



N I R S - M - 2 4 2

平成 2 2 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 ¹ の運転実績と利用状況	(1)
2. サイクロトロン ² の改良・開発	(9)
3. 平成22年度サイクロトロン ³ 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. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究	(19)
4-2. 高エネルギー中性子場におけるガンマ線測定	(24)
4-3. $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 反応からの中性子線測定による PHITS コードの検証	(28)
4-4. 核破砕片生成二重微分断面 ⁴ 積の測定	(31)
5. 粒子線検出器の開発	
5-1. 中性子検出器の応答関数の評価に関する研究	(37)
5-2. 荷電粒子に対する無機シンチレーターの発光応答	(40)
5-3. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発	(43)
5-4. 超小型衛星搭載用放射線検出器の荷電粒子バックグラウンド評価試験	(46)
5-5. 高高度環境での携行使用に適した環境放射線モニタの開発研究	(50)
6. 粒子線による損傷試験	
6-1. 普及型重粒子線がん治療装置用超伝導コイルシステム開発 のための基礎研究	(53)
6-2. 光学機器の耐放射線性能に関する研究	(66)
7. 照射システム ⁵ の開発	
サイクロトロン汎用照射室 C-8 コースにおける 30, 40, 70 MeV 陽子線の照射場の一様性の測定	(69)
8. 生物研究	
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	(75)
9. 研究成果一覧	(79)
10. 関連資料	
平成22年度第 I 期・II 期マシンタイム予定表	(85)

1. サイクロトロンの運転実績と利用状況

サイクロトロン^Aの運転実績と利用状況

北條 悟^A、杉浦 彰則^A、金澤 光隆^A、田代 克人^A、本間 壽廣^A、岡田 高典^B、神谷 隆^B、
高橋 勇一^B、野田 耕司^A

^A : 放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

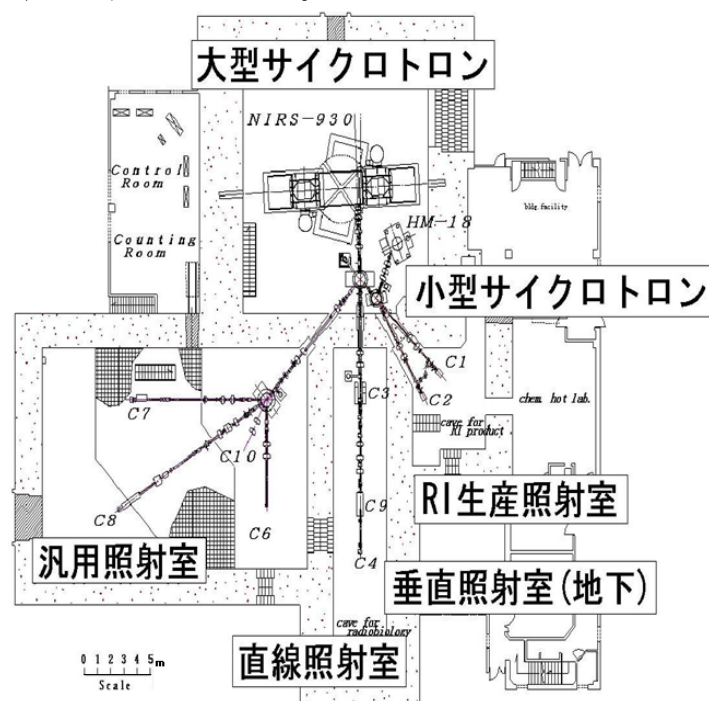
^B : 加速器エンジニアリング株式会社

はじめに

放射線医学総合研究所（放医研）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]。

大型サイクロトロン（トムソン CSF 社製）は、速中性子線による癌の治療と診断用の放射性薬剤の製造を目的として設置され、1974 年に運転を開始した。その後、速中性子線による治療から、陽子線による治療を経て、粒子線による癌の治療は HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)[2]へと引き継がれた。現在では、診断用の放射性薬剤の製造を主目的として、様々な分野で利用されている。一方、1994 年に設置された小型サイクロトロン（住友重機械工業(株)製）は、PET 診断用薬剤の製造専用として利用されている。

各サイクロトロンと各照射室のレイアウトを図1に示す。大型サイクロトロンからは、汎用照射室、直線・垂直照射室、RI 生産照射室の3つの照射室にビームを輸送することが可能となっている。汎用照射室には C-6,C-7,C-8,C-10 の4つのポートがあり、粒子線検出器の開発をはじめとして生物・物理実験など様々な分野で利用されている。直線・垂直照射室には C-3,C-4,C-9 の3つのポートがあり、C-3 では中性子発生源としての利用が、また、C-4,C-9 では固体ターゲットを用いた放射性薬剤の製造等が行われている。RI 生産照射室は、小型サイクロトロンと供用の C-1,C-2 の2つのポートがあり、PET 診断用の薬剤の製造・研究等に利用されている。小型サイクロトロンには、さらに、ビーム輸送を必要としないサイクロトロン本体に直結した照射ポート(T-0)があり、RI 生産照射室の2つのポートとあわせて PET 診断用の薬剤の製造に利用されている。



RI 生産照射室 : C-1,C-2 コース
汎用照射室 : C-6,C-7,C-8,C-10 コース
直線照射室 : C-4 コース
垂直照射室 : C-3,C-9 コース
(直線照射室より90度振り下げ)

図1. 放医研サイクロトロン棟のレイアウト

1. 大型サイクロトロン

1-1. 運転実績

本年度の大型サイクロトロンの総運転時間は 1584 時間であった。各粒子・エネルギー別の運転実績を表 1 に、加速粒子別の割合を図 2 に示す。大型サイクロトロンには、外部イオン源として永久磁石型 ECR イオン源(Kei-source)[3]が設置されており、陽子をはじめとしてヘリウム(He)、炭素(C)、酸素(O)といった様々な粒子を加速することが可能となっている。加速可能なエネルギーは、陽子で 8~90 MeV である。

主目的である放射性薬剤の製造・研究では主に比較的低いエネルギーの陽子が利用されている。また、高いエネルギーの陽子は粒子線検出器の開発や有料ビーム提供での利用が多い。そのため、陽子の運転時間が 72.1%を占めている。各目的における粒子やエネルギー等の利用状況について、次項で詳細を述べる。

表 1. 平成 22 年度大型サイクロトロンの加速粒子エネルギー別運転実績

陽子		水素分子(H ₂ ⁺)		ヘリウム(He)	
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	3	27	115	100	23
70	255			60	22
60	9				
50	24				
40	79				
30	275				
25	19				
18	178				
16	16				
15	67				
14	63				
12	102				
10	20				
8	31				

重陽子(d)		酸素(O)	
エネルギー [MeV]	運転時間 [h]	エネルギー [MeV]	運転時間 [h]
35	14	96	43
30	65		

炭素(C) { ¹³ C}		ネオン(Ne)	
エネルギー [MeV]	運転時間 [h]	エネルギー [MeV]	運転時間 [h]
72	4	120	31
48	74		
130*	52		

ネオンは、未取出し

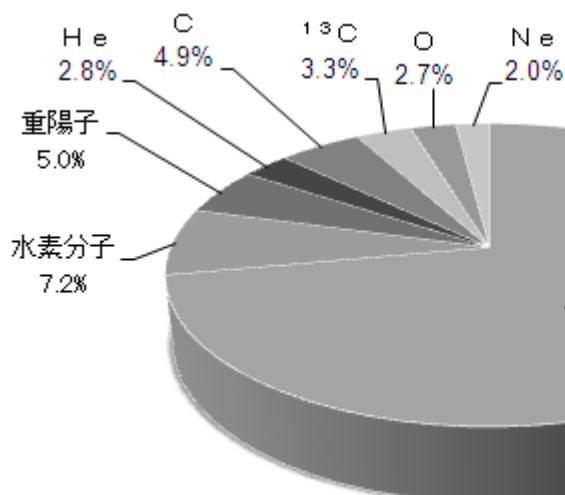


図 2. 大型サイクロトン加速粒子別運転実績割合

1-2. 利用状況

総運転時間の 1584 時間の内訳として、利用目的別の運転時間を表 2 に、利用目的別運転時間割合を図 3 に示す。主目的である放射性薬剤の製造・研究では 27.9%の運転時間が当てられた。そのほかでは、物理研究に 10.6%、粒子線検出器の開発に 6.2%、粒子線による損傷試験に 3.8%、照射システムの開発に 3.7%、生物研究に 1.0%が当てられた。さらに、本年度は有料ビーム提供が大幅に増え昨年の倍以上である 12.0%にのぼった。各ビーム開発運転に 34.5%が費やされている。

表 2. 平成 22 年度大型サイクロトロン利用目的別運転実績

目 的	時 間 [h]	割 合 [%]
(1) 放射性薬剤の製造・研究	442	27.9
(2) 物理研究	168	10.6
(3) 粒子線検出器の開発	98	6.2
(4) 粒子線による損傷試験	61	3.8
(5) 照射システムの開発	59	3.7
(6) 生物研究	15	1.0
(7) 有料ビーム提供	191	12.0
(8) ビーム開発	547	34.5
(9) 放射線安全測定	5	0.3
合計	1584	100.0

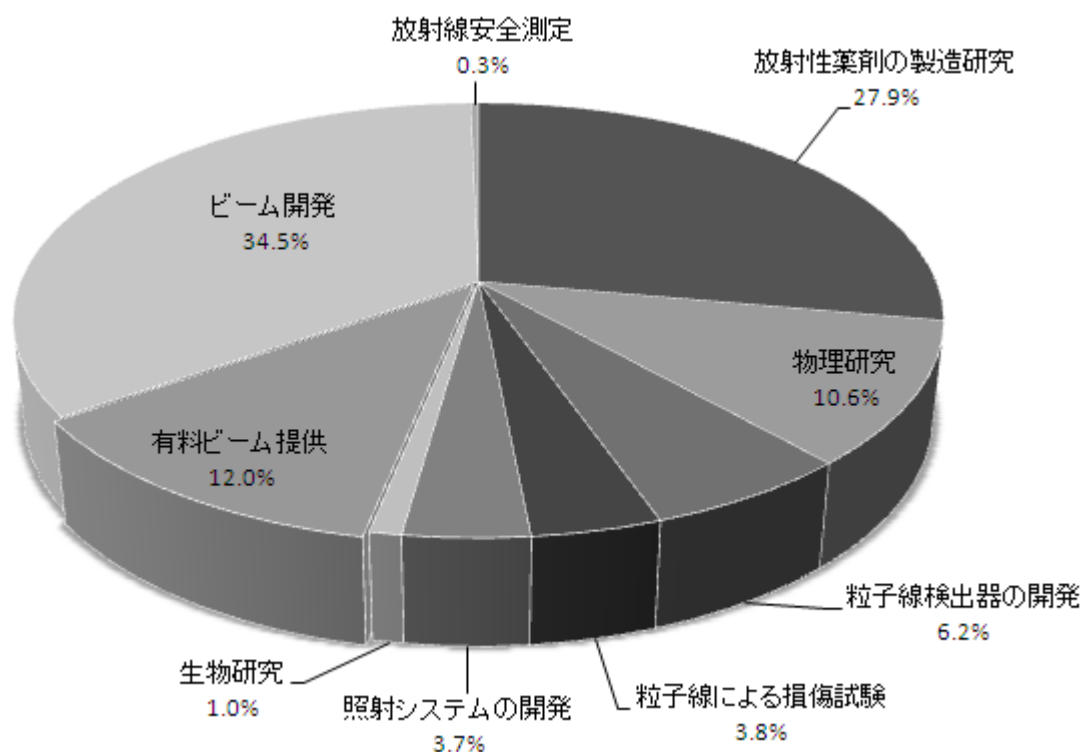


図 3. 大型サイクロトロン目的別利用割合

(1) 放射性薬剤の製造・研究

放射性薬剤の製造・研究[本誌 p13-p17]では、総運転時間の 27.9%である 442 時間が当目的で利用された。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を図 4 に示す。加速粒子としては、陽子が 72.5%で、さらに解離しての陽子照射用の水素分子(H₂⁺)ビームの利用時間が 21.9%となっており、利用時間のほとんどが陽子照射の利用となっている。水素分子ビームのエネルギーは 124I や 76Br の製造に用いられる 27 MeV のみが利用された。陽子のエネルギー別の利用状況は、¹⁸F 等の製造に用いられる 18 MeV が 25.3%、⁶²Zn/⁶²Cu 等の製造に用いられる 30 MeV が 20.6%、⁶³Cu 等の製造に用いられる 12 MeV が 9.1%、今年度から新しく ⁸⁹Zr 等の製造に用いられた 15 MeV が 12.0%であった。12 月か

ら $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレーターの供給を再開したため、ビーム利用と調整に 30 MeV の運転時間が増えて
いる。

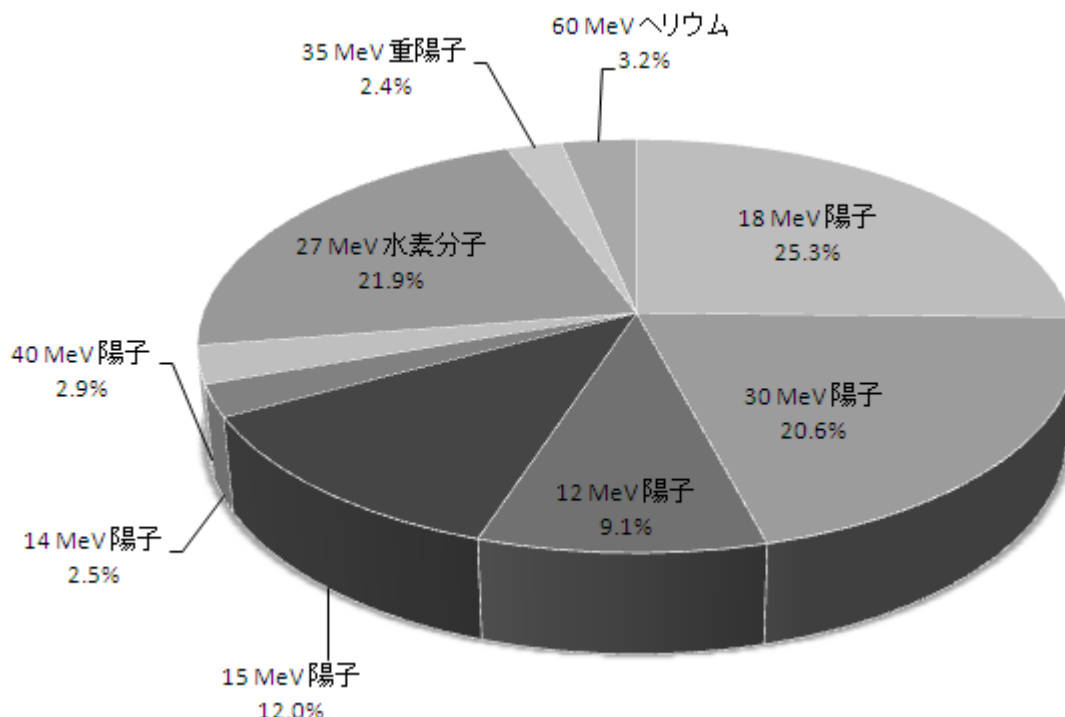


図 4. 放射性薬剤の製造研究における粒子エネルギー別利用割合

(2) 物理研究

物理研究では、168時間が利用された。粒子線検出器の開発等における粒子エネルギー別利用割合を
図5に示す。粒子別にみると、陽子の利用時間が34.1%で、陽子のエネルギーは、18~70 MeVと
いった広範囲のものが利用された。これらの陽子ビームを使っては、高エネルギー中性子場にお
けるガンマ線測定[本誌 p24-p27]や、核破砕片生成二重微分断面積の測定[本誌 p31-p36]が
行われた。陽子以外の利用も多く、利用時間の25.2%が48 MeV炭素で21.6%が96 MeV酸素
でこれらは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 p19-p23]に供された。
また、19.0%が質量数13の炭素(^{13}C)の130 MeVで $^1\text{H}(^{13}\text{C},n)$ 反応からの中性子線測定
によるPHITSコードの検証[本誌 p28-p30]に利用された。

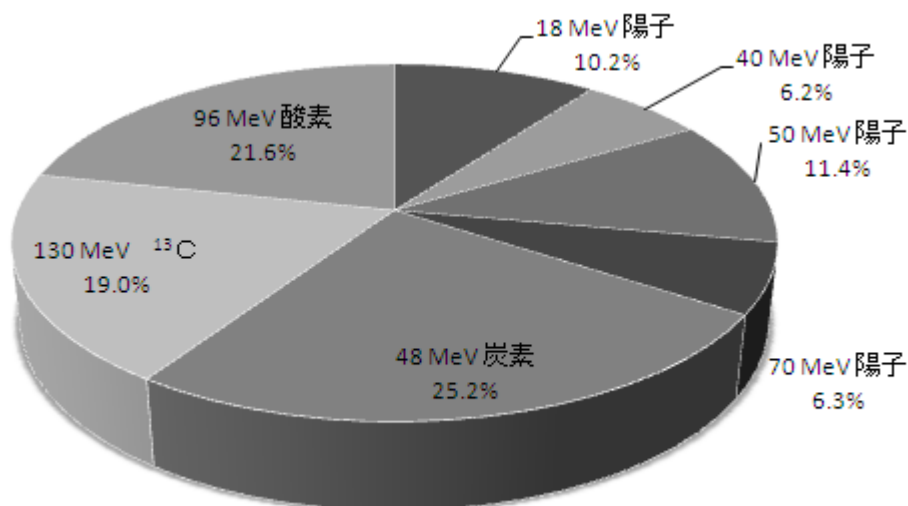


図 5. 物理研究における粒子エネルギー別利用割合

(3) 粒子線検出器の開発

粒子線検出器の開発では、98時間が利用された。粒子線検出器の開発等における粒子エネルギー別利
用割合を図6に示す。粒子別にみると、陽子が77%を占めており、そのエネルギーは、8~70 MeVとい

った広範囲のものが利用された。8 MeV, 10MeVといった低エネルギーの陽子は、中性子検出器の応答関数の評価に関する研究[本誌 p37-p39]に利用された。さらに高いエネルギーでは、30 MeVは宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発[本誌 p43-p45]に、60 MeVは高高度環境での携行使用に適した環境放射線モニタの開発研究[本誌 p50-p51]に、70 MeVは、超小型衛星搭載用放射線検出器の荷電粒子バックグラウンド評価試験[本誌 p46-p49]と荷電粒子に対する無機シンチレーターの発光応答[本誌 p40-p42]に用いられた。荷電粒子に対する無機シンチレーターの発光応答では、陽子以外に100 MeVのヘリウムも併せて利用された。

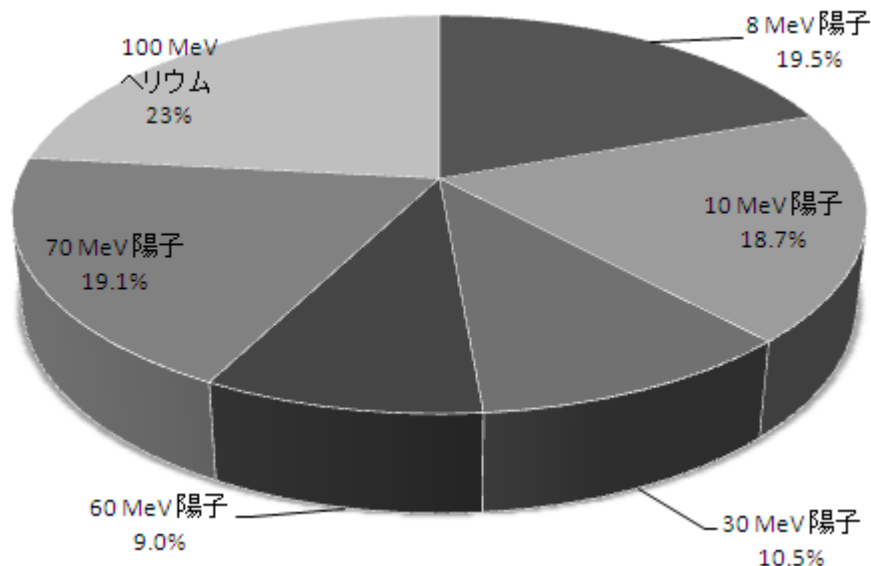


図 6. 粒子線検出器の開発における粒子エネルギー別利用割合

(4) 粒子線による損傷試験

粒子線による損傷試験では、61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7に示す。粒子別にみると、30 MeVの重陽子の利用時間が74.9%で、普及型重粒子線がん治療装置用超電導コイルシステム開発のための基礎研究[本誌 p53-p65]に利用された。この実験では、C-3コースのベリリウムターゲット直下で超伝導線材への中性子照射が行われた。また、それ以外の25.1%では、70 MeVの陽子が利用され光学機器の耐放射線性能に関する研究[本誌 p66-68]が行われた。

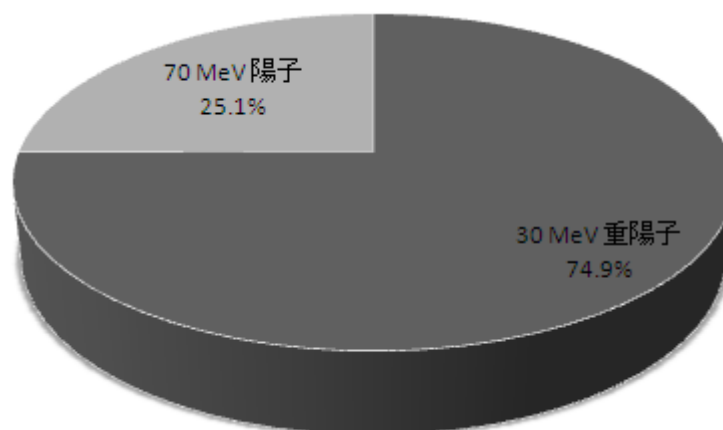


図 7. 粒子線による損傷試験における粒子エネルギー別利用割合

(5) 照射システムの開発

照射システムの開発では、59 時間が利用された。照射システムの開発における粒子エネルギー別利用割合を図 8 に示す。利用された粒子は、全てが陽子で、30 MeV、40 MeV、70 MeV の 3 種のエネルギーが利用され、サイクロトロン汎用照射室 C-8 コースにおける 30,40,70 MeV 陽子線の照射場の一様性の測定[本誌 p69-p73]が行われた。これにより開発されたシステムや測定結果は、他の C-8 コースで行われる多くの実験に対し、非常に有用なものとなっている。

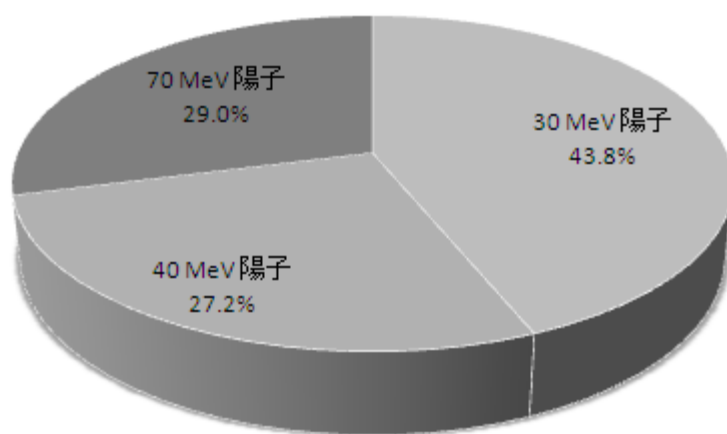


図 8. 照射システムの開発における粒子エネルギー別利用割合

(6) 生物実験

生物実験では 70 MeV の陽子が 15 時間利用され、細胞培養容器 OptiCell を用いた 70 MeV 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 p75-p78]が行われた。この実験は前項に記述した C-8 コースの照射システムが利用された。陽子線のブラッグピークを含む全飛程における生物効果を測定し、HIMAC での炭素線やその他ガンマ線、X 線で得られた結果との比較が行われた。

(7) 有料ビーム提供

有料ビーム提供では 4 機関 5 グループによって 191 時間が利用された。有料ビーム提供に利用された粒子は陽子のみで、エネルギー別にみると、70 MeV が 89.0%、40 MeV が 6.5%、30 MeV が 4.4% と、70 MeV を主体に 3 種のエネルギーが利用された。主に、宇宙線による影響を評価するための利用であるため、大型サイクロトロンにおける他のビーム提供と比較すると極めて低い強度での提供が主となっている。利用された照射ポートは、広い照射野が要求される場合は C-8 コースが利用され、狭い照射野が必要な場合は C-6 コースが利用された。

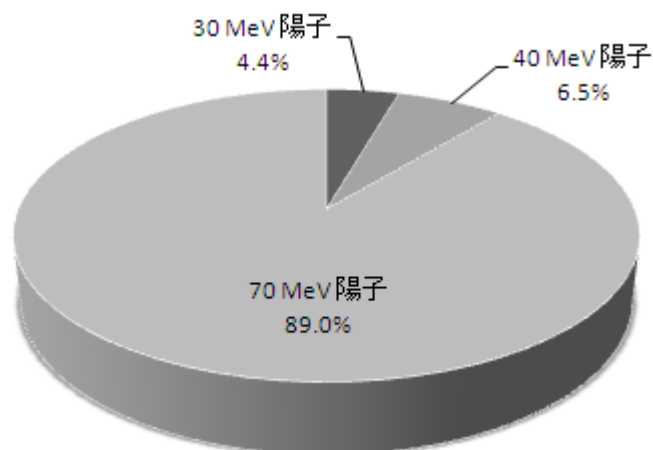


図 9. 有料ビーム提供における粒子エネルギー別利用割合

(8) ビーム開発

本年度のビーム開発には 547 時間が当てられた。ビーム開発運転時間の粒子エネルギー別の割合を図 10 に示す。ビーム開発において多くの時間を占めるのは多目的に広く利用される陽子で、全時間の 73.7%と大半を占めている。特に放射性薬剤製造・研究において重要度の高いジェネレーター用に利用されている 30 MeV 陽子は、高いビーム強度でかつ長時間の照射が行われることに加え、本年度は C-4 コースのターゲット照射システムの改修が行われたことに伴い、調整およびビーム確認を行う頻度が高く全体の 25.6%を占めている。

また、本年度の新規供給ビームとしては、放射性薬剤の製造・研究用に 14 MeV,15 MeV,25 MeV 陽子を、基礎物理研究用に 96 MeV 酸素イオンを、粒子線検出器の開発用に 130 MeV 炭素(¹³C)イオンを

新たに供給することができた。これらの新規ビームの調整運転時間には 117 時間が当てられた。このなかで、基礎物理研究用に要求があった 120 MeV ネオンイオンに 32 時間が当てられたが、十分なビーム調整を行う事ができなかった。120 MeV ネオンイオン加速についての詳細は、本誌のサイクロトロン改良・開発[本誌 p9-p12]において述べる。

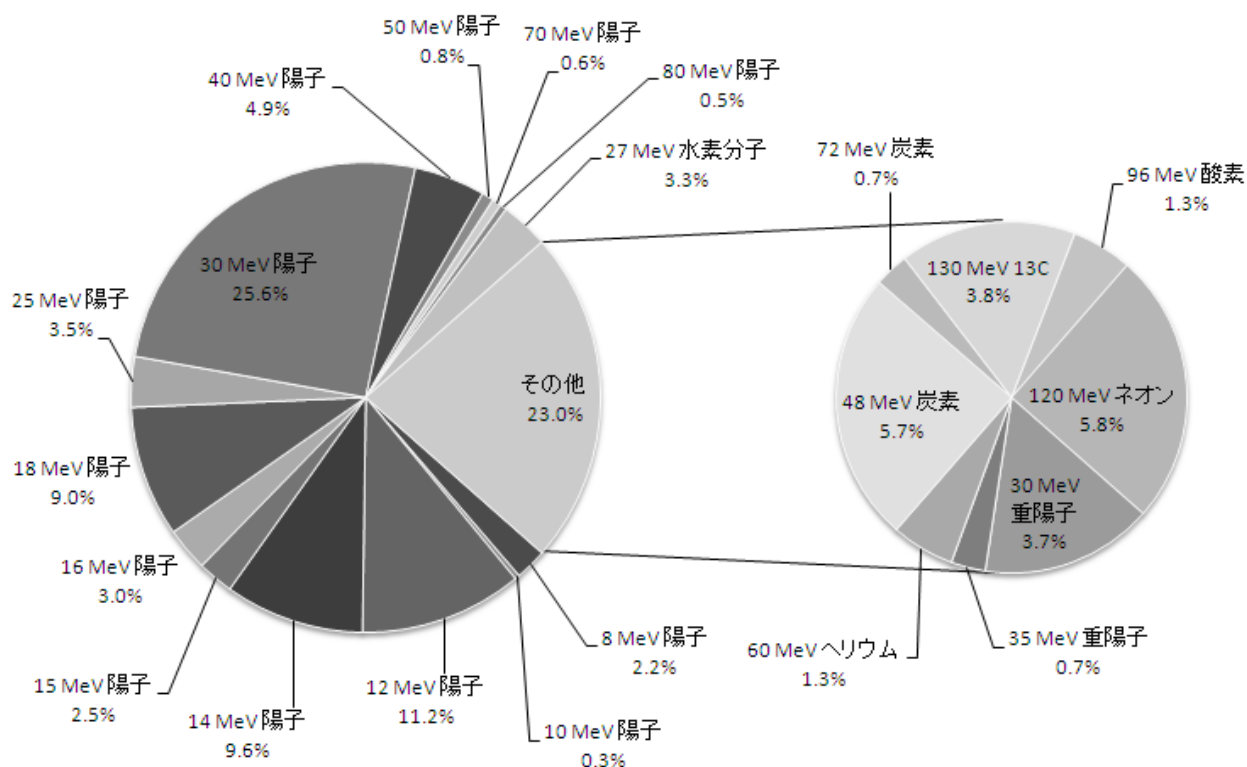


図 10. ビーム開発における粒子エネルギー別割合

1. 小型サイクロトロン

小型サイクロトロンは、負イオン加速型のサイクロトロンであるため、陽子と重陽子のみが供給可能である。加速エネルギーも固定で、陽子で 18 MeV、重陽子で 9 MeV となっている。本年度の小型サイクロトロンの運転実績を表 3 に、各割合を図 11 に示す。総運転時間は 1691 時間で、そのうち 98.8% の 1671 時間が陽子による ¹¹C や ¹³N、¹⁸F などの放射性薬剤の製造に利用された。重陽子は、昨年度と同様に ¹⁵O の提供依頼がなく、本年度も利用運転はなかった。また、定期点検に伴うビーム確認のための調整運転時間は、陽子が 11 時間で、重陽子が 9 時間であった。

表 3. 小型サイクロトロン運転実績

	18 MeV 陽子	9 MeV 重陽子	計
放射性薬剤の製造・研究	1671	0	1671
調整運転	11	9	20
計	1682	9	1691

[h]

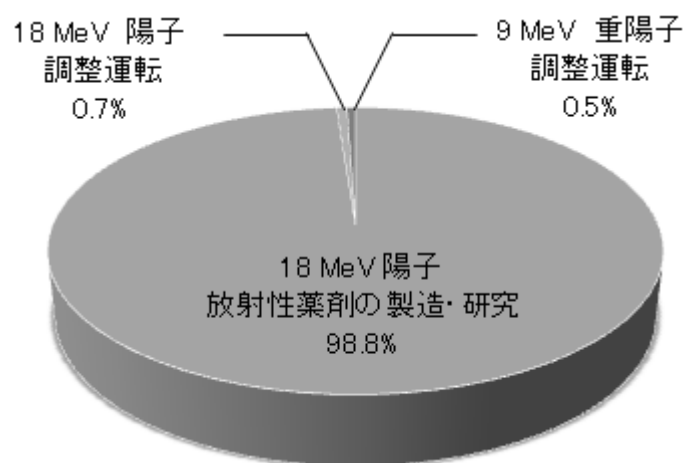


図 11. 小型サイクロトロン運転実績割合

参考文献

- [1] M.Kanazawa, S.Hojo, A.Sugiura, T.Honma, K.Tashiro, H.Suzuki, H.Kitamura, Y.Uchihori, T.Okada, T.Kamiya, Y.Takahashi: PRESENT STATUS OF CYCLOTRONS (AVF930, HM18) IN NIRS, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 4-6, 2010, Himeji, Japan) WEPS027.
- [2] PRESENT STATUS OF HIMAC, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 4-6, 2010, Himeji, Japan) FSRP16.
- [3]M.Muramatsu, A.Kitagawa, Y.Sato, S.Yamada, T.Hattori, M.Hanagasaki, T.Fukushima, H.Ogawa : Development of an ECR ion source for carbon therapy, Rev. Sci. Instrum.73 573 (2002).

