



N I R S - M - 2 5 0

平成 2 3 年度

サイクロトロン利用報告書

独立行政法人放射線医学総合研究所

目 次

1. サイクロトロンの運転実績と利用状況	(1)
2. サイクロトロンの改良・開発	(9)
3. 平成23年度サイクロトロンの分子プローブの製造・開発への利用状況	(15)
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. 最前方における陽子及び重陽子生成断面積の測定	(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. 放医研サイクロトロン Li (p, n) 中性子場の特性評価	(31)
4-5. LYSO (Ce) シンチレーターの陽子、重陽子、 α 粒子に対する発光特性	(35)
5. 粒子線検出器の開発	
5-1. 小型ホスウィッチ検出器とレンジカウンタの陽子応答測定	(41)
5-2. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発	(44)
6. 粒子線による損傷試験	
6-1. 次世代型重粒子線がん治療装置用超電導加速器の基盤技術研究	(47)
6-2. 光学機器の耐放射線性能に関する研究	(60)
7. 生物研究	
7-1. 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	(63)
7-2. 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果	(67)
7-3. 陽子線被ばくしたマウス正常組織反応の解析	(69)
8. 研究成果一覧	(71)
9. 関連資料	
平成23年度第Ⅰ期・Ⅱ期マシンタイム予定表	(77)

1. サイクロトロンの運転実績と利用状況

サイクロトロン運転実績と利用状況

杉浦 彰則^A、北條 悟^A、片桐 健^A、田代 克人^A、後藤 彰^A、岡田 高典^B、
高橋 勇一^B、神谷 隆^B、中山 竜二^B、本間 壽廣^B、角谷 昌彦^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

放射線医学総合研究所のサイクロトロン棟には、大型サイクロトロン(NIRS-930)と小型サイクロトロン(HM-18)の2台のサイクロトロンが設置されている[1]。これら2台のサイクロトロンは、平成23年度も大きなトラブルもなくビーム提供を行うことができ、放射性薬剤の開発研究を中心に物理研究、粒子線検出器の開発、粒子線による損傷試験、生物研究、有料ビーム提供が行われた。大型サイクロトロンではビーム開発も行っていて、新規供給ビームとして65 MeVヘリウム、75 MeVヘリウム、117 MeV炭素-13を新たに供給した。また、大型サイクロトロンでは月に1～2回の土曜日運転を開始し、計14回の土曜日運転を行った。

本報告書では、平成23年度における2台のサイクロトロン運転実績と利用状況、運用体制について報告する。

1. 大型サイクロトロン

1-1. 運転実績

平成23年度の総運転時間は1841.6時間であった。加速粒子・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1に示す。

加速粒子・エネルギー別運転時間では、まず放射線薬剤の製造・研究で使用する30 MeV陽子が374.2時間で、次に物理研究、粒子線検出器の開発、粒子線による損傷試験、生物研究、有料ビーム提供といった幅広い分野で使用する70 MeV陽子が331.6時間となっている。この2種類のエネルギーが多く使用されており、総運転時間の38.3%を占めている。

加速粒子別運転時間割合では、放射線薬剤の製造・研究や物理実験等で主に使用されている陽子の使用が76.1%を占めている。その他の粒子は、水素分子で4.8%、重陽子で4.7%、ヘリウムで8.3%、炭素で1.0%、13炭素で0.7%、酸素で4.5%の割合となっている。

表1. 加速粒子・エネルギー別運転時間

陽子		水素分子		重陽子	
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]
90*	12.5	30	15.8	50	4.7
88*	18.7	27	72.3	30	81.4
80	56.1				
70	331.6	ヘリウム		炭素	
50	59.8	エネルギー [MeV]	運転時間 [h]	エネルギー [MeV]	運転時間 [h]
40	44.9				
30	374.2	100	14.1	144	19.2
24.4	24.5	75	73.8	(¹³ C) 117	13.0
18	198.7	65	64.5		
15	160.7			酸素	
12	119.0			エネルギー [MeV]	運転時間 [h]
* 未取出し				96	82.3

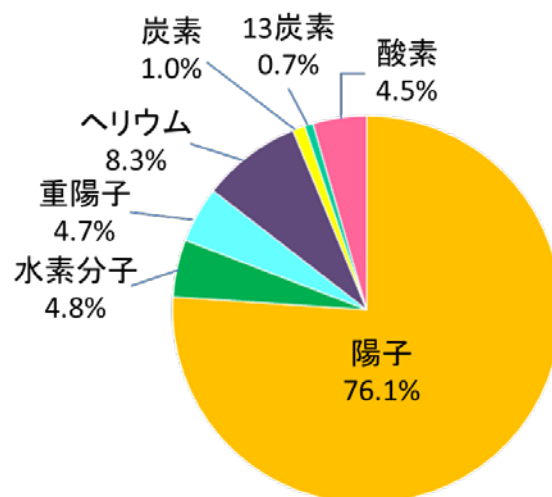


図 1. 加速粒子別運転時間割合

1－2．利用状況

総運転時間の 1841.6 時間の内訳として、利用目的別の運転時間とその割合を表 2 に、利用目的別の運転時間割合を図 2 に示す。主目的である放射性薬剤の製造・研究には 651.8 時間の運転時間が当てられた。その他には、物理研究に 167.4 時間、粒子線検出器の開発に 54.0 時間、粒子線による損傷試験に 77.1 時間、生物研究に 68.1 時間、有料ビーム提供に 186.1 時間利用された。また、各ビーム開発に 627.7 時間、放射線安全測定に 9.4 時間が費やされた。

総運転時間からの割合でみると、おおよそ 1/3 となる 35.4%が放射性薬剤の製造・研究にあてられている。同様におおよそ 1/3 となる 34.1%が新たなビームエネルギーの調整や機器開発、ビームの質の改善のための調整運転にあてられており、残りの 1/3 が有料ビーム提供を含む多種多様な利用目的にあてられた。

表 2. 利用目的別運転時間

目 的	時 間 [h]	割 合 [%]
(1) 放射性薬剤の製造・研究	651.8	35.4
(2) 物理研究	167.4	9.1
(3) 粒子線検出器の開発	54.0	2.9
(4) 粒子線による損傷試験	77.1	4.2
(5) 生物研究	68.1	3.7
(6) 有料ビーム提供	186.1	10.1
(7) ビーム開発	627.7	34.1
(8) 放射線安全測定	9.4	0.5
合計	1841.6	100.0

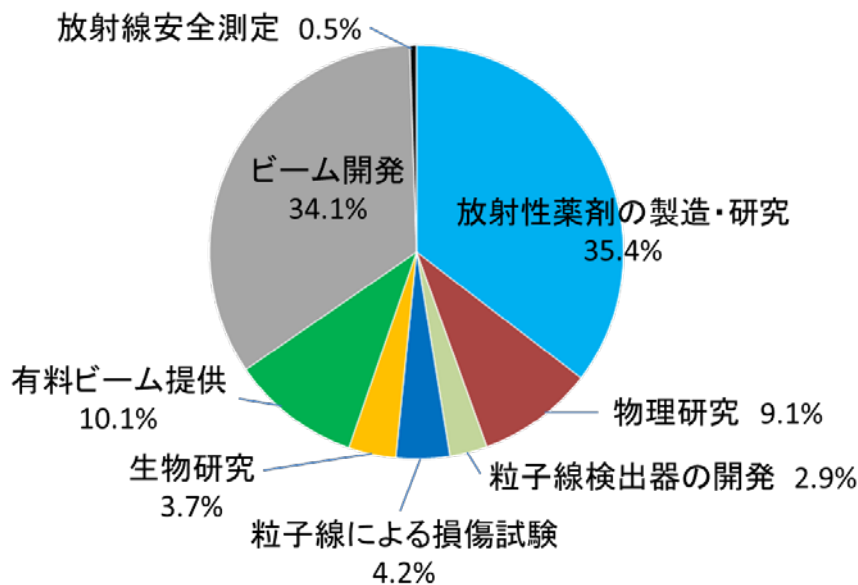


図 2. 利用目的別運転時間割合

(1) 放射性薬剤の製造・研究

放射性薬剤の製造・研究[本誌 p15-p17]では、総運転時間の 35.4%である 651.8 時間が利用された。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 3 に示す。陽子のエネルギー別の利用状況は、 ^{11}C 、 ^{18}F の製造に用いられた 18 MeV が 23.3%、 $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレータの製造に用いられた 30 MeV が 23.0%、 ^{63}Cu の製造に用いられた 12 MeV が 9.6%、 ^{89}Zr の製造に用いられた 15 MeV が 18.3%であった。平成 23 年度から新しく提供したエネルギーは、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の製造試験に用いられた 24.4 MeV 陽子が 0.8%、 ^{67}Cu の製造試験に用いられた 50 MeV 陽子が 0.4%、 ^{34}Cl 生成を目的とした照射試験に用いられた 65 MeV ヘリウムが 6.9%、 ^{28}Mg の製造に用いられた 75 MeV ヘリウムが 7.9%であった。

利用された加速粒子で見ると、陽子が 75.4%、水素分子が 9.8%、ヘリウムが 14.8%となっている。水素分子は解離して陽子として照射しているため、陽子による照射を目的とした利用は 85.2%となる。

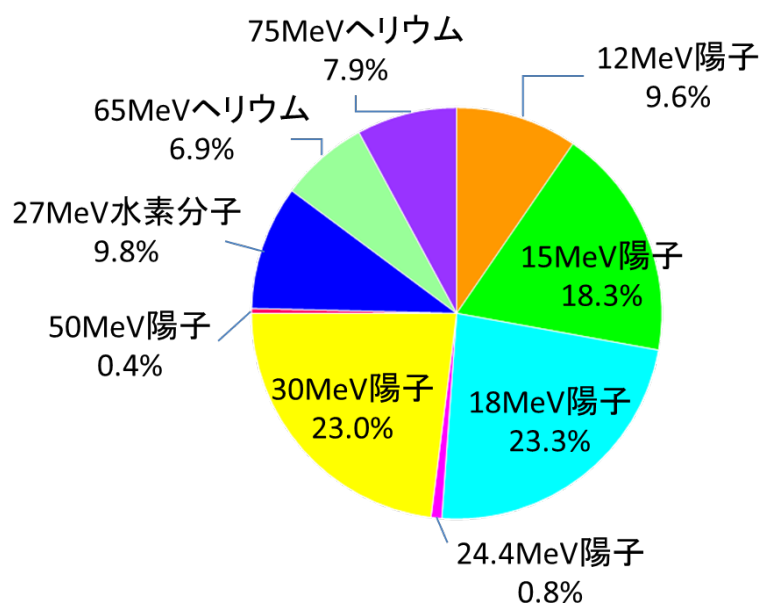


図 3. 放射性薬剤の製造・研究における粒子・エネルギー別利用割合

(2) 物理研究

物理研究では、167.4 時間が利用された。物理研究における粒子・エネルギー別利用割合を図 4 に示す。粒子別にみると、陽子が 33.9%、重陽子が 2.8%、ヘリウムが 2.9%、炭素が 11.6%、酸素が 48.7% と様々な粒子が利用されている。

重イオン衝撃による水からの二次電子放出を測定する「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]が 96 MeV 酸素のビームを用いて行われた。また、PHITS コードの改良を目的として、「最前方における陽子および重陽子生成断面積の測定」[本誌 p24-p27]が 40 MeV 陽子のビームを、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, \text{n})$ 反応からの中性子測定による PHITS コードの検証」[本誌 p28-p31]が 117 MeV 炭素-13 のビームを用いて行われた。そして、即発ガンマ線バックグラウンド差引きのための「放医研サイクロトロン $\text{Li}(\text{p}, \text{n})$ 中性子場の特性評価」[本誌 p32-p34]が 80 MeV 陽子のビームを用いて行われた。他にも、軽イオンの測定用検出器の開発として「LYSO(Ce)シンチレータの陽子、重陽子、 α 粒子に対する発光特性」[本誌 p35-p39]が 40, 80 MeV 陽子、50 MeV 重陽子、100 MeV ヘリウム、144 MeV 炭素のビームを用いて行われた。

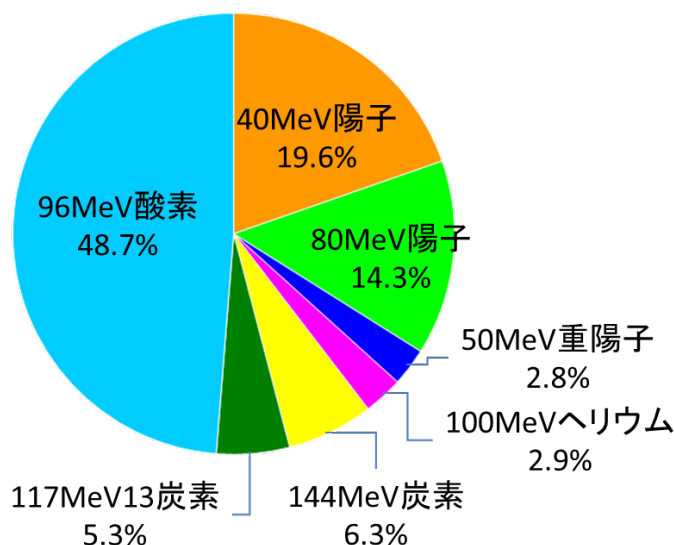


図 4. 物理研究における粒子・エネルギー別利用割合

(3) 粒子線検出器の開発

粒子線検出器の開発では、54.0 時間が利用された。粒子線検出器における粒子・エネルギー別利用割合を図 5 に示す。粒子別にみると、陽子が 82.8%、ヘリウムが 17.1%となっている。

フラグメント線質測定に利用するための「小型ホスウィッチ検出器とレンジカウンタの陽子応答測定」[本誌 p41-p43] が 80 MeV 陽子のビームを用いて行われた。宇宙放射線線量計の相互比較および校正のための「宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発」[本誌 p44-p45]が 70, 80 MeV 陽子、100 MeV ヘリウムのビームを用いて行われた。

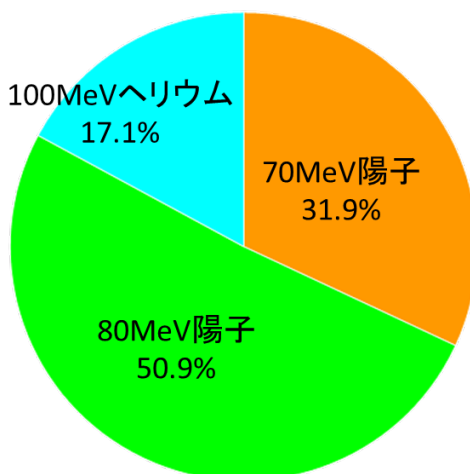


図 5. 粒子線検出器における粒子・エネルギー別利用割合

(4) 粒子線による損傷試験

粒子線による損傷試験では、77.1 時間が利用された。粒子線による損傷試験における粒子・エネルギー別利用割合を図 6 に示す。70MeV 陽子が 17.1%、30MeV 重陽子が 82.9%となっている。

高温超電導線材の放射線照射と機械特性および外熱による影響を調査した「次世代型重粒子線がん治療装置用超電導加速器の基盤技術研究」[本誌 p47-p59] が 30 MeV 重陽子のビームを用いて行われた。また、国際宇宙ステーション内で使用される光学機器の放射線耐性を調べた「光学機器の耐放射線性能に関する研究」[本誌 p60-p61]が 70MeV 陽子のビームを用いて行われた。

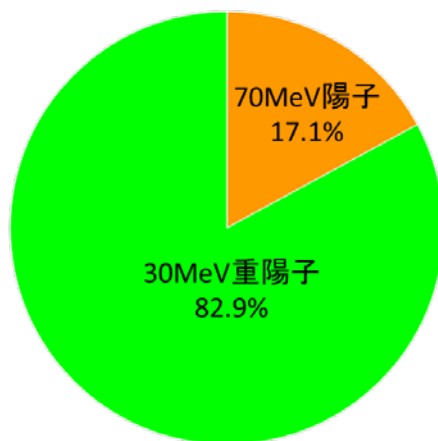


図 6. 粒子線による損傷試験における粒子・エネルギー別利用割合

(5) 生物研究

生物研究では、68.1 時間が利用された。生物研究における粒子・エネルギー別利用割合を図 7 に示す。生物研究に利用された粒子は 70 MeV 陽子のみとなっている。

飛程内においての生物効果を調査した「細胞培養容器 OptiCell を用いた 70MeV 陽子線の水中における深さ方向の変化による生物効果の測定」[本誌 p63-p66]、重粒子線の酸素効果と比較するための「陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果」[本誌 p67-p68]、低線量被ばくした正常組織の応答を調べる「陽子線被ばくしたマウス正常組織反応の解析」[本誌 p69]が行われた。



図 7. 生物研究における粒子・エネルギー別利用割合

（６）有料ビーム提供

有料ビーム提供では、186.1 時間が利用された。有料ビーム提供における粒子・エネルギー別利用割合を図 8 に示す。有料ビーム提供に利用された粒子は陽子のみで、70 MeV が 95.3%、40 MeV が 4.7% と、主に 70MeV 陽子が利用された。主に宇宙線による電子機器への影響を評価するための利用となっている。

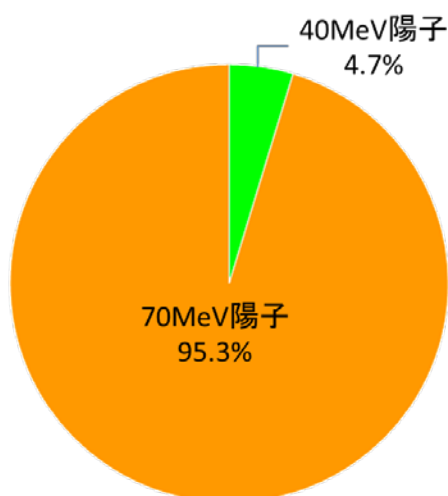


図 8. 有料ビーム提供における粒子・エネルギー別利用割合

（７）ビーム開発

平成 23 年度のビーム開発には、627.7 時間が当てられた。ビーム開発における粒子・エネルギー別利用割合を図 9 に示す。粒子別にみると、陽子が 83.7%、水素分子が 4.1%、重陽子が 2.9%、ヘリウムが 7.0%、炭素が 2.1%、酸素が 0.2%となっている。特に、放射性薬剤の製造・研究において重要度の高いジェネレータ製造用に利用されている 30 MeV 陽子は、調整およびビーム確認を行う頻度が高く全体の 33.8%を占めている。

また、平成 23 年度の新規ビームとして、放射性薬剤の製造・研究用に 24.4 MeV 陽子、65 MeV ヘリウム、75 MeV ヘリウムを、物理研究用に 117 MeV 炭素-13 を新たに供給した。

平成 23 年度にマグネチックチャンネルの更新[本誌 p13]を行ったため、80 MeV 陽子を提供できるようになった。また、大型サイクロトロンで加速可能な最大エネルギーである 90 MeV 陽子の加速調整を行ったが、RF が安定しなかったため 88 MeV 陽子に変更して調整を行った。

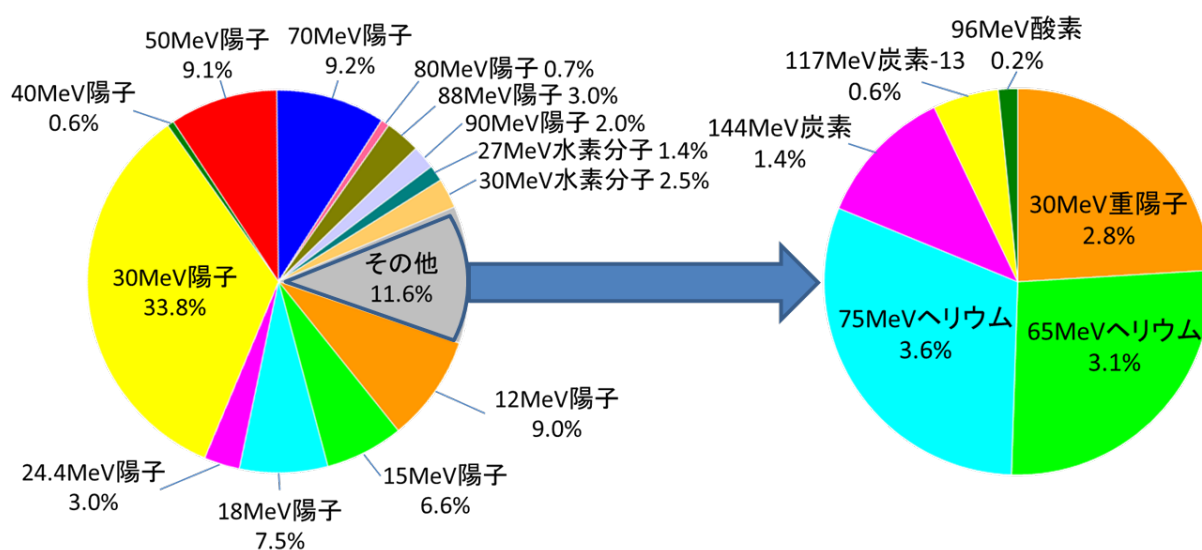


図 9. ビーム開発における粒子・エネルギー別利用割合

2. 小型サイクロトロン

2-1. 運転実績

平成 23 年度の総運転時間は 1721.5 時間であった。平成 23 年度の運転実績を表 3 に、運転実績割合を図 10 に示す。

小型サイクロトロンでは、加速エネルギーが固定されているため、18 MeV 陽子と 9 MeV 重陽子が提供可能である。その内、18 MeV 陽子の利用が総運転時間の 96%である 1653.2 時間となっている。また、9 MeV 重水素ビームによる RI 生産が 46.5 時間であった。その他には、調整運転で 18 MeV 陽子に 13.1 時間、9 MeV 重水素に 8.7 時間費やした。

2-2. 利用状況

小型サイクロトロンは放射性薬剤の製造・研究専用に使われている。総運転時間のほとんどが 18 MeV 陽子による ^{11}C や ^{13}N 、 ^{18}F などの放射性薬剤の製造・研究に利用された。また、本年度は 6 月から 9 MeV 重陽子による ^{15}O の放射性薬剤の製造・研究が行われた。なお、調整運転時間は定期点検および安全測定に伴うビーム確認のために使われた。

表 3. 小型サイクロトロンの運転実績

	18 MeV陽子	9 MeV重陽子	[時間]
放射性薬剤の製造・研究	1653.2	46.5	1699.7
調整運転	13.1	8.7	21.8
計	1666.3	55.2	1721.5

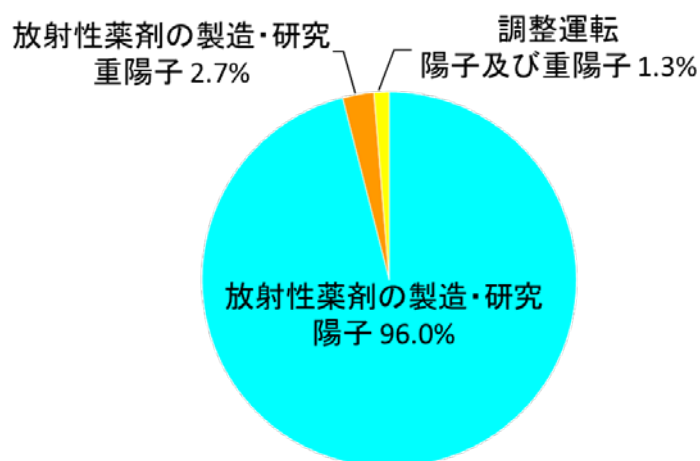


図 10. 小型サイクロトロンの運転実績割合

3. 運用体制

大型および小型サイクロトロンでは、平日の9:00から17:00まで運転を行い、実験者の要望がある場合は19:00まで延長可能という運転体制になっている。大型サイクロトロンでは、物理研究等のユーザーから実験できる日数を増やしてほしいという要望が以前よりあったことから、平成23年度より1カ月に1～2回の土曜日運転を開始した。前期は試験運用のため1カ月に約1回、後期から1カ月に約2回行った。平成23年度は計14回の土曜日運転を行った。

参考文献

- [1] A.Sugiura, S.Hojo, K.Tashiro, T.Honma, M.Kanazawa, A.Goto, T.Okada, T.Kamiya, Y.Takahashi, K.Noda, : STATUS REPORT OF NIRS CYCLOTRON FACILITY (NIRS-930, HM-18), Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tukuba, Japan) MOPS031.

2. サイクロトロンの改良・開発

サイクロトロンの改良・開発

北條 悟^A、片桐 健^A、杉浦 彰則^A、田代 克人^A、本間 壽廣^A、後藤 彰^A、
岡田 高典^B、高橋 勇一^B、中山竜二^B、神谷 隆^B

^A：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

^B：加速器エンジニアリング株式会社

概要

大型サイクロترون(NIRS-930)においては、昨年度に製作した位相プローブとシングルギャップバンチャーを設置した。位相プローブを用いて、各エネルギーにおけるビーム位相の測定を行い、トリムコイルによる等時性磁場の調整を実施した。シングルギャップバンチャーは、昨年度問題となっていた点を改善し、実際のビーム提供に使用できるようにした。垂直入射ラインではビームアッテネータとビームビューアの追加を行った。さらに、サイクロترونにおける完全3次元電磁場分布のもとでビームのシミュレーションを行う軌道計算プログラムを構築した。また、冷却水流量が低下し冷却不足が問題となっていたマグネティックチャンネルの更新を行った。小型サイクロترون(HM-18)では簡略的な構造の位相プローブを導入し、等時性磁場の調整を行った。これら2台のサイクロترونにおける改良・開発について報告する。

1. NIRS-930 用位相プローブの導入



写真1. NIRS-930 内に設置された位相プローブ

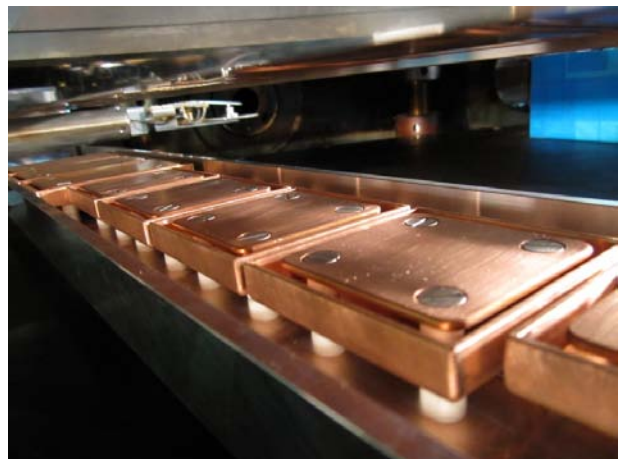


写真2. 位相プローブピックアップ電極

昨年度に設計製作を行った位相プローブ[1]の据え付け作業を7月の定期点検時に行った(写真1, 2)。ピックアップ電極は上下10対あり、各半径におけるビーム位相の測定が可能である。このビーム位相の相対的なずれを比較する事により、等時性の正否を知ることができる。各ピックアップ電極の設置された半径と各トリムコイルにより生成される磁場の関係を図1に示す。

位相測定では、各ピックアップ電極からのラインの長さをそろえなければならない。そのため、極力同一のラインを用いるようピックアップ電極間近の本体室に選択回路を用いている。選択回路は1桁デジスイッチと複数の同軸切換えスイッチを用いて信号増幅器の入力の切換えを行っている。信号増幅器の出力は、1本のケーブルラインで制御室のオシロスコープに接続され、モニターされる。このオシロスコープにより、加速高周波電極のピックアップ電圧と比較し各半径での位相の測定を行った(写真3)。

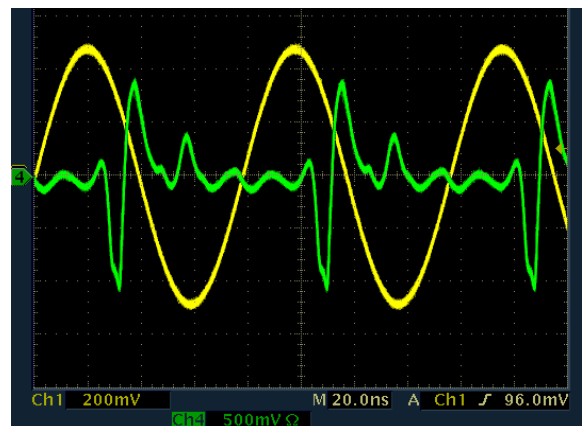


写真3. 加速高周波電圧(黄)と
ビームピックアップ波形(緑)

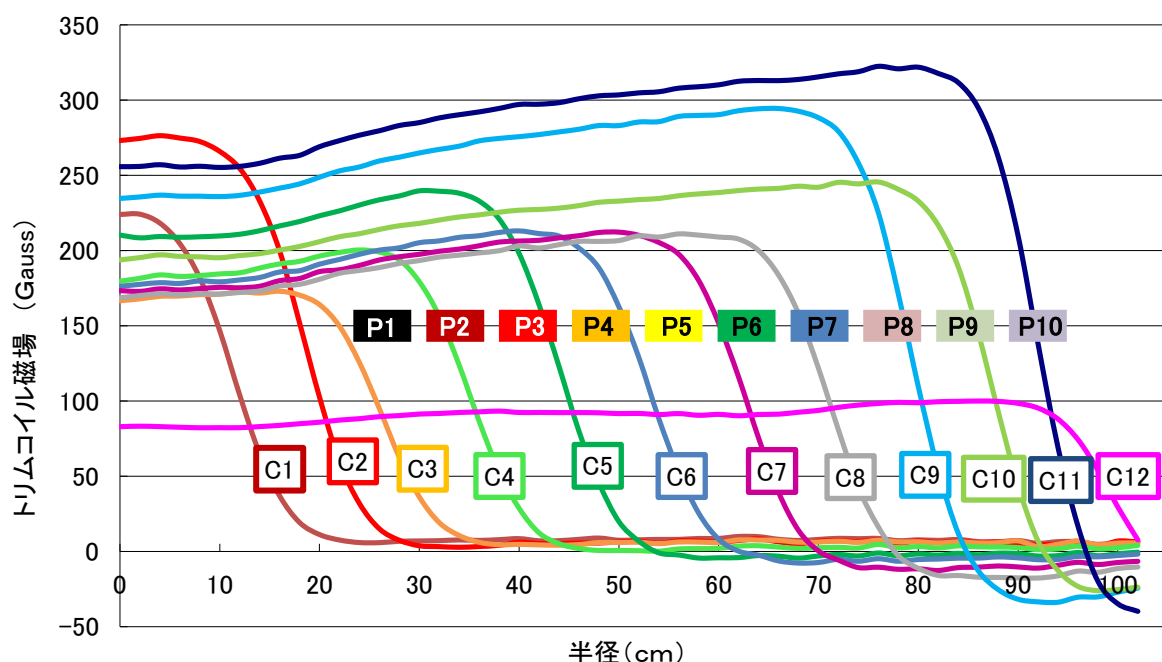


図 1. 各トリムコイルの生成磁場（メインコイル電流=630 A）と位相プローブの位置関係

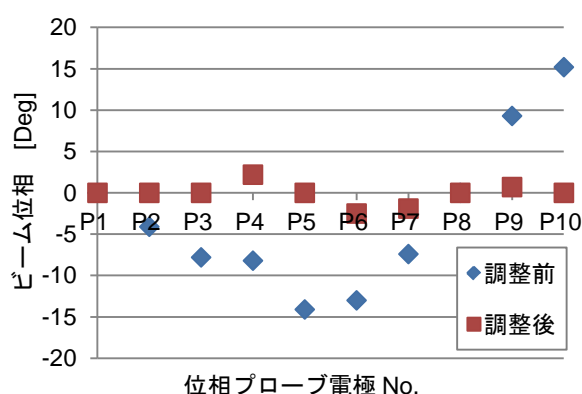


図 2. 30 MeV 陽子に対する位相測定結果

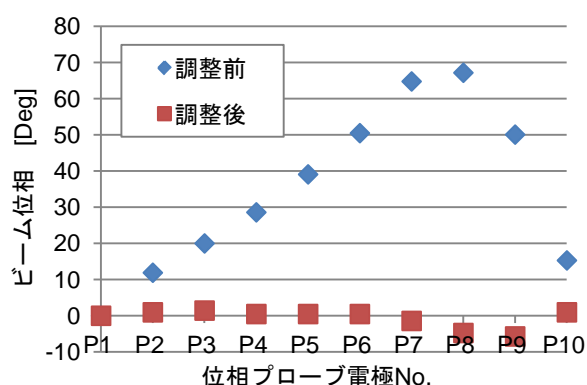


図 3. 12 MeV 陽子に対する位相測定結果

30 MeV 陽子と 12 MeV 陽子に対する各半径でのビーム位相の測定結果と、この測定結果をもとにトリムコイルにより磁場の調整を実施した後のビーム位相（最も内側の電極 P1 を 0 度とした）をそれぞれ図 2, 3 に示す。30 MeV 陽子のビーム位相のずれ幅は、 ± 15 度であったのに対して、トリムコイルの調整後は ± 5 度以下にすることができた。また、12 MeV 陽子では、最大で 70 度と大きくビーム位相がずれていたが、これもトリムコイルの調整後は、最大で 5 度以下にすることができ、双方とも良い等時性磁場を作ることができた。

