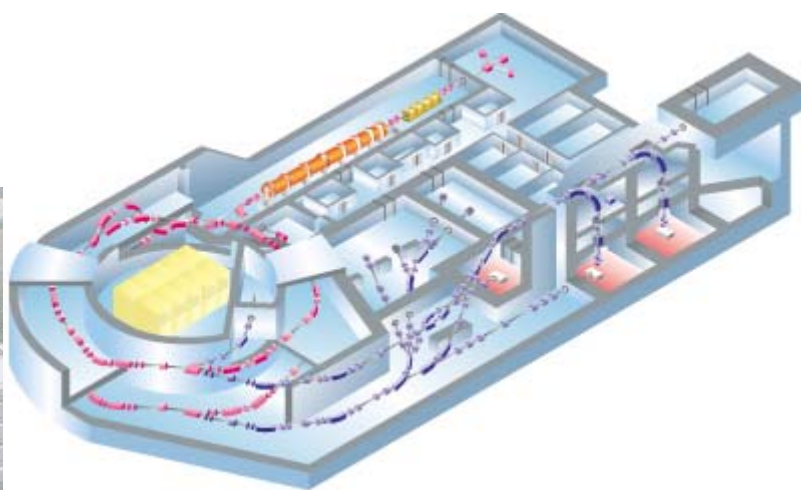


NIRS-M-277  
ISBN 978-4-938987-96-1  
HIMAC-142

## HIMAC20 年の歩み

—HIMAC20 周年記念 研究成果要覧—  
(PDF 版)



2015 年 8 月

放射線医学総合研究所  
〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

National Institute of Radiological Sciences  
9-1 Anagawa 4-chome, Inage-ku, Chiba 263-8555, JAPAN

## 序文

放射線医学総合研究所（放医研）の粒子線治療は 1975 年の速中性子線に始まり、1979 年陽子線治療、さらに 1994 年に始まった重粒子線がん治療装置（通称 HIMAC）による重粒子線治療（炭素イオン線を使用）へと発展してきました。

この間、関連する数多くの開発研究とともに臨床試験が実施され、個々の疾患に適した線量分割法の開発や、呼吸同期照射法など新たな照射技術の開発、PET を中心とした新しい画像診断法の治療への応用等が行われています。

更に放医研では普及小型の重粒子線治療装置の開発（2010 年群馬大学稼働、2013 年九州国際重粒子がん治療センター稼働）、3 次元スキャニング照射による次世代型重粒子線治療装置の開発（2011 年放医研新治療研究棟稼働、2015 年神奈川県立がんセンター稼働予定）、超伝導技術を応用した小型回転ガントリーの開発（2015 年放医研新治療研究棟稼働予定）等、多くの成果を生み出しています。

2003 年には放医研の重粒子線治療は臨床試験とともに「固形がんに対する重粒子線治療」という名称で高度先進医療としても実施するに至りました。国内の重粒子線治療施設も 2015 年度には 5 カ所となり、さらに 2 カ所で新たな重粒子線治療施設の建設が決定しています。これまでの放医研における重粒子線の総治療件数は 10000 件を越えており最近では保険収載についても検討されるに至っています。

一方、HIMAC は夜間や週末など治療を行わない時間は、生物・物理工学的実験のための共同利用施設として国内外の研究者に提供されています。加速器の運転時間は年間約 6000 時間で、毎年 650 人以上の外部研究者に解放されています。この共同利用研究は、便宜上 3 つのカテゴリー（治療・診断、生物、物理・工学）に分かれています。年 2 回の課題募集、それぞれの分野の外部委員による診査を経て毎年 130 以上の課題が採択されており、年度毎に成果発表会も実施され、次々と優れた成果が出ています。これらの共同利用研究は、重粒子線治療の臨床研究あるいは装置開発においても重要な役割を果たしてきていますが、基礎生物学から物理・加速器工学、宇宙までより広い分野においても当然ながら優れた成果をもたらすものとなっています。

この業績集は 2004 年の HIMAC 共同利用 10 周年業績集につづいて HIMAC 共同利用の 20 周年を記念するものです。本業績集が、同種の加速器を用いて臨床・基礎研究を行っている、あるいは行おうとしている関係者の皆様の少しでもお役にたてれば幸いです。

最後に共同利用運営委員会、課題採択・評価部会においてご協力をいただいた委員の皆様、また本業績集の発行にご協力をいただいた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

2015 年 8 月

放射線医学総合研究所 重粒子医科学センター長  
鎌田 正

## 目 次

	タ イ ト ル	著 者	頁
	序文	鎌田正	
I.	共同利用研究－生物		
	1. 重粒子線治療生物研究の進歩と新潮流	佐々木武仁	5
	2. Worldwide trends in particle radiobiology	Marco Durante	9
	3. 粒子線化学 線質による活性酸素生成の違い	松本謙一郎	15
	4. HIMAC 利用者のための粒子線生物	古澤佳也	20
	5. 重粒子線による DNA 損傷とその修復機構	岡安隆一	27
	6. 重粒子線により誘導されるシグナル伝達	高橋昭久	35
	7. Induction of Adaptive Response in Mice in vivo and in utero	Bing Wang、他	41
	8. 粒子線による発がんリスク	島田義也、他	47
	9. HIMAC を利用した植物育種研究	岡村正愛	51
II.	共同利用研究－物理・工学		
	1. 重粒子線を用いたコヒーレント共鳴励起の研究	東俊行	59
	2. 重粒子線による核反応断面積の研究	福田光順	66
	3. Microdosimetry of Heavy Ions	Thomas B. Borak	73
	4. 重粒子線による超高エネルギー実験用検出器の試験と校正	増田公明	79
	5. The Role of HIMAC in Space Radiation Research	Eric Benton	85
	6. 高エネルギー重粒子線による高分子材料への照射効果とその応用	鷲尾方一	89
	7. 超伝導体に対する粒子線照射効果	為ヶ井強	95
資料			
A1.	HIMAC 共同利用研究の実施状況		101
A2.	研究成果一覧		107
A3.	HIMAC レポート一覧		191
A4.	HIMAC 共同利用研究実施課題一覧		199





# I. 共同利用研究一 生 物

Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC

Biology



# 重粒子線治療生物研究の進歩と新潮流

佐々木武仁  
東京医歯大学名誉教授

## Abstract

Severely hypoxic tumor cells resistant to high LET ions, higher levels of signal transduction induced by irradiation and hyperactivity of DNA double strand breaks repair particularly involved in homologous recombination (HR) repair have been notified as biological factors that seem relevant to the resistance of tumor cells to heavy-ions therapy. Many measures to overcome these problems have been studied and LET modulated ion beams therapy based on oxygen enhancement ratio (OER) for every boxels, drugs to modify signal transductions and to inhibit HR repair processes are considered promising for further improvement of heavy-ions therapy.

## はじめに

世界初の医療用重粒子線加速器 HIMAC による優れた治療成績が示され、その有効性が明らかにされるようになった。しかし一方、治療に対して難治性を示す腫瘍が存在するのも事実で、特に放射線抵抗性ががんや進行がんに対する更なる有効性の向上が強く望まれている。重粒子線のような高 LET (linear energy transfer) 放射線では、その生物学的効果比 RBE (relative biological effectiveness) が X 線と比べて高いこと、また X 線に対して抵抗性を示す低酸素性細胞は、高 LET 放射線に対して抵抗性を示さず、酸素増感比 OER (oxygen enhancement ratio) は 1.0 に近づくことなどは、旧くから知られ、40 年前に出版された Eric Hall の放射線生物学の教科書の第 1 版 (1973) [1] に既にこれらの知見はデータを基にはっきり記載されている。腫瘍に対する重粒子線治療の生物学的効果は、このような生物学的研究から予測したとおりと云える反面、それほど単純ではないことが、HIMAC 10 周年記念の研究成果要覧でも既に指摘されている[2]。最近の HIMAC を用いた研究では、これらの細部に亘る研究が進展し、重粒子線の生物学的作用機構が X 線や  $\gamma$  線と基本的に異なり、そのことを利用する新たな治療方法も示唆されるようになってきた。本稿では、最近の研究進展状況[3]を筆者なりに概観し、新たな潮流について記載した。

## 1. 重粒子線の生物学的効果と LET

RBE は LET のみならず、判定基準や線量の大きさに依存するが、コロニー法による細胞生存率曲線の 10% 生存率線量 (D10) での炭素線の RBE は LET 100 keV/ $\mu$ m 付近で約 3-4 のピーク値に達する[4]。一般に RBE は、X 線、 $\gamma$  線に抵抗性を示す細胞ほど大きく、結果的に細胞間の放射線抵抗性の違いが小さくなる。例えば、p53 変異型の glioblastoma 細胞は野生型の細胞より X 線、 $\gamma$  線に抵抗性を示すが、炭素線に対する RBE は野生型より大きい[5]。高 LET 放射線は p53 非依存的に高率に癌細胞にアポトーシスを誘導し、この誘導

は高 LET 放射線の方が X 線より Akt シグナルを抑制する機構が明らかにされ、p53 欠損の有無が高 LET 放射線治療の適応選択の重要な要因であることが明らかにされた[6]。

RBE の大きさは DNA 二重鎖切断修復機構と関係することも明らかにされている。p53 欠損のマウス胚線維芽細胞で、相同組み換え (HR) 修復関連遺伝子欠損、非相同末端結合 (NHEJ) 修復関連遺伝子欠損、さらに両者の二重欠損細胞を対象に広範囲の LET の重粒子線による細胞生存率曲線を p53 野生型細胞と比較すると、D10 線量比での RBE は、野生型と HR 修復欠損細胞で LET 100-200keV/ $\mu$ m で約 3、NHEJ 欠損及び二重欠損細胞で LET 200keV/ $\mu$ m 以下では RBE 約 1 で一定であることが示された。野生型細胞と比べた相対的感受性 (ER) は HR 欠損細胞では LET に関係なく約 2 と一定で、NHEJ 欠損細胞の ER は LET が低いと大きく、LET の増加に伴い低下した。このような広範囲の LET の粒子線と修復欠損細胞の感受性変動に関するデータは、癌細胞の遺伝的背景が粒子線治療の適応選択を決める要因であることを示唆し、臨床応用にはヒト腫瘍細胞での確認が必要と思われる (高橋昭久他：課題番号：12J467)[3]。

低酸素下では CHO 細胞と HR 修復欠損細胞では共に 200keV/ $\mu$ m 付近で RBE は 5 程度のピークを示したが、NHEJ 修復欠損細胞では LET 100 keV/ $\mu$ m 付近で RBE は 2 程度のピークを示した。この低酸素下での解析から高 LET 放射線でも酸素増感比 OER は 1 より大きく、重粒子線治療でも低酸素性腫瘍細胞の抵抗性は治療効果を左右する重要な要因であることが示された (平山亮一他：課題番号：12J468) [3] (古澤佳也執筆の項を参照)。

酸素増感比 (OER) と広範な LET との関係が CHO 細胞において調べられた。O<sub>2</sub> 分圧 0~2%、炭素線 (LET 30~150 keV/ $\mu$ m)、及び Si 線 (LET 300 keV/ $\mu$ m) を用いた研究で、OER は 0% O<sub>2</sub> で低 LET 放射線に対して大きい、O<sub>2</sub> 分圧 2% 以上では LET が比較的低い 30 keV/ $\mu$ m 炭素線でも OER は

小さく、 $O_2$  分圧 0～2%の低酸素下では LET 100keV/ $\mu m$  の炭素線に対しても OER は1 よりかなり大きいことが示されている。Si 線 300 keV/ $\mu m$  の OER は低酸素下でも 1 に近づき、低酸素性腫瘍細胞に対しても高い治療効果を望める(Durante M et al: 課題番号: 12J385)[3] (Durante M 執筆の項参照)。

低酸素性細胞の PET によるイメージング技術の進歩と連携し、ボクセル毎に OER を考慮して LET を変調できる粒子線治療法の開発も現実味を帯びてきている[7,8]。重粒子線の生物効果はその LET だけでは決まらず、トラック構造にも依存することが、DNA double strand break (DNAdsb)の  $\gamma$ H2AX フォーカスの蛍光輝度分布によって示され、同程度の LET の粒子線でもイオン種によって効果が異なることが報告されている (古澤佳也他: 課題番号: 11J496) [3]。そのため、ボクセル毎の OER に応じた LET 変調のみならず、加速イオン種も考慮する必要があると思われる。

## 2. 重粒子線治療効果の増強

HIMAC10 周年記念の当時から重粒子線治療効果をさらに高めるための研究が行なわれ、固形腫瘍に対する効果を増強し、主要な標的正常組織反応を軽減する分割照射方法などに関する研究が行われ現在も研究が継続されている。また炭素線の腫瘍血管新生能や腫瘍細胞の遊走能や転移能に対する抑制効果、バイスタンダー効果を利用する治療法の開発研究も継続して行われている。

一方最近の研究では、重粒子線特有の DNA 損傷修復機構の理解が著しく深まり、薬剤による修復機構の修飾を介する増感法の開発研究が活発に行われ、その成果が注目されている。

### 1) 腫瘍に対する増感効果

がん細胞では種々の DNA 損傷修復の応答経路に変異を持つものが多く、このこと利用してがん細胞に選択的な増感効果が期待できる可能性がある。高 LET 放射線は、トラックのコア領域でクラスターDNA 損傷を生じ、その修復速度は X 線による DNAdsb 修復よりも極端に遅いこと[9]。この過程は Ring finger factor 8 (RNF8)依存적であることが明らかにされた。RNF8 はヘテロクロマチン領域の DNA 損傷修復に必須の因子で、この部位のヒストンをユビキチン化することで、53BP1、BRCA1 等の修復因子を切断端にリクルートする働きを持つ。クラスターDNAdsb の修復には、RNF8 はヘテロクロマチン領域のみならず、ユークロマチン領域の DNAdsb 修復にも機能し、この過程に 53BP1 が必要であることも示された。このため RNF8-53BP1 発現抑制は重粒子線の有力な効果増強法になる可能性がある (中島菜花子他: 課題番号: 13J375) [3]。

重粒子線による DNAdsb 初期応答の解明が精力的に進められ、重粒子線による複雑な DNA 損傷の HR 修復の機構解明と、その治療への応用方法に関する研究が新しい領域として注目されている。これらには CtIP (CtBP-interacting protein)リン酸化と、その後に生じる RPA リン酸化[10] (矢島浩彦他: 課題番号: 11J494) [3]、ATR キナーゼ阻害剤の併用効果 (藤澤寛 他: 課題番号: 12J395) [3]、MRN 複合体の MRE11 阻害剤 (柴田淳史他: 課題番号: 13J405) [3]が挙げられる。MRE11 阻害剤は HR 修復経路で作動するヌクレアーゼ活性を特異的に阻害する薬剤で、特に重粒子線では低 LET 放射線に比べて、DNA 断端のプロセッシングに時間を要し、その間に NHEJ 経路から HR 経路に移行して、HR 経路の割合が高くなるので、MRE11 阻害剤は重粒子線治療で効果的な増感剤として期待される [11,12] (高橋昭久執筆項目を参照)。

poly(ADP-ribose)polymerase(PARP)阻害剤 (AZD2281) との併用が放射線増感効果を示し、増感率は炭素線に対する方が  $\gamma$  線に対するより大きいこと[13]、さらに Poly(ADP-ribose) glycohydrolase (PARG) 機能阻害で増感率 1.5 の大きな増感効果が示された[3, 14] (藤森浩彰他: 課題番号: 12J366)。

Hsp90 阻害剤、PU-H71 及び 17AAG、が放射線の細胞致死効果を増強すること、その作用機構が DNAdsb の HR 及び NHEJ 修復因子の発現抑制によることが明らかにされている。Hsp90 の発現及び細胞生存への依存性は腫瘍の方が正常組織より大きく、正常組織では Hsp90 は本来不活性化状態にあるので、Hsp90 阻害剤の効果は、腫瘍細胞特異的であることが期待されている。(松本孔貴他: 課題番号: 12J396) [3] (岡安隆一他: 課題番号: 11J452) [3] (岡安隆一執筆項目を参照)。

ヒト腫瘍細胞の遊走能・浸潤能が炭素線で抑制され、X線では亢進、または抑制されないことが以前から報告されているが、このような現象が特定の腫瘍細胞にのみ見られるのか、線量-効果関係はどうなのかなについては、まだ結論が得られていない。このことに関してヒト癌細胞 30 株の浸潤能を調べた最近の研究では、X線のみならず炭素線照射でも浸潤能の亢進が問題となり得ることが示唆された。この浸潤能の亢進にはマトリックス分解酵素 MMP-2 やセリンプロテアーゼ、及びアクトミオシンの収縮を制御する Rho-associated coiled-coil forming protein (ROCK)が関与すること、この誘導の抑制にはセリンプロテアーゼ阻害剤と ROCK 阻害剤の組み合わせが必要であることが示されている[15,16]。標準的阻害剤キット 285 種から浸潤能を抑制する阻害剤をスクリーニングし、一酸化窒素合成酵素 (NOS) 阻害剤 2 種、PI3K 阻害剤 2 種が有効であることが示された(藤

田真由美他：課題番号：11J178) [3]。これらの薬剤の炭素線との併用効果が期待される。

高原子番号物質の白金化合物 Chrolo terpyridine platinum (PtTC)及び金化合物 aurothioglucose Au (AuTG)が炭素線 (LET 13keV/ $\mu$ m) 照射に対して増感効果を示し、この効果は高原子番号の Pt や Au の Auger 効果を介する水ラジカル産生によると解釈され、従来からの CHO 細胞での研究と同様の結果を示した[17]。高原子番号物質のナノ粒子と重粒子線との併用効果の機構には Auger 効果のみならず、NF-kB を介するシグナルの関与が示唆されている(N. Usami et al: 課題番号：13 J 462)[3]。

腫瘍幹細胞を、幹細胞マーカー陽性で、球状体形成能をもつ細胞として分離し、そのX線や炭素線抵抗性を検討する研究が代表的な放射線抵抗性腫瘍である、グリオブラストーマ、膵癌及び胆管癌細胞について報告されている。興味深ことにグリオーマ幹細胞の放射線抵抗性がHR修復の亢進による可能性が示唆されている(斉藤裕一他:課題番号:12J492、藤森亮他:課題番号:11J361) [3]。

大腸癌、膵癌及び胆管癌細胞から幹細胞マーカー陽性で、球状体形成能を持つ幹細胞様細胞を分離すると、X線に対しては抵抗性を示すが、炭素線に対しては大きな違いを示さない[3,18,19] (Sei Sai et al : 課題番号 : 12J371)。

## 2) 正常組織に対する防護効果

放射線治療では、腫瘍組織に対して防護効果を示さず、標的正常組織に対して選択的防護効果がある薬剤が求められる。出来れば腫瘍に対して増感効果も示すことが理想的である。

Fibroblast growth factor1 (FGF1)の腸上皮細胞に対する防護効果[20]、及び FGF1 のアミノ酸を置換させた活性の異なる変異体の野生型 FGF1 より優れた放射線防護効果が示された[21]。FGF のシグナル伝達経路は X 線のみならず、炭素線治療でも標的に成り得ることが示唆され、正常組織に対する防護効果と同時に腫瘍に対する増感効果の可能性も注目される (中山文明他：課題番号：13J398)[3]。

D-メチオニンマウス SCCVII腫瘍に対する炭素線照射効果に対して、防護効果を示さず、舌粘膜上皮及び唾液腺障害に対し、X線でも炭素線でも防護効果を示すことが明らかにされている (村山千恵子他：課題番号：13J272)[3]。

低分子化合物 DIM (3,3'-diindolylmethane)は、ヒトに投与しても安全で、その癌予防効果が示唆され、最近この放射線防護効果が注目されている[22]。 $\gamma$ 線 13Gy を全身照射したラットに DIM を投与すると、90 日後のラットの生存率が 50%以上で、体重も非照射群と変わらないと云う驚くべ

きデータが示された。DIM は骨髓死のみならず腸死に対しても照射前投与での防護効果、および照射後の投与でも障害緩和効果を示す。ヒト乳腺上皮細胞を用いた実験から、DIM は $\gamma$ 線照射による DNAdsbs の再結合を促進し、線量-細胞生存率曲線での細胞生存率を高める。この効果は ATM 上流のネガティブ制御因子であるフォスファターゼ 2A を DIM が阻害することにより、ATM の自己リン酸化を可能にして、放射線を照射しなくても ATM が活性化することによる。放射線によって生じる DNA 切断部位の一部は DNA 複製を介して DNAdsbs を生じ、この二次的 dsb は照射後数時間以後になって HR 修復によって修復されることが明らかにされている[23]。DIM の放射線防護効果、障害緩和効果が突然変異や発がんの増加に繋がらないかが問題であるが、NHEJ 修復促進によって生存可能になる細胞が、数時間以後に HR 修復の制御因子である BRCA1 と CHEK1 のリン酸化を介する HR 修復によって損傷の無い生存細胞に回復することが期待されている。一方、ヒト乳癌細胞のヌードマウス移植腫瘍に、DIM は放射線防護効果を示さない。腫瘍では恒常的に ATM は活性化されていて、DIM がそれ以上の活性化を生じないことによる。このような放射線防護剤の開発と実用化は、光子線治療のみならず、将来の粒子線治療にとっても重要な研究領域と思われる。

## まとめ

重粒子線治療効果を高めるための生物学的研究は最近著しい進歩を遂げ、新たな治療法開発への兆しが感じられる。高 LET 炭素線治療でも重度の低酸素性腫瘍細胞の抵抗性が治療効果を阻む要因になることが明らかにされ、これを克服するボクセルごとの OER に対応する LET 変調重粒子線照射法が示唆されている。炭素線に対する抵抗性要因として、放射線で誘導される高レベルのシグナル伝達や DNA 二重鎖切断修復機構の亢進をもつ腫瘍細胞の存在が明らかにされ、これらの機構の解明とそれを阻害する多様な薬剤が開発されつつある。これらの研究により重粒子線治療の更なる発展への道が開かれることが期待される。

## 参考文献

- [1] Hall EJ: Radiobiology for the Radiologist. Harper & Row Publ., New York, 1973.
- [2] 佐々木武仁：重粒子線治療応用を目指す生物学的研究 HIMAC 10 年の歩み-HIMAC 10 周年記念 研究成果要覧-放射線医学総合研究所 117-121, 2004
- [3] 平成 25 年度放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書 放射線医学総合研究所 2014 年 4 月。
- [4] Ando K, Kase Y: Int J Radiat Biol. 2009;85:715-728.
- [5] Tsuboi K, Tsuchida Y, Nose T et al: Int J Radiat Biol 74: 71-79, 1998.
- [6] Takahashi A, Matsumoto H, Furusawa Y et al: Int J Radiat Biol 81:581-586, 2005.
- [7] Scifoni E, Tinganelli W, Weyrather WK et al: Phys Med Biol 58:3871-3895, 2013.
- [8] Brahme A: Int J Rad Onc Biol Phys 58: 603-616, 2004.
- [9] Nakajima NI, Brunton H, Watanabe R et al: PLoS One.8:e70107, 2013.
- [10] Yajima H, Fujisawa H, Nakajima NI et al: DNA Repair (Amst).12:9369-9346, 2013.
- [11] Shibata A, Moiani D, Arvai AS et al: Mol Cell.53:7-18, 2014.
- [12] Shibata A, Jeggo PA; Clin Oncol (R Coll Radiol).26:243-249, 2014.
- [13] Hirai T, Shirai H, Fujimori H et al: Cancer Sci. 103:1045-1050, 2012.
- [14] Nakadate Y, Kodera Y, Kitamura Y et al: Biochem Biophys Res Commun. 441:793-798, 2013.
- [15] Fujita M, Otsuka Y, Yamada S et al: Cancer Sci. 102:792-798, 2011.
- [16] Fujita M, Otsuka Y, Imadome K et al: Cancer Sci. 103:677-683, 2012.
- [17] Usami N, Furusawa Y, Kobayashi K et al: Int J Radiat Biol. 84:603-611, 2008.
- [18] Cui X, Oonishi K, Tsujii H et al: Cancer Res. 71:3676-3687, 2011.
- [19] Oonishi K, Cui X, Hirakawa H, et al: Radiother Oncol. 105:258-265, 2012.
- [20] Nakayama F, Hagiwara A, Umeda S et al: Int J Radiat Oncol Biol Phys. 78:860-867, 2010.
- [21] Nakayama F, Umeda S, Yasuda T et al: Int J Radiat Oncol Biol Phys. 85:477-483, 2013.
- [22] Fan S, Meng Q, Xu J et al: Proc Natl Acad Sci U S A. 110:18650-18655, 2013.
- [23] Groth P, Orta ML, Elvers I et al: Nucleic Acids Res. 40:6585-6594, 2012.

# Worldwide trends in particle radiobiology

Marco Durante

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Biophysics Deptment, and Technische Universität Darmstadt, Institut für Festkörperphysik, Darmstadt, Germany.

## Abstract

Particle radiobiology is an essential basic research topic for ion therapy in oncology and space radiation protection. Modern studies are shifting the core interest from measurement of the relative biological effectiveness (RBE) of particle beams of different energy and charge in cell cultures to mechanistic, molecular studies on the response of tumour and normal tissues. HIMAC played a decisive role in this transition. First, a very large database has been accumulated at HIMAC on RBE of ion beams, especially carbon, both in vivo and in vitro. This database was instrumental to the establishment of the successful heavy ion therapy program. Later, with the clinical progress of the heavy ion cancer therapy program, research is moving toward mechanistic studies, also in collaboration with International partners, for instance within the International Open Laboratory program.

## Introduction

Particle radiobiology research has two main applications: charged particle therapy (CPT) in oncology and radiation protection in manned space missions. In both cases, charged particles at energies  $>100$  MeV/n are involved. The characteristic depth-dose distribution with the sharp Bragg peak at the end of the range can be exploited for killing tumors; on the other hand, densely ionizing radiation can effectively late tissue morbidity. Notwithstanding the many differences in exposure conditions, CPT and space radiation protection share several research topics, including individual sensitivity, non-targeted effects, late stochastic effects, and so forth [1]. Research in these fields require large high-energy accelerators, and is often performed by the same research groups with a common interest in particle radiobiology. Research is rapidly moving forward owing to the diffusion of CPT centers in USA, Europe, and Asia and to the growing interest in manned space exploration, now a priority for all space agencies, but with cosmic rays acknowledged as a potential showstopper. We are also facing a shift in the mainstream research topics, from comparisons of cellular endpoints to studies of the tissues and of the microenvironment [2].

## RBE

For many years, particle radiobiology was focused on measurements of relative biological effectiveness (RBE). The RBE is used to scale the data from reference radiation (X- or  $\gamma$ -rays) to test radiation (here energetic charged particles). The radiation weighting factors  $w_R$

are among the few quantities proposed by ICRP [[3] not derived from epidemiology, but from laboratory studies in radiobiology. In space travel, radiation weighting is instead based on the radiation quality factor  $Q$ , which is a continuous function of the radiation linear energy transfer (LET), rather than on radiation quality-specific  $w_R$  values [4]. Quality factors are derived mostly from accelerator-based experiments on relevant endpoints, such as carcinogenesis in animals, neoplastic transformation in vitro, mutations, chromosomal aberrations, and so on. In CPT, the RBE-weighted absorbed dose is expressed in Gy (RBE), which replaces the former gray-equivalent (GyE) or cobalt-gray-equivalent (CGE) [5]. Notwithstanding many years of studies, starting at the Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) in the 70's [6] and then at GSI in Germany, HIMAC in Japan [7], Brookhaven National Laboratory in USA and many other accelerators, uncertainty on RBE is still very high. RBE is indeed the main source of uncertainty in the estimates of cancer risk for interplanetary missions (Fig. 1) [8] and in dose estimation in CPT. Many years of in vitro studies on the RBE for cell killing consistently show a bell-shaped dependence on LET (Fig. 2) [9], and a significant dependence also on the particle charge. RBE is a function of several factors, often non-independent: biological endpoint, tissue type, proliferation status, dose, dose rate, oxygen concentration, culture conditions (in vitro) or metabolism (in vivo), and so forth. Replicating in vitro measurements on different cell lines, as done many times since the Berkeley experiments [6], cannot reduce this intrinsic variability. The efforts to compare the Gy(RBE) developed at HIMAC with the models used in Europe[11] are very important for comparing clinical results with heavy ions.



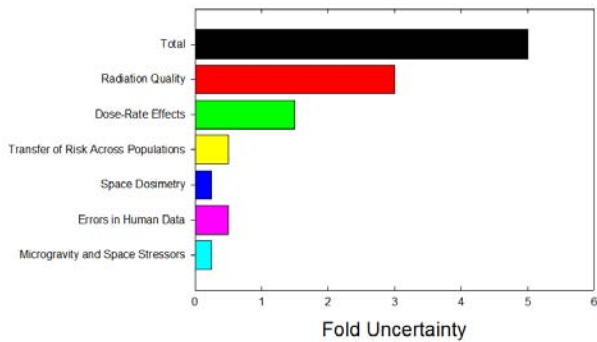


Fig. 1 Estimates of uncertainties in projecting cancer risks for interplanetary space missions based on current knowledge on radiation protection on Earth. Several factors such as radiation quality of high-energy ions, space dosimetry, and microgravity do not contribute on Earth and lead to large increases in risk projections. The RBE is by far the main factor contributing to uncertainty. Predicting risks to individuals is difficult as there are very few quantitative measures of individual sensitivity. Chart from ref. [8].

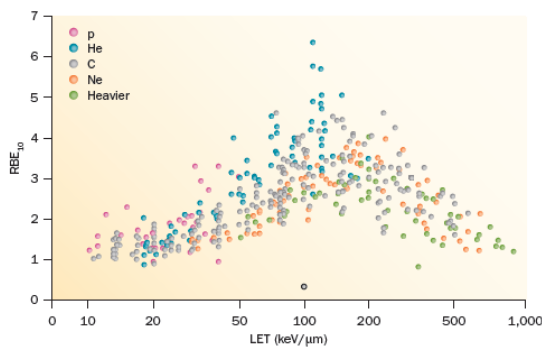


Fig. 2 Variability of the RBE (calculated at 10% survival level) vs. LET (dose-averaged in water, in keV/μm) in vitro data. Points are extracted from the large PIDE database (<https://www.gsi.de/bio-pide>) developed at GSI [9]]. Different colors correspond to different ions as shown in the legend.

## Hypofractionation

Thanks to tremendous improvements in image-guided radiotherapy (IGRT), there is nowadays a tendency to reduce the number of fractions and increase the dose per fraction (hypofractionation) [12]. The advantages for the patient and for the economy are enormous. X-ray stereotactic body radiation therapy (SBRT) and CPT are both pushing hypofractionation toward the region of 1-3 fractions (oligofractionation) with a very high dose/fraction (up to 25-30 Gy). For non-small cell lung cancer (NSCLC) and oligometastases, SBRT has proven

high control rates, durable local control and little normal tissue complications [13]. The high conformity granted by the Bragg peak makes CPT ideal for radiosurgery. Particle radiobiology research at high doses is needed to support and guide oligofractionation in hadrontherapy. A potential advantage of CPT in hypofractionation is the reduced oxygen enhancement ratio (OER) using high-LET radiation [6],[7]. Hypoxia is one of the main factors reducing local controls in solid tumors [14], and fractionation in radiotherapy has one of the main reasons in the possibility of re-oxygenation of the hypoxic areas. Re-oxygenation will be reduced in hypofractionation, and finally lost in single-fraction/high-dose radiosurgery. Owing to the reduction of OER using heavy ions [6],[7], CPT may be useful against hypoxic tumors. For oligofractionation or single fraction/high dose treatments, use of ions heavier than carbon (such as  $^{16}\text{O}$ ) may be beneficial, because with these ions the OER can be further reduced in the clinically relevant hypoxia region [15] (Fig. 3).

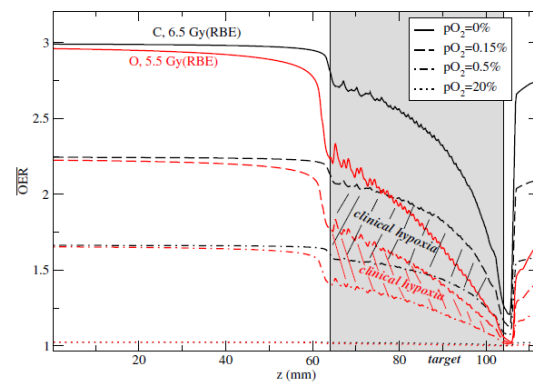


Fig. 3 Comparison of the computed OER along an SOBP for carbon (black curves) and oxygen (red curves) at different  $p\text{O}_2$  levels. The hatched areas represent the clinical interesting regions for hypoxia ( $0.15\% < p\text{O}_2 < 0.5\%$ ). Doses indicated are prescribed RBE-weighted doses in the target to achieve iso-survival. Plans for use of  $^{16}\text{O}$  in addition to  $^{12}\text{C}$  and  $^1\text{H}$  in the clinics are currently under way at HIT (Heidelberg). From ref. [15], reproduced with permission.

## Combined Treatments

Even though local control is generally very high with CPT, in most malignancy radiotherapy must be combined to systemic therapies to control metastasis and increase survival. Combined radio + chemotherapy protocols are already used in many cancers, such as glioblastoma multiforme (GMB) or pancreas cancer. However, very few radiobiology studies specifically address the potential synergistic interaction of the drugs

and ion irradiations. In vitro experiments on GBM provided useful indications on the combination of different drugs with C-ions [16].

Equally important is the combination of particle therapy with immunotherapy [17], which is now rapidly gaining access in the clinics with great expectations for cancer cure. Abscopal effects, defined as shrinkage of metastatic lesions far from the irradiation field during radiotherapy of a primary malignancy, have been reported for many years [18] and its link to the immune response has been recently proved [19], [20]. The mechanism underlying this effect is now fairly well understood [21]. Radiation triggers cell death via DNA damage. Ceramide formation and mitochondrial damage, leading to release of mitochondrial cytochrome C and consecutive caspase activation, cause cell apoptosis. In addition to apoptosis, cells can be effectively eliminated following DNA damage by necrosis, mitotic catastrophe, autophagy and premature senescence, and these pathways are prevalent in most solid cancers [22]. Radiation damage response leads to the release of Damage Associated Molecular Patterns (DAMP) which induce Dendritic Cell (DC) maturation and tumor antigen uptake, resulting in priming and clonal expansion of cytotoxic lymphocytes (CTL) in the lymph node, which harbor the T-Cell receptor matching specifically to the antigen. From the lymph nodes, CTL can travel to the tumor. There, release of granzyme results in caspase activation and mitochondrial membrane permeabilization (MOMP). At that point, immunity converges with the same cell death pathways as induced directly by irradiation (Figure 4).

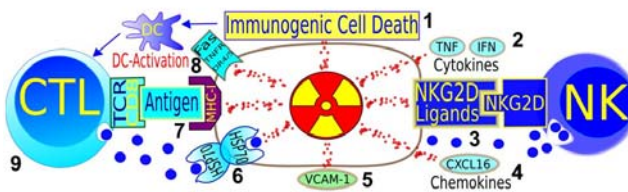


Fig. 4 Pathways where radiation can synergize with immune adjuvant therapy for cancer. 1. Immunogenic cell death is promoted by ionizing radiation, through dendritic cell activation and consequently, T-Cell expansion. 2. Cytokines play a role in radiation therapy success. 3. NKG2D-Ligands, sensitizing stressed cells to Natural Killer Cells (innate immunity) are upregulated by radiation. 4. Chemokines can be induced by radiation, attracting effector T Cells to the tumor. 5. Radiation-induced interferon-gamma dependent upregulation of cell adhesion molecule also influences antitumor immunity. 6. Heat Shock proteins sensitize to cytotoxic granzymes. 7. Radiation can lead to enhanced expression of MHC-I and to de novo expression of neoantigens. 8. Death receptors can be upregulated by

irradiation. 9. CD8 T Cells are essential for the success of radiotherapy. Image from ref. [2], courtesy of Norman Reppingen, TU Darmstadt.

These studies beg the question of whether abscopal effects, and combined immunotherapy and radiotherapy, can be enhanced by charged particles [21]. Carbon ions significantly reduced lung metastasis count in LM8 osteosarcoma mouse models and a model of squamous cell carcinoma in immune competent C3H mice [23]. A recent study showed that heavy ion irradiation could confer tumor rechallange resistance which was dependent on CD8+ T-Cells and influenced by NK cells in this system, showing synergy with dendritic cells treatment approaches [24] - an encouraging outcome for future protocols combining immunotherapy and CPT [21].

### Radiogenomics

The ultimate goal of radiogenomics is to develop a genetic risk profile individualization of radiation dose prescriptions to optimize tumor control while minimizing normal tissue damage [25]. Genome-wide association studies have already been successful in finding novel genetic variants with high risk of developing some common diseases, for instance breast cancer [26]. Radiogenomics uses a similar approach to predict the sensitivity of the normal [27] and cancer [28] tissue to radiation. Recent results show that the genetic response to charged particles can be quite distinct from sparsely ionizing radiation [29] and bystander cells not traversed by the ions [30]. Radiogenomics in CPT is certainly one of the hot topics currently under study.

### Late Effects

Risk of late morbidity is a major issue for charged particle radiobiology. For space travel, cancer and noncancer late effects represent the major showstopper for long-term interplanetary missions beyond low-Earth-orbit (LEO) [8]. In CPT, as noted above, the problem is mostly related to second cancers in pediatric patients [31]. The problem has been reviewed by ICRP both for terrestrial [3] and space [4] exposures, and even though clearly heavy charged particles are generally more effective than X-rays in inducing carcinogenesis, the effectiveness strongly depends from the type of tumor, with an RBE dropping to around 1 for leukemia [32]. Even less is known for the normal tissues, where high-dose exposures are important for modelling normal tissue complications in CPT, and low doses exposures for late degenerative tissue effects in astronauts, such as cardiovascular diseases [33] and cataracts [34].

## HIMAC Contributions

HIMAC has provided a tremendous support to the development of particle radiobiology in the past 20 years. The *in vitro* RBE data [7] are the most consistent database used for modelling cell killing and biological optimization of the treatment plan. The experiments in mice also represent a unique database for particle therapy, particularly on the impact of fractionation [35]. The most recent studies on radioimmunology [24], radiogenomics [30], and cancer stem cells [36] show that HIMAC is fully projected in XXI century radiobiology and opening new ways in understanding biological response to energetic charged particles.

HIMAC was also open to International collaboration, with a rigorous selection of the experiments. Many seminal experiments on the radiobiology of heavy ion after shielding were performed at HIMAC (Fig. 5) using accelerated ions also heavier than carbon, such as iron [37]. In more recent years, the establishment of the International Open Laboratory (Fig. 6) has further fostered collaborations with US and European laboratories in space radiobiology, modelling, clinical radiobiology, and DNA repair. Research at HIMAC was instrumental for the success of particle therapy in Japan [38], and will continue to be the driver for therapy in the rest of the world, as well as a testbed for space exploration in the XXI century.

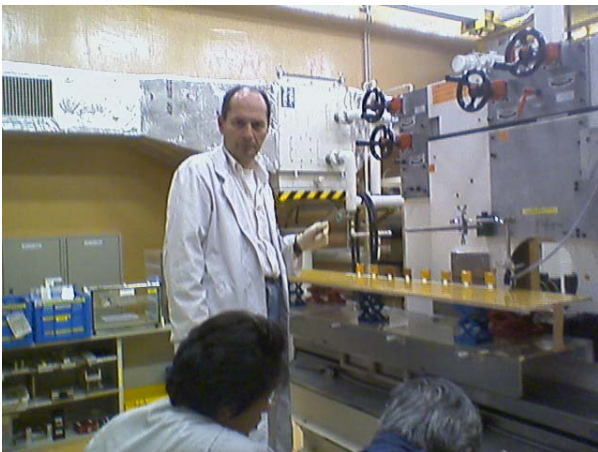


Fig. 5 A shielding experiment at HIMAC. Different shielding blocks are positioned along the trailer of the targets in the biology room at HIMAC. The authors of this paper and Dr. Furusawa can be seen in the picture.



Fig. 6 Kick-off meeting of the International Open Laboratory on “Particle. The meeting was held at the University of Darmstadt on September 6, 2011.

## Acknowledgements

The author spent at HIMAC a postdoc and has been visiting scientist for many years. In the past 3 years, he has been director of one of the four International Open Laboratories (IOL) established at NIRS, along with Dr. Furusawa. I am enormously indebted to all the HIMAC crew and the NIRS researchers for teaching virtually everything I know on heavy-ion therapy. Dr. Koichi Ando and Dr. Yoshiya Furusawa were my mentors during my postdoc, and my colleagues and friends forever. Dr. Hirohiko Tsujii, Dr. Shigeru Yamada, and Dr. Takashi Nakano (presently Director of the Gunma University Heavy Ion Medical Center) introduced me to medical oncology and set a worldwide unique example of fusion between basic, bench-research and applied, bed-applications. Dr. Kanai, Dr. Soga, and Dr. Kawata, were my mentors in particle radiation physics. Dr. Ryuchi Okayasu managed the IOL and was instrumental for his success. For a foreigner (*gaijin*) in Japan it is sometimes difficult to solve simple everyday tasks, but the NIRS crew, especially Nakata-san and Takakura-san, were so helpful that I have no words to thank them enough. The environment for a *gaijin* at NIRS is a school of science and a school of life. Thank you all, and I am sure this tradition will remain the same and more and more *gaijin* will be trained as scientists at NIRS.

## References

- [1] Durante M, Eighth Warren K, Sinclair keynote address: Heavy ions in therapy and space: benefits and risks. *Health Phys.* 2012;103:532-9.
- [2] Durante M. New challenges in high-energy particle radiobiology. *Br J Radiol.* 2014;87: 20130626.
- [3] ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann ICRP.* 2007;37 (2-4).
- [4] ICRP. Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. ICRP Publication 123. *Ann ICRP.* 2013;42(4).
- [5] ICRU. Prescribing, Recording, and Reporting Proton-Beam Therapy. ICRU Report 78. *J ICRU.* 2007;7(2).
- [6] Blakely EA, Ngo FQH, Curtis SB, Tobias CA. Heavy-ion radiobiology: cellular studies. *Adv Radiat Biol.* 1984;11:295-389.
- [7] Furusawa Y, Fukutsu K, Aoki M, Itsukaichi H, Eguchi-Kasai K, Ohara H, et al. Inactivation of aerobic and hypoxic cells from three different cell lines by accelerated  $^3\text{He}$ -,  $^{12}\text{C}$ - and  $^{20}\text{Ne}$ -ion beams. *Radiat Res.* 2000;154:485-96.
- [8] Durante M, Cucinotta FA. Heavy ion carcinogenesis and human space exploration. *Nat Rev Cancer.* 2008;8:465-72.
- [9] Friedrich T, Scholz U, Elsässer T, Durante M, Scholz M. Systematic analysis of RBE and related quantities using a database of cell survival experiments with ion beam irradiation. *J Radiat Res.* 2013;54:494-514.
- [10] Friedrich T, Durante M, Scholz M. Particle species dependence of cell survival RBE: Evident and not negligible. *Acta Oncol.* 2013;52:589-603.
- [11] Steinsträter O, Grün R, Scholz U, Friedrich T, Durante M, Scholz M. Mapping of RBE-weighted doses between HIMAC- and LEM-Based treatment planning systems for carbon ion therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2012;84:854-60.
- [12] Lo SS, Fakiris AJ, Chang EL, Mayr NA, Wang JZ, Papiez L, et al. Stereotactic body radiation therapy: a novel treatment modality. *Nat Rev Clin Oncol.* 2010;7:44-54.
- [13] Tree AC, Khoo VS, Eeles RA, Ahmed M, Dearnaley DP, Hawkins MA, et al. Stereotactic body radiotherapy for oligometastases. *Lancet Oncol.* 2013;14:e28-37.
- [14] Horsman MR, Mortensen LS, Petersen JB, Busk M, Overgaard J. Imaging hypoxia to improve radiotherapy outcome. *Nat Rev Clin Oncol.* 2012;9:674-87.
- [15] Scifoni E, Tinganelli W, Weyrather WK, Durante M, Maier A, Krämer M. Including oxygen enhancement ratio in ion beam treatment planning: model implementation and experimental verification. *Phys Med Biol.* 2013;58:3871-95.
- [16] Harrabi S, Combs SE, Brons S, Haberer T, Debus J, Weber KJ. Temozolomide in combination with carbon ion or photon irradiation in glioblastoma multiforme cell lines - does scheduling matter? *Int J Radiat Biol.* 2013;89:692-7.
- [17] Formenti SC, Demaria S. Combining radiotherapy and cancer immunotherapy: a paradigm shift. *J Natl Cancer Inst.* 2013;105:256-65.
- [18] Mole RH. Whole body irradiation: radiobiology or medicine? *Br J Radiol.* 1953;26:234-41.
- [19] Postow MA, Callahan MK, Barker CA, Yamada Y, Yuan J, Kitano S, et al. Immunologic correlates of the abscopal effect in a patient with melanoma. *N Engl J Med.* 2012;366:925-31.
- [20] Hiniker SM, Chen DS, Knox SJ. Abscopal effect in a patient with melanoma. *N Engl J Med.* 2012;366:2035.
- [21] Durante M, Reppingen N, Held KD. Immunologically augmented cancer treatment using modern radiotherapy. *Trends Mol Med.* 2013;19:565-82.
- [22] Brown JM, Attardi LD. The role of apoptosis in cancer development and treatment response. *Nat Rev Cancer.* 2005;5:231-7.
- [23] Ogata T, Teshima T, Kagawa K, Hishikawa Y, Takahashi Y, Kawaguchi A, et al. Particle irradiation suppresses metastatic potential of cancer cells. *Cancer Res.* 2005;65:113-20.
- [24] Matsunaga A, Ueda Y, Yamada S, Harada Y, Shimada H, Hasegawa M, et al. Carbon-ion beam treatment induces systemic antitumor immunity against murine squamous cell carcinoma. *Cancer.* 2010;116:3740-8.
- [25] Barnett GC, West CM, Dunning AM, Elliott RM, Coles CE, Pharoah PD, Burnet NG. Normal tissue reactions to radiotherapy: towards tailoring treatment dose by genotype. *Nat Rev Cancer.* 2009;9:134-42.
- [26] Garcia-Closas M, Couch FJ, Lindstrom S, Michailidou K, Schmidt MK, Brook MN, et al. Genome-wide association studies identify four ER negative-specific breast cancer risk loci. *Nat Genet.* 2013;45:392-8.
- [27] Bentzen SM. Preventing or reducing late side effects of radiation therapy: radiobiology meets molecular pathology. *Nat Rev Cancer.* 2006;6:702-13.
- [28] Das AK, Bell MH, Nirodi CS, Story MD, Minna JD. Radiogenomics predicting tumor responses to radiotherapy in lung cancer. *Semin Radiat Oncol.* 2010;20:149-55.
- [29] Ding LH, Park S, Peyton M, Girard L, Xie Y, Minna JD, Story MD. Distinct transcriptome

- profiles identified in normal human bronchial epithelial cells after exposure to  $\gamma$ -rays and different elemental particles of high Z and energy. *BMC Genomics*. 2013;14:372.
- [30] Iwakawa M, Hamada N, Imadome K, Funayama T, Sakashita T, Kobayashi Y, Imai T. Expression profiles are different in carbon ion-irradiated normal human fibroblasts and their bystander cells. *Mutat Res*. 2008;642:57-67.
  - [31] Newhauser WD, Durante M. Assessing the risk of second malignancies after modern radiotherapy. *Nat Rev Cancer*. 2011;11:438-48.
  - [32] Weil MM, Bedford JS, Bielefeldt-Ohmann H, Ray FA, Genik PC, Ehrhart EJ, et al. Incidence of acute myeloid leukemia and hepatocellular carcinoma in mice irradiated with 1 GeV/nucleon  $^{56}\text{Fe}$  ions. *Radiat Res*. 2009;172:213-9.
  - [33] Little MP, Azizova TV, Bazyka D, Bouffler SD, Cardis E, Chekin S, et al. Systematic review and meta-analysis of circulatory disease from exposure to low-level ionizing radiation and estimates of potential population mortality risks. *Environ Health Perspect*. 2012;120:1503-11.
  - [34] Chylack LT Jr, Feiveson AH, Peterson LE, Tung WH, Wear ML, Marak LJ, et al. NASCA report 2: Longitudinal study of relationship of exposure to space radiation and risk of lens opacity. *Radiat Res*. 2012;178:25-32.
  - [35] Ando K, Koike S, Nojima K, Chen YJ, Ohira C, Ando S, et al. Mouse skin reactions following fractionated irradiation with carbon ions. *Int J Radiat Biol*. 1998;74:129-38.
  - [36] Cui X, Oonishi K, Tsujii H, Yasuda T, Matsumoto Y, Furusawa Y, et al. Effects of carbon ion beam on putative colon cancer stem cells and its comparison with X-rays. *Cancer Res*. 2011;71:3676-87.
  - [37] Durante M, George K, Gialanella G, Grossi G, La Tessa C, Manti L, et al. Cytogenetic effects of high-energy iron ions: dependence on shielding thickness and material. *Radiat Res*. 2005;164:571-6.
  - [38] Tsujii, H., Kamada, T., Shirai, T., et al. (Eds.) *Carbon-Ion Radiotherapy*. Springer-Verlag, Berlin, 2014. ISBN 978-4-431-54457-9



# 粒子線化学 線質による活性酸素生成の違い

Chemistry of Particle Radiation – Characteristics of ROS Generation –

松本謙一郎

放射線医学総合研究所 重粒子医科学センター 先端粒子線生物研究プログラム

## Abstract

Amounts and distributions of reactive oxygen species (ROS) generated in aqueous samples by irradiating X-ray or carbon ion beams were investigated. High linear energy transfer (LET) beams have a lower oxygen effect compare to low LET radiations. For improvement of carbon ion beam cancer therapy, low fractionated protocols are planned to reduce mental pain of patients. When clinical dose become higher in future low fractionated protocols, however, generation of ROS will become un-negligible. Very first hydroxyl radical ( $\bullet\text{OH}$ ) can be generated by radiolysis of water molecules. Sequentially, superoxide ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ) and hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) were generated with or without oxygen consumption. Reactions of  $\text{H}_2\text{O}_2$  and metal ions, such as  $\text{Cu}^+$  and/or  $\text{Fe}^{2+}$ , can again give  $\bullet\text{OH}$ . The oxygen effect of radiation may be determined by an outcome of ROS. Amounts and distributions of ROS generated by X-ray and carbon ion beam were assessed by electron paramagnetic resonance based methods. Amount of total ROS (free radical species, i.e.  $\bullet\text{OH}$  and  $\text{O}_2^{\bullet-}$ ) was  $3\mu\text{mol/L/Gy}$  for X-ray and  $0.4\text{--}1.2\mu\text{mol/L/Gy}$  for carbon ion beam. Amount of  $\text{H}_2\text{O}_2$  generation was  $0.2\mu\text{mol/L/Gy}$  for X-ray and  $0.06\text{--}0.6\mu\text{mol/L/Gy}$  for carbon ion beam. The total ROS and  $\text{H}_2\text{O}_2$  decreased with increasing LET ( $20\text{--}169\text{ keV}/\mu\text{m}$ ) of carbon ion beam when an identical dose was given. The  $\bullet\text{OH}$  generations expected to be localized on the track/range of the radiation beam/ray. The results suggested that both sparse ( $\approx 3.3\text{ mM}$ ) and very dense ( $> 1.7\text{ M}$ )  $\bullet\text{OH}$  generation were occurred in the irradiated samples. Different types of dense  $\bullet\text{OH}$  generation were expected for X-ray and C290-beam. Dens  $\bullet\text{OH}$  clusters may be scattered in X-ray region. It may be presumed that generation of high density  $\bullet\text{OH}$  localized on a track of carbon ion beam. Percentage of dense  $\bullet\text{OH}$  generation increased with LET becoming higher.

重粒子線は X 線や  $\gamma$  線に比べて酸素効果が小さいことが知られており、重粒子線がん治療において、その酸素効果はこれまであまり問題視されてこなかった。しかし今後の重粒子線がん治療の高度化を意識して、重粒子線による活性酸素 (Reactive Oxygen Species: ROS) の生成とそれに伴う酸素効果を認識し考慮する必要性を示す報告も出てきた[1-3]。生成する ROS を利用して癌細胞により大きなダメージを与える可能性も考えられるが、逆に、ROS の発生量や発生箇所をとらえてこれを抑制し、治療時に正常な細胞の保護に役立てることができる。正常組織を確実に保護することが出来れば、今よりも治療線量を上げることが可能になり効率的な治療に繋がっていく。それにはまず、重粒子 (炭素イオン) 線による ROS 生成の特性を明らかにする必要がある。

生体に放射線を照射すると、生体内の水分子の電離あるいは励起によってヒドロキシルラジカル ( $\bullet\text{OH}$ ) をはじめ反応性の高いいくつかの分子種が生じる。それらが互いに反応し合い、あるいは更に水中に溶けている酸素と反応することにより過酸化水素 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) やスーパーオキシド ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ) 等が生じる。生体内でこれらの ROS が出来やすいかどうかは放射線の酸素効果を生み出すと考えられる。重粒子 (炭素イオン) 線のような高 LET 放射線と、X 線や  $\gamma$  線のような低 LET 放射線では、最も初期の水の電離や励起で生じる活性種の生成比 (g 値) がそもそも異なる事が分かっている。このような初期活性種の出来高に依

存して、その後のフリーラジカル反応の進行に違いが生じ、これらの放射線の酸素効果の違いをもたらすと考えられる。そこで、炭素線と X 線の ROS 生成の違いについてフリーラジカル反応に基づいて解析した。

## ROS とフリーラジカル

生体内のエネルギー産生系における電子受容体として酸素が消費される過程では、 $\text{O}_2^{\bullet-}$  が副産物として生じ、これが段階的に還元され  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、更に  $\bullet\text{OH}$  が生じる。また皮膚などでは、酸素が光によって励起されて一重項酸素 ( $^1\text{O}_2$ ) が生じる。ROS とは狭義には、これら  $\text{O}_2^{\bullet-}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\bullet\text{OH}$ 、 $^1\text{O}_2$  の 4 種を指す。

一方、フリーラジカルとは分子上の不対電子のこと、あるいは不対電子を持つ分子のことを指す。ROS の中で、 $\bullet\text{OH}$  と  $\text{O}_2^{\bullet-}$  は分子中に不対電子を持っておりフリーラジカルである。しかし  $\text{H}_2\text{O}_2$  と  $^1\text{O}_2$  は不対電子を持たないのでフリーラジカルではない。

放射線の生体への影響を考える上で重要な ROS は  $\bullet\text{OH}$ 、 $\text{O}_2^{\bullet-}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$  の 3 種と言える。放射線による水の電離によって  $\bullet\text{OH}$  が、続いて  $\text{O}_2^{\bullet-}$  や  $\text{H}_2\text{O}_2$  が生じ、 $\text{H}_2\text{O}_2$  は  $\text{Fe}^{2+}$  や  $\text{Cu}^+$  などによって容易に還元され再び  $\bullet\text{OH}$  を生成する。 $\text{H}_2\text{O}_2$  は比較的安定なので生体成分と直接反応することは少ないが、そのぶん長い距離を移動することが出来るようになり、また蓄積することも可能になるので、影響の広がりや後続する影響を考える上

で重要である。

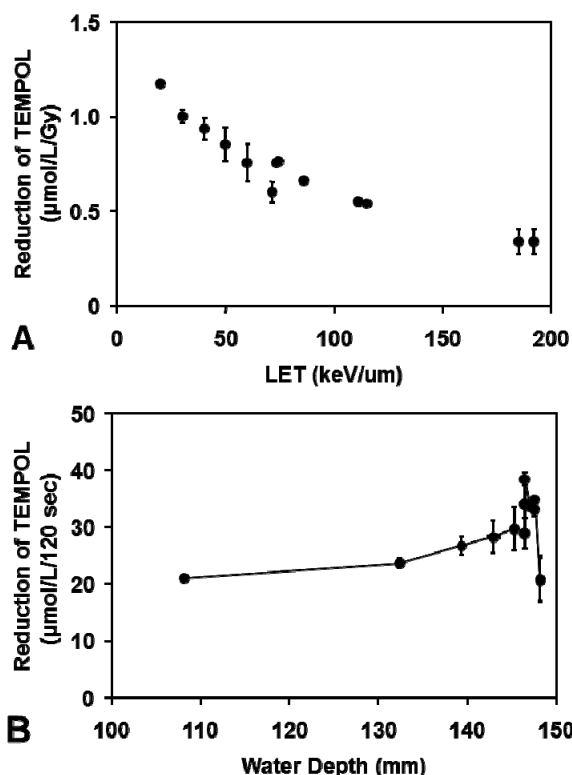


図 1. 炭素線を照射した水溶液試料内の ROS 生成量の評価。(A) 一定線量の炭素線を照射した時の LET と ROS 生成量の関係。(B) 照射時間を一定にした時の水に相当する深さと ROS 生成量の関係。

#### 炭素線により生じるフリーラジカル ( $\cdot\text{OH}$ と $\text{O}_2\cdot^-$ ) の定量と視覚化

スピンプローブ法はニトロキシラジカルを分子プローブとして、その分子上のフリーラジカル (不対電子) が還元される様子を磁気共鳴学的手法により観察する方法である。ニトロキシラジカルは分子上に比較的安定な不対電子を 1 つ持つ常磁性種で、電子常磁性共鳴 (EPR あるいは電子スピン共鳴: ESR と呼ばれる) により直接測定する事が出来る。また MRI の  $T_1$  強調画像に常磁性種がコントラストを与えること ( $T_1$  短縮効果) を利用して検出することも可能である。

ニトロキシラジカルは  $\cdot\text{OH}$  や  $\text{O}_2\cdot^-$  により容易に 1 電子酸化されてオキソアンモニウムカチオンとなる。更にオキソアンモニウムカチオンと GSH や NAD(P)H が共存すると、オキソアンモニウムカチオンが GSH や NAD(P)H から電子を受け取って 2 電子還元されてヒドロキシラミンとなる。ヒドロキシラミンは非磁性の分子なので EPR や MRI に信号を与えない。

そこでニトロキシラジカルと GSH を含む水溶液試料に放射線を照射した後、EPR 等で測定し

て試料中のニトロキシラジカルの消失量を定量すれば、試料中に生じた ROS の量を評価できる[4]。この反応では  $\cdot\text{OH}$  と  $\text{O}_2\cdot^-$  の反応を区別することはできないので、両者の起こす反応の総量を ROS 生成量として評価した。

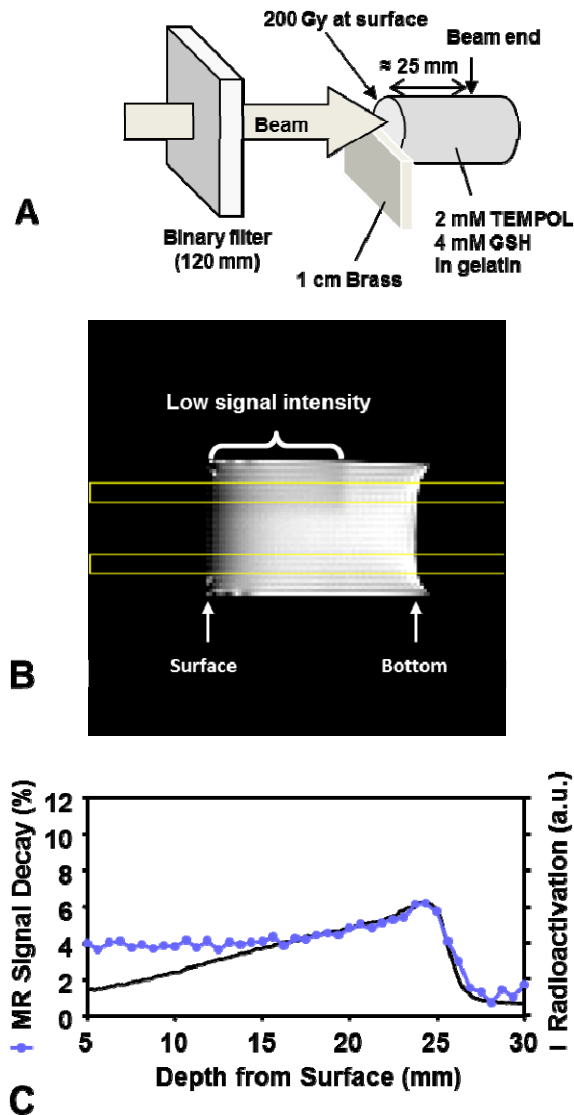


図 2. 炭素線を照射したゼラチン試料内の ROS 生成量の視覚化。TEMPOL と GSH を含むゼラチン試料に 290 MeV/n の炭素線を照射して、その断面の  $T_1$  強調 MRI 画像を撮像した。(A) ゼラチン試料の形状と照射の方向。(B) 炭素線を照射したゼラチン試料断面の  $T_1$  強調 MRI 画像。(C) MRI 画像から求めた試料内部の活性酸素生成量 (TEMPOL の還元に伴う  $T_1$  強調信号の減衰量)。

0.1 mM の TEMPOL (4-hydroxy-2,2,6,6-tetramethylpiperidine-*N*-oxyl) と 1 mM の GSH を含む 100 mM リン酸緩衝溶液に X 線あるいは炭素線を 16 Gy 照射した後、試料溶液中の TEMPOL 濃度を X-band EPR で測定した。TEMPOL の消失量から、試料溶液内に生じた



ROS 生成量を評価した。

X 線による TEMPOL の消失量、つまり ROS ( $\cdot\text{OH}$  と  $\text{O}_2\cdot^-$ ) 生成量は  $3\ \mu\text{mol/L/Gy}$  であった。炭素線による ROS 生成量は、試料に一定の線量を与えた場合には  $0.4\text{--}1.2\ \mu\text{mol/L/Gy}$  の範囲で、与えた LET ( $20\text{--}169\ \text{keV}/\mu\text{m}$ ) によって異なり、LET が大きくなるにつれて少なくなった。しかし一つの大きな試料に炭素線を照射した場合には、試料の内部で線量が増えるため、ROS 生成量を照射時間で規格化すると、ブラッグピーク付近で反応量が若干増加するが、それより手前の部分ではほぼ一定の ROS 生成が予想された。

そこで比較的大きな試料内部の ROS 生成の分布を確かめるため、MRI による画像化実験を行った。2 mM の TEMPOL と 4 mM の GSH を含む溶液をゼラチンで固めて、円柱形の試料を作成した (図 1A)。ゼラチン試料のある方向から炭素線を 200 Gy 照射して、その断面を  $T_1$  強調 MRI で画像化した (図 1B)。その結果、MRI 画像解析によっても EPR 測定と同様の結果が得られ、図 1C から分かるようにフリーラジカル反応は、ブラッグピーク付近で若干増える以外は、浅い部分から深い部分までほぼ一定に起きていることが分かった[5]。

#### 炭素線により生じる $\text{H}_2\text{O}_2$ のスピントロブ法による観測

ニトロキシラジカルの水溶液に比較的高線量 ( $\sim 256\ \text{Gy}$ ) の放射線を照射した場合には GSH や NAD(P)H 等の水素供与体が存在しなくてもニトロキシラジカルの EPR シグナルがわずかに消失する。その量は GSH が共存する時のシグナル消失量の  $1/30$  程度である。この反応の機構は明らかではないが、カタラーゼの添加でこの反応が抑制されることから、生成する  $\text{H}_2\text{O}_2$  が関与することがわかっている。またこの時、 $\text{H}_2\text{O}_2$  の生成に伴って酸素消費が起こる。言い換えると、GSH や NAD(P)H を含まないニトロキシラジカルの水溶液に放射線を照射した時のニトロキシラジカルの消失量は、試料中に生成する  $\text{H}_2\text{O}_2$  の量に対応する。

2 mM の TEMPOL を加えたゼラチン試料に X 線あるいは炭素線を 200 Gy 照射して、試料中の TEMPOL の消失量から試料中に生じた  $\text{H}_2\text{O}_2$  の量を評価した。またゼラチン試料内の酸素消費を EPR 酸素濃度測定法により測定した。微量のコーン油に溶いた LiPc-BuO の粉末を、予め試料容器内壁 (炭素線照射時の表面側) に塗り付けておき、容器にゼラチン試料を注いで固めた。炭素線の照射の前後で LiPc-BuO の EPR スペクトルを L-band EPR に取り付けた表面コイルリゾネータを用いて測定し、その EPR 線幅に基づいて試料内の酸素濃度を求めた。

X 線による  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成量は  $0.2\ \mu\text{mol/L/Gy}$  であった。炭素線による  $\text{H}_2\text{O}_2$  の生成は、一定の線量を与えた場合には LET が高くなるのに伴って低下し、LET が  $20\text{--}169\ \text{keV}/\mu\text{m}$  の範囲で、 $0.06\text{--}0.6\ \mu\text{mol/L/Gy}$  程度であった (図 3A)。X 線による酸素消費量は  $0.4\ \mu\text{mol/L/Gy}$  であった。炭素線による酸素消費は  $\text{H}_2\text{O}_2$  の生成量と同様に、LET が高くなるのに伴って酸素消費量が低下する傾向が見られた (図 3B)。酸素消費量は LET が  $20\text{--}100\ \text{keV}/\mu\text{m}$  の範囲で、 $0.04\text{--}0.4\ \mu\text{mol/L/Gy}$  程度であった[6]。

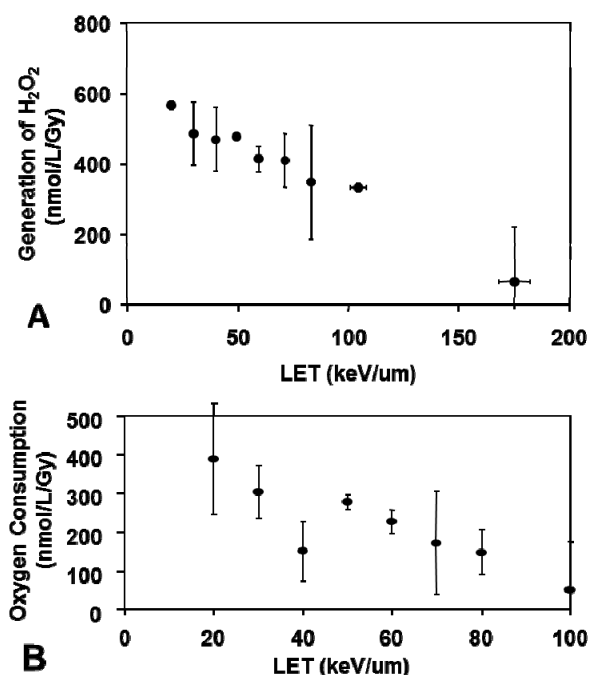


図 3. 炭素線を照射した水溶液試料内の  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成量と酸素消費量の評価。(A) LET と  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成量の関係。(B) LET と酸素消費量の関係。

#### スピントラッピング法によるヒドロキシラジカルの生成密度の解析

スピントラッピング法は、 $\cdot\text{OH}$  や  $\text{O}_2\cdot^-$  などの短寿命フリーラジカルをスピントラップ剤と反応させて比較的安定なフリーラジカル種を生じさせ、これを EPR で測定する方法である。

本実験ではスピントラッピング剤として DMPO を用いて、DMPO と  $\cdot\text{OH}$  が反応して生じる DMPO-OH を検出した。ここで DMPO は、言わば  $\cdot\text{OH}$  のディテクターといえる。反応系内で生じる  $\cdot\text{OH}$  を十分な感度で検出するにはディテクターの密度が  $\cdot\text{OH}$  の生成密度を上回らなければならない。ディテクターの密度が  $\cdot\text{OH}$  の密度を上回らないうちは、ディテクターの密度を増やせば増やすだけ検出される DMPO-OH の量が増えるはずである。しかしディテクターの密度が  $\cdot\text{OH}$  の密度を上回っていれば、それ以上は検出できないので、検出される DMPO-OH の量は飽和すると

考えられる。そこで 0.5 mM から 1685 mM までの様々な DMPO 濃度の水溶液に、X 線あるいは炭素線を 32 Gy 照射して、試料溶液内に生じる DMPO-OH 濃度の変化を調べた。

図 4 に結果を示す。上から X 線、LET = 60 keV/μm の炭素線、LET = 169 keV/μm の炭素線での結果である。横軸に DMPO 密度（ある濃度における分子間距離の逆数）、縦軸に生成した DMPO-OH の濃度をプロットした。濃度と分子間距離と密度の関係を表 1 に示す。X 線でも炭素線でも試料溶液中の DMPO 密度が 125 μm<sup>-1</sup> (3.3 mM) 程度まで、検出された DMPO-OH 濃度が直線的に増加した。DMPO 密度が 125 μm<sup>-1</sup> を超えた辺りから DMPO-OH の検出濃度は一度プラトーに達したように思われたが、更に DMPO 密度が増していくと X 線では DMPO 濃度が 700 μm<sup>-1</sup> を超えた辺りから、炭素線では 500 μm<sup>-1</sup> を超えた辺りから、再び原点を通ると思われる直線的な DMPO-OH 濃度の増加が見られた。DMPO 密度の増加に対する DMPO-OH 濃度の原点を通ると思われる直線的な増加は、DMPO 密度が・OH 生成密度を上回っていないことを示しているの、ここでは異なる 2 つの密度で・OH が生成していることが予想された。DMPO 密度が 125 μm<sup>-1</sup> 辺りに肩が見られ、このことから先ず DMPO 濃度 3.3 mM に相当する・OH 生成があると考えられた。また DMPO 密度の高い部分では実験で用いた最大濃度 (1.7 M) まで直線部分が続いていることから、1.7 M 以上の密な・OH 生成が予想できた。更に、検出した DMPO-OH の最大濃度は 40 μM 程度であり、予想した・OH 生成濃度よりもはるかに低い濃度であった。このことから・OH の生成が局所的に生じていると予想された。

### 活性酸素生成量の比較

X 線、炭素線 (20 keV/μm)、および炭素線 (80 keV/μm) の線量当りの ROS (O<sub>2</sub>・と・OH) 生成量、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 生成量、酸素消費量、および・OH 生成量を表 1 にまとめた。ROS (O<sub>2</sub>・と・OH) 生成量は X 線で一番多く、炭素線では LET が大きいほど少なかった。ただしこの実験では、分子プローブとして使用している TEMPOL 濃度が 0.1 mM と薄いことから、ここで観測している ROS は、主に溶存酸素由来の O<sub>2</sub>・および疎な・OH の一部であると考えられる。

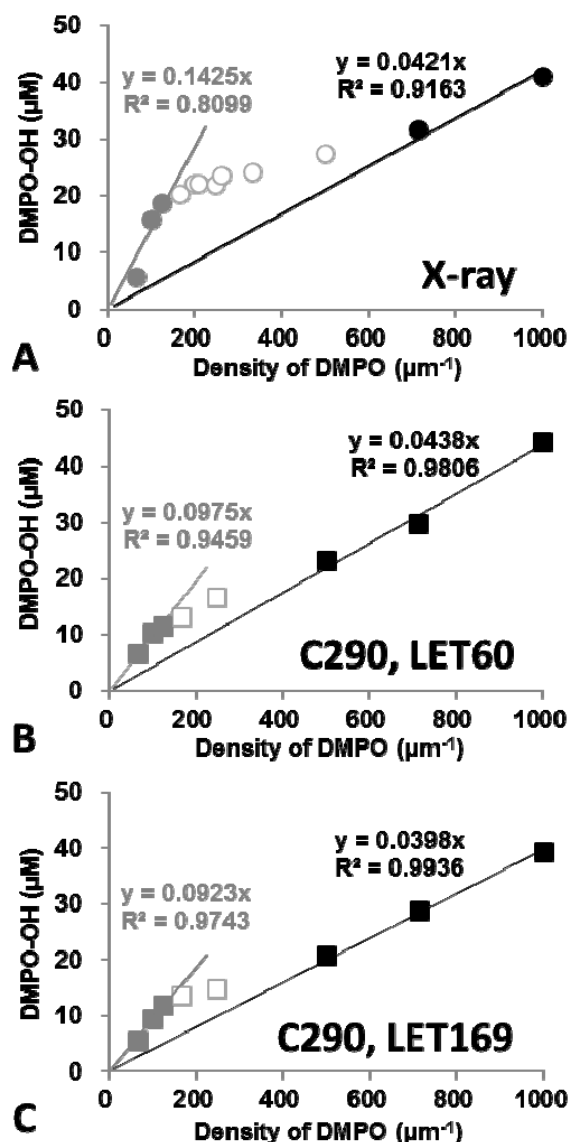
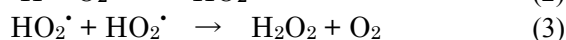
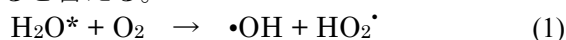


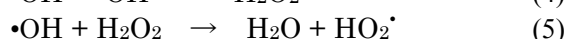
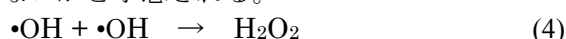
図 4. X 線および炭素線による・OH 生成密度の評価。横軸は DMPO 密度（ある濃度における分子間距離の逆数）。(A) X 線による結果。(B) 炭素線 (LET = 60 keV/μm) による結果。(C) 炭素線 (LET = 169 keV/μm) による結果。DMPO 密度の増加に対して、原点を通ると思われる直線的な DMPO-OH 濃度の増加が、DMPO 濃度の薄い場合と非常に濃い場合の 2 ヶ所で観察された。これは疎な・OH 生成と密な・OH 生成が生じていることを示している。

一方、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 生成量は X 線よりも炭素線のほうが多く、炭素線では LET が大きいほど少なかった。また H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 生成量当りの酸素消費量の比は、X 線で 2、炭素線 (20 keV/μm)、および炭素線 (80 keV/μm) ではそれぞれ 0.68 と 0.42 と少なかった。X 線では、水の励起あるいは電離によって生じた活性種 (それぞれ H<sub>2</sub>O\* と・H) と酸素 (O<sub>2</sub>) との反応によってヒドロペルオキシラジカル (HO<sub>2</sub>・) が生じ Eq. (1, 2)、この HO<sub>2</sub>・同士が反応して H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> と酸素が生じるものと考えられる Eq. (3)。HO<sub>2</sub>・

と  $O_2^{\cdot -}$  は平衡状態にあり、酸素濃度の高い場合には  $O_2^{\cdot -}$  の生成が増加すると考えられるため、X 線の影響を考える上では酸素濃度が重要になってくると言える。



しかし炭素線では、非常に密な  $\cdot OH$  生成の割合が多いことから、 $\cdot OH$  同士が反応することによって酸素消費を伴うことなく  $H_2O_2$  が生成するものと考えられる Eq. (4)。更に  $H_2O_2$  と近くの  $\cdot OH$  の反応によって  $HO_2^{\cdot}$  が生じ Eq. (5)、その結果、酸素消費を伴わない  $O_2^{\cdot -}$  の生成が起こる。そのため酸素消費よりも、逆に酸素を生じる可能性が考えられる Eq. (3)。ここで生じた酸素は Eq. (2) の反応で消費されると考えられるので、更なる  $HO_2^{\cdot}$  の生成へとつながるものと思われる。このような環境を考えると、炭素線では  $O_2^{\cdot -}$  の作用が比較的大きくなると考えられ、その制御が重要になるのではないかと予想される。



X 線の場合にも  $\cdot OH$  生成が密な場所ではこの反応が生じるであろうが、X 線の場合は密な  $\cdot OH$  生成の場所が点在すると考えられたため、Eq. (4, 5) の反応は炭素線に比べると少ないと思われる。

スピントラッピング法によるヒドロキシルラジカルの生成密度の解析実験で、DMPO 濃度の一番濃い条件 (1.7 M) での DMPO-OH 生成量は線質に関わらずほぼ一定であった。与えた線量が同じであれば最初に起こる電離の量は同じではずであり、この結果から  $\cdot OH$  の総生成量は線質によらずほぼ一定であると予想された。しかしながら、疎な  $\cdot OH$  には X 線および LET の異なる炭素線の間に違いが見られ、X 線で多く、20 keV/μm の炭素線ではそれよりも若干少なく、80 keV/μm の炭素線では更に少なかった。言い換えれば LET の高い炭素線では、密な  $\cdot OH$  の生成割合が大きいといえる。

$\cdot OH$  は反応性が極めて高いので、ほとんどの物質と大差無く反応する。このような高密度な  $\cdot OH$  の生成が在るならば、その場にある生体内分子と  $\cdot OH$  との反応は避けられず、必ず何らかの形で化学修飾を受けるはずである。つまり、重粒子線の軌跡上に存在した分子は、高濃度の  $\cdot OH$  によって高密度でかつ部位特異性の無い酸化障害を被る事になると考えられる。 $\cdot OH$  の生成には水分子の生成が必要不可欠であるが、これほど高密度の  $\cdot OH$  に対して抗酸化剤などによる充分な抑制を期待するのはほぼ不可能であり、厳密には間接効果であるもののこれを直接効果と区別することは難しいと思われる。

表 1. X 線および炭素線の活性酸素生成量の比較

	X ray	Carbon ion beam	
		20 keV/μm	80 keV/μm
$\cdot O_2^{\cdot -} + \cdot OH$ (Sparse)	3 μmol/L/Gy	1.3 μmol/L/Gy	0.66 μmol/L/Gy
$H_2O_2$	0.2 μmol/L/Gy	0.57 μmol/L/Gy	0.35 μmol/L/Gy
Oxygen consumption	0.4 μmol/L/Gy	0.39 μmol/L/Gy	0.15 μmol/L/Gy
Total $\cdot OH$	1.28 μmol/L/Gy	1.26 μmol/L/Gy	1.26 μmol/L/Gy
Sparse $\cdot OH$ (≈ 3.3 mM)	0.58 μmol/L/Gy	0.52 μmol/L/Gy	0.37 μmol/L/Gy

Total  $\cdot OH$  は、DMPO 濃度の一番濃い条件 (1.7 M) での DMPO-OH 生成量。Sparse  $\cdot OH$  は、DMPO 濃度 3.3 mM (DMPO-OH/DMPO の曲線の編曲点) における DMPO-OH 生成量。

## 参考文献

- [1] Moritake, T., Tsuboi, K., Anzai, K., Ozawa, T., Ando, K., and Nose, T. ESR spin trapping of hydroxyl radicals in aqueous solution irradiated with high-LET carbon-ion beams. *Radiat. Res.*, 159: 670–675, 2003.
- [2] Hirayama, R., Furusawa, Y., Fukawa, T., and Ando, K. Repair kinetics of DNA-DSB induced by X-ray or carbon ions under oxic and hypoxic conditions. *J. Radiat. Res.* 46: 325–332, 2005.
- [3] Ito, A., Nakano, H., Kusano, Y., Hirayama, R., Furusawa, Y., Murayama, C., Mori, T., Katsumura, Y., and Shinohara, K. Contribution of indirect action to radiation-induced mammalian cell inactivation: dependence on photon energy and heavy-ion LET. *Radiat. Res.*, 165: 703–712, 2006.
- [4] Matsumoto K, Okajo A, Nagata K, DeGraff WG, Nyui M, Ueno M, Nakanishi I, Ozawa T, Mitchell JB, Krishna MC, Yamamoto H, Endo K, Anzai K. Detection of free radical reactions in an aqueous sample induced by low linear-energy-transfer irradiation. *Biol. Pharm. Bull.* 32, 542–547, 2009.
- [5] Matsumoto K, Nagata K, Yamamoto H, Endo K, Anzai K, Aoki I. Visualization of free radical reactions in an aqueous sample irradiated by 290 MeV carbon beam. *Magn. Reson. Med.* 61, 1033–1039, 2009.
- [6] Matsumoto K, Aoki I, Nakanishi I, Matsumoto A, Nyui M, Endo K, Anzai K. Distribution of hydrogen peroxide-dependent reaction in a gelatin sample irradiated by carbon ion beam. *Magn. Reson. Med.* 9, 131–140, 2010.

# HIMAC 利用者のための粒子線生物

Particle Radiation Biology for HIMAC Users

古澤佳也

放射線医学総合研究所 研究基盤センター

## Abstract

HIMAC cooperative research project has open started in October 1994 for world researchers following start of clinical trial in June 1994. Particle radiobiology is now common by this project in Japan. I introduce some interesting points on high-LET particle radiation in radiobiology. There are many new knowledge and different evidences from our conventional understandings through the studies from 20 years of the project. Some biological evidences after high-LET radiation may different from old textbooks. Here I introduce those new fact and some attention in the study.

## はじめに

1964年6月にHIMACの臨床試行が始まり同年10月からビームが共同利用に供された。この共同利用によって粒子線生物学が国内に広まり多くの科学者を集めての研究が開始された。それ以前の粒子線を用いた放射線生物学研究は、放医研で重粒子線治療を行うための基礎研究として放医研のサイクロトロンと理化学研究のリングサイクロトロンを用いて少数の研究者に依頼して行っていた。

初期の共同利用生物研究では、HIMACで臨床試行が始まった事もあり癌治療の為に粒子線生物学的研究が大半を占めていたが、中盤で研究課題は宇宙放射線に広がり、最近ではさらに広範囲の課題へと広がりを見せている。

此处では高LET粒子線に特徴的な生物応答の一端と実験時に一部誤解を生じているかも知れない問題点を紹介する

## 重粒子線の線質:LET

重粒子線の生物効果の最大の特徴は、その「高い生物効果」と「低い酸素効果」あるいは「損傷の修復性」等の低LETまたは光子放射線との違いである。重粒子線の線質を示すためにHIMACでは通常LET(線エネルギー付与)が用いられるが、時にlineal energy;  $y$ (共に単位はkeV/μm)やStopping Power(阻止能);  $dE/dx$ (MeV/cm; ディメンションは同じ、 $= x \cdot 10$  keV/μm)として記述される。最近ではスポットスキャンへの移行に伴い、生物効果から治療ビーム線量分布の設計を行う際にMKMモデル(Microdosimetric Kinetic Model) [1, 2]が用いられるようになり、LETについても $y$  [3]が多用されるようになってきた。LETはさらに100 eV以下の電子の寄与を切捨てたり(LET<sub>100</sub>)、全エネルギーの電子を考慮したり(LET<sub>∞</sub>)とバリエーションがある事も考慮すべきである。粒子線のLETの値は概ね粒子の電荷の自乗に比例し、媒体中での速度に反比例する。X線やγ線など光子線では何をもってLETとするか定義の議論の分かれる所であるが数keV/μm前

後の値を用いている場合が多い。これに対しHIMAC炭素線のLETは入射端部で13 keV/μm(@~290 MeV/u)でありビーム終端の約1mm手前で110 keV/μm(~16 MeV/u)となる。治療用陽子線(200 MeV前後)では概ね0.5 keV/μmで停止直前でも数keV/μm程度(~10 MeV; 1mm手前)に過ぎない。またHIMACではLETは線量平均LET(dose average LET)が用いられているが、放射核種を線源に用いた論文や加速器を用いた古い研究論文では飛跡平均LET(track average LET)が用いられている場合もあるので注意が必要である。

粒子の加速エネルギーを表す単位のMeV/uはMeV/n(nucleon)やMeV/atm等が使われることもあるがこれらは同義である。

治療ではピーク幅の狭いBragg Curveを深さ方向に癌組織の大きさまでに拡大するため、異なるエネルギーの粒子ビームを混合してSOBP(Spread-Out Bragg Peak)を形成する。このためSOBP中では幅広い異なったエネルギーの粒子が混在している。ビームの飛程に吸収体を挿入する方法でエネルギーを混合する受動的方法では二次粒子の発生により分布の広がりがさらに大きくなる。加速器で異なるエネルギーの粒子を供給する場合にはここでの分布の広がりは小さいが、この場合であっても体内の通過部位からの二次粒子の発生は避けられない。

HIMACではmonoビームSOBPビームを問わずLET値は全て線量平均LETとして示される。SOBPの深さによって異なるが同じLETであってもRBEはmonoの方が数段高いので注意が必要である。またmonoとは言っても相当広いLETの分布を持つビームであることや、加速器出口から細胞までの間で派生する二次粒子等の寄与も含めた線量平均LETであることを念頭に置くべきである。

HIMACで代表的な290 MeV/u炭素線ビームの6cm- SOBPでは、体表面に相当する入射部で14 keV/μmであったLETは計画標的体積; PTVの近位(SOBP入口)で~40 keV/μm、中心で~50

keV/μm、最遠位端の直前では 100 keV/μm を越える。現在 mono ビームでは凡そ 13~70 keV/μm の範囲で利用が薦められているが、かつては実験者自身の測定によりさらに高い LET のビームでも実験が可能である。この場合には測定時と試料照射時に気圧や気温の変動によるビーム飛程等の変化による線量率や LET の変化に注意が必要である。

### 生物効果比 RBE

高低 LET の放射線による細胞の生存率曲線は、通常、低 LET 放射線では肩のある曲線が描かれるが、高 LET 放射線では肩が減少して直線的になり(図 1)、

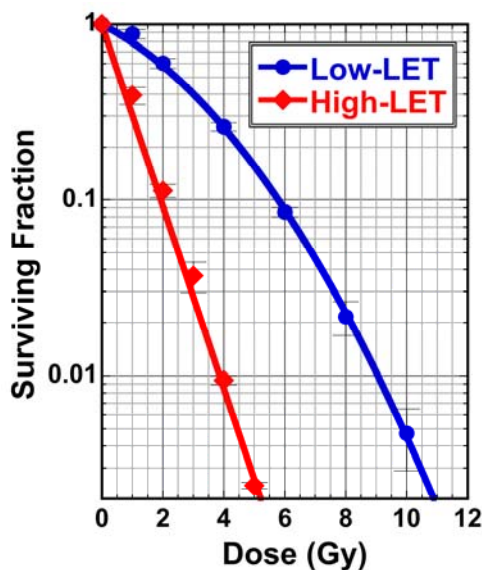


図 1

非常に高い LET ではこの直線性を保ったまま傾きだけが穏やかになり、数百 keV/μm を超えると低 LET 放射線による生存率曲線と交差する。こういった異なる LET の放射線で「同じ生物効果を得るために必要な放射線量」を、参照基準と考える特定の放射線と比較するのに RBE (Relative Biological Effectiveness) が用いられる。これは基準放射線量( $D_{ref}$ ; X 線等)と試験放射線量( $D_{test}$ ; 粒子線等)を比較し

$$RBE = D_{ref} / D_{test}$$

と定義される。この線量効果曲線の形の違いにより RBE は生物効果のレベルに依存する関数となるが、定義では考慮されて居ない。細胞の致死で見た RBE は LET 値が 10 keV/μm 程度まで大きな変化を見せず、100~200 keV/μm に極大を示し、X 線に比べて数倍大きな値を示し、さらに LET が上昇すると減少に転じる (図 2)。図は 200 kVp-X 線(ターゲット; W、フィルター; 0.5 mmAl +

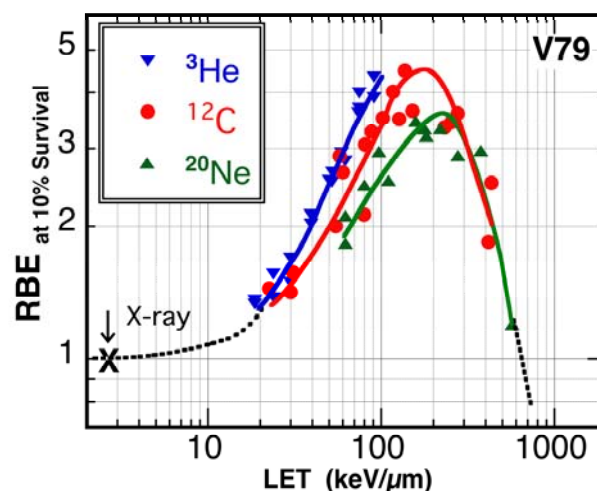


図 2

0.5mmCu)を基準放射線とし、V79 細胞の生存率を 10 %とする時の <sup>3</sup>He, <sup>12</sup>C, <sup>20</sup>Ne の mono ビームに対する LET-RBE 関係である[4]。図に示すように加速粒子の種類によって LET-RBE の関係にズレ[5, 6]が生じ一義的ではない。適当なドメインサイズを選ぶことで LET にかわり生物効果をより一般的[7]に現せるリニアルエネルギー  $y$  の導入がより適切かもしれないが、ドメインサイズはフィットのための自由パラメータであり、これが生物効果のどのような実体を反映しているかが明らかになれば意義深い。また諸々の論文でエンドポイントが異なる事や基準放射線が異なる事が多く事態をさらに複雑にしている。様々な粒子とエンドポイントについての RBE 等の LET 分布が安藤ら[8]や Freidrich ら[9, 10]によってもまとめられ、粒子線治療の RBE [11]の扱いが IAEA でレポートされている。

放医研では臨床試行開始に先立ち、当初治療の対象が頭頸部癌であったので、ヒト唾液腺癌由来の HSG 細胞に対して LET-RBE 分布を求めた[4]。この分布から治療標的領域の効果が均一となる様 SOBP の LET 分布および物理線量分布を決定してリッジフィルターの形状を導きビームを設計[12]した。次に作成したリッジフィルターを用いて複数種の細胞で効果の均一性を検証し細部を調整して最終的に生物効果(及び治療効果)が均一と考えられる物理線量分布を持つリッジフィルターを決定[13]した。この時、放医研で従来行われていた速中性子線治療ビームは HSG 細胞の RBE が 2.0 であり、炭素線の SOBP 遠位端より 8 mm 手前(SOBP の線量平均 LET が 80 keV/μm)の点が同じ RBE 値を示したことから、この点を速中性子線に対する参照点とした(図 3)。参照点での生物 RBE は 2.0 であり中性子線治療の臨床 RBE が 3.0 で有ったことから、臨床 RBE を生物 RBE の 1.5 倍とした。この時の治療での一回線量が 2.7 GyE ( $y$  線等価線量)であったことから炭



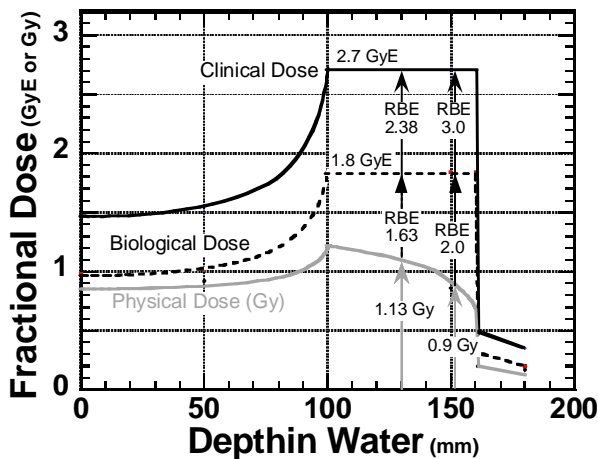


図 3

素線 SOBP ビーム中心での臨床 RBE は 2.38、生物 RBE は 1.63 となっている。その後の臨床試行で得られた非小細胞肺癌の治療成績では、18 回分割照射の TCP 曲線で腫瘍制御率が 80% の場合の RBE が 2.36 となり、ビーム設計時の SOBP 中心での設計臨床 RBE(2.38)と良い一致が確認された [14, 15]。また炭素線では 80% 制御率を得るための総線量は光子線の 72.0Gy に対し炭素線では 30.5Gy であり急峻な TCP 曲線となることが報告されている。深部癌を対照とした場合には図 3 から判るように、治療計画体積;PTV 入射端から約 1 cm 手前の正常組織の被ばく線量は標的線量;GTV/CTV の概ね 2/3 であり皮膚表面の被ばく線量は概ね 1/2 で、副作用を抑えた治療が行い得る事が示唆される。癌組織の深さによってもこれらは異なるが、陽子線についてはこれらの値は 4/5 程度であり、光子線については逆転して 10/7 程度（一門照射）であって、重粒子線の優位性が示唆される。しかし、寡分割照射の方向に動いている HIMAC の臨床では分割回数に応じた RBE の見直しが必要であり、MKM モデルを取り入れる方向に動いてきた。

#### 粒子密度

X 線やガンマ線などの光子放射線の照射野は通常マクロな視点で均一であると考えられているが、MKM モデルの様な微小ドメインを考える場合にはエネルギー付与は大きな確率的分布を持つ [16]。細胞サイズのマクロな視点であっても粒子線では飛来粒子の到達部位に大きな分布が見られる。細胞に入射する粒子数  $N[p]$  は線量  $D[Gy=J/kg]$ 、LET  $[keV/\mu m]$ 、細胞面積  $S[\mu m^2]$  の時、単位エネルギー  $1[J]$  は  $6.24 \cdot 10^{-15}[keV]$  であるので細胞の密度を 1 とするとき

$$N = 6.24 \cdot D \cdot S / LET$$

となる。ビームから見た細胞核の投影面積を  $100 \mu m^2$  をとしたとき 1Gy の粒子線に対して LET が  $70 keV/\mu m$  の時は平均 9 粒子が細胞核を通過する

ことになる。LET-RBE のピークである  $100 \sim 200 keV/\mu m$  では  $6 \sim 3$  粒子/細胞核となり、HIMAC で良く用いられる Fe イオンでは LET が数百  $keV/\mu m$  を超えるので 1 Gy 程度では照射されていない細胞が増加するので注意が必要である。

細胞内での信号伝達系の研究は盛んであるが、高 LET や低線量を扱う場合不均一系となりバイスタンダー効果（非照射細胞の放射線応答） [17] や適応応答 [18]、免疫系 [19] などの細胞間信号伝達の研究が重要になってくる。

#### トラック構造

加速粒子種や LET によって生物効果が異なるのはそのビームのトラック構造に強く関連していると考えられる。図 4 には LET が  $70 keV/\mu m$  の時の  $^3He$ ,  $^{12}C$ ,  $^{20}Ne$  ビームのトラック構造を Chatterjee らのモデル式 [20] より計算し、同時に細胞内微小器官の大きさを示した。左上端のイオン化密度の変わらない部分がコアと呼ばれ、上から  $^3He$ ,  $^{12}C$ ,  $^{20}Ne$  の順である。斜めの部分はペナンプラと呼ばれる傾き部分に大きな違いは無く半径が規定されている部分では中心側から  $^3He$ ,  $^{12}C$ ,  $^{20}Ne$  の順である。

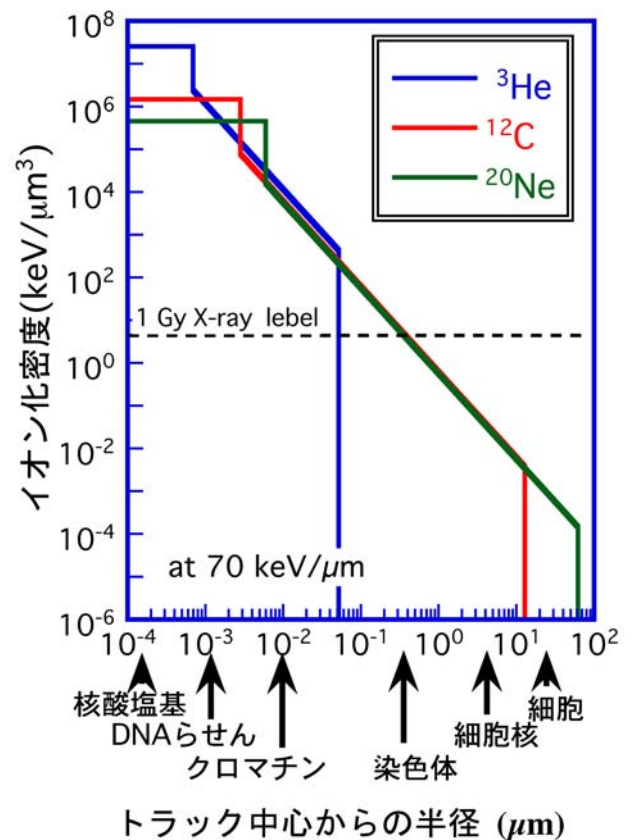


図 4

構造を持たない放射線 1 Gy の電離密度は  $6.24 keV/\mu m^3$  (図 4 中央の破線) であり、細胞構造の大きさは、核酸塩基や DNA は粒子線飛跡のコア

の中に入る大きさであるのに対し、染色体や細胞核の大きさはコアより大きく最大ペナンプラ径より小さい。重粒子線のペナンプラの外郭では局所的かつ比較的低線量のエネルギー付与であって1粒子で細胞に大きな致死損傷を与える事は考えにくい。 $\gamma$  H2AX等の免疫抗体法でDNAの損傷領域を観る[21]とこのトラック構造が可視化できる(図5)。どのDNA領域が最も重要な放射線感受性に対応する部分であるかはよく解っていないが、こういったトラック構造と細胞構造の関係が、同じLETであっても粒子種によって生物効果が異なる原因になっているであろうと想像できる。

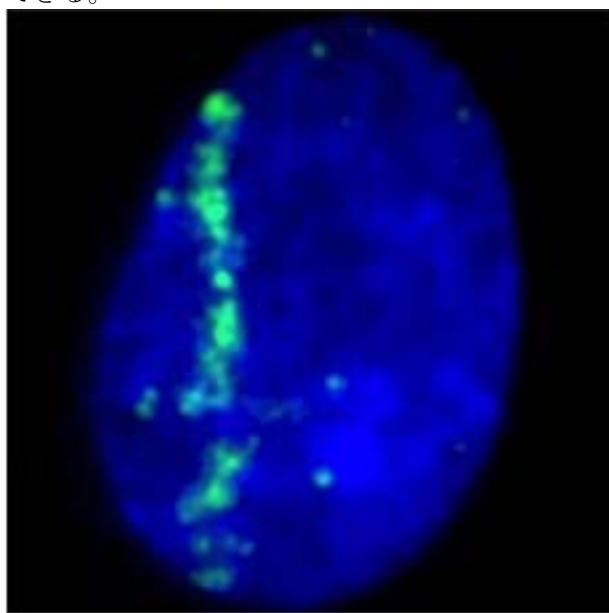


図5

### 直接作用と間接作用

放射線の作用は標的分子の物理的エネルギー吸収による直接作用と化学的過程を経由した間接作用に分類され、低LETで全体の約2/3を占める間接作用が高LETでは無くなり直接作用が取って代わると考えられている。しかし高LETになっても間接効果はあまり減少せず[22]、1000keV/μmを超える高LETビームであっても3割以上[23]残っているという結果も報告されている。これは高LETと言っても図4に示すように、コア部分が実際の高LETの主役ではあるが、総エネルギーの1/2を占める低LETのペナンプラ部分が周期に広がり、平均としての高LET放射線であってもかならず低LET成分を含んでいて不可分であるからに他ならないであろう。

### 酸素効果

酸素増感比(OER; Oxygen Enhancement Ratio)に関しては放射線治療後の腫瘍再発に関連した重要因子とされているが、実際には腫瘍内の酸素濃度分布などの測定が現実的でないこと

から、現在は治療計画には取入れられていない。

OERは通常、照射時に有酸素状態と無酸素(または低酸素状態)で同じ効果を与える線量比として

$$\text{OER} = D_{\text{hypoxic}} / D_{\text{oxic}} \quad \text{または} \\ = D_{\text{anoxic}} / D_{\text{oxic}}$$

と定義される。細胞の生存率でみたOERは炭素線では数十keV/μm程度迄は大きな変化は無く、そこから減少が始まって、数百keV/μmでほぼ1となる[4](図6)。粒子種依存性も見られ炭素より重い粒子での差は明らかでないが、 $^3\text{He}$ 粒子ではOERの減少がより低いLET領域から始まる。これはトラックが細いビームで高電離密度成分が多いビームの特性なのかも知れない。

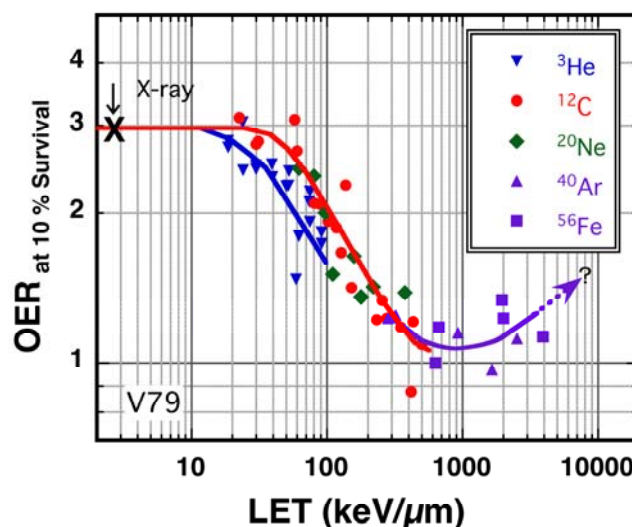


図6

酸素効果は照射時に酸素が存在することによって起こる損傷の生成に基づくものであるが、照射後の修復にも関与しているらしい。DNA二本鎖切断の生成効率で観ると、OERは6近くあったものが、直後の有酸素下で修復によりすぐに3程度に落ち着くという報告[24, 25]があるが、その部位がさらに長時間低酸素のまま存在するとその後の生物学的プロセスでどのような挙動を見せるかは判って居ない。腫瘍などの低酸素状態での放射線効果の酸素濃度依存性やLET依存性は研究されていなかったが、国際オープンラボラトリープロジェクトで研究が行われた。

治療において体表面の入射端部は低LET高OERであるが此処は通常有酸素の正常組織領域でありOERを考慮に入れる必要は大きくは無い、さらに低RBEであり線量も低いので正常組織障害も小さい。照射体積内部は比較的高LETとなり、OERの減少したビームで照射され、またRBEも線量も高いので癌細胞の抑制に有利である。このコントラストが重粒子線治療を有利にしている生物学的要因と考えられる。治療線量はOERを特に考慮しないで低酸素部分も込みでの治療



線量が決められており、言い換えると此処に存在する有酸素領域にとっては過剰線量が投入されている。分子イメージング技術が進展して酸素濃度分布等の癌組織微小環境が非侵襲的に測定できるようになると、治療体積内での線量に濃淡をつけた照射が可能になりより高度な治療が可能になるであろう。

腫瘍治癒確率(TCP)曲線の傾きの程度は腫瘍細胞の感受性のばらつきに一因が有ると考えられるが、重粒子線ではこれが小さく傾きは急峻であった[15, 26]。これは癌細胞本来の感受性のばらつきとともに低 OER のため、細胞・部位間での感受性の差が小さくなった事も大きな要因であろう。

### 細胞周期

細胞周期によって放射線感受性が変わることは良く知られている[27]。高 LET 放射線に対しては元々感受性の高い G2/M 期の感受性はあまり変わらないものの比較的抵抗性であった G1~S 期の感受性は LET と共に感受性によって変わってきて感受性差が高感受性側に小さくなる事[28]が明らかにされている。治療の上では細胞集団の細胞周期毎の存在比率が変化しても放射線治療の「4R」で言うところの redistribution(再配分)による感受性変化は高感受性の側で感受性変化は小さいと考えられる。

### DNA 損傷、染色体異常

重粒子線では電離がトラックに沿って集中して起こるため複数の DNA 損傷も限局した領域に生成され、クラスター損傷を生成しやすい[29]。DNA 損傷は X 線やγ線では SSB に比べて DSB が 1/10~1/20 程度であるとされているが、ブラッグピーク近傍では DSB の生成量が SSB のそれよりも高くなる(私信)ようである。また損傷部の化学的構造が複雑で修復困難な損傷が多いと考えられている。

染色体切断は低 LET ではクロマチンタイプの切断(姉妹染色分体の片側の切断)が主として観られる。高 LET では両方の切断が同時に起こるアイソクロマチッドタイプ(同位染色分体型)[30]に取って代わり早期染色体凝縮(G2-PCC)法で確認されている事からも、高 LET 放射線による染色体損傷はトラックに沿って集中的に生成されている事が伺われる。修復の観点から観ると、修復前には線量当たりの切断数は LET 依存性が少ないが、修復後には総数で減少するものの LET の依存性が大きくなっている事[31]など修復が大きく関わっていて、細胞死で見た RBE のピークの原因[32]は損傷修復時に起こる誤修復が関与している事も判ってきた。

DNA レベルでは損傷を SSB と DSB に分けて

考えるように、染色体レベルでは HRR・NHEJ の修復機構と姉妹染色分体の存在様式(細胞周期と相同染色体の有無)、クロマチンタイプ・アイソクロマチッドタイプの損傷の関係が図 7 のように説明できる。先に述べたリニアルエナジーの最適ドメインサイズ(~0.4μm) [7]は DNA より非常に大きく細胞核より非常に小さく、寧ろ染色体に近いことから、粒子線の標的は染色体レベルである可能性を物語っているのかも知れない。

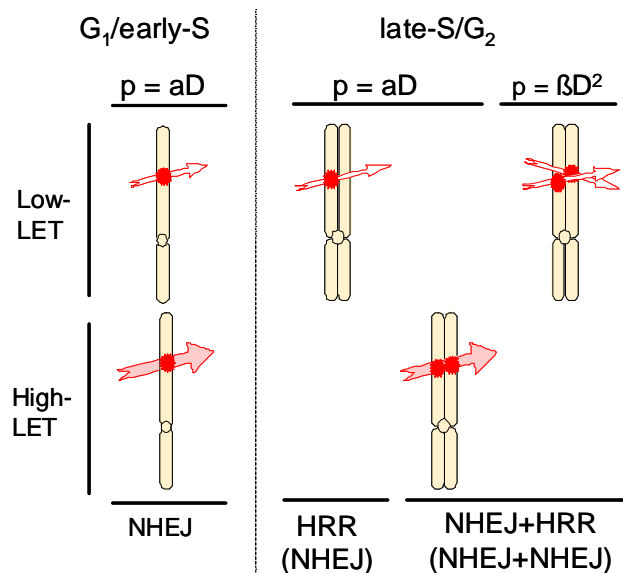


図 7

- [1] Hawkins, R.B., *A microdosimetric-kinetic theory of the dependence of the RBE for cell death on LET*. Med Phys, 1998. **25**(7 Pt 1): p. 1157-70.
- [2] Inaniwa, T., et al., *Treatment planning for a scanned carbon beam with a modified microdosimetric kinetic model*. Phys Med Biol, 2010. **55**(22): p. 6721-37.
- [3] Kase, Y., et al., *Microdosimetric calculation of relative biological effectiveness for design of therapeutic proton beams*. J Radiat Res, 2013. **54**(3): p. 485-93.
- [4] Furusawa, Y., et al., *Inactivation of aerobic and hypoxic cells from three different cell lines by accelerated (3)He-, (12)C- and (20)Ne-ion beams*. Radiat Res, 2000. **154**(5): p. 485-96.
- [5] Furusawa, Y., et al., *A Method to Estimate Cell Killing Induced by Heavy Ions as a Function of Ion Species and LETs*, in *Exploring Future Research Strategies in Space Radiation Sciences*, H.J. Majima and K. Fujitaka, Editors. 2000, Iryokagakusha Co Ltd: Tokyo. p. 104-9.
- [6] Friedrich, T., M. Durante, and M. Scholz, *Particle species dependence of cell survival RBE: Evident and not negligible*. Acta Oncol, 2013. **52**(3): p. 589-603.
- [7] Kase, Y., et al., *Microdosimetric measurements and estimation of human cell survival for heavy-ion beams*. Radiat Res, 2006. **166**(4): p. 629-38.
- [8] Ando, K. and Y. Kase, *Biological characteristics of carbon-ion therapy*. Int J Radiat Biol, 2009. **85**(9): p. 715-28.
- [9] Friedrich, T., et al., *Systematic analysis of RBE and related quantities using a database of cell survival experiments with ion beam irradiation*. J Radiat Res, 2013. **54**(3): p. 494-514.
- [10] Friedrich, T., et al., *Sensitivity analysis of the relative biological effectiveness predicted by the local effect model*. Phys Med Biol, 2013. **58**(19): p. 6827-49.
- [11] IAEA, *Relative Biological Effectiveness in Ion Beam Therapy*, in *Technical Reports Series No. 461*. 2008, International Atomic Energy Agency International Commission on Radiation Units and Measurements: Vienna. p. pp.153.
- [12] Kanai, T., et al., *Irradiation of mixed beam and design of spread-out Bragg peak for heavy-ion radiotherapy*. Radiat Res, 1997. **147**(1): p. 78-85.
- [13] Kanai, T., et al., *Biophysical characteristics of HIMAC clinical irradiation system for heavy-ion radiation therapy*. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1999. **44**(1): p. 201-10.
- [14] Ishikawa, H., et al., *Carbon ion radiation therapy for prostate cancer: results of a prospective phase II study*. Radiother Oncol, 2006. **81**(1): p. 57-64.
- [15] Matsufuji, N., et al., *Specification of Carbon Ion Dose at the National Institute of Radiological Sciences (NIRS)*. J Radiat Res, 2007. **48 Suppl A**: p. A81-6.
- [16] Sato, T. and Y. Furusawa, *Cell survival fraction estimation based on the probability densities of domain and cell nucleus specific energies using improved microdosimetric kinetic models*. Radiat Res, 2012. **178**(4): p. 341-56.
- [17] Nagasawa, H. and J.B. Little, *Unexpected sensitivity to the induction of mutations by very low doses of alpha-particle radiation: evidence for a bystander effect*. Radiat Res, 1999. **152**(5): p. 552-7.
- [18] Matsumoto, H., et al., *Induction of radioresistance to accelerated carbon-ion beams in recipient cells by nitric oxide excreted from irradiated donor cells of human glioblastoma*. Int J Radiat Biol, 2000. **76**(12): p. 1649-57.
- [19] Li, F., et al., *Apoptotic cells activate the "phoenix rising" pathway to promote wound healing and tissue regeneration*. Sci Signal, 2010. **3**(110): p. ra13.
- [20] Chatterjee, A. and H.J. Schaefer, *Microdosimetric structure of heavy ion tracks in tissue*. Radiat Environ Biophys, 1976. **13**(3): p. 215-27.
- [21] Nakajima, N.I., et al., *Visualisation of gammaH2AX foci caused by heavy ion particle traversal: distinction between core track versus non-track damage*. PLoS One, 2013. **8**(8): p. e70107.
- [22] Ito, A., et al., *Contribution of indirect action to radiation-induced mammalian cell inactivation: dependence on photon energy and heavy-ion LET*. Radiat Res, 2006. **165**(6): p. 703-12.
- [23] Hirayama, R., et al., *Contributions of direct and indirect actions in cell killing by high-LET radiations*. Radiat Res, 2009. **171**(2): p. 212-8.
- [24] Hirayama, R., et al., *Repair kinetics of DNA-DSB induced by X-rays or carbon ions under oxic and hypoxic conditions*. J

- Radiat Res, 2005. **46**(3): p. 325-32.
- [25] Hirayama, R., et al., *Induction of DNA DSB and its rejoining in clamped and non-clamped tumours after exposure to carbon ion beams in comparison to X rays*. Radiat Prot Dosimetry, 2011. **143**(2-4): p. 508-12.
- [26] Kanai, T., et al., *Examination of GyE system for HIMAC carbon therapy*. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006. **64**(2): p. 650-6.
- [27] Terashima, T. and L.J. Tolmach, *X-Ray Sensitivity and DNA Synthesis in Synchronous Populations of HeLa Cells*. Science, 1963. **140**: p. 490-2.
- [28] Tauchi, H., et al., *Two major factors involved in the reverse dose-rate effect for somatic mutation induction are the cell cycle position and LET value*. J Radiat Res, 2009. **50**(5): p. 441-8.
- [29] Terato, H. and H. Ide, *Clustered DNA damage induced by heavy ion particles*. Biol Sci Space, 2004. **18**(4): p. 206-15.
- [30] Kawata, T., et al., *Rejoining of isochromatid breaks induced by heavy ions in G2-phase normal human fibroblasts*. Radiat Res, 2001. **156**(5 Pt 2): p. 598-602.
- [31] Tsuruoka, C., et al., *The difference in LET and ion species dependence for induction of initially measured and non-rejoined chromatin breaks in normal human fibroblasts*. Radiat Res, 2008. **170**(2): p. 163-71.
- [32] Aoki-Nakano, M. and Y. Furusawa, *Misrepair of DNA double-strand breaks after exposure to heavy-ion beams causes a peak in the LET-RBE relationship with respect to cell killing in DT40 cells*. J Radiat Res, 2013. **54**(6): p. 1029-35.

# 重粒子線による DNA 損傷とその修復機構

## DNA damage and its repair induced by heavy ion irradiation

岡安隆一

放射線医学総合研究所 放射線防護研究センター・重粒子医科学センター

### Abstract

Biological research using NIRS HIMAC has yielded abundant results and it is important to understand the basic biological principle behind the successful heavy ion radiotherapy. Heavy ion radiobiology is also useful from the aspect of radiation protection as space explorations are actively ongoing and more space travels are being planned in the near future. In this short review, I focused on the aspect of DNA damage and repair induced by heavy ions, especially DNA double strand breaks (DSBs) and their repair as DSB is thought to be the key lesion for various biological consequences following exposure to ionizing radiation. Four basic subjects associated with heavy ion exposure are described here including 1) Initial DNA damage, 2) DNA DSB repair, 3) Chromosome damage/repair, and 4) Some other aspects relating to DNA damage responses (DDR). A high linear energy transfer (LET) heavy ion radiation induces more complex DNA damage than low LET radiation, DDR studies using heavy ions could provide new insight into the area of DNA repair and other related fields. More new exciting findings and applications from these studies are anticipated in the near future.

### 1. はじめに

過去 10 年間に HIMAC を用いた臨床活動、またそれに付随する研究活動は大いに発展してきた。その証拠として最近 2014 年 4 月 3 日号の *Nature* に技術特集として“SHARP SHOOTERS”[1]という記事が載り、世界の粒子線の状況、特に Chiba の放医研が炭素線治療で世界をリードしている事実が述べられている。また重粒子線の生物効果が低エネルギー付与 linear energy transfer (LET) の X 線と比べて、2-3 倍もあることが DNA 損傷のイラスト付きで説明されている。筆者自身過去 10 年間、多くの方々の助けを借り、研究のかなりの部分を放医研の HIMAC を用いて行ってきた。過去約 10 年間の自分自身が関連する HIMAC 関係の論文数は 33 編に達している。その中に 2 編の最近のレビュー (① Hamada et al “Recent Advances in the biology of heavy-ion cancer therapy” *J. Radiat. Res.* 2010; 51:365-383 [2] ② Okayasu “Repair of DNA damage induced by accelerated heavy ions-a mini review” *Int. J. Cancer* 2012; 130:991-1000 [3]) もあり、この要覧のテーマである重粒子線による DNA 損傷とその修復はかなりの部分がこれでカバーされている。さらに興味のある読者はそちらを参考にされたい。よって当レビューでは、筆者の研究室関連の仕事で、特に哺乳類の細胞を用いた研究が焦点となる。筆者は国際共同研究の一環としてドイツ宇宙航空研究所 (DLR) の Moeller 博士とも枯草菌を用いて DNA 修復に関する研究を行っているが、それに関しては Moeller et al *Appl. Environ. Microbiol.* 2014 [4], Moeller et al *J. Bacteriol.* 2011 [5] 等を参考にされたい。

### 2. 重粒子線による DNA の初期損傷

一般的に言って、高 LET 重粒子線による DNA 損傷は低 LET によるそれと比べてより複雑であり、このことがより重篤な生物効果をもたらすとされている [6,7]。このような複雑な DNA 損傷はクラスター損傷 (clustered damage) あるいは多損傷サイト (multiply damage site) と呼ばれている [8]。これらは 2 つの主グループすなわち二重鎖切断傷 double strand breaks (DSBs)、酸化クラスター損傷 non-DSB oxidative clustered oxidative groups (OCDL) に分けられる。いわゆる塩基損傷 (base damage) は OCDL に含まれる。クラスター損傷の定義は 2 つ以上の隣接した両方の鎖にまたがる DNA の傷が普通 1 つか 2 つの鎖の螺旋の区切り (helical turn) の中で存在することになっている。これらの複雑な DNA 損傷は LET 値に依存して多くなり、重粒子線によってできる損傷のように複雑なほど、その修復もできにくいとされている [9]。

DSB を測定する方法としてよく用いられたものはゲルを使用する方法でパルスフィールドゲル、コンスタントフィールド電気泳動法等があり、また OCDL を測定する方法としては *E. coli* より分離した修復酵素をプローブとして用いる方法等がある。またコメットアッセイも DSB, OCDL 測定のためによく用いられている。これらの手法はその長所・欠点も含めて、より詳しく文献 [3] のレビューに述べられている。

以上の方法は長らく使用されてきたが、一つ問題として比較的高線量の放射線 (10 Gy 以上) を用いなければならないことがあり、最近ではこれらに変わって、Bonner 博士グループが提唱したヒストン H2AX の Ser139 部位のリン酸化をフォークラスによって観察するガンマ H2A(γH2AX) 手

法がとてもよく使用されるようになった[10]。この方法を用いると、比較的低線量(例 1 Gy)照射後で DSB とその修復が観測でき、細胞生存率等の生物指標と同レベル線量での比較ができ良好な方法である。しかしながら 1 DSB:1  $\gamma$ H2AX フォーカスとの対応関係にはいまだに議論があり、バックグラウンドの値も細胞周期にも絡んできて、問題になることがある[11]。 $\gamma$ H2AX フォーカスに関しては新しい発展等、次のセクションで再度触れることにする。

### 3. 高 LET 重粒子線照射後の DNA DSB の修復

1990 年代の中ごろまでに重粒子線照射後の DSB の再結合が中性フィルターエリクション(neutral filter elution)やパルスフィールドゲルやスタティックフィールドゲル電気泳動法を用いて測定され、その結果 LET 値に依存して、DSB 再結合(rejoining)の効率が低下し、残った DSB の割合も多くなることが示されている。このことは LET 値が 200keV/um 迄は確実になっている。また低酸素下の DSB rejoining が検討され、高 LET と重粒子線と低 LET 放射線照射後では酸素効果比(oxygen enhancement rate: OER), その変化に違いがあること、最終的な OER 値が重要であることが報告されている[12]。

近年 ataxia telangiectasia mutated (ATM)や Artemis 蛋白が放射線による複雑な DNA 損傷修復に関連していることが提案されている[13]。このことは ATM 蛋白(等)への要求が重粒子線に起因するような複雑な損傷では大きいことが予想される。我々の研究室ではこの仮説に基づいて実験を行い、ATM 欠損細胞や ATM 阻害剤を投与した細胞では高 LET 重粒子線照射後、細胞の放射線感受性が高くなることを示した。さらに ATM が 2つの主 DNA DSB修復機構に関与していることを示した[14]。(図 1A,1B)

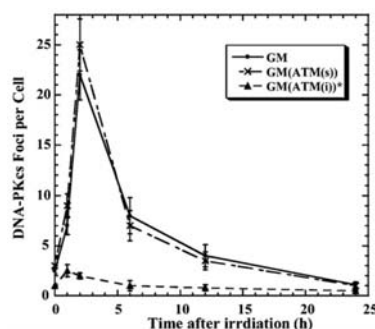
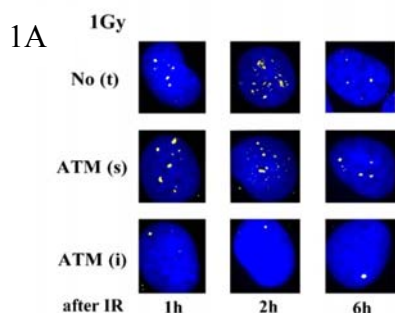


図 1A: ヒト正常細胞に 1 Gy の炭素線を照射し ATM 阻害剤を入れた細胞(i)、ATM 増強剤を入れた細胞(s)、対象群で DNA-PKcs (Thr 2609 のリン酸化)フォーカス出現の経時変化を観測し、阻害剤を入れた際(i)に DNA-PKcs リン酸化フォーカスが極端に少なく NHEJ 修復が正常に機能していないことを示す。(Xue et al 2009 より引用) [14]

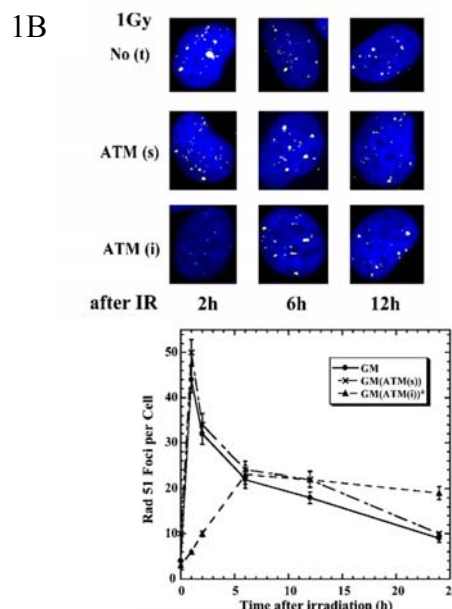


図 1B: 1A と同様な処理で、この場合は Rad51 のフォーカスを経時的に観測している。ATM 阻害剤を入れた細胞は Rad51 の立ち上がりが悪く HRR 修復が影響を受けていることが示される。(Xue et al 2009 より引用)[14]

以上の結果より、ATM は高 LET の炭素線照射後、非相同末端結合(non-homologous end joining: NHEJ)の代表蛋白の DNA-PKcs および、相同組み換え修復 homologous recombination repair: HRR)の代表蛋白である Rad51 に影響を与えていることがわかる。

前の章でも触れたが、 $\gamma$ H2AX のフォーカスアッセイは高 LET 放射線照射後も多く使われてきた。一般的に言って、高 LET 照射後ではより複雑な DSB ができるが、この手法でも、低 LET 放射線照射後と比べ、より多くの残存損傷が観測されている。さらに高 LET 放射線では、DSB 結合の経時変化のうち、遅延した(slow component)



結合の占める割合が大きいことも報告されている[15]。我々は高精度の顕微鏡を用いてさらに $\gamma$ H2AX フォーカスの詳細な検討を行い、例えば高 LET 鉄線(200keV/ $\mu$ m)等照射後のフォーサイ(foci)が、小さなフォーカスの集まり(クラスター様)でできたもので(図 2A)、これらは NHEJ の遅い(slow) kinetics で修復されることを示し、これらの現象が、高 LET 照射後の特徴(signature)であることを提唱した(図 2B) [16]。修復等の実験ではできるだけ、他の粒子の混入がないよう pencil beam と呼ばれる条件(他のイオンの混入が少なく 90%以上が鉄線のビーム)を用いている。

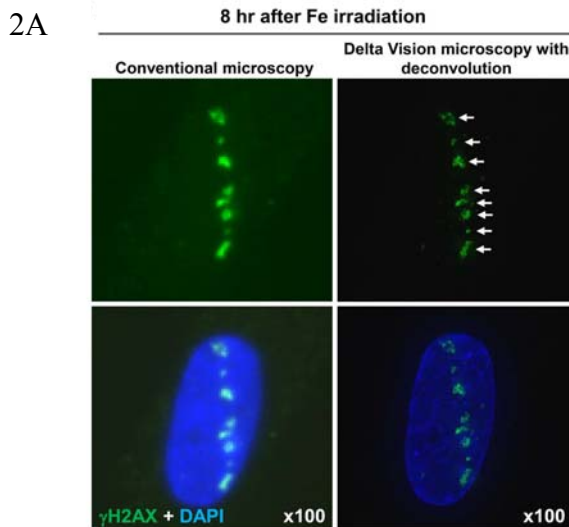


図 2A: 48BR ヒト繊維芽細胞(G0/G1 期)を用いた鉄線照射後の $\gamma$ H2AX フォーカスの詳しい観察。一般の顕微鏡観察では大きなフォーカスとみられるものが(左側)、デルタビジョンと呼ばれる詳細な顕微鏡観察では、小さなフォーカスの集まりであることがわかる(右側)。(Nakajima et al 2013 より引用)[16]

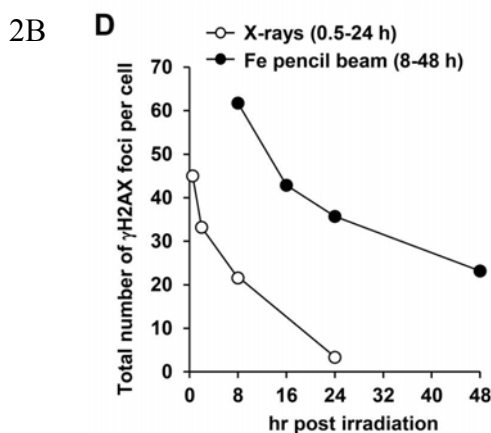


図 2B: 鉄線 1Gy 照射後の $\gamma$ H2AX フォーサイの計時的変化を X 線 1 Gy の場合と比較。鉄線(Fe pencil beam)ではその修復がかなり遅延していることがわかる。(Nakajima et al 2013 より引用) [16]

さらに高 LET 重粒子線を平行に照射させた際の $\gamma$ H2AX のフォーカスを詳しく観察すると、幅の広い主トラックのほかに、そこより離れた場所に小さな複雑さのないフォーサイが観察される(図 2C)。これらの小さなフォーサイは、そのサイズも修復の度合いも X 線による DSB と類似しており(図 2D)、高エネルギーのデルタエレクトロンによるものと考えられている[16]。上記の論文ではさらに高 LET 重粒子線照射後の細胞周期上での変化も言及されているが、これはこのセクションのテーマを超えているので、詳しくは論文自体を参照いただきたい。

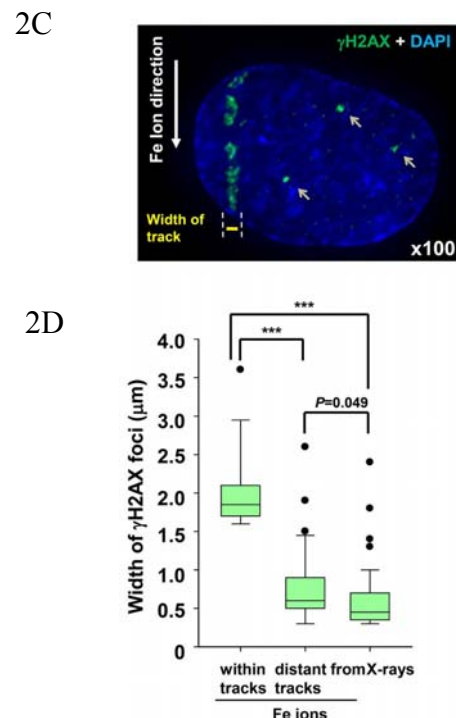


図 2C: 1 Gy 鉄線水平方向照射後 (30 分) の $\gamma$ H2AX フォーサイ(DSB) の発生具合を示す写真。鉄線の主トラックより離れた矢印がデルタエレクトロンと思われるフォーカス。図 2D: 鉄線による主トラックによるフォーサイの幅の値(左)、また鉄線より離れたところに観察されるフォーサイ(デルタエレクトロンによる)の幅(真ん中)、X 線によるフォーサイの幅(右)を比較したもの。(Nakajima et al 2013 より引用)[16]

#### 4. Premature chromosome condensation (PCC: 未成熟染色体凝縮)と染色体の修復について

PCC 法は一般的な分裂期 (metaphase) の染色体観察と比べて、細胞周期中の G1 又は G2 染色体の損傷修復を観測でき、その感度も良い。PCC 法による染色体の切断又は修復は DNA DSB のそれを直接反映するとされている[17]。また PCC 法と Fluorescence in situ hybridization (FISH)を組

み合わせることで、染色体の mis-repair (誤修復) も観察可能になる。PCC 法を用いた重粒子線照射後の染色体損傷修復は Goodwin らにより 1990 年前後からそのデータが発表されており、基本的には LET が高くなれば染色体の修復効率も悪くなり、多くの残存傷があることがわかっている[18]。LET の違いによる生存率と残存の染色体切断数の関連も Suzuki らによって確認されている[19]。またこれらの結論は最近の HIMAC を用いた実験によっても再現されている[20,21]。Durante らは PCC と FISH 法を用い、間期 (interphase) の細胞と分裂期で染色体のダメージを比較観察した結果、高 LET 放射線照射後では大きな違いがあることを報告し[22]、これは細胞周期の遅延や、間期の細胞死に関係しているようである。

G2 PCC を用いた研究でも、高 LET 重粒子線照射後、低 LET 放射線に比べて、より多くの切断された染色体が残っていることが報告されている (例[23])。より最近では、多色のバンドを観察できる FISH 法を用い、一つの染色体内での exchange の様相が、高 LET と低 LET では異なることを示した報告がある[24]。

このセクションの最後に我々がヒトの正常細胞(HFL III) と DSB 修復欠陥細胞 (180BR) と G1 PCC 法を用いて報告した実験結果を載せる。かなり前より NHEJ 欠陥細胞に高 LET 放射線を照射すると、生物学的効果比 (relative biological effectiveness: RBE) が 1 に近くなることが報告されている。ここではそのことを染色体レベルで

射した後の G1 タイプ染色体切断の修復の度合を比較した。(Okayasu 2012 より引用)[3]

吟味してみる。図 3 はこれらの細胞に様々な放射線で 2 Gy を照射し、その後の切断された染色体の修復の割合を PCC 法で継時的に観測した結果である。LET の違いによる修復の違いが正常細胞 HFL III でははっきり表れているが、修復欠陥の 180BR 細胞では、その違いがかなり縮まっており、RBE の違いが少なくなっていることに気づく。これは高 LET 放射線が、より多くの修復不能な損傷を作り、修復がまともに行われようと、行われまいと、その結果は変わりなくなると考えられていて、これは特に NHEJ タイプの修復系により明らかとされている[25]。ATM 欠損細胞と正常細胞の G2 PCC/FISH を用いた比較照射実験では、NHEJ 修復の忠実度 (fidelity) が低くなっていることが AT 細胞の放射線感受性を高めているという報告もある[26]。

## 5. 高 LET 重粒子線照射後の細胞のその他の分子レベルでの研究

高 LET 放射線照射後の細胞周期上での生存率の変動は LET に依存して少なくなってくることは前から知られているが、その分子機構はまだはっきりとは解明されていない。最近の DNA 修復関連の研究によりこの問題に対していくつかの新しい洞察がみられる。Wang らは高 LET 重粒子線照射により、Ku 蛋白依存的な NHEJ 修復が主に影響を受けることを提唱した[25]。また我々の研究室でも DNA-PKcs 蛋白が高 LET 重粒子線で大きく影響を受けることを発表した[27]。さらに S 期の細胞が重粒子線照射後に特に高感受性になることも示され、この原因として S 期では Ku 蛋白が DSB のサイトに結合しにくいという理論が発表されている[25]。HRR 欠陥の細胞等を用いて、HRR の修復系が高 LET 放射線照射後ではとても重要であると報告されている[28]。また DNA-PKcs 欠陥細胞等を用い、特に NHEJ 系がかけている細胞では、高 LET 放射線後の複雑な DNA 損傷に対して NHEJ/HRR 両修復系の相互作用が大切とされている[29]。

Jacob らは重粒子線の beam line に設置された蛍光顕微鏡を用い、放射線によって誘発されるいくつかの蛋白のフォーカス (Radiation induced foci: RIF) 形成を検討した。その結果、例えば照射後にすぐに招集される蛋白として DNA-PK や XRCC-1 等、またやや後に出てくる蛋白として 53BP1 や MDC1 等を明らかにした[30]。さらに彼らのグループは重粒子線によって作られる蛋白のフォーカスの軌跡が、ヘテロクロマチンのある場所の周りを進んでいくことを示した。さらに修復蛋白は速やかにヘテロクロマチン内に招集

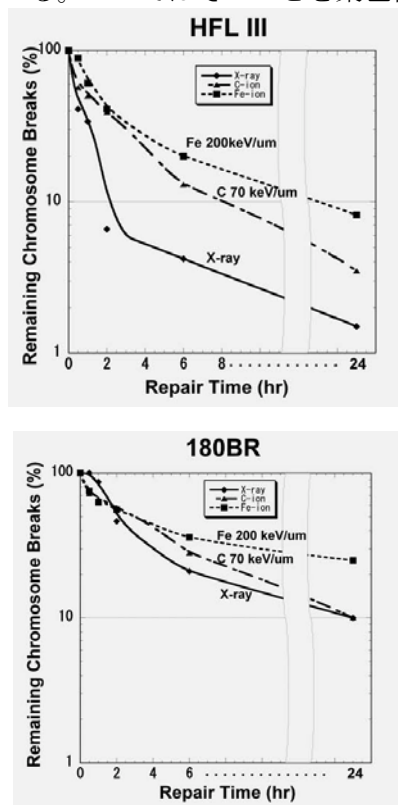


図 3: ヒト正常細胞 HFL III (上)と NHEJ 修復欠陥細胞 180BR (下) に LET の異なる放射線を照



されるが、20分ほどでクロモセーターと呼ばれるところに移るらしいことも示されている[31]。これらの研究者は重粒子線が当たった場所でヘテロクロマチンが非凝縮することも報告している。このようなユニークで賢明な研究結果は、これからも重粒子線による生物影響研究に有用であると思われる。

最後に我々の研究室のメンバーによる最近の重粒子線照射後の DSB 修復関連の結果を以下に示す。Yajima らは高 LET 重粒子線が複雑な DNA DSB を作ることを利用して、この様な損傷の後、細胞はその修復の初期過程でどのような振る舞いを示すかを、特に DNA end resection (切込み過程)という立場より検討した[32]。Resection の過程は、特に HRR 修復に必要な初期プロセスで CtIP や、RPA 蛋白が関与してくる。ここでは紙面の関係でそのごく一部の結果を紹介する。興味のある読者はどうか原著論文の方(Yajima et al DNA Repair 12:936-946, 2013)[32] を見ていただきたい。図 4A は HeLa 細胞に 3 Gy と 10 Gy の X 線、高 LET 鉄線 (200keV/μm) を照射し、その後の CtIP や RPA2 蛋白の挙動を追ったデータである。図より明らかなように、例えば鉄線 10 Gy 照射後では明らかに CtIP のバンドが上にシフト (リン酸化を示す) しており、シフトしている量の少ない X 線照射の場合とは対照的である。さらに RPA2 蛋白のリン酸化もいくつかのサイトで明らかに X 線のサンプルと比べて、著しく上昇していることがわかる。これらのことより重粒子線照射細胞で end resection がかなり活発に起こっていることがわかる。同じようなことは別のがん細胞でも示されている。図 4B では実際にこの現象が細胞レベルで起こっていることを示す例があり、2 Gy の鉄線照射後に DSB の指標のγH2AX と resection の指標の RPA2 のリン酸化シグナルが同一か所に存在していることが示されており、end resection が DSB のできた場所で行われていることがわかる。

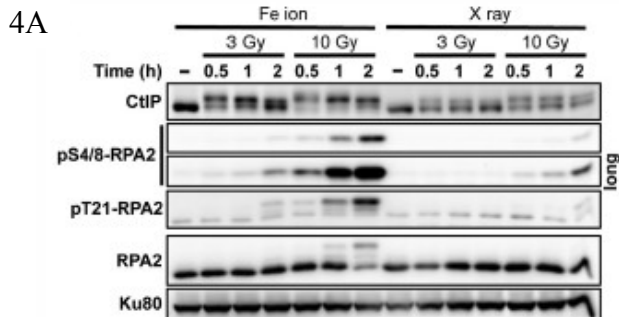


図 4A: HeLa 癌細胞に X 線、鉄線を照射し end resection の指標である CtIP、RPA2 のリン酸化 (3つのリン酸化部位で確認)の度合を継時的に比較した。(Yajima et al 2013 より引用)[32]

4B

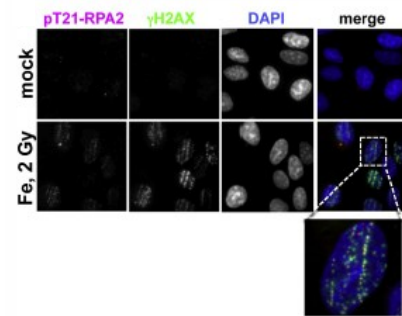


図 4B: 鉄線 2 Gy 照射後のγH2AX(DSB)のフォーカスと end resection 指標の RPA2 のリン酸化のフォーカスを比較し、同時局在を確認した(Yajima et al 2013 より引用) [32]。

さらにこの論文では ATM リン酸化の関与、また end resection がヘテロクロマチンの領域のみならず、ユークロマチン部位でも起こっていることも示されている。もう一つ興味深い現象として、end resection が重粒子線照射後の G1 期の細胞でも起こっていることである。G1 細胞では DSB 損傷をほとんど NHEJ 修復系で対応しているはずで、resection 過程は不要に思われるが、データによると例えば鉄線照射後では 30% ぐらいの G1 細胞で、end resection が行われている。この説明として G1 細胞で NHEJ ができにくい場合、マイクロホモロジーを利用した末端結合 micro-homology mediated end joining (MMEJ) を推進している可能性があげられている。

## 6. おわりに

放医研 HIMAC 利用はがんの治療、研究も含めて増加しつつあり、これからもその積極的な活動が期待される。優れた臨床成果に比べると、重粒子線を用いた生物関係の研究はやや遅れをとっている感があるが、生物学的な裏付けがはっきりして、より安心した治療が続けられるわけであるので、これからも生物学者の健闘を期待したい。何回か述べたように、重粒子線は細胞の特に DNA にユニークな損傷を作る。この事実は修復機構等 DNA の損傷応答の研究に大いに役立つと確信している。さらに重粒子線とある種の薬品との併用療法に関する研究も、より良い臨床成績を得るために必要となってくると思われる。また重粒子線は最近とみに盛んになっている cancer stem like cell (癌幹細胞) [33]の損傷応答研究にも役に立つと考えられる。

## 謝辞：

このレビューは当研究室の仕事を中心に書かれているので、一面的であり、多くの同様な分野の方々の優れた研究成果を載せられなかったこと

をお詫びいたします。以下の共同研究者の方々に深く感謝いたします：岡田真希、岡部篤史、野口実穂、平山亮一、高倉かおる、高橋千太郎、鈴木雅雄、鶴岡千鶴、藤森亮、平川博一、安藤興一、古澤佳也、斉藤志織、川田哲也、劉翠華、于冬、安西和紀、関根絵美子、内堀幸夫、北村尚、加藤宝光、松藤成弘、崔星、藤井雄大、窪田宣夫、上野昭子、鶴澤玲子、松本孔貴、小池幸子、安田武嗣、辻井裕彦、鎌田正、丹羽太貫、明石真言、上坂充、津田晃久、益谷美都子、平井宗久、中島菜花子、矢島浩彦、柴田淳史、村上健、正岡綾、Penny Jeggo, Holly Brunton, Joel Bedford, Ralf Moeller, Marina Raguse, Prakash Hande, Lian Xue, HIMAC の operator その他の方々。

## References:

- [1] V. Marx, Cancer treatment: Sharp shooters. *Nature* **508**, 133-138 (2014)
- [2] N. Hamada, T. Imataka, S. Masunaga, T. Ogata, R. Okayasu, A. Takahashi, T. A. Kato, Y. Kobayashi, T. Ohnishi, K. Ono, Y. Shimada, T. Teshima, Recent advances in the biology of heavy-ion cancer therapy. *J Radiat Res (Tokyo)* **51**, 365-383 (2010)
- [3] R. Okayasu, Repair of DNA damage induced by accelerated heavy ions--a mini review. *International journal of cancer. Journal international du cancer* **130**, 991-1000 (2012)
- [4] R. Moeller, M. Raguse, G. Reitz, R. Okayasu, Z. Li, S. Klein, P. Setlow, W. L. Nicholson, Resistance of *Bacillus subtilis* spore DNA to lethal ionizing radiation damage relies primarily on spore core components and DNA repair, with minor effects of oxygen radical detoxification. *Applied and environmental microbiology* **80**, 104-109 (2014)
- [5] R. Moeller, P. Setlow, M. Pedraza-Reyes, R. Okayasu, G. Reitz, W. L. Nicholson, Role of the Nfo and ExoA apurinic/apyrimidinic endonucleases in radiation resistance and radiation-induced mutagenesis of *Bacillus subtilis* spores. *Journal of bacteriology* **193**, 2875-2879 (2011)
- [6] H. Terato, R. Tanaka, Y. Nakaarai, T. Nohara, Y. Doi, S. Iwai, R. Hirayama, Y. Furusawa, H. Ide, Quantitative analysis of isolated and clustered DNA damage induced by gamma-rays, carbon ion beams, and iron ion beams. *J Radiat Res (Tokyo)* **49**, 133-146 (2008)
- [7] M. Hada, A. G. Georgakilas, Formation of clustered DNA damage after high-LET irradiation: a review. *J Radiat Res (Tokyo)* **49**, 203-210 (2008)
- [8] J. F. Ward, The complexity of DNA damage: relevance to biological consequences. *Int J Radiat Biol* **66**, 427-432 (1994)
- [9] A. Asaithamby, B. Hu, D. J. Chen, Unrepaired clustered DNA lesions induce chromosome breakage in human cells. *Proc Natl Acad Sci U S A* **108**, 8293-8298 (2011)
- [10] E. P. Rogakou, D. R. Pilch, A. H. Orr, V. S. Ivanova, W. M. Bonner, DNA double-stranded breaks induce histone H2AX phosphorylation on serine 139. *J Biol Chem* **273**, 5858-5868 (1998)
- [11] M. Lobrich, A. Shibata, A. Beucher, A. Fisher, M. Ensminger, A. A. Goodarzi, O. Barton, P. A. Jeggo, gammaH2AX foci analysis for monitoring DNA double-strand break repair: strengths, limitations and optimization. *Cell Cycle* **9**, 662-669 (2010)
- [12] R. Hirayama, Y. Furusawa, T. Fukawa, K. Ando, Repair kinetics of DNA-DSB induced by X-rays or carbon ions under oxic and hypoxic conditions. *J Radiat Res (Tokyo)* **46**, 325-332 (2005)
- [13] M. Lobrich, P. A. Jeggo, Harmonising the response to DSBs: a new string in the ATM bow. *DNA Repair (Amst)* **4**, 749-759 (2005)
- [14] L. Xue, D. Yu, Y. Furusawa, R. Okayasu, J. Tong, J. Cao, S. Fan, Regulation of ATM in DNA double strand break repair accounts for the radiosensitivity in human cells exposed to high linear energy transfer ionizing radiation. *Mutat Res* **670**, 15-23 (2009)
- [15] T. E. Schmid, G. Dollinger, W. Beisker, V. Hable, C. Greubel, S. Auer, A. Mittag, A. Tarnok, A. A. Friedl, M. Molls, B. Roper, Differences in the kinetic of gamma-H2AX fluorescence decay after exposure to low and high LET radiation. *Int J Radiat Biol* **86**, 682-691 (2010)
- [16] N. I. Nakajima, H. Brunton, R. Watanabe, A. Shrikhande, R. Hirayama, N. Matsufuji, A. Fujimori, T. Murakami, R. Okayasu, P. Jeggo, A. Shibata, Visualisation of

- gammaH2AX foci caused by heavy ion particle traversal; distinction between core track versus non-track damage. *PloS one* **8**, e70107 (2013)
- [17] G. Iliakis, H. Wang, A. R. Perrault, W. Boecker, B. Rosidi, F. Windhofer, W. Wu, J. Guan, G. Terzoudi, G. Pantelias, Mechanisms of DNA double strand break repair and chromosome aberration formation. *Cytogenet Genome Res* **104**, 14-20 (2004)
- [18] E. Goodwin, E. Blakely, G. Ivery, C. Tobias, Repair and misrepair of heavy-ion-induced chromosomal damage. *Adv Space Res* **9**, 83-89 (1989)
- [19] M. Suzuki, Y. Kase, T. Kanai, F. Yatagai, M. Watanabe, LET dependence of cell death and chromatin-break induction in normal human cells irradiated by neon-ion beams. *Int J Radiat Biol* **72**, 497-503 (1997)
- [20] E. Sekine, M. Okada, N. Matsufuji, D. Yu, Y. Furusawa, R. Okayasu, High LET heavy ion radiation induces lower numbers of initial chromosome breaks with minimal repair than low LET radiation in normal human cells. *Mutat Res* **652**, 95-101 (2008)
- [21] C. Tsuruoka, M. Suzuki, M. P. Hande, Y. Furusawa, K. Anzai, R. Okayasu, The difference in LET and ion species dependence for induction of initially measured and non-rejoined chromatin breaks in normal human fibroblasts. *Radiat Res* **170**, 163-171 (2008)
- [22] M. Durante, Y. Furusawa, K. George, G. Gialanella, O. Greco, G. Grossi, N. Matsufuji, M. Pugliese, T. C. Yang, Rejoining and misrejoining of radiation-induced chromatin breaks. IV. Charged particles. *Radiat Res* **149**, 446-454 (1998)
- [23] T. Kawata, M. Durante, Y. Furusawa, K. George, H. Ito, H. Wu, F. A. Cucinotta, Rejoining of isochromatid breaks induced by heavy ions in G2-phase normal human fibroblasts. *Radiat Res* **156**, 598-602 (2001)
- [24] M. Hada, Y. Zhang, A. Feiveson, F. A. Cucinotta, H. Wu, Association of Inter- and Intrachromosomal Exchanges with the Distribution of Low- and High-LET Radiation-Induced Breaks in Chromosomes. *Radiat Res* **176**, 25-37 (2011)
- [25] H. Wang, X. Wang, P. Zhang, Y. Wang, The Ku-dependent non-homologous end-joining but not other repair pathway is inhibited by high linear energy transfer ionizing radiation. *DNA Repair (Amst)* **7**, 725-733 (2008)
- [26] M. Kan' o, T. Kawata, H. Ito, N. Shigematsu, C. Liu, T. Uno, K. Isobe, H. Kawakami, F. Cucinotta, K. George, A. Kubo, Repair of potentially lethal damage in normal cells and ataxia telangiectasia cells; consideration of non-homologous end-joining. *J Radiat Res (Tokyo)* **48**, 31-38 (2007)
- [27] R. Okayasu, M. Okada, A. Okabe, M. Noguchi, K. Takakura, S. Takahashi, Repair of DNA damage induced by accelerated heavy ions in mammalian cells proficient and deficient in the non-homologous end-joining pathway. *Radiat Res* **165**, 59-67 (2006)
- [28] F. Zafar, S. B. Seidler, A. Kronenberg, D. Schild, C. Wiese, Homologous recombination contributes to the repair of DNA double-strand breaks induced by high-energy iron ions. *Radiat Res* **173**, 27-39 (2010)
- [29] J. A. Anderson, J. V. Harper, F. A. Cucinotta, P. O'Neill, Participation of DNA-PKcs in DSB repair after exposure to high- and low-LET radiation. *Radiat Res* **174**, 195-205 (2010)
- [30] B. Jakob, J. Splinter, M. Durante, G. Taucher-Scholz, Live cell microscopy analysis of radiation-induced DNA double-strand break motion. *Proc Natl Acad Sci U S A* **106**, 3172-3177 (2009)
- [31] B. Jakob, J. Splinter, S. Conrad, K. O. Voss, D. Zink, M. Durante, M. Lobrich, G. Taucher-Scholz, DNA double-strand breaks in heterochromatin elicit fast repair protein recruitment, histone H2AX phosphorylation and relocation to euchromatin. *Nucleic Acids Res*, (2011)
- [32] H. Yajima, H. Fujisawa, N. I. Nakajima, H. Hirakawa, P. A. Jeggo, R. Okayasu, A. Fujimori, The complexity of DNA double strand breaks is a critical factor enhancing end-resection. *DNA Repair (Amst)* **12**, 936-946 (2013)

- [33]X. Cui, K. Oonishi, H. Tsujii, T. Yasuda, Y. Matsumoto, Y. Furusawa, M. Akashi, T. Kamada, R. Okayasu, Effects of Carbon Ion Beam on Putative Colon Cancer Stem Cells and Its Comparison with X-rays. *Cancer Res* **71**, 3676-3687 (2011)

# 重粒子線により誘導されるシグナル伝達

Signal-transduction induced by heavy-ion beams

高橋 昭久

群馬大学 先端科学研究指導者育成ユニット

## Abstract

Although mutations and deletions in the *p53* tumor suppressor gene lead to resistance to low-LET radiation, high-LET radiation efficiently induces cell lethality and apoptosis regardless of the *p53* gene status in cancer cells. Our recent data suggest that (1) high-LET radiation enhances apoptosis through the activation of Caspase-3 and Caspase-9, and suppresses cell growth by suppressing Akt-related survival signaling, even in *mp53* bearing cancer cells; (2) carbon-ion beams efficiently induced cell killing in X-ray resistant cells which displayed activated Akt-related survival signaling and contained more numerous cancer stem-like cells; (3) targeting NHEJ repair yields higher radiosensitivity than targeting HR repair with carbon-ion therapy. In this review we will summarize signal-transduction induced by heavy-ion beams, and highlight outstanding issues.

