



N I R S - M - 2 8 4

平成 2 6 年度

サイクロトロン利用報告書

独立行政法人放射線医学総合研究所

目 次

1. サイクロトロンの運転実績と利用状況	(1)
2. サイクロトロンの改良・開発	(9)
3. サイクロトロンの分子プローブの製造・開発への利用状況	(13)
4. 物理研究	
4-1. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究	(17)
4-2. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究	(23)
4-3. 核破砕片生成二重微分断面積の測定	(29)
4-4. 最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定	(34)
4-5. 陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究	(37)
4-6. 重粒子ドシメトリーにおける線質依存の評価	(40)
4-7. 放射性遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験	(42)
4-8. 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分析	(44)
5. 生物研究	
5-1. 陽子線の生物効果の研究	(49)
5-2. プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析	(52)
5-3. 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果	(54)
6. 粒子線検出器の開発	
6-1. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発	(57)
6-1-a. Evaluation of Detection Technique of EPT and HET Detectors for Solar Orbiter using 50 MeV Deuteron Beam at NIRS	(61)
6-2. Additional Calibration of the Radiation Assessment Detector (RAD) Using ^1H and ^2H Beams at the NIRS Cyclotron	(66)
7. 粒子線による損傷試験	
光学機器の耐放射線性能に関する研究	(69)
8. 有料ビーム提供	
NIRS-930 における有料提供の利用状況	(73)
9. 研究成果一覧	(75)
10. 関連資料	
平成26年度第Ⅰ期・Ⅱ期マシンタイム予定表	(85)

1. サイクロトロンの運転実績と利用状況

サイクロトロン運転実績と利用状況

OPERATION RESULTS AND UTILIZATION OF NIRS CYCLOTRON

杉浦 彰則^A、北條 悟^A、片桐 健^A、中尾 政夫^A、田代 克人^A、鈴木 和年^A、
野田 章^A、岡田 高典^B、高橋 勇一^B、井 博志^B、神谷 隆^B、野田 耕司^A
Akinori Sugiura^A, Satoru Hojo^A, Ken Katagiri^A, Nakao Masao^A, Katsuto Tashiro^A,
Kazutoshi Suzuki^A, Akira Noda^A, Takanori Okada^B, Yuichi Takahashi^B, Hiroshi Ii^B,
Takashi Kamiya^B, Koji Noda^A

^A：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

^B：加速器エンジニアリング株式会社

概要

放射線医学総合研究所のサイクロトロン棟には、大型サイクロトロン(NIRS-930)と小型サイクロトロン(HM-18)の2台のサイクロトロンが設置されている[1]。小型サイクロトロンは放射性薬剤の製造・研究専用、大型サイクロトロンは放射性薬剤の製造・研究を中心に物理研究、生物研究、粒子線検出器の開発、粒子線による損傷試験、有料ビーム提供が行われた。大型サイクロトロンではビーム開発もっており、新規供給ビームとして24 MeV 水素分子、50 MeV 炭素を新たに供給し、また、利用者の要望により20 MeV ネオンの調整を行っている。また、大型サイクロトロンでは月に1回程度で土曜日のビーム提供運転を行い、計11回行った。

本報告書では、平成26年度における2台のサイクロトロンの運転実績と利用状況、運用体制について報告する。

1. 大型サイクロトロン

1-1. 運転実績

平成26年度の総運転時間は1789.6時間であった。加速粒子・エネルギー別の運転時間を表1に、加速粒子別の運転時間割合を図1に示す。加速粒子・エネルギー別の運転時間では、放射線薬剤の製造・研究に利用される30 MeV 陽子が228.1時間、18 MeV 陽子が186.6時間、34 MeV ヘリウムが284.5時間となり、物理研究、生物研究、粒子線検出器の開発、粒子線による損傷試験、有料ビーム提供といった幅広い分野で利用される70 MeV 陽子が415.8時間となっている。この3つのエネルギーの陽子と今年度から供給頻度が多かった34 MeV ヘリウムが多く利用されており、総運転時間の62.3%を占めている。

加速粒子別運転時間割合では、放射線薬剤の製造・研究や物理実験等で主に利用されている陽子が56.8%を占めている。その他の粒子では、水素分子が7.7%、重陽子が7.4%、ヘリウムが22.8%、炭素が1.3%、ネオンが4.1%の割合となっている。放射線薬剤の製造・研究において内用療法に向けた治療薬の開発の頻度が多かったことから、重陽子やヘリウムの運転時間が増加している。その他の粒子の利用目的などについては、各利用目的の説明の項に後述する。

表1. 加速粒子・エネルギー別運転時間

陽子		水素分子		ヘリウム		ネオン	
エネルギー [MeV]	運転時間 [h]	エネルギー [MeV]	運転時間 [h]	エネルギー [MeV]	運転時間 [h]	エネルギー [MeV]	運転時間 [h]
80	10.8	27	34.3	100	24.3	120	60.3
70	415.8	24	103.4	75	46.3	*20	12.5
60	71.8			50	10.9		
50	32.8	重陽子		40	41.1	*入射テストのみ	
40	33.6	エネルギー	運転時間	34	284.5		
30	228.1	[MeV]	[h]				
25	6.2	50	22.7	炭素			
18	186.6	20	109.7	エネルギー	運転時間		
15	22.6			[MeV]	[h]		
10	8.0			50	23.5		

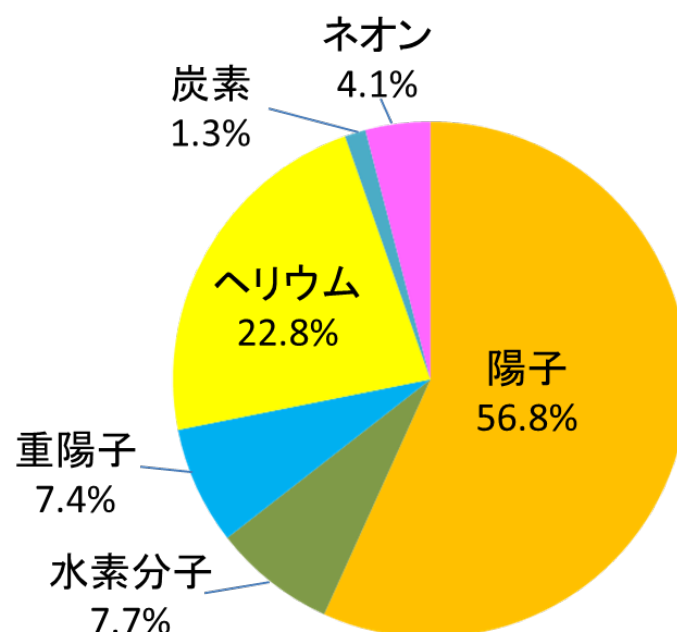


図1.加速粒子別運転時間割合

1-2. 利用状況

総運転時間の 1789.6 時間の利用内訳として、利用目的別の運転時間とその割合を表 2 に、利用目的別の運転時間割合を図 2 に示す。主目的である放射性薬剤の製造・研究には 864.9 時間の運転時間が当てられた。その他には、物理研究に 212.2 時間、生物研究に 65.3 時間、粒子線検出器の開発に 48.9 時間、粒子線による損傷試験に 9.0 時間、有料ビーム提供に 218.9 時間利用された。また、各ビーム開発に 357.9 時間、放射線安全測定に 12.5 時間が費やされた。

総運転時間からの割合でみると、約半分となる 48.3%が放射性薬剤の製造・研究にあてられている。同様におおよそ 1/3 となる約 31.0%が有料ビーム提供を含む多種多様な利用目的にあてられており、残りの 1/5 となる 20.7%が新たなビームエネルギーの調整や機器開発、ビームの質の改善のための調整運転にあてられた。

表2.利用目的別運転時間

目 的	時 間 [h]	割 合 [%]
(1) 放射性薬剤の製造・研究	864.9	48.3
(2) 物理研究	212.2	11.9
(3) 生物研究	65.3	3.7
(4) 粒子線検出器の開発	48.9	2.7
(5) 粒子線による損傷試験	9.0	0.5
(6) 有料ビーム提供	218.9	12.2
(7) ビーム開発	357.9	20.0
(8) 放射線安全測定	12.5	0.7
合 計	1789.6	100.0

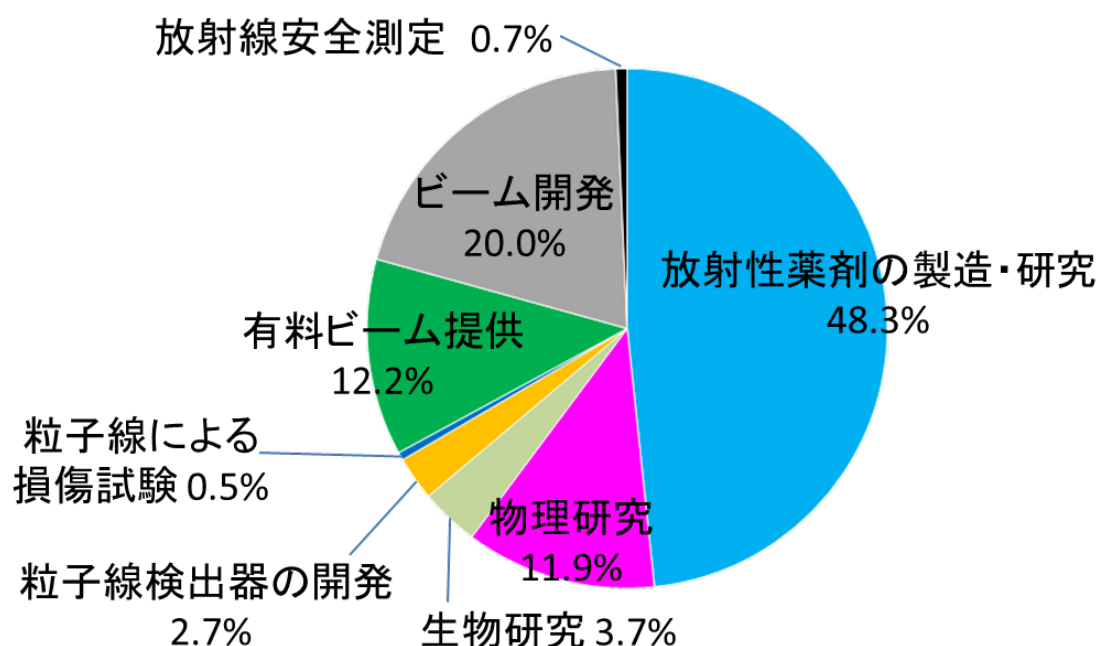


図 2.利用目的別運転時間割合

(1) 放射性薬剤の製造・研究

放射性薬剤の製造・研究[2]では、総運転時間の 48.3%にあたる 864.9 時間が利用された。粒子・エネルギー別に集計した利用時間の割合を図 3 に示す。利用時間を粒子別に割合を見ると、陽子が 43.0%、水素分子が 15.3%となっている。水素分子は解離後に陽子として照射しているため、陽子による照射を目的とした利用は 58.3%となる。それ以外の粒子では、重陽子が 10.6%、ヘリウムが 31.1%となっている。陽子のエネルギー別の利用状況は、 ^{89}Zr の製造に用いられた 15 MeV 陽子が 2.6%、 ^{11}C の製造に用いられた 18 MeV が 17.6%、 $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレータの製造や ^{68}Ge の製造に用いられた 30 MeV が 17.2%、 ^{67}Cu の製造に用いられた 60 MeV 陽子が 5.6%となっている。その他の核種では、 ^{64}Cu の製造に用いられた 24 MeV 水素分子が 11.3%、 ^{124}I の製造に用いられた 27 MeV 水素分子が 4.0%、 ^{177}Lu の製造に用いられた 20 MeV 重陽子が 10.6%、 $^{43,47}\text{Sc}$ 、 ^{67}Cu 、 ^{74}As 、 ^{155}Tb 、 ^{186}Re 、 ^{211}At の製造に用いられた 34 MeV ヘリウムが 21.0%、 ^{67}Cu の製造に用いられた 40 MeV ヘリウムが 4.7%、 ^{28}Mg の製造に用いられた 75 MeV ヘリウムが 5.4%であった。新たに供給を開始したエネルギーは 60 MeV 陽子、24 MeV 水素分子、20 MeV 重陽子、40 MeV ヘリウムとなっている。

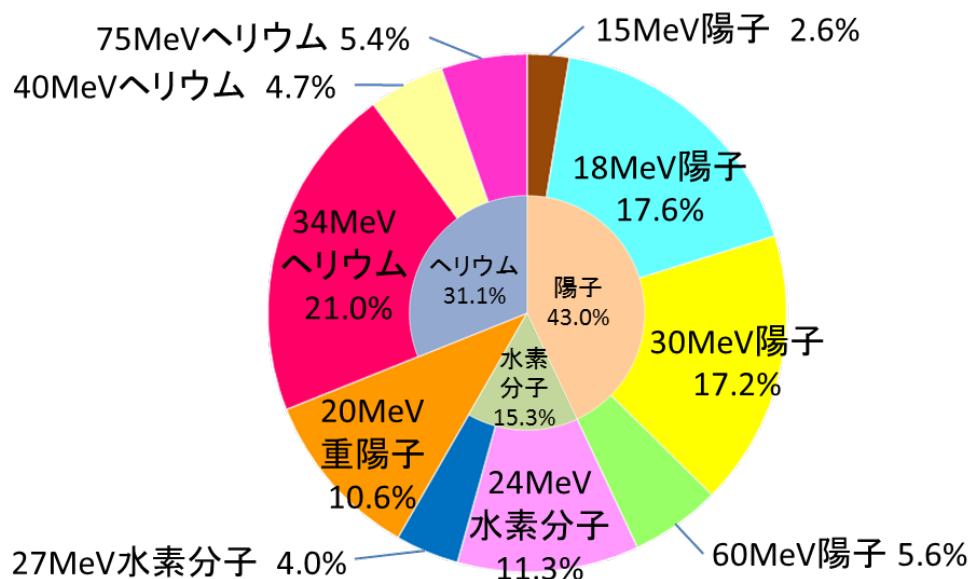


図 3.放射性薬剤の製造・研究における粒子・エネルギー別利用割合

(2) 物理研究

物理研究では、総運転時間の 11.9% である 212.2 時間が利用された。物理研究における粒子・エネルギー別利用割合を図 4 に示す。粒子別にみると、主に陽子が利用され 70.5% となっている。その他の粒子では、ヘリウムが 9.3%、炭素が 4.9%、ネオンが 15.3% と様々な粒子が利用されている。

物理研究では、6 課題のマシントimeが実施されており、それぞれの課題で利用された粒子とエネルギーは次のとおりである。

「高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究」[3]	70 MeV 陽子
「重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究」[4]	120 MeV ネオン
「核破砕片生成二重微分断面積の測定」[5]	50, 100 MeV ヘリウム、50 MeV 炭素
「最前方における陽子および重陽子生成断面積の測定」[6]	40 MeV 陽子
「陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究」[7]	30, 40, 50, 60, 70 MeV 陽子
「重粒子ドシメトリーにおける線質依存の評価」[8]	10, 50 MeV 陽子
「放射性遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験」[9]	50 MeV 陽子
「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分析」[10]	30 MeV 陽子

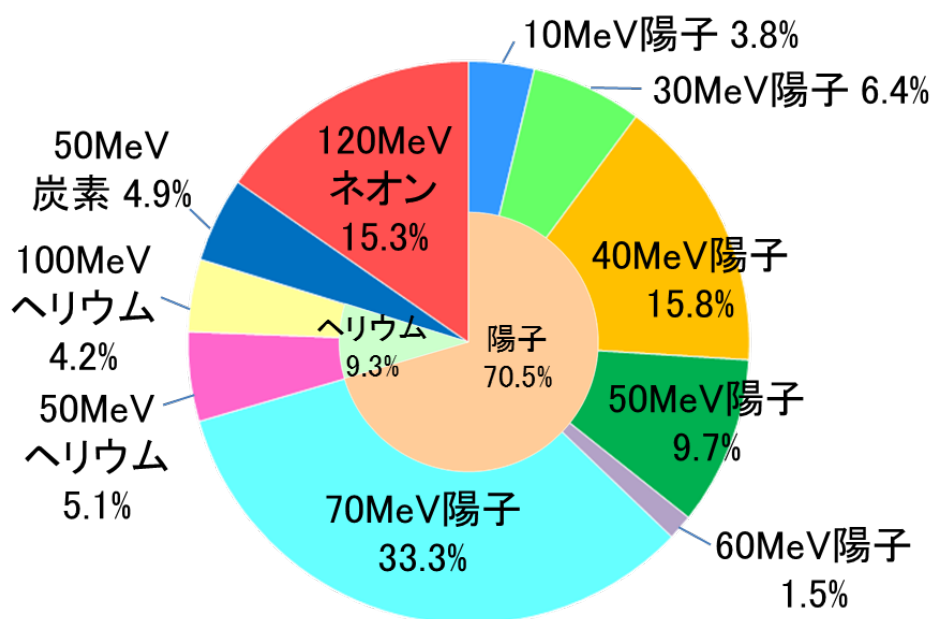


図 4. 物理研究における粒子・エネルギー別利用割合

(3) 生物研究

生物研究では、総運転時間の 3.7% にあたる 65.3 時間が利用された。生物研究の課題は 3 課題あるが、利用された粒子はすべて 70 MeV 陽子のみであった。

陽子線におけるブラックピーク近傍の RBE についての再検証を行った「陽子線の生物効果の研究」[11]や、粒子放射線治療における分割照射の効果を調査する「プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析」[12]や、DNA 二本鎖切断修復機構の違いによる酸素の増感効果を明らかにする「陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果」[13]が行われた。

(4) 粒子線検出器の開発

粒子線検出器の開発では、総運転時間の 2.7% に当たる 48.9 時間が利用された。粒子線検出器における粒子・エネルギー別利用割合を図 5 に示す。携帯型宇宙放射線線量計を評価するための「宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発」[14]や、放射線検出器のキャリブレーションを行った「Additional Calibration of the Radiation Assessment Detector (RAD) Using 1H and 2H Beams at the NIRS Cyclotron」[15]に利用された。「宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発」では、「Evaluation of Detection Technique of EPT and HET Detectors for Solar Orbiter using 50 MeV Deuteron Beam at NIRS」[16]も同時に行われた。粒子線検出器の開発にはエネルギーや核種が異なる場合でも検出されるようにさまざまな粒子やエネルギーが使われた。粒子別にみると、陽子が 29.8%、重陽子が 38.5%、ヘリウムが 31.7% となっている。

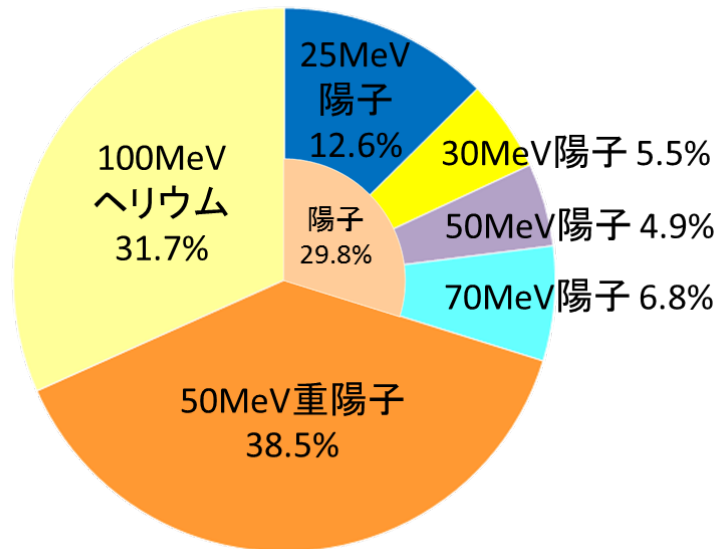


図5.粒子線検出器の開発における粒子・エネルギー別利用割合

(5) 粒子線による損傷試験

粒子線による損傷試験では、総運転時間の 0.5%に当たる 9.0 時間が利用された。利用された粒子はすべて 70 MeV 陽子のみであった。

国際宇宙ステーションに搭載を予定している装置の放射線耐性を調べる「光学機器の耐放射線性能に関する研究」[17]に利用された。

(6) 有料ビーム提供

有料ビーム提供では、総運転時間の 12.2%に当たる 218.9 時間が利用された。有料ビーム提供に利用された粒子は 70 MeV 陽子のみであった。主に宇宙放射線による電子機器への影響を評価するための利用となっている。[18]

(7) ビーム開発

ビーム開発には、総運転時間の 20.0%に当たる 357.9 時間が当てられた。ビーム開発における粒子・エネルギー別利用割合を図6に示す。粒子別にみると、陽子が 48.7%、水素分子が 1.5%、重陽子が 6.0%、ヘリウムが 28.8%、炭素が 3.7%、ネオンが 11.3%となっている。特に、放射性薬剤の製造・研究において重要度の高い $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレータ製造用に利用されている 30 MeV 陽子や、診断及び内用療法への利用が期待される ^{211}At や ^{67}Cu の製造等に利用されるヘリウム 34 MeV は、調整およびビーム確認を行う頻度が高くそれぞれ全体の 17.6%と 28.8%を占めている。

また、平成 26 年度の新規ビームとして、放射性薬剤の製造・研究用に 24 MeV 水素分子を、物理実験用に 50 MeV 炭素を供給した。また、利用者からの要望により Harmonic3 加速による 20 MeV ネオンを試みているが調整中である。

なお、60MeV 陽子、24 MeV 水素分子、20 MeV 重陽子、34 MeV ヘリウム、75 MeV ヘリウムについてターゲットで 20 μA 以上のビーム強度が出せるように再調整を行った。上記のビーム核種は放射性薬剤の開発研究において内用療法に用いられるため、さらに多くのビーム強度が求められている。サイクロトロン改良・開発[19]において、ビーム強度増強のため行った調整内容を記載する。

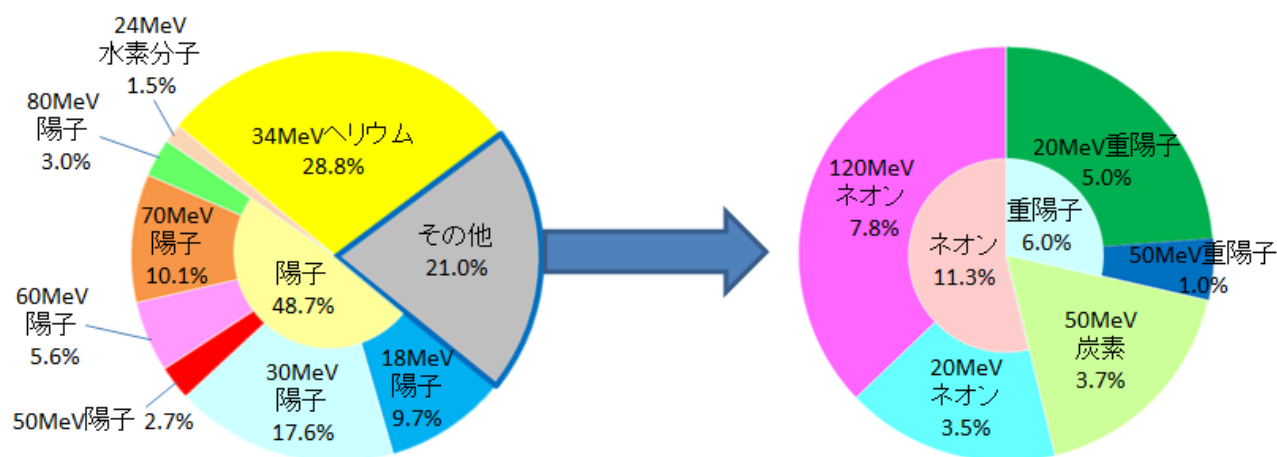


図6．ビーム開発における粒子・エネルギー別利用割合

2. 小型サイクロトロン

2-1. 運転実績

平成26年度の総運転時間は1597.9時間であった。粒子目的別の運転時間を表3に、粒子目的別の運転時間割合を図7に示す。

小型サイクロトロンでは、エネルギー固定で18 MeV陽子と9 MeV重陽子が供給可能である。18 MeV陽子の利用は総運転時間の93.0%に当たる1486.7時間であった。また、9 MeV重陽子の利用は総運転時間の3.5%に当たる56.5時間であった。その他には、調整運転で18 MeV陽子に54.0時間、9 MeV重陽子に0.8時間費やした。

表3. 小型サイクロトロンの運転時間

	18 MeV陽子	9 MeV重陽子	計
放射性薬剤の製造・研究	1486.7	56.5	1543.2
調整運転	54.0	0.7	54.7
計	1540.7	57.2	1597.9

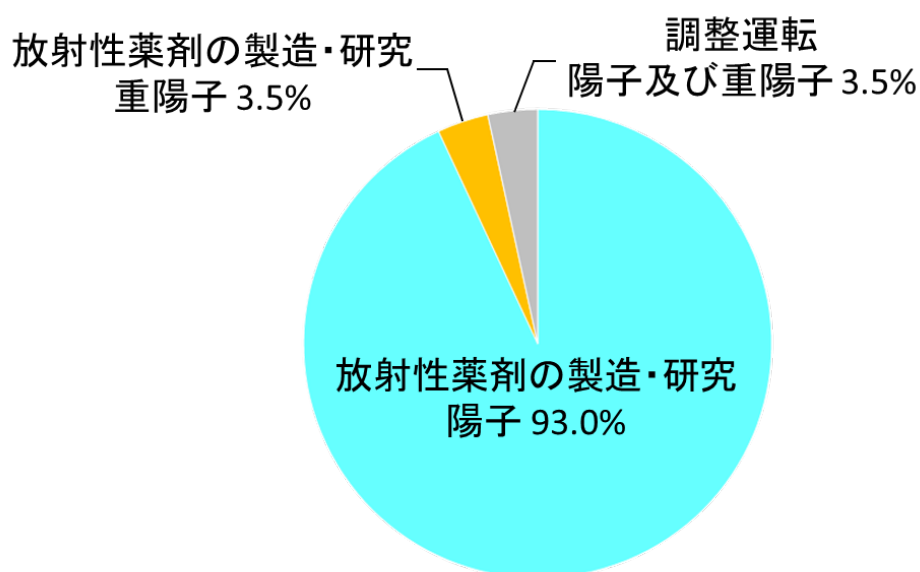


図7．小型サイクロトロンの運転時間割合

2-2. 利用状況

小型サイクロトロンは放射性薬剤の製造・研究[2]専用に利用されている。総運転時間のほとんどが18 MeV 陽子による ^{11}C や ^{13}N 、 ^{18}F などを用いた放射性薬剤の製造・研究に利用された。また、9 MeV 重陽子による ^{15}O を用いた放射性薬剤の製造・研究が行われた。なお、調整運転時間のうち、約半分が安全測定に伴うビーム確認に費やされている。残りの約半分がダミーDeeの固定ボルトの緩み等の不具合に伴うビーム確認等に費やされている。

3. 運用体制

3-1. 運転実績

大型および小型サイクロトロンでは、平日の8:30から17:00まで運転を行っている。大型サイクロトロンでは月に1回程度の土曜日に運転を行っている。平成26年度は、前期7回、後期4回の計11回の土曜日運転を行った。なお、実験者の要望がある場合には平日に限り19:00まで延長可能となっている。

マシンタイムは毎年2回に分けて募集している。2月上旬に4月から8月までの第Ⅰ期マシンタイムを、7月上旬に9月から3月までの第Ⅱ期マシンタイムを募集している。

参考文献

- [1] 北條 悟, 片桐 健, 中尾 政夫, 杉浦 彰則, 野田 章, 野田 耕司: 放医研のサイクロトロン NIRS-930 と HM-18 現状報告, 第 11 回日本加速器学会年会, 青森県青森市, 2014 年 8 月 9 日~11 日, pp.331
- [2] 張 明栄, 河村 和紀, 根本 和義, 鈴木 寿, 永津 弘太郎, 武井 誠, 石井 英樹, 藤永 雅之, 破入 正行: サイクロトロンの分子プローブの製造・開発への利用状況, 本誌 p13-p16
- [3] 西尾 禎治, 松下 慶一郎, 中村 哲志, 余語 克紀, 恒田 雅人, 青野 裕樹, 田中 創大, 株木 重人, 稲庭 拓, 杉浦 彰則, 北條 悟: 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究, 本誌 p17-p22
- [4] 大澤 大輔, 俵 博之, 曾我 文宣, 岩田 佳之, 平山 亮一, 松藤 成弘, 野田 章, 野田 耕司: 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究, 本誌 p23-p28
- [5] 佐波 俊哉, 山口 雄二, 魚住 裕介, 古場 裕介: 核破砕片生成二重微分断面積の測定, 本誌 p29-p33
- [6] 魚住 裕介, 橋口 太郎, 米重 英成, 園田 暁史, 山口 雄司, 古場 裕介: 最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定, 本誌 p34-p36
- [7] 小平 聡, 北村 尚: 陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究, 本誌 p37-p39
- [8] 松藤 成弘, 松山 哲大, 佐竹 佑介, 石田 祥大, 篠崎 真理, 三上 集, 下山 薫: 重粒子ドシメトリーにおける線質依存の評価, 本誌 p40-p41
- [9] 執行 信寛, 今富 宏祐, 三根 貴大, 池田 伸夫, 石橋 健二, 木村 健一, 高橋 定明, 平澤 勇人, 古場 裕介: 放射性遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験, 本誌 p42-p43
- [10] 山内 知也, 楠本 多聞, 池永 龍之介, 安田 修一郎, 小平 聡, 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分析, 本誌 p44-p47
- [11] 前田 淳子, Cartwright Ian, 藤沢 寛, 藤井 義大, 平川 博一, 北村 尚, 藤森 亮, 上坂 充, 鎌田 正, David Chen, 加藤 宝光: 陽子線の生物効果の研究, 本誌 p49-p51
- [12] 鈴木 雅雄, 稲庭 拓, 佐藤 眞二, 北村 尚, 村上 健: プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析, 本誌 p52-p53
- [13] 平山 亮一, 小原 麻希, 鶴澤 玲子, 劉 翠華, 内堀 幸夫, 北村 尚: 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果, 本誌 p54-p55
- [14] 内堀 幸夫, 北村 尚, 小平 聡, 小林 進悟: 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発, 本誌 p57-p60
- [15] C. Zeitlin, G. Weigle, Y. Tyler, D. Hassler, B. Ehresmann, and H. Kitamura: Additional Calibration of the Radiation Assessment Detector (RAD) Using 1H and 2H Beams at the NIRS Cyclotron, 本誌 p66-p68
- [16] Shrinivasrao Kulkarni, Jan Tammen, Robert Elftmann, Jan Steinhagen, Sebastian Boden, Sönke Burmeister, Robert Wimmer-Schweingruber, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Satoshi Kodaira: Evaluation of Detection Technique of EPT and HET Detectors for Solar Orbiter using 50 MeV Deuteron Beam at NIRS, 本誌 p61-p65
- [17] 滝澤 慶之, 川崎 賀也, 小川 貴代, 北村 尚, 内堀 幸夫: 光学機器の耐放射線性能に関する研究, 本誌 p69-p71
- [18] 杉浦 彰則, 北條 悟, 片桐 健, 中尾 政夫, 田代 克人, 鈴木 和年, 野田 章, 岡田 高典, 高橋 勇一, 井 博志, 神谷 隆, 野田 耕司: NIRS-930 における有料提供の利用状況, 本誌 p73-p74

- [19] 北條 悟, 片桐 健, 中尾 政夫, 村松 正幸, 杉浦 彰則, 鈴木 和年, 田代 克人, 野田 章, 岡田 高典, 高橋 勇一, 井 博志, 野田 耕司: サイクロトロンの改良・開発, 本誌 p9-p11

2. サイクロトロンの改良・開発

サイクロトロン改良・開発 IMPROVEMENT AT NIRS CYCLOTRON FACILITY

北條 悟^A、片桐 健^A、中尾 政夫^A、村松 正幸^A、杉浦 彰則^A、鈴木 和年^A、
田代 克人^A、野田 章^A、岡田 高典^B、高橋 勇一^B、井 博志^B、野田 耕司^A

Satoru Hojo^A, Ken Katagiri^A, Masao Nakao^A, Masayuki Muramatsu^A,
Akinori Sugiura^B, Kazutoshi Suzuki^B, Katsuto Tashiro^B, Akira Noda^A,
Takanori Okada^B, Yuichi Takahashi^B, Hiroshi Ii^A, and Koji Noda^A

A：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

B：加速器エンジニアリング株式会社

概要

大型サイクロトロンは、現在 Targeted Radionuclide Therapy (TRT) に向けた放射性同位元素の製造を中心に、基礎物理、生物実験、放射線検出器の開発等に利用されている[1]。TRT に向けた放射性同位元素 (RI) の製造では、高い強度のビームが要求されている。今年度は、34 MeV He²⁺ のビームにおいて、ターゲット電流 20 μ A のビーム要求を満たすことができた。また、重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究では、これまで 6 MeV/u の炭素および酸素による実験が行われてきて、さらに質量が高いネオン 6 MeV/u の要求があり、供給を行うことができた。装置の老朽化対策を行いながら、装置の改良開発もおこなっている。Q-magnet の更新や、これまで照光式押しボタンやポテンショメータを用いていた垂直入射制御系の PLC と PC による制御への改修が行われた。

1. 34 MeV He²⁺ ビーム調整

垂直照射 RI 製造コース C-9 コースにおいて、TRT にむけた放射性同位元素の製造方法の研究が行われている。そのなかでも、²¹¹At の製造方法の研究が進められており、昨年度より 34 MeV He²⁺ ビーム供給を行っている。これまで、15 μ A のビーム強度の供給は行っており、更に 20 μ A の強度要求が出され、調整運転を行った。

まず、加速中のビーム位相が、理想的な位相からのズレが大きかったため、トリムコイルによる等時性磁場と入射エネルギーの調整を行った [2]。調整前と調整後のビーム位相を図 1 に示す。ここでの位相は、理想的な加速位相を 0 としている。調整後は、ほぼ±5 度の範囲に収めることができた。

その後、効率改善のために、サイクロトロン内部のビーム調整を行った。調整前後での、ビーム強度および、効率を表 1 に示す。まず、入射エネルギーや中心領域の磁場の調整を行っている。その結果、サイクロトロンの中心に設置されているインфлекタ (Inflector) から、取り出し直前となる最外周 (R=920 mm) までの加速効率は 48% から 50% になった。さらにデフレクタの位置やハーモニックコイルの調整などにより、R=920 mm から取出し後 (Extracted) までのビーム取出し効率は、83% から 89% に上げることができている。その結果 Inflector からの加速-取出しの効率は 45% となり、Inflector でのビーム強度を 31.0 μ A から 50.9 μ A へ増やすことにより 22.8 μ A の取出し強度を実現することができた。

今後、更なるビーム強度増強を図るため、入射強度の増強やビームバンチャーの改良等を行っていく予定である。

表 1. 34 MeV He²⁺ ビーム強度および効率

	Inflector [μ A]	R=920 mm [μ A]	Extracted [μ A]	R=920 mm /Inflector	Extracted /R=920 mm	Extracted /Inflector
調整前	31.0	15.0	12.4	48%	83%	40%
調整後	50.9	25.5	22.8	50%	89%	45%

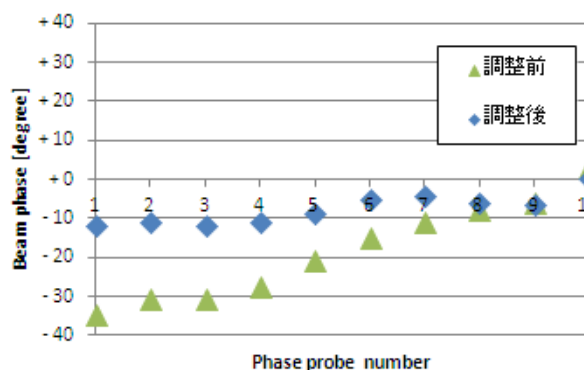


図 1 : 34 MeV He²⁺ ビーム位相調整結果

2. 120 MeV Ne ビーム調整

重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究では、これまで 6 MeV/u の炭素および酸素による実験が行われてきた。本年度は、6 MeV/u Ne¹⁰⁺ の要求があり、イオン源から供給可能な Ne⁶⁺ を 6 MeV/u への加速し、取出し後にビーム輸送ラインで荷電変換を行い、6 MeV/u Ne¹⁰⁺ としてビーム供給を行った。ここでは、6 MeV/u Ne⁶⁺ のビーム調整について述べる。

まず、ビーム位相の測定結果を元に、等時性磁場の調整を行った。その結果を図 2 に示す。Probe No.1 および調整前の No.2 では、ピックアップ信号が小さすぎて測定できなかった。そのため、No.3 より外側のビーム位相により等時性磁場の調整を行った。調整前のビームの位相は、Probe No.8 で 20 度以上ずれていたものに対し、等時性磁場の調整後では、±5 度の範囲に収めることができた。

その後、デフレクタの位置調整を行うことによりデフレクタ入口から取出し後までの効率を 64.2% から 78.6% へ改善することができた。これらの結果により、イオン源分析後から取出し後までのサイクロトロン全体の入射加速取出効率は、6.6% から 23.6% まで上げることができた。

次に課題となるのが、強度の増強である。イオン源からの Ne⁶⁺ の供給量増強を狙い、ガスマキシング用のサポートガスとしてメタンガス (CH₄) を用いてビームテストを行った。このときの価数分布を図 3 に示す。サポートガスを入れない場合の Ne⁶⁺ のビーム強度が 1 eμA であったのに対し、CH₄ サポートガスを入れて調整を行ったところ、6 eμA まで増やすことができた。この強度で入射、加速、取出しを行い、取出し後で 1.25 eμA を確認することができた。このときの入射加速取り出し効率は 20.8% であり、高い効率を維持したまま高強度化に成功した。この強度により、荷電変換後のターゲット位置でのビーム強度を必要最低限である 400 enA での供給を行うことができた。

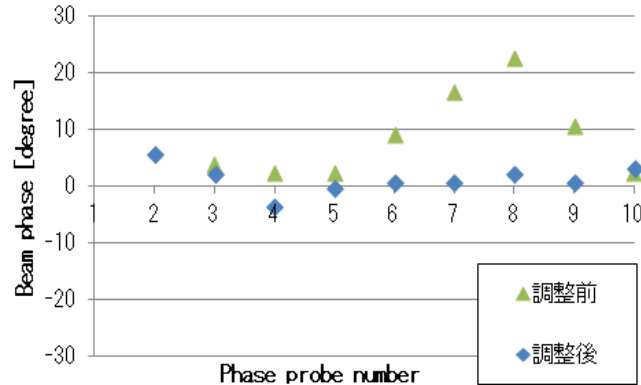


図 2: 6 MeV/u Ne⁶⁺ のビーム位相調整結果

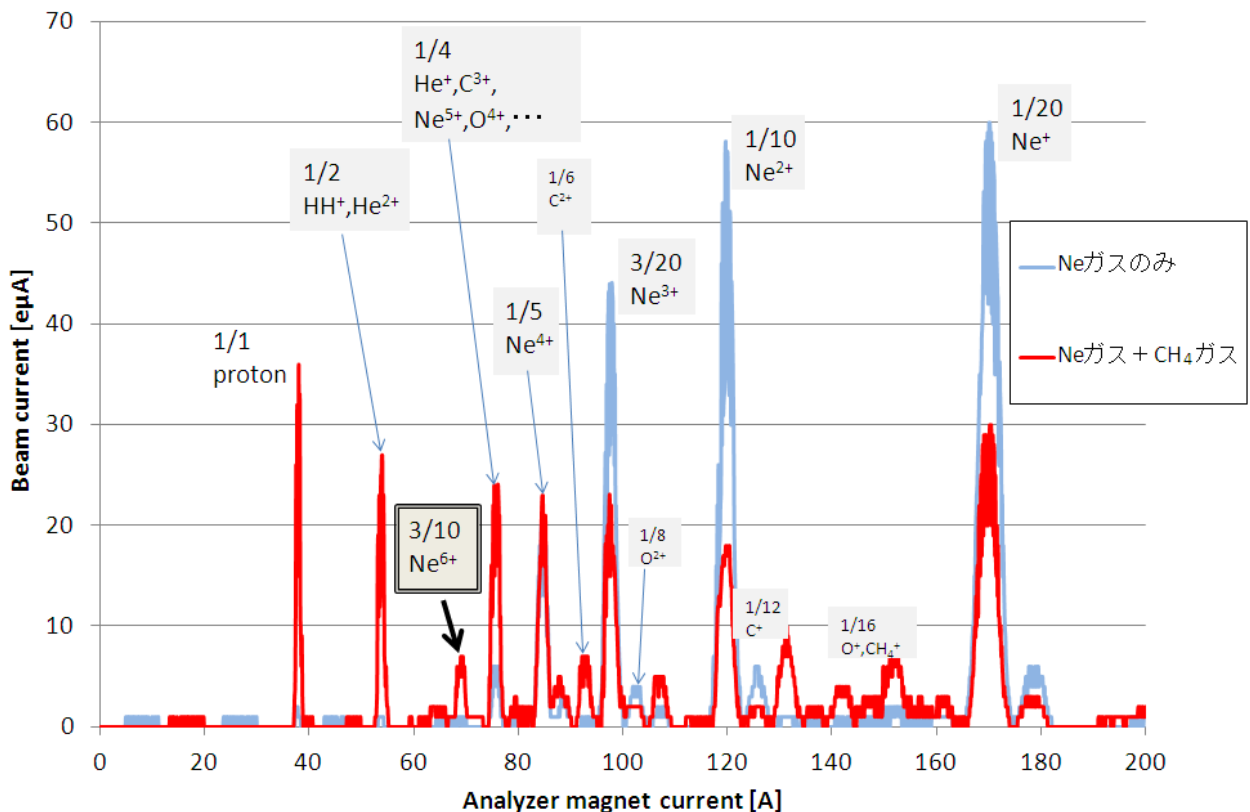


図 3 : Ne イオン価数分布サポートガス CH₄ 有無の比較

しかしながら、更に効率よく実験を進めるために、高い強度と安定性において対策が必要となっている。加速粒子が Ne^{6+} であるため、取出し直後に荷電変換を行い Ne^{10+} にするが、そのためのフォイルストリッパの径は $\phi 18$ を用いている。これに対し、取り出されているビームサイズが縦方向で 25 mm 程度となっているため、 $\text{Ne}^{6+} 1.65 \text{ e}\mu\text{A}$ をフォイルストリッパに通すと、分析前での各価数トータルのビーム電流が 1.40 e μA と荷電変換後の粒子数が減ってしまっている。また、日々の安定性においても問題があり、同パラメーターでの再立ち上げにおいてのビーム効率の変化が大きく、ビームがデフレクタや加速高周波電圧の放電を誘発している可能性も危惧されている。

