



N I R S - M - 2 7 1

平成 2 5 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 <sup>1</sup> の運転実績と利用状況                        | ( 1) |
| 2. サイクロトロン <sup>2</sup> の改良・開発                            | (11) |
| 3. サイクロトロン <sup>3</sup> の分子プローブ <sup>4</sup> の製造・開発への利用状況 | (15) |
| 4. 物理研究   |      |
| 4-1. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究                             | (19) |
| 4-2. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究                              | (25) |
| 4-3. 最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定                              | (29) |
| 4-4. 核破砕片生成二重微分断面積の測定                                     | (34) |
| 4-5. 陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究                        | (36) |
| 5. 生物研究   |      |
| 5-1. プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析                          | (43) |
| 5-2. 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果                         | (45) |
| 6. 粒子線検出器の開発  |      |
| 6-1. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発                                   | (47) |
| 6-2. シリコン半導体センサーの陽子線に対する特性評価                              | (50) |
| 7. 粒子線による損傷試験   |      |
| 7-1. 高温超伝導線材の中性子照射特性                                      | (53) |
| 7-2. 光学機器の耐放射線性能に関する研究                                    | (55) |
| 8. 照射システムの開発  |      |
| 検出器校正用の照射場の作成   | (57) |
| 9. 有料ビーム提供  |      |
| NIRS-930における有料提供の利用状況                                     | (63) |
| 10. 研究成果一覧  | (65) |
| 11. 関連資料  |      |
| 平成25年度第I期・II期マシンタイム予定表                                    | (75) |

## 1. サイクロトロンの運転実績と利用状況

# サイクロトロン<sup>の</sup>運転実績と利用状況

## OPERATION RESULTS AND UTILIZATION OF NIRS CYCLOTRON

杉浦 彰則<sup>A</sup>、北條 悟<sup>A</sup>、片桐 健<sup>A</sup>、中尾 政夫<sup>A</sup>、田代 克人<sup>A</sup>、鈴木 和年<sup>A</sup>、  
 野田 章<sup>A</sup>、岡田 高典<sup>B</sup>、高橋 勇一<sup>B</sup>、込山 明仁<sup>B</sup>、本間 壽廣<sup>B</sup>、野田 耕司<sup>A</sup>  
 Akinori Sugiura<sup>A</sup>, Satoru Hojo<sup>A</sup>, Ken Katagiri<sup>A</sup>, Nakao Masao<sup>A</sup>, Katsuto Tashiro<sup>A</sup>,  
 Kazutoshi Suzuki<sup>A</sup>, Akira Noda<sup>A</sup>, Takanori Okada<sup>B</sup>, Yuichi Takahashi<sup>B</sup>, Akihito Komiyama<sup>B</sup>,  
 Toshihiro Honma<sup>B</sup>, and Koji Noda<sup>A</sup>

<sup>A</sup> : 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

<sup>B</sup> : 加速器エンジニアリング株式会社

### 概要

放射線医学総合研究所のサイクロトロン棟には、大型サイクロトロン(NIRS-930)と小型サイクロトロン(HM-18)の2台のサイクロトロンが設置されている[1]。これら2台のサイクロトロンは、大きなトラブルも無くビーム提供を行うことができている。小型サイクロトロンは放射性薬剤の製造・研究専用、大型サイクロトロンは放射性薬剤の製造・研究を中心に物理研究、粒子線検出器の開発、粒子線による損傷試験、生物研究、有料ビーム提供が行われた。大型サイクロトロンではビーム開発も行っており、新規供給ビームとして 34, 34.5, 35MeV ヘリウムを新たに供給し、また、利用者の要望により 60 MeV 陽子、24 MeV 水素分子、20 MeV 重陽子、40 MeV ヘリウムの調整をおこない供給可能にした。また、大型サイクロトロンでは月に1回程度、土曜日のビーム提供運転を行い、計10回行った。

本報告書では、平成25年度における2台のサイクロトロンの運転実績と利用状況、運用体制について報告する。

## 1. 大型サイクロトロン

### 1-1. 運転実績

平成25年度の総運転時間は1790.8時間であった。加速粒子・エネルギー別の運転時間を表1に、加速粒子別の運転時間割合を図1に示す。加速粒子・エネルギー別の運転時間では、放射線薬剤の製造・研究に利用される30 MeV 陽子が254.8時間、18 MeV 陽子が265.9時間となり、物理研究、粒子線検出器の開発、粒子線による損傷試験、生物研究、有料ビーム提供といった幅広い分野で利用される70 MeV 陽子が288.8時間となっている。この3つのエネルギーの陽子が多く利用されており、総運転時間のおおよそ半分を占めている。

加速粒子別運転時間割合では、放射線薬剤の製造・研究や物理実験等で主に利用されている陽子が74.4%を占めている。その他の粒子では、水素分子が1.7%、重陽子が4.4%、ヘリウムが14.6%、炭素が0.6%、酸素が3.4%、ネオンが0.9%の割合となっている。各粒子の利用目的などについては、各利用目的の説明の項に後述する。

表1. 加速粒子・エネルギー別運転時間

| 陽子             |             | 水素分子           |             | ヘリウム           |             | 炭素             |             |
|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| エネルギー<br>[MeV] | 運転時間<br>[h] | エネルギー<br>[MeV] | 運転時間<br>[h] | エネルギー<br>[MeV] | 運転時間<br>[h] | エネルギー<br>[MeV] | 運転時間<br>[h] |
| 80             | 40.1        | 27             | 21.0        | 100            | 14.5        | 72             | 11.5        |
| 70             | 288.8       | 24             | 8.9         | 75             | 40.2        |                |             |
| 60             | 139.2       |                |             | 40             | 27.9        | 酸素             |             |
| 50             | 51.3        | 重陽子            |             | 35             | 8.7         | エネルギー          | 運転時間        |
| 45             | 28.7        | エネルギー          | 運転時間        | 34.5           | 7.8         | [MeV]          | [h]         |
| 40             | 110.8       | [MeV]          | [h]         | 34             | 127.3       | 96             | 60.5        |
| 30             | 254.8       | 30             | 17.3        | 33             | 17.2        |                |             |
| 25             | 22.2        | 20             | 61.3        | 30             | 17.4        | ネオン            |             |
| 18             | 265.9       |                |             |                |             | エネルギー          | 運転時間        |
| 15             | 33.5        |                |             |                |             | [MeV]          | [h]         |
| 12             | 70.2        |                |             |                |             | 120            | 16.4        |
| 8              | 27.5        |                |             |                |             |                |             |

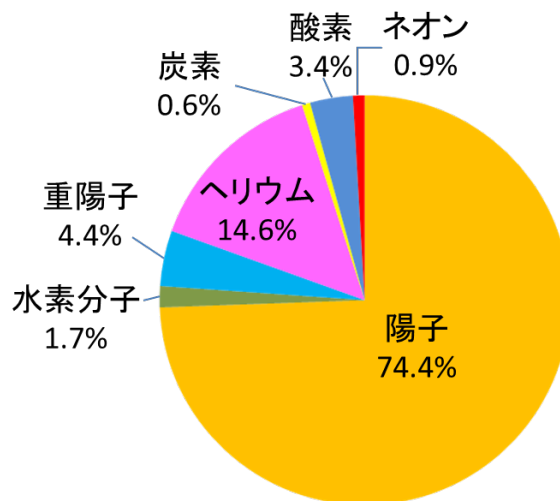


図1.加速粒子別運転時間割合

### 1-2. 利用状況

総運転時間の 1790.8 時間の利用内訳として、利用目的別の運転時間とその割合を表 2 に、利用目的別の運転時間割合を図 2 に示す。主目的である放射性薬剤の製造・研究には 791.3 時間の運転時間が当てられた。その他には、物理研究に 269.6 時間、生物研究に 45.3 時間、粒子線検出器の開発に 32.8 時間、粒子線による損傷試験に 32.2 時間、照射システムの開発に 24.4 時間、有料ビーム提供に 136.1 時間利用された。また、各ビーム開発に 453.9 時間、放射線安全測定に 5.2 時間が費やされた。

総運転時間からの割合でみると、半分弱となる 44.2%が放射性薬剤の製造・研究にあてられている。同様におおよそ 1/3 となる約 30.2%が有料ビーム提供を含む多種多様な利用目的にあてられており、残りの 1/4 となる 25.6%が新たなビームエネルギーの調整や機器開発、ビームの質の改善のための調整運転にあてられた。

表2.利用目的別運転時間

| 目 的            | 時 間 [h] | 割 合 [%] |
|----------------|---------|---------|
| (1)放射性薬剤の製造・研究 | 791.3   | 44.2    |
| (2)物理研究        | 269.6   | 15.1    |
| (3)生物研究        | 45.3    | 2.5     |
| (4)粒子線検出器の開発   | 32.8    | 1.8     |
| (5)粒子線による損傷試験  | 32.2    | 1.8     |
| (6)照射システムの開発   | 24.4    | 1.4     |
| (7)有料ビーム提供     | 136.1   | 7.6     |
| (8)ビーム開発       | 453.9   | 25.3    |
| (9)放射線安全測定     | 5.2     | 0.3     |
| 合計             | 1790.8  | 100.0   |

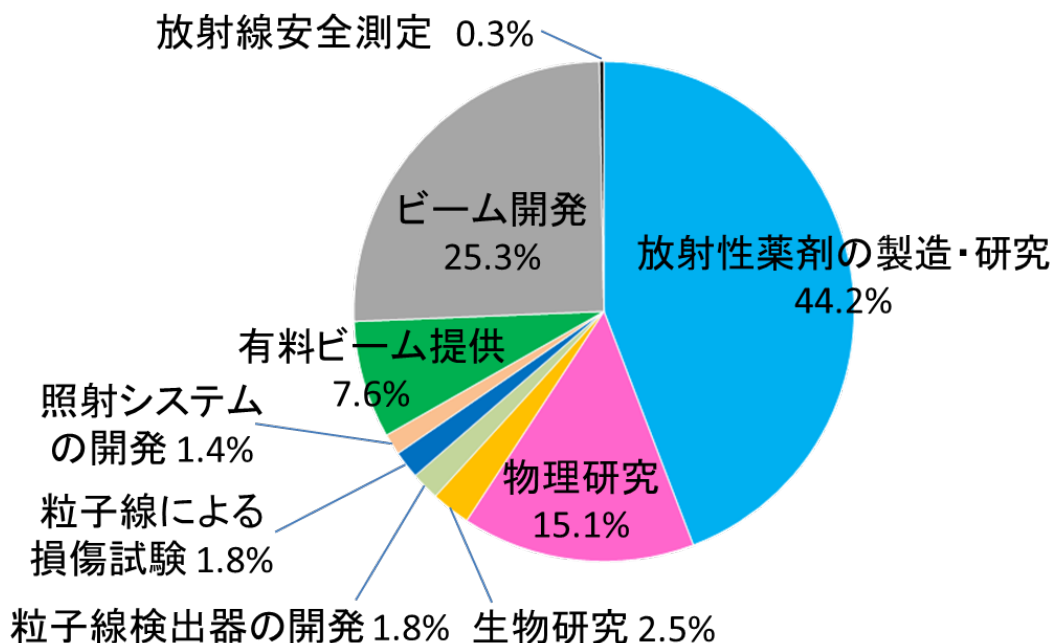


図2.利用目的別運転時間割合

### (1) 放射性薬剤の製造・研究

放射性薬剤の製造・研究[2]では、総運転時間の44.2%である791.3時間が利用された。粒子・エネルギー別に集計した利用時間の割合を図3に示す。利用時間を粒子別に割合を見ると、陽子が77.9%、水素分子が2.7%となっている。水素分子は解離後に陽子として照射しているため、陽子による照射を目的とした利用は80.6%となる。それ以外の粒子では、ヘリウムが19.4%となっている。陽子のエネルギー別の利用状況は、<sup>64</sup>Cuの製造に用いられた12 MeV陽子が7.8%、<sup>89</sup>Zrの製造に用いられた15 MeV陽子が3.0%、<sup>11</sup>C、<sup>18</sup>Fの製造に用いられた18 MeV陽子が27.3%、<sup>62</sup>Zn/<sup>62</sup>Cuジェネレータの製造に用いられた30 MeV陽子が24.6%、<sup>86</sup>Yの製造に用いられた45 MeV陽子が3.1%、<sup>211</sup>Atの製造に用いられた50 MeV陽子が0.7%、<sup>67</sup>Cuの製造に用いられた60 MeV陽子が11.4%となっている。その他の核種では、<sup>124</sup>Iの製造に用いられた27 MeV水素分子が2.7%、<sup>211</sup>Atの製造に用いられた30、33、34、34.5、35 MeVヘリウムがそれぞれ0.6%、1.7%、11.3%、0.4%、0.7%、<sup>28</sup>Mgの製造に用いられた75 MeVヘリウムが4.7%であった。新た供給を開始したエネルギーは、45 MeV陽子、60 MeV陽子、34、34.5、35 MeVヘリウムであった。また、利用者の要望により24 MeV水素分子、20 MeV重陽子、40 MeVヘリウムの調整をおこない供給可能にした。

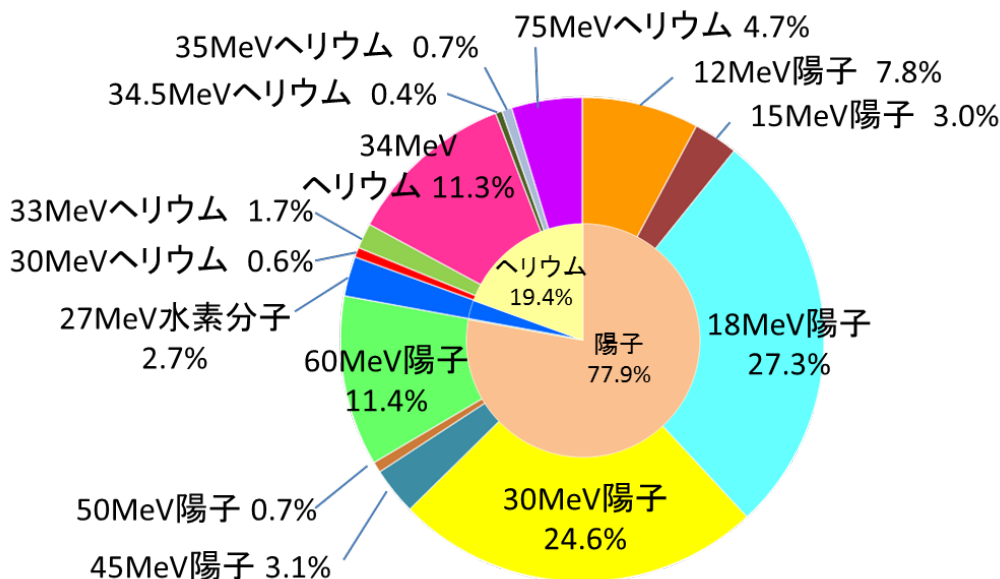


図3.放射性薬剤の製造・研究における粒子・エネルギー別利用割合

## (2) 物理研究

物理研究では、総運転時間の 15.1% である 269.6 時間が利用された。物理研究における粒子・エネルギー別利用割合を図 4 に示す。粒子別にみると、陽子が 73.9%、ヘリウムが 2.4%、炭素が 3.2%、酸素が 20.5% と、陽子と共に様々な粒子が利用されている。

物理研究では、5 課題のマシントimeが実施されており、それぞれの課題で利用された粒子とエネルギーは次のとおりである。

|                                     |                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 「高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究」 [3]      | 60,70 MeV 陽子                      |
| 「重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究」 [4]       | 72 MeV 炭素、96 MeV 酸素               |
| 「最前方における陽子および重陽子生成断面積の測定」 [5]       | 40 MeV 陽子                         |
| 「核破砕片生成二重微断面積の測定」 [6]               | 25, 50 MeV 陽子                     |
| 「陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究」 [7] | 30, 40, 50 60 MeV 陽子、100 MeV ヘリウム |

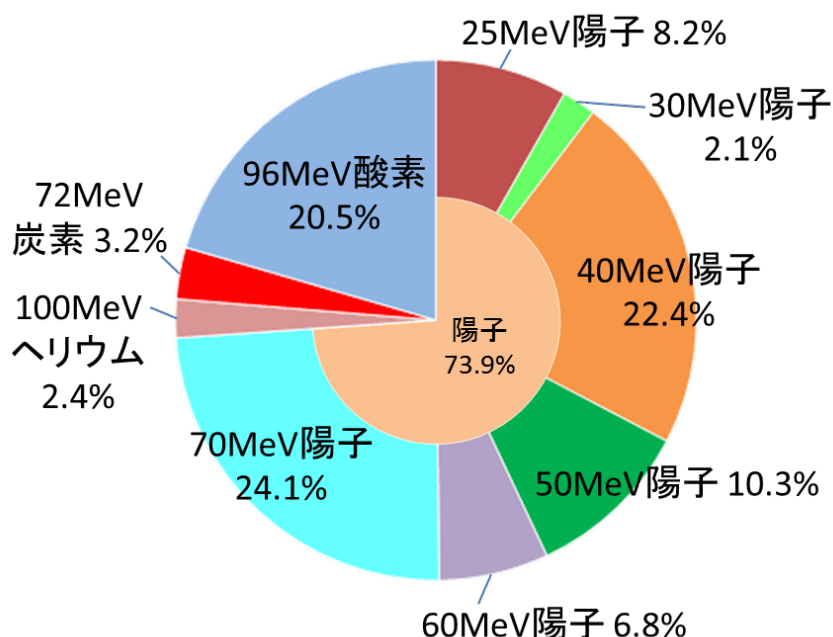


図 4.物理研究における粒子・エネルギー別利用割合

## (3) 生物研究

生物研究では、総運転時間の 2.5% にあたる 45.3 時間が利用された。生物研究における粒子・エネルギー別利用割合を図 5 に示す。生物研究の課題は 2 課題あるが、利用された粒子はすべて 70 MeV 陽子となっている。

粒子放射線治療における分割照射の効果を調査する「プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析」 [8] や、DNA 二本鎖切断修復機構の違いによる酸素の増感効果を明らかにする「陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果」 [9] が行われた。

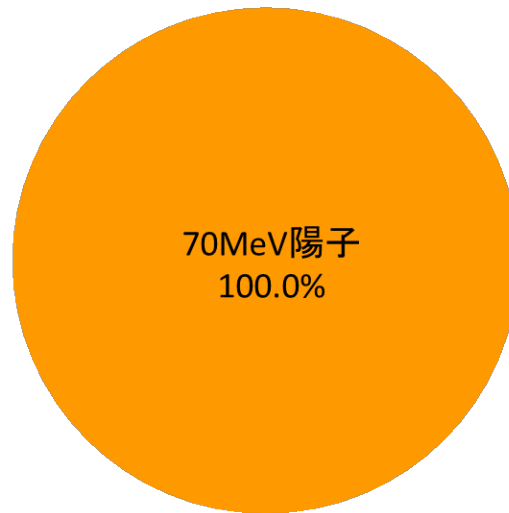


図5.生物研究における粒子・エネルギー別利用割合

#### (4) 粒子線検出器の開発

粒子線検出器の開発では、総運転時間の1.8%に当たる32.8時間が利用された。粒子線検出器における粒子・エネルギー別利用割合を図6に示す。携帯型宇宙放射線線量計を評価するための「宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発」[10]や、中性子被ばく線量計における応答特性の評価を行った「シリコン半導体センサーの陽子線に対する特性評価」[11]に利用された。粒子はすべて陽子で、8 MeV が47.7%、40MeV が26.9%、80MeV が25.4%となっている。

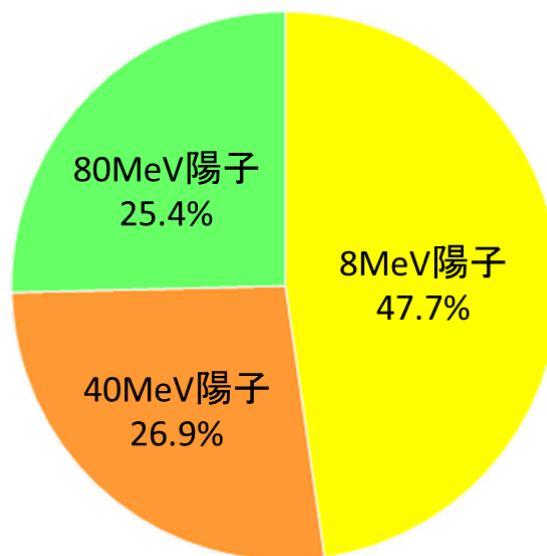


図6.粒子線検出器の開発における粒子・エネルギー別利用割合

#### (5) 粒子線による損傷試験

粒子線による損傷試験では、総運転時間の1.8%に当たる32.2時間が利用された。粒子線による損傷試験における粒子・エネルギー別利用割合を図7に示す。70MeV陽子が46.4%、30MeV重陽子が53.6%となっている。

超電導線材の中性子照射による特性変化を調べる「超伝導線材ならびにコイル構成材料の耐放射線に関する研究」[12]では、ベリリウムターゲットを用いた中性子照射のために30 MeV重陽子が利用された。また、国際宇宙ステーションに搭載を予定している装置の放射線耐性を調べる「光学機器の耐放射線性能に関する研究」[13]に70MeV陽子が利用された。



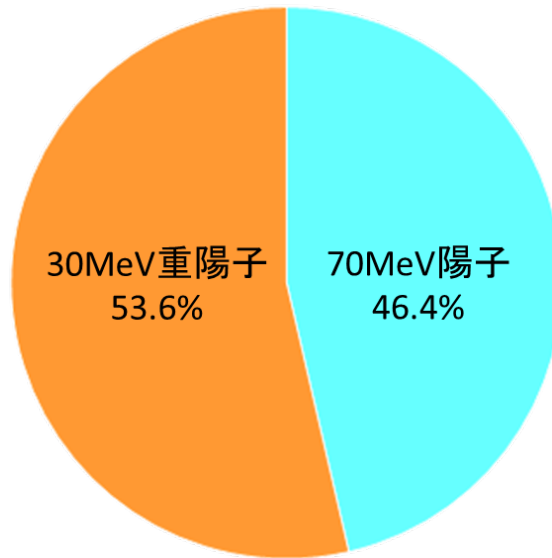


図7.粒子線による損傷試験における粒子・エネルギー別利用割合

#### (6) 照射システムの開発

粒子線による損傷試験では、総運転時間の1.4%に当たる24.4時間が利用された。粒子線による損傷試験における粒子・エネルギー別利用割合を図8に示す。70MeV陽子が67.6%、100MeVヘリウムが32.4%となっている。

課題は1課題で、汎用照射室のC-8コースにおいて、広く平坦な陽子線の検出器校正用の照射場を構築する「検出器校正用の照射場の作成」[14]で70 MeV陽子と100 MeVヘリウムが利用された。

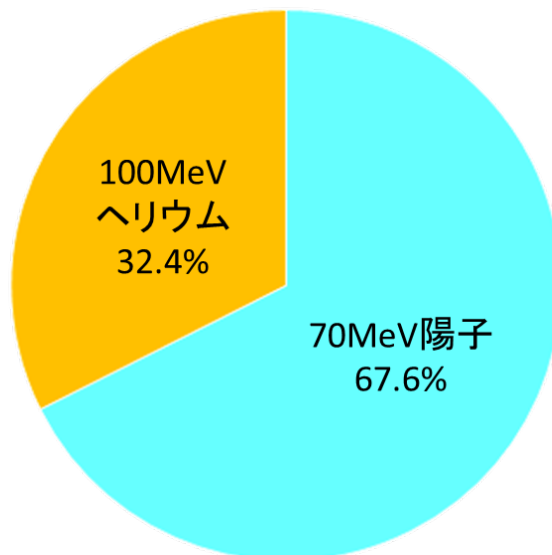


図8.照射システムの開発における粒子・エネルギー別利用割合

## (7) 有料ビーム提供

有料ビーム提供では、総運転時間の7.6%に当たる136.1時間が利用された。有料ビーム提供における粒子・エネルギー別利用割合を図9に示す。有料ビーム提供に利用された粒子は陽子のみで、40 MeVが12.9%、70 MeVが80.6%、80 MeVが6.5%であった。主に宇宙放射線による電子機器への影響を評価するための利用となっている。

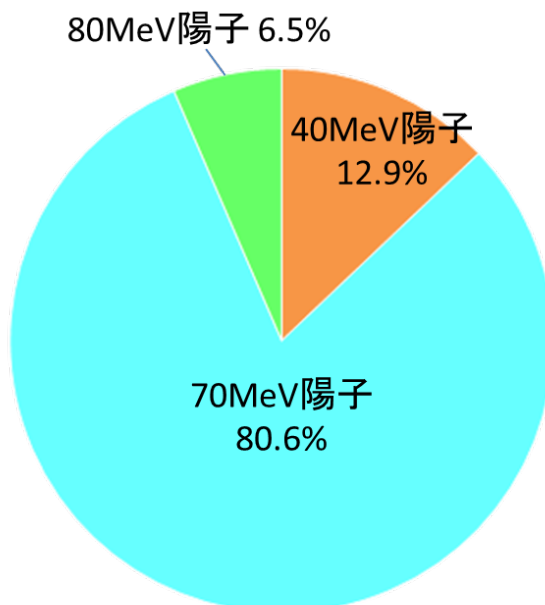


図9. 有料ビーム提供における粒子・エネルギー別利用割合

## (8) ビーム開発

ビーム開発には、453.9時間が当てられた。ビーム開発における粒子・エネルギー別利用割合を図10に示す。粒子別にみると、陽子が58.7%、水素分子が2.0%、重陽子が13.5%、ヘリウムが16.7%、炭素が0.6%、酸素が1.2%、ネオンが3.6%となっている。特に、放射性薬剤の製造・研究において重要度の高いジェネレータ製造用に利用されている30 MeV陽子は、調整およびビーム確認を行う頻度が高く全体の34.1%を占めている。

また、平成25年度の新規ビームとして、放射性薬剤の製造・研究用に34, 34.5, 35 MeVヘリウムを、物理実験用に120 MeVネオン供給した。なお、放射性薬剤の開発研究に供給するため60 MeV陽子、24 MeV水素分子、20 MeV重陽子、40 MeVヘリウムを10  $\mu$ A以上のビーム強度が出せるように再調整を行った。60 MeV陽子は供給を行い、24 MeV水素分子、20 MeV重陽子、40 MeVヘリウムは調整中である。

そして、サイクロトロン改良・開発[15]において、高強度ビームを複数のモニターで確認するため、3線式プロファイルモニターの新設および冷却式アルミナモニターの開発を行い、30, 18 MeV陽子を用いて調整を行った。

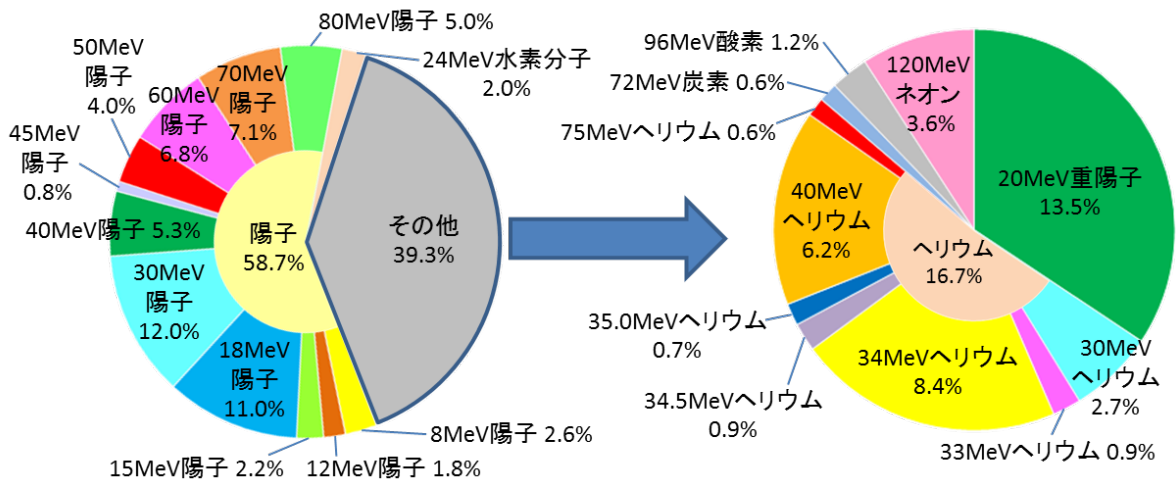


図 10. ビーム開発における粒子・エネルギー別利用割合

## 2. 小型サイクロトロン

### 2-1. 運転実績

平成 25 年度の総運転時間は 1766.1 時間であった。粒子目的別の運転時間を表 3 に、粒子目的別の運転時間割合を図 10 に示す。

小型サイクロトロンでは、エネルギー固定で 18 MeV 陽子と 9 MeV 重陽子が提供可能である。その内、18 MeV 陽子の利用が総運転時間の 96.0%に当たる 1750.5 時間であった。また、9 MeV 重陽子ビームによる RI 生産が 22.0 時間であった。その他には、調整運転で 18 MeV 陽子に 44.9 時間、9 MeV 重陽子に 5.4 時間費やした。

表 3. 小型サイクロトロンの運転時間

|             | 18 MeV陽子 | 9 MeV重陽子 | [時間]   |
|-------------|----------|----------|--------|
| 放射性薬剤の製造・研究 | 1699.5   | 53.9     | 1753.4 |
| 調整運転        | 5.8      | 6.9      | 12.7   |
| 計           | 1705.3   | 60.8     | 1766.1 |

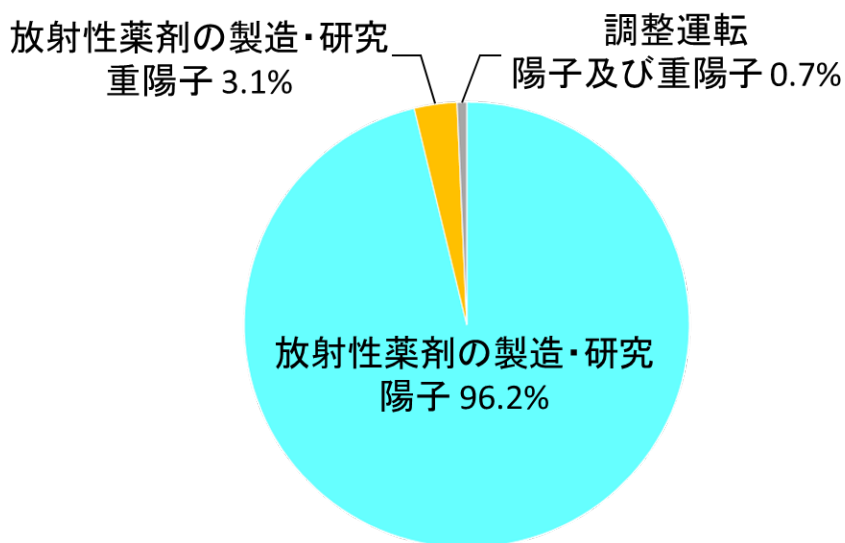


図 11. 小型サイクロトロンの運転時間割合

## 2-2. 利用状況

小型サイクロトロンは放射性薬剤の製造・研究[2]専用に利用されている。総運転時間のほとんどが18 MeV 陽子による<sup>11</sup>Cや<sup>13</sup>N、<sup>18</sup>Fなどを用いた放射性薬剤の製造・研究に利用された。また、9 MeV 重陽子による<sup>15</sup>Oを用いた放射性薬剤の製造・研究が行われた。なお、調整運転時間では定期点検および安全測定に伴うビーム確認が行われた。

## 3. 運用体制

### 3-1. 運転実績

大型および小型サイクロトロンでは、平日の8:30から17:00まで運転を行っている。大型サイクロトロンは、月に1回程度の土曜日に運転を行った。平成25年度は、前期5回、後期5回の計10回の土曜日運転を行った。なお、実験者の要望がある場合には平日に限り19:00まで延長可能となっている。

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

## 参考文献

- [1] 北條 悟、片桐 健、中尾政夫、杉浦彰則、村松正幸、野田 章、岡田高典、高橋勇一、込山明仁、本間壽廣: 放医研サイクロトロン(NIRS-930、HM-18)の現状報告, 第10回日本加速器学会年会, 2013年8月3日~5日, 愛知県, SSPF14
- [2] 張 明栄、河村和紀、根本和義、鈴木 寿、菊池 達矢、永津弘太郎、藤永 雅之、武井 誠: サイクロトロンの分子プローブの製造・開発への利用状況, 本誌 p15-p17
- [3] 西尾禎治、松下慶一郎、中村哲志、余語克紀、恒田雅人、青野裕樹、田中創大、稲庭 拓、杉浦 彰則、北條 悟: 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究, 本誌 p19-p24
- [4] 大澤大輔、俵 博之、曾我文宣、野田 章、野田耕司: 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究, 本誌 p25-p28
- [5] 魚住裕介、山田剛広、和西航平、橋口太郎、米重英成、古場裕介、高田真志: 最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定, 本誌 p29-p33
- [6] 佐波俊哉、古場裕介、高田真志: 核破砕片生成二重微分断面積の測定, 本誌 p34-p35
- [7] 小平 聡、北村 尚、内堀幸夫: 陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究, 本誌 p36-p40
- [8] 鈴木雅雄、稲庭 拓、佐藤眞二、北村 尚、村上 健: プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析, 本誌 p41-p42
- [9] 平山亮一、尾崎匡邦、山下慶、李 恵子、金子由美子、松本孔貴、鶴澤玲子、北村 尚、内堀幸夫、古澤佳也: 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果, 本誌 p43-p44
- [10] 内堀幸夫、北村 尚、小平 聡、小林進悟: 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発, 本誌 p45-p47
- [11] 高田真志: シリコン半導体センサーの陽子線に対する特性評価, 本誌 p48-p49
- [12] 宮原信幸、石山敦士、道辻健太、狩野開、有谷友汰: 高温超伝導線材の中性子照射特性, 本誌 p51
- [13] 滝澤慶之、川崎賀也、小川貴代、北村 尚、内堀幸夫: 光学機器の耐放射線性能に関する研究, 本誌 p52-p53
- [14] 北村 尚、小平 聡、小林進悟、内堀幸夫: 検出器校正用の照射場の作成, 本誌 p55-p59
- [15] 北條分: サイクロトロンの改良・開発, 本誌 p11-p13



## 2. サイクロトロンの改良・開発

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

北條 悟<sup>A</sup>、片桐 健<sup>A</sup>、杉浦 彰則<sup>A</sup>、鈴木 和年<sup>A</sup>、田代 克人<sup>A</sup>、野田 章<sup>A</sup>、  
岡田 高典<sup>B</sup>、高橋 勇一<sup>B</sup>、込山 明仁<sup>B</sup>、本間 壽廣<sup>B</sup>、野田 耕司<sup>A</sup>  
Satoru Hojo<sup>A</sup>, Ken Katagiri<sup>A</sup>, Masao Nakao<sup>A</sup>, Akinori Sugiura<sup>A</sup>, Kazutoshi Suzuki<sup>A</sup>, Katsuto  
Tashiro<sup>A</sup>, Akira Noda<sup>A</sup>, Takanori Okada<sup>B</sup>, Yuichi Takahashi<sup>B</sup>, Akihito Komiyama<sup>B</sup>,  
Toshihiro Honma<sup>B</sup>, and Koji Noda<sup>A</sup>

A：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

B：加速器エンジニアリング株式会社

## 概要

大型サイクロトロンにおいては、分子イメージング研究のために、固体ターゲットへの大電流での長時間照射が頻繁に行われている。固体ターゲットの場合、ビームスポットが小さくなりすぎてターゲットへの効率的な照射ができないため、ビームサイズの確認が必要不可欠となっており、そのためのプロファイルモニターの新設やビームビューアの開発を行った。さらに、老朽化への対策としてサイクロトロンメインプローブの一部改修やビーム輸送系の機器などの改良を実施した。

