



N I R S - M - 2 5 9

平成 2 4 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. 中性子場におけるガンマ線測定	(19)
4－2. 核破碎片生成二重微分断面積の測定	(23)
4－3. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究	(28)
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	(32)
4－5. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究	(36)
4－6. 薄い PET 標的を用いた $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 反応断面積測定	(41)
4－7. 生体元素に対する陽子入射中性子エネルギースペクトルのテスト測定	(45)
4－8. 反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー評価方法の研究	(48)
5. 粒子線検出器の開発	
宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発	(53)
6. 粒子線による損傷試験	
6－1. 超伝導線材ならびにコイル構成材料の耐放射線に関する研究	(57)
6－2. 光学機器の耐放射線性能に関する研究	(60)
7. 生物研究	
7－1. 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	(63)
7－2. 細胞培養容器 OptiCell を用いた 70MeV 陽子線の 水中における深さ方向の変化による生物効果の測定	(65)
8. 研究成果一覧	(69)
9. 関連資料	
平成 24 年度第 I 期・II 期マシンタイム予定表	(79)

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、田代 克人^A、鈴木和年^A、後藤 彰^A、岡田 高典^B、
高橋 勇一^B、中山 竜二^B、本間 壽廣^B、野田 耕司^A

Akinori Sugiura^A, Satoru Hojo^A, Ken Katagiri^A, Katsuto Tashiro^A, Kazutoshi Suzuki^A, Akira Goto^A,
Takanori Okada^B, Yuichi Takahashi^B, Ryuji Nakayama^B, Toshihiro Honma^B, 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

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]。これら2台のサイクロトロンは、大きなトラブルもなくビーム提供を行うことができています。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、粒子線検出器の開発、粒子線による損傷試験、生物研究、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行っており、新規供給ビームとして40 MeV 重陽子、30, 33, 70 MeV ヘリウムを新たに供給した。また、大型サイクロトロンでは月に2回程度、土曜日のビーム提供運転を行い、計18回行った。

本報告書では、平成24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24年度の総運転時間は1936.2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439.7時間、18 MeV陽子が251.8時間となり、物理研究、粒子線検出器の開発、粒子線による損傷試験、生物研究、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299.0時間となっている。この3つのエネルギーの陽子が多く利用されており、総運転時間の半分を占めている。

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67.8%を占めている。その他の粒子では、水素分子が3.4%、重陽子が8.4%、ヘリウムが14.3%、炭素が0.6%、質量数が13の炭素が1.1%、酸素が4.4%の割合となっている。各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		ヘリウム		炭素	
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	91.0	75	45.1	72	10.8
70	299.0	70	40.3	(13C) 143	10.3
60	37.5	60	15.8	(13C) 117	11.0
40	40.3	33	52.3	酸素	
30	439.7	30	109.5		
20	46.7	28	14.5	エネルギー [MeV]	運転時間 [h]
18	251.8			128	3.7
14	28.0	重陽子		96	80.8
12	79.2	エネルギー [MeV]	運転時間 [h]		
水素分子		50	10.8		
エネルギー [MeV]	運転時間 [h]	40	28.0		
27	65.5	30	101.7		
		15	22.9		

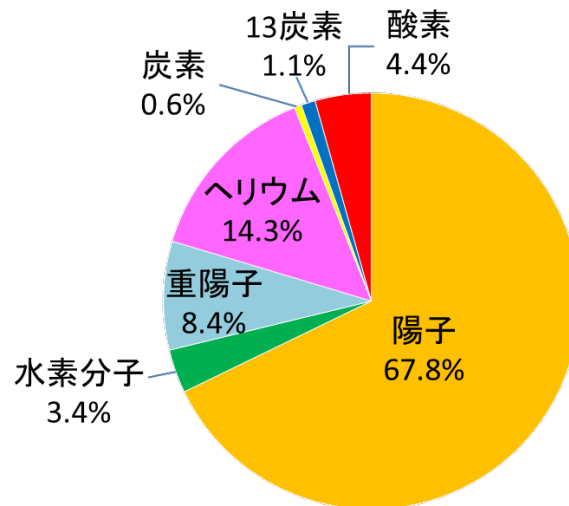


図 1.加速粒子別運転時間割合

1－2. 利用状況

総運転時間の 1936.2 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 681.4 時間の運転時間が当てられた。その他には、物理研究に 303.6 時間、粒子線検出器の開発に 28.8 時間、粒子線による損傷試験に 90.8 時間、生物研究に 64.4 時間、有料ビーム提供に 186.9 時間利用された。また、各ビーム開発に 573.4 時間、放射線安全測定に 6.9 時間が費やされた。

総運転時間からの割合でみると、おおよそ 1/3 となる 35.2%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 29.6%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ており、残りの 1/3 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	681.4	35.2
(2) 物理研究	303.6	15.7
(3) 粒子線検出器の開発	28.8	1.5
(4) 粒子線による損傷試験	90.8	4.7
(5) 生物研究	64.4	3.3
(6) 有料ビーム提供	186.9	9.6
(7) ビーム開発	573.4	29.6
(8) 放射線安全測定	6.9	0.4
合計	1936.2	100.0

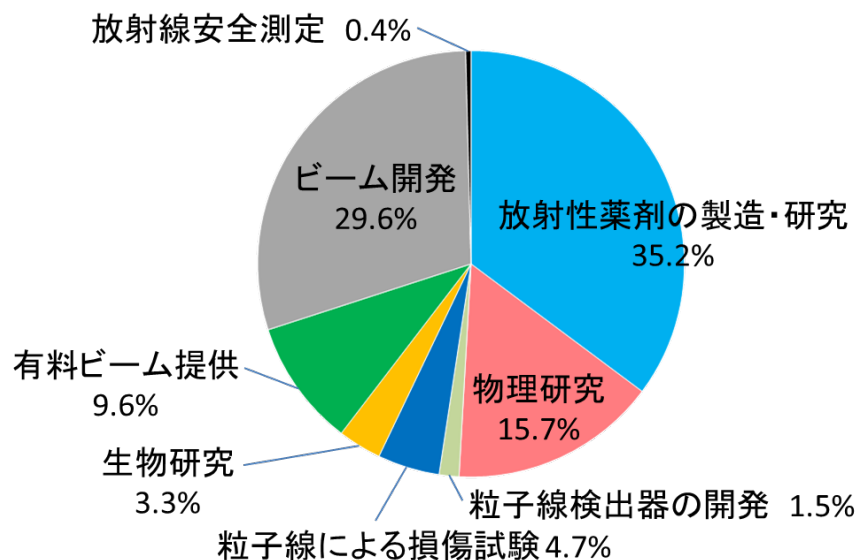


図 2.利用目的別運転時間割合

(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 35.2%である 681.4 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 67.7%、水素分子が 8.3%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 76.1%となる。それ以外の粒子では、重陽子が 2.2%、ヘリウムが 21.8%となっている。陽子のエネルギー別の利用状況は、 ^{11}C 、 ^{18}F の製造に用いられた 18 MeV が 28.2%、 $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレータの製造に用いられた 30 MeV が 34.2%となっている。その他の核種では、 ^{124}I の製造に用いられた 27 MeV 水素分子が 8.3%、 ^{28}Mg の製造に用いられた 75 MeV ヘリウムが 6.2%であった。新たに提供を開始したエネルギーは、励起関数測定に用いられた 40 MeV 重陽子が 1.7%、 ^{211}At の製造に用いられた 30、33 MeV ヘリウムが 8.9%と 3.4%であった。

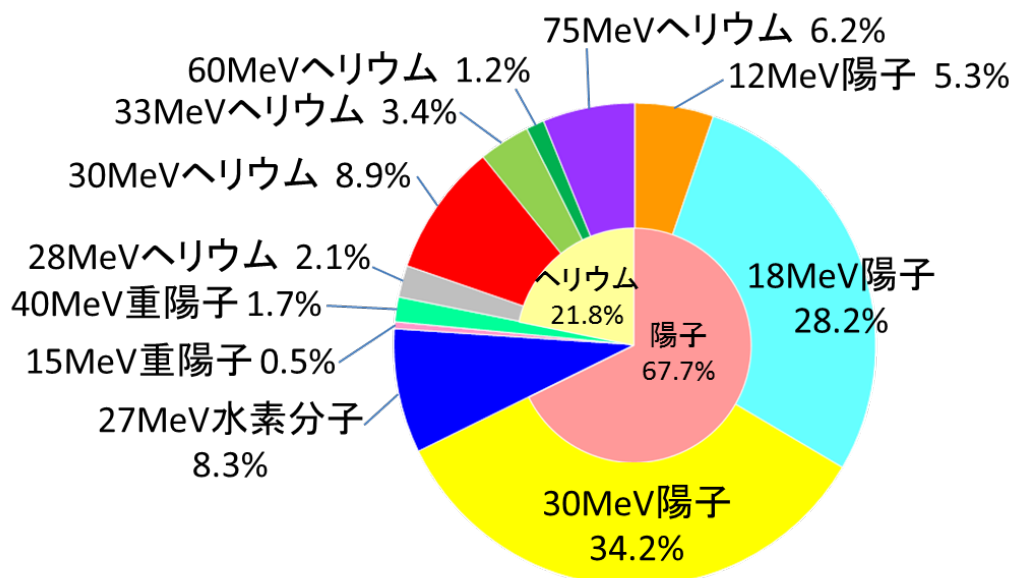


図 3. 放射性薬剤の製造・研究における粒子・エネルギー別利用割合

(2) 物理研究

物理研究では、総運転時間の 15.7%である 303.6 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、陽子が 57.2%、重陽子が 3.5%、ヘリウムが 10.8%、炭素が 3.5%、質量数が 13 の炭素が 7.0%、酸素が 17.8%と様々な粒子が利用されている。

物理研究では、8 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。

「中性子場におけるガンマ線測定」 [3]	14, 20, 80 MeV 陽子
「核破砕片生成二重微分断面積の測定」 [4]	50 MeV 重陽子、70 MeV ヘリウム、72 MeV 炭素
「重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究」 [5]	96 MeV 酸素
「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
「薄い PET 標的を用いた $^1\text{H}(^{13}\text{C},n)$ 反応断面積測定」 [7]	117, 143 MeV 質量数 13 の炭素
「高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究」 [8]	70 MeV 陽子
「生体元素に対する陽子入射中性子エネルギースペクトルのテスト測定」 [9]	70 MeV 陽子
「反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー評価方法の研究」 [10]	20 MeV 陽子

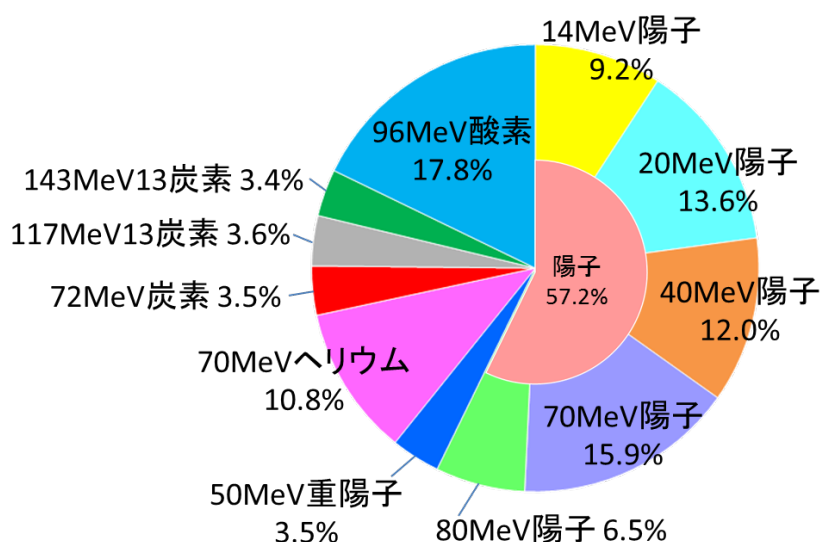


図 4. 物理研究における粒子・エネルギー別利用割合

(3) 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 1.5%に当たる 28.8 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。課題は 1 課題で宇宙放射線線量計の相互比較および校正のための「宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発」 [11]に利用された。粒子はすべて陽子で、30MeV が 6.9%、40MeV が 13.3%、70MeV が 30.6%、80MeV が 49.1%となっている。

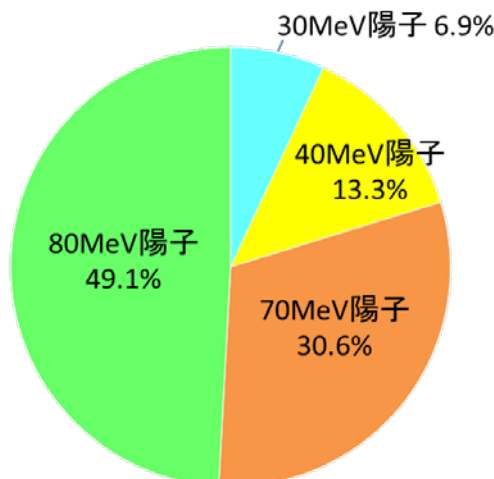


図 5. 粒子線検出器における粒子・エネルギー別利用割合

（４）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 9.7%に当たる 90.8 時間が利用された。粒子線による損傷試験における粒子・エネルギー別利用割合を図 6 に示す。70MeV 陽子が 2.8%、30MeV 重陽子が 97.2% となっている。

超電導線材の中性子照射による特性変化を調べる「超伝導線材ならびにコイル構成材料の耐放射線に関する研究」[12]では、ベリリウムターゲットを用いた中性子照射のために 30 MeV 重陽子が利用された。また、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」[13]に 70MeV 陽子が利用された。

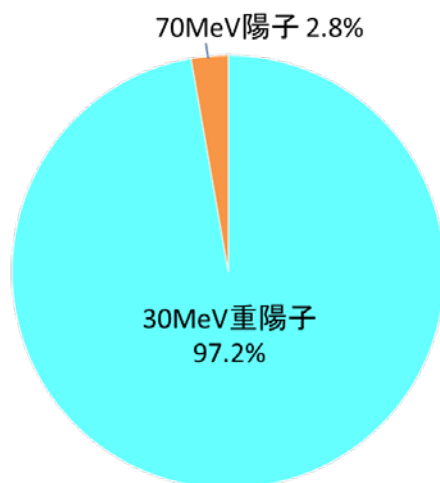


図 6. 粒子線による損傷試験における粒子・エネルギー別利用割合

（５）生物研究

生物研究では、総運転時間の 3.3%にあたる 64.4 時間が利用された。生物研究における粒子・エネルギー別利用割合を図 7 に示す。生物研究の課題は 2 課題あるが、利用された粒子はすべて 70 MeV 陽子となっている。

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、「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」[14]や、飛程内においての生物効果を調査した「細胞培養容器 OptiCell を用いた 70MeV 陽子線の水中における深さ方向の変化による生物効果の測定」[15]が行われた。



図 7. 生物研究における粒子・エネルギー別利用割合

（６）有料ビーム提供

有料ビーム提供では、総運転時間の 9.6% に当たる 186.9 時間が利用された。有料ビーム提供における粒子・エネルギー別利用割合を図 8 に示す。有料ビーム提供に利用された粒子は陽子のみで、30 MeV が 4.8%、70 MeV が 73.5%、80 MeV が 21.7% であった。主に宇宙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。

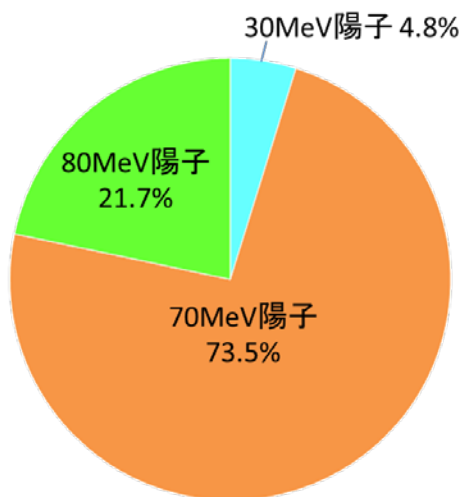


図 8. 有料ビーム提供における粒子・エネルギー別利用割合

（７）ビーム開発

ビーム開発には、573.4 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 9 に示す。粒子別にみると、陽子が 67.7%、水素分子が 1.5%、重陽子が 8.7%、ヘリウムが 16.7%、酸素が 5.3% 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ジェネレータ製造用に利用されている 30 MeV 陽子は、調整およびビーム確認を行う頻度が高く全体の 34.1% を占めている。

また、平成 24 年度の新規ビームとして、放射性薬剤の製造・研究用に 40 MeV 重陽子、30, 33 MeV ヘリウムを、物理研究用に 70 MeV ヘリウムを新たに供給した。なお、放射性薬剤の開発研究に供給するため、60 MeV 陽子、15 MeV 重陽子を 10 μ A 以上のビーム強度が出せるように再調整を行った。15 MeV 重陽子は供給を行い、60 MeV 陽子は調整中である。

そして、装置の改良・開発では、30 MeV 陽子の高強度化を目指して、垂直入射ビームラインの輸送効率の改善や、ラディアルプローブの取り出しビーム分布測定[16]を行った。

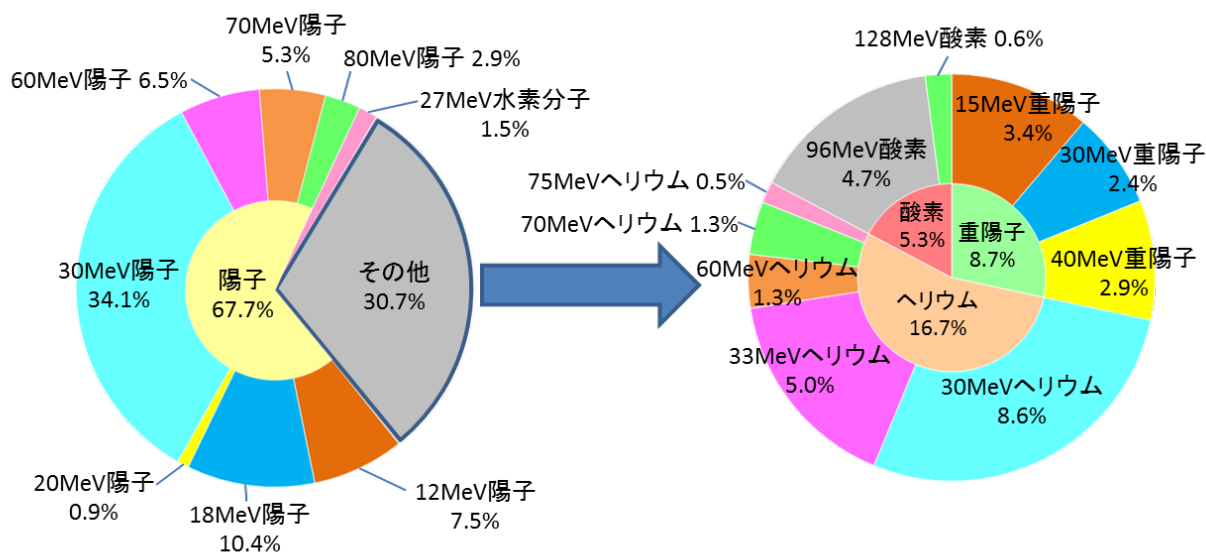


図 9. ビーム開発における粒子・エネルギー別利用割合

2. 小型サイクロトロン

2-1. 運転実績

平成24年度の総運転時間は1822.8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10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重陽子が提供可能である。その内、18 MeV陽子の利用が総運転時間の96.0%に当たる1750.5時間であった。また、9 MeV重陽子ビームによるRI生産が22.0時間であった。その他には、調整運転で18 MeV陽子に44.9時間、9 MeV重陽子に5.4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	[時間]
放射性薬剤の製造・研究	1750.5	22.0	1772.5
調整運転	44.9	5.4	50.3
計	1795.4	27.4	1822.8

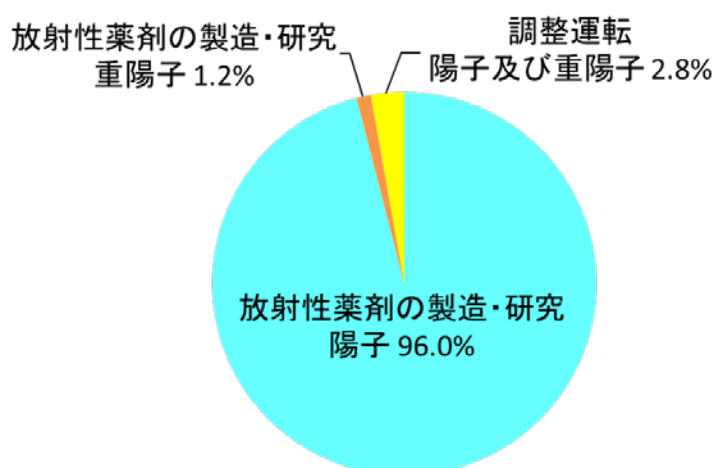


図10.小型サイクロトロンの運転時間割合

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、調整運転時間では定期点検および安全測定に伴うビーム確認や、昨年度小型サイクロトロンへ導入した位相プローブを用いて18 MeV陽子及び9 MeV重陽子のビーム位相測定等を行った[16]。

3. 運用体制

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は、月に2回程度の土曜日に運転を行った。平成24年度は、前期8回、後期10回の計18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、杉浦彰則、片桐 健、田代克人、後藤 彰、岡田高典、高橋勇一、中山竜二、神谷 隆、本間壽廣: 放医研サイクロトロン (NIRS-930、HM-18) の現状報告, 第9回日本加速器学会年会, 2012年8月8日~11日, 大阪府豊中市, WEPS008

- [2]張 明榮、河村和紀、根本和義、鈴木 寿、永津弘太郎: 平成24年度サイクロトロンの分子プロールの製造・開発への利用状況, 本誌 p13-p18
- [3] 鎌田 創、高田真志: 中性子場におけるガンマ線測定, 本誌 p19-p22
- [4] 佐波俊哉、鎌田 創、高田真志: 核破砕片生成二重微分断面積の測定, 本誌 p23-p27
- [5] 大澤大輔、俵 博之、曾我文宣: 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 p28-p31
- [6] 魚住裕介、中村直人、野ヶ峯翔、山田剛広、和西航平、古場裕介、鎌田 創、高田真志: 最前方における陽子および重陽子生成断面積の測定, 本誌 p32-p35
- [7] 遠藤暁、梶本 剛、唐 継龍、高田真志、鎌田 創、静間 清: 薄いPET 標的を用いた $^1\text{H}(^{13}\text{C},n)$ 反応断面積測定, 本誌 p41-p44
- [8] 西尾禎治、玉木聖一、松下慶一郎、関根雅晃、野口綾太、川端麻莉子、鈴木龍彦、中村哲志、余語克紀、稲庭 拓、杉浦 彰則、北條 悟、後藤 彰: 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 p36-p40
- [9] 執行信寛、高宮大義、橋口太郎、石橋健二、鎌田 創、高田真志: 生体元素に対する陽子入射中性子エネルギースペクトルのテスト測定, 本誌 p45-p47
- [10] 納富昭弘、中西大樹、高田真志、鎌田 創: 反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー評価方法の研究, 本誌 p48-p52
- [11] 内堀幸夫、北村尚、小平聡、小林進吾: 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発, 本誌 p53-p55
- [12] 道辻健太、狩野 開、有谷友汰、斉藤 隼、石山敦士、宮原信幸: 超伝導線材ならびにコイル構成材料の耐放射線に関する研究, 本誌 p57-p59
- [13] 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 p60-p62
- [14] 平山亮一、尾崎匡邦、山下 慶、李 恵子、幸田華奈、金子由美子、松本孔貴、鵜澤玲子、北村 尚、内堀幸夫、古澤佳也: 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 p63-p64
- [15] Stefan Genet、前田淳子、Chuck Yurkon、藤井義大、藤沢 寛、Ashley Romero、Paula Genik、北村 尚、藤森 亮、上坂 充、加藤宝光: 細胞培養容器 OptiCell を用いた 70MeV 陽子線の水中における深さ方向の変化による生物効果の測定, 本誌 p65-p67
- [16] 北條 悟、片桐 健、杉浦彰則、鈴木和年、田代克人、後藤 彰、岡田高典、高橋勇一、中山竜二、本間壽廣: サイクロトロンの改良・開発, 本誌, p9-p10

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、杉浦 彰則^A、鈴木 和年^A、田代 克人^A、後藤 彰^A、
岡田 高典^B、高橋 勇一^B、中山竜二^B、本間 壽廣^B
Satoru Hojo^A, Ken Katagiri^A, Akinori Sugiura^A, Kazutoshi Suzuki^A, Katsuto Tashiro^A,
Akira Goto^A, Takanori Okada^B, Yuichi Takahashi^B, Ryuji Nakayama^B, Toshihiro Honma^B
^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(NIRS-930) [1]では、RI 製造のためのビーム高強度化を目指し、いくつかの改良を行っている。本年度は主に垂直入射ビームラインの改良を実施した。まず、垂直入射ビームラインの輸送効率の改善を目指し、ビームビューアの設置と併せて垂直入射ビームラインにステアリングマグネットを2か所追加し、ビームが静電四重極レンズの中心を通るように調整を行った。また、昨年度に製作したビームアッテネータを設置し、迅速なビーム強度の制御が可能となった。垂直入射ビームライン以外では、マグネティックチャンネル通過後のサイクロトロンから取出されるビームのモニターとしてラディアルプローブを設置した。

小型サイクロトロンでは、昨年度導入された位相プローブによる陽子ビームの位相測定に引き続き、重陽子ビームの位相測定をおこなった。

これら2台のサイクロトロンにおける改良・開発について報告する。

1. 大型サイクロトロン

1-1. 垂直入射ビームラインの輸送効率の改善

大型サイクロトロンの垂直入射ビームラインのレイアウト図を図1に示す。垂直入射ビームラインには、2連の静電四重極レンズと3連の静電四重極レンズがそれぞれ1式ずつ設置されている。これら2式の静電四重極レンズの透過効率が70%と低く、サイクロトロンから取出されるビーム電流が増強できない要因の一つと考えられた。静電四重極レンズは、ビームがビームラインの中心を通ると電場によりレンズの効果が得られるが、ビームラインの中心を通らない場合には、偏向される作用も生じてしまう。不要な偏向を受けずにレンズの効果を得るには、ビームは静電四重極レンズの中心を通らなければならない。しかしながら、既設の垂直入射ビームラインは、静電四重極レンズの上流にはイオン分析用のマグネットのみで、静電四重極レンズの中心にビームを通すのが非常に困難であった。そのため、イオン源分析マグネットの上流と下流に、それぞれ縦方向と縦横両方向のステアリングマグネットの増設を行った。また、昨年度製作したビームビューアを導入しビームの位置と形状の確認に用いた。

ステアリングマグネットの増設後、30 MeV 陽子用の入射ビームで、輸送調整を行った。調整前後の輸送効率を表1に示す。調整前ではイオン源から分析後のFCN2から、2連と3連の静電四重極レンズを通過した後のFCN3までの効率は70%と、3割のビームをロスしていた。今回導入した2つのステアリングマグネットを使用して調整した結果、FCN2からFCN3までの効率は89%と改善することができた。サイクロトロンの中心にあるインフレクター電極までの効率も、51%から75%へと改善することができた。今後、この垂直入射ビームラインのパラメータでのサイクロトロンへの入射を行い、これ以降のサイクロトロンでの加速、取出し調整を実施し、取出されるビームの高強度化を目指す予定である。

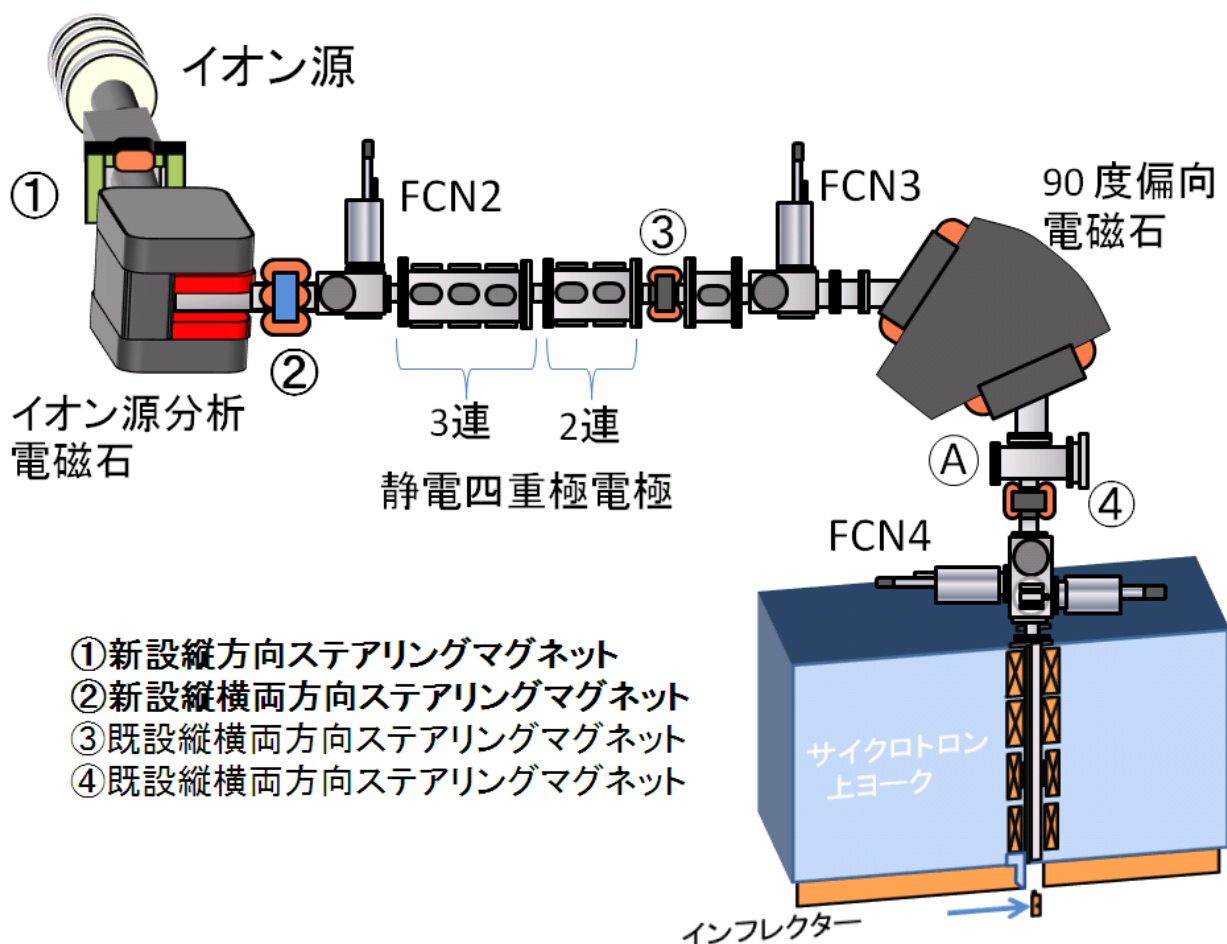


図1 垂直入射ビームラインレイアウト図

表1 垂直入射ビームラインのビーム強度と輸送効率 (30 MeV 陽子用入射ビーム)

	FCN2	FCN3 (FCN3/FCN2)	FCN4 (FCN3/FCN2)	インフレクター (インフレクター/FCN2)
調整前	215 μ A	150 μ A (70%)	140 μ A (65%)	110 μ A (51%)
調整後	140 μ A	124 μ A (89%)	120 μ A (86%)	105 μ A (75%)

1-2. ビームアッテネータの追加

昨年製作したビームアッテネータ[2]を90度偏向電磁石の下流(図1 ④)に設置し通常運転に導入した。このビームアッテネータを利用することにより、エミッタンスに変化を与えることなく強度変更ができ、さらに強度変更に要する時間を大幅に削減することができている。

メッシュの減衰率を昨年製作した1/10に加え1/100メッシュを新たに製作し、それぞれ1枚ずつ取り付けている。これら2枚の組み合わせにより、1/10,1/100,1/1000の対応が可能となった。

1-3. ラディアルプローブ

大型サイクロトロンから取出されるビームは、静電デフレクタ、マグネティックチャンネル、グラディエントコレクタを通り、ビーム輸送ラインへ導入される。これまで、静電デフレクタの入口でビーム電流を確認した後は、ビーム輸送ラインへ入り3連四重極電磁石を通った後のファラデーカップ(BS0)まで、ビームをモニターする事ができなかった。そのため、マグネティックチャンネルとグラディエントコレクタ間でビームを計測するために、ラディアルプローブを導入した。取出されるビームは、マグネティックチャンネルを通った後のCh2側Dee電極の内部を通過してグラディエントコレクタ入口に到

達する（図2．大型サイクロトロン内部レイアウトと取出しビーム軌道）。そのため、Ch2 側 Dee 電極の内部に、同軸型空洞共振器の背面から内筒内部を通してプローブを挿入し Ch2 側 Dee 中心軸でのビーム電流を計測するラディアルプローブを導入した。空洞共振器の背面から Dee 電極内部の取出されるビームの位置まで挿入するには、2500 mm の長さのシャフトが必要となる。そのため、プローブヘッド部の支えと挿入軸のズレを防止するために内筒内部のレール用にガイドローラーを取り付けた（写真1）。プローブ先端の形状は高さ 30 mm 幅 100 mm で、駆動範囲は、サイクロトロンの半径（中心からの距離）で 1070 mm ～1170 mm である。このラディアルプローブを用いた 30 MeV と 18MeV の陽子ビームの分布を図3．4．にそれぞれ示す。両ビームとも、1125 ～1130 mm の位置で、ビーム幅も 12 mm 程度であることが分かった。