そのため、入射条件や加速条件などを調整し、さらに効率を改善していく必要がある。また、マイクロ波の入力をさらに増やし、イオン源からのビーム量を増やす調整を行う必要がある。

3. 老朽化対策および修理等について

老朽化の対策として、ビーム輸送ラインの Q-magnet の更新を行った。この Q-magnet は、サイクロロン建設時に設置されたもので、間接水冷コイルにおいて、モールドされたケーシング内部からの水漏れが発生していた。さらにこの漏水により磁極にも錆が発生していた（写真 1,2）。そのため、新たに設計製作した Q-magnet との交換を実施した。同様の水漏れや、漏水によるヨークの錆び等が他の Q-magnet にも見られており、全体的に対策が必要となってきた。

また、大型サイクロトロンの垂直入射ラインの制御系では、照光式押しボタンやポテンショメータを用いていたが、現在 PLC 化を進めている。本年度は、輸送ラインの電磁石電源やファラデーカップの PLC 制御による運用を開始することができた。[3]

大型サイクロトロン用取出し機構である、マグネティックチャンネルにおいて、ビームプロテクタの改良を行った。ビームプロテクタは、マグネティックチャンネルのビームダクトを保護するためのものであるが、使用していたプロテクタの固定部分が破損し、ビームライン上に入り、取出しビームへの悪影響が懸念される状態になっていたため、プロテクタの固定を強化する改良を行った。



写真 1：Q-magnet コイル漏水部



写真 2：漏水した Q-magnet の磁極面

参考文献

- [1] S. Hojo, et al., Proc. PASJ2014, 2014, p.331.
- [2] S. Hojo, et al., Proc. PASJ2014, 2014, p.254.
- [3] Y. Takahashi, et al., “Operation of NIRS Cyclotrons” WAO2014, Germany

3. サイクロトロンの分子プローブの製造・開発への利用状況

サイクロトロン分子プローブの製造・開発への利用状況

PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF MOLECULAR PROBES USING CYCLOTRON IN 2014

張 明榮、河村 和紀、根本 和義、鈴木 寿、永津 弘太郎、武井 誠、
石井 英樹、藤永 雅之、破入 正行

Ming-Rong Zhang, Kazunori Kawamura, Kazuyoshi Nemoto, Hisashi Suzuki, Kotaro
Nagatsu, Makoto Takei, Hideki Ishii, Masayuki Fujinaga and Masayuki Hanyu

放射線医学総合研究所分子イメージング研究センター分子認識研究プログラム

概要

分子イメージング研究センター分子認識研究プログラムでは、臨床診断や生体機能の計測に有用な分子プローブの開発、分子プローブ合成に必要な放射性核種の製造及び標識技術の開発を行っています。また、安全で高品位な PET 用の放射性薬剤の供給も行っており、分子イメージング研究センターのみならず重粒子医科学センター病院や外部の大学・研究機関・企業の研究者に広く提供している。

その主な用途は、放射性核種の効率的な製造法の確立、新規 PET 用分子プローブ及び標識技術(中間体と反応)の開発、動物実験による薬剤の有効性と前臨床評価、臨床研究等である。臨床研究用に製造された放射性薬剤は、1) HIMAC を用いた腫瘍の治療効果の評価や転移の有無などの判定、2) 治療抵抗性を有する腫瘍の低酸素部位の特定、判別及び治療効果の評価に関する研究 3) 認知症、統合失調症、などの各種の精神神経疾患の診断、治療効果の評価及び病態発生メカニズムの解明研究などに利用されている。本報告書では新規な分子プローブの開発状況及び放射性薬剤の製造状況を報告する。

1. 分子プローブの開発研究状況

新規分子プローブの開発、内用療法に資する放射性核種の製造、新規標識技術・合成法の開発、超高比放射能化の研究等のために短寿命放射性同位元素が製造されている。以下にこれらの研究について代表的な成果を紹介する。

- 1) ヨウ化 ^{11}C メチル、・ヨウ化 ^{11}C メチル及び ^{18}F フルオロ臭化エチルを含む多種の合成中間体を製造し、それらを用い、20種の新規 PET プローブ作成に成功した。また、 ^{11}C 一酸化炭素の製造条件を最適化し、自動製造システムを開発し、PET プローブの標識化に成功した。さらに、非金属元素として As-74 の製造を行い、単離に成功した。また内用療法に資する At-211、Cu-67、Sc-43、Sc-47 及び Re-186 を選択し、製造・精製検討を行

い、高い核種純度と放射能を得ることができた。その中の一部の金属核種は動物実験等への提供に成功した。

- 2) 種々の標識技術を生かしながら、代謝型グルタミン酸受容体、トランスロケータタンパク質(TSP0)などの生体タンパク質に対する PET プローブを多数開発した。その中から、新たな TSP0 の PET プローブ ^{18}F FEDAC が臨床に有用であることを明らかにし、臨床への展開研究を開始し、また、 ^{18}F FEDAC を他施設への展開を進めている。
- 3) 診断並びに内用療法への利用が期待できるその他の核種として、診断並びに標的アイソトープ治療への利用が期待できるその他の核種として、At-211 及び Cu-64 の大量製造に向けた装置開発を行い、臨床利用に向けた品質保証項目・方法の確立を目指し評価実験を行っている。また、医療用途に活用できる核種ライブラリーの充実を図った。さらに、Zr-89、Cu-64、Cu-67、I-124、At-211、Mg-28 などの核種も製造し、共同研究を行った。

2. 分子プローブの生産・提供状況

平成 26 年度に製造した短寿命放射性薬剤は、腫瘍診断（メチオニン、S-dThd、FDG）、脳機能測定（PBB3、ABP688、BTA、ラクロプライド、FLB、MP4P、FMeNER、FetPE2I、MPPF）等の臨床利用、サル、ラット、マウスなどの動物実験（PBB3、ABP688、PK11195、 ^{15}O - H_2O 、FetPE2I、Altanserin、 ^{64}Cu 水溶液、 ^{211}At 水溶液など）、校正用ファントム線源（F-など）等へ提供した。また、サイクロトロン棟の大型サイクロトロンを利用して製造を行った $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレータ、 ^{28}Mg 水溶液、 ^{64}Cu 水溶液、 ^{68}Ge 水溶液などを 5 研究機関に 28 回の譲渡を行った。

設備関係では、サイクロトロン棟における新規薬剤の合成要望に対応するために第 1 ホットラボ室および地下第 5 ホットラボ室にホットセルを 4 台新設し、高頻度での薬剤合成に対応した。

なお、平成 26 年度に製造した標識化合物の種類、生産量、提供量を表 1 に、被験者数を図 1 に、生産・提供回数の推移を図 2 にそれぞれ示した。

表1. 平成26年度に製造した標識化合物および生産量

核種	化合物	生産量		診断供給量			動物供給量		譲渡	
		GBq	(回数)	GBq	(回数)	(人数)	GBq	(回数)	GBq	(回数)
¹¹ C	PBB3	142.179	(98)	45.051	(43)	(44)	13.401	(22)		
	BTA	116.943	(53)	57.96	(43)	(44)	2.299	(4)		
	RAC	137.122	(52)	44.004	(39)	(40)	3.917	(7)		
	FLB	16.093	(7)	4.446	(5)	(5)	0.904	(1)		
	ABP688	108.736	(53)	12.186	(8)	(8)	29.152	(28)		
	WAY	24.75	(10)	3.657	(4)	(4)	2.354	(2)		
	MNPA	25.11	(8)	4.703	(6)	(6)				
	MP4P	40.85	(11)	10.942	(7)	(7)				
	MET	1562.48	(171)	851.783	(242)	(373)				
	S-dThd	41.306	(11)	10.335	(9)	(9)	0.47	(1)		
	PE2I	6.88	(1)				0.666	(1)		
	DAA	2.79	(2)							
	PK11195	19.826	(19)				6.117	(13)		
	Ac5216	26.659	(11)				8.062	(11)		
	CH3I	20.05	(46)							
	その他	876.2752	(620)	26.9	(15)	(15)	65.208	(122)		
¹⁵ O	H2O	52.637	(12)				50.187	(12)		
¹⁸ F	FDG	353.697	(56)	211.401	(93)	(161)	0.235	(1)		
	FMeNER	22.896	(20)	5.287	(17)	(17)	0.231	(1)		
	FEtPE2I	39.027	(21)	8.576	(13)	(15)	10.386	(16)		
	Altanserlin	24.765	(15)	2.956	(2)	(2)	7.592	(10)		
	MPPF	4.792	(5)	3.004	(4)	(4)				
	FEtDAA	0.344	(1)				0.175	(1)		
	FLT	56.797	(21)				5.219	(7)		
	F-	35.6016	(14)				28.478	(12)		
	その他	165.1594	(157)				9.313	(28)		
²⁸ Mg	水溶液	0.03193	(6)						0.03193	(6)
⁴³ Sc	水溶液	0.36	(1)							
⁶⁴ Cu	水溶液	37.9755	(17)				18.17324	(21)	10.06	(3)
⁶⁷ Cu	水溶液	0.2323	(4)				0.039	(1)		
⁶² Zn	62Zn/Cu	49.615	(10)						49.615	(18)
⁶⁸ Ge	水溶液	0.0076	(1)						0.0037	(1)
⁸⁹ Zr	水溶液	0.48	(1)				0.47	(1)		
¹²⁴ I	水溶液	1.187	(4)				1.15	(4)		
²¹¹ At	水溶液	2.263	(7)				1.295	(7)		

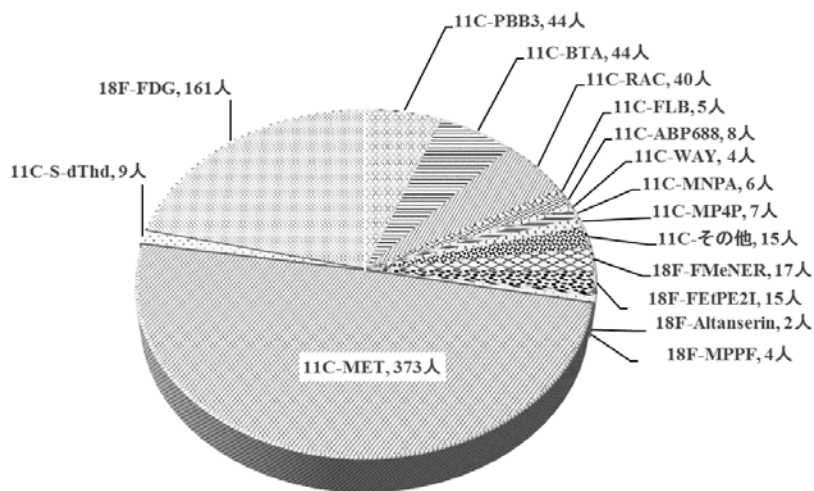


図1. 平成26年度における被験者数(753人)

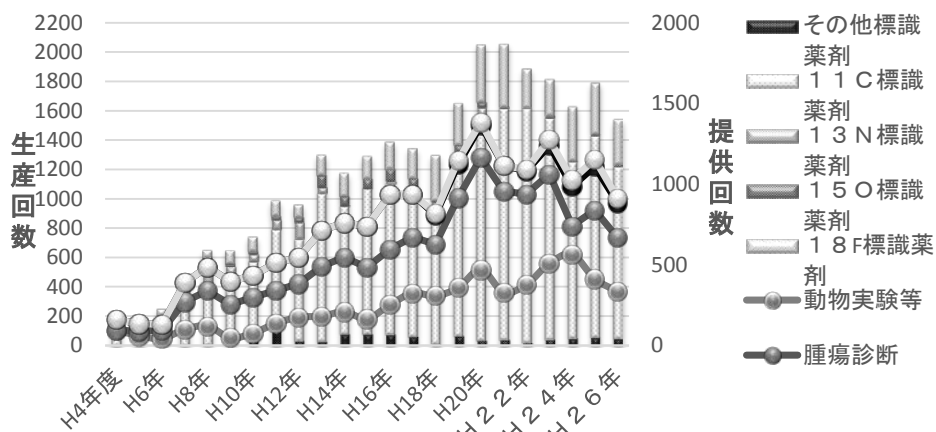


図2. 生産回数と提供回数の推移

4. 物理研究

- 4－1. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究
- 4－2. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究
- 4－3. 核破砕片生成二重微分断面積の測定
- 4－4. 最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定
- 4－5. 陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究
- 4－6. 重粒子ドシメトリーにおける線質依存の評価
- 4－7. 放射性遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験
- 4－8. 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分析

高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究

STUDY OF FUNDAMENTAL TECHNOLOGY FOR HIGH PRECISION PROTON THERAPY

西尾 禎治^A、松下 慶一郎^B、中村 哲志^B、余語 克紀^C、恒田 雅人^C
青野 裕樹^C、田中 創大^D、株木重人^E、稲庭 拓^F、杉浦 彰則^G、北條 悟^G
Teiji Nishio^A, Keiichirou Matsushita^B, Satoshi Nakamura^B, Katsunori Yogo^C,
Masato Tsuneda^C, Yuuki Aono^C, Soudai Tanaka^D, Shigeto Kabuki^E, Taku Inaniwa^F,
Akinori Sugiura^G, Satoru Hojo^G

A：国立がん研究センター東病院臨床開発センター粒子線医学開発分野

B：立教大学大学院理学研究科

C：北里大学大学院医療系研究科

D：東京大学大学院工学系研究科

E：東海大学医学部

F：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター次世代重粒子治療研究プログラム

G：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

概要

現在、国内のがん患者数は年々増加の傾向にあり、国民の2人に1人ががんで亡くなる時代が到来している。この国民病とも云えるがんの治療は、手術療法・化学療法（抗がん剤治療）・放射線療法（放射線治療）の3つに大別され、国内において放射線治療が占める割合は30%程度である。しかし、諸外国の現状または国内での放射線治療数の増加率から判断する限り、国内でも放射線によるがん治療は、近い将来には50%を超えると予想される。放射線治療が、がん治療の中で占める割合が非常に高くなる時代が直ぐそこまで来ていると言える。

近年、がんの治療、特に単独療法で根治を狙った、強度変調放射線治療や粒子線治療といった高精度放射線治療が、国内外において急速に普及が進んでいる。高精度放射線治療の特徴は、がん腫瘍のみに放射線（線量）を集中させた治療ができる点である。その中でも、陽子線や炭素線による粒子線治療は、がん腫瘍へ照射された粒子が腫瘍内で止まる寸前にその領域へ大きなエネルギーを付与する特性を活かした、線量集中性の高い最先端の放射線治療である。近年、国内外で粒子線治療施設数の増加傾向にあり[1]、その施設の普及率は、陽子線治療の方が圧倒的に高い数値であり、その需要の高さが伺える。装置の急速な小型化によるイニシャルコスト削減や光子線治療に近い生物学的効果であることから光子線治療の臨床データが活用できる点などが理由と考えられる。

その一方、陽子線治療は、光子線治療と比較すると歴史が浅いこともあり、古くから用いられている照射技術のままの治療が実施されている現状があり、X線治療と同様の先端技術を駆使した革新的な治療へ進化を遂げる必要がある。高精度陽子線治療のために、陽子線照射技術や計測技術を中枢とする基盤技術の構築が必要不可欠である。

1. 目的

腫瘍に対する線量集中性を更に向上させた高精度陽子線治療を実現するために、患者体内中での陽子線照射領域可視化及び陽子線のレンジの停止位置精度に関する研究は最も重要な課題である。そこで、陽子線照射領域可視化については、陽子線照射によって標的原子核破砕反応より患者体内中で生成されるポジトロン放出核を情報因子とする陽子線治療患者体内中での照射領域可視化システムを開発とその反応メカニズムの研究を実施してきた。患者体内中での陽子線レンジの停止位置精度については、陽子線CT画像取得システムの開発と画像再構成法の研究を進めてきた。

本年度の研究では、これまでと同様に陽子線治療において、腫瘍に対する線量集中性を更に向上させた高精度陽子線治療の研究を目指す。その実現のために、照射領域可視化システム用の原子核破砕反応断面積を決定するための陽子線照射実験、治療計画において患者体内中での陽子線レンジ位置を精度良く算出するための陽子線CT画像取得法の確立に関する陽子線照射実験を実施する。

2. 実験方法

本研究では、患者体内中での陽子線照射領域可視化における標的原子核破砕反応のメカニズム解明に

関する研究、陽子線 CT 画像取得法の確立に関する研究の 2 本柱に大別される。尚、マシンタイムの割り当て時間に応じて調整しながら実験を実施して行く。全ての実験において、利用する陽子線のエネルギーは最大 (70MeV)、ビーム強度は実験用途に合わせて最大 50nA までを用いる。また、標的原子核破碎反応メカニズム解明のための実験は C6 及び C8 コース、陽子線 CT 画像取得法確立のための実験は C8 コースで実施する。照射前にはそれぞれの実験用途に合わせて、装置の設置や信号系回路の調整、ビームモニター設定などを実施する。照射後は設置した装置の撤去を行う。

2-1. 標的原子核破碎反応メカニズム解明のための実験

我々が陽子線治療の臨床用に開発した Beam ON-LINE PET system mounted on a rotating gantry port : BOLPs-RGp [2-4]と同じ検出器及び計測系を持つ基礎研究用に開発された BOLPs を C6 コース上に設置し実験を行った (図 1 左参照)。このシステムの検出器ヘッド部分は、浜松ホトニクス製の BGO 結晶が利用されているプラナータイプの検出器であり、2mm×2mm×20mm サイズの BGO 結晶が 7920 個マウントされている。陽子線照射によって標的原子核破碎反応によって患者体内中で生成されるポジトロン放出核からの消滅ガンマ線 (180 度方向に放出される一対の 511keV ガンマ線) を対向するプラナータイプ検出器で同時計測することで、患者体内中での生成ポジトロン放出核の位置と量を観測することが可能である。

標的原子核破碎反応による照射領域可視化で人体構成要素として重要とされる、炭素核、酸素核及びカルシウム核に対する生成ポジトロン放出核の陽子線エネルギーごとの生成量を BOLPs で観測するために、ポリエチレン (CH_2)、水 (H_2O :ゼラチン質にした物) 及び酸化カルシウム (CaO) を照射ターゲット (図 1 右参照) とした実験を行う。70MeV の陽子線をそれぞれのターゲットへ照射した。生成断面積は mb 単位で非常に小さいため、多くの陽子線照射を必要とする。また、生成ポジトロン放出核の半減期は数秒から 20 分であり、更に陽子線照射中は即発ガンマ線及び中性子線による高いバックグラウンドがあるため、陽子線照射は短時間で実施されることが要求される。陽子線の照射は 5nA・3 秒照射で実施した。陽子線の照射野形状は 3mm (FWHM) ×8mm (FWHM) のガウス分布に近い形状であった。陽子線照射開始直前から 10-30 分間の消滅ガンマ線計測を実施した。尚、ターゲットに対し、陽子線の進行方向及びその方向に直交する重力方向の生成ポジトロン放出核の activity プロファイルの観測ができるように BOLPs を設置した。C6 コースのペンシルビーム的な大強度の陽子線照射実験では、それぞれの照射ターゲットで生成されるポジトロン放出核の陽子線進行方向、即ち、陽子線のエネルギー変化に伴う activity 分布形状を計測する。また、C8 コースのワブラーで拡大された照射野での低い強度での陽子線を利用し、ビームライン上に設置した線量モニター値に対する照射ターゲット中の全エネルギー積算での activity 量を実験で求めることで、入射陽子数に対する activity 量の関係を導出する。

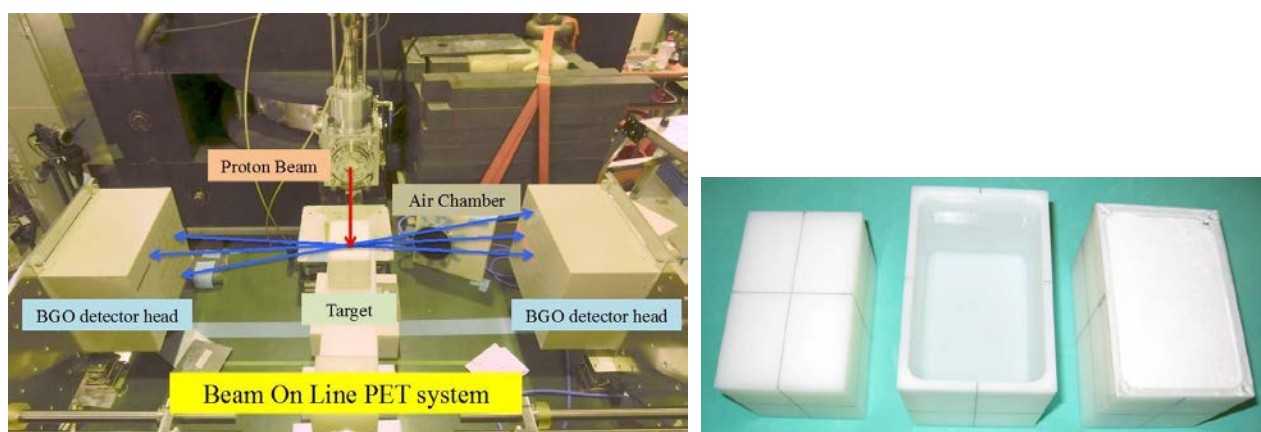


図 1 : C6 コースにおける BOLPs の設置 (左) と照射ターゲット : 左からポリエチレン、水、酸化カルシウム (右) の写真。

2-2. 陽子線CT画像取得法確立のための実験

本実験では、これまでのプロトタイプ陽子線 CT 画像取得システムの性能向上を図るため、CMOS カメラから低ノイズデータが取得可能な電気冷却式 CCD カメラを採用した。プロトタイプの陽子線 CT 画像取得システムを 20cm×20cm×5cm のプラスチックシンチレーター (PS) 検出器と新規導入した電気冷却式 CCD カメラ、シンチレーション光反射鏡、被写体回転テーブルを用いて構築した (図 2 参照)。本システムにより、10cm 照射野の陽子線を回転テーブル上の回転する被写体に照射し、PS 検出器の

20cm×20cm 面で被写体を通過後の陽子線の照射位置及びその位置での発光量を計測することで、2次元発光量プロファイルデータを取得する。PS 検出器の発光量は、検出器内で失う陽子線のエネルギーに相当するので、陽子線の被写体通過前後での発光量の差分が被写体の位置ごとのエネルギー吸収量に相当したデータとなる。

改良版プロトタイプ陽子線 CT 画像取得システムでの実験では、回転する様々な物質及び形状の被写体に陽子線を照射し、被写体通過後の陽子線エネルギーの残量を PS 検出器で発光量として計測する。ワブラーで照射野を形成した 70MeV の陽子線の強度を 3nA 程に調整して、回転被写体ごとに 5 分ほど陽子線を照射し、その PS 検出器の発光量を計測する。尚、被写体回転テーブルの中心から 1 cm の位置に、2.5cmφ 円筒形容器に封入した水、エタノール、40%リン酸水素二カリウム水溶液を設置した。

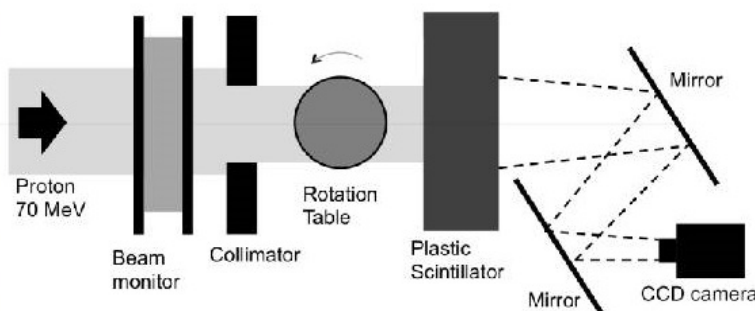
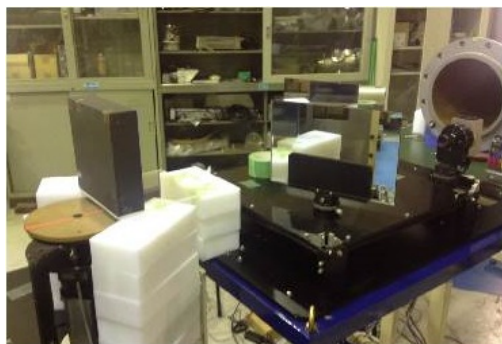


図 2：陽子線CT画像取得システムの概念図（左）及びC8コースに設置した改良版プロトタイプ陽子線CT画像取得システムの写真（右）。

3. 実験結果

3-1. 標的原子核破碎反応断面積値

基礎研究用 BOLPs による、ポリエチレン、水、酸化カルシウムターゲットごとの activity 分布の計測を行った。特に、今回はポリエチレンターゲットに対する実験データを詳細に解析する。

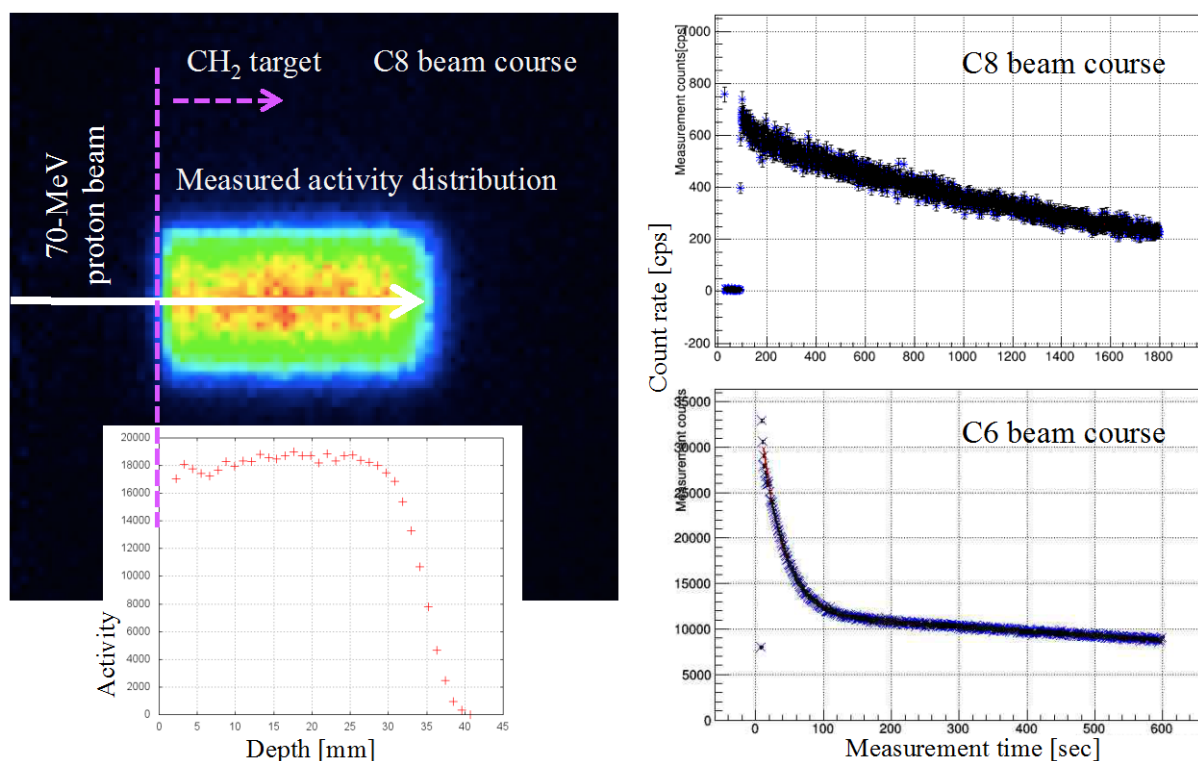


図 3：C8 コースでのポリエチレンターゲットへの陽子線照射より実測された activity 分布の計測結果（左）及び C8 コース、C6 コースでの実測より得られた activity の計測率結果（右）。

図 3 左は C8 コースの陽子線照射実験より得られた、ポリエチレンターゲット中での activity 分布である。図中の activity 分布において、左側から右側が陽子線の進行方向となる。Activity 分布の横方向はそ

それぞれのターゲットでの深部位置での activity を示しており、深部位置がゼロ（左端）の位置では 70MeV の陽子線照射による activity 計測の結果に相当し、ターゲットごとの陽子線の阻止能計算に基づくエネルギー減衰によって、それぞれの深部位置での陽子線エネルギーを算出できる。そのため、深部位置が深くなるに連れて低い陽子線エネルギーに対する activity 計測の結果を示していることになる。図 3 右は C8 コースで 30 分間及び C6 コースで 10 分間の実測より得られた activity の計測率結果である。C8 コースでの照射実験では、基礎研究用 BOLPs をビームライン上に設置せずに（beam off Line）、陽子線照射後のポリエチレンターゲットを移動させて基礎研究用 BOLPs で計測する実験系のため、図 3 右の計数率結果では、陽子線照射後 100 秒ほど経過してから計測開始となっていることが判る。それに対して、C6 コースでの照射実験では、基礎研究用 BOLPs をビームライン上に設置しているため、陽子線照射中から継続した計測が実施出来ていることを示している。

陽子線をポリエチレンターゲットへ照射した場合、入射陽子核と炭素核の標的原子核破砕反応により、本実験で考慮される生成ポジトロン放出核は ^{11}C と ^{10}C となる。半減期が約 20 秒の ^{10}C と半減期が約 20 分の ^{11}C の 2 成分から構成される、測定された生成ポジトロン放出核の崩壊曲線、及びビーム深部方向の activity 分布を用いて反応断面積の値を導出した。0~70 MeV の陽子線エネルギーにおける ^{10}C と ^{11}C の平均断面積値を求め、深部方向 activity 分布を用いて個々の陽子線エネルギーでの反応断面積の導出を行った。尚、基礎研究用 BOLPs の検出効率、モンテカルロシミュレーションコード：GEANT4 による計算及び点線源を用いた実測結果より算出した。

図 4 は、ポリエチレンターゲットへの陽子線照射実験結果によって導出された、陽子線エネルギーに対する $^{12}\text{C}(p,pn)^{11}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}(p,p2n)^{10}\text{C}$ の標的原子核破砕反応断面積値の実験結果である。NNDC に報告されている ^{11}C の生成反応断面積データは、大別すると最大値が 100mb 程となる高い傾向を示す分布と 80mb 程となる低い傾向を示す分布の 2 つに大別されているが、本研究より取得したデータは低い傾向を示す分布との一一致度が高かった。また、 ^{10}C の生成反応断面積データに関しては本研究で測定したエネルギー範囲では反応断面積データが報告されておらず、世界初のデータを取得したことになる。

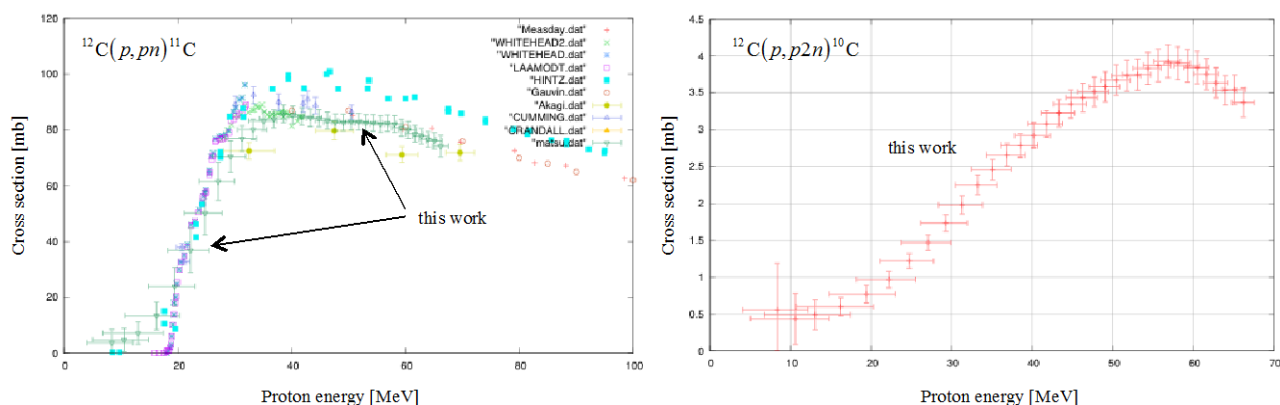


図 4：陽子線エネルギーに対する $^{12}\text{C}(p,pn)^{11}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}(p,p2n)^{10}\text{C}$ の標的原子核破砕反応断面積値の実験結果。

3-2. 陽子線 CT 画像

図 5 左に示す 2.5cmφ 円筒容器に封入した水、エタノール、40%リン酸水素二カリウム水溶液の照射サンプルに対し、改良版プロトタイプ陽子線 CT 画像取得システムによる計測された発光量による Protography データを用いた FBP (Filtered Back Projection) 法により画像化した陽子線 CT 画像の結果を図 5 右に示す。

図 6 左は円筒容器に封入した水の陽子線 CT 画像のサーフェスプロットの結果である。図 6 右は 4 種類の物質（空気、水、エタノール、40%リン酸水素二カリウム水溶液）の水等価長 (Water Equivalent Length : WEL) 係数値に対する陽子線 CT 値の相関グラフの結果である。空気 (WEL 係数値 : 0.00) に対する陽子線 CT 値は 0.02 ± 0.01 、水 (WEL 係数値 : 1.00) に対する陽子線 CT 値は 0.94 ± 0.01 、エタノール (WEL 係数値 : 0.82) に対する陽子線 CT 値は 0.81 ± 0.01 、40%リン酸水素二カリウム水溶液 (WEL 係数値 : 1.30) に対する陽子線 CT 値は 2.21 ± 0.01 であった。尚、WEL 係数値は、陽子線治療で実際に利用されている X 線 CT 値と WEL 係数値の相関関係式から算出された値である。理想値は、WEL 係数値と陽子線 CT 値が一致すること、即ち、原点を通過する傾きが 1 の比例直線上に値の点が乗ることである。WEL 係数値の増加に伴い、陽子線 CT 値との値の相違が大きくなる傾向があり、その差は最大で 6.7% であった。

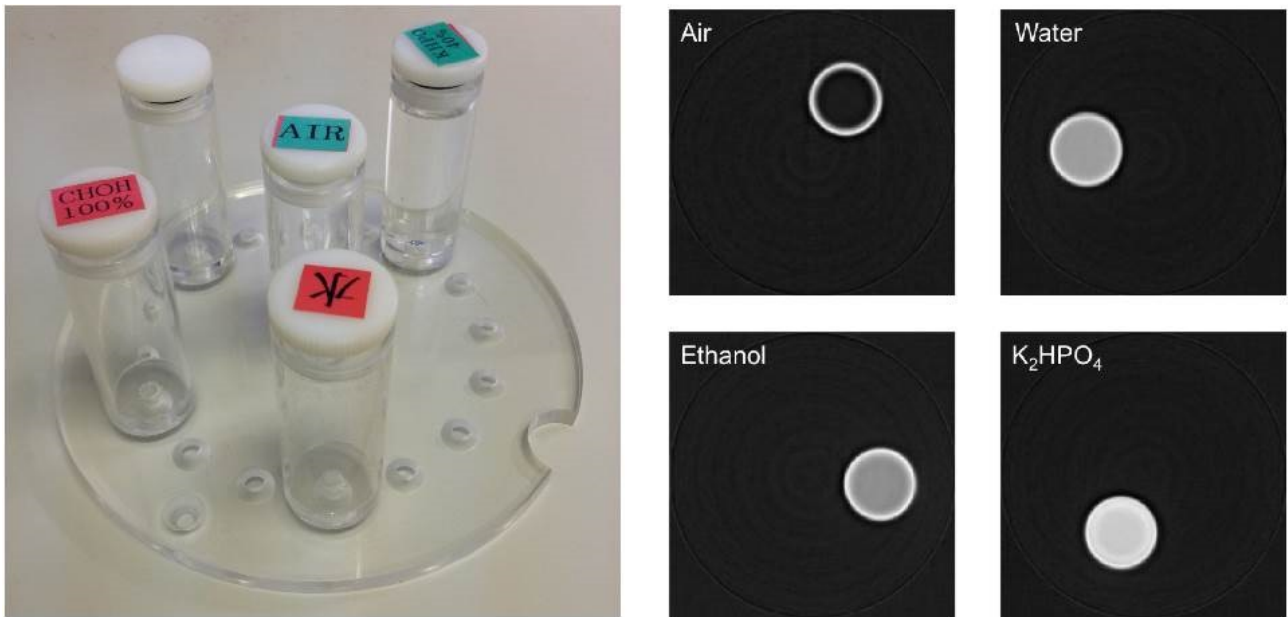


図5：陽子線 CT 画像用照射サンプル（左）及び陽子線照射より得られた陽子線 CT 画像の結果。

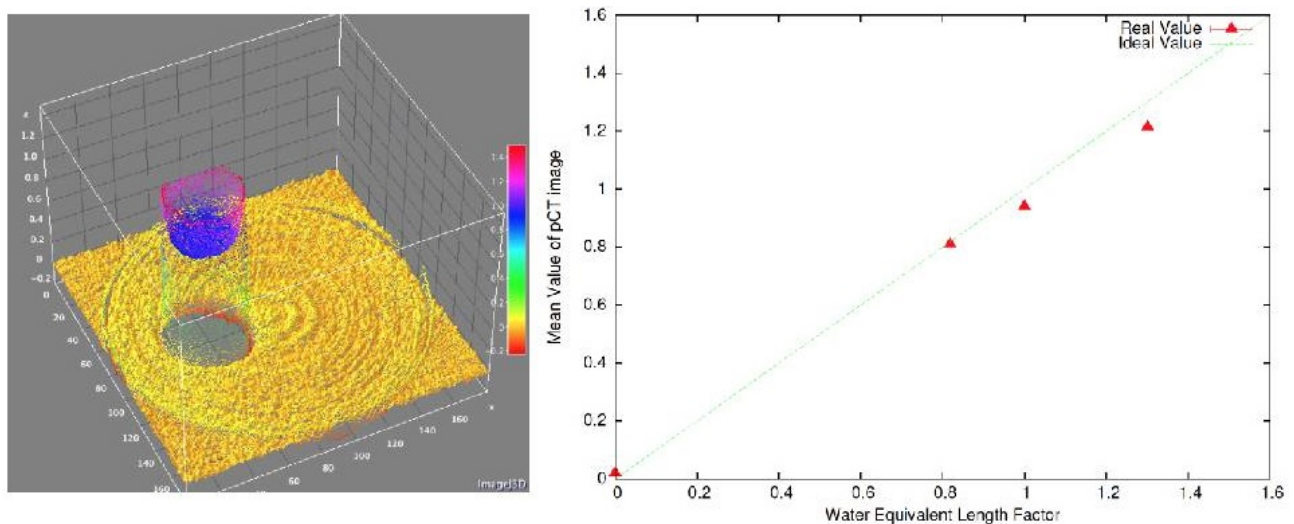


図6：円筒形容器に封入した水の陽子線 CT 画像のサーフェスプロットの結果（左）及び4種類の物質（空気、水、エタノール、40%リン酸水素二カリウム水溶液）の水等価長係数値に対する陽子線 CT 値の相関グラフの結果（右）。

4. まとめ

放医研大型サイクロトロン施設の C6 及び C8 コースの陽子線照射実験により、高精度陽子線治療を実現するための基盤整備として、陽子線照射領域可視化のための陽子線照射による標的原子核破碎反応メカニズムの研究及び患者体内中での陽子線レンジの停止位置精度向上のための陽子線 CT 画像取得システムの開発と画像再構成法の研究を実施することができた。

標的原子核破碎反応メカニズムの解明においては、これまで報告数が少ない ^{11}C の生成反応断面積値の結果を導出することが出来た。また、これまでの報告が全く無い ^{10}C の生成反応断面積値の結果を導出することに成功した。陽子線 CT 画像については、電気冷却式 CCD カメラを用いた改良型陽子線 CT 画像取得システムを用いることで、異なる物質の陽子線 CT 画像化の実現に成功し、その陽子線 CT 画素値の精度評価を実施することが出来た。

平成27年度も引き続き実験を継続することで、2つの大別されたテーマを主軸とする研究を遂行することで実験データの精度向上を図る予定である。

参考文献

- [1] PTCOG data : Patientstatistics-update02Mar2009.pdf
- [2] A. Miyatake, T. Nishio, T. Ogino, “Development of activity pencil beam algorithm using measured distribution

data of positron emitter nuclei generated by proton irradiation of targets containing ^{12}C , ^{16}O and ^{40}Ca nuclei in preparation of clinical application,” Med. Phys. 38(10), 5818-5829 (2011).

- [3] T. Nishio, A. Miyatake, T. Ogino, K. Nakagawa, N. Saijo, H. Esumi, “The development and clinical use of a beam ON-LINE PET system mounted on a rotating gantry port in proton therapy,” Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 76(1), 277-286 (2010).
- [4] T. Nishio, T. Ogino, K. Nomura, H. Uchida, “Dose-volume delivery guided proton therapy using beam ON-LINE PET system,” Med. Phys. 33(11), 4190-4197 (2006).