## 1. 研究分野の状況やバックグラウンド

がん細胞の遺伝的背景の違いは放射線療法におけるがん細胞の致死感受性に大きく影響する。がん細胞のどの遺伝子を検索すればその感受性を知ることができるのか、効率の良い治療効果が望めるのかを明らかにする必要がある。

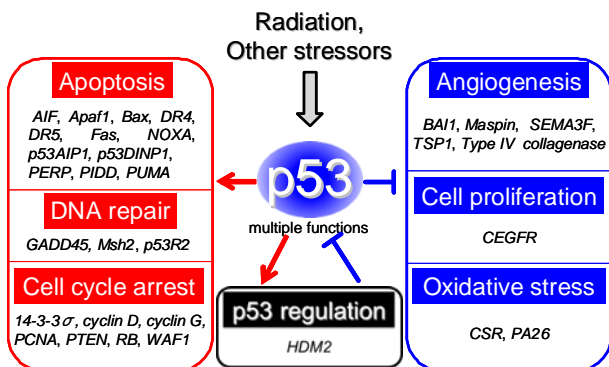


図 1. ゲノムの守護神としての *p53* の役割

これまでに、我々はゲノムの守護神として知られているがん抑制遺伝子 *p53* を放射線療法の先行指標として注目してきた。放射線等によって DNA 損傷を受けた細胞は、細胞周期を制御することで修復の“場”と“時間”を提供し、修復の“機会”を増やすはたらきを持ち備えている。さらに、修復しきれないほどの DNA 損傷を受けた細胞は、積極的に細胞死（アポトーシス）を引き起こし、DNA 損傷を後々まで引き継がないようにする機構も持ち備えている（図 1）。放射線照射後、*p53* 自身が活性化し、種々の標的遺伝子を活性化したり、様々なタンパク質と相互作用したりすることで、この細胞周期の制御やアポトーシスの誘発を引き起こす。

しかし、悪性腫瘍の約半数は *p53* の機能を失っていることが報告されている。我々はこのような *p53* の機能を失った細胞はアポトーシスが誘導さ

れにくく、一般的に治療に用いられている X 線に抵抗性であることを培養細胞レベルおよび移植腫瘍レベルで報告してきた[1-6]。この現象は放射線のみならず、温熱処理[7,8]および抗がん剤[9-11]でも同様の結果を得ている（図 2）。これらのことから *p53* の遺伝子型を検索することで、がん患者さんの治療効果予測ができること、すなわち *p53* 遺伝子が治療効果の先行指標となることを提唱してきた。一方、正常型 *p53* のがん細胞を有する患者にこれらのがん治療は適しているが、*p53* の機能を失った患者には適していないことを示唆するものである。

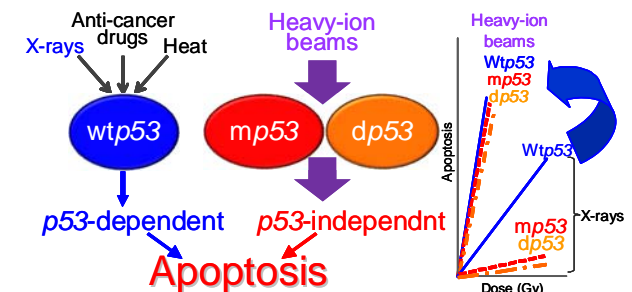


図 2. *p53* 依存性および非依存性アポトーシス

次の段階として、治療効果が望まれない患者をいかにして救うのかを考えることが重要である。我々はがん細胞の *p53* 遺伝子型にかかわらず、高い治療効果が望まれる治療法として、炭素線治療にたどり着いた。炭素線では X 線と比べて高い殺細胞効果や抗腫瘍効果があること[1,12,13]、さらに *p53* 遺伝子型に関係なく効率的にアポトーシスを引き起こし、高い殺細胞効果をもたらすことを報告してきた[3-6]（図 2）。他のグループから我々の結果を支持するデータが数多く報告されているものの[14-18]、相矛盾する報告もあった[19-21]。これはがん細胞の *p53* 以外の遺伝的背景が異なり、



細胞死と生存を導くバランスが異なっていたためと考える。我々は *p53* 以外の遺伝子背景が同じ *p53* 正常型・変異型・欠損型のヒトがん細胞株を樹立し、実験に用いてきたことが功を奏した。

## 2. HIMAC で得られた最近の成果

### 2-1. 細胞死シグナルの亢進

等生存率の照射でも LET が高くなるにつれてアポトーシス頻度が増え、ネクローシスの頻度が減った。すなわち、高 LET 放射線は細胞死におけるアポトーシスの占める割合を高めている。また、このことは程度の差はあれ、変異型および欠失型 *p53* 細胞でも同様の傾向を示した[22]。

この *p53* 非依存的なアポトーシス経路を調べるため、*p53* 変異型遺伝子(codon248 Arg→Trp)を有するヒト歯肉扁平上皮癌細胞 Ca9-22 を用い、アポトーシスの実行因子を調べた。その結果、等線量(2 Gy)において、X 線に比べて炭素線の LET が 13-100 KeV/μm と高くなるにつれ、また、鉄線で PARP および Caspase-3 の断片化が顕著に認められることを明らかにした。次に、活性化した Caspase-3 によって断片化されると発色する試薬を用い、フローサイトメトリー法で生きている細胞における Caspase-3 の活性化を調べた。X 線に比べて鉄線照射では、Caspase-3 の活性化は等生存率線量で比較すると約 1.5 倍、等線量で比較すると約 10 倍となった。このことから、高 LET 重粒子線は Caspase-3 を高頻度に活性化することがわかった。さらに、Caspase-3 の上流の経路を明らかにするため、各種 Caspase 阻害剤を用い、先と同様にフローサイトメトリー法にて Caspase-3 誘導活性を調べた。Caspase-3 の阻害剤を用いると当然 Caspase-3 の活性化は抑えられ、Caspase-9 の阻害剤を用いても Caspase-3 の活性化は抑えられていた。一方、Caspase-8 阻害剤を加えても、阻害剤を用いていないときの Caspase-3 の活性とほとんど差が認められなかった。さらに、Hoechst33342 蛍光顕微鏡観察の結果、等生存率線量で X 線に比べて炭素線の照射 48 時間後におけるアポトーシス頻度は、Caspase-8 阻害剤に比べて Caspase-9 および Caspase-3 阻害剤で顕著に阻害されることがわかった[23]。

以上のことから、高 LET 重粒子線誘導 *p53* 非

依存的アポトーシスにおける Caspase 経路は Caspase-8 よりも、Caspase-9 を経由した Caspase-3 が関与していることを明らかにした(図 3A)。

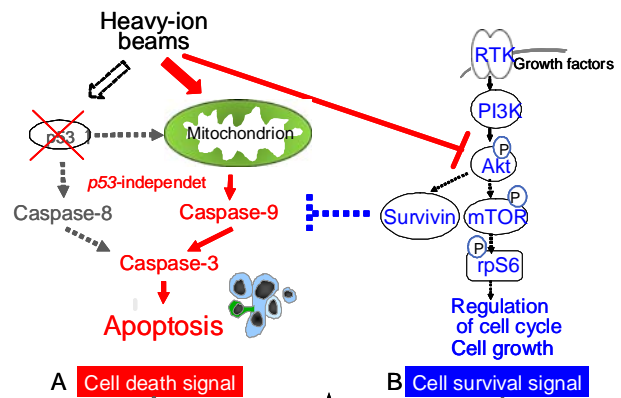


図 3. 重粒子線照射後の *p53* 非依存的細胞死シグナルの亢進と Akt 生存シグナルの抑制

### 2-2. 生存シグナルの抑制

Caspase-9 を介した Caspase-3 の活性経路についてはさまざまな役者が関与していることが報告されている[24]。我々はこれまで細胞死シグナルに注目して高 LET 重粒子線の影響を調べてきたが、細胞内では生存シグナルとのバランスで、細胞の生死が決定していることが知られている。生存シグナルの中でも Akt は重要な役割を担っているタンパク質リン酸化酵素で、その活性化によって細胞は種々のストレス刺激によるアポトーシスから免れることが報告されている<sup>25)</sup>。そこで、我々は高 LET 重粒子線で Akt に関連した生存シグナル(抗アポトーシス経路)が抑制されているのかどうか注目した。放射線照射によって、Akt シグナル系に関連するタンパク質を Western blot 法にて解析した結果、照射 2-3 時間後をピークに X 線よりも鉄線を照射した場合の方が減少していた。さらに、等線量(2 Gy)照射において、X 線よりも鉄線を照射した場合の方が mTOR、リン酸化 mTOR、rpS6、リン酸化 rpS6、Survivin いずれも細胞内タンパク質量が効率的に減少していた[26]。X 線と比較して重粒子の鉄線の方が Akt シグナル系をより効率的に抑制することによって、細胞増殖を抑制するとともに、Survivin による Caspase-9 の阻害が解除され、アポトーシスを亢進することが示唆された(図 3B)。



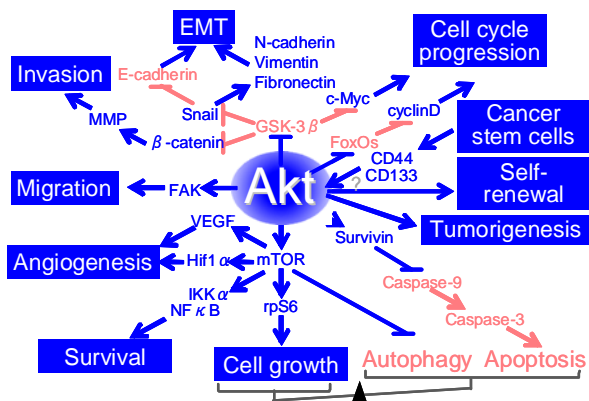


図 4. がんの進展にはたらく Akt 生存シグナル

Akt を中心としたシグナル系に関わる分子は、多くのがんで遺伝子増幅や活性亢進しており、がんの進展、術後再発や転移などの治療抵抗性の原因と深くかかわっている (図 4)。それ故、Akt 生存シグナルは発がんシグナルとも呼ばれている。実際、炭素線によって転移能が抑制される細胞は、Akt が不活性化していることが報告されている [27]。一方、炭素線によって浸潤が亢進する細胞もあり、NO を介して Akt が活性することが報告されている [28]。

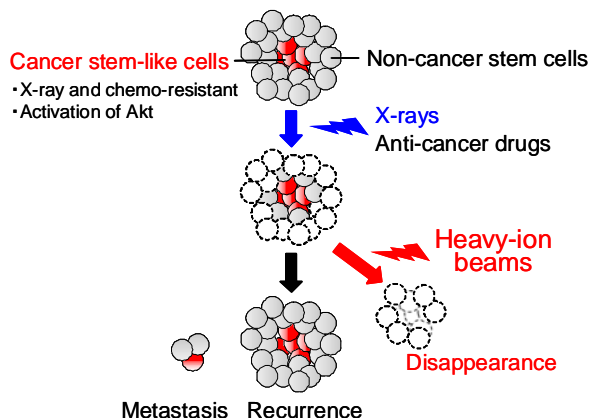


図 5. 炭素線は Akt を抑制することで、がん幹細胞様細胞を殺傷し、がんの根治が期待される

また、がん幹細胞が増殖するときに Akt シグナルが活性化することが知られている [29]。我々は X 線分割照射を続けると、非がん幹細胞は死ぬため、X 線抵抗性のがん幹細胞様細胞の割合が増えて、Akt が活性化されることを明らかにした [30,31]。その後、炭素線を追加照射すると、Akt が不活性化して、この X 線抵抗性のがん幹細胞様細胞も殺せることを見出した [31] (図 5)。さらに、炭素線は Akt シグナルの阻害によるもう一つの細胞死のオートファジー誘導が起りやすくなることも確認した [31]。

## 2-3. DNA 修復

我々は、重粒子線が飛跡に沿って重篤な二本鎖切断 (DSB) を引き起こし、またその修復は X 線に比べて遅いことを報告した [32]。しかし、重粒子線による DSB も全く修復できないわけではない。そこで、がん細胞が生存するのに重要な DSB 修復の NHEJ 修復と HR 修復のいずれが重粒子線の主な分子標的になるかを明らかにすることを目的とした。がん抑制遺伝子 *p53* 欠損マウス胚線維芽細胞由来の HR 関連 *Rad54* 欠損、NHEJ 関連 *Lig4* 欠損、二重欠損および野生型の細胞を用いて LET 依存的な放射線感受性を調べた [33]。その結果、 $D_{10}$  値はいずれの線質においても、野生型細胞 > HR 修復欠損細胞 > NHEJ 修復欠損細胞 > 二重修復欠損細胞の順に低くなった。200 keV/μm 以下の線質において、野生型細胞および *Rad54* 欠損細胞は LET が高くなるにつれて高感受性になった。*Lig4* 欠損および二重欠損細胞の放射線感受性は LET 依存的な差異が無かった。200 keV/μm を超えると、いずれの細胞でも一様に抵抗性を示した。HR 修復欠損による増感比は LET 無関係に一定で約 2 であった。一方、NHEJ 修復欠損の増感比は X 線で 9 もあり、LET が高くなるに従い減少するものの、200 keV/μm 以下で有意に HR 修復欠損よりも高い増感効果を示した [33]。

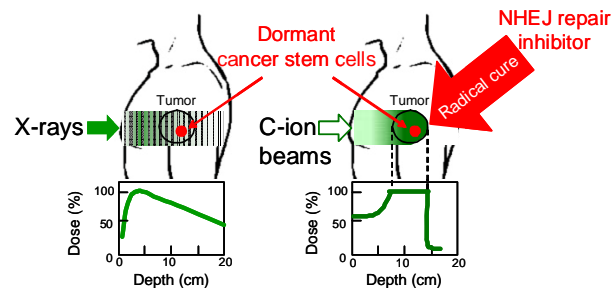


図 6. NHEJ 修復阻害剤と重粒子線との併用のイメージ図

## 3. まとめ

高 LET 重粒子線は生存シグナルの Akt を不活性化して、細胞死シグナルの Caspase-9 および Caspase-3 を介した *p53* 非依存的アポトーシスを誘導することを示した (図 3)。また、炭素線は Akt の不活性化により、X 線抵抗性の増殖性のがん幹細胞様細胞も殺せることを示した (図 5)。さらに、重粒子線の主な分子標的は NHEJ 修復であり、この NHEJ 修復を標的にすることで、炭素線においても、がんの抗腫瘍効果をさらに高められる可能性を示した (図 6)。

## 4. 将来展望

炭素線による細胞死について、アポトーシス誘

導だけでは説明できない可能性がある。アポトーシスを抑制するがん遺伝子 *Bcl-2* のはたらきによって従来の放射線治療が困難ながんであっても、炭素線治療が有効である可能性が報告されており<sup>34)</sup>、最近、アポトーシス以外にも、オートファジーや老化が炭素線による細胞死に関与することが報告されている[17,35]。がん化にともない、*p53*以外のどの遺伝子が異常になると、光子線と比べて炭素線でどのような細胞死が主となるのかの解明が待たれる。また、細胞によって、重粒子線照射後にAktが不活性化したり、活性化したりするのはどのような遺伝子背景が寄与しているのかも興味深い。これらの遺伝子検索とともに、より効率のよい細胞死誘導機構が解明されることを期待している。

炭素線治療の需要が高まった場合、光子線治療後Akt生存シグナルの活性化した増殖性のがん幹細胞を標的として、炭素線追加照射も一つの選択肢と考えられるので、我々の生物学的基礎研究も将来役に立つことを期待している。

NHEJ修復阻害剤と優れた線量分布の炭素線との併用により、がん組織に集中して効果を発揮することで副作用の軽減が期待できる。また、休眠状態のがん幹細胞はAkt生存シグナルとHR修復がはたらかないが、NHEJ修復が亢進して、放射線抵抗性を獲得している。NHEJ修復を阻害することで再発や転移の原因となる放射線抵抗性で休眠状態のがん幹細胞に細胞死をもたらし、がんの根治治療の切り札になるかもしれない。さらに、がん化の原因となる誤修復を減らし、二次発がんの抑制も期待している。

重粒子線により誘導されるシグナル伝達系の光子線との違いについて、我々の研究成果を中心にレビューした。本稿が生物学的アプローチによる炭素線がん治療のさらなる効果向上のアイデアの一助となり、がんの根治が果たせる日がくることを期待している。

## 5. 謝辞

本研究の多くは、放射線医学総合研究所の重粒子線照射装置を利用した。また、群馬大学に異動してからは、本学の重粒子線医学研究センターおよび原研高崎の重粒子線照射装置も利用した。研究費についてはJAXA、JSFおよび科研費、科学技術人材育成費「テニユアトラック普及・定着事業」の支援いただいた。最後に、これまでお世話になった施設のスタッフや、研究成果論文の共著の多くの先生方に御礼申し上げる。

## 6. 参考文献

- [1] Takahashi A, Ohnishi K, Wang X, Kobayashi M, Matsumoto H, Tamamoto T, Aoki H, Furusawa Y, Yukawa O, Ohnishi T.: The dependence of *p53* on the radiation enhancement of thermosensitivity at different LET. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* **47**: 489-494, 2000.
- [2] Takahashi A.: Different inducibility of radiation- or heat-induced *p53*-dependent apoptosis after acute or chronic irradiation in human cultured squamous cell carcinoma cells. *Int J Radiat Biol.* **77**: 215-224, 2001.
- [3] Takahashi A, Ohnishi K, Ota I, Asakawa I, Tamamoto T, Furusawa Y, Matsumoto H, Ohnishi T.: *p53*-dependent thermal enhancement of cellular sensitivity in human squamous cell carcinomas in relation to LET. *Int J Radiat Biol.* **77**: 1043-1051, 2001.
- [4] Asakawa I, Yoshimura H, Takahashi A, Ohnishi K, Nakagawa H, Ota I, Furusawa Y, Tamamoto T, Ohishi H, Ohnishi T.: Growth inhibition in transplanted human tongue tumors bearing different *p53* gene status with X-ray or C-beam irradiation. *Anticancer Res.* **22**: 2037-2043, 2002.
- [5] Takahashi A, Ota I, Tamamoto T, Asakawa I, Nagata Y, Nakagawa H, Kondo N, Ohnishi K, Furusawa Y, Matsumoto H, Ohnishi T.: *p53*-dependent hyperthermic enhancement of tumor growth inhibition by X-ray or carbon-ion beam irradiation. *Int J Hyperthermia.* **19**: 145-153, 2003.
- [6] Takahashi A, Matsumoto H, Yuki K, Yasumoto J, Kajiwarra A, Aoki M, Furusawa Y, Ohnishi K, Ohnishi T.: High-LET radiation enhanced apoptosis but not necrosis regardless of *p53* status. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* **60**: 591-597, 2004.
- [7] Ota I, Ohnishi K, Takahashi A, Yane K, Kanata H, Miyahara H, Ohnishi T, Hosoi H.: Transfection with mutant *p53* gene inhibits heat-induced apoptosis in a head and neck cell line of human squamous cell carcinoma. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* **47**: 495-501, 2000.
- [8] Tamamoto T, Yoshimura H, Takahashi A, Asakawa I, Ota I, Nakagawa H, Ohnishi K, Ohishi H, Ohnishi T.: Heat-induced growth inhibition and apoptosis in transplanted human head and neck squamous cell carcinomas with different *p53* status. *Int J Hyperthermia.* **19**: 590-597, 2003.
- [9] Kanata H, Yane K, Ota I, Miyahara H,

- Matsunaga T, Takahashi A, Ohnishi K, Ohnishi T, Hosoi H.: CDDP induces *p53*-dependent apoptosis in tongue cancer cells. *Int J Oncol.* **17**: 513-518, 2000.
- [10] Yuki K, Takahashi A, Ota I, Ohnishi K, Yasumoto J, Kanata H, Yane K, Hosoi H, Ohnishi T.: Glycerol enhances CDDP-induced growth inhibition of thyroid anaplastic carcinoma tumor carrying mutated *p53* gene. *Oncol Rep.* **11**: 821-824, 2004.
- [11] Yuki K, Takahashi A, Ota I, Ohnishi K, Yasumoto J, Yane K, Kanata H, Hosoi H, Ohnishi T.: Sensitization by glycerol for CDDP-therapy against human cultured cancer cells and tumors bearing mutated *p53* gene. *Apoptosis.* **9**: 853-859, 2004.
- [12] Ohnishi T, Takahashi A, Yano T, Matsumoto H, Wang X, Ohnishi K, Tamamoto T, Tsuji K, Furusawa Y, Yukawa O.: Hyperthermic enhancement of tumor growth inhibition by accelerated carbon-ions in transplantable human esophageal cancer. *Int J Hyperthermia.* **14**: 195-202, 1998.
- [13] Takahashi A, Yano T, Matsumoto H, Wang X, Ohnishi K, Tamamoto T, Tsuji K, Yukawa O, Ohnishi T.: Effects of accelerated carbon-ions on growth inhibition of transplantable human esophageal cancer in nude mice. *Cancer Lett.* **122**: 181-186, 1998.
- [14] Aoki M, Furusawa Y, Yamada T.: LET dependency of heavy ion induced apoptosis in V79 cells. *J Radiat Res.* **41**: 163-175, 2000.
- [15] Coelho D, Fischer B, Holl V, Dufour P, Denis JM, Gueulette J, Bergerat JP, Bischoff P.: Induction of apoptosis by high linear energy transfer radiation: role of *p53*. *Canad J Phys Pharmacol.* **80**: 644-649, 2002.
- [16] Holgersson A, Jernberg AR, Persson LM, Edgren MR, Lewensohn R, Nilsson A, Brahme A, Meijer AE.: Low and high LET radiation-induced apoptosis in M059J and M059K cells. *Int J Radiat Biol.* **79**: 611-621, 2003.
- [17] Jinno-Oue A, Shimizu N, Hamada N, Wada S, Tanaka A, Shinagawa M, Ohtsuki T, Mori T, Saha MN, Hoque AS, Islam S, Kogure K, Funayama T, Kobayashi Y, Hoshino H.: Irradiation with carbon ion beams induces apoptosis, autophagy, and cellular senescence in a human glioma-derived cell line. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* **76**: 229-241, 2010.
- [18] Alphonse G, Maalouf M, Battiston-Montagne P, Ardail D, Beuve M, Rousson R, Taucher-Scholz G, Fournier C, Rodriguez-Lafrasse C.: *p53*-independent early and late apoptosis is mediated by ceramide after exposure of tumor cells to photon or carbon ion irradiation. *BMC Cancer.* **13**: 151, 2013.
- [19] Biard DS, Martin M, Rhun YL, Duthu A, Lefaix JL, May E, May P.: Concomitant *p53* gene mutation and increased radiosensitivity in rat lung embryo epithelial cells during neoplastic development. *Cancer Res.* **54**: 3361-3364, 1994.
- [20] Brachman DG, Beckett M, Graves D, Haraf D, Vokes E, Weichselbaum RR.: *p53* mutation does not correlate with radiosensitivity in 24 head and neck cancer cell lines. *Cancer Res.* **53**: 3667-3669, 1993.
- [21] Slichenmyer WJ, Nelson WG, Slebos RJ, Kastan MB.: Loss of a *p53*-associated G<sub>1</sub> checkpoint does not decrease cell survival following DNA damage. *Cancer Res.* **53**: 4164-4168, 1993.
- [22] Takahashi A, Matsumoto H, Furusawa Y, Ohnishi K, Ishioka N, Ohnishi T.: Apoptosis induced by high-LET radiations is not affected by cellular *p53* gene status. *Int J Radiat Biol.* **81**: 581-586, 2005.
- [23] Yamakawa N, Takahashi A, Mori E, Imai Y, Furusawa Y, Ohnishi K, Kirita T, Ohnishi T.: High LET radiation enhances apoptosis in mutated *p53* cancer cells through Caspase-9 activation. *Cancer Sci.* **99**: 1455-1460, 2008.
- [24] Mori E, Takahashi A, Yamakawa N, Kirita T, Ohnishi T.: High LET heavy ion radiation induces *p53*-independent apoptosis. *J Radiat Res.* **50**: 37-42, 2009.
- [25] Datta SR1, Brunet A, Greenberg ME.: Cellular survival: a play in three Acts. *Genes Dev.* **13**: 2905-2927, 1999.
- [26] Nakagawa Y, Takahashi A, Kajihara A, Yamakawa N, Imai Y, Ota I, Okamoto N, Mori E, Noda T, Furusawa Y, Kirita T, Ohnishi T.: Depression of *p53*-independent Akt survival signals in human oral cancer cells bearing mutated *p53* gene after exposure to high-LET radiation. *Biochem Biophys Res Commun.* **423**: 654-660, 2012.
- [27] Ogata T, Teshima T, Inaoka M, Minami K, Tsuchiya T, Isono M, Furusawa Y, Matsuura N.: Carbon ion irradiation suppresses metastatic potential of human non-small cell lung cancer A549 cells through the

- phosphatidylinositol-3-kinase/Akt signaling pathway. *J Radiat Res.* **52**: 374-379, 2011.
- [28] Fujita M, Imadome K, Endo S, Shoji Y, Yamada S, Imai T.: Nitric oxide increases the invasion of pancreatic cancer cells via activation of the PI3K-AKT and RhoA pathways after carbon ion irradiation. *FEBS Lett.* **588**: 3240-3250, 2014.
- [29] Hambardzumyan D, Squatrito M, Carbajal E, Holland EC.: Glioma formation, cancer stem cells, and akt signaling. *Stem Cell Rev.* **4**: 203-210, 2008.
- [30] Shimura T, Noma N, Oikawa T, Ochiai Y, Kakuda S, Kuwahara Y, Takai Y, Takahashi A, Fukumoto M.: Activation of the AKT/cyclin D1/Cdk4 survival signaling pathway in radioresistant cancer stem cells. *Oncogenesis.* **1**: e12, 2012.
- [31] Takahashi A, Ma H, Nakagawa A, Yoshida Y, Kanai T, Ohno T, Kuwahara Y, Fukumoto M, Nakano T.: Carbon-ion beams efficiently induce cell killing in X-ray resistant human squamous tongue cancer cells. *Int J Med Phys Clin Engin Radiat Oncol.* **3**: 133-142, 2014.
- [32] Takahashi A, Yamakawa N, Kirita T, Omori K, Ishioka N, Furusawa Y, Mori E, Ohnishi K, Ohnishi T.: DNA damage recognition proteins localize along heavy ion induced tracks in the cell nucleus. *J Radiat Res.* **49**: 645-652, 2008.
- [33] Takahashi A, Kubo M, Ma H, Nakagawa A, Yoshida Y, Isono M, Kanai T, Ohno T, Furusawa Y, Funayama T, Kobayashi Y, Nakano T.: NHEJ repair plays a more important role than HR repair in defining radiosensitivity after exposure to high LET radiation. *Radiat Res.* **182**: 338-344, 2014.
- [34] Hamada N, Imaoka T, Masunaga S, Ogata T, Okayasu R, Takahashi A, Kato T, Kobayashi Y, Ohnishi T, Ono K, Shimada Y, Teshima T.: Recent advances in the biology of heavy-ion cancer therapy. *J Radiat Res.* **51**: 365-383, 2010.
- [35] Kubo N, Noda S, Takahashi A, Yoshida Y, Oike T, Murata K, Musha A, Suzuki Y, Ohno T, Takahashi T, Nakano T.: Radiosensitizing effect of carboplatin and paclitaxel to carbon-ion beam irradiation in the non-small cell lung cancer cell line H460. *J Radiat Res.* in press, 2014.

# Induction of Adaptive Response in Mice *in vivo* and *in utero*

Bing Wang, Kaoru Tanaka, Guillaume Varès, Yasuharu Ninomiya, Kouichi Maruyama, Yi Shang, Kazuko Fujita\*, Kiyomi Eguchi-Kasai, Mitsuru Neno

Research Center for Radiation Protection, National Institute of Radiological Sciences

\*Toho University School of Medicine

## Abstract

Induction of adaptive response (AR) by combination of irradiation with different LET values was attempted in a series of investigations in young adult female mice and in fetal mice of C57BL/6J strain using mainly thirty-day survival *in vivo*, and prenatal death and malformation *in utero* as endpoints. For total body irradiations, X-rays and high LET accelerated heavy ion irradiations including carbon, silicon, neon and iron particles were used. Significant suppression of mouse death *in vivo* and marked reduction of prenatal death and malformation *in utero* were used as criteria for judgment of a successful AR induction. In the past 6 years, nine combinations in the *in utero* studies and twenty-three combinations in the *in vivo* studies were performed. Results showed that induction of AR is an event depending on the LET or/and species of the ions. Generally, it is hardly to induce AR by X-rays against heavy ion irradiations with very high LET values, and high LET heavy ion irradiations hardly induce AR against X-rays or higher LET heavy ion irradiations. These findings are expected to contribute to the risk estimation, mechanism study, and practical applications to active induction of radioresistance and to cancer therapy with heavy ion irradiations.

## Research background

In contradiction to the classical paradigm, which assumes that radiation effects are directly proportional to energy deposited, numerous studies described the existence of radiation-induced AR, which is the phenomenon manifesting as a priming low-dose-induced resistance to subsequent challenge exposure at higher doses. As investigations on the conditions essential for induction of these effects are expected to provide important scientific basis for radiation risk estimates, protection and practical applications, and offer significant insight into the novel biological defense mechanisms regarding protection against radiation, study on AR is of great concern for both public health and academic research. Studies on AR in rodents retrospect to 1960 for the *editio princeps* by Maisin *et al.* [1], stating a slight increase in 30-day survival induced by preirradiation in rats. The first report on a significantly enhanced survival rate induced by preirradiation was by Yonezawa *et al.* in 1990 in ICR mice [2]. Later in 2001 Nosen *et al.* [3] verified this so-called "Yonezawa Effect" and demonstrated that the AR could be induced in C57BL strain mice under the similar conditions. Namely, preirradiation of 6 weeks old mice with 0.5 Gy of X-rays before a second exposure 2 weeks later to a lethal dose of 6.5 Gy significantly enhanced the survival rate from 0 to about 77% in a 30-day survival study. For the investigation *in utero*, Wang *et al.*'s work in 1998 [4] and 2000 [5] demonstrated for the first time the existence of AR in fetal mice in both ICR and C57BL strains. Later, successful AR induction by low LET irradiations *in utero* was also reported by Mitchell *et al.* in 2002 [6] and by Okazaki *et al.* in 2005 [7]. However, all the investigations were performed using only low LET X-irradiations for both priming and challenge doses.

On the other hand, for the work regarding the high LET irradiations, by using human cells from high background inhabitants (receiving low dose of low

and high LET irradiations), in 2002, Ghiassi-nejad *et al.*'s studies on the human lymphocytes [8] showed low chromosome aberrations when the cells were challengingly irradiated by high dose of gamma-rays; and in 2006 Mohammadi *et al.* [9] reported that human peripheral blood mononuclear cells showed low micronuclei, high apoptosis, and high DNA damage repair after challengingly irradiated by high dose of gamma-rays. There are only few works on high LET irradiation induced AR in the cultured cells *in vitro* as reported by Wolff *et al.* in 1991 [10] and Marples and Skov in 1996 [11]. There were merely a few reports on a successful AR induction in certain organs by heavy-ion irradiations *in vivo* according to Zhang *et al.*'s works reported in 1998 [12], 2000 [13], and 2006 [14]. Among few works available on high LET irradiation induced AR, Vares *et al.* recently reported that low dose priming X-rays or high LET carbon ions could induce AR against challenge doses from high LET carbon ions *in vitro*, and low dose priming X-rays could induce AR against challenge doses from carbon and silicon ions *in vivo* [15,16].

There is so far no documented data on a successful AR induction by heavy-ion irradiations at the whole body level *in vivo* or *in utero*. The present work was a further study on possible AR induction by heavy-ion irradiations *in vivo* and *in utero*.

## Materials and Methods

**Animals:** 6 or 8 weeks old female mice, and 10 weeks old pregnant mice (E11 or E12) of C57BL/6J strain were used. The animals were of SPF level and purchased from SLC (Japan) 1 week in advance for adaptation to the laboratory environment. The research protocol for using mice was approved by the Animal Care and Use Committee of the National Institute of Radiological Sciences (NIRS). All experimental protocols involving mice in this study were performed in strict accordance with the NIRS *Guidelines for the Care and Use of Laboratory Animals*.

Irradiations: Mono beams generated at HIMAC of carbon ions 290MeV/u (C290) at a LET of about 15 KeV/ $\mu$ m, neon ions 400MeV/u (Ne400) at a LET value of about 30 KeV/ $\mu$ m, silicon ions 490MeV/u (Si490) at a LET of about 55 KeV/ $\mu$ m, and iron ions 500MeV/u (Fe500) at a LET of about 200 KeV/ $\mu$ m were used. X-irradiations (200 kVp with a filter of 0.5mm Cu plus 0.5mm Al) were used either to establish the positive control or in the radiation combination. For the adult mice, the priming and the challenge irradiations were performed at 6 and 8 weeks of the postnatal age, respectively. For the fetal mice, the priming dose and the challenge dose were delivered on E11 and E12 of the embryonic age, respectively.

**Methodology:** The AR models in mice *in vivo* (Yonezawa Effect) and *in utero* (Wang *et al.*'s work) were adopted, verified and confirmed under the experimental set up in our research facilities, and finally applied to the present study. Reproducibility of each model for AR induction was verified and confirmed by using low LET X-rays for delivery of both the priming low dose and challenge high dose. Serving also as a positive control, the verification work was performed in parallel to the investigations using heavy ion irradiations. The killing effect in adult mice and the teratogenic effect in fetal mice were used as main biological endpoints. The criteria for judgment of a successful AR induction were a marked enhancement of survival rate induced by the priming irradiation in a 30-day survival test in adult mice, and a significant reduction by priming irradiation of fetal malformation or prenatal death in fetal mice.

**Statistical analysis:** For the *in vivo* studies, statistical evaluation of the data was done using the  $\chi^2$  test and Student's *t*-test when appropriate. For the *in utero* studies, the litter was used as the unit of statistical analysis, and statistical evaluation of the data was done using Student's *t*-test. For both *in vivo* and *in utero* studies, statistical significance was assigned to  $P < 0.05$ .

## Results

Reproducibility of "Yonezawa Effect", the model for induction of AR in young adult female mice, was verified and confirmed by using low LET X-rays for delivery of both the priming low-dose at 0.50 Gy and challenge high dose at 7.50 Gy. The 30-day survival test was applied to evaluate the AR induction (Fig. 1). The priming dose markedly increased the survival rate from 16.67% to 83.33%. These results clearly indicated that AR was induced with efficient reliability and reproducibility in our experimental setup. The combinations of irradiations with different LET values were verified. Due to the space limitation, we show here two examples for the successful *in vivo* AR induction by the priming dose of 0.50 Gy X-rays against challenge dose from heavy ion irradiations. Rescuing effect on bone marrow death in the 30-day survival test by the priming dose of 0.50 Gy X-rays against a challenge dose of 6.50 Gy from carbon ion

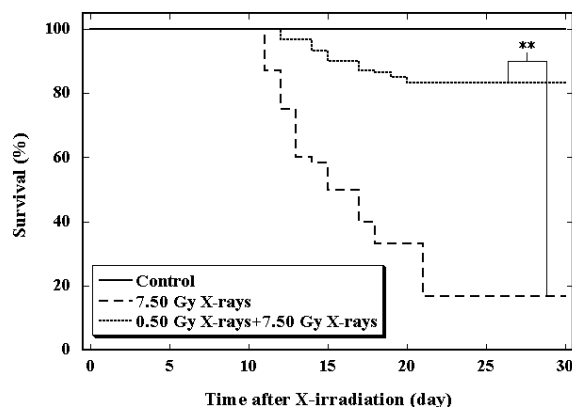


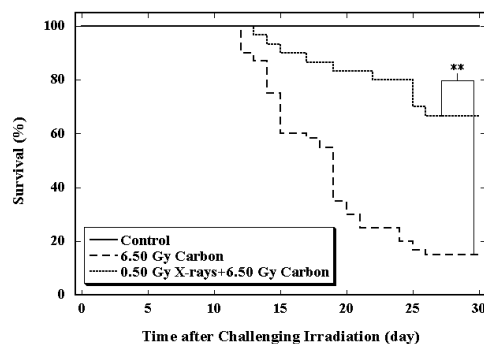
Fig.1. Effect of a priming dose of 0.50 Gy X-rays on a challenge dose of 7.50 Gy X-rays on 30-day survival of mice. The Control group (solid line) received no irradiation, the 7.50 Gy X-rays group (broken line) received only the challenge irradiation, and the 0.50 Gy X-rays + 7.50 Gy X-rays (dotted line) received both the priming and the challenge irradiations. Two asterisks (\*\*) indicate statistically significant differences ( $P < 0.01$ ) between the two groups that were compared.

irradiation or 5.50 Gy from neon ion irradiations was confirmed. Fig. 2a and 2b respectively illustrated a representative survival graph showing that the priming low-dose of X-rays could relieve the mouse killing effect caused by the challenge dose from carbon and neon ion irradiations. In the following studies with carbon ion irradiations, a challenge dose at 5.75 Gy was used instead of 6.50 Gy to obtain more survivors in the 30-day survival test for further investigations on the residual damage in the hematopoietic system.

The reproducibility of the fetal mouse model for induction of AR was verified by using low LET X-rays for delivery of both a priming low-dose at 0.05 Gy or 0.30 Gy on Day 11 and challenge high dose at 3.50 Gy on Day 12, and was confirmed on Day 18 by judging the existence of protective effect from the priming dose against the teratogenic effect from the challenge dose. A significant suppression of either the incidence of fetal death, live malformed fetuses (either limb defects or malformed tails) or low body weight was judged as a successful induction of AR.



a



b

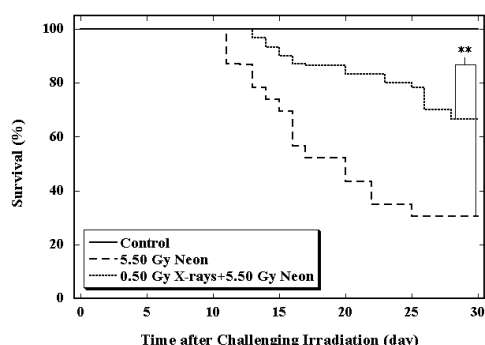


Fig.2. Effect of a priming dose of 0.50 Gy X-rays on a challenge dose of 6.50 Gy Carbon (a) or, 5.50 Gy Neon (b) on 30-day survival of mice. In a, the Control group (solid line) received no irradiation, the 6.50 Gy Carbon group (broken line) received only the challenge irradiation, and the 0.50 Gy X-rays + 6.50 Gy Carbon (dotted line) received both the priming and the challenge irradiations. In b, the Control group (solid line) received no irradiation, the 5.50 Gy Neon group (broken line) received only the challenge irradiation, and the 0.50 Gy X-rays + 5.50 Gy Neon (dotted line) received both the priming and the challenge irradiations. Two asterisks (\*\*) indicate statistically significant differences ( $P < 0.01$ ) between the two groups that were compared.

As shown in Table 1a, compared to the data obtained in the animals of the sham exposure group, a challenge dose alone at 3.50 Gy resulted in a significant increase in the mean number of fetal death and in the mean number of live malformed fetuses, and a marked decrease in the mean body weight. A priming dose at 0.05 Gy prior to the challenge dose markedly suppressed the teratogenic effect from the challenge dose: the mean number of fetal death decreased, the mean number of live malformed fetuses reduced, and the mean body weight increased. For the priming dose at 0.30 Gy, the mean number of fetal death decreased, the mean number of live malformed fetuses reduced and the mean body weight increased. In addition to the detailed record on the gross external malformations (limb defects and malformed tails), the findings on litter size, early *in utero* death and the other type external malformations were shown in Table 1b. No significant difference was found for the

litter size, early *in utero* death, and the other type external malformations among the experimental groups. These results clearly indicated that AR was induced with efficient reliability and reproducibility in our experimental setup. Using the fetal mouse model for induction of AR confirmed in the present experimental setup, in the following investigations, the priming dose at either 0.05 Gy or 0.30 Gy was delivered from low LET X-rays and the challenge dose was from high LET accelerated heavy carbon, neon, silicon or iron ions. A challenge dose of carbon ions alone at 3.00 Gy resulted in a significant increase in the mean number of fetal death and in the mean number of live malformed fetuses. A priming dose at 0.05 Gy prior to the challenge dose markedly suppressed the teratogenic effect from the challenge dose: the mean number of fetal death decreased and the mean number of live malformed fetuses reduced. For the priming dose at 0.30 Gy, the mean number of fetal death decreased and the mean number of live malformed fetuses reduced. No effect from the two priming doses was observed on the mean body weight. A challenge dose of neon ions alone at 2.50 Gy resulted in a marked increase in the mean number of fetal death and live malformed fetuses. A priming dose at 0.05 Gy prior to the challenge dose markedly reduced the mean number of live malformed fetuses. The priming dose at 0.30 Gy prior to the challenge dose significantly suppressed the mean number of fetal death and the mean number of live malformed fetuses. No effect from the two priming doses was observed on the mean body weight. A challenge dose of silicon ions alone at 1.50 Gy resulted in a significant increase in the mean number of fetal death and live malformed fetuses. Though no effect from the two priming doses was observed on the fetal death, a significant effect on the suppressed occurrence of live malformed fetuses was observed. Both the priming doses reduced the mean number of live malformed fetuses induced by the challenge dose alone. The challenge dose alone markedly reduced the body weight. The priming doses at 0.05 Gy and 0.30 Gy prior to the challenge dose significantly suppressed the decrease in body weight. On the other hand, a challenge dose of iron ions alone at 2.00 Gy resulted in a significant increase in the mean number of fetal death, a marked increase in the mean number of live malformed fetuses, and a significant decrease in body weight. However, neither of the two priming doses of X-rays showed significant suppressive effect against the increased incidences of fetal death and live malformed fetuses, or the decreased in fetal body weight that were induced by the challenge dose of iron ions alone. On the contrary, with the priming dose at 0.05 Gy delivered prior to the challenge dose, a significant increase in the mean number of live malformed fetuses was observed. For the priming dose at 0.30 Gy, marked increase in the number of fetal death was observed. In addition, when either priming dose was delivered prior to the challenge dose,

a significantly reduced body weight was also observed.

Table 1.

Effects of the Priming doses of X-rays on Day 11 of Gestation Prior to the Challenge Doses of X-rays or Heavy Ions on Day 12 of Gestation on the Caesarean Section Findings in Mice

a

Treatment	No. of mother	No. of implants	No. of fetal death(%)	No. of live malformed fetuses(%)	Body weight <sup>a</sup> (g)
Sham exposure	25	219	9(4.10)	1(0.53)	1.120±0.031
3.50 Gy X-rays	28	246	32(13.00) <sup>b</sup>	55(28.95) <sup>b</sup>	0.525±0.032 <sup>b</sup>
0.05Gy X-rays+3.50 Gy X-rays	29	251	16(6.37) <sup>+</sup>	21(10.00) <sup>++</sup>	0.576±0.042 <sup>++</sup>
0.30Gy X-rays+3.50 Gy X-rays	33	281	21(7.47)	27(11.64) <sup>++</sup>	0.574±0.054 <sup>++</sup>
3.00 Gy carbon ions	15	131	16(12.21) <sup>b</sup>	38(37.25) <sup>b</sup>	0.524±0.045 <sup>b</sup>
0.05Gy X-rays+3.00 Gy carbon ions	18	153	11(7.19)	19(14.96) <sup>++</sup>	0.556±0.054
0.30Gy X-rays+3.00 Gy carbon ions	18	150	12(8.00)	20(16.26) <sup>++</sup>	0.554±0.061
2.50 Gy neon ions	14	124	26(20.97) <sup>b</sup>	55(63.95) <sup>b</sup>	0.534±0.060 <sup>b</sup>
0.05Gy X-rays+2.50 Gy neon ions	12	105	17(16.19)	25(32.47) <sup>++</sup>	0.556±0.104
0.30Gy X-rays+2.50 Gy neon ions	12	102	11(10.78)	9(11.11) <sup>++</sup>	0.544±0.054
1.50 Gy silicon ions	15	130	14(10.77) <sup>b</sup>	12(11.65) <sup>b</sup>	0.625±0.030 <sup>b</sup>
0.05Gy X-rays+1.50 Gy silicon ions	17	151	11(7.28)	6(4.80)	0.666±0.032 <sup>++</sup>
0.30Gy X-rays+1.50 Gy silicon ions	18	161	12(7.45)	7(5.22)	0.664±0.035 <sup>+</sup>
2.00 Gy iron ions	18	151	35(23.18) <sup>b</sup>	22(21.78) <sup>b</sup>	0.485±0.042 <sup>b</sup>
0.05Gy X-rays+2.00 Gy iron ions	19	168	35(20.83)	37(31.90)	0.445±0.044
0.30Gy X-rays+2.00 Gy iron ions	20	176	51(28.98)	23(21.29)	0.429±0.069

<sup>a</sup> The values are presented as mean ± SD.

<sup>b</sup> Indicates a significant difference at  $p < 0.01$  compared with the sham exposure group.

<sup>+</sup> Indicates a significant difference at  $p < 0.05$  compared with its counterpart group receiving only the challenging dose.

<sup>++</sup> Indicates a significant difference at  $p < 0.01$  compared with its counterpart group receiving only the challenging dose.

b

Treatment	Litter size <sup>a</sup>	No. of early death <sup>a</sup>	No. of other type external malformations						
			ELC	MCL	HCL	MPM	CLP	VH	
Sham exposure	8.8±0.7	0.9±0.6	0	0	0	0	0	0	0
3.50 Gy X-rays	8.8±0.7	0.9±0.6	0	0	0	0	0	0	0
0.05Gy X-rays+3.50 Gy X-rays	8.7±0.7	0.9±0.6	0	0	0	0	0	0	1
0.30Gy X-rays+3.50 Gy X-rays	8.8±0.6	0.8±0.6	1	0	0	0	0	0	0
3.00 Gy carbon ions	8.7±0.7	0.9±0.6	0	0	0	0	0	0	0
0.05Gy X-rays+3.00 Gy carbon ions	8.4±0.5	0.8±0.4	0	0	0	0	0	0	0
0.30Gy X-rays+3.00 Gy carbon ions	8.3±0.6	0.8±0.6	0	1	0	0	0	0	0
2.50 Gy neon ions	8.9±0.7	0.9±0.5	0	0	0	0	0	1	0
0.05Gy X-rays+2.50 Gy neon ions	8.8±0.6	0.8±0.6	0	0	0	0	0	0	0
0.30Gy X-rays+2.50 Gy neon ions	8.5±0.7	0.8±0.6	0	0	0	0	0	0	0
1.50 Gy silicon ions	8.7±0.7	0.9±0.6	0	0	0	0	0	0	0
0.05Gy X-rays+1.50 Gy silicon ions	8.9±0.6	0.9±0.6	0	0	0	0	1	0	0
0.30Gy X-rays+1.50 Gy silicon ions	8.9±0.6	0.8±0.6	0	0	0	0	0	0	0
2.00 Gy iron ions	8.4±0.7	0.8±0.5	0	0	1 <sup>c</sup>	1 <sup>c</sup>	0	0	0
0.05Gy X-rays+2.00 Gy iron ions	8.8±0.6	0.9±0.6	0	0	0	0	0	0	0
0.30Gy X-rays+2.00 Gy iron ions	8.8±0.6	0.9±0.5	0	0	0	0	0	0	0

<sup>a</sup> The values are presented as mean ± SD.

<sup>b</sup> Abbreviations: ELC, encephalocele; MCL, microcephaly; HCL, hydrocephalus; MPM, microphtalmia; CLP, cleft lip and palate; VH, ventral hernia.

<sup>c</sup> Of the same fetus.

In summary, for the *in vivo* studies, as shown in Table 2, it could be concluded in general that the priming low dose X-rays could induce protective effects against the detrimental effects from the high LET heavy-ion challenge irradiations from carbon, neon and silicon but not from iron beams. In case of the priming dose was from high LET heavy-ion irradiations and the challenge dose was from X-rays, only in the combination of carbon plus X-rays, an AR was observed. In the case of the combination between heavy-ion irradiations, the results varied with the ion species. AR was observable only in the following two combinations: carbon plus carbon and carbon plus neon. For the *in utero* studies as shown in Table 3, results demonstrated that priming low dose of X-rays could induce protective effects against the detrimental effects from the high LET heavy-ion

challenge irradiations from carbon, neon and silicon but not from iron beams; while no adaptive response was observable when the priming low dose was from high LET heavy-ion irradiations and the challenge dose was from X-rays.

Table 2.

Induction of Adaptive Response in Adult Mice

Animal	Priming Dose	Challenging Dose	Adaptive Response
Adult Mice	X-Rays	X-Rays	Observable
	X-Rays	C (LET15)	Observable
	X-Rays	Ne (LET30)	Observable
	X-Rays	Si (LET50)	Observable
	X-Rays	Fe (LET200)	Not Observable
	C (LET15)	X-Rays	Observable
	Ne (LET30)	X-Rays	Not Observable
	Si (LET50)	X-Rays	Not Observable
	Fe (LET200)	X-Rays	Not Observable
	C (LET15)	C (LET15)	Observable
	C (LET15)	Ne (LET30)	Observable
	C (LET15)	Si (LET50)	Not Observable
	C (LET15)	Fe (LET200)	Not Observable
	Ne (LET30)	C (LET15)	Not Observable
	Ne (LET30)	Ne (LET30)	Not Observable
	Ne (LET30)	Si (LET50)	Not Observable
	Ne (LET30)	Fe (LET200)	Not Observable
	Si (LET50)	C (LET15)	Not Observable
	Si (LET50)	Ne (LET30)	Not Observable
	Si (LET50)	Si (LET50)	N/A
	Si (LET50)	Fe (LET200)	N/A
	Fe (LET200)	C (LET15)	Not Observable
	Fe (LET200)	Ne (LET30)	Not Observable
	Fe (LET200)	Si (LET50)	Not Observable
	Fe (LET200)	Fe (LET200)	Not Observable

Table 3.

Induction of Adaptive Response in Fetal Mice

Animal	Priming Dose	Challenging Dose	Adaptive Response
Fetal Mice	X-Rays	X-Rays	Observable
	X-Rays	C (LET15)	Observable
	X-Rays	Ne (LET30)	Observable
	X-Rays	Si (LET50)	Observable
	X-Rays	Fe (LET200)	Not Observable
	C (LET15)	X-Rays	Not Observable
	Ne (LET30)	X-Rays	Not Observable
	Si (LET50)	X-Rays	Not Observable
	Fe (LET200)	X-Rays	Not Observable

## Conclusions and discussions

Space radiations are both from solar and cosmic origin and galactic cosmic rays consist of high-charge and high-energy particles. Considering the possibility that exposure to low dose of low LET and/or high LET irradiations could induce an AR, which may result in resistance to high radiation levels caused by solar activity, it is crucial to study in the suitable AR models for the possibility of triggering an AR, especially with the interest by a low dose of high LET radiations. Among all the significance of possible practical applications to the case of exposures to high LET irradiations, induction of AR by low dose high LET priming irradiations may provide a reduction in cancer-causing DNA damage for radiation workers, patients receiving heavy-ion radiotherapy, and especially the space mission crews and travelers. The possible induction by heavy-ion irradiations of an AR is of an on-the-spot inspection. The present *in vivo* and *in utero* investigation is aimed to verify the possible existence of a heavy-ion irradiation induced AR in mice at the whole body level and provide insights into the studies to explore the underlying molecular mechanisms. The obtained results are expected to contribute to the risk estimation, mechanism study and possible practical applications of low dose high LET irradiations.

Taken together, results obtained in the *in vivo* studies showed that priming low-dose of both low and high LET irradiations could relieve the acute killing effect (bone marrow death) induced by challenge high doses from both low and high LET irradiations. These findings bring new knowledge to the characterization of the "Yonezawa Effect" by providing a new insight into the mechanistic study in this mouse AR model *in vivo*. For the *in utero* studies using our fetal mouse AR model, results suggest that the efficacy of the biological defense mechanisms induced by priming doses of low LET X-rays depends on the quality of the challenge irradiations. These findings provide a new insight into the mechanistic study on the low-LET X-ray-induced AR against the detrimental effects of high-LET accelerated heavy ions in the fetal mouse AR model *in utero*.

## Research in progress

As the mechanism underlying AR *in vivo* in mice (Yonezawa Effect) induced by X-rays as both the priming and the challenge doses was due to the radioresistance occurring in hematopoietic tissues, to explore the mechanism involved in the AR with high LET irradiation, we are investigating if the same mechanism is involved. In addition, roles of DNA repair and antioxidant events in AR induction are also studied. In fiscal year 2014, we start a new project to study the mechanisms underlying Yonezawa Effect induced by high LET irradiation. Radioresistance induced by the priming irradiation in hematopoietic tissues is verified by measuring the survival of endogenous spleen colony-forming units in mice after challenge dose with or without priming

irradiations at different doses. For the combinations of irradiations, the followings are preferably tested: X-rays plus carbon, X-rays plus iron, carbon plus X-rays, iron plus X-rays, carbon plus carbon, carbon plus neon, and carbon plus iron. The reproducibility of this AR model is verified by using X-rays for delivery of both the priming low dose and challenge high dose. This serves also as a positive control, which is performed in parallel to the investigations using heavy ion irradiations.

## References

- [1] Maisin J, Van Duysel E, Dunjic A, Van der Merckt J, Wambersie A, Werbrueck D. Acquired radio-resistance, radio-selection and radio-adaptation. In "Immediate and Low Level Effects of Ionizing Radiations", Ed Buzzati-Traverso A A, pp183-194, Taylor & Francis Ltd., London.
- [2] Yonezawa M, Takeda A, Misonoh J. Acquired radioresistance after low dose X-irradiation in mice. *Journal of Radiation Research*. 31, 256-62 (1990).
- [3] Nose M, Wang B, Itsukaichi H, Yukawa O, Hayata I, Yamada T, Ohyama H. Rescue of lethally irradiated mice from hematopoietic death by pre-exposure to 0.5 Gy X-rays without recovery from peripheral blood cell depletion and its modification by OK432. *Radiation Research*. 156, 195-204 (2001).
- [4] Wang B, Ohyama H, Nose T, Itsukaichi H, Nakajima T, Yukawa O, Odaka T, Tanaka K, Kojima E, Yamada T, Hayata I. Adaptive response in embryogenesis: I. Dose and timing of radiation for reduction of prenatal death and congenital malformation during the late period of organogenesis. *Radiation Research*. 150, 120-2 (1998).
- [5] Wang B, Ohyama H, Haginoya K, Odaka T, Itsukaichi H, Yukawa O, Yamada T, Hayata I. Adaptive response in embryogenesis. III. Relationship to radiation-induced apoptosis and Trp53 gene status. *Radiation Research*. 154, 277-82 (2000).
- [6] Mitchell RE, Dolling JA, Misonoh J, Boreham DR. Influence of prior exposure to low-dose adapting radiation on radiation-induced teratogenic effects in fetal mice with varying Trp53 function. *Radiation Research*. 158, 458-63 (2002).
- [7] Okazaki R, Ootsuyama A, Norimura T. Radioadaptive response for protection against radiation-induced teratogenesis. *Radiation Research*. 163, 266-70 (2005).
- [8] Ghiassi-nejad M, Mortazavi SM, Cameron JR, Niroomand-rad A, Kararam PA. Very high background radiation areas of Ramsar, Iran:

preliminary biological studies. *Health Physics*. 82, 87-93 (2002).

- [9] Mohammadi S, Taghavi-Dehaghani M, Gharaati MR, Masoomi R, Ghiasi-Nejad M. Adaptive response of blood lymphocytes of inhabitants residing in high background radiation areas of Ramsar- micronuclei, apoptosis and comet assays. *Journal of Radiation Research*. 47, 279-85 (2006).
- [10] Wolff S, Jostes R, Cross FT, Hui TE, Afzal V, Wiencke JK. Adaptive response of human lymphocytes for the repair of radiation-induced chromosomal damage. *Mutation Research*. 250, 299-306 (1991).
- [11] Marples B, Skov KA. Small doses of high-linear energy transfer radiation increase the radioresistance of Chinese hamster V79 cells to subsequent X irradiation. *Radiation Research*. 146, 382-7 (1996).
- [12] Zhang H, Zheng RL, Wang RY, Wei ZQ, Li WJ, Gao QX, Chen WQ, Wang ZH, Han GW, Liang JP. Chromosomal aberrations induced by 12C6+ heavy ion irradiation in spermatogonia and spermatocytes of mice. *Mutation Research*. 398, 27-31 (1998).
- [13] Zhang H, Zhang X, Zheng RL, Gao QX, Wei ZQ, Li WJ, Chen WQ, Liang JP, Han GW, Huang T, Xie HM. Alleviation of pre-exposure to low-dose 16O8+ ion on mouse testicular histological damage induced by subsequent high-dose irradiation. *Acta Biologica Experimentalis Sinica*. 33, 97-100 (2000).
- [14] Zhang H, Liu B, Zhou Q, Zhou G, Yuan Z, Li W, Duan X, Min F, Xie Y, Li X. Alleviation of pre-exposure of mouse brain with low-dose 12C6+ ion or 60Co gamma-ray on male reproductive endocrine damages induced by subsequent high-dose irradiation. *International Journal of Andrology*. 29, 592-6 (2006).
- [15] Varès G, Wang B, Tanaka K, Kakimoto A, Eguchi-Kasai K, Neno M. Mutagenic adaptive response to high-LET radiation in human lymphoblastoid cells exposed to X-rays. *Mutation Research*. 706, 46-52 (2011).
- [16] Varès G, Wang B, Tanaka K, Kakimoto A, Eguchi-Kasai K, Neno M. Mutagenic adaptive response to high-LET radiation in human lymphoblastoid cells exposed to low doses of heavy-ion radiation. *Mutation Research*. 712, 49-54 (2011).

## Major publications in English and presentations at international meeting

Bing Wang, Kaoru Tanaka, Guillaume Varès, Yi Shang, Kazuko Fujita, Yasuharu Ninomiya, Tetsuo Nakajima, Kiyomi Eguchi-Kasai, Mitsuru Neno. X-Ray-Induced Radioresistance against High LET Irradiations from Accelerated Heavy Ions in Mice. *Radiation Research*. 174 : 532-536, 2010.

Wang B., Ninomiya Y., Tanaka K., Maruyama K., Varès

G, Eguchi-Kasai K., Neno M.: Adaptive Response of Low LET X-Rays for Protection Against High LET Accelerated Heavy Ion-Induced Teratogenesis. *Birth Defects Research Part B: Developmental and Reproductive Toxicology*. 95, 379-385 (2012).

Wang B., Tanaka K., Ninomiya Y., Maruyama K., Varès G., Eguchi-Kasai K., Neno M.: Relieved residual damage in the hematopoietic system of mice rescued by radiation-induced adaptive response (Yonezawa Effect). *Journal of Radiation Research*. 54, 45-51 (2013).

Wang B., Tanaka K., Ninomiya Y., Maruyama K., Varès G., Shang Y., Eguchi-Kasai K., Neno M.: X-ray-induced radioresistance against high-LET radiations from accelerated neon-ion beams in mice. In *Current Topics in Ionizing Radiation Research* (M. Neno Ed.), pp. 199-214, Intech-Open Access Publisher, Rijeka (Croatia), 2012.

Wang B., Tanaka K., Shang Y., Nakajima T., Neno M., Hayata I.: Reduction in malformations by low dose pre-irradiation: The early beginning of adaptive response story in fetal mice. *NIRS International Symposium on the Effects of Low Dose Radiation*. Chiba, Japan, February 2008.

Varès G., Wang B., Murakami M., Tanaka K., Kakimoto A., Eguchi-Kasai K., Neno M.: Adaptive response and high-LET radiation. The 7th Japan-France Workshop on Radiobiology. Chiba, Japan, October 2008.

Bing Wang, Kaoru Tanaka, Yasuharu Ninomiya, Kouichi Maruyama, Guillaume Varès, Yi Shang, Kazuko Fujita, Yasuko Morimoto, Tetsuo Nakajima, Kiyomi Eguchi-Kasai, Mitsuru Neno. X-ray-induced radioresistance against high-LET radiations from accelerated neon-ion beams in mice. The 14th International Congress of Radiation Research. Warsaw, Poland, August 28-September 1, 2011.

Guillaume Varès, Bing Wang, Mitsuru Neno. On the molecular mechanisms for radioadaptive responses. The 14th International Congress of Radiation Research. Warsaw, Poland, August 28-September 1, 2011.

## Acknowledgments

This work was partially supported both by the Grant-in-Aid for Scientific Research (C), 21510060, 2009-2011 from the Ministry of Education, Culture, Sports, and Science Culture, and two Research Project Grants (19B-258 and 22B-258) with Heavy Ions at NIRS-HIMAC. The authors thank all the staff of Experiment Support Group, Accelerator Division, Accelerator Engineering Corporation, for performing heavy-ion irradiations. The technical assistance and administrative support of Ms. Mikiko Nakajima, Ms. Nobuko Tsutsumi, Ms. Yasuko Morimoto, Ms. Satoko Idohara, Ms. Ichika Kishi, Ms. Kaori Tateno, Mr. Tatsuo Hayao, Ms. Maki Asano and Ms. Hiromi Arai, is gratefully acknowledged. The authors also thank Dr. Yi Shang for her critical and constructive comments on the experimental design, performance, data analysis and manuscript preparation. We are also deeply grateful to Dr. Toshiaki Kokubo and Dr. Takeshi Murakami for their continual support that made this study possible. Our great appreciation is especially given to Dr. Takeo Ohnishi, professor emeritus, Naara Medical University School of Medicine, for his constructive comments and continual encouragement throughout the study.

## 粒子線による発がんリスク

島田義也、西村まゆみ、今岡達彦、尚奕、鶴岡千鶴、山田裕、臺野和広、柿沼志津子  
放射線医学総合研究所 発達期被ばく影響研究プログラム

### Abstract

With a successful improvement of cancer survival rate of patients with radiotherapy, the risk of developing second cancer becomes a matter of concern. Heavy ion therapy is a powerful tool for cancer therapy, but the potential risk of late effects has not been adequately studied. We have investigated for a decade the carcinogenic effect of carbon ions using animal models. We here introduce the outline of our research program on the effect of carbon ions on lifespan shortening and carcinogenesis. The results so far demonstrate that the relative biological effectiveness (RBE) is dependent on type of organ, LET of radiation, dose range and age at exposure.

### はじめに

放射線治療を成功に導くポイントは、腫瘍部への線量を集中することと、正常組織への線量を下げることによる合併症の回避である。その点で、強度変調放射線治療 (IMRT) は優れており、その利用が広まりつつある。しかし、IMRT は、正常組織への局所被ばく線量は減少するものの、被ばくする体積は多くなってしまう。その結果、急性の障害は減少することが期待されるが、将来的な晩期合併症、特に2次がん発生リスクが増加することが懸念されている[1]。特に小児の場合、正常組織の発がん感受性が高く、また、体が小さいので散乱線の被ばく範囲も広くなること、さらに治療後も長い期間生存するため、生涯の発がんリスクが高まると予想される。粒子線治療は、ブラッグピークの特性から、腫瘍の手前の正常組織の線量は腫瘍部位に比べて少なく、また、腫瘍の後ろにある組織の線量は極めて少なくなるので線量集中性はさらに優れている。近年、粒子線による小児がん治療について関心が高まり、適用が拡大しつつある。問題は、電離密度が大きいことから、被ばくした正常組織の2次がんリスクが高まる可能性があることである。ところが、粒子線のリスクに関する疫学的な情報はほとんどないため、培養細胞や動物を用いた実験によって、粒子線の発がんリスクが評価されているが、情報は充分とは言えない[2, 3]。そこで、我々は、発がんモデル動物を用いて、体系的に炭素線の発がん影響を定量的に明らかにすることを始めた。特に、分割の影響と被ばく時年齢の影響について注目している。

### HIMAC による発がんリスク

我々が主に用いた発がんモデルは、毒性実験に標準的に使用されている B6C3F1 マウス (♂♀) と乳がん研究に広く使われている SD ラットである。エンドポイントは、寿命短縮と発がんリスク

である。B6C3F1 マウスは、肝臓、肺の腫瘍が自然発生し、♀では、放射線によって脳下垂体腫瘍や卵巣腫瘍が誘発される。放射線は、正常組織が被ばくする入射ビームである 290 MeV/u の炭素線モノビーム (LET は  $13\text{keV}/\mu\text{m}$ ) である。対照線源として  $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$  線を用いた。線量は、0.2Gy から 2Gy である。人の乳児から成熟した大人に対応する、生後 1 から 15 週齢に照射を行い、B6C3F1 は生涯、SD ラットは生後 90 週まで観察した。

まず、先に結果が出た炭素線による乳がんリスクについて説明する。炭素線も  $\gamma$  線も、被ばく時の週齢が高いほど、乳がんは早く発症した。90 週までのハザード比を指標とした線量効果関係は、 $\gamma$  線も炭素線も概ね直線モデルが適合した。 $\gamma$  線による乳がんリスクは、被ばく時の年齢 (週齢) には影響されなかった。炭素線による乳がんリスクは、被ばく時年齢 (週齢) が高くなるほど大きくなった。炭素線の RBE は、7 週齢の成体期の照射では 2.8 と計算された。実際の照射では、細胞致死効果が 3 倍であることを考慮し X 線の治療に比べ照射線量は 3 分の 1 になり、さらに、腫瘍前後の正常組織の線量も X 線に比べ小さくなるので、同じプロトコルであれば発がんリスクは小さくなると予想される。また、週齢が若いほど RBE の値が小さくなったので、若年層への治療による 2 次がんリスクはさらに小さくなることが考えられる[4]。一方、LET が高くなる SOBP の炭素線 (LET, 40-90  $\text{keV}/\mu\text{m}$ ) の 7 週齢での照射の場合は、線量効果が上に凸のカーブとなり、RBE は 1Gy では 1.9、0.05Gy では 8.6 となり、線量域によって RBE は変動した[5]。

B6C3F1 マウスの結果は、現在、解析中である。寿命短縮の指標にした場合、 $13\text{keV}/\mu\text{m}$  の炭素線の RBE は、1 週齢、7 週齢ともに 2 を超えないという結果を得ている[6]。

また、治療においては、肺がんや肝がんの治療

を除き、分割照射による反復被ばくとなる。高 LET 放射線は、低 LET 放射線と異なり、分割照射によって発がんリスクが高まるという報告がある。そこで、入射の 13keV/ $\mu\text{m}$  の炭素線の分割照射の実験を始めた。2016 年には、臓器依存性などのデータを公表する予定である。

## 考察

我々の結果は、13keV/ $\mu\text{m}$  炭素線の発がんリスクの RBE は、1-3 であることを示した。近年、高 LET 粒子線による発がんリスクに関する報告が増えてきているが、粒子線治療の 2 次がんリスクを求めることに留まらず、宇宙飛行士の発がんリスクを推定するためにも利用される。

いくつかの動物実験から報告された RBE を表 1 にまとめた。まず、RBE は LET に依存する。ハーダー腺腫瘍の発生率を指標にした実験では LET の異なる多くの種類の粒子線 (He, C, Ne, Ar, Fe, Nb, La) が使われ、LET が高くなるほど RBE が高まることが示された[7,8]。同様にサルコーマ (肉腫) 発生においても、20keV/ $\mu\text{m}$  に比べ、60keV/ $\mu\text{m}$  の RBE が大きいと報告されている[3]。次に、RBE は線量域に依存している。一般に高 LET 放射線の発がんリスクの線量効果は上に凸になり、 $\gamma$  線などの低 LET 放射線は下に凸となるので、低線領域ほど、RBE が高くなる[4,9]。さらに、臓器によっても RBE は異なる。骨髄性白血病発生において Fe の RBE は 1 であるが、肝がんは 50 である[10]。炭素線によるサルコーマ発

生の RBE は、2.2 である[3]。我々は、Tリンパ腫の RBE が小さいことを確認している[6]。造血系腫瘍や非上皮系の腫瘍の RBE は小さいのかもしれない。被ばく時年齢によっても RBE は変わる。乳がんにおいて、幼若期の RBE は小さいことを示した[4]。

以上、粒子線の RBE は、種々の要因によって影響を受ける。さらに、治療は、分割照射で行われるので、照射のプロトコルによっても変わる可能性がある。低 LET 放射線の場合は、分割照射の間に DNA 損傷が修復されるので、正常組織の発がんリスクは低減する。Fe による乳がん発生においては、分割照射は 1 回の照射に比べ発がんリスクを減少させるが、ハーダー腺腫瘍の場合は、増加させる[11]。炭素線によるサルコーマ誘発では、分割照射の影響は観察されない[3]。HIMAC 治療において、分割照射による種々の臓器の発がんリスクを求めることにより、将来的な 2 次がんリスクも考慮した、より安全なプロトコル作りが可能となる。

## 将来展望

重粒子線の治療の高度化や、宇宙への有人飛行の成功のためにも、粒子線による発がんリスクの正しい評価が必要である。それに加えて、粒子線被ばくによる発がんリスクを下げる方策も重要である。活性酸素種をスカベンジする目的で開発された amifostine、そしてセレンや N-acetyl-L-cysteine は、放射線による遺伝的不安

【表1】粒子線のRBE(発がん)

Strain	Tumor site	Radiation	Energy (MeV/u)	LET (keV/um)	Dose (Gy)	RBE	Ref
SD	Mammary gland	C (SOBP)	290	40-90	0.05	8.6	5
		C (SOBP)	290	40-90	1	1.9	
SD		C	290	13	0-2	2.8	4
SD		Fe	1 x 10 <sup>3</sup>	155	0.05-0.16	<10	11
CBA	Liver	Fe	1 x 10 <sup>3</sup>	155	0-0.4	50	10
	AML	Fe	1 x 10 <sup>3</sup>	155	0-1	1	
B6CF1	Harderian gland	He	228	n.i.	0.05 - 7	5	8
		C	400	n.i.		12	
		Ne	425	n.i.		18	
		Ar	570	650		27	
		Fe	600	190		27	
B6CF1	Harderian gland	He	228	1.6	0.2 - 3	2.3	7
		Fe	600	193		40	
		Fe	350	253		20	
C3H/He	Sarcoma	C	135, 290	14-100	20-60	2.2	3
SD	Skin	Ar	640	125	0.75	50	9
		Ar	640	125	9	2.5	

n.i.: not indicated



定性を抑制することが報告され、がん予防にも期待できる[12]。ビタミンAは、皮膚の線維腫を抑制する。我々は、最近、カロリー制限が、肝がんや肺がんのリスクを低減することを報告し、カロリー制限と同様のシグナル伝達系を動かすレスベラトロールによるがん抑制実験も始めている[13]。重粒子線治療後の2次がんリスクの低減にもカロリー制限は有効だと推測される。

## まとめ

重粒子線は、放射線治療の新しいツールとして適用が徐々に広がっている。重粒子線の治療成績がよくなり長期生存者が増えることを考えると、晩期合併症を少なくする事が重要となる。粒子線をより安全に利用するためにも、発がんリスクを正しく評価し、そのリスクを低減する研究を進めていくことが重要である。

## References

- [1] Hall EJ. Intensity-modulated radiation therapy, protons, and the risk of second cancers. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 65(1):1-7, 2006
- [2] Bettega D, Calzolari P, Hessel P, Stucchi CG, Weyrather WK. Neoplastic transformation induced by carbon ions. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 73(3):861-8, 2009
- [3] Ando K, Koike S, Oohira C, Ogiu T, Yatagai F. Tumor induction in mice locally irradiated with carbon ions: a retrospective analysis. *J Radiat Res.* 46(2):185-90, 2005
- [4] Imaoka T, Nishimura M, Daino K, Kokubo T, Doi K, Izuka D, Nishimura Y, Okutani T, Takabatake M, Kakinuma S, Shimada Y. Influence of age on the relative biological effectiveness of carbon ion radiation for induction of rat mammary carcinoma. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 85(4):1134-40, 2013
- [5] Imaoka T, Nishimura M, Kakinuma S, Hatano Y, Ohmachi Y, Yoshinaga S, Kawano A, Maekawa A, Shimada Y. High relative biologic effectiveness of carbon ion radiation on induction of rat mammary carcinoma and its lack of H-ras and Tp53 mutations. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 69(1):194-203, 2007
- [6] Kakinuma S, Shang Y, Amasaki Y, Tsuruoka C, Hirano S, Sawai T, Nishimura M, Shimada Y. Age dependence of susceptibility to life span shortening by carbon ions in mice. In preparation, 2014
- [7] Alpen EL, Powers-Risius P, Curtis SB, DeGuzman R. Tumorigenic potential of high-Z, high-LET charged-particle radiations. *Radiat Res.* 136(3):382-91, 1993
- [8] Fry RJ, Powers-Risius P, Alpen EL, Ainsworth EJ. High-LET radiation carcinogenesis. *Radiat Res* 8:S188-95, 1985
- [9] Burns FJ, Hosselet S, Jin Y, Dudas G, Garte SJ. Progression and multiple events in radiation carcinogenesis of rat skin. *J Radiat Res.* 32 Suppl 2:202-16, 1991
- [10] Weil MM, Bedford JS, Bielefeldt-Ohmann

H, Ray FA, Genik PC, Ehrhart EJ, Fallgren CM, Hailu F, Battaglia CL, Charles B, Callan MA, Ullrich RL. Incidence of acute myeloid leukemia and hepatocellular carcinoma in mice irradiated with 1 GeV/nucleon (56)Fe ions. *Radiat Res.* 172(2):213-9, 2009

- [11] Dicello JF, Christian A, Cucinotta FA, Gridley DS, Kathirithamby R, Mann J, Markham AR, Moyers MF, Novak GR, Piantadosi S, Ricart-Arbona R, Simonson DM, Strandberg JD, Vazquez M, Williams JR, Zhang Y, Zhou H, Huso D. In vivo mammary tumourigenesis in the Sprague-Dawley rat and microdosimetric correlates. *Phys Med Biol.* 49(16):3817-30, 2004
- [12] Dziegielewski J, Goetz W, Baulch JE. Heavy ions, radioprotectors and genomic instability: implications for human space exploration. *Radiat Environ Biophys.* 49(3):303-16, 2010
- [13] Shang Y, Kakinuma S, Yamauchi K, Morioka T, Kokubo T, Tani S, Takabatake T, Kataoka Y, Shimada Y. Cancer prevention by adult-onset calorie restriction after infant exposure to ionizing radiation in B6C3F1 male mice. *Int J Cancer.* 135(5):1038-47, 2014

# HIMAC を利用した植物育種研究

Plant Breeding with HIMAC ion beams

岡村正愛

キリン（株）基盤技術研究所

## Abstract

Ion beams have much higher linear energy transfer and relative biological effectiveness than those of gamma rays. In this study, biological effects of ion beams at NIRS-HIMAC on the growth, survival and mutagenesis in several plant species were examined. Median growth dose (MGD), a dose of irradiation that reduces the growth of irradiated plants by half, for 290 MeV/u carbon, 400 MeV/u neon and 500 MeV/u argon ion beams was investigated in carnation, *Gypsophyla*, petunia etc, which enabled us to develop “MGD- LET” map in plants. By exploiting the map, we could efficiently obtain mutants in horticultural plants. In carnation, wider mutation spectrum was obtained in plants irradiated with ion beams than gamma rays. Decorative type *Gypsophyla* emerged from single type cultivar irradiated with carbon ion beams. Carnation ‘G14G’ irradiated with neon ion beams produced various flower color mutants such as glittering pink ‘G14P’, and wine red ‘G14R’ that is caused by null mutation in *flavonoid 3'-hydroxylase* allele. New carnation varieties have been developed by ion beam breeding and commercialized in both Europe and Japan.

Tissue-dependent somaclonal mutation frequencies and spectra were strikingly enhanced by ion beam irradiation in chrysanthemum. Three Gy of argon ion beams was regarded as an appropriate dose for irradiation because the resulting color mutants maintained characteristics suitable for commercial use even with high mutation frequencies. Analysis of 7,258 individuals from three separate experiments revealed that 1) somaclones from petal tissue had a higher mutation frequency than leaf somaclones; 2) the effect of tissue source on the frequency of flower color mutations was significantly enhanced when combined with ion-beam irradiation in that the mutation frequency of ion-beam irradiated petal clones was 6.47% ( $\sigma = 0.77$ ), whereas that of ion-beam irradiated leaf clones was 3.89% ( $\sigma = 0.52$ ); and 3) the spectrum of carotenoid color mutations was remarkably increased by ion-beam irradiation. These results suggest that intentional or directed induction of flower color mutants with practical value is possible by combining tissue source selection with ion beam irradiation.

Another trial to add useful characteristics to a chrysanthemum cultivar Jimba, one of the most economically important cultivar in the world, successfully produced promising mutants with fewer floral buds. Their field test is continued. Mutation generation with HIMAC ion beams will continue contributing to the development of plant science and plant breeding.

## はじめに

イオンビームは通過した領域に大きなエネルギーが集中するため、ガンマ線やX線等の低LET（線エネルギー付与）放射線に比べ非常に少ない照射量で突然変異を誘導することができ、null変異を得やすいことが *Arabidopsis* 等モデル植物で明らかにされてきた (Tanaka et al. 2010)。これは植物育種にとり 2 つの重要な利点をもたらす。すなわち不要な変異を併発しない変異体を得られること、および復帰突然変異 (back mutation) のない安定した変異体を得られることである。また突然変異はランダムに起こると言われ、究極の目標は変異の方向性の制御であるとされる。つまり突然変異により特定の形質を狙ってその形質が変化し、また改良された変異個体を高頻度で得ることができれば画期的な技術となる。

がん治療に高い成績をあげ、ヒトや動物などの生物研究に実績を持つ HIMAC イオンビームは高エネルギーの豊富なイオン種を持ち、100 mm 前後という高い組織透過性を有する。そのため植物育種において、材料の自由度が拡大し新品種育成期間の大幅短縮や新たな変異体の獲得が期待で

きる。ここでは植物での育種研究と実用化また突然変異育種の夢である変異の方向性制御について HIMAC イオンビームの利用例を中心に原子力機構 TIARA で得られた結果も交え筆者の研究事例を紹介する。

## イオンビーム育種技術の確立

園芸植物はその役割を増し世界的に大きな市場をもつ。しかし主要花卉の優良品種はほぼ 10 年に 1 つしか生まれない。キクやカーネーションでは交雑により優良品種を育成し、突然変異により赤、桃、白などその品種の色揃えをすることで経済性を向上させる。しかし、自然突然変異はまれにしか起こらず、花色のシリーズ化には長年を要す。それゆえ短期間に優良品種の特性を保持した花色変異を得る技術、また形質をさらに改良する突然変異育種法の開発が望まれている。イオンビームは突然変異育種の新たな変異原として期待されていたが、TIARA のイオンビームは組織透過性が 2 mm と浅く実用化の制限要因となっていた。筆者は、カーネーションの葉の表層から 1 mm 内の深さの組織から多数の不定芽を誘導する

培養系を開発し、植物における汎用性の高いイオンビーム育種技術の確立に成功した (Okamura et al. 2003)。

生産性・耐病性・花持ち性に優れるカーネーション優良品種「ビタル」(チェリー花色)を材料に、試験管培養植物体に TIARA の 220 MeV 炭素イオンビームを照射し、葉からの不定芽再生により得られた植物体を開花検定した。花の色と形を指標に突然変異の誘発頻度と変異の幅を調査した。対照としてガンマ線照射試験を実施した。その結果、照射したカーネーション培養片からの不定芽再生率が半減する線量はガンマ線で 60 Gy であるのに対し炭素イオンでは 15 Gy であり、炭素イオンはガンマ線に比べて生物効果が 4 倍高いことが示された。また、桃色、赤色の花色変異体を得た線量を比べると、イオンビームでは細胞あたり約 20 トラックであったのに対し、ガンマ線では 60,000 スプール必要であった。またガンマ線では赤、桃、濃桃、条斑の変異が出現したが、イオンビームではこれらに加え、サーモン、黄、桃白複色、丸弁、ナデシコ花卉などの幅広い花色花形変異体を得られた (Fig. 1)。これらの結果はイオンビームが低い線量で突然変異を誘導し、副次的な遺伝子変異が少ない一部の形質のみが変化した新品種を効率よく作出できることを示唆している。



Fig. 1  
Flower mutants of carnation cultivar Vital (top left) obtained with ion beam irradiation.

#### HIMAC を利用した植物育種基盤研究

放射線医学総合研究所 HIMAC イオンビームを利用し植物育種を行う上での基盤となる知見の獲得と照射条件の確立のため、まず HIMAC の 290 MeV/u 炭素 (C)、400 MeV/u ネオン (Ne)、500 MeV/u アルゴン (Ar) の 3 種イオンビームについて、その生物影響を調査した。つまりカーネーション、リモネウム、カスミソウ、ペチュニア

の試験管培養植物体にイオンビームを照射し、その脇芽を植え継ぎ生育してきた植物体の生重量で生育量を測定し、非照射個体の生育を 10 とした場合の比を生育度とした。カーネーションにおける生育度は Ar と Ne の場合 5 Gy の照射で落ち始め、生育度が半減する照射量は Ar で 15 Gy、Ne では 20 Gy 前後であった。また C の場合 10 Gy 以上の照射で緩やかに生育度が落ち、30 Gy で生育度が半減した (Fig. 2, 3)。

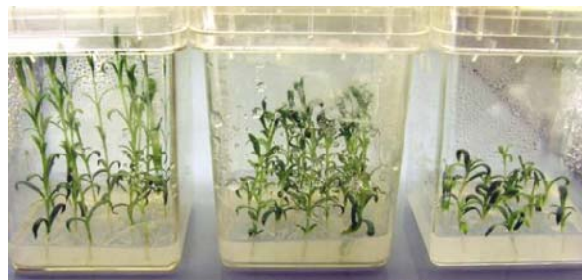


Fig. 2  
Growth of carnation plants *in vitro* without irradiation (left), irradiated with argon ion beams of 10 Gy (center), and of 30 Gy (right) from HIMAC.

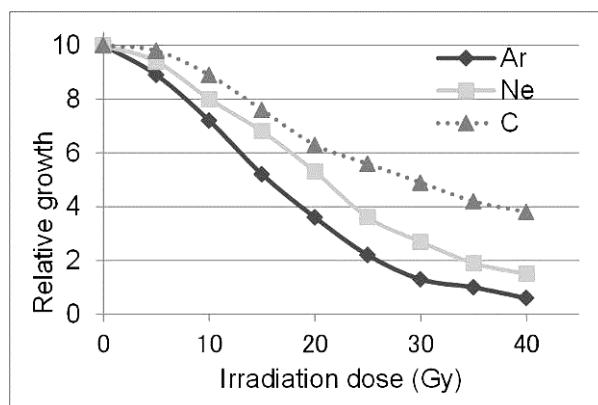


Fig. 3  
Relative growth of carnation cv. Beam Cherry irradiated with Ar, Ne or C ion beams of 5 to 40 Gy.

TIARA の炭素イオンビーム照射試験で、優良形質を保持しつつ幅広い花色花形変異体を得られたのは 10 Gy 照射区であり、これは照射材料からの不定芽再生率が落ち始め、かつ再分化当代の植物個体の生育がほぼ半減する線量でもあった。そこで、材料とした 4 種の植物各々について 2 から 3 品種を用い、NIRS-HIMAC の各種イオンビームで照射当代植物の草丈・生育を指標として線量反応曲線をもとめ、そこから生育度が半減する照射量を決定した。

品種により差が見られたが、カーネーションの場合に生育の半減する線量 (Median growth dose: MGD) は、Ar では 12~15 Gy、Ne ではおよそ 20 Gy、C では 25~30 Gy であった。他の 3 種の植物と合わせた結果、各イオン種の LET と生育量が半減する照射量 (MGD) の関係を図示できた (Fig. 4)。

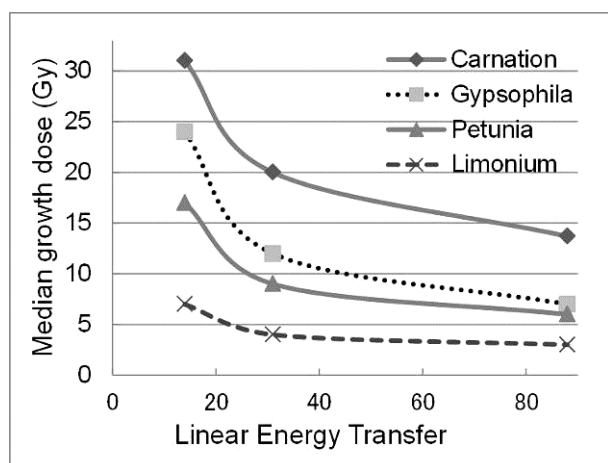


Fig. 4  
Relation map between MGD\* and LET (linear energy transfer) obtained from dose response curves of carnation, *Gypsophila*, petunia and *Limonium* irradiated with Ar, Ne or C ion beams from HIMAC.  
\* Median growth dose is a dose of irradiation that reduces the growth of irradiated plants by half.

この図は様々な植物種を材料に実用品種を育成する上での羅針盤となる。すなわち、材料として新たな植物種でガンマ線での線量反応など既知のデータを比較検討することで、育種目標の難易度に応じて 290 MeV/u 炭素、400 MeV/u ネオン、500 MeV/u アルゴン、さらに 500 MeV/u 鉄イオンでの大よその照射量を決める際に有用である。

以上の HIMAC イオンビーム照射個体の開花検定では TIARA イオンビーム照射で得られなかったカーネーション品種「ビタル」の白花色、品種「コマチ」の赤覆輪などが出現した (Fig. 5)。また 290 MeV/u 炭素イオンビームを 20 Gy 照射したカスミソウ 1200 個体の検定では、花径や花数の変異、八重化変異などの形態変化や、低温期に栽培した時の開花早生化などの農業上重要な突然変異体を得た (Fig. 6)。



Fig. 5  
Breeding of carnation cultivar Red Komachi (right) from cv. Komachi (left) irradiated with carbon ion beams from HIMAC.

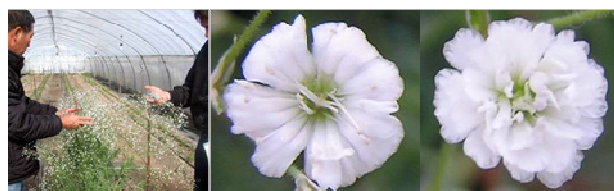


Fig. 6  
Breeding of decorative type *Gypsophyla elegans* (right) from single type cultivar (left and center) irradiated with carbon ion beams from HIMAC.

#### HIMAC イオンビーム変異体の解析

イオンビームにより誘導される突然変異に関する DNA レベルでの特徴については、これまでシロイヌナズナなどのモデル植物では報告されていた (Tanaka et al. 2010)。しかし実用花卉の研究例は極少ない。そこで特徴的な紫花色を持つカーネーション系統 'G14G' で変異体の育成と遺伝子の解析を試みた。

発根済みの挿し穂に Ne イオンビームを 15~20 Gy 照射した。そのまま圃場に展開し、伸びてきたシュートを 3 回きり戻し、8 本の花芽を誘導することで、照射からわずか半年強という短期間で開花検定に至る手法を確立した。この方法により 'G14G' から、明桃、輝き桃 'G14P'、ワインレッド 'G14R'、輝赤などの種々な花色をもつ変異体を得た (Fig. 7)。

色素の種類及び含量を調査した結果。'G14G' の色素はシアニジン 3-glucoside が  $22.1 \pm 0.8$  (シアニジン 3, 5-dG 等量) であるのに対し、'G14R' の色素はペラルゴニジン 3-glucoside が  $11.4 \pm 0.6$  (ペラルゴニジン 3,5-dG 等量) であり、'G14P' は  $0.3 \pm 0.0$  (シアニジン 3, 5-dG 等量) という極少量のシアニジン 3-glucoside を含んでいた。

また輝き桃やワインレッドの花弁を顕微鏡観察するとカーネーションで花弁の輝きを生むとされる液胞内アントシアニン凝集 (Okamura et al. 2013) が起こっていた。

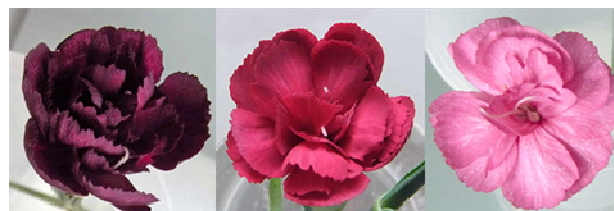


Fig. 7  
Breeding of glittering carnation 'G14R' (wine red, center) and 'G14P' (glittering pink, right) from 'G14P' (dark purple, left) irradiated with neon ion beams from HIMAC.



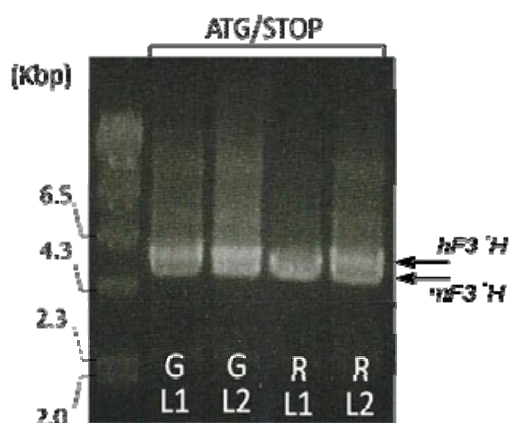


Fig. 8  
Analysis of flavonoid 3'-hydroxylase (*F3'H*) gene alleles in layer 1 (L1) and 2 (L2) of 'G14G' and 'G14R': L1 of 'G14R' has *mF3'H* (mutated) only resulting in loss of *F3'H* enzyme, whereas others have both *hF3'H* (healthy) and *mF3'H*.

紫花色をもつ 'G14G' のイオンビーム照射により得たワインレッド色の花色変異系統 'G14R' では、アントシアニンのアグリコンがシアニジンからペラルゴニジンへと変化していたことから 'G14R' はシアニジン合成に必須である flavonoid 3'-hydroxylase (*F3'H*) 遺伝子がイオンビーム照射によって変異していると予想された。

そこで両者の *F3'H* ゲノム構造を検討した。その結果、'G14G' は、正常に *F3'H* を合成できる *hF3'H* と、途中で終止コドンが挿入されることで正常な *F3'H* タンパク質を生産できない *mF3'H* をもつこと、また変異系統 'G14R' は、後者の *mF3'H* 配列のみをもち、この変異は 'G14R' の第 1 層 (L1) でのみ起こっていることが分かった (Fig. 8)。また解析によりこの変異体では *hF3'H* 遺伝子全体または一部で欠失が起きていることが示唆された。これはモデル植物以外でイオンビーム変異の特徴である DNA 欠失による null 変異の誘導を示す重要な事例となった (山本ら 2013)。

### 突然変異の方向性の制御

キクは世界で最大の生産量をもつ重要花卉であり、その花色や花形の変化は大きな経済効果をもたらす。高次倍数性栄養繁殖植物のため突然変異育種に適した植物である。突然変異誘発の効率 *efficiency* は植物の受ける生育不良・不稔などのダメージ量に対する特定の遺伝的変異の割合で示される。実用品種の育成では不要な変異を併発せずに目的とする突然変異を得ることが常に課題であり、効率が鍵となる。HIMAC イオンビームを利用し、生育の指標である草丈へのダメージを最小限に留めつつ花色突然変異を意図して得る方法を検討した (Okamura et al. 2014)。

キク栽培品種「ヨミステリー」(紫花色) の葉

と花を材料に Ar イオンビームを 1, 2, 3, 4, または 5 Gy 照射したイオンビーム区、無照射であること以外は同じ処理を行ったソマクローン区の各々で植物体を得た。開花検定により得た花色変異体について、突然変異体の草丈と花色変異体の出現率を調査した。その結果、全ての照射量 (Gy) で草丈には有意差が無かったのに対し、花組織にイオンビームを照射した区画 (花イオンビーム区) のほうが葉イオンビーム区よりも有意に高い花色突然変異出現率を示した (Fig. 9)。

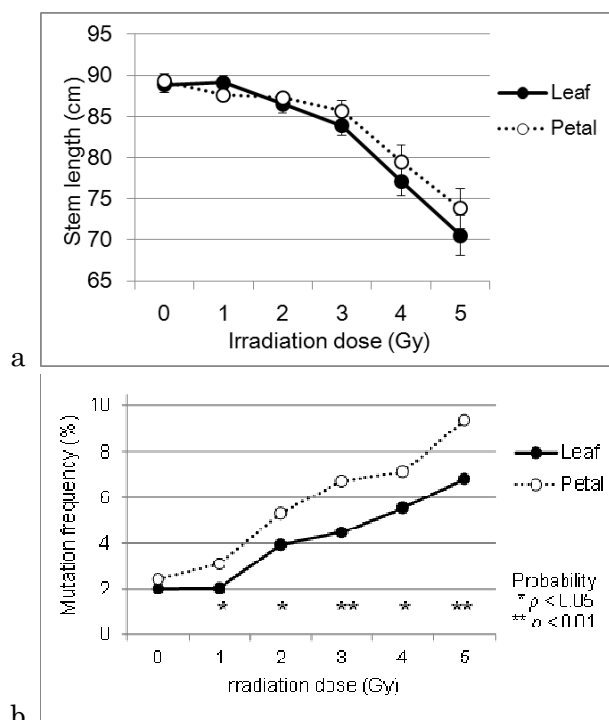


Fig. 9  
Stem length (a) and mutation frequency (b) in plants regenerated from leaves or petals of chrysanthemum cv. YoMystery irradiated with argon ion beams of 5, 4, 3, 2 or 1 Gy (ion-beam irradiated clones) and 0 Gy (non-irradiated somaclones). Error bars in (a) and (b) represent the standard errors.

キクのような栄養繁殖性植物では突然変異体を直接実用に供することが多い。本試験では実用性に優れるキクの花色突然変異体の開発を意図しているため、以降の試験では、Ar イオンビーム照射量として、突然変異体の草丈平均が原品種の 90% となり、かつ葉で 4.47%、花で 6.71% という突然変異頻度を示す 3 Gy を用いた。

葉及び花組織からイオンビームクローン、ソマクローンを各々約 700 個体得て、開花試験することを 3 回実施し、様々な花色変異体を得た (Fig. 10)。イオンビーム照射の場合、花組織での変異出現率は 6.47% ( $\sigma = 0.77$ ) となり、葉の 3.89% ( $\sigma = 0.52$ ) を大きく上回った。さらにソマクローン変異では light purple 及び dark purple 変異がほとんどであったのに対し、イオンビーム照射



では花と葉のいずれを材料とした場合でも **dark purple, light purple, brown, red, yellow** の 5 種類の変異全てが出現した。加えてイオンビーム処理区でのみ **light brown, pearl** などの花色変異が出現した。この結果は、花組織特異的な花色変異出現頻度と変異の幅はイオンビーム照射により顕著に高まることを示している。



Fig. 10  
Flower color mutants obtained from somaclones and ion-beam irradiated clones. Wild type cv. YoMystery (YM, purple), dark purple mutant (DP), and light purple mutant (LP), brown mutant (BR), red mutant (RE), and yellow mutant (YE).

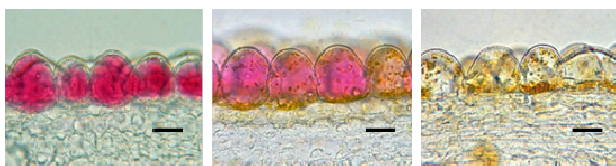


Fig. 11  
Micrographs of transverse cross-sections of petal epidermal cells: (left to right); wild type cv. YoMystery containing anthocyanin in the vacuoles, the brown mutant containing both anthocyanins and carotenoids, and the yellow mutant containing carotenoids in the plastids. Scale bars indicate 30  $\mu$ m.

花の色素は主にアントシアニン系色素とカロテノイド系色素とからなる。アントシアニンはフラボノイドの一種で水溶性であり液胞に蓄積され赤、紫から青の色を呈する。カロテノイドは黄、オレンジ、赤色を呈し、脂溶性でプラスチドに蓄積する。得られた突然変異体の花卉をミクロトームで細断し、花卉細胞を観察した (Fig. 11)。その結果、原品種「ヨミステリー」と **dark purple, light purple** の花色はアントシアニン色素によること、**yellow** の花色はカロテノイドによりものであるとわかった。また **brown** と **red** の変異体はシアニック系の赤紫の液胞と細胞質内の黄色のプラスチドを併せ持っていた。キク花卉では黄色が白色に対して優性であり、「白」花卉では黄色素が合成された後に分解され白を呈する。カロテノイド系突然変異体はこの分解遺伝子の変異と推定された。

次に材料組織別にアントシアニン系変異体とカロテノイド系変異体の出現の様子を比較した (Fig. 12)。ソマクローン及びイオンビームクローンの両方で、アントシアニン系変異の出現頻度は葉組織に比べ花組織由来クローンで有意に高かった。またカロテノイド系の変異体に関しても花組織由来クローンの方が葉由来よりも高頻度に出現する傾向があり、ソマクローンでは花組織のみで **yellow** 変異が得られ、かつイオンビーム区でも葉組織由来よりも花由来の方が有意に高い頻度で **red** 変異が得られた。

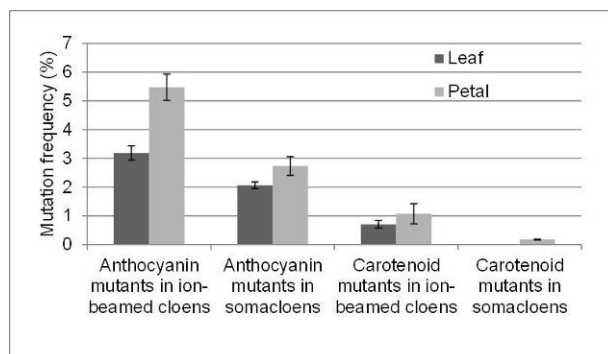


Fig. 12  
A comparison of mutation frequencies in anthocyanin and carotenoid flower colors between leaf-derived (black bars) and petal-derived (gray bars) clones. Anthocyanin mutants comprise light purple and dark purple mutants, and carotenoid mutants brown, red and yellow. Error bars represent the standard errors.

本試験で得られた結果について、そのメカニズムは今後の研究を待たねばならない。葉組織では紫や黄色と言った色素の合成は行なわれていないのに対し、花では色素の合成系が発現している。これが花組織を材料とした場合のほうが葉を材料とする場合よりも花色の変異が得られやすい、つまり花色変異に関する放射線感受性が高い原因である可能性がある。凝集度の低下したクロマチンでは DNA 二重鎖切断が起こりやすいことが示されている。花組織由来のクローンで花色変異が多いことに関して同様なメカニズムが作用している可能性がある。

本試験により 1) 花組織由来ソマクローンは葉ソマクローンよりも花色変異出現頻度が高いこと、2) イオンビーム照射を併用することで花組織由来クローンでの花色変異出現頻度と幅が著しく高まること、3) 材料組織として花を選択しイオンビームを併用する手法により実用的な草丈と変異花色の安定性をもつ変異体が高頻度で得られること、が示された。突然変異の誘発制御は従来考えられていた以上に実現できる可能性があることを明確に示された (Okamura et al. 2014)。

## まとめと展望

本研究では放射線医学研 HIMAC イオンビームが植物に与える影響についてその特性の把握、カーネーションほか各種植物で得られる変異の種類と頻度、イオンビーム変異体の解析、キクでの突然変異の方向性を制御する試みを行い、植物の突然変異育種の課題に対し有用な知見を得た。原子力機構の事例を含め筆者のカーネーション品種シリーズの経済効果は 60 億円を超えている。これらはイオンビーム育種が、1) 変異の誘発率が高い、そのため少ない試料・狭い施設圃場で優良個体選抜ができる、2) 変異のスペクトルが広い、そのため新奇形質をもつ変異体が獲得できる、3) 変異する箇所は少ない、そのため他の不必要な変異を伴わないワンポイント改良ができる、という重要な特長を示す(岡村 2014)。

ここで紹介した以外にも、世界最大の生産量をもつキク品種「神馬」からの優良品種育成試験が継続され、リンドウなどほかの園芸植物への応用が展開され(佐々木ら 2014)、モデル植物を素材にストレス耐性などの機構解明が進んでいる(栗林ら 2013)。HIMAC イオンビームは医学、生物学に加え、植物育種や環境の保全においても研究、開発、実用産業化の各分野で今後の展開と社会への貢献が大いに期待される。

## References

- [1] Okamura M, Yasuno N, Ohtsuka M, Tanaka A, Shikazono N, Hase Y (2003) Wide variety of flower-color and -shape mutants regenerated from leaf cultures irradiated with ion beams. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 206:574–578. doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00835-8
- [2] Okamura M., Nakayama M., Umemoto N., Cano E.A., Hase Y., Nishizaki Y., Sasaki N., Ozeki Y. (2013) Crossbreeding of a metallic color carnation and diversification of the peculiar coloration by ion-beam irradiation. *Euphytica* 191: 45–56. doi: 10.1007/s10681-012-0859-x
- [3] Okamura M., Hase Y., Furusawa Y., Tanaka A. (2014) Tissue-dependent somaclonal mutation frequencies and spectra enhanced by ion beam irradiation in chrysanthemum. *Euphytica* doi: 10.1007/s10681-014-1220-3
- [4] Tanaka A, Shikazono N, Hase Y (2010) Studies on biological effects of ion beams on lethality, molecular nature of mutation, mutation rate, and spectrum of mutation phenotype for mutation breeding in higher plants. *J Radiat Res* 51:223–233. doi:10.1269/jrr.09143
- [5] 岡村 (2014) イオンビームによる植物の育種, 美濃部侑三 (編) アグリバイオビジネス—その魅力と技術動向, 34-52、シーエムシー出版.
- [6] 山本, 岡村, 西崎, 古澤, 小関, 佐々木 (2013) イオンビーム照射カーネーション花色変異株の *F3'H* 遺伝子の解析, 園芸学研究 12 巻別冊 1, P. 181
- [7] 栗林, 渡辺, 下山, 岡村, 古澤, 高橋 (2013) 重イオンビームによる栄養ストレス耐性植物の作出と原因遺伝子の同定, 2012 Annual Report of the Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC
- [8] 佐々木, 千葉, 樋口, 山田, 岡村, 星, 古澤, 下川, 西原 (2014) 重イオンビームを用いたリンドウ育種効率化のための条件検討, イオンビーム育種研究会 10 年の歩み, 18-19

## II. 共同利用研究－物理・工学

Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC

Physics and Engineering



重粒子線を用いたコヒーレント共鳴励起の研究  
Resonant coherent excitation using heavy ion beam

東 俊行

理化学研究所 東原子分子物理研究室

**Abstract**

For decades, our group has been involved in the selective excitation of heavy atomic ions in the x-ray energy domain making use of a thin single crystal. The relativistic ions accelerated to  $\sim 70\%$  of the speed of light using HIMAC are guided in a silicon single crystal, and excited by a temporally oscillating strong Coulomb field arising from the periodical atomic arrangement. When one of the frequencies corresponds to the transition energy of the ion, the oscillating field has a chance to resonantly excite the internal atomic states of the ion. This process is called resonant coherent excitation (RCE). Starting from the resonance by a periodic field due to the arrays of the atomic strings in the crystal (2D-RCE) in the 1999, we developed the resonance technique by the periodical field by an array of the atomic planes (3D-RCE) under the condition in 2006. Making use of the 3D-RCE, we have made significant progresses in the selective excitation of heavy atomic ions accompanying one or a few electrons. Control of magnetic substate population i.e., ion alignment has been achieved by selecting polarization of the periodic field. The use of double resonance technique offered a variety of population controls and probing schemes in three-level configurations, that enabled observation of quantum optical phenomena even in the x-ray energy domain, as well as double excitation to make two K-shell holes in an heavy ion and sequential excitation to higher levels.