### 1. 3線式プロファイルモニターの新設

直線照射室 C4 コースにおいて、ジェネレータのような金属ターゲットの長時間照射が多く行われている。金属ターゲットへの照射では、ビーム電流が高く、ビーム形状が小さくなると熱集中によるターゲットの損傷が問題となってしまうため、ビーム形状の確認も重要となる。

そのため、照射中のビーム形状の確認のために、ターゲット 30 cm 程度上流に、3線式プロファイルモニターを新たに設置した。

3線式プロファイルモニターの計測方法は、水平、垂直、斜めにスキャンし、ワイヤーに流れる電流をモニターする方法である。3本のワイヤーの検出電流は、電流アンプにより電圧信号に変換され、操作室のオシロスコープによりモニターすることができる。また、位置検出用のポテンショメータの出力電圧も同時にモニターしている。

写真1に30 MeV proton 20  $\mu$ A 時の計測波形を示す。上から、チャンネル1、チャンネル2、チャンネル3、チャンネル4で、それぞれ、X方向検出電流、Y方向検出電流、Z（斜め）方向検出電流、位置検出ポテンショメータ出力である。スキャン時間は、二秒程度であるため、長時間の照射が行われている途中で、ビームを止めずに1  $\mu$ A ~ 20  $\mu$ A までの強度で、プロファイルの確認を行うことができている。

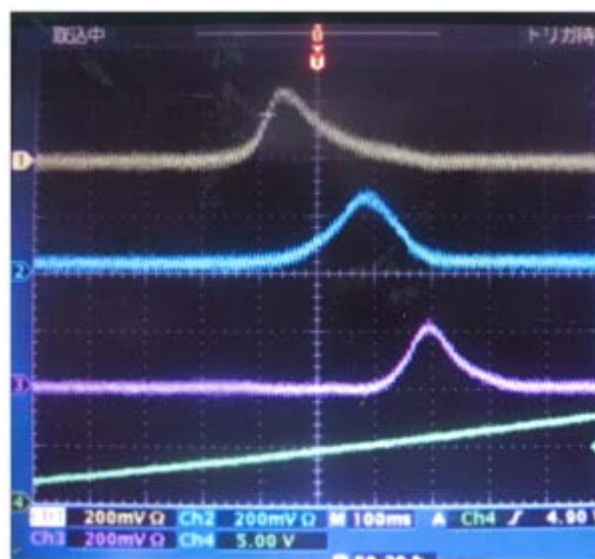


写真1. 30MeV proton 20 $\mu$ A 照射時の3線式プロファイルモニター出力

Ch1(黄)：X Ch2(青):Y Ch3(赤): z (斜め)  
Ch4(緑):位置ポテンショメータ出力

### 2. 冷却式アルミナモニターの開発

これまで、サイクロトロンから取り出されたビームの形状や分布等を二次元的に確認するために、アルミナ蛍光板が多く用いられてきた。

アルミナ蛍光板は、厚さ3mmの物を用いており、蛍光量が高く、冷却も行っていないためビーム形状がモニター可能なビーム電流は、数nA~0.5  $\mu$ A程度であった。また、誤って数 $\mu$ Aのビーム電流で照射してしまうと、焼けて蛍光量が少なくなってしまうたり、ビームからの発熱による熔融や割れなどの破損が生じてしまったりしていた(写真2)。

そのため、サイクロトロンから取り出されたビームの形状や分布を確認する際には、サイクロトロンに入射ビーム電流を下げて、ビーム電流の低い状態でのみビーム形状や分布の確認を行っていた。

入射ビーム電流の強度は、 $200\ \mu\text{A}$  と高くさらにエネルギーが低いため、空間電荷効果による影響が大きい。そのため、入射ビーム電流を変えることによってビームの形状や分布に変化が生じてしまう恐れがある。そのため、ビーム電流を下げることなくターゲット照射強度での蛍光により、ビームの形状や分布を確認できるように、高いビーム電流に耐えうるアルミナモニターの開発を行っている。

これまで、厚さ  $3\text{--}5\ \text{mm}$  のアルミナ蛍光板を固定台に取り付けて使用していた。そのため、高いビーム電流になると、アルミナ蛍光板でのエネルギーロスによる発熱が大きくなってしまっていた。

そこで今回、水冷された銅にアルミナ蒸着を用いることにより、アルミナの厚さを薄くしてアルミナでのエネルギーロスを少なくし、さらに冷却が可能な冷却式アルミナモニターを開発した (写真 3)。

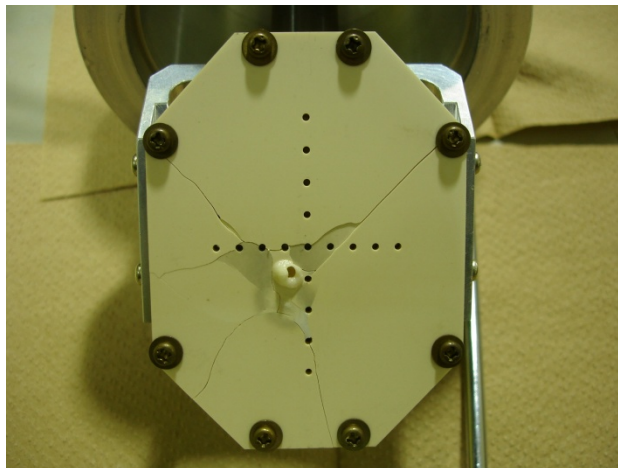


写真 2: 高いビーム電流により破損したアルミナモニター

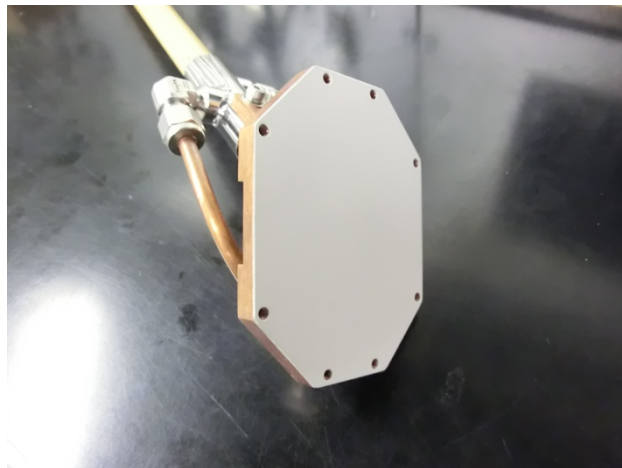


写真 3: 冷却式アルミナモニター



写真 4:  $300\ \text{nA}$ でのスポット確認

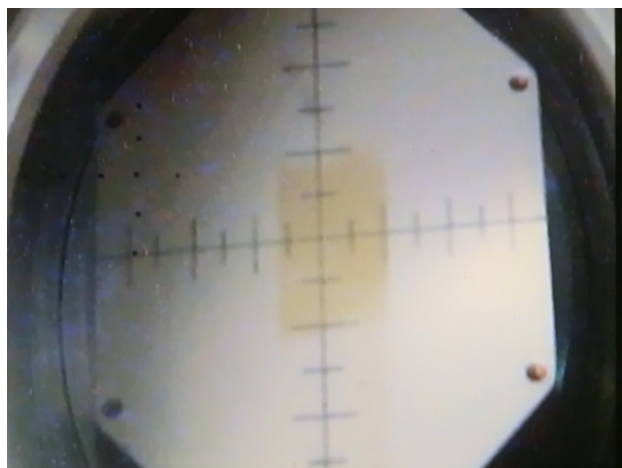


写真 5: スポット確認後のアルミナモニター溶射面

アルミナの厚さを  $0.1\ \text{mm}$  として製作した冷却式アルミナモニターを  $18\ \text{MeV}$  陽子ビームを用いてビーム照射による蛍光テストを行った。

まず、これまでの厚さのアルミナモニターでの使用範囲である  $300\ \text{nA}$  のビーム電流での確認をおこなった (写真 5)。この強度ではこれまでの厚さのアルミナモニターでは、蛍光が強く確認しづらい状態であったが、冷却式ビーム形状を確認することができた。照射後のアルミナ表面を写真 6 に示す。表面の色の変化はあるが、蛍光には問題なかった。更にビーム電流を 10 倍の  $3\ \mu\text{A}$  での蛍光を確認した。結果を写真 6 に示す。ビーム分布確認するための蛍光量として十分な蛍光が確認でき、熱による損傷も無いことが確認できた。

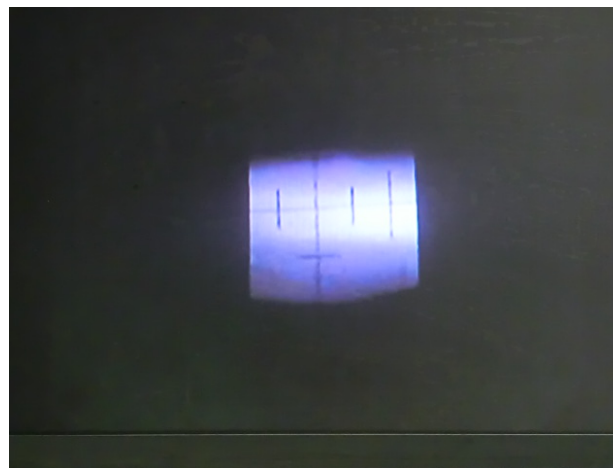


写真 6:  $3\ \mu\text{A}$ でのスポット確認



今後、更にビーム電流を上げて 20  $\mu\text{A}$  以上でのテストや、エネルギー、核種を変えてテストを行っていく予定である。

### 3. ビームバンチャーの改良

既設のビームバンチャーは電力効率の高い整合回路を用いた正弦波型のビームバンチャーである。正弦波型のビームのバンチャーは、鋸歯状波型のビームバンチャーに比べ、理論的にビームバンチ効率が低い。そのため、鋸歯状波型のビームバンチャーへの改良を進めており、これまで、垂直入射ビームラインに設置されている電極について、ダブルギャップからシングルギャップへの改造が行われた。今回は、電極に電圧を発生させるシステムの改造を行った。これまで用いてきた正弦波のみを発生させる整合回路から、鋸歯状波に対応した広帯域の増幅器とインピーダンス変換回路を用いたシステムへの変更を行った。今後、Low-level 回路の改良を行い、鋸歯状波でのビームバンチを行い、ビーム強度の増強を目指す予定である。

### 4. 老朽化対策

老朽化の対策として、メインプローブ、ビームスリット、制御系のような各所の改修を進めている。

メインプローブでは、真空シール、位置検出、プローブ先端ヘッドの改良を行った[1]。まず、駆動シャフトの二重 X リングによる真空シール部にリークが発生しリングの交換を定期的にも実施しても、改善されない状態になってきていた。そのため、二重 X リングの中間をロータリーポンプで真空排気し、低真空層として真空悪化が加速箱内に影響しないように対処を行った。位置検出部では、多回転ポテンショメータを用いていたのに対して、ワイヤーエンコーダーを用いたものに改良を行った。プローブ先端ヘッドでは、O リングシールを用いていたのに対し、フィードスルーを用いたものへの改良を行った。

入射ラインのビームスリットでは、30 年以上前に製作された取出し後のビーム輸送ライン用のスリットを流用していたもので、イオン源に近い真空リークが問題となっていた。そのため、駆動シール部にベローズを用いた、新たなスリットの設計製作を行った。また、サイクロトロンからの取出し後のビーム輸送ラインである C-5 に設置されているスリットの制御系の更新を行った。

また、垂直入射ラインの制御系では PLC での制御化を進めており今回は、ステアリング電磁石電源の制御を PLC からの制御に切り替えている。今後、その他の電源や、ファラデーカップ、スリットなどの制御について、随時 PLC 化を進めていく予定である。

### 参考文献

- [1] 北條 悟、杉浦彰則、片桐 健、中尾政夫、野田 章、岡田高典、高橋勇一、込山明仁、本間壽廣：  
NIRS-930 のメインプローブについて 独立行政法人放射線医学総合研究所第 8 回技術と安全の報告  
会，2014/3/11 報告集(ISBN 978-4-938987-91-6) OP-07/33



### 3. サイクロトロンの分子プローブの製造・開発への利用状況

## サイクロトロンのも子プローブの製造・開発への利用状況

PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF MOLECULAR PROBES USING CYCLOTRON IN 2013

張 明榮、河村 和紀、根本和義、鈴木 寿、菊池 達矢、永津弘太郎、藤永  
雅之、武井 誠

Ming-Rong Zhang, Kazunori Kawamura, Kazuyoshi Nemoto, Hisashi Suzuki,  
Tatsuya Kikuchi, Kotaro Nagatsu, Masayuki Fujinaga and Makoto Takei

放射線医学総合研究所分子イメージング研究センター分子認識研究プログラム

### 概要

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

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

### 1. 分子プローブの開発研究状況

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

- 1) ヨウ化 $^{11}\text{C}$ メチル、 $^{18}\text{F}$ フッ素イオン、 $^{18}\text{F}$ フルオロ臭化エチル、 $^{11}\text{C}$ ホスゲン、 $^{11}\text{C}$ シアレン、 $^{11}\text{C}$ 一酸化炭素などの標識合成中間体及びこれらを利用した標識技術を駆使し、多種多様の分子プローブの開発と自動合成を行った。
- 2) 有機アニオン排出輸送体を始めとする各種のトランスポーターなどの PET プローブを数種開発した。また、代謝型グルタミン酸 I 型受容体、トランスロケータタンパク質、脂肪酸アミド加水分解酵素などの種々の生体タンパク質をターゲットとする PET プローブを開発した。さらに、多様の動物モデルを使用し、これらのプローブを評価し、有用性が高いプローブを創出するこ

とができた。

- 3) 代謝型グルタミン酸 I 型受容体 PET プローブ [ $^{11}\text{C}$ ]ITTM の臨床研究を引き続き行っている。また、研究所で開発した新規タウイメージング剤 [ $^{11}\text{C}$ ]PBB3 について安定した製造法及び品質検査法を確立し、国内外多くの施設に製造技術及び品質検査技術の移転と指導を実施した。
- 4) 市販される Tc-99m 標識キットについて標識効率評価を行い、Tc-99m の還元を要しない標識法を採用する場合に良好な結果が得られることを確認した。
- 5) 診断並びに内用療法への利用が期待できるその他の核種として、Ge-68、At-211 及び Cu-67 の遠隔製造法を確立し、医療用途に活用できる核種ライブラリーの充実を図った。当該ライブラリーの拡充に関し、Ac-225 を対象にその製造に関する基礎的評価を行っている。さらに、Zr-68、Cu-64、Mg-28、I-124 などの核種も製造し、共同研究を行った。

## 2. 分子プローブの生産・提供状況

平成 25 年度に製造した短寿命放射性薬剤は、腫瘍診断（メチオニン、S-dThd、FDG、FAZA）脳機能測定（PBB3、BTA、ラクロプライド、FLB、M2、MP4P、FMeNER、FEPE2I）等の臨床利用、サル、ラット、マウスなどの動物実験（WAY、SCH、S-dThd、Ac-5216、FLT、FMISO など）、校正用ファントム線源（F-など）等へ提供した。また、サイクロトロン棟の大型サイクロトロンを利用して製造を行った  $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$  ジェネレータ、 $^{28}\text{Mg}$  水溶液、 $^{68}\text{Ge}$  水溶液などを 5 研究機関に合計 43 回の譲渡を行った。

なお、平成 25 年度に製造した標識化合物の種類、生産量、提供量を表 1 に、被験者数を図 1 に、生産・提供回数の推移を図 2 にそれぞれ示した。

表1. 平成25年度に製造した標識化合物および生産量

| 核種                | 化合物                 | 生産量      |       | 診断供給量   |       |         | 動物供給量  |      | 譲渡      |      |
|-------------------|---------------------|----------|-------|---------|-------|---------|--------|------|---------|------|
|                   |                     | GBq      | (回数)  | GBq     | (回数)  | (人数)    | GBq    | (回数) | GBq     | (回数) |
| <sup>11</sup> C   | PBB3                | 204.671  | (133) | 75.358  | (72)  | (72)    | 4.645  | (11) |         |      |
|                   | BTA                 | 152.495  | (83)  | 75.667  | (75)  | (76)    | 3.071  | (9)  |         |      |
|                   | RAC                 | 104.097  | (39)  | 16.657  | (34)  | (34)    | 5.421  | (11) |         |      |
|                   | FLB                 | 34.152   | (18)  | 3.896   | (12)  | (13)    | 4.664  | (9)  |         |      |
|                   | SCH                 | 22.76    | (11)  | 1.034   | (4)   | (4)     | 4.874  | (8)  |         |      |
|                   | M2                  | 45.276   | (24)  | 5.93    | (4)   | (4)     | 5.888  | (14) |         |      |
|                   | WAY                 | 30.127   | (17)  | 1.449   | (2)   | (2)     | 5.553  | (9)  |         |      |
|                   | MNPA                | 2.57     | (1)   | 0.281   | (1)   | (1)     |        |      |         |      |
|                   | MP4P                | 12.56    | (4)   | 1.17    | (1)   | (1)     | 0.72   | (1)  |         |      |
|                   | MET                 | 1411     | (170) | 815.541 | (290) | (425)   | 12.49  | (2)  |         |      |
|                   | S-dThd              | 71.11    | (21)  | 4.875   | (6)   | (6)     | 10.226 | (11) |         |      |
|                   | DASB                | 19.516   | (9)   |         |       |         | 6.502  | (9)  |         |      |
|                   | DAA                 | 3.64     | (4)   |         |       |         | 1.847  | (4)  |         |      |
|                   | Ro1788              | 8.423    | (4)   |         |       |         | 2.012  | (4)  |         |      |
|                   | PE2I                | 4.72     | (1)   |         |       |         | 0.612  | (1)  |         |      |
|                   | PK11195             | 6.82     | (6)   |         |       |         | 3.145  | (5)  |         |      |
|                   | Ac5216              | 18.449   | (9)   |         |       |         | 4.961  | (8)  |         |      |
|                   | CH3I                | 40.853   | (95)  |         |       |         |        |      |         |      |
| その他               | 938.6636            | (723)    |       |         |       | 127.652 | (187)  |      |         |      |
| <sup>15</sup> O   | H2O                 | 55.945   | (12)  |         |       |         | 32.19  | (11) |         |      |
| <sup>18</sup> F   | FDG                 | 362.823  | (69)  | 239.155 | (127) | (236)   | 0.752  | (5)  |         |      |
|                   | FMeNER              | 43.776   | (38)  | 9.757   | (33)  | (33)    | 0.444  | (1)  |         |      |
|                   | FEtPE2I             | 36.995   | (23)  | 10.061  | (14)  | (17)    | 2.518  | (5)  |         |      |
|                   | Altanserin          | 24.708   | (14)  | 13.002  | (14)  | (14)    | 0.93   | (3)  |         |      |
|                   | MPPF                | 5.069    | (8)   | 0.358   | (1)   | (1)     | 2.017  | (5)  |         |      |
|                   | FAZA                | 16.98    | (13)  | 8.545   | (8)   | (8)     | 0.218  | (1)  |         |      |
|                   | FEtDAA              | 1.25     | (1)   |         |       |         | 0.326  | (1)  |         |      |
|                   | FLT                 | 26.685   | (13)  |         |       |         | 6.747  | (13) |         |      |
|                   | NaF                 | 5.24     | (2)   |         |       |         | 2.79   | (2)  |         |      |
|                   | FMISO               | 16.905   | (5)   |         |       |         | 11.921 | (5)  |         |      |
|                   | F-                  | 46.198   | (19)  |         |       |         | 31.181 | (9)  |         |      |
|                   | その他                 | 124.0586 | (146) |         |       |         | 3.144  | (19) |         |      |
| <sup>28</sup> Mg  | 水溶液                 | 0.02032  | (6)   |         |       |         |        |      | 0.02032 | (6)  |
| <sup>62</sup> Cu  | Cu-ATSM             | 0.51     | (1)   |         |       |         |        |      |         |      |
| <sup>64</sup> Cu  | 水溶液                 | 24.1124  | (17)  |         |       |         | 13.015 | (21) |         |      |
| <sup>62</sup> Zn  | <sup>62</sup> Zn/Cu | 94.165   | (19)  |         |       |         | 0.54   | (1)  | 93.625  | (37) |
| <sup>68</sup> Ge  | 水溶液                 | 0.006    | (1)   |         |       |         |        |      | 0.00074 | (1)  |
| <sup>86</sup> Y   | 水溶液                 | 0.4954   | (4)   |         |       |         | 0.074  | (2)  |         |      |
| <sup>89</sup> Zr  | 水溶液                 | 2.173    | (3)   |         |       |         | 1.24   | (3)  |         |      |
| <sup>124</sup> I  | 水溶液                 | 0.96     | (3)   |         |       |         | 0.89   | (3)  |         |      |
| <sup>211</sup> At | 水溶液                 | 0.142    | (7)   |         |       |         |        |      |         |      |

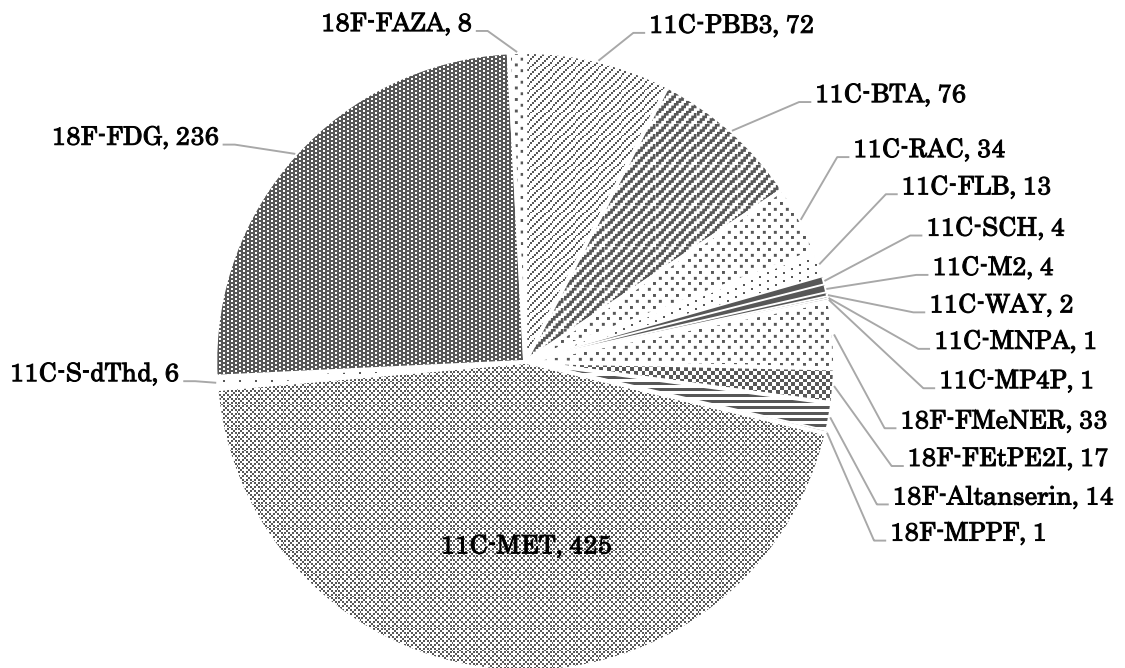


図1.平成25年度における被験者数（947人）

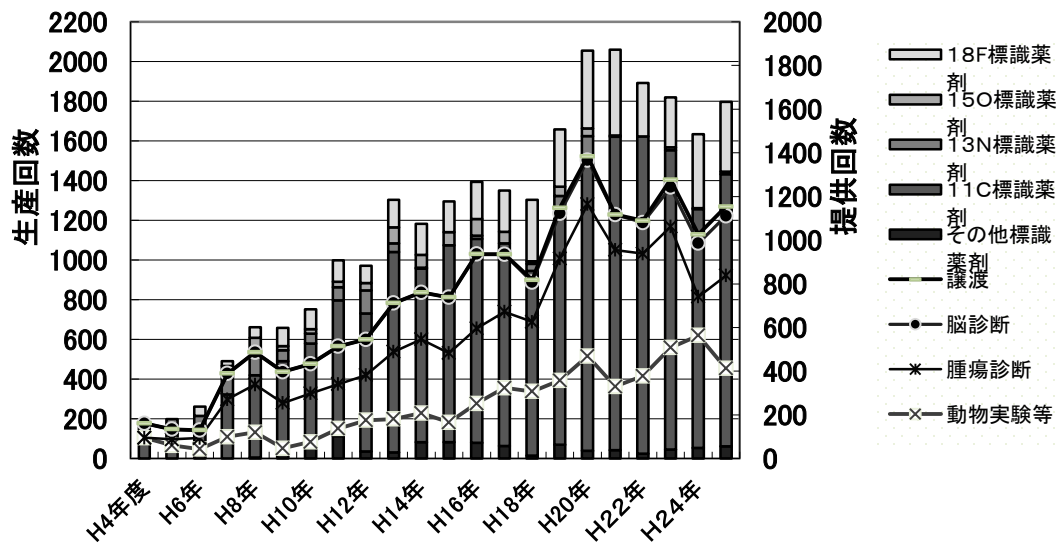


図2.生産回数と提供回数の推移

## 4. 物理研究

- 4-1. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究
- 4-2. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究
- 4-3. 最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定
- 4-4. 核破碎片生成二重微分断面積の測定
- 4-5. 陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究



# 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究

## STUDY OF FUNDAMENTAL TECHNOLOGY FOR HIGH PRECISION PROTON THERAPY

西尾 禎治<sup>A</sup>、松下 慶一郎<sup>B</sup>、中村 哲志<sup>B</sup>、余語 克紀<sup>C</sup>、恒田 雅人<sup>C</sup>  
青野 裕樹<sup>C</sup>、田中 創大<sup>D</sup>、稲庭 拓<sup>E</sup>、杉浦 彰則<sup>F</sup>、北條 悟<sup>F</sup>  
Teiji Nishio<sup>A</sup>, Keiichirou Matsushita<sup>B</sup>, Satoshi Nakamura<sup>B</sup>, Katsunori Yogo<sup>C</sup>,  
Masato Tsuneda<sup>C</sup>, Yuuki Aono<sup>C</sup>, Soudai Tanaka<sup>D</sup>, Taku Inaniwa<sup>E</sup>, Akinori Sugiura<sup>F</sup>, Satoru Hojo<sup>F</sup>  
A : 国立がん研究センター東病院臨床開発センター粒子線医学開発分野

B : 立教大学大学院理学研究科

C : 北里大学大学院医療系研究科

D : 東京大学大学院工学系研究科

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

F : 放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

### 概要

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

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

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

### 1. 目的

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

本年度の研究では、前年度に引き続き、陽子線照射領域可視化による高精度陽子線治療を実現するために、入射陽子とターゲット原子核との標的原子核破砕反応によって、ターゲット（患者体内中の腫瘍）中で生成される多種のポジトロン放出核の特性を実験的に把握すること、また、陽子線 CT 画像取得システムの開発と陽子線照射実験による計測データ収集と陽子線 CT 画像の取得である。

### 2. 実験方法

本研究では、患者体内中での陽子線照射領域可視化における標的原子核破砕反応のメカニズム解明に関する研究、陽子線 CT 画像取得法の確立に関する研究の2本柱に大別される。尚、マシンタイムの割り当て時間に応じて調整しながら実験を実施して行く。全ての実験において、利用する陽子線のエネルギー

ギーは最大 (70MeV)、ビーム強度は実験用途に合わせて最大 50nA までを用いる。また、標的原子核破碎反応メカニズム解明のための実験は C6 及び C8 コース、陽子線 CT 画像取得法確立のための実験は C8 コースで実施する。照射前にはそれぞれの実験用途に合わせて、装置の設置や信号系回路の調整、ビームモニター設定などを実施する。照射後は設置した装置の撤去を行う。

## 2-1. 標的原子核破碎反応メカニズム解明のための実験

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

標的原子核破碎反応による照射領域可視化で人体構成要素として重要とされる、炭素核、酸素核及びカルシウム核に対する生成ポジトロン放出核の陽子線エネルギーごとの生成量を BOLPs で観測するために、ポリエチレン (CH<sub>2</sub>)、水 (H<sub>2</sub>O : ゼラチン質にした物) 及び酸化カルシウム (CaO) を照射ターゲット (図 1 右参照) とした実験を行う。70MeV の陽子線をそれぞれのターゲットへ照射した。生成断面積は mb 単位で非常に小さいため、多くの陽子線照射を必要とする。また、生成ポジトロン放出核の半減期は数秒から 20 分であり、更に陽子線照射中は即発ガンマ線及び中性子線による高いバックグラウンドがあるため、陽子線照射は短時間で実施されることが要求される。陽子線の照射は 5nA・3 秒照射で実施した。陽子線の照射野形状は 3mm (FWHM) ×8mm (FWHM) のガウス分布に近い形状であった。陽子線照射開始直前から 30 分間の消滅ガンマ線計測を実施した。尚、ターゲットに対し、陽子線の進行方向及びその方向に直交する重力方向の生成ポジトロン放出核の activity プロファイルの観測ができるように BOLPs を設置した。C6 コースのペンシルビーム的な大強度の陽子線照射実験では、それぞれの照射ターゲットで生成されるポジトロン放出核の陽子線進行方向、即ち、陽子線のエネルギー変化に伴う activity 分布形状を計測する。また、C8 コースのワブラーで拡大された照射野での低い強度での陽子線を利用し、ビームライン上に設置した線量モニター値に対する照射ターゲット中の全エネルギー積算での activity 量を実験で求めることで、入射陽子数に対する activity 量の関係を導出する。

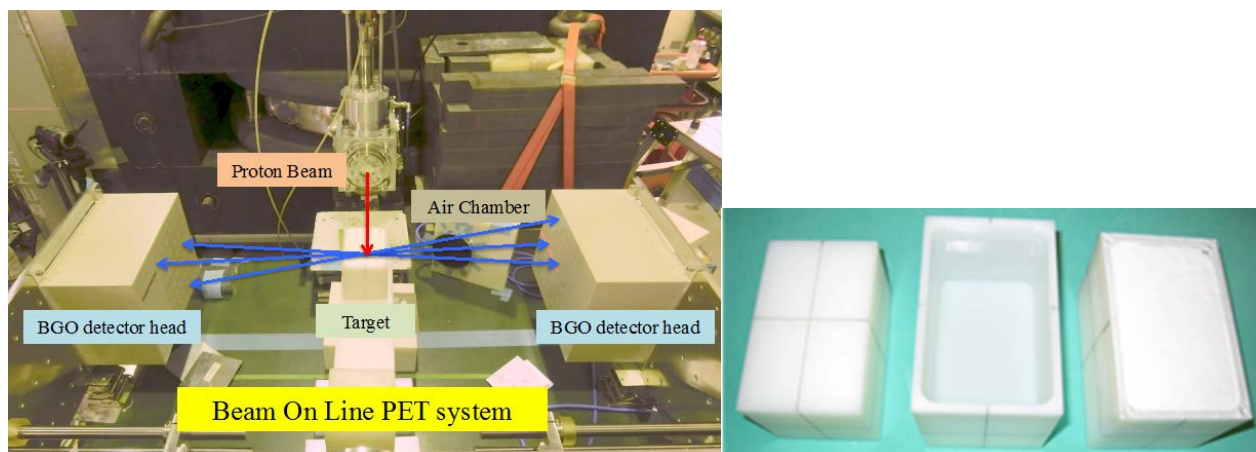


図 1 : C6 コースにおける BOLPs の設置 (左) と照射ターゲット : 左からポリエチレン、水、酸化カルシウム (右) の写真。

## 2-2. 陽子線CT画像取得法確立のための実験

プロトタイプの陽子線 CT 画像取得システムを 20cm×20cm×5cm のプラスチックシンチレーター (PS) 検出器と CMOS カメラ、被写体回転テーブルを用いて構築した (図 2 参照)。本システムにより、10cm 照射野の陽子線を回転テーブル上の回転する被写体に照射し、PS 検出器の 20cm×20cm 面で被写体を通過後の陽子線の照射位置及びその位置での発光量を計測することで、2次元発光量プロファイルデータを取得する。PS 検出器の発光量は、検出器内で失う陽子線のエネルギーに相当するので、陽子線の被写体通過前後での発光量の差分量が被写体の位置ごとのエネルギー吸収量に相当したデータとなる。

プロトタイプ陽子線 CT 画像取得システムでの実験では、回転する様々な物質及び形状の被写体に陽子線を照射し、被写体通過後の陽子線エネルギーの残量を PS 検出器で発光量として計測する。ワブラーで照射野を形成した 70MeV の陽子線の強度を 3nA 程に調整して、回転被写体ごとに 5 分ほど陽子線を照射し、その PS 検出器の発光量を計測する。

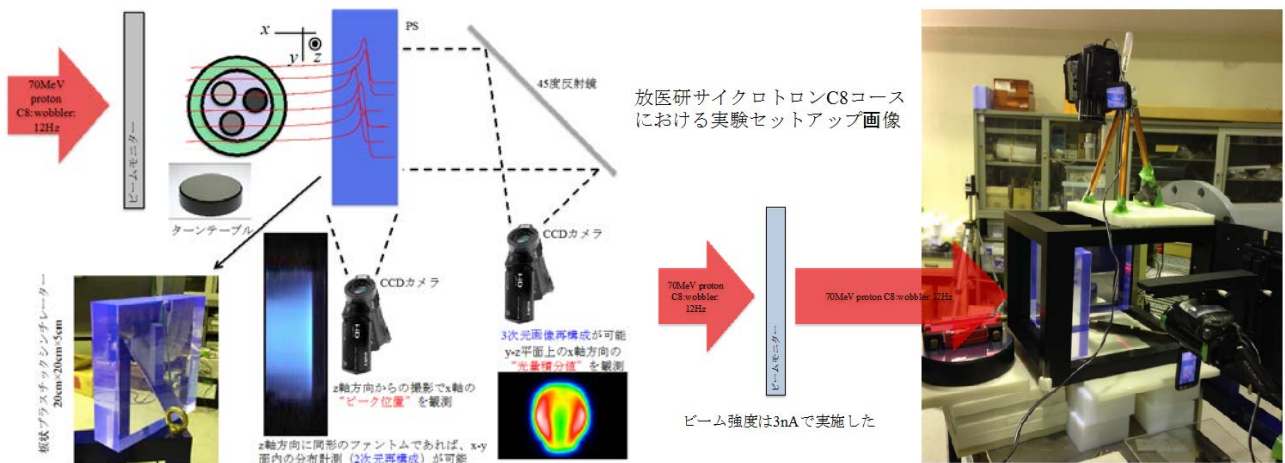


図 2 : 陽子線CT画像取得システムの概念図 (左) 及びC8コースに設置したプロトタイプ陽子線CT画像取得システムの写真 (右)。

### 3. 実験結果

#### 3-1. 標的原子核破碎反応断面積値

図 3 は、基礎研究用 BOLPs による、ポリエチレン、水、酸化カルシウムターゲットごとの activity 分布の計測結果の例である。図中の activity 分布において、左側から右側が陽子線の進行方向となる。Activity 分布の横方向はそれぞれのターゲットでの深部位置での activity を示しており、深部位置がゼロ (左端) の位置では 70MeV の陽子線照射による activity 計測の結果に相当し、ターゲットごとの陽子線の阻止能計算に基づくエネルギー減衰によって、それぞれの深部位置での陽子線エネルギーを算出できる。そのため、深部位置が深くなるに連れて低い陽子線エネルギーに対する activity 計測の結果を示していることになる。