2. サイクロトロンの改良・開発

サイクロトロン改良・開発

杉浦 彰則^A、北條 悟^A、金澤 光隆^A、田代 克人^A、本間 壽廣^A、岡田 高典^B、
神谷 隆^B、高橋 勇一^B、野田 耕司^A

^A：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

^B：加速器エンジニアリング株式会社

概要

大型サイクロトロン(NIRS-930)では、ビーム強度の増強・ビーム品質の向上を目指して、シングルギャップビームバンチャー電極と位相プローブの製作を行った。また、ユーザーの要求に応えるべく、これまでの加速実績において最も質量数の高い、ネオンイオンの加速試験を行った。

一方、老朽化対策として、マグネチックチャンネルの製作および冷却水流量計の更新を行った。また、老朽化による故障も起こっており、メインプローブ電極の破損や空洞共振器のショート板駆動時にシャフトから真空漏れなどが起こった。

以下に本年度のサイクロトロン改良・開発について詳細を述べる。

1. 装置の開発およびビーム開発

(1) シングルギャップビームバンチャー電極の製作およびビームテスト

ビームバンチャーは、イオン源から引き出された直流ビームを、サイクロトロンの加速周波数に合わせてバンチングする装置である。加速位相と比べて早いビームを減速し、遅いビームを加速させることにより、加速位相内にビームを集めてサイクロトロンへの入射効率を向上させる装置である。

大型サイクロトロンの入射系には、以前より正弦波の電圧を印加する共振型のダブルギャップビームバンチャー（以下ダブルギャップ）が設置されている。このダブルギャップによってビーム強度を2～5倍にする効果が得られている。

ビームバンチャーの理想的な電圧波形は、加速位相からずれた時間に比例した強さで加速および減速をする鋸歯状波形である[1]。共振型のダブルギャップは必要電力を低くすることができる利点はあるが、電圧を鋸歯状波にすることができない。そのため、理想的なバンチャーに近づけ、さらなる高倍率を実現するためにシングルギャップビームバンチャー（以下シングルギャップ）の開発を行うこととした[2]。

本年度は、シングルギャップの電極の製作を行いダブルギャップの上流に設置した。今回製作したシングルギャップ電極の構造図を図1に、写真を図2に示す。シングルギャップは、高周波電極とアース電極の2つの電極により構成されている。2つの電極はそれぞれ内径35 mmのリングに、直径50 μmの金メッキされたタングステンワイヤーを3 mm間隔で張ったものを用いている。電極間のワイヤー間隔は5 mmである。

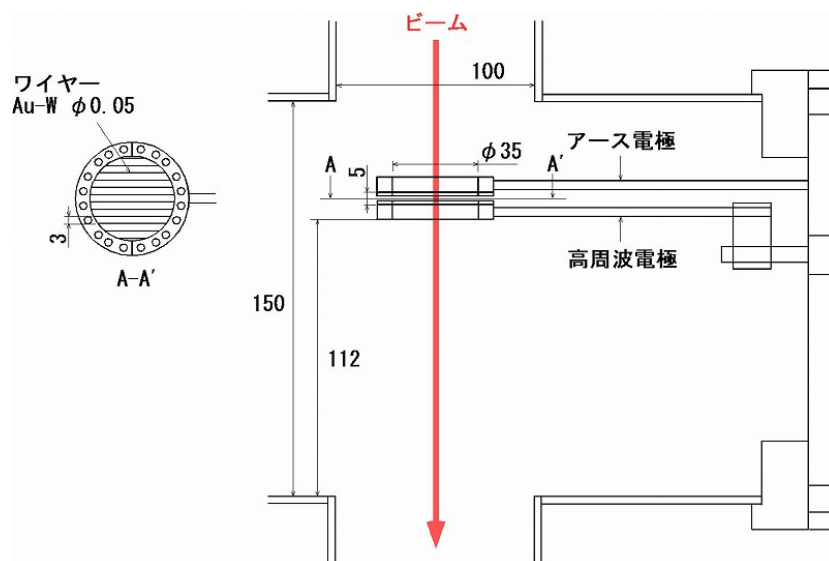


図1. シングルギャップビームバンチャー電極の構造図

ビームテストはダブルギャップの共振回路を使用して、高周波電極に正弦波電圧を印加した。ビームは 12 MeV の陽子であり、加速周波数は 16.55 MHz、ハーモニクスは 2 である。

ビームテストの結果、ダブルギャップのバンチング効率の 2.5 倍に対して、シングルギャップのバンチング効率は 1.7 倍と低い値であった。同じ効果が得られなかった原因について今後の検討課題となっている。また、鋸歯状波電圧を発生させるためのシステムは、今後構築する予定である。

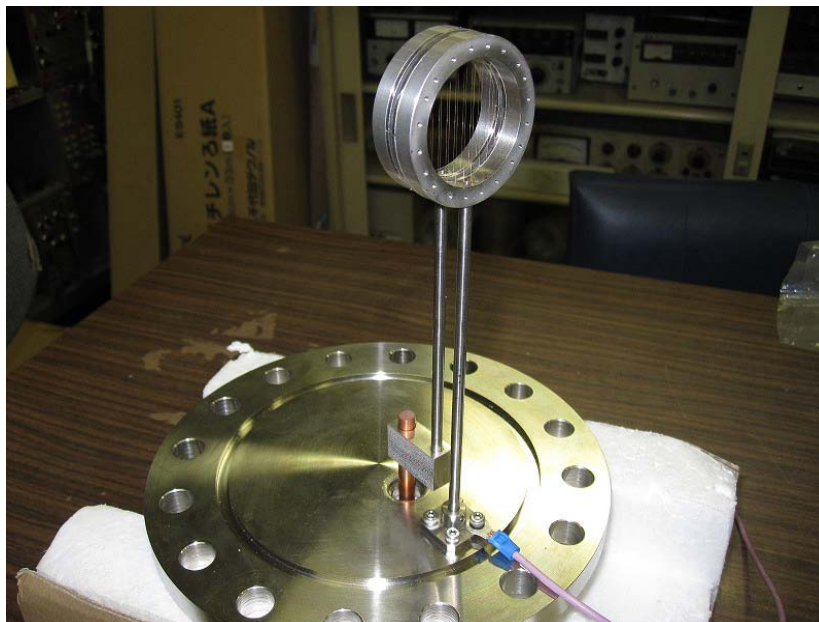


図 2. シングルギャップビームバンチャー電極の写真

(2) 位相プローブの製作

サイクロトロンにおいて粒子を加速するためには、粒子の周回周波数を一定(等時性)に保つ必要があり、そのためには等時性磁場を作ることが本質的な問題である。大型サイクロトロンではこの等時性磁場が、メインコイルの他に 12 個のトリムコイルによって形成されている。

現在は、新しい粒子を加速する場合、メインプローブと呼ばれる半径方向に移動するビームモニターでビームを止めて電流を確認しながら、トリムコイルを用いて磁場の調整をしている。この方法では、ビーム加速調整に時間がかかる上に最終的に得た磁場が本当に等時性になっているかを確認することができない。

そこで、位相プローブを設置することとした。位相プローブは、平行平板の電極をビーム軌道を上下に挟むように半径方向に沿って複数対配置することで、ビームによる誘導電流を検知して、ビームが各電極対を通過するタイミングを測定する非破壊型ビームモニターである。これにより、等時性の確認が容易にできることから、ビームの品質や通過効率の向上、特に後述するネオンイオンの加速調整のような新規ビームの加速調整時間の短縮が期待される。

本年度は、位相プローブ本体の製作を行った。図 3 に位相プローブの構造とそれがサイクロトロンに設置された様子を示す。位相プローブは 10 対の電極からなり、各電極の大きさはサイクロトロン最内周側から 58 mm×40 mm が 3 対、58 mm×60 mm が 4 対、58 mm×93 mm が 3 対で、電極間隔は 50 mm である。設置は平成 23 年の夏を予定している。

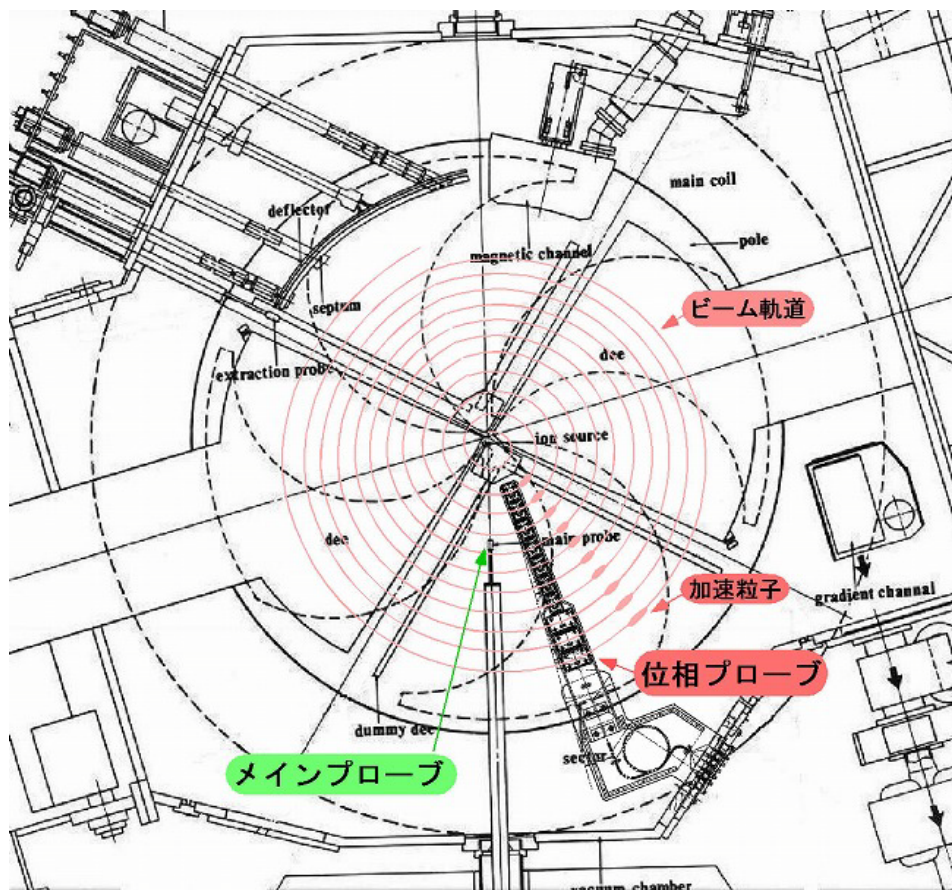


図3. 位相プローブの設置予定図

(3) 120 MeV ネオンイオン加速

基礎物理研究のユーザーから 120 MeV ネオンイオン加速の要求があった。そのため、外部 ECR イオン源(Kei-source[3])からの垂直入射への開始後で初となる、ネオンイオンの加速試験を行った。

要求されるビーム電流は、サイクロトロン取り出し後で 500 nA である。他のビームにおける実質的な効率から考えると、Kei-source から少なくとも 5 μ A のビーム電流が必要となる。現状の Kei-source では、ネオンの 5 価が 12 μ A、6 価が 2 μ A 得られている。そのうち、ネオンの 5 価は十分なビーム電流であるが、質量電荷比が 0.250095 であるため、炭素の 3 価(質量電荷比 0.250000)や酸素の 4 価(質量電荷比 0.250079)といった質量電荷比に近いイオンがあり、サイクロトロンにおいても十分な分離が非常に困難である。一方、6 価のビーム強度は、ユーザーから要求された強度に対して不足している。

本年度はまず、Kei-source から十分な強度が得られるネオンの 5 価の加速試験を行った。加速試験を 30 時間行ったが、半径 60 cm までの加速を確認するのみで等時性磁場の形成ができていない。今後、前述した位相プローブを導入することにより、短時間で等時性磁場が形成されることが期待される。

なお、Kei-source からのネオンの 6 価のビーム電流については、サイクロトロンの垂直入射へ導入前のテストスタンドにおいて 17 μ A の実績がある。ネオンの 6 価のビーム電流が低下している原因として、輸送ラインからの雑ガスの流入が考えられるため、今後の対策が必要となっている。

2. 老朽化対策や故障等

大型サイクロトロンでは様々な老朽化対策を行っている。建設以来使用してきた差圧式の流量計を、フロート型流量計に順次入れ替えている。また、大型サイクロトロンのマグネチックチャンネルは、冷却水の流量低下により運転可能な通電電流が低下し、最大エネルギー(90 MeV)の陽子を取り出せなくなっていた。そのため、新たに同型のマグネチックチャンネルを製作した。3 月末に交換予定であったが、東日本大震災後の余震の影響により延期され、平成 23 年度の夏に交換作業を行うこととした。

主な故障事例とその対応を以下に記す。

メインプローブ電極の破損：メインプローブのシャフトが垂れ下がり、メインプローブの冷却水銅パイプおよびカバーが、ダミーDeeの先端に接触して破損した。予備の電極と交換した。
空洞共振器ショート板駆動時シャフト真空漏れ：ショート板駆動用のシャフトに縦傷が入り、ショート板の駆動時に真空が悪化した。シャフトの研磨を実施後は真空漏れがなくなった。

参考文献

- [1] K.Ikegami, A.Goto : Beam Buncher in the Injection Beam Line for the Injector AVF Cyclotron., RIKEN Accel. Prog. Rep. 22 (1988).
- [2] 杉浦 彰則、金澤 光隆、北條 悟、本間 壽廣、田代 克人、岡田 高典、神谷 隆、小松 克好、野田 耕司, : AVF サイクロトロン用高調波ビームバンチャーの開発. 第7回日本加速器学会年会. WEPS057 p77. 兵庫県姫路市. 2010.8.
- [3]M.Muramatsu, A.Kitagawa, Y.Sato, S.Yamada, T.Hattori, M.Hanagasaki, T.Fukushima, H.Ogawa : Development of an ECR ion source for carbon therapy, Rev. Sci. Instrum.73 573 (2002).

3. 平成22年度

サイクロトロン分子プローブの製造・開発への利用状況

平成 22 年度サイクロトロン分子プローブの製造・開発への利用状況

福村 利光、張明榮、永津弘太郎、鈴木 寿、根本和義
^a 放射線医学総合研究所、分子イメージング研究センター

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と動物実験、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・企業の研究者に提供されている。その主な用途は、放射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) 統合失調症、躁鬱病、アルツハイマー病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、新規製造法・合成法の開発、超高比放射能化の研究等のためにも短寿命放射性同位元素が製造された。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) 血液脳関門に存在する多剤耐性タンパクのひとつ MRP4 および有機アニオントランスポータのひとつ OAT3 の活性を定量測定するためのプローブ開発に関し、これらのノックアウトマウスを用いた検討から有望なプローブ構造を見出した。
- 2) 酸化ストレスの指標である Glutathione/GST 還元系機能を捉えるプローブ開発に関して、基礎検討において有望と考えられた ¹⁸F 標識体が、サルを用いた PET おいても良好な放射能動態を示すことを確認することができた。
- 3) マイクロダイアリシスによる病態モデルにおける [¹¹C]酢酸ベンジルの代謝測定により、脳アストロサイトの機能変化の測定に成功した。
- 4) 新規 I₂ イミダゾリン受容体 PET 用プローブ [¹¹C]FTIMD の小動物 PET 測定での有用性を高めるため、超高比放射能 (>100 Ci/ μ mol) の [¹¹C]FTIMD を合成することに成功し、小動物脳定量的 PET 測定を行った結果、通常比放射能 (一般的な施設で達成される最大値、2 Ci/ μ mol 程度) に比べて脳での結合能が有意に増大した。超高比放射能 [¹¹C]FTIMD を用いた小動物 PET 測定は、定量的に I₂ イミダゾリン受容体濃度を感度良く測定できる優れた研究ツールであることを確立した。
- 5) [¹¹C]ホスゲンを使用し分子間結合による [¹¹C]カルバメートや非対称 [¹¹C]ウレアなどのプローブの標識合成技術を確認することができた。また、C-¹¹C 結合構築法を用い、 [¹¹C]アミノ酸などのプローブの簡便かつ効率な合成法を見いだした。さらに、 [¹¹C]シアンの簡便な製造法を確立し、PET プローブの開発に使用されている。
- 6) 数種の代謝型グルタメート受容体サブタイプ 1 の PET プローブを開発し評価を行った。その中から、高いインビボ特異結合を持つ有用なプローブを見いだした。また、構造/インビトロ活性/インビボ動態

の相関研究を行い、最適なプローブ構造を探索した。一方、末梢性ベンゾジアゼピン受容体の PET プローブを応用し、種々の疾病モデルに対する有用性を検証した。また、数種の抗がん剤の PET プローブ化を行い、これらが薬物排泄トランスポーターとの関連を調べた。

7) 5年間で腫瘍イメージング研究・精神神経疾患イメージング研究に必要な 102 種類以上の分子プローブの開発を行い、そのうち 11 個を臨床研究に利用可能なように製造・品質管理法の開発を行った。

1-1. 中半減期核種の製造状況

垂直照射法による中寿命ハロゲン核種・金属核種の自動製造に関する開発

数日間に渡る観察を可能にする中半減期核種、I-124 や Br-76 などを効率よく製造できる垂直照射法を開発した。垂直照射によりターゲット物質の保持が容易になり、ターゲット発熱密度 400 W/cm^2 を超える強強度照射を可能にした。さらに、作業者が被ばくを受けない遠隔自動処理装置を開発した。これらの結果、短時間で高核種純度を持った上記核種が得られた。

また、分子標的プローブ標識核種として、従来 Cu-62, -64 などの製造を行ってきたほか、新たに半減期約 3 日の Zr-89 の製造を行い、提供を行った。高純度の Zr-89 が得られたことから、今後、金属核種の自動製造に関する機器開発を行う。

Mo-99/Tc-99m の安定供給に向けた研究開発

核医学で広く利用される Tc-99m の安定供給へ向け、比較的容易かつ低開発コストが期待できる医療用加速器を用いた Tc-99m の直接製造を検討した。製造に関わる全ての工程を遠隔的に実施、かつ繰返し製造することを目的とし、 $10 \mu\text{A} \times 3 \text{ h}$ の照射により約 100 mCi の $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ を塩酸酸性水溶液として得た。今後、従来品との生物学的同等性や品質評価を行い、Tc-99m 供給の国内需要の一部を賄える代替手法としての確立を目指す。また、医療用加速器は国内に 100 基を超えて存在しており、水平展開可能な技術開発を検討する。

1-2. C4 (水平照射) コースによる ^{62}Zn ジェネレーター用照射装置の開発

C4 (水平照射) コースでは、大型サイクロトロンより供給される各種ビームを利用して、 ^{61}Cu 、 $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ 、 ^{63}Zn 、 ^{64}Cu 、などの金属核種の製造が行われている。第 2 期文部科学省委託費「分子イメージングプログラム」課題、「難治性ガンの診断及び治療に関する研究」において ^{62}Cu -ATSM を用いた多施設間での臨床研究が開始されることとなりジェネレーターを共同研究施設に月 1 回程度供給することとなった。これを受けて設置後 10 年以上経過しトラブルが多くなった照射システムをジェネレーターの安定的な外部への供給と収量の安定化を目指して更新を行った。この装置を使用した $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレーターを 3 施設 (福井大学医学部、国立がんセンター、横浜市立大学) への供給を 12 月から開始し、H22 年度は計 3 回のジェネレーターの供給を行った。



ジェネレーター用照射装置の全景

1-3. 分子プローブの生産・提供状況

平成 22 年度は、平成 21 年度に「新規短寿命放射性薬剤の有効性及び安全性に関するワーキンググループ」において承認された短寿命放射性薬剤 (^{11}C]thiothymidine, ^{18}F]FET-PE2I, ^{11}C]sulpiride 及び ^{11}C]AZD2184) が新規薬剤の臨床利用が開始されそれぞれ腫瘍の悪性度の評価やアルツハイマー病におけるアミロイドイメージング研究に使用された。

22 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。製造回数は震災等の影響により昨年度よりやや減少し 1877 回であった。

製造した放射性薬剤は、腫瘍診断 (^{11}C]メチオニン、 ^{11}C]チオチミジン、 ^{18}F]FDG、 ^{18}F]FLT、 ^{62}Cu]Cu-ATSM、 ^{18}F]FAZA など)、脳・中枢機能診断 (^{11}C]ラクロプライド、 ^{11}C]MNPA、 ^{11}C]DOPA ^{11}C]6-OH-BTA-1、 ^{11}C]スルピリドなど) の臨床利用、サルやラットなどの動物実験 (^{11}C]Ac5216、 ^{11}C]FLB457、 ^{11}C]PE2I、 ^{11}C]WAY100635 など)、校正用ファントム線源 (^{18}F]F $^-$ など) 等に提供した。

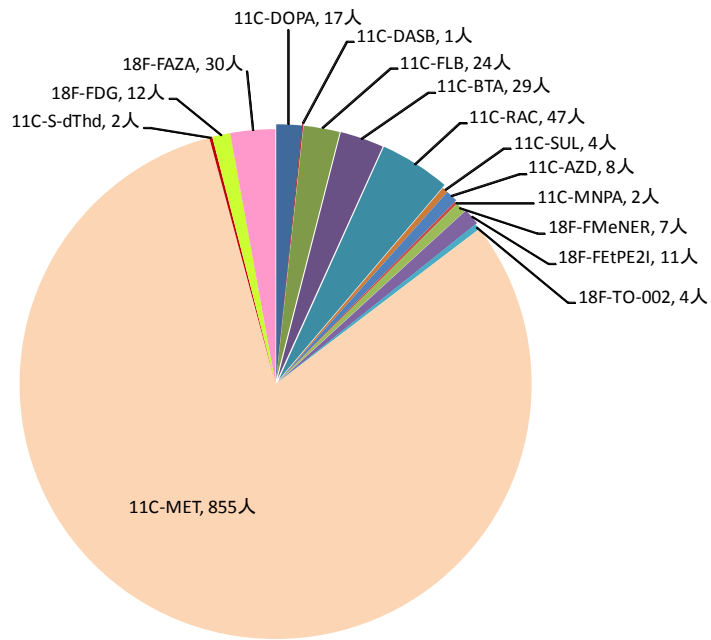


図1. 平成22年度における被験者数 (被験者総数 1053人)

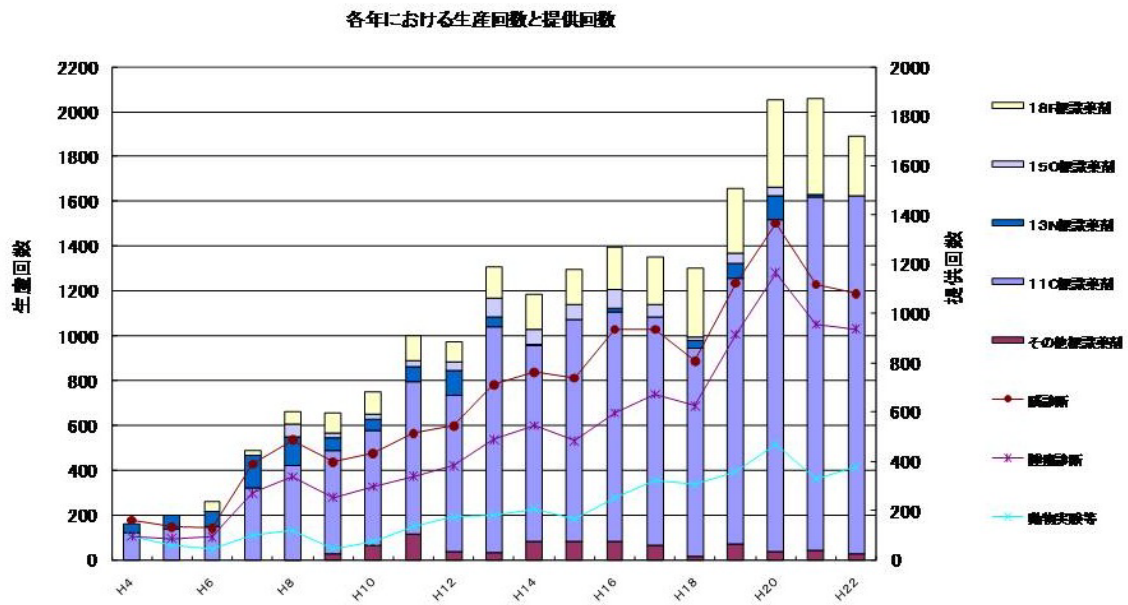


図2. 各年における生産回数と提供回数

表1. 平成22年度に製造した標識化合物および生産量

核種	化合形	生産量		診断供給量		動物供給量		譲渡		
		GBq	(回数)	GBq	(回数)	(人数)	GBq	(回数)	GBq	(回数)
¹¹ C	DOPA	27.82	(20)	15.81	(17)	(17)				
	DASB	2.14	(1)	0.862	(1)	(1)				
	FLB	91.7927	(39)	5.834	(18)	(24)	14.448	(33)		
	BTA	111.0628	(31)	34.692	(29)	(29)	16.124	(31)		
	MP4P	4.31	(1)							
	SCH	93.758	(34)				18.698	(34)		
	RAC	151.186	(48)	14.697	(41)	(47)	7.812	(15)		
	WAY	43.1758	(37)				15.6987	(34)		
	Sulpiride	20.27	(5)	6.464	(4)	(4)	1.689	(2)		
	PE2I	4.07	(1)				0.862	(1)		
	PK11195	0.11	(2)							
	AZD2184	36.512	(26)	4.809	(8)	(8)	2.14	(5)		
	MET	2509.374	(282)	1476.364	(530)	(855)	13.398	(8)		
	VER	3.59	(1)							
	MNPA	18.5	(6)	0.472	(2)	(2)	1.95	(3)		
	Ac5216	76.362	(33)				19.984	(31)		
	S-dThd	12.23	(4)	1.847	(2)	(2)				
	CH3I	68.941	(123)							
	その他	903.1998	(905)				37.25	(93)		
	合計	4178.404	(1597)	1561.851	(652)	(989)	150.0537	(290)		
¹⁸ F	FDG	7.466	(3)	5.651	(6)	(12)				
	FEtDAA	19.355	(15)				7.426	(12)		
	SPARQ	4.246	(6)				2.164	(5)		
	FMeNER	9.912	(10)	1.398	(7)	(7)				
	FEtPE2I	32.225	(17)	15.145	(11)	(11)	2.86	(8)		
	TO-002	3.447	(5)	0.938	(4)	(4)				
	FAZA	45.104	(28)	15.313	(22)	(30)	0.214	(1)		
	MPPF	1.446	(3)				1.135	(3)		
	F-	12.68	(18)				7.598	(17)		
	その他	129.9539	(164)				14.24	(34)		
	合計	265.8349	(268)	38.445	(50)	(64)	35.637	(80)		
	⁶⁴ Cu	水溶液	2.57	(5)				2.45	(5)	
⁶² Zn	62Zn/Cu	28.76	(3)						26.64	(9)
⁶³ Zn	水溶液	1.001	(2)				0.538	(2)		
⁸⁹ Zr	水溶液	0.26	(2)				0.037	(1)		
^{99m} Tc	水溶液	0.187	(1)							
¹²⁴ I	水溶液	1.755	(11)							

4. 物理研究

- 4-1. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究
- 4-2. 高エネルギー中性子場におけるガンマ線測定
- 4-3. $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 反応からの中性子線測定による PHITS コードの検証
- 4-4. 核破碎片生成二重微分断面積の測定

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^B

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

京大^A、放医研^B

研究成果概要

去年度までに測定した 6.0 MeV/u C^{6+} 入射による二次電子生成二重微分断面積について、CDW-EIS(Continuum Distorted Wave - Eikonal Initial State)による理論計算を R.D. Rivarola らの理論計算グループに依頼し比較した。1~10 eV では、1 eV の前方(<40°)を除いて非常に良く一致した一方、20 eV~10 keV では、(特に)後方で不一致が観測された。今年度から等速 O^{5+} 入射で同様に二次電子生成二重微分断面積測定を開始し、放出角度 20~160° まで 10° 刻み、二次電子エネルギー 5 eV~1 keV の二次電子計数、及び、バックグラウンド計数を測定した。

1. 研究目的と背景

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を得ることが難しいため、信頼できる高精度実験データは殆ど発表されていない。

本研究の目的は、ブラッグピーク近傍のエネルギー(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療率の向上に寄与できると言える。

2. 研究内容と成果

去年度までに測定した 6.0 MeV/u C^{6+} 入射による二次電子生成二重微分断面積(DDCS)について、CDW-EIS(Continuum Distorted Wave - Eikonal Initial State)による理論計算を R.D. Rivarola らの理論計算グループに依頼し比較を試みた。CDW 近似はボルン近似に電離電子が入射イオンによって歪まされる効果を考慮し、電離電子の終状態の波動関数を二中心クーロン波動関数で表したもので、ボルン近似よりも上位の近似とされており、特に、重イオン入射による多原子分子の電離断面積計算に広く用いられている。図 1 に結果を示す。1~10 eV では、1 eV の前方(<40°)を除いて非常に良く一致した一方、20~400 eV では、前方と(特に)後方で不一致が観測された。なお、500~600 eV の不一致は CDW-EIS で考慮しない Auger 電子放出の寄与が大きいためである。600 eV~10 keV では、後方(>120°)で不一致があるものの、前方のバイナリピークは良く再現された。参考として、L.H. Toburen らにより測定された水蒸気への 0.3、1.5 MeV/u H^+ 、0.3、0.5 MeV/u He^{2+} 入射による DDCS と CDW-EIS、HKS 理論計算値との比較も示す(図 2)[1,2]。CDW-EIS については、高エネルギー領域で、特に後方で不一致が観測されており、我々の結果と同様の傾向を示した。

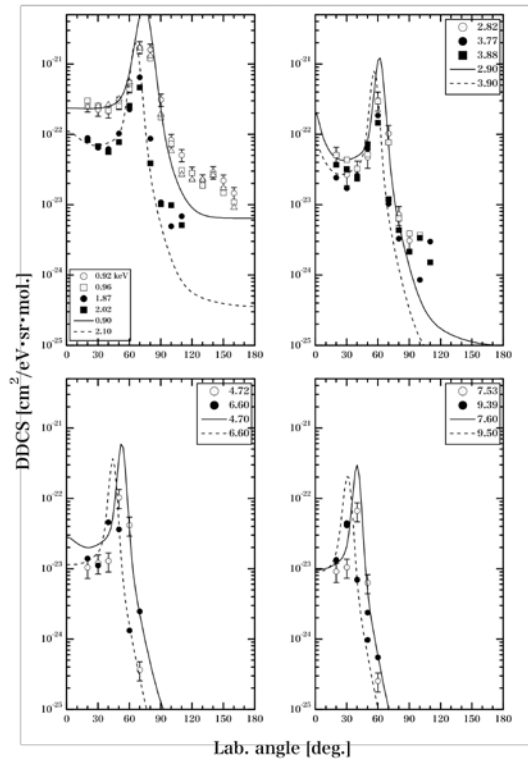
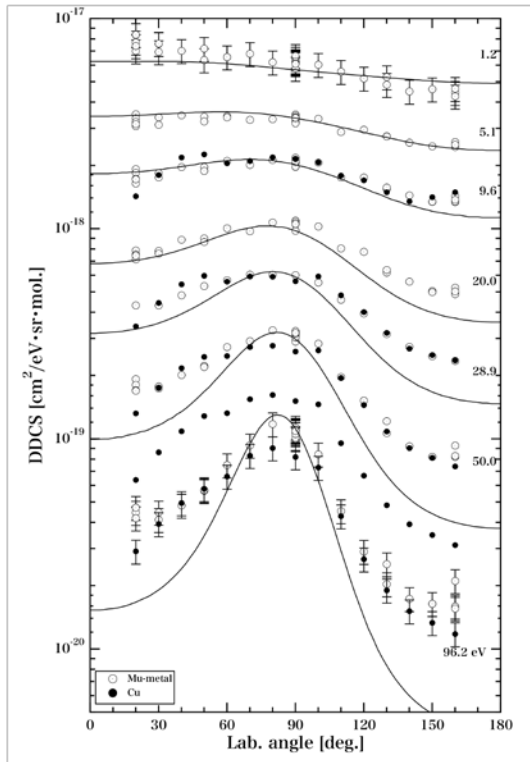


図1. 水蒸気への6.0 MeV/u C⁶⁺入射によるDDCS角度分布(放出角度20~160°、二次電子エネルギー1 eV~10 keV)とCDW-EIS理論計算値との比較

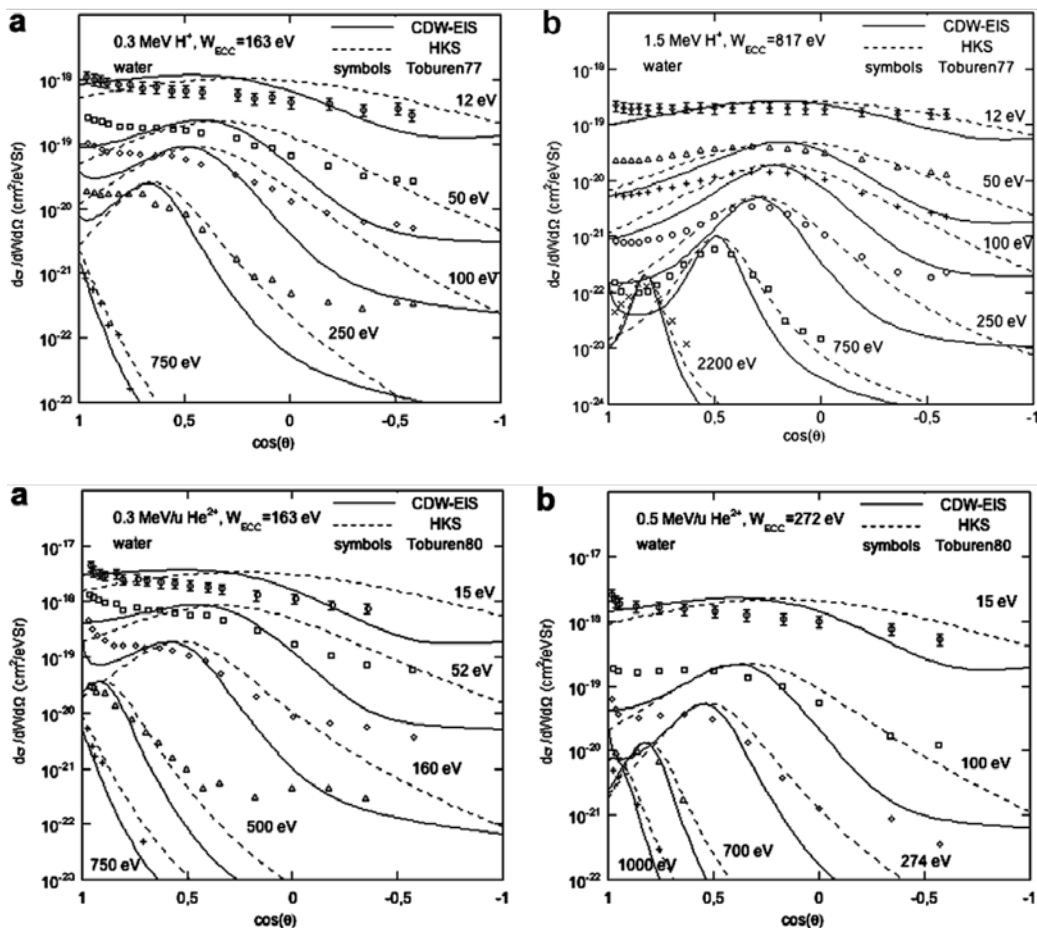
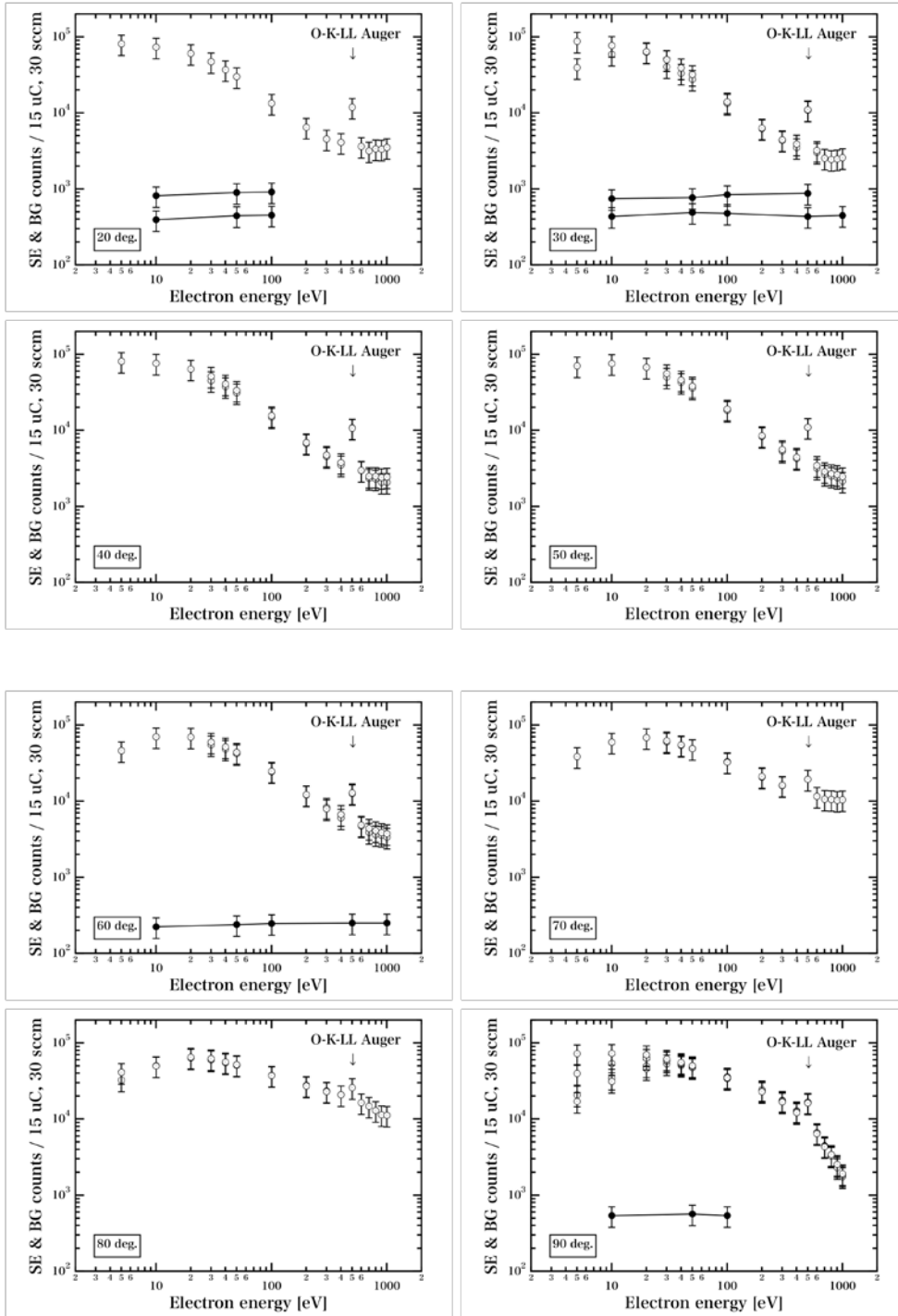


図 2. L.H. Toburen らにより測定された水蒸気への 0.3、1.5 MeV/u H^+ (上)、0.3、0.5 MeV/u He^{2+} (下)入射による DDCS 角度分布と CDW-EIS(実線)、HKS(破線)理論計算値との比較。CDW-EIS については高エネルギー領域の後方で不一致が見られる。

去年度までに 6.0 MeV/u C^{6+} 、 C^{4+} 入射で測定を完了し、今年度から等速 O^{5+} 入射で同様に二次電子生成二重微分断面積測定を開始した。サイクロスタッフの尽力により、数 MT のビーム調整を経て低バックグラウンドの良質なビームが得られている。2MT で 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、放出角度 20~160°まで 10°刻み、二次電子エネルギー 5 eV~1 keV 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。図 3 に結果を示す。すべての角度に対して、500 eV 近傍に鋭い O-K-LL Auger ピークを観測した。さらに SE の測定点数を増やし、BG の未測定角度を測定した後、DDCS、SDCS を評価する予定である。今後、等速 O^{8+} 、 O^{5+} 入射で測定し、過去に測定した He^{2+} 、 C^{6+} 、 C^{4+} 入射と比較することで以下 2 つを明らかにしたい。

- (1) Z^2 スケーリング則、すなわち高速イオン入射の電離、励起におけるボルン近似の有効性
- (2) 非完全電離イオン入射における入射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効果

(1)については、 Z^2 スケーリング則が高 Z イオン入射で過大になることは全電離断面積(TICS)測定でも報告されており、飽和(saturation)効果による高 Z イオン入射での Z^2 スケーリングの不適合、二中心効果(two-center effect)、すなわち、前方への加速によるエネルギー Spektral 変化が要因として指摘されているが、詳細は不明である。(2)については、 C^{4+} 、 O^{5+} の電子配置の違い(He 様と Li 様)が軌道電子の離脱に大きく影響すると期待される。



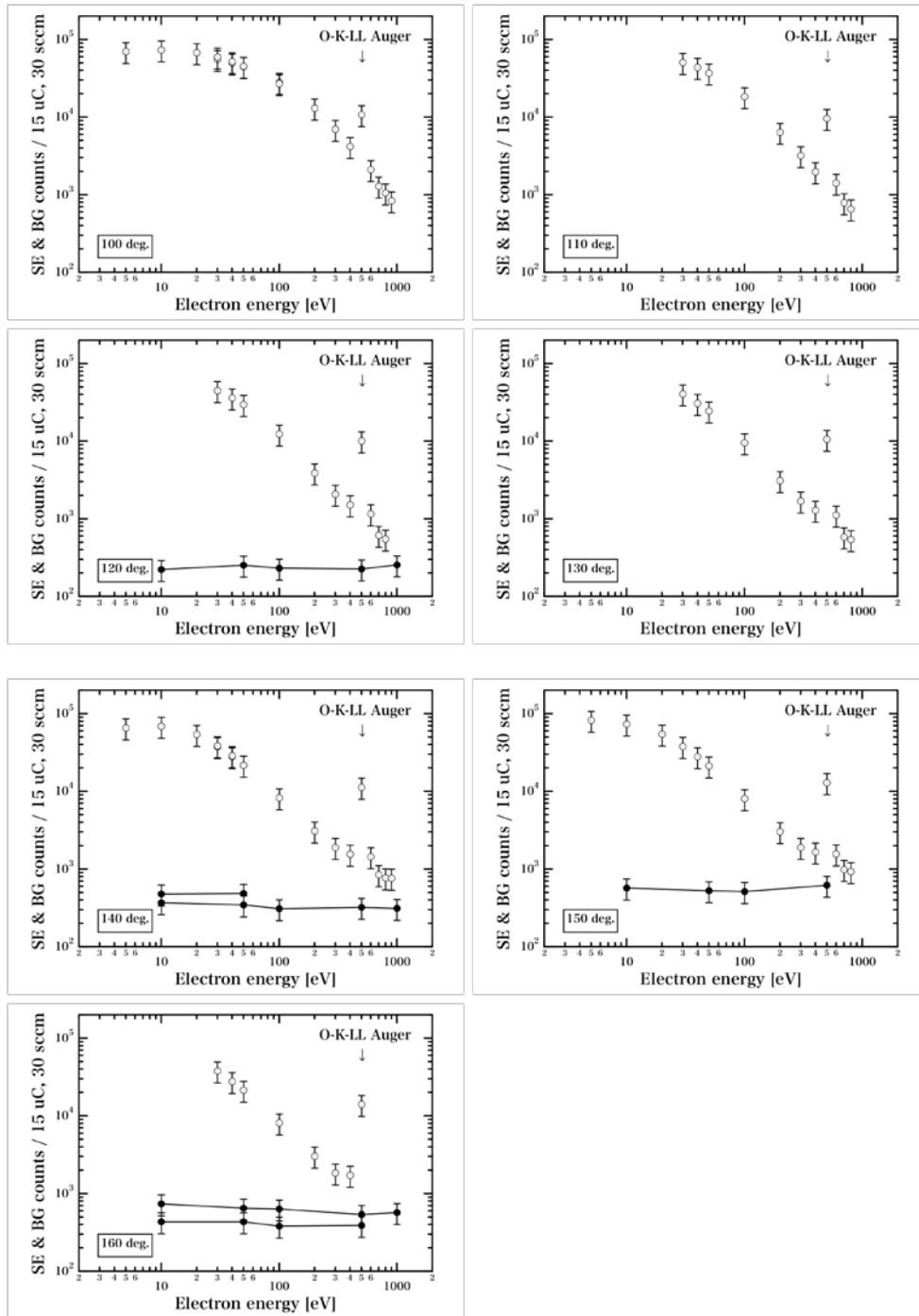


図3. 水蒸気への6.0 MeV/u O^{5+} 入射における二次電子計数(○)、バックグラウンド計数(●)の二次電子エネルギー依存性

参考文献

- [1] M.A. Bernal and J.A. Liendo, Inelastic-collision cross sections for the interactions of totally stripped H, He and C ions with liquid water, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B **262**, 1 (2007).
- [2] L.H. Toburen, W.E. Wilson, R.J. Popowich, Secondary electron emission from ionization of water vapor by 0.3 to 2.0 MeV He^+ and He^{2+} ions, Radiat. Res. **82**, 27 (1980).