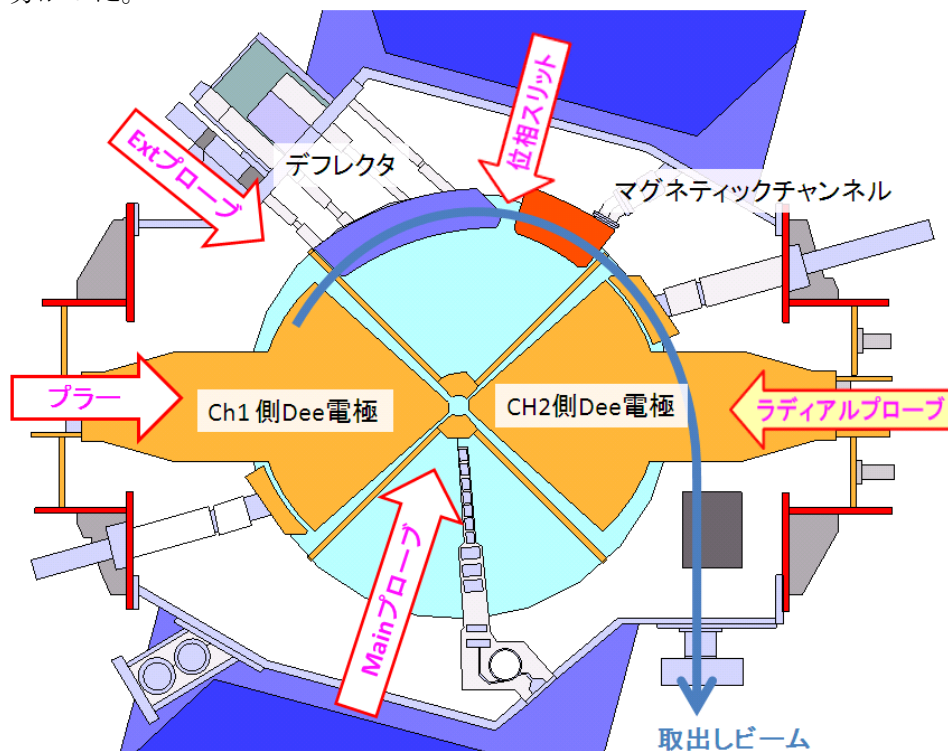


図2．大型サイクロトロン内部レイアウトと取出しビーム軌道



写真1：ラディアルプローブヘッド部

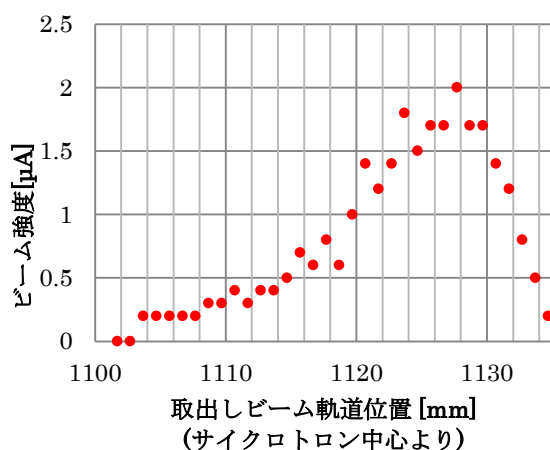


図3．取出しビーム分布 30 MeV 陽子

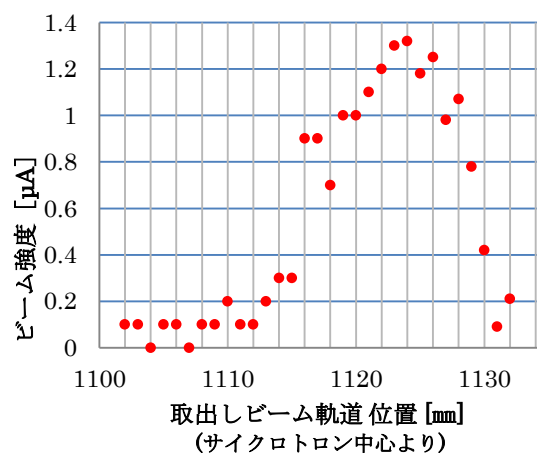


図4．取出しビーム分布 18 MeV 陽子

2. 小型サイクロトロン (HM-18)

2-1. 位相プローブによる重陽子ビームの位相測定

昨年度小型サイクロトロンへ導入した位相プローブ[2,3,4]を用いて、本年度は重陽子ビームの位相測定を行った。これまでのメインコイル電流、トリムコイル電流での設定パラメータではビーム位相のずれは最大で 60 度程度であった。その結果を丸印で図 5 に示す。全体のズレが+の方向だったため、メインコイルによる全体磁場の調整を行った。その結果をビームの位相のずれを三角印で図 5 に示す。位相のズレを 30 度程度に収めることができた。ただし、このメインコイルの調整により荷電変換後のターゲット直前ビームシャッターでのビーム強度が 14 μA から 11 μA まで低下してしまった。これは昨年プロトンでの等時性磁場の調整と同じく中心バンパ領域の磁場が変わったためと考えられる。今後、良い等時性磁場を確保しつつ最適な中心バンパ磁場分布を生成することによってビーム強度を増やすことを試みる予定である。

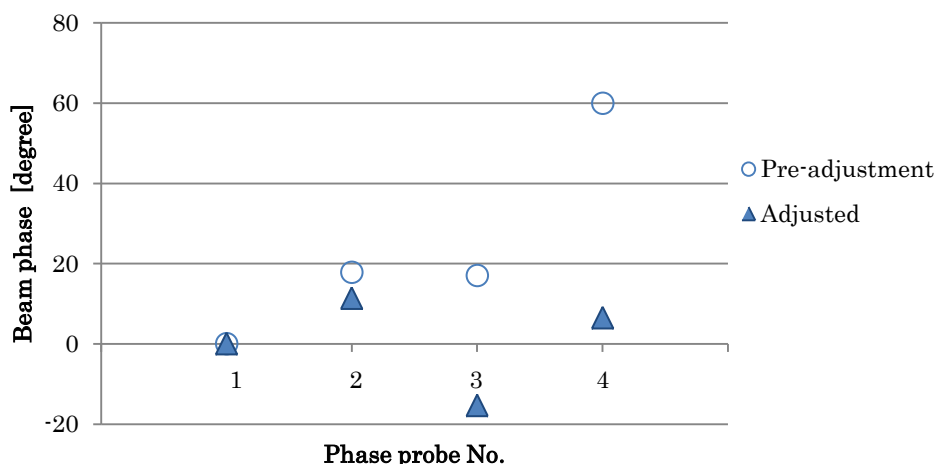


図 5 重陽子ビーム位相測定結果

参考文献

- [1] 北條 悟, 杉浦 彰則, 片桐 健, 田代 克人, 後藤 彰, 岡田 高典, 高橋 勇一, 中山 竜二, 神谷 隆, 本間 壽廣, Victor Smirnov, Sergey Vorozhtsov : 放医研サイクロトロン (NIRS-930、HM-18) の現状報告, 第 9 回日本加速器学会年会, 大阪, WEPS008, p359-361
- [2] 平成 23 年度サイクロトロン利用報告書 サイクロトロンの改良開発 p9-14
- [3] Satoru Hojo, Ken Katagiri, Akira Goto, Yuichi Takahashi, Toshihiro Honma : DEVELOPMENT OF PHASE PROBE FOR THE NIRS SMALL CYCLOTRONS HM-18, International Beam Instrumentation Conference, Tsukuba, Japan MOPA07
- [4] Satoru Hojo, Ken Katagiri, Akira Goto, Yuichi Takahashi, Toshihiro Honma : 放医研小型サイクロトロン (HM-18) 用位相プローブの開発, 第 9 回日本加速器学会年会, 大阪, WEPS029, p424-426

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 2012

張 明榮、河村 和紀、根本和義、鈴木 寿、永津弘太郎

Ming-Rong Zhang, Kazunori Kawamura, Kazuyoshi Nemoto, Hisashi Suzuki, and
Kotaro Nagatsu

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

分子イメージングセンター分子認識研究グループでは、サイクロトロンを用いて生産した短寿命ポジトロン核種を利用してPETによる分子イメージング研究に不可欠な分子プローブの開発、標識技術の開発及び動物実験、臨床研究等の用途に定常的な供給を行っている。製造された分子プローブは分子イメージング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されている。その主な用途は、放射性核種と放射性薬剤の新規製造法の開発、新規放射性薬剤の開発、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) 腫瘍の治療抵抗性低酸素部位に関する研究 3) アルツハイマー病、統合失調症、躁鬱病、不安などの精神神経疾患の診断や病態解明研究などに利用されている。本報告書では新規なプローブの開発状況、プローブ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、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。またその他にも加速器製^{99m}Tcの製造法の確立の研究や内用療法に使用する治療用放射性核種の製造を行っている。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) 標識合成中間体である^[11C]MeOH/^[11C]MeOTf を応用し、2-^[11C]メトキシピリジンの選択的な合成法と自動製造システムを開発した。この標識技術を応用し新規のPET製剤を合成、臨床応用に向けた研究を行っている。一方、^[18F]F⁻水溶液を用い、ペプチドやタンパク質に対して直接標識する合成法と製造システムを確立し、PETプローブの製造と評価に応用した。さらに、^[11C]HCHO を合成中間体とし安定製造と遠隔合成装置に適した標識技術を開発し、^[11C]環状ペプチドを迅速的に得ることに成功した。

- 2) 代謝型グルタミン酸 I 型受容体を始め、種々の生体タンパク質をターゲットとするプローブ候補を探索し、数種の新規 PET プローブを開発し、評価した。これらのプローブの中から、代謝型グルタミン酸 I 型受容体 PET プローブ [^{11}C] ITTM を用いた世界初の臨床研究を行った。
- 3) 有機アニオン排出輸送体などをイメージングするための PET プローブを、構造活性相関解析等の手法を用いて開発し、その結果血液脳関門の破綻などを捉える PET プローブを見出した。
- 4) 加速器を用いた直接製造法により得られるテクネチウム $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を使用した医薬品の検証について、種類及び実施件数を増やし、品質の検討を行った。
- 5) 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、Zr-89及びAt-211の遠隔製造法を確立し、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。当該核種ライブラリーの拡充に関し、Ge-68を対象に、その製造に関する基礎的評価を終了した。さらに ^{64}Cu 、 ^{28}Mg 、 ^{124}I 、 ^{211}At 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 24 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、FDG、FAZA、FLT）、脳機能測定（ラクロプライド、FETPE2I、FMeNER、PBB3、FLB、BTA、MP4P、DOPA）等の臨床利用、サル、ラット、マウスなどの動物実験（BTA、Ac-5216、MPPF、S-dThd、MNPA、FMISO、FLT 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 $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレータを 3 研究機関に 18 回の譲渡を行った。

24 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。製造回数は 23 年度の震災時等に比べて、昨年度はやや増加傾向にあった。

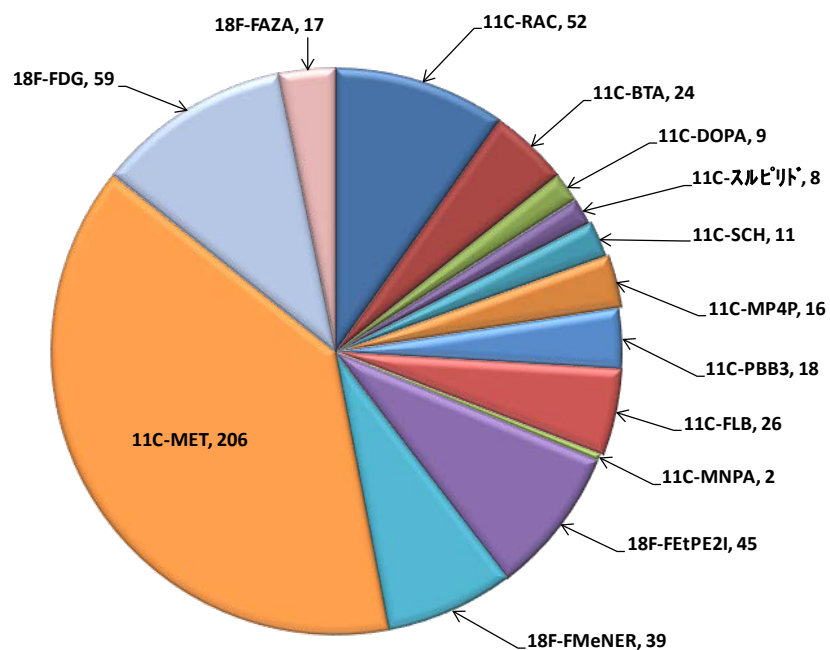


図1. 平成24年度における被験者数(被験者総数532人)

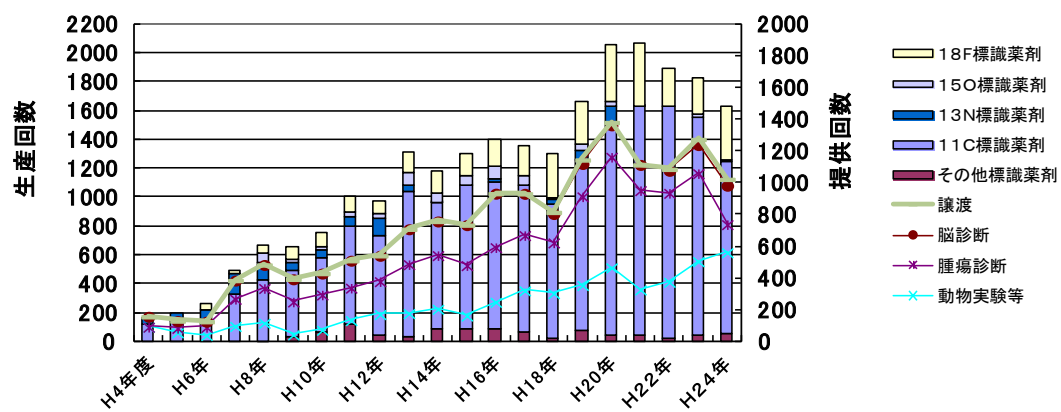


図2. 生産回数と提供回数の推移

表1. 平成24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)
11C	DOPA	17.423	(16)	6.614	(9)	(9)	3.826	(5)		
	DASB	24.38	(11)				7.422	(13)		
	MP4P	65.82	(20)	10.074	(16)	(16)	0.772	(2)		
	FLB	97.465	(42)	7.474	(21)	(26)	9.295	(18)		
	BTA	77.725	(29)	25.718	(24)	(24)	13.717	(23)		
	SCH	41.5	(20)	2.885	(11)	(11)	6.939	(15)		
	スルピリド*	32.03	(10)	14.961	(8)	(8)	0.245	(1)		
	RAC	220.111	(86)	48.871	(52)	(52)	30.142	(53)		
	PBB3	57.192	(49)	15.928	(18)	(18)	6.332	(17)		
	PE2I	9.91	(2)				1.006	(2)		
	PK11195	3.2	(4)							
	MET	796.86	(95)	379.749	(140)	(206)	5.117	(3)		
	PIB	6.23	(3)							
	MNPA	49.11	(19)	0.528	(2)	(2)	10.571	(17)		
	Ac5216	57.357	(23)				15.554	(24)		
	S-dThd	48.994	(13)				6.638	(8)		
	WAY	2.392	(3)				1.126	(2)		
	Ro1778	5.71	(1)				1.11	(1)		
	CH3I	64.21	(136)							
	その他	904.67	(620)				123.944	(208)		
15O	H2O	24.38	(6)				10.274	(4)		
18F	FDG	142.141	(25)	62.119	(23)	(59)	0.37	(2)		
	FEtDAA	7.619	(7)				3.182	(7)		
	FLT	15.801	(8)				3.055	(8)		
	FMISO	24.334	(7)				11.365	(7)		
	FMeNER	57.417	(52)	10.194	(39)	(39)	0.64	(2)		
	FEtPE2I	74.581	(53)	9.888	(45)	(45)	10.898	(27)		
	FAZA	37.137	(21)	10.094	(14)	(17)	6.307	(12)		
	MPPF	17.443	(18)				3.512	(7)		
	Altanserin	7.9	(3)				1.473	(2)		
	F-	32.54	(15)				25.621	(14)		
	その他	115.843	(163)				15.1324	(33)		
28Mg	水溶液	0.02897	(6)						0.02897	(6)
64Cu	水溶液	16.94	(11)				10.66	(18)		
62Zn	62Zn/Cu	98.6127	(18)				1.75	(2)	89.1723	(34)
124I	水溶液	2.554	(7)				1.702	(7)		

参考文献

- [1] T. Matsuda, S. Furumoto, J. Yokoyama, M.-R. Zhang, K. Yanai, R. Iwata, T. Kigawa: Rapid biochemical synthesis of (11)C-labeled single chain variable fragment antibody for immuno-PET by cell-free protein synthesis, *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 20(22), 6579-6582, 2012-11.
- [2] C. Asakawa, M. Ogawa, M. Fujinaga, K. Kumata, L. Xie, T. Yamasaki, J. Yui, T. Fukumura, M.-R. Zhang: Utilization of [11C]phosgene for radiosynthesis of N-(2-{3-[3,5-bis(trifluoromethyl)] phenyl}[11C]ure2;ido)ethylglycylrhettinamide, an inhibitory agent for proteasome and kinase in tumors, *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 22(11), 3594-3597, 2012-6.
- [3] L. Xie, J. Yui, A. Hatori, T. Yamasaki, K. Kumata, H. Wakizaka, Y. Yoshida, M. Fujinaga, K. Kawamura, M.-R. Zhang: Translocator protein (18kDa), a potential molecular imaging biomarker for non-invasively distinguishing non-alcoholic fatty liver disease, *Journal of Hepatology*, 57(5), 1076-1082, 2012-11.

- [4] Y. Takada, M. Hanyu, K. Nagatsu, T. Fukumura: Radiolabeling of aromatic compounds using K[*Cl]Cl and OXONE, *Journal of Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals*, 55(10), 383-386, 2012-8.
- [5] K. Hayashi, K. Furutsuka, T. Ito, M. Mutou, H. Aki, T. Fukumura, K. Suzuki: Fully automated synthesis and purification of 4-(2'-methoxyphenyl)-1-[2'-(N-2"-pyridinyl)-p-[18F]fluorobenzamido]ethylpiperazine, *Journal of Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals*, 55(3), 120-124, 2012-3.
- [6] M. Fujinaga, T. Yamasaki, J. Yui, A. Hatori, L. Xie, K. Kawamura, C. Asakawa, K. Kumata, Y. Yoshida, M. Ogawa, N. Nengaki, T. Fukumura, M.-R. Zhang: Synthesis and Evaluation of Novel Radioligands for Positron Emission Tomography Imaging of Metabotropic Glutamate Receptor Subtype 1 (mGluR1) in Rodent Brain, *Journal of Medicinal Chemistry*, 55(5), 2342-2352, 2012-3.
- [7] A. Wakai, K. Tuchida, T. Fukumura, H. Iida, K. Suzuki: Determination of two-photon-excitation cross section for molecular isotope separation, *Journal of Molecular Spectroscopy*, 274, 14-21, 2012-4.
- [8] T. Yamasaki, M. Fujinaga, K. Kawamura, J. Yui, A. Hatori, T. Ohya, L. Xie, H. Wakizaka, Y. Yoshida, T. Fukumura, M.-R. Zhang: In Vivo Measurement of the Affinity and Density of Metabotropic Glutamate Receptor Subtype 1 in Rat Brain Using 18F-FITM in Small-Animal PET, *Journal of Nuclear Medicine*, 53(10), 1601-1607, 2012-10.
- [9] Natsuko Kobayashi, Naoko Iwata, Takayuki Saito, Hisashi Suzuki, Ren Iwata, Keitaro Tanoi, Tomoko Nakanishi: Application of 28Mg for Characterization of Mg Uptake in Rice Seedling under Different pH Conditions, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2012-8
- [10] K. Tanoi, N. Kobayashi, T. Saito, N. Iwata, A. Hirose, Y. Ohmae, R. Iwata, H. Suzuki, T. Nakanishi: Application of 28Mg to the kinetic study of Mg uptake by rice plants, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 296(2), 749-751, 2012-9
- [11] T. Ohya, M.-R. Zhang, T. Fukumura, K. Fukushi, T. Kikuchi, T. Irie: A method to predict the ratio of the tracer conversion rate to the tracer back-diffusion rate of an irreversible-type radiotracer in humans by preclinical evaluation, *Nuclear Medicine Communications*, 33(10), 1019-1023, 2012-10
- [12] K. Nagatsu, H. Suzuki, M. Fukada, K. Minegishi, A. Tsuji, T. Fukumura: An alumina ceramic target vessel for the remote production of metallic radioisotopes by in situ target dissolution., *Nuclear Medicine and Biology*, 39(8), 1281-1285, 2012-11
- [13] A. Hatori, J. Yui, T. Yamasaki, L. Xie, K. Kumata, M. Fujinaga, Y. Yoshida, M. Ogawa, N. Nengaki, K. Kawamura, T. Fukumura, M.-R. Zhang: PET Imaging of Lung Inflammation with [18F]FEDAC, a Radioligand for Translocator Protein (18 kDa), *PLoS ONE* (Online only: URL: <http://www.plosone.org>), 7(9), 1-8, 2012-9
- [14] M. Fujinaga, J. Maeda, J. Yui, A. Hatori, T. Yamasaki, K. Kawamura, K. Kumata, Y. Yoshida, Y.

- Nagai, M. Higuchi, T. Suhara, T. Fukumura, M.-R. Zhang: Characterization of 1- (2- [18F] fluoro-3-pyridyl) -4-(2-isopropyl-1-oxo- isoindoline-5-yl)-5-methyl-1H-1,2,3-triazole, a PET ligand for imaging the metabotropic glutamate receptor type 1 in rat and monkey brains, *Journal of Neurochemistry*, 121(1), 115~124, 2012-4
- [15] T. Yamasaki, M. Fujinaga, J. Maeda, K. Kawamura, J. Yui, A. Hatori, Y. Yoshida, Y. Nagai, M. Tokunaga, M. Higuchi, T. Suhara, T. Fukumura, M.-R. Zhang: Imaging for metabotropic glutamate receptor subtype 1 in rat and monkey brains using PET with [18F]FITM, *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 39(4), 632~641, 2012-4
- [16] K. Sato, K. Fukushi, H. Shinoto, H. Shimada, N. Tanaka, S. Hirano, T. Irie: A short-scan method for $k(3)$ estimation with moderately reversible PET ligands: Application of irreversible model to early-phase PET data, *NeuroImage*, 59(4), 3149~3158, 2012-11

4. 物理研究

- 4－1. 中性子場におけるガンマ線測定
- 4－2. 核破砕片生成二重微分断面積の測定
- 4－3. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究
- 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. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究
- 4－6. 薄い PET 標的を用いた $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 反応断面積測定
- 4－7. 生体元素に対する
陽子入射中性子エネルギースペクトルのテスト測定
- 4－8. 反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー評価方法の研究

中性子場におけるガンマ線測定

Gamma rays measurements in neutron fields

鎌田 創^A、高田真志^A

Kamada So^A), Takada Masashi^A),

^A：放射線医学総合研究所緊急被ばく医療研究センター緊急被ばく医療研究プログラム

^B：放射線医学総合研究所緊急被ばく医療研究センター被ばく線量評価部

概要

数十 MeV 領域の核反応ガンマ線のエネルギースペクトル、発生断面積の取得を目的として、放医研サイクロトロンの中性子場において、ガンマ線を測定した。

中性子とガンマ線の弁別には波形弁別法、飛行時間法を用いる。波形弁別法とは、シンチレータの出力信号波形が入射粒子によって異なる事を利用して粒子識別を行う方法である。飛行時間法とは、放射線源と検出器の距離を予め設定しておき、飛行時間の測定を検出器で行い、古典的な運動エネルギーの式から粒子の質量やエネルギーを導出する測定手法である。中性子ガンマ線混在場において、波形弁別法によって中性子とガンマ線を区別し、飛行時間法によって、時間に依存しない中性子放射化起因ガンマ線、高エネルギー中性子イベント、即発ガンマ線とイベントが混在したデータから即発ガンマ線を選別する。NaI (Tl) を用いた中性子・ガンマ線弁別可能性は、以前の我々の研究によって示されている[1]。粒子弁別によって得られたガンマ線の情報を解析によってエネルギースペクトルの導出を行う。

1. 目的

近年の加速器技術の進展に伴って、数 10～数 100 MeV の中高エネルギー粒子線は、伝統的な原子核物理等の基礎科学分野のみならず、医学、工学など多様な分野で応用されている。とくに、医学分野での応用の代表的なものとして粒子線治療が挙げられる。また、中性子の生体影響も研究されつつあり、中性子の照射実験も行われている。粒子線照射では、物質との相互作用(以下、核反応)によって、二次粒子の発生が随伴する。二次粒子は、照射において有意なバックグラウンドとなる。そこで、二次粒子の評価を明らかにすることは非常に重要である。二次粒子の線量評価には、発生する二次粒子のエネルギースペクトルが必要である。

また、粒子線と物質の核反応によって発生する二次粒子のエネルギースペクトルは、核反応で生成される複合核の原子核構造ならびに原子核反応機構の解明にもつながる。原子核反応機構の解明は、核反応モデルの構築に貢献できる。それは、放射線利用のために使用されるモンテカルロシミュレーションの計算精度の向上にも貢献されることが期待される。従って、核反応で起こる二次粒子のエネルギースペクトルや核反応の起こりやすさ(以下、断面積)の測定は重要である。しかしながら、粒子線と周囲の構造物や検出器を構成する物質との核反応によって生成する放射能からのガンマ線バックグラウンドが多い事、ガンマ線に不感な検出器の種類が少ないこともあって、ガンマ線放出データについてはほとんどないのが現状である。前年度までの申請者らは、ガンマ線検出器として有力な NaI (Tl) 検出器が中性子とガンマ線の弁別できる事を示している[1]。そこで、本課題では、粒子弁別手法を用いて、核反応から発生する即発ガンマ線の測定を行い、核反応から二次的に発生するガンマ線の発生機構を突き詰める事を目的とする。

2. 実験方法

放医研サイクロトロン棟のC6コースにおいて、実験を行った。図1に示すように、サイクロトロンから取り出した陽子を真空中で加速し、加速器下流側にターゲットを設置してある。ターゲット厚さは、入射エネルギーに対して2 MeV損失となるようにしてある。ターゲットを通過した陽子ビームは、電磁石によってビームダンプ方向へ曲げられるようになっている。加速陽子エネルギーは80 MeVであった。ターゲットから発生する即発ガンマ線をNaI(Tl)シンチレータを用いて、飛行時間測定を行った。シンチレータからの信号処理として、光電子増倍管のアノード出力から取り出し、ディバイダで3分割し、一つは、データ収集装置を制御するトリガ信号とし、残りの信号は全波形成分、減衰波形成分としてデータ収集装置を介してPCに取り込んだ。

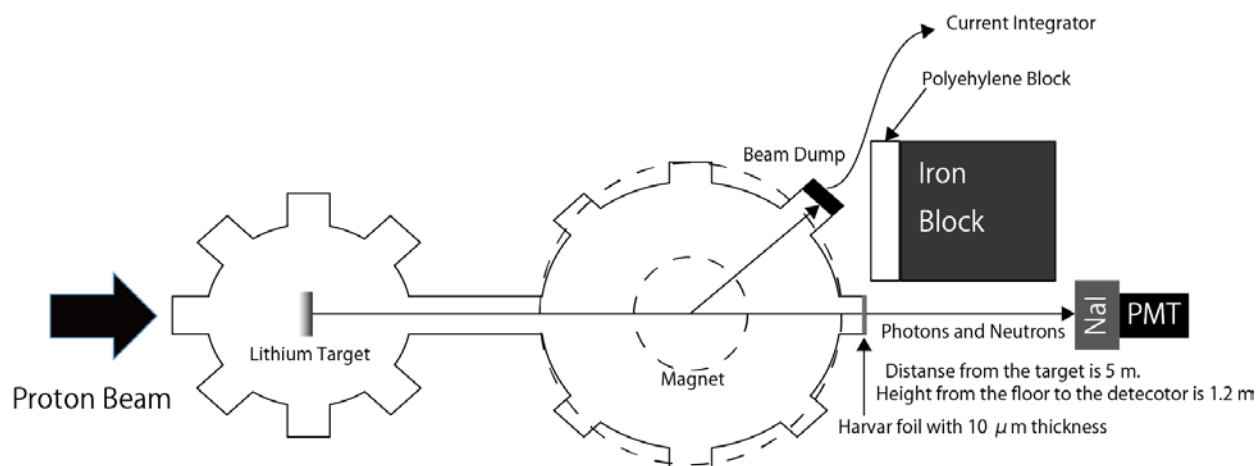


図1 サイクロトロン汎用照射室C6コースを用いた実験概観

3. データ処理

3-1. 波形識別法による粒子弁別

図2に波形識別法による中性子とガンマ線の弁別の様子を示す。この図は、NaI(Tl)検出器の発光量を2次元でプロットしたもの(横軸:信号全体に亘って積分した発光量、縦軸:信号の減衰時間に亘って積分した発光量)である。また、中性子とガンマ線を弁別するためのROIが併せて示されている。

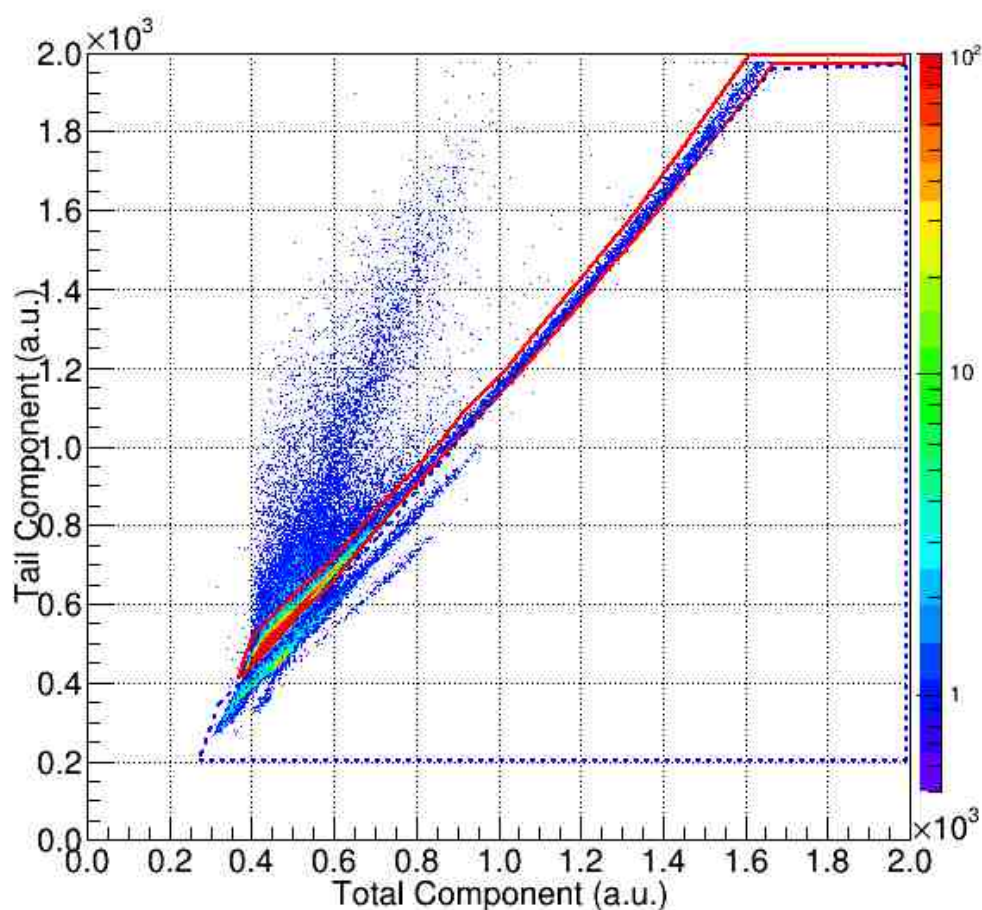


図2 波形弁別の様子を示した2次元発光量プロット

3-2. 飛行時間法を用いたイベント弁別

検出器のアノード出力とサイクロトロンのRF信号をそれぞれTAC(Time to Amplitude Converter)のスタート入力、ストップ入力として、飛行時間を測定した。ターゲットでの核反応で発生する即発ガンマ線と中性子はそれぞれ速度が異なるため、それぞれのイベントを識別する事が可能である。図3に

飛行時間分布をしめす。1800ch 近辺のピークが即発ガンマ線イベント、600-1000ch、350-450 ch 周辺の構造はそれぞれ、中性子、ビームダンプから発生するガンマ線を示している。また、中性子のピークが二山観測されるのはサイクロトロンでビームの位相がずれるものを観測しているからである。

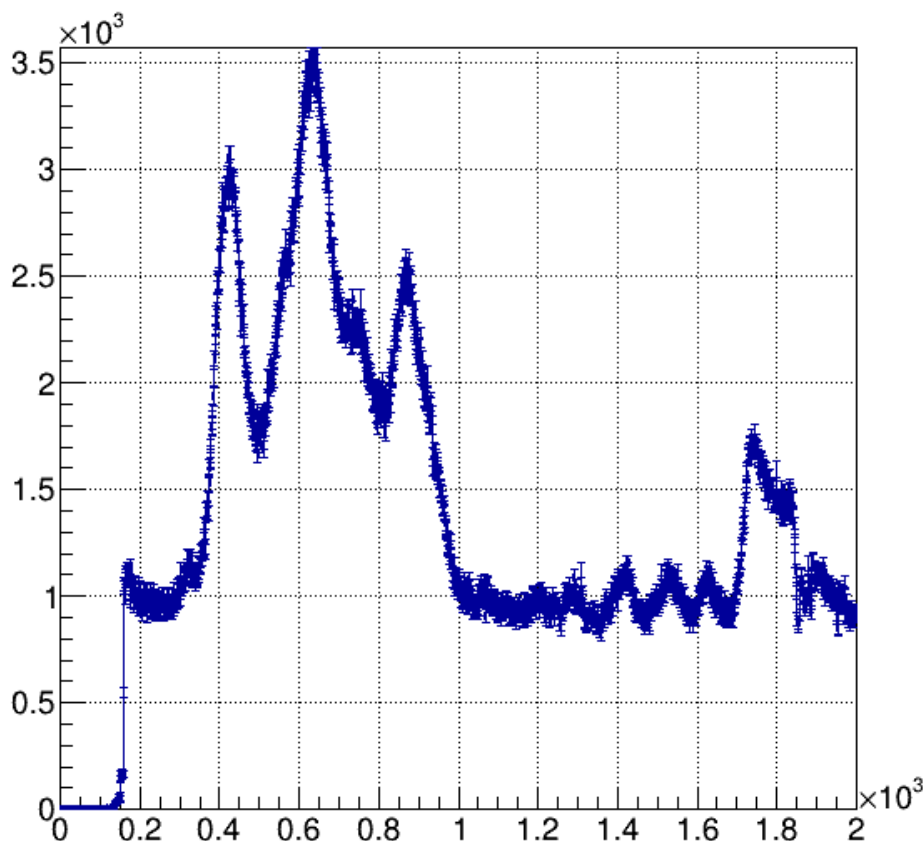


図 3 NaI(Tl)で測定した飛行時間分布。

4. 実験結果

3.1、3.2 項節で示した、2次元発光量分布から粒子弁別を行い、飛行時間分布によってイベントを選別し、即発ガンマ線イベントによる発光量分布を得た。得られた発光量分布を図に示す。12-14 MeV に構造が確認できる。これはちょうどリチウムの第 6, 7 励起状態(13.7, 14.7 MeV)に相当する。0.5~6.5 MeV までの分布は、検出器を構成する Na と I 原子核が熱中性子捕獲する際に発生する即発ガンマ線や生成する放射能から発生するベータ線が原因である。また、17 MeV より上の分布は、宇宙線ミュー粒子が NaI(Tl)を最小電離で通過したときに付与されるエネルギーが原因である。35 MeV 以上のピークは ADC のオーバーフローが原因である。

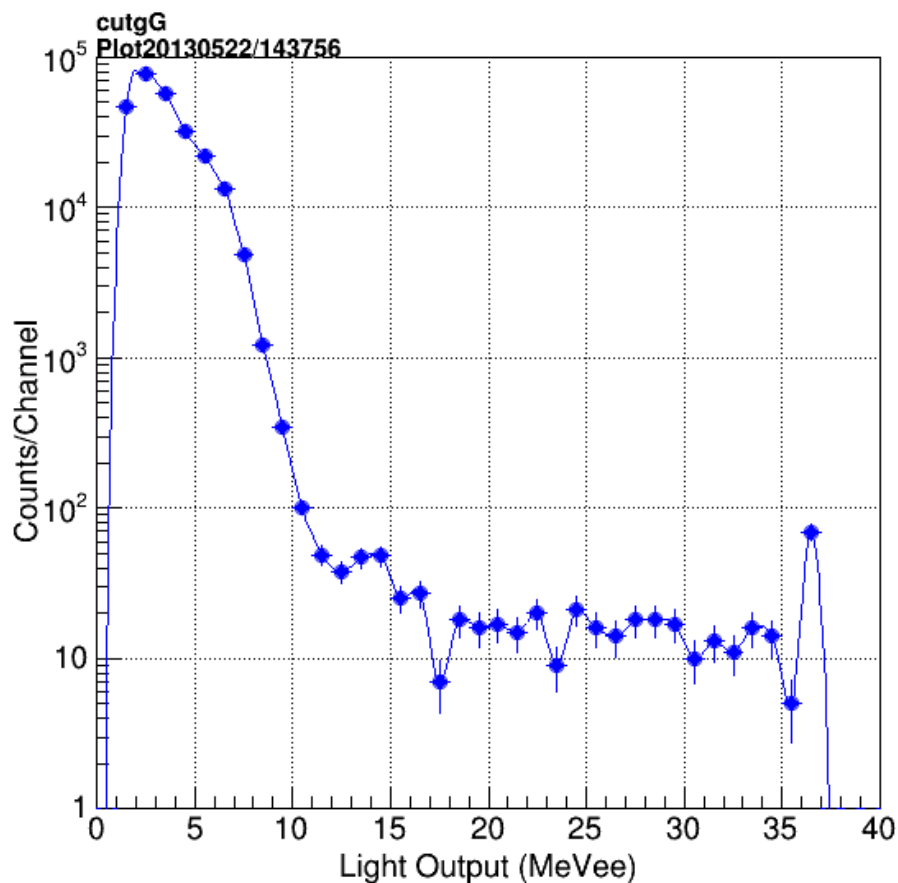


図4 得られた発光量スペクトル

5. まとめ

中性子と随伴するガンマ線を波形識別法、中性子飛行時間法によって測定した。主に、リチウムの非弾性散乱による高エネルギーガンマ線を観測した。今後 NaI(Tl)検出器のレスポンスを求め、アンフォールディングすることによって、エネルギースペクトル、検出効率を求める事で断面積を導出する。

参考文献

- [1] S. Kamada, M. Takada, "Measurement of gamma-ray pulse height spectrum under the p-Li high-energy neutron fields," Progress of Nuclear Science and Technology, (2013). accepted.