**1. はじめに**

「あっという間の 20 年」これが本原稿を書くにあたって、改めて昔の手帳やログノートを見返しての感慨である。「1993 年 12 月 16 日理研(和光)LINAC 棟において、放医研・高田さんから、是非原子分子衝突実験を HIMAC においてと熱い勧誘を受けた」と古いログノートに記録してあった文面を読みながら、その当日の様子をありありと思い出すことができた。コミッショニング中の HIMAC の現場の様子を撮影したホームビデオ動画を使っの説明であった。実際に共同利用研究が始まったのは 1995 年夏であり、原子分子実験は、当初固体フォイル標的を使った核融合研の俵組(P14)、結晶標的を使う東大駒場の小牧組(P32)の 2 テーマで始まった。前者の実験では、俵博之(核融合研)氏、戸沼正雄氏(理研)、島邦博(筑波大)氏、松尾崇氏(神奈川工大)といった方々と、まず Ge 結晶 X 線検出器を標的そばにおいてどんなスペクトルが見えるかを調べるという実験から始まった。HIMAC のような高エネルギー重イオンでは数 100 keV までの連続 X 線が放出される。最初は「連続状態への放射性電子捕獲」、要するに入射ビーム系座標で考えた時に、標的電子が入射核によって軌道を曲げられる際に放出される制動放射を観測することに焦点を絞った。検出器をおいただけで結果がスタート、順調なスタートであった。P14 実験はその後二次電子スペクトルの実験を行って使命を終え、松尾たちは、中エネルギーのビームラインを使ったイオン・分子標的衝突実験へと移行した。

結晶を標的とする P32 実験は、まずチャネリングを観測する必要があった。高速イオンが、単結晶中を結晶軸あるいは結晶面にほぼ平行に入射

した場合、通過イオンは、原子列や原子面の原子と衝突することなく、その隙間を進む。これは一般に「チャネリング現象」と呼ばれており、数 100 keV から MeV のイオンを取り扱うイオンビーム工学の分野では、結晶や表面構造の研究に広く応用されている。特に原子面内を進む場合は、面チャネリングと呼ばれ、この原子面の間にできた隙間を何回も蛇行しながら結晶内を進む。しかしこれを 100MeV/u の重イオンで行う挑戦は、極めて野心的であり相当の困難を伴うと当初危惧されていた。数 100MeV/u までエネルギーが上がると、臨界角がとて小くなる。例えば、290MeV/u  $C^{6+}$  を Si 結晶の $\langle 110 \rangle$ 軸に対してチャネリングを起こさせればその臨界角は 0.453mrad すなわち  $0.026^\circ$  である。したがってその詳細を観測するには  $0.001^\circ$  程度の角度分解能が必要になる。さて、(1)そんな平行な入射ビームはどうやって作るのか、一方で(2)結晶の角度を走査するのにそんなに精度の良いゴニオメータは存在するどうやって用意するのかと頭を悩ませた。(2)に関しては幸いにもスタートアップの共同利用実験の予算や科研費などに恵まれて、構造全体を大きくすることで精度を出す大型ゴニオメータを作ることなどでなんとか達成できる目処がついた。(1)の平行ビームは、上流のビーム輸送の磁場条件を最適化し、標的の手前では一切ビームを絞る磁石を使わず、わずか 1 mm 径のコリメータ(といっても厚さ 50 mm もの鉛厚板に穴をあけたもの)を使用した。コリメータを通過する際に穴内壁をかすめるだけでエネルギー損失や電荷交換、さらに弾性散乱をしてしまい欲しいビーム強度は実質的にゼロになってしまうのではないかと、さらに核反応によって生成された陽子や中性子が同時に飛んできて

処理しきれなくなるのではなど様々な心配をした。しかしながら、結果的に  $0.04\text{mrad}=0.023^\circ$  すなわち  $10\text{m}$  飛んでも  $0.4\text{mm}$  しか広がらないという重イオンビームとしては素晴らしい平行ビーム性能を達成することができた。

HIMAC のビームを用いて当初から挑戦したかったのは、それ以前から実験を続けていたコヒーレント共鳴励起 (resonant coherent excitation, RCE、オコロコフ効果とも呼ばれる) である。高速イオンが結晶という周期的配列を通過する際、イオンは原子列を構成するひとつひとつの原子の傍を周期的に通過する。これは、通過イオンの静止系から眺めると、イオンが時間とともに変化する振動電場を感じることに相当する。つまり、イオンが通常の「光」を照射されている状況に対応するため、電場エネルギーがイオンの内部自由度の準位差に一致すれば、イオンの準位は共鳴的に励起され得る。つまり実光子という周期的電磁場に対して、一種の疑似光子という周期的電磁場による励起と見なしうる。この原理は 1965 年代にロシアのオコロコフによって理論予想された[2]が、存在が検証されたのが 1970 年代後半[3]であり、その後もよりはっきりした観測に向けて様々な努力が続けられていた。当時我々は東大原子核研究所の SF サイクロトロンを利用して、少数の電子を基底状態に持つ重イオンを共鳴励起して、軌道電子を  $1s$  から主量子数  $n=2$  の準位に共鳴励起するといった内殻電子励起を目指して、数 MeV/u 程度の重イオンを使ったチャネリング実験を行ってきた実績があった。しかしながら、なかなか明瞭な共鳴ピークを観測できずに苦しんでいた。この重イオンの内殻電子遷移という keV オーダーの X 線領域の遷移を起こそうとすると、結晶格子定数という Å オーダーの周期間隔を考慮すると、例えば東大核研のビームエネルギーでは結晶周期の 2 次 3 次といった高フーリエ成分でしか励起できなかったのに対して、HIMAC の核子あたり数 100MeV のイオン速度では、基本周波数の周期場が使えるため、共鳴強度の増大が期待できるであろうとも期待した。加えて、電子・イオン衝突の場合、高速になると衝突断面積が大きく減少する。そのために高速イオンは結晶中を素通りしやすくなり、コヒーレント共鳴励起のみの現象を観測しやすくなる。従来、入射イオンのエネルギーが数 MeV 程度であったときには、通過イオンが一度共鳴励起を経てイオン化しても、大きな確率で再び電子捕獲するため、通過イオンの電荷分布観測において、共鳴現象がぼけてしまう欠点があった。このやっかいな問題が相対論的エネルギー領域では大きく抑制されると熱く期待を寄せていた。

## 2. フェイズ I: 2D-RCE

さて HIMAC でのチャネリングの実験もトントン

拍子に進み、すぐに本実験に移行した。上述のように衝突断面積も下がるので、ある程度分厚い標的が使えるであろうということで、21 ミクロン厚のシリコン結晶を薄膜結晶標的として選んだ。現在得られる最も質の高い結晶が得られるのはシリコン結晶であり、この選択が成功の重要な要因であった。高い結晶性を持った標的がこの実験には本質的である。結晶配列の乱れがチャネリングに影響するだけでなく、直接的に励起準位の占有率の時間発展におけるコヒーレンスの低下に繋

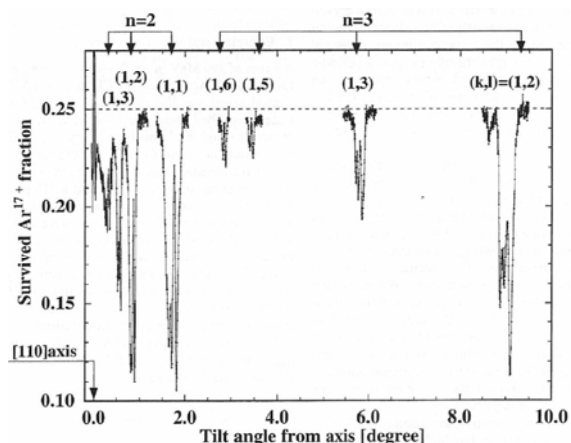


図 1 390MeV/u H-like  $\text{Ar}^{17+}$  が 21 ミクロン厚 Si 結晶を通過する際に、(220)面内で[110]軸からイオン入射角度を走査した場合の  $\text{Ar}^{17+}$  生き残り割合。基底準位から  $n=2$  や  $n=3$  準位に様々な 2D-RCE 共鳴条件下で励起されている様子が見える[5]。

がるからである。

最初、我々は 390 MeV/u の水素様  $\text{Ar}^{17+}$  (つまり 1 個の束縛電子を残し残りの 17 個の電子を剥ぎとった状態) 重イオンビームを用いて  $1s$  基底状態を主量子数  $n=2$  の準位へ電子励起した。さて共鳴条件を作り出すのに最も自然な発想は、イオンの入射エネルギーを変化させるというものである。しかし、シンクロトロン加速器ではイオンエネルギーを短時間に変化させるのは実用上困難である。我々は、入射エネルギーを 390MeV/u に固定し、(220)面内で入射ビームに対する結晶の角度を振り、面チャネリング下での 1 次の共鳴励起を観測した。これは結晶軸に並ぶ原子を周期的に通過するのではなく、周期的原子列を次々に横切る際に共鳴励起を起こすことに相当する (以下 2 次元共鳴励起 2D-RCE と呼ぶ)。このようにビームエネルギーを変化させずに結晶を回転させることで共鳴条件付近を走査することは、実験上の制約から逃れるだけではなく、高精度分光のためには本質的役割を果たしている。入射ビームエネルギーと結晶の格子定数が常に一定であることが重要であり結晶回折格子による光子の波長測定の際にブラッグ角を走査することと対比される。

励起準位にある軌道電子は、結晶内の電子と衝



突してイオン化する確率が、基底状態にあるときより大きい。従って共鳴条件下で電離が促進され結晶通過後の束縛電子を伴うイオンの生き残り割合が減少する。結晶通過後のイオンの電荷分布を観測すると共鳴条件下では、より多価の出射イオンの割合が増大する。我々が実際に結晶を細かい角度ステップで回転させ出射イオンの荷電分布をみると、いきなり数多くの鋭い共鳴構造が現れた。それまでは幅広のぼんやりしたピークしか見ていなかったのに、いきなりほとんどの  $\text{Ar}^{17+}$  イオンが全部共鳴条件下では電子損失してしまうという強烈な印象を残すスペクトルが得られた。しかもエネルギー分解能が向上したおかげで、励起準位に対する結晶電場の影響（DC シュタルク効果）やスピン・軌道( $l \cdot s$ )相互作用による効果などの情報が初めて高精度で得られるようになった[4][5]。このスペクトルが得られた直後の放医研・年次報告会で、当時の平尾放医研所長が、「東大核研で見ていた実験結果からはホントにそんな現象があるのかなと思っていたが、本当だったのですね」という趣旨の感想をいただき、とても嬉しかったのを記憶している。さらに、その結果を国際会議でポスター発表したところ、米国のオークリッジ国立研(ORNL)の Sheldon Datz 氏、すなわち初めてこの現象の実験的検証に成功した大御所が我々の結果に感動し、彼が我々の HIMAC で実験に参加するということまでに発展した。

ところで、水素様イオンの  $n=2$  準位は DC シュタルク効果によって元々  $2s$ - $2p_{1/2}$ ,  $2p_{3/2}$  の 2 準位が 4 準位に分裂する。しかもイオンの結晶内の位置によって異なる結晶電場強度に依存して、 $2s$ ,  $2p$  成分が複雑に混じり合う。この波動関数の様相を引き出せるような実験的な手法はないであろうか。Datz の持っていたアイデアは励起準位から放出される X 線の角度異方性を見てやることである。つまり双極子遷移で放出される脱励起 X 線の放出角度が励起状態のアライメントを反映することを利用するのである。彼は ORNL で苦労していた実験を HIMAC で実現しようと実験に参加したわけである。極めて残念なことに、彼はその後まもなくして病没したが、観測は最終的に He 様(束縛電子を 2 個伴う)  $\text{Fe}^{25+}$  イオンを使って見事に観測された[6]。

また、シリコン結晶を母材とする透過型表面障壁型シリコン検出器 surface barrier detector(SSD)を結晶試料として採用する実験も行った[7]。これにより、通過イオンが結晶に付与するエネルギーを同時に直接測定できるという素晴らしいアイデアである。付与エネルギーは、イオンが結晶中の原子面間チャンネルをどのように通過するかを敏感に反映するため、イオンの軌道が推定可能になる。これから、結晶内での位置すなわち結晶内電場に依存した電場に依存した DC シュタルク効果

を観測した。具体的に実験としては、出射イオンの電荷分布とそのときのイオンの付与エネルギーの同時測定を行った。1 電子系イオンに対して、スピン・軌道( $l \cdot s$ )相互作用と DC シュタルク効果による摂動が同程度の大きさである場合のエネルギー準位の分裂という問題を実験的に観測して見せたということにもなる。もちろんこの観測は、H や He 等の軽い原子に対して、数  $\text{kV/cm}$  の電場を印加するという場合は容易である。しかし、重イオンの場合、マクロに数  $\text{GV/cm}$  という電場を与えることは実質上不可能である。これを結晶電場という強電場内の様々な場所を通過する重イオンを使って、縦軸をチャンネル中心からの距離というイオンの位置に対応した電場強度として一気に実験的に示したのが「みそ」である。

ここまで RCE 現象の存在の確認という段階を経てその中身まで詳しく探ることができるようになったところまでの経緯を説明した。これら結果はたいへん大変好評で様々な国内外の学会で発表する機会を得た。ただ、当時放射線物理の大御所であった井口道生氏(米国アルゴンヌ国立研)には「Where are you going?」、たぶんその意味するところ、「特異的な条件で起こる特異的な現象を観測して楽しんでいるのでは」という辛口の批評もいただいた。次の章では、この現象は実は普遍的であり様々な展開が可能であったという様相を紹介する。

### 3. フェイズ II: 3D-RCE

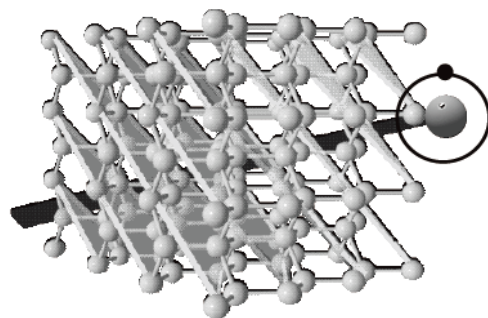


図 2 3D-RCE の模式図

2006 年、標的結晶として 1 ミクロン厚の極薄膜 Si 結晶を採用した。これはデンマーク・オーフス大の Chevalier 氏がイオンインプランテーションとエッチングを組合せて作成に成功した試料である。現在でも世界で最も薄い良質の Si 結晶を作成できるのは彼である。そもそもこのような薄い結晶を採用したのは、より厚い結晶では面チャンネル条件下でイオンが原子面間を蛇行軌道して進んでいたのが、薄い結晶では 1-2 回の原子面での反射になるため、まるでイオンビームが結晶表面に斜め入射した時に鏡面反射するときのようにと、イオン出射角から軌道が特定できることを

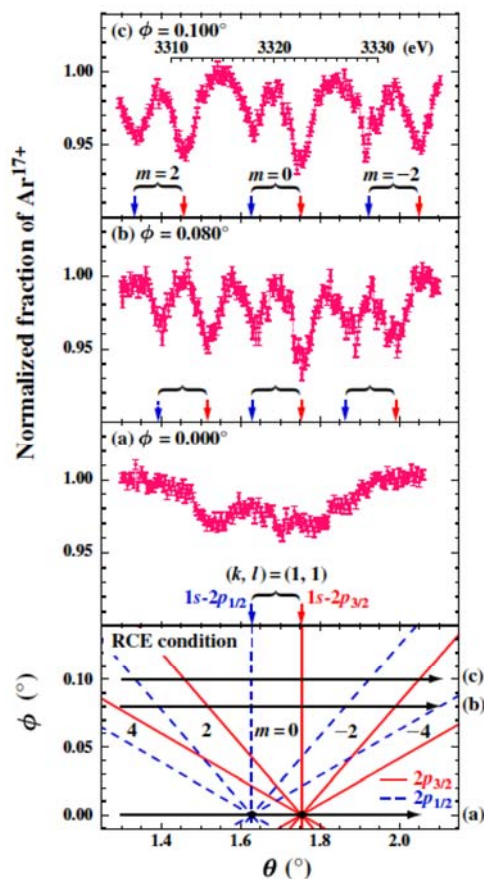


図3 391MeV/u H-like  $\text{Ar}^{17+}$  が1ミクロン厚Si結晶を通過する際に、(220)面内( $\phi=0$ )から離れていった場合( $\phi=0.08, \phi=0.1$ )に[110]軸からイオン入射角度を走査した場合の $\text{Ar}^{17+}$ 生き残り割合。基底準位から $2p_{1/2}, 2p_{3/2}$ への3D-RCE条件下で励起する様子が見える[8]。

期待したためであった。ところが、面チャネリング条件以外でバックグラウンドを測定しようと結晶角度を振って測定していたとき、奇妙な現象を全く偶然に発見した。そもそもチャネリング条件以外のランダム条件下では標的はアモルファス構造として取り扱うことができるため、角度を少々振っても全く変化がない一定の信号強度がとれるはずであるのに、生き残りイオン割合もX線収量にもガタガタと構造が現れた。さまざまな変動要因を想定したが、測定を繰り返しても結果が再現された。

この正体は、実は非チャネリング条件下の3次元空間における原子面の周期的配列による3次元RCE(3D-RCE)に起因するピークであるということがしばらくして明らかになった。すなわち、周期的原子あるいは周期的原子列ではなく、周期的原子面によって引き起こされる共鳴励起である(以降この特定の原子面を指定するのにミラー指数を用いて $(k, l, m)$ で表記する。詳細は文献[8]参照)。今となって見れば、1次元や2次元があるなら3次元があるのは当然に聞こえるが、HIMACで得られるような高エネルギーイオンビームでなければ、そもそもランダム条件下では、電子損失や捕獲過程が起こり、共鳴現象が全く見え

ない。高エネルギーであっても、結晶が分厚いと電子損失のみでイオンからすべて束縛電子が剥がれてしまうので、まったく観測される可能性がない。ところが、結晶には原子面配列高次のものを含めると無数に存在する。従って、高エネルギーイオンを結晶に入射すると、共鳴条件を避けることが難しいほどに多くのイオン入射角度条件下で共鳴が起こる。我々のこの発見によって、RCE現象は非常に特異な現象であるという従来の観念を覆し、高エネルギーイオンと結晶の相互作用として極めて普遍的な現象であることが明らかになった。この3D-RCEの発見というブレイクスルーにより、その後の研究に画期的展開が起こった。なお、この成果をPhysical Review Letter(PRL)誌に投稿した際[8]、編集者の判断でレフリースにまわらず一発採択となったという嬉しい体験もした。

この3次元RCEの大きな特徴は、量子力学的には入射イオンが平面波で取り扱えるということである。やや奇異に聞こえるが、ぶつかる相手は原子面なので、イオン進行方向に対して横成分の位置依存性がない。これはとりも直さず平面波である。つまり2D-RCEではイオン軌道に依存して様々な電場を感じてDCシュタルク効果があったが、3D-RCEでは位置依存性のない振動電場しか感じない。とするとイオン軌道に応じて様々に変化する波動関数ではなく、励起に利用した原子面の配列方向に依存した特定の磁気副準位のみに励起できることになる。これは直線偏光レーザーを用いて励起する時と全く同様である。1点異なっているのは本当の光は進行方向に垂直方向に電場は偏光しているが、我々の場合はいかなる方向にも偏光するという点である。結晶面配列の方向を選択することにより偏光方向が選択され、これにより励起イオンがアライメントし、その様相が脱励起X線収量において大きな角度依存性となって現れることを定量的に観測した[9]。このように、RCEはX線領域の偏光方向が任意に選択制御可能である励起光源として捉えられる。

#### 4. フェイズ III: 2重共鳴

さて3D-RCEが当たり前であるという目で共鳴条件を探し始めると思っても見なかった事実気づいた。先述のように「共鳴を探すのが大変」のではなく、「共鳴を避けるのが大変」なのである。そうしているうちにさらに気づくのは、多くの共鳴条件下では、ふたつの異なった振動数、偏光方向の振動電場によって複数のRCEが同時に起こることである。ということは2重共鳴が起こるということである。



量子光学は2本のレーザー光を用いることで大きく進展した。例えばポンプ・プローブ法という手法は、標的の状態をポンプ光で変化させ、これをプローブ光を用いて観測する。これと同様のことが1個の結晶で可能となるというわけである。なお、3D-RCEの特徴の一つは共鳴条件を満足させる手法として、入射イオンエネルギーを一定に保ったままイオンビームと結晶との間の角度 $\theta$ ,  $\phi$ という2つの独立した自由度を走査することができることである。つまり波長可変の光源である。ちょうどこの頃実験グループに新しいメンバーも加わり、2重共鳴を利用する視点からの研究が大きく加速され始めた。これらの展開例を以下にふたつ紹介する。

### (1)ラムダ型2重共鳴によるドレスト原子生成

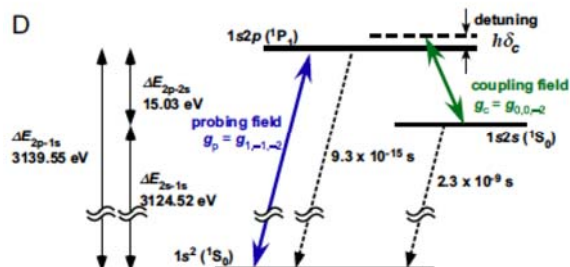


図4 416MeV/u He-like  $\text{Ar}^{16+}$  が1ミクロン厚Si結晶を通過する際に経験するラムダ型3D-RCE2重共鳴のエネルギー準位図 [10]。

我々は、図4のようなHe様(2個の束縛電子を伴う)416MeV/u  $\text{Ar}^{16+}$  の3D-RCEによる2重共鳴( $1s^2 \rightarrow 1s2p, 1s2p \rightarrow 1s2s$ )を観測した[10]。前者の遷移は $(k,l,m) = (1,-1,-2)$ の原子面配列を使ったX線領域の3.14keV、後者は $(k,l,m) = (0,0,-2)$ の原子面配列を使ったXUV光領域の15eVの遷移である。このような高エネルギーレーザー光を利用して選択的に電子準位を励起することは一般に困難だけでなく、ましてや2重共鳴を行うことは、現在XFEL装置が稼働し始めた現在も至難のであることをまず述べておきたい。さて、この物理過程はいくつかの立場から説明される。まずこの束縛電子の内ひとつだけを考え、例えば基底状態にある1s電子の内1個をまず、2p状態に選択的に励起し、更にこれを2sに移動させるという2段階操作を行ったと見ることができる。これにより禁制である1sから2sへの遷移が可能になる。実験では、イオンビームと結晶との間の2つの角度 $\theta$ ,  $\phi$ の内、2s-2p間の共鳴も起こる $\phi$ を設定し、さら角度 $\theta$ を走査して1s-2p間の共鳴プロファイルを観測したところ、図5に示すようにイオン生き残り割合で観測した共鳴プロファイルでは、1s-2p間遷移エネルギーの中心部が窪み、2本に分裂したピークが観測された。

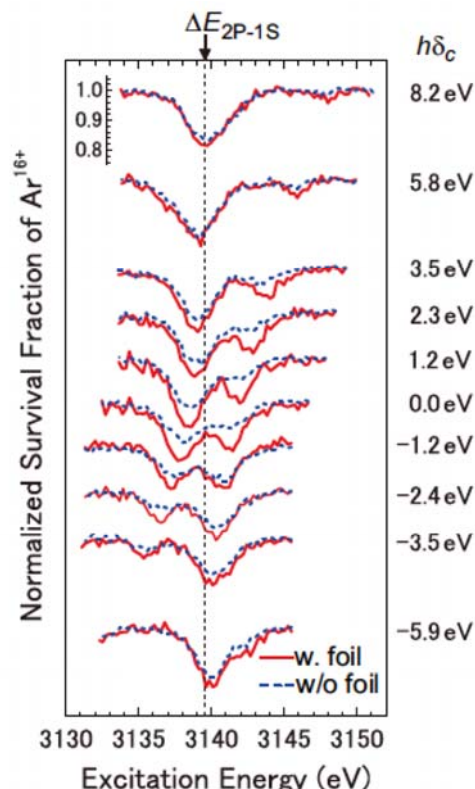


図5 416MeV/u He-like  $\text{Ar}^{16+}$  が1ミクロン厚Si結晶を通過する際に2s-2p間の振動電場に対する結晶角度を固定し、1s-2p間の振動電場に対する結晶角度を走査した場合の $\text{Ar}^{16+}$ 生き残り割合。ちょうど2s-2pの振動電場が加わった場合( $h\delta_c=0$ )、2重項が観測される[10]。

この現象は次のように理解される。利用した2s-2p間の遷移に対応する振動電場強度が強いために反対の2p $\rightarrow$ 2sのみならず2s $\rightarrow$ 2pの遷移も同時に起こり状態は2s, 2p準位間を行ったり来たりする。すなわち2sと2pが振動電場で強くコヒーレント結合されラビ振動が起こる。このような状況をイオンの波動関数に光子場(光子数nで表記)も加えてより正確に量子力学的に記述すると、<原子状態:2p, 光子場:n>と<原子状態:2s, 光子場:n+1>というふたつの状態の重ね合わせとなり、このふたつを足す(+)場合と引く場合(-)によってエネルギーが異なり2準位が存在することになる。このような例はレーザーを用いた光と孤立原子系の相互作用を議論する場合多く見られるような現象であり、2つのピークは「Autler-Townes 2重項」と呼ばれる。この分裂幅から直接2s-2p間振動電場のラビ振動数が決定でき、レーザー強度としては $1.8 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ に相当すると評価された。このような現象は2s, 2p原子準位がコヒーレントに結合している必要があり、媒質との相互作用が無視できない固体や凝縮相中ではなかなか観測されない。しかし、通常の原子衝突過程が抑制された高エネルギーイオンではこれが観測されるというわけである。なお注意すべきは、RCEはレーザー照射のように真の光子場ではなく、イ

オンの運動量のやりとりが結晶を介して行われており、この運動量移行が結晶格子によって一定の値のみが許される(この事情は結晶回折と同じである)、このために光子と同様の記述ができるということにほかならない。一般に強光子場中の原子の振舞いは光の衣をまとった原子という意味合いで「ドレスト原子」という描像で良く説明されるが、我々の観測した状況は、結晶振動電場によって形成された「ドレスト原子」という概念によって統一的に解釈される。以上の実験は脱励起 X 線の観測でも確認され様々な側面が調べられた。

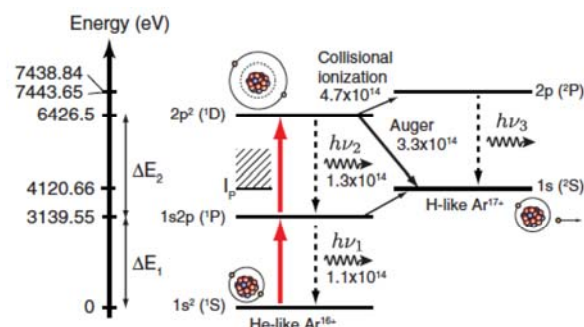


図 6 464MeV/u He-like Ar<sup>16+</sup> が 1 ミクロン厚 Si 結晶を通過する際に経験するラダー型 2 重共鳴のエネルギー準位図 [11]。

## (2)ラダー型 2 重共鳴による 2 重励起状態生成

次に He 様イオンの基底状態にある 2 つの束縛電子 1s<sup>2</sup> を逐次励起して K 殻を空にして 2 重励起状態を選択的に生成することに成功した例を紹介する[11]。内殻軌道が空で複数の電子が外殻軌道にあるような多電子励起状態のイオンは中空イオンと呼ばれる。このような状態は軌道電子間の相互作用が強く、それぞれの電子を独立に扱う独立粒子モデル(または平均場近似)を超えた量子多体系の取り扱いが必要となり、実験的にも選択的に中空イオンを生成することが容易でなく、その研究は原子物理学の重要課題のひとつである。

464MeV/u He 様 Ar<sup>16+</sup> イオンを対象とし、(k,l,m) = (1,-2,-3) の結晶面配列を使って、1s<sup>2</sup> → 1s2p 励起を起こし、さらに(k,l,m) = (1,-1,2) 配列によって 1s2p → 2p<sup>2</sup> 励起させた(図 6 参照)。1 電子励起状態に比べて、2 電子励起状態の方が結晶内原子との衝突によってイオン化しやすいことに加えて、Auger 電子を放出する自動電離過程が加わる。従って、2 電子励起状態生成の確かな証拠となるのは、共鳴励起条件下でこの Auger 電子を観測することである。そのために、通過イオンの荷電分布や X 線測定に加えて、2 次電子観測装置を組み込んだ。結晶標的下流数 10cm の位置に、入射イオンのイオン化に伴って生成する入射イオンとほぼ等速の 2 次電子に対する、SDD 型 Si 検出器を組み込んだ磁場型分光器を設置した。これによって磁場で 2 次電子の運動量、SSD でそのエネルギー

を測定した。非共鳴条件時には、基底状態入射イオンの電子損失に起因するコンボイ電子と呼ばれる成分のみが観測され、1 重励起によって励起状態イオンからのイオン化が増加してコンボイピークが増大する。これらは、イオンビームが 465.2 MeV/u で飛行しているので衝突によってイオンから剥がされた電子はビームとほぼ等速度で観測され、その運動量は 570 keV/c である。ところが図 7 に示すように、2 重共鳴時にはコンボイピークに加えて Auger 電子に相当するピークがコンボイ電子の両側に現れた。すなわち、Auger 電子は 2.3 keV のエネルギーを持ってイオンから放出されるため、前方と後方に放出された電子のみがビームから 0 度方向で観測され、その運動量はそれぞれ 645 keV/c, 495 keV/c となる。これは 2 電子励起状態の直接的証拠であるとともに、今まで不可能であった X 線領域で自在かつ選択的に多重励起状態を生成し、これを Auger 電子分光で研究可能であることを示した好例である。

## 5. まとめ

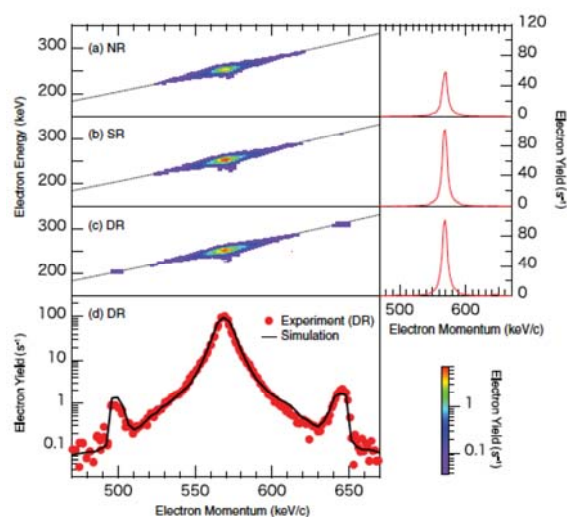


図 7 464MeV/u He-like Ar<sup>16+</sup> が 1 ミクロン厚 Si 結晶を通過する際にゼロ度方向へ出射された 2 次電子の運動量スペクトル(a) non-resonance (b) single resonance (c)(d) double resonance の場合を示す[11]。

HIMAC を利用した RCE 研究は、当初原理検証を終えれば数年で終了と予想していた。20 年間にわたって次々と本質的に新しいことが発見される実験テーマというのはそうそうないと考えるが、が、RCE は例外で実に魅力的な研究テーマであったため今に至っている。1965 年にロシアのオコロコフによって理論予想された当時[2]、彼は RCE がすべてのエネルギー領域をカバーする万能の分光法になるであろうと夢を描いたが、まさに 50 年を経てその一部が実現された。

結局 RCE 現象は結晶を介して高エネルギーイオンの運動(並進)エネルギーを内部自由度に移動させる非弾性散乱回折である。これをイオンの運

動エネルギーの変化で観測することは至難であるが、電子遷移の方はイオン化やX線放出という過程を通じて極めて高感度に測定できる。2012年のノーベル物理学賞は光と物質の相互作用の本質に迫ったとして、HarocheとWeinlandに与えられた。Weinlandの業績はイオントラップ中の調和振動子ポテンシャルに束縛された原子イオンに対して、その電子励起状態と運動(ここでは調和振動子で記述される振動)を結合したことであるが、我々は結晶を用いて原子イオンの電子励起状態と運動を結合することに成功した。しかもそのエネルギー領域として我々の場合はX線領域までをカバーしている。その後「光」を使わないX線領域のコヒーレントな3準位系量子状態の操作という新しい研究領域が切り開かれ、これを使って様々な量子系が選択的に生成できるようになった。上述の2つの例以外にも最近ラダー型2重共鳴によって高励起状態生成にも成功し、今後さらなる研究が期待される。

HIMACの果たした役割は極めて大きい。必要不可欠であった高エネルギーの重イオンを供給したことはむろんであるが、高品質の平行ビームを安定して出せる点が本質的である。加速器側に、4桁の精度で決められたエネルギーの平行ビームを、束縛電子の数も1個から3個までと実験のたびに次々と変えてゆくという我々の要求を満たせる加速器側のビーム供給体制は驚異的である。このようなタイプの実験は実験者側と加速器ビーム供給側側の綿密な共同作業によってのみ達成される。

最近HIMACで培われたこのRCE実験技術が、ドイツGSIにおいてより重いウラン原子を使った実験に適用され始めた。これは高分解能精密分光[12]として高電場中でのラムシフトを観測することを目的としている。ロシアで理論が作られ、米国で検証され、日本で開花した研究分野が、今度はヨーロッパでさらに展開されてゆく予定である。今後も驚くような発見がなされることを期待して本稿を終わりにしたい。

## 6. 謝辞

この研究の要である、平行度が高くビーム径が細い高エネルギー重イオンビームを、安定供給してくださった高田栄一、村上健両氏を初めとするHIMACのスタッフおよびAEC運転の方々に感謝の意を表す。立ち上げ段階のビーム開発では北川敦氏、取越正己氏にお世話になった。原子分子衝突実験立ち上げ時とともに研究を行った俵博之(核融合研)氏、松尾崇(神奈川工大)氏、戸沼正雄(理研)氏、島邦博(筑波大)氏に感謝する。共同研究者として、小牧研一郎(東大)、山崎泰規(理研)両氏、加えて、畠山温(東京農工大)氏、中井陽一(理研)氏、中野祐司(理研)氏、さらに実験当時博士課程

大学院生であった伊藤高臣氏((株)エリオニクス)、高林雄一(佐賀SOR)氏、近藤力(理研)氏に、修士大学院生であった真杉三郎((株)ニコン)氏、村中友子(スウェーデン在)氏に感謝する。

本研究は、放射線医学総合研究所共同研究プロジェクトであり、放医研の共同利用運営費とともに、科研費・基盤研究(S)、2回の基盤研究(A)、基盤研究(B)、さらに松尾財団、住友財団、三菱財団からの助成を受けて行われた。

## 主要参考文献

- [1] 和文総合解説: 中野祐司, 東俊行, "周期場を使ったX線領域の原子状態制御(解説)", 日本物理学会誌 65, 516 (2010); 東俊行, "結晶場による相対論的重イオンのコヒーレント共鳴励起の観測(解説)", 日本物理学会誌 56, 502 (2001).
- [2] V. V. Okorokov, Yad. Fiz. 2, 1009(1965). [Sov. J. Nucl. Phys. 2, 719(1966)].
- [3] S. Datz et.al., Phys. Rev. Lett. 40, 843(1978).
- [4] K. Komaki, T. Azuma, T. Ito, Y. Takabayashi, Y. Yamazaki, M. Sano, M. Torikoshi, A. Kitagawa, E. Takada, and T. Murakami, Nucl. Instrum. and Methods B 146, 19-28(1998).
- [5] T. Azuma, T. Ito, Y. Takabayashi, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami, Physica Scripta T92, 61(2001).
- [6] T. Azuma, Y. Takabayashi, C. Kondo, T. Muranaka, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami, Phys. Rev. Lett., 97, 145502(2006).
- [7] T. Azuma, T. Ito, K. Komaki, Y. Yamazaki, M. Sano, M. Torikoshi, A. Kitagawa, E. Takada, and T. Murakami, Phys. Rev. Lett., 83, 528-531(1999).
- [8] C. Kondo, S. Masugi, Y. Nakano, A. Hatakeyama, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, T. Murakami, and E. Takada, Phys. Rev. Lett., 97, 135503(2006).
- [9] Y. Nakano, C. Kondo, A. Hatakeyama, Y. Nakai, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami, Phys. Rev. Lett., 102, 085502(2009).
- [10] Y. Nakai, Y. Nakano, T. Azuma, A. Hatakeyama, C. Kondo, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami, Phys. Rev. Lett., 101, 113201(2008).
- [11] Y. Nakano, S. Suda, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki, E. Takada, T. Murakami, and T. Azuma, Phys. Rev. A 85, 020701(Rapid Comm.) (2012).
- [12] Y. Nakano, Y. Takano, T. Ikeda, Y. Kanai, S. Suda, T. Azuma, H. Bräuning, A. Bräuning-Demian, Th. Stöhlker, D. Dauvergne, Y. Yamazaki, Phys. Rev. A (Rapid Comm.) 87, 060501R(2013).



# 重粒子線による核反応断面積の研究

Experimental Studies of Nuclear Reaction Cross Sections using Heavy Ion Beams

福田 光順  
大阪大学 理学研究科

## Abstract

Reaction cross sections for  $^{12}\text{C}$  beams on Be, C, and Al targets were precisely and systematically measured in the energy range of 30–400 A MeV. The modified optical-limit approximation of the Glauber theory which includes the Fermi-motion and multiple-scattering effects was found to have an excellent reproducibility of the experimental data. Based on these precise data and the prescription to reproduce the data from the nucleon density distribution, we have developed techniques to explore the surface structure of the nucleus, such as the method to determine surface density distributions of nucleons, protons, and neutrons. These techniques will contribute to the investigations not only on the nuclear structure of exotic nuclei but also on the properties of nuclear matter or the astrophysical problems.

## 1. はじめに

核反応断面積 ( $\sigma_R$ ) という物理量は、原子核同士が核反応を起こす確率の総和とも言うべき量で、非弾性チャンネルの全断面積である。ある程度以上高いエネルギーでの原子核同士の衝突の場合、衝突パラメータが互いの核半径の和以下になると、核反応の確率は急激に1に飽和する。つまり、標的核と入射核に幾何学的なオーバーラップがあれば、核反応を起こすことになる。したがって、核反応を起こす確率、すなわち反応断面積を測定することにより、逆に標的核と入射核の核半径の和を知ることができるわけである。

しかし、実際の原子核では表面がそれほどはっきりしているわけではなく、ある厚さのぼやけ (diffuseness) がある。また、不安定核になると、ハローやスキンといった特殊な表面構造をとる場合がある。そこで、我々は核半径だけではなくこのような原子核の表面構造をも調べるために、核子当たり数10~数100 MeV のエネルギー領域での核反応断面積測定を放医研 HIMAC にて行ってきた。その結果、このエネルギー領域の核反応断面積は、原子核の核子密度分布を研究するための良い手段となってきた [1-2]。なぜなら、このエネルギー領域では核子-核子全断面積はエネルギーが下がるにつれて急激に増加するため、エ

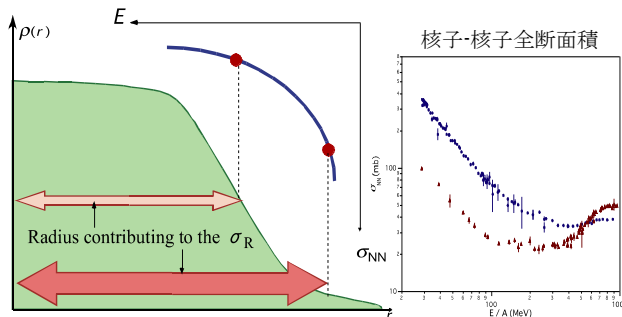


図1 左：原子核の密度の模式図とエネルギーによって反応領域が変化する様子。右：核子-核子全断面積。

ネルギーが低くなるほど、原子核表面付近の核子密度が薄い部分でも核反応が起こるようになってくる。このことを利用すると、反応断面積のエネルギー依存性を調べることで、核表面付近の密度分布を mapping できる訳である (図1)。このような方法で原子核の表面構造を調べたいというのが本研究のそもそもの動機である。本稿では、この動機に沿い HIMAC において展開した本研究 (H093) の2000年代初頭から現在までの約10年間の進展を振り返り、そこに現れた問題点とその解決、その方法による研究成果、さらに進捗しつつある発展的研究について述べていきたい。

## 2. $^{12}\text{C}$ ビームを用いた反応断面積測定

上に述べた目的を遂行するためには1つの大きな問題が存在していた。反応断面積と核子密度分布を結びつけるために、Glauber 理論の光学極限近似計算法 (OL近似) を用いるが、この計算法による計算値は、核子当たり数百 MeV 以下のエネルギー領域では実験値よりも系統的に10~20%程小さい値を与えることが、密度分布既知の原子核の反応断面積からわかってきたのである [3]。そこで我々は放医研 HIMAC において、今まで信頼

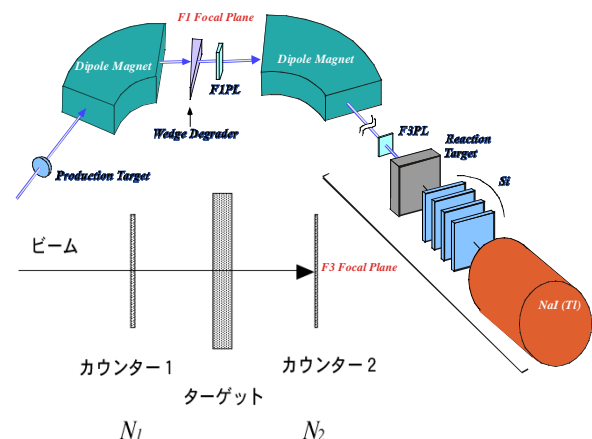


図2 反応断面積測定のための典型的なセットアップ。



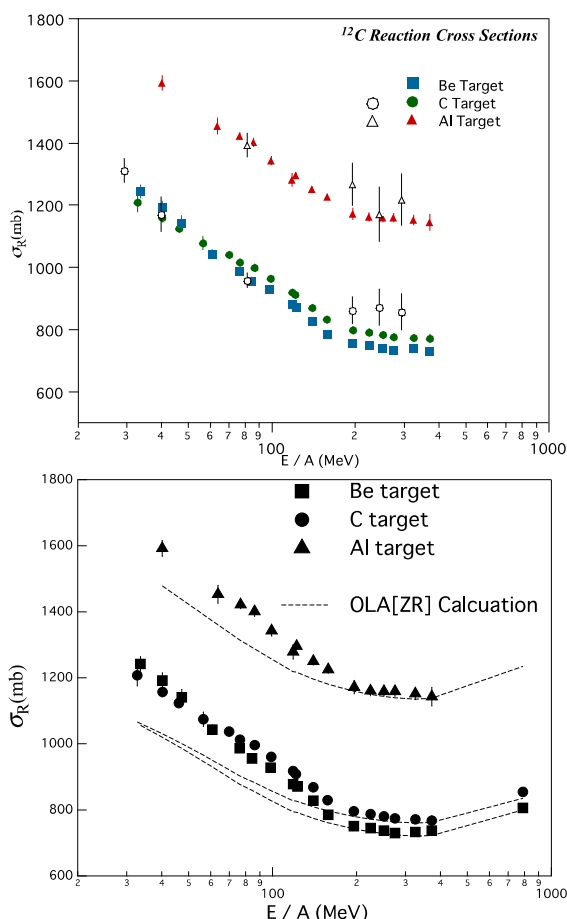


図3 上： $^{12}\text{C}$  ビームによる反応断面積実験値。濃い点が本研究での測定値。白抜きの点は他グループ。下：本研究の測定値とOL計算値(点線)の比較。

できる精度の高いデータが乏しかった安定核  $^{12}\text{C}$  ビームの  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$  に対する反応断面積を 30A-400A MeV のエネルギー範囲で、高精度かつ系統的に測定した。測定のための典型的なセットアップを図2に示す。反応断面積は透過法で測定され、入射粒子数を  $N_1$ 、標的通過後に無反応だった粒子数を  $N_2$  とすると、反応断面積  $\sigma_R$  は、

$$\sigma_R = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{N_1}{N_2} \right)$$

のように表される。測定結果を図3(上)に示す。濃い点が放医研における我々の測定値、白抜きの点は他のグループによる測定値である。この図からわかるように、放医研における我々のデータは格段に精度がよく、系統性にも優れている。

この実験値を、上述のOL近似計算値と比べると、図3(下)に示すように計算値は200A MeV以上では実験値をよく再現しているが、それ以下のエネルギーでは過小評価してしまう。この計算では、これら安定核の核子密度分布として、電子散乱から決定された電荷分布をもとにしたものを用いている。この低-中エネルギーにおける実験値と理論値の不一致を解決するために、我々は核内核子のFermi運動効果と多重散乱効果を計算

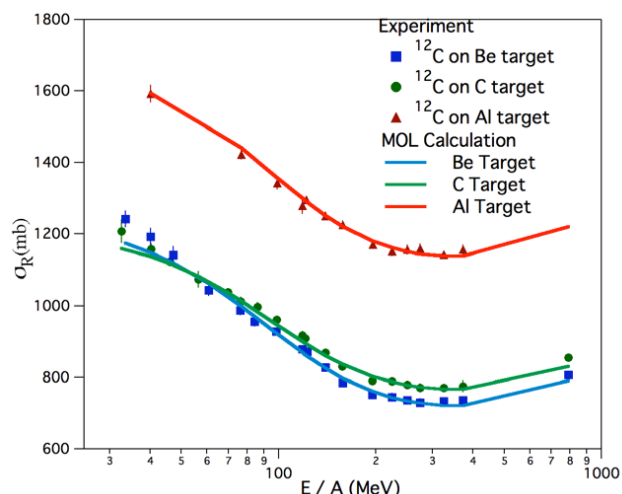


図4  $^{12}\text{C}$  ビームによる反応断面積実験値と改良光学極限近似計算(MOL; 実線)との比較。

に取り入れた。OL近似計算は、原子核同士の衝突を、原子核中の核子の自由散乱の重ね合わせと考え、1つでも核子対が散乱を起こしたときには核反応が起きたと考える計算方法である。衝突における原子核同士の相対速度が、核内核子のFermi運動を無視できるほど大きくない場合(つまり低-中エネルギー領域)、核子同士の相対速度をFermi運動を考慮して評価するというのが前者である。核子同士の衝突断面積が、エネルギーに対して線型に変化していたらこの効果はほとんど無いと考えられるが、これは図1に示すようにエネルギーが下がるほど急激に増加する。また後者の多重散乱効果は、原子核が核子の複合体であることの量子力学的な効果であり、OL近似は核子の1回目の散乱で核反応が起きたとしてしまうのに対して、2回目以降の散乱効果を考慮することにより散乱効果が若干打ち消され、核反応確率をやや小さくする効果となる。これら2つの効果を考慮した計算値(MOL計算)は、図4に示すように実験値を極めてよく再現することがわかる[4]。

### 3. 不安定核ビームによる $\sigma_R$ と核子密度分布

前項では、安定核について HIMAC で測定された高精度の  $\sigma_R$  データが、改良されたOL近似(MOL)計算で極めてよく再現されることを示した。つぎに、このことが不安定核、特にハロー構造を伴う場合など、特殊な核子密度分布を持つ核種に対しても通用するかどうかを試した。比較的よく研究されているハロー核  $^{11}\text{Be}$  (中性子ハロー)と  $^8\text{B}$  (陽子ハロー)について、HIMAC で精度の良い  $\sigma_R$  データを取り、その結果を  $^{12}\text{C}$  の場合と同様な MOL 近似計算と比較したものが図5である。ここで、これら不安定核の核子密度分布は分解反応断面積や電気四重極モーメントなど、別の物理量をよく再現する理論値を用いた。データ点数は少な

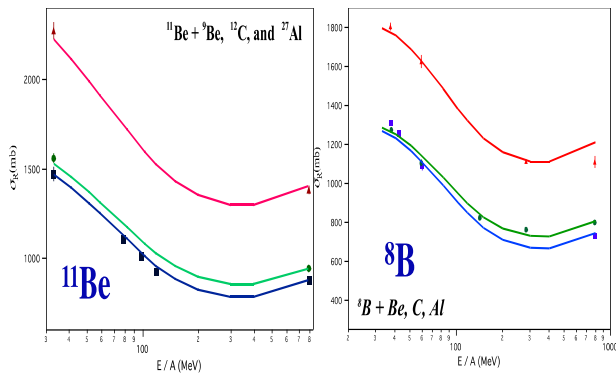


図5  $^{11}\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$  ビームによる反応断面積実験値と改良光学極限近似計算(MOL; 実線) との比較。

いが、やはり計算値は実験値を極めてよく再現している。このことから、通常の安定核とは違った特殊な核子密度分布に対しても、前述の Glauber 理論 MOL 近似計算は適用できるであろうと結論づけられた。

このように高い信頼性で核子密度分布と  $\sigma_R$  実験値が結びつけられるようになったため、つぎに、核子密度分布が未知の核種（主に不安定核）に対して、 $\sigma_R$  実験値から核子密度分布を導出することを試みた。まず、中性子スキンがあると考えられていた最も軽い核種  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$  について、HIMAC にて  $\sigma_R$  の高精度測定を行った。 $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$  の核子密度分布として自由パラメータを含むモデル関数を仮定し、それをを用いた MOL 近似計算を行い、計算結果を  $\sigma_R$  の実験データに最もよく

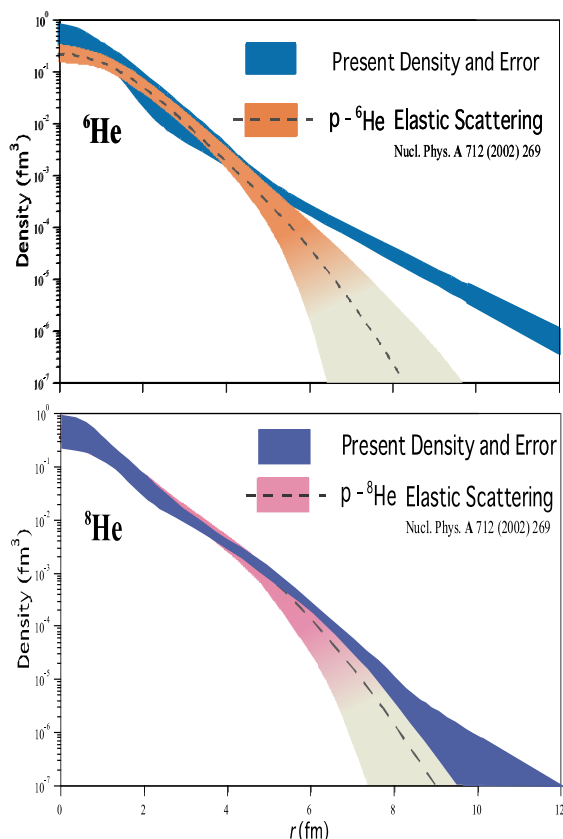


図6  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$  ビームの反応断面積から導出された核子密度分布と陽子弾性散乱による分布との比較。

近づけるように自由パラメータを変化させることでフィッティングを行った。その結果を図6に示す。この図では GSI における陽子弾性散乱実験から求められた密度分布 [5] と本研究のものを比較してある。特に  $^6\text{He}$  で本研究の核子密度分布に顕著に見られる特徴は、距離  $r$  が大きい領域での中性子ハロー様のテールである。陽子弾性散乱からは、それほど大きな  $r$  の領域の密度分布は決定できていない。つまり、本研究の方法は核子密度分布に対する、より高い感度を持っているということである。一方、 $^8\text{He}$  に関しては本研究でも有意なテールは見られなかった。 $^8\text{He}$  では、 $^6\text{He}$  より大きな価中性子結合エネルギーをもつことが原因しているか、または、統計量が若干少なかったことが影響している可能性もある [6]。

一方で陽子過剰核に関しても興味を持たれるが、我々は陽子ドリップライン核である  $^{17}\text{Ne}$  について、理研リングサイクロトロンにおいて  $\sigma_R$  の測定を行った。その結果に対し、前述の方法でフィッティングを行い、導出された核子密度分布を図7に示す。この場合の核子密度分布に見られるテールは、最外殻陽子による陽子ハローと考えられ、得られた密度分布を理論計算と比較することにより、最外殻陽子は、通常入ると考えられる  $1d_{5/2}$  軌道ではなく、むしろ普通はそれより高いエネルギーにある  $2s_{1/2}$  軌道に入っている可能性（割合）が大きいことが示された。このことは、中性子過剰核で見られた  $1d_{5/2}-2s_{1/2}$  軌道のエネルギー的逆転が、 $^{17}\text{Ne}$  付近の陽子過剰領域でも起きていることを示唆している。これは、このような  $s$  軌道が相対的に下がって軌道の逆転が起きる現象は、価核子が中性子か陽子かには依らず、弱束縛系のポテンシャル表面近傍における普遍的な量子力学的効果である可能性を支持している [7]。

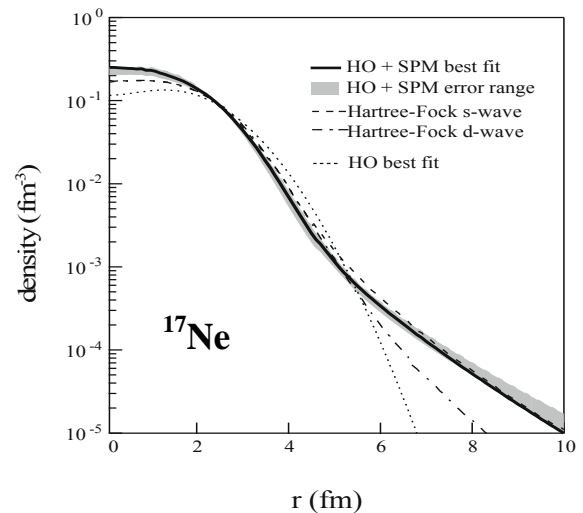


図7 理研で測定された  $^{17}\text{Ne}$  ビームの  $\sigma_R$  から導出された核子密度分布。モデル関数として調和振動子型＋単一粒子密度を仮定。 $s$  軌道を仮定した Hartree-Fock 計算とよく一致している。

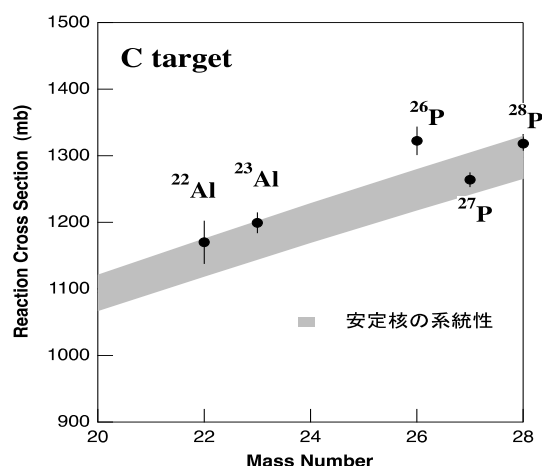


図8  $^{22,23}\text{Al}$ ,  $^{26,27,28}\text{P}$  の C に対する反応断面積。グレーの帯は電子散乱から導かれた安定核の系統性。

#### 4. 陽子ドリップライン領域核の生成と反応断面積

不安定核の研究は、中性子過剰側の方が、領域が広いということもあり、また不安定核生成技術的に低バックグラウンドであるということも手伝って、開拓は世界的に進んでいる。これに比べて陽子過剰側は、世界的な不安定核研究施設で主流の核子当たり 100 MeV 前後以下の領域では特にバックグラウンドが多くなることが障害となり、あまり研究が進んでいない。そこで、我々は HIMAC において、エネルギーの高いビームが利用可能という特長を生かし、この領域での研究に挑戦した。この 2 次ビームの S/N 比が悪く測定が難しいという問題を克服するため、我々は、

- 1) 陽子ピックアップ反応の利用
  - 2) 陽子生成標的( $\text{CH}_2$ )の利用
  - 3) 高い 1 次ビームエネルギー (300A MeV) の利用
- により、従来に比べ極めて S/N 比および強度の良好な  $^{22}\text{Al}$ ,  $^{26}\text{P}$  等の陽子過剰 2 次ビームの生成に成功した。これらの 2 次ビームを生成するためには、従来なら  $^{22}\text{Al}$  ( $^{26}\text{P}$ ) に対し 1 次ビームとして  $^{27}\text{Al}$  または  $^{28}\text{Si}$  ( $^{31}\text{P}$  または  $^{32}\text{S}$ ) を用い、最大 5 ~ 6 個の核子を剥がす入射核破碎反応を利用していた。我々は逆に陽子 1 つを生成標的から取り込み中性子を数個剥がす反応、つまり (p, xn) 反応の逆運動学条件で生成した。さらに生成標的として陽子を多く含むポリエチレン ( $\text{CH}_2$ ) を用いることにより、入射核破碎反応に比べ最大で 10 倍程度強度の強い 2 次ビームを得ることができた。これらの 2 次ビームを用いた、C 標的に対する反応断面積の測定結果を図 8 に示す。陽子ドリップライン核  $^{22}\text{Al}$ ,  $^{26}\text{P}$  に関しては、世界初の反応断面積測定結果である。この図では、電子散乱から求められた電荷半径をもとに計算された安定核の系統性がグレーの帯で示されており、帯の幅は電子散乱データのばらつきを示している。この図からわかるように、 $^{26}\text{P}$  以外は安定線付近の原子

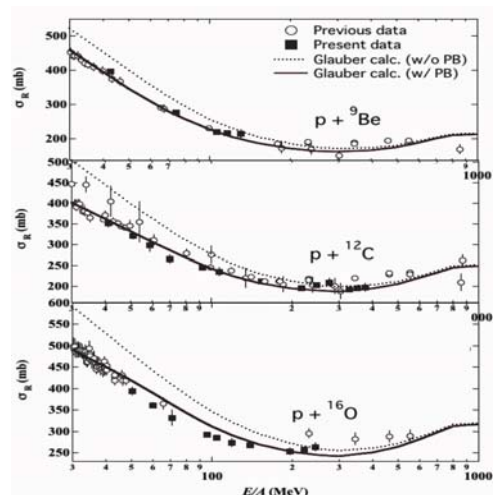


図9 安定核+陽子の反応断面積データ。黒い四角が HIMAC のデータ。実線がパウリブロッキング(PB)を考慮した OL 計算。(点線は PB なし)

核とはほぼ同等な半径を持っていると考えられる。 $^{23}\text{Al}$  に関しては、過去に中国での実験結果から示唆されている、この核が陽子ハローを持っているという可能性 [8] とは矛盾するものであり、一方で理研における磁気モーメントの測定結果 [9] とは一致している。陽子ドリップライン核  $^{26}\text{P}$  については、安定核の標準半径に比べやや大きな値を示しており、この核の何らかの異常性を示唆している可能性がある。実際にこの測定の過程で、我々は  $^{26}\text{P}$  に励起エネルギー  $164.4 \pm 0.1$  keV、半減期  $120 \pm 9$  ns のアイソマーを発見している。この核はまだ質量の測定値が無いが、系統性からは 1 陽子結合エネルギーは 140 keV 程度と予測されている。つまり、アイソマーの励起エネルギーの方が大きく、このアイソマー状態はクーロン障壁により 1 陽子がトラップされている系の可能性があり、やや大きな反応断面積とも合わせて大変興味を持たれる原子核である。

#### 5. 陽子標的による陽子分布・中性子分布の分離

これまで述べてきたのは、陽子と中性子を区別しない核子密度分布を対象とした議論であった。陽子数と中性子数がほぼ等しい軽い安定核に関しては、陽子分布と中性子分布の違いはほとんど無いと考えられており、これまでのところ実験的に精度よく調べられているのもクーロン相互作用を利用した電荷密度分布(陽子分布)の方だけである。ところが、陽子数/中性子数の比が 1 から大きく外れた不安定核になると、陽子と中性子の分布に差異が出てくる可能性があり、実際ハロー構造はそのような差異の一例である。中性子過剰核に存在されるとする中性子スキンも、そのような例の一つである。その差異(スキンの厚さ)がどれくらいあるのかは、陽子と中性子がどれくらいどのような密度で一緒にいたいかを測る尺度であり、これは核力あるいは核物質の性質をよ



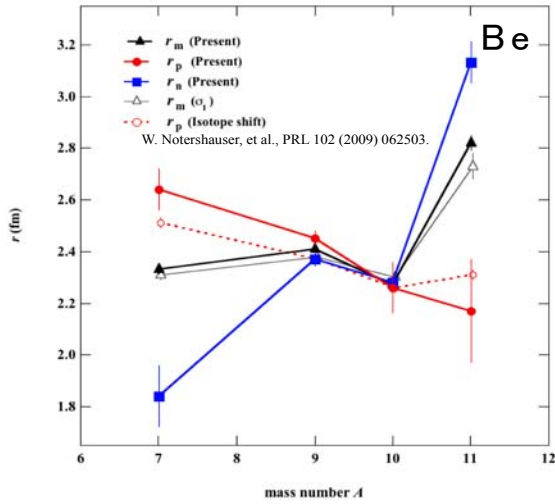


図 1 0 Be 同位体で導出された陽子・中性子・核子分布半径。点線はアイソトープシフトによる実験値。

く反映する量であるとともに、中性子星の構造や超新星爆発のメカニズムなど宇宙物理の諸問題とも深く関わる物理量である。そこで我々は、核子核子散乱のアイソスピン非対称性（核子-核子全断面積が p-p(n-n) 間と p-n 間で大きく違うこと）を利用し、反応断面積による陽子分布・中性子分布の分離を試みた。エネルギーが 100 MeV 以下になると、図 1 からわかるように核子-核子全断面積は、p-n 間の方が p-p(n-n) 間よりも約 3 倍も大きくなる。これにより、もし原子核表面に中性子だけの層があったとしたら、陽子標的に対する  $\sigma_R$  の方が中性子標的に対するそれよりも大きくなると期待できる。実際には中性子標的はないので、陽子・中性子が半々の安定核標的との比較になる。具体的には、炭素など安定核標的と陽子標的に対する  $\sigma_R$  をそれぞれ測定・比較することによって、陽子・中性子分布をそれぞれ導出するというものである。

この方法を実現するためには、まずは陽子-安定核間の  $\sigma_R$  の実験値を Glauber 計算値で正しく再現できることを確認しなければならない。ところが、この場合は原子核-原子核の反応断面積の場合と違って、陽子の原子核中での平均自由行程が比較的長く、核反応を起こさずに核内部まで入り込む確率が格段に大きいので、パウリブロッキング効果を考慮しなくてはならないと考えられる。そこで、適切にパウリブロッキング効果を Glauber 計算に取り入れた結果、図 9 の実線に示すように安定核の陽子に対する  $\sigma_R$  実験値を非常に良く再現することが可能となった（点線がパウリブロッキング無し）。この計算法を利用して、HIMAC で得られた  $^{7,9,10,11}\text{Be}$  および  $^8\text{B}$  の陽子標的反応断面積データを、原子核標的データからの情報と合わせて、陽子分布・中性子分布を独立自由度としてフィットした結果、それぞれの核種に対してうまく陽子・中性子それぞれの分布を求め

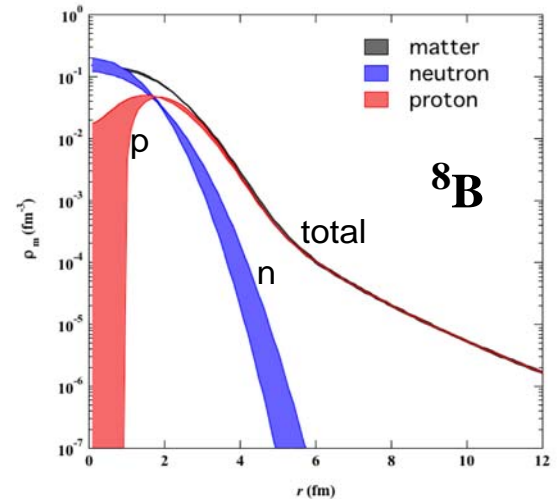


図 1 1  $^8\text{B}$  について導出された陽子・中性子・核子分布。

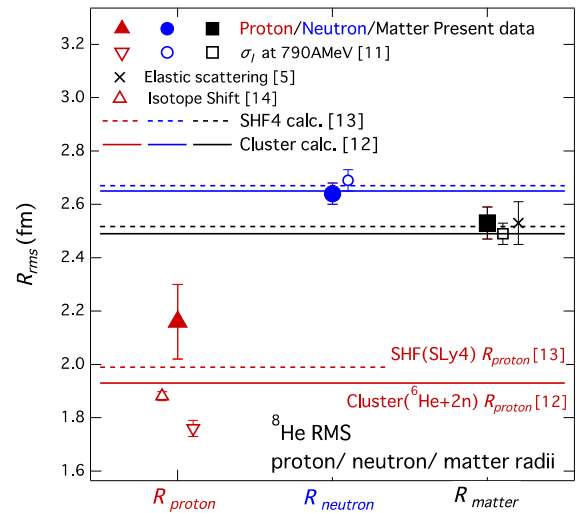


図 1 2  $^8\text{He}$  について導出された陽子・中性子・核子平均 2 乗半径。濃いシンボルが本研究の値。線は理論値。

ることができた。Be アイソトープに対する平均 2 乗半径の結果を図 1 0 に示す。本研究で得られた陽子分布半径(黒丸)は、アイソトープシフト測定から得られた値(白丸)と良い一致を示している。また、中性子分布半径(黒四角)については、大変興味深い挙動を示している。中性子ハローがあると言われている  $^{11}\text{Be}$  では極めて大きくなっているのに対し、 $^7\text{Be}$  では陽子分布よりも有意に小さくなっている。同様の測定・解析を  $^8\text{B}$  についても行ったところ、図 1 1 に示すような陽子・中性子分布が得られた。この結果から、 $^8\text{B}$  の密度分布には陽子のテール(陽子ハロー)が存在することが、直接的に示された。また、コアの中性子分布半径は比較的小さく、上記で述べた  $^7\text{Be}$  のそれと良く一致していることもわかった [10]。

最近、同様の測定・解析を中性子ドリップライン核  $^8\text{He}$  にも適用してみた。 $^8\text{He}$  は上で述べたように、中性子スキン核である可能性が指摘されていた核種である。まだ preliminary な結果では

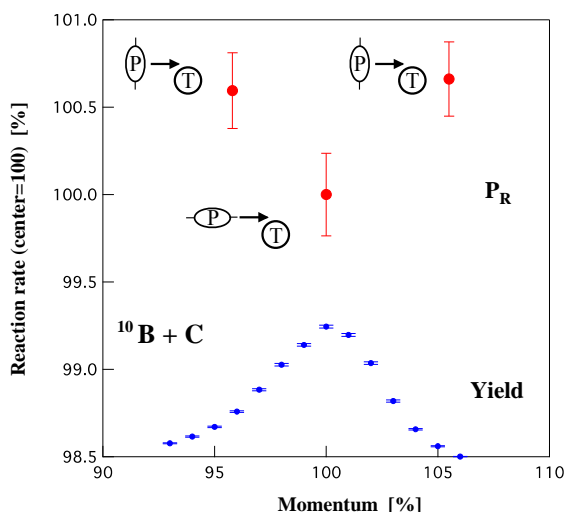


図 1 3  $^{10}\text{B}$  の C 標的に対する反応確率を運動量の関数としてプロットしたもの。

あるが、陽子・中性子・核子について導出された平均 2 乗半径を図 1 2 に示す。導出された半径は、陽子よりも中性子に対するもののほうが有意に大きい。核子分布半径・中性子分布半径については、それぞれ過去に高エネルギーでの相互作用断面積から導出された値 [11] やクラスター・モデルおよび Skyrme-Hartree-Fock 理論計算 [12, 13] とよく一致している。陽子分布半径については誤差が大きい、これら理論計算やレーザー分光によるアイソトープシフト測定からの値、特に最近測定された値 [14] と矛盾しない結果を与えている。この  $^8\text{He}$  については今後解析を完成させ、最終的な陽子・中性子・核子それぞれの密度分布を導出する予定である。

## 6. 変形核反応断面積の方位異方性

原子核の変形および核スピン整列と 反応断面積との関連を調べる測定を行った。130A MeV の  $^{11}\text{B}$  1 次ビームを Be 標的に照射して入射核破碎過程により生成された  $^{10}\text{B}$  2 次ビームの運動量を F1 スリットにより選ぶことで、核スピン整列したビームを SB2 コースに輸送し、C 標的に対する反応断面積を 72A MeV で測定した。 $^{10}\text{B}$  の基底状態 ( $I^\pi = 3^+$ ) は変形パラメータ  $\beta_2$  が 1 に近く、大きく prolate に変形した核である。入射核破碎過程による運動量分布の中央を選ぶと、ビーム方向に対して正の、また高いあるいは低い部分を選ぶと負の核スピン整列が生成される。 $^{10}\text{B}$  の場合、変形対称軸方向に核スピンが向いていると考えられるため、変形軸とビームの速度方向との関係は図 1 3 中の模式図の通りになる。ビームラインの磁場により、その核スピン整列は多少回転し減少するが、今の場合その影響はそれほど大きくはない。ここで、単純に運動量を選択すると、反応標的への入射ビーム・エネルギーが違ってくことになり、エネルギー依存性からくる反応断面積の変化

が問題となる。この問題を避けるために、反応標的に入射するエネルギーが同じになるように、選択する運動量により違う厚さの wedge degrader を使用した。この際、エネルギーの微調整を上流側の磁場  $B\rho_1$  で行い、反応標的への入射エネルギーは高い精度 ( $\sim 0.1\%$  以下) で一致させた。図 1 3 に測定された運動量分布と、その運動量での反応確率 (preliminary) をプロットしたものを示す。図から分かるように、運動量に対する反応断面積の依存性がはっきりと確認できた。この依存性は prolate に変形した原子核が、上述の符号で核スピン整列したときに期待される反応断面積の変化と矛盾しない。このことは、変形核の対称軸が運動量に平行な場合と垂直な場合について、標的核に衝突する全確率が違ってくことを直接示す初めての実験的事実と考えられ、原子核の変形を実験的に確認する全く新しい方法として大変興味深い。

## 7. 検出器開発

これまでの HIMAC における反応断面積測定実験では、反応標的を通過したあとの粒子識別はほとんどの場合、Si や薄い CsI (Tl) による  $\Delta E$  検出器と NaI (Tl) や CsI (Na) による E 検出器を用いた  $\Delta E$ -E カウンター・テレスコープ法を利用してきた。しかし、質量数が 30 程度以上に大きくなると、この方法では質量分解能が足らず、測定が難しくなる。そこで、研究対象・領域を広げるため、また、理研 RIBF や GSI などの最先端不安定核研究施設における実験で用いる、新しい高分解能検出器を製作するため、HIMAC の重粒子ビームを用いて検出器の開発を始めている。現在開発中の検出器は次の通りである。

- 1) 高分解能イオン・チェンバー ( $\Delta E$  測定)
- 2) 全反射型チェレンコフ飛行時間検出器 (飛行時間・Z 測定)
- 3) リング・イメージング・チェレンコフ検出器 (速度測定)

1) は  $\Delta E$  による原子番号 Z の識別能力向上のため、2) は通常のシンチレータにある蛍光寿命のないチェレンコフ光による高時間分解能測定や時間と同時にチェレンコフ光の光量の Z 依存性を利用した Z 識別の可能性を追求するために行っている。3) はチェレンコフ光の放出角度の粒子速度依存性を利用し、その場での高分解能粒子速度測定を可能にするために行っている。これまでのところ、400A MeV  $^{58}\text{Ni}$  ビームによる試験で、1) は理研の通常型イオン・チェンバーより 20~30 % の分解能向上を達成できている。また、2) は同じビームで一検出器の時間分解能として  $\sigma \sim 8.5$  ps と、極めて良い値を記録している。3) についてはまだセンサーが一部しか揃っていない

が、それでもチェレンコフ光リングの一部を観測することができている。

## まとめ

以上、我々のグループによる放医研HIMACでの反応断面積研究(H(P)093)について述べてきた。安定核  $^{12}\text{C}$  ビームによる非常に単純な測定から始まり、さまざまな不安定核への応用、陽子・中性子分布の分離、変形核の方位異方性、アイソマー状態の  $\sigma_R$  と、その進展は多岐にわたり、これからのそれぞれのテーマにおける発展も大いに期待できるところである。本研究は放医研HIMACにおける独立した興味深い研究であるが、その結果の一部は、理研RIBFなどの世界最先端の不安定核研究施設における我々の実験に対して、開発・テスト・補完などの意味合いで大きく貢献していることも申し添えたい。最後に、本研究は複数の研究機関にまたがる共同研究であり、多くの方の研究協力のもとに成り立ってきたことを感謝し、以下にその主要メンバーのリストを添える。

## 共同研究者リスト

阪大理： 福田光順, 田中聖臣, 大野淳一,  
山岡慎太郎, 三原基嗣, 松多健策, 南園忠則  
東京理大： 西村太樹  
新潟大理： 武智麻耶, 室岡大樹, 鈴木伸司,  
長島正幸, 大坪隆  
新潟大 RI： 泉川卓司  
埼玉大理： 山口貴之, 鈴木健, 洲崎 ふみ,  
山木 さやか, 榎本 彩乃, 松永 達,  
大甕 舜一朗, 竹内 勇貴, 西村 拓真,  
三浦 宙, 久保木隆正, 中島 真平  
高知工大： 百田佐多生  
中国上海応用物理研： G.W. Fan, W. Xu  
放医研: 佐藤眞二, 福田茂一, 金澤光隆, 北川敦志  
(その他大勢の各大学の学生)

## 謝辞

HIMAC からのビーム供給や実験準備に関して、我々の我が儘な要求にいつも全力で応えていただいた、高田栄一さんと HIMAC 運転チームのみなさん、そして AEC 実験サポートグループのみなさんに深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] M. Fukuda et al., Phys. Lett., B268, 339, 1991.
- [2] M. Fukuda et al., Nucl. Phys. A, 656, 209, 1999.
- [3] A. Ozawa et al., Nucl. Phys. A, 608, 63, 1996.
- [4] M. Takechi, M. Fukuda, M. Mihara, et al., Phys. Rev. C79, 061601(R), 2009.
- [5] G.D. Alkhazov et al., Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 2313-2316; G.D. Alkhazov et al., Nucl. Phys. **A712**, 269, 2002.
- [6] M. Takechi, M. Fukuda et al., AIP Conf. Proc. 891, Tours Symposium on Nuclear Physics VI, 187-191,

- 2007.
- [7] K. Tanaka, M. Fukuda et al., Phys. Rev. C **82**, 044309(11 pages), 2010.
- [8] Z. Hu-Yong et al., Chin. Phys. Lett. **20** (2003) 1234-1237; Z. Ren et al., Phys. At. Nuc. **66** (2003) 1515-1518.
- [9] A. Ozawa et al., Phys. Rev. C **74** (2006) 021301(4 pages).
- [10] D. Nishimura, Doctoral Thesis, Dept. Phys., Osaka Univ., (2011)
- [11] I. Tanihata et al., Phys. Lett. B **289** (1992) 261-266.
- [12] F. Kobayashi and Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C **88**, 034321 (2013) (17 pages).
- [13] R. Baldik et al., Phys. At. Nucl. **73** (2010) 74-80.
- [14] Z.-T. Lu et al., Rev. Mod. Phys., **85** (2013) 1383 (18 pages).



## Abstract

Real-Time dosimetry of energetic charged nuclei during manned space missions and radiotherapy requires identification of mixed particle fields in order to determine Relative Biological Effectiveness (RBE) or Quality Factors. A Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC) gives details of the absorbed dose and dose rate. It can also provide direct information on the quality or type of the radiation field. The interior cavity of the detector is filled with tissue equivalent gas such that the aerial density,  $\text{cm}^2/\text{g}$ , of the gas is equivalent to the aerial density of tissue with dimensions approaching the nucleus of a mammalian cell (1-5 $\mu\text{m}$ ). The motivation for this was that the proportional counter serves as a microdosimeter that can measure the pattern of energy deposition events similar to those encountered by biological systems having the comparable dimensions

## Introduction

Ionizing radiation is unique because it transfers energy on an atomic scale in a highly concentrated manner. The average energy absorbed per unit mass of irradiated medium is referred to as the absorbed dose. However, alterations created in the irradiated material depend on the microscopic patterns of energy imparted, which can vary by several orders of magnitude for different types of ionizing radiation. Thus, while absorbed dose is a generalized quantity in the determination of radiation effects, the patterns of energy deposition provide a deeper understanding and basis for estimating the responses to ionizing radiation.

Microdosimetry, is the systematic study and quantification of the spatial and temporal distribution of absorbed energy in irradiated matter [1]. It focuses on the heterogeneous and stochastic nature of these effects. The discipline has evolved as a system of concepts and methodologies for measuring the associated physical quantities [2,3,4]. Although it can be utilized in the interpretation of a variety of radiation effects such as single event upsets in integrated circuits, its principal applications have been intended for understanding basic mechanisms of biological response. Microdosimetry has been applied in estimating Quality Factors for risk assessment in radiation protection [5] and quantifying relative biological effectiveness, RBE, using the microdosimetric kinetic model (MKM) for treatment planning of hadron radiation therapy [6].

The tissue equivalent proportional counter (TEPC) was developed by Rossi and Rosenberg [7,8]. The TEPC is not a  $LET$  (linear energy transfer) spectrometer, but does attempt to simulate the distribution of energy deposition by densely ionizing particles traversing spherical volumes of tissue with diameters on the order of a few microns. It has been used extensively to characterize patterns of energy deposition by recoil nuclei generated by neutrons interacting in the wall of the detector. If: a) energy

deposition,  $\varepsilon$ , is equal to  $LET$  multiplied by the trajectory,  $l$ , of the charged particle through the spherical volume and b) the trajectory is a chord through the sphere, then the  $LET$  of the incident particles can be obtained analytically from the distribution of,  $\varepsilon$ .

Fig. 1 shows the expected distribution of energy deposition in a sphere with a diameter of 1 $\mu\text{m}$  based on  $LET \times l$  for a particle with an  $LET$  of 210  $\text{keV}/\mu\text{m}$ . It is a triangular distribution representing the distribution of random chord lengths through a sphere with a maximum chord length,  $l$ , equal to the diameter. Also shown in Fig.1 are data obtained with a TEPC for  $^{56}\text{Fe}$  at 400 $\text{MeV}/n$  that actually has a  $LET$  of 210  $\text{keV}/\mu\text{m}$ . [9]. The distributions are normalized to the same integral value and clearly not identical.

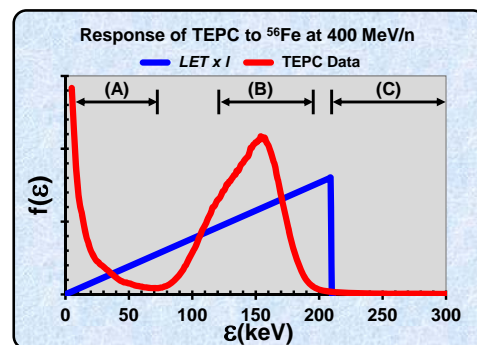


Fig. 1 Single event spectrum for a simulated sphere 1 $\mu\text{m}$  in diameter

The objectives of the experiments at HIMAC were to characterize the response of a TEPC to incident HZE particles that have specific charge,  $Z$ , velocity,  $\beta$  ( $\text{MeV}/\text{nucleon}$ ), and  $LET$ . The goal was to determine what features represent actual energy deposition in mammalian cells and what events are artifacts caused by the detector. This is necessary in order to interpret or predict the biological response from exposure to high energy charged particles (HZE).

## Materials and Methods

The TEPC was a spherical shell fabricated from tissue equivalent plastic (A-150) with an inside diameter of 12.7 mm and a wall thickness of 2.5mm.

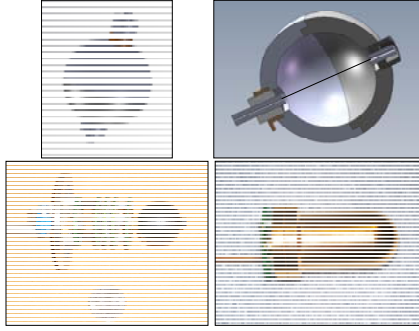


Fig. 2 Illustrations of spherical TEPC with pre amplifier and vacuum chamber

The collector was an anode wire surround by helical grid to create a uniform electrical field along the wire. The vacuum chamber was filled with a propane based tissue equivalent gas using the following relationship to simulate spherical volumes of tissue,

$$\rho_g D_g = \rho_t D_t$$

Where,  $\rho$  is the density, and  $D$  is the diameter of the gas cavity designated by, g, and desired simulated volume of tissue designated by, t. The system was typically operated at a gas pressure of 34 Torr to simulate a tissue diameter of 1  $\mu$ m

The unique feature of these experiments was to embed the TEPC in a charged particle spectrometer consisting of a series of position sensitive silicon detectors. A schematic diagram of the experimental arrangement is shown in Fig. 2. An upstream trigger is used to identify the incoming particle and initiate the data acquisition system. Energy loss in the Si position detectors is used to verify the charge of the particle at each location and discriminate fragmentation events occurring in the system. The transverse location of the particle in each of the Si detectors is used to reconstruct the flight path through the TEPC.

## Experimental Method

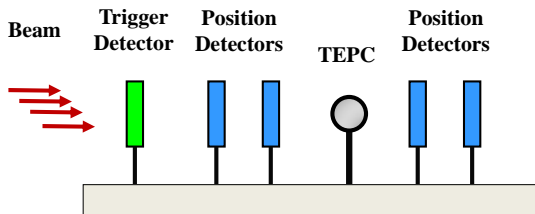


Fig. 3 Diagram of beam line set-up at HIMAC

About  $5 \times 10^5$  particles are analyzed individually and

then combined to isolate a selected portion of the incident beam or the integrated response of the dosimeter to a uniform beam.

It was not possible to investigate the TEPC response for all particles and energies comprising Galactic Cosmic Rays, GCR, or carbon therapy beams and fragments in a Spread Out Bragg Peak, SOBP. Fig. 3 is a summary of particles and energies selected for these scientific investigations.

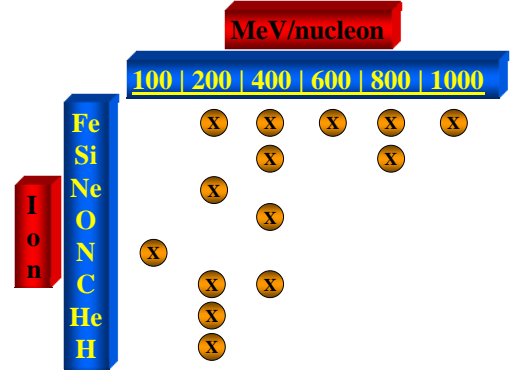


Fig. 4 Selection of Ions and MeV/nucleon for experiments at HIMAC

Experiments were designed to investigate the response of the TEPC to a single ion ( $Z$ ) at various velocities (MeV/n) [9,10], several ions with similar velocities [11], and several ions with velocities resulting in similar LET [12].

## Results

Analyses were performed to identify reasons for the shape of the TEPC response shown in Fig. 1. Data were selected according to the impact parameter of the incident particle, defined as the radial distance from the center of the spherical volume. Results for  $^{56}\text{Fe}$  at 400 MeV/n are shown in Fig.4.

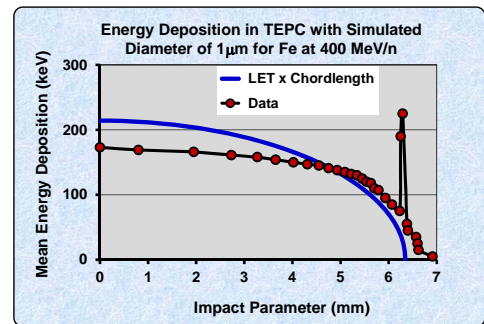


Fig. 5 Energy deposition events in TEPC as a function of impact parameter

An impact parameter of zero implied the particles passed through the center of the detector, therefore having a trajectory equal to the diameter. Also shown on the plot is the expected energy loss equivalent to LET multiplied by the corresponding chord length,  $l$ .

For particles traversing through the center of the

detector (simulated chord length =  $1\mu\text{m}$ ) about 23% of the energy transferred to the gas cavity by the charged particles escaped the sensitive volume, presumably through high energy delta rays. This ratio is unchanged from 400 to 1000 MeV/nucleon ( $\beta = 0.7$  to  $0.9$ ). Calculations using track structure models indicate that about 40% of the energy should escape a  $1\mu\text{m}$  diameter volume at these energies. We attribute that the difference between calculations and measurements is due to enhanced delta ray production in the plastic wall of the TEPC.

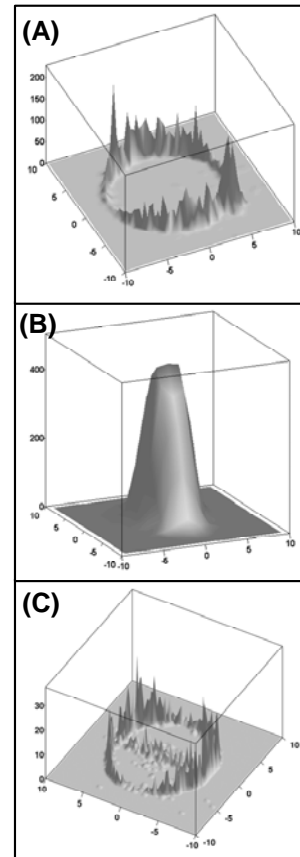
The data also indicate that the ratio between the expected value of  $LET \times l$  and measured energy deposition decreases as impact parameter increases. It ultimately becomes less than 1 for impact parameters near the outer regions of the spherical gas cavity. In this region the energy deposited by delta rays created in the wall that enter the gas cavity actually exceeds the energy of delta rays escaping the sensitive volume.

There is a region of small energy deposition events at impact parameters greater than the radius of the gas cavity. These correspond to events where the particle passes through the wall but misses the gas cavity. There is a large peak in energy deposition near the surface of the gas wall interface where the impact parameter is equal to the radius of the gas cavity.

We have confirmed these results by constructing two-dimensional histograms with the base of the plots corresponding to the transverse X,Y coordinates of the particle incident on the detector and the Z axis represent the frequency of observed events. These are shown in Fig.5 for the three regions of energy deposition (A), (B), (C) indicated in Fig.1.

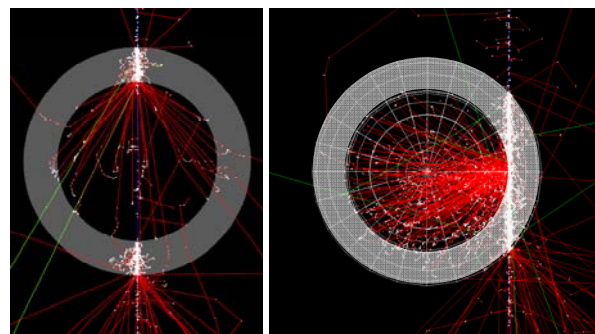
This shows that the large number of low energy deposition events in region (A) occur from particles passing through the peripheral wall without intercepting the gas cavity. These are all low LET delta rays. Energy deposition events, indicated by region (B), occur from particles passing directly through the gas cavity. These events include the dense ionization near the core of the track and associated delta rays that either stop or deposit a fraction of their initial energy before escaping. The very large energy depositions occurring in region (C) are the result of a detector that has a high density wall surrounding a low density gas cavity. An analysis has shown that the circular ring occurs just at the wall gas interface where a large number of very low energy delta rays emerge from the wall into the gas cavity. These electrons do not have sufficient energy to reach the gas cavity for impact parameters even slightly larger than the radius of the gas cavity. The line of large energy deposition events through the middle of the gas cavity are cases where the incident particle

intercepted the high density wires forming the anode and helical grid. These are artifacts of detector design that would not be evident in homogeneous tissue systems.



**Fig. 6 Two dimensional histograms showing the radial location of events for regions A,B and C in Fig.1**

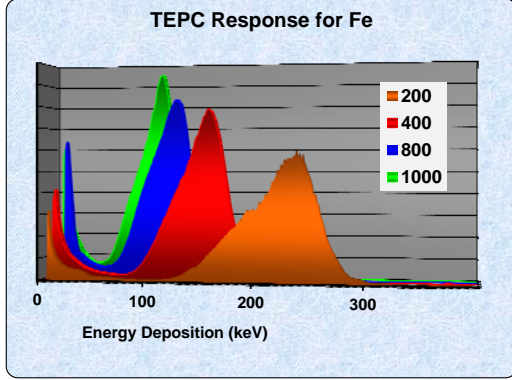
There had been considerable speculation that the analyses describe above were incorrect and the results could possibly be explained by improper energy calibration of the TEPC and nuclear events occurring in the wall. We have simulated the response of a TEPC using the Monte Carlo package Geant4 [13]. This was repeated independently using FLUKA [14,15). These computations verified our conclusions. Fig. 7 shows an event where  $^{56}\text{Fe}$  at 1000 MeV/n passes through the center of a TEPC and startling illustration of an event for  $^{56}\text{Fe}$  grazing the inside wall of the detector .



**Fig.7 Simulation of energy deposition events using Geant 4**  
Here, red tracks represent electrons, green represents

neutral particles, and white dots represent locations of interactions.

Fig.8 shows that the general shape of the TEPC response for HZE particles is preserved when the energy and corresponding LET of the particle changes.



**Fig. 8** Single event distributions of energy deposition for Fe at four incident energies.

### Summary

Microdosimetric analysis is usually made by transforming the random variable,  $\varepsilon$ , into a quantity called lineal energy,  $y$ , defined as:

$$y = \frac{\varepsilon}{\bar{l}}$$

Where  $\bar{l}$  is the mean chord length through the spherical cavity for uniform spatial trajectories (i.e.,  $\mu$ -randomness). It is a constant equal to  $2/3 D$ . Lineal energy has the same dimensions as LET but is a stochastic variable. The frequency averaged value of  $y$  (i.e., First moment about zero) is referred to

$$\bar{y}_f$$

The dose averaged lineal energy is weighted by the contribution to absorbed dose for each value of  $y$ . It is defined as the second moment divided by the first moment:

$$\bar{y}_D = \frac{\overline{y^2}}{\bar{y}_f}$$

For the approximations yielding the triangular distribution of energy deposition events on Fig. 1,  $\bar{y}_f$  is numerically equal to LET.

Our results have shown that:

- For all HZE particles with energies greater than 100 MeV/n (i.e.,  $\beta > 0.43$ ) passing through the center of the detector, about 20% of the LET escapes the  $1\mu\text{m}$  diameter volume.
- For all HZE particles with energies greater than 100

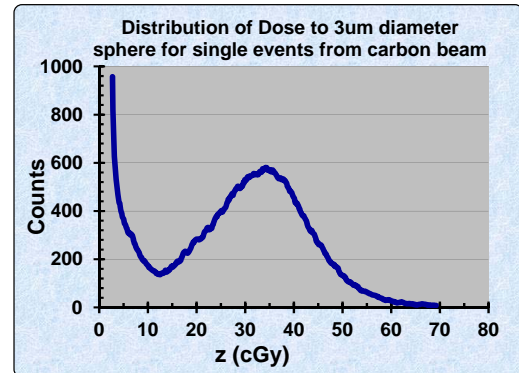
MeV/n (i.e.,  $\beta > 0.43$ ) the ratio of  $\bar{y}_f$  to LET was  $0.8 \pm 0.1$

- For all HZE particles with energies greater than 100 MeV/n (i.e.,  $\beta > 0.43$ ) the ratio of  $\bar{y}_D$  to LET was  $1.02 \pm 0.05$ .

• The response function of the TEPC is a complicated combination of competing physical processes. However, the detector does yield an estimate of absorbed dose. There is sufficient enhancement of energy deposition from delta rays produced in the 2 mm wall to compensate for high-energy delta rays that escape the spherical volume. Thus while charged particle equilibrium is not preserved on an event-by-event basis, it is achieved when the distribution of energy deposition events is integrated over the complete response function that includes particles that do not pass through the sensitive volume. The output will be incorrectly biased if the complete detector is not irradiated uniformly.

At low doses less than 1 mGy the single event spectrum provides an assessment of radiation quality that can be used for radiation protection. In this case a cell is affected by a single event or not at all. The probability of multiple events is unlikely. However for therapeutic applications, the single event analysis may not be appropriate.

Fig. 9 shows the single event distribution of energy deposition in a simulated sphere of diameter  $3\mu\text{m}$ . from the passage of a single carbon ion that has penetrated 3 cm of water.



**Fig. 9** Single event distribution for energy deposition for  $^{12}\text{C}$  at 200 MeV/n

The residual energy at this location is 200 MeV/nucleon ( $Z=6$ ,  $\beta = 0.57$ ,  $\text{LET} = 16.3 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ). In this case the data are converted to the random variable specific energy imparted,  $z$ :

$$z = \frac{\varepsilon}{m}$$

where  $m$  is the mass of the simulated volume and  $z$  has units of cGy. The mean dose for these single



events is 27 cGy with a standard deviation of 14 cGy. The large variation in dose is because high doses are received when a carbon ion intercepts the volume ( $D > 12$  cGy) and very low doses are received when only delta rays or low Z fragments intercept the volume ( $D < 12$  cGy).

We have examined the distribution when there are multiple events in this volume. For instance, the mean number of events required to deliver a dose of 100 cGy to a collection of cells is 3.6. The dose delivered to the sphere depends on how many energy deposition events occur per volume (i.e., Poisson[ $\mu = 3.6$ ]). This implies that 2.7 % of the volumes would receive zero dose. The remaining volumes would receive a distribution of doses based on the number of events and a convolution of the distribution of single events shown in Fig. 8. Fig. 9 shows the results for a dose of 100 cGy. The mean dose is indeed 100cGy but the standard deviation is 60cGy with about 3% receiving no dose and 10% receiving more than 170 cGy.

The computations were repeated for doses of, 150 cGy, 200 cGy, and 300 cGy. These data are also shown in Fig. 10. As the dose increases the number of cells receiving zero dose diminishes, but the variance of the distributions increases (Table 1). These results illustrate that there is a large variance in the dose delivered to cellular volumes of interest by high energy heavy ions.

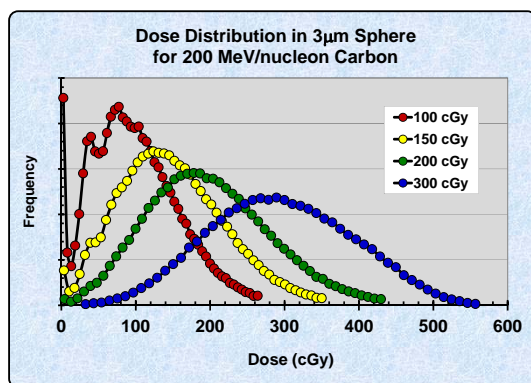


Fig. 10 Distribution of dose in 3mm diameter Sphere for doses ranging from 100 to 300 Gy

Table 1

Dose (cGy)	Mean # of events per volume	Fraction with no events	$\sigma$ (cGy)	$\sigma/\mu$ (%)	10 Percentile (cGy)	90 Percentile (cGy)
100	3.6	2.7 %	60	60	25	170
150	5.4	0.45 %	73	49	55	240
200	7.2	0.07 %	84	42	100	310
300	10.7	0.002 %	96	32	170	420

## Conclusions

A TEPC can provide measurements of the patterns of energy deposition from HZE particles passing through or near volumes of tissue having dimensions similar to the nucleus of a mammalian cell. This provides information on the heterogeneity of energy imparted

from high velocity particles that create a dense “core” of ionization surrounded by a “cloud” of high energy electrons.

The TEPC is not a homogeneous representation of microscopic volumes of tissue. There is large difference in the density of the wall compared with the gas cavity. Secondary electrons generated in the wall compensate for delta rays that escape the gas cavity. A thickness of a few mm of tissue equivalent plastic provides a slowing down spectrum of electrons with sufficient build up to provide charged particle equilibrium for determination of absorbed dose when the entire detector is irradiated uniformly.

The concept of Linear Energy Transfer, LET, is often used to describe radiation quality or predict the variation of biological effectiveness for different types of radiation. For heavy charged particles, it is numerically equal to the stopping power,  $dE/dx$ , in the medium. Although it is easy to measure, LET does not take into account the radial extent of the associated delta rays emerging from the track.

A TEPC does not provide a direct measurement of LET for HZE particles. The microdosimetric quantity  $\bar{y}_f$  (i.e., frequency mean lineal energy) underestimates LET of the incident particles whereas,  $\bar{y}_D$  (i.e., dose mean lineal energy) approximates LET. An analysis has shown that using the dose averaged lineal energy provides a satisfactory estimate of quality factors currently used for radiation protection.

There are experimental artifacts that occur when the incident particle intercepts the anode wire or collector as well as for particles that just graze the wall gas interface. The frequency of these events is small and they do not substantially influence the measurement of absorbed dose or pattern of energy depositions.

Thus the TEPC can serve as a single detector system that provides a measure of absorbed dose and radiation quality based on the stochastic distribution of events in microscopic volumes of tissue. This single event spectrum may not be sufficient to determine radiation quality when the dose rate is sufficiently large that more than one particle is likely to impart energy to the specified target during the period of irradiation. For these situations, a convolution of the single event distribution with the random number of events is suggested as an appropriate way to estimate patterns of multiple energy deposition events in cellular targets.

The analyses described here apply to conditions where the incident radiation has sufficient residual

range to pass through the detector system with negligible loss of total kinetic energy. The TEPC will properly measure energy deposition in the gas cavity, but this may not be representative of a homogeneous system because of particles randomly stopping in the detector. This is similar to the limitations of any LET spectrometer.

It must be noted that microdosimetric evaluations are based on single event patterns of energy deposition. The TEPC does this, but with a physical volume that is on the order of a centimeter. There may be conditions where two particles intercept the sensitive volume simultaneously. For example, two fragments emerging from a shield might be separated by a few mm. They would be registered as one event in a TEPC, but in reality would be two single events in different cell nuclei.

For some applications, particularly in dosimetry for astronauts during space missions, there can be restrictions on the size, mass, and power consumption for radiation dosimeters. We have recently investigated the possibility of extracting  $\bar{y}_f$  and  $\bar{y}_D$  from a single TEPC without the requirement of compiling details of the single event spectrum using pulse height analysis. An alternative approach is to store random energy deposition events in a sequence of fixed time intervals that does not require recording single events. We developed an algorithm using expectation analysis of the statistical estimators for the first and second moments of lineal energy that yield  $\bar{y}_f$  and  $\bar{y}_D$  [16].

### Acknowledgements

The success of these investigations would not have been possible without the assistance, advice and encouragement of the entire staff at HIMAC. Special gratitude is expressed for Murakami, T., Iwata, Y. and Takada, E.

NIRS and HIMAC provided facilities for many students to participate in the experiments and eventually complete their degree. Colorado State University is thankful that the following students had an opportunity to launch their professional careers at HIMAC: B. Gersey, S. Guetersloh, P. Taddei, D. Farrar, L. Manglass, D. Oertli

We acknowledge the scientific collaborators participating in this research. The following individuals devoted great amounts of time and effort to insure the successful planning, execution and completion of the experiments: C. Zeitlin, L. Heilbronn, J. Miller, D. Warner

### References

- [1] Rossi H., Zaider M., Microdosimetry and its applications, Springer Verlag, Berlin, 1966.
- [2] Kellerer A.M., Chmelevsky, Concepts of Microdosimetry I, Quantities, Rad, and Environm. Biophys 1975; 61:69-12.
- [3] Kellerer A.M., Chmelevsky, Concepts of Microdosimetry II, Probability distributions, Rad, and Environm. Biophys 1975; 205:216-12.
- [4] Kellerer A.M., Chmelevsky, Concepts of Microdosimetry III, Mean values of microdosimetric distributions, Radiat, and Environm. Biophys 1975; 61:69-12.
- [5] Microdosimetry. ICRU Report 36, Bethesda: International Commission on Radiological Units and Measurements, 1983.
- [6] Inaniwa T, Furukawa T, Kase Y, Matsufuji N, Toshito T, Matsumoto Y, Furusawa Y, Noda K., Treatment planning for a scanned carbon beam with a modified microdosimetric kinetic model, Phys Med Biol. Nov 21;55(22):6721-6737 2010.
- [7] Rossi H., Rosenweig W., A device for the measurement of dose as a function of specific ionization, Radiology 1955; 404:411-64
- [8] Rossi H., Microscopic energy distribution in irradiated matter, in Radiation Dosimetry, 2<sup>nd</sup> ed., Vol 1, Eds., Attix F., Roesch, W., Academic Press, New York, NY, 1968.
- [9] Rademacher S.E., Borak T.B., Zeitlin C., Heilbronn L. Miller J., Wall Effects Observed in Tissue Equivalent Proportional Counters from 1.05 GeV/nucleon Fe Particles, Radiat. Res; 1998, 149: 387-395.
- [10] Gersey B, Borak T.B., Zeitlin C.J., Miller J, Heilbronn L, Murakami T, Iwata Y. The response of a spherical tissue equivalent proportional counter to <sup>56</sup>Fe particles from 200 - 1000 MeV/nucleon. Radiat. Res. 2002; 350:360-157.
- [11] Taddei, P.J., T. B. Borak, B. S Guetersloh, B. B. Gersey, C. Zeitlin, L. Heilbronn, J. Miller, T. Murakami, and Y. Iwata, The response of a spherical tissue-equivalent proportional counter to different ions having similar velocities. Radiat. Meas. 2006; 1227:1234-41.
- [12] Guetersloh S.B., Borak T.B., Taddei P.B., Zeitlin C.J., Heilbronn L., Miller J., Murakami T., Iwata Y. The Response of a spherical tissue equivalent proportional counter to different ions having similar LET Radiat. Res. 2004; 161:64-71.
- [13] Taddei, P.J., Zhao, Z., Borak, T.B., A comparison of the measured responses of a tissue-equivalent proportional counter to high energy heavy (HZE) particles and those simulated using theGeant4 Monte Carlo code. Radiat. Meas 2008; 43:1498–1505.
- [14] Bohlen, T.T., Dosanjh, M., Ferrari, A., Gudowska, I., and Mairani, A., FLUKA simulations of the response of tissue-equivalent proportional counters to ion beams for applications in hadron therapy and space, Phys. Med. Biol. 2011, 56:6545-6561.
- [15] Burigo, L., Pshenichnov, I., Mishustin, I. and Bleicher, M., Monte Carlo simulations of Microdosimetry for Space Research at FAIR, J. of Physics: Conference Series. 2013, 426:1-5.
- [16] Borak, T.B. and Chapman, P.L. Description and Verification of an Algorithm for Obtaining Microdosimetric Quantities for High LET Radiation Using a Single TEPC without Pulse Height Analysis. Radiat Res., 2014, In Press.



# 重粒子線による超高エネルギー実験用検出器の試験と較正

Test and calibration of particle detectors for ultra-high-energy experiments  
using heavy ion beam

増田 公明

名古屋大学 太陽地球環境研究所 宇宙線研究室

## Abstract

LHCf is a unique collider experiment at CERN in order to evaluate the hadron interaction models used for simulations in ultra-high-energy cosmic-ray observations. Detector used for LHCf has been required to be small in size to be installed in a narrow space in the LHC tunnel, to have good energy resolution and position resolution and to be tolerant of fast and large signal processing. Also they must have radiation hardness for very large multiplicity of particles. We have developed detectors satisfying all requirements and conducted a series of experiments at HIMAC to test and calibrate the detector. We report how the detector was examined and some of results of the experiments.

## 1. はじめに

宇宙線強度は広いエネルギー範囲にわたって測定されている[1]が、 $10^{15}$  eV より高いエネルギーに対しては、空気シャワーによって生成される二次粒子を地上で検出することによって行われている。地上観測で得られる情報から元の一次宇宙線のエネルギーを推定するためには、宇宙線が地球大気に入射してから地上で検出されるまでの反応過程がわかっていなければいけない。特に一次宇宙線のエネルギーが高い場合は、加速器による較正が行われていないため、その反応過程が必ずしもわかっていない。観測されている宇宙線の最高エネルギーは  $10^{20}$  eV に達しているが、世界の加速器のエネルギーは来年実現する 7 TeV (=  $7 \times 10^{12}$  eV) が最高である。7 TeV 同士の陽子衝突は実験室系で  $10^{17}$  eV に対応する。現在の加速器のエネルギーは検出されている宇宙線のエネルギーには達していないのであるが、CERN(欧州原子核研究所)/LHC(Large Hadron Collider)においてこれまでで最高のエネルギーをもつ衝突型の新しい加速器が稼働するのに合わせて、我々はその最高エネルギーにおけるハドロン反応を検証する実験を提案した[2]。この実験は、衝突反応のエネルギーのほとんどが粒子の飛来方向の最前方へ放出されることを考慮して、衝突点から最前方へ放出される中性粒子を測定するもので、LHCf (LHC forward)と名付けられている。最前方に小型の検出器を置き、衝突点から飛来する粒子(光子)のエネルギーと方向(位置)を測定して、生成粒子(光子)のエネルギースペクトル、横方向運動量、 $\pi^0$ の不変質量などが得られ、また検出器内のシャワー構造から粒子の種類を判別する

使用する検出器の概要は2章で述べるが、その特徴的な性能を確認および較正するために国内における放射線ビームが必要であった。LHCf 実

験が CERN/LHC という最高エネルギーでの実験を行うことから、検出するエネルギーの範囲が 1 粒子から  $10^7$  粒子( $10^6$  eV~ $10^{12}$  eV)と広範囲に及ぶため、広いダイナミックレンジが必要なこと、粒子数が増えた場合は放射線損傷を考慮しなければならないこと、検出器からの信号出力が大きくなるため信号の飽和を考慮することが必要であることなどのため、これらの特性試験や性能の較正に最も適していたのが HIMAC の高輝度重粒子ビームであった。

LHC は 2013 年初めに phase-1 の実験を終了し、陽子 3.5 TeV (衝突エネルギー 7 TeV) までの加速に成功して、データを取得した。LHCf は本格運転に入る前のビーム強度が低い時期に、対応するエネルギーでの実験を行い、大きな成果を得ている。これらの物理結果の詳細については、別途論文[3-5]を参照していただきたい。現在、LHC は phase-2 の 7 TeV 加速に向けて準備中であり、2015 年からの開始を目指している。LHCf も、より高いエネルギーに近づくために当初の目標である 7 TeV 陽子の衝突を測定する。ただ、エネルギーが上がると発生粒子数が増え、最前方へ放出される粒子による放射線損傷が問題になる。特に phase-1 で使用したプラスチック・シンチレータは放射線損傷に弱い。そこで、放射線損傷に強い無機シンチレータの中から現在の検出器に置き換えられるものを探した結果、GSO 結晶を用いた検出器を使用することに決定した。GSO についても HIMAC の重粒子ビームを用いて、検出器の性能試験と較正を行った。

本稿では、まず LHCf 実験と使用する検出器について概要を説明し、HIMAC での実験の必要性を述べる。次に HIMAC 実験の結果をいくつか報告し、さらに実際の LHCf 実験でその成果がどのように生かされたか、あるいは生かされつつあるかを述べる。

## 2. CERN/LHC における LHCf 実験と検出器

### 2-1 LHCf 実験

LHC 加速器は CERN に設置されている最大 7 TeV の陽子同士を衝突させる加速器であり、重イオンの加速も可能である。LHC には衝突点 (Interaction Point) が 8ヶ所あるが、そのうちの ATLAS 検出器がある IP1 と呼ばれる衝突点の近くに LHCf 検出器を設置している。衝突点から 140 m 離れた場所に、衝突点では 1つになっているビームパイプが、逆方向に走る陽子ビームのために二つに分かれる場所があり、その二又に分かれた空間 (衝突方向 0 度) に TAN と呼ばれる中性粒子に対する遮蔽体が置かれている。その中に幅 10 cm, 長さ 30 cm の小さな空間がある。我々はこの空間に入る小型の電磁シャワー検出器を開発し、陽子衝突によって発生し最前方へ放出される中性粒子 (光子, 中性子等) を検出する実験を計画した。超高エネルギーの衝突において最前方に放出される粒子は、フラックスは大きくないが、衝突のエネルギーのほとんどを保持しており、大気原子核と衝突する宇宙線粒子の反応を知るうえで極めて重要である。なお、加速粒子を含む荷電粒子は衝突点と TAN の間にある電磁石によって軌道を曲げられ、LHCf 検出器には入らない。図 1 に衝突点付近のビームラインと検出器の配置の概略を示す。

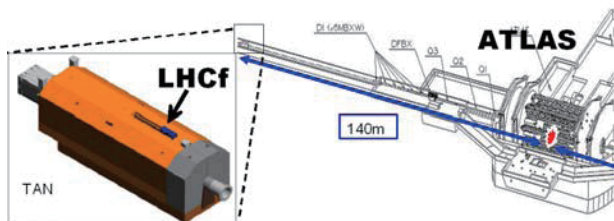


図 1 LHC/IP1 付近のビームライン

### 2-2 LHCf 検出器[6]

LHC は衝突型加速器であり、衝突点の両側に反応粒子が放出される。そのため、LHCf 検出器は、IP1 の両側のそれぞれ 140 m 離れた対称位置に 1 台ずつを置く。IP8 側を Arm1, IP2 側を Arm2 と呼ぶ。Arm1 検出器は断面 20 mm × 20 mm の Small Calorimeter (SC) と断面 40 mm × 40 mm の Large Calorimeter (LC) から成る。この SC と LC はビーム軸を中心にして 45 度回転させて、ダイヤモンド型に設置されている。これらは、3 mm 厚のプラスチック・シンチレータと 7 mm 厚 (前半 11 層) または 14 mm 厚 (後半 5 層) のタングステン板を交互に並べたサンプリング・カロリメータである。ビーム方向の長さは 220 mm であり、放射長 44 Xo, 吸収長 1.7 λ に相当する。

タングステンの Moliere 長は 9 mm と小さいので、カロリメータの中心近くに入射した光子による電磁シャワーは十分に検出器内に収まる。またビーム方向の 4ヶ所に  $x$ - 及び  $y$ - 方向の位置検出機能をもった 1 mm 角の細いシンチレータ・ホドスコープ検出器を配置する。Arm2 の SC は 25 mm × 25 mm, LC は 32 mm × 32 mm の断面を持ち、これらは検出器の向きは回転させずに、配置の軸を回転させている。これらはビームパイプの影や検出器のアクセプタンスから最適化された。Arm2 の位置検出器は、共同研究をしているイタリア・グループが担当したシリコン・ストリップ検出器である。Arm1, Arm2 検出器の大きさと性能を表 1 に示す。LHCf 検出器の外観を図 2 に示す。

シンチレータで生じる光子はアクリル製の fish-tail 型ライトガイドとクリアファイバーを通して、メッシュによって光量を調節した後、検出器上部に設置してある光電子増倍管へ導いた。

Arm1, Arm2 とともに、図 2 に示した SC, LC に読み出し回路部などを加えて、92 mm (W) × 280 mm (L) × 620 mm (H) のアルミニウムのケースに収められている。

表 1 LHCf 検出器の特性

	Arm1	Arm2
Sampling cal.	Plastic scinti. (3 mm thick)	
Passive plate	Tungsten (5 mm or 10 mm)	
SC size	20mm <sup>2</sup>	25mm <sup>2</sup>
LC size	40mm <sup>2</sup>	32mm <sup>2</sup>
Position detector	1mm <sup>2</sup> scinti.	0.1mm Si strip
Radiation length	44 Xo	
Interaction length	1.7 λ	
Moliere length	9 mm (Tungsten)	
Energy resolution	< 5%	
Position resolution	< 0.2mm	< 0.1mm

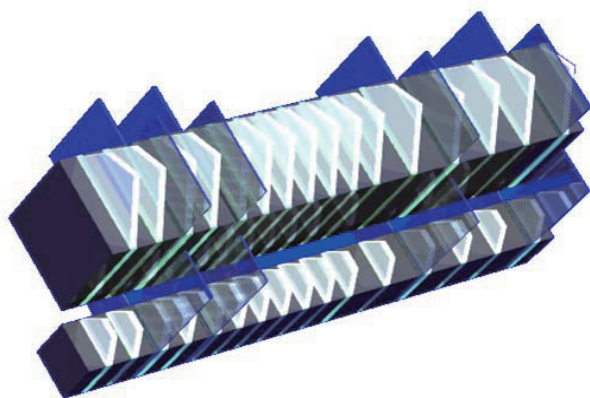


図 2 (a) LHCf 検出器 (Arm1)

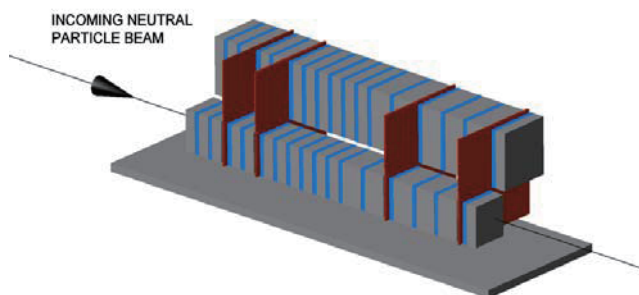


図 2 (b) LHCf 検出器 (Arm2)

## 2-3 検出器の特徴

LHCf 検出器のカロリメータは限られた空間に設置するために数 cm の幅しかなく、光電子増倍管も小型の 1.25 インチ径のものを使用している一方で、測定する粒子のエネルギーは最大 7 TeV である。カロリメータの端の方に入射した粒子によるシャワーは横もれが大きくなり、エネルギー分解能劣化の原因となるため、漏れの影響が大きい外側 2mm 以内に入射した粒子は解析で除外した。

BC-404 などの通常のプラスチック・シンチレータは発光時定数が $\sim 1$  ns と速く、小型の光電子増倍管は大光量による信号に対して飽和現象を起こしやすい。そこで、時定数の遅い EJ-260 ( $\tau \sim 10$  ns) をシンチレータとして採用し、さらに光電子増倍管の高電圧回路の電圧配分を変更して、大光量信号に対しても飽和しにくい検出器を開発し、1 粒子から 7 TeV ガンマ線に相当する  $10^6$  粒子による光量まで良い線形性 (5%以内のずれ) をもって検出できることを確認した。

## 2-4 Phase-2 検出器 (GSO)

LHCf の phase-2 実験では、衝突粒子のエネルギーが 7 TeV に上がるため、生成粒子の数も増加し、被曝吸収線量が増えることが予想される。そこで基本的な形状や大きさは phase-1 と同じにして、

放射線損傷に強い 2%Ce-doped GSO シンチレータを用いる。プラスチック・シンチレータに比べて GSO は密度や原子番号が大きく、吸収エネルギーが大きいので、厚さを 1 mm とした。Arm1 の位置検出器も断面が  $1\text{ mm}^2$  の棒状の GSO-bar に変更した。屈折率もプラスチックと違うので、光学特性を含めた集光効率の発光位置依存性を測定した。

## 3. HIMAC における検出器試験と較正

HIMAC では、phase-1 検出器に使われたプラスチック・シンチレータ、ライトガイド、光電子増倍管の組み合わせに対する大光量検出能力の評価を行うとともに、大線量被曝に対する放射線損傷を測定した[6]。また、phase-2 検出器に使用する耐放射線性のある無機検出器[7]の性能評価を行った。さらに GSO-bar[8]を含むこれらのシンチレータの集光効率の発光位置依存性の測定と較正を行った。これらのうち、おもな結果を紹介する。

### 3-1 プラスチック・シンチレータの放射線損傷[6]

LHCf 検出器は相当な量の電離放射線にさらされる。Mokhov ら[9] は TAN 周辺の吸収線量分布を計算し、LHCf 検出器が  $10^{29}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$  のルミノシティで最大 10 Gy/day の線量の放射線を受けるという結果を得た。我々は、プラスチック・シンチレータとクリアファイバー・ライトガイドの電離放射線被曝に対する許容値を調べた。実験は HIMAC の重粒子ビームで行われ、コバルト 60 のガンマ線照射とも比較した。プラスチック・シンチレータの光量やライトガイドに対するシンチレーション光の透過率の変化及び放射線損傷からの回復を測定した。

この測定では 2 種類のプラスチック・シンチレータ (時定数の速い BC-404 と時定数の遅い EJ-260) とクリアファイバー・ライトガイド (CLEARPSM, クラレ製) に 290 MeV/u  $^{12}\text{C}$  イオンを照射した。吸収線量は、プラスチック・シンチレータによる測定と空気電離箱を連動させて測定した。最終的な積算線量は  $10^8\text{ particles cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$  のフラックスで 30 kGy であった。シンチレータ光量の減少は、強度の弱い  $^{12}\text{C}$  イオンビームとキセノン・フラッシュ・ランプ (浜松ホトニクス社製 L4633-01) からフィルターを通して得られる UV 光 (350 nm) に対する信号を測定して評価した。また吸収線量率を  $3 \times 10^4\text{ Gy/h}$ ,  $8 \times 10^4\text{ Gy/h}$ ,  $2 \times 10^0 \sim 8 \times 10^4\text{ Gy/h}$  の連続変化に対して影響を調べた。さらに照射直後の放射線損傷の短時間及び長時間の回復現象を測定した。

図 3 に、 $^{12}\text{C}$  イオンとガンマ線照射による吸収線量に対する、プラスチック・シンチレータとライトガイドの光量の変化を示す。シンチレータの光量は吸収線量 10 Gy まではほぼ一定で、100 Gy



以上になると照射前光量の 90 % 以下に減少する。ほとんどのサンプルは 30 kGy で照射前光量の 40% まで減少した。UV 光による光量変化と  $^{12}\text{C}$  ビームによる光量変化にはほとんど差がなかった。照射による透明性の変化によるファイバー・ライトガイドの波長 490nm の光に対する透過光量の減少は小さかった。またガンマ線による光量の減少は  $^{12}\text{C}$  ビームによるものとほとんど変わらなかった。放射線損傷を受けたシンチレータは照射後数時間で光量を回復した。しかし回復量は小さく、照射前の約 40% まで減少した光量が、照射前の 60% まで回復した。

HIMAC の重粒子による照射実験により、プラスチック・シンチレータは放射線損傷を受けてシンチレーション光量が減少し、100 Gy の照射で照射前の 90% 程度になることが明らかになった。10 Gy 程度までの被曝ならば光量は一定であるが、それ以上の被曝の場合はレーザー光などによる標準光量と比較して補正することが必要である。このシンチレータは実際の LHCf 実験 (phase-1) に使用された。

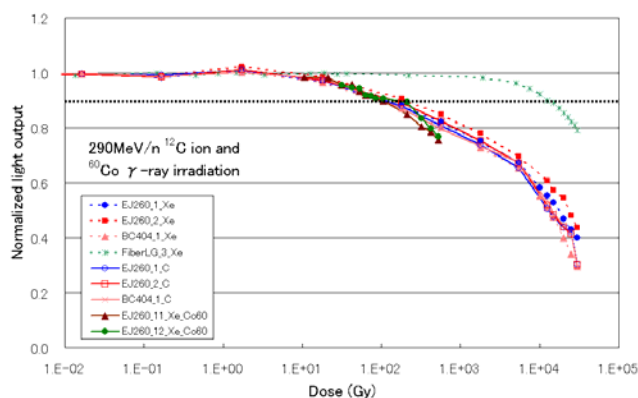


図3 プラスチック・シンチレータの吸収線量に対する光量の変化[4]

実際の LHCf 実験における被曝線量は、シミュレーション計算、シンチレータへのエネルギー付与の測定値、検出器後方に置かれた線量計の測定値などから推定された。概略値として 0.2 Gy/nb<sup>-1</sup> の線量率で、実験終了までに数十 Gy の吸収線量を被曝したと考えられる。

シンチレータからの光量は、放射線損傷により減光するが、回復効果のために減光が弱められたり、照射をやめれば増光も有り得る。LHCf 検出器では同時に 2 本のガンマ線を検出したデータから  $\pi^0$  の不変質量を求めることができるため、この質量値の変化から検出器のエネルギースケールを評価できる。図 4 にその結果を示す[10]。この不変質量の変化から、照射の開始から終了までの間に、Arm1, Arm2 検出器ともに約 3 % の減光が見られ、HIMAC で測定された放射線損傷に

よる効果と考えると矛盾ない。なお、波長 337 nm の UV レーザー光による光量の変化をモニターしたが、その精度は  $\pm 5\%$  で、放射線損傷による影響を見るには至らなかった。

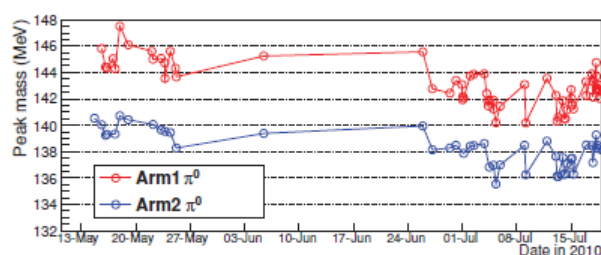


図4 2010年のビーム実験において再構成された  $\pi^0$  粒子の不変質量の時間変化[10]。系統誤差のため、peak mass が 134 MeV からずれている。5月末から6月末までの約 1 か月間はビーム照射がなく、光量の回復が見られる。

### 3-2 無機シンチレータの放射線損傷[7]

LHC の phase-2 では、最高エネルギー 7 TeV の陽子同士を衝突させる実験が 2015 年に予定されている。このエネルギーの衝突では、大きな多重度のために最前方での被曝線量が 1 nb<sup>-1</sup> あたり 10 Gy とかなり大きくなると予想されるため、phase-1 の検出器で使われたプラスチック・シンチレータを放射線損傷に強い検出器に交換する。そこで、10<sup>6</sup> Gy 以上の被曝にも耐えると言われている Ce-doped Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> (GSO) シンチレータを採用し、その耐放射線性を調べた。Arm1 検出器の位置検出器も、phase-1 のプラスチックから棒状の GSO-bar シンチレータに変更する。

実験は  $^{12}\text{C}$  ビームで行われ、最大  $7 \times 10^5$  Gy まで GSO に被曝させたが、光量の減少は見られなかった。しかし、10 Gy を越えたあたりから光量の増加が認められ、0.025%/Gy の増加率で変化し、1 kGy の照射で照射前光量の 25% 増加したあたりで飽和した。増光に対する回復効果も見られ、15,000 秒の遅い時定数と 2,000 秒より早い時定数が得られた。CERN における実験ではレーザー光によるモニターなども考えているが、LHCf phase-2 では 100 Gy 程度の被曝が想定され、増光による光量の変化は数% 以下で、測定には影響しないと考えられる。

### 3-4 アップグレード LHCf 検出器の較正

シンチレータの発光場所によって光の集光効率が異なる。これはライトガイドのファイバーから発光点を見る方向によって集光率が異なるためである。さらに、シンチレータにおけるシンチレーション光の読み出し方向はカロリメータごと、あるいはシンチレータごとに異なっている。これは測定器内の配線等の都合から同じ方向にライトガイドを取り付けられないためである。これらの理由から、検出光量を正しくエネルギー付与

に換算するにはシンチレータ内の集光効率の発  
光場所依存性を較正しておく必要がある。

LHCf 検出器を組み上げた状態で、ビームがシン  
チレータの全面をサーベイするように、1 mmφ  
の重粒子ビームに対して検出器の位置を変えな  
がら各シンチレータからの光量を測定した。典型  
的な結果を図5と図6に示す。図5の場合は、ラ  
イトガイドはシンチレータの下側に左右対称に  
取り付けられているが、図6の場合はシンチレー  
タの下側に右に傾けて取り付けられており、この  
違いが結果に反映されていることがわかる。この  
発光場所に依存する集光効率のデータは、LHCf  
実験の解析に使われている。

#### 4. まとめ

HIMAC で供給される高エネルギー重粒子線  
の特徴を生かして、CERN/LHC で行われている  
LHCf 実験のための検出器の性能評価と較正を行  
った。LHCf 検出器が加速器ビームパイプの間の  
極めて狭い空間へ設置するため、大きさと形状に  
強い制限があることを考慮して、HIMAC におい  
てのみ可能な較正実験を行うことができ、LHCf  
検出器の性能を確認することができた。LHCf 実  
験の phase-1 は成功裏に終わり、これからまた最  
高エネルギー7 TeV での実験が始まる。さらに大  
きな成果を期待したい。

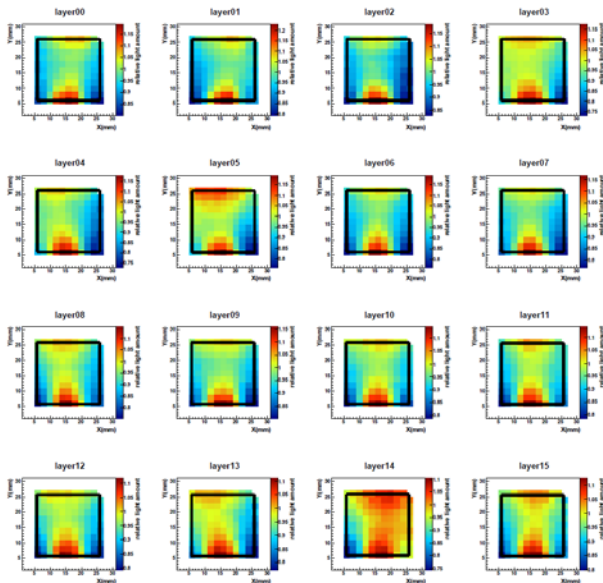


図5 GSO 全層応答マップ (20mm<sup>□</sup>)

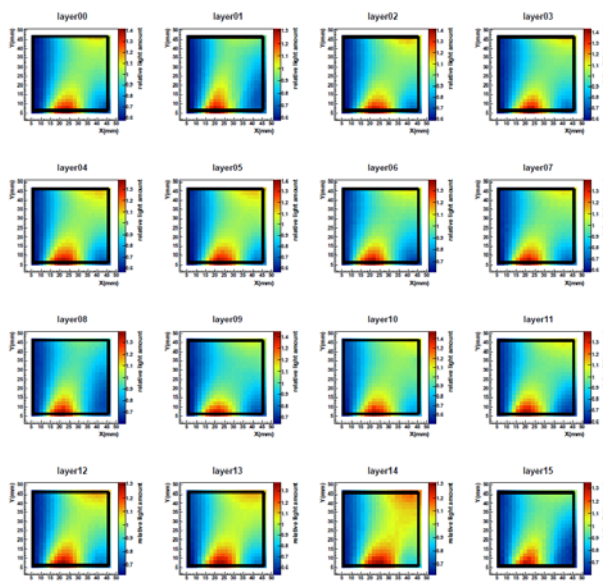


図6 GSO 全層応答マップ (40mm<sup>□</sup>)

## 参考文献

- [1] J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 86, 010001 (2012).
- [2] O. Adriani et al. (The LHCf Collaboration), LHCf Technical Design Report, CERN-LHCC-2006-004
- [3] O. Adriani et al. (The LHCf Collaboration), Measurement of zero degree single photon energy spectra for  $\sqrt{s} = 7$  TeV proton–proton collisions at LHC, Phys. Lett. B 703 (2011) 128.
- [4] O. Adriani et al. (The LHCf Collaboration), Measurement of forward neutral pion transverse momentum spectra for  $\sqrt{s} = 7$  TeV proton–proton collisions at the LHC, Phys. Rev. D 86, 092001 (2012).
- [5] O. Adriani et al. (The LHCf Collaboration), Measurement of zero degree inclusive photon energy spectra for  $\sqrt{s} = 900$  GeV proton–proton collisions at LHC, Phys. Lett. B 715 (2012) 298.
- [6] O. Adriani et al. (The LHCf Collaboration), The LHCf detector at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 (2008) S08006.
- [7] K. Kawade, K. Fukatsu, Y. Itow, K. Masuda, T. Murakami, T. Sako, K. Suzuki, T. Suzuki and K. Taki, Study of radiation hardness of  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  scintillator for heavy ion beam, JINST 6 (2011) T09004.
- [8] T. Suzuki, K. Kasahara, K. Kawade, T. Murakami, K. Masuda, T. Sako and S. Torii, Performance of very thin  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  scintillator bars for the LHCf experiment, JINST 8 (2013) T01007.
- [9] N.V. Mokhov, I. L. Rakhno, J. S. Kerby and J. B. Strait, Protecting LHC IP1/IP5 Components against radiation resulting from colliding beam interactions, LHC-Project-Report-633 (2003).
- [10] O. Adriani et al. (The LHCf Collaboration), LHCf detector performance during the 2009-2010 LHC run, Intern. J. Mod. Phys. A 28 (2013) 1330036.



# The Role of HIMAC in Space Radiation Research

Eric Benton

Oklahoma State University

## Abstract

Since the beginning of operations, HIMAC has been used to carry out space radiation research on an international scale. Excluding heavy ion radiobiology, the space radiation research carried out at HIMAC can be divided into three general categories: 1) instrument/detector development, characterization, and calibration, 2) measurement of nuclear interaction cross sections for use by and for validation of space radiation transport codes, and 3) development and testing of advanced materials for use as space radiation shielding. Instruments and detectors from over twenty institutions in at least fourteen countries that have been flown aboard both manned and unmanned spacecraft have been characterized and calibrated at HIMAC. In the following report, we highlight some of the major space radiation research activities that have been successfully carried out using HIMAC.

## Introduction

Over the course of the 20 years that HIMAC has been in operation, it has played a crucial role in space radiation research. The HIMAC is a particularly useful facility for studying space radiation due to the fact that the types and energies of particles it is capable of accelerating represent an important fraction of the ionizing radiation field encountered in space. The galactic cosmic ray (GCR) environment in space consists of 87% protons, 11% Helium nuclei, 1% heavy charged particles, including C, O, Si, and Fe, and 1% electrons and positrons [1]. These particles span an energy range from a few tens of MeV/n to in excess of a GeV/n, with a broad peak ranging from several hundred MeV/n to 1 GeV/n. Despite the fact that heavy charged particles make up only a small fraction of the GCR environment, the damage they do to living tissue, as quantified by the absorbed dose, scales as the square of their atomic number, making them of critical importance to our understanding of how space radiation interacts with matter and the radiation protection of space crews and radiation sensitive electronics. It is the HIMAC's ability to accelerate protons, and especially Helium nuclei and heavier charged particles to energies of up to several hundred MeV/n that has made it such a valuable resource in space radiation research.

Space radiation research that has been carried out at HIMAC can roughly be classified into three categories: 1) characterization, calibration, and intercomparison of instrumentation used for space dosimetry, 2) measurement of heavy ion projectile fragmentation cross sections needed in space radiation transport codes, and 3) characterization of shielding properties of baseline and newly developed materials for use as space radiation shielding. This excludes heavy ion radiobiology which is covered elsewhere in this report, but which is nonetheless crucial to our understanding of the effects of space radiation on living organisms.

## Instrument Characterization/Calibration

Given the high cost of launching instrumentation into space and the highly limited ability to modify or alter the instrumentation once it is in space, it is vitally important that space radiation detectors and dosimeters be completely characterized and fully calibrated before they are sent into orbit. Further, given the highly complex and mixed nature of the space radiation field, it is highly advantageous to characterize an instrument in a field of known composition and energy prior to its operation in space. Generous HIMAC beam time has led to the successful operation of a large number of space radiation detectors and dosimeters. Table 1 lists those detectors, as well as the institutions and countries of their origin that have flown aboard manned or unmanned spacecraft and that have been characterized and calibrated at HIMAC.

Two of the more recent instruments to be characterized at HIMAC are the Radiation Assessment Detector (RAD) on the Mars Science Laboratory (MSL) Curiosity Rover currently in operation on the surface of Mars [2], the Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRA TER) silicon telescope on the Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) [3], and the Radiation Environment Monitor (REM) based on the Timepix/Medipix detector currently in operation aboard the international Space Station [4].

RAD, developed by a group at SouthWest Research Institute, USA, led by D. Hassler and C. Zeitlin, is designed to analyze the full energetic particle radiation spectrum on the surface of Mars, including galactic cosmic rays (GCRs) and solar energetic particles (SEPs), as well as secondary neutrons and other particles created in the Martian atmosphere and beneath the Martian surface. The RAD instrument is made up of three Si detectors in a telescope arrangement, a cesium iodide (CsI) calorimeter, BC-432 plastic scintillator, and an anticoincidence shield to detect and

characterize neutral particles (i.e., neutrons and gamma rays) [2]. RAD is designed to provide information on the ionizing radiation environment on the surface of Mars needed in planning future human exploration missions to Mars.

CRA TER on LRO developed by N. Schwadron and H. Spence of the University of New Hampshire is a particle telescope consisting of three pairs of silicon detectors separated by layers of tissue equivalent plastic [3]. CRA TER was designed to measure LET spectra and absorbed dose in the Lunar orbit to aid in planning human return missions to the Moon.

REM is based on the TimePix version of the Medipix2 detector developed at CERN. It is a  $2\text{cm}^2$  pixelated CMOS ASIC consisting of  $256 \times 256$  individual square detectors. The electronics for each individual  $55\text{ }\mu\text{m}$  square detector is contained within the footprint of that pixel. REM is sensitive to energetic protons and heavy ions at the energies produced by HIMAC, as shown in Figure 1, and encountered during spaceflight. REM can serve as a personal active dosimeter, providing absorbed dose and equivalent dose rates in real time.

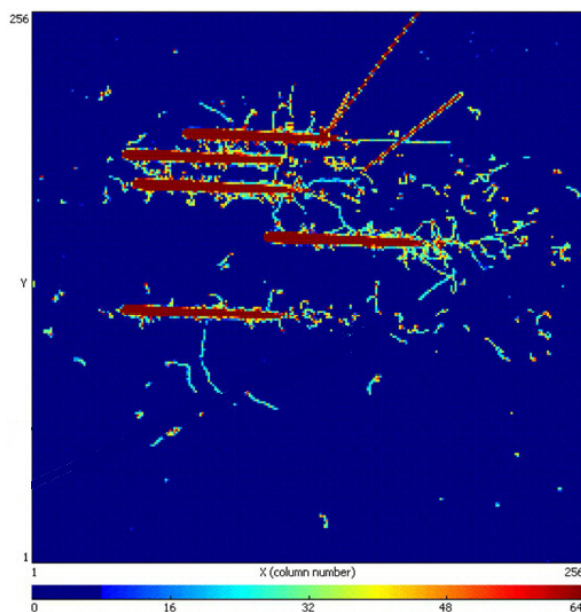


Figure 1. Tracks from 800 MeV/n Si at  $85^\circ$  incidence in Medipix exposed at HIMAC. image courtesy of L. Pinsky, U of Houston.

One of the most significant projects carried out at HIMAC in support of space radiation research is the ICCHIBAN (Inter-Comparison for Cosmic-ray with Heavy Ion Beams At NIRS) experiments. The main objective of these experiments is to intercompare space radiation instruments used for dosimetry on manned space missions by the various space agencies of the world. The objectives of the ICCHIBAN project are: 1) to determine the response of space radiation instruments and dosimeters to

heavy ions of charge and energy similar to that found in the galactic cosmic radiation (GCR) spectrum; 2) to compare the response and sensitivity of various space radiation monitoring instruments; aid in reconciling differences in measurements made by various radiation instruments during space flight; and 3) to establish and characterize a heavy ion “reference standard” against which space radiation instruments can be calibrated [5,6].

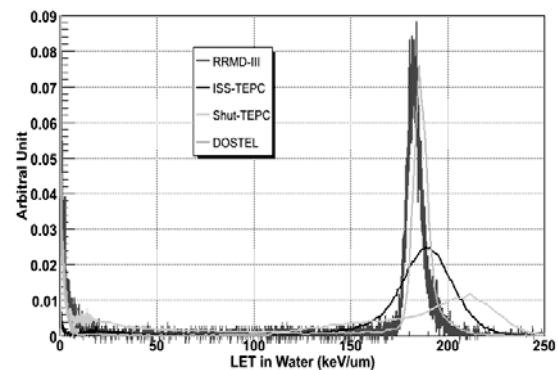


Figure 2. LET/  $\gamma$  distribution of instruments for Iron 500 MeV/n beam in ICCHIBAN-3. The instruments were exposed vertically ( $0^\circ$ ) relative to the beam.

Between 2002 and 2008 a total of nine ICCHIBAN experiments were carried out at the HIMAC using a wide range of both passive and active space radiation dosimeters and detectors. Active instruments tested during ICCHIBAN experiments at HIMAC included the Space Shuttle and International Space Station (ISS) versions of the Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC) from NASA Johnson Space Center (JSC), the RRMD-III Silicon Telescope from JAXA/Waseda University, the DosTel Silicon Telescope from DLR/University of Kiel, the DB-8 and Liulin-4 and -5 silicon detectors from the Russian Institute of BioMedical Sciences (IMBP) and the Bulgarian Academy of Sciences/NIRS, respectively. Passive dosimeters included thermoluminescence detectors and CR-39 plastic nuclear track detectors from NASA JSC, ESA, JAXA, and IMBP, as well as from research groups in Austria, the Czech Republic, Poland, Hungary, Germany, Belgium, and the USA. In total, instruments from 22 research groups in 13 countries have participated in the ICCHIBAN project, making it truly international in scope. Figure 3 shows a representative sample of the type of ICCHIBAN intercomparison experiment for active detectors carried out at HIMAC.

Table 1. Detectors and Instruments that have been characterized at HIMAC and flown aboard manned and unmanned spacecraft.

Country	Institution	Detectors
Armenia	Yerevan Physics Institute	Nuclear Emulsions
Austria	Atomic Institute of the Austrian Universities, Vienna University of Technology	Thermoluminescence Detector (TLD) CR-39 Plastic Nuclear Track Detector (PNTD)
Belgium	Belgian Nuclear Research Center (SCK-CEN)	TLD
Bulgaria	Solar Terrestrial Influences Laboratory, Bulgarian Academy of Sciences	Liulin Si Dosimeter
Canada	Canadian Space Agency/Bubble Technology Industries	Bubble Detectors
Czech Republic	Nuclear Physics Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic	TLD CR-39 PNTD
Germany	Christian Albrechts University of Kiel/DLR	DOSTEL Matroshka Si Detectors
Germany	German Aerospace Center (DLR)	TLD CR-39 PNTD
Greece	Aristotle University of Thessaloniki	MOSFET dosimeters
Hungary	Center for Energy Research, Hungarian Academy of Sciences	Pille TLD System
Japan	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	Bonner Ball Neutron Detector TLD CR-39 PNTD
Japan	National Institute of Radiological Sciences (NIRS)	TLD CR-39 PNTD
Japan	Waseda University/JAXA	RRMD-III Si Telescope
Poland	Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences	TLD CR-39 PNTD
Russia	Institute of Biomedical Problems/Russian Space Corporation Energia	R-16 Ionization Chamber DB-8 Silicon Dosimeter TLD CR-39 PNTD
UK	Health Protection Agency	CR-39 PNTD
USA	NASA Johnson Space Center	Shuttle Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC) ISS TEPC IV-CPDS Silicon Telescope TLD, Optically Stimulated Luminescence Detectors (OSLD) CR-39 PNTD

USA	Oklahoma State University	TLD, OSLD CR-39 PNTD
USA	SouthWest Research Institute	Radiation Assessment Detector (RAD) on MSL/Curiosity
USA	University of Houston/NASA JSC	Medipix2/Radiation Environment Monitor
USA	University of New Hampshire	Cosmic Ray Telescope for Effect of Radiation (CRaTER)

## Cross Section Measurements

To accurately predict absorbed dose and dose equivalent received during space missions, accurate data is needed not only on the composition and energy spectrum of the space radiation environment, but on how this radiation is transformed into secondary particles as it propagates through the mass of a spacecraft and its contents, including the bodies of the crew. This requires the use of space radiation transport codes and these codes, in turn, require empirically determined interaction cross sections. A large amount of cross section data used in these radiation transport codes has been measured at HIMAC [7].

The group of Miller, Zeitlin, and Heilbronn from Lawrence Berkeley National Laboratory charge-changing and fragment production cross sections for a long list of heavy ion beams at HIMAC on a wide variety of targets. These include 400 and 500 MeV/n Fe, 290 to 800 MeV/n Si, 400 MeV/n Mg, 290 to 600 MeV/n Ne, O, N, and C all at 290 and 400 MeV/n, 400 MeV/n B, and 230 MeV/n He [8]. In addition, charge changing cross sections relevant to radiation transport codes have been measured by the groups including those of Zhang et al. of Beijing Normal University, Yasuda et al. of Fukui University, Sihver et al. of Chalmers University, Golovchenko et al. of JINR, Dubna, and Murakami and Iwata of NIRS. Extensive efforts have been carried out to measure the cross sections for secondary neutron production by heavy ions at HIMAC. This work has been done for a large number of heavy ions at a variety of energies on a large number of targets. This secondary neutron production cross section data is collected in refs [9] and [10].

The radiation transport codes used in predict radiation exposure in space which have benefited from the inclusion of HIMAC cross section data include PHITS developed by Niita et al. of JAEA [11] and HZETRN developed by Wilson et al. of NASA Langley Research Center [7,12]. HIMAC data has also been used to validate these radiation transport codes [13].

## Space Radiation Shielding Testing

One approach to mitigate the effects of long duration exposure of space crews to the radiation environment is the use of shielding. However, given the highly complex nature of the space radiation environment, the complex nature of the interactions between radiation and matter, and the high cost of launching material including shielding, into space, the problem of successfully protecting a spacecraft with shielding is extraordinarily difficult. One approach is to use advanced materials in building a spacecraft that both serve as radiation shielding and perform other crucial functions such as acting as structural elements or the walls of the spacecraft's pressure vessel. For eventual habitats on the surface of the Moon or Mars, the use of local regolith has been considered.

Numerous research projects to characterize the space radiation shielding properties of baseline and multifunctional materials have been carried out at HIMAC [14,15]. Figure 3 shows an example of shielding measurements carried out at HIMAC. Dose and dose equivalent, measured using CR-39 plastic nuclear track detector, as a function of depth behind polyethylene, aluminum, and copper shielding are shown for a beam of 400 MeV/n Fe from the HIMAC. Similarly, Figure 4 shows deposited energy as a function of depth in lunar regolith simulant measured in a 3mm Si detector exposed at HIMAC to a beam of 290 MeV/n  $^{10}\text{B}$ .

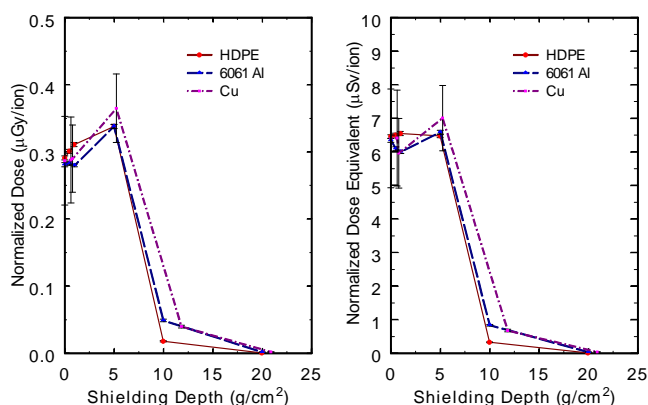


Figure 3. Dose and dose equivalent as a function of shielding depth in polyethylene, aluminum, and copper, measure in CR-39 PNTD exposed to 400 MeV/n Fe at the HIMAC.

## Conclusions

Over its twenty years of operation, HIMAC has made many important contributions to space radiation research, in areas such as detector development, characterization, and calibration, in the measurement of heavy ion nuclear cross sections, including neutron production cross section, and in the development and testing of

advanced materials for use as space radiation shielding. Because of the type and energy of heavy ion beams that can be accelerated at HIMAC, it will remain a critical tool in these three areas. Indeed, because of its central role in the ICCHIBAN project, HIMAC has become the standard heavy ion accelerator in the calibration of radiation detectors used in space dosimetry and radiation protection.

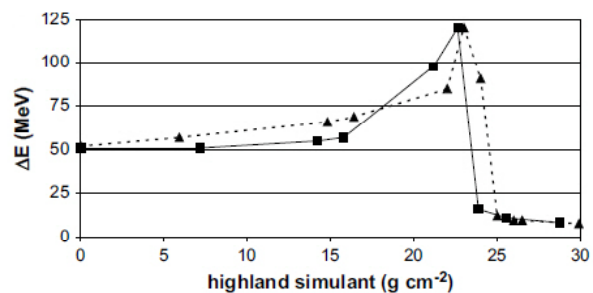


Figure 4. Energy deposition in a 3 mm silicon detector for a 290 MeV/n  $^{10}\text{B}$  beam at HIMAC after passing through lunar highland regolith simulant [15].

## References

- [1] National Council on Radiation Protection (1989) *Guidance on Radiation Received in Space Activities*. NCRP Report No. 98, Bethesda.
- [2] <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/mission/instruments/radiationdetectors/rad/>
- [3] <http://crater.sr.unh.edu/index.shtml>
- [4] L. Pinsky et al., *Rad. Meas.* (2011) **46** pp. 1610-1614.
- [5] Y. Uchihori and E. Benton, editors, HIMAC Report 078, 2004.
- [6] Y. Uchihori and E. Benton, editors, HIMAC Report 128, 2008.
- [7] J.W. Norbury et al. (2012) *Rad. Meas.*, **47**, pp 315-363.
- [8] <https://sites.google.com/site/fragserver/>
- [9] T. Nakamura & L. Heilbronn (2006) *Secondary Particle Production and Transport by High Energy Heavy Ions*, World Sci. Pub., Singapore.
- [10] L. Heilbronn et al., (2007) *Nuc. Sci. & Eng.*, **157** pp 142-158.
- [11] K. Niita et al., (2006) *Rad. Meas.*, **41** pp 1080-1090.
- [12] J. Wilson et al., (1991) HZETRN: A heavy ion/nucleon transport code for space radiations, NASA TP-3146.
- [13] L. Sihver et al., (2008) *Acta Astro.*, **63** pp 865-877.
- [14] Guetersloh et al., (2006) *Nucl. Inst. & Meth. B*, **252** pp 319-332
- [15] Miller et al., (2009) *Rad. Meas.*, **44** pp 163-167.



# 高エネルギー重粒子線による高分子材料への照射効果とその応用

High energy heavy ion beam irradiation effects on polymers and its application

鷲尾 方一

早稲田大学 理工学術院 総合研究所 理工学研究所

## Abstract

High-energy ion beams (H, He, C, N, O, Ne, Mg, Si, Ar, Fe, Kr, Xe) from MEXP port in HIMAC were irradiated to various polymers under vacuum at room temperature (RT). The irradiation effects were evaluated by DSC, Optical absorption spectroscopy, ESR, NMR, etc. Further, we have demonstrated the micro-fabrication through the direct etching of PTFE. We have also evaluated the etching rates of various ion beams for PTFE and results showed that higher Z ion has higher etching rate. Finally, we have demonstrated the function gradient materials applicable for PEFC by using localized energy deposition of ion beams with the very expecting results.

