



NIRS-M-224

平成20年度

サイクロトロン利用報告書



独立行政法人 放射線医学総合研究所

目 次

1. サイクロトロン ¹ の運転・維持及び改良・開発	(1)
2. サイクロトロン ¹ の R I 製造への利用状況	(9)
3. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究	(13)
4. 粒子線検出器の開発	
4-1. 宇宙環境中における中性子検出器の開発	(17)
4-1-I. 数 10MeV 陽子からのフラグメント生成 2 重微分断面積の測定	(18)
4-1-II. $^1\text{H}(^{13}\text{C},n)$ 反応からの中性子線測定による PHITS コードの検証	(22)
4-1-III. 硼素中性子捕捉療法用加速器中性子源のための 30MeV 陽子による ベリリウムターゲットからの中性子スペクトル測定	(26)
4-1-IV. LYSO(Ce)シンチレーターを用いた 中エネルギー陽子エネルギー測定	(31)
4-1-V. 飛翔体搭乗員用の個人線量計の開発に関する研究	(34)
4-2. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発	(35)
4-3. 宇宙飛翔体搭載型放射線検出器の開発	(37)
4-3-I. 宇宙機搭載放射線観測装置の開発	(38)
4-3-II. ISS 搭載候補 JEM-EUSO ミッションで使用する 部品パーツの放射線耐性試験	(40)
4-4. 宇宙線中性子測定装置の応答関数評価	(43)
5. 高温超電導線材の耐放射線損傷試験	(45)
6. 研究成果一覧	(51)
7. 関連資料	
平成 19 年度第 I 期・II 期マシンタイム予定表	(63)

1. サイクロトロンの運転・維持及び改良・開発

サイクロトロン施設の運転・維持及び改良・開発

杉浦彰則^a、金澤光隆^a、本間壽廣^a、鈴木直方^a、北條 悟^a、金井達明^a、野田耕司^a、
岡田高典^b、小松克好^b、神谷 隆^b

^a 放射線医学総合研究所、^b 加速器エンジニアリング株式会社

はじめに

放射線医学総合研究所(放医研)のサイクロトロン施設(図 1)には、建設より 35 年間運転を続けている大型サイクロトロン(NIRS-930)と、1994 年に放射性薬剤の製造を目的として導入された小型サイクロトロン(HM-18)の 2 台のサイクロトロンがある[1]。大型サイクロトロンで加速されたビームは、9 つの照射ポートにおいてさまざまな用途で利用されている。そのうち、2 つの放射性薬剤の製造専用照射ポートでは、小型サイクロトロンで加速されたビームの利用も行なわれている。これら 2 台のサイクロトロンは、平成 20 年度も大きなトラブルもなくビーム提供を行なう事ができており、放射性薬剤の開発研究を中心に、宇宙環境中における粒子線の検出器の開発、重粒子線治療に関する基礎実験、放射線損傷試験、有料ビーム提供が行なわれた。

本報告書では、平成 20 年度における 2 台のサイクロトロンの利用状況、及び改良・開発の現状について報告する。

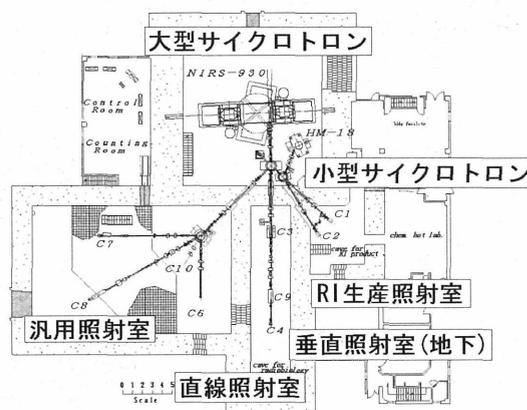


図 1. サイクロトロン施設の配置図

1. 利用状況

1-1. 総運転時間の推移

過去 5 年間の大型・小型サイクロトロンの運転時間を図 2 に示す。平成 20 年度の総運転時間は大型サイクロトロンで 1,676 時間、小型サイクロトロンで 1,415 時間であった。

平成 20 年度の大型サイクロトロンの総運転時間は、平成 19 年度より提供時間が増加し、調整運転の時間が減少している。これは、平成 19 年度から要求が増え調整運転が頻繁に行われていた、低エネルギー陽子ビームの提供が、平成 20 年度には定常化したためである。

平成 20 年度の小型サイクロトロンの総運転時間は調整運転の時間、平成 19 年度より増加している。これは小型サイクロトロンの制御系及び電源の更新にともなうもので、詳細は 2-1 小型サイクロトロンの制御系及び電源の更新で述べる。

平成 17、18 年度は大型サイクロトロンの加速高周波系更新にともない運転停止期間長かったため、総運転時間が大型小型ともに少なくなっている。

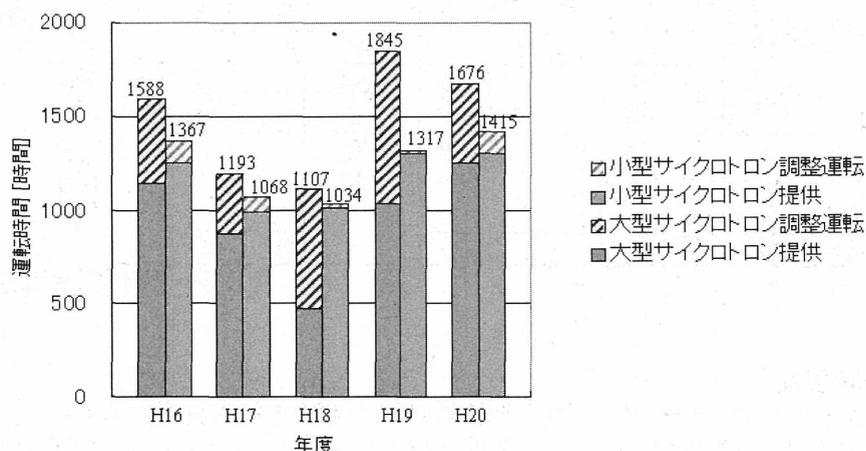


図 2. 過去 5 年間の総運転時間の推移

1-2. 大型サイクロトロンの利用状況

大型サイクロトロンの分野別運転時間を図3に示す。大型サイクロトロンの分野別運転時間を見ると、A) 放射性薬剤の製造では814.9時間、B) 粒子線検出器の開発では229.7時間、C) 物理研究では120.9時間、D) 中性子による損傷試験では7.7時間、E) 有料ビーム提供では70.5時間となり、ビーム提供時間の総計では、1243.7時間であった。また、ビーム提供以外のE)調整運転では、432.6時間であり、総運転時間では、1,676.3時間となった。大型サイクロトロンの利用は、全体の1/2が放射線薬剤の製造、1/4が物理実験、1/4が調整運転となっている。また、粒子・エネルギー別運転時間を表1に示す。陽子(P)ではP18 MeVや30 MeVが主に放射性薬剤の製造で利用されている。また、P70 MeVが粒子線検出器の開発や、有料提供で利用されている。水素分子(H₂⁺)ではH₂+28 MeVが主に放射性薬剤の製造で利用されている。また、炭素(C)ではC72 MeVが主に生物物理研究で利用されている。各分野における、利用粒子やエネルギーなどについて以下に述べる。

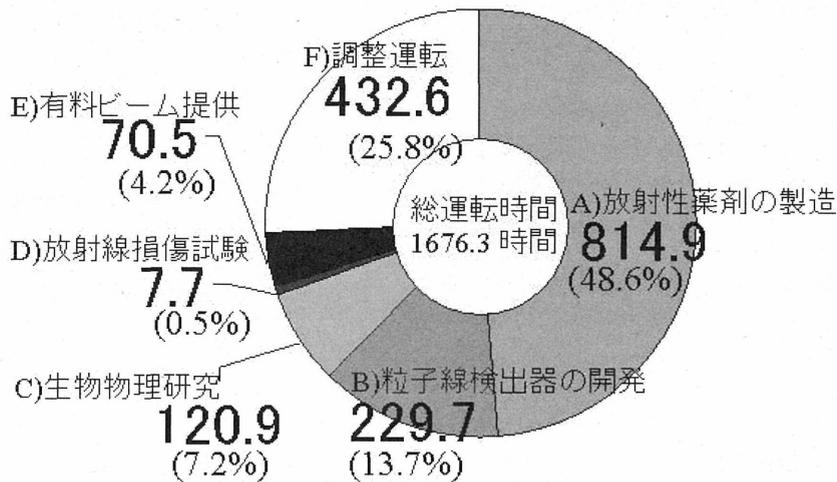


図3. 平成20年度の大型サイクロトロンの分野別運転時間 [時間]

表1. 大型サイクロトロンの粒子・エネルギー別運転時間

陽子 (P)		重水素 (D)		水素分子 (H ₂ ⁺)		ヘリウム3 (³ He ²⁺)		
エネルギー [MeV]	運転時間 [時間]	エネルギー [MeV]	運転時間 [時間]	エネルギー [MeV]	運転時間 [時間]	エネルギー [MeV]	運転時間 [時間]	
80	46.8	30	15.7	36	14.0	135	28.0	
70	124.7	12	15.3	28	299.8	105	4.0	
50	22.0			24	12.5	75	13.5	
40	29.4							
35	7.0							
30	244.6		計 31.0		計 326.3		計 45.5	
25	12.5	アルファ粒子 (α)		炭素 (C)		酸素 (¹⁶ O)		
20	11.5	100	9.5	144	16.0	(6価)		
18	370.8	40	6.0	72	111.3	170	7.5	
16	9.7	24	21.0	(¹³ C)		(5価)		
14	96.9			143	13.0	160	59.2	
12	50.8					128	3.5	
	計 1026.6		計 36.5		計 140.3		計 70.2	
							総運転時間 [時間]	1676.3

A) 放射性薬剤の製造

大型サイクロロンにおけるビーム提供時間の中で最も大きい部分を占めている分野は放射性薬剤の製造[2]に関するビーム提供で、総運転時間の48.6%を占めている。主に陽子(P)12~30 MeVのビームが、放射性薬剤の開発研究や、臨床研究及び診断用の放射性薬剤を製造するために利用されている。これらの照射は、RI生産照射室(C-1,C-2コース)、直線照射室(C-4コース)、垂直照射室(C-9コース)で

行なわれた。本年度の大型からの RI 提供は、C-1,C-2 コースへ、週に 1 回程度、C-4 コースへ週に 2 回程度、C-9 コースへ週に 3 回程度の頻度でビーム提供が行なわれた。また、ジェネレーター(^{62}Zn - ^{62}Cu)の製造が昨年度に引き続き行なわれ、福井大学、横浜市立大学、がんセンター東病院と、放医研の 4 施設へ提供された。このためのジェネレーターの製造では、P30 MeV, 20 μA のビームを C-4 コースへ 9 時間連続で照射を行なった。また、垂直照射室(C-9 コース)では、熔融ターゲットを用いた ^{124}I 等の RI 製造が行われ P14 MeV, 10 μA のビームを提供している。

B) 粒子線検出器の開発

粒子線検出器の開発は、総運転時間の 13.7%を占めている。ここでは、P40~70 MeV と α 100 MeV のビームが利用されており、個人被ばく線量計から衛星搭載用の放射線観測装置まで、様々な検出器の開発が行なわれた[5,6,7]。この実験は主に汎用照射室の C-6,C-8 コースで行なわれた。宇宙環境実験の目的上、極少ないビーム量での利用が多く、また、エネルギーを均一にさせたビームや、ビームバンチ内での時間分布を一定にするなどの要求があり、それぞれの要望に応じて、サイクロトロンを中心部にあるスリットや、加速高周波系の電圧や位相等を調整してビーム提供を行なった。

C) 生物物理研究

生物物理の研究では、重粒子線の生物効果に関する研究が、汎用照射室の C-10 コースで行なわれ総運転時間の 7.2%を占めている。この研究では、C72 MeV と 144 MeV のビームが利用され、炭素イオンが水分子に衝突することによって発生する 2 次電子の研究が行われた[6]。この実験では、炭素イオンのエネルギーだけでなく、価数も重要視されており、 C^{4+} と C^{6+} ビームの要求があった。したがって 6 価のビーム提供をする場合は、サイクロトロンで C^{4+} ビームを加速し、取出した後、厚さ 50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の carbon foil stripper を用いて 6 価に荷電変換して C-10 コースへ供給した。

D) 中性子による損傷試験

中性子による損傷試験は、本年度から始まった課題で総運転時間の 0.5%を占めている。ここでは、中性子線を超伝導材料に当て、その特性を調査する実験が行われた[8]。ベリリウムターゲットに D30 MeV を当てることによって発生する中性子を利用している。この実験は C-3 コースで行われたが、照射線量を上げる為ターゲット直近の直線照射室内で行なわれた。

E) 有料ビーム提供

サイクロトロン施設では、本年度も外部機関への有料ビーム提供を行なった。提供先は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の 3 つの実験グループと、HIREC 株式会社のグループ、東京大学グループである。有料ビーム提供の運転時間は 70.5 時間で、総運転時間の 4.2%を占めている。この運転時間は料金の発生していない提供開始前の準備運転時間も含まれている。実際に有料である提供時間の総計は 55.0 時間となっている。この提供では P70 MeV のビームが擬似宇宙線として利用され、衛星搭載用機器等に対する耐放射線試験が行なわれた。

F) 調整運転

大型サイクロトロンでは、総運転時間の 25.8%となる 432.6 時間を調整運転が占めている。この調整運転の中では、輸送効率の向上や、新規ビーム加速などを行っている。今期は、放射性薬剤の製造用に使われる P18, P14, P12 MeV 等のビームの輸送効率を向上させる調整運転が 215 時間であった。また、新規ビームでは、 $^{13}\text{C}^{5+}$ 143 MeV, O^{5+} 128 MeV, O^{6+} 170 MeV 等の調整運転が行われた。放射線障害防止法に基づき年 2 回行なわれる放射線漏洩測定もこの時間内で行なわれた。

1-4. 小型サイクロトロンの利用状況

小型サイクロトロン(HM-18)は、放射性薬剤の製造専用で P18 MeV と D9 MeV の加速を行なっている。小型サイクロトロンの運転時間を図 4 に示す。総運転時間は 1,414.9 時間で、 ^{11}C や ^{13}N の製造に利用される P18 MeV が総運転時間の 84.8%で 1,199.8 時間、 ^{15}O の製造に利用される D9 MeV は総運転時間の 6.8%で、96.8 時間であった。これらのビーム提供時間の総計は 1,296.6 時間であった。それ以外の調整運転は、総運転時間の 8.4%で 118.3 時間であったが、このほとんどは、2-1 で述べる小型サイクロトロンの制御系及び電源の更新後に行なわれたビーム確認や各駆動機器の試験等に使われた。

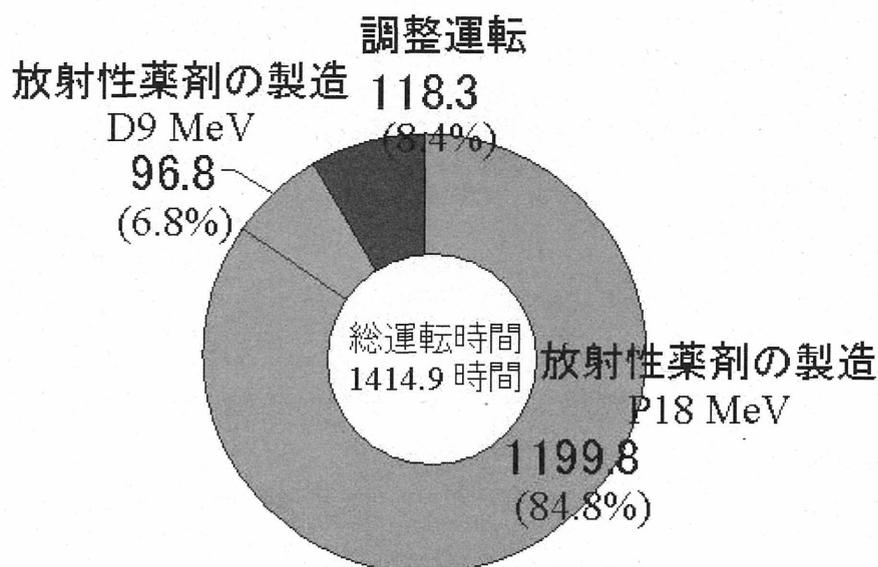


図 4. 小型サイクロトロン運転時間 [時間]

2. サイクロトン装置の改良・開発

サイクロトン施設では装置の維持・性能向上のために、いくつかの改良・開発を行ってきた。本年度に行った改良・開発は、小型サイクロトロン制御系及び電源の更新、直線照射コース(C-4コース)におけるビーム輸送系の改良、バックアップイオン源のビーム試験がある。以下にそれぞれの内容を示す。

2-1. 小型サイクロトロン制御系及び電源の更新

小型サイクロトロンは、1994年に設置されて以来、安定したビーム提供を行なっている。しかしながら、設置より15年以上が経ち、電源内部の高電圧部や電気的接点部などの経年劣化が進み、これを原因としたトラブルが増えてきた。また制御系では、各電源の制御を設置当初からPC9801計算機で行なっていたが、この計算機の互換機はすでに入手不可能であり、予備機を準備することができなかった。さらに、計算機と各電源間のインターフェイスとして使われていたUDCも製造中止で入手不可能になっていた。そのため、制御系と電源の更新を行った。

図5に制御系及び電源の新旧システムのブロック図を示す。電源を制御する計算機は、PC9801からAT互換機へ変更された。OSはMS-DOSからWindows-XPに変更され、Windows-VISTAにも対応可能なプログラムになっている。また、計算機と電源間のインターフェイスも一新された。従来は、サイクロトンメーカーのオリジナル規格であるUDC(Universal Device Controller)が使われていたが、一般的なPLC(Programmable Logic Controller)になっている。そのため、旧システムでは、19インチラック(0.5 m²)4台分に制御システムが収納されていたが、モジュール化されたPLCを用いることにより、19インチラック1台分に小型化されている。さらに、各直流電源もシリーズレギュレータ方式の電源から、スイッチング方式の電源になり小型化されている。このため従来の電源筐体は電磁石電源1.4 m²、RF電源1.4 m²、イオン源電源0.7 m²の3台分のスペースが必要であったのに対し、更新後には19インチラック2台分に収納されている。これらの制御盤及び電源が小型化したことにより、旧制御盤を設置していた副操作室に、制御盤及び電源を設置する事ができた。

しかしながら、副操作室に電源を移動したことにより、熱源が副操作室に集中している。これにより小型サイクロトロンを運転すると、電源の排熱を処理することができず室温が上昇してしまう。そのため、今後副操作室の冷房能力を増強する必要がある。

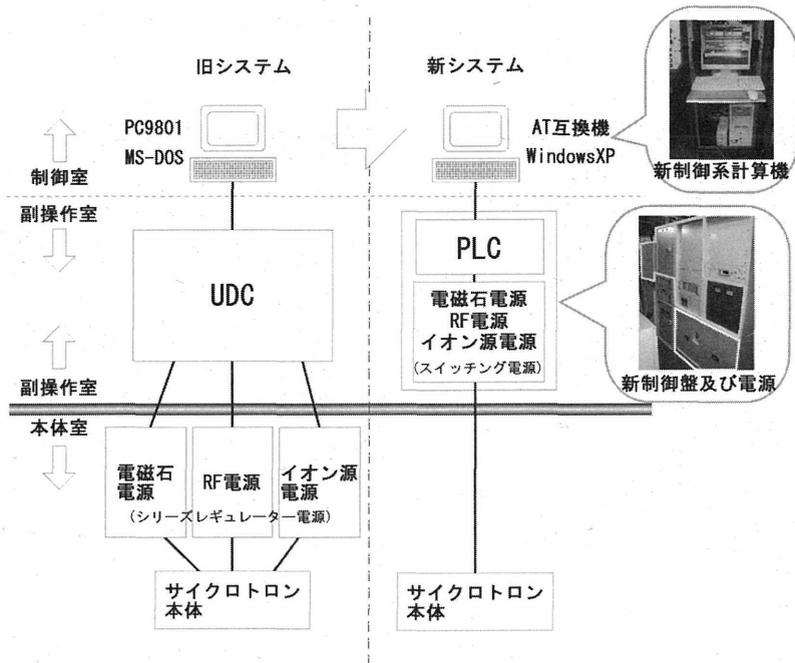


図5. 制御系及び電源の新旧システムブロック図

2-2. 直線照射コース(C-4コース)におけるビーム輸送系の改良

直線照射室の C-4 コースは放射性薬剤の製造専用で使用されていて、金属ターゲットへ照射し ^{62}Cu や ^{64}Cu 等を製造することができるコースとなっている。

この C-4 コースにおいて、ターゲットと 90 度偏向電磁石の間で、ビームの位置や形状を調整できるビーム輸送系の要素は、垂直方向のステアリング電磁石と四極電磁石 2 台のみであった。そのため、ターゲットに合わせてビームの位置を調整する場合にはビーム形状も変わってしまっていた。これを改善するため、ステアリング電磁石を四極電磁石の下流に追加した(図 6)。これにより、ビームの形状を変えずにビームの位置を調整できるようになった。また、ターゲット周辺部の放射化低減や、ビーム形状の調整をさらにしやすくするために、四極電磁石を 1 台を追加して FDF トリプレット四極電磁石にした。また、放射化していたステンレス製のダクトを減衰の早いアルミ製のダクトへ変更した。このダクトの形状は四極電磁石内側の形状に合わせて円形から四角ダクトへ変更してビームのアクセプタンスを広げた。

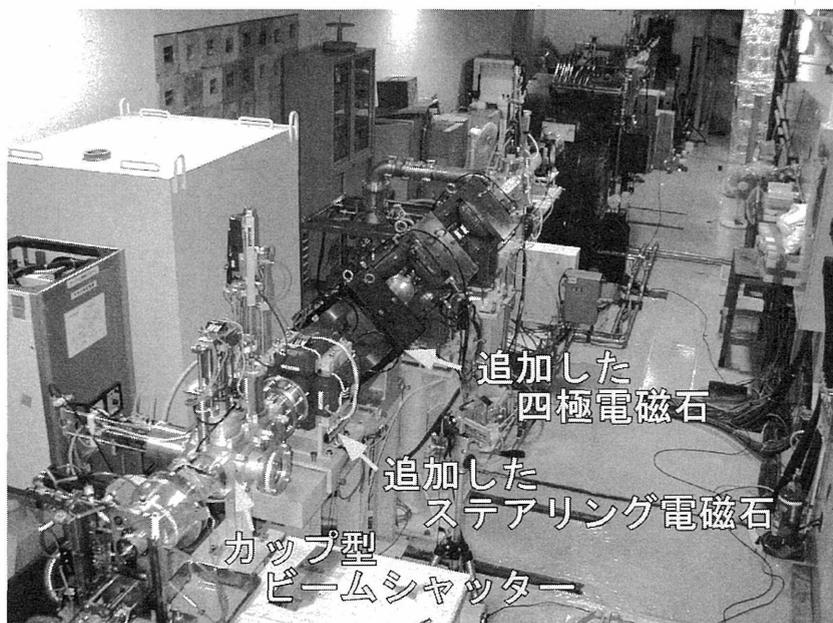


図6. 直線照射コース(C-4コース)

さらに、ビームシャッターを板状のものから、ビームカレントの精度を上げるため2次電子の影響を受けにくいカップ型に変更した。このカップ型ビームシャッターは、放射化低減も狙ってカップ底面にグラファイトを埋め込んだ構造になっている(図7)。

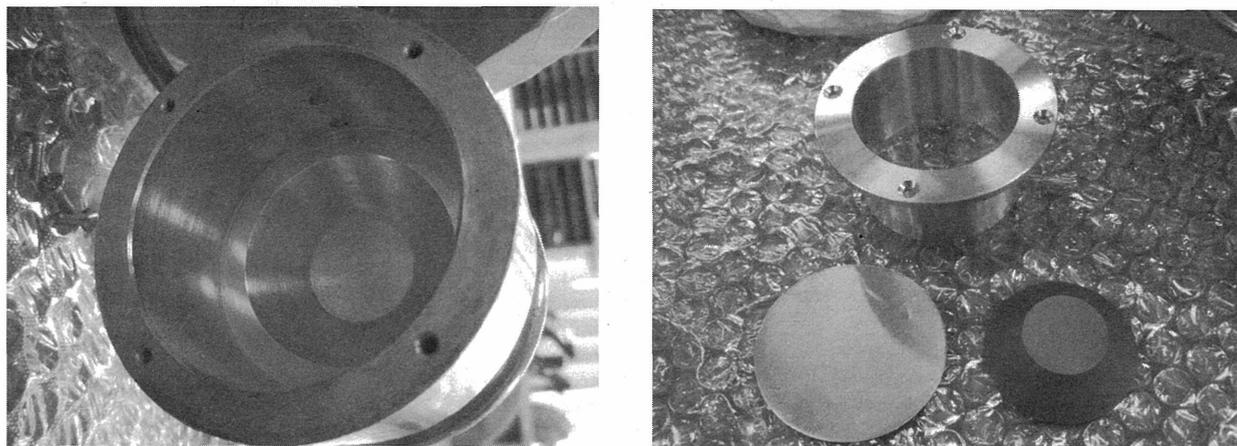


図7. カップ型ビームシャッター
左：カップ型ビームシャッター底面 右：グラファイト及びその蓋

2-3. バックアップイオン源からの入射テスト

前年度にテストベンチでバックアップイオン源のビームテストを行い、大型サイクロトロンへ設置した。本年度はバックアップイオン源の直下に静電ステアラーとアインツェルレンズを追加したうえで、大型サイクロトロンへのビーム入射テストを行った。

バックアップイオン源は既存の入射ラインの90度偏向電磁石の上と設置されている(図8)。

この90度偏向電磁石を偏向せずに通過するため、残留磁場の補正用に静電ステアラーを追加した。また、90度偏向電磁石からサイクロトロンヨーク上面のファラデーカップ(FC4: 図8)サイクロトロン入り口までは、収束要素が無いため、アインツェルレンズを追加した。この静電ステアラーとアインツェルレンズは90度偏向電磁石の真空チェンバーサイズ82mm×68mm内に収めるように設計し、上面フランジから吊り下げるように設置した(図9)。静電ステアラーの電極形状はφ60内に均一な電場を得るように2次元電場計算(Poisson superfish)を行い設計し、アインツェルレンズにはバックアップイオン源の最大引出電圧と同じ20kVまで印加可能になっている。

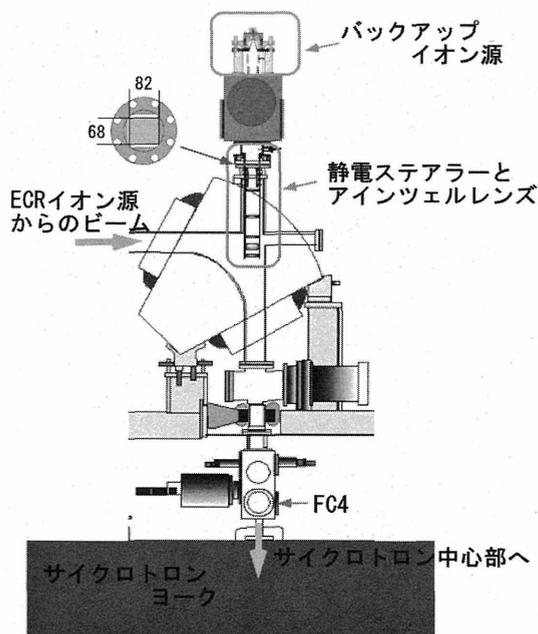


図8. バックアップイオン源、静電ステアラー及びアインツェルレンズの配置図

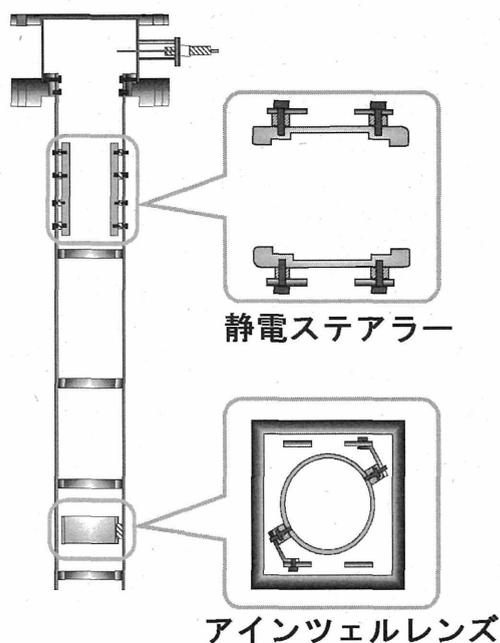


図 9. 静電ステアラール及びアインツェルレンズ

バックアップイオン源から取出された H_2^+ を用いて入射加速テストを行った。入射テストの結果、FC4(図 8)で $15 \mu A$ 、サイクロトロンから取り出した後のビームシャッター(BS0)でのビーム量として $2.1 \mu A$ が得られた。FC4 から BS0 までの効率、ECR イオン源からのビーム提供時には 12~20% であるのに対して、今回のバックアップイオン源からの入射テストでは 14% となりビーム提供可能な効率が得られている。