次に、加速電圧の位相とビーム位相との相対的関係の較正を行った。まず、位相プローブの計測ラインの電気路長と加速電圧ピックアップの電気路長との差を各周波数において測定した。次に、位相プローブの設置位置と加速電極の角度を考慮して、H1,H2 の各加速モードにおいてオシロスコープ上で現れるべき両者の位相の差を求めた。その結果を図 4 に示す。これを用いることにより、加速位相を理想的な位相に合わせる調整が可能となる。

これまで加速されていたビームのみならず新たな核種やエネルギーのビーム調整では、この位相プローブを使ってビーム位相を測定し等時性磁場を調整することにより、サイクロトロン内部の加速調整に要する時間を大幅に短縮することができるようになった。

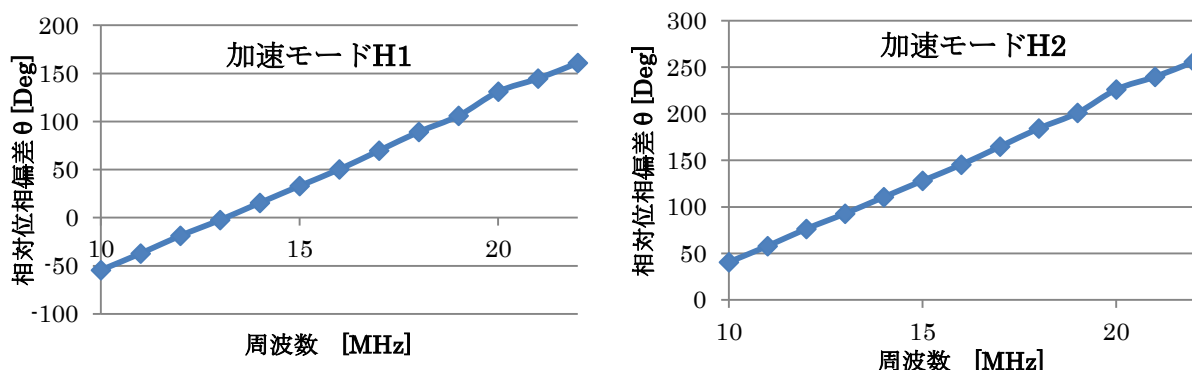


図4．理想的な加速が行われているときの加速電圧の位相とビーム位相との相対位相差
(Ch1 Dee 電極中心位置での位相を 0 度とした)

2. 軌道計算

3次元電磁場分布のシミュレーション結果をもととしてビームの軌道計算を行うプログラムを構築した。サイクロトロンを構成する各機器の電磁場（メインコイル、トリムコイル、ハーモニックコイルによる磁場、マグネティックチャンネル、グラディエントコレクターの磁場、ヨーク内のグレーザレンズの磁場、Dee 電極ギャップの電場、インフレクターの電場）をすべて OPERA-3d[2]を用いて計算し、それらの分布のもとで入射・加速・取出しの軌道計算を行った（図5）。

典型的なビーム（30 MeV 陽子）に対して先ず行った計算ではビームパターンやビーム通過効率等が実際の運転をよく再現することが確認された。一例としてビーム位相に関する計算と運転との比較を図6に示す。今後既存のビームや新しいビームについてその通過効率を上げることを目指して、さらに計算を行う予定である。

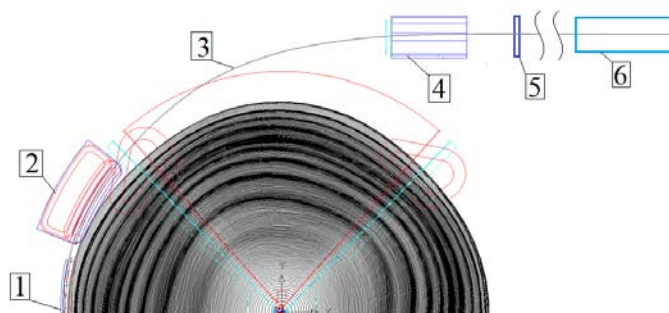


図5．ビーム軌道計算（30MeV 陽子）

- 1：静電デフレクタ，2：マグネティックチャンネル，
3：ビーム軌道，4：グラディエントコレクター，
5：ビームスリット，6：BS0（取出し後ファラデーカップ）

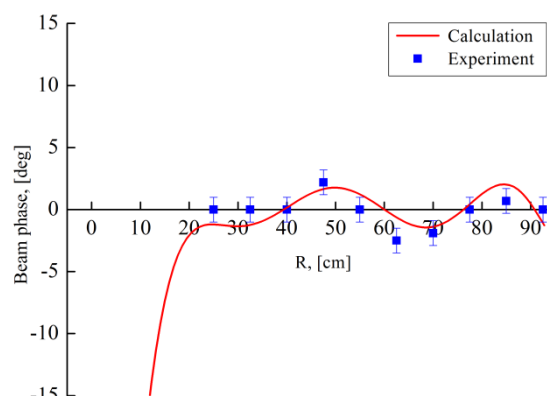


図6．ビーム位相の計測と計算結果の比較

3. シングルギャップバンチャーの運用

シングルギャップバンチャーの昨年度のビームテスト結果では、ダブルギャップのバンチング効率の2.5倍に対して、バンチング効率が1.7倍と低い値となっており、ビーム提供に用いるには不十分であった。本年度は、この原因究明のための調査が進められ対策を実施した[1]。

調査の結果、バンチング効率が低くなっているのはビーム強度が高い場合のみであったため、空間電荷効果を疑った。空間電荷効果は、バンチャーの位置からインフレクターまでの距離が長いほど大きくなる。昨年度の配置では、ダブルギャップバンチャーからインフレクターまでの距離は1.53 mで、シングルギャップバンチャーはさらに0.8 m上流の2.33 mであった。そのため、ダブルギャップバンチャーと同じ場所に設置してビームテストを行い、バンチング効率の確認をおこなった。

バンチング効率の入射ビーム強度依存性を図7に示す。問題となっていた高強度におけるバンチング効率の悪化が見られなくなっている。また、バンチャーの位相を変えたときのサイクロトロン取出し後のビーム強度の変化を図8に示す。シングルギャップを2.33 mの距離に設置した場合には位相方向に収束しきれずに2つのピークがあらわれているのに対し、1.53 mに設置した場合にはダブルギャップと同程度のビーム強度が得られ位相方向の分布も同様の結果が得られた。このことはビーム強度が大きくなったときのバンチング効率の悪化が確かに空間電荷効果によるものであることを意味している。

シングルギャップバンチャーは、現状では基本周波数の正弦波をかけて運転しているが、理論上さらに効率の高い鋸歯状波での運転を今後進めていく予定である。

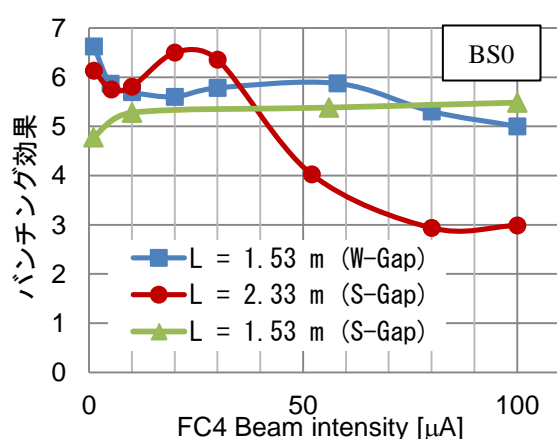


図7. バンチング効率のビーム強度依存性
(FC4:入射ラインのファラデーカップ)

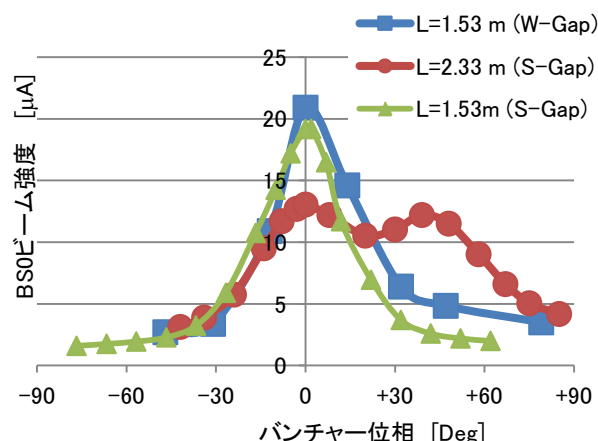


図8. サイクロトロン取出し後のビーム強度
バンチャー位相依存性

4. 垂直入射ライン用ビームビューアーとビームアッテネータの製作

垂直入射ラインにおいて、ビーム診断を行うためのビームビューアーの製作を行った（写真4）。このビームビューアーでは、蛍光体としてアルミのベース板に KBr を塗付したものを用いている。ビームビューアーをモニターするためにはカメラが必要となるが、垂直入射ラインのあるサイクロトロンの本体室は中性子線量が高いためカメラの劣化が著しい。それを避けるために、遮蔽体内にカメラを設置しファイバースコープを用いてビームスポットを確認する設計とした。そのため、ビームビューアーのフランジにはファイバースコープが入るパイプの先端に覗き窓を取り付けている。

また、現状のビーム提供において、ビーム強度の調整にはイオン源引き出し直後のスリットを用いている。しかしながらスリットを用いたビーム強度の調整は、ビームのエミッタンスが変化し加速・輸送効率も変わり、さらにターゲット位置でのビーム形状にも変化を与えてしまう。そのため、ビームのエミッタンスに変化を与えずにビーム強度の調整ができるようビームアッテネータの製作を行った（写真5）。このビームアッテネータの減衰板（メッシュ）は、設置される入射ラインでのビームのエネルギーは低いため強制冷却は行わず、スパッターしにくいタンタルを採用した。タンタル板の厚さは0.1 mmで、1/10 メッシュとするため1 mm ピッチで0.1 mm の穴を開けている。このタンタル板2枚を1セットとし個別にビーム軸上に出し入れできる構造になっている。

このビームビューアーとビームアッテネータは、今後入射ラインに取り付け、通常運転で使用する予定である。



写真4. ビームビューアー

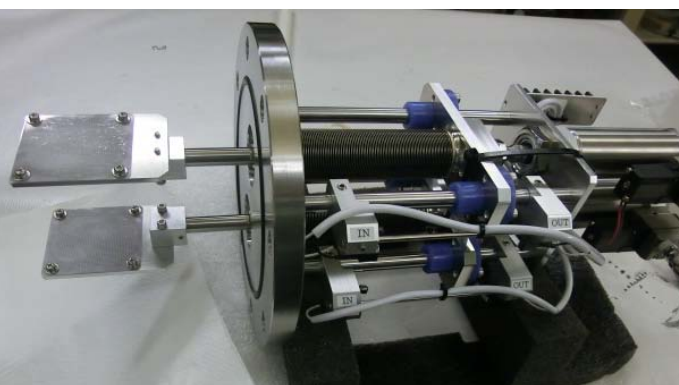


写真5. ビームアッテネータ

5. マグネティックチャンネルの更新

長年使用してきたマグネティックチャンネルは、冷却水流量が低下し冷却不足による温度上昇が問題となり、仕様定格電流を流す事ができなくなっていた。そのため、高いエネルギーのビーム取出しが不可能となったりその効率が低下したりするなどの不具合が生じており、更新が必要となった。新しいマグネティックチャンネル(写真6)は既に昨年度製作されており、交換予定であったが、震災の影響により延期になっていた。その交換作業を本年度実施した。

交換後はマグネティックチャンネルに定格電流を流す事ができるようになり、70 MeV 陽子ビームにおいて 5%程度であった取出し効率を 30%程度に向上させることができた。また、80 MeV 陽子ビームにおいては、旧マグネティックチャンネルでは十分なビーム強度を取り出せなくなっていたが、更新後には提供可能な強度を取り出せるようになり、マシンタイムへの提供を実施することができた。

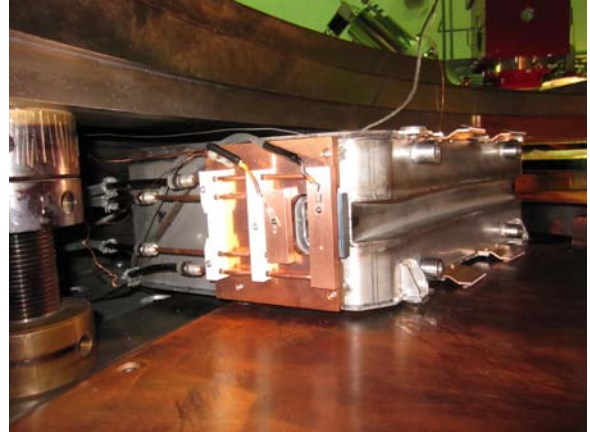


写真6. 更新されたマグネティックチャンネル

6. HM-18 用位相プローブの導入

HM-18 には、等時性磁場の調整のため 4 つのトリムコイルがある。これまで、このトリムコイルの電流調整は、荷電変換取出し後のビーム強度のみをモニターしながら行っていた。つまり、磁場がどの程度正しく等時性になっているかどうかは確認していなかった。そこで今回、HM-18 に銅薄板とポリイミドフィルムを用いた位相プローブを導入し、ビーム位相の測定を行った。この位相プローブは、55-76 mm×68 mm で厚さ 0.1 mm の銅薄板のピックアップ電極 4 枚を 0.1 mm のポリイミドフィルムで絶縁してベースの銅薄板に張り合わせるといった、簡略化された構造とした(写真7、図8)。また、通常採用される上下が対になった構造ではなく下側の電極のみをセクター磁極表面に張り付ける構造とし、設置も非常に簡易的に行えるものとした(写真8)。信号配線は、長さをそろえた直径 1.25 mm の銅管同軸ケーブルを用いた。

18 MeV 陽子ビームに対して行ったビーム位相の測定結果を図9に示す。これまでのトリムコイル電流の設定パラメータではビーム位相のずれは最大で 15 度程度であり割りと良い等時性の磁場が生成されていることが確認された。次に、より良い等時性磁場を生成する目的でトリムコイル電流の調整を行った結果、ビームの位相のずれを赤四角印で示す程度に収めることができた。ただし、それよりさらに位相を合わせるように調整すると、加速されるビーム強度が低下してしまった。これはこの調整によって中心バンパ領域の磁場が変わったためと考えられる。今後、良い等時性磁場を確保しつつ最適な中心バンパ磁場分布を生成することによってビーム強度を増やすことを試みる予定である。

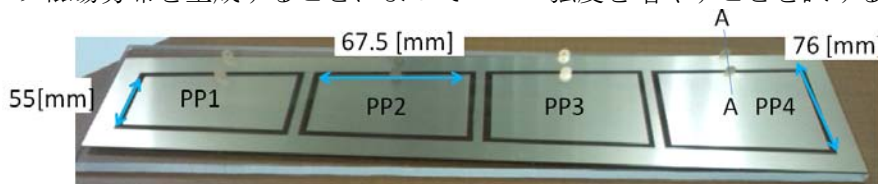


写真7. 製作された HM-18 用位相プローブ

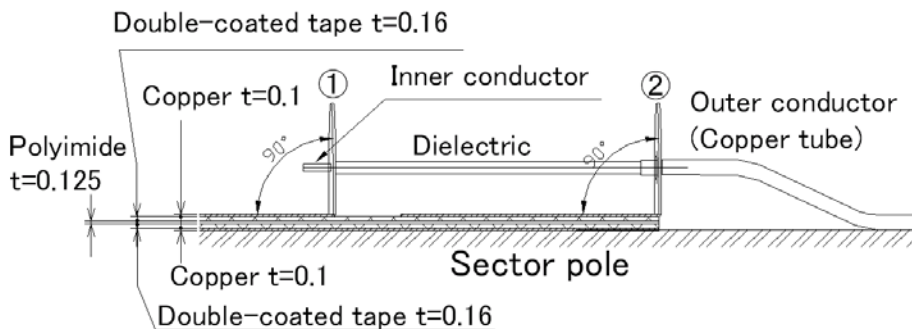


図8. HM-18 用位相プローブ構造断面図 (A-A 断面)
(①ピックアップ電極、②アース電極)



写真 8. HM-18 内に設置された位相プローブ

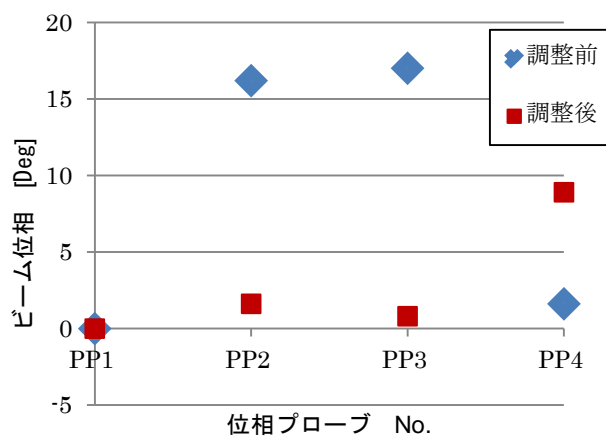


図 9. 陽子 18 MeV ビームに対する位相測定結果

参考文献

- [1] Satoru Hojo, Akira Goto, Toshihiro Honma, Akinori Sugiura, Katsuto Tashiro, Takanori Okada, Takashi Kamiya, Yuichi Takahashi, and Kouji Noda : DEVELOPMENT OF MULTI-HARMONIC BEAM BUNCHER FOR AVF-930 CYCLOTRON (II), Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan)
- [2] OPERA/TOSCA Reference Manual. Vector Fields Limited. Oxford, OX5 1JE, England.

3. 平成23年度

サイクロトロンの分子プローブの製造・開発への利用状況

平成 23 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 明栄、河村 和紀、永津弘太郎、鈴木 寿、根本和義
放射線医学総合研究所、分子イメージング研究センター 分子認識研究プログラム

概要

分子イメージングセンター分子認識研究グループでは、サイクロトロンを用いて生産した短寿命ポジトロン核種を利用して PET による分子イメージング研究に不可欠な分子プローブの開発と動物実験、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短寿命放射性同位元素が製造されている。またその他にも加速器製 ^{99m}Tc の製造法の確立の研究や内用療法に使用する治療用放射性核種の製造のための準備を進めている。以下にこれらの研究について代表的な成果を紹介する。

- 1) $[^{11}\text{C}]\text{COCl}_2$ を用い、異なる 2 分子の縮合により $[^{11}\text{C}]$ カルバメートや $[^{11}\text{C}]$ ウレアなどの合成法と化合物のライブラリーを構築している。 $[^{11}\text{C}]\text{HCN}$ による $[^{11}\text{C}]$ シアノベンゼン環を有する PET プローブの自動合成システムを確立した。
- 2) 上記の標識技術を生かし、異なる作用機序を有する数種の抗がん剤を合成した。また、数種の代謝調節型グルタミン酸 I 型受容体 PET プローブを設計し、臨床に使用可能なプローブ $[^{18}\text{F}]\text{FITM}$ を開発した。また本プローブと同時に開発した代謝調節型グルタミン酸 I 型受容体イメージングプローブ $[^{11}\text{C}]\text{ITMM}$ を東京都健康長寿医療センターに導出し、臨床試験の準備を進めている
- 3) 垂直照射法を技術的主軸とし、今年新たにセラミック製ターゲット容器を開発した。照射野において、酸による金属ターゲットの溶解を可能にすることで、ロボティックな遠隔技術を不要にできた。容易かつ安価な遠隔製造を実現可能になったことから、今後、広範囲な応用が期待できる。
- 4) 加速器製 ^{99m}Tc の製造法を確立するために製造量 3.7GBq (100mCi) 程度を 1 回あたりの製造目標量に設定、実証試験を繰返し行い、安定した成果を得た。加速器製 ^{99m}Tc の品質評価を行うため、製薬企業との共同研究を実施した。その結果数種類の Tc-^{99m} 医薬品に関して、現行の品質基準を満たす物であった。

2. 分子プローブの生産・提供状況

平成23年度は、短寿命放射性薬剤 ^{18}F FAZA, ^{18}F FEt-PE2I, ^{11}C sulpiride 及び ^{11}C AZD2184等の臨床利用が継続して行わ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。

23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。製造回数は震災等や夏場の節電等の影響により昨年度よりやや減少した。

製造した放射性薬剤は、腫瘍診断、脳・中枢機能診断等の臨床利用の他に、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)等に使用された。

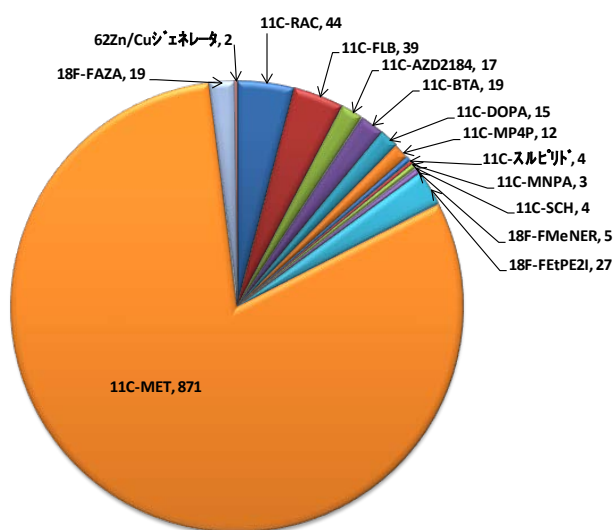


図1. 平成23年度における被験者数(被験者総数1081人)

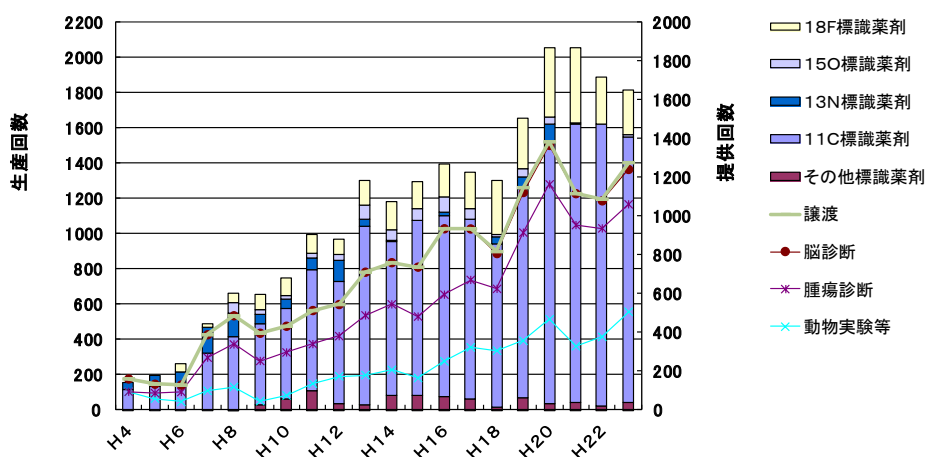


図2. 生産回数と提供回数の推移

表1. 平成23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	34.19	(7)	13.049	(15)	(15)				
	DASB	8.77	(4)				1.521	(3)		
	DAA	24.021	(12)				6.166	(12)		
	FLB	122.819	(55)	11.592	(34)	(39)	21.354	(42)		
	MP4P	40.35	(13)	5.949	(12)	(12)	0.362	(1)		
	BTA	100.413	(52)	14.6883	(19)	(19)	27.359	(41)		
	SCH	64.41	(33)	1.076	(4)	(4)	13.813	(26)		
	NMSP	1.91	(1)							
	Ro1788	3.67	(1)							
	RAC	161.752	(56)	12.881	(40)	(44)	20.574	(36)		
	WAY	36.81	(30)				11.4139	(27)		
	スルピリト*	28.05	(10)	6.793	(4)	(4)				
	PE2I	13.5	(4)				1.088	(2)		
	PK11195	3.694	(6)				0.925	(2)		
	AZD	55.622	(21)	28.657	(17)	(17)	0.554	(1)		
	MET	2788.85	(300)	1604.37	(538)	(871)	66.06	(10)		
	VER	5.59	(1)				0.552	(1)		
	BF227	5.706	(3)				0.6	(2)		
	MNPA	15.459	(5)	0.739	(3)	(3)	1.301	(2)		
	S-dThd	6.521	(4)				3.253	(4)		
	Ac5216	135.021	(58)				36.749	(56)		
	CH3I	65.86	(156)							
	その他	720.945	(664)				52.6754	(133)		
¹³ N	その他									
¹⁵ O	H2O	43.8	(14)				33.303	(10)		
¹⁸ F	FETDAA	13.8372	(13)				6.179	(12)		
	FLT	3.743	(1)				0.447	(1)		
	FMeNER	6.03	(6)	1.03	(5)	(5)	0.951	(2)		
	FETPE2I	62.109	(30)	10.277	(27)	(27)	0.79	(2)		
	TO-002	0.797	(1)				0.534	(1)		
	FAZA	36.4487	(28)	7.699	(14)	(19)	3.2265	(11)		
	MPPF	11.26	(13)				5.681	(11)		
	F-	27.12	(25)				17.75	(22)		
	その他	135.334	(134)				6.005	(16)		
²⁸ Mg	水溶液	2.70132	(4)						2.70132	(4)
⁶² Cu	Cu-ATSM	5.39	(4)	3.8	(2)	(2)				
⁶⁴ Cu	水溶液	9.78	(11)				6.14	(12)		
⁶² Zn	62Zn/Cu	88.8	(10)						88.8	(30)
⁷⁶ Br	水溶液	0.18	(3)							
⁸⁹ Zr	水溶液	5.37	(9)				1.262	(5)		
^{99m} Tc	水溶液	2.39	(3)						1.54	(1)
¹²⁴ I	水溶液	0.88	(3)				0.222	(2)		

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. 最前方における陽子及び重陽子生成断面積の測定
- 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. 放医研サイクロトロン Li (p, n) 中性子場の特性評価
- 4－5. LYSO (Ce) シンチレーターの陽子、重陽子、
 α 粒子に対する発光特性

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^C

京大^A、核融合研^B、放医研^C

研究成果概要

水蒸気への6.0 MeV/u O^{5+} 入射で、二次電子エネルギー10 eV~1 keV、放出角度20~160°にわたる二次電子生成二重微分断面積(DDCS)を測定した。得られたDDCSエネルギースペクトルにおいて、以前に測定した等速 C^{4+} 入射との比較では、高Z入射を反映して約2倍の放出を観測した。さらに、等速 O^{8+} 入射で同様に断面積測定を開始した。

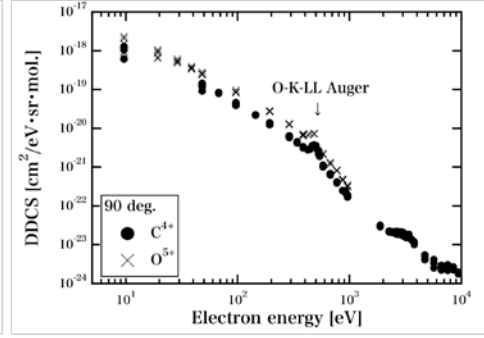
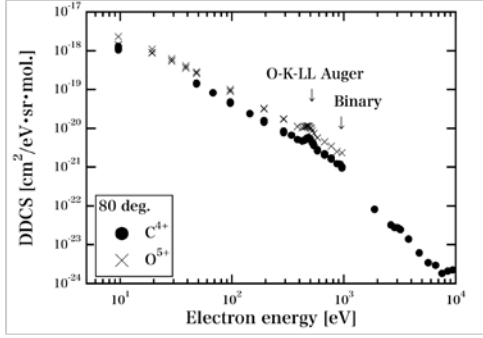
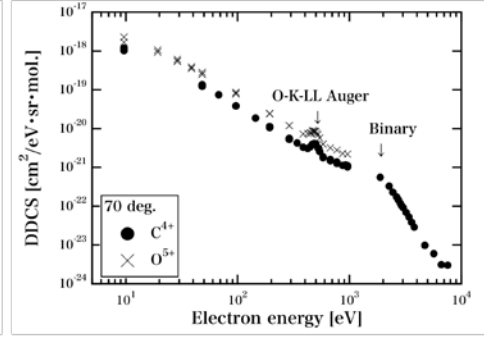
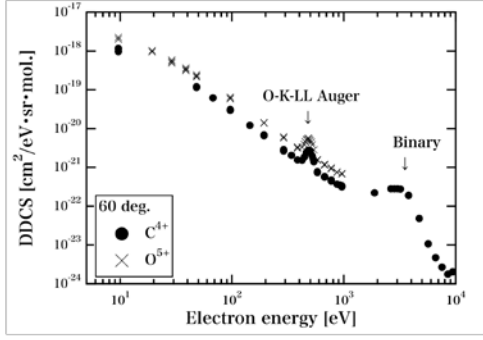
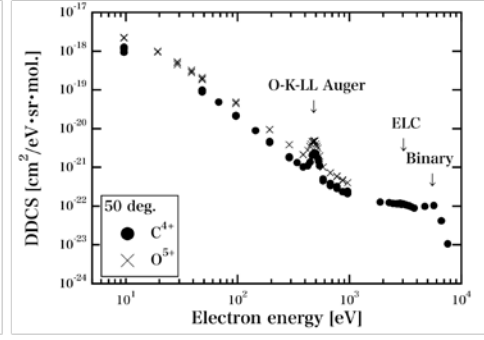
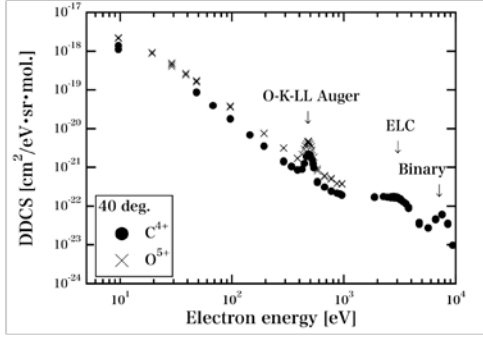
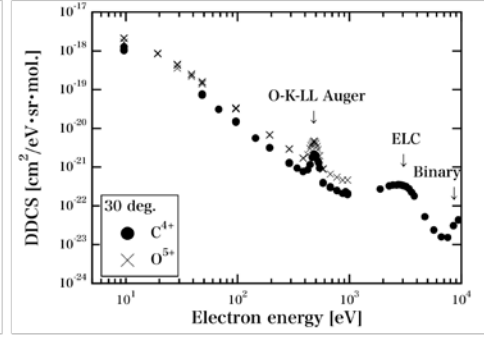
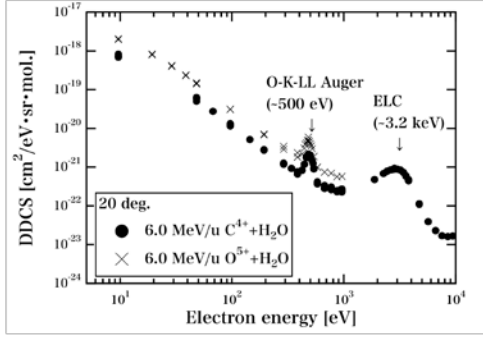
1. 研究目的と背景

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、高真空中で安定希薄な水蒸気ターゲット得ることが難しいため、信頼できる高精度実験データは殆ど発表されていない。

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

2. 研究内容と成果

去年度に引き続き 6.0 MeV/u O^{5+} 入射で二次電子生成断面積を測定した。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10 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。SE と BG とから DDCS を求め、以前に測定した等速 C^{4+} 入射と比較した。図 1 に結果を示す。 O^{5+} 入射は高 Z 入射を反映して C^{4+} 入射に比べて約 2 倍の放出を示した。入射イオンポテンシャルの遮蔽効果を考慮した、より定量的な議論は O^{8+} 入射との比較で可能になると思われる。さらに、高エネルギー領域(>1 keV)を測定することで、二体衝突(Binary)ピーク、ELC(Electron Loss to Continuum)ピークの Z 依存性も調べる予定である。