高エネルギー中性子場におけるガンマ線測定

鎌田創、高田真志

基盤技術センター研究基盤技術部放射線計測技術開発室

1. 概要

近年、国内外で陽子線を用いたガン治療が積極的に行われている。粒子線治療の現場では治療に用いられる粒子線の2次粒子として、中性子やガンマ線が発生する。従ってガン治療の効果と同時に2次粒子による患者の被ばく線量評価が必要である。一方、医療被ばく以外にも JCO 東海臨界事故のような原子炉での被ばく事故、高エネルギー加速器施設での被ばく事故にも被ばく線量評価は治療のために必要不可欠である。被ばく線量評価や2次粒子による人体影響を模擬するモンテカルロシミュレーションを行う際には二次粒子生成断面積データが必要不可欠である。しかしながら、評価済み核データライブラリでは 20 MeV までのエネルギー領域において、精度良く整備されているが、20 MeV 以上のエネルギー領域では圧倒的に信頼性が低い事が現状である。そこで、我々は NaI(Tl)検出器の中性子とガンマ線に対する応答信号の減衰時定数が異なる事[1]に着目した波形弁別法と併せて飛行時間法を適用する事によって、中性子と即発ガンマ線の弁別を行った。

2. 実験

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。入射陽子エネルギーに対して 2 MeV 損失となるような厚さの Li ターゲット、入射粒子がフルストップになるような厚さの Cu ダンプを真空チェンバー内に設置して陽子を入射した。加速陽子エネルギーは、40 MeV であった。ターゲットから発生する中性子エネルギースペクトルを寸法 2 インチ径 2 インチ厚のナフタレンベース有機液体シンチレータ EJ-399-06 を用いて飛行時間法で測定した。一方、ターゲットから発生するガンマ線を NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いて、飛行時間測定を行った。図 1 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:信号全体にわたって積分した発光量、縦軸:信号の減衰時間で積分した発光量)である。このときターゲットラダーではリチウムターゲットが選択されている。また、図 2 には、NaI(Tl)の中性子飛行時間分布および発光量の 2 次元プロット(横軸:飛行時間分布、縦軸:検出器の発光量)、図 3 にはターゲットにビームがフルストップになるような厚さの銅を選択した場合の 2 次元プロットを示してある。図の比較から、図 2

で観測される 1700 ch 周辺のピークが中性子によるイベント、図 3 で観測される 1000 ch におけるピークが即発ガンマ線によるイベントと考えられる。

我々は、ガンマ線のイベントを波形識別したスペクトルからゲートを決定し、中性子およびガンマ線の飛行時間分布から即発ガンマ線イベントを選択、バックグラウンド測定でえられた波高分布をオンビーム測定で得られた波高分布から引き去ることによって、正味の波高分布を得た。

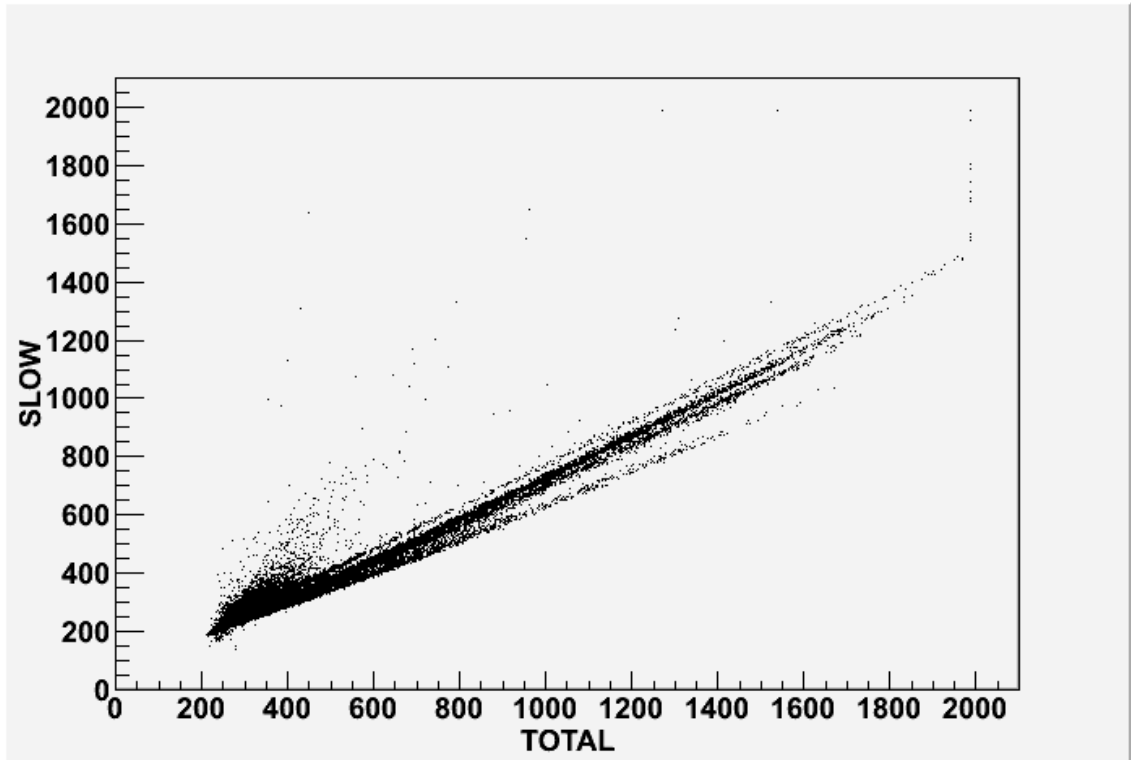


図 1NaI(Tl)検出器を用いた測定の発光量 2次元分布

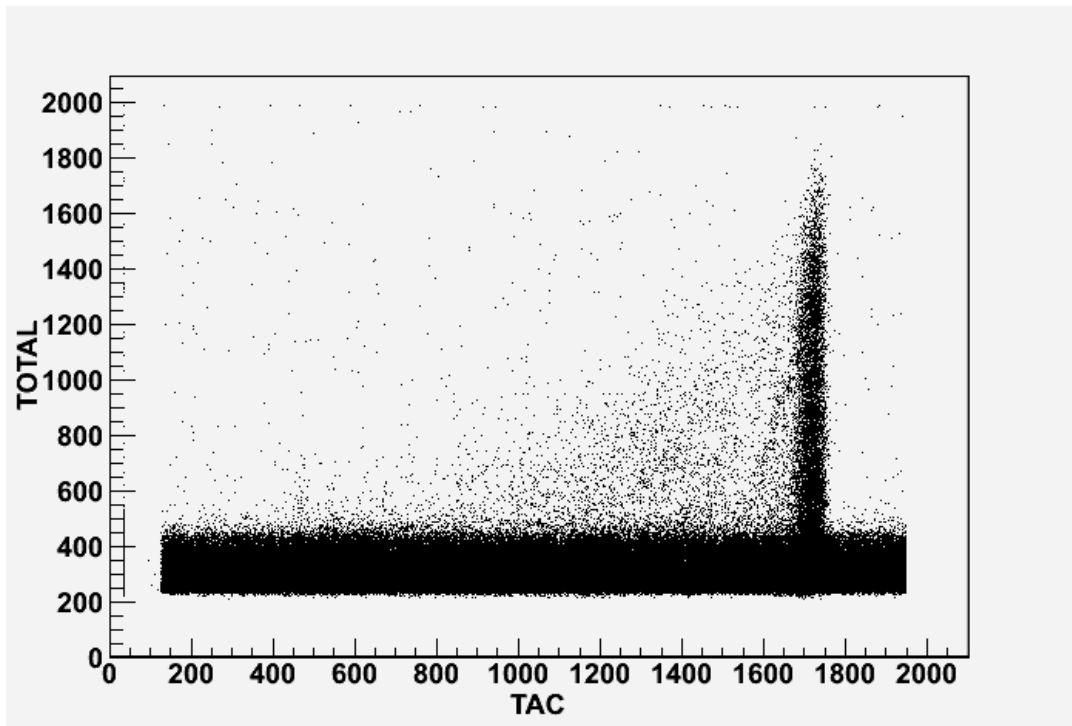


図 2 NaI(Tl)を用いた測定での飛行時間と発光量の 2 次元分布、ターゲットはリチウム

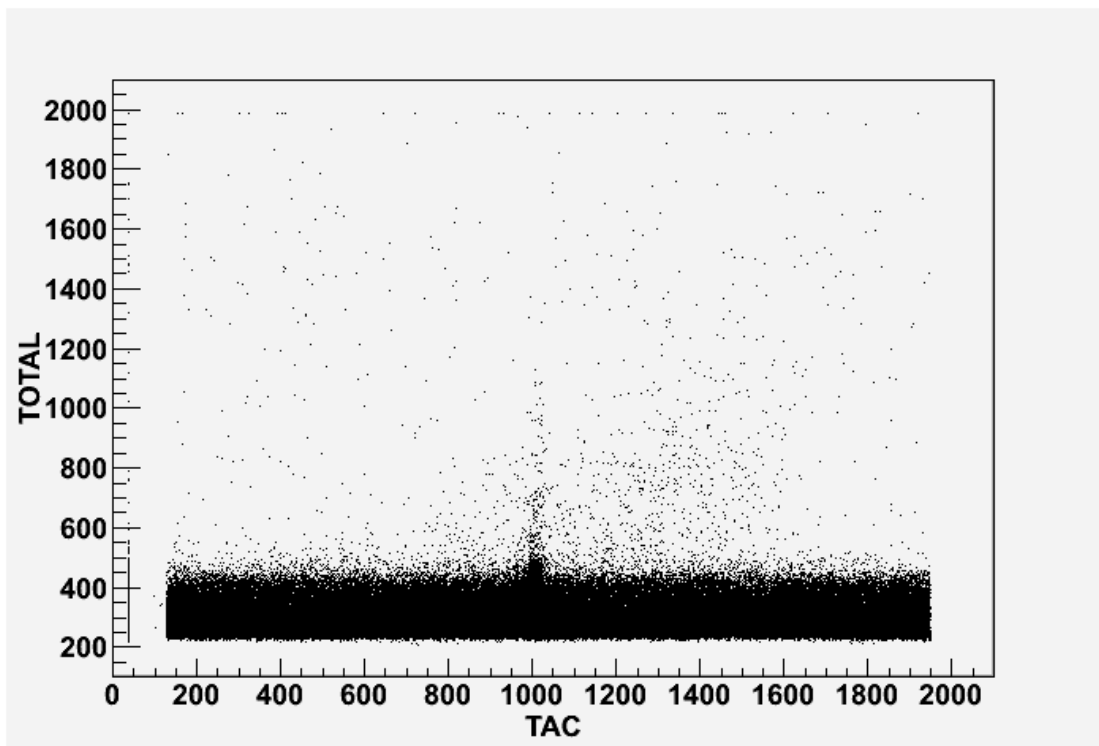
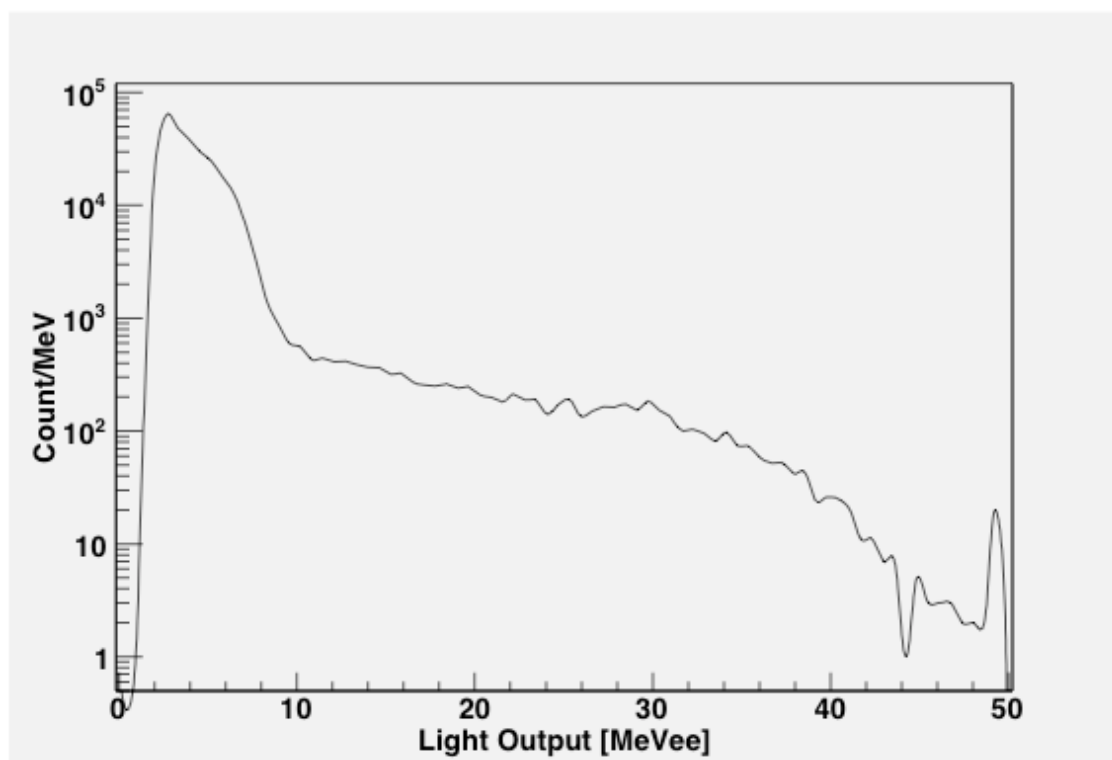


図 3 NaI(Tl)を用いた発光量と飛行時間の 2 次元分布、ターゲットは銅

3.結果

図4に、ゲートをかけたガンマ線の波高分布を示す。横軸が発光量を電子エネルギー、縦軸をエネルギーあたりのカウント数でしめしてある。20 MeV まで分布が広がるのは陽子捕獲反応によって、原子核の陽子結合エネルギーと陽子が持ち込んだ運動エネルギーの和のエネルギーが基底状態まで遷移したものである。



4.まとめ

放医研サイクロトロン施設において、陽子 40 MeV を真空チェンバーに設置したターゲットに入射させたときに発生する即発ガンマ線を測定した。

今後は、これらの波形識別から2次粒子線量評価手法への適用を考えている。一方、陽子入射での即発ガンマ線発生断面積の取得も目指していく。

謝辞

今回の実験結果は金澤前サイクロトロン運転室長をはじめとするメンバーの方々、AEC 運転クルーの方々のご尽力によって得られたものです。どうもありがとうございました。

参考文献: G.H. SHARE, J. D. KURFESS, R. B. THEUS, Nucl. Instrum. Methods, 148, 531-533, (1981).

$^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 反応からの中性子測定による PHITS コードの検証

遠藤 暁^a、森宗佑樹^a、早川陽祐^a、高田真志^b、鎌田 創^b、静間 清^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]

現在、逆反応を用いた重粒子線と BNCT の新しい複合治療法の検討を行うため、重粒子線の輸送計算可能な PHITS モンテカルロコード[1]を利用した検討を開始している。この検討に用いる PHITS コードでは、断面積データの不足から、QMD モデル断面積[2]を使用しており 10MeV/核子以下のエネルギーに対する精度が必ずしも確かめられていない。そこで、計算に使用する PHITS コードの低エネルギー中性子過剰核ビーム計算精度の検証が必要である。

新しい重粒子・中性子補足反応の混合療法の可能性を検討するための第一歩として、まず PHITS コードの信頼性を検証することが目的である。PHITS コードの中でも、特に中性子過剰核ビームの低エネルギー計算の精度を確認する必要がある。そのため、放射線医学総合研究所サイクロトロンからの ^{13}C と生体透過物質であるアクリル標的との $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 反応で生成される中性子線の収量を測定する。この測定値と PHITS コードを用いた計算を比較・検討することである。これまで、 ^{13}C エネルギー 11MeV/核子を用いた試験実験、8MeV/核子を用いた実験の行っている。本研究年度は 10MeV/核子、11MeV/核子において実験を行い断面積データを追加する。

[実験]

放射線医学総合研究所サイクロトロン[3]からの 10 および 11MeV/核子 ^{13}C を生体透過物質であるアクリル($\text{H}_6\text{C}_4\text{O}_2$)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。標的として厚さ 3mm のアクリル板を用い、標的から ~210cm の飛行距離において、ヴェトカウンターおよび液体シンチレーションカウンターを用いて測定を行った。また、水素標的からの中

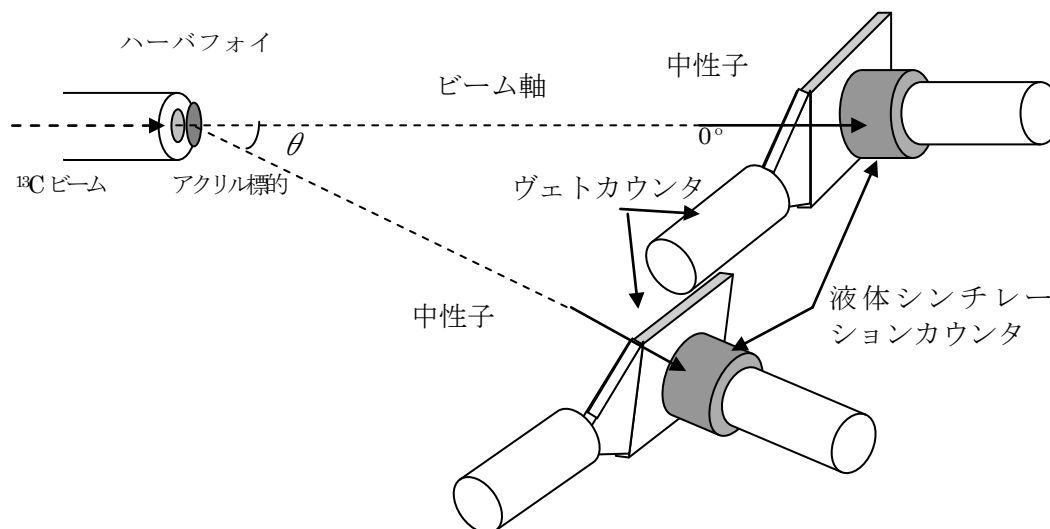


図 1. 測定セットアップ

中性子の評価のため、炭素標的(C)、ポリエチレン(H₄C₂)標的についても測定を行った。測定は散乱角 0 度、6、12、24、30、60 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を 0 度で行った。

[データ解析]

測定データは、波高弁別法を用いて中性子成分を抽出し、飛行時間法を用いて中性子エネルギー分布を導出した。得られた中性子事象に対し、γフラッシュの計測時間 7ns(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た。断面積の導出のため、SCINFL コードを用いて、測定効率を決定し補正を行った。

[結果およびまとめ]

まず、アクリル標的(H₆C₄O₂)とポリエチレン(H₄C₂)標的からの発生中性子の測定スペクトルを図 2 に示す。アクリル標的とポリエチレン標的からの中性子の測定スペクトルは、ほぼ一致しておりアクリル中の酸素原子と炭素で生成する中性子が近似的に等しいことが示された。したがって、本解析では、アクリルで発生中性子スペクトル(図 3(a))から、(炭素+酸素)原子数でスケールした炭素標的からの発生中性子スペクトル(図 3(b))を差し引くことで、¹H(¹³C,n)¹³N 反応に対応する中性子スペクトルを導出した。2体反応である ¹H(¹³C,n)¹³N 反応を仮定し、運動学から発生中性子エネルギーを計算するとおおよそ 20MeV が得られる。また、このバンプ構造は放出角が大きくなると共に急激に減少していく。これらのことから、図 4 中のバン

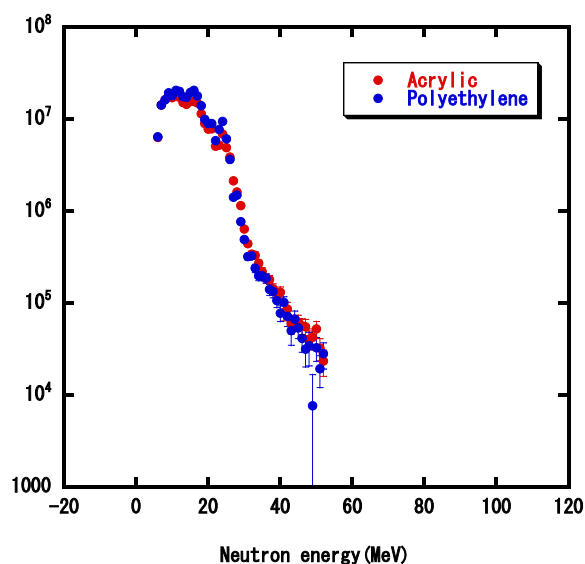


図 2 アクリル標的(H₆C₄O₂)とポリエチレン(H₄C₂)標的からの発生中性子の測定スペクトル

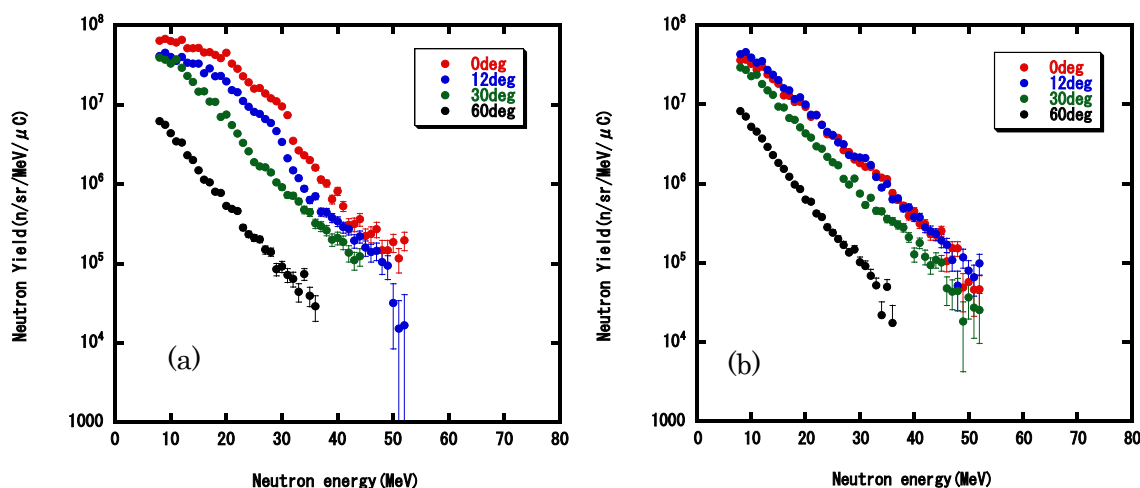


図 3 入射エネルギー11MeV/核子 ¹³C ビーム中性子生成断面積(a)アクリル標的、(b)炭素標的。

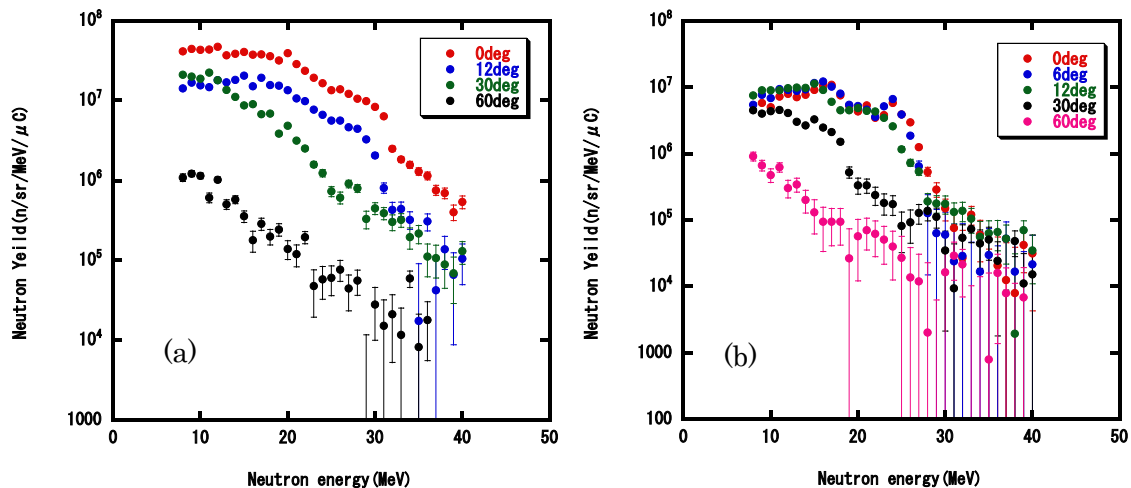


図4 ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C},\text{n}){}^{13}\text{N}$ 反応中性子生成断面積。(a)11MeV/核子、(b)10MeV/核子

構造は、 ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C},\text{n}){}^{13}\text{N}$ 反応からの中性子に由来すると考えられる。今後エネルギー点を追加し、更に断面積データを蓄積し、PHITS 計算用の ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C},\text{n}){}^{13}\text{N}$ 反応や ${}^1\text{H}({}^7\text{Li},\text{n}){}^7\text{Be}$ 反応などの中性子過剰核ビーム入射に対する反応断面積ライブラリーの構築を目指す。

[謝辞]

今回の実験を行なうにあたり、放医研サイクロロン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] Chiba, S., Chadwick, M. B., Niita, K., Maruyama, T., Maruyama, T. and Iwamoto, A., Nucleon-induced preequilibrium reactions in terms of the quantum molecular dynamics, Phys Rev. C, 53,1824-1832, (1996).
- [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)

核破砕片生成二重微分断面積の測定

佐波俊哉^a、萩原雅之^a、岩瀬広^a、鎌田創^b、高田真志^b
^a 高エネルギー加速器研究機構、^b 放射線医学総合研究所

概要

核破砕片生成二重微分断面積は核子やイオンにより引き起こされた核反応に伴う核破砕片の生成エネルギー・角度分布を記述し、核子やイオンの物質中でのエネルギー付与分布・過程を正確に記述するための基礎的なパラメータである。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 10MeV 陽子、中性子による核反応に伴う核破砕片の二重微分断面積の測定を目的に、ブラックカーブカウンターを開発してきた[1,2,8]。このブラックカーブカウンター(BCC)に対して、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[1]、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[2]、という手法を開発し、数 10MeV 陽子起因の核破砕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きた。さらに、2008 年度には入射窓を従前のアルミナイズドマイラーに比べ 1/10 の厚さの窒化シリコンに変更し、試料厚みも従前のポリエチレンの約 1/10 となる炭素箔を用いることにより、エネルギーロスの低減とエネルギー分解能の向上を実現し[3]、より低い入射エネルギーである 40 MeV 入射に対するフラグメント生成から、2 体反応成分の同定を行った [4]。昨年度から、文部科学省原子力基盤研究イニシアティブによる研究資金を利用した BCC による包括的なデータ測定プログラムにより、4 台の BCC を新規に製作し同時に用いたより効率的にデータ取得と、大阪大学核物理研究センターでの 140MeV、200MeV、300MeV の入射陽子に対するの測定が行われた [5]。平成 22 年度の放医研サイクロトロンの実験では、この大阪大学での測定とこれまでの放医研での測定結果の整合性の確認と新たなデータの取得を目的に、3 台の BCC を用いて、陽子 50MeV に対する炭素、窒素、酸素、アルミニウムからの核破砕片生成断面積測定を行った。

本報告では、平成 22 年度の放医研サイクロトロンにおける実験の概要と結果について項目毎に述べる。

1. 実験装置[1,2,3,4]

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

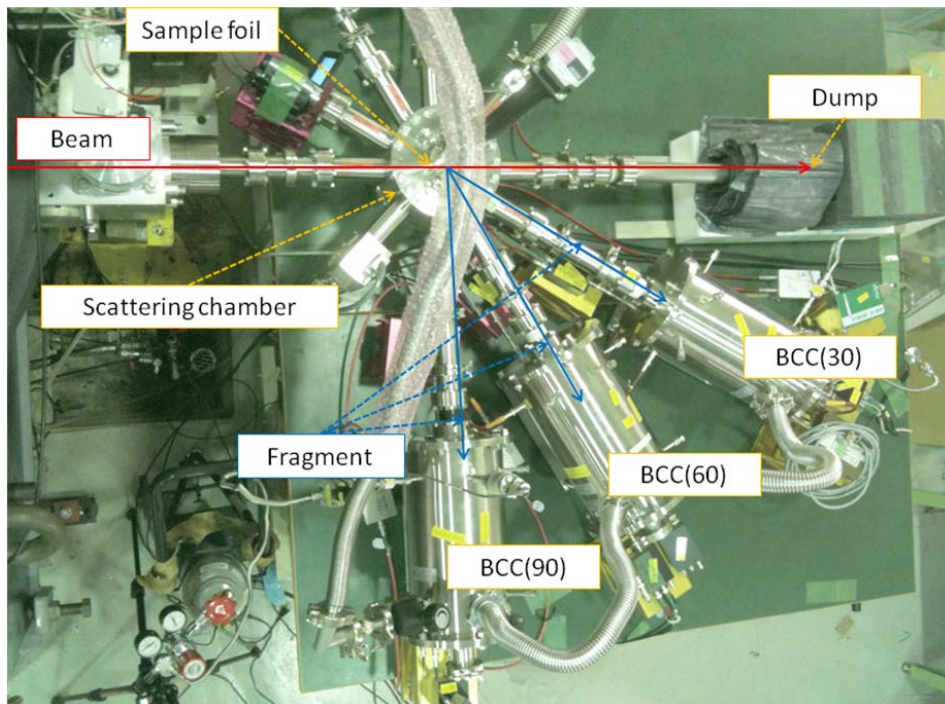


図 1 実験機器配置。30 度ポート、60 度ポート、90 度ポートに BCC をそれぞれ接続し、3 角度の同時測定を行う

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。

散乱チェンバー、BCC の縦断面図を図 2 に示す。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。

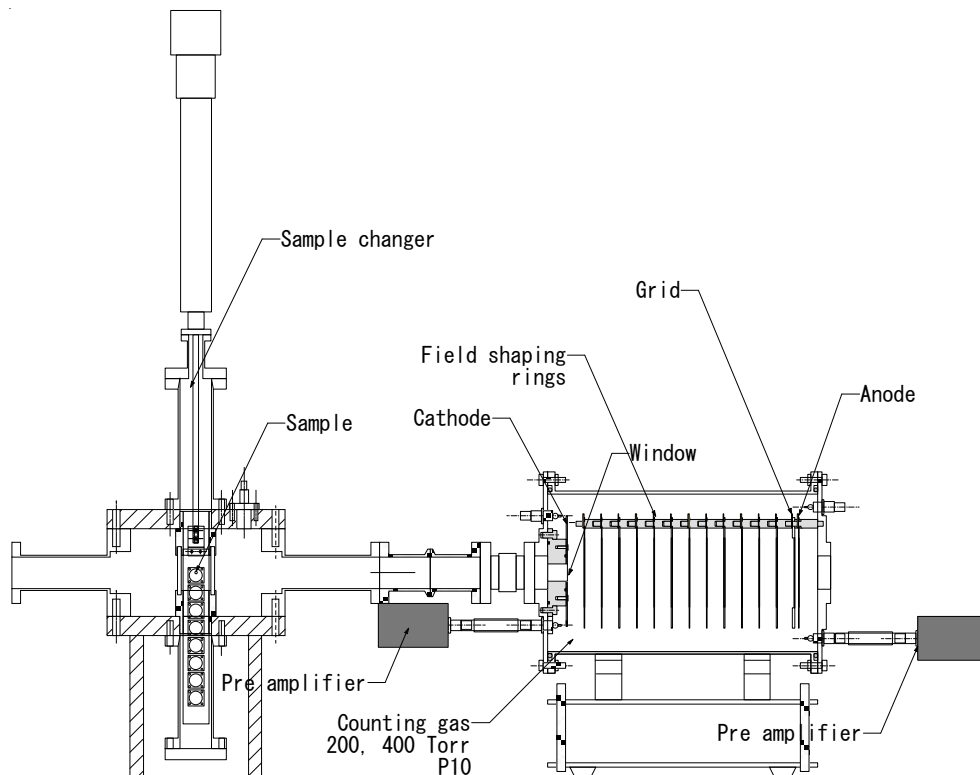


図 2 散乱チェンバー、ブラッグカーブカウンターの縦断面図

図 3 にブラッグカーブカウンターの内部構造模式図(左)と粒子弁別の方法(右)について示す。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 4 に典型的なブラックピーク-エネルギーの相関図として炭素標的に 50 MeV 陽子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①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時間差、すなわち粒子の飛程に相当する信号を得ることができ、これを利用し図中の①の成分も粒子同定することができる[1]。また図中の②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[2]。これらの2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定エネルギー域を大幅に拡充し、十分な広い可測定をもったフラグメント測定を実現している。

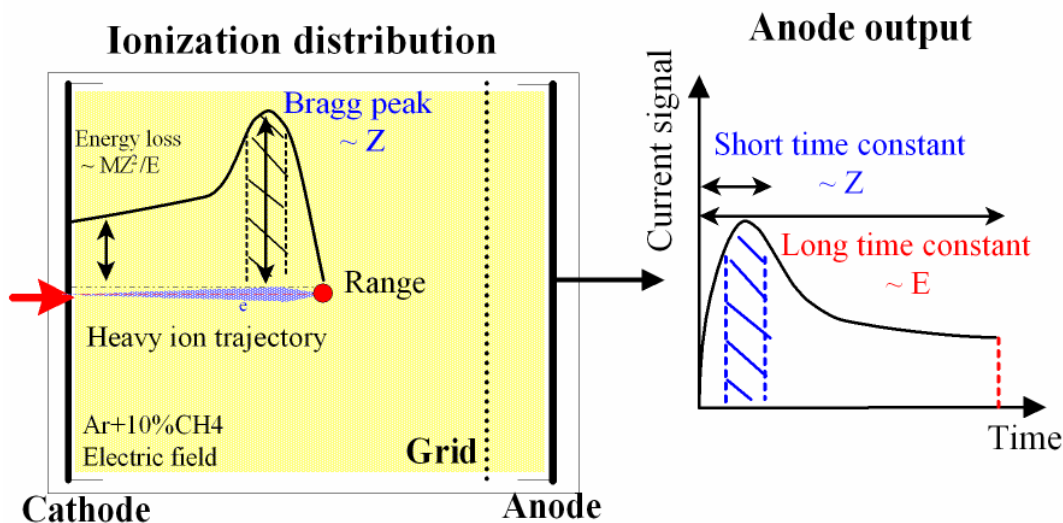


図3 ブラックカーブカウンターの構造(左)と粒子弁別の方法(右)：入射粒子は検出器左側から入射窓を透過して検出器に入射する。粒子は検出器内のガスを電離し止められる。電離により生成した電子を陽極に電場を用いて収集する。陽極の直前にグリッドを置くことにより、1台の検出器で、陽極信号(右図)の時間分布と積分値を用いて粒子の種類とエネルギーの情報を得る。

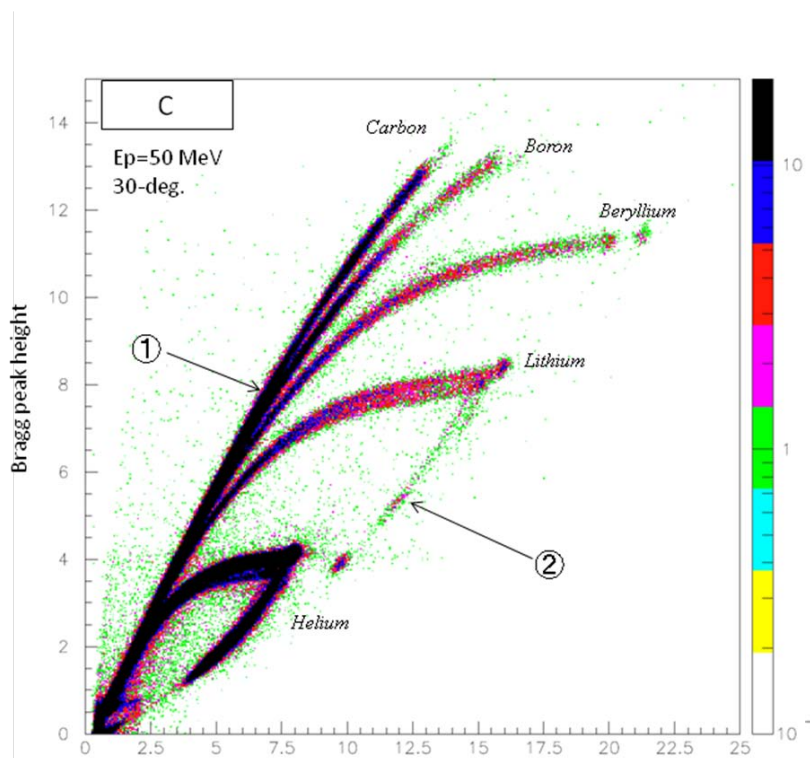


図4 炭素標的に50 MeV陽子を入射した場合に生成する核破断片を30度方向で測定した場合のブラックピークとエネルギーの相関図。縦軸のブラックピークの高さが粒子の種類に応じて変化しており、粒子が明瞭に同定されている。