重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究

BIOPHYSICAL INVESTIGATION ON THE INITIAL PROCESS OF HEAVY-ION IMPACT

大澤大輔^A、俵博之^B、曾我文宣^C、岩田佳之^C、
平山亮一^C、松藤成弘^C、野田章^C、野田耕司^C

D. Ohsawa^A, H. Tawara^B, F. Soga^C, Y. Iwata^C, R. Hirayama^C, N. Matsufuji^C, A. Noda^C, K. Noda^C

A: 京大 RI センター, B: 核融合研, C: 放医研

概要

カロリンスカ研究所腫瘍病理学部門の H. Nikjoo 教授のもとで在外研究を行った。Classical Trajectory and Monte Carlo(CTMC)計算により二次電子生成断面積を求め実験結果と比較したところ、良い一致が見られた。

1. 目的

粒子線照射による深部ガン治療がブラッグピークによる線量集中性や予後の QOL の観点から注目され、近年、本格的に実用化されている。ブラッグピーク領域(6~25 MeV/u)のエネルギー損失過程は生体構成物質(主に水)の電離、励起が主であり、それに伴って多数の二次電子が放出されるため、その生物効果初期過程はこれら放出二次電子線の空間及びエネルギー分布に密接に関係している。過去に、様々な入射核種(主に軽イオン)、ターゲット(主に希ガス)を用いてこの種の実験がなされてきたが、数 MeV/u の重イオン衝撃による水からの二次電子放出については、高真空中で安定希薄な水蒸気ターゲットを得ることが難しいため、信頼できる高精度実験データは殆ど発表されていない。

本研究の目的は、ブラッグピーク領域のエネルギー(数 MeV/u)を持つ重イオン衝撃により水蒸気から放出される二次電子線のエネルギー及び角度分布を測定し、既存の理論と比較しうる高精度な二次電子生成二重微分断面積 $d^2\sigma/dE d\Omega$ (Doubly Differential Cross Section: DDCS) を評価することである。さらに、得られた断面積を九大上原氏らにより開発された電子輸送コード(KURBUC)に組み込み、重イオンの水中におけるトラック構造(重イオンの飛跡に沿って生じるエネルギー付与の微視的空間分布)をモンテカルロ法により解析する。トラック構造は、DNA サイズ(~2nm)におけるエネルギー付与の(平均化されていない)非均質性の情報を提供するため、重イオンの持つ高い生物学的効果比(high RBE)、低い酸素増感度(low OER)、細胞周期依存性が無い等のマクロな生物効果の、DNA レベルでのメカニズムの解明、さらに、DNA へのダメージ付与(局所的な分子間結合の損傷)がどのようにして細胞不活性化(分裂停止)へ移行するかを解明する端緒となりえるが、元となる断面積データが不足しているため、信頼性に欠く状況にある。断面積データについては、近年、データの相互利用、有機的なフィードバックを目的とした原子分子データベースの構築、XML(eXtensible Markup Language)等による標準化が進められているが、重粒子線と生体構成原子/分子の相互作用に関する高精度基礎データは未だ整備されていない。本研究で得られる水蒸気ターゲットデータを組み入れることにより、重粒子線治療における治療計画の精密化、テーラーメイド医療の確立、その結果としてがん治癒率の向上に寄与できると言える。

2. 方法

マシンタイムでは 6.0 MeV/u Ne^{10+} 入射で断面積測定を継続している。平成 26 年度は京都大学教育研究振興財団 在外研究短期助成に採択されたため、カロリンスカ研究所腫瘍病理学部門の H. Nikjoo 教授のもとで在外研究を行っており、それについて詳説する。当研究所は粒子線治療において先進的研究機関の一つであり、Nikjoo 教授はモンテカルロ電子トラック及びイオントラックコード開発の世界的権威として知られている。現在、Nikjoo 教授らは直接作用に関係するトラック構造に加えて間接作用に関係するラジカル拡散も模擬し、さらに DNA をモデリングすることでクラスターDNA 損傷の生成や修復過程も計算できるまで研究を進めている。

訪問後、議論を重ねるうち、当初の目的であった実験断面積の組み込みではなく、それを説明できる理論計算断面積(Classical Trajectory and Monte Carlo: CTMC)を組み込むほうがより汎用性の高いコードになるとの指摘を受け、まず、その理論計算の理解と実験データとの整合性を検証することとなった。CTMC 計算については、Nikjoo 教授の共同研究者である Liamsuwan 博士が詳細に研究を進めており、それを参考にさせていただいた[1-3]。図 1 に CTMC やその他の理論計算の適用範囲を示す。Zp, Zt は入射イオン、標的核電荷、Vp, Ve は入射イオン、軌道電子速度を表す。CTMC は重イオン入射に対してブ

ラッグピーク領域を含む広い入射エネルギー範囲で有効であることが分かる。

CTMC では計算機上で入射イオンと標的原子(分子)との衝突を模擬することで最終的に電離、励起等の断面積(double, single, total)が計算される。図 2 に CTMC で模擬される衝突関係図を示す。p、e、t はそれぞれ入射イオン、電離を被る軌道電子、他の軌道電子を含む標的原子(分子)を表す。標的原子(分子)の重心 G を原点とし、そこから $Z_0(10^3 \sim 10^4 \text{ a.u.})$ の距離にある p が速度 V_p 、衝突径数 b で入射する(最大の b を 25 a.u. とし、それを ~ 100 等分割して b を変化させる)。t に対する e の位置 R_2 と速度 dR_2/dt は、別に求めた各軌道電子に対する位相空間分布を用いて、モンテカルロ法によりサンプリングして与えられる(1 つの b に対して $R_2, dR_2/dt$ は $\sim 10^4$ サンプルングされ、それぞれに対して電離の有無を判定する)。

p、e、t 間の相互作用により 3 者の位置と運動量は時々刻々変化していく。3 者の運動方程式をルンゲ-クッタ法で数値計算することで、それらを時間の関数として求め、続いて、t に対する e の相対的な運動エネルギーを計算することで電離の有無を判定し、その確率、すなわち、断面積を得る。CTMC 計算の実行は京都大学学術情報メディアセンターの大型計算機システムを利用して行われた。並列処理等の高速化を図ったが、計算が長時間に及ぶことが分かり(1 軌道電子あたり 10~14 日を要する)、途中で大型計算機システムのアカウントをアップグレードすることとなった。

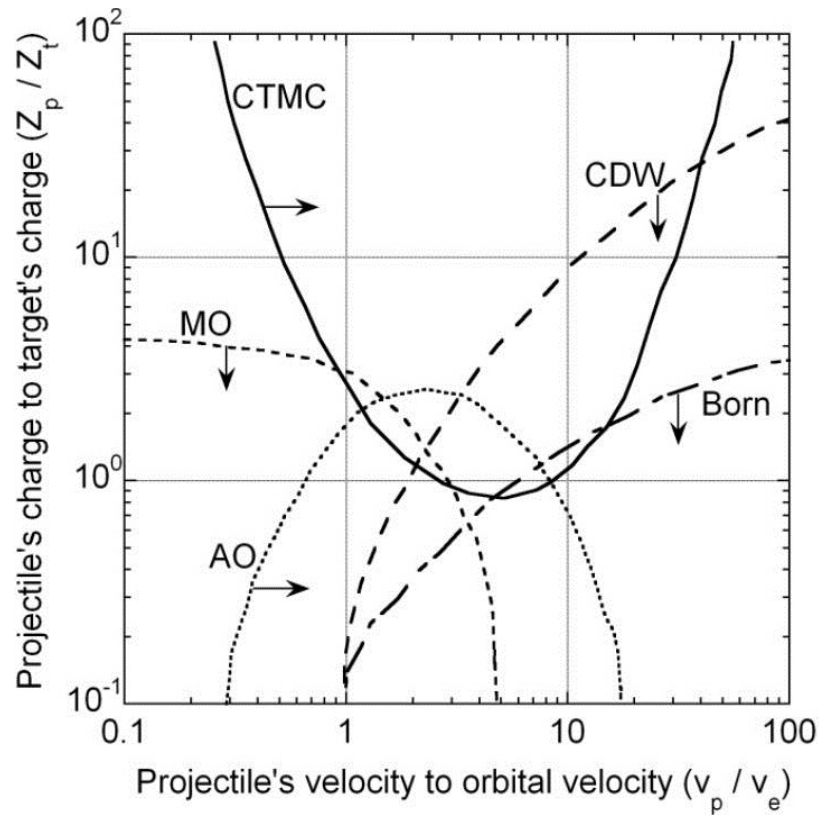


図 1. CTMC やその他の理論計算の適用範囲

Z_p, Z_t は入射イオン、標的核電荷を、 V_p, V_e は入射イオン、軌道電子速度をそれぞれ表す。CTMC は重イオン入射に対してブラッグピーク領域を含む広い入射エネルギー範囲で有効であることが分かる。

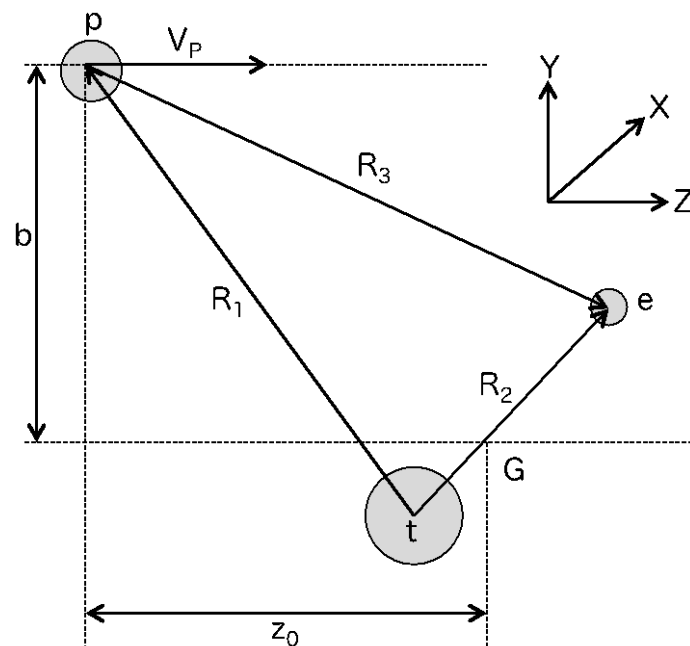


図 2. CTMC における衝突関係図

p、e、tはそれぞれ入射イオン、電離を被る軌道電子、他の軌道電子を含む標的原子(分子)を表す。標的原子(分子)の重心 G を原点とし、そこから $Z_0(10^3 \sim 10^4 \text{ a.u.})$ の距離にある p が速度 V_P 、衝突径数 b で入射する。t に対する e の位置 R_2 と速度 dR_2/dt は、各軌道電子に対する位相空間分布を用いて、モンテカルロ法によりサンプリングして与えられる。

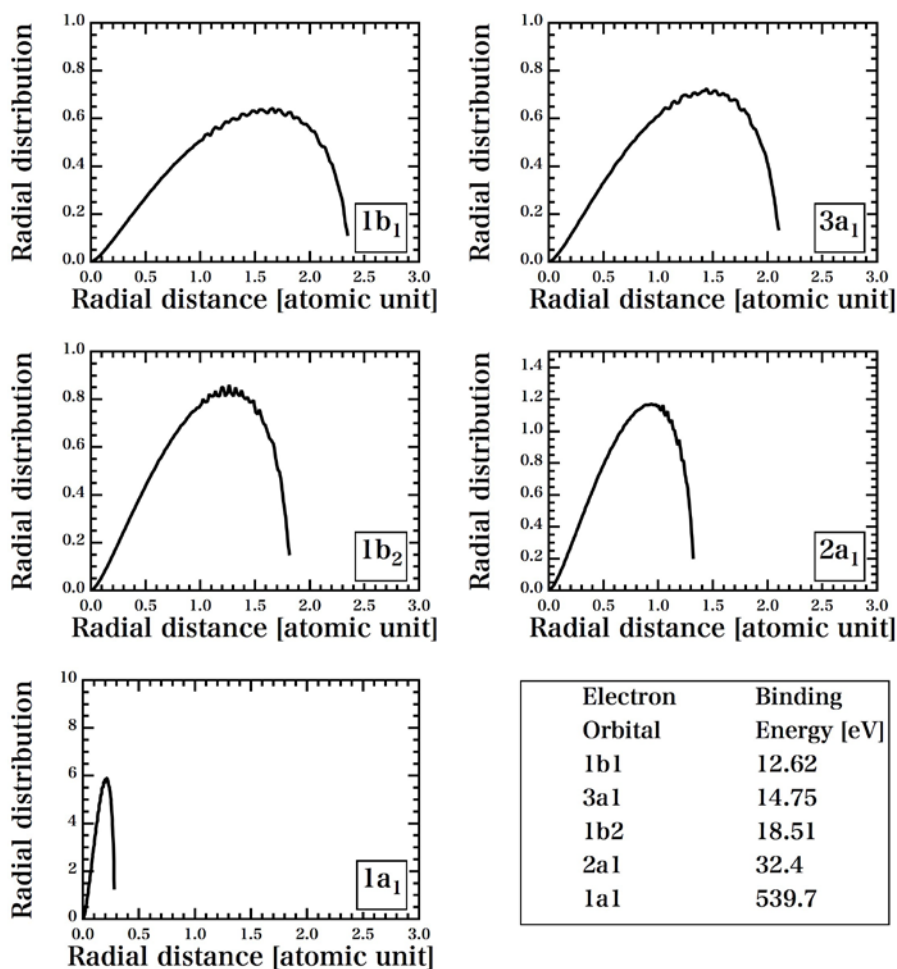
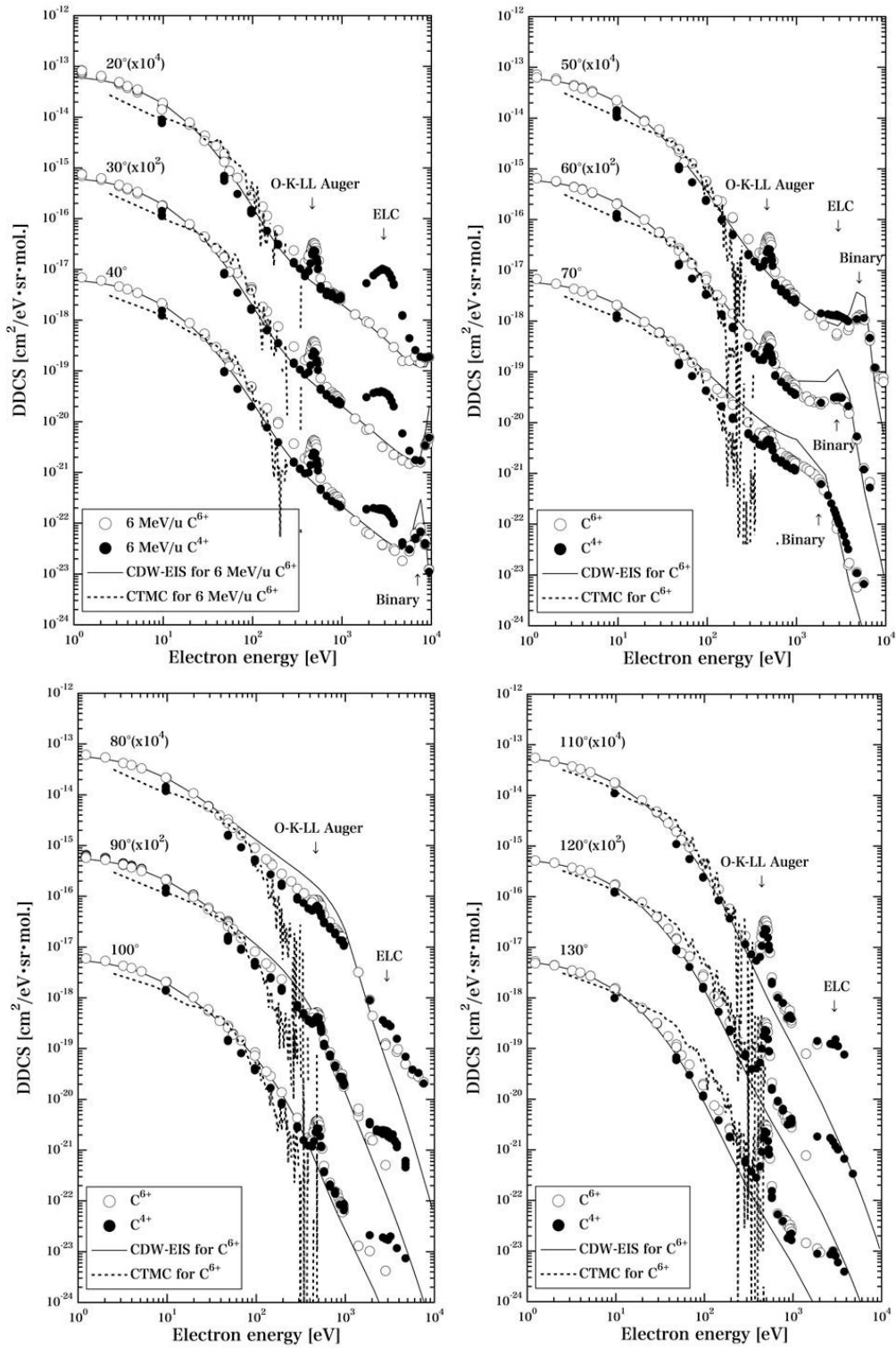


図 3. 水分子の各軌道電子(1b₁~1a₁)に対する位相空間分布(動径距離分布=位置 R_2 分布)図

Reinhold らによりマイクロカノニカル分布を用いて古典的に計算されている[4]。分布面積はすべて 1 に規格化されている。内殻電子ほど動径距離(電子-核間距離)が短く ($1a_1 < 2a_1 < 1b_2 < 3a_1 < 1b_1$)、その空間的広がりも小さいことが分かる。



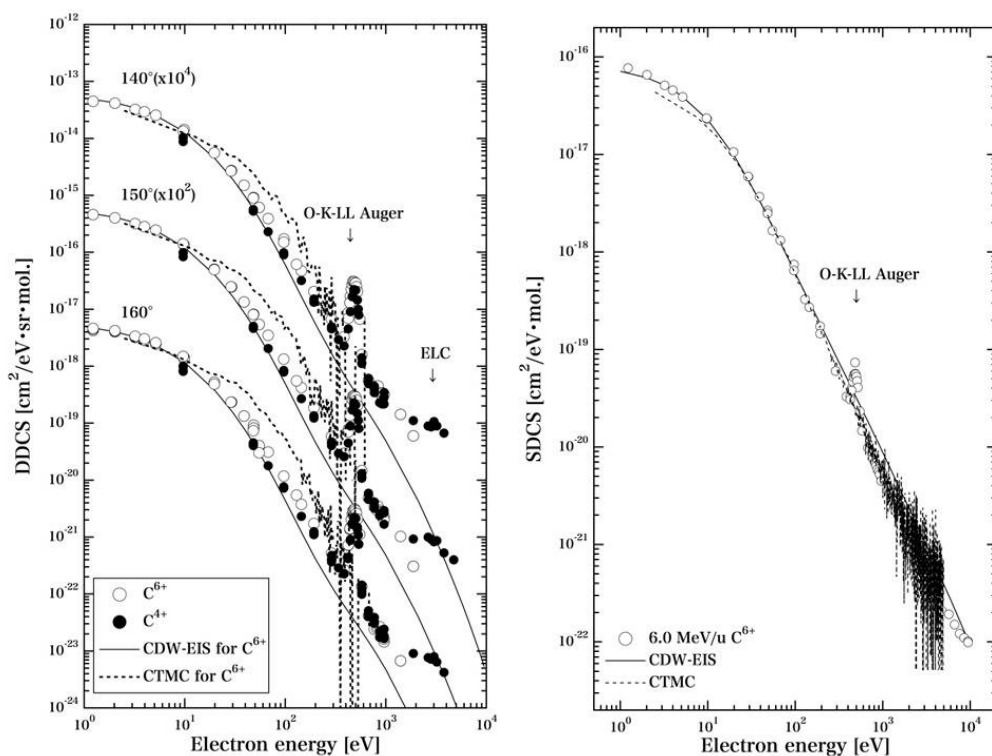


図3. 実験断面積とCTMC、CDW-EISとの比較

CTMC計算結果と実験断面積との比較では、後方(>130°)の20 eV以上のエネルギー領域でずれている(過大になる)が、それ以外の領域では良く一致している。また、全角度で見られる500 eV以上のばらつきは統計不足によるものと思われ、さらに試行回数を増やす必要があることを示唆している。

3. 結果

6.0 MeV/u C^{6+} 入射による二次電子生成断面積について、CTMC 計算結果を実験断面積と比較したところ、後方(>130°)の20 eV以上のエネルギー領域でずれた(過大になった)が、それ以外の領域では良く一致した(図 3)。ずれの原因について詳細は不明だが、水分子の位相空間分布の精度が不十分な可能性がある。位相空間分布を量子力学的に求める手法もあり、それを用いて再計算する予定である。また、全角度で見られる500 eV以上のばらつきは統計不足によるものと思われ、さらに試行回数を増やす必要があることを示唆している。

4. まとめ

CTMC の利点はCDW、Born 近似といった波動関数を用いて散乱振幅を求める量子力学的手法と違って、古典的であるため計算の詳細を理解しやすく、また、位相空間分布が分かれば任意の標的原子(分子)に対して適応可能であることが挙げられる。さらに、入射イオンが非完全電離イオンであっても、その軌道電子の位相空間分布が分かれば、同様にそれらの電離断面積を計算で求めることができる。図4に炭素イオン($C^{5+} \sim C^0$)の各電荷状態に対する軌道電子の位相空間分布(動径距離分布)を示す。現在、この分布を用いて6.0 MeV/u C^{4+} 入射についてもCTMC 計算を実行している。一方、欠点として計算時間の長期化があるが、1 keV 以上の高エネルギー電子の発生頻度は稀であり、今のところトラック計算へ組み込む場合には、さらに試行回数を増やす必要はないと考えている。今後、入射エネルギーを変えて系統的にCTMC 計算した後、その結果をトラック計算に組み込む予定である。

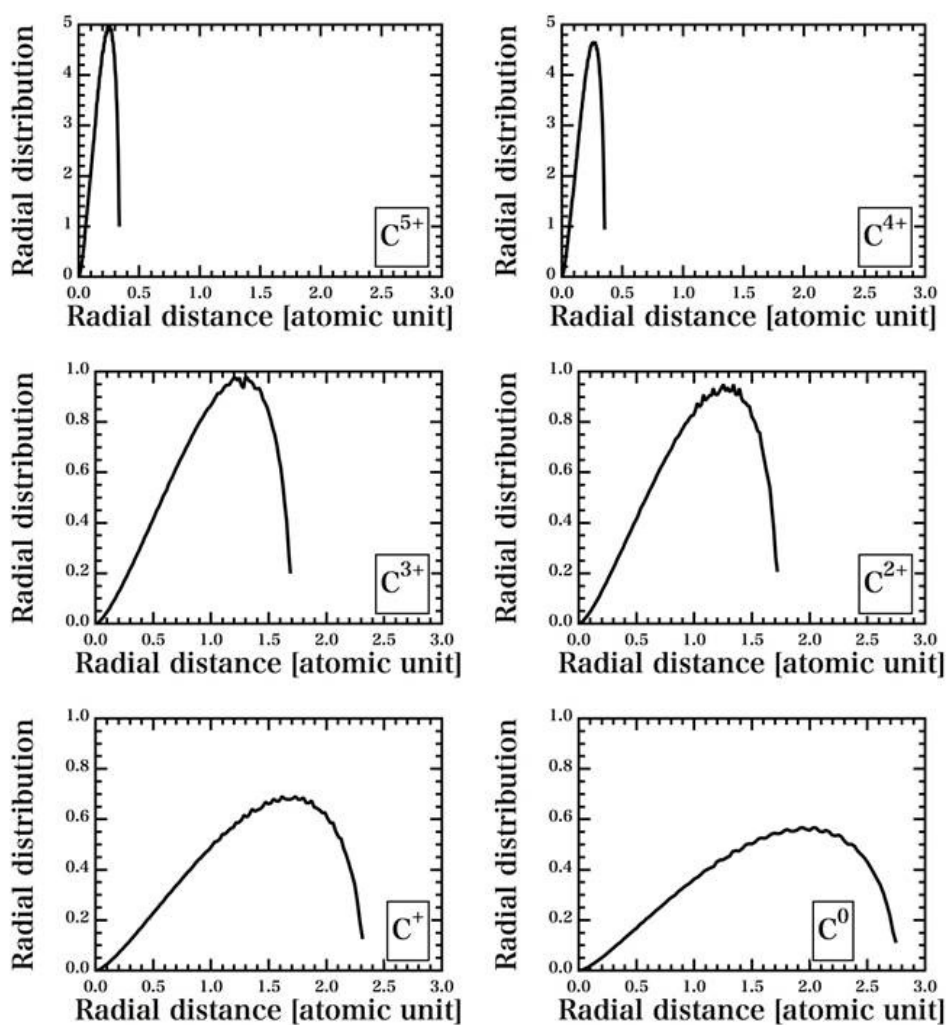


図 4. 炭素イオン($C^{5+} \sim C^0$)の各電荷状態に対する軌道電子の位相空間分布(動径距離分布)図
分布面積はすべて 1 に規格化されている。最内殻から軌道電子が増えるに従って、その空間的広がり
が大きくなることが分かる。

参考文献

- [1] T. Liamsuwan, S. Uehara, D. Emfietzoglou and H. Nikjoo, Radiat. Prot. Dosim. 143, 152–155 (2011).
- [2] T. Liamsuwan and H. Nikjoo, Phys Med Biol. 58, 641-72 (2013).
- [3] T. Liamsuwan and H. Nikjoo, Phys Med Biol. 58, 673-701 (2013).
- [4] C. O. Reinhold and C. A. Falcón, Phys. Rev. A 33, 3859 (1986).

核破碎片生成二重微分断面積の測定

DOUBLE DIFFERENTIAL CROSS SECTION OF FRAGMENT PRODUCTION

佐波 俊哉^A、山口 雄二^B、魚住 裕介^B、古場 裕介^C

Toshiya. Sanami^A), Yuji Yamaguchi^B), Yusuke Uozumi^B), Yusuke Koba^C)

^A : 高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 放射線科学センター

^B : 九州大学工学府

^C : 放射線医学総合研究所

概要

平成 26 年度の放医研サイクロトロンの実験では、核破碎片生成の入射粒子種による依存性の解明を目的として、50 MeV、100 MeV ヘリウム入射と 50 MeV 炭素入射に対するベリリウム、炭素、アルミニウム、銅、銀ターゲットからの核破碎片生成二重微分断面積測定を行った。また、測定角度の拡充を目的に散乱チェンバーの改良を行った。

1. 目的

高エネルギー加速器研究機構、九州大学、放射線医学総合研究所からなる当グループでは核破碎片生成二重微分断面積の入射粒子依存性を明らかにすることを目的として、放医研サイクロトロンを利用した実験データの取得を行っている。これまでの研究[1-10]により、陽子、重陽子、ヘリウム原子核、炭素入射に対するベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットからの核破碎片生成二重微分断面積が得られている。これらの実験データと理論計算の結果を比較することにより、核破碎片生成にはその前段階に当たる核子-核子散乱過程でのエネルギーと核子の放出が寄与していることがわかってきた。核子-核子散乱過程で放出される粒子は陽子、重陽子、三重陽子、ヘリウム原子核などの比較的軽い粒子であり、これまである程度の実験データが得られているが、核破碎片と同時に測定された例は殆どない。昨年度は、これまでの核破碎片生成二重微分断面積測定と平行して、測定対象粒子の拡充を目的とした検出器の改良を行った。本年度はこの検出器を用いて、測定を進めると共に、散乱チェンバーの改良を行い測定角度の拡充を図った。本報告では、散乱チェンバーの改良についてその概要と、今年度の測定結果について述べる。

2. 散乱チェンバーの改良

核破碎片の測定はブラックカーブカウンター(BCC)を用いており、これに独自に開発した、カソード信号を用いた低エネルギー粒子弁別能力の改善[2]、突き抜け粒子のエネルギー補正による高エネルギー粒子の測定[3]、という手法を適用し、核破碎片の測定のために必要とされる効率と可測定エネルギー域の確保を行っている。BCC で測定可能な粒子はリチウム以上の粒子であり、これより軽い粒子では検出器厚みと分解能が十分ではなく、十分に測定が行えていなかった。そこで、昨年度に BCC について、(1)前置検出器を内蔵させることによりエネルギー分解能の向上を図り、(2)半導体検出器を組み合わせ

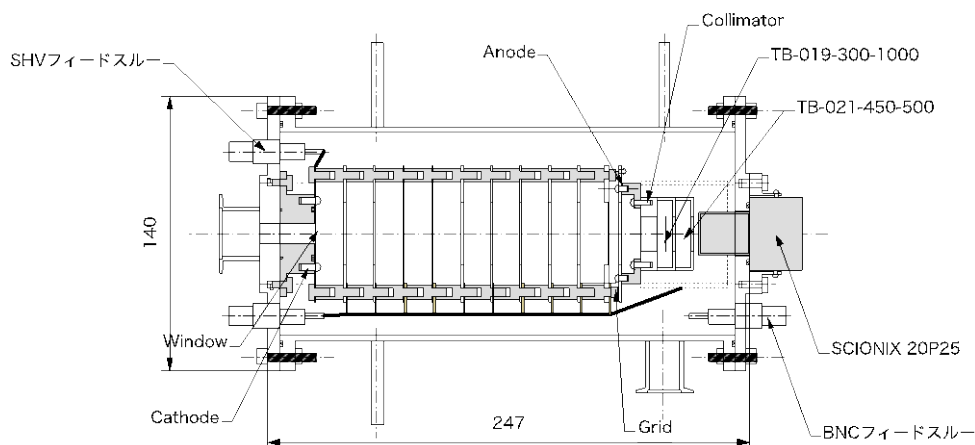


図 1 改良型 BCC の断面図

ることにより軽粒子を測定可能にし、(3)全体を小型化して測定角度の拡充を行っている。

図 1 に昨年度開発した BCC を示す。アノードと検出器フランジの間に 70mm 程度のスペースを設けて、アノード用前置検出器と半導体検出器、CsI シンチレータを組み込み可能な形状とした。アノード用前置検出器としては、これまで用いているクリアパルス社製 581 型を利用した。半導体検出器はセイコー EG&G 社製の TB-019-300-1000 (SSD 1000 μm)、TB-021-450-500 (Veto SSD 500 μm) を組み込んだ。CsI シンチレータは SCONIX 20P25 を組み込む予定である

この改造により BCC が小型化して可測定域が拡充されたのを受けて、散乱チェンバーの改良を行った。表 1 に主な核破砕片生成二重微分断面積測定の入射陽子エネルギーと測定角度をまとめる。これまで使用してきた散乱チェンバーを用いた実験は T.Sanami(2010)で示してあるが、測定対象の陽子エネルギー(E_p)は広範にわたっているが、測定角度が 30 度、60 度、90 度、120 度の 4 点であり、他のグループの測定角度(概ね 7 点以上)に比べ少ない。また、入射粒子が重イオンの場合、入射エネルギーが低い場合は放出粒子が前方に集中するために、測定角度も前方角度を中心とする必要がある。以上を踏まえ、新たに表 1 の Present(2014)に示す 8 点を測定角度として選定し散乱チェンバーの改良を行う。

表 1 主な核破砕片生成二重微分断面積測定の入射陽子エネルギーと測定角度

Author	Year	E_p	Angle															
			10	16	20	25	30	35	40	45	50	60	65	70	75	80	90	100
A.Budzanowski	2009	175 MeV																
A.Bubak	2007	2.5GeV		○	○			○			○		○			○		○
R.Berns	2004																	
H.Machner	2006	200MeV			○					○		○			○		○	○
S.J.Yennello	1990	161MeV		○		○			○			○					○	○
R.E.L.Green	1984	480MeV	○		○				○			○	○	○			○	
C.T.Roche	1976	45-100 MeV	○		○		○		○		○	○				○	○	○
T.Sanami	2010	40-300MeV					○					○					○	
Present	2014			○	○				○			○				○	○	

図 2 に新たに作成した散乱チェンバーの縦断面図と平面図を示す。設計においては測定角度の拡充に加え、以下について留意した。(1)検出器は最前方のみ小型の BCC を想定し、それ以外の角度では既存の BCC が使用できるようにする、(2)散乱チェンバーの真空を効率的に引くために、チェンバーにターボ分子ポンプを取り付ける、(3)測定角度を減らさずにターゲットを覗けるように、散乱面でない方向にビューポートを設ける、(4)半導体検出器の使用を考慮し、ビームダンプまでの距離を延長する、(5)ビームダンプ直前にデマルキャストを設置し、ダンプに入射するビームのモニターを行う、(6)これらを専

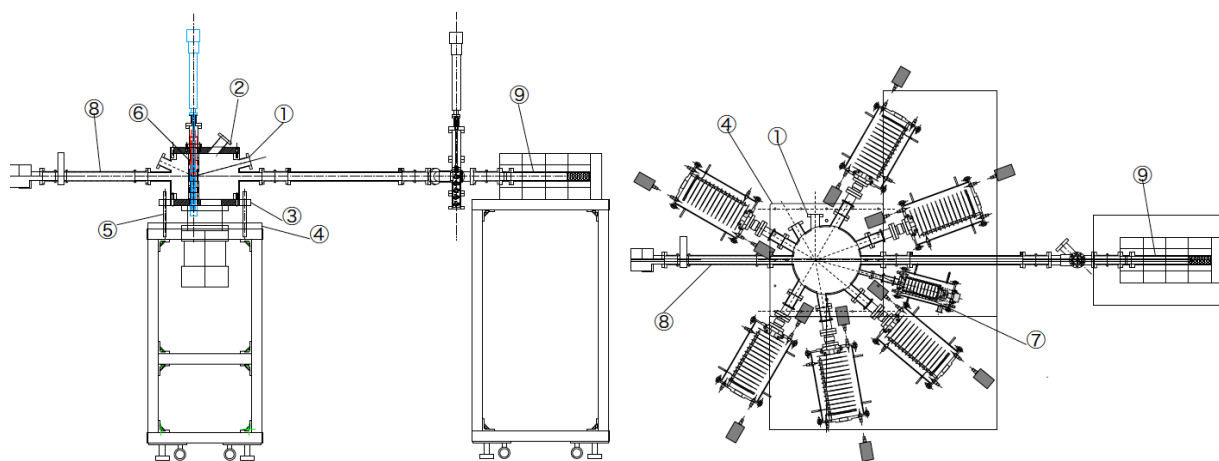


図 2 新たに作成した散乱チェンバーの縦断面図(左)と平面図(右)

用の架台に配して容易に設置ができるようにした。図 3 に新たな散乱チェンバーを C6 コースのビームラインに設置した写真を示す。

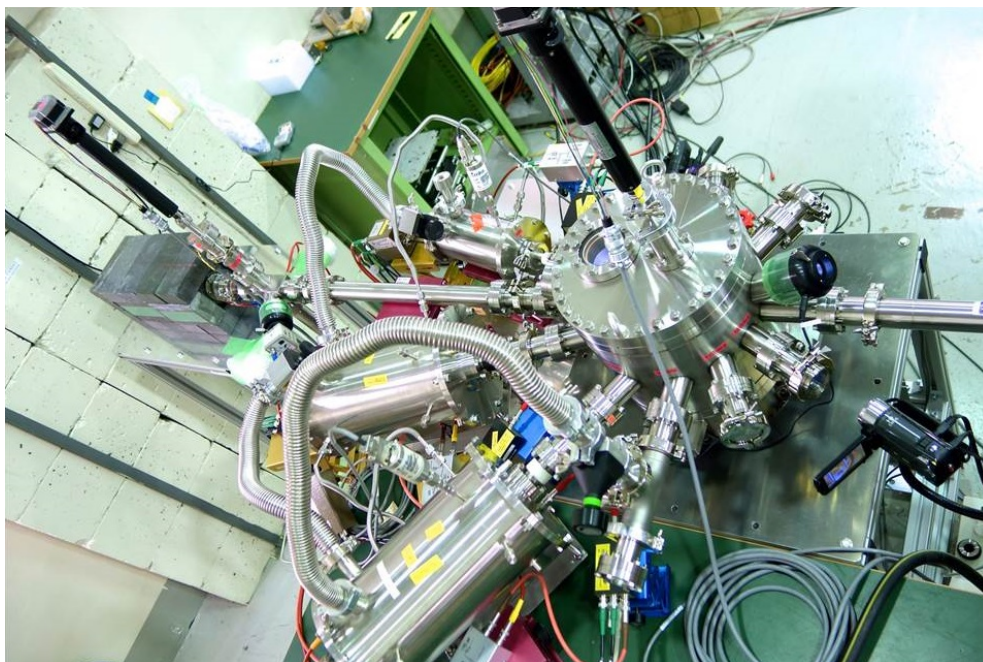


図 3 新たな散乱チェンバーを C6 コースのビームラインに設置した写真

3. ビーム実験

核破砕片生成の入射粒子種による依存性の解明を目的として、今年度は 50 MeV、100 MeV ヘリウム入射と 50MeV 炭素入射によるベリリウム、炭素、アルミニウム、銅、銀ターゲットからの核破砕片生成二重微分断面積測定を行った。これまでに測定したビーム種とエネルギーについて表 2 にまとめる。

表 2 入射粒子種を変えた核破砕片生成二重微分断面積測定の測定エネルギーと粒子種

エネルギー ／ 入射粒子	粒子あたり同一エネルギー			核子あたり同一エネルギー	
	50MeV	70MeV	140MeV	12MeV/n	25MeV/n
p	2014/ 1/17 2013/ 8/ 8	Ref[8]	2010/ 7/ 4 (RCNP)		2013/ 6/ 7
d	2012/11/13			2015 年予定	2012/11/13
He	2014/ 7/ 4	2013/ 1/11		2014/ 7/ 4	2014/ 7/ 5
C	2014/12/19	2013/ 7/ 3	2009/ 7/ 9	2009/ 7/ 9	

陽子 140MeV を除くビーム実験は放射線医学総合研究所の大型サイクロトロン(NIRS-930)の C6 コースにて行った。実験装置の配置、手法については参考文献 [1-10]に詳細な記述がある。前述の通り、2014 年 1 月の実験より BCC に半導体検出器を併用している。改良した散乱チェンバーの使用は 2014/12/19

からである。2015 年に予定している重陽子 24MeV(12MeV/n)の測定を行って、放射線医学総合研究所の大型サイクロトロンを用いて行える粒子種、エネルギー種の測定は網羅される。

4. 実験結果

図 4、5 に 2014 年度の測定結果のうち He 入射に係わるもののうち、炭素ターゲット、アルミニウムターゲットについて、30 度方向に放出された核破碎片の二重微分断面積を以前に測定した 70 MeV 入射の結果と比較して示す。図中の実線は計算値であり、PHITS コードバージョン 2.76 によるものである。物理オプションはデフォルト値を用いた。

図 4、5 の実験値により入射エネルギーが変わった場合の生成核破碎片のエネルギー分布の変化が見て取れる。炭素、アルミニウムターゲットのどちらについても、入射エネルギーが高くなるほど、放出粒子が軽くなるほど、スペクトルは高エネルギー側にシフトしており、また、形状が単純なマクスウェル分布からずれてくる。この傾向は陽子入射の場合と同様である。

計算結果は概ね実験値を再現しているものの、リチウム、ベリリウムの高エネルギー部について過小評価している傾向が見られる。この部分の核破碎片生成の機構が計算コードに組み込まれていないことによるものと推定される。また、このエネルギー帯では核破碎片生成は PHITS コードに組み込まれている GEM コードを経て生成されているが、そのエネルギー依存性は、例えば放出核破碎片の最頻エネルギーでの断面積値の挙動、高エネルギー側テールの傾きの変化などにおいて、実験データと異なっている。核破碎片生成量も炭素については比較的よい一致を示しているが、アルミニウムやこれより重いターゲットでは極端に過小評価をする傾向が、他の入射粒子の実験データと同様に見られた。

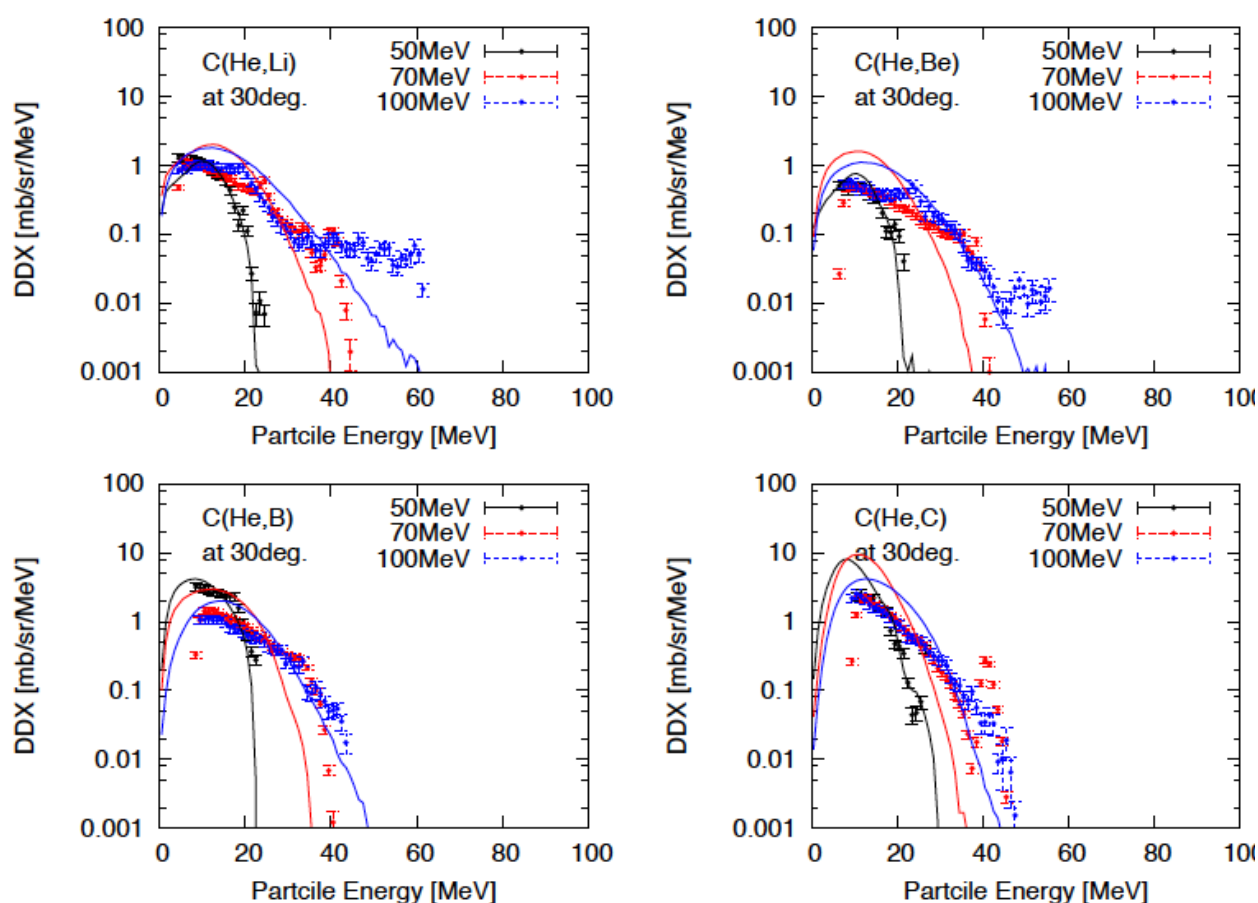


図 4 リチウム、ベリリウム、ボロン、炭素のエネルギースペクトルの測定値と計算値。実験値は BCC のみで測定したデータ。計算値は PHITS コードによるもの。

5. まとめ

平成 26 年度のマシンタイムにおいてはデータ取得に加え、散乱チェンバーの改良を行い、測定角度を拡充することができた。ビーム実験ではヘリウム入射 50MeV、100MeV、炭素入射 50MeV の実験を

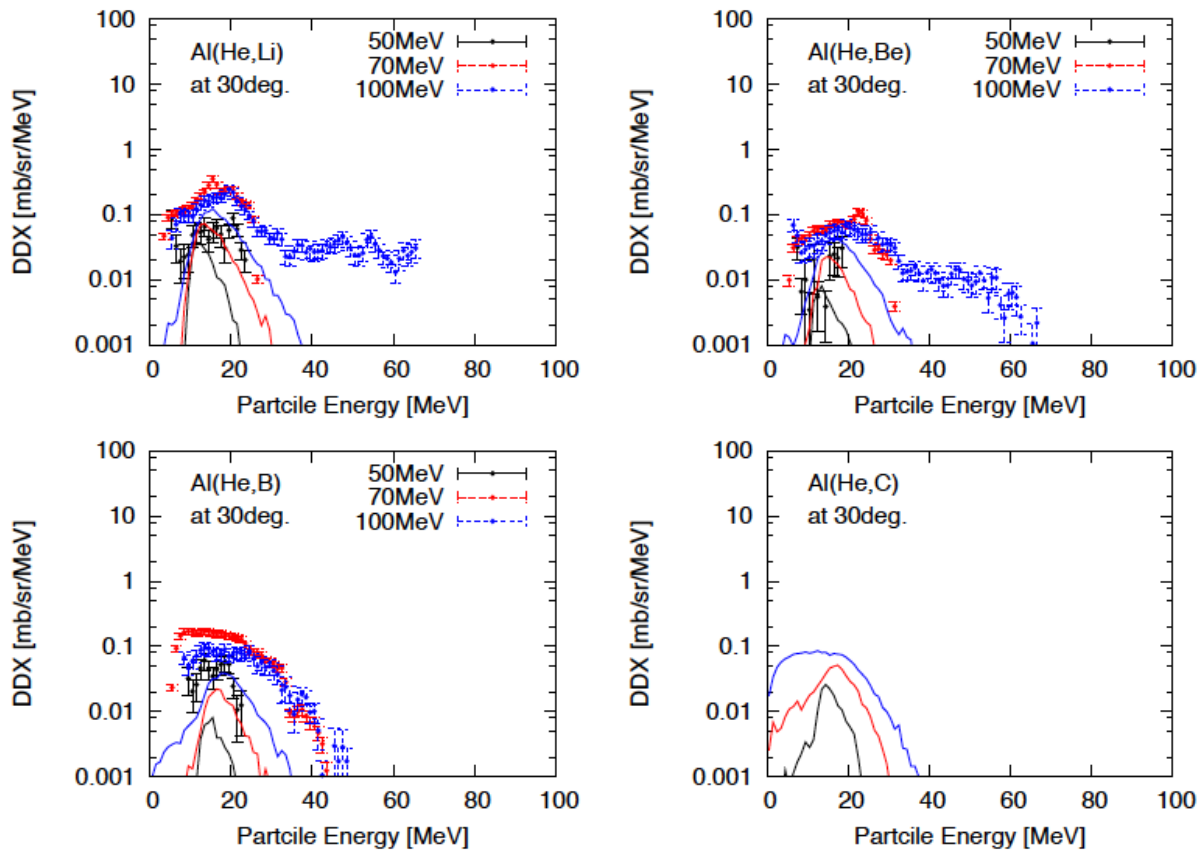


図 5 リチウム、ベリリウム、ボロン、炭素のエネルギースペクトルの測定値と計算値。実験値は BCC のみで測定したデータ。計算値は PHITS コードによるもの。

行い、測定データを得ることができた。次年度予定されている重陽子 12 MeV/n の測定を行い、放医研サイクロトロンで取得可能なデータの取得を一通り終えることができるので、これまで得られたデータを種々のパラメータについて整理し、系統性を導出していく。

参考文献

- [1] T. Sanami *et al.*, "Measurement of fragment production DDX of 72 and 144 MeV ^{12}C beam induced reaction on carbon using Bragg Curve Counter", *Proc. 2009 Symp. Nucl. Data*, JAEA-Conf 2010-005 (2010).
- [2] T. Sanami *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A589** 193 (2008).
- [3] M. Hagiwara *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A592** 73 (2008).
- [4] M. Hagiwara *et al.*, "Measurements of Double Differential Fragment Production Cross Sections of Silicon for 70 MeV Protons", *Proc. 2005 Symp. Nucl. Data*, JAEA-Conf 2006-009 (2006).
- [5] T. Sanami *et al.*, "Recent progress of fragment measurement from tens of MeV proton induced reaction using Bragg Curve Counter", *Proc. 2008 Symp. Nucl. Data*, JAEA-Conf 2009-004 (2009).
- [6] T. Sanami *et al.*, "Fragment DDX measurement of proton induced reactions on light-medium nuclei for energy range from reaction threshold to a few hundred MeV ", *Journal of Korean Physics Society* 59, 1805-1808 (2011).
- [7] T. Sanami *et al.*, "Experimental studies of light fragment production cross section for nucleon induced reaction at intermediate energies", *Proc. 2010 Symp. Nucl. Data* (JAEA-Conf 2011-002) (2011).
- [8] M. Hagiwara *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **49(6)** 571-587 (2012).
- [9] T. Sanami *et al.*, "Angular distribution of light fragments for proton induced reaction at intermediate energies", *Proc. 2011 Symp. Nucl. Data* (JAEA-Conf 2012-001) 189 (2012).
- [10] T. Sanami *et al.*, "Target Dependency of Light Mass Fragment Production DDX for 6 MeV/u Carbon Induced Reaction" *Proc. 2012 Symp. Nucl. Data* (JAEA-Conf 2013-002) 185 (2013).