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、鎌田 創^B、高田 真志^B

Toshiya. Sanami^{A)}, So Kamada^{B)}, Masashi. Takada^{B)}

^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 : 放射線医学総合研究所

概要

平成 24 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 重陽子、50 MeV ヘリウム、6 MeV/n (=72 MeV)炭素入射に対するベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットに対する核破碎片生成二重微分断面積測定を行った。

1. 目的

核破碎片生成二重微分断面積は中高エネルギー核子やイオンの入射により引き起こされた核反応に伴う核破碎片の生成エネルギー・角度分布を記述する。この断面積データは核子やイオンの物質中でのエネルギー付与分布・過程を精密に記述するための基礎的なデータである。高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所からなる当グループでは数10~300 MeV陽子、70 MeV中性子、6 MeV/n, 12 MeV/nの炭素入射による核反応に伴う核破碎片の二重微分断面積の測定を行ってきた [1-9]。測定にはブラックカーブカウンタ(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。これまで測定した陽子のデータから、核破碎片生成二重微分断面積はマクスウェル型の分布関数にクーロン障壁を記述する関数を組み合わせることによりおおむね表現できることが明らかになった[9]。また、炭素入射の炭素ターゲット、アルミニウムターゲットの実験結果を理論モデルによる計算が十分な精度で模擬できていないことも明らかになった[1]。そこで、核破碎片生成二重微分断面積の入射粒子依存性を実験的に取得し、これがどの程度マクスウェル型の分布関数にクーロン障壁を記述する関数を組み合わせることにより記述可能であるかを調査することとした。この調査は、同じ全エネルギーを有する異なる入射粒子同士の比較と、同じ核子あたりエネルギーを有する異なる入射粒子同士の比較に着目する。これまでに測定例が少ない、重陽子、ヘリウム原子核、炭素などの複合粒子による核破碎片生成二重微分断面積の実験データの取得を行う。

平成24年度の放医研サイクロトロンの実験では、50 MeV重陽子、70 MeVヘリウム、6 MeV/n (=72 MeV)炭素入射に対するベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットに対する核破碎片生成二重微分断面積測定を行った。これらはすでに取得済みの50 MeV、70MeV 陽子入射のデータと比較するためのものである。本報告では、このうち6 MeV/nの炭素入射に対するデータの取得と結果について述べる。

2. 実験方法

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 コースにて行っている。図 1 に実験配置を示す。サイクロトロンから引き出されたビームは散乱チェンバー内での薄膜試料位置に於いて約 5 mm 径に絞られる。薄膜試料を透過した陽子ビームは炭素製のビームダンプに吸収される。ビームダンプには電流計を接続し、ビーム量をモニターする。試料中の原子核と入射粒子が核反応をおこし、二次粒子を生成する。散乱チェンバーの 30,60,90 度のポートに二次粒子検出器である BCC を接続し、生成した二次粒子の核種同定を行い、エネルギーを測定する。

BCC は円筒形状をしたグリッド付き電離箱であり、カソードの位置に入射窓を有している。入射窓は 3x3 のウィンドウフレームサポート付き 0.5 μm 厚窒化シリコン製のものを用いた。カソードとアノードの距離は 30 cm でありアノードのカソード側 5 mm 手前にグリッドが設置されている。検出ガスは 200 Torr の P10 ガスを利用しており、低压ガスフローシステムにより圧力を一定に保ちながらガス置換を行っている。検出器厚みを薄くすることにより、二次粒子のうち生成量の多い水素同位体の信号寄与を小さくして、エネルギー損失の大きいヘリウム以上の粒子を選択的に測定することができる。

入射粒子は検出器左側から入射窓を透過して入射する。入射粒子は検出器内のガスを電離し、そのエネルギーと検出器内のガス圧力に対応する飛程で止められる。飛程が検出器長より長い場合は検出器を

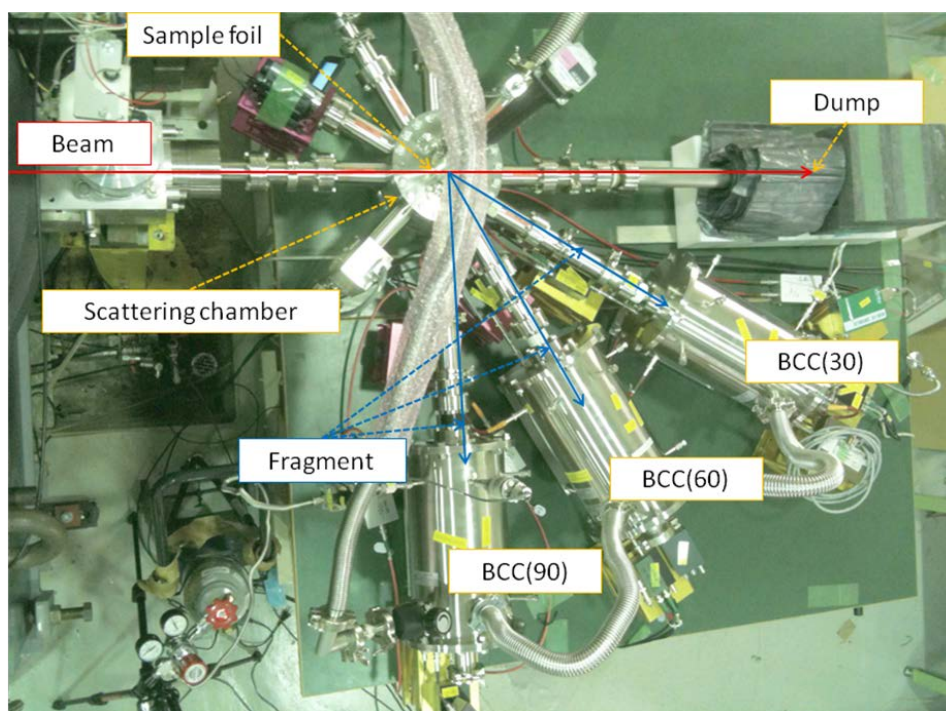


図1 実験機器配置。30度ポート、60度ポート、90度ポートにBCCをそれぞれ接続し、3角度の同時測定を行う

突き抜けるが、この補正については後述する。電離により生成した電子はアノード、カソード間の電場を用いて収集する。アノードの直前に適切な中間電圧を付与したグリッドを置くことにより、カソード・グリッド間の電子のドリフトによる誘導からアノードを遮蔽し、アノードから電離電子の検出器内分布に相当する時間分布を持つ信号を得ることができる。この信号の先頭部分はブラックピーク高に、全積分値はフラグメントのエネルギーに比例する信号となる。このブラックピーク高とエネルギーの相関から1台の検出器でフラグメントの粒子同定とエネルギー測定ができる。

図2にブラックピーク・エネルギーの二次元図の例としてベリリウムターゲットに6 MeV/u 炭素を入射した場合に生成する核破砕片を30度方向で測定した場合について示す。縦軸のブラックピークの高さが粒子の種類に応じて変化しており、粒子が明瞭に同定されている。図中の(i)の成分は粒子のエネルギーが小さくブラックピークを形成しないために粒子同定ができていない。我々の検出器ではカソード信号も取り出しているために、カソード信号とアノード信号の相関、すなわち粒子の飛程とエネルギーの相関を得ることができ、これを利用し図中の(ii)の成分も粒子同定することができる。また図中の(ii)の成分は検出器を突き抜けた成分であるが、粒子種が明確であるので、検出器への付与エネルギーから入射エネルギーを推定する手法により、これらの粒子についても入射エネルギーを決定している[3]。これらの手法を併用することにより従来のブラックカーブカウンターの可測

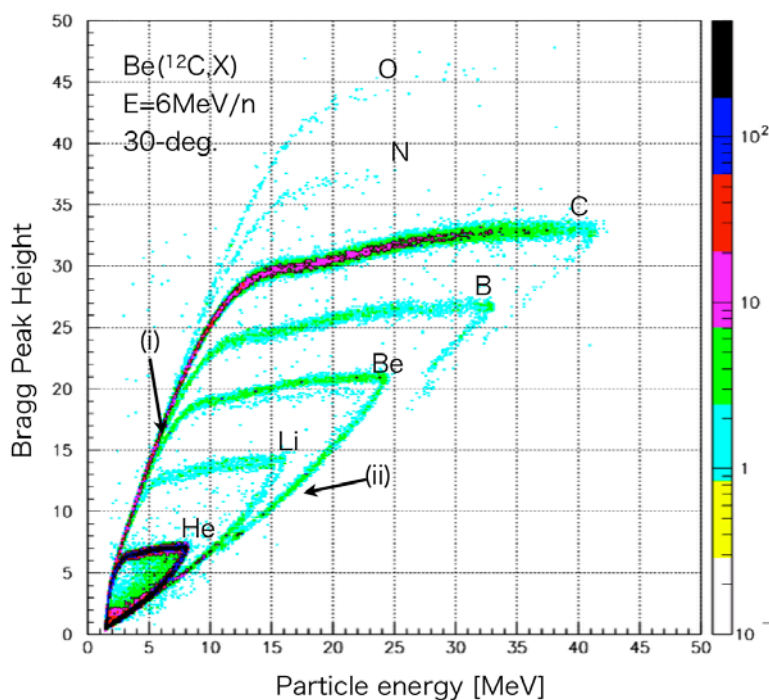


図2 ベリリウムターゲットに6 MeV/u 炭素を入射した場合に生成する核破砕片を30度方向で測定した場合のブラックピーク・エネルギーの二次元図

定エネルギー域を大幅に拡充し、十分な広い可測定エネルギー域をもったフラグメント測定を実現している。

ブラックピークとエネルギーの相関図により粒子を同定した後、各粒子の波高スペクトルはエネルギースペクトルへ変換される。この変換には各粒子が突き抜ける BCC を突き抜けるエネルギーをガス圧力から求めた値を元に導出したエネルギー校正データを用いた。このエネルギースペクトルは入射粒子の数、ターゲット原子数、立体角で規格化され、二重微分断面積となる。ここで用いた立体角は計算により推定し、 ^{241}Am をターゲットの代わりにおいた測定で確認した。

3. 実験結果

図 3～8 に 6 MeV/n 炭素をベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅のターゲットに入射した際に生成するリチウム、ベリリウム、ボロン、炭素、窒素、酸素の 30 度方向の二重微分断面積の実験値を示す。実験データはリチウムについて 30 MeV、ベリリウムについて 45 MeV、ボロンと炭素について 70 MeV 以上までの測定エネルギー域で得られている。従って、リチウムとベリリウムについては高エネルギー成分が得られていない。これらの成分は BCC の背後に Si 半導体検出器を付して同時測定することにより測定可能と考えられる。

これら図 3～8 に示すとおり、最も大きい断面積を与えているのは図 6 の炭素放出である。ほとんどの入射炭素はターゲット原子によりそのまま散乱される。図 5 のボロンと図 7 の窒素放出二重微分断面積を比べると、いろいろなターゲットにおける陽子の付着と脱離の違いがわかる。同様に図 4 のベリリウムと図 8 の酸素放出のデータでは、ヘリウム原子核の付着と脱離の違いが比較できる。陽子の付着と脱離においては、炭素とアルミニウムターゲットにおいて、放出粒子のエネルギースペクトルは類似しているが、ベリリウムや、チタン、銅ターゲットでは大きく異なっている。ヘリウム原子核の付着と脱離においては、アルミターゲットの場合のみ同様の値を示している。図の 7 と 8 はほぼ同様の値を示しており、付着確率が陽子とヘリウム原子核では似ていることが示唆される。今後実験データを拡充し、特徴をまとめていく予定である。

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. Instrm. Meth.* **A589** 193 (2008).
- [3] M. Hagiwara *et al.*, *Nucl. Instrm. 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).

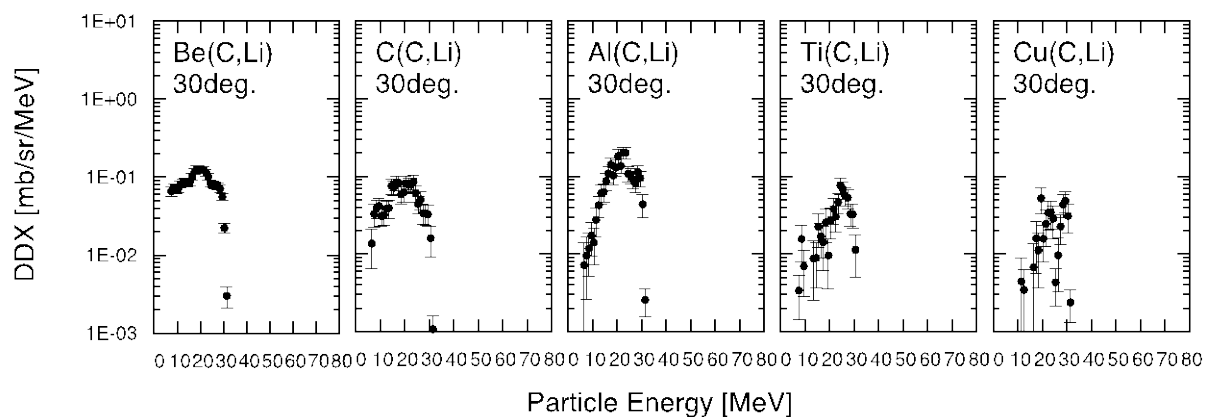


図 3 6 MeV/n の炭素入射によるベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットに対する 30 度方向のリチウム放出二重微分断面積

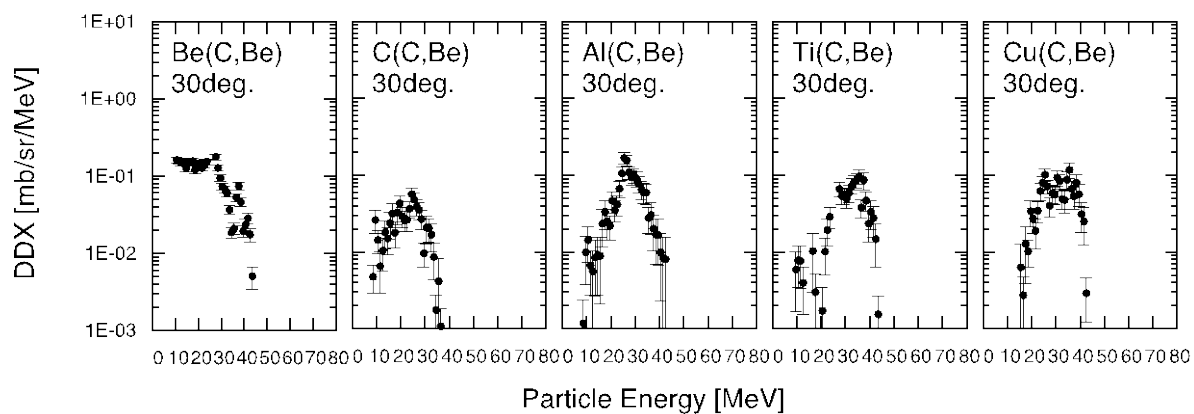


図 4 6 MeV/n の炭素入射によるベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットに対する 30 度方向のベリリウム放出二重微分断面積

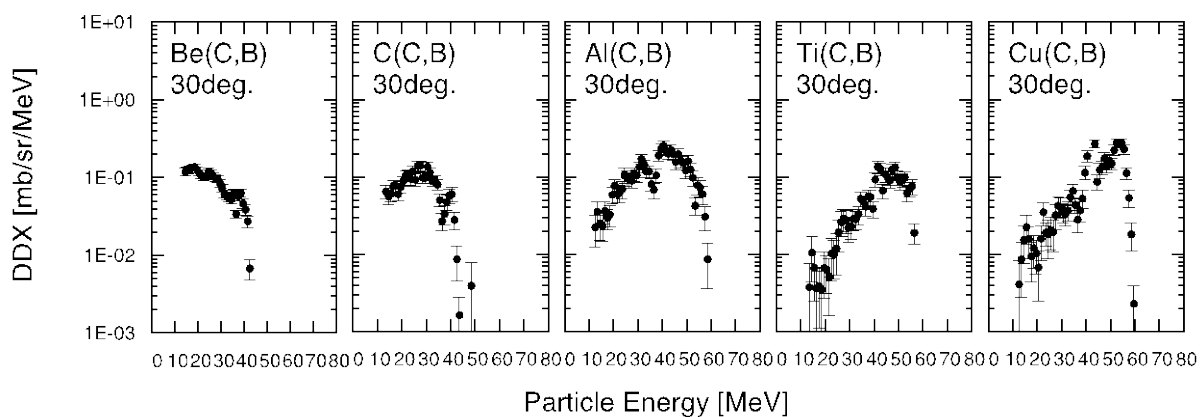


図 5 6 MeV/n の炭素入射によるベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットに対する 30 度方向のボロン放出二重微分断面積

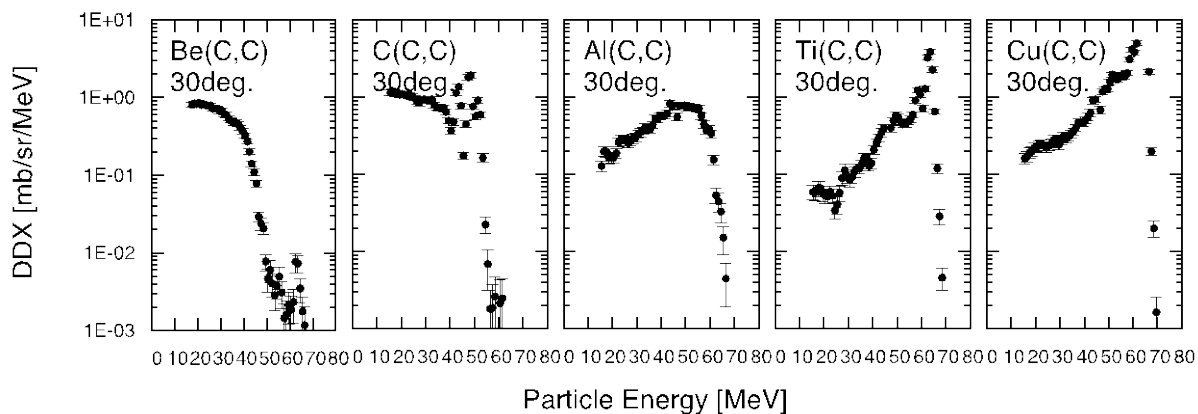


図 6 6 MeV/n の炭素入射によるベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットに対する 30 度方向の炭素放出二重微分断面積

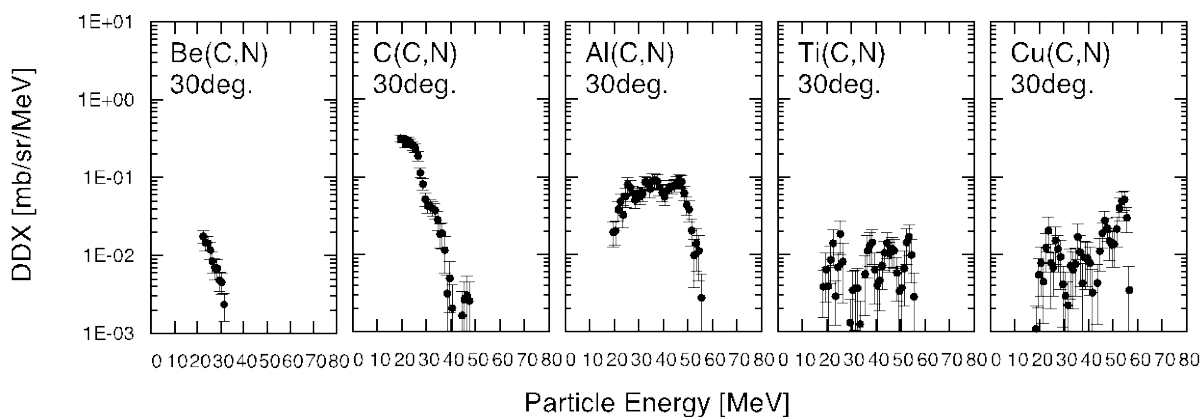


図 7 6 MeV/n の炭素入射によるベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットに対する 30 度方向の窒素放出二重微分断面積

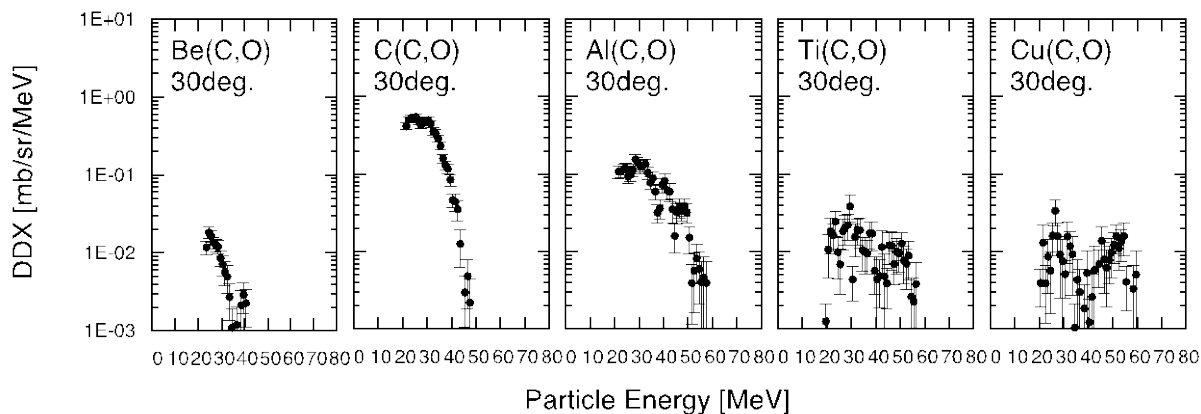


図 8 6 MeV/n の炭素入射によるベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットに対する 30 度方向の酸素放出二重微分断面積

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
D. Ohsawa^A, H. Tawara^B, F. Soga^C

A : 京大 RI センター

B : 核融合研

C : 放医研

研究成果概要

去年度までに測定した 6.0 MeV/u C^{6+} 、 C^{4+} 、 O^{5+} 入射に引き続き、等速 O^{8+} 入射にて水蒸気へのイオン衝突における二次電子生成二重微分断面積(DDCS)を測定した。測定二次電子エネルギーは前方向(20~90°)に対して 10 eV~10 keV、後方向(100~160°)に対して 10 eV~1 keV となっている。得られた DDCS エネルギースペクトルでは、等速 C^{6+} 入射と同様に前方向の高エネルギー領域に二体衝突ピークが観測された。

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、高真空下で安定希薄な水蒸気ターゲット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 $d^2s/dEdW$ (DDCS : Doubly Differential Cross Section)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. 実験方法

測定装置は軟鉄製チャンバ、水蒸気流発生・捕獲装置、電子線分析・検出装置等からなる。放医研サイクロトロンで加速されたブラッグピーク領域のエネルギーを持つ重イオンをチャンバ内にて希薄な水蒸気ターゲットに衝突させ、そこから放出される二次電子のエネルギー及び角度分布を測定し、二次電子生成二重微分断面積を実験的に求める。放出二次電子線は平行平板型の電子線分析器によりエネルギー弁別された後、マイクロチャンネルプレート(MCP)で計数される。噴出水蒸気は、入射イオンと相互作用した後、液体窒素温度に冷却されたチャンバ上部のステンレス製パネル及び衝突領域を取り囲む冷却カバー(Cu 製と μ -metal 製を二次電子エネルギーで使い分けている)で氷結捕獲されるため、チャンバ内の真空度(~ 3×10^{-5} Pa)を悪化させることなく安定(~10 hours)かつ希薄(~ 1×10^{-1} Pa)な水蒸気流が生成される。

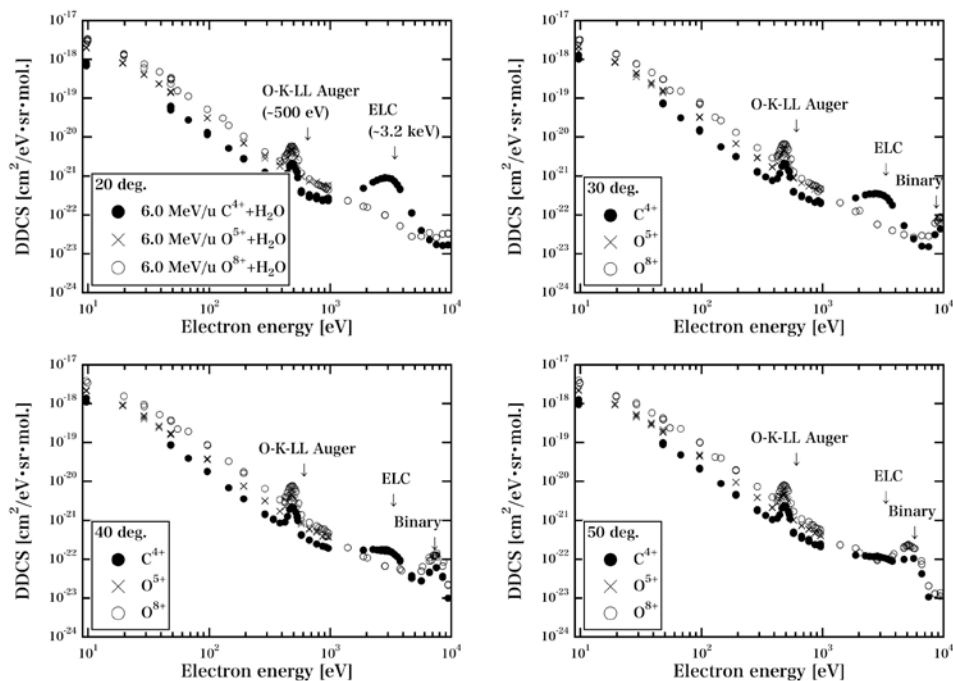
去年度までに測定した 6.0 MeV/u C^{6+} 、 C^{4+} 、 O^{5+} 入射に引き続き、等速 O^{8+} 入射にて水蒸気へのイオン

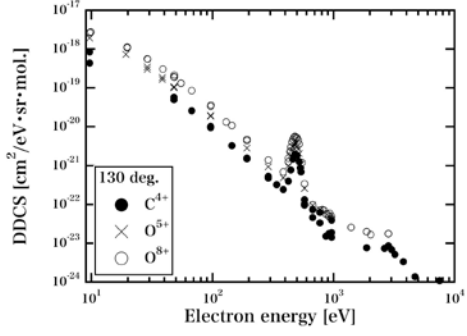
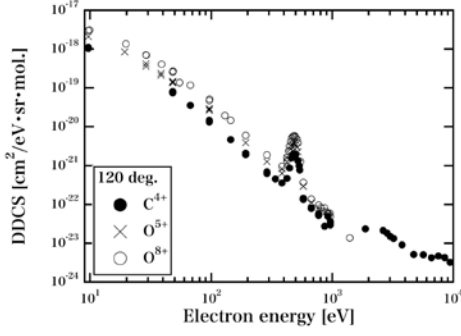
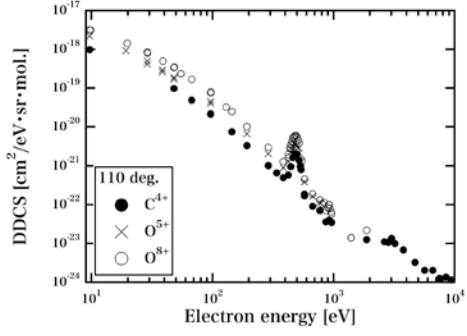
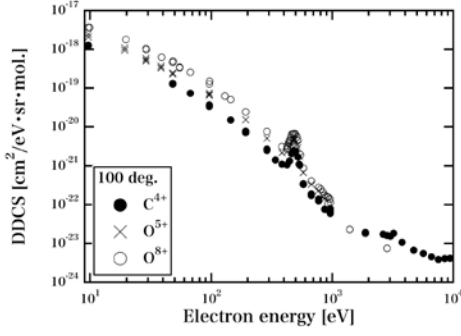
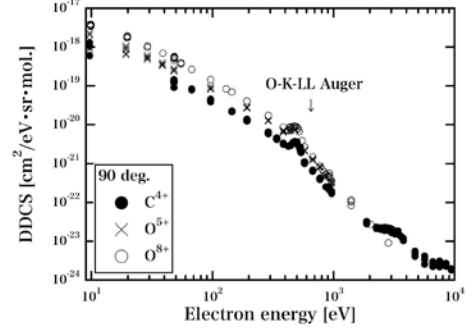
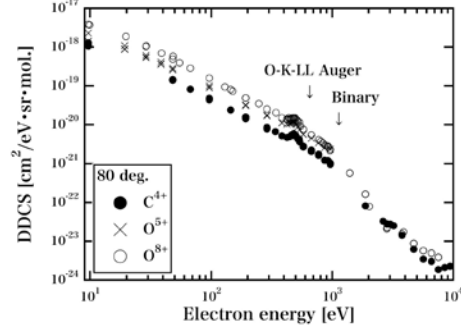
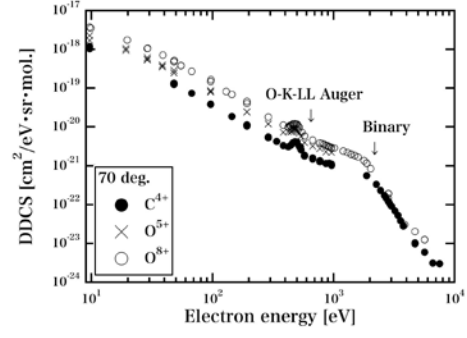
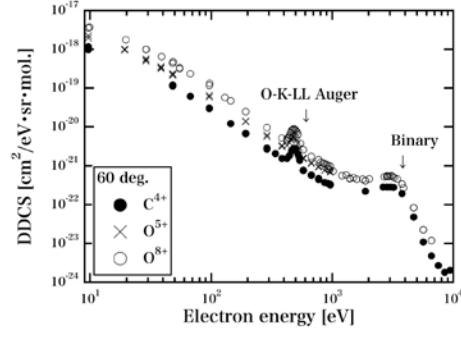
衝突における二次電子生成二重微分断面積(DDCS)を測定した。ブラッグピーク領域の高速イオンは水中で完全電離しており、非完全電離イオンの二次電子生成断面積はトラック構造解析の入力データとしては寄与しない。しかしながら、非完全電離イオン(C^{4+} 、 O^{5+})では入射イオン内の軌道電子のために、完全電離イオン(C^{6+} 、 O^{8+})に比べてイオンポテンシャルの遮蔽による電子放出の減少と軌道電子の離脱による電子放出の増加の2つの寄与が新たに加わり、また、これら2つの寄与は二次電子エネルギー領域で異なることが予想されるため、原子物理学上、大変興味深い。特に、水蒸気へのブラッグピーク領域の C^{4+} 、 O^{5+} 入射については、 C^{6+} 、 O^{8+} 入射と同様に実験値がないため、得られる断面積は二次電子放出の理論研究にも貢献できると考えられる。

O^{8+} 入射では、Cu 製冷却カバーを用い、マスフロー流量 30 sccm、入射イオン電荷量 15 μC にて、測定角度 20 $^{\circ}$ ~160 $^{\circ}$ まで 10 $^{\circ}$ 刻み、二次電子エネルギー10 eV~10 keV(20~90 $^{\circ}$)、10 eV~1 keV(100~160 $^{\circ}$)の二次電子(SE)計数を測定した。Cu 製冷却カバーは放出水蒸気の氷結捕獲効率が良く、30 sccm 時とマスフローオフ時とで真空度に大きな変化がないため、残留水蒸気からのバックグラウンド(BG)寄与は少ないとし、マスフローオフ時の計数を BG としている。SE と BG とから DDCS を求め、以前に測定した等速 C^{4+} 、 O^{5+} 入射と比較した。

3. 実験結果

図1に結果を示す。一般に、二次電子放出は二次電子エネルギーのほぼ2乗に比例して減少するため、 C^{4+} 、 O^{5+} 、 O^{8+} 入射とも二次電子エネルギーの増加に従い、いくつかのピークを除いて急激に減少を示している。また、 C^{4+} 、 O^{5+} 、 O^{8+} 入射とも全角度で~490 eV に H_2O 由来の O-K-LL Auger ピーク、さらに、 C^{4+} 、 O^{8+} 入射では、前方方向(20~90 $^{\circ}$)で二体衝突(binary encounter)ピーク(O^{5+} は未測定)、 C^{4+} 入射では全方向(20~160 $^{\circ}$)で~3.2 keV に幅広の ELC(Electron Loss to Continuum)ピークが観測された(O^{5+} は未測定)。ELC ピークは非完全電離イオン内の軌道電子が標的原子との衝突で離脱した直後、入射イオンのクーロン力により前方に入射イオンとほぼ等速で引っ張られてできるピークである。 O^{5+} と O^{8+} 入射との比較では、低中エネルギー領域(10~700 eV)において、 O^{5+} 入射は O^{8+} 入射に比べて~50 %減少した一方、高エネルギー領域(>700 eV)では両者ではほぼ一致した。この変化は衝突径数 P の大小によって入射イオンのポテンシャルの遮蔽度が変わるためと思われる。すなわち、低エネルギー電子放出は P の大きい、遠く離れた衝突で生じるため、これらの電子は十分に遮蔽されたイオンポテンシャルを感じるのに対して、高エネルギー電子放出は P の小さい、電子雲内部での衝突で生じるため、ほぼ裸のイオンポテンシャルを感じるためと思われる。