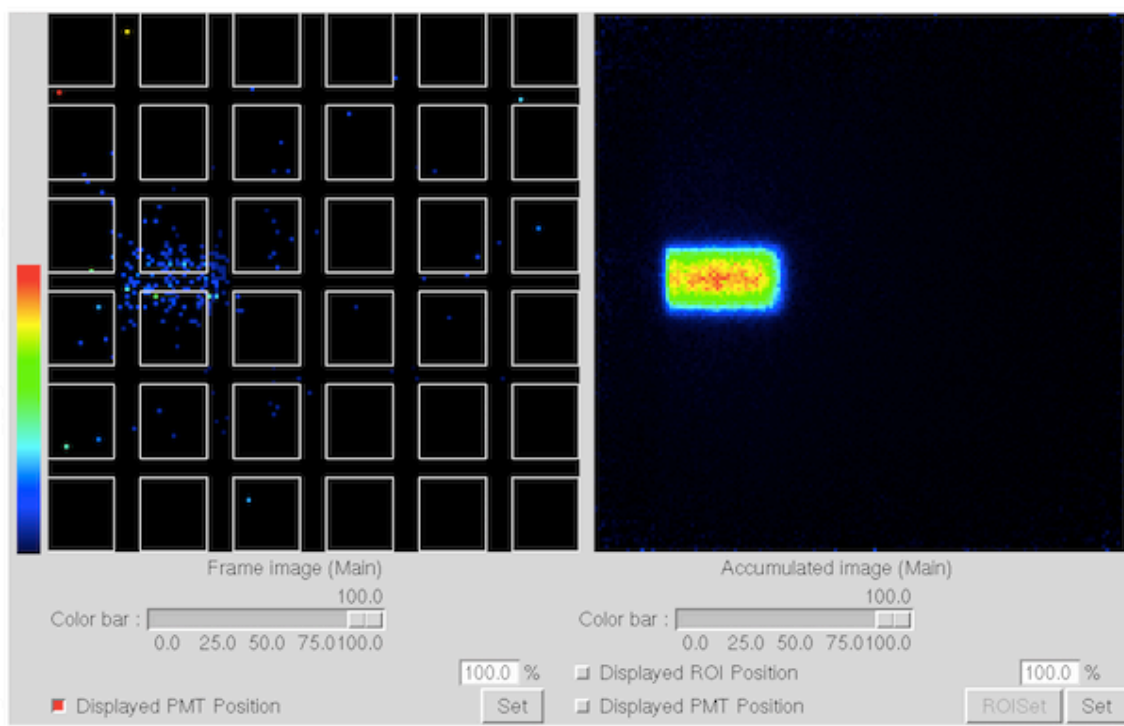


図 3 : 基礎研究用 BOLPs によって実測された activity 分布の計測画面。

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

図4は、ポリエチレンターゲットへの陽子線照射実験結果によって導出された、陽子線エネルギーに対する $^{12}\text{C}(p,pn)^{11}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}(p,p2n)^{10}\text{C}$ の標的原子核破砕反応断面積値の実験結果である。取得した $^{11}\text{C}$ の反応断面積データはNNDCに報告されているデータと比較し、エネルギー依存形状の一致度は高かった。その一方、絶対値としては20%程度大きな値となっており、また、低エネルギー側で断面積のグラフに形状の不一致が見られた。これらの問題は現状エネルギーストラグリングを考慮に入れておらずその影響が考えられる。更に、照射ビームのビーム形状による入射粒子数変化、消滅ガンマ線計測率シミュレーション結果の詳細評価などの考慮が必要であり、今後の課題である。 $^{10}\text{C}$ に関しては本研究で測定したエネルギー範囲では反応断面積データが報告されておらず、世界初のデータを取得したことになる。但し同様に、得られた断面積データの精度についての詳細検証が更に必要である。尚、ポリエチレンターゲットへの陽子線照射実験データと同様に、その他のターゲットに対する実験データを取得したが、そのデータ解析及び反応断面積値の導出は、今後の実施課題である。

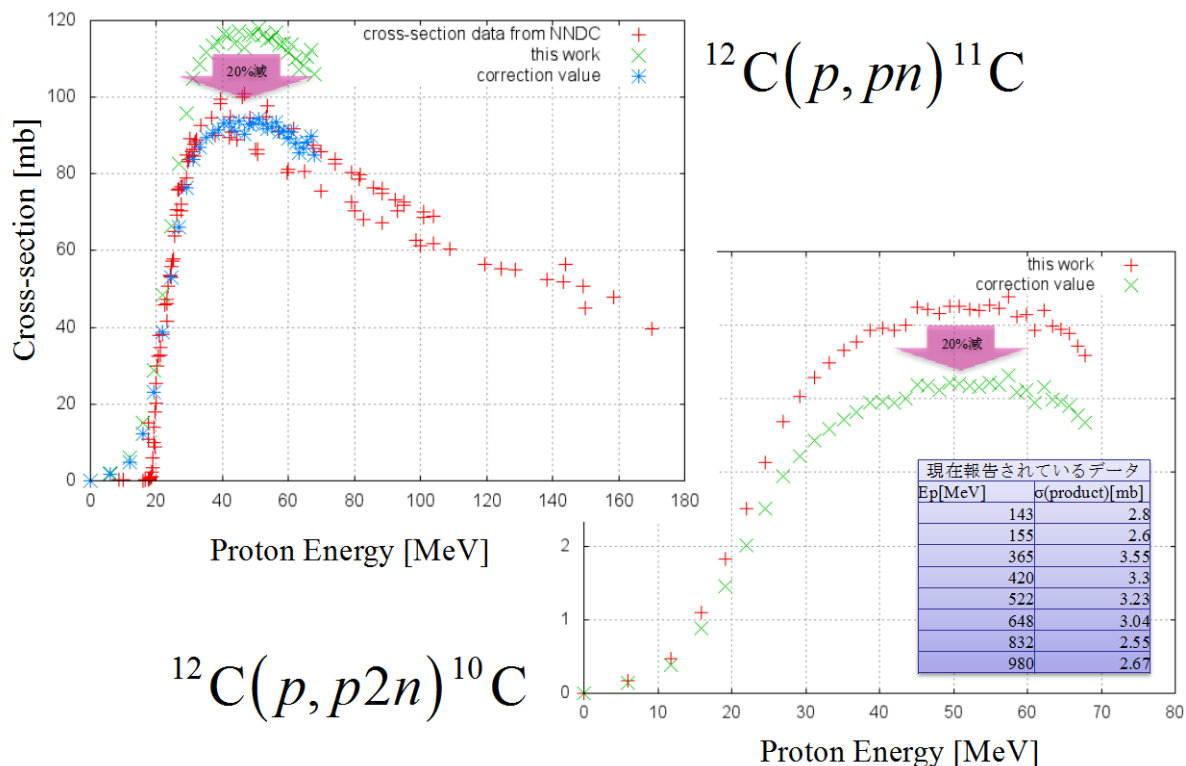


図4：陽子線エネルギーに対する $^{12}\text{C}(p,pn)^{11}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}(p,p2n)^{10}\text{C}$ の標的原子核破砕反応断面積値の実験結果。

### 3-2. 陽子線 CT 画像

プロトタイプ陽子線 CT 画像取得システムを用いた陽子線照射実験を行った。被写体回転テーブルの中心から1 cm の位置に、2.5cmφ 円筒容器に封入した水、エタノール、リン酸水素二カリウム水溶液を設置した(図5左参照)。陽子線照射より、サンプルを通過後の陽子線の2次元発光量プロファイルである、即ち、陽子線の物質中でのエネルギー損失量をパラメータとする水等価物質厚を投影データである Protography の画像を得ることができた。図5右は、円筒容器に封入した水に対する Protography の画像結果である。被写体回転テーブルによって、360度方向からの Protography 画像データを取得し、FBP (Filtered Back Projection) 法により陽子線 CT 画像化した結果が図6左である。尚、図6中はモンテカルロ計算コード：PHITS によるシミュレーション計算結果、図6右はサンプルでの陽子線散乱効果を無視した場合に得られる理想的画像の結果である。サンプルの直径や回転テーブル中心点からの設置位

置に関しては高い精度が得られた。その一方で、陽子線 CT 画像の画素値は水で 1.0 が理想値であるのに対して 1.0 近傍の値となつてはいるが、その値にはばらつきが生じていた。実験より得られた陽子線 CT 画像では、サンプルの容器のエッジ領域で 2-3mm 幅のスパイク的な形状が現れた。この現象は、PITHS によるシミュレーション計算結果から、サンプルの容器と空気の境界領域における陽子線散乱効果が寄与していることを確認した。

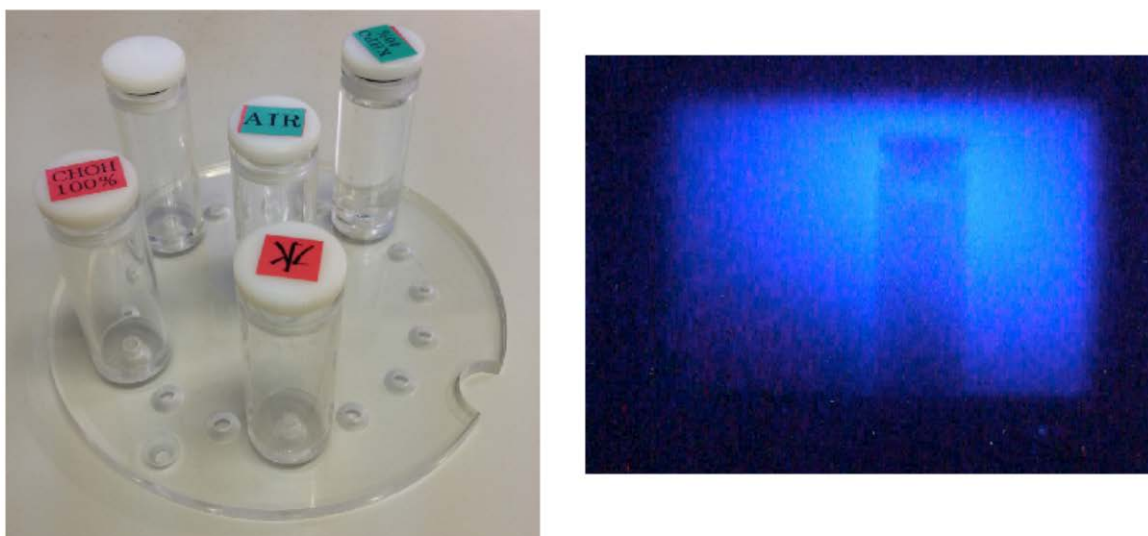


図 5：陽子線 CT 画像用照射サンプル例（左）及び陽子線照射より得られた 2 次元発光量プロファイル (Protography) の実験結果。

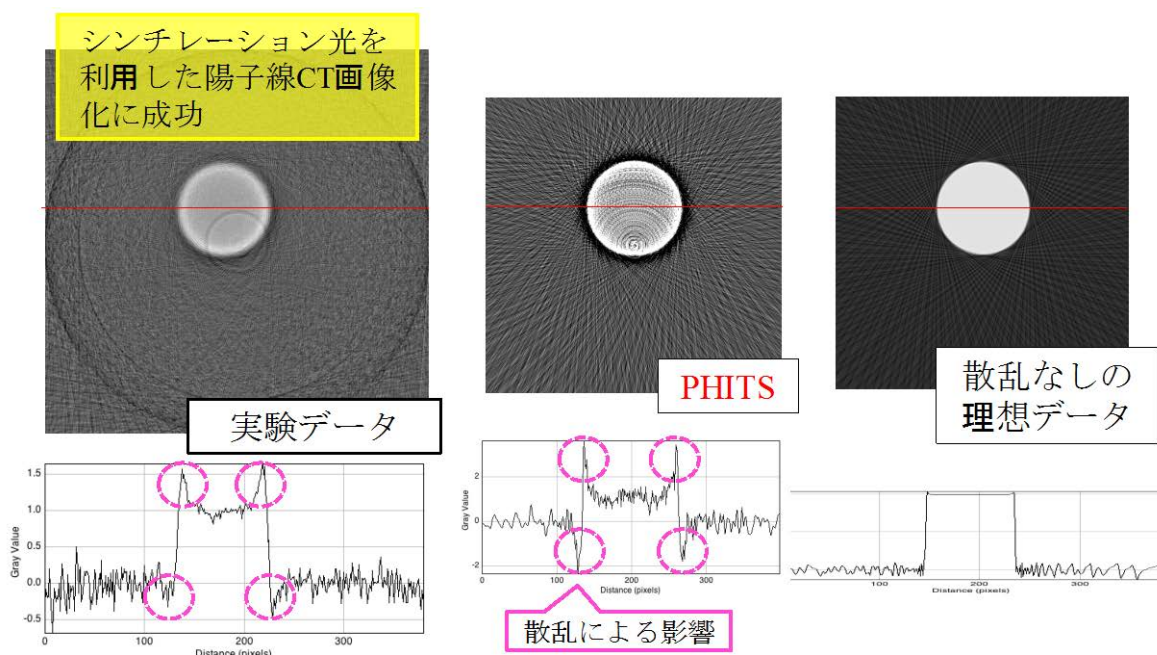


図 6：円筒形容器に封入した水に対する陽子線 CT 画像結果（左）、PHITS によるシミュレーション計算結果（中）、及びサンプルでの陽子線散乱効果を無視した理想的画像の計算結果（右）。

円筒形容器のサンプルと同様に複雑形状の亚克力製サンプルを被写体回転テーブル中心点か 1cm の位置に設置した。図 7 は複雑形状サンプル及びその各断面の 2 次元再構成画像の重ね合わせによる 3 次元陽子線 CT 画像の再構結果である。尚、再構成手法としてはノイズ低減のために ML-EM (Maximum Likelihood Expectation Maximization) 法を用いて行った。この結果から、検出システムなどの高精度検出化に向けたハード面の開発だけではなく、陽子線の散乱効果を考慮した画像再構成法を確立することが重要な要素であることが本実験結果から確認できた。

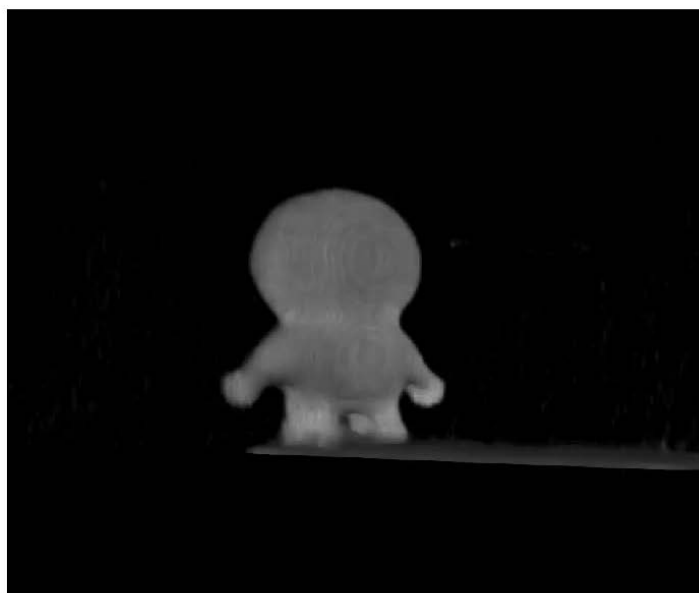


図7：アクリル製複雑形状サンプル（左）と ML-EM 法による3次元陽子線 CT 画像結果（右）。

#### 4. まとめ

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

標的原子核破碎反応メカニズムの解明においては、特にこれまで、報告数が少ないまたは全く無いエネルギー領域での入射陽子核と炭素核との反応断面積値を実験より導出することができた。陽子線 CT 画像については、PS 検出器の発光量から照射サンプル中でのエネルギー損失を計測する手法の検証と陽子線 CT 画像を得ることに成功した。

今後も2つの大別されたテーマを主軸とする研究を遂行すると共に、平成26年度は実験データの精度向上を図る予定である。

#### 参考文献

- [1] PTCOG data : Patientstatistics-update02Mar2009.pdf
- [2] A. Miyatake, T. Nishio, T. Ogino, “Development of activity pencil beam algorithm using measured distribution data of positron emitter nuclei generated by proton irradiation of targets containing  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  and  $^{40}\text{Ca}$  nuclei in preparation of clinical application,” Med. Phys. 38(10), 5818-5829 (2011).
- [3] T. Nishio, A. Miyatake, T. Ogino, K. Nakagawa, N. Saijo, H. Esumi, “The development and clinical use of a beam ON-LINE PET system mounted on a rotating gantry port in proton therapy,” Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 76(1), 277-286 (2010).
- [4] T. Nishio, T. Ogino, K. Nomura, H. Uchida, “Dose-volume delivery guided proton therapy using beam ON-LINE PET system,” Med. Phys. 33(11), 4190-4197 (2006).

# 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究

## BIOPHYSICAL INVESTIGATION ON THE INITIAL PROCESS OF HEAVY-ION IMPACT

大澤大輔<sup>A</sup>、俵博之<sup>B</sup>、曾我文宣<sup>C</sup>、野田章<sup>C</sup>、野田耕司<sup>C</sup>  
D. Ohsawa<sup>A</sup>, H. Tawara<sup>B</sup>, F. Soga<sup>C</sup>

A : 京大RIセンター

B : 核融合研

C : 放医研

### 研究成果概要

去年度に引き続き、6.0 MeV/u  $O^{8+}$ 、 $O^{5+}$ 入射にて水蒸気へのイオン衝突における二次電子生成二重微分断面積(DDCS)を測定した。測定二次電子エネルギーは全角度方向(20~160°)に対して1 keV~10 keVとなっている。得られた $O^{5+}$ 入射のDDCSエネルギースペクトルでは、二体衝突ピーク、ELC(Electron Loss to Continuum)ピークが観測された。二体衝突ピークは等速 $O^{8+}$ 入射の場合とほぼ一致し、ELCピークは電子配置の違い(He様とLi様)を反映して、等速 $C^{4+}$ 入射の場合より大きな放出を示した。

### 1. 目的

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

本研究の目的は、ブラッグピーク領域のエネルギー(数MeV/u)を持つ重イオン衝撃により水蒸気から放出される二次電子線のエネルギー及び角度分布を測定し、既存の理論と比較しうる高精度な二次電子生成二重微分断面積 $d^2s/dEd\Omega$ (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. 実験方法

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

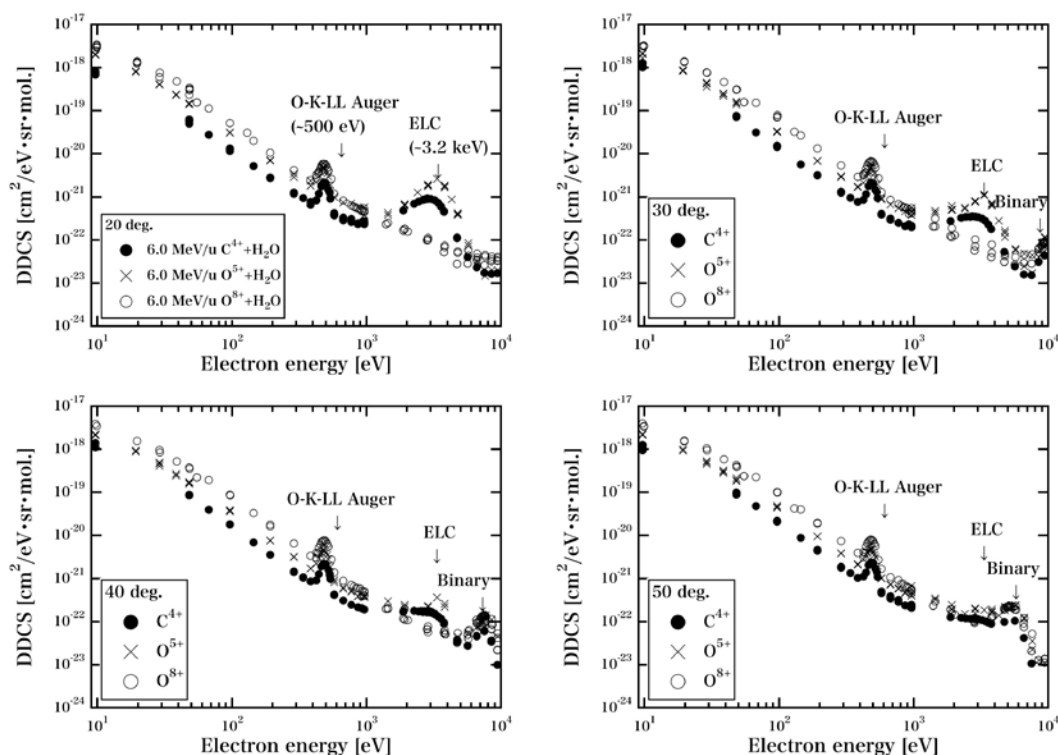
去年度に引き続き、6.0 MeV/u  $O^{8+}$ 、 $O^{5+}$ 入射にて水蒸気へのイオン衝突における二次電子生成二重微

分断面積(DDCS)を測定した。ブラッグピーク領域の高速イオンは水中で完全電離しており、非完全電離イオンの二次電子生成断面積はトラック構造解析の入力データとしては寄与しない。しかしながら、非完全電離イオン( $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $Ne^{6+}$ )では入射イオン内の軌道電子のために、完全電離イオン( $C^{6+}$ 、 $O^{8+}$ 、 $Ne^{10+}$ )に比べてイオンポテンシャルの遮蔽による電子放出の減少と軌道電子の離脱による電子放出の増加の2つの寄与が新たに加わり、また、これら2つの寄与は二次電子エネルギー領域で異なることが予想されるため、原子物理学上、大変興味深い。特に、水蒸気へのブラッグピーク領域の $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $Ne^{6+}$ 入射については、 $C^{6+}$ 、 $O^{8+}$ 、 $Ne^{10+}$ 入射と同様に実験値がないため、得られる断面積は二次電子放出の理論研究にも貢献できると考えられる。

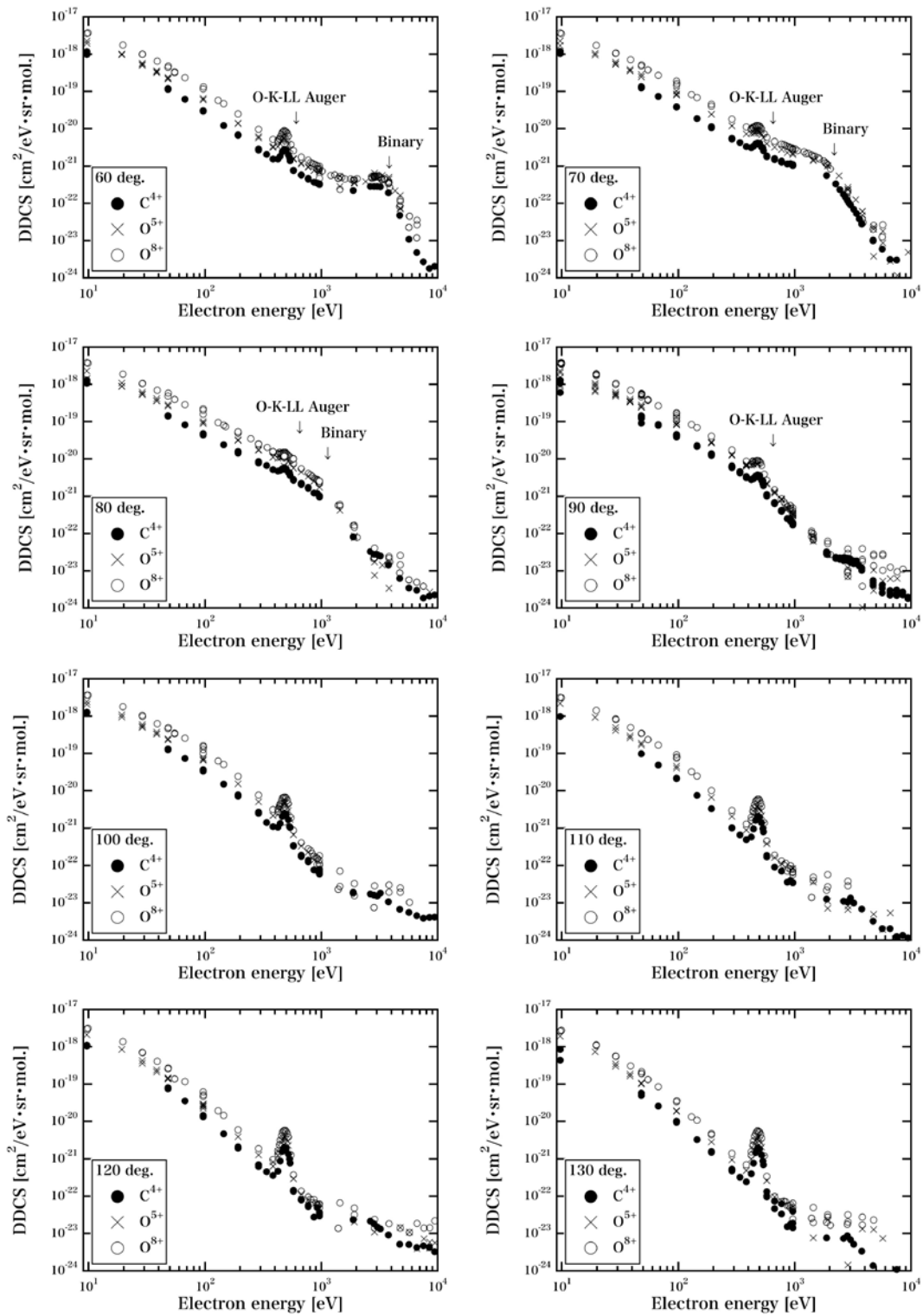
$O^{8+}$ 、 $O^{5+}$ 入射では、Cu 製冷却カバーを用い、マスフロー流量 10~30 sccm、入射イオン電荷量 15  $\mu C$  にて、測定角度 20~160°まで 10°刻み、二次電子エネルギー1 keV~10 keV の二次電子(SE)計数を測定した。Cu 製冷却カバーは放出水蒸気の氷結捕獲効率が良く、マスフロー流量 10~30 sccm 時とマスフローオフ時とで真空度に大きな変化がないため、残留水蒸気からのバックグラウンド(BG)寄与は少ないとし、マスフローオフ時の計数を BG としている。SE と BG とから DDCS を求め、以前に測定した等速  $C^{4+}$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

### 3. 実験結果

図1に結果を示す。一般に、二次電子放出は二次電子エネルギーのほぼ2乗に比例して減少するため、 $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $O^{8+}$ 入射とも二次電子エネルギーの増加に従い、いくつかのピークを除いて急激に減少を示している。また、 $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $O^{8+}$ 入射とも全角度で~490 eV に  $H_2O$  由来の O-K-LL Auger ピーク、さらに、前方向(20~90°)で二体衝突(binary encounter)ピークが観測された。 $O^{5+}$  と  $O^{8+}$  入射の比較では、高エネルギー領域(>1 keV)において、両者で二体衝突ピークも含めてほぼ一致しており、 $O^{5+}$  の遮蔽効果は高エネルギー領域では見られないことが確認できた。 $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$  入射では前方向(20~50°)優勢で~3.2 keV に幅広の ELC(Electron Loss to Continuum)ピークが観測された。ELC ピークは非完全電離イオン内の軌道電子が標的原子との衝突で離脱した直後、入射イオンのクーロン力により前方に入射イオンとほぼ等速で引っ張られてできるピークである。 $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$  の電子配置の違い(He 様と Li 様)を反映して、等速  $C^{4+}$  入射の場合より大きな放出を示した。







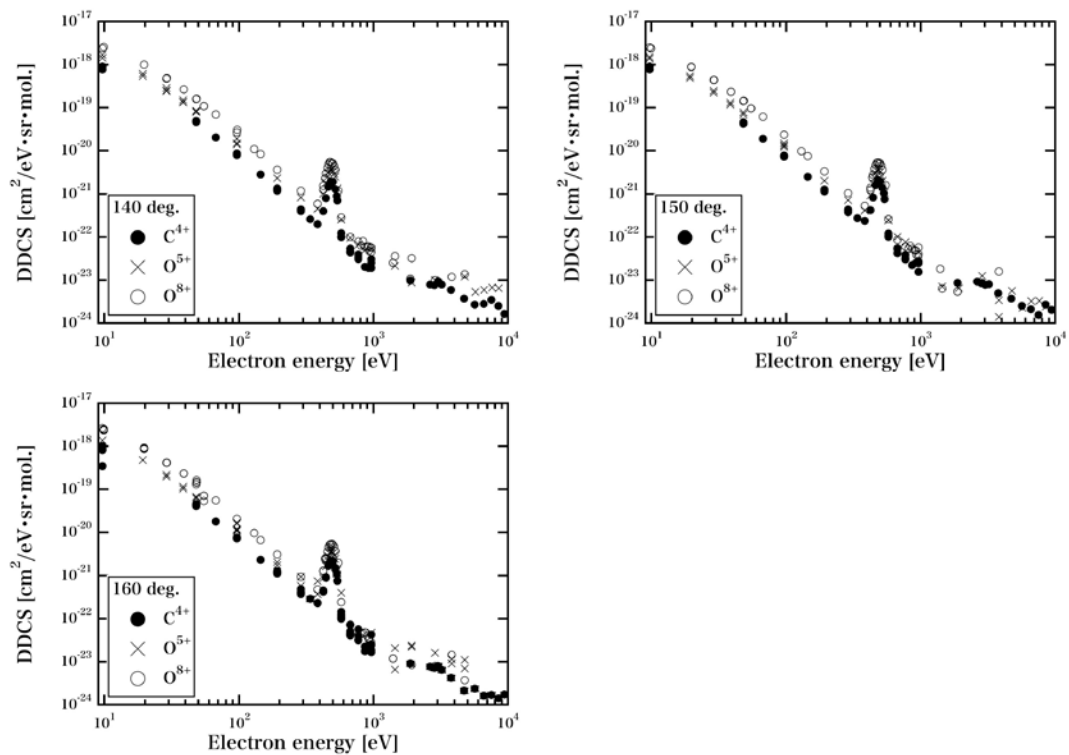


図1. 水蒸気への6.0 MeV/u  $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $O^{8+}$ 入射による二次電子生成二重微分断面積(DDCS)エネルギースペクトル

#### 4. まとめ

水蒸気への6.0 MeV/u  $O^{8+}$ 、 $O^{5+}$ 入射で、全角度方向(20~160°)に対して二次電子エネルギー1 keV~10 keVにわたる二次電子生成二重微分断面積(DDCS)を測定した。来年度から  $Ne^{6+}$ 、 $Ne^{10+}$ 入射で測定を開始する予定であり、これまでの  $He^{2+}$ 、 $C^{4+}$ 、 $C^{6+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $O^{8+}$ 入射と比較することで、二体衝突ピーク、ELCピークのZ依存性、特に、 $C^{4+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $Ne^{6+}$ の電子配置の違いによる効果について議論したいと考えている。

# 最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定

## MEASUREMENTS OF CHARGED PARTICLE PRODUCTION CROSS SECTIONS AT MOST FORWARD ANGLES

魚住 裕介<sup>A</sup>、山田 剛広<sup>B</sup>、和西航平<sup>B</sup>、橋口 太郎<sup>B</sup>、米重 英成<sup>C</sup>、  
古場 裕介<sup>C</sup>、高田 真志<sup>D</sup>

Yusuke Uozumi<sup>A</sup>, Takahiro Yamada<sup>B</sup>, Kohei Wanishi<sup>B</sup>, Taro Hashiguchi<sup>B</sup>,  
Hidenaru Yoneshige<sup>C</sup>, Yusuke Koba<sup>D</sup>, Masashi Takada<sup>E</sup>

<sup>A</sup>: 九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門

<sup>B</sup>: 九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻

<sup>C</sup>: 九州大学工学部エネルギー科学科

<sup>D</sup>: 放射線医学総合研究所重粒子医科学センター

<sup>E</sup>: 放射線医学総合研究所緊急被ばく医療研究センター

### 概要

原子核反応モデルの開発と検証に用いる目的で、過去に測定例のない最前方角での(p,p'x)反応二重微分断面積の整備を目指して実験を開始している。C6 コースに散乱チェンバーを設置し、大型サイクロトロンからの 40 MeV 陽子を使用して、散乱角度 6° から 30° までの 6 点で二重微分断面積を測定した。強いバックグラウンドが存在するため、注意深い測定が重要となっている。バックグラウンドは、シミュレーションによるバックグラウンドの調査を行っている。得られた測定データは、過去の実験値および理論計算の結果と比較して検証した。

### 1. 目的

粒子輸送コードPHITS [1]は粒子線医療等多くの応用分野で利用されており、コードの改良は現在でも進められている。特にエネルギー範囲20-100MeVでの核反応計算の精度向上が要望されている。このため、核反応モデルであるINC (Intranuclear Cascade) モデルを100MeV以下のエネルギー領域まで拡張する必要がある。我々は(p,p'x)反応に関する最近の研究 [2] において、回折効果と集団励起とを適切に取り扱う事により、INCコードの予測精度を大幅に改善できる事を示した。(p,p'x)反応の場合、集団励起の影響は20° より前方の二重微分断面積において強く現れ、10° より前方で特に顕著となる。このため、最前方角での(p,p'x)反応実験データを用いた検証が重要となる。しかし、ゼロ度近傍の最前方データは過去に測定例がなく、新しく実験を行ってデータを取得しなければならない。平成23年度から、最前方角での(p,p'x)反応の二重微分断面積測定をNIRSの大型サイクロトロン施設で開始している。ゼロ度近傍の測定については、ビームの直接的影響や強い弾性散乱の影響等バックグラウンド要因が大きく、バックグラウンド除去が容易ではない。バックグラウンドを正確に取り除くため、ビームプロファイル測定を含めたバックグラウンド測定方法を調査し、データ収集をおこなう。

### 2. 実験とデータ解析

実験は NIRS の大型サイクロトロンを用い、C6 コースにおいて実施した。入射粒子には 40 MeV 陽子を、ターゲットには厚さ 100 μm の <sup>12</sup>C、<sup>181</sup>Ta その他を用いた。ターゲットは昨年度に製作した真空チェンバーの中に設置した。検出器は真空チェンバー外の大気中に置くため、チェンバー窓には厚さ 50 μm のカプトンフィルムを用いた。カウンターテレスコープは、半導体検出器(SSD) 2 枚と GSO(Ce)結晶シンチレータから構成した。シンチレータの信号は光電子増倍管により読み出した。測定を行った角度は 6° 9° 12° 15° 20° 30° であった。

6° 9° 等の前方測定では、ビーム電流を低く抑える必要があるが、微弱なビーム電流ではファラデーカップが正常に動作しなくなる。このため、ビーム粒子数の計数用にビームモニターを製作、設置して使用した。ビームモニターはチェンバー下流に置いた厚さ 500 μm の <sup>12</sup>C 板からの散乱線を、そこから 30° 方向の位置に置いたプラスチックシンチレータ 2 枚で同時計数するような構成とした。ビームモニターの較正は、ファラデーカップが正確に動作するビーム強度において、ビーム強度[pA]を変化させていき、それに対応するビームモニターのカウント数を測定して、ビーム強度とカウント数と関係性を求め、これを用いた。実験で使用するビーム強度の範囲において、良好な線形性が確認できた。実験方法の詳細およびデータ解析については、平成 23 年度の報告 [3] を参照されたい。

バックグラウンドを確定する目的で、ビームプロファイルの測定を行った。測定にはガフクロミックフィルムを用い、ターゲットの上流と下流とで、それぞれターゲット有りとの条件で行った。ターゲットとしてTaを用いた。撮像データはimageJにより画像解析しおり、その例を図1に示している。このデータは、ターゲット下流での縦および横の広がりであり、PHITSの値（実線）も共に示している。