最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定 MEASUREMENTS OF CHARGED PARTICLE PRODUCTION CROSS SECTIONS AT MOST FORWARD ANGLES

魚住 裕介^A、橋口 太郎^B、米重 英成^B、園田暁史^B、山口雄司^C、
古場 裕介^D

Yusuke Uozumi^A, Taro Hashiguchi^B, Hidenaru Yoneshige^B, Akifumi Sonoda^B,
Yuji Yamaguchi^C, Yusuke Koba^D

^A: 九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門

^B: 九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻

^C: 九州大学工学部エネルギー科学科

^D: 放射線医学総合研究所医療被ばく研究プロジェクト

概要

原子核反応モデルの開発と検証に用いる目的で、過去に測定例のない最前方角での陽子入射荷電粒子生成反応二重微分断面積の整備を目指して実験を開始している。C6 コースに散乱チェンバーを設置し、大型サイクロトロンからの 40 MeV 陽子を使用して、散乱角度 6° から 30° までの 6 点で二重微分断面積を測定した。さらに最後方角でのデータも重要であることから 150°、160°、165° の測定も行った。得られた測定データは、過去の実験データと比較検証した。さらに理論計算の結果とも比較を行った。

1. 目的

粒子輸送コードPHITS [1]は粒子線医療等多くの応用分野で利用されており、コードの改良は現在でも進められている。特にエネルギー範囲20-100MeVでの核反応計算の精度向上が要望されている。このため、核反応モデルであるINC (Intranuclear Cascade) モデルを100MeV以下のエネルギー領域まで拡張する必要がある。我々は(p,p'x)反応に関する最近の研究 [2,3] において、回折効果と集団励起とを適切に取り扱う事により、INCコードの予測精度を大幅に改善できる事を示した。(p,p'x)反応の場合、集団励起の影響は20° より前方の二重微分断面積において強く現れ、10° より前方で特に顕著となる。このため、最前方角での(p,p'x)反応実験データを用いた検証が重要となる。しかし、ゼロ度近傍の最前方データは過去に測定例がなく、新しく実験を行ってデータを取得しなければならない。また、(p,dx)反応や(p,tx)反応のデータも最前方の測定例はなく、モデルの一般化のためにこれらも同時に整備する必要がある。ゼロ度近傍の測定については、ビームの直接的影響等バックグランド要因が大きく、バックグランド除去を注意深く行わねばならない。さらに、最後方でのデータ測定に向けた検討も行う。

2. 実験とデータ解析

実験はNIRSの大型サイクロトロンを用い、C6 コースにおいて実施した。入射粒子には 40 MeV 陽子を、ターゲットには厚さ 100 μm の ^{12}C 、 ^{27}Al 、 ^{93}Nb その他を用いた。ターゲットは昨年度に製作した真空チェンバーの中に設置した。検出器は真空チェンバー外の大気中に置くため、チェンバー窓には厚さ 50 μm のカプトンフォイルを用いた。カウンターテレスコープは、半導体検出器(SSD) 2 枚と GSO(Ce) 結晶シンチレータから構成した。シンチレータの信号は光電子増倍管により読み出した。測定を行った角度は 6°, 9°, 12°, 15°, 20°, 30° であった。

6°, 9° 等の前方測定では、ビーム電流を低く抑える必要があるが、微弱なビーム電流ではファラデーカップが正常に動作しなくなる。このため、ビーム粒子数の計数用にビームモニターを製作、設置して使用した。ビームモニターはチェンバー下流に置いた厚さ 500 μm の ^{12}C 板からの散乱線を、そこから 30° 方向の位置に置いたプラスチックシンチレータ 2 枚で同時計数するような構成とした。ビームモニターの較正は、ファラデーカップが正確に動作するビーム強度において、ビーム強度[pA]を変化させていき、それに対応するビームモニターのカウント数を測定して、ビーム強度とカウント数と関係性を求め、これを用いた。実験で使用するビーム強度の範囲において、良好な線形性が確認できた。実験方法の詳細およびデータ解析については、平成 23 年度の報告 [4] を参照されたい。

3. 結果と考察

結果の例として 40 MeV での $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{dx})$ 反応、 $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{dx})$ 反応、 $^{93}\text{Nb}(\text{p}, \text{dx})$ 反応の DDX スペクトルを図 1 から図 3 に示している。図中には CCONE [5] および PHITS コードによる計算結果を実線で示している。CCONE は、連続スペクトル領域はエキシトンモデルにより計算しており、非連続状態への遷移ピークについては検出器の分解能を考慮して幅を広げて表示している。PHITS は核反応モデルとして INCL と GEM を用いた。C ターゲットでの実験値は 30° では CCONE とほぼ一致しているが、他の角度では小さい値となっている。PHITS の結果は全体的に大きい値を示している。

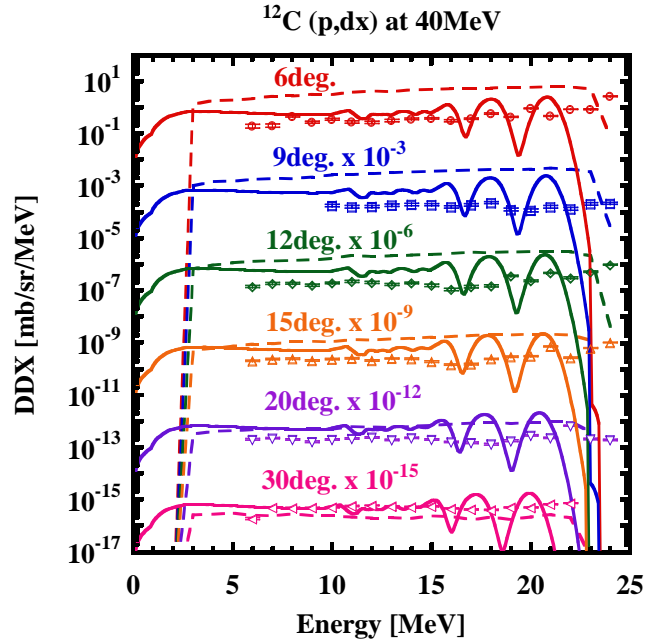


図 1 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{dx})$ 反応 DDX および CCONE(実線)、PHITS(点線)の結果。

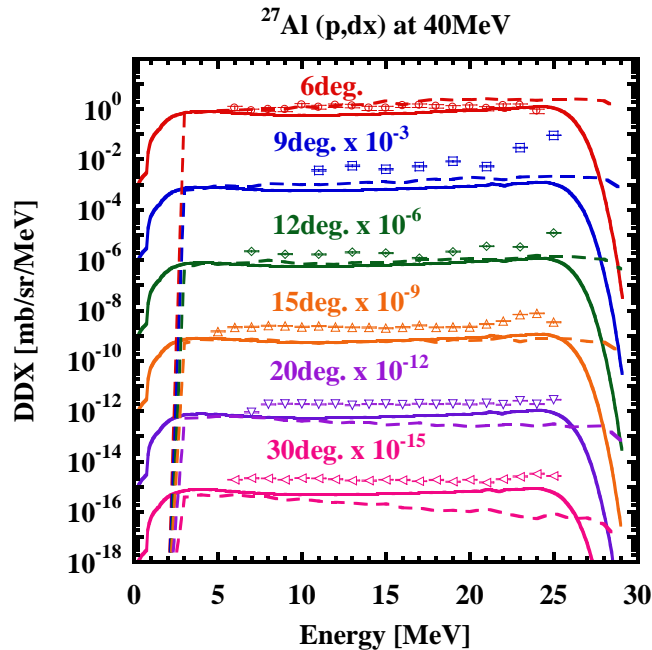


図 2 $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{dx})$ 反応 DDX および CCONE(実線)、PHITS(点線)の結果。

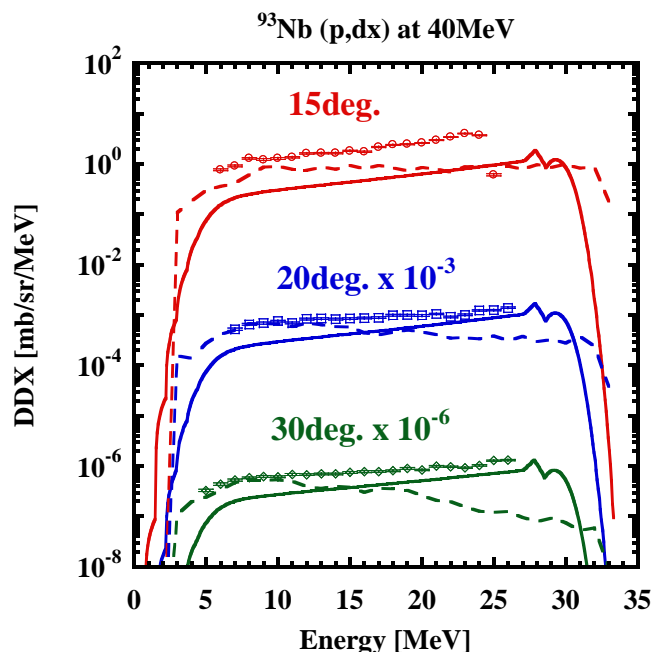


図3 $^{93}\text{Nb}(p, dx)$ 反応 DDX および CCONE (実線)、PHITS (点線) の結果。

昨年度の本報告書で示したように、 ^{12}C ターゲットの場合は $(p, p'x)$ 反応の連続スペクトル領域でも実験値と計算結果とは比較的良い一致が見られた。

一方、 ^{27}Al と ^{93}Nb ターゲットの場合は、CCONE と PHITS との間にも違いがあるが、実験値はこれら計算値よりも全体的に大きな値となっている。CCONE はいずれのターゲットでも実験値とスペクトル形状は似ているが、ターゲットが重くなると過小評価する傾向が見られる。なお、データ確定までにバックグラウンドについて再確認をする必要があると考えられる。

5. まとめ

散乱角度 6° から 30° までの最前方において、 (p, dx) 反応の二重微分断面積測定を行った。ターゲットとして ^{12}C 、 ^{27}Al 、 ^{93}Nb 等を、ビームとして 40 MeV 陽子を用いた。測定値を PHITS および CCONE の計算値と比較したが、それぞれが異なる値を示すことが分かった。このため、実験データの確定と精度向上が重要である。核反応モデルを幅広い視点から検証可能にするため、今年度は後方角での測定の可能性についても調査を行った。標的核と入射ビームエネルギーについて幅広い範囲でデータを収集して反応断面積の系統性を明らかにしていく計画である。

参考文献

- [1] T. Sato et al.: J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).
- [2] Y. Uozumi et al.: Phys. Rev. C 86, 034680 (2012).
- [3] Y. Uozumi et al.: Jour. Nucl. Sci. Tech. 52:2, 263-272 (2015).
- [4] 魚住裕介他：平成 23 年度サイクロトロン利用報告書, NIRS-M-250, 24 (2012).
- [5] O. Iwamoto: J. Nucl. Sci. Technol., 44, 5 (2007) 687.

陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ENERGY DEPENDENCY OF PROTON-INDUCED TARGET FRAGMENTATION REACTIONS

小平聡、北村尚

Satoshi Kodaira, Hisashi Kitamura,

放射線医学総合研究所研究基盤センター研究基盤技術部放射線計測技術開発課

概要

放射線治療に用いられる陽子線が人体内中に二次的に生成する標的核破砕粒子による余剰線量が懸念されている。標的核破砕粒子は、標的核のノックオンのほか励起状態からの蒸発過程など複雑な核反応による放出される。その中で飛程が短い非常に高い LET (線エネルギー付与) を持つ粒子については、人体に与える線量影響は無視できないと考えられる。従来の線量計測法では一次ビームと同時に放出される二次粒子の同時計測が難しいことや、LET スペクトルの実測が必要であることなどから、二次粒子の線量の定量的評価は行われていないのが現状である。本研究では、CR-39 プラスチック固体飛跡検出器を用いることで、二次粒子によるイオントラックを記録し、それらの LET スペクトルの実測から定量的な線量評価の実施を進めている。大型サイクロトロンを用いた研究では、30MeV から 70MeV 程度の低エネルギー領域での二次粒子生成のエネルギー依存性を取得することを目的としている。HIMAC で照射を行った 160 MeV 陽子線の水中でのブラッグカーブに沿った二次粒子の LET スペクトルと、サイクロトロンで照射を行った単色の 40 MeV と 60 MeV のエネルギーでの二次粒子のスペクトルの比較では、水中 LET で 100 keV/μm 以下の領域で前者に明らかな増大を確認した。

1. 目的

放射線治療に用いられる陽子線が、がん病巣に投与する線量の他に、人体との核反応による二次粒子を放出しながら人体通過中すると考えられる。これらの二次粒子は、一次陽子線よりも高い LET を持つ重荷電粒子を含むため、生物学的効果が高く、人体に与える線量影響は無視できない。従来の電離箱やシリコン検出器などによる線量計測法では、高密度な陽子線とそこから発生する二次粒子の同時計測が難しいだけでなく、特に飛程が 10 μm よりも短い粒子の検出が困難であること、LET スペクトルの実測が必要であることなどから、実際に二次粒子がどの程度の余剰線量を呈するかは分かっていないのが現状である。本研究では、CR-39 プラスチック固体飛跡検出器と原子間力顕微鏡を組み合わせた精密計測法により二次粒子を実測し[1]、陽子線の標的核破砕反応に関する基礎実験データを取得することを目的としている。この研究は HIMAC 共同利用研究課題(H286) においても並行して進めている。HIMAC では 160MeV ならびに 230MeV の高エネルギー領域での実験を行っており、バイナリフィルタ (水等価 PMMA アブソーバ) を用いたエネルギー減衰により、水中のブラッグカーブに沿った二次粒子の線量を評価している。エネルギーのストラグリングのほか、アブソーバ自身で二次的に発生する陽子線が標的の中で N 次的に生成する事象も全て含めた複雑なビームであると考えられることから、標的核破砕反応のエネルギー依存性については知見を得ることは難しい。そこで、本研究ではサイクロトロンから供給される低エネルギーの陽子線を 30MeV から 70MeV にわたってエネルギー別に照射することにより、陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性を評価することを目的とする。

2. 実験方法

C-8 コースにおいて、ワブラー電磁石と散乱体によって直径 7cm 円形程度のビームサイズで均一な照射野を持つ陽子線 70MeV、60 MeV、50 MeV、40 MeV、30 MeV を CR-39 スタックへ照射した。放出される二次粒子の角度分布や CR-39 自身の臨界角度依存性を補正するために[2]、入射角度は 90 度から 15 度まで 15 度刻みの計 6 角度で照射を行った (図 1)。照射線量はサンプル照射位置前方に設置した平行平板型の大型電離箱のカウント値により制御した[3]。この電離箱の信号は、予め照射位置に設置した Markus 電離箱を用いて較正してある。ビーム電流は大よそ 1nA 程度で、照射フルエンスは $3.53 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ になるように各陽子線エネルギーの LET 値を考慮して照射線量を決定した。CR-39 はフクビ化学工業社製の BARYOTRAK を使い、50mm×50mm×0.9mm を 2 枚重ねた組を 1 セットとし、重なり合う面を解析面とした。

照射後、CR-39 を 70 度に保持した 7 規定の水酸化ナトリウム水溶液中で 0.5 時間エッチングした。エ

ツチング後、CR-39 表面を AFM (Veeco Dimension-V) を用いて走査し、二次粒子の飛跡画像を取得した。CR-39 中央部をタッピングモードで、1 視野あたり $25\ \mu\text{m}$ 角のサイズ毎に格子状に 1.5Hz の速度で走査した。走査面積は約 $62500\ \mu\text{m}^2$ で、分解能は $0.024\ \mu\text{m}/\text{pix}$ であった。

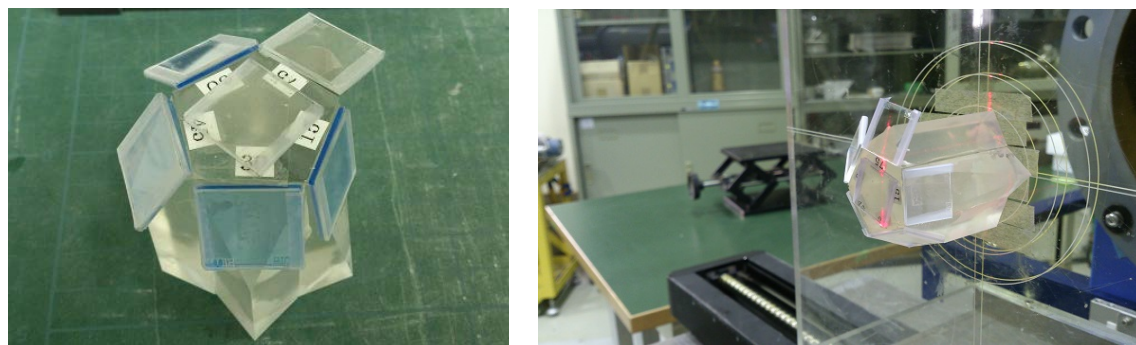


図 1. 二次粒子の立体角及び臨界角補正のための、 $90^\circ \sim 15^\circ$ まで 15° 刻みの角度照射用治具。 $19\text{mm} \times 19\text{mm}$ の CR-39 スタックを固定し、一度に 6 角度で照射することができる。

3. 実験結果

最も低いエネルギーの陽子線 ($30\ \text{MeV}$) の水中での LET は約 $2\ \text{keV}/\mu\text{m}$ であり、CR-39(BARYOTRAK) の LET 検出閾値 ($15\ \text{keV}/\mu\text{m}$) [4]により、陽子線自体は CR-39 中に飛跡を作らない。従って、CR-39 は標的核破砕粒子だけをイオントラックとして観測していることになる。HIMAC からの重粒子線を用いた CR-39 の応答校正曲線を用い[1]、生成した二次粒子の LET 値を求めることができる。HIMAC ならびにサイクロトロンで照射した単色エネルギー (230MeV , 160MeV , 60MeV , 40MeV) の陽子線照射により生成した二次粒子の LET スペクトルを図 2 に示す (なお、図 2 は入射角度が 90° のみの結果であり、角度依存性は考慮していない)。エネルギーが低くなるほど二次粒子のフルエンスが増大しており、二次粒子の生成断面積のエネルギー依存性を示している。

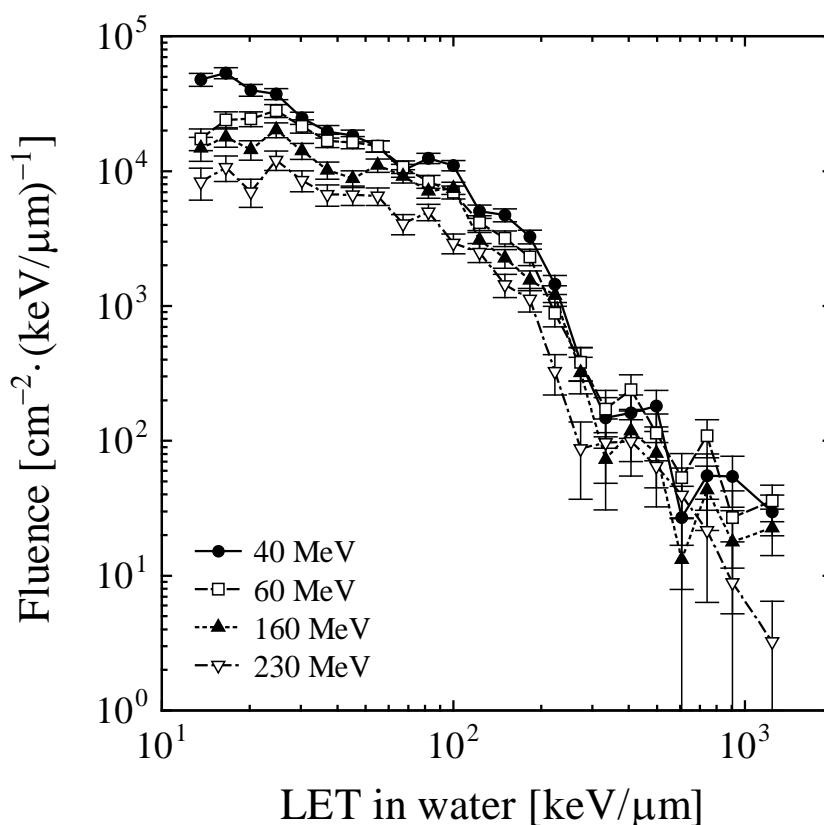


図 2. 入射陽子エネルギー毎に観測された二次粒子の LET スペクトル

一方で、HIMAC からの 160MeV 陽子線をバイナリフィルタを用いてエネルギーを減衰させた場合と単色エネルギーとの LET スペクトルの違いについて比較を行った。160MeV 陽子線が水等価厚で 136mm ならびに 154mm を通過した場合、陽子線のエネルギーはそれぞれ約 60MeV ならびに 40MeV であり、図 3 にそれぞれの単色エネルギーの LET スペクトルと比較した。LET が 100 keV/μm 以下の領域でエネルギー減衰させた時の二次粒子生成量の明らかな増大を確認した。これは従来 CR-39 では観測されないエネルギー領域にあるような、高エネルギーのノックオン粒子自身が、バイナリフィルタを通過する際に生成ならびにエネルギー減衰したことによって、CR-39 で観測されたものと推察される。

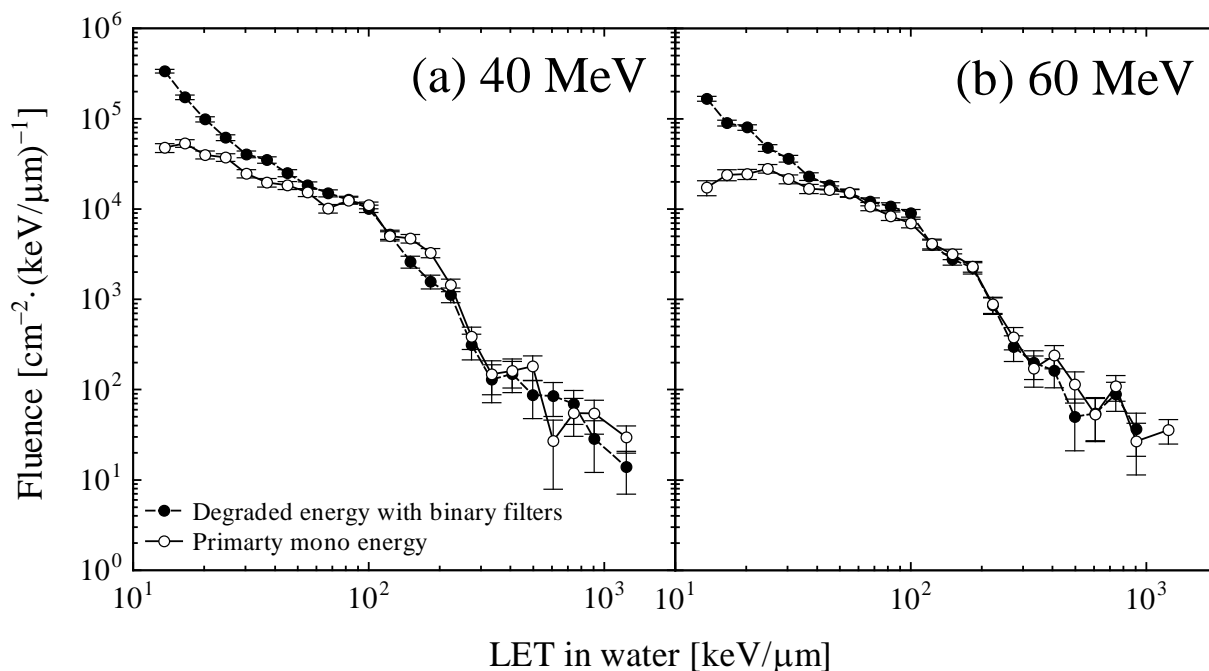


図 3. HIMAC からの 160MeV 陽子線のエネルギーをバイナリフィルタにより減衰させた場合 (●) とサイクロトロンからの単色エネルギーの場合 (○) で観測した二次粒子の LET スペクトルの比較。(a) 40MeV と (b) 60MeV.

4. まとめ

CR-39 固体飛跡検出器と原子間力顕微鏡を組み合わせた精密計測法により、70MeV, 60 MeV, 50 MeV, 40 MeV, 30 MeV の陽子線が CR-39 中に生成する標的核破砕粒子の生成断面積や線量寄与のエネルギー依存性の評価を進めている。現在、角度依存性を考慮した解析を進めている途中であり、今後定量的なエネルギー依存性に関する議論を進めたい。

参考文献

- [1] Kodaira, S., Yasuda, N., Konishi, T., Kitamura, H., Kurano, M., Kawashima, H., Uchihori, Y., Ogura, K., Benton, E.R., 2013. 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.
- [2] Kodaira, S., Konishi, T., Kitamura, H., Kurano, M., Kawashima, H., Uchihori, Y., Nishio, T., Yasuda, N., Ogura, K., Sihver, L., Benton, E.R., 2015. On the use of CR-39 PNTD with AFM analysis in measuring proton-induced target fragmentation particles, Nucl. Instrum. Meth. B, B349, 163-168.
- [3] 北村尚, 内堀幸夫, 小平聡, Ploc Ondrej, 金澤光隆, 杉浦章則, 鈴木直方, 北條悟, 岡田高典, 小松克好, 神谷隆, 2010, 汎用照射室 C-8 コースにおけるビーム制御, 平成 21 年度サイクロトロン利用報告書, 46-49.
- [4] Kodaira, S., Yasuda, N., Kawashima, H., Kurano, M., Naka, S., Ota, S., Ideguchi, Y., Hasebe, N., Ogura, K. 2011. 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.

重粒子ドシメトリーにおける線質依存性の評価

The evaluation of the radiation quality dependence in heavy-ion dosimetry

松藤成弘^{a,b}、松山哲大^{a,b}、佐竹佑介^{a,b}、石田祥大^{a,b}、篠崎真理^{a,c}、三上集^{a,c}、下山薫^{a,c}

N. Matsufuji^{a,b}, T. Matsuyama^{a,b}, Y. Satake^{a,b}, A. Ishida^{a,b}, M. Sinozaki^{a,c}, S. Mikami^{a,c}, K. Shimoyama^{a,c}.

Abstract

The extent of recombination on an ion chamber is dependent on the radiation quality of incident radiation. In particular, heavy ion beams such as carbon shows complex radiation quality. The reason is not only the energy of incident ions is continuously changing in the material, but also the beam is associated with fragment particles of various species and energies produced by nuclear reactions. Therefore, it is essential to evaluate and formulate of the recombination characteristics of the therapeutic beams for the accuracy of the treatment. However, few studies have been carried out so far on the quantification of the recombination effect. In this study, it was aimed to experimentally obtain the recombination characteristics of ion beams to understand and formulate using the track-structure model.

1. 研究の目的とバックグラウンド

放射線治療において患者に投与される吸収線量の測定には一般に電離箱が使用される。電離箱で測定した電荷から吸収線量を評価するために必要となる補正の一つに、電離箱内で生じた電荷の再結合補正がある。再結合の程度は放射線の種類や照射条件（線質）によって異なる。特に炭素線など重粒子線は物質内でエネルギーが連続的に変化するのみならず、核反応により生じた様々な核種・エネルギーのフラグメント片が混入することから複雑な線質を呈する。このため、治療用重粒子線の再結合特性の評価とその定式化が治療の高精度化のためには不可欠である。しかしながら、重粒子線の複雑な線質における再結合のメカニズムは明らかになっていない。現状の再結合補正では線質の違いが考慮されておらず光子線と同様の補正を行っている。故に、HIMAC に於いて、炭素線をはじめとする種々の治療領域のイオンビームについて電離箱を用いた測定により再結合特性を実験的に得るとともに、トラック構造モデルを用いた解析によって、その系統的な理解と定式化を試みた。その結果、治療領域のイオンビームについて電離箱を用いた測定により再結合特性を実験的に得る事が出来た。また、実験結果を従来の再結合モデルと比較するとともに、ト

ラック構造モデルを用いた解析によって再結合の定式化を行った。

本研究ではこのモデルの低エネルギー領域での妥当性を検証することを目的としてサイクロ実験を行った。

2. HIMAC 実験&再結合モデル

HIMAC 実験では、イオン再結合の線質依存性を明らかにすることを目的とし、そのための手段としてトラック構造モデルを用いて重粒子線照射における初期再結合を評価する。実験では再結合を評価するために、電離箱に印加する電圧と使用核種・エネルギーを変化させて再結合の線質依存性を測定した。実験は4種類の核種に関する単色ビームを使用した実験を2次ビームコースで複数の核種について様々なエネルギーを用いた実験を行った。加速器側ならびに、プロジェクションターゲットを使用してエネルギーを変化させた。ビーム強度は 10^7 pps 程度である。実験値を計算と比較した結果を図2に示す。炭素線をはじめとする種々の治療領域のイオンビームについて電離箱を用いた測定により再結合特性を実験的に得る事が出来た。実験結果を従来の再結合モデルと比較するとともに、トラック構造モデルを用いた解析によって再結合の定式化を行い、その傾向を説明する事ができた。しかしながら実験値を再現するためには線質依存する補正項 β を導入する必要があった。

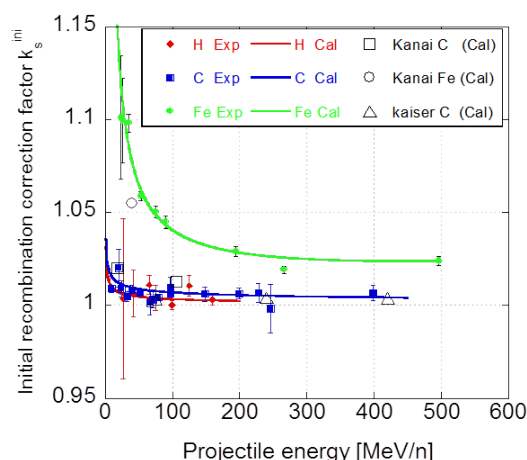


図1 初期再結合補正係数の線質依存性
プロットは実験値、実線は計算値を表す。
□○△は先行研究の計算値を表す[1]。

3. 今年度の研究内容

本年度の研究では、本研究では再結合モデルの低エネルギー領域での妥当性を検証することを目的とした。

実験では再結合を評価するために、電離箱に印加する電圧と使用核種・エネルギーを変化させて再結合の線質依存性を測定した。実験では $^1\text{H}10/50\text{MeV}$ を使用した。また Al ターゲットを使用してエネルギーを変化させた。ビーム強度は 10^8pps 程度である。照射対象として、有感領域の直径が 148mm の大面積平行平板電離箱を 2 台使用した (図 2)。一つは電圧を一定としてモニタに使用し、もう一方は電圧を 4 段階変化させて、収集電荷を測定した。

初期再結合は、電圧の逆数 $1/V$ に対する収集電荷量の逆数 $1/Q_V$ のグラフに於いて線形関係に回帰できる。この時の切片の値は電圧が無量大で、再結合が起こらないと考える事が出来、飽和電荷量 Q_∞ の逆数に相当する。これにより初期再結合補正係数 $k_s^{\text{ini}} = Q_\infty/Q_V$ の線質依存性を求めた。

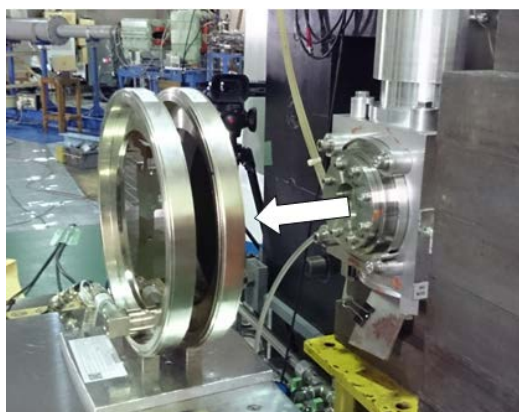


図 2 C6 コースでの実験体系

4. 今年度の研究成果と解析結果

低エネルギー陽子線に対して、電離箱を用いた測定により再結合特性を測定した実験結果を図 3 に示す。低エネルギー陽子では 1%未満の再結合しか起こらないことがわかった。

サイクロ実験による、低エネルギー領域の陽子線に対する実験結果と、HIMAC 実験による高エネルギー領域の実験結果・モデル計算の結果を比較した結果を図 4 に示す。両者には不連続性が見られ、この統合的な理解・説明が今後の課題である。

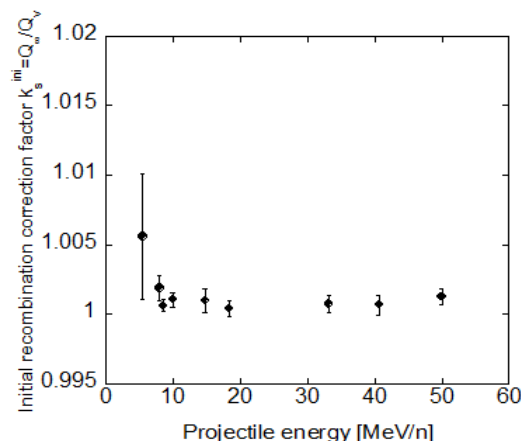


図 3 低エネルギー陽子線に対する再結合補正係数の線質依存性

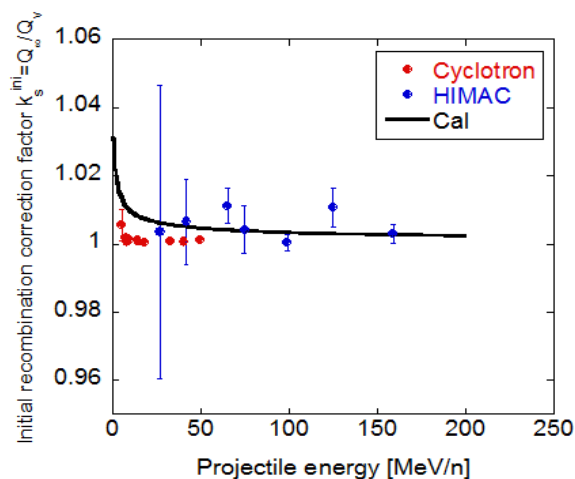


図 4 陽子線に関する、HIMAC の実験結果ならびにモデル計算結果との比較

-
- a. 放医研
 - b. 東工大
 - c. 東邦大

放射線遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験

NEUTRON TRANSMISSION EXPERIMENT FOR FLEXIBLE MATERIAL FOR RADIATION SHIELDING

執行 信寛^A、今富 宏祐^A、三根 貴大^A、池田 伸夫^A、石橋 健二^A
木村 健一^B、高橋 定明^C、平澤 勇人^C、古場 裕介^D
Nobuhiro Shigyo^A, Kosuke Imatomi^A, Takahiro Mine^A, Nobuo Ikeda^A, Kenji Ishibashi^A
Ken-ich Kimura^B, Sadaaki Takahashi^C, Hayato Hirasawa^C, Yusuke Koba^D,
A : 九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門
B : 株式会社フジタ技術センター
C : 中国塗料株式会社
D : 放射線医学総合研究所

概要

加速器施設用の放射線遮蔽用に開発された可とう性を有する材料の中性子遮蔽能力を調べるために、50 MeV 陽子を鉄板に入射して生成される中性子の透過量の材料厚さに対する変化を測定した。10 MeV 以上の中性子の線減弱係数は、シミュレーションから予測されるコンクリートの係数の 95 % 程度であることが分かった。

1. 目的

加速器施設の放射線遮蔽では一般的にコンクリートが使用されるが、可とう性を有する材料が使用できれば、局所遮蔽や施設の柔軟な設計に寄与できる。本研究では、放射線の中でも特に中性子遮蔽に主眼を置いて開発された可とう性材料の中性子透過量を測定し、中性子の遮蔽能力を評価することを目的とする。

2. 実験方法

使用した可とう性材料は中国塗料株式会社と株式会社フジタで開発されたラディシールと呼ばれるウレタンをベースにしたのもで、密度が 1.0 g/cm^3 で水素含有量を一般的なコンクリートに近い 87.3 mg/cm^3 に増やしたものを使用した。この試料は 1 枚が $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ の大きさと、厚さを 0 cm から 20 cm まで 5 cm 毎に変化させた。

実験はサイクロトロン施設の C-8 ビームラインで行った。このビームラインの ST2 電磁石の下流のビームダクトを外し、ST2 のすぐそばにビーム量測定用の厚さ 0.5 mm の NE102A プラスチックシンチレータと中性子生成用の直径 5 cm、厚さ 1 cm の鉄を置いた。この鉄で陽子ビームは完全に停止する。その下流 1.9 m のところに可とう性材料試料を透過した中性子を計測するための直径 12.7 cm、長さ 12.7 cm の NE213 有機シンチレータを置いた。このシンチレータの上流側に荷電粒子識別用の厚さ 2mm の NE102A プラスチックシンチレータを置いた。試料となる可とう性材料は鉄板から 70cm 下流に設置した。図 1 に実験のセットアップを示す。

ビーム電流は 1 pA とし、それぞれの厚さで 30 分から 1 時間測定した。



図 1.実験のセットアップ

3. データ解析

試料を透過する荷電粒子事象を NE102A シンチレータの発光量分布から取り除いた後、NE213 有機シンチレータの波形減衰成分の違いからガンマ線事象を取り除き、中性子事象のみを抽出した。NE213

シンチレータの波高スペクトルを SCINFUL-QMD コード[1]による中性子応答関数と UMG コードセットの MAXED コード[2]でアンフォールディングし鉄板に入射した陽子数で規格化することで、中性子エネルギースペクトルを導出した。アンフォールディングの初期値には PHITS コード[3]で同等の体系を設定して得られた中性子のエネルギースペクトルを使用した。中性子透過量は厚さ 0 cm の時の値で規格化した。シンチレータからの信号の処理回路とサイクロトロンからの陽子ビームの出射間隔の関係でエネルギースペクトルとして利用できるものは、10 MeV 以上の中性子であった。

4. 実験結果

図 2 に厚さ 0 cm で規格化した中性子透過量の測定値を示す。この図から 10 MeV 以上の中性子の線減弱係数は 0.056 cm^{-1} であることが分かった。比較のために実験と同等の体系を設定して中性子透過量を PHITS 2.67 コードで計算した結果を合わせて示す。PHITS では陽子と 20 MeV 以上の中性子は INCL モデル[4]、20 MeV 以下の中性子に対しては JENDL-4.0 [5]を使用した。その結果、PHITS で計算した場合の線減弱係数は 0.051 cm^{-1} となり、実験をほぼ再現していることが分かった。また、PHITS で一般的な密度が 2.2 g/cm^3 のコンクリートに対する中性子透過量は 0.059 cm^{-1} となり、今回の試料は 10 MeV 以上の中性子に対してコンクリートの 95 %程度の遮蔽性能を有することが分かった。

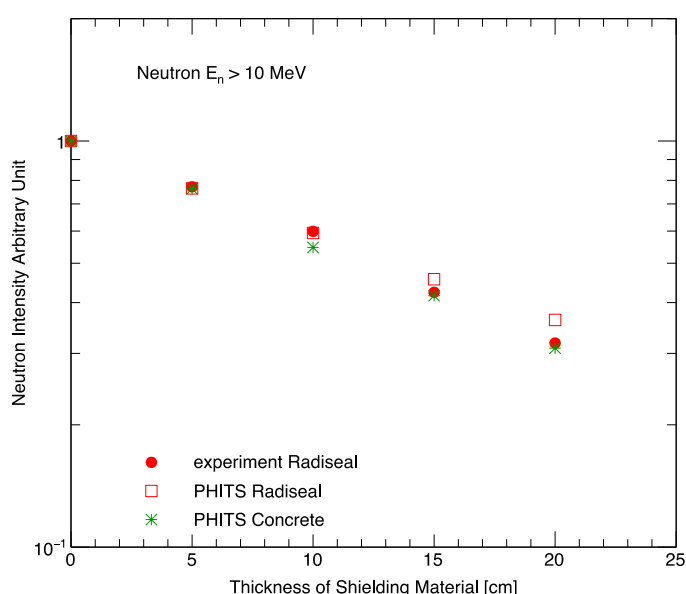


図 2. 10 MeV 以上の中性子の透過量を厚さ 0 cm で規格化した結果

5. まとめ

加速器施設での使用を想定した可とう性を有する遮蔽材料の中性子遮蔽性能を測定した。10 MeV 以上の中性子に対する線減弱係数は一般的なコンクリートと近い値を有することがわかり、遮蔽材料として高い能力を持つことが示された。今後は、この可とう性材料と同時に開発された類似の遮蔽材料などに対しても測定を行う予定である。

参考文献

- [1] D. Satoh, T. Sato, N. Shigyo, K. Ishibashi: SCINFUL-QMD; Monte Carlo based computer code to calculate response function and detection efficiency of a liquid organic scintillator for neutron energies up to 3 GeV, JAEA-Research 2006-023 (2006).
- [2] M. Reginatto, P. Goldhagen, S. Neumann: Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolution code MAXED, Nucl. Instrum and Meth. A 476, 242-246 (2002).
- [3] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta, L. Sihver: Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913-923 (2013).
- [4] A. Boudard, J. Cugnon, J.-C. David, S. Leray, and D. Mancusi: New potentialities of the Liège intranuclear cascade model for reactions induced by nucleons and light charged particles, Phys. Rev C87, 014606 (2013).
- [5] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura: JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl. Sci. Technol. 48, 1-30 (2011).