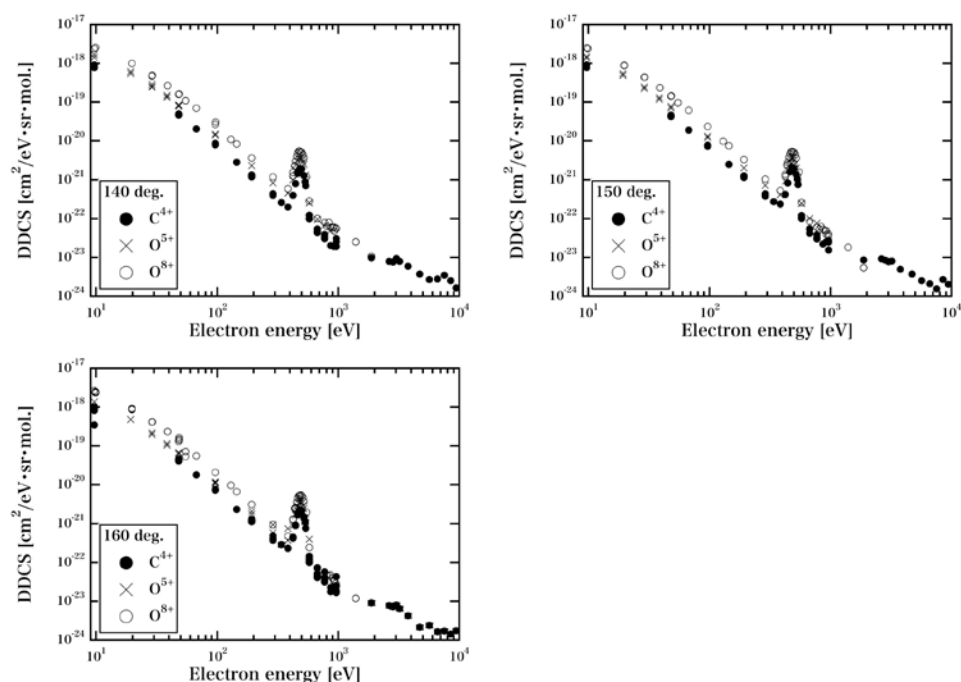


図 1. 水蒸気への 6.0 MeV/u C^{4+} 、 O^{5+} 、 O^{8+} 入射による二次電子生成二重微分断面積 (DDCS) エネルギースペクトル

4. まとめ

水蒸気への 6.0 MeV/u O^{8+} 入射で、前方向(20~90°)に対して二次電子エネルギー10 eV~10 keV、後方向(100~160°)に対して 10 eV~1 keV にわたる二次電子生成二重微分断面積(DDCS)を測定した。来年度に O^{5+} 、 O^{8+} 入射で未測定領域(O^{5+} 入射では全方向(20~160°)の高エネルギー領域(1 keV~10 keV)、 O^{8+} 入射では後方向(100~160°)の高エネルギー領域(1 keV~10 keV))を測定することで、二体衝突ピーク、ELC ピークの Z 依存性、特に、 C^{4+} 、 O^{5+} の電子配置の違い(He 様と Li 様)による効果について定量的に議論したいと考えている。

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、中村 直人^B、野ヶ峯 翔^B、山田 剛広^B、和西航平^B、
古場 裕介^C、鎌田 創^D、高田 真志^D

Yusuke Uozumi^A, Naoto Nakamura^B, Sho Nogamine^B, Takahiro Yamada^B, Kohei Wanishi^B,
Yusuke Koba^C, So Kamata^D, Masashi Takada^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: 放射線医学総合研究所重粒子医科学センター

^D: 放射線医学総合研究所緊急被ばく医療研究センター

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 $(p,p'x)$ 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。強いバックグラウンドが存在するため、注意深い測定が重要となっている。バックグラウンドは、シミュレーションによるバックグラウンドの調査を行っている。得られた測定データは、過去の実験値および理論計算の結果と比較して検証した。

1. 目的

粒子輸送コード PHITS 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 20-100 MeV 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 100 MeV 以下のエネルギー領域まで拡張する計画がある。我々は $(p,p'x)$ 反応に関する最近の研究 [1] 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。また、従来の計算では蒸発過程でのみ考慮されていたクーロンバリアの影響が、カスケード過程においても無視できないことを示し、その取扱い方法について提案をしている [2]。 $(p,p'x)$ 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、最前方角度での $(p,p'x)$ 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。平成 23 年度から、最前方角度での $(p,p'x)$ 反応の二重微分断面積測定を NIRS の大型サイクロトロン施設で開始している。初年度は測定システムが適正に作動していること、さらに二重微分断面積を求めること等基礎的技術の確認を行った。ゼロ度近傍の測定については、ビームの直接的影響や強い弾性散乱の影響等バックグラウンド要因が大きく、バックグラウンド除去が容易でないことも明白となった。バックグラウンドを正確に除去するため、バックグラウンドソースの解明を含む総合的なバックグラウンド測定方法の確立に向けて、データ収集をおこなう。

2. 実験方法

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 $100\ \mu\text{m}$ の ^{12}C および、 ^{27}Al 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 $50\ \mu\text{m}$ のカプトンフォイルを用いた。実験に用いたカウンターテレスコープの構成を図 1 に示す。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 $500\ \mu\text{m}$ の ^{12}C ターゲットからの散乱線を、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。実験方法の詳細は、平成 23 年度の報告 [3] を参照されたい。

3. データ解析

エネルギーに較正には、エネルギー既知の弾性散乱ピークを利用することができる。しかし、今回は高エネルギー側の較正を完了していない。各検出器に付与されるエネルギーは Bethe の式により計算した。粒子弁別は次式で表される PI パラメータを用いて行った。

$$PI = E_{total}^b - (E_{total} - \Delta E)^b$$

ΔE は SSD に、 E_{total} はすべての検出器に付与したエネルギーである。 b は粒子に依存する係数である。 ΔE 検出器で粒子が損失するエネルギーは各粒子によって異なり、同一の粒子に対して PI はほぼ一定となる。この他の詳細は、平成 23 年度の報告 [3] を参照されたい。

4. 結果と考察

図 1 は 40 MeV $^{12}\text{C}(p, p'x)$ 反応の測定データの例である。今年度の測定で得た 20° と 30° データを、EXFOR から取得した Bertrand 等の実験データ [4] と比較している。また、INC モデル計算と CCONE 計算の結果も示している。Bertrand 等は、 10° 近傍は測定していないが、 20° と 30° を測定しているため、今回、比較に使用することができた。主検出器として Ge(Li) 検出器を用いており、GSO(Ce) を用いた本実験よりもエネルギー分解能が良く、振動励起に伴うピーク構造を反映した分散を観察することができる。また、EXFOR 格納データは弾性散乱ピークが削除されている。連続スペクトル領域に着目すると、 20° では CCONE がやや大きめの結果となっているが、他の 3 つの結果はほぼ一致していると考えられる。一方 30° では、Bertrand 等の結果と INC とは一致が良いように思われる。INC では 10 MeV 付近に広い巨大共鳴に対応するバンプが見られるが、過大評価となっている。CCONE は 20° の場合と同様に過大評価の傾向にある。我々の結果は 20 MeV 以下の領域で過小評価である。弾性散乱ピークもと考えられるため、データ確定までに再確認をする必要がある。

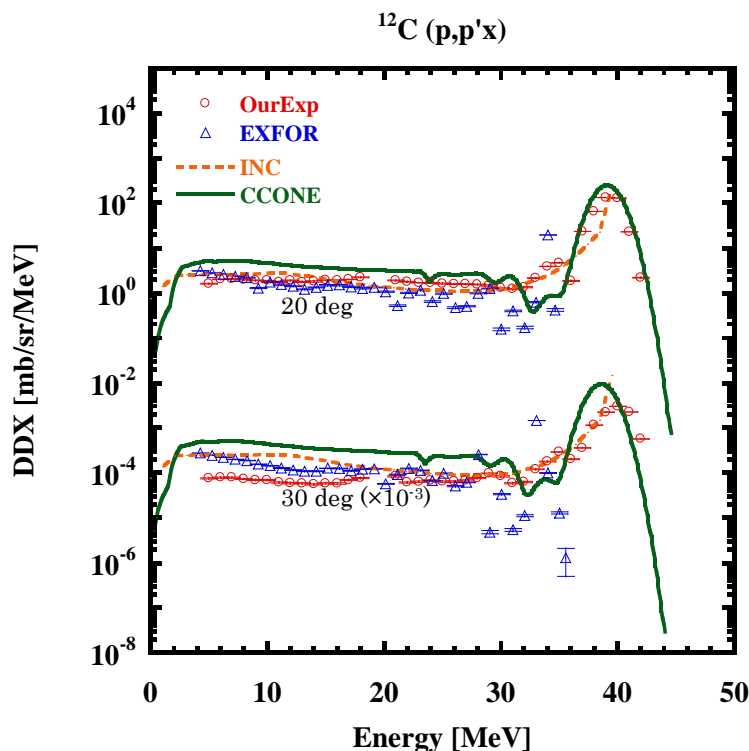


図 1 炭素標的陽子エネルギースペクトル DDX。本研究の結果を、EXFOR に格納された過去の実験値[4]、INC 計算[1]、CCONE 計算[5]と比較している。

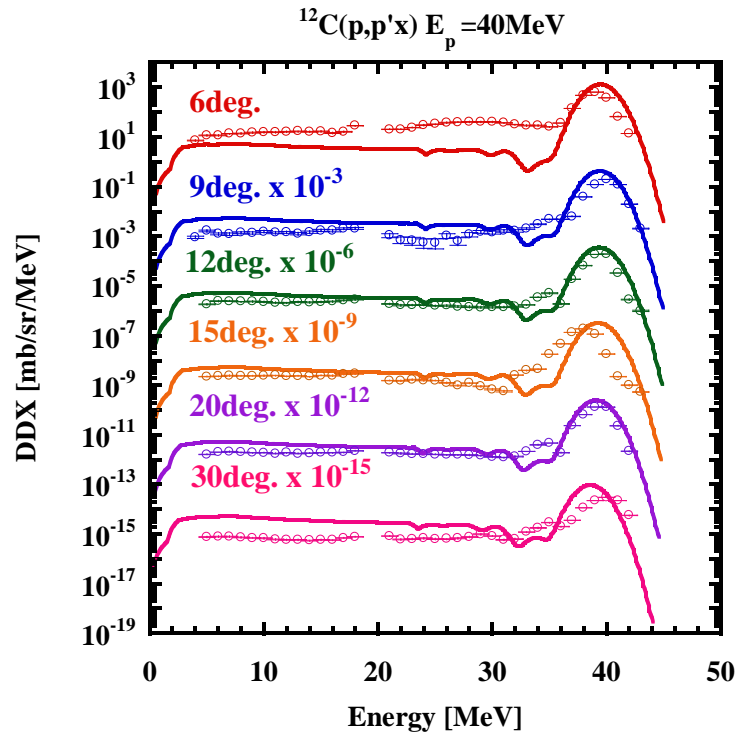


図2 炭素標的陽子エネルギースペクトル DDX の CCONE[5] との比較。

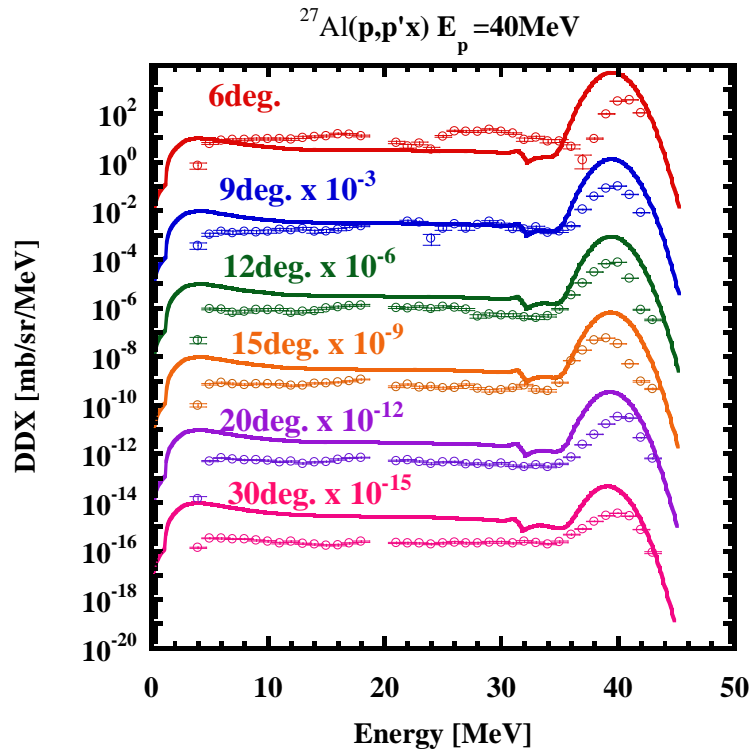


図3 アルミニウム標的陽子エネルギースペクトル DDX の CCONE[5] との比較。

図2と図3はそれぞれ、 ^{12}C と ^{27}Al を標的とした $(p,p'x)$ 反応のDDXの結果を示しており、比較のためにCCONE [5]による計算結果も示している。角度は 6° から 30° までの6点である。CCONEでは弾性散乱断面積は光学模型計算により求められている。光学ポテンシャルパラメータの検証は必要であるが、現在は全て初期パラメータを使用している。今回の実験データは、高エネルギー領域のエネルギー較正が完全には終了していないため、ピークの位置が正しく再現出来ていない場合がある。 ^{12}C の結果を見ると、弾性散乱断面積はCCONEと概ね一致している。一方、 ^{27}Al の場合は全ての角度においてCCONEよりも小さい値となっている。炭素標的の連続スペクトルは、前節で議論したCCONEにおける過大評価傾向を考慮すると、 12° から 20° までの範囲は妥当な結果であると考えられる。 6° と 9° は理論計算の精度も検証されていないため、注意深く再検証してデータを確定していく必要がある。アルミニウム標的のデータは、連続スペクトル領域でもCCONEより全般的に小さい。弾性散乱も小さい値であるため、データの見直しが必要である。

5. まとめ

散乱角度 6° から 30° までの最前方において、 $(p,p'x)$ 反応の二重微分断面積測定を開始している。標的として ^{12}C と ^{27}Al を用いて、40MeV陽子ビームによる実験を行った。他のデータとの比較から、概ね良好な結果と考えられる。特にバックグラウンドに関する理解を深めて、データの精度を向上させていく必要がある。今後は、測定法と解析方を確立させて ^{12}C と ^{27}Al のデータを確定し、その後は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] Y. Uozumi et al.: Phys. Rev. C 86, 034680 (2012).
- [2] Y. Uozumi et al.: Phys. Rev. C, submitted.
- [3] 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).
- [4] F. E. Bertrand et al.: Phys. Rev. C 8 (1973) 1045. EXFOR, <http://www.jcprg.org/exfor/source.pl?database=exfor&subentry=C0925002>.
- [5] O. Iwamoto: J. Nucl. Sci. Technol., 44, 5 (2007) 687.

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、玉木 聖一^B、松下 慶一郎^B、関根 雅晃^B、野口 綾太^B、川端 麻莉子^B、
鈴木 龍彦^B、中村 哲志^C、余語 克紀^C、
稲庭 拓^D、杉浦 彰則^E、北條 悟^E、後藤 彰^E

Teiji Nishio^A, Seiichi Tamaki^B, Keiichirou Matsushita^B, Masaaki Sekine^B, Ryouta Noguchi^B,
Mariko Kawabata^B, Tatsuhiko Suzuki^B, Satoshi Nakamura^C, Katsunori Yogo^C,
Taku Inaniwa^D, Akinori Sugiura^E, Satoru Hojo^E, Akira Goto^E

^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 : 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

^E : 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法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、陽子線照射領域可視化に関する研究は最重要課題の一つである。国立がん研究センター東病院では、これまでその研究を精力的に取り組んできた。その成果、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した。

本年度の研究では、陽子線照射領域可視化による高精度陽子線治療を実現するために、入射陽子とターゲット原子核との標的原子核破砕反応によって、ターゲット（患者体内中の腫瘍）中で生成される多種のポジトロン放出核の特性を実験的に把握することである。

2. 実験方法

国立がん研究センター東病院の陽子線治療装置には、ビームライン上に設置されたPET装置：Beam ON-LINE PET system mounted on a rotating gantry port (BOLPs-RGp) が構築されている（図1左参照）[2-4]。BOLPs-RGp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、検出器間の不感領域を狭める設計を施した（図1右参照）。最小の検出器間のギャップを3.3mmにし、1個の光電子増倍管に1つが2mm×2mm×20mmサイズのBGO結晶を11×10個マウン

トされた物を 36 ブロック、対向する一対のプラナータイプ検出器に総計で 7920 個の BGO 結晶をマウントした。尚、検出領域は $164.8\text{mm} \times 167.0\text{mm}$ である。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 BOLPs-RGp の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。

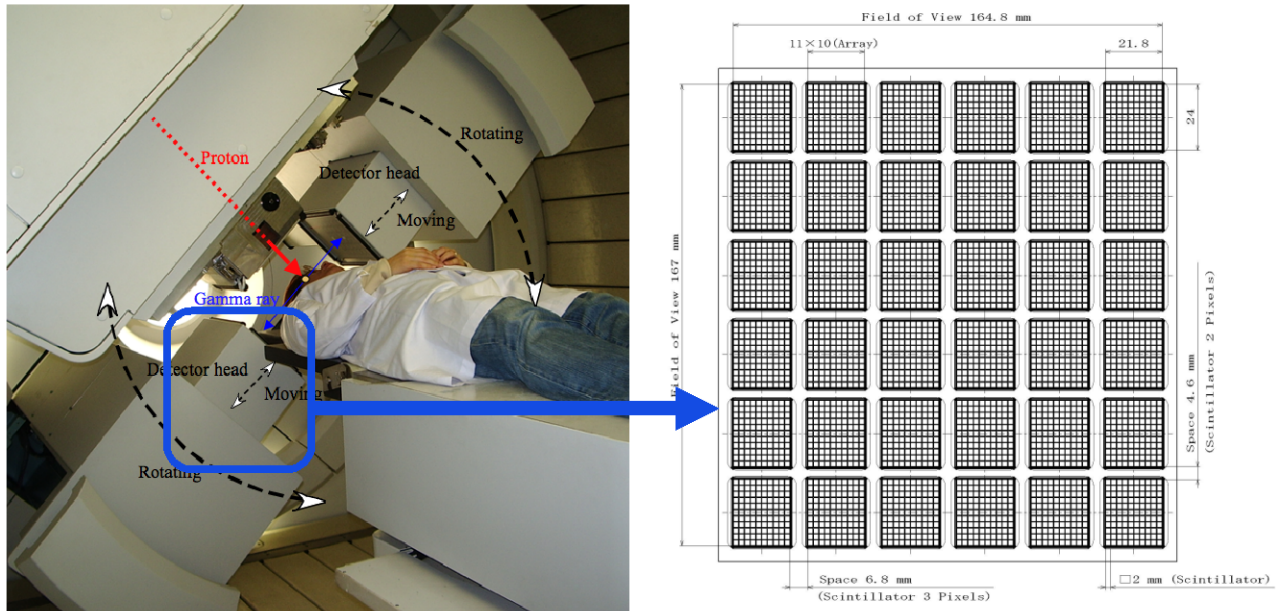


図 1：陽子線装置に設置された BOLPs-RGp の外観及び BGO 検出器ヘッドの構造図。

本研究では、BOLPs-RGp の基礎研究用に開発した同じ検出器及び計測系を持つ BOLPs を C6 コース上に設置し実験を行った（図 2 左参照）。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 2 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バックグラウンド増加があるため、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 $5\text{nA} \cdot 3$ 秒照射で実施した。陽子線の照射野形状は 3mm (FWHM) $\times 8\text{mm}$ (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 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。

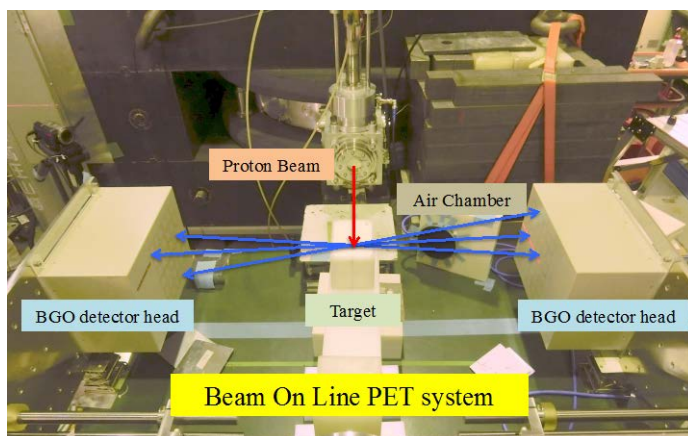


図 2：C6 コースにおける BOLPs の設置（左）と照射ターゲット：左からポリエチレン、水、酸化カルシウム（右）の写真。

ターゲットへの陽子線照射量はそれぞれのターゲットの陽子線入射面に線量測定フィルムである ISP 社製のガフクロミックフィルム（EBT3）を設置して実施した。EBT3 は照射線量に対するフィルム黒化度の相関関係があるため、その特性を検証する実験をワブラー法により均一な陽子線照射野を形成できる C8 コースを利用した。また、陽子線の深部線量分布測定はタイセイメディカル社・KMP 社製の水ファントム中で PTW 社製の 3D PinPoint 電離箱線量計の設置位置を深部方向に変えることで実施した（図 3 左参照）。

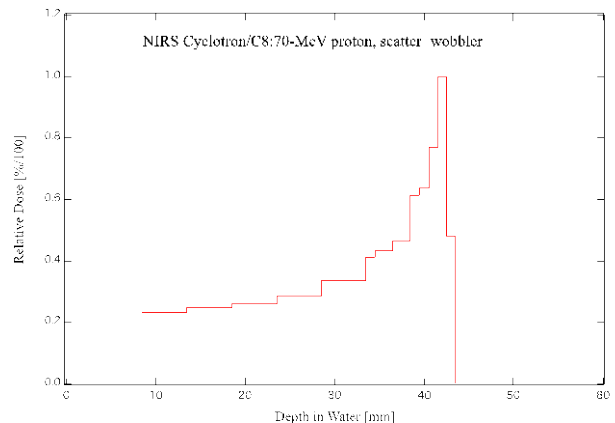
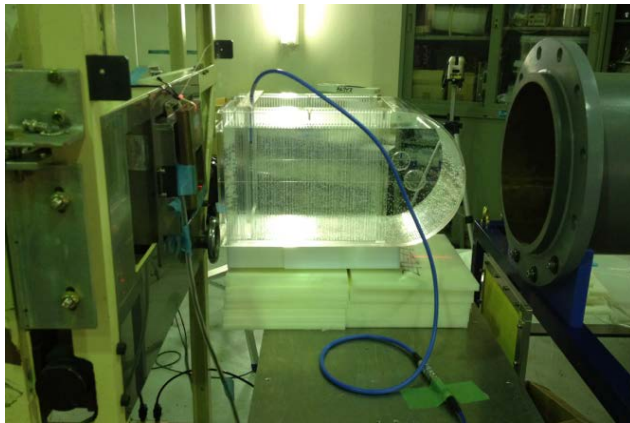


図 3：C8 コースにおける深部線量分布実測風景（左）及び深部線量分布実測結果（右）。

3. 実験結果

3-1. 陽子線深部線量分布

図 3 右に C8 コースにおける 70MeV 陽子線の深部線量分布を示す。ブラックピーク近傍では 1mm ステップ、それ以外では 5mm ステップで実測を行った。物理レンジと深部線量分布との相関において、ブラックピークの distal 側の 84%線量位置での深部位置が物理レンジと一致することが判っている。また、水ファントムの壁厚及び 3D PinPoint 電離箱線量計の設置位置を考慮した場合の深部ゼロ点位置は 9.0mm である。本実測結果から、深部ゼロ点位置を考慮すると物理レンジは 42.3mm、また、その物理レンジに相当する陽子線エネルギーは 70.4MeV となった。C8 と C6 のビームライン上にある物質の違いから C6 での陽子線エネルギーの算出結果は約 72MeV であった。

3-2. 線量測定フィルム EBT3 の線量-フィルム黒化度特性及び照射陽子数算出

図 4 左は実験によって得られた 70MeV の陽子線における EBT3 の線量とフィルム黒化度の特性結果である。図 4 右は、ポリエチレン、水、酸化カルシウムターゲットに陽子線を照射した際の陽子線プロファイルの黒化度の実測結果である。線量とフィルム黒化度特性結果及び 70MeV の陽子線の阻止能の計算値より、それぞれのターゲットに照射された陽子数の算出結果は、ポリエチレン： $1.4(\pm 0.3) \times 10^{11}$ 、水： $2.0(\pm 0.4) \times 10^{11}$ 、酸化カルシウム： $2.0(\pm 0.4) \times 10^{11}$ となった。

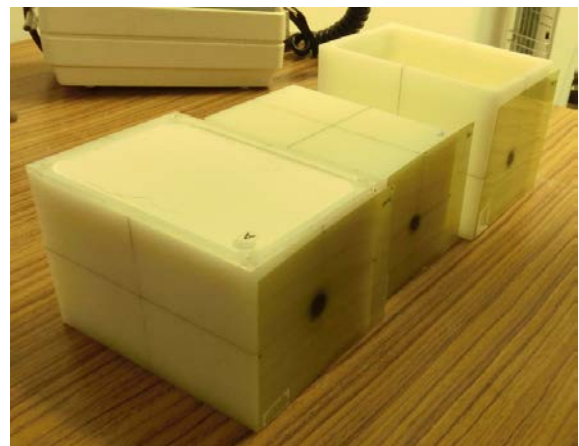
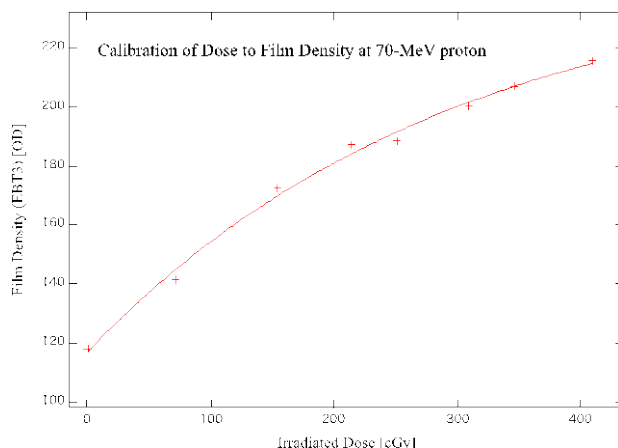


図 4：EBT3 の陽子線線量とフィルム黒化度の特性結果（左）
及び EBT3 によるターゲットへの照射陽子線のプロファイルの黒化度結果（右）。

3-3. ポリエチレン、水、酸化カルシウムの深部 activity 分布及び減衰特性

図5左はBOLPsによって実測された深部 activity 分布の計測ソフトの画面キャプチャーである。図の左側より陽子線照射方向、下側は重力方向である。図中の左側は1秒辺りの計測マップ、右側は積算計測データを示している。図5右は、ポリエチレン、水、酸化カルシウムターゲットごとの深部 activity 分布の実測結果である。グラフの横軸はそれぞれのターゲットでの深部位置を示しており、深部位置がゼロの位置では70MeVの陽子線照射による activity 実測結果に相当し、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、横軸の深部位置が深くなるにつれて、低い陽子線エネルギーに対する activity 計測結果を示していることになる。尚、縦軸は activity の値を示しており、それぞれのターゲットでの activity の最大値で正規化してある。

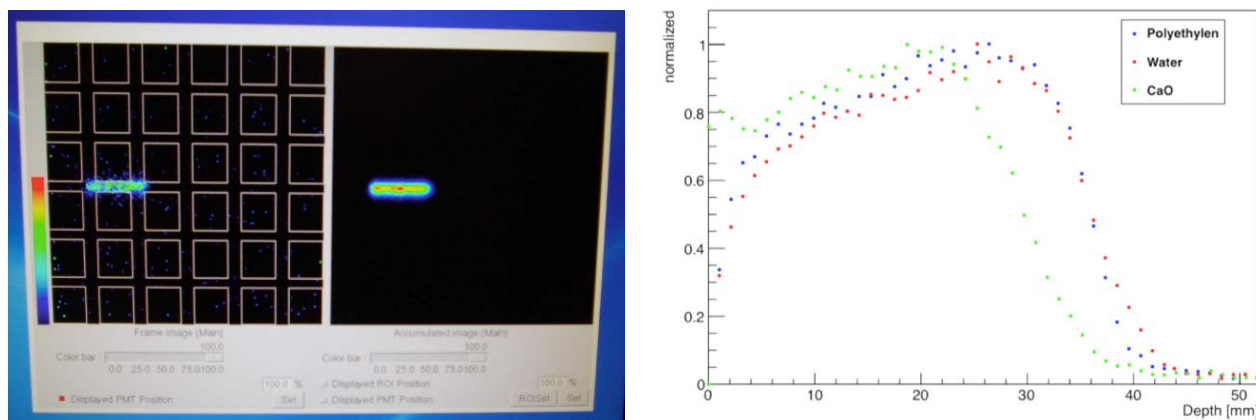


図5：BOLPsによって実測された深部 activity 分布の計測画面（左）及びポリエチレン、水、酸化カルシウムターゲットごとの深部 activity 分布実測結果（右）。

ポリエチレンと水ターゲットに対する、BOLPsの activity 計測時間による減衰特性の結果を図6に示す。ポリエチレンターゲットの場合、標的原子核破砕反応による生成ポジロン放出核は半減期が20.4分の ^{11}C と19.2秒の ^{10}C の2つに限定して考えることができる。図6左の結果において、陽子線照射後直後の計測時間領域での activity の急速な減衰成分とその他の計測時間領域の緩やかな減衰成分があることが観測された。急速な減衰成分は半減期が20秒、緩やかな減衰成分の半減期は20分であることが確認できた。図6右は水ターゲットに対する陽子線照射から得られた activity 計測時間による減衰特性であり、ポリエチレンターゲットの場合と比較すると大きな相違がある。水ターゲットの場合、半減期が122.4秒の ^{15}O 、70.8秒の ^{15}O 、10.0分の ^{13}N 、20.4分の ^{11}C と19.2秒の ^{10}C などの多種のポジロン放出核が生成されると推測される。中でも一番支配的なポジロン放出核は、 ^{16}O から中性子核が一つ取れた ^{15}O である。また、これまでの研究成果[2-4]から、その減衰特性は2つの半減期成分で近似することが可能である。

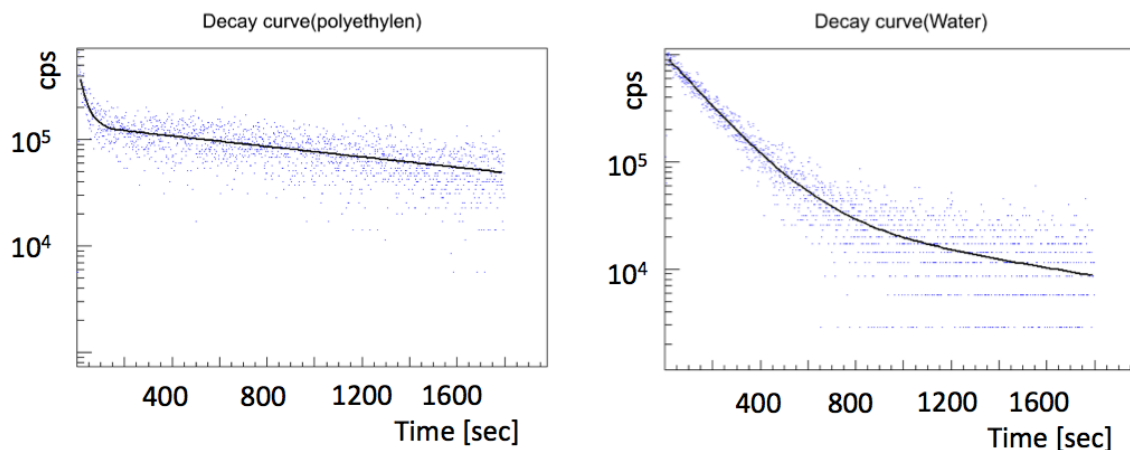


図6：BOLPsによる計測時間に対する activity の減衰特性結果（左：ポリエチレン、右：水）。

4. まとめ

C6 コースに設置した BOLPs による消滅ガンマ線計測によって、陽子線照射領域可視化で最も重要な、入射陽子とターゲット原子核との標的原子核破砕反応による患者体内中で生成されるポジトロン放出核種の特性を把握する実験を行った。70MeV から止まるまでの陽子線エネルギー領域で、ポリエチレン、水、酸化カルシウムへの陽子線照射によって、入射陽子核と炭素核、酸素核、カルシウム核の標的原子核破砕反応による生成ポジトロン放出核の計測によりデータ取得ができた。また、水ファントムと電離箱線量計を用いることで 70MeV 陽子線の深部線量分布を実測することができた。

今後、陽子線照射による標的原子核破砕反応によるポジトロン放出核の生成率を算出するため、実験で取得したデータの解析を進める予定である。また、平成 25 年度は、実験による生成率算出の精度向上を目指すために、特に陽子線入射数の計測方法の検討が必要と考えている。

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).