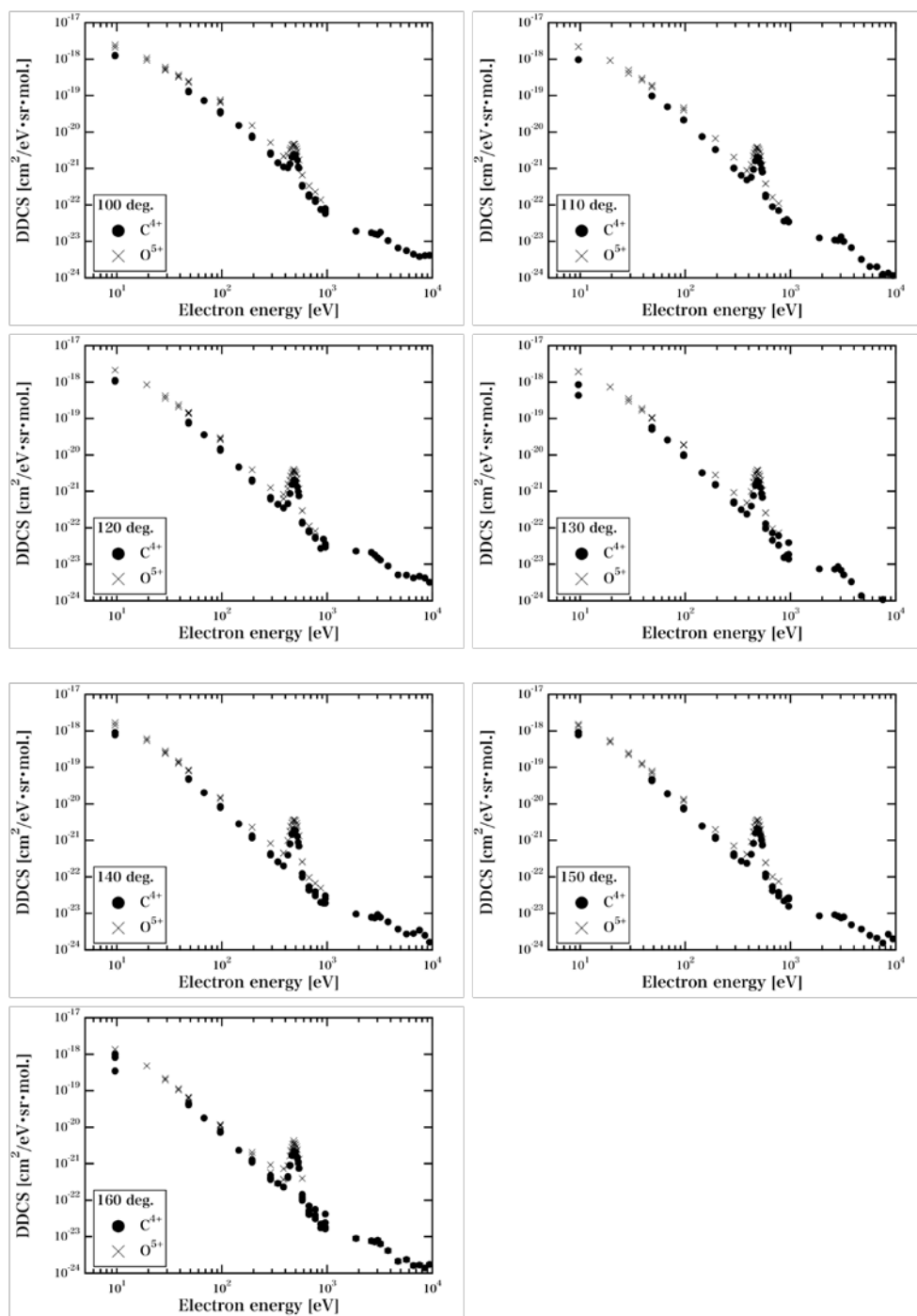


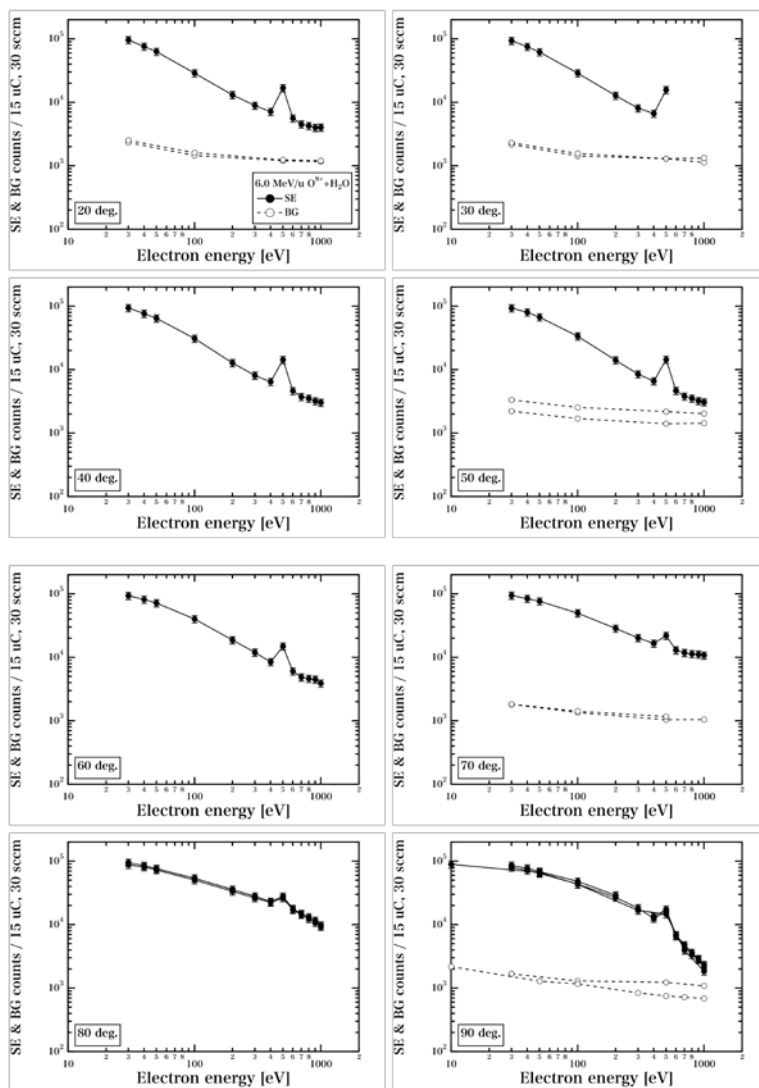
図1. 水蒸気への6.0 MeV/u O^{5+} 、 C^{4+} 入射による二次電子生成二重微分断面積エネルギースペクトル

O^{5+} 入射で測定中に原因不明な BG 増加を観測しており、震災の影響によりチャンバが微動してしまった可能性があったため、夏期メンテナンス期間中に、サイクロスタッフの協力により、チャンバを再アライメントした。また、長年の使用により MCP ノイズがかなり増加していたため、 O^{5+} 入射で SE 計数の少ない高エネルギー領域(>1 keV)の測定は困難と判断し、等速 O^{8+} 入射に切り替え、低中エネルギー領域(<1 keV)の断面積測定を開始した。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30 eV~1 keV の SE 計数を測定した。図 2 に結果を示す。以前に測定した等速 C^{6+} 入射に比べて約 2 倍の放出が観測されている。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 を求める予定である。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と考えている。

(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スペクトル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。



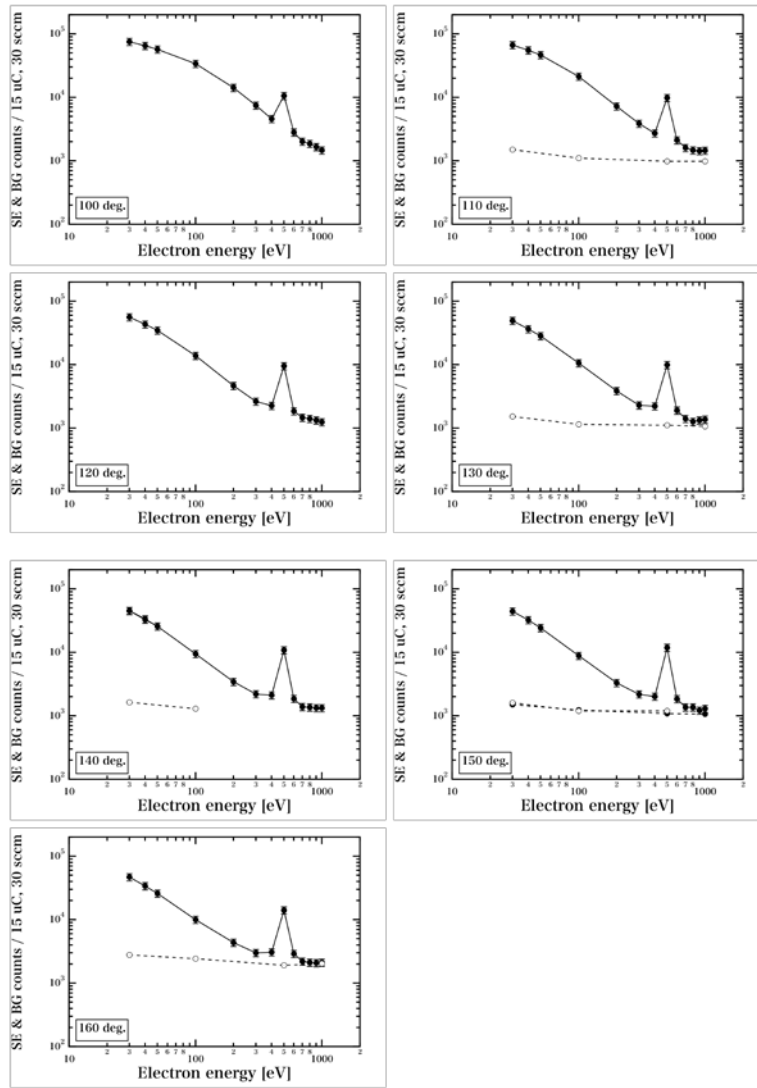


図3. 水蒸気への6.0 MeV/u O^{8+} 入射における二次電子計数(●)、バックグラウンド計数(○)の二次電子エネルギー依存性

最前方における陽子および重陽子生成断面積の測定

魚住 裕介^A、柳田 侑樹^B、中村 直人^B、野ヶ峯 翔^B、山田 剛広^C、和西航平^C、
古場 裕介^D、高田 真志^E、

^A：九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門

^B：九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻

^C：九州大学工学部エネルギー科学科

^D：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター

^E：放射線医学総合研究所緊急被ばく医療研究センター

概要

原子核反応モデルの開発と検証に用いる目的で、過去に測定例のない最前方角での(p,p'x)反応二重微分断面積の整備を目指して実験を開始した。特殊な散乱チェンバーを製作して C6 コースに設置し、大型サイクロトロンからの 40 MeV 陽子を使用した。¹²C および ²⁷Al を標的核として、散乱角度 3° から 30° までの 7 点で二重微分断面積を測定した。過去の測定データおよび理論計算の結果と比較して、検証を行った。

1. 目的

粒子輸送コード PHITS は粒子線医療をはじめとして多くの応用分野で利用されている。PHITS の改良は現在でも進められているが、近年はイベントジェネレータ計算を 20-100 MeV のエネルギー範囲で可能とする事が強く要望されている。このためには、核反応モデルである INC (Intranuclear Cascade) モデルを 100 MeV 以下のエネルギー領域まで拡張する計画がある。我々は(p,p'x)反応に関する最近の研究において、回折効果と集団励起とを新しく考慮に入れる事により、INC コードの予測精度を大幅に改善できる事を示している。(p,p'x)反応の場合、集団励起の影響は 20° より前方の二重微分断面積において強く現れ、10° より前方で特に顕著となる。このため、最前方角度での(p,p'x)反応実験データを用いた検証が重要となる。しかし、ゼロ度近傍の最前方データは過去に測定例がなく、新しく実験を行ってデータを取得しなければならない。

以上の理由から、最前方角度での(p,p'x)反応の二重微分断面積測定を NIRS の大型サイクロトロン施設で開始した。ゼロ度近傍の測定については、ビームの直接的影響や強い弾性散乱の影響等バックグラウンド要因が大きい。これらを除くするにはノウハウを蓄積する必要がある。実際にデータを取得して過去の実験データや理論計算結果と比較し、測定方法の問題点や改善点等について検討する。

2. 実験方法

実験は NIRS の大型サイクロトロンを用い、C6 コースにおいて実施した。入射粒子として 40 MeV 陽子を使用した。ターゲットには厚さ 100 μm の ¹²C および、²⁷Al を用いた。ターゲットは新しく製作した真空チェンバーの中に設置した。検出器は真空チェンバー外の大気中に置くため、チェンバー窓には厚さ 50 μm のカプトンフォイルを用いた。実験に用いたカウンターテレスコプの構成を図 1 に示す。半導体検出器(SSD) 2 枚と GSO(Ce)結晶シンチレータから構成した。シンチレータの信号は光電子増倍管により読み出した。測定を行った角度は 3° 6° 9° 12° 15° 20° 30° であった。検出器立体角は、3° で 2.50×10^{-4} 、30° で 1.28×10^{-3} となった。

10° より前方の測定では、ビーム粒子が直接検出器に入射してこれを破壊する恐れがある。このため測定の際は、ビーム電流を低く抑える必要がある。一方、微弱なビーム電流ではファラデーカップが正常に動作しなくなるため、ビーム粒子数の計数用にビームモニターとして設置した。ビームモニターはチェンバー下流に設置した厚さ 500 μm の ¹²C ターゲットからの散乱線を、そこから 30° 方向の位置に置いたプラスチックシンチレータ 2 枚で同時計数するような構成とした。ビームモニターの較正は、ファラデーカップが正確に動作するビーム強度において、ビーム強度[pA]を変化させていき、それに対応するビームモニターのカウント数を測定して、ビーム強度とカウント数と関係を求めた。さらに、ターゲットを置いた時と置かない時の 2 つの場合で測定結果を比較したところ、差が十分小さいことをから、ターゲットに因るビームの広がり十分小さいことを確認した。測定の際のビーム強度は、3° と 6° の測定の時には 12 [pA]、20° と 30° の測定の時には 48 [pA]であった。DAQ 計数率は 1000 [cps]を超えると、アクシデンタル事象と考えられる異常なデータセットが現れるため、DAQ 計数率を 100-500 [cps]程度になるようにビーム強度を調整した。測定対象粒子は陽子、重陽子、三重陽子とした。

3. データ解析

3-1. エネルギー較正

エネルギーに較正には、エネルギー既知の弾性散乱ピークを利用した。相対論的運動学により、弾性散乱のエネルギーを求めた。各検出器に付与されるエネルギーは Bethe の式により計算した。さらに、 $\Delta E - E$ 2次元プロットの曲線を再現するようにフィッティングすることで ADC チャンネル値をエネルギーに変換するパラメータを決定した。2次元プロットの例は図2に示している。

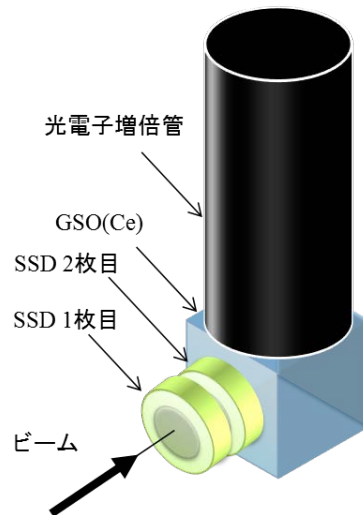


図1.カウンターテレスコープ

3-2. 粒子弁別

粒子弁別は次式で表される PI パラメータを用いて行った。

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

ΔE は SSD に、 E_{total} はすべての検出器に付与したエネルギーである。 b は粒子に依存する係数である。 ΔE 検出器で粒子が損失するエネルギーは各粒子によって異なり、同一の粒子に対して PI はほぼ一定となる。図3は SSD 検出器による PI スペクトルの例である。陽子、重陽子、三重陽子のグループに分離できている。PI スペクトルを用いて粒子弁別を行った後に 1 MeV 刻みの収量をガウスフィッティングで求めた。重陽子、三重陽子に関しては 2 MeV 刻みである。バックグラウンドはブランクターゲット測定を行い求めた。

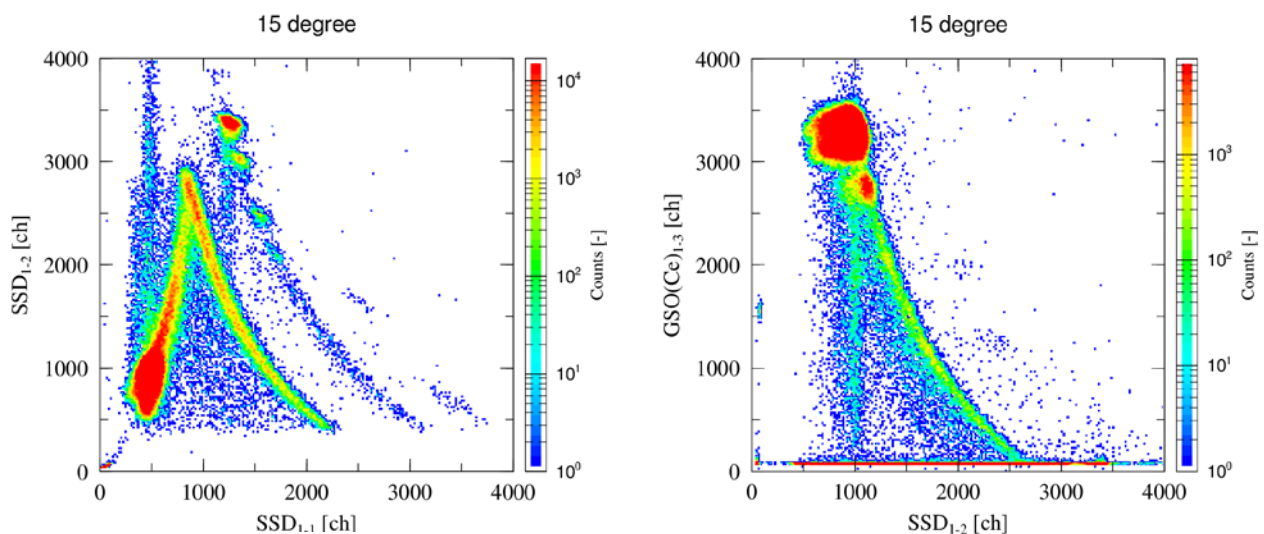


図2 二次元プロットの例 ($^{12}\text{C} + p$)

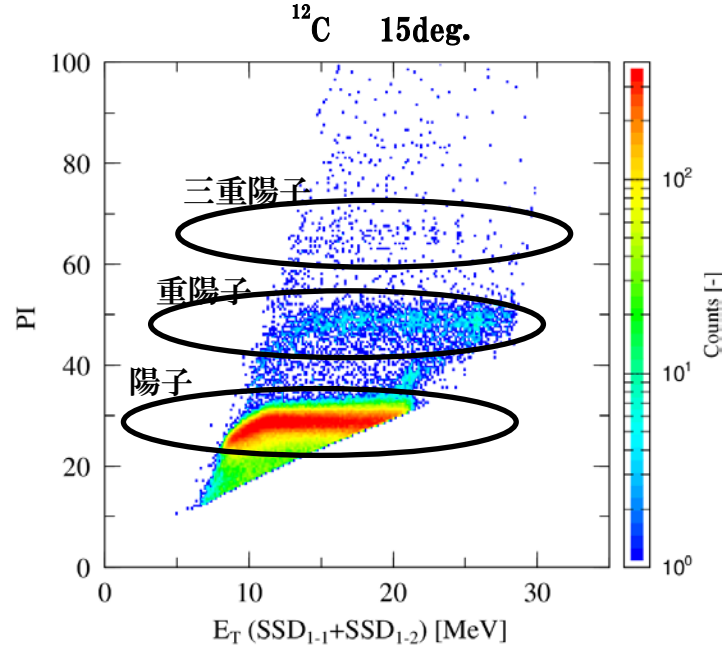


図3 SSD 検出器 2 枚による粒子弁別 PI の例 ($^{12}\text{C} + \text{p}$)。

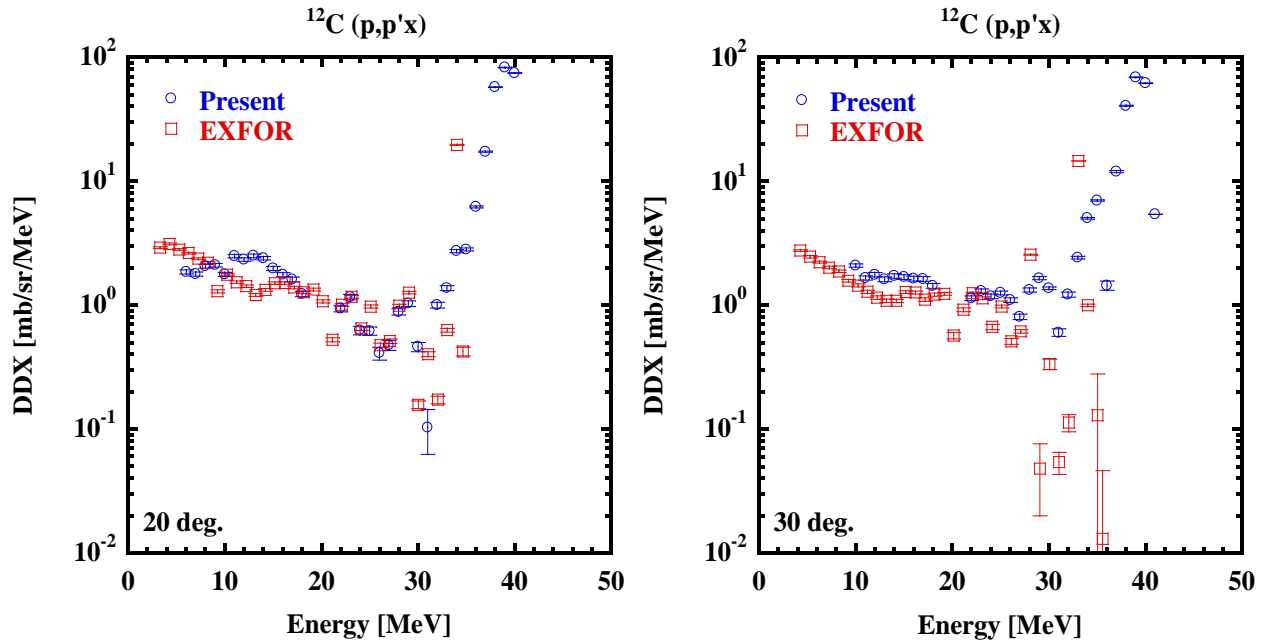


図4 陽子エネルギースペクトル DDX の論文値[1]との比較。

3-3. 二重微分断面積の決定

二重微分断面積は次式より算出した。

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = \frac{Y}{P \rho_s \Delta\Omega \Delta E_{bin} \Phi_{st}} \quad [\text{mb/sr/MeV}]$$

ここで、 Y : エネルギービンあたりの収量 [Counts]、 P : ピーク効率、 ρ_s : 面密度 [n/m]、 ΔE_{bin} : エネルギービン幅 [MeV]、 Φ_{st} : 入射陽子数 [Counts]、 $\Delta\Omega$: 検出器立体角 [sr] である。

4. 結果と考察

図4は ^{12}C ターゲットの 20° における実験データと EXFOR から取得した実験データ(Ref[1])との比較である。Ref[1]は主検出器として GSO(Ce)ではなく Ge(Li)検出器を用いており、本実験よりもエネルギー分解能が良いため、振動励起に伴うピーク構造が見られている。また、弾性散乱ピークは削除してある。しかし、陽子エネルギーが10MeVから30MeVの間では、絶対値とスペクトル形状共に概ね一致している。

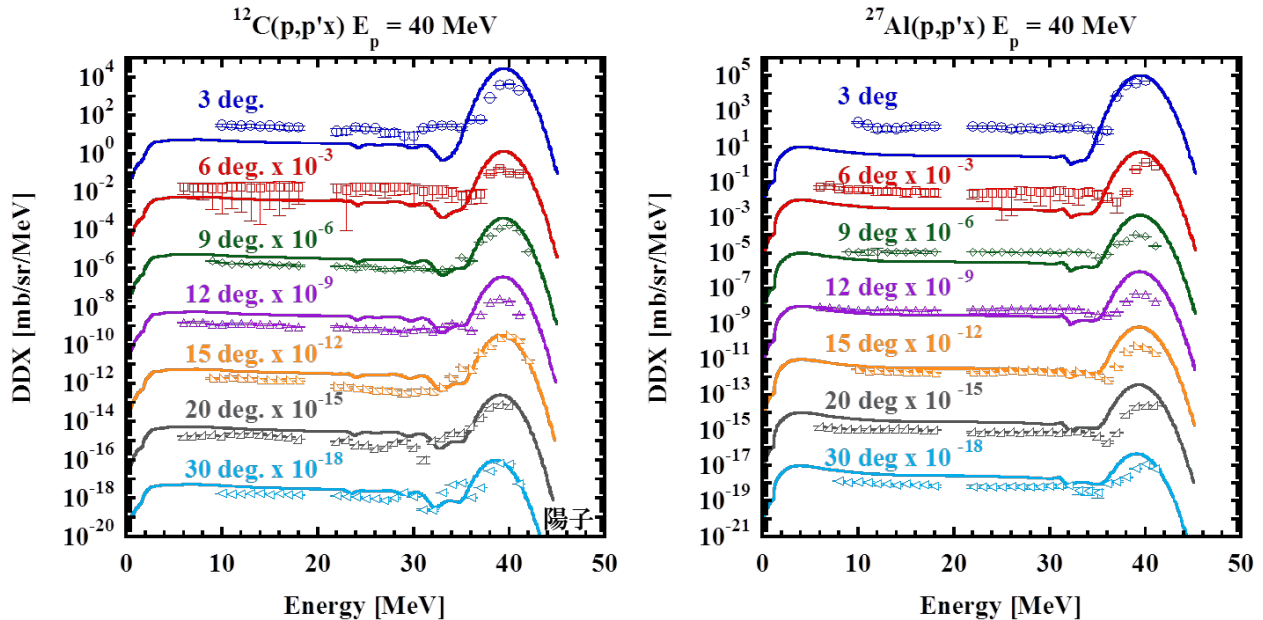


図5 DDX の CCONE[2] との比較の例

図5は ^{12}C (左) と ^{27}Al (右) を標的とした (p,p')反応の DDX の例であり、CCONE による計算結果と比較している。CCONE では弾性散乱断面積は光学模型計算により、高い精度で求められている。 ^{12}C の場合、弾性散乱の結果は CCONE とよく一致している。 ^{27}Al の場合は9度と15度において比較的大きな差が見られる。一方、前平衡過程に起因する連続スペクトル領域は、 ^{12}C と ^{27}Al とともに3度以外では概ね良い一致が見られるが、3度では絶対値に大きな差が見られる。現時点ではこれら差異の原因の特定は出来ていない。再実験によりデータを確定する必要がある。

5. まとめ

散乱角度3度までの最前方において、(p,p')反応の二重微分断面積測定を開始した。標的として ^{12}C と ^{27}Al を用いて、40MeV陽子ビームによる実験を行った。概ね良好な結果と考えられるが、精度を向上させる必要がある。さらに、標的核と入射ビームエネルギーについて幅広い範囲でデータを収集して反応断面積の系統性を明らかにしていく予定である。

参考文献

- [1] F.E. Bertrand et al.: Phys. Rev. C8 (1973) 1045. EXFOR, <http://www.jcprg.org/exfor/source.pl?database=exfor&subentry=C0925002>.
- [2] O. Iwamoto: J. Nucl. Sci. Technol., 44, 5 (2007) 687.

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

遠藤 暁^a、早川陽祐^a、鎌田 創^b、高田真志^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

1. 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8、10、11MeV/核子を用いた試験実験を行っている。本研究年度は 9MeV/核子において実験を行い断面積データを追加する。

2. 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

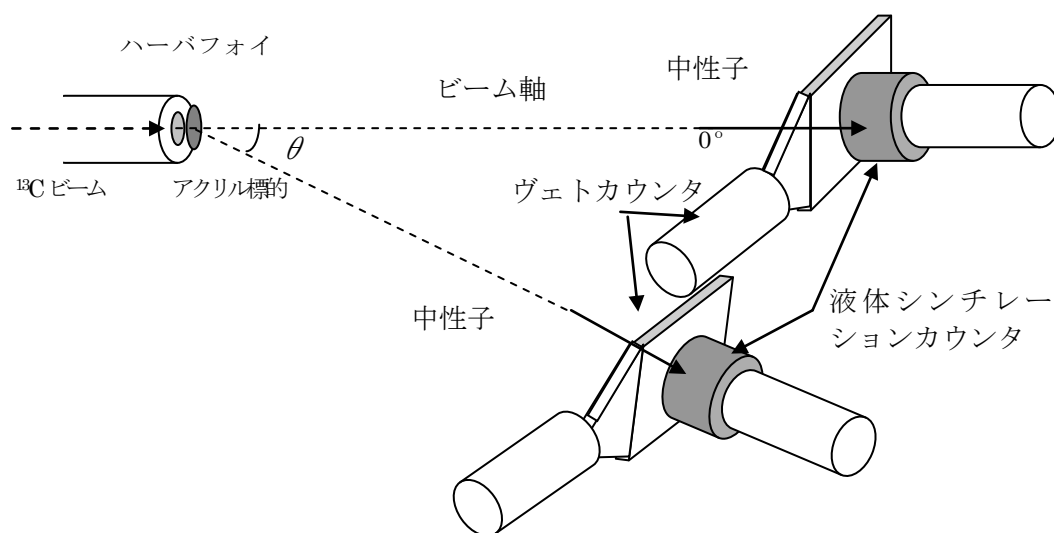


図 1. 測定セットアップ

中性子の評価のため、炭素標的(C)、ポリエチレン(H_4C_2)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。

3. 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。

4. 結果およびまとめ

本年度までに、8,9,10,11MeV/核子のデータがそろった。図 2(a)に 0 度における、各入射エネルギーの 2 階微分断面積及び図 2(b)に 9 MeV/核子の入射エネルギーに対する 0,12,30,60 度の 2 階微分断面積を示す。このスペクトルは、アクリル標的ランの分布より、原子数をそろえ炭素標的ランの分布を差し引いた中性子イールドを決定し、更に SCINFL-QMD を用いて使用した 2 インチ液体シンチレータの測定効率を補正してある。したがって、 $^1\text{H}(^{13}\text{C},n)^{13}\text{N}$ 反応に対応する 2 階微分断面積と考えられる。2 体反応である $^1\text{H}(^{13}\text{C},n)^{13}\text{N}$ 反応を仮定し、運動学から発生中性子エネルギーを図中に矢印で示す。矢印は、中性子断面積が階段状に大きくなる端とおおむね一致しており、厚い標的を用いた場合の 2 体反応生成と矛盾は無い。

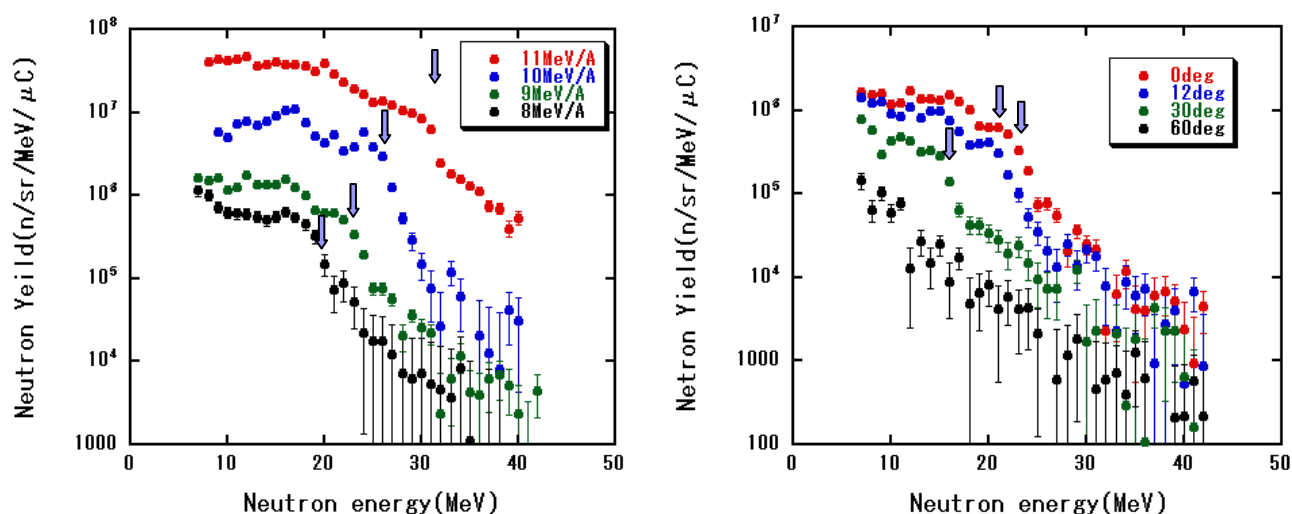


図 2 (a) 8,9,10,11MeV/核子 ^{13}C の 2 体反応生成中性子 0 度での 2 階微分断面積、(b)9MeV/核子 ^{13}C の 0,12,30,60 度における 2 階微分断面積

得られた 2 階微分断面積を中性子エネルギーで積分し、角分布を導出した。8MeV 以下の中性子は、測定にかからないため、このエネルギー以下の領域は、8-10MeV の傾きで外挿で積分を行った。この外挿は、phits で外挿した場合と一定値で外挿した場合と比較したところ 30%程度の誤差を伴っていた。得られた角分布を図 3 に示す。