## 1. はじめに

高分子材料に対する重粒子線誘起の放射線化学反応は、物質中へのエネルギー付与、各種放射線場で使用される材料の健全性、材料への機能性付与や微細加工等、基礎から応用に至る多岐に渡る先端科学分野に資する可能性を秘めている。本稿では、早大を中心に東大・阪大・東北大・原子力機構・放医研からなるグループでこれまで行ってきた高エネルギー重粒子線による高分子材料への照射効果とその応用に関して記述する。

我々のグループでは、重粒子線による高分子材料中への特異的なエネルギー付与による化学反応機構の解明を目的として研究を進めてきた。基礎的な見地から、分子構造が炭素と水素原子からなるポリエチレン(PE)やポリプロピレン(PP)、同じく炭素とフッ素原子からなるポリテトラフルオロエチレン(PTFE)やその共重合材料(FEP)等を対象物質とし、照射前後での各種分光分析、構造解析等を行い、重粒子線照射による放射線化学反応の微小空間における局所性に関して研究を行ってきた。その後、得られた知見を元に、微小空間での重粒子線のエネルギー付与量を制御し、空間的な分布を持ったラジカルを誘起し、グラフト反応させることを試み、空間制御型の機能性材料の創製を行ってきた。

## 2. 局所的なエネルギー付与～生成物分析

Fig.1 は、厚さ 50 $\mu\text{m}$  の PTFE フィルムを積層した試料に  $\text{He}^{2+}$  イオンを大気中で照射後、DSC により分析した際の代表的フルエンスの結晶化曲線をイオンビームの入射方向から厚さ方向でまとめたものである。なお、未照射の場合、310 $^{\circ}\text{C}$  付近に発熱反応のピーク(結晶化温度)が観察される。ビーム入射側の試料の結晶化温度は、約 310 $^{\circ}\text{C}$  であり、結晶化熱量は、大気中照射のために酸化劣化が起き、50~55J/g と大きな熱量を示した。一方、SRIM コード[1]より求めた  $\text{He}^{2+}$  の飛程のブラッグピーク付近では、305 $^{\circ}\text{C}$  付近に新たにピークが現れるとともに結晶化曲

線は、ブロード化した。この時の結晶化熱量は、入射側の試料に比べ 36J/g と小さな値を示した[2]。同様に、他のイオン種においてもブラッグピーク付近で同様の挙動が観察された。

分子構造に関して  $^{19}\text{F}$  固体 NMR により解析した結果、ブラッグピーク付近のサンプルでは、主鎖上に分岐構造を示す三級炭素の形成が確認できたが、入射側の試料では観察できなかった。したがって、DSC ならびに NMR 解析から、イオン照射では、その LET 効果により、照射試料のブラッグピーク付近で分岐構

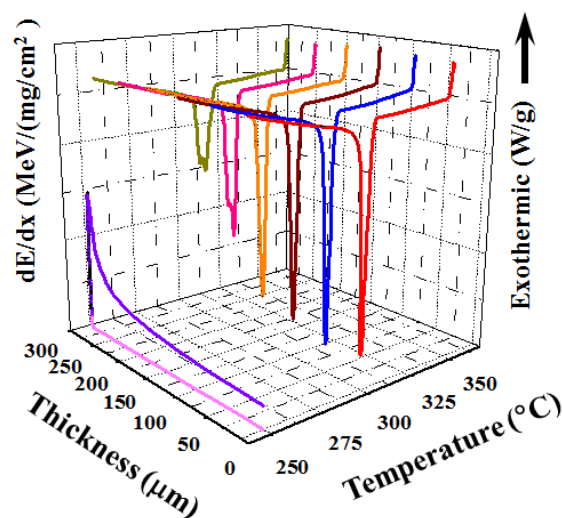


Fig.1  $\text{He}^{2+}$  イオン照射後の PTFE の深さ方向での DSC 結晶化曲線(大気中室温照射  $5.54 \times 10^{11}$  ion/ $\text{cm}^2$ )

造形成応が誘起されることによる結晶構造に変化が起きたと考えられる。

Fig.1 の結果は、大気中照射のため重粒子線により誘起される照射効果は、酸化が主反応となる。このため重粒子線照射による高分子の照射効果を正しく評価・理解するためには、真空中照射で評価する必要がある。また、放射線照射効果の研究において問題となる真空照射後の高分子内に



生成捕捉されたラジカルが、大気中に取り出した際の酸化などの後反応による影響[3-7]を避けるために、照射後直ぐに熱処理可能な真空中イオン照射装置を製作し、HIMAC の中エネルギー照射室に設置し、6MeV/n の重粒子線照射実験を行った。ビームライン上流のQマグネットでデフォーカスしたビームを装置内に組み込んだφ20mmのコリメータを通すことにより、ほぼ均一なビームとし、装置内のファラデーカップによりビーム電流を計測し、放射線照射によって共役二重結合を生成することで着色する試料(ETFE)[8-10]に照射後、変色域を計測することでフラックスを決定した。試料面でのビームサイズはビーム種に関わりなく約φ25mmとなった。なお、照射時の真空度は、 $2 \times 10^{-4}$ Pa以下で行った。

各高分子試料に対して重粒子線照射後、各々の融点あるいはガラス転移温度近傍の温度で5分間熱処理を行うことで、高分子中に生成補足されているラジカルのアニール処理を行った。

真空中室温照射したPE[11]やPP[12]については、アニール処理を行った場合、carbonylはほとんどで生成せず、アニール無しのものは、表面で生成した。これは、生成したラジカルが後反応で酸素と反応し酸化したためであることがわかった。このため、純粋な重粒子線による照射効果を考える上でラジカルの処理が重要であることがわかる。

真空中室温下で $\text{Ar}^{18+}$ イオンを照射したLDPEのcarbonyl, trans-vinylene, end-vinyl, vinylideneの顕微FT-IRによる吸光度の深さ分布は、end-vinylは試料表面ではほとんど増加せず、SRIMの計算から求めた試料内部のブラッグピーク付近で増加した。また、vinylideneが照射により減少した。LDPEの結果と比較すると、LLDPE(Fig.2参照)は、trans-vinyleneの吸光度は同程度であったが、end-vinylはLDPEに比べて、試料内部だけでなく表面での増加も顕著に観察された。vinylideneは表面付近でやや増加しており、LDPEに対する真空中照射と大きく結果が異なっ

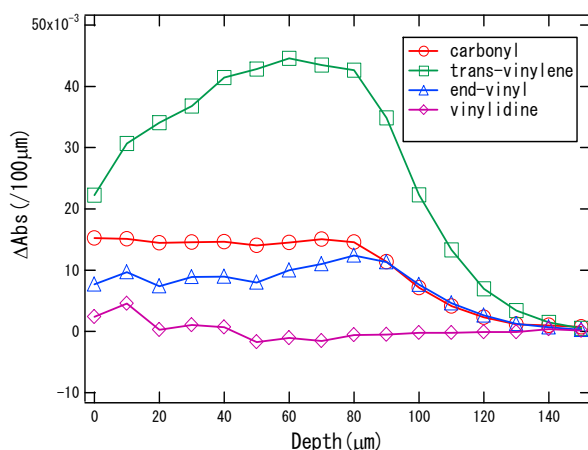


Fig.2  $\text{Ar}^{18+}$  照射後の LLDPE の深さ方向での吸光度(OD)変化

た。また、真空中照射にもかかわらず、carbonylの生成が見られたが、これは、PE内の溶存酸素と反応したものと考えられる。

HDPEに各種重粒子線を真空中照射後、アニールによるラジカル処理を行い顕微FT-IR法により分析した際の代表的な結果をFigs.3, 4に示す。図からわかるように、trans-vinyleneの生成量は、 $\text{C}^{6+}$ などの軽イオンでは、実際の飛程よりも長く、 $\text{Xe}^{54+}$ などの重イオンでは短くなっており、ブラッグピークとずれていることがわかる。この原因として、SRIMコードが、電子をはぎ取ったモデルをもとにシミュレーションしており、電子捕獲による電荷の変化を考慮していないことやばじき出された二次電子の効果によるものと考えられる。

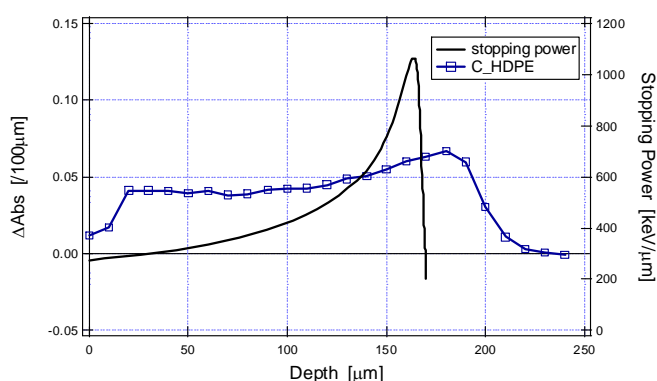


Fig.3  $\text{C}^{6+}$  照射後の HDPE の深さ方向での trans-vinylene の吸光度変化と SRIM による Stopping power の関係

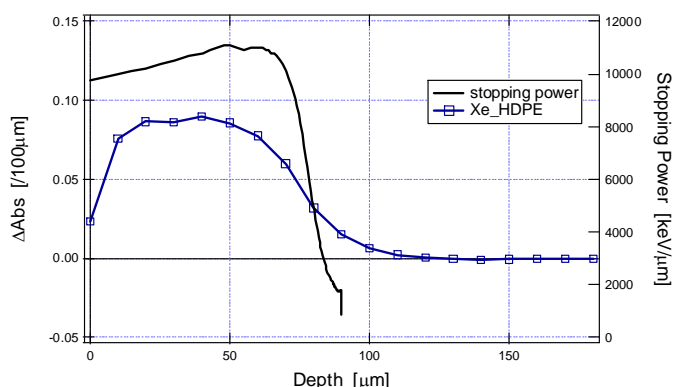


Fig.4  $\text{Xe}^{54+}$  照射後の HDPE の深さ方向での trans-vinylene の吸光度変化と SRIM による Stopping power の関係

### 3. 局所的なエネルギー付与～中間活性種

各種重粒子線照射によって各FEP層生じたラジカル収量と深さ方向の関係をFig.5に示す。Fig.5内右上のグラフはSRIMによって計算したエネルギー付与分布曲線(ブラッグカーブ)である。深さ方向に対してラジカル濃度はブラッグ曲線におおむね従いながら増加し、エネルギーが一番高くなるブラッグピーク付近では計算値

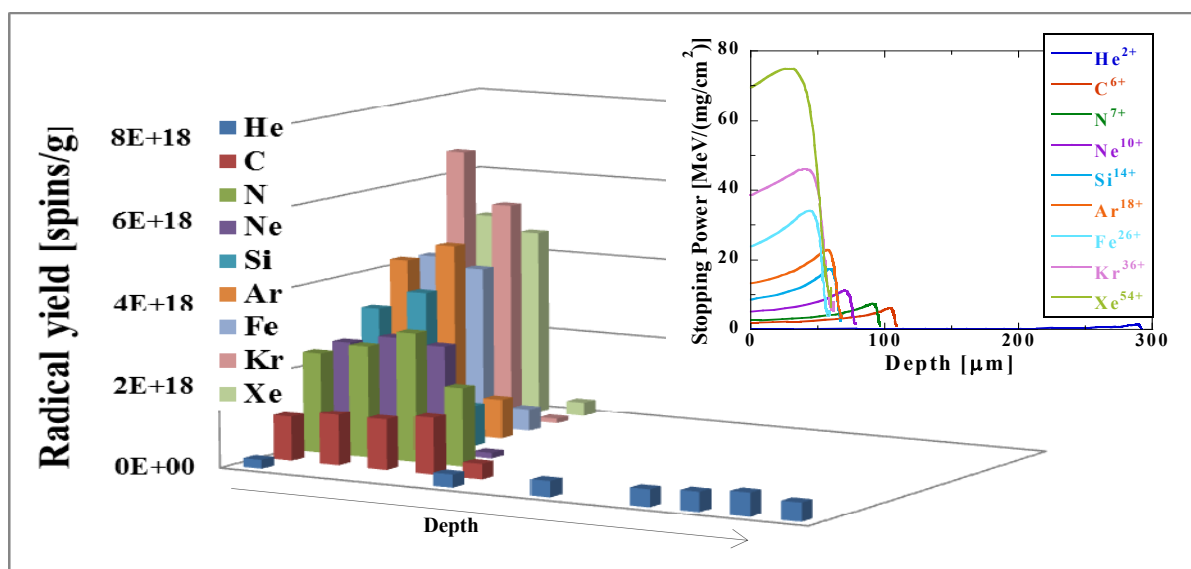


Fig.5 各種重粒子線照射によって各 FEP 層生じたラジカル収量と深さ方向の関係（左図）ならびに、SRIM によって計算したエネルギー付与分布曲線(ブラッグカーブ)（右図）

よりも減少する傾向になることがわかった。これはラジカルの高濃度化による対消滅が原因だと考えられる[13, 14]。また、他のイオンに比べて低 LET の  $\text{He}^{2+}$  を照射した場合は、フルエンスの増加 ( $\sim 1.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$  の範囲) と共にラジカル濃度は比例的に増加するのに対し、 $\text{Ne}^{10+}$  よりも高 LET のイオンを照射した場合はあるフルエンスまでは比例的に、それ以上のフルエンスでは飽和気味にラジカル濃度が増加することがわかった。この現象は、 $\gamma$  線や電子線で大線量を照射した場合においても観察され[15,16]、生成したラジカルが近傍のラジカルとの反応し消滅するためであるといえる。

#### 4. 重粒子による微細加工

これまでに 30~50keV 程度の加速エネルギーの集束イオンビーム(FIB)装置を用いて、高分子材料の直接エッチングによる極微細加工がなされているが、 $\text{Ga}^+$  イオンによる結果であり[17-21]、イオンの核種や加速エネルギーの違いによる加工性に関する知見がなかったので、HIMAC の重粒子線を用いて、高分子材料の加工性を評価した。なお、HIMAC の中エネルギー照射ビームラインには、集束ビームスキャナーが設置されていないので、Q マグネットでデフォーカスしたビームを Ni 製のマスク ( $72\mu\text{m}$  格子状) を通して照射を行った。

Fig.6 は、PTFE に対して  $3.1 \times 10^{12} \text{ ion/cm}^2$  個の  $\text{Kr}^{36+}$  イオンを照射後の SEM 像である[22]。マスクの加工サイズに対応する  $72\mu\text{m}$  四方の格子状にエッチングがなされており、重粒子線の直進性を反映した加工ができています。また、SEM 像からは、加工時に問題となる分解物の再付着などのデブリは観察されなかった。なお、ビームスキャンによる微細加工の場合、規則正しく重粒子が試

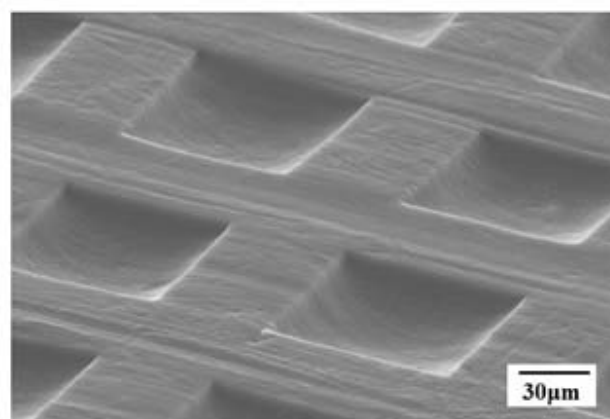


Fig.6 PTFE に  $3.1 \times 10^{12} \text{ ion/cm}^2$  個の  $\text{Kr}^{36+}$  イオン照射後の SEM 像

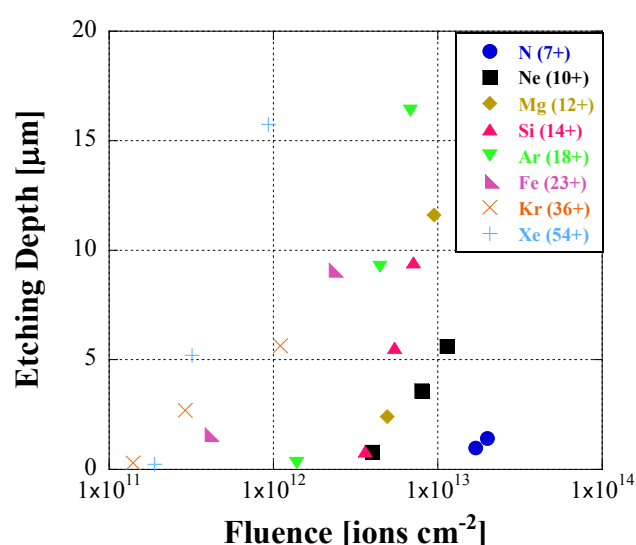


Fig.7 各種重粒子線を PTFE に照射した時のフルエンスとエッチング深さの関係

Table. 1 各種重粒子線による PTFE のエッチング速度.

Ion species	Atomic number (Z)	Etching rate		
		$\mu\text{m (ion cm}^{-2}\text{)}^{-1}$	$\text{g ion}^{-1}$	$-(\text{CF}_2-\text{CF}_2)\text{-units ion}^{-1}$
Ne <sup>10+</sup>	10	$6.5 \times 10^{-13}$	$1.4 \times 10^{-16}$	$8.4 \times 10^5$
Mg <sup>12+</sup>	12	$2.0 \times 10^{-12}$	$4.3 \times 10^{-16}$	$2.6 \times 10^6$
Si <sup>14+</sup>	14	$2.5 \times 10^{-12}$	$5.2 \times 10^{-16}$	$3.2 \times 10^6$
Ar <sup>18+</sup>	18	$3.0 \times 10^{-12}$	$6.3 \times 10^{-16}$	$3.8 \times 10^6$
Fe <sup>26+</sup>	26	$3.9 \times 10^{-12}$	$8.4 \times 10^{-16}$	$5.0 \times 10^6$
Kr <sup>36+</sup>	36	$4.9 \times 10^{-12}$	$1.1 \times 10^{-15}$	$6.3 \times 10^6$
Xe <sup>54+</sup>	54	$2.0 \times 10^{-11}$	$4.2 \times 10^{-15}$	$2.5 \times 10^7$
FIB Ga <sup>+</sup>	31	$5.2 \times 10^{-16}$	$1.1 \times 10^{-19}$	$6.7 \times 10^2$

料に照射されるため、底部にナノスケールの突起状の加工体得られることがあるが、本照射実験ではデフォーカスしたビームを用いているため、重粒子はランダムに照射され、試料底部は平滑な形状となっている。

Fig.7 に各種重粒子線を PTFE に照射した時のフルエンスとエッチング深さの関係を示す。H<sup>+</sup>, He<sup>2+</sup>, C<sup>6+</sup>等の軽イオンでは、このフルエンスの範囲内では、ほとんど直接エッチングされず、エッチング深さの観察はできなかったが、Ne<sup>10+</sup>以上の重イオンでは、フルエンスの増加に従ってエッチングは進行し、また、重いイオンほどエッチング速度が速く、高効率でエッチングが進行する。さらには、エッチングの閾値ともいえるべき閾フルエンス（閾線量）が存在することもわかった。

また、Fig. 7 の傾きより、各種重粒子線照射によるエッチング速度を算出し、まとめたものを Table1 に示す。エッチング速度は、 $2.0 \times 10^{-11} \sim 6.5 \times 10^{-13} \mu\text{m}/(\text{ion}/\text{cm}^2)$ であり、重い核種ほどイオン1個当たりのモノマーユニットの離脱量が多くなることがわかる。

一方、比較対象として Ga<sup>+</sup>による FIB 照射では、PTFE のエッチングに必要とするフルエンスは、HIAMC からの重粒子線照射による加工に比べ約3桁～5桁高くそのエッチング速度レートは、 $5.0 \times 10^{-16} \mu\text{m}/(\text{ion}/\text{cm}^2)$ であった[18,20]。

この原因として、HIMAC からの重粒子線は、エネルギーが高いため、イオンによる物理スパッタよりも二次電子による PTFE の主鎖切断反応がきわめて強く作用し、エッチングが早く進行したのではないかと考えられる。

## 5. 重粒子による空間的な機能性付与～傾斜機能

これまでに述べたように、重粒子線照射によって局所的なエネルギー付与が起き、その結果、高分子材料中にブラッグカーブに沿ったラジカル

が生成捕捉されること、ならびに、エッチングの閾線量があることがわかった。そこで、閾線量以下の領域で、重粒子線のエネルギー付与特性を利用することで、空間的な機能性を有する新規機能材料が合成できると考えられる。

FEP に各種重粒子線を照射し、それぞれの核種の飛跡方向での空間的なエネルギー付与特性の違いを利用することで、ラジカルを FEP 中に傾斜的な分布をもって生成させた。生成したアルキルラジカルを大気中に取り出すことで、過酸化ラジカルとし、その後、イオン交換基を持つスルホン酸をグラフト反応させることで、傾斜機能性電解質膜(G-PEM)を合成した。合成した電解質膜について、スルホン酸基の分布を EDX や XPS で評価した結果、ブラッグカーブのエネルギー付与に対応して、硫黄原子の傾斜的な分布を観察することができ[13]、膜の両面で親水性の異なる傾斜機能材料の合成に成功した。

得られた傾斜機能材料の固体高分子形燃料電池用電解質膜 (PEFC 膜) への適用を検討した。

Ne<sup>10+</sup> 照射後、得られた G-PEM の1層目(Ne1)の平均のグラフト率は9%、3層目(Ne3)は14%であり、これらの値をもとに計算した平均イオン交換容量(IEC)は各々1.0、1.1meq/gであった。平均含水率はそれぞれ10、18%となり、いずれも市販の Nafion®212 とほぼ似たような性質を持つことがわかった。ブラッグピーク近傍の Ne3 は照射面に比べ透過面のスルホン酸基がかなり少なく強い傾斜がかかっていることがわかった。

発電試験は、傾斜度の大きい Ne3 を用いて行った。Ne3 を挟んだ MEA と Nafion®212 の4h 発電前後の発電特性を Fig.9 に示す。Ne3 はアノードからカソードにかけてスルホン酸基の密度傾斜がかかる向き(Ne3\_Up)にセットした。4h の発電試験前の発電特性は両者に大きな違いは見られなかったが、試験後は高電流密度領域における

Nafion®212 の著しい電圧降下が確認された。Ne3\_Up のカソード側での高含水性が、加湿水・生成水で溜まりがちなカソード付近の水を吸水し、安定出力に寄与したのではないかと考えられる。

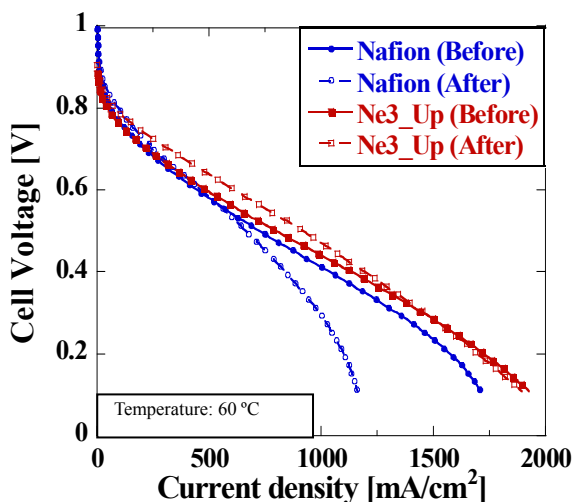


Fig. 9 出力電流 400 mA/cm<sup>2</sup> で 4 時間運転前後での Nafion®212 と Ne3\_Up の I-V 曲線 (PEFC)

## 6. 重粒子による空間的な機能性付与～空間制御

固体高分子形燃料電池用電解質膜 (PEFC 膜) として試料内部に立体的な微細形状を有する空間機能制御材料の創製を行うため、マスクを用いて微細加工形状を有する空間制御材料の創製を検討した。重粒子線を ( $1.0 \times 10^{11}$  ions/cm<sup>2</sup>) を、Ni 製のマスク (72μm 格子状) を通して FEP に照射した。その後、スルホン酸基をグラフト反応させることで、電解質膜 (MF-PEM) を作製した。

Fig. 10 に Si<sup>14+</sup> イオンによる空間機能制御膜のレーザー顕微鏡像を示す。マスクの形状に合わせて、表面には親水部の隆起による格子状の凹凸があることが確認された。この凹凸は、イオンのフルエンスが大きくなると、大きくなったことから、この凹凸は、親水化領域の体積膨潤に由来し、このままでは PEFC 膜としての性能が得られないことから、膜表面をさらに機能化することによって、平滑化を行った。

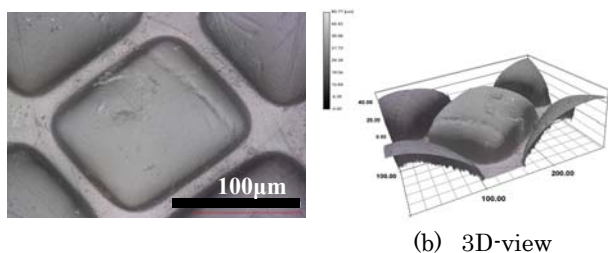


Fig.10 Si<sup>14+</sup> イオンによる空間機能制御膜のレーザー顕微鏡像

膜表面の機能化には、重粒子線照射の前に、阪大産研設置の超低エネルギー電子線加速器を用い

て加速電圧 70kV で真空中室温照射を行い、表面から 7μm 程度の領域のみにラジカルを誘起した。その後、ラジカルを誘起した状態で、重粒子線照射を行い、機能化を行った (SM<sup>2</sup>F-PEM)。その結果、膜表面の隆起は大きく抑制された。

SM<sup>2</sup>F-PEM 膜を SEM-EDX を用いた元素マッピングにより、その空間的なスルホン酸基 (SO<sub>3</sub>) の分布を評価した。その結果、SM<sup>2</sup>F-PEM 膜は、膜の表面では均一な硫黄原子の分布を持ち、さらに断面では、格子状に S 原子が存在することが確認できた。

メタノール型燃料電池 (DMFC) 用電解質膜として適用を検討するため、TCD ガスクロマトグラフィを用いて、燃料となるメタノールの膜透過テストを行った。その結果、SM<sup>2</sup>F-PEM 膜は、マスク無しでイオン照射して得た同程度のグラフト率を示す機能化膜 (通常膜) よりも約三割低いメタノール透過性を示した。これにより、立体的なイオン交換基の空間制御を行った SM<sup>2</sup>F-PEM 膜は、その構造によりメタノール透過性が抑制されていることがわかる。

Fig.11 に DMFC 発電試験結果を示す。この結果から、SM<sup>2</sup>F-PEM 膜は、通常型の 1.5 倍の出力を示した。

以上のことから重粒子線による空間的エネルギー付与によって、空間的に機能制御された新素材の創製が可能であることがわかる。

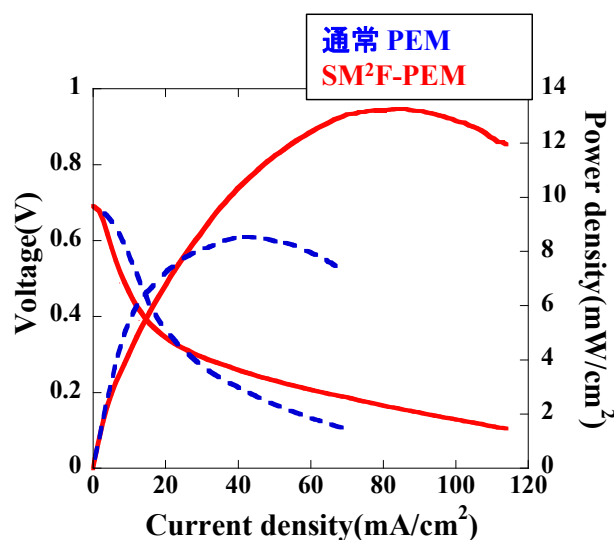


Fig. 11 SM<sup>2</sup>F-PEM と通常 PEM の I-V 曲線 (DMFC)

## 参考文献

- [1] J. F. Ziegler, 2013. The stopping and range of ions in matter. SRIM-2013, <http://www.srim.org/>
- [2] A. Oshima, K. Murata, T. Oka, N. Miyoshi, A. Matsuura, H. Kudo, T. Murakami, E. Katoh, M. Washio, Y. Hama, Nucl. Instr. and Meth. B 265 (2007) 314-319.
- [3] Y. Hamaa, T. Oka, J. Uchiyama, H. Kanbe, K. Nabeta, F. Yatagai, Radiat. Phys. Chem.,

- 62 (2001) 133-139
- [4] Y. Hama, T. Oka, H. Kudoh, M. Sugimoto, T. Seguchi, Nucl. Instr. and Meth. B 208 (2003) 123-132
- [5] T. Oka, H. Kanbe, F. Yatagai, Y. Hama, Nucl. Instr. and Meth. B 208 (2003) 181-184
- [6] Y. Hama, T. Oka, Res. Chem. Intermed., 31 (2005) 19-24
- [7] T. Oka, Y. Hama, Res. Chem. Intermed., 31 (2005) 661-666
- [8] A. Oshima, S. Ikeda, T. Seguchi, Y. Tabata, Radiat. Phys. Chem. 50(1997), 519-522
- [9] A. Oshima, M. Washio, Nucl. Instr. and Meth. B 208(2003) 380-384
- [10] T. Gowa, T. Shiotsu, T. Urakawa, T. Oka, T. Murakami, A. Oshima, Y. Hama, M. Washio, Radiat. Phys. Chem., 80 (2011) 264-267
- [11] T. Oka, M. Kondo, A. Oshima, M. Washio, M. Iwata, H. Kudo, Y. Katsumura, K. Ito, Y. Kobayashi, T. Murakami, Y. Hama, ACS SYMPOSIUM SERIES 978, Polymer Durability and Radiation Effects, 2007, pp131-139, Edited by Mathew C. Celina and Roger A. Assink
- [12] T. Oka, A. Oshima, R. Motohashi, N. Seto, Y. Watanabe, R. Kobayashi, K. Saito, H. Kudo, T. Murakami, M. Washio, Y. Hama, Radiat. Phys. Chem., 80 (2011) 278-280
- [13] F. Shiraki, T. Yoshikawa, A. Oshima, Y. Oshima, Y. Takasawa, N. Fukutake, T. G. Oyama, T. Urakawa, H. Fujita, T. Takahashi, T. Oka, H. Kudo, T. Murakami, Y. Hama, M. Washio, Nucl. Instr. and Meth. B 269 (2011) 1777-1781
- [14] [14] T. Yoshikawa, A. Oshima, T. Murakami, M. Washio, Radiat. Phys. Chem. 81 (2012), 81, 1904-1908
- [15] A. Oshima, T. Seguchi, Y. Tabata, Radiat. Phys. Chem. 50(1997), 601-606
- [16] A. Oshima, T. Seguchi, Y. Tabata, Radiat. Phys. Chem. 55(1999) 61-71
- [17] Y. Takasawa, N. Fukutake, K. Okamoto, A. Oshima, S. Tagawa, M. Washio, J. Photopolym. Sci. Technol. 22 (2009) 341-345
- [18] N. Fukutake, N. Miyoshi, Y. Takasawa, T. Urakawa, T. Gowa, K. Okamoto, A. Oshima, S. Tagawa, M. Washio, Jpn. J. App. Phys., 49 (2010) 065201-1-5
- [19] S. Okubo, T. Takahashi, Y. Takasawa, T. Gowa, T. Sasaki, N. Nagasawa, M. Tamada, A. Oshima, S. Tagawa, M. Washio, J. Photopolym. Sci. Technol. 23 (2010) 393-398
- [20] N. Miyoshi, A. Oshima, T. Urakawa, N. Fukutake, H. Nagai, T. Gowa, Y. Takasawa, T. Takahashi, Y. Numata, T. Katoh, E. Katoh, S. Tagawa, M. Washio, Radiat. Phys. Chem., 80 (2011) 230-235
- [21] A. Oshima, S. Okubo, T. G. Oyama, M. Washio, S. Tagawa, Radiat. Phys. Chem. 81 (2012) 584-588
- [22] H. Tsubokura, A. Oshima, T. G. Oyama, Y. Takasawa, N. Fukutake, S. Okubo, T. Yoshikawa, T. Oka, T. Murakami, Y. Hama, M. Washio, Radiat. Phys. Chem. 92 (2013) 37-42



# 超伝導体に対する粒子線照射効果

## Effects of Particle Irradiations in Superconductors

為ヶ井 強  
東京大学工学系研究科

### Abstract

Irradiations of high-energy particles are well-controlled methods to introduce defects into superconductors. Defects created in superconductors play two major roles. The first is the mixing of superconducting order parameters on different part of the Fermi surface. Depending on the anisotropy and symmetry of the order parameter, such scattering centers affect the superconducting transition temperature weakly or strongly. This, in turn, can work as a tool to know the nature of superconducting order parameters. The second is that the introduced defects work as pinning centers for quantized vortices whose motions give rise to dissipations in superconductors, which are unfavorable for the application of superconductors. In this article, these two aspects of artificial defects in superconductors created by energetic particle irradiations are reviewed.

### 1. はじめに

“ゼロ抵抗”という常識を超えた現象が実現する超伝導体の研究・開発には2つの側面がある。一つは、ある物質がなぜ超伝導状態を示すかという超伝導発現機構の解明及び、実現した超伝導状態の性質の解明を目指した基礎研究である。もう一つは、超伝導体の特異な性質を用いた応用研究であり、リニア・モーターカーやエネルギー損失の無い送電線への適用がそれにあたる。これら2つの課題を解明・実現するために、加速器等を用いた高エネルギー粒子の照射により生成された欠陥が重要な役割を果たしてきた。本稿では、粒子線照射を利用した超伝導体の研究を、HIMACを用いて行った実験を交えて紹介する。

### 2. 超伝導状態の基礎

量子効果がマクロなスケールで発現した超伝導体においては、様々な特異な現象が実現する。最も顕著なものは“ゼロ抵抗”であり、エネルギー損失の無い送電や強磁場発生への応用が期待されている。超伝導現象の本質は完全反磁性であり、“マイスナー効果”として知られている。超伝導状態は磁場の印加と共に不安定化し、最終的には常伝導状態へと転移する。しかし多くの超伝導体では、常伝導状態へと転移する前に、超伝導領域と常伝導領域が共存した“混合状態”が実現する。混合状態においては、超伝導体に部分的に磁束が磁束量子として侵入する。磁束量子の運動は、本来ゼロ抵抗のはずの超伝導体に散逸を発生させる。したがって、超伝導体のゼロ抵抗を利用するには、磁束量子の運動をなんらかの形で抑制する必要がある。その役割を果たすのが広い意味での欠陥であり、高エネルギーの粒子線照射により、制御された形でこれを導入することができる。

### 3. 粒子線照射により生成される欠陥

様々なエネルギーの粒子を各種物質に照射し

たとき、生成される欠陥は様々である。また、粒子がエネルギーを失う過程で、逐次欠陥の形状も変化する。図1に、粒子線照射により生成される2種類の代表的な欠陥を示す。図1(a)は軽粒子により生成される点状欠陥であり、図1(b)はよりエネルギーの大きな重イオン照射により生成される柱状欠陥である。どちらの欠陥も、外部磁場下で超伝導体に侵入した磁束量子を捕捉する。

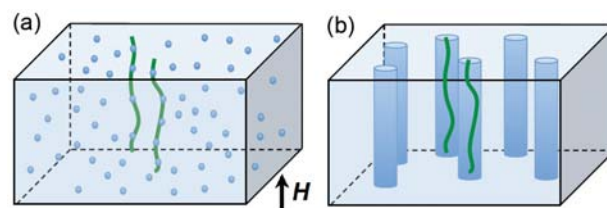


図1 粒子線照射により超伝導体に生成される2種類の欠陥：(a)軽粒子照射による点状欠陥、(b)重イオン照射による柱状欠陥。磁場下で超伝導体に侵入した磁束量子（試料中の曲線）はこれらの欠陥によりピン止めされる。

### 4. 生成された欠陥の効果

#### 4.1 準粒子に対する散乱中心

様々な実験事実から超伝導体は波数空間において、エネルギーギャップを生じることにより、超伝導状態を実現していることが知られている。多くの超伝導体は、波数によらずおよそ同じ超伝導ギャップを持っており、その対称性からs波超伝導体と呼ばれる。s波超伝導体に、散乱中心を導入すると、それらが非磁性のものである限り、超伝導転移温度 ( $T_c$ ) に影響はない。これは、Anderson の定理として良く知られた事実である[1]。しかし、s波超伝導体でも磁性を持つ散乱中心を導入した場合には大きな  $T_c$  の抑制があり、Abrikosov と Gor'kov により説明されている[2]。一方、銅酸化物高温超伝導体のような電子間斥力でクーパー対が形成されている場合、エネルギーギャップが波数に応じて大きさ及び符号を変える場合がある。銅酸化物はd波超伝導体であり、

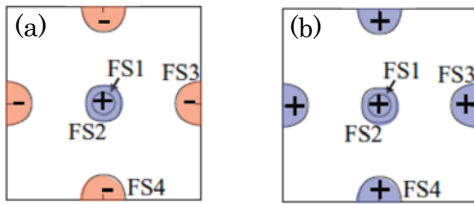


図2 鉄系超伝導体で提唱されている(a)磁気揺らぎによる $s\pm$ 波超伝導状態と(b)軌道揺らぎによる $s++$ 波超伝導状態の超伝導ギャップの模式図。

エネルギーギャップはフェルミ面上で符号を変える。このような $d$ 波超伝導体に非磁性の散乱体を導入すると、符号の異なる超伝導ギャップの状態が混ざり合い、全体としての超伝導ギャップの大きさが小さくなり、 $T_c$ が大きく抑制される。このように、非磁性の散乱中心の導入は、その超伝導体のエネルギーギャップ構造の同定において、大変有力な手段となる。非磁性散乱中心の導入方法には2つの手法がある。最も一般的なのは、化学的手法であり、具体的には非磁性不純物の導入である。しかし、この場合、散乱中心濃度を変化させるには複数の試料を準備する必要がある。また、試料依存性による揺らぎをどう考慮するのも問題となる。一方、物理的な手法として、粒子線照射による点状欠陥の導入が用いられている。プロトンを $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ に照射した場合の実験はすでに試みられており、照射量に応じて散乱率が增大し電気抵抗が増大すると共に、 $d$ 波超伝導体であることを反映して大きな $T_c$ の抑制が観測されている[3]。

近年最も研究が盛んな鉄系超伝導体[4]においても、超伝導発現機構に直結する超伝導ギャップの性質に関して2つの大きな考え方があり。鉄系超伝導体は2次元的な電子状態を持ち、2次元面内で2図に示すような2種類のフェルミ面を持つ[5]。すなわち、ゾーン中心のホール面とゾーン境界の電子面である。鉄系超伝導体における超伝導が銅酸化物高温超伝導体と同様に“磁気揺らぎ”により生じているとすると、異なるフェルミ

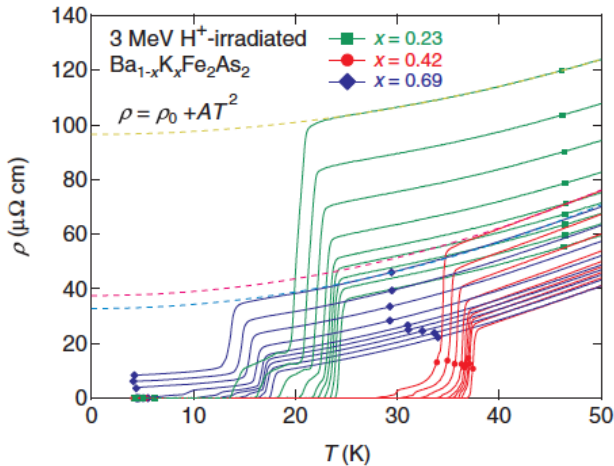


図3 3 MeVのプロトンを最大 $5.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 照射した3種類のドーピング量をもつ $(\text{Ba}, \text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 単結晶における電気抵抗率の温度依存性の変化[12]。

面上の超伝導ギャップは図2(a)に示すように符号を変えると都合が良い。一方、鉄系超伝導体において重要な役割を果たしていることが明らかな“軌道揺らぎ”が超伝導の起因であるとする、2種類のフェルミ面上のギャップ関数は符号が同じになると考えられている。したがって、粒子線照射を用いて点状欠陥生成し散乱を導入することにより、その $T_c$ に対する効果を系統的に調べ、これら2種類の超伝導状態を区別できる可能性がある。

3図に、最も典型的な鉄系超伝導体である $(\text{Ba}, \text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ にプロトンを照射した場合の実験例を示す[6]。3種類の異なるドーピング量をもつ $(\text{Ba}, \text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 単結晶の電気抵抗の温度依存性を順次プロトン照射量を増やしなが、最大照射量 $5.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ まで測定したものである。プロトン照射による欠陥導入に伴い、電気抵抗が系統的に増加すると共に、 $T_c$ が低下していることがわかる。破線で示すように残留抵抗率 $\rho_0$ を見積もると、 $T_c$ の最も高い最適ドーピング( $x=0.42$ )では $\rho_0 \sim 5 \mu\Omega\text{cm}$ と大変小さいことがわかる。

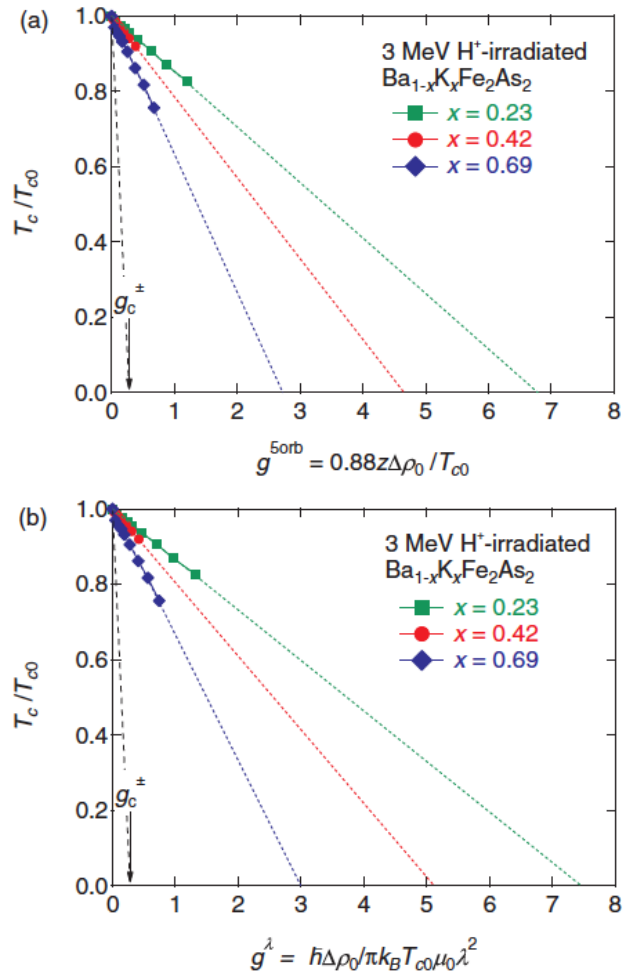


図4 3 MeVのプロトン照射した3種類の異なるドーピング量をもつ $(\text{Ba}, \text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 単結晶における規格化転移温度( $T_c/T_{c0}$ )の規格化緩和率( $g$ )依存性。 (a)第一原理計算と(b)磁場侵入長を用いて $g$ を評価している[12]。

図4に3 MeVのプロトン照射に伴う3種類の $(\text{Ba,K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 単結晶の規格化転移温度 $T_c/T_{c0}$ を規格化緩和率 $g(=h/2\pi k_B T_{c0} \tau)$ の関数として示した。ここで、 $\tau$ のは散乱時間、 $T_{c0}$ は散乱を導入していないときの $T_c$ である。欠陥導入による電気抵抗率の増大 $\Delta\rho$ は散乱時間 $\tau$ の減少によるが、 $\tau$ を評価するのに際し、何らかの考察が必要になる。図4(a)では鉄の5つのバンドをすべて考慮した第一原理計算による $g$ の評価 $g^{\text{5orb}}(=0.88z\Delta\rho/T_{c0})$ を用いた。ここで、 $z(=m/m^*)$ はバンドの規格化因子である。一方、図4(b)では $n/m^*$ を磁場侵入長 $\lambda$ ( $\propto (n/m^*)^{-1/2}$ )の値から評価し、 $g$ を計算し $g^\lambda$ としている。どちらの場合もほぼ同じような $g$ の評価を与えていることがわかる。また、実験データを外挿し $T_c/T_{c0}=0$ となる $g$ の値は、どちらの場合も3~8程度の大きな値をとる。一方、最も単純な $s$ ±波超伝導体で期待される $T_c/T_{c0}=0$ となる $g(g_c)$ は約0.3であることから、 $(\text{Ba,K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 単結晶で実現している超伝導状態は単純な $s$ ±波超伝導体とは相いれないものと考えられる。ただし、ここで仮定した $\lambda=200$  nmは、上記の結晶そのものについての測定値ではないので、注意を要する。同様な結論は他の鉄系超伝導体である $\text{Ba}(\text{Fe,Co})_2\text{As}_2$ 単結晶に関しても得られている[7]。しかし、類似の別の $\text{Ba}(\text{Fe,Ru})_2\text{As}_2$ 単結晶における2.5 MeVの電子線照射実験からは、より小さな $g_c$ の値が報告されており[8]、今後それぞれの粒子が生成する欠陥の性質・形状等に関する詳細な考察が必要になってくるものと考えられる。また、鉄系超伝導体は明確に分離したホールと電子からなるフェルミ面が存在し、散乱時間はバンド間散乱だけではなく、バンド内散乱も存在することから、これらの寄与が電気抵抗と $T_c$ の抑制にどのように定量的に効いてくるのかの詳細な検討も必要となろう。

## 4.2 量子化磁束のピン止め中心

### 4.2.1 点状欠陥

3節に説明したように比較的軽い粒子の照射により点状の欠陥が生成される。中性子、電子、陽子(プロトン)がそれに当たる。金属系超伝導体では、 $J_c$ 増強のために中性子照射が用いられ、その効果が確認されている。粒子線照射による点状欠陥の超伝導体に対する効果が見直されたのは、高温超伝導体が発見されてからである。図5は $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ に3 MeVのプロトンを $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 程度まで照射した例である[9]。自己磁場下における不可逆磁化 $M(\propto J_c)$ が5 Kにおいて約6倍に、77 Kでは10倍以上に大幅に増強されている。

同様のプロトン照射による $J_c$ の増強は、鉄系超伝導体でも試みられている。 $\text{Ba}_x(\text{Fe,Co})_2\text{As}_2$ 単結晶では、 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 程度までのプロトン照射により低温・自己磁場下で約2.5倍の $J_c$ の増大が観測さ

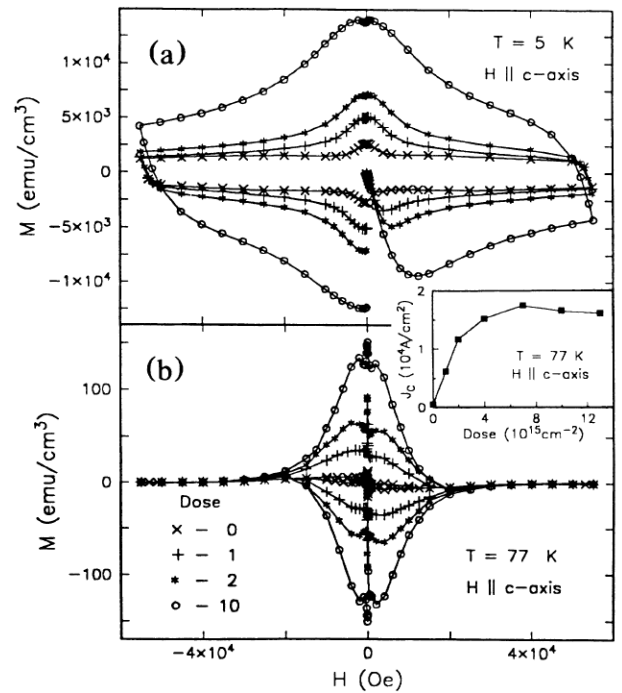


図5 3 MeVのプロトンを照射した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 単結晶における磁化( $M \propto J_c$ )の磁場依存性(a) 5 K、(b) 77 K。照射量の単位は $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  [9]。

れている[10]。図6は、 $(\text{Ba,K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 単結晶に $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 程度までプロトンを照射した場合の $J_c$ の変化である[11]。この場合も、5 Kにおいて $J_c$ が3倍以上増強されている。

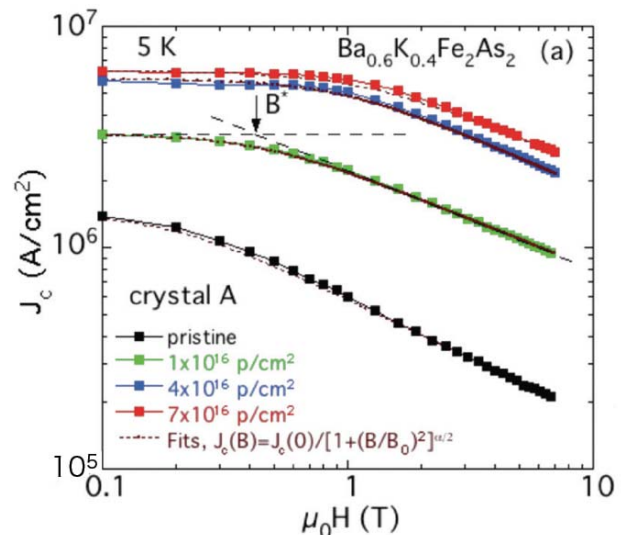


図6 3 MeVのプロトン照射した $(\text{Ba,K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 単結晶における5 Kでの $J_c$ の磁場依存性の照射量による変化[11]。

### 4.2.2 柱状欠陥

超伝導体への重イオン照射による柱状欠陥の導入は、銅酸化物高温超伝導体の発見以降活発に行われた。図7は $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ に580 MeVのSnイオンを照射した例である[12]。柱状欠陥においては、照射量をマッチング磁場 $B_\Phi = \Phi_0 n$ 表わすのが通例である。ここで、 $\Phi_0(=2.07 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ G})$ は磁束



量子、 $n$  は柱状欠陥の面密度である。点状欠陥のときと同様に  $J_c$  の大幅な増大が実現されている。 $B_\Phi=5$  T の照射では、5 K において 5 倍、77 K では数十倍以上の増大が見られている。YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> においては、柱状欠陥の直径は 8-10 nm であり、 $B_\Phi=5$  T における欠陥の平均間隔 20 nm と近くっており、この数倍の柱状欠陥を導入すると既に超伝導が大幅に破壊され  $J_c$  の減少が始まる。

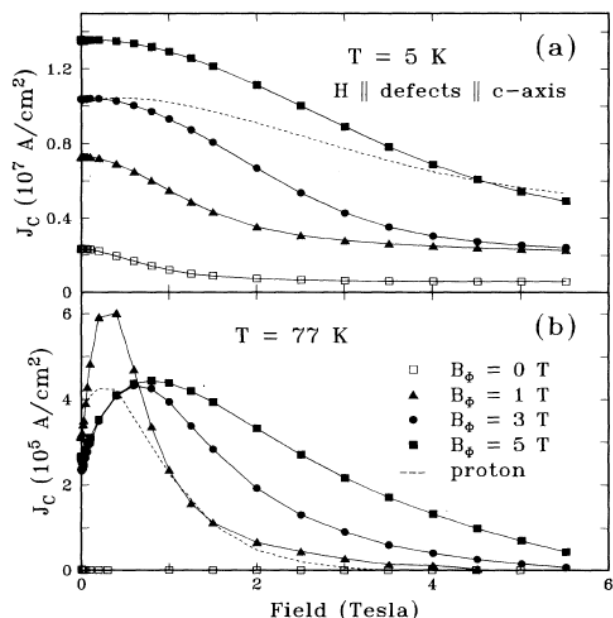


図7 580 MeV の Sn イオンを照射した YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 単結晶における  $J_c$  の磁場依存性(a) 5 K、(b) 77 K [11]。

柱状欠陥の最も特徴的な点はその方向性であり、例えば柱状欠陥を結晶表面 ( $ab$  面) から 45° 傾けて導入した場合、磁場をその方向に印加した場合と、逆向きに 45° 傾けて印加した場合で、その効果が大きく異なることが報告されている[11]。

また、重イオン照射で導入される柱状欠陥と同様な欠陥は、図8に示すように不純物を意図的に導入した薄膜においても生成可能であることが明らかにされている[13]。この種の化学的に導入した柱状欠陥 (ナノロッド) は、実用的な高温超伝導体テープ線材において非常に有効なピン止め中心として働き  $J_c$  を増大させることが確認されており、実用的にも利用され始めている。

図9は、鉄系超伝導体 Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 単結晶に 200 MeV の Au イオンを照射した場合の柱状欠陥

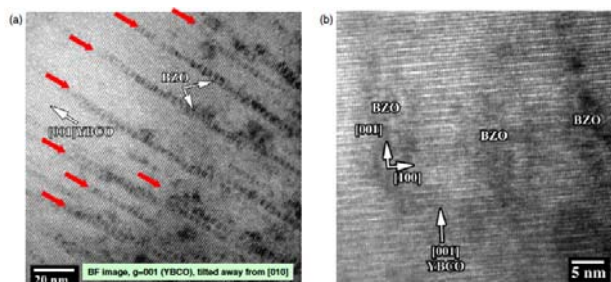


図8 意図的に不純物を導入して成長した YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 薄膜における BaZrO<sub>3</sub> の(a)ナノロッドと(b)ナノドット[13]。

の例である[14,15]。銅酸化物高温超伝導体の場合と比較して不連続な柱状欠陥となっており、その直径も 2-5 nm と銅酸化物高温超伝導体のものと比較して小さい。Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 単結晶に 200 MeV

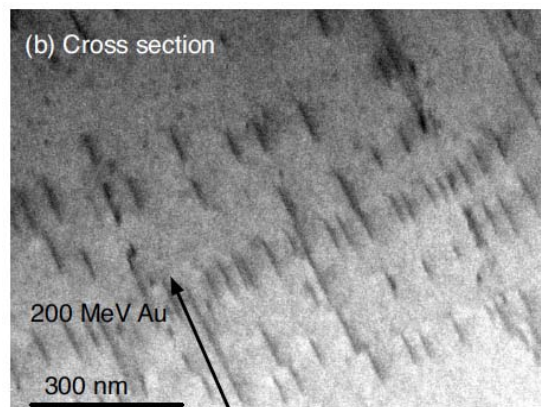


図9 200 MeV の Au イオンを  $B_\Phi=2$  T で照射した Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 単結晶における柱状欠陥の電子顕微鏡像[14]。

の Au イオンを照射した前後の  $J_c$  の磁場依存性の变化を 10 図に示す。2 K・自己磁場下で  $1 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> であったものが、 $5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> まで増大している。中温域ではより大きな  $J_c$  の増大が見られる。

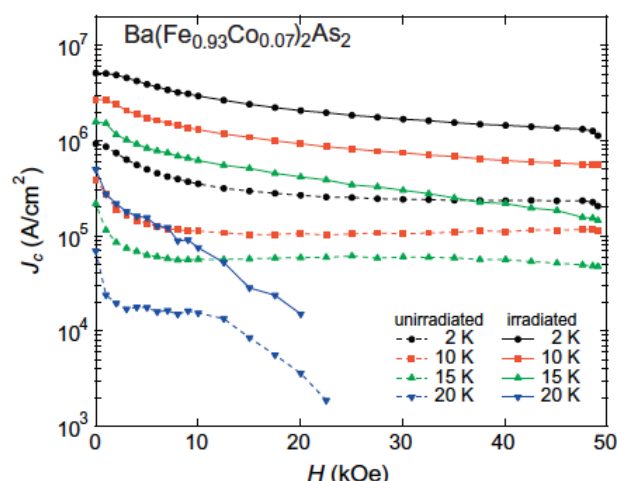


図10 200 MeV の Au イオンを  $B_\Phi=2$  T で照射した Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 単結晶における照射前後の  $J_c$  の磁場依存性の比較[14]。

最近の研究では、(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 単結晶への 320 MeV の Au イオン照射の場合に、5 K・自己磁場下において  $1 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup> という大きな  $J_c$  も実現され、鉄系超伝導体の実用材料としての可能性が注目を集めている[15]。実際、パウダー・イン・チューブ法を用いて作製した鉄系超伝導体線材では高磁場下において、従来型超伝導体の Nb<sub>3</sub>Sn 線材を凌駕する性能も報告されつつある[16]。

## 5. おわりに

本稿では、超伝導体における粒子線照射効果を、銅酸化物高温超伝導体、鉄系超伝導体を中心に、HIMAC を用いて得られた我々のグループの最近

の結果と併せて紹介した。特に、鉄系超伝導体における最近の実験では、銅酸化物における結果と併わせて考察することにより、超伝導体中での子磁束量子に対する照射欠陥の本質的な役割が明らかにされようとしていることを付記しておく。

最後に、国内の他の照射施設と比較し、HIMACは年に2度の申請の機会があり、大変使い勝手の良い施設となっている。照射できる核種・エネルギー、および照射強度は、加速器等の能力により制限されることは十分理解できる。一方、照射ビームの均一性および定量性に関しては、改善の余地があると考えている。HIMACにおいては、加速器側での調整によりある程度のビームサイズの調整が可能である。しかし、強度の強い領域を1 cm<sup>2</sup>程度にしかできない。他の施設では、電磁石によるビームの2次元的な走査により、均一な照射の行える面積を増大できる。また、照射により発生する2次電子によるビーム強度計測の誤差を抑える機構が装備されている場合もある。物質科学における粒子線照射効果の定量的な解析・理解のためには、このあたりの課題を解決し、より使い勝手の良い施設にしていいただければと願う次第である。

#### 謝辞

本稿に用いた鉄系超伝導体における照射効果の実験は、以下の方々の協力により行われたものである。(敬称略) 東京大学：仲島康行、田縁俊光、卞舜生、放医研の北村尚、村上健、原子力研究機構の岡安悟、若狭湾エネルギー研究センター：笹瀬雅人、RIKEN：神原正、金井保之。

#### 参考文献

- [1] P. W. Anderson, “Theory of dirty superconductors”, *J. Phys. Chem. Solids* **11**, 26 (1959).
- [2] A. A. Abrikosov and L. P. Gor’kov, “Contribution to the theory of superconducting alloys with paramagnetic impurities”, *Sov. Phys. JETP* **12**, 1243 (1961).
- [3] F. Rullier-Albenque, H. Alloul, and R. Tourbot, “Influence of Pair Breaking and Phase Fluctuations on Disordered High  $T_c$  Cuprate Superconductors”, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 047001 (2003).
- [4] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, “Iron-Based Layered Superconductor  $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$  ( $x = 0.05-0.12$ ) with  $T_c = 26$  K”, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008).
- [5] P. J. Hirschfeld, M. M. Korshunov, and I. I. Mazin, “Gap symmetry and structure of Fe-based superconductors”, *Rep. Prog. Phys.* **74**, 124508 (2011).
- [6] T. Taen, F. Ohtake, H. Akiyama, H. Inoue, Y. Sun, S. Pyon, T. Tamegai, and H. Kitamura, “Pair-breaking effects induced by 3 MeV proton irradiation in  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ”, *Phys. Rev. B* **88**, 224514 (2013).
- [7] Y. Nakajima, T. Taen, Y. Tsuchiya, T. Tamegai, H. Kitamura, and T. Murakami, “Suppression of the critical temperature of superconducting  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  by point defects from proton irradiation”, *Phys. Rev. B* **82**, 220504(R) (2010).
- [8] R. Prozorov, M. Kończykowski, M. A. Tanatar, A. Thaler, S. L. Bud’ko, P. C. Canfield, V. Mishra, and P. J. Hirschfeld, “Effect of Electron Irradiation on Superconductivity in Single Crystals of  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ru}_x)_2\text{As}_2$  ( $x = 0.24$ )”, *Phys. Rev. X* **4**, 041032 (2014).
- [9] L. Civale, A. D. Marwick, M. W. McElfresh, T. K. Worthington, A. P. Malozemoff, F. H. Holtzberg, J. R. Thompson, M. A. Kirk, “Defect Independence of the Irreversibility Line in Proton-Irradiated Y-Ba-Cu-O Crystals”, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1164 (1990).
- [10] T. Taen, Y. Nakajima, T. Tamegai, and H. Kitamura, “Enhancement of critical current density and vortex activation energy in proton-irradiated Co-doped”, *Phys. Rev. B* **86**, 094527 (2012).
- [11] K. J. Kihlstrom, L. Fang, Y. Jia, B. Shen, A. E. Koshelev, U. Welp, G. W. Crabtree, W.-K. Kwok, A. Kayani, S. F. Zhu, and H.-H. Wen, “High-field critical current enhancement by irradiation induced correlated and random defects in  $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$ ”, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 202601 (2013).
- [12] L. Civale, A. D. Marwick, T. K. Worthington, M. A. Kirk, J. R. Thompson, L. Krusin-Elbaum, Y. Sun, J. R. Clem, and F. Holtzberg, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 648 (1991).
- [13] A. Goyal, S. Kang, K. J. Leonard, P. M. Martin, A. A. Gapud, M. Varela, M. Paranthaman, A. O. Ijaduola, E. D. Specht, J. R. Thompson, D. K. Christen, S. J. Pennycook, and F. A. List, “Irradiation-free, columnar defects comprised of self-assembled nanodots and nanorods resulting in strongly enhanced flux-pinning in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films”, *Supercond. Sci. Technol.* **18**, 1533 (2005).
- [14] Y. Nakajima, Y. Tsuchiya, T. Taen, T. Tamegai, S. Okayasu, and M. Sasase, “Enhancement of Critical Current Densities in Co-Doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  with Columnar Defects Introduced by Heavy-Ion Irradiation”, *Phys. Rev. B* **80**, 012510 (2009).
- [15] T. Tamegai, T. Taen, H. Yagyuda, Y. Tsuchiya, S. Mohan, T. Taniguchi, Y. Nakajima, S. Okayasu, M. Sasase, H. Kitamura, T. Murakami, T. Kambara, and Y. Kanai, “Effects of particle irradiations on vortex states in iron-based superconductors”, *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 084008 (2012).
- [16] S. Pyon, T. Taen, F. Ohtake, Y. Tsuchiya, H. Inoue, H. Akiyama, H. Kajitani, N. Koizumi, S. Okayasu, and T. Tamegai, “Enhancement of



critical current densities in  $(\text{Ba,K})\text{Fe}_2\text{As}_2$  by 320 MeV Au irradiation in single crystals and by high-pressure sintering in PIT wires”, *Appl. Phys. Express* **6**, 123101 (2013).

- [17] Z. S. Gao, K. Togano, A. Matsumoto and H. Kumakura, “High transport  $J_c$  in magnetic fields up to 28T of stainless steel/Ag double sheathed Ba122 tapes fabricated by scalable rolling process”, *Supercond. Sci. Technol.* **28**, 012001 (2015).

# A1. HIMAC 共同利用研究 の実施状況

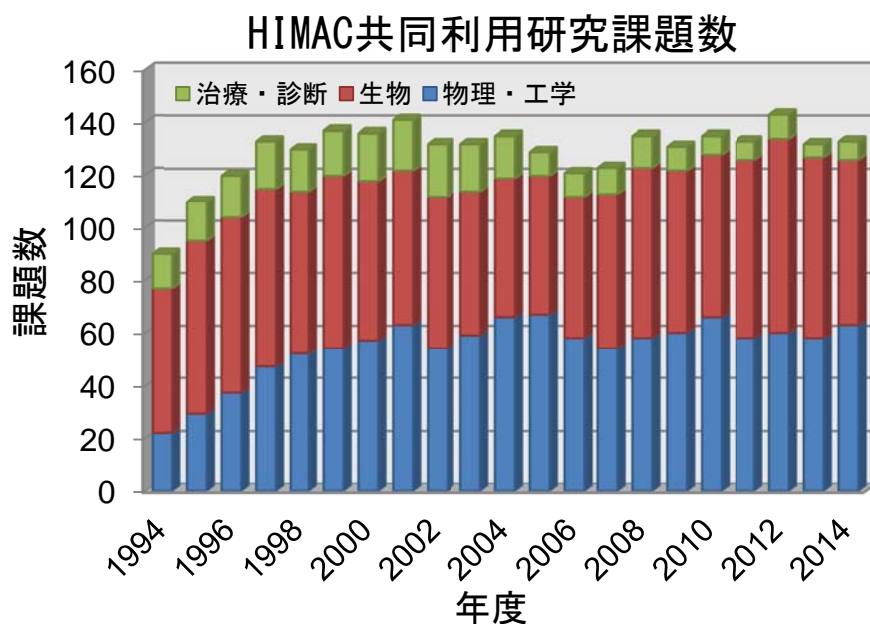
Summary of the Research Project with  
Heavy Ions at NIRS-HIMAC



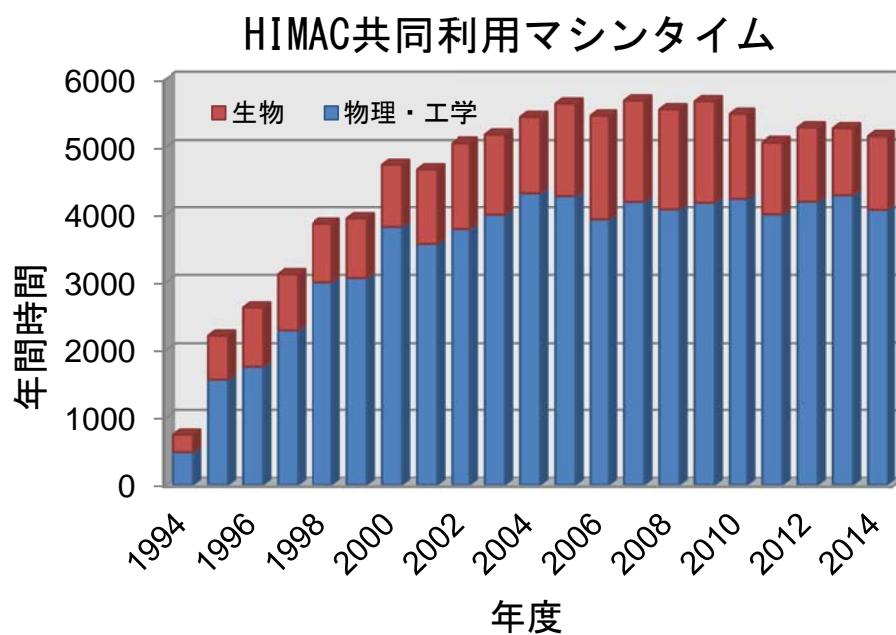
## 共同利用研究のまとめ

### 1 研究課題数

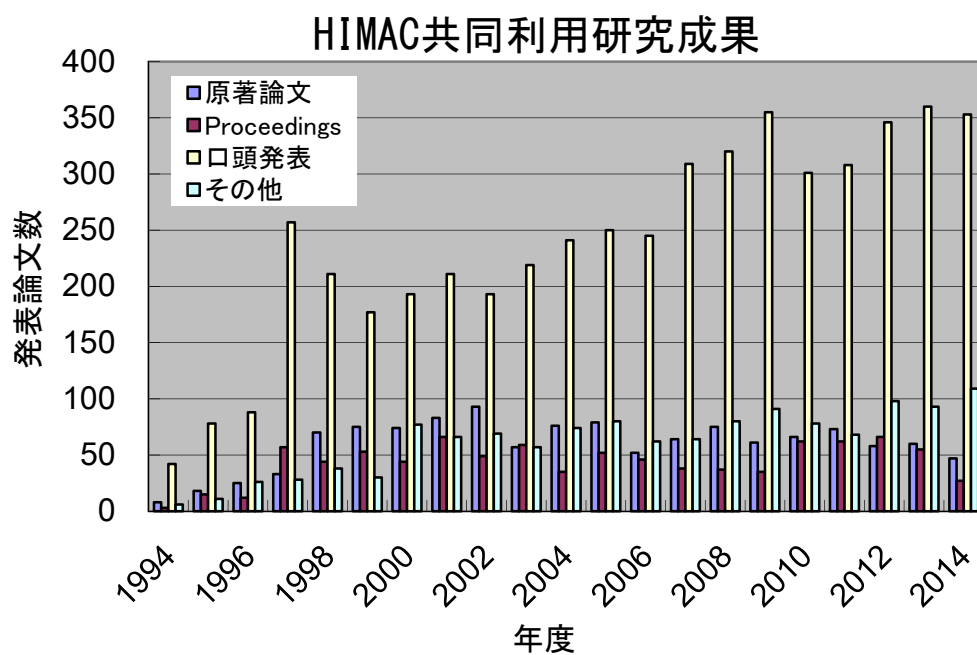
- ・ HIMAC 共同利用研究では、便宜上、課題を3つのカテゴリー（治療・診断班、生物班、物理・工学班）に分けている。
- ・ 治療・診断班は主に重粒子線治療の結果の解析や、治療方法、用具の開発、診断方法の開発研究等を行なう。
- ・ 生物班は細胞や動物等を照射対象とする課題。
- ・ その他の照射実験は全て物理・工学班に分類。



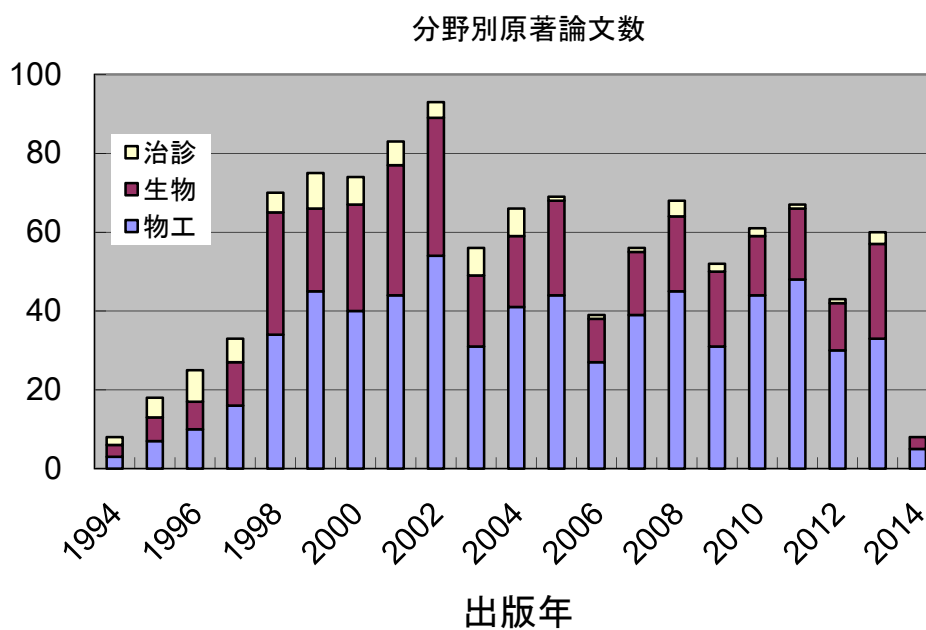
### 2 マシンタイム (1994 年度～)



### 3 研究成果（1994年度～）

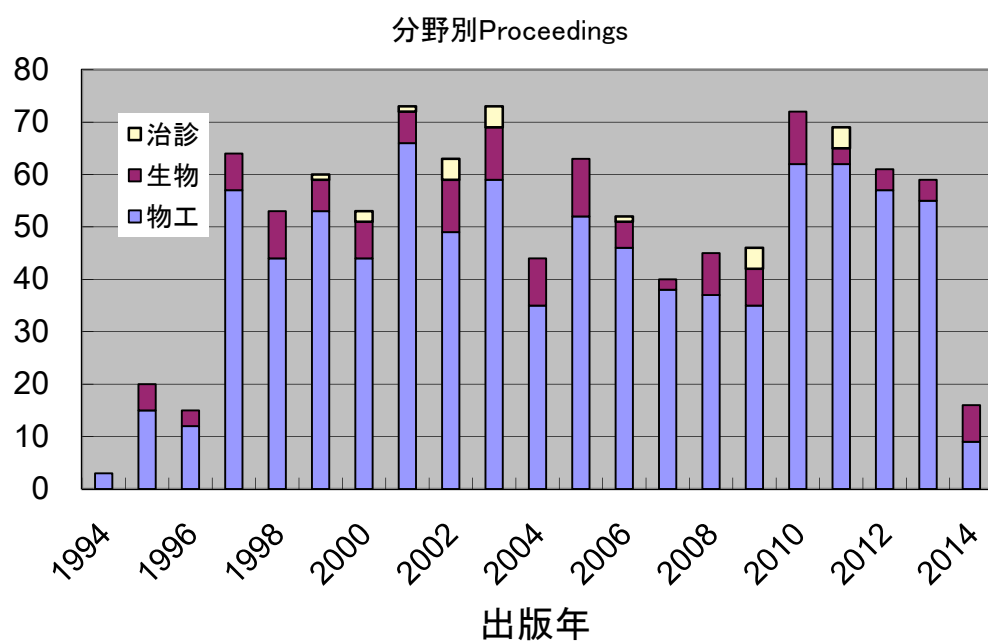


#### 3.1 分野別原著論文

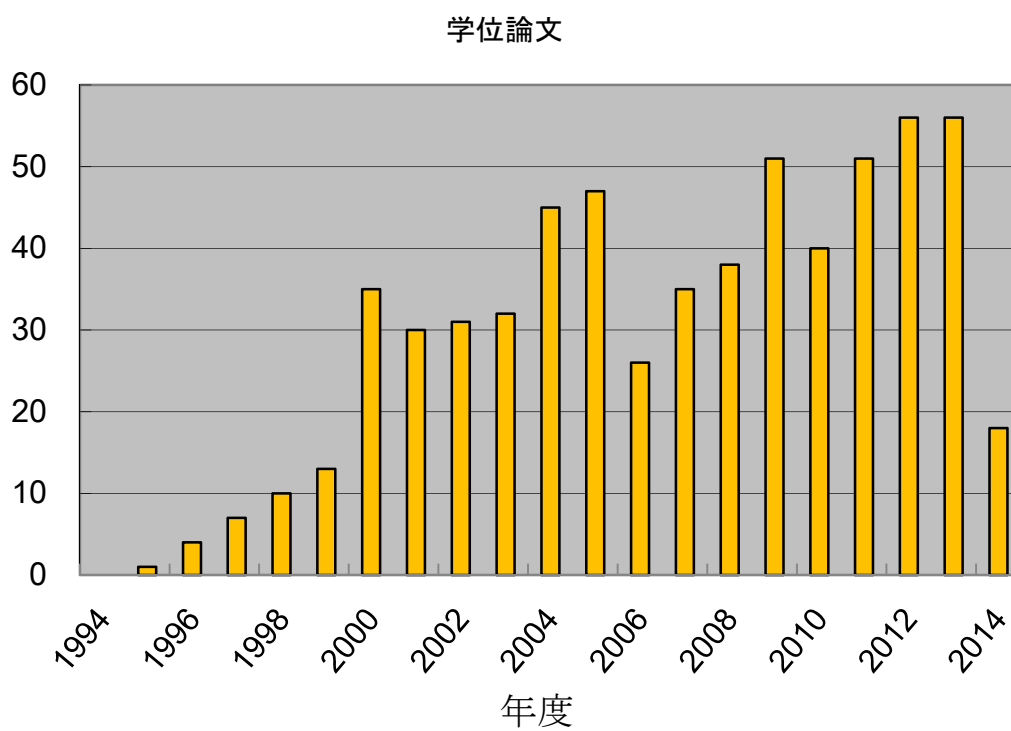




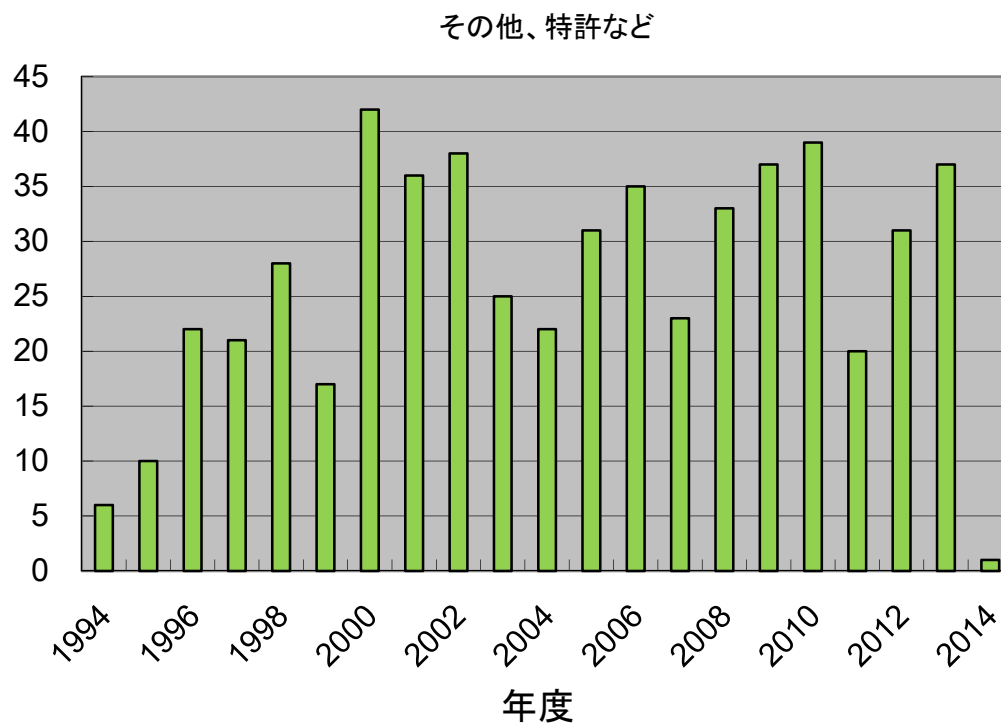
### 3.2 分野別プロシーディングス



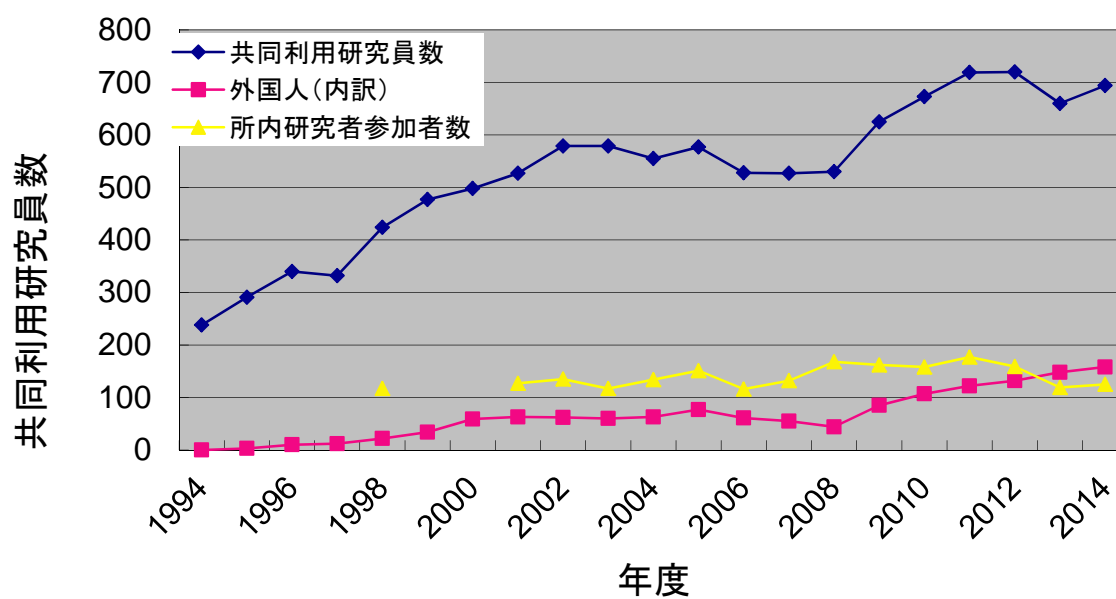
### 3.3 学位論文



### 3.4 その他成果



### 4 参加研究者数



## A2. 研究成果一覽

List of Publications

(2004～2014)



臨床試験、治療・診断

- Akakura K., Tsujii H., Morita S., Tsuji H., Yagishita T., Isaka S., Ito H., Akaza H., Hata M., Fujime M., Harada M., Shimazaki J., the working group for genitourinary tumors: Phase I/II clinical trials of carbon ion therapy for prostate cancer. *The Prostate* 55, 252-258 (2004).
- Imai R., Kamada T., Tsuji H., Yanagi T., Baba M., Miyamoto T., Kato S., Kandatsu S., Mizoe J.E., Tsujii H., Tatezaki S., Working Group for Bone, Soft Tissue Sarcomas: Carbon ion radiotherapy for unresectable sacral chordomas. *Clin. Cancer Res.* (2004).
- Kato H., Tsujii H., Miyamoto T., Mizoe J., Kamada T., Tsuji H., Yamada S., Kandatsu S., Yoshikawa K., Obata T., Ezawa H., Morita S., Tomizawa M., Morimoto N., Fujuta J., Ohto M.: Results of the first prospective study of carbon in radiotherapy for hepatocellular carcinoma with liver cirrhosis. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 59, 1468-1476 (2004).
- Koto M., Miyamoto T., Yamamoto N., Nishimura H., Yamada S., Tsujii H.: Local control and recurrence of stage I non-small cell lung cancer after carbon ion radiotherapy. *Radiotherapy and Oncology* 71, 147-156 (2004).
- Zhang H., Yoshikawa K., Tamura K., Tomemori T., Sago K., Mei T., Kandatsu S., Kamada T., Tsuji H., Suhara T., Suzuki K., Tanada S., Tsujii H.: [<sup>11</sup>C]Methionine Positron Emission Tomography and survival in patients with bone and soft tissue sarcomas treated by carbon ion radiotherapy. *Clin. Cancer Res.* 10, 1764-1772 (2004).
- 宮本忠昭:重粒子線による肺癌治療－重粒子線による1回照射法の確立へー、*肺癌* 44, 741-751 (2004).
- 佐藤善隆、瀧田憲晃、羽石秀昭、土田大輔、森 豊、外山比南子、宮本忠昭:胸部X線CT画像における葉間裂抽出とその重粒子線治療評価への応用、*Medical Imaging Technology* 22, 269-277 (2004).
- Ohto M., Kato H., Tsujii H., et al.: Vascular flow patterns of hepatic tumors in contrast-enhanced 3-dimensional fusion ultrasonography using plane shift and opacity control Modes. *J. Ultrasound Med.* 24, 49-57 (2005).
- Kitabayashi H., Shimada H., Yamada S., Yasuda S., Kamada T., Ando K., Tsujii H., Ochiai T.: Synergistic growth suppression induced in esophageal squamous cell carcinoma cells by combined treatment with docetaxel and heavy carbon-ion beam irradiation. *Oncol. Rep.* 15, 913-918 (2006).
- Miyamoto T., Baba M., Yamamoto N., Koto M., Sugawara T., Yashiro T., Kadono K., Ezawa H., Tsujii H., Mizoe J., Yoshikawa K., Kandatsu S., Fujisawa T.: Curative treatment of stage I non-small-cell lung cancer with carbon ion beams using a hypofractionated regimen. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 67, 750-758 (2007).
- Koizumi M., Saga T., Yoshikawa K., Baba M.: Gastric Cancer Found on 3'-Deoxy-3' F-18 Fluorothymidine Positron Emission Tomography. *Clinical Nuclear Medicine* 33, 641-642 (2008).
- Mori S., Kumagai M., Asakura H., Kandatsu S., Baba M., Endo M.: Magnitude of Residual Internal Anatomy Motion on Heavy Charged Particle Dose Distribution in Respiratory Gated Lung Therapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 71, 587-594 (2008).
- Sugane T., Baba M., Imai R., Nakajima M., Yamamoto N., Miyamoto T., Ezawa H., Yoshikawa K., Kandatsu S., Kamada T., Mizoe J., Tsujii H.: Carbon ion radiotherapy for elderly patients 80 years and older with stage I non-small cell lung cancer. *Lung Cancer*, 641-642 (2008).
- Tsujii H., Kamada T., Baba M., Tsuji H., Katou H., Kato S., Yamada S., Yasuda S., Yanagi T., Kato H., Hara. R., Yamamoto N., Mizoe J.: Clinical advantages of carbon-ion radiotherapy. *New J. Phys.* 10, 075009 (2008).
- Kumagai M., Mori S., Gregory S., Asakura H., Kandatsu S., Endo M., Baba M.: Dosimetric variation due to CT inter-slice spacing in four-dimensional carbon beam lung therapy. *Phys. Med. Biol.* 54, 3231-3246 (2009).
- Sugane T., Baba M., Imai R., Nakajima M., Yamamoto N., Miyamoto T., Ezawa H., Yoshikawa K., Kandatsu S., Kamada T., Mizoe J., Tsujii H.: Carbon ion radiotherapy for elderly patients 80 years and older with stage I non-small cell lung cancer. *Lung Cancer* 64, 45-50 (2009).
- Mori S., Kumagai M., Dobashi S., Sugane T., Baba M., et al.: Practical approaches to four-dimensional heavy-charged-particle lung therapy. *Radiological Physics and Technology* 3, 23-22 (2010).
- Okada T., Kamada T., Tsuji H., Mizoe J.E., Baba M., Kato S. et al.: Carbon ion radiotherapy: clinical experiences at National Institute of Radiological Science (NIRS). *J. Radiat. Res.* 51, 355-364 (2010).
- Shinoto M., Shiroyama Y., Sasaki T., Nakamura K., Ohura H., Toh Y., Higaki Y., Yamaguchi T., Ohnishi K., Atsumi K., Hirata H., Honda H.: Clinical results of definitive chemoradiotherapy



for patients with synchronous head and neck squamous cell carcinoma and esophageal cancer. *Am. J. Clin. Oncol.* 34, 362-366 (2011).

Shinoto M., Yamada S., Yasuda S. et al.: Phase 1 trial of preoperative, short-course carbon-ion radiotherapy for patients with resectable pancreatic cancer. *Cancer*, doi:10.1002/cncr.27723 (2012).

Takahashi W., Yamashita H., Kida S., et al.: Verification of planning target volume settings in volumetric modulated arc therapy for stereotactic body radiation therapy by using in-treatment 4-dimensional cone beam computed tomography. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 86, 426-431 (2013).

Takahashi W., Yamashita H., Omori M., et al.: The feasibility and efficacy of stereotactic body radiotherapy for centrally-located lung tumors. *Anticancer Res.* 33, 4959-4964 (2013).

Toubaru S., Yoshikawa K., Ohashi S., Tanimoto K., Hasegawa A., Kawaguchi k., Saga T., Kamada T.: Accuracy of methionine-PET in predicting the efficacy of heavy-particle therapy on primary adenoid cystic carcinomas of the head and neck. *Radiat. Oncol.* 8, 143 (2013).

## 生物

Demizu Y., Kagawa K., Ejima Y., Nishimura H., Sasaki R., Soejima T., Yanou T., Shimizu M., Furusawa Y., Hishikawa Y., Sugimura K.: Cell biological basis for combination radiotherapy using heavy-ion beams and high-energy X-rays. *Radiotherapy and Oncology* 71, 207-211 (2004).

Fukawa T., Takematsu K., Oka K., Koike S., Ando K., Kobayashi H., Tanishita K.: Differences in pO<sub>2</sub> peaks of a Murine Fibrosarcoma between carbon-ion and X-ray irradiation. *J. Radiat. Res.* 45, 303-308 (2004).

Grossi G., Durante M., Gialanella G., Pugliese M., Scamporrè P., Furusawa Y., Kanai T., Matsufuji N.: Chromosomal aberrations induced by high-energy iron ions with shielding. *Adv. Space Res.* 34, 1358-1361 (2004).

Hirai F., Motoori S., Kakinuma S., Tomita K., Ito H., Katou H., Yamaguti T., Yen H., Clair D., Nagano T., Ozawa T., Saisho H., Majima H.: Mitochondrial signal lacking manganese superoxide dismutase failed to prevent cell death by reoxygenation of following Hypoxia in a Human pancreatic Cancer Cell Line, KP4. *Antioxid. Redox Signal.* 6, 523-535 (2004).

Hirobe T., Eguchi-Kasai K., Murakami M.: Effects of carbon ion-radiations on the

postnatal development of mice and on the yield of white spots in the mid-ventrum and the tail-tips. *Radiat. Res.* 162, 580-584 (2004).

Ishihara H., Tanaka I., Wan H., Nojima K., Yoshida K.: Retrotransposition of limited deletion type of intracisternal A-particle elements in the myeloid leukemia cells of C3H/He mice. *J. Radiat. Res.* 45, 25-32 (2004).

Kawata T., Ito H., Uno T., Saito M., Yamamoto S., Furusawa Y., Durante M., George K., Wu H., Cucinotta F.A.: G2 chromatid damage and repair kinetics in normal human fibroblast cells exposed to low- or high-LET radiation. *Cytogenet. Genome. Res.* 104, 211-215 (2004).

Lee R., Yamada S., Yamamoto N., Miyamoto T., Ando K., Durante M., Tsujii H.: Chromosomal aberrations in Lymphocytes of lung cancer patients treated with carbon ions. *J. Radiat. Res.* 45, 195-199 (2004).

Monobe M., Koike S., Uzawa A., Aoki M., Takai N., Fukawa T., Furusawa Y., Ando K.: Radioprotective activities of beer administration for radiation-induced acute toxicity in mice. *Radiotherapy and Oncology* 73(2), S127-S129 (2004).

Nishimura M., Kakinuma S., Yamamoto D., Kobayashi Y., Suzuki G., Sado T., Shimada Y.: Elevated Interleukin-9 Receptor expression and response to Interleukins-9 and -7 in Thymocytes during radiation-induced T-cell Lymphomagenesis in B6C3F1 mice. *Journal of Cellular Physiology* 198, 82-90 (2004).

Obata T., Ando K., Koike S., Oohira C., Yasuda H., Ikehira H., Tanada S., Tsujii H.: Changes in the pharmacokinetics of Gd-DTPA in experimental tumors after charged particle radiation: comparison with  $\gamma$ -ray radiation. *J. Radiat. Res.* 45, 261-267 (2004).

Ogawa K., Nakamura K., Sasaki T., Yamamoto T., Koizumi M., Inoue T., Teshima T., and the Japanese Patterns of Care Study Working Subgroup on Prostate Cancer: Radical external beam radiotherapy for prostate cancer in Japan: Preliminary results of the changing trends in the Patterns of Care Process Survey between 1996-1998 and 1999-2001. *Jpn. J. Clin. Oncol.* 34, 131-136 (2004).

Oohira G., Yamada S., Ochiai T., Matsubara H., Okazumi S., Ando K., Tsujii H., Shimada H.: Growth suppression of esophageal squamous cell carcinoma induced by heavy carbon-ion beams combined with p53 gene transfer. *Int. J. Oncol.* 25, 563-569 (2004).

Takahashi A., Matsumoto H., Yuki K., Yasumoto J., Kajihara A., Aoki M., Furusawa

- Y., Ohnishi K., Ohnishi T.: High-LET radiation enhanced apoptosis but not necrosis regardless of p53 status. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 60, 591-597 (2004).
- Waldren C.A., Vannais D.B., Ueno A.M.: A role for long-lived radicals (LLR) in radiation-induced mutation and persistent chromosomal instability: counteraction by ascorbate and RibCys but not DMSO. *Mutat. Res.* 551, 255-265 (2004).
- Waldren C.A.: Classical radiation biology dogma, bystander effects and paradigm shifts. *Hum. Exp. Toxicol.* 23, 95-100 (2004).
- Yasumura K., Sugimura I., Igarashi K., Kakinuma S., Nishimura M., Doi M., Shimada Y.: Altered expression of Tfg and Dap3 in Ikaros-defective T cell lymphomas induced by X-irradiation in B6C3F1 mice. *Br. J. Haematology* 124, 179-185 (2004).
- 長谷川正俊、野島久美恵、大野達也、石川仁、鈴木義行、若月優、今井礼子、加藤真吾、中野隆史: 粒子線治療と p53、癌の臨床 50、1103-1106 (2004).
- Amemiya K., Takahashi H., Kajimoto Y., Nakazawa M., Yanagi H., Hisa T., Eriguchi M., Nakagawa Y., Majima T., Kageji T., Sakurai Y., Kobayashi T., Konishi T., Hieda K., Yasuda N., Ogura K.: High-resolution nuclear track mapping in detailed cellular histology using CR-39 with the contact microscopy technique. *Radiat. Meas.* 40, 283-288 (2005).
- Ando K., Koike S., Uzawa A., Takai N., Fukawa T., Furusawa Y., Aoki M., Miyato Y.: Tumor induction in mice locally irradiated with carbon ions: a retrospective analysis. *J. Radiat. Res.* 46, 185-190 (2005).
- Ando K., Koike S., Uzawa A., Takai N., Fukawa T., Furusawa Y., Aoki M., Miyato Y.: Biological gain of carbon-ion radiotherapy for the early response of tumor growth delay and against early response of skin reaction in mice. *J. Radiat. Res.* 46, 51-57 (2005).
- Hirayama R., Furusawa Y., Fukawa T., Ando K.: Repair kinetics of DNA-DSB induced by X-rays or carbon ions under oxic and hypoxic conditions. *J. Radiat. Res.* 46, 325-332 (2005).
- Huang J., Arimatsu Y., Sadakane K., Endo Y., Furusawa T.: Gene expression and Localization of Trehalase during Embryonic Development of the Silkworm, *Bombyx mori*. *Int. J. Wild Silkworm and Silk* 10, 17-26 (2005).
- Iwakawa M., Takai N., Gotou M., Noda S., Ando K., Imai T.: Strain-dependent differences in locomotor activity after local brain irradiation with 30 GyE of carbon ions. *Exp. Anim.* 54, 447-450 (2005).
- Kawahara Y., Tadokoro K., Endo R., Shioya M., Sugimura Y., Furusawa T.: Chemically retted Kenaf fibers. *Sen'I GAKKAISHI* 61, 115-117 (2005).
- Kenjo M., Oguchi M., Gomi K., Yamashita T., Uno T., Hirokawa Y., Inoue T., Teshima T.: Radiation therapy for esophageal cancer: results of the Patterns of Care Study in Japan 1995-1997. *Esophagus* 2, 77-83 (2005).
- Konishi T., Takeyasu A., Yasuda N., Natsume T., Nakajima H., Matsumoto K., Asuka T., Sato Y., Furusawa Y., Hieda K.: Number of Fe ion traversals through cell nucleus for mammalian cell inactivation near the Bragg peak. *J. Radiat. Res.* 46, 415-424 (2005).
- Konishi T., Yasuda N., Takeyasu A., Ishizawa S., Fujisaki T., Matsumoto K., Furusawa Y., Sato Y., Hieda K.: Irradiation system of ions (H-Xe) for biological studies near the Bragg peak. *Rev. Sci. Instrum.* 75, 114302-114307 (2005).
- Mitsumori M., Hiraoka M., Negoro Y., Yamauchi C., Shikama N., Sasaki S., Yamamoto T., Teshima T., Inoue T.: The Patterns of Care Study for breast-conserving therapy in Japan: Analysis of process survey from 1995 to 1997. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 62, 1048-1054 (2005).
- Miyamoto T., Ishi S., Eguchi-Kasai K., Koyama-Saegusa K.: Radiosensitivity of hypoxic and proliferating clonogen in a human lung cancer grown in nude mice. *Oncol. Rep.* 14, 1421-1428 (2005).
- Monobe M., Uzawa A., Hino M., Ando K., Kojima S.: Glycine betaine, a beer component, protects radiation-induced injury. *J. Radiat. Res.* 46, 117-121 (2005).
- Ogata T., Teshima T., Kagawa K., Hishikawa Y., Takahashi Y., Kawaguchi A., Suzumoto Y., Nojima K., Furusawa Y., Matsuura N.: Particle irradiation suppresses metastatic potential of cancer cells. *Cancer Res.* 65, 113-120 (2005).
- Ogawa K., Nakamura K., Onishi H., Teshima T.: Radical external beam radiotherapy for clinically localized prostate cancer in Japan: Changing trends in the Patterns of Care Process Survey between 1996-1998 and 1999-2001. *Anticancer Res.* 25, 3507-3512 (2005).
- Shimada A., Shima A., Nojima K., Seino Y., et al.: Germ cell mutagenesis in medaka fish after exposures to high-energy cosmic ray nuclei: A human model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102, 6063-6067 (2005).

- Shimizutani K., Inoue T., Inoue T., Yoshioka Y., Kakimoto N., Murakami S., Furukawa S., Fuchihata H., Teshima T.: Late complications after high-dose-rate brachytherapy for tongue cancer. *Oral Radiol.* 21, 1-5 (2005).
- Suzuki M., Tsuruoka C., Uchihori Y., Ebisawa S., Yasuda H., Fujitaka K.: Reduction in life span on normal human fibroblasts exposed to very low-dose rate charged particles. *Radiat. Res.* 164, 505-508 (2005).
- Takahashi A., Matsumoto H., Furusawa Y., Ohnishi K., Ishioka N., Ohnishi T.: Apoptosis induced by high-LET radiation is not affected by cellular p53 gene status. *Int. J. Radiat. Biol.* 81, 581-586 (2005).
- Teshima T.: Japanese PCS working group. patterns of care study in Japan. *Jpn. J. Clin. Oncol.* 35, 497-506 (2005).
- Toita T., Nakamura K., Uno T., Kodaira T., Shinoda A., Ogawa K., Mitsuhashi N., Maebayashi K., Kawaguchi A., Inoue T., Teshima T., and the Japanese PCS working group of uterine cervix cancer: Radiotherapy for uterine cervical cancer: Results of the 1995-1997 Patterns of Care Process Survey in Japan. *Jpn. J. Clin. Oncol.* 35, 139-148 (2005).
- Usami N., Furusawa Y., Kobayashi K., Frohlich H., Lacombe S., Le Sech C.: Fast  $\text{He}^{2+}$  ion irradiation of DNA loaded with Platinum containing molecules. *Int. J. Rad. Biol.* 81, 515-522 (2005).
- Wang B., Murakami M., Eguchi-Kasai K., Nojima K., Shang Y., Tanaka K., Fujita K., Coffigny H., Hayata I.: Effects of prenatal irradiation of accelerated heavy ion beam on postnatal development in rats: I. Neurophysiologic alterations. *Radiat. Res.* 164, 561-566 (2005).
- 沖本宜音、竹下哲史、濱竹芳久、野島久美恵、荒西太士：重粒子線照射による抗酸化多糖類を豊富に含む海藻類の作出、*Food Function* 1, 48-51 (2005).
- Amino M., Yoshioka K., Tanabe T., Tanaka E., Mori H., Furusawa Y., Zareba W., Yamazaki M., Nakagawa H., Honjo H., Yasui K., Kamiya K., Kodama I.: Heavy ion radiation up-regulates Cx43 and ameliorates arrhythmogenic substrates in hearts after myocardial infarction. *Cardiovascular Res.* 72, 412-421 (2006).
- Ando K., Koike S., Uzawa A., Takai N., Fukawa T., Furusawa Y., Aoki M., Hirayama R.: Repair of skin damage during fractionated irradiation with gamma rays and low-LET carbon ions. *J. Radiat. Res.* 47, 167-174 (2006).
- Huang J., Furusawa T., Sadakane K., Sugimura Y.: Purification and properties of two types of soluble Trehalases from embryonic larvae of the Silkworm, *Bombyx mori*. *J. Insect Biotechnol. Sericol.* 75, 1-8 (2006).
- Ito A., Nakano H., Kusano Y., Hirayama R., Furusawa Y., Murayama C., Mori T., Katsumura Y., Shinohara K.: Contribution of indirect action to radiation-induced mammalian cell inactivation: Dependence on photon energy and heavy-ion LET. *Radiat. Res.* 165, 703-712 (2006).
- Kase Y., Kanai T., Matsumoto Y., Furusawa Y., Okamoto H., Asaba T., Sakama M., Shinoda H.: Microdosimetric measurements and estimation of human cell survival for heavy-ion beams. *Radiat. Res.* 160, 629-638 (2006).
- Kawaguchi I., Doi M., Kakinuma S., Shimada Y.: Combined effect of multiple carcinogens, and synergy index. *Journal of Theoretical Biology* 243, 143-151 (2006).
- Moeller R., G. Horneck, U. Pogoda de la Vega, P. Rettberg, E. Stackebrandt, G. Reitz, R. Okayasu, T. Berger: DNA damaging effects of heavy ion and X-ray irradiation of *Bacillus subtilis* spores. *Int. J. Astrobiol.* 5, 87 (2006).
- Okayasu R., Okada M., Okabe A., Noguchi M., Takakura K., Takahashi S.: Repair of DNA damage induced by accelerated heavy ions in mammalian cells proficient and deficient in the Non-homologous End-joining pathway. *Radiat. Res.* 165, 59-67 (2006).
- Sawajiri M., Nomura Y., Bhawal U.K., Nishikiori R., Okazaki M., Mizoe J., Tanimoto K.: Different effects of carbon ion and gamma ray irradiation on expression of receptor activator of NF- $\kappa$ B ligand in MC3T3-E1 Osteoblast Cells. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine* 11, 566-572 (2006).
- Suzuki M., Tsuruoka C., Kanai T., Kato T., Yatagai F., Watanabe M.: Cellular and molecular effects for mutation induction in normal human cells irradiated with accelerated neon ions. *Mutat. Res.* 594, 86-92 (2006).
- Suzuki M., Tsuruoka C., Nakano T., Ohno T., Furusawa Y., Okayasu R.: The PCC assay can be used to predict radiosensitivity in biopsy cultures irradiated with different types of radiation. *Oncol. Rep.* 16, 1293-1299 (2006).
- Endo S., Takada M., Onizuka Y., Tanaka K., Maeda N., Ishikawa M., Miyahara N., Hayabuchi N., Shizuma K., Hoshi M.: Microdosimetric evaluation of secondary particles in a phantom produced by carbon 290 MeV/nucleon ions at HIMAC. *J. Radiat. Res.* 48, 397-406 (2007).
- Fukuda M., Takechi M., Mihara M.,

- Matsumiya R., Matsuta K., Minamisono T., Ohtsubo T., Izumikawa T., Momota S., Suzuki T., Yamaguchi T., Nakajima S., Kobayashi K., Tanaka K., Suda T., Sato S., Kanazawa M., Kitagawa A.: New study of reaction cross sections and the nucleon density distribution. AIP Conference Proceedings Volume 891, Tours Symposium on Nuclear Physics VI, 181-186 (2007).
- Hamada N., Matsumoto H., Hara T., Kobayashi Y.: Inter-cellular and intra-cellular signaling pathways mediating ionizing radiation-induced bystander effects. *J. Radiat. Res.* 48, 87-95(2007).
- Imaoka T., Nishimura M., Kakinuma S., Hatano Y., Ohmachi Y., Kawano A., Maekawa A., Shimada Y.: High relative biological effectiveness of carbon ion radiation on induction of rat mammary carcinoma and its lack of H-ras and Tp53 mutations. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 69 194-203 (2007).
- Inaniwa T., Furukawa T., Tomitani T., Sato S., Noda K., Kanai T.: Optimization for fast-scanning irradiation in particle therapy. *Med. Phys.* 34, 3302-3311 (2007).
- Matsumoto H., Hamada N., Takahashi A., Kobayashi Y., Ohnishi T.: Vanguard of paradigm shift in radiation biology: Radiation-induced adaptive and bystander responses. *J. Radiat. Res.* 48, 97-106 (2007).
- Okada M., Okabe A., Uchihori Y., Kitamura H., Sekine E., Ebisawa S., Suzuki M., Okayasu R.: Single extreme low dose/low dose rate irradiation causes alteration in lifespan and genome instability in primary human cells. *Br. J. Cancer* 96, 1707-1710 (2007).
- Sawajiri M., Takinami S., Uchida T., Nomura Y., Mizoe J., Banik S., Tanimoto K.: Expression of MMP-13 in osteoblast cells and rat tibia after exposure to gamma rays or accelerated carbon ions. *Physica Medica* 23, 73-79 (2007).
- Shao C., Furusawa Y., Matsumoto Y., Pan Y., Xu P., Chen H.: Effect of gap junctional intercellular communication on radiation responses in neoplastic human cells. *Radiat. Res.* 167, 283-288 (2007).
- Takahashi K., Monzen S., Eguchi-Kasai K., Abe Y., Kashiwakura I.: Severe damage of human megakaryocytopoiesis and thrombopoiesis by heavy-ion beam radiation. *Radiat. Res.* 168, 545-551 (2007).
- Terato H., Tanaka R., Nakaarai Y., Hirayama R., Furusawa Y., Ide H.: Analysis of complex DNA lesions generated by heavy ion beams. *Nucleic Acids Symp. Ser.* 51, 221-222 (2007).
- Terato H., Tanaka R., Nakaarai Y., Nohara T., Doi Y., Iwai S., Hirayama R., Furusawa Y., Ide H.: Quantitative analysis of isolated and clustered DNA damage induced by gamma-rays, carbon ion beams, and iron ion beams. *J. Radiat. Res.* 49, 133-146 (2008).
- Usami N., Furusawa Y., Kobayashi K., Frohlich H., Lacombe S., Le Sech C.: Irradiation of DNA loaded with molecules containing platinum atoms by fast atomic ions  $C^{6+}$  and  $Fe^{26+}$ . *Int. J. Radiat. Biol.* 83, 569-576 (2007).
- Uzawa A., Ando K., Furusawa Y., Kagiya G., Fuji H., Hata M., Sakae T., Terunuma T., Scholz M., Ritter S., Peschke P.: Biological intercomparison using gut crypt survivals for Proton and Carbon-Ion beams. *J. Radiat. Res.* 48 [Sup.A], A75-A80 (2007).
- Yashiro T., Koyama-Saegusa K., Imai T., Fujisawa T., Miyamoto T.: Inhibition of Potential Lethal Damage Repair and Related Gene Expression after Carbon-ion Beam Irradiation to Human Lung Cancer Grown in Nude Mice. *J. Radiat. Res.* 48, 377-387 (2007).
- 三上麻里、手島昭樹、松浦成昭: 放射線治療における照射野辺縁モデル細胞の動態解析、画像ラボ、18、76-79 (2007).
- Fujimori A., Yaoi T., Ogi H., Wang B., Suetomi K., Sekine E., Yu Dong., Kato T., Takahashi S., Okayasu R., Itoh K., Fushiki S.: Ionizing radiation downregulates ASPM, a gene responsible for microcephaly in humans. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 369, 953-9
- Imadome K., Iwakawa M., Nojiri K., Tamaki T., Sakai M., Nakawatari M., Moritake T., Yanagisawa M., Nakamura E., Tsujii H., Imai T.: Upregulation of stress-response genes with cell cycle arrest induced by carbon ion irradiation in multiple murine tumors models. *Cancer Biol Ther.* 7, 208-217 (2008).
- Manda K., Ueno M., Anzai K.: Memory impairment, oxidative damage and apoptosis induced by space radiation: Ameliorative potential of  $\alpha$ -lipoic acid. *Behavioural Brain Research* 187, 387-395 (2008).
- Manda K., Ueno M., Anzai K.: Melatonin mitigates oxidative damage and apoptosis in mouse cerebellum induced by high-LET  $^{56}Fe$  particle irradiation. *J. Pineal Res.* 44, 189-196 (2008).
- Manda K., Ueno M., Anzai K.: Space radiation-induced inhibition of neurogenesis in the hippocampal dentate gyrus and memory impairment in mice: ameliorative potential of the melatonin metabolite, AFMK. *J. Pineal Res.* 45, 430-438 (2008).
- Masunaga S., Ando K., Uzawa A., Hirayama R., Furusawa Y., Sakurai Y., Nagata K., Suzuki

- M., Kashino G., Kinashi Y., Tanaka H., Maruhashi A., Ono K.: Radiobiological significance of the response of intratumor quiescent cells in vivo to accelerated carbon ion. Masunaga S., Ando K., Uzawa A., Hirayama R., Furusawa Y., Koike S., Ono K.: The radiosensitivity of total and quiescent cell populations in solid tumors to 290 MeV/u carbon ion beam irradiation in vivo. *Acta Oncol.* 19, 1-7 (2008).
- Masunaga S., Ando K., Uzawa A., Hirayama R., Furusawa Y., Koike S., Ono K.: Responses of total and quiescent cell populations in solid tumors to carbon ion beam irradiation (290 MeV/u) in vivo. *Radiat. Med.* 26, 270-277 (2008).
- Matsumoto Y., Iwakawa M., Furusawa Y., Ishikawa K., Tsujii H., Ando K., Imai T.: Gene expression analysis of human malignant melanoma cell lines irradiated with carbon-ion beams or X-rays. *Int. J. Radiat. Biol.* 84, 299-314 (2008).
- Moeller R., Setlow P., Horneck G., Berger T., Reitz G., Rettberg P., J. Doherty A., Okayasu R., Nicholson W.L.: Role of the major, small, acid-soluble spore proteins and spore-specific and universal DNA repair mechanisms in the resistance of *Bacillus subtilis* spores to ionizing radiation from X-rays and high-energy charged-particle bombardment. *J. Bacteriol.* 190, 1134-1140 (2008).
- Sekine E., Okada M., Matsufuji N., Yu D., Furusawa Y., Okayasu R.: High LET heavy ion radiation induces lower numbers of initial chromosome breaks with minimal repair than low LET radiation in normal human cells. *Mutat. Res.* 652, 95-101 (2008).
- Takahashi A., Yamakawa N., Kirita T., Omori K., Ishioka N., Furusawa Y., Mori E., Ohnishi K., Ohnishi T.: DNA damage recognition proteins localize along heavy ion induced tracks in the cell nucleus. *J. Radiat. Res.* 49, 645-652 (2008).
- Takahashi K., Monzen S., Yoshino H., Eguchi-Kasai K., Abe Y., Kashiwakura I.: Effects of a 2-step culture with cytokine combinations on megakaryocytopoiesis and thrombopoiesis from carbon-ion beam-irradiated human hematopoietic stem/progenitor cells. *Sever*
- Terato H., Tanaka R., Nakaarai Y., Nohara, T., Doi Y., Iwai S., Hirayama R., Furusawa Y., Ide H.: Quantitative analysis of isolated and clustered DNA damage induced by gamma-rays, carbon ion beams, and iron ion beams. *J. Radiat. Res.* 49, 133-146 (2008).
- Terato H., Watari H., Shimazaki Y., Hirayama R., Furusawa Y., Ide H.: Analysis for complexity of clustered DNA damage generated by heavy ion beams. *Nucleic Acids Symp. Ser.* 52, 443-444 (2008).
- Tsuruoka C., Suzuki M., Hande M.P., Furusawa Y., Anzai K., Okayasu R.: The difference in LET and ion-species dependence for induction of initially measured and non-rejoined chromatin breaks in normal human fibroblasts. *Radiat. Res.* 170, 163-171 (2008).
- Usami N., Furusawa Y., Kobayashi K., Lacombe S., Reynaud-Angelin A., Sage Ting-Di Wu E., Croisy A., Guerquin-Kern J-L., Le Sech C.: Mammalian cells loaded with Platinum-containing molecules are sensitised to fast atomic ions. *Int. J. Radiat. Biol.* 84, 603-611 (2008).
- Wang B., Tanaka K., Murkami M., Eguchi-kasai K., Shang Y., Fujita K., Moreno S.G., Coffigny H., Hayat I.: Prenatal irradiation with accelerated-heavy-ion beams induced LET-dependent detrimental effects on prenatal development and postnatal neurophysiologic accomplishment in rats. *Indian Journal of Radiation Research* 5, 15-23 (2008).
- Yamakawa N., Takahashi A., Mori E., Imai Y., Furusawa Y., Ohnishi K., Kirita T., Ohnishi T.: High LET radiation enhances apoptosis in mutated p53 cancer cells through Caspase-9 activation. *Cancer Sci.* 99, 1455-1460 (2008).
- Akino Y., Teshima T., Kihara A., Kodera-Suzumoto Y., Inaoka M., Higashiyama S., Furusawa Y., Matuura N.: Carbon-ion beam irradiation effectively suppresses migration and invasion of human non-small-cell lung cancer cells. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 75, 475-481 (2009).
- Hase Y., Okamura M., Takeshita D., Narumi I., Tanaka A.: Efficient induction of flower-color mutants by ion beam irradiation in petunia seedlings treated with high sucrose concentration. *Plant Biotechnol.* (2009).
- Hirayama R., Ito A., Tomita M., Tsukada T., Yatagai F., Noguchi M., Matsumoto Y., Kase Y., Ando K., Okayasu R., Furusawa Y.: Contributions of Direct and Indirect Actions in Cell Killing by High-LET Radiations. *Radiat. Res.* 171, 212-218 (2009).
- Hirayama R., Furusawa Y., Murayama C., Kusano Y., Ito A.: LET dependence of oxidative DNA base damage in 2'-deoxyguanine aqueous solution irradiated with heavy ions. *Radiat. Phys. Chem.* 78, 1207-1210 (2009).
- Kano M., Yamada S., Hoshino I., Murakami K., Akutsu Y., Sakata H., Nishimori T., Usui A.,



- Miyazawa Y., Kamada T., Tsujii H., Matsubara H.: Effects of carbon-ion radiotherapy combined with a novel histone deacetylase inhibitor, cyclic hydroxamic-acid-containing peptide 31 in human esophageal squamous cell carcinoma. *Anticancer Res.* 29, 4433-4438 (2009).
- Lacombe S., Le Sech C.: Advances in radiation biology: Radiosensitization in DNA and living cells. *Surface Science* 603, 1953-1960 (2009).
- Matsumoto H., Tomita M., Otsuka K., Hatashita M.: A new paradigm in radioadaptive response developing from microbeam research. *J. Radiat. Res.* 50, Sup. A67-A79 (2009).
- Matsumoto K., Nagata K., Yamamoto H., Endo K., Anzai K., Aoki I.: Visualization of free radical reactions in an aqueous sample irradiated by 290 MeV carbon beam. *Magn. Reson. Med.* 61, 1033-1039 (2009).
- Monzen S., Takahashi K., Yoshino H., Kasai-Eguchi K., Abe Y., Maruyama A., Itoh K., Kashiwakura I.: Heavy ion beam irradiation regulates the mRNA expression in megakaryocytopoiesis from human hematopoietic stem/progenitor cells. *J. Radiat. Res.* 50, 477-486 (2009).
- Nakamura E., Iwakawa M., Furuta R., Ohno T., Satoh T., Nakawatari M., Ishikawa K., Imadome K., Michikawa Y., Tamaki T., Kato S., Kitagawa T., Imai T.: Villin1, a novel diagnostic marker for cervical adenocarcinoma. *Cancer Biol. Ther.* 8, 1148-1155 (2009).
- Ohnishi T., Takahashi A., Nagamatsu A., Omori K., Suzuki H., Shimazu T., Ishioka N.: Detection of space radiation-induced double strand breaks as a track in cell nucleus. *Biochem Biophys Res. Commun.* 390, 485-8 (2009).
- Shimada M., Komatsu K.: Emerging connection between centrosome and DNA repair machinery. *J. Radiat. Res.* 50, 295-301 (2009).
- Sun J., Yomogida K., Sakao S., Yamamoto H., Yoshida K., Watanabe K., Morita T., Araki K., Yamamura K., Tateishi S.: Rad18 is required for long-term maintenance of spermatogenesis in mouse testes. *Mechanisms. Dev.* 126, 173-183 (2009).
- Suzuki M., Tsuruoka C., Uchihori Y., Kitamura H., Liu C.H.: Radiation-quality dependent cellular response in mutation induction in normal human cells. *J. Radiat. Res.* 50, 395-399 (2009).
- Takahashi A., Ohnishi T.: A low dose pre-irradiation induces radio- and heat-resistance via HDM2 and NO radicals, and is associated with p53 functioning. *Adv. Space. Res.* 43, 1185-92 (2009).
- Tamaki T., Iwakawa M., Ohno T., Imadome K., Nakawatari M., Sakai M., Tsujii H., Nakano T., Imai T.: The application of carbon ion beams or gamma-rays on primary tumors does not change the expression profiles of metastatic tumors in an in vivo Murine Model. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 74, 210-218 (2009).
- Tsuruoka C., Suzuki M., Furusawa Y., Anzai K., Okayasu R.: The influence of mutation induction in normal human fibroblasts irradiated with X rays and iron ions. *Biol. Sci. Space* 23, 55-60 (2009).
- Xue L., Yu D., Furusawa Y., Okayasu R., Tong J., Cao J.P., Fan S.J.: Regulation of ATM in DNA double strand break repair accounts for the radiosensitivity in human cells exposed to high linear energy transfer ionizing radiation. *Mutat. Res. -Fundam. Mol. Mech. Mutagen.* 670, 15-23 (2009).
- Yatagai F., Takahashi A., Honma M., Suzuki H., Omori K., Seki M., Hashizume T., Shimazu T., Enomoto S., Ohnishi T., Ishioka N.: LOH analyses for biological effects of space radiation: human cell culture in "Kibo" of International Space Station. *Biol. Sci. Space.* 23, 11-6 (2009).
- Fujii Y., Kato T., Ueno A., Kubota N., Fujimori A., Okayasu R.: Ascorbic acid gives different protective effects in human cells exposed to X-rays and heavy ions. *Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis: A Section of Mutation Research* 699, 58-61 (2010).
- Hase Y., Okamura M., et al.: Efficient induction of flower-color mutants by ion beam irradiation in petunia seedlings treated with high sucrose concentration. *Plant Biotechnol.* 27, 99-103 (2010).
- Kobayashi K., Usami N., Porcel E., Lacombe S., Le Sech C.: Enhancement of radiation effect by heavy elements. *Mutation Research* 704, 123-131 (2010).
- Matsumoto K., Aoki I., Nakanishi I., Matsumoto A., Nyui M., Endo K., Anzai K.: Distribution of hydrogen peroxide-dependent reaction in a gelatin sample irradiated by carbon ion beam. *Magn. Reson. Medic. Sci.* 9, 131-140 (2010).
- Moeller R., Reitz G., Berger T., Okayasu R., Nicholson W.L., Horneck G.: Astrobiological aspects of the mutagenesis of cosmic radiation on bacterial spores. *Astrobiology* 10, 509-521 (2010).
- Ohkubo Y., Iwakawa M., Seino K., Nakawatari M., Wada H., Kamijuku H., Nakamura E., Nakano T., Imai T.: Combining carbon ion radiotherapy and local injection of

- $\alpha$ -galactosylceramide-pulsed dendritic cells inhibits lung metastases in an in vivo murine model. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 78, 1524-1531 (2010).
- Porcel E., Liehn S., Remita H., Usami N., Kobayashi K., Furusawa Y., Le Sech C., Lacombe S.: Platinum nanoparticles : A promising material for future cancer therapy? *Nanotechnology* 21, 085103 (2010).
- Takahashi T., Yoshida Y., Ando K. et al.: Signal transduction and heavy radiation therapy: biological mechanisms, biological quality assurance, and new multimodality approach. *Current Signal Transduction Therapy* 5, 237-243 (2010).
- Takahashi T., Fukawa T., Hirayama R., Yoshida Y., et al.: In vitro interaction of high-LET heavy -ion irradiation and chemotherapeutic agents in two cell lines with different radiosensitivities and different p53 status. *Anticancer Res.* 30, 1961-1968 (2010).
- Tomiyama A., Tachibana K., Suzuki K., Seino S., Sunayama J., Matsuda K.I., Sato A., Matsumoto Y., Nomiya T., Nemoto K., Yamashita H., Kayama T., Ando K., Kitanaka C.: MEK-ERK-dependent multiple caspase activation by mitochondrial proapoptotic Bcl-2 family proteins is essential for heavy ion irradiation-induced glioma cell death. *Cell Death Dis.* 1: e60 (2010).
- Tsuruoka C., Furusawa Y., Anzai K., Okayasu R., Suzuki M.: Rejoining kinetics of G1-PCC breaks induced by different heavy-ion beams with a similar LET value. *Mutation Research*, 701, 47-51 (2010).
- Usami N., Hirayama R., Kobayashi K., Furusawa Y., Porcel E., Lacombe S., Le Sech C.: Comparison of DNA breaks at entrance channel and Bragg peak induced by fast C6+ ions. Influence of the addition of high-Z platinum atom on DNA. *J. Radiat. Res.* 51, 21-26
- Wang B., Tanaka K., Varès G., Shang Y., Fujita K., Ninomiya Y., Nakajima T., Eguchi-Kasai K., Neno M.: X-rays-induced radioresistance against high LET irradiations from accelerated heavy ions in mice. *Radiat. Res.* 174, 532-536 (2010).
- Yoshida K., Yoshida S., Eguchi-Kasai K., Morita T.: Study of the effects of space radiation on mouse ES cells. *Biol. Sci. Space* 24, 11-15 (2010).
- Zhang M.R., Kumata K., Hatori A., Takai N., Toyohara J., Yamasaki T., Yanamoto K., Yui J., Kawamura K., Koike S., Ando K., Suzuki K.: [<sup>11</sup>C]Gefitinib ([<sup>11</sup>c]Iressa): radiosynthesis, in vitro uptake, and in vivo imaging of intact murine fibrosarcoma. *Mol. Imaging Biol.* 12, 181-191 (2010).
- Cui X., Oonishi K., Tsujii H., Yasuda T., Matsumoto Y., Furusawa Y., Akashi M., Kamada T., Okayasu R.: Effects of carbon ion beam on putative colon cancer stem cells and its comparison with X-rays. *Cancer Res.* 71, 3676-3687 (2011).
- Fujita M., Otsuka Y., Imadome K., Endo S., Yamada S., Imai T.: Carbon-ion radiation enhances migration ability and invasiveness of the pancreatic cancer cell, PANC-1, in vitro. *Cancer Sci.* doi: 0.1111/j.1349-7006.2011.02190.x (2011).
- He J., Li J., Ye C., Zhou L., Zhu J., Wang J., Mizota A., Furusawa Y., Zhou G.: Cell cycle suspension: A novel process lurking in G2 arrest. *Cell Cycle* 10, 1468-1476 (2011).
- Hirayama R., Uzawa A., Matsumoto Y., Noguchi M., Kase Y., Takase N., Ito A., Koike S., Ando K., Okayasu R., Furusawa Y.: Induction of DNA DSB and its rejoining in clamped and non-clamped tumors after exposure to carbon ion beams in comparison to X-rays. *Radiation Protection Dosimetry.* 143, 508-512 (2011).
- Jin X., Li Q., Wu Q., Li P., Matsumoto Y., Furusawa Y., Gong L., Hao J., Dai Z.: Radiosensitization by inhibiting survivin in human hepatoma HepG2 cells to high-LET radiation. *J. Radiat. Res.* 52, 335-341 (2011).
- Kato TA., Tsuda A., Uesaka M., Fujimori A., Kamada T., Tsujii H., Okayasu R.: In vitro characterization of cells derived from chordoma cell line U-CH1 following treatment with X-rays, heavy ions and chemotherapeutic drugs. *Radiat. Oncol.* 6, 116 (2011).
- Li P., Zhou L., Dai Z., Jin X., Liu X., Matsumoto Y., Furusawa Y., Li Q.: High LET radiation enhances nocodazole induced cell death in HeLa cells through mitotic catastrophe and apoptosis. *J. Radiat. Res.* 52, 481-489 (2011).
- Matsumoto H., Tomita M., Otsuka K., Hatashita M., Hamada N.: Nitric oxide is a key molecule serving as a bridge between radiation-induced bystander and adaptive responses. *Curr. Mol. Pharmacol.* 4, 126-134 (2011).
- Moeller R., Setlow P., Pedraza-Reyes M., Okayasu R., Reitz G., Nicholson W.L.: Role of the Nfo and ExoA apurinic/apyrimidinic (AP) endonucleases in the radiation resistance and radiation-induced mutagenesis of *Bacillus subtilis* spores. *J. Bacteriol.* 193, 2875-2879 (2011).
- Ogata T., Teshima T., Inaoka M., Minami K., Tsuchiya T., Isono M., Furusawa Y., Matsuura N.: Carbon ion irradiation suppresses

- metastatic potential of human non-small cell lung cancer A549 cells through the Phosphatidylinositol3-Kinase/Akt signaling pathway. *J. Radiat. Res.* 52, 374-379 (2011).
- Ohno T., Kanai T., Yamada S., Yusa K., Tashiro M., Shimada H., Torikai K., Yoshida Y., Kitada Y., Katoh H., Ishii T., Nakano T.: Carbon Ion Radiotherapy at the Gunma University Heavy Ion Medical Center: New facility set-up. *Cancers* 3, 4046-4060 (2011).
- Okamoto H., Kohno T., Kanai T., Kase Y., Matsumoto Y., Furusawa Y., Fujita Y., Saitoh H., Itami J.: Microdosimetric study on influence of low energy photons on relative biological effectiveness under therapeutic conditions using 6 MV linac. *Med. Phys.* 38, 4714-4722 (2011).
- Saito-Fujita T., Iwakawa M., Nakamura E., Nakawatari M., Fujita H., Moritake T., Imai T.: Attenuated lung fibrosis in Interleukin 6 Knock-out Mice after C-ion irradiation to lung. *J. Radiat. Res.* 52, 270-277 (2011).
- Sawajiri M., Nomura Y., Nishikiori R., Banik S., Sonoda Y., Tanimoto K.: Irradiation effect on osteoclastogenesis stimulated by breast cancer cell. *Health Phys.* 101, 259-264 (2011).
- Takahashi A., Suzuki H., Omori K., Seki M., Hashizume T., Shimazu T., Ishioka N., Ohnishi T.: Expression of p53-regulated genes in human cultured lymphoblastoid TSCE5 and WTK1 cell lines after spaceflight in a frozen state. *Adv. Space Res.* 47, 1062-1070 (2011).
- Varès G., Wang B., Tanaka K., Kakimoto A., Eguchi-Kasai K., Neno M.: Mutagenic adaptive response to high-LET radiation in human lymphoblastoid cells exposed to X-rays. *Mutat. Res.* 706, 46-52 (2011).
- Varès G., Wang B., Tanaka K., Kakimoto A., Eguchi-Kasai K., Neno M.: Mutagenic adaptive response to high-LET radiation in human lymphoblastoid cells exposed to low doses of heavy-ion radiation. *Mutat. Res.* 712, 49-54 (2011).
- Wang Y., Wang B., Zhang H., Li N., Tanaka K., Zhou X., Chen R., Zhang X.: BRCA1 involves in regulation of Bcl-2 expression and apoptosis susceptibility to ionizing radiation. *Sci. China Phys. Mech. Astron.* 54, 1-7 (2011).
- Fujita M., Otsuka Y., Imadome K., Endo S., Yamada S., Imai T.: Carbon-ion radiation enhances migration ability and invasiveness of the pancreatic cancer cell, PANC-1, in vitro. *Cancer Sci.* 103, 677-683 (2012).
- Genet S.C., Maeda J., Fujisawa H., Yurkon C.R., Fujii Y., Romero A.M., Genik P.C., Fujimori A., Kitamura H., Kato T.A.: Comparison of cellular lethality in DNA repair-proficient or -deficient cell lines resulting from exposure to 70 MeV/n protons or 290 MeV/n carbon ions. *Oncol Rep.* 28, 1591-1596 (2012).
- Hirai T., Shirai H., Fujimori H., Okayasu R., Sasai K., Masutani M.: Radiosensitization effect of poly (ADP-ribose) polymerase inhibition in cells exposed to low and high linear energy transfer radiation. *Cancer Sci.* 103, 1045-1050 (2012).
- Hirobe T., Eguchi-Kasai K., Sugaya K., Murakami M.: Effects of low-dose heavy ions on embryonic development in mice and on melanocytes differentiation in the epidermis and hair bulb. *J. Radiat. Res.* doi:10.1093/Jrr/rrs116 (2012).
- Le Sech C., Kobayashi K., Usami N., Furusawa Y., Porcel E., Lacombe S.: Comment on "Enhanced relative biological effectiveness of proton radiotherapy in tumor cells with internalized gold nanoparticles" [*Appl. Phys. Lett.* 98, 193702 (2011)]. *Appl. Phys. Lett.* 100, 026101 (2012).
- Le Sech C., Kobayashi K., Usami N., Furusawa Y., Porcel E., Lacombe S.: Comment on 'Therapeutic application of metallic nanoparticles combined with particle-induced x-ray emission effect'. *Nanotechnology* 23, 078001 (2012).
- Nakagawa Y., Takahashi A., Kajihara A., Yamakawa N., Imai Y., Ota I., Okamoto N., Mori E., Noda T., Furusawa Y., Kirita T., Ohnishi T.: Depression of p53-independent Akt survival signals in human oral cancer cells bearing mutated p53 gene after exposure to high-LET radiation. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 423, 654-660 (2012).
- Oonishi K., Cui X., Hirakawa H., Fujimori A., Kamijo T., Yamada S., Yokosuka O., Kamada T.: Different effects of carbon ion beams and x-rays on clonogenic survival and DNA repair in human pancreatic cancer stem-like cells. *2012 Radiotherapy and Oncology*, 105, 258-265 (2012).
- Porcel E., Li S., Usami N., Remita H., Furusawa Y., Kobayashi K., Le Sech C., Lacombe S.: *J. of Phys. Conf. Series* 373, 012006 (2012).
- Saisho Y., Ito A.: Mathematical models of the generation of radiation-induced DNA double-strand breaks. *J. Mathematical Biol.* Doi:10.1007/s00285-012-0567-0 (2012).
- Shoukamy M.I., Nakano T., Ohshima M., Hirayama R., Uzawa A., Furusawa Y., Ide H.: Detection of DNA-protein crosslinks (DPCs) by novel direct fluorescence labeling methods: distinct stabilities of aldehyde and radiation-induced DPCs. *Nucleic Acids Res.* 40, e143 (2012).

- Wang B., Ninomiya Y., Tanaka K., Maruyama K., Varès G., Eguchi-Kasai K., Nenoï M.: Adaptive response of low LET X-Rays for protection against high LET accelerated heavy ion-induced teratogenesis. *Birth Defects Res. B Dev. Reprod. Toxicol.* 95, 379-385 (2012).
- Autsavapromporn N., Suzuki M., Plante I., Liu C., Uchihori Y., Hei T.K., Azzam E.I., Murakami T.: Participation of gap junction communication in potentially lethal damage repair and DNA damage in human fibroblasts exposed to low- or high-LET radiation. *Mutat. Res.* 756, 78-85 (2013).
- Ding N., Pei H., He J., Furusawa Y., Hirayama R., Liu C., Matsumoto Y., Li H., Hu W., Li Y., Wang J., Wang T., Zhou G.: Simulated studies on the biological effects of space radiation on quiescent human fibroblasts. *Adv. Space Res.* 52, 1314-1319 (2013).
- Fujii Y., Yurkon C.R., Maeda J., Genet S.C., Okayasu R., Kitamura H., Fujimori A., Kato T.A.: Influence of track directions on the biological consequences in cells irradiated with high LET heavy ions. *Int. J. Radiat. Biol.* 89, 401-410 (2013).
- Fujii Y., Genet M.D., Roybal E.J., Kubota N., Okayasu R., Miyagawa K., Fujimori A., Kato T.A.: Comparison of the bromodeoxyuridine-mediated sensitization effects between low-LET and high-LET ionizing radiation on DNA double-strand breaks. *Oncol. Rep.* 29, 2133-2139 (2013).
- Fujisawa H., Genik P.C., Kitamura H., Fujimori A., Uesaka M., Kato T.A.: Comparison of human chordoma cell-kill for 290 MeV/n carbon ions versus 70 MeV protons in vitro. *Radiat. Oncol.* 8, 91 (2013).
- Hirayama R., Uzawa A., Takase N., Matsumoto Y., Noguchi M., Koda K., Ozaki M., Yamashita K., Li H., Kase Y., Matsufuji N., Koike S., Masunaga S., Ando K., Okayasu R., Furusawa Y.: Evaluation of SCCVII tumor cell survival in clamped and non-clamped solid tumors exposed to carbon-ion beams in comparison to X-rays. *Mutat. Res.* 756, 146-151 (2013).
- Imaoka T., Nishimura M., Daino K., Kokubo T., Doi K., Iizuka D., Nishimura Y., Okutani T., Takabatake M., Kakinuma S., Shimada Y.: Influence of age on the relative biological effectiveness of carbon ion radiation for induction of rat mammary carcinoma. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 85, 1134-1140 (2013).
- Kawakami K., Nishida H., Tatewaki N., Eguchi-Kasai K., Anzai K., Eitsuka T., Konishi T., Hirayama M.: Persimmon Leaf Flavonols Enhance the Anti-Cancer Effect of Heavy Ion Radiotherapy on Murine Xenograft Tumors. *Journal of Cancer Therapy*, Published Online, doi:10.4236/jct.2013 (2013).
- Liu C., Kawata T., Furusawa Y., Zhou G., Inoue K., Fukada J., Kota R., George K., Cucinotta F., Okayasu R.: Chromosome aberrations in normal human fibroblasts analyzed in G0/G1 and G2/M phases after exposure in G0 to radiation with different linear energy transfer (LET). *Mutat. Res.* 756, 101-107 (2013).
- Liu C., Kawata T., Zhou G., Furusawa Y., Kota R., Kumabe A., Sutani S., Fukada J., Mishima M., Shigematsu N., George K., Cucinotta F.: Comparison of the repair of potentially lethal damage after low- and high-LET radiation exposure, assessed from the kinetics and fidelity of chromosome rejoining in normal human fibroblasts. *J. Radiat. Res.* 54, 989-997 (2013).
- Masunaga S., Sakurai Y., Tanaka H., Hirayama R., Matsumoto Y., Uzawa A., Suzuki M., Kondo N., Narabayashi M., Maruhashi A., Ono K.: Radio-sensitivity of pimonidazole-unlabeled intratumor quiescent cell population to gamma-rays, accelerated carbon ion beams and boron neutron capture reaction. *Br. J. Radiol.* 86, 20120302 (2013).
- Matuo Y., Izumi Y., Sato N., Yamamoto T., Shimizu K.: Evaluation of DNA lesions caused by high-LET radiation using the polymerase chain reaction. *Radiat. Meas.* 55, 93-95 (2013).
- Monzen S., Yoshino H., Kasai-Eguchi K., Kashiwakura I.: Characteristics of myeloid differentiation and maturation pathway derived from human hematopoietic stem cells exposed to different Linear Energy Transfer radiation types. *PLoS ONE*. 8, e59385 (2013).
- Nakajima N.I., Brunton H., Watanabe R., Shrikhande A., Hirayama R., Matsufuji N., Fujimori A., Murakami T., Okayasu R., Jeggo P., Shibata A.: Visualisation of  $\gamma$ H2AX Foci caused by heavy ion particle traversal; Distinction between core track versus non-Track damage. *PLOS ONE*. 8, e70107 (2013).
- Saisho Y., Ito A.: Mathematical models of the generation of radiation-induced DNA double-strand breaks. *J. Mathematical Biol.* 67, 717-736 (2013).
- Scifoni E., Tinganelli W., Weyrather W.K., Durante M., Maier A., Krämer M.: Including oxygen enhancement ratio in ion beam treatment planning: model implementation and experimental verification. *Phys. Med. Biol.* 58, 3871-3895 (2013).