2. 50MeV 陽子入射実験

本研究では、これまでに、炭素、アルミニウム、シリコン、酸素、窒素、チタン、銅の核破砕生成二重微分断面を陽子 40, 50, 70, 80, 140, 200, 300 MeV 入射に対し測定している[3,5, 9,10]。また、炭素入射に対しては 72MeV, 144MeV で同様の測定を行っている[7]。本年は大阪大学核物理研究センターにおいて 140,200,300MeV のデータを取得した検出器群に対し、放医研サイクロトロンでの数 10MeV 測定との整合性を確認するための測定として、50MeV 陽子入射に対する炭素からの核破砕生成二重微分断面測定を行った。あわせてこれまで未取得であった、50MeV 陽子入射に対する酸素、窒素からの核破砕生成二重微分断面の測定も行った。

図 5 に 50MeV 陽子を炭素に入射した際に生成する核破砕を測定した BCC のブラックピーク-エネルギーの 2 次元図を 30,60,90 度について示す。ヘリウム、リチウム、ベリリウム、ボロン、炭素が二次粒子として測定されている、この中で特徴的なのは $^{12}\text{C}(n, ^6\text{Li})^7\text{Be}$ 反応によるピーク状の成分である。図中に ^7Be のエネルギー準位を示す。基底状態、第一励起状態への成分($^{12}\text{C}(n, ^6\text{Li})^7\text{Be}_{\text{gs}+0.44}$ - 図中に赤丸で示した)、第二励起状態への成分($^{12}\text{C}(n, ^6\text{Li})^7\text{Be}_{4.57}$)などが測定されている。同様にベリリウムについても ^6Li の基底状態への成分($^{12}\text{C}(n, ^7\text{Be})^6\text{Li}_{\text{gs}}$)が測定されている。

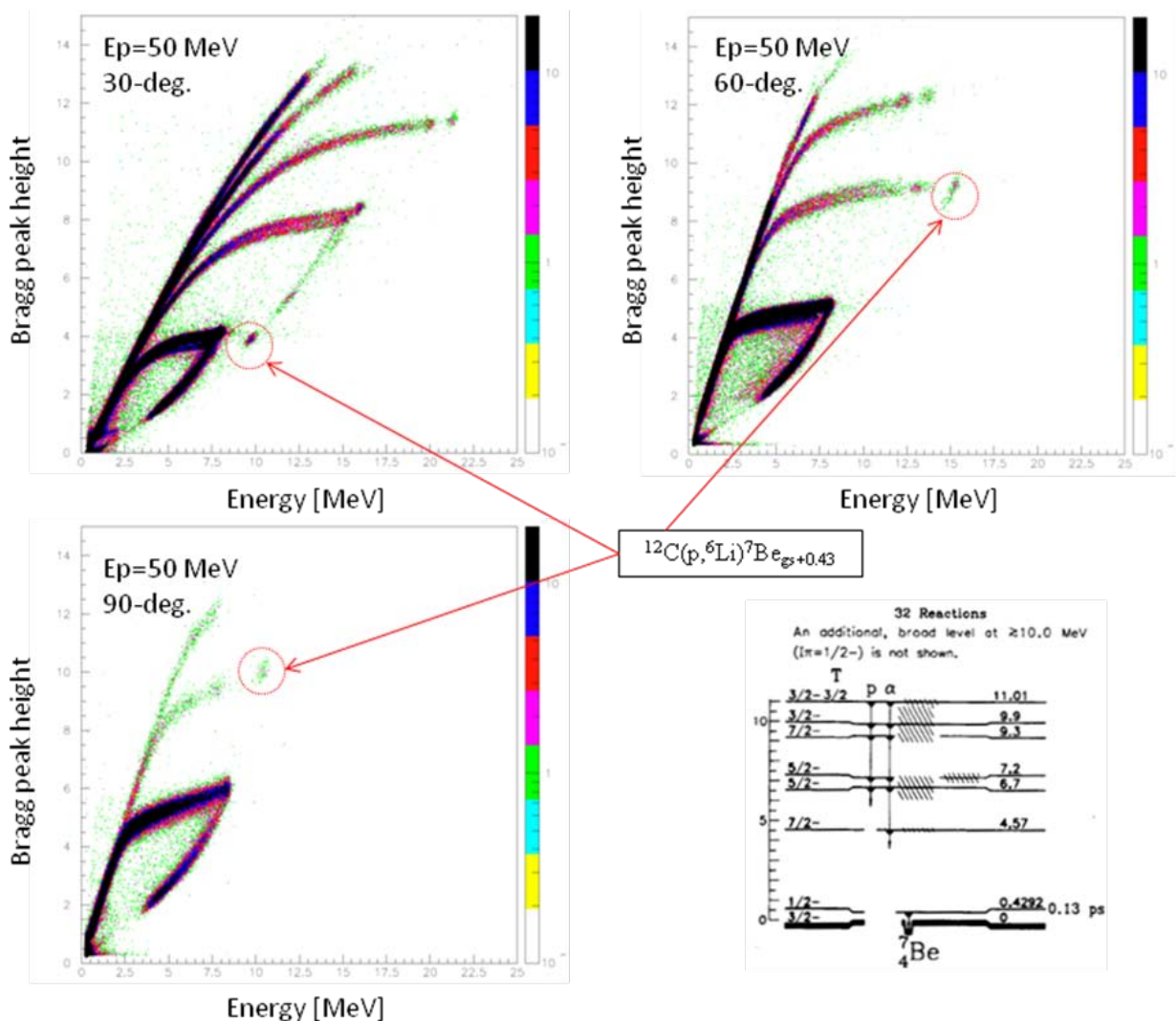


図 5 50MeV 陽子を炭素に入射した際に生成する核破砕を測定した BCC のブラックピーク-エネルギーの 2 次元図

このうち $^{12}\text{C}(n, ^6\text{Li})^7\text{Be}_{\text{gs}+0.44}$ については炭素からの核破砕放出に係わる原子核のクラスター構造の寄与を検討するために、G.D.Erasmo らと S.Kato らにより角度分布が測定されている[11][12]。これらの実験では $^{12}\text{C}(n, ^6\text{Li})^7\text{Be}_{\text{gs}}$ と $^{12}\text{C}(n, ^6\text{Li})^7\text{Be}_{0.44}$ 反応に焦点を絞り、 $E_p=40.3\text{MeV}$ と 51.9MeV に対して、それぞれの成分の詳細な角度分布を得ている。BCC はこの 2 成分を分けることはできないので、2 成分の合算

について比較を行い、実験値の妥当性を確認する。また、2008 年度に、すでに 40 MeV の 30,60,90 度と 50 MeV の 30 度での測定を行っているの、このデータとも比較し、BCC 検出器間の整合性を確認する。

断面積値は図 5 に示すピーク部分の計数を、入射陽子数、立体角、ターゲット原子数で規格化し、不感時間の補正を行って求める。この断面積値は実験室系の値であるので、2 体の運動学を用いて重心系で見た放出角度、断面積値に換算を行う。この換算の際に ${}^7\text{Be}_{\text{gs}}$ の成分と ${}^7\text{Be}_{0.44}$ の成分の換算計数は異なるが、その差異は断面積絶対値の誤差に比べ小さいので、 ${}^7\text{Be}_{\text{gs}}$ であるとして換算を行った。誤差は統計によるもの(最大 10%)と系統誤差(立体角誤差、陽子数誤差、ターゲット原子数誤差などによる)12%を見込んだ。

図 6 に ${}^{12}\text{C}(\text{n}, {}^6\text{Li}){}^7\text{Be}_{\text{gs}+0.44}$ 反応の角度分布の実験値間における比較を示す。本実験値は Present は陽子エネルギー 50 MeV に対する値であり、以前の測定データ 50MeV Sanami et al(2008)と誤差内で一致しており、BCC による測定の整合性が確認できたと言える。Kato et al の 51.9MeV に対する値とは差異があるが、Erasmus et al の 40MeV の値と Kato et al の値の間に位置しており、入射エネルギーの違いがこの差異に影響していると考えられる。同様に BCC により測定した値 40MeV Sanami et al (2008)はこの 40.3MeV の Erasmus et al の値と大変よく一致しており、これらから測定の妥当性が確認できた。

これら複数の実験値は入射陽子エネルギーが 40MeV から 50MeV に変化する間に ${}^{12}\text{C}(\text{n}, {}^6\text{Li}){}^7\text{Be}_{\text{gs}+0.44}$ 成分が 1 桁近く減少することを示しており、反応のモデル化の視点から興味深い。同様の手法によりより高い励起エネルギーに対応する成分(${}^{12}\text{C}(\text{n}, {}^6\text{Li}){}^7\text{Be}_{4.57}$)や異なる残留核に遷移する成分(${}^{12}\text{C}(\text{n}, {}^7\text{Be}){}^6\text{Li}_{\text{gs}}$)の角度分布が導出可能であり、二重微分断面積の導出とあわせて現在解析を進めている。

3. まとめ

数 10 MeV 領域での核破砕片生成二重微分断面積データの取得のためにブラックカーブカウンターを中心とした測定システムを作成し、放射線医学総合研究所サイクロトロンにおいて、50MeV 陽子入射に対する炭素、酸素、窒素、アルミニウムからの核破砕片測定を行った。このうち ${}^{12}\text{C}(\text{n}, {}^6\text{Li}){}^7\text{Be}_{\text{gs}+0.44}$ に着目し、重心系角度分布の結果を、他のグループの測定結果、これまでの BCC による測定結果、と比較し、データの妥当性と整合性が確認できた。継続してデータ解析を進め二重微分断面積を得る。

次年度は、陽子、重陽子、三重陽子、ヘリウム原子核などの核破砕片より軽い粒子についても測定を開始し、核破砕片生成データとあわせて数 10 から数 100 MeV 領域における核反応生成物の実験データの拡充を図るとともに、これらのデータを記述する核反応モデルについて検証を加えていく。

参考文献

- [1] T.Sanami, M.Hagiwara, T.Oishi, M.Baba, M.Takada, *Nucl. Instrum. Meth. A* Vol 589/2 pp 193-201 (2008)
- [2] M. Hagiwara, T. Sanami, T. Oishi, M. Baba, M. Takada, *Nucl. Instrum. Meth. A* Vol 592 pp 73-79 (2008)
- [3] T.Sanami, M.Hagiwara, M.Takada, M.Baba: Recent progress of fragment measurement from tens of MeV proton induced reaction using Bragg curve counter, *Proceedings of the 2008 Symposium on Nuclear Data*
- [4] T.Sanami, M.Hagiwara, M.Takada, M.Baba: Improvement of lower energy threshold of fragment measurement from tens of MeV protons using Bragg Curve counter, *Proceedings of the Radiation Detectors and their uses, 2009*

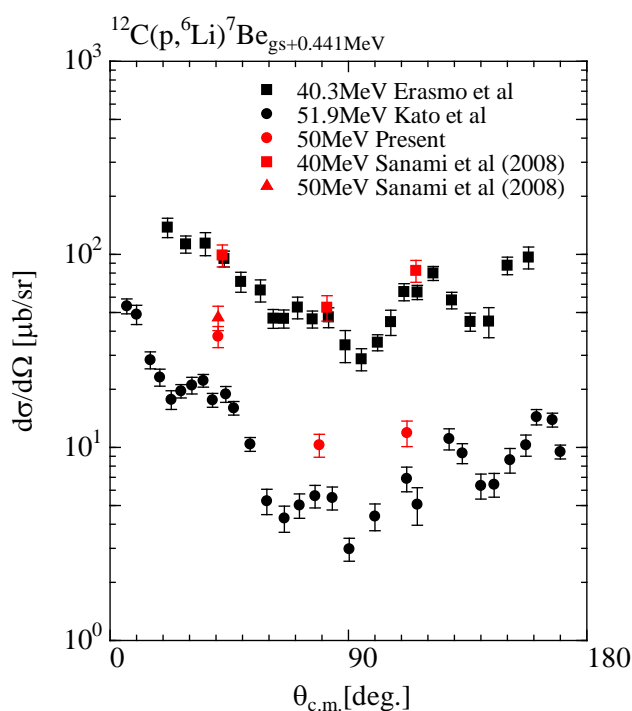


図 6 ${}^{12}\text{C}(\text{n}, {}^6\text{Li}){}^7\text{Be}_{\text{gs}+0.44}$ 反応の角度分布の比較。

- [5] M. Hagiwara, T. Oishi, S. Kamada, M. Baba, T. Sanami, M. Takada and N. Miyahara, "Measurements of Double Differential Fragment Production Cross Sections of Silicon for 70 MeV Protons", *Proceedings of 2005 Symposium on Nuclear Data (JAEA-Conf 2006-009)*
- [6] H.Iwase et al., *J.Nucl.Sci.Technol.*, **39** (2002) 1142
- [7] T.Sanami, M.Hagiwara, M.Takada, M.Baba: Measurement of fragment production DDX of 72 and 144 MeV ^{12}C beam induced reaction on carbon using Bragg Curve Counter, *Proceedings of the 2009 Symposium on Nuclear Data*
- [8] T. Sanami, M. Hagiwara, T. Oishi, M. Hosokawa, S. Kamada, Su. Tanaka, Y. Iwamoto, H. Nakashima, M. Baba, *Nucl. Instrm. Meth. A* **Vol 610** pp 660-668 (2009)
- [9] T.Sanami, M.Hagiwara, H.Iwase, M.Takada, D.Satoh, Y.Iwamoto, S.Kamada, S.Kunieda, H.Yashima, A.Tamii, K.Hatanaka, Fragment DDX measurement of proton induced reactions on light-medium nuclei for energy range from reaction threshold to a few hundred MeV, *Proceedings of the Nuclear data for science and technology, (2010, Jeju, Korea), to be published*
- [10] T.Sanami, M.Hagiwara, H.Iwase, M.Takada, D.Satoh, H.Yashima, T.Kajimoto, Y.Iwamoto, S.Kamada, Y.Nakane, S.Kunieda, A.Tamii, K.Hatanaka, Experimental studies of light fragment production cross section for nucleon induced reaction at intermediate energies, *Proceedings of the 2010 Symposium on Nuclear Data, to be published*
- [11] G.D.Erasmo et al, *Phys.Rev* **C31** 656
- [12] S.Kato et al, *Phys. Lett.* **62B** 153

5. 粒子線検出器の開発

- 5-1. 中性子検出器の応答関数の評価に関する研究
- 5-2. 荷電粒子に対する無機シンチレーターの発光応答
- 5-3. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発
- 5-4. 超小型衛星搭載用放射線検出器の
荷電粒子バックグラウンド評価試験
- 5-5. 高高度環境での携行使用に適した環境放射線モニタの開発研究

中性子検出器の応答関数の評価に関する研究

高田真志^a、鎌田 創^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被ばく線量評価部

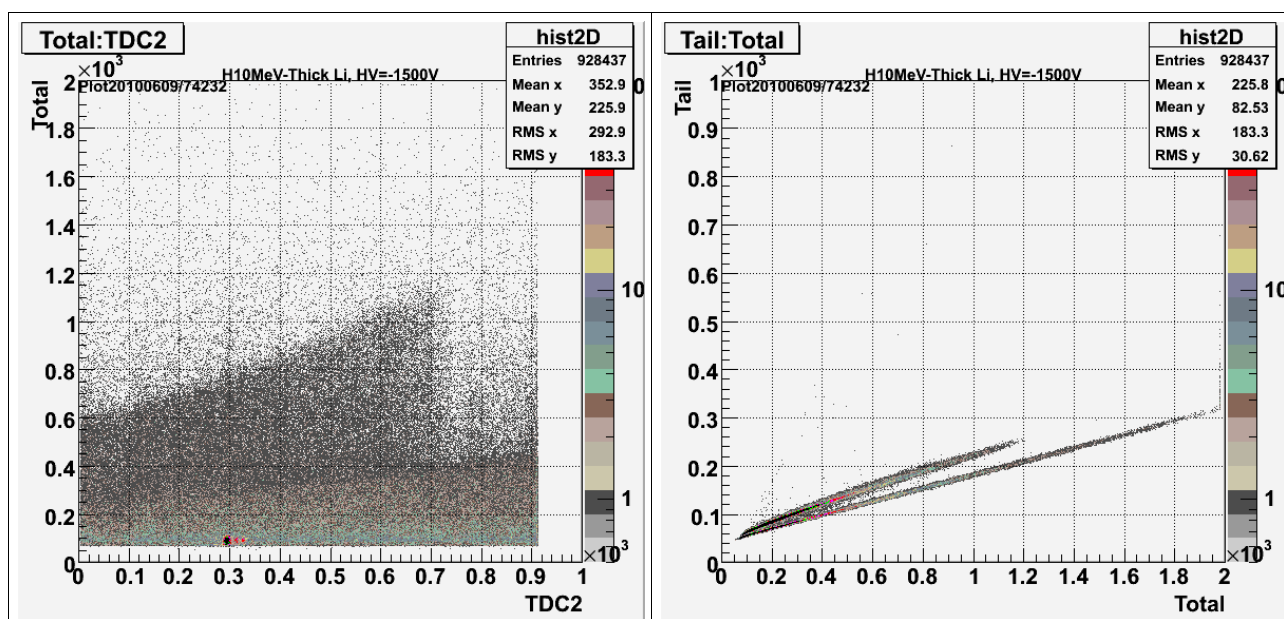
概要

放医研内に中性子に対する生物影響評価研究のために、高速中性子照射施設 (NASBEE: Neutron Accelerator System for Biological Effect Experiments) が設置された。この中性子ビームは、 $d4\text{MeV-Be}$ 核反応を利用して発生させている。この中性子ビームは生物影響を調べるために、数 $100\ \mu\text{A}$ の重陽子ビームを用いて、大強度な中性子ビームを用いている。これまで、この大強度な中性子ビームのエネルギースペクトルは、中性子放射化法で導出した。しかし、このエネルギースペクトルのエネルギー分解能は不十分であるために、中性子とガンマ線の識別が可能な有機液体シンチレーターを用いた高エネルギー分解能での中性子エネルギースペクトル計測を行った。このシンチレーターから得られたデータから、エネルギースペクトルを得るためには、有機液体シンチレーターの応答関数が必要である。本研究では、この応答関数をサイクロトロンで実験的に評価した。

1. 応答関数計測

本研究では、厚さ 1.27cm ($1/2$ インチ)、直径 5.08cm (2 インチ) の有機液体シンチレーター (EJ-399-06) を用いた。本シンチレーターは、従来の NE213 ベースとした高速中性子検出に利用されているシンチレーターよりも高い安全性を有し、航空機実験[1] にも利用され、応答関数も実験とシミュレーションにより評価されている[2]。ここで使用された検出器は、ホスウィッチタイプかつ 12.7cm 直径、 12.7cm 長さを有し、本研究で使用したシンチレーターと構造が異なる。そこで、NASBEE での中性子計測に利用した中性子検出器の応答関数を放医研大型サイクロトロンで実測した。

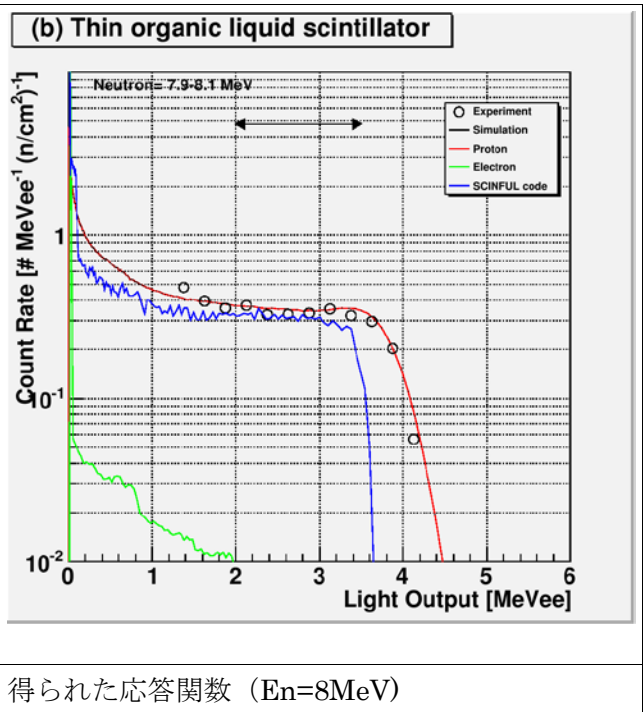
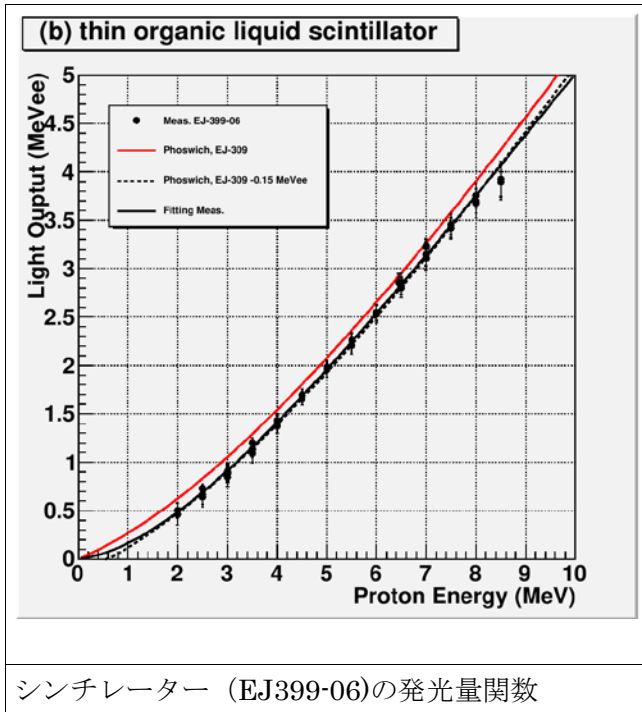
サイクロトロンで加速された 10MeV 陽子を C-6 コースに輸送し、チェンバー内部の薄いリチウムターゲットもしくは厚いリチウムターゲットに照射して、中性子を発生させた。中性子エネルギーを同定するために、中性子飛行時間法 (TOF: Time-Of-Flight method) を用いた。そのために、ビームの Quality を上げたビームを照射した。得られた飛行時間と検出器からの信号の 2 次元分布図と、中性子とガンマ線の識別の分布図を示す。左側の 2 次元分布図から、横軸の 300ch 付近にターゲットから発生した即発ガンマ線、 $0-700\text{ch}$ に中性子成分を確認できる。右側の 2 次元分布図から、中性子とガンマ線成分を分離できる。



飛行時間 (横軸) と検出器からの波高値 (縦軸) の 2 次元分布図

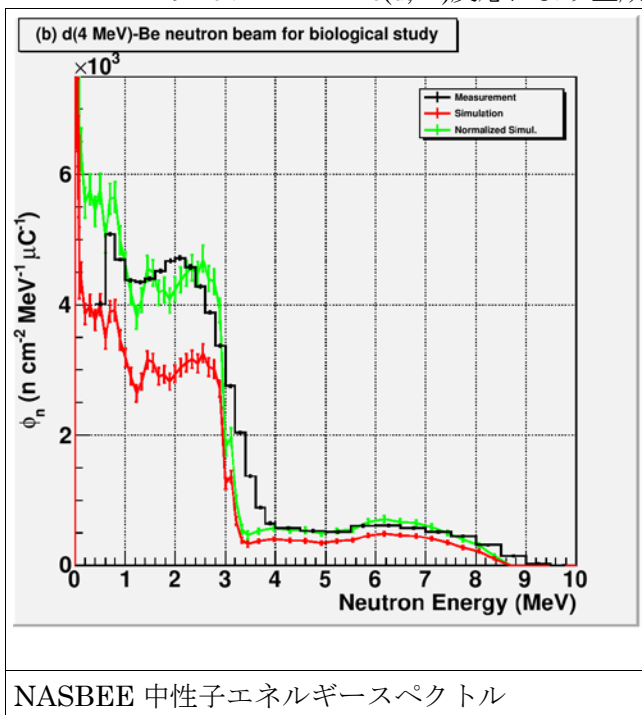
中性子とガンマ線の識別の 2 次元分布図

この分布図から、中性子エネルギー毎のシンチレーターの発光量を得た（左下図）。得られた発光量の各点から、中性子により生成された反跳陽子のエネルギーと発光量の関係を得た。得られた値は、ホスウィッチ型中性子検出器に利用されている物よりも 0.15MeV 小さいものであった。中性子エネルギー8MeV の応答関数を右下図に示した。白丸が実測値である。実測可能な中性子エネルギー領域外の応答関数を得るために、MCNPX シミュレーションでも評価した。実線がその結果であり、実測値と計算評価値は良く一致している。



本研究で得られた応答関数を用いて、NASBEE の中性子ビームを導出した（左下図）。このように3つのエネルギー領域の分けられる中性子エネルギースペクトルをしていることが分かった[3]。得られた結果は、シミュレーションで評価したスペクトルと良い一致を示した。

- $E_n=0-1\text{MeV}$ ターゲット構造体で散乱した中性子
- $E_n=1-4\text{MeV}$ 重陽子の Stripping 反応により生成された中性子
- $E_n=4-9\text{MeV}$ ${}^9\text{Be}(d,xn)$ 反応により生成された中性子



参考文献

- [1] M. Takada, K. Yajima, H. Yasuda, T. Sato, T. Nakamura, “Measurement of Atmospheric Neutron and Photon Energy Spectra at Aviation Altitudes using a Phoswich-Type Neutron Detector”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.47(10), 932 – 944 (2010).
- [2] M. Takada, K. Yajima, H. Yasuda, T. Nakamura, M. Baba, T. Honma, A. Endo, Y. Tanimura, “Response Functions of Phoswich-Type Neutron Detector for High-Energy Cosmic Ray Neutron Measurement”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.47(10), 917 – 931 (2010).
- [3] M.Takada, M.Suda, S.Kamada, T.Hagiwara, H.Imaseki and Tsuyoshi Hamano, “Neutron Exposure Accelerator System for Biological Effect Experiments (NASBEE)”, *AIP Proceeding of the 21st International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry* (2010).

荷電粒子に対する無機シンチレータの発光応答

若林源一郎^a、上山正彦^a、田原和弥^a、柳田侑樹^a、魚住裕介^a、古場裕介^b、高田真志^b

^a 九州大学、^b 放射線医学総合研究所

概要

無機シンチレータへの付与エネルギーと発光量の関係は一般に非線形であり、また粒子ごとに発光応答が異なることが知られている。したがって高エネルギーの荷電粒子を測定する原子核実験では、測定対象粒子に対する無機シンチレータの発光応答をあらかじめ知る必要がある。そこで本研究では、BGO シンチレータ及びLYSO(Ce)シンチレータの低エネルギー陽子・ヘリウムビームに対する発光応答を調査することを目的として実験を行った。その結果、主に低エネルギー領域における各シンチレータの発光応答の非線形性に関する基礎データを得ることができた。

1. 背景と目的

近年、様々な種類の無機シンチレータが開発され、原子核実験や医療応用の分野で活用されているが、無機シンチレータへの付与エネルギーと発光量の関係は一般に非線形であり、また粒子ごとに発光応答が異なることが知られている。したがって高エネルギーの荷電粒子を測定する原子核実験では、測定対象粒子に対する無機シンチレータの発光応答をあらかじめ知る必要がある。本研究グループでは現在までに様々な無機シンチレータの発光応答を広いエネルギー範囲、様々な粒子に対して調査を行ってきた。本研究ではその一環として、従来から用いられてきたBGOや新しい無機シンチレータであるLYSO(Ce)の低エネルギー陽子・ヘリウムビームに対する発光応答を調査することを目的として実験を行った。

2. 実験

実験に用いた無機シンチレータは、円柱型BGO結晶(φ50.8 mm×50.8 mm)と立方体型LYSO(Ce)結晶(20 mm×20 mm×20 mm)である。それぞれのシンチレータに、サイクロトロンからの陽子(70 MeV)およびヘリウムビーム(100 MeV)を入射し、発光応答を調査した。また、ディグレーダとしてアルミニウム、銅およびプラスチックの板を設置することにより、入射ビームのエネルギーを様々に変化させてシンチレータの発光応答を調べた。

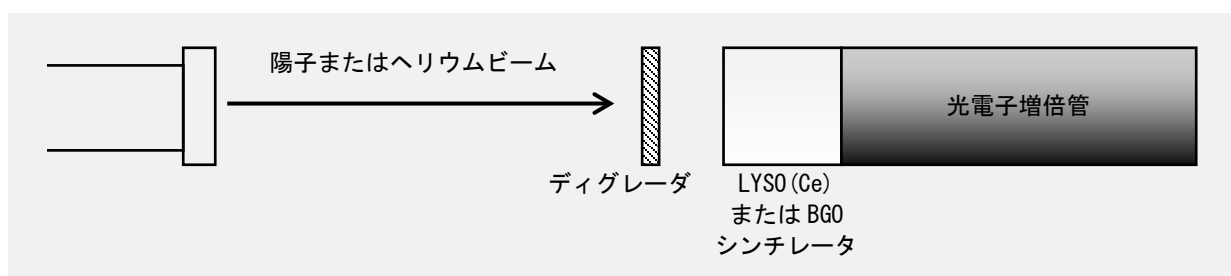


図1 実験体系

なお、入射エネルギーは、ビーム出射口とシンチレータの間の空気の影響も考慮して決定した。シンチレータからの発光の読み出しには光電子増倍管を用いた。図1に実験体系の様子、表1及び表2に使用したディグレーダと入射ビームのエネルギーを示す。

3. 結果および考察

LYSO(Ce)シンチレータに陽子及びヘリウムビームを入射したときの入射エネルギーと発光量の関係を図2及び図3に示す。また、BGOシンチレータに陽子及びヘリウムビームを入射したときの入射エネルギーと発光量の関係を図4及び図5に示す。

LYSO(Ce)シンチレータでは、陽子入射に対して約20 MeV以下の領域で入射エネルギーと発光量の関係に非線形性が見られたが、20 MeV以上の領域ではほぼ比例関係にあることが分かった。またヘリウムに関しては、低エネルギー領域でばらつきがあるものの、約40 MeV以下の領域で入射エネルギーと発光量の関係に非線形性が見られ、40 MeV以上の領域ではほぼ比例関係にあることが分かった。

表 1 : 入射エネルギー70 MeV の陽子ビームに対して用いたディグレーダの種類と減衰後のエネルギー

ディグレーダ	減衰後の エネルギー (MeV)
(空気, 100 mm, 1 気圧)	69.7
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 1.0 mm + PS 1.0 mm + Al 1.0 mm	58.5
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 2.0 mm + PS 1.0 mm + Al 2.0 mm	49.4
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 3.0 mm + PS 1.0 mm + Al 3.0 mm	38.5
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 4.0 mm + PS 1.0 mm + Al 3.0 mm	28.9
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 5.0 mm + PS 1.0 mm + Al 1.0 mm	25.7
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 5.0 mm + Al 4.0 mm	18.4
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 4.0 mm + PS 1.0 mm + Al 6.0 mm	14.0
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 6.0 mm + PS 1.0 mm + Al 1.0 mm	9.8
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 5.0 mm + PS 1.0 mm + Al 4.0 mm	7.0
(空気, 100 mm, 1 気圧) + Cu 4.0 mm + PS 1.0 mm + Al 7.0 mm	4.0

表 2 : 入射エネルギー100 MeV のヘリウムビームに対して用いたディグレーダと減衰後のエネルギー

ディグレーダ	減衰後の エネルギー (MeV)
(空気, 105 mm, 1 気圧)	97.2
(空気, 800 mm, 1 気圧)	90.0
(空気, 105 mm, 1 気圧) + Al 1.0 mm	77.7
(空気, 105 mm, 1 気圧) + PS 1.0 mm	65.0
(空気, 105 mm, 1 気圧) + Al 2.0 mm	53.2
(空気, 800 mm, 1 気圧) + Al 2.0 mm + PS 1.0 mm	35.0
(空気, 105 mm, 1 気圧) + Cu 1.0 mm	26.6
(空気, 700 mm, 1 気圧) + Al 1.0 mm + PS 1.0 mm	19.2
(空気, 800 mm, 1 気圧) + Al 1.0 mm + PS 1.0 mm	15.5
(空気, 900 mm, 1 気圧) + Al 1.0 mm + PS 1.0 mm	10.9
(空気, 1000 mm, 1 気圧) + Al 1.0 mm + PS 1.0 mm	7.6

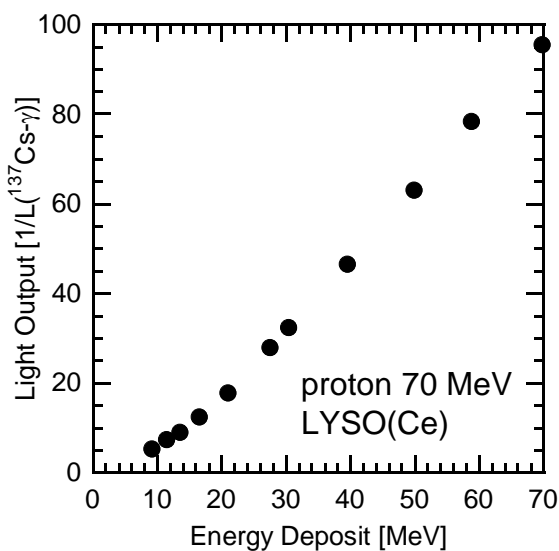


図 2 LYSO(Ce)シンチレータに陽子を入射したときの入射エネルギーと発光量の関係

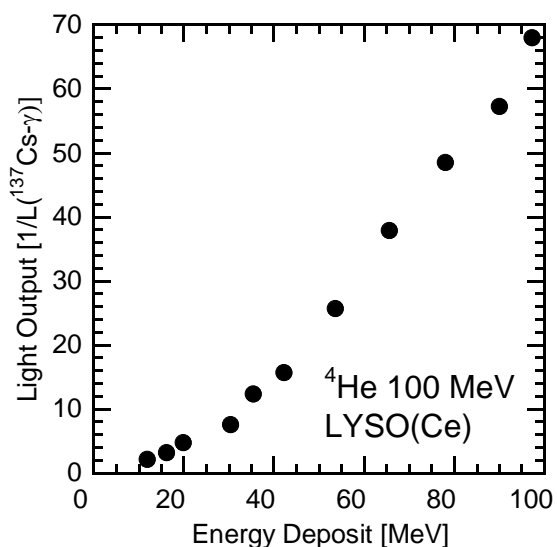


図 3 LYSO(Ce)シンチレータにヘリウムを入射したときの入射エネルギーと発光量の関係

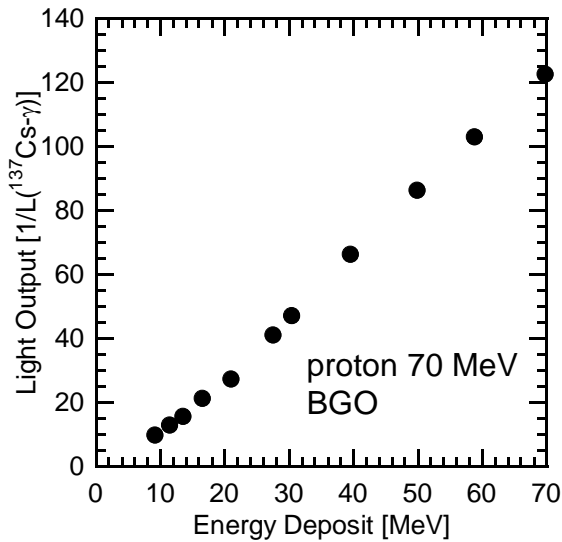


図4 BGOシンチレータに陽子を入射したときの入射エネルギーと発光量の関係

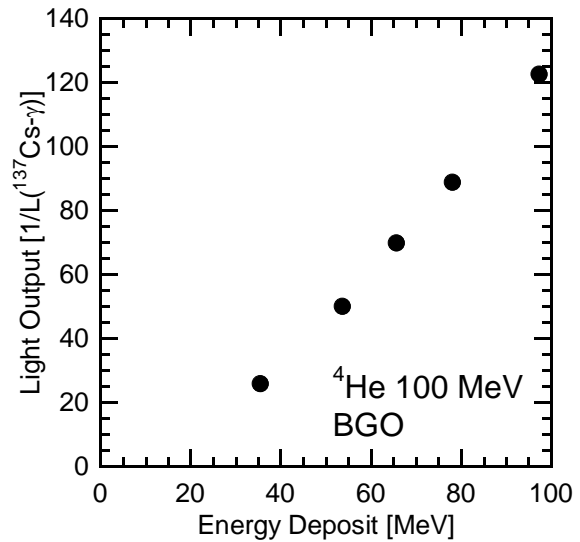


図5 BGOシンチレータにヘリウムを入射したときの入射エネルギーと発光量の関係

BGOシンチレータでは、LYSO(Ce)と同様に陽子入射に対して約20 MeV以下の領域で入射エネルギーと発光量の関係に非線形性が見られ、20 MeV以上の領域ではほぼ比例関係にあることが分かった。ヘリウム入射に関しては、低エネルギー領域で測定点が少ないため、今後この領域での測定点を増やしていく必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、BGOシンチレータ及びLYSO(Ce)シンチレータの低エネルギー陽子・ヘリウムビームに対する発光応答を調査することを目的として実験を行った。シンチレータへの入射ビームのエネルギーは、様々な材料、厚さのディグレーダを組み合わせることによって調節した。測定の結果、主に低エネルギー領域における各シンチレータの発光応答の非線形性に関する基礎データを得ることができた。今後は、得られた基礎データをもとにして発光応答を再現する理論式のパラメータの決定を進めていくとともに、他のシンチレータに対する測定実験を行って基礎データの拡充を行っていく予定である。

宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

内堀幸夫^a、安田仲宏^a、北村尚^a、小平聡^a、Ondrej Ploc^{a, e}、Eric Benton^b、Michael Hajek^c、
Thomas Berger^d、Iva Jadrnickova^e、他 ICCHIBAN Collaborators
^a 放射線医学総合研究所、^b オクラホマ州立大、^c ウィーン工科大、
^d ドイツ航空宇宙センター(DLR)、^e チェコ科学院原子核研究所(NPI)、

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、平成 22 年度に引き続き、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を行った。これは、HIMAC 等の加速器ビームを利用して行ってきた、ICCHIBAN プロジェクトの第 2 フェーズの実験の一部である。ここでは、今回行った実験について紹介する。

研究概要

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のもでもなく、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名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/um 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。それを受けて、放医研のサイクロトロンを利用した実験を平成 22 年度から開始し、23 年度も継続して行った。

実験概要

平成 23 年 2 月 4 日に、サイクロトンの 30MeV の陽子線ビームを利用した実験が各国からの実験者の参加も得て実施された。当日は、国内外合わせて 19 名の参加があった（図 1）。



図 1 2月4日の実験の参加者。



図 2 照射を行った線量計ホルダー。

今回の実験では、11ヶ国の14宇宙機関等から、使用されている放射線線量計に対して照射を行った。昨年度同様、放医研に集められた線量計素子は、我々のグループにおいて照射専用のホルダーに詰めて照射した。図2に今回照射した線量計ホルダーの写真を示す。各ホルダーは5cm角(対角線長が7.1cm)で、平坦な領域が直径7cmの照射野に収まるようにしている。このため、平坦な領域の作成は、「直径7cmの円内で一様な領域にする」という方針で行った。作成したプロファイルは図3のようになった。図3上は水平方向のプロファイルであるが、レーザーポインターを基準としたビームの幾何学的な中心から約1cm程度ビーム中心がずれてしまったことが測定結果から見られたので、上流のコリメータの影響を考慮して、線量計は幾何学的中心から線量計は5mmずらした位置に設置した。このビーム条件においてはホルダー上の約90%の場所において平坦度は1%以内であり、強度が低くなるホルダーの角の部分においても4%以内に抑えることができた。

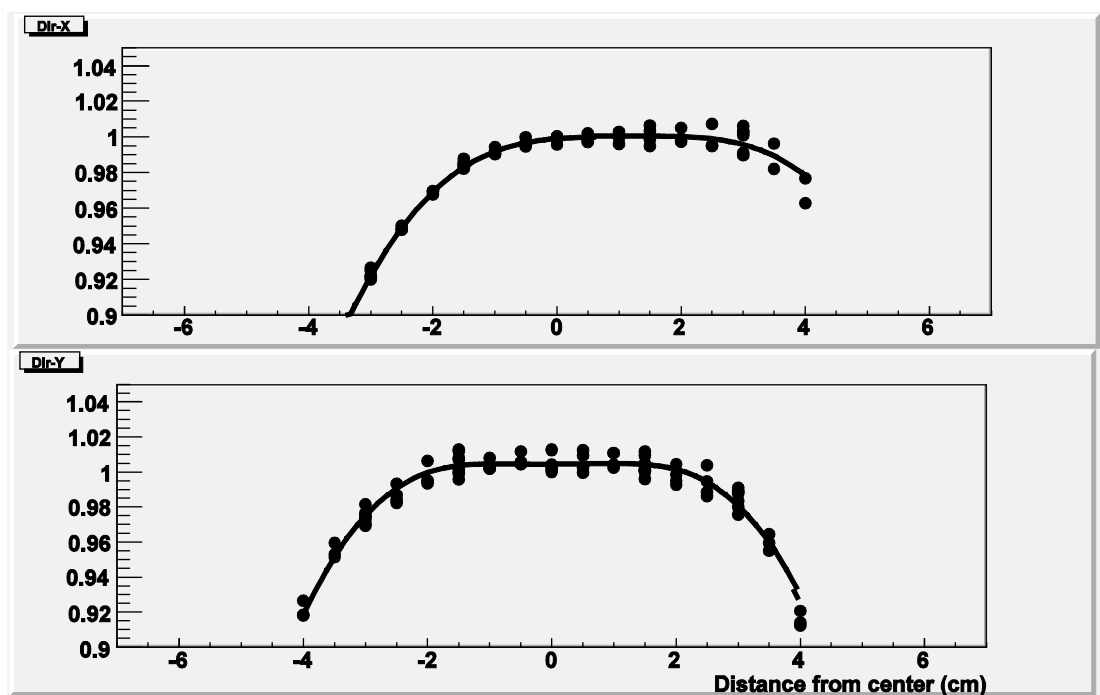


図 3 2月4日に測定した陽子30MeVの横方向プロファイル。上が水平方向、下が垂直方向のプロファイルで、横軸が幾何学的なビーム中心からの距離(単位:cm)で、縦軸は相対強度を表している。

実験においては、1, 10, 50, 100 mGyの照射と、1mm厚のアルミニウムプレートを直前に設置して50 mGyの照射、および、照射線量(および線質)を参加者に知らせないBlind照射等の条件を設定

して照射を行った。その後、実験参加者が持ち込んだ線量計への照射を行い、トータルで 92 回もの照射を行った。実験後、放医研のホルダーから線量計を戻して、各国の宇宙機関等へ国際宅配便にて返送した。線量計は、各機関において現在解析されており、近々、ICCHIBAN プロジェクト・ワーキンググループに対して報告される予定であり、それらがまとめられて、国際宇宙ステーションにおける放射線モニタリングに関する国際ワークショップ（WRMISS）において議論される予定である。

これらの一連の実験によって、各種のルミネッセンス線量計の低 LET 領域における応答についての貴重な知見が得られ、これまで長年の間、議論されてきたこの問題の本質的な解決につながり、宇宙環境における放射線線量評価のみならず、地上における個人線量評価の信頼性の向上にもつながると考えられる。



図 4 C-8 コースに導入したバイナリーフィルター。

C-8 コースの改善

今回の実験に先立って、C8 コースに PMMA を素材とするバイナリーフィルターをビーム出口直下のビームモニター電離箱の下流側に設置した(図 2)。フィルターは、0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 mm 厚の 7 枚から成り立っており、0.5mm 刻みで、最大 63.5 mm 厚の PMMA を挿入することが可能である。この厚さでは 90 MeV の陽子線のレンジより長いので、現在のサイクロトロン全ての種類のビームに対して使用可能である。フィルターの水等価厚の測定に関しては平成 23 年度以降に行う予定である。

謝辞

当研究は、サイクロトロンの陽子線ビームを利用した実験であり、サイクロトロンの運転に関わる方々の努力による安定な供給によって、初めて可能となった。ここに感謝します。

照射系の構築は、科研費 基盤(B) 21310042 のサポートによる。

超小型衛星搭載用放射線検出器の 荷電粒子バックグラウンド評価試験

谷津陽一、川上孝介、常世田和樹、榎本雄太、戸泉貴裕

東京工業大学 大学院理工学研究科 基礎物理学専攻

概要

超小型衛星搭載用ガンマ線観測装置の放射線環境試験として高エネルギープロトンの照射実験を行った。本衛星は高度約 500 km の極軌道に打ち上げられる予定であり、定期的に通過する南太平洋異常帯や極環のオーロラ帯などの荷電粒子による検出器システムへの影響を事前に調べる事が、観測を成功させる上で必要不可欠である。本実験では放射化が心配される CsI シンチレータの軌道上でのバックグラウンドレートの見積もりを行い、本観測システム中で最も体積の大きい結晶でも 5 counts/s 程度になるという結果が得られた。また、主検出器であるガンマ線偏光測定装置のイベント選別ロジックの実証を行い、プロトンの様な荷電粒子が入射した場合にも検出器が安定して動作し続け、ノイズイベントを除去できることを確認した。

1. 背景

ガンマ線バースト(GRB)は非常に遠方の宇宙で起こる巨大な爆発現象であり、その一部はブラックホールの誕生と関連していると考えられているが、重力崩壊により開放されるエネルギーが、どの様にして相対論的な速度まで加速されるのかという根本的な機構はまだ理解はなされていない。ガンマ線の偏光は放射源の磁気構造と密接に関連しており、この現象を解明するための鍵となり得る。これを観測するため、我々はコンプトン散乱を用いた偏光観測装置を開発し衛星に搭載する。GRB は継続時間がたかだか数十秒の突発天体であるため、衛星自身で GRB を検知し位置決定を行い、すぐさま観測を開始する必要がある。この目的のため我々の観測システムは、常に半天を監視し簡易的な位置決定を行う広視野バーストモニタと、ガンマ線偏光を測定するガンマ線偏光計の 2 つで構成される。

実際にこれらの装置を用いて観測を行うにあたり考慮すべき問題として、地磁気に束縛された高エネルギーの荷電粒子の影響が挙げられる。これらによるセンサの性能劣化や、荷電粒子による擬似イベントが天体からのガンマ線観測に影響を及ぼすかどうか事前に評価する必要がある。

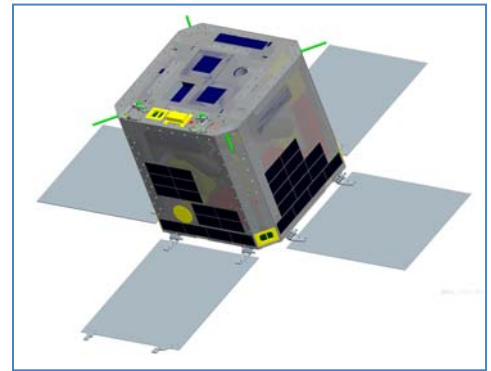


図 1：偏光計を搭載する超小型衛星 Tsubame の 3D-CAD モデル。反太陽方向に小型の X 線偏光計と広視野バーストモニタを搭載する。

2. 軌道上におけるシンチレータの放射化の評価

偏光計およびバーストモニタには発光光量・密度の高いヨウ化セシウム結晶を用いているが、これが軌道上の荷電粒子に晒されることにより放射化し、自身がノイズイベントを生成するようになる。本実験では大きさ $10 \times 10 \times 50 \text{ mm}^3$ の CsI サンプルピースに、70 MeV のプロトンビームを $4.0 \times 10^6 \text{ counts s}^{-1} \text{ cm}^2$ のレートで 1 時間照射し (Total = $1.4 \times 10^{10} \text{ protons cm}^{-2}$)、放射化バックグラウンドレートの時間変動を測定した。得られたライトカーブは指数関数で減少している様に見える (図 2)。我々はこれを異なる時定数を持つ 2 つの指数関数の足し合わせ、

$$N(t) = N_1 e^{-t/\tau_1} + N_2 e^{-t/\tau_2} \quad (1)$$

でフィッティングを行い、それぞれの成分の係数と減衰時定数を求めた (表 1)。

表 1：放射化バックグラウンド ライトカーブのパラメータ

N_1 [counts]	14843.9 ± 208.5
τ_1 [s]	1589.3 ± 43.4
N_2 [counts]	7935.7 ± 142.8
τ_2 [s]	15977.4 ± 332.8
reduced χ^2	0.831

解析の結果、2つの放射性同位体の崩壊時定数はそれぞれ、 $\tau_1 = 1600$ 秒、 $\tau_2 = 16000$ 秒と求まった。一方、照射終了直後における放射化バックグラウンドのイベントレートは2成分とも15000~16000 counts s⁻¹と同程度になっており、放射性同位体が生成される散乱断面積は同程度と考えられる。

次に、本試験で得られた放射化バックグラウンドレートを元に、実際の検出器のサイズと軌道上の荷電粒子数を考慮して、放射化バックグラウンドがどの程度になるかを推定する。軌道上でのプロトンのフラックスはSPENVIS (AP-8, Solar-max) を用いてシミュレーションを行い、高度700 kmの太陽同期軌道における平均的エネルギースペクトルから1~200 MeVにおける積算値を採用し3×10⁹ counts yr⁻¹ cm⁻²とした。一方、ターゲットとなる結晶のサイズはTSUBAME衛星に搭載する検出器の中で、最も大きな広視野バーストモニタの30×120×5 mm³を仮定した。シミュレーションの結果、短寿命核種は打上げ後~1000秒、長寿命核種についても打上げ後~2日以内に平衡状態に達することが分かった。平衡状態におけるバック

グラウンドイベントは高々5 count s⁻¹程度であり、天体の測定にはほとんど影響しないことが確認できた[1]。

3. 偏光計に入射する荷電粒子イベント

我々の開発する偏光計は入射光子の散乱角を測定するため、入射光子を散乱するプラスチックシンチレータと散乱光子を吸収するCsIシンチレータから構成される。これらのシンチレータはそれぞれマルチアノード光電子増倍管

(MAPMT) とアバランシェ・フォトダイオード (APD) で読み出される。期待されるコンプトンイベントは散乱体と吸収体に同時にエネルギーを落とすため、これらの同時係数を行うことにより、バックグラウンドイベントを低く抑えることが可能となる。実際にこの機構が機能していることを検証するため、プロトンビームを照射し測定を行った。また、ガンマ線と比較した場合、荷電粒子によるエネルギー付与が桁違いに大きいため特にPMTが異常動作を起こす可能性も考えられる。本実験では、上記機能試験と同時にこのような異常動作が起こらないことを確認する。

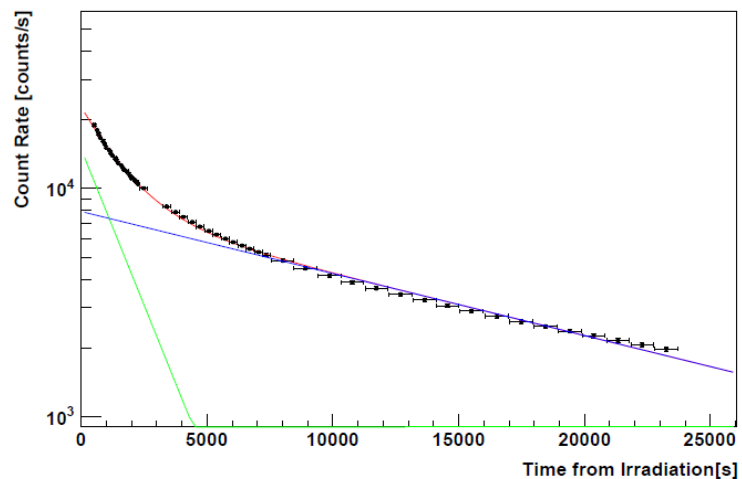


図2：放射化バックグラウンドの時間変化。2成分のモデル関数でフィッティング。解析結果については表を参照

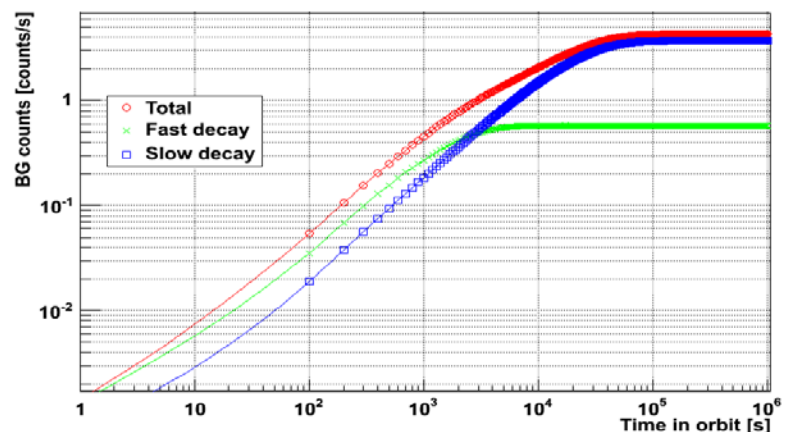


図3：実際の軌道上における放射化バックグラウンドレートのシミュレーション結果。モデルはそれぞれ、緑：短時間崩壊成分、青：長時間崩壊成分、赤：トータルの効果を表す。

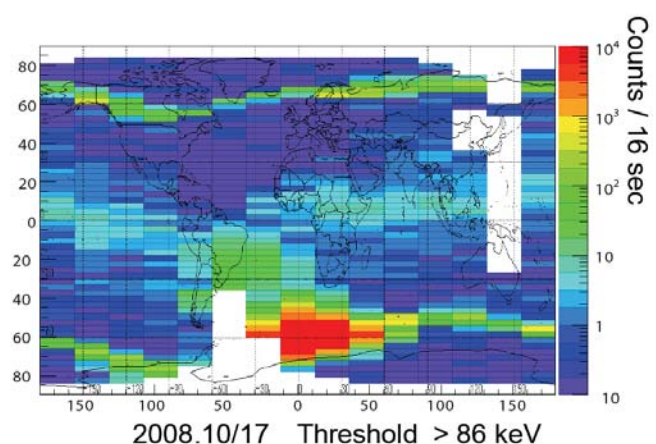


図4：超小型衛星で測定した軌道上陽子の全球分布図。SAA, オーロラ帯におけるイベントが格段に大きい[2]。

軌道上におけるプロトンイベントは基本的に極環のオーロラ帯と南大西洋異常帯に集中しており、オーロラ帯で $100\sim 1000\text{ counts s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ 、SAA で $\sim 10^4\text{ counts s}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ 程度に達する (図 4)。衛星がこれらの領域を通過する際はセンサ保護の目的で高压電源の落とす予定であるが、それ以外の低緯度領域で安定して観測できることを確認するため、入射レートは 200 counts s^{-1} 程度とした。エネルギーは最も厳しい条件として 70 MeV とした。また、プロトンを照射する際に ^{137}Cs の 662 keV も同時に照射し、このガンマ線が引き起こすコンプトンイベントを正常に取得できることを確認する (図 5)。

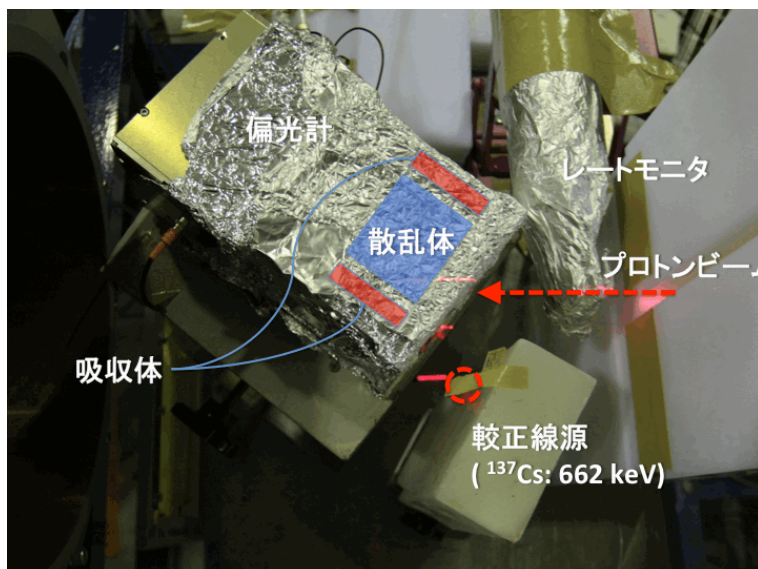


図 5：実験セットアップ(斜め入射時)

図 6 に異なるトリガロジックでデータを取得した際のトリガレートの時間変化を示した。左から、吸収体単独のトリガ、散乱体単独のトリガ、同時検出トリガを示す。プロトンは偏光計の光軸方向から照射している為、計算上は厚さ 50 mm のプラスチックシンチレータに全てのエネルギーを付与して静止するはずであるが、実際に PMT (散乱体) のトリガレートは 200 counts s^{-1} となっており、プロトンによる大信号イベントを正常に検出していると考えられる。一方、その際の APD トリガは $2000\text{ counts s}^{-1}$ 以上と高い。これは、 ^{137}Cs の放射線の他に回路系のノイズの混入等の影響もあり、プロトンのイベントとはほとんど無関係だと考えられる。最後にこれらの同時係数イベントを見ると、PMT 単体でのトリガよりも明らかに小さくなっており ($\sim 50\text{ counts s}^{-1}$)、同時係数によるノイズ落としがある程度機能していることを伺わせている。

一方、本来のコンプトンイベントは入射光子の約 1 割程度でしかなく、今回の測定で得られた同時係数のトリガレートは高すぎる。この原因として考えられるのが APD 処理回路のノイズ干渉である。APD の読み出し回路には $\sim 10^{-15}\text{ C}$ にも反応する極めて高感度の電荷有感型増幅器を用いているが、筐体設計の問題からデジタル配線からの電磁干渉により、同期してトリガしてしまう現象が確認されている。現在、この問題の原因は特定できており、フライトモデルではより正確なイベントセレクションが可能となる予定である。

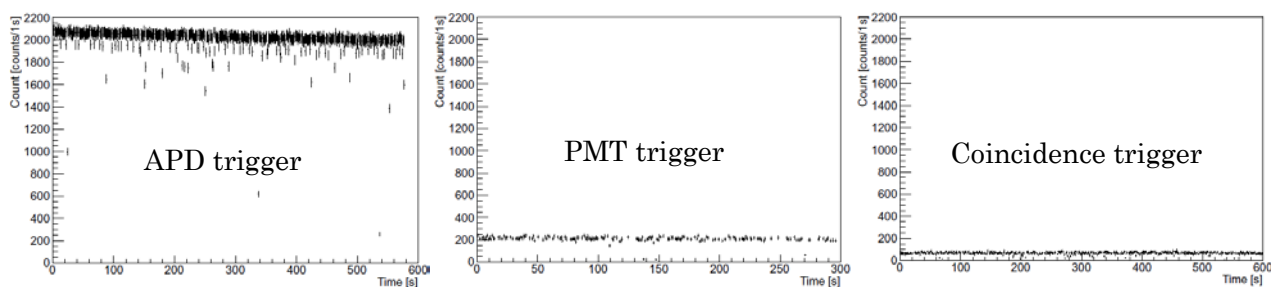


図 6：トリガロジックの違いによる検出イベント数の変化。左：吸収体 (APD+CsI) によるトリガレート、中：散乱体 (プラスチックシンチレータ+MAPMT) によるトリガレート、右：同時係数によるトリガレート[3]

4.まとめ

本実験では人工衛星に搭載する小型偏光計およびバーストモニタの宇宙放射線環境試験を行った。本衛星で多用する CsI シンチレータについては、約 10 年分の照射の後、崩壊時定数を測定することで、放射化バックグラウンドがどれ位のレートになるのかを推定し、実際の観測に対してほとんど影響しない程度であることを確認した。また、偏光計の同時係数トリガによるイベントセレクションが実際に機能することを確認した。現時点では、電磁ノイズの干渉等解決すべき課題も見つかっているが、機能としてはきちんと動作していることを確認できた。

参考文献

1. 榎本雄太 放医研サイクロトロン実習報告書(2010)
2. 戸泉貴裕 ”小型衛星 Cute-1.7+APD II の運用結果と X 線偏光観測衛星 TSUBAME の開発”,
東工大修士論文(2009)
3. 戸泉貴裕 放医研サイクロトロン実習報告所(2010)

高高度環境での携行使用に適した環境放射線モニタの開発研究

保田 浩志^a 矢島 千秋^a 高田 真志^b

^a放射線医学総合研究所放射線防護研究センター、^b放射線医学総合研究所基盤技術センター

概要

これまでに、スチルベンとプラスチックシンチレータから構成されたフォスウィッチ型検出器をプローブとする携行型環境放射線モニタの試作機を製作して応答試験を行い、高高度の宇宙線被ばくで重要となる陽子、He イオン、中性子を粒子弁別可能であることを確認した。しかしながら、特に高エネルギーの重荷電粒子に対する応答に大きな粒子入射角度依存性が現れることも判った。本年度は、プラスチックシンチレータ厚を初期プローブより小さくした改良型プローブに対し、放医研サイクロトロンからの 60 MeV 陽子ビームを照射して応答試験を行い、角度依存性が低減されることを実験的に検証した。

1. 目的

我々のチームでは、航空機乗務員や宇宙飛行士の宇宙線被ばくを監視するための携行型放射線モニタの開発研究に取り組んでいる。平成 21 年度までに、スチルベンとプラスチックシンチレータから構成されるフォスウィッチ型検出器をプローブとする放射線モニタ試作機を製作し、放医研サイクロトロン及び他の加速器施設を利用して応答試験を行ったところ、高高度の宇宙線被ばくで重要となる陽子、He イオン、中性子に対して粒子弁別能を有することが確認された。しかし一方、特に高エネルギー重荷電粒子に対する応答では粒子の入射角度依存性が大きく現れることも判明したため、対策としてプラスチックシンチレータ厚を小さくした改良型プローブを製作した。本実験は、放医研サイクロトロンからの 60MeV 陽子ビームを用いて改良型プローブの応答試験を行い、改良型プローブの角度依存性が初期型プローブと比べて低減されていることを実験的に検証することを目的とする。

2. 実験方法

本放射線モニタ試作機は、プローブ、小型高圧電源、AD 変換出力機能を持つデータロガー及びノート PC を一体化した測定システムであり、バッテリーを用いた携行使用が可能である。プローブは発光時間の短いスチルベン円筒形シンチレータ（減衰時間 3.5ns、 ϕ 50mm×50mm）を発光時間の長いプラスチックシンチレータ（減衰時間 320ns）で覆ったシンチレータ部を持つフォスウィッチ型検出器である。改良型プローブはプラスチックシンチレータ厚が 5mm、初期型プローブは 15mm である。プローブ出力信号はデータロガーにより -20~400ns の範囲で 2ns 間隔のデジタル波形データに変換される。信号波形の早い蛍光成分と遅い蛍光成分を区分して積分し、それらの比率から粒子弁別解析を行う。

実験は大型サイクロトロン C6 コースにおいて 60MeV 陽子ビームを用いて行った。ターゲット位置での照射野は初期型プローブの円筒形底面（ ϕ 8cm）ができるだけ一様に照射されるように、ビーム強度は本モニタのカウントレートで 300 s⁻¹以下になるように調整した。また、厚さ 4、8、16mm の人体軟組織等価ファントムをターゲット上流に設置してアブゾーバーとして用い、計算上、約 56MeV、51MeV、40MeV のビームエネルギーをそれぞれ得た。改良型プローブに関しては、プローブの円筒形底面に垂直にビームが入射する 0° 方向と、側面に垂直に入射する 90° 方向に対して、60、56、51、40MeV の 4 つのビームエネルギーについて測定を行った。初期型プローブに関しては、0° と 90° 方向に対して、60、56、51MeV の 3 つのビームエネルギーについて測定を行った。

3. 実験結果

初期型プローブに 60、56、51MeV の陽子ビームが 0° 入射した場合と 90° 入射した場合の粒子弁別の様子を図 1 に、改良型プローブに 60、56、51、40MeV の陽子ビームが 0° 入射した場合と 90° 入射した場合の粒子弁別の様子を図 2 に示す。図 1、2 とも横軸は発光ピークを含む早い蛍光成分（トリガ時点を 0 とした -20~50ns）の信号波形積分値、縦軸は遅い蛍光成分（100~200ns）の信号波形積分値である。図 1、2 から、改良型プローブの角度依存性は初期型プローブに比べ明らかに低減していることが判る。また、改良型プローブではエネルギー同定の分解能も向上していることが判る。ただし、60MeV の陽子はプローブ内で全エネルギーを失って止まるため、プローブを透過する高エネルギーの陽子に関しては 60MeV の結果とは物理的に異なる様相を呈すと考えられ、今後の検討課題である。

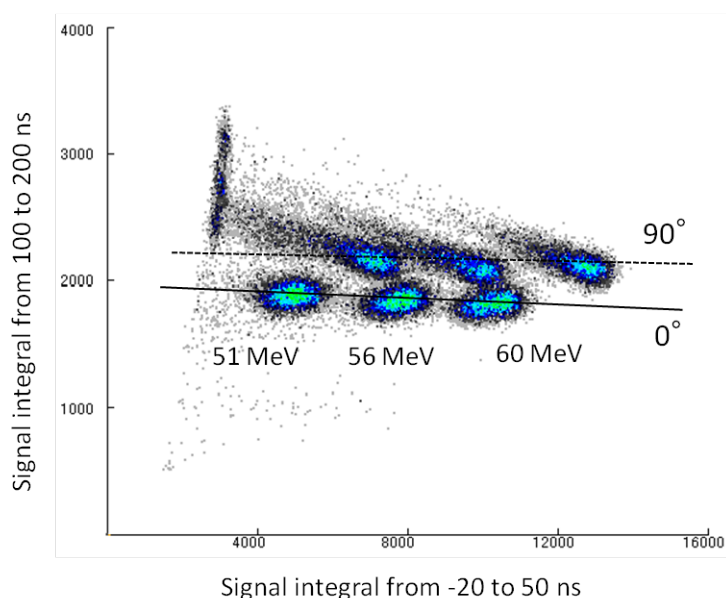


図 1. 初期型プローブに 60、56、51MeV の陽子ビームが 0° 入射した場合と 90° 入射した場合の粒子弁別の様子；横軸は早い蛍光成分（ $-20\sim 50\text{ns}$ ）の信号波形積分値、縦軸は遅い蛍光成分（ $100\sim 200\text{ns}$ ）の信号波形積分値。

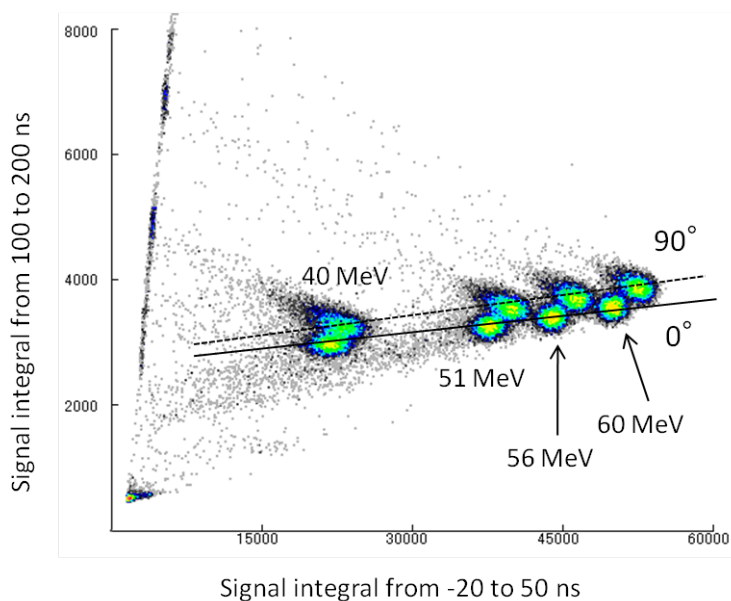


図 2. 改良型プローブに 60、56、51、40MeV の陽子ビームが 0° 入射した場合と 90° 入射した場合の粒子弁別の様子；横軸は早い蛍光成分（ $-20\sim 50\text{ns}$ ）の信号波形積分値、縦軸は遅い蛍光成分（ $100\sim 200\text{ns}$ ）の信号波形積分値。

4. まとめ

60MeV 陽子ビームに対しては、改良型プローブの角度依存性は初期型プローブに比べて低減された。しかし、今後もプローブを透過する高エネルギーの粒子に関する考察、調査を続ける必要がある。

本実験の遂行にあたり、懇切にサポートして頂いた放医研サイクロン運転室の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Hiroshi Yasuda, Kazuaki Yajima, Masashi Takada, Tatsuhiko Sato and Takashi Nakamura : Development of Cosmic Radiation and Energetic Particle Analysing system CREPAS. Prog. Nucl. Sci. Technol. 1 (2011) 356-359.
- [2] 保田浩志、矢島千秋、高田真志、佐藤達彦、福田光宏、中村尚司：宇宙探査用放射線サーベイメータの開発. Space Util. Res. 26 (2010) 239-240.

6. 粒子線による損傷試験

- 6-1. 普及型重粒子線がん治療装置用超伝導コイルシステム開発
のための基礎研究
- 6-2. 光学機器の耐放射線性能に関する研究

普及型重粒子線がん治療装置用 超伝導コイルシステム開発のための基礎研究

石山敦士^a、青木 徹^a、神林 佑^a、柄澤彰良^a、矢崎真二郎^a
宮原信幸^b

^a 早稲田大学、^b 放射線医学総合研究所

概要

近年、高温超伝導線材の高性能化が進んでおり、将来的には核融合や加速器への応用も期待されている。このような応用の場合には、放射線環境中での使用が想定されるが、超伝導線材に対する放射線の照射実験は世界的に見てもまだまだあまり行われていない。放射線環境中で用いる機器の放射化はメンテナンス時の装置運用や被ばく管理上好ましくなく、さらに機器廃棄時にも高レベル廃棄物となる可能性を考慮する必要がある。以上のような背景から、昨年度に引続き超伝導線材の放射線損傷の調査を行った。

具体的には、普及型重粒子線治療装置の小型化・高効率化のための各種機器の超伝導化を目的とし、イットリウム (Y) 系超伝導線材とビスマス (Bi) 系超伝導線材の放射線環境中での適用可能性と有効性を評価・検証するため、中性子照射の超伝導特性および機械特性に与える影響を実験的に調べた。

1. 高温超伝導線材の中性子照射実験

1-1. 実験目的

重粒子線がん治療装置のコイルは放射線環境中での利用が想定されるので、コイルに用いられる高温超伝導線材の耐放射線性を調査する必要がある。これを明らかにするために本実験では放医研大型サイクロトロン(AVF-930)を使用し、中性子線を Bi-2223 および YBCO 線材に照射し、照射前後における超伝導特性に劣化が見られるかどうかを試験した。

1-2. 実験方法

本実験の順序を図 1.1 に示す。最初に照射前の超伝導特性として I_c (臨界電流値) を測定し、その後は「中性子線の照射→照射後の I_c 測定」というプロセスを 7 回繰り返した。中性子線の照射は室温で行い、 I_c 測定は液体窒素中で行った。中性子線の照射方法や、超伝導特性の測定方法は次項で述べる。

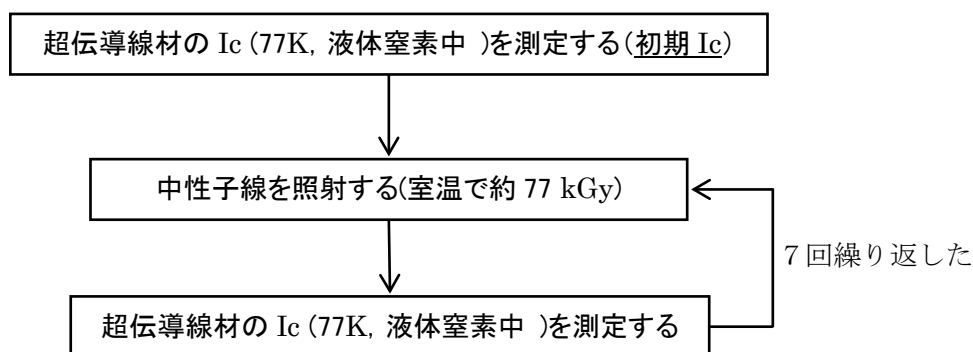


図 1.1 実験の順序

A) 試料線材

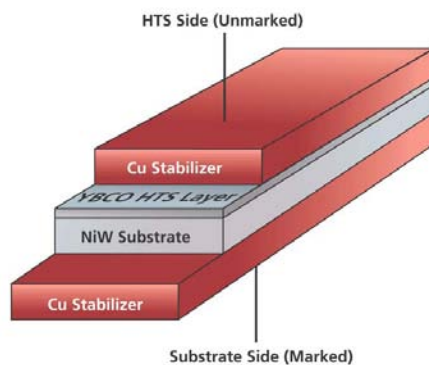
今回は、サンプルとして Bi-2223 線材と Y 系線材の測定を行った。サンプル線材の諸元を表 1.1 に、線材の断面構成を以下図 1.2 に示す。

表 1.1 高温超電導線材の諸元

	Sample 1	Sample 2
material	Bi-2223	YBCO
manufacturer	Sumitomo Electric	American Superconductor
model number	DI-BSCCO (Type H)	344 Super conductors
process	CT-OP	RABiTS/MOD
width	4.4 mm	4.4 mm
length	90 mm	120 mm
thickness	0.22 mm	0.22 mm
I_C (nominal)	140 A	Min 70 A



(a) Sample 1 (Bi-2223 conductor)



(b) YBCO Conductor (AMSC)

図 1.2 (a)ビスマス線材断面図 (b)YBCO 線材の構造

B) 中性子線照射方法

図 1.3 に中性子線照射方法と放医研大型サイクロトロン(AVF-930)を示す。AVF-930 からの 14 MeV 中性子を Bi-2223 線材および YBCO 線材に照射した。Be ターゲット上の d 電流は $20\mu\text{A}$ でターゲットからの距離 10 cm で照射野直径 5 cm である。この位置では、中性子のフラックスが高すぎて直接測定できないので、ターゲットから 2 m 離れた位置での中性子フラックスならびに線量率から推定した。

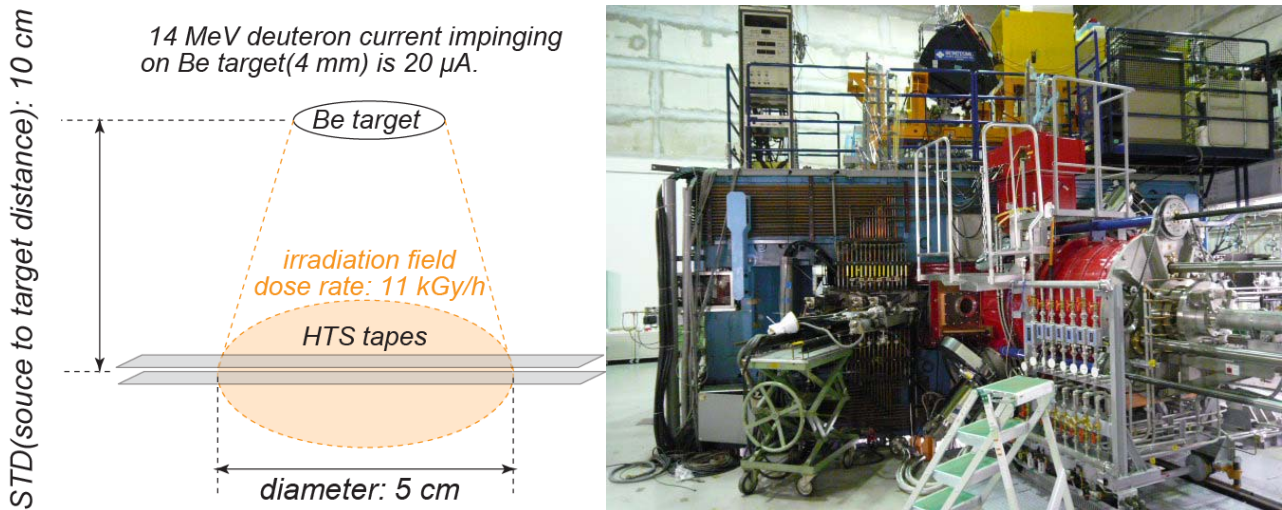


図 1.3 中性子線照射方法と放医研サイクロトロン(AVF-930)