薄いPET 標的を用いた $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 反応断面積測定

Measurement of $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ cross section for a thin PET target

遠藤 暁^A、梶本 剛^A、唐 継龍^A、高田真志^B、鎌田 創^B、静間 清^A
Satoru Endo^A、Tsuyoshi Kajimoto^A、Jilong Tang^A、Masashi Takada^B、
So Kamata^B、Kiyoshi Shizuma^A

^a 広島大学大学院工学研究科、^a 放射線医学総合研究所

[目的]

これまで、逆反応を用いた重粒子線と BNCT の新しい複合治療法の可能性検討するため、重粒子線の輸送計算可能な PHITS モンテカルロコード[1]の実験データの再現性を評価してきた[2]。実験では、厚いアクリル標的を用い、入射 ^{13}C エネルギー：8、9、10、11 MeV/A において、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 反応断面積を測定した。その結果、PHITS コードには、2 体反応である $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)^{13}\text{N}$ 反応断面積は組み込まれておらず、2 体反応運動学に一致したエネルギーの中性子生成は再現できないことが確認された。また、10、11 MeV/A の断面積の差分を取り、入射 ^{13}C エネルギー11MeV/A、エネルギー損失 13MeV に対応した断面積の推定も行った。

本実験では、標的を薄い PET に変更しこれまで集積した厚い標的のデータと組み合わせることで、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)^{13}\text{N}$ 反応断面積を決定することを目指す。

[実験]

放射線医学総合研究所サイクロトロン[3]からの 9、11MeV/核子 ^{13}C を厚さ 100 μm の PET 標的へ入射し、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 反応で生成される中性子線の収量を測定した。測定セットアップを図 1 に示す。標的から ~210cm の飛行距離において、ヴェトカウンタおよび液体シンチレーションカウンタを用いて、中性子の飛行時間を測定した。測定は散乱角 0 度、7.5、15、30、45、75 度で行なった。また、散乱線量を見積もるためにシャドウバーを用いた測定も行った。

解析が進行中であるため、本報告書においては測定したデータのうち、入射エネルギー11MeV/A の 0° のデータのみを紹介する。

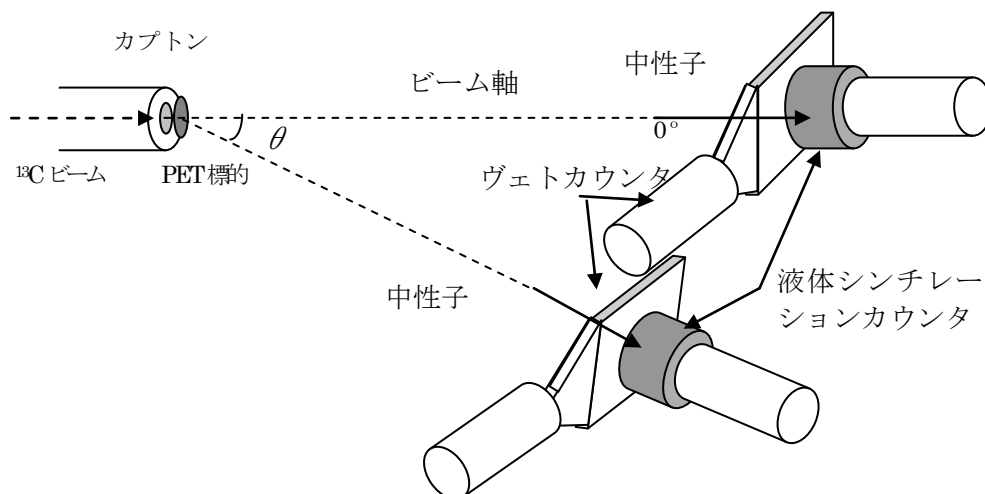


図 1.setup

[データ解析]

測定データは、ヴェトカウンター信号を用いて非荷電粒子の同定を行い、波高弁別法を用いて γ 線と中性子を同定した、また、飛行時間法を用いて中性子エネルギー分布を導出した。図 2(a)、(b)に測定された事象の分布を示す。(a)ヴェトカウンター (VSC) -液体シンチレーションカウンター (LSC)、(b)波形弁別に利用する LSC のテール成分とピーク成分の相関を示す。(a)のヴェトカウンター波高は、50ch 付近に中性子と γ 線事象が確認できる。250、1400、1600、1800ch 付近の事象は、それぞれ電子、フラグメント陽子、フラグメント重陽子、フラグメント 3 重陽子の事象と考えられる。このうち 50ch 付近の事象のみを取り出した。(b)の波形弁別に利用する LSC のテール成分とピーク成分の相関より、中性子領域を抽出した。

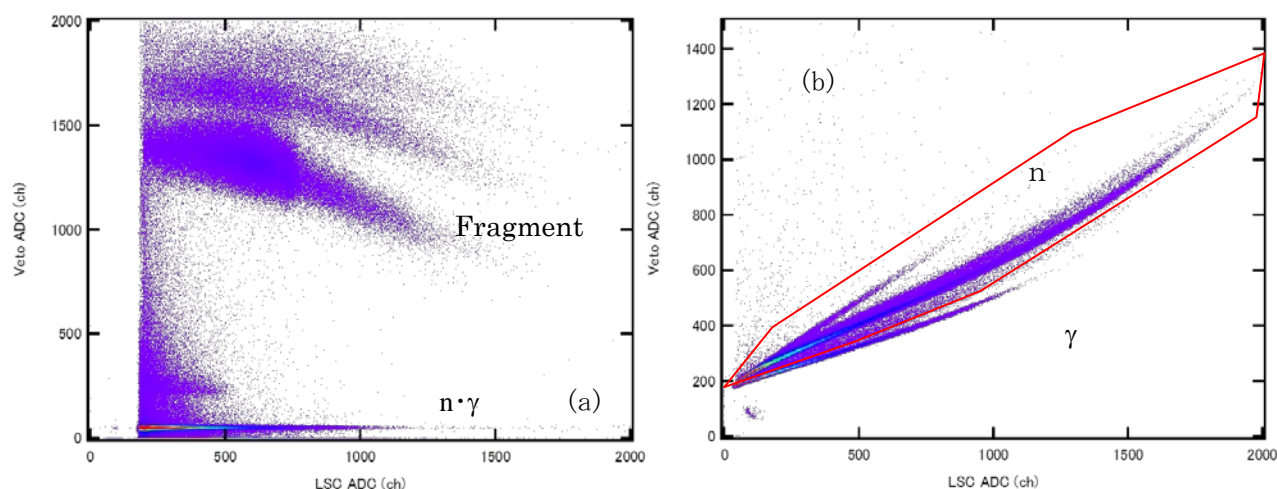


図 2. (a)非荷電事象抽出、(b)中性子事象抽出

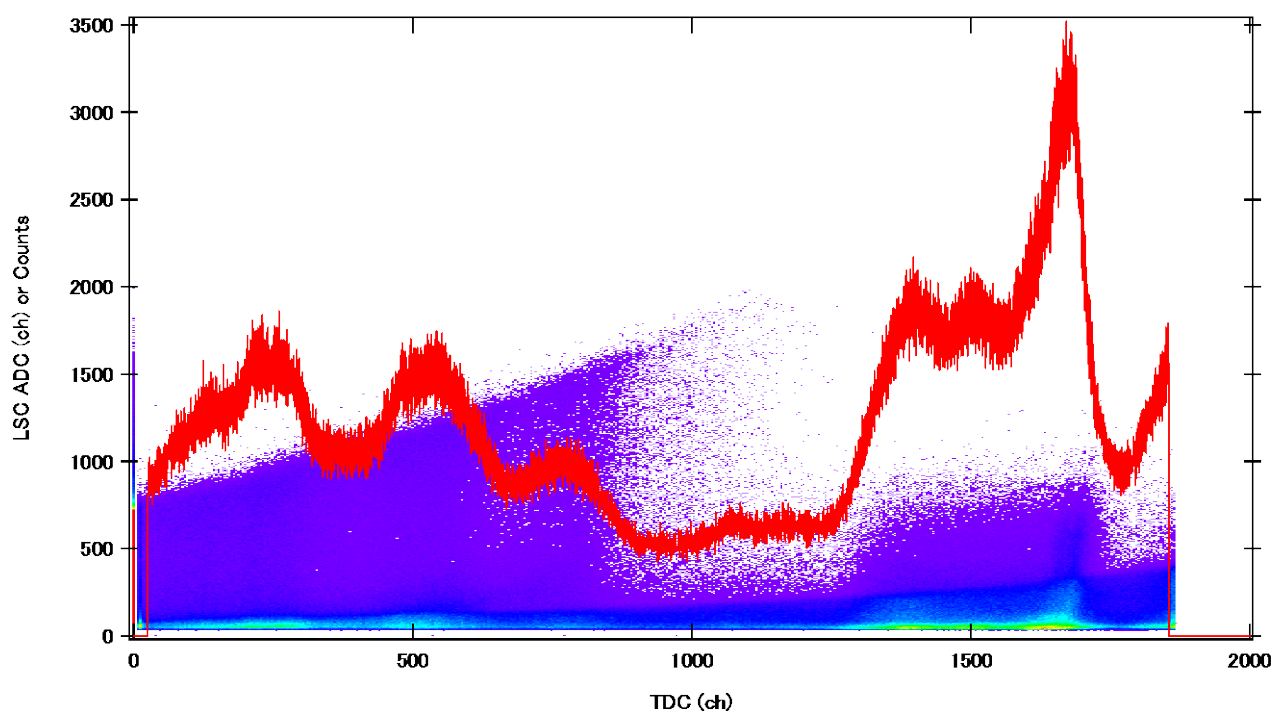


図 3 TDC の時間分布および TDC と液体シンチレータの波高の相関

図 3 に TDC 時間分布および TDC と液体シンチレータの波高の相関を示す。通常、中性子事象に対し、 γ フラッシュの計測時間 7ns (1600ch 付近のピーク) を用いて、飛行距離/光速=210(cm)/30(cm/ns)=7ns) を時間の基準とし、中性子の飛行時間を決定し運動エネルギーを求める。しかしながら、標的が薄いために標的を通過した ^{13}C ビームが大気中元素と核反応を起こす成分が見られる(1300-1600ch の成分)。まず、標的中で生成される γ フラッシュの位置と時間分解を求めるために、1000-1800ch の事象を用いて、多重ピークフィットを行った。結果を図 4 に示す。フィッティングの結果、標的中で生成された γ 線に対応した γ フラッシュは 1675.3 ch、時間分解能は 45.7 ch=1.2ns と見積もられた。

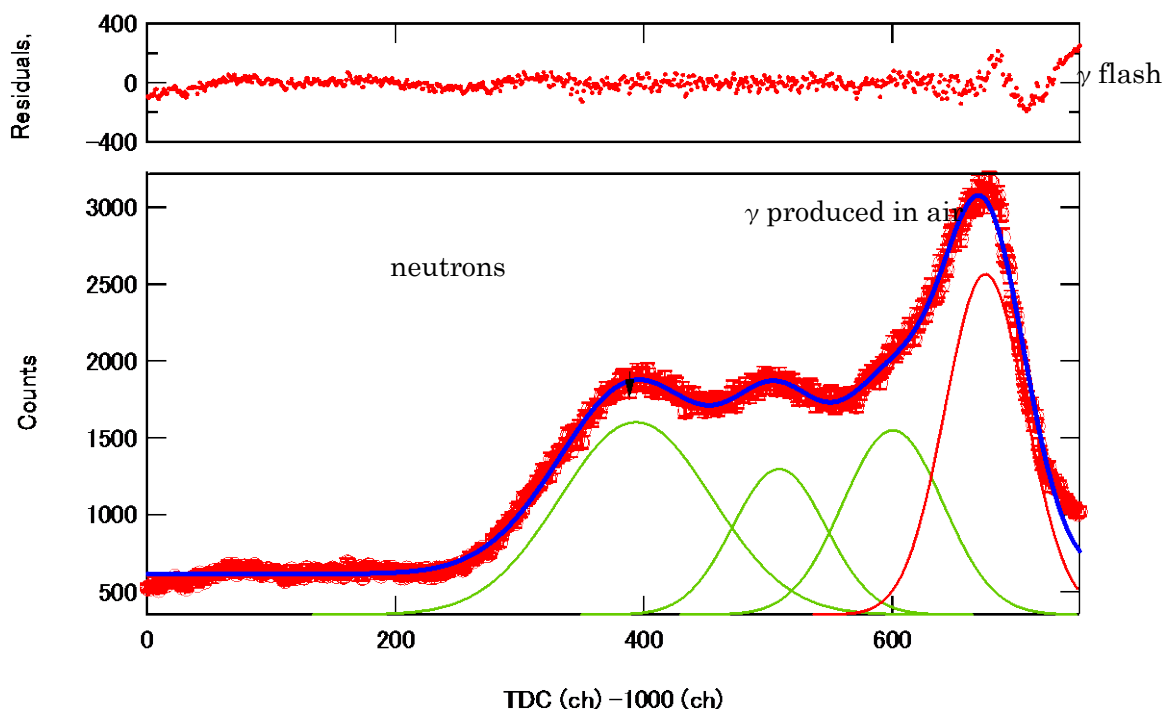


図 4 標的中で生成された γ フラッシュ、および大気中で生成された γ 線成分

大気中で生成された γ 線成分の時間広がりより飛行距離を求めると、 $300\text{ch} \times 0.0254\text{ns/ch} \times 30\text{cm/ns} \times \beta = 12\text{cm}$ が得られる。大気中では、水素成分が少ないため $^1\text{H}(^{13}\text{C},\text{n})$ のイールドは無視できると考えられる。したがって、標的下流 12cm 程度の間で生成される中性子は、 $^{14}\text{N}(^{13}\text{C},\text{n})$ 、 $^{16}\text{O}(^{13}\text{C},\text{n})$ からの中性子と考えられる。これらのイールドは、厚い C 標的を用いたこれまでの測定データを用いることで、補正が出来ると考えられる。本解析では標的下流 12cm 程度までのイールドは考慮せず、散乱角 0° における中性子のエネルギースペクトルを試験的に導出した。図 5 に PET ($^{13}\text{C},\text{n}$) 反応 0° 中性子エネルギースペクトルを●で示す。図より、20-30MeV にブロードピークが存在する。 $^1\text{H}(^{13}\text{C},\text{n})^{13}\text{N}$ の 2 体反応で放出される中性子は、30MeV であり、100 μm の PET 標的におけるエネルギー損失：20MeV を考慮すると、このピークは $^1\text{H}(^{13}\text{C},\text{n})^{13}\text{N}$ 反応によるものと類推される。また、18MeV 付近のピークは、 ^{14}N の中性子分離エネルギー：10.55MeV と矛盾しない。したがって、検出された中性子ピーク構造は、 $^1\text{H}(^{13}\text{C},\text{n})^{13}\text{N}$ 反応で生成された 2 体反応中性子に由来すると考えられる。

更に、昨年度までに収集した厚いアクリルターゲットを用いた $^{13}\text{C}(^1\text{H},\text{n})$ 測定実験の結果から、入射エネルギー 11MeV/A と 10MeV/A の測定値から差分を取ることで推定した $^1\text{H}(^{13}\text{C},\text{n})^{13}\text{N}$ 反応を相対的に比

較した。図 5 中に△のシンボルで示す。今回の測定結果と差分で推定した $^1\text{H} (^{13}\text{C},n) ^{13}\text{N}$ 反応断面積は、形がほぼ一致していることがわかる。このことから、大気中で生成される中性子の補正を考慮し、 $\text{PET} (^{13}\text{C},n)$ 、 $^1\text{H} (^{13}\text{C},n) ^{13}\text{N}$ 反応断面積の決定が可能と考えられる。

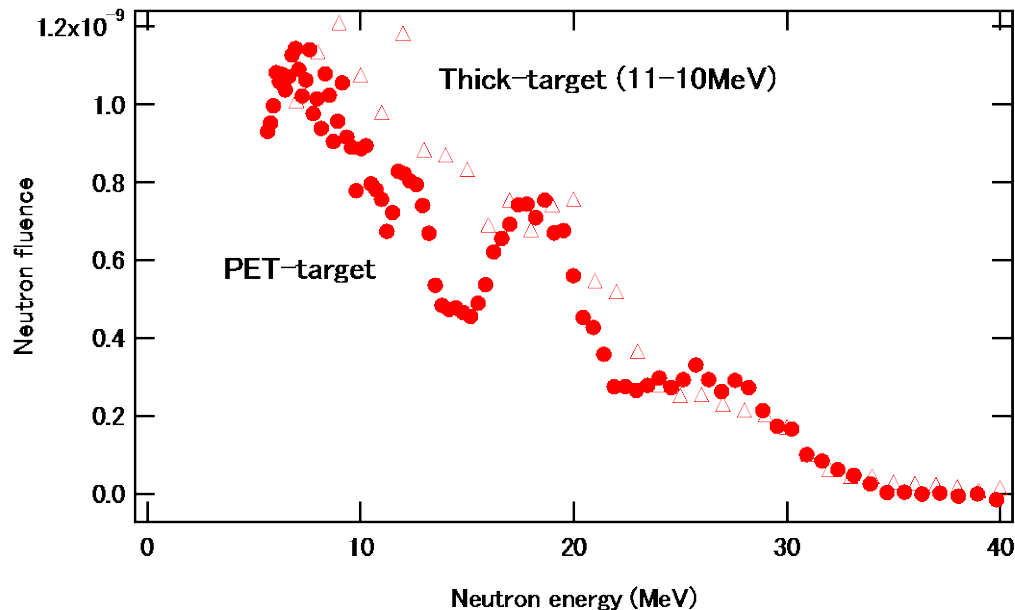


図 5 $\text{PET} (^{13}\text{C},n)$ 反応 0° 中性子エネルギースペクトル

[まとめ]

薄い PET 標的を用いて、 $\text{PET} (^{13}\text{C},n)$ 反応断面積測定を行った。標的を通り抜けたビームにより、大気との核反応が混じることが確認されたが、その量は比較的少ないものと予想された。また、既往の厚い標的を用いて推定した $^1\text{H} (^{13}\text{C},n) ^{13}\text{N}$ 反応断面積と類似した中性子エネルギースペクトルが得られた。このことから、補正が必要ではあるものの $^1\text{H} (^{13}\text{C},n) ^{13}\text{N}$ 反応断面積の導出が可能であると考えられる。

[謝辞]

今回の実験を行なうにあたり、放医研サイクロترون室員の方の協力が不可欠であった。また、実験時には AEC の方々による安定した運転のおかげでスムーズなデータ収集が行なえた。この場を借りて感謝する。

[参考文献]

- [1] Iwase, H., Niita, K. and Nakamura, T., “Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code”, J. Nucl. Sci. Tech., 39 (11), 1142–1151 (2002).
- [2] 早川陽祐, 平成23年度広島大学大学院工学研究科修士論文.
- [3] Honma, T., Hojo, S., Miyahara, N., Nemoto, K., Sato, Y., Suzuki, K. Takada, M. and Yamada, S., Improvements and applications at NIRS cyclotron facility, Cyclotrons and Their Applications 2001, Sixteenth International Conference, edited by F. Marti, CP600, (2001)

生体元素に対する陽子入射中性子エネルギースペクトルのテスト測定

TEST MEASUREMENT OF PROTON INDUCED NEUTRON ENERGY SPECTRA FROM BIO ELEMENTS

執行 信寛^A、高宮 大義^A、橋口 太郎^A、石橋 健二^A、鎌田 創^B、高田 真志^B
Nobuhiro. Shigyo^A), Masanori. Takamiya^A), Taro. Hashiguchi^A), Kenji. Ishibashi^A),
So. Kamada^B), Masashi. Takada^B)

^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 : 放射線医学総合研究所

概要

70MeV 陽子が炭素、窒素、酸素などの生体元素に照射された際に生成される中性子のエネルギースペクトルのテスト測定を行った。まず、ビーム中に 70MeV とは大幅にエネルギーの異なる陽子が混在しているか確認した。次に、中性子検出器に直径と長さが 5.04cm の NE213 液体有機シンチレータを使用し、中性子のエネルギーは飛行時間法により導出した。

1. 目的

陽子や重粒子によるがん治療では、ビーム粒子により生成される中性子の他にビーム粒子との反応で生成されるエネルギーの高い陽子などと生体物質との相互作用により生成される中性子量を把握することも患者に与える影響を考慮する際には重要となってくる。日本では、20 MeV以上の評価済み核データライブラリとしてJENDL-HE[1]が公開されている。炭素に対しては実験データが比較的多く存在するが、窒素や酸素に対しては実験データが非常に限られており、軽い元素に対する中性子エネルギースペクトルの検証が十分とはいえない状況である。

また、加速器などの遮蔽設計では、PHITS[2]等のモンテカルロ法によるシミュレーションコードが利用されるが、この中の数10MeV領域でのカスケード過程で放出される粒子の精度検証が十分にされているとは言えない。特に数MeV以下の低エネルギー中性子はRBEが比較的大きいため、精度よく検証することが望ましい。

本研究では、炭素、窒素、酸素などの生体を構成する元素からの特に低エネルギーの中性子スペクトルの本格的な測定の前段階として、テスト測定を行うことを目的とした。

2. 実験方法

実験は、サイクロトロン施設のC8ビームラインで実施した。通常はST2とその下流のワブラー電磁石の間はダクトが設置されているが、このダクトを取り外しST2のすぐ下流にビーム検出用の厚さ0.5mmのプラスチックシンチレータを設置した。高計数率のビーム測定に対応できるように、このシンチレータに接続されている光電子増倍管には高計数率時の波高の低下を防止する補助電源を接続した。

設定した入射エネルギーと極端にエネルギーの異なる粒子が混入する可能性があったため、サイクロトロン加速器のRF信号をトリガ信号として、プラスチックシンチレータの信号とRF信号との時間差を測定することで設定したエネルギーから極端に異なるエネルギーの陽子が混在しているか確認することとした。

次にST2のすぐ下流のプラスチックシンチレータのすぐ下流にターゲットを設置した。今回はテスト実験として実施したので、ターゲットには生体元素ではなく、密度が約3.9g/cm³、厚さ4mmの窒化アルミニウムを設置した。90度方向を測定する際にターゲットの実効厚さが大きくなるため、ターゲットをビーム軸に対して45度傾けて設置した。

中性子検出器には直径5.04cm、長さ5.04cmの円筒形のNE213有機液体シンチレータを設置した。この検出器は中性子・荷電粒子とガンマ線・電子に有感であるために発光パルスの全体と減衰成分を別々に保存し、測定終了後にこの情報から中性子のガンマ線を弁別した。NE213シンチレータの前面には陽子などの荷電粒子を別々するための厚さ2mmのNE102Aプラスチックシンチレータを配置した。ターゲットと中性子検出器の距離は約1.1mとし、測定角度は30°とした。ターゲットや検出器の配置の様子を図1に示す。

中性子検出器と荷電粒子弁別ならびにビーム検出用検出器の発光量とビーム検出器と中性子検出器間の信号パルスの時間差をCAMACモジュールでデジタル量に変換し、PCに保存して測定後にデータ解析を行った。

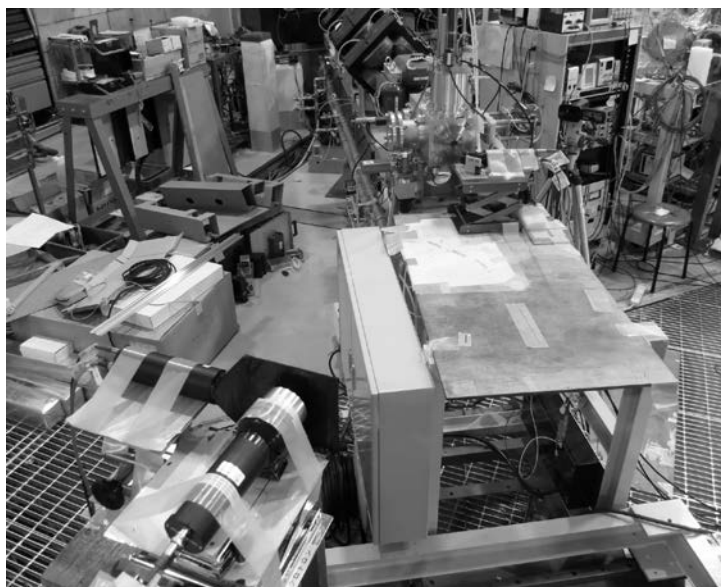


図1.ターゲットや検出棟の配置図

3. 実験結果

3-1. ビーム粒子のエネルギー分布

ST2の出口の近くに設置したプラスチックシンチレータからの信号と加速器のRF信号を使用したビーム中の粒子の時間分布を図2に示す。ここでは1chが0.125nsのTDCを使用し、1個の陽子のみが記録されている事象のみを表示している。この結果から、ビームパンチの半値幅は約1.7nsで、設定したエネルギー以外の陽子がほとんど混入していないことが確認された。

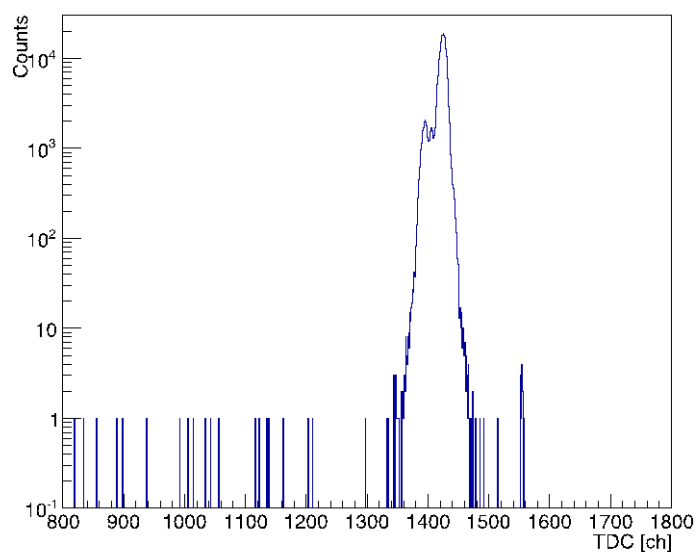


図2.ビームに含まれる粒子に対する飛行時間スペクトル

3-2. 中性子飛行時間スペクトル

データ解析では、飛行時間ゲート中に1個の入射陽子のみが検出される事象だけを抽出した。次に、中性子検出器の前面に置いたプラスチックシンチレータの発光量スペクトルから荷電粒子の事象を取り除いた。中性子検出器の全発光量と減衰部分による2次元プロットを作成し、ガンマ線・電子の事象を取り除いた。こうして得られた中性子事象に対して、ビーム検出器と中性子検出器間の粒子の飛行時間差から中性子の飛行時間スペクトルを算出した。その結果を図3に示す。

この結果から、約20MeV以上の中性子が測定されている事がわかった。飛行時間ゲートの設定が最適化されていなかったため、これ以下のエネルギーの中性子は測定できていなかった。

陽子の入射エネルギーが70MeVの時、サイクロトロンRF周波数が約19MHzであるため、測定できる飛行時間幅は約50ns以下である。数MeV以下の低エネルギーを飛行時間法により測定するため

には飛行距離を数 10cm 程度にする必要がある。しかし、この場合は、バックグラウンド中性子を測定するためにターゲットと中性子検出器の間に鉄などのシャドーバーを置くことができなくなるため、高エネルギー中性子と低エネルギー中性子を分割して測定することが適当であると考えられる。

飛行時間法で測定するためには、飛行時間ゲート中に入射陽子を 1 個になるようにビーム量を低下させるか、2 個以上の陽子が入射した事象を弁別する必要がある。そのため測定効率を上げるためにビーム量を増加させるのは現実的ではない。そこで、中性子検出器の全発光量スペクトルをアンフォールディングすることでエネルギースペクトルを導出する方法が考えられるが、飛行時間法よりも高精度な測定することが困難であることが考えられるため、今後測定方法を再検討する必要がある。

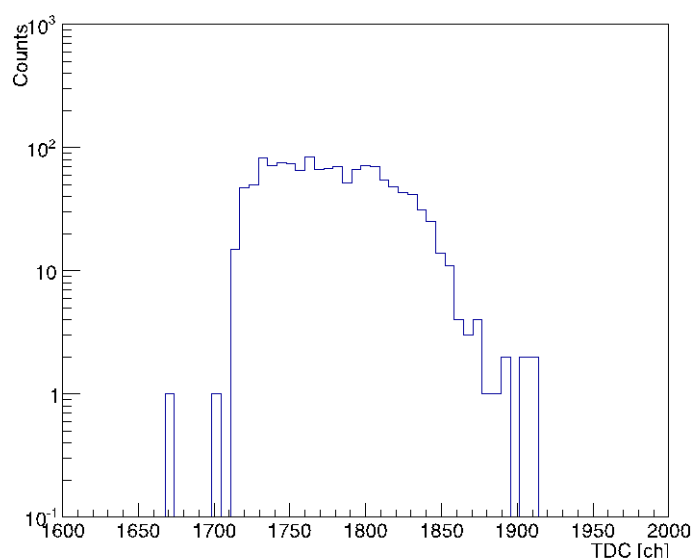


図 3.70MeV 陽子を窒化アルミニウムターゲットに照射した際に発生する中性子飛行時間スペクトル

4. まとめ

陽子入射による生体元素から生成される中性子のエネルギースペクトルを測定するためのテスト測定として、70MeV 陽子を窒化アルミニウムターゲットに入射した際に生成されるエネルギースペクトルを測定した。入射ビーム中には設定したエネルギー以外の陽子が混入していないことが確認された。テスト測定では、約 20MeV 以上のエネルギーの中性子を測定することができた。より低エネルギーの中性子を測定するためには、飛行距離を数 10cm 以下に短くするかアンフォールディング法を検討する必要があることがわかった。また、多くの角度を測定するためには実効的な測定効率を上げる必要があり直径 127mm、長さ 127mm のようなより大型の中性子検出器を使用することが望ましいことがわかった。

参考文献

- [1] Y.Watanabe, K.Kosako, S.Kunieda, S.Chiba, R.Fujimoto, H.Harada, M.Kawai, F.Maekawa, T.Murata, H.Nakashima, K.Niita, N.Shigyo, S.Shimakawa, N.Yamano, T.Fukahori: Status of JENDL High Energy File, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 59, 1040 - 1045 (2011).
- [2] K.Niita, N.Matsuda, Y.Iwamoto, H.Iwase, T.Sato, H.Nakashima, Y.Sakamoto, L. Sihver: PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23, JAEA-Data/Code 2010-022 (2010).

反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー評価方法の研究

STUDY ON ENERGY EVALUATION OF NEUTRONS BASED ON THE POSITION DISTRIBUTION OF RECOIL PROTONS

納富 昭弘^A、中西 大樹^B、高田 真志^C、鎌田 創^C
Akihiro Nohtomi^A, Daiki Nakanishi^B, Masashi Takada^C, So Kamada^C
^A: 九州大学大学院・医学研究院保健学部門
^B: 九州大学大学院・医学系学府保健学専攻
^C: 放射線医学総合研究所・緊急被ばく医療センター

概要

場所によって厚さの異なるポリエチレンコンバータをイメージングプレートの上に配置し、その上から中性子ビームを入射させた時に発生する反跳陽子位置分布をイメージングプレートで記録して、その分布が中性子エネルギー情報を反映しているかを調べた。今回は、 $17.2 \pm 1.1 \text{ MeV}$ の準単色中性子線を用いて測定を行った。使用したプリズム状のポリエチレンコンバータの端部で、反跳陽子に起因する特徴的な信号強度の増加が見られた。

1. 目的

申請者らは、イメージングプレートと水素含有コンバータを組み合わせ、中性子入射により生じた反跳陽子位置分布を観測することにより、中性子エネルギーをできるだけ簡便に評価する方法について検討している^{[1][2][3]}。特に、放射線加重係数の値が大きい数10keV～10数MeVの領域に関心を持っている。現在まで、²⁵²Cfや²⁴¹Am-Be線源、研究用原子炉、加速器中性子源等を用いて数MeV領域の中性子に対する応答を調査した。本実験では、これらよりもエネルギーの高い十数MeV領域の準単色中性子ビームを用いた測定を行い、本方法の適用可能なエネルギー範囲の検討を行うことを目的とする。今回使用予定の中性子ビームのエネルギーは $17.2 \pm 1.1 \text{ MeV}$ であり、本実験に適している。

2. 中性子エネルギー評価原理

数10keV～10数MeV領域における中性子の水素弾性散乱断面積の値は比較的大きく(～数barn)、かつエネルギーが増加するにつれてその値が単調に減少する。このことに着目し、当初は厚さの異なる水素含有コンバータを複数用いた場合に生成される反跳陽子収量の違いから、入射中性子のエネルギーに関する情報を得られないかと考えた(これに類するアプローチは既に多く存在する)。その際、厚さの異なる複数のコンバータの代りに、厚さが零から連続的に変化するコンバータに中性子を照射し、その底面に到達する反跳陽子数の位置分布を観測すれば、その「分布形状」に中性子エネルギー情報が反映される可能性があることに気がついた(図1)。ただし、カウンターテレスコープ法の場合と同様に中性子の入射方向は既知であるとし、その入射強度はコンバータの広がりの中で一様と仮定する必要がある。この場合、コンバータ底面上のある位置に到達する反跳陽子の収量は、弾性散乱断面積の中性子エネルギー依存性のみで単純に決まるのではなく、弾性散乱の発生位置(深さ)、そこから放出される反跳陽子の角度分布およびコンバータ中の陽子残飛程、コンバータ自身の幾何学的形状等を通じて中性子のエネルギーに複雑に関連していることが予想された。この分布は、モンテカルロ法により予測することができる。

この時のコンバータは、中性子を反跳陽子に変換すると同時に「中性子のエネルギー分布」を「反跳陽子の位置分布」に変換する働きをしている。これは、荷電粒子の磁気スペクトロメータに用いられる偏向電磁石に類似していると見なせる。図 2(a) に示すように、磁気スペクトロメータでは分光された後に焦点面(focal plane)を通過する粒子の位置は、その粒子の運動量に1対1に対応している。一方、今考えている「中性子スペクトロメータ」では、単色中性子に対応する固有の位置分布(すなわち応答関数)が、そのエネルギーの中性子の存在率に応じた量で足しあわされた結果としての陽子位置分布を、コンバータの底面(detection plane)で検出することになる[図 2(b)]。原理的には、これを unfolding することにより、中性子エネルギースペクトルを得ることができる。

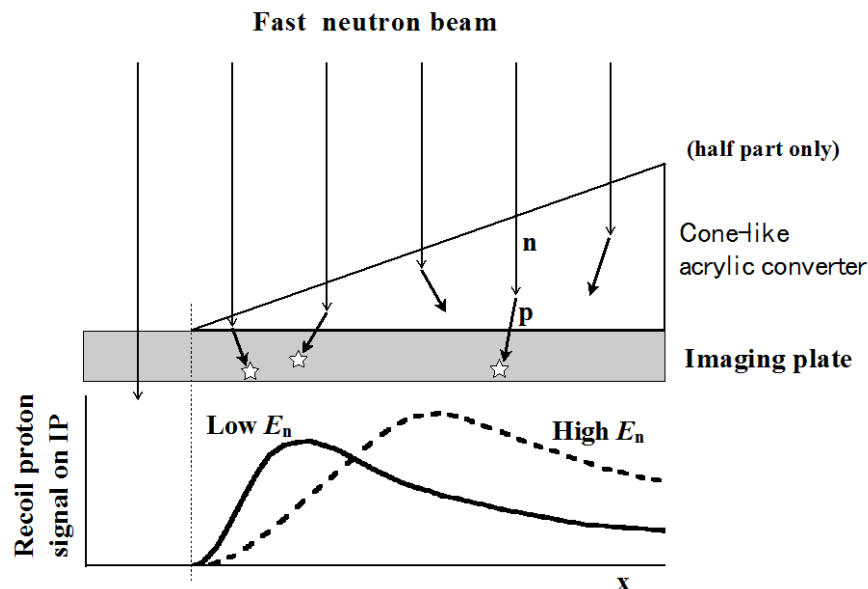


図1.中性子エネルギー評価の原理

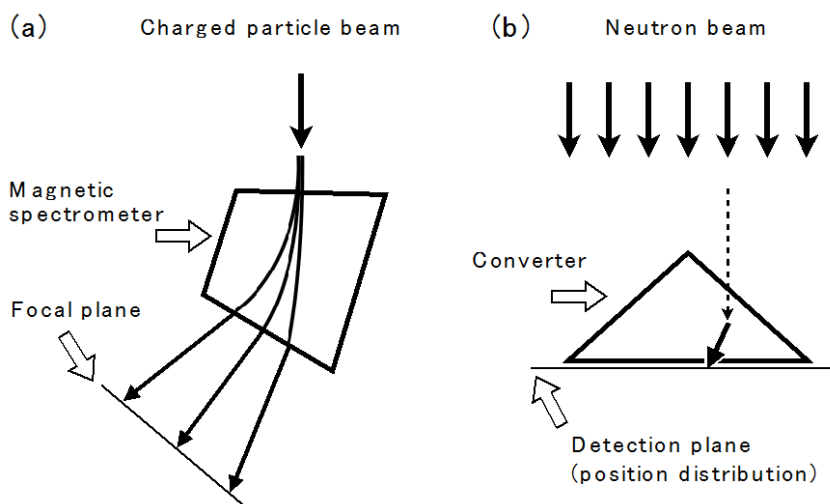
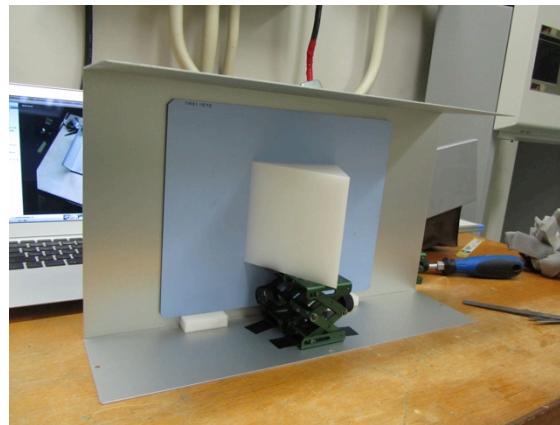


図2.本手法と磁気スペクトロメータとのアナロジー

3. 実験方法

実験は、放医研サイクロترون汎用照射室C6コースのLi (p, n) 数十MeV中性子場で行った。厚さ2.9 mmのLiターゲットに 20 MeVの陽子線を照射し、 17 ± 1 MeVの準単色中性子線を発生させた。使用した水素含有コンバータは、底面積が10cm×10cm、高さが9cmのプリズム状のポリエチレンである。これを、低エネルギーβ線用のイメージングプレートであるBAS-TRの表面に置き、全体をアルミの遮光箱の中に配置してから中性子線を照射した。イメージングプレートが、Liターゲットから3 m下流の位置になるようにした。また、γ線の混入を低減させるために、遮光箱の上流側(中性子が入射する側)に厚さ5cmの鉛ブロックを置いた。陽子ビームの平均電流は、約25nAであった。約1.9時間の照射後、IPリーダーFLA-5100でIPの画像を読み出した。照射の際の測定セットアップを図3に示す。