- Shirai H., Fujimori H., Gunji A., Maeda D., Hirai T., Poetsch A.R., Harada H., Yoshida T., Sasai K., Okayasu R., Masutani M.: Parg deficiency confers radio-sensitization through enhanced cell death in mouse ES cells exposed to various forms of ionizing radiation. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 24, 435, 100-106 (2013).
- Takahashi Y., Shibata S., Yokoyama J., Hashimoto H., Yokobori S., Yamagishi A.: Selection of lichens resistant to the cosmic environment — thermal cycle treatment, UV irradiation and heavy particle beam. *Biol. Sci. Space.* 27, 9-18 (2013).
- Wada M., Suzuki M., Liu C., Kaneko Y., Fukuda S., Ando K., Matsufuji N.: Modeling of response to carbon beam fractionated irradiation of normal human cells including repair process. *J. Radiat. Res.* doi: 10.1093/jrr/rrt012 (2013).
- Wada M., Suzuki M., Liu C., Kaneko Y., Fukuda S., Ando K., Matsufuji N.: Modeling the biological response of normal human cells, including repair processes, to fractionated carbon beam irradiation. *J. Radiat. Res.* 54, 798-807 (2013).
- Wang B., Tanaka K., Ninomiya Y., Maruyama K., Varès G., Eguchi-Kasai K., Nenoï M.: Relieved residual damage in the hematopoietic system of mice rescued by radiation-induced adaptive response (Yonezawa Effect). *J. Radiat. Res.* 54, 45-51 (2013).
- Wang B., Tanaka K., Bin J., Ono M., Yagun H., Ninomiya Y., Maruyama K., Nakajima N., Begum N., Higuchi M., Fujimori A., Uehara Y., Nakajima T., Suhara T., Nenoï M.: Low-dose total body carbon-ion irradiations induce early transcriptional alteration without late Alzheimer's disease-like pathogenesis and memory impairment in mice. *Journal of Neuroscience Research.* 92, 915-926 (2013).
- Yajima H., Fujisawa H., Nakajima N.I., Hirakawa H., Jeggo P., Okayasu R., Fujimori A.: The complexity of DNA double strand breaks is a critical factor enhancing end-resection. *DNA Repair* 12, 936-946 (2013).
- Zhou X., Zhang X., Xie Y., Tanaka K., Wang B., Zhang H.: DNA-PKcs inhibition sensitizes cancer cells to carbon-ion irradiation via telomere capping disruption. *PLoS ONE.* 8, e72641 (2013).
- 物理・工学
- Azuma T., Tanuma H., Shiromaru H.: Present and future projects of TMU atomic physics group. *J. of Phys. Conf. Series* 2, 143-151 (2004).
- Berger T., Hajek M., Summerer L., Vana N., Akatov Y., Shurshakov V., Arkhangelsky V.: Austrian dose measurements onboard Space Station Mir and the International Space Station-overview and comparison. *Adv. Space Res.* 34, 1414-1419 (2004).
- Fadil H., Noda A., Shirai T., Noda K., Furukawa T., Beutelspacher M., Grieser M.: Electron cooling of longitudinally hot ion beams. *Nucl. Instr. and Meth. A* 517, 1-8 (2004).
- Furukawa T., Noda K., Muramatsu M., Uesugi T., Shibuya S., Kawai H., Takada E. and Yamada S.: Global spill control in RF-knockout slow-extraction. *Nucl. Instr. and Meth. A* 522, 196-204 (2004).
- Gaza R., Yukihiro E.G., McKeever S.W.S.: The response of thermally and optically stimulated luminescence from  $Al_2O_3:C$  to relativistic heavy charged particles. *Radiat. Meas.* 38, 417-420 (2004).
- Giacomelli M., Sihver L., Skvarc J., Yasuda N., Ilıc R.: Projectilelike fragment emission angles in fragmentation reactions of light heavy ions in the energy region  $< 200$  MeV/nucleon: Modeling and Simulations. *Phys. Rev. C* 69, 064601 (2004).
- Guetersloh S.B., Borak T.B., Taddei P.B., Zeitlin C.J., Heilbronn L., Miller J., Murakami T., Iwata Y.: The response of a spherical Tissue-Equivalent Proportional Counter to different ions having similar LET. *Radiat. Res.* 161, 64-71 (2004).
- Gunji S., Sakurai H., Tokanai F., Ohoshima Y., Yasuda N., Yamashita Y.: A study on angular and energy resolution for imaging plate using heavy particles. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 51, 2012-2017 (2004).
- Hashimoto Y., Fujisawa T., Morimoto T., Fujita Y., Honma T., Muto S., Noda K., Sato Y., Yamada S.: Oxygen gas-sheet beam profile monitor for the synchrotron and storage ring. *Nucl. Instr. and Meth. A* 527, 289-300 (2004).
- Ikeda N., Kuboyama S., Matsuda S.: Single-event burnout of super-junction power MOSFETs. *IEEE trans. Nucl. Sci.* 51, 3332-3335 (2004).
- Iseki Y., Kanai T., Kanazawa M., Kitagawa A., Mizuno H., Tomitani T., Suda M., Urakabe E.: Range verification system using positron emitting beams for heavy-ion radiotherapy. *Phys. Med. Biol.* 49, 3179-3195 (2004).
- Kanazawa M., Kitagawa A., Kouda T., Nishio



- S., Torikoshi M., Noda K., Murakami T., Sato S., Suda M., Tomitani T., Kanai T., Futami Y., Shinbo M., Urakabe E., Iseki T.: Present status of secondary beam courses in HIMAC. Nucl. Phys. A 746, 393-396 (2004).
- Kodaira S., Hasebe N., Doke T., Kitagawa A., Kitamura H., Sato S., Uchihori Y., Yasuda N., Ogura K., Tawara H.: Mass resolution for iron-isotopes in CR-39 track detector. Jpn. J. Appl. Phys. 43, 6358-6363 (2004).
- Kohno R., Kanematsu N., Kanai T., Yusa K.: Experimental evaluation of analytical penumbra calculation model for wobbled beams. Med. Phys. 31, 1153-1157 (2004).
- Kohno R., Kanematsu N., Kanai T., Yusa K.: Evaluation of a pencil beam algorithm for therapeutic carbon ion beam in presence of bolus, Med. Phys. 31, 2249-2253 (2004).
- Kuge K., Arisawa M., Aoki N., Hasegawa A.: Preparation of gold clusters in gelatin layer film using photographic film (4): Effect of photographic materials. Imaging Science Journal 52, 176-180 (2004).
- Li Q., Kanai T., Kitagawa A.: The potential application of  $\beta$ -delayed particle decay beam  $^{9}\text{C}$  in cancer therapy. Phys. Med. Biol. 49, 1817-1831 (2004).
- Li Q., Kitagawa A., Kanai T., Kanazawa M., Urakabe E., Tomitani T., Sato S., Wei Z.: Therapeutic purpose  $^{9}\text{C}$  beam produced in the secondary beam line at HIMAC. Nucl. Instr. and Meth. B 222, 270-284 (2004).
- Li Q., Komori M., Kanai T., Kitagawa A., Urakabe E., Kanazawa M., Tomitani T., Sato S.: The LET spectra at different penetration depths along secondary  $^{9}\text{C}$  and  $^{11}\text{C}$  beams. Phys. Med. Biol. 49, 5119-5133 (2004).
- Li Q., Kitagawa A., Kanazawa M., Urakabe E., Kanai T., Tomitani T., Sato S., Wei Z.: The production of  $^{9}\text{C}$  beam in the secondary beam line of the HIMAC facility and its potential application in cancer therapy. Nucl. Phys. A 746, 288c-292c (2004).
- Matsuta K., Arimura K., Nagatomo T., Akutsu K., Iwakoshi T., Kudo S., Ogura M., Takechi M., Tanaka K., Sumikama T., Minamisono K., Miyake T., Minamisono T., Fukuda M., Mihara M., Kitagawa A., Sasaki M., Kanazawa M., Torikoshi M., Suda M., Hirai M., Momota S., Nojiri Y., Sakamoto A., Saihara M., Ohtsubo T., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Magnetic moment of  $^{33}\text{Cl}$ . Nucl. Phys. A 746, 493c-496c (2004).
- McKeever S.W.S., Blair M.W., Bulur E., Gaza R., Gaza R., Kalchgruber R., Klein D.M., Yukihara E.G.: Recent advances in dosimetry using the optically stimulated luminescence of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ . Radiat. Prot. Dosim. 109, 269-276 (2004).
- Miyata T., Miyoshi T., Sakuma T., Yamamoto M., Kitagawa A., Muramatsu M., Sato Y.: Improvement of the yield of highly charged ions by a gas-pulsing technique and the current status of the NIRS Penning source. Rev. Sci. Instrum. 75, 1863-1865 (2004).
- Momota S., Tanihata I., Ozawa A., Notani M., Yoshida K., Morimoto K., Onishi T., Yamaguchi T., Yoshida A., Watanabe Y.X., Zhong L., Kanazawa M., Kitagawa A., Suda M., Nojiri Y.: Momentum distributions and production cross sections of projectile-like fragments. Nucl. Phys. A 746, 407-410 (2004).
- Muramatsu M., Kitagawa A., Sakamoto Y., Sato Y., Yamada S., Ogawa H., Drentje A.G., Biri S., Yoshida Y.: Compact ECR ion source with permanent magnets for carbon therapy. Rev. Sci. Instrum. 75, 1925-1927 (2004).
- Nagatomo T., Matsuta K., Akutsu K., Iwakoshi T., Nakashima Y., Sumikama T., Ogura M., Mihara M., Fujiwara H., Kumashiro S., Minamisono K., Minamisono T., Fukuda M., Miyake M., Momota S., Nojiri Y., Kitagawa A., Sasaki M., Torikoshi M., Kanazawa M., Suda M., Sato S., Hirai M., Symons T.J.M., Krebs G.F., Alonso J.R., Zhu S.Y., Zhu J.Z., Xu Y.J., Zheng Y.N.: Precise nuclear moments of  $^{13}\text{B}$  and the  $\beta$ -ray angular distribution. Nucl. Phys. A 746, 509c-512c (2004).
- Nagatomo T., Matsuta K., Akutsu K., Iwakoshi T., Nakashima Y., Sumikama T., Ogura M., Mihara M., Fujiwara H., Kumashiro S., Minamisono K., Minamisono T., Fukuda M., Miyake M., Momota S., Nojiri Y., Kitagawa A., Sasaki M., Torikoshi M., Kanazawa M., Suda M., Sato S., Hirai M., Symons T.J.M., Krebs G.F., Alonso J.R., Zhu S.Y., Zhu J.Z., Xu Y.J., Zheng Y.N.: Nuclear spin orientation of  $^{12,13}\text{B}$  created in heavy ion collisions. Nucl. Phys. A 746, 505c-508c (2004).
- Nakagawa K., Sato Y.: ESR investigation of sucrose radicals produced by particle irradiation. Spectrochim. Acta A Mol Biomol. Spectroscopy 60, 1315 (2004).
- Noda K., Shibuya S., Tann D., Ninomiya S., Uesugi T., Furukawa T., Honma T., Iwashima T., Y. Ogawa H., Hashimoto Y., Fujisawa T., Uchiyama H., Uesugi T., Muramatsu M., Syresin E.: Electron cooling of bunched ion beam at NIRS-HIMAC. Nucl. Instrum. Meth. A 532, 129-136 (2004).
- Ogura M., Nagatomo T., Minamisono K., Matsuta K., Minamisono T., Nakashima Y., D. P. Levy C., Sumikama T., Mihara M., Fujiwara H., Kumashiro S., Fukuda M., A.

- Behr J., P. Jackson K., Momota S., Nojiri Y., Ohtsubo T., Ohta M., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Suda M., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.M.: Quadrupole moments of Na isotopes. *Hyperfine Interactions* 159, 235-238 (2004).
- Ohmori C., Kanazawa M., Takagi A., Noda K., Uesugi T., Shirakabe Y., Sugiura A., Mori Y., Muto M., Cho Y.: Beam diagnostics using a chopped beam. *Nucl. Instr. and Meth. A* 526, 215-221 (2004).
- Ohno Y., Kohno T., Matsufuji N., Kanai T.: Measurement of electron density distribution using heavy ion CT. *Nucl. Instr. and Meth. A* 525, 279-283 (2004).
- Sato Y., Miyoshi T., Murakami T., Noda K., Shevelko V.P., Tawara H.: Penetration of 4.3 and 6.0 MeV/u highly charged, heavy ions through carbon foils. *Nucl. Instr. and Meth. B* 225, 439-448 (2004).
- Takada M., Awaya I., Iwai S., Iwaoka M., Masuda M., Kimura T., Takagi S., Sato O., Nakamura T., Fujitaka K.: Progress report on the phoswich neutron detector to measure high-energetic neutron spectra onboard an aircraft and a spacecraf. *J. Nucl. Sci. Technol.* 4[Sup.], 399-402 (2004).
- Tanaka K., Fukuda M., Mihara M., Takechi M., Chinda T., Sumikama T., Kudo S., Matsuta K., Minamisono T., Ohtsubo T., Suzuki T., Momota S., Izumikawa T., Yamaguchi T., Onishi T., Ozawa A., Tanihata I., Tao Z.: Density distribution of proton drip-line nucleus  $^{17}\text{Ne}$ . *Nucl. Phys. A* 746, 532-535 (2004).
- Uesugi T., Fujisawa T., Noda K., Hashimoto Y., Machida S., Mori Y., Uchiyama H.: Observation of beam-size blowup due to half-integer resonance in a synchrotron. *Phys. Rev. ST-AB*, 7, 064203 (2004).
- Yashima H., Uwamino Y., Sugita H., Ito S., Nakamura T., Fukumura A.: Induced radioactivity in Cu targets produced by high-energy heavy ions and the corresponding estimated photon dose rates. *Radiation Protection Dosimetry* 112, 195-208 (2004).
- Yashima H., Uwamino Y., Iwase H., Sugita H., Nakamura T., Ito S., Fukumura A.: Cross sections for the production of residual nuclides by high-energy heavy ions. *Nucl. Instr. and Meth. B* 226, 243-263 (2004).
- Yukihara E.G., Whitley V.H., McKeever S.W.S., Akselrod A.E., Akselrod M.S.: Effect of high dose irradiation on the optically stimulated luminescence of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ . *Radiat. Meas.* 38, 317-330 (2004).
- Yukihara E.G., Gaza R., McKeever S.W.S., Soares C.G.: Optically stimulated luminescence and thermoluminescence efficiencies for relativistic heavy charged particle irradiation in  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ . *Radiat. Meas.* 38, 59-70 (2004).
- 水野秀之、井関康、浦壁恵理子、須田充、金澤光隆、北川敦志、富谷武浩、中村譲、金井達明、石井慶造：ポジトロンカメラによる RI ビームの体内到達深度の測定に有効なポジトロン放出核種についての検討、*Jpn. J. Med. Phys.* 24, 37-48 (2004).
- Broggio D., Jung J.M., Barillon R., Yamauchi T.: Ion-induced degradation of BC-418 scintillation yield. *Radiat. Meas.* 40, 736-740, (2005).
- Endo S., Tanaka K., Ishikawa M., Hoshi M., Onizuka Y., Takada M., Yamaguchi H., Hayabuchi N., Maeda N., Shizuma K.: Microdosimetric evaluation of the 400 MeV/nucleon carbon beam at HIMAC. *Med. Phys.* 32, 3843-3848 (2005).
- Furukawa T., Noda K., H. Uesugi T., Naruse T., Shibuya S.: Intensity control in RF-knockout extraction for scanning irradiation. *Nucl. Instr. and Meth. B* 240, 32-35 (2005).
- Furukawa T., Noda K.: Contribution of synchrotron oscillation to spill ripple in RF-knockout slow-extraction. *Nucl. Instr. and Meth. A* 539, 44-53 (2005).
- Guo S-L., Doke T., Li L., Chen B-L., Zhang D-H., Kikuchi J., Terasawa K., Komiyama M., Hara K., Fuse T., Yasuda N., Murakami T.: Comparison between theoretical model and experimental calibrations and its inference for track formation in bubble detectors. *Radiat. Meas.* 40, 229-233 (2005).
- Hojo S., Honma T., Sakamoto Y., Yamada S.: Production of  $^{11}\text{C}$ -beam for particle therapy. *Nucl. Instr. and Meth. B* 240, 75-78 (2005).
- Ikedo N., Kuboyama S., Matsuda S., Handa T.: Analysis of angular dependence of proton-induced multiple-bit upsets in a synchronous SRAM. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 52, 2200-2204 (2005).
- Inaniwa T., Kohno T., Tomitani T.: Simulation for position determination of distal and proximal edges for SOBP irradiation in hadron therapy by using the MLE method. *Phys. Med. Biol.* 50, 5829-5845 (2005).
- Kitagawa A., Muramastu M., Sato S., Suda M., Noda K., Kanai T.: New medical irradiation technique by the permanent magnet system for the heavy-ion therapy. *Nucl. Instr. and Meth. B* 240, 79-82 (2005).
- Kohno R., Yasuda N., Takeshi H., Kase Y., Ochiai K., Komori M., Matsufuji N., Kanai T.:

- Measurements of dose-averaged Linear Energy Transfer distributions in water using CR-39 plastic nuclear track detector for therapeutic carbon ion beams. *Jpn. J. Appl. Phys.* 44, 8722-8726 (2005).
- Kumamoto Y., Noda Y., Sato Y., Kanai T., Murakami T.: Measurements of neutron effective doses and attenuation lengths for shielding materials at the heavy-ion medical accelerator in CHIBA. *Health Phys.* 469-479 (2005).
- Li Qiang., Furusawa Y., Kanazawa M., Kanai T., Kitagawa A., Aoki M., Urakabe E., Tomitani T., Sato S., Yoshimoto M., We Z.: Enhanced efficiency in cell killing at the penetration depths around the bragg peak of a radioactive  $^{9}\text{C}$ -ion beam. *Int.J.Radiation Oncology Biol. Phys.* 63, 1237-1244 (2005).
- Mala D., Yasuda N., Homma A., Sawamura T.: Threshold temperatures of heavy ion-induced nucleation in superheated emulsions. *Nucl. Instr. and Meth. A* 543, 570-576 (2005).
- Maruyama K., Hanada T., Kikumura R., Kanazawa M., Kitagawa A., Sato S., Suda T., Maeda K.: Total reaction cross sections of  $^{11}\text{C}$  on plastic scintillator in the energy range of 100-345 MeV/u. *J. Phys. Soc. Jpn.* 74, 1636-1639 (2005).
- Matsufuji N., Komori M., Sasaki H., Akiu K., Ohara M., Fukumura A., Urakabe E., Inaniwa T., Nishio T., Kohno T., Kanai T.: Spatial fragment distribution from a therapeutic pencil-like carbon beam in water. *Phys. Med. Biol.* 50, 3393-3403 (2005).
- Matsumura H., Sanami T., Masumoto K., Nakao N., Toyoda A., Kawai M., Aze T., Nagai H., Takada M., Matsuzaki H.: Target dependence of beryllium fragment production in neutron- and alpha-induced nuclear reactions at intermediate energies. *Radiochim. Acta* 93, 497-501 (2005).
- Muramatsu M., Kitagawa A., Sakamoto Y., Sato S., Ogawa H., Yamada S., Ogawa H., Yoshida Y., Drentje A.G.: Development of a compact Electron-Cyclotron-Resonance ion source for high-energy carbon therapy. *Rev. Sci. Instrum.* 76, 113304 (2005).
- Nagatomo T., Sumikama T., Ogura M., Matsuta K., Nakashima Y., Akutsu K., Iwakoshi T., Fujiwara H., Minamisono T., Fukuda M., Mihara M., Minamisono K., Miyatake T., Momota S., Nojiri Y., Kitagawa A., Sasaki M., Torikoshi M., Kanazawa M., Suda M., Hirai M., Sato S., Zhu S.Y., Zhu J.Z., Xu Y.J., Zheng Y.N., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.M.: Precise nuclear quadrupole moments of  $^8\text{B}$  and  $^{13}\text{B}$ . *Hyperfine Interactions* 10.1007/s10751-005-9109-0 (2005).
- Nagatomo T., Matsuta K., Nakashima Y., Sumikama T., Ogura M., Akutsu K., Iwakoshi T., Fujiwara H., Minamisono T., Fukuda M., Mihara M., Miyake T., Minamisono K., Momota S., Nojiri Y., Kitagawa A., Sasaki M., Torikoshi M., Kanazawa M., Suda M., Hirai M., Sato S., Zhu S.Y., Zhu J.Z., Xu Y.J., Zheng Y.N., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.M.: Nuclear spin orientation created in heavy ion collisions and the sign of the Q moment of  $^{13}\text{B}$ . *Hyperfine Interactions* (2005) DOI 10.1007/s10751-005-9110-7 (2005).
- Nakagawa K., Sato Y.: Investigation of heavy-ion-induced Sucrose radicals by electron paramagnetic resonance. *Radiat. Res.* 164, 336-338 (2005).
- Nakanishi T., Furukawa T., Yoshida K., Noda K.: Slow beam-extraction method using a fast Q-magnet assisted by RF-knockout. *Nucl. Instr. and Meth. A* 553, 400-406 (2005).
- Noda K., Tann D., Uesugi T., Shibuya S., Honma T., Hashimoto Y.: Production of short-pulsed beam for ion-beam radiolysis. *Nucl. Instr. and Meth. B* 240, 18-21 (2005).
- Ogura M., Nagatomo T., Minamisono K., Matsuta K., Minamisono T., Nakashima Y., D. P. Levy C., Sumikama T., Mihara M., Fujiwara H., Kumashiro S., Fukuda M., A. Behr J., P. Jackson K., Momota S., Nojiri Y., Ohtsubo T., Ohta M., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Suda M., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.M.: Quadrupole moments of Na isotopes. *Hyperfine Interactions* DOI 10.1007/s10751-005-9105-4 (2005).
- Ohmori C., Kanazawa M., Noda K., Kawashima M., Misu T., Mori Y., Sugiura A., Takagi A., Uesugi T.: A multi-harmonic RF system using a MA cavity. *Nucl. Instr. and Meth. A* 547, 249-258 (2005).
- Ohsawa D., Sato Y., Okada Y., Shevelko V.P., Soga F.: Unexpectedly large cross sections of high-energy electrons ejected from water vapor by 6.0-10.0 MeV/u  $\text{He}^{2+}$  Ions. *Phys. Lett. A* 342, 168-174 (2005).
- Ohsawa D., Sato Y., Okada Y., P. Shevelko V., Soga F.: 6.0-10.0 MeV/u  $\text{He}^{2+}$  ion-induced electron emission from water vapor. *Phys. Rev. A* 72, 062710 (2005).
- Ohsawa D., Kawauchi H., Hirabayashi M., Okada Y., Honma T., Higashi A., Amano S., Hashimoto Y., Soga F., Sato Y.: An apparatus for measuring the energy and angular distribution of secondary electrons emitted from water vapor by fast heavy-ion impact, *Nucl. Instrum. and Meth. B* 227, 431-449

- (2005).
- Sakama M., Kanai T., Kase Y., Komori M., Fukumura A., Kohno T.: Responses of a diamond detector to high-LET charged particles. *Phys. Med. Biol.* 50, 2275-2289 (2005).
- Sato S., Kitagawa A., Mitsutaka M., Urakabe E., Tomitani T., Suda M., Li Q., Inaniwa T., Hanawa K., Sato K.: A versatile control system for irradiation and measurement for secondary beam experiments in a heavy ion accelerator, HIMAC. *Nucl. Instr. and Meth. B* 240, 95-99 (2005).
- Sato Y., Ohsawa D., Higashi A., Kawauchi H., Hirabayashi M., Okada Y., Uehara S., Nikjoo H., Soga F.: Secondary electrons from water vapor with the impact of 6.0 MeV/u  $\text{He}^{2+}$  ions. *Atomic and Molecular Data and their Applications* 771, 128-137 (2005).
- Shevelko V.P., Tawara H., Ivanov O.V., Miyoshi T., Noda K., Sato Y., Subbotin A.V., Tolstikhina I.Y.: Target density effects in collisions of fast ions with solid targets. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 38, 2675-2690 (2005).
- Shibuya S., Noda K., Nakamura S., Noda A., Grieser M.: Optimization of a beam line equipped with a laser ion source. *Nucl. Instr. and Meth. B* 240, 26-31 (2005).
- Takechi M., Fukuda M., Mihara M., Chinda T., Matsumasa T., Matsubara H., Nakashima Y., Matsuta K., Minamisono T., Koyama R., Shinosaki W., Takahashi M., Takizawa A., Ohtsubo T., Suzuki T., Izumikawa T., Momota S., Tanaka K., Suda T., Sasaki M., Sato S., Kitagawa A.: Reaction cross sections for stable nuclei and nucleon density distribution of proton drip-line nucleus  $^8\text{B}$ . *Eur. Phys. J. A* 25, 217-219 (2005).
- Tanaka K., Fukuda M., Mihara M., Takechi M., Chinda T., Sumikama T., Kudo S., Matsuta K., Minamisono T., Suzuki T., Ohtsubo T., Izumikawa T., Momota S., Yamaguchi T., Onishi T., Ozawa A., Tanihata I., Zheng T.: Nucleon density distribution of proton drip-line nucleus  $^{17}\text{Ne}$ . *Eur. Phys. J. A* 25, 221 (2005).
- Terasawa K., Borak T.B., Doke T., Fuse T., Hara K., Kikuchi J., Kitamura H., Suzuki S., Uchihori Y.: The response of the silicon based Linear Energy Transfer spectrometer (RRMD III) to protons from 1 to 70 MeV. *Jpn. J. Appl. Phys.* 44, 7608-7613 (2005).
- Terasawa K., Doke T., Miuchi K., Nagayoshi T., Sasaki S., Tawara H., Matsumoto H.: Position-Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) for space dosimetry. *Proc. of the 19th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses* 63-73 (2005).
- Toshito T., Kodama K., Yusa K., Ozaki M., Amako K., Kameoka S., Murakami K., Sasaki T., Aoki S., Ban T., Fukuda T., Naganawa N., Nakamura T., Natsume M., Niwa K., Takahashi S., Kanazawa M., Kanematsu N., Komori M., Sato S., Asai M., Koi T., Fukushima C., Ogawa S., Shibasaki M., Shibuya H.: Charge identification of highly ionizing particles in desensitized nuclear emulsion using high speed read-out system. *Nucl. Instr. and Meth. A* 556, 482-489 (2006).
- Uesugi T., Noda K., Syresin E., Meshkov I., Shibuya S.: Cool-stacking injection and damping of a transverse ion-beam instability at the HIMAC synchrotron. *Nucl. Instr. and Meth. A* 545, 45-56 (2005).
- Yamauchi T., Yasuda N., Asuka T., Izumi K., Masutani T., Oda K., Barillon R.: Track core size estimation for heavy ions in CR-39 by AFM and UV methods. *Nucl. Instr. and Meth. B* 236, 318-322 (2005).
- Yasuda N., Konishi T., Matsumoto K., Yamauchi T., Asuka T., Furusawa Y., Sato Y., Oda K., Tawara H., Hieda K.: Dose distribution of carbon ions in air assessed using imaging plates and ionization chamber. *Radiat. Meas.* 40, 384-388 (2005).
- Zeitlin C., Guetersloh S., Heilbronn L., Miller J.: Shielding and fragmentation studies. *Radiation Protection Dosimetry* 116, 123-124 (2005).
- 安田仲宏、内堀幸夫、北村尚、藤高和信、Benton E.: 国際宇宙放射線モニタ比較実験と新しい固体飛跡検出法の開発、放射線 31、No.2、119-128 (2005).
- 佐藤幸夫、大澤大輔、岡田裕樹：重粒子線のトラック構造と高 LET 効果、放射線 31(1), 33-40 (2005).
- 松林史泰、吉田勝英、丸山浩一：荷電粒子検出器応答試験用の単一エネルギー電子生成装置、医学物理 25、156-164 (2006).
- Akselrod G.M., Akselrod M.S., Benton E.R., Yasuda N.: A novel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fluorescent nuclear track detector for heavy charged particles and neutrons. *Nucl. Instr. and Meth. B* 247, 295-306 (2006).
- Azuma T., Takabayashi Y., Kondo C., Muranaka T., Komaki K., Yamazaki Y., Takada E., Murakami T.: Anisotropic X-ray emission from heliumlike  $\text{Fe}^{24+}$  ions aligned by resonant coherent excitation with a periodic crystal potential. *Phys. Rev. Lett.* 97, 145502 (2006).
- Beck P., Wind M., Rollet S., Latocha M., Bock

- F., Böck H., Uchihori Y.: Microdosimetric GEANT4 and FLUKA Monte-Carlo simulations and measurements of heavy ion irradiation of silicon and tissue. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 53, 3701-3706 (2006).
- Drentje A.G., Muramatsu M., Kitagawa A.: Optimizing C4+ and C5+ beams of the Kei2 electron cyclotron resonance ion source using a special gas-mixing technique. *Rev. Sci. Instrum.* 77, 03B701 (2006).
- Furukawa T., Noda K., Fujimoto T., Uesugi T.H., Shibuya S. and Torikoshi M.: Optical matching of a slowly extracted beam with transport line. *Nucl. Instr. and Meth. A* 560, 191-196 (2006).
- Furukawa T., Noda K., Yoshida K., H. Uesugi T., Katsumata M., Shiraishi T., Shimojyu T., Shibuya S., Miyoshi T., Kanazawa M., Torikoshi M., Takada E., Yamada S.: Design of synchrotron and transport line for carbon therapy facility and related machine Study at HIMAC; *Nucl. Instr. and Meth. A* 562, 1050-1051 (2006).
- Furukawa T., Noda K.: Compensation of the asymmetric phase-space distribution for a slowly extracted beam from a synchrotron. *Nucl. Instr. and Meth. A* 565, 430-438 (2006).
- Guetersloh S., Zeitlin C., Heilbronn L., Miller J., Komiyama T., Fukumura A., Iwata Y., Murakami T., Bhattacharya M.: Polyethylene as a radiation shielding standard in simulated cosmic-ray environments. *Nucl. Instr. and Meth. B* 252, 319-332 (2006).
- Heilbronn L., Iwata Y., Iwase H., Murakami T., Sato H., Nakamura T., Ronningen R.M., Ieki K., Gudowska I., Sobolevsky N.: Secondary neutron-production cross sections from heavy-ion interactions in composite targets. *Phys. Rev. C* 73, 024603 (2006).
- Imamura M., Yamashita Y., Evtoukhovitch P., Hohara S., Kalinikov V., Kallies W., Khumutov N., Kin T., Kuchinski N., Matsufuji N., Moisenko A., Mzavia D., Samoilov V., Tsamalaidze Z., Uozumi Y., Wakabayashi G.: Response characteristics of GSO(Ce) crystal to intermediate-energy  $\alpha$ -particles. *Nucl. Instr. and Meth. A* 564, 324-327 (2006).
- Inaniwa T., Kohno T., Tomitani T., Urakabe E., Sato S., kanazawa M., Kanai T.: Experimental determination of particle range and dose distribution in thick targets through fragmentation reactions of stable heavy ions. *Phys. Med. Biol.* 51, 4129-4146 (2006).
- Inaniwa T., Kohno T., Tomitani T., Kanazawa M., Sato S., Urakabe E., Kanai K.: Application of MLE method to range determination with induced  $\beta^+$  activity in hadron therapy. *Nucl. Instr. and Meth. A* 562, 1017-1019 (2006).
- Kanai T., Matsufuji N., Miyamoto T., Mizoe J., Kamada T., Tsuji H., Kato H., Baba M., Tsujii H.: Examination of Gye system for HIMAC carbon therapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 64, 650-656 (2006).
- Kanai T., Kanematsu N.: Commissioning of a conformal irradiation system for heavy-ion radiotherapy using a layer-stacking method. *Med. Phys.* 33, 2989-2997 (2006).
- Kanazawa M., Misu T., Sugiura A., al et.: RF cavity with co-based amorphous core; *Nucl. Instr. and Meth. A* 566, 195-204 (2006).
- Kondo C., Masugi S., Nakano Y., Hatakeyama A., Azuma T., Komaki K., Yamazaki Y., Murakami T., Takada E.: Three-dimensional resonant coherent excitation of non-channeling ions in a crystal. *Phys. Rev. Lett.* 97, 135503 (2006).
- Kuboyama S., Kamezawa C., Satoh Y., Ikeda N., Hirao T., Ohyama H.: Single-event burnout of Silicon Carbide Schottky Barrier Diodes caused by high energy protons. 2007 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (2006).
- Miyachi T., Nakamura Y., Kuraza G., Fujii M., Nagashima A., Hasebe N., Kobayashi M.N., Kobayashi S., Miyajima M., Okudaira O., Yamashita N., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N., Tou T.: Response of acoustic signals generated in water by energetic xenon ions. *Nucl. Instr. and Meth. A* 560, 606-612 (2006).
- Miyachi T., Nakamura Y., Kuraza G., Fujii M., Nagashima A., Hasebe N., Kobayashi M.N., Kobayashi S., Miyajima M., Mori K., Okudaira O., Yamashita N., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Acoustic signals generated in piezoelectric lead-zirconate-titanate elements by direct bombardment with xenon ions. *Nucl. Instr. and Meth. A* 568, 760-766 (2006).
- Miyoshi T., Noda K., Sato Y., Tawara H., Yu. Tolstikhina I., Schevelko V.: Evaluation of excited nl-state distributions of fast exit ions after penetrating through solid foils. Part 1: Charge-state fractions for 4.3 MeV/u projectiles with atomic numbers  $Z = 6-26$  passing through carbon foils. *Nucl. Instr. and Meth. B* 251, 79-88 (2006).
- Miyoshi T., Noda K., Sato Y., Tawara H., Tolstikhina I.Y., Schevelko V.: Evaluation of excited nl-state distributions of fast exit ions after penetrating through solid foils. Part 2: Determination of the nl-state distribution fractions of exit ions. *Nucl. Instr. and Meth. B* 251, 89-95 (2006).



- Nakagawa K., Sato Y.: Analyses of the EPR Responses of Sucrose and L-a-Alanine radicals induced by C, Ne, and Ar ion irradiations. *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectroscopy* 63, 851-854 (2006).
- Satoh D., Sato T., Endo A., Yamaguchi Y., Takada M., Ishibashi K.: Measurement of response functions of a liquid organic scintillator for neutrons up to 800 MeV. *J. Nucl. Sci. Technol.* 43, 714-719 (2006).
- Shinoda H., Kanai T., Kohno T.: Application of heavy-ion CT. *Phys. Med. Biol.* 51, 4073-4081 (2006).
- Taddei P.J., Borak T.B., S Guetersloh B., Gersey B.B., Zeitlin C., Heilbronn L., Miller J., Murakami T., Iwata Y.: The response of a spherical tissue-equivalent proportional counter to different ions having similar velocities. *Radiat. Meas.* 41, 1227-1234 (2006).
- Yasuda N., Uchihori Y., R. Benton E., Kitamura H., Fujitaka K.: The InterComparison of Cosmic rays with Heavy Ion Beams at NIRS (ICCHIBAN) project. *Radiation Protection. Dosimetry* 120, 414-420 (2006).
- 花田剛士、喜久村力、児玉清幸、橋本成世、金澤光隆、北川敦志、須田利美、前田和茂、丸山浩一:  $^{11}\text{C}$  ビームのプラスチックシンチレータ中でのエネルギー吸収スペクトル解明. *医学物理* 26, 1-12 (2006).
- Endo S., Tanaka K., Takada M., Onizuka Y., Miyahara N., Sato T., Ishikawa M., Maeda N., Hayabuchi N., Shizuma K., Hoshi M.: Microdosimetric evaluation of secondary neutrons in a phantom produced by a 290 MeV/nucleon carbon beam at HIMAC. *Med. Phys.* 34, 3571-3578 (2007).
- Furukawa T., Inaniwa T., Sato S., Tomitani T., Minohara S., Noda K., Kanai T.: Design study of a raster scanning system for moving target irradiation in heavy-ion radiotherapy. *Med. Phys.* 34, 1085-1097 (2007).
- Heilbronn L., J.Zeitlin C., Iwata Y., Murakami T., Iwase H., Nakamura T., Nunomiya T., Sato H., Yashima H., M.Ronningen R., Ieki K.: Secondary Neutron-Production Cross Sections from Heavy-Ion Interactions Between 230 and 600 MeV/Nucleon. *Nucl. Sci. Eng.* 1
- Inaniwa T., Furukawa T., Matsufuji N., Kohno T., Sato S., Noda K., Kanai T.: Clinical ion beams: semi-analytical calculation of their quality. *Phys. Med. Biol.* 52, 7261-7279 (2007).
- Inaniwa T., Kohno T., Yamagata F., Tomitani T., Sato S., Kanazawa M., Kanai T., Urakabe E.: Maximum likelihood estimation of proton irradiated field and deposited dose distribution. *Med. Phys.* 34, 1684-1692 (2007).
- Inaniwa T., Kohno T., Tomitani T., Urakabe E., Sato S., Kanazawa M., Kanai T.: Measurements of deposited dose with induced  $\beta^+$  activity in proton and heavy-ion therapy. *Nucl. Instr. and Meth. A* 580, 1140-1143 (2007).
- Kobayashi T., Ozeki K., Watanabe K., Matsuda Y., Seki Y., Shinohara T., Miki T., Naoi Y., Otsu H., Ishimoto S., Suzuki S., Takahashi Y., Takada E.: (p,2p) Reactions on Carbon Isotopes:  $p(^{9-16}\text{C},2p)^{8-15}\text{B}$  at 250 A MeV. *Proceedings of Tours Symposium on Nuclear Physics VI, Tours, AIP Conference Proceedings*, 891, 108-112 (2007).
- Kodaira S., Yasuda N., Hasebe N., Doke T., Ota S., Sato M., Tawara H., Ogura K.: Improvement of mass resolution for iron isotopes in CR-39 track detector. *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, 5281-5287 (2007).
- Kodaira S., Yasuda N., Hasebe N., Doke T., Ota S., Ogura K.: New method of the precise measurement for the thickness and bulk etch rate of the solid-state track detector. *Nucl. Instr. and Meth. A* 574, 163-170 (2007).
- Kondo C., Masugi S., Muranaka T., Ishikawa A., Nakano Y., Azuma T., Hatakeyama A., Komaki K., Nakai Y., Takada E., Yamazaki Y., Murakami T.: Trajectory dependent resonant coherent excitation of planar-channeled ions in a thin Si crystal. *Nucl. Instr. and Meth. B* 256, 157-161 (2007).
- Kuge K., Iwakiri S., Endo Y., Yasuda N., Fukushima C., Kimura M., Shibuya H., Kumagai H.: Detection of nuclear tracks comprised of gold grains in nuclear emulsion by using gold deposition development method. *J. Radiat. Res.* 42, 1335-1341 (2007).
- Kusano Y., Kanai T., Kase Y., Matsufuji N., Komori M., Kanematsu N., et al.: Dose contributions from large-angle scattered particles in therapeutic carbon beams. *Med. Phys.* 34, 193-198 (2007).
- Kusano Y., Kanai T., Yonai S., Komori M., et al.: Field-size dependence of doses of therapeutic carbon beams. *Med. Phys.* 34, 4016-4022 (2007).
- Masuda K., Nishikido F., Shibamura E., Kikuchi J., Doke T., Murakami T.: Fluctuation in energu-loss measurements in allene-doped liquid argon for heavy ions. *Nucl. Instr. and Meth. A* 570, 487-497 (2007).
- Matsuta K., Mihara M., Nagatomo T., Matsumiya R., Momota S., Ohtsubo T., Izumikawa T., Hirano H., Takahashi S., Nishimura D., Komurasaki J., Kitagawa A.,

- Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Fukuda M., Minamisono T., Sumikama T., Tanaka K., Takechi M., Ishikawa D., Pahlovy S.A., Nagao M., Nojiri Y., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Hyperfine Interaction of  $^{25}\text{Al}$  in  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  and Its Quadrupole Moment. *Hyperfine Interactions* 180, 65-69 (2007).
- Mihara M., Matsuta K., Nishimura D., Nagatomo T., Matsumiya R., Momota S., Ohtsubo T., Izumikawa T., Zhou D.M., Zheng Y.N., Zhu Y.Y., Hirano H., Komurasakai J., Takahashi S., Kitagawa A., Torikoshi M., Sato S., Fukuda M., Ishikawa D., Minamisono T., Watanabe R., Kubo T., Nojiri Y., Sumikama T., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Spin-Lattice Relaxation of  $^{25}\text{Al}$  and  $^{28}\text{P}$  in Pt. *Hyperfine Interactions* 178, 83-86 (2007).
- Miyoshi T., Noda K., Tawara H., Tolstikhina I.Yu., Shevelko V.P.: Distribution of exit silicon ions over excited states after penetrating through carbon foils at 2.65, 4.3 and 6.0 MeV/u. *Nucl. Instr. and Meth. B* 258, 329-339 (2007).
- Nagayoshi T., Doke T., Fujita Y., Hattori K., Ishida K., Kikuchi J., Kitamura H., Komiyama T., Kubo H., Matsumoto H., Miuchi K., Nishimura H., Saito K., Sasaki S., Sekiya H., Takada A., Tanimori T., Terasawa K., Tawara H., Uchihori Y., Ueno K.: Response of a Micro Pixel Chamber to heavy ions with the energy of several hundreds of MeV/n. *Nucl. Instr. and Meth. A* 581, 110-114 (2007).
- Nishimura D., Komurasaki J., Matsuta K., Mihara M., Matsumiya R., Momota S., Ohtsubo T., Izumikawa T., Hirano H., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Fukuda M., Ishikawa D., Minamisono T., Watanabe R., Kubo T., Nojiri Y., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Magnetic Moment of Short Lived  $\beta$ -Emitter  $^{24\text{m}}\text{Al}$ . *Hyperfine Interactions*, 180, 71-74 (2007).
- Noda K., Furukawa T., Fujisawa T., Iwata Y., Kanai T., Kanazawa M., Kitagawa A., Komori M., Minohara S., Murakami T., Muramatsu M., Satou S., Takei Y., Tashiro M., Torikoshi M., Yamada S., Yusa K.: New accelerator facility for carbon-ion cancer-therapy. *J. Radiat. Res.* 48, A43-A54 (2007).
- Oka T., Kondo M., Oshima A., Washio M., Iwata M., Kudo H., Katsumura Y., Ito K., Kobayashi Y., Murakami T., Hama Y.: Suppression of the long-term degradation of polymers by  $\text{SiO}_2$  coating. *ACS Symposium Series* 978, Polymer Durability and Radiation Effects 131-139 (2007).
- Oshima A., Murata K., Oka T., Miyoshi N., Matsuura A., Kudo H., Murakami T., Katoh E., Washio M., Hama Y.: Heavy Ion Beam Induced Phenomena in Polytetrafluoroethylene. *Nucl. Instr. and Meth. B* 265, 314-319 (2007).
- Rakvin B., Maltar-Strečki N., Nakagawa K.: Pulsed EPR study of low-dose irradiation effects on L-alanine crystal irradiated with  $\gamma$ -rays, Ne, and Si ion beams. *Radiat. Meas.* 42, 1469-1474 (2007).
- Sako T., Adriani O., Bonechi L., Bongi M., Faus A., Haguenaue M., Itow Y., Kasahara K., Masuda K., Matsubara Y., Matsumoto H., Menjo H., Muraki Y., Obata Y., Tamura T., Tanaka K., Torii S., Turner W.C., Velasco J., Yoshida K.: Performance of the prototype detector for the LHCf experiment. *Nucl. Instr. and Meth. A* 578, 146-159 (2007).
- Sasaki S., Sanami T., Saito K., Iijima H., Tawara K., Murakami T.: IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record N15-221 (2007).
- Sato S., Furukawa T., Noda K.: Dynamic intensity control system with RF-knockout slow-extraction in the HIMAC synchrotron. *Nucl. Instr. and Meth. A* 574, 226-231 (2007).
- Takechi M., Fukuda M., Mihara M., Matsumiya R., Matsuta K., Minamisono T., Ohtsubo T., Izumikawa T., Momota S., Suzuki T., Yamaguchi T., Nakajima S., Kobayashi K., Tanaka K., Suda T., Sato S., Kanazawa M., and Kitagawa A.: Precise Studies of Nucleon Density Distribution of  $^6\text{He}$  and  $^8\text{He}$ . *AIP Conference Proceedings* 891, Tours Symposium On Nuclear Physics VI, 187-191 (2007).
- Takechi S., Onishi T., Minami S., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Mori K., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Comparison between two piezoelectric lead-zirconate-titanate detectors bombarded with high energy xenon beam. *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, 1704-1706 (2007).
- Takechi S., Onishi T., Minami S., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Mori K., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Detection of acoustic wave excited in chloroform bombarded with high-energy xenon beam. *Nucl. Instr. and Meth. A* 577, 729-733 (2007).
- Takechi S., Onishi T., Minami S., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Mori K., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Evaluation of piezoelectric lead-zirconate-titanate multilayered detector by Fourier analysis. *Nucl. Instr. and Meth. A* 577, 741-744 (2007).
- Toshito T., Kodama K., Sihver L., Yusa K., Ozaki M., Amako K., Kameoka S., Murakami

- K., Sasaki T., Aoki S., Ban T., Fukuda T., Komatsu M., Kubota H., Naganawa N., Nakamura T., Nakano T., Natsume M., Niwa K., Tkahashi S., Yoshida J., Yoshida H., Kanazawa M., Kanematsu N., Komori M., Sato S., Asai M., Koi T., Fukushima C., Ogawa S., Shibasaki M., Shibuya H.: Measurements of total and partial charge-changing cross sections for 200- to 400-MeV/nucleon  $^{12}\text{C}$  on water and polycarbonate. *Phys. Rev. C* 75, 054606 (2007).
- Yamaguchi T., Suzuki T., Ohnishi T., Sümmerer K., Becker F., Fukuda M., Geissel H., Hosoi M., Janik R., Kimura K., Mandal S., Münzenberg G., Nakajima S., Ohtsubo T., Ozawa A., Prochazka A., Shindo M., Sitár B., Strmeň P., Suda T., Sugawara K., Szarka I., Takisawa A., Takechi M., Tanaka K.: Nuclear radii of neutron-deficient Kr isotopes studied via their interaction cross-sections at relativistic energies. *Nucl. Phys. A* 787, 471-475 (2007).
- Zeitlin C., Fukumura A., Guetersloh S., Heilbronn L., Iwata Y., Miller J., Murakami T.: Fragmentation cross sections of  $^{28}\text{Si}$  at beam energies from 290 to 1200 MeV/nucleon. *Nucl. Phys. A* 784, 341-367 (2007).
- Zeitlin C., Guetersloh S., Heilbronn L., Miller J., Fukumura A., Iwata Y., and Murakami T.: Fragmentation cross sections of 290 and 400 MeV/nucleon  $^{12}\text{C}$  on elemental targets. *Phys. Rev. C* 76, 014911 (2007).
- Zhou D., Zheng Y., Matusta K., Mihara M., Fukuda M., Nishimura D., Komurasaki J., Ishikawa D., Matsumiya R., Nagatomo T., Izumikawa T., Takahashi S., Hirano H., Ohtsubo T., Momota S., Nojiri Y., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Minamisono T., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M., Yuan Daqing., Zuo Yi., Fan Ping., Suzuki T., Zhang Xizhen. Zhu Shengyun.: Magnetic Moment of Proton Halo Nucleus  $^{28}\text{P}$ . *Hyperfine Interactions* 180, 37-42.(2007).
- 久下謙一、遠藤雄輔、安田仲宏、熊谷宏、長谷川朗：銀塩感光材料と金沈着現像法を用いた重粒子線の核破碎反応のグレイン・デンスティの測定による解析、日本写真学会誌、70、44-51 (2007)。
- 古場裕介、今村稔、古場尚雅、嶋津拓郎、岩元大樹、若林源一郎、魚住裕介、松藤成弘：中高エネルギー荷電粒子に対する NaI(Tl)・GSO(Ce) シンチレータの発光特性、放射線、33、61-68 (2007)。
- 小林憲正、小川智也、増田仁美、遠西寿子、金子竹男、高野淑識、高橋淳一、斉藤威、村松康行、吉田聡：高エネルギー粒子線および光子による模擬星間物質からのアミノ酸前駆体の合成。電気学会誌、127、293-298 (2007)。
- 真柄昂胤、喜久村力、亀岡覚、池田俊昭、丸山浩一：不均質積層型ファントム中での治療用炭素線の減弱量評価：水ファントムを用いた現行の方法との比較。医学物理 26、173-185 (2007)。
- Berger T., Hajek M.: On the linearity of the high-temperature emission from  $^7\text{LiF:Mg,Ti}$ (TLD-700). *Radiat. Meas.* 43, 1467-1473 (2008).
- Berger T., Hajek M.: TL-efficiency-Overview and experimental results over the years. *Radiat. Meas.* 43, 146-156 (2008).
- Furukawa T., Inaniwa T., Sato S., Iwata Y., Fujimoto T., Minohara S., Noda K., Kanai T.: Design study of a rotating gantry for the HIMAC new treatment facility. *Nucl. Instr. and Meth. B* 266, 2186-2189 (2008).
- Furukawa T., Saotome N., Inaniwa T., Sato S., Noda K., Kanai T.: Delivery verification using 3D dose reconstruction based on fluorescence measurement in a carbon beam scanning irradiation system. *Med. Phys.* 35, 2235-2242 (2008).
- Hajek M., Berger T., Bergmann R., Vana N., Uchihori Y., Yasuda N. and Kitamura H.: LET dependence of thermoluminescent efficiency and peak height ratio of  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ . *Radiat. Meas.* 43, 1135 – 1139 (2008).
- Himukai T., Takada Y., et al.: Analytical design method of optimum ridge filters for wobbled and collimated proton beam. *Jpn. J. Med. Phys.* 28, 57-69 (2008).
- Hojo S., Honma T., Muramatsu M., Sakamoto Y., Sugiura A.: Development of gas pulsing system for electron cyclotron resonance ion source. *Rev. Sci. Instrum.* 79, 02A306 (2008).
- Ikeda N., Kuboyama T., Tamura S.: Study of Latent Damage in Power MOSFETs Caused by Heavy Ion Irradiation. *IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference* 55, 3388 (2008).
- Inaniwa T., Kohno T., Tomitani T., Sato S.: Monitoring the irradiation field of  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$  SOBP beams using positron emitters produced through projectile fragmentation reactions. *Phys. Med. Biol.* 53, 529-542 (2008).
- Inaniwa T., Furukawa T., Sato S., Tomitani T., Minohara S., Noda Koji., Kanai Tatsuaki., et al.: Development of treatment planning for scanning irradiation at HIMAC. *Nucl. Instr.*

- and Meth. B 266, 2194-2198 (2008).
- Inaniwa T., Kohno T., Tomitani T., Sato S.: Monitoring the irradiation field of  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$  SOBP beams using positron emitters produced through projectile fragmentation reaction. Phys. Med. Biol. 53, 529-542 (2008).
- Kanematsu N., Shunsuke Y., Ishizaki A., Torikoshi M.: Computational modeling of beam-customization devices for heavy-charged-particle radiotherapy. Phys. Med. Biol. 53, 3113-3127 (2008).
- Kanematsu N.: Alternative scattering power for Gaussian beam model of heavy charged particles. Nucl. Instr. and Meth. B 266, 5056-5062 (2008).
- Kase Y., Kanai T., Matsufuji N., Furusawa Y., Elsässer T., Scholz M.: Biophysical calculation of cell survival probabilities using amorphous track structure models for heavy-ion irradiation. Phys. Med. Biol. 53, 37-59 (2008).
- Kobayashi K., Ogawa T., Tonishi H., Kaneko T., Takano Y., Takahashi J., Saito T., Muramatsu Y., Yoshida S. and Utsumi Y.: Synthesis of amino acid precursors from simulated interstellar media by high-energy particles or photons. Electr. Eng. Jpn. 91, 293-298 (2008).
- Kodaira S., Asaeda M., Doke T., Hareyama M., Hasebe N., Ogura K., Yasuda N., Tsuruta T., Kori Y.: Track detector of CR-39-DAP-copolymer with variable threshold to detect trans-iron nuclei in galactic cosmic rays. Radiat. Meas. 43, S52-S55 (2008).
- Matusta K., Mihara M., Zhou D.M., Zheng Y.N., Zhu S.Y., Fukuda M., Nagatomo T., Izumikawa T., Momota S., Takahashi S., Hirano H., Ohtsubo T., Nishimura D., Komurasaki J., Ishikawa D., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Minamisono T., Nojiri Y., Matsumiya R., Sumikama T., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Magnetic Moment of  $^{28}\text{P}$ . Nucl. Phys. A805, 359-361 (2008).
- Murakami T., Furukawa T., Inaniwa T., Iwata Y., Kanai T., Kanazawa M., kanematsu N., Kitagawa A., Takei Y., Komori M., Minohara S., Muramatsu M., Noda K., Takada E., Torikoshi M., Torikai k., Yonai S.: Compact carbon-therapy facility and next-generation irradiation scheme. Radiat. Phys. Chem. 77, 1148-1152 (2008).
- Muramatsu M., Kitagawa A., Iwata Y., Ogawa H., Hojo S., Kubo T., Kato Y., Biri S., Fekete E., Yoshida Y., Drentje A.G.: Application of compact electron cyclotron resonance ion source. Rev. Sci. Instrum. 79, 02A328 (2008).
- Nakagawa K., Ikota N., Anzai K.: Sucrose and L-alanine radical-production cross section regarding heavy-ion irradiation. Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectroscopy 69, 1384-1387 (2008).
- Nakagawa K., Ikota N., and Sato Y.: Heavy-Ion Induced Sucrose and L-a-Alanine Radicals Investigated by Electron Paramagnetic Resonance. Appl. Magn. Reson. 33, 111-116 (2008).
- Nakai Y., Nakano Y., Azuma T., Hatakeyama A., Kondo C., Komaki K., Yamazaki Y., Takada E., Murakami T.: Atoms in flight through a periodic crystal field "Dressed.: X-VUV Double Resonance". Phys. Rev. Lett. 101, 113201 (2008).
- Nakanishi T., Furukawa T., Noda K.: Characteristics of extracted beam from a synchrotron using a fast Q-magnet assisted by RF-knockout. Nucl. Instr. and Meth. B, 266, 2169-2172 (2008).
- Noda K., Furukawa T., Fujimoto T., Inaniwa T., Iwata Y., Kanai T., Kanazawa M., Minohara S., Miyoshi T., Murakami T., Sano Y., Sato S., Takada E., Takei Y., Torikai K., Torikoshi M.: New treatment facility for heavy-ion cancer therapy at HIMAC. Nucl. Instr. and Meth. B, 266, 2182-2185 (2008).
- Ota S., Kodaira S., Yasuda N., R. Benton E., Hareyama M., Kurano M., Sato M., Shu D., Hasebe N.: Tracking method for the measurement of projectile charge changing cross section using CR-39 detector with a high speed imaging microscope. Radiat. Meas. 43, S195-S198 (2008).
- Sakama M., Kanai T., Fukumura A.: Development of a portable graphite calorimeter for radiation dosimetry. Jpn. J. Med. Phys. 28, 1-14 (2008).
- Sykora G. J., Akselrod M.S., Benton E.R., Yasuda N.: Spectroscopic properties of novel fluorescent nuclear track detectors for high and low LET charged particles. Radiat. Meas. 422-426 (2008).
- Takada Y., Himukai T., Takizawa K., Terashita Y., Kamimura S., Matsuda H., Hotta K., Kohno R., Komori M., Kanai T.: The basic study of a bi-material range compensator for improving dose uniformity for proton therapy. Phys. Med. Biol. 53, 5555-5569 (2008).
- Takechi S., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Mori K., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Radiation detector based on piezoelectric lead zirconate titanate material. Nucl. Instr. and Meth. A 586, 309-313 (2008).
- Takechi S., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Mori K., Shibata H., Murakami T., Uchihori

- Y., Okada N.: Characteristics of piezoelectric lead zirconate titanate fourteen-layered detector bombarded with high-energy xenon beam. *Sensors and Actuators A* 147, 365-368 (2008).
- Tawara H., Eda K., Takahashi K., Doke T., Hasebe N., Kodaira S., Ota S., Kurano M., Yasuda N.: Development of an automated multisample scanning system for nuclear track etched detector. *Nucl. Instr. and Meth. A* 593, 475-480 (2008).
- Torikai K., Kanazawa M., Shibuya S., Uchiyama H., Noda K.: Manipulation of a cooled beam for future heavy ion therapy. *Nucl. Instr. and Meth. B* 266, 2190-2193 (2008).
- Yamaguchi T., Suzuki T., Ohnishi T., Becker F., Fukuda M., Geissel H., Hosoi M., Janik R., Kimura K., Kuboki T., Mandel S., Matsuo M., Münzenberg G., Nakajima S., Ohtsubo T., Ozawa A., Prochazka A., Shindo M., Sitár B., Strmeň P., Suda T., Sümmerer K., Sugawara K., Szarka I., Takechi M., Takisawa A., Tanaka K., and Yamagami M.: Nuclear matter radii of neutron-deficient Kr isotopes. *Phys. Rev. C* 77, 034315-1-6 (2008).
- Yamashita S., Katsumura Y., Lin M., Muroya Y., Miyazaki T., Murakami T., Meesungnoen J., Jay-Gerin J.-P.: Water radiolysis with heavy ions of energies up to 28 GeV. - 3. Measurement of  $G(MV^+)$  in deaerated Methyl Viologen solutions containing various concentrations of sodium formate and Monte Carlo Simulation. *Radiat. Res.* 170, 521-533 (2008).
- Yamashita S., Katsumura Y., Lin M., Muroya Y., Maeyama T., Murakami T.: Water radiolysis with heavy ions of energies up to 28 GeV - 2: Extension of primary yield measurements to very high LET values. *Radiat. Phys. Chem.* 77, 1224-1229 (2008).
- Yamashita S., Katsumura Y., Lin M., Muroya Y., Miyazaki T., Murakami T.: Water radiolysis with heavy ions of energies up to 28 GeV. Yield measurements of primary yields as track segment yields. *Radiat. Phys. Chem.* 77, 439-446 (2008).
- Yamauchi T., Mori Y., Oda K., Yasuda N., Kitamura H., Barillon R.: Structural modification along heavy ion tracks in Poly(allyl diglycol carbonate) films. *Jpn. J. Appl. Phys.* 47, 3606-3609 (2008).
- Yamauchi T., Watanabe S., Seto A., Oda K., Yasuda N. and Barillon R.: Loss of carbonate ester bonds along Fe ion tracks in thin CR-39 films. *Radiat. Meas.* 43 [Sup.1], S106-S110 (2008).
- Yamauchi T., Watanabe S., Oda K., Yasuda N. and Barillon R.: An evaluation of radial track etch rate in LR-115 detectors exposed to Fe ions by means of FT-IR spectrometry. *Radiat. Meas.* 43 [Sup.1], S116-S119 (2008).
- Yasuda N., Abe S., Nishimura K., Sato H., Muraishi H., Yokoyama K., Tomida T., Inada T., Ohno Y., Kanai T., Kodera Y., Iwasaki A.: The application of nonlinear wavelet shrinkage denoising to heavy ion CT using rotation range shifter. *Bulletin of Health Sciences Hirosaki*, 7, 69-79 (2008).
- Yonai S., Matsufuji N., Kanai T., Matsui Y., Matsushita K., Yamashita H., Numao Masumi., Sakae Takeji., Terunuma Toshiyuki., Nishio Teiji., Kohno R., Akagi T.: Measurement of neutron ambient dose equivalent in passive carbon-ion and proton radiotherapies. *Med. Phys.* 35, 4782-4792 (2008).
- Yonai S., Kanematsu N., Komori M., Kanai T., Takei Y., Takahashi O., Isobe Y., Tashiro M.: Evaluation of beam wobbling methods for heavy-ion radiotherapy. *Med. Phys.* 35, 927-938 (2008).
- Zeitlin C., Guetersloh S., Heilbronn L., Miller J., Fukumura A., Iwata Y., Murakami T., Sihver L., Mancusi D.: Fragmentation cross sections of medium-energy  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ , and  $^{48}\text{Ti}$  beams on elemental targets. *Phys. Rev. C* 77, 034605 (2008).
- Zeitlin C., Guetersloh S., Heilbronn L., Miller J., Elkhayari N., Empl A., LeBourgeois M., W. Mayes B., Pinsky L., Christl M., Kuznetsov E.: Shielding experiments with high energy heavy ions for spaceflight applications. *New J. Phys.* 10, 075007 (2008).
- 小平聡 : CR-39 固体飛跡検出器による重粒子の同位体弁別、応用物理、77、36-40 (2008).
- Ando K., Kase Y.: Biological characteristics of carbon-ion therapy. *Int. J. Radiat. Biol.* 85, 715-728 (2009).
- Baldacchino G., Maeyama T., Yamashita S., Taguchi M., Kimura A., Katsumura Y., Murakami T.: Determination of the time-dependent  $\text{OH}^\cdot$  yield by using a fluorescent probe. Application to heavy ion irradiation. *Chem. Phys. Lett.* 468, 275-279 (2009).
- Blanc M., Alibert Y., Andre N., Atreya S., Beebe R., Benz W., Bolton S.J., Coradini A., Coustenis A., Dehant V., Dougherty M., Drossart P., Fujimoto M., Grasset O., Gurvits L., Hartogh P., Hussmann H., Kasaba Y., Kivelson M., Khurana K., Krupp N., Louarn P., Lunine J., McGrath M., Mimoun D., Mousis O., Oberst J., Okada T., Pappalardo R., Prieto-Ballesteros O., Prieur D., Regnier P.,



- Roos-Serote M., Sasaki S., Schubert G., Sotin C., Spilker T., Takahashi Y., Takashima T., Tosi F., Turrini D., van Hoolst T., Zelenyi L. : LAPLACE: A mission to Europa and the Jupiter System for ESA's Cosmic Vision Programme. *Experimental Astronomy* 23, 849-892 (2009).
- Inaniwa T., Furukawa T., Nagano A., Satou S., Saotome K., Noda N., Kanai T.: Field-size effect of physical doses in carbon-ion scanning using range shifter plates. *Med. Phys.* 36, 2889-2897 (2009).
- Iva J., Yasuda N., Kawashima H., Kurano M., Uchihori Y., Kitamura H., Akatov Y., Shurshakov V., Kobayashi I., Ohguchi H., Koguchi Y., Spurny F., et al.: Variation of absorbed doses onboard of ISS Russian Service Module as measured with passive detectors. *Radiat. Meas.* 44, 901-904 (2009).
- Kanematsu N.: Semi-empirical formulation of multiple scattering for Gaussian beam model of heavy charged particles stopping in tissue-like matter. *Phys. Med. Biol.* 54, N67-N73 (2009).
- Kasahara S., Asamura K., Ogasawara K., Kazama Y., Takashima T., Hirahara M., Saito Y.: A noise attenuation method for medium-energy electron measurements in the radiation belt. *Adv. Space. Res.* 43, 792-801 (2009).
- Kobayashi K., Taniuchi T., Kaneko T., Yoshida S., Takano Y., Takahashi J.: Interstellar origins of complex amino acid precursors with large molecular weights. *Orig. Life Evol. Biosph.* 39, 244 (2009).
- Kudo H., Sudo S., Oka T., Hama Y., Oshima A., Washio M., Murakami T.: Ion beam irradiation effects on polyimide - UV-Vis spectroscopic study. *Radiat. Phys. Chem.* 78, 1067-1070 (2009).
- Kuge K., Hayashi K., Endo Y., Yasuda N., Fukushima C., Kimura M., Shibuya H., Hasegawa A., Kumagai H., Kodaira S., Ota S.: Identification of nuclear fragments formed during fragmentation reaction with a heavy-ion beam by using a hybrid track detector system combining silver halide photographic film and CR-39 plastic track detectors. *J. Soc. Photogr. Sci. Tech. Jpn.* 72, 209-213 (2009).
- Kuge K., Tsutsumi T., Morimoto K., Kimura S.M.H., Suzuki T., Mitsuhashi T., Hasegawa A.: Sensitization of ultra-fine-grain photographic emulsions. *J. Imaging Sci. Tech.* 53, 010507(6) (2009).
- Miller J., Taylor L., Zeitlin C., Heilbronn L., Guetersloh S., DiGiuseppe M., Iwata Y., Murakami T.: Lunar Soil As Shielding Against Space Radiation. *Radiat. Meas.* 44, 163-167 (2009).
- Mizushima K., Shirai T., Furukawa T., Satou S., Iwata Y., Noda K., Uchiyama H.: Reduction of uncontrollable spilled beam in RF-knockout slow extraction. *Nucl. Instr. and Meth. A* 606, 325-329 (2009).
- Mori Y., Ikeda T., Yamauchi T., Sakamoto A., Chikada H., Honda Y., Oda K.: Radiation chemical yield for loss of carbonate ester bonds in PADC films exposed to gamma ray. *Radiat. Meas.* 44, 211-213 (2009).
- Muraishi H., Nishimura K., Abe S., Satoh H., Hara S., Hara H., Takahashi Y., Mogaki T., Kawai R., Yokoyama K., Yasuda N., Tomida T., Ohno Y., Kanai T.: Evaluation of spatial resolution for Heavy Ion CT system based on the measurement of residual range distribution with HIMAC. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 56, 2714-2721 (2009).
- Nakajima H., Matsuura D., Anabuki N., Miyata E., Tsunemi H., Doty J.P., Ikeda H., Takashima T., Katayama H.: Performance of an analog ASIC developed for X-ray CCD camera readout system onboard astronomical satellite. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 56, 747-751 (2009).
- Nakano Y., Kondo C., Hatakeyama A., Nakai Y., Azuma T., Komaki K., Yamazaki Y., Takada E., Murakami T.: Polarization control in three-dimensional Resonant Coherent Excitation. *Phys. Rev. Lett.* 102, 085502 (2009).
- Nakazato T., Matsuo T., Kohno T., Ohno Y., Watanabe S., Murakami T.: Isomer effect on ionization processes in collisions of 6-MeV/amu bare ions with C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> molecules. *J. of Phys. Conf. Series* 163, 012063 (2009).
- Ohno Y., Matsuo T., Kohno T., Nakazato T., Watanabe S., Murakami T.: Gross and partial ionization cross sections in 6-MeV/amu bare-ion collisions with methane. *J. of Phys. Conf. Series* 163, 012057 (2009).
- Reitz G., Berger T., Bilski P., Facius R., Hajek M., Petrov V., Puchalska M., Zhou, D., Bossler J., Akatov Y., Shurshakov V., Olko P., Ptaszkiwicz M., Bergmann R., Fugger M., Vana N., Beaujean R., Burmeister S., Bartlett D., Hager L., Palfalvi J., Szabo J., O'Sullivan D., Kitamura H., Uchihori Y., Yasuda N., Nagamatsu A., Tawara H., Benton E., Gaza R., McKeever S., Sawakuchi G., Yukihiro E., Cucinotta F., Semones E., Zapp N., Miller J., Dettmann J., Astronaut's Organ Doses Inferred from Measurements in a Human Phantom Outside the International Space

- Station. Radiat. Res. 171, 225-235 (2009).
- Sakama M., Kanai T., Fukumura A., Abe K.: Evaluation of w values for carbon beams in air, using a graphite calorimeter, Phys. Med. Biol. 54, 1111-1130 (2009).
- Takechi S., Morinaga S., Kurozumi A., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Detection of high-energy heavy ions using piezoelectric lead zirconate titanate. J. Appl. Phys. 105, 084903 (2009).
- Takechi S., Morinaga S., Kurozumi A., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Behaviour of piezoelectric lead zirconate titanate irradiating with high-energy xenon ions. Nucl. Instr. and Meth. A609, 272-275 (2009).
- Takechi S., Morinaga S., Kurozumi A., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Dependence of thickness of lead zirconate titanate material used as radiation detector. Jpn. J. Appl. Phys. 40, 108003 (2009).
- Tanner R.J., Hager L.G., Eakins J.S.: Neutron dosimetry characteristics of PADC manufactured by Instrument Plastics Ltd. Radiat. Meas. 44, 992-995 (2009).
- Toshito T., Kubota H., Ota S., Kanematsu N., Kodaira S., Komori M., Yasuda N., Kuge K.: Recent progress in emulsion technology to study fragmentation reactions of high energetic ion beams. Nucl. Instr. and Meth. B 267, 997-1000 (2009).
- Yamauchi T., Mori Y., Chikada H., Sakamoto A., Kii J., Kanasaki M., Oda K., Fujii M.: Sensitization of PADC trackdetector in carbon dioxide gas. Radiat. Meas. 44, 1105-1108 (2009).
- Yonai S., Matsufuji N., Kanai T.: Monte Carlo study on secondary neutrons in passive carbon-ion radiotherapy: Identification of the main source and reduction of the secondary neutron dose. Med. Phys. 36, 4830-4839 (2009).
- Zheng Y.N., Zhou D.M., Matsuta K., Mihara M., Fukuda M., Nishimura D., Komurasaki J., Ishikawa D., Matsumiya R., Nagatomo T., Izumikawa T., Takahashi S., Hirano H., Ohtsubo T., Momota S., Nojiri Y., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Minamisono T., Alonso J., Krebs G.F., Symons T.J.M., Yuan D.Q., Yi Z., Ping F., Suzuki T., Zhang X.Z., Zhu S.Y.: Nuclear structure of proton-rich unstable nucleus  $^{28}\text{P}$  studied by g-factor measurement. Chinese Physics C 33, Sup. 215—217 (2009).
- Zhong W.H., Sui G., Jana S., Miller J.: Cosmic radiation shielding tests for UHMWPE fiber/nano-epoxy composites. Compos. Sci. Technol. 69, 2093-2097 (2009).
- 小川達彦、阿部琢也、飯本武志、小佐古敏荘：中性子遮蔽実験における散乱線の再入射による影響、Radioisotopes 58(5) (2009).
- Bilski P., Puchalska M.: Relative efficiency of TL detectors to energetic ion beams. Radiat. Meas. 45, 1495-1498 (2010).
- Brabcová K., Jadrníčková I., Molokanov A.G., Spurný F.: Dosimetry in heavy ion beams using various detectors. Radiat. Meas. 45, 1384-1386 (2010).
- Brabcová K., Jadrníčková I., Spurný F.: Comparison of characteristics of different polyalyl diglycol carbonates used as linear energy transfer spectrometers. Bezpečnost jaderné energie 56, 173-176 (2010).
- Endo S., Takada M., Tanaka H., Onizuka Y., Tanaka K., Miyahara N., Ishikawa M., Hoshi M., Kimura S., Shizuma K.: Measurement of neutron and photon microdosimetric spectra produced from 290 MeV/A Spread Out Bragg Peak carbon beam. Radiat. Environ. Biophys. 49, 469-475 (2010).
- Fukuda M., Nishimura D., Takechi M., Mihara M., Matsuta K., Matsumiya R., Kuboki T., Namihira K., Hachiuma I., Yamaguchi T., Suzuki T., Okuma Y., Nagashima M., Ohtsubo T., Shimbara Y., Izumikawa T., Tanaka K., Suda T., Momota S., Minamisono T., Xu W., Fan G.W., Fukuda S., Sato S., Kanazawa M., Kitagawa A.: Directional correlation of nuclear-collision probability for aligned beams of deformed nucleus. Nucl. Phys. A834, 461c-463c (2010).
- Furukawa T., Inaniwa T., Sato S., Shirai T., Takei Y., Takeshita E., Mizushima K., Iwata Y., Himukai T., Mori S., Fukuda S., Minohara S., Takada E., Murakami T., Noda K.: Performance of the NIRS fast scanning system for heavy-ion radiotherapy. Med. Phys. 37, 5672-5682 (2010).
- Furukawa T., Inaniwa T., Sato S., Shirai T., Mori S., Takeshita E., Mizushima K., Himukai T., Noda K.: Moving target irradiation with fast rescanning and gating in particle therapy. Med. Phys. 37, 4874-4879 (2010).
- Golovchenko A.N., Sihver L., Ota S., Skvarc J., Yasuda N., Kodaira S., Timoshenko G.N., Giacomelli M.: Fragmentation of 370 MeV/n  $^{20}\text{Ne}$  and 470 MeV/n  $^{24}\text{Mg}$  in light targets. Radiat. Meas. 45, 856-860 (2010).
- Gowa T., Takahashi T., Oka T., Murakami T., Oshima A., Tagawa S., Washio M.: Ion beam irradiation effects on resist materials. J. Photopolym. Sci. Technol. 23, 399-404

- (2010).
- Guang-Wei F., Wang X., Fukuda M., Qiang-Yan P., Xiao-Lu C., Gong-Tao F., Yong-Jiang L., Wen L., Ben-Ji X., Zhe Y., Li-Feng Y.: Radius studies of  $^8\text{Li}$  and  $^8\text{B}$  using the optical-limit Glauber model in conjunction with relativistic mean-field theory. *Chinese Phys. C* 34, 1622–1627 (2010).
- Inaniwa T., Furukawa T., Kase Y., Matsufuji N., Toshito T., Matsumoto Y., Furusawa Y., Noda K.: Treatment planning for a scanned carbon beam with a modified microdosimetric kinetic model. *Phys. Med. Biol.* 55, 6721–6737 (2010).
- Iwata Y., Kadowaki T., Uchiyama H., Fujimoto T., Takada E., Shirai T., Furukawa T., Mizushima K., Takeshita E., Katagiri K., Sato S., Sano Y., Noda K.: Multiple-energy operation with extended flattops at HIMAC. *Nucl. Instr. and Meth. A* 624, 33–38 (2010).
- Jadrníčková I., Brabcová K., Spurný F., Ploc O., Mrázová Z., Yasuda N., Uchihori Y., Kitamura H., Kodaira S.: Measurement in the beam of He 150 MeV/n MONO at HIMAC by means of various detectors. *Bezpečnost jaderné energie* 18, 223–225 (2010).
- Kanematsu N.: Dose calculation algorithm of fast fine-heterogeneity correction for heavy charged particle radiotherapy. *Physica Medica* doi:10.1016/j.ejmp.2010.05.001 (2010).
- Karakirova Y., Nakagawa K., Yordanov N.D.: EPR and UV spectroscopic investigations of sucrose irradiated with heavy-ion particles. *Radiat. Meas.* 45, 10–14 (2010).
- Kasahara S., Takashima T., Mitani T., Asamura K.: Development of an APD with large area and thick depletion layer for energetic electron measurement in space. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 57, 1549–1555 (2010).
- Kobayashi Y., Nagatomo T., Yamada Y., Mihara M., Sato W., Miyazaki J., Sato S., Kitagawa A., Kubo M.K.: Anticoincidence measurement of  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectra obtained after  $^{57}\text{Mn}$  implantation: application to Fe in  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . *Hyperfine Interactions* 198, 173–178 (2010).
- Kuboyama S., Maru A., Ikeda N., Hirao T., Tamura T.: Characterization of microdose damage caused by single heavy ion observed in Trench type Power MOSFETs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 57, 3257–3261 (2010).
- Maru A., Shindou H., Ebihara T., Makihara A., Hirao T., Kuboyama S.: DICE-based Flip-Flop with SET Pulse Discriminator on a 90 nm Bulk CMOS process. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 57, 3602–3608 (2010).
- Matsuta K., Mihara M., Fukuda M., Nishimura D., Matsumiya R., Nagatomo T., Ohtsubo T., Izumikawa T., Momota S., Zhou D.M., Yuan D.Q., Zheng Y.N., Zuo Y., Fan P., Zhu S.Y., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Minamisono K., Sumikama T., Ogura M., Tanigaki M., Ozawa A., Yamaguchi T., Suzuki T., Tanaka K., Takechi M., Minamisono T., Nojiri Y., Levy P., Symons T.J.M., Alonso J.R., Krebs G.F.: Nuclear structure and fundamental symmetry studied through nuclear moments. *Nucl. Phys. A* 834, 424c–427c (2010).
- Matsuta K., Mihara M., Zhou D.M., Zheng Y.N., Nishimura D., Nagatomo T., Yuan D.Q., Momota S., Izumikawa T., Zuo Y., Fan P., Zhu S.Y., Ohtsubo T., Fukuda M., Namiki Y., Nagashima M., Minamisono T., Kameda D., Sumikama T., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Matsumiya R., Komurasaki J., Ishikawa D., Hirano H., Takahashi S., Kubo T., Yamada R., Shimbara Y., Nojiri Y., Suzuki T., Zhang X.Z., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Polarization creation in proton-rich  $^{28}\text{P}$  via charge exchange reactions and measurement of its electric quadrupole moment. *Hyperfine Interactions* 198, 147–151 (2010).
- Mihara M., Matsuta K., Komurasaki J., Hirano H., Nishimura D., Momota S., Ohtsubo T., Izumikawa T., Shimbara Y., Kubo T., Kameda D., Zhou D.M., Zheng Y.N., Yuan D.Q., Zhu S.Y., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Nagatomo T., Matsumiya R., Ishikawa D., Fukuda M., Minamisono T., Nojiri Y., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Electromagnetic moment of  $^{22}\text{F}$ . *Nucl. Phys. A* 834, 75c–77c (2010).
- Mihara M., Matsuta K., Nishimura D., Hirano H., Komurasaki J., Takahashi S., Nagatomo T., Matsumiya R., Ogura M., Akai H., Momota S., Ohtsubo T., Izumikawa T., Zhou D.M., Zheng Y.N., Yuan D.Q., Fan P., Zuo Y., Zhu S.Y., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Fukuda M., Ishikawa D., Minamisono T., Watanabe R., Kubo T., Nojiri Y., Sumikama T., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Nuclear spin-lattice relaxation of light impurities in platinum studied by using polarized unstable nuclear beams. *Nucl. Phys. A* 834, 777c–779c (2010).
- Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Okudaira O., Takechi S., Kurozumi A., Morinaga S., Uno T., Shibata H., Kobayashi M., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Study of the characteristic lead zirconate titanate radiation detector using a pulsed xenon source. *J. Appl. Phys.* 107, 104902 (2010).
- Mrázová Z., Jadrníčková I., Brabcová K., Spurný

- F.: Fragmentation of Ne ions with energy 400 MeV/u behind targets from different materials measured with PNTD. *Radiat. Meas.* 45, 1438-1440 (2010).
- Mrázová Z., Jadrníčková I., Brabcová K., Spurný F.: Study of fragmentation of Ne ions with nominal energy 400 MeV/n behind various shielding materials with plastic nuclear track detectors. *Bezpečnost jaderné energie* 18, 233-234 (2010).
- Nakagawa K., Anzai K.: EPR Investigation of radical-production cross sections for sucrose and L-Alanine irradiated with X-ray and heavy ions. *Appl. Magn. Reson.* 39, 285-293 (2010).
- Nakagawa S., Taguchi M., Hirota K., Murakami T.: Degradation of hydroxymaleimide in 2-propanol by irradiation of energetic heavy ions (II). *Radiat. Phys. Chem.* 79, 890-893 (2010).
- Nakagawa S., Ohta N., Murakami T.: Efficiency of radical yield in alkylthymine and alkyluracil by high-LET irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* 79, 637-642 (2010).
- Nakajima Y., Taen T., Tsuchiya Y., Tamegai T., Kitamura H., Murakami T.: Suppression of the critical temperature of superconducting  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  by point defects from proton irradiation. *Phys. Rev. B* 82, 220504(R) (2010).
- Nishimura D., Fukuda M., Takechi M., Mihara M., Ishikawa D., Komurasaki J., Matsuta K., Matsumiya R., Kuboki T., Yoshitake M., Suzuki T., Yamaguchi T., Nakajima S., Saito K., Miura M., Hachiuma I., Namihira K., Ohtsubo T., Shimbara Y., Watanabe R., Ohkuma Y., Izumikawa T., Tanaka K., Suda T., Ozawa A., Yasuda Y., Moriguchi T., Momota S., Fukuda S., Sato S., Kanazawa M., Kitagawa A.: Distinction between proton-neutron density distribution of Halo Nuclei at the nuclear surface via reaction cross sections. *Nucl. Phys. A* 834, 470c-472c (2010).
- Ogawa T., Morev M., Abe T., Iimoto T., Kosako T., Kimura K., Kinno M.: Experimental evaluation of neutron performance in boron-doped low activation concrete. *Radiation Protection Dosimetry* 140, 89-95 (2010).
- Pachnerová Brabcová K., Jadrníčková I., Spurný, F.: Spectrometry of linear energy transfer with track etched detectors in carbon ion beams, MONO and SOBP. *Radiation Protection Dosimetry* doi:10.1093/rpd/ncq471 (2010).
- Pálfalvi J.K., Szabó J., Eördögh I.: Detection of high energy neutrons, protons and He particles by solid state nuclear track detectors. *Radiat. Meas.* 45, 1568-1573 (2010).
- Takechi M., Ohtsubo T., Kuboki T., Fukuda M., Nishimura D., Suzuki T., Yamaguchi T., Ozawa A., Moriguchi T., Sumikama T., Geissel H., Aoi N., Fukuda N., Hachiuma I., Inabe N., Ishibashi Y., Itoh Y., Kameda D., Kusaka K., Lantz M., Mihara M., Miyashita Y., Momota S., Namihira K., Ohishi H., Ohkuma Y., Ohnishi T., Ohtake M., Ogawa K., Shimbara Y., Suda T., Suzuki S., Takeda H., Tanaka K., Watanabe R., Winkler M., Yanagisawa Y., Yasuda Y., Yoshinaga K., Yoshida A., Yoshida K., Kubo T.: Measurements of nuclear radii for neutron-rich Ne isotopes  $^{28-32}\text{Ne}$ . *Nucl. Phys. A* 834, 412c-415c (2010).
- Takechi S., Morinaga S., Kurozumi A., Uno T., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Response of lead zirconate titanate without poling to high-energy heavy-ion beam. *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, 068002 (2010).
- Takechi S., Morinaga S., Kurozumi A., Uno T., Miyachi T., Fujii M., Hasebe N., Shibata H., Murakami T., Uchihori Y., Okada N.: Irradiation of piezoelectric lead zirconate titanate with 400 MeV/n xenon beam. *Radiat. Phys. Chem.* 79, 603 (2010).
- Tanaka K., Fukuda M., Mihara M., Takechi M., Nishimura D., Chinda T., Sumikama T., Kudo S., Matsuta K., Minamisono T., Suzuki T., Ohtsubo T., Izumikawa T., Momota S., Yamaguchi T., Onishi T., Ozawa A., Tanihata I., Zheng T.: Density distribution of  $^{17}\text{Ne}$  and possible shell-structure change in the proton-rich sd-shell nuclei. *Phys. Rev. C* 82, 044309-1 (2010).
- Tanaka K., Yamaguchi T., Suzuki T., Ohtsubo T., Fukuda M., Nishimura D., Takechi M., Ogata K., Ozawa A., Izumikawa T., Aiba T., Aoi N., Baba H., Hashizume Y., Inafuku K., Iwasa N., Kobayashi K., Komuro M., Kondo Y., Kubo T., Kurokawa M., Matsuyama T., Michimasa S., Motobayashi T., Nakabayashi T., Nakajima S., Nakamura T., Sakurai H., Shinoda R., Shinohara M., Suzuki H., Takeshita E., Takeuchi S., Togano Y., Yamada K., Yasuno T., Yoshitake M.: Observation of a large reaction cross section in the Drip-Line nucleus  $^{22}\text{C}$ . *Phys. Rev. Lett.* 104, 062701 (2010).
- Tanaka K., Fukuda M., Mihara M., Takechi M., Nishimura D., Chinda T., Sumikama T., Kudo S., Matsuta K., Minamisono T., Suzuki T., Ohtsubo T., Izumikawa T., Momota S., Yamaguchi T., Onishi T., Ozawa A., Tanihata I., Zheng T.: Density distribution of  $^{17}\text{Ne}$  and

- possible shell-structure change in the proton-rich sd-shell nuclei. *Phys. Rev.* 82, 044309 (2010).
- Tsuda S., Sato T., Takahashi F., Satoh D., Endo A., Sasaki S., Namito Y., Iwase H., Ban S., Takada M.: Analysis of the effect of structural materials in a wall-less tissue equivalent proportional counter irradiated by 290 MeV/u carbon beam. *Radiation Protection Dosimetry* doi:10.1093/rpd/ncq536 (2010).
- Tsuda S., Sato T., Takahashi F., Satoh D., Endo A., Sasaki S., Namito Y., Iwase H., Ban S., Takada M.: Measurement of microdosimetric spectra with a wall-less tissue-equivalent proportional counter for a 290 MeV/u  $^{12}\text{C}$  beam. *Phys. Med. Biol.* 55, 5089-5101 (2010).
- Yonai S., Kase Y., Matsufuji N., Kanai T., Nishio T., Namba M., Yamashita W.: Measurement of absorbed dose, quality factor, and dose equivalent in water phantom outside of the irradiation field in passive carbon-ion and proton radiotherapies. *Medical Physics* 37, 4046-4055 (2010).
- Zeitlin C., Guetersloh S., Heilbronn L., Miller J., Fukumura A., Iwata Y., Murakami T., Sihver L.: Nuclear fragmentation database for GCR transport code development. *Adv. Space Res.* 46, 728-734 (2010).
- Akselrod M.S., Sykora G.J.: Fluorescent nuclear track detector technology - A new way to do passive solid state dosimetry. *Radiat. Meas.* 46, 1671-1679 (2011).
- Fujimoto T., Kanazawa M., Shirai T., Iwata Y., Uchiyama H., Noda K.: Acceleration of heavy ions with a new RF system at HIMAC synchrotron. *Nucl. Instr. and Meth. B* 269, 2886-2890 (2011).
- Gowa T., Shiotsu T., Urakawa T., Oka T., Murakami T., Oshima A., Hama Y., Washio M.: Study on depth profile of heavy ion irradiation effects in Poly(tetrafluoroethylene-co-ethylene). *Radiat. Phys. Chem.* 80, 264-267 (2011).
- Heilbronn L., Zeitlin C.J., Iwata Y., Murakami T., Nakamura T., Yonai S., Ronningen R.M., Iwase H.: Neutron-production yields from 400MeV/nucleon iron stopping in carbon, aluminum, copper, and lead targets. *Nucl. Sci. Eng.* 169, 279-289 (2011).
- Inaniwa T., Kanematsu N., Furukawa T., Noda K.: Optimization algorithm for overlapping-field plans of scanned ion beam therapy with reduced sensitivity to range and setup uncertainties. *Phys. Med. Biol.* 56, 1653-1669 (2011).
- Isobe T., Kumada H., Takada K., Hashimoto T., Hashii H., Shida K., Tadano K., Fujibuchi T., Hanmura M., Sakurai H., Sakae T.: Effects of secondary neutron beam generated in radiotherapy on electronic medical devices. *Prog. Nucl. Sci. Technol.* 2, 524-529 (2011).
- Kadowaki T., Iwata Y., Noda K., Takada E., Shirai T., Furukawa T., Uchiyama H., Fujimoto T.: Development of synchrotron control for Heavy-Ion Medical Accelerators. *Nucl. Instr. and Meth. B* 269, 2901-2904 (2011).
- Kanematsu N.: Modeling of beam customization devices in the pencil beam splitting algorithm for heavy charged particle radiotherapy. *Phys. Med. Biol.* 56, 1361-1371 (2011).
- Kase Y., Kanai T., Sakama M., Tamesjoge Y., Himukai T., Nose H., Matsufuji N.: Microdosimetric approach to NIRS-defined biological dose measurement for carbon-ion treatment beam. *J. Radiat. Res.* 52, 59-68 (2011).
- Katagiri K., Furukawa T., Mizushima K., Uchiyama H., Takeshita E., Himukai T., Satou S., Iwata Y., Shirai T., Noda K.: Beam stability improvement of the HIMAC synchrotron using feed-forward system for magnet power supplies. *Nucl. Instr. and Meth. B* 269, 2905-2910 (2011).
- Katagiri K., Fukumura T., Noda K.: Numerical studies of transient gain reduction process in a multi-wire proportional chamber. *Rev. Sci. Instrum.* 82, 053303 (2011).
- Kawade K., Fukatsu K., Itow Y., Masuda K., Murakami T., Sako T., Suzuki K., Suzuki T., Taki K.: Study of radiation hardness of  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  scintillator for heavy ion beam. *JINST* 6, T09004 (2011).
- Kinouchi S., Yamaya T., Miyoshi Y., Yoshida E., Nishikido F., Tashima H., Suga M.: New Component-based normalization method to correct PET system models. *Medical Imaging Technology* 29, 239-249 (2011).
- Kodaira S., Yasuda N., Kawashima H., Kurano M., Naka S., Ota S., Ideguchi Y., Hasebe N., Ogura K.: Detection threshold control of CR-39 plastic nuclear track detectors for the selective measurement of high LET secondary charged particles. *Radiat. Meas.* 46, 1782-1785 (2011).
- Koehler J., Ehresmann B., Martin C., Bohm E., Kharytonov A., Kortmann O., Zeitlin C., Hassler D.M., Wimmer-Schweingurber R.F.: Inversion of neutron/gamma spectra from scintillator measurements, *Nucl. Instr. and Meth. B* 269, 2641-2648 (2011).
- Kuboki T., Ohtsubo T., Takechi M., Hachiuma I., Namihira K., Suzuki T., Yamaguchi T., Ohkuma Y., Shimbara Y., Suzuki S.,

- Watanabe R., Fukuda M., Mihara M., Nishimura D., Ishibashi Y., Ito Y., Moriguchi T., Nagae D., Ooishi H., Ogawa K., Ozawa A., Yasuda Y., Suzuki H., Sumikama T., Yoshinaga K., Geissel H., Winkler M., Izumikawa T., Momota S., Aoi N., Fukuda N., Inabe N., Kameda D., Kusaka K., Kubo T., Lantz M., Ohnishi T., Ohtake M., Suda T., Takeda H., Tanaka K., Yanagisawa Y., Yoshida A., Yoshida K.: Measurement of interaction cross-sections for neutron-rich Na isotopes. *Acta Physica Polonica B* 42, 765-768 (2011).
- Kuboyama S., Shindou H., Ikeda N., Tamura T., Hirao T.: Single-event damages observed in AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 58, 2734-2738 (2011).
- Kumada H., Sakae T., Saito K., Isobe T., Hashimoto T., Sakurai H.: Application of the multi-model Monte-Carlo treatment planning system combined with PHITS to proton radiotherapy. *Prog. J. Nucl. Sci. Technol.* 2, 213-218 (2011).
- Maeyama T., Yamashita S., Baldacchino G., Taguchi M., Kimura A., Katsumura Y., Murakami T.: Fluorescent probe for steady-state radiolysis with heavy ions 1: LET effects and time dependence of OH yields. *Radiat. Phys. Chem.* 80, 535-539 (2011).
- Maeyama T., Yamashita S., Baldacchino G., Taguchi M., Kimura A., Katsumura Y., Murakami T.: Production of a fluorescent probe in ion-beam radiolysis of aqueous Coumarin-3-Carboxylic Acid Solution-2: effects of nuclear fragmentation and its simulation with PHITS. *Radiat. Phys. Chem.* 80, 1352-1357 (2011).
- Mizushima K., Shirai T., Furukawa T., Noda K.: Making beam spill less sensitive to power supply ripple in resonant slow extraction. *Nucl. Instr. and Meth. A* 638, 19-23 (2011).
- Mizushima K., Satou S., Shirai T., Furukawa T., Katagiri K., Takeshita E., Iwata Y., Himukai T., Noda K.: Development of beam current control system in RF-knockout slow extraction. *Nucl. Instr. and Meth. B* 269, 2915-2918 (2011).
- Mori Y., Yamauchi T., Kanasaki M., Maeda Y., Oda K., Kodaira S., Konishi T., Yasuda N., Barillon R.: Radiation chemical yields for loss of ether and carbonate ester bonds in PADC films exposed to proton and heavy ion beams. *Radiat. Meas.* 46, 10, 1147-1153 (2011).
- Nagatomo T., Kobayashi Y., Kubo M.K., Yamada Y., Mihara M., Sato W., Miyazaki J., Sato S., Kitagawa A.: Remarkable improvement of the signal-to-noise ratio of  $^{57}\text{Mn}/^{57}\text{Fe}$  in-beam Mössbauer spectroscopy. *Nucl. Instr. and Meth. B* 269, 455-459 (2011).
- Nakajima H., Matsuura D., Idehara T., Anabuki N., Tsunemi H., Doty J.P., Ikeda H., Katayama H., Kitamura H., Uchihori Y.: Development of the analog ASIC for multi-channel readout X-ray CCD camera. *Nucl. Instr. and Meth. A* 632, 128-132 (2011).
- Nakajima Y., Kohno T., Inaniwa T., Sato S., Yoshida E., Yamaya T., Sihver L., Tsuruta Y.: Approach to 3D dose verification by utilizing autoactivation. *Nucl. Instr. and Meth. A* 648, S119-121 (2011).
- Ogawa T., Morev M.N., Hirota M., Abe T., Koike Y., Iwai S., Iimoto T., Kosako T.: Benchmarking of activation reaction distribution in an intermediate energy neutron field using 3-D Monte Carlo Codes. *Radiation Protection Dosimetry* 146, 356-359 (2011).
- Ogawa T., Morev M.N., Iimoto T., Kosako T.: Measurements of induced activity in concrete by secondary particles at forward direction produced by intermediate energy heavy ions on an Fe target. *Nucl. Instr. and Meth. B* 269, 1929-1939 (2011).
- Ogawa T., N. Morev M., Hirota M., Abe T., Koike Y., Iwai S., Iimoto T., Kosako T.: Benchmarking of activation reaction distribution in an intermediate energy neutron field using 3-D Monte Carlo Codes. *Radiation Protection Dosimetry* 146, 356-359 (2011).
- Oka T., Oshima A., Motohashi R., Seto N., Watanabe Y., Kobayashi R., Saito K., Kudo H., Murakami T., Washio M., Hama Y.: Changes to the chemical structure of isotactic-polypropylene induced by ion-beam irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* 80, 278-280 (2011).
- Pinsky L., Stoffle N., Jakubek J., Pospisil S., Leroy C., Uchihori Y., Yasuda N., Kitamura H.: Application of the Medipix2 technology to space radiation dosimetry and hadron therapy beam monitoring. *Nucl. Instr. and Meth. A* 628, A226-229 (2011).
- Pinsky L., Stoffle N., Empl A., Jakubek J., Pospisil S., Leroy C., Kitamura H., Yasuda N., Uchihori Y.: Application of the Medipix2 technology to space radiation dosimetry and hadron therapy beam monitoring. *Rad. Meas.* 46, 1610-1614 (2011).
- Pinsky L., Empl A., Gutierrez A., Jakubek J., Kitamura H., Miller J., Leroy C., Stoffle N., Pospisil S., Uchihori Y., Yasuda N., Zietlin C.: Penetrating heavy ion charge and velocity discrimination with a TimePix-based Si detector (for space radiation applications). *Nucl. Instr. and Meth. A* 633, S190-S193



- (2011).
- Satoh D., Moriguchi D., Kajimoto T., Uehara H., Shigyo N., Ueyama M., Yoshioka M., Uozumi Y., Sanami T., Koba Y., Takada M., Matsufuji N.: Measurement of neutron-production double-differential cross-sections on carbon bombarded with 290-MeV/nucleon carbon and oxygen ions. *Nucl. Instr. and Meth. A* 644, 59-67 (2011).
- Shinsho K., Tomizawa Y., Horikawa H., Miyajima S., Saitoh H., Urushiyama A.: Basic characteristic of a prototype tissue equivalent phantom thermoluminescence dosimeter (TEP-TLD). *Radiat. Meas.* 46, 1912-1915 (2011).
- Shiraki F., Yoshikawa T., Oshima A., Oshima Y., Takasawa Y., Fukutake N., G. Oyama T., Urakawa T., Fujita H., Takahashi T., Oka T., Kudo H., Murakami T., Hama Y., Washio M.: Development of function-graded proton exchange membrane for PEFC using heavy ion beam irradiation. *Nucl. Instr. and Meth. B* 269, 1777-1781 (2011).
- Spurný F., Brabcová K., Ploc O., Jadrníčková I., Mrázová Z.: Spectra of the linear energy transfer and other dosimetry characteristics as measured in C 290 MeV/n MONO and SOBP ion beams at HIMAC-BIO (NIRS, Japan) with different detectors. *Radiation Protection Dosimetry*. doi: 10.1093/rpd/ncq532 (2011).
- Takeshita E., Furukawa T., Inaniwa T., Satou S., Himukai T., Shirai T., Noda K.: A fluorescent screen + CCD system for quality assurance of therapeutic scanned ion beams. *Nucl. Instr. and Meth. B* 269, 2936-2940 (2011).
- Tsubokura H., Oshima A., Oyama T.G., Yamamoto H., Murakami T., Tagawa S., Washio M.: Nanofabrication of sulfonated Polystyrene-g-FEP with silver ion ( $\text{Ag}^+$ ) using ion beam direct etching and reduction. *J. Photopolym. Sci. Technol.* 24, 513-516 (2011).
- Yamaguchi T., Tanaka K., Suzuki T., Ozawa A., Ohtsubo T., Aiba T., Aoi N., Baba H., Fukuda M., Hashizume Y., Inafuku K., Iwasa N., Izumikawa T., Kobayashi K., Komuro M., Kondo Y., Kubo T., Kurokawa M., Matsuyama T., Michimasa S., Motobayashi T., Nakabayashi T., Nakajima S., Nakamura T., Sakurai H., Shinoda R., Shinohara M., Suzuki H., Takechi M., Takeshita E., Takeuchi S., Togano Y., Yamada K., Yasuno T., Yoshitake M.: Nuclear reactions of  $^{19,20}\text{C}$  on a liquid hydrogen target measured with the superconducting TOF spectrometer. *Nucl. Phys. A* 864, 1-37 (2011).
- Yamaguchi T., Hachiuma I., Kitagawa A., Namihira K., Sato S., Suzuki T., Tanihata I., Fukuda M.: Scaling of charge-changing interaction cross sections and point-proton radii of neutron-rich carbon isotopes. *Phys. Rev. Lett.* 107 032502/1-4. (2011).
- Yamaya T., Yoshida E., Inaniwa T., Sato S., Nakajima Y., Wakizaka H., Kokuryo D., Tsuji A., Mitsuhashi T., Kawai H., Tashima H., Nishikido F., Inadama N., Murayama H., Haneishi H., Suga M., Kinouchi S.: Development of a small prototype for a proof-of-concept of OpenPET imaging. *Phys. Med. Biol.* 56, 1123-1137 (2011).
- Yasuda H., Yajima K., Takada M., Sato T., Nakamura T.: Development of cosmic radiation and energetic particle analyzing system: CREPAS. *Prog. Nucl. Sci. Technol.* 1, 356-359 (2011).
- Zeitlin C., Miller J., Guetersloh S., Heilbronn L., Fukumura A., Iwata Y., Murakami T., Norman R., Blattnig S.: Fragmentation of  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ , and  $^{24}\text{Mg}$  Nuclei at 290 to 1000 MeV/nucleon. *Phys. Rev. C* 83, 034909 (2011).
- 海部俊介、森 豊、金崎真聡、山内知也、小田啓二、小平 聡、小西輝昭、安田仲宏：新しい固体飛跡検出器としてのポリイミド薄膜、放射線 37, No.3, 157-163 (2011).
- 小平聡、安田仲宏、蔵野美恵子、川嶋元、北村尚、内堀幸夫、Akselrod M.S., Bartz J.A., Sykora G.J., Benton E.R.: 酸化アルミニウム単結晶  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C,Mg}$  を用いた蛍光飛跡検出法に関する研究、放射線 37, No.3, 165-168 (2011).
- 森 豊、前田佑介、金崎真聡、山内知也、小田啓二、蔵岡孝治、安田仲宏、小西輝昭、小平聡、菅田義英、藤乗幸子：イオン照射した PADC 固体飛跡検出器の表面特性評価、放射線 37, No.3, 149-155 (2011).
- 森本彰、森 豊、山内知也、小田啓二、小平 聡、小西輝昭、安田仲宏：ポリエチレンテレフタレート薄膜中重イオントラックの損傷構造、放射線 37, No.3, 133-141 (2011).
- Hara Y., Takada Y., Hotta K., Tansho R., Nihei T., Suzuki Y., Nagafuchi K., Kawai R., Tanabe M., Mizutani S., Himukai T., Matsufuji N.: Improvement of spread-out Bragg peak flatness for a carbon-ion beam by the use of a ridge filter with a ripple filter. *Phys. Med. Biol.* 57, 1717-1731 (2012).
- Hashimoto T., Isobe T., Hashii H., Kumada H., Tada H., Okumura T., Tsuboi K., Sakae T., Aonuma K., Sakurai H.: Influence of secondary neutrons induced by proton radiotherapy for cancer patients with

- implantable cardioverter defibrillators. *Radiat. Oncol.* 7, 10 (2012).
- Inaniwa T., Furukawa T., Kanematsu N., Mori S., Mizushima K., Satou S., Toshitou T., Shirai T., Noda K.: Evaluation of hybrid depth scanning for carbon-ion radiotherapy. *Medical Physics*, 39, 2820-2825 (2012).
- Iwata Y., Noda K., Shirai T., Murakami T., Furukawa T., Mori S., Fujita T., Itano A., Shouda K., Mizushima K.: Design of a superconducting rotating gantry, for heavy-ion therapy. *Phys. Rev. Special Topics-Accelerators and Beams* 15, 044701 (2012).
- Kanematsu N., Inaniwa T., Koba Y.: Relationship between electron density and effective densities of body tissues for stopping, scattering, and nuclear interactions of proton and ion beams. *Med. Phys.* 39, 1016-1020 (2012).
- Kinouchi S., Yamaya T., Yoshida E., Tashima H., Kudo H., Haneishi H., Suga M.: GPU-Based PET image reconstruction using an accurate geometrical system model. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 59, 1977-1983 (2012).
- Kobayashi K., Sarker P.K., Ono K., Kawamoto Y., Obayashi Y., Kaneko T., Yoshida S., Mita H., Yabuta H., Yamagishi A.: Formation, alteration and delivery of exogenous high molecular weight organic compounds: objectives of the Tanpopo Mission from the point of view of chemical evolution. *Trans. Jpn. Soc. Aero. Space Sci.* 10 (ists28), 7-11 (2012).
- Kodaira S., Naka S., Yasuda N., Kawashima H., Kurano M., Ota S., Ideguchi Y., Hasebe N., Ogura K.: Improvement of charge resolution for high  $Z/\beta$  particles in CR-39 nuclear track detectors by means of two-step etching technique. *Nucl. Instrum. and Meth. B* 274, 36-41 (2012).
- Kodaira S., Nanjo D., Kawashima H., Yasuda N., Konishi T., Kurano M., Kitamura H., Uchihori Y., Naka S., Ota S., Ideguchi Y., Hasebe N., Mori Y., Yamauchi T.: Mass spectrometry analysis of etch products from CR-39 plastic irradiated by heavy ions. *Nucl. Instr. and Meth. B* 286, 229-232 (2012).
- Kubota H., Kuge K., Yasuda N., Kodaira S., Nakamura M.: Measurement of the deposition energy of tracks of high-energy particles using the line density of latent image specks. *J. Soc. Photogr. Imag. Jpn.* 75, 334-339 (2012).
- Kuge K., Ito R., Kodaira S., Yasuda N.: Discriminated detection of nuclear tracks recorded on multilayers of photographic emulsions with different sensitivities by color-development method. *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 056402 (2012).
- Mase T., Odriani O., Bonechi L., Bongi M., Castellini G., D'Alessandro R., Fukui K., Haguenaue M., Itow Y., Kasahara K., Macina D., Masuda K., Menjo H., Mitsuka G., Mizuishi M., Muraki Y., Nakai M., Papini P., Perot A.L., Ricciarini S., Sako T., Shimizu Y., Sumi T., Taki K., Tamura T., Torii S., Tricomi A., Turner W.C., Viciani A., Watanabe H., Yoshida K.: Calibration of LHCf calorimeters for photon measurement by CERN SPS test beam. *Nucl. Instr. and Meth. A* 671, 129-136 (2012).
- Mori Y., Yamauchi T., Kanasaki M., Hattori A., Matai Y., Matsukawa K., Oda K., Kodaira S., Kitamura H., Konishi T., Yasuda N., Tojo S., Honda Y., Barillon R.: Greater radiation chemical yields for losses of ether and carbonate ester bonds at lower stopping powers along heavy ion tracks in poly(allyl diglycol carbonate) films. *Appl. Phys. Express* 5, 086401-1-3 (2012).
- Nagatomo T., Kobayashi Y., Kubo M.K., Yamada Y., Mihara M., Sato W., Miyazaki J., Mae K., Sato S., Kitagawa A.: In-beam Mössbauer spectroscopy of  $^{57}\text{Mn}$  implanted into lithium hydride, *Hyperfine Interactions* 204, 125-128 (2012).
- Nakano Y., Suda S., Hatakeyama A., Nakai Y., Komaki K., Takada E., Murakami T., Azuma T.: Selective production of the doubly excited  $2p^2(^1D)$  state in He-like  $\text{Ar}^{16+}$  ions by resonant coherent excitation. *Phys. Rev. A* 85, 020701 (2012).
- Ogawa T., Morev M.N., Iimoto T., Kosako T.: Measurements of activation reaction rates in transverse shielding concrete exposed to the secondary particle field produced by intermediate energy heavy ions on an iron target. *Nucl. Instr. and Meth. B* 271, 65-71 (2012).
- Taen T., Nakajima Y., Tamegai T., Kitamura H.: Enhancement of critical current density and vortex activation energy in proton-irradiated Co-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ . *Phys. Rev. B* 86, 094527 (2012).
- Taen T., Nakajima Y., Tamegai T., Okayasu S., Sasase M.: Effects of swift Xe irradiation in  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  single crystals. *J. Phys. Conf. Ser.* 400, 022119 (2012).
- Takechi M., Ohtsubo T., Fukuda M., Nishimura D., Kuboki T., Suzuki T., Yamaguchi T., Ozawa A., Moriguchi T., Ooishi H., Nagae D., Suzuki H., Suzuki S., Izumikawa T., Sumikama T., Ishihara M., Geissel H., Aoi N., Chen R.J., Fang D.Q., Fukuda N., Hachiuma I.,

- Inabe N., Ishibashi Y., Ito Y., Kameda D., Kubo T., Kusaka K., Lantz M., Ma YG., Matsuta K., Mihara M., Miyashita Y., Momota S., Namihira K., Nagashima M., Ohkuma Y., Ohnishi T., Ohtake M., Ogawa K., Sakurai H., Shimbara Y., Suda T., Takeda H., Takeuchi S., Tanaka K., Watanabe R., Winkler M., Yanagisawa Y., Yasuda Y., Yoshinaga K., Yoshida A., Yoshida K.: Interaction cross sections for Ne isotopes towards the island of inversion and halo structures of  $^{29}\text{Ne}$  and  $^{31}\text{Ne}$ . *Phys. Lett. B* 707, 357-361 (2012).
- Tamegai T., Taen T., Yagyuda H., Tsuchiya Y., Mohan S., Taniguchi T., Nakajima Y., Okayasu S., Sasase M., Kitamura H., Murakami T., Kambara T., Kanai Y.: Effects of particle irradiation on vortex states in iron-based superconductors. *Supercond. Sci. Technol.* 25, 084008 (2012).
- Tamegai T., Taniguchi T., Taen T., Nakajima Y., Nishizaki T., Naito T., Kobayashi N., Kitamura H., Murakami T.: Vortex phase diagram of pristine and irradiated Co-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ . *J. Phys. Conf. Series* 400, 022122 (2012).
- Tashima H., Yoshida E., Kinouchi S., Nishikido F., Inadama N., Murayama H., Suga M., Haneishi H., Yamaya T.: Real-time imaging system for the OpenPET. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 59, 40-46 (2012).
- Tashima H., Yamaya T., Yoshida E., Kinouchi S., Watanabe M., Tanaka E.: A single-ring OpenPET enabling PET imaging during radiotherapy. *Phys. Med. Biol.* 57, 4705-4718 (2012).
- Tsuda S., Sato T., Takahashi F., Satoh D., Sasaki S., Namito Y., Iwase H., Ban S., Takada M.: Systematic measurement of Lineal Energy distributions for Proton, He and Si ion beams over a wide energy range using a Wall-less Tissue Equivalent Proportional Counter. *J. Radiat. Res.* 53, 264-271 (2012).
- Yamashita S., Baldacchino G., Maeyama T., Taguchi M., Muroya Y., Lin M., Kimura A., Murakami T., and Katsumura Y.: Mechanism of radiation-induced reactions in aqueous solution of coumarin-3-carboxylic acid: Effects of concentration, gas and additive on fluorescent product yield. *Free Radic. Res.* 46, 861-871 (2012).
- Yamauchi T., Mori Y., Morimoto A., Kanasaki M., Oda K., Kodaira S., Konishi T., Yasuda N., Tojo S., Honda Y., Barillon R.: Thresholds of etchable track formation and chemical damage parameters in poly(ethylene terephthalate), bisphenol a polycarbonate, and poly(allyl diglycol carbonate) films at the stopping powers ranging from 10 to 12,000  $\text{keV}/\mu$ . *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 056301-1-5 (2012).
- Yoshida E., Kinouchi S., Tashima H., Nishikido F., Inadama N., Murayama H., Yamaya T.: System design of a small OpenPET prototype with 4-layer DOI detectors. *Radiol. Phys. Technol.* 5, 92-97 (2012).
- Yoshikawa T., Oshima A., Murakami T., Washio M.: ESR study for ion beam induced phenomena in poly(tetrafluoroethylene-co-hexafluoropropylene)(FEP). *Radiat. Phys. Chem.* 81, 1904-1908 (2012).
- Zhang D.H., Cheng J.X., Kodaira S., Yasuda N.: Projectile fragmentation of 388 A MeV  $^{20}\text{Ne}$  in polyethylene, carbon and aluminum targets. *Nucl. Instr. and Meth. B* 286, 238-242 (2012).
- 久下謙一、宮里尚宏、安田仲宏、小平聡、熊谷宏：低温赤色光後露光補力による銀塩感光材料での放射線感度の向上、日本写真学会誌、75, 408-415 (2012).
- Barillon R., Mori Y., Kanasaki M., Yamauchi T., Yasuda N.: Chemical cross sections induced by ions in solid organic detectors: Experimentation and simulation. *Radiat. Meas.* 50, 38-42 (2013).
- Case A.W., Kasper J.C., Spence H.E., Zeitlin C.J., Looper M.D., Golightly M.J., Iwata Y., et al. : The deep space galactic cosmic ray lineal energy spectrum at solar minimum. *Space Weather.* 11(6), 361-368 (2013)
- Guo S.L., Doke T., Zhang D.H., Li L., Chen B.L., Kikuchi J., Hasebe N., Terasawa K., Hara K., Fuse T., Yasuda N., Murakami T.: Experimental investigation of bubble occurrence and locality distribution of bubble detectors bombarded with high-energy helium ions. *Radiat. Meas.* 50, 31-37 (2013).
- Hassan N.M., Matai Y., Kusumoto T., Mori Y., Kanasaki M., Oda K., Kitamura H., Konishi T., Kodaira S., Yasuda N., Yamauchi T.: On the mechanism of the sensitization of PADC (poly(allyl diglycol carbonate)) track detectors by carbon dioxide treatment. *Radiat. Meas.* 59, 23-29 (2013).
- Hirano Y., Kinouchi S., Ikoma Y., Yoshida E., Wakizaka H., Ito H., Yamaya T.: Compartmental analysis of washout effect in rat brain: in-beam OpenPET measurement using a  $^{11}\text{C}$  beam. *Phys. Med. Biol.* 58, 8281-8294 (2013).
- Kishimoto Y., Sasaki S., Saito K., Takahashi K., Doke T., Miuchi K., Fuse T., Nagamatsu A., Uchihori Y., Kitamura H., Terasawa K.: Basic performance of a position-sensitive tissue-equivalent proportional chamber

- (PS-TEPC). Nucl. Instr. and Meth. A 732, 591-594 (2013).
- Koba Y., Fukuda S., Shinsho K., Wakabayashi G., Tamatsu S.: Response of plate-type thermoluminescence dosimeter to therapeutic carbon Beam. J. Korean Phys. Soc. 63, 1432-1436 (2013).
- Kobayashi M., Miyachi T., Takechi S., Sekiguchi M., H. Shibata, N. Okada, Hattori M., Okudaira O., Fujii M., Murakami T., Uchihori Y.: Study of deterioration in a piezoelectric lead zirconate titanate radiation detector through measurement of the electromechanical coupling factor with 400 MeV/n xenon ions. Jpn. J. Appl. Phys. 52, 126604 (2013).
- Kodaira S., Yasuda N., Konishi T., Kitamura H., Kurano M., Kawashima H., Uchihori Y., Ogura K., Benton E.R.: Calibration of CR-39 with atomic force microscope for the measurement of short range tracks from proton-induced target fragmentation reactions. Radiat. Meas. 50, 232-236 (2013).
- Kuge K., Inoue R., Oishi Y., Yasuda N., Kodaira S., Sato O.: Detection of radiation tracks recorded on silver-salt photographic materials by fluorescence-labeling method. Jpn. J. Appl. Phys. doi:10.7567/JJAP.52.106402 (2013).
- Maeyama T., Fukunishi N., Ishikawa K.L., Fukasaku K., Furuta T., Takagi S., Noda S., Himeno R., Fukuda S.: Response of aqueous dichromate and nanoclay dichromate gel dosimeters to carbon ion irradiation. J. Physics. Conf. Series. 444, 012033 (2013).
- Makihara A., Yokose T., Tsuchiya Y., Miyazaki Y., Abe H., Shindou H., Ebihara T., Maru A., Morikawa K., Kuboyama S., Tamura T.: Applicability of redundant pairs of SOI transistors for analog circuits and their applications to phase-locked loop circuits. IEEE Trans. on Nuc. Sci. 60, 230-235 (2013).
- Matsuda Y., Sakaguchi H., Takeda H., Terashima S., Zenihiro J., Kobayashi T., Murakami T., Iwao Y., Ichihara T., Suda T., Ohnishi T., Watanabe Y., Otsu H., Yoneda K., Satou Y., Ozeki K., Kanazawa M.: Elastic scattering of protons from  $^{12}\text{C}$  with a 290 Me/nucleon  $^{12}\text{C}$  beam. Phys. Rev. C 87, 034614 (2013).
- Matsuta K., Minamisono T., Mihara M., Fukuda M., Zhu S., Masuda Y., Hatanaka K., Yuan D., Zheng Y., Zuo Y., Fang P., Zhou D., Ohtsubo T., Izumikawa T., Momota S., Nishimura D., Matsumiya R., Kitagawa A., Sato S., Kanazawa M., Torikoshi M., Nagatomo T., Nojiri Y., Suzuki T., Zhang X., Alonso J.R., Symons T.J.M., Kawasaki S., Jeong S.C., Watanabe Y., Minamisono K. et al.: Nuclear moments as a probe of electronic structure in material, exotic nuclear structure and fundamental symmetry. Hyperfine Interactions. doi:10.1007/s10751-013-0847-0 (2013).
- Mihara M., Matsuta K., Nishimura D., Fukuda M., Yaguchi M., Iwamoto K., Wakabayashi M., Kamisho Y., Ohno J., Morita Y., Izumikawa T., Ohtsubo T., Suzuki S., Nagashima M., Abe K., Sakai T., Momota S., Ozawa A., Nagae D., Ishibashi Y., Abe Y., Niwa T., Nagatomo T., Minamisono T., Kubo M.K., Kitagawa A., Torikoshi M., Kanazawa M., Sato S.: Production of spin polarized  $^{12}\text{N}$  through heavy ion reactions. Hyperfine Interactions. doi:10.1007/s10751-013-0869-7 (2013).
- Mizushima K., Takeshita E., Furukawa T., Hara Y., Shirai T., Katagiri K., Noda K.: Beam spot imaging system using a fluorescent screen for carbon-ion radiotherapy. J. Korean Phys. Soc. 63, 1437-1440 (2013).
- Momota S., Mihara M., Nishimura D., Fukuda M., Kamisho Y., Wakabayashi M., Matsuta K., Suzuki S., Nagashima M., Zhu S., Yuan D., Zheng Y., Yi Z., Fan P., Izumikawa T., Kitagawa A., Sato S., Kanazawa M., Torikoshi M., Minamisono T., Nakamura Y., Tashiro K., Honma A., Yoshida N., Shirai H., Ohtsubo T., Nagatomo T., Uenishi H., Iwamoto K., Yaguchi M., Ogura T., Ito T., Yamamura K., Ichikawa Y., Nojiri Y., Alonso J.R., Symons T.J.M.: Momentum dependence of spin polarization for beta emitting nuclei produced through charge exchange reaction at intermediate energy. Hyperfine Interactions. doi:10.1007/s10751-012-0741-1. (2013).
- Mori Y., Yamauchi T., Kanasaki M., Hattori A., Oda K., Kodaira S., Konishi T., Yasuda N., Tojo S., Honda Y., Barillon R.: Vacuum effects on the radiation chemical yields in PADC films exposed to gamma rays and heavy ions. Radiat. Meas. 50, 97-102 (2013).
- Nagae D., et al.: Time-of-flight detector applied to mass measurements in Rare-RI Ring. Nucl. Instr. and Meth. B 317, 640-643 (2013).
- Nakano Y., Hatakeyama A., Nakai Y., Komaki K., Takada E., Murakami T., Azuma T.: Effects of fine structure depolarization studied by resonant coherent excitation of H-like  $\text{Ar}^{17+}$ . Physica Scripta. T156, 014061 (2013).
- Ogawa T., Morev M.N., Sato T., Hashimoto S.: Analysis of fragmentation excitation functions of lead by carbon ions up to 400 MeV/u. Nucl. Instr. and Meth. B 300, 35-45 (2013).
- Ogawa T., Sato T., Hashimoto S. Niita, K.:

- Analysis of multi-fragmentation reactions induced by relativistic heavy ions using the statistical multifragmentation model. Nucl. Instr. and Meth. A 723, 36-46 (2013).
- Sihver L., Giacomelli M., Ota S., Skvarc J., Yasuda N., Ilic R., Kodaira S.: Projectile fragment emission angles in fragmentation reactions of light heavy ions in the energy region  $< 200$  MeV/nucleon: Experimental study. Radiat. Meas. 48, 73-81 (2013).
- Suzuki T., Kasahara K., Kawade K., Murakami T., Masuda K., Sako T., Torii S.: Performance of very thin  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  scintillator bars for the LHCf experiment. JINST. 8 T01007 (2013).
- Taylor M.L., Maeyama T., Fukunishi N., Ishikawa K.L., Fukasaku K., Furuta T., Takagi S., Noda S., Himeno R., Fukuda S.: Radiological characteristics of charged particle interactions in the first clay-nanoparticle dichromate gel dosimeter. J. Phys. Conf. Series. 444, 012110 (2013).
- Tsubokura H., Oshima A., Oyama T.G., Takasawa Y., Fukutake N., Okubo S., Yoshikawa T., Oka T., Murakami T., Hama Y., Washio M. : Study on direct etching of poly(tetrafluoroethylene) by high energy heavy ion beams. Radiat. Phys. Chem. 92, 37-42 (2013).
- Yamada Y., Kobayashi Y., Kubo M.K., Mihara M., Nagatomo T., Sato W., Miyazaki J., Sato S., Kitagawa A.: In-beam Mössbauer study of  $^{57}\text{Mn}$  implanted into a low-temperature xenon. Hyperfine Interactions. Doi:10.1007/s10751-013-0913-7 (2013).
- Yamaguchi T., et al.: Performance of high-resolution position-sensitive detectors developed for storage-ring decay experiments. Nucl. Instr. and Meth. B 317, 697-700 (2013).
- Yamauchi T., Matsukawa K., Mori Y., Kanasaki M., Hattori A., Matai Y., Kusumoto T., Tao A., Oda K., Kodaira S., Konishi T., Kitamura H., Yasuda N., Barillon R.: Applicability of polyimide films as etched-track detectors for ultra-heavy cosmic ray components. Appl. Phys. Express. 6, 046401, 1-4 (2013).
- Yamauchi T., Kaifu S., Mori Y., Kanasaki M., Oda K., Kodaira S., Konishi T., Yasuda N., Barillon R.: Applicability of the polyimide films as an SSNTD material. Radiat. Meas. 50, 16-21 (2013).
- Zeitlin C., Case A.W., Spence H.E., Schwadron N.A., Golightly M., Wilson J.K., Iwata Y., et al. : Measurements of galactic cosmic ray shielding with the CRaTER instrument. Space Weather 11, 284-296 (2013).
- Zhang D.H., Wang L., Li Y., Kodaira S., Yasuda N.: Projectile fragmentation of 471 A MeV  $^{56}\text{Fe}$  in polyethylene, carbon and aluminum targets. Radiat. Meas. 50, 56-60 (2013).
- Zhang D.H., Wang L.C., Li Y.J., Li J.S., Kodaira S., Yasuda N.: Fragmentation  $^{56}\text{Fe}$  on C, Al and CH<sub>2</sub> targets at 471 A MeV. Nucl. Instr. and Meth. B 315, 99-104 (2013).

## Proceedings

- Das M., Yasuda N., Oinuma G., Sawamura T.: Response of superheated emulsions to heavy ions. Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accel. Meeting in Japan, Funabashi, 441-443 (2004).
- Endo S., Onizuka Y., Takada M., Tanaka K., Ishikawa M., Shizuma K., Maeda N., Yamaguchi H., Hayabuchi N., Hoshi M.: Evaluation of secondary neutral fragments from therapeutic carbon beam. Jpn. J. Med. Phys. 24 [Sup.2], 77-78 (2004).
- Endo S., Onizuka Y., Takada M., Ishikawa M., Tanaka K., Hoshi M., Maeda N., Yamaguchi H., Hayabuchi N., Shizuma K.: Evaluation of secondary neutral fragments from therapeutic carbon beam. Jpn. J. Med. Phys. 24 [Sup.3], 70-72 (2004).
- Furukawa T., Noda K., Uesugi T.H., Naruse T., Shibuya S., Fujimoto T., Kanazawa M., Takada E., Yamada S.: Recent improvement of slow-extraction at HIMAC synchrotron. Proc. 9th EPAC, 267-269 (2004).
- Iwata Y., Fujisawa T., Furukawa T., Kanai T., Knnazawa M., Kanematsu M., Komori M., Minohara S., Murakami T., Muramatsu M., Noda K., Torikoshi M., Yamada S., Ogawa H., Fujimoto T., Shibuya S., Mitsumoto T., Tsutsui H., Fujii Y., Kapin V.: Alternating-phase-focused linac for an injector of medical synchrotrons. Proc. EPAC, Switzerland, 2631-2633 (2004).
- Kobayashi K., Tonishi H., Tsuboi T., Suzuki N., Kaneko T., Takano Y., Muramatsu Y., Hashimoto H., Yamashita M.: Formation and stability of complex organic compounds in space environments. Biol. Sci. Space 18, 179-180 (2004).
- Kodaira S., Hasebe N., Doke T., Asaeda M., Kitagawa A., Kitamura H., Sato S., Uchihoori Y., Yasuda N., Ogura K., Tawara H.: Beam experiment at HIMAC secondary beam course for the isotope separation of ultra-heavy nuclei in space. Proc. of the 18th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, Tsukuba, 197-206 (2004).
- Kohno R., Yasuda N., Takeshi H., Kase Y., Ochiai K., Komori M., Matsufuji N., Kanematsu N., Kanai T.: Measurements of dose distributions in water using CR-39 for therapeutic carbon-ion beams. Med. Phys. 31. 1798 (2004).
- Miyata T., Miyoshi T., Sakuma T., Kageyama Y., Yamamoto M., Muramatsu M., Sato. Y.: Improvement of the yield of highly charged ions from penning source by gas pulsing. Proc. 6th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 81-84 (2004).
- Miyoshi T., Shevelko V.P., Kageyama Y., Miyata T., Murakami T., Sato Y.: Electron capture of 6.0MeV/u highly charged ions through carbon foils. Proc. 6th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 61-64 (2004).
- Muramatsu M., Kitagawa A., Sakamoto Y., Sato Y., Sato S., Yamada S., Ogawa H., Drentje A.G., Biri S., Yoshida Y.: Beam tests of a 10 GHz compact ECR ion source. Proc. 6th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 77-80 (2004).
- Noda K., Fujisawa T., Furukawa T., Iwata Y., Kanai T., Kanazawa M., Kanematsu N., Kitagawa A., Kobayashi Y., Komori M., Minohara S., Torikoshi T., Urakabe E., Yoshida K., Yamada S.: Proposal for carbon-beam facility for the cancer therapy in japan. Proc. of EPAC, Switzerland, 2634-2636 (2004).
- Noda K., Shibuya S., Uesugi T., Honma T., Furukawa T., Tann D., Syresin E., Meshkov I., Ninomiya S., Iwashima T.: Electron cooling experiments at HIMAC synchrotron. Proc. 9th EPAC, 2089-2091 (2004).
- Ohno Y., Kohno T., Matsufuji N., Kanai T.: Electron density distribution by broad beam heavy ion CT system. Proc. 6th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 65-68 (2004).
- Satoh D., Sato T., Endo A., Yamaguchi Y., Takada M. and Ishibashi K.: Study on response function of organic liquid scintillator for high-energy neutrons. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (2004).
- Takada M., Awaya I., Iwai S., Iwaoka M., Masuda M., Kimura T., Takagi S., Sato O., Nakamura T., Fujitaka K.: High-energetic neutron spectrometer onboard aircraft and spacecraft. 11th International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid, ID522 (2004).
- Tann D., Noda K., Shibuya S., Ninomiya S., Uesugi T., Furukawa T., Honma T., Iwashima T., Ogawa H. Y., Hashimoto Y., Fujisawa T., Uchiyama H., Uesugi T.H., Muramatsu M., Syresin E.: Production of short bunched ion beam at HIMAC synchrotron. Proc. 6th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 53-56 (2004).
- Uesugi T., Fujisawa T., Noda K., Shibuya S., Tann D., Uchiyama H., Meshkov I., Syresin E., Hashimoto Y., Ninomiya S.: Observation of coupling resonance in HIMAC synchrotron. Proc. 9th EPAC, 1321-1323 (2004).



- Uesugi T., Furukawa T., Naruse T., Noda K., Fujimoto T., Shibuya S.: Study of multiturn injection at HIMAC synchrotron. Proc. 9th EPAC, 2640-2642 (2004).
- Yasuda N., Abe S., Nishimura K., Sato H., Yokoyama K., Tomida T., Muraishi H.: Noise reduction in heavy ion CT using wavelet shrinkage. Jpn. J. Med. Phys. 24[Sup.2], 43-44 (2004).
- 横山健一、阿部慎司、西村克之、佐藤斉、安田成臣、富田哲也、村石浩、河野良介、金井達明、稲田哲雄：ダイナミックレンジシフトを用いた重イオン線 CT システムの高速化、Jpn. J. Med. Phys. 24[Sup.2], 101-102 (2004).
- 横山健一、阿部慎司、西村克之、佐藤斉、安田成臣、富田哲也、村石浩、河野良介、金井達明、稲田哲雄：ウェーブレット縮退を用いた高速重イオン線 CT におけるノイズ低減、Jpn. J. Med. Phys. 24[Sup.3], 316-319 (2004).
- 河野良介、安田伸宏、落合佳子、日向猛、小森雅孝、松藤成弘、兼松伸幸、金井達明：CR-39 を用いた水中における重粒子線・線量分布測定(2). Jpn. J. Med. Phys. 24. 71-72 (2004).
- 小林憲正、坪井大樹、枝澤野衣、長谷川直樹、金子竹男、高野淑識、広石大介、池田秀松、村松康行、春山純一、大竹真紀子、山下雅道：宇宙空間および月・惑星環境下での有機物の安定性、Space Util. Res. (2004).
- 村石浩、西村克之、阿部慎司、佐藤斉、安田成臣、横山健一、長谷川智之、富田哲也、藤崎達也、稲田哲雄、金井達明：FDR 法による重粒子線 CT の分解能補正、Jpn. J. Med. Phys. 24[Sup.2], 45-46 (2004).
- 柳澤正規、河野俊之、金井達明、松藤成弘：ブロードビーム重イオン CT 用測定システムの改良、第 88 回日本医学物理学学会学術大会報文集、77-80 (2004).
- Endo S., Tanaka K., Ishikawa M., Hoshi M., Onizuka Y., Takada M., Hayabuchi N., Maeda N., Shizuma K.: Microdosimetric evaluation of secondary fragments in Phantom produced by therapeutic 290 MeV/nucleon carbon beam at HIMAC. Proc. 1st Asian Congress of Radiation Research, 181 (2005).
- Furukawa T., Noda K., Yoshida K., Uesugi T.H., Kanazawa M., Torikoshi M., Takada E., Yamada S., Shibuya S., Miyoshi T., Katsumata M., Shiraishi T., Shimojyu T.: Design study of synchrotron for compact carbon therapy facility. Proc. 2nd Annual Meeting of Part. Accel. Society of Japan, Tosu, 624-626 (2005).
- Hasebe N., Hareyama M., Kodaira S., Sakurai K., Yamashita N., Miyachi T., Okudaira O., takano M., Torii S., Doke T., Ogura K., Yasuda N., Uchihori Y., Tawara H., Nakamura S., Shibata T., Yanagimachi T., Wanajo S.: Observation program of isotope composition in the ultra heavy cosmic rays. Proc. of the 9th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle, Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications 223-227 (2005).
- Hashimoto Y., Fujisawa T., Morimoto T., Fujita Y., Honma T., Muto S., Noda K., Sato Y., Uesugi T., Yamada S.: Oxygen gas-sheet beam profile monitor for the synchrotron and storage ring. Proc. 2nd Annual Meeting of Part. Accel. Society of Japan, Tosu, 223-225 (2005).
- Himukai T., Takada Y., Kohno R., Kamimura S., Matsuda H., Hotta K.: Study of Improving Dose Uniformity Using a Truncated Cone Filter with GEANT4. Jpn. J. Med. Phys. 25 [Sup.3-1], 344-346 (2005).
- Hohara S., Imamura M., Kin T., Yamashita Y., Maki D., Saiho F., Ikeda K., Uozumi Y., Matoba M.: Development of Gas Proportional Scintillation Counter for Light Heavy-Ion Detection. AIP Conference Proc. 769, International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, 773-775 (2005).
- Hojo S., Honma T., Sakamoto Y., Yamada S.: Analysis of residual gas from ECR ion source. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 85-86 (2005).
- Ikeda N., Kuboyama S., Matsuda S., Handa T.: Analysis of angular dependence of proton-induced multi-bit upsets in a synchronous sram. 第 5 回 半導体の放射線照射効果研究会、茨城 (2005).
- Inaniwa T., Kohno T., Tomitani T., Kanazawa M., Urakabe E., Sato S., Kanai K.: Range determination of therapeutic heavy ions with induced  $\beta^+$  activity. Proc. PTCOG 42, 52-53 (2005).
- Inaniwa T., Kohno T., Tomitani T., Kanazawa M., Urakabe E., Sato S., Kanai K.: Application of MLE method to SOBP irradiation with  $^{12}\text{C}$  beam. Proc. 4th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics and the 5th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, 290-293 (2005).
- Kanazawa M.: Accelerators for the medical use. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 51-52 (2005).
- Kase Y., Kanai T., Furusawa Y., Matsumoto Y., Okamoto H.: Response of human tumor cells and microdosimetry in heavy-ion beams. Proc. 4th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics and The 5th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, 283-286 (2005).