しかし、FC4 まで到達するビーム量が非常に少なく提供に必要なビーム量に満たなかった。この理由は、バックアップイオン源から FC4 までのビームロスが多く、まだ収束要素が不足していると考えられる。

今後、さらに収束要素を強化するため、イオン源に内蔵されているアインツェルレンズの強化、90 度偏向電磁石と FC4 までの間に、アインツェルレンズの追加を行う予定である。また、イオン源の磁石を強化するなど、バックアップイオン源からのビーム量を増強するための改造も合わせて行う予定である。

3. サイクロトロン施設の運転維持

サイクロトロンの長期メンテナンスは、8 月に 2 週間、2~3 月に 2 週間を使って行なわれた。8 月の長期メンテナンス期間中に、大型サイクロトロンでは、中性子による損傷試験を行なうため、ベリリウムターゲットの交換等の C-3 コースの整備をおこなった。また、大型サイクロトロン及びビームライン上で使用されている真空排気装置は、長期メンテナンス中または停電中を除いて通常 24 時間運転されている。メンテナンス期間中に真空排気装置では、O リングや潤滑油などの消耗品の交換を行なった。小型サイクロトロンでは、メーカーによる定期点検が行なわれた。また、2~3 月の長期メンテナンス期間では、2-2 で述べた直線照射コース(C-4)ビーム輸送系の改良や小型サイクロトロンの制御系及び電源の更新が行われた。小型サイクロトロンの制御系及び電源の更新は 5 週間かけて行なわれたが、そのうち 3 週間は、午前中にビーム確認や各駆動機器の調整運転などの電源更新作業を行い、午後から大型サイクロトロンを運転しユーザーへビーム提供を行った。

本年度は、ビーブ音によるビーム監視システムを操作室に導入した。これにより、ビーム電流の増減を、聴覚的に判別できるようになり、長時間連続照射の場合などにターゲット上の電流を常時目視する必要が無くなった。

4. 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] 根本和義, et al., サイクロトロンへのRI製造への利用状況, 本誌, pp9-12
- [3] 大澤大輔, et al., 重粒子線の生物効果初期課程における基礎物理研究, 本誌, pp13-16
- [4] 高田真志, et al., 宇宙環境中での中性子検出器の開発, 本誌, pp17-34
- [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, 本誌, pp35-36
- [6] 北村尚, et al., 宇宙飛翔体搭載型放射線検出器の開発, 本誌, pp53-57
- [7] 保田浩志, et al., 宇宙線中性子測定装置の応答関数評価, 本誌, pp43-44
- [8] 宮原信幸, et al., 高温超電導線材の耐放射線損傷試験, 本誌, pp45-52
- [9] A.Sugiura, et al., Status Report of NIRS Cyclotron, Proc. of ARTA 2008 Tokyo, pp.19-22
- [10] 平成19年度サイクロトロン利用報告書,バックアップイオン源 pp6-7

2. サイクロトロンへのRI製造への利用状況

サイクロトロンでの RI 製造への利用状況

分子イメージングセンター、分子認識研究グループ

根本和義、中尾隆士、福村利光、張明栄、入江俊章、菅野 巖

「概要」

分子認識研究グループでは、大型、小型サイクロトロンを利用して ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F やその他の金属、ハロゲン核種で標識した標識化合物を定常的に製造し、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している。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) 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。

「生産・提供状況」

平成 20 年度は、「新規短寿命放射性薬剤の有効性及び安全性に関するワーキンググループ」において新規に 4 種類の短寿命放射性薬剤 ($[^{11}\text{C}]\text{Ac5216}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{TO-002}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{gefitinib}$ 及び $[^{18}\text{F}]\text{FAZA}$) が承認され臨床利用が可能となり、これらのうち 2 つの薬剤は臨床研究に利用された。

20 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。製造した放射性薬剤は、腫瘍診断 ($[^{11}\text{C}]\text{メチオニン}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{FLT}$ 、 $[^{62}\text{Cu}]\text{Cu-ATSM}$ 、など)、脳・中枢機能診断 ($[^{11}\text{C}]\text{ラクロプライド}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{MNPA}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{6-OH-BTA-1}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{DASB}$ など) の臨床利用、サルやラットなどの動物実験 ($[^{11}\text{C}]\text{WAY100635}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{Ac5216}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{FLB457}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{6-OH-BTA-1}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{タミフル}$ など)、校正用ファントム線源 ($[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{F}^-$ など) 等に提供し、また大型サイクロトロンを利用して製造した $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレータを 3 研究機関に 18 回譲渡した。

表1. 平成20年度に製造した標識化合物および生産量

核種	化合物形	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	5.65	(7)				1.45	(4)		
	DASB	95.75	(41)	12.03	(14)	(14)	17.30	(30)		
	DAA1106	10.07	(3)	7.55	(3)	(3)				
	FLB457	91.52	(45)	0.73	(1)	(1)	15.70	(30)		
	6-OH-BTA-1	161.90	(45)	66.32	(40)	(40)	14.76	(29)		
	SCH23390	39.48	(15)	0.26	(1)	(1)	6.16	(13)		
	Ro1788	4.82	(2)							
	Raclopride	129.96	(58)	14.17	(50)	(50)	11.86	(26)		
	WAY100635	102.24	(56)	5.05	(8)	(8)	29.30	(54)		
	PE2I	48.54	(14)				7.47	(15)		
	PK11195	1.10	(3)							
	MET	2939.42	(377)	1686.42	(643)	(1019)	5.19	(5)		
	Verapamil	3.01	(1)							
	MNPA	149.56	(56)	13.07	(48)	(48)	14.50	(26)		
	Ac5216	144.16	(60)	26.12	(13)	(13)	24.03	(47)		
	CH3I	6.11	(12)							
	C2H5I	3.71	(16)							
	その他	520.42	(669)				26.34	(36)		
	合計	4457.41	(1480)	1831.73	(821)	(1197)	174.04	(315)		
¹³ N	その他	93.63	(105)							
¹⁵ O	H2O	179.52	(39)				170.26	(39)		
¹⁸ F	FDG	75.39	(21)	41.70	(22)	(47)	1.69	(5)		
	FEtDAA	14.22	(11)				6.28	(12)		
	FEtSPARQ	21.24	(28)				10.55	(24)		
	FLT	65.97	(33)	13.81	(19)	(23)	1.34	(3)		
	NaF	4.07	(4)				0.50	(3)		
	FMeNER	40.15	(33)	4.47	(22)	(22)	0.38	(4)		
	TO-002	4.93	(6)	0.16	(1)	(1)				
	FAZA	9.07	(4)							
	MPPF	17.76	(22)				10.53	(20)		
	F-	103.11	(114)				21.24	(39)		
	その他	50.24	(116)				0.91	(2)		
合計	406.14	(392)	60.13	(64)	(93)	53.43	(112)			
⁶¹ Cu	Cu-ATSM	0.96	(3)				0.15	(3)		
⁶² Cu	Cu-ATSM	9.09	(11)							
⁶² Zn	62Zn/Cu	79.03	(13)	16.33	(12)	(21)			46.08	(18)
⁶³ Zn	水溶液	3.23	(7)							
⁶⁴ Zn	水溶液	0.32	(1)				0.11	(1)		
¹²⁴ I	水溶液	0.41	(3)				0.05	(2)		

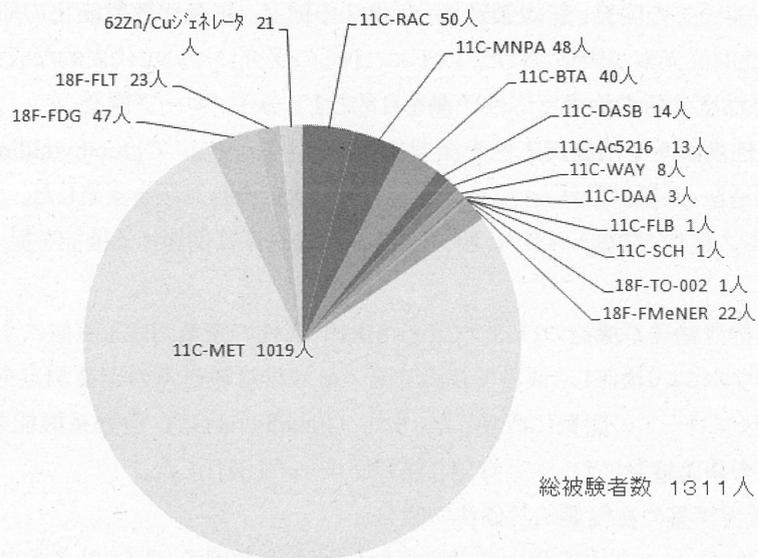


図1. 平成20年度における被験者数

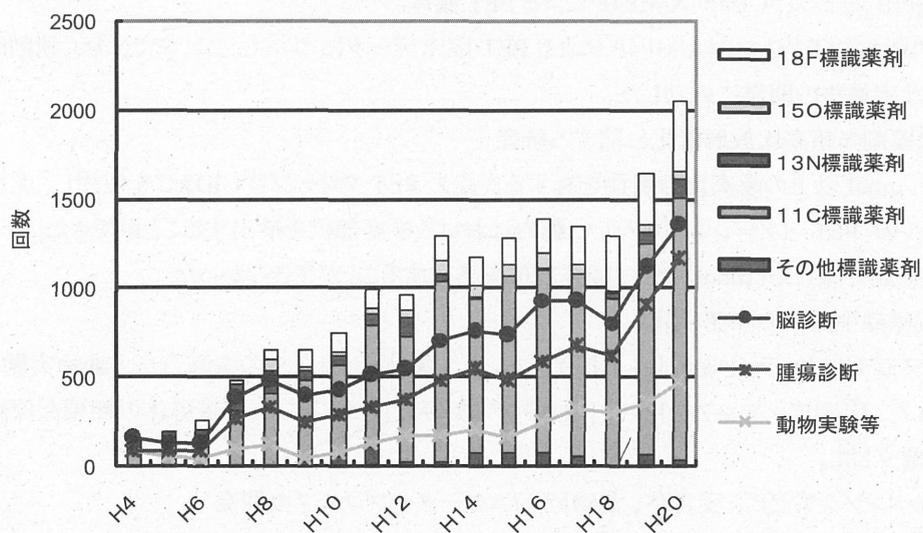


図2. 生産回数と提供回数の推移

「新規製造法の開発および新規放射薬剤の研究開発」

新規分子プローブの開発、新規製造法・合成法の開発、超高比放射能化の研究等のためにも短寿命放射性同位元素が製造された。以下にこれらの研究について代表的な成果を紹介する。

- 1) 腫瘍の悪性度診断や治療反応性予測を目的とする分子プローブ開発
腫瘍の悪性度診断や治療反応性予測期待される 4'-[methyl- ^{11}C]thiothymidine の前臨床評価として、製造法・品質試験法を確立し、急性毒性、遺伝毒性試験を実施した。
- 2) 酸化ストレスおよび防御システム、脳/血液排泄輸送系に関連する機能を捉える分子プローブ開発
脳/血液排泄輸送系機能のひとつである MRP1 活性の定量測定を可能にするプローブをノックアウトマウスにより検証し、世界で初めて脳/血液排泄輸送系の定量測定を可能にする方法論に基づくプローブの開発に成功した。また、Glutathione/GST 還元系機能を捉える分子プローブ開発の基礎検討において、有望な候補プローブを見出した。
- 3) 心筋組織再構築の非侵襲的評価法の開発
標識抗テネイシン C 抗体を用いて、顆粒球コロニー刺激因子 (G-CSF) の虚血心筋保護効果を非侵襲的に検討した。
- 4) [^{11}C]PIB および [^{11}C]MP4A/MP4P による PET 臨床
 ^{11}C -PIB および ^{11}C -MP4A/MP4P による PET 臨床データについて、これまでに無く独創的かつ有用な定量法の開発に成功した。
- 5) 標識薬剤の超高比放射能化に関する研究
100Ci/ μmol 以上の超高比放射能を有する炎症の PET プローブ [^{11}C]DAC を使用し、虚血動物モデルの PET イメージングを行い、脳内における梗塞部位を検出することができた。一方、通常の比放射能 (1 Ci/ μmol) では、梗塞部位を発見することができなかった。
- 6) 新規標識中間体の開発と利用
[^{11}C]アセチルクロライドを使用し、抗インフルエンザ薬 [^{11}C]タミフルの標識合成と動物実験を行った。また、[^{13}N]アンモニアを用い、[^{13}N]ウレア及び [^{13}N]カルバメート誘導体の簡便な標識合成法を確立した。
- 7) 新規ベンゾジアゼピン受容体、薬物トランスポータープローブの開発
末梢性ベンゾジアゼピン受容体の PET プローブを合成し、脳機能に対する評価を行った。その中から、 ^{18}F で標識した 3 種の新規なトレーサが有用であることが明らかとなった。また、抗癌薬である [^{11}C]イレッサが P 糖蛋白/乳癌耐性因子の機能を測定できることを見出した。
- 8) 中寿命核種生産の最適化・実用化に関する研究
酸化テルルを用いてターゲットの冷却方法などの検討を行い 15 μA 、30 分間の照射で約 9 mCi の ^{124}I の製造を行うことができた。
- 9) マイクロダイアリシス radio-LC システムの開発
超高感度検出 (検出限度 1 Bq) 達成するとともに、サンプリング・分析の自動化・複数部位の同時計測・内在性物質との同時測定を実現し、従来は困難であった L-[^{11}C]DOPA のラット脳内動態のリアルタイムモニタリングを可能とした。
- 10) [^{62}Cu]Cu-ATSM の臨床利用に関する研究
前年度に引き続き放射線医学総合研究所、国立がんセンター、横浜市立大学、福井大学の 4 施設により [^{62}Cu]Cu-ATSM の臨床利用に関する共同研究を行った。外部 3 施設および当所の合計 4 施設向けに月 1 回程度の $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ジェネレータの提供を行った。

3. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究

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、岡田豊史^B、俵博之^C、曾我文宣^C、村上健^C、本間壽廣^C、野田耕司^C

D. Ohsawa^A, T. Okada^B, H. Tawara^C, F. Soga^C, T. Murakami^C, T. Honma^C, K. Noda^C

京大^A、千葉大^B、放医研^C

研究概要

水分子への 6.0 MeV/u C^{6+} 入射で、二次電子エネルギー 1 eV~10 keV、放出角度 20~160° にわたる広範囲な二次電子生成二重微分断面積 (DDCS) を取得した。得られた DDCS 角度分布では、二次電子エネルギー 2 keV 以上で異常後方放出を、また、DDCS の角度積分で得られる微分断面積 (SDCS) と Rudd モデルのスケーリング値 ($\times 6^2$) との比較では、低速領域 (1~50 eV) ではほぼ一致、中速領域 (50 eV~5 keV) で減少、高速領域 (>5 keV) で異常増加を観測した。これらの結果は入射イオンと軌道電子との単純な二体衝突では説明できない現象であり、特に、異常増加については、中速領域の減少も考慮すると、二次電子の一部が入射イオン標的核間での繰り返し衝突により入射イオン速度 V_p の 2 倍ずつ運動エネルギーを獲得していく (+2n V_p , n=1, 2, 3, ...)、Fermi-shuttle 加速と呼ばれる現象が発生し、中速領域の減少分がこれにより加速され高速領域の増加分として移り込んでいる可能性がある。

トラック構造解析については、新たに、イオン-水分子衝突での弾性散乱による入射イオンの偏向と水分子へのエネルギー付与、また、電離、励起による水分子のイオンポテンシャル増加を考慮した。このコード改良により、ブラッグピーク領域 (6~25 MeV/u) で起こりうるすべての素過程が考慮され、ほぼ完全なトラック構造解析が可能となった。過去に測定した 6.0~15.0 MeV/u He^{2+} 入射による二次電子生成断面積を用いて、水中へのブラッグピーク領域の He^{2+} 入射におけるトラック構造を解析し、その結果から、動径線量分布、阻止能、W 値を求めたところ、上原氏らの低エネルギー (1 keV~8 MeV) He^{2+} 入射におけるそれらと整合する結果が得られた。

1. 研究目的と背景

粒子線照射による深部ガン治療がブラッグピークによる線量集中性や予後の QOL の観点から注目され、近年、本格的に実用化されている。ブラッグピーク領域 (6~25 MeV/u) のエネルギー損失過程は生体構成物質 (主に水) の電離、励起が主であり、それに伴って多数の二次電子が放出されるため、その生物効果初期過程はこれら放出二次電子線の空間及びエネルギー分布に密接に関係している。過去に、様々な入射核種 (主に軽イオン)、ターゲット (主に希ガス) を用いてこの種の実験がなされてきたが、数 MeV/u の重イオン衝撃による水からの二次電子放出については、高真空下で安定希薄な水蒸気ターゲット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分子から放出される二次電子線のエネルギー及び角度分布を測定し、既存の理論と比較しうる高精度な二次電子生成二重微分断面積 $d^2\sigma/dE d\Omega$ (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

2.1. 2007 年度までの経過

2.1.1. 角度移動の遠隔操作化

チェンバ上蓋に既設の回転導入機にモータ駆動装置を、また、計測室に制御盤を設置し、角度移動を遠隔操作化した。照射室への頻繁な入室を抑制することにより、測定時間の大幅な短縮化と、入室の際のビームオンオフ操作によるビーム電流変動の低減化を実現した。

2.1.2. 低中速領域(1 eV<E<500 eV)測定(二次電子計数(SE)のリニアリティ確認によるバックグラウンド計数(BG)再評価)

2006年後期から水分子への6.0 MeV/u C⁶⁺衝撃による二次電子生成二重微分断面積測定を開始している。測定では、放出水蒸気のトラップ効率向上のため、交差領域を囲む形で冷却カバーを設置しており、二次電子エネルギーに応じて、μ-metal(1 eV<E<500 eV)、Cu(10 eV<E<10 keV)製を使い分けている。μ-metalカバーは、磁場低減には必須だが、熱伝導率がCuカバーの約1/10と小さいため、放出水蒸気の氷結捕獲効率が低下し、真空度は、マスフローオフ時に比べ10 sccm時で約1桁悪化する(μ-metal: ~3.4e-5 Pa→~5.5e-4 Pa、一方、Cu: 真空度変化なし)。従って、ターゲット領域以外の残留水蒸気から発生する二次電子が新たなBG要因として問題となるが、過去の測定では、マスフローオフ時の計数をBGとしていたため、これを過小評価している可能性がある。この寄与はビームやマスフローのオン/オフ操作により直接測定できないため、マスフロー流量を変えてSE計数の直線性(リニアリティ)を確認し、それを直線フィットすることで流量ゼロでの値(つまりY切片値)を求め、これをBGと再評価し、より信頼性の高い断面積を得た。

2.1.3. 中高速領域(10 eV<E<10 keV)測定

2007年後期から、Cuカバーに交換しマスフロー流量10 sccmにて、角度20~160°まで10°刻み、二次電子エネルギー10 eV~10 keVのSEを測定した。Cuカバーでは、10 sccm時とマスフローオフ時とで真空度に変化がないため、マスフローオフ時の計数をBGとしている。2 keV以下で等速He²⁺入射に比べて約9倍の放出を確認した一方、それ以上で異常増加を観測した。不要な二次電子が発生しMCPへ入射している可能性があり、その検証が必要と判断した。

2.2. 2008年度での成果

2.2.1. コリメータ改造

2 keV以上の異常増加の原因として、分析器周辺への高速二次電子衝突により、不要な二次電子が発生し、その一部がMCPへ入射している可能性がある。その発生箇所として(1)分析器出口スリット(5x10 mm²)、(2)分析器-MCP間に設置しているCu製コリメータ(開口部8φ)、(3)MCP直上の後段加速電場形成用Niメッシュコリメータ(開口部6φ)が考えられる。(2)、(3)については、Cu製コリメータのほぼ全面を二次電子発生が少ないカーボン板(2 mm厚)でマスクし、さらに、コリメータ最下段とNiメッシュコリメータの開口部をそれぞれ、6、8φに変更してNiメッシュコリメータの開口部エッジからの二次電子発生を防いだ。(1)については、コリメータ最上段を下段と絶縁しサプレッサ電圧を印加してMCPへの入射を抑制した(図1)。

図2に6.0 MeV/u C⁶⁺入射で、コリメータなし、カーボンコリメータ+サプレッサ印加電圧0, -100, -500, -1000 Vに対するMCP計数変化を示す。SEは、マスフロー流量30 sccm、入射イオン電荷量15 μCにて、角度90°、二次電子エネルギー100 eV~10 keVで測定された。電圧印加については、高電圧印加につれて、1 keV以下で計数減少が見られた一方、2 keV以上では変化しなかった。1 keV以下の減少は測定すべき分析二次電子がサプレッサで偏向しているため、サプレッサの適切動作を示すものである。また、電子衝撃による金属表面からの発生二次電子エネルギーはせいぜい100 eV以下(ピークは20 eV以下)であるため、サプレッサ電圧は-1000 Vで十分であり、従って、2 keV以上の異常増加は不要な二次電子によるものではないと結論した。

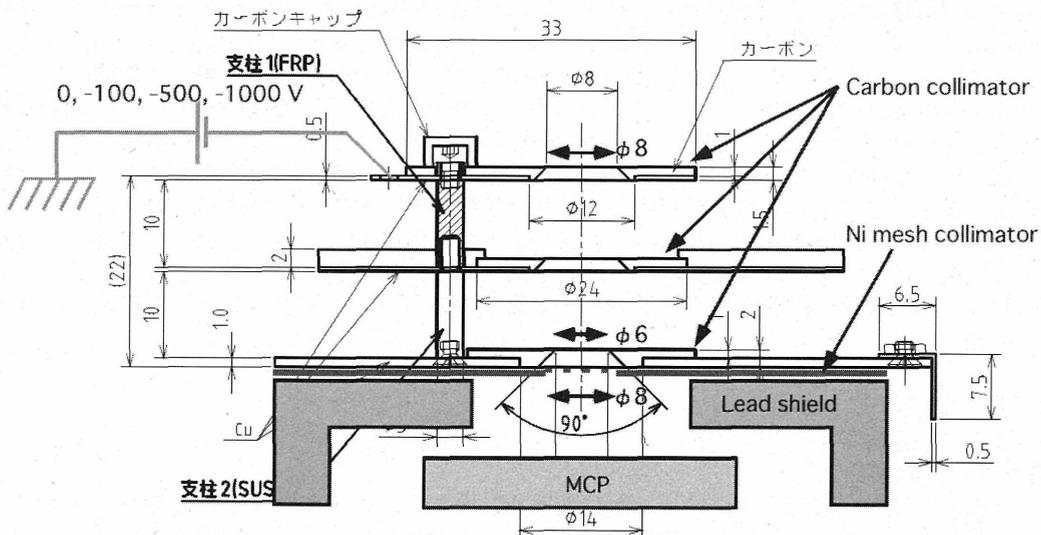


図1. カーボンコリメータ、サプレッサ電圧印加図

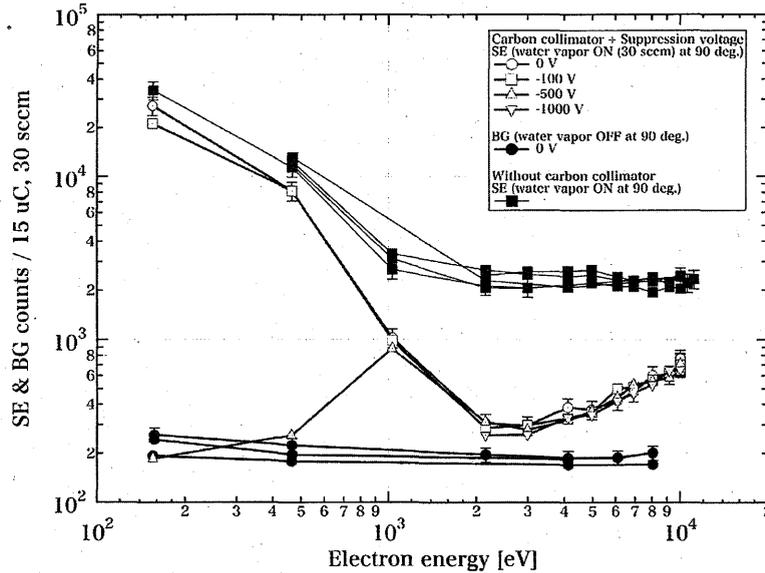


図 2. サプレッサ電圧印加による MCP 計数変化

2.2.2. 二次電子生成二重微分断面積測定(10 eV<E<10 keV)

図 3 に Cu カバー、カーボンコリメータを用いて 6.0 MeV/u C^{6+} 入射で得られた二次電子生成二重微分断面積(DDCS)の角度分布を示す。SE は、マスフロー流量 30 sccm、入射イオン電荷量 15 μC にて、角度 20~160° まで 10° 刻み、二次電子エネルギー 10 eV~10 keV で測定された。また、BG は、Cu カバーでは 30 sccm 時とマスフローオフ時とで真空度に変化がないため、残留水蒸気からの BG 寄与はないとし、マスフローオフ時の計数を用いている。

10~50 eV では、 μ -metal と Cu データはエラー範囲($\pm 13\%$)ではほぼ一致した。30~400 eV では、エネルギー増加につれて、等方分布から 90° を最大とする、やや前方優勢分布を示した。等速 He^{2+} 入射での 90° 優勢対称分布とは異なり、入射イオン電荷の増加に伴う二次電子の入射イオンへの引き寄せ(two center)効果の現れと考えられる。400 eV 以上では 90° 以下の角度で二体衝突ピークを観測し、相対論考慮の計算エネルギー値との一致も確認できた。2 keV 以上では、 He^{2+} 入射と同様に 120° 以上で異常後方放出を観測した。二次電子の一部がターゲット核との強い相互作用で後方散乱していることを示唆するもので、後述の Fermi-shuttle 加速に起因している可能性がある。

続いて、図 4 に DDCS の角度積分で得られる微分断面積(SDCS : Singly Differential Cross Section、二次電子エネルギースペクトルに相当)を示す。 H^+ 入射における半経験的解析式の 1 つの Rudd モデルにボルン近似を仮定して Z^2 スケーリング($\times 6^2$)し比較した。1~10 eV で~10%減少、10~50 eV で一致、50 eV~5 keV で減少(最大 47%減@640 eV)、5 keV~10 keV で異常増加(最大 2.6 倍@9.5 keV)を観測した。また、~490 eV、~950 eV には O-K-LL Auger, O-KK-LLL Auger ピーク、~3.3 keV には ECC(Electron Capture to Continuum)ピークも観測された。

1~10 eV の減少については、飽和(saturation)効果による高 Z 入射での Z^2 スケーリングの不適応、two center 効果(前方への加速)によるエネルギースペクトルの変化が原因と考えられる。

5 keV~10 keV の異常増加については、前述の通り、カーボンコリメータ最上段にサプレッサ電圧(最大-1000 V)を印加しても MCP 計数変化はなかった。50 eV~5 keV の減少も考慮すると、 He^{2+} 入射と同様に Fermi-shuttle 加速が発生している可能性がある。Fermi-shuttle 加速は入射イオン速度 V_p に相当する二次電子エネルギーでピークを持ち、かつ、低速、非完全電離イオン入射で顕著に発生するとされており、来年度に 4.0 MeV/u C^{4+} 入射でその真偽検証を予定している。非完全電離イオン入射では、イオンのクーロンポテンシャルの遮蔽による電子放出減少とイオン内軌道電子の離脱による電子放出増加の 2 つのプロセスも加わり、また、電子エネルギー領域でこの寄与の優劣は異なるため、原子物理学上、大変興味深いものであるが、実験データは、特に、水蒸気ターゲットに対して存在せず、測定意義は大きい。