(Top View)

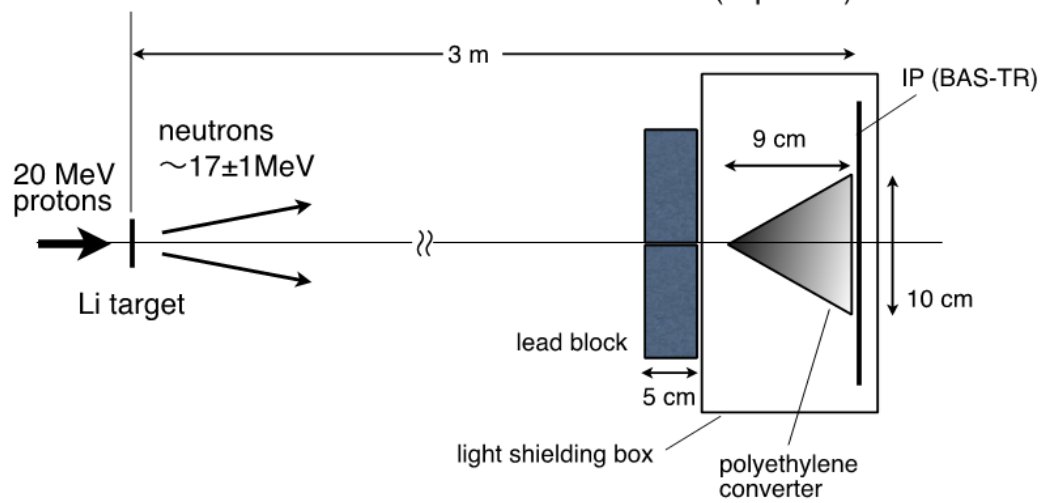


図3. 測定セットアップ

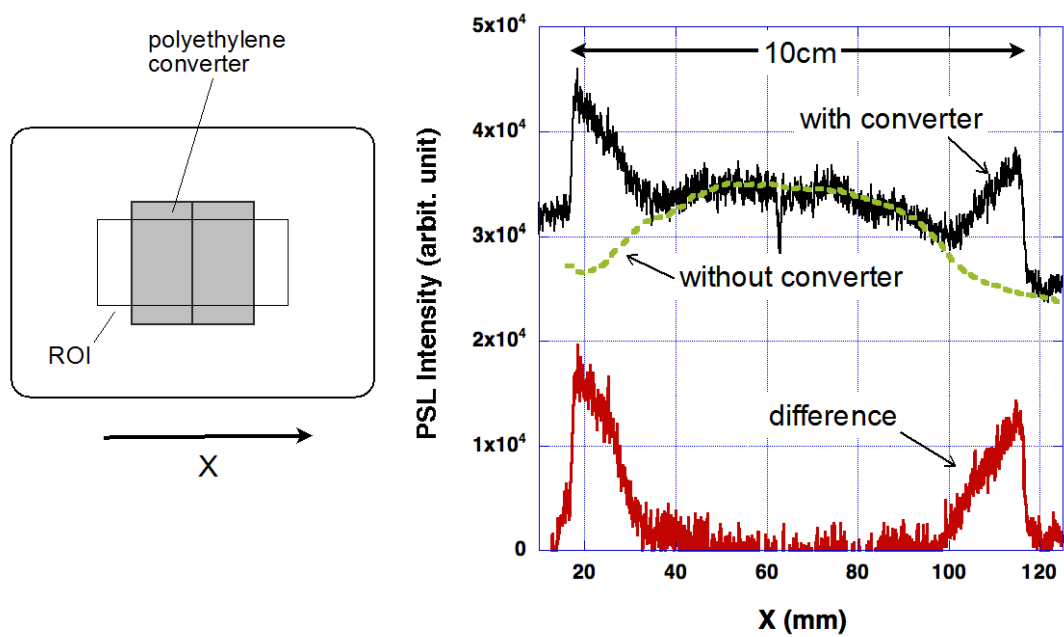


図4. 17MeV の準単色中性子線に対する反跳陽子信号分布

4. 結果と考察

図4に、IPで読み出したPSL強度のプロファイルを示す。ポリエチレンコンバータを置かない場合に測定される連続分布に相当する成分を差し引くことにより、ポリエチレンコンバータを原因として発生する信号成分(difference)を評価した。ポリエチレンの端部には、数 MeV 領域の中性子を用いて行った以前の測定と同様に、反跳陽子に起因する特徴的な信号強度の増加が確認された。 ^{252}Cf 線源を用いて測定された結果の一部を、比較のために図5に示す^[1]。 ^{252}Cf 線源による測定で用いたコンバータは、円錐状あるいはプリズム状の亚克力であった。

今回用いたポリエチレンのコンバータは、エネルギー17MeVの中性子に対しては厚すぎたと考えられる。コンバータの大きさを調節することにより、測定対象の中性子のエネルギーに適したコンバータを設計することができる。コンバータの設計計算にはPHITSなどの汎用モンテカルロコードが利用できると考えられるが、本実験の測定結果はそのような計算結果の検証に有用である。

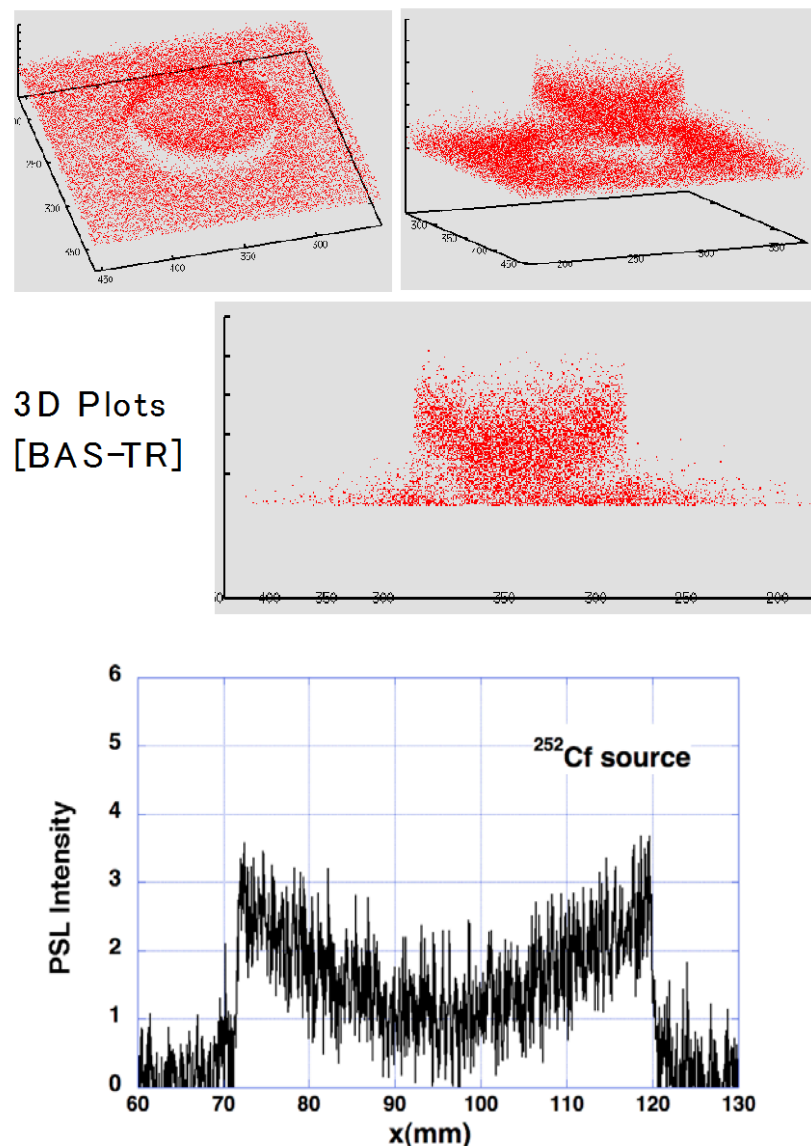


図5. ^{252}Cf 線源からの中性子線で測定された反跳陽子信号分布^[1]

謝辞

本実験を行うにあたり、杉浦彰則博士をはじめとする放医研サイクロترون室員の方々、およびAEC運転グループの方々にたいへんお世話になりました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] A. Nohotmi, N. Sugiura, T. Itoh, G. Wakabayashi, T. Sakae, T. Terunuma, K. Yabuta, M. Tamura, T. Fujibuchi, T. Takata, K. Kume: A method of neutron energy evaluation by using an imaging plate and cone-like acryl converters with a geometrical modulation concept, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A633 (2011) 36-45.
- [2] 納富昭弘、中性子のエネルギーを「形」で認識する、Japanese Journal of Medical Physics, Vol. 32, No. 3: (2013) 130-137.
- [3] D. Nakanishi, A. Nohotmi, R. Tanaka, G. Wakabayashi: A Method of Neutron-Energy Evaluation based on the Position Distribution of Recoil Protons, Progress in Nuclear Science and Technology (already accepted and to be published in 2013).

5. 粒子線検出器の開発

宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

Development of Detectors for Charged Particles in Space Radiations

内堀幸夫^A、北村尚^A、小平聡^A、小林進吾^A

Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Satoshi Kodaira, Singo Kobayashi

^A：放射線医学総合研究所 研究基盤センター 放射線計測技術開発課

^{A)} Radiation Measurement Research Section, Research Development and Support Center,
National Institute of Radiological Sciences

概要

放射線医学総合研究所のサイクロトロンからの陽子線ビームを利用して、各国宇宙関連機関が所有する宇宙放射線線量計の相互比較および校正実験プロジェクトを進めている。本プロジェクトでは校正場の作成もまた重要なテーマで、今年度については、サイクロトロンのC-8コースでの放射線場の評価を行うための機器の開発と性能評価を行った。第一に、ビームのレンジ測定用およびレンジ調整用のバイナリフィルターの水等価厚の測定を陽子 80MeV のビームで行ない、PMMA（アクリル樹脂）でできた各フィルターの水等価厚が実厚に比べて 1.16 倍になっていることを確認した。

1. 目的

各国宇宙機関等が使用している宇宙放射線線量計は、主として、地上における放射線環境において使用されることを念頭に開発され、十分に宇宙環境に対応したものでもなく、よって、ガンマ線等の線源により校正され、利用されてきた。また、相互には線量評価結果を十分に比較されておらず、宇宙環境における線量評価の相違に対して、十分な情報がなかった。そこで、放医研のHIMACを利用して、宇宙環境において、線量当量への寄与が大きく、十分に校正されていなかった重粒子線を中心に比較・校正実験を実施するICCHIBANプロジェクトが2002年から開始された。HIMACのみならず、HIMACでは出せないビームを照射できる世界各地の加速器も利用した約5年間の研究の結果、各線量計について、かなり理解が進んだ。しかしながら、2004年から開始された、宇宙環境における相互比較実験（国際宇宙ステーションロシアサービスモジュールにおける）において、大きな相違が見られるケースがあった。これは、主として、ルミネッセンス線量計の低LET領域における感度の上昇（あるいは低下）が十分に理解されていないことが理由と考えられる。ルミネッセンス線量計には、Super Linearity（高LET領域において感度が下がる現象）が良く知られ、ICCHIBANプロジェクトの中でも、その理解に力が注がれた。しかし、1~10 keV/ μ mの領域におけるデータ点が十分ではなく、さらなる照射実験の必要性が、国際ワークショップにおいて推奨された。

その様な要求から、放医研大型サイクロトロンのC-8コースに注目し、平成21年度から低LET領域の標準照射場として構築を開始した。平成23年度までに照射線量の制御系の開発、また、30, 40, 70, 80 MeVの陽子線と100 MeVの α 線（順にLETが約2, 1.5, 1, 0.9 keV/ μ m）について広範囲の平坦照射野の作成を行った[1,2]。

C-8コースには水等価物質としてPMMA(ポリメタクリル酸メチル樹脂：アクリル樹脂)製のバイナリフィルターをレンジシフターとして導入した[2]。PMMA板の水等価さの指標として、陽子線に対する水等価厚を、実際に陽子線ビームの水ファントム内での飛程を測定して求めた。本稿では、バイナリフィルターの水等価厚の測定結果と、その結果から導出したC-8コースでのビームの特徴（エネルギー、LET）について報告する。

2. バイナリフィルターの水等価厚測定

生物の放射線影響を調査するC-8コースに導入されたバイナリフィルターはPMMA(ポリメタクリル酸メチル)製で、水等価ファントムとして用いられて、生体中でのビーム場の模擬だけでなく、ビームエネルギーの吸収体としても使用されている。現在では主にビーム粒子の飛程を測定に使用しており、0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 mmの7枚のフィルターの組み合わせによって、厚さで0.5mmの精度でビーム粒子の飛程を得ることが可能であるが、PMMAのようなプラスチックはメーカーや製品によって物性が異なっている場合があり、水等価厚を測定しておく必要がある。

測定方法としては、水ファントムを用いてブラッグ曲線を測定し、各フィルターを挿入した場合と挿

入しない場合でブラッグ曲線の位置のずれを水等価厚とした。陽子線の飛程とバイナリフィルターの厚さと水ファントムの壁厚の関係から、陽子線の 80MeV ビームを測定に用いた。実験は 2012 年 6 月 9 日に行なった。実験及び解析の詳細に関しては文献[3]を参考していただきたい。

表 1 は 7 枚のフィルターについて用いた PMMA 樹脂の製品名と測定した水等価厚の値である。加工上の問題で、設計上の厚さと実際の厚さに違いがある可能性のある 0.5 及び 1 mm 厚の薄いフィルター以外のフィルターに関しては、水等価比(Water-Equivalent Ratio)が 1.16～1.17 となった。これらの値は他グループによる測定結果である 1.174 や[4]、モデル計算による値の 1.158 である[5]のと良く一致しており、十分信頼性があると考えられる。

表 1 バイナリフィルターの水等価厚

	製品名	設計上の厚さ(mm)	測定した水等価厚(mm)	比
BF1	クラレックス	0.5	0.56	1.12
BF2	カナセライト	1	1.18	1.18
BF3	アクリライト L	2	2.32	1.16
BF4	アクリライト L	4	4.67	1.17
BF5	アクリライト L	8	9.31	1.16
BF6	アクリライト S	16	18.64	1.17
BF7	アクリライト S	32	37.22	1.16

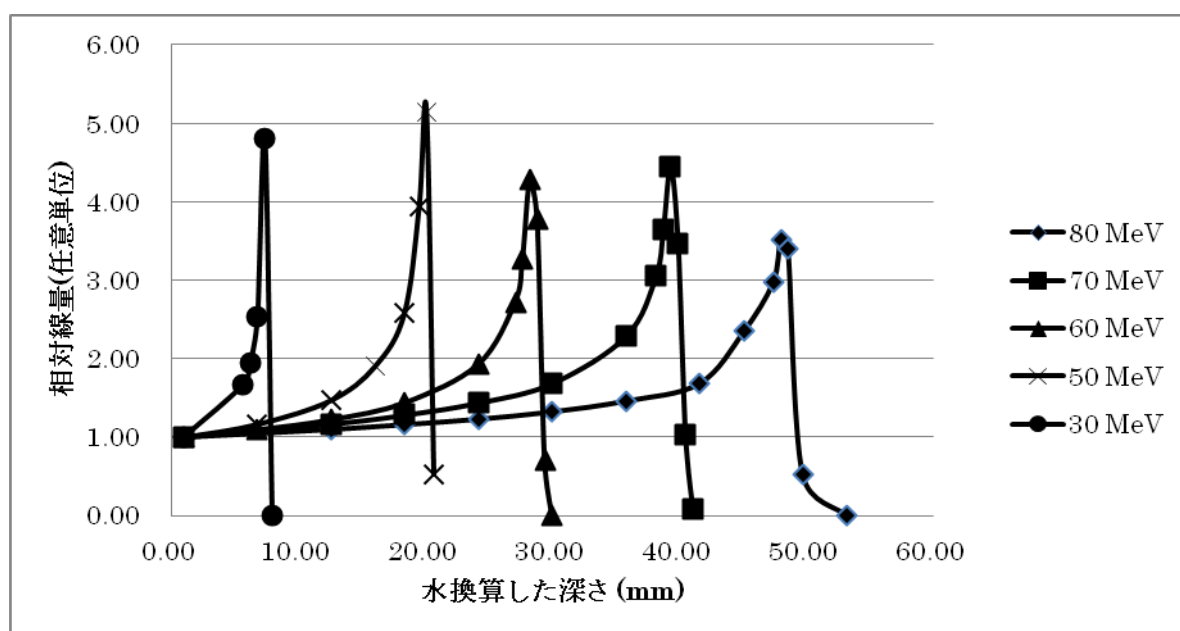


図 1 バイナリフィルターを使用して測定した、陽子ビームのブラッグ曲線。横軸は水換算した深さで、縦軸はバイナリフィルターが入っていないときの値で規格化した相対線量である。

3. バイナリフィルターによるブラッグ曲線

図 1 は、バイナリフィルター上流に設置したビームモニタ電離箱[6]と下流に設置した Markus 型電離箱の値をバイナリフィルターの厚さを変えながら測定し、それら二つの線量計の測定値の比をすることで求めた C-8 コースでの陽子線ビームのブラッグ曲線である。2013 年 5 月までに、陽子線については、30, 50, 60, 70, 80 MeV のビームに対して測定を行なった。これらの形状からビームの水中での飛程をもとめ、さらに、飛程の値から、C-8 コースの照射位置での平均的なビームエネルギーと LET を導出した。表 2 に計算結果をまとめた。但し、バイナリフィルターの最も薄いものは水等価厚さが 0.56 mm であるため、飛程の決定精度はその程度であり、エネルギーに換算して 0.5 MeV 程度の不確定性をもっている。測定されたビームのエネルギーが加速器で加速されたエネルギーより低いのは、C-8 コースでは散乱体やビーム窓などによってエネルギーが失われているためであり、加速器からのビームに対して数 MeV 程度のエネルギーの低下が起こっている。

表 2 陽子線ビームの照射場のエネルギーと LET の測定値

加速エネルギー (MeV)	水中での飛程 (mm)	エネルギー (MeV)	LET ₀ (keV/μm in water)	測定日
30	7.7	27.6	2.02	2011 年 2 月 4 日
50	20.4	47.7	1.30	2013 年 5 月 25 日
60	29.1	58.1	1.11	2013 年 4 月 17 日
70	40.1	69.3	0.97	2013 年 2 月 6 日
80	48.8	77.4	0.89	2012 年 1 月 25 日

4. まとめ

放医研サイクロトロン C-8 コースを、低 LET 粒子線を用いた線量計の標準校正場とするための整備の一環として、バイナリフィルターの水等価さの測定を行なった。また、その結果を元に、照射場でのビームのエネルギーと LET の評価を行った。

平成 24 年度には、これまで、蛍光板とビデオカメラで行っていた、ビームの横方向プロファイルの調整を、リアルタイムでプロファイルを数値化し、調整にフィードバック可能とするために、多チャンネル型電離箱 (Multi-Channel Ion Chamber) を開発し、実際にビームに照射して、ビームプロファイルの測定を行なう際のビーム強度やデータ収集速度などの最適化を開始した。データ取得系のペデスタルやリニアリティなど今後改善していく予定である。

最後に、本研究のために、ビームの提供をしていただき、実験の遂行に大きく協力していただいた、放医研・サイクロトロン運転課の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 内堀幸夫 他, “宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発”, 平成 21 年度サイクロトロン利用報告書, pp. 50-51, 2010.
- [2] 内堀幸夫 他, “宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発”, 平成 22 年度サイクロトロン利用報告書, pp. 43-45, 2011.
- [3] 北村尚, 「放医研サイクロトロン用バイナリフィルターの水等価厚測定」, 放射線医学総合研究所技術報告書, Vol.7, p26-34, 2012
- [4] P. de Vera, I. Abril and R. Garcia-Molina, “Water equivalent properties of materials commonly used in proton dosimetry”, *Appl. Radiat. Isotopes*, in press (2013)
- [5] R. Zhang and W. D. Newhauser, “Calculation of water equivalent thickness of materials of arbitrary density, elemental composition and thickness in proton beam irradiation”, *Phys. Med. Biol.*, **54**, 1384, 2009
- [6] 北村尚 他, “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, pp. 46-49, 2010.
- [7] J. Ziegler, “SRIM 2011”, <http://www.srim.org/SRIM/SRIM2011.htm>

6. 粒子線による損傷試験

6－1. 超伝導線材ならびにコイル構成材料の耐放射線に関する研究

6－2. 光学機器の耐放射線性能に関する研究

超伝導線材ならびにコイル構成材料の耐放射線に関する研究

Neutron Irradiation Experiments on HTS coil system

道辻 健太^A、狩野 開^A、有谷 友汰^A、斉藤 隼^A、石山 敦士^A、宮原 信幸^B
Kenta. Michitsuji^A), Hiraku. Karino^A), Yuta. Ariya^A), Jun. Saito^A), Atsushi. Ishiyama^A),

Nobuyuki. Miyahara^B)

^A：早稲田大学

^B：基盤技術センター

概要

1. 目的

YBCO 超伝導コイルを用いた小型・高効率・高性能の次世代超伝導サイクロトロンの開発・実現を目指し、その基礎研究を行った。次世代超伝導サイクロトロンの実運転において、YBCO 線材は磁場中で放射化されるため、磁場印加環境における超伝導線材の特性変化のデータは工学的・工業的に非常に重要であるといえる。そこで我々は市販の YBCO 線材について、外部磁場を印加して J_c - B - θ 特性を測定した。

2. 実験方法

試料線材の諸元をTable 1に示す。中性子照射は放医研サイクロトロン (AVF-930) を使い、14 MeV中性子を試料に照射した。その後、液体窒素浸漬冷却化 (77 K)、最大約0.19 Tの外部磁場印加状態で I_c 測定を行った。線材に対して平行磁場 (c軸と垂直) がかかる位置を基準 ($\theta=0$) として、ホールプローブの出力電圧を監視しながら、5° 刻みに回転させ I_c 測定を行った。実験装置の写真をFig.1に示す。磁場は永久磁石と鉄の磁気回路を構成し、印加する。実験時の治具の回転の様子をFig.2に示す。

Table 1 Specifications of HTS sample

	sample A	sample B
material	YBCO	YBCO
	AMSC	
manufacturer	344	Super Power
	Superconductor	
process	MOD/RABiTS	MOCVD/IBAD
length	100 [mm]	100 [mm]
width	4.4 [mm]	4.1 [mm]
thickness	0.22 [mm]	0.160~0.212 [mm]
I_c (nominal)	90 [A]	133 [A]

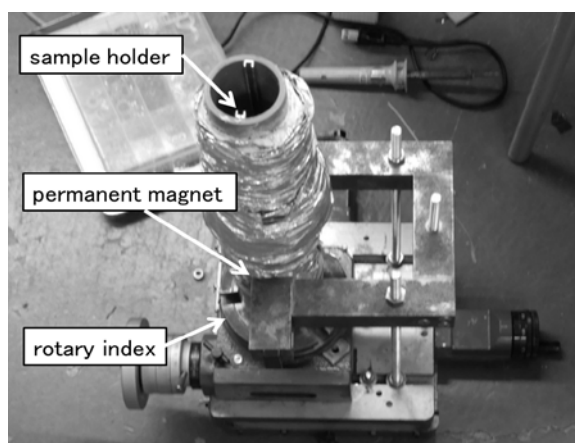


Fig.1 Experiment Apparatus

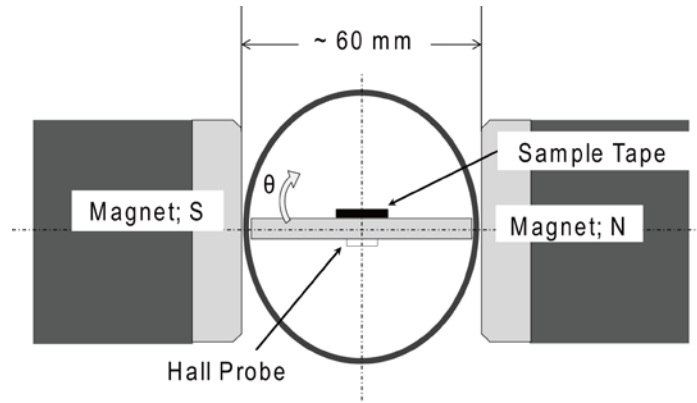


Fig.2 Schematic drawing of measurement of I_c - B - θ characteristics of HTS tapes

3. 実験結果

中性子照射および非照射の機械特性の sample A、sample B の測定結果をそれぞれ Fig.3、Fig.4 に示す。

照射量による位相ずれや臨界電流 I_c の変化, 線材の個体差を考慮する必要があり、単純な比較はできないが、今回の評価実験の結果からは、 c 軸と平行磁場($\theta=90^\circ$, 270°)付近で臨界電流密度 I_c が最小となり、 c 軸と垂直磁場($\theta=0^\circ$, 180°)付近で I_c が最大となる。照射・非照射による角度依存性に明確な変化は見られなかった。

また、sample B の結果が正弦波状でないのは人口ピンの影響であると考えられる。

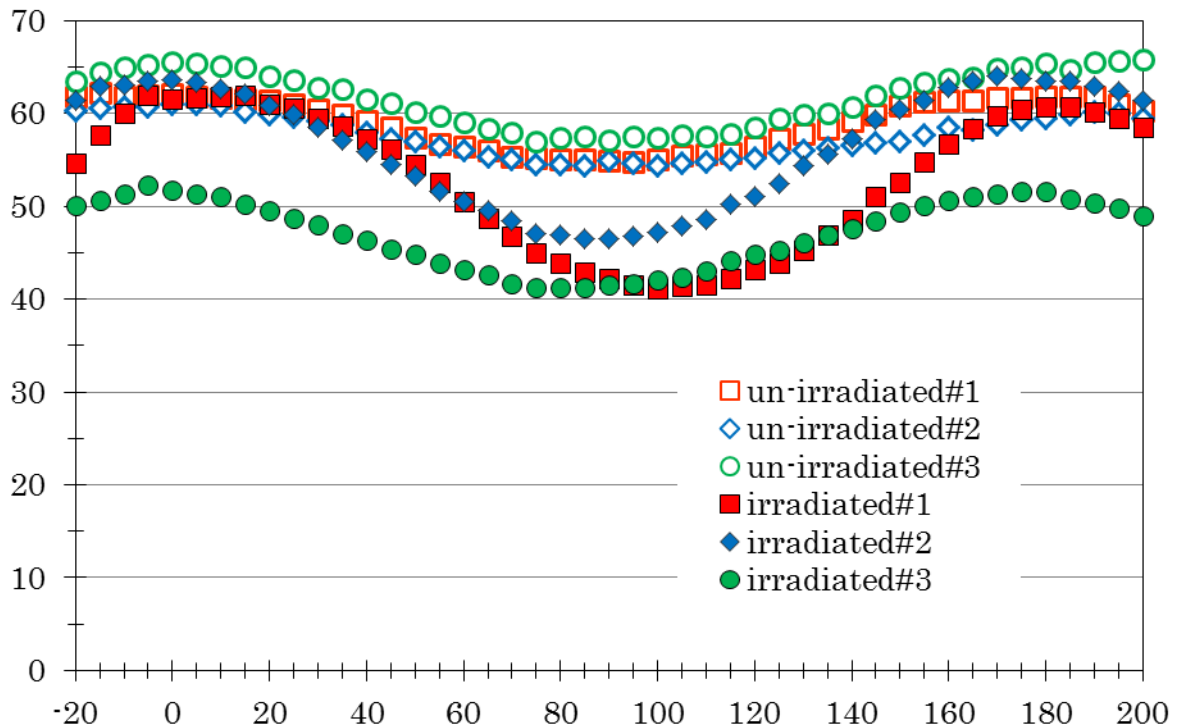


Fig.3 I_c - B - θ characteristics of Sample A

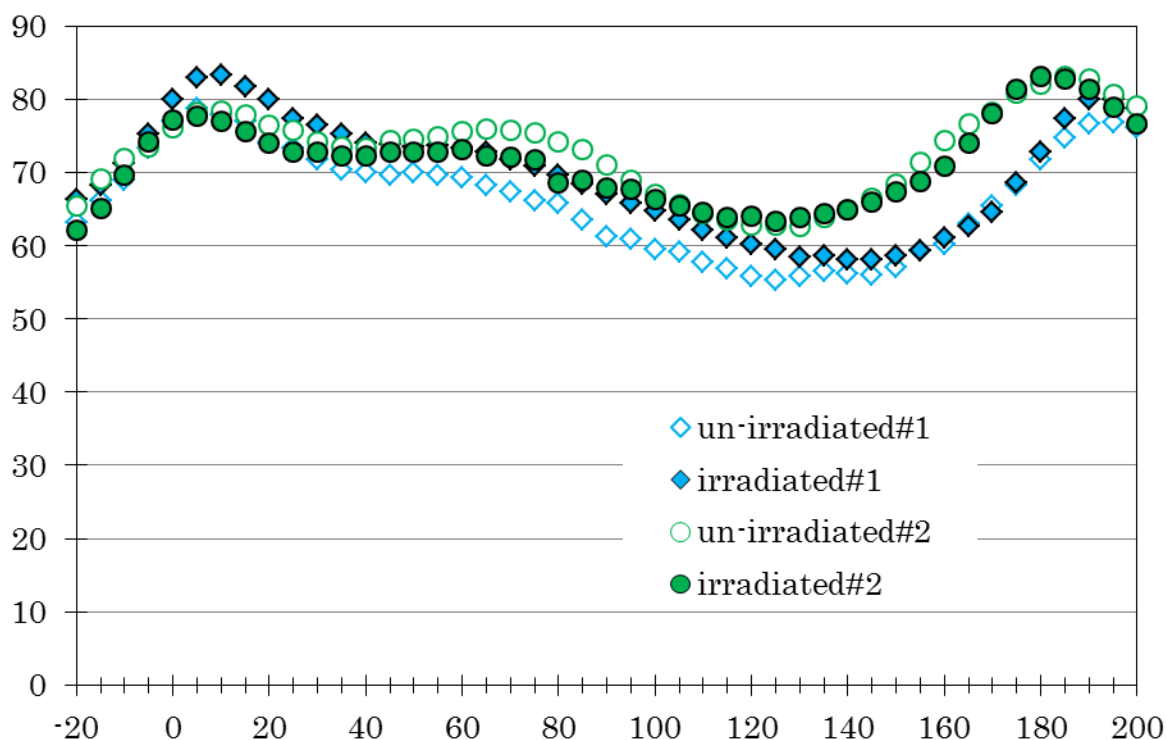


Fig.4 I_c - B - θ characteristics of Sample B

4. まとめ

中性子照射前後で高温超電導線材の低磁場中（約 0.19 mT）における I_c - B - θ 特性を測定した。中性子照射前後において、SampleA(AMSC 社)では、 I_c の角度依存性の変化が確認できた。角度全体にわたる 10%程度の I_c 低下が確認できた。SampleB(SuperPower 社)では、目立った I_c の変化は認められなかった。

参考文献

- [1] R.Fuger, M.Eisterer, F.Hengstberger, H.W.Weber, “Influence of neutron irradiation on high temperature superconducting coated conductors”, Physica C 468(2008), 1647-1651, 2008.
- [2] Akira Karasawa, Atsushi Ishiyama, Nobuyuki Miyahara, Hiroshi Ueda, Tao Wang, Shinjiro Yazaki, Mitsuhiro Fukuda, Kichiji Hatanaka, Shigeo Nagaya, Naoji Kashima, “Influence of Neutron Irradiation on Superconducting Characteristics of HTS Conductors”, Applied Superconductivity 2012, 2012.
- [3] K.Michitsuji, A. Ishiyama, A. Karasawa, H.Ueda and N.Miyahara; “Neutron Irradiation Experiments on HTSs; Mechanical Properties”, ICEC24-ICMC2012, 17P-P06-08,2011.
- [4] 道辻 健太, 狩野 開, 柄澤 彰良, 矢崎 真二郎, 王 旭東, 石山 敦士, 植田 浩史, 宮原 信幸; “次世代超電導サイクロトロンの開発：高温超電導線材の中性子照射特性（超電導特性）”, 第 86 回秋季低温工学・超電導学会, Vol.86, p187, 2012.