当面の目的は達成したもの、今後薄い標的を用いて同様の実験を行っていく予定である。

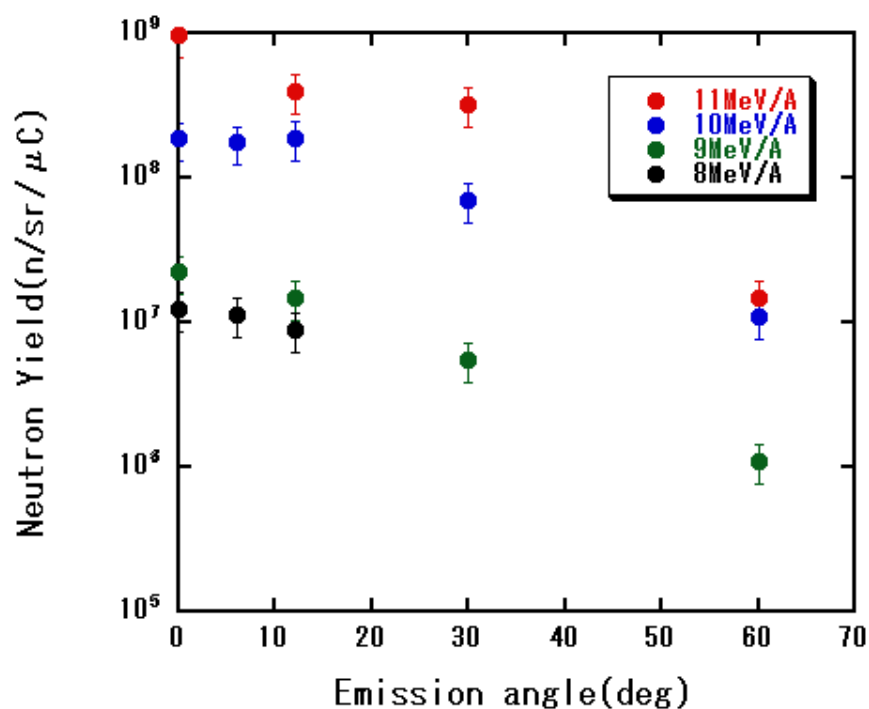


図3 $^1\text{H}(^{13}\text{C},n)^{13}\text{N}$ 反応の微分断面積

謝辞

今回の実験を行なうにあたり、放医研サイクロト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)

放医研サイクロトロンLi (p, n) 中性子場の特性評価

鎌田創¹⁾、高田真志²⁾

1) 緊急被ばく医療研究センター緊急被ばく医療研究プログラム

2) 緊急被ばく医療研究センター 線量評価部

1. 概要

放医研サイクロトロン汎用照射室 C6 コースに、以前高田らが構築した数十 MeV 中性子場がある。中性子場を用いた応用には、生物照射、断面積測定、半導体ソフトエラー照射試験等がある。しかし本中性子場のような原子核反応を利用した加速器中性子源では、必ずガンマ線の発生が随伴する。随伴するガンマ線は、中性子照射においてバックグラウンドとなるため、バックグラウンド差し引きの対策を講ずる必要がある。バックグラウンドの差し引きにはガンマ線バックグラウンドの素性が必要である。今回我々は、バックグラウンドの評価として、中性子発生ターゲットから発生する即発ガンマ線の評価を始めた。

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、80 MeV であった。ターゲットから発生する即発ガンマ線を NaI(Tl)シンチレー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 650 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 1500 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。

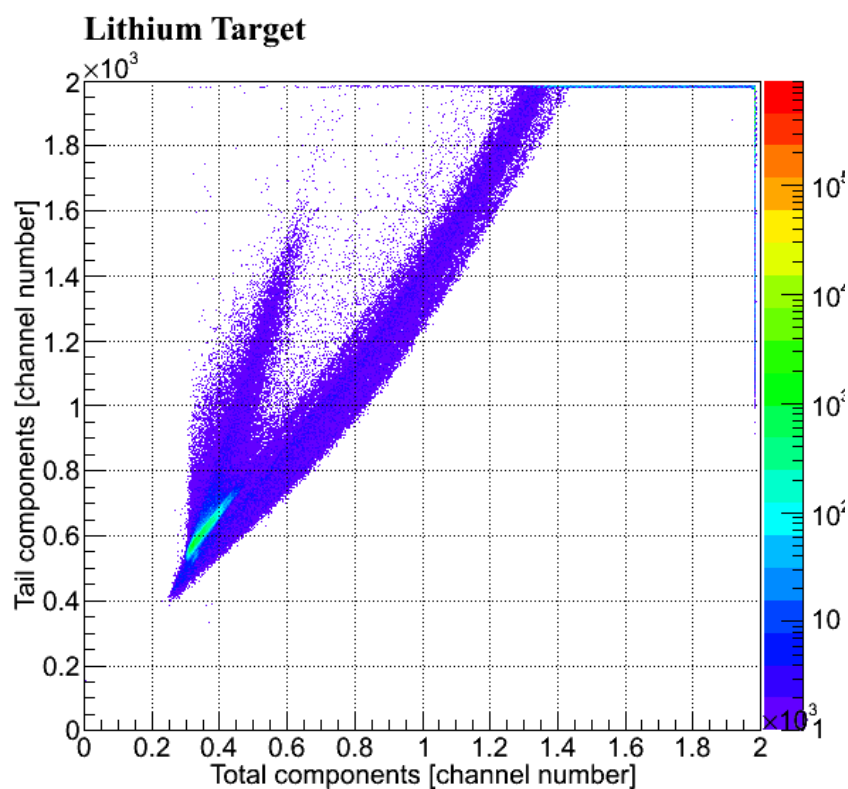


図 1 NaI(Tl)検出器を用いた測定が発光量 2 次元分布

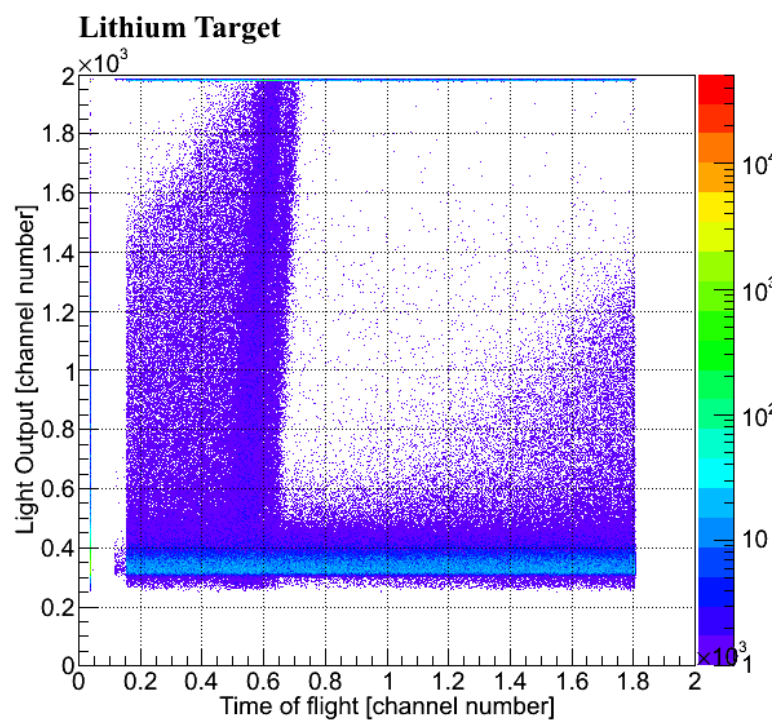


図 2 NaI(Tl)を用いた測定での飛行時間と発光量の 2 次元分布、ターゲットはリチウム

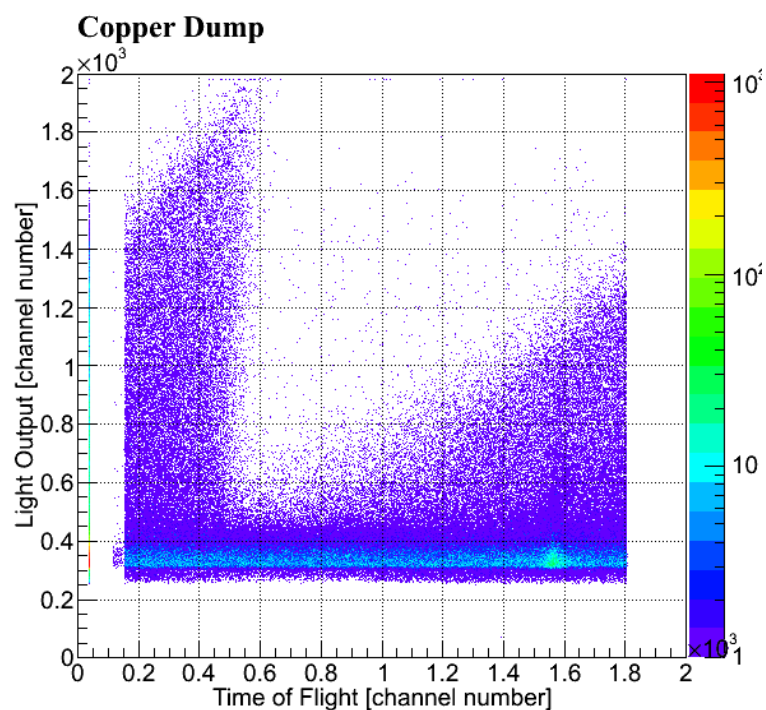


図 3 NaI(Tl)を用いた発光量と飛行時間の 2 次元分布、ターゲットは銅

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 付近分布が広がっていることが分かる。

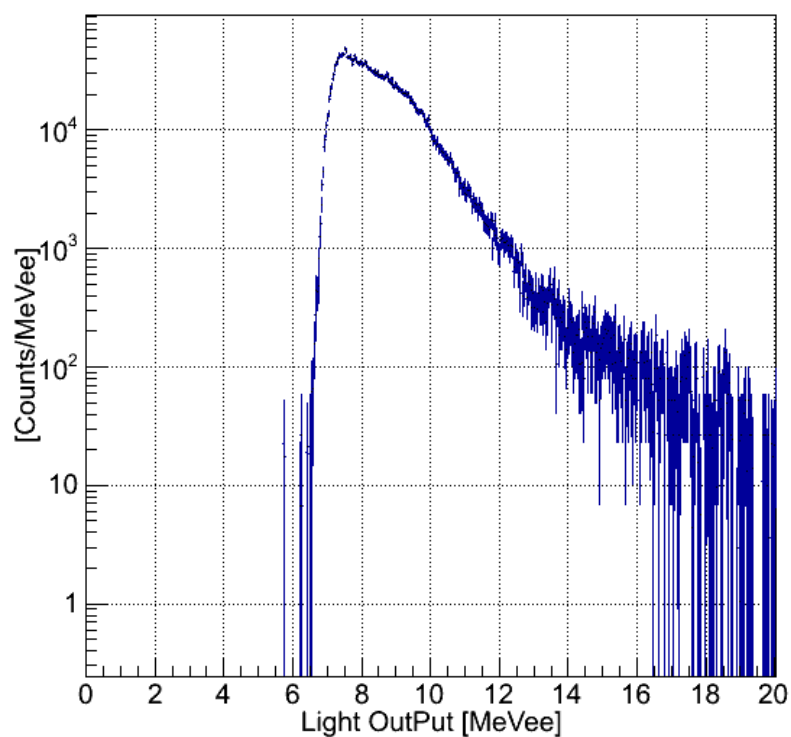


図 4 ガンマ線波高スペクトル

4.まとめ

放医研サイクロترون施設において、陽子 80 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 次粒子線量評価への適用を考えている。また、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ترون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).

LYSO(Ce)シンチレータの陽子、重陽子、 α 粒子に対する発光特性

萩原雅之^a、佐波俊哉^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

数 10 から数 100 MeV の中高エネルギー粒子線は原子核物理等の基礎科学分野のみならず、医学や工学などの多様な分野で応用されている。医学分野での応用の代表的なものは炭素線や陽子線を用いたがん治療であり、高度先進医療制度が適用になったこともあり、今後ますます一般化していくと考えられる。このような応用技術の基礎データとして必要不可欠なものの一つに、中高エネルギー粒子線と標的核(細胞組織等を構成する原子核)との相互作用に関する核データがある。中高エネルギー領域の核反応では、入射粒子によって標的核が破壊される核破砕反応が支配的となり、多くの中性子や p, d, t などの軽イオンとともに核破砕片(フラグメント)が放出され、様々な照射効果を引き起こす。近年、宇宙環境や航空機で問題となっている半導体機器の誤動作(ソフトウェア)現象はフラグメント誘起の照射効果の代表例である。一方、核破砕反応における反応機構は現在でも完全には解明されておらず、全ての放出粒子に対し包括的に記述できる理論計算モデルはまだ実現していない。そのため理論計算では実験データを基にパラメータを取得しモデル化を行っているが、フラグメント生成に関しては実験データも少ないため、その予測精度も非常に低いのが現状である。中高エネルギー粒子を用いる応用技術の精度向上のためには、核破砕反応における核データ・理論計算の精度向上が必要不可欠である。

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、これまでにフラグメント測定に対してブラッグカーブカウンター(BCC)の開発を行い、数 10 から数 100 MeV の陽子・中性子入射に伴うフラグメント(Li~F)の測定に成功している。中性子入射反応に対しては世界で始めての結果である。[1,2,3,4,5] 本研究では、BCC では測定が困難であった軽イオン(p, d, t, α)を測定するために新たにシリコン半導体検出器(SSD)と無機シンチレータ(LYSO(Ce))から構成される ΔE -E テレスコープ検出器の開発を行った。

本報告では、平成 23 年度に放射線医学総合研究所や日本原子力研究開発機構高崎研究所の AVF サイクロトロンを用いて行った LYSO(Ce)シンチレータの発光特性試験の概要と結果について述べる。

1. 検出器概要

表 1 に高エネルギー原子核実験で用いられる無機シンチレータの基本的な特性を比較したものを示す。本研究では、 ΔE -E テレスコープ検出器の E 検出器として、短い減衰時間、比較的高い発光量、高阻止能の特徴を持つ LYSO(Ce)シンチレータ(2 cm³)を選択した。また、アバランシェフォトダイオード: APD (Hamamatsu : S8664-1010)を用いて信号読出しを行うことによって、検出器群をコンパクトにかつ真空中に設置できるようにした。これによって、検出器群を真空チェンバー内に設置でき、比較的高い立体角で低エネルギー粒子まで測定することができる。

シンチレータを E 検出器として利用する場合、シンチレータへの付与エネルギーと発光量の関係が重要となるが、付与エネルギーと発光量の関係は一般的に非線形であり、測定粒子により異なる事が知られている。シンチレータの付与エネルギーと発光量の関係を表すものとして、クエンチングによる非線形性の効果を考慮し、単位距離当たりの発光量(dL/dx)を単位距離当たりの付与エネルギー(dE/dx)によって表す Birks の式 (1) が良く用いられる。[6]

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \left(\frac{dE}{dx} \right)}{1 + kB \left(\frac{dE}{dx} \right)} \quad (1)$$

ここで、 S は絶対シンチレーション効率、 kB は Birks パラメータである。式 (1) は、有機・無機に関わらずシンチレータの発光応答曲線を良く再現することが知られている。

本実験では単位距離当たりの発光量ではなく、付与エネルギーに対する全発光量 $L(E)$ の測定を行った。付与エネルギーに対する全発光量 $L(E)$ の関係式は式 (1) を用いると式 (2) のように表せる。

$$L(E) = \int_0^E \frac{dE}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (2)$$

一方、式 (2) は式 (3) でフィッティングできる事が報告されている。[7]

$$L(E) = a \left(\frac{E^\alpha}{A^\beta Z^\gamma} \right) + b \quad (3)$$

本研究では、式 (3) を用いて 10-100MeV 領域における様々な粒子 (p, d, t, ^3He , α) に対する LYSO(Ce) シンチレータの発光特性を調べた。

表 1 高エネルギー原子核実験で用いられる無機シンチレータの基本的な特性

Scintillator	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BaF ₂	BGO	GSO(Ce)	LYSO(Ce)	PWO
Composition	NaI:Tl	CsI:Tl	BaF ₂	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	Gd ₂ SiO ₅ :Ce	Lu _{1.8} Y _{0.2} SiO ₅ :Ce	PbWO ₄
Effective Z	51	54	52	74	59	66	73
Density [g/cm ³]	3.67	4.51	4.89	7.13	6.71	7.1	8.2
Decay Time [ns] fast/slow	230	1000	0.6/620	300	60/600	45	~3/<40
Light Output (Relative) fast/slow	100	145	5/16	7	2/18	40	0.26/0.04
Emission Wave Length fast/slow	415	540	220/310	505	430	420	430
Radioactivity	no	no	no	no	no	yes	no
Radiation Resistivity [rad]	10 ³	10 ⁶⁻⁷	10 ³⁻⁴	10 ⁵⁻⁷	10 ⁹	> 10 ⁶	10 ⁷⁻⁸

2. 照射試験概要

実験は放射線医学総合研究所の AVF サイクロトロン(NIRS-930)或いは日本原子力研究開発機構高崎研究所の AVF サイクロトロンを用いて行った。放射線医学総合研究所での実験では、陽子 (40, 80 MeV)、重陽子 (50 MeV)、ヘリウム (100 MeV) の単色ビームを C6 コース終端に配置した小型真空チャンバー内の LYSO(Ce)シンチレータに直接入射させ、その発光量を測定した。付与エネルギーと発光量の関係を導出するため、LYSO(Ce)シンチレータ上流にサンプルチェンジャーを配置し、入射ビームを様々な厚みのアルミニウム板に通すことでシンチレータへの付与エネルギーを変化させた。アルミニウム板によるエネルギーロス は SRIM コード[8]によって評価した。実験で用いた粒子、エネルギーとアルミニウム板の厚さを表 2 に示す。

表 2 実験で用いた粒子、エネルギーとアルミニウム板の厚さ

Proton [40 MeV]		Proton [80 MeV]		Deuteron [50 MeV]		Helium [100 MeV]	
Al degrader thickness [mm]	E [MeV]	Al degrader thickness [mm]	E [MeV]	Al degrader thickness [mm]	E [MeV]	Al degrader thickness [mm]	E [MeV]
0	40.0	0	80.0	0	50.0	0	100.0
1	36.8	2	76.2	1	45.3	0.5	90.7
2	33.4	5	70.4	2	40.3	1	80.6
3	29.6	8	64.2	3	34.6	1.5	69.3
4	25.4	10	59.8	4	28.1	2	56.4
5	20.6	12	55.1	5	20.2	2.5	40.5
6	14.7	14	50.1	5.5	15.1	3	16.7

日本原子力研究開発機構高崎研究所での実験では、260 MeV の Ne イオンを厚さ 1 μm の鉄ターゲットに入射させ、30° 方向に放出した二次粒子を用いた。シンチレータに入射する二次粒子の粒子種・エネルギーを同定するため、シンチレータの上流に有効径 19.5 mm の 3 枚の透過型シリコン半導体検出器:SSD(それぞれ 31 μm 厚、250 μm 厚、1012 μm 厚)を配置した。図 1 に得られた SSD の波高対 LYSO(Ce) の波高の 2 次元分布を示す。陽子、重陽子、三重陽子、ヘリウム-3、ヘリウム-4 によるイベントの縞が明瞭に分かれており、高いエネルギー分解能で測定できていることが分かる。それぞれの粒子に対してシンチレータに入射したエネルギー (E) を 3 段目の SSD (1012 μm 厚) の付与エネルギー (ΔE) から導出した。 ΔE と E の関係は SRIM コードを用いて評価した。

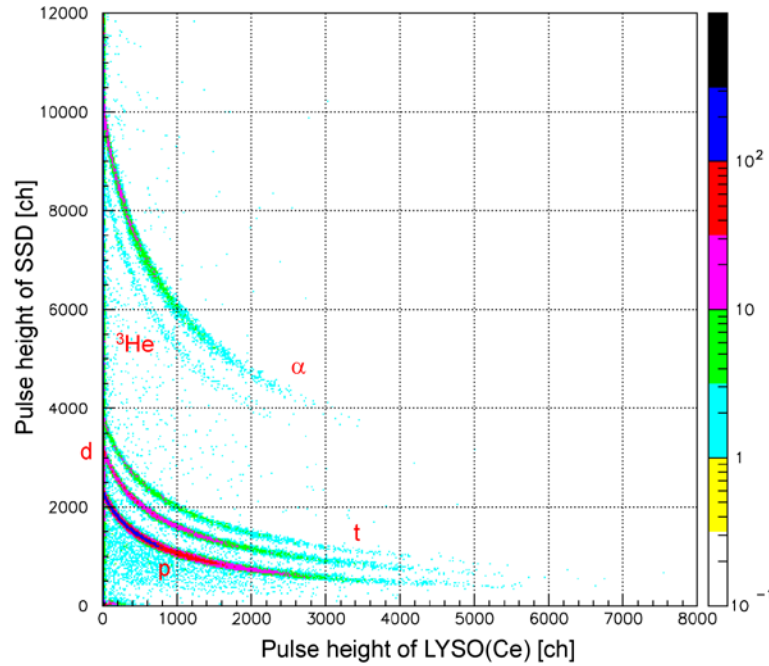


図 1 260 MeV の Ne イオンを鉄ターゲットに入射させ、30° 方向に放出した二次粒子に対して得られた SSD(1012 μm 厚)対 LYSO(Ce)シンチレータ(2 cm 厚)の 2 次元波高分布。陽子、重陽子、三重陽子、ヘリウム-3、ヘリウム-4 によるイベントの縞が明瞭に分かれている。

3. 照射試験結果

図 2 に 260 MeV のネオンビームを鉄ターゲットに入射させた際に生成する二次粒子をから導出した LYSO(Ce)シンチレータの付与エネルギーと発光量の関係を示す。陽子、重陽子、三重陽子、ヘリウム-3、ヘリウムについて測定することができた。得られた実測値を (3) 式を用いてフィッティングを行った。その結果、 β 、 γ についてそれぞれ 0.61、1.65 とすると、下記のような関係式を得た。

$$L(E) = a \left(\frac{E^\alpha}{A^{0.61} Z^{1.65}} \right) + b \quad (4)$$

ここで

$$\alpha = \begin{cases} 1.275 & (p) \\ 1.341 & (d) \\ 1.369 & (t) \\ 1.491 & (^3\text{He}) \\ 1.499 & (\alpha) \end{cases}$$

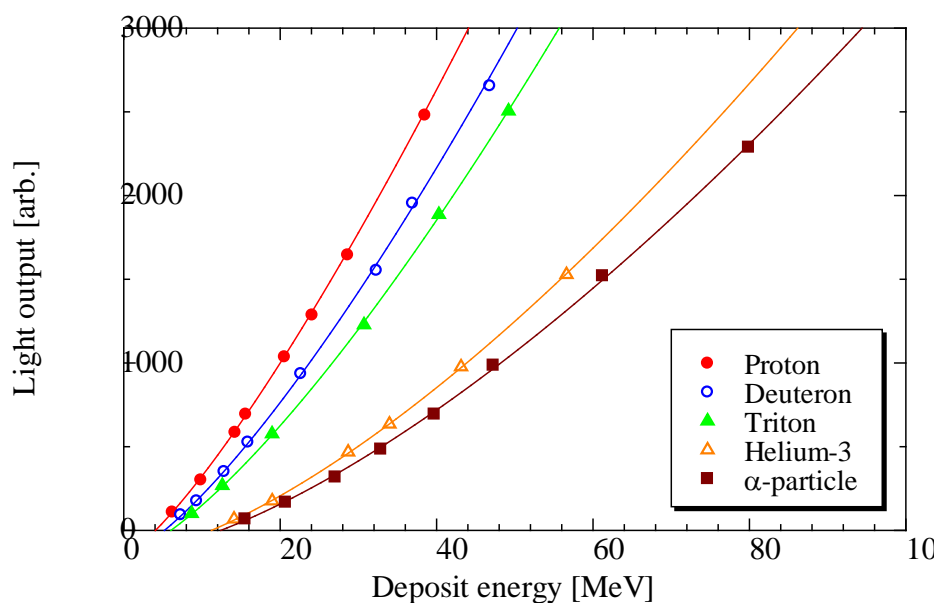


図 2 260 MeV のネオンビームを鉄ターゲットに入射させた際に生成する二次粒子をから導出した LYSO(Ce)シンチレータの付与エネルギーと発光量の関係。シンボルが実測値で、実線は(4)式によるフィッティング。

図 3、4、5 に単色エネルギーの陽子、重陽子、ヘリウムを用いて得られた LYSO(Ce)シンチレータの付与エネルギーと発光量の関係を示す。シンボルで表されている実測値はピーク波高値であり、その半値幅をエラーバーで示した。また (4) 式によるフィッティング結果を実線で示している。図 3、4、5 いずれにおいても (4) 式は実測値を再現している。

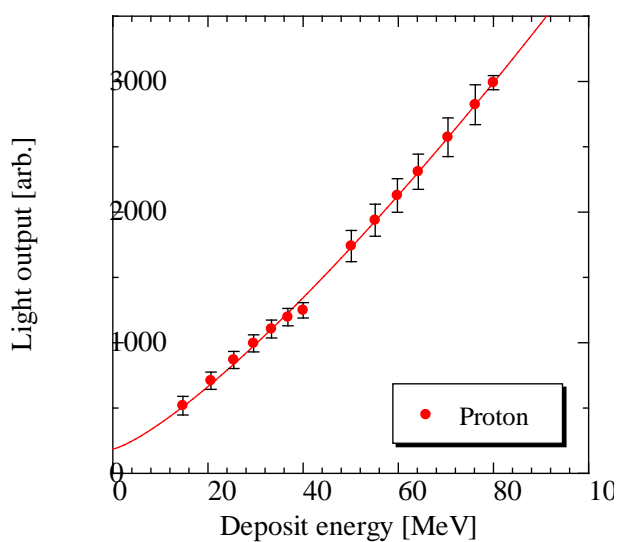


図 3. 単色の陽子ビームの直接入射によって得られた LYSO(Ce)シンチレータの付与エネルギーと発光量の関係。シンボルが実測値で、実線は(4)式によるフィッティング。

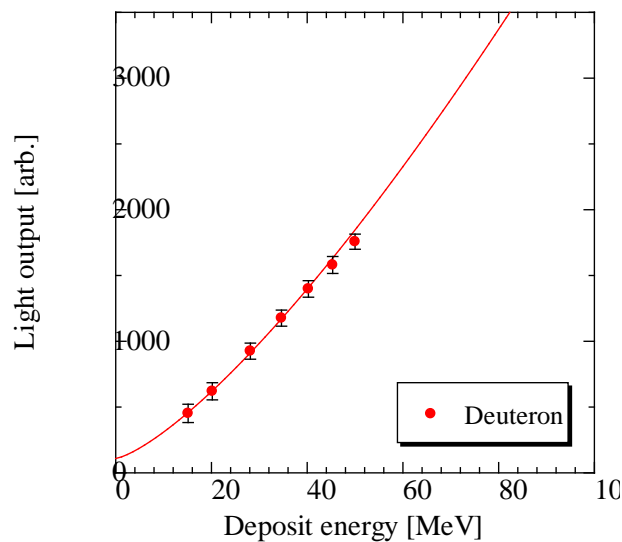


図 4. 単色の重陽子ビームの直接入射によって得られた LYSO(Ce)シンチレータの付与エネルギーと発光量の関係。シンボルが実測値で、実線は(4)式によるフィッティング。

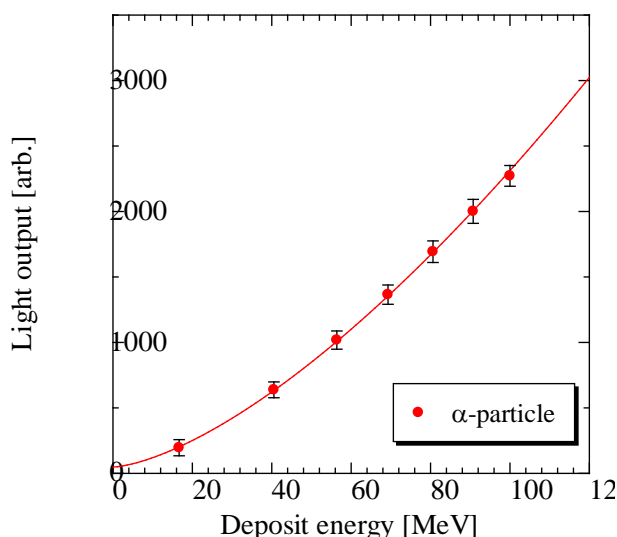


図 5. 単色のヘリウムビームの直接入射によって得られた LYSO(Ce)シンチレータの付与エネルギーと発光量の関係。シンボルが実測値で、実線は(4)式によるフィッティング。

4. まとめ

数 10 から数 100 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 SSD と LYSO(Ce) シンチレータからなる ΔE -E テレスコープ検出器を作成し、放射線医学総合研究所サイクロトロンにおいて、100 MeV 以下の陽子、重陽子、ヘリウム入射に対する LYSO(Ce)シンチレータの発光量の測定を行った。日本原子力研究開発機構高崎研究所において行った二次粒子を用いた実験結果から得られた関係式と比較し、測定データの妥当性と整合性が確認できた。今後、得られた関係式を用いて軽イオン生成に対してもデータ取得を進め、重フラグメントから軽イオンまで包括的な核破砕反応二重微分断面積を得る。また、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, T. Oishi, M. Hosokawa, S. Kamada, Su. Tanaka, Y. Iwamoto, H. Nakashima, M. Baba, *Nucl. Instrum. Meth. A* Vol 610 pp 660-668 (2009)
- [5] 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, *Journal of Korean Physics Society* 59 (2011) 1805-1808
- [6] Y. Uwamino, K. Shin, M. Fujii, and T. Nakamura, "Light output and response function of an NE-213 scintillator to neutrons up to 100 MeV," *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. 204 pp 179-189 (1982).
- [7] G. Lanzanó, A. Pagano, S. Urso, E. De Filippo, B. Berthier, J. L. Charvet, R. Dayras, R. Legrain, R. Lucas, C. Mazur, E. Pollacco, J. E. Sauvestre, C. Volant, C. Beck, B. Djerroud, and B. Heusch, "Using BaF₂ crystals as detectors of light charged particles at intermediate energies," *Nucl. Instrum. Meth. A* Vol. 312 pp 515-520 (1992).
- [8] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, The stopping and range of ions in solids New York: Pergamon, 1985.