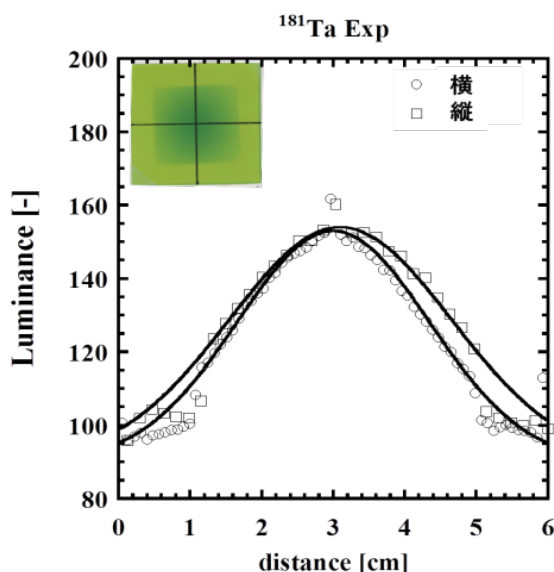


図1：ターゲットチェンバー下流でのビーム形状。

### 3. 結果と考察

図2と3に結果の例として40 MeVでの $^{12}\text{C}(p, p'x)$  反応、 $^{181}\text{Ta}(p, p'x)$  反応のDDXスペクトルを示している。図中にはCCONEコードによる計算結果を実線で示している。CCONEは、弾性散乱ピークについては光学模型計算の結果を、検出器の分解能を考慮して幅を広げて表示している。連続スペクトル領域は、エキシトンモデルで計算している。弾性散乱ピークは、 $^{12}\text{C}$ と $^{181}\text{Ta}$ の両ターゲットについて実験値と計算値はほぼ一致している。

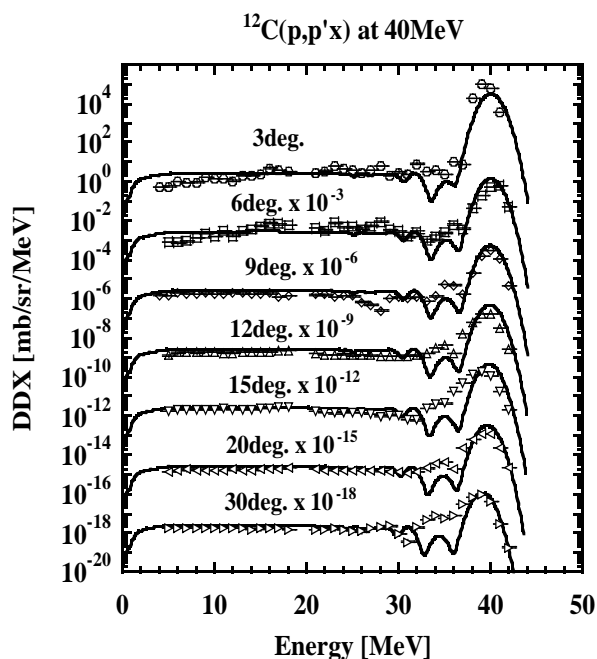


図2  $^{12}\text{C}(p, p'x)$  反応 DDX および CCONE 計算[4]の結果。

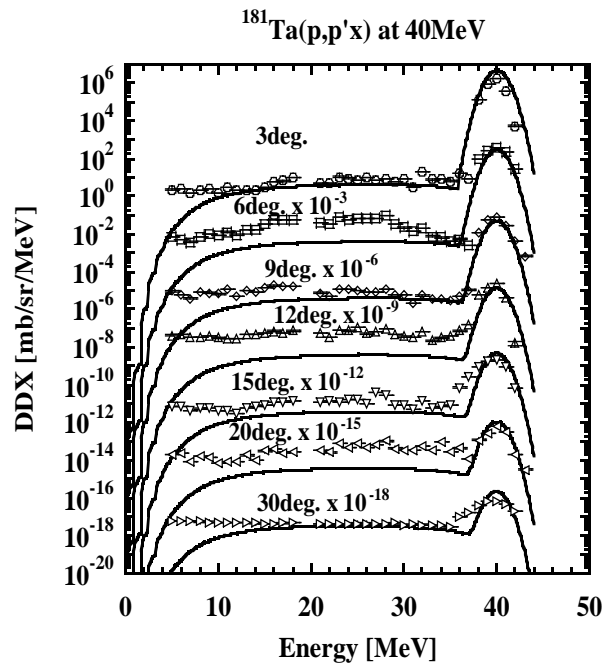


図3  $^{181}\text{Ta}(p, p'x)$  反応 DDX および CCONE 計算[4]の結果。

連続スペクトル領域に着目すると、 $^{12}\text{C}$  ターゲットの場合、実験値は計算結果と比較的良好な一致が見られる。一方、 $^{181}\text{Ta}$  ターゲットの場合は、実験値は計算値よりも大きな値となっている。データ確定までにバックグラウンドについて再確認をする必要があると考えられる。

## 5. まとめ

散乱角度  $6^\circ$  から  $30^\circ$  までの最前方において、 $(p, p'x)$  反応の二重微分断面積測定を行った。ターゲットとして  $^{12}\text{C}$ 、 $^{181}\text{Ta}$  等を、ビームとして 40 MeV 陽子を用いた。新しくビームプロファイルの測定を行ったことで、PHITS 計算との比較からバックグラウンドに関する理解が深まったが、データの精度向上に向けては更なる改善が必要である。現時点では、測定法と解析法共に不確かさが残っている。今後はこれらを確認させて測定済みのデータを確定したい。その後は標的核と入射ビームエネルギーについて幅広い範囲でデータを収集して反応断面積の系統性を明らかにしていく計画である。

## 参考文献

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

# 核破碎片生成二重微分断面積の測定

## DOUBLE DIFFERENTIAL CROSS SECTION OF FRAGMENT PRODUCTION

佐波 俊哉<sup>A</sup>、古場 裕介<sup>B</sup>、高田 真志<sup>B</sup>

Toshiya. Sanami<sup>A)</sup>, Yusuke Koba<sup>B)</sup>, Masashi. Takada<sup>B)</sup>

<sup>A</sup> : 高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 放射線科学センター

<sup>B</sup> : 放射線医学総合研究所

### 概要

平成 25 年度の放医研サイクロトロンの実験では、核破碎片生成の入射粒子種による依存性の解明を目的として、25 MeV、50 MeV 陽子に対するベリリウム、炭素、窒素、酸素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットに対する核破碎片生成二重微分断面積測定を行った。また、測定粒子と角度の拡充を目的に検出器の改良を行った。

### 1. 目的

高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所からなる当グループでは核破碎片生成二重微分断面積の入射粒子依存性を明らかにすることを目的として、放医研サイクロトロンを利用した実験データの取得を行っている。これまでの研究[1-10]により、陽子、重陽子、ヘリウム原子核、炭素入射に対するベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅ターゲットからの核破碎片生成二重微分断面積が得られている。これらの実験データと理論計算の結果を比較することにより、核破碎片生成にはその前段階に当たる核子-核子散乱過程でのエネルギーと核子の放出が寄与していることがわかってきた。核子-核子散乱過程で放出される粒子は陽子、重陽子、三重陽子、ヘリウム原子核などの比較的軽い粒子であり、これまである程度の実験データが得られているが、核破碎片と同時に測定された例は殆どない。そこで、平成25年度の放医研サイクロトロンの実験では、これまでの核破碎片生成二重微分断面積測定と平行して、測定対象粒子の拡充を目的とした検出器の改良を行うこととした。本報告では、検出器の改良についてその概要と試験結果について述べる。

### 2. 測定器の改良

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

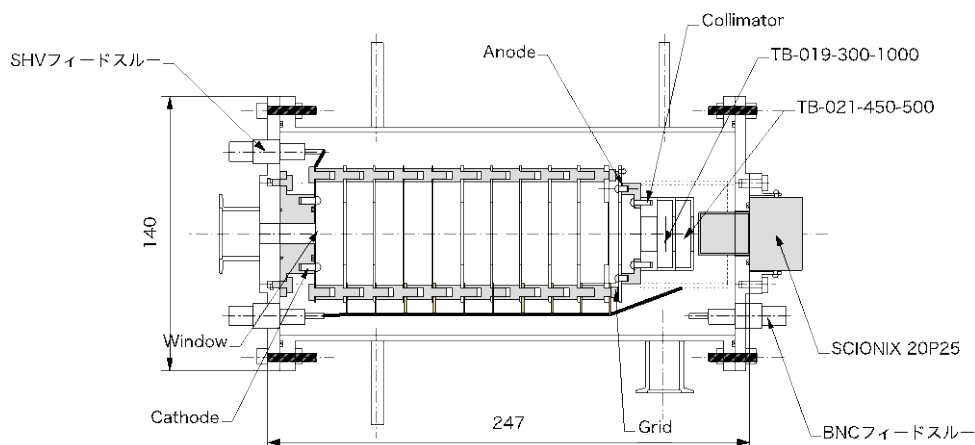


図 1 改良型 BCC の断面図

うこととした。

図1に新たに設計した改良型のBCCを示す。アノードと検出器フランジの間に70mm程度のスペースを設けて、アノード用前置検出器と半導体検出器、CsIシンチレータを組み込み可能な形状とした。アノード用前置検出器としては、これまで用いているクリアパルス社製581型を利用した。半導体検出器はセイコーEG&G社製のTB-019-300-1000 (SSD 1000 $\mu\text{m}$ )、TB-021-450-500 (Veto SSD 500 $\mu\text{m}$ )を組み込んだ。CsIシンチレータはSCONIX 20P25を組み込む予定であるが、納期の問題により、まだ組み込まれていない。図2にアノードと前置増幅器の部分の写真を示す。信号はBNCフィードスルーにより取り出し、前置増幅器の電源はDsub9ピンのフィードスルーで供給している。半導体検出器のアーチャーはアノード電極の後段の銅製のコリメータにより決めている。

検出器の外形はフランジ部で140mmとした。これは以前の230mmに比べ100mm小さくなった。外形が小さくなったことによりこれまでの最前方の測定角度の30度を20度にする事が出来るようになった。接続フランジはICF70からNW25としてチェンバーとの脱着が容易出来るようにした。外径を小さくしたことから、極板半径も70mmと小さくした。極板の保持はアノード側に多くの機器が入ることから、従来とは反対方向のカソード側から積み上げる方式とした。積み上げにはテフロン支柱を廃し、汎用のPEEKスペーサを用いることにした。これにより堅牢性が増し、電極の脱落などの問題が無くなる事が期待される。

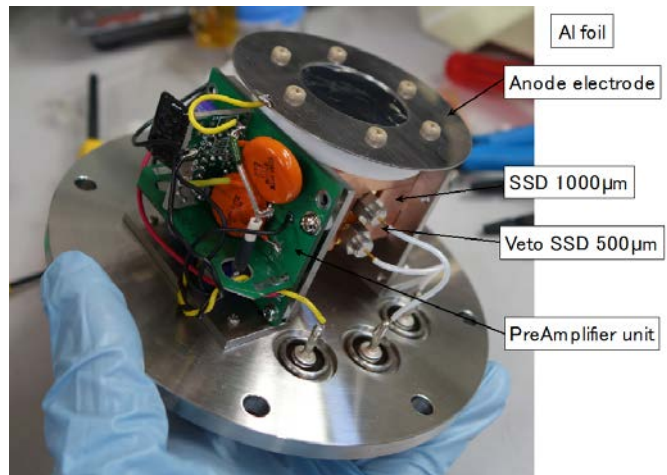


図2 アノード極板、前置増幅器部分の写真

### 3. ビーム試験

検出器のビーム試験は放射線医学総合研究所の大型サイクロトロン(NIRS-930)のC6コースにて行った。実験装置の配置、手法はこれまでと同様である[1-10]。主な変更点は、(1)BCCの入射窓は陽子を測定することを考慮に入れて、タングステンメッシュサポート付の4 $\mu\text{m}$ 厚のアルミナイズドマイラーを使用、(2)BCCのアノードとカソードとブラックピーク、2つのSSDの波高信号をA3000データ収集システムによりタイムスタンプ付セルフトリガリストで収集、の2点である。従来使用していたSiN入射窓はフレーム部が500 $\mu\text{m}$ のシリコンになっており、陽子が貫通して信号を作ることが出来るために(1)とした。また、これまで使用していたアノードとカソードの同時計数をトリガーとする回路に2つのSSD同時計数条件をORで組み合わせるとトリガー条件とそのための回路が煩雑になること、陽子を収集対象に加えたためにデータ収集レートが高くなったので、VMEを用いた高速なデータ収集系であるA3000を使用し、タイムスタンプを元にイベントを再構成した。

改良型BCCを散乱チェンバーの30度方向に設置し、50 MeV陽子を4 $\mu\text{m}$ 厚みのポリエチレン膜に入射して取得したデータを図3に示す。左上はBCCのブラックピークとエネルギーのプロットで、右上のBCCのカソードとエネルギーとエ

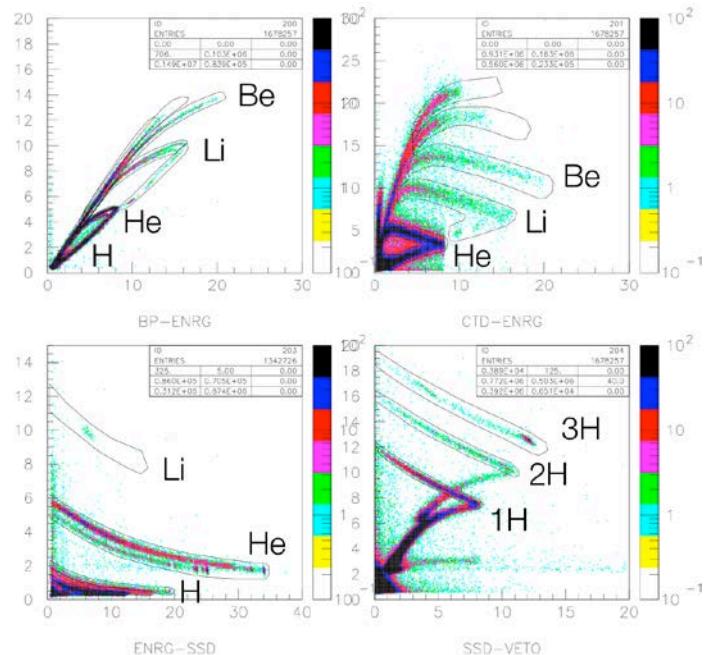


図3 50 MeVの陽子が4 $\mu\text{m}$ 厚みのポリエチレン膜に入射した際に生成した二次粒子を改良型BCCで測定して得た二次元スペクトル 左上:BCCのブラックピークとエネルギー、右上:BCCのカソードとエネルギー、左下:BCCとSSDの $\Delta E-E$ 、右下SSDとVetoの $\Delta E-E$

エネルギーのプロットで決めた分離下限値を元に He 以上の粒子の分離を行っている。左下は BCC と SSD による  $\Delta E$ -E プロットで陽子からリチウムまでが測定されている。右下は SSD と Veto の  $\Delta E$ -E プロットで陽子、重陽子、三重陽子が測定されている。

図 4 には図 3 の水素同位体部分の弁別の拡大図を示す。左上のブラックカーブとエネルギーの弁別図において BCC において水素同位体の分離が出来ていることがわかる。この分離下限値は陽子で約 1 MeV であり、6  $\mu\text{m}$  厚みのシリコンに相当する。粒子弁別の下限を下げるにはカソードとエネルギーの 2 次元図に基づく粒子弁別が有効であるが、カソード信号の S/N が十分でないために弁別が出来ていない(図 3)。他に測定下限を下げる方法としてはエネルギー-TOF 法がある。測定下限を下げることにより、核破砕片測定で明らかになったクーロン障壁による粒子放出の抑制の系統性を見ることが出来ると期待される。

図 4 の左下に示す BCC と SSD による  $\Delta E$ -E では SSD の下限測定エネルギーが 1 MeV 程度になっているが、これはエネルギー補正前の値であり、SSD の前にある試料、BCC 入射窓、BCC の検出ガス、アノード板のアルミ厚み、を補正することにより、陽子は 2 MeV、ヘリウムで 10 MeV 程度となる。一方上限エネルギーについてはエネルギー付与が小さくなることから、分解能が十分でなく、粒子弁別が難しい。BCC で粒子弁別が出来ていることも考え合わせ、BCC の検出ガス厚みなどを調整する事によるエネルギー付与割合について検討が必要である。

図 4 の右下に示す SSD と Veto による  $\Delta E$ -E でも同様に下限測定エネルギーを決めると陽子で 13 MeV 程度、三重陽子で 20 MeV 程度になる。上限エネルギーについては現状では突き抜け粒子が重なっており限られているが、CsI 検出器を組み合わせることにより、改善されると考えられる。

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

### 3. 実験結果

図 5 に陽子、重陽子、三重陽子、ヘリウム原子核のエネルギースペクトルの測定値と計算値、図 6 にリチウム、ベリリウム、ボロン、炭素のエネルギースペクトルの測定値と計算値を示す。実験値は BCC のみ、BCC-SSD の組み合わせ、SSD-VETO の組み合わせで求めたデータを分けて示す。計算値は PHITS コードバージョン 2.52 である。物理オプションはデフォルトを用いた。

表 1 には各検出器で測定できているエネルギー範囲について、エネルギー損失補正こみの値を示す。BCC では下限値が水素同位体について 1 から 1.5 MeV、上限値は 2 から 3.5 MeV であり範囲が狭いが、半導体検出器のみで構成される  $\Delta E$ -E 検出器では実現が難しい極めて低いエネルギー領域を測定できている。BCC と BCC-SSD の測定範囲のギャップはアノード板でのエネルギー損失によるものである。アノード板として今回はアルミニウム 10  $\mu\text{m}$  厚を用いたが、振動ノイズ等は見られなかったので、さらに薄くしてこのギャップを狭めることが可能であると考えられる。BCC-SSD で測定できているエネルギー領域は水素同位体について 3 から 20.0 MeV、SSD-VETO で測

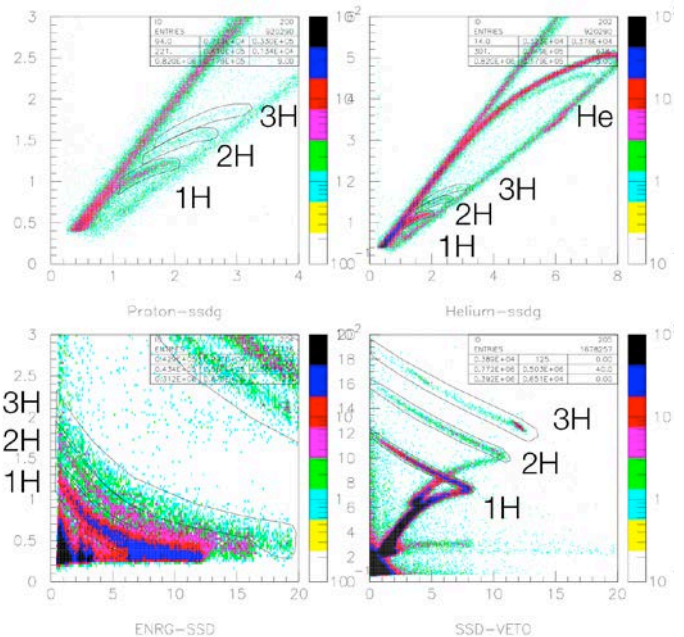


図 4 図 3 の陽子弁別の部分の拡大図。左上及び右上: BCC のブラックピークとエネルギー、左下: BCC と SSD の  $\Delta E$ -E、右下 SSD と Veto の  $\Delta E$ -E

表 1 各粒子同定方法のエネルギー範囲

|          | BCC         | BCC-SSD  | SSD-VETO |
|----------|-------------|----------|----------|
| Proton   | 1~2 MeV     | 3~6.5    | 13~16    |
| Deuteron | 1.5~3 MeV   | 3.5~8.5  | 17~21.5  |
| Triton   | 1.5~3.5 MeV | 3.5~20.0 | 20.5~    |
| Helium   | 1~18 MeV    | 10.0~    |          |
| Lithium  | 5 MeV~      |          |          |



定できているエネルギー領域は 13MeV 以上である。BCC-SSD と SSD-VETO の間の測定できていない

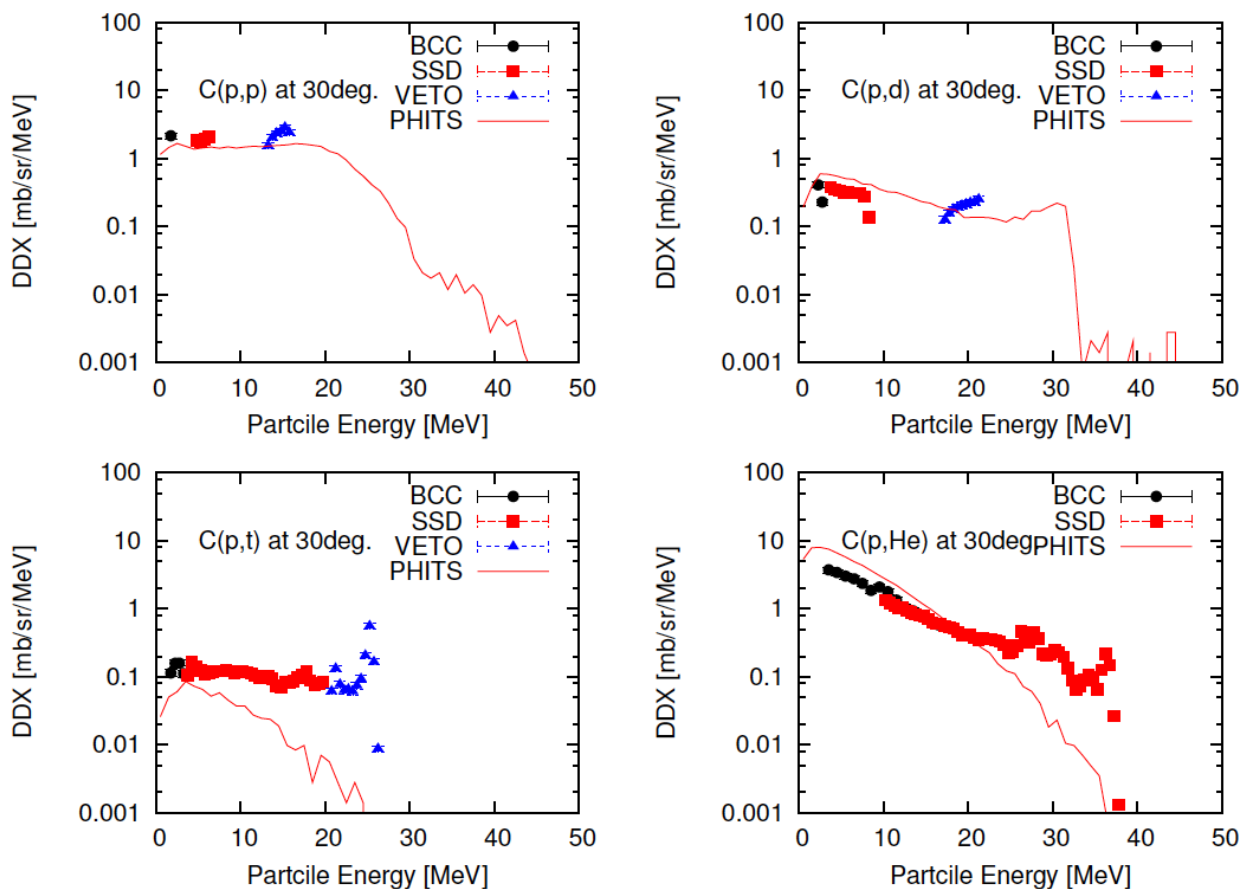


図 5 陽子、重陽子、三重陽子、ヘリウム原子核のエネルギースペクトルの測定値と計算値。実験値は BCC のみ、BCC-SSD の組み合わせ、SSD-VETO の組み合わせで求めたデータを分けて示す。計算値は PHITS コードによるもの。

エネルギー領域が広いのは、BCC のエネルギー分解能に比べ SSD の厚みが厚いことに原因があると考えられる。厚みを現状の半分以下にすることにより、BCC へのエネルギー付与が十分な領域に BCC-SSD の分布をとどめることが出来、結果として粒子弁別能が向上すると考えられる。SSD-VETO の上限については、今後 CsI 検出器を併用することにより改善が期待できる。

計算結果は概ね実験値を再現しているものの、三重陽子、ヘリウム原子核の高エネルギー部について過小評価している傾向が見られる。

#### 4. まとめ

平成 25 年度のマシンタイムにおいてはデータ取得に加え、検出器の改良を試みて、核破碎片のみで無く、陽子、重陽子、三重陽子、ヘリウム原子核のデータを包括的に取得する目処が得られた。

#### 参考文献

- [1] T. Sanami *et al.*, “Measurement of fragment production DDX of 72 and 144 MeV  $^{12}\text{C}$  beam induced reaction on carbon using Bragg Curve Counter”, *Proc. 2009 Symp. Nucl. Data*, JAEA-Conf 2010-005 (2010).
- [2] T. Sanami *et al.*, *Nucl. Instrm. Meth.* **A589** 193 (2008).
- [3] M. Hagiwara *et al.*, *Nucl. Instrm. Meth.* **A592** 73 (2008).
- [4] M. Hagiwara *et al.*, “Measurements of Double Differential Fragment Production Cross Sections of Silicon for 70 MeV Protons”, *Proc. 2005 Symp. Nucl. Data*, JAEA-Conf 2006-009 (2006).
- [5] T. Sanami *et al.*, “Recent progress of fragment measurement from tens of MeV proton induced reaction

using Bragg Curve Counter”, *Proc. 2008 Symp. Nucl. Data*, JAEA-Conf 2009-004 (2009).

[6] T. Sanami *et al.*, "Fragment DDX measurement of proton induced reactions on light-medium nuclei for energy range from reaction threshold to a few hundred MeV ", *Journal of Korean Physics Society* 59, 1805-1808 (2011).

[7] T. Sanami *et al.*, “Experimental studies of light fragment production cross section for nucleon induced reaction at intermediate energies”, *Proc. 2010 Symp. Nucl. Data* (JAEA-Conf 2011-002) (2011).

[8] M. Hagiwara *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **49(6)** 571-587 (2012).

[9] T. Sanami *et al.*, “Angular distribution of light fragments for proton induced reaction at intermediate energies”, *Proc. 2011 Symp. Nucl. Data* (JAEA-Conf 2012-001) 189 (2012).

[10] T. Sanami *et al.*, "Target Dependency of Light Mass Fragment Production DDX for 6 MeV/u Carbon Induced Reaction" *Proc. 2012 Symp. Nucl. Data* (JAEA-Conf 2013-002) 185 (2013).

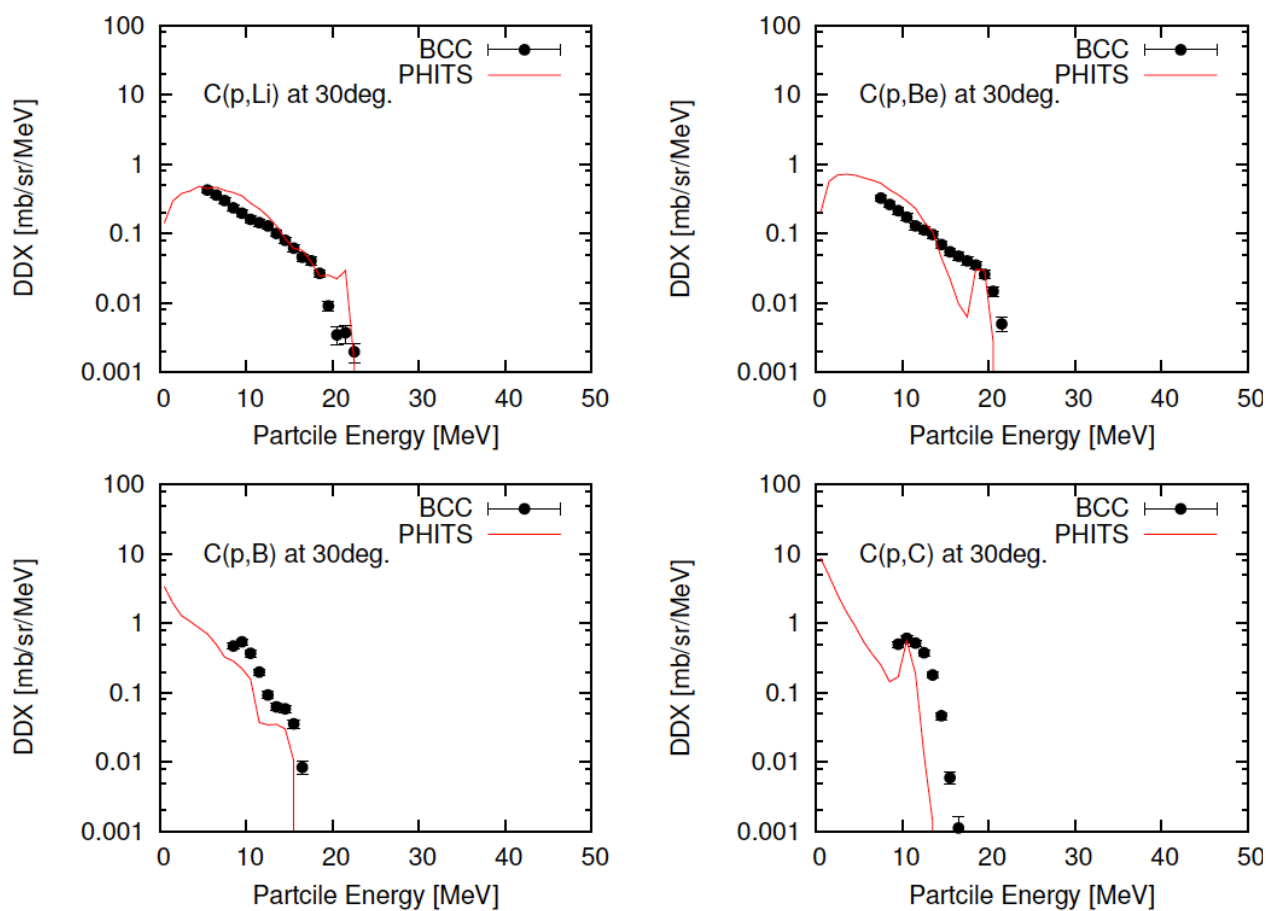


図 6 リチウム、ベリリウム、ボロン、炭素のエネルギースペクトルの測定値と計算値。実験値は BCC のみで測定したデータ。計算値は PHITS コードによるもの。

# 陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究

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

小平聡<sup>A</sup>、北村尚<sup>A</sup>、内堀幸夫<sup>B</sup>

Satoshi Kodaira<sup>A</sup>, Hisashi Kitamuta<sup>A</sup>, Yukio Uchihori<sup>B</sup>

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

B : 放射線医学総合研究所企画部経営戦略室

### 概要

放射線治療に用いられる陽子線が人体内中に二次的に生成する標的核破砕粒子のエネルギー依存性について評価することを目的とする。標的核破砕粒子は、さまざまな核反応プロセスを経て放出され、とりわけ飛程が短いものは LET (線エネルギー付与) が高く、人体に与える線量影響は無視できない。従来の線量計測法では、一次ビームと二次粒子の同時計測が難しいこと、また LET スペクトルを得ることができないため、二次粒子の線量寄与は投与される計画線量には反映されていないのが現状である。本研究では CR-39 固体飛跡検出器と原子間力顕微鏡を組み合わせた精密計測法により、60 MeV, 50 MeV, 40 MeV, 30 MeV の陽子線が CR-39 中に生成する標的核破砕粒子の生成断面積や線量寄与のエネルギー依存性を評価した。HIMAC の 160 MeV および 230 MeV の結果と組み合わせると、生成断面積や線量寄与は低エネルギー側で高くなることが分かった。

### 1. 目的

放射線治療に用いられる陽子線が、腫瘍に投与する線量以外に、それらが人体内外の物質との核反応によって二次粒子を発生させることが知られている。これらの被ばくと二次がん発生リスクとの関係を系統的に評価することは今後の重要な課題となる。標的核破砕反応で生成する二次粒子は、人体内外の物質を通過する際に、確率的に繰り返し生成すると考えられている [1-3]。これらの二次粒子は、高 LET 荷電粒子であることから、生物学的効果が高く、人体に与える線量影響は無視できない。従来の線量計測法では、高密度な陽子線とそれらからの二次粒子の同時計測が難しいだけでなく、二次粒子の殆どが 10  $\mu\text{m}$  よりも短い飛程しかないので、検出自体が非常に難しい。そのため、二次粒子の線量寄与は投与される計画線量には反映されていないのが現状である。本研究では CR-39 固体飛跡検出器と原子間力顕微鏡を組み合わせた精密計測法により二次粒子を実測し、陽子線の標的核破砕反応に関する基礎実験データを取得することを目的としている。この研究は HIMAC 共同利用研究課題(H286)においても並行して進めている。HIMAC では 160MeV や 230MeV の高エネルギー領域での実験を行っており、PMMA アブソーバを用いたエネルギー減衰により、水中のブラッグカーブに沿った二次粒子の線量を評価している。しかしながら、この手法では治療に対する二次粒子の線量寄与を評価することはできるが、エネルギーのストラグリングのほか、アブソーバ自身で二次的に発生する陽子線が標的中で N 次的に生成する事象も全て含めた複雑なビームであると考えられることから、標的核破砕反応のエネルギー依存性については知見を得ることは難しい。そこで、本研究ではサイクロトロンから供給される低エネルギーの陽子線を 30MeV から 80MeV にわたってエネルギー別に照射することにより、陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性を評価することを目的とする。

### 2. 実験方法

CR-39 は、重粒子線の通過痕を化学エッチング処理することで、通過痕をミクロンサイズにまで拡大させた”エッチピット”と呼ばれるコーン状の穴を顕微鏡で観察する検出器である。CR-39 はエッチピット 1 つ 1 つの LET を計測することが可能である。通常は、十分な精度で LET を計測するために、数 10 $\mu\text{m}$  程度エッチングし、光学顕微鏡下で観察可能な大きさまでエッチピットを成長させる必要がある。陽子線起因の標的核破砕反応粒子は非常に短い飛程 (<10 $\mu\text{m}$ ) しかもたないために、このような従来の計測法では、エッチピットが消失したり (エッチアウト)、LET 情報を担っている「形状」が崩れてしまう (オーバーエッチ) ことにより、正確な線量評価ができなかった。そのため、エッチングを二次粒子の飛程を超えない極微量 (1 $\mu\text{m}$  程度) に制御し、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いることで、精度良く計測を行った [4]。

C-8 コースにおいて、ワブラー電磁石と散乱体によって直径 7cm 円形程度のビームサイズで均一な照

射野を持つ陽子線 60 MeV、50 MeV、40 MeV、30 MeV を CR-39 へ垂直に照射した。照射線量はサンプル照射位置前方に設置した平行平板型の大型電離箱のカウント値により制御した[5]。この電離箱の信号は、予め照射位置に設置した Markus 電離箱を用いて較正してある。ビーム電流は大よそ 1nA 程度で、照射フルエンスは  $3.53 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$  になるように各陽子線エネルギーの LET 値を考慮して照射線量を決定した。CR-39 はフクビ化学工業社製の BARYOTRAK をもちいて、50mm×50mm×0.9mm を 2 枚重ねた組を 1 セットとし、重なり合う面を解析面とした。

照射後、CR-39 を 70 度に保持した 7 規定の水酸化ナトリウム水溶液中で 0.5 時間エッチングした。エッチング後、CR-39 表面を AFM (Veeco Dimension-V) を用いて走査し、二次粒子の飛跡画像を取得した。CR-39 中央部をタッピングモードで、1 視野あたり 25  $\mu\text{m}$  角のサイズ毎に格子状に 1.5Hz の速度で走査した。走査面積は約 62500  $\mu\text{m}^2$  で、分解能は 0.024 $\mu\text{m}/\text{pix}$  であった。

### 3. 実験結果

最も低いエネルギーの陽子線 (30 MeV) の水中での LET は約 2 keV/ $\mu\text{m}$  であり、CR-39(BARYOTRAK) の LET 検出閾値 (15 keV/ $\mu\text{m}$ ) [6]により、陽子線自体は CR-39 中に飛跡を作らない。従って、CR-39 は標的核破砕粒子だけを飛跡として観測することが可能となる。図 1 は CR-39 に生成した標的核破砕粒子の AFM 画像の例を示している。さまざまな放出角度で二次粒子が生成しているのがわかる。二次粒子の飛程は数 $\mu\text{m}$  程度以下であり、陽子線による標的中の核内カスケードによるノックアウト粒子 (p, n,  $\alpha$ ) や反跳重粒子 (C, N, O 等)、あるいはエバポレーション過程による放出粒子 (p や  $\alpha$ ) であると考えられる[7]。