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分析

Modified structure along nuclear tracks in etched track detectors

山内 知也^A、楠本 多聞^A、池永 龍之介^A、安田 修一郎^A、小平 聡^B、北村 尚^B
Tomoya Yamauchi^A, Tamon Kusumoto^A, Ryunosuke Ikenaga^A, Shuichiro Yasuda^A,
Satoshi Kodaira^B, Hisashi Kitamura^B

A：神戸大学大学院海事科学研究科

B：放射線医学総合研究所研究基盤センター研究基盤技術部放射線計測技術開発課

概要

ポリアリルジグリコールカーボネート (PADC) をはじめとする種々の高分子系飛跡検出器中に形成されるプロトントラックの構造上の特徴を分析化学的に明らかにし、重イオントラックに関する結果との総合的な比較検討を通じて、イオントラック形成機構解明のための基礎的知見を得ることを目的とする。関連する PADC についての HIMAC からのプロトンと重イオンを利用した研究を振り返ると、阻止能領域では 10～12000 keV/μm の領域での分析に取り組んできたが、今回実施した 30 MeV プロトンの阻止能は 2.5 keV/μm であった。放射線感受性が最も高いエーテル基に着目すると、その損失の実効的トラックコア半径は 0.26 nm であり、同損失の放射線化学収率 (G 値) は 100 eV あたり 24 であった。この G 値は、Co-60 線源からのガンマ線や 5.7 MeV プロトン照射における値よりも有意に高い。高いエネルギーの重イオン照射では G 値が高くなり、高エネルギー電子線照射では相対的にそれが低くなっていたことから、トラックハロー領域 (あるいはペナンブラ領域) において、減速によって生じる低エネルギー電子が効率的に分子鎖を切断していると推察されていたが、今回の結果はこの見方を支持するものである。

1. 目的

ポリアリルジグリコールカーボネート (PADC) は感度の高いエッチング型飛跡検出器として知られており、宇宙放射線計測やイオンビーム診断、中性子線量計測等に活用されているが、そのイオントラック形成機構については現在も未解明の部分が残されている。我々はより感度の高い検出器や検出閾値の高い検出器を新たに開発する関心から、種々の高分子系飛跡検出器の応答特性評価を進めるとともに、それぞれの素材中に形成されるイオントラックの構造分析を系統的に実施してきている。本報告に関連する PADC についてのこれまでの研究を振り返ると、HIMAC からのプロトンと重イオンを利用したブラッグピーク近傍での実験において (阻止能領域では 10～12000 keV/μm に相当)、実効的トラックコア半径や放射線化学収率 (G 値) を評価した[1]。これに並行して Co-60 線源を利用した照射実験にて G 値を求めた[2]。PADC の特徴として、数 MeV/n 程度のプロトンや重イオンでは阻止能が低いほど G 値が高くなるという他の高分子材料には見られない特異的とも言える傾向が確認された。エーテル基の損失に着目すると、ガンマ線では 100 eV あたり 21 であり、5.7 MeV プロトンでは 20 であった。これらに対して 1.2 MeV/n の Ne イオンでは 5 にとどまる。115 MeV/n の C イオンや 400 MeV/n の Fe イオンを用いた実験から、それぞれのイオン種に対する G 値の阻止能依存性が明らかとなった[3]。同一のイオンでは阻止能が低いほど (すなわちエネルギーが高いほど) G 値は大きく、同じ阻止能であればイオン種が重たいほど G 値は大きくなる。Katz の局所線量分布に従った考察から、イオンの軌跡から相対的に離れた領域に生じる損傷の割合が大きくなっていることが示唆された。すなわち、トラックハロー領域 (あるいはペナンブラ領域) において、減速によって生じる低エネルギー電子が効率的に分子鎖を切断していると考えられるようになった。高エネルギー電子の影響を知るために、大阪大学産業科学研究所の L バンド電子リニアックからの 28 MeV 電子線を用いて G 値を求めると (LET は 0.025 keV/μm) 6.9 という有意に低い値が確認された[4]。ちなみにガンマ線照射は電子平衡条件下で行われ、平均 LET は 0.4 keV/μm であった。

これらの結果を受けて、高エネルギーのプロトンについての実験的検討を進めることとした。阻止能では 1～10 keV/μm の領域での G 値を評価することになる。本年度はこの目的のために、放射線医学総合研究所内のサイクロトロンを用いて 30 MeV に加速したプロトンを PADC 薄膜に照射し、実効的トラックコア半径及び G 値を評価した。

2. 実験方法

フクビ化学社製の公称厚さ 100 μm の BARYOTRAK を出発物質として、化学エッチング処理によって 3 μm 以下の厚さの PADC 薄膜を作成した。これにより吸光度が 2 以下となるいずれの吸収ピークに対しても未飽和の赤外線吸収スペクトルを得ることができる。照射前後の吸光度を測定することで相対吸光度が得られるが、以下に述べるような評価手順に従って、相対吸光度のフルエンス依存性から実効的トラックコア半径や G 値が得られる。

照射は C-8 コースにおいて実施し、ワブラー電磁石と散乱体によって直径 7 cm 程度のビームサイズで均一な照射野を持つ 30 MeV のプロトンを用いた。照射雰囲気は大気中であり、プロトンは PADC 薄膜へ垂直に入射させた。照射線量はサンプル照射位置前方に設置した平行平板型の大型電離箱のカウント値にしたがってコントロールした[5]。ビーム電流は 100 nA 程度に保たれ、最大フルエンスは 7.1×10^{13} ions/cm² であった。

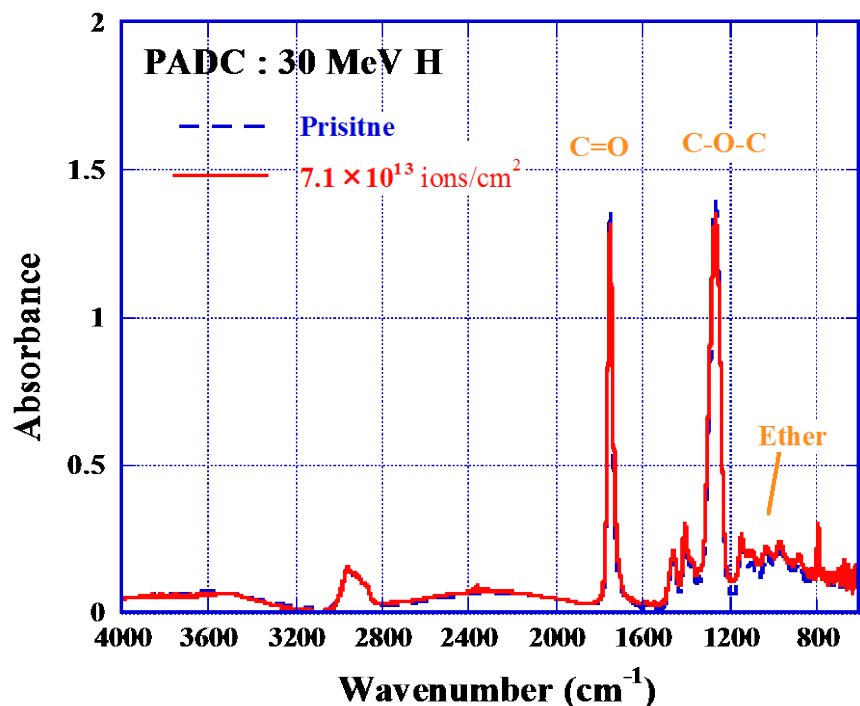


Fig.1. IR spectra of PADC films before and after the exposure to 30 MeV protons in air.

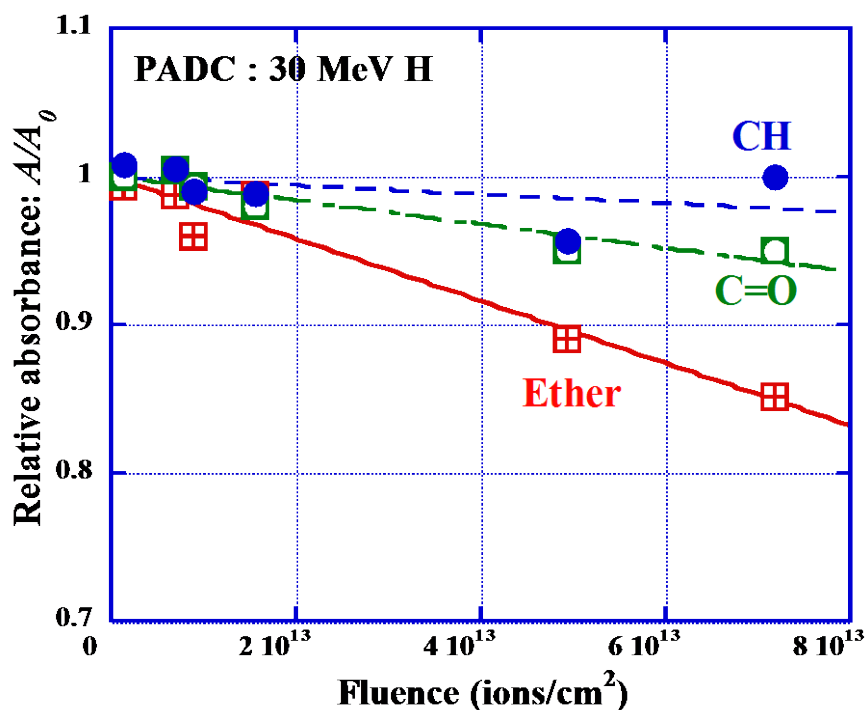


Fig.2. Reduction of the relative absorbance of ether, C=O and CH groups in PADC films exposed to 30 MeV protons.

3. 実験結果

Fig. 1.に 30 MeV のプロトン照射前後の赤外線吸収スペクトルを示す。プロトンを 7.1×10^{13} ions/cm² 照射した試料の赤外線吸収スペクトルを見ると、未照射のそれと比べて、エーテル基やカーボネートエステル基を

構成する C=O 基や C-O-C 基に帰属されるピークの吸収強度が低下している。Fig. 2.に代表的官能基の相対吸光度 A/A_0 をフルエンスの関数として示す。相対吸光度は着目する官能基の照射前後の密度比 (N/N_0) に一致する。それはフルエンスの増加に伴って低下しており、エーテル基の損傷率が最も大きい、これは他の照射実験の結果とも整合性を保っている[1-3]。トラックの重なりが無視できるフルエンス域では、損傷数はフルエンスに比例するので、次の実験式を適用することは妥当である：

$$A/A_0 = 1 - \sigma F. \quad (1)$$

ここに σ は相対吸光度の最適直線の勾配であり、 F はフルエンスである。トラック 1 本あたりの相対吸光度変化である σ は、着目する官能基の除去断面積と見なせる。 σ は面積の次元を持つため損傷の径方向への広がりを示す実効的トラックコア半径 r は次式に従って評価できる：

$$r = \sqrt{\sigma / \pi}. \quad (2)$$

Fig. 3. にエーテル基損失の実効的トラックコア半径を阻止能の関数として示す。塗りつぶした四角のプロットが 30 MeV プロトンの実験結果であり、白抜きのプロットは HIMAC の中エネルギービーム照射室での実験結果である。本研究で得られた実効的トラックコア半径は、HIMAC の実験結果の外挿線上に存在していることが示されている。PADC 薄膜の素材である BARYOTRAK のエッチピット形成の閾値は 10 keV/ μ m 付近であるが、エーテル基に着目する限りでは実効的トラックコア半径に大きな飛躍はなく、阻止能に対して単調増加していることが分かる。

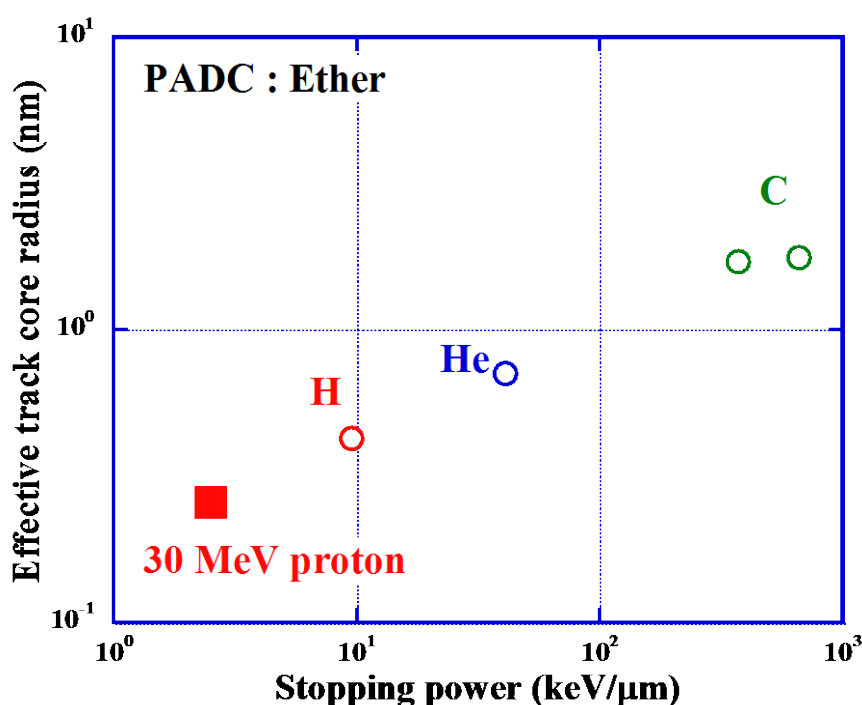


Fig.3. Effective track core radius for the loss of ether bonds in PADC as a function of the stopping power.

Fig. 4. にエーテル基損失の放射線化学収率、すなわち G 値を阻止能の関数として示す。 G 値は式(3)に示すようにトラック単位長さ当たりの損失数である σN_0 と阻止能の比として得られる：

$$G \text{ value} = \frac{\sigma N_0}{(-dE/dx)}. \quad (3)$$

先に述べたように、我々はガンマ線や 28 MeV 電子線を使った実験も並行して進めてきているが、ここではそれらの値もプロットしており（白抜きの四角）、横軸は LET の値に一致させている。本研究で得られた 24 という G 値はガンマ線よりも大きな値になっており、高エネルギーのプロトンについての照射と分析を進めることが PADC 中に形成されるトラックの特性評価のために必要であり、PADC が検出感度の高い飛跡検出器であることの分子構造上の理由を理解するためにも不可欠になっている。

4. まとめ

PADC 薄膜に 30 MeV のプロトンを照射し赤外線分光分析を用いて、最も放射線感受性の高いエーテ

ル基損失の実効的トラックコア半径及び G 値を評価した。その実効的トラックコア半径は低エネルギーのプロトンや重イオンに対して得られていた阻止能依存性の外挿線上にあり、2.5 keV/μm 以上の阻止能領域で阻止能の増加に伴って単調に増加する傾向が新たに確認された。これに対応する G 値は 100 eV あたり 24 と評価され、従来の低エネルギープロトンやガンマ線照射実験よりも大きな値となった。これは PADC が低エネルギーの電子も含めてエネルギー付与の空間的広がりや分散的であればあるほど損傷率が高くなるという傾向に加えて、やはりプロトンのような損傷密度が低いトラックコアでは効率的にエーテル基が失われることを示す重要な証拠となる。今後も、サイクロトロンを活用し、25~70 MeV のプロトンの PADC をはじめとする高分子系飛跡検出器に対する応答特性とイオントラック構造分析を継続的に実施する予定である。

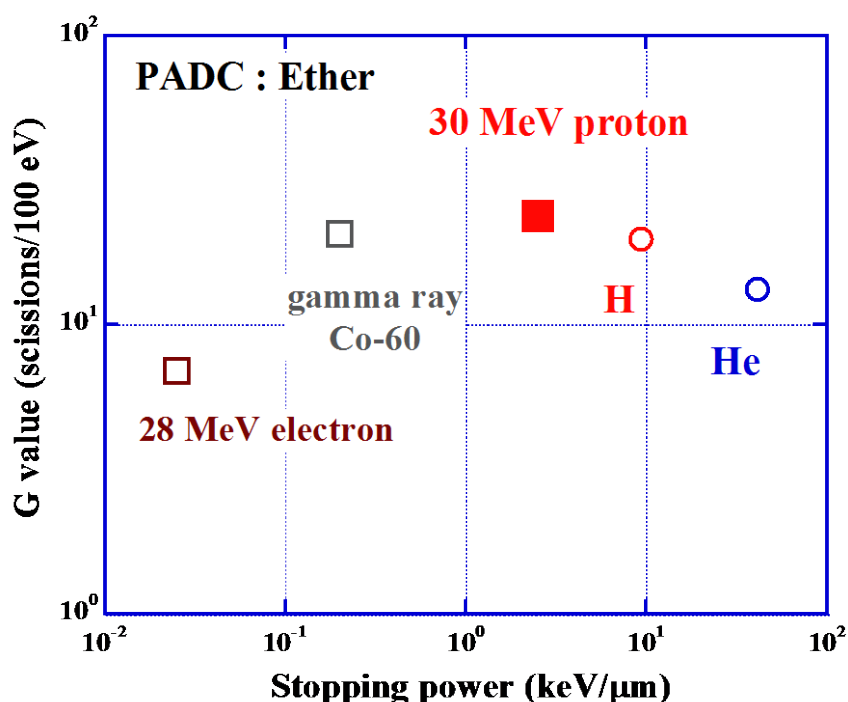


Fig.4. Radiation chemical yields for the loss of ether bonds as a function of the stopping power.

謝辞

放射線医学総合研究所内のサイクロトロンの利用に際し、多大なご協力を賜りましたスタッフの皆様
に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Mori, T. Yamauchi, M. Kanasaki, Y. Maeda, K. Oda, S. Kodaira, H. Kitamura, T. Konishi, N. Yasuda, R. Barillon: Radiation chemical yields for loss of ether and carbonate ester bonds in PADC films exposed to proton and heavy ion beams, *Radiation Measurements*, **46** (2011) 1147.
- [2] Y. Mori, T. Ikeda, T. Yamauchi, A. Sakamoto, H. Chikada, Y. Honda, K. Oda: Radiation chemical yields for loss of carbonate ester bonds in PADC films exposed to gamma ray, *Radiation Measurements*, **44** (2009) 211.
- [3] Y. Mori, T. Yamauchi, M. Kanasaki, A. Hattori, Y. Matai, K. Matsukawa, K. Oda, S. Kodaira, H. Kitamura, T. Konishi, N. Yasuda, S. Tojo, Y. Honda, R. Barillon: 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, *APPLIED PHYSICS EXPRESS* **5** (2012) 086401.
- [4] 森豊: ポリアリルジグリコールカーボネート検出器中に形成されるプロトン及び重イオントラック構造, 神戸大学博士学位論文 (2014) 66.
- [5] T. Kusumoto, Y. Mori, M. Kanasaki, T. Ueno, Y. Kameda, K. Oda, S. Kodaira, H. Kitamura, R. Barillon, T. Yamauchi: Yields of the formation of OH groups and the loss of CH groups along nuclear tracks in PADC films, *Radiation Measurements*, in press (doi:10.1016/j.radmeas.2015.04.008).
- [6] 北村尚, 内堀幸夫, 小平聡, Ploc Ondrej, 金澤光隆, 杉浦彰則, 鈴木直方, 北条悟, 岡田高典, 小松克, 神谷隆: 汎用照射室 C-8 コースにおけるビーム制御, 平成 21 年度サイクロトロン利用報告書 (2011) 46.

5. 生物研究

5－1. 陽子線の生物効果の研究

5－2. プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析

5－3. 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果

陽子線の生物効果の研究

Investigation of biological effects after proton exposure.

前田淳子^a、Cartwright Ian^a、藤沢寛^{b,c}、藤井義大^{c,d}、平川博一^c、
北村尚^c、藤森亮^c、上坂充^b、鎌田正^c、David Chen^e、加藤宝光^a

Junko Maeda^a、Cartwright Ian^a、Hiroshi Fujisawa^{b,c}、Yoshihiro Fujii^{b,c,d}、Hirokazu Hirakawa^c、
Hisashi Kitamura^c、Akira Fujimori^c、Mitsuru Uesaka^b、Takamitsu Kato^a

^aコロラド州立大学、^b東京大学、^c放医研、^d茨城県立医療大、^eテキサス大

概要

This study investigated the effects of targeted mutations in the DNA-PKcs kinase and phosphorylation domains on cell survival to different qualities of ionizing radiation. These mutated CHO V3 cells were exposed to 500 MeV/nucleon of initial energy and 200 keV/μm monoenergetic Fe ion, 290 MeV/nucleon of initial energy and average 50 keV/μm Spread out Bragg Peak C ion, 70 MeV/nucleon of initial energy and 1 keV/μm monoenergetic Protons, and 0.663 MeV of initial energy and 0.3 keV/μm of Cs¹³⁷ γ radiation. We showed that sensitivity to high LET radiation is increased when both the S2056 and T2609 clusters contain a point mutation, where as the PI3K cluster only requires a single mutation to induce the sensitized phenotype of V3 cells. Additionally, we show that sensitivity to DNA crosslinking damage by cisplatin only requires a single mutation in one of the three clusters and that additional point mutations do not increase the cells sensitivity.

1. 序章

放射線医学総合研究所の大型サイクロトロン施設（NIRS-930）において、70MeV に加速された粒子線を、汎用照射室 C-8 で照射を行った（1）。放医研ではこのエネルギーの陽子線を用いて、過去には治療も行われた（2）。これまで汎用照射室では生物実験に向けた線量測定、装置の開発などが行われていた（3、4、5）。

陽子線の Relative Biological Effectiveness (RBE) は古典的におよそ 1.1 程度とされ、他の低 LET (Linear Energy Transfer) 放射線である X 線やガンマ線と似た性質をもつとされていた。しかし、近年、ブラッグピーク近傍では、高 LET 放射線とやや似た振る舞いをするとの報告もあり（6、7、8）、放医研のサイクロトロンの場合における RBE を再検証する必要があると考えた。我々は、NIRS-930 で得られる陽子線の生物効果を検証するために、70MeV に加速された粒子を用いて、DNA 修復欠損細胞、特に DNA-PKcs タンパク質に様々な突然変異の入った細胞を使用した。結果は、γ 線炭素線、鉄線照射されたものと比較した。

2. 実験材料と方法

A) Cell Culture Condition

For this study we utilized a wild-type Chinese hamster cell line CHO10B2, NHEJ-deficient xrs-5 and V3 cells, HR-deficient 51D1 cells, and cell lines derived from DNA-PKcs null V3 cells with complemented human DNA-PKcs cDNA containing amino acid substitutions at various positions that are described in **Table 1**. Cells were cultured in MEM-alpha (Gibco, Indianapolis, IN) supplemented with 10% fetal bovine serum (FBS, Sigma, St Louis, MO) and 1% antibiotics and antimycotics (Gibco), and they were maintained at 37°C in a humidified atmosphere of 5% CO₂ in air.

B) Radiation Condition

Log growing cells were irradiated aerobically at room temperature. The radiation source was a J. L. Shepherd and Associates irradiator that emitted Cs¹³⁷ γ rays at a dose rate of 2.5 Gy/min. Cells were also irradiated using accelerated iron-ions, carbon-ions, and protons at the National Institute of Radiation Sciences in Chiba, Japan. The LET of the radiation used are as followed 500 MeV/nucleon of initial energy and LET 200 keV/μm monoenergetic Fe ion, 290 MeV/nucleon of initial energy and average LET 50 keV/μm Spread Out Bragg Peak (SOBP) C ion, 70 MeV/nucleon of initial energy and LET 1 keV/μm monoenergetic Protons, and 0.663 MeV of initial energy and LET 0.3 keV/μm of Cs¹³⁷ γ radiation. Additionally, the cells were exposed to various concentrations of Cisplatin for 1 hour before being plated for survival experiments. Survival curves were obtained by measuring the colony forming ability of irradiated cell populations. Cells were plated postirradiation onto 60-mm plastic petri dishes and incubated for 7–10 days for colony formation. The dishes were then fixed with 100% ethanol and stained with 0.1% crystal violet solution. A colony with more than 50 cells was scored as a survivor.

Table 1: Cell lines derived from DNA-PKcs null V3 cells with complemented human DNA-PKcs cDNA containing amino acid substitutions at various positions in the DNA-PKcs constructs.

^a Serine (S) and threonine (T) substituted by alanine (A) in the S2056 and T2609 cluster sites.

^b V3-KC23 mutant carries a frame-shift at position of amino acid 3715 that resulted in truncation of the protein after 10 amino acids and loss of the entire PI3K kinase domain.

^c V3-KA4 mutant substituted lysine 3752 (K3752) to arginine (R).

^d V3-KB20 mutant substituted leucine 3750 (L3750) and K3752 to arginine (R).

^e V3-KD51 mutant substituted aspartic acid (D) to asparagine (N).

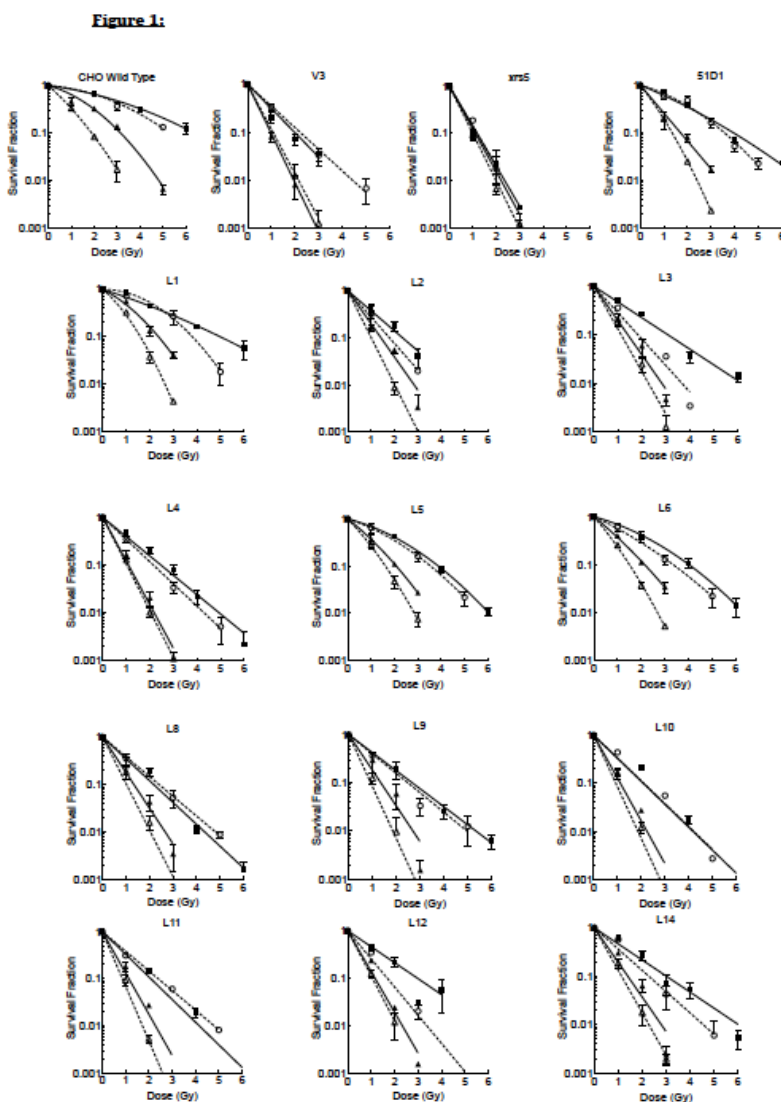
Cell lines	Altered DNA-PKcs Mutants	Substituted Domains														
		S2056 Cluster					T2609 Cluster						PI3K			
		S2023	S2029	S2043	S2051	S2054	T2604	S2612	T2620	S2624	T2638	T2647	P3715	L3750	K3752	D3821
L-1	Wild Type															
L-2	V3-7A					A	A	A	A	A	A					
L-3	V3-6A						A	A	A	A	A	A				
L-4	V3-2A					A	A									
L-5	V3-S2056A					A										
L-6	V3-T2609A						A									
L-8	V3-KA4														R	
L-9	V3-KB20													R	R	
L-10	V3-KC23												A			
L-11	V3-KD51															N
L-12	V3-5A	A	A	A	A	A										
L-14	V3-3A						A				A	A				

3. 結果

A) Cell survival curves

Figure 1 is a summary of cell survival curves of each cell line after photon and hadron radiation exposure. Some cell lines showed slightly increased radiosensitivity in proton exposure compared to photon radiation. However, compared to carbon-ions and iron-ions, proton radiation sensitivity is much lower.

Figure 1: Survival curves of CHO mutant cell lines. CHO10B2, V3, XRS5, 51D1, and all L-series cells were exposed to 500 MeV/nucleon of initial energy and 200 keV/ μ m monoenergetic Fe ion, 290 MeV/nucleon of initial energy and average 50 keV/ μ m Spread out Bragg Peak C ion, 70 MeV/nucleon of initial energy and 1 keV/ μ m of monoenergetic Protons, and 0.663 MeV of initial energy and 0.3 keV/ μ m of Cs^{137} γ radiation. ● indicates γ radiation, O indicates proton radiation, ▲ indicates Carbon ion radiation, and Δ indicates Iron ion radiation. The error bars are the standard error of the mean.



4. 考察

we have shown in this study that the whole DNA-PKcs protein is required for repair of high LET induced DNA

damage. As seen in L-5 and L-6 a single point mutation is able to decrease the sensitivity of the cell to a value similar to the DNA-PKcs null cell line. However, when both the S2056 and T2609 clusters are both damaged the sensitivity of the cell to high LET radiation is increased as seen in L-4 and L-2. Additionally, unlike high LET radiation and low LET radiation (photon and protons), cellular sensitivity to cisplatin appears to only require a single point mutation in one of the three clusters investigated. Likewise, when a second cluster is mutation, the cell does not become more sensitive as seen in cells exposed to high LET radiation.

参考文献

1. T.Honma, et al., RECENT STATUS OF THE NIRS CYCLOTRON FACILITY, The 18th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, pp137-139
2. Tsunemoto et al., Proton Therapy in Japan, Radiation Research, 104 (2) 1985, 235-243
3. 北村尚、内堀幸夫、放医研サイクロトロン of 広範囲照射場のプロファイル測定とモデル化、放射線医学総合研究所技術報告書、20-27, 2010
4. 北村尚 et al. 汎用照射室 C-8 コースにおけるビーム制御
5. 内堀幸夫 et al. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発
6. Paganetti et al., Relative biological effectiveness values for proton beam therapy, Int J Radiation Oncology Biol Physics, 53, 2, 2002, 407-421
7. Wouters et al. Measurements of Relative biological effectiveness of the 70 MeV Proton beam at TRIUMF using Chinese hamster V79 cells and the High-precision cell sorter assay, Radiation Research, 146, 1996, 159-170
8. Belli et al., RBE-LET relationships for cell inactivation and mutation induced by low energy protons in V79: further results at the LNL facility, Int J Radiat Biol, 74, 4, 1998, 501-509

プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析

ANALYSIS PROTON-INDUCED CELL DEATH BY THE MICRODOSIMETRIC KINETIC MODEL (MKM)

鈴木 雅雄^A、稲庭 拓^B、佐藤 眞二^C、北村 尚^D、村上 健^A
Masao Suzuki^A, Taku Inaniwa^B, Shinji Satou^C, Hisashi Kitamura^D, Takeshi Murakami^A

A：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

B：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター次世代重粒子治療研究プログラム

C：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

D：放射線医学総合研究所研究基盤センター研究基盤技術部

概要

重イオンからプロトンの広範囲に渡る粒子放射線治療用ビームの設計や最適な分割照射スケジュール立案のために必須な粒子放射線独自の分割照射法の確立を最終目的として、モデル解析・シミュレーションを実施する基礎となる生物学的基礎実験データ集積を進めている。二年目の平成 26 年度は、モデル解析に使用するヒト由来がん細胞を用いて、平成 25 年度に設定した一回照射で生存率が約 5%となる線量を 0 から 3 時間程度の比較的短時間間隔で二分割照射し、それに対する細胞致死効果を調べ、分割照射に対する回復現象を明らかにした。

1. 目的

炭素イオンやプロトンによるがん治療の最適な治療スケジュール構築のためには、粒子放射線独自の分割照射法を確立することが必要であるが、粒子線治療を念頭においた分割照射に対する生物学的基礎データは非常に限られているのが現状である。本研究課題では、粒子放射線治療用ビームの設計や最適な分割照射スケジュール立案のために必要不可欠な生物学的基礎データのうち、プロトンに対する実験データを集積し、治療モデル MKM (the microdosimetric kinetic model) [1]に適用して細胞致死効果や細胞損傷修復に関するパラメーターを決定し、粒子線治療の高度化に資する論理の構築に寄与することを目的として計画した。得られたデータと現在 HIMAC で実施している炭素イオンビーム照射の実験データを合わせ、プロトンから重粒子線に至る粒子放射線がん治療の論理の一般化を図り、世界における粒子線治療法のスタンダード作成を最終目的とする。

2. 実験方法

平成 26 年度の実験には、平成 25 年度で使用したヒト由来細胞の内ヒト唾液腺由来がん細胞株 (Human undifferentiated carcinoma cell line from floor of mouth : HSGc-C5) を用いた。C8 コースで得られる 70MeV プロトンを用いて、平成 25 年度に設定した単一照射に対する生存率が 5% 程度となる線量を十数分から 3 時間の比較的短い時間間隔で等分割照射を行い、コロニー形成法にて細胞増殖死を検出し、いわゆる Elkind recovery [2]を調べた。

3. 実験結果

図 1 に HSGc-C5 細胞に対する Elkind recovery 曲線を示す。プロトンに対する二分割照射では、X 線で報告されている分割間隔が 100-120 分で致死効果からの回復が最大となるような Elkind recovery 曲線と同様な致死損傷からの回復が観察された。100-120 分の分割間隔では、0 分 (分割照射無し) に対して 2.7 倍高い生存率を示した。また HIMAC の炭素イオンのデータとの比較から、比較的 LET の小さい炭素イオンと同レベルの分割照射からの回復があることが判った。

4. まとめ

平成 27 年度以降は、(1) ヒト正常細胞に対する分割照射効果、(2) 治療を模擬するような拡大ブラッグピークに対する分割照射効果、に対する実験データを集積し、分割照射による致死効果からの回復が LET のみによって規定されるのか否か？正常細胞とがん由来細胞で差があるのか？を明らかにし、得られた実験データを MKM (the microdosimetric kinetic model) に適用して粒子線の細胞致死

効果や細胞損傷修復に関するパラメーターを決定し、生物学的基礎データを用いて粒子線治療の高度化に資する論理の構築に寄与する。

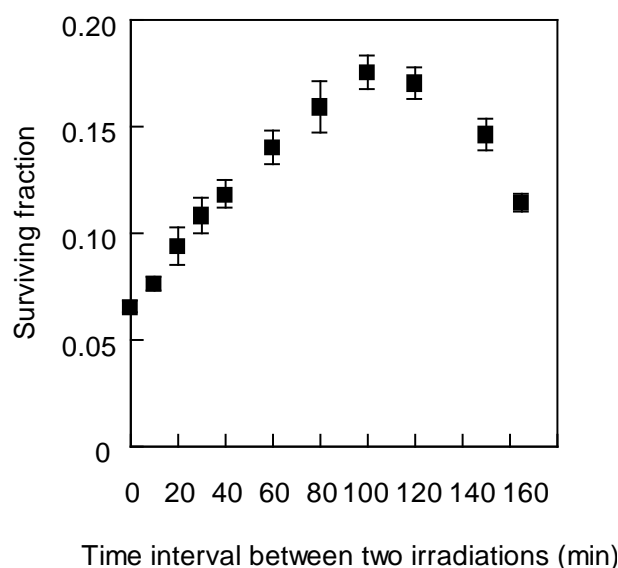


図 1. ヒト唾液腺由来がん細胞株 (HSGc-C5) における 70MeV プロトン照射に対する Elkind recovery 曲線。等分割照射は、2.95Gy-interval-2.95Gy のスケジュールで行った。データは、3 回の独立した照射実験の平均値とその標準誤差を示す。

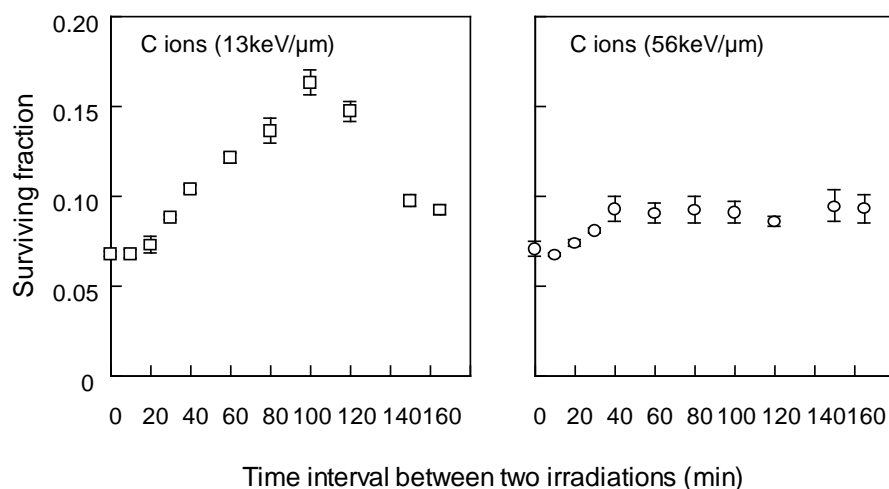


図 2. HIMAC 炭素イオンビーム照射に対する Elkind recovery 曲線。等分割照射は、炭素イオン (LET 13keV/μm) に対して 2.5Gy-interval-2.5Gy、炭素イオン (LET 56keV/μm) に対して 1.1Gy-interval-1.1Gy のスケジュールで行った。データは、4 回の独立した照射実験の平均値とその標準誤差を示す。

参考文献

- [1] Taku Inaniwa, Masao Suzuki, Takuji Furukawa, Yuki Kase, Nobuyuki Kanematsu, Toshiyuki Shirai, Roland B. Hawkins, Effect of dose-delivery time structure on biological effectiveness for therapeutic carbon-ion beams evaluated with microdosimetric kinetic model. *Radiat. Res.*, **180**, 44-59 (2013).
- [2] M.M.Elkind, H.Sutton-Gilbert, W.B.Moses, T.Alescio and R.W. Swain Radiation Response of Mammalian Cells Grown in Culture. V.Temperature Dependence of the Repair of X-Ray Damage in Surviving Cells (Aerobic and Hypoxic). *Radiat. Res.*, **25**, 359-376 (1965).

陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果 CELL KILLING OF MAMMALIAN CELLS AFTER EXPOSURE TO PROTON BEAMS UNDER OXIC AND HYPOXIC CONDITIONS

平山亮一^A、小原麻希^A、鵜澤玲子^A、劉翠華^B、内堀幸夫^C、北村尚^D
Ryoichi Hirayama^A, Maki Obara^A, Akiko Uzawa^A, Liu Chiuhua^B, Yukio Uchihori^C, Hisashi
Kitamura^C

A：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター次世代重粒子治療研究プログラム

B：放射線医学総合研究所放射線防護研究センターリスク低減化研究プログラム

C：放射線医学総合研究所企画部経営戦略室

D：放射線医学総合研究所研究基盤センター研究基盤技術部

概要

サイクロトロンから供給された 70 MeV/n 陽子線を用いて、NHEJ 欠損細胞である xrs6 細胞の細胞致死における陽子線の間接作用を、ラジカルスカベンジャーを用いて推定し、陽子線の細胞致死機序について放射線化学の観点から明らかにした。

1. 目的

大気下で xrs6 細胞に陽子線を照射し、OH ラジカル由来の間接作用が細胞致死にどの程度寄与しているかを明らかにする。

2. 実験方法

チャイニーズハムスター卵巣由来の CHO 細胞を親株に持つ NHEJ 修復欠損細胞である xrs6 細胞を照射 12 時間前に、ガラスシャーレ上で培養した。照射 1 時間前に DMSO を加え（濃度は 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 1 M）、陽子線（70 MeV/n）を CHO 細胞に照射した。照射線量は 1, 2, 3 Gy とし、照射後培養細胞をガラスシャーレから回収し、コロニー形成法で細胞の生存率を測定した。各 DMSO 濃度において、保護された細胞生存率を求め、DMSO 濃度と細胞保護率の両逆数から DMSO 濃度無限大時の最大保護率を求めることで、細胞致死への間接作用を見積もることとした[1-4]。

3. 実験結果

3-1. 細胞生存率

Xrs6 細胞を各 DMSO 濃度で処理後に調べた細胞生存率の線量効果関係を図 1 に示した。DMSO 濃度増加に伴い、OH ラジカルが捕捉され、細胞生存率が上昇することが確認できた。また、高濃度の DMSO では細胞保護効果は飽和状態になっていることも確認できた。

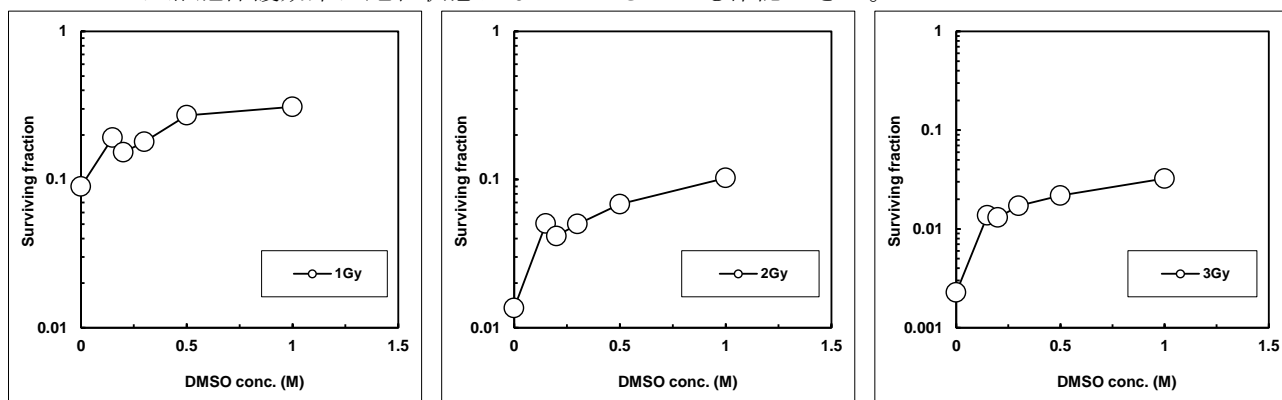


図 1 各 DMSO 濃度における xrs6 細胞の生存率

3-2. 間接作用の寄与率

図 1 から細胞保護率を算出し、各 DMSO における細胞保護率を図 2A に示した。細胞保護率は DMSO 濃度増加に伴い上昇し、高濃度領域では飽和する傾向を示した。任意の線量 3 点の違いは観察されなかったため、線量依存性が無いことを確認できた。また図 2A の両軸の逆数を図 2B に取り直し（両逆数プロット法）、回帰直線の切片の逆数から細胞致死における陽子線の間接作用寄与率を 46 ± 10 %（1/切片×100%）と推定した。

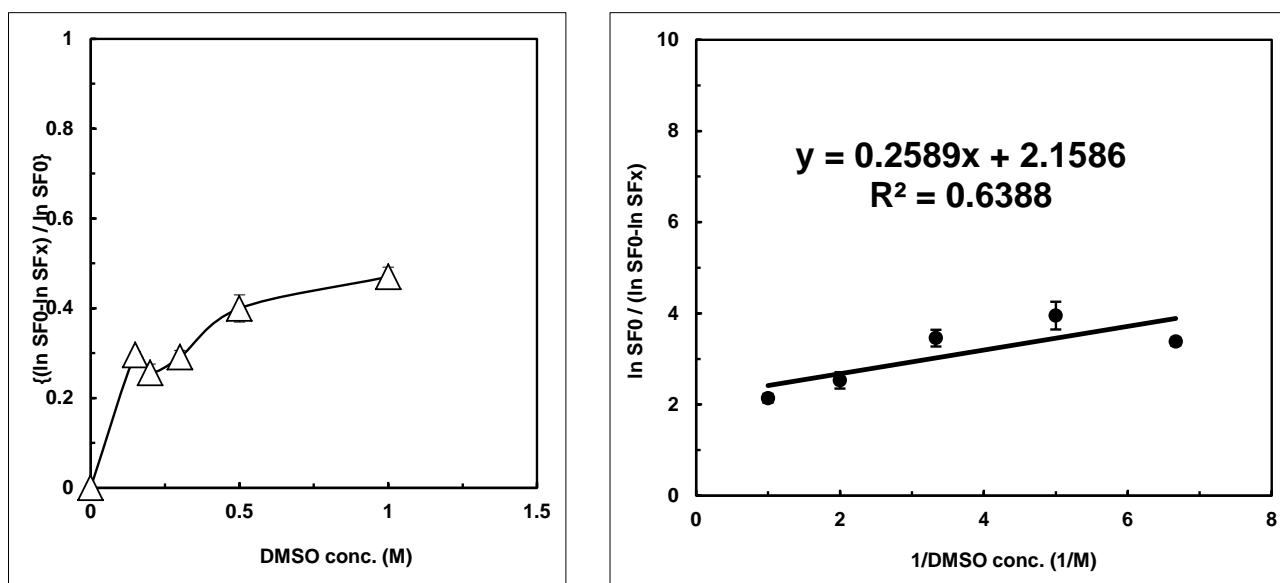


図 2 間接作用の推定 細胞保護率の DMSO 濃度依存性 (A)。両逆数プロット法による直線回帰 (B)。

4. まとめ

Xrs6 細胞を大気下で陽子線照射した場合、細胞致死の約 46%は OH ラジカル由来の間接作用であることがわかった。CHO 細胞では間接作用の寄与率は約 80%であったので、DNA 損傷修復の一つである NHEJ と間接作用による細胞致死の関連性が明らかになった。今後は低酸素下での細胞致死における間接作用の寄与率を求める予定である。

参考文献

- [1] Atsushi Ito, Hisako Nakano, Yohsuke Kusano, Ryoichi Hirayama, Yoshiya Furusawa, Chieko Murayama, Tomoyuki Mori, Yosuke Katsumura, Kunio Shinohara: Contribution of Indirect Action to Radiation Induced Mammalian Cell Inactivation: Dependence on Photon Energy and Heavy ion LET. Radiation Research, 165, 703-712, 2006.
- [2] Ryoichi Hirayama, Atsushi Ito, Masanori Tomita, Teruyo Tsukada, Fumio Yatagai, Miho Noguchi, Yoshitaka Matsumoto, Yuki Kase, Koichi Ando, Ryuichi Okayasu, Yoshiya Furusawa: Contributions of Direct and Indirect Actions in Cell Killing by High LET Radiations. Radiation Research, 171, 212-218, 2009
- [3] Ryoichi Hirayama, Yoshitaka Matsumoto, Yuki Kase, Miho Noguchi, Koichi Ando, Atsushi Ito, Ryuichi Okayasu, Yoshiya Furusawa: Radioprotection by DMSO in Nitrogen Saturated Mammalian Cells Exposed to Helium Ion Beams. Radiation Physics and Chemistry, 78, 1175-1178, 2009
- [4] Ryoichi Hirayama, Atsushi Ito, Miho Noguchi, Yoshitaka Matsumoto, Akiko Uzawa, Gen Kobashi, Ryuichi Okayasu, Yoshiya Furusawa: OH radicals from the indirect actions of X-rays induce cell lethality and mediate the majority of the oxygen enhancement effect. Radiation Research, 180, 514-523, 2013

6. 粒子線検出器の開発

6-1. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

6-1-a. Evaluation of Detection Technique of EPT and HET Detectors for Solar Orbiter using 50 MeV Deuteron Beam at NIRS

6-2. Additional Calibration of the Radiation Assessment Detector (RAD) Using ^1H and ^2H Beams at the NIRS Cyclotron

宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

Developments of Radiation Detectors for Charged Particles in the Space Radiation Environment

北村尚^A、小平聡^A、内堀幸夫^B、
Soenke Burmeister^C、Robert Elftmann^C、Jan Steinhagen^C
Hisashi Kitamura^A、Satoshi Kodaira^A、Yukio Uchihori^B、
Soenke Burmeister^C、Robert Elftmann^C、Jan Steinhagen^C

A: 放射線医学総合研究所研究基盤センター研究基盤技術部放射線計測技術開発課

B: 放射線医学総合研究所企画部経営戦略室

C: キール大学 実験応用物理研究所 (ドイツ)

A: NIRS, Dept. of Technical Support and Development

B: NIRS, Dept. of Planning and Management

C: Univ. of Kiel, Institute of Experimental and Applied Physics, Germany

概要

地球低軌道や月面等で飛翔する宇宙船中の宇宙飛行士は、人体に深刻なダメージの原因となる宇宙線中の重粒子を伴う宇宙放射線にさらされる。そのような放射線量を決定するために、携帯型の放射線線量計の開発を行っている。開発中のスペクトロメーター A-DREAMS-1 の校正試験を放医研サイクロトロンの C-6 コースにおいて陽子線、重陽子線、アルファ線ビームを用いて行った。

1. 目的

宇宙の放射線環境の主たる成分は銀河宇宙線(GCR: Galactic Cosmic Ray)で、スペクトル換算で約98%が高エネルギーの陽子や重粒子から成り立っている。さらにそれらの内訳は陽子が87%、ヘリウム原子核(アルファ線)が12%、他の重粒子線が1%である。そのエネルギースペクトルは、1-10 GeVをピークとして、それ以下のエネルギーでは急激に下降し、それ以上のエネルギーではエネルギーに関してべき型の形状で減少している。このように、宇宙環境での放射線測定に置いては、フルエンスとしては、陽子やアルファ線の成分がそのほとんどを占めており、これら低 LET(線エネルギー付与)粒子に対する測定精度は、吸収線量を決定する上で大きく影響する。そのため、宇宙放射線用検出器においては、加速器からの高エネルギービームで性能を評価することが重要である。

我々のグループでは小型の携帯型宇宙放射線用スペクトロメータの開発を行っている(図1)。A-DREAMS-1 と名付けられた線量計は、シリコン検出器をもち、宇宙放射線によるシリコンへのエネルギー付与のスペクトルをとることができる。また、再充電可能なバッテリーとフラッシュメモリーを持ち、USB 接続でパーソナルコンピュータ(PC)と通信可能である。PC を用いて線量計の制御とデータ収集が可能である。主要諸元を表1にまとめる。

この線量計の高エネルギー陽子線(低 LET 線)に対するレスポンスを評価するためにサイクロトロンによる陽子線、重陽子線、アルファ線の照射を行った。

2. 実験方法

放医研サイクロトロンでの実験は、汎用照射室の C-6 ポートを用いて行った。用いたビームは平成25年度に40 MeV 及び80 MeV の陽子線で、平成26年度に、100 MeV のアルファ線と50 MeV の重陽子線を用いて行った。ビーム形状は0.5から1 cm 直径程度のペンシルビームとし、強度は約500 ions/sec で調整したが、実際には500 - 20000 ions/sec 程度であった。

図2にセットアップの写真を示す。ビーム軸に垂直の面上を、水平及び垂直に動く自動ステージ上に水平面上に回転するステージを置いた。線量計を回転ステージ上に置くことで、ビームの検出器内での位置の違いやビーム入射角の違いによるスペクトル形状の違いなどの評価を行った。

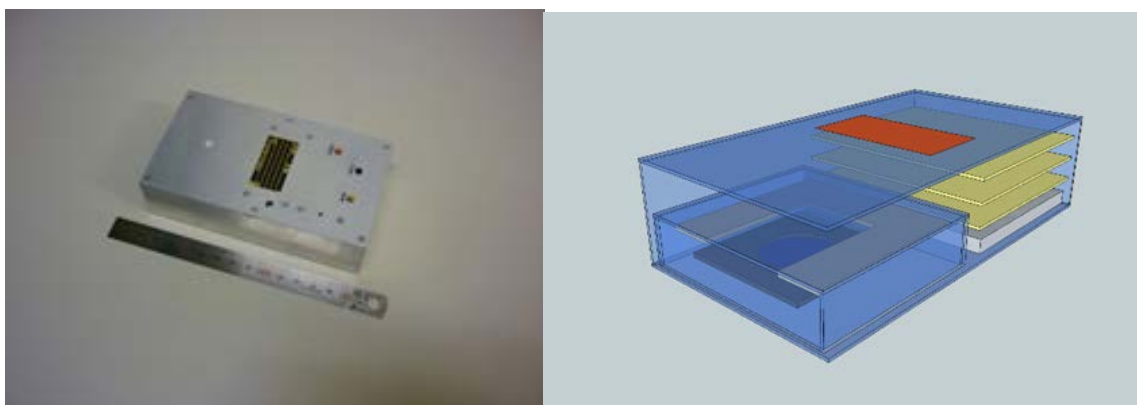


図 1 A-DREAMS-1 の外観写真(左)と概念図(右)。右図において、紺色の円形の部分にシリコン本導体検出器が置かれている。オレンジ色の部分が簡易表示用の EL ディスプレイがあり、測定された付与エネルギーのスペクトルがリアルタイムで表示が可能である。その下の 3 枚の電子回路基板が黄色であらわされている。さらにその下にバッテリーがある。

表 1 A-DREAMS-1 の主要諸元

外寸	135×75×35 mm ³
重量	250 g
検出器	24mm 直径 丸形シリコン半導体型 (実行エリア 20mm 直径、Micron 社製 MSD-020)
ADC	12 bits
内蔵表示部	オレンジ EL ディスプレイ
接続	ミニ USB B オス
バッテリー	Li-ion (駆動時間 10 時間)
電流	0.5 A @ 3.7 V
添付ソフトウェア	dE 分布、実効線量、

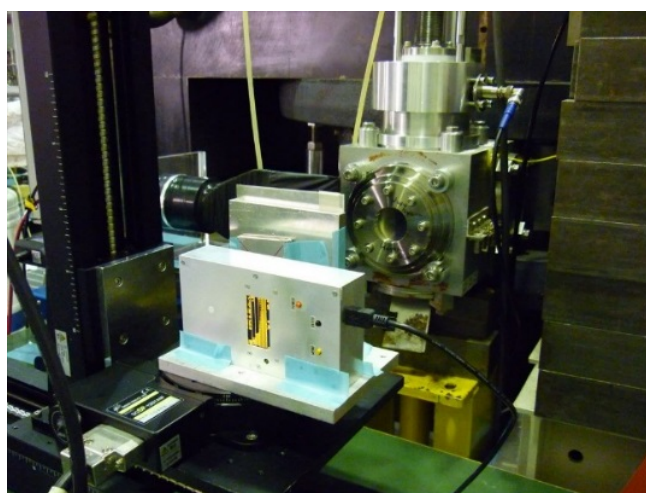


図 2 サイクロトロン C-6 コースでの A-DREAMS-1 の照射試験のセットアップの様子。A-DREAMS-1 は垂直と水平方向、および、水平面を回転する自動ステージ上に置かれている。写真中央部の円形の部分が C-6 コースのビーム取り出し口である。そのすぐ下流にビーム強度確認用のシンチレーションカウンタが設置されている。このシンチレータも自動ステージ上に乗せられており、照射室に入ることなく必要な時にビーム強度のモニタリングが可能である。写真中ではシンチレータはビームライン中から抜けた状態である。また、写真中では線量計のすぐ上流にビームエネルギーを落とすためのアブソーバーとしてアルミ板を置いている。

3. 実験結果

放医研サイクロトロンにおいて、アルファ線 100 MeV、重陽子線 50 MeV を A-DREAMS-1 線量計に照射し、波高分布をとったものが図 3 で、比較のために前年度行った陽子線 40, 80 MeV ビームの波高分布とともに表した。このように、高いエネルギー分解能を持つことが確認できた。また、図 4 はそれぞれの粒子がシリコン検出器中に付与したエネルギーの計算値(計算ソフトとして、陽子線とアルファ線に関しては SRIM[1]、重陽子線については[2]を用いた。)と ADC ch. とのプロットである。図中には四点から決まる一次回帰直線を記述した。同図中に記したように、その相関係数は、 $R^2 = 0.9998$ と、ほぼ 1 であり、約 6 MeV までの付与エネルギーと ADC ch. との間に、非常に良い線形性があることが確認できた。

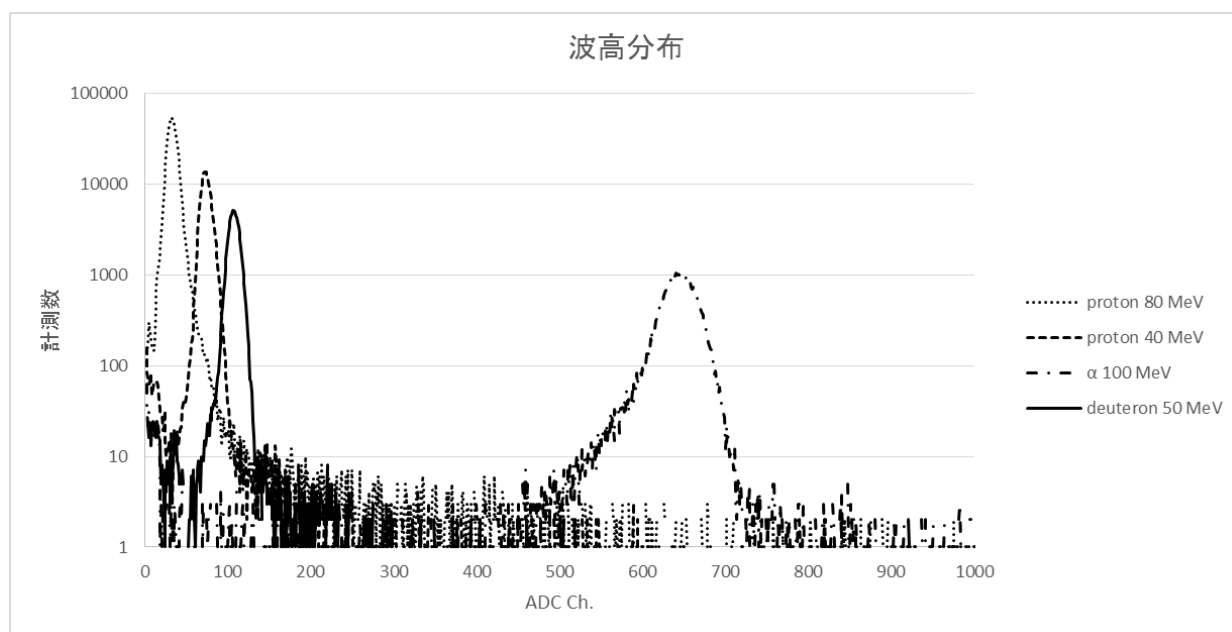


図 3 検出器出力のパルスハイト分布。点線が陽子線 80 MeV、破線が陽子線 40 MeV、一点鎖線がアルファ線 100 MeV、実線が重陽子線 50 MeV の分布を表している。各ビームはシリコン検出器に対して垂直に入射した。

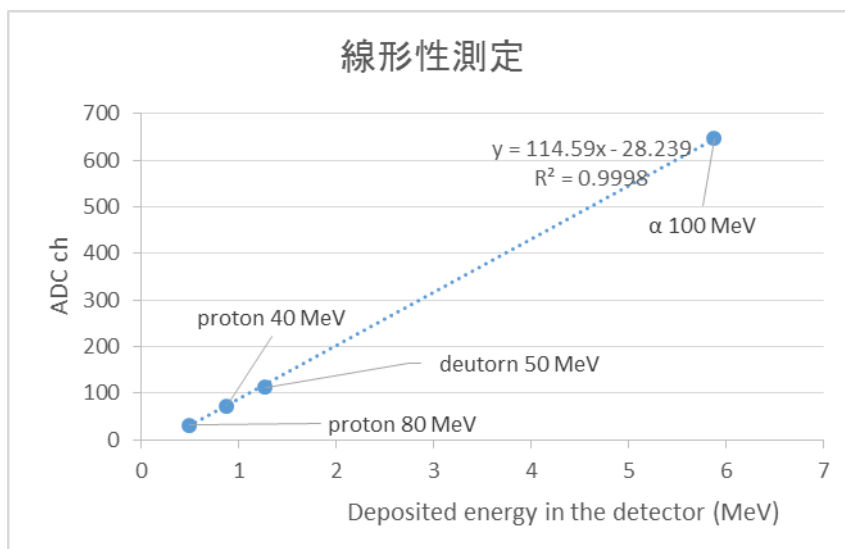


図 4 検出器中のエネルギー付与量と ADC Ch. の相関図。直線は四点からの一次回帰直線で、図中に直線の式と相関係数 R^2 を記述した。

4. まとめ

昨年度（平成 25 年度）から行った一連のサイクロトロンでの照射実験において、宇宙放射線検出

器である A-DREAMS-1 が、陽子線やアルファ線など低 LET 放射線の検出に対して十分な性能を持っていることが確認できた。現在、ともに重陽子線を使ったビーム実験を行ったドイツ・キール大学のシンチレータ・半導体からなるハイブリット検出器との比較を行い、同位体弁別等の考察を進めている。今回の結果を元に、平成 27 年度に複数の半導体検出器を持つテレスコープ型の放射線検出器の開発を行う予定である。

謝辞

当研究に対して素晴らしいビームを提供していただきました放医研サイクロトロンのメンバーの皆様に、深く感謝の意を表したいと思います。

参考文献

1. J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, J. P. Biersack, “SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010)”, *Nucl. Instrum. Meth. B*, 268, 11-12, pp.1818-1823, 2010
2. 重粒子のためのエネルギー損失・飛程計算ソフト “dedx”, 金井達明, 他

Evaluation of Detection Technique of EPT and HET Detectors for Solar Orbiter using 50 MeV Deuteron Beam at NIRS

Shrinivasrao Kulkarni¹, Jan Tammen¹, Robert Elftmann¹, Jan Steinhagen¹, Sebastian Boden¹,
Sönke Burmeister¹, Robert Wimmer-Schweingruber¹, Yukio Uchihori², Hisashi Kitamura², Satoshi
Kodaira²

1. Institute of Experimental and Applied Physics, University of Kiel, Germany.

2. National Institute of Radiological Sciences, Japan

Abstract

The Energetic Particle Detector (EPD) suite for ESA's Solar Orbiter will provide key measurements to address particle acceleration at and near the Sun. The EPD suite consists of four sensors (STEP, SIS, EPT, and HET). The University of Kiel in Germany is responsible for the design, development, and builds EPT-HET and STEP. The Electron Proton Telescope (EPT) is designed to cleanly separate and measure electrons in the energy range from 20 - 400 keV and protons from 0.02 - ~15 MeV. It will cover the gap with some overlap between suprathermal electrons and protons measured by STEP and high-energy electrons and protons measured by HET. The EPT relies on the magnet/foil-technique. The High-Energy Telescope (HET) on ESA's Solar Orbiter mission, will measure electrons from 300 keV up to 15 MeV, protons from 10 - 100 MeV, and heavy ions from ~20 to 200 MeV/nuc. These measurement capabilities are reached by a combination of solid-state detectors and a scintillator calorimeter that allows use of the dE/dx vs. total E technique for particle identification and energy measurement. To evaluate EPT anti-coincidence technique 50 MeV deuterons were used, as well as to estimate HET scintillation crystal response to 50 MeV deuterons by utilizing the facility of Cyclotron of NIRS, Japan. Preliminary results of this experiment are discussed in the report.

1 . Basic principle and Design of EPT-HET

EPT: The Electron and Proton Telescope has heritage from STEREO SEPT. SEPT and Solar Orbiter EPT are designed to cleanly separate and measure electrons in the energy range from 20 - 400 keV and protons from 0.02 - ~15 MeV, and will cover the gap with some overlap between suprathermal electrons measured by STEP and high energy electrons measured by HET. The proton measurements will cover the gap between STEP and HET. The Electron and Proton Telescope relies on the magnet/foil-technique, adapted from STEREO SEPT.

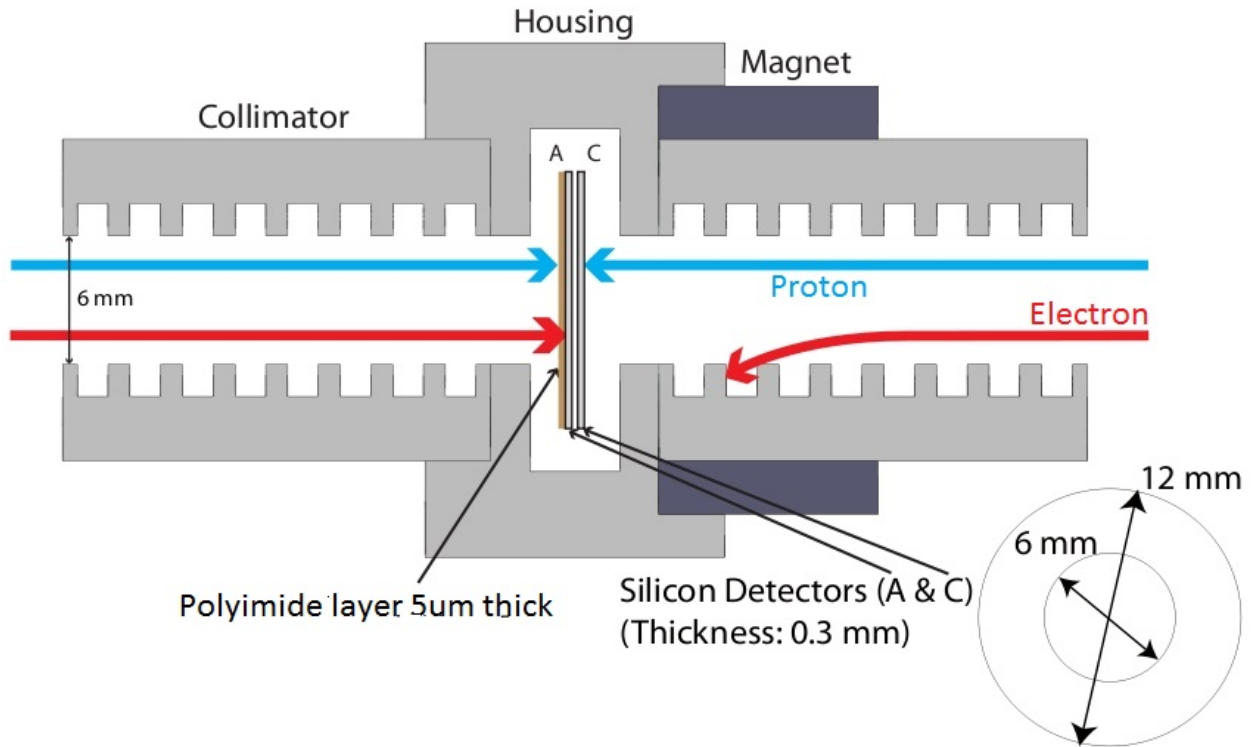


Figure 1 . Schematics of EPT sensor head.

EPT has 300 μ thick two silicon detectors, and are place very close by, as shown in the figure 1 (A and C). One of the detectors has a 5 μ thick polyimide foil/layer. The sensor head has a magnet system in front of the non-foil detector. The telescope is design such way that, at magnet side detects low energy protons and deuterons and foil side mainly detects low energy electrons. During proposed experiment, it is evaluate our design capability and anti-coincident logic using 50 MeV deuterons at magnet side of the telescope. Preliminary results are discussed in the next section.

HET: HET is one of the instruments in the Energetic Particle Detector (EPD) Consortium of Solar Orbiter mission. HET helps to understand the sources, acceleration mechanisms and transport process of high energetic particles. HET will measure electrons from 300 keV up to about 30 MeV, protons from 10 – 100 MeV, and heavy ions from ~20 to 200 MeV/nuc. It is achieved by combination of Si and high-density scintillation detectors. HET is designed with Si tracking detectors and a BGO crystal as stopping detector. dE/dx vs total E technique is used for particle identification and energy measurement.

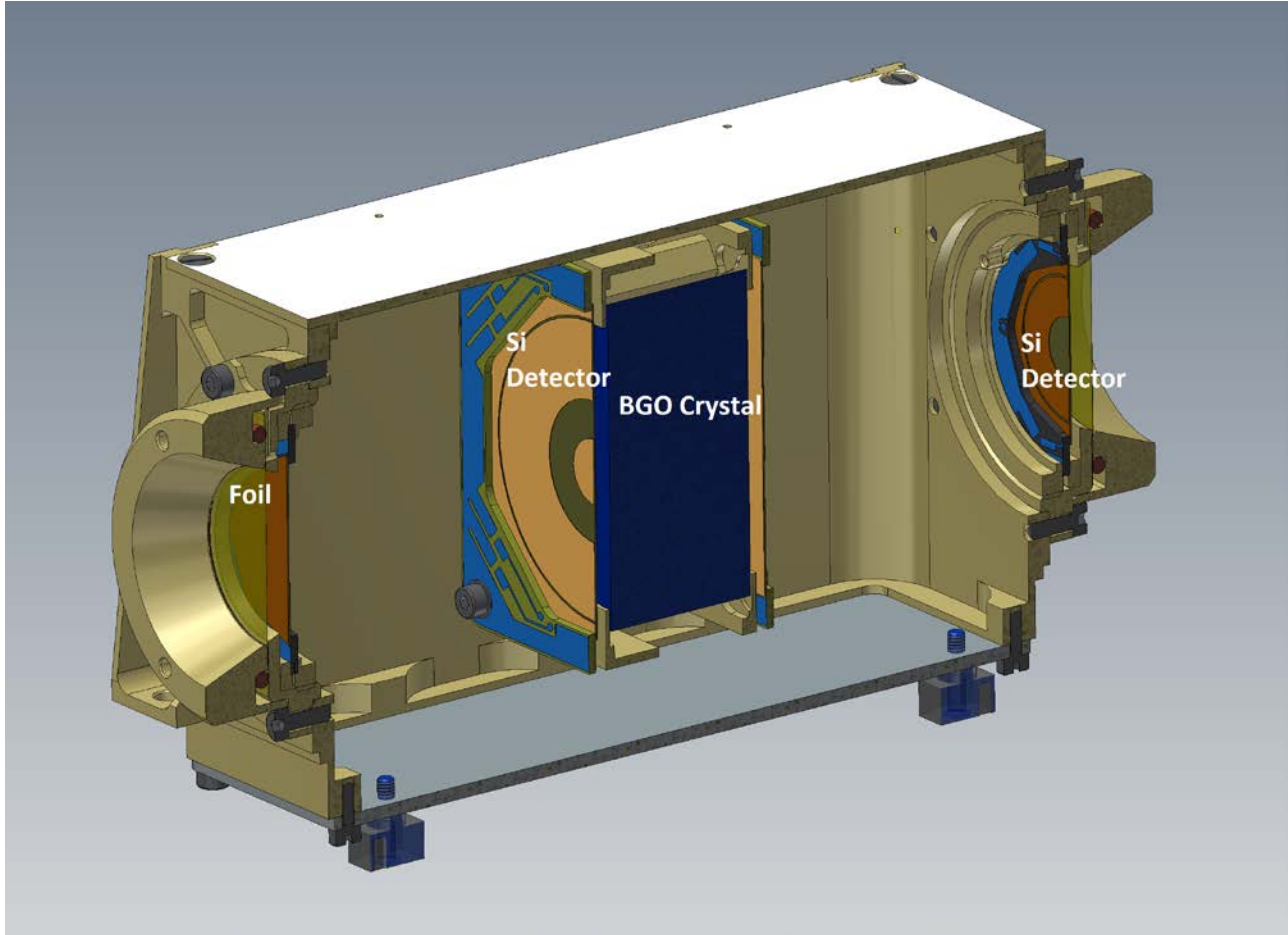


Figure2. Cross-section of HET sensor head.

As it is mentioned above and shown in figure 2, HET has 2 cm thick high-density scintillation crystal, BGO. To estimate the quenching effect of this crystal and understand the phenomenon, it is planned to evaluate with proton, deuterons and heavy ions¹⁻⁸. This time the NIRS Cyclotron facility was used to expose the detectors to 50 MeV deuterons. Preliminary results of this experiment are discussed in the next section.

2. Experimental and Results

The EPT as well as HET sensor heads were evaluated with 50 MeV deuteron utilizing Cyclotron facility of NIRS. Different thickness of PE material was used as an absorber as well as to get fragment (proton) of 50 MeV deuterons. Analysis of data is in progress and preliminary results of both sensor head are shown below. In the figure 3, one of the silicon detectors of EPT results are shown. In this plot energy seen in the silicon detector along x-axis and counts along y-axis are shown for three PE thicknesses 0, 10, and 11 mm. As the absorber thickness is increased, incident energy of deuteron decreased. As a result of this, energy deposited in the silicon detector is increased. Detailed analysis of this data is in progress.

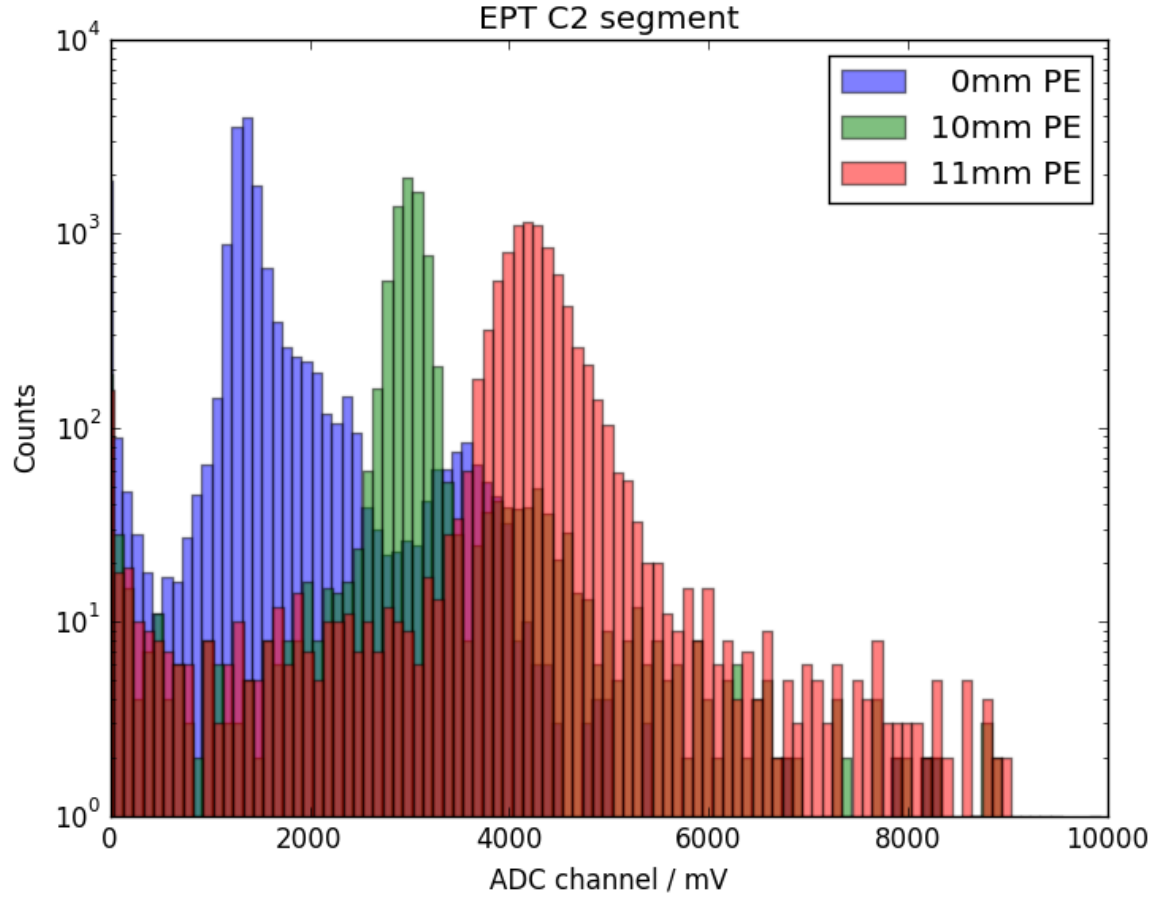


Figure 3. Deuterons seen in one of the centre segment of the EPT detectors.

For HET scintillation crystal evaluation experiments were carried out with 50 MeV deuterons and two different thicknesses (0 and 3 mm) of PE material. These thicknesses were chosen such way that, deuterons are seen in and stopped in the crystal. In the figure 4 the energy depositions are shown for two thicknesses of PE absorber. In this plot x-axis shows energy seen in the BGO crystal (in ADC channels, in mv) and y-axis shows counts. By using these measurements estimate the light quenching of deuteron in BGO crystal by comparing with GEANT 4 simulation results. Light quenching is one of the important properties of scintillation crystals/detectors for particle detector application; hence in our work we are characterizing light quenching of BGO crystal using HIMAC accelerator facility with different ions. Detailed analysis of this data is in progress.

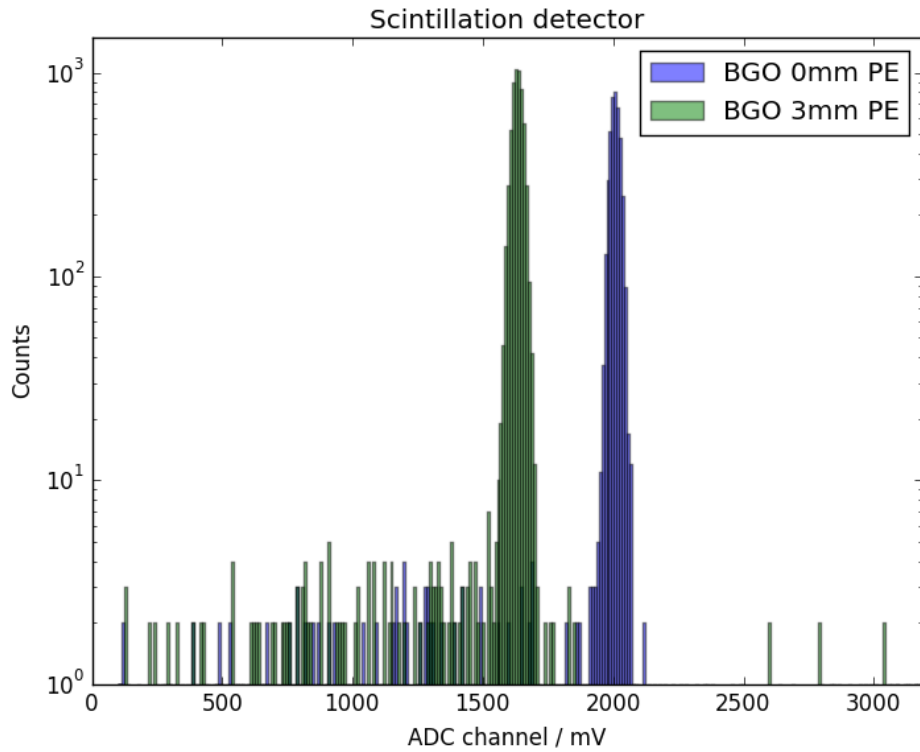


Figure 4. Deuterons seen in HET BGO crystal.

References

- [1] C. Martin, S. Kulkarni, D. Sommerfeld, M. Kruse, B. Schuster, S. Boettcher, R. F. Wimmer-Schweingruber, D. Sie, E. Boehm, L. Seimetz, C. Helmke, S. Kolbe, B. Heber, and S. Burmeister, "Characterization of Inorganic Scintillators for the HET/EPD Instrument on board Solar Orbiter", Presented at American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract # SH11B-1624, USA.
- [2] S.R. Kulkarni, R.F. Wimmer-Schweingruber, C. Martin, J. Grunau, R. Paspigilis, S. Boden, S. Boettcher, L. Seimetz, B. Schuster and A.Kulemzin, "EPT-HET for Solar Orbiter", Presented at Solar Orbiter Workshop-5, Brugge, Belgium 2012.
- [3] J. Grunau, S.R. Kulkarni, C. Martin, S. Boettcher, L. Seimetz, B. Schuster, A. Kulemzin and R.F. Wimmer-Schweingruber, "Quenching in BGO scintillating crystal of the Solar Orbiter High-Energy Telescope", Presented at Solar Orbiter Workshop-5, Brugge, Belgium 2012.
- [4] J. Grunau, S.R. Kulkarni, C. Martin, S. Boettcher, L. Seimetz, B. Schuster, A. Kulemzin, R.F. Wimmer-Schweingruber, "Scintillation quenching in BGO crystal of the Solar Orbiter HET" Presented at DPG 2013, Jena, Germany.
- [5] Robert Elftmann, Jan Grunau, Shrinivasrao Kulkarni, Cesar Martin, and Robert Wimmer-Schweingruber, "Characterisation of a LSO scintillation crystal for space applications", Presented at DPG 2013, Jena, Germany.
- [6] S R Kulkarni, J. Grunau, S. Boden, J. Steinhagen, C. Martin, R.F. Wimmer-Schweingruber, S. Boettcher, L. Seimetz, B. Schuster, A. Kulemzin, M. Wetzel and A. Ravanbakhsh, "Electron-Proton and High Energy Telescopes for Solar Orbiter," Presented at EGU 2013, Vienna, Austria.
- [7] C. Martin, R.F. Wimmer-Schweingruber, S.R. Kulkarni, J. Grunau, C.Terasa, S. Boden, J. Steinhagen, L. Panitzsch, A. Ravanbakhsh, S. Boettcher, "Development of the Kiel sensors for the EPD instrument onboard Solar Orbiter", Presented at EGU 2013, Vienna, Austria.
- [8] S. R. Kulkarni, J. Tammen, S. Boden, J. Steinhagen, C. Martin, R. F. Wimmer-Schweingruber, S. I. Boettcher, L. Seimetz, A. Ravanbakhsh, R. Elftmann, J. Rodriguez-Pacheco, M. Prieto, and R. Gomez-Herrero, "An Overview of Electron-Proton and High Energy Telescopes of Solar Orbiter", Presented at AGU 2013, San Francisco, US.