5. 粒子線検出器の開発

5－1. 小型ホスウィッチ検出器とレンジカウンタの陽子応答測定

5－2. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

小型ホスウィッチ検出器とレンジカウンタの陽子応答測定

古場 裕介^A、金山 沙緒理^B、松藤 成弘^A、野元 大輔^C、坂本 晴香^D、
丸橋 健太^B、脇田 明尚^E、山本 治^F、高田 真志^G、鎌田 創^G

^A：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター

^B：千葉大学大学院理学研究科

^C：横浜市立大学大学院医学研究科

^D：東京工業大学大学院総合理工学研究科

^E：国立がん研究センター中央病院

^F：東邦大学理学部物理学科

^G：放射線医学総合研究所緊急被ばく医療センター

概要

重粒子線の線質測定のための新たな検出器として、小型ホスウィッチ検出器と高感度カメラを用いたレンジカウンタの開発を行った。重粒子フラグメントの測定において非常に重要となる陽子に対して、試作した2つの検出器の応答を得るため、陽子 80 MeV を利用した実験を行った。小型ホスウィッチ検出器を使用した実験では、2種のシンチレータからの波形弁別を行うことにより陽子とガンマ線の弁別が可能であることが分かった。レンジカウンタを使用した実験では CsI シンチレータ中の陽子飛跡を撮影することができた。本実験により陽子を含むフラグメント線質測定に利用するためには両検出器ともに改良の必要性があることが分かった。

1. 目的

重粒子線治療において線量の評価は生物学的効果を考慮した生物線量に基づいて行われる。生物学的効果はその線質において大きく異なることから、重粒子線の線質を詳細に調べることは重粒子線治療において非常に重要となる。重粒子線治療では数百 MeV/u のエネルギー領域の炭素ビームを用いることから、飛程内で核破砕反応が起こり、多くのフラグメントが生じる。重粒子治療におけるフラグメントの中でも陽子は、非常に生成量が多く、その飛程も長いので重粒子線の線質を調べるうえで重要な粒子の一つである。

我々は重粒子線の線質測定のための新たな検出器として、小型ホスウィッチ検出器と高感度カメラを用いたレンジカウンタの開発を行っている。これらの検出器はフラグメントを含む混合場における使用を目的としているが、各粒子の応答を事前に調べておく必要がある。本実験の目的は試作した小型ホスウィッチ検出器とレンジカウンタの測定試験とそれらの陽子に対する応答を得ることである。

2. 実験方法

小型ホスウィッチ検出器の使用した実験では、図1のような径 2 mm のホスウィッチ検出器の試作版を用いた。本検出器は波形の外径 2 mm、内径 0.5 mm の CaF₂ シンチレータに液体シンチレータを充填して作成した。各シンチレータの発光を一つの光電子増倍管で検出し、各パルス波形に対して Gate 幅を変えた波形取り込みを行うことにより各シンチレータの発光の弁別を行った[1]。本実験では NIM、CAMAC と PC を用いたデータ収集と高速デジタイザーによる直接波形取り込みの2種類のデータ収集システムを使用した。図2のように厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータを本検出器の上流に配置し、それらのコインシデンス信号をトリガーとして測定を行った。

レンジカウンタを使用した実験では、図3のような測定体系を使用した。上流から厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータ2枚、43 mm 角 CsI シンチレータの順で設置した。2枚のプラスチックシンチレータの同期信号により撮影トリガーを生成した。粒子飛跡を撮影するために高感度 I.I+CCD カメラを暗箱内に設置した。画像データ保存等で生じる Dead Time が大きいことから測定効率が非常に小さくなる。本実験での測定効率は約 20 イベント/秒であった。よって統計量を貯めるため、レンジカウンタを用いた測定にマシンタイムの大半を利用した。両実験ともに 80 MeV のエネルギーの陽子を使用し、

ビーム強度を数線 cps まで低下させて実験を行った。

3. 実験結果

小型ホスウィッチ検出器を利用した測定結果を図 4 に示す。図 4 より波形弁別を行うことにより陽子のイベントとガンマ線イベントの弁別されていることが示された。しかしながら、陽子のイベントのうち外径の CaF_2 シンチレータ部のみを通過したイベントの割合が非常に多く、また中心の液体シンチレータ部が小さいため付与エネルギーが小さく、良いイベント弁別能が得られなかった。本実験結果を受けて検出器形状を変えたものを製作していく予定である。

レンジカウンタによる CsI シンチレータ中の陽子の飛跡を撮影した画像を図 5 に示す。陽子の飛跡画像に対して画像解析を行い、その陽子の停止位置の算出を行った。図 6 に CsI シンチレータ中の陽子の停止位置のヒストグラムを示す。光の散乱、中性子の影響等により画像解析処理の際に飛跡を正しく解析できないイベントがあり、裾野で広がりが生じている。本実験体で得られた陽子の停止位置の分解能は 2.8 mm であった。本レンジカウンタを用いて炭素の飛跡測定を測定した場合、図 7 のような鮮明な飛跡画像が得られており、CsI シンチレータより発光量が小さいプラスチックシンチレータ中の炭素飛跡の撮影も可能であった。本実験内にてプラスチックシンチレータ中の陽子飛跡の撮影を試みたが飛跡の撮影を行うことができなかった。陽子飛跡中の発光量は阻止能比の関係から他の重粒子に比べて発光量が小さくなるため[2]、さらに鮮明に陽子の飛跡を得るために CCD カメラの感度の向上が必要である。

4. まとめ

重粒子フラグメントの測定において非常に重要となる陽子に対して、試作した 2 つの検出器の応答を得るため、陽子 80 MeV を利用した実験を行った。小型ホスウィッチ検出器を使用した実験では、2 種のシンチレータからの波形弁別を行うことにより陽子とガンマ線の弁別が可能であることが分かった。しかし、より良いイベント弁別能を得るためには検出器形状の再検討が必要であることが分かった。レンジカウンタを使用した実験では CsI シンチレータ中の陽子飛跡を撮影することができた。重粒子治療におけるフラグメントの評価では、水中を模擬したプラスチックシンチレータ中での飛跡を撮影することが望ましいが、プラスチックシンチレータ中での陽子飛跡を撮影するためには CCD カメラの感度上昇が必要であることが分かった。本実験により陽子を含むフラグメント線質測定に利用するためには両検出器ともに改良の必要性があることが分かった。

参考文献

- [1] M. Takada et al., Neutron, photon and proton energy spectra at high altitude measured using a phoswich-type neutron detector, Radiation measurement 45 (2010) 1297.
- [2] Y. Koba et al., Scintillation Efficiency of Inorganic Scintillators for Intermediate-Energy Charged Particles, PROGRESS IN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol. 1 (2011) 218.

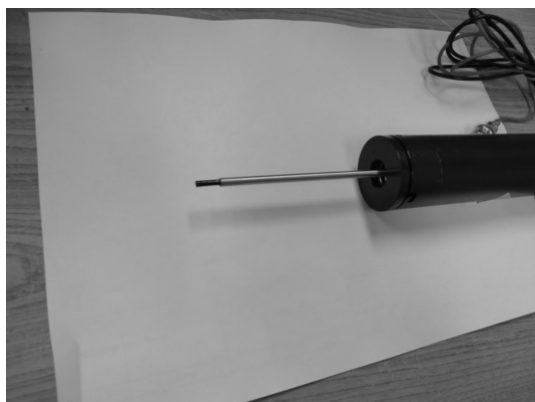


図 1. 試作した小型ホスウィッチ検出器

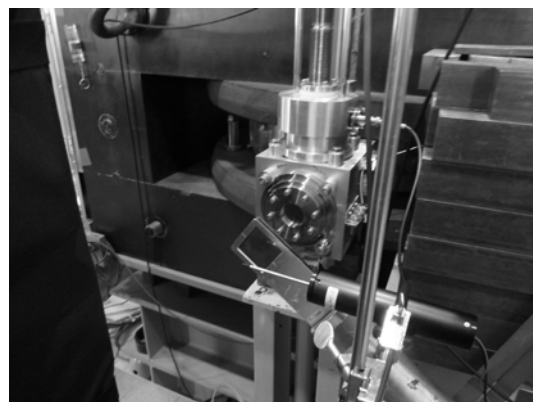


図 2. 小型ホスウィッチ検出器の測定体系

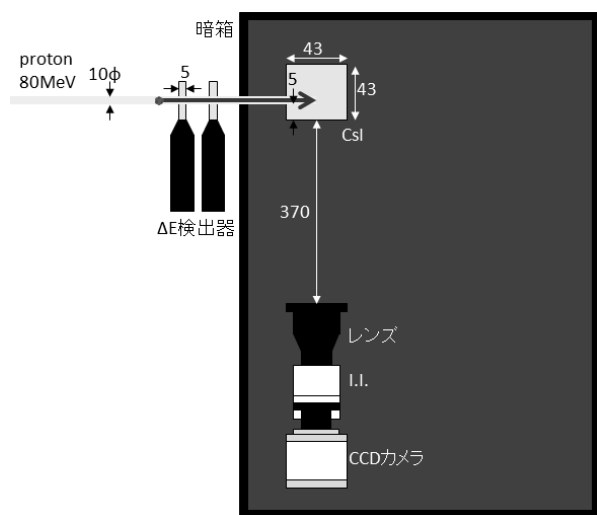


図 3. レンジカウンタの実験体系

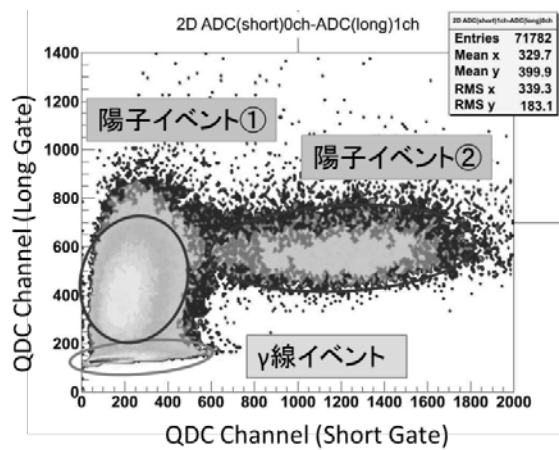


図 4. ホスウィッチ検出器から得られた信号の波形弁別プロット

陽子イベント①：CaF₂部のみを通ったイベント、②液体シンチレータ部を通ったイベント

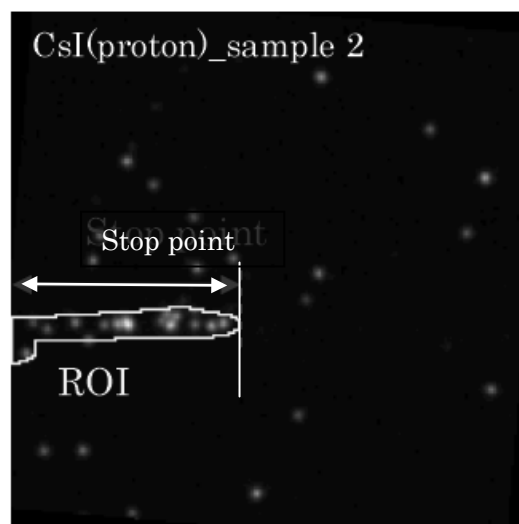
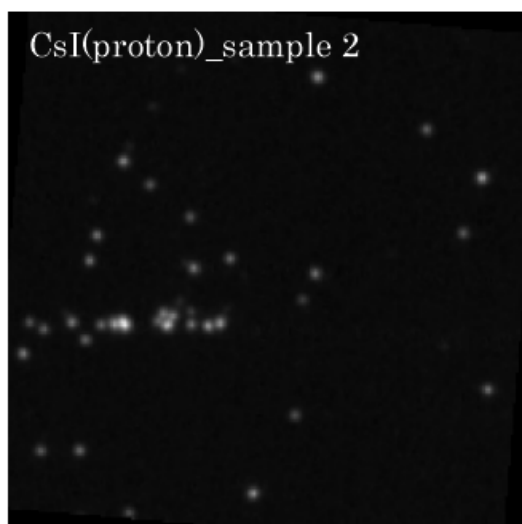


図 5. (左) レンジカウンタにより撮影した CsI シンチレータ中の陽子飛跡画像
(右) 陽子飛跡解析による停止位置の検出例

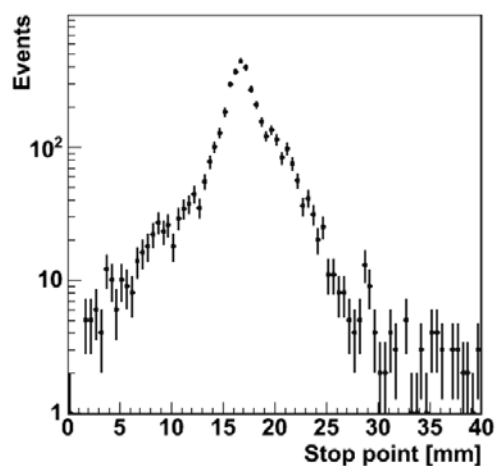


図 6. CsI シンチレータ中の陽子停止位置のヒストグラム

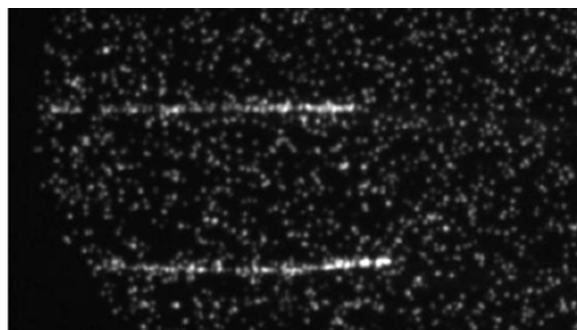


図 7. CsI シンチレータ中の炭素飛跡画像

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, b}、Iva Ambrozova^b
他 ICCHIBAN Collaborators

^a 放射線医学総合研究所、^b 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、各国宇宙関連機関が所有する宇宙放射線線量計の相互比較および校正実験プロジェクトを進めている。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。本プロジェクトでは校正場の作成もまた重要なテーマで、今年度については、サイクロトロンの C-8 コースにおいて、陽子線 80 MeV と α 線 100 MeV の約 7cm 直径の円状の平坦な照射場の作成を行った。これによって、0.9 keV/ μ m から 9 keV/ μ m の範囲の LET での照射が可能となった。

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

その様な要求から、放医研大型サイクロトロンの C-8 コースに注目し、平成 21 年度から低 LET 領域の標準照射場として構築を開始した。平成 22 年度までに照射線量の制御系の開発¹、また、30, 40, 70 MeV の陽子線（順に LET が 2, 1.5, 1 keV/ μ m）について広範囲の平坦照射野の作成を行った²。平成 23 年 2 月、これらの陽子線ビームを用いた比較校正実験(Proton-ICCHIBAN)を行なった³。

平成 23 年度には、利用できるビームの LET の範囲を広げる目的で、大型サイクロトロンでの陽子線の最高エネルギーである 80 MeV ビームと同じく α 線の最高エネルギーである 100 MeV ビームについて、C-8 コースでの広領域照射場の作成を行った。本稿では、新しく作成した 2 つのビーム種の照射場の特性について報告する。

広領域照射場の作成

大型サイクロトロン C-8 コースはビームの横方向広がりを一様にするために、薄い金属膜（0.1mm 厚のアルミ箔）からなる散乱体でビームの角度分布をガウス型に広げ、さらにビーム方向を円状に回転させるワブラー磁石を使用することで、円形に一樣なビーム強度を持つ照射場を作成している。そのため、この照射場の強度の分布は、散乱体によるガウス型のビーム広がりをワブラー磁石によって動かすビーム中心のパスにそって積分することでモデル化ができ、特にパスが円形の場合にはベッセル級数によって表すことが可能である。ここから、ビームの横方向の強度分布の測定値をこのような関数に fitting することでガウス分布の幅とビーム中心の値を求め、その関係式から最適なパスの直径、さらに、そのパスの大きさの元となるワブラー磁石の強度を求めた。ビームの横方向の強度に関しては、1cm 角のシンチレータを、十字型に 13 個配置したプロファイルモニターを、さらに、自動ステージ上に乗せ、スキャンして測定した。これらの方法に関しては文献⁴を参考にさせていただきたい。

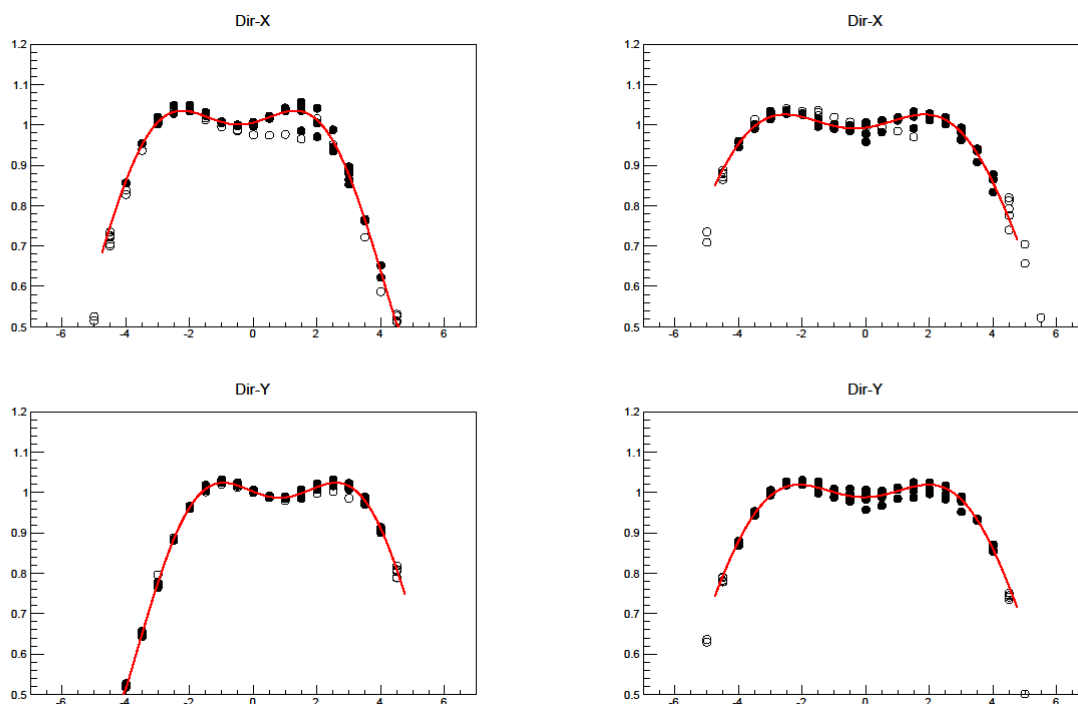


図 1 ワブラーを最適化した際のビームの横方向強度のプロファイルの測定。左が陽子 80MeV、右が α 線 100 MeV で、上のグラフが水平方向、下が垂直方向を表している。横軸の単位は cm、縦軸はビームの幾何学的中心からの相対強度を表している。

図 1 は、陽子 80 MeV、 α 線 100 MeV の各ビームで最適化を行なった際の横方向のビームプロファイルを示している。この際のビームの主要なパラメータをまとめたものが、表 1 である。陽子 80 MeV では、「強度 5% 以内の直径」が約 6 cm で、他のビームが 7 cm 以上であるのに対して小さくなっている。これを、他のビームと同様のサイズとするには、ビームの広がり が 2.4 cm 程度必要であり、そのためには 0.12 mm 程度の厚さのアルミ板が必要となる。陽子線 80 MeV ビームに関しては、留意が必要である。 α 線 100 MeV ビームに関しては十分な広がりを得ることが出来るが、核子あたりのエネルギーが 25 MeV であり、ワブラー磁石以降でビームを広げているところでエネルギーの減衰やエネルギーの広がりの測定が必要であり、今後の課題である。

表 1 最適化した際のパラメータ

	散乱体の使用	ビーム広がり (cm)	軌道半径 (cm)	強度 5% 以内の直径 (cm)	水平ワブラーモニター値 (V)	垂直ワブラーモニター値 (V)
陽子 80 MeV	あり	2.2	3.2	6.0	1.22	1.37
α 線 100 MeV	なし	2.6	4.0	7.2	1.65	1.8

線量計への照射

ビーム作成の最適化終了後、放医研、JAXA、IBMP(ロシア)、NPI(チェコ)、Aristotle Univ. of Thessaloniki (ギリシャ) の各研究機関で使用している受動型線量計に対して照射実験を行なった。照射実験のサンプルは各研究機関において解析中で、今後、照射場の性能評価に際して重要なデータとなるであろう。

まとめ

今回新たに、80 MeV 陽子線と 100 MeV α 線ビームの最適化が行なわれたことで、大型サイクロトロン C-8 コースで利用できるビームの LET は、0.9 keV/ μ m から 9 keV/ μ m と、1 桁の範囲で照射実験が可能になった。これまでのところ、ビームの横方向の広がりについては測定が進んでいるが、エネルギー

ギーの絶対量や広がりについての情報が計算によるものに頼っており、特に、核子あたりのエネルギーが低いビームについては、今後、ビームのエネルギー測定が必要であろう。

C-8 の照射場は、線量計の校正だけではなく、素材やデバイスの耐放射線評価、細胞・マウスへの照射実験など多くのユーザーに使用されるようになっており、平成 22 年度には 17 回のマシンタイムで使われた。今後、多くの成果が得られることが期待される。

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。

参考文献

- ¹ 北村尚, 内堀幸夫, 小平聡, Ondrej Ploc, 金澤光隆, 杉浦彰則, 鈴木直方, 北條悟, 岡田高典, 小松克好, 神谷隆, 平成 21 年度サイクロトン利用報告書 46-49 (2010).
- ² 北村尚, 内堀幸夫, 小平聡, Ondrej Ploc, 平成 22 年度サイクロトン利用報告書 69-74 (2011).
- ³ 内堀幸夫, 安田仲宏, 北村尚, 小平聡, Ondrej Ploc, Iva Ambrocova, 平成 22 年度サイクロトン利用報告書 43-45 (2011).
- ⁴ 北村尚, 内堀幸夫, 放射線医学総合研究所技術報告書 5, 20-27 (2010).

6. 粒子線による損傷試験

6－1. 次世代型重粒子線がん治療装置用超電導加速器の基盤技術研究

6－2. 光学機器の耐放射線性能に関する研究

次世代型重粒子線がん治療装置用超電導加速器の基盤技術研究

石山敦士^A、宮原信幸^B、柄澤彰良^A、矢崎真二郎^A、琴寄拓哉^A、狩野開^A、道辻健太^A

^A：早稲田大学 先進理工学研究科 電気・情報生命専攻

^B：放射線医学総合研究所

概要

近年、高温超電導線材(HTS: High Temperature Superconductor)の高性能化とその応用技術が発展を続けている。それらは、将来的には核融合や加速器への応用も期待されている。これらの応用の場合には、放射線環境中での運用が想定されるが、超電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あまり行われていない。さらに、核融合炉用コイル、加速器用コイルにおいては通電による機械的ストレスをはじめとする複数の影響を複合的に考慮する必要がある。加えて、コイル加工・メンテナンス時、運用時における外熱による熱的損傷の可能性を考慮する必要がある。そこで本年度、我々は、高温超電導線材の放射線照射と機械特性、および外熱による影響を調査した。

本研究では、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電導化を目的とし、イットリウム (Y) 系超電導線材・ビスマス (Bi) 系超電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。

1. 高温超電導線材の中性子照射による機械特性変化の評価試験

1-1. 実験目的

HTSを加速器用途で応用する際、それらは放射線環境中で利用されることが想定される。同時に、コイルを構成する各線材は、通電によるローレンツに起因する機械的ストレスを経験する。そのため、放射線照射を受けた HTS に対する機械特性評価は、加速器応用において重要な指標である。HTS に対する機械特性評価は前例があるが、放射線照射を行った場合の評価については研究例がない。

本実験では、放医研大型サイクロトロン(AVF-930)を用いて、HTS(Y系2種)に中性子を照射(77kGy)し、照射前後での機械特性の変化を観測・比較した。

1-2. 実験方法

A) 中性子照射方法

HTS に対する中性子照射は放医研大型サイクロトロンを用いて行った。中性子照射における HTS の配置の模式図を図1に示す。照射については 14 MeV の中性子線を用い、照射量は 77 kGy である。

中性子フラックスについては、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 $1.74 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ であった。今回の照射実験を小型サイクロトロン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 $777.5 \text{ n/(cm}^2 \cdot \mu\text{A} \cdot \text{min})$ 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 $1 \mu\text{A}$ とする)1日24時間運転で、 $1.12 \times 10^6 \text{ n/(cm}^2 \cdot \text{day})$ であるから 1.55×10^9 日、 4.25×10^6 年の運転に相当する。

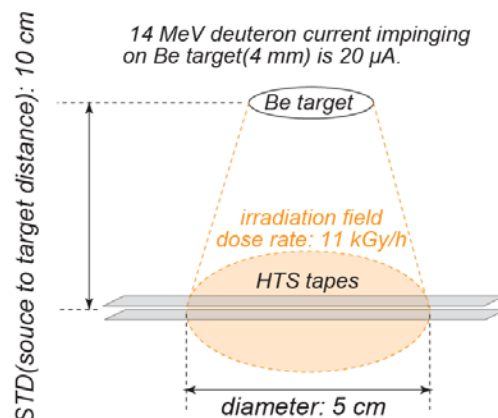


図1. 中性子照射方法の模式図

Beターゲット上のd電流は20μAでターゲットからの距離10 cmで照射野直径5 cmである。

B) 臨界電流特性評価方法

超電導線材はそれぞれ、超電導状態を維持したままで通電することのできる最大の電流値が決まっており、これが臨界電流値(I_c)と呼ばれるものである。この I_c は、超電導特性を評価する一般的な指標として利用されている。我々は、臨界電流値における基準を $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$ (電圧観測端子間の距離を $1\ \text{cm}$ とし、そこで観測される電圧値が $1\ \mu\text{V}$ となる電流値を臨界電流値とする)とし、液体窒素浸漬冷却下($77\ \text{K}$)、自己磁場中で、多端子法を用いた I_c 測定を行った。臨界電流値測定の様式図を図 2 に示す。

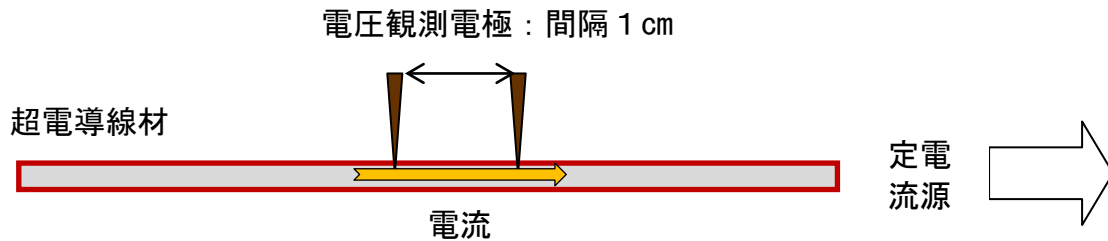


図 2. 臨界電流評価

C) 機械特性評価

本実験のフローチャートを図 1 に示す。中性子照射方法および I_c 測定の方法は上で述べたとおりである。ひずみ印加時とひずみ解放時の I_c をそれぞれ測定し、ひずみ印加前の I_c (初期 I_{c0})と比較した。

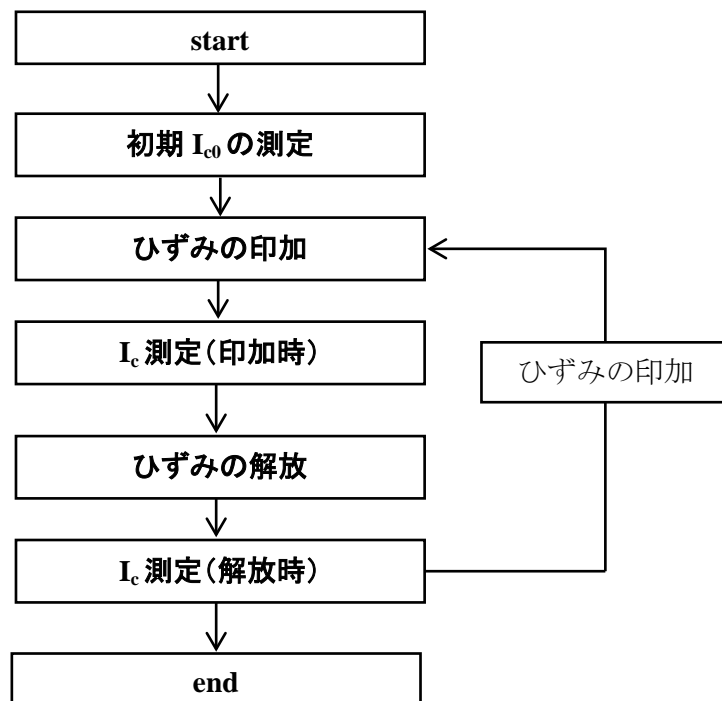


図 3. HTS の機械特性評価フローチャート

D) 実験に用いた高温超電導線材の諸元

本実験に用いた高温超電導線材の諸元を表 1 に、構造を図 4 に示す。

表 1. 高温超電導線材の諸元

Samples	Bi-2223	YBCO-1	YBCO-2
Manufacturer	Sumitomo	AMSC	Super Power
Process	CT-OP	MOD/RABiTS	MOCVD/IBAD
Length	100[mm]	100[mm]	100[mm]
Width	4.3[mm]	4.4[mm]	4.1[mm]
Thickness	0.22[mm]	0.22[mm]	0.160～0.212[mm]
I_c (nominal rate)	140[A]	70[A](minimum)	133[A](minimum)