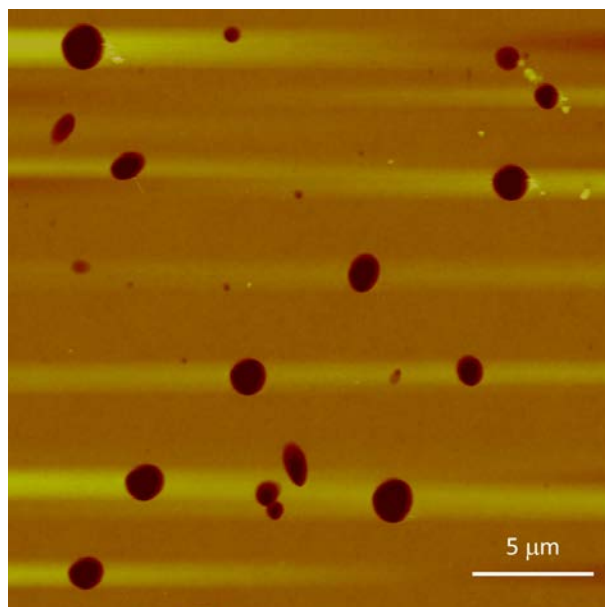


図 1. CR-39 に生成した陽子線 30 MeV による標的核破砕粒子の AFM 画像

図 2 に、観測された二次粒子の生成率について、入射陽子線のエネルギーを関数として示している。データはサイクロトロンその他、HIMAC での 160 MeV と 230 MeV のデータを併せている。生成率のオーダーは 1 陽子あたり  $10^{-3}$  % 台で、エネルギーの低下に伴って増加していることが分かる。予めさまざまな重粒子線を用いて CR-39 の応答を較正してあり [8]、二次粒子の水中の LET を求め、図 3 に示すように LET スペクトルを取得した。さまざまな標的核破砕粒子から構成され、およそ 1,500 keV/ $\mu\text{m}$  までの連続スペクトルとなっている。一方で、図 4 に示すように、CR-39 では観測可能な入射角度が制限される、いわゆる臨界角度が存在する [9]。臨界角度 (図中破線) を超えると、バルクエッチング速度が飛跡に沿ったトラックエッチング速度よりも先行するため、飛跡がエッチピットとして観測されない。臨界角度は LET に依存して変化するため、真の放出角度分布を得るためには各 LET ビン毎に粒子フルエンスを考慮する必要がある。また、生成される二次粒子の放出角度分布は等方的でないと考えられるため、二次粒子の線量の絶対評価のためには、臨界角度依存性をも考慮した立体角度補正が必要である。この手法を最近見出しており [10]、今後の線量評価実験に活用していく予定である。

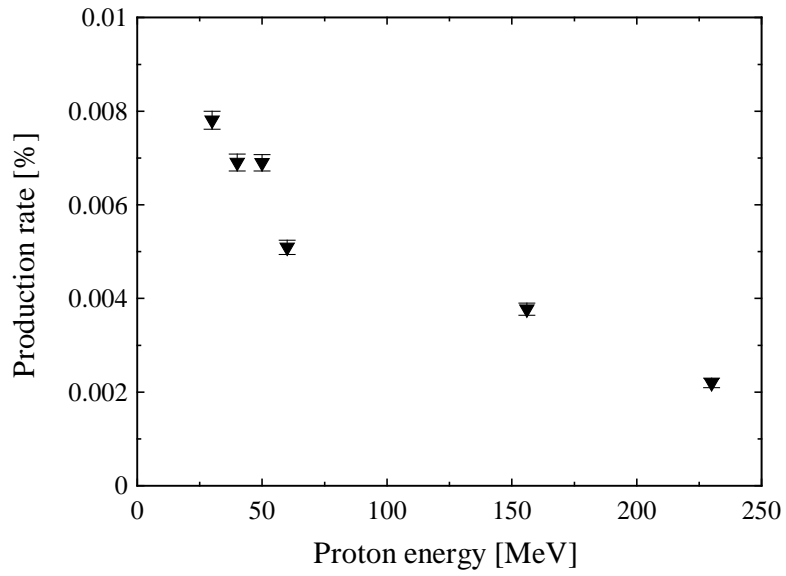


図 2. 入射陽子線のエネルギーに対する観測された二次粒子の生成率の変化

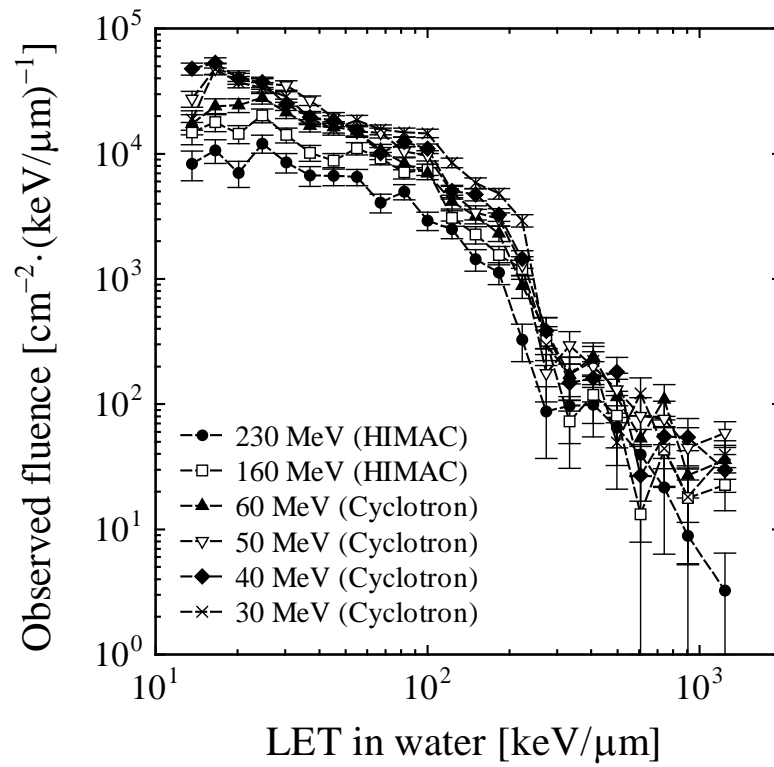


図 3. 入射陽子エネルギー毎に観測された LET スペクトル

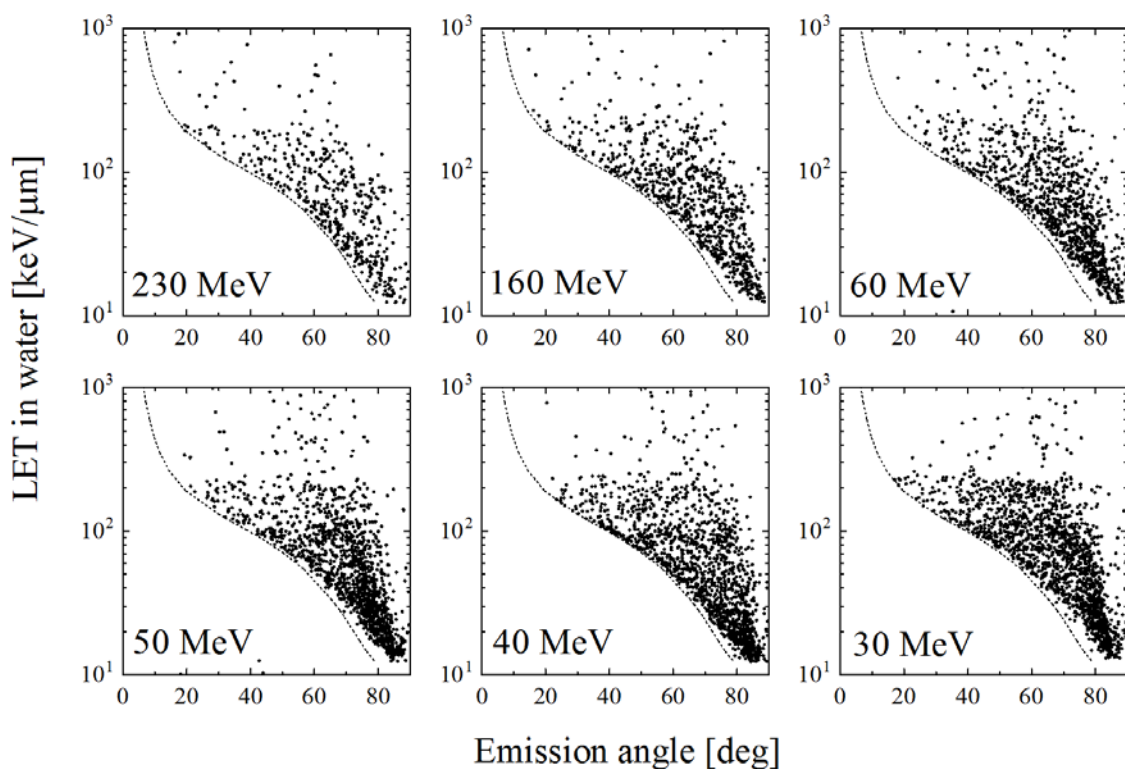


図 4. CR-39 に生成した二次粒子の放出角度と LET の散布図。破線は臨界角度を示しており、これを超えると飛跡がエッチピットとして観測されない

#### 4. まとめ

CR-39 固体飛跡検出器と原子間力顕微鏡を組み合わせた精密計測法により、60 MeV, 50 MeV, 40 MeV, 30 MeV の陽子線が CR-39 中に生成する標的核破砕粒子の生成断面積や線量寄与のエネルギー依存性を評価した。HIMAC の 160 MeV および 230 MeV の結果と組み合わせると、生成断面積や線量寄与は低エネルギー側で高くなることが分かった。今後、二次粒子の放出角度分布と CR-39 固有の臨界角度依存性を考慮した立体角度補正を用いた二次粒子の線量評価を進める予定である。

#### 参考文献

- [1] Cucinotta, F.A., Katz, R., Wilson, J.W., Townsend, L.W., Shinn, J., Hajnal, F., 1991. Biological effectiveness of high-energy protons: target fragmentation. *Radiat. Res.*, 127, 130-137.
- [2] Sihver L, Radioanalytical Studies of Target Fragmentation in Intermediate and Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, (Almqvist & Wiksell International, Stockholm, Sweden, ISBN 91-554-2645-x, ISSN 0282-7468), PhD Thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden, December 7, 1990.
- [3] Benton, E.R., Benton, E.V., Frank, A.L., Frigo, L.A., Csige, I., 1996. Secondary particle contribution to LET spectra on LDEF, *Radiat. Meas.*, 26, 793-797.
- [4] Johnson, C.E., Benton, E.R., Yasuda, N., Benton, E.V., 2009. Analysis of short-range tracks and large track fluences in CR-39 PNTD using atomic force microscopy. *Radiat. Meas.* 44, 742-745.
- [5] 北村尚, 内堀幸夫, 小平聡, Ploc Ondrej, 金澤光隆, 杉浦彰則, 鈴木直方, 北條悟, 岡田高典, 小松克好, 神谷隆, 2010, 汎用照射室 C-8 コースにおけるビーム制御, 平成 21 年度サイクロトロン利用報告書, 46-49.
- [6] Kodaira, S., Yasuda, N., Kawashima, H., Kurano, M., Naka, S., Ota, S., Ideguchi, Y., Hasebe, N., Ogura, K., 2011. Detection threshold control of CR-39 plastic nuclear track detectors for the selective measurement of high LET secondary charged particles. *Radiat. Meas.* 46, 1782-1785.
- [7] Cugnon, J., Volant, C., Vuillier, S. 1997. Improved intranuclear cascade model for nucleon-nucleus interactions. *Nucl. Phys. A620*, 475-509
- [8] Kodaira, S., Yasuda, N., Konishi, T., Kitamura, H., Kurano, M., Kawashima, H., Uchihori, Y., Ogura, K., Benton, E.R., 2013. Calibration of CR-39 with atomic force microscope for the measurement of short range tracks from proton-induced target fragmentation reactions, *Radiat. Meas.* 50, 232-236.

- [9] Somogyi, G., and Szalay, S.A., 1973. Track-diameter kinetics in dielectric track detectors. Nucl. Instrum. Meth. 109, 211-232.
- [10] Kodaira, S., Konishi, T., Kitamura, H., Kurano, M., Kawashima, H., Uchihori, Y., Nishio, T., Yasuda, N., Ogura, K., Sihver, L., Benton, E.R. 2014. Measurements of proton-induced secondary particles in the radiation therapy field by means of CR-39 and AFM, Phys. Med. Biol. (to be submitted).





## 5. 生物研究

5-1. プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析

5-2. 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果

# プロトンに対するヒト培養細胞の細胞致死効果のモデル解析 ANALYSIS PROTON-INDUCED CELL DEATH BY THE MICRODOSIMETRIC KINETIC MODEL (MKM)

鈴木 雅雄<sup>A</sup>、稲庭 拓<sup>B</sup>、佐藤 眞二<sup>C</sup>、北村 尚<sup>D</sup>、村上 健<sup>A</sup>

Masao Suzuki<sup>A</sup>, Taku Inaniwa<sup>B</sup>, Shinji Satou<sup>C</sup>, Hisashi Kitamura<sup>D</sup>, Takeshi Murakami<sup>A</sup>

A : 放射線医学総合研究所重粒子医科学センター国際重粒子医科学研究<sup>°</sup> ough

B : 放射線医学総合研究所重粒子医科学センター一次世代重粒子治療研究<sup>°</sup> ough

C : 放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

D : 放射線医学総合研究所研究基盤センター研究基盤技術部

## 概要

粒子放射線治療用ビームの設計や最適な分割照射スケジュール立案のために必須な粒子放射線独自の分割照射法の確立を目的として、プロトン分割照射法の最適化に必要なモデル解析・シミュレーションを実施する基礎となる生物学的基礎実験データ集積を開始した。研究初年度の平成 25 年度は、モデル解析に使用するヒト由来の正常細胞およびがん細胞をそれぞれ一種類用いて、プロトン照射に対する細胞致死効果の線量効果関係を取り、分割照射実験に用いる生存率 5%を与えるプロトンの線量を設定した。

## 1. 目的

炭素イオンやプロトンによるがん治療の最適な治療スケジュール構築のためには、粒子放射線独自の分割照射法を確立することが必要である。しかしながら、生物実験データを基にしたスタンダードと成り得る分割照射法の知識は乏しい。本研究課題では、粒子放射線治療用ビームの設計や最適な分割照射スケジュール立案のために必要不可欠な生物学的基礎データのうち、プロトンに対する実験データを集積し、プロトン分割照射法の最適化に必要なモデル解析・シミュレーションを実施する。得られたデータと現在 HIMAC で実施している炭素イオンビーム照射の実験データを合わせ、プロトンから重粒子線に至る粒子放射線がん治療の論理の一般化を図り、世界における粒子線治療法のスタンダード作成を最終目的とする。

## 2. 実験方法

実験に用いた細胞試料は、国内の公的な細胞バンクより供給されたヒト由来正常細胞一種類（皮膚由来正常線維芽細胞：NB1RGB）とがん細胞株一種類（唾液腺由来細胞株：HSGc-C5）を用いた。C8 コースで得られる 70MeV プロトンをそれぞれの細胞につき、0.5~10Gy の範囲で単一照射し、直ちにトリプシン処理を施しコロニー形成法にて細胞致死効果を細胞増殖死として検出した。得られた線量効果関係を linear quadratic model にて解析し、パラメーターを決定して一回照射で 5%生存率を与える分割照射線量を決定した。

## 3. 実験結果

得られた結果を図 1 にまとめた。正常細胞およびがん細胞何れの場合も、低線量域に“肩”を持つ生存曲線となった。linear quadratic model による解析から、正常細胞の  $\alpha$ 、 $\beta$  値はそれぞれ 0.35041、0.03892 となった。またがん細胞の  $\alpha$ 、 $\beta$  値は 0.28728、0.03758 となった。これらのパラメーターを基に 5%生存率を与える線量を計算し、それぞれの細胞に関して、5.36Gy と 5.89Gy を得た。比較のために掲載した HIMAC 炭素イオンビームや X 線の実験データと比較して、プロトンの細胞致死効果は低いことが判った。

#### 4. まとめ

平成 26 年度以降は、平成 25 年度に得られた実験データより求めた単一照射における 5% 生存率を与える線量を基礎に、その線量を 0~180 分の間で任意の時間間隔で二分割照射を施し、致死効果からの回復現象 (Elkind recovery curve) を調べる。そのデータを MKM (the microdosimetric kinetic model) に適用して解析し [1]、プロトンの細胞致死効果や細胞損傷修復に関するパラメーターを決定し、粒子線治療の高度化に資する論理の構築を行う。

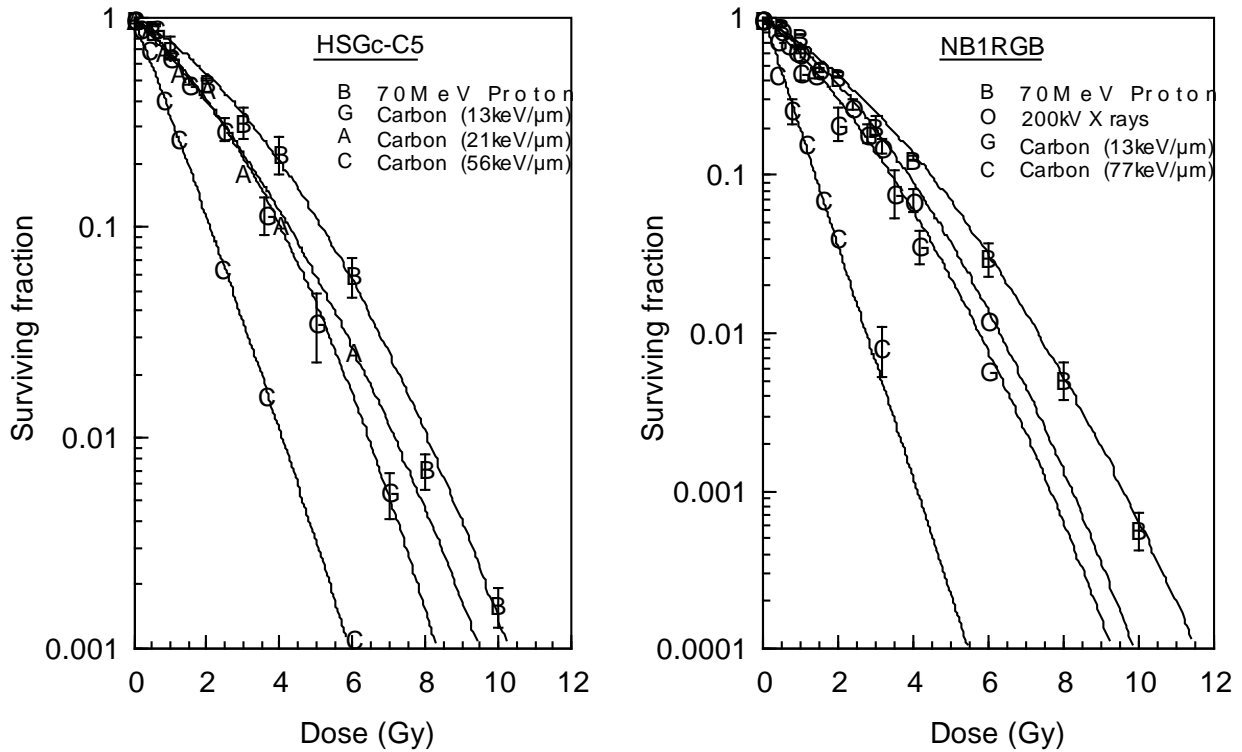


図 1. ヒト由来正常細胞(右)とがん細胞(左)に対する 70MeV プロトン単一照射に対する細胞致死効果の線量効果関係。■が 70MeV プロトンの結果を示す。実験データは、4 回の独立したマシンタイムの結果の平均値とその標準誤差を示す。オープンシンボルのデータは、HIMAC 炭素イオンや 200kV X線の実験データ。

#### 参考文献

- [1] Taku Inaniwa, Masao Suzuki, Takuji Furukawa, Yuki Kase, Nobuyuki Kanematsu, Toshiyuki Shirai, Roland B. Hawkins, Effect of dose-delivery time structure on biological effectiveness for therapeutic carbon-ion beams evaluated with microdosimetric kinetic model. *Radiat. Res.*, **180**, 44-59 (2013).

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

平山亮一<sup>A</sup>、尾崎匡邦<sup>A</sup>、山下慶<sup>A</sup>、李惠子<sup>A</sup>、金子由美子<sup>A</sup>、  
松本孔貴<sup>A</sup>、鶴澤玲子<sup>A</sup>、北村尚<sup>B</sup>、内堀幸夫<sup>C</sup>、古澤佳也<sup>A</sup>

Ryoichi Hirayama<sup>A</sup>, Masakuni Ozaki<sup>A</sup>, Kei Yamashita<sup>B</sup>, Hui Li<sup>A</sup>, Yumiko Kaneko<sup>A</sup>,  
Yoshitaka Matsumoto<sup>A</sup>, Akiko Uzawa<sup>A</sup>, Hisashi Kitamura<sup>B</sup>, Yukio Uchihori<sup>C</sup>, Yoshiya Furusawa<sup>A</sup>

<sup>A</sup>: 放射線医学総合研究所 重粒子医科学センター 次世代重粒子治療研究プログラム

<sup>B</sup>: 放射線医学総合研究所 研究基盤センター 研究基盤技術部放射線計測技術開発課

<sup>C</sup>: 放射線医学総合研究所 企画部 経営戦略室

## 概要

サイクロトロンから供給された 70 MeV/n 陽子線を用いて、大気下ならびに低酸素下での CHO 細胞の細胞生存率曲線を作成してきた。本年度は DNA 二本鎖切断修復機構の欠損細胞を用いて、大気下ならびに低酸素下の細胞生存率曲線を明らかにした。

### 1. 目的

CHO細胞を親株とするDNA二本鎖切断修復欠損細胞であるxrs6細胞（非相同末端結合（NHEJ）欠損）と51D1細胞（相同組換え修復（HRR）欠損）に陽子線を照射し、酸素の有無によって細胞の線量・効果関係がどのようになるかを明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験方法

チャイニーズハムスター卵巣由来のxrs6細胞と51D1細胞を照射12時間および24時間前にそれぞれガラスシャーレ上で培養した（20万細胞/dish）。低酸素下での照射は照射1時間前に5%炭酸ガス入り純窒素を細胞に吹き付け、陽子線（70 MeV/n）をxrs6細胞と51D1細胞に照射した。酸素の濃度は0.034%以下である[1]。照射線量は0.3～14 Gyとし、照射後培養細胞をガラスシャーレから回収し、コロニー形成法で細胞の生存率を測定した。照射後、xrs6細胞は11日後、51D1細胞は13日後に細胞をホルマリン固定し、メチレンブルーでコロニー染色を行い、コロニー数を計測して細胞生存率を算出した。

### 3. 実験結果

陽子線に対する細胞生存率を図1にまとめた。xrs6細胞では直線的に線量増加に伴い、細胞生存率が低下した。高線量域では放射線抵抗性を示すような傾向があり、LQモデル（直線-二次曲線モデル）で細胞生存率曲線をフィットさせると、線量の二乗に比例する二次項がマイナス値になった。これらは酸素の有無にかかわらず同じ傾向を示した。51D1細胞では、親株であるCHO細胞と同じように“肩”のある曲線になった。

細胞生存率が10%に減少させる線量（D<sub>10</sub>）で酸素増感比（OER）を算出するとxrs6細胞では $3.56 \pm 0.13$ 、51D1細胞では $2.52 \pm 0.12$ であった。CHO細胞（ $2.93 \pm 0.09$ ）に比べ、xrs6細胞は酸素の増感効果が非常に大きく、一方、51D1細胞では酸素の増感効果は小さいことが明らかになった。

### 4. まとめ

DNA 二本鎖切断修復機構の違いによって、酸素効果の大きさが大きく異なることが判明した。

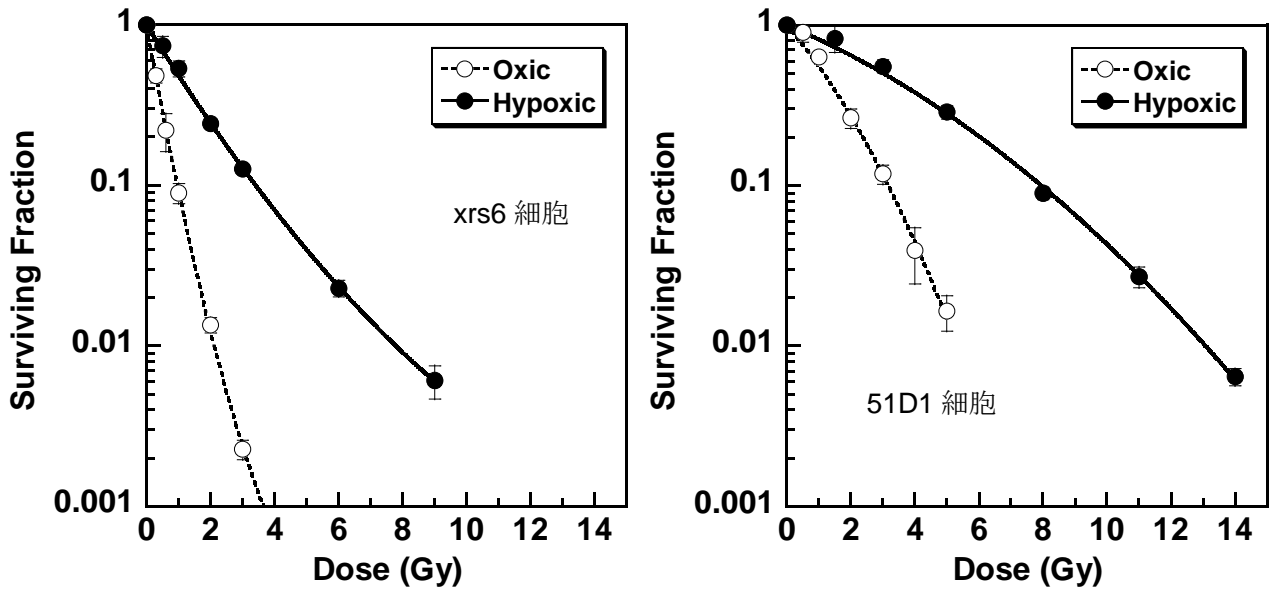


図1 xrs6 細胞 (左) と 51D1 細胞 (右) の陽子線に対する細胞生存率

**参考文献**

[1] Ryoichi Hirayama, Yoshitaka Matsumoto, Yuki Kase, Miho Noguchi, Koichi Ando, Atsushi Ito, Ryuichi Okayasu, Yoshiya Furusawa: Radioprotection by DMSO in Nitrogen Saturated Mammalian Cells Exposed to Helium Ion Beams. Radiation Physics and Chemistry, 78, 1175-1178, 2009

## **6. 粒子線検出器の開発**

**6-1. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発**

**6-2. シリコン半導体センサーの陽子線に対する特性評価**

# 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

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

内堀幸夫<sup>A,B</sup>、北村尚<sup>A</sup>、小平聡<sup>A</sup>、小林進悟<sup>A</sup>

Yukio Uchihori<sup>A,B</sup>, Hisashi Kitamura<sup>A</sup>, Satoshi Kodaira<sup>A</sup>, Shingo Kobayashi<sup>A</sup>

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

B: 放射線医学総合研究所企画部経営戦略室

### 概要

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

### 1. 目的

地上の放射線環境と異なり、宇宙の放射線環境は約 90%が高エネルギーの陽子から成り立っている。そのエネルギースペクトルは、1-10 GeV をピークとして、それ以下のエネルギーでは急激に下降し、それ以上のエネルギーではエネルギーに関してべき型の形状で減少している。ピークのエネルギーは太陽活動によって左右され、特にピークより低いエネルギーの陽子線のエネルギー付与量の測定精度は、吸収線量を決定する上で大きく影響する。そのため、宇宙放射線用検出器においては、加速器からの高エネルギーの陽子線で性能を評価することが重要である。

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

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

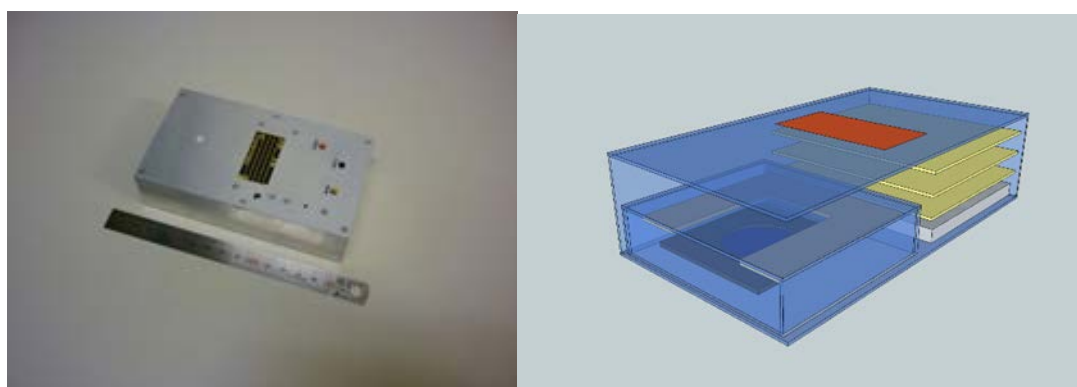


図 1 A-DREAMS-1 の外観写真(左)と概念図(右)。写真左中心のものが線量計で、並んでいる棒状のものは 15cm の定規である。線量計中心部に EL ディスプレイがあり、測定された付与エネルギーのスペクトルがリアルタイムで表示が可能である。筐体左の白い丸印にシリコン検出器の中心が置かれている。左図は線量計筐体内の構成を表した図である。図中のオレンジ色が筐体表面に出ている EL ディスプレイで、その下の 3 枚の電子回路基板が黄色であらわされている。さらにその下にバッテリーがある。筐体の反対側の紺色の円形の部分にシリコン本導体検出器が置かれている。

表 1 A-DREAMS-1 の主要諸元

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

## 2. 実験方法

放医研サイクロトロンでの実験は、汎用照射室の C-6 ポートを用いて行った。用いたビームは 40 MeV 及び 80 MeV の陽子線で、ビーム形状は 0.5 から 1 cm 直径程度のペンシルビームとした。ビーム強度は約 500 – 20000 ions/sec であった。

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

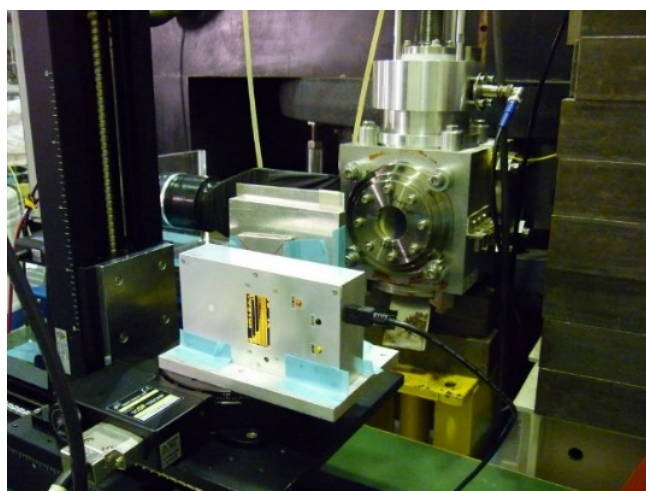


図 2 サイクロトロン C-6 コースでの A-DREAMS-1 の照射試験のセットアップの様子。A-DREAMS-1 は垂直と水平方向、および、水平面を回転する自動ステージ上に置かれている。写真中央部の円形の部分が C-6 コースのビーム取り出し口である。そのすぐ下流にビーム強度確認用のシンチレーションカウンターが設置されている。このシンチレータも自動ステージ上に乗せられており、照射室に入ることなく必要な時にビーム強度のモニタリングが可能である。写真中ではシンチレータはビームライン中から抜けた状態である。また、写真中では線量計のすぐ上流にビームエネルギーを落とすためのアブソーバーとしてアルミ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

## 3. 実験結果

放医研サイクロトロンにおいて、陽子線 40, 80 MeV を A-DREAMS-1 線量計に照射し、パルス高の分布をとったものが図 3 である。荷電粒子が貫通した際に見られる高パルス高側にテールを引くようなランダウ分布の形状が見られ、確かに高エネルギー陽子線を測定していることが確認できた。また、HIMAC において照射した 290 MeV/u の炭素線照射の結果を合わせており、炭素の検出まで線形性があることを確認した。

図 4 (左) は、陽子線 80 MeV のビームを検出器に対して角度を変えて入射させたものである。基本的に一様な角度から到来する宇宙放射線の測定においては最終的に波高分布から LET (Linear Energy Transfer) を導出する際に、入射角分布の補正を考慮する必要があるため、角度に対するレスポンスは検出器の性能評価の重要なポイントとなっている。図 4 (右) は、ビームライン上で線量計よ



りビーム上流側に減速用の素材（ここではアルミ板を使用）を置き、エネルギーを変化させて、検出器での付与エネルギー量を変化させて、エネルギー測定値の分解能を調べた結果である。アルミ板を入れることで、付与エネルギーを 0.49 MeV から 0.66 MeV まで変化させた。図中からも見られるように、0.1 MeV 程度のエネルギー付与量の分解能を持っていることが確認できた。

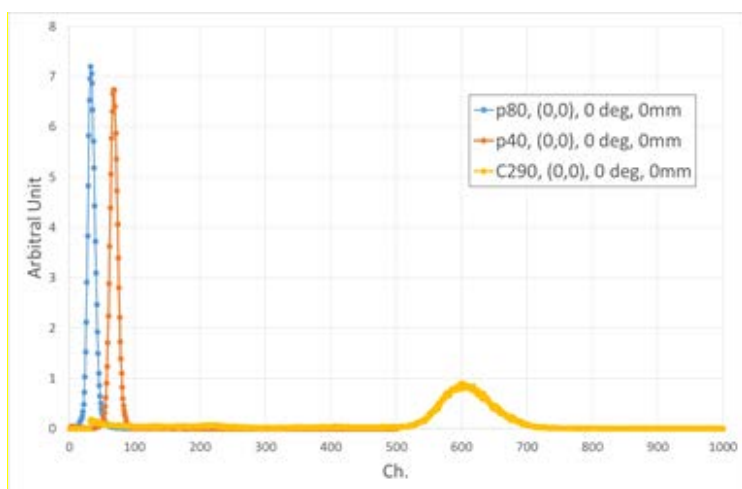


図 3 陽子線 40, 80 MeV、および、HIMAC での炭素線 290 MeV/u を用いたエネルギー付与に対する検出器出力のパルスハイト分布。各ビームはシリコン検出器に対して垂直に入射した。