Auger, ECC ピークについては、等速 He^{2+} 入射と比べてイールドが増加した。高 Z 入射による内殻電離、電子捕獲確率増加が原因と考えられる。

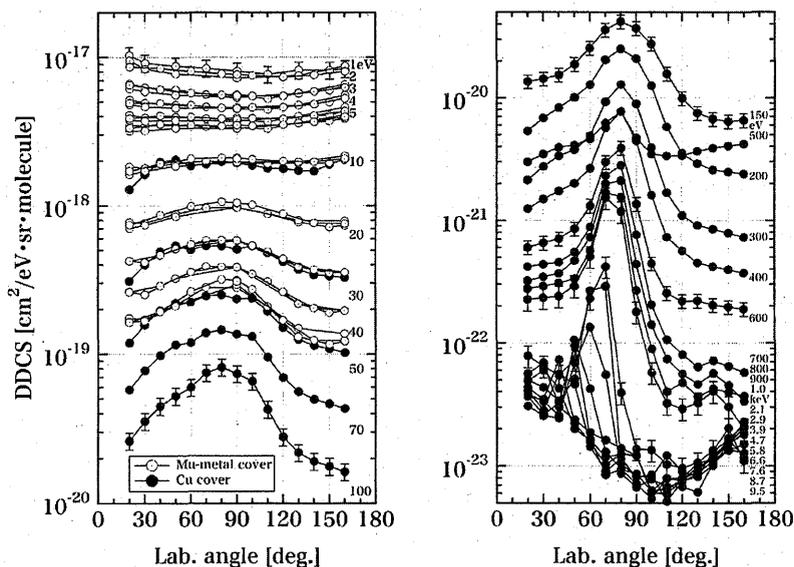


図3. 水分子への6.0 MeV/u C^{6+} 衝撃による二次電子生成二重微分断面積(DDCS)の角度分布

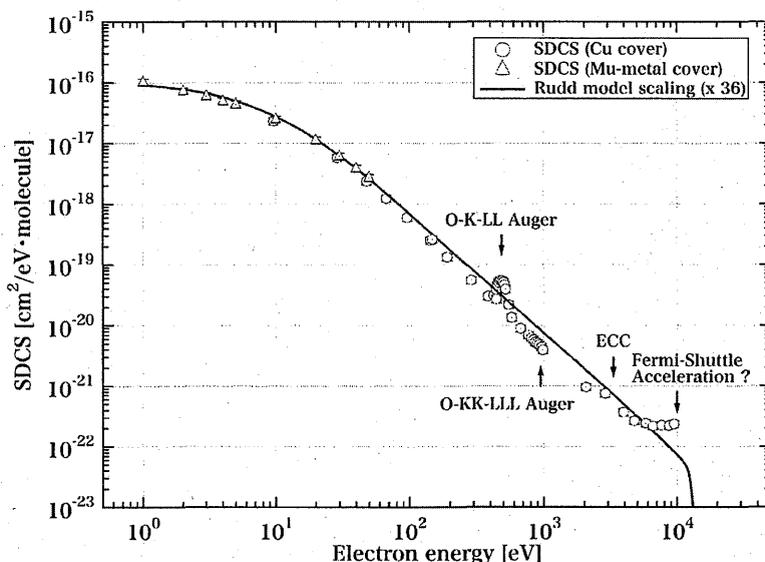


図4. 水分子への6.0 MeV/u C^{6+} 衝撃による二次電子生成微分断面積(SDCS)とRuddモデルスケーリング($\times 36$)との比較

2.2.3. トラック構造解析

新たに、イオン-水分子衝突での弾性散乱による入射イオンの偏向と水分子へのエネルギー付与、また、電離、励起による水分子のイオンポテンシャル増加を考慮した。弾性散乱はBohr(指数減衰)型の遮蔽ポテンシャル下でのクーロン散乱として計算により、励起は水蒸気への電子衝撃における半経験的解析式の1つのMiller & Greenモデルにボルン近似を仮定して Z^2 スケーリングにより、それぞれの断面積を求めた。なお、発生二次電子のその後のトラック構造は九大上原氏らが開発した電子輸送モンテカルロコード(KURBUC)を用いている。このコード改良により、ブラッグピーク領域(6~25 MeV/u)で起こりうるすべての素過程が考慮され、ほぼ完全なトラック構造解析が可能となった。過去に測定した6.0~15.0 MeV/u He^{2+} 入射による二次電子生成断面積を用いて、水中へのブラッグピーク領域の He^{2+} 入射におけるトラック構造を解析し、その結果から、動径線量分布、阻止能、W値を求めたところ、上原氏らの低エネルギー(1 keV~8 MeV) He^{2+} 入射におけるそれらと整合する結果が得られた。

来年度は、6.0 MeV/u C^{6+} 入射でのトラック構造を解析し、等速 He^{2+} 入射との違いの検証、及び、トラック構造から求められる動径線量分布を用い、臨床効果モデル(Local Effect Model、Microdosimetric Kinetic Model)への適用を行う予定である。特に、重イオン入射では弾性散乱、励起断面積の修正が必要となる可能性があり、過去の文献等を参照し比較検討を行う。

4. 粒子線検出器の開発

4-1. 宇宙環境中における中性子検出器の開発

宇宙環境中における中性子検出器の開発

高田真志^a、佐波俊哉^b、萩原雅之^b、遠藤 暁^c、森宗祐樹^c、田中浩樹^d、古場裕介^e、
岩元大樹^e、福井芳則^e、森元陽介^e、若林源一郎^e、魚住裕介^e、牧大介^f、大口裕之^f、
篠崎和佳子^f

- A 放射線医学総合研究所
- B 高エネルギー加速器研究機構
- C 広島大学大学院工学研究科
- D 京都大学原子炉実験所
- E 九州大学大学院工学研究科
- F (株) 千代田テクノル

平成20年度

中性子検出器の開発と核データ評価のために、以下の実験研究を実施した

1. 数10MeV陽子からのフラグメント生成二重微分断面積の測定
2. $^1\text{H}(^{13}\text{C},n)$ 反応からの中性子線測定によるPHITSコードの検証
3. 硼素中性子捕捉療法加速器中性子源のための30MeV陽子によるベリリウムターゲットからの中性子スペクトル測定
4. LYSO(Ce)シンチレーターを用いた中エネルギー陽子エネルギー測定
5. 飛翔体搭乗員用の個人線量計の開発に関する研究

数 10MeV 陽子からのフラグメント生成二重微分断面積の測定

佐波俊哉^a、萩原雅之^a、高田真志^b、馬場護^c

^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、^c 東北大学

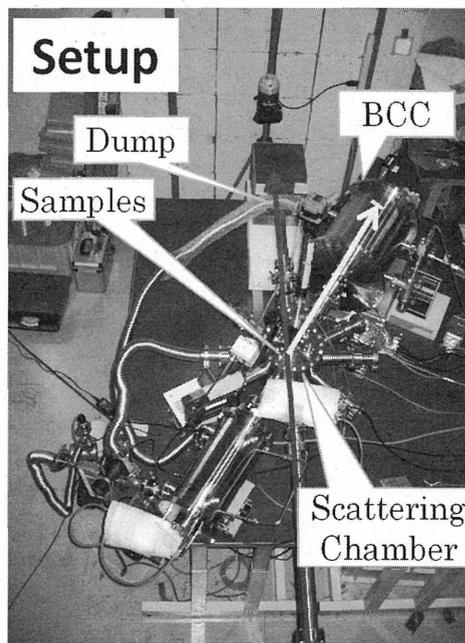
概要

数 10MeV 陽子によるフラグメント生成二重微分断面積データは、このエネルギー領域におけるフラグメント生成メカニズムの理解とモデル化、パラメータの評価において有用であり、データの乏しい数 10MeV 中性子によるフラグメント生成断面積の整備に資する。当グループでは、これまでブラックカーブカウンタ(Bragg Curve Counter - BCC)を用いたフラグメント測定システムを開発し、BCC の可測定エネルギー域を拡充するための工夫を施し[1, 2]、50MeV, 70MeV 陽子入射による C, Al, Si のフラグメント生成 DDX を測定してきた。この測定データは、本エネルギー帯でのフラグメント生成が蒸発過程によるものであることを示唆している。本年度は BCC の可測定エネルギー範囲に対応した入射窓と試料を用意し、測定系全体としての測定下限値を下げ、エネルギー分解能を向上させ、40MeV、50MeV と 80MeV の陽子に対する、炭素からのフラグメント生成二重微分断面積データの測定を行い、40 MeV から 80 MeV までのデータの取得を完了した。

本報告書では、平成 20 年度における実験についてその手法と成果をまとめる。

1. 実験装置 [1,2]

実験は放射線医学総合研究所の大型サイクロトロン(NIRS-930)の C6 コースをもちいて行っている。図 1 に実験配置を示す。サイクロトロンから引き出されたビームは散乱チェンバー内での薄膜試料位置において約 5mm 径に絞られる。薄膜試料を透過した陽子ビームは炭素製のビームダンプに吸収される。ビームダンプには電流計を接続し、ビーム量をモニターする。試料中の炭素と陽子が核反応をおこし、生成した二次粒子はブラックカーブカウンタ(BCC)で測定する。散乱チェンバーには 30,45,60,90,120,135,150 度のポートがあり、これらのそれぞれに BCC を接続し、順次に測定を行う。BCC の模式図を図 2 に示す。BCC は円筒形状をしたグリッド付き電離箱であり、カソードの位置に入射窓を有している。カソードとアノードの距離は 30cm でありアノードの 5mm 前にグリッドが設置されている。内部は典型的には 200Torr の P10 ガスで満たされており、試料からの二次粒子のうちエネルギー損失の大きいヘリウム以上の粒子を選択的に測定することができる。図 3 に BCC にフラグメントが入射した時の様子を模式的に示す。入射したフラグメントは検出ガスで止められ、そのエネルギー損失に比例した分布を持つ電離電子を生成する。電離電子はアノード-グリッド-カソードによる電場によりアノード方向にドリフトし、アノードとカソードからこのドリフトによる誘導電荷を電荷敏感型プリアンプにより読み出す。このとき、アノードはグリッドに遮蔽されているので、得られる信号の時間分布はフラグメントにより生成された電離電子の分布を反映しており、その信号の先頭部分はブラックピーク高を、全体はフラグメントのエネルギーに比例する信号となる。このブラックピーク高とエネルギーの相関から 1 台の検出器でフラグメントの粒子同定ができる。図 4 に典型的なブラックピーク-エネルギーの相関図を示す。さらに、我々の実験では、カソード信号とアノード信号の時間差を取ることで飛程の情報も得ることができるので、ブラックピークを形成しない低いエネルギーのフラグメントの同定も可能とし、BCC を突き抜けたフラグメントもエネルギー損失と粒子相関からエネルギー補正を行っており、十分な広い可測定をもったフラグメント DDX 測定を実現している。



Well focused beam from NIRS930 Cyclotron

図 1: Picture of the experimental setup for DDX measurement with the BCC at 30-degree.

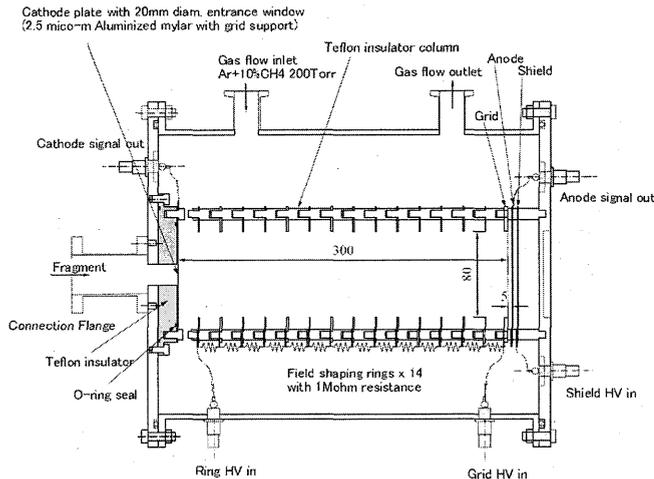


図 2. Schematic drawing of the Bragg curve counter.

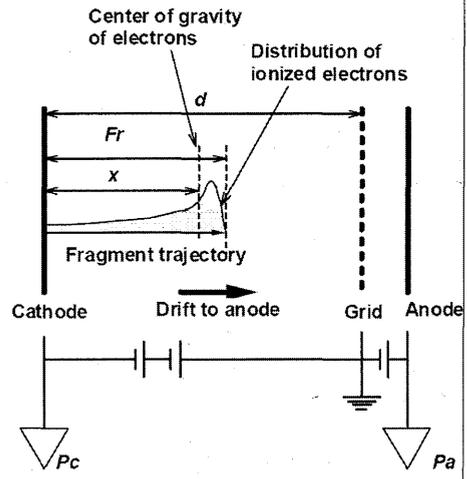


図 3 Schematic diagram of the BCC

1-1. 測定システムの変更点

BCC の可測定域の拡充に伴い、これまで使用してきた入射窓、試料厚みが測定下限値を決める要素となってきた。これはより重い粒子であるボロン、炭素などの測定において顕著である。

入射窓は従前は 2.5 μm 厚のアルミナイズドマイラーを用いていたが、今年度は約 1/10 の厚みを有する 0.2 μm 厚の SiN 薄膜を試験した。この薄膜は Silson 社製のもので、5 mm 角の 0.2 μm 厚み SiN 膜が 4 枚、500 μm 厚のフレームに取り付けられているものである。これを BCC の入射窓として取り付け 200 Torr のガス厚で試験したところ、十分な強度を有していることから、今年度のすべての実験で採用した。

入射窓の厚みを減らしたことに伴い、試料についても厚みを減じた。従前は炭素試料として 4 μm 厚みのポリプロピレンを使用していたが、今年度からは 200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜を用いた。図 5 にこれらの改良による測定下限値の改善を示す。これらの改善により BCC の弁別下限値までのエネルギースペクトルの測定が可能になっただけでなく、平均化法によるスペクトルの補正量も減らすことができ、BCC の分解能についてもこれを生かすことが可能になった。

上記の他に今年度はデータ収集系についても、Agilent 社製高速 10bit デジタイザ DC282 を採用し、PA 波形の直接取得を行った。このことにより従来、固定値であった波形の微分時定数をオフライン処理により自由に設定でき、弁別下限を下げるための短い時定数と、質量数分離のための長い時定数でのデータ処理が同時に行えるようになった。この波形データのまとめについては現在継続中であり、今後 BCC の分解能をさらに向上させる技術となることが期待される。

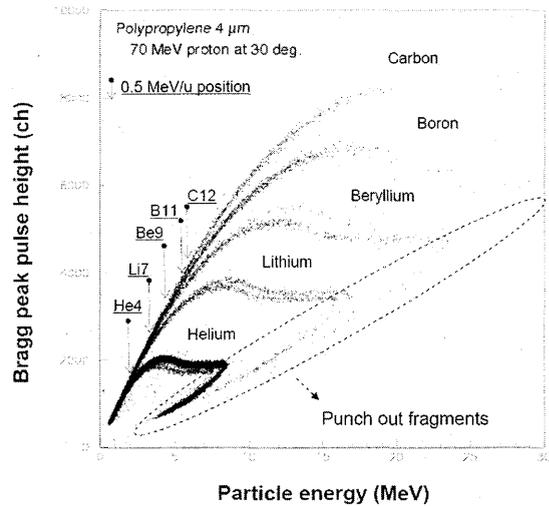


図 4: Typical two dimensional spectrum for fragment identification.

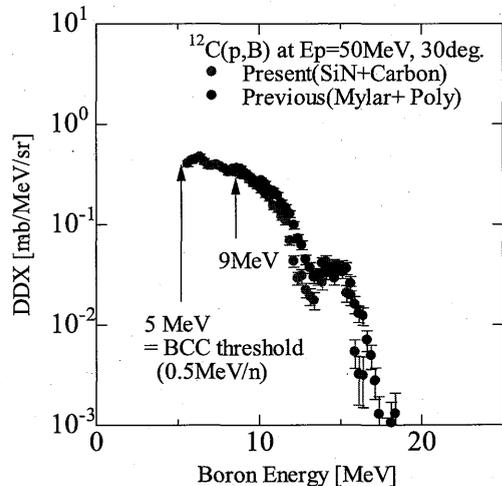


図 5: Experimental results of DDX at 30-degree, the $^{12}\text{C}(p,B)$ reaction for $E_p=50$ MeV

2. 測定結果

図 6-9 に 40MeV から 80MeV までの陽子に対する 30 度方向の二重微分断面積を Li, Be, B, C についてを示す。赤丸が本年度取得データ、黒丸がこれまでに測定したデータ[3]、実線と点線がそれぞれ INC モデルとして ISOBAR と Bertini を用いた場合の PHITS コードの計算結果である[4]。この比較から以下の点が明らかとなった。

- ・ 入射エネルギーの変化に伴い連続成分が高エネルギー側にシフトする
- ・ エネルギーが下がると Li や Be に 2 体反応によるピーク形状がある
- ・ 2 体反応によるピーク形状は計算では表現できていない
- ・ ISDOBAR モデルを用いた PHITS は比較的良好にフラグメント生成を記述している
- ・ 計算と実験の一致度は数 10MeV 領域全体に同様な傾向で現れている

参考文献

- [1] T.Sanami, M.Hagiwara, T.Oishi, M.Baba, M.Takada, *Nucl. Instrm. Meth. A* Vol 589/2 pp 193-201 (2008)
- [2] M. Hagiwara, T. Sanami, T. Oishi, M. Baba, M. Takada, *Nucl. Instrm. Meth. A* Vol 592 pp 73-79 (2008)
- [3] M. Hagiwara, T. Oishi, S. Kamada, M. Baba, T. Sanami, M. Takada and N. Miyahara, "Measurements of Double Differential Fragment Production Cross Sections of Silicon for 70 MeV Protons", Proceedings of 2005 Symposium on Nuclear Data (JAEA-Conf 2006-009)
- [4] H.Iwase et al., *J.Nucl.Sci.Technol.*, 39 (2002) 1142

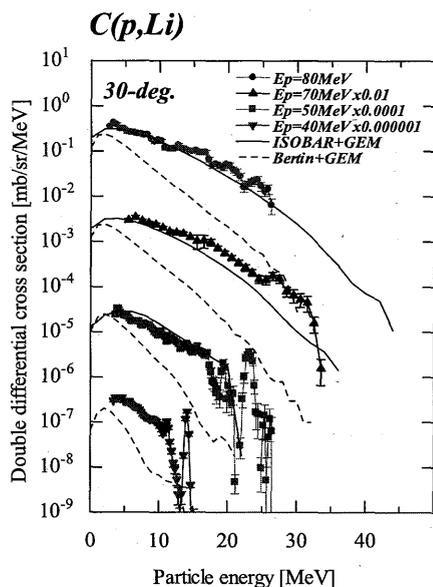


Figure 6 DDX for Li production on C at 30 degree for 40-80 MeV proton induced reaction.

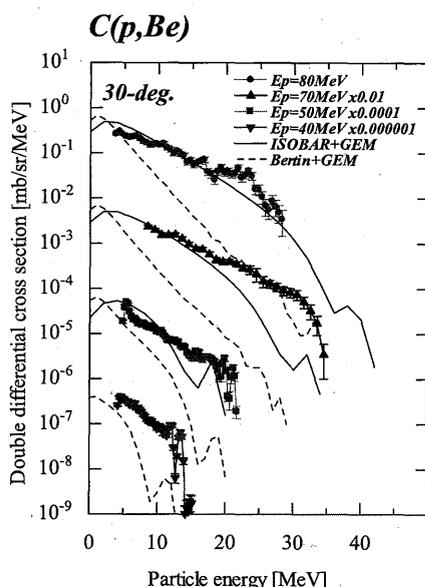


Figure 7 DDX for Be production on C at 30 degree for 40-80 MeV proton induced reaction.

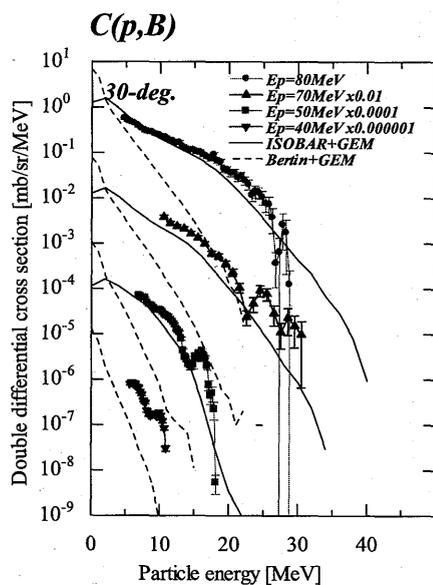


Figure 8 DDX for B production on C at 30 degree for 40-80 MeV proton induced reaction.

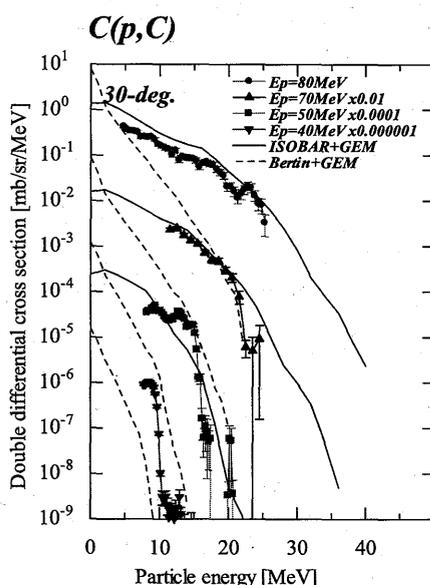


Figure 9 DDX for C production on C at 30 degree for 40-80 MeV proton induced reaction.

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

遠藤 暁^a、森宗佑樹^a、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

[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を行うために、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 を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。

[実験]

放射線医学総合研究所サイクロトロン[3]からの ^{13}C を生体透過物質であるアクリル標的へ入射し、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 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。標的として暑さ 3mm のアクリル板を用い、標的から ~230cm の飛行距離をとり、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。本測定は散乱角 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。

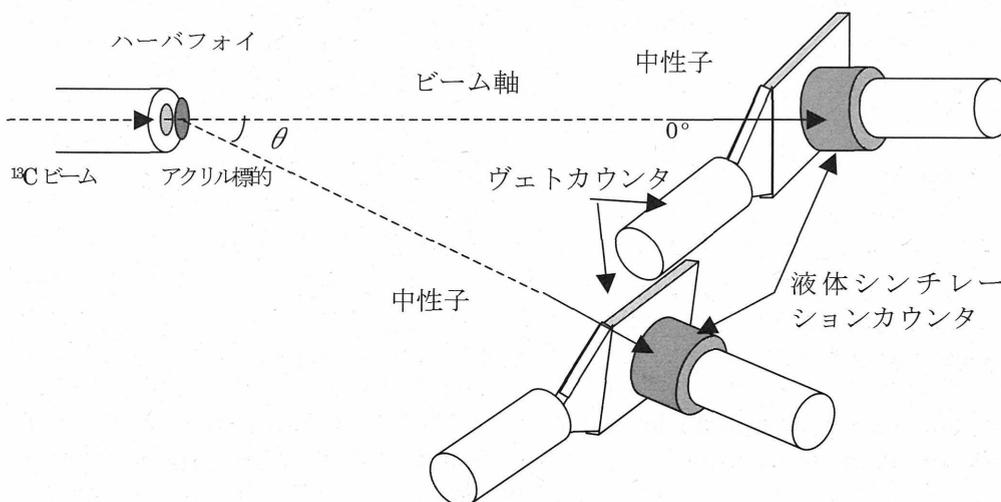


図 1.setup

[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する。図 2(a)、(b)に測定された事象の分布を示す。(a)は液体シンチレータ波高と TDC の相関、(b)は液体シンチレータ波高とヴェトシンチレータ波高の相関である。(a)では、730ch 付近に γ フラッシュが観測されており 0-400ch にかけてその他の粒子が確認できる。(b)においてヴェトカウンター波高は、130ch 付近に中性子と γ 線事象が確認され、200、900、1200、1300ch 付近の事象は、それぞれ電子、フラグメント陽子、フラグメント重陽子、フラグメント 3 重陽子の事象と考えられる。このうち 130ch 付近の事象のみを取り出し、液体シンチレータ波高と TDC を作成しなおしたものを図 2 に示す。(c)よりヴェトカウンターのセレクションで中性子と γ 線事象が抽出できていることがわかる。中性子領域を再度抽出し、更に液体シンチレータ波形の速い成分と遅い成分による波形弁別を行なうことで、他のビームバンチからの γ 線の成分を落とした。図 3 に波形弁別の例を示す。

得られた中性子事象に対し、 γ フラッシュの計測時間 7.7ns (飛行距離/光速= $230(\text{cm})/30(\text{cm/ns})=7.7\text{ns}$) 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。

また、実験データと比較するため、QMD モデル断面積を使用した PHITS モンテカルロコードを用いてシミュレーションを行い測定器位置における中性子エネルギー分布を計算した。

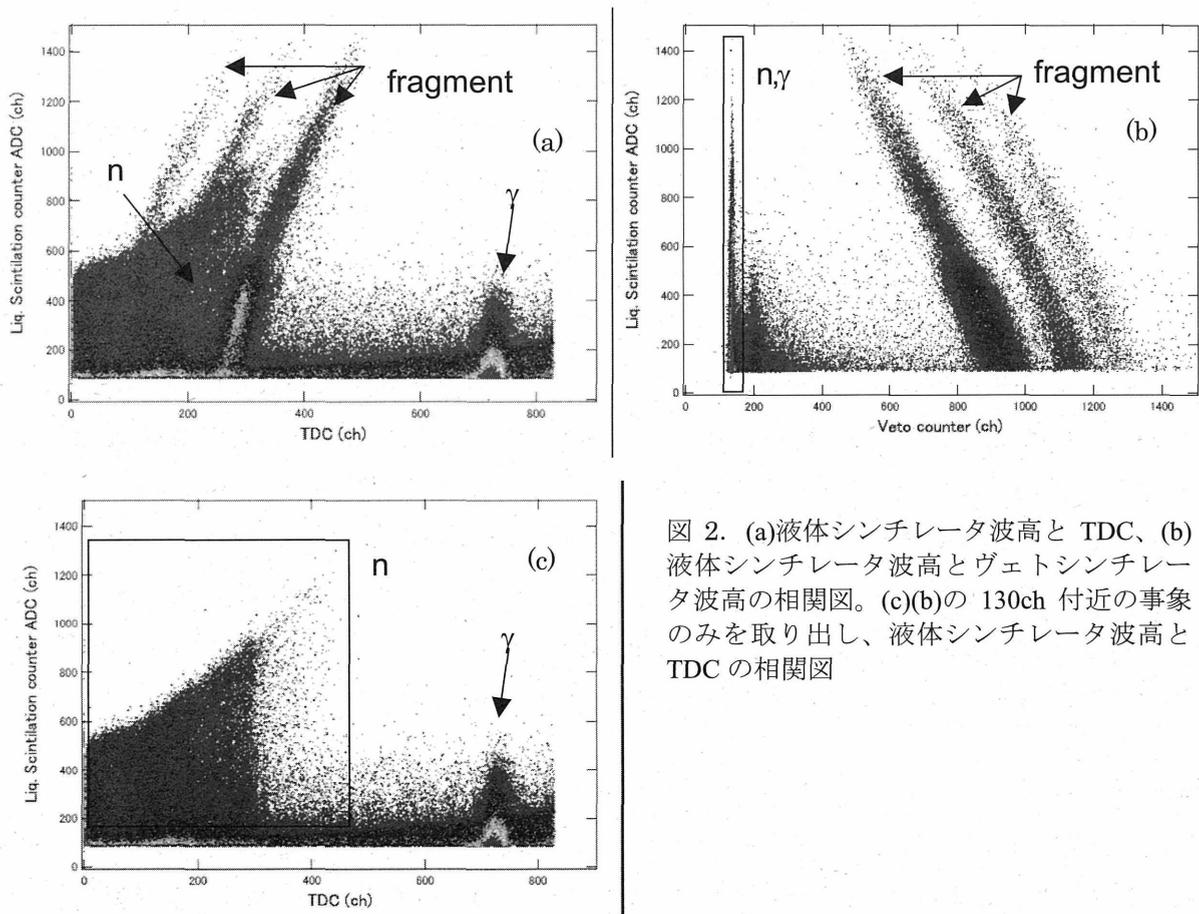


図 2. (a)液体シンチレータ波高と TDC、(b)液体シンチレータ波高とヴェトシンチレータ波高の相関図。(c)(b)の 130ch 付近の事象のみを取り出し、液体シンチレータ波高と TDC の相関図