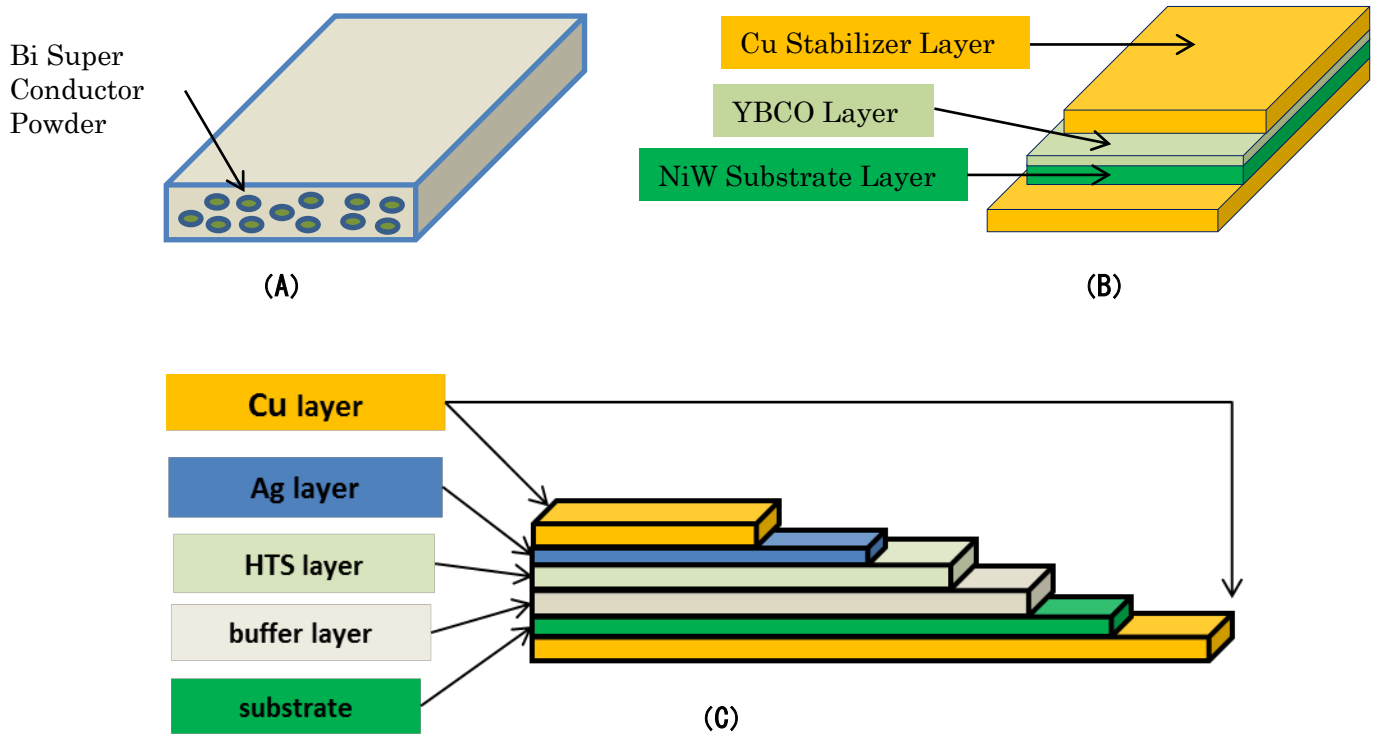


図 4. HTS の構造
(A) Bi-2223, (B) AMSC, (C) Super Power

1-3. 実験結果

機械特性評価の結果を

(1)AMSC 社の照射・非照射については図 5, 図 6 に

(2)Super Power 社の照射・非照射については図 7, 図 8

にそれぞれ示す。なお、結果は、各ひずみ値における I_c を初期 I_{c0} で規格化した値をグラフ化した。

(1) AMSC 社製 HTS の機械特性評価試験結果

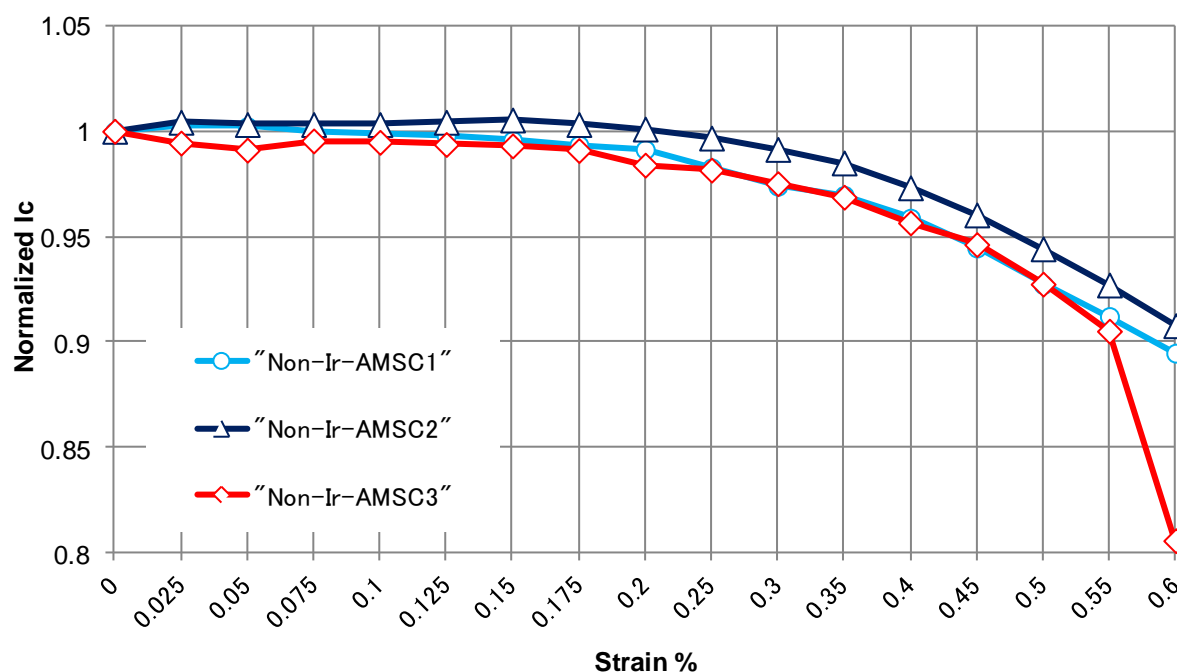


図 5. (A) : AMSC 社非照射線材 ひずみ印加時の機械特性評価結果

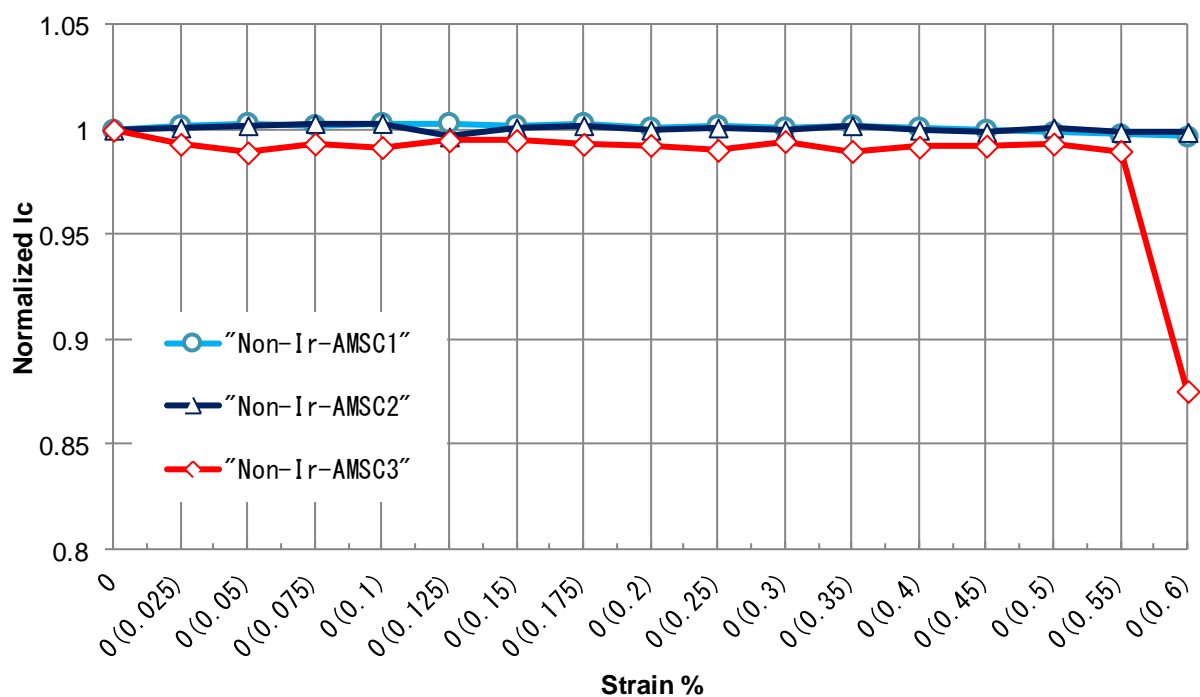


図 5. (B) : AMSC 社非照射線材 ひずみ解放時の機械特性評価結果

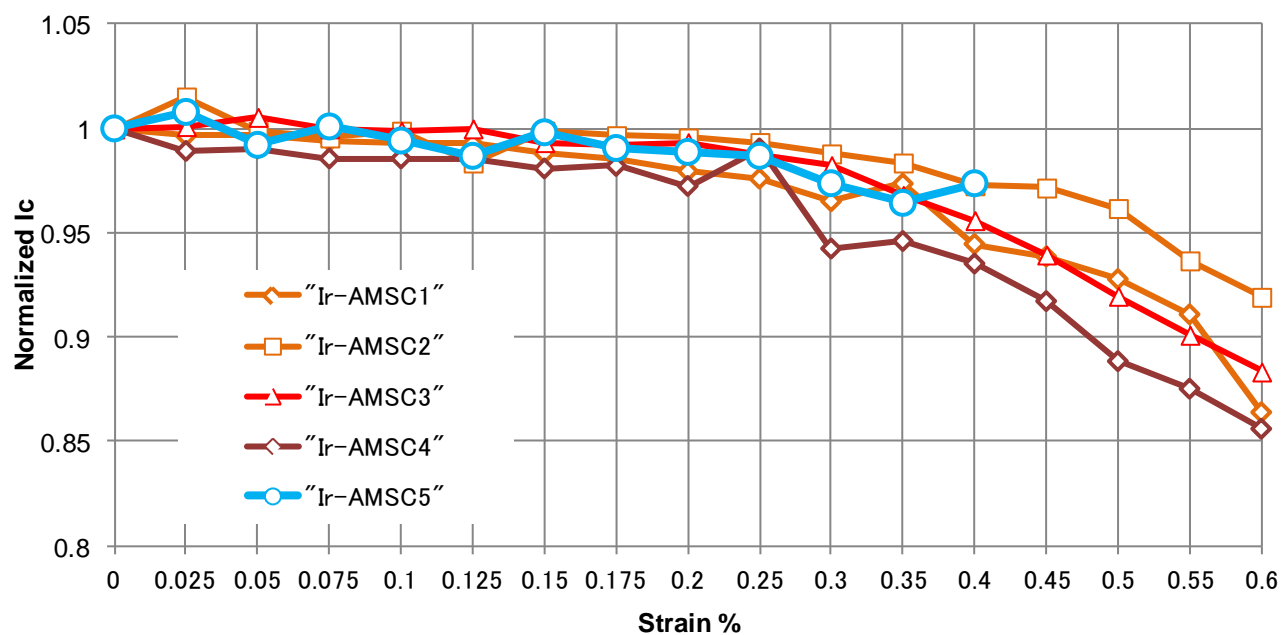


図 6. (A) AMSC 社照射線材 ひずみ印加時の機械特性評価結果

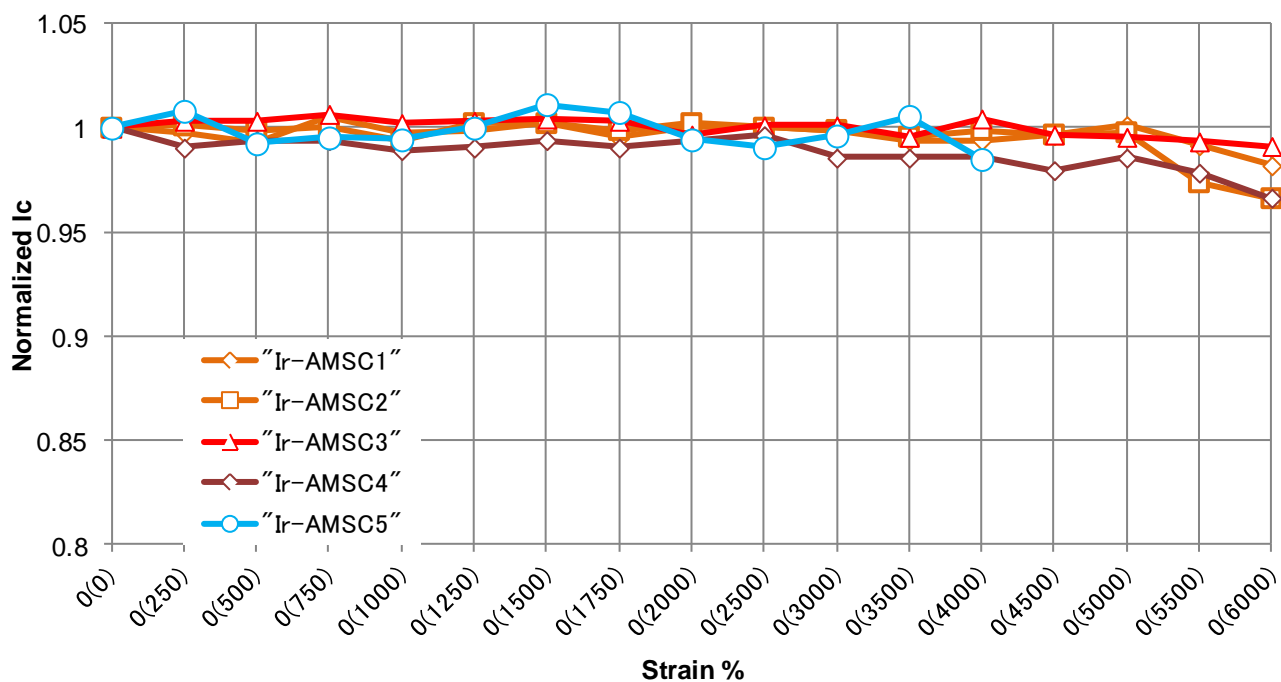


図 6. (B) AMSC 社照射線材 ひずみ解放時の機械特性評価結果

(2)Super Power 社製 HTS の機械特性評価試験

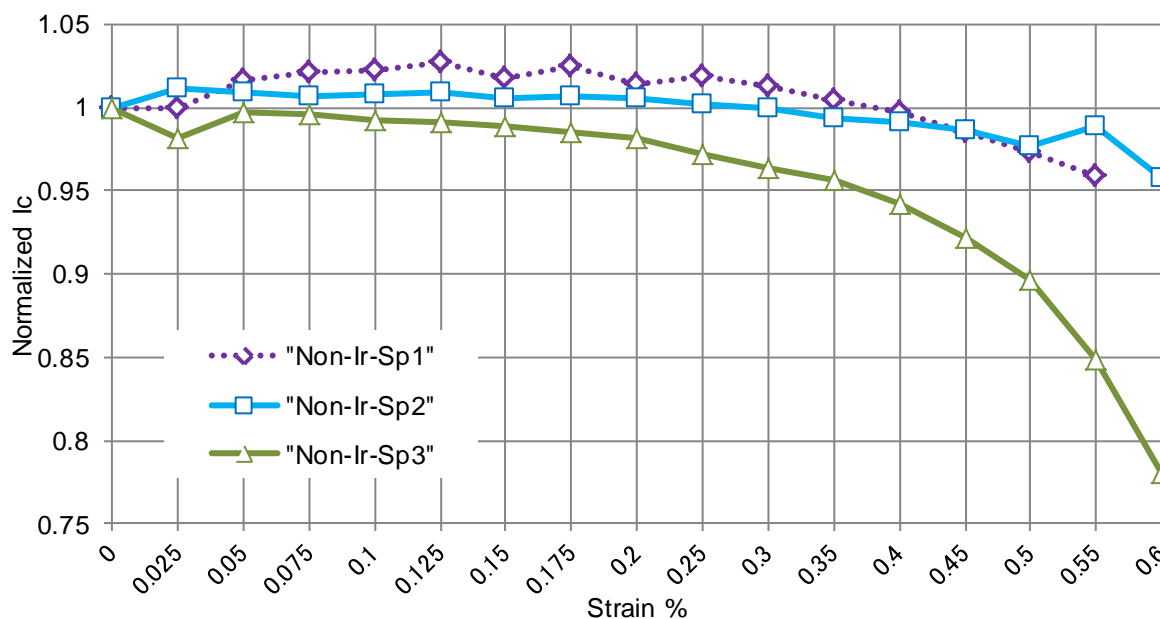


図 7. (A)Super Power 社非照射線材 ひずみ印加時の機械特性評価結果

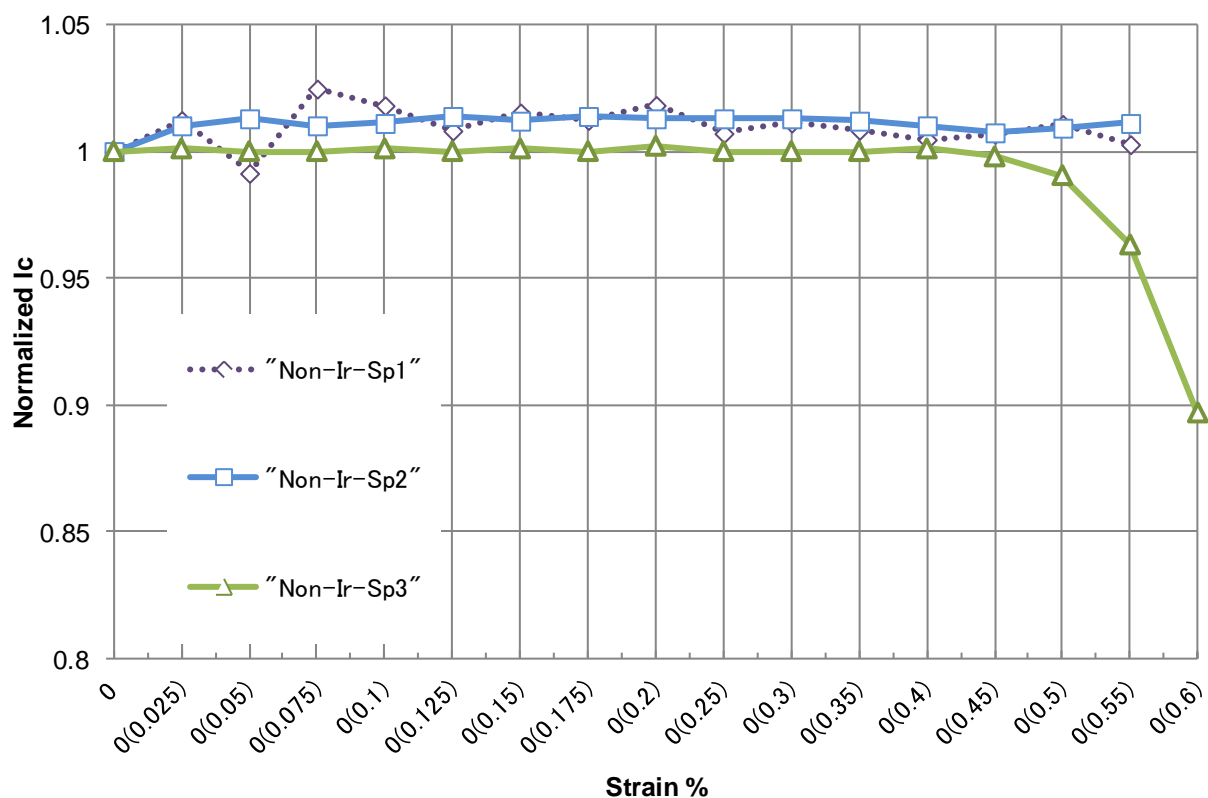


図 7. (B)Super Power 社非照射線材 ひずみ解放時の機械特性評価結果

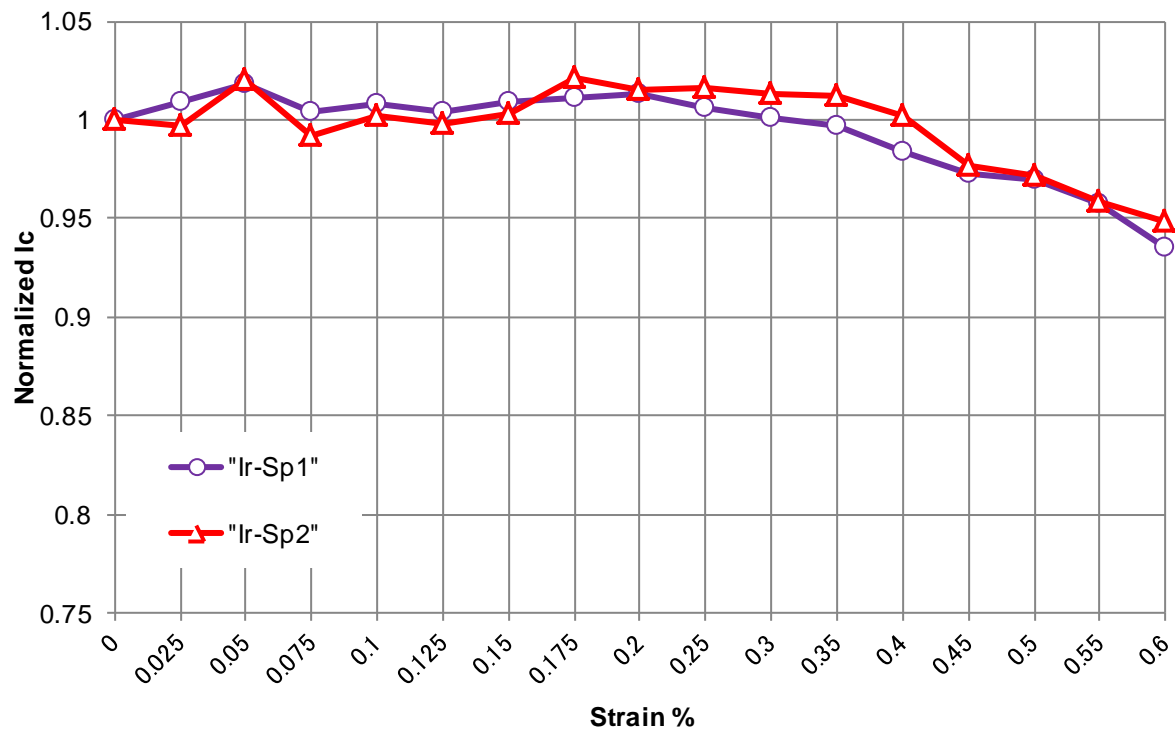


図 8. (A) Super Power 社照射線材 ひずみ印加時の機械特性評価結果

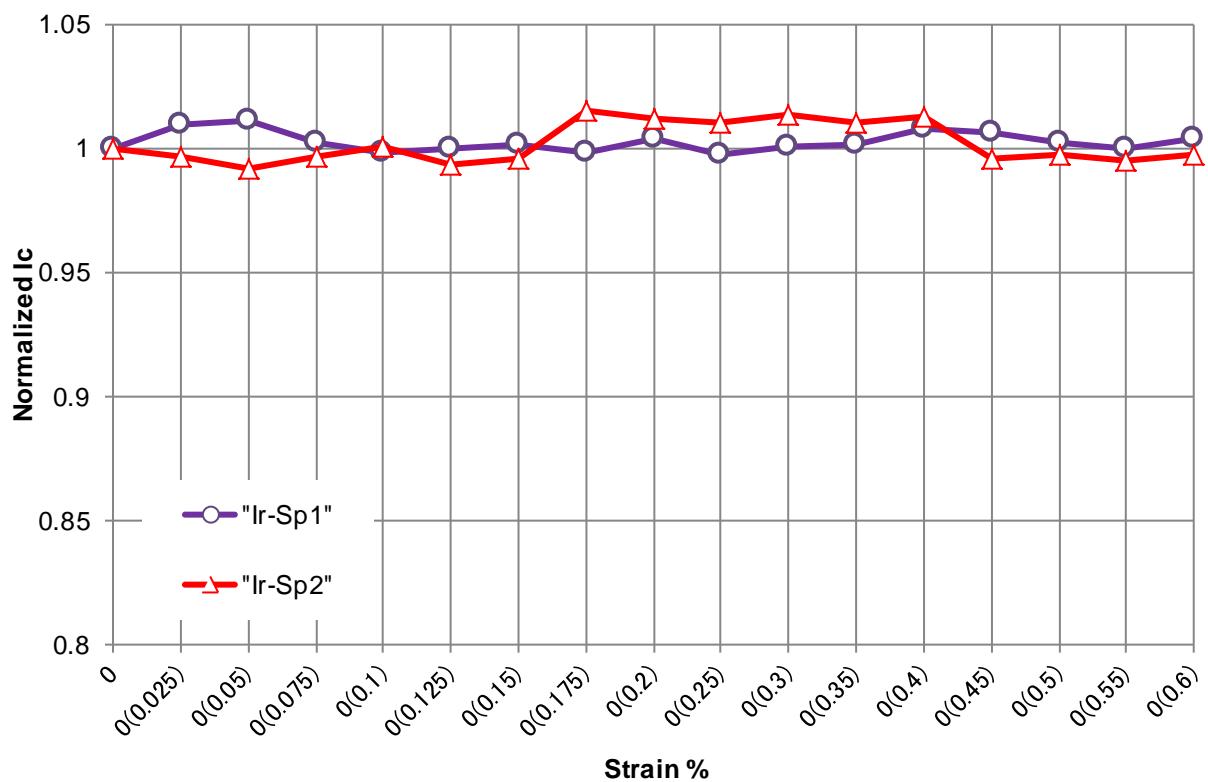


図 8. (B) Super Power 社照射線材 ひずみ解放時の機械特性評価結果

1-4. まとめと今後について

HTS の機械特性評価試験についてまとめを行う。

1-3 節に示した結果より以下のことがわかる。

- (1) AMSC 社製および Super Power 社製、照射・非照射線材ともにひずみ率 0.3 %程度から臨界電流特性の低下が確認でき、以後ひずみ率の増加に伴い単純減少となる。ひずみ率 0.5%程度においても 95 %の臨界電流特性を維持している。
- (2) AMSC 社製および Super Power 社製、双方の線材について、照射・非照射ともに機械特性に大きな違いは見られない。従って、本実験において印加したひずみの範囲においては、中性子照射は HTS の機械特性に影響を与えないということが考えられる。
- (3) AMSC 社製および Super Power 社製のどちらの線材についても、ひずみ解放時にはその臨界電流値特性がほぼ回復していることがわかる。いくつかのサンプルにおいて、ひずみ解放時においても臨界電流値の回復が確認できない(不可逆的な劣化が生じている)ことが認められるため、サンプル数を増やして検証する必要がある。

本実験では、H22 年度より引き続き多くのデータを取得することができた。昨年度と比較すると、データの安定性・個数ともに向上していると認識している。各線材のデータの数としては、本年度より測定を開始した Super Power 社製線材について、さらに多くのデータを取得する必要がある。

本実験は、H24 年度においても引き続き行う予定であり、Super Power 社製線材をはじめとする Y 系薄膜積層線材についての調査を中心に継続する。また、Y 系線材について、製法や構造の異なるいくつかの種類の線材について追加調査を行う予定である。

加えて、ひずみ印加による、臨界電流値および諸特性の変化のメカニズムについても並行して解明していく予定である。

現状でのまとめとして、機械特性の観点からは、AMSC 社製および Super Power 社製線材ともに加速器コイルへの応用を期待できる性能を有していると考えられる。

2. 加工を想定した高温超電導線材の加熱—中性子照射試験

2-1. 実験目的

近年、超電導線材、特に高温超電導線材の特性の向上により、それらを製品に応用する機会が増大している。HTS を工業応用するには、はんだ付けやエポキシ含浸等の加熱処理を行う必要が生じる。我々の先行研究において、Y 系および Bi 系について、はんだ加工を想定した加熱試験を行い、Y 系についてはその超電導特性の劣化温度を特定できた。しかし、Bi 系についてはさらに高い温度での検証を必要とした。

今回、我々は、Bi 系 HTS についてより高い温度での加熱試験を行った。また、Y 系の AMSC 社製、Bi 系ともに、HTS の加速器への応用を想定し、加熱を施したサンプルに対し中性子照射を行い、加熱前後、また、中性子照射前後での臨界電流特性の変化を調べた。

2-2. 実験方法

(A) 加熱方法

Y 系については、恒温槽を用いて、403 K(130 °C)～523 K(250 °C)の温度範囲について 10 分間の加熱を行った。加熱に用いた温度の詳細については図 8 に示す。Y 系のサンプルは AMSC 社製、Super Power 社製の 2 種類について調査した。

Bi 系については電気炉を用いて 573 K(300 °C)～823 K(823 °C)の温度範囲について 323 K(50 °C)ステップで加熱を行なった。加熱時間は 10 分間である。

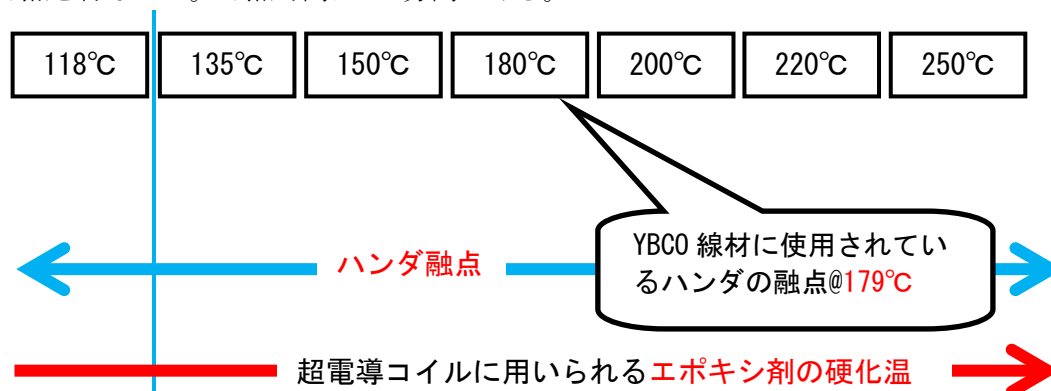


図 8. Y 系 HTS の加熱温度詳細

(B) 実験方法

実験方法のフローチャートを図 9 に示す。なお、 I_c 測定および、中性子照射方法については 1・2 節で述べたものと同じである。

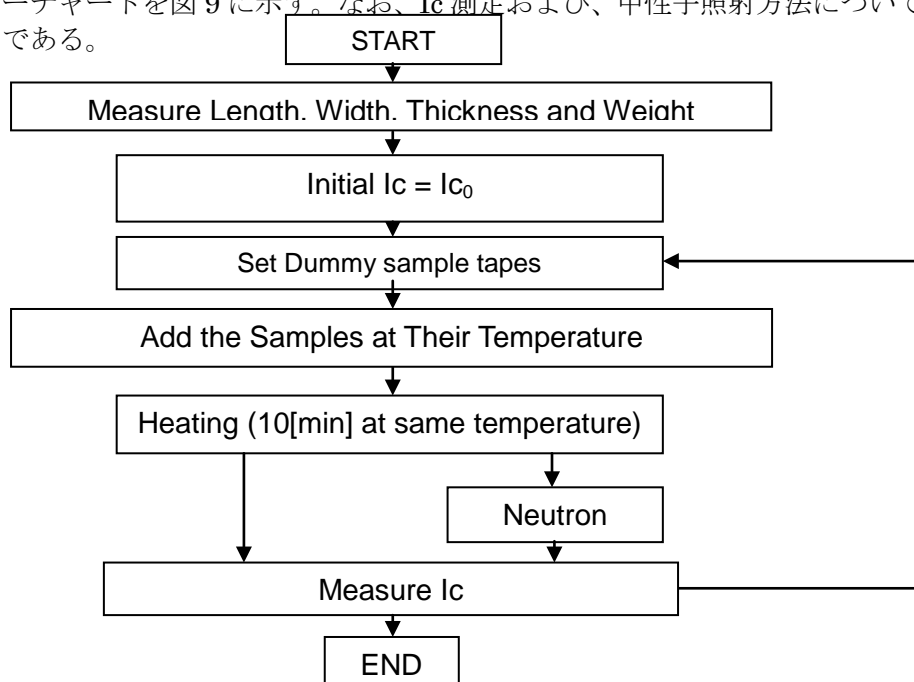


図 9 加熱特性評価試験フローチャート

2-3. 実験結果

加熱特性評価試験の結果を各種の線材についてそれぞれ示す。結果については、加熱後の I_c を加熱前の初期 $I_c(I_{c0})$ で規格化した値をグラフに示している。同様に、中性子照射したものについては、加熱した後の I_c を I_{c1} とし、中性子照射後の I_c を I_{c2} として規格化を行っている。

(1)AMSC 社製 HTS の加熱特性評価試験結果

AMSC 社製 HTS の実験結果について、中性子照射を行っていない(加熱のみ)の特性変化の様子を図 10 に、加熱後に中性子照射を行った場合の結果についてを図 11 に示す。

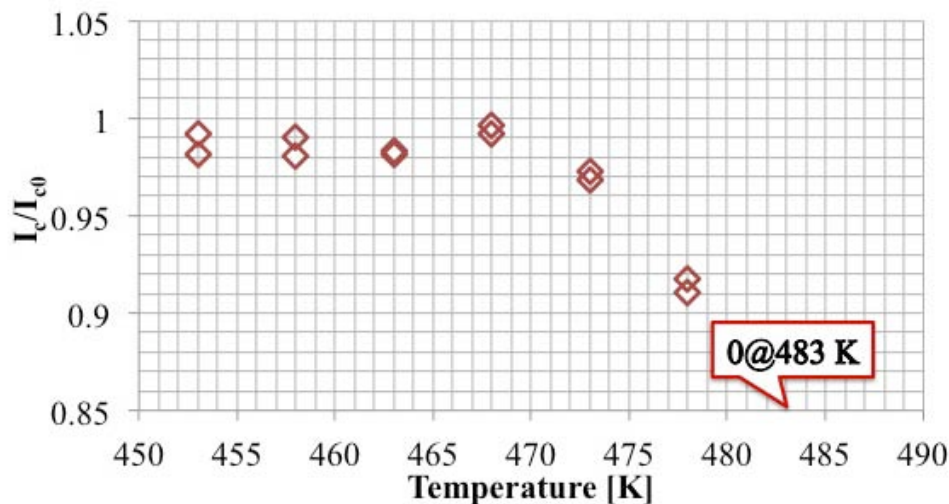


図 10. AMSC 社 HTS の加熱特性評価試験結果

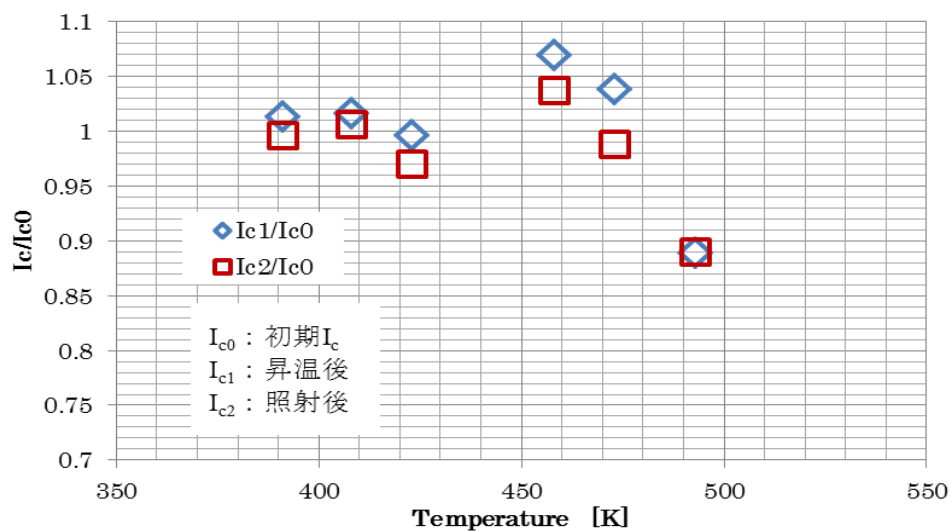


図 11. AMSC 社製 HTS の加熱—中性子照射特性評価試験結果

(2) Super Power 社製 HTS の加熱特性評価試験結果

Super Power 社製 HTS の加熱特性評価試験の結果を図 12 に示す。Super Power 社製 HTS については中性子照射は行っていないため、単純加熱のみの結果である。