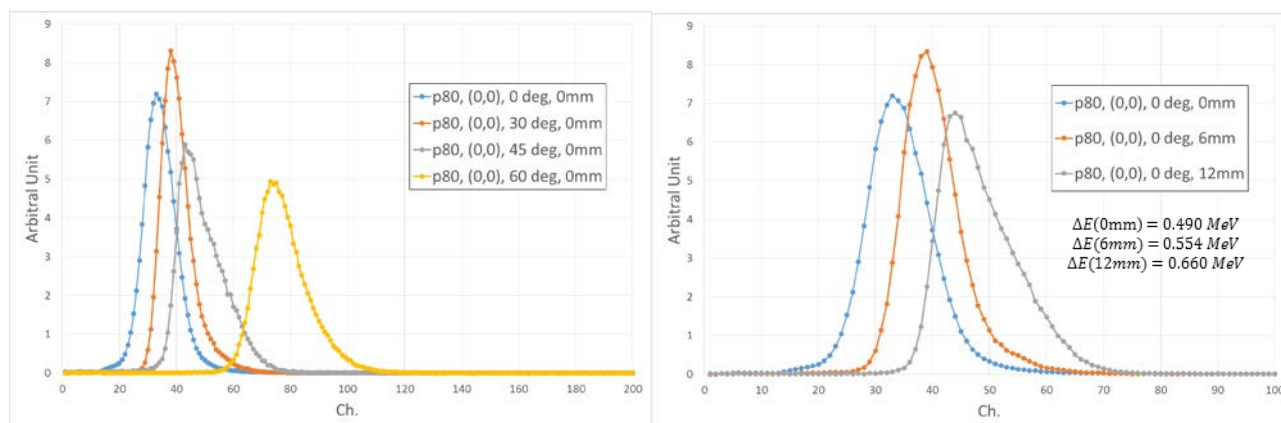


図 4 陽子線 80 MeV ビームの照射条件を変えて線量計に照射した際の波高分布。左図は線量計への入射角 ( $0^\circ$  が検出器に垂直) を変えた場合で、右図が 6 及び 12 mm 厚さのアルミ板を入れた場合の波高分布を示している。

#### 4. まとめ

今回のサイクロトロンでの照射実験において、宇宙放射線検出器である A-DREAMS-1 が、陽子線検出に対して十分な機能を持っていることが確認できた。この線量計がシリコン検出器内での付与エネルギー、さらに、宇宙飛行士に対して用いられるための LET の分布を測定することができることを表している。次の試作機では、より高い分解能で放射線線量を測定するための改良を行う予定である。

#### 謝辞

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

# シリコン半導体センサーの陽子線に対する特性評価

Measurement of Silicon Sensor Response to Low-Energy Protons

高田真志<sup>A</sup>  
Masashi Takada<sup>A</sup>

A: 防衛大学校応用科学群応用物理学科

## 概要

シリコン半導体センサーの低エネルギー陽子線に対する特性評価を実測し、従来のシリコンセンサーに発生していたファンネリング現象が、新しいセンサーには発生しないことを実験的に評価した。

## 1. 目的

現在、市販されているリアルタイム中性子線量計を用いて、航空機搭乗員の中性子被ばく線量を実測した場合、中性子被ばく線量を数倍過大評価することが報告されている[1]。この中性子線量の過大評価の原因の一つが、個人線量計に使用されているシリコンセンサーがファンネリング現象[2]を起こすためである。航空機搭乗員の中性子被ばく線量をリアルタイムに計測するために、新たなセンサーの開発を試みた。本研究では、シリコンセンサーを透過できる陽子線を直接、センサーに照射することで、センサーの深部の状況と応答特性を評価した。

## 2. 実験内容

陽子 8 MeV のビーム強度を照射位置で数 100 cps に加速器で調整した後、図 1 に示す体系で陽子ビームをセンサー表面に対して垂直に照射した。ビームライン上のアルミニウム板(厚さ 0 から 0.3 mm)でエネルギーを変化させることで、センサーに入射する陽子エネルギーを 8MeV から段階的に下げた。アルファ線源を用いて、センサーに付与されたエネルギーの値を校正した。

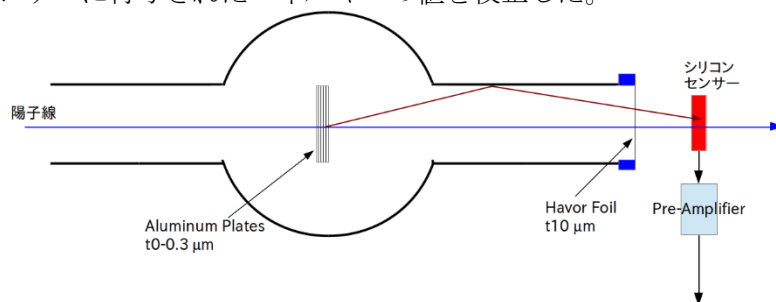


図 1 実験体系

## 3. 結果

シリコン検出器中で、ファンネリング現象が発生すると、シリコン検出器を透過するような陽子線の付与エネルギーの値は、検出器に印加する電圧が上昇するにつれて、高くなる。今回のセンサーで、ファンネリング現象が発生するかどうかを、電圧を変化させた後、陽子線のピークエネルギーの変化を計測することで評価した。印加電圧を段階的に上昇させたときの応答特性を図 2 にプロットした。これはアルミニウム板を挿入しない場合の計測データである。波高分布中に 470 keV の陽子ピークを確認でき、1600 keV 付近にエッジも確認できた。図から明らかなおり、印加電圧を変化させても、応答特性は変化していないことが分かる。同様の測定を、アルミ板を挿入し、入射陽子のエネルギーを変えて行った。計測された応答特性は、図 2 と同様に印加電圧に無関係であった。このことから、今回のシリコン検出器の応答特性は、数 MeV の陽子線に対して、印加電圧に無関係であるため、ファンネリング現象は起こっていないことが分かった。

次に、シリコン検出器の応答特性の入射陽子エネルギー依存性を調べた。数種類の厚さのアルミ減速材で陽子線エネルギーを変化させたときの応答特性を図 3 に示す。応答特性には 300 から 1400 keV に加速器からの陽子線のピーク成分(直接陽子線)、1500 から 1700 keV にビームライン中の真空ダクトなどで散乱した陽子線の成分(散乱陽子線)を確認できる。

計測した応答特性から直接陽子線(色丸)と、散乱陽子線のピーク値(白丸)をそれぞれ求め、さらにピークの幅を加味したエネルギーの値を図 4 にプロットした。直接陽子線のピークエネルギーは、アルミの厚さとともに徐々に増加するが、散乱陽子線のエネルギー値は一定であった。

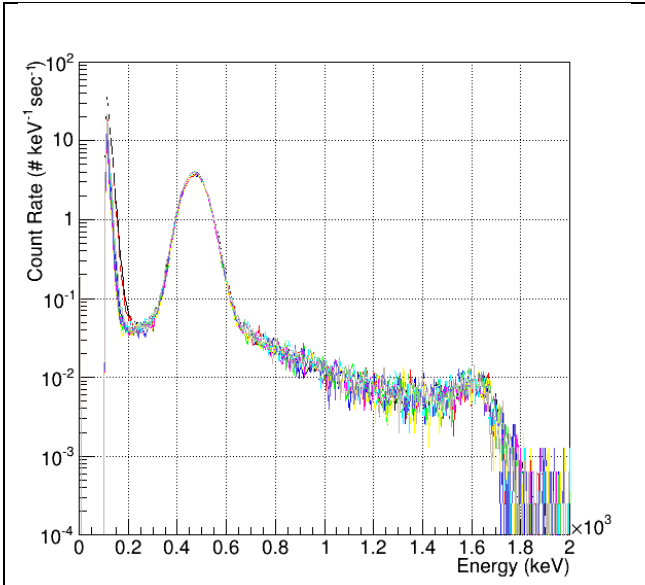


図 2 バイアス電圧を変化させたときの陽子線計測時の波高分布

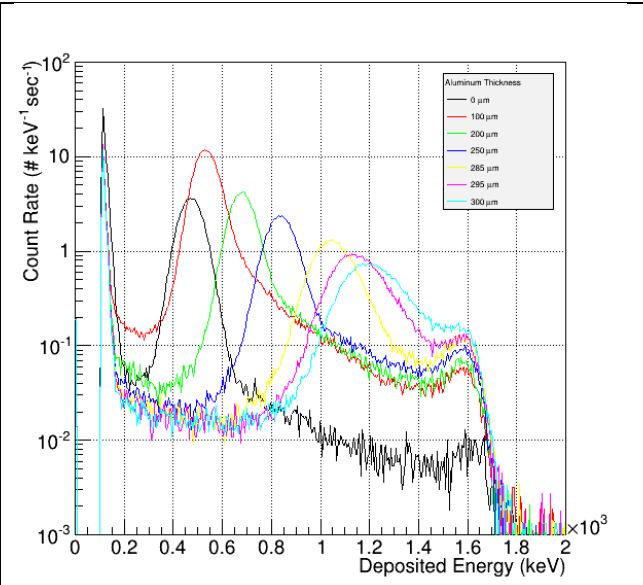


図 3 入射陽子エネルギーを変化させたときの波高分布

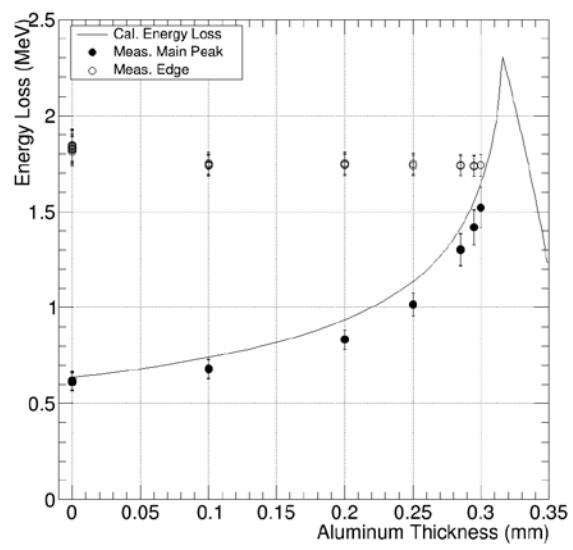


図 4 検出された陽子線エネルギーとエネルギー損失の計算評価の比較

実験結果を検証するために、8 MeV 陽子線がアルミニウム板などでのエネルギーを損失後、シリコン検出器に付与したエネルギーを計算した(実線)。実測した直接陽子線のエネルギーは計算値よりも数 10 keV 低い値であった。この相違は、陽子線のエネルギー損失の計算の精度や、シリコン検出器のエネルギー校正のずれなどが考えられる。

#### 4. まとめ

陽子線を照射することで、今回のシリコンセンサーではファンネリング現象が発生していないことを確認できた。

#### 参考文献

[1] M.Takada, T.Nunomiya, T.Ishikura, T.Nakamura, B.J.Lewis, L.G.I. Bennett, I.L.Getley, B.H.Bennett: "Measuring Cosmic-Ray Exposure in Aircraft Using Real-Time Personal Dosimeters", Rad. Prot. Dosim., 149(2), 169-176 (2012)  
 [2] 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 NS-56(1), 337-345, (2009)



## 7. 粒子線による損傷試験

7-1. 高温超伝導線材の中性子照射特性

7-2. 光学機器の耐放射線性能に関する研究

# 高温超伝導線材の中性子照射特性

## Neutron Irradiation Experiments on High Temperature Superconductors

宮原信幸<sup>A</sup>、石山敦士<sup>B</sup>、道辻 健太<sup>B</sup>、狩野 開<sup>B</sup>、有谷 友汰<sup>B</sup>  
Nobuyuki Miyahara<sup>A</sup>, Atsushi Ishiyama<sup>B</sup>, Kenta Michitsuji<sup>B</sup>, Hiraku Karino<sup>B</sup>, Yuta Ariya<sup>B</sup>

A：放射線医学総合研究所基盤技術センター研究基盤技術部

B：早稲田大学理工学術院先進理工学研究科

### 概要

#### 1. 目的

高温超伝導コイルを用いた小型・高効率・高性能の次世代超伝導サイクロトロンの開発・実現を目指している。次世代超伝導サイクロトロンの実運転において、高温超伝導線材は放射化されるため、放射線環境下における超伝導線材の特性変化のデータは工学的・工業的に非常に重要であるといえる。そこで市販のイットリウム (Y) 系超伝導線材について、1) 中性子照射によって生じる放射性核種分析、2) 中性子照射による超伝導特性への影響、3) 中性子照射による機械的ストレスへの耐性評価、4) 中性子照射による外部印加磁場角度依存性評価を行ってきた。平成 25 年度は、中性子照射の向きを変化させた場合の Y 系線材の超伝導特性 ( $I$ - $V$  特性) を測定した。

#### 2. 実験方法

試料線材の諸元を Table 1 に示す。中性子照射は放医研サイクロトロン (AVF-930) を用い、14 MeV 中性子を試料に照射した。この際、線材テープ面に対して垂直・平行の 2 つの向きから中性子を照射した。その後、液体窒素浸漬冷却化 (77 K) で  $I$ - $V$  測定を行った。

Table 1 Specifications of HTS sample

|                    |            |
|--------------------|------------|
| material           | YBCO       |
| manufacturer       | Fujikura   |
| length             | 100 [mm]   |
| width              | 5 [mm]     |
| thickness          | 0.223 [mm] |
| $I_c$<br>(minimum) | 200 [A]    |

#### 3. 実験結果

垂直、平行に中性子照射前後の臨界電流値測定結果 (照射前の値により規格化) を Fig.1 に示す。

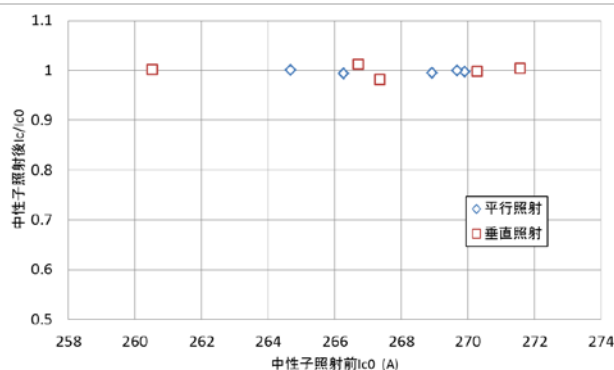


Fig.1 中性子照射前後における臨界電流値測定結果

Fig.1 より、中性子照射前後で臨界電流値の大きな差は無く、中性子照射の向きによる違いも確認できなかった。その他の試料線材においても照射前後で 1% 以下の変化しか観測されなかった。

#### 4. まとめ

中性子照射前後で高温超伝導線材の  $I$ - $V$  特性を測定した。中性子照射前後において、目立った臨界電流値の変化は見られず、中性子照射の向きによる違いも確認できなかった。

# 光学機器の耐放射線性能に関する研究

## Study of the effect of radiation on the optical instruments

滝澤 慶之<sup>A</sup>、川崎 賀也<sup>A</sup>、小川 貴代<sup>A</sup>、北村 尚<sup>B</sup>、内堀 幸夫<sup>B</sup>  
Yoshiyuki Takizawa<sup>A</sup>, Yoshiya Kawasaki<sup>A</sup>, Takayo Ogawa<sup>A</sup>,  
Hisashi Kitamura<sup>B</sup>, and Yukio Uchihori<sup>B</sup>

A : 理化学研究所、B : 放射線医学総合研究所重粒子医科学センター物理工学部

### 概要

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

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

### 1. 目的

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

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

今年度は、マイクロプロセッサの試験を行う。

### 2. 実験

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

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

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

## ◇ PMMA・CYTOP

今年度は、ハウスキーピング等の制御で使用を検討している、マイコンボード Arduino Leonardo への照射テストを行った。

### 2-1. マイコンボード Arduino Leonardo への照射

マイコンボード Arduino シリーズは、Atmel AVR マイクロコントローラを用いた、オープンソースハードウェアである。C++風の Arduino 言語とその統合開発環境なども準備されており、その利用のしやすさから、さまざまな場面で利用され始めている。小型衛星等への搭載も行われている。

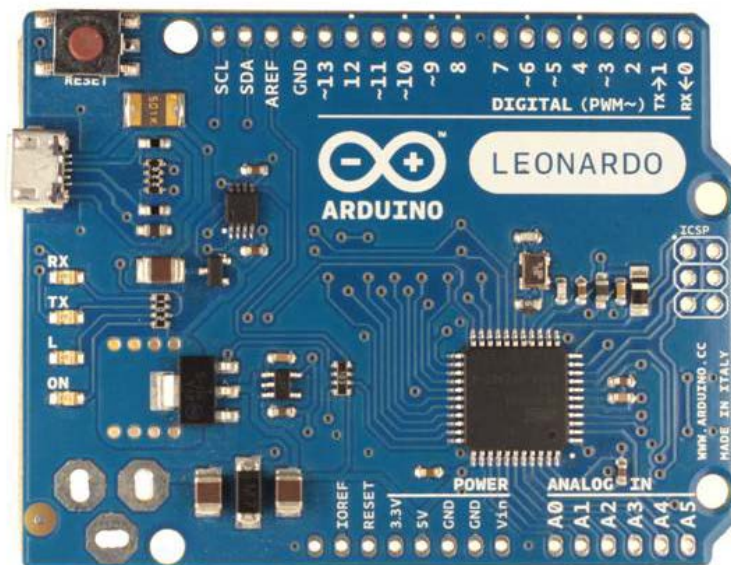


図1. マイコンボード Arduino Leonardo。右中央下に核となる AVR チップ ATmega32u4、右上にデジタル I/O、右下にアナログ I/O、左上には、マイクロ USB コネクタが配置されている。

今回、マイコンボード Arduino Leonardo (図1) への照射テストを行った。Arduino を稼動させた状態で照射を行った。照射中の Arduino は、以下にあげる動作を行わせ、正常に動作し続けるかを監視した。

- 1) デジタル I/O (出力) に接続した複数の LED を点滅させる。
- 2) アナログ I/O (入力) の電圧を AD 変換して読み取る。
- 3) 2)で読み取った値を、USB ケーブルで接続された PC へシリアル通信でデータ転送を行う。

照射したビームは 70MeV 陽子線ビームで、約 0.1nA での照射を行った。尚、照射の際は、マイコンボードの核となる AVR チップだけにビームが当たるように、真鍮のコリメータを設置した。

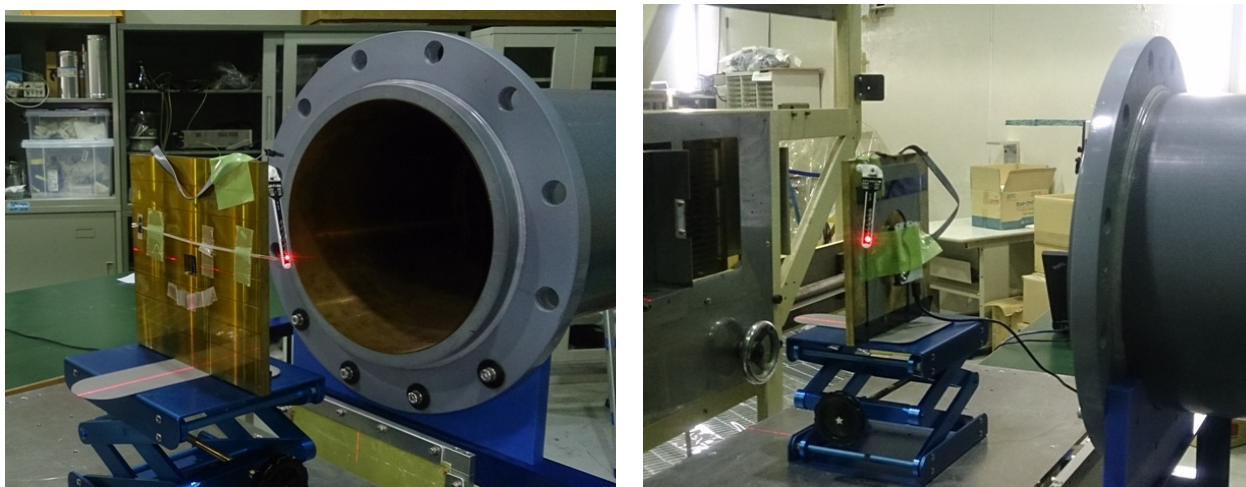


図1. ビームライン上のマイコンボード Arduino Leonardo。右図の用に、コリメータの背面にマイコンボードを貼りつけている。手前で赤く光っているのが LED 群で7つの LED を順に点滅させている。ボード下部に USB ケーブルを接続しており、PC へ接続されている。

合計 8 時間、約 167Gy の照射を行ったが、その期間中、マイコンチップは正常に動作し続け、照



射終了後も異常は見られなかった。ISS 曝露環境において、Al 1mm の厚さのシールドの条件での1年間の線量は、約 30Gy と見積もられているので、今回の試験は、約 5 年分に相当する。

### 3. まとめ

JEM-EUSO で使用を検討しているマイコンチップ (ATmega32u4) に対する 70MeV 陽子線ビームの照射による放射線耐性のテストを実施した。軌道上での約 5 年分のドーズを照射し、全く問題が起きないことを確認し、JEM-EUSO の環境で使用できることを確認した。

### 謝辞

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

### 参考文献

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

## **8. 照射システムの開発**

**検出器校正用の照射場の作成**

# 検出器校正用の照射場の作成

## Construction of the Radiation Field to Calibrate Radiation Detectors

北村 尚<sup>A</sup>、小平 聡<sup>A</sup>、小林進悟<sup>A</sup>、内堀幸夫<sup>B</sup>

Hisashi Kitamura<sup>A</sup>, Satoshi Kodaira<sup>A</sup>, Shingo Kobayashi<sup>A</sup>, Yukio Uchihori<sup>B</sup>

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

B : 放射線医学総合研究所企画部経営戦略室

### 概要

サイクロトロン棟汎用照射室の C-8 コースにおいて、広く平坦な陽子線の検出器校正用の照射場を構築している。これまでに、標準的なビームとして 70 MeV 陽子線を中心に照射場の構築を行ってきた。照射場の平坦さの確認をリアルタイムで行い、ビームサイズのカスタマイズを可能にするために多チャンネル型電離箱(MCIC)を導入した。MCIC の校正手法を確立し、平坦な照射場を作成しビームプロファイルの測定を行なった。

### 1. 目的

一般的に個人線量計には TLD(熱ルミネッセンス検出器)や OSLD (光刺激ルミネッセンス線量計)などの受動型検出器の素子が用いられており、放射線種に対して感度の違う数種の線量計と吸収・減速材からなるパッケージとなっている。このような線量計パッケージを、加速器ビームを用いて校正する際に、TLD や OSLD は吸収線量を積分するタイプの検出器であり、測定値から照射されたフルエンスが求められないことから、ビーム量をモニターし、照射線量を別途測定しておく必要がある。また、線量計パッケージは数センチの大きさを持っており、パッケージ内の個々の素子に等しい量の放射線が照射されることが望ましいので、そのパッケージ全体に一樣にビームが照射されているような放射線場が必要となる。このような照射場を実現されるために、放医研サイクロトロン棟の汎用照射室の C-8 コースにおいて、設置されたワブラー磁石等を用いて陽子線の平坦な照射場の構築を進めている。

これまでに、70 MeV の陽子線ビームを中心に、30, 40 MeV のビームに対して照射場を作成し、サイクロトロン利用報告書において報告を行った[1], [2]。その後、新しく加速器になされた改良や、ビーム調整のプロトコルの変更などでビーム形状に変更があったので、ビームの平坦度の測定が必要となった。また、これまで C-8 コースにおいて使用しなかったビームでの照射場の作成が必要となったので、ビームのプロファイルの測定を簡便化し、ビーム作成時の省時間化のために、リアルタイムでビームの形状が測定できる多チャンネル型の電離箱(Multi-Channel Ion Chamber: MCIC)の導入を行った。本報告書では MCIC での測定方法についての説明と測定結果について報告する。

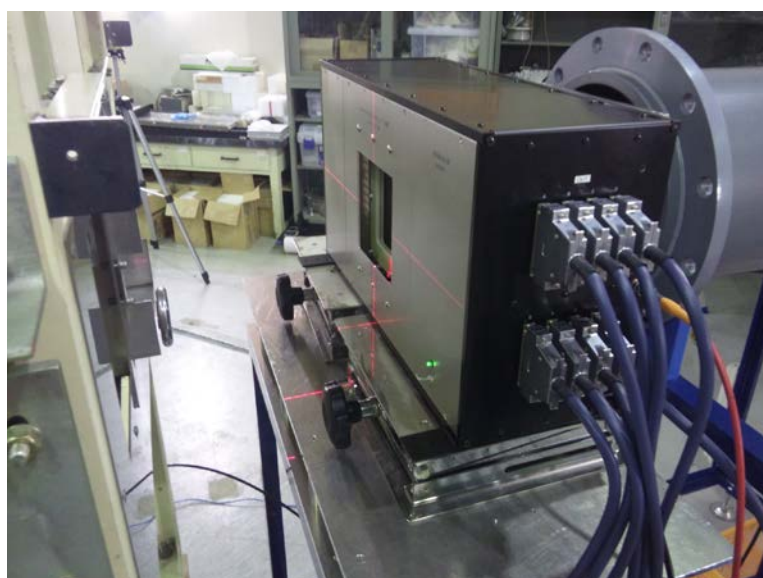


図 1 C-8 の照射位置に設置した MCIC。

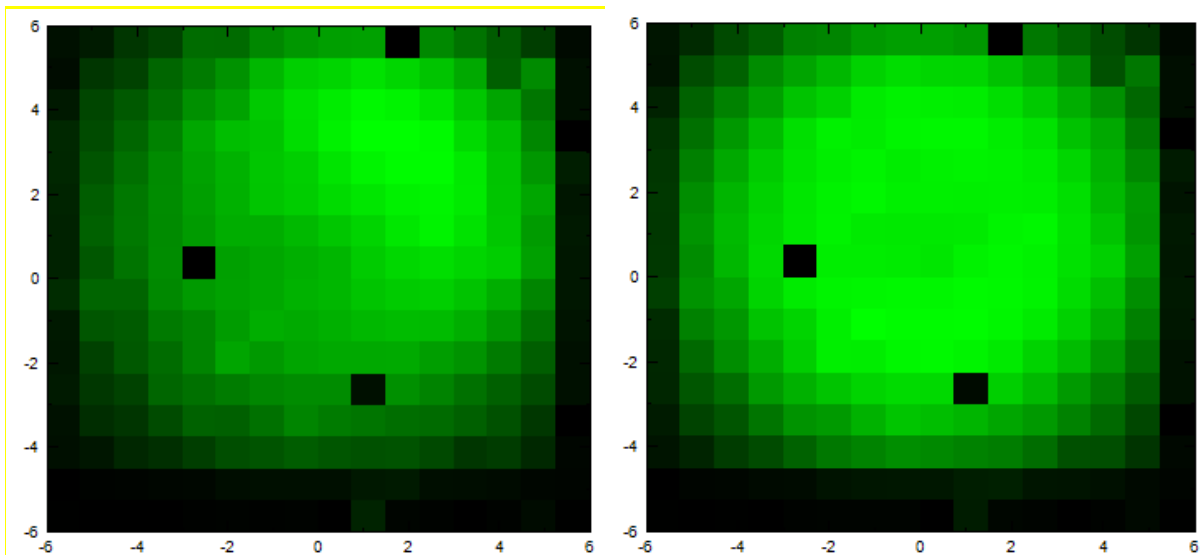


図 2 MCIC で測定した 70 MeV の陽子線ビームの形状。画素が明るくなっていくにしたがってビーム強度が強いことを示している。左図は 5Hz でデータ収集を行った画像で、図右上の明るく出ている部分がワブラー周期 12Hz とのずれによって現れたビームスポットである。右図は画像の 1 秒間の移動平均を取ったもので、このようにするとビームスポットを正しく測定できる。

## 2. 実験方法

### 2-1. 多チャンネル型電離箱 (MCIC)

今回導入した多チャンネル型電離箱はカイズワークス社製の特注品で、角型のアノード電極が 7.5mm 間隔で縦横に 16 個、計 256 のアノード電極を持った多チャンネル読み出し型の電離箱で、ビームプロファイルとして  $12 \times 12 \text{ cm}^2$  の領域が測定可能である。各アノードの読み取りは ADC (Analog to Digital Converter) を用いて電荷を数値化している。図 1 は MCIC を C-8 コースの照射台に設置し、横方向の平坦度を測定したときの写真である。

MCIC のデータ収集の周期は 5 または 10 Hz の二種から選択可能である。データのイベントビルドを行った後、データ取得用の PC に USB 経由で送信される。データ通信はシリアルインターフェースを USB に変換して行っているため、PC 側からは仮想シリアルポートとして認識される。データ取得用の PC はネットワークサーバソフトウェアが動作しており、モニター用のサーバにアクセスすることによってオンラインでのデータの取得が可能であり、ネットワーク上につながっている複数の端末において同時にモニター可能である。

図 2 はオンラインで平坦度を測定したときの例である。ワブラー磁石によるワブリングの周波数 12 Hz と異なっているため、同左図に示すようにビーム構造を確認することができる。また、モニター用のクライアントソフトには独自で QL (Quick-Look) の条件を持っているため、同右図のようにリアルタイムで移動平均 (図中では 1 秒間) をとることによってスポット構造を打ち消しながらビームの平坦度の測定が可能である。

### 2-2. MCIC の動作確認

2012 年度末から MCIC の導入を開始したが、いくつかの問題点が明るみになった。主な点は

1. チャージアンプの pole zero cancellation (PZC) が設定できないので、ペDESTアルの ADC が 0 より小さくなった場合、バックグラウンドではペDESTアル測定が行えない。
2. チャージアンプ (又は ADC) の零点が安定しておらず、MCIC の移動等の振動で値が変わる。
3. 各チャンネルのサチュレーションが起こった場合の形状の変化。

ペDESTアルについては、プロファイルの本測定の前に、ある程度広げたビーム電流を段階的に切り替え強度と計測値の相関を直線で fit することで 0 点を導出している。図 3 は、70MeV の陽子線を  $7\text{cm}\Phi$  程度に広げた場合に、ビーム強度を変化させ、その際のビームモニタ電離箱と MCIC のチャンネル (図中では MCIC の中央付近の 16 チャンネル分) をプロットしたもので、この場合、1nA 程度でサチュレーションが起こりはじめている。そのため実際のプロファイル測定ではビーム強度を 0.5 nA 以下で行なった。2. であげたように、MCIC の移動などによって原点がずれることが見つかっているために、今のところ、このような校正をプロファイル測定の前に行っており、そのための時間として 1 時間程度の必

要となっている。

画素電極のサチュレーションが起こった場合、MCIC で測定されるプロファイルは、ワブリングの中心をピークにした山形になることがわかってきた。図4では、ビームの強度に対してMCICでの測定値が線型性を保っている0.5 nAのビームと、サチュレーションが起こっている2 nAのビームでどのように測定が変化したかを検証したものである。MCICの測定では、ビームの強度が大きくなるほど、中心部が盛り上がった富士山型の形状がみられる。MCIC導入当初に、GAFchromicフィルムでの測定とMCICの測定結果がうまく一致したことがある一方、MCICのほうが平坦な領域が狭くなっているような結果があらわれたのは、この効果が起因していると思われる。

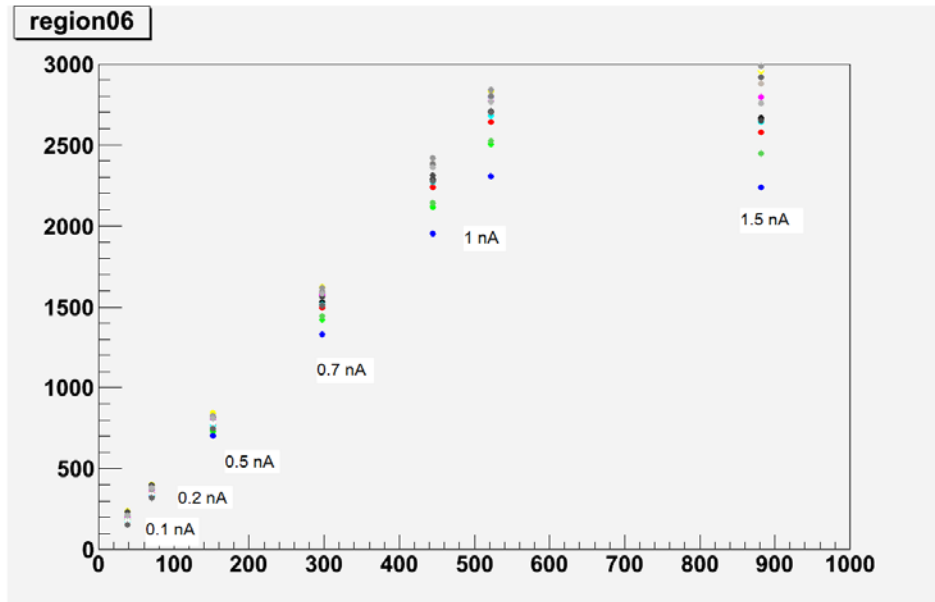


図3 ビーム電流を変化させて得た、ビームモニタ用電離箱の信号値とMCICの信号の線形性のグラフ。ビームは陽子線70 MeVで、約7cmΦに広げたものである。MCICの電極の違いごとに色違いの点をプロットしている。図中の電流値は測定前に調整した際の値なので、必ずしも正しい値とは限らない。実際、図中にあるように1 nAのビームを使って二回測定を行なったが、ビームモニタ電離箱の値は10%程度異なっていた。

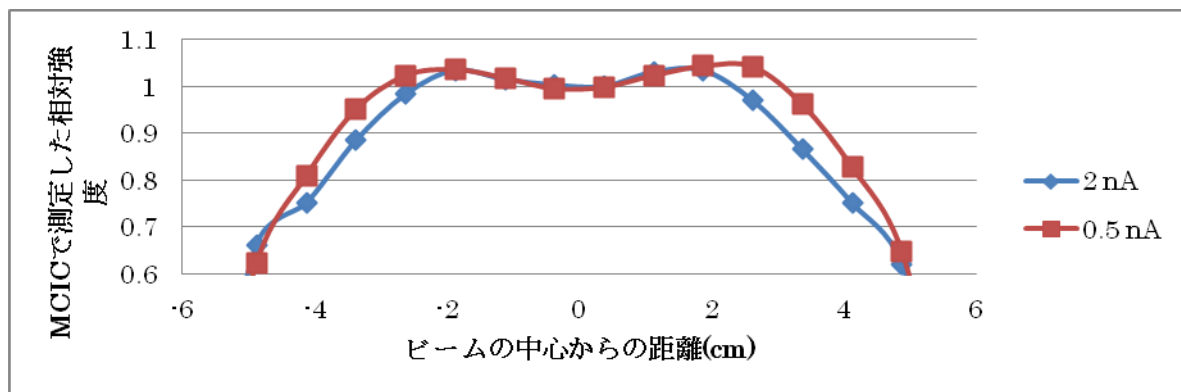


図4 ビーム強度を変えた際のMCICによるプロファイル測定の例。陽子線70 MeVのビームで、ビーム電流値が0.5 nAと2 nAの際の測定の結果である。図中の2つの系統は、ビーム強度のみの違いであるが、2 nAではサチュレーションが起こっているために正しく測定が行なわれておらず、その場合、平坦な部分が小さく見えてしまうという現象が起こった。

### 3. プロファイルの測定結果

2-2項で示したように、初期のMCICの測定結果に関しては問題が多いものもあるので、ここでは、MCIC校正手法を確立させた後の結果を図5に表す。また測定日については表1にまとめた。陽子50, 60 MeVビームについては、今回、新しく作成を行った[3]。