Additional Calibration of the Radiation Assessment Detector (RAD) Using ^1H and ^2H Beams at the NIRS Cyclotron

C. Zeitlin^{a,1}, G. Weigle^b, Y. Tyler^a, D. Hassler^a, B. Ehresmann^a, and H. Kitamura^c

Author affiliations: ^aSouthwest Research Institute, USA

^bBig Head Endian LLC, Burden, Kansas, USA

^cNIRS, Chiba, Japan

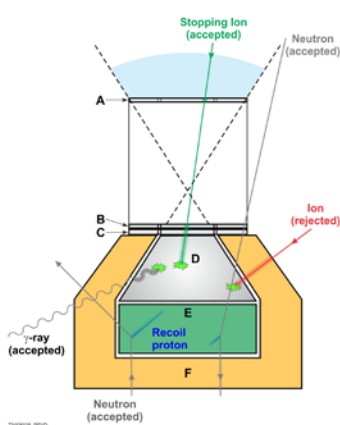
Contact information: 1. zeitlin@boulder.swri.edu

Abstract

In June 2014, we performed an experiment at the NIRS Cyclotron to help us better understand the calibration of the flight spare unit of the Radiation Assessment Detector (RAD). The flight unit is aboard the Curiosity rover on Mars. The flight spare has previously been extensively calibrated in the P2 course at HIMAC with high-energy heavy ion beams, but one of the interesting observations – first during the flight to Mars and later on the surface – has been the relatively large fluxes of deuterons and tritons. It is important to be sure we are measuring these particles with the correct energy scale, which is non-trivial due to the fact that the energies are mostly measured in the RAD “D” detector, a CsI(Tl) scintillator in which quenching of the light output may be an important factor.

Background

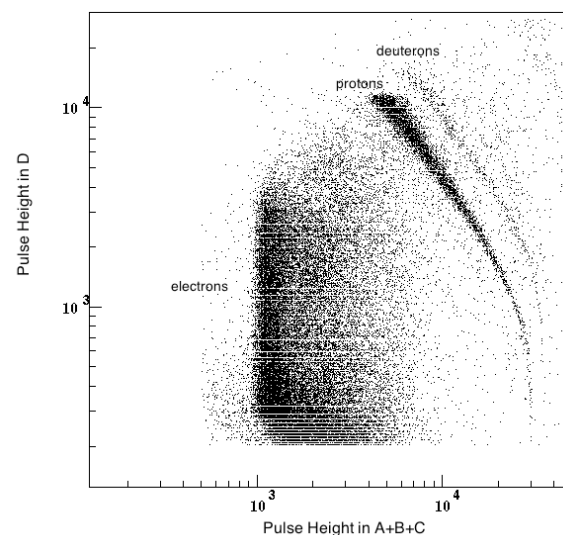
The RAD flight unit [1] has been making GCR and SEP measurements behind shielding since the launch of the MSL spacecraft in November 2011 [2]. The “sensor head” portion of the instrument (the part that contains all the detectors) is shown schematically below. The A and B silicon detectors define a telescope geometry; particles in the telescope may fully penetrate, or (for low energies) stop. The D



detector presents 12.6 g cm^{-2} of mass to incoming particles, so it is by far the most likely location for particles to stop.

During the cruise to Mars [2], RAD was shielded by other components of the spacecraft, mostly by

the Descent Vehicle which was immediately above the Curiosity rover. Average shielding of the upper field of view was about 16 g cm^{-2} . On the Martian surface RAD is under an average shielding of about 22 g cm^{-2} of CO_2 . In both situations, isotopes of hydrogen and helium with energies below about 100 MeV/nuc can be identified in RAD data using the ΔE vs. E_{tot} technique as illustrated in the scatter plot below, which was made using a sample of events from the last 6 weeks of the cruise phase. Here we have selected stopping particles by requiring hits in the A, B, C, and D detectors, but with no hits in E or F. Energy loss calculations predict that protons with energies up to 95 MeV will stop in D. At higher energies, they penetrate at least into E. Similarly, deuterons up to 64 MeV/nuc should stop in D.



The importance of stopping particles is that, during solar quiet time, they are dominantly secondary particles produced in transport of GCR ions through shielding. Therefore they can be used as a sensitive probe of transport models. It is essential that we are confident in our identification of these ions and we must assess the accuracy of the energy calibration.

Quenching in CsI(Tl)

The relation between the pulse height and energy deposited in scintillators is not simple due to the effect of quenching, which has been described by Birks [3]. The light output, dL/dx , is given by $dL/dx = \eta dE/dx (1 + k_B dE/dx)^{-1}$ where η and k_B are determined empirically. There is a complication when applying Birks' formula, namely k_B is in general a function of the particle type, so that different ions show different quenching behavior. There is also some controversy as to the applicability of Birks' Law to inorganic scintillators, but that debate is beyond the scope of this report.

RAD Calibration

In flight, RAD performs real-time event processing that relies on calibration parameters stored onboard. For simplicity, it was decided that the onboard calibration parameters would be those determined from minimum-ionizing particles (MIPs). For the silicon detectors in RAD, there is no difference between calibration parameters from MIPs and those from heavy charged particles. However, for the scintillators, there is a difference, which may be quite large. Of particular importance, the deposited energy scale for D based on MIPs appears to yield incorrect deposited energy values when applied to stopping protons. The data taken at the NIRS Cyclotron are the first clean low-energy ($E < 100$ MeV) proton data the RAD team has been able to obtain. Other low-energy proton beams were obtained by moderating higher-energy proton beams; this technique yields a broad distribution of incident energy not suitable for precise calibration. Also, the ^2H data obtained at the Cyclotron allow us to verify the identification of deuterons in flight and to make a careful check of the energy scale, which – due to the dependence of k_B on particle type – may be somewhat different from that of protons.

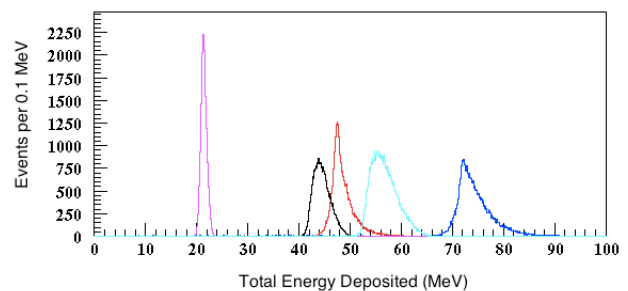
Experimental Protocol

The NIRS Cyclotron provided protons at 30, 50, and 70 MeV, and ^2H at 25 MeV/nuc. A beam

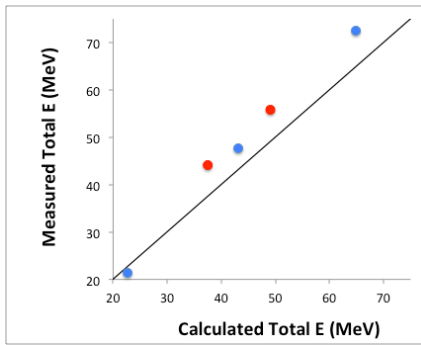
counting scintillator 3 mm thick was placed in between the exit of the vacuum line and the RAD entrance window for most runs, but was removed during a few of the runs with 30 MeV protons. The rate from the beam counter was used as feedback to the operators to keep the RAD trigger rate low, as it can only process events at about 100 Hz. RAD has two operating modes: flight-like, in which the data acquired are highly compressed before being telemetered; and streaming, in which the raw data are output on a USB port connected to a PC. Either mode can be used on the ground. Streaming mode can also be used in two ways, one with RAD set up as in flight (using the onboard calibration), and the other so that RAD is in “unity gain” mode and raw ADC values are passed. For each beam configuration, we ran all 3 ways (flight, streaming with calibration, and streaming with unity gain).

Results

The unity-gain data can be used to systematically check the internal calibration values, which are set to values close to those used in the flight unit. That analysis has not yet been performed. However, previous comparisons of the flight spare and the flight unit have shown that their performance is almost identical, so the results from the Cyclotron runs can be applied to flight data in ground analysis. In the histogram below, we show the total energy deposited as determined from the onboard calibrations. The five distributions shown are for (from left to right) protons at 30 MeV, ^2H at 25 MeV/nuc with the



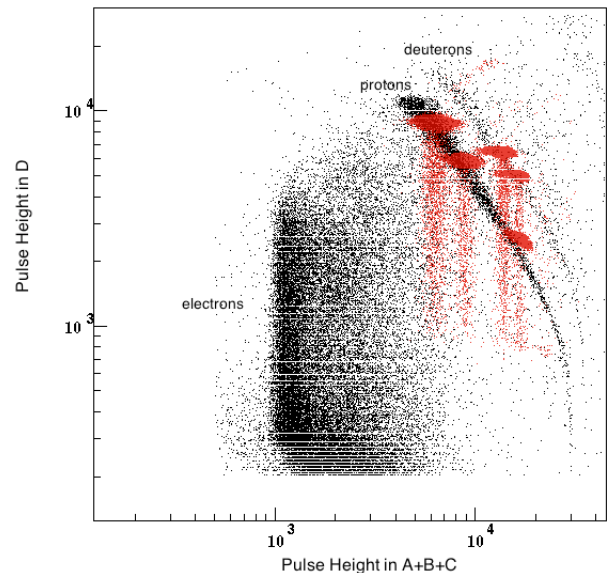
scintillator in the beam, 50 MeV protons, ^2H with the scintillator removed, and 70 MeV protons.



Comparisons between measured energies and calculated energies are shown in the scatter plot at the top of the next page. Points for ^1H are in blue, for ^2H in red. All but the lowest-energy point are off by at least 10%, with measured energy being greater than the expected energy. The total is dominated by the energy deposited in D, so the offset is mainly due to quenching. The offset of the measured vs. calculated energy for ^1H is in the same direction as the offset seen in RAD flight data. That is, when we select stopping protons in flight data and apply the MIP calibration, we find a maximum energy of about 110 MeV, whereas the range-energy relation shows that the actual maximum stopping energy is 95 MeV. It is also interesting to note that the ^2H points are further away from the expected energy than the ^1H points by an additional $\sim 5\%$, which seems to indicate that k_B is, as expected, somewhat sensitive to the particular isotope. The only point that falls below the black line in the plot (which indicates perfect agreement between measurement and calculation) is the one for 30 MeV protons. For that point, the calculated energy is greater than the measured energy. This may be because the calculation does not take into account the exit window at the end of the vacuum line, which has a stronger effect on the 30 MeV proton beam than it does on the other beams.

Comparison to Flight Data

The scatter plot at the top of the next column shows the same flight data as above, but now with data from the NIRS Cyclotron superimposed (red points). The three clusters of events that fall along the proton band are the ^1H data, as expected, and the two clusters on the deuteron band are the ^2H data. This confirms that the second band consists of ^2H , and



confirms that the flight unit and flight spare unit have very similar calibrations.

Conclusions

The experiment performed at the NIRS Cyclotron in June 2014 has provided very useful data for the calibration of RAD. The key findings are: (1) the difference between MIP calibration used onboard and actual energy deposits by stopping protons is off in both units, in the same direction, by about the same amount; (2) confirmation that we have correctly identified the ^2H band; (3) apparent (small) sensitivity of quenching to isotope; (4) confirmation of the similarity of response between the flight unit and flight spare.

Acknowledgements

We thank H. Kitamura and the staff of the Cyclotron for their great support of our experiment. These results have not yet been published or presented, but will be included in a forthcoming journal article on RAD calibration.

References

- [1] D.M. Hassler et al., doi:10.1007/s11214-012-9913-1
- [2] C. Zeitlin et al., doi:10.1126/science.1235989
- [3] J.B. Birks, Proc. Phys. Soc. A64, 874 (1951).

7. 粒子線による損傷試験

光学機器の耐放射線性能に関する研究

光学機器の耐放射線性能に関する研究

Study of the effect of radiation on the optical instruments

滝澤 慶之^A、川崎 賀也^A、小川 貴代^A、北村 尚^B、内堀 幸夫^B
Yoshiyuki Takizawa^A, Yoshiya Kawasaki^A, Takayo Ogawa^A,
Hisashi Kitamura^B, and Yukio Uchihori^B
A：理化学研究所、B：放射線医学総合研究所

概要

本研究は、JEM-EUSO(Extreme Universe Space Observatory onboard JEM)実験(文献[1])の一環で、JEM-EUSO 実験で使用する予定の部品の耐放射線性能の確認である。JEM-EUSO 実験は、口径約 2.5 m で約 60 度の視野を持つ超広視野望遠鏡で、高度約 400 km の軌道上の国際宇宙ステーションから、 10^{20} eV を超える極限エネルギー宇宙線を観測する。宇宙から観測することにより、飛躍的に大きな有効面積を実現する。この高い統計精度は、荷電粒子による新しい天文学を創出し、永年の謎である極限エネルギー宇宙線の起源を解き明かす。

ISS 環境において曝露されたとき、10 年間に陽子によって付与される線量は、Al 1mm の厚さのシーリングの条件で 10 Gy (電子では 300 Gy) と推定している。この照射量に対して、JEM-EUSO で使用する部品に対する 70MeV 陽子線ビームの照射による放射線耐性のテストを実施している。

1. 目的

放射線計測機器の耐放射線特性は、計測性能を大きく左右する問題である。放射線耐性が優れているものは特注品であることが多く、製作コストに大きく反映している。そのため、一般部品において、十分な放射線耐性を持っていることが確認できれば、計測機器の低コスト化に貢献できる。

本研究では、国際宇宙ステーションに搭載を予定している装置で用いる各種一般部品及び専用開発部品を中心に、放射線照射試験を行い、放射線耐性の評価を行う。

今年度は、紫外線フィルタの試験を行う。

2. 実験

宇宙放射線場を模擬するため、高エネルギー(70 MeV)の陽子線を用いる。照射対象が 2cm 角程度の大きさのものを数個同時に照射するので、散乱体およびワブラーを用いた 10cm 直径のビームを使用する。

同ビームを使い、これまでに、以下の試験を行い、十分な耐性があることを確認している。

- 光電子増倍管用高圧電源モジュール
 - ◇ DC-HVDC コンバータ (EMCO Q10N-5、CA12N-5)
 - ◇ DAC (AD5320)
 - ◇ OP-Amp
 - ◇ FET
- 光電子増倍管硝材
 - ◇ 浜松ホトニクス MAPMT UV ガラス
- 光電子増倍管
- 光電子増倍管用印可電圧反転用フォトMOSリレー
 - ◇ 松下電工 AQV258
- 紫外線LED (JEM-EUSO 軌道上校正用光源)
 - ◇ 340nm Seoul Optodevice 社 T9B34C GaN 系
 - ◇ 360nm Roithner 社 RLT360-1.0-15 InGaN
 - ◇ 385nm Roithner 社 RLS-UV385 GaN 系
- 多層膜フィルタ(空気シャワーの室素輝線選択用フィルタ)
 - ◇ 紫外線バンドパスフィルタ
- 結晶 (大気及び雲モニタ用レーザー部品)
 - ◇ レーザー 光学結晶
- ASIC
 - ◇ フロントエンド読出用 Q-T 変換 ASIC

- ◇ フロントエンド読出用 ASIC
- プラスチックレンズ素材
 - ◇ PMMA・CYTOP
- マイクロプロセッサ
 - ◇ Arduino Leonardo

今年度は、近紫外線を選択透過させる色ガラスフィルタへの照射テストを行った。

2-1. 色ガラスフィルタ Schott BG3 への照射

JEM-EUSO では、宇宙線空気シャワーによる大気蛍光を主に観測する。これは、近紫外線領域での発光が卓越しており、不要な可視光線を排除するために紫外線透過フィルタ Schott 社製の BG3 フィルタ(図 1)を使用する予定である。

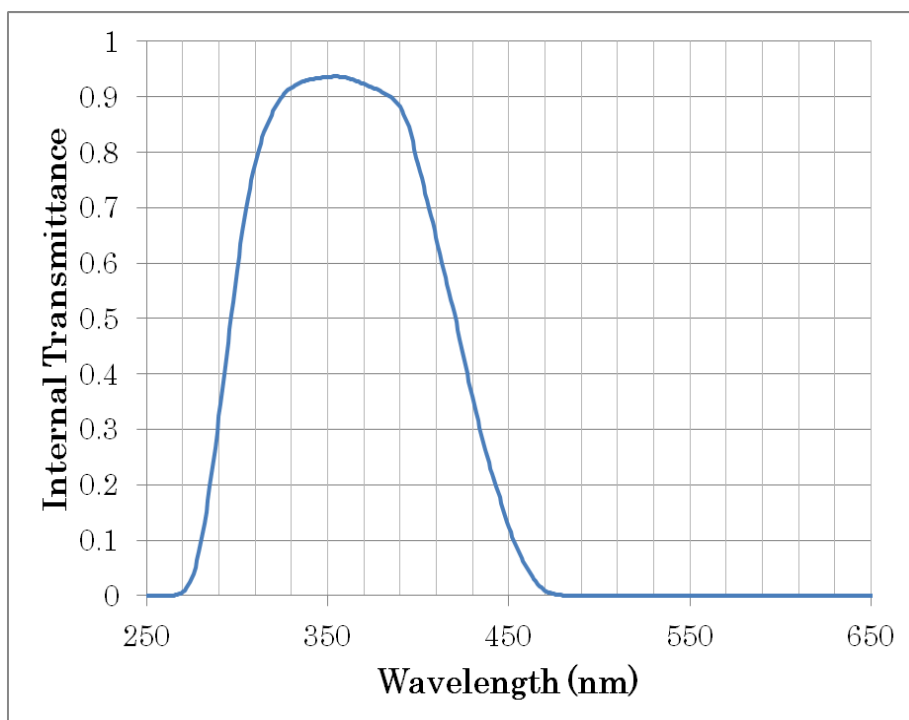


図 1. 5mm 厚の BG3 フィルタの内部透過率の波長特性。
近紫外線を透過し、可視光線を透過させていないことがわかる

今回、BG3 フィルタへの陽子線照射を行い、その後の透過率の変化を測定した。照射サンプルとしては、0.01 kGy, 0.03 kGy, 0.1 kGy, 0.3 kGy, 0.7kGy, 1.0 kGy の 6 種類作製した。これらのサンプルの分光透過率を測定し、非照射サンプルの分光透過率との比較を行った。その結果を図 2 に示す。BG3 フィルタの陽子線に対する透過率の減少は、紫外線透過ガラスよりも激しく、短波長になるにつれて、透過率の減少が激しくなり、300nm 付近では、0.3 kGy 以上の照射では 20%以下になることが分かった。

今回は、陽子線照射による変化を十分に確認するために、1.0 kGy までの照射を行ったが、JEM-EUSO 実験で期待される BG3 フィルタの Total Dose は 1 年当り 1 Gy 程度と見積もられている。これは、今回の最低の 0.01 kGy の照射でも約 10 年相当分に相当することになる。したがって、JEM-EUSO の想定観測期間 6 年では、BG3 フィルタの放射線による劣化は無視できるレベルであることがわかった。

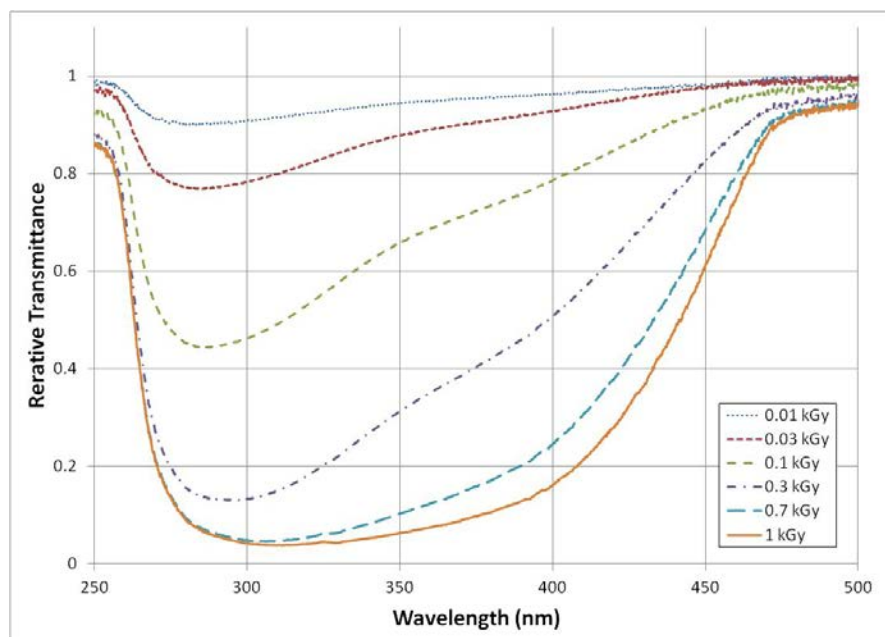


図 2. BG3 フィルタの分光透過率の変化。

非照射サンプルの分光透過率との比で表している。短波長ほど透過率が減少していることが分かる。

3. まとめ

JEM-EUSO で使用を予定している紫外線透過フィルタ BG3 に対する 70MeV 陽子線ビームの照射による放射線耐性のテストを実施した。軌道上での約 10 年以上のドーズを照射し、放射線による BG3 フィルタの劣化は無視できるレベルであることを確認し、JEM-EUSO の環境で使用できることを確認した。

謝辞

放射線医学総合研究所 医用サイクロトロンを用いて、本試験の行う機会を得、有益な実験結果を得ることが出来ました。サイクロトロンの運転にたずさわる方々に感謝致します。

参考文献

[1] Y.Takahashi et al.: The JEM-EUSO mission, New Journal of Physics, 11, p-065009 (2009).

8. 有料ビーム提供

NIRS-930 における有料提供の利用状況

NIRS-930 における有料提供の利用状況

PROPRIETARY RESEARCH AT NIRS-930

杉浦 彰則^A、北條 悟^A、片桐 健^A、中尾 政夫^A、田代 克人^A、鈴木 和年^A、
野田 章^A、岡田 高典^B、高橋 勇一^B、井 博志^B、神谷 隆^B、野田 耕司^A、
Akinori Sugiura^A, Satoru Hojo^A, Ken Katagiri^A, Nakao Masao^A, Katsuto Tashiro^A,
Kazutoshi Suzuki^A, Akira Noda^A, Takanori Okada^B, Yuichi Takahashi^B, Hiroshi Ii^B,
Takashi Kamiya^B, Koji Noda^A

^A : 放射線医学総合研究所 重粒子医科学センター 物理工学部

^B : 加速器エンジニアリング株式会社

はじめに

放射線医学総合研究所の大型サイクロトロン(NIRS-930)では、有料提供のマシントimeとして、受託契約に基づく設備利用が行われている。この有料提供は平成 14 年から開始され、現在では総運転時間の約 1 割を占めている。

1. 利用目的

利用目的としては、主に宇宙放射線による電子機器への影響の評価が挙げられる。宇宙空間では宇宙放射線によりデバイスおよび材料の劣化又は一時的な誤動作が引き起こされる。この宇宙放射線の中で捕捉放射線や太陽宇宙線に含まれる高エネルギー陽子はトータルドーズ効果と呼ばれる材料の劣化やシングリイベント効果と呼ばれる回路素子の誤動作や永久的損傷等を与えることが知られている[1]。このため、宇宙空間において利用実績のない電子機器を宇宙空間で使用する際には、あらかじめ宇宙放射線の影響を調査する必要がある。NIRS-930 から提供される陽子線を宇宙放射線に含まれる陽子に見立てて電子機器に照射することにより、耐放射線の評価が行われた。

2. 利用状況

平成 26 年度に行った有料提供日数は 24 日となった。当初有料提供に配分されたマシントime日数は 26 日分であったが、3 日分のキャンセルがあり、1 日分が追加配分された。

有料提供における、立ち上げ調整時間を含めたサイクロトロンの運転時間は合計 218.9 時間となった。このうち有料となるビーム利用時間は、立ち上げ調整時間を含まず、各コースで照射形状を確認した後からビーム提供終了までとなっている。実際の有料となったビーム利用時間の合計は 149 時間だった。

有料提供における利用された粒子とエネルギーは 70 MeV 陽子のみであった。80 MeV 陽子を照射したいとの要望があったが、マグネチックチャンネルの冷却水流量低下により提供が困難になっている。80 MeV の提供を再開できるよう調整を行っていく予定である。

3. ビームコースおよび照射条件

有料提供では、C6 コースと C8 コースが利用された。C6 コースは照射野が $\phi 1 \sim 2$ cm 程度のビームを照射できるコースであり、C8 コースは照射野を $\phi 7$ cm 程度に広げたコースとなっている。主に利用されたコースは、C8 コースであり 210.4 時間であった。C6 コースでは 8.5 時間利用された。

C8 コースで利用されたビーム強度は 1 pA 以下から 100 nA であり、C6 コースでは 1 pA 以下のビーム強度が利用された。

4. 有料ビーム提供の手続きについて

NIRS-930 を使用した有料提供を行うには、放医研と利用者間で契約を交わす必要がある。平成 26 年度は 6 件の契約を元に 8 課題の実験が行われた。過去 5 年間の契約件数は 1 年当り 4~6 件となっている。

また、実験に参加するには放医研において身分登録と放射線作業従事者登録をする必要がある。平成 26 年度は 70 名の登録を行い、のべ 72 名の利用者が有料提供の実験に参加した。

新規に利用をご希望の方はサイクロトロン運転室(cyc_sec@nirs.go.jp)までご連絡ください。

参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構,耐放射線設計標準,JERG-2-143

9. 研究成果一覽

研究成果一覧

1 & 2. サイクロトロン運転実績と利用状況と改良・開発

<原著論文等>

1. Satoru Hojo, Ken Katagiri, Masao Nakao, Akinori Sugiura, Masayuki Muramatsu, Akira Noda, Takanori Okada, Yuichi Takahashi, Akihito Komiyama, Toshihiro Honma, Koji Noda: Status of a compact electron cyclotron resonance ion source for National Institute of Radiological Sciences-930 cyclotron, Rev. Sci. Instrum., vol. 85 (2014) 02A959.

<Proceedings等>

1. Satoru Hojo, Ken Katagiri, Akinori Sugiura, Masao Nakao, Akira Noda, Koji Noda: MEASUREMENT OF BEAM PHASE USING PHASE PROBE AT THE NIRS-930 CYCLOTRON, The 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, June15-20, 2014, MOPRI080.
2. Masao Nakao, Satoru Hojo, Ken Katagiri, Akira Noda, Koji Noda, Akinori Sugiura, et al.: BEAM SIMULATION FOR IMPROVED OPERATION OF CYCLOTRON NIRS-930, The 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, June15-20, 2014, MOPRI081.
3. Ken Katagiri, Satoru Hojo, Masao Nakao, Akinori Sugiura, Kazutoshi Suzuki, Akira Noda, Koji Noda: DESIGN OF BEAM TRANSPORT LINES FOR RADIOISOTOPE PRODUCTION SYSTEMS IN NIRS CYCLOTRON FACILITY, The 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, June15-20, 2014, WEPRI088.

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 北條 悟, 片桐 健, 中尾 政夫, 杉浦 彰則, 野田 章: NIRS-930 における加速位相の調整について, 第 11 回日本加速器学会年会, 青森県青森市, 2014 年 8 月 9 日~11 日, MOOM03 p.254.
2. 北條 悟, 片桐 健, 中尾 政夫, 杉浦 彰則, 野田 章, 野田 耕司: 放医研のサイクロトロン NIRS-930 と HM-18 現状報告, 第 11 回日本加速器学会年会, 青森県青森市, 2014 年 8 月 9 日~11 日, FSP005 p.331
3. 中尾 政夫, 北條 悟, 片桐 健, 杉浦 彰則, 野田 章, et al: NIRS-930 におけるビームのシミュレーション, 第 11 回日本加速器学会年会, 青森県青森市, 2014 年 8 月 9 日~11 日, SUP012 p.959.
4. 片桐 健, 北條 悟, 中尾 政夫, 杉浦 彰則, 野田 章 野田 耕司: NIRS サイクロトロン・RI 生成用ビームポートのためのビーム輸送ラインの設計, 第 11 回日本加速器学会年会, 青森県青森市, 2014 年 8 月 9 日~11 日, SUP118 p.1360.
5. S. Hojo, K. Katagiri, A. Sugiura, M. Nakao, A. Noda, H. Suzuki, K. Nagatsu, K. Noda, T. Okada, Y. Takahashi, H. Ii, CUSTOMER SATISFACTION IN RADIONUCLIDES PRODUCTION -present and future-, The Workshop on Accelerator Operations 2014, Mainz, Germany, Oct26-31, 2014 Board #: 4.
6. Yuichi Takahashi, Satoru Hojo, Ken Katagiri, Masao Nakao, Akinori Sugiura, Takanori Okada, Hiroshi Ii, Akira Noda: Operation of NIRS Cyclotrons The Workshop on Accelerator Operations 2014, Mainz, Germany, Oct26-31, 2014, Board #: 2.

3. 平成24年度サイクロトロン分子プローブの製造・開発への利用状況

<原著論文等>

1. Masayuki Fujinaga, Lin Xie, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Yoko Shimoda, Akiko Hatori, Katsushi Kumata, Yiding Zhang, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Synthesis and Evaluation of 4-Halogeno-N-4-[6-(isopropylamino)pyrimidin-4-yl]-1,3-thiazol-2-yl]-N-[11C]methylbenzamide for Imaging of Metabotropic Glutamate 1 Receptor in Melanoma, *Journal of Medicinal Chemistry*, 58(3), 1513 - 1523, 2015-02.
2. Hideki Ishii, Katsuyuki Minegishi, Koutarou Nagatsu, Ming-Rong Zhang: Pd(0)-mediated [11C]carbonylation of aryl and heteroaryl boronic acid pinacol esters with [11C]carbon monoxide under ambient conditions and a facile process for the conversion of [carbonyl-11C]esters to [carbonyl-11C]amides, *Tetrahedron Letters*, 71(10), 1588-1596, 2015-03.
3. Anjani Tiwari, Joji Yui, Pooja Singh, Swati Agrawal, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Nidhi Chadha, Yiding Zhang, Masayuki Fujinaga, Yoko Shimoda, Katsushi Kumata, Anil K Mishra, Masanao Ogawa, Ming-Rong Zhang: Design, synthesis and biological evaluation of small molecule based PET radioligand for 5-HT₇ receptor, *RSC Advances*, 5(25), 19752-19759, 2015-02.
4. Katsushi Kumata, Joji Yui, Akiko Hatori, Jun Maeda, Lin Xie, Masanao Ogawa, Tomoteru Yamasaki, Yuji Nagai, Yoko Shimoda, Masayuki Fujinaga, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Development of [11C]MFTC for PET Imaging of Fatty Acid Amide Hydrolase in Rat and Monkey Brains, *ACS Chemical Neuroscience*, 6(2), 339 - 346, 2015-02.
5. Haidong Qin, Ming-Rong Zhang, Lin Xie, Yanjie Hou, Zichun Hua, Minjin Hu, Zizheng Wang, Feng Wang: PET imaging of apoptosis in tumor-bearing mice and rabbits after paclitaxel treatment with (18)F(-)-labeled recombinant human His10-annexin V, *American journal of nuclear medicine and molecular imaging*, 5(1), 27 - 37, 2015-01.
6. Ferenc Szelecsenyi, G.F. Steyn, Zoltan Kovacs, C. Vermeulen, Kotaro Nagatsu, Ming-Rong Zhang, Kazutoshi Suzuki: Excitation functions of natZr + p nuclear processes up to 70 MeV: New measurements and compilation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 343(15), 173 - 191, 2014-12.
7. Anjani K Tiwari, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Katsushi Kumata, Anil K Mishra, Yoko Shimoda, Akiko Hatori, Bin Ji, Masanao Ogawa, Kazunori Kawamura, Feng Wang, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of new (18)F-labelled acetamidobenzoxazolone-based radioligands for imaging of the translocator protein (18 kDa, TSPO) in the brain, *Organic & biomolecular chemistry*, 12(47), 9621 - 9630, 2014-12.
8. Kotaro Nagatsu, Katsuyuki Minegishi, Masami Fukada, Hisashi Suzuki, Sumitaka Hasegawa, Ming-Rong Zhang: Production of ²¹¹At by a vertical beam irradiation method, *Applied Radiation and Isotopes*, 94, 363 - 371, 2014-12.
9. Keitaro Tanoi, Natsuko Kobayashi, Takayuki Saito, Naoko Iwata, Risa Kamada, Ren Iwata, Hisashi Suzuki, Atsushi Hirose, Yoshimi Ohmae, Ryohei Sugita, Tomoko Nakanishi: Effects of magnesium deficiency on magnesium uptake activity of rice root, evaluated using ²⁸Mg as a tracer, *Plant and soil*, 384(1/2), 69 - 77, 2014-11.
10. Hiroki Hashimoto, Kazunori Kawamura, Nobuyuki Igarashi, Makoto Takei, Tomoya Fujishiro, Yoshiharu Aihara, Satoshi Shiomi, Masatoshi Muto, Takehito Ito, Kenji Furutsuka, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Lin

Xie, Maiko Ono, Akiko Hatori, Kazuyoshi Nemoto, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis, Photoisomerization, Biodistribution, and Metabolite Analysis of ^{11}C -PBB3 as a Clinically Useful PET Probe for Imaging of Tau Pathology, *Journal of nuclear medicine*, 55(9), 1532 - 1538, 2014-09.

11. Yoko Shimoda, Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Lin Xie, Katsushi Kumata, Tomoteru Yamasaki, Akiko Hatori, Masanao Ogawa, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: [^{11}C]CEP-32496: radiosynthesis, biodistribution and PET study of brain uptake in P-gp/Bcrp knockout mice, *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 24(15), 3574 - 3577, 2014-08.
12. Masaaki Suzuki, Misato Takashima-Hirano, Hideki Ishii, Chika Watanabe, Kengo Sumi, Hiroko Koyama, Hisashi Doi: Synthesis of ^{11}C -labeled retinoic acid, [^{11}C]ATRA, via an alkenylboron precursor by Pd(0)-mediated rapid C- ^{11}C methylation, *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 24(15), 3622 - 3625, 2014-08.
13. Lin Xie, Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Katsushi Kumata, Hidekatsu Wakizaka, Kenji Furutsuka, Makoto Takei, Zhao-Hui Jin, Takako Furukawa, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Molecular imaging of ectopic metabotropic glutamate 1 receptor in melanoma with a positron emission tomography radioprobe (18) F-FITM, *International journal of cancer*, 135(8), 1852 - 1859, 2014-09.
14. Ferenc Szelecsenyi, Zoltan Kovacs, Kotaro Nagatsu, Ming-Rong Zhang, Kazutoshi Suzuki: Excitation function of (p, α) nuclear reaction on enriched ^{67}Zn : Possibility of production of ^{64}Cu at low energy cyclotron, *Radiochimica Acta*, 102(6), 465 - 472, 2014-06.
15. Tomoteru Yamasaki, Jun Maeda, Masayuki Fujinaga, Yuji Nagai, Akiko Hatori, Joji Yui, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: PET brain kinetics studies of (11)C-ITMM and (11)C-ITDM, radioprobes for metabotropic glutamate receptor type 1, in a nonhuman primate, *American journal of nuclear medicine and molecular imaging*, 4(3), 260 - 269, 2014-04.
16. Tiwari Anjani, Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Katsushi Kumata, Yoko Shimoda, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Akiko Hatori, Jun Maeda, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Characterization of a novel acetamidobenzoxazolone-based PET ligand for translocator protein (18 kDa) imaging of neuroinflammation in the brain, *Journal of Neurochemistry*, 129(4), 712 - 720, 2014-05.
17. Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Hidekatsu Wakizaka, Maki Okada, Kenichi Odaka, Joji Yui, Atsushi B Tsuji, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: OAT3-mediated extrusion of the (99m)Tc-ECD metabolite in the mouse brain, *Journal of cerebral blood flow and metabolism : official journal of the International Society of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 34(4), 585 - 588, 2014-04.
18. Eva Galante, Toshimitsu Okamura, Kerstin Sander, Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Ming-Rong Zhang, Mathew Robson, Adam Badar, Mark Lythgoe, Matthias Koepp, Erik Årstad: Development of Purine-Derived ^{18}F Labeled Pro-drug Tracers for Imaging of MRP1 Activity with PET, *Journal of Medicinal Chemistry*, 57(3), 1023 - 1032, 2014-02.

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 張 明榮: Development of Radioprobes for Imaging of Metabotropic Glutamate I Receptor and Radionuclide Therapy in Tumor, 2015 Asian-Pacific Conference of Tumor Biology and Medicine, The 9th Forum of Chinese Middle-aged and Young Oncologist, 南京医科大学, 2015-03-22.
2. Ming-Rong Zhang: Development of Radiopharmaceuticals in National Institute of Radiological Sciences, 日

中核医学交流合同シンポジウム, 日中核医学交流会, 沖縄, 2015-03-15.

3. Lin Xie: Identifying neuronal damage and neuroprotective effects in vivo by ^{11}C -ITMM-PET, 日中核医学交流合同シンポジウム, 沖縄, 2015-03-15.
4. 峯岸 克行: 標識薬剤の製造と利用状況について, 第 9 回技術と安全の報告会, 放射線医学総合研究所, 2015-03-10.
5. 鈴木 寿: 放医研での Cu-64 製造と利用状況 陽イオン交換樹脂による分離性製法, PET 化学ワークショップ 2015, 神戸, 2015-02-07.
6. 永津 弘太郎: ^{211}At の核種製造, PET 化学ワークショップ 2015, 神戸, 2015-02-07.
7. 武井 誠: PET 化学てびき 第 5 版 [^{11}C]DAA1106 合成てびき, PET 化学ワークショップ 2015, 神戸, 2015-02-07.
8. 橋本 裕輝: 新規薬剤立上げの話 代謝について, PET 化学ワークショップ 2015, 神戸, 2015-02-06.
9. 河村 和紀: 「新規薬剤立上げの話」 タウイメーキング剤 [^{11}C]PBB3, PET 化学ワークショップ 2015, 神戸, 2015-02-06.
10. 河村 和紀: 放医研における PET 薬剤製造の標準化と技術移転, 第 9 回分子イメージング研究センターシンポジウム, 放射線医学総合研究所, 2014-12-17.
11. 石井 英樹: ^{11}C -カルボニル化反応-これまでとこれから, 第 9 回分子イメージング研究センターシンポジウム, 放射線医学総合研究所, 2014-12-17.
12. 藤永 雅之: ^{18}F -フルオロアルキル剤の製造と PET プローブ開発への応用, 第 9 回分子イメージング研究センターシンポジウム, 放射線医学総合研究所, 2014-12-17.
13. 永津 弘太郎: 実用量を目指したイメージング・RI 内用療法向け核種の製造, 第 9 回分子イメージング研究センターシンポジウム, 放射線医学総合研究所, 2014-12-17.
14. 鈴木 寿: 放医研での放射性銅の製造と利用状況, 第 9 回分子イメージング研究センターシンポジウム, 放射線医学総合研究所, 2014-12-17.
15. 古塚 賢士: 学会製造基準に準拠した ^{11}C 標識薬剤製造における品質管理と工夫, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
16. 下田 陽子, 由井 譲二, 羽鳥 晶子, 熊田 勝志, 藤永 雅之, 謝 琳, 山崎 友照, 小川 政直, 河村 和紀, 張 明栄: 新規 PET プローブ [^{11}C]CEP-32496 の合成と P-gp/BCRP 欠損マウスにおける評価, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
17. 大矢 智幸, 鈴木 寿, 深田 正美, 永津 弘太郎, 峯岸 克行, 張 明栄: $^{64}\text{Ni}(\text{a,p})^{67}\text{Cu}$ 反応を用いた ^{67}Cu 製造についての検討, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
18. 羽鳥 晶子, 熊田 勝志, 由井 譲二, 謝 琳, 山崎 友照, 前田 純, 念垣 信樹, 河村 和紀, 張 明栄: 糖尿病モデル ZDF ラットを用いた [^{11}C]1-Methyl-L-tryptophan の PET イメージング, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
19. 由井 譲二, 藤永 雅之, 熊田 勝志, 謝 琳, 山崎 友照, 下田 陽子, 羽鳥 晶子, 栗原 雄祐, 張 明栄: トランスロケータータンパク質(TSPO)PET プローブ [^{18}F]PyBMP の合成と評価, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
20. 武井 誠, 河村 和紀, 古塚 賢士, 潮見 聡, 藤代 智也, 金子 いづみ, 岩隈 佳寿子, 脇 厚生, 藤林 康久, 張 明栄: 学会製造基準に準拠した ^{11}C 標識薬剤製造における環境改善, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
21. 永津 弘太郎, 峯岸 克行, 張 明栄: 放射性砒素(V)の遠隔製造に関する基礎検討, 第 54 回日本核医学

会学術総会, 大阪, 2014-11-06.