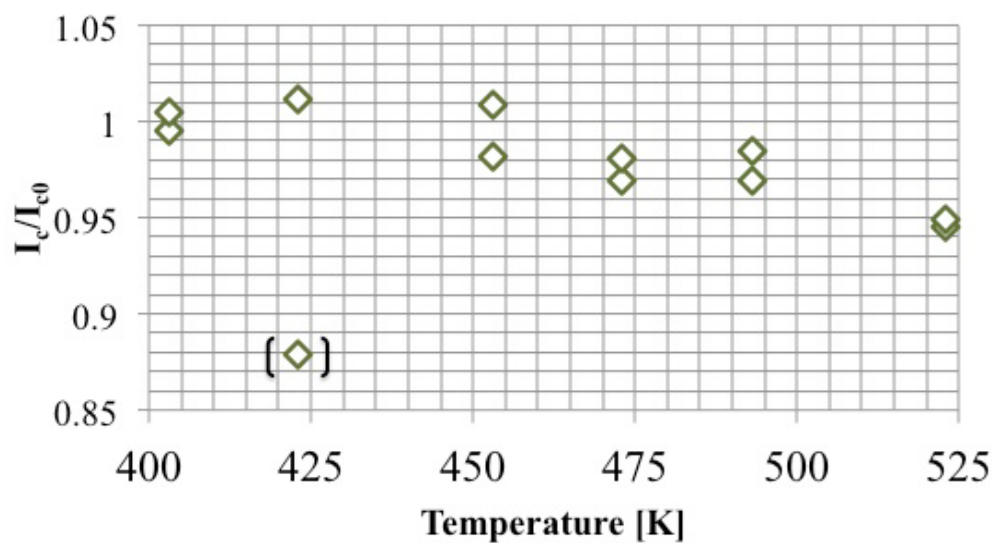


図 12. Super Power 社製 HTS の加熱特性評価試験結果

(3) Bi-2223HTS の加熱特性評価試験結果

Bi-2223HTS の加熱特性評価試験結果を加熱のみのものについては図 13 に、加熱後中性子を照射したものについては図 14 に示す。

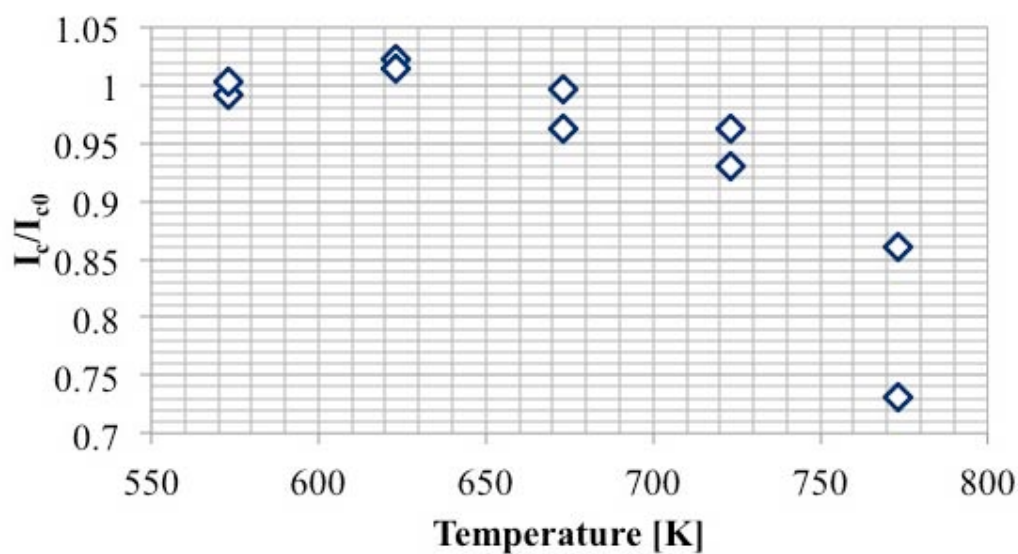


図 13. Bi-2223HTS の加熱特性評価試験結果

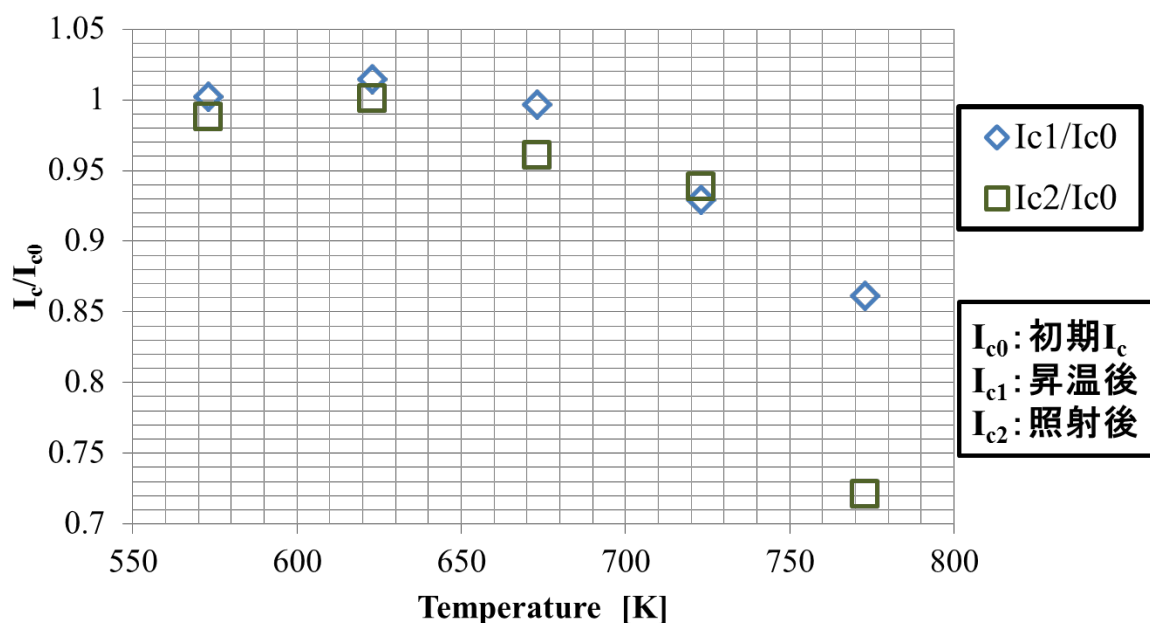


図 14. Bi-2223HTS の加熱—中性子照射特性評価試験結果

2-4. まとめと今後について

HTS の加熱特性評価試験および加熱—中性子照射特性評価試験についてまとめる。

まず、2-3 節に示した結果より、

- (1) AMSC 社製 HTS は 473 K(200 °C)において、臨界電流特性の不可逆的な低下、すなわち超電導特性の低下を開始している。また、それ以上の温度において臨界電流特性は低下していき、483 K(210 °C)において超電導特性が破壊されていることがわかる。従って、AMSC 社製 HTS は 473 K 以下での加工を必要とする。
- (2) Super Power 社製 HTS については、AMSC 社製 HTS の劣化温度である 473 K に到達しても超電導特性大きな低下は見られなかった。また、今回実験を行った温度範囲においては、超電導特性が破壊されることはなかった。しかしながら、図 12 を見ると、温度の上昇によりわずかながら臨界電流特性が低下しているように見える。これについては、今後さらに高い温度における検証が必要である。
- (3) Bi-2223HTS については劣化温度 773 K(500 °C)が確認された。Bi-2223HTS は耐熱温度の観点からは Y 系 HTS よりも高い特性を示しているといえる。
- (4) 中性子を照射した AMSC 社製 HTS については中性子照射前後の臨界電流特性に大きな違いは確認できない。したがって、加熱後の HTS に対する中性子照射の影響はないものと考えられる。
- (5) 中性子を照射した Bi-2223HTS については、一部のサンプルで、劣化開始温度である 773 K において臨界電流特性の低下が確認できる。これについては、今後サンプル数を増やしての検証が必要である。

本年度の、HTS に対する加熱試験においては、AMSC 社製 HTS の劣化開始温度、すなわち、加工時における最大の許容温度を導くことができた。また、Bi-2223HTS についても同様にその劣化開始温度を発見することができた。しかし、Super Power 社製線材については、その劣化開始温度を特定することができなかった。

今後は、全体としてサンプル数をさらに増やすことを目標とする。また、Super Power 社製 HTS のさらに高い温度における特性評価、および、中性子照射による特性変化の観測を行う。AMSC 社製および Bi-2223HTS についても、引き続き中性子照射による特性変化の観測を行う予定である。

また、温度による HTS の劣化メカニズムを解明するために、SEM による表面観察および、非大気雰囲気における加熱を行うことを計画している。加えて、本実験では温度を単一パラメータとして実験を行ったが、今後、温度一定環境下において、時間をパラメータとした実験を行い、より工業的な観点から考察を行えるデータ収集を予定している。

参考文献

- [1] 柄澤 彰良、青木 徹、神林 佑、矢崎 真二郎、石山 敦士、宮原 信幸: 高温超電導線材の加熱による特性変化、第 84 回低温工学・超電導学会(May 18-20 2011, Tsukuba Japan) 、 p.151
- [2] 矢崎 真二郎、青木 徹、神林 佑、柄澤 彰良、琴寄 拓哉、石山 敦士、宮原 信幸: 高温超電導線材の高温加熱による特性変化、第 85 回低温工学・超電導学会(November 9-11 2011, Kanazawa Japan) 、 p.137
- [3] 道辻 健太、柄澤 彰良、矢崎 真二郎、石山 敦士、宮原 信幸: 中性子照射高温超電導線材の機械特性、平成 24 年度電気学会全国大会(March 21-23 2012,Hiroshima Japan)、 p.183
- [4] 神林 佑、青木 徹、王 旭東、石山 敦、宮原 信、植田 浩史、鹿島 直二、長屋 重夫: Influence of neutron irradiation on mechanical properties of high temperature superconductors 、 European Conference on Applied Superconductivity 2011(September 18-23 2011, Den Haag Netherland)

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、榊 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 の厚さのシールドイングの条件で 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
- ・ 光電子増倍管用印可電圧反転用フォトMOSリレー
 - 松下電工 AQV258
- ・ 紫外線LED (JEM-EUSO 軌道上校正用光源)
 - 340nm Seoul Optodevice 社 T9B34C GaN 系
 - 360nm Roithner 社 RLT360-1.0-15 InGaN
 - 385nm Roithner 社 RLS-UV385 GaN 系
- ・ 多層膜フィルタ (空気シャワーの窒素輝線選択用フィルタ)
 - 紫外線バンドパスフィルタ
- ・ 結晶 (大気及び雲モニタ用レーザー部品)
 - レーザー 光学結晶
- ・ ASIC
 - フロントエンド読出用 Q-T 変換 ASIC
- ・ プラスチックレンズ素材
 - PMMA・CYTOP

今回、照射したサンプルは、次である。

- 1) レーザー Q スイッチ用結晶
 - ・ LiTaO₃ (LT) 単結晶
- 2) ASIC
 - ・ フロントエンド読出用 ASIC

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)

我々は JEM-EUSO 望遠鏡校正のために、大気及び雲頂高度測定のための LIDAR を開発している。LIDAR に用いる 355nm レーザー光源の更なる高効率・小型化およびパルス動作の長期間での安定性向上のためには、非線形光学素子及び Q スイッチとして用いられる LiTaO₃ (LT) 結晶の放射線耐性は大変重要である。今回、LT 結晶の ISS 軌道上での利用を想定し、放射線耐性の測定を行った。

サンプル: LiTaO₃ 結晶

サイズ: 径 7 x 10mm 厚さ 5mm

表面加工: 鏡面研磨

数量: 1 個

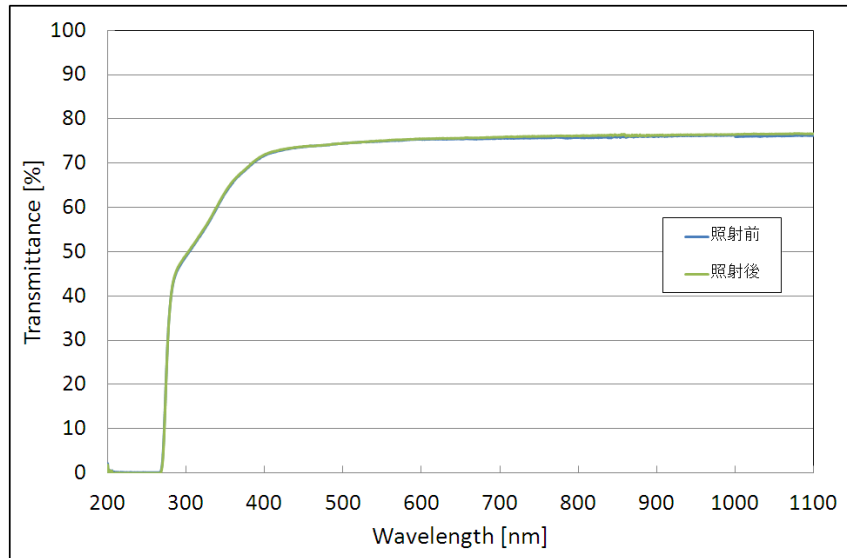


図1) Nd,Cr:GdVO4 単結晶の吸収スペクトル (Nd2.0%、Cr1.0%)

実験では、LT 結晶サンプルに 27krad の照射を行い、透過率の変化を確認した。図 1 に LT 結晶の照射前・照射後の透過スペクトルを示す。紫外から、レーザー発振波長（基本波）である $1\mu\text{m}$ 帯までの幅広い波長領域において、照射前後の結晶の吸収スペクトルに全く変化は見られなかった。

以上の結果により、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) 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 $0.35\mu\text{m}$
- ・チップサイズ： $4.6\text{mm} \times 4.1\text{mm}$ (19mm^2)
- ・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、ベアチップへ照射を行った。今回は照射中に ASIC を稼働させ、シングルイベント効果の影響を調べた。モニタした項目は以下の通りである。

- ・アナログ、デジタル電源電流
- ・内蔵 DAC の出力電圧
- ・内蔵カウンタデジタル値出力

36krad の陽子照射を行っている間、上記モニタデータに変動はみられなかった。内蔵カウンタデジタル値出力に関しては、低速のデータ読み出しで行ったため、実効照射線量当量は 7.2rad であった。この照射量は、実際の軌道上の装置では 631 時間分に相当する。

この試験は、24 年度に、半導体中でのエネルギー損失が大きく、シングルイベント効果が顕著になる HIMAC の 500MeV/u の Fe 粒子でも試験する予定である。

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 Q スイッチ結晶、フロントエンド ASIC の試験を行い、JEM-EUSO 用として使用できることを確認した。

謝辞

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

7. 生物研究

- 7-1. 細胞培養容器 OptiCell を用いた 70MeV 陽子線の
水中における深さ方向の変化による生物効果の測定
- 7-2. 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果
- 7-3. 陽子線被ばくしたマウス正常組織反応の解析

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

Stefan Genet^a, 前田淳子^a, Chuck Yurkon^a, 藤井義大^{b,c}, 藤沢寛^{b,c}, Ashley Romero^a,
Paula Genik^a, 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ける生物効果を Chienese Hamster Ovary (CHO) cell および DNA 修復欠損細胞株を用いて調べた。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 2mm 間隔で陽子線の飛程 4 cm 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。また、DNA 修復欠損株においても、陽子線の結果は他の低 LET 放射線と変わらなかった。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ける RBE を再検証する必要があると考えた。我々は、NIRS-930 で得られる陽子線の生物効果を検証するために、70MeV に加速された粒子を用いて、その飛程の全てを網羅する細胞照射容器として OptiCell を使用した。

2. 実験材料と方法

A) 細胞と培養方法

Chinese Hamster Ovary (CHO) 細胞野生株は、コロラド州立大の Dr Joel Bedford 教授より譲り受けた。Ku80 欠損株である xrs5 細胞、Rad51D 欠損細胞株である 51D1 はローレンスリバモア国立研究所の Dr. Larry Thompson から譲り受けた。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、培養面積がおよそ 50 平方 cm 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。

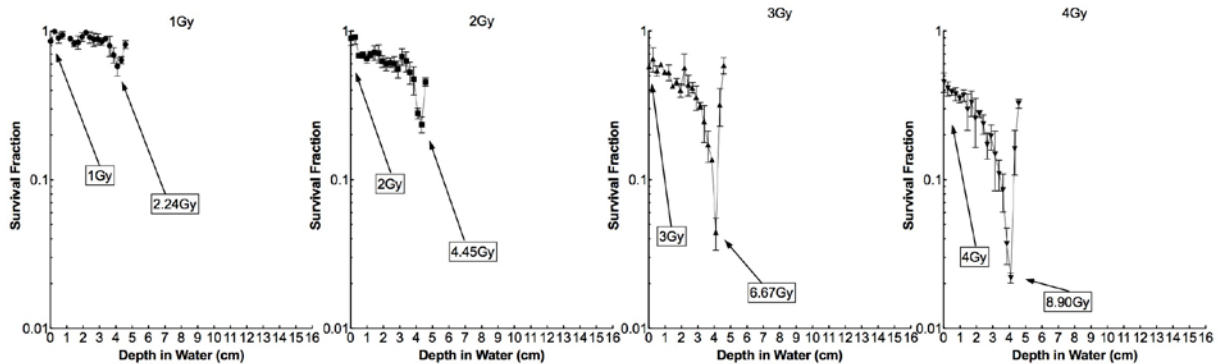


図 1. 70MeV/n 陽子線各線量照射後の深さあたりの細胞生存率の変化。矢印で示された線量は計算によって得られた。実験は 3 回繰り返され、エラーバーは平均誤差である。

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 以上の容器に入れ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大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、Lucite 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。

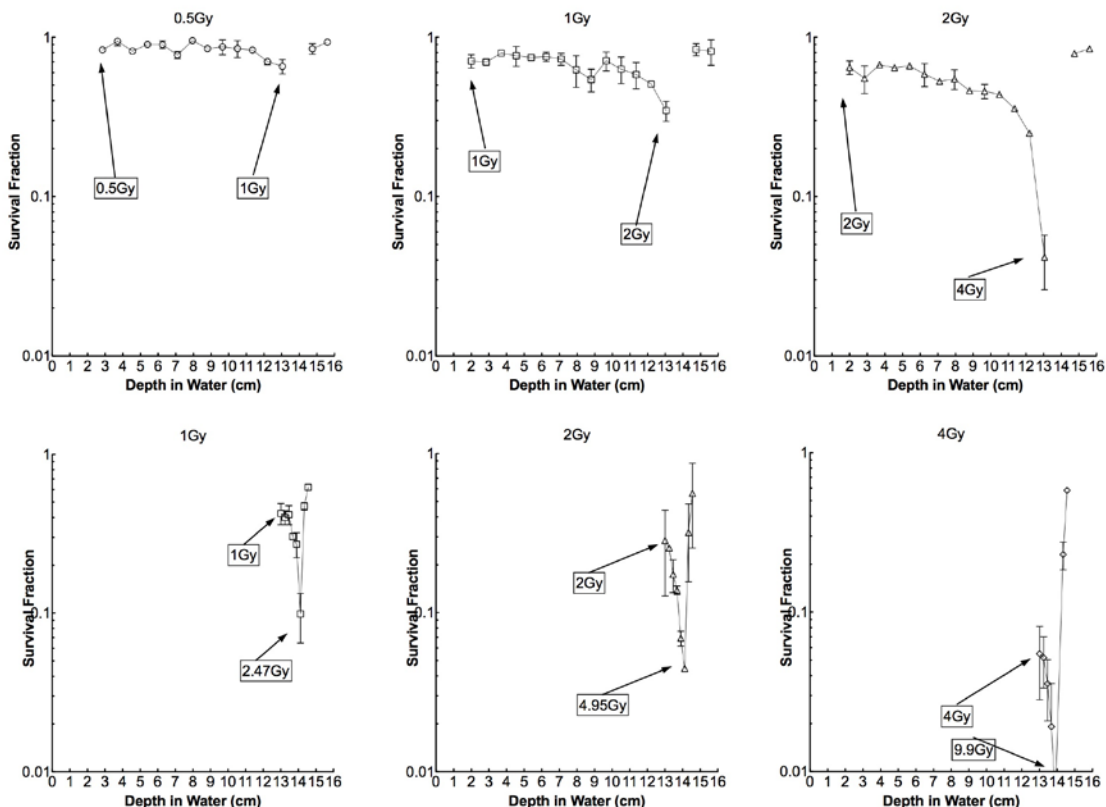


図 2. 290MeV/n 炭素線各線量照射によって得られた深さあたりの細胞生存率の変化。上段は、

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。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。

C) DNA 修復欠損株の場合

野生株で行ったのと、同様の実験を行い、深さあたりの生存率を得、それ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。Ku80 欠損である *xrs5* 細胞は全ての放射線に対し、等しい生物効果を示し、Rad51D 欠損である 51D1 は野生株と比較し、小さいながらも LET に依存すると思われる細胞死を確認した。

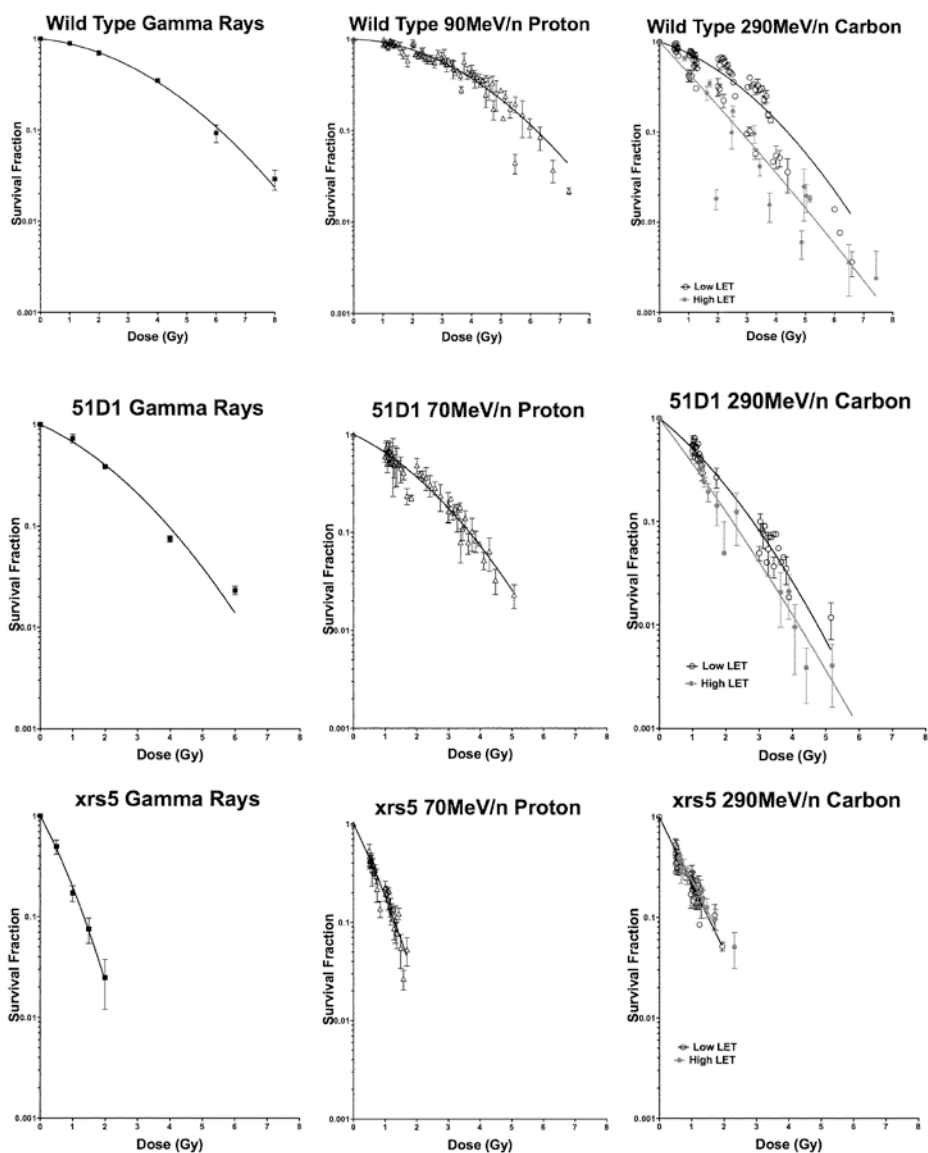


図 3. 細胞生存率曲線。図 1, 2 から得られた生存率を照射線量に対して再プロットした。ガンマ線の実験は 3 回以上行われ、それぞれのエラーバーは平均値の標準誤差である。

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 3 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/ μ m 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。70MeV 陽子線が X 線や γ 線に近い性質を持つとは、DNA 修復欠損細胞株を用いて確認された。次回は、より高 LET となると思われるブラッグピーク近傍に集中して研究を行いたい。また、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
5. 内堀幸夫 et al. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発
6. Paganetti et al., Relative biological effectiveness values for proton beam therapy, Int J Radiation Oncology Biol Physics, 53, 2, 2002, 407-421
7. Wouters et al. Measurements of Relative biological effectiveness of the 70 MeV Proton beam at TRIUMF using Chinese hamster V79 cells and the High-precision cell sorter assay, Radiation Research, 146, 1996, 159-170
8. Belli et al., RBE-LET relationships for cell inactivation and mutation induced by low energy protons in V79: further results at the LNL facility, Int J Radiat Biol, 74, 4, 1998, 501-509

陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果

平山 亮一^A、松本 孔貴^A、幸田 華奈^A、鵜澤 玲子^A、陳 剣^A、北村 尚^B、内堀 幸夫^B、
古澤 佳也^A

^A：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター一次世代重粒子治療研究プログラム

^B：放射線医学総合研究所研究基盤センター放射線計測技術開発課

概要

X線や γ 線などの低LET放射線は、酸素の存在下では無酸素の時より生物学的効果は大きくなり、3倍程度の増感がある。これは酸素効果と呼ばれ、放射線生物学の大きな特徴の一つである。また、重粒子線などの高LET放射線では酸素効果が小さくなることが知られている[1]。低酸素下での照射実験を行うには酸素のコンタミを防ぐため、ガラス製のシャーレを用いるのが一般的ではあるが、光子放射線ではガラスからの後方散乱線の影響を接着培養細胞が受ける為、高LET放射線の対照線源として用いることができない。そこで後方散乱線の影響がない、粒子線である陽子線が高LET放射線の対照線源として適当な低LET放射線であるかを検証した。さらに簡易クリーンベンチをサイクロトン棟管理区域内へ持ち込み、照射室全室での無菌操作を行えるよう整備し、実験の効率化を図った。

1. 目的

チャイニーズハムスター卵巣由来のCHO細胞を用いて、大気下および低酸素下での70 MeV/u陽子線に対する線量効果関係を調べた。得られた10%細胞生存率線量 (D_{10}) を用いて酸素増感比 (OER) を求めた。

2. 実験方法

照射実験日の24時間前に、CHO細胞をガラスシャーレに播種し (2×10^5 cell/dish)、照射開始1時間前に低酸素置換装置にて0.026%以下の低酸素状態へ置換させた[2]。C-8コースでmono beamである70 MeV/u陽子線のplateau部分に照射容器を合わせ、照射を行った。大気下での照射は、ガラスシャーレを照射容器に入れ、そのまま照射を行った。照射後、クリーンベンチ内でガラスシャーレからCHO細胞を回収し、コロニー形成法を行った。照射後12日目にコロニーを固定・染色し、細胞生存率曲線を作成した。

3. 実験結果

CHO細胞の線量効果関係を図1に示した。細胞生存率をLQモデルでフィットさせ大気下照射では α 値と β 値はそれぞれ 0.199 Gy^{-1} と 0.035 Gy^{-2} となり D_{10} 値は 5.78 Gy であった。低酸素下では α 値、 β 値ならびに D_{10} 値はそれぞれ 0.049 Gy^{-1} 、 0.005 Gy^{-2} ならびに 16.93 Gy となり、OER値は2.93となった。また、これらの実験ではコンタミが一度もなく、サイクロトン棟内での無菌作業を行う環境が整備されたことも証明できた。

4. まとめ

低LET陽子線照射によって低LET放射線と同様の値 (2.5~3) が得られたので、我々の実験環境は低酸素実験を行うことが十分可能であることが証明できた。今後はDNA損傷修復欠損細胞を使って、DNA損傷修復と酸素効果の関係を明らかにし、ラジカルスカベンジャーを用いた実験により、細胞致死における陽子線の間接作用の寄与率を求め、酸素効果の機構解明を放射線化学・生物学的に明らかにする予定である。

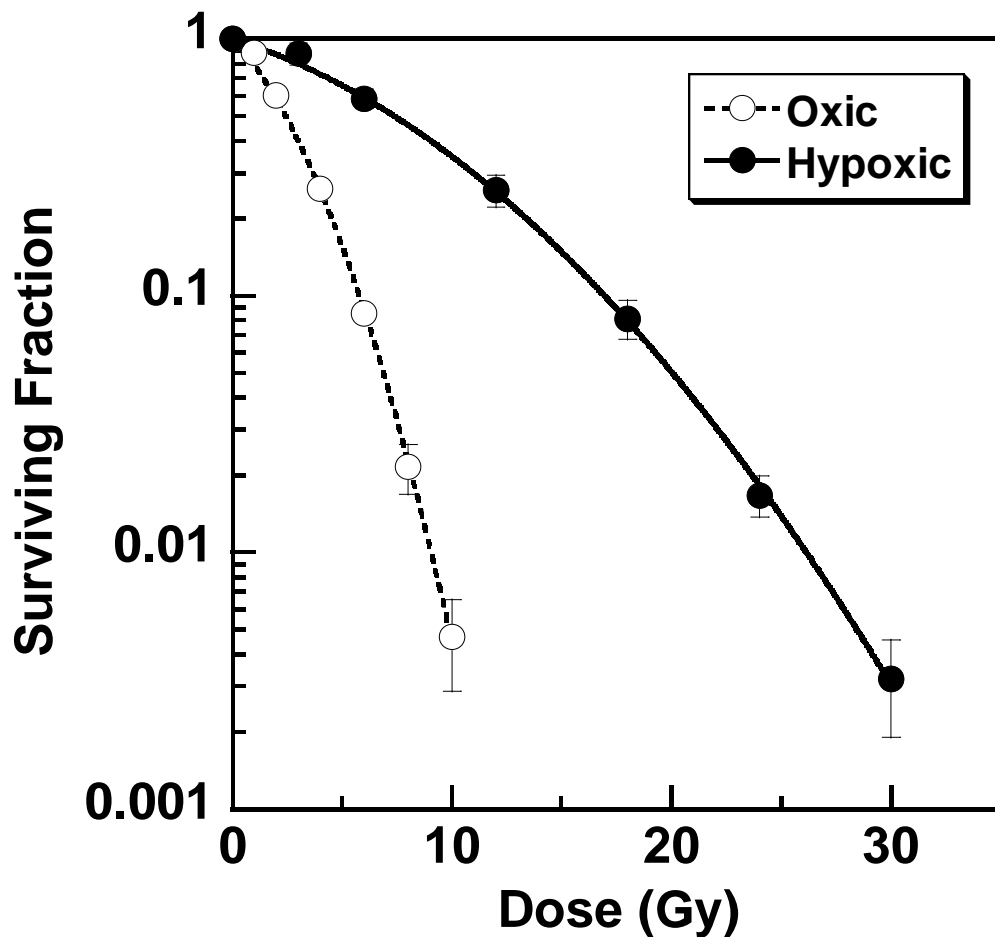


図1. 70 MeV/u 陽子線に対する CHO 細胞の放射線感受性。エラーバーは SD 値 (n = 3)

参考文献

- [1] Y. Furusawa, K. Fukutsu, M. Aoki, H. Itsukaichi, K. Eguchi-Kasai, H. Ohara, F. Yatagai, T. Kanai, K. Ando. Inactivation of aerobic and hypoxic cells from three different cell lines by accelerated (3)He-, (12)C- and (20)Ne-ion beams. Radiat. Res., 154, 485-96, 2000
- [2] R. Hirayama, Y. Matsumoto, Y. Kase, M. Noguchi, K. Ando, A. Ito, R. Okayasu, Y. Furusawa. Radioprotection by DMSO in Nitrogen Saturated Mammalian Cells Exposed to Helium Ion Beams. Radiat. Phys. Chem., 78, 1175-1178, 2009

8. 研究成果一覽

平成 23 年度 研究成果一覧

1. サイクロトロン の 運転実績 と 利用状況

<学会及び研究会口頭発表等>

1. Akinori Sugiura, Satoru Hojo, Katsuto Tashiro, Toshihiro Honma, Mitsutaka Kanazawa, Akira Goto, Takanori Okada, Takashi Kamiya, Yuichi Takahashi, and Kouji Noda., STATUS REPORT OF NIRS CYCLOTRON FACILITY(NIRS-930,HM-18). 第8回加速器学会年会. 茨城県つくば市. 2011,8
2. A. Kitagawa., Status of ion sources at NIRS. 14th International Conference on Ion Sources. Giardini Naxos, Italy. 2011,7

2. サイクロトロン の 改良 ・ 開発

<学会及び研究会口頭発表等>

1. S. Hojo, A.Goto, T. Honma, A. Sugiura, N. Tasiro, T. Okada, T. Kamiya, Y. Takahasi, and K. Noda., DEVELOPMENT OF MULTI-HARMONIC BEAM BUNCHER FOR AVF-930 CYCLOTRON (II) 第8回加速器学会年会. 茨城県つくば市. 2011,8

3. 平成 23 年度サイクロトロン の 分子プローブ の 製造 ・ 開発 への 利用状況

<原著論文等>

1. Katsushi Kumata, Joji Yui, Akiko Hatori, Masayuki Fujinaga, Kazuhiko Yanamoto, Tomoteru Yamasaki, Kazunori Kawamura, Hidekatsu Wakizaka, Nobuki Nengaki, Yuichirou Yoshida, Masanao Ogawa, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Synthesis and Evaluation of Novel Carbon-11 Labeled Oxopurine Analogues for Positron Emission Tomography Imaging of Translocator Protein (18 kDa) in Peripheral Organs Journal of Medicinal Chemistry 54(17) 6040~6049 2011-09
2. Chiharu Asakawa, Masanao Ogawa, Katsushi Kumata, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Joji Yui, Kazunori Kawamura, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis of three [11C]ureido-substituted benzenesulfonamides as PET probes for carbonic anhydrase IX in tumors Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters 21(23) 7017~7020 2011-12
3. Chiharu Asakawa, Masanao Ogawa, Katsushi Kumata, Masayuki Fujinaga, Koichi Kato, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Kazunori Kawamura, Akiko Hatori, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: [11C]Sorafenib: Radiosynthesis and preliminary PET study of brain uptake in P-gp/Bcrp knockout mice. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters 21(8) 2220~2223 2011-4
4. Koichi Kato, Atsushi Tsuji, Tsuneo Saga, Ming-Rong Zhang: An efficient and expedient method for the synthesis of 11C-labeled α -aminoisobutyric acid: A tumor imaging agent potentially useful for cancer diagnosis. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters 21(8) 2437~2440 2011-4
5. Feng Wang, Wei Fang, Ming-Rong Zhang, Katsushi Kumata, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Kazuhiko Yanamoto, Kazutoshi Suzuki: Evaluation of Chemotherapy Response in VX2 Rabbit Lung Cancer with 18F-Labeled C2A Domain of Synaptotagmin I. Journal of Nuclear Medicine : 52(4) 592~599 2011-4
6. Akiko Hatori, Joji Yui, Kazuhiko Yanamoto, Tomoteru Yamasaki, Kazunori Kawamura, Makoto Takei, Takuya Arai, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Determination of radioactivity in infant, juvenile and

adult rat brains after injection of anti-influenza drug [¹¹C]oseltamivir using PET and autoradiography
Neuroscience Letters 495(3)187~191 2011-5

7. Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Nobuki Nengaki, Kenji Furutsuka, Hidekatsu Wakizaka, Toshimitsu Okamura, Ming-Rong Zhang, Koichi Kato: Efficient synthesis and chiral separation of ¹¹C-labeled ibuprofen assisted by DMSO for imaging of in vivo behavior of the individual isomers by positron emission tomography. *Bioorganic & Medicinal Chemistry* 19(10) 3265~3273 2011-5
8. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Yuichiro Yoshida, Katsushi Kumata, Joji Yui, Kazunori Kawamura, Akiko Hatori, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis and preliminary evaluation of 4-[¹⁸F]fluoro-N-[4-[6-(isopropylamino) pyrimidin-4-yl]-1,3-thiazol-2-yl]-N-methylbenzamide as a new positron emission tomography ligand for metabotropic glutamate receptor subtype 1. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters* 21(10) 2998~3001 2011-5
9. Tomoyuki Ohya, Toshimitsu Okamura, Yuji Nagai, Kiyoshi Fukushi, Toshiaki Irie, Tetsuya Suhara, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura, Tatsuya Kikuchi: Effect of radiolabeled metabolite elimination from the brain on the accuracy of cerebral enzyme activity estimation using positron emission tomography with substrate tracers. *NeuroImage* 56(3) 1105~1110 2011-6
10. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Kazunori Kawamura, Akiko Hatori, Joji Yui, Nobuki Nengaki, Masanao Ogawa, Yuichiro Yoshida, Hidekatsu Wakizaka, Kazuhiko Yanamoto, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: Evaluation of the P-glycoprotein- and breast cancer resistance protein-mediated brain penetration of ¹¹C-labeled topotecan using small-animal positron emission tomography. *Nuclear Medicine and Biology* 38(5) 707~714 2011-7
11. Atsushi Wakai, Kazuki Tsuchida, Toshimitsu Fukumura, Kazutoshi Suzuki: Isotopic effect in the (2+1) REMPI spectra of ¹³C-substituted methyl iodide for UV selective dissociation. *Chemical Physics Letters* 516(1/3) 23~28 2011/10
12. G.F. Steyn, Szelecsenyi Ferenc, Kovacs Zoltan, Kazutoshi Suzuki, Toshimitsu Fukumura, Kotaro Nagatsu: Excitation Functions of Proton Induced Reactions on ⁸⁹Y and ⁹³Nb with Emphasis on the Production of Selected Radio-Zirconiums. *Journal of the Korean Physical Society* 59(2) 1991~1994 2011-8
13. Kenichi Odaka, Ichio Aoki, Junji Moriya, Kaoru Tateno, Hiroyuki Tadokoro, Jeffrey Kershaw, Tohru Minamino, Toshiaki Irie, Toshimitsu Fukumura, Issei Komuro, Tsuneo Saga: In vivo tracking of transplanted mononuclear cells using manganese-enhanced magnetic resonance imaging (MEMRI) *PLoS ONE* 6(10) 2011-10-07
14. Norihiro Kobayashi, Kenichi Odaka, Tomoya Uehara, Kyoko Yoshida, Hiroyuki Ohyama, Hiroyuki Tadokoro, Michiaki Hiroe, Toshimitsu Fukumura, Issei Komuro, Yasushi Arano: Toward in Vivo Imaging of Heart Disease Using a Radiolabeled Single-Chain Fv Fragment Targeting Tenascin-C. *Analytical Chemistry* 83(23) 9123~9130 2011-12
15. Jun Toyohara, Tadashi Nariai, Muneyuki Sakata, Keiichi Oda, Kenji Ishii, Toshiaki Irie, Tsuneo Saga, Kazuo Kubota, Kiichi Ishiwata: Whole-Body Distribution and Brain Tumor Imaging with ¹¹C-4DST: a Pilot Study. *Journal of Nuclear Medicine* 52 (8) 1322~1328 2011-8
16. Tsuneo Saga, Mitsuru Koizumi, Masayuki Inubushi, Kyosan Yoshikawa, Katsuyuki Tanimoto, Toshimitsu Fukumura, Tadaaki Miyamoto, Mio Nakajima, Naoyoshi Yamamoto, Masayuki Baba: PET/CT with 3-deoxy-3-[¹⁸F]fluorothymidine for lung cancer patients receiving carbon-ion radiotherapy *Nuclear*

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

<原著論文等>

1. D. Ohsawa, H. Tawara, T. Okada, F. Soga, M. E. Galassi, and R. D. Rivarola., Secondary electron emission from water vapor under 6.0-MeV/u C6+ ion impact, Journal of Physics: Conference Series in press.