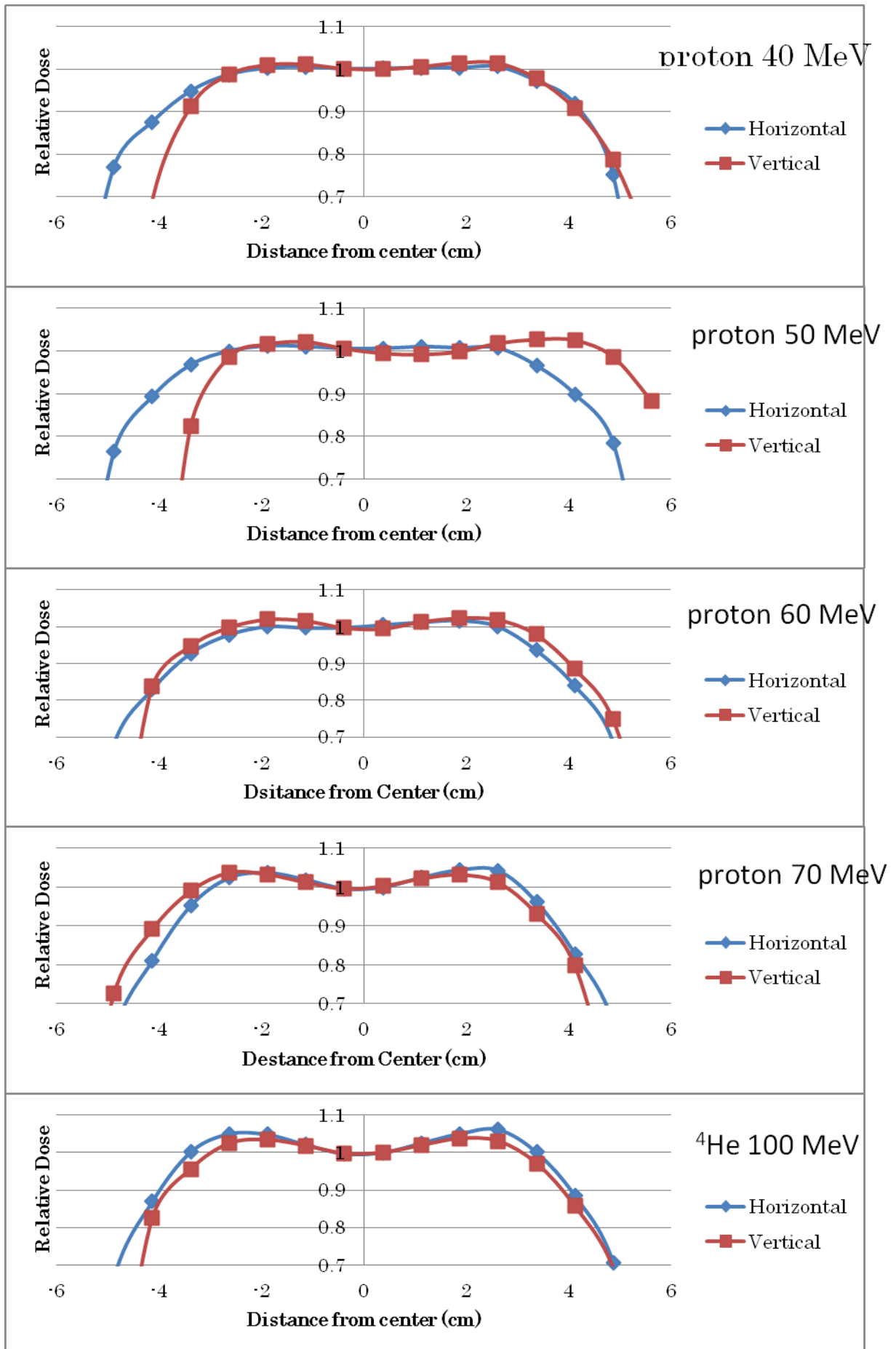


図 5 MCIC によるプロファイル測定の結果。陽子 50 MeV のセンター位置が違っているのは、MCIC のマウントの問題で、検出器の中心とビームの中心が合わせられなかったため。

表 1. MCIC を用いてプロファイル測定を行なったビーム

| 測定日              | ビーム種          | エネルギー (MeV) |
|------------------|---------------|-------------|
| 2013 年 4 月 17 日  | 陽子            | 60          |
| 2013 年 5 月 23 日  | $^4\text{He}$ | 100         |
| 2013 年 5 月 25 日  | 陽子            | 50          |
| 2013 年 8 月 9 日   | 陽子            | 70          |
| 2013 年 10 月 26 日 | 陽子            | 40          |

#### 4. まとめ

MCIC を用いた平坦なビーム照射場の作成においては、ビームモニタ用電離箱と MCIC 自身の校正作業として、サイクロトロンからのビーム供給開始から約 1.5 から 2 時間程度必要である。しかしながら、そこまで終わると、ワブラーの調節はリアルタイムで行えるので、現状では、ビームのユーザーが希望するビームのカスタマイズは約二時間で行うことが出来る。現状で問題となっている、アンプや ADC の原点位置がずれてしまうという問題が解決できれば、校正にかかる時間は、1 時間程度は短縮可能だと予想され、ビーム作成時の高精度化、カスタマイズ化に向けての第一歩をしるせたであろう。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、サイクロトロン運転室の皆様には大変にお世話になりました。特に、北條悟氏には GAF フィルム等によるプロファイルの確認においてご協力いただきました。この場をお借りして感謝の意を表したいと思います。

#### 参考文献

- [1] 北村尚, 内堀幸夫, 小平聡, O. Ploc, 金澤光隆, 杉浦彰則, 鈴木直方, 北條悟, 岡田高典, 小松克好, and 神谷隆, “汎用照射室 C-8 コースにおけるビーム制御,” 平成 21 年度サイクロトロン利用報告書, pp. 46–49, 2010.
- [2] 北村尚, 内堀幸夫, 小平聡, and O. Ploc, “サイクロトロン汎用照射室 C-8 コースにおける 30, 40, 70 MeV 陽子線の照射場の様性の測定,” 平成 22 年度サイクロトロン利用報告書, pp. 69–74, 2011.
- [3] 小平聡, 北村尚, 内堀幸夫, “陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究”, 本報告書





## 9. 有料ビーム提供

NIRS-930 における有料提供の利用状況

# NIRS-930 における有料提供の利用状況

## UTILIZATION OF CHARGE BEAM TIME FEE AT NIRS-930

杉浦 彰則<sup>A</sup>、北條 悟<sup>A</sup>、片桐 健<sup>A</sup>、中尾 政夫<sup>A</sup>、田代 克人<sup>A</sup>、鈴木 和年<sup>A</sup>、  
野田 章<sup>A</sup>、岡田 高典<sup>B</sup>、高橋 勇一<sup>B</sup>、込山 明仁<sup>B</sup>、本間 壽廣<sup>B</sup>、野田 耕司<sup>A</sup>  
Akinori Sugiura<sup>A</sup>, Satoru Hojo<sup>A</sup>, Ken Katagiri<sup>A</sup>, Nakao Masao<sup>A</sup>, Katsuto Tashiro<sup>A</sup>,  
Kazutoshi Suzuki<sup>A</sup>, Akira Noda<sup>A</sup>, Takanori Okada<sup>B</sup>, Yuichi Takahashi<sup>B</sup>, Akihito Komiyama<sup>B</sup>,  
Toshihiro Honma<sup>B</sup>, Koji Noda<sup>A</sup>

<sup>A</sup> : 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

<sup>B</sup> : 加速器エンジニアリング株式会社

### はじめに

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

### 1. 利用目的

利用目的としては、主に宇宙放射線による電子機器への影響の評価が挙げられる。宇宙空間では、宇宙放射線によりデバイスおよび材料の劣化又は一時的な誤動作を引き起こされることが知られている。この宇宙放射線の中で捕捉放射線や太陽宇宙線に含まれる高エネルギー陽子はシングルイベント現象と呼ばれる回路素子の誤動作や永久的損傷等を与えることが知られている。このような宇宙放射線の影響について NIRS-930 から提供される陽子線を宇宙放射線に含まれる陽子に見立てて電子機器に照射することにより、耐シングルイベント現象の評価が行われた。

### 2. 利用状況

平成 25 年度に行った有料ビーム提供日数は 15 日となった。マシントイム配分日数は 16 日分であったが、4 日分のキャンセルがあり、3 日分が追加配分された。

有料提供における、立ち上げ調整時間を含めたサイクロトロンの運転時間は合計 136.1 時間となった。有料となるビーム利用時間は、立ち上げ調整時間を含まず、各コースで照射形状を確認した後からビーム提供終了までとなっている。実際の有料となるビーム利用時間の合計は 98 時間となった。

有料ビーム提供における利用されたビーム粒子は陽子のみで、そのエネルギー別利用割合を図 1 に示す。一番多く利用されたエネルギーは 70 MeV で 80.6%、そのほかには、40 MeV が 12.9%、80 MeV が 6.5%となっている。

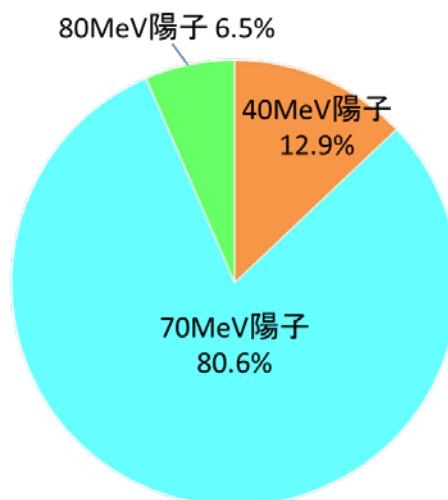


図 1. 有料ビーム提供におけるエネルギー別利用割合

### 3. ビームコースおよび照射条件

有料ビーム提供では、C6 コースと C8 コースが利用された。C6 コースは照射野が  $\phi$  1~2cm 程度のビームを照射できるコースであり、C8 コースは照射野を  $\phi$  8cm 程度に広げたコースとなっている。主に利用されたコースは、ビームの照射野を広げた C8 コースであり 127.3 時間であった。内訳は p40 MeV が 17.6 時間、p70 MeV が 109.7 時間であった。ビームを絞った C6 コースで p80 MeV のみが 8.8 時間利用された。

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

### 4. 有料ビーム提供の手続きについて

NIRS-930 を使用した有料ビーム提供を行うには、放医研と契約を交わす必要がある。平成 25 年度は 5 件の契約を元に 8 課題の実験が行われた。過去 5 年間の契約件数は 1 年当り 4~6 件となっている。

また、実験に参加するには放医研において身分登録と放射線作業従事者登録をする必要がある。平成 25 年度は 39 名の登録を行い、のべ 38 名の利用者がサイクロトロンの有料ビーム提供にて実験を行った。

## 10. 研究成果一覽

## 研究成果一覧

### 1 & 2. サイクロトロン<sup>1</sup>の運転実績と利用状況と改良・開発

#### <原著論文等>

1. Ken Katagiri, Satoru Hojo, Toshihiro Honma, Kazutoshi Suzuki, Akira Noda, and Koji Noda: A simple algorithm for beam profile diagnostics using a thermographic camera, Rev. Sci. Instrum., vol. 85 (2014) 033306-1.
2. Ken Katagiri, Koutaro Nagatsu, Katsuyuki Minegishi, Satoru Hojo, Masayuki Muramatsu, Kazutoshi Suzuki, Toshihiro Honma, Atsushi Kitagawa, Akira Noda, Koji Noda:  $^{11}\text{C}$ -molecule production using a  $\text{NaBH}_4$  target for  $^{11}\text{C}$ -ion acceleration, Rev. Sci. Instrum., vol. 85 (2014) 02C305-1.

#### <Proceedings等>

1. S. Hojo, T. Honma, K. Katagiri, M. Nakao, A. Noda, K. Noda, A. Sugiura, A. Komiyama, T. Okada, Y. Takahashi: PRESENT STATUS OF CYCLOTRONS (NIRS-930, HM-18) AT NIRS, Proceedings of CYCLOTRONS'13, Vancouver, Canada (2013) pp46.
2. K. Katagiri, S. Hojo, T. Honma, A. Noda, K. Noda: A Profile Analysis Method for High-Intensity DC Beams Using a Thermographic Camera, Proceedings of CYCLOTRONS'13, Vancouver, Canada (2013) pp168.
3. 北條 悟, 片桐 健, 中尾 政夫, 杉浦 彰則, 村松 正幸, 野田 章, 岡田 高典, 高橋 勇一, 込山 明仁, 本間 壽廣, 野田 耕司: 放医研サイクロトロン(NIRS-930, HM-18)の現状報告, 第10回日本加速器学会年会, 愛知県名古屋市, 2013年8月3日~5日, pp344.
4. 杉浦 彰則, 北條 悟, 片桐 健, 中尾 政夫, 野田 章, 北村 尚, 岡田 高典, 高橋 勇一, 込山 明仁, 本間 壽廣, 野田 耕二: NIRS-930 サイクロトロンにおける照射野改善のための設計検討, 第10回日本加速器学会年会, 愛知県名古屋市, 2013年8月3日~5日, pp434.
5. 中尾 政夫, 北條 悟, 片桐 健, 杉浦 彰則, 野田 章, 後藤 彰, 本間 壽廣, Smirnov Victor, Vorozhtsov Sergey: NIRS-930 におけるビームのシミュレーション, 第10回日本加速器学会年会, 愛知県名古屋市, 2013年8月3日~5日, pp496.
6. 片桐 健, 北條 悟, 中尾 政夫, 野田 章, 野田 耕司: サーモグラフィックカメラと薄膜を用いたビームプロファイル診断アルゴリズムの開発, 第10回日本加速器学会年会, 愛知県名古屋市, 2013年8月3日~5日, pp658.

#### <その他：特許>

1. 片桐 健, 他: 2次元温度分布からビーム電流密度分布を導出するためのデジタル画像処理アルゴリズム, 特願 2013-212385 号, 2013.10.9, 出願中
2. 片桐 健, 他:  $^{11}\text{C}$  または  $^{10}\text{C}$  を含む気体化合物を生成する方法および装置, 特願 2013-023128 号, 2013.2.8, 出願中

### 3. 平成24年度サイクロトロン分子プローブの製造・開発への利用状況

#### <原著論文等>

1. Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Hidekatsu Wakizaka, Maki Okada, Kenichi Odaka, Joji Yui, Atsushi Tsuji, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang: OAT3-mediated extrusion of the <sup>99m</sup>Tc-ECD metabolite in the mouse brain, *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 34(4), 585-8, , 2014-03.
2. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Youko Ikoma, Akiko Hatori, Lin Xie, Hidekatsu Wakizaka, Katsushi Kumata, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Noninvasive quantification of metabotropic glutamate receptortype 1 with [<sup>11</sup>C]ITDM:a small-animal PET study, *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 1 - 7, 2014-01.
3. Akiko Hatori, Joji Yui, Lin Xie, Tomoteru Yamasaki, Katsushi Kumata, Masayuki Fujinaga, Hidekatsu Wakizaka, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Visualization of Acute Liver Damage Induced by Cycloheximide in Rats Using PET with [<sup>18</sup>F]FEDAC, a Radiotracer for Translocator Protein (18 kDa), *PLoS ONE (Online only:URL:http://www.plosone.org)*, 9(1), e86625 - e86625, 2014-02.
4. Takayuki Saito, Natsuko Kobayashi, Keitaro Tanoi, Naoko Iwata, Hisashi Suzuki, Ren Iwata, Tomoko Nakanishi: Expression and Functional Analysis of the CorA-MRS2-ALR-Type Magnesium Transporter Family in Rice, *Plant Cell Physiology*, 54(10), 1673 - 1683, 2013-10.
5. Masayuki Hanyu, Yuuki Takada, Hiroki Hashimoto, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura: Carbon-11 radiolabeling of an oligopeptide containing tryptophan hydrochloride via a Pictet-Spengler reaction using carbon-11 formaldehyde, *Journal of Peptide Science*, 19(10), 663 - 668, 2013-10.
6. Tatsuya Kikuchi, Katsuyuki Minegishi, Hiroki Hashimoto, Ming-Rong Zhang, Koichi Kato: The use of tetrabutylammonium fluoride to promote N- and O-<sup>11</sup>C-methylation reactions with iodo[<sup>11</sup>C]methane in dimethyl sulfoxide, *Journal of Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals*, 56(13), 672 - 678, 2013-11.
7. Kazunori Kawamura, Tomoteru Yamasaki, Katsushi Kumata, Kenji Furutsuka, Makoto Takei, Hidekatsu Wakizaka, Masayuki Fujinaga, Kariya Kaori, Joji Yui, Akiko Hatori, Lin Xie, Yoko Shimoda, Hiroki Hashimoto, Kazutaka Hayashi, Ming-Rong Zhang: Binding potential of (E)-[<sup>11</sup>C]ABP688 to metabotropic glutamate receptor subtype 5 is decreased by the inclusion of its <sup>11</sup>C-labelled Z-isomer, *Nuclear Medicine and Biology*, 41(1), 17 - 23, 2014-01.
8. Toshimitsu Okamura, Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Hidekatsu Wakizaka, Ming-Rong Zhang: Imaging of Activity of Multidrug Resistance-Associated Protein 1 in the Lungs: *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 49(3), 335 - 340, 2013-09.
9. Tomoteru Yamasaki, Katsushi Kumata, Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Kenji Furutsuka, Akiko Hatori, Lin Xie, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of [<sup>11</sup>C]MMPiP as a potential radioligand for imaging of metabotropic glutamate 7 receptor in the brain, *EJNMMI Research*, 3(54), 2013-08.
10. Joji Yui, Lin Xie, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Akiko Hatori, Katsushi Kumata, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Monitoring Neuroprotective Effects Using Positron Emission Tomography With [<sup>11</sup>C]ITMM, a Radiotracer for Metabotropic Glutamate 1 Receptor, *Stroke*, 44(9), 2567 - 2572, 2013-09.

11. Yoko Shimoda, Joji Yui, Lin Xie, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Katsushi Kumata, Akiko Hatori, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Synthesis and Evaluation of 1-[2-(4-[11C]Methoxyphenyl)phenyl]piperazine for Imaging of the Serotonin 5-HT7 Receptor in the Rat Brain, *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 21(17), 5316 - 5322, 2013-09.
12. Tomoyuki Ohya, Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Fukumura, Ming-Rong Zhang, Toshiaki Irie: Non-input analysis for incomplete trapping irreversible tracer with PET, *Nuclear Medicine and Biology*, 40(5), 664 - 669, 2013-07.
13. Jun Toyohara, Muneyuki Sakata, Keiichi Oda, Kenji Ishii, Kimiteru Ito, Mikio Hiura, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Ming-Rong Zhang, Kiichi Ishiwata: Initial Human PET Studies of Metabotropic Glutamate Receptor Type 1 Ligand 11C-ITMM, *Journal of Nuclear Medicine*, 54(8), 1302 - 1307, 2013-08.
14. Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Ming-Rong Zhang, Toshiaki Irie: PET probes for imaging brain acetylcholinesterase, *Journal of Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals*, 56(3-4), 172 - 179, 2013-04.
15. Maki Okada, Ryuji Nakao, Sotaro Momosaki, Kazuhiko Yanamoto, Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Hidekatsu Wakizaka, Rie Hosoi, Ming-Rong Zhang, Osamu Inoue: Improvement of brain uptake for in vivo PET imaging of astrocytic oxidative metabolism using benzyl [1-11C]acetate, *Applied Radiation and Isotopes*, 78, 102 - 107, 2013-08.
16. Kazunori Kawamura, Hiroki Hashimoto, Masanao Ogawa, Joji Yui, Hidekatsu Wakizaka, Tomoteru Yamasaki, Akiko Hatori, Lin Xie, Katsushi Kumata, Masayuki Fujinaga, Ming-Rong Zhang: Synthesis, metabolite analysis, and in vivo evaluation of [11C]irinotecan as a novel positron emission tomography (PET) probe 新規 PET プローブとしての[11C]イリノテカンの合成、代謝物分析、インビボ評価, *Nuclear Medicine and Biology*, 40(5), 651 - 657, 2013-07.
17. Natsuko Kobayashi, Naoko Iwata, Takayuki Saito, Hisashi Suzuki, Ren Iwata, Keitaro Tanoi, Tomoko Nakanishi: Different magnesium uptake and transport activity along the rice root axis revealed by a 28Mg tracer experiments, *Soil Science and Plant Nutrition*, 59(2), 149 - 155, 2013.
18. Natsuko Kobayashi, Naoko Iwata, Takayuki Saito, Hisashi Suzuki, Ren Iwata, Keitaro Tanoi, Tomoko Nakanishi: Application of 28Mg for Characterization of Mg Uptake in Rice Seedling under Different pH Conditions, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 296(1), 531 - 534, 2013-04.
19. Szelecsenyi Ferenc, Zoltan Kovacs, Koutarou Nagatsu, Ming-Rong Zhang and Kazutoshi Suzuki: Excitation function of (p,α) nuclear reaction on enriched 67Zn: Possibility of production of 64Cu at low energy cyclotron, *Radiochimica Acta*, 2013-12. (In Press)

#### <学会及び研究会口頭発表等>

1. 謝琳, 由井 讓二, 羽鳥 晶子, 山崎 友照, 熊田 勝志, 脇坂 秀克, 張 明榮: TSPO を標的とした [18F]FEDAC による肝細胞癌イメージング Molecular Imaging of Hepatocellular Carcinoma with TSPO Radioligand [18F]FEDAC, 日本分子イメージング学会第 8 回学会総会・学術集会, 横浜, 2013-05-31.
2. Lin Xie, Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Hidekatsu Wakizaka, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: First imaging of metabotropic glutamate 1 receptor in melanoma with a positron emission tomography probe 18F-FITM, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging 2013 Annual Meeting, The Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, Vancouver, 2013-06-12.

3. Kazuhiro Takahashi:  $^{64}\text{Cu}$ -DOTA-trastuzumab-PET imaging in patients with HER2-positive breast cancer, 神経疾患の分子プローブによるイメージング及び標的治療に関する新しい進展, 日本学術振興会, Shanghai, 2013-09-20.
4. Ming-Rong Zhang: Development and production of radiopharmaceuticals for brain PET imaging in NIRS, 神経疾患の分子プローブによるイメージング及び標的治療に関する新しい進展, 日本学術振興会, Shanghai, 2013-09-20.
5. Lin Xie: Molecular Imaging of Multiple Sclerosis and Non-alcoholic Fatty Liver Disease Using Translocator Protein (18kDa)Radioligands, 神経疾患の分子プローブによるイメージング及び標的治療に関する新しい進展, 日本学術振興会, Shanghai, 2013-09-20.
6. Masayuki Fujinaga: Radiosynthesis and evaluation of PET ligands for imaging of the metabotropic glutamate 1 receptor, 神経疾患の分子プローブによるイメージング及び標的治療に関する新しい進展, 日本学術振興会, Shanghai, 2013-09-20.
7. 小高 謙一, 伊藤 康一, 森谷 純治, 岡田 真希, 岡田 将, 舘野 馨, 由井 譲二, 謝 琳, 岡村 敏充, 菊池 達矢, 小畠 隆行, 小林 欣夫, 小室 一成, 小瀧 勝, 佐賀 恒夫, 張 明栄: マンガン標識末梢血単核球の脳虚血モデルラットへの脳移植と動態追跡, 第 41 回日本磁気共鳴医学会大会, 徳島, 2013-09-21.
8. 謝 琳, 由井 譲二, 羽鳥 晶子, 山崎 友照, 熊田 勝志, 脇坂 秀克, 吉田 勇一郎, 藤永 雅之, 河村 和紀, 張 明栄: トランスロケータタンパク質 (18 k Da)、非アルコール性脂肪肝疾患診断の新たな分子イメージングバイオマーカー Translocator protein(18kDa), a potential molecular imaging biomarker for non-invasively distinguishing non-alcoholic fatty liver disease, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
9. 山崎 友照, 藤永 雅之, 河村 和紀, 由井 譲二, 羽鳥 晶子, 大矢 智幸, 謝 琳, 脇坂 秀克, 吉田 勇一郎, 福村 利光, 張 明栄:  $^{18}\text{F}$ -FITM-PET を用いたラット脳におけるリガンド親和性と代謝型グルタミン酸受容体 1 型の受容体密度の生体内測定, In Vivo Measurement of the Affinity and Density of Metabotropic Glutamate Receptor Subtype 1 in Rat Brain Using  $^{18}\text{F}$ -FITM in Small-Animal PET, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
10. 河村 和紀, 山崎 友照, 熊田 勝志, 古塚 賢士, 武井 誠, 由井 譲二, 羽鳥 晶子, 謝 琳, 藤永 雅之, 橋本 裕輝, 張 明栄: 代謝型グルタミン酸受容体サブタイプ 5 選択的 PET 用リガンド [ $^{11}\text{C}$ ]ABP688 の Z 異性体混入による脳 PET 測定の影響 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
11. 山崎 友照, 前田 純, 藤永 雅之, 念垣 信樹, 張 明栄: 代謝型グルタミン酸受容体 1 (mGlu1) を標的とした PET リガンド [ $^{11}\text{C}$ ]ITMM と [ $^{11}\text{C}$ ]ITDM のサル脳における動態比較, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
12. 藤永 雅之, 山崎 友照, 由井 譲二, 羽鳥 晶子, 熊田 勝志, 謝 琳, 小川 政直, 河村 和紀, 張 明栄: FITM 構造を持つ新規  $^{18}\text{F}$  標識 mGlu1 受容体用 PET プローブの合成と評価, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
13. 謝 琳, 由井 譲二, 藤永 雅之, 羽鳥 晶子, 山崎 友照, 熊田 勝志, 脇坂 秀克, 念垣 信樹, 河村 和紀, 張 明栄: メラノーマに過剰発現する mGlu1 を標的とする [ $^{18}\text{F}$ ]FITM-PET イメージング, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.



14. 橋本 裕輝, 河村 和紀, 古塚 賢士, 伊藤 岳人, 山崎 友照, 張 明栄: オンラインカラムスイッチング法 HPLC による PET 薬剤代謝分析, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
15. 河村 和紀, 鈴木 寿, 熊倉 嘉勝, 山崎 清一, 長沼 陽二, 武井 誠, 古塚 賢士, 根本 和義, 脇 厚生, 藤林 康久, 張 明栄: 日本核医学会 PET 薬剤製造基準に適合するための既存ホットセルの改造, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
16. 橋本 裕輝, 河村 和紀, 張 明栄, 脇 厚生, 藤林 康久: FDG 注射液中の FDG 及び CIDG 分析法のバリデーション, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
17. 岡田 真希: PET プローブの新規測定法の開発と新規 PET の開発・評価, 第 2 回腫瘍分子イメージング夏季集中セミナー, 北海道大学, 2013-07-29.
18. 謝 琳、由井 譲二、藤永 雅之、羽鳥 晶子、山崎 友照、張 明栄: [18F]FITM-PET を用いたメラノーマに過剰発現する代謝型グルタミン酸 1 型受容体, を標的とする腫瘍イメージングの開発, 第 13 回放射性医薬品・画像診断薬研究会, 京都, 2013-12-14.
19. 永津 弘太郎: 核種製造 (44mSc/44Sc を中心に), PET 化学ワークショップ 2014, 神戸, 2014-02-08
20. Kazunori Kawamura, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Tomoteru Yamasaki, Akiko Hatori, Lin Xie, Hidekatsu Wakizaka, Katsushi Kumata, Yuichirou Yoshida, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of 18F-and 11C-labeled ghrelin receptor ligand as a PET probe, The 20th International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Society of Radiopharmaceutical Sciences, Jeju, 2013-05-17.
21. Katsushi Kumata, Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Akiko Hatori, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of [11C]MMPIP for metabotropic glutamate receptor subtype 7 in brain, The 20th International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Society of Radiopharmaceutical Sciences, Jeju, 2013-05-17.
22. Katsushi Kumata, Joji Yui, Lin Xie, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis of glycogen synthase kinase 3beta (GSK-3beta) inhibitors containing [11C]methylsulfide, [11C]methylsulfoxide and [11C]methylsulfone, The 20th International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Society of Radiopharmaceutical Sciences, Jeju, 2013-05-17
23. Masayuki Fujinaga, Masanao Ogawa, Joji Yui, Katsushi Kumata, Lin Xie, Tomoteru Yamasaki, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang, Radiosynthesis of a PET tracer bearing [11C]carbamate moiety for FAAH using [11C]COCl<sub>2</sub> or [11C]CO<sub>2</sub>, The 20th International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Society of Radiopharmaceutical Sciences, Jeju, 2013-05-17.
24. Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Katsushi Kumata, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis and evaluation of novel PET ligands deriving from FITM for imaging of the metabotropic glutamate 1 receptor, The 20th International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Society of Radiopharmaceutical Sciences, Jeju, 2013-05-17.
25. Yoko Shimoda, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Lin Xie, Katsushi Kumata, Tomoteru Yamasaki, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis of the 5-HT<sub>7</sub> receptor antagonist 1-[2-(4-[11C]methoxyphenyl)phenyl]piperazine, The 20th International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Society of Radiopharmaceutical Sciences, Jeju, 2013-05-17.
26. Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Akiko Hatori, Katsushi Kumata, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: [11C]ITDM is a useful PET ligand for quantification of

metabotropic glutamate 1 receptor in rat and monkey brains, The 20th International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Society of Radiopharmaceutical Sciences, Jeju, 2013-05-17.

27. 謝 琳, 由井 讓二, 羽鳥 晶子, 山崎 友照, 熊田 勝志, 脇坂 秀克, 張 明榮: TSPO を標的とした [18F]FEDAC による肝細胞癌イメージング Molecular Imaging of Hepatocellular Carcinoma with TSPO Radioligand [18F]FEDAC, 日本分子イメージング学会第 8 回学会総会・学術集会, 横浜, 2013-05-31.
28. Kazunori Kawamura, Kenji Furutsuka, Tomoteru Yamasaki, Katsushi Kumata, Makoto Takei, Joji Yui, Akiko Hatori, Lin Xie, Hiroki Hashimoto, Ming-Rong Zhang: Efficient production of (E)-11C-ABP688 by the HPLC separation, as a useful PET probe for the imaging of the metabotropic glutamate receptor subtype 5 HPLC 分取による mGluR5 受容体イメージング用 PET プロブである (E)-11C-ABP688 の効率的な製造法, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging 2013 Annual Meeting, The Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, Vancouver, 2013-06-12.
29. Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: PET imaging of metabotropic glutamate receptor subtype 1 in the ischemic rat brain using 11C-ITMM, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging 2013 Annual Meeting, The Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, Vancouver, 2013-06-12.
30. Masayuki Hanyu, Atsushi Tsuji, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura: Radiosynthesis and preliminary PET study of an 11C-labelled RGD peptide containing [1-11C]1,2,3,4-tetrahydro- $\beta$ -carboline-3-carboxylic acid, 10th Australian Peptide Conference, Australian Peptide Association, Penang, 2013-09-13.
31. Masayuki Hanyu, Aya Sugyou, Aung U Winn, Atsushi Tsuji, Kazunori Kawamura, Tsuneo Saga, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura: Radiolabeling and Preliminary PET Study of Carbon-11 Labeled Amino Acids and Oligopeptides by Using Carbon-11 Formaldehyde, 第 50 回ペプチド討論会, 日本ペプチド学会, 大阪, 2013-11-08.
32. 熊田 勝志, 由井 讓二, 藤永 雅之, 謝 琳, 山崎 友照, 小川 政直, 河村 和紀, 張 明榮: 脂肪酸アミド加水分解酵素(FAAH)を標的とする新規 PET リガンドの合成と評価, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
33. 菊池 達矢, 峯岸 克行, 橋本 裕輝, 張 明榮, 加藤 孝一: DMSO 中における TBAF を塩基として用いた [11C]H3I による N-および O-11C-メチル化 N- and O-methylation using TBAF and [11C]H3I in DMSO, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
34. 峯岸 克行, 大矢 智幸, 永津 弘太郎, 鈴木 和年, 張 明榮: 遠隔回収法による  $^{68}\text{Ge}$  の簡易な製造, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
35. 岡田 真希, 辻 厚至, 菊池 達矢, 脇坂 秀克, 岡村 敏充, 加藤 孝一, 張 明榮: [3-11C]AIB および [11C]MeAIB による血液脳関門の高感度 PET イメージング, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
36. 大矢 智幸, 菊池 達矢, 張 明榮, 入江 俊章: 定量目的の PET トレーサに望まれる動態特性, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
37. 下田 陽子, 由井 讓二, 羽鳥 晶子, 熊田 勝志, 藤永 雅之, 謝 琳, 山崎 友照, 小川 政直, 河村 和紀, 張 明榮: [11C]COCl<sub>2</sub> を利用した脂肪酸アミド加水分解酵素新規 PET プロブの開発, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.

38. 岡村 敏充, 菊池 達矢, 岡田 真希, 脇坂 秀克, 張 明栄: プリン誘導体の MRP1 イメージングプローブとしての評価, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
39. 鈴木 寿, 永津 弘太郎, 深田 正美, 峯岸 克行, 張 明栄:  $^{68}\text{Zn}(p,x)$  反応による  $^{67}\text{Cu}$  及び  $^{67}\text{Ga}$  の同時製造方法の検討, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.
40. 永津 弘太郎, 峯岸 克行, 張 明栄: 医療用小型加速器による  $\text{Tc-99m}$  の遠隔製造法の開発, 第 53 回日本核医学会学術総会, 福岡国際会議場, 2013-11-10.

#### <その他：執筆>

1. 河村 和紀, 山崎 友照: 中枢神経のトランスポーター・チャンネル：新たな創薬標的として分子イメージングによる血液脳関門の薬物トランスポーターの機能評価, 脳 21, 16(3), 85 - 90, 2013-07.

### 4—1. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究

#### <原著論文等>

1. T. Nishio, K. Matsushita, M. Sekine, S. Nakamura, S. Tanaka, A. Miyatake: Study of dose-volume delivery guided proton therapy, J. J. Radiol. Tech. 69(11), 1297-1305 (2013).
2. A. Miyatake, T. Nishio: Application of activity pencil beam algorithm using measured distribution data of positron emitter nuclei for therapeutic SOBP proton beam," Med. Phys. 40(9), 091709-1-9 (2013).
3. Y. Egashira, T. Nishio, K. Hotta, R. Kohno, M. Uesaka: Application of the pencil-beam redefinition algorithm in heterogeneous media for proton therapy, Phys. Med. Biol. 58(4), 1169-1184 (2013).

#### <Proceedings等>

1. T. Nishio, T. Okamoto, S. Kabuki, T. Tanimori, T. Aso, S. Nakamura, M. Hiraoka, A. Miyatake, "Study of dose delivered tumor damage monitoring system in innovative proton therapy," Jpn. J. Med. Phys. Proc., 34 Supple. 1, 66 (2014).
2. K. Matsushita, T. Nishio, K. Yogo, M. Tsuneda, Y. Aono, M. Sekine, K. Ieki, "Measurement of the production cross-section in fragmentation reaction for proton therapy," Jpn. J. Med. Phys. Proc., 34 Supple. 1, 68 (2014).
3. S. Tanaka, T. Nishio, K. Matsushita, S. Nakamura, M. Tsuneda, Y. Aono, K. Yogo, S. Kabuki, M. Uesaka, "Study of proton CT imaging," Jpn. J. Med. Phys. Proc., 34 Supple. 1, 69 (2014).
4. S. Nakamura, H. Asai, S. Akita, Y. Kamikubo, M. Ishibashi, H. Takei, K. Maruyama, K. Hayakawa, K. Kurita, T. Nishio, "Development and evaluation of the dosimetry system for proton therapy," Jpn. J. Med. Phys. Proc., 33 Supple. 3, 144 (2013).
5. T. Nishio, "PET imaging in proton therapy," Jpn. J. Med. Phys. Proc., 33 Supple. 1, 10 (2013).
6. K. Matsushita, T. Nishio, S. Tamaki, T. Inaniwa, R. Noguchi, T. Suzuki, T. Nakamura, M. Kawabata, A. Sugiura, "Study of nuclear fragmentation reaction in the body for proton therapy," Jpn. J. Med. Phys. Proc., 33 Supple. 1, 124 (2013).
7. S. Tamaki, T. Nishio, T. Furuta, T. Maeyama, K. Ishikawa, N. Fukunishi, S. Noda, K. Fukasaku, S. Takagi, R. Himeno, "Study of proton therapy simulation included effect of secondary particle generated in nuclear reaction," Jpn. J. Med. Phys. Proc., 33 Supple. 1, 174 (2013).
8. R. Noguchi, T. Nishio, K. Sugawara, T. Okamoto, S. Tamaki, "Development of dynamic tumor locating system for accurate proton therapy," Jpn. J. Med. Phys. Proc., 33 Supple. 1, 200 (2013).