- Kase Y., Kanai T., Okamoto H., Furusawa Y., Matsumoto Y., Asaba T.: Biological effect and microdosimetric quantity in heavy-ion beams. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 33- 34 (2005)
- Komori M., Kanai T., Kanematsu N., Kobayashi Y., Yonai S., Kusano Y., Nakajima T., Takahashi O., Tashiro M., Ihara Y., Koikegami H.: First experimental results of spiral-wobbler system for heavy-ion radiotherapy. Proc. 4th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics and The 5th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, 164-166 (2005).
- Magara T., Kikumura R., Kanazawa M., Sato S., Maeda K., Maruyama K.: Evaluation of charged particle multiplicity in fragmentation reactions induced by therapeutic  $^{12}\text{C}$  beams. Jpn. J. Med. Phys. 25 [Sup.3-2], 161-163 (2005).
- Matsuta K., Fujiwara H., Nagatomo T., Mihara M., Kumashiro S., Nakashima Y., Ogura M., Momota S., Ohtsubo T., Ohta M., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Fukuda M., Minamisono T., Nojiri Y., Minamisono K., Suda M., Izumikawa T., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Electric quadrupole moment of  $^{25}\text{Na}$ . Proc. of Int. Symp. on Correlation Dynamics in Nuclei, IOP Conference Series 20. 169-170 (2005).
- Mihara M., Matsumiya R., Matsuta K., Nagatomo T., Fukuda M., Minamisono T., Momota S., Nojiri Y., Ohtsubo T., Izumikawa T., Kitagawa A., Torikoshi M., Kanazawa M., Sato S., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Spin Polarization of  $^{23}\text{Ne}$  Produced in Heavy Ion Reactions. Proc. Int. Symp. on Polarized Sources and Targets, Tokyo (2005).
- Mihara M., Matsumiya R., Matsuta K., Nagatomo T., Fukuda M., Minamisono T., Momota S., Nojiri Y., Ohtsubo T., Izumikawa T., Kitagawa A., Torikoshi M., Kanazawa M., Sato S., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Spin polarization of  $^{23}\text{Ne}$  produced in heavy ion reactions. Proc. Int. Symp. on Polarized Sources and Targets, Tokyo (2005).
- Miyoshi T., Shevelko V.P., Murakami T., Noda K., Sato Y.: Distribution over charge states and excited levels of fast highly charged ions penetrating through carbon foils. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 43-46 (2005)
- Muraishi H., Nishimura K., Abe S., Satoh H., Yokoyama K., Hasegawa T., Isobe T., Okafuji J., Yasuda N., Tomida T., Kanai T.: Application of FDR to a sinogram measured by a Heavy Ion CT system based on the measurement of residual range distribution. 医学物理 25 [Sup.3-2], 89-92 (2005).
- Muramatsu M., Kitagawa A., Ogawa H., Sakamoto Y., Sato Y., Yamada S., Ogawa H., Drentje A.G., Biri S., Yoshida Y.: Improvement of compact ECR ion source. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 87-90 (2005).
- Ohno Y., Trikoshi M., Tsunoo T., Endo M., Hyodo K., Natsuhori M., Kakizaki T., Ito N., Uesugi K., Yagi N.: Dual-energy X-ray CT and the extension to polychromatic X-ray CT. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 37-38 (2005).
- Okada Y., Sato Y., Ohsawa D., Soga F.: 15.0 MeV/u  $\text{He}^{2+}$  ion-induced low energy electrons from water vapor. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 47-50 (2005).
- Saito K., Sasaki S., Tomozawa H., Takano M., Hazuku T., Takamasa T., Fukumura A.: Response of a RISA radiation detector for heavy charged particles. KEK Proc. 2005-12 RADIATION DETECTORS AND THEIR USES, 49-55 (2005).
- Sakama M., Fukumura A., Kanai T.: Development of a graphite calorimeter for absolute dosimetry. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 29-30 (2005)
- Sakama M., Fukumura A., Tatsuaki K.: Development of a graphite calorimeter for absolute dosimetry. Proc. of the 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 31-32 (2005).
- Sakama M., Fukumura A., and Kanai T.: Determination of the absorbed dose using a graphite calorimeter. Proc. of the 4th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Kyoto (2005).
- Sasaki S., Sanami T., Saito K., Iijima K., Tawara H., Fukumura A., Murakami T.: Average energy to produce an ion pair for heavy charged particles in gases measured as a function of particle energy. IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record N35-3 (2005).
- Sato S., Furukawa T., Noda K.: Development of intensity modulation extraction system for spot-scan irradiation. Proc. 7th Symp. Accel. and Related Technol. for Application, 35-36 (2005).
- Sato S., Furukawa T., Noda K.: Development of intensity modulated extraction system in HIMAC synchrotron. Proc. 2nd Annual Meeting of Part. Accel. Society of Japan, Tosu, 663-665 (2005).
- Satoh D., Sato T., Endo A., Matsufuji N., Sato S., Takada M., Ishibashi K.: Study of light output

- and response function of liquid organic scintillator for high-energy neutron spectrometry, 2005 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record, 1288-1290 (2005).
- Shiraishi T., Katsumata M., Furukawa T., Torikoshi M., Takada E.: Development for turn-key treatment-beam delivery. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 39-42 (2005).
- Takada Y., Kohno R., Himukai T., Kamimura S., Ishibashi K., Kanai T.: Bi-material range compensator for improving dose uniformity for particle therapy. Jap. J. Med. Phys. 25. [Sup.3-1], 294-297 (2005).
- Tashiro M., Minohara S., Yusa K., Sakurai H., Kanai T., Kanai T., Nkano. T.: Three-dimensional quantification of respiratory organ-motion for precise heavy-ion therapy. Proc. 7th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 29-30 (2005)
- Terasawa K., Doke T., Matsumoto H., Miuchi K., Nagayoshi T., Sasaki S., Tawara H.: Space dosimetry with a tissue equivalent position sensitive proportional counter. Space Util. Res. 21, 266-269 (2005).
- Uesugi T.H., Furukawa T., Shibuya S., Noda K.: Study of beam injection at HIMAC synchrotron. Proc. 7th Symp. Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 27-28 (2005).
- Uesugi T.H., Furukawa T., Shibuya S., Yoshida K., Noda K.: Study of beam-loss due to characteristics of injected beam at HIMAC synchrotron. Proc. 2nd Annual Meeting of Part. Accel. Society of Japan, Tosu, 675-677 (2005).
- 岡田裕樹、大澤大輔、佐藤幸夫、曾我文宣：15.0 MeV/u  $\alpha$  粒子衝突における水分子からの低速二次電子計測、Proc. 7th Symp. Accel. and Related Technol. for Application, Tokyo, 47-50 (2005).
- 加瀬優紀、金井達明、岡本裕之、古澤佳也、松本孔貴、浅羽徹：重粒子線の生物効果と microdosimerty 測定と比較、Proc. 7th Symp. Accel. and Related Technol. for Application, 33-34 (2005).
- 小平聡、浅枝真行、奥平修、梶原延浩、小林正規、櫻井邦朋、道家忠義、長谷部信行、晴山慎、宮地孝、山下直之、安田仲宏：宇宙線重核中の同位体観測のための検出器開発、平成 16 年度大気球シンポジウム報告集、158-161 (2005).
- 武井友昭、宇野隆之、取越正己、遊佐顕、金井達明、大野由美子：薄型多層電離箱の開発、Jpn. J. Med. Phys. 25 [Sup.2], 211-212 (2005).
- Fujii M., Kuraza G., Nakamura Y., Hasebe N., Kobayashi M., Kobayashi S., Miyachi T., Miyajima M., Yamashita N.: Radiation detectors based on acoustic methods using piezoelectric PZT elements, Proc. of the 20th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK, 206-216 (2006).
- Furukawa T., Torikoshi M., Noda K., Sato S., Katsumata M., Shiraishi T., Shimojyu T., Kanai T., Takada E., Yamada S.: Development toward turn-key beam delivery for therapeutic operation at HIMAC. Proc. 10th European Particle Accel. Conf., Edinburgh, 2325-2327 (2006).
- Furukawa T., Noda K., Sato S., Shibuya S., Torikoshi M., Takada E., Yamada S.: Study of scatterer method to compensate asymmetric distribution of slowly extracted beam at HIMAC synchrotron. Proc. 10th European Particle Accel. Conf., Edinburgh, 2322-2324. (2006).
- Koba Y., Imamura M., Koba N., Ohkawa H., Shimazu T., Kaneko M., Yamashita Y., Iwamoto H., Hukuda H., Uozumi Y., Wakabayashi G., Ikeda N., Kin T., Hohara S., Matsufuji N.: Light Output Response of GSO(Ce) Crystal to Intermediate-energy Heavy-charged Particles. Proc. of the 20th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK, 161-166 (2006).
- Kodaira S., Hasebe N., Doke T., Hareyama M., Sakurai K., i Asaeda M., Ota S., Yasuda N., Tawara H., Ogura K.: High performance particle detection system for trans iron isotopes in galactic cosmic rays. J. Phys. Conf. Series, 31, 221-222 (2006).
- Komaki K.: Crystal assisted atomic physics experiments using heavy ions. Photonic, Electronic and Atomic Collisions 548 (2006).
- Komori M., Kanai T., Kanematsu N., Takei Y., Yonai S., Koikegami H.: Design of a Ridge Filter for Carbon Ion Radiotherapy. Jpn. J. Med. Phys. 26 [Sup.3] 127-128 (2006).
- Kuge K., Hayashi K., Endo Y., Yasuda N., Fukushima C., Shibuya H., Hasegawa A., Kumagai H.: Nuclear charge identification of nuclear fragments formed by accelerated heavy ion beam reaction using hybrid system of silver halide photography and CR-39 plastic track detector. International Congress of Imaging Sciences 65-68 (2006).
- Magara T., Kameoka S., Iwai G., Suda T., Maeda K., Kanazawa M., Maruyama K.: A critical selection of fragmentation models for carbon beam therapy. World Congress 2006, Seoul (2006).
- Magara T., Ikeda T., Maruyama K.: An evaluation of carbon beam attenuation using

- inhomogeneous layered phantoms: comparison with the present method using a water phantom. 48th ASTRO Annual Meeting, Philadelphia (2006).
- Matsumoto H., Kawakami H., Terasawa K., Doke T., Goka T., Zhao Z., Song Q., Ye B., Ni H., Ferguson I., Howorth J., Nozaki T., Uchihori Y.: A 52 mm cubic scintillating fiber camera with 75mm $\Phi$  gated-image intensifier as a dosimeter in space. Proc. of SPIE 6294, 62940Y-1-8 (2006).
- Matsuta K., Nagatomo T., Ozawa A., Mihara M., Matsumiya R., Yamada K., Yamaguchi T., Ohtsubo T., Momota S., Izumikawa T., Sumikama T., Nakashima Y., Fujiwara H., Kumashiro S., Ota M., Shinojima D., Tanaka H., Yasuno T., Nakajima S., Suzuki T., Yoshida K., Muranaka K., Maemura T., Chiba A., Utsuno Y., Fukuda M., Tanaka K., Kitagawa A., Torikoshi M., Kanazawa M., Sato S., Takechi M., Miyake T., Ogura M., Tanihata I., Nojiri Y., Minamisono K., Minamisono T., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Nuclear structure study through nuclear moments of mirror pairs. Proc. 6 th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, Shanghai, AIP Conf. Proc. 865, 153-158 (2006).
- Nagayoshi T., Terasawa K., Matsumoto H., Doke T., Miuchi K., Sasaki S., Tawara H.: Development of position-sensitive tissue equivalent proportional counter. Proc. of the 20th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK, 1-7 (2006).
- Nagayoshi T., Fujita Y., Kikuchi J.: Heavy ion irradiation test of a micro pixel chamber. Proc. of the 20th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK (2006).
- Noda K., Fujisawa T., Furukawa T., Iwata Y., Kanai T., Kanazawa M., Kanematsu N., Kitagawa A., Kobayashi Y., Komori M., Minohara S., Murakami T., Muramatsu M., Sato S., Takada E., Torikoshi M., Yoshida K., Yamada S., Sato Y., Tashiro M., Yusa K., Kobayashi C., Shibuya S., Takahashi O., Tsubuku H.: Development for new carbon cancer-therapy facility and future plan of HIMAC. Proc. 10th European Particle Accel. Conf., Edinburgh, 955-957 (2006).
- Sasaki Y., Matsumoto H., Nakamura T., Goka T.: Development of technical data acquisition equipment on board GOSAT, 電子情報通信学会 2006 年総合大会講演, SE-40-41 (2006).
- Sato S., Furukawa T., Noda K.: Development of intensity control system with RF-knockout extraction at the HIMAC synchrotron. Proc. 10th European Particle Accel. Conf., Edinburgh, 2331-2333 (2006).
- Syresin E., Noda K., Shibuya S., Uesugi T.: Numerical and experimental study of cooling-stacking injection in HIMAC synchrotron. Proc. 10th European Particle Accel. Conf., Edinburgh, 2907-2909 (2006).
- Terasawa K., Doke T., Fujita Y., Komiyama T., Matsumoto H., Miuchi K., Nagayoshi T., Nishimura H., Sasaki S., Takada A., Tawara H. and Uchihori Y.: Space dosimetry with a tissue equivalent position sensitive proportional counter II. Space Util. Res. 22, 313-316 (2006).
- Wind M., Beck P., Bock F., Böck H., Rollet S., Uchihori Y.: TEPC measurements and simulation of heavy ion exposure. Conf.Proc., Second European IRPA Congress on Radiation Protection, Paris (2006).
- Yonai S., Komori M., Kanematsu N., Kanai T., Takei Y., Takahashi O., Tashiro M., Koikegami H., Tomita H.: Irradiation field formation using an amplitude modulation wobbler system for heavy-ion radiotherapy. Jpn. J. Med. Phys. 26 [Sup.3] 119-120 (2006).
- 稲庭拓、山形文子、河野俊之、富谷武浩、浦壁恵理子、佐藤眞二、金澤光隆、金井達明: 入射核破砕反応を利用した飛程推定における Fisher's information を用いた最適核種の定量的決定. 第 91 回日本医学物理学学会大会報文集 235-236 (2006).
- 稲庭拓、山形文子、河野俊之、富谷武浩、浦壁恵理子、佐藤眞二、金澤光隆、金井達明: 重粒子線治療時に生じる陽電子崩壊核を利用した照射野および線量分布の確認. 第 92 回日本医学物理学学会学術大会報文集, 125-126 (2006).
- 橋本浩利、大澤大輔、佐藤幸夫:  $\alpha$  粒子の水中におけるトラック構造の研究、第 8 回応用加速器・関連技術研究シンポジウム ARTA 2006、東京工業大学 (2006).
- 高田義久、日向 猛、松田博司、堀田健二、小森雅孝、金井達明、河野良介: Bi-material bolus による陽子線・線量分布の平坦化、医学物理 26[Sup3], 137-138 (2006).
- 三好智広、Shevelko V., 佐藤幸夫、野田耕司: 炭素薄膜を通過後の高速多価イオンの励起した nl 状態の評価、Proc. 8th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application 45-48. (2006).
- 山下真一、勝村庸介、林銘章、室屋裕佐、宮崎豊明、Jintana Meesungnoen、Jean-Paul Jay-Gerin、村上健: メチルビオローゲン/ギ酸水溶液の重イオン照射 -実験とモンテカルロ計算の比較-、「イオンビーム誘起放射線化学」研究会、東京、23-28 (2006).

- 山形文子、稲庭拓、河野俊之、富谷武浩、浦壁恵理子、佐藤眞二、金澤光隆、金井達明: 入射核破碎反応により生成された陽電子崩壊核を利用した飛程および線量分布の推定. 第 91 回日本医学物理学会大会報文集 233-234 (2006).
- 山形文子、稲庭拓、河野俊之、富谷武浩、浦壁恵理子、佐藤眞二、金澤光隆、金井達明: 入射核破碎反応により生じる陽電子崩壊核を用いた照射野確認法の研究. Proc. 8th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application 71-72 (2006).
- 山形文子、稲庭 拓、河野俊之、富谷武浩、佐藤眞二、金澤光隆、金井達明: 入射核破碎反応により生成される陽電子崩壊核を用いた不均質標的に対する飛程の推定. 第 92 回日本医学物理学会学術大会報文集, 123-124 (2006).
- 前村尚、小原雅子、松藤成弘、小森雅孝、浦壁恵理子、福村明史、西尾禎治、河野俊之、金井達明: フラグメントの空間分布モデルの研究、第 91 回日本医学物理学会大会報文集 237-238 (2006).
- 前村尚、小原雅子、松藤成弘、小森雅孝、浦壁恵理子、福村明史、西尾禎治、河野俊之、金井達明: 高エネルギーフラグメントの空間分布モデルの研究、Proc. of the 8th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application 65-66 (2006).
- 村石浩、西村克之、阿部慎司、佐藤 斉、富田哲也、安田成臣、横山健一、福井貴之、長谷川智之、丸山浩一、金井達明: 飛程測定法に基づいた重イオン CT システムにおける照射ビームの飛来方向精度の評価: Geant4 によるシミュレーションスタディ、医学物理 26 [Sup.2] 269-270 (2006).
- 村石浩、鈴谷佳子、西村克之、阿部慎司、佐藤 斉、原 秀剛、横山健一、高橋良幸、安田成臣、富田哲也、金井達明: 重イオン CT における空間分解能の補正: Geant4 を用いた多重クーロン散乱によるボケ関数の導出、医学物理 26 [Sup.3] 121-122 (2006).
- 大澤大輔: 高速重イオン衝撃による水蒸気からの二次電子放出、京都大学量子理工学 第 7 回公開シンポジウム招待講演、京都大学 (2006).
- 中西哲也、古川卓司、吉田克久、野田耕司: Slow beam extraction method using a fast Q-magnet assisted by RFKO. 第 3 回日本加速器学会年会、仙台、648-650. (2006).
- 中西哲也、古川卓司、吉田克久、野田耕司: スポットスキニング照射に有効なシンクロトロンからのビーム取り出し法、Proc. 8th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application 73-75 (2006).
- 中川公一、佐藤幸夫、伊古田暢夫: 重粒子(C, Si, Ne, Ar)イオン線照射で生ずるスクロースと L-a-アラニンのラジカルの ESR による詳細解析、「イオンビーム誘起放射線化学」研究会、東京、40-43 (2006).
- 中川清子、田口光正、小嶋拓治、村上 健: アルコール溶媒中ヒドロキシイミド化合物の重イオン照射効果、「イオンビーム誘起放射線化学」研究会、東京、23-28 (2006).
- 鳥飼幸太、野田耕司、渋谷真二: Increase of storage beam intensity by vertical feedback damping in HIMAC. 第 3 回日本加速器学会年会、仙台、157-158. (2006).
- Ishii Y., Kawai H., Kishimoto H., Nakayama H., Tabata M., Tajima Y., Yokogawa H., Yoshida H.: Performance evaluation of Silica Aerogel Cherenkov counters with  $n > 1.08$ . 2007 IEEE Nuclear Science Symposium N15-261, Hawaii, 663-665 (2007).
- Koba Y., Wakabayashi G., Imamura M., Uozumi Y., Koba N., Iwamoto H., Ohkawa H., Shimazu T., Matsufuji N., Evtoukhovitch P., Kalinnikov V., Khomutov N., Kuchinskii N., Moiseenko A., Mzavia D., Samoilov V., Tsamalaidze Z.: Light Output Response of LYSO(Ce) Crystal to Relativistic Helium and Carbon Ions. 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2303-2306 (2007).
- Kodaira S., Doke T., Hareyama M., Hasebe N., Miyachi T., Miyajima M., Okudaira O., Sakurai K., Takano M., Torii S., Yamashita N., Yasuda N., Tawara H., Nakamura S., Ogura K., Shibuya H.: Development of high performance particle detection system for ultra-heavy nuclei in galactic cosmic rays. Proc. of the Int. Workshop on Cosmic-Rays and High Energy Universe, 183-186 (2007).
- Maruyama K., Kawabata T., Mukai K., Magara T., Kanazawa M., Maeda K.: Analysis of the factors that disturb dose concentration in carbon beam therapy. Ion Beams in Biology and Medicine, Heidelberg, (2007).
- Matsuta K., Nagatomo T., Mihara M., Matsumiya R., Momota S., Ohtsubo T., Izumikawa T., Hirano H., Takahashi S., Kitagawa A., Torikoshi M., Kanazawa M., Fukuda M., Minamisono T., Ozawa A., Yamada K., Suzuki T., Yamaguchi T., Nakajima S., Sumikama T., Tanaka K., Yoshida K., Nakashima Y., Fujiwara H., Kumashiro S., Ota M., Shinojima D., Tanaka H., Yasuno T., Muranaka K.,

- Maemura T., Chiba A., Pahlovy S.A., Nagao M., Tanihata I., Minamisono K., Nojiri Y., Alonso J.R., Krebs G.F., Symons T.J.M.: Polarization and Momentum Distribution of  $^{23}\text{Ne}$  and  $^{25}\text{Al}$  Produced in One Nucleon Pickup Reactions at 100 A MeV. Proc. 17 th Int. Spin Physics Symposium, 2-7 Oct. 2-7, 2006, Kyoto:AIP Conf. Proc. 915, 837-840 (2007).
- Menjo H., et al.: The performance of the LHCf detector, 30th Int. Cosmic Ray Conf., icrc0981 (2007).
- Menjo H., et al.: Status of the LHCf experiment, 30th Int. Cosmic Ray Conf., icrc0982 (2007).
- Momota S., Kanazawa M., Kitagawa A., Sato S., Nojiri Y.: Target effect on fragmentation reactions at  $E = 290\text{A MeV}$ . The European Physical Journal Spec. Topics 150, 315-316 (2007).
- Muraishi H., Nishimura K., Abe S., Satoh H., Takahashi Y., Hara H., Hara S., Kawai R., Yokoyama K., Yasuda N., Tomida T., Ohno Y., Kanai T.: Heavy Ion CT System based on the measurement of residual range distribution: improvement of the optical detector system. IEEE Conf. 2007 -Medical Imaging Conf., Hawaii, 5 (2007).
- Nakano Y., Masugi S., Muranaka T., Azuma T., Kondo C., Hatakeyama A., Komaki K., Yamazaki Y., Takada E., Murakami T.: Doubly-resonant coherent excitation of HCI planar channeled in a Si crystal, J. Phys. Conf. Ser. 58, 359-362 (2007).
- Sakama M., Kanai T., Fukumura A.: Comparisons of graphite calorimetry and ionometric measurements in absolute dosimetry, 第9回応用加速器・関連技術研究シンポジウム, 東京 (2007).
- Sasaki S., Sanami T., Saito K., Iijima H. Tawara K., Murakami T.: Energy dependence of W-values for heavy charged particles in gases. IEEE Nucl Sci.Symp. Hawaii, (2007).
- Sasaki Y., Matsumoto H., Goka T., Nakamura T., Terasawa K., Kitamura H.: Technical data acquisition equipment for GOSAT, 30th Int. Cosmic Ray Conference (2007).
- Takada Y., Himukai T., Hotta K., Kohno R., Komori M., Kanai T.: Bi-material range compensator for improving dose uniformity for proton therapy. Proc. of PTCOG46, China, 18 (2007).
- Wakabayashi G., Koba Y., Imamura M., Uozumi Y., Koba N., Shimazu T., Kaneko M., Ohkawa H., Ikeda N., Kin T., and Matsufuji N.: Light Output Response of GSO(Ce) Crystals to Relativistic Carbon Ions. 2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 1175-1177 (2007).
- Yonai S., Kanematsu N., Kanai T., Komori M., Takei Y., Koikegami H., Tomita H.: Development of monitor unit calculation for heavy-ion radiotherapy, Jpn. J. Med. Phys. 27 [Sup.2], 149-150 (2007).
- Yonai S., Kanematsu N., Kanai T., Komori M., Takei Y., Koikegami H., Tomita H.: Verification of monitor unit calculation for heavy-ion radiotherapy on field-size dependence, Jpn. J. Med. Phys. 27 [Sup.4], 121-122 (2007).
- 加瀬優紀、松藤成弘、金井達明、古澤佳也: 高エネルギー重粒子線におけるトラック構造を用いた生物物理モデルの検証, 第9回応用加速器・関連技術研究シンポジウム, 東京, Proc. of ARTA 2007, 43-46 (2007).
- 高橋良幸、阿部慎司、西村克之、佐藤 斉、原秀剛、原 敏、村石 浩、横山健一、安田成臣、富田哲也、大野由美子、金井達明: 高速重イオンCTの画質向上: wavelet 変換によるノイズ除去、Jpn. J. Med. Phys. 27, 94-95 (2007).
- 高橋良幸、阿部慎司、西村克之、佐藤 斉、原 秀剛、村石 浩、横山健一、安田成臣、富田哲也、大野由美子、金井達明: 高速重イオンCTの画質向上: CCDの感度補正と wavelet 変換によるノイズ除、Jpn. J. Med. Phys. 27, 139-140 (2007).
- 高田義久、日向 猛、松田博司、堀田健二、金井達明、小森雅孝、河野良介: Wobbler 法における Bolus 通過後の陽子線の水中における水中での線量計算モデル, 医学物理 27[Sup.2], 145-146, (2007).
- 今川邦樹、山形文子、稲庭 拓、河野俊之、富谷武浩、佐藤真二、金澤光隆、金井達明: 重粒子線入射時における2層標的に対する飛程と線量分布の推定. 第93回日本医学物理学会大会報文集、163-164 (2007).
- 今川邦樹、河野俊之、山形文子、稲庭 拓、富谷武浩、佐藤真二、金澤光隆、金井達明: 重粒子線入射時における2層標的に対する飛程と線量分布の推定. Proc. 9th Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, 61-62 (2007).
- 今川邦樹、河野俊之、稲庭 拓、佐藤真二、金井達明: 重粒子線照射時に生じる陽電子崩壊核を利用した2次元照射野確認法. 第94回日本医学物理学会大会報文集、131-132 (2007).
- 坂間誠、金井達明、福村明史: 光子、重粒子線場でのグラフィイトカロリメータによる絶対線量評価、第94回日本医学物理学会大会、



- 新潟 (2007).
- 坂間誠、金井達明、福村明史:重粒子線におけるグラフイトカロリメトリーと電離箱線量測定、第 93 回日本医学物理学大会、神奈川 (2007).
- 松井祐樹、松藤成弘、渡部恵理子、金井達明、河野俊之: 炭素線治療場における中性子線量当量測定、医学物理、27 [Sup.2], 153-154 (2007).
- 松井祐樹、松藤成弘、金井達明、河野俊之: 治療用粒子場における中性子測定と線量当量の評価、Proc. 9th Symp. Accel. and Related Technol. for Application, 63-64 (2007).
- 松井祐樹、松藤成弘、金井達明、河野俊之: 治療ビームによる中性子線量当量の角度・距離依存性、医学物理、27 [Sup.4], 127-128 (2007).
- 清道明男、中川秀利、富澤正人、安達利一、染谷宏彦、佐藤皓、市川武、持木幸一、野田耕司: J-PARC に向けた DSP を利用したスピルフィードバックに関する研究、日本加速器学会年会・リニアック技術研究会、4, 410-412 (2007).
- 西潟修一、松藤成弘、河野俊之、金井達明、稲庭 拓、小森雅孝、福村明史、今川邦樹、都築大吾、松井祐樹: 高エネルギー炭素線より発生するフラグメントの広がりに関する研究、Proceedings of the 9th Symposium on Accel. and Related Technol. for Application, 41-42 (2007).
- 村石浩、西村克之、阿部慎司、佐藤 齊、高橋良幸、原 敏、原秀剛、河井梨恵、横山健一、安田成臣、富田哲也、大野由美子、金井達明: 飛程測定法による重イオン線 C T の開発: 光学系システムの改良、Jpn. J. Med. Phys. 27, 92-93 (2007).
- 村石浩、西村克之、阿部慎司、佐藤 齊、原 秀剛、高橋良幸、鈴谷佳子、横山健一、安田成臣、富田哲也、大野由美子、金井達明、重イオン C T における空間分解能の補正: ウィナーフィルタを考慮に入れた FDR 法の適用、Jpn. J. Med. Phys. 27, 141-142 (2007).
- 中西哲也、古川卓司、野田耕司: 高速四極電磁石と RFKO を使ったビーム取り出し法のビーム特性、Proc. Symp. on Accel. and Related Technol. for Application, 35-36 (2007).
- 富澤正人、安達利一、野田耕司、その他: J-PARC メインリングからの遅い取り出し設計と開発、日本加速器学会年会・リニアック技術研究会、4, 91-93、(2007).
- 米内俊祐: 炭素線治療における二次中性子の評価、第 7 回重粒子医科学センターシンポジウム、千葉、(2007).
- Furukawa T., Inaniwa T., Sato S., Saotome N., Takei Y., Iwata Y., Nagano A., Mori S., Minohara S., Shirai T., Murakami T., Takada E., Noda T. Kanai K.: Development of Scanning System at HIMAC. Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 1794-1796 (2008).
- Hayato A., Tamagawa T., Abe K., Nakamura S., Takanori I., Harayama A., Makishima K., Yasuda N., Kitamura H., Sakurai H., Tokanai. F.: Heavy ion irradiation test to gas electron multipliers, Proc. of SPIE 7011, 70113W-1 (2008).
- Iwata Y., Furukawa T., Noda K., Shirai T., Takada E., Kadowaki T., Sano Y., Uchiyama H.: Update of an Accelerator Control System for the New Treatment Facility at HIMAC. Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 1800-1802 (2008).
- Kanazawa M., Watanabe K., Maeda K.: Beam Test with a New Control System of Acceleration in HIMAC. Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 1538-1540 (2008).
- Kase Y., Kanai T., Sakama M., Okabe H., Nose H., Okamoto H., Ishizaki A., Abe K., Saotome N., Matsufuji N.: Microdosimetry for a Biological Dose Estimation in Therapeutic Carbon-ion Beams. The 5th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Jeju (2008).
- Kawabata T., Mukai K., Kanazawa M., Sasaki T., Tanaka S., Saito A., Kimura A., Maruyama K.: Evaluation of dose distribution profiles for carbon-beam therapy by theoretical fragmentation models using gMocren-Geant4 visualization toolkit. The 5th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics(Jeju, Korea), 10-12,(2008).
- Kawai R., Muraishi H., Nishimura K., Abe S., Satoh H., Hara S., Hara H., Takahashi Y., Mogaki T., Yasuda N., Maruyama K., Ohno Y., Kanai T.: Spatial Resolution of Heavy Ion CT System Based on the Measurement of Residual Range Distribution. The 5th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Jeju, Korea (2008).
- Koba Y., Imamura M., Shimazu T., Iwamoto H., Wakabayashi G., Uozumi Y., Matsufuji, N.: Light Output Characteristic of Inorganic Scintillators to Intermediate-energy Charged Particles. J. Nucl. Sci. Technol. [Sup.5], Proc. of the Fourth International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology, 470-476 (2008).
- Koba Y., Tsamalaidze Z., Evtoukhovitch P., Imamura M., Kalinnikov V., Kallies W., Khomutov N., Kuchinski N., Moiseenko A.,

- Mzavia D., Samoilov V., Fukahori T., Kiyohara K., Uozumi Y., Wakabayashi G.: Study of a New Crystal Array Detector to Measure Double Differential Cross Sections of Proton-actinide Reactions in 600-MeV Region. Proc of the 2007 Symposium on Nuclear Data, JAEA-Conf 2008-008, 68-73 (2008).
- Koba Y., Wakabayashi G., Uozumi Y., Imamura M., Iwamoto H., Fukui Y., Tonohata N., Morimoto Y., Kiyohara K., Matsufuji N., Evtoukhovitch P., Kalinnikov V., Khomutov N., Kuchinskii N., Moiseenko A., Samoilov V., Tsamalaizde Z., Mzavia A.: A New Detector System for the Measurement of Double Differential Cross Sections of Proton-Actinide Reactions in the 600-MeV Region. 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 1021-1024 (2008).
- Koba Y., Tsamalaizde Z., Evtoukhovitch P., Imamura M., Iwamoto H., Kalinnikov V., Kallies W., Khomutov N., Kuchinski N., Moiseenko A., Mzavia D., Samoilov V., Uozumi Y., Wakabayashi G.: Study of a New Crystal Array Detector to Measure Double Differential Cross Sections of Proton-actinide Reactions in 600-MeV Region. Proc. of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007 (ND 2007), 1031-1034 (2008).
- Matsufuji N., Yonai S., Matsui Y., Matsushita K., Kohno T. Kanai T.: Proc. Measurement of Neutron Dose Distribution during Charged Particle Radiotherapy (2008).
- Matsushita K., Matsui Y., Matsufuji N., Yonai S., Kanai T., Kohno T.: Feasibility study to estimate neutron energy distribution in hadron therapy by activation method, The Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, 142 (2008).
- Matsushita K., Matsui Y., Matsufuji N., Yonai S., Kanai T., Kohno T.: Feasibility study to estimate neutron energy distribution in hadron therapy by activation method, 第 96 回日本医学物理学会学術大会、韓国・済州島 (2008).
- Mogaki T., Hara S., Abe S., Nishimura K., Sato H., Muraishi H., Hara H., Kawai R., Takahashi Y., Yasuda N., Ohno Y., Kanai T.: Improvement of Image Quality of Heavy Ion CT -Correction of Beam Intensity Fluctuation-. The 5th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Jeju, Korea (2008).
- Morev M., Ogawa T., Shimada T., Shimada K., Suzuki C., Zhiping L., Hirota M., Abe T., Koike Y., Iimoto T., Kosako T.: An experimental study of spatial distribution of induced activity in concrete exposed to high-energy neutrons. GCOE International Symposium "Key to the Future - Energy, Security and Nuclear Education and Research". The University of Tokyo, 253-258 (2008).
- Noda K., Furukawa T., Inaniwa T., Iwata Y., Kanai T., Kanazawa M., Minohara S., Mori S., Murakami T., Sato S., Shirai T., Takada E., Takei Y., Torikoshi M., Fujimoto T., Miyoshi T., Sano Y.: New Heavy-Ion Cancer Treatment Facility at HIMAC. Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 1818-1820 (2008).
- Sakama M., Kanai T., Fukumura K. Abe A.: Evaluation of the W values for Ionization Chamber Dosimetry in Therapeutic Carbon Beams. The 5th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics, Jeju, Korea (2008).
- Sakama M., Kanai T., Fukumura A., Abe K.: Sophistication of ionization chamber dosimetry using the calorimetry in high-energy heavy-ion fields, 第 10 回応用加速器・関連技術研究シンポジウム, 東京(2008).
- Saotome N., Furukawa T., Inaniwa T., Sato S., Noda T. Kanai K.: Development of 3D Dose Verification System for Scanned Ion Beam at HIMAC. Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 1830-1832 (2008).
- Takada Y., Himukai T., Hotta K., Hara Y.: Fast Calculation Method of Dose Distribution in Water Formed by Protons Traversing a Range Compensator in a Beam-Wobbling Method for Proton Therapy. Proc. of the 5th Korea- Japan Joint Meeting on Medical Physics, held in Jeju, Korea, Sept.10-12, SS3-R1-5, 119 (2008).
- Takikawa T., Nishikata S., Matsufuji N., Kohno T., Kanai T., and Matsushita K.: Angular Distributions of Secondary Particles Generated through Fragmentation Reactions of Carbon Ions. Proc. 10th Symp. Accel. and Related Technol. for Application, 93-96 (2008).
- Terasawa K., Doke T., Fujita Y., Ishida K., Kikuchi J., Kitamura H., Komiyama T., Kubo H., Matsumoto H., Miuchi K., Nagayoshi T., Nishimura H., Saito K., Sasaki S., Takada A., Tanimori T., Tawara H. and Uchihori Y.: Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) and Establishment of Dosimetric Technique in the International Space Station (ISS) with PS-TEPC", Space Util. Res. 24, 322-325 (2008).
- 加瀬優紀、坂間誠、岡本裕之、石崎梓、阿部杏子、岡部博、早乙女直也、松藤成弘、金井達明：重粒子線の臨床線量推定のための比例計数管を用いた線質測定、第 10 回応用加速器・関連技術研究シンポジウム、東京、Proc. 10th Symp. Accel. and Related Technol. for Application, 37-38 (2008).
- 河井梨恵、村石浩、西村克之、阿部慎司、佐

- 藤斉、原秀剛、原 敏、高橋良幸、大野由美子、金井達明：飛程測定法による重イオンCTの開発：多重クーロン散乱によるボケの効果の検証、日本医学物理学会第95回大会、横浜、2008.4. Jap. J. Med. Phys. 28, 297-298 (2008).
- 歳藤利行：医療用炭素ビームの核破碎反応、日本写真学会誌 71, 248 (2008).
- 松下郁、松井祐樹、松藤成弘、米内俊祐、金井達明、河野俊之：粒子線治療場における二次中性子空間分布の測定、第10回応用加速器・関連技術研究シンポジウム、Proc. of the Tenth Symposium Accelerator and Related Technology for Application, 89-92 (2008).
- 松藤成弘、米内俊祐、松井祐樹、松下郁、河野俊之、金井達明：陽子線、重粒子線治療での中性子被曝評価、第55回応用物理学会(2008).
- 村石浩、河井梨恵、西村克之、阿部慎司、佐藤 斉、原 敏、原秀剛、茂垣達也、大野由美子、金井達明：“増感紙－CCD カメラシステムによる重粒子CTの検討：空間分解能の定量評価”，日本放射線腫瘍学会第21回学術大会、札幌、2008年10月[日本放射線腫瘍学会報文集、Jpn. J. Med. Phys. 20 [Sup.1], 268 (2008).
- Iitsuka M., Tomori S., Mukai K., Kawabata T., Kanazawa M., Inaniwa T., Maruyama K.: Experimental and theoretical studies of the carbon-beam profile variations in phantom for cancer treatment planning. 9th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, Chiang Mai, Thailand, (2009).
- Morev M., Ogawa T., Kosako T.: An implementation of internal efficiency calibration method for  $\gamma$ -ray spectrometry analysis of activated samples. Proceedings of the Second anniversary symposium of GoNERI's Foundation, 157-162 (2009).
- Morev M., Ogawa T., Cooper A., Shimada K., Suzuki C., Ngoc L.T., Hirota M., Abe T., Koike Y., Iimoto T., Kosako T.: Activation of ion accelerator facilities, 2nd Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology, (Digital copy only) (2009).
- Muraishi H., Mogaki T., Abe S., Satoh H., Hara S., Hara H., Miyake S., Takahashi Y., Yasuda N., Himukai T.: Fundamental study on heavy ion CT based on the measurement of residual range distribution in HIMAC. The Inaugural Sydney International Workshop on Synergies in Astronomy and Medicine (Sydney, Australia), (2009).
- Nakajima Y., Tsuruta Y., Kohno T., Sato S., Inaniwa T., Yoshida E., Yamaya T.: Analysis on the distribution of positron annihilation g-ray with PET measurement to estimate dose distribution in the target irradiated with heavy ions. Proceedings of the 11th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 47-48 (2009).
- Nakano Y., Inoue T., Azuma T., Hatakeyama A., Nakai Y., Komaki K., Yamazaki Y., Takada E., Murakami T.: Resonant coherent excitation of Li-like  $\text{Ar}^{15+}$  ions in a thin Si crystal. J. Phys. Conf. Ser. 163, 012094 (2009).
- Nishikido F., Yazaki Y., Osada H., Inadama N., Inaniwa T., Satoh S., Shibuya K., Yoshida E., Yamaya T., Murayama H.: Influence of secondary particles from heavy ion irradiation to in-beam OpenPET detectors. Conf. Rec. 2009 IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imag. Conf. J04-5 (2009).
- Ogasawara K., Asamura K., Takashima T., Saito Y., Mukai T.: Development of a measurement technique for medium-energy electrons. AIP Conference Proceedings, 1144, 183-191 (2009).
- Ogawa T., Morev M., Kosako T., Hirota M., Abe T., Koike Yu., Iimoto T., Kosako T.: Validation of accelerator oriented activation estimation method, Poster session proceedings of the Second anniversary symposium of GoNERI's Foundation, 165-167 (2009).
- Ogawa T., Morev M., Hirota M., Abe T., Koike Y., Iwai S., Iimoto T., Kosako T.: Activation of electron accelerator facilities, 2nd Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology, (Digital copy only) (2009).
- Saotome N., Furukawa T., Iwata Y., Shirai T., Inaniwa T., Satou S., Nagano A., Takeshita E., Kanai T., Noda K.: Development of Screen Beam-Profile-Monitor System for High-Energy Beam-Transport Line at the HIMAC. Proceedings of the Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 11, 35-36 (2009).
- Satou S., Inaniwa T., Shirai T., Mizushima K., Noda K.: Development of Scanning System at HIMAC. Proceedings of the Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 11, 33-34 (2009).
- Terasawa K., Doke T., Fujita Y., Ishida K., Kikuchi J., Kitamura H., Komiyama T., Kubo H., Matsumoto H., Miuchi K., Nagayoshi T., Nishimura H., Saito K., Sasaki S., Takada A., Tanimori T., Tawara H., Uchihori Y.: Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) for space dosimetry. Space Util. Res. 25, 57-60 (2009).

- Tsuruta Y., Nakajima Y., Kohno T., Inaniwa T., Sato S.: Utilization of CT data for the range estimation in the heterogeneous material using autoactivation of heavy-ion beams. Proceedings of the 11th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 45-46 (2009).
- 遠藤暁、高田真志、田中浩基、鬼塚昌彦、田中憲一、宮原信幸、星正治、石川正純、木村真三、静岡清：炭素 SOBP ビームおよび生成フラグメント粒子のマイクロドシメトリ、Jpn. J. Med. Phys. 29 [Sup.2], 133-134 (2009).
- 錦戸文彦、矢崎祐次郎、長田拓人、稲玉直子、稲庭拓、佐藤眞二、澁谷憲悟、吉田英治、山谷泰賀、村山秀雄：オンラインモニタリング OpenPET 用検出器の重粒子線照射からの影響、医学物理、第 29 巻 [Sup.3], 112-113 (2009).
- 原 敏、西村克之、茂垣達也、阿部慎司、佐藤 斉、村石 浩、原 秀剛、河井梨恵、大野由美子、金井達明：飛程測定法による重イオン CT の開発：確率論を用いた画像再構成手法、Jpn. J. Med. Phys. 29, 289-290 (2009).
- 原洋介、高田義久、日向 猛、堀田健二、赤坂浩亮、木村太亮、丹正亮平、二瓶哲哉：Bolos が炭素線の線量分布に及ぼす影響、医学物理 29 巻 [Sup.2], 148-149, (2009).
- 中村尚司、保田浩志、矢島千秋、他：宇宙船内における中性子線被ばく評価のための開発研究. Space Util. Res. 25, 51-54 (2009).
- 津田修一、佐藤達彦、岩瀬広、波戸芳仁、佐々木慎一：Evaluation of delta-rays production in a wall-less tissue equivalent proportional counter irradiated by energetic heavy ion beams、第 16 回 EGS 研究会プロシーディング、90-95 (2009).
- 二瓶哲哉、高田義久、堀田健二、原洋介、赤坂浩亮、木村太亮、丹正亮平、日向 猛：Bolos を通過した陽子線が作る線量分布の高速計算法の開発 (Wobbler 法)、医学物理 29 [Sup.3], 37-38 (2009).
- 保田浩志、矢島千秋、高田真志他：宇宙で用いるサーベイメータ型放射線モニタの開発. Space Util. Res. 25, 55-56 (2009).
- 保田浩志、矢島千秋、高田真志、中村尚司、福田光宏、佐藤達彦、長沼毅、大西武雄：宇宙探査用放射線サーベイメータの開発. Space Util. Res. 26, 239-240 (2009).
- 茂垣達也、阿部慎司、西村克之、佐藤 斉、村石 浩、原秀剛、原 敏、河井梨恵、大野由美子、金井達明：Geant4 モンテカルロシミュレーションによる残留飛程測定に基づく重イオン CT の基礎、Jpn. J. Med. Phys. 29, 287-288 (2009).
- Bilski P., Berger T., Körner C., Matthä D., Hajek M., Pálfalvi J.K., Horwacik T., Hager L., Tanner R., Burmeister S., Labrenz J., Puchalska M., Sihver L., Reitz G.: HAMLET: Ground based verification of the MATROSHKA facility: results from the experiments at HIMAC and GSI. 15th Workshop for Radiation Monitoring onboard the ISS (WRMISS) 2010 meeting in September 2010, Frascati, Germany (2010).
- Bilski P., Berger T., Hajek M., Reitz G.: Comparison of the response of various TLDs to cosmic radiation and ion beams: current results of the HAMLET project. 16th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD), Sydney (2010).
- Bilski P.: Response of thermoluminescent detectors to space radiation and accelerator ions. 16th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD), Sydney (2010).
- Fukuda M., Takechi M., Nishimura D., Mihara M., Matsumiya R., Matsuta K., Minamisono T., Ohtsubo T., Ohkuma Y., Shimbara Y., Suzuki S., Watanabe R., Izumikawa T., Momota S., Suzuki T., Yamaguchi T., Kuboki T., Hachiuma I., Namihira K., Nakajima S., Kobayashi K., Sumikama T., Miyashita Y., Yoshinaga K., Tanaka K., Aoi N., Fukuda N., Inabe N., Kameda D., Kubo T., Kusaka K., Lantz M., Ohnishi T., Ohtake M., Suda T., Takeda H., Yanagisawa Y., Yoshida A., Yoshida K., Ozawa A., Moriguchi T., Ohishi H., Itoh Y., Ishibashi Y., Ogawa K., Yasuda Y., Geissel H., Winkler M., Sato S., Kanazawa M., Kitagawa A.: Reaction cross section studies at NIRS and RIBF. AIP Conf. Proc. 1238, 270-273 (2010).
- Furukawa T., Inaniwa T., Sato S., Shirai T., Takei Y., Takeshita E., Mizushima K., Iwata Y., Himukai T., Mori S., Fukuda S., Minohara S., Murakami T., Noda K.: Fast raster scanning system for HIMAC new treatment facility. Proc. IPAC'10, 76-78 (2010).
- Higashio N., Sasaki S., Doke T., Komiyama T., Terasawa K., Tawara H., Saito K., Takahashi K., Miuchi K., Matsumoto H., Kubo H., Tanimori T., Nagayoshi T., Fujita Y., Takeuchi K., Kikuchi J., Uchihori Y., Kitamura H.: Present status of position-sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC). KEK Proc. 2010-10, 172-177 (2010).
- Horwacik T., Bilski P., Körner C., Facius R., Berger T., Nowak T., Reitz G., Olko P.: Determination of nuclear tracks parameters on sequentially etched PADC detectors. 38th

- Scientific Assembly of the Committee on space research (COSPAR) 2010 meeting, Bremen, Germany (2010).
- Iwata Y., Furukawa T., Mizushima K., Noda K., Shirai T., Takeshita E., Takada E., Fujimoto T., Kadowaki T., Sano Y., Uchiyama H.: Multiple-energy operation with quasi-DC extension of flattops at HIMAC. Proc. IPAC'10, 79-81 (2010).
- Kanai T., Matsufuji N., Kase Y., Inaniwa T., Sakama M., Yusa K.: Design of Spread-Out Bragg Peak for passive irradiation system of carbon therapy. Jpn. J. Med. Phys. 30 [Sup.2] 138-139 (2010).
- Katagiri K., Furukawa T., Takeshita E., Noda K.: Space charge analysis on the multi-wire proportional chamber for the high rate incident beams. Proc IPAC'10, 942-944 (2010).
- Kokubun M., Nakazawa K., et al.: Hard x-ray imager (HXI) for the ASTRO-H Mission. Proc. SPIE, 7732, 773215 (2010).
- Matsuta K., Zhu S., Mihara M., Zhou D., Nishimura D., Zheng Y., Fukuda M., Yuan D., Matsumiya R., Zuo Y., Komurasaki J., Fan P., Zhang X., Ishikawa D., Suzuki T., Nagatomo T., Izumikawa T., Ohtsubo T., Takahashi S., Hirano H., Shimbara Y., Kubo T., Yamada R., Namiki Y., Nagashima M., Momota S., Ooi K., Nojiri Y., Kameda D., Kitagawa A., Kanazawa M., Torikoshi M., Sato S., Minamisano T., Sumikama T., Ogura M., Akai H., Alonso J.R., Symons T.J.M., Krebs G.F.: Electromagnetic Moments of proton-rich  $^{28}\text{P}$  and decomposition of its spin. AIP Conference Proceedings 1235, 260-264 (2010).
- Miyoshi Y., Ono T., Takashima et al. T.: Geospace Exploration Mission: ERG project. Int. Symp. The Inner Magnetosphere and the Auroral Zone Physics, Russia (2010).
- Mizushima K., Shirai T., Furukawa T., Noda K.: Insensitive method to power supply ripple in resonant slow extraction. Proc. IPAC'10, 3894-3896 (2010).
- Morev M., Ogawa T., Kosako T.: Measurement of radionuclide product yields in iron from 400 A MeV carbon ions. 3rd Joint Int. Symp. on Nuclear Science and Technology (2010).
- Nakajima Y., Tsuruta Y., Kohno T., Sato S., Inaniwa T., Yoshida E., Yamaya T.: Extension to 3D of the method of dose distribution estimation in the target irradiated with heavy-ions beam. Proc. 12th Symp. Accel. and Related Technol. for Application 31-32 (2010).
- Nishikido F., Mitsuhashi T., Inadama N., Inaniwa T., Satoh S., Tashima H., Yoshida E., Murayama H., Yamaya T.: Performance evaluation of an OpenPET Detector for heavy ion therapy under actual in-beam condition. Conf. record of 2010 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conf. M19-75, Knoxville, USA (2010).
- Noda K., Furukawa T., Fukuda S., Inaniwa T., Himukai T., Iwata Y., Kanematsu N., Katagiri K., Kitagawa A., Minohara S., Mori S., Murakami T., Muramatsu M., Sato S., Shirai T., Takada E., Takei Y., Takeshita E., Fujimoto T., Miyoshi T., Sano Y.: New treatment research facility project at HIMAC. Proc. IPAC'10, 1324-1326 (2010).
- Ogawa T., Morev M., Iimoto T., Kosako T.: Measurement and simulation of radionuclide product yields in iron from 400 A MeV carbon ions. 10th meeting of the task force on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities 281-290 (2010).
- Pinsky L., Stoffle N., Leroy C., Gutierrez A., Jakubek, J., Pospisil S.; Kitamura H., Uchihori Y., Yasuda N., Miller J., Zietlin C.: Heavy ion charge and velocity resolution with a Medipix-Based active space radiation dosimeter. Proc. of the IEEE Aerospace Conf. Montana (2010).
- Sakama M., Kanai T., Fukumura A., Kase Y.: Experimental determination of beam quality correction factors in therapeutic carbon ion beams. Proc. Int. Symp. on Standards, Applications and Quality Assurance in Medical Radiation Dosimetry, Vienna (2010).
- Sasaki S., Sanami T., Saito K., Iijima H. Tawara K., Murakami T.: W-values for heavy ions in gases. IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record N13-146 (2010).
- Takashima T.: Japanese exploration missions of planets with strong radiation environments. 9th RASEDA, Takasaki (2010).
- Takashima T., Mitani T., Nishimura K.: High-energy electron instrument for the exploration of the Mercurys Magnetosphere by BepiColombo-MMO. IEEE Nucl. Sci., Knoxville (2010).
- Takashima T., Hirahara M., Mitani T., Kobayashi M., Nishimura K.: Performance of SSSDs under high temperature environment for BepiColombo/MMO mission. IEEE Nucl. Sci., Knoxville (2010).
- Takeshita E., Furukawa T., Iwata Y., Shirai T., Inaniwa T., Sato S., Noda K.: Semi-nondestructive monitoring system for high-energy beam transport line at HIMAC. Proc. IPAC'10, 3218-3220 (2010).
- Terasawa K., Doke T., Higashio N., Kitamura H., Komiyama T., Kubo H., Matsumoto H., Miuchi K., Saito K., Sasaki S., Takahashi K., Tanimori T., Tawara H. and Uchihori Y.: Development of

- Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) and establishment of a technique for space dosimetry on the International Space Station (2009WG report), Space Util. Res. 26, 236-238 (2010).
- Yamauchi T., Mori Y., Oda K., Kodaira S., Yasuda N., Barillon R.: On the tracks of proton and heavy ions in PC and PADC plastic detectors. Proc. of the 20th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses 2010, KEK, 2010-10, 1-11 (2010).
- 磯辺智範、橋本孝之、志田晃一、熊田博明、藤淵俊王、米内俊祐、松藤成弘、袴田敬樹、半村勝浩、福田茂一、榮武二：放射線治療時に発生する2次中性子線のCR-39による簡易測定、医学物理 30 [Sup.5], 148-149 (2010).
- 磯辺智範、橋本孝之、志田晃一、橋井晴子、大川綾子、藤淵俊王、熊田博明、櫻井英幸、榮武二：放射線治療時に発生する中性子線による埋め込み型除細動器(ICD)への影響、医学物理 30 [Sup.2], 109-110 (2010).
- 吉田英治、木内尚子、稲庭拓、佐藤眞二、中島靖紀、田島英朗、錦戸文彦、稲玉直子、村山秀雄、山谷泰賀：小型 OpenPET 試作機の開発と重粒子線照射野イメージングの実証、医学物理 30 [Sup.5], 197-198 (2010).
- 錦戸文彦、矢崎祐次郎、長田拓人、稲玉直子、稲庭拓、佐藤眞二、吉田英治：重粒子線照射下で計測可能なインビーム用 OpenPET 検出器の開発、医学物理 30 [Sup.2] 231-232 (2010).
- 熊田博明、榮 武二、磯辺智範、橋本孝之、照沼利之：陽子線治療におけるモンテカルロ計算による2次放射線の影響解析、医学物理 30 [Sup.2], 217-218 (2010).
- 原洋介、高田義久、堀田健二、丹正亮平、二瓶哲哉、鈴木庸次郎、永渕功輔、日向 猛：Ripple filter を用いた炭素イオン線によるSOBP 形成の改善、医学物理 30 [Sup.5], 193-194 (2010).
- 古川卓司：放医研における高速スキャンング照射装置開発の現状、医学物理 30 [Sup.2], 99-100 (2010).
- 坂間誠、金井達明、福村明史：治療用炭素線に対する SOBP 内における線質補正係数の評価、医学物理 30 [Sup.5], 211-212 (2010).
- 坂間誠、金井達明、河村英将：光子線治療における DVH を用いた線量評価指標の検討、医学物理 30 [Sup.2], 311-312 (2010).
- 坂間誠、金井達明、歳籐利行、加瀬優紀、遊佐顕、田代睦、鳥飼幸太、島田博文、山田聰：モンテカルロシミュレーションによる炭素線治療用リッジフィルタの高度化、医学物理 30 [Sup.2], 140-141 (2010).
- 山谷泰賀、吉田英治、錦戸文彦、稲玉直子、佐藤眞二、稲庭拓、三橋隆之、田久創大、木内尚子、菅幹生、村山秀雄：OpenPET によるがん診断治療癒合コンセプトの提案と小型実証実験装置の設計、医学物理 30 [Sup.2], 229-230 (2010).
- 村石 浩、阿部慎司、佐藤 斉、原 秀剛、原 敏、茂垣達也、三宅晶子、日向 猛：重粒子線 CT におけるビーム強度モニターシステムの構築、医学物理学 30 [Sup.5], 195-196 (2010).
- 丹正亮平、高田義久、堀田健二、原洋介、赤坂浩亮、木村太亮、二瓶哲哉、日向 猛：陽子線のコリメータ散乱に与えるボーラス厚の影響、医学物理 30 [Sup.2], 87-88 (2010).
- 竹下英里、古川卓司、岩田佳之、白井敏之、稲庭拓、佐藤眞二、野田耕司：蛍光膜を用いた準非破壊モニタの開発、Proc. 12th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 15-16 (2010).
- 中島靖紀、鶴田有樹、河野俊之、佐藤眞二、稲庭拓、吉田英治、山谷泰賀、Sihver L.：重粒子線の自己放射化を利用した3次元照射野推定のアプローチ、医学物理 30 [Sup.2], 89-90 (2010).
- 中島靖紀、鶴田有樹、河野俊之、佐藤眞二、稲庭拓、吉田英治、山谷泰賀、Sihver L.：自己放射化を利用した3次元線量分布推定における推定精度、医学物理 30 [Sup.5], 203-204 (2010).
- 中島靖紀、鶴田有樹、河野俊之、佐藤眞二、稲庭拓、吉田英治、山谷泰賀、Sihver L.：放射化を利用した3次元線量分布を推定する方法の検証実験、医学物理 30 [Sup.5], 205-206 (2010).
- 東明男、白井敏之、野田耕司、金澤光隆、岩田佳之、佐藤眞二、古川卓司、稲庭拓、竹下英里、日向猛、片桐健、永野あい、早乙女直也、水島康太、久保将人、渋谷真二、藤本哲也、富澤正人、その他：HIMAC におけるがん治療用加速器の総合的研究、Proc. 12th Symp. Accel. and Related Technol. for Application 13-14 (2010).
- 難波将夫、松藤成弘、米内俊祐、野元大輔、井上登美夫 題名：モンテカルロコード PHITS による炭素線照射時の水ファントム内二次中性子分布の実験的検証、医学物理 30 [Sup.2], 219-220 (2010).



- 飯塚正樹、朝倉祐太、鎌苅玄、戸森聖治、須釜裕也、竹中重治、渡邊哲也、野村一弘、武居秀行、稲庭拓、金澤光隆、丸山浩一：治療用炭素線ペンシルビームの物質内でのプロファイル評価法の確立、医学物理 30 [Sup.5], 213-214 (2010).
- 米内俊祐、加瀬優紀、難波将夫、山下航、松藤成弘、西尾禎治 題名：陽子線治療における照射野外吸収線量、線質係数、線量当量の測定、医学物理 30 [Sup.2], 85-86 (2010).
- 片桐健、古川卓司、竹下英里、野田耕司：MWPC ビームモニタにおける空間電荷効果の数値解析、Proc. 12th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 29-30 (2010).
- 茂垣達也、阿部慎司、佐藤斉、村石浩、原秀剛、原 敏、三宅晶子、日向猛、金井達明：残留飛程分布測定に基づく重イオン CT の高速化の検討、医学物理 30 [Sup.2], 235-236 (2010).
- 眞正浄光、漆山秋雄、若林源一郎、大谷浩樹、齋藤秀敏、松藤成弘：組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計(TEP-TLD)の炭素線に対するダイナミックレンジの測定、医学物理 30 [Sup.5], 227-228 (2010).
- Fuse T., Terasawa K., Doke T., N., Kitamura H., Komiyama T., Kubo H., Matsumoto H., Miuchi K., Saito K., Sasaki S., Takahashi K., Tanimori T., Tawara H., Uchihori Y.: Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) and establishment of a technique for space dosimetry on the International Space Station (2010WG report). Space Utilization Research 27, 100-102 (2011).
- Hirano Y., Yoshida E., et al.: Evaluation of secondary particles in the small OpenPET detector by use of Geant4 simulation. The 6th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Fukuoka (2011).
- Ishizaki A., Kanematsu N., Komori M., Fukuda S., Kumagai T., Matsuzaki Y., Minohara S., Sato S., Kanai T.: To form a pentagonal dose distribution in biological dose with cone-filter scanning. 6th Japan-Korea Joint meeting on Medical Physics and the 11th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, 232 (2011).
- Katagiri K., Furukawa T., Higashida A., Mizushima K., Iwata Y., Satou S., Shirai T., Noda K.: Longitudinal beam profiles affected by the current ripples of bending magnets in HIMAC Synchrotron. Commissioning of new beam intensity control system at HIMAC. Proc. Annual Meeting of Particle Accel. Society of Japan and the Linear Accel. Meeting in Japan 8 (2011).
- Katagiri K., Furukawa T., Mizushima K., Satou S., Iwata Y., Shirai T., Noda K.: Tuning methods for HIMAC multiple-energy operation. Proc. IPAC2011 2, 3595-3597 (2011).
- Katsunuma T., Yamaya T., et al.: International Forum on Medical Imaging in Asia(IFMIA) 2011, P1-18 (2011).
- Kawade K., et al.: Study of GSO scintillator for the LHCf upgrade. Proc. Int. Symp. Recent Progress of Ultra-High Energy Cosmic Ray Observation (UHECR2010), AIP Conf. Proc. 1367, 220-223 (2011).
- Kawade K., et al.: Study of GSO scintillator for upgrade of LHCf detectors. Proc. 32nd Int. Cosmic Ray Conf. 0959 (2011).
- Kinouchi S., Yamaya T., et al.: International Forum on Medical Imaging in Asia(IFMIA) 2011, O9-2 (2011).
- Kinouchi S., Yamaya T., et al.: The 11th International Meeting of Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine and the 3rd Workshop on High Performance Image Reconstruction, 37-40 (2011).
- Kinouchi S., Yamaya T., et al.: GPU implementation of one-pass list-mode DRAMA toward real-time OpenPET image reconstruction. The 6th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Fukuoka (2011).
- Kinouchi S., Yamaya T., et al.: Conf. Rec. of 2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, MIC15.S-275 (2011).
- Kuboyama S., Ikeda N., Mizuta E., Abe H., Hirao T., Tamura T.: Rediscovery of single-event gate rupture mechanism in power MOSFETs. 12th European Conf. on Radiation Effects on Components and Systems RADECS (2011).
- Kuwahara J., Muraishi H., Takei H., Hara H., Watanabe Y., Hayakawa N., Ishihara H., Takahashi R., Yanagi K.: Simulation study of heavy ion CT based on the measurement of residual range distribution with Geant4: Accuracy of the measurement of residual range. The 6th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Fukuoka (2011).
- Makihara A., Yokose T., Tsuchiya Y., Miyazaki Y., Ebihara T., Maru A., Shindou H., Kuboyama S.: Radiation hardness-by-design SRAM design for 0.15 $\mu$ m fully depleted SOI-ASIC. 12th European Conf. on Radiation Effects on Components and Systems RADECS (2011).
- Miyoshi Y., Kinouchi S., et al.: International Forum on Medical Imaging in Asia(IFMIA) 2011, P1-17 (2011).

- Mizushima K., Furukawa T., Shirai T., Satou S., Iwata Y., Katagiri K., Takeshita E., Higashida A., Noda K.: Commissioning of new beam intensity control system at HIMAC. Proc. Annual Meeting of Particle Accel. Society of Japan and the Linear Accel. Meeting in Japan 8 (2011).
- Mizushima K., Furukawa T., Shirai T., Satou S., Iwata Y., Katagiri Ken., Takeshita E., Noda K.: The HIMAC beam-intensity control system for heavy-ion scanning. Proc. IPAC2011 2, 3592-3594 (2011).
- Moriguchi D., Nakamura Y., Kajimoto T., Koba Y., Ueyama M., Yoshioka M., Shigyo N., Uozumi Y., Satoh D., Sanami T., Takada M., Matsufuji N.: Measurement of neutron-production cross sections for 290MeV/u carbon ion incidence. J. Korean Phys. Soc. 59, 1789-1792 (2011).
- Moriguchi D., Uehara H., Kajimoto T., Hirabayashi K., Hirano H., Nishizawa T., Shigyo N., Uozumi Y., Satoh D., Sanami T., Koba Y., Takada M., Matsufuji N.: Measurement of neutron-production double-differential cross sections for 290 MeV/u oxygen ion incidence. Proc. the 2010 Symp. on Nuclear Data, JAEA-Conf 2011-002, 141-146 (2011).
- Muraishi H., Abe S., Satoh H., Hara H., Mogaki T., Hara S., Miyake S., Yasuda N., Koba Y.: Fast data acquisition in heavy ion CT using intensifying screen - EMCCD camera system. 2011 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Spain (2011).
- Muraishi H., Abe S., Satoh H., Hara H., Mogaki T., Hara S., Miyake S., Yasuda N., Watanabe Y., Koba Y.: Fast data acquisition in heavy ion CT based on the measurement of residual range distribution with HIMAC. The 6th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Fukuoka (2011).
- Nagafuchi K., Takada Y., Hotta K., Hara Y., Tansyo R., Suzuki Y., Kohno R.: Calculation of monitor units for proton radiotherapy. Proc. of the 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Fukuoka, D4-2 (2011).
- Nakajima Y., Tsuchiya Y., Taen T., Tamegai T., Kitamura H., Murakami T.:  $H^+$  irradiation effect in Co-doped  $BaFe_2As_2$  single crystals. Physica C 471, 647 (2011).
- Nakano Y., Takano Y., Ikeda T., Kanai Y., Suda S., Azuma T., Bräuning H., Bräuning-Demian A., Stöhlker Th., Dauvergne D., Yamazaki Y.: Observation of intrashell radiative decay of Li-like uranium ( $2p_{3/2}-2s_{1/2}$ ) using silicon drift detectors. Physica Scripta T144, 014010 (2011).
- Sakamoto H., Matsufuji N., Yamashita W., Nakao M., Namba M., Fukahori M., Kanayama S., Kishi Y., Nomoto D.: Response to carbon ions and properties of bubble detectors. KEK Proc. 25 th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, 135-143 (2011).
- Sasaki S., Sanami T., Saito K., Iijima H., Tawara K., Murakami T.: Average energy to produce an ion pair in gases for high energy heavy ions. IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record N35-3, 1873-1876 (2011).
- Satoh D., Moriguchi D., Kajimoto T., Koba Y., Nakamura Y., Shigyo N., Ueyama M., Uozumi Y., Yoshioka M., Matsufuji N., Takada M., Sanami T.: Neutron-production double-differential cross sections from heavy-ion interactions. J. Korean Phys. Soc. 59, 1741-1744 (2011).
- Shimizu Y., et al.: Study for nuclei identification capability of CALET charge detector. International Cosmic Ray Conference 6. 386-389 (2011).
- Shinaji T., Tashima H., et al.: Realtime tumor tracking by OpenPET for radaition therapy. The 6th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Fukuoka (2011).
- Shirai T., Furukawa T., Inaniwa T., Iwata Y., Katagiri K., Mizushima K., Satou S., Takada E., Takei Y., Takeshita E., Noda K., Fujimoto T., Kadowaki T., Miyoshi T., Sano Y.: Recent progress of new cancer therapy facility at HIMAC. Proc. IPAC2011 2, 3604-3606 (2011).
- Suda S., Nakano Y., Metoki K., Azuma T., Takano Y., Hatakeyama A., Nakai Y., Komaki K., Takada E., Murakami T.: Electron emission from fast heavy ions associated with resonant coherent excitation. Physica Scripta T144, 014044 (2011).
- Suzuki T., et al. : Position sensitive detector at the upgraded LHCf detector. Proc. 32nd Int. Cosmic Ray Conf. 0264 (2011).
- Taen T., Nakajima Y., Tamegai T., Kitamura H., Murakami T.: Vortex dynamics in proton irradiated Co-doped  $BaFe_2As_2$ . Physica C 471, 784-786 (2011).
- Takada K., Isobe T., Shida K., Takahashi H., Seki M., Yokota H., Sakurai H., Sakae T.: Basic characteristics of a CR-39 track-etched detector in a radiotherapy field. The 6<sup>th</sup> Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics and 11<sup>th</sup> Asia-Oceania Congress of Medical Physics (2011).
- Takada Y., Nihei T., Hotta K., Hara Y., Tansyo R.: Design method of rangecompensators based on dose optimization. Proc. of the 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Fukuoka, A3-2 (2011).
- Tamegai T., Taen T., Yagyuda H., Nakajima Y.,

- Okayasu S., Sasase M., Kitamura H., Murakami T., Kambara T., Kanai Y.: Low-field anomaly of vortex dynamics in iron-pnictide superconductors. *Physica C* 471, 777 (2011).
- Tashima H., Katsunuma T., et al.: The 11th International Meeting of Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine and the 3rd Workshop on High Performance Image Reconstruction, 109-112 (2011).
- Terasawa K., Doke, Kitamura H., Komiyama T., Kubo H., Matsumoto H., Miuchi K., Saito K., Sasaki S., Takahashi K., Tanimori T., Tawara H., Uchihori Y.: Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) and establishment of a technique for space dosimetry on the International Space Station (2011WG report). *Space Util. Res.* 28 (2011).
- Terasawa K., Doke T., Miuchi K., Tanimori T., Sasaki S., Saito K., Takahashi K., Tawara H., Matsumoto H., Fuse T., Komiyama T., Naganatsu A., Uchihori Y., Kitamura H.: Response of a prototype Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber to heavy ions with energies of several hundreds of MeV/n. *KEK Proc.* 2011-8, 189-195 (2011).
- Tsuda S., Sato T., Takahashi F., Satoh D., Sasaki S., Namito Y., Iwase H., Ban S., Takada M.: Measurement of lineal energy distribution of heavy ion using a wall-less tissue equivalent proportional counter. *Proc. the 25<sup>th</sup> Radiation detectors and their uses*, 100-108 (2011).
- Yamaya T., Yoshida E., et al.: In-beam imaging performance of the small OpenPET prototype with  $^{11}\text{C}$  beam irradiation. *The 6th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Fukuoka* (2011).
- Yoshioka M., Ueyama M., Koba Y., Nakamura Y., Kajimoto T., Moriguchi D., Uozumi Y., Shigyo N., Sato D., Sanami T., Takada M.: Study of Pulse Shape Discrimination of sub-MeV neutrons from gamma-rays with liquid scintillator. *J. Korean Phys. Soc.* 59, 1971-1974 (2011).
- Yoshioka S., Nishikido F., et al.: Comparison of four PMTs for the four-layer DOI detector. *The 6th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Fukuoka* (2011).
- 吉岡俊祐、稲玉直子、吉田英治、錦戸文彦、村山秀雄、河合秀幸、山谷泰賀、三橋隆之、岸本彩：LGSO シンチレーターを用いた OpenPET 用 8 層 DOI 検出器の開発、医学物理、31[Sup.1]、104 (2011)。
- 吉田英治、田島英朗、木内尚子、錦戸文彦、稲玉直子、村山秀雄、山谷泰賀：小型 OpenPET 試作機の性能評価と改良計画、医学物理、31[Sup.1]、103 (2011)。
- 錦戸文彦、三橋隆之、稲玉直子、吉田英治、田島英朗、稲庭拓、佐藤眞二、村山秀雄、山谷泰賀：重粒子線照射野イメージングのための OpenPET 用 4 層 DOI 検出器の最適化、医学物理、31[Sup.1]、135 (2011)。
- 熊田博明、榮 武二、磯辺智之範、橋本孝之、照沼利之：陽子線治療におけるモンテカルロ計算による 2 次放射線の影響分析、医学物理、30[Sup.2]、217-218 (2011)。
- 原洋介、高田義久、堀田健二、丹正亮平、二瓶哲哉、鈴木庸次郎、永渕功輔、日向 猛：AI スラブ通過後の単一エネルギー炭素線のブラッグピーク形状のスラブ厚依存性、医学物理 31[Sup.2] (2011)。
- 坂間誠、金井達明、福村明史、日向猛：炭素線に対する線質補正係数への平均励起ポテンシャルの影響評価、第 101 回日本医学物理学学会大会 (2011)。
- 山谷泰賀、吉田英治、木内尚子、中島靖紀、佐藤眞二、稲庭拓、田島英朗、錦戸文彦、菅幹生、羽石秀昭：小型 OpenPET 試作機の重粒子線照射野イメージング性能の検証、医学物理、31[Sup.1]、133 (2011)。
- 長友傑、小林義男、久保謙哉、山田康洋、三原基嗣、佐藤渉、宮崎淳、佐藤眞二、北川敦志： $^{57}\text{Mn}/^{57}\text{Fe}$  インビーム・メスバウアー分光の研究開発、平成 22 年度京大炉専門研究会報告「短寿命核および放射線を用いた物性研究(III)」*Proc. of the specialist research meeting on "Condensed Matter Physics using Short-lived Nuclei and Radiations"*, KURRI-KR-159, 62-65 (2011)。
- 田島英朗、木内尚子、吉田英治、錦戸文彦、稲玉直子、村山秀雄、山谷泰賀：小型 OpenPET 試作機におけるリアルタイムイメージングシステムの開発、医学物理、31[Sup.1]、134 (2011)。
- 品地哲弥、田島英朗、他：生体医工学シンポジウム 2011、1-3-6 (2011)。
- 木内尚子、山谷泰賀、吉田英治、田島英朗、工藤博幸、菅幹生：OpenPET のための one-pass リストモード画像再構成法 DRAMA の最適化、医学物理、31[Sup.1]、105 (2011)。
- Kinouchi S., Yamaya T., Tashima H., Yoshida E., Ito H., Suga M.: Total variation minimization for in-beam PET image reconstruction. *2012 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Record*, M17-42 (2012)。
- Kishimoto Y., Sasaki S., Saito K., Takahashi K.,

- Tawara H., Terasawa K., Fuse T., Nagamatsu A., Ito Y., Matsumoto H., Mori K., Miuchi K., Tanimori T., Uchihori Y., Doke T.: Response of PS-TEPC filled with propane based tissue-equivalent gas to proton beam with energy of 230 MeV. KEK Proc. 2012-8, 1-7 (2012).
- Kuboyama S., Mizuta E., Ikeda N., Abe H., Ohshima T., and Tamura T.: Consideration of single-event gate rupture mechanism in power MOSFET. The 10th Int. Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (10th RASEDA), Tsukuba (2012).
- Makihara A., Yokose T., Tani K. and Morimura T., Abe H., Shindou H., Ebihara T., Maru A., Morikawa K., Kuboyama S., Tamura T.: Applicability of redundant pairs of SOI Transistors for Analog Circuits. The 10th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (10th RASEDA), Tsukuba (2012).
- Masuda K., Yoshida E., Kinouchi S., Yamaya T., Suga M.: Basic investigation of effective OpenPET geometries for an entire-body PET. Proc. Medical Engineering Week 2012 in Chiba, 71-72 (2012).
- Miyazaki J., Nagatomo T., Kobayashi Y., K. Kubo M., Yamada Y., Mihara M., Sato W., Mae K., Sato S., Kitagawa A.: In-beam Moessbauer spectroscopy of  $^{57}\text{Mn}/^{57}\text{Fe}$  implanted into LiH. KURRI-KR-168, 61-64 (2012).
- Mizushima K., Furukawa T., Hara Y., Katagiri K., Noda K., Shirai T., Takeshita E.: Beam spot measurement using a phosphor screen for carbon-ion therapy at NIRS. Proc. of Int. Beam Instrumentation Conf. IBIC2012, Tsukuba (2012).
- Nishikido F., Hirano Y., Inadama N., Yoshida E., Tashima H., Sato S., Inaniwa T., Murayama H., Ito H., Yamaya T.: Optimization of the in-beam OpenPET detector for carbon beam irradiation. 2012 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Record, M22-2 (2012).
- Nitta M., Inadama N., Nishikido F., Hirano Y., Yoshida E., Tashima H., Kawai H., Ito H., Yamaya T.: Influence of Misalignment of a Scintillator Array and a Multi-Anode PMT for 4-layer DOI PET detector. 2012 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Record, M16-70 (2012).
- Nitta M., Hirano Y., Inadama N., Nishikido F., Yoshida E., Tashima H., Kawai H., Ito H., Yamaya T.: Development of a four-layer DOI detector composed of Zr-doped GSO scintillators and a high sensitive multi-anode PMT. 2012 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Record, M16-71 (2012).
- Pinsky L., Empl A., Hoang S., Stoffle N., Jakubek J., Vykydal Z., Turecek D., Pospisil S.; Kitamura H., Ploc O., Uchihori Y., Yasuda N., Amberboy C., Hauss J., Lee K., Semones E., Zapp N., Parker R., Cooke D.: Preparing for the first Medipix Detectors in space. Proc. of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana (2012).
- Pinsky L.S., Idarraga-Munoz J., Kroupa M., Son H.M., Stoffle N.N., Semones E.J., Amberboy C., Swan B.G., Bahadori A.A., Lee K.T., Wheeler S.A., Turecek D., Pospisil S., Jakubek J., Vykydal Z., Hauss J., Kitamura H., Uchihori Y.: Space radiation monitoring with Active Pixel Detectors. Mini, Micro, Nano Dosimetry Workshop, Wollongong, Australia (2012).
- Sato T., et al.: Hard x-ray imager (HXI) for the ASTRO-H Mission. Conf. Record of IEEE TNS, N28, Experimental Software Developments (2012).
- Shinaji T., Tashima H., Yoshida E., Murayama H., Yamaya T., Haneishi H.: Time delay correction method for PET-based tumor tracking. 2012 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Record, M16-29 (2012).
- Shindou H., Maru A., Ebihara T., Makihara A., Kuboyama S., and Tamura T.: Investigation of the SEE sensitivity of 90nm DICE based Flip-Flops using pulsed-laser testing methodology. The 10th Int. Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (10th RASEDA) Tsukuba (2012).
- Stoffle N., Pinsky L., Idarraga J., Hoang S., Empl A., Jakubek J., Pospisil S., Turecek D.: Initial results on charge and velocity discrimination for heavy ions using Silicon Timepix Detectors. Int. Workshop on Radiation Imaging Detectors, Coimbra, Portugal (2012).
- Taen T., Yagyuda H., Nakajima Y., Tamegai T., Okayasu S., Kitamura H., Murakami T., Laviano F., Ghigo G.: Effects of irradiation-particle energy on critical current density in Co-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ . doi:10.1016/j.physc.2012.02.040, (2012).
- Tansho R., Kohno R., Takada Y., Hotta K., Hara Y., Nagafuchi K., Suzuki Y., Akimoto T.: Dose calculation model using the simplified Monte Carlo Method with an initial beam model adapted to a beam-wobbling system. Med. Phys. 39, 3817 (2012).
- Tashima H., Yoshida E., et al.: Proc. 1st NIRS-SNU Workshop on Nucl. Medicine Imaging Sci. and Technol. 45-49 (2012).
- Tashima H., Yoshida E., Shinaji T., Hirano Y., Kinouchi S., Nishikido F., Suga Mikio., Haneishi H., Ito H., Yamaya T.: Simulation

- study of real-time tumor tracking by OpenPET using the 4D XCAT phantom with a realistic  $^{18}\text{F}$ -FDG distribution. 2012 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Record, M10-21 (2012).
- Tashima H., Hirano Y., Kinouchi S., Yoshida E., Ito H., Yamaya T.: Theoretical and Numerical Analysis of the Single-Ring OpenPET geometry for in-beam PET. 2012 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Record, M22-14 (2012).
- Terasawa K., Doke, Kitamura H., Komiyama T., Kubo H., Matsumoto H., Miuchi K., Saito K., Sasaki S., Takahashi K., Tanimori T., Tawara H., Uchihori Y.: Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) and establishment of a technique for space dosimetry on the International Space Station (2011WG report). Space Util. Res. 28, 123-125 (2012).
- Ueahara, H., Moriguchi D., Kajimoto T., Hirabayashi K., Hirano H., Nishizawa T., Shigyo N., Uozumi Y., Satoh D., Sanami T., Koba Y., Takada M., Matsufuji N.: Measurement of gamma-ray-production double-differential cross section for 290 MeV/u oxygen ion incidence. Proc. 2011 Symposium on Nuclear Data, JAEA-Conf 2012-001, 135-140 (2012).
- Yamaya T.: Proc. 1st NIRS-SNU Workshop on Nucl. Medicine Imaging Sci. and Technol. 1-5, (2012).
- Yamaya T., Yoshida E., Kinouchi S., Nakajima Y., Nishikido F., Hirano Y., Tashima H., Ito H., Suga M., Haneishi H., Sato S., Inaniwa T.: A small prototype of a single-ring OpenPET. 2012 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Record, M06-2 (2012).
- Yoshida E., Kinouchi S., Tashima H., Nishikido F., Hirano Y., Inadama N., Murayama H., Ito H., Yamaya T.: Development and performance evaluation of a singlering OpenPET prototype. 2012 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. Record, M16-16 (2012).
- 河合竜一、高田義久、丹正亮平、田邊雅貴、水谷昌平：陽子線治療用 bi-material bolus の最適設計法の研究、医学物理、32[Sup.3], 313-314(2012).
- 吉田英治、木内尚子、山谷泰賀：(8)Single-Ring OpenPET 試作機の開発、第2回 OpenPET 研究会資料集、18-19 (2012).
- 錦戸文彦、平野祥之、稲玉直子、吉田英治、山谷泰賀：(4)重粒子照射野モニタリング用 OpenPET 検出器の開発、第2回 OpenPET 研究会資料集、9-10 (2012).
- 錦戸文彦、平野祥之、稲玉直子、吉田英治、山谷泰賀：(4)重粒子線治療モニタリング用 OpenPET 検出器の開発、平成23年度次世代 PET 研究報告書、13-14 (2012).
- 錦戸文彦、稲玉直子、平野祥之、吉田英治、田島英朗、佐藤眞二、稲庭拓、山谷泰賀：GSOZ を用いた PET 検出器の炭素線照射下における最適化と特性評価、医学物理、32[Sup.1], 210 (2012).
- 兼松伸幸、稲庭拓、古場裕介：陽子線とイオン線の阻止能、多重散乱、原子核反応における人体組織の実効密度と電子密度との関係、医学物理、32[Sup.1], 255 (2012).
- 坂本晴香、山本治、河野俊之、松藤成弘：過熱液滴型検出器の治療用重粒子線場における生物効果評価への応用、医学物理、32[Sup.3] 241 (2012).
- 山谷泰賀：(1)OpenPET 実証機開発プロジェクト概要、第2回 OpenPET 研究会資料集、1-2 (2012).
- 山谷泰賀、吉田英治、稲玉直子、錦戸文彦、平野祥之、田島英朗、脇坂秀克、辻厚至、佐藤眞二、稲庭拓、木内尚子、菅幹生、羽石秀昭、渡辺光男、山下貴司：(1)OpenPET 開発プロジェクトの進捗概要、平成23年度次世代 PET 研究報告書、5-7 (2012).
- 山谷泰賀、吉田英治、脇坂秀克、辻厚至、田島英朗、錦戸文彦、木内尚子、中島靖紀、佐藤眞二、稲庭拓：OpenPET：小型試作機による C-10 ビーム照射野イメージング性能の実証、医学物理、32[Sup.1], 209 (2012).
- 新田宗孝、平野祥之、稲玉直子、錦戸文彦、吉田英治、田島英朗、河合秀幸、山谷泰賀：Zr 添加 GSO と高感度 PMT を用いた OpenPET 用 DOI 検出器の試作、医学物理、32[Sup.1], 232 (2012).
- 水島康太、白井敏之、古川 卓司、佐藤 眞二、岩田 佳之、片桐 健、野田 耕司：Commissioning of variable beam-energy extraction system at HIMAC, 第9回日本加速器学会年会, 228 (2012).
- 石崎梓、兼松伸幸、小森雅孝、福田茂一、熊谷忠房、松崎有華、養原伸一、佐藤眞二、金井達明：コーンフィルタースキャニングにおける最適なスキャン速度の評価、医学物理、32[Sup.1] 202 (2012).
- 前山拓哉、福西暢尚、石川顕一、深作和明、古田琢哉、高木周、野田茂穂、姫野龍太郎：ナノクレイ添加による拡散のないゲル線量計の開発、医学物理、32[Sup.1], 286 (2012).
- 前山拓哉、福西暢尚、石川顕一、深作和明、古田琢哉、高木周、野田茂穂、姫野龍太郎：炭

- 素線治療における VIPAR ポリマーゲル線量計を用いた線量分布測定・検証の検討、医学物理、32[Sup.3], 179 (2012).
- 丹正亮平、河野良介、高田義久、堀田健二、水谷昌平、河合竜一、田邊雅貴：ワブラー法における入射ビームモデルの改善と簡易モンテカルロ法を使った線量分布計算の精度検証、医学物理、32[Sup.3], 95-96 (2012).
- 中島靖紀、河野俊之、佐藤眞二、稲庭拓、吉田英治、山谷泰賀、SIHVER L.: 消滅放射線分布の計算方法改良による複雑形状照射野の3次元線量分布推定、医学物理、32[Sup.1] 212 (2012).
- 田島英朗、山谷泰賀、吉田英治、木内尚子、渡辺光男、田中栄一：OpenPET:第二世代開放型 PET「Single-Ring OpenPET」の提案、医学物理、32[Sup.1], 211 (2012).
- 品地哲弥、田島英朗、吉田英治、村山秀雄、山谷泰賀、羽石秀昭：呼吸性体動に対応した PET ベース腫瘍トラッキング、電子情報通信学会技術研究報告(IEICE Technical Report), 112, 129-133 (2012).
- 品地哲弥、田島英朗、吉田英治、村山秀雄、山谷泰賀、羽石秀昭：(10)OpenPET における腫瘍トラッキング、第2回 OpenPET 研究会資料集、22-24 (2012).
- 品地哲弥、田島英朗、吉田英治、村山秀雄、山谷泰賀、羽石秀昭：(7)OpenPET における腫瘍トラッキング、平成23年度次世代 PET 研究報告書、21-23 (2012).
- 平野祥之、吉田英治、木内尚子、稲玉直子、錦戸文彦、山谷泰賀：(3)In-beam PET (OpenPET) における二次粒子の Geant4 シミュレーション、第2回 OpenPET 研究会資料集、6-8 (2012).
- 片桐健、水島康太、古川卓司、佐藤眞二、村松正幸、岩田佳之、白井敏之、高田栄一、野田耕司、影山雄生、川島祐洋、小林泉、佐野悦信：Present status of HIMAC, 第9回日本加速器学会年会、356 (2012).
- 木内尚子、山谷泰賀、他：電子情報通信学会技術研究報告、111、437-439 (2012).
- 木内尚子、山谷泰賀、菅幹生：(9)MAP-TV 法による OpenPET 粒子線照射野イメージング、第2回 OpenPET 研究会資料集、20-21 (2012).
- 木内尚子、山谷泰賀、菅幹生：(5)Single-ring OpenPET の装置設計と計算機シミュレーション、平成23年度次世代 PET 研究報告書、15-16 (2012).
- 木内尚子、山谷泰賀、田島英朗、平野祥之、吉田英治、錦戸文彦、羽石秀昭、菅幹生：第2世代開放型 PET「Single-ring OpenPET」のための検出器配置方法の検討、医学物理、32[Sup.1], 231 (2012).
- Hirano Y., Yoshida E., Wakisaka H., Nakajima Y., Nishikido F., Ito H., Yamaya T.: Washout studies of in-Beam rat imaging by the 2nd generation OpenPET prototype. 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. Abstract, M21-16 (2013).
- Hirano Y., Kinouchi S., Yoshida E., Tashima H., Nishikido F., Inadama N., Murayama H., Ito H., Yamaya T.: Washout effect in RI beam irradiation of rat using small OpenPET. Jpn. J. Med. Phys. 33 [Sup.1], 125, (2013).
- Hiroki A., Yamashita S., Sato Y., Nagasawa N., Taguchi M.: New polymer gel dosimeters consisting of less toxic monomers with radiation-crosslinked gel matrix. Journal of Physics, Conference Series 444, 012028 (2013).
- Hiroki A., Yamashita S., Oshiro Y., Taguchi M.: Radiation sensitivity of novel polymer gel dosimeters. Jpn. J. Med. Phys. 33 [Sup.3], 116, (2013).
- Israt J., Takada Y., Tansho R., Mizutani S., Yachidate R., Matsui K., Iizumi N., Doi J., Yamaguchi H.: Study on optimization of multi-portal patch irradiation using proton beam. Jpn. J. Med. Phys. 33, 143 (2013).
- Koba Y., Kanematsu N., Ogata R.: Evaluation of range compensation materials for carbon ion therapy. Jpn. J. Med. Phys. 33 [Sup.1], 183, (2013).
- Maeyama T., Fukunishi N., Ishikawa K.L., Fukasaku k., Furuta T., Takagi S., Noda S., Himeno R., Fukuda S.: Invitaion of VIPAR polymer gel dosimeter for dosimetric verification in the carbon ion beam therapy(2). Jpn. J. Med. Phys. 33 [Sup.1], 130, (2013).
- Mizota M., Fukuda S., Ikeda N., Uno T., Tachikawa Y., Shimabukuro K., Jincho K.: Dose measurement program in quality assurance or broad beam therapy at HIMAC. Jpn. J. Med. Phys. 33 [Sup.1], 131, (2013).
- Mizuta E., Kuboyama S., Abe H., Iwata Y., Tamura T.: Investigation of Single-Event Damages on silicon carbide (SiC) power MOSFETs. Radiation Effects on Components and Systems. (2013).
- Mizutani S., Takada Y., Tansho R., Kawai R., Tanabe M., Yachidate R., Jahan I., Akimoto T., Kohno R., Hotta K.: A comparative study of dose distribution in proton scanning and that in patch irradiation. J. Med. Phys. 33, 171 (2013).
- Nakajima Y., Hirano Y., Yamaya T., Yoshida E., Tashima H., Sato S., Inaniwa T., Kohno T., Sihver L.: Dosimetry by means of in-beam PET



- with RI beam irradiation. 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Abstract. Seoul, M07-2, (2013).
- Nakajima Y., Kohno T., Inaniwa T., Sato S., Yoshida E., Yamaya T., Sihver L.: Estimation of standard deviation of range in 3-D irradiation by using Fisher's Information. *Jpn. J. Med. Phys.* 33 [Sup.1], 129 (2013).
- Nitta M., Hirano Y., Nishikido F., Inadama N., Yoshida E., Tashima H., Nakajima Y., Kawai H., Yamaya T.: Activation measurement for material selection of OpenPET components in particle therapy. 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. Abstract, NPO2-58 (2013).
- Ogawa T., Morev N.M., Sato T.: Design of an experimental method for measurement of isotopic fragmentation cross-section energy dependence of nucleus-nucleus collisions. *Proc. 11th meeting of the task force on Shielding Aspects of Accelerators. Targets and Irradiation Facilities.* 51-60 (2013).
- Oshima A., Oyama T.G., Washio M., Tagawa S. : Evaluation of sensitivity for positive tone non-chemically and chemically amplified resists using ionized radiation: EUV, x-ray, electron and ion induced reactions. *Proc. SPIE.* 8682, *Advances in Resist Materials and Processing Technology XXX.* 86821A (March 29, 2013) doi:10.1117/12.2011433, (2013).
- Pinsky L., Idarraga-Munoz J., Kroupa M., Son H.M., Stoffle N.N., Semones E.J., Amberboy C., Swan B.G., Bahadori A.A., Lee K.T., Wheeler S.A., Turecek D., Posposil S., Jakubek J., Vykydal Z., Kitamura H., Uchihori Y.: First results from Medipix in space. *Vienna Instrumentation Conf. Vienna,* (2013).
- Shigyo N., Uozumi Y., Uehara H., Nishizawa T., Mizuno T., Satoh D., Sanami T., Koba Y., Takada M., Matsufuji N.: Measurement of 100 MeV/u carbon incident neutron production cross sections on a carbon target. *Proc. 2012 Symposium on Nuclear Data. JAEA-Conf 2013-002,* 137-142 (2013).
- Shinaji T., Tashima H., Yoshida E., Yamaya T., Haneishi H.: Accuracy improvement of time delay correction method for PET-based tumor tracking. 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. Abstract, M21-13 (2013).
- Shinaji T., Tashima H., Yoshida E., Murayama H., Yamaya T., Haneishi H.: The PET-based tumor tracking with error reduction method. *Jpn. J. Med. Phys.* 33 [Sup.1], 127 (2013).
- Taen T., Yagyuda H., Nakajima Y., Tamegai T., Okayasu S., Kitamura H., Murakami T., Laviano F., Ghigo G.: Effects of irradiation-particle energy on critical current density in Co-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ . *Physica.* C484, 62 (2013).
- Taen T., Ohori T., Ohtake F., Tamegai T., Kihou K., Ishida S., Eisaki H., Kitamura H.: Critical current density and vortex dynamics in pristine and proton-irradiated  $(\text{Ba}, \text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ . *Physica.* C494, 106 (2013).
- Takada Y., Kawai R., Tansho R., Mizutani S., Tanabe M., Jahan I., Yachidate R.: Experimental verification of effectiveness of bolus designed using the dose-optimization method. *Jpn. J. Med. Phys.* 33 (Sup. 1), 181 (2013).
- Tamatsu S., Koba S., Shinsho K., Fukuda S.: Study on dose distribution measurement of therapeutic carbon beam by tissue equivalent phantom thermoluminescence slab dosimeter(TEP-TLD). *Jpn. J. Med. Phys.* 33 [Sup.1], 202 (2013).
- Tamatsu S., Koba S., Shinsho K., Fukuda S.: LET dependency of glow curve of tissue equivalent phantom thermoluminescence dosimeter(TEP-TLD). *Jpn. J. Med. Phys.* 33 [Sup.3], 41 (2013).
- Tamegai T., Ding Q.P., Taen T., Ohtake F., Inoue H., Tsuchiya Y., Mohan S., Sun Y., Nakajima Y., Pyon S., Kitamura H.: Superconducting properties of iron-platinum-arsenides  $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_n\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$  ( $n = 3, 4$ ). *Physica.* C494, 65 (2013).
- Tansho R., Takada Y., Kohno R., Hotta K., Mizutani S.: Fast dose calculation method using non-Gaussian initial beam model for beam-wobbling system. *Jpn. J. Med. Phys.* 33, 105 (2013).
- Tashima H., Yamaya T., Kinahan P.E.: Simulation study of the OpenPET scanner with bridge detectors to compensate for incomplete data. *Proc. 12th International Meeting on Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine.* 360-363 (2013).
- Tashima H., Yoshida E., Shinaji T., Haneishi H., Ito H., Yamaya T.: Monte Carlo simulation of region-of-interest reconstruction for real-time tumor tracking by OpenPET. 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. Abstract, M21-25 (2013).
- Tashima H., Yamaya T.: Impact of TOF Information in OpenPET imaging. 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. Abstract, M22-13 (2013).
- Tashima H., Yoshida E., Shinaji T., Hirano Y., Nishikido F., Haneishi H., Ito H., Yamaya T.: Monte Carlo simulation of real-time tumor tracking by the OpenPET using the 4D XCAT

- phantom with a realistic 18F-FDG distribution. Proceedings for 2nd SNU-NIRS Workshop on Nuclear Medicine Imaging Science and Technology. 56-60, (2013).
- Tashima H., Yoshida E., Shinaji T., Hirano Y., Kinouchi S., Nishikido F., Suga M., Haneishi H., Ito H., Yamaya T.: A Monte Carlo simulation of real-time tumor tracking by the OpenPET: a feasibility study. Jpn. J. Med. Phys. 33 [Sup.1], 130 (2013).
- Taylor M.L., Maeyama T., Fukunishi N., Ishikawa K.L., Fukasaku K., Furuta T., Takagi S., Noda S., Himeno R., Fukuda S.: A novel clay-nanoparticle dichromate gel: radiological properties for electron and hadron interactions. Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine: 2012 Engineering and Physical Sciences in Medicine Conference. Springer Netherlands, 36, 136-137 (2013)
- Tran L.T., Bolst D., Guatelli S., Prokopovich D.A., Lerch M.L.F., Petasecca M., Reinhard M.I., Sagia E., Fazzi A., Agosteo S., Matsufuji N., Rosenfeld A.B.: High spatial resolution microdosimetry with  $\Delta E$ -E detector on 12C beam: Monte Carlo simulations and experiment. Conference record. IEEE Conference, New Technologies in Hadron Therapy: Particle Imaging and Optimization of Treatment Delivery workshop. (2013).
- Yachidate R., Takada Y., Tansho R., Kawai R., Tanabe M., Mizutani S., Jahan I.: A study on simultaneous optimization of boluses for broad beam patch irradiation in proton therapy. Jpn. J. Med. Phys. 33, 182 (2013).
- Yamaguchi H., Takada Y., Kohno R., Hotta K., Miyagishi T., Tansho R., Mizutani S., Akimoto T.: Verification of accuracy of calculated dose calibration factors for the clinical cases in proton therapy. Jpn. J. Med. Phys. 33, 104 (2013).
- Yamaya T., Yoshida E., Tashima H., Nakajima Y., Nishikido F., Hirano Y., Inadama N., Ito H., Shinaji T., Haneishi H., Suga M., Inaniwa T.: A prototype of a novel transformable single-ring OpenPET. 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Abstract. M07-1 (2013).
- Yamaya T., Yoshida E., Kinouchi S., Nakajima Y., Nishikido F., Hirano Y., Tashima H., Suga M., Sato S., Inaniwa T.: In-beam imaging test of a small prototype for the second generation OpenPET. Jpn. J. Med. Phys. 33 [Sup.1], 128 (2013).
- Yoshida E., Shinaji T., Tashima H., Haneishi H., Yamaya T.: Performance evaluation of a transformable axial-shift type single-ring OpenPET. 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. Abstract, M11-7 (2013).
- 宮武裕和, 河野俊之, 稲庭拓, 佐藤眞二, 中島靖紀, SIHVER Lembit: 未知組成標的中飛程 推定における組成近似法, 第 106 回日本医学物理学学会学術大会報文集. 108 (2013).
- 錦戸文彦, 平野祥之, 稲玉直子, 吉田英治, 山谷泰賀: 炭素線治療モニタリング用 OpenPET 検出器の炭素線照射下での性能評価, 平成 24 年度次世代 PET 研究会講演予稿集, 39-40 (2013).
- 山谷泰賀, 吉田英治, 田島英朗, 錦戸文彦, 平野祥之, 稲玉直子, 木内尚子, 菅幹生, 羽石秀昭, 中島靖紀, 佐藤眞二, 稲庭拓: 第二世代 single-ring OpenPET 小型試作機の開発と HIMAC 実験評価, 平成 24 年度次世代 PET 研究会講演予稿集, 48-49 (2013).
- 山谷泰賀, 吉田英治, 稲玉直子, 錦戸文彦, 田島英朗, 平野祥之, 伊藤浩, 佐藤眞二, 稲庭拓, 木内尚子, 菅幹生, 羽石秀昭, 中島靖紀: がん診断と治療の融合を目指した開放型 PET 装置 OpenPET の開発, 研究会「放射線検出器とその応用」(第 27 回)要旨論文集, 3-4 (2013).
- 新田宗孝, 稲玉直子, 錦戸文彦, 平野祥之, 吉田英治, 田島英朗, 河合秀幸, 山谷泰賀: OpenPET 用検出器の基礎的研究, 平成 24 年度次世代 PET 研究会講演予稿集, 36-38 (2013).
- 新田宗孝, 稲玉直子, 錦戸文彦, 平野祥之, 吉田英治, 田島英朗, 河合秀幸, 山谷泰賀: 光分配方式 PET 用 4 層 DOI 検出器の反射材とアノードの位置関係が結晶弁別に及ぼす影響, 研究会「放射線検出器とその応用」(第 27 回)要旨論文集, 5-6 (2013).
- 中島靖紀, 河野俊之, 稲庭拓, 佐藤眞二, 吉田英治, 山谷泰賀, SIHVER Lembit: 3 次元照射野の飛程推定における Fisher's Information を利用した精度の予測, 第 105 回日本医学物理学学会学術大会報文集. 129 (2013).
- 田島英朗, 吉田英治, 山谷泰賀: OpenPET リアルタイム腫瘍追跡の実現可能性検討, 平成 24 年度次世代 PET 研究会講演予稿集, 43-44 (2013).
- 品地哲弥, 田島英朗, 吉田英治, 村山秀雄, 山谷泰賀, 羽石秀昭: OpenPET における腫瘍トラッキング, 平成 24 年度次世代 PET 研究会講演予稿集, 45-47 (2013).
- 品地哲弥, 田島英朗, 吉田英治, 村山秀雄, 山谷泰賀, 羽石秀昭: 呼吸性体動に対応した

PET ベース腫瘍トラッキング. (JAMIT Frontier 2013 メディカルイメージング連合フォーラム,那覇市,2013/1/24-25 ), 電子情報通信学会技術研究報告(IEICE Technical Report). 112, 411, 129-133 (2013).

平野祥之、木内尚子、吉田英治、稲玉直子、錦戸文彦、伊藤浩、山谷泰賀：OpenPET 小型試作機を用いた重粒子 RI ビーム照射によるラット頭部洗い出しの計測、平成 24 年度次世代 PET 研究会講演予稿集、52-53 (2013).

木内尚子、山谷泰賀、田島英朗、吉田英治、菅幹生：粒子線照射野画像化のための Total variation 最小化画像再構成法の検討、平成 24 年度次世代 PET 研究会講演予稿集、41-42 (2013).

眞正浄光: 熱蛍光体による放射線イメージングシステムの現状と展望. Jpn. J. Med. Phys. 33 [Sup.1], 35, 2013.

## 学位論文

- 屋良早香：高感度検出系を用いた低線量重粒子線影響の解析(2)、卒業研究、茨城大学理学部地球生命環境科学科 (2004).
- 高橋桃子：重粒子線による AT 細胞のアポトーシス、修士論文、国際基督教大学大学院理学研究科 (2004).
- 松本孔貴：スフェロイド(多細胞球状体)を用いた高線量域での重粒子線の RBE の算出、卒業研究、茨城県立医療大学 (2004).
- 浅川勇雄：Radiation-induced growth inhibition in transplanted human tongue carcinomas with different p53 gene status (p53 遺伝子型の異なるヒト舌癌細胞株の移植系を用いた X 線あるいは炭素線照射による腫瘍増殖抑制)、博士論文、奈良県立医科大学大学院医学研究科 (2004).
- 田中瑠理：重粒子線により生じるクラスター DNA 損傷の定量、修士論文、広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻 (2004).
- 渡裕美：アルデヒド反応性プローブ (ARP) を用いた DNA クラスター損傷の検出、卒業研究、広島大学理学部生物科学科 (2004).
- Broggio D.: Ion induced scintillation in organic solids: average track modelling, scintillation intensity degradation and dosimetry application. PhD degree, University Louis Pasteur (2004).
- Gaza G.: Space radiation dosimetry: An optically dtimulated luminescence tadiation fetector for low-earth orbit. PhD Thesis, Oklahoma State University (2004).
- Giacomelli M.: Fragmentation of heavy ions in tissue equivalent targets. PhD thesis, University of Ljubljana, Slovenia (2004).
- Giacomelli M.: Fragmentation of heavy ions in tissue equivalent targets: Study of emission angles in nuclear fragmentation of light ions at intermediate energies, Ph.D thesis, University of Ljubljana, Slovenia (2004).
- 安田成臣：重イオン線 CT におけるノイズ解析と非線形ウェーブレット縮退によるノイズ低減、修士論文、茨城県立医療大学大学院 (2004).
- 井関康：陽電子放出核種ビームを用いた重粒子線がん治療体内飛程確認法に関する研究、博士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻 (2004).
- 稲庭拓：陽子線照射によりターゲット中に生成される陽電子崩壊核に関する研究、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻 (2004).
- 遠藤雄輔：写真乳剤を用いた多層カラー放射線検出器、卒業研究、千葉大学工学部 (2004).
- 岡田裕樹：6.0-15.0 MeV/u 重粒子と水分子衝突による放出 2 次電子の二重微分断面積に必要なパラメータの導出、卒業研究、東京理科大学理工学部 (2004).
- 加瀬優紀：組織等価比例計数管を用いた治療用重イオンビームの線質測定、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻 (2004).
- 花田剛士：がん治療用炭素線の原子核反応による減弱量の新しい評価法、修士論文、北里大学大学院医療系研究科医療放射線工学 (2004).
- 岩切章太郎：写真フィルムを用いた高エネルギー重粒子イオンの検出、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科 (2004).
- 岩淵雅也：CR-39 とルミネセンス線量計を用いた宇宙放射線線量計測法の研究、卒業研究、東邦大学理学部物理学科基礎物理学教室 (2004).
- 喜久村力：がん治療用炭素線の生体内での減弱量評価に関する基礎研究、修士論文、北里大学大学院医療系研究科 (2004).
- 古川卓司：シンクロトロンにおける遅い取り出しビームの高速遮断に関する研究、修士論文、千葉大学大学院自然科学研究科数理物性科学専攻 (2004).
- 坂間誠：高 LET 重イオンに対するダイヤモンド検出器の応答、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻 (2004).
- 崎久保拓男： $^{11}\text{C}$  ビームの飛程末端位置における  $^{11}\text{C}$  数の絶対測定、卒業研究、北里大学医療衛生学部卒業研究抄録集 (2004).
- 秋生賢吾：核破砕反応により生成される粒子の角度分布と横方向線量分布、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻 (2004).
- 小林利史：カラー写真の原理を用いた放射線検出器の改良、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科 (2004).
- 松本健一：マイクロビーム細胞照射装置 (SPICE)における磁場集束型イオンマイクロビームのシングルイオン化に、修士論文、東邦大学大学院理学研究科 (2004).
- 上杉健弘：HIMAC シンクロトロンにおける多重周回ビーム入射法の最適化、卒業研究、千葉大学理学部物理学科 (2004).
- 新田哲士：ICCHIBAN 実験で用いる大面積 Si 検出器の漏れ電流と分解能の評価、卒業研究、東邦大学理学部物理学科 (2004).

- 真柄昂胤：重粒子線治療における重粒子線と生体構成元素の原子核との核破砕反応、卒業研究、北里大学医療衛生学部卒業研究抄録集 (2004).
- 石川明幸：薄膜結晶中をチャネリング通過した高速イオンの出射角測定による軌道の特定、卒業研究、東京都立大学理学部物理学学科 (2004).
- 石村倫子：核破砕反応が  $^{11}\text{C}$  重粒子線治療に及ぼす影響、卒業研究、北里大学診療放射線技術科学学科 (2004).
- 浅枝真行：Si(Li)検出器を用いた Fe 同位体の区別、卒業研究、早稲田大学 (2004).
- 蔵座元英：重イオンパルスビームを用いた PZT 検出器特性、卒業研究、早稲田大学 (2004).
- 大野由美子：ブロードビーム重イオン CT システムの開発と性能評価、博士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2004).
- 田中鐘信：Nucleon Density Distribution of Proton Drip-Line Nucleus  $^{17}\text{Ne}$ , 博士論文、大阪大学 (2004).
- 渡部恵理子：治療用重イオンビームの核破砕反応により生成される中性子測定、卒業研究、東京工業大学理学部 (2004).
- 土井龍介：重粒子線治療場炭素ビームの線質評価、卒業研究、広島大学工学部第 1 類 (2004).
- 藤本宏涼：治療用重粒子ビームによる水の放射線分解 (Radiolysis of water by irradiation with heavy ion beam)、卒業研究、東京大学工学部システム創成工学科生体情報システムコース (2004).
- 内山宙志：HIMAC に於ける、酸素分子ビームを用いたビームプロファイルモニターのガスシートビーム収束系の最適化に関する研究、修士論文、千葉大学大学院自然科学研究科理化学専攻 (2004).
- 八島浩：高エネルギー重荷電粒子の核破砕反応による核種生成の断面積と生成放射能の物質内分布に関する研究、東北大学大学院工学研究科 (2004).
- 平野江里子： $^{12}\text{C}$  重粒子線と核破砕反応粒子の生体内における線量評価、卒業研究、北里大学診療放射線技術科学学科 (2004).
- 平林誠貴：重イオン衝撃による水分子からの二次電子トラック構造及び動径線量分布に関する研究、修士論文、東京理科大 (2004).
- 平林誠貴：重イオン衝撃による水分子からの二次電子トラック構造及び動径線量分布に関する研究、修士論文、東京理科大学理工学部 (2004).
- 並木佳世子：炭素線による水媒質での核破砕反応 (Total charge changing cross section) の CR-39 による測定—高速顕微鏡の開発を通して—、修士論文、東邦大学大学院理学研究科 (2004).
- 矢島佳央理：重イオンビームを利用した人工ダイヤモンド放射線検出器の開発、修士論文、東邦大学理学研究科物理学専攻 (2004).
- Huang J.: Properties and localization of Trehalase in embryo of the silkworm, *Bombyx mori*. 博士論文、京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 (2005).
- Kawaguchi A.: Characterization of a radioresistance in lung cancer cell line, 修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2005).
- Suzumoto Y.: The effects of radiation on angiogenesis – the difference between X ray and carbon ion beam, 修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2005).
- 大井和樹：突然変異誘発長寿命蛋白質ラジカル生成への線質効果と硫黄系抗酸化剤の消去能の検討、修士論文、名古屋大学大学院工学研究科 (2005).
- 定金恵子：家蚕の絹糸腺における炭水化物に関する研究 —特にトレハラーゼおよびソルビトール - 6 - 磷酸脱水素酵素について、修士論文、京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 (2005).
- Taddei P J.: The response of a spherical tissue-equivalent proportional counter to different ions having similar velocities. Dissertation, Colorado State University (2005).
- Tessa C.L.: Study of fragmentation cross sections for validation of factorization properties and benchmarking of heavy-ion transport codes. Dissertation, Chalmers University of Technology (2005).
- 阿須賀拓：CR-39 検出器中重イオントラック径方向サイズ評価、修士論文、神戸大学自然科学研究科 (2005).
- 遠西寿子：模擬星間物質からの放射線によるアミノ酸の生成と不斉の起源、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2005).
- 遠藤奈津美：重 RI ビーム粒子識別用全エネルギー検出器の開発、修士論文、東北大学大学院理学研究科 (2005).
- 遠藤雄輔：金沈着現像法を用いた荷電粒子弁別法の開発、修士論文、千葉大学大学院自然科学研究科 (2005).
- 鎌田真太郎：固体飛跡検出器を応用した X 線

- マルチコリメータの研究、修士論文、横浜国立大学大学院工学研究科 (2005).
- 岩塚正博：CALET 全吸収カロリメータ開発：フォトダイオードによる BGO シンチレーション光ワイド、レンジ読み出しシステムの開発、卒業研究、横浜国立大学工学部 (2005).
- 恵比寿和也：CdTe 半導体検出器による低エネルギー X 線検出の試み、卒業研究、東京都立大学 (2005).
- 古場尚雅：ガスシンチレーションカウンターの特性の研究、卒業研究、九州大学工学部 (2005).
- 高橋聖：軽い原子核ビームに対する無機結晶シンチレータの応答の研究、修士論文、新潟大学大学院自然科学研究科物質基礎科学専攻 (2005).
- 三橋庸智：ALET 全吸収カロリメータ開発：光電子増倍管による BGO シンチレーション光のワイド読み出しの研究、卒業研究、横浜国立大学工学部 (2005).
- 三木俊也：低物質質量位置検出器の開発、修士論文、東北大学大学院理学研究科 (2005).
- 山下真一：治療用重粒子線による水の放射線分解～収量測定とスパー内反応シミュレーション～、修士論文、東京大学大学院工学系研究科 (2005).
- 紙崎直樹：プラスチック飛跡検出器 CR-39 のエッチピット形状の解析、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科 (2005).
- 柴崎昌紀：医療用重イオンビームの核破砕反応の研究－同位体分離用エマルジョンスペクトロメーターの基礎特性－、修士論文、東邦大学大学院理学研究科 (2005).
- 小屋謙介：治療想定部位ファントムへのがん治療用炭素線の照射、卒業研究、北里大学医療衛生学部 (2005).
- 小淵保幸：高時間・空間分解能オーロラ観測のための INDEX 衛星搭載多波長オーロラカメラの開発、修士論文、東北大学 (2005).
- 松政泰三：中間エネルギーにおける反応断面積と中性子過剰核  ${}^6\text{He}$  の核子密度分布、修士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2005).
- 真杉三郎：極薄結晶を用いたコヒーレント共鳴励起の観測、修士論文、東京都立大学理学研究科 (2005).
- 泉健太郎：CR-39 プラスチックの赤外線吸収スペクトル、修士論文、神戸大学自然科学研究科 (2005).
- 倉田真吾：ガラス飛跡検出器を応用した X 線マルチコリメータの性能評価、卒業研究、横浜国立大学工学部知能物理工学科 (2005).
- 相場政光：Study of resonance crossing in strong focusing accelerators 強収束加速器における共鳴横切りに関する研究、博士論文、東京大学大学院理学研究科物理専攻 (2005).
- 大川仁志：重粒子入射核反応実験のための計測技術の開発、卒業研究、九州大学工学部 (2005).
- 知念良哉：がん治療用イオンビームによる水分解の空間・時間挙動のシミュレーション、卒業研究、東京大学工学部 (2005).
- 中橋喜悦：高電離重イオン衝撃による水・炭化水素分子の電離断面積測定、修士論文、東京工業大学総合理工学研究科創造エネルギー先専攻 (2005).
- 中村勇介：高速重イオンに対する圧電素子の応答、修士論文、早稲田大学 (2005).
- 中村勇介：高速重イオンに対する圧電素子の応答、修士論文、早稲田大学 (2005).
- 中島千晴：核反応断面積測定のための治療用同位体ビームの純度測定に関する研究、卒業研究、東邦大学 (2005).
- 椿智子：EUSO 用カメラの高電圧装置に対する粒子線照射の影響、卒業研究、甲南大学理工学部物理学科 (2005).
- 坪井大樹：月惑星環境下における有機物の変成、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2005).
- 藤原裕樹：ベータ放射性核  ${}^{25}\text{Na}$  の電気四重極モーメント、修士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2005).
- 武智麻耶：Elucidation of the Behavior of Reaction Cross Sections at Intermediate Energies and Halo Structure of  ${}^6\text{He}$ . 博士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2005).
- 平井賢：薄膜放電を用いた強結合プラズマ標的の開発、修士論文、東京工業大学総合理工学研究科 (2005).
- 芳原新也：カウンターテレスコープ?E 検出器としてのガス比例シンチレーション計数管に関する研究、博士論文、九州大学大学院工学府 (2005).
- 牧大介：重粒子入射核反応測定用 MWPC の開発、修士論文、九州大学大学院工学府 (2005).
- 榭谷隆志：ポリカーボネート中重イオントラックの損傷分布、修士論文、神戸大学自然科学研究科 (2005).
- 野原智紀：8-オキシグアニンを含むクラスター損傷に対する塩基除去修復酵素の活性、修士論文、広島大学大学院理学研究科 (2005).
- 柳澤正規：ブロードビーム重イオン C T システムの実用化に向けた改良、修士論文、東



- 京工業大学大学院総合理工学研究科 (2005).  
 落合佳子：水標的に対する C 同位体の核反応断面積の測定、修士論文、東邦大学大学院理学研究科 (2005).  
 林賢太郎：ハロゲン化銀写真乾板とプラスチック飛跡検出器 CR39 を複合した放射線飛跡検出器の研究、修士論文、千葉大学大学院自然科学研究科 (2005).  
 高柳浩紀：重荷電粒子線誘発による体細胞突然変異に関する研究－キイロショウジョウバエ体細胞突然変異誘発システムを用いた解析－、修士論文、長崎大学生産科学研究科 (2005).  
 松永晃直：重粒子線療法と樹状細胞療法の併用はマウス扁平上皮癌に対する腫瘍免疫を活性化する、医学博士論文、千葉大学大学院医学研究院先端生命科学専攻(2006).  
 森下佳奈：タマネギ根端細胞において放射線によって生じる小核の定量的解析、修士論文、長崎大学生産科学研究科 (2006).  
 渡邊かおり：プラナリアにおける重粒子線の影響、修士論文、慶應義塾大学大学院理工学研究科(2006).  
 稲庭拓：粒子線治療時に生じる陽電子崩壊核を利用した照射野確認法の研究、博士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2006).  
 亀井拓也：BP-1 ガラス飛跡検出器の研究、卒業研究、横浜国立大学工学部知能物理工学科 (2006).  
 菊地正人：BP-1 ガラス X 線コリメータを用いた X 線 CCD の研究、修士論文、横浜国立大学大学院工学研究科 (2006).  
 近藤力：非チャネリング条件下における高速多価イオンのコヒーレント共鳴励起、博士論文、東京大学理学研究科 (2006).  
 江原将文：突然変異誘発長寿命ラジカルの生成機構・部位およびラジカル種の線量依存性、修士論文、名古屋大学大学院工学研究科 (2006).  
 篠田浩司：ブロードビーム重イオン CT システムの応用研究 修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2006).  
 小原雅子：重粒子線治療におけるフラグメントの生成・輸送モデルの研究、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2006).  
 松井祐樹：治療用高エネルギー粒子場におけるボナー球の応答特性、卒業研究、東京工業大学理学部物理学科 (2006).  
 松宮亮平：短寿命ベータ放射性核  $^{23}\text{Ne}$  の磁気モーメント、修士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2006).  
 浅枝真行：宇宙線中の超鉄核同位体観測のための固体飛跡検出器の開発、修士論文、早稲田大学大学院理工学研究科 (2006).  
 倉田真吾：重イオン CT を用いた CT 値－阻止能比変換テーブルの評価、修士論文、横浜国立大学大学院工学府(2006).  
 太田周也：CR-39 固体飛跡検出器を用いた Fe 核の反応断面積測定、卒業研究、早稲田大学理工学部 (2006).  
 大橋邦光：「BP-1 製 X 線マルチコリメータにおける微細孔の位置決定法」、卒業研究、横浜国立大学工学部知能物理工学科 (2006).  
 中野祐司：コヒーレント共鳴励起による 2 重共鳴の観測、修士論文、東京都立大学理学研究科 (2006).  
 天草善信：低線量  $\gamma$  線照射による哺乳動物細胞中の突然変異誘発長寿命ラジカル量の線量依存性、卒業研究、名古屋大学工学部 (2006).  
 渡部恵理子：治療用粒子場における中性子の測定と線量評価、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2006).  
 土井龍介：放射線治療炭素線及び生成 2 次粒子フラグメントの生物効果比の評価、修士論文 (2006).  
 嶋津拓郎：医療用重粒子線を用いた核反応実験のための検出器開発、卒業研究、九州大学工学部エネルギー科学科 (2006).  
 藤ヶ崎大地：放射線感度の異なる写真乳剤を用いた多層カラー放射線検出器の開発、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科 (2006).  
 内田佳宏：「積層型 BP-1 ガラス X 線コリメータの研究」、修士論文、横浜国立大学大学院工学研究科 (2006).  
 比佐雄爾：放射線感度の異なる写真乳剤を用いた放射線飛跡の検出、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科(2006).  
 平山亮一：放射線誘発 DNA 損傷と修復に対する酸素の影響、博士論文、千葉大学大学院自然科学研究科多様性科学専攻エネルギー多様性科学 (2006).  
 鈴木宣成：模擬星間物質から粒子線照射により生成した複雑有機物のキャラクタリゼーション、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2006).  
 Moeller R.: Characterization of different types of radiation- and pressure-induced DNA damage in *Bacillus subtilis* spores and their global

- transcriptional response during spore germination. Ph.D. Thesis, Technical University Braunschweig, Germany (2007).
- 古市渉：重粒子線による DNA 酸化的損傷～LET, 粒子種, 酸素依存性～、修士論文、東海大学大学院工学研究科 (2007).
- 高瀬信宏：蛍光抗体法による X 線誘発された DNA 酸化損傷の検出、卒業研究、東海大学工学部 (2007).
- 三上麻里：放射線治療における照射野辺縁モデル細胞の動態解析、修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2007).
- 竹内朝子：血管新生に対する X 線及び炭素イオン線の作用の検討、修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2007).
- 渡邊雅彦：炭素線照射に対する腸管反応の機能的評価および血流補正の重要性について、修士論文、東京理科大学大学院薬学研究科(2007).
- 木原彩佳：がん細胞の遺伝子変化に与える放射線の影響、修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2007).
- 阿部幸二：宇宙応用に向けたガス電子増幅フォイルの重イオン照射実験、修士論文、東京理科大学 (2007).
- 加瀬優紀：組織等価比例計数管を用いた重粒子線ビームの線質測定と生物効果の推定、博士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科(2007).
- 原 洋介：Wobbler 法における Bolus が線量分布に及ぼす影響の研究、卒業研究、筑波大学工学基礎学類・卒業論文 (2007).
- 古場尚雅：290 MeV/u  $^{12}\text{C}$  入射反応からの陽子生成断面積の測定、修士論文、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学部門 (2007).
- 古場裕介：シンチレータ検出器を用いた中高エネルギー荷電粒子測定に関する研究、修士論文、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学部門 (2007).
- 向井謙騎：炭素線と生体構成物質との核破砕反応のエネルギー依存性の評価、卒業研究、北里大学医療衛生学部卒業研究抄録集 (2007).
- 高橋慎太郎：短寿命 $\beta$ 放射性核  $^{28}\text{P}$  の磁気双極子モーメント、修士論文、新潟大学大学院自然科学研究科(2007).
- 佐藤匡：宇宙線観測のための固体飛跡検出器による超重核飛跡深さ測定法、卒業研究、早稲田大学理工学部(2007).
- 山形文子：核破砕反応により生じる陽電子崩壊核を用いた不均質標的に対する飛程の推定、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2007).
- 酒井貴博：放射線によるタンパク質変性過程の解析、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2007).
- 首藤章志：分光分析によるイオン照射ポリイミド高分子の構造変化に関する研究、修士論文、平成 18 年度東京大学大学院工学系研究科(2007).
- 小平聡：銀河宇宙線中の超重核成分観測のための高性能固体飛跡検出器の開発、博士論文、早稲田大学大学院理工学研究科 (2007).
- 小林亮二：HDPE,UHMWPE に対する重イオン照射効果、卒業研究、平成 18 年度早稲田大学理工学部(2007).
- 松本秀紀：LHCf のためのカロリメータの開発とエネルギー測定精度の評価、修士論文、2006 年度名古屋大学大学院理学研究科 (2007).
- 松木祐美：がん治療用炭素線ペンシルビームの核破砕反応による光量分布への影響の評価、卒業研究、北里大学医療衛生学部卒業研究抄録集 (2007).
- 真柄昂胤：炭素線癌治療計画を高精度化するために必要な理論モデルの実験的検証、修士論文、北里大学大学院医療系研究科医療放射線工学 (2007).
- 成川由佳：放射線照射したヒト血清アルブミン中のアミノ酸の分析、卒業研究、横浜国立大学工学部物質工学科 (2007).
- 西村太樹：質量数  $A=9$  体系の反応断面積と核子密度分布、修士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2007).
- 斉藤功樹：ポリプロピレンに対する放射線照射効果、卒業研究、平成 18 年度早稲田大学理工学部(2007).
- 川畑徹：治療想定部位ファントムを用いたがん治療用炭素線の減弱量評価、卒業研究、北里大学医療衛生学部卒業研究抄録集 (2007).
- 前山拓哉：ケイ光プローブを用いた重粒子線照射効果の研究、修士論文、東京大学大学院工学系研究科 (2007).
- 大川仁志：シミュレーション計算による重粒子入射核反応測定用 MWPC の特性評価、修士論文、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学部門 (2007).
- 谷藤宏平、斉藤和哉、三浦宗賢、柴田寛之： $^3\text{He}$ ,  $^3\text{H}$  の反応断面積測定、卒業研究、埼玉大学理学部(2007).
- 渡邊宗一郎：赤外線分光法による高分子固体

- 飛跡検出器中潜在飛跡構造、修士論文、神戸大学大学院自然科学研究科 (2007).
- 渡邊泰典：LHCf 検出器の放射線耐性評価、修士論文、名古屋大学大学院理学研究科 (2007).
- 土谷忠義：重イオン照射ポリエチレンの構造変化-PE 構造への依存性-、修士論文、平成 18 年度早稲田大学大学院理工学研究科 (2007).
- 本橋良太：アイソタクチックポリプロピレンに対するイオンビーム照射効果、修士論文、平成 18 年度早稲田大学大学院理工学研究科 (2007).
- 齋藤碧：治療部位想定ファントムと水ファントムによる治療用炭素線の減弱量評価、卒業研究、北里大学医療衛生学部 (2007).
- 中嶋美緒：Peptidomic analysis of sera from non-small cell lung cancer patients before and after carbon-ion radiotherapy (非小細胞肺癌に対する炭素イオン線治療前後の血ペプチドーム解析)、博士論文、千葉大学大学院医学薬学府 先進医療科学専攻 胸部外科病態学 (2008).
- 稲岡美穂：The effect of carbon ion beam irradiation on metastasis- and invasion-related protein、卒業研究、大阪大学医学部保健学科 (2008).
- 舘脇直人：癌細胞の DNA 損傷チェックポイントに対する五味子成分の作用、修士論文、新潟薬科大学大学院応用生命科学研究科 (2008).
- 高橋江里佳：マウス T リンパ腫における Ikaros ならびに p53 変異の系統差、卒業研究、東邦大学理学部生物分子科学科 (2008).
- 佐藤克俊：Expression of p53 and radiosensitive factor in radioresistant cancer cell line、修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2008).
- 山川延宏：線エネルギー付与の高い放射線は変異型 p53 がん細胞において Caspase-9 の活性化を經由してアポトーシス誘導を増強する、博士論文、奈良県立医科大学大学院 (2008).
- 秋野祐一：The Effect of Carbon Particle Irradiation on Hypoxia-mediated Invasion of Glioblastoma、修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2008).
- 増野 陽一：大線量 X 線照射及び高エネルギー重粒子線照射に対する微生物の生存に関する研究、卒業研究、広島大学生物生産学部 (2008).
- 渡邊昌彦：炭素線照射に対する腸管反応の機能的評価および血流補正の重要性について、修士論文、東京理科大学大学院薬学研究科薬学専攻 (2008).
- Mancusi D.: Radiation and matter: how do they play with each other? Nuclear Engineering Department of Applied Physics, Chalmers University of Technology Goteborg, Sweden (2008).
- 塩津智之：空気中における ETFE の重イオンビーム照射効果、卒業研究、早稲田大学 理工学部 応用物理学科 (2008).
- 横澤孝章：BP-1 ガラス製 X 線コリメータの最適化の研究、卒業研究、横浜国立大学工学部 (2008).
- 岡田豊史：6.0 MeV/u C<sup>6+</sup> ビーム衝撃による水蒸気からの放出二次電子線の生成二重微分断面積の測定、卒業研究、千葉大理学部物理学科 (2008).
- 河井梨恵：重イオン線 CT の開発に関する基礎的研究～照射ビームの違いによる影響～、卒業研究、北里大学医療衛生学部医療工学科診療放射線技術科学専攻 (2008).
- 間瀬剛：LHCf 実験用カロリメータにおける粒子弁別能力の研究、修士論文、名古屋大学大学院理学研究科 (2008).
- 亀井拓也：宇宙線超重核観測に向けたガラス固体飛跡検出器の開発、修士論文、横浜国立大学大学院工学府 (2008).
- 吉竹利織：A=3 体系鏡映核の核半径、修士論文、埼玉大学理工学研究科 (2008).
- 久保木隆正：理研稀少 RI リングの為に TOF 検出器の開発、修士論文、埼玉大学理工学研究科 (2008).
- 橋本浩利：炭素イオン線 (C<sup>6+</sup>) と水分子の衝突による放出二次電子の二重微分断面積測定、修士論文、東京理科大学大学院理工学研究科物理学専攻 (2008).
- 高橋良幸：重イオン線 CT の画質向上に関する研究、修士論文、茨城県立医療大学保健医療科学研究科放射線技術科学専攻 (2008).
- 今川邦樹：消滅  $\gamma$  線の観測によるスキヤニング照射時のビーム幅推定、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2008).
- 細貝知弘：模擬タイタンソーリンのキャラクタリゼーション、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2008).
- 坂間誠：グラフィイトカロリメータを用いた高エネルギー重粒子線場の絶対線量測定、博士論文、東京工業大学大学院 総合理工学研究科 創造エネルギー専攻 (2008).
- 山下真一：HIMAC からの GeV 級重粒子線による水分解の研究 ～収量測定とシミュレ

- ーションによるトラック構造の検討～、博士論文、東京大学大学院工学系研究科 (2008).
- 小紫順治：短寿命  $\beta$  放射性核  $^{22}\text{F}$ ,  $^{24\text{m}}\text{Al}$ ,  $^{28}\text{P}$  の磁気モーメント、修士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2008).
- 松井祐樹：治療用粒子場における中性子の線量当量評価と人体への影響、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2008).
- 森口哲朗：RI ビームの飛行時間測定のための Hybrid Photo Detector の研究、修士論文、筑波大学数理物質科学研究科 (2008).
- 瀬戸直人：アイソタクチックポリプロピレンに対する放射線照射効果、修士論文、早稲田大学 大学院 理工学研究科 (2008).
- 西潟修一：高エネルギー炭素線によるフラグメント生成に関する研究、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2008).
- 太田周也：銀河宇宙線中の原子核成分と星間媒質との核変換断面積の測定、修士論文、早稲田大学大学院理工学研究科 (2008).
- 田川智博：ガラス飛跡検出器 BP-1 のエッチング処理の最適化と化学構造、卒業研究、横浜国立大学工学部 (2008).
- 渡邊裕司：イオンビーム照射ポリエチレンの微小構造変化、修士論文、早稲田大学 大学院 理工学研究科 (2008).
- 嶋津拓郎：重粒子入射陽子生成核反応データの測定、修士論文、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学部門 (2008).
- 内藤理生：放射線感度の異なる写真乳剤を用いた放射線飛跡の検出、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科 (2008).
- 福田洋平：重粒子入射核反応実験のためのシンチレーションファイバー検出器の開発、卒業研究、九州大学工学部エネルギー科学科 (2008).
- 平野晴誉：核子交換反応を用いた偏極不安定核生成についての研究、修士論文、新潟大学大学院自然科学研究科 (2008).
- 保谷毅：中高エネルギーでの  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  の反応断面積の測定、修士論文、筑波大学数理物質科学研究科 (2008).
- 野中敦：中間エネルギー不安定核ビームによる陽子弾性散乱測定装置、修士論文、宮崎大学工学研究科 (2008).
- 五十野優：膵癌細胞の転移能および転移関連タンパク発現に対する放射線照射の影響、卒業研究、大阪大学医学部保健学科 (2009).
- 土屋貴裕：微小管重合阻害薬 TZT-1027 と放射線の併用によるがん細胞の血管新生能へ及ぼす影響、卒業研究、大阪大学医学部保健学科 (2009).
- 伊丹淳：X 線および炭素線照射による細胞遊走・浸潤活性の促進あるいは減弱に対する p53 ステータスの影響、修士論文、徳島大学大学院保健科学教育部 (2009).
- 柿菌裕介： $\gamma$  線および重荷電粒子線を受けたタマネギ発芽種子の根の伸長、修士論文、崎大学生産科学研究科 (2009).
- 松尾陽一郎：重粒子線による出芽酵母の照射効果 ―重粒子線を用いた育種技術に関する基礎的研究―、博士論文、大阪大学大学院工学研究科 (2009).
- 倉重理恵子：放射線が誘発する DNA 二本鎖切断と DNA-タンパク質クロスリンク損傷の解析、卒業研究、広島大学理学部 (2009).
- 藤崎健太：模擬宇宙環境下での微生物の生存可能性とその検出法の検討、修士論文、横浜国立大学大学院工学府 (2009).
- 藤崎健太：模擬宇宙環境下での微生物の生存可能性とその検出法の検討、修士論文、横浜国立大学大学院工学研究科 (2009).
- 保田隆子：メダカ胚発生中の脳へ及ぼす放射線影響研究、博士論文、千葉大学大学院融合科学研究科 (2009).
- 門前暁：ヒト造血幹細胞からの巨核球・血小板造血に対する放射線の影響に関する研究、博士論文、弘前大学大学院保健学研究科保健学専攻 (2009).
- Manglass L.: Omni-Directional Sensitivity Of A Tissue Equivalent Proportional Counter For Personal Dosimetry During Extra Vehicular Activity On The Moon. Thesis, Colorado State University (2009).
- 岡部博：炭素線治療における線質の照射野依存性、修士論文、日本大学大学院理工学研究科 (2009).
- 岡部博：炭素線治療における線質の照射野依存性、修士論文、日本大学大学院理工学研究科 (2009).
- 久保徹：短寿命  $\beta$  放射性核  $^{22}\text{F}$  の電気四重極モーメント、修士論文、新潟大学大学院自然科学研究科 (2009).
- 牛川多恵、滝澤芽未、日名子裕介：増感紙-CCD カメラシステムによる医用重粒子線 CT の検討；光学レンズの集光力特性、卒業研究、北里大学医療衛生学部医療工学科診療放射線技術科学専攻 (2009).
- 九島洋介：HDPE に対する重イオン照射効果、卒業研究、平成 20 年度早稲田大学 理工学部 物理学科 (2009).