C) 超伝導特性測定方法

今回の中性子照射が超伝導特性にどのような影響を与えたのかを調べるために、線材の放射線照射前と、中性子線を照射した後でそれぞれ I_c 測定(液体窒素中・77 K)を行い、結果を比較した。測定に際し、図 1.4 のような電圧タップを用いた多端子法により I_c を測定した。

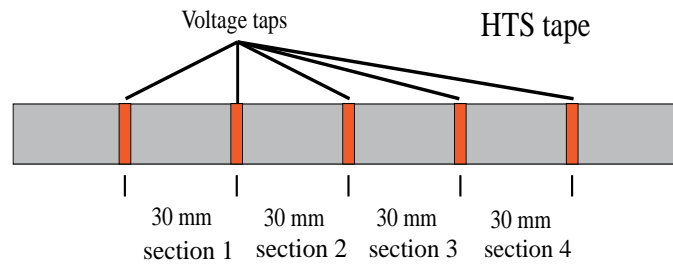


図 1.4 電圧タップ取り付け図

この測定は照射前と 1、2、3、7 回目照射後に関して行った。尚、この測定における I_c の定義はタップ間の電圧が $1\mu\text{V}/\text{cm}$ である時の電流値である。

1-3. 実験結果

A) 照射線量

照射位置より 2m 下流の線量率は 0.46Gy/min であったので、逆二乗則より照射位置直下 10 cm では 184Gy/min となり、これより照射線量率は約 11kGy/h である。Bi-2223 線材と YBCO 線材を試料として、照射を約 7 時間行った。従って 1 回の照射における線量は約 77kGy となった。これを最終的に 7 回繰り返したので、合計約 539kGy (約 0.5MGy) の中性子照射を行ったことになる。

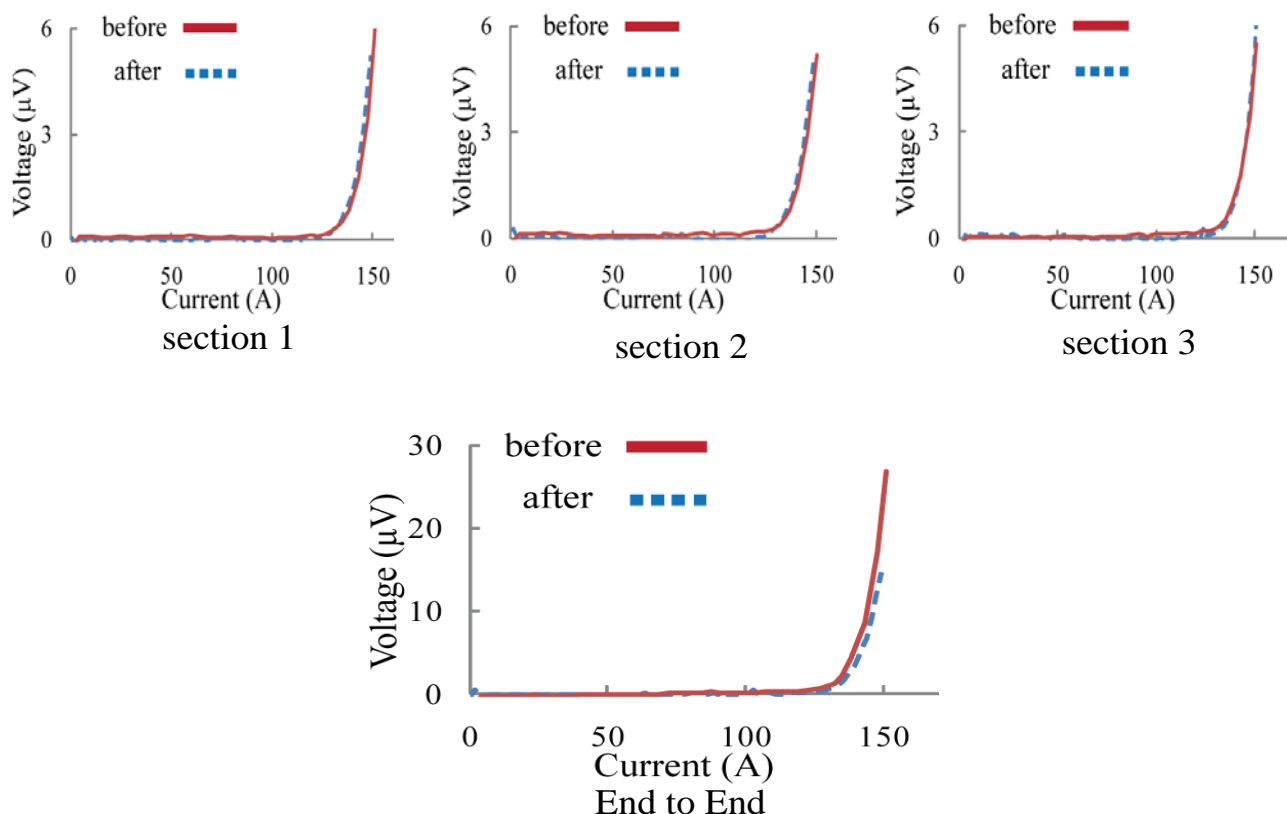
B) 中性子フラックス

今回、線材が置かれた位置 (Be ターゲットの 10 cm 下流) における 1 回あたりの照射量での中性子フラックスは 1.74×10^{15} n/cm² であった。

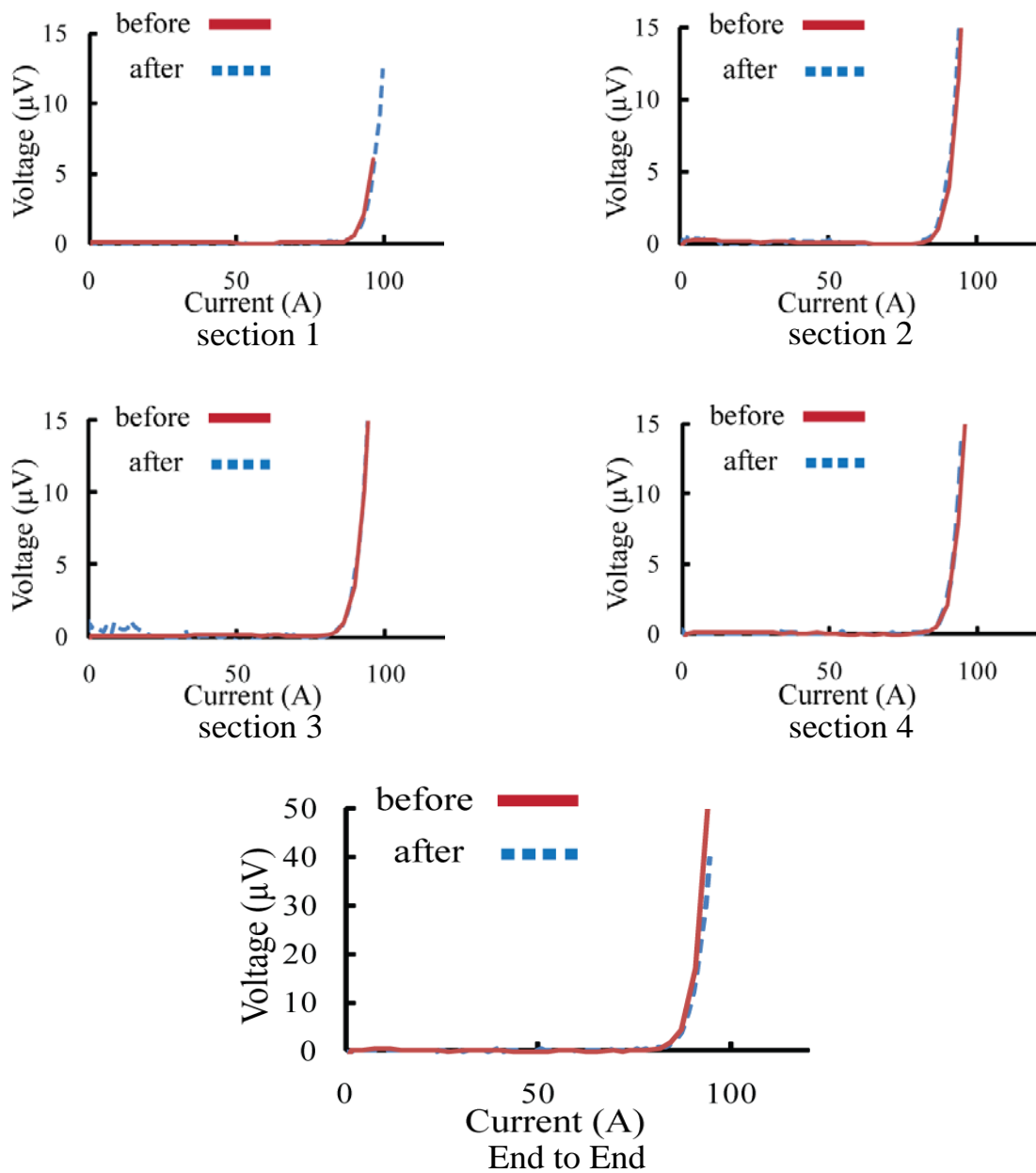
今回の照射実験を小型サイクロトロン(HM-18)の運転時間に換算すると、対象をサイクロトロン(HM-18)とするとコイルが配置される場所において最大 777.5n/(cm²・ μ A・min) の中性子フラックス密度である。これより今回の照射 1 回分がサイクロトロン(HM-18)のどの程度の運転時間に相当するか見積もると (プロトン 250MeV、取り出し電流 1 μ A とする) 1 日 24 時間運転で、 1.12×10^6 n/(cm²・day) であるから 1.55×10^9 日、 4.25×10^6 年の運転に相当する。

C) 超伝導特性

図 1.5 に照射前と 7 回照射後(539kGy)の I-V カーブを、図 1.6 に総照射線量と初期臨界電流 Ic の関係を、照射前と照射後(77kGy-539kGy)の臨界電流 Ic と n 値を表 1.2 に示した。なお、ここで Ic は 1 μ V/cm 基準を採用している。



(a) Bi-2223



(b) YBCO

図 1.5 照射前後の I-V 特性 (a)Bi-2223(b)YBCO

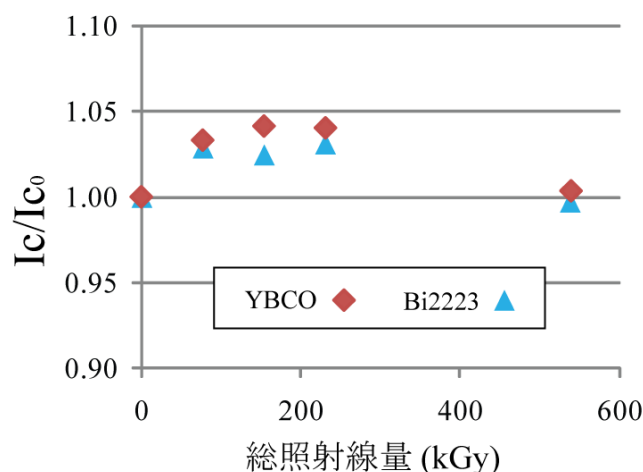


図 1.6 総照射線量と I_c の関係

表 1.2 放射化実験前後の I_c と n 値 (a)Bi-2223(b) YBCO

(a) Bi-2223

Section	Before Irradiation		After Irradiation (77kGy)		After Irradiation (154kGy)		After Irradiation (231kGy)		After Irradiation (539kGy)	
	I_c	n -value	I_c	n -value	I_c	n -value	I_c	n -value	I_c	n -value
1	146.9	17	150.0	23	148.5	17	150.0	19	144.8	21
2	145.4	15	150.0	16	149.2	17	152.1	20	144.4	20
3	146.7	14	150.5	17	151.8	17	148.1	17	146.2	22
End to End	146.0	16	150.2	16	149.6	19	150.5	18	145.6	21

(b) YBCO

Section	Before Irradiation		After Irradiation (77kGy)		After Irradiation (154kGy)		After Irradiation (231kGy)		After Irradiation (539kGy)	
	I_c	n -value	I_c	n -value	I_c	n -value	I_c	n -value	I_c	n -value
1	93.8	29	98.0	30	98.7	28	98.4	29	94.3	29
2	89.9	27	92.0	26	93.3	35	93.3	25	88.8	31
3	89.1	25	91.5	24	92.5	27	92.8	26	88.9	32
4	90.3	26	93.5	40	93.7	30	95.6	32	90.1	31
End to End	90.0	25	93.0	26	93.8	27	93.7	24	90.3	31

上記の結果から Bi-2223、YBCO とともに照射前に比べて数回照射した後のの方がわずかに I_c が上昇しているように見える。しかし上昇値はきわめて微量であり、実験誤差の範囲内である。さらに7回照射後についても I_c に目立った変化は見られなかった。また、 n 値についても大きな変化はなかった。総照射線量と I_c の関係においても、はっきりとした関連性は見えていないが、照射による劣化は確認されなかった。

1-4. まとめと今後

今回の中性子照射による高温超伝導線材放射化試験の結果においては、照射後の I_c 測定試験において、線材の I_c に変化が見られなかった。したがって耐放射線性という面でサイクロトロン機の運転に支障はないと考えられる。

この試験の今後として、今回は室温で中性子照射を行ったが、サイクロトロン機の運転中の環境を想定した実験として、冷凍機冷却された線材について通電状態で中性子照射する実験と、磁場中での超伝導特性への影響について実験を行う予定である。

2. 高温超伝導線材の機械特性評価試験

2-1. 実験目的

重粒子線がん治療装置のコイルに高温超伝導線材を利用することを想定すると、コイル励磁時の超伝導線材には機械的ひずみが加わる。したがって、加速器用コイルの設計や利用においては放射線環境中で高温超伝導線材にひずみを印加した場合にその超伝導特性がどのように変化するかを調査する必要がある。

そのため、本実験においては高温超伝導線材に中性子を照射し、その後にひずみを印加することにより臨界電流特性がどのように変化するかを実験的に検証した。

2-2. 実験装置・方法

ひずみ測定に用いる治具、線材の接続の様子を図 2.1 に示す。線材の治具への接着はハンダを用いて行った。ひずみゲージは線材の長手方向中心部に接着し、電圧タップも同様に接続した。治具は Stepping Handle を回転させることにより A が上下し、線材にひずみの印加と開放を行うことができる構造となっている。冷却方法は液体窒素浸漬冷却(77K)である。実験は図 2.2 のように臨界電流値(I_c)の測定を行い、表 1.1 と同じ YBCO および Bi-2223 線材について評価した。

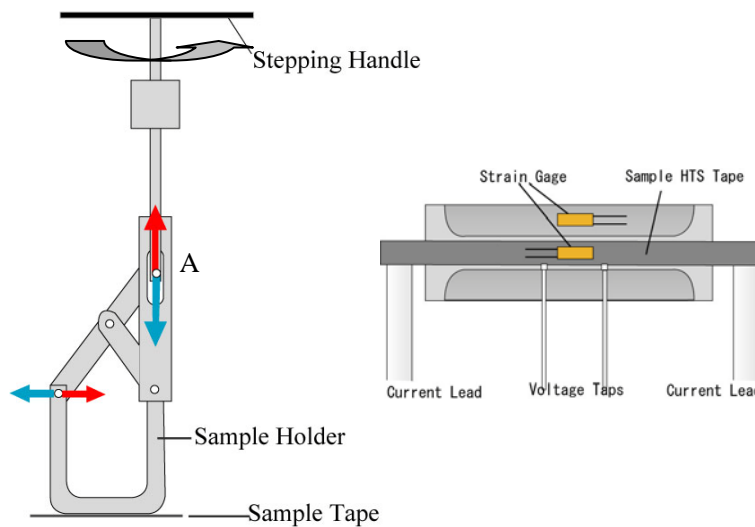


図 2.1 ひずみ測定用治具および線材・電圧タップ接続図

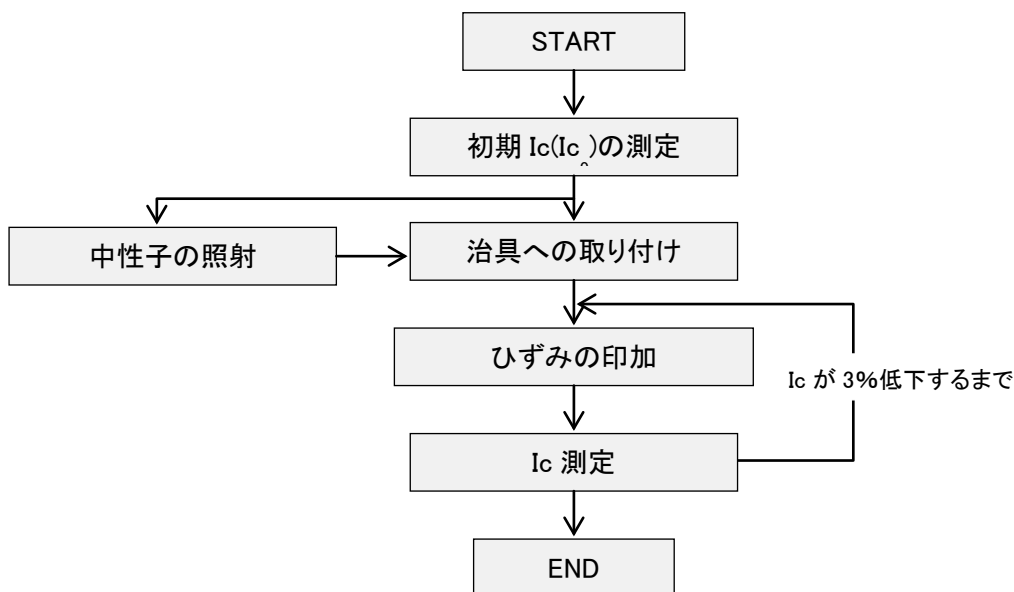


図 2.2 実験手順

2-3. 実験結果

中性子照射前後の結果を図 2.3、図 2.4 に示す。縦軸の値は、各ひずみに対する I_c の値を $I_{c_{max}}$ により規格化したものである。

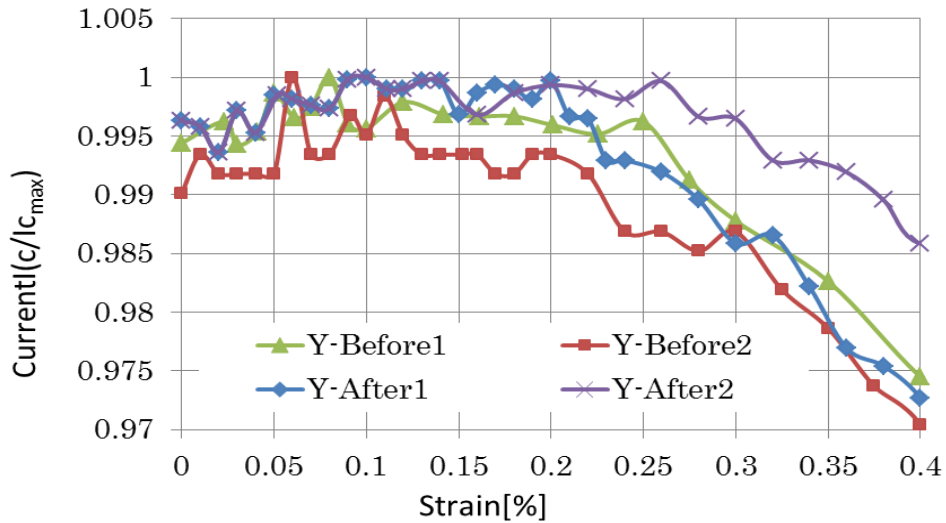


図 2.3 YBCO 線材

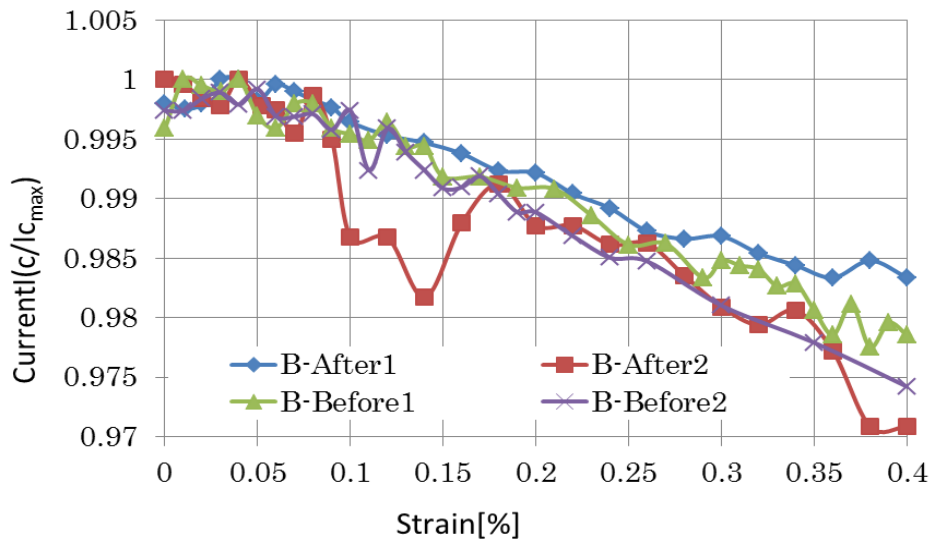


図 2.4 Bi-2223 線材

以上の結果より以下のことがわかる。

- (1) YBCO 線材はひずみの印加に伴いひずみ率 0.1% 近傍で I_c が最大となり、その後はひずみ印加に従って I_c の減少が確認できる。これは線材に初期ひずみがかかっているためと考えられる。
- (2) Bi-2223 線材については、ひずみの印加に伴い I_c は単調に減少している。
- (3) YBCO・Bi-2223 線材どちらも中性子照射の影響による超伝導特性の大きな変化は確認できない。

2-4. 今後

本実験については、平成 22 年度を通して多くの実験データを取得した。しかし、実際には実験データの解析を行ってみるとデータのばらつきが多い。そこで次年度も引き続き同様の評価・実験を行っていく予定である。22 年度の実験手順においては、ひずみを単調増加し、その後減少させるというプロセスで I_c 測定を行ってきた。23 年度は、「0→ひずみ印加、ひずみ印加状態→0・・・」を繰り返すプロセスについて評価する。また、外部磁場印加状態でのひずみ印加による超伝導特性(I_c -B 特性)も評価する予定である。

3. 高温超伝導線材の昇温による特性評価試験

3-1. 実験目的

加速器コイルをはじめとする工業製品へ超伝導線材を応用する際には、溶接や安定化のための加工に、はんだ付けやエポキシ含浸などの方法が採られる。このような場合、線材が 100℃を超える高温にさらされる場合もあるため、線材の昇温に対する耐性のデータは工学的に非常に重要である。

そこで表 1.1 の YBCO 線材と Bi-2223 線材を試料として、恒温炉で加熱し一様な高温環境下に一定時間曝露し、曝露前後の臨界電流値(Ic) を比較することによって超伝導特性の変化を評価した。

3-2. 実験方法

実験方法を以下のフローチャート（図 3.1）に示す。また、各温度パラメータに対し用いた線材の諸元を YBCO については表 3.1 および表 3.2 に、Bi-2223 については表 3.3 および表 3.4 に示す。

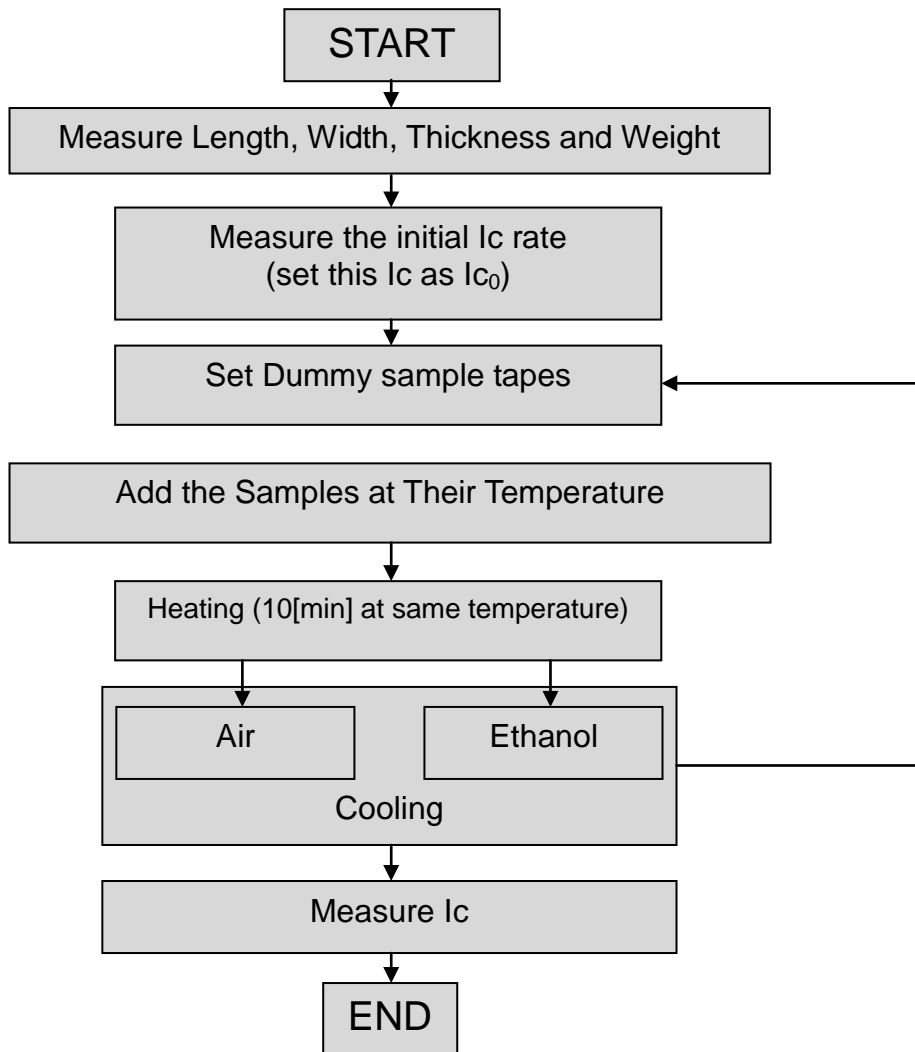


図 3.1 実験手順

表 3.1 YBCO 試料線材の諸元

Sample No.	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]	Sample No.	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]
#1	114.0	4.40	0.20	0.9	#15	113.0	4.35	0.20	0.8
#2	117.0	4.35	0.20	0.9	#16	114.5	4.35	0.20	0.8
#3	112.5	4.35	0.20	0.9	#17	109.5	4.35	0.20	0.8
#4	115.5	4.35	0.20	0.8	#18	109.5	4.35	0.20	0.8
#5	101.0	4.35	0.20	0.8	#19	111.5	4.35	0.20	0.8
#6	106.5	4.35	0.20	0.8	#20	108.0	4.35	0.20	0.8
#7	110.0	4.35	0.20	0.8	#21	116.0	4.35	0.20	0.8
#8	108.5	4.35	0.20	0.9	#22	110.0	4.35	0.20	0.8
#9	105.0	4.35	0.20	0.8	#23	108.5	4.35	0.20	0.8
#10	975.0	4.35	0.20	0.8	#24	113.5	4.35	0.20	0.8
#11	110.0	4.35	0.20	0.8	#26	97.90	4.45	0.20	0.8
#12	114.5	4.35	0.25	0.8	#27	100.8	4.35	0.20	0.8
#13	114.5	4.40	0.20	0.8	#28	101.4	4.35	0.20	0.8
#14	101.0	4.35	0.20	0.8	#29	101.4	4.35	0.25	0.8

表 3.2 YBCO 線材の温度と冷却方法

Sample No.	Temperature[°C]	Cooling Condition
#1、2	118	Air
#3、4	118	Ethanol
#5、6	135	Air
#7、8	135	Ethanol
#9、10	150	Air
#11、12	150	Ethanol
#13、14	185	Air
#15、16	185	Ethanol
#17、18	200	Air
#19、20	200	Ethanol
#26、27	220	Air
#28、29	220	Ethanol
#21、22	245	Air
#23、24	245	Ethanol

表 3.3 Bi-2223 試料線材の諸元

Sample No.	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]	Sample No.	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]
#1	100.2	4.00	0.25	0.7	#15	100.0	4.00	0.25	0.8
#2	97.30	3.90	0.25	0.8	#16	100.6	4.00	0.25	0.8
#3	100.8	4.00	0.20	0.8	#17	100.0	4.00	0.25	0.7
#4	100.8	4.00	0.20	0.7	#18	100.3	4.05	0.25	0.8
#5	101.1	4.00	0.20	0.8	#19	99.20	4.00	0.25	0.8
#6	99.60	4.00	0.20	0.8	#20	100.2	4.00	0.25	0.8
#7	100.7	4.00	0.25	0.8	#21	100.2	4.05	0.25	0.8
#8	100.9	4.05	0.25	0.8	#23	101.7	4.05	0.25	0.8
#9	101.8	4.05	0.25	0.8	#25	100.2	4.00	0.25	0.8
#10	101.3	4.00	0.25	0.8	#27	99.00	4.05	0.25	0.8
#11	98.80	4.00	0.20	0.8	#29	106.5	4.00	0.25	0.8
#12	100.3	4.00	0.25	0.8	#30	104.0	4.00	0.25	0.8
#13	100.4	4.00	0.25	0.8	#31	105.0	4.00	0.25	0.8
#14	100.0	4.00	0.25	0.8	#32	103.0	4.00	0.25	0.8

表 3.4 Bi-2223 線材の温度の冷却方法

Sample No.	Temperature[°C]	Cooling Condition
#1、2	118	Air
#3、4	118	Ethanol
#5、6	135	Air
#7、8	135	Ethanol
#9、10	150	Air
#11、12	150	Ethanol
#13、14	185	Air
#15、16	185	Ethanol
#17、18	200	Air
#19、20	200	Ethanol
#29、30	220	Air
#31、32	220	Ethanol
#21、23	245	Air
#25、27	245	Ethanol

3-3. 実験結果

各温度および冷却方法について得られた I_c 値を初期 I_c で規格化した結果を図 3.2、3.3 に示す。なお、図に記されている値は各温度において観測された規格化 I_c の平均値である。また、凡例の Air は空気中静置による緩慢な冷却を、Rapid はエタノールによる急冷をそれぞれ示している。図 3.4 に加熱後の線材の写真を示す。左が YBCO 線材、右が Bi-2223 線材となっている。

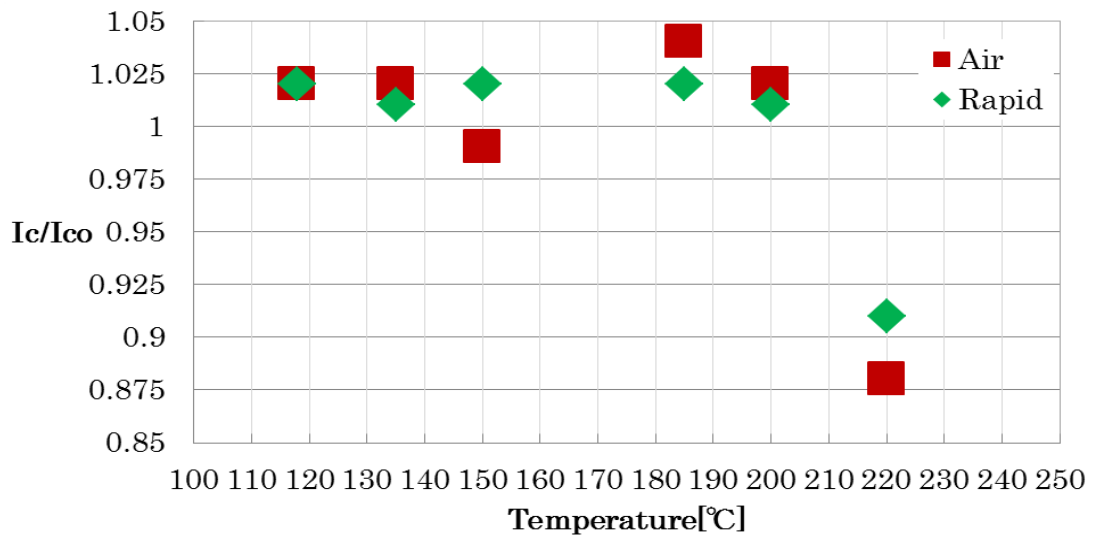


図 3.2 YBCO 線材の Ic

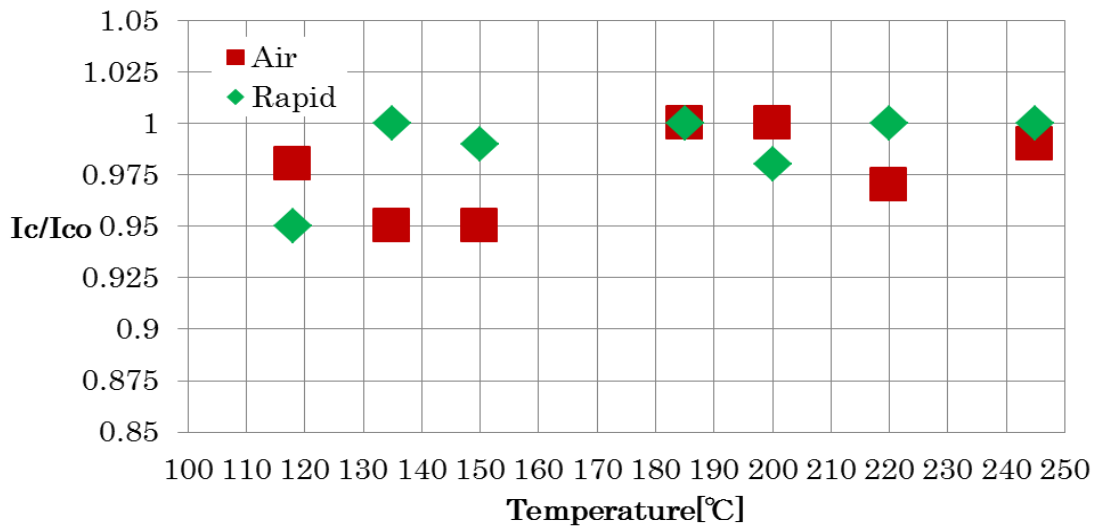


図 3.3 Bi-2223 線材の Ic

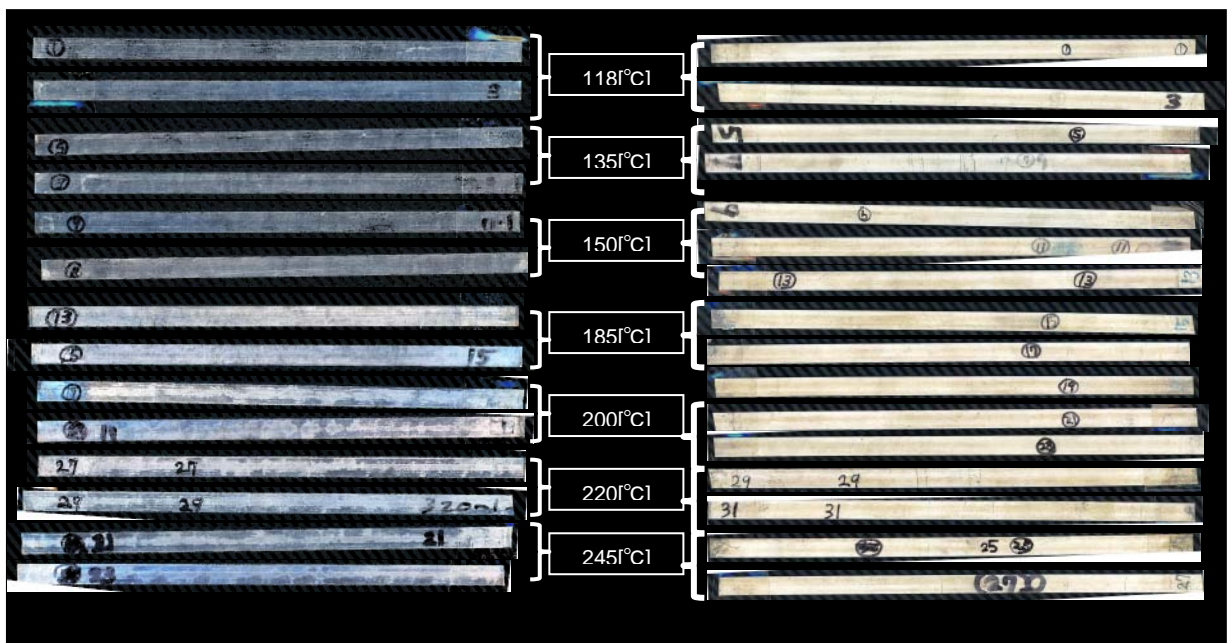


図 3.4 昇温後の線材の様子

以上の結果より以下のことがわかる。

- (1) YBCO 線材は 200℃以上で超伝導特性が失われる。
- (2) YBCO 線材の劣化開始温度はおおよそ 200～220℃の間にある。
- (3) Bi-2223 線材は 250℃においても超伝導特性に劣化は見られない。
- (4) YBCO・Bi-2223 線材どちらも空冷と急冷の間で超伝導特性の変化に大きな違いは見られない
- (5) Bi-2223 線材はどの温度でも表面外観に変化は見られないが、YBCO 線材は 185℃を超えると表面に白い筋状の変色を生じていることがわかる。

3-4. 今後

YBCO 線材については 200℃～250℃の間での特性劣化が確認できたが、細かい劣化温度の特定には至っていない。また、Bi-2223 線材については今回の実験における最大温度である 250℃でも劣化が確認されず、Bi-2223 線材の劣化開始温度の特定はできなかった。