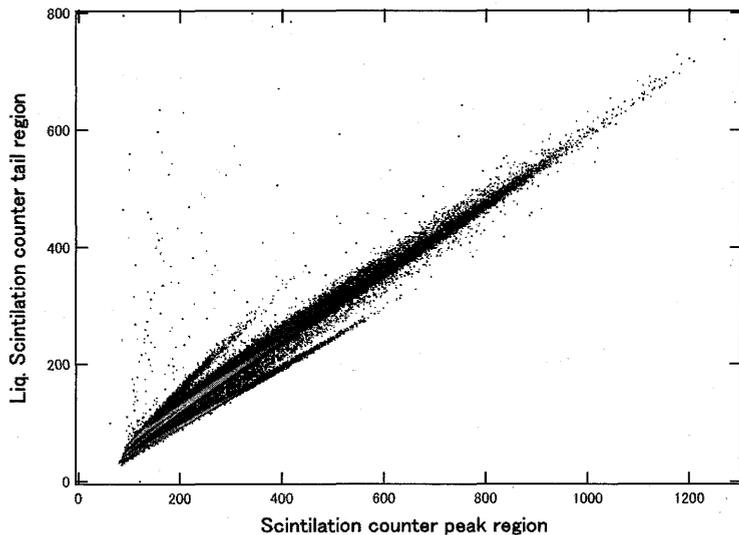


図 3. 液体シンチレータ波形の速い成分(Peak)と遅い成分(Tail)の相関. 3つの成分がわかる. Tail成分の波高の小さいクラスターより、 γ 線、中性子線による反跳陽子、中性子線による反跳ヘリウムと考えられる。

[結果およびまとめ]

今回の測定では入射粒子数をモニターする機構が無かったため、加速器内部の電流値を測定の前後で読み入射粒子数を評価したが、測定値と PHITS 計算結果とオーダーの違いが求められた。したがって、今回は測定されたエネルギー分布の形のみの比較を行なうこととした。測定データ(プロット)と PHITS 計算結果(ヒストグラム)の相対値の比較のプレリミナリデータを図4に示す。図4(a)は、散乱角0度における●:中性子測定値、○シャドウバー:散乱線測定のデータを示す。散乱線は50MeV以上で中性子測定と同程度、それ以下では1/20程度であったため、今回の解析では無視した。同様に(b)6度、(c)12度、(d)24度、(e)30度、(f)60度のデータを示す。測定した結果と計算結果を相対的に比較すると中性子エネルギー分布の傾向は測定と PHITS 計算とよく一致している。しかしながら、散乱角0、6及び12度においては小さいエネルギー付近の構造に違いが見られた。現在のところ、相対分布の違いの原因はわかってないが、可能性として(1)解析上でフラグメント粒子の寄与が落としかれていないことや、(2)QMD断面積と実際の断面積の違いを反映していることなどが考えられる。(1)については、解析を進め、中性子成分のみでなく測定にかかったフラグメントなどを解析することで確認可能と考えられる。(2)であれば本研究の目的とする計算を行うにあたり断面積を決定する必要がある。

今後解析を進め絶対値での比較を行う必要がある。また、相対値による比較においてもQMD断面積を用いた計算と実験値の間に違いが見出されていることから、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には、まず ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C},n){}^{13}\text{N}$ 反応や ${}^1\text{H}({}^7\text{Li},n){}^7\text{Be}$ 反応などの中性子過剰核ビーム入射に対する反応断面積の評価が必要になると考えられる。今後の課題としていきたい。

[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。

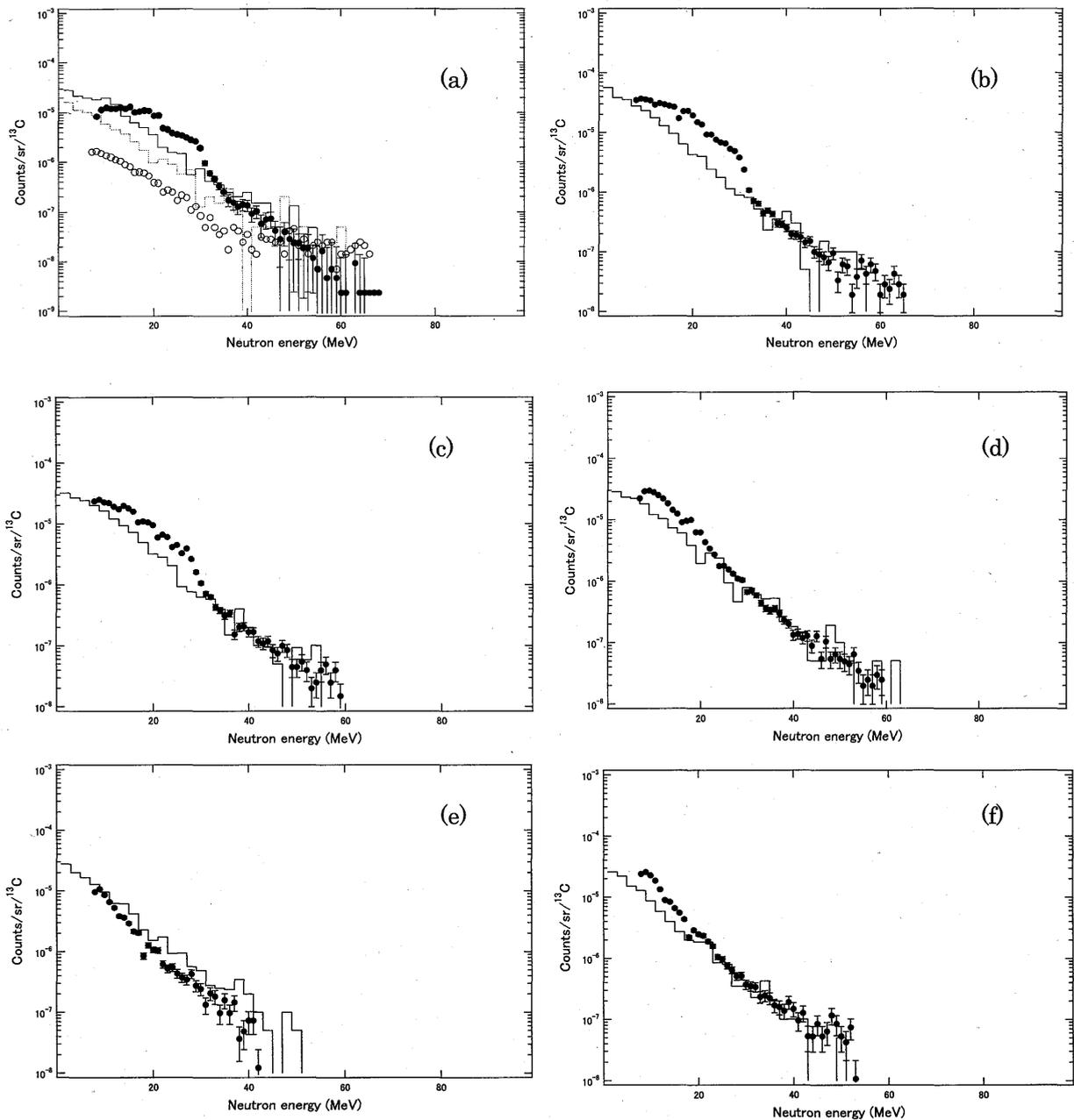


図 4. 測定値と PHITS 計算値の相対分布の比較

[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] T. Honma, S. Hojo, N. Miyahara, K. Nemoto, Y. Sato, K. Suzuki, M. Takada and S. Yamada, IMPROVEMENTS AND APPLICATIONS AT NIRS CYCLOTRON FACILITY, Cyclotrons and Their Applications 2001, Sixteenth International Conference, edited by F. Marti, CP600, (2001)

硼素中性子捕捉療法用加速器中性子源のための 30MeV 陽子による ベリリウムターゲットから中性子スペクトル測定

田中浩基^a、高田真志^b、櫻井良憲^a、鈴木実^a、増永慎一郎^a、丸橋晃^a、小野公二^a、
^a 京都大学原子炉実験所、^b 放射線医学総合研究所

概要

京都大学原子炉実験所では研究用原子炉 (Kyoto University Research Reactor :KUR) に設置された重水中性子照射設備を用いて 275 例の硼素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy :BNCT) を行い、従来行われていた脳腫瘍 (開頭) 及び悪性黒色腫から、脳腫瘍 (非開頭)、頭頸部腫瘍、多発性肝腫瘍[1]、肺癌[2]へと適応症例を拡大してきた。BNCT をさらに発展させるためには、病院併設が可能な加速器を用いた熱外中性子源の実現が望まれている。これまで 20 年に渡って世界中で BNCT 用加速器中性子源の研究開発がなされてきたが、加速器の電流不足、ターゲットの健全性などの課題があり治療可能なシステムの実現には未だ到っていない。本実験所では 30MeV 陽子によるベリリウムターゲットからの高エネルギー中性子を治療に適したエネルギーまで減速させるシステムを考案し、京都大学原子炉実験所イノベーションラボラトリ医療エリアに本システムの建設を終え、平成 21 年 4 月より中性子発生実験を開始した。

本システム設計に際し、30MeV 陽子によるベリリウムターゲットからの中性子スペクトルの角度分布が必要であったが、軽核に対する物理モデルは実験値を再現しないことが分かっており、また、Be(p,n) 反応の核データライブラリは ENDF-B/VII にしか存在せず、ENDF-B/VII を用いるには実験的検証が必要であった。そこで本研究では 30MeV 陽子による厚いベリリウムターゲットからの中性子スペクトルの角度分布を飛行時間法によって測定し、BNCT 用中性子源設計で重要となる 5MeV 以上の実験値が ENDF-B/VII とファクター 2 以内で一致することを確認でき、本システムの設計の指針を得ることができた。

本報告書では 30MeV 陽子による厚いベリリウムターゲットからの中性子エネルギースペクトルの角度分布測定を行ったことについて報告する。

1. サイクロトロンベース熱外中性子源

京都大学原子炉実験所に設置したサイクロトロンベース熱外中性子源の概略図を図 1 に示す。本システムは陽子サイクロトロン、ビーム輸送系、減速整形体系から形成される。[3]

図 2 に熱外中性子発生のための減速整形体系の概略図を示す。減速体系の構成物質は鉛、鉄である。鉛は 10MeV 以上で 1barn 程度の (n,2n) 反応断面積を有しており、1MeV 以上の中性子において 1barn 程度の非弾性散乱断面積を有する。鉄は鉛よりも (n,2n) 反応断面積が小さいが、非弾性散乱断面積が数 MeV 付近で鉛よりも高い。よってターゲット近くには鉛を配置しその後鉄の減速体を設置した。また、ターゲット周りの鉛はターゲットから後方散乱した中性子を反射するための反射体として設置した。ターゲットアセンブリは交換時には後方に移動できる構造となっている。熱外中性子整形体系はアルミニウム、フッ化カルシウムから構成される。それは以下の理由による。アルミニウムは 27keV、70keV 付近に全断面積の谷があり、その部分のエネルギーを持つ中性子が他のエネルギー領域に比べて反応を起こしにくい。一方、70keV 付近で抜けてくる中性子は高すぎて、治療効果の劣化を招ため、数十 keV 以上で共鳴断面積を有するフッ素含有の物質を加えることで 70keV 付近のエネルギーを減速させる。

フッ化カルシウムを通過して、熱外中性子領域に整形された中性子は鉛のガンマ遮蔽体を通してコリメータへと導かれる。コリメータは 25cm 角まで拡大でき、患部の形に合わせて開口部を自由な形に変形可能である。1.5cm 厚みの LiF 入りポリエチレンブロックで形成されている。

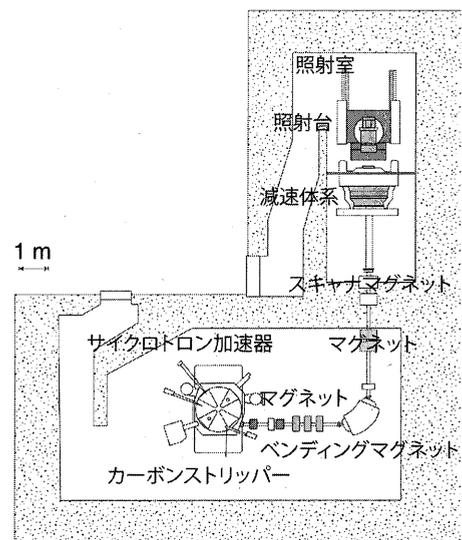


図 1 サイクロトロンベース熱外中性子源概略図

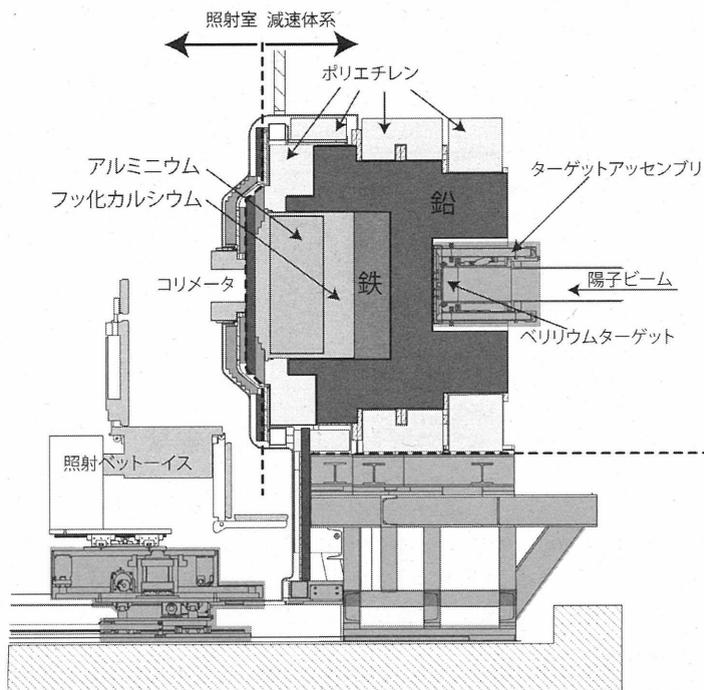


図 2 熱外中性子発生のための減速整形体系の概略図

2. 30MeV 陽子による厚いベリリウムターゲットからの中性子スペクトル測定

2-1 実験方法

実験は放射線医学総合研究所サイクロトロン施設の汎用照射室内に設置された C8 コースにて行った。入射粒子は 30MeV に加速された陽子であり、ベリリウムターゲットは飛程が 5.8mm の 30MeV 陽子が完全に止まる厚さとした。実験体系及び検出器配置写真を図 3、図 4 に示す。測定角度は 0,15,30,45,60,90,135 の 7 点とした。中性子検出器には時間分解能がよく、 $n-\gamma$ 弁別能に優れた、NE213 有機液体シンチレータを用いた。30MeV 陽子とベリリウムとの反応によって生成される中性子エネルギーは 30MeV より小さいため、直径 2 インチ×厚さ 2 インチの NE213 シンチレータを用いた。

TOF 法ではベリリウムターゲットで発生した中性子が NE213 シンチレータに入射するまでの飛行時間から中性子エネルギー情報を得る。本実験ではサイクロトロンからの陽子ビームラインには飛行時間のスタート信号となり得るチョッパー信号が無いので、AVF サイクロトロンの RF 周波数である 16.8MHz(60ns)ごとに中性子が発生することになる。図 5 に中性子エネルギーと飛行時間の関係を示す。飛行距離が長くなるほどエネルギー分解能が上がるためできるだけ長いことが望ましい。しかしながら、60ns 毎に陽子が入射され、60ns よりも飛行時間が長い中性子は次のサイクルに入射されるため測定することが出来ない。よって今回の実験では 5MeV 以上の中性子を測定対象としていることから、2m の飛行距離を選択した。

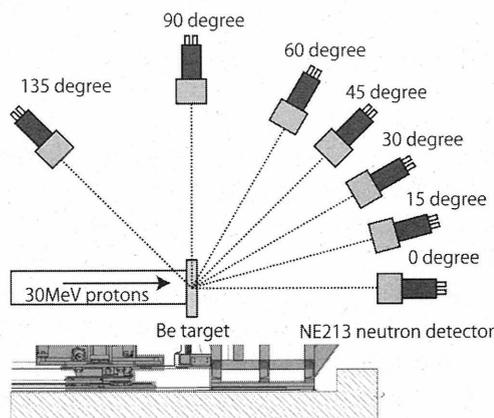


図 3 実験体系図



図 4 検出器配置

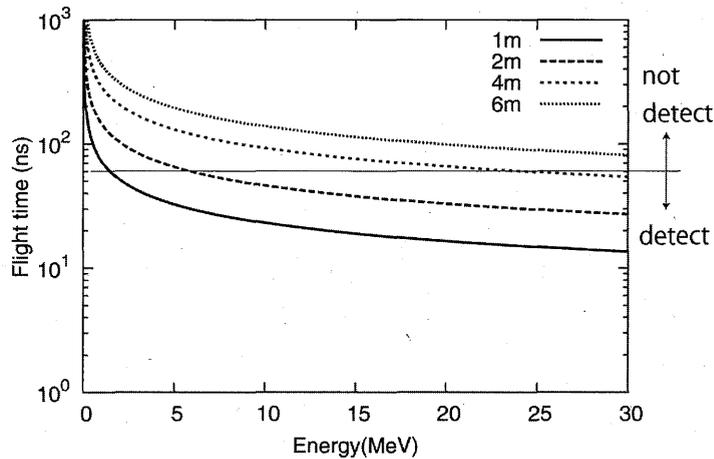


図5 中性子飛行時間とエネルギーの関係

測定回路を図6に示す。NE213からのアノード信号はディバイダ(DIV)によって三つに分割される。そのうち二つの信号は中性子とガンマ線の波形弁別を行うために用いられる。パルス全体がゲートの中に入るように調整された total 成分と、波形の減衰成分のみがゲートに入るように調整された slow 成分として電荷積分型波高分析器(ADC)に入力される。

もう一つのアノード信号はコンスタントフラクションディスクリミネータ(CFD)でタイミング信号に変換される。このタイミング信号を基準にして、ゲートジェネレータ(GG)において total,slow 成分のゲート信号を作り、ADCに入力する。また、飛行時間を検出するためのスタート信号として TDC に入力される。一方飛行時間のストップ信号は AVF サイクロトロンからの RF 信号を用いた。

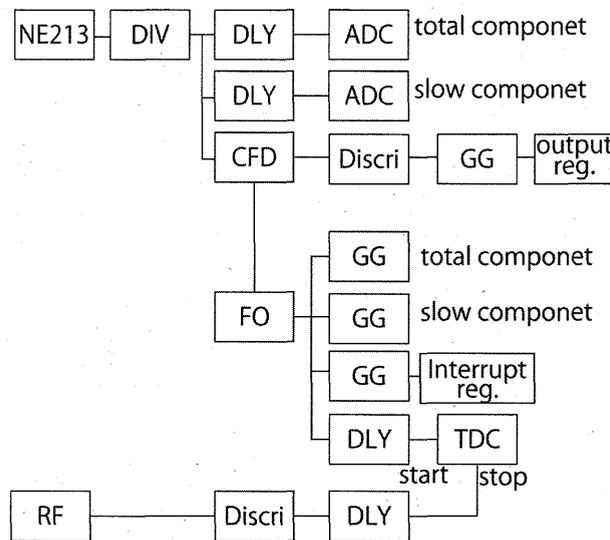


図6 測定回路図

2-2 データ解析

図7にNE213の波形の total 成分と slow 成分の相関関係を示す。一定の total 成分に対して中性子入射に起因する α 粒子、重陽子、陽子の発光量は、ガンマ線起因の電子による発光よりも大きくなるため、図7のように弁別して測定可能となる。中性子イベントのみにゲートをかけてガンマ線のイベントを除去することにより、中性子のイベント情報を取得する。

図8にTDCで取得した飛行時間と total 成分の波高分布の相関関係を示す。本測定ではサイクロトロンからの RF 信号をストップ信号、NE213からの信号をスタート信号としているため、逆 TOF となっており、TDCのチャンネルが高いほどエネルギーが高い。図8より、前の周期の遅い中性子成分が、着目しているサイクルの高エネルギー成分に重なっていることが分かる。このイベントを除去するために、total 成分のバイアスを 1.9MeVee に設定した。このときの2インチのNE213の検出効率を図9に示す。検出効率は SCINFUL モンテカルロコードによるNE213の応答関数より導出した。

エネルギー分解能は飛行時間の時間分解能と距離の不確かさから導出される。時間分解能はRFのパルス幅、ターゲットからの中性子放出時間のばらつき、測定回路の時間分解能に起因し、距離の不確かさはターゲットの厚さ及び、検出器の厚さによって決まる。これらの不確かさはターゲットにおけるガンマフラッシュの測定値から導出でき、本測定では1.9nsであった。エネルギー分解能は図10に示すように30MeVで約15%であった。

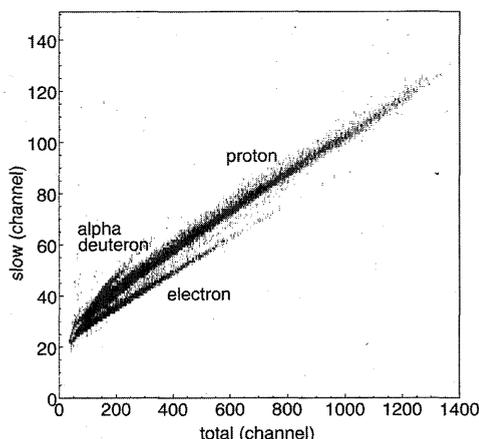


図7 NE213からの光出力のtotal成分とslow成分の関係

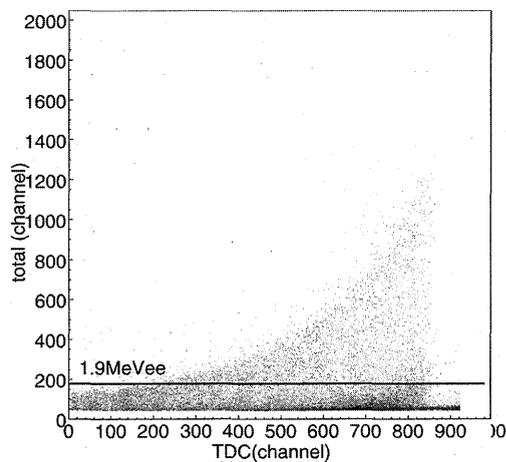


図8 NE213からの光出力のtotal成分とTDCの時間応答の関係

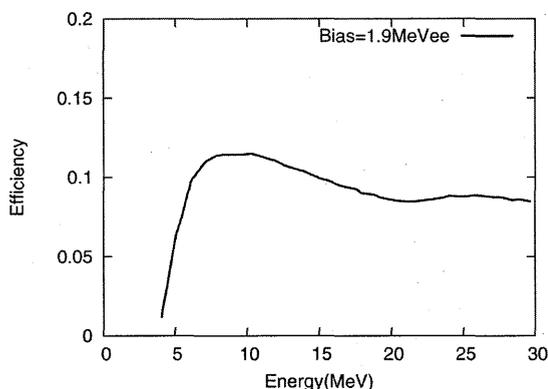


図9 バイアスは1.9MeVeeの時のNE213の検出効率

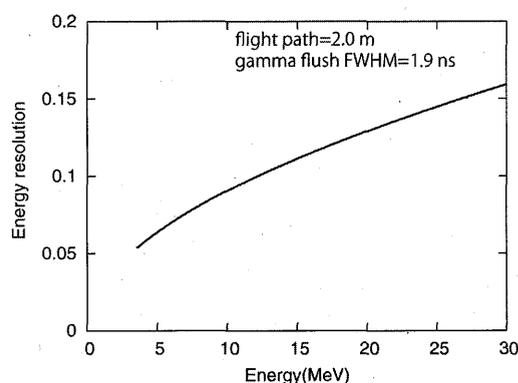


図10 エネルギー分解能

2-3 結果と考察

各測定角度における中性子スペクトルは図11のように示される。比較のために、MCNPXのBertini物理モデル及びENDF-B/VIIの計算値を示す。ENDF-B/VIIは前方方向でよく実験値を再現できていることが分かる。また、90度、135度と広角になるに従って実験値はENDF-B/VIIよりも過小評価となる。これは、ターゲットの自身及びビームダクトで散乱されるためであると考えられる。

一方Bertini物理モデルでは25MeV以上のエネルギーにおいては過小評価となっている。また、広角になるほど実験値を過小評価することになる。これはBertiniモデルが直接過程を再現できないためであると考えられる。以上のように30MeV陽子の厚いベリリウムターゲットからの中性子スペクトルはENDF-B/VIIがよく再現出来ていることを実験的に確認することができた。

3 まとめと今後の予定

サイクロトロンからの30MeV陽子による厚いベリリウムターゲットからの中性子スペクトルの角度分布を飛行時間法によって測定した。Bertini物理モデル及びENDF-B/VIIと比較したところ、Bertini物理モデルは実験値を再現しないことが分かり、一方ENDF-B/VIIは実験値をよく再現することから、中性子捕捉療法用熱外中性子源の設計に有用であることを確認した。

京都大学原子炉実験所に設置された30MeV陽子サイクロトロンベース熱外中性子源は平成21年4月現在運転を開始しているが、さらに熱外中性子源の高度化という観点から、より低い陽子エネルギー

(16MeV 程度)での熱外中性子源の開発が必要となってくる。なぜなら、減速体系が小さくできることや、発生中性子のエネルギーが小さいことから患者に対する被ばく線量も少なくできる可能性があるからである。またエネルギーが低いことから、しきい値によっては放射化物を生成しないことになる。しかしながら、中性子発生量が十分で無くなるために、加速器のビーム電流が増え、ターゲットにおける熱負荷も増大する。よって新たな中性子源の開発を行う際に 16MeV 領域における陽子入射中性子発生に関する基礎データを取得することが必須となってくる。今後の予定としては陽子エネルギー16MeV 近傍での中性子スペクトル測定を行いたいと考えている。

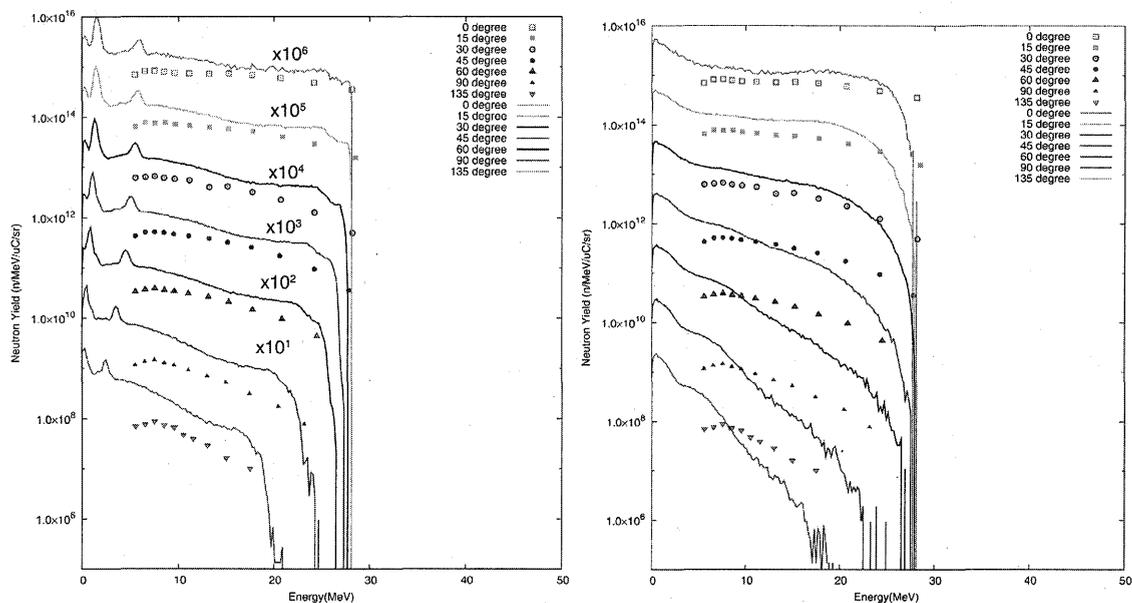


図 11 中性子エネルギースペクトル角度分布の実験値と計算値の比較 (左 ENDF-B/VII、右 Bertini 物理モデル)

謝辞

放射線医学総合研究所のサイクロトロン施設のスタッフの方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Minoru Suzuki, et al.; First attempt of boron neutron capture therapy(BNCT) for hepatocellular carcinoma, Jpn J Clin Oncol 2007,37(5) 376-381
- [2] Minoru Suzuki, et al.; Feasibility of boron neutron capture therapy(BNCT) for malignant pleural mesothelioma from a viewpoint of dose distribution analysis, Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 66, No. 5, pp. 1584-1589(2006)
- [3] H. Tanaka, et al; Improvement of dose distribution in phantom by using epithermal neutron source based on the Be(p,n) reaction using a 30 MeV proton cyclotron accelerator, App. Rad. Isotope, in press.