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 A)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 の厚さのシールドの条件下で 1 k rad (電子では 30k rad) 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た。

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、主にレーザー結晶等のレーザー関連部品の試験を行う。

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(空気シャワーの窒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

今回、照射したサンプルは、次である。

- 1) レーザー発生用 レーザーダイオード

- ① Quantel 社製 LD
- ② Coherent 社製 LD
- ③ Northrop Grumman 社製 LD

2) 波長変換用 非線形光学結晶

- ・BaB₂O₄結晶(BBO)
- ・周期分極反転定比組成ニオブ酸リチウム結晶(PPSLT)

次に各項目の実験結果を示す。

1) レーザーダイオード(大気及び雲モニタ用レーザー部品)

我々は JEM-EUSO 望遠鏡校正のために、大気及び雲頂高度測定のための LIDAR (Light Detection and Ranging、Laser Imaging Detection and Ranging)を開発している。LIDAR に用いる 355nm レーザー光源の更なる高効率・小型化と、長期間での安定性向上のためには、レーザー発生のための、励起源となるレーザーダイオード(LD)の放射線耐性は大変重要である。今回、同等仕様を有する 3 種類の LD について、照射前・照射後の入出力特性を測定した。

・メーカー

- ① Quantel 社製 LD
- ② Coherent 社製 LD
- ③ Northrop Grumman 社製

・出力:200W(QCW)

・数量:各 2 個

上記 LD に15krad 及び 30krad の陽子線を照射した。

その結果、いずれの LD においても、陽子線照射による出力の低下は認められなかった。

2) 結晶(大気及び雲モニタ用レーザー部品)

我々は JEM-EUSO 望遠鏡校正のために、大気及び雲頂高度測定のための LIDAR を開発している。LIDAR に用いる 355nm レーザー光源の更なる高効率・小型化およびパルス動作の長期間での安定性向上のためには、可視～紫外光発生のための非線形光学素子の放射線耐性は大変重要である。今回、非線形光学結晶のうち特に可視～紫外領域での波長変換効率が大きい BBO、PPSLT について、ISS 軌道上での利用を想定し、放射線耐性の測定を行った。

①BBO 結晶

サイズ:径 3 x 3mm 長さ 5mm

表面加工:レーザーグレード研磨+両面反射防止膜@1064/532/355nm

数量:2 個

①PPSLT 結晶

サイズ:径 3 x 3mm 長さ 10mm

分極周期:30 ミクロン

表面加工:レーザーグレード研磨

数量:2 個

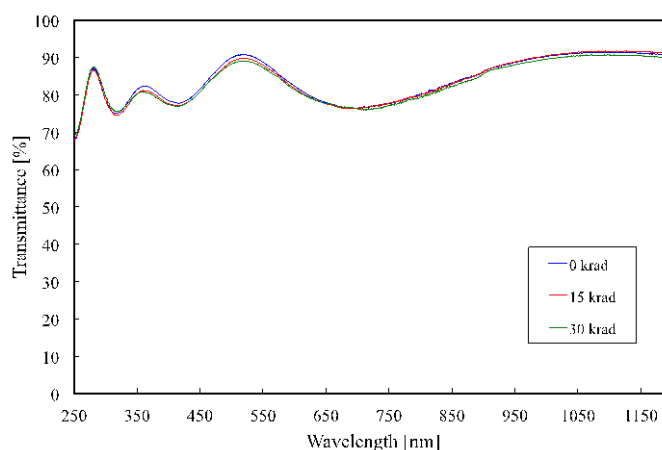


図1)BBO 結晶の吸収スペクトル

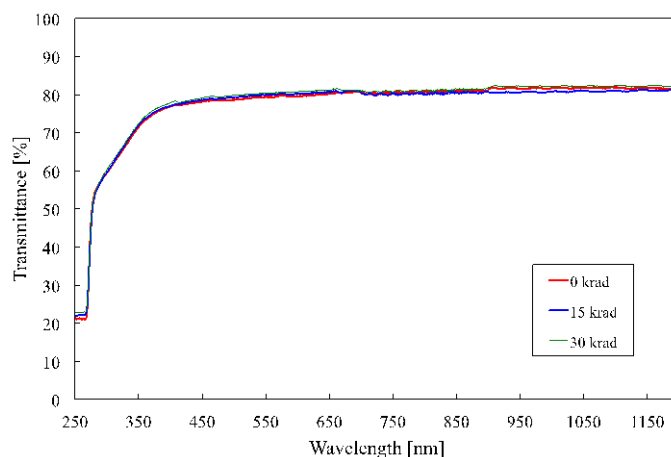


図2)PPSLT 結晶の吸収スペクトル

実験では、BBO 結晶および PPSLT 結晶サンプルに 15krad 及び 30krad の照射を行い、照射透過率の変化を確認した。透過率の測定には、分光光度計 (Shimadzu UVPC3600) を使用した。図 1 に BBO 結晶の照射前・照射後の透過スペクトルを示す。紫外から、レーザー発振波長 (基本波) である $1\mu\text{m}$ 帯までの幅広い波長領域において、照射前後の結晶の吸収スペクトルに全く変化は見られなかった。

また、PPSLT 結晶の照射前後の透過スペクトルを図 2 に示す。BBO と同様に、紫外から、レーザー発振波長 (基本波) である $1\mu\text{m}$ 帯までの幅広い波長領域において、照射前後の結晶の吸収スペクトルに全く変化は見られなかった。

この PPSLT は、分極の反転周期が、波長変換効率に大きく影響を及ぼすため、陽子線照射による分極の変化がないかどうか、AFM トポグラフおよびピエゾ焦点フォースマイクロスコープ (PFM) を用いて、陽子線照射後の結晶を観察した。図 3 に観察結果の一例を示す。観察の結果、30krad までの陽子線照射でも、分極の消失・乱れなどは見つからなかった。

以上の結果により、紫外線発生用非線形光学結晶である BBO および PPSLT 結晶は ISS 環境での使用に問題ない放射線耐性を有することが確かめられた。

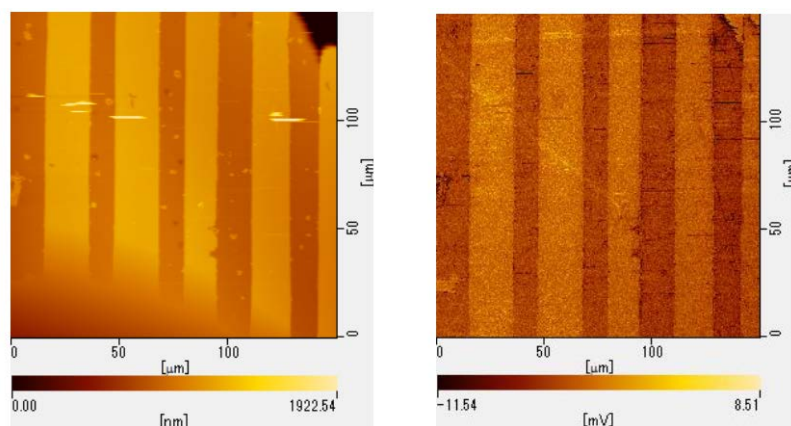


図3)PPSLT 結晶の分極の様子 (左:AFM トポグラフィイメージ、右:PFM ドメインイメージ)

3. まとめ

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、ISS 曝露環境において、10 年間の陽子線量は、Al 1mm の厚さのシールドの条件で 1 k rad となる。レーザー励起用 LD 及び非線形光学結晶の試験を行い、JEM-EUSO 用として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] “The JEM-EUSO mission,” Y.Takahashi et al., New Journal of Physics, 11, p-065009 (2009)

7. 生物研究

7-1. 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

7-2. 細胞培養容器 OptiCell を用いた 70MeV 陽子線の
水中における深さ方向の変化による生物効果の測定

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、尾崎匡邦^A、山下慶^A、李恵子^A、幸田華奈^A、金子由美子^A、松本孔貴^A、鵜澤
玲子^A、北村尚^B、内堀幸夫^B、古澤佳也^A

Ryoichi Hirayama^{A)}, Masakuni Ozaki^{A)}, Kei Yamashita^{A)}, Hui Li^{A)}, Kana Koda^{A)},
Yumiko Kaneko^{A)}, Yoshitaka Matsumoto^{A)}, Akiko Uzawa^{A)}, Hisashi Kitamura^{B)},
Yukio Uchihori^{B)}, and Yoshiya Furusawa^{A)}

^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

サイクロトロンから供給された 70 MeV/n 陽子線を用いて、CHO 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 CHO 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 細胞を照射 24 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, 0.3, 0.5, 1 M）、陽子線（70 MeV/n）を CHO 細胞に照射した。照射線量は 6, 8, 10 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[1-3]。

3. 実験結果

3-1. 細胞生存率

CHO 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。

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～79%（1/切片×100%）と推定した。

4. まとめ

CHO 細胞を大気下で陽子線照射した場合、細胞致死の約 79% は OH ラジカル由来の間接作用であることがわかった。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。

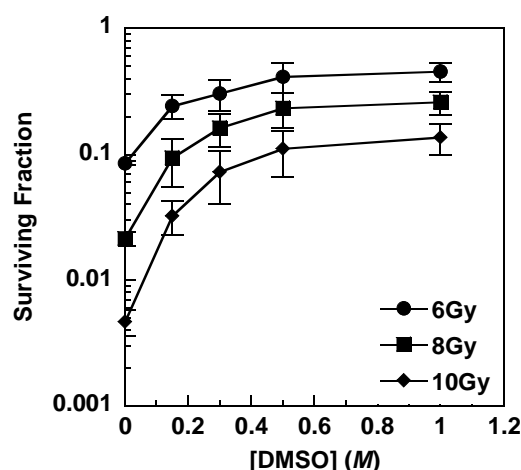


図 1 各 DMSO 濃度における CHO 細胞の生存率

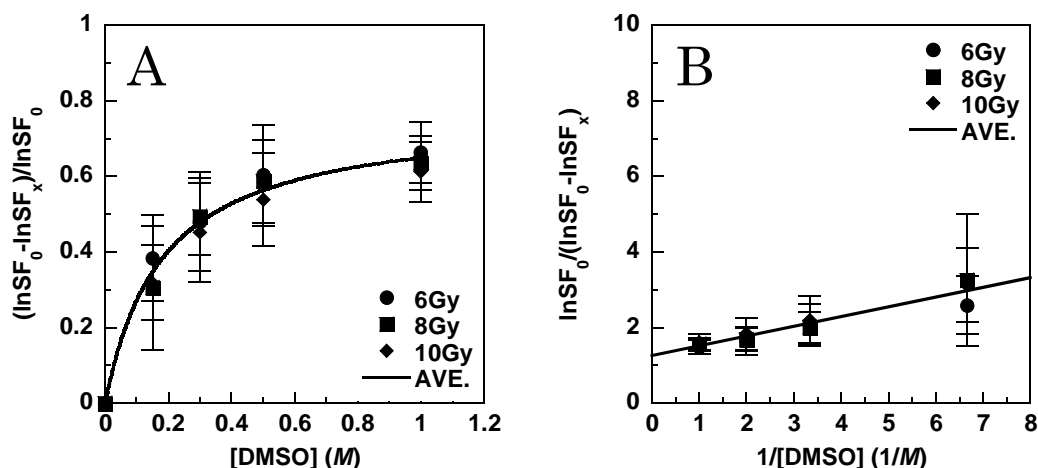


図2 間接作用の推定 細胞保護率の DMSO 濃度依存性 (A)。両逆数プロット法による直線回帰 (B)。

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

細胞培養容器 OptiCell を用いた 70MeV 陽子線の 水中における深さ方向の変化による生物効果の測定

Biological effectiveness of 70MeV proton track using OptiCell cell culture system.

Stefan Genet^a, 前田淳子^a, Chuck Yurkon^a, 藤井義大^{b,c,d}, 藤沢寛^{b,c}, Ashley Romero^a,
Paula Genik^a, 北村尚^c, 藤森亮^c, 上坂充^b, 加藤宝光^a
Stefan Genet^a, Junko Maeda^a, Chuck Yurkon^a, Yoshihiro Fujii^{b,c,d}, Hiroshi Fujisawa^{b,c}, Ashley
Romero^a, Paula Genik^a, 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

概要

Background: While the pace of commissioning of new charged particle radiation therapy facilities is accelerating world wide, biological data pertaining to chordomas, theoretically and clinically optimally suited targets for particle radiotherapy, are still lacking. In spite of the numerous clinical reports of successful treatment of these malignancies with this modality, the characterization of this malignancy remains hampered by its characteristic slow cell growth, particularly in vitro.

Methods: Cellular lethality of U-CH1-N cells in response to different qualities of radiation was compared with immediate plating after radiation or as previously reported using the multilayered OptiCell™ system. The OptiCell™ system was used to evaluate cellular lethality over a broad dose-depth deposition range of particle radiation to anatomically mimic the clinical setting. Cells were irradiated with either 290 MeV/n accelerated carbon ions or 70 MeV accelerated protons and photons and evaluated through colony formation assays at a single position or at each depth, depending on the system.

Results: There was a cell killing of approximately 20–40% for all radiation qualities in the OptiCell™ system in which chordoma cells are herein described as more radiation sensitive than regular colony formation assay. The relative biological effectiveness values were, however, similar in both in vitro systems for any given radiation quality. Relative biological effectiveness values of proton was 0.89, of 13–20 keV/μm carbon ions was 0.85, of 20–30 keV/μm carbon ions was 1.27, and >30 keV/μm carbon ions was 1.69. Carbon-ions killed cells depending on both the dose and the LET, while protons depended on the dose alone in the condition of our study. This is the first report and characterization of a direct comparison between the effects of charged particle carbon ions versus protons for a chordoma cell line in vitro. Our results support a potentially superior therapeutic value of carbon particle irradiation in chordoma patients.

Conclusion: Carbon ion therapy may have an advantage for chordoma radiotherapy because of higher cell-killing effect with high LET doses from biological observation in this study.

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、その飛程の全てを網羅する細胞照射容器として OptiCell を使用した。本年度は粒子線治療をよく行われる脊索腫の細胞を用いた。

2. 実験材料と方法

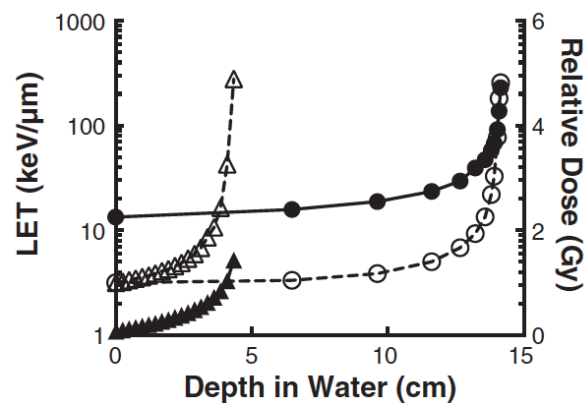
A) Cell Culture Condition

The human chordoma cell line U-CH1 was kindly supplied by the Chordoma Foundation (Greensboro, NC, USA). The U-CH1-N cells used in this study are a subpopulation derived from the original U-CH1 chordoma cells at National Institute of Radiological Sciences (NIRS) [16]. Cells were grown in α -MEM (Invitrogen, Carlsbad, CA, USA) supplemented with 10% (v/v) fetal bovine serum (Sigma, Japan) and 1% (v/v) antibiotics and antimycotic (Invitrogen, Carlsbad, CA, USA) and they were maintained in a tissue culture incubator at 37°C in a 100% humidified atmosphere of 5% CO₂ in air.

B) Radiation Condition

Hadron irradiations were conducted at the NIRS in Chiba, Japan. Carbon ions were accelerated to 290 MeV/n using the Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) and protons were accelerated to 70 MeV using the NIRS-930 cyclotron delivery port in C-8. Dose rates for carbon ions and protons were set at 1 Gy/min. Monoenergetic 290 MeV/n carbon ions have a LET value of 13 keV/ μ m on entrance. Monoenergetic 70 MeV protons have a LET value of 1 keV/ μ m on entrance. Maximum doses of carbon ions and protons were delivered at depths of 14 and 4 cm in water, respectively (Figure 1) [21]. X-ray irradiations were performed using a TITAN irradiator at 200 kVp, 20 mA and 0.5 cm aluminum and copper filters (Shimadzu, Japan), at a dose rate of 1 Gy/min. Gamma-ray irradiations were carried out at a dose rate of 2.5 Gy/min at Colorado State University (Fort Collins, CO, USA) using a 6,000 Ci (nominal activity) $^{137}\text{Cesium}$ sealed source [Model Mark I-68A (SS0056) J.L. Shepherd, San Fernando, CA, USA]. Irradiations were carried out at room temperature.

Figure 1 Dose and LET at each depth in water. Open circles represent relative dose of proton (70 MeV) compared to entrance, and closed circles represent LET spectrum of proton. Open triangles represent relative dose of carbon ions (290 MeV/n) compared to entrance, and triangles represent LET spectrum of carbon ions.



C) Cell Survival Assay

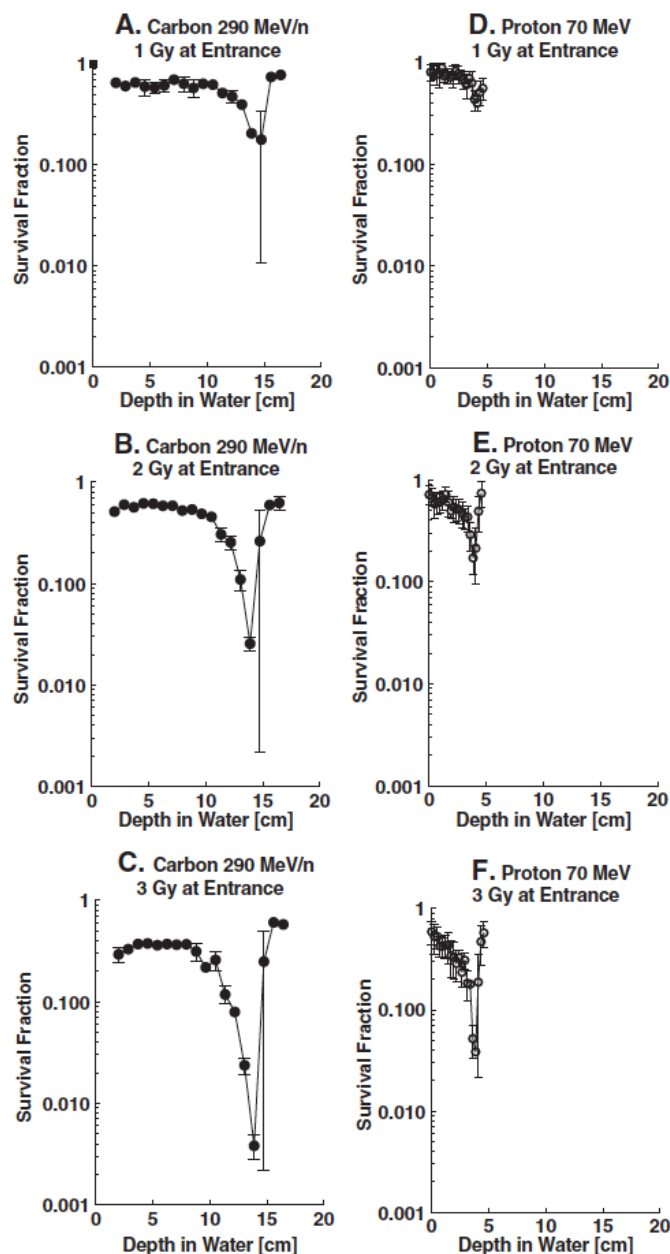
Cultured cells were trypsinized and re-suspended into complete growth medium. Once re-suspended, 10 ml of medium containing 8,000 cells was placed into each individual OptiCell™ cell culture vessel (Thermo Fisher Scientific, Pittsburgh, PA, USA) within 3 hours prior to irradiation. The chamber dimensions were 2°—65°—150 mm with a maximum 10 ml volume capacity. All samples were stacked in layers and arranged perpendicular to the beam paths. Immediately following radiation at doses of 1, 2 and 3 Gy (of exposure for the first chamber) with carbon and proton particle beams and of 2, 4, 6 and 8 Gy with gamma-rays, cells were incubated at 37°C in 100% humidified atmosphere of 5% CO₂ in air for 3 weeks. After this culture period, cells were washed with 0.9% NaCl, fixed in 100% ethanol and stained with 0.1% crystal violet. Colonies containing more than 50 cells were recorded as reproductively viable surviving cells. Cell survival assays were carried out in as many as four independent replicates.

3. 結果

A) Cell survival versus depth in water

Cell survival assays were conducted with our stacked OptiCell™ cell culture system, and cells irradiated with carbon ion and proton particles. Positions of OptiCell™ chambers at each depth were altered to the depths in water using the physical parameters determined in our previous report [21]. Bragg peaks of each carbon and proton beams were delivered at depths of 14 and 4 cm, respectively (Figure 1). Survival fractions were gradually decreased and minimized at the Bragg peaks. Survival fraction near the Bragg peaks for carbon showed lower survival fractions compared to those for protons (Figure 2A-F).

Figure 2 Cell survival curves at each depth in water. Cell survival assays were conducted with stacked OptiCell™ cell culture systems, irradiated with 290 MeV/n carbon ions: A-C and 70 MeV protons: D-F. Error bars indicate standard errors of the means from as many as four independent experiments.



B) Cell survival at low LET and at high LET

Cell survival in the OptiCell™ system for U-CH1-N cells was evaluated in response to three groups of LET values for carbon particles. LET values were assigned to 13–20, 20–30, and >30 keV/μm value ranges. Higher LETs killed more cells. Proton particles were considered to be of low LET value only. Depths in water were translated to radiation doses by referring to physical parameters as our previous report (Figure 1) [21]. The survival fractions that correspond to the doses were then plotted (Figure 3A-C). Cellular lethality caused by carbon ions was found to depend on both the dose and the LET, while in contrast, that caused by protons depended exclusively on the dose in the range of LETs in our study (1 to 10 keV/μm).

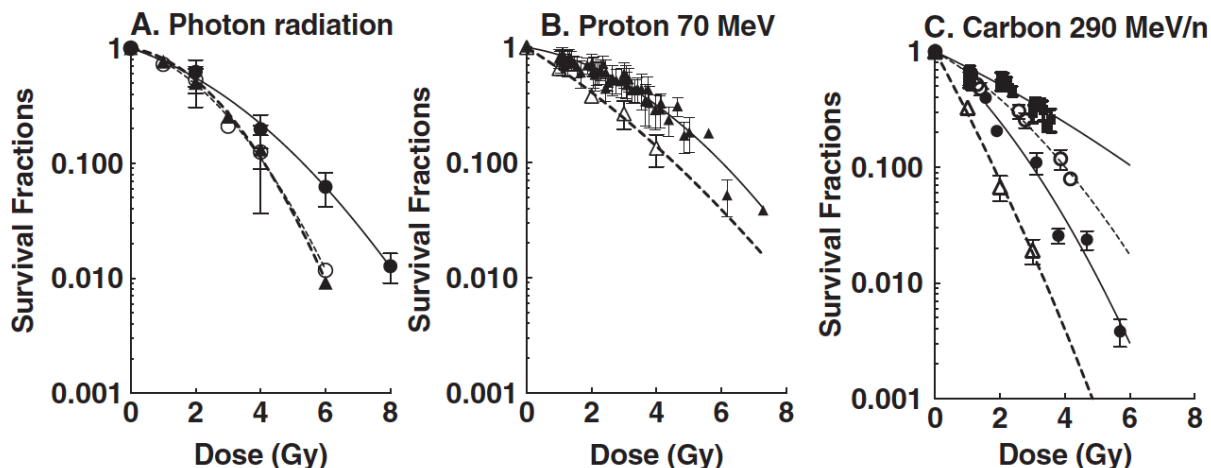


Figure 3 Dose response curves for proton and carbon ions. Survival fraction per dose obtained by OptiCell™ was calculated from Figure 1 and 2. Cell survival curves in standard cell culture dishes are also plotted. A. photon radiation, gamma-ray survival obtained by OptiCell™ was described by closed circles. Standard survival assay for x-ray was described by closed triangles and gamma-rays was described by open circles. B. proton, closed triangles represent OptiCell™ survival and open triangles represent standard survival. C. carbon ions, closed squares represent LET 13–20 keV/μm, open circles represent LET 20–30 keV/μm, closed circles represent LET >30 keV/μm obtained by the OptiCell™ system. Open triangles represent monoenergetic carbon ions LET 70 keV/μm. Error bars indicate standard errors of the means from as many as four independent experiments.

4. 考察

Our chordoma model describes a more biologically representative assessment of the true radiation responsiveness or resistance to varying radiation qualities (high versus low LET carbon relative to protons and photons) and doses with respect to charged particle beams at energies and at doses currently used in the clinic. Our data for a rare and difficult to treat chordoma tumor type indeed confirm that chordomas are exquisitely more responsive targets to carbon ion than to proton radiotherapy from an in vitro biological standpoint, principally in light of a unique dependency of carbon ion effects on both LET and dose on cellular lethality.

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

8. 研究成果一覽

研究成果一覧

1 & 2. サイクロトロン¹の運転実績と利用状況と改良・開発

<Proceedings等>

1. Satoru Hojo, Akinori Sugiura, Toshihiro Honma, Ken Katagiri, Akira Goto: OBSERVATION OF LONGITUDINAL SPACE CHARGE EFFECTS IN THE INJECTION BEAM LINE OF NIRS-930 CYCLOTRON, IPAC12 New Orleans, USA, MOPPD028, Contributions to the Proceedings 3rd 427-429.
2. V.L. Smirnov, S.B. Vorozhtsov, Akira Goto, Satoru Hojo, Toshihiro Honma, Ken Katagiri: QUANTITATIVE SIMULATION OF NIRS-930 CYCLOTRON, IPAC12, May 20-25 2012, New Orleans, USA, MOPPC069.
3. Satoru Hojo, Ken Katagiri, Akira Goto, Yuichi Takahashi, Toshihiro Honma: DEVELOPMENT OF PHASE PROBE FOR THE NIRS SMALL CYCLOTRON HM-18, IBIC12, Oct 1-4 2012, Tsukuba, Japan, MOPA07, Contributions to the Proceedings 3rd 292-294.

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 北條 悟、杉浦彰則、片桐 健、田代克人、後藤 彰、岡田高典、高橋勇一、中山竜二、神谷 隆、本間壽廣: 放医研サイクロトロン(NIRS-930、HM-18)の現状報告, 第9回日本加速器学会年会, 2012年8月8日~11日, 大阪府豊中市, WEPS008.
2. 北條 悟、片桐 健、後藤 彰、高橋勇一、本間壽廣: 放医研小型サイクロトロン(HM-18)用位相プローブの開発, 第9回日本加速器学会年会, 2012年8月8日~11日, 大阪府豊中市, WEPS029.
3. 片桐 健、永津弘太郎、峰岸克行、北條 悟、村松正幸、鈴木和年、本間壽廣、後藤 彰: ¹¹C イオン生成のための ¹¹CH₄ ガス高効率生成法の検討, 第9回日本加速器学会年会, 2012年8月8日~11日, 大阪府豊中市, THPS144

3. 平成24年度サイクロトロン¹の分子プローブの製造・開発への利用状況

<原著論文等>

1. Takayoshi Matsuda, Shozo Furumoto, Jun Yokoyama, Ming-Rong Zhang, Kazuhiko Yanai, Ren Iwata, Takanori Kigawa: Rapid biochemical synthesis of (¹¹C)-labeled single chain variable fragment antibody for immuno-PET by cell-free protein synthesis, Bioorganic & Medicinal Chemistry, 20-22, (2012-11) PP.6579-6582
2. Chiharu Asakawa, Masanao Ogawa, Masayuki Fujinaga, Katsushi Kumata, Lin Xie, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Utilization of [¹¹C]phosgene for radiosynthesis of N-(2-{3-[3,5-bis(trifluoromethyl)] phenyl}[¹¹C]ure2;ido)ethylglycyrhetinamide, an inhibitory agent for proteasome and kinase in tumors, Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, 22-11, (2012-6) pp.3594-3597
3. Lin Xie, Joji Yui, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Katsushi Kumata, Hidekatsu Wakizaka, Yuichirou Yoshida*, Masayuki Fujinaga, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Translocator protein (18kDa), a potential molecular imaging biomarker for non-invasively distinguishing non-alcoholic fatty liver disease, Journal of Hepatology, 57-5, (2012-11) pp.1076-1082
4. Yuuki Takada, Masayuki Hanyu, Koutarou Nagatsu, Toshimitsu Fukumura: Radiolabeling of aromatic

compounds using K[*Cl]Cl and OXONE, *Journal of Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals*, 55-10 (2012-8) pp.383-386

5. Kazutaka Hayashi, Kenji Furutsuka, Takehito Ito, Masatoshi Mutou, Hatsumi Aki, Toshimitsu Fukumura, Kazutoshi Suzuki: Fully automated synthesis and purification of 4-(2'-methoxyphenyl)-1-[2'-(N-2"-pyridinyl)- p-[18F]fluorobenzamido]ethylpiperazine, *Journal of Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals*, 55-3, (2012-3) pp.120-124
6. Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Akiko Hatori, Lin Xie, Kazunori Kawamura, Chiharu Asakawa, Katsushi Kumata, Yuichiro Yoshida, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Synthesis and Evaluation of Novel Radioligands for Positron Emission Tomography Imaging of Metabotropic Glutamate Receptor Subtype 1 (mGluR1) in Rodent Brain, *Journal of Medicinal Chemistry*, 55-5 (2012-3) pp.2342-2352
7. Atsushi Wakai, Kaduki Tuchida, Toshimitsu Fukumura, Hidehiro Iida, Kazutoshi Suzuki: Determination of two-photon-excitation cross section for molecular isotope separation, *Journal of Molecular Spectroscopy*, 274 (2012-4) pp.14-21
8. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Kazunori Kawamura, Joji Yui, Akiko Hatori, Tomoyuki Ohya, Lin Xie, Hidekatsu Wakizaka, Yuichirou Yoshida, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: In Vivo Measurement of the Affinity and Density of Metabotropic Glutamate Receptor Subtype 1 in Rat Brain Using 18F-FITM in Small-Animal PET, *Journal of Nuclear Medicine*, 53-10 (2012-10) pp.1601-1607
9. Natsuko Kobayashi, Naoko Iwata, Takayuki Saito, Hisashi Suzuki, Ren Iwata, Keitaro Tanoi, Tomoko Nakanishi: Application of 28Mg for Characterization of Mg Uptake in Rice Seedling under Different pH Conditions, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, (2012-8)
10. Keitaro Tanoi, Natsuko Kobayashi, Takayuki Saito, Naoko Iwata, Atsushi Hirose, Yoshimi Ohmae, Ren Iwata, Hisashi Suzuki, Tomoko Nakanishi: Application of 28Mg to the kinetic study of Mg uptake by rice plants, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 296-2 (2012-9) pp.749-751
11. Tomoyuki Ohya, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura, Kiyoshi Fukushi, Tatsuya Kikuchi, Toshiaki Irie: A method to predict the ratio of the tracer conversion rate to the tracer back-diffusion rate of an irreversible-type radiotracer in humans by preclinical evaluation, *Nuclear Medicine Communications*, 33-10 (2012-10) pp.1019-1023
12. Koutarou Nagatsu, Hisashi Suzuki, Masami Fukada, Katsuyuki Minegishi, Atsushi Tsuji, Toshimitsu Fukumura: An alumina ceramic target vessel for the remote production of metallic radioisotopes by in situ target dissolution., *Nuclear Medicine and Biology*, 39-8 (2012-11) pp.1281-1285
13. Akiko Hatori, Joji Yui, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Katsushi Kumata, Masayuki Fujinaga, Yuichirou Yoshida, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: PET Imaging of Lung Inflammation with [18F]FEDAC, a Radioligand for Translocator Protein (18 kDa), *PLoS ONE* (Online only:URL:<http://www.plosone.org>), 7-9 (2012-9) pp.1-8
14. Masayuki Fujinaga, Jun Maeda, Joji Yui, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Kazunori Kawamura, Katsushi Kumata, Yuichirou Yoshida, Yuji Nagai, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Characterization of 1- (2- [18F] fluoro-3-pyridyl) -4-(2-isopropyl-1-oxo-isoinoline-5-yl)-5-methyl-1H-1,2,3-triazole, a PET ligand for imaging the metabotropic glutamate receptor type 1 in rat and monkey brains, *Journal of Neurochemistry*, 121-1 (2012-4) pp.115~124

15. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Jun Maeda, Kazunori Kawamura, Joji Yui, Akiko Hatori, Yuichirou Yoshida, Yuji Nagai, Masaki Tokunaga, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Imaging for metabotropic glutamate receptor subtype 1 in rat and monkey brains using PET with [18F]FITM, European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 39-4 (2012-4) pp.632～641
16. Koichi Sato, Kiyoshi Fukushi, Hitoshi Shinoto, Hitoshi Shimada, Noriko Tanaka, Shigeki Hirano, Toshiaki Irie: A short-scan method for k(3) estimation with moderately reversible PET ligands: Application of irreversible model to early-phase PET data, NeuroImage 59-4, (2012-11) pp.3149～3158,

<学会及び研究会口頭発表等>

1. Maki Okada, Atsushi Tsuji, Tatsuya Kikuchi, Hidekatsu Wakizaka, Toshimitsu Okamura, Ming-Rong Zhang, Koichi Kato: In Vivo Imaging of Blood-brain Barrier Permeability with 2-Amino-[3-11C]isobutyric Acid by Positron Emission Tomography, 2012 World Molecular Imaging Congress, 2012-09-05～2012-09-08
2. Lin Xie, Joji Yui, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Katsushi Kumata, Hidekatsu Wakizaka, Yuichirou Yoshida, Masayuki Fujinaga, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Translocator Protein (18 kDa) is a Potential Biomarker for Molecular Imaging of Non-alcoholic Fatty Liver Disease, 2012 World Molecular Imaging Congress, 2012-09-05～2012-09-08
3. 小高 謙一、青木 伊知男、田所 裕之、森谷 純治、黒岩 大悟、舘野 馨、南野 徹、菊池 達矢、小室 一成、小畠 隆行、小林 欣夫、佐賀 恒夫、張 明榮：マンガン標識移植細胞追跡と心筋梗塞マウスの心機能評価法, 第 40 回日本磁気共鳴医学会大会, 2012-09-06～2012-09-08
4. Katsushi Kumata, Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Akiko Hatori, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of [11C]MMPIP as a PET ligand for metabotropic glutamate receptor subtype 7 in brain, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11～2012-10-13
5. Hisashi Suzuki, Koutarou Nagatsu, Masami Fukada, Katsuyuki Minegishi, Ming-Rong Zhang: Development of the target box for remote fabrication of a metal nuclide, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11～2012-10-13
6. Kazunori Kawamura, Makoto Takei, Satoshi Shiomi, Hiroki Hashimoto, Kenji Furutsuka, Nobuki Nengaki, Hisashi Suzuki, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura: バブルポイントレシオによる PET 用注射液でのフィルター完全性試験の規格値の検討, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11～2012-10-13
7. Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Yuichirou Yoshida, Nobuki Nengaki, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Development and evaluation of novel PET ligands using FITM derivatives for imaging of the metabotropic glutamate receptor type 1, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11～2012-10-13
8. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Akiko Hatori, Hidekatsu Wakizaka, Lin Xie, Ming-Rong Zhang: Validation study for noninvasive quantification of metabotropic glutamate receptor subtype 1 (mGluR1) using PET with [11C]ITDM, a novel radioligand for mGluR1, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11～2012-10-13
9. Ming-Rong Zhang, Masayuki Fujinaga, Chiharu Asakawa, Masanao Ogawa, Katsushi Kumata, Joji Yui, Kazunori Kawamura, Toshimitsu Fukumura: [11C]COCl₂ 及び[11C]CO₂ を利用した[11C]カルなメート骨格の標識合成, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11～2012-10-13
10. Akiko Hatori, Joji Yui, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Hidekatsu Wakizaka, Yuichirou Yoshida, Katsushi

Kumata, Ming-Rong Zhang: TSPO リガンド [18F]FEDAC を用いたラット肝線維化の PET イメージング, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11~2012-10-13

11. Koutarou Nagatsu, Hisashi Suzuki, Masami Fukada, Katsuyuki Minegishi, Sumitaka Hasegawa, Ming-Rong Zhang: Automated remote production of Astatine-211, a therapeutic alpha-emitting radionuclide, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11~2012-10-13
12. Masayuki Hanyu, Yuuki Takada, Hiroki Hashimoto, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura: RADIOLABELLING OF OLIGOPEPTIDES CONTAINING [1-11C]-1,2,3,4-TETRAHYDRO-6-1538;-CARBOLINE-3-CARBOXYLIC ACID VIA A PICTET-SPENGLER REACTION, 第 49 回ペプチド討論会, 2012-11-07~2012-11-09
13. Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Maki Okada, Hidekatsu Wakizaka, Joji Yui, Toshimitsu Fukumura: Development of a PET Probe for Imaging of Organic Anion Transporters, 2012 World Molecular Imaging Congress, 2012-09-05~2012-09-08
14. Joji Yui, Lin Xie, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Akiko Hatori, Hidekatsu Wakizaka, Yuichirou Yoshida: 代謝型グルタミン酸受容体 1 (mGluR1)PET リガンド[18F]FITM による悪性黒色腫イメージング, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11~2012-10-13
15. Hiroki Hashimoto, Kazunori Kawamura, Kenji Furutsuka, Takehito Ito, Toshimitsu Fukumura: カラムスイッチング法 HPLC による [11C]スルピリド代謝分析法の開発, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11~2012-10-13
16. Masami Fukada, Hisashi Suzuki: 62Zn/62Cu ジェネレーター製造装置の自動化, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11~2012-10-13
17. Lin Xie, Joji Yui, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Katsushi Kumata, Hidekatsu Wakizaka, Ming-Rong Zhang: [18F]FEDAC-PET による非アルコール性脂肪性肝疾患画像診断法の開発, 第 12 回放射線医薬品・画像診断薬研究会, 2012-12-15~2012-12-15
18. Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Maki Okada, Hidekatsu Wakizaka, Joji Yui, Toshimitsu Fukumura: 有機アニオン輸送体活性の定量測定を目的とした PET プローブの開発研究, 第 52 回日本核医学会学術総会, 2012-10-11~2012-10-13
19. Ming-Rong Zhang: Development of 18F-labeled PET ligands for imaging peripheral benzodiazepine receptor, Coordinated Research Project: CRP) "Development of 18F Radiopharmaceuticals (beyond 18F [FDG]) for use in Oncology and Neurosciences", 2012-06-04~2012-06-08
20. Maki Okada, Atsushi Tsuji, Tatsuya Kikuchi, Hidekatsu Wakizaka, Toshimitsu Okamura, Ming-Rong Zhang, Koichi Kato: In vivo PET imaging of BBB with 2-amino-[3-11C]isobutyric acid, 第 52 回日本核医学会学術総会,

4—2. 核破碎片生成二重微分断面積の測定

<Proceedings等>

1. 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).