- 古場裕介：中高エネルギー荷電粒子測定におけるシンチレータ検出器の非線形発光特性と高効率化に関する研究、博士学位論文、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻 (2009).
- 戸森聖治：がん治療用炭素線ペンシルビームの物質内でのプロファイル評価、卒業研究、北里大学医療衛生学部 (2009).
- 胡子昇一朗：Symmetry Energy の研究のための Pion Range Counter の開発とそのテスト、修士論文、京都大学大学院理学研究科 (2009).
- 向井謙騎：がん治療用炭素線ペンシルビームの物質内でのプロファイル評価、修士論文、北里大学大学院医療系研究科 (2009).
- 今村稔：無機シンチレータの非線形発光特性に関する研究、博士論文、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻 (2009).
- 佐藤修司：南極昭和基地周辺土壤中のホスファターゼ活性、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2009).
- 市川武：J-PARC 陽子線加速器スピル電流デジタル制御システムの開発、修士論文、武蔵野工業大学 (2009).
- 秋澤文明：重粒子線照射におけるポリプロピレンのラジカル変化、卒業研究、平成 20 年度早稲田大学 理工学部 物理学科 (2009).
- 小沼慎弥：加速器のビーム取り出し制御のためのパワースペクトル密度分析回路の開発、卒業論文、武蔵野工業大学 (2009).
- 小川賢一郎：RI ビームのエネルギー損失測定用傾斜電極型電離箱の性能評価、修士論文、筑波大学数理物質科学研究科 (2009).
- 小川達彦：高エネルギー放射線の放射線場および放射化により生成する放射能の評価に関する研究、修士論文、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻 (2009).
- 小林亮二：真空中イオンビーム照射による HDPE の微小構造変化、修士論文、平成 20 年度早稲田大学 大学院 理工学研究科 物理学及応用物理学専攻 (2009).
- 松下郁：金属箔の放射化を用いた中性子エネルギー分布の推定に関する研究、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2009).
- 新田稔：非対称原子核衝突における生成パイ中間子測定用検出器の開発、修士論文、立教大学大学院理学研究科 (2009).
- 水島康太：3D スキャニング照射のための RF ノックアウト法による遅れ取り出しの研究、修士論文、千葉大学大学院理学研究科 (2009).
- 斉藤功樹：イオン照射によるアイソタクチックポリプロピレンの微小構造変化、修士論文、平成 20 年度早稲田大学 大学院 理工学研究科 物理学及応用物理学専攻 (2009).
- 石崎梓：拡大ブラッグピーク変調エネルギーフィルターを用いた新照射システムの開発、博士論文、東北大学大学院工学研究科 (2009).
- 川畑徹：がん治療用炭素線における核破砕反応理論モデルが生体内線量分布に与える影響の評価、修士論文、北里大学大学院医療系研究科 (2009).
- 太田周也：銀河宇宙線中の原子核成分と星間媒質との核変換断面積の測定、修士論文、早稲田大学理工学研究科 (2009).
- 大釜章嗣：高電離重イオン衝撃による炭化水素異性体の電離過程の研究、修士論文、東京理科大学大学院理工学研究科 (2009).
- 大島雄二：燃料電池用電解質の開発ーハイブリッド型 MEA システムのための電解質微粒子の合成ー、修士論文、平成 20 年度早稲田大学 大学院 理工学研究科 物理学及応用物理学専攻 (2009).
- 滝川達也：核破砕反応による 2 次粒子の空間分布モデルの研究、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2009).
- 中村泰博：炭素に対する 290MeV/u 炭素イオン入射中性子生成断面積測定、修士論文、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻 (2009).
- 中野祐司：Internal State Manipulation of Fast Heavy Ions by Periodic Crystal Fields、博士論文、首都大学東京 理工学研究科物理学専攻 (2009).
- 仲秀一郎：CR-39 固体飛跡検出器を用いた新しい超重元素弁別法の研究、卒業研究、早稲田大学理工学部 (2009).
- 鄭 文娟：低温赤色光補力による、放射線飛跡の検出感度の向上、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科 (2009).
- 田原和弥：医療用重粒子線入射による陽子生成反応に関する研究、卒業研究、九州大学工学部エネルギー科学科 (2009).
- 田中鷹平：飛行時間法によるシンチレータ蛍光寿命の測定、卒業論文、九州大学工学部エネルギー科学科 (2009).
- 渡辺広太：T クロックのみによるシンクロトロンでのビーム加速、修士論文、千葉大学大学院理学研究科 (2009).
- 八馬功：理研 RIBF における中性子過剰 Ne 同位体の核半径に関する研究、修士論文、埼

- 玉大学理工学研究科 (2009).
- 伴 尚：重粒子入射陽子生成反応の最前方測定に関する研究、修士論文、九州大学大学院工学部エネルギー量子工学専攻 (2009).
- 飯塚正樹：炭素線による核破砕反応の拡がりの理論モデルによる正当性の評価、卒業研究、北里大学医療衛生学部 (2009).
- 福武直之：集束イオンビームを用いたフッ素系高分子のナノ加工に関する研究、修士論文、平成 20 年度早稲田大学 大学院 理工学研究科 物理学及応用物理学専攻 (2009).
- 峯松正和：HIMAC180 ビーム及び 2 次粒子フラグメントのマイクロドシメトリ、卒業研究、広島大学大学院工学研究科 (2009).
- 柳田侑樹：中高エネルギー荷電粒子に対する無機シンチレータの発光の研究、卒業研究、九州大学工学部エネルギー科学科 (2009).
- 稲岡美穂：肺腺癌における転移関連分子に対する放射線照射の影響、修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2010).
- 富田恒幸：血管新生に対する放射線の影響、修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2010).
- 高橋江里佳：B6C3F1 マウスに置ける炭素線誘発 T 細胞リンパ腫のゲノム変化、修士論文、千葉大学大学院地球生命圏科学専攻 (2010).
- 高瀬信宏：重粒子線によって誘発された細胞内 DNA 酸化損傷の蛍光抗体法による観察、修士論文、東海大学大学院工学研究科応用理学専攻 (2010).
- 曾子峰：放射線を照射した発芽種子の根の伸長、修士論文、長崎大学生産科学研究科 (2010).
- 増野陽一：微生物の大線量エックス線および高エネルギー重粒子線照射に対する生存に関する研究、修士論文、広島大学 大学院生物圏科学研究科 (2010).
- 谷 琨：たまねぎ発芽種子の小核発生の時間的变化、修士論文、長崎大学生産科学研究科 (2010).
- 鶴岡千鶴：ヒト由来正常細胞の様々な生物効果に対する重粒子線の加速核種及び LET 依存性について、博士論文、千葉大学大学院融合科学研究科 (2010).
- 伏見英彦：地球周回軌道上での宇宙人補修法とその有機物分析法の検討、修士学位論文、横浜国立大学 大学院工学研究科 (2010).
- Pachnerová B.K.: Study and development of track etch detectors for dosimetric purposes. Ph.D. Thesis, Czech Technical University in Prague (2010).
- 伊藤崇之：厚い標的中で生成される核破砕片の空間分布とその入射核種依存性、卒業研究、東京工業大学理学部 (2010).
- 井手口悠介：CR-39 固体飛跡検出器を使用した Kr の核破砕断面積測定、卒業研究、早稲田大学理工学部物理学科 (2010).
- 井川麻理沙、川原田幸道、藤本理紗：EMCCD カメラと電離箱モニターの導入による医用重粒子線 CT の高速撮影化、卒業研究、北里大学医療衛生学部医療工学科診療放射線技術科学専攻 (2010).
- 宇野豪文：高エネルギーXe ビーム照射によって液体媒質中に生成された音響波の検出、修士論文、大阪市立大学 (2010).
- 鎌苅玄：がん治療用ペンシルビームの物質内でのプロファイル変化評価法の確立、卒業研究、北里大学医療衛生学部 (2010).
- 宮里尚宏：放射線エネルギー測定のためのグレインデンシティ測定方法の改良、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科 (2010).
- 元山拓也：模擬星間環境下で生成する複雑態アミノ酸前駆体の分析、修士論文、横浜国立大学大学院工学部機能発現工学専攻 (2010).
- 高澤侑也：集束イオンビームを用いたフッ素系高分子ナノスケール機能性材料の創製、修士（工学）論文、早稲田大学大学院 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻 (2010).
- 細川哲：がん治療用重粒子線の挙動評価、卒業研究、東京大学工学部システム創成学科 (2010).
- 酒向正己： $^{115}\text{In}(^{28}\text{Si}, \pi^+)X$  反応の入射エネルギー依存性、修士論文、京都大学大学院理学研究科 (2010).
- 出原寿紘：衛星搭載用 X 線 CCD カメラの信号処理用アナログ ASIC の開発、修士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2010).
- 新納史朗：重粒子入射による陽子生成断面積の測定に関する研究、卒業研究、九州大学工学部エネルギー科学科 (2010).
- 翠川匡道：パルスラジオリシスと ESR 法によるスピントラップ剤 CYPMPO の反応性研究、修士論文、東京大学大学院工学系研究科(2010).
- 川出健太郎：LHCf測定器の耐放射線改良 GSO シンチレータの性能評価、修士論文、名古屋大学大学院理学研究科 (2010).
- 大野祐樹：低温赤色光後露光補力による放射線飛跡検出感度の向上、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科 (2010).



- 朝倉祐太：治療用炭素線ペンシルビームの物質内でのプロファイル評価法の確立、卒業研究、北里大学医療衛生学部 (2010).
- 津田修一：重荷電粒子線のマイクロシメトリを目的とした Wall-less 型組織等価比例計数管の開発に関する研究、博士論文、総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 (2010).
- 鶴田有樹：重粒子線の自己放射化と CT 測定を利用した不均質標的中の飛程推定、修士論文、東京工業大学総合理工学研究科 (2010).
- 東田明洋：ベータトロン振動のチューン補正によるビーム不安定性の改善、卒業研究、千葉大学大学院理学部物理学科 (2010).
- 鍋谷好礼：3SBPM を用いたビームの加速過程における拡がりに関する研究、卒業研究、千葉大学大学院理学部物理学科 (2010).
- 難波将夫：粒子線治療における患者体内二次中性子のリスク評価、修士論文、横浜市立大学大学院医学研究科 (2010).
- 二瓶哲哉：陽子線治療(Wobbler 法)における最適な bolus 形状の設計、修士論文、筑波大学大学院数理物質科学研究科 (2010).
- 白木文也：量子ビーム照射による固体高分子型燃料電池用膜電極接合体の接着性改良に関する研究、修士論文、早稲田大学大学院先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻 (2010).
- 伏見英彦：地球周回軌道上での宇宙塵捕集法とその有機物分析法の検討、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2010).
- 福田洋平：重粒子入射による陽子生成核反応データの測定、修士論文、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻 (2010).
- 並木祐一：核子交換反応を用いた偏極不安定核  $^{28}\text{P}$  生成についての研究、修士論文、新潟大学大学院自然科学研究科 (2010).
- 茂垣達也：重イオン CT の高速化と画質改善、修士論文、茨城県立医療大学大学院保健医療科学研究科放射線技術科学専攻 (2010).
- 柳生田英徳：重イオン照射した  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  における磁気特性、卒業研究、東京大学工学部物理工学科 (2010).
- 濱田誠也：HIMAC400MeV/A SOBP 炭素ビームのマイクロシメトリ、卒業研究 (2010).
- 沖津正典、高井伸彦：脳内毛細血管密度を指標にした中枢神経障害の早期検出、卒業研究、平成 23 年度長崎国際大学薬学部薬学科 (2011).
- 乾翔輝：The effect of irradiation on surviving fraction, invasion and migration of lung adenocarcinoma cell in intermittent hypoxia. 卒業研究、大阪大学医学部保健学科 (2011).
- 吉岡彩：The effect of irradiation on metastatic potential and cytoskeleton-related protein of lung adenocarcinoma cell. 卒業研究、大阪大学医学部保健学科 (2011).
- 高居邦友：人工多能性幹細胞 (iPS 細胞) における放射線 DNA 損傷応答の解析、修士論文、京都大学大学院人間・環境学研究科 (2011).
- 高橋勇太：宇宙環境を想定した微生物の極限状態での生存可能性の推定、卒業研究、東京薬科大学生命科学部 (2011).
- 高柳千尋、小川由起子：炭素線を照射した放線菌の培養上清の抗腫瘍効果、卒業論文、平成 23 年度長崎国際大学薬学部薬学科 (2011).
- 上野瑞己：重粒子線照射によるマウス組織内での DNA 酸化産物の生成の観測・計測に関する実験、修士論文、東海大学大学院工学研究科 (2011).
- 西原明日香：The effect of irradiation on cytoskeleton of vascular endothelial cell. 卒業研究、大阪大学医学部保健学科 (2011).
- 塚田晃平、高井伸彦：脳への放射線照射における脳組織の RBE 測定方法の開発、卒業研究、平成 23 年度長崎国際大学薬学部薬学科 (2011).
- 平井崇久： $\gamma$  線、及び炭素線照射に対する PARP 阻害剤による増感作用、博士論文、順天堂大学大学院医学研究科 (2011).
- 袁 軍：放射線照射した発芽種子の根の伸長について、修士論文、長崎大学生産科学研究科 (2011).
- Sohier T.: Nouvelle approche de la dosimétrie des rayonnements ionisants par mesure de fluorescence, selon la technique du comptage de photon unique, corrélé en temps, à l'échelle nanoseconde. Université de Strasbourg, Ph.D. Defense Thesis (2011).
- 伊藤怜太：感度特性の異なる乳剤に記録された放射線飛跡のカラー現像による分別検出法の開発、修士論文、千葉大学大学院融合科学研究科画像マテリアルコース(2011).
- 永渕功輔：陽子線治療における計算による線量較正值の算出、修士論文、筑波大学大学院数理物質科学研究科 (2011).
- 岡部拓人：模擬原始惑星大気・星間物質から生成する核酸塩基の分析法の研究、卒業研究、横浜国立大学工学部物質工学科 (2011).
- 加藤大己、中野冴起、望月佑馬：医用重粒子線 CT の高速撮影化に関する研究、卒業研

- 究、北里大学医療衛生学部医療工学科診療放射線技術科学専攻 (2011).
- 吉川妙子：イオンビーム照射によるマイクロ／ナノスケール PEFC 用電解質膜の開発、修士論文、早稲田大学大学院先進理工学研究科 (2011).
- 近田啓：PADC 飛跡検出器に吸蔵させた二酸化炭素の挙動と増感効果、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2011).
- 金崎真聡：高精度粒子線分析のための PADC 中潜在飛跡特性評価、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2011).
- 原昌史：土壌中のアミノ酸分析による生物活動評価法の検討、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2011).
- 原洋介：炭素線治療における拡大ブラッグピークの線量一様性改善に関する研究、博士論文 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 (2011).
- 黒木俊貴：高電離重イオン衝撃による炭化水素気体の電離断面積測定、修士論文、東京理科大学大学院理工学研究科物理学専攻 (2011).
- 坂本晴香：過熱液滴型検出器の炭素線に対する応答、卒業研究、千葉大学理学部物理学科 (2011).
- 阪本淳志：高分子材料中カーボネートエステル結合に及ぼす紫外線照射効果、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2011).
- 三須晃裕、坂間誠：水中におけるカーボンビームの横方向散乱の精度検証、卒業研究、日本大学生産工学部電気電子工学科 (2011).
- 勝田義之：がん治療用炭素線ペンシルビームの物質内におけるプロファイル変化の評価、卒業研究、北里大学医療衛生学部 (2011).
- 小杉友香：重粒子線衝突によるエチレンの電離断面積における異性体効果、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2011).
- 上西秀和：中間エネルギー領域の荷電交換反応で生成される Na アイソトープの運動量分布、修士論文、大阪大学大学院 (2011).
- 上林聖：がん治療用炭素線ペンシルビームの物質内におけるプロファイル変化評価法の確立、卒業研究、北里大学医療衛生学部 (2011).
- 森口大輔：290 MeV/u 重イオン入射  $\gamma$  線生成二重微分断面積の測定、修士論文、九州大学大学院工学府 (2011).
- 深津幸平：GSO シンチレータを用いた新型 LHCf 検出器の開発と集光の位置依存性の評価、修士論文、名古屋大学大学院理学研究科 (2011).
- 水島康太：Beam Extraction Control for Fast 3D Scanning Irradiation in Medical Synchrotron. 博士論文、千葉大学大学院理学部物理学科 (2011).
- 西村太樹：Separation of the proton and neutron density distributions at the nuclear surface by utilizing proton-nucleus reaction cross sections. 博士論文、大阪大学理学研究科、(2011).
- 川本幸徳：宇宙環境での宇宙塵捕集および有機物曝露実験に関する基礎的検討、卒業研究、横浜国立大学工学部物質工学科 (2011).
- 前山拓哉：水への重粒子線照射で生じる $\cdot\text{OH}$ の収量—蛍光プローブの利用と核破碎の影響の検討、博士論文、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻 (2011).
- 前田佑介：イオン照射した CR-39 固体飛跡検出器の表面特性評価、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2011).
- 太田周也：Precise Measurements of projectile charge changing cross sections for intermediate energy heavy ions using CR-39 track detectors、博士論文、早稲田大学先進理工学研究科物理学及応用物理学専攻 (2011).
- 巽貴浩：イオンビーム照射による微細構造体を有した電解質膜の作製研究、修士論文、早稲田大学大学院先進理工学研究科 (2011).
- 谷口智隆：高エネルギーイオン照射した Co ドープ  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  における磁束状態とその物性評価、卒業研究、東京大学工学部物理工学科 (2011).
- 中野祐樹：粒子識別型 TEPC システムの性能試験、平成 22 年度卒業研究、広島大学工学部 (2011).
- 中竜大：暗黒物質の方向性探索に向けた高分解能原子核乾板技術の開発研究、博士論文、名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 (2011).
- 坪倉英裕：量子ビームを用いたマイクロ／ナノスケールの金属パターンニング作製、修士論文、早稲田大学大学院先進理工学研究科 (2011).
- 田縁俊光：高品質な鉄系超伝導体単結晶における磁束ダイナミクスと粒子線照射効果、修士論文、東京大学工学系研究科 (2011).
- 田原和弥：重粒子線入射によるフラグメント生成核データ測定に関する研究、修士論文、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻 (2011).
- 都築怜理：入射核破碎反応と CT 測定を利用し

- た飛程推定法の研究、卒業研究、東京工業大理学部物理学科 (2011).
- 藤田真吾：グレインデンシティとして測定された放射線感度と光感度の相関、卒業研究、千葉大学工学部情報画像工学科 (2011).
- 藤淵俊王：陽子線治療における2次中性子分布評価法に関する研究、博士論文、筑波大学大学院博士課程人間総合科学研究科 (2011).
- 馬籠泰宏、坂間誠：物質反応後の炭素線に対する水中深部線量分布の評価、卒業研究、日本大学生産工学部電気電子工学科 (2011).
- 飯塚正樹：治療用炭素線ペンシルビームの物質内でのプロファイル評価法の確立、修士論文、北里大学大学院医療系研究科 (2011).
- 峯松正和：粒子識別型 TEPC システムを用いた O-16 ビームの評価、平成 22 年度修士論文、広島大学工学部 (2011).
- 鈴木孝嗣：アミノ酸の円偏光紫外線および  $\beta$  線照射による分解とホモキラリティーの起源、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2011).
- Shoukamy M.: Induction and repair of DNA-protein cross-link damage in mammalian cells treated with aldehydes, ionizing radiation and anticancer drugs. 博士論文、広島大学大学院理学研究科 (2012).
- 宮澤浩人：グリオーマ幹細胞における DNA 修復能の解析、修士論文、京都大学大学院人間環境学研究科 (2012).
- 光定雄介：放射線が誘発する DNA 二本鎖切断と DNA-タンパク質クロスリンク損傷の細胞内動態、修士論文、広島大学大学院理学研究科 (2012).
- 川尻成俊：高層大気から単離された *Deinococcus* 属真正細菌の国際宇宙ステーション上における生存可能性の検証、卒業研究、東京薬科大学生命科学部 (2012).
- 大西和彦：膵臓癌幹細胞様細胞における細胞生存及び DNA 修復に関する炭素線と X 線の効果の違い、博士論文、千葉大学大学院医学薬学府先進医療科学専攻消化器病態学 (2012).
- 池田駿：重粒子線による脳障害への影響、卒業論文、卒業論文、長崎国際大学薬学部薬学科 (2012).
- 藤代華歌：ラン藻の宇宙環境耐性実験のための実験系の検討、卒業研究、筑波大学生物資源学類 (2012).
- 内田任仁弘：脳内毛細血管に与える炭素線照射の早期影響、卒業論文、長崎国際大学薬学部薬学科 (2012).
- 白神綾奈：幼弱期日暴くによるマウス T リンパ腫の癌関連遺伝子の解析、卒業研究、東邦大学理学部生物分子科学科 (2012).
- 白石啓祐：*Deinococcus radiodurans* の DNA 修復系変異体を用いた模擬宇宙環境下での耐性実験、卒業研究、東京薬科大学生命科学部 (2012).
- アルディヤロフ シバガット：高エネルギー RI ビーム検出用シンチレーション検出器の特性評価、卒業研究、筑波大学理工学群物理学類 (2012).
- 伊藤崇之：重粒子線によるフラグメントのビーム軸付近における TOF および角度分布測定、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2012).
- 益田佳尚：高エネルギービームに照射された 2 種類の液体媒質中で PZT から得られた音響波信号特性の比較、修士論文、大阪市立大学 (2012).
- 河合竜一：陽子線治療用 bi-material bolus の最適設計法の研究、修士論文、筑波大学大学院数理物質科学研究科 (2012).
- 河野準平：中間エネルギーに於ける  $^{65}\text{Cu}$  核からの破砕片生成断面積の測定、卒業研究、埼玉大 (2012).
- 花崎祐：燃料電池用のポリイミド/PTFE ハイブリッド膜の作製、卒業研究、早稲田大学先進理工学部応用物理学科 (2012).
- 海部俊介：高閾値飛跡検出器としてのポリイミド中重イオンとラックの研究、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2012).
- 宮里尚宏：低温赤色光後露光補力による、放射線飛跡検出感度の向上、2011 年度修士論文、千葉大学大学院融合科学研究科画像マテリアルコース (2012).
- 近藤慧之輔：CALET における重原子核検出システム(CHD)の研究・開発、修士論文、早稲田大学理工学術院先進理工学研究科 (2012).
- 金山沙緒里：炭素線治療時に生じる二次粒子の炭素同位体の成分評価に向けたレンジカウンタの開発、修士論文、千葉大学大学院理学研究科 (2012).
- 桑原潤一：GEANT4 を用いたシミュレーションによる重粒子 CT 精度検証—相対残留飛程の測定精度—、卒業研究、北里大学医療衛生学部医療工学科診療放射線技術科学専攻 (2012).
- 古浦新司：HIMAC での超許容  $\beta$  崩壊実験におけるクローバーゲルマニウム検出器の性能評価、卒業研究、東京理科大学理工学物理

- 学科 (2012).
- 古芝浩史：高エネルギービーム照射と高速微粒子衝突における PZT 圧電素子応答の比較、修士論文、大阪市立大学(2012).
- 高橋良：医用重粒子線 CT の検討：拡大照射ビームの均一性と相対残留飛程への影響、卒業研究、北里大学医療衛生学部医療工学科診療放射線技術科学専攻 (2012).
- 高橋賢人：低圧力位置検出器の開発、修士論文、東北大学大学院理学研究科 (2012).
- 佐古貴行：不安定核反応実験のための大型中性子検出器 NEBULA の開発、修士論文、東京工業大学大学院理工学研究科 (2012).
- 山本治：過熱液滴型検出器内の生成気泡に対する X 線ラジオグラフィーの研究、卒業研究、東邦大学理学部物理学科 (2012).
- 山木さやか：Ni 同位体の荷電変化反応断面積と荷電半径、卒業研究、埼玉大 (2012).
- 小川達彦：Prediction of activation induced by intermediate-energy protons and heavy ions. 博士論文、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻 (2012).
- 小島拓実：Geant4 による HIMAC $\beta$ - $\gamma$  測定実験の Ge 検出器における検出効率の位置依存性のシミュレーション、卒業研究、東京理科大学理工学物理学科 (2012).
- 小野恵介：模擬地球外環境下での有機物の生成と変成に関する研究、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2012).
- 松井健人：照射野形成機器通過後の陽子線が作る水中線量分布計算の高速化、卒業研究、筑波大学応用理工学類 (2012).
- 森秀樹：次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 SXI (Soft X-ray Imager) 用に向けた CCD 素子のスクリーニングシステムの構築、修士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2012).
- 森本彰：ポリエチレンテレフタレート中重イオントラックの特性評価、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2012).
- 深尾裕亮：二酸化炭素処理による PADC 検出器の増感機構、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2012).
- 西塚一平：中間エネルギーに於ける  $^{58}\text{Fe}$  核からの破砕片生成断面積の測定、卒業研究、埼玉大 (2012).
- 石原寛明：医用重粒子線 CT における集光力向上のための新レンズおよび新增感紙の導入、卒業研究、北里大学医療衛生学部医療工学科診療放射線技術科学専攻 (2012).
- 石川稔：粒子種の違いによる PZT 圧電素子の衝突応答の調査、修士論文、大阪市立大学 (2012).
- 川野涼：電子スピン共鳴法を用いた CR-39 プラスチックにおける放射線損傷の研究、卒業研究、東邦大学理学部 (2012).
- 早川直道：電子密度評価ファントムによる重粒子線 CT の評価、卒業研究、北里大学医療衛生学部医療工学科診療放射線技術科学専攻 (2012).
- 沢畑克樹：高エネルギー RI ビームの飛行時間測定用薄膜検出器の特性評価、卒業研究、筑波大学理工学群物理学類 (2012).
- 中川健太：直鎖分子間長の異なる固体飛跡検出器の応答感度の研究、卒業研究、早稲田大学先進理工学部 (2012).
- 田口義真：位置検出器 PPAC による HIMAC における二次ビームのエミッタンス測定、卒業研究、東京理科大学理工学物理学科 (2012).
- 田邊雅貴：陽子線と標的の核反応で生成される 2 次粒子の線量分布に与える影響、修士論文、筑波大学大学院数理物質科学研究科 (2012).
- 渡邊仁規：ビーム実験による CALET-CHD の電荷分解能実証研究、修士論文、早稲田大学 理工学術院先進理工学研究科 (2012).
- 土居惇一：炭素線用 Bi-material bolus の研究、卒業研究、筑波大学応用理工学類 (2012).
- 土田亮太：イオン・電子ビームの複合照射による DMFC 用新規電解質膜の開発、修士論文、早稲田大学大学院先進理工学研究科 (2012).
- 唐継龍：炭素線治療ビーム整形時に発生する散乱中性子のエネルギースペクトル測定、平成 23 年度卒業研究、広島大学工学部 (2012).
- 嶋田和真：個人線量計を用いた外部被ばく線量評価の不確実性に関する研究、博士論文、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻 (2012).
- 藤川真里：次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載用軟 X 線撮像器(SXI)信号処理用 ASIC の性能評価、修士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2012).
- 飯泉直也：炭素線回転ガントリーへ入射する側方非対称ビームの対称化の研究、卒業研究、筑波大学応用理工学類 (2012).
- 蜂谷由佳子：重粒子線の飛程変化を利用した複数物質の平均励起エネルギーの同時決定、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2012).

- 野元大輔：炭素線治療場での蛍光ガラス線量計の荷電粒子応答特性に関する研究、修士論文、横浜市立大学大学院医学研究科 (2012).
- 柳賢佑：医用重粒子 CT におけるスパイクノイズ低減のためのハウ素ブロックの作成、卒業論文、北里大学医療衛生学部医療工学科診療放射線技術科学専攻 (2012).
- 鈴木駿一郎：Zn 同位体の荷電変化反応断面積と荷電半径、卒業研究、埼玉大 (2012).
- 濱田誠也：粒子識別型ガス比例計数管を用いた炭素線治療ビームのマイクロドシメトリ、平成 23 年度修士論文、広島大学工学部 (2012).
- 河口優子：Assessing the viability of *Deinococcus* spp. under the simulated ISS environment and detection of microbes from silica aerogel for the space experiment. 博士論文、東京薬科大学大学院生命科学研究科 (2013).
- 乾翔輝：The effect of irradiation on human induced pluripotent stem cells. 修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2013).
- 吉岡彩：The effect of irradiation on metastatic potential of pancreatic cancer stem cells. 修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2013).
- 五十嵐裕一：陸棲ラン藻 *Nostoc* sp.HK-01 の高温耐性、修士論文、筑波大学大学院生物資源科学専攻 (2013).
- 江川愛：Low-grade glioma の患者における放射線治療と晩発性の認知機能障害との関係性について、卒業論文、長崎国際大学薬学部薬学科 (2013).
- 荒木正義：炭素線脳局所照射による海馬領域のアストロサイトの活性化について、卒業論文、長崎国際大学薬学部薬学科 (2013).
- 高橋裕一：A selection of terrestrial species resistant to the cosmic environment. 博士論文、山形大学大学院理工学研究科地球共生圏科学専攻 (2013).
- 今泉大将：The effect of irradiation on nuclear envelop proteins of breast cancer cell. 学士論文、大阪大学医学部保健学科 (2013).
- 児玉壮：*Psychomorhis pusilla* のモデル植物化を目的とした変異体の作出と解析、修士論文、明治大学大学農学研究科 (2013).
- 西原明日香：The effect of irradiation on metastatic potential of cancer cells. 修士論文、大阪大学大学院医学系研究科 (2013).
- 中谷香菜：The effect of multiple times irradiation on cell adhesion. 学士論文、大阪大学医学部保健学科 (2013).
- 仲川洋介：Depression of p53-independent Akt survival signals in human oral cancer cells bearing mutated p53 gene after exposure to high-LET radiation. (p53 変異型ヒト口腔がん細胞における高 LET 放射線による p53 非依存 Akt 生存シグナルの抑制). 博士論文、奈良県立医科大学大学院 (2013).
- 田向未来、小山裕二：重粒子線照射細胞における DNA 損傷の修復の観察、卒業研究、東海大学工学部エネルギー工学科 (2013).
- 服部峻：蛍光標識を用いた DNA-タンパク質クロスリンク損傷の解析、修士論文、広島大学大学院理学研究科 (2013).
- 和田麻美：Modeling of dose response on human cells for fractionated carbon beam irradiation including repair effects、博士論文、千葉大学大学院理学研究科 (2013).
- Jahan Israt：陽子線多門照射における照射方向選択と標的分割法の最適化、修士論文、筑波大学大学院数理物質科学研究科 (2013).
- LEE DONG JUN：リッジフィルターで生成する 2 次中性子のマイクロドシメトリ、卒業論文、広島大学工学部 (2013).
- 阿部康介：陽子過剰核  $^{24-26}\text{Si}$  の反応断面積測定、修士論文、新潟大学理学研究科 (2013).
- 井上亮兵：銀塩感光材料を用いた放射線飛跡像の蛍光標識化による微細飛跡検出システム、卒業論文、千葉大学工学部画像科学科 (2013).
- 永田裕規：Wobbler 法を用いた陽子線治療における出力因子の高精度予測に関する研究、卒業論文、筑波大学応用理工学類 (2013).
- 岡田俊祐：稀少 RI リングに用いる飛行時間検出器の開発、修士論文、筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻 (2013).
- 岡部拓人：模擬地球外環境下での有機物の生成と変成に関する研究、修士論文、横浜国立大学大学院工学府機能発現工学専攻 (2013).
- 花岡慶祐：CR-39 を用いた飛跡追跡法による重イオンのフラグメンテーション反応の測定、卒業研究、早稲田大学先進理工学部 (2013).
- 関口正大：PZT 圧電素子を用いた高エネルギービーム検出器の信号特性、修士論文、大阪市立大学 (2013).
- 関野千穂：重粒子線と気体標的の衝突により生成される負イオンの測定、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科 (2013).
- 岩元昂大：中性子過剰核  $^{14}\text{B}$  の反応断面積と子密度分布、修士論文、大阪大学理学研究科

- (2013).
- 吉田賢司：修士論文、甲南大学大学院理工学研究科 (2013).
- 宮前英史：輝尽性蛍光に基づく放射線治療時の線量モニタリングシステムの開発. 修士論文、名古屋大学大学院工学研究科量子エネルギー工学分野 (2013).
- 宮澤周：高分解能位置感応型ファイバーシンチレーション検出器の開発、修士論文、埼玉大 (2013).
- 橋口太郎：重イオン入射に対する陽子生成反応に関する研究、卒業研究、九州大学工学部 (2013).
- 古木悠敬：中間エネルギー領域に於ける Mg 同位体の反応断面積測定、修士論文、埼玉大 (2013).
- 佐藤加奈恵：Fe 同位体の荷電変化断面積と荷電半径、修士論文、埼玉大 (2013).
- 佐藤祐貴子：水素化リチウムに注入された Fe 原子の時間分割インビーム・メスバウアースペクトル. 卒業論文、電気通信大学情報理工学部 (2013).
- 坂本晴香：過熱液滴型検出器の治療用重粒子線場における生物効果評価への応用、修士論文、東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻 (2013).
- 山崎啓資：内部現象を用いた放射線飛跡の弁別検出、卒業論文、千葉大学工学部画像科学科 (2013).
- 市橋直卓：中間エネルギー不安定核ビームの破碎反応の研究、修士論文、埼玉大 (2013).
- 若林優：陽子ドリップライン近傍核  $^{26,27,28}\text{P}$  の反応断面積と核子密度分布、修士論文、大阪大学理学研究科、(2013).
- 朱易帆：ベータ-ガンマ分光法による  $^{18}\text{Ne}$  の超許容フェルミ遷移のベータ崩壊分岐比の測定. 修士論文、東京理科大学理工学物理学科 (2013).
- 酒井拓：陽子ドリップライン核  $^{26}\text{P}$  のアイソマー状態の発見、修士論文、新潟大学理学研究科 (2013).
- 松林恵理：光電子増倍管の温度依存性を考慮した LHCf 実験のエネルギースケール問題の解明. 修士論文、名古屋大学大学院理学研究科 (2013).
- 上原春彦：生体元素に対する炭素イオン入射中性子生成二重微分断面積に関する研究、修士論文、九州大学大学院工学府 (2013).
- 菅裕哲：次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載軟 X 線 CCD カメラ (SXI) 用素子の放射線耐性、修士論文、大阪大学大学院理学研究科 (2013).
- 齊藤佑多： $^{33}\text{Cl}$  の荷電変換断面積の測定と荷電核半径の導出. 修士論文、筑波大学数理学物質科学研究科物理学専攻 (2013).
- 大久保翔太郎：陽子線治療における bolus 通過後の線量分布計算の高精度化の研究. 卒業論文、筑波大学応用理工学類 (2013).
- 谷川祥太郎：ガス固体中の孤立 Fe 原子の化学反応、卒業論文、電気通信大学情報理工学部 (2013).
- 谷地館亮：陽子線ブロードビームによるパッチ照射のためのボーラス同時最適化の研究. 修士論文、筑波大学大学院数理学物質科学研究科 (2013).
- 中野裕樹：粒子識別型組織等価比例計数管を用いた炭素線治療場のマイクロドシメトリ. 修士論文、広島大学大学院工学研究科 (2013).
- 内田洵喜：炭素イオン線治療用回転ガントリーにおけるビーム光学の研究. 卒業論文、筑波大学応用理工学類 (2013).
- 服部篤人：エッチピット成長挙動に基づく PADC 飛跡検出器のプロトン及び重イオンに対する応答特性. 修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科(2013).
- 保高寿也： $^{30}\text{S}$  における超許容フェルミ型  $\beta$  崩壊の分岐比精密測定. 修士論文、東京理科大学理工学物理学科 (2013).
- 牧野友耶：LHCf 実験における  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  シンチレータを用いた新型位置検出器のシャワー位置分解能測定. 修士論文、名古屋大学大学院理学研究科 (2013).
- 木村泰一朗：陽子線断層撮影における空間分解能改善のための研究、修士論文、新潟大学自然科学研究科 (2013).
- 木内尚子：PET 診断と放射線がん治療の融合が可能な開放型 PET 装置のための画像再構成. 博士論文 千葉大学大学院工学研究科 (2013).
- 鈴木聖人：平行平板電子なだれ型  $\gamma$  線共鳴カウンターの作製とその評価. 卒業論文、電気通信大学電気通信学部 (2013).
- 鈴木麻未：宇宙線による雲凝結核生成促進についての複数線源での検証実験. 修士論文、名古屋大学大学院理学研究科 (2013).
- 高宮大義：水ファントムに対する重イオン入射中性子生成に関する研究、卒業研究、九州大学工学部 (2013).



## その他

- Kato H.: Hepatocellular Carcinoma Screening, Diagnosis, and Management (NIH), pp.195-196 (2004).
- Tsujii H., Yamada S.: HIMAC and heavy-ion therapy. Science & Technology in Japan, 23(92), (2004).
- 安藤興一、高井伸彦：放射線照射による脳機能障害とその防護、インナービジョン、19、34-34 (2004).
- 安藤興一、高井伸彦：放射線照射による脳機能障害とその防護、インナービジョン、19、34-34 (2004).
- 岡安隆一：宇宙放射線による遺伝的影響は？「宇宙からヒトを眺めて」－宇宙放射線 人体影響－、第 9 章 (2004).
- 大西武雄：宇宙の重粒子線による生物影響、宇宙からヒトを眺めて－宇宙放射線の人体への影響－（藤高和信他編、研成社）、55-62 頁 (2004).
- 島田義也、柿沼志津子、西村まゆみ、今岡達彦、甘崎佳子、高田真由美：放射線発癌頻度は複合暴露因子で左右される、放射線による制癌シンポジウム-基礎と臨床との対話-、京都市 (2004).
- 物部真奈美、安藤興一：ビールは放射線から体を守る？、Isotope News、607、2-5 頁 (2004).
- 野島久美恵：地上での宇宙放射線研究 第 3 回放射線安全研究センターシンポジウム「宇宙からヒトを眺めて」報文集 (2004).
- 鈴木雅雄：粒子放射線誘発バイスタンダー効果の放射線治療への応用の可能性、臨床放射線 49、939-941 (2004).
- 鈴木雅雄：マイクロビームを利用した研究、宇宙からヒトを眺めて；宇宙放射線の人体への影響、93-99 頁 (2004).
- Benton E.R.: Radiation Shielding for Tomorrow's Spacecraft. Colloquium: National Space Science and Technology Center, 2004.4.
- Borak T.B.: Radiation protection for astronauts. Waseda University, (2004).
- Borak T.B.: Radiation protection for astronauts. Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama. (2004).
- 久下謙一：放射線の痕跡を追う、日本写真学会誌 67、520 (2004).
- 佐藤幸夫：重イオンのトラック構造研究、放射線科学 47、5-15 (2004).
- 村島未生、川原田円、国分紀秀、岡田祐、牧島一夫、井上北斗、小林謙仁、三谷烈史、中澤和洋、高橋忠幸、洪秀徴、寺田幸功、宮坂浩正、山岡和貴、川添哲志、他 HXD チーム：Astro-E2 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) の放射化バックグラウンド特性、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA Research and Development Report, JAXA-RR-04-004 (2004).
- 中川公一、佐藤幸夫：高エネルギー粒子線によるスクロースラジカル生成の断面積、放医研ニュース、No. 93(8)、6 (2004).
- 藤高和信、内堀幸夫：ICCHIBAN プロジェクト、FB News (株式会社千代田テクノル月刊誌)、No. 332、pp.1-6 (2004).
- 林賢太郎、久下謙一、渋谷寛、安田仲宏、熊谷宏、長谷川朗：ハロゲン化銀写真乳剤を用いた高エネルギー重粒子弁別法、日本写真学会誌、67-別冊 2、88-89 (2004).
- Benton E.R.: Radiation shielding for tomorrow's spacecraft. Seminar talk, National Institute for Radiological Sciences (2005).
- Hirayama R., Ito A., Furusawa Y., Tomita M., Tsukada T., Izumi M., Yatagai F., Ando K.: Maximal protection by DMSO in inactivation of mammalian cells exposed to very high LET radiation. RIKEN Accel. Prog. Rep. 39 (2005).
- Shi-Lun Guo.: Bubble Detector-A new category of solid state track detectors. 第 20 回固体飛跡検出研究会、大阪 (2005).
- Wei Z.Q., Xie H.M., Mei M.T., Zhuang C.X.: Identification model of space heavy ions by CR-39. HEP & NP, 29, 91-94 (2005).
- 阿須賀拓、山内知也、小田啓二、安田仲宏：CR-39 検出器中重イオントラック径方向サイズ評価、神戸大学海事科学部紀要、第 2 号、179-184 頁 (2005).
- 安藤興一：粒子線の生物効果に関する研究、放影協ニュース 44、3-5 頁 (2005).
- 安藤興一：重粒子線治療の生物効果、第 12 回群馬 Clinical Oncology Research 勉強会、前橋、(2005).
- 安藤興一：粒子線治療の生物効果に関する研究、高エネルギー加速器科学研究奨励会第 21 回特別講演会、東京、(2005).
- 伊藤敦：重粒子線とフリーラジカル、放射線生物研究 39、314-327 (2004).
- 稲庭拓：入射核破碎反応を利用した標的内での飛程の推定、放医研ニュース 2005 年 8 月号 (No. 105) 研究レポート、1-2 頁 (2005).
- 遠藤雄輔、久下謙一、安田仲宏、熊谷宏、渋谷寛、福島知佳、長谷川朗：金沈着現像法を用いた荷電粒子弁別法の開発、日本写真学会誌、68-別冊 2、57-58 頁 (2005).
- 丸山浩一：癌放射線治療における線量集中性

- と線量確認方法、北里医学 35(1)、38-47 (2005).
- 久下謙一、遠藤雄輔、岩切章太郎、安田仲宏、熊谷宏、長谷川朗：金沈着現像法と原子核乳剤を用いた金微粒子からなる放射線飛跡の検出、日本写真学会誌、68-別冊 1、54-55 頁 (2005).
- 久下謙一、川田賢三、小林孝治、長谷川朗：エネルギー一定の電子線照射により形成された潜像核の分散、日本写真学会誌、68-別冊 1、56-57 頁 (2005).
- 高井伸彦、大町康、菊池達矢：放射線による高次脳機能障害の発症メカニズム、福岡大学薬学部臨床疾患薬理学講座 講義、福岡、(2005).
- 高井伸彦、安藤興一、鶴澤玲子、小池幸子、扶川武志、古澤佳也、張明栄、鈴木和年：正常組織障害および腫瘍特性の把握による照射線量の適正化、癌の臨床 51(5)、323-327 (2005).
- 佐藤幸夫、大澤大輔、岡田裕樹：重粒子線のトラック構造と高 LET 効果、放射線 31 No.1、33-40 (2005).
- 山下真一、勝村庸介、林銘章、室屋裕佐、宮崎豊明、村上健：スパー拡散モデルによるイオントラック構造の検討、放射線化学討論会、大阪、(2005).
- 小林憲正：放射線と生命の起源、放射線 31、173-179 (2005).
- 松村宏：中高エネルギー領域における軽核生成核反応の研究、2005 日本放射化学会年会第 49 回放射化学討論会、日本放射化学会奨励賞受賞講演、金沢大、(2005).
- 斉藤正好、宇野隆、川田哲也、高井伸彦、伊東久夫：科研費研究課題の成果「基盤 C」、中枢神経腫瘍に対する重粒子線照射（治療）が個体の生殖能におよぼす影響、INNERVISION 53、20-8 (2005).
- 大西武雄、高橋昭久：宇宙放射線の生物影響研究の意義：宇宙放射線と微小重力の相互作用に関する研究の新たな展開、日本マイクログラビティ応用学会誌 22、151-154 (2005).
- 大西武雄、高橋昭久：太陽・地球・生命—宇宙実験から知れたもの—宇宙空間での防菌・防黴を考える—、防菌・防黴 33、531-541 (2005).
- 谷口和樹、東海林裕、飯田聡、植竹宏之、榎本雅之、島田義也、柿沼志津子、西村まゆみ、今岡達彦：ラット大腸の Aberrant crypt foci (ACF) を指標とした、放射線と化学物質の複合効果の検討、日本外科学会雑誌、106(9)、369 (2005).
- 島田義也、西村まゆみ、柿沼志津子、今岡達彦、大町康：子どもと私たちの生活における放射線被ばくの健康リスクを考える、助産雑誌 59(7)、634-639 (2005).
- 島田義也、西村まゆみ、柿沼志津子、今岡達彦、大町康：子どもと私たちの生活における放射線被ばくの健康リスクを考える、助産雑誌 59(7)、634-639 (2005).
- 林賢太郎、久下謙一、長谷川朗、安田仲宏、福島知佳、渋谷寛：プラスチック検出器 CR-39 と原子核乾板を複合した放射線飛跡検出器の開発、日本写真学会誌、68-別冊 2、59-60 頁 (2005).
- 鈴木雅雄：放射線によるバイスタンダー効果の誘導機構とその生物学的意義、放射線生物研究、40(3)、282-295 (2005).
- 鈴木雅雄、鶴岡千鶴、安田仲宏：重粒子線のより効果的な照射法をめざして-炭素イオンビームで誘発されるバイスタンダー効果を検証実験、放医研ニュース、No.101、10-11 (2005).
- 山田滋、安田茂雄、北林宏之、成島一夫、野尻和典、鎌田正、辻井博彦：直腸癌局所再発に対する重粒子線治療、日本消化器外科学会雑誌、29、95-103 頁 (2006).
- Okamura M., Tanaka A., Omose M., Umemoto N., JA Teixeira da Silva., Toguri T.: Advances of Mutagenesis in Flowers and their Industrialization. Global Science Books 1, 619-628 (2006).
- 岡安隆一：重粒子線と X 線による生物効果の違い：DNA 二重鎖切断修復の側面よりの検討、放射線科学、49(5)、140-144 (2006).
- 岡安隆一：高 LET 放射線と非同相末端結合修復、放射線生物研究、41(4)、424-432 (2006).
- 岡安隆一：星間旅行者を宇宙線から守る、日経サイエンス、60-70 (2006).
- 岡安隆一：火星旅行への挑戦-生物学の視点から、日経サイエンス 6 月号 (2006).
- 戸板孝文、手島昭樹：子宮頸癌に対する高線量率腔内照射の最適線量スケジュールの開発、Innervision 21(7)、37 (2006).
- 高橋昭久、大西武雄：重粒子線がん治療における基礎研究のねらい、放射線生物研究、92-98 (2006).
- 高橋昭久、大西武雄：放射線をかいくぐり生きる微生物、科学、76、824-826 (2006).
- 手島昭樹、山田章吾：放射線腫瘍医を増やすために、日放腫会誌、18、47-48 (2006).

- 手島昭樹、立崎英夫：JASTRO 平成 15・16 年度研究課題報告 医療実態調査研究により放射線治療施設構造成準化(案)の改訂、日放腫会誌、18, 107-112 (2006).
- 手島昭樹：放射線腫瘍医増加対策—JASTRO シンポジウム、治療談話会記録、臨床放射線、51(7), 902-904 (2006).
- 手島昭樹：わが国の放射線治療の現況—医療実態調査研究 (PCS) 客筆随想 シリーズ がん治療が変わる、Clinic Magazine 8 月号、48-51 (2006).
- 手島昭樹：放射線治療マニュアル 改訂第 2 版 平岡眞寛、笹井啓資、井上俊彦 編、9.副鼻腔 中外医学社 (東京)、237-245 (2006).
- 手島昭樹：放射線治療マニュアル 改訂第 2 版 平岡眞寛、笹井啓資、井上俊彦 編、10.外耳道 中外医学社 (東京)、246-251 (2006).
- 手島昭樹：がんのベーシックサイエンス 第 3 版、谷口直之、大島明、鈴木敬一郎 監訳、14 章、放射線治療の分子・細胞学的基礎、メディカル・サイエンス・インターナショナル (東京)、297-326 (2006).
- 松本英樹：平成 18 年 8 月 3 日 19 時 30 分、NHK 総合、[クローズアップ現代]、「残留放射線の脅威 ～“第 3 の被爆”を追う～」取材出演 (2006).
- 大原潔、手島昭樹：IVR 医と放射線治療医に必要な基礎的知識—消化器癌に対する科学放射線療法— はじめに、臨床放射線、51, 333-335 (2006).
- 大西武雄、高橋昭久、松本英樹：放射線適応応答のしくみを探る、月刊エネルギー、3 月号、8-10 (2006).
- 渡邊宗一郎、山内知也、小田啓二、安田仲宏：ポリカーボネート中重イオントラックに沿った損傷分布、神戸大学海事科学部紀要、第 3 号 pp.123-131 (2006).
- 尾方俊至、手島昭樹：放射線によるがんの浸潤・転移への影響 —科研費研究課題の成果 基盤研究 (B) —、Innervision 21(7), 51 (2006).
- 鈴木雅雄：マイクロビームの生物・ライフサイエンス研究への応用、粒子線マイクロビームで誘導される生物効果のバイスタンダー効果、Radioisotopes, 55(6), 341-349, (2006).
- Ohno T., Kakinuma S., Kato S., Tsujii H., Shimada Y.: Risk of second cancers after radiotherapy for cervical cancer. Expert Review of Anticancer Therapy. 6(1), 49-57 (2006).
- 永吉勉、道家忠義、寺沢和洋、藤田康信、石田幸司、菊池順、佐々木慎一、俵裕子、齋藤究、身内賢太郎、松本晴久、込山立人、内堀幸夫、北村尚：マイクロピクセルガス検出器を用いた宇宙放射線線量計、宇宙放射線 5, 119-125 (2006).
- 久下謙一、比佐雄爾、藤ヶ崎大地、安田仲宏、ソクマン・ホー・キムラ、鈴木哲也、三觜剛、熊谷宏、長谷川明：サイズの異なる微粒子写真乳剤に記録された放射線飛跡の解析、日本写真学会誌、69-別冊 2, 24-25 (2006).
- 久保田寛隆、丹羽公雄、歳藤利行、夏目光教、安田仲宏、兼松伸幸、木村充宏、福島知佳、久下謙一：金沈着現像法と原子核乳剤を用いた金微粒子からなる放射線飛跡の検出、日本写真学会誌、69-別冊 1, 94-95 (2006).
- 小倉紘一、小平聡、浅枝真行、道家忠義、長谷部信行、晴山慎、安田仲宏、鶴田隆雄、郡佳伸：CR-39/DAP 共重合体の DAP 混合比と粒子検出閾値について -宇宙線超重核観測の観点から-、宇宙放射線、Vol. 5 No. 1, 77-86 (2006).
- 小平聡、長谷部信行、道家忠義、晴山慎、桜井邦朋、太田周也、安田仲宏、俵裕子、小倉紘一：CR-39 飛跡検出器による鉄核同位体弁別のための高精度厚さ測定法の開発、宇宙放射線、Vol. 5 No. 1, 67-76 (2006).
- 小林憲正：宇宙の複雑有機物から生物へ、現代化学、2006(6), 24-30 (2006).
- 小林憲正：アミノ酸の前生物的合成と触媒機能の起源、Biol. Sci. Space, 20 (1), 3-9 (2006).
- 小林憲正：太陽系天体に生命を探る、サイエンスネット、No. 28, 10-13 (2006).
- 小林憲正：生命の起源を探る～原始地球環境と地球外有機物～、Jpn Geosci. Lett., 2(4), 6-8 (2006).
- 中村正吾、内田佳宏、尾崎雄一、亀井拓也、俵裕子、道家忠義、長谷部信行、小平聡：BP-1 ガラス飛跡検出器の感度と製法の研究、宇宙放射線、Vol. 5 No. 1, 87-95 (2006).
- 長谷部信行、鳥居祥二、鷹野正利、道家忠義、晴山慎、小平聡、宮地孝、宮島光弘、奥平修、山下直之、櫻井邦朋、安田仲広、俵裕子、中村正吾、小倉紘一、渋谷寛：宇宙線超重核観測計画、宇宙放射線、Vol. 5 No. 1, 3-37 (2006).
- Matsumoto H., N. Hamada, A. Takahashi, Y. Kobayashi, T. Ohnishi: Vanguard of paradigm shift in radiation biology: radiation-induced adaptive and bystander responses. J. Radiat. Res. 79-106 (2007).
- 岡安隆一、岡田真希、岡部篤史、野口実穂：高

- LET 重粒子線による DNA 二重鎖切断損傷とその修復. 癌の臨床 53(6), 371-375 (2007).
- 高井伸彦、井上修: パートナー分析化学 II - 画像診断法・物理的分析法、(南江堂) pp.280-290 (2007).
- 高橋昭久: LET と RBE.“放射線医科学”(大西武雄監修)、学会出版センター、東京、pp.4-5 (2007).
- 高橋昭久、大西武雄、高沖宗夫: 宇宙空間は過去と未来のモデル実験場. アイソトープニュース、638、2-5、(2007).
- 平山亮一、古澤佳也、安藤興一: DNA 損傷生成と修復にかかわる酸素の影響、癌の臨床 (Jpn. J. Cancer Clin.)、Vol. 53、No. 6、365-370 (2007).
- 加瀬優紀、坂間誠、都築大吾、阿部杏子、早乙女直也、松藤成弘、金井達明、松本孔貴、古澤佳也、松藤成弘: “Microdosimetry による重粒子線の測定”, 放射線科学 50, No.9, 4-10 (2007).
- 高田義久: 平成 16 年度～平成 17 年度・科学研究費補助金報告書(基盤研究(C))研究成果報告書、「がん治療のための重荷電粒子線・照射野平坦化の研究」(課題番号: 16591182)、平成 18 年 7 月、研究代表者: 高田義久、pp.1-47. (2007).
- 小林憲正: 地球と宇宙における化学進化、遺伝別冊, No. 20, 184-190 (2007).
- 小林憲正: “生命の”もと“は宇宙から? - 高分子態複雑有機物と生命の起源: がらくた分子から生命へ”、Biophilia, 3, 28-33 (2007).
- 小林憲正: 生物物理学ハンドブック、(石渡信一ほか編、朝倉書店) (2007).
- 陳 祥、久下謙一、長谷川朗: 「銀塩感光材料を用いた金微粒子調製の調製条件の検討 (1): チオシアン酸カリウムの濃度効果」、日本写真学会誌、70-別冊 1, 128-129 (2007).
- 陳 祥、久下謙一、長谷川朗: 「銀塩感光材料を用いた金微粒子調製の調製条件の検討 (2): 硫酸ナトリウムの添加効果」、日本写真学会誌、70-別冊 1, 130-131 (2007).
- 渡邊宗一郎、山内知也、小田啓二、安田仲宏: ポリカーボネート中重イオントラックの層構造、神戸大学海事科学部紀要 第 4 号 pp.61-70 (2007).
- 加藤博敏、馬場雅行、辻比呂志、山田滋: 奇跡の病院 理想の医師～がん削減 重粒子線治療の凄さ～、文藝春秋、86(9)、268-273 (2008).
- 馬場雅行、須金紀雄、中嶋美緒、山本直敬、原竜介: 非小細胞肺癌に対する炭素線治療、肺癌の臨床、(2008～2009)、pp.303-311 (2008).
- 馬場雅行、山本直敬、中嶋美緒: 末梢型 I 期非小細胞肺癌に対する炭素線治療—根治性の高い局所療法の確立をめざして—、医学のあゆみ、277(9)、746-751 (2008).
- 馬場雅行、山本直敬、中嶋美緒: 肺癌放射線治療②—放射線治療の最前線; I 期非小細胞肺癌に対する炭素線治療—、The Lung Perspectives、16(4)、39(483)-42(86) (2008).
- 馬場雅行: 最新の癌治療—重粒子線治療—、住民講演会、千葉市 (2008).
- 馬場雅行: 肺癌の炭素線治療—死角のない局所療法の完成を目指して—、第 17 回肺癌フォーラム、浜松市 (2008).
- 馬場雅行: 第 33 回細胞診断学セミナー、講義、東京都 (2008).
- 馬場雅行、山本直敬、中嶋美緒: 非小細胞肺癌に対する炭素線治療、KARF (Kazusa Academia Respiratory Forum)、千葉県木更津市 (2008).
- 馬場雅行: 肺癌の重粒子(炭素イオン)線治療、日本医事新報、4382、96-97 (2008).
- 馬場雅行: 非小細胞肺癌の重粒子線感受性予測および治療効果判定マーカーの探索、科学研究費補助金、基礎研究(C)、課題番号(20591508)、(2008).
- Kawata T.: Radiation induced DNA and chromosomal breaks. Igaku-no-ayumi, Ishiyaku-publishing, pp.639-643 (2008).
- Michikawa Y., Suga T., Ishikawa A., Ohtsuka Y., Iwakawa M., Imai T.: Visible haplotype-tagSNP typing array device for human radiation sensitivity-associated genes. Oligonucleotide Array Sequence Analysis, Nova Science Publishers, New York, 3-14 (2008).
- Ohnishi T., Takahashi A., Mori E., Ohnishi K.: p53 targeting can enhance cancer therapy via radiation, heat and anti-cancer agents. Anticancer Agents Med Chem 8, 564-570 (2008).
- 高井伸彦、井上修: パートナー分析化学 II-画像診断法・物理的分析法(南江堂)、280-290 頁 (2008).
- 高井伸彦、井上修: パートナー分析化学 II-画像診断法・物理的分析法(南江堂)、280-290 (2008).
- 川田哲也: 放射線の作用—DNA 切断および染色体損傷とその修復、医学の歩み(医歯薬出版)、639-643 頁 (2008).
- 大西武雄、高橋昭久: 放射線適応応答のしくみの再考. 放射線生物研究 43、91-99 (2008).
- 道川祐市、菅 智、石川敦子、大塚好美、松

- 本いづみ、石川顕一、岩川眞由美、今井高志：ヒト放射線感受性遺伝子多型を短時間で簡便に解析する、放射線科学 51、24-29 (2008).
- 鈴木雅雄：放射線適応応答の線質依存性、放射線生物研究、43(4)、424-435 (2008).
- 鈴木雅雄：放射線で誘発される生物効果のバイスタンダー効果の線質依存性、放射線科学 51(3)、18-27 (2008).
- Kobayashi K., Kaneko T., Takano Y. and Takahashi J.: "Formation of Amino Acid Precursors with Large Molecular Weight in Dense Clouds and Their Relevance to Origins of Bio-homochirality," Proc of IAU Symposium 251, "Organic Matter in Space," eds. By S. Kwok and S. Sandford, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp.465-472 (2008).
- 加瀬優紀：炭素線治療ビームに対する臨床線量の測定システムの開発、放医研 NEWS 9 月号、8(2008).
- 小林憲正：太陽系と惑星(シリーズ現代の天文学 9)、(渡部潤一他編、分担執筆、日本評論社) (2008).
- 小林憲正、遠西寿子、坪井大樹、酒井貴博、金子竹男、吉田聡、高野淑識、高橋淳一：星間での複雑有機物の生成と変成—生命の素材は宇宙でつくられた—、低温科学 66、39-46 (2008).
- 小林憲正：アストロバイオロジー 宇宙が語る<生命の起源>、(岩波書店)東京 (2008).
- 清道明男、武藤良太郎、澤田真也：J-PARC 50GeV メイリングにおける遅い取り出しシステムの紹介、原子核研究 53、47-56 頁 (2008).
- 保田浩志：宇宙飛行士の実行線量、放射線生物研究 43(3)、248-260 (2008).
- 野田耕司：次世代重粒子線照射システムの構築に向けて、放射線科学 51、4-21 頁 (2008).
- Fukumura A., Tsujii H., Kamada T., Baba M., Tsuji H., Katou H., Kato S., Yamada S., Yasuda S., Yanagi T., Kato H., Hara R., Yamamoto N., Mizoe J., Akahane K., Fukuda S., Furusawa Y., Iwata Y., Kanai T., Kanematsu N., Kitagawa A., Matsufuji N., Minohara S., Miyahara N., Mizuno H., Murakami T., Nishizawa K., Noda K., Takada E., Yonai S.: Carbon-ion radiotherapy: clinical aspects and related dosimetry, Radiation Protection Dosimetry, 137, 149-155 (2009).
- 神宮啓一、溝江純悦：第 8 回重粒子医科学センターシンポジウム「炭素線治療の標準化と効率化」、千葉 (2009).
- Hamada N., Imaoka T., Masunaga S., Ogata T., Okayasu R., Takahashi. A., Kato T., Kobayashi Y., Ohnishi T., Ono K., Shimada Y., Teshima T.: Recent advances in the biology of heavy-ion cancer therapy. J. Radiat. Res. (2009).
- Hirayama R.: Financial Assistance for Young Scientists. 15th International Symposium on Microdosimetry (Micros 2009), Verona, Italy (2009).
- Kajihara A, Takahashi A, Ohnishi T.: Heat-induced signal transduction pathways leading to cell death and cell survival in cancer cells. Thermal. Med. 25, 1-11 (2009).
- Mori E., Takahashi A., Yamakawa N., Kirita T., Ohnishi T.: High LET heavy ion radiation induces p53-independent apoptosis. J. Radiat. Res. Tokyo, 50, 37-42 (2009).
- Mori E., Takahashi A., Yamakawa N., Kirita T., Ohnishi T.: High LET heavy ion radiation induces p53-independent apoptosis. J Radiat Res (Tokyo). 50, 37-42 (2009).
- Ohnishi T., Mori E., Takahashi A.:  $\gamma$ H2AX. In: Encyclopedia of Cancer, 2nd Edn. Springer, Heidelberg, pp.1378-1381 (2009).
- Takahashi A., Ohnishi T.: Molecular mechanisms involved in adaptive responses to radiation, UV light, and heat. J Radiat. Res. 50, 385-93 (2009).
- 安田茂雄、今田浩史、山田滋、篠藤誠、鎌田正、伊東久夫：肝細胞癌に対する X 線治療、肝胆膵、59(4)、795-801 (2009).
- 岡安隆一、加藤宝光、藤森亮、野口実穂、瀬尾健太郎、藤井義大：高 LET 重粒子線による生物効果：DNA 二重鎖切断修復を中心に、放射線生物研究、44(2)、182-189 (2009).
- 岡村正愛：イオンビームによる植物の育種：「アグリバイオビジネス：その魅力とバイオビジネス」、(シーエムシー出版)、pp.34-52 (2009) .
- 岡村正愛：イオンビームによる植物の育種：「アグリバイオビジネス：その魅力とバイオビジネス」(シーエムシー出版)、34-52、(2009).
- 近藤夏子、高橋昭久、大西武雄：アルキル化剤による DNA 損傷修復メカニズムとそのがん治療への応用. 放射線生物研究、44、140-53 (2009).
- 高橋昭久、山川延、桐田忠昭、大西武雄：重粒子線がん治療における基礎研究、放射線生物研究、44、208-15 (2009).
- 今田浩史、安田茂雄、加藤博敏、山田滋、篠藤誠、横須賀収、宮崎勝、鎌田正：肝細胞癌に対する重粒子線(炭素イオン線)治療、肝胆膵、59(5)、803-810 (2009).
- 根井充、Guillaume Varès、王 冰：放射線適応応答に関与する多様な因子、放射線生物研

- 究、44、294-311、(2009).
- 山田滋、篠藤誠、安田茂雄、今田浩史、加藤博敏、鎌田正、辻井博彦：直腸癌局所再発に対する重粒子線治療、癌と化学療法、36(8)、1263-1266 (2009).
- 山田滋、篠藤誠、鎌田正、辻井博彦：重粒子線治療の今、大腸癌 Frontier = Frontiers in Colorectal Cancer、2(3)、39-44 (2009).
- 山田滋、篠藤誠、今田浩史、安田茂雄、鎌田正：脾癌に対する術前重粒子線治療の現状と将来性、肝胆脾、59(5)、1111-1119 (2009).
- 篠藤誠、山田滋、今田浩史、安田茂雄、鎌田正：脾がんに対する放射線治療の戦略と最新技術、腫瘍内科=Clinical Oncology、4(4)、374-379 (2009).
- 松本謙一郎、中西郁夫、安西和紀：重粒子線により水中で生じる活性酸素種の検出とその可視化. 放射線生物研究 44、345-355 (2009).
- 松本謙一郎：重粒子（炭素）線が生成する活性酸素を可視化する、放射線科学 52(8)、4-9 (2009).
- 松本謙一郎：読者の疑問に答える ー重粒子線が生成する活性酸素分布の視覚化に成功ー、エネルギーレビュー、8月号、52-53 (2009).
- 松本謙一郎：重粒子線が生成する活性酸素の可視化. Isotope News No. 670、2-5 (2009).
- 大庭義史、高井伸彦、一瀬沙織：薬学分野の分析化学（仮題）「PET および SPECT などの物理的分析法を利用したガン治療への貢献」（じほう出版）(2009).
- 道川祐市、菅原圭亮、菅智、荘司好美、石川颯一、石川敦子、塩見尚子、塩見忠博、岩川眞由美、今井高志：両親由来の染色体 DNA 断片を 1 分子レベルで個別に増幅する技術、放射線科学、52、(2009) .
- 尾方俊至、手島昭樹、高橋豊、古澤佳也、松浦成昭：光子線と重粒子線によるがんの転移過程と血管新生に及ぼす影響. 特集(重粒子線治療生物学の進展)：放射線生物研究、44、199-207 (2009).
- Ohnishi T., Mori E., Takahashi A.: DNA double-strand breaks: their production, recognition, and repair in eukaryotes. Mutat. Res. (Fund Mol Mech Mutag). 669, 8-12 (2009).
- Bergmann R., Hajek M., Berger T., Reitz G., Bilski P., Puchalska. Radiation hazards to astronauts. In Leben mit Strahlung M.: Von den Grundlagen zur Praxis (eds. Maringer, F. J., Czarwinski, R., Geringer, T., Brandl, A., Steurer, A.) 411- 414, ISSN 1013-4506, TÜV Media (2009).
- Shursakov V.A., Uchihori Y., et al.: Scientific reports of space experiment (IBMP-NIRS-1 to 4) in the IBMP-NIRS Collaboration, NIRS-R-62 (2009).
- 森 豊、坂本淳志、山内知也、小田啓二、安田仲宏：PADC 飛跡検出器に及ぼす重イオン照射効果、神戸大学大学院海事科学研究科紀要、6、65-75 (2009).
- 保田浩志：宇宙放射線計測の現状と課題、東京大学大学院工学研究科原子力国際専攻特別講義、原子力機構東海研究センター (2009).
- 野田耕司：次世代重粒子線照射システムの開発研究、映像情報 MEDICAL、41、1239-1242 (2009).
- Yamamoto N., Nakajima M., Baba M.: Carbon ion radiotherapy for clinical stage I non-small cell lung cancer (2010).
- 山本直敬、馬場雅行：肺癌の重粒子線治療、呼吸、29(10)、976-979 (2010).
- 山本直敬、馬場雅行、中嶋美緒、鎌田正、辻井博彦：重粒子線治療ー特に肺癌に対する重粒子線（炭素線）治療ー、日本臨牀、68(6)、1040-1046 (2010).
- 山本直敬、中嶋美緒、馬場雅：重粒子線治療ー特に肺癌に対する重粒子線(炭素線)治療ー、日本臨牀、(2010).
- 山本直敬、中嶋美緒、馬場雅行：末梢 I 期非小細胞肺癌に対する重粒子線治療、インナービジョン、25(1)、50-51 (2010).
- Fujimori A., Okayasu R.: Extremely low doses of ionizing radiation can elicit significant changes at the gene level. Genomic Instability and Cancer, Chapter9, 189-199 (2010).
- Hamada N., Imaoka T., Masunaga S., Ogata T., Okayasu R., Takahashi A., Kato T., Kobayashi Y., Ohnishi T., Ono K., Shimada Y., Teshima T.: Recent advances in the biology of heavy-ion cancer therapy. J Radiat Res (Tokyo). 51, 365-383 (2010).
- Kondo N., Takahashi A., Ono K., Ohnishi T.: DNA damage induced by alkylating agents and repair pathways. J Nucleic Acids. Article ID 543531, 7 (2010).
- Meijer A.E.: Summary of the biology session of the KI-NIRS Joint Symposium on Ion-Radiation Sciences Friday the 10th of September 2010. Radiological Sciences, 53, 9-11 (2010).
- Mohanty C.: Karolinska Institutet a medical university. Radiological Sciences, 53, 12-14 (2010).
- Mohanty C., Meijer A.E.: Cell inactivation in prostate carcinoma in response to high and low



- LET ions. *Radiological Sciences*, 53, 27-32 (2010).
- Takahashi A., Ohnishi K., Kondo K., Mori E., Noda T., Ohnishi T.: Effective new cancer therapies which are independent of p53 gene status. *J. Nara Med Assoc.* 61, 19-33 (2010).
- Takahashi A., Nagamatsu A., Su X., Suzuki M., Tsuruoka C., Omori K., Suzuki H., Shimazu T., Seki M., Hashizume T., Iwasaki T., Ishioka N., Ohnishi T.: The first life science experiments in ISS: Reports of "Rad Gene"-space radiation effects on human cultured cells-. *Biol Sci Space*. 24, 17-41 (2010).
- Watanabe-Asaka T., et al.: Technologies and analyses using medaka to evaluate effects of space on health. *Biol. Sci. in Space*, 24, 3-9 (2010)
- Zielinska-Chomej K.: Particle Training Network for European Radiotherapy (PARTNER). *Radiological Sciences*, 53, 15-18 (2010).
- 安田茂雄、今田浩史、加藤博敏、山田滋、篠藤誠、溝江純悦、鎌田正、辻井博彦：肝細胞がんに対する重粒子線治療、インナービジョン、(HIMAC 特集) (2010).
- 高橋昭久、大西武雄：宇宙ステーションと太陽粒子線。In: からだと光の事典。(編集. 太陽紫外線防御研究委員会), 朝倉書店, pp.49-52 (2010).
- 高橋昭久、永松愛子、鈴木雅雄、鶴岡千鶴, Xiaoming Su, 鈴木ひろみ, 大森克徳, 嶋津徹, 石岡憲昭, 大西武雄: 国際宇宙ステーション Kibo 利用宇宙実験「Rad Gene」の成果。生物工学会誌, 88, 271-279 (2010).
- 山田滋、篠藤誠、安田茂雄、今田浩史、鎌田正、辻井博彦：直腸がん術後再発に対する重粒子線治療、インナービジョン、(HIMAC 特集) (2010).
- 山田滋、篠藤誠：膵がんに対する重粒子線治療、インナービジョン、(HIMAC 特集)、(2010).
- 大西武雄、高橋昭久、永松愛子、鈴木雅雄、鶴岡千鶴, Xiaoming Su, 鈴木ひろみ, 大森克徳, 嶋津徹, 石岡憲昭: 国際宇宙ステーション Kibo 利用宇宙実験「Rad Gene」の成果報告。放射線生物研究, 45, 103-126 (2010).
- 平山亮一、伊藤敦、古澤佳也：細胞や DNA への影響から見たトラック構造、放射線化学、89, 9-12 (2010).
- Baldacchino. G., Katsumura Y.: Chapter 9: Chemical processes in heavy ion tracks. in "Recent Trends in Radiation Chemistry" ed. by J. M. Wishart and B. S. M. Rao, World Science, pp. 255-277 (2010).
- Kobayashi K., Kaneko T., Takahashi J., Takano Y., Yoshida S.: High molecular weight complex organics in interstellar space and their relevance to origins of life. in "Astrobiology: from Simple Molecules to Primitive Life," ed. by V. Basiuk, American Scientific Publishers, Valencia, CA, pp. 175-186 (2010).
- Yamashita S., Baldacchino G., Taguchi M., Katsumura Y.: Chapter 13: Radiation chemistry of liquid water with heavy ions: steady-state and pulse radiolysis studies. in "Charged Particle and Photon Interactions with Matter - Recent Advances, Applications, and Interfaces -", ed. by Y. Hatano, Y. Katsumura, A. Mozumder, pp. 325-354 (2010).
- 坂本淳志、森豊、金崎真聡、山内知也、小田啓二：紫外線照射下における高分子系飛跡検出器中カーボネートエステル結合損失の量子収率、神戸大学大学院海事科学研究科紀要第7号、pp.87-98 (2010) .
- 山下真一：日本放射線化学会奨励賞受賞記事、治療用重粒子イオンビームの放射線化学反応、放射線化学 90, 11-17 (2010).
- 山下真一：はじめに：放射線生物における放射線化学の可能性、放射線化学 89, 2 (2010).
- 小林憲正、他：生命の起源を探る、山下雅道ほか編、東京大学出版会、pp. 23-44, 51-54 (2010).
- 中野祐司：3次元コヒーレント共鳴励起を用いたX線-VUV領域の2重共鳴と磁気サブレベルコントロール、原子衝突研究協会「しようつつ」, 2010年9月号 (2010).
- 中野祐司、東俊行：周期場を使ったX線領域の原子状態制御、日本物理学会誌、Vol.65, No 7, 516-523 (2010).
- 東俊行：結晶周期場によるイオンの極端紫外およびX線分光、パリティ 特集:物理科学、この1年、2010年1月号 (2010).
- 山田滋、篠藤誠：局所再発に対する重粒子線治療の役割、コンセンサス癌治療、10(1)、45-47 (2011).
- 篠藤誠、山田滋：膵癌に対する重粒子線治療、コンセンサス癌治療、10(3)、168-170 (2011).
- 篠藤誠、山田滋：放射線・診断と治療、がん生物学イラストレイテッド、337-346、(2011).
- Shimada M., Kato A., Kobayashi J.: Potential role of DNA repair proteins in centrosome maintenance. Book4/DNA repair, Intech publisher, (2011)
- 王冰, Guillaume Varès, 酒井一夫. 低線量影響としての放射線適応応答 放射線防護へのインパクト. 日本原子力学会誌. 53, 96-101 (2011).
- 山田滋、篠藤誠：局所再発に対する重粒子線

- 治療の役割、コンセンサス癌治療、10(1)、45-47 (2011).
- 篠藤誠、山田滋：膀胱に対する重粒子線治療、コンセンサス癌治療、10(3)、168-170 (2011).
- 篠藤誠、山田滋：放射線・診断と治療、がん生物学イラストレイテッド、337-346 (2011).
- 松本孔貴：がん転移に対する放射線影響研究～歴史的背景と近況～、放射線生物研究、46、247-270 (2011).
- 平山亮一：東京 RBC 新春放談会印象記、放射線生物研究会、46、283-284 (2011).
- Allen C., Borak T.B., Tsujii H., Nickoloff J.: Heavy charged particle radiobiology: Using enhanced biological effectiveness and improved beam focusing to advance cancer therapy. Invited mini review paper, *Mutat. Res.* 711, 150-157 (2011).
- 山谷泰賀、吉田英治、他：日本分子イメージング学会機関紙、Vol. 4、No. 2、135、2011.
- 森本彰、森 豊、山内知也、小田啓二、小西輝昭、安田仲宏：ポリエチレンテレフタレート薄膜中重イオントラックの構造分析、神戸大学大学院海事科学研究科紀要 第 8 号、31-40 (2011) .
- 前田佑介、森 豊、金崎真聡、山内知也、小田啓二、小西輝昭、安田仲宏、藤乗幸子、菅田義英、蔵岡孝治：プロトン照射した PADC 検出器表面上液滴の接触角異常、神戸大学大学院海事科学研究科紀要 第 8 号 21-29 (2011).
- 田島英明、吉田英治、他：核医学、第 48 巻、第 3 号、S241、(2011).
- 佐々木慎一：LET 計測に基づくリアルタイム宇宙放射線量計の開発、*J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 28, 67-73 (2011).
- Yamada S., Shinoto M., Hasegawa A., Yamamoto N., Yasuda S., Imai R., Tsuji H., Kamada T.: Recent clinical results on heavy ion radiotherapy, *Radiotherapy in Clinical Practice*, Debrecen, Hungary (2012).
- 寺嶋広太郎：医療概論、第 8 回医学部物理コース、千葉市、(2012).
- 寺嶋広太郎：実習「人の体を外から覗く：画像診断」 内視鏡・模擬人体を使用した体験、サマー・サイエンスキャンプ 2012、千葉市、(2012).
- Okayasu R.: Repair of DNA damage induced by accelerated heavy ions-a mini review. *Int. J. Cancer* 130, 991-1000 (2012).
- 崔 星：がん幹細胞を標的とした重粒子線治療の可能性、群馬大学・重粒子線医学センターがんプロフェッショナル養成プラン・放射線腫瘍専門医コース・重粒子線治療推進研修コース合同講演会、2012.01.
- Okamura M., Umemoto N., Onishi N.: Breeding glittering carnations by an efficient mutagenesis system. *Plant Biotechnol.* 29, 209-214, (2012).
- Wang B., Tanaka K., Ninomiya Y., Maruyama K., Varès G., SHANG Y., Eguchi-Kasai K., Neno M.: X-ray-induced radioresistance against high-LET radiations from accelerated neon-ion beams in mice. In *Current Topics in Ionizing Radiation Research* (M. Neno Ed.), pp.199-214, Intech-Open Access Publisher, Rijeka, Croatia (2012).
- 松本謙一郎：放射線と活性酸素、日本酸化ストレス学会サマースクール in 館山 (2012).
- 松本謙一郎：放射線防御と抗酸化物質、第 3 回抗酸化歯科研究会、神奈川歯科大学附属横浜研修センター (2012).
- 鈴木雅雄：放射線によって誘導されるバイスタンダー効果の生物学的意義、東京大学アイソトープ総合センターニュース、42、2-10 (2012).
- 崔星：Elimination of Cancer Stem Cells by Carbon Ion Beam---A Promising New Strategy for Cancer Treatment. 中国延辺大学附属病院にて、延吉(2012).
- 崔星：Elimination of Cancer Stem Cells by Carbon Ion Beam---A Promising New Strategy for Cancer Treatment. 韓国原子力研究院 (KAERI) 先端放射線技術研究所 (ARTI) にて、井邑(2012).
- 崔星：Eradication of Cancer Stem Cells by Heavy Ion Radiotherapy. Columbia University Center for Radiological Research にて、New York, USA (2012).
- Maeyama T., Fukunishi N., Ishikawa K.L., Fukasaku K., Furuta T., Takagi S., Noda S., Himeno R.: Diffusion suppression in gel dosimetry by addition of nanoclay. *RIKEN Accel. Prog. Rep.* 45, 205 (2012).
- 吉田英治、田島英明、山谷泰賀：OpenPET：小型試作機の開発、放射線科学、55、11-12 (2012).
- 佐々木慎一：気体の W 値測定の現状、*RADIOISOTOPES*, 61, 415-427 (2012).
- 山谷泰賀：開放型 PET 装置による粒子線治療の照射野イメージング、*Isotope News*, 699, 2-7 (2012).
- 山谷泰賀：がん診断と放射線治療を融合する開放型 PET 装置の開発、Readout HORIBA Technical Reports, 2012 年 10 月増刊号、18-22 (2012).
- 山谷泰賀：次世代装置の開発動向 3)DOI 検出

- 器の新しい展開ークリスタルキューブ検出器と OpenPET の開発、INNERVISION, 27, 62-65 (2012).
- 寺沢和洋：宇宙長期滞在に向けた宇宙放射線被曝線量計測、応用物理学会誌、第 81 巻、225-228 (2012).
- 小平聡、山内知也：固体飛跡検出器 CR-39 における重イオン飛跡生成メカニズム研究の現状、放射線化学、94, 27-40 (2012).
- 小林憲正：生命の起源を宇宙に求めて、ぶんせき、2012 (10), 576-580 (2012).
- 深尾裕亮、金崎真聡、森豊、山内知也、小田啓二、小西輝昭、安田仲宏：二酸化炭素処理による PADC 飛跡検出器の増感機構、神戸大学大学院海事科学研究科紀要、9, 69-78 (2012).
- 中嶋靖紀、河野俊之：安定核ビームの Autoactivation を利用した粒子線治療時の飛程推定：医歯工学連携研究センターシンポジウム、東京 (2012).
- 田島英朗、吉田英治、木内尚子、山谷泰賀：リアルタイム PET イメージング、放射線科学、55, 17 (2012).
- 土田亮太、平岩郷志、巽貴浩、吉川妙子、村上健、大島明博、鷲尾方一：放射線照射を用いた空間制御による、DMFC 用機能性電解質膜の開発、第 14 回放射線プロセスシンポジウム、東京 (2012).
- 平野祥之、錦戸文彦、稲玉直子、吉田英治、田島英朗、山谷泰賀：OpenPET：重粒子線照射野イメージングの核反応シミュレーション、放射線科学、55, 12-15 (2012).
- 皆巳和賢、手島昭樹、乾翔輝、西原明日香、吉岡彩、古澤佳也、松浦成昭：癌細胞の転移能に及ぼす重粒子線の影響、癌の臨床、59, 155-160 (2013).
- 平井崇久、笹井 啓資、益谷 美都子：PARP 阻害剤：がん治療における合成致死と増感剤としての役割、放射線生物研究、48, 52-65 (2013).
- 崔星：重粒子線による癌幹細胞を標的とした癌治療の基礎的研究、山梨大学医学部 (分子病理学講座)にて、中央 (2013).
- 崔星：重粒子線による消化器癌幹細胞を標的とした癌治療の基礎的研究、新潟大学医学部 (第一外科講座)にて、新潟 (2013).
- Allen C., Fujimori A., Okayasu R., Nickoloff J.: Radiation-Induced Delayed Genome Instability and Hypermutation in Mammalian Cells . Stress-Induced Mutagenesis, Springer, New York, 183-198 (2013).
- Durante M., Tinganelli W., Scifoni E., Hirayama R., Furusawa Y.: GSI-NIRS International Open Laboratory: filling the gap of oxygen effect measurements. GSI Scientific Report. (2013).
- Fujimori A., Itoh K., Goto S., Hirakawa H., Wang B., Kokubo T., Kito S., Tsukamoto S., Fushiki S.: Disruption of Aspm causes microcephaly with abnormal neuronal differentiation. Brain & development (2013).
- Matsumoto H.: Nitric oxide-mediated signal transduction induced by ionizing radiation, Cellular response to physical stress and therapeutic Applications. Ed. Shimizu T., Kondo T., NOVA publishers, 15-36 (2013).
- Scifoni E., Tinganelli W., Kraft-Weyrather W., Durante M., Maier A., Krämer M.: Experimental verification of TRiP-OER 467. GSI Scientific Report. (2013).
- 下川 卓志、佐藤 克俊、馬 立秋、中渡 美也子、中村 悦子、大塚 裕美、森竹 浩之：転移機構解析研究チーム研究概要。放射線科学。56, 31-36 (2013).
- 吉川 正信：放射線防護薬としての D 体アミノ酸の可能性、日本薬理学会雑誌。141.310-313 (2013).
- 高井伸彦：福島第一原子力事故に伴う健康リスクと問題点：Health risk effects due to radiation from the Fukushima daiichi nuclear disaster and problems: 長崎国際大学論叢 第 13 巻 震災復興特集合併号。199-209 (2013).
- 上坂充、藤森亮、加藤宝光：放射線生物学の最前線「DNA 損傷修復の動的可視化とシミュレーション」日本原子力学会誌、アトモス、55, 63-67 (2013).
- 小澤俊介、他：重イオンビーム実験による CALET-CHD の電荷分解能、第 13 回宇宙科学シンポジウム、ISAS (2013).
- Kobayashi Y.: “Chapter 3: In-beam Mössbauer Spectroscopy Using a Radioisotope Beam and a Nuclear Capture Reaction”, in Mössbauer Spectroscopy – Applications in Chemistry, Biology, Nanotechnology, ed. V. K. Sharma, G.Klingelhöfer, and T. Nishida, Wiley, 58-70 (2013).
- Maeyama T., Fukunishi N., Ishikawa K.L., Fukasaku K., Furuta T., Takagi S., Noda S., Himeno R.: Verification of carbon ion dose distribution using VIPAR polymer gels. RIKEN Accel. Prog. Rep., 46, 268 (2013).
- Yamaya T., Yoshida E., Tashima H., Wakizaka H., Hirano Y., Nishikido F., Inadama N., Ito H.: Development of a small prototype of a novel transformable single-ring OpenPET. J. NUCL. Med. MEETING(SNMMI 2013 Annual Meeting, No. 2166) (2013).
- 吉田英治、木内尚子、山谷泰賀：(4)Single-Ring

OpenPET 試作機の開発. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 20-21 (2013).

錦戸文彦, 平野祥之, 稲玉直子, 吉田英治, 山谷泰賀: (12)炭素線治療モニタリング用 OpenPET 検出器の炭素線照射下での性能評価. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 39-40 (2013).

山谷泰賀: トピックス 放医研の「OpenPET」開発／「OpenPET」が切り拓く新しいイメージング：小型実証機開発. PET Journal 2013, 21, 7-9 (2013).

山谷泰賀: 次世代 PET 機器開発研究の最新動向. 医学物理, 32, 3, 155-161 (2013).

山谷泰賀: (2)OpenPET 実証機開発プロジェクト概要. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 15-16 (2013).

山谷泰賀, 吉田英治, 田島英朗, 錦戸文彦, 平野祥之, 稲玉直子, 木内尚子, 菅幹生, 羽石秀昭, 中島靖紀, 佐藤眞二, 稲庭拓: (5)第二世代 single-ring OpenPET 小型試作機の開発と HIMAC 実験評価. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 22-23 (2013).

小川達彦: 高エネルギー放射線による原子核破碎の正確な予測に向けて－フラグメント生成反応の手法による断面積測定と理論モデルの開発－. 原子力機構の研究開発成果 2013 年度版, 85 (2013).

小林義男: メスバウアースペクトロメトリーの基礎と応用 量子ビームを用いたインビーム・メスバウアースペクトロメトリー, RADIOISOTOPE, 63, 103-106 (2013).

小林憲正, 他: アストロバイオロジー 山岸明彦編, 分担執筆, 化学同人 (2013)

小林憲正: 生命の起源 宇宙・地球における化学進化, 講談社 (2013).

森豊, 楠本多聞, 又井悠里, 金崎真聡, 小田啓二, 小平聡, 北村尚, 小西輝昭, 安田仲宏, 藤乗幸子, 菅田義英, 山内知也: PADC 飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造分析, 神戸大学大学院海事科学研究科紀要 第 10 号, 21-32 (2013).

中島靖紀, 河野俊之, 稲庭拓, 佐藤眞二, 吉田英治, 山谷泰賀, Sihver Lembit: (17)安定核ビームの Autoactivation を利用した 3 次元照射野の飛程推定精度. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 50-51 (2013).

田島英朗, 吉田英治, 山谷泰賀: (8)OpenPET リアルタイム腫瘍追跡の実現可能性検討. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 28-29 (2013).

品地哲弥, 田島英朗, 吉田英治, 村山秀雄, 山

谷泰賀, 羽石秀昭: (9)OpenPET における腫瘍トラッキング. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 30-32 (2013).

平野祥之, 木内尚子, 吉田英治, 稲玉直子, 錦戸文彦, 伊藤浩, 山谷泰賀: (6)OpenPET 小型試作機を用いた重粒子 RI ビーム照射によるラット頭部洗い出しの計測. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 24-25 (2013).

木内尚子, 山谷泰賀, 田島英朗, 吉田英治, 菅幹生: (7)粒子線照射野画像化のための Total variation 最小化画像再構成法の検討. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 26-27 (2013).

廣木章博: 放射線橋かけ技術を用いたゲルの創生研究とゲル線量計への展開、放射線と産業, 135, 15-18 (2013).

## 特許

盛武敬, 坪井康次, 松丸祐司, 他: X線遮蔽装置、特許公開 2004-49849、特許第 3599049 号取得 (2004).

盛武敬, 藤崎三郎, 小口靖弘, 水島浩, 松野陽, 内田敬: 線量計装着ウェア、これを用いた体表面被曝線量分布測定装置、特願 2005-46292 (2005).

盛武敬, 小泉洋人, 小野洋伸: エックス線遮蔽装置、特願 2005-39556 (2005).

山田滋: 腫瘍の放射線療法における放射線治療増強剤 (2006).

Joe Z. Sostaric, Norio Miyoshi, Peter Riesz: 超音波媒介細胞崩壊から細胞を保護するための方法及び組成物. 国際特許申請番号: PCT/US2005/037912, (2007/6/18)日本での特許申請〔識別番号;100078282〕

三好憲雄, 杉本和広: 光力学的治療法に使用するための光増感剤組成物. 申請番号:2007-046640(2007).

橋本義徳: カーボングラフィットを用いたマルチリボンビームプロファイル(MRPM)モニター: 特願 2005-291800, (2008).

三好憲雄, 伊藤慎治: ヒトや動物の細胞の増殖の抑制を容易にかつ安価に実施できる方法および薬剤を提供する. 特許番号:2007-263784, 申請日: (平成 19 年 9 月 8 日)

今井高志, 岩川眞由美, 道川祐市: 染色体 1 分子の多型を解析する技術、米国特許承認済み (2009).

山口充孝, 中野隆史, 荒川和夫, 鳥飼幸太, 島田博文, 河地有木, 佐藤隆博, 神谷富裕, 高

橋忠幸, 渡辺伸, 国分紀秀: 特許名称「放射線モニタリング」 (2010).

Sohier T., Munier M., Jung J.M., Barillon R., Raffy Q.: Brevet Français n° 11 59615, Nouveau procédé de détermination de la dose d'irradiation déposée dans un scintillateur par un rayonnement ionisant et dispositif associé. Patent (2011).

眞正浄光: 熱蛍光体板状体とそれを用いてなる画像読取装置 出願番号: 特許出願 2012-4573 (2011).

城潤一郎, 青木伊知男, 佐賀恒夫: 核酸類ハイドロゲル状態変更方法、放射線分解ハイドロゲル、物質内包放射線分解ハイドロゲル、および放射線応答ハイドロゲルキット、出願番号: 特願 2012-259393(2012).

中山文明, 梅田禎子, 安田武嗣, 藤田真由美, 今井高志: 膜透過ペプチド融合 FGF を有効成分とする医薬組成物 (2012).

新田宗孝, 稲玉直子, 錦戸文彦, 平野祥之, 吉田英治, 田島英朗, 河合秀幸, 山谷泰賀: (10)OpenPET 用検出器の基礎的研究. 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 33-35 (2013).

前山拓哉, 姫野龍太郎, 高木周, 福西暢尚, 野田茂穂, 古田琢哉, 深作和明, 石川顕一: 放射線線量測定用のゲル線量計およびその製造方法, 理化学研究所, 特願 2013-069797(特許申請), (2013).

## 学会賞

Kato TA., Fujii Y., Seo K., Bedford JS., Thompson LH., Fujimori A., Okayasu R.: Radiosensitivity of heavy charged particles irradiated various DNA repair deficient CHO mutant cells. 優秀発表論文賞、放射線影響学会、千葉、2007.11.

吉岡公一郎: 重粒子線照射がウサギ梗塞心のコネキシン発現と不整脈耐性に及ぼす影響—重粒子線照射による心室細動・頻拍の低侵襲治療法の開発—. 日本心電学会総会, 医科学応用財団助成金による優秀論文受賞、2007.10.

石川顕一, 今留香織, 大野達也, 田巻倫明, 岩川眞由美: 子宮頸がん放射線治療症例の生検腫瘍に対する放射線抵抗性マーカー遺伝子によるプロファイリング、日本放射線影響学会第 50 回大会優秀発表賞、千葉市、2007.11.

道川祐市, 野宮琢磨, 田巻倫明, 大塚好美, 塩見尚子, 塩見忠博, 岩川眞由美, 今井高

志: 放射線感受性の異なる 2 種のマウス扁平上皮癌細胞(SCCVII、NR-S1)を用いた in vitro 放射線応答の時系列解析、日本放射線影響学会第 50 回大会優秀発表賞、千葉市、2007.11.

佐藤達彦, 佐藤大樹: 広帯域エネルギー多粒子対応放射線モニタリングシステムの開発、第 39 回(平成 18 年度)日本原子力学会賞 技術賞 2007.

武智麻耶: 中間エネルギー領域における反応断面積エネルギー依存性と不安定核核子密度分布. 日本物理学会、首都大、原子核談話会新人賞受賞記念招待講演、2007.3.

山下真一ら: 第 50 回放射線化学討論会、ポスター賞. 2007.

Maeyama T., Yamashita S., Baldacchino G., Katsumura Y., Taguchi M., Kimura A., Muroya Y., Murakami T.: Sensitive Yield Measurement of OH in Water Radiolysis at the Bragg Peak of High-Energy Heavy-Ions with CCA as a Fluorescent Probe. The 2nd Asia-Pacific Symposium on Radiation Chemistry, Tokyo, 学会賞受賞 2008.

Oshima A., Murata K., Fukutake N., Urakawa T., Oka T., Kudo H., Murakami T., Katoh E., Washio M., Hama Y.: He<sup>2+</sup> ion beam irradiation effects of perfluorinated Polymers. Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry [TSRP2008]、優秀ポスター賞受賞、2008.1.

小平聡: 第 30 回応用物理学会論文賞 (JJAP 論文奨励賞) 受賞、2008.

平山亮一: 第 48 回日本医学放射線学会生物部会学術大会大会長賞、第 48 回日本医学放射線学会生物部会学術大会、富山、2009.

Hirayama R.: Contributions of direct and indirect actions in cell killing by high-LET radiations under hypoxic condition. The Outstanding Poster Award. PTCOG49, Chiba/Maebashi 2010.

平山亮一: 重粒子線誘発 OH ラジカルの細胞致死影響と酸素効果の機構解明、平成 22 年度日本放射線影響学会奨励賞 2010.

齋藤茂芳: 第 38 回日本磁気共鳴医学会大会長賞を受賞 2010.

磯辺智範, 他: 放射線治療時に発生する 2 次中性子線の CR-39 による簡易測定、第 100 回日本医学物理学会学術大会 (2010 年 9 月) にて、優秀ポスター賞を受賞 2010.

岡壽崇, 山下真一: 第 53 回放射線化学討論会ポスター賞受賞 2010.

山下真一: 日本放射線化学会奨励賞受賞 2010. Muraishi H., Abe S., Satoh H., Hara H., Mogaki T., Hara S., Miyake S., Yasuda N., Watanabe

Y., Koba Y.: Fast data acquisition in heavy ion CT based on the measurement of residual range distribution with HIMAC. Poster Award in 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics and 11th Asia Oceania Congress of Medical Physics 2011.

山下真一：第 54 回放射線化学討論会ポスター  
賞受賞 2011.

Tsuchida R., Hiraiwa S., Tsukamoto A., Tatsumi T., Washio M., Murakami T., Oshima A.: Fabrication of micro functional PEMs having a hydrophilic micro structure by quantum beam irradiation for DMFC. Best Poster Award in 4th Asia Pacific Symposium on Radiation Chemistry (APSRC-2012), 2012/10/30 - 11/3, Huangshan, Anhui, China 2012.

坂本晴香: Application of a bubble detector for the estimation of biological effectiveness for heavy ion radiotherapy. 東京工業大学 2012 年中間発表会で Presentation Award 受賞 2012.

平野祥之, 吉田英治, 木内尚子, 稲玉直子, 錦戸文彦, 山谷泰賀, "(11)In-beam PET (OpenPET) における二次粒子の Geant4 シミュレーション," 平成 24 年度次世代 PET 研究報告書, 36-38 2013.

## プレス発表

馬場雅行：専門医にきく「肺がん治療の最新情報とこれから」治療の選択を考える、[プレス発表](2008).

馬場雅行、辻井博彦：がん治療の最前線である粒子線治療をレポートし、進化するがん治療の現場と今後の可能性を描く、[プレス発表](2009).





## A3. HIMAC レポート一覧

List of the HIMAC Reports  
(2004～2014)



## HIMAC レポート一覧

HIMAC-092	三須敏幸、岩田佳之、宮原信幸、北條 悟、杉浦彰則、金澤光隆、村上健、山田 聡：炭素線治療用小型ラジアル・セクター型F F A Gの開発研究、2004 年 7 月.
HIMAC-093 (NIRS-M-177)	HIMAC10 年の歩み－HIMAC10 周年記念 研究成果要覧－、2004 年 7 月
HIMAC-094	Takuji Furu kawa an d K oji Noda : Experimental St udy on Be am Contr ol by RF-knockout Slow-Extraction for Medical Synchrotron, October 2004.
HIMAC-095	E. Syresin, K. Noda, T. Furukawa, T. Uesugi, T. Naruse : High intensity carbon ion beam at HIMAC multi turn injection, November 2004.
HIMAC-096	E. Sy resin, K . Noda, T. U esugi, S. Sh ibuya : Cooling-stacking injection and transverse instability of carbon beam at HIMAC synchrotron, November 2004.
HIMAC-097	E. Syresin, K. Noda, T. Uesugi, S. Shibuya : Colling-stacking experiments with argon beam at HIMAC synchrotron, November 2004.
HIMAC-098	E. Syresin, T. Tanabe, K. Noda : Collisions of DNA anions with electrons in KEK electrostatic ring, November 2004.
HIMAC-099	Lembit Sih ver, N aruhiro Mats ufuji a nd T atsuki Kanai : Calculation o f Depth-Dose, Fluence, Energy, Dose and Track Average LET Distributions of Therapeutic Heavy Ion Beams by Hibrac, December 2004.
HIMAC-100	欠.
HIMAC-101	V.P. Sh evelko, H. T awara, O.V. Iv anov, T. Miyo shi, K. No da, Y. Sato, A.V. Subbotin, and I.Yu. Tolstikhina : Target Density Effects i n Co llisions of Fast Ions with Solid Targets, December 2004.
HIMAC-102	T. Uesugi, K. Noda, E. Syresin, I.Meshkov, S. Shibuya : Cool-stacking injection and damping of transverse ion-beam instability at the HIMAC synchrotron, To be published in Nucl. Instrum. Methods Res. A, January 2005.

HIMAC-103	金井達明、兼松伸幸、AEC 照射系 G : 積層原体照射による線量分布の形成、2005 年 3 月.
HIMAC-104	HIMAC 照射系グループ : HIMAC 炭素線眼治療に関する物理技術的な総合報告書－(1)物理・生物学的基礎 (2) 治療計画 (3) 線量分布の確認・検証 (4)照射ノズルと患者位置決め－2006 年 3 月.
HIMAC-105	編集－村松正幸 : 2003 年度、粒子線がん治療用加速器に関する共同研究報告書、2004 年 2 月.
HIMAC-106 (NIRS-M-180)	平成 16 年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2005 年 5 月.
HIMAC-107	丹 大輔、上杉智教、渋谷眞二、野田耕司 : HIMAC シンクロトロンにおけるショートバンチビームの生成に関する研究、2005 年 11 月.
HIMAC-108	岩田佳之、藤本哲也、宮原信幸、小川弘幸、藤澤高志、村上 健、山田聰 : IH 型モデル共振器の電場測定、2005 年 11 月.
HIMAC-109	編集－村松正幸、野田耕司 : 2004 年度、粒子線がん治療用加速器に関する共同研究報告書、2005 年 12 月.
HIMAC-110	T. Miyoshi, K. Noda, Y. Sato, H. Tawara, I.Yu. Tolstikhina, and V.P. Shevelko : Evaluation of Excited $nl$ -state D istributions of Exit Ions after 4-20 MeV/u Projectile Ions Penetrating Carbon Foils, December 2005.
HIMAC-111	H. Fadil, S. Fujimoto, T. Fujimoto, S. Iwata, A. Noda, K. Noda, I. Seleznev, S. Shibuya, T. Shirai, H. Souda, E. Syresin : Electron Beam Cooling Experiments at S-LSR, January 2006.
HIMAC-112	E. Syresin, K. Noda, T. Uesugi, S. Shibuya : Experimental and numerical study of cooling-stacking injection on the HIMAC synchrotron, January 2006.
HIMAC-113	M. Okamura, H. Kashiwagi, T. Fujimoto, K. Yamamoto, T Hattori : High current carbon beam production with DPIS, January 2006.
HIMAC-114	古川卓司、取越正巳、佐藤眞二、野田耕司、金井達明、高田栄一、山田聰、勝間田匡、白石直浩、霜重拓也 : HIMAC 運転改善に関する検討報告書－粒子線がん治療のさらなる効率化に向けて－2006 年 5 月.

HIMAC-115 (NIRS-M-192)	平成 17 年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2006 年 5 月。
HIMAC-116	藤澤高志、上垣外修一：導体及び導体薄膜の高周波損失について、2006 年 7 月。
HIMAC-117	上杉健弘、古川卓司、野田耕司：HIMAC シンクロトロンにおける入射ビーム特性とビームロスに関する研究、2006 年 9 月。
HIMAC-118	稲庭 拓、河野俊之、富谷武弘、金井達明、金澤光隆、佐藤眞二：粒子線治療時に生じる陽電子崩壊核を利用した照射野確認法の研究、2006 年 9 月。
HIMAC-119	AEC 実験 G、村上 健、古川卓司：リサーチ図形による拡大照射野の形成、2006 年 9 月。
HIMAC-120	編集ー柴田裕実：「イオンビーム誘起放射線化学」研究会、2006 年 12 月。
HIMAC-121	Y. Iwata, S. Yamada, T. Murakami, T. Fujimoto, K. Yamamoto, N. Miyahara, H. Ogawa, T. Fujisawa, S. Hojo, Y. Sakamoto, T. Takeuchi, M. Muramatsu, T. Mitsumoto, H. Tsutsui, T. Watanabe, and T. Ueda : Performance of a compact injector for medical accelerators, August 2006.
HIMAC-122	武井由佳、金井達明、兼松伸幸、小森雅孝、佐藤眞二、野田耕司、山田聰、遊佐 颯、田代 睦、藤原秀樹、小林千広、宇野隆之、渋谷真二：普及型粒子線治療装置システムに関する検討、2007 年 3 月。
HIMAC-123	編集ー村松正幸、野田耕司：2005 年度、粒子線がん治療用加速器に関する共同研究報告書、2007 年 1 月。
HIMAC-124	古川卓司、稲庭 拓、佐藤眞二、富谷武弘、岩田佳之、武井由佳、蓑原伸一、野田耕司、金井達明：3 次元スキャニング照射装置の設計検討、2007 年 4 月。
HIMAC-125 (NIRS-M-203)	平成 18 年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2007 年 6 月。



HIMAC-126	A. Smirnov, I. Meshkov, A. Sidorin, A. Noda, T. Shirai, H. Souda, H. Tongu, K. Noda, M. Grieser : Investigation of ordered proton beams at S-LSR, October 2007.
HIMAC-127	岩田佳之、野田耕司、板野明史：三次元磁場計算コードの精度評価、2008年1月.
HIMAC-128	Y. Uchihori and E. R. Benton : Results from the ICCHIBAN-3 and ICCHIBAB-4 Experiments to Intercompare the Response of Space Radiation Dosimeters, March 2008.
HIMAC-129 (NIRS-M-214)	平成19年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2008年6月.
HIMAC-130	藤澤高志、高田栄一、安田仲宏、野田耕司、川嶋 元、小林育夫、奥野功一：CCDカメラの放射線遮へいと HIMAC 室（B2）内の放射線分布、2008年9月.
HIMAC-131	渡辺広太、金澤光隆、藤本哲也：HIMAC シンクロトロンの新 RF cavity による T-clock のみを用いた加速について、2009年2月.
HIMAC-132 (NIRS-M-226)	平成20年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2009年6月.
HIMAC-133	編集一柴田裕実、山下真一、村上 健：高 LET 放射線研究会 ～物理・化学・生物の基礎研究から医学応用まで～、2009年7月.
HIMAC-134 (NIRS-M-234)	平成21年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2010年6月.
HIMAC-135 (NIRS-R-63)	Takashi Nakamura, Hiroshi Yasuda, Masashi Takada, Kazuaki Yajima, Tatsuhiko Sato, Toru Fujishima : Dosimetry and Spectrometry of Cosmic-ray Neutrons in Aircraft (DOSCONA Experiment), 2011年12月.
HIMAC-136 (NIRS-M-244)	平成22年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2011年11月.

HIMAC-137	Kota Mizushima, Takuji Furukawa, Toshiyuki Shirai, Yoshiyuki Iwata : Beam Extraction Control for Fast 3D Scanning Irradiation in Medical Synchrotron, April 2012.
HIMAC-138 (NIRS-M-251)	平成 23 年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2012 年 8 月.
HIMAC-139	平成 24 年度 国内・国際会議アブストラクト・プロシーディング集、2013 年 3 月.
HIMAC-140 (NIRS-M-260)	平成 24 年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2013 年 8 月.
HIMAC-141 (NIRS-M-273)	平成 25 年度放射線医学総合研究所 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2014 年 10 月.



## A4. HIMAC 共同利用研究

### 実施課題一覧

List of Accepted Proposals at HIMAC  
(2004～2014)



平成 16 年度 課題番号	課題申請者	所内対応者	課題名
(治療・診断)			
15C017	加藤博敏	加藤博敏	肝癌の重粒子線治療における最適照射範囲設定のための精密診断法に関する研究
15C019	溝江純悦	溝江純悦	重粒子線に於ける PULC(Probability of Uncomplicated Local Control)の有用性に関する研究
14C024	馬場雅行	馬場雅行	小型肺癌に対する炭素線の超短期照射法における照射技術の開発と治療効果の評価に関する研究
15C025	鎌田 正	鎌田 正	重粒子線に於ける Quality of Life (QOL)調査に関する研究
14C030	山田 滋	山田 滋	重粒子線照射後の各種サイトカインの動態に関する研究
14C031	山田 滋	山田 滋	重粒子線治療における正常組織障害の定量的評価の試み
14C035	森 豊	宮本忠昭	Fusion 画像による重イオン線の局所肺傷害の定量的評価に関する研究
16C036	吉川京燦	吉川京燦	眼窩原発悪性黒色腫の C-11 メチオニン PET による画像診断と治療効果判定法の研究
16C037	井上 修	鈴木和年	組織内活性酸素イメージング剤の開発:Hydroethidine 誘導体の腫瘍集積におよぼす重粒子線照射効果
16C038	神立 進	神立 進	Gradient ECHO 法をもちいた MRI による病変組織の鑑別
16C039	大坂康博	溝江純悦	重粒子線 治療における腫瘍の反応と免疫機能に関する研究
16C040	岸本理和	岸本理和	前立腺癌の高速撮影法 SENSE(sensitivity encoding)を用いた拡散強調画像
16C041	安田茂雄	安田茂雄	肝細胞癌の炭素イオン線治療における肝有害反応の DVH 解析
16C042	柳 剛	柳 剛	前立腺癌における直腸、尿道反応に対する DVH 解析
15D011	荒野 泰	入江俊章	癌の重粒子線治療効果を早期に判定する放射性薬剤の開発
15D012	古賀雅久	吉川京燦	頭頸部・脳腫瘍における PET-CT-MRI/MRS 画像の有用性の検討
(生物)			
16B132	手島昭樹	古澤佳也	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
14B136	熊谷 健	宮原信幸	培養脈絡膜悪性黒色腫細胞における重粒子線感受性についての研究
15B137	大西武雄	古澤佳也	p53 非依存的重粒子線誘導アポトーシスを標的とした基礎的研究
15B140	安藤興一	安藤興一	重粒子線治療の最適化のための生物学研究-III 腫瘍の感受性と LET
15B141	古澤佳也	古澤佳也	重粒子線治療の最適化のための生物学研究-VI;混合ビームの生物効果
16B144	二村好憲	山田 滋	消化器扁平上皮癌における放射線治療個別診断アレイの開発
16B145	大賀 優	野島久美恵	Clioma に対する放射線増感 promoter を用いた p53 遺伝子治療と重粒子治療の併用効果の実験的検討
16B146	宮本忠昭	宮本忠昭	重粒子線治療における肺癌腫瘍の至適分割法の研究:低酸素下加速分裂細胞の放射線感受性と血管誘導および低酸素関連遺伝子発現について
16B147	北林宏之	北林宏之	食道癌に対する重粒子線と血管新生阻害因子 NK4 の併用効果の検討
16B148	中野隆史	安藤興一	重粒子線による細胞死の分子機構と重粒子線治療の有効な分割照射法に関する放射線生物学的研究
16B223	野島久美恵	野島久美恵	脳の正常組織と高次生体機能に対する重粒子線の影響解析
15B235	大和谷 厚	安藤興一	重粒子線による中枢神経の障害発症における神経性アミノ酸の役割
16B238	廣部知久	廣部知久	メラノサイトの増殖・分化に対する重粒子線の影響
14B239	今岡達彦	今岡達彦	重粒子線による乳癌発生に関する研究



14B240	中川秀彦	伊古田暢夫	重粒子線による生体内一酸化窒素産生：誘導機構と生体影響
14B241	柿沼志津子	柿沼志津子	重粒子線による胸線リンパ腫の発生とそのメカニズムの分子生物学的研究
14B242	長谷川正俊	野島久美恵	放射線感受性正常組織における重粒子線照射後の細胞死と回復の実験的検討
14B244	石原昭彦	野島久美恵	脊髄への重粒子線の照射が運動ニューロンの形態や代謝特性に及ぼす影響
14B245	王 冰	王 冰	ラット精子形成細胞における粒子線の影響に関する研究
14B246	稲次基希	稲次基希	炭素線照射によるパーキンソン・モデル動物に対する神経幹細胞移植の効果-PET による画像評価および行動学的評価-
15B247	高井伸彦	高井伸彦	重粒子線治療の最適化のための生物学的研究-I.正常組織障害
15B248	青木瑞穂	青木瑞穂	重粒子線治療の最適化のための生物学的研究-II.損傷修復と分割照射
15B249	溝田 淳	宮原信幸	重粒子線による誘発 ERG の基礎的研究
16B250	斉藤正好	安藤興一	ラットの中枢神経に対する重粒子線照射が生殖機能（性行動）におよぼす影響
16B328	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線低線量率照射が及ぼす生物影響に関する研究
14B332	鈴木雅雄	鈴木雅雄	マイクロビーム様粒子線低密度照射による細胞死・突然変異・DNA 損傷に関する研究
14B333	川田哲也	古澤佳也	ヒト線維芽細胞の重粒子線照射による生存率と FISH 法による染色体異常に関する研究
15B335	澤尻昌彦	溝江純悦	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
16B336	柏倉幾郎	笠井清美	ヒト巨核球・血小板造血におよぼす重粒子線の作用
16B413	檜枝光太郎	古澤佳也	ブラックピーク近傍の重粒子イオンを用いたイオン特異的な DNA 損傷の誘発と修復
14B419	田内 広	笠井清美	HPRT 突然変異高感度検出系を用いた突然変異スペクトルの LET 依存性解明
16B424	伊藤 敦	古澤佳也	DNA 酸化損傷の細胞内生成の LET 依存性
15B439	盛武 敬	盛武 敬	膠芽腫に対する重粒子線の治療効果比向上に関するラジカル反応の研究
16B446	鈴木雅雄	鈴木雅雄	突然変異およびクロマチン損傷誘発に対する重粒子線の LET・加速核種依存性
16B447	西坂 剛	村上 健	重粒子線を用いた腫瘍の治療に対する外因性および内因性のプロトポルフィリンの効果
14B452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線と X 線による初期 DNA（染色体）損傷、修復の比較
15B454	矢追 毅	野島久美恵	低線量重粒子線照射応答性遺伝子の発現制御機構の解析
15B455	井出 博	古澤佳也	重粒子線により生じる DNA クラスター損傷の解析
15B456	富田雅典	古澤佳也	DNA クラスター損傷に対する DNA 2 本鎖切断修復タンパク質の応答
15B457	笠井清美	笠井清美	DNA 障害部位認識抗体を用いた重粒子線誘発 DNA 切断部位の可視化
15B458	竹下哲史	古澤佳也	重粒子線による海藻類の変異誘導に関する研究
15B459	三枝公美子	三枝公美子	ヒト培養細胞を用いた重粒子線照射における遺伝子発現変化の検討
16B460	村上正弘	村上正弘	マウス卵形成過程における重粒子線誘発 DNA、染色体損傷とその修復機構の原子間力顕微鏡による解析
16B461	熊谷 純	野島久美恵	重イオン照射で生成する長寿命ラジカルの化学腫瘍の解明と遺伝子的不安定性との関係
16B462	LE SECH C.	古澤佳也	STUDY of DAMAGES of DNA LOADED with HIGH-Z ATOMS by ATOMIC IONS
14B516	古澤壽治	野島久美恵	体細胞突然変異検出法によるカイコ個体への重粒子線影響解析
14B525	吉川 勲	野島久美恵	重粒子線誘発突然変異のスペクトラム
16B527	岩橋 均	野島久美恵	重粒子線による酵母およびイネの遺伝子発現プロファイル

16B528	石崎寛治	鈴木雅雄	ヒト不死化細胞株に対する重粒子線による遺伝的影響の解析
16B529	Furweger, Christoph	岡安隆一	Correlation of Radiation induced cellular Signal Transduction Events with LET-selective Thermoluminescence Dosimetry
16B612	松本英樹	古澤佳也	重粒子線がん治療における NO ラジカル役割
16B625	吉岡公一郎	古澤佳也	重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発
14B632	山田 滋	山田 滋	消化器癌に対する重粒子線照射と化学療法の併用効果に関する研究
16B905 (C037)	井上 修	鈴木和年	組織内活性酸素イメージング剤の開発: Hydroethidine 誘導体の腫瘍集積におよぼす重粒子線照射効果
(物理・工学)			
16P005	金井達明	金井達明	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
16P009	佐藤幸夫	佐藤幸夫	重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究
16P026	松多健策	金澤光隆	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性
16P028	野田耕司	野田耕司	がん治療用加速器の総合的研究
16P032	小牧研一郎	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
14P034	西村克之	河野良介	重粒子線によるコンピューター断層撮影の研究
14P037	J. Miller	岩田佳之	Light Ion Fragmentation Studies with Large Angular Acceptance and Multiple Particle Resolution
15P045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による原子分子の電離過程の研究
15P054	金澤光隆	金澤光隆	二次ビームコース及びこの医学利用に関する基礎研究
15P057	河野俊之	金井達明	ブロードビーム重イオン CT の応用に関する研究
15P060	松藤成弘	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
16P065	T. B. Borak	岩田佳之	軽い重イオンのマイクロドジメトリー (Microdosimetry of Heavy Ions and Neutrons)
16P066	柏木利介	内堀幸夫	重粒子入射に対する新しい半導体検出器の応答
14P078	金澤光隆	金澤光隆	重粒子線の体内フラグメンテーションの断面積の測定
14P087	森 義治	野田耕司	重粒子加速器のビーム高品質化のためのビーム力学の研究、および新型空洞とビームチョッパーの開発研究
15P093	福田光順	金澤光隆	重粒子線による核反応断面積の研究
15P095	久保山智司	岩田佳之	半導体素子の放射線の影響に関する研究
15P105	宮地 孝	村上 健	PZT を基礎材とする音響型放射線検出器
16P111	佐々木慎一	福村明史	重荷電粒子に対する気体の W-値に関する研究
16P113	内堀幸夫	内堀幸夫	Intercomparison for Cosmic-ray with Heavy Ion Beams At NIRS
16P121	中川公一	佐藤幸夫	重粒子線で生ずる L- $\alpha$ -アラニンとスクロースのラジカル ESR による研究
14P132	丸山浩一	金澤光隆	プラスチックシンチレータ中での $^{11}\text{C}$ と $^{12}\text{C}$ の核破砕反応
14P133	高島 健	内堀幸夫	科学衛星搭載観測機器の耐放射線素子開発と照射実証実験
14P136	須田利美	金澤光隆	高エネルギー重粒子に対する無機シンチレーターの応答関数測定
14P138	山内知也	安田仲宏	Radial size and chemical structure of nuclear tracks in polymers
14P139	高田真志	高田真志	高エネルギー中性子検出器の中性子-陽子弁別特性の試験評価と高エネルギー中性子の応答関数測定
14P141	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水分解生成物の収量評価
15P143	遠藤 暁	福村明史	重粒子放射線治療場の深部 RBE と 2 次粒子線の寄与の評価
15P146	小平 聡	安田仲宏	固体飛跡検出器 CR-39 を用いた Fe 核同位体弁別実験
15P148	澤村晃子	安田仲宏	過熱液滴型検出器の重イオンに対する応答とその応用
15P149	久下謙一	安田仲宏	CR39 と写真乾板を用いたハイブリッド飛跡検出器の開発
15P150	Wei Zenquan	金澤光隆	Research on biological effects of radioactive ion beam
15P152	丹羽公雄	兼松伸幸	宇宙・医療分野へのエマルジョンチェンバー技術の応用のための研究
15P153	E. Benton	内堀幸夫	BEAMS: Benchmark Evaluations and Analysis of Materials for Shielding
15P154	宮地 孝	内堀幸夫	重粒子の Fragments を用いた質量弁別

15P155	Zengquan Wei	安田仲宏	Calibration experiments of CR-39 with 16O, 20Ne and 40Ar ions of more than 100 MeV/u at HIMAC
15P157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成
15P158	松藤成弘	松藤成弘	治療ビームの中性子・荷電粒子フラグメントによる生物効果に関する研究
15P159	高田義久	金井達明	粒子線による平坦な照射野形成の研究
15P160	松村 宏	村上 健	中高エネルギーハドロン誘起反応における軽核生成反応率の測定
15P161	S. McKeever	内堀幸夫	Optically Stimulated Luminescence Studies of the HCP Response of Al2O3 for use in Space Radiation Dosimetry
15P162	片寄祐作	内堀幸夫	結晶シンチレータを用いた全吸収型カロリメータの重粒子線検出性能に関する研究
15P163	河野良介	河野良介	重粒子線による不均質媒質中の LET 分布並びに線量分布の研究
15P164	若林源一郎	松藤成弘	フラグメント生成反応研究のための検出器開発
15P165	取越正己	取越正己	電離箱用材料の基本特性の調査と試験
16P166	吉村尚郎	村上 健	微細 CMOSLSI におけるラッチ回路のソフトエラー評価
16P167	安田仲宏	安田仲宏	固体素子の組み合わせによる積算型複合検出器の開発と評価
16P168	R. Barillon	安田仲宏	Improvement of the radiation dosimetry of heavy ions, assessing the mechanisms of track formation and scintillation in polymers
16P169	M. Hajek	内堀幸夫	LET Calibration of TL Response and Efficiency of Selected TL Materials for Radiation Dosimetry in Heavy-Ion Fields
16P170	岩田和朗	村上 健	TLD による重粒子線 Bragg ピーク近傍の 2 次元線量分布の測定
16P171	斎藤 究	福村明史	放射線誘起表面活性現象を利用した放射線検出器の開発
16P172	遠藤 章	松藤成弘	インテリジェント中性子モニタを用いた数百 MeV 中性子に対する線量測定法の開発
16P174	J. Skvarc	安田仲宏	Application of radioactive beams and charge-changing cross sections relevant for radiotherapy
16P175	長谷川 純	村上 健	プラズマ阻止能における強結合効果の実験的検証
16P176	櫻井敬久	安田仲宏	イメージングプレートを使った宇宙線検出器の開発
16P177	河野俊之	金井達明	核破砕反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
16P178	百田佐多生	金澤光隆	入射核破砕片の生成メカニズムの研究
16P179	坂口治隆	金澤光隆	不安定核陽子弾性散乱のためのビームラインカウンターのテスト
16P180	中川（太田）清子	村上 健	アルコール溶媒中ヒドロキシフタルイミドの放射線照射における LET 効果の検討
16P181	小林俊雄	高田栄一	重 RI ビーム粒子識別用検出器の開発
16P182	金井達明	金井達明	重粒子線治療におけるマイクロドシメトリック的手法を用いた生物効果推定
16P183	小森雅孝	小森雅孝	普及型炭素線治療施設における照射システムに関する研究
16P185	山下直之	内堀幸夫	惑星核分光における宇宙線中のアルファ粒子の影響
16P186	濱 義昌	村上 健	高エネルギー重イオンビームによる高分子材料への照射効果ー化学構造変化の局所性と耐環境性
16P187	平賀純子	内堀幸夫	BP-1 ガラス製微細コリメータの製作と天体 X 線観測用 CCD の詳細診断
16P188	Durante, Marco	古澤佳也	Biophysical Studies of Heavy-Ion Nuclear Fragmentation Experiment:BINFRA

平成 17 年度

課題番号      課題申請者      所内対応者

(治療・診断)

課題名

17C035	森 豊	宮本忠昭	Fusion 画像による重イオン線の局所肺傷害の定量的評価に関する研究
16C040	岸本理和	岸本理和	前立腺癌の高速撮影法 SENSE(sensitivity encoding)を用いた拡散強調画像
17C043	馬場雅行	馬場雅行	中心型肺癌に対する炭素イオン線治療における 3 次元治療計画の研究
17C044	山田 滋	山田 滋	重粒子線がん治療における新しい腫瘍マーカーとしての血中サイトカイン値の動態に関する研究
17C045	吉川京燦	吉川京燦	メチオニン PET による鼻腔悪性黒色腫の重粒子線治療前後評価と予後判定研究
17C046	石川 仁	石川 仁	子宮頸癌重粒子線治療における COX-2 発現の予後との関連と COX-2 阻害剤の臨床応用に関する研究
17C047	中井浩二	吉川京燦	ポルフィリン誘導 DDS 型癌医療のための基礎研究
17C048	今井礼子	今井礼子	骨軟部腫瘍における重粒子線治療後の QOL に関する研究
15D011	荒野 泰	入江俊章	癌の重粒子線治療効果を早期に判定する放射性薬剤の開発
	(生物)		
16B132	手島昭樹	古澤佳也	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
15B137	大西武雄	古澤佳也	p53 非依存的重粒子線誘導アポトーシスを標的とした基礎的研究
15B140	安藤興一	安藤興一	重粒子線治療の最適化のための生物学研究-III腫瘍の感受性と LET
15B141	古澤佳也	古澤佳也	混合ビームの生物効果
16B145	大賀 優	野島久美恵	Glioma に対する放射線/低酸素増感 promoter を用いた p53 遺伝子治療と重粒子治療の併用効果の実験的検討
16B146	藤澤武彦	宮本忠昭	重粒子線治療における肺癌腫瘍の至適分割法の研究:低酸素下加速分裂細胞の放射線感受性と血管誘導および低酸素関連遺伝子発現について
16B147	北林宏之	山田 滋	食道癌に対する重粒子線と血管新生阻害因子 NK4 の併用効果の検討
16B148	中野隆史	安藤興一	重粒子線による細胞死の分子機構と重粒子線治療の有効な分割照射法に関する放射線生物学的研究
17B151	中野隆史	安藤興一	重粒子線によるがん細胞の細胞死におけるシグナル伝達経路の役割-X 線との比較
17B152	山田 滋	山田 滋	扁平上皮癌における重粒子線の治療効果比に関する研究
17B153	成島一夫	成島一夫	食道癌扁平上皮癌における重粒子線と抗血管新生薬の併用効果に関する研究
16B223	野島久美恵	野島久美恵	脳の正常組織と高次生体機能に対する重粒子線の影響解析
15B235	大和谷 厚	安藤興一	重粒子線による中枢神経障害発症における神経性アミノ酸の役割
16B238	廣部知久	廣部知久	メラノサイトの増殖・分化に対する重粒子線の影響
17B239	今岡達彦	今岡達彦	胎児とこどもにおける重粒子線誘発乳腺発癌の研究
17B241	柿沼志津子	柿沼志津子	重粒子線によるマウス発がん研究-胸腺リンパ腫の発生の系統差と被ばく時年齢依存性-
17B245	王 冰	王 冰	ラット精子形成細胞における粒子線の影響に関する研究 (II)
15B247	高井伸彦	高井伸彦	重粒子線治療の最適化のための生物学研究-I.正常組織障害
15B248	古澤佳也	古澤佳也	重粒子線治療の最適化のための生物学研究-II.損傷修復と分割照射
15B249	溝田 淳	宮原信幸	重粒子線による誘発 ERG の基礎的研究
16B250	斉藤正好	安藤興一	中枢神経に対する重粒子線照射がラット生殖機能 (性行動) におよぼす影響
17B251	長谷川正俊	野島久美恵	重粒子線の RBE と治療可能比の検討;放射線抵抗性腫瘍と正常組織の比較
16B328	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線低線量率照射が及ぼす生物影響に関する研究
17B332	鈴木雅雄	鈴木雅雄	粒子線低密度照射による細胞死・突然変異・染色体損傷誘発

のバイスタンダー効果に関する研究

15B335	澤尻昌彦	溝江純悦	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
16B336	柏倉幾郎	笠井清美	ヒト巨核球・血小板造血におよぼす重粒子線の作用
17B337	古澤佳也	古澤佳也	重粒子線の細胞致死作用における線量率効果
17B338	川田哲也	古澤佳也	粒子線照射された線維芽細胞における染色体異常の細胞周期依存性に関する研究
17B340	岡村正愛	古澤佳也	植物の突然変異誘発への重イオンビームの効果に関する研究
16B413	檜枝光太郎	古澤佳也	ブラックピーク近傍の重粒子イオンを用いたイオン特異的な DNA 損傷の誘発と修復
16B424	伊藤 敦	古澤佳也	DNA 酸化損傷の細胞内生成の LET 依存性
15B439	盛武 敬	盛武 敬	膠芽腫に対する重粒子線の治療効果比向上に関するラジカル反応の研究
16B446	鈴木雅雄	鈴木雅雄	突然変異およびクロマチン損傷誘発に対する重粒子線の LET・加速核種依存性
17B452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線による DNA 二重鎖切断・修復機構の解明
15B455	井出 博	古澤佳也	重粒子線により生じる DNA クラスター損傷の解析
15B457	笠井清美	笠井清美	DNA 障害部位認識抗体を用いた重粒子線誘発 DNA 切断部位の可視化
16B460	村上正弘	村上正弘	マウス卵形成過程における重粒子線誘発 DNA、染色体損傷とその修復機構の原子間力顕微鏡による解析
16B461	熊谷 純	野島久美恵	重イオン照射で生成する長寿命ラジカルの化学腫の解明と突然変異・遺伝的不安定性との関係
16B462	LE SECH,	古澤佳也	STUDY of DAMAGES of DNA LOADED with HIGH-Z ATOMS by ATOMIC IONS
	Claude		
17B463	Moeller, Ralf	岡安隆一	Gene activation of heavy ion treated Bacillus subtilis 168 (DSM 402) endospores during germination involved DNA-repair
17B464	岩川眞由美	岩川眞由美	マウス腫瘍の重粒子線照射効果関連遺伝子群の網羅的解析
17B466	西田浩志	安西和紀	重粒子線による DNA 損傷応答反応における Schisandrin の作用に関する研究
17B516	古澤壽治	野島久美恵	カイコの胚発生期における低線量重粒子線感受性
15B517	Durante, Marco	古澤佳也	Influence of the Shielding on the Space Radiation Biological Effectiveness (Experiment Shield)
16B527	岩橋 均	野島久美恵	重粒子線による酵母およびイネの遺伝子発現プロファイル
16B528	石崎寛治	鈴木雅雄	ヒト不死化細胞株に対する重粒子線による遺伝的影響の解析
16B529	Furweger, Christoph	岡安隆一	Correlation of Radiation induced cellular Signal Transduction Events with LET-selective Thermoluminescence Dosimetry, Part 2
17B530	高辻俊宏	野島久美恵	重荷電粒子によるタマネギ小核および染色体異常の発生断面面積
17B531	Kohwi, Yoshinori	野島久美恵	The effects of heavy-ion radiation on translational regulation of circulatory homeostasis in the hypothalamus.
17B532	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線低線量（率）照射による遺伝的不安定性の研究
17B533	松本 緑	野島久美恵	プラナリア全能性幹細胞の再生、分化に関わる重粒子線の影響
16B612	松本英樹	古澤佳也	重粒子線癌治療における NO ラジカルの役割
16B625	吉岡公一郎	古澤佳也	重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発
15B904 (D011)	荒野 泰	入江俊章	癌の重粒子線治療効果を早期に判定する放射性薬剤の開発
(物理・工学)			
16P005	金井達明	金井達明	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
16P009	佐藤幸夫	佐藤幸夫	重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究
16P026	松多健策	金澤光隆	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性

16P028	野田耕司	野田耕司	がん治療用加速器の総合的研究
16P032	小牧研一郎	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
17P037	Miller, J.	岩田佳之	Light Ion Fragmentation Studies with Large Angular Acceptance and Multiple Particle Resolution
15P045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による原子・分子の電離過程の研究
15P054	金澤光隆	金澤光隆	二次ビームの医学利用に関する基礎研究
15P057	金井達明	金井達明	ブロードビーム重イオン CT の応用に関する研究
15P060	松藤成弘	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
16P065	Borak, Thomas B.	岩田佳之	軽い重イオンのマイクロドジメトリー (Microdosimetry of Light Ions)
16P066	柏木利介	内堀幸夫	重粒子入射に対する新しい半導体検出器の応答
17P087	大森千広	野田耕司	重粒子加速器のビーム高品質化のためのビーム力学の研究、および新型空洞とビームチョッパーの開発研究
15P093	福田光順	金澤光隆	重粒子線による核反応断面積の研究
15P095	久保山智司	岩田佳之	半導体素子の放射線の影響に関する研究
15P105	宮地 孝	村上 健	PZT を基礎材とする音響型放射線検出器
16P111	佐々木慎一	福村明史	重荷電粒子に対する気体の W-値に関する研究
16P113	内堀幸夫	内堀幸夫	Intercomparison for Cosmic-ray with Heavy Ion Beams At NIRS
16P121	中川公一	佐藤幸夫	重粒子線で生ずる L- $\alpha$ -アラニンとスクロースのラジカル of ESR による研究
17P132	丸山浩一	金澤光隆	炭素線治療における線量集中性阻害要因の解明と対策
17P136	須田利美	金澤光隆	高エネルギー重粒子に対する無機シンチレーターの応答関数測定
17P138	山内知也	安田仲宏	高分子材料中重イオントラックに沿った損傷分布
17P141	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水分解生成物の収量評価
15P143	遠藤 暁	福村明史	重粒子放射線治療場の深部 RBE と 2 次粒子線の寄与の評価
15P146	小平 聡	安田仲宏	固体飛跡検出器 CR-39 を用いた Fe 核同位体弁別実験
15P149	久下謙一	安田仲宏	CR39 と写真乾板を用いたハイブリッド飛跡検出器の開発
15P150	Li, Qiang	金澤光隆	Research on biological effects of radioactive ion beam
15P152	丹羽公雄	兼松伸幸	宇宙・医療分野へのエマルジョンチェンバー技術の応用のための研究
15P153	Benton, E. .	内堀幸夫	BEAMS: Benchmark Evaluations and Analysis of Materials for Shielding
15P157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成
15P158	松藤成弘	松藤成弘	治療ビームの中性子・荷電粒子フラグメントによる生物効果に関する研究
15P159	高田義久	金井達明	粒子線による平坦な照射野形成の研究
15P160	松村 宏	村上 健	中高エネルギーハドロン誘起反応における軽核生成反応率の測定
15P161	E. Yukihiro	内堀幸夫	Optically Stimulated Luminescence Studies of the HCP Response of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> for use in Space Radiation Dosimetry
15P162	片寄祐作	内堀幸夫	結晶シンチレータを用いた全吸収型カロリメータの重粒子線検出性能に関する研究
15P164	若林源一郎	松藤成弘	フラグメント生成反応研究のための検出器開発
15P165	取越正己	取越正己	電離箱用材料の基本特性の調査と試験
16P167	安田仲宏	安田仲宏	固体素子の組み合わせによる積算型複合検出器の開発と評価
16P168	Barillon, R.	安田仲宏	Improvement of the radiation dosimetry of heavy ions, assessing the mechanisms of track formation and scintillation in polymers
16P169	Hajek, M.	内堀幸夫	LET Calibration of TL Response and Efficiency of Selected TL Materials for Radiation Dosimetry in Heavy-Ion Fields
16P171	斎藤 究	福村明史	放射線誘起表面活性現象を利用した放射線検出器の開発
16P172	遠藤 章	松藤成弘	インテリジェント中性子モニタを用いた数百 MeV 中性子に対する線量測定法の開発
16P175	長谷川 純	村上 健	プラズマ阻止能における強結合効果の実験的検証



16P177	河野俊之	金井達明	核破砕反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
16P178	百田佐多生	金澤光隆	入射核破砕片の生成メカニズムの研究
16P179	坂口治隆	金澤光隆	不安定核陽子弾性散乱のためのビームラインカウンター系のテスト
16P180	中川清子	村上 健	アルコール溶媒中ヒドロキシフタルイミドの放射線照射における LET 効果の検討
16P181	小林俊雄	高田栄一	重 RI ビーム粒子識別用検出器の開発
16P182	金井達明	金井達明	重粒子線治療におけるマイクロドシメトリ的手法を用いた生物効果推定
16P183	小森雅孝	小森雅孝	普及型炭素線治療施設における照射システムに関する研究
16P186	濱 義昌	村上 健	高エネルギー重イオンビームによる高分子材料への照射効果-化学構造変化の局所性と耐環境性
16P187	平賀純子	内堀幸夫	BP-1 ガラス製微細コリメータの製作と天体 X 線観測用 CCD の詳細診断
16P188	Durante, Marco	古澤佳也	Biophysical Studies of Heavy-Ion Nuclear Fragmentation for Hadrontherapy and radiation protection in space( Experiment BINFRA)
17P189	寺沢和洋	内堀幸夫	位置有感比例計算管の重イオンに関する応答
17P190	原田 久	野田耕司	粒子線がん治療におけるスポットスキニング照射方法の開発
17P194	松本晴久	内堀幸夫	中性子線量モニタの重イオン飛跡に対する応答関数の導出
17P196	Sihver, Lembit	安田仲宏	Measurements of alpha production and target fragmentation cross sections of C, O and Ne in Al, tissue and bone equivalent materials for bench making of the heavy ion transport code PHITS.
17P197	Akselrod, Mark	安田仲宏	Investigation of a novel Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C,Mg Fluorescent Nuclear Track Detector
17P198	取越正己	取越正己	多葉コリメータの試験
17P199	高島 健	内堀幸夫	高放射線環境下における粒子イメージング装置の開発
17P201	阿部慎司	浦壁恵理子	増感紙?CCD カメラシステムを用いた重粒子線治療の QC
17P202	増田公明	村上 健	高エネルギー重イオンに対するプラスチックシンチレータと光電子増倍管の応答特性
17P203	山口貴之	金澤光隆	A=3 体系鏡映核の相互作用半径の測定
17P204	国分紀秀	内堀幸夫	電子陽電子対消滅撮像検出器の衛星軌道上における応答特性
17P205	村井 正	安田仲宏	宇宙放射線個人被ばく線量計測における CR-39 感度の酸素分圧影響評価
17P206	野田真永	野田真永	ゲル線量計による重粒子線照射の 3 次元線量分布解析
17P207	梶野文義	内堀幸夫	宇宙ステーション暴露部で使用する高感度紫外線検出器の重粒子線による影響

#### 平成 18 年度

課題番号 (治療・診断)	課題申請者	所内対応者	課題名
17C043	馬場雅行	馬場雅行	中心型肺癌に対する炭素イオン線治療における 3 次元治療計画の研究
17C047	中井浩二	吉川京燦	ポルフィリン誘導 DDS 型癌医療のための基礎研究
17C048	今井礼子	今井礼子	骨軟部腫瘍における重粒子線治療後の QOL に関する研究
18C049	荒野 泰	入江俊章	癌の重粒子線治療効果を早期に判定するアミノ酸誘導体の開発
18C050	影井兼司	影井兼司	肺癌患者の非侵襲的 (マーカレス) 照射位置決めに関する研究
18C052	山田 滋	山田 滋	骨盤腫瘍に対する重粒子線治療におけるスパーサーの有用性に関する研究
18C053	吉川京燦	吉川京燦	メチオニン PET による肺癌の重粒子線治療前後評価と予後