LYSO(Ce)シンチレータを用いた中エネルギー陽子エネルギー測定

古場裕介¹、岩元大樹¹、福井芳則¹、森元陽介¹、若林源一郎¹、魚住裕介¹、高田真志²

九州大学¹、放医研²

1. はじめに

数十～数百 MeV の核データは、工学や医療など幅広い分野で利用される。核データ研究では核反応二重微分断面積の測定を、核反応放出粒子エネルギーの全領域にわたって行うため、無機シンチレータによるカロリメータ的測定が適している。しかし、数百 MeV までのエネルギー範囲ではエネルギー非線形性が顕著になる他、シンチレータ内での核反応等により測定効率が大幅に低下する。このため、測定において何らかの工夫が必要となる。無機シンチレータによる波高測定と TOF 測定とを組み合わせた検出器では、大アクセプタンス化、高効率化、高分解能化が同時に可能になると考えられる。無機シンチレータとしては、近年開発された LYSO(Ce)に着目した。LYSO(Ce)は特徴として、高密度、大発光量、短発光時間等を有しているため、高性能スペクトロメータの構成要素として期待が大きい。

本研究では、LYSO(Ce)シンチレータの陽子に対する発光のエネルギー非線形性を測定し、さらに TOF 測定にも応用してエネルギー分解能を測定する。TOF 測定の際、LYSO(Ce)シンチレータはエネルギー損失測定の役割とエネルギーデグレーダとしての役割の二つを果たしている。本報告では以上の結果についてまとめる。

2 実験と議論

2-1 発光応答

実験は、放医研サイクロトロン施設において 80MeV の陽子ビームを用いて行った。陽子ビームはまず金属板デグレーダーに照射して減速させ、そのエネルギーを 35 MeV から 80 MeV までの範囲で変えた後、シンチレータ発光応答の測定を行った。使用した LYSO(Ce)シンチレータは一辺 20mm の立方体であり、光電子増倍管の出力を ADC によって電荷分析を行った。図 1 に得られた実験結果を示す。図中のデータは、¹³⁷Cs γ 線 (661.7keV) による光電ピークの発光量を 1 となるように規格化している。図中の実線は Birks の式による計算結果である。Birks の式は次式で与えられる。

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

S および kB は実験データを再現するように選ばれる。特に kB は Birks パラメータと呼ばれ、一般に正の定数で dE/dx が大きいときのクエンチを表現する。今回の実験で得られた非線形性を再現する最適な Birks パラメータは、 $kB = 299 [\mu\text{m/MeV}]$ 、 $S = 3.2 [\text{arb.}]$ であった。図 2 には今回の陽子の結果と、HIMAC で測定した ⁴He および、¹²C に対する発光量の比較を示している。

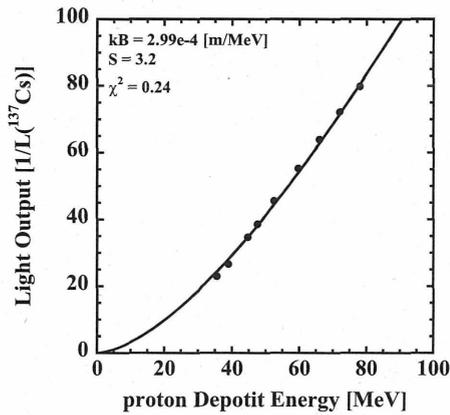


図1 LYSO(Ce)の対陽子光出力

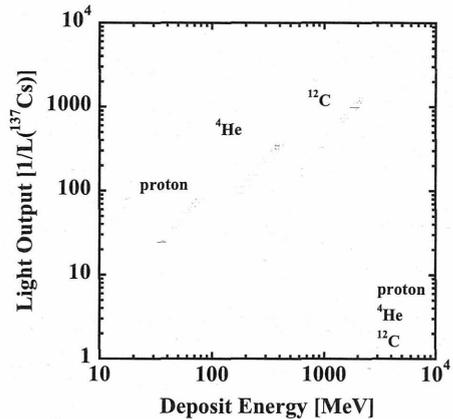


図2 LYSO(Ce) の対 p, α, C 光出力

2-2. TOF 測定

図3に実験体系を示す。本来、start PL（プラスチックシンチレータ）の前にLYSO(Ce)シンチレータをdE測定兼エネルギーデグレーダとして配置するが、今回は省略している。ビームエネルギーは金属板デグレーダにより調整した。陽子のエネルギーに対する飛行時間測定結果を図4に示している。図中の実線は計算値である。図5にエネルギー分解能を示す。低エネルギーで分解能が悪化しているのはデグレーダによるエネルギーストラグリングが大きく影響するためである。測定したエネルギー領域では、1.2 mの短い距離であっても分解能約7%程度を達成している。

図6に収集効率の結果を示している。ここで収集効率とはStart用シンチレータに入射した陽子のうちTOF Stop用シンチレータで検出した割合である。従って、Start用シンチレータに入射した際の陽子の位置・角度広がり、Stop用シンチレータの大きさ、飛行距離に主に依存する。実験と同体系でGEANT4を用いて収集効率を計算した。計算結果は比較のため図6の中に横棒で示す。

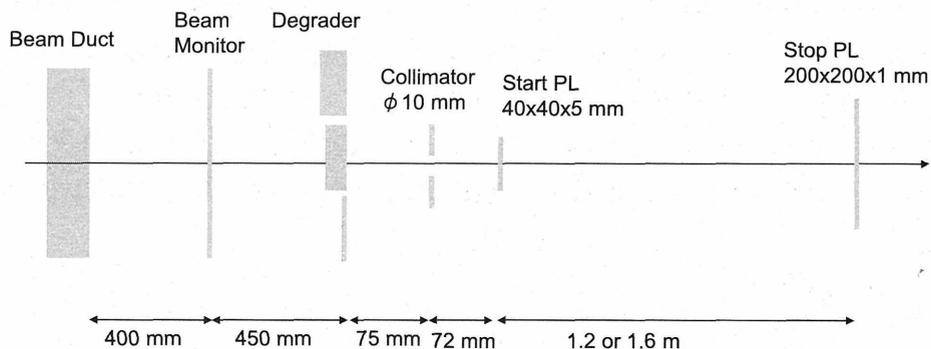


図3 TOF測定での機器の配置
(PL: プラスチックシンチレータ)

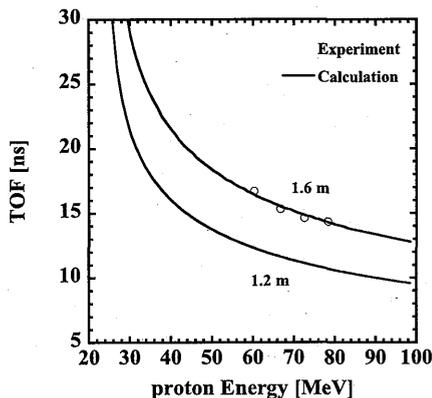


図4 TOFの結果

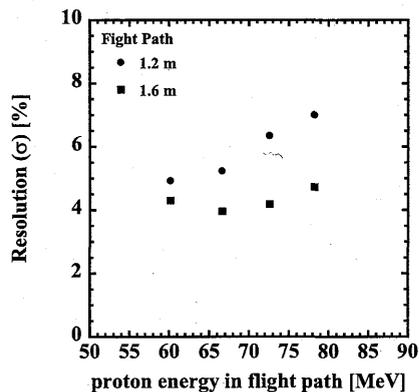


図5 TOF エネルギー分解能

低エネルギー側ではより厚いデグレーダーを使用する必要があり、角度ストラグリングが大きくなるため、収集効率は低下している。また、飛行距離が長い方が当然収集効率は下がっている。このような傾向は GEANT4 の計算によって再現できている。しかし、角度ストラグリングの影響が大きい領域においては実験値との差が大きくなっていることが分かる。この要因として、入射陽子ビームの収束性を GEANT4 の計算では考慮していないことに加えて、GEANT4 ではデグレーダーによる角度ストラグリング計算に問題がある可能性が考えられる。

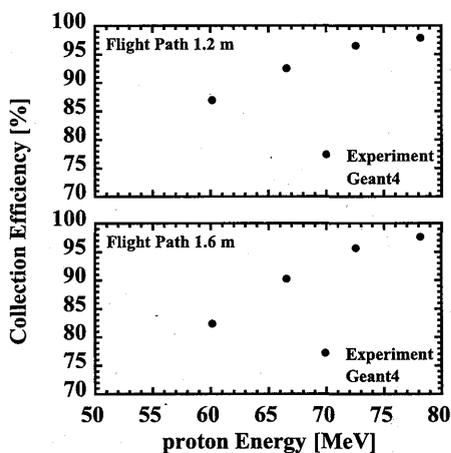


図6 収集効率の結果

3. まとめ

LYSO(Ce)シンチレータによる中エネルギー陽子エネルギー測定のため、その基本的性能を陽子ビームにより調査した。LYSO(Ce)シンチレータのシンチレーション効率を決定した。TOF のエネルギー分解能も予想した値と一致していた。陽子の角度ストラグリングは計算結果との一致が良くなかった。GEANT4 計算に問題がある可能性がある。

飛翔体搭乗員用の個人線量計の開発に関する研究

大口裕之^a、牧大介^a、篠崎和佳子^a、小口靖弘^a、山本幸佳^a、高田真志^b

^a 株式会社千代田テクノロ 大洗研究所、^b 放射線医学総合研究所

1. 研究の目的とバックグラウンド

現在、国際宇宙ステーションを対象とした被ばく線量測定検出器として PADC (ポリアリルジグリコールカーボネイト) 検出器が利用されている。PADC 検出器は、製造方法、エッチング処理方法が異なると中性子に対する応答性が変化することが分かっている。また、一般に PADC 検出器を用いた中性子個人線量計は、ポリエチレンラジエータ内の水素原子と中性子との相互作用から発生する反跳陽子を利用しているため、PADC 検出器の陽子に対する効率を向上させるための研究を進めてきた。

これまでの研究では、PADC 製造の際に IR1010 の抗酸化剤を添加することで陽子に対する検出効率を向上させることに成功し、エッチング処理時間と陽子に対する検出エネルギーの関係を調べた。本研究では PADC 検出器を用いて、高エネルギー中性子に対する応答を調べた。

一方、当社は PADC を用いた新型の環境用中性子線量計を開発した。線量計の実現場への適用性を検討するために、2009 年 2 月にサイクロトロンからの漏洩中性子線を使ってフィールド試験を行った。

2. 実験材料及び実験方法

(PADC 検出器の高エネルギー中性子に対する応答)

本研究では、 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反応で生じる 18MeV 中性子を線量計に照射した。入射陽子には、放射線医学総合研究所のサイクロトロン加速器で 20MeV に加速したものをを使った。

線量計として、ポリエチレン (1.0mm) と PADC の間に厚さの異なるアルミニウムを挟んだ構造のものを用意した。アルミニウムの厚さは 0.2~1.2mm とし、ポリエチレン中で発生する反跳陽子のエネルギーとアルミニウム内での飛程の関係を SRIM2003 コードで調べた。

照射後の PADC のエッチング処理は、30%KOH, 90°C, 1.5 時間処理で行なった後、PADC 表面上に発生しているエッチピットを高速顕微鏡 (HSP) で計測した。尚、30%KOH, 90°C, 1.5 時間処理した場合の検出上限エネルギーは 8MeV となった。

(新型の環境用中性子線量計フィールド試験)

正確な中性子線量当量を定めるために、放射化ボナー法を使って、漏洩中性子スペクトルを測定した。また、環境用中性子線量計の応答とレムカウンタの応答を比較した。

3. 研究結果

(PADC 検出器の高エネルギー中性子に対する応答)

アルミニウム 0.2mm を挟み込んだ PADC の感度を基準とした場合、アルミニウムの厚さを 0.4mm~0.8mm にすれば、PADC の感度が 1.2 倍向上した。さらにアルミニウムの厚さを 1.0mm~1.2mm にすれば、PADC の感度が 1.4 倍向上した。この応答性向上は、SRIM2003 で計算した値とほぼ一致していることが分かった。(アルミニウム 1.0mm の場合、ポリエチレン中で発生する反跳陽子が PADC に到達するエネルギーは 11MeV~7MeV となる。)

(新型の環境用中性子線量計フィールド試験)

現在、詳細なデータの解析を進めている。

4 - 2. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

内堀幸夫^a、北村尚^a、安田仲宏^a、小平聡^a、太田周也^{a,b}
Jordanka Semkova^c、Stefan Maltchev^c、
Victor Bengin^d、Soenke Burmeister^e、Johannes Labrenz^e

^a放射線医学総合研究所、^b早稲田大学、
^cブルガリア科学院、^dロシア生物医学問題研究所、
^eキール大学(ドイツ)

概要

放医研大型サイクロトロン施設の汎用照射室にある C-8 コースは、散乱体およびワブラー磁石を用いて広い照射場の作成が可能となっており、生物・物理実験などの様々な分野で利用されている。C-8 コースを、放射線計測器に対する陽子線および α 粒子の標準較正場とするために、放射線場の特性評価を進めている。70 MeV 陽子ビームと 40 MeV 陽子ビームについて照射場の一様性の測定を行い、直径 7~10 cm の範囲内で一様であることを確認した。

1. 研究の目的と背景

我々のグループでは、宇宙放射線計測器の国際比較実験(ICCHIBAN)を進めている。これまで、放医研 HIMAC を中心とした国内外の加速器施設での地上での比較較正実験や、ロシア・ミール宇宙船や国際宇宙ステーションにおいての実験を行っている。地上実験においては、検出器間のレスポンスの相互比較が主なテーマであり、これまで HIMAC などでの重イオンによる高 LET 粒子に対するレスポンスの評価を目的として実験を行ってきたが、宇宙放射線の大多数を占める陽子線を用いた実験が必要であり、その較正場として放医研大型サイクロトロン施設の汎用照射室の C-8 コースの利用を計画している。C-8 コースには、現在、広い照射野を形成するためのワブラーマグネット等の機器がインストールされており、放射線計測器の標準較正場としての環境が整いつつある。これまで、C-8 コースのビームプロファイルの確認は下流に置かれた蛍光板で行ってきたが(写真1)、本研究ではビームの横広がりプロファイルを、検出器を用いて測定し、定量化して平坦度を求めることを目的としてビーム実験を行った。

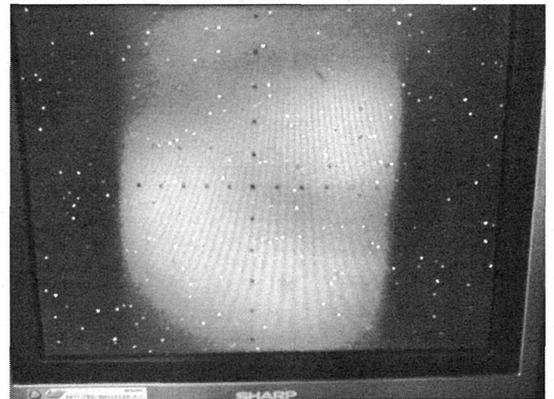


写真1 蛍光板上のビームスポット。コリメータで切られているので、10cm×10cmの角型の領域でのビーム強度が視認できる。

2. 実験と結果

2.1 プロファイル測定に用いた検出器

C-8 コースでのビームの横広がり測定には、1 cm 角のシンチレータを 1.5 cm 間隔で十字状に並べたシンチレータアレイ型検出器を用いた。図1にその概略図を示す。各シンチレータは光ファイバーで光電子増倍管と接続されている。信号はディスクリミネータを用いて粒子数として記録した。シンチレータ間の位置での粒子数も計測するために、検出器を、ビーム軸に対して垂直な面で、水平方向と鉛直方向に移動するステージ上に載せて、計測室からリモートでコントロールした。また、ビームモニタとして、検出器下流(検出器でビームが止まる場合には上流)に、20×20 cm²のシンチレータを配置した。

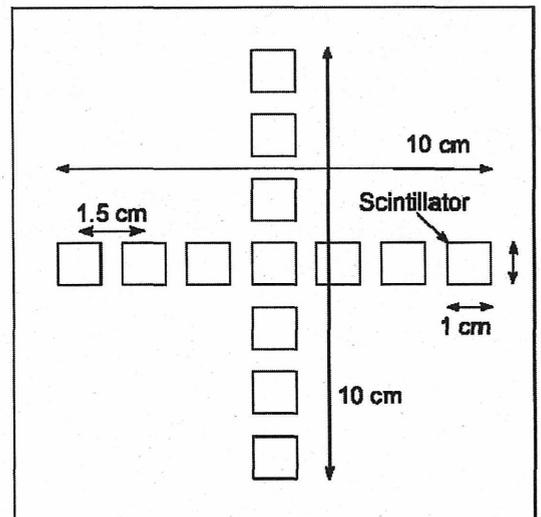


図1 検出器の概略図

2.2 ビームプロファイルの測定と結果

a. 70 MeV 陽子ビーム

測定は2008年6月20日に行った。散乱体およびワブラー磁石は、通常行われている設定、すなわち、散乱体にアルミ 0.3mmt、ワブラー磁石電流を X・Y 方向ともモニターで 1.48 V になるようにセットし、ビーム強度はビーム中心で $10^3 \text{ particles cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ となるように調整した。

図2(左)はプロファイル測定の結果である。横軸はビームセンターからの距離、縦軸はビームセンターでの測定値で規格化した相対的ビーム強度である。それぞれ上図は水平方向、下図は鉛直方向の測定である。図中のラインは、分散 σ^2 のガウス型分布を持つビームスポットが、半径 R の円周上を回転しているとして行ったフィッティングしたものである。

測定の結果から、鉛直方向の広がりが少ないものの、ビーム中心でのビーム強度から 10% 以内の場所が有効であるとする、直径約 7cm の円内で一様な照射場が得られていることがわかった。

b. 40 MeV 陽子ビーム

測定は2009年1月6日に行った。エネルギーが低いために散乱体として物質を入れるまでもなく、ビームウインドで広がっていたので、散乱体は用いなかった。ワブラー磁石は、制御盤でのモニターの値が X 方向で 1.34 V、Y 方向で 1.60 V となるようにセットした。ビーム強度は、70 MeV 陽子ビームと同じく、 $10^3 \text{ particles cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ で行った。

プロファイル測定結果は図2(右)の様になった。もともとのビームスポットが大きく広がっていたために、70 MeV 陽子の場合に比べると平坦であり、直径約 10 cm の円内で一様な照射場が得られていることがわかった。鉛直方向が水平方向より平坦度が悪く見えるのは、ワブラー磁石のパラメータの最適化に時間を要し、測定点が取れなかったため、上流のコリメータの影響を受けているエッジ部分の計測数が減少している外側の測定点をフィッティングに用いたためであり、実際は水平方向と同じように広がっていると思われる。

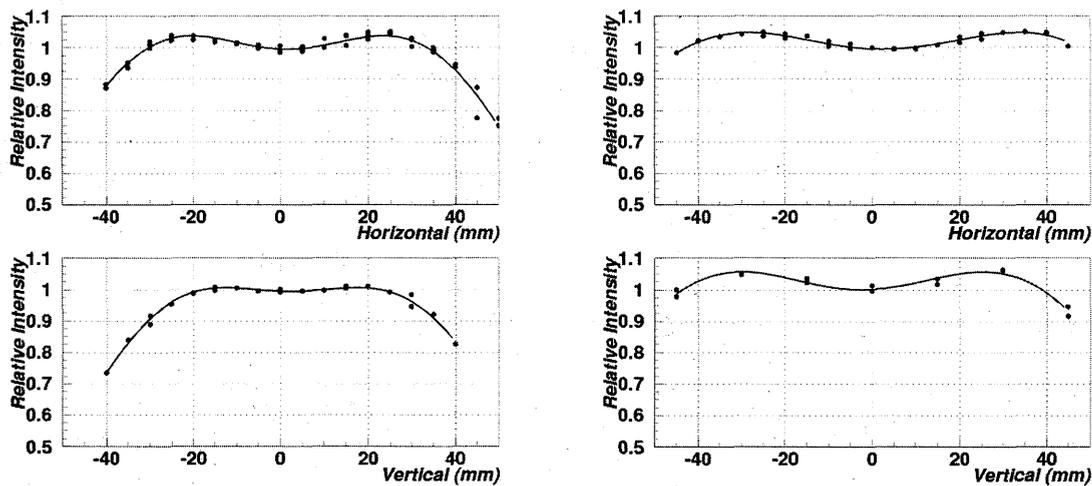


図2 C-8 コースでの陽子線ビームのプロファイル。左は 70 MeV 陽子、右は 40 MeV 陽子ビーム、上段が水平方向で下段が鉛直方向のプロファイルを示している。強度はビーム軸上の強度の相対値として示している。

4-3. 宇宙飛行体搭載型放射線検出器の開発

宇宙飛翔体搭載型放射線検出器の開発

北村尚^a、内堀幸夫^a、松本晴久^b、佐々木康友^b、寺門康男^c、富高真^c、
川崎賀也^d、滝澤慶之^d、榊直人^e、

^a放射線医学総合研究所、
^b宇宙航空研究開発機構、^c明星電気、
^d理化学研究所、^e青山学院大学、

平成 20 年度は、宇宙飛翔体に搭載する放射線計測器の放射線感度の較正実験、および、宇宙放射線場での電子機器の耐放射線実験を行った。次の二点の実験について報告する。

- I. 宇宙機搭載放射線観測装置の開発
- II. ISS 搭載候補 JEM-EUSO ミッションで使用する部品パーツの放射線耐性試験

I. 宇宙機搭載放射線観測装置の開発

松本晴久^a、佐々木康友^a、内堀幸夫^b、北村尚^b

a. 宇宙航空研究開発機構、 b. 放射線医学総合研究所

概要

サイクロトロン施設を利用した宇宙機搭載放射線観測装置の開発について報告する。本年度は、準天頂測位衛星(QZS)に搭載する放射線観測装置を製作し、サイクロトロン施設を利用してビーム照射試験を実施した。

1. 研究の目的とバックグラウンド

宇宙放射線は、衛星に有害な影響を与えるため、衛星の安全な運用、及び信頼性設計向上のために、JAXAが開発する衛星には継続的に放射線観測装置を搭載し、宇宙放射線に関する情報を取得してきた。取得した情報は、衛星の軌道上不具合の解析、宇宙放射線モデルの開発などに資されている。

2. 研究内容と成果

A) QZS 搭載軽粒子観測装置

表1に QZS に搭載する軽粒子観測装置の主要緒元を示す。QZS 搭載軽粒子観測装置は、半導体検出器を数枚内蔵する2種類のセンサ(ESL-A,APS-B)から構成される。サイクロトロン施設では、APS-B について、He3 に対するエネルギー応答を計測した。

表1. QZS 搭載軽粒子観測装置の主要緒元

項目	ELS-A	APS-B
観測エネルギー範囲 (MeV)		
電子	0.03 - 1.3	-
陽子	-	1.5 - 250
ヘリウム	-	10 - 400
最大計数率 (event/sec)	5×10^4	5×10^4
幾何学的因子 (cm ² sr)	0.003	0.057
視野角 (全角) (deg)	20	44

B) 使用ビーム

QZS に搭載する装置と同等のものを、別プロジェクトで開発しておりその際 He4 の応答を実施したので、今回は He3 の応答を計測した。

- a) 線種: He3
- b) エネルギー: 75MeV
- c) 強度: 1000~10000 particles/sec

C) 試験セットアップ

図1に試験セットアップを示す。He3 75MeV の粒子を、ビーム強度モニタであるプラスチックシンチレーション検出器、及びエネルギー吸収体であるアクリルまたはアルミを介して供試体に照射し、単一エネルギーの He3 に対する供試体内蔵半導体検出器の出力を計測した。減速材を変更することにより、供試品に照射するビームのエネルギーを 8 段階に調整した。APS-B センサは、4 枚の半導体検出器(内1枚は突き抜け検知用検出器)構成である。

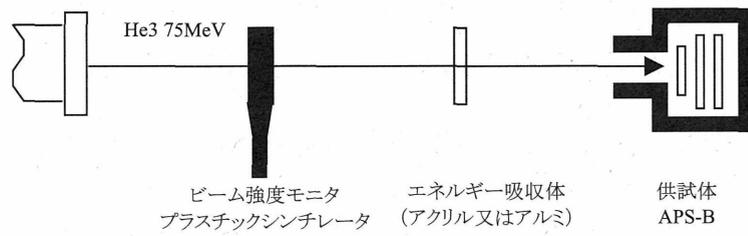


図1 試験セットアップ

D) 試験結果

図2に試験結果の一例として、APS-B センサについて、縦軸に半導体検出器における損失エネルギー、横軸に半導体検出器の出力を取ったグラフを示す。理論の予測値に良く一致する結果を得た。これらの試験結果に基づき、図3に示す検出器出力から粒子弁別とエネルギーCHを決定する変換テーブルを決定した。

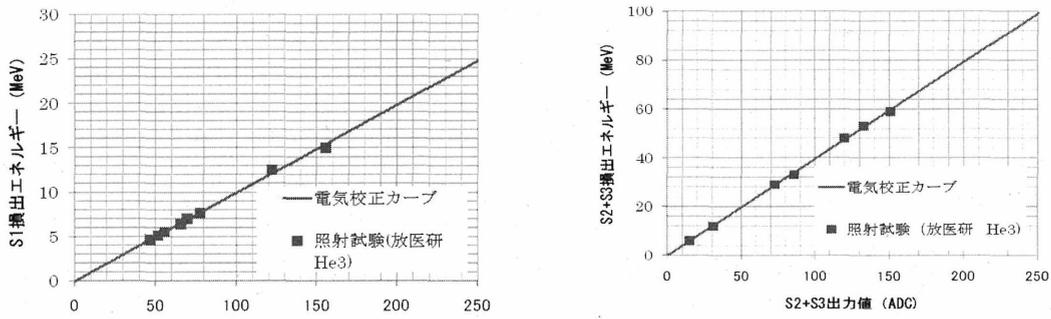


図2 APS-B 内蔵半導体検出器のエネルギー応答

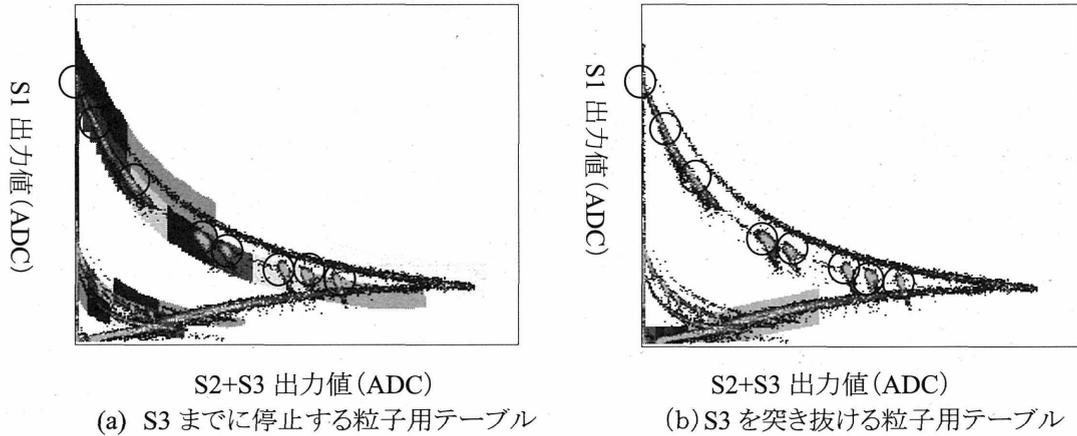


図3 粒子エネルギーへの変換テーブル

○が放医研での校正点、異なる色で塗りつぶされた領域が各粒子のエネルギーCHを示す。

II. ISS 搭載候補 JEM-EUSO ミッションで使用する部品パーツの放射線耐性試験

滝澤慶之^a、川崎賀也^a、榊直人^a、北村尚^b、内堀幸夫^b

^a理化学研究所、^b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 の厚さのシールドディングの条件で 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、十分な体制があることを確認している。