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 佐波俊哉、萩原雅之、鎌田創、高田真志: 低エネルギー炭素入射によるフラグメント生成二重微分断面積の測定、日本原子力学会秋の大会(2012/9/19-21 広島大学 東広島キャンパス)、I17

2. 佐波俊哉、萩原雅之、鎌田創、高田真志: 72MeV 炭素に対するBe,C,Al,Ti,Cu の軽核破砕片生成二重微分断面積の測定、日本原子力学会春の年会 (2013/3/26-28 近畿大学 東大阪キャンパス)、I01
3. Toshiya SANAMI: Target dependency of light mass fragment production DDX for 6 MeV/u Carbon induced reaction, 2012 Symposium on Nuclear Data (2012/11/15-16 Kyoto University Research Reactor Institute) P20

4—3. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究

<原著論文等>

1. D. Ohsawa, H. Tawara, F. Soga, M. E. Galassi, and R. D. Rivarola, 6.0 MeV/u carbon ion (C6+ and C4+) induced secondary electron emission from water vapor, Physica Scripta in press.

<学会及び研究会口頭発表等>

1. D. Ohsawa, H. Tawara, F. Soga, M. E. Galassi, and R. D. Rivarola, 6.0 MeV/u carbon Ion (C6+ and C4+) induced secondary electron emission from water vapor, 16th International Conference on Physics of Highly Charged Ions, 9/2-7 2012, Heidelberg, Germany.
2. D. Ohsawa, H. Tawara, F. Soga, S. Uehara, M.E. Galassi, and R.D. Rivarola, Secondary electron emission from water vapor by 6.0-MeV/u C6+ ion impact: cross-section data and their application to radiobiological investigations, 8th International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter, 10/24-27 2012, Kyoto Japan.
3. 大澤大輔, 高LET重粒子線+水蒸気衝突における二次電子測定とモンテカルロ飛跡構造解析, 日本放射線化学会 先端放射線化学セミナー (電気学会 量子ビームによるナノバイオ物理応用技術調査専門委員会共催), 2012年10月27日

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. 魚住 裕介, 中村直人, 野ヶ峯翔, 和西航平, 山田剛広, 古場裕介, 高田真志, 陽子入射荷電粒子生成二重微分断面積の最前方測定, 日本原子力学会 2012年秋の大会, 2012年9月19日 広島大学

4—5. 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. Egashira, T. Nishio, T. Matsuura, S. Kameoka, M. Uesaka, “Experimental evaluation of a spatial resampling technique to improve the accuracy of pencil-beam dose calculation in proton therapy,” Med. Phys. 39(7), 4104-4114 (2012).

<Proceedings 等>

1. T. Nishio, “Development of RTP System with the Plug-in Function for Various Radiation Therapy System,” Third International Conference on Real-time Tumor-tracking Radiation Therapy with 4D Molecular Imaging Technique, Symposium, Abstracts, 08, (2013).
2. 西尾禎治, “Beam ON-LINE PET systemにおけるplanar検出器の問題点と解決案”、平成24年度次世代PET研究会 特別講演、予稿集、32-33 (2013).
3. 西尾禎治, “Study of Beam On-Line PET system for proton therapy”、群馬大学博士課程教育リーディングプログラム「重粒子線医工学グローバルリーダー養成プログラム」公開シンポジウム、アブストラクト、2012.
4. T. Nishio, K. Matsusita, M. Sekine, A. Miyatake, M. Kawabata, T. Suzuki, T. Tanimori, T. Kubo, S. Kabuki,

“Study of hybrid Beam ON-LINE PET / Compton Camera system for proton therapy,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 32 Supple. 3, 175-176 (2012).

5. K. Matsusita, T. Nishio, A. Miyatake, M. Sekine, “Basic measurement of beam online PET system,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 32 Supple. 3, 177-178 (2012).
6. T. Nishio, A. Miyatake, K. Matsushita, M. Sekine, “Performance of beam ON-LINE PET system constructed with two opposing planar-type detector heads in proton therapy,” The 31st Sapporo International Cancer Symposium / Advanced Radiation Therapy and Cancer Research Up-to-Date, Abst., 45 (2012).
7. T. Nishio, A. Miyatake, K. Matsushita, M. Sekine, T. Akimoto, “Study of real-time measurement method of irradiation dose to a bladder for prostate proton therapy,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 32 Supple. 1, 214 (2012).
8. T. Nishio, Y. Egashira, T. Aso, S. Ozawa, T. Koizumi, K. Nakagawa, “Development of prototype device for continuous SOBP proton irradiation method,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 32 Supple. 1, 201 (2012).
9. S. Nakamura, H. Asai, S. Akita, Y. Aoyama, Y. Kamikubo, Y. Sugama, R. Noguchi, H. Takei, T. Nishio, K. Maruyama, K. Hayakawa, “Development of the facilitation equipment of range and beam profile measurement for proton therapy,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 32 Supple. 1, 205 (2012).
10. Y. Sugama, T. Nishio, H. Onishi, T. Araki, “Experimental determination of effective point of measurement for cylindrical ion-ization chambers by clinical proton beam,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 32 Supple. 1, 208 (2012).

<学会及び研究会口頭発表等>

1. T. Nishio, “Development of RTP System with the Plug-in Function for Various Radiation Therapy System,” Third International Conference on Real-time Tumor-tracking Radiation Therapy with 4D Molecular Imaging Technique, Symposium, February 7-8, 2013.
2. T. Aso, K. Kawashima, T. Nishio, S. B. Lee, T. Sasaki, “A Study of Multiplex Proton Imaging Using GEANT4,” IEEE NSS/MIC/RTSD, October 27-November 3, 2012.
3. T. Akagi, T. Aso, A. Kimura, S. Kameoka, Y. Maeda, N. Matsufuji, T. Nishio, C. Omachi, T. Sasaki, T. Toshito, T. Yamashita, “Status of Quality Assurance Using Particle Therapy Simulation Framework in Particle Therapy Facility in Japan,” IEEE NSS/MIC/RTSD, October 27-November 3, 2012.
4. T. Akagi, T. Aso, G. Iwai, A. Kimura, S. Kameoka, S. B. Lee, Y. Maeda, N. Matsufuji, T. Nishio, C. Omachi, S. 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,” 12th International Conference on Radiation Shielding (ICRS-12) / 17th Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division of the American Nuclear Society (RPSD-2012), September 2-7, 2012.
5. M. Yamada, D. Amano, T. Tachikawa, M. Hirabayashi, T. Nishio, “On-line PET imaging for proton therapy system,” 22nd International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI 2012), August 5-10, 2012.
6. T. Nishio, A. Miyatake, K. Matsushita, M. Sekine, “Performace of beam ON-LINE PET system constructed with two opposing planar-type detector heads in proton therapy,” The 31st Sapporo International Cancer Symposium / Advanced Radiation Therapy and Cancer Research Up-to-Date, July 23-24, 2012.
7. 西尾禎治、松下慶一郎、関根雅晃、宮武彩 “標的原子核破碎反応と高精度陽子線がん治療に関する研究”、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月26-29日
8. 西尾禎治、 “Beam ON-LINE PET systemにおけるplanar検出器の問題点と解決案”、平成24年度次

世代PET研究会 特別講演、2013年1月21日

9. 西尾禎治、“Study of Beam On-Line PET system for proton therapy”、群馬大学博士課程教育リーディングプログラム「重粒子線医工学グローバルリーダー養成プログラム」公開シンポジウム、2012年12月7日
10. 石橋京、西尾禎治、福士政広、江頭祐亮、須釜裕也、中村哲志、“陽子線に対するガフクロミックフィルムの阻止能特性の検証”、日本放射線腫瘍学会第25回学術大会、2012年11月23-25日
11. 西尾禎治、“陽子線がん治療における原子核反応の重要性”、2012年度RCNP研究会、2012年9月28-29日
12. 西尾禎治、松下慶一郎、関根雅晃、宮武彩、川端麻莉子、鈴木達彦、谷森達、窪秀利、株木重人、“陽子線治療のためのhybrid Beam ON-LINE PET/Compton Camera systemの研究”、日本医学物理学会第104回学術大会、2012年9月14-15日
13. 中村哲志、浅井博之、秋田峻吾、上窪純史、青山結樹、横澤淳司、須釜裕也、武居秀行、西尾禎治、丸山浩一、早川和重、“深部方向の線量測定簡便化装置の開発”、日本医学物理学会第104回学術大会、2012年9月14-15日
14. 松下慶一郎、西尾禎治、宮武彩、関根雅晃、家城和夫、“ON LINE PET systemの基礎測定”、日本医学物理学会第104回学術大会、2012年9月14-15日
15. 小澤修一、加瀬優紀、山下晴男、福田茂一、福村明史、西尾禎治、寅末千枝、榮武二、田代睦、金井達明、“粒子線治療装置の物理・技術的QAシステムガイドライン”、日本医学物理学会第104回学術大会、2012年9月14-15日
16. 西尾禎治、“がんの陽子線照射において人体内での原子核反応を観る”、基研主導研究会2012-原子力・生物学と物理、2012年8月8-10日
17. 西尾禎治、“陽子線照射による患者体内での生成ポジトロン放出核の強度分布シミュレーションの研究”、第2回OpenPET研究会、2012年7月30日
18. 西尾禎治、宮武彩、松下慶一郎、関根雅晃、秋元哲夫、“前立腺陽子線治療における膀胱へのリアルタイム照射線量計測法の研究”、日本医学物理学会第103回学術大会、2012年4月12-15日
19. 西尾禎治、江頭祐亮、阿蘇司、小澤修一、小泉哲夫、中川恵一、“陽子線連続可変SOBP照射法のプロトタイプ装置の開発”、日本医学物理学会第103回学術大会、2012年4月12-15日
20. 中村哲志、浅井博之、秋田峻吾、青山結樹、上窪純史、須釜裕也、野口綾太、武居秀行、西尾禎治、丸山浩一、早川和重、“治療用陽子線の飛程及びビームプロファイル測定簡便化装置の開発”、日本医学物理学会第103回学術大会、2012年4月12-15日
21. 須釜裕也、西尾禎治、大西洋、荒木力、“陽子線の線量測定における指頭型電離箱の実効中心位置の算出”、日本医学物理学会第103回学術大会、2012年4月12-15日

<その他>

1. 上坂充、中川恵一、西尾禎治、金井達明監修、“医学物理の理工学-上巻-”、養賢堂、2012年8月28日発行

<学位論文>

1. 松下慶一郎、立教大学理学研究科物理学専攻修士論文、“陽子線治療における体内中での標的原子核破碎反応の研究”、2013年

4—8. 反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー評価方法の研究

<原著論文等>

1. D. Nakanishi, A. Nohtomi, R. Tanaka, G. Wakabayashi: A Method of Neutron-Energy Evaluation based on the Position Distribution of Recoil Protons, Progress in Nuclear Science and Technology (already accepted and to be published in 2013)

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 中西大樹、納富昭弘、田中亮治：反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー測定における応答関数の評価、第103回日本医学物理学会学術大会報文集(2012年4/12～4/15、横浜) O-202, pp.282
2. 納富昭弘：反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー評価方法、第104回日本医学物理学会学術大会報文集(2012年9/13～9/15、つくば) pp.29-32
3. H. Inoue, A. Nohtomi and D. Nakanishi: A method of neutron energy evaluation based on the position distribution of recoil protons、The 8th International Workshop on Ionizing Radiation Monitoring (December 1- 2, 2012 Oarai , Japan) P-28
4. 井上弘規、中西大樹、納富昭弘：反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー評価に用いるコンバータの検討、第7回九州放射線医療技術学術大会 (2012年11/24～11/25、長崎) 188, pp.106

<その他>

1. 納富昭弘、中性子のエネルギーを「形」で認識する (Shape of Neutron Energy)、Japanese Journal of Medical Physics, Vol. 32, No. 3: (2013) 130-137.

<学位論文>

1. 中西大樹「反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー測定における応答関数の評価に関する研究」九州大学大学院医学系学府保健学専攻修士論文、平成25年1月
2. 井上弘規「反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー評価システムに用いるコンバータの特性比較」九州大学医学部保健学科卒業論文、平成25年1月

5—1. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

<Proceedings 等>

1. 北村尚、「放医研サイクロトロン用バイナリフィルターの水等価厚測定」、放射線医学総合研究所技術報告書, Vol.7, p26-34, 2012

<学会及び研究会口頭発表等>

1. H. Kitamura, et al., “Preliminary Results of Proton ICCHIBAN Experiments”, 17th Workshops on Radiation Monitoring for the International Space Station, Austin, USA, Sep. 4-6, 2012
2. 北村尚、内堀幸夫、小平聡、「低LET陽子線による汎用照射場」、NIRSテクノフェア、千葉、2012年12月6日

6—1. 次世代型重粒子線がん治療装置用超電導加速器の基盤技術研究

<学会及び研究会口頭発表等>

1. Akira Karasawa, Atsushi Ishiyama, Nobuyuki Miyahara, Hiroshi Ueda, Tao Wang, Shinjiro Yazaki, Mitsuhiro Fukuda, Kichiji Hatanaka, Shigeo Nagaya, Naoji Kashima, “Influence of Neutron Irradiation on Superconducting Characteristics of HTS Conductors”, Applied Superconductivity 2012, 2012.
2. 道辻 健太、狩野 開、柄澤 彰良、矢崎 真二郎、王 旭東、石山 敦士、植田 浩史、宮原 信幸; “次世代超電導サイクロトロンの開発：高温超電導線材の中性子照射特性（超電導特性）”、

第86回秋季低温工学・超電導学会、 Vol.86, p187, 2012.

3. 有谷 友汰、斉藤 隼、道辻 健太、狩野 開、王 旭東、植田 浩史、宮原 信幸； “高温超電線材の耐放射線性評価：超電導特性”、平成 25 年電気学会全国大会、5-161.

7—1. 細胞培養容器 OptiCell を用いた 70MeV 陽子線の水中における深さ方向の変化による生物効果の測定

<原著論文等>

1. Fujisawa H, Genik PC, Kitamura H, Fujimori A, Uesaka M, Kato TA, Comparison of human chordoma cell-kill for 290 MeV/n carbon ions versus 70 MeV protons in vitro. Radiat Oncology. 8:91 2013
2. Genet SC, Maeda J, Fujisawa H, Yurkon CR, Fujii Y, Romero AM, Genik PC, Fujimori A, Kitamura H, Kato TA, Comparison of cellular lethality in DNA repair-proficient or –deficient cell lines resulting from exposure to 70 MeV/n protons or 290 MeV/n carbon ions, Oncol Rep. 2012, 28, 1591-1596.

9. 関連資料

平成24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26日 (月)	安全測定 本体室	RI生産	安全測定 本体室・汎用照射室	調整運転	4月16日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
3月27日 (火)	RI生産		調整運転		4月17日 (火)	RI生産		半導体デバイスのプロトン シングルイベント試験 HIREC (N社) P70MeV / 30nA C8	
3月28日 (水)	RI生産		RI生産		4月18日 (水)	RI生産		R&D	
3月29日 (木)	RI生産		RI生産		4月19日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, C4, 9:00～	
3月30日 (金)	RI生産		RI生産		4月20日 (金)	RI生産		中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田 P80MeV / 10nA C6	
3月31日 (土)					4月21日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3	
4月1日 (日)					4月22日 (日)				
4月2日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	4月23日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
4月3日 (火)	RI生産		R&D	RI生産(¹²⁴ I) H ₂ 27,C9,12:00～	4月24日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV, 15 μ A, C9	
4月4日 (水)	RI生産		RI生産 P30MeV, 20 μ A, C9		4月25日 (水)	RI生産		RI生産 P30MeV, 10 μ A, C9	
4月5日 (木)	RI生産		人工衛星搭載用電子デバイス シングルイベント評価試験 アクセルスペース P70MeV / 10e7 pps C8		4月26日 (木)	RI生産		RI生産 H ₂ 27MeV, 15 μ A, C9	
4月6日 (金)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00～	R&D	4月27日 (金)	RI生産		半導体デバイスのプロトン シングルイベント試験 HIREC (J社) P70MeV / 30nA C8	
4月7日 (土)			中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田 P80MeV / 10nA C6		4月28日 (土)				
4月8日 (日)					4月29日 (日)			昭和の日	
4月9日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18MeV,15 μ A,C9	4月30日 (月)			振替休日	
4月10日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu) P12,8 μ A,C4,9:00～	R&D	5月1日 (火)	メンテナンス		R&D	
4月11日 (水)	RI生産		超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3		5月2日 (水)	メンテナンス		R&D	
4月12日 (木)	RI生産		R&D	RI生産(¹²⁴ I) D15MeV,15 μ A,C9	5月3日 (木)			憲法記念日	
4月13日 (金)	RI生産		R&D		5月4日 (金)			みどりの日	
4月14日 (土)					5月5日 (土)			こどもの日	
4月15日 (日)					5月6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7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス		5月28日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P30MeV, 12 μ A, C9
5月8日 (火)	RI生産		R&D		5月29日 (火)	RI生産		RI生産 P30MeV, 20 μ A, C4	
5月9日 (水)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, C4, 9:00～	RI生産	5月30日 (水)	RI生産		RI生産 α 30MeV, 5 μ A, C9	
5月10日 (木)	RI生産		半導体デバイスのプロトン シングルイベント試験 HIREC (F社) P70MeV / 30nA C8		5月31日 (木)	RI生産		深宇宙用放射線観測装置の 陽子に対する反応 JAXA(松本) P30MeV / 1nA C6	
5月11日 (金)	RI生産		RI生産 α 28MeV, 2 μ A, C9		6月1日 (金)	RI生産		深宇宙用放射線観測装置の 陽子に対する反応 JAXA(松本) P80MeV / 1nA C6	
5月12日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3		6月2日 (土)				
5月13日 (日)					6月3日 (日)				
5月14日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	6月4日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
5月15日 (火)	RI生産		RI生産(¹²⁴ I) H ₂ 27, 15 μ A, C9		6月5日 (火)	RI生産		陽子線の水中における深さ方向の変化による 生物効果の測定 北村(加藤) P70MeV / 3nA C8	
5月16日 (水)	RI生産		RI生産 D15MeV, 10 μ A, C9 P30MeV, 10 μ A, C9		6月6日 (水)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, C4, 9:00～	RI生産 P18, 20 μ A, C4
5月17日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, C4, 9:00～		6月7日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV, 15 μ A, C9	
5月18日 (金)	RI生産		宇宙放射線粒子の電子デバイスに 与える影響に関する研究 JAXA(高島) P80MeV / 10e8～10e9 pps C6		6月8日 (金)	RI生産		R&D	
5月19日 (土)					6月9日 (土)			宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P80MeV / 10nA C8	
5月20日 (日)					6月10日 (日)				
5月21日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		6月11日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
5月22日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu) P12, C4, 9:00～	RI生産 P30, 10 μ A, C9	6月12日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV, 15 μ A, C9	
5月23日 (水)	RI生産		RI生産 (Mg所外) He75, 10 μ A, C4		6月13日 (水)	RI生産		粒子線利用による植物ゲノムDNAの変異誘発 理研(松山) 陽子線の水中における深さ方向の変化による生物効果の測定 北村(加藤) P70MeV / 3nA C8	
5月24日 (木)	RI生産		RI生産 He28, 3 μ A, C4		6月14日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV, 10 μ A, C9	
5月25日 (金)	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 / 5nA C8		6月15日 (金)	RI生産		RI生産 He30, 5 μ A, C9	
5月26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 / 5nA C8		6月16日 (土)				
5月27日 (日)					6月17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
6月18日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		7月9日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 He30, 5 μ A, C9
6月19日 (火)	RI生産		RI生産	RI生産(¹²⁴ I) H ₂ 27, C9 ,11 μ A	7月10日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV , 15 μ A , C9	
6月20日 (水)	RI生産		RI生産 P18MeV , 10 μ A , C9		7月11日 (水)	RI生産		RI生産 He30, 7 μ A, C9	
6月21日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30 , 20 μ A , C4 , 9:00～		7月12日 (木)	RI生産		中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田(佐波) He70MeV / 10nA C6	
6月22日 (金)	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13日 (金)	RI生産		中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田(佐波) C72MeV / 10nA C6	
6月23日 (土)			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14日 (土)				
6月24日 (日)					7月15日 (日)				
6月25日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P30, 12 μ A, C9	7月16日 (月)			海の日	
6月26日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu) P12,8 μ A ,C4,9:00～	RI生産 P18, 10 μ A, C9	7月17日 (火)	RI生産		メンテナンス	
6月27日 (水)	RI生産		R&D	RI生産 (Mg所外) He75, 10 μ A ,C4	7月18日 (水)	RI生産		メンテナンス	
6月28日 (木)	RI生産		RI生産 He30MeV , 5 μ A , C9		7月19日 (木)	RI生産		メンテナンス	
6月29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) O ⁵⁺⁸⁺ 96MeV / 500 nA C10		7月20日 (金)	RI生産		メンテナンス	
6月30日 (土)					7月21日 (土)				
7月1日 (日)					7月22日 (日)				
7月2日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	7月23日 (月)	長期メンテナンス			
7月3日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV , 15 μ A , C9		7月24日 (火)	長期メンテナンス			
7月4日 (水)	RI生産		中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田 P20MeV / 10nA C6		7月25日 (水)	長期メンテナンス			
7月5日 (木)	RI生産		RI生産 He30MeV , 5 μ A , C9		7月26日 (木)	長期メンテナンス			
7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) O ⁵⁺⁸⁺ 96MeV / 500 nA C10		7月27日 (金)	長期メンテナンス			
7月7日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3		7月28日 (土)				
7月8日 (日)					7月29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	
7月30日 (月)	長期メンテナンス			8月20日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス RI生産	
7月31日 (火)	長期メンテナンス			8月21日 (火)	RI生産		RI生産 He30MeV, 8μA, C9	
8月1日 (水)	長期メンテナンス			8月22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 理科大 P70MeV / 1nA C8	
8月2日 (木)	長期メンテナンス			8月23日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, C4, 9:00~	
8月3日 (金)	長期メンテナンス			8月24日 (金)	RI生産		RI生産 He30MeV, 8μA, C9 宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P70MeV / 10nA C8	
8月4日 (土)					8月25日 (土)			中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田 P14MeV / 10nA C6
8月5日 (日)					8月26日 (日)			
8月6日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	調整運転	8月27日 (月)	メンテナンス	メンテナンス	
8月7日 (火)	RI生産		調整運転		8月28日 (火)	RI生産		宇宙放射線粒子の電子デバイスに 与える影響に関する研究 JAXA(高島) P70MeV / 10e8~10 pps C8
8月8日 (水)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu) P12,8μA, C4,9:00~	調整運転	8月29日 (水)	RI生産		RI生産 (Mg所外) He75, C4
8月9日 (木)	RI生産		RI生産 He30MeV, 7μA, C9		8月30日 (木)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu) P12,8μA, C4,9:00~ RI生産 He30MeV, 8μA, C9
8月10日 (金)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00~	調整運転	8月31日 (金)	RI生産		RI生産 He30MeV, 8μA, C9
8月11日 (土)					9月1日 (土)			
8月12日 (日)					9月2日 (日)			
8月13日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		9月3日 (月)	来期マシンタイム		
8月14日 (火)	R&D		人工衛星搭載用電子デバイス シングルイベント評価試験 アクセルスペース P70MeV / 10e7 pps C8		9月4日 (火)	来期マシンタイム		
8月15日 (水)	R&D	安全測定 本体室	R&D	安全測定 本体室・汎用照射室	9月5日 (水)	来期マシンタイム		
8月16日 (木)	R&D		超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20μA C3		9月6日 (木)	来期マシンタイム		
8月17日 (金)	R&D		中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田 P14MeV / 10nA C6		9月7日 (金)	来期マシンタイム		
8月18日 (土)					9月8日 (土)			
8月19日 (日)					9月9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
9月3日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産	9月24日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
9月4日 (火)		RI生産	RI生産(¹²⁴ I) H ₂ 27, C9		9月25日 (火)	RI生産		R&D	
9月5日 (水)		RI生産	RI生産 P18MeV, 15 μA, C9		9月26日 (水)	RI生産		RI生産(²⁸ Mg) He75, 10 μA, C4	
9月6日 (木)		RI生産	R&D		9月27日 (木)	RI生産		電子部品の放射線による 劣化傾向評価 JAXA (河原) P70MeV / 1×10 ⁹ pps C8	
9月7日 (金)		RI生産	超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μA C3		9月28日 (金)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00～	RI生産 He33,10 μA,C9
9月8日 (土)					9月29日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μA C3	
9月9日 (日)					9月30日 (日)				
9月10日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	10月1日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
9月11日 (火)		RI生産	RI生産 He30MeV, 12 μA, C9		10月2日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu) P12,C4,9:00～	RI生産 He33,5 μA,C9
9月12日 (水)		RI生産	RI生産 P18MeV, 15 μA, C9		10月3日 (水)	RI生産		電子部品の放射線による 劣化傾向評価 JAXA (河原) P70MeV / 1×10 ⁹ pps C8	
9月13日 (木)		RI生産	RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μA, C4, 9:00～		10月4日 (木)	RI生産		RI生産 P30,0.1 μA,C1	R&D
9月14日 (金)		RI生産	超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μA C3		10月5日 (金)	RI生産		RI生産 He33MeV, 5 μA, C9	
9月15日 (土)					10月6日 (土)				
9月16日 (日)					10月7日 (日)				
9月17日 (月)			敬老の日		10月8日 (月)			体育の日	
9月18日 (火)		RI生産	RI生産(⁶⁴ Cu) P12,C4,9:00～	RI生産	10月9日 (火)	RI生産		RI生産 He60MeV, 150nA, C1	
9月19日 (水)		RI生産	RI生産 He30MeV, 12 μA, C9		10月10日 (水)	RI生産		RI生産 P30MeV, 150nA, C1	
9月20日 (木)		RI生産	R&D		10月11日 (木)	RI生産		粒子線利用による植物ゲノムDNAの変異誘発 理研(松山) 光学機器の耐放射線性能に関する研究 理研(川崎) P70MeV / 5nA C8	
9月21日 (金)		RI生産	R&D		10月12日 (金)	RI生産		R&D	
9月22日 (土)			秋分の日		10月13日 (土)			中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田 P14MeV / 10nA C6	
9月23日 (日)					10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
10月15日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	11月5日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18MeV, 10 μ A, C2
10月16日 (火)	RI生産		反跳陽子位置分布に基づく中性子エネルギー 評価方法の研究 九大(納富) P20MeV / 10nA C6		11月6日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu) P12,C4,9:00～	R&D
10月17日 (水)	RI生産		RI生産 D40MeV, 100 nA, C2		11月7日 (水)	RI生産		RI生産 He33MeV, 15 μ A, C9	
10月18日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4		11月8日 (木)	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	
10月19日 (金)	RI生産		RI生産 He60MeV, 100nA, C2		11月9日 (金)	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	
10月20日 (土)					11月10日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3	
10月21日 (日)			一般公開		11月11日 (日)				
10月22日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		11月12日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18MeV, 10 μ A, C2
10月23日 (火)	RI生産		RI生産(¹²⁴ I) H ₂ 27, 10 μ A, C9		11月13日 (火)	RI生産		中性子検出器の開発および荷電粒子 入射核反応断面積取得 鎌田(佐波) P70MeV / 40nA C6	
10月24日 (水)	RI生産		R&D		11月14日 (水)	RI生産		RI生産 P30MeV, 25 μ A, C9	
10月25日 (木)	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		11月15日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4	
10月26日 (金)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00～	RI生産	11月16日 (金)	RI生産 (15時まで)	メン テナ ンス	R&D	メンテナンス
10月27日 (土)			宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P70MeV / 1pA C6		11月17日 (土)			停電	
10月28日 (日)					11月18日 (日)				
10月29日 (月)	メンテナンス	RI生産	R&D		11月19日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
10月30日 (火)	RI生産		R&D P30, C4		11月20日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV, 10 μ A, C1/C2	
10月31日 (水)	RI生産		R&D		11月21日 (水)	RI生産		RI生産 P18MeV, 10 μ A, C9	
11月1日 (木)	RI生産		R&D P30, C9		11月22日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV, 10 μ A, C9	
11月2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) O ⁵⁺⁸⁺ 96MeV / 500 nA C10		11月23日 (金)			勤労感謝の日	
11月3日 (土)			文化の日		11月24日 (土)				
11月4日 (日)					11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
11月26日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	12月17日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
11月27日 (火)		RI生産	RI生産(¹²⁴ I) H ₂ 27, C9		12月18日 (火)		RI生産	RI生産(¹²⁴ I) H ₂ 27, C9	
11月28日 (水)		RI生産	RI生産(²⁸ Mg) He75, C4		12月19日 (水)		RI生産	RI生産 P18MeV, 5μA, C9	
11月29日 (木)		RI生産	深宇宙用放射線観測装置の陽子に対する応答 JAXA(松本) 電子部品の放射線による劣化傾向評価 JAXA(河原) P80MeV / 1×10 ⁵ pps C6,C8		12月20日 (木)		RI生産	半導体素子の放射線の影響に関する研究 JAXA(久保山) P70MeV / 10nA C8	
11月30日 (金)		RI生産	RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00～	RI生産 P30MeV, 25μA, C9	12月21日 (金)		RI生産	RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00～	RI生産 P30MeV, 25μA, C9
12月1日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20μA C3		12月22日 (土)				
12月2日 (日)					12月23日 (日)			天皇誕生日	
12月3日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	12月24日 (月)			振替休日	
12月4日 (火)		RI生産	RI生産(⁶⁴ Cu) P12,C4,9:00～	RI生産 P18MeV, 5μA, C9	12月25日 (火)		RI生産	中性子検出器の開発および荷電粒子 入射核反応断面積取得 鎌田(遠藤) ¹³ C143MeV / 30nA C8	
12月5日 (水)		RI生産	半導体素子デバイスの シングルイベント試験 HIREC P70MeV / 30nA C8		12月26日 (水)		RI生産	中性子検出器の開発および荷電粒子 入射核反応断面積取得 鎌田(遠藤) ¹³ C117MeV / 30nA C8	
12月6日 (木)		RI生産	R&D		12月27日 (木)		RI生産	R&D	
12月7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 / 1×10 ⁹ pps C8		12月28日 (金)		RI生産	陽子線の水中における深さ方向の変化による 生物効果の測定 北村(加藤) P70MeV / 3nA C8	
12月8日 (土)					12月29日 (土)				
12月9日 (日)					12月30日 (日)				
12月10日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	12月31日 (月)				
12月11日 (火)		RI生産	R&D		1月1日 (火)			元日	
12月12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 理科大 P70MeV / 1nA C8		1月2日 (水)				
12月13日 (木)		RI生産	RI生産(⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, C4		1月3日 (木)				
12月14日 (金)		RI生産	RI生産 P30MeV, 25μA, C9		1月4日 (金)	メンテナンス		メンテナンス	
12月15日 (土)			中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田 P20MeV / 1nA C6		1月5日 (土)				
12月16日 (日)					1月6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7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	1月28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
1月8日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV, 5 μ A, C9		1月29日 (火)	RI生産		RI生産(¹²⁴ I) H ₂ 27, C9	
1月9日 (水)	RI生産		RI生産 P30MeV, 25 μ A, C9		1月30日 (水)	RI生産		R&D O96	
1月10日 (木)	RI生産		中性子検出器の開発および荷電粒子 入射核反応断面積取得 鎌田(佐波) He70MeV / 40nA C6		1月31日 (木)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P80MeV / 10nA C8	
1月11日 (金)	RI生産		中性子検出器の開発および荷電粒子 入射核反応断面積取得 鎌田(佐波) He70MeV / 40nA C6		2月1日 (金)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00～	R&D P30
1月12日 (土)					2月2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 C6, C8	
1月13日 (日)					2月3日 (日)				
1月14日 (月)			成人の日		2月4日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
1月15日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV, 1 μ A, C9		2月5日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu) P12,C4,9:00～	RI生産 P18MeV, 5 μ A, C9
1月16日 (水)	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 / 5nA C8		2月6日 (水)	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 / 5nA C8	
1月17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 / 5nA C8		2月7日 (木)	RI生産		R&D	
1月18日 (金)	RI生産		RI生産 He30MeV, 10 μ A, C9		2月8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) O ⁵⁺⁸⁺ 96MeV / 500 nA C10	
1月19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 C6, C8		2月9日 (土)				
1月20日 (日)					2月10日 (日)				
1月21日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		2月11日 (月)			建国記念の日	
1月22日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV, 10 μ A, C9		2月12日 (火)	RI生産		R&D	
1月23日 (水)	RI生産		RI生産 P18MeV, 10 μ A, C9		2月13日 (水)	RI生産		RI生産 P18MeV, 5 μ A, C9	
1月24日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4		2月14日 (木)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30, 20 μ A, C4	
1月25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) O ⁵⁺⁸⁺ 96MeV / 500 nA C10		2月15日 (金)	RI生産		生体元素に対する陽子入射中性子生成 二重微分断面積の測定 九大(執行) P70MeV / 1nA C8	
1月26日 (土)					2月16日 (土)			生体元素に対する陽子入射中性子生成 二重微分断面積の測定 九大(執行) P70MeV / 1nA C8	
1月27日 (日)					2月17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
2月18日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		3月11日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	
2月19日 (火)	RI生産		RI生産 P18MeV, 10 μ A, C9		3月12日 (火)	RI生産		メンテナンス	
2月20日 (水)	RI生産		RI生産(²⁸ Mg) He75, C4		3月13日 (水)	RI生産		メンテナンス	
2月21日 (木)	RI生産		中性子線量計の開発と応答関数の 評価に関する研究 鎌田 P20MeV / 1nA C6		3月14日 (木)	RI生産		メンテナンス	
2月22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 / 1 $\times 10^9$ pps C8		3月15日 (金)	RI生産		メンテナンス	
2月23日 (土)					3月16日 (土)			全所停電	
2月24日 (日)					3月17日 (日)				
2月25日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 He33MeV, 15 μ A, C9	3月18日 (月)	長期メンテナンス			
2月26日 (火)	RI生産		RI生産(¹²⁴ I) H ₂ 27, 10 μ A, C9		3月19日 (火)	長期メンテナンス			
2月27日 (水)	RI生産		RI生産 P18MeV, 15 μ A, C9		3月20日 (水)			春分の日	
2月28日 (木)	RI生産		半導体素子デバイスの シングルイベント試験 HIREC P70MeV / 30nA C8		3月21日 (木)	長期メンテナンス			
3月1日 (金)	RI生産		RI生産 (⁶² Zn/ ⁶² Cu所外) P30,C4,9:00～	RI生産 P18MeV, 10 μ A, C9	3月22日 (金)	長期メンテナンス			
3月2日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3		3月23日 (土)				
3月3日 (日)					3月24日 (日)				
3月4日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	3月25日 (月)	長期メンテナンス			
3月5日 (火)	RI生産		RI生産(⁶⁴ Cu) P12,C4,9:00～	RI生産 P18MeV, 15 μ A, C9	3月26日 (火)	長期メンテナンス			
3月6日 (水)	RI生産		RI生産 He33MeV, 15 μ A, C9		3月27日 (水)	長期メンテナンス			
3月7日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV, 15 μ A, C9		3月28日 (木)	長期メンテナンス			
3月8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) O ⁵⁺⁸⁺ 96MeV / 500 nA C10		3月29日 (金)	長期メンテナンス			
3月9日 (土)					3月30日 (土)				
3月10日 (日)					3月31日 (日)				

平成 24 年度サイクロトロン利用報告書

- ・発行年月 2013 年 10 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>