<学会及び研究会口頭発表等>

1. D. Ohsawa, H. Tawara, T. Okada, F. Soga, M. E. Galassi, and R. D. Rivarola., Secondary electron emission from water vapor under 6.0-MeV/u C6+ ion impact. XXVII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 7/27~ 8/2 2011, Belfast, Northern Ireland, UK.
2. 大澤大輔, 俵博之, 上原周三, 曾我文宣. ブラッグピーク領域の炭素線衝撃による水蒸気からの二次電子放出とトラック構造解析. 日本原子力学会 2011年秋の大会, 2011年9月19~22日, 北九州国際会議場
3. 大澤大輔. ブラッグピーク領域の炭素線衝撃による水蒸気からの二次電子放出とトラック構造解析. 日本物理学会 第67回年次大会 領域1シンポジウム 放射線が生体に与える影響 -原子分子から生物まで-, 2012年3月24~27日, 関西学院大学 西宮西宮上ヶ原キャンパス

4—2. 最前方における陽子及び重陽子生成断面積の測定

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 和西航: 放医研サイクロトロンでの(p,p'x)二重微分断面積の測定、研究会「中性子／粒子線の利用、医療への応用」純真学園大学 平成24年3月24日

<学位論文>

1. 柳田侑樹 「40 MeV陽子入射荷電粒子生成二重微分断面積に関する研究」
2. 和西航平 「40 MeV陽子入射反応二重微分断面積の最前方測定」

4—3. $^1\text{H}(^{13}\text{C}, \text{n})$ 反応からの中性子線測定による PHITS コードの検証

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 遠藤 暁、早川陽祐、森宗佑樹、静間 清、高田真志、鎌田 創、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, \text{n})$ 反応断面積の実験的な評価、「中性子／粒子線の利用、医療への応用」研究会、福岡、2012
2. 早川陽祐、森宗佑樹、遠藤 暁、静間 清、高田真志、鎌田 創、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, \text{n})^{13}\text{N}$ 反応を用いた単色中性子源の検討、日本原子力学会 中国・四国支部 第4回研究発表会、広島、2011.
3. 森宗佑樹、森宗佑樹、遠藤 暁、静間 清、高田真志、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, \text{n})^{13}\text{N}$ 反応測定によるPHITS モンテカルロコードの検証②、日本原子力学会 中国・四国支部 第3回研究発表会、広島、2010.
4. 早川陽祐、遠藤 暁、小島康明、静間 清、高田真志、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, \text{n})^{13}\text{N}$ 反応を用いた単色中性子源の検討、日本原子力学会 中国・四国支部 第3回研究発表会、広島、2010.
5. 森宗佑樹、遠藤 暁、小島康明、静間 清、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, \text{n})^{13}\text{N}$ 反応測定によるPHITSモンテカルロコードの検証、日本原子力学会 中国・四国支部 第2回研究発表会、広島、2009.

4—5. LYSO (Ce) シンチレーターの陽子、重陽子、 α 粒子に対する発光特性

<原著論文等>

1. 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", Journal of Korean Physics Society 59 (2011) 1805-1808

<Proceedings 等>

1. 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", Journal of Korean Physics Society 59 (2011) 1805-1808
2. 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, JProceedings of the 2010 Symposium on Nuclear Data, November 25-26, 2010, C-CUBE, Chikushi Campus, Kyushu University, Kasuga, Japan, JAEA-Conf 2011-002,
3. 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, "Fragment DDX on C, N, O, Al, Ti Cu for $E_p=140, 200, 300$ MeV", RCNP Annual Report 2010, p15

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 佐波俊哉、萩原雅之、岩瀬広、「中高エネルギー陽子による核破砕片の系統測定に関する研究」、原子力システム研究開発事業及び原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ 平成23年度成果報告会 2012年2月6日 科学技術振興機構 東京本部別館
2. T.Sanami, M.Hagiwara, H.Iwase, "Angular distribution of light fragments for proton induced reaction at intermediate energies", 2011 Symposium on Nuclear Data (November 16,17, 2011, Tokai-mura, Ibaraki-ken), to be published on JAEA-Conf
3. 佐波俊哉、萩原雅之、岩瀬広、高田真志、鎌田創、佐藤大樹、岩元洋介、中根佳宏、國枝賢、梶本剛、八島浩、民井淳、畑中吉治、数100MeV陽子入射に対するAl,Ti,Cuの 核破砕片生成二重微分断面積、日本原子力学会秋の大会 (2011/9/21 北九州)
4. 佐波俊哉、萩原雅之、岩瀬広、高田真志、鎌田創、佐藤大樹、岩元洋介、中根佳宏、國枝賢、梶本剛、八島浩、民井淳、畑中吉治、数100MeV陽子によるフラグメント生成二重微分断面積の測定、RCNPでの核データ研究戦略検討会(大阪大学核物理研究センター、2011年6月28日(火)、29日(水))
5. 佐波俊哉、萩原雅之、岩瀬広、高田真志、鎌田創、佐藤大樹、岩元洋介、中根佳宏、國枝賢、梶本剛、八島浩、民井淳、畑中吉治、数100MeV陽子入射に対する核破砕片生成二重微分断面積測定、日本原子力学会春の年会 (2011/3 福井)
6. 萩原雅之、岩元洋介、松田規宏、西澤知也、執行信寛、佐波俊哉、坂本幸夫、低エネルギー重イオン入射核反応から生成する粒子生成二重微分断面積の包括的な測定 -核子あたり13MeVのネオン入射によるベリリウム、炭素、鉄からの荷電粒子 (H~Ar) 生成-、日本原子力学会春の年会 (2011/3 福井)

<その他>

1. 佐波俊哉、萩原雅之、岩瀬広、平成22年度 文部科学省 原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ「中高エネルギー陽子による核破砕片の系統測定に関する研究」成果報告書

5—1. 小型ホスウィッチ検出器とレンジカウンタの陽子応答測定

<学位論文>

1. 金山沙緒里、「炭素線治療時に生じる二次粒子の炭素同位体の成分評価に向けたレンジカウンタの開発」、千葉大学大学院理学研究科修士論文、平成24年2月

5—2. 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. H. Kitamura, Y. Uchihori, N. Yasuda, E. Benton, S. Kodaira, O. Ploc, T. Berger, M. Hajek, I. Ambrozova, and ICCHIBAN Participants., Preliminary Results of 2nd and 3rd Proton ICCHIBAN Experiments. 16th WRMISS, Sept. 6th 2011, Prague, Czech Republic.
2. M. Fragopoulou, S. Stoulos, M. Zamani, E. Benron, Y. Uchihori, D. O'Sullivan, S. Siskos, T. Laopoulos, V. Konstantakos, and G. Sarabayrouse., Calibration of depleted type of p-MOSFET dosimeter to high energy protons. 16th WRMISS, Sept. 8th 2011, Prague, Czech Republic

6—1. 次世代型重粒子線がん治療装置用超電導加速器の基盤技術研究

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 矢崎 真二郎、青木 徹、神林 佑、柄澤 彰良、石山 敦士、宮原 信幸: 高温超電導線材の中性子照射実験: 機械特性評価、第 84 回低温工学・超電導学会(May 18-20 2011, Tsukuba Japan) 、 p.133
2. 石山 敦士、王 旭東、植田 浩史、福田 光宏、畑中 吉治、長屋 重夫、鹿島 直二、宮原 信幸、横田 渉: 次世代高温超電導サイクロトロンの開発、第 84 回低温工学・超電導学会(May 18-20 2011, Tsukuba Japan) 、 p.134
3. 石山 敦士、王 旭東、植田 浩史、福田 光宏、畑中 吉治、長屋 重夫、鹿島 直二、宮原 信幸、横田 渉: 次世代高温超電導サイクロトロンの試設計、第 84 回低温工学・超電導学会(May 18-20 2011, Tsukuba Japan) 、 p.135
4. 柄澤 彰良、青木 徹、神林 佑、矢崎 真二郎、石山 敦士、宮原 信幸: 高温超電導線材の加熱による特性変化、第 84 回低温工学・超電導学会(May 18-20 2011, Tsukuba Japan) 、 p.151
5. 神林 佑、青木 徹、王 旭東、石山 敦、宮原 信、植田 浩史、鹿島 直二、長屋 重夫: Influence of neutron irradiation on mechanical properties of high temperature superconductors 、European Conference on Applied Superconductivity 2011(September 18-23 2011, Den Haag Netherland)
6. 矢崎 真二郎、青木 徹、神林 佑、柄澤 彰良、琴寄 拓哉、石山 敦士、宮原 信幸: 高温超電導線材の高温加熱による特性変化、第 85 回低温工学・超電導学会(November 9-11 2011, Kanazawa Japan) 、 p.137
7. 琴寄 拓哉、神林 佑、柄澤 彰良、矢崎 真二郎、石山 敦士、宮原 信幸: 中性子照射による高温超電導体への影響、第 85 回低温工学・超電導学会(November 9-11 2011, Kanazawa Japan) 、 p.142
8. 柄澤 彰良、石山 敦士、植田 浩史、福田 光宏、畑中 吉治、長屋 重夫、鹿島 直二、宮原 信幸: 次世代超電導サイクロトロンの設計: 電磁応力評価、第 85 回低温工学・超電導学会(November 9-11 2011, Kanazawa Japan) 、 p.143
9. 植田 浩史、福田 光宏、畑中 吉治、石山 敦士: 次世代高温超電導サイクロトロンのための高温超電導コイルの遮へい電流による磁場の空間的・時間的变化 -(2)計算例- 、第 85 回低温工学・超電導学会(November 9-11 2011, Kanazawa Japan) 、 p.144

10. 狩野 開、柄澤 彰良、琴寄 拓哉、矢崎 真二郎、道辻 健太、石山 敦士、宮原 信幸：高温超電導線材の温度上昇における特性変化、平成24年度電気学会全国大会(March 21-23 2012,Hiroshima Japan)、p.154
11. 道辻 健太、柄澤 彰良、矢崎 真二郎、石山 敦士、宮原 信幸：中性子照射高温超電導線材の機械特性、平成24年度電気学会全国大会(March 21-23 2012,Hiroshima Japan)、p.183

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

<原著論文等>

1. Stefan C. Genet, Junko Maeda, Hiroshi Fujisawa, Charles R. Yurkon, Yoshihiro Fujii, Ashley M. Romero, Paula C. Genik, Akira Fujimori, Hisashi Kitamura, and Takamitsu A. Kato., Comparison of cellular lethality in DNA repair proficient or deficient cell lines resulting from exposure to 70 MeV/n protons or 290 MeV/n carbon ions. Submitted to International Journal of Oncology.

<学会及び研究会口頭発表等>

1. 加藤宝光、Comparison of cellular lethality in DNA repair proficient or deficient cell lines resulting from exposure to 70 MeV/n protons or 290 MeV/n carbon ions、放射線影響学会 2011年、神戸、口頭発表

9. 関連資料

平成23年度第Ⅰ期・Ⅱ期マシンタイム予定表

小型サイクロトロン			大型サイクロトロン		小型サイクロトロン			大型サイクロトロン	
月 日	午 前	午 後	午 前	午 後	月 日	午 前	午 後	午 前	午 後
3月28日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		4月18日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
3月29日 (火)	メンテナンス		メンテナンス		4月19日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	
3月30日 (水)	メンテナンス		メンテナンス		4月20日 (水)	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	
3月31日 (木)	メンテナンス		メンテナンス		4月21日 (木)	RI生産		RI生産 (所外generator) 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	
4月1日 (金)	調整運転		調整運転		4月22日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	
4月2日 (土)					4月23日 (土)			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	
4月3日 (日)					4月24日 (日)				
4月4日 (月)	調整運転		調整運転		4月25日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9
4月5日 (火)	RI生産		調整運転		4月26日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	
4月6日 (水)	RI生産		調整運転		4月27日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	
4月7日 (木)	RI生産		調整運転		4月28日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	
4月8日 (金)	RI生産		調整運転		4月29日 (金)	昭和の日			
4月9日 (土)					4月30日 (土)				
4月10日 (日)					5月1日 (日)				
4月11日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	5月2日 (月)	R&D		R&D	
4月12日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		5月3日 (火)	憲法記念日			
4月13日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		5月4日 (水)	みどりの日			
4月14日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		5月5日 (木)	こどもの日			
4月15日 (金)	RI生産		人工衛星搭載用電子デバイス シングルイベント評価試験 アクセルスペース P70MeV / 10e7 pps C8		5月6日 (金)	RI生産		R&D	
4月16日 (土)					5月7日 (土)				
4月17日 (日)					5月8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9日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	5月30日 (月)	メンテナンス	メンテナンス
5月10日 (火)	RI生産		陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 2nA C8		5月31日 (火)	RI生産	
5月11日 (水)	RI生産		RI生産 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		6月1日 (水)	RI生産	
5月12日 (木)	RI生産		RI生産 (所内generator) 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		6月2日 (木)	RI生産	
5月13日 (金)	RI生産		RI生産 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		6月3日 (金)	RI生産	
5月14日 (土)					6月4日 (土)		
5月15日 (日)					6月5日 (日)		
5月16日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	6月6日 (月)	メンテナンス	RI生産
5月17日 (火)	RI生産		RI生産 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		6月7日 (火)	RI生産	
5月18日 (水)	RI生産		RI生産 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		6月8日 (水)	RI生産	
5月19日 (木)	RI生産		RI生産 (所外generator) 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		6月9日 (木)	RI生産	
5月20日 (金)	RI生産		人工衛星搭載用電子デバイス シングルイベント評価試験 アクセルスペース P70MeV / 10e7 pps C8		6月10日 (金)	RI生産	
5月21日 (土)					6月11日 (土)		
5月22日 (日)					6月12日 (日)		
5月23日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	6月13日 (月)	メンテナンス	RI生産
5月24日 (火)	RI生産		RI生産 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		6月14日 (火)	RI生産	
5月25日 (水)	RI生産		RI生産 福島 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		6月15日 (水)	RI生産	
5月26日 (木)	RI生産		電子部品の放射線による 劣化傾向評価 JAXA (河原) P70MeV / 1e10 pps C8		6月16日 (木)	RI生産	
5月27日 (金)	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		6月17日 (金)	RI生産	
5月28日 (土)					6月18日 (土)		
5月29日 (日)					6月19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20日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		7月11日 (月)	メンテナンス	RI生産
6月21日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		7月12日 (火)	RI生産	
6月22日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		7月13日 (水)	RI生産	
6月23日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		7月14日 (木)	RI生産	
6月24日 (金)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 鎌田 (佐波) P70MeV / 40nA C6		7月15日 (金)	RI生産	
6月25日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3		7月16日 (土)		
6月26日 (日)					7月17日 (日)		
6月27日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV / 15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	7月18日 (月)	海の日	
6月28日 (火)	RI生産		RI生産 (所内generator) 福村 P40MeV / 15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		7月19日 (火)	RI生産	
6月29日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		7月20日 (水)	RI生産	
6月30日 (木)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		7月21日 (木)	RI生産	
7月1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 ^{5+ 8+} 96MeV / 500 nA C10		7月22日 (金)	RI生産 (15時まで)	メンテナンス
7月2日 (土)					7月23日 (土)	停電(予定)	
7月3日 (日)					7月24日 (日)		
7月4日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	7月25日 (月)	長期メンテナンス	
7月5日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		7月26日 (火)	長期メンテナンス	
7月6日 (水)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV / 15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		7月27日 (水)	長期メンテナンス	
7月7日 (木)	RI生産		半導体デバイスのプロトン シングルイベント試験 HIREC P70MeV / 1nA C8		7月28日 (木)	長期メンテナンス	
7月8日 (金)	RI生産		半導体デバイスのプロトン シングルイベント試験 HIREC P70MeV / 1nA C8		7月29日 (金)	長期メンテナンス	
7月9日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3		7月30日 (土)		
7月10日 (日)					7月31日 (日)		

小型サイクロロン		大型サイクロロン		小型サイクロロン		大型サイクロロン	
月 日	午 前	午 後	午 前	午 後	月 日	午 前	午 後
8月1日 (月)	長期メンテナンス				8月22日 (月)	メンテナンス	メンテナンス
8月2日 (火)	長期メンテナンス				8月23日 (火)	RI生産	RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9
8月3日 (水)	長期メンテナンス				8月24日 (水)	RI生産	RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9
8月4日 (木)	長期メンテナンス				8月25日 (木)	RI生産	RI生産(所外generator) 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9
8月5日 (金)	長期メンテナンス				8月26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
8月6日 (土)					8月27日 (土)		
8月7日 (日)					8月28日 (日)		
8月8日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	調整運転	8月29日 (月)	来期マシンタイム	
8月9日 (火)	RI生産		調整運転		8月30日 (火)	来期マシンタイム	
8月10日 (水)	RI生産		調整運転		8月31日 (水)	来期マシンタイム	
8月11日 (木)	RI生産		調整運転		9月1日 (木)	来期マシンタイム	
8月12日 (金)	RI生産		調整運転		9月2日 (金)	来期マシンタイム	
8月13日 (土)					9月3日 (土)		
8月14日 (日)					9月4日 (日)		
8月15日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9	9月5日 (月)	来期マシンタイム	
8月16日 (火)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		9月6日 (火)	来期マシンタイム	
8月17日 (水)	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		9月7日 (水)	来期マシンタイム	
8月18日 (木)	RI生産		RI生産(所内generator) 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		9月8日 (木)	来期マシンタイム	
8月19日 (金)	RI生産		RI生産 福村 P40MeV／15 μ A etc、C1,C2,C4,C9		9月9日 (金)	来期マシンタイム	
8月20日 (土)			陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 2nA C8		9月10日 (土)		
8月21日 (日)					9月11日 (日)		

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
8月29日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産	9月19日 (月)			敬老の日	
8月30日 (火)	RI生産		RI生産		9月20日 (火)	RI生産		RI生産	
8月31日 (水)	RI生産		RI生産		9月21日 (水)	RI生産		RI生産	
9月1日 (木)	RI生産		RI生産		9月22日 (木)	RI生産		RI生産	
9月2日 (金)	RI生産		超小型衛星搭載電子機器の シングレイベント評価試験 理科大 P40MeV / 1nA C8		9月23日 (金)			秋分の日	
9月3日 (土)					9月24日 (土)				
9月4日 (日)					9月25日 (日)				
9月5日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産	9月26日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
9月6日 (火)	RI生産		RI生産 (所内generator)		9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 京大(大澤) O ⁸⁺ 96MeV / 500 nA C10	
9月7日 (水)	RI生産		最前方における陽子及び重陽子 生成断面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 1nA C6		9月28日 (水)	RI生産		RI生産 (Mg)	
9月8日 (木)	RI生産		RI生産		9月29日 (木)	RI生産		RI生産	
9月9日 (金)	RI生産		RI生産	R&D	9月30日 (金)	RI生産		半導体デバイスのプロトン シングレイベント試験 HIREC P70MeV / 1nA C8	
9月10日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3		10月1日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3	
9月11日 (日)					10月2日 (日)				
9月12日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		10月3日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
9月13日 (火)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) O ⁸⁺ 96MeV / 500 nA C10		10月4日 (火)	RI生産		RI生産 (所内generator)	
9月14日 (水)	RI生産		RI生産		10月5日 (水)	RI生産		RI生産	R&D
9月15日 (木)	RI生産		RI生産 (所外generator)		10月6日 (木)	RI生産		RI生産	
9月16日 (金)	RI生産		RI生産		10月7日 (金)	RI生産		人工衛星搭載用電子デバイス シングレイベント評価試験 アクセルスペース P70MeV / 10e7 pps C8	
9月17日 (土)			文化の日		10月8日 (土)				
9月18日 (日)					10月9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
10月10日 (月)			体育の日		10月31日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
10月11日 (火)	RI生産		RI生産		11月1日 (火)	RI生産		RI生産	
10月12日 (水)	RI生産		宇宙放射線粒子の電子デバイスに 与える影響に関する研究 JAXA(高島) P70MeV / 10e8～10 pps C6		11月2日 (水)	RI生産		RI生産 (Mg)	
10月13日 (木)	RI生産		RI生産 (所外generator)		11月3日 (木)			文化の日	
10月14日 (金)	RI生産		RI生産		11月4日 (金)	RI生産		RI生産	
10月15日 (土)			宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P70MeV / 10nA C8		11月5日 (土)				
10月16日 (日)					11月6日 (日)				
10月17日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産	11月7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
10月18日 (火)	RI生産		RI生産		11月8日 (火)	RI生産		RI生産 (所内generator)	
10月19日 (水)	RI生産		RI生産		11月9日 (水)	RI生産		小型ホスウィッチ検出器とレンジカウンタの 陽子応答測定 古場 P80MeV / 1nA C6	
10月20日 (木)	RI生産		RI生産		11月10日 (木)	RI生産		RI生産	R&D
10月21日 (金)	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		11月11日 (金)	RI生産		RI生産	
10月22日 (土)					11月12日 (土)			陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 5nA C8	
10月23日 (日)					11月13日 (日)				
10月24日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		11月14日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
10月25日 (火)	RI生産		RI生産		11月15日 (火)	RI生産		RI生産	
10月26日 (水)	RI生産		RI生産		11月16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	
10月27日 (木)	RI生産		RI生産		11月17日 (木)	RI生産		RI生産 (所外generator)	
10月28日 (金)	RI生産		宇宙機搭載用放射線環境計測装置 の開発 JAXA(松本) P30MeV / 1nA C6		11月18日 (金)	RI生産		宇宙機搭載用放射線環境計測装置 の開発 JAXA(松本) P70MeV / 1nA C6	
10月29日 (土)					11月19日 (土)				
10月30日 (日)					11月20日 (日)				

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
11月21日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産	12月12日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18MeV / 17 μ A / C1
11月22日 (火)	RI生産		RI生産		12月13日 (火)	RI生産		RI生産 P12MeV / 8 μ A / C4	
11月23日 (水)			勤労感謝の日		12月14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	
11月24日 (木)	RI生産		RI生産		12月15日 (木)	RI生産		RI生産 (所外generator) P30MeV / 20 μ A / C4	
11月25日 (金)	RI生産		RI生産		12月16日 (金)	RI生産		人工衛星搭載用電子デバイス シングルイベント評価試験 アクセルスペース P70MeV / 10e7 pps C8	
11月26日 (土)					12月17日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3	
11月27日 (日)					12月18日 (日)				
11月28日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		12月19日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
11月29日 (火)	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		12月20日 (火)	RI生産		R&D	
11月30日 (水)	RI生産		RI生産 (Mg)		12月21日 (水)	RI生産		RI生産 (Mg) 4He75MeV / 10 μ A / C4	
12月1日 (木)	RI生産		RI生産		12月22日 (木)	RI生産		R&D	
12月2日 (金)	RI生産		RI生産		12月23日 (金)			天皇誕生日	
12月3日 (土)			中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 鎌田 (遠藤) 13C 117MeV / 30nA C8		12月24日 (土)				
12月4日 (日)					12月25日 (日)				
12月5日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P15MeV / 10 μ A / C9	12月26日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18MeV / 17 μ A / C1
12月6日 (火)	RI生産		RI生産 (所内generator) P30MeV / 20 μ A / C4 H ₂ 27MeV / 15 μ A / C9		12月27日 (火)	RI生産		放医研サイクロトロンLi(p,n)中性子場の 特性評価 鎌田 P80MeV / 10nA C6	
12月7日 (水)	RI生産		RI生産 H ₂ 27MeV / 15 μ A / C9		12月28日 (水)	メンテナンス		放医研サイクロトロンLi(p,n)中性子場の 特性評価 鎌田 P80MeV / 10nA C6	
12月8日 (木)	RI生産		最前方における陽子及び重陽子 生成断面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 1nA C6		12月29日 (木)				
12月9日 (金)	RI生産		最前方における陽子及び重陽子 生成断面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 1nA C6		12月30日 (金)				
12月10日 (土)					12月31日 (土)				
12月11日 (日)					1月1日 (日)			元日	

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
1月2日 (月)					1月23日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
1月3日 (火)					1月24日 (火)	RI生産		RI生産 P12MeV / 8 μ A / C4 P15MeV / 15 μ A / C9	
1月4日 (水)	RI生産		小型ホスウィッチ検出器とレンジカウンタの 陽子応答測定 古場 P80MeV / 1nA C6		1月25日 (水)	RI生産		宇宙放射線粒子の電子デバイスに 与える影響に関する研究 JAXA(高島) P70MeV / 10e8～10 pps C8	
1月5日 (木)	RI生産		R&D		1月26日 (木)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) O ⁵⁺ 96MeV / 500 nA C10	
1月6日 (金)	RI生産		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 北村(加藤) P70MeV / 3nA C8		1月27日 (金)	RI生産		RI生産 P18MeV / 15 μ A / C9	
1月7日 (土)					1月28日 (土)				
1月8日 (日)					1月29日 (日)				
1月9日 (月)			成人の日		1月30日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18MeV / 17 μ A / C2 P18MeV / 10 μ A / C1
1月10日 (火)	RI生産		R&D		1月31日 (火)	RI生産		RI生産(所内generator) P30MeV / 20 μ A / C4	
1月11日 (水)	RI生産		RI生産 P18MeV / 15 μ A / C9		2月1日 (水)	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	
1月12日 (木)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 鎌田(佐波) P80,P40MeV / 10nA C6		2月2日 (木)	RI生産		RI生産 P30MeV / 5 μ A / C9	
1月13日 (金)	RI生産		中性子検出器の開発、特性評価、 核データ取得 鎌田(佐波) He100, D50MeV / 10nA C6		2月3日 (金)	RI生産		R&D	
1月14日 (土)					2月4日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3	
1月15日 (日)					2月5日 (日)				
1月16日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18MeV / 10 μ A / C1	2月6日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
1月17日 (火)	RI生産		陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 5nA C8		2月7日 (火)	RI生産		RI生産 P15MeV / 15 μ A / C9	
1月18日 (水)	RI生産		RI生産 H ₂ 27MeV / 25 μ A / C9		2月8日 (水)	RI生産		RI生産(Mg) 4He75MeV / 10 μ A / C4	
1月19日 (木)	RI生産		RI生産(所外generator) P30MeV / 20 μ A / C4		2月9日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV / 15 μ A / C9	
1月20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 He 100MeV / 10nA C8		2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 京大(大澤) O ⁵⁺ 96MeV / 500 nA C10	
1月21日 (土)			宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P 80MeV / 10nA C8		2月11日 (土)			建国記念の日	
1月22日 (日)					2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	午 前	午 後
2月13日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	3月5日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	
2月14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 μ A C3		3月6日 (火)	RI生産		メンテナンス	
2月15日 (水)	RI生産		RI生産 H ₂ 27MeV / 25 μ A / C9		3月7日 (水)	RI生産		メンテナンス	
2月16日 (木)	RI生産		RI生産 (所外generator) P30MeV / 20 μ A / C4		3月8日 (木)	RI生産		メンテナンス	
2月17日 (金)	RI生産		R&D		3月9日 (金)	RI生産		メンテナンス	
2月18日 (土)			超電導線材ならびにコイル構成材料の 耐放射線性に関する研究 宮原 D30MeV / 20 μ A C3		3月10日 (土)				
2月19日 (日)					3月11日 (日)				
2月20日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P12MeV / 8 μ A / C4	3月12日 (月)	長期メンテナンス			
2月21日 (火)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) O ⁸⁺ 96MeV / 500 nA C10		3月13日 (火)	長期メンテナンス			
2月22日 (水)	RI生産		RI生産 P18MeV / 15 μ A / C9		3月14日 (水)	長期メンテナンス			
2月23日 (木)	RI生産		RI生産 P30MeV / 10 μ A / C9		3月15日 (木)	長期メンテナンス			
2月24日 (金)	RI生産 (15時まで)	メン テナ ンス	R&D	メンテナンス	3月16日 (金)	長期メンテナンス			
2月25日 (土)			全所停電		3月17日 (土)				
2月26日 (日)					3月18日 (日)				
2月27日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		3月19日 (月)	長期メンテナンス			
2月28日 (火)	RI生産		RI生産 P30MeV / 20 μ A / C4		3月20日 (火)	長期メンテナンス			
2月29日 (水)	RI生産		RI生産 P18MeV / 0.05 μ A / C2		3月21日 (水)	長期メンテナンス			
3月1日 (木)	RI生産		RI生産 P18MeV / 20 μ A / C9		3月22日 (木)	長期メンテナンス			
3月2日 (金)	RI生産		陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 5nA C8		3月23日 (金)	長期メンテナンス			
3月3日 (土)			陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 5nA C8		3月24日 (土)				
3月4日 (日)					3月25日 (日)				

平成 2 3 年度サイクロトロン利用報告書

- ・ 発行年月 2 0 1 2 年 1 2 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_sec@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