- ・ 光電子増倍管用高圧電源モジュール
 - DC-HVDC コンバータ (EMCO Q10N-5, CA12N-5)
 - DAC (AD5320)
 - OP-Amp
 - FET
- ・ 光電子増倍管硝材
 - 浜松ホトニクス MAPMT UV ガラス
- ・ 光電子増倍管用印可電圧反転用フォトMOSリレー
 - 松下電工 AQV258

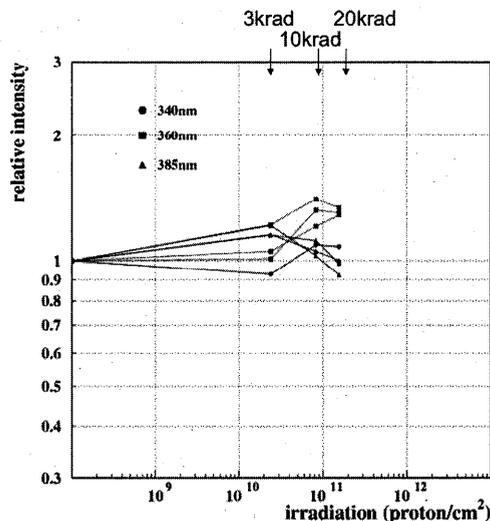
今回、照射したサンプルは、次である。

- 1) 紫外線LED (JEM-EUSO 軌道上較正用光源)
 - ・ 340nm Seoul Optodevice 社 T9B34C GaN 系
 - ・ 360nm Roithner 社 RLT360-1.0-15 InGaN
 - ・ 385nm Roithner 社 RLS-UV385 GaN 系
- 2) 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
- 3) 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

次に各項目の実験結果を示す。

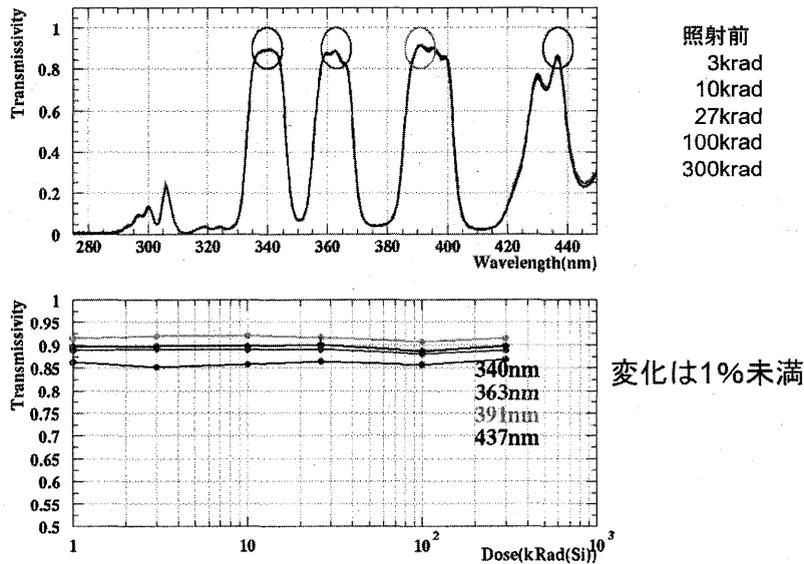
1) 紫外線LED (JEM-EUSO 軌道上較正用光源)

照射に量に対しての各 LED の相対強度の以下グラフに示す。グラフ中の強度変化は測定精度以下の変動であり、20krad まで、十分に耐性があることを確認した。



2) 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)

本フィルタは、Ta₂O₅/SiO₂ の 25 ペア層で構成される多層膜である。照射に量に対しての透過率の変化を以下のグラフに示す。上図は、波長に対する透過率の変化を重ねて表示したものである。下図は、各ピーク波長での照射量に対する透過率の変化である。300 k rad まで、変化は1%未満で十分に耐性が有ることを確認した。

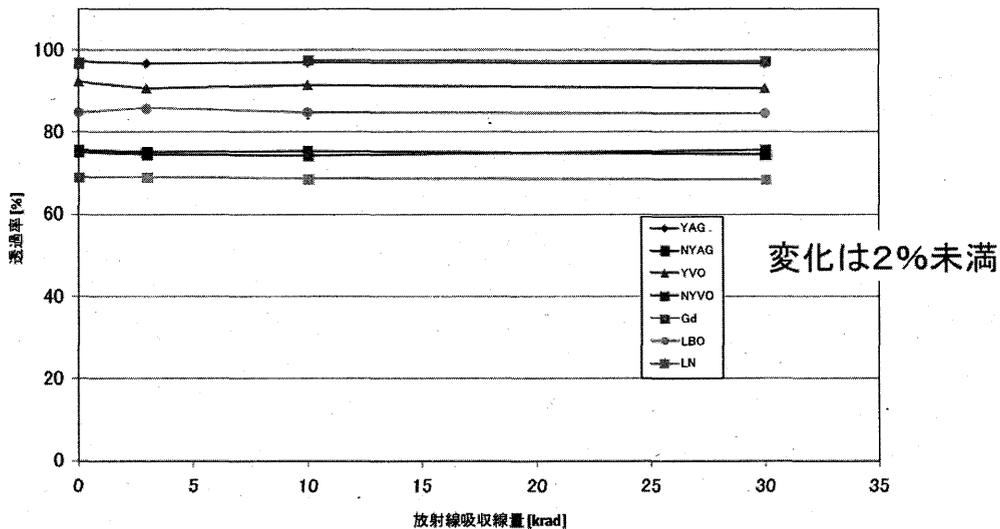


3) 結晶 (大気及び雲モニタ用レーザー部品)

試験したレーザー結晶は、次の7種類である。

- ・ ND:YAG (AR コート有、無)
- ・ ND:YVO4 (AR コート有、無)
- ・ ND:GdVO4 (AR コート有)
- ・ LBO (AR コート無) : 波長変換用非線形結晶
- ・ LN (LiNbO₃) (AR コート無) : Q スイッチ用結晶

照射後、1064nm での透過率の変化を測定した。照射に対する各結晶の透過率の変化を以下に示す。レーザー用結晶は、30 k rad まで、変化は2%未満で十分に耐性が有ることを確認した。



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 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。紫外線 LED、多層膜フィルタ、レーザー用結晶は、それぞれ 20 k rad、300 k rad、30 k rad まで耐性が有り、JEM-EUSO 用として使用できることを確認した。

謝辞

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

4-4. 宇宙線中性子測定装置の応答関数評価

宇宙線中性子測定装置の応答関数評価

保田 浩志^a 矢島 千秋^a 高田 真志^b

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

概要

高高度環境で高エネルギー (>10MeV) 中性子のスペクトル・線量を荷電粒子等と弁別して測定することのできるプロトタイプ測定装置について、放医研のサイクロトロンで供給される 80MeV 陽子に対する応答を実験で確認、中性子やガンマ線との弁別能を検証した。

1. 目的

我々のチームでは、航空機乗務員や宇宙飛行士の宇宙線被ばくをリアルタイムに監視するための宇宙線専用の粒子弁別測定装置の開発研究に独自に取り組んでいる。具体的には、中性子と荷電粒子とを弁別して測定し、高エネルギー領域 (>数 MeV) の中性子のエネルギー・スペクトル・線量を精度よく評価できる、航空機や宇宙船内のリソースの限られた空間で利用可能な可搬型中性子スペクトロメトリシステムの開発を進め、昨年 (2008 年) にはそのプロトタイプを完成させた。

本実験は、そのプロトタイプについて、高エネルギー (~80MeV) 陽子に対する応答を実験で評価・検証し、高高度環境での被ばくにおいて主要な成分である中性子、陽子及び光子に対する弁別測定能を明らかにすることを狙いとして実施した。

2. 実験方法

放医研の AVF サイクロトロン (以下「サイクロトロン」という。) で供給される 80MeV の陽子線ビームを用いて、複合シンチレータから成るフォスウィッチ型検出部をベースに構成した測定システム (以下「本システム」という。) の照射を行った (図 1 参照)。

照射野は、ビーム出口から 60cm の位置にある円筒型検出部の上面 ($\phi 12\text{cm}$) が一様に照射されるように拡げ、ビーム強度は検出器がカウントするイベント数で $\sim 500\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ となるように調整をお願いした。イベント数のカウントは、独自に開発した専用データロガーを用いて行った。

調整後のビームを用いて、付加電圧を -1200V で固定した状態で、装置の向き (ビームの入射角度) を変えながら一定時間 (5~10 分程度) 照射を繰り返し、各イベントについて 20~400ns の範囲で 2ns 間隔にて信号波形のデジタルデータを取得した。取得したデータから ROI を任意に変えて積分発光量を求め、その結果に基づき粒子弁別の技法について解析した。なお、本実験では、中性子線量の検証のため、市販の中性子モニタ (レムカウンタ及び反跳陽子シンチレーションカウンタ) による測定も同時に実施した。

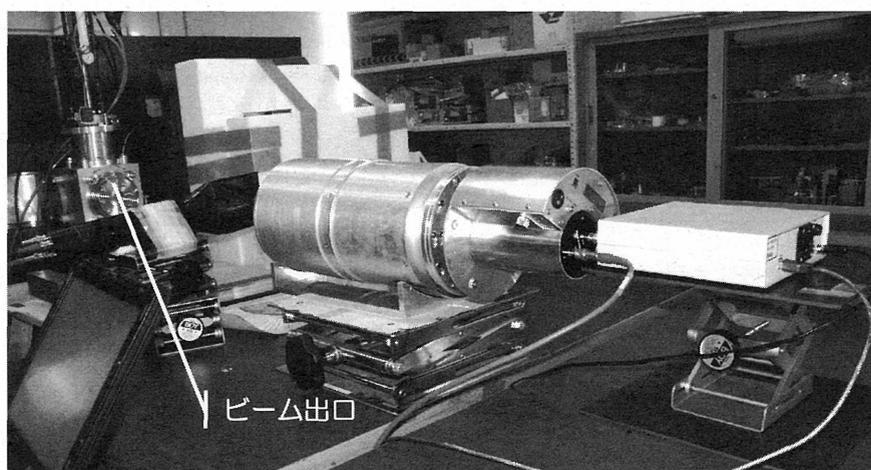


図 1. 放医研サイクロトロンでの測定システム CREPAS の照射風景。

3. 実験結果

図2に、メインピーク(-20~150ns)の積分発光量とそれ以降の遅い成分(100~400ns)の積分発光量の関係を示す。図の横軸はメインピークの発光量で、縦軸が遅い成分のメインピークに対する比である。エネルギーが80MeVで揃っている陽子の場合、プロットはごく狭い範囲に集中して現われることが分かる。

弁別能について検証するため、Co-60 ガンマ線、日本原子力研究開発機構で供給される5MeV及び45MeVの準単色中性子、ならびに東北大学サイクロtron・ラジオアイソトープセンターで供給される65MeVの準単色中性子について得られた結果も図2に併せて示す。これらの結果より、本システムを用いることにより、比較的エネルギーの高い陽子は中性子やガンマ線と綺麗に弁別して検出できることが分かる。

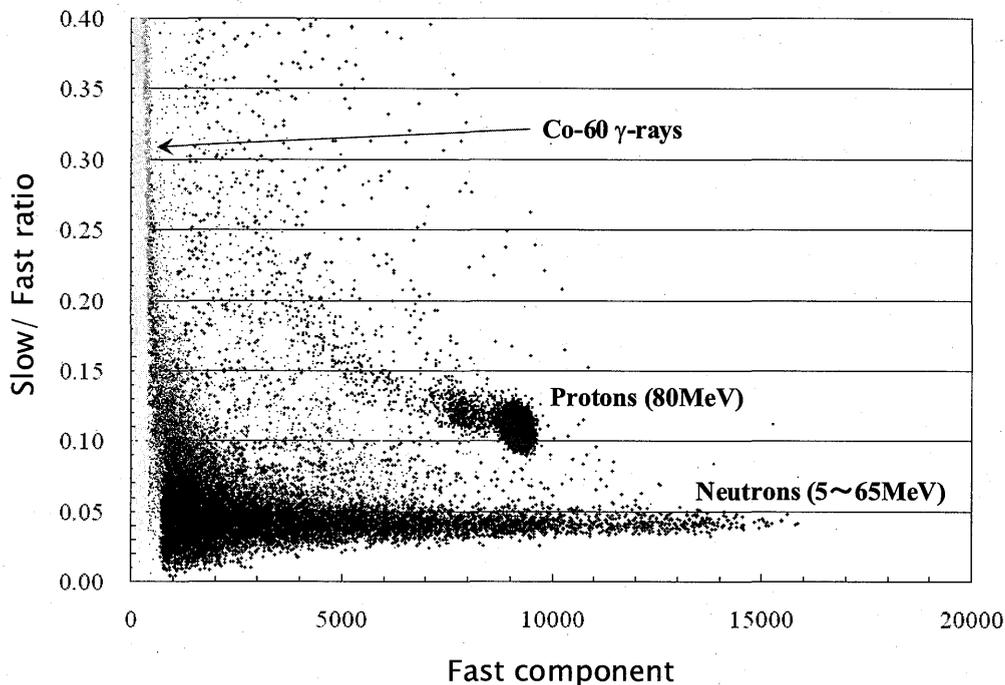


図2. メインピーク(-20~150ns)の積分発光量とそれ以降の遅い成分(100~400ns)の積分発光量を用いて作成した2次元プロット。横軸はメインピークの発光量で、縦軸が遅い成分のメインピークに対する比。比較的エネルギーの高い中性子では、陽子やガンマ線と明確に弁別できることが分かる。

4. まとめ

当初の計画どおり応答データを取得することができた。取得したデータについては、他の諸施設での実験結果も含めて現在も解析を進めているところであるが、これまでに得られた知見から、当チームで開発した測定システムは宇宙線粒子の弁別測定に有効であることが確認できた。

平成21年度以降は、異なるエネルギーレベルの陽子及びLiターゲットを利用して発生させた準単色中性子を用いた応答試験を同様の方法で実施し、より精密な弁別技法やエネルギースペクトルの導出方法について検討を進めたいと考えている。

さいごに、実験計画の策定を助けてくださった放医研の本間壽廣・前室長ならびに実験を懇切にサポートして頂いた金澤光隆室長はじめサイクロtron運転室の皆様は厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 保田浩志、矢島千秋、中村尚司、高田真志、佐藤達彦: 宇宙船内における中性子被ばく線量評価に関する開発研究. *Space Utilization Research* 23: 291-294, 2007.
- [2] 保田浩志、矢島千秋、高田真志、中村尚司、佐藤達彦、藤島徹: 宇宙で用いるサーベイメータ型放射線モニタの開発、宇宙利用シンポジウム. *Space Utilization Research* 25, 2009, in press.

5. 高温超電導線材の耐放射線損傷試験

高温超電導線材の耐放射線損傷試験

宮原信幸^a、石山敦士^b、植田浩史^b、鹿島直二^c、長屋重夫^c

^a 放射線医学総合研究所、^b 早稲田大学、^c 中部電力

概要

近年、実用的な高温超電導材料として YBCO の線材化が活発に行われている。当該線材は 20K 程度の温度で 12T 程度の高磁場を発生することが可能で、温度マージンが非常に大きく通常の使用の範囲ではクエンチの恐れはない。また、ハステロイと呼ばれる Ni 系金属基板上に製膜してテープ線材とする構造であるので、電磁力によるフープ力にも極めて強い。さらに、2 段程度の冷凍機を当該線材のコイルに付帯させることにより伝導冷却が可能であることから、システム全体を小型化可能である。

高温超電導線材およびコイル構成材料（含浸材、絶縁材等）について、伝熱特性、機械特性はこれまでに明らかになっているが[1]-[6]、ガンマ線、中性子、陽子線、炭素線等の放射線に対する耐放射線性は明らかになっていない。当該超電導物質の微小な結晶や薄膜では放射線によるピンニング導入による超電導特性の向上等の耐放射線特性が報告されているが[7]、線材については開発されて日が浅いこともあり耐放射線性は不明である。本研究では YBCO 線材が十分な耐放射線を有するか調査する。また、核融合にも当該線材の利用が検討されつつあるので D-T 反応で発生する 14MeV 中性子を照射した場合の放射化の減衰ならびに中性子照射による誘導放射能の分析を行う。

1. CVD-YBCO 線材

中性子照射実験は他の物質による汚染を防止するため、それぞれのサンプルをジッパー付きのポリエチレンバッグに収めたのちにサンプル保持台にメンディングテープで 2 本並べて照射野中心部に固定した。CVD-YBCO 線材のテープ面（超電導側）に垂直に中性子を照射した。

放射化分析にあたって短寿命核種を重点的に測定するために 14 MeV 中性子を線量にして 30 Gy を照射した。20 μ A の照射条件では 30 Gy の照射線量のコントロールは困難であるため取り出し電流を約 1 μ A とし 3 Gy/min の照射条件で 10 分間照射を行った。

CVD-YBCO 線材サンプルは 2 本提供されたそれぞれのサイズと重量を表 1 に示す。

表 1. CVD-YBCO 線材サンプルサイズならびに重量

サンプル	長さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)	重量 (g)
CVD-YBCO-1	174	10	0.130	1.7790
CVD-YBCO-2	182	10	0.129	1.8611

2. 表面線量測定

CVD-YBCO 線材の表面線量は NaI シンチレーションサーベイメータ (ALOKA Model:TCS-172) を用いて行った。このサーベイメータは ICRP74 に準拠しており、事前に ¹³⁷Cs 校正用線源を用いて校正した。照射前の表面線量測定では有意な線量は確認されなかった。

照射終了後約 15 分で入室できたのでその後、NaI シンチレーションサーベイメータにより表面線量の減衰測定を行った。照射 15 分後の表面線量は CVD-YBCO-1、CVD-YBCO-2 それぞれ 10.7 ならびに 10.3 μ SV/h であった。減衰曲線を図 1 に示す。

中性子を 30 Gy 照射された CVD-YBCO 線材は約 30 分で表面線量が半減しており、3.5 時間(220 分)程度で 1 オーダー低い表面線量となっている。環境レベルに減衰するためには約 1 週間の時間を要している。

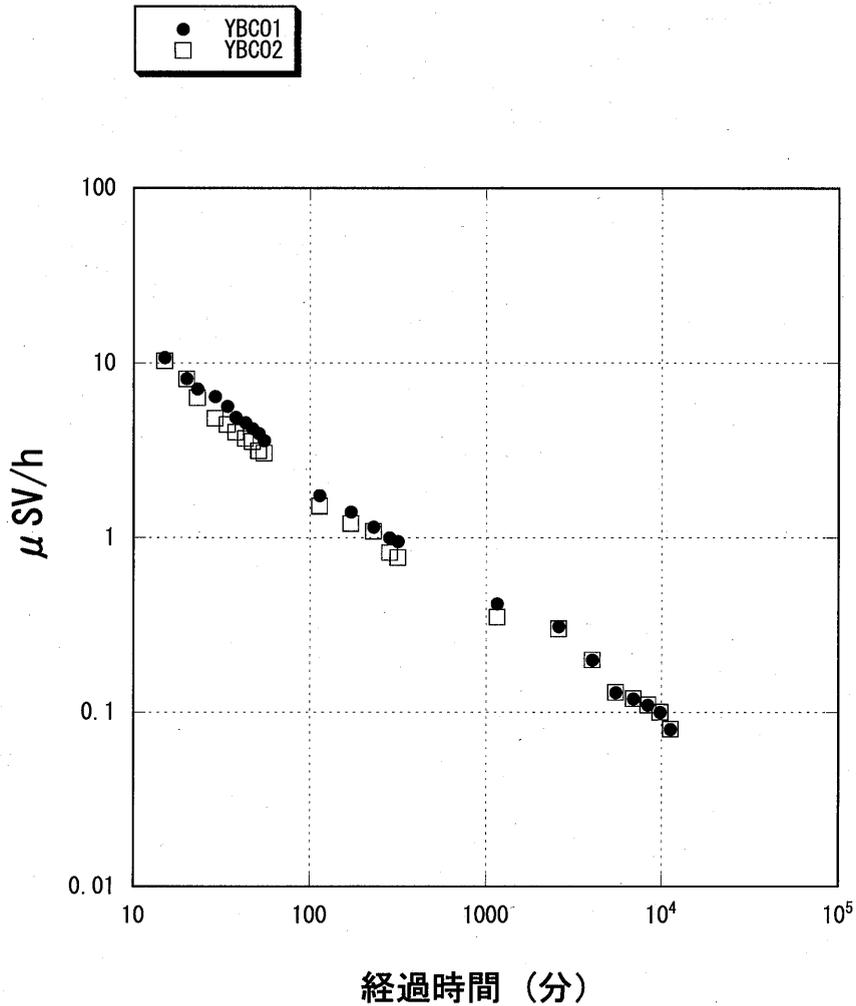


図 1. YBCO 線材表面線量減衰曲線 (30Gy)

3. Ge 検出器ガンマ線スペクトル分析結果

測定に用いた Ge 検出器は EG&G GMX-30200 であり、検出部の直径は 50 mm で相対検出効率は 29.3% である。ガンマ線スペクトル分析に先立ち校正用の既知の混合線源 (^{109}Cd , ^{57}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{54}Mn ならびに ^{88}Y) を用いてエネルギー校正ならびに検出効率校正を行った。

中性子を 30Gy 照射した汚染防止のためのビニール袋を新品に交換したのちに Ge 検出器にサンプルをセットし計数時間は 5×10^4 秒とした。分析に当たっては自己吸収やサンプル形状に依存する形状検出効率は混合線源と同一とみなした。

ガンマ線スペクトル測定の結果を表 2 ならびに 3 に示す。最も半減期の長いものとしては ^{60}Co の 5.27 年である。放射能として最も顕著であるものは ^{106}Ag の 31.2 Bq であった。

CVD-YBCO-1 と CVD-YBCO-2 の間に放射化の若干の相違があるがサンプル製造上のばらつきのためか照射線量の相違であるかは不明である。参考のために照射直後での放射能を逆算して表に併記した。

表 2. CVD-YBCO 線材に生成したガンマ線放出核種 (CVD-YBCO-1: 照射 6 日後)

生成核種	半減期	放射能 (Bq)	照射直後 (Bq)	由来元素
^{57}Ni	35.6 時間	14.1	232.2	Fe, Ni
^{187}W	23.72 時間	20.9	1406	W
^{99}Mo	65.94 時間	31.2	141.8	Mo
^{59}Fe	44.5 日	0.335	0.37	Fe, Co
^{88}Y	106.65 日	0.383	0.40	Y
^{105}Ag	41.29 日	3.41	3.77	Ag
^{106}Ag	8.46 日	31.2	51.1	Ag
^{110}Ag	249.79 日	5.94	6.04	Ag
^{54}Mn	312.2 日	1.38	1.40	Fe, Mn
^{56}Co	77.27 日	2.40	2.53	Co, Ni
^{57}Co	271.79 日	23.8854	24.3	Co, Ni
^{58}Co	70.92 日	116.8	123.9	Co, Ni
^{60}Co	5.27 年	0.673	0.674	Co, NiCu

表 3. CVD-YBCO 線材に生成したガンマ線放出核種 (CVD-YBCO-2: 照射 7 日後)

生成核種	半減期	放射能 (Bq)	照射直後 (Bq)	由来元素
^{57}Ni	35.6 時間	8.63	227.5	Fe, Ni
^{187}W	23.72 時間	11.6	1568	W
^{99}Mo	65.94 時間	21.8	127.7	Mo
^{59}Fe	44.5 日	0.392	0.437	Fe, Co
^{88}Y	106.65 日	0.666	0.698	Y
^{105}Ag	41.29 日	3.34	3.77	Ag
^{106}Ag	8.46 日	26.1	46.3	Ag
^{110}Ag	249.79 日	5.77	5.88	Ag
^{54}Mn	312.2 日	0.919	0.934	Fe, Mn
^{56}Co	77.27 日	2.51	2.67	Co, Ni
^{57}Co	271.79 日	20.8	21.1	Co, Ni
^{58}Co	70.92 日	116.8	125.1	Co, Ni
^{60}Co	5.27 年	0.60	0.60	Co, NiCu

4. CVD-YBCO 線材の I_c 測定

I_c 測定は図 2 に示すように線材に線材の両端に電流リード線を取り付け、線材上に 5 か所 3 cm おきに金箔タップとプローブリードを取り付けた。その後木の板に線材・電流リード・タップを木のキャブテンテープを用いて木製板に貼り付け発泡スチロール製の箱の中に収めたのちに液体窒素を静かに注ぎ、沸騰現象が見られない均一な温度に冷却されたことを確認したのちに電流リードへの通電を開始した。 I_c は両端並びに各タップ間の電圧をマイクロボルトメータで測定し各点での電圧が $1 \times 10^{-6} \text{ V/cm}$ に達した時点の電流値として求めた。

線材 2 本に対して 30 Gy の中性子照射前後の I_c 測定 (液体窒素中) を表 4 ならびに 5 に示す。I-V 特性を図 3 ならびに 4 に示す。 I_c の劣化または改善は確認されなかった。



図 2. Ic 測定状況 (中央の灰白色のテープが CVD-YBCO 線材。タップ取付用のカプトンテープが 3 cm おきに貼り付けられている。右側から超電導から常電導に遷移しており液体窒素が蒸発している。コンクリートブロックは浮き上がり防止)

表 4. CVD-YBCO -1 測定区間 : 5 区間 (1 区間 3 cm 程度、全体 12 cm)

区間	V12	V23	V34	V45	End-to-end
照射前 Ic (A)	194	194	210	211	197
照射後 Ic (A)	192	193	209	212	198

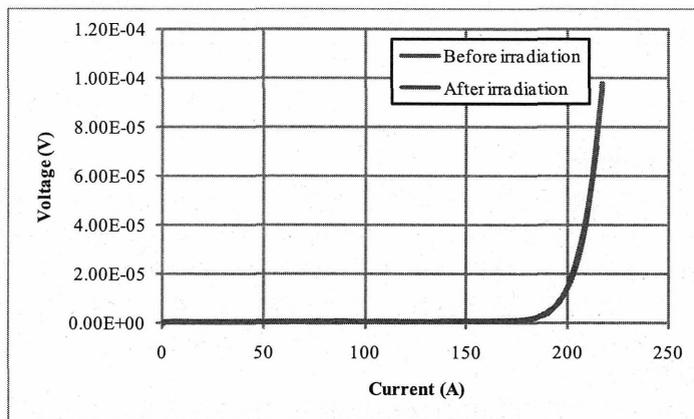


図 3. CVD-YBCO -1 の I-V 特性 (End to end)

表 5. CVD-YBCO -2 測定区間 : 5 区間 (1 区間 3 cm 程度、全体 12 cm)

区間	V12	V23	V34	V45	End-to-end
照射前 Ic (A)	214	198	206	189	196
照射後 Ic (A)	214	198	206	190	197

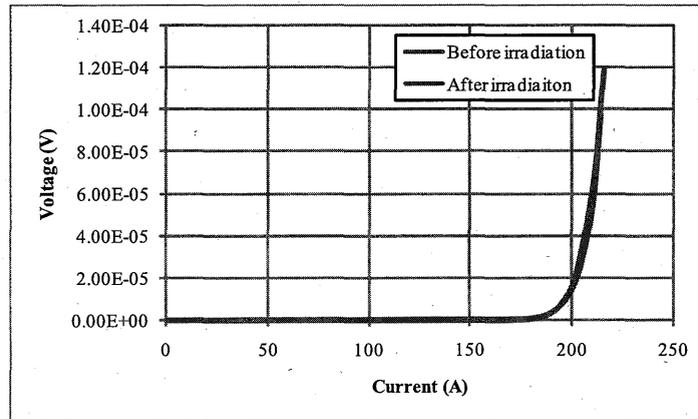


図 4. CVD-YBCO-2 の I-V 特性 (End to end)

参考文献

- [1] A. Ishiyama et al., "Normal Transition and Propagation Characteristics of YBCO Tapes", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 1659-1662, 2005.
- [2] Y. Sutoh, K. Kakimoto, N. Kaneko, Y. Iijima, T. Saitoh, "Mechanical bending property of YBCO coated conductor by IBAD/PLD", Physica C, vol. 426-431, pp.933-937, 2005.
- [3] N. Cheggour, J. W. Ekin, C. L. H. Thieme, Y.-Y. Xie, V. Selvamanickam, and R. Feenstra, "Reversible axial-strain effect in Y-Ba-Cu-O coated conductors," Supercond. Sci. Technol., vol. 18, pp. S319-S324, 2005.
- [4] N. Cheggour, J.W. Ekin, and C. L. H. Thieme, "Magnetic-field dependence of the reversible axial-strain effect in Y-Ba-Cu-O coated conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, pp. 3577-3560, 2005.
- [5] N. Cheggour, J. W. Ekin, C. L. H. Thieme, and Y.-Y. Xie, "Effect of Fatigue Under Transverse Compressive Stress on Slit Y-Ba-Cu-O Coated Conductors", IEEE Trans. on applied Superconductivity, vol. 17, no. 2, pp. 3063-3066, 2007.
- [6] T. Takao, T. Iwamura, Y. Fukasawa, S. Minowa, H. Sato, T. Asano, A. Ishiyama, J. Kato, T. Machi, K. Nakao, and Y. Shiohara, "Influence of Bending and Torsion Strains on Critical Currents in YBCO Coated Conductors", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 17, no. 2, pp. 3513-3516, 2007.
- [7] Topal U., et al., Physica C, Vol.388-389,401-402(2003)

6. 研究成果一覽

1. サイクロトロン¹の運転・維持及び改良・開発

<学会及び研究会口頭発表等>

杉浦彰則、本間壽廣、北條悟、金澤光隆、鈴木直方、河野耕二、坂本幸雄、金井達明、岡田高典、小松克好、神谷隆: 放医研サイクロトロン¹の現状報告, 第10回応用加速器・関連技術研究シンポジウム ARTA2008, p19-22.