今後の予定としては、(1) Bi-2223 を 250℃以上まで昇温する、(2) YBCO の昇温幅を細かくし 200～220℃の間での劣化開始温度を特定する、(3) 線材にひずみゲージを接着し加熱中のひずみを測定する、(4) 線材の種類を増やして特性評価を行う、(5) サンプル数を増やすということがあげられる。

本実験の当初の目的である、高温超伝導線材の工業応用における熱的指標を評価するという点に関してはさらなる調査が必要であり、23 年度も本実験を継続する予定である。

光学機器の耐放射線性能に関する研究

滝澤 慶之^a、川崎 賀也^a、榎 直人^b、北村 尚^c、内堀 幸夫^c

^a 理化学研究所、^b 青山学院大学、^c 放射線医学総合研究所

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 の厚さのシールドリングの条件で 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。

同ビームを使い、過去に、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 軌道上較正用光源)
 - 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
- ・ 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) 結晶 (大気及び雲モニタ用レーザー部品)
 - ・Nd,Cr:GdVO₄ 単結晶
- 2) 紫外線LED (JEM-EUSO 軌道上較正用光源)
 - ・360nm, 385nm
- 3) ASIC
 - ・フロントエンド読出用 ASIC
- 4) 光電子増倍管
 - ・R11265-M64 管体

次に各項目の実験結果を示す。

1) 結晶 (大気及び雲モニタ用レーザー部品)

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・小型化のために、従来の Nd 系レーザーに Cr を活性イオンとして共添加した新結晶の開発を行っている。今回、新結晶の ISS 軌道上での利用を想定し、放射線耐性の測定を初めて行った。測定したサンプルは、以下の3つである。

結晶名: Nd,Cr:GdVO₄ 単結晶
サイズ: φ4mm×1mm
活性イオン添加濃度:

サンプル①: Nd2.0%, Cr0.5%

サンプル②: Nd2.0%, Cr1.0%

サンプル③: Nd2.0%, Cr2.0%

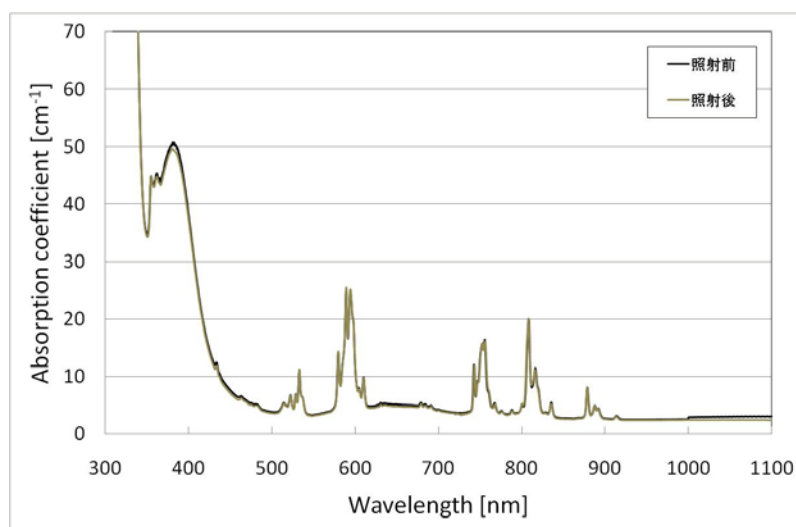


図1: Nd,Cr:GdVO₄ 単結晶の吸収スペクトル (Nd2.0%、Cr1.0%)

今回の実験では、上記3種類のサンプルに 30krad の照射を行い、透過率の変化を測定した。一例として図 1 に Nd2.0%、Cr1.0%添加した GdVO₄ 単結晶の吸収スペクトルを示す。紫外から、レーザー発振波長(基本波)である 1 μ 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変化は見られず、本結晶は 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。

2) 紫外線LED (JEM-EUSO 軌道上較正用光源)

JEM-EUSO 望遠鏡焦点面検出器、電子回路、光学系の光子数効率の変化を測定するための光源用紫外線 LED 候補 2 種について耐放射線試験を行った。今回は定性的な試験であったが、今回同じ型番の 360nm と 385nm の LED 3 個ずつに対し、照射しながら発光強度の変化をモニターして定量的なデータを得た。また、ビームの当たらない場所に 385nm LED をおいてレファレンスとして用い照射中の LED の光量変化との比較を行った。約 90krad まで照射したがレファレンス LED の変化分を差し引くと発光強度の変化は 5% 以内(360nm LED では増加、385nm では減少)であった。

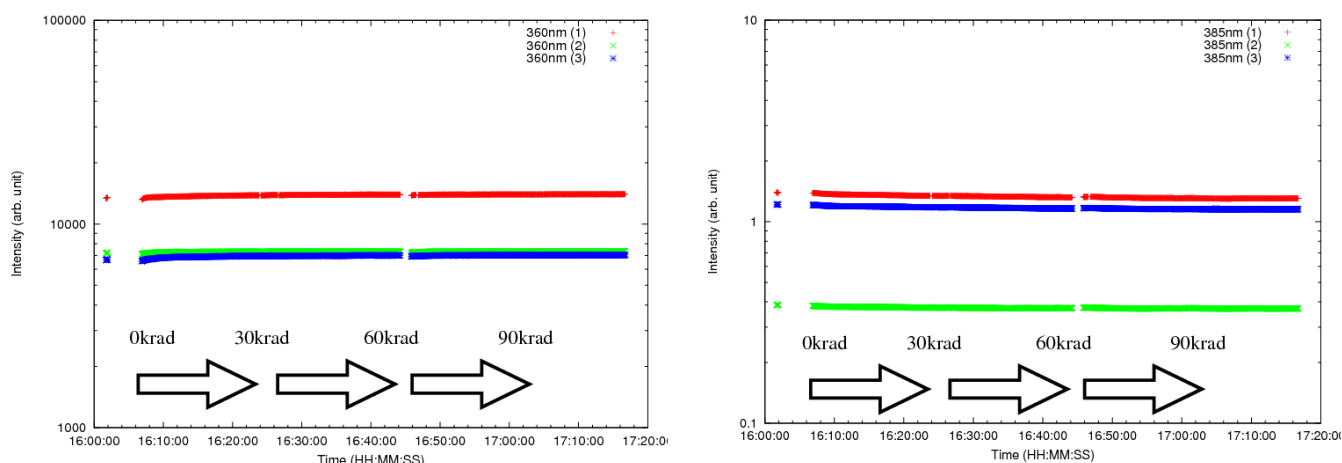


図 2 : 波長 360nm(左)、385nm(右)の LED への陽子照射に対する発光強度の変化。有意な変化は見られない。

3) ASIC

・フロントエンド読出用 ASIC

JEM-EUSO 望遠鏡焦点面検出器のフロントエンド読み出しに用いる、光子計数および電荷計数 ASIC の放射線耐性試験を行った。ASIC の基本仕様は以下の通りである。

- ・プロセス: AMS SiGe 0.35 μ m
- ・チップサイズ: 4.6mm \times 4.1mm (19mm²)
- ・パッケージ: 240pin CQFP

- ・ 電源電圧: +3.0V

パッケージカバーを除去し、ベアチップに 30k rad の照射を行った。信号入力を行わなかったが、ASIC は稼動状態で照射を行った。内部アンプゲイン、リニアリティ、ノイズ特性、消費電力等の有為な変化は見られなかった。

4) 光電子増倍管

JEM-EUSO 望遠鏡焦点面検出器の主光検出器として開発した 64 チャンネルマルチアノード光電子増倍管 R11265-M64 の管体に対して 30k rad の照射を行った。2 本の光電子増倍管に照射したが、2 本とも照射前後に置いて、光検出効率、光電子増倍ゲイン、感度一様性等の特性に有意な変化は見られなかった。尚、光電子増倍管の窓材に関しては、過去に試験しており、JEM-EUSO 望遠鏡度での使用に問題が無いことを確認している。

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。レーザー単結晶、紫外線 LED、フロントエンド ASIC、光電子増倍管は、30 k rad、まで耐性が有り、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。

7. 照射システムの開発

サイクロトロン汎用照射室 C-8 コースにおける
30, 40, 70 MeV 陽子線の照射場の一様性の測定

サイクロトロン汎用照射室 C-8 コースにおける 30, 40, 70MeV 陽子線の照射場の一様性の測定

北村尚、内堀幸夫、小平聡、Ploc, Ondrej

放射線医学総合研究所 放射線計測技術開発室

概要

放射線医学総合研究所のサイクロトロン汎用照射室の C-8 コースには、ワブラー磁石が設置されており、広い照射野のビームが作成可能である。その広照射野のビームを用いて、線量計等の校正、生物実験などに使用するため機器の整備を進めている。これまで、70MeV プロトンのビームを中心に実験を行ってきたが、より低いエネルギーでの照射場の作成のために、ワブラー磁石の強度とプロファイルの相関を測定し、最適なワブラー磁石の設定を求めた。

1. 背景

サイクロトロンの汎用照射室の C-8 コースでは、高エネルギー粒子に対する線量計の校正を行うために、広い領域で一様な横方向分布を持つ粒子線（陽子、 α 線）の照射場の構築を進めている。個人被ばく線量計として用いられている TLD（熱ルミネッセンス検出器）や OSLD（光ルミネッセンス検出器）など、入射放射線のフルエンスや LET（Linear Energy Transfer）が記録できないので、LET が一定で、線量計全体が一様な線量分布を持つ場での校正が必要である。そこで C-8 コースにおいて、過去に治療で用いた装置¹を基に校正場を作成している²。治療では、70 MeV の陽子線（LET \sim 1 keV/ μ ）を使用したので、主に 70 MeV のビームで校正実験などを行っているが、陽子線においても LET が異なったビームでの校正が必要になってきたので、2 keV/ μ (30 MeV) と 1.5 keV/ μ (40 MeV) のビームでの校正場の作成を行った。C-8 コースでは、ワブラー・散乱体法を用いて、広い範囲で一様な照射場を作成しているが、これまでワブラー磁石の最適化については、ワブラー磁石の値を変化させ、蛍光板で確認しつつ最適と思われる条件を探し、その位置での詳細なプロファイルを計測し、より良い条件にワブラー磁石を合わせる、という測定を繰り返して、最適な条件に収束させるという方法をとってきた。しかしながら、その方法では、平坦な領域の状態をさまざまな実験に合わせようとすると、非常に手間のかかることになる。それを解決するために、ワブラー磁石を系統的に変化させ、各条件でのビームのプロファイルを測定しパラメータ化することで、必要な条件から最適なワブラー磁石の条件を導出する方法の開発を行った。

2. C-8 コースでのワブラー・散乱体

C-8 コースでは、横方向に一様な照射場を作成するために、ビームを散乱体と呼ばれる金属板を通過させ、その際にガウス型の角度分布を持ったビームを作成し、それを、ワブラー磁石と呼ばれる電磁石を用いて、ビーム照射位置を周期的に移動させることによって、一様な部分を大きく広げる方法をとっている。ビームライン上には、二台の電磁石が、磁場がそれぞれ水平と鉛直方向となるように設置されている。それぞれの磁石には sin 型の磁場がかけられ、互いに位相が $\pi/2$ ずれているために、ビームは円錐の上を螺旋状に進むような形状となり、時間平均をとることで一様な部分を作成している。この方法は HIMAC の治療ビームや BIO 照射室などと同じ方法³で、Single-ring Wobbling Method と呼ばれている。文献⁴によると、ビーム軸を中心とした動径方向 r の強度分布は、式(1)のように表される。

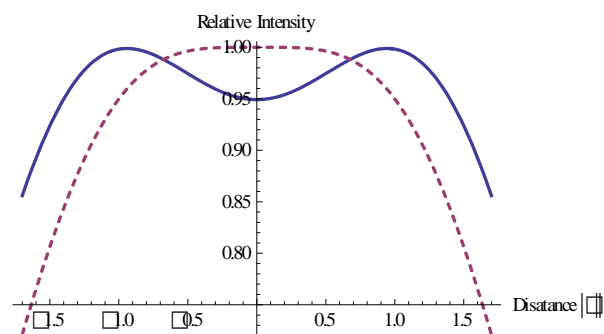


図 1 ワブラー・散乱体法によるビーム強度の横広がり計算値。式(1)を元に計算している。横軸はビームの中心からの距離で、単位はビーム広がり σ で表している。縦軸は最大強度となる位置で規格化した相対強度を表している。実線は「5%以内の領域を最大にする」との条件、破線は $R_w \geq \sqrt{2}\sigma$ という条件下での計算値。

$$I(r) = \frac{C}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + R_w^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rR_w}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 σ は散乱体によって広がったときのガウス分布の σ 、 R_w はワブラー磁石によって円状に回転した時の軌跡の半径、関数 I_0 は0次の第一種変形ベッセル関数である。式(1)は、 $r = 0$ で極値を持ち、 $I = 0$ に漸近的に近づく関数であるが、 $R_w \geq \sqrt{2}\sigma$ の条件で、 $r = 0$ では極小値で、他に極大値を持つ関数となる。図1にグラフを示す。したがって、最適化の条件として、「ビーム中心を最も平坦にする」とした場合、 $R_w = \sqrt{2}\sigma$ の時に、平坦な領域を広くすることができる。また、ビーム軸を凹ませることを許した場合では、「最大の強度になる点から5%以内の領域を最大にする」との条件で、 $R_w = 1.585\sigma$ となり、一様な領域は半径 1.40σ の円内となる。このように、必要とする平坦な場を作成する際には、その大きさの半径の1/1.40倍の σ を持つように散乱体を選択し、ワブラー磁石によるビームの振りを $1/1.585\sigma$ とすればいいことになる。

サイクロトロンC-8コースにおいて、ビームは、一旦、真空から取り出されて散乱体を通過させた後、低真空槽に戻し、ワブラー磁石でビームを螺旋状にして、照射位置まで送られる。70MeVの陽子ビームなどでは、散乱体として0.3mm厚のアルミニウム板を使用している。低いエネルギーのプロトンや、その他の核種では真空を取り出すウインドで広がるので、特に散乱体は使用していない。ワブラー電磁石に流す電流は、計測室内にある制御装置で設定及びモニターが可能である。電流は二台のスキヤナー磁石にsin型とcos型で流されている。電流の振幅と周波数が設定可能であるが、周波数は12Hzで最適化されている。電流の振幅が、ワブラー磁石の強度、さらに、回転半径に関わるので、各ビームで最適となる電流値を求めている。電流値は、制御装置の指示部に電圧として表示されるので、これ以降、その値をモニター電圧と記述する。

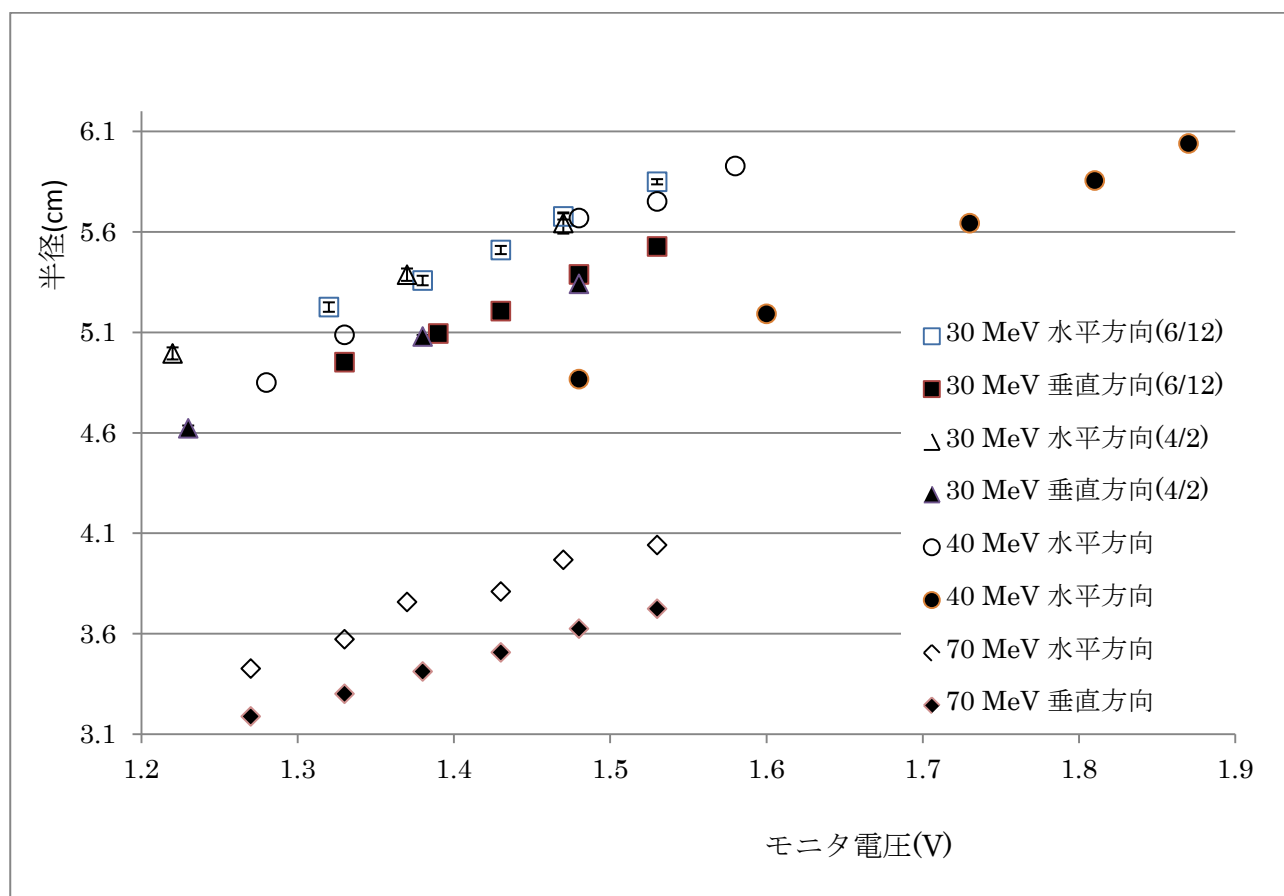


図2 ワブラーを変化させたときの軌道半径の変化。マーカーはそれぞれ四角形と三角形が陽子30 MeV、丸形が40 MeV、ひし形が70 MeVを表している。各点で白抜き点が水平方向、黒点が垂直方向を表している。

3. ワブラー磁石と平坦度の相関の測定

ワブラー磁石と照射場の平坦度の測定は、ワブラー磁石の制御装置で印加する電流値を変化させ、その際のモニター電圧の値と、平坦度の相関を取ることで行った。照射場の平坦度は、十字型に配置した

シンチレーションアレイを、自動ステージ上で動かして測定した。測定方法や測定値の(1)式へのフィッティング処理に関しては文献⁵を参照頂きたい。

測定は、30, 40, 70 MeV の三種類のエネルギーの陽子線について行った。散乱体については、通常 0.3 mm 厚のものを用いている。30 MeV の陽子線に関してはビーム窓等で広がるためにしていない。

3.1 陽子 30 MeV

陽子 30 MeV ビームの平坦度の測定は、2010 年 4 月 2 日及び 6 月 16 日に行った。図 2 にモニター電圧と回転半径の相関図を示す。ビーム広がり σ はリーズナブルな fitting で示された値の平均値である 3.50 cm で固定している。二度の測定の間隔は約 2 ヶ月であるが、fitting 誤差とほぼ同じ差であるので、十分再現性を持っていることがわかる。また、モニター電圧とワブラー半径には比例関係にあると近似することが可能である。その関係式として、ワブラー半径を R [cm]、モニター電圧を V [V] とすると

$$\begin{cases} R_x = 1.1709 + 3.0528 V_x \\ R_y = 1.0190 + 2.9432 V_y \end{cases} \quad (2)$$

と表せる。

3.2 陽子 40 MeV

陽子 40 MeV ビームの平坦度の測定は、2011 年 1 月 18 日に行った。通常、40 MeV の陽子ビームに対しては、散乱体は使用していないが、本測定の際には、70 MeV 陽子ビームと同様、0.3 mm 厚のアルミ板の散乱体を用いた。ビーム広がり σ は、ワブラーを使わない状態で取ったプロファイルをガウス分布で fitting した結果から 4.17 cm を用いた。その相関は一次直線で近似して、

$$\begin{cases} R_x = 0.3304 + 3.5605 V_x \\ R_y = 0.3493 + 3.0451 V_y \end{cases} \quad (3)$$

となる。

3.3 陽子 70 MeV

これまでよく使われてきた陽子 70 MeV ビームに対しても、同様の方法で平坦度の測定を 2010 年 7 月 8 日に行った。散乱体として 0.3 mm のアルミ板を用いた場合のビーム広がり σ は、2.48 cm を用いた。その相関は一次直線で近似して、

$$\begin{cases} R_x = 0.3986 + 2.4035 V_x \\ R_y = 0.5425 + 2.0795 V_y \end{cases} \quad (4)$$

となる。

3.4 測定結果

表 1 に今年度測定した 3 種類のビームについて、「最大の強度になる点から 5% 以内の領域を最大」にするワブラー磁石に合わせるためのモニター電圧の条件をまとめた。第 2 節の議論から、ワブラーで動かす軌道の半径が $R_w = 1.585 \sigma$ のときに、一様な領域は半径 1.40σ の円内となるので、各ビームの広がり σ を基に一様となる最大の半径と軌道の半径を求め、近似式(2,3,4)からワブラー磁石のモニター電圧を求めた。最適化の際には式(1)及びその微分 $dI(r)/dr$ を使用したが、解析的に解けないので、数値計算を基に近似的な数値を出し、その数値計算の結果は表 2 にまとめている。

最適化の条件として、「最大の強度になる点から 5% 以内の領域を最大」としたために、40 MeV 陽子で散乱体を使用した条件では、散乱自体が大きいので通常使用しているワブラーの設定より大きくなるので注意が必要であるが、1% の平坦度の領域を半径 3.6 cm 程度にまで広げることが可能であることがわかり、対象物の大きさに応じて平坦度をコントロールできる可能性を示すことができた。

表 1 陽子線ビームについてのプロファイル測定によるワブラー条件の最適値のまとめ。ワブラーモニターの値は、近似式(2,3,4)から求めた数値。特に、下線が引いてあるものに関しては、実測範囲から外れているので、使用する際には確認が必要である。

エネルギー (MeV)	アルミ散乱体厚(mm)	ビーム広がり(cm)	軌道半径の最適値(cm)	5%以内となる半径(cm)	水平方向ワブラーモニター電圧(V)	水平方向ワブラーモニター電圧(V)
30	なし	3.5	5.56	4.9	1.44	1.54
40	0.3	4.17	6.63	5.83	<u>1.76</u>	<u>2.06</u>
70	0.3	2.48	3.94	3.47	1.47	<u>1.63</u>

4. まとめ

サイクロトロン C-8 コースにおいて、一様な照射野を作成するのに用いているワブラー磁石を系統的に変化させて、その際のビーム形状を測定・解析して、それらの関係を調べた。第 2 節で述べたように、ほぼ比例関係があるので、今回の解析では一次関数でのフィッティングを行った。フィッティング関数は、陽子 30, 40, 70 MeV がそれぞれ式(2),(3),(4)に相当するが、それらの比例係数は、磁場中での曲げられやすさ、つまり、ビームのエネルギーが大きければ比例係数は小さくなるはずであるが、30 MeV と 40 MeV とで逆転してしまっている。原因としては、ワブラーによって広げた範囲が小さいと中心部のくぼみが小さくなり、フィッティング精度が向上しなかったために、40 MeV の陽子ビームに関してはズレが生じたのではないかと考えられる。測定した際の 40 MeV のビームでは散乱体を使用しており、通常のビーム条件と異なっているので、データとしては役にたたないかもしれないが、ビームの平坦度を上げる方法として紹介するために、本稿で記述した。通常の、散乱体を用いない 40 MeV 陽子ビームの条件に関しては、別機会に測定を行いたい。

最後に、ビームの供給や様々な助言を頂いたサイクロトロン運転課の皆様に感謝の意を表したいと思います。

参考文献

1. Kanai, T. et al. Spot scanning system for proton radiotherapy. *Med. Phys.* **7**, 365–369(1980).
2. 北村尚 汎用照射室 C-8 コースにおけるビーム制御. *平成 21 年度サイクロトロン利用報告書* 46–49(2010).
3. Yonai, S. et al. Evaluation of beam wobbling methods for heavy-ion radiotherapy. *Med. Phys.* **35**, 927(2008).
4. Tomura, H. et al. Analysis of the penumbra for uniform irradiation fields delivered by a wobbler method. *Jpn. J. Appl. Phys.* **18**, 42–56(1998).
5. 北村尚 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* **5**, 20–27(2010).

表 2 ワブラー半径と平坦度が 1,2,5,10%となる領域の半径の計算値。表中の数値の単位はビーム広がり(ガウス分布の σ)である。表中の数値が入っていないセルについては、中心部のくぼみが必要とする平坦度より大きくなる場合であり、実用上使用できないので、計算を行っていない。太字は平坦度が 5%となる最大の場合を表している。

ワブラーの 軌道半径	最高点の 半径	中心と同じにな る外周の半径	平坦な領域の半径			
			平坦度 1%	平坦度 2%	平坦度 5%	平坦度 10%
1.4			0.586461	0.725433	0.956801	1.18439
1.414	0	0	0.646346	0.776905	0.99866	1.2201
1.415	0.066743	0.0943282	0.650854	0.780713	1.00171	1.22268
1.42	0.180614	0.255894	0.672874	0.799427	1.01679	1.2355
1.43	0.297471	0.422768	0.714553	0.835319	1.04609	1.26056
1.45		0.636913	0.790214	0.901847	1.10156	1.30859
1.47	0.553112	0.795817	0.857933	0.962645	1.15343	1.35416
1.48	0.599088	0.864579	0.889421	0.991258	1.17819	1.37611
1.487	0.629034	0.909709	0.910654	1.01066	1.1951	1.39117
1.49	0.641382	0.928401		1.01883	1.20225	1.39755
1.5	0.680695	0.988251		1.04545	1.22564	1.41851
1.51	0.717531	1.04482		1.0712	1.24843	1.43903
1.519	0.748881	1.09336		1.0937	1.26845	1.45713
1.52	0.752269	1.09863			1.27065	1.45912
1.53	0.7852	1.15008			1.29233	1.47881
1.54	0.816548	1.19947			1.31352	1.49812
1.55	0.846507	1.24706			1.33423	1.51707
1.56	0.875227	1.29305			1.3545	1.53569
1.57	0.902835	1.33763			1.37436	1.55398
1.58	0.92944	1.38092			1.39434	1.57231
1.585	0.94496	1.40633			1.40532	1.58261
1.6	0.979995	1.46414				1.60707
1.64	1.07239	1.61963				1.67424
1.666	1.12747	1.71449				1.71599
1.68	1.15579	1.7639				
1.7	1.19481	1.83274				

8. 生物研究

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

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

前田淳子^a、Chuck Yurkon^a、藤井義大^{b,c}、藤沢寛^{b,c}、北村尚^c、加藤宝光^a

^a コロラド州立大学、^b 東京大学、^c 放医研

概要

これまで、陽子線は、低 LET 放射線であるとの認識され、その生物効果は X 線やガンマ線と大きく変わらないとされてきた。しかし近年、陽子線においても、ブラッグピーク領域においては、炭素線、鉄線などと同様に、十分に密度の濃い電離があり、高い生物効果をもつ可能性があることが示唆されている。そこで、我々は、放医研サイクロトロンにおいて加速された 70MeV 陽子線の飛程内の全てにおいての生物効果を Chinese Hamster Ovary (CHO) cell を用いて調べた。そのために、厚さの薄い細胞培養フラスコである OptiCell を重ね、およそ 2 mm 間隔で陽子線の飛程 4cm における生物効果を細胞生存率から調べ、これをコロラド州立大学の Cs-137 由来ガンマ線、放医研共同実験施設の X 線、HIMAC 炭素線 290MeV/n で得られた結果と比較した。その結果、陽子線はブラッグピークを含む全ての領域において、細胞生存率は X 線、ガンマ線同様に照射線量に依存し、炭素線で観察されるような LET に依存する高い生物効果は見られなかった。ゆえに、このエネルギーの陽子線においては、ブラッグピークにおいても X 線、ガンマ線と変わらない性質であると結論づけた。

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いての 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。

2. 実験材料と方法

A) 細胞と培養方法

Chinese Hamster Ovary (CHO) 細胞は、コロラド州立大の Dr Joel Bedford 教授より譲り受けた。細胞培養には、MEM アルファに 10% の FBS, 抗生物質を加えたものを使用した。細胞は、37 度、5% CO₂ に制御されたインキュベーターで培養した。

B) 照射容器と線量測定

照射容器は、OptiCell を用いた。OptiCell は、培養面積が、7x7cm² で、培養間隔は、2mm である。これを 20 枚重ねたものを陽子線照射した。

線量測定は、(3)の報告にしたがって行われた。同様に、各 OptiCell における照射線量、LET は計算された。

C) 細胞生存率測定

対数増殖期の細胞をトリプシン処理し、一つ一つバラバラにした。照射前一時間前に、およそ 200 - 500 の細胞を OptiCell に培養を開始した。照射時には細胞は OptiCell 膜に張り付いていることは確認されている。これに陽子線を照射し、その後およそ 7 日から 9 日間培養し、コロニーを形成させた。その後、0.9% NaCl で洗浄し、100% エタノールで固定した。0.1% クリスタルバイオレットでコロニーは染色された。50 個以上の細胞を含んだものをコロニーとして数え、細胞生存率を測定した。

3. 結果

A) 深さあたりの生存率

陽子線をそれぞれ 1, 2, 3, 4Gy 照射した。飛程が進むにつれ、線量は多くなっていき細胞死が多くなる。ブラッグピークに到達後、照射線量は小さくなり、生存率は 100% 近くに回復する。物理測定通り、およそ 4cm にブラッグピークがあるのが確認された。

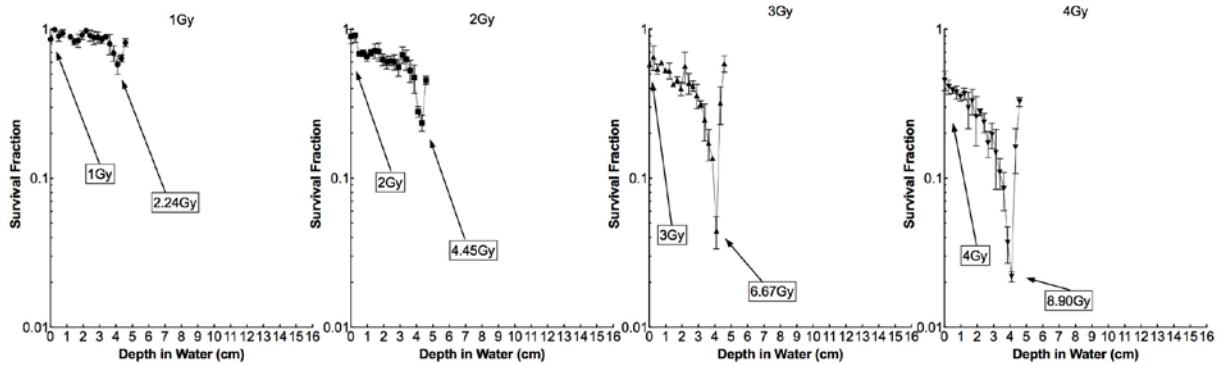


図 1. 70MeV/n 陽子線各線量照射後の深さあたりの細胞生存率の変化。矢印で示された線量は計算によって得られた。実験は 3 回繰り返され、エラーバーは平均誤差である。

また、一方で HIMAC において、同様の実験を 290MeV/n 炭素線で行った。エネルギーが大きいため、炭素線の飛程はおよそ 14cm であり、その付近で大きな細胞死が確認できた。炭素線の飛程は陽子線と比べて長いため、大気中で照射する場合、OptiCell を大量に消費してしまう。故に、照射は二つのシステムを用いて行われた。ひとつは、OptiCell を重ね、それを 14cm 以上の容器に入った水に沈めて照射する方法。これにより、飛程内の全ての生物効果をだまかに確認することができた。そして、ブラッグピーク近傍の生物効果をより詳細に観察するために、PMMA (Poly Methyl Methacrylate) でエネルギーをブラッグピーク近傍まで落としてから照射する方法である。

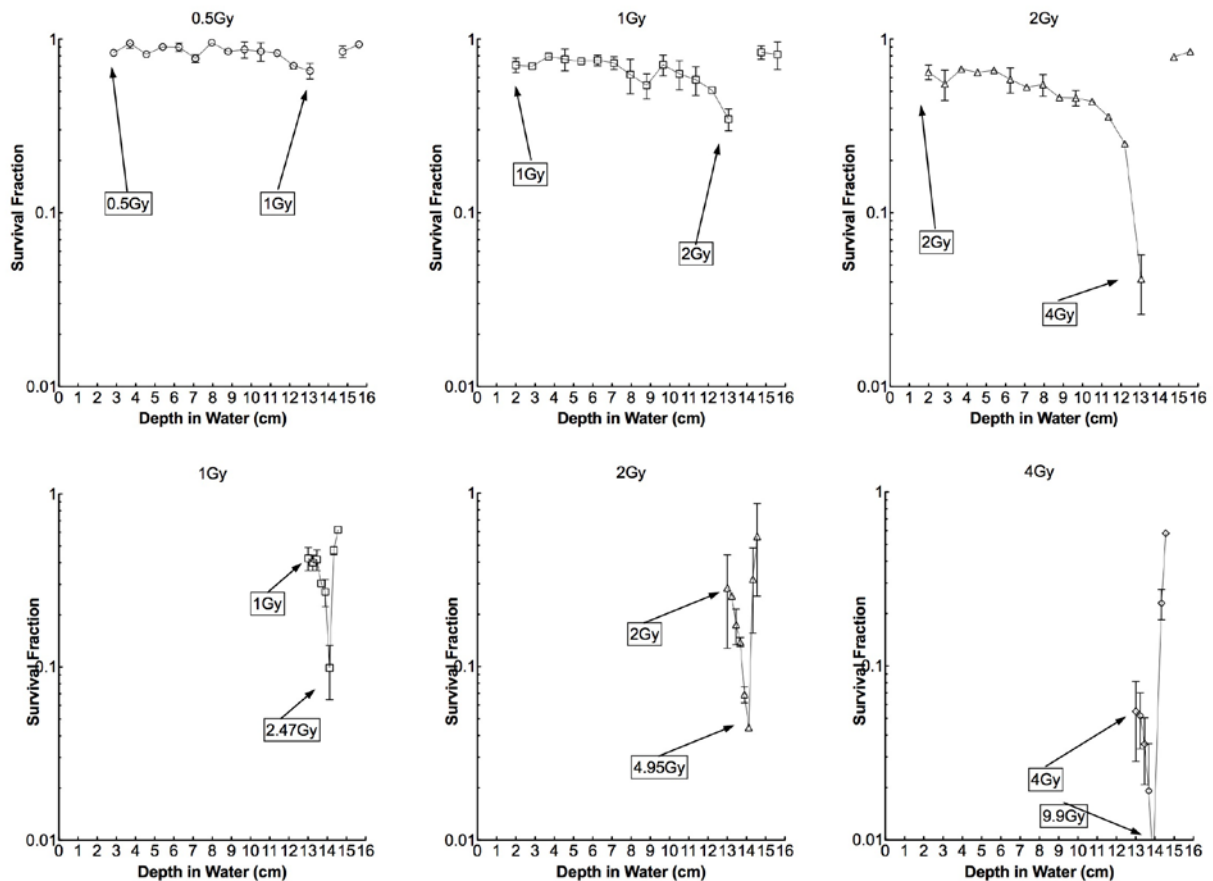


図 2. 290MeV/n 炭素線各線量照射によって得られた深さあたりの細胞生存率の変化。上段は、OptiCell を水中に沈め照射した。下段は Lucite を入れ、深さを調節したものを重ね、大気中で照射した。よって、上段では各点の間隔が広く、下段では各点の間隔が短い。上段でのブラッグピークの点は、再現性が少なかったため除いた。

B) 線量あたりの生存率

A で得られた生存率を、計算で得られた線量に大して再プロットした。ただし、ブラッグピーク付近と、ブラッグピーク以降の点は、小さな実験誤差が大きな線量変化を生み、再現性にかけるため除外した。

各点は PRISM5 を用いてカーブフィッティングを行った。それぞれ Linear Quadratic 回帰曲線で処理された。X 線、ガンマ線、陽子線は得られた回帰曲線上にデータが乗ったが、炭素線はデータが大きく散らばり、回帰曲線上には乗らなかった。