22. 橋本 裕輝, 河村 和紀, 山崎 友照, 古塚 賢士, 伊藤 岳人, 樋口 真人, 張 明栄: 脳内タウイメー
ジ
ング用 PET プローブ[¹¹C]PBB3 の安定性の検討, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
23. 鈴木 寿, 永津 弘太郎, 深田 正美, 峯岸 克行, 張 明栄: ⁶⁸Zn(p, x)反応による ⁶⁷Cu 及び ⁶⁷Ga の同
時製造と ⁶⁷Cu の品質評価, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
24. 熊田 勝志, 由井 譲二, 羽鳥 晶子, 謝 琳, 山崎 友照, 栗原 雄祐, 前田 純, 張 明栄: [¹¹C] 1-メチ
ルトリプトファンの標識合成と体内分布, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
25. 峯岸 克行, 永津 弘太郎, 張 明栄: 酸化カルシウムをターゲットとした、放射性スカンジウムの遠
隔製造法の開発, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-08.
26. 破入 正行, 武井 誠, 橋本 裕輝, 古塚 賢士, 潮見 聡, 藤代 智也, 小川 政直, 念垣 信樹, 河村 和
紀, 福村 利光, 張 明栄: 2-[¹¹C]メトキシピリジル基を有する H3 受容体 PET プローブの合成最適化
の検討, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-08.
27. 謝 琳, 由井 譲二, 熊田 勝志, 羽鳥 晶子, 山崎 友照, 季 斌, 河村 和紀, 張 明栄: ヒト肝臓検体
を用いる脂肪肝に対する ¹⁸F-FEDAC イメージングの有用性評価, 第 54 回日本核医学会学術総会,
大阪, 2014-11-07.
28. 山崎 友照, 河村 和紀, 由井 譲二, 下田 陽子, 大矢 智幸, 念垣 信樹, 羽鳥 晶子, 藤永 雅之, 謝
琳, 熊田 勝志, 張 明栄: [¹¹C]Elacridar を用いた薬剤排出トランスポーター機能の PET 定量解析,
第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-07.
29. Lin Xie, Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Katsushi Kumata, Hidekatsu
Wakizaka, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Oncoimaging of melanoma by targeted ectopic
metabotropic glutamate 1 receptor with a positron emission tomography radioprobe ¹⁸F-FITM, The 54th
Annual Scientific Meeting of the Japanese Society for Nuclear Medicine Japan-China Nuclear Medicine
Exchange Seminar, Osaka, 2014-11-06.
30. 岡田 真希, 辻 厚至, 菊池 達矢, 脇坂 秀克, 岡村 敏充, 加藤 孝一, 張 明栄:
2-Amino-[3-¹¹C]isobutyric acid PET を用いた収束超音波-マイクロバブルによる血液脳関門開放の評
価, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
31. 藤永 雅之, 謝 琳, 山崎 友照, 由井 譲二, 熊田 勝志, 下田 陽子, 羽鳥 晶子, 念垣 信樹, 張 明栄:
腫瘍に発現する代謝型グルタミン酸受容体 1 をターゲットとする PET プローブの開発, 第 54 回日
本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
32. 岡村 敏充, 岡田 真希, 脇坂 秀克, 菊池 達矢, 張 明栄: 酸化還元状態イメージング用分子プロ
ーブの開発, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
33. 橋本 裕輝, 狩谷 香, 河村 和紀, 岩隈 佳寿子, 脇 厚生, 藤林 康久, 張 明栄: [¹¹C]放医研にお
ける ¹⁸F-FDG 注射液の受託試験の信頼性保証について, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪,
2014-11-06.
34. 河村 和紀, 武井 誠, 古塚 賢士, 橋本 裕輝, 潮見 聡, 藤代 智也, 金子 いづみ, 岩隈 佳寿子, 脇
厚生, 藤林 康久, 張 明栄: ¹¹C 標識自動合成装置と分取 HPLC システムの洗浄バリデーションの
検討, 第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.
35. 河村 和紀, 下田 陽子, 山崎 友照, 由井 譲二, 熊田 勝志, 藤永 雅之, 謝 琳, 羽鳥 晶子, 脇坂 秀
克, 小川 政直, 張 明栄: イミダゾリン I2 受容体イメージング用 ¹⁸F 標識 PET 用プローブの開発,
第 54 回日本核医学会学術総会, 大阪, 2014-11-06.

36. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Kazunori Kawamura, Yoko Shimoda, Kenji Furutsuka, Nobuki Nengaki, Joji Yui, Hidekatsu Wakizaka, Akiko Hatori, Lin Xie, Katsushi Kumata, Ming-Rong Zhang: PET studies: in vivo monitoring of group I metabotropic glutamate receptors in Parkinson's disease rat, EANM Congress 2014, the European Association of Nuclear Medicine, Sweden, 2014-10-20.
37. Kazunori Kawamura, Tomoteru Yamasaki, Yoko Shimoda, Katsushi Kumata, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Lin Xie, Akiko Hatori, Hidekatsu Wakizaka, Kurihara Yusuke, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of an 18F-labeled imidazoline I2 receptor, ligand as a PET probe, EANM Congress 2014, the European Association of Nuclear Medicine, Sweden, 2014-10-19.
38. 破入 正行, 須堯 綾, 辻 厚至, 河村 和紀, 張 明榮, 福村 利光: 炭素 11 標識した環状 RGD ペプチドの合成と評価, 第 8 回バイオ関連化学シンポジウム, 公益社団法人日本化学会, 岡山, 2014-09-12.
39. 居 堯, 岡本 真由美, 清水 功雄, 山上 あゆみ, 小川 健司, 中野 雄司, 加藤 孝一, 鈴木 千恵, 菊池 達矢, 張 明榮: 18F 標識カステステロンの合成とマウス PET による体内動態の評価, 第 14 回放射性医薬品画像診断薬研究会, 京都大学大学院薬学研究科, 2014-09-13.
40. Toshimitsu Okamura, Maki Okada, Hidekatsu Wakizaka, Ming-Rong Zhang: Development of a tracer for imaging activity of NADHP oxidase in the brain, First Adriatic Symposium on Biophysical Approaches in Biomedical Studies, Medical College of Wisconsin, Republic of Croatia, 2014-08-25.
41. Maki Okada, Atsushi Tsuji, Tatsuya Kikuchi, Hidekatsu Wakizaka, Toshimitsu Okamura, Koichi Kato, Ming-Rong Zhang: PET imaging with 2-amino-[3-11C]isobutyric acid for the assessment of blood-brain barrier opening induced by focused ultrasound in the rat, the 11th Congress of the World Federation of Nuclear Medicine and Biology, World Federation of Nuclear Medicine and Biology, Cancun, 2014-07-28.
42. Katsushi Kumata, Joji Yui, Akiko Hatori, Jun Maeda, Masanao Ogawa, Lin Xie, Tomoteru Yamasaki, Yoko Shimoda, Masayuki Fujinaga, Ming-Rong Zhang: PET imaging of fatty acid amide hydrolase in rat and monkey brains with 11C-MFTC, SNMMI 61th Annual Meeting, Missouri, 2014-06-09.
43. 張 明榮: PET 用分子プローブの研究開発と応用(Development and application of PET Probes), Seminar of Tumor signature and Nuclear Medicine Targeting Theranostics, 南京, 2014-04-19.
44. 河村 和紀: 製造・試験検査の様式について, PBB3 画像病理相関実証研究キックオフミーティング, 東京, 2014-04-07.

<その他：執筆>

1. 永津 弘太郎: 分子イメージングはどこまで進んだか, INNERVISION 医療と画像の総合情報誌, 29(7), 6-10, 2014-07.

4—1. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究

<原著論文等>

1. Y. Matsumoto, T. Matsuura, M. Wada, Y. Egashira, T. Nishio, Y. Furusawa: Enhanced radiological effects at the distal end of a clinical proton beam: in vitro study, J. Radiat. Res. 55(4), 816-822 (2014).
2. M. Aoki-Nakano, Y. Furusawa, A. Uzawa, Y. Matsumoto, R. Hirayama, C. Tsuruoka, T. Ogino, T. Nishio, K. Kagawa, M. Murakami, G. Kagiya, K. Kume, M. Hatashita, S. Fukuda, K. Yamamoto, H. Fuji, S. Murayama, M. Hata, T. Sakae, H. Matsumoto: Relative biological effectiveness of therapeutic proton beams for HSG cells at Japanese proton therapy facilities, J. Radiat. Res. 55(4), 812-815 (2014).
3. T. Akagi, T. Aso, G. Iwai, A. Kimura, S. Kameoka, S. B. Lee, Y. Maeda, N. Matsufuji, T. Nishio, C. Omachi, S. J. Park, T. Sasaki, T. Toshito, W. Takase, T. Yamashita, Y. Watase: Geant4-based particle therapy simulation framework for verification of dose distributions in proton therapy facilities, Progress in Nuclear Science and Technology 4, 896-900 (2014).

<Proceedings等>

1. 西尾 禎治: 粒子線治療における腫瘍の線量応答性観測システムの研究開発に向けて, 平成26年度次世代PET研究会, 特別講演, 予稿集, 20-21 (2015).
2. S. Tanaka, T. Nishio, K. Matsushita, M. Tsuneda, Y. Aono, A. Sugiura, M. Uesaka: Development of proton CT imaging system for evaluation of proton range calculation accuracy, Bulletin of the American Physics Society, Vol. 59(10), 225 (2014).
3. K. Matsushita, T. Nishio, S. Tanaka, M. Tsuneda, Y. Aono, S. Kabuki, A. Sugiura, K. Ieki: Measurement of reaction cross section in the target nuclear fragment reactions required for the accuracy of proton therapy, Bulletin of the American Physics Society, Vol. 59(10), 226 (2014).
4. T. Aso, T. Nishio, S. Kabuki: Software Design for extending Geant4 Based Particle Therapy System Simulation Framework to Medical Imaging Applications, The 7th JSMP-KSMP Joint Meeting on Medical Physics, 125 (2014).
5. T. Nishio, T. Okamoto, S. Kabuki, T. Tanimori, T. Aso, S. Nakamura, M. Hiraoka, A. Miyatake: Study of dose delivered tumor damage monitoring system in innovative proton therapy, Jpn. J. Med. Phys. Proc., 34 Supple. 1, 66 (2014).
6. K. Matsushita, T. Nishio, K. Yogo, M. Tsuneda, Y. Aono, M. Sekine, K. Ieki: Measurement of the production cross-section in fragmentation reaction for proton therapy, Jpn. J. Med. Phys. Proc., 34 Supple. 1, 68 (2014).
7. S. Tanaka, T. Nishio, K. Matsushita, S. Nakamura, M. Tsuneda, Y. Aono, K. Yogo, S. Kabuki, M. Uesaka, : Study of proton CT imaging, Jpn. J. Med. Phys. Proc., 34 Supple. 1, 69 (2014).

<学会及び研究会口頭発表等>

1. S. Tanaka, T. Nishio, K. Matsushita, M. Tsuneda, Y. Aono, A. Sugiura, M. Uesaka: Development of proton CT imaging system for evaluation of proton range calculation accuracy, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physics Society and the Physical Society of Japan, Hawaii, October 7 – 11, 2014.
2. K. Matsushita, T. Nishio, S. Tanaka, M. Tsuneda, Y. Aono, S. Kabuki, A. Sugiura, K. Ieki: Measurement of reaction cross section in the target nuclear fragment reactions required for the accuracy of proton therapy, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physics Society and the Physical Society of Japan, Hawaii, October 7 – 11, 2014.

3. T. Aso, T. Nishio, S. Kabuki: Software Design for extending Geant4 Based Particle Therapy System Simulation Framework to Medical Imaging Applications, The 7th JSMP-KSMP Joint Meeting on Medical Physics, Busan, September 25 – 27, 2014.
4. 西尾 禎治: 粒子線治療における腫瘍の線量応答性観測システムの研究開発に向けて, 平成26年度次世代PET研究会, 特別講演, 2015年1月30日.
5. 西尾 禎治: 医療現場のニーズから生まれるシーズ技術の研究と装置の開発, パネルディスカッション: 医療現場のニーズに基づいた研究開発の新たな展開, 日本放射線腫瘍学会第27回学術大会, 2014年12月11–13日.
6. 松下 慶一郎, 西尾 禎治, 田中創大, 恒田雅人, 青野裕樹, 杉浦彰則, 株木重人, 家城和夫: 陽子線治療のための標的原子核破砕反応におけるポジトロン放出核生成断面積の測定, 日本放射線腫瘍学会第27回学術大会, 2014年12月11–13日.
7. 田中 創大, 西尾 禎治, 松下 慶一郎, 恒田 雅人, 青野 裕樹, 株木 重人, 杉浦 彰則, 上坂 充: 陽子線治療における体内中飛程計算精度向上のための陽子線CT画像取得法の研究, 日本放射線腫瘍学会第27回学術大会, 2014年12月11–13日.
8. 西尾禎治: 陽子線治療の現状と課題: 陽子線治療における医学物理の重要性, 7大学連携先端がん教育基盤創造プラン, 第3回放射線療法講演会, 2014年10月25日.
9. 西尾 禎治, がんの最先端放射線治療と医学物理士を知る: 最先端放射線治療における医学物理士. 日本医学物理学会・日本医学物理士会, 市民公開講座, 2014年9月21日.
10. 西尾 禎治, 岡本 俊, 株木 重人, 谷森 達, 阿蘇 司, 中村 哲志, 平岡 眞寛, 宮武 彩: 革新的陽子線治療技術による腫瘍線量応答性観測システムの研究, 日本医学物理学会第107回学術大会, 2014年4月10–13日.
11. 松下 慶一郎, 西尾 禎治, 余語 克紀, 恒田 雅人, 青野 裕樹, 関根 雅晃, 家城 和夫: 陽子線治療のための標的原子核破砕反応における実効反応断面積及び ^{10}C 、 ^{11}C 生成断面積の測定, 日本医学物理学会第107回学術大会, 2014年4月10–13日.
12. 田中 創大, 西尾 禎治, 松下 慶一郎, 中村 哲志, 恒田 雅人, 青野 裕樹, 余語 克紀, 株木 重人, 上坂 充: 陽子線CT画像取得法の研究, 日本医学物理学会第107回学術大会, 2014年4月10–13日.

<その他>

1. 田中 創大: 陽子線治療における体内中飛程計算精度向上のための陽子線CT画像取得法の研究, 東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻修士論文, 2015年2月.
2. 上坂充編集幹事, 西尾禎治編集委員・執筆者: 原子力・量子・核融合事典第IV分冊, 丸善出版, 2014年12月発行.

4—3. 核破碎片生成二重微分断面積の測定

<Proceedings等>

1. M.Hagiwara, T.Sanami, D.Mancusi et al.: Recent Progress in Experimental and Theoretical Studies of Proton-induced Fragment Production Cross Section at Intermediate Energies, Proceedings of the 2013 Symposium on Nuclear Data, November 14-15, 2013, JAEA-Conf 2014-002, p63-68.
2. T.Sanami: Light Mass Fragment Production DDXs of 70 MeV Proton, Helium and Carbon Induced Reactions, Proceedings of the 2013 Symposium on Nuclear Data, November 14-15, 2013, JAEA-Conf 2014-002, p139-144.

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 佐波 俊哉, 他: 軽荷電粒子の同時測定のためのブラックカーブカウンターの改良, 日本原子力学会 2014秋の大会, 2014年9月8日～10日, 京都大学, L47.

4—4. 最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定

<学会及び研究会口頭発表等>

1. Yusuke Uozumi, T. Hashiguchi, H. Yoneshige, S. Sonoda, Y. Koba: Small-angle measurements of proton-carbon nuclear reaction for secondary dose estimation, SCIS & ISIS 2014 Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, Kitakyushu, December 3-6, 2014.
2. Yusuke Uozumi, Taro Hashiguchi, Hidenari Yoneshige, Akihumi Sonoda, Yusuke Koba: Light Ion Spectra of Small-Angles from Proton-Nucleus Reactions for Secondary Dose Estimation, BMFSA2014 Biomedical Fussy System Association, Tokyo, November 15-16, 2014.

4—5. 陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 小平 聡, 小西 輝昭, 北村 尚, 内堀 幸夫, 川嶋 元, 蔵野 美恵子, 西尾 禎治, 安田 伸宏, 小倉 紘一, Lembit Sihver, Eric R. Benton: CR-39とAFMを用いた陽子線からの標的核破砕粒子の線量計測法, 第29回固体飛跡検出器研究会, 福井大学, 2015年3月30日-31日.

4—7. 放射線遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 今富 宏祐, 三根 貴大, 執行 信寛, 池田 伸夫, 石橋 健二, 木村 健一, 池見 拓, 平澤 勇人, 高橋 定明, 古場裕介: 放射線遮蔽可撓性材料の特性評価, 日本原子力学会九州支部第33回研究発表講演会, 九州大学伊都キャンパス, 稲盛財団記念館, 2014年12月, P11.
2. 執行 信寛, 今富 宏祐, 三根 貴大, 池田 伸夫, 石橋 健二, 木村 健一, 池見 拓, 高橋 定明, 平澤 勇人, 古場裕介: 加速器施設建屋用放射線遮蔽可とう性材料の開発; V 10MeV以上の中性子に対する特性評価, 日本原子力学会2015年春の年会, 茨城大学日立キャンパス, 2015年3月, N53.

<その他: 学位論文>

1. 三根 貴大: 放射線遮蔽用可撓性材料の特性評価に関する研究, 九州大学工学部, 卒業論文, 2015年3月.

4—8. 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分析

<その他：学位論文>

1. 楠本 多聞: 高分子系飛跡検出器中に形成されるプロトン及び重イオントラックの化学構造と応答特性, 神戸大学, 修士論文, 2015年3月.

6—1. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

<学会及び研究会口頭発表等>

1. Y. Uchihori, et al.: A New Active Space Radiation Instruments for the International Space Station, A - DREAMS, The 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Aug 2-10, 2014.
2. 内堀 幸夫: 国際宇宙ステーション等における各種宇宙実験での線量評価, 日本放射線影響学会第57回大会, 鹿児島, 2014年10月1〜3日, W6-1.

7. 陽子線の生物効果の研究

<原著論文等>

1. Junko Maeda, Yoshihiro Fujii, Hiroshi Fujisawa, Hirokazu Hirakawa, Ian M. Cartwright, Mitsuru Uesaka, Hisashi Kitamura, Akira Fujimori, Takamitsu Kato: The hyperthermia induced radiosensitization in CHO wild type, NHEJ and HR repair mutant after proton and carbon-ion exposure, Oncology Letters, Accepted 2014. In Press.
2. Ian M. Cartwright, Justin J. Bell, Junko Maeda, Matthew D. Genet, Yoshihiro Fujii, Akira Fujimori, Hisashi Kitamura, Tadashi Kamada, David J. Chen, Takamitsu Kato: Effects of targeted phosphorylation site mutations in DNA-PKcs phosphorylation domain on low and high LET radiation sensitivity, Oncology Letters, 2015, Apr;9(4):1621-1627. Epub 2015 Feb 17.
3. Hiroshi Fujisawa, Paula C. Genik, Hisashi Kitamura, Akira Fujimori, Mitsuru Uesaka, Takamitsu Kato: Comparison of human chordoma cell-kill for 290 MeV/n carbon ions versus 70 MeV protons in vitro. Radiation Oncology 2013 Apr 15;8(1):91.

10. 関連資料

平成26年度第Ⅰ期・Ⅱ期マシンタイム予定表

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
3月31日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	4月21日 (月)	メンテナンス	RI生産 (¹⁵ O) D9, 13:00～	メンテナンス	RI生産 P18, C1orC2
4月1日 (火)	RI生産		R&D		4月22日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所外) H ₂ 24, 10 μA, C4, 10:00～11:30	
4月2日 (水)	RI生産		R&D P30 or He34		4月23日 (水)	RI生産		RI生産(²⁸ Mg所外) He75, C4, 10:00～	
4月3日 (木)	RI生産		RI生産(⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μA, C4, 10:00～18:00		4月24日 (木)	RI生産		RI生産	
4月4日 (金)	RI生産		RI生産 P30MeV, 20 μA, C9		4月25日 (金)	RI生産		高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾) P70MeV / 50nA C8	
4月5日 (土)					4月26日 (土)				
4月6日 (日)					4月27日 (日)				
4月7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	4月28日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
4月8日 (火)	RI生産		RI生産 He34MeV, 5 μA, C9		4月29日 (火)			昭和の日	
4月9日 (水)	RI生産		RI生産(⁶⁷ Cu所内) He34, 10 μA, C4, 10:00～15:00		4月30日 (水)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μA, C4, 10:00～11:00	
4月10日 (木)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) Ne ^{10+,6+} 120MeV / 500 nA C10		5月1日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV, 20 μA, C9	
4月11日 (金)	RI生産		RI生産 P18MeV, 20 μA, C9		5月2日 (金)	RI生産		RI生産 He34MeV, 5 μA, C9	
4月12日 (土)			陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 10nA C8		5月3日 (土)			憲法記念日	
4月13日 (日)					5月4日 (日)			みどりの日	
4月14日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		5月5日 (月)			こどもの日	
4月15日 (火)	RI生産		RI生産(¹²⁴ I所内) H ₂ 27, C9, 11:00～		5月6日 (火)			振替休日	
4月16日 (水)	RI生産		半導体素子の放射線の影響に関する研究 久保山 P70MeV / 10nA C8		5月7日 (水)	RI生産		RI生産 P18MeV, 20 μA, C9	
4月17日 (木)	RI生産		宇宙放射線の電子部品・材料・観測センサー に与える影響に関する研究 JAXA(高島) P70MeV / 10nA C8		5月8日 (木)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μA, C9	
4月18日 (金)	RI生産		RI生産 P18MeV, 20 μA, C9		5月9日 (金)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μA, C9	
4月19日 (土)					5月10日 (土)				
4月20日 (日)			一般公開		5月11日 (日)				

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
5月12日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		6月2日 (月)	定期検査 (原子力安全技術センター)		定期検査 (原子力安全技術センター) P70, 75nA, C8	
5月13日 (火)	RI生産		RI生産 He40MeV, 15 μ A, C9		6月3日 (火)	RI生産		RI生産 (⁶⁴ Cu所内) P12, 8 μ A, C4	R&D He34
5月14日 (水)	RI生産		RI生産 P30MeV, 20 μ A, C4		6月4日 (水)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 北村 He100MeV / 1pA C6, 8	
5月15日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4, 10:00~19:00		6月5日 (木)	RI生産		RI生産 P30MeV, 15 μ A, C9	
5月16日 (金)	RI生産		プロトンに対するヒト培養細胞の 細胞致死効果のモデル解析 鈴木 P70MeV / 1nA C8		6月6日 (金)	RI生産		高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾) P70MeV / 50nA C8	
5月17日 (土)					6月7日 (土)			高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾) P70MeV / 50nA C8	
5月18日 (日)					6月8日 (日)				
5月19日 (月)	安全測定 本体室	RI生産	安全測定 本体室・汎用照射室	R&D	6月9日 (月)	メンテナンス	RI生産 (¹⁵ O) D9, 13:00~	メンテナンス	R&D
5月20日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所外) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00		6月10日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所外) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00	
5月21日 (水)	RI生産		陽子線の標的核破砕反応の エネルギー依存性に関する実験的研究 小平 P70MeV / 10nA C8		6月11日 (水)	RI生産		陽子線の生物効果の研究 コロラド州立大 加藤 P70MeV / 5nA C8	
5月22日 (木)	RI生産		RI生産 He40MeV, 10 μ A, C4		6月12日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV, 20 μ A, C9	
5月23日 (金)	RI生産		RI生産(⁶⁷ Cu所内) P60, 5 μ A, C9, 15:00~17:00 P18MeV, 20 μ A, C9		6月13日 (金)	RI生産		設備利用 P70MeV / 1nA C8	
5月24日 (土)			陽子線の生物効果の研究 コロラド州立大 加藤 P70MeV / 5nA C8		6月14日 (土)				
5月25日 (日)					6月15日 (日)				
5月26日 (月)	メンテナンス	RI生産 (¹⁵ O) D9, 13:00~	メンテナンス	R&D	6月16日 (月)	メンテナンス	RI生産 (¹⁵ O) D9, 13:00~	メンテナンス	RI生産 P18, C1, 15 μ A, 13:15~
5月27日 (火)	RI生産		RI生産(¹²⁴ I所内) H ₂ 27, C9, 11:00~		6月17日 (火)	RI生産		RI生産 P30MeV, 15 μ A, C9	
5月28日 (水)	RI生産		RI生産 P30MeV, 15 μ A, C9		6月18日 (水)	RI生産		Calibration of the RAD Instrument SwRI(Cary) D50MeV / 1e5pps C6	
5月29日 (木)	RI生産		陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 10nA C8		6月19日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4, 10:00~18:00	
5月30日 (金)	RI生産		R&D He34 or D20		6月20日 (金)	RI生産		RI生産 P18, C9, 10 μ A,	R&D 3He105
5月31日 (土)					6月21日 (土)			Calibration of the RAD Instrument SwRI(Cary) P70,50,30MeV / 1e5pps C6	
6月1日 (日)					6月22日 (日)				

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
6月23日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	7月14日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
6月24日 (火)	RI生産		RI生産(²⁸ Mg所外) He75, C4, 10:00~		7月15日 (火)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9	
6月25日 (水)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9		7月16日 (水)	RI生産		RI生産 He40MeV, 20 μ A, C4	
6月26日 (木)	RI生産		超エネルギー電子観測装置の校正試験 JAXA(東尾) P70MeV / 1e5pps C6		7月17日 (木)	RI生産		R&D 電力制限中	
6月27日 (金)	RI生産		RI生産 P60, 5 μ A, C9, 15:00~17:00		7月18日 (金)	RI生産		R&D 電力制限中	
6月28日 (土)					7月19日 (土)				
6月29日 (日)					7月20日 (日)				
6月30日 (月)	メンテナンス	RI生産 (¹⁵ O) D9, 13:00~	メンテナンス	R&D	7月21日 (月)			海の日	
7月1日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00		7月22日 (火)	RI生産		RI生産 He34MeV, 3 μ A, C9	
7月2日 (水)	RI生産		RI生産 D20MeV, 5 μ A, C9		7月23日 (水)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9	
7月3日 (木)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9		7月24日 (木)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μ A, C9	
7月4日 (金)	RI生産		中高エネルギー粒子による核反応の研究 KEK(佐波) He50MeV / 40nA C6		7月25日 (金)	RI生産		R&D 電力制限中	
7月5日 (土)			中高エネルギー粒子による核反応の研究 KEK(佐波) He100MeV / 40nA C6		7月26日 (土)				
7月6日 (日)					7月27日 (日)				
7月7日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		7月28日 (月)	メンテナンス	RI生産 D9, ¹⁵ O, 13:00~	メンテナンス	RI生産 P18, C1,C2,
7月8日 (火)	RI生産		RI生産 P18, 5 μ A, C9		7月29日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00	
7月9日 (水)	RI生産		最前方における荷電粒子生成 二重微分断面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 1nA C6		7月30日 (水)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μ A, C9	
7月10日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4, 15:00~18:00		7月31日 (木)	RI生産		RI生産(²¹¹ At所内) α 34, 10 μ A, C9, 10:00~12:30	
7月11日 (金)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9		8月1日 (金)	RI生産		小型衛星用データ処理系部品の 放射線環境に対する評価 JAXA(森下) P70MeV / 3 \times 10 ¹¹ pps C8	
7月12日 (土)					8月2日 (土)			光学機器の耐放射線性能に関する研究 北村(川崎) P70MeV / 10nA C8	
7月13日 (日)					8月3日 (日)				

小型サイクロトロン			大型サイクロトロン			小型サイクロトロン			大型サイクロトロン				
月 日		午 前	午 後	午 前		午 後	月 日		午 前	午 後	午 前		午 後
8月4日 (月)		メンテナンス		メンテナンス			8月25日 (月)		メンテナンス	RI生産	メンテナンス		R&D
8月5日 (火)		RI生産		RI生産 He34MeV , 5 μ A , C9			8月26日 (火)		RI生産		RI生産(²⁸ Mg所外) He75, C4, 10:00~		
8月6日 (水)		RI生産		設備利用 P70MeV / 30nA C8			8月27日 (水)		RI生産		宇宙放射線の電子部品・材料・観測センサー に与える影響に関する研究 JAXA(高島) P70MeV / 10nA C8		
8月7日 (木)		RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30 , 20 μ A , C4 , 15:00~18:00			8月28日 (木)		RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00 P60MeV , 5 μ A , C9		
8月8日 (金)		RI生産		RI生産 He34MeV , 10 μ A , C9			8月29日 (金)		RI生産		設備利用 P70MeV / 10nA C8		
8月9日 (土)							8月30日 (土)						
8月10日 (日)							8月31日 (日)						
8月11日 (月)		メンテナンス	RI生産	メンテナンス		RI生産	9月1日 (月)		メンテナンス	RI生産	メンテナンス		
8月12日 (火)		RI生産		設備利用 P70MeV / 30nA C8			9月2日 (火)		RI生産		メンテナンス		
8月13日 (水)		RI生産		設備利用 P70MeV / 30nA C8			9月3日 (水)		RI生産		メンテナンス		
8月14日 (木)		RI生産		設備利用 P70MeV / 30nA C8			9月4日 (木)		RI生産		メンテナンス		
8月15日 (金)		RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00~		RI生産	9月5日 (金)		RI生産		メンテナンス		
8月16日 (土)							9月6日 (土)						
8月17日 (日)							9月7日 (日)						
8月18日 (月)		メンテナンス	RI生産	メンテナンス		RI生産	9月8日 (月)		長期メンテナンス				
8月19日 (火)		RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) Ne ^{10+,6+} 120MeV / 500 nA C10			9月9日 (火)		長期メンテナンス				
8月20日 (水)		RI生産		RI生産 He34MeV , 10 μ A , C9 D20MeV , 10 μ A , C9			9月10日 (水)		長期メンテナンス				
8月21日 (木)		RI生産		RI生産(²¹¹ At所内) α 34, 10 μ A, C9, 10:00~11:30			9月11日 (木)		長期メンテナンス				
8月22日 (金)		RI生産		小型衛星用データ処理系部品の 放射線環境に対する評価 JAXA(森下) P70MeV / 3 \times 10 ¹¹ pps C8			9月12日 (金)		長期メンテナンス				
8月23日 (土)				プロトンに対するヒト培養細胞の 細胞致死効果のモデル解析 鈴木 P70MeV / 1nA C8			9月13日 (土)						
8月24日 (日)							9月14日 (日)						

月 日	小型サイクロロン		大型サイクロロン		月 日	小型サイクロロン		大型サイクロロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
9月22日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	10月13日 (月)			体育の日	
9月23日 (火)			秋分の日		10月14日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV, 5 μ A, C9	
9月24日 (水)	RI生産		R&D		10月15日 (水)	RI生産		RI生産(²¹¹ At所内) He34, 10 μ A, C9, 10:00~12:00	
9月25日 (木)	RI生産		RI生産 D20MeV, 5 μ A, C9		10月16日 (木)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9	
9月26日 (金)	RI生産		RI生産 He34MeV, 5 μ A, C9		10月17日 (金)	RI生産 (15時まで)	メンテ ナンス	RI生産 D20MeV, 10 μ A, C9	メンテナンス
9月27日 (土)					10月18日 (土)			停電	
9月28日 (日)					10月19日 (日)				
9月29日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	10月20日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
9月30日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00 P15, 10 μ A, C9		10月21日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00	
10月1日 (水)	RI生産		RI生産(²⁸ Mg所外) He75, 10 μ A, C4, 10:00~14:00 He34, 5 μ A, C9		10月22日 (水)	RI生産		設備利用 P70MeV / 1nA C8	
10月2日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV, 5 μ A, C9		10月23日 (木)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9 P18MeV, 5 μ A, C9	
10月3日 (金)	RI生産		放射線遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験 九大(執行) P50MeV / 1nA C8		10月24日 (金)	RI生産		RI生産 H ₂ 27MeV, 5 μ A, C9	
10月4日 (土)					10月25日 (土)			陽子線の標的核破砕反応の エネルギー依存性に関する実験的研究 小平 P30, 50MeV / 10nA C8	
10月5日 (日)					10月26日 (日)				
10月6日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D P70	10月27日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 He34, 10 μ A, C9
10月7日 (火)	RI生産		RI生産(⁸⁹ Zr所内) P15, 10 μ A, C9, 10:00~12:00		10月28日 (火)	RI生産		RI生産 P60MeV, 10 μ A, C9	
10月8日 (水)	RI生産		設備利用 P70MeV / 30nA C8		10月29日 (水)	RI生産		最前方と最後方における荷電粒子生成 二重微分面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 10nA C6	
10月9日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4, 10:00~18:00		10月30日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV, 20 μ A, C9	
10月10日 (金)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9		10月31日 (金)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00~	R&D
10月11日 (土)					11月1日 (土)				
10月12日 (日)					11月2日 (日)				

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
11月3日 (月)			文化の日		11月24日 (月)			振替休日	
11月4日 (火)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 北村 He100MeV / 1pA C6		11月25日 (火)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9	
11月5日 (水)	RI生産		陽子線の標的核破砕反応の エネルギー依存性に関する実験的研究 小平 P40, 60MeV / 10nA C8		11月26日 (水)	RI生産		設備利用 P70MeV / 30nA C8	
11月6日 (木)	RI生産		重粒子ドシメトリーにおける線質依存性の評価 松山 P10MeV / 1e8 pps C6		11月27日 (木)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9	
11月7日 (金)	RI生産		重粒子ドシメトリーにおける線質依存性の評価 松山 P50MeV / 1e8 pps C6, C8		11月28日 (金)	RI生産		RI生産 P60MeV, 10 μ A, C9, 10:00~17:00	
11月8日 (土)					11月29日 (土)			高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾) P70MeV / 50nA C8	
11月9日 (日)					11月30日 (日)				
11月10日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		12月1日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
11月11日 (火)	RI生産		RI生産(¹²⁴ I所内) H ₂ 27, 10 μ A, C9, 11:00~		12月2日 (火)	RI生産		RI生産(²⁸ Mg所外) He75, C4, 10:00~14:00	
11月12日 (水)	RI生産		RI生産 P15MeV, 10 μ A, C9		12月3日 (水)	RI生産		RI生産(⁶⁷ Cu所内) He40, 15 μ A, C4, 10:00~17:00	
11月13日 (木)	RI生産		RI生産(⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4, 10:00~19:00		12月4日 (木)	RI生産		RI生産 H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00	
11月14日 (金)	RI生産		半導体素子の放射線の影響に関する研究 久保山 P70MeV / 10nA C8		12月5日 (金)	RI生産		宇宙放射線の電子部品・材料・観測センサー に与える影響に関する研究 JAXA(高島) P70MeV / 100nA C8	
11月15日 (土)					12月6日 (土)				
11月16日 (日)					12月7日 (日)				
11月17日 (月)	安全測定 本体室	RI生産	安全測定 本体室・汎用照射室	R&D	12月8日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
11月18日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00 P30, 20 μ A, C9		12月9日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00 He34, 10 μ A, C9	
11月19日 (水)	RI生産		設備利用 P70MeV / 1nA C8		12月10日 (水)	RI生産		超小型衛星搭載電子機器の シングルイベント評価試験 木村 P70MeV / 1nA C8	
11月20日 (木)	RI生産		RI生産(²¹¹ At所内) He34, 10 μ A, C9, 10:00~11:00		12月11日 (木)	RI生産		RI生産(²¹¹ At所内) He34, 12 μ A, C9, 10:00~12:00	
11月21日 (金)	RI生産		RI生産 P60MeV, 10 μ A, C9		12月12日 (金)	RI生産 (15時まで)	メン テナ ンス	RI生産 D20, 10 μ A, C9	メンテナンス
11月22日 (土)					12月13日 (土)			停電	
11月23日 (日)			勤労感謝の日		12月14日 (日)				

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
12月15日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		1月5日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
12月16日 (火)	RI生産		RI生産(¹²⁴ I所内) H ₂ 27,10 μ A , C9, 11:00~		1月6日 (火)	RI生産		陽子線の生物効果の研究 北村(加藤) P70MeV / 5nA C8	
12月17日 (水)	RI生産		R&D		1月7日 (水)	RI生産		RI生産 D20MeV , 10 μ A , C9	
12月18日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A , C4, 10:00~19:00		1月8日 (木)	RI生産		RI生産 D20MeV , 3 μ A , C9	
12月19日 (金)	RI生産		中高エネルギー粒子による核反応の研究 KEK(佐波) C50MeV / 40nA C6		1月9日 (金)	RI生産		設備利用 P70MeV / 30nA C8	
12月20日 (土)					1月10日 (土)				
12月21日 (日)					1月11日 (日)				
12月22日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D P18	1月12日 (月)			成人の日	
12月23日 (火)			天皇誕生日		1月13日 (火)	RI生産		設備利用 P70MeV / 30nA C8	
12月24日 (水)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A , C4, 10:00~11:00 P18, 15 μ A , C9		1月14日 (水)	RI生産		RI生産 D20MeV , 10 μ A , C9	
12月25日 (木)	RI生産		RI生産 He34, 10 μ A , C9		1月15日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A , C4, 10:00~19:00	
12月26日 (金)	メンテナンス		高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾) P70MeV / 50nA C6		1月16日 (金)	RI生産		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分析 神戸大(山内) P30MeV / 100nA C8	
12月27日 (土)					1月17日 (土)				
12月28日 (日)					1月18日 (日)				
12月29日 (月)					1月19日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
12月30日 (火)					1月20日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A , C4, 10:00~11:00	
12月31日 (水)					1月21日 (水)	RI生産		RI生産 He34MeV , 12 μ A , C9	
1月1日 (木)			元日		1月22日 (木)	RI生産		RI生産(²¹¹ At所内) He34, 10 μ A , C9, 10:00~11:00	
1月2日 (金)					1月23日 (金)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 北村 D50MeV / 1pA C6	
1月3日 (土)					1月24日 (土)				
1月4日 (日)					1月25日 (日)				

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
1月26日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 20 μ A, C1	2月16日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
1月27日 (火)	RI生産		RI生産(⁸⁹ Zr所内) P15, 10 μ A, C9, 10:00~12:00 H ₂ 24, 10 μ A, C4		2月17日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu所内) H ₂ 24, 10 μ A, C4, 10:00~11:00	
1月28日 (水)	RI生産		小型衛星用データ処理系部品の 放射線環境に対する評価 JAXA(森下) P70MeV / 3×10 ¹¹ pps C8		2月18日 (水)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μ A, C9	
1月29日 (木)	RI生産		RI生産 H ₂ 24, 10 μ A, C9		2月19日 (木)	RI生産		RI生産(²¹¹ At所内) He34, 10 μ A, C9, 10:00~11:00	
1月30日 (金)	RI生産		RI生産 P60MeV, 5 μ A, C9		2月20日 (金)	RI生産		プロトンに対するヒト培養細胞の 細胞致死効果のモデル解析 鈴木 P70MeV / 1nA C8	
1月31日 (土)			最前方と最後方における荷電粒子生成 二重微分断面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 10nA C6		2月21日 (土)				
2月1日 (日)					2月22日 (日)				
2月2日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	2月23日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 μ A, C1
2月3日 (火)	RI生産		RI生産(²⁸ Mg所外) He75, C4, 10:00~14:00		2月24日 (火)	RI生産		宇宙放射線の電子部品・材料・観測センサー に与える影響に関する研究 JAXA(高島) P70MeV / 10nA C8	
2月4日 (水)	RI生産		RI生産(⁶⁷ Cu所内) He34, 15 μ A, C4, 10:00~17:00		2月25日 (水)	RI生産		RI生産 H ₂ 24, 10 μ A, C9	
2月5日 (木)	RI生産		RI生産 D20, 10 μ A, C9		2月26日 (木)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 北村 P25, P70MeV / 10nA C8	
2月6日 (金)	RI生産		設備利用 P70MeV / 1nA C8		2月27日 (金)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, C4, 9:00~	R&D
2月7日 (土)					2月28日 (土)			陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 10nA C8	
2月8日 (日)					3月1日 (日)				
2月9日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 μ A, C1	3月2日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
2月10日 (火)	RI生産		RI生産 P18, 15 μ A, C4		3月3日 (火)	RI生産		高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾) P70MeV / 50nA C6	
2月11日 (水)			建国記念の日		3月4日 (水)	RI生産		高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾) P70MeV / 50nA C6	
2月12日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4, 10:00~19:00		3月5日 (木)	RI生産		R&D	
2月13日 (金)	RI生産		RI生産 He34MeV, 10 μ A, C9		3月6日 (金)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) Ne ^{10+,6+} 120MeV / 500 nA C10	
2月14日 (土)					3月7日 (土)				
2月15日 (日)					3月8日 (日)				

	小型サイクロロン		大型サイクロロン			小型サイクロロン		大型サイクロロン	
月 日	午 前	午 後	午 前	午 後	月 日	午 前	午 後	午 前	午 後
3月9日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		3月30日 (月)	来期マシンタイム			
3月10日 (火)	RI生産		R&D Ne1MeV, 500nA		3月31日 (火)	来期マシンタイム			
3月11日 (水)	RI生産		メンテナンス		4月1日 (水)	来期マシンタイム			
3月12日 (木)	RI生産		メンテナンス		4月2日 (木)	来期マシンタイム			
3月13日 (金)	RI生産		メンテナンス		4月3日 (金)	来期マシンタイム			
3月14日 (土)					4月4日 (土)				
3月15日 (日)					4月5日 (日)				
3月16日 (月)	長期メンテナンス				4月6日 (月)	来期マシンタイム			
3月17日 (火)	長期メンテナンス				4月7日 (火)	来期マシンタイム			
3月18日 (水)	長期メンテナンス				4月8日 (水)	来期マシンタイム			
3月19日 (木)	長期メンテナンス				4月9日 (木)	来期マシンタイム			
3月20日 (金)	長期メンテナンス				4月10日 (金)	来期マシンタイム			
3月21日 (土)			春分の日 全所停電		4月11日 (土)				
3月22日 (日)					4月12日 (日)				
3月23日 (月)	長期メンテナンス				4月13日 (月)	来期マシンタイム			
3月24日 (火)	長期メンテナンス				4月14日 (火)	来期マシンタイム			
3月25日 (水)	長期メンテナンス				4月15日 (水)	来期マシンタイム			
3月26日 (木)	長期メンテナンス				4月16日 (木)	来期マシンタイム			
3月27日 (金)	長期メンテナンス				4月17日 (金)	来期マシンタイム			
3月28日 (土)					4月18日 (土)				
3月29日 (日)					4月19日 (日)				

平成 2 6 年度サイクロトロン利用報告書

- ・ 発行年月 2 0 1 5 年 1 0 月
- ・ 編 集 独立行政法人放射線医学総合研究所
 重粒子医科学センター 物理工学部
- 住 所 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4 丁目 9 番 1 号
- 連 絡 先 独立行政法人放射線医学総合研究所
 重粒子医科学センター 物理工学部
- TEL:043-206-3173 FAX:043-287-6146
- メールアドレス cyc_ope@nirs. go. jp
- ホームページ <http://www.nirs.go.jp>
- ・ 印刷 株式会社 さくら印刷

Printed in Japan

<http://www.nirs.go.jp>