北條悟、本間壽廣、金澤光隆、村松正幸、坂本幸雄、杉浦彰則、鈴木直方、金井達明: 11C ビーム加速のためのガス分離方法の検討, 第10回応用加速器・関連技術研究シンポジウム ARTA2008, p23-24.

2. サイクロトロン¹のRI製造への利用状況

<原著論文等>

Ming-Rong Zhang, Katsushi Kumata, Makoto Takei, Toshimitsu Fukumura, Kazutoshi Suzuki: How to Introduce Radioactive Chlorine into a Benzene Ring Using [³⁶Cl]Cl₂?, Applied Radiation and Isotopes, 66(10), 1341-1345, 2008

Toshimitsu Fukumura, Makoto Takei, Kazutoshi Suzuki: Synthesis and biodistribution of ³⁴mCl-labeled 2-chloro-2-deoxy-D-glucose: A major impurity in [¹⁸F]FDG injection, Applied Radiation and Isotopes, 66(12), 1905-1909, 2008

Ryuji Nakao, Maki Okada, Osamu Inoue, Toshimitsu Fukumura, Kazutoshi Suzuki: Combining high-performance liquid chromatography-positron detection and on-line microdialysis for animal metabolism study of positron emission tomography probes, Journal of Chromatography A, 1203(2), 193-197, 2008

Khaled Mohamed Saleh Ibrahim El Azony, Kazutoshi Suzuki, Toshimitsu Fukumura, Szelecsenyi Ferenc, Zoltan Kovacs: Proton induced reactions on natural tellurium up to 63 MeV: Data validation and investigation of possibility of ¹²⁴I production, Radiochimica Acta, 96(12), 763-769, 2008

Takuya Arai, Ming-Rong Zhang, Masanao Ogawa, Toshimitsu Fukumura, Koichi Kato, Kazutoshi Suzuki: Efficient and reproducible synthesis of [¹¹C]acetyl chloride using the loop method, Applied Radiation and Isotopes, 67(2), 296-300, 2009

Guiyang Hao, Toshimitsu Fukumura, Ryuji Nakao, Hisashi Suzuki, Szelecsenyi Ferenc, Zoltan Kovacs, Kazutoshi Suzuki: Cation exchange separation of ⁶¹Cu²⁺ from natCo targets and preparation of ⁶¹Cu-DOTA-HSA as a blood pool agent, Applied Radiation and Isotopes, 67(4), 511-515, 2009, doi:10.1016/j.apradiso.2008.12.004(2008-12-16)

Akiko Hatori, Takuya Arai, Kazuhiko Yanamoto, Tomoteru Yamazaki, Kazunori Kawamura, Jyouji Yui, Fujiko Konno, Ryuji Nakao, Toshimitsu Fukumura, Kazutoshi Suzuki, Iwao Kanno, Ming-Rong Zhang: Biodistribution and Metabolism of Anti-influenza Drug [¹¹C]Oseltamivir and Its Active Metabolite [¹¹C]Ro 64-0802 in Mice., Nuclear Medicine and Biology, 36(1), 47-55, 2009

Takuya Arai, Fujiko Konno, Masanao Ogawa, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura, Kazutoshi Suzuki: The first synthesis of [¹¹C]oseltamivir: a valuable tool for elucidating the relationship between Tamiflu and its adverse effects on the central nervous system., Journal of Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals

Kenichi Odaka, Tomoya Uehara, Yasushi Arano, Sayaka Adachi, Hiroyuki Tadokoro, Katsuya Yoshida, Hiroshi Hasegawa, Toshimichi Yoshida, Michiaki Hiroe, Toshiaki Irie, Shuji Tanada, Issei Komuro, et.al: Noninvasive Detection of Cardiac Repair After Acute Myocardial Infarction in Rats by ¹¹¹In Fab Fragment of Monoclonal Antibody Specific for Tenascin-C, International Heart Journal, 49(4), 481-492, 2008

- Shigeki Hirano, Hitoshi Shinoto, Akiyo Aotsuka, Fumihiko Yasuno, Noriko Tanaka, Tsuneyoshi Ota, Koichi Sato, Kiyoshi Fukushi, Shuji Tanada, Takamichi Hattori, Toshiaki Irie: PET Study of Brain Acetylcholinesterase in Cerebellar Degenerative Disorders, *Movement Disorders*, 23(8), 1154-1160, 2008
- Toshimitsu Okamura, Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Chie Toramatsu, Kiyoshi Fukushi, Makoto Takei, Toshiaki Irie: Noninvasive and quantitative assessment of the function of multidrug resistance-associated protein 1 in the living brain, *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 29(3), 504-511, 2009
- Masaki Okumura, Ryosuke Arakawa, Hiroshi Ito, Chie Seki, Hidehiko Takahashi, Harumasa Takano, Eisuke Haneda, Ryuji Nakao, Hidenori Suzuki, Kazutoshi Suzuki, Yoshiro Okubo, Tetsuya Suhara: Quantitative Analysis of NK1 Receptor in the Human Brain Using PET with 18F-FE-SPA-RQ, *Journal of Nuclear Medicine*, 49(11), 1749-1755, 2008
- Mitsuru Koizumi, Tsuneo Saga, Kyosan Yoshikawa, Kazutoshi Suzuki, Shigeru Yamada, Mitsuhiko Hasebe, Seiya Ohashi, Sherif Mahmoud Abd-Elrazek Helmy, Hiroyuki Ishikawa, Kenji Sagou, Ryusuke Hara, Hirotohi Katou, Shigeo Yasuda, Takeshi Yanagi, Hirohiko Tsujii, et.al: L-[11C]methyl-methionine positron emission tomography for evaluation of carbon ion radiotherapy in patients with pelvic recurrence of rectal cancer, *Molecular Imaging and Biology*, 10(6), 374-380, 2008
- Ryuji Nakao, Kenji Furutsuka, Masatoshi Yamaguchi, Kazutoshi Suzuki: Sensitive determination of specific radioactivity of positron emission tomography radiopharmaceuticals by radio high-performance liquid chromatography with fluorescence detection, *Nuclear Medicine and Biology*, 35(7), 733-740, 2008
- Tomoyuki Ohya, Keitaro Tanoi, Yousuke Hamada, Junko Hojo, Kazutoshi Suzuki, Tomoko Nakanishi, et.al: An Analysis of Long-Distance Water Transport in the Soybean Stem Using H215O, *Plant and Cell Physiology*, 49(5), 718-729, 2008
- Hin Ki, Jun Maeda, Makoto Sawada, Maiko Ono, Takashi Okauchi, Motoki Inaji, Ming-Rong Zhang, Kazutoshi Suzuki, Kiyoshi Andou, Matthias Staufenbiel, John Q. Trojanowski, Virginia M.-Y. Lee, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara: Imaging of Peripheral Benzodiazepine Receptor Expression as Biomarkers of Detrimental Versus Beneficial Glial Responses in Mouse Models of Alzheimer's and Other CNS Pathologies, *The Journal of Neuroscience*, 28(47), 12255-12267, 2008
- Kazuhiko Yanamoto, Katsushi Kumata, Tomoteru Yamazaki, Chika Odawara, Kazunori Kawamura, Jyouji Yui, Akiko Hatori, Kazutoshi Suzuki, Ming-Rong Zhang: [18F]FEAC and [18F]FEDAC: Two Novel Positron Emission Tomography Ligands for Peripheral-type Benzodiazepine Receptor in the Brain., *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 19(6), 1707-1710, 2009
- Tetsuya Suhara, Kazutoshi Suzuki, Makoto Higuchi, Christer Halldin, et.al: A comparative autoradiography study in post mortem whole hemisphere human brain slices taken from Alzheimer patients and age-matched controls using two radiolabelled DAA1106 analogues with high affinity to the peripheral benzodiazepine receptor system, *Neurochemistry international*, 54(1), 28-36, 2009
- Masaki Tokunaga, Nicholas Seneca, Ryong-Moon Shin, Jun Maeda, Shigeru Obayashi, Takashi Okauchi, Yuji Nagai, Ming-Rong Zhang, Ryuji Nakao, Hiroshi Ito, Rb Innis, Christer Halldin, Kazutoshi Suzuki, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara: Neuroimaging and Physiological Evidence for Involvement of Glutamatergic Transmission in Regulation of the Striatal Dopaminergic System, *The Journal of Neuroscience*, 29(6), 1887-1896, 2009
- Katsumi Tamura, Kyosan Yoshikawa, Hiroyuki Ishikawa, Mitsuhiko Hasebe, Hiroshi Tsuji, Takeshi Yanagi,

Kazutoshi Suzuki, Atsushi Kubo, Hirohiko Tsujii: Carbon-11-Methionine PET Imaging of Choroidal Melanoma and the Time Course after Carbon Ion Beam Radiotherapy, *Anticancer Research*

Ming-Rong Zhang, Katsushi Kumata, Akiko Hatori, Nobuhiko Takai, Jun Toyohara, Kazuhiko Yanamoto, Tomoteru Yamazaki, Jyouji Yui, Kazunori Kawamura, Sachiko Koike, Koichi Ando, Kazutoshi Suzuki: [11C]Gefitinib ([11C]Iressa): Radiosynthesis, In Vitro Uptake and In Vivo Imaging of Intact Murine Fibrosarcoma, *Molecular Imaging and Biology*

Atsushi Tsuji, Chizuru Sogawa, Aya Sugyou, Hitomi Sudou, Mitsuru Koizumi, Okio Hino, Yoshinobu Harada, Takako Furukawa, Kazutoshi Suzuki, Tsuneo Saga, et.al: Comparison of Conventional and Novel PET Tracers for Imaging Mesothelioma in Nude Mice with Subcutaneous and Intrapleural Xenografts, *Nuclear Medicine and Biology*

Kazuhiko Yanamoto, Tomoteru Yamazaki, Katsushi Kumata, Jyouji Yui, Chika Odawara, Kazunori Kawamura, Akiko Hatori, Osamu Inoue, Masatoshi Yamaguchi, Kazutoshi Suzuki, Ming-Rong Zhang: Evaluation of N-benzyl-N-[11C]methyl-2-(7-methyl-8-oxo-2-phenyl-7,8-dihydro-9H-purin-9-yl)acetamide ([11C]DAC) as a novel peripheral-type benzodiazepine receptor radioligand in rat model of brain injury., *Synapse*

Takeaki Saijo, Jun Maeda, Takashi Okauchi, Kazutoshi Suzuki, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara, et.al: Utility of small animal positron emission tomographic imaging of rats for preclinical development of drugs acting on serotonin transporter, *The International Journal of Neuropsychopharmacology*, [http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=4291624&fulltextType=RA&fileId=S1461145709000042\(2009-02-23\)](http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=4291624&fulltextType=RA&fileId=S1461145709000042(2009-02-23))

< Proceedings 等 >

Ming-Rong Zhang, Katsushi Kumata, Masanao Ogawa, Koichi Kato, Kazutoshi Suzuki: One-Pot Radiosynthesis of [13N]Carbamate and [13N]Urea Using No-carrier Added [13N]NH₃, 2008

Chie Seki, Masaki Tokunaga, Satoko Hattori, Miho Shidahara, Ryuji Nakao, Jun Maeda, Toshiaki Irie, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara, Iwao Kanno, Yuichi Kimura, et.al: Quantification of 11C-PIB kinetics in mouse brain using metabolite-corrected arterial input function, *NeuroImage*, 41(Suppl 2), T32, 2008

< 学会及び研究会口頭発表等 >

田巻 倫明、大野 達也、加藤 真吾、吉川 京燦、岩川 眞由美、今井 高志、古川 高子、佐賀 恒夫、福村 利光、鈴木 和年: マウス腫瘍モデルでの炭素イオン線および γ 線照射における腫瘍分子イメージングの解析、H19 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、千葉市、2008.04

中井 浩二、松井 裕史、下川 治、長野 由美子、湯浅 真、小島 周二、寅松 千枝、吉川 京燦、鈴木 和年: ポルフィリン誘導 DDS 型癌医療のための基礎研究、H19 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、千葉市、2008.04

石川 博之、吉川 京燦、長谷部 充彦、佐合 賢治、田村 克巳、神立 進、溝江 純悦、鈴木 和年、辻井 博彦: 頭頸部癌の術前メチオニン PET 診断と手術病理結果の比較研究、H19 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、千葉市、2008.04

長谷部 充彦、吉川 京燦、Sherif Mahmoud Abd-Elrazek Helmy、石川 博之、佐合 賢治、田村 克巳、神立 進、溝江 純悦、佐賀 恒夫、鈴木 和年、辻井 博彦: 頭頸部領域腺癌系腫瘍のメチオニン PET による重粒子線治療予後評価の研究、H19 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、千葉市、2008.04

Hidehiko Takahashi, Harumasa Takano, Kazutoshi Suzuki, Yoshiro Okubo, Tetsuya Suhara, Christer Halldin,

et.al: Quantitative analysis of norepinephrine transporter binding in human brain using PET with (S,S)FMeNER-D2, NeuroReceptor Mapping 2008, Pittsburgh, 2008.07

河村 和紀、山崎 友照、柳本 和彦、由井 譲二、羽鳥 晶子、昆野 富士子、入江 俊章、福村 利光、鈴木 和年、菅野 巖、張 明栄: [11C]イレッサのP糖たんぱく質及び乳癌耐性たんぱく質による影響の評価、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10

岡田 真希、中尾 隆士、入江 俊章、井上 修*、福村 利光、鈴木 和年: マイクロダイアリシス radio-LC による L-[beta-11C]DOPA のラット脳内 in vivo 動態計測、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10

吉川 京燦、長谷部 充彦、桃原 幸子、大橋 靖也、石川 博之、佐合 賢治、田村 克巳、谷本 克之、鈴木 和年、佐賀 恒夫、辻井 博彦: メチオニンPETによる子宮頸癌の重粒子線治療後評価の検討、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10

長谷部 充彦、吉川 京燦、大橋 靖也、桃原 幸子、石川 博之、佐合 賢治、田村 克巳、谷本 克之、鈴木 和年、佐賀 恒夫、辻井 博彦: 子宮頸癌の ^{62}Cu -ATSM による低酸素組織画像と ^{11}C -Methionine との比較検討、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10

柳本 和彦、熊田 勝志、寅松 千枝、山崎 友照、羽鳥 晶子、福村 利光、鈴木 和年、菅野 巖、張 明栄: 小動物用PETを用いた末梢性ベンゾジアゼピン受容体リガンド[11C]DAC の基礎検討、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10

大橋 靖也、吉川 京燦、長谷部 充彦、桃原 幸子、石川 博之、佐合 賢治、田村 克巳、谷本 克之、鈴木 和年、佐賀 恒夫、辻井 博彦: 頭頸部及び他部位原発癌におけるメチオニンPET-CTによる頭頸部リンパ節転移診断能の検討、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10

桃原 幸子、吉川 京燦、長谷部 充彦、大橋 靖也、石川 博之、佐合 賢治、田村 克巳、谷本 克之、鈴木 和年、佐賀 恒夫、辻井 博彦: 肺癌重粒子線治療におけるメチオニン PET-CT による再発・転移・予後評価の検討、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10

柳本 和彦、熊田 勝志、小田原 知佳、山崎 友照、羽鳥 晶子、河村 和紀、武井 誠、念垣 信樹、鈴木 和年、張 明栄: 末梢性ベンゾジアゼピン受容体リガンドAC-5216 を母核とした、 ^{18}F 標識誘導体の合成と評価、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10

島田 斉、伊藤 彰一*、篠遠 仁、須原 哲也、服部 孝道*、入江 俊章: T1 強調画像水平断を用いた海馬萎縮の評価に関する考察、第49回日本神経学会総会、横浜市、2008.05

三好 美智恵、篠遠 仁、島田 斉、佐藤 康一、田中 典子、黄田 常嘉、福士 清、伊藤 浩、入江 俊章、須原 哲也: [11C]PIB PET による脳内アミロイド沈着の経時的変化の検討、第49回日本神経学会総会、横浜市、2008.05

Michie Miyoshi, Hitoshi Shinoto, Koichi Sato, Noriko Tanaka, Kiyoshi Fukushi, Hiroshi Ito, Tetsuya Suhara, Toshiaki Irie, et.al: Changes in beta-amyloid deposition in Alzheimers disease and mild cognitive impairment measured by PET with [11C]-PIB: Two years follow up study, International Conference on Alzheimer's Disease 2008, Chicago, 2008.07

Hitoshi Shimada, Hitoshi Shinoto, Shigeki Hirano, Michie Miyoshi, Koichi Sato, Noriko Tanaka*, Miho Ota, Kiyoshi Fukushi, Tetsuya Suhara, Takamichi Hattori*, Toshiaki Irie: The deadline for this submission has passed.No further editing is possible., International Conference on Alzheimer's Disease 2008, Chicago, 2008.07

小高 謙一、上原 知也*、荒野 泰*、長谷川 洋*、田所 裕之*、吉田 勝哉*、廣江 道昭*、棚田 修二、小室 一成*、入江 俊章: In-111 標識抗テネイシン C 抗体による急性心筋梗塞後組織修復の非侵襲的評価

- 法の開発、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10
- 三好 美智恵、篠遠 仁、島田 斉、佐藤 康一、田中 典子、黄田 常嘉、福士 清、伊藤 浩、入江 俊章、須原 哲也、その他: [11C]PIB PET を用いた脳内アミロイド沈着の経時的変化の定量的検討、第48回日本核医学会学術総会、千葉県千葉市、2008.10
- 島田 斉、篠遠 仁、伊藤 浩、三好 美智恵、田中 典子、黄田 常嘉、佐藤 康一、福士 清、入江 俊章、須原 哲也: アルツハイマー病と軽度認知障害における大脳皮質アミロイド沈着と傍海馬領域の萎縮の関係、第48回日本核医学会学術総会、千葉県千葉市、2008.10
- 篠遠 仁、島田 斉、三好 美智恵、田中 典子、黄田 常嘉、佐藤 康一、福士 清、伊藤 浩、入江 俊章、須原 哲也: 一般高齢者における脳内アミロイド沈着 —小金原地域調査研究一、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10
- 篠遠 仁、島田 斉、三好 美智恵、田中 典子、黄田 常嘉、佐藤 康一、福士 清、伊藤 浩、入江 俊章、須原 哲也: 早期発症と晩期発症アルツハイマー病における脳内アミロイド沈着 —[11C]PIB PET による測定一、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10
- 入江 俊章: 優れたPET薬剤(脳イメージング剤)を創出するために、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10
- 三好 美智恵、篠遠 仁、島田 斉、佐藤 康一、田中 典子、黄田 常嘉、福士 清、伊藤 浩、入江 俊章、須原 哲也: [11C]PIB PET による脳内アミロイド沈着と認知機能の経時変化、第20回日本脳循環代謝学会総会、東京、2008.11
- 島田 斉、伊藤 彰一、篠遠 仁、入江 俊章、須原 哲也: T1 強調画像水平断を用いた海馬萎縮の評価に関する考察 -第二報-、第38回日本神経放射線学会、茨城県、2009.02
- 張 明栄: 「薬物の動態予測のための薬物トランスポータープローブの開発とリソース化」([13N]アンモニアを利用した標識合成法の開発と[13N]ダントレン合成への応用)、合同研究討論会、東京 市ヶ谷、2008.08
- 張 明栄: [11C]オセルタミビル及びその活性代謝体[11C]Ro 64-0802 の合成、体内動態と代謝、第3回分子イメージング研究センターシンポジウム 脳科学における分子イメージングの将来像、千葉市、2009.01
- 福村 利光: 「新規開発プローブを含めたプローブライブラリー/リソースの強化充実」(分子プローブデータベースの構築について)、合同研究討論会、東京 市ヶ谷、2008.08
- 福村 利光: 初心者のためのわかる合成装置入門、PET化学ワークショップ 2009、神戸市、2009.02
- 山崎 友照、羽鳥 晶子、小池 幸子、柳本 和彦、河村 和紀、熊田 勝志、福村 利光、菅野 巖、安藤 興一、張 明栄: 炭素線癌治療における腫瘍イメージング剤を用いた評価、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10
- 河村 和紀、昆野 富士子、山崎 友照、由井 譲二、羽鳥 晶子、入江 俊章、福村 利光、菅野 巖、張 明栄: P-gp 及び BCRP 両阻害剤 GF120918 の C-11 標識合成及び PET 用分子プローブとしての評価、日本薬学会 第129年会、京都市、2009.03
- Koichi Kato, Ming-Rong Zhang, Kazutoshi Suzuki: RAPID AND CONTROLLED NITROALDOL REACTION FOR NITRO[11C]METHANE AND PARAFORMALDEHYDE, XI Turku PET 2008, Turku, 2008.05
- 曾川 千鶴、辻 厚至、須堯 綾、須藤 仁美、豊原 潤、小泉 満、樋野 興夫*、原田 良信、古川 高子、鈴木 和年、佐賀 恒夫: 悪性中皮腫モデルマウスにおける3種の PET トレーサーの検討、第3回日本分子イメージング学会総会・学術集会、さいたま市、2008.05
- Kyosan Yoshikawa, Mitsuhiko Hasebe, Seiya Ohashi, Sherif Mahmoud Abd-Elrazek Helmy, Hiroyuki Ishikawa,

- Katsumi Tamura, Katsuyuki Tanimoto, Susumu Kandatsu, Tsuneo Saga, Kazutoshi Suzuki: Use of FDG-PET/CT to predict prognosis of patients with pancreas cancer treated by carbon ion radiotherapy, Society of nuclear medicine 55rd Annual Meetng, ニューオリンズ, 2008.06
- Masaki Okumura, Ryosuke Arakawa, Hiroshi Ito, Chie Seki, Hidehiko Takahashi, Harumasa Takano, Eisuke Haneda, Ryuji Nakao, Hidenori Suzuki*, Kazutoshi Suzuki, Yoshiro Okubo, Tetsuya Suhara: Quantitative analysis of NK1 receptor binding in human brain using PET with [18F]FE-SPA-RQ, NeuroReceptor Mapping 2008, ピッツバーグ, 2008.07
- Ryosuke Arakawa, Masaki Okumura, Hiroshi Ito, Chie Seki, Hidehiko Takahashi, Ryuji Nakao, Kazutoshi Suzuki, Yoshiro Okubo, Tetsuya Suhara, Christer Halldin: Quantitative analysis of norepinephrine transporter binding in human brain using PET with (S,S)-[18F]FMENER-D2, NeuroReceptor Mapping 2008, ピッツバーグ, 2008.07
- Ming-Rong Zhang, Katsushi Kumata, Masanao Ogawa, Koichi Kato, Kazutoshi Suzuki: One-Pot Radiosynthesis of [13N]Carbamate and [13N]Urea Using No-carrier Added [13N]NH₃, Seventh International Conference on Nuclear and Radiochemistry, ブダペスト, 2008.08
- Atsushi Tsuji, Chizuru Sogawa, Hitomi Sudou, Aya Sugyou, Mitsuru Koizumi, Yoshinobu Harada, Kazutoshi Suzuki, Tsuneo Saga, et.al: Comparison of Three PET Tracers for Noninvasive Imaging of Malignant Mesothelioma in Orthotopic and Subcutaneous Implantation Mouse Models, World Molecular Imaging Congress, Nice, 2008.09
- Takeaki Saijo, Jun Maeda, Takashi Okauchi, Masayuki Suzuki, Kazutoshi Suzuki, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara, et.al: APPLICATION OF SMALL ANIMAL POSITRON EMISSION TOMOGRAPHIC IMAGING TO PRECLINICAL ASSESSMENT OF DRUGS ACTING ON SEROTONIN TRANSPORTER, 第23回日本薬物動態学会, 熊本市, 2008.09
- 中尾 隆士、岡田 真希、井上 修、福村 利光、鈴木 和年: Microdialysis-radio-LC による PET プローブのラット脳内 in vivo 動態計測法の開発、日本分析化学会第 57 年会、福岡市、2008.09
- Tsuneo Saga, Mitsuru Koizumi, Kyosan Yoshikawa, Mitsuhiro Hasebe, Seiya Ohashi, Katsuyuki Tanimoto, Masayuki Baba, Kazutoshi Suzuki, Hirohiko Tsujii, et.al: FLT-PET for the Evaluation of Lung Cancer Patients Treated with Carbon-Ion Radiation Therapy: Initial Results, Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine 2008, ミュンヘン, 2008.10
- 熊田 勝志、武井 誠、小川 政直、福村 利光、鈴木 和年、菅野 巖、張 明榮: [13N]ダントレインの標識合成、第 48 回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10
- 中尾 隆士、伊藤 岳人、福村 利光、鈴木 和年: 新規 LC 分離法の PET プブ製造、代謝物分析への導入、第 48 回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10
- 高田 由貴、福村 利光、鈴木 和年: ホスホジエステラーゼ-タイプ4 (PDE4) 阻害剤ロリプラムの 11C 標識合成条件の検討、第48回日本核医学会学術総会、千葉市、2008.10
- Hin Ki, Jun Maeda, Makoto Sawada, Maiko Ono, Takashi Okauchi, Motoki Inaji, Ryong-Moon Shin, Kazutoshi Suzuki, Kiyoshi Andou, John Q. Trojanowski, Virginia M.-Y. Lee, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara: PBR in astrocytes and microglia: relationship to negative and positive impacts of glial response to CNS pathologies, 38th Annual Meeting of Society for Neuroscience, ワシントン DC, 2008.11
- Atsushi Wakai, Kazuki Tsuchida, Toshimitsu Fukumura, Kazutoshi Suzuki: Development of ion mass separator for PET molecular probes with near theoretical specific activities, 分子イメージング研究シンポジウム, 神戸市, 2008.12

Koutarou Nagatsu, Hisashi Suzuki, Toshimitsu Fukumura, Kazutoshi Suzuki: Production of Iodine-124 by Vertical Irradiation System; Its design and Optimization, 分子イメージング研究シンポジウム 2008, 神戸市, 2008.12

熊田 勝志、武井 誠、小川 政直、由井 譲二、羽鳥 晶子、鈴木 和年、張 明栄: [13N]サリドマイドの標識合成、日本薬学会 第 129 年会、京都市、2009.03

岡田 真希、中尾 隆士、細井 理恵*、入江 俊章、福村 利光、鈴木 和年、井上 修*: グリア細胞代謝阻害時における 11C-Benzyl Acetate および 13N-NH₃ ラット線条体マイクロダイアリシス in vivo 動態計測、日本薬学会第 129 年会、京都市、2009.03

篠遠 仁、島田 斉、三好 美智恵、福士 清、田中 典子、黄田 常嘉、佐藤 康一、入江 俊章、伊藤 浩、須原 哲也: 早期発症および晩期発症のアルツハイマー病における脳内アミロイドの沈着、第 49 回日本神経学会総会、横浜市、2007.05