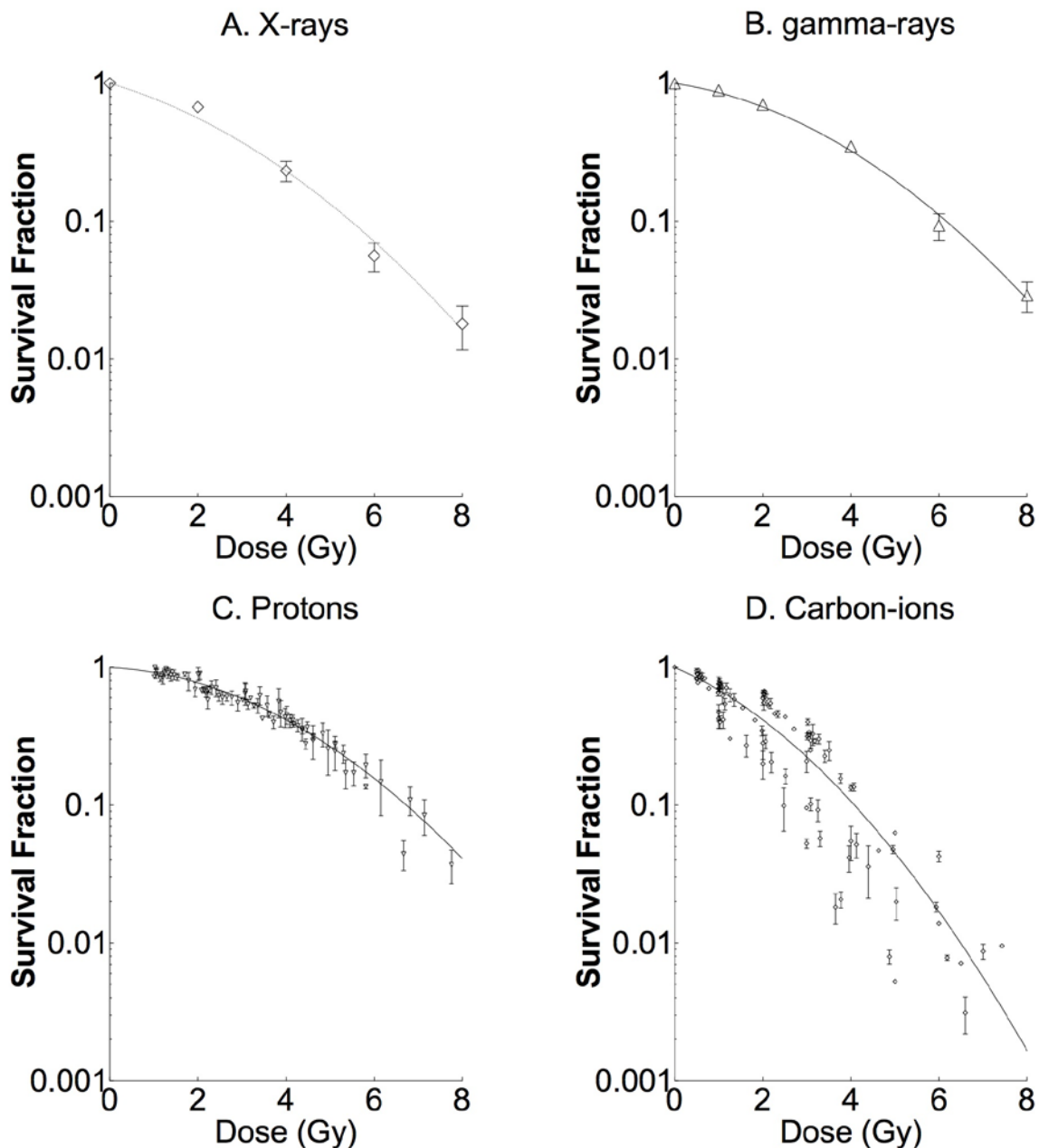


図 3. 細胞生存率曲線。図 1, 2 から得られた生存率を照射線量に対して再プロットした。X 線、ガンマ線の実験は 3 回以上行われ、それぞれのエラーバーは平均値の標準誤差である。

4. 考察

OptiCell を用いて、陽子線、炭素線の飛程内の生物効果を網羅的に比較することができた。図 1 であるように、明確な細胞死の増大が陽子線、炭素線ともにブラッグピーク近傍で確認できた。陽子線においては、これは図 3 で確認されたように線量の増大によって引き起こされた現象であった。高い生物効果を持つとされるブラッグピーク近傍のデータを含む炭素線では、図 2 であるように線量に対して再プロットしたところ、細胞死は炭素線の線量によってのみ決まるものではないのがわかる。同じ線量でも生物効果が高いものと低いものがあり、これらは LET によって決定されていることはわかっている。LET 30 keV/μm 以下のものでは、細胞死は起こりにくく、それ以上のものは、より強い生物効果を引き起こす。

これらの結果、70MeV 陽子線においては、RBE は限りなく 1 に近いことが示唆された。現在のところ、SOBP 陽子線は放医研サイクロトロンでは供給されていない。そのため、やや高い RBE を持つとされる SOBP 陽子線における実験は行い比較することができなかった。

今後は、染色体損傷や DNA 損傷と修復など他のエンドポイントを指標として実験を行うことを予定している。

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、平成 21 年度サイクロトロン利用報告書、2010 年、46-49
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、平成 20 年度サイクロトロン利用報告書、2009 年、35-36
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

9. 研究成果一覽

平成22年度 研究成果一覧

1. サイクロトロン¹の運転実績と利用状況

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 金澤光隆、田代克人、本間壽廣、北條悟、杉浦彰則、岡田高典、神谷隆、高橋勇一、放医研サイクロトロン (AVF930, HM18) の現状. 第7回加速器学会年会. 兵庫県姫路市. 2010,8
2. M. Kanazawa, S. Hojo, T. Honma, A. Sugiura, K. Tashiro, T. Kamiya, T. Okada, Y. Takahashi, PRESENT OPERATIONAL STATUS OF NIRS CYCLOTRONS (AVF930, HM18). 19th International Conference on Cyclotrons and their Applications. 中国蘭州. 2010,9

2. サイクロトロン¹の改良・開発

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 杉浦彰則、金澤光隆、北條悟、本間壽廣、鈴木直方、田代克人、岡田高典、神谷隆、高橋勇一、野田耕司, AVF930サイクロトロン用高調波ビームバンチャーの開発. 第12回応用加速器・関連技術研究シンポジウム. 東京都目黒区. 2010,6
2. 北條悟、金澤光隆、田代克人、本間壽廣、杉浦彰則、岡田高典、神谷隆、高橋勇一、野田耕司, AVF930サイクロトロン用マグネティックチャンネルの現状と改造検討. 第12回応用加速器・関連技術研究シンポジウム. 東京都目黒区. 2010,6
3. 杉浦彰則、金澤光隆、北條悟、本間壽廣、田代克人、岡田高典、神谷隆、高橋勇一、野田耕司, AVF930サイクロトロン用高調波ビームバンチャーの開発. 第7回加速器学会年会. 兵庫県姫路市. 2010,8
4. 金澤光隆、北條悟、本間壽廣、宮原信幸、杉浦彰則、岡田高典、神谷隆、高橋勇一、野田耕司, AVF930サイクロトロン用マグネティックチャンネルの設計検討. 第7回加速器学会年会. 兵庫県姫路市. 2010,8
5. Satoru Hojo, Mitsutaka Kanazawa, Katsuto Tashiro, Toshihiro Honma, Nobuyuki Miyahara, Akinori Sugiura, Takanori Okada, Takashi Kamiya, Yuichi Takahashi, and Kouji Noda, DESIGN STUDY OF MAGNETIC CHANNEL AT NIRS-AVF930. 19th International Conference on Cyclotrons and their Applications. 中国蘭州. 2010,9

3. サイクロトロン¹のR I製造への利用状況

<原著論文等>

1. Kazuhiko Yanamoto, Katsushi Kumata, Masayuki Fujinaga, Nobuki Nengaki, Makoto Takei, Hidekatsu Wakizaka, Rie Hosoi, Soutarou Momosaki, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Kazunori Kawamura, Akiko Hatori, Osamu Inoue, Ming-Rong Zhang : In vivo imaging and quantitative analysis of TSPO in rat peripheral tissues using small-animal PET with [¹⁸F]FEDAC, Nuclear Medicine and Biology, 37(7) 853~860, 2010-10
2. Koichi Kat, Tatsuya Kikuchi, Nobuki Nengaki, Takuya Arai, Ming-Rong Zhang : Tetrabutylammonium fluoride-promoted alpha-[¹¹C]methylation of alpha-arylesters: a simple and robust method for the preparation of ¹¹C-labeled ibuprofen, Tetrahedron Letters 51 (45) 5908-5911 2010

3. Tomoteru Yamasaki, Kazunori Kawamura, Akiko Hatori, Joji Yui, Kazuhiko Yanamoto, Yuichiro Yoshida, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Hidekatsu Wakizaka, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: PET study on mice bearing human colon adenocarcinoma cells using [¹¹C]GF120918, a dual radioligand for P-glycoprotein and breast cancer resistance protein, *Nuclear Medicine Communications*, 31(11) 985-993 2010
4. Ming-Rong Zhang, Katsushi Kumata, Akiko Hatori, Nobuhiko Takai, Jun Toyohara, Kazuhiko Yanamoto, Tomoteru Yamazaki, Joji Yui, Kazunori Kawamura, Sachiko Koike, Koichi Ando, Kazutoshi Suzuki : [¹¹C]Gefitinib ([¹¹C]Iressa): Radiosynthesis, In Vitro Uptake and In Vivo Imaging of Intact Murine Fibrosarcoma, *Molecular Imaging and Biology*, 12(2) 181-191 2010
5. Maki Okada, Ryuji Nakao, Rie Hosoi, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura, Kazutoshi Suzuki, Osamu Inoue : Microdialysis with radiometric monitoring of L-[beta-¹¹C]DOPA to assess dopaminergic metabolism: Effect of inhibitors of L-amino acid decarboxylase, monoamine oxidase, and catecholamine-O-methyltransferase on rat striatal dialysate. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism* 2010
6. Kazunori Kawamura, Fujiko Konno, Joji Yui, Tomoteru Yamasaki, Akiko Hatori, Kazuhiko Yanamoto, Hidekatsu Wakizaka, Makoto Takei, Nobuki Nengaki, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of [¹¹C]XR9576 to assess the function of drug efflux transporters using PET, *Annals of Nuclear Medicine* 24(5) 403-412 2010
7. Joji Yui, Akiko Hatori, Kazuhiko Yanamoto, Makoto Takei, Nobuki Nengaki, Katsushi Kumata, Kazunori Kawamura, Tomoteru Yamasaki, Kazutoshi Suzuki, Ming-Rong Zhang: Imaging of the translocator protein (18kDa) in rat brain after ischemia using [¹¹C]DAC with ultra-high specific Activity *Synapse* 64(6) 488-493 2010
8. Kazuhiko Yanamoto, Fujiko Konno, Chika Odawara, Tomoteru Yamasaki, Kazunori Kawamura, Akiko Hatori, Joji Yui, Hidekatsu Wakizaka, Nobuki Nengaki, Makoto Takei, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis and evaluation of [¹¹C]YM-202074 as a PET ligand for imaging the metabotropic glutamate receptor type 1, *Nuclear Medicine and Biology*, 37(5) 615-624 2010
9. Kazunori Kawamura, Mika Naganawa, Fujiko Konno, Joji Yui, Hidekatsu Wakizaka, Tomoteru Yamasaki, Kazuhiko Yanamoto, Akiko Hatori, Makoto Takei, Yuichiro Yoshida, Kazuya Sakaguchi, Toshimitsu Fukumura, Yuichi Kimura, Ming-Rong Zhang: Imaging of I₂-imidazoline receptors by small-animal PET using 2-(3-fluoro-[4-¹¹C]tolyl)-4,5-dihydro-1H-imidazole ([¹¹C]FTIMD), *Nuclear Medicine and Biology* 37(5) 625-635 2010
10. Joji Yui, Jun Maeda, Katsushi Kumata, Kazunori Kawamura, Kazuhiko Yanamoto, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Nobuki Nengaki, Makoto Higuchi, Ming-Rong Zhang: ¹⁸F-FEAC and ¹⁸F-FEDAC : PET of the Monkey Brain and Imaging of Translocator Protein (18 kDa) in the Infarcted Rat Brain, *Journal of Nuclear Medicine* 51(8) 1301-1309 2010
11. Joji Yui, Akiko Hatori, Kazunori Kawamura, Tomoteru Yamasaki, Kazuhiko Yanamoto, Yuichiro Yoshida, Masanao Ogawa, Katsushi Kumata, Masayuki Fujinaga, Nobuki Nengaki, Kazutoshi Suzuki, Ming-Rong Zhang: Visualization of early infarction in rat brain after ischemia using a translocator protein (18 kDa) PET ligand [¹¹C]DAC with ultra-high specific activity, *NeuroImage* 54(1) 123-130 2010
12. Kazunori Kawamura, Megumi Akiyama, Joji Yui, Tomoteru Yamasaki, Akiko Hatori, Katsushi Kumata,

- Hidekatsu Wakizaka, Makoto Takei, Nobuki Nengaki, Kazuhiko Yanamoto, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: In Vivo Evaluation of Limiting Brain Penetration of Probes for alpha2C-Adrenoceptor Using Small-Animal Positron Emission Tomography, *ACS Chemical Neuroscience* 1(7) 520~528 2010
13. Koutarou Nagatsu, Masami Fukada, Katsuyuki Minegishi, Hisashi Suzuki, Toshimitsu Fukumura, Hiromichi Yamazaki, Kazutoshi Suzuki: Fully automated production of iodine-124 using a vertical beam, *Applied Radiation and Isotopes* 69 (1) 146-157 2010
 14. Yuuki Takada, Masanao Ogawa, Hisashi Suzuki, Toshimitsu Fukumura: Radiosynthesis of [2-¹¹C-carbonyl] dantrolene using [¹¹C]phosgene for PET, *Applied Radiation and Isotopes* 68(9) 1715-1720 2010
 15. Toshimitsu Okamura, Tatsuya Kikuchi, Toshiaki Irie: PET Imaging of MRP1 Function in the Living Brain: Method Development and Future Perspectives, *Current Topics in Medicinal Chemistry* 10(17) 1810-1819 2010
 16. Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Kiyoshi Fukushi, Toshiaki Irie: Piperidine-4-methanethiol Ester Derivatives for a Selective Acetylcholinesterase Assay *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, *Biological & Pharmaceutical Bulletin* 33 (4) 702-706 2010
 17. Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Takuya Arai, Takayuki Obata, Kiyoshi Fukushi, Toshiaki Irie, Tetsuya Shiraishi: Use of a novel radiometric method to assess the inhibitory effect of donepezil on acetylcholinesterase activity in minimally diluted tissue samples, *British Journal of Pharmacology* 159(8) 1732-1742 2010
 18. Yota Fujimura, Hiroshi Ito, Hidehiko Takahashi, Fumihiko Yasuno, Youko Ikoma, Ming-Rong Zhang, Kazutoshi Suzuki, Tetsuya Suhara, et.al :Measurement of dopamine D2 receptors in living human brain using [¹¹C]raclopride with ultra-high specific radioactivity, *Nuclear Medicine and Biology* 37(7) 831-835 2010
 19. Soutarou Momosaki, Rie Hosoi, Kouji Abe, Ming-Rong Zhang, Osamu Inoue :PK11195 might selectively suppress the quinolinic acid-induced enhancement of anaerobic glycolysis in glial cells,*Brain Research* 1340 (22) 18-23 2010
 20. Daisuke Kokuryo, Yuichi Kimura, Takayuki Obata, Taiga Yamaya, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang, Iwao Kanno, Ichio Aoki :Small animal holding fixture system with positional reproducibility for longitudinal multimodal imaging, *Physics in Medicine and Biology* 55(14) 4119-4130 2010
 21. Mathieu Galibert, Zhao-Hui Jin, Takako Furukawa, Toshimitsu Fukumura, Tsuneo Saga, Yasuhisa Fujibayashi,et.al: RGD-cyclam conjugate: Synthesis and potential application for positron emission tomography, *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters* 20(18) 5422~5425 2010
 22. Mitsuru Koizumi, Tsuneo Saga, Masayuki Inubushi, Toshimitsu Fukumura, Kyosan Yoshikawa, Naoyoshi Yamamoto, Mio Nakajima, Toshio Sugane, Masayuki Baba :Uptake Decrease of Proliferative PET Tracer ¹⁸FLT in Bone Marrow after Carbon Ion Therapy in Lung Cancer, *Molecular Imaging and Biology* in press
 23. Tsuneyoshi Ota, Hitoshi Shinoto, Kiyoshi Fukushi, Tatsuya Kikuchi, Koichi Sato, Noriko Tanaka, Hitoshi Shimada, Shigeki Hirano, Michie Miyoshi, Tetsuya Suhara, Toshiaki Irie et.al :Estimation of Plasma IC₅₀ of Donepezil for Cerebral Acetylcholinesterase Inhibition in Patients With Alzheimer Disease Using Positron Emission Tomography, *Clinical Neuropharmacology* 33(2) 74~78 2010
 24. Michie Miyoshi, Hitoshi Shinoto, Hitoshi Shimada, Ryosuke Arakawa, Makoto Higuchi, Youko Ikoma, Fumihiko Yasuno, Kiyoshi Fukushi, Toshiaki Irie, Hiroshi Ito, Tetsuya Suhara,et.al :In vivo detection of

neuropathologic changes in presymptomatic MAPT mutation carriers: a PET and MRI study, *Parkinsonism & Related Disorders* 16(6) 404~408 2010

25. Shigeki Hirano, Hitoshi Shinoto, Hitoshi Shimada, Akiyo Aotsuka, Noriko Tanaka, Tsuneyoshi Ota, Koichi Sato, Hiroshi Ito, Kiyoshi Fukushi, Toshiaki Irie, Tetsuya Suhara, et al: Cholinergic imaging in corticobasal syndrome, progressive supranuclear palsy, and frontotemporal dementia, *Brain* 133(7) 2058~2068 2010
26. Chie Seki, Hiroshi Ito, Tetsuya Ichimiya, Ryosuke Arakawa, Youko Ikoma, Miho Shidahara, Jun Maeda, Akihiro Takano, Hidehiko Takahashi, Yuichi Kimura, Kazutoshi Suzuki, Iwao Kanno, Tetsuya Suhara : Quantitative analysis of dopamine transporters in human brain using [¹¹C]PE2I and positron emission tomography: evaluation of reference tissue models, *Annals of Nuclear Medicine* 24(4) 249~260 2010

5—1. 中性子検出器の応答関数の評価に関する研究

<原著論文等>

1. M.Takada, K.Yajima, S.Kamada, H.Yasuda, T.Nakamaura Simulated Neutron Response Functions of Phoswich-type Neutron Detector and Thin Organic Liquid Scintillator, *Progress in Nuclear Science and Technology* (Submitted)

<学会及び研究会口頭発表等>

1. Masashi Takada, Kazuaki Yajima, So Kamada, Hiroshi Yasuda, Takashi Nakamaura : Simulated Neutron Response Functions of Phoswich-type Neutron Detector and Thin Organic Liquid Scintillator, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2010 Poster 17-21 Oct. 2010 Tokyo, Hitotsubashi Memorial Hall

5—2. 荷電粒子に対する無機シンチレーターの発光応答

<Proceedings 等>

1. Y. Yanagita, Y. Koba, M. Ueyama, K. Kiyohara, Y. Fukuda, K. Tahara, S. Nino, G. Wakabayashi, Y. Uozumi, N. Matsufuji: Light Output Characteristic of Inorganic Scintillators to Intermediate- and High-Energy Charged Particles, *Proceedings of the 24th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK proceedings 2010-10, pp. 39-45, December, 2010.*

<学会及び研究会口頭発表等>

1. Aleksandre Mzhavia: Study of the BGO Detector for the Measurement of the Double Differential Cross Sections of Cluster Production Reactions, 2010 年度核データ研究会 (11/25-26、福岡県春日市)

<学位論文>

1. 藤山侑也 : シンチレータ検出器特性の研究、卒業論文、九州大学工学部エネルギー科学科

5—3. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

<学会及び研究会口頭発表等>

1. Y. Uchihori, "The preliminary results of the Proton-ICCHIBAN-2 experiments for luminescence detectors", 15th WRMISS, 7-9 September 2010 in Frascati, Italy
2. M. Fragopoulou, "The sensitivity of a new type p-MOSFET dosimeter to high energy protons", 15th WRMISS, 7-9 September 2010 in Frascati, Italy

3. L. Hager, "Charged particle LET threshold determinations for the HPA neutron PADC dosimeter", 15th WRMISS, 7-9 September 2010 in Frascati, Italy

5—5. 高高度環境での携行使用に適した環境放射線モニタの開発研究

<原著論文等>

1. Masashi Takada, Kazuaki Yajima, Hiroshi Yasuda, Takashi Nakamura, Mamoru Baba, Toshihiro Honma, Akira Endo and Yoshihiko Tanimura: Response functions of phoswich-type neutron detector for high-energy cosmic ray neutron measurement, J. Nucl. Sci. Technol. 47[10] (2010) 917-931.
2. Hiroshi Yasuda, Kazuaki Yajima, Masashi Takada, Tatsuhiko Sato and Takashi Nakamura : Development of Cosmic Radiation and Energetic Particle Analysing system CREPAS. Prog. Nucl. Sci. Technol. 1 (2011) 356-359.

<Proceedings 等>

1. 保田浩志, 矢島千秋, 高田真志, 佐藤達彦, 中村尚司, 福田光宏, 五家建男, 石岡憲昭: 宇宙探査用放射線サーベイメータの開発研究, Space Util. Res. 27 (2011) 103-104.

<学会及び研究会口頭発表等>

1. Hiroshi Yasuda, Kazuaki Yajima, Masashi Takada, Takashi Nakamura, Mitsuhiro Fukuda: A portable in-flight radiation monitor having the ability of particle discrimination, 38th the Committee on Space Research (COSPAR) Scientific Assembly, Bremen, 2010.7.
2. Hiroshi Yasuda, Kazuaki Yajima, Masashi Takada, Takashi Nakamura, Akira Endo, Yoshihiko Tanimura, Masahiro Tsutsumi, Mitsuhiro Fukuda: A portable cosmic radiation monitor designed for use in spacecraft and aircraft, 16th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD-16), Sydney, 2010.9.
3. 保田浩志, 矢島千秋, 松澤孝男: 富士山頂における放射線測定装置の特性評価, 日本放射線影響学会第53回大会, 京都市, 2010年10月.
4. 保田浩志, 矢島千秋, 高田真志, 中村尚司, 佐藤達彦, 福田光宏, 五家建男, 石岡憲昭: 宇宙探査用放射線サーベイメータの開発研究, 宇宙利用シンポジウム (第27回), 相模原市, 2011年1月.

7. サイクロトロン汎用照射室 C-8 コースにおける

30, 40, 70MeV 陽子線の照射場の一様性の測定

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 北村尚, 放医研サイクロトロンの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 5, 20-27(2010).

10. 関連資料

平成22年度第I期・II期マシンタイム予定表

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	
3月29日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	4月19日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス RI生産 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4
3月30日 (火)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P30MeV / 10nA C8		4月20日 (火)	RI生産		半導体デバイスのシングルイベント 耐性評価 HIREC P70MeV / 1nA C8
3月31日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		4月21日 (水)	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 大澤 C ^{4+,6+} 48,72MeV / 500 nA C10
4月1日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		4月22日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4
4月2日 (金)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P30MeV / 10nA C8		4月23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 大澤 C ^{4+,6+} 48,72MeV / 500 nA C10
4月3日 (土)					4月24日 (土)			
4月4日 (日)					4月25日 (日)			
4月5日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	4月26日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス RI生産 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4
4月6日 (火)	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 / 30 μA C3		4月27日 (火)	RI生産		半導体デバイスのシングルイベント 耐性評価 HIREC P70MeV / 1nA C8
4月7日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		4月28日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4
4月8日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		4月29日 (木)			昭和の日
4月9日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		4月30日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4
4月10日 (土)					5月1日 (土)			
4月11日 (日)					5月2日 (日)			
4月12日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		5月3日 (月)			憲法記念日
4月13日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		5月4日 (火)			みどりの日
4月14日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		5月5日 (水)			子供の日
4月15日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		5月6日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4
4月16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 大澤 C ^{4+,6+} 48,72MeV / 500 nA C10		5月7日 (金)	RI生産		R&D
4月17日 (土)					5月8日 (土)			
4月18日 (日)			一般公開		5月9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		
5月10日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		5月31日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
5月11日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		6月1日 (火)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 大澤 C ^{4+,6+} 48MeV / 500 nA C10	
5月12日 (水)	RI生産		R&D		6月2日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
5月13日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		6月3日 (木)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 大澤 C ^{4+,6+} 48MeV / 500 nA C10	
5月14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) P70MeV / 10e8~9 pps C6		6月4日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
5月15日 (土)					6月5日 (土)				
5月16日 (日)					6月6日 (日)				
5月17日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	6月7日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
5月18日 (火)	RI生産		半導体デバイスのシングルイベント 耐性評価 HIREC P70MeV / 1nA C8		6月8日 (火)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田 P10MeV / 10nA C6	
5月19日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		6月9日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
5月20日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		6月10日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
5月21日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		6月11日 (金)	RI生産		R&D	
5月22日 (土)					6月12日 (土)				
5月23日 (日)					6月13日 (日)				
5月24日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	6月14日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4
5月25日 (火)	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 / 30 μA C3		6月15日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
5月26日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		6月16日 (水)	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	
5月27日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		6月17日 (木)	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 / 30 μA C3	
5月28日 (金)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田(佐波) C72MeV / 50nA C6		6月18日 (金)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P30MeV / 10nA C8	
5月29日 (土)					6月19日 (土)				
5月30日 (日)					6月20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	
6月21日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	7月12日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4
6月22日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		7月13日 (火)	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 東工大(谷津) P70MeV / 1nA C8
6月23日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		7月14日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4
6月24日 (木)	RI生産		R&D		7月15日 (木)	RI生産		R&D
6月25日 (金)	RI生産		半導体デバイスのシングルイベント 耐性評価 HIREC P70MeV / 1nA C8		7月16日 (金)	RI生産		光学機器の耐放射線性能に関する研究 北村(谷津) P70MeV / 0.1nA C8
6月26日 (土)					7月17日 (土)			
6月27日 (日)					7月18日 (日)			
6月28日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		7月19日 (月)			海の日
6月29日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		7月20日 (火)	RI生産		R&D
6月30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 / 1e10 pps C8		7月21日 (水)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田 P8MeV / 10e5 pps C6
7月1日 (木)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田(魚住) He100MeV / 1nA C6		7月22日 (木)	RI生産		光学機器の耐放射線性能に関する研究 北村(川崎) P70MeV / 0.1nA C8
7月2日 (金)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田(魚住) He100MeV / 1nA C6		7月23日 (金)	RI生産		R&D
7月3日 (土)					7月24日 (土)			
7月4日 (日)					7月25日 (日)			
7月5日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4	7月26日 (月)	メンテナンス		メンテナンス
7月6日 (火)	RI生産		細胞培養容器OptiCellを用いた70MeV陽子線の水の中 における深さ方向の変化による生物効果の測定 加藤 P70MeV / 1nA C8		7月27日 (火)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 大澤 Ne 120MeV / 500 nA C10
7月7日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc, C1,C2,C4		7月28日 (水)	RI生産		R&D
7月8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 P70MeV / 1nA C8		7月29日 (木)	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 東工大(谷津) P70MeV / 1nA C8
7月9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) P70MeV / 10e8~9 pps C6		7月30日 (金)	RI生産		半導体デバイスのシングルイベント 耐性評価 HIREC P70MeV / 1nA C8
7月10日 (土)					7月31日 (土)			
7月11日 (日)					8月1日 (日)			

月 日	小型サイクロロン		大型サイクロロン		月 日	小型サイクロロン		大型サイクロロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
8月2日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス		8月23日 (月)	来期マシンタイム			
8月3日 (火)	RI生産		メンテナンス		8月24日 (火)	来期マシンタイム			
8月4日 (水)	RI生産		メンテナンス		8月25日 (水)	来期マシンタイム			
8月5日 (木)	RI生産		メンテナンス		8月26日 (木)	来期マシンタイム			
8月6日 (金)	RI生産		メンテナンス		8月27日 (金)	来期マシンタイム			
8月7日 (土)					8月28日 (土)				
8月8日 (日)					8月29日 (日)				
8月9日 (月)	長期メンテナンス				8月30日 (月)	来期マシンタイム			
8月10日 (火)	長期メンテナンス				8月31日 (火)	来期マシンタイム			
8月11日 (水)	長期メンテナンス				9月1日 (水)	来期マシンタイム			
8月12日 (木)	長期メンテナンス				9月2日 (木)	来期マシンタイム			
8月13日 (金)	長期メンテナンス				9月3日 (金)	来期マシンタイム			
8月14日 (土)					9月4日 (土)				
8月15日 (日)					9月5日 (日)				
8月16日 (月)	長期メンテナンス				9月6日 (月)	来期マシンタイム			
8月17日 (火)	長期メンテナンス				9月7日 (火)	来期マシンタイム			
8月18日 (水)	長期メンテナンス				9月8日 (水)	来期マシンタイム			
8月19日 (木)	長期メンテナンス				9月9日 (木)	来期マシンタイム			
8月20日 (金)	長期メンテナンス				9月10日 (金)	来期マシンタイム			
8月21日 (土)					9月11日 (土)				
8月22日 (日)					9月12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
8月23日 (月)	メンテナンス	RI生産	R&D		9月13日 (月)	メンテナンス	
8月24日 (火)	RI生産		R&D		9月14日 (火)	RI生産	R&D
8月25日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		9月15日 (水)	RI生産	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9
8月26日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		9月16日 (木)	RI生産	R&D
8月27日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		9月17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 大澤 O ⁶⁺ 96MeV / 500 nA C10
8月28日 (土)					9月18日 (土)		
8月29日 (日)					9月19日 (日)		
8月30日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	9月20日 (月)	敬老の日	
8月31日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		9月21日 (火)	RI生産	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9
9月1日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		9月22日 (水)	RI生産	中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田 P 8MeV / 1000pps C6
9月2日 (木)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田 (遠藤) 13C 130MeV / 30nA C8		9月23日 (木)	秋分の日	
9月3日 (金)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田 (遠藤) 13C 130MeV / 30nA C8		9月24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 大澤 O ⁶⁺ 96MeV / 500 nA C10
9月4日 (土)					9月25日 (土)		
9月5日 (日)					9月26日 (日)		
9月6日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	9月27日 (月)	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9
9月7日 (火)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田 (遠藤) 13C 130MeV / 30nA C8		9月28日 (火)	RI生産	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9
9月8日 (水)	RI生産		高高度環境での携行使用に適した 環境放射線モニタの開発研究 保田 P60MeV / 100nA C6		9月29日 (水)	RI生産	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9
9月9日 (木)	RI生産		R&D		9月30日 (木)	RI生産	中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田 (若林) P70MeV / 1nA C6
9月10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 大澤 O ⁶⁺ 96MeV / 500 nA C10		10月1日 (金)	RI生産	中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 高田 (若林) He100MeV / 1nA C6
9月11日 (土)					10月2日 (土)		
9月12日 (日)					10月3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4日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		10月25日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
10月5日 (火)	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26日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9	
10月6日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9		10月27日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9	
10月7日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9		10月28日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9	
10月8日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9		10月29日 (金)	RI生産		半導体素子CPU・FPGAの シングルイベント試験 HIREC (JAXA) P70MeV / 1nA C8	
10月9日 (土)					10月30日 (土)				
10月10日 (日)					10月31日 (日)				
10月11日 (月)	体育の日				11月1日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9
10月12日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9		11月2日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9	
10月13日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9		11月3日 (水)	文化の日			
10月14日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9		11月4日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9	
10月15日 (金)	RI生産		超小型衛星搭載電子機器の放射線環境試験 東工大(谷津) P70MeV / 1nA C8		11月5日 (金)	RI生産		薄いプラスチックシンチレーターの 発光量特性 鎌田 P18MeV / 5nA C6	
10月16日 (土)					11月6日 (土)				
10月17日 (日)					11月7日 (日)				
10月18日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	11月8日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9
10月19日 (火)	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		11月9日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9	薄いプラスチックシンチレーターの 発光量特性 鎌田 P18MeV / 5nA C6
10月20日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9		11月10日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9	
10月21日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9		11月11日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9	
10月22日 (金)	RI生産 (15時まで)	メン テナ ンス	RI生産 福村 P40MeV / 15 μA etc、C1,C2,C4,C9	メンテナンス (停電準備)	11月12日 (金)	RI生産		超小型衛星搭載電子機器の放射線環境試験 東工大(谷津) P70MeV / 1nA C8	
10月23日 (土)	停電				11月13日 (土)				
10月24日 (日)					11月14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
11月15日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		12月6日 (月)	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9
11月16日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		12月7日 (火)	RI生産 R&D	
11月17日 (水)	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 大澤 O ^{5+ 8+} 96MeV / 500 nA C10		12月8日 (水)	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
11月18日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		12月9日 (木)	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
11月19日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	中性子検出器の開発、特性評価 核データ取得 高田 P 8MeV / 1000pps C6	12月10日 (金)	RI生産 宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P30MeV / 10nA C8	
11月20日 (土)					12月11日 (土)		
11月21日 (日)					12月12日 (日)		
11月22日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	12月13日 (月)	メンテナンス	メンテナンス
11月23日 (火)	勤労感謝の日				12月14日 (火)	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
11月24日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		12月15日 (水)	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
11月25日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		12月16日 (木)	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
11月26日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		12月17日 (金)	RI生産 半導体素子CPU・FPGAのシングル イベント試験 HIREC (産業技術高専) P70MeV / 1nA C8	
11月27日 (土)					12月18日 (土)		
11月28日 (日)					12月19日 (日)		
11月29日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	12月20日 (月)	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9
11月30日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		12月21日 (火)	RI生産 薄いプラスチックシンチレーターの 発光量特性 鎌田 P70MeV / 5nA C6	
12月1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		12月22日 (水)	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 大澤 O ^{5+ 8+} 96MeV / 500 nA C10	
12月2日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		12月23日 (木)	天皇誕生日	
12月3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) P70MeV / 10e8~9 pps C8		12月24日 (金)	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
12月4日 (土)					12月25日 (土)		
12月5日 (日)					12月26日 (日)		

月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
12月27日(月)	メンテナンス	R&D	メンテナンス	R&D	1月17日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9
12月28日(火)	メンテナンス		R&D		1月18日(火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P40MeV / 10nA C8
12月29日(水)					1月19日(水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	薄いプラスチックシンチレーターの発光量特性 鎌田 P50MeV / 10nA C6
12月30日(木)					1月20日(木)	RI生産		RI生産(generator予定) 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
12月31日(金)					1月21日(金)	RI生産		超小型衛星搭載電子機器の放射線環境試験 東工大(谷津) P70MeV / 1nA C8	
1月1日(土)	元日				1月22日(土)				
1月2日(日)					1月23日(日)				
1月3日(月)					1月24日(月)	メンテナンス	メンテナンス		
1月4日(火)	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 / 20μA C3			1月25日(火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
1月5日(水)	RI生産	宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P30MeV / 10nA C8			1月26日(水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
1月6日(木)	RI生産	細胞培養容器OptiCellを用いた70MeV陽子線の水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 / 10nA C8			1月27日(木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
1月7日(金)	RI生産	宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P40MeV / 10nA C8			1月28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) P70MeV / 10e8~9 pps C8	
1月8日(土)					1月29日(土)				
1月9日(日)					1月30日(日)				
1月10日(月)	成人の日				1月31日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9
1月11日(火)	RI生産	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9			2月1日(火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
1月12日(水)	RI生産	中性子検出器の開発、特性評価、核データ取得 高田(佐波) P50MeV / 40nA C6			2月2日(水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
1月13日(木)	RI生産	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	半導体素子CPU・FPGAのシングルイベント試験 HIREC P40MeV / 1nA C8		2月3日(木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
1月14日(金)	RI生産	半導体素子CPU・FPGAのシングルイベント試験 HIREC(産業技術高専) P70MeV / 1nA C8			2月4日(金)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P30MeV / 10nA C8	
1月15日(土)					2月5日(土)				
1月16日(日)					2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
2月7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	2月28日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
2月8日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		3月1日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
2月9日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		3月2日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
2月10日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		3月3日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	
2月11日 (金)	建国記念の日				3月4日 (金)	RI生産		薄いプラスチックシンチレーターの 発光量特性 鎌田 P40MeV / 1nA C6	
2月12日 (土)					3月5日 (土)				
2月13日 (日)					3月6日 (日)				
2月14日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	3月7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	
2月15日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		3月8日 (火)	RI生産		メンテナンス	
2月16日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		3月9日 (水)	RI生産		メンテナンス	
2月17日 (木)	RI生産		RI生産 (generator予定) 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		3月10日 (木)	RI生産		メンテナンス	
2月18日 (金)	RI生産		光学機器の耐放射線性能に関する研究 北村 (川崎) P70MeV / 10nA C8		3月11日 (金)	RI生産		メンテナンス	
2月19日 (土)					3月12日 (土)				
2月20日 (日)					3月13日 (日)				
2月21日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	3月14日 (月)	長期メンテナンス			
2月22日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		3月15日 (火)	長期メンテナンス			
2月23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		3月16日 (水)	長期メンテナンス			
2月24日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9		3月17日 (木)	長期メンテナンス			
2月25日 (金)	RI生産 (15時まで)	メン テナ ンス	RI生産 福村 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4,C9	メンテナンス (停電準備)	3月18日 (金)	長期メンテナンス			
2月26日 (土)	停電 (10分程度) (総合試験)				3月19日 (土)				
2月27日 (日)					3月20日 (日)				

月 日	小型サイクロロン		大型サイクロロン		月 日	小型サイクロロン		大型サイクロロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
3月21日 (月)	長期メンテナンス				4月11日 (月)	来期マシンタイム			
3月22日 (火)	長期メンテナンス				4月12日 (火)	来期マシンタイム			
3月23日 (水)	長期メンテナンス				4月13日 (水)	来期マシンタイム			
3月24日 (木)	長期メンテナンス				4月14日 (木)	来期マシンタイム			
3月25日 (金)	長期メンテナンス				4月15日 (金)	来期マシンタイム			
3月26日 (土)					4月16日 (土)				
3月27日 (日)					4月17日 (日)				
3月28日 (月)	来期マシンタイム				4月18日 (月)	来期マシンタイム			
3月29日 (火)	来期マシンタイム				4月19日 (火)	来期マシンタイム			
3月30日 (水)	来期マシンタイム				4月20日 (水)	来期マシンタイム			
3月31日 (木)	来期マシンタイム				4月21日 (木)	来期マシンタイム			
4月1日 (金)	来期マシンタイム				4月22日 (金)	来期マシンタイム			
4月2日 (土)					4月23日 (土)				
4月3日 (日)					4月24日 (日)				
4月4日 (月)	来期マシンタイム				4月25日 (月)	来期マシンタイム			
4月5日 (火)	来期マシンタイム				4月26日 (火)	来期マシンタイム			
4月6日 (水)	来期マシンタイム				4月27日 (水)	来期マシンタイム			
4月7日 (木)	来期マシンタイム				4月28日 (木)	来期マシンタイム			
4月8日 (金)	来期マシンタイム				4月29日 (金)	来期マシンタイム			
4月9日 (土)					4月30日 (土)				
4月10日 (日)					5月1日 (日)				

平成22年度サイクロトロン利用報告書

- ・発行年月 2011年8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