18C054	須金紀雄	須金紀雄	判定研究 間質性肺炎に合併した肺癌に対する炭素イオン線治療による間質性肺炎への影響についての検討
18C055	中嶋美緒	中嶋美緒	非小細胞肺癌の炭素イオン線治療前後におけるプロテオーム変化の解析
(生物)			
16B132	手島昭樹	古澤佳也	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
16B146	藤澤武彦	宮本忠昭	重粒子線治療における肺癌腫瘍の至適分割法の研究:低酸素下加速分裂細胞の放射線感受性と血管誘導および低酸素関連遺伝子発現について
16B147	北林宏之	山田 滋	食道癌に対する重粒子線と血管新生阻害因子 NK4 の併用効果の検討
16B148	中野隆史	安藤興一	重粒子線による細胞死の分子機構と重粒子線治療の有効な分割照射法に関する放射線生物学的研究
17B151	中野隆史	安藤興一	重粒子線による放射線肺線維症並びに癌細胞の細胞死におけるシグナル伝達経路の解析とその修飾-X線との比較-扁平上皮癌における重粒子線の治療効果比に関する研究
17B152	山田 滋	山田 滋	食道癌扁平上皮癌における重粒子線と抗血管新生薬の併用効果に関する研究
17B153	成島一夫	成島一夫	食道癌扁平上皮癌における重粒子線と抗血管新生薬の併用効果に関する研究
18B154	島田英昭	加野将之	消化管癌に対する重粒子線と分子標的治療併用治療の検討
18B155	松永晃直	山田 滋	扁平上皮癌に対する重粒子線療法と樹状細胞療法の併用による相乗効果の検討
18B156	野島久美恵	村上 健	中皮腫の重粒子線治療への可能性
18B157	鵜沢玲子	鵜沢玲子	粒子線治療の腫瘍治療効果と障害に関する研究
16B238	廣部知久	廣部知久	メラノサイトの増殖・分化に対する重粒子線の影響
17B239	今岡達彦	今岡達彦	胎児とこどもにおける重粒子線誘発乳腺発癌の研究
17B241	柿沼志津子	柿沼志津子	重粒子線によるマウス発がん研究-系統差と被ばく時年齢依存性-
17B245	王 冰	王 冰	ラット精子形成細胞における粒子線の影響に関する研究 (II)
17B251	長谷川正俊	村上 健	重粒子線の RBE と治療可能比の検討;放射線抵抗性腫瘍と正常組織の比較
18B253	高井伸彦	安藤興一	炭素線治療効果の早期画像診断法の開発-基礎的研究-
18B254	安西和紀	安西和紀	重粒子線による乳腺腫瘍の発生とその防御
16B328	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線低線量率照射が及ぼす生物影響に関する研究
17B332	鈴木雅雄	鈴木雅雄	粒子線低密度照射による細胞死・突然変異・染色体損傷誘発のバイスタンダー効果に関する研究
18B335	澤尻昌彦	溝江純悦	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
16B336	柏倉幾郎	笠井清美	ヒト巨核球・血小板造血におよぼす重粒子線の作用
17B337	古澤佳也	古澤佳也	重粒子線の細胞致死作用における線量率効果
17B338	川田哲也	古澤佳也	粒子線照射された線維芽細胞における染色体異常の細胞周期依存性に関する研究
17B340	岡村正愛	古澤佳也	植物の突然変異誘発への重イオンビームの効果に関する研究
18B341	増永慎一郎	安藤興一	休止期腫瘍細胞挙動から見た重イオン線照射効果解析
18B344	WANG, Xiao	古澤佳也	Hyper-radiosensitivity and mutation after low-dose heavy ion beam
18B345	VARES, Guillaume	Guillaume Vares	Prospective study on adaptive response induction by heavy-ion radiation in human lymphoblastoid cell lines
16B413	檜枝光太郎	古澤佳也	ブラックピーク近傍の重粒子イオンを用いたイオン特異的な DNA 損傷の誘発と修復
16B424	伊藤 敦	古澤佳也	DNA 酸化損傷の細胞内生成の LET 依存性
16B446	鈴木雅雄	鈴木雅雄	突然変異およびクロマチン損傷誘発に対する重粒子線の LET・加速核種依存性
17B452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線による DNA 二重鎖切断・修復機構の解明

18B455	井出 博	古澤佳也	重粒子線により生じるクラスター塩基損傷の生物影響
18B457	笠井清美	笠井清美	重粒子線誘発 DNA 障害の特徴
16B462	LE SECH, Claude	古澤佳也	STUDY of CELLS DEATH RATE LOADED with HIGH-Z ATOMS by ATOMIC IONS
17B463	Moeller, Ralf	岡安隆一	Gene activation of heavy ion treated Bacillus subtilis 168 (DSM 402) endospores during germination involved DNA-repair
17B464	岩川眞由美	岩川眞由美	マウス腫瘍の重粒子線照射効果関連遺伝子群の網羅的解析
17B466	西田浩志	安西和紀	重粒子線による DNA 損傷応答反応における Schisandrin の作 用に関する研究
18B467	大西武雄	古澤佳也	重粒子線誘導遺伝子の解析
18B468	平山亮一	平山亮一	低酸素下での重粒子線誘発 DNA 損傷とその修復
18B469	松本孔貴	松本孔貴	悪性黒色腫の重粒子線治療高反応性の遺伝子発現による解 明
18B470	安西和紀	安西和紀	重粒子線による正常組織の障害を防護する化合物の開発
18B471	二宮康晴	二宮康晴	脳腫瘍の薬物の併用による重粒子線治療の基礎研究
18B472	清水喜久雄	古澤佳也	重粒子線による突然変異生成の分子機構の解析
18B473	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子線照射野およびその周辺におけるフリーラジカル反 応の視覚化
17B516	古澤壽治	村上 健	カイコの胚発生期における低線量重粒子線感受性
16B527	岩橋 均	村上 健	重粒子線による酵母およびイネの遺伝子発現プロファイル
16B528	石崎寛治	鈴木雅雄	ヒト不死化細胞株に対する重粒子線による遺伝的影響の解 析
16B529	Furweger, Christoph	岡安隆一	Correlation of Radiation induced cellular Signal Transduction Events with LET-selective Thermoluminescence Dosimetry, Part 3
17B532	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線低線量（率）照射による遺伝的不安定性の研究
17B533	松本 緑	村上 健	プラナリア全能性幹細胞の再生、分化に関わる重粒子線の影 響
18B534	高垣哲也	村上 健	宇宙放射線（重粒子）照射の発がんに及ぼす影響
16B612	松本英樹	古澤佳也	重粒子線に対する腫瘍応答および正常組織反応への NO ラ ジカルの寄与
16B625	吉岡公一郎	古澤佳也	重粒子線を用いた致死性不整脈治療の開発
18B905 (C049)	荒野 泰	入江俊章	癌の重粒子線治療効果を早期に判定するアミノ酸誘導体の 開発
(物理・工学)			
16P005	取越正己	取越正己	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
16P009	大澤大輔	岩田佳之	重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究
16P026	松多健策	金澤光隆	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性
16P028	野田耕司	野田耕司	がん治療用加速器の総合的研究
16P032	東 俊行	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
17P037	MILLER, Jack	岩田佳之	Measurements of Charge Changing and Fragmentation Cross Sections for B, Al and Mg
18P045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による気体分子の電離過程の研究
18P054	金澤光隆	金澤光隆	二次ビームの医学利用に関する基礎研究
18P057	金井達明	金井達明	ブロードビーム重イオン CT の応用に関する研究
18P060	河野俊之	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
16P065	BORAK, Thomas B	岩田佳之	Microdosimetry of Heavy Ions
16P066	高島 健	内堀幸夫	重粒子入射による新しい半導体検出器の応答
17P087	大森千広	野田耕司	重粒子加速器のビーム高品質化のためのビーム力学の研究、 および新型空洞とビームチョッパの開発研究
18P093	福田光順	金澤光隆	重粒子線による核反応断面積の研究
18P095	久保山智司	岩田佳之	半導体素子の放射線の影響に関する研究
18P105	宮地 孝	村上 健	媒質に放射線照射し発生する音響信号の生成機構
16P111	佐々木慎一	村上 健	重荷電粒子に対する気体の W-値に関する研究

16P121	中川公一	伊古田暢夫	重粒子線で生ずる L- $\alpha$ -アラニンとスクロースのラジカルの ESR による研究
17P132	丸山浩一	金澤光隆	炭素線治療における線量集中性阻害要因の解明と対策
17P138	山内知也	安田仲宏	高分子材料中重イオントラックに沿った損傷分布
17P141	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水分解生成物の収量評価
18P150	Li, Qiang	金澤光隆	Research on biological effects of radioactive ion beam
18P157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
18P158	松藤成弘	松藤成弘	粒子線治療場における中性子の生物・臨床影響に関する研究
18P159	高田義久	金井達明	粒子線による平坦な照射野形成の研究
18P160	松村 宏	村上 健	中高エネルギーハドロン誘起反応における軽核生成反応率の測定
16P167	安田仲宏	安田仲宏	固体素子の組み合わせによる積算型複合検出器の開発と評価
16P169	Hajek, M.	内堀幸夫	LET Calibration of TL Response of Selected Phosphors and Its Application to Studies of Shielding Design for HZE Particles
16P172	遠藤 章	高田真志	インテリジェント中性子モニタを用いた数百 MeV 中性子に対する線量測定法の開発
16P177	河野俊之	金井達明	核破砕反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
16P178	百田佐多生	金澤光隆	入射核破砕片の生成メカニズムの研究
16P180	中川清子	村上 健	アルコール溶媒中ヒドロキシフタルイミドの放射線照射における LET 効果の検討
16P181	小林俊雄	高田栄一	重 RI ビーム粒子識別用検出器の開発
16P182	金井達明	金井達明	重粒子線治療におけるマイクロドシメトリ的手法を用いた生物効果推定
16P183	小森雅孝	小森雅孝	普及型炭素線治療施設における照射システムに関する研究
16P186	濱 義昌	村上 健	高エネルギー重イオンビームによる高分子材料への照射効果-化学構造変化の局所性と耐環境性
17P189	寺沢和洋	内堀幸夫	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答
17P194	松本晴久	内堀幸夫	中性子線量モニタの重イオン飛跡に対する応答関数の導出
17P197	Akselrod, Mark	安田仲宏	Investigation of a novel Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C,Mg Fluorescent Nuclear Track Detector
17P198	取越正己	取越正己	多葉コリメータの試験
17P199	高島 健	内堀幸夫	高放射線環境下における粒子イメージング装置の開発
17P201	阿部慎司	大野由美子	増感紙-CCD カメラシステムを用いた重粒子線治療の QC
17P202	増田公明	村上 健	高エネルギー重イオンに対するプラスチックシンチレータと光電子増倍管の応答特性
17P203	山口貴之	金澤光隆	A=3 体系鏡映核の相互作用半径の測定
17P206	野田真永	金井達明	ゲル線量計による重粒子線照射の 3 次元線量分布解析
18P208	小沢 顕	金澤光隆	理研質量測定蓄積リングのための飛行時間検出器の開発
18P209	松本晴久	内堀幸夫	宇宙機搭載用重イオン観測装置の研究
18P210	遠藤 暁	宮原信幸	粒子識別型組織透過比例計数管(PID-TEPC)の開発
18P211	小平 聡	安田仲宏	超鉄核弁別用高性能ガラス固体飛跡検出器の開発と評価
18P212	久下謙一	安田仲宏	金沈着現象法により発現した写真乾板上の飛跡の解析
18P213	坂口治隆	金澤光隆	不安定核ビームによる陽子弾性散乱
18P214	若林源一郎	松藤成弘	重粒子入射軽イオン生成反応におけるエネルギー・空間分布の最前方測定
18P215	Peter Beck	内堀幸夫	Microdosimetric analysis of high Z-particle interaction with Tissue and Silicon
18P216	今村 剛	北村 尚	金星探査機の搭載撮像装置の耐放射線性に関する研究
18P217	金井達明	金井達明	重粒子線に対するカロリメータを用いた絶対線量測定
18P218	田村忠久	北村 尚	宇宙線観測装置 CALET のフロントエンド回路の耐放射線性能
18P219	東 俊行	村上 健	高速重イオン衝突による分子反応イメージング

18P220	金井達明	金井達明	新多層電離箱の開発
<b>平成 19 年度</b>			
<b>課題番号</b>	<b>課題申請者</b>	<b>所内対応者</b>	<b>課題名</b>
(治療・診断)			
17C043	馬場雅行	馬場雅行	中心型肺癌に対する炭素イオン線治療における 3 次元治療計画の研究
17C047	中井浩二	吉川京燦	ポルフィリン誘導 DDS 型癌医療のための基礎研究
18C052	山田 滋	山田 滋	骨盤腫瘍に対する重粒子線治療におけるスパーサーの有用性に関する研究
18C054	須金紀雄	須金紀雄	間質性肺炎に合併した肺癌に対する炭素イオン線治療による間質性肺炎への影響についての検討
18C055	中嶋美緒	中嶋美緒	非小細胞肺癌の炭素イオン線治療前後におけるプロテオーム変化の解析
19C056	長谷部充彦	長谷部充彦	頭頸部領域腺癌系腫瘍のメチオニン PET による重粒子線治療予後評価の研究
19C057	蔵本千夏	溝江純悦	顎顔面における重粒子線照射後腐骨と照射野及び照射線量に関する研究
19C058 (B906)	田巻倫明	田巻倫明	マウス腫瘍モデルでの炭素イオン線および $\gamma$ 線照射における腫瘍分子イメージングの解析
19C059	石川博之	吉川京燦	頭頸部癌の術前メチオニン PET 診断と手術病理結果の比較研究
19C060	山本直敬	山本直敬	非小細胞肺癌重粒子線治療後の CT 画像の変化と局所制御の関連性についての検討
(生物)			
19B132	手島昭樹	古澤佳也	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
18B154	松下一之	山田 滋	消化管癌に対する重粒子線と FIR 遺伝子治療併用治療の検討
18B157	鵜澤玲子	鵜澤玲子	粒子線治療の腫瘍治療効果と障害に関する研究
19B158	吉田由香里	加藤真吾	重粒子線と化学療法の併用療法における脳正常組織および神経膠芽腫の放射線感受性の検討
19B160	山田 滋	山田 滋	扁平上皮癌における重粒子線の転移抑制作用に関する研究
19B163	三好憲雄	小久保年章	移植前立腺癌への炭素粒子線照射効果の検討
19B238	廣部知久	廣部知久	メラノサイトの増殖・分化に対する重粒子線の影響
17B239	今岡達彦	今岡達彦	胎児とこどもにおける重粒子線誘発乳腺発癌の研究
17B241	柿沼志津子	柿沼志津子	重粒子線によるマウス発がん研究-系統差と被ばく時年齢依存性-
17B251	長谷川正俊	村上 健	重粒子線の RBE と治療可能比の検討; 放射線抵抗性腫瘍と正常組織の比較
18B253	高井伸彦	安藤興一	炭素線治療効果の早期画像診断法の開発-基礎的研究-
18B254	安西和紀	安西和紀	重粒子線による乳腺腫瘍の発生とその防御
19B256	吉岡公一郎	古澤佳也	重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発
19B257	岩川眞由美	岩川眞由美	晩期障害マウスモデルを用いた重粒子線治療有害事象
19B258	王 冰 (Bing WANG)	王 冰 (Bing WANG)	Dose Radioadaptive Response Also Apply to the Case of Heavy-ion Irradiations in Fetal and Adult Mice?
19B328	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線低線量率照射による生物効果の遺伝的不安定性の誘導に関する研究
17B332	鈴木雅雄	鈴木雅雄	粒子線低密度照射による細胞死・突然変異・染色体損傷誘発のバイスタンダー効果に関する研究
18B335	澤尻昌彦	溝江純悦	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
19B336	柏倉幾郎	笠井清美	ヒト巨核球・血小板造血過程における遺伝子発現の変化と放射線の影響
17B337	古澤佳也	古澤佳也	重粒子線の細胞致死作用における線量率効果
17B338	川田哲也	古澤佳也	粒子線照射された線維芽細胞における染色体異常の細胞周期依存性に関する研究

17B340	岡村正愛	古澤佳也	植物の突然変異誘発への重イオンビームの効果に関する研究
18B341	増永慎一郎	安藤興一	休止期腫瘍細胞挙動から見た重イオン線照射効果解析
18B345	VARES, Guillaume	王 冰	Prospective study on adaptive response induction by heavy-ion radiation in human lymphoblastoid cell lines (Part2) ヒトリンパ芽球細胞における粒子線による適応応答誘導に関する研究
19B347	高辻俊宏	古澤佳也	タマネギ種子の根の伸び方による根端細胞生存率の評価
19B348	Hafer, Kurt M.	小西輝昭	The role of high LET radiation induced persistent oxidative stress and nucleotide excision repair on genomic instability in mammalian cells.
19B349	嘉山孝正	安藤興一	重粒子線によるがん細胞殺傷メカニズムに関する検討
19B350	高橋健夫	加藤真吾	重粒子線ならびに化学療法併用における増感効果の放射線生物学的検討
19B351	小西輝昭	小西輝昭	ヒト HCT116 細胞を用いた重粒子イオンの低線量領域における超放射線感受性と DNA 損傷修復機構の研究
19B352	松本英樹	古澤佳也	重粒子線に対する腫瘍応答および正常組織反応への NO ラジカルの寄与
19B353	長沼 毅	保田浩志	微生物の放射線耐性における生理生化学的特性に関する研究
19B354	小泉雅彦	安西和紀	放射線防護剤による正常および腫瘍細胞に対する高 LET 放射線防護効果の検討
19B355	辻 厚至	辻 厚至	悪性中皮腫の重粒子線治療の動物での検討
19B413	檜枝光太郎	小西輝昭	Bragg ピーク近傍の重粒子イオン照射による細胞致死及び DNA 二本鎖切断誘発率の測定
19B424	伊藤 敦	古澤佳也	DNA 酸化損傷の細胞内生成量評価とその分布
19B446	鶴岡千鶴	鶴岡千鶴	ヒト正常細胞の細胞致死、突然変異、クロマチン損傷に対する重粒子線の誘発メカニズム解明
17B452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線による DNA 二重鎖修復機構の解明とその応用
18B455	井出 博	古澤佳也	重粒子線により生じるクラスター塩基損傷の生物影響
18B457	笠井清美	笠井清美	重粒子線誘発 DNA 障害の特徴
19B462	LE SECH, Claude	古澤佳也	STUDY of CELLS DEATH RATE LOADED with PLATINUM and IRRADIATED with ATOMIC IONS for a GIVEN FLUENCE
17B463	Moeller, Ralf	岡安隆一	Characterization of heavy ion-induced damage in Bacillus subtilis spores and their global transcriptional response during spore germination
17B464	岩川眞由美	岩川眞由美	マウス腫瘍の重粒子線照射効果関連遺伝子群の網羅的解析
17B466	西田浩志	安西和紀	重粒子線による DNA 損傷応答反応における Schisandrin の作用に関する研究
18B467	大西武雄	古澤佳也	重粒子線誘導遺伝子の解析
18B468	平山亮一	平山亮一	低酸素下での重粒子線誘発 DNA 損傷とその修復
18B470	安西和紀	安西和紀	重粒子線による正常組織の障害を防護する化合物の開発
18B471	二宮康晴	二宮康晴	脳腫瘍の薬物の併用による重粒子線治療の基礎研究
18B472	清水喜久雄	古澤佳也	重粒子線による突然変異生成の分子機構の解析
18B473	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子線照射野およびその周辺におけるフリーラジカル反応の視覚化
19B475	盛武 敬	盛武 敬	神経膠腫細胞の重粒子線照射効果関連レドックス遺伝子群の解析
19B476	石崎寛治	鈴木雅雄	ヒト AT、AT ヘテロ細胞株に対する重粒子線による影響の分子解析
19B477	細井義夫	岡安隆一	重粒子線による増殖因子受容体活性化とその機序の解明
19B478	小林秀光	安藤興一	炭素線照射により作製した放射菌変異株より得られる新規生理活性物質の探索
19B479	藤森 亮	藤森 亮	重粒子線によって発現が変動する遺伝子の機能解析
19B480	加藤宝光	加藤宝光	重粒子線の水平・垂直方向照射による生物効果



19B481	Hande, M. Prakash	岡安隆一	Complex chromosomal aberrations induced by low doses of densely ionising radiation in human cells
19B482	Lian Xue (蓮 薛)	古澤佳也	Mechanism of DNA damage and Mutation in Mammalian cells induces by Low Dose Heavy Ions
17B531	Kohwi, Yoshinori	小久保年章	The effects of heavy-ion radiation on translational regulation in the mouse brain
18B534	高垣哲也	村上 健	宇宙放射線（重粒子）照射の発がんに関与する影響
19B906 (C058)	田巻倫明	田巻倫明	マウス腫瘍モデルでの炭素イオン線および $\gamma$ 線照射における腫瘍分子イメージングの解析
(物理・工学)			
19P005	取越正己	取越正己	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
19P009	大澤大輔	岩田佳之	重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究
19P026	松多健策	北川敦志	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性
19P028	野田耕司	野田耕司	がん治療用加速器の総合的研究
19P032	東 俊行	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
17P037	Miller, Jack	岩田佳之	Light Ion Fragmentation Studies with Large Angular Acceptance and Multiple Particle Resolution
18P045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による気体分子の電離過程の研究
18P054	金澤光隆	金澤光隆	二次ビームの医学利用に関する基礎研究
18P060	河野俊之	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
18P093	福田光順	北川敦志	重粒子線による核反応断面積の研究
18P095	久保山智司	岩田佳之	半導体の放射線の影響に関する研究
18P105	宮地 孝	村上 健	媒質に放射線照射し発生する音響信号の生成機構
19P111	佐々木慎一	村上 健	重荷電粒子に対する気体の W-値に関する研究
19P121	中川公一	安西和紀	重粒子線照射によるスクロースと L-アラニンのラジカルの生成断面積の検討
17P132	丸山浩一	金澤光隆	炭素線治療における線量集中性阻害要因の解明と対策
17P138	山内知也	安田仲宏	高分子材料中重イオントラックに沿った損傷分布
17P141	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水分解生成物の収量評価
18P150	Li, Qiang	北川敦志	Research on biological effects of radioactive ion beam
18P157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
18P158	松藤成弘	松藤成弘	粒子線治療場における中性子の生物・臨床影響に関する研究
19P168	Barillon, Remi	安田仲宏	New ionic organic detectors for ion beam dosimetry
19P177	河野俊之	金井達明	核破砕反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
19P178	百田佐多生	金澤光隆	入射核破砕片の生成メカニズムの研究
19P180	中川清子	村上 健	アルコール溶媒中ヒドロキシ化合物の重イオン照射効果
19P183	小森雅孝	小森雅孝	普及型炭素線治療施設における照射システムに関する研究
19P186	濱 義昌	村上 健	高分子材料への重イオンビーム照射効果に関する研究-化学構造の違いによる反応の局所性-
17P189	寺沢和洋	内堀幸夫	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答
17P194	松本晴久	北村 尚	中性子線量モニタの重イオン飛跡に対する応答関数の導出
17P197	Akselrod, Mark	安田仲宏	Investigation of a novel Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C,Mg Fluorescent Nuclear Track Detector
17P198	取越正己	取越正己	多葉コリメータの試験
17P199	高島 健	内堀幸夫	高放射線環境下における粒子イメージング装置の開発
17P201	阿部慎司	大野由美子	増感紙-CCD カメラシステムを用いた重粒子線治療の QC
17P202	増田公明	村上 健	高エネルギー重イオンに対するプラスチックシンチレータと光電子増倍管の応答特性
17P203	山口貴之	金澤光隆	A=3 体系鏡映核の相互作用半径の測定
18P208	小沢 顕	金澤光隆	理研質量測定蓄積リングのための飛行時間検出器の開発
18P209	松本晴久	北村 尚	宇宙機搭載用重イオン観測装置の研究

18P210	遠藤 暁	高田真志	粒子識別型組織透過比例計数管(PID-TEPC)の開発
18P211	小平 聡	安田仲宏	超鉄核弁別用高性能ガラス固体飛跡検出器の開発と評価
18P212	久下謙一	安田仲宏	金沈着現象法により発現した写真乾板上の飛跡の解析
18P213	坂口治隆	金澤光隆	不安定核ビームによる陽子弾性散乱
18P214	若林源一郎	松藤成弘	重粒子入射軽イオン生成反応におけるエネルギー・空間分布の最前方測定
18P217	坂間 誠	金井達明	重粒子線に対するカロリメータを用いた絶対線量測定
18P218	田村忠久	北村 尚	宇宙線観測装置 CALET のフロントエンド回路の耐放射線性能
18P219	東 俊行	村上 健	高速重イオン衝突による分子反応イメージング
19P223	高田義久	金井達明	粒子線治療におけるボラス形状の最適化の研究
19P224	小林俊雄	高田栄一	He, Li 同位体の内殻陽子電荷分布半径の測定
19P225	太田信昭	村上 健	アルキルチミン類のイオンビーム照射
19P226	村上哲也	高田栄一	非対称原子核物質研究用検出器のテスト
19P227	高田真志	高田真志	プラスチックシンチレーターの波形形状の核種依存性の計測
19P228	玉川 徹	安田仲宏	宇宙 X 線偏光計の宇宙環境模擬試験
19P229	河合秀幸	野田耕司	高屈折率シリカエアロゲルの発光量測定
19P230	小佐古敏荘	村上 健	重イオン照射による各種材料の放射化生成核種の検討
19P231	歳藤利行	兼松伸幸	炭素線治療における線量計算の精密化のための Charge-Changing Cross Section の測定
19P232	加瀬優紀	加瀬優紀	重粒子線の生物学的線量評価のための線質測定

#### 平成 20 年度

課題番号 (治療・診断)	課題申請者	所内対応者	課題名
18C052	山田 滋	山田 滋	骨盤腫瘍に対する重粒子線治療におけるスパーサーの有効性に関する研究
18C054	須金紀雄	馬場雅行	間質性肺炎に合併した肺癌に対する炭素イオン線治療による間質性肺炎への影響についての検討
18C055	中嶋美緒	中嶋美緒	非小細胞肺癌の炭素イオン線治療前後におけるプロテオーム変化の解析
19C057	蔵本千夏	溝江純悦	顎顔面における重粒子線照射後腐骨と照射野及び照射線量に関する研究
19C059	石川博之	吉川京燦	頭頸部癌の術前メチオニン PET 診断と手術病理結果の比較研究
19C060	山本直敬	山本直敬	非小細胞肺癌重粒子線治療後の CT 画像の変化と局所制御の関連性についての検討
20C061	長谷部充彦	吉川京燦	子宮頸癌における重粒子線治療前後の Methionine-PET と <sup>62</sup> CuATSM-PET 診断の比較研究
20C062	安田茂雄	安田茂雄	肝細胞癌の炭素イオン線治療における有害反応の DVH 解析
20C063	大橋靖也	吉川京燦	頭頸部腫瘍における PET によるメチオニン集積範囲と CT 造影範囲の対比検討
20C064	山田 滋	山田 滋	重粒子線治療における酸化ストレスおよび抗酸化力に関する研究
20C065	馬場雅行	馬場雅行	肺癌の炭素線治療計画の精度向上に関する総合的研究
20C066	神宮啓一	神宮啓一	粘膜悪性黒色腫重粒子線治療における機能画像による予後予測解析
(生物)			
19B132	手島昭樹	古澤佳也	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
18B154	加野将之	山田 滋	食道扁平上皮癌に対する重粒子線と分子標的治療薬併用治療の検討
18B157	鵜澤玲子	鵜澤玲子	粒子線治療の腫瘍治療効果と障害に関する研究

19B158	吉田由香里	加藤真吾	重粒子線と化学療法の併用療法における脳正常組織および神経膠芽腫の放射線感受性の検討
19B160	山田 滋	山田 滋	扁平上皮癌における重粒子線の転移抑制作用に関する研究
20B164	高橋健夫	古澤佳也	群馬大学重粒子線治療装置の前臨床生物実験における比較対照用基礎研究
20B165	上田泰次	山田 滋	重粒子線治療による腫瘍免疫の惹起と樹状細胞によるその増強
19B238	廣部知久	廣部知久	メラノサイトの増殖・分化に対する重粒子線の影響
20B239	今岡達彦	今岡達彦	胎児とこどもにおける重粒子線誘発乳腺発癌の研究
18B253	高井伸彦	鵜澤玲子	炭素線治療効果の早期画像診断法の開発-基礎的研究-
18B254	安西和紀	安西和紀	重粒子線による乳腺腫瘍の発生とその防御
19B256	吉岡公一郎	古澤佳也	重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発
19B257	岩川眞由美	岩川眞由美	晩期障害マウスモデルを用いた重粒子線治療有害事象
19B258	王 冰 (Bing WANG)	王 冰 (Bing WANG)	Does Radioadaptive Response Also Apply to the Case of Heavy-ion Irradiations in Fetal and Adult Mice?
20B259	久保田善久	久保田善久	土壌生物、植物における重粒子線の生物影響
20B260	保田隆子	保田隆子	重粒子放射線の発達神経毒性に関するメダカ胚を用いた研究
20B261	三谷啓志	保田浩志	メダカ雄性生殖細胞に対する重粒子放射線の影響評価
20B262	前澤 博	古澤佳也	細胞遊走能に対する重粒子線照射効果の研究
20B264	西田浩志	安西和紀	DNA 損傷チェックポイントに対する重粒子線の影響とその増感因子の探索
20B265	森田 隆	笠井清美	哺乳動物 ES 細胞に対する重粒子線の影響の解析
20B266	関根絵美子	関根絵美子	新たな抗腫瘍薬の開発及びそのメカニズムの解明
19B328	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線低線量率照射による生物効果の遺伝的不安定性の誘導に関する研究
20B332	鈴木雅雄	鈴木雅雄	低エネルギーイオンビーム照射による生物効果のバイスタンダー効果に関する研究
18B335	澤尻昌彦	村上 健	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
19B336	柏倉幾郎	笠井清美	ヒト巨核球・血小板造血過程における遺伝子発現の変化と放射線の影響
20B338	川田哲也	古澤佳也	粒子線照射された線維芽細胞における染色体異常の細胞周期依存性に関する研究
20B340	岡村正愛	古澤佳也	植物の突然変異誘発への重イオンビームの効果に関する研究
18B341	増永慎一郎	鵜澤玲子	休止期腫瘍細胞挙動から見た重イオン線照射効果解析
18B345	VARES, Guillaume	VARES, Guillaume	Prospective study on adaptive response induction by heavy-ion radiation in human lymphoblastoid cell lines and cultured mouse fetal striatum cells (Part IV)
19B347	高辻俊宏	古澤佳也	タマネギ種子の根の伸び方による根端細胞生存率の評価
19B348	Hafer, Kurt M.	小西輝昭	The role of high LET radiation induced persistent oxidative stress and nucleotide excision repair on genomic instability in mammalian cells.
19B349	北中千史	安藤興一	重粒子線によるがん細胞殺傷メカニズムに関する検討
19B352	松本英樹	古澤佳也	重粒子線に対する腫瘍応答および正常組織反応への NO ラジカルの関与
19B353	長沼 毅	保田浩志	微生物の放射線耐性における生理生化学的特性に関する研究
19B355	辻 厚至	辻 厚至	悪性中皮腫の重粒子線治療の動物での検討
20B356	長谷川正俊	村上 健	腫瘍内の放射線抵抗性細胞に対する重粒子線の効果の検討
20B357	崔 星	崔 星	重粒子線がん治療の分子病理学的変化と新規増感剤の開発
20B358	張 明栄	張 明栄	NFSa 担ガンマウスを用いた腫瘍イメージング
20B361	藤森 亮	藤森 亮	難治性がんに対する放射線治療の生物学的側面からの高度化

20B362	ZHOU Libin (周 利斌)	古澤佳也	Establishment of Quick Measurement System for IMP/CAS Cancer Therapy in Lanzhou.
20B363	横堀伸一	吉田 聡	微生物生存に対する重粒子線の影響と鉱物による遮蔽効果の検証
20B364	Zhang, Hong	王 冰	Relationship between telomere length and radiosensitivity of human cancer cell lines induced by heavy ion irradiation
19B424	伊藤 敦	古澤佳也	DNA 酸化損傷の細胞内生成量評価とその分布
19B446	鶴岡千鶴	鶴岡千鶴	ヒト正常細胞の細胞致死、突然変異、クロマチン損傷に対する重粒子線の誘発メカニズム解明
20B452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線による DNA 二重鎖修復機構の解明とその応用
18B455	井出 博	古澤佳也	重粒子線により生じるクラスター塩基損傷の生物影響
18B457	笠井清美	笠井清美	重粒子線誘発 DNA 障害の特徴
19B462	LE SECH, Claude	古澤佳也	STUDY of CELLS DEATH RATE LOADED with PLATINUM and IRRADIATED with ATOMIC IONS for a GIVEN FLUENCE
20B463	Moeller, Ralf	岡安隆一	Characterization of heavy ion-induced damage in Bacillus subtilis spores and their global transcriptional response during spore germination
20B464	岩川眞由美	岩川眞由美	マウス腫瘍の重粒子線照射効果関連遺伝子群の網羅的解析
18B467	高橋昭久	古澤佳也	重粒子線誘導遺伝子の解析
18B468	平山亮一	平山亮一	低酸素下での重粒子線誘発 DNA 損傷とその修復
18B470	安西和紀	安西和紀	重粒子線による正常組織の障害を防護する化合物の開発
18B471	二宮康晴	二宮康晴	脳腫瘍の薬物の併用による重粒子線治療の基礎研究
18B472	清水喜久雄	古澤佳也	重粒子線による突然変異生成の分子機構の解析
19B477	細井義夫	岡安隆一	重粒子線による増殖因子受容体活性化とその機序の解明
19B478	小林秀光	安藤興一	炭素線照射により作製した放線菌変異株より得られる新規生理活性物質の探索
19B479	藤森 亮	藤森 亮	重粒子線によって発現が変動する遺伝子の機能解析
19B481	Hande, M. Prakash	岡安隆一	Complex chromosomal aberrations induced by low doses of densely ionising radiation in human cells
19B482	Lian Xue (蓮 薛)	古澤佳也	Mechanism of DNA damage and Mutation in Mammalian cells induces by Low Dose Heavy Ions
20B483	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子線によるフリーラジカル生成反応の解析と制御
20B484	加藤宝光	加藤宝光	重粒子線の細胞周期による生物効果の変化
20B485	道川祐市	道川祐市	重粒子線照射によるゲノム構造と遺伝子発現量の変化
20B486	松本孔貴	古澤佳也	悪性腫瘍由来細胞における重粒子線の生物効果と細胞周期
20B531	Kohwi, Yoshinori	小久保年章	The effects of heavy-ion radiation on translational regulation in the mouse brain
(物理・工学)			
19P005	取越正己	取越正己	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
19P009	大澤大輔	岩田佳之	重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究
19P026	松多健策	北川敦志	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性
19P028	野田耕司	野田耕司	がん治療用加速器の総合的研究
19P032	東 俊行	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
20P037	Miller, Jack	岩田佳之	Measurement of the Inclusive Cross section $^{14}\text{N}(p,X)^9\text{Li}$ at 180 and 290 MeV/nucleon
18P045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による気体分子の電離過程の研究
18P060	河野俊之	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
18P093	福田光順	北川敦志	重粒子線による核反応断面積の研究
18P095	久保山智司	岩田佳之	半導体の放射線の影響に関する研究
18P105	宮地 孝	村上 健	媒質に放射線照射し発生する音響信号の生成機構
19P111	佐々木慎一	村上 健	重荷電粒子に対する気体の W-値の総合的研究
19P121	中川公一	安西和紀	重粒子線照射によるスクロースと L-アラニンのラジカルの生成断面積の検討
20P138	山内知也	安田仲宏	固体飛跡検出器中重イオントラックに沿った損傷構造

20P141	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水の放射線分解収量とトラック構造の相関
18P150	Li, Qiang	北川敦志	Research on biological effects of radioactive ion beam
18P157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
18P158	松藤成弘	松藤成弘	粒子線治療場における中性子の生物・臨床影響に関する研究
19P177	河野俊之	金井達明	核破砕反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
19P178	百田佐多生	金澤光隆	入射核破砕片の生成メカニズムの研究
19P180	中川清子	村上 健	アルコール溶媒中ヒドロキシ化合物の重イオン照射効果
19P183	兼松伸幸	兼松伸幸	普及型炭素線治療施設における照射システムに関する研究
19P186	濱 義昌	村上 健	高分子材料への重イオンビーム照射効果に関する研究-化学構造の違いによる反応の局所性-
20P189	寺沢和洋	内堀幸夫	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答
20P197	Akselrod, Mark	安田仲宏	Investigation of a novel Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C,Mg Fluorescent Nuclear Track Detector
20P198	取越正己	取越正己	多葉コリメータの試験
20P201	村石 浩	大野由美子	増感紙-EMCCD システムを用いた重粒子線 CT における高精度 3 次元画像収集法の検討
18P210	遠藤 暁	高田真志	粒子識別型組織等価比例計数管(PID-TEPC)の開発
18P211	小平 聡	小平 聡	超鉄核弁別用高性能ガラス固体飛跡検出器の開発と評価
18P212	久下謙一	安田仲宏	金沈着現象法により発現した写真乾板上の飛跡の解析
18P213	坂口治隆	金澤光隆	不安定核ビームによる陽子弾性散乱
18P214	若林源一郎	松藤成弘	重粒子入射軽イオン生成反応におけるエネルギー・空間分布の最前方測定
18P217	坂間 誠	金井達明	重粒子線に対するカロリメータを用いた絶対線量測定
19P223	高田義久	金井達明	粒子線治療におけるボラス形状の最適化の研究
19P225	中川清子	村上 健	アルキルチミン類のイオンビーム照射
19P226	村上哲也	高田栄一	非対称原子核物質研究用検出器のテスト
19P228	玉川 徹	安田仲宏	宇宙 X 線偏光計の宇宙環境模擬試験
19P230	小佐古敏荘	村上 健	Benchmark experiment for high-energy neutron transport and activation in concrete
19P231	歳藤利行	兼松伸幸	炭素線治療における線量計算の精密化のための Charge-Changing Cross Section の測定
19P232	加瀬優紀	加瀬優紀	重粒子線の生物学的線量評価のための線質測定
20P233	Soenke Burmeister	安田仲宏	Intercomparison and Verification of Active Dosimeters for Space
20P235	川合將義	村上 健	応用発光材の発光特性に及ぼすイオンビーム照射影響
20P236	石崎 梓	兼松伸幸	正常組織への過照射低減のための新照射方法および装置の開発
20P237	津田修一	高田真志	Wall-less 型組織等価比例計数管を用いた重粒子線に対する沈着エネルギー分布測定に関する研究
20P238	久保謙哉	北川敦志	不安定核ビームを応用したインビーム・メスバウアー分光法の開発
20P239	魚住裕介	松藤成弘	大アクセプタンス荷電粒子検出器の研究
20P240	Thomas Berger	安田仲宏	Space Radiation Dosimetry-Ground Based Verification of the MATROSHKA Facility
20P241	Spurny Frantisek	安田仲宏	Contribution to the development of the LET distributions data base for the modeling of biological effects in HIMAC BIO particle beams
20P242	安田仲宏	安田仲宏	各種 CR-39 検出器の特性比較(CR-39 ICCHIBAN)
20P243	丸山浩一	金澤光隆	がん治療用ペンシルビームの物質内でのプロファイル評価法の確立
20P244	小林俊雄	高田栄一	重 RI ビーム粒子識別用検出器のビーム試験
20P245	小沢 顕	金澤光隆	RI ビームの粒子識別検出器の開発

20P246	山口貴之	北川敦志	Charge changing cross section を用いた中性子過剰炭素同位体の核子密度分布の研究
20P247	Cary, Zeitlin	岩田佳之	Calibration of the Radiation Assessment Detector(RAD) using heavy-ion beams at HIMAC
20P248	Lawrence, Pinsky	内堀幸夫	Heavy Ion Response of the TimePix Version of the Medipix2 Technology In Preparation For Use In Space Radiation Dosimetry Applications
20P249	太田周也	安田仲宏	高性能固体飛跡検出器を利用する超鉄核の核破砕反応断面積の測定
20P250	錦戸文彦	錦戸文彦	OpenPET 用ガンマ線検出器の重粒子線照射環境での性能の基礎研究
20P251	橋本義徳	村上 健	大強度陽子ビームのためのビームプロファイルモニターの開発

# 平成 21 年度

課題番号	課題申請者	所内対応者	課題名
(治療・診断)			
21C055	中嶋美緒	中嶋美緒	非小細胞肺癌の炭素イオン線治療前後におけるプロテオーム変化の解析
19C060	山本直敬	山本直敬	非小細胞肺癌重粒子線治療後の CT 画像の変化と局所制御の関連性についての検討
20C061	長谷部充彦	長谷部充彦	子宮頸癌における重粒子線治療前後の Methionine-PET と <sup>62</sup> CuATSM-PET 診断の比較研究
20C064	山田 滋	山田 滋	重粒子線治療における酸化ストレスおよび抗酸化力に関する研究
20C065	馬場雅行	馬場雅行	肺癌の炭素線治療計画の精度向上に関する総合的研究
20C066	神宮啓一	神宮啓一	粘膜悪性黒色腫重粒子線治療における機能画像による予後予測解析
21C067	大橋靖也	大橋靖也	MET-PET/CT による頸部頸部リンパ節転移検出能の検討
21C068	桃原幸子	桃原幸子	重粒子線治療における肺癌の再発・転移・予後評価におけるメチオニン PET-CT の有用性の検討：腺癌と扁平上皮癌の比較
21C069	宇治川清登	長谷川安都佐	顎顔面における重粒子線照射後腐骨と照射野及び照射線量に関する研究
(生物)			
19B132	手島昭樹	古澤佳也	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
21B154	加野将之	山田 滋	食道扁平上皮癌に対する重粒子線と分子標的治療薬併用治療の検討
21B157	鵜澤玲子	鵜澤玲子	粒子線治療での腫瘍と正常組織への影響の研究
19B158	吉田由香里	加藤真吾	重粒子線と化学療法の併用療法における脳正常組織および神経膠芽腫の放射線感受性の検討
19B160	山田 滋	山田 滋	扁平上皮癌における重粒子線の転移抑制作用に関する研究
20B164	高橋健夫	古澤佳也	群馬大学重粒子線治療装置の前臨床生物実験における比較対照用基礎研究
21B166	Peter Peschke	松藤成弘	Relative Biological Effectiveness (RBE) of Carbon Ions: An interinstitutional comparison of treatment facilities, differing in mode of beam delivery
21B167	岩川眞由美	岩川眞由美	マウスモデルを用いた炭素イオン線治療併用療法研究
21B168	篠藤 誠	篠藤 誠	難治性消化器癌に対する重粒子線と上皮成長因子受容体阻害剤併用治療の基礎的検討
21B254	安西和紀	安西和紀	重粒子線による乳腺腫瘍の発生とその防御
19B256	吉岡公一郎	古澤佳也	重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発
19B257	岩川眞由美	岩川眞由美	晩期障害マウスモデルを用いた重粒子線治療有害事象
19B258	王 冰 (Bing WANG)	王 冰 (Bing WANG)	Does Radioadaptive Response Also Apply to the Case of Heavy-ion Irradiations in Fetal and Adult Mice?
20B259	久保田善久	久保田善久	土壌生物、植物における重粒子線の生物影響

20B260	保田隆子	保田隆子	重粒子放射線の発達神経毒性に関するメダカ胚を用いた研究
20B262	前澤 博	古澤佳也	細胞遊走能に対する重粒子線照射効果の研究
20B264	西田浩志	安西和紀	DNA 損傷チェックポイントに対する重粒子線の影響とその増感因子の探索
20B265	森田 隆	笠井清美	哺乳動物 ES 細胞に対する重粒子線の影響の解析
20B266	関根絵美子	関根絵美子	PI3 キナーゼを標的とした放射線併用療法剤の研究
21B267	高井伸彦	鶴澤玲子	脳内毛細血管密度を指標にした中枢神経の RBE の創出
21B268	齋藤茂芳	齋藤茂芳	高磁場 MRI を用いた重粒子照射における細胞・組織変性の生体内評価
19B328	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線低線量率照射による生物効果の遺伝的不安定性の誘導に関する研究
20B332	鈴木雅雄	鈴木雅雄	低エネルギーイオンビーム照射による生物効果のバイスタンダー効果に関する研究
21B335	澤尻昌彦	村上 健	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
19B336	柏倉幾郎	笠井清美	ヒト巨核球・血小板造血過程における遺伝子発現の変化と放射線の影響
20B340	岡村正愛	古澤佳也	植物の突然変異誘発への重イオンビームの効果に関する研究
19B347	高辻俊宏	古澤佳也	タマネギ種子の根の伸び方による根端細胞生存率の評価
19B349	北中千史	村上 健	重粒子線によるがん細胞殺傷メカニズムに関する検討
19B352	松本英樹	古澤佳也	重粒子線により誘導されるバイスタンダー応答および適応応答への NO ラジカル関与
19B353	長沼 毅	保田浩志	微生物の放射線耐性における生理生化学的特性に関する研究
19B355	辻 厚至	辻 厚至	悪性中皮腫の重粒子線治療の動物での検討
20B356	長谷川正俊	村上 健	腫瘍内の放射線抵抗性細胞に対する重粒子線の効果の検討
20B361	藤森 亮	藤森 亮	難治性がんに対する放射線治療の生物学的側面からの高度化
20B362	ZHOU Libin (周 利斌)	古澤佳也	Establishment of Quick Measurement System for IMP/CAS Cancer Therapy in Lanzhou.
20B363	横堀伸一	吉田 聡	微生物生存に対する重粒子線の影響と鉍物による遮蔽効果の検証
20B364	Zhang, Hong	王 冰	Relationship between telomere length and radiosensitivity of human cancer cell lines induced by heavy ion irradiation
21B365	崔 星	崔 星	重粒子線照射による癌組織の病理学的変化と癌幹細胞への影響
21B366	益谷美都子	岡安隆一	重粒子線がん治療におけるポリ ADP-リボシル化関連酵素の役割と阻害剤の効果
21B367	島田幹男	平山亮一	重粒子線照射時の動物細胞における中心体過剰複製の検討
21B368	劉 翠華	劉 翠華	重粒子線における悪性胸膜中皮腫細胞致死メカニズムの解析
21B369	浜田信行	浜田信行	低線量率重粒子線照射が活性化する情報伝達系の解明
21B370	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線少分割照射における放射線感受性変動要因の研究
21B371	崔 星	崔 星	重粒子線照射による癌組織の病理学的変化と癌幹細胞関連マーカーの発現変化
19B413	小西輝昭	小西輝昭	Bragg ピーク近傍の重粒子イオン照射による細胞致死及び DNA 二本鎖切断誘発率の測定
19B424	伊藤 敦	古澤佳也	DNA 酸化損傷の細胞内生成量評価とその分布
19B446	鶴岡千鶴	鶴岡千鶴	ヒト正常細胞の細胞致死、突然変異、クロマチン損傷に対する重粒子線の誘発メカニズム解明
20B452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線による DNA 二重鎖修復機構の解明とその応用
19B462	LE SECH, Claude	古澤佳也	STUDY of CELLS DEATH RATE LOADED with HIGH-Z ATOMS-platinum and gold- IRRADIATED with ATOMIC IONS



20B463	Moeller, Ralf	岡安隆一	Investigation on the DNA repair processes in the microbial model system - <i>Bacillus subtilis</i> after exposure to different LET-charged HZE particles
21B467	高橋昭久	古澤佳也	重粒子線によるアポトーシス誘導経路の解明
21B468	平山亮一	平山亮一	低酸素環境下での RBE ならびに OER の LET 依存性
21B470	安西和紀	安西和紀	重粒子線による正常組織の障害を防護する化合物の開発
21B472	清水喜久雄	古澤佳也	重粒子線による DNA 損傷と突然変異誘発の特性
19B477	細井義夫	岡安隆一	重粒子線による増殖因子受容体活性化とその機序の解明
19B478	小林秀光	鶴澤玲子	炭素線照射により作製した放線菌変異株より得られる新規生理活性物質の探索
19B481	Hande, M. Prakash	岡安隆一	Complex chromosomal aberrations induced by low doses of densely ionising radiation in human cells
19B482	Lian Xue (蓮 薛)	古澤佳也	Mechanism of DNA damage and Mutation in Mammalian cells induces by Low Dose Heavy Ions
20B483	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子線によるフリーラジカル生成反応の解析と制御
20B484	加藤宝光	加藤宝光	重粒子線の細胞周期による生物効果の変化
20B485	道川祐市	道川祐市	重粒子線照射によるゲノム構造と遺伝子発現量の変化
21B487	井出 博	古澤佳也	高 LET 放射線が誘発する DNA-タンパク質クロスリンク損傷の解析
21B488	寺東宏明	古澤佳也	重粒子線誘発クラスターDNA 損傷の複雑性解析とその生物効果の解明
21B490	二宮康晴	二宮康晴	ヘテロクロマチン形成に着目した重粒子線作用機序に関する研究
21B491	松本孔貴	松本孔貴	マウス悪性黒色腫由来細胞の高転移能に対する重粒子線の効果
21B492	高居邦友	平山 亮一	人工多能性幹細胞 (iPS 細胞)における重粒子線 DNA 損傷応答の解析
(物理・工学)			
19P005	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
19P026	松多健策	北川敦志	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性
19P028	野田耕司	野田耕司	がん治療用加速器の総合的研究
19P032	東 俊行	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
20P037	Jack Miller	岩田佳之	Measurements of Radiation Transport in Materials for Spacecraft Applications
21P045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による気体分子の電離過程の研究
21P060	河野俊之	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
21P093	福田光順	北川敦志	重粒子線による核反応断面積の研究
21P095	久保山智司	岩田佳之	半導体の放射線の影響に関する研究
21P105	宮地 孝	村上 健	高エネルギーXe 粒子を用いた音響信号形成機構
19P111	佐々木慎一	村上 健	重荷電粒子に対する気体の W-値の総合的研究
19P121	中川公一	安西和紀	重粒子線照射によるスクロースと L-アラニンのラジカルの生成断面積の検討
20P138	山内知也	小西輝昭	固体飛跡検出器中重イオントラックに沿った損傷構造
20P141	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水の放射線分解収量とトラック構造の相関
21P150	Li, Qiang	北川敦志	Research on biological effects of radioactive ion beam
21P157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
21P158	松藤成弘	松藤成弘	粒子線治療場における中性子の生物・臨床影響に関する研究
19P177	河野俊之	稲庭 拓	核破砕反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
19P178	百田佐多生	金澤光隆	入射核破砕片の生成メカニズムの研究
19P180	中川清子	村上 健	アルコール溶媒中ヒドロキシ化合物の重イオン照射効果
19P186	鷲尾方一	村上 健	高分子材料への重イオンビーム照射効果に関する研究-化学構造の違いによる反応の局所性-
20P189	寺沢和洋	内堀幸夫	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答

20P197	Akselrod, Mark	小平 聡	Investigation of a novel Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C,Mg Fluorescent Nuclear Track Detector
20P201	村石 浩	日向 猛	増感紙-EMCCD システムを用いた重粒子線 CT における高精度 3 次元画像収集法の検討
21P210	遠藤 暁	高田真志	PID-TEPC 開発と 2 次中性子線の評価
21P212	久下謙一	小平 聡	多層塗布カラー現像銀塩写真感光材料を用いた核種弁別型飛跡検出器の開発
21P214	若林源一郎	松藤成弘	重粒子入射による軽イオン生成反応断面積の系統的な実験データ収集
21P217	坂間 誠	加瀬優紀	重粒子線に対するカロリメータを用いた絶対線量測定
19P223	高田義久	兼松伸幸	粒子線治療におけるボラス形状の最適化の研究
19P226	村上哲也	高田栄一	非対称原子核物質研究用検出器のテスト
19P230	小佐古敏荘	村上 健	Benchmark experiment for high-energy neutron transport and activation in concrete
20P233	Burmeister, Soenke	内堀幸夫	Intercomparison and Verification of Active Dosimeters for Space
20P237	津田修一	高田真志	Wall-less 型組織等価比例計数管を用いた重粒子線に対する沈着エネルギー分布測定に関する研究
20P238	久保謙哉	北川敦志	不安定核ビームを応用したインビーム・メスバウアー分光法の開発
20P239	魚住裕介	松藤成弘	大アクセプタンス荷電粒子検出器の研究
20P240	Berger, Thomas	北村 尚	Space Radiation Dosimetry-Ground Based Verification of the MATROSHKA Facility
20P241	SPURNY, Frantisek	小平 聡	Contribution to the development of the LET distributions data base for the modeling of biological effects in HIMAC BIO particle beams
20P242	安田仲宏	小平 聡	各種 CR-39 検出器の特性比較(CR-39 ICCHIBAN)
20P243	丸山浩一	金澤光隆	がん治療用ペンシルビームの物質内でのプロファイル評価法の確立
20P244	小林俊雄	高田栄一	重 RI ビーム粒子識別用検出器のビーム試験
20P245	小沢 顕	金澤光隆	RI ビームの粒子識別検出器の開発
20P246	山口貴之	北川敦志	Charge changing cross section を用いた中性子過剰炭素同位体の核子密度分布の研究
20P247	Cary Zeitlin	岩田佳之	Calibration of the Radiation Assessment Detector (RAD) using heavy-ion beams at HIMAC
20P248	Lawrence, Pinsky	内堀幸夫	Heavy Ion Response of the TimePix Version of the Medipix2 Technology In Preparation For Use In Space Radiation Dosimetry Applications
20P249	太田周也	小平 聡	高性能固体飛跡検出器を利用する超鉄核の核破砕反応断面積の測定
20P250	錦戸文彦	錦戸文彦	OpenPET 用ガンマ線検出器の重粒子線照射環境での性能の基礎研究
20P251	橋本義徳	村上 健	大強度陽子ビームのためのビームプロファイルモニターの開発
21P252	魚住裕介	松藤成弘	生体元素からの中性子およびガンマ線生成断面積の測定
21P253	BORAK, Thomas B	岩田佳之	Testing and Calibration of Radiation Dosimeters Designed for Astronauts during EVA on the Lunar Surface
21P254	川合將義	村上 健	高速および高輝度 2 次元発光体の発光特性測定
21P255	保田浩志	保田浩志	高高度環境での携行使用に適した放射線モニタの開発研究
21P256	遊佐 顕	兼松伸幸	普及型炭素線治療装置におけるコミッショニング試験の高度化に関する研究
21P257	山口充孝	松藤成弘	Cd/Te コンプトンカメラによる炭素線治療場における $\gamma$ 線エネルギー分布測定および中性子損傷の調査
21P258	国分紀秀	内堀幸夫	ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線・ガンマ線検出器の宇宙線重粒子に対する応答
21P260	高島 健	内堀幸夫	高放射線環境下で動作するプラズマ粒子観測器の開発

21P262	為ヶ井 強	北村 尚	FeAs 系高温超伝導体に対する重イオン照射効果
21P263	眞正浄光	松藤成弘	組織等価 3 次元熱ルミネセンス線量計の重粒子線に対する特性の研究
21P264	増田公明	村上 健	重イオンに対する無機シンチレータの応答特性
21P265	Edward Semones	岩田佳之	Investigation of the performance of the new NASA International Space Station (ISS)-Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC)
21P266	橋本孝之	福田茂一	ペースメーカー等に対する重粒子線照射の影響に関する研究

# 平成 22 年度

課題番号 (治療・診断)	課題申請者	所内対応者	課題名
20C064	山田 滋	山田 滋	重粒子線治療における酸化ストレスおよび抗酸化力に関する研究
20C065	馬場雅行	馬場雅行	肺がんの炭素線治療計画の精度向上に関する総合的研究
21C068	桃原幸子	桃原幸子	耳下腺原発癌における 11C-メチオニン PET 診断：検出能および診断能の検討
21C069	宇治川清登	長谷川安都佐	顎顔面における重粒子線照射後腐骨と照射野及び照射線量に関する研究
22C070	篠藤 誠	篠藤 誠	局所進行膵癌に対するゲムシタビン併用炭素イオン治療における消化管有害反応の DVH 解析
22C071	大橋靖也	大橋靖也	頭頸部原発腫瘍組織型の違いによる 11C-Methionine PET/CT 頸部リンパ節転移診断の比較
22C072	山本直敬	山本直敬	肺癌炭素線治療で I 次気管支が照射野に含まれる症例の治療後の肺機能の予測に関する研究
(生物)			
22B132	手島昭樹	古澤佳也	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
21B157	鵜澤玲子	鵜澤玲子	粒子線治療での腫瘍と正常組織への影響の研究
22B160	山田 滋	山田 滋	扁平上皮癌における重粒子線の転移抑制作用に関する研究
20B164	高橋健夫	古澤佳也	群馬大学重粒子線治療装置の前臨床生物実験における比較対照用基礎研究
21B167	今井高志	今井高志	マウスモデルを用いた炭素イオン線治療併用療法研究
21B168	篠藤 誠	篠藤 誠	難治性消化器癌に対する重粒子線と上皮成長因子受容体阻害剤併用治療の基礎的検討
22B171	国領大介	国領大介	ナノ DDS 重粒子線治療実現のための基礎検討
22B172	古澤佳也	古澤佳也	炭素線治療ビームの国際比較と標準化-CNAO-
21B254	安西和紀	上野恵美	重粒子線による乳腺腫瘍の発生とその防御
22B258	王 冰 (Bing WANG)	王 冰 (Bing WANG)	Does Radioadaptive Response Also Apply to the Case of Heavy-ion Irradiations in Fetal and Adult Mice?
20B262	前澤 博	古澤佳也	細胞遊走・浸潤能に対する重粒子線照射効果の研究
20B264	西田浩志	笠井清美	DNA 損傷チェックポイントに対する重粒子線の影響とその増感因子の探索
20B265	森田 隆	笠井清美	哺乳動物 ES 細胞に対する重粒子線の影響の解析
21B267	高井伸彦	鵜澤玲子	脳内毛細血管密度を指標にした中枢神経の RBE の創出
21B268	齋藤茂芳	齋藤茂芳	グリオーマ腫瘍モデルマウスにおけるマンガン増感 MRI を用いた重粒子照射における細胞の変性評価
22B269	柿沼志津子	柿沼志津子	重粒子線による発がんの被ばく時年齢依存性
22B270	丸山耕一	丸山耕一	メダカ胸腺に対する重粒子線の影響
22B271	三谷啓志	保田浩志	メダカ固体を用いた重粒子線照射に対する組織応答の解析
22B272	村山千恵子	古澤佳也	重粒子線照射による粘膜炎・唾液腺障害に対する D メチオニンの防護効果
22B273	浅香智美	鈴木雅雄	宇宙放射線の低線量率・長期被ばくに対する生物影響
22B274	斉藤正好	平山亮一	中枢神経に対する重粒子線照射がマウスの母性行動に及ぼす影響

22B275	Wang, Xiao	古澤佳也	Molecular biological mechanism of the interaction between nervous and immune systems in rats exposed to heavy ion radiation by different proteomic analysis
22B328	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線低フルエンス照射により引き起こされるバイスタンダー効果誘導因子の解明
20B332	鈴木雅雄	鈴木雅雄	低エネルギーイオンビーム照射による生物効果のバイスタンダー効果に関する研究
21B335	澤尻昌彦	村上 健	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
22B336	柏倉幾郎	笠井清美	ヒト造血システムに対する重粒子線特異的障害機構の解明
20B340	岡村正愛	古澤佳也	植物の突然変異誘発への重イオンビームの効果に関する研究
22B347	高辻俊宏	古澤佳也	照射されたタマネギ種子根端細胞における小核発生頻度の経時変化と根の伸長
22B349	北中千史	村上 健	重粒子線によるがん細胞殺傷メカニズムに関する検討
22B352	松本英樹	古澤佳也	重粒子線により誘導されるバイスタンダー応答および適応応答への NO ラジカルの関与
20B356	長谷川正俊	村上 健	腫瘍内の放射線抵抗性細胞に対する重粒子線の効果の検討
20B361	藤森 亮	藤森 亮	難治性がんに対する放射線治療の生物学的側面からの高度化
20B363	横堀伸一	吉田 聡	微生物生存に対する重粒子線の影響と鉱物による遮蔽効果の検証
20B364	Zhang, Hong	王 冰	Relationship between telomere length and radiosensitivity of human cancer cell lines induced by heavy ion irradiation
21B366	益谷美都子	岡安隆一	重粒子線がん治療におけるポリ ADP-リボシル化関連酵素の役割と阻害剤の効果
21B367	島田幹男	平山亮一	重粒子線照射時の動物細胞における中心体過剰複製の検討
21B368	劉 翠華	劉 翠華	重粒子線における悪性胸膜中皮腫細胞致死メカニズムの解析
21B370	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線少分割照射における放射線感受性変動要因の研究
21B371	崔 星	崔 星	重粒子線照射による癌組織の病理学的変化と癌幹細胞関連マーカーの発現変化
22B372	Li, Qiang	北川敦志	The effect of carbon ion irradiation on tumor cells of mitosis
22B373	Meijer, Annelie Elisabeth	古澤佳也	Molecular and cellular effects in tumor and normal cells exposed to accelerated ions
22B375	中島菜花子	中島菜花子	重粒子線による DNA 損傷応答を制御するエピジェネティクスの研究
22B424	伊藤 敦	古澤佳也	DNA 酸化損傷 8-OHdG を指標とした高 LET 線の生物作用の解明
22B446	鶴岡千鶴	鶴岡千鶴	ヒト正常細胞の細胞致死、突然変異、クロマチン損傷に対する重粒子線の誘発メカニズム解明
20B452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線による DNA 二重鎖切断とその修復機構の解明
22B462	LE SECH, Claude	古澤佳也	STUDY of CELLS DEATH RATE LOADED with HIGH-Z ATOMS-platinum and gold- IRRADIATED with ATOMIC IONS
20B463	Moeller, Ralf	岡安隆一	Investigation of DNA repair in heavy ion irradiated Bacillus subtilis (cells and spores) by homologous recombination and non-homologous end-joining(REBAS)
21B467	高橋昭久	古澤佳也	重粒子線によるアポトーシス誘導経路の解明
21B468	平山亮一	平山亮一	低酸素環境下での RBE ならびに OER の LET 依存性
21B470	安西和紀	上野恵美	重粒子線による正常組織の障害を防護する化合物の開発
21B472	清水喜久雄	古澤佳也	重粒子線による DNA 損傷と突然変異誘発の特性
22B478	高井伸彦	鶴澤玲子	炭素線照射により作製した放線菌および真菌変異株より得られる新規生理活性物質の探索
22B481	Hande, M. Prakash	岡安隆一	Complex chromosomal aberrations induced by low doses of densely ionising radiation in human cells
20B483	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子線によるフリーラジカル生成反応の解析と制御

20B484	Kato, Takamitsu	岡安隆一	重粒子線の細胞周期による生物効果の変化
20B485	道川祐市	道川祐市	重粒子線照射によるゲノム構造と遺伝子発現量の変化
21B487	井出 博	古澤佳也	高 LET 放射線が誘発する DNA-タンパク質クロスリンク損傷の解析
21B488	寺東宏明	古澤佳也	重粒子線誘発クラスターDNA 損傷の複雑性解析とその生物効果の解明
21B490	二宮康晴	二宮康晴	ヘテロクロマチン形成に着目した重粒子線作用機序に関する研究
21B491	松本孔貴	松本孔貴	転移に対する重粒子線の効果解析
21B492	高居邦友	平山亮一	人工多能性幹細胞 (iPS 細胞)における重粒子線 DNA 損傷応答の解析
22B493	Sihver, Lembit	小西輝明	Study of high-LET radiation-produced radical/ROS species and indirect strand break induction in plasmid DNA
(物理・工学)			
22P005	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
22P026	松多健策	北川敦志	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性
22P028	白井敏之	白井敏之	がん治療用加速器の総合的研究
22P032	東 俊行	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
20P037	Miller, Jack	岩田佳之	Angular dependence of fragments from carbon and silicon projectiles incident on thick targets
21P045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による気体分子の電離過程の研究
21P060	河野俊之	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
21P093	福田光順	北川敦志	重粒子線による核反応断面積の研究
21P095	久保山智司	岩田佳之	半導体の放射線の影響に関する研究
21P105	小林正規	村上 健	高エネルギーXe 粒子を用いた音響信号形成機構
22P111	佐々木慎一	村上 健	高エネルギー重荷電粒子に対する気体の W-値の系統的測定
22P121	中川公一	松本謙一郎	重粒子線で生ずるスクロースラジカルの ESR と ESR イメージングによる画像化
20P138	山内知也	小西輝昭	固体飛跡検出器中重イオントラックに沿った損傷構造
20P141	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水の放射線分解収量とトラック構造の相関
21P150	Li, Qiang	北川敦志	Research on biological effects of radioactive ion beam
21P157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
21P158	松藤成弘	松藤成弘	粒子線治療場における中性子の生物・臨床影響に関する研究
22P168	Barillon, Remi	北村 尚	Improvement of the radiation dosimetry of heavy ions, assessing the mechanisms of track formation and scintillation in organic detectors
22P177	河野俊之	稲庭 拓	核破砕反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
22P178	百田佐多生	金澤光隆	入射核破砕片の生成メカニズムの研究
22P180	中川清子	村上 健	重イオン照射によりメタノール中に生成するラジカル量の研究
22P186	鷲尾方一	村上 健	重イオンビーム照射によるナノ空間制御材料の創製
20P189	寺沢和洋	内堀幸夫	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答
20P197	Akselrod, Mark	安田仲宏	Investigation of a novel Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C,Mg Fluorescent Nuclear Track Detector
20P201	村石 浩	日向 猛	増感紙-EMCCD システムを用いた重粒子線 CT における高精度 3 次元画像収集法の検討
21P210	遠藤 暁	高田真志	PID-TEPC 開発と 2 次中性子線の評価
21P212	久下謙一	安田仲宏	多層塗布カラー現像銀塩写真感光材料を用いた核種弁別型飛跡検出器の開発
21P214	若林源一郎	松藤成広	重粒子線入射による軽イオン生成反応断面積の系統的な実験データ収集
21P217	坂間 誠	日向猛	重粒子線に対するカロリメータを用いた絶対線量測定

22P223	高田義久	兼松伸幸	粒子線治療におけるボース形状の最適化の研究
22P230	小佐古敏荘	村上 健	Benchmark experiment for high-energy neutron transport and activation in concrete
20P233	Burmeister, Soenke	北村 尚	Intercomparison and Verification of Active Dosimeters for Space
20P236	石崎 梓	福田茂一	コーンフィルタースキャニングの呼吸運動性臓器に対する評価
20P237	津田修一	高田真志	Wall-less 型組織等価比例計数管を用いた重粒子線に対する沈着エネルギー分布測定に関する研究
20P238	久保謙哉	北川敦志	不安定核ビームを応用したインビーム・メスバウアー分光法の開発
20P240	Berger, Thomas	北村 尚	Space Radiation Dosimetry-Ground Based Verification of the MATROSHKA Facility
20P241	SPURNY, Frantisek	安田仲宏	Contribution to the development of the LET distributions database for the modeling of biological effects in HIMAC BIO particle beams
20P242	安田仲宏	安田仲宏	各種 CR-39 検出器の特性比較(CR-39 ICCHIBAN)
20P243	丸山浩一	金澤光隆	がん治療用ペンスルビームの物質内でのプロファイル評価法の確立
20P244	小林俊雄	高田栄一	重 RI ビーム粒子識別用検出器のビーム試験
20P245	小沢 顕	金澤光隆	RI ビームの粒子識別検出器の開発
20P246	山口貴之	北川敦志	Charge changing cross section を用いた中性子過剰炭素同位体の核子密度分布の研究
20P247	Zeitlin, Cary	岩田佳之	Proposal for calibration for the radiation assessment detector (RAD) for ISS using heavy-ion beams at HIMAC
20P248	Pinsky, Lawrence	内堀幸夫	Heavy Ion Response of the TimePix Version of the Medipix2 Technology In Preparation For Use In Space Radiation Dosimetry Applications
20P249	太田周也	安田仲宏	高性能固体飛跡検出器を利用する超鉄核の核破砕反応断面積の測定
20P250	錦戸文彦	錦戸文彦	OpenPET 用ガンマ線検出器の重粒子線照射環境での性能の基礎研究
20P251	橋本義徳	村上 健	大強度陽子ビームのためのビームプロファイルモニターの開発
21P252	魚住裕介	松藤成弘	生体元素からの中性子およびガンマ線生成断面積の測定
21P253	Borak, Thomas B	岩田佳之	Testing and calibration of radiation dosimeters designed for astronauts during EVA on the Lunar surface
21P255	保田浩志	保田浩志	高高度環境での携行使用に適した放射線モニタの開発研究
21P257	山口充孝	松藤成弘	CdTe コンプトンカメラによる炭素線治療場における $\gamma$ 線エネルギー分布測定および中性子損傷の調査
21P258	国分紀秀	内堀幸夫	ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線・ガンマ線検出器の宇宙線重粒子に対する応答
21P260	高島 健	内堀幸夫	高放射線環境下で動作するプラズマ粒子観測器の開発
21P262	為ヶ井 強	北村 尚	FeAs 系高温超伝導体に対する重イオン照射効果
21P263	眞正浄光	松藤成弘	組織等価 3 次元熱ルミネセンス線量計の重粒子線に対する特性の研究
21P264	増田公明	村上 健	重イオンに対する無機シンチレーターの応答特性
21P266	橋本孝之	福田茂一	ペースメーカー等に対する重粒子線照射の影響に関する研究
22P267	Benton, Eric	内堀幸夫	Tissue Equivalent Detectors for Space Crew Dosimetry and Characterization of the Space Radiation Environment
22P268	小澤俊介	内堀幸夫	重イオンビーム照射による C A L E T 用シリコンピクセルアレイの電荷分解性能
22P269	小出功史	村上 健	重粒子線照射による多孔性樹脂フィルムの製造方法の検討
22P270	小平 聡	小平 聡	重イオン照射による CR-39 における局所放射線損傷メカニズムの研究

22P273	村上哲也	高田栄一	中間エネルギー原子核—原子核衝突を使った対称エネルギーの研究
22P274	加藤一成	村上 健	SRAM 型 FPGA に対する重イオンシングイベント効果の評価
22P275	大田晋輔	高田栄一	アクティブターゲットを用いた(d,2He)反応による鉄近傍元素の B(GT)分布測定
22P277	中嶋 大	北村 尚	ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD 素子・ASIC 素子の放射線耐性
22P279	Ryu, Kwangsun	内堀幸夫	Development of 3 dimensional staking mass memory module

#### 平成 23 年度

課題番号 (治療・診断)	課題申請者	所内対応者	課題名
21C069	宇治川清登	長谷川安都 佐	顎顔面における重粒子線照射後腐骨と照射野及び照射線量に関する研究
22C070	篠藤 誠	篠藤 誠	局所進行膵癌に対するゲムシタビン併用炭素イオン治療における消化管有害反応の DVH 解析
23C074	森川貴迪	森川貴迪	炭素イオン線治療における耳下腺の体積変化と線量の関わりの研究
23C075	小藤昌志	小藤昌志	炭素イオン線治療後の放射線脳傷害の予測因子に関する研究
23C076	大橋靖也	大橋靖也	多変量解析による鼻腔悪性黒色腫の重粒子線治療効果予測因子の検討: 11C-Methionine PET とその他基本因子
23C077	馬場雅行	馬場雅行	炭素線肺癌治療 高精度化に関する研究
23C078	山田 滋	山田 滋	重粒子線治療における血栓症塞栓症に関する研究
23C079	桃原幸子	桃原幸子	頭頸部腺様嚢胞癌の重粒子線治療効果予測因子の検討: メチオニン PET 及びその他基本因子を用いた多変量解析
(生物)			
22B132	手島昭樹	古澤佳也	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
21B157	鵜澤玲子	鵜澤玲子	粒子線治療での腫瘍と正常組織への影響の研究
22B160	山田 滋	山田 滋	扁平上皮癌における重粒子線の転移抑制作用に関する研究
23B164	吉田由香里	古澤佳也	群馬大学重粒子線治療装置の前臨床生物実験における比較対照用基礎研究-重粒子線治療の生物学的考察のための基礎研究-
21B168	篠藤 誠	篠藤 誠	難治性消化器癌に対する重粒子線と上皮成長因子受容体阻害剤併用治療の基礎的検討
22B171	國領大介	國領大介	ナノ DDS 重粒子線治療実現のための基礎検討
22B172	古澤佳也	古澤佳也	炭素線治療ビームの国際比較-CNAO-
23B173	佐々木良平	山田 滋	吸収性素材を用いた新規体内スパーサーの生体反応と線量分布最適化の研究
23B174	石川顕一	石川顕一	炭素線治療予後因子を制御するエピゲノム情報の解明
23B175	藤田英俊	藤田英俊	マウスモデルを用いた炭素イオン線治療と樹状細胞療法の併用療法の研究
23B178	藤田真由美	藤田真由美	放射線照射によるヒト癌由来細胞株の浸潤能変化とその抑制に有効な阻害剤の探索
23B180	遠藤悟史	遠藤悟史	放射線照射によるヒト大腸癌由来細胞株の浸潤能変化の検討
23B181	CHEN Jian (陳 劍)	古澤佳也	Radiation Biological Effect of Carbon Beam to Glioma Cells
23B182	Hanneman, William	藤森 亮	Inhibition of Radioresistance by Novel Anticancer Drugs
21B254	安西和紀	上野恵美	重粒子線による乳腺腫瘍の発生とその防御
22B258	王 冰 (Bing WANG)	王 冰 (Bing WANG)	Does Radioadaptive Response Also Apply to the Case of Heavy-ion Irradiations in Fetal and Adult Mice?
23B265	森田 隆	笠井清美	哺乳動物 ES 細胞に対する重粒子線の影響の解析



21B267	高井伸彦	鵜澤玲子	脳内毛細血管密度を指標にした中枢神経の RBE の創出
22B269	柿沼志津子	柿沼志津子	重粒子線による発がんの被ばく時年齢依存性
22B270	丸山耕一	丸山耕一	メダカ胸腺に対する重粒子線の影響
22B272	村山千恵子	古澤佳也	重粒子線照射による粘膜炎・唾液腺障害に対する D メチオニンの防護効果
22B273	浅香智美	鈴木雅雄	宇宙放射線の低フルエンス・長期被ばくに対する生物影響
22B275	Wang, Xiao	古澤佳也	Molecular biological mechanism of the interaction between nervous and immune systems in rats exposed to heavy ion radiation by differential proteomic analysis
23B276	Wang, Zhenhua	王 冰 (Bing WANG)	Mitochondrial dysfunction induced by heavy-ion radiation in mouse brain: Does hypoxia play a role?
23B277	田畑哲之	村上 健	重粒子線利用による植物品種識別法の開発
23B278	下川卓志	下川卓志	重粒子線照射による肺晩発障害機構の解明
23B279	鈴木信雄	松本謙一郎	骨モデル（魚のウロコ）に対する重粒子線の影響
23B280	高橋 計介	中島菜花子	海産二枚貝アカガイの造血組織に対する重粒子線照射の効果
22B328	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線低フルエンス照射により引き起こされるバイスタンダー効果誘導因子の解明
21B335	澤尻昌彦	村上 健	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
23B340	岡村正愛	古澤佳也	植物の突然変異誘発への重イオンビームの効果に関する研究
22B347	高辻俊宏	古澤佳也	照射されたタマネギ種子根端細胞における小核発生頻度の経時変化と根の伸長
23B356	長谷川正俊	村上 健	放射線抵抗性腫瘍細胞の生存と分化に対する重粒子線の影響
23B361	藤森 亮	藤森 亮	難治性がんに対する放射線治療の生物学的側面からの高度化
23B363	横堀伸一	吉田 聡	微生物の重粒子線照射下での生存条件の検討
23B364	Zhang, Hong	王 冰	Relationship between telomere length and radiosensitivity of human cancer cell lines induced by heavy ion irradiation
21B366	益谷美都子	岡安隆一	重粒子線がん治療におけるポリ ADP-リボシル化関連酵素の役割と阻害剤の効果
21B367	島田幹男	平山亮一	重粒子線照射時の動物細胞における中心体過剰複製の検討
21B368	劉 翠華	劉 翠華	重粒子線における悪性胸膜中皮腫細胞致死メカニズムの解析
21B370	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線少分割照射における放射線感受性変動要因の研究
21B371	崔 星	崔 星	重粒子線照射による癌組織の病理学的変化と癌幹細胞関連マーカーの発現変化
22B372	Li, Qiang	古澤佳也	The effect of carbon ion irradiation on tumor cells of mitosis
22B373	Meijer, Annelie Elisabeth	鈴木雅雄	Molecular and cellular effects in tumor and normal cells exposed to accelerated ions
22B375	中島菜花子	中島菜花子	重粒子線による DNA 損傷応答を制御するエピジェネティクスの研究
23B376	松本英樹	古澤佳也	重粒子線がん治療における低線量被ばくによる正常組織反応の機構解明
23B377	Zhou, Guangming	古澤佳也	Mechanisms underlying cell cycle suspension induced by ionizing radiation and its potential application in tumor radiotherapy
23B378	Kato, Takamitsu	岡安隆一	高 LET 放射線によるクロマチン構造依存 DNA 損傷と修復
23B379	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線分割照射における培養細胞の生物効果に関する研究
23B382	Zhou, Guangming	古澤佳也	Evaluation of tumorigenic risk of highly energetic particles.

23B384	高橋 美智子	古澤佳也	重イオンビーム照射による栄養ストレス耐性植物の作出と原因遺伝子の同定
22B424	伊藤 敦	古澤佳也	DNA 酸化損傷 8-OHdG を指標とした高 LET 線の生物作用の解明
23B452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線照射による細胞損傷応答とその応用
22B462	LE SECH, Claude	古澤佳也	STUDY of CELLS DEATH RATE LOADED with HIGH-Z ATOMS-gadolinium and gold- IRRADIATED with HELIUM IONS
23B463	Moeller, Ralf	岡安隆一	Analysis of temporal gene expression of heavy ion irradiated Bacillus subtilis spores towards understanding of the interaction of error-prone and error-free DNA repair processes during spore germination (ANEXI)
21B467	高橋昭久	古澤佳也	重粒子線による生と死のシグナル制御機構の解明
21B468	平山亮一	平山亮一	低酸素環境下での RBE ならびに OER の LET 依存性
21B470	安西和紀	上野恵美	重粒子線による正常組織の障害を防護する化合物の開発
21B472	清水喜久雄	古澤佳也	重粒子線による DNA 損傷と突然変異誘発の特性
22B478	高井伸彦	鶴澤玲子	炭素線照射により作製した放線菌および真菌変異株より得られる新規生理活性物質の探索
23B483	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子線によるフリーラジカル生成反応の解析と制御
21B487	井出 博	古澤佳也	高 LET 放射線が誘発する DNA-タンパク質クロスリンク損傷の解析
21B488	寺東宏明	古澤佳也	重粒子線誘発クラスターDNA 損傷の複雑性解析とその生物効果の解明
21B490	二宮康晴	二宮康晴	ヘテロクロマチン形成に着目した重粒子線作用機序に関する研究
21B491	松本孔貴	松本孔貴	転移に対する重粒子線の効果解析
21B492	高居邦友	平山亮一	グリオーマ幹細胞の重粒子線 DNA 損傷応答
23B494	矢島浩彦	矢島浩彦	重粒子線による DNA 二本鎖切断に対する初期応答の分子生物学的解析
23B495	Nickoloff, Jac A.	藤森 亮	Genetic Control of the DNA-repair Response to Photon and Hardron-particle Radiation
23B496 (物理・工学)	古澤佳也	古澤佳也	重粒子線のトラック構造の広がり生物効果
22P005	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
22P026	松多健策	北川敦志	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性
22P028	白井敏之	白井敏之	がん治療用加速器の総合的研究
22P032	東 俊行	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
21P045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による気体分子の電離過程の研究
21P060	河野俊之	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
21P093	福田光順	北川敦志	重粒子線による核反応断面積の研究
21P095	久保山智司	岩田佳之	半導体の放射線の影響に関する研究
21P105	小林正規	村上 健	高エネルギーXe 粒子を用いた音響信号形成機構
22P111	佐々木慎一	村上 健	高エネルギー重荷電粒子に対する気体の W-値の系統的測定
23P138	山内知也	小西輝昭	固体飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造
21P150	Li, Qiang	北川敦志	Research on biological effects of radioactive ion beam
21P157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
21P158	松藤成弘	松藤成弘	粒子線治療場における二次放射線の生物・臨床影響に関する研究
22P168	Barillon, Remi	北村 尚	Improvement of the radiation dosimetry of heavy ions, assessing the mechanisms of track formation and scintillation in organic detectors
22P177	河野俊之	稲庭 拓	核破碎反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
22P180	中川清子	村上 健	重イオン照射によりメタノール中に生成するラジカル量の研究

22P186	鷺尾方一	村上 健	重イオンビーム照射によるナノ空間制御材料の創製
23P189	寺沢和洋	内堀幸夫	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答
23P197	Akselrod, Mark	安田仲宏	Investigation of a novel Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C,Mg Fluorescent Nuclear Track Detector
23P201	村石 浩	古場裕介	増感紙-EMCCD カメラを用いた高速重粒子線 CT に関する総合的研究
21P210	遠藤 暁	鎌田 創	PID-TEPC 開発と 2 次中性子線の評価
21P212	久下謙一	安田仲宏	多層塗布カラー現像銀塩写真感光材料を用いた核種弁別型飛跡検出器の開発
21P217	坂間 誠	稲庭 拓	重粒子線に対するカロリメータを用いた絶対線量測定
22P230	小佐古敏荘	村上 健	Benchmark experiment of activation induced by high-energy heavy ions
23P233	Burmeister, Soenke	北村 尚	Space Radiation Dosimetry-Energetic Particle Detection with active Instruments for Space Missions
23P236	石崎 梓	福田茂一	コーンフィルタースキニングの呼吸運動性臓器に対する評価
23P237	津田修一	高田真志	Wall-less 型組織等価比例計数管を用いた重荷電粒子に対するエネルギー付与分布測定に関する研究
23P238	久保謙哉	北川敦志	不安定核ビームを応用したインビーム・メスバウアー分光法の物質科学の研究
23P244	小林俊雄	高田栄一	重 RI ビーム粒子識別用検出器のビーム試験
23P246	山口貴之	北川敦志	不安定原子核の荷電変換反応の研究
23P247	Zeitlin, Cary	岩田佳之	Proposal for Calibration of the Radiation Assessment Detector for the ISS (ISS-RAD) using Heavy-Ion Beams at HIMAC
23P248	Pinsky, Lawrence	内堀幸夫	Heavy Ion Response of the TimePix Version of the Medipix2 Technology In Preparation For Use In Space Radiation Dosimetry Applications
21P252	魚住裕介	松藤成弘	生体元素からの中性子およびガンマ線生成断面積の測定
21P255	保田浩志	保田浩志	高エネルギー放射線場の線量評価に用いる携帯型モニタの開発研究
21P258	国分紀秀	内堀幸夫	ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線・ガンマ線検出器の宇宙線重粒子に対する応答
21P260	高島 健	内堀幸夫	高放射線環境下で動作するプラズマ粒子観測器の開発
21P262	為ヶ井 強	北村 尚	FeAs 系高温超伝導体に対する重イオン照射効果
21P263	眞正浄光	松藤成弘	組織等価 3 次元熱ルミネセンス線量計の重粒子線に対する特性の研究
21P264	増田公明	村上 健	重イオンに対する無機シンチレーターの応答特性
21P266	橋本孝之	福田茂一	ペースメーカー等に対する重粒子線照射の影響に関する研究
22P267	Benton, Eric	内堀幸夫	Tissue Equivalent Detectors for Space Crew Dosimetry and Characterization of the Space Radiation Environment
22P268	小澤俊介	内堀幸夫	重イオンビーム照射による CALET 用電荷測定器の電荷分解性能及び耐放射線耐性評価
22P269	小出功史	村上 健	重粒子線照射による多孔性樹脂フィルムの製造方法の検討
22P270	小平 聡	小平 聡	重イオン照射による CR-39 における局所放射線損傷メカニズムの研究
22P273	村上哲也	高田栄一	中間エネルギー原子核-原子核衝突を使った対称エネルギーの研究
22P275	大田晋輔	高田栄一	アクティブターゲットを用いた鉄近傍元素の電子捕獲確率の研究
22P277	中嶋 大	北村 尚	ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD 素子・ASIC 素子の放射線耐性
22P279	Ryu, Kwangsun	内堀幸夫	Development of 3 dimensional staking mass memory module
23P281	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水分解：気体生成物のオンライン収率測定
23P282	Berger,	北村 尚	Ground Based Verification of a European Crew Personal Active Dosimeter (EuCPAD) for Astronauts

23P283	近藤洋介	高田栄一	高エネルギー中性子用検出器のテスト実験
23P284	高田義久	松藤成弘	粒子線ブロードビーム照射法の高精度化と省力化の研究
23P285	山谷泰賀	山谷泰賀	重粒子線照射野イメージングのための OpenPET 装置開発に関する研究
23P286	小平 聡	小平 聡	CR-39 を用いた高エネルギー荷電粒子が人体内中に生成する短飛程二次粒子の線量寄与の研究
23P287	田口光正	村上 健	重粒子線治療用天然高分子ゲル線量計の開発
23P289	松本晴久	北村 尚	宇宙機搭載用放射線環境計測装置の開発研究
23P290	三原基嗣	北川敦志	物性プローブとしての高偏極不安定核ビーム生成法の開発

## 平成 24 年度

課題番号	課題申請者	所内対応者	課題名
(治療・診断)			
11L075	小藤昌志	小藤昌志	炭素イオン線治療後の放射線脳傷害の予測因子に関する研究
11L078	山田 滋	山田 滋	重粒子線治療における血栓症塞栓症に関する研究
12L080	桃原幸子	桃原幸子	多変量解析による非小細胞肺癌重粒子線治療効果予測因子としてのメチオニン PET の意義の検討
12L081	篠藤 誠	山田 滋	肺癌炭素イオン線治療における FDG-PET による予後予測解析
12L082	大橋靖也	大橋靖也	11C-Methionine PET による非小細胞性肺癌の副腎転移診断能の検討
12L083	今井礼子	今井礼子	骨盤肉腫における重粒子線治療後の神経障害解析
12L084	若月 優	若月 優	子宮頸癌重粒子線治療における骨盤リンパ節に対する照射線量の解析
12L085	伊川裕明	伊川裕明	炭素イオン線治療後の放射線性顎骨壊死の予測因子に関する研究
12L086	寺嶋広太郎	寺嶋広太郎	肺癌に対する炭素イオン治療時の局所治療効果と ADC 値との関係
(生物)			
10J132	松浦成昭	古澤佳也	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
12J157	鶴澤玲子	鶴澤玲子	粒子線分割照射による正常組織反応の研究
10J160	山田 滋	山田 滋	扁平上皮癌における重粒子線の転移抑制作用に関する研究
11J164	吉田由香里	古澤佳也	群馬大学重粒子線治療装置の前臨床生物実験における比較対照用基礎研究-重粒子線治療の生物学的考察のための基礎研究-
10J171	國領大介	國領大介	ナノ DDS 重粒子線治療実現のための基礎検討
10J172	古澤佳也	古澤佳也	炭素線治療ビームの国際比較-CNAO-
11J174	石川顕一	石川顕一	炭素線治療予後因子を制御するエピゲノム情報の解明
11J175	下川卓志	下川卓志	マウスモデルを用いた炭素イオン線治療と樹状細胞療法の併用療法の研究
11J178	藤田真由美	藤田真由美	放射線照射によるヒト癌由来細胞株の浸潤能変化とその抑制に有効な阻害剤の探索
11J181	CHEN, Jian (陳 剣)	古澤佳也	Radiation Biological Effect of Carbon Beam to Glioma Cells
11J182	HANNEMAN, William	藤森 亮	Inhibition of Radioresistance by Novel Anticancer Drugs
12J183	佐藤克俊	佐藤克俊	局所再発腫瘍における炭素イオン線抵抗性獲得とそれに伴う転移に関わる性質変化に関する研究
12J184	KIRKBY, Karen Joy	鈴木雅雄	Molecular and Cellular Effects in Glioblastoma Patients 'Tumor Initiating Cells' Exposed to Accelerated Ions With and Without Chemo-Therapeutic Drugs

12J185	野村大成	古澤佳也	ヒトがん組織等移植 SCID マウスを用いた重粒子線治療の有効性・安全性の研究
10J258	王 冰 (WANG, Bing)	王 冰 (Bing WANG)	Does Radioadaptive Response Also Apply to the Case of Heavy-ion Irradiations in Fetal and Adult Mice?
12J262	前澤 博	古澤佳也	がん細胞の遊走及び浸潤に対する重粒子線照射効果の研究
11J265	森田 隆	笠井清美	哺乳動物 ES 細胞に対する重粒子線の影響の解析
10J269	柿沼志津子	柿沼志津子	重粒子線による発がんの被ばく時年齢依存性
10J272	村山千恵子	古澤佳也	重粒子線照射による粘膜炎・唾液腺障害に対する D メチオニンの防護効果
10J275	WANG, Xiao	古澤佳也	Molecular biological mechanism of the interaction between nervous and immune systems in rats exposed to heavy ion radiation by differential proteomic analysis
11J276	ZHANG, Hong	王 冰 (Bing WANG)	Mitochondrial dysfunction induced by heavy-ion radiation in mouse brain: Does hypoxia play a role?
11J277	田畑哲之	村上 健	重粒子線利用による植物品種識別法の開発
11J278	下川卓志	下川卓志	重粒子線照射による肺晩発障害機構の解明
11J280	高橋計介	中島菜花子	海産二枚貝アカガイの造血組織に対する重粒子線照射の効果
12J281	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子（炭素）線の生物影響に対する抗酸化剤の影響の
12J335	澤尻昌彦	村上 健	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
11J340	岡村正愛	古澤佳也	植物の突然変異誘発への重イオンビームの効果に関する研究
10J347	高辻俊宏	古澤佳也	照射されたタマネギ種子根端細胞における小核発生頻度の経時変化と根の伸長
11J356	長谷川正俊	村上 健	放射線抵抗性腫瘍細胞の生存と分化に対する重粒子線の影響
11J361	藤森 亮	藤森 亮	次世代がん治療標的分子に対する粒子線の効果に関する研究
11J363	横堀伸一	吉田 聡	微生物の重粒子線照射下での生存条件の検討
11J364	ZHANG, Hong	王 冰	Relationship between telomere length and radiosensitivity of human cancer cell lines induced by heavy ion irradiation
12J366	益谷美都子	岡安隆一	DNA 修復応答阻害剤の重粒子線及び低 LET 放射線に対する効果増強作用
12J368	劉 翠華	劉 翠華	中皮腫細胞致死メカニズムおよび潜在的致死損傷修復の LET・加速核種依存性の検討
12J370	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線少分割照射における放射線感受性変動要因の研究
12J371	崔 星	崔 星	消化器癌幹細胞に対する重粒子線照射による細胞生存と DNA 修復への影響
10J372	LI, Qiang	古澤佳也	Autophagy contributes to the radio-sensitivity or radio-resistance of tumor cells to high-LET radiations
10J373	MEIJER, Annelie Elisabeth	鈴木雅雄	Molecular and cellular effects in tumor and normal cells exposed to accelerated ions
10J375	中島菜花子	中島菜花子	重粒子線による DNA 損傷応答を制御するエピジェネティクスの研究
11J376	松本英樹	古澤佳也	重粒子線がん治療における低線量被ばくによる正常組織反応の機構解明
11J377	ZHOU, Guangming	古澤佳也	Mechanisms underlying cell cycle suspension induced by ionizing radiation and its potential application in tumor radiotherapy
11J379	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線分割照射における培養細胞の生物効果に関する研究
11J382	ZHOU, Guangming	古澤佳也	Evaluation of tumorigenic risk of highly energetic particles.

11J384	高橋美智子	古澤佳也	重イオンビーム照射による栄養ストレス耐性植物の作出と原因遺伝子の同定
12J385	DURANTE, Marco	古澤佳也	Oxygen Enhancement Ratio of heavy ions in partial hypoxic conditions
12J386	XUE, Lian (薛/蓮)	古澤佳也	Mechanism of DNA damage and Mutation in Mammalian cells induces by Low Dose Heavy Ions
12J387	SHAO, Chunlin	古澤佳也	HZE particle irradiation-induced signals and its downstream cell responses
12J388	KATO, Takamitsu	藤森 亮	粒子線による液体の放射化による生物効果
12J389	二宮康晴	二宮康晴	XRCC4 に着目した重粒子線作用機序に関する研究
12J390	唐澤久美子	唐澤久美子	乳癌の炭素イオン線感受性に関する研究
12J391	若月 優	若月 優	放射線抵抗性とバイスタンダー効果の関係
12J392	中山文明	中山文明	糖鎖の重粒子線感受性に関する基礎研究
12J393	秋山(張) 秋梅	鈴木雅雄	各種重粒子線による酸素ラジカル経路細胞損傷とその防御・修復機構
12J394	平井崇久	岡安隆一	がんの陽子線治療と重粒子線治療の生物効果の比較と増感剤の検討
12J395	藤澤 寛	藤森 亮	相同組換え修復に関与する修復タンパク質の挙動に関する研究
12J396	松本孔貴	松本孔貴	局所制御と転移抑制を目指した放射線との併用療法の検討
12J397	岡野ジェイムス洋尚	野島久美恵	神経細胞活動に対する重粒子線の影響
10J424	伊藤 敦	古澤佳也	DNA 酸化損傷 8-OHdG を指標とした高 LET 線の生物作用の解明
11J452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線照射による細胞損傷応答とその応用
10J462	LE SECH, Claude	古澤佳也	STUDY of CELLS DEATH RATE LOADED with HIGH-Z ATOMS-platinum and gold- IRRADIATED with HELIUM IONS
12J467	高橋昭久	古澤佳也	重粒子線による生と死のシグナル制御機構の解明
12J468	平山亮一	平山亮一	重粒子線による有・低酸素環境下での RBE ならびに OER
12J472	清水喜久雄	古澤佳也	重粒子線による DNA 損傷と突然変異誘発機構の解析
10J478	高井伸彦	鶴澤玲子	炭素線照射により作製した放線菌および真菌変異株より得られる新規生理活性物質の探索
12J487	井出 博	古澤佳也	重粒子線が誘発する DNA-タンパク質クロスリンク損傷の除去動態
12J488	寺東宏明	古澤佳也	重粒子線誘発クラスターDNA 損傷の複雑性解析とその生物効果の解明
12J491	松本孔貴	松本孔貴	分割照射の転移への影響
12J492	宮澤浩人	平山亮一	グリオーマ幹細胞の重粒子線 DNA 損傷応答
11J494	矢島浩彦	矢島浩彦	重粒子線による DNA 二本鎖切断に対する初期応答の分子生物学的解析
11J495	NICKOLOFF, Jac A.	藤森 亮	Genetic Control of the DNA-repair Response to Photon and Hardron-particle Radiation
11J496	古澤佳也	古澤佳也	重粒子線のトラック構造の広がりとその生物効果
12J497	AUTSAVAPORN, Narongchai	鈴木雅雄	Intercellular Communication and Heavy Ions-induced Bystander Effects: Application of Nanotechnology in Cancer Therapy
12J498	城 潤一郎	城 潤一郎	重粒子線応答型バイオマテリアル創製のための基礎検討
12J499	松尾陽一郎	古澤佳也	蛍光修飾オリゴヌクレオチドを用いた放射線による生体分子の損傷量評価手法に関する研究
(物理・工学)			
10H005	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
10H026	松多健策	北川敦志	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性
10H028	白井敏之	白井敏之	がん治療用加速器の総合的研究

10H032	東 俊行	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
12H045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による気体分子の電離過程の研究
12H060	河野俊之	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
12H093	福田光順	北川敦志	重粒子線による核反応断面積の研究
12H095	久保山智司	岩田佳之	半導体の放射線の影響に関する研究
12H105	小林正規	村上 健	放射線による音響信号の形成とその伝播機構
10H111	佐々木慎一	村上 健	高エネルギー重荷電粒子に対する気体の W-値の系統的測定
11H138	山内知也	北村 尚	固体飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造
12H150	Li, Qiang	北川敦志	Research on biological effects of radioactive ion beam
12H157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
12H158	松藤成弘	松藤成弘	治療ビーム中の中性子・荷電粒子フラグメントによる生物効果に関する研究
10H168	BARILLON, Remi	北村 尚	Improvement of the radiation dosimetry of heavy ions, assessing the mechanisms of track formation and scintillation in organic detectors
10H177	河野俊之	稲庭 拓	核破砕反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
10H180	中川清子	村上 健	重イオン照射によりメタノール中に生成するラジカル量の研究
10H186	鷲尾方一	村上 健	重イオンビーム照射によるナノ空間制御材料の創製
11H189	寺沢和洋	内堀幸夫	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答
11H197	AKSELROD, Mark	小平 聡	Investigation of a novel Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C,Mg Fluorescent Nuclear Track Detector
12H212	久下謙一	小平 聡	銀塩感光材料を用いた飛跡像の蛍光標識化による微細飛跡検出システムの開発
11H233	BURMEISTER, Soenke	北村 尚	Space Radiation Dosimetry-Energetic Particle Detection with active Instruments for Space Missions
11H236	石崎 梓	福田茂一	コーンフィルタースキャンニングの呼吸運動性臓器に対する評価
11H238	久保謙哉	北川敦志	不安定核ビームを応用したインビーム・メスバウアー分光法の物質科学の研究
11H244	小林俊雄	高田栄一	重 RI ビーム粒子識別用検出器のビーム試験
11H246	山口貴之	北川敦志	不安定原子核の荷電変換反応の研究
11H248	PINSKY, Larry	内堀幸夫	Heavy Ion Response of the TimePix Version of the Medipix2 Technology In Preparation For Use In Space Radiation Dosimetry Applications
12H252	魚住裕介	松藤成弘	生体元素からの中性子およびガンマ線生成断面積の測定
12H258	国分紀秀	内堀幸夫	ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線・ガンマ線検出器の宇宙線重粒子に対する応答
12H262	為ヶ井 強	北村 尚	粒子線照射を用いた鉄系超伝導体における臨界電流増強とギャップ関数の同定
12H264	増田公明	村上 健	重イオンに対する無機シンチレーターの応答特性
10H268	小澤俊介	内堀幸夫	超重イオンビーム照射による CALET 用電荷測定器の超重核宇宙線検出性能評価
10H269	造田敬一	村上 健	重粒子線照射による多孔性樹脂フィルムの製造方法の検討
10H270	小平 聡	小平 聡	重イオン照射による CR-39 における局所放射線損傷メカニズムの研究
10H277	中嶋 大	北村 尚	ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD 素子・ASIC 素子の放射線耐性
11H281	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水分解：気体生成物のオンライン収率測定
11H282	BERGER, Thomas	北村 尚	Ground Based Verification of a European Crew Personal Active Dosimeter (EuCPAD) for Astronauts
11H284	高田義久	松藤成弘	粒子線ブロードビーム照射法の高精度化と省力化の研究
11H285	山谷泰賀	山谷泰賀	重粒子線照射野イメージングのための OpenPET 装置開発に関する研究



11H286	小平 聡	小平 聡	CR-39 を用いた高エネルギー荷電粒子が人体内中に生成する短飛程二次粒子の線量寄与の研究
11H287	田口光正	村上 健	重粒子線治療用天然高分子ゲル線量計の開発
11H290	三原基嗣	北川敦志	物性プローブとしての高偏極不安定核ビーム生成法の開発
12H291	泉川卓司	福田茂一	粒子線 CT のためのシリコンストリップ検出器の開発
12H292	磯部忠昭	高田栄一	中間エネルギー原子核-原子核衝突中心度測定器・飛跡検出器の性能評価
12H293	上坂（黒川）明子	村上 健	Performance test of a Si detector array used for the Coulomb breakup experiment at 250 MeV/u
12H295	川崎賀也	北村 尚	宇宙ステーション暴露部で使用する光検出器読出用集積回路の重粒子線による影響
12H296	長江大輔	北川敦志	RI ビーム飛行時間検出器の開発
12H297	前山拓哉	福田茂一	LET 依存性のないゲル線量計の開発
12H298	東 明男	白井敏之	二次電子放出材質の研究
12H299	ZEITLIN, Cary J.	岩田佳之	Beam Tests of the Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER)
12H301	山田康洋	北川敦志	インビーム・メスバウアー分光法による孤立プローブ核の化学反応の研究
12H302	小佐古敏荘	村上 健	Benchmark experiment of activation induced by high-energy heavy ions
12H303	遠藤 暁	高田真志	リッジフィルターで生成される 2 次中性子線のマイクロドメストリ
12H304	佐藤典夫	村上 健	MEMS 半導体部品に対する重イオンシングルのイベント効果の評価
12H306	越水正典	古場裕介	重粒子線照射下でのシンチレーション挙動の解析と基礎過程解明
12H307	大田晋輔	高田栄一	アクティブ標的による重陽子非弾性散乱の研究
12H308	郡司修一	北村 尚	小型衛星搭載用ガンマ線バースト偏光度検出器の性能評価
12H309	柳田（宮本）由香	小平 聡	銀活性リン酸塩ガラスの LET 依存性
12H310	秋岡眞樹	北村 尚	先進的宇宙通信ミッションモジュールの放射線耐性評価手法の確立
12H312	西村大樹	北川敦志	重粒子線による超許容 $\beta$ 崩壊の研究
<b>平成 25 年度</b>			
<b>課題番号</b>	<b>課題申請者</b>	<b>所内対応者</b>	<b>課題名</b>
<b>(治療・診断)</b>			
12L083	今井礼子	今井礼子	骨盤肉腫における重粒子線治療後の神経障害解析
13L087	小藤昌志	小藤昌志	頭頸部腫瘍に対する炭素イオン線治療後の滲出性中耳炎の危険因子に関する研究
13L088	桃原幸子	桃原幸子	非小細胞肺癌患者を対象とした重粒子線治療前後における MET-PET と FDG-PET の診断能の比較
13L089	大橋靖也	大橋靖也	肺癌におけるメチオニン PET の各種集積指標 TNR、SUVmax、SUVpeak、SUVave の比較
13L090	高橋 渉	高橋 渉	早期肺癌への炭素線治療に伴う肺機能障害の検討:1 回照射における肺機能変化の評価およびその予測因子に関する研究
<b>(生物)</b>			
13J132	小泉雅彦	松本孔貴	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
12J157	鵜澤玲子	鵜澤玲子	粒子線分割照射による正常組織反応の研究
11J164	吉田由香里	古澤佳也	群馬大学重粒子線治療装置の前臨床生物実験における比較対照用基礎研究-重粒子線治療の生物学的考察のための基礎研究-
11J175	今井高志	今井高志	マウスモデルを用いた炭素イオン線治療と樹状細胞療法の併用療法の研究

11J178	藤田真由美	藤田真由美	放射線照射によるヒト癌由来細胞株の浸潤能変化とその抑制に有効な阻害剤の探索
12J183	佐藤克俊	佐藤克俊	局所再発腫瘍における炭素イオン線抵抗性獲得とそれに伴う転移に関わる性質変化に関する研究
12J185	野村大成	古澤佳也	ヒトがん組織等移植 SCID マウスを用いた重粒子線治療の有効性・安全性の研究
13J186	松本文彦	唐澤久美子	頭頸部癌における EGFR,IGF-1R と重粒子線の関係の検討
13J187	TINGANELLI, Walter	小池幸子	Immune system-mediated radiation effect
11J265	森田 隆	笠井清美	哺乳動物 ES 細胞に対する重粒子線の影響の解析
13J272	村山千恵子	古澤佳也	重粒子線治療成績向上を目的とした正常組織障害防護薬の研究開発
11J277	田畑哲之	村上 健	重粒子線利用による植物品種識別法の開発
11J278	下川卓志	下川卓志	重粒子線照射による肺晩発障害機構の解明
12J281	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子（炭素）線の生物影響に対する抗酸化剤の影響
13J285	高井伸彦	鵜澤玲子	重粒子線に脆弱性を示す脳部位の障害機序の解明
13J301	MOELLER, Ralf	岡安隆一	Intercomparison study of astrobiological model systems in their response to major components of the galactic cosmic radiation (STARLIFE project)
13J302	MOELLER, Ralf	岡安隆一	Molecular characterization of different error-prone DNA repair pathways in heavy ion irradiated <i>Bacillus subtilis</i> spores: systematic studies of the temporal DNA repair cascade from germination to outgrowth (hiiSPORES)
13J303	馬嶋秀行	松本謙一郎	ヒト神経細胞 SK-N-SH 細胞における重粒子線による酸化ストレス影響およびヒドロキシアパタイトに対する重粒子線の効果
13J306	WU, Honglu	古澤佳也	mFISH and mBAND study of chromosome aberrations induced by high-LET radiation
13J307	KIM, Eun Ho	古澤佳也	Radiosensitization of Metformin in HCC to low and high LET radiation
13J308	西原昌宏	古澤佳也	重粒子線照射による多年生植物の突然変異に関する研究
13J309	KATO, Takamitsu	藤森 亮	Visualization of single strand break and double strand breaks along with heavy ion tracks
12J335	澤尻昌彦	村上 健	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
11J356	長谷川正俊	村上 健	放射線抵抗性腫瘍細胞の生存と分化に対する重粒子線の影響
11J361	藤森 亮	藤森 亮	次世代がん治療標的分子に対する粒子線の効果に関する研究
11J363	横堀伸一	吉田 聡	微生物の重粒子線照射下での生存条件の検討
11J364	ZHANG, Hong	王 冰	Relationship between telomere length and radiosensitivity of human cancer cell lines induced by heavy ion irradiation
12J366	益谷美都子	岡安隆一	DNA 修復応答阻害剤の重粒子線及び低 LET 放射線に対する効果増強作用
12J368	劉 翠華	劉 翠華	重粒子線における中皮腫細胞致死メカニズムおよび潜在的致死損傷修復の LET および加速核種依存性の検討
12J371	崔 星	崔 星	消化器癌幹細胞に対する重粒子線照射による細胞生存と DNA 修復への影響
13J372	LI, Qiang	古澤佳也	Autophagy contributes to sensitivity or resistance of tumor cells to high-LET radiations
13J375	中島菜花子	中島菜花子	重粒子線による DNA 損傷応答を制御するエピジェネティクスの研究
11J376	松本英樹	古澤佳也	重粒子線がん治療における低線量被ばくによる組織幹細胞の動態解明
11J379	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線分割照射における培養細胞の生物効果に関する研究
11J382	ZHOU,	古澤佳也	Evaluation of tumorigenic risk of highly energetic particles.

11J384	高橋美智子	古澤佳也	重イオンビーム照射による栄養ストレス耐性植物の作出と原因遺伝子の同定
12J385	DURANTE, Marco	古澤佳也	Oxygen Enhancement Ratio of heavy ions in partial hypoxic conditions
12J386	XUE, Lian (薛/蓮)	古澤佳也	Mechanism of DNA damage and Mutation in Mammalian cells induces by Low Dose Heavy Ions
12J387	SHAO, Chunlin	古澤佳也	HZE particle irradiation-induced signals and its downstream cell responses
12J389	二宮康晴	二宮康晴	XRCC4に着目した重粒子線作用機序に関する研究
12J390	唐澤久美子	唐澤久美子	乳癌の炭素イオン線感受性に関する研究
12J391	若月 優	若月 優	放射線抵抗性とバイスタンダー効果の関係
12J393	秋山(張) 秋梅	鈴木雅雄	各種重粒子線による酸素ラジカル経路細胞損傷とその防御・修復機構
12J394	平井崇久	岡安隆一	がんの陽子線治療と重粒子線治療の生物効果の比較と増感剤の検討
12J395	藤澤 寛	藤森 亮	相同組換え修復に関与する修復タンパク質の挙動に関する研究
12J396	松本孔貴	松本孔貴	局所制御と転移抑制を目指した放射線との併用療法の検討
13J398	中山文明	中山文明	FGF1 シグナルの重粒子線感受性に関する研究
13J399	BAUMSTARK-K HAN, Christa	小西輝明	Cell death bypass mechanisms in DNA damage response of mammalian cells after exposure with heavy ions relevant for Space radiation environment
13J401	SIHVER, Lembit	村上 健	Radiation quality on sub-cellular level: correlation of physical characteristic of heavy ion beams with scavenger-controlled plasmid DNA damage
13J402	坪井康次	平山亮一	炭素線により生じる DNA 損傷とその修復メカニズムの解明
13J403	CHOI, Eunae	松藤成弘	Modeling the biological response including three “Rs”, to fractionated carbon beam irradiation
13J404	ZHOU, Libin	古澤佳也	Characterization and Target-select Identification of Genomic Variations Induced by Heavy Ion Irradiation in Plants
13J405	柴田淳史	中島菜花子	分子モデリングにより開発した新規相同組換え修復阻害剤の重粒子線治療における増感効果の解析
13J406	STAAF, Elina	古澤佳也	Biological Effects of Dual Bragg Peak Carbon ion exposure
13J424	伊藤 敦	古澤佳也	高 LET 粒子線による DNA 酸化損傷生成の可視化
11J452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線照射による細胞損傷応答とその応用
13J462	LE SECH, Claude	古澤佳也	STUDY of CANCEROUS CELLS DEATH RATE -HeLa , U87- LOADED with HIGH-Z ATOMS -platinum and gold- IRRADIATED with CARBON IONS
12J467	高橋昭久	古澤佳也	重粒子線による生と死のシグナル制御機構の解明
12J468	平山亮一	平山亮一	重粒子線による有・低酸素環境下での RBE ならびに OER
12J472	清水喜久雄	古澤佳也	重粒子線による DNA 損傷と突然変異誘発機構の解析
12J487	井出 博	古澤佳也	重粒子線が誘発する DNA-タンパク質クロスリンク損傷の除去動態
12J488	寺東宏明	古澤佳也	重粒子線誘発クラスターDNA 損傷の複雑性解析とその生物効果の解明
12J491	松本孔貴	松本孔貴	分割照射の転移への影響
12J492	斎藤裕一郎	平山亮一	グリオーマ幹細胞の重粒子線 DNA 損傷応答
11J494	矢島浩彦	矢島浩彦	重粒子線による DNA 二本鎖切断に対する初期応答の分子生物学的解析
11J495	NICKOLOFF, Jac A.	藤森 亮	Genetic Control of the DNA-repair Response to Photon and Hardron-particle Radiation
11J496	古澤佳也	古澤佳也	重粒子線のトラック構造の広がり と生物効果

12J497	AUTSAVAPROM PORN, Narongchai	鈴木雅雄	Intercellular Communication and Heavy Ions-induced Bystander Effects:Application of Nanotechnology in Cancer Therapy
12J499	松尾陽一郎	古澤佳也	蛍光修飾オリゴヌクレオチドを用いた放射線による生体分子の損傷量評価手法に関する研究
(物理・工学)			
13H005	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
13H026	松多健策	北川敦志	偏極不安定核ビームによる核モーメント及び固体物性
13H028	白井敏之	白井敏之	がん治療用加速器の総合的研究
13H032	東 俊行	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
12H045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による気体分子の電離過程の研究
12H060	河野俊之	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
12H093	福田光順	北川敦志	重粒子線による核反応断面積の研究
12H095	久保山智司	岩田佳之	半導体の放射線の影響に関する研究
12H105	小林正規	村上 健	放射線による音響信号の形成とその伝播機構
13H111	佐々木慎一	村上 健	高エネルギー重荷電粒子に対する気体の W-値の系統的測定 II
11H138	山内知也	北村 尚	固体飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造
12H157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
12H158	松藤成弘	松藤成弘	治療ビーム中の中性子・荷電粒子フラグメントによる生物効果に関する研究
13H177	河野俊之	稲庭 拓	核破砕反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
13H180	中川清子	村上 健	重イオン照射によりメタノール中に生成するラジカル量の研究
13H186	鷲尾方一	村上 健	重イオンビームのエネルギー付与特性を利用したナノ空間制御材料の創製
11H189	寺沢和洋	内堀幸夫	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答
12H212	久下謙一	小平 聡	銀塩感光材料を用いた飛跡像の蛍光標識化による微細飛跡検出システムの開発
11H233	BURMEISTER, Soenke	北村 尚	Space Radiation Dosimetry-Energetic Particle Detection with active Instruments for Space Missions
11H238	久保謙哉	北川敦志	不安定核ビームを応用したインビーム・メスバウアー分光法による物質科学の研究
11H244	小林俊雄	高田栄一	重 RI ビーム粒子識別用検出器のビーム試験
11H248	PINSKY, Lawrence	内堀幸夫	Heavy Ion Response of the TimePix Version of the Medipix2 Technology In Preparation For Use In Space Radiation Dosimetry Applications
12H252	魚住裕介	松藤成弘	生体元素からの中性子およびガンマ線生成断面積の測定
12H262	為ヶ井 強	北村 尚	粒子線照射を用いた鉄系超伝導体における臨界電流増強とギャップ関数の同定
12H264	増田公明	村上 健	重イオンに対する無機シンチレーターの応答特性
13H270	小平 聡	小平 聡	重イオン照射による CR-39 における局所放射線損傷メカニズムの研究
11H281	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水分解：気体生成物のオンライン収率測定
11H282	BERGER, Thomas	北村 尚	Ground Based Verification of a European Crew Personal Active Dosemeter (EuCPAD) for Astronauts
11H284	高田義久	松藤成弘	粒子線ブロードビーム照射法の高精度化と省力化の研究
11H285	山谷泰賀	山谷泰賀	重粒子線照射野イメージングのための OpenPET 装置開発に関する研究
11H286	小平 聡	小平 聡	CR-39 を用いた高エネルギー荷電粒子が人体内中に生成する短飛程二次粒子の線量寄与の研究
11H287	田口光正	村上 健	重粒子線治療用天然高分子ゲル線量計の開発
11H290	三原基嗣	北川敦志	物性プローブとしての高偏極不安定核ビーム生成法の開発

12H291	泉川卓司	福田茂一	粒子線 CT のためのシリコンストリップ検出器の開発
12H295	川崎賀也	北村 尚	宇宙ステーション暴露部で使用する光検出器読出用集積回路の重粒子線による影響
12H296	長江大輔	北川敦志	RI ビーム飛行時間検出器の開発
12H297	前山拓哉	福田茂一	LET 依存性のないゲル線量計の開発
12H298	東 明男	白井敏之	二次電子放出材質の研究
12H299	ZEITLIN, Cary J.	岩田佳之	Beam Tests of the Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER)
12H301	小林義男	北川敦志	インビーム・メスバウアー分光法による孤立プローブ核の化学反応の研究
12H302	小川達彦	村上 健	Benchmark experiment of activation induced by high-energy heavy ions
12H303	梶本 剛	高田真志	リッジフィルターで生成される 2 次中性子線のマイクロドメシトリ
12H307	大田晋輔	高田栄一	アクティブ標的による重陽子非弾性散乱の研究
12H308	郡司修一	北村 尚	小型衛星搭載用ガンマ線バースト偏光度検出器の性能評価
12H309	柳田 (宮本) 由香	小平 聡	銀活性リン酸塩ガラスの LET 依存性
12H312	西村太樹	北川敦志	重粒子線による超許容ベータ崩壊の研究
13H313	齋藤 究	村上 健	重荷電粒子に対する希ガスシンチレーションの蛍光効率とエネルギー分解能に関する研究
13H314	OBERTELLI, Alexandre	高田栄一	Performance measurement of MINOS
13H315	渡辺賢一	古場裕介	治療中線量オンラインモニタリングに向けた小型線量計の開発
13H317	井関 康	古川卓司	重粒子線照射装置の開発
13H318	阿部康志	北川敦志	固体水素標的を用いた、陽子ドリップライン近傍核生成法の開発
13H319	ROSENFELD, Anatoly B	松藤成弘	Out of Field Dose Profile from Therapeutic Hadron Therapy Beams
13H320	眞正浄光	古場裕介	熱蛍光板状線量計による重粒子線の線量と線質分布に関する研究
13H321	増田公明	村上 健	重イオンによるエアロゾル粒子生成効率
13H322	HIRN, Attila	内堀幸夫	On-ground calibration of the 3-dimensional silicon detector space dosimetry telescope TRITEL with energetic heavy ions
13H323	NASCIMENTO, Luana de	小平 聡	Radioluminescence and Optically Stimulated Luminescence studies of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C in hadron beams
13H324	越水正典	古場裕介	重粒子線照射によるリチウムイオン電池材料におけるイオン伝導チャネルの形成
13H325	埜 隆志	村上 健	赤外線照射による無機シンチレータの放射線損傷からの回復の研究
13H326	LEE, Jaejin	内堀幸夫	Calibration of prototype TEPC and personal dosimeter designed for International Space Station application
<b>平成 26 年度</b>			
<b>課題番号</b>	<b>課題申請者</b>	<b>所内対応者</b>	<b>課題名</b>
(治療・診断)			
12L083	今井礼子	今井礼子	骨盤肉腫における重粒子線治療後の神経障害解析
13L087	小藤昌志	小藤昌志	頭頸部腫瘍に対する炭素イオン線治療後の滲出性中耳炎の危険因子に関する研究
13L090	高橋 渉	山本直敬	早期肺癌への炭素線治療に伴う肺機能障害の検討: 1 回照射における肺機能変化の評価およびその予測因子に関する研究
14L091	高木 亮	高木 亮	頭頸部領域炭素イオン線治療における照射野近傍の体内金属の影響

14L092	宮本忠昭	山本直敬	悪性中皮腫 (MPM) に対する炭素線治療のフィージビリティスタディ
14L093	桃原幸子	桃原幸子	Bland-Altman 解析による肺癌患者 FDG-PET/CT の各種集積評価指標の統計的比較
14L094	大橋靖也	大橋靖也	<sup>11</sup> C-Methionine PET 集積指標 TNR、SUVmax と新しい指標 SUVpeak の統計的比較 : 頭頸部悪性黒色腫頸部リンパ節症例
14L095	長縄憲亮	長縄憲亮	炭素イオン線治療による頭頸部粘膜悪性黒色腫の肉眼的腫瘍体積(GTV)の経時的変化の解析
(生物)			
13J132	小泉雅彦	佐藤克俊	重粒子線照射によるがんの転移と血管新生抑制機序の解明
12J157	鵜澤玲子	鵜澤玲子	粒子線分割照射による正常組織反応の研究
14J164	吉田由香里	鵜澤玲子	重粒子線至適分割照射法開発の為の基礎研究
14J175	馬 立秋	馬 立秋	マウスモデルを用いた炭素イオン線治療と樹状細胞療法の併用療法の研究
14J178	藤田真由美	藤田真由美	放射線照射によるヒト癌由来細胞株の浸潤能変化とその機序解明
12J183	佐藤克俊	佐藤克俊	局所再発腫瘍における炭素イオン線抵抗性獲得とそれに伴う転移に関わる性質変化に関する研究
12J185	野村大成	鵜澤玲子	ヒトがん組織等移植 SCID マウスを用いた重粒子線治療の有効性・安全性の研究
13J186	松本文彦	唐澤久美子	頭頸部癌における EGFR, IGF-1R と重粒子線の関係の検討
14J188	柴田淳史	中島菜花子	重粒子線照射後のがん治療標的分子 NKG2D 発現誘導機構の解明
14J191	長谷川正俊	村上 健	神経系腫瘍幹細胞を標的とした重粒子線治療の有効性の検討
14J192	若月 優	若月 優	LET の異なる炭素イオン線と抗癌剤併用時の増感効果の解明
14J265	森田 隆	笠井清美	DNA 修復遺伝子の変異によるほ乳動物細胞への重粒子線の影響の解析
13J272	村山千恵子	平山亮一	重粒子線治療成績向上を目的とした正常組織障害防護薬の研究開発
14J277	松山知樹	下川卓志	重粒子線利用による植物品種識別法の開発
14J278	下川卓志	下川卓志	重粒子線照射による有害事象の発症機序の解明と予防
12J281	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子 (炭素) 線の生物影響に対する抗酸化剤の影響
13J285	高井伸彦	鵜澤玲子	重粒子線に脆弱性を示す脳部位の障害機序の解明
14J286	田中 薫	田中 薫	成体マウスにおいて重粒子線によって誘導された適応応答の機構研究
14J287	吉岡公一郎	平山亮一	重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発
14J288	松本謙一郎	松本謙一郎	重粒子 (炭素) 線で誘発される組織のレドックス状態変化の画像解析
14J289	有村源一郎	下川卓志	重粒子線による有用天敵種作出に向けた基盤研究
14J290	今岡達彦	今岡達彦	重粒子線によるラット乳がん誘発の被ばく時年齢依存性メカニズム
13J301	MOELLER, Ralf	岡安隆一	Intercomparison study of astrobiological model systems in their response to major components of the galactic cosmic radiation (STARLIFE project)
13J302	MOELLER, Ralf	岡安隆一	Molecular characterization of different error-prone DNA repair pathways in heavy ion irradiated Bacillus subtilis spores: systematic studies of the temporal DNA repair cascade from germination to outgrowth (hiSPORES)
13J303	馬嶋秀行	松本謙一郎	ヒト神経細胞 SK-N-SH 細胞における重粒子線による酸化ストレス影響およびヒドロキシアパタイトに対する重粒子線の効果
13J307	KIM, Eun Ho	鵜澤玲子	Radiosensitization of Metformin to low and high LET radiation
13J308	西原昌宏	下川卓志	重粒子線照射による多年生植物の突然変異に関する研究

14J310	正岡 綾	正岡 綾	重粒子線を用いた新たな併用療法の探索
14J311	Hada, Megumi	岡安隆一	Chromosomal Aberrations in Human Lymphocytes and Fibroblasts after Exposure to Very Low Doses of High-LET Radiation
14J313	LIU Qiang (劉強)	勝部孝則	重粒子線に対する細胞応答における DNA 損傷応答関連因子の機能に関する研究
12J335	澤尻昌彦	村上 健	重粒子線の骨代謝におよぼす影響
14J361	藤森 亮	藤森 亮	次世代がん治療標的分子に対する粒子線の効果に関する研究
14J363	横堀伸一	吉田 聡	微生物の重粒子線照射下での生存条件の検討
12J366	益谷美都子	岡安隆一	DNA 修復応答阻害剤の重粒子線及び低 LET 放射線に対する効果増強作用
12J368	劉 翠華	劉 翠華	重粒子線における中皮腫細胞致死メカニズムおよび潜在的致死損傷修復の LET および加速核種依存性の検討
12J371	崔 星	崔 星	消化器癌幹細胞に対する重粒子線照射による細胞生存と DNA 修復への影響
13J372	LI, Qiang	平山亮一	Autophagy contributes to sensitivity or resistance of tumor cells to high-LET radiation
13J375	中島菜花子	中島菜花子	重粒子線による DNA 損傷応答を制御するエピジェネティクスの研究
14J376	松本英樹	平山亮一	重粒子線がん治療における低線量被ばくによる正常組織幹細胞の動態解明
14J379	鈴木雅雄	鈴木雅雄	重粒子線分割照射における培養細胞の生物効果に関する研究(2)異なる核種のイオンビーム分割照射効果と Elkind 修復を加味した細胞致死効果のモデル化
12J386	XUE, Lian (薛/蓮)	岡安隆一	Differential processing of low and high LET radiation induced DNA damage: Investigation of switch from ATM to ATR signaling
12J387	SHAO, Chunlin	小西輝昭	HZE particle irradiation-induced signals and its downstream cell responses
12J389	二宮康晴	二宮康晴	XRCC4 に着目した重粒子線作用機序に関する研究
12J390	唐澤久美子	唐澤久美子	乳癌の炭素イオン線感受性に関する研究
12J393	秋山(張)秋 梅	鈴木雅雄	各種重粒子線による酸素ラジカル経路細胞損傷とその防御・修復機構
12J395	藤澤 寛	藤森 亮	相同組換え修復に関与する修復タンパク質の挙動に関する研究
13J398	中山文明	中山文明	FGF1 シグナルの重粒子線感受性に関する研究
13J399	BAUMSTARK-K HAN, Christa	小西輝昭	Cell death bypass mechanisms in DNA damage response of mammalian cells after exposure with heavy ions relevant for Space radiation environment
13J402	坪井康次	平山亮一	炭素線により生じる DNA 損傷とその修復メカニズムの解明
13J403	CHOI, Eunae	松藤成弘	Modeling the biological response including three “Rs”, to fractionated carbon beam irradiation
13J405	柴田淳史	中島菜花子	分子モデリングにより開発した新規相同組換え修復阻害剤の重粒子線治療における増感効果の解析
14J407	三好憲雄	小久保年章	炭素線に増感作用のあるポルフィリン誘導体の実験腫瘍モデルによる検証
14J408	高橋昭久	平山亮一	がん幹細胞を標的とした重粒子線と NHEJ 修復阻害剤併用による抗腫瘍効果
14J409	Hong Mei	小西輝昭	Effects of carbon ion on expression of organic anion transporting polypeptides
13J424	伊藤 敦	平山亮一	高 LET 粒子線による DNA 酸化損傷生成の可視化
14J452	岡安隆一	岡安隆一	重粒子線照射効果を増進する因子の研究
13J462	LE SECH, Claude	平山亮一	STUDY of CANCEROUS CELLS DEATH RATE -HeLa, U87-LOADED with HIGH-Z ATOMS and NANOPARTICLES IRRADIATED with CARBON IONS



12J468	平山亮一	平山亮一	重粒子線による有・低酸素環境下での RBE ならびに OER
12J472	清水喜久雄	下川卓志	重粒子線による DNA 損傷と突然変異誘発機構の解析
12J487	井出 博	平山亮一	重粒子線が誘発する DNA-タンパク質クロスリンク損傷の除去動態
12J488	寺東宏明	平山亮一	重粒子線誘発クラスターDNA 損傷の複雑性解析とその生物効果の解明
12J491 (J396)	松本孔貴	鵜澤玲子	不均等分割照射による抗腫瘍効果と転移抑制効果
12J492	斎藤裕一朗	平山亮一	グリオーマ幹細胞の重粒子線 DNA 損傷応答
14J494	矢島浩彦	矢島浩彦	重粒子線に誘発される DNA 損傷応答の分子細胞生物学的解析
14J495	NICKOLOFF, Jac A.	藤森 亮	Genetic Control of the DNA-repair Response to Photon and Hardron-particle Radiation
12J499	松尾陽一郎	下川卓志	蛍光修飾オリゴヌクレオチドを用いた放射線による生体分子の損傷量評価手法に関する研究
(物理・工学)			
13H005	松藤成弘	松藤成弘	重粒子線治療照射法に関する総合的研究
13H028	白井敏之	白井敏之	がん治療用加速器の総合的研究
13H032	東 俊行	村上 健	結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起
12H045	松尾 崇	村上 健	高電離重イオン衝撃による気体分子の電離過程の研究
12H060	河野俊之	松藤成弘	重粒子ビームの線質測定に関する研究
12H093	福田光順	北川敦志	重粒子線による核反応断面積の研究
12H095	久保山智司	岩田佳之	半導体の放射線の影響に関する研究
12H105	小林正規	村上 健	放射線による音響信号の形成とその伝播機構
13H111	佐々木慎一	村上 健	高エネルギー重荷電粒子に対する気体の W-値の系統的測定 II
14H138	山内知也	北村 尚	高分子系飛跡検出器の応答特性を表す化学的クライテリオンの確立 Chemical criterion for the response of polymeric nuclear track detectors
12H150	Li, Qiang	北川敦志	Research on biological effects of radioactive ion beam
12H157	小林憲正	吉田 聡	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
12H158	松藤成弘	松藤成弘	治療ビーム中の中性子・荷電粒子フラグメントによる生物効果に関する研究
13H177	河野俊之	稲庭 拓	核破碎反応により生成される陽電子崩壊核を利用した照射野確認システムに関する研究
13H180	中川清子	村上 健	重イオン照射によりメタノール中に生成するラジカル量の研究
13H186	鷲尾方一	村上 健	重イオンビームのエネルギー付与特性を利用したナノ空間制御材料の創製
14H189	寺沢和洋	北村 尚	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答
12H212	久下謙一	小平 聡	銀塩感光材料を用いた飛跡像の蛍光標識化による微細飛跡検出システムの開発
14H233	BURMEISTER, Soenke	北村 尚	Space Radiation Dosimetry-Energetic Particle Detection with active Instruments for Space Missions
14H238	久保謙哉	北川敦志	不安定核ビームを応用したインビーム・メスバウアー分光法による物質科学の研究
14H248	PINSKY, Lawrence	北村 尚	Advancing the Medipix Technology For Use In Space Radiation Monitoring and Dosimetry Applications
12H252	魚住裕介	松藤成弘	生体元素からの中性子およびガンマ線生成断面積の測定
12H262	為ヶ井 強	北村 尚	粒子線照射を用いた鉄系超伝導体における臨界電流増強とギャップ関数の同定
13H277	中嶋 大	北村 尚	宇宙硬 X 線精密撮像分光観測に向けた CCD 素子・ASIC 素子の放射線耐性の実証
14H281	勝村庸介	村上 健	重粒子線による水分分解：気体生成物のオンライン収率測定

14H282	BERGER, Thomas	北村 尚	Ground Based Verification of a European Crew Personal Active Dosimeter (EuCPAD) for Astronauts- Flight Model Verification
14H284	高田義久	松藤成弘	粒子線ブロードビーム照射法の高精度化と省力化の研究
14H285	山谷泰賀	山谷泰賀	重粒子線照射野イメージングのための OpenPET 装置開発に関する研究
14H286	小平 聡	小平 聡	CR-39 を用いた高エネルギー荷電粒子が人体内部中に生成する短飛程二次粒子の線量寄与の研究
14H287	田口光正	村上 健	多糖類ゲルによる重粒子線治療用ポリマーゲル線量計の開発
14H290	三原基嗣	北川敦志	物性プローブとしての高偏極不安定核ビーム生成法の開発
12H291	泉川卓司	福田茂一	粒子線 CT のためのシリコンストリップ検出器の開発
12H293	上坂（黒川）明子	岩田佳之	Performance test of a Si detector array used for the Coulomb breakup experiment at 250 MeV/u
12H296	長江大輔	北川敦志	RI ビーム飛行時間検出器の開発
12H297	前山拓哉	福田茂一	LET 依存性のないゲル線量計の開発
12H298	東 明男	白井敏之	二次電子放出材質の研究
12H301	小林義男	北川敦志	インビーム・メスバウアー分光法による孤立プローブ核の化学反応の研究
12H302	小川達彦	村上 健	プラグメント生成反応断面積の角度・エネルギー依存性測定
12H307	大田晋輔	高田栄一	アクティブ標的による重陽子非弾性散乱の研究
12H308	郡司修一	北村 尚	小型衛星搭載用ガンマ線バースト偏光度検出器の性能評価
12H309	柳田（宮本）由香	小平 聡	銀活性リン酸塩ガラスの LET 依存性
12H312	西村太樹	北川敦志	重粒子線による超許容ベータ崩壊の研究
13H313	齋藤 究	村上 健	重荷電粒子に対する希ガスシンチレーションの蛍光効率とエネルギー分解能に関する研究
13H315	渡辺賢一	古場裕介	治療中線量オンラインモニタリングに向けた小型線量計の開発
13H318	阿部康志	北川敦志	固体水素標的を用いた、陽子ドリップライン近傍核生成法の開発
13H319	ROSENFELD, Anatoly B	松藤成弘	In field and Out of field Dose Profile from Therapeutic Hadron Therapy Beams
13H320	眞正浄光	古場裕介	熱蛍光板状線量計による重粒子線の線量と線質分布に関する研究
13H321	増田公明	村上 健	重イオンによるエアロゾル粒子生成効率
13H322	HIRN, Attila	北村 尚	On-ground calibration of the 3-dimensional silicon detector space dosimetry telescope TRITEL with energetic heavy ions
13H323	NASCIMENTO, Luana de	小平 聡	Radioluminescence and Optically Stimulated Luminescence studies of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C in hadron beams
13H326	LEE, Jaejin	北村 尚	Calibration of TEPC and personal dosimeter designed for ISS(International Space Station) dose measurement
14H327	村石 浩	古場裕介	増感紙-EMCCD カメラを用いた重粒子線 CT による大型被写体の撮影
14H328	Vynckier, Stefaan	福村明史	Dosimetry for light -ion beams
14H329	銭廣十三	高田栄一	大強度重イオンビームの飛跡決定及び粒子識別検出器開発
14H330	梶本 剛	濱野 毅	PID-TEPC を用いたマイクロドシメトリによる陽子線 RBE の評価
14H331	磯部忠昭	高田栄一	中間エネルギー原子核衝突実験の為の飛跡検出器用読み出し系の性能評価
14H332	松藤成弘	松藤成弘	重粒子ドシメトリーにおける線質依存性のトラック構造モデルを用いた評価に関する研究
14H333	Heilbronn, Lawrence H	岩田佳之	Secondary Neutron Yields from 4He-induced reactions at 100 and 230 MeV/nucleon
14H334	Zeitlin,	岩田佳之	Calibration of the RAD Instrument for Dosimetry and Isotope

	Cary J.		Identification
14H335	田中隆宏	福村明史	熱量計測を基にした治療用重粒子線の吸収線量の絶対評価
14H336	若林源一郎	古場裕介	CsI シンチレータの放射化を用いた中性子測定法の開発
14H337	石野宏和	北村 尚	宇宙背景放射偏光測定科学衛星実験で使用する部材の放射線耐性の研究
14H338	山口一郎	濱野 毅	重イオン線照射による歯牙のインビボ EPR 信号の測定
14H339	ARICO Giulia	松藤成弘	Enhancement of a New Method for Ion Spectroscopy Using Different Primary Beams
14H340	中川公一	松本謙一郎	重粒子線で生ずるスクロースラジカルの ESR イメージングによる画像化

HIMAC20 年の歩み

－HIMAC20 周年記念 研究成果要覧－（PDF 版）

---

2015 年 8 月

放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

発行 鎌田 正

（放医研 重粒子医科学センター）

編集 下川卓志、濱野毅、村上健

（放医研 重粒子医科学センター）

---

本誌の内容についてのお問い合わせは、下記に御連絡下さい。

〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

放射線医学総合研究所重粒子医科学センター国際重粒子医科学研究プログラム

電話：043-251-2111

FAX：043-251-1840

---

ISBN 978-4-938987-96-1