Hitoshi Shimada, Hitoshi Shinoto, Shigeki Hirano, Michie Miyoshi, Koichi Sato, Noriko Tanaka, Tsuneyoshi Ota, Kiyoshi Fukushi, Takamichi Hattori*, Toshiaki Irie, Tetsuya Suhara: Cortical Amyloid Deposition And Parahippocampal Atrophy In Alzheimer's Disease And Mild Cognitive Impairment, ICAD2008, Chicago, 2008.07

Kenichi Odaka, Ichio Aoki, Junji Moriya, Kaoru Tateno, Hiroyuki Tadokoro, Tohru Minamino*, Toshiaki Irie, Issei Komuro*, Iwao Kanno: In-Vivo Application of Manganese-Labeled Immunocytes, 2008 World Molecular Imaging Congress, ニース, 2008.09

Toshimitsu Okamura, Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Chie Toramatsu, Kiyoshi Fukushi, Toshiaki Irie: A PET Probe for Quantitatively Assessing the Efflux Transport Function of Multidrug Resistance-Associated Protein 1 in the Brain, World Molecular Imaging Congress (WMIC), ニース, 2008.09

小高 謙一、青木 伊知男、森谷 純治、館野 馨、田所 裕之、Kershaw Jeffrey、南野 徹*、入江 俊章、小室 一成*、菅野 巖: 虚血性疾患再生治療におけるマンガン標識細胞移植と動態追跡、第 8 回日本再生医療学会総会、東京都千代田区、2009.03

菊池 達矢、岡村 敏充、福士 清、入江 俊章: Ellman 法のための新規アセチルコリンエステラーゼ特異基質、日本薬学会第 129 年会、京都市、2009.03

Ming-Rong Zhang: [11C]AC-5216: RADIOSYNTHESIS AND EVALUATION AS A NOVEL PET LIGAND FOR THE PERIPHERAL-TYPE BENZODIAZEPINE RECEPTOR IN BRAIN, 分子イメージング研究シンポジウム 2008, 神戸市, 2008.12

張 明栄、河村 和紀、由井 譲二、中熊 映乃、羽鳥 晶子、柳本 和彦、山崎 友照、菅野 巖: α 2C アドレナリン受容体選択的 PET プロブの開発、日本薬学会 第 129 年会、京都市、2009.03

<その他>

<プレス発表・報道>

張明栄、鈴木和年: タミフルの動き画像化 PET 向け 標識薬剤合成に成功、2007

<特許登録>

張 明栄、鈴木 和年: 核医学診断用医薬、2008

鈴木 和年、張 明栄: 蛍光標識フェニルオキシアニリン誘導体及び蛍光標識プローブ、2008

菊池 達矢、入江 俊章、福士 清、岡村 敏充: コリンエステラーゼ活性測定用試薬、2009

<特許出願>

鈴木 和年、鈴木 寿、吉田 勇一郎*: シリンダ装置、2008

鈴木 和年、吉田 勇一郎*: 医療用チューブ接続具、2008

鈴木 和年: [11C]CH₃Xの製造方法、2009

鈴木 和年: [11C]ハロゲン化メチルの合成方法、2009

鈴木 和年、福村 利光、鈴木 寿: 自動合成装置、2009

<講義・講演>

張 明栄: 神経伝達機能イメージング剤(II)、学部学生(3年生)の画像診断薬物学の授業、仙台市、2008.11

張 明栄: PETプローブ開発に実用標識合成中間体と合成法の開発、分子イメージング研究シンポジウム
2008—飛躍を迎えた創薬・疾患診断研究—、神戸市、2008.12

張 明栄: 放射性医薬品、放射線診断・治療コース(基礎:講義見学編)、千葉市稲毛区、2008.12

張 明栄: 分子イメージングプローブ・マイクロドージング、セメスター3年 画像診断薬物学の授業、仙台市、
2009.02

入江 俊章: 神経伝達機能イメージング剤(I)、学部学生(3年生)の画像診断薬物学の授業、仙台市、
2008.11

Kazutoshi Suzuki: 1. Integrated quality system 2. Automation including multipurpose radiochemistry unit 3.
Radiodetector including set-up of method for comparing sensitivity, Karolinska Hospital Institute for
Nuclearchemie, スウェーデン, 2008.06

鈴木 和年: 高品位標識薬剤製造の実際、PET 科学アカデミーサマープログラムセミナー、神戸市、2008.07

鈴木 和年: PET用分子プローブの製造とその利用、平成20年度主任者部会年次大会 セッション3「RI・放
射線の利用と発展未来」、愛知県 名古屋市、2008.11

Kazutoshi Suzuki: Advanced Production of PET-Probes for Clinical use, FNCA医療用PET・サイクロトロンワ
ークショップ, クアラルンプール, 2009.01

鈴木 和年: 高品位 PET プローブの安全な製造法 —超高比放射能、総合的製造システム、他—、東北大
学分子イメージング連携合同セミナー、仙台市、2009.01

<招待発表>

Toshimitsu Fukumura: PET Radiopharmaceuticals Production for Molecular Imaging, The 5th Korea-Japan
Joint Meeting on Medical Physics, Jeju, 2008.09

Kazutoshi Suzuki: Production of High Specific Radioactivity C-11 Tracers, 12th International Targetry
Workshop, シアトル, 2008.07

<総説>

黄田 常嘉、新井 平伊*、入江 俊章: PETを用いた脳内アセチルコリンエステラーゼ活性測定によるアルツ
ハイマー病の診断、臨床検査、52(3)、337-341、2008

Yasuhisa Fujibayashi, Kazutoshi Suzuki, Toshimitsu Fukumura: Non-standard radionuclide production for PET
in Japan, The Quarterly Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 52(2), 140-144, 2008

3-1. 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>

C. Dal Cappello, C. Champion, O. Boudrioua, H. Lekadir, Y. Sato, D. Ohsawa, Theoretical and experimental
investigations of electron emission in C⁶⁺ + H₂O collisions, Nuclear Instruments and Methods in Physics
Research B 267, 781-790 (2009)

<学会及び研究会口頭発表等>

橋本浩利、大澤大輔^A、村上健^B、本間壽廣^B、曾我文宣^B、東理大工、京大 RI セ^A、放医研^B、炭素イオン線と水分子の衝突による放出二次電子の二重微分断面積測定物理学第 63 回年次大会、近大、2008 春

岡田豊史、大澤大輔^A、俵博之^B、曾我文宣^B、村上健^B、本間壽廣^B、野田耕司^B、千葉大院理、京大 RI セ^A、放医研物理工^B、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物理学第 64 回年次大会、立教大、2009 春

4-1. 宇宙環境中における中性子検出器の開発

<原著論文等>

森宗佑樹、¹H(¹³C,n)¹³N 反応測定による PHITS モンテカルロコードの検証、平成 20 年度広島大学工学部卒業論文。

H. Ohguchi, K. Oda, T. Yamauchi, T. Nakamura, D. Maki, 2008, New Pre-Soaking Technique for CR-39 and Application to Wide-Range Personal Neutron Dosimeter, *Radiat. Meas.* 43, Supplement1, S500-S503

T.Sanami, M.Hagiwara, T.Oishi, M.Baba, M.Takada, A bragg curve counter with an active cathode to improve the energy threshold in fragment measurements, *Nucl. Instrm. Meth. A* Vol 589/2 pp 193-201 (2008)

M. Hagiwara, T. Sanami, T. Oishi, M. Baba, M. Takada, Extension of energy acceptance of Bragg curve counter at the high-energy end *Nucl. Instrm. Meth. A* Vol 592 pp 73-79 (2008)

M. Takada, T. Nunomiya, T. Ishikura and T. Nakamura, Charge-Collection Length Induced by Proton and Alpha Particle Injected in to Silicon Detectors due to Funneling Effect, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 56(1) 337-345 2009

H. Tanaka, Y. Sakurai, M. Suzuki, S. Masunaga, Y. Kinashi, G. Kashino, Y. Liu, T. Mitsumoto, S. Yajima, H. Tsutsui, M.Takada, A. Maruhashi, and K. Ono, Improvement of dose distribution in phantom by using epithermal neutron source based on the Be(p,n) reaction using a 30 MeV proton cyclotron accelerator, *Applied radiation Isotope* in press

<Proceedings 等>

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 2005 Symposium on Nuclear Data*, in print

H. Tanaka, Y. Sakurai, M. Suzuki, T. Takata, S. Masunaga, G. Kashino, Y. Liu, Y. Kinashi, T. Mitsumoto, S. Yajima, H. Tsutsui, A. Maruhashi, K. Ono Optimization of epithermal neutron beam using cyclotron-based neutron source for boron neutron capture therapy, *Proc. of 5th Korea-Japan Joint Meeting on Med. Phys.*, PS1-ROOM3-3(2008)

<学会及び研究会口頭発表等>

佐波俊哉、萩原雅之、高田真志、馬場護、: RECENT PROGRESS OF FRAGMENT MEASUREMENT FROM TENS OF MeV PROTON INDUCED REACTION USING BRAGG CURVE COUNTER,, 2009 核データ研究会、2008 年 11 月 20,21 日 テクノ交流館リコッティ

佐波俊哉、萩原雅之、高田真志、馬場護、: ブラックカーブカウンタを用いた数 10MeV 陽子誘起反応

からのフラグメント測定における測定下限の改善, 研究会「放射線検出器とその応用」、2009年1月27-29日 高エネルギー加速器研究機構

佐波俊哉、萩原雅之、高田真志、馬場護、数 10MeV 陽子による炭素からのフラグメント DDX の入射エネルギー依存性、日本原子力学会春の年会、3月23-25日 東工大

高田真志、布宮智也、石倉 剛、中村尚司、シリコン半導体検出器の Funneling 現象に関する研究, 研究会「放射線検出器とその応用」(第23回), 平成21年(2009年)1月27日、28日、29日, 高エネルギー加速器研究機構、つくば

田中浩基、櫻井良憲、鈴木実、高田卓志、増永慎一郎、菓子野元郎、劉勇、木梨友子、丸橋晃、小野公二、密本俊典、矢島暁、筒井裕士: 30MeV 陽子 Be(p,n)反応による硼素中性子捕捉療法用熱外中性子源の開発、2009年春日本原子力学会

4-2. 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>

Hisashi Kitamura, Yukio Uchihori, Nakahiro Yasuda, et.al., "Future ICCHIBAN Experiments Using Proton Beams", 13th WRMISS, Sept. 9th, 2008, Krakow, Poland

4-3. 宇宙飛翔体搭載型放射線検出器の開発

<学会及び研究会口頭発表等>

松本晴久, 込山立人, 佐々木康友, "軽粒子モニタの開発と Jason-2, GOSAT 衛星への搭載", JAXA 宇宙航空技術研究発表会, 2008年11月27日, つくば市

松本晴久, 佐々木康友, 寺門康男, 中澤道夫, 日下部正希, 富高真, "宇宙機搭載放射線観測装置の開発", 先端研究施設共用イノベーション創出事業つくば4機関合同ワークショップ, 2008年12月2日, つくば市

川崎賀也, 榊直人, 北村尚, 滝澤慶之, 小川貴代, 和田芳夫, 他. JEM-EUSO Collaboration, "JEM-EUSO(75) 部品の放射線試験(2)", 日本物理学会, 2008年9月20日, 山形市

4-4. 宇宙線中性子測定装置の応答関数評価

<Proceedings 等>

保田浩志、矢島千秋、中村尚司、高田真志、藤島徹: 宇宙で用いるサーベイメータ型放射線モニタの開発. Space Utilization Research 25, 2009, in press.

中村尚司、保田浩志、高田真志、矢島千秋、佐藤達彦: 宇宙船内における中性子線被ばく評価のための開発研究. Space Utilization Research 25, 2009, in press.

<学会及び研究会口頭発表等>

Masashi Takada, Hiroshi Yasuda, Kazuaki Yajima, Tatsuhiko Sato, Takashi Nakamura: High-energy phoswich-typed neutron detector in the space station; measurement of energy spectra at aviation altitude. 37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, 2008.7.

Kazuaki Yajima, Hiroshi Yasuda, Tateo Goka, Masashi Takada, Tatsuhiko Sato, Takashi Nakamura: Measurement of low to middle energy neutron spectra in aircraft at aviation altitude. 37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, 2008.7.

Hiroshi Yasuda, Kazuaki Yajima, Masashi Takada, Tateo Goka, Tatsuhiko Sato, Takashi Nakamura: Prototype

development for real-time neutron energy spectra in space, 37th COSPAR Scientific Assembly. 37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, 2008.7.

矢島千秋、保田浩志、福田光宏、畑中吉治、岩元洋介、坂本幸夫: 高エネルギー単色中性子線及び白色中性子線を用いた広域エネルギーレムモニタの評価、日本放射線安全管理学会第7回学術大会、金沢市、2008.12.

7. 関連資料

平成20年度第I期・II期マシンタイム表

月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
3月17日 (月)	長期メンテナンス				4月7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4
3月18日 (火)	長期メンテナンス				4月8日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
3月19日 (水)	長期メンテナンス				4月9日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
3月20日 (木)	春分の日				4月10日 (木)	RI生産		二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 6MeV/300nA C10	
3月21日 (金)	RI生産	R&D			4月11日 (金)	RI生産		二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 6MeV/300nA C10	
3月22日 (土)					4月12日 (土)				
3月23日 (日)					4月13日 (日)				
3月24日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	4月14日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
3月25日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		4月15日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
3月26日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4 二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 6MeV/300nA C10		4月16日 (水)	RI生産		電子デバイスシングルイベント評価試験 東大 中村 P 70MeV 50nA C6	
3月27日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4 二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 6MeV/300nA C10		4月17日 (木)	RI生産		RI生産 ジェネレータ 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
3月28日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		4月18日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
3月29日 (土)					4月19日 (土)				
3月30日 (日)					4月20日 (日)				
3月31日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		4月21日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4
4月1日 (火)	RI生産		宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 P25MeV/1nA以下 C6		4月22日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
4月2日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		4月23日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
4月3日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		4月24日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4	
4月4日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15μA etc、C1,C2,C4		4月25日 (金)	RI生産		BNCTのための中性子エネルギー測定 高田 P40MeV/10nA C8	
4月5日 (土)					4月26日 (土)				
4月6日 (日)					4月27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
4月28日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		5月19日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
4月29日 (火)	昭和の日				5月20日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
4月30日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		5月21日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
5月1日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		5月22日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
5月2日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		5月23日 (金)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 北村 P70MeV/0.1~10nA C8	
5月3日 (土)	憲法記念日				5月24日 (土)				
5月4日 (日)	みどりの日				5月25日 (日)				
5月5日 (月)	子供の日				5月26日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4
5月6日 (火)	振替休日				5月27日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
5月7日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		5月28日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
5月8日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		5月29日 (木)	RI生産		宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 P80MeV/30nA C6	
5月9日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		5月30日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
5月10日 (土)					5月31日 (土)				
5月11日 (日)					6月1日 (日)				
5月12日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	6月2日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
5月13日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		6月3日 (火)	RI生産		R&D	
5月14日 (水)	RI生産		2次粒子の生成反応断面積の計測評価 高田 P80MeV/1000pps C6		6月4日 (水)	RI生産		定期検査	R&D
5月15日 (木)	RI生産		RI生産 ジェネレータ 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		6月5日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
5月16日 (金)	RI生産		粒子弁別測定装置の評価検証 保田 P80MeV/1000pps C6		6月6日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
5月17日 (土)					6月7日 (土)				
5月18日 (日)					6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		
6月9日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	6月30日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4
6月10日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		7月1日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
6月11日 (水)	RI生産		二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 6MeV/300nA C10		7月2日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
6月12日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		7月3日 (木)	RI生産		宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 P80MeV/数10nA C6	
6月13日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		7月4日 (金)	RI生産		宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 P80MeV/数10nA C6	
6月14日 (土)					7月5日 (土)				
6月15日 (日)					7月6日 (日)				
6月16日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	7月7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4
6月17日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		7月8日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
6月18日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		7月9日 (水)	RI生産		半導体素子の放射線の影響に関する研究 JAXA 久保山 P18~70MeV/~1E10pps C8	
6月19日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		7月10日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
6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 北村 P70MeV/1~100pA C8		7月11日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
6月21日 (土)					7月12日 (土)				
6月22日 (日)					7月13日 (日)				
6月23日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	7月14日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
6月24日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		7月15日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
6月25日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		7月16日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
6月26日 (木)	RI生産		RI生産 ジェネレータ 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		7月17日 (木)	RI生産		RI生産 ジェネレータ 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	
6月27日 (金)	RI生産		マイクロコントローラに対する放射線の 影響に関する研究 JAXA 河原 P18~70MeV/~1E7pps C8		7月18日 (金)	RI生産		宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 P50MeV/数10nA C6	
6月28日 (土)					7月19日 (土)				
6月29日 (日)					7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
7月21日 (月)	海の日				8月11日 (月)	長期メンテナンス			
7月22日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		8月12日 (火)	長期メンテナンス			
7月23日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		8月13日 (水)	長期メンテナンス			
7月24日 (木)	RI生産		二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 6MeV/300nA C10		8月14日 (木)	長期メンテナンス			
7月25日 (金)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		8月15日 (金)	長期メンテナンス			
7月26日 (土)					8月16日 (土)				
7月27日 (日)					8月17日 (日)				
7月28日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	8月18日 (月)	長期メンテナンス			
7月29日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		8月19日 (火)	長期メンテナンス			
7月30日 (水)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		8月20日 (水)	長期メンテナンス			
7月31日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		8月21日 (木)	長期メンテナンス			
8月1日 (金)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 北村 P70MeV/1-10nA C6		8月22日 (金)	長期メンテナンス			
8月2日 (土)					8月23日 (土)				
8月3日 (日)					8月24日 (日)				
8月4日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	8月25日 (月)	RI生産	R&D		
8月5日 (火)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		8月26日 (火)	RI生産	R&D		
8月6日 (水)	RI生産		二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 6MeV/300nA C10		8月27日 (水)	RI生産	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		
8月7日 (木)	RI生産		RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		8月28日 (木)	RI生産	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		
8月8日 (金)	RI生産	メンテナンス	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4	メンテナンス	8月29日 (金)	RI生産	RI生産 鈴木 P40MeV/15 μ A etc、C1,C2,C4		
8月9日 (土)					8月30日 (土)				
8月10日 (日)					8月31日 (日)				

月日	小型サイクロロン		大型サイクロロン		月日	小型サイクロロン		大型サイクロロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
8月25日 (月)	RI生産		R&D		9月15日 (月)	敬老の日			
8月26日 (火)	RI生産		R&D		9月16日 (火)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV/25μA etc, C1,C2,C4
8月27日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/20μA C1,C2,C4,C9		9月17日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
8月28日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/20μA C1,C2,C4,C9		9月18日 (木)	RI生産		RI生産 ジェネレータ 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
8月29日 (金)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/20μA C1,C2,C4,C9		9月19日 (金)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 北村 ³ He75MeV / 1pA C6	
8月30日 (土)					9月20日 (土)				
8月31日 (日)					9月21日 (日)				
9月1日 (月)	R&D		R&D (放射線安全測定)		9月22日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
9月2日 (火)	RI生産		宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 P20MeV / 1μA C6		9月23日 (火)	秋分の日			
9月3日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		9月24日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
9月4日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		9月25日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
9月5日 (金)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		9月26日 (金)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
9月6日 (土)					9月27日 (土)				
9月7日 (日)					9月28日 (日)				
9月8日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		9月29日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
9月9日 (火)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		9月30日 (火)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
9月10日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		10月1日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
9月11日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		10月2日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
9月12日 (金)	RI生産		二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 72MeV / 300nA C10		10月3日 (金)	RI生産		宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 P30MeV / 1nA C8	
9月13日 (土)					10月4日 (土)				
9月14日 (日)					10月5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
10月6日 (月)	メンテナンス	メンテナンス		10月27日 (月)	メンテナンス RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9
10月7日 (火)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		10月28日 (火)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
10月8日 (水)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		10月29日 (水)	RI生産	宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 P70MeV / 40nA C6	
10月9日 (木)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		10月30日 (木)	RI生産	宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 He100MeV / 40nA C6	
10月10日 (金)	RI生産	宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 D12MeV / 1nA C8		10月31日 (金)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
10月11日 (土)				11月1日 (土)			
10月12日 (日)				11月2日 (日)			
10月13日 (月)	体育の日			11月3日 (月)	文化の日		
10月14日 (火)	メンテナンス RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A etc., C1,C2,C4	11月4日 (火)	メンテナンス	メンテナンス	
10月15日 (水)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		11月5日 (水)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
10月16日 (木)	RI生産	RI生産 ジェネレータ 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		11月6日 (木)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
10月17日 (金)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		11月7日 (金)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
10月18日 (土)				11月8日 (土)			
10月19日 (日)				11月9日 (日)			
10月20日 (月)	メンテナンス RI生産	メンテナンス	R&D	11月10日 (月)	メンテナンス RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9
10月21日 (火)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		11月11日 (火)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
10月22日 (水)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		11月12日 (水)	RI生産	二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 72MeV / 400nA C10	
10月23日 (木)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		11月13日 (木)	RI生産	RI生産 ジェネレータ 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
10月24日 (金)	RI生産	二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 72MeV / 300nA C10		11月14日 (金)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
10月25日 (土)				11月15日 (土)			
10月26日 (日)				11月16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
11月17日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	12月8日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9
11月18日 (火)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		12月9日 (火)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
11月19日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		12月10日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
11月20日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		12月11日 (木)	RI生産		二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 72MeV / 300nA C10	
11月21日 (金)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 北村 P70MeV / 10nA C8		12月12日 (金)	RI生産		高温超電導線材の耐放射線損傷試験 宮原 D30MeV / 0.1 μ A C3	
11月22日 (土)					12月13日 (土)				
11月23日 (日)	勤労感謝の日				12月14日 (日)				
11月24日 (月)	振替休日				12月15日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9
11月25日 (火)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	12月16日 (火)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
11月26日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		12月17日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
11月27日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		12月18日 (木)	RI生産		RI生産 ジェネレータ 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
11月28日 (金)	RI生産		二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 72MeV / 300nA C10		12月19日 (金)	RI生産		宇宙環境中における中性子 測定器の開発 高田 ¹³ C 130MeV / 1nA C8	
11月29日 (土)					12月20日 (土)				
11月30日 (日)					12月21日 (日)				
12月1日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		12月22日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
12月2日 (火)	RI生産		二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 72MeV / 300nA C10		12月23日 (火)	天皇誕生日			
12月3日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		12月24日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
12月4日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		12月25日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	
12月5日 (金)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9		12月26日 (金)	RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	メンテナンス
12月6日 (土)					12月27日 (土)				
12月7日 (日)					12月28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	
12月29日 (月)					1月19日 (月)	メンテナンス	RI生産	光部品の放射線の影響に関する研究 JAXA(石島) P18-70MeV / ~1E10pps C8
12月30日 (火)					1月20日 (火)		RI生産	光部品の放射線の影響に関する研究 JAXA(石島) P18-70MeV / ~1E10pps C8
12月31日 (水)					1月21日 (水)		RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月1日 (木)	元日				1月22日 (木)		RI生産	RI生産 ジェネレータ 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月2日 (金)					1月23日 (金)		RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月3日 (土)					1月24日 (土)			
1月4日 (日)					1月25日 (日)			
1月5日 (月)	メンテナンス	メンテナンス			1月26日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月6日 (火)	RI生産	宇宙放射線の荷電粒子成分 検出器の開発 内堀 P30 / 10000pps C8			1月27日 (火)		RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月7日 (水)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9			1月28日 (水)		RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月8日 (木)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9			1月29日 (木)		RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月9日 (金)	RI生産	二次電子実験 大澤 C ⁶⁺ 72MeV / 300nA C10			1月30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 P30, 70MeV / 10000pps C6
1月10日 (土)					1月31日 (土)			
1月11日 (日)					2月1日 (日)			
1月12日 (月)	成人の日				2月2日 (月)	メンテナンス		メンテナンス
1月13日 (火)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9			2月3日 (火)		RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月14日 (水)	RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9			2月4日 (水)		RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月15日 (木)	RI生産	半導体素子の放射線の影響に関する研究 JAXA(久保山) P70MeV / 1nA C8			2月5日 (木)		RI生産	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9
1月16日 (金)	RI生産	高温超電導線材の耐放射線損傷試験 宮原 D30MeV / 0.1μA C3			2月6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 He100MeV / 10000pps C6
1月17日 (土)					2月7日 (土)			
1月18日 (日)					2月8日 (日)			

月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
2月9日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	3月2日 (月)	長期メンテナンス			
2月10日 (火)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		3月3日 (火)	長期メンテナンス			
2月11日 (水)	建国記念の日				3月4日 (水)	長期メンテナンス			
2月12日 (木)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		3月5日 (木)	長期メンテナンス			
2月13日 (金)	RI生産		フォトカプラーのディスプレイメント ダメージ評価 HIREC(小笠原) P70MeV / 1nA C8		3月6日 (金)	長期メンテナンス			
2月14日 (土)					3月7日 (土)				
2月15日 (日)					3月8日 (日)				
2月16日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	3月9日 (月)	メンテナンス	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2	
2月17日 (火)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		3月10日 (火)	メンテナンス	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2	
2月18日 (水)	RI生産		RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		3月11日 (水)	メンテナンス	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2	
2月19日 (木)	RI生産		RI生産 ジェネレータ 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9		3月12日 (木)	メンテナンス	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
2月20日 (金)	RI生産	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	メンテナンス	3月13日 (金)	メンテナンス	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
2月21日 (土)					3月14日 (土)				
2月22日 (日)					3月15日 (日)				
2月23日 (月)	長期メンテナンス 全所停電 (13:30~14:00)				3月16日 (月)	メンテナンス	メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
2月24日 (火)	長期メンテナンス				3月17日 (火)	メンテナンス	R&D	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
2月25日 (水)	長期メンテナンス				3月18日 (水)	メンテナンス	R&D	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
2月26日 (木)	長期メンテナンス				3月19日 (木)	メンテナンス	R&D	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25μA C1,C2,C4,C9	
2月27日 (金)	長期メンテナンス				3月20日 (金)	春分の日			
2月28日 (土)					3月21日 (土)				
3月1日 (日)					3月22日 (日)				

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
3月23日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	4月13日 (月)	来年度マシンタイム			
3月24日 (火)	メンテナンス		R&D	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	4月14日 (火)	来年度マシンタイム			
3月25日 (水)	R&D		R&D	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	4月15日 (水)	来年度マシンタイム			
3月26日 (木)	R&D		R&D	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	4月16日 (木)	来年度マシンタイム			
3月27日 (金)	R&D		R&D	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	4月17日 (金)	来年度マシンタイム			
3月28日 (土)					4月18日 (土)				
3月29日 (日)					4月19日 (日)				
3月30日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		4月20日 (月)	来年度マシンタイム			
3月31日 (火)	R&D		R&D	RI生産 菅野 P40MeV,etc/25 μ A C1,C2,C4,C9	4月21日 (火)	来年度マシンタイム			
4月1日 (水)	来年度マシンタイム				4月22日 (水)	来年度マシンタイム			
4月2日 (木)	来年度マシンタイム				4月23日 (木)	来年度マシンタイム			
4月3日 (金)	来年度マシンタイム				4月24日 (金)	来年度マシンタイム			
4月4日 (土)					4月25日 (土)				
4月5日 (日)					4月26日 (日)				
4月6日 (月)	来年度マシンタイム				4月27日 (月)	来年度マシンタイム			
4月7日 (火)	来年度マシンタイム				4月28日 (火)	来年度マシンタイム			
4月8日 (水)	来年度マシンタイム				4月29日 (水)	来年度マシンタイム			
4月9日 (木)	来年度マシンタイム				4月30日 (木)	来年度マシンタイム			
4月10日 (金)	来年度マシンタイム				5月1日 (金)	来年度マシンタイム			
4月11日 (土)					5月2日 (土)				
4月12日 (日)					5月3日 (日)				

平成20年度サイクロトロン利用報告書

平成21年7月刊行

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
郵便番号	263-8555
住 所	千葉県千葉市稲毛区穴川4丁目9番1号
連絡先	独立行政法人 放射線医学総合研究所 重粒子医科学センター 物理工学部 TEL:043-206-3173 FAX:043-287-6146 メールアドレス : cyc_ope@nirs.go.jp
ホームページ	http://www.nirs.go.jp/