9. T. Suzuki, M. Kawabata, S. Kabuki, H. Kubo, T. Tanimori, T. Nishio, “Development and verification of Bragg Peak locating system in patient body by proton irradiation,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 33 Supple. 1, 201 (2013).

#### ＜学会及び研究会口頭発表等＞

1. T. Aso, G. Iwai, W. Takase, T. Sasaki, Y. Watase, Y. Maeda, T. Yamashita, T. Akagi, S. Harada, T. Nishio, S. Y. Cai, T. C. Chao, E. Yen, T. H. Wu, Y. T. Lin, “Performance evaluation of Geant4 Based Particle Therapy System Simulation Framework in Grid Environments,” International Symposium on Grids & Clouds, Taiwan, March 23-28, 2014.
2. T. Aso, T. Akagi, G. Iwai, A. Kimura, T. Maeda, N. Matsufuji, T. Nishio, C. Omachi, T. Sasaki, W. Takase, T. Toshito, T. Yamashita, Y. Watase, “Recent updates and plan in Geant4 based particle therapy system simulation framework,” 2013 IEEE NSS, Seoul, October 27 – November 2, 2013.
3. M. Yamada, D. Amano, T. Tachikawa, H. Nonaka, T. Nishio, “Built in online-PET system of Sumitomo proton therapy system,” ACCAPP 2013, Bruges, August 5 – 8, 2013.
4. 西尾禎治、“高精度放射線治療のための医学物理研究-日本から世界への発信を目指して-”、第11回広島放射線治療研究会、2014年5月17日。
5. 西尾禎治、岡本俊、株木重人、谷森達、阿蘇司、中村哲志、平岡眞寛、宮武彩、“革新的陽子線治療技術による腫瘍線量応答性観測システムの研究”、日本医学物理学会第107回学術大会、2014年4月10-13日。
6. 松下慶一郎、西尾禎治、余語克紀、恒田雅人、青野裕樹、関根雅晃、家城和夫、“陽子線治療のための標的原子核破砕反応における実効反応断面積及び $^{10}\text{C}$ 、 $^{11}\text{C}$ 生成断面積の測定”、日本医学物理学会第107回学術大会、2014年4月10-13日。
7. 田中創大、西尾禎治、松下慶一郎、中村哲志、恒田雅人、青野裕樹、余語克紀、株木重人、上坂充、“陽子線CT画像取得法の研究”、日本医学物理学会第107回学術大会、2014年4月10-13日。
8. 西尾禎治、漆山秋雄、黒河千恵、“組織等価型熱蛍光フィルム陽子線線量特性の検証”、日本放射線腫瘍学会第26回学術大会、2013年10月18-20日。
9. 松下慶一郎、西尾禎治、関根雅晃、家城和夫、“陽子線治療における体内中での標的原子核破砕反応の研究”、日本放射線腫瘍学会第26回学術大会、2013年10月18-20日。
10. 関根雅晃、西尾禎治、松下慶一郎、小泉哲夫、“陽子線照射領域シミュレーションのための核破砕反応の断面積測定”、日本放射線腫瘍学会第26回学術大会、2013年10月18-20日。
11. 中村哲志、浅井博之、秋田峻吾、上窪純史、石橋京、武居秀行、丸山浩一、早川和重、西尾禎治、“陽子線治療用線量分布測定システムの開発及び評価”、日本医学物理学会第106回学術大会、2013年9月17-18日。
12. 西尾禎治、“陽子線治療におけるPETイメージング”、合同シンポジウム3-医学物理におけるイノベーションテクノロジー、日本医学物理学会第105回学術大会、2013年4月11-14日。
13. 松下慶一郎、西尾禎治、玉木聖一、稲庭拓、野口綾太、鈴木龍彦、中村哲志、川端麻莉子、杉浦彰則、“陽子線治療における体内中での標的原子核破砕反応の研究”、日本医学物理学会第105回学術大会、2013年4月11-14日。

14. 玉木聖一、西尾禎治、古田琢哉、前山拓哉、石川颯一、福西暢尚、姫野龍太郎、“原子核反応による生成2次粒子を考慮した陽子線治療シミュレーションの研究”、日本医学物理学会第105回学術大会、2013年4月11-14日。
15. 野口綾太、西尾禎治、菅原浩一郎、玉木聖一、岡本俊、“高精度陽子線照射のための動的腫瘍位置確認システムの開発”、日本医学物理学会第105回学術大会、2013年4月11-14日
16. 鈴木龍彦、川端麻莉子、株木重人、窪秀利、谷森達、西尾禎治、“陽子線照射における体内中ブラックピーク位置計測システムの基礎検証”、日本医学物理学会第105回学術大会、2013年4月11-14日。

#### 4—2. 重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究

##### <学会及び研究会口頭発表等>

1. D. Ohsawa, H. Tawara, T. Okada, F. Soga, M. E. Galassi, and R. D. Rivarola: Double and single differential cross sections for secondary electron production in 6.0 MeV/u O<sup>8+</sup> + H<sub>2</sub>O collisions, XXVIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 7/24~ 7/31 2013, Lanzhou, China.

#### 4—3. 最前方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定

##### <学会及び研究会口頭発表等>

1. 和西航平, 魚住 裕介, 山田 剛広, 高田 真志, 古場 裕介, 鎌田 創: 粒子線治療に用いる陽子反応二重微分断面積の最前方測定, バイオメディカルファジィシステム学会, 第26回年次大会, 北海学園大学 (2013年10月) .

##### <学位論文>

1. 和西航平: 最前方角における荷電粒子生成反応二重微分断面積の測定, 九州大学 (平成26年3月) .

#### 4—4. 核破砕片生成二重微分断面積の測定

##### <Proceedings等>

1. 1. T.Sanami et al., "Target Dependency of Light Mass Fragment Production DDX for 6 MeV/u Carbon Induced Reaction" Proc. 2012 Symp. Nucl. Data (JAEA-Conf 2013-002) 185 (2013).

##### <学会及び研究会口頭発表等>

1. 佐波俊哉、萩原雅之、鎌田創、高田真志: 70MeVヘリウム入射に対するフラグメント生成二重微分断面積の測定、日本原子力学会秋の大会(2012/9/3-5 八戸工業大学)、C07.
2. Toshiya SANAMI: Light mass fragment production DDXs of 70 MeV proton, helium and carbon induced reactions, 2013 Symposium on Nuclear Data (2013/11/14-15 Fukui International University) P10.

#### 4—5. 陽子線の標的核破砕反応のエネルギー依存性に関する実験的研究

##### <学会及び研究会口頭発表等>

1. S. Kodaira: Dosimetric measurement of secondary particles from therapeutic radiation beams, The 2nd Global Chinese Congress of Radiation Research (GCCRR2014), Suzhou, China, May.11-15, 2014. (招待講演)

## 6—1. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発

### <学会及び研究会口頭発表等>

1. Y. Uchihori, H. Kitamura, S. Kobayashi, S. Kodaira: Development of Portable Radiation Dosimeters for Radiation Protection at Low Earth Orbit and on Lunar Surface, Asia Oceania Geosciences Society 10th Annual Meeting, 24 to 28 June 2013, Brisbane, Australia.

## 6—2. シリコン半導体センサーの陽子線に対する特性評価

### <原著論文等>

1. M.Takada, T.Nakamura, M.Matsuda, T.Nunomoya: Simulation of Response Functions of Fast Neutron Sensors and Development of Thin Neutron Silicon Sensor, Rad. Prot. Dosim. (2014)

### <学会及び研究会口頭発表等>

1. M.Takada, T.Nakamura, M.Matsuda, T.Nunomoya: Simulation of Response Functions of Fast Neutron Sensor, NEUDOS-12, Neutron and Ion Dosimetry Symposium, Aix-en-Provence, France, June 3-7, 2013.

## 8—1. 検出器校正用の照射場の作成

### <学会及び研究会口頭発表等>

1. Hisashi Kitamura, Satoshi Kodaira, Yukio Uchihori, Nakahiro Yasuda, Eric Benton, Thomas Berger, Michael Hajek, Iva Ambrozova, Ondrej Ploc: Status Report of the ICCHIBAN projects, Workshops on Radiation Monitoring for the International Space Station, Budapest, Hungary (2013-09-05).
2. Hisashi Kitamura, Yukio Uchihori, Satoshi Kodaira, Satoru Hojo, Akinori Sugiura, Takanori Okada, Yuichi Takahashi, Ryuji Nakayama, Akira Goto: Reference Field of Low LET Particles in the NIRS-Cyclotron Facility, HITSRS2013, Chiba, Japan (2013-05-15).

## 1 1. 関連資料

平成25年度第I期・II期マシンタイム予定表

| 月日       | 小型サイクロトロン |      | 大型サイクロトロン   |                          | 月日       | 小型サイクロトロン |   | 大型サイクロトロン   |    |
|----------|-----------|------|---|--------------------------|----------|-----------|---|---|----|
|          | 午前        | 午後   | 午前  | 午後                       |          | 午前        | 午後  | 午前  | 午後 |
| 4月1日(月)  | メンテナンス    | RI生産 | メンテナンス  | R&D                      | 4月22日(月) | メンテナンス    |   | メンテナンス  |    |
| 4月2日(火)  |           | RI生産 | R&D   |                          | 4月23日(火) | RI生産      | RI生産( <sup>64</sup> Cu)<br>P12,C4,9:00~                     | R&D<br>He35MeV, 5μA, C9                             |    |
| 4月3日(水)  |           | RI生産 | RI生産<br>P18MeV, 15μA, C9  |                          | 4月24日(水) | RI生産      | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9                                    |   |    |
| 4月4日(木)  |           | RI生産 | RI生産<br>He33MeV, 15μA, C9                                       |                          | 4月25日(木) | RI生産      | RI生産<br>He35MeV, 10μA, C9                                   |   |    |
| 4月5日(金)  |           | RI生産 | RI生産<br>( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30,C4,9:00~ | R&D                      | 4月26日(金) | RI生産      | 高精度陽子線治療のための<br>基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾)<br>P60MeV / 50nA<br>C8 |   |    |
| 4月6日(土)  |           |      |   |                          | 4月27日(土) |           |   |   |    |
| 4月7日(日)  |           |      |   |                          | 4月28日(日) |           |   |   |    |
| 4月8日(月)  | メンテナンス    | RI生産 | メンテナンス  | RI生産<br>P18MeV, 5μA, C9  | 4月29日(月) |           |   | 昭和の日  |    |
| 4月9日(火)  |           | RI生産 | RI生産( <sup>28</sup> Mg所外)<br>He75, C4                           |                          | 4月30日(火) | RI生産      | RI生産<br>He33MeV, 15μA, C9                                   |   |    |
| 4月10日(水) |           | RI生産 | RI生産( <sup>124</sup> I所内)<br>H <sub>2</sub> 27, 10μA, C9        |                          | 5月1日(水)  | RI生産      | RI生産<br>He34MeV, 15μA, C9                                   |   |    |
| 4月11日(木) |           | RI生産 | RI生産<br>He33MeV, 12μA, C9                                       |                          | 5月2日(木)  | RI生産      | RI生産<br>P60MeV, 3μA, C9                                     |   |    |
| 4月12日(金) |           | RI生産 | 宇宙放射線の荷電粒子成分<br>検出器の開発 内堀<br>P80MeV / 10nA<br>C6                |                          | 5月3日(金)  |           | 憲法記念日   |   |    |
| 4月13日(土) |           |      | 超電導線材ならびにコイル構成材料の<br>耐放射線性に関する研究 宮原<br>D30MeV / 20μA<br>C3      |                          | 5月4日(土)  |           | みどりの日   |   |    |
| 4月14日(日) |           |      |   |                          | 5月5日(日)  |           | こどもの日   |   |    |
| 4月15日(月) | メンテナンス    | RI生産 | メンテナンス  | R&D<br>He34MeV, 10μA, C9 | 5月6日(月)  |           | 振替休日  |   |    |
| 4月16日(火) |           | RI生産 | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9  |                          | 5月7日(火)  | RI生産      | 中性子線量計の開発と応答関数の<br>評価に関する研究 高田<br>P8MeV / 1nA<br>C6         |   |    |
| 4月17日(水) |           | RI生産 | 陽子線の標的核破砕反応の<br>エネルギー依存性に関する実験的研究 小平<br>P60MeV / 10nA<br>C8     |                          | 5月8日(水)  | RI生産      | RI生産( <sup>64</sup> Cu)<br>P12,C4,9:00~                     | 中性子線量計の開発と応答関数の<br>評価に関する研究 高田<br>P8MeV / 1nA<br>C6 |    |
| 4月18日(木) |           | RI生産 | RI生産( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20μA, C4    |                          | 5月9日(木)  | RI生産      | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9                                    |   |    |
| 4月19日(金) |           | RI生産 | RI生産<br>He34MeV, 10μA, C9                                       | R&D                      | 5月10日(金) | RI生産      | RI生産<br>P60MeV, 1μA, C9                                     |   |    |
| 4月20日(土) |           |      |   |                          | 5月11日(土) |           | 超電導線材ならびにコイル構成材料の<br>耐放射線性に関する研究 宮原<br>D30MeV / 20μA<br>C3  |   |    |
| 4月21日(日) |           |      | 一般公開  |                          | 5月12日(日) |           |   |   |    |



| 月日       | 小型サイクロトロン |      | 大型サイクロトロン   |   | 月日       | 小型サイクロトロン |        | 大型サイクロトロン   |                          |
|----------|-----------|------|---|---|----------|-----------|--------|---|--------------------------|
|          | 午前        | 午後   | 午前  | 午後  |          | 午前        | 午後     | 午前  | 午後                       |
| 5月13日(月) | メンテナンス    |      | メンテナンス  |   | 6月3日(月)  | メンテナンス    | RI生産   | メンテナンス  | R&D<br>P60MeV, 5μA, C9   |
| 5月14日(火) | RI生産      |      | 高精度陽子線治療のための<br>基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾)<br>P70MeV / 50nA<br>C8     |   | 6月4日(火)  | RI生産      |        | RI生産( <sup>64</sup> Cu)<br>P12,C4,9:00~                       | RI生産<br>P18MeV, 15μA, C9 |
| 5月15日(水) | RI生産      |      | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9  |   | 6月5日(水)  | RI生産      |        | 超エネルギー電子観測装置の校正試験<br>JAXA(東尾)<br>P80MeV / 1nA<br>C6           |                          |
| 5月16日(木) | RI生産      |      | RI生産 ( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20μA, C4   |   | 6月6日(木)  | RI生産      |        | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9                                      |                          |
| 5月17日(金) | RI生産      |      | RI生産<br>He34MeV, 10μA, C9                                       |   | 6月7日(金)  | RI生産      |        | 中高エネルギー粒子による核反応の研究<br>高田(佐波)<br>P25MeV / 40nA<br>C6           |                          |
| 5月18日(土) |           |      |   |   | 6月8日(土)  |           |        | 中高エネルギー粒子による核反応の研究<br>高田(佐波)<br>P50MeV / 40nA<br>C6           |                          |
| 5月19日(日) |           |      |   |   | 6月9日(日)  |           |        |   |                          |
| 5月20日(月) | メンテナンス    | RI生産 | メンテナンス  | RI生産<br>P18MeV, 15μA, C1<br>P50MeV, 1μA, C9 | 6月10日(月) | メンテナンス    |        | メンテナンス  |                          |
| 5月21日(火) | RI生産      |      | RI生産<br>He33MeV, 10μA, C9<br>P50MeV, 1μA, C9                    |   | 6月11日(火) | RI生産      |        | RI生産( <sup>28</sup> Mg所外)<br>He75, C4                         |                          |
| 5月22日(水) | RI生産      |      | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9  |   | 6月12日(水) | RI生産      |        | RI生産<br>P18MeV, 20μA, C9                                      |                          |
| 5月23日(木) | RI生産      |      | 検出器校正用の照射場の作成<br>北村<br>He100MeV / 10nA<br>C8                    |   | 6月13日(木) | RI生産      |        | RI生産<br>P45MeV, 2μA, C9                                       |                          |
| 5月24日(金) | RI生産      |      | RI生産<br>( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30,C4,9:00~ | RI生産<br>P60MeV, 2μA, C9                     | 6月14日(金) | RI生産      |        | 宇宙放射線の荷電粒子成分<br>検出器の開発 内堀<br>P40MeV / 10nA<br>C6              |                          |
| 5月25日(土) |           |      | 陽子線の標的核破砕反応の<br>エネルギー依存性に関する実験的研究 小平<br>P50MeV / 10nA<br>C8     |   | 6月15日(土) |           |        |   |                          |
| 5月26日(日) |           |      |   |   | 6月16日(日) |           |        |   |                          |
| 5月27日(月) | メンテナンス    | RI生産 | メンテナンス  | R&D   | 6月17日(月) | メンテナンス    | RI生産   | メンテナンス  | R&D                      |
| 5月28日(火) | RI生産      |      | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9<br>P45MeV, 1μA, C9                     |   | 6月18日(火) | RI生産      |        | RI生産<br>P45MeV, 1μA, C9                                       |                          |
| 5月29日(水) | RI生産      |      | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9  |   | 6月19日(水) | RI生産      |        | RI生産<br>P60MeV, 2μA, C9                                       |                          |
| 5月30日(木) | RI生産      |      | RI生産<br>P60MeV, 2μA, C9   | R&D   | 6月20日(木) | RI生産      |        | RI生産 ( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20μA, C4 |                          |
| 5月31日(金) | RI生産      |      | 高精度陽子線治療のための<br>基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾)<br>P70MeV / 50nA<br>C8     |   | 6月21日(金) | RI生産      | メンテナンス | 最前方における荷電粒子生成<br>二重微分断面種の測定 九大(魚住)<br>P40MeV / 1nA<br>C6      | メンテナンス                   |
| 6月1日(土)  |           |      |   |   | 6月22日(土) |           |        |   |                          |
| 6月2日(日)  |           |      |   |   | 6月23日(日) |           |        |   |                          |

| 月日           | 小型サイクロトロン   |      | 大型サイクロトロン  |  | 月日           | 小型サイクロトロン |    | 大型サイクロトロン |    |
|--------------|-------------|------|--|--|--------------|-----------|----|-----------|----|
|              | 午前          | 午後   | 午前   | 午後   |              | 午前        | 午後 | 午前        | 午後 |
| 6月24日<br>(月) | メンテナンス      | RI生産 | メンテナンス   | 最前方における荷電粒子生成<br>二重微分断面積の測定 九大(魚住)<br>P40MeV / 1nA<br>C6 | 7月15日<br>(月) |           |    | 海の日       |    |
| 6月25日<br>(火) |             | RI生産 | 最前方における荷電粒子生成<br>二重微分断面積の測定 九大(魚住)<br>P40MeV / 1nA<br>C6                       |  | 7月16日<br>(火) | RI生産      |    | メンテナンス    |    |
| 6月26日<br>(水) |             | RI生産 | RI生産<br>He34MeV, 10μA, C9  | R&D  | 7月17日<br>(水) | RI生産      |    | メンテナンス    |    |
| 6月27日<br>(木) |             | RI生産 | 宇宙放射線の電子部品・材料・観測センサー<br>に与える影響に関する研究 JAXA(高島)<br>P70MeV / 10nA<br>C8           |  | 7月18日<br>(木) | RI生産      |    | メンテナンス    |    |
| 6月28日<br>(金) |             | RI生産 | RI生産<br>( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30,C4,9:00~                | R&D  | 7月19日<br>(金) | RI生産      |    | メンテナンス    |    |
| 6月29日<br>(土) |             |      |  |  | 7月20日<br>(土) |           |    |           |    |
| 6月30日<br>(日) |             |      |  |  | 7月21日<br>(日) |           |    |           |    |
| 7月1日<br>(月)  | 安全測定<br>本体室 | RI生産 | 安全測定<br>本体室・汎用照射室  | R&D  | 7月22日<br>(月) | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月2日<br>(火)  |             | RI生産 | RI生産<br>He34MeV, 10μA, C9  |  | 7月23日<br>(火) | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月3日<br>(水)  |             | RI生産 | RI生産<br>P18MeV, 15μA, C9   |  | 7月24日<br>(水) | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月4日<br>(木)  |             | RI生産 | RI生産<br>P30MeV, 25μA, C9   |  | 7月25日<br>(木) | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月5日<br>(金)  |             | RI生産 | RI生産<br>P60MeV, 2μA, C9  |  | 7月26日<br>(金) | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月6日<br>(土)  |             |      | 光学機器の耐放射線性能に関する研究<br>北村(川崎)<br>P70MeV / 10nA<br>C8                             |  | 7月27日<br>(土) |           |    |           |    |
| 7月7日<br>(日)  |             |      |  |  | 7月28日<br>(日) |           |    |           |    |
| 7月8日<br>(月)  | メンテナンス      | RI生産 | メンテナンス   | RI生産<br>P18MeV, C1                                       | 7月29日<br>(月) | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月9日<br>(火)  |             | RI生産 | RI生産( <sup>124</sup> I所内)<br>H <sub>2</sub> 27, 10μA, C9                       |  | 7月30日<br>(火) | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月10日<br>(水) |             | RI生産 | 小型衛星用データ処理系部品の<br>放射線環境に対する評価 JAXA(森下)<br>P70MeV / 1×10 <sup>9</sup> pps<br>C8 |  | 7月31日<br>(水) | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月11日<br>(木) |             | RI生産 | RI生産<br>He34MeV, 10μA, C9  |  | 8月1日<br>(木)  | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月12日<br>(金) |             | RI生産 | RI生産<br>P60MeV, 5μA, C9  |  | 8月2日<br>(金)  | 長期メンテナンス  |    |           |    |
| 7月13日<br>(土) |             |      |  |  | 8月3日<br>(土)  |           |    |           |    |
| 7月14日<br>(日) |             |      |  |  | 8月4日<br>(日)  |           |    |           |    |

| 月日       | 小型サイクロトロン |   | 大型サイクロトロン   |                          | 月日       | 小型サイクロトロン |   | 大型サイクロトロン                 |    |  |
|----------|-----------|---|---|--------------------------|----------|-----------|---|---------------------------|----|--|
|          | 午前        | 午後  | 午前  | 午後                       |          | 午前        | 午後  | 午前                        | 午後 |  |
| 8月5日(月)  | メンテナンス    | RI生産  | メンテナンス  | R&D                      | 8月26日(月) | メンテナンス    | メンテナンス  |                           |    |  |
| 8月6日(火)  | RI生産      |   | R&D   |                          | 8月27日(火) | RI生産      | RI生産( <sup>64</sup> Cu)<br>P12,C4,9:00~                         | RI生産<br>P15MeV, 20 μA, C9 |    |  |
| 8月7日(水)  | RI生産      |   | RI生産( <sup>28</sup> Mg所外)   |                          | 8月28日(水) | RI生産      | 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果 平山<br>P70MeV / 5nA<br>C8           |                           |    |  |
| 8月8日(木)  | RI生産      |   | RI生産  |                          | 8月29日(木) | RI生産      | RI生産<br>He34MeV, 10 μA, C9                                      |                           |    |  |
| 8月9日(金)  | RI生産      |   | 検出器校正用の照射場の作成<br>北村<br>p70MeV / 10nA<br>C8                              |                          | 8月30日(金) | RI生産      | RI生産<br>( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30,C4,9:00~ | RI生産<br>P60MeV, 5 μA, C9  |    |  |
| 8月10日(土) |           |   |   |                          | 8月31日(土) |           |   |                           |    |  |
| 8月11日(日) |           |   |   |                          | 9月1日(日)  |           |   |                           |    |  |
| 8月12日(月) | メンテナンス    | メンテナンス  |   | 9月2日(月)                  | 来期マシンタイム |           |   |                           |    |  |
| 8月13日(火) | メンテナンス    | R&D   |   | 9月3日(火)                  | 来期マシンタイム |           |   |                           |    |  |
| 8月14日(水) | メンテナンス    | R&D   |   | 9月4日(水)                  | 来期マシンタイム |           |   |                           |    |  |
| 8月15日(木) | メンテナンス    | R&D   |   | 9月5日(木)                  | 来期マシンタイム |           |   |                           |    |  |
| 8月16日(金) | メンテナンス    | 重粒子線の生物効果初期課程における基礎物理研究 京大(大澤)<br>O <sup>5+8+</sup> 96MeV / 500 nA<br>C10 |   | 9月6日(金)                  | 来期マシンタイム |           |   |                           |    |  |
| 8月17日(土) |           |   |   |                          | 9月7日(土)  |           |   |                           |    |  |
| 8月18日(日) |           |   |   |                          | 9月8日(日)  |           |   |                           |    |  |
| 8月19日(月) | メンテナンス    | RI生産  | メンテナンス  | RI生産<br>P45MeV, 2 μA, C9 | 9月9日(月)  | 来期マシンタイム  |   |                           |    |  |
| 8月20日(火) | RI生産      |   | RI生産<br>P15MeV, 20 μA, C9   |                          | 9月10日(火) | 来期マシンタイム  |   |                           |    |  |
| 8月21日(水) | RI生産      |   | 半導体素子デバイスのプロトン照射試験 HIREC<br>P70MeV / 30nA<br>C8                         |                          | 9月11日(水) | 来期マシンタイム  |   |                           |    |  |
| 8月22日(木) | RI生産      |   | RI生産 ( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20 μA, C4          |                          | 9月12日(木) | 来期マシンタイム  |   |                           |    |  |
| 8月23日(金) | RI生産      |   | RI生産<br>P30MeV, 25 μA, C9   |                          | 9月13日(金) | 来期マシンタイム  |   |                           |    |  |
| 8月24日(土) |           |   | 重粒子線の生物効果初期課程における基礎物理研究 京大(大澤)<br>C <sup>6+</sup> 72MeV / 500 nA<br>C10 |                          | 9月14日(土) |           |   |                           |    |  |
| 8月25日(日) |           |   |   |                          | 9月15日(日) |           |   |                           |    |  |

| 月 日          | 小型サイクロロン |      | 大型サイクロロン  |  | 月 日           | 小型サイクロロン |      | 大型サイクロロン  |   |
|--------------|----------|------|---|--|---------------|----------|------|---|---|
|              | 午前       | 午後   | 午前  | 午後   |               | 午前       | 午後   | 午前  | 午後  |
| 9月2日<br>(月)  | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス  | RI生産<br>P18MeV, 15μA, C1<br>P30MeV, 25μA, C9   | 9月23日<br>(月)  |          |      | 秋分の日  |   |
| 9月3日<br>(火)  | RI生産     |      | 高精度陽子線治療のための<br>基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾)<br>P70MeV / 50nA<br>C8               |  | 9月24日<br>(火)  | RI生産     |      | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9  |   |
| 9月4日<br>(水)  | RI生産     |      | RI生産<br>He34MeV, 15μA, C9<br>P18MeV, 3μA, C9                              |  | 9月25日<br>(水)  | RI生産     |      | RI生産<br>He34MeV, 15μA, C9   |   |
| 9月5日<br>(木)  | RI生産     |      | 光学機器の耐放射線性能に関する研究<br>北村(川崎)<br>P70MeV / 10nA<br>C8                        |  | 9月26日<br>(木)  | RI生産     |      | 高精度陽子線治療のための<br>基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾)<br>P70MeV / 50nA<br>C8               |   |
| 9月6日<br>(金)  | RI生産     |      | RI生産<br>P60MeV, 5μA, C9   |  | 9月27日<br>(金)  | RI生産     |      | RI生産<br>( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30,C4,9:00~           | RI生産<br>P18MeV, 5μA, C9   |
| 9月7日<br>(土)  |          |      |   |  | 9月28日<br>(土)  |          |      |   |   |
| 9月8日<br>(日)  |          |      |   |  | 9月29日<br>(日)  |          |      |   |   |
| 9月9日<br>(月)  | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス  | RI生産<br>( <sup>89</sup> Zr所内)<br>P15,C9,13:00~ | 9月30日<br>(月)  | メンテナンス   |      | メンテナンス  |   |
| 9月10日<br>(火) | RI生産     |      | プロトンに対するヒト培養細胞の<br>細胞致死効果のモデル解析 鈴木<br>P70MeV / 1nA<br>C8                  |  | 10月1日<br>(火)  | RI生産     |      | RI生産<br>( <sup>64</sup> Cu所外)<br>P12,C4,10:00~                            | RI生産<br>He34MeV, 10μA, C9                                       |
| 9月11日<br>(水) | RI生産     |      | RI生産<br>He34MeV, 15μA, C9   |  | 10月2日<br>(水)  | RI生産     |      | RI生産( <sup>28</sup> Mg所外)<br>He75, C4, 10:00~                             |   |
| 9月12日<br>(木) | RI生産     |      | RI生産( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20μA, C4, 10:00~19:00 |  | 10月3日<br>(木)  | RI生産     |      | RI生産<br>P60MeV, 5μA, C9   |   |
| 9月13日<br>(金) | RI生産     |      | RI生産<br>P18MeV, 3μA, C9<br>P60MeV, 5μA, C9                                |  | 10月4日<br>(金)  | RI生産     |      | 検出器校正用の照射場の作成<br>北村<br>P70MeV / 10nA<br>C8                                |   |
| 9月14日<br>(土) |          |      |   |  | 10月5日<br>(土)  |          |      |   |   |
| 9月15日<br>(日) |          |      |   |  | 10月6日<br>(日)  |          |      |   |   |
| 9月16日<br>(月) |          |      | 敬老の日  |  | 10月7日<br>(月)  | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス  | RI生産<br>( <sup>89</sup> Zr所内)<br>P18, 20μA, C1<br>P15,C9,16:00~ |
| 9月17日<br>(火) | RI生産     |      | プロトンに対するヒト培養細胞の<br>細胞致死効果のモデル解析 鈴木<br>P70MeV / 1nA<br>C8                  |  | 10月8日<br>(火)  | RI生産     |      | RI生産<br>P18MeV, 20μA, C9  |   |
| 9月18日<br>(水) | RI生産     |      | RI生産<br>( <sup>64</sup> Cu所内)<br>P12,C4,10:00~                            | RI生産<br>He34MeV, 15μA, C9                      | 10月9日<br>(水)  | RI生産     |      | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9  |   |
| 9月19日<br>(木) | RI生産     |      | RI生産<br>P30MeV, 25μA, C9  |  | 10月10日<br>(木) | RI生産     |      | RI生産( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20μA, C4, 10:00~19:00 |   |
| 9月20日<br>(金) | RI生産     |      | RI生産<br>P60MeV, 5μA, C9   |  | 10月11日<br>(金) | RI生産     |      | 人工衛星搭載用電子デバイス<br>シングルイベント評価試験 アクセルスペース<br>P70MeV / 1nA<br>C8              |   |
| 9月21日<br>(土) |          |      |   |  | 10月12日<br>(土) |          |      |   |   |
| 9月22日<br>(日) |          |      |   |  | 10月13日<br>(日) |          |      |   |   |

| 月日            | 小型サイクロロン        |                | 大型サイクロロン  |                          | 月日            | 小型サイクロロン   |      | 大型サイクロロン   |     |
|---------------|-----------------|----------------|---|--------------------------|---------------|------------|------|--|-----|
|               | 午前              | 午後             | 午前  | 午後                       |               | 午前         | 午後   | 午前   | 午後  |
| 10月14日<br>(月) |                 |                | 体育の日  |                          | 11月4日<br>(月)  |            |      | 振替休日   |     |
| 10月15日<br>(火) | RI生産            |                | RI生産<br>P30MeV, 20μA, C9                                    |                          | 11月5日<br>(火)  | RI生産       |      | RI生産<br>P12MeV, 8μA, C4  |     |
| 10月16日<br>(水) | RI生産            |                | RI生産<br>( <sup>64</sup> Cu所内)<br>P12,C4,10:00~              | R&D                      | 11月6日<br>(水)  | RI生産       |      | R&D  |     |
| 10月17日<br>(木) | RI生産            |                | RI生産<br>P18MeV, 10μA, C9                                    |                          | 11月7日<br>(木)  | RI生産       |      | R&D  |     |
| 10月18日<br>(金) | RI生産<br>(15時まで) | メン<br>テナ<br>ンス | RI生産<br>P60MeV, 10μA, C9                                    | メンテナ<br>ンス               | 11月8日<br>(金)  | RI生産       |      | プロトンに対するヒト培養細胞の<br>細胞致死効果のモデル解析 鈴木<br>P70MeV / 1nA<br>C8                   |     |
| 10月19日<br>(土) |                 |                | 停電  |                          | 11月9日<br>(土)  |            |      |  |     |
| 10月20日<br>(日) |                 |                |   |                          | 11月10日<br>(日) |            |      |  |     |
| 10月21日<br>(月) | メンテナンス          |                | メンテナンス  |                          | 11月11日<br>(月) | メンテナンス     |      | メンテナンス   |     |
| 10月22日<br>(火) | RI生産            |                | R&D<br>P18MeV, 20μA, 本体                                     |                          | 11月12日<br>(火) | RI生産       |      | R&D  |     |
| 10月23日<br>(水) | RI生産            |                | RI生産<br>P18MeV, 12μA, C9                                    |                          | 11月13日<br>(水) | RI生産       |      | プロトンに対するヒト培養細胞の<br>細胞致死効果のモデル解析 鈴木<br>P70MeV / 1nA<br>C8                   |     |
| 10月24日<br>(木) | RI生産            |                | RI生産<br>P30MeV, 20μA, C9                                    |                          | 11月14日<br>(木) | RI生産       |      | RI生産 ( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20μA, C4, 10:00~19:00 |     |
| 10月25日<br>(金) | RI生産            |                | RI生産<br>P18MeV, 12μA, C9                                    |                          | 11月15日<br>(金) | RI生産       |      | 高精度陽子線治療のための<br>基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾)<br>P70MeV / 50nA<br>C8                |     |
| 10月26日<br>(土) |                 |                | 陽子線の標的核破砕反応の<br>エネルギー依存性に関する実験的研究 小平<br>P40MeV / 10nA<br>C8 |                          | 11月16日<br>(土) |            |      |  |     |
| 10月27日<br>(日) |                 |                |   |                          | 11月17日<br>(日) |            |      |  |     |
| 10月28日<br>(月) | メンテナ<br>ンス      | RI生産           | メンテナ<br>ンス  | RI生産<br>P18MeV, 15μA, C1 | 11月18日<br>(月) | メンテナ<br>ンス | RI生産 | メンテナンス   |     |
| 10月29日<br>(火) | RI生産            |                | RI生産<br>( <sup>64</sup> Cu所内)<br>P12,C4,10:00~              | RI生産<br>P30MeV, 20μA, C9 | 11月19日<br>(火) | RI生産       |      | RI生産<br>( <sup>64</sup> Cu所内)<br>P12,C4,10:00~                             | R&D |
| 10月30日<br>(水) | RI生産            |                | R&D   |                          | 11月20日<br>(水) | RI生産       |      | R&D (P70 C8)   |     |
| 10月31日<br>(木) | RI生産            |                | RI生産<br>P18MeV, 12μA, C9                                    | R&D                      | 11月21日<br>(木) | RI生産       |      | RI生産<br>P18MeV, 3μA, C9  | R&D |
| 11月1日<br>(金)  | RI生産            |                | 最前方における荷電粒子生成<br>二重微分断面の測定 九大(魚住)<br>P40MeV / 1nA<br>C6     |                          | 11月22日<br>(金) | RI生産       |      | R&D (D20 C9)   |     |
| 11月2日<br>(土)  |                 |                |   |                          | 11月23日<br>(土) |            |      | 勤労感謝の日   |     |
| 11月3日<br>(日)  |                 |                | 文化の日  |                          | 11月24日<br>(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25日<br>(月) | メンテナンス      | RI生産 | メンテナンス   | R&D                      | 12月16日<br>(月) | メンテナンス   |    | メンテナンス   |                          |
| 11月26日<br>(火) | RI生産        |      | RI生産<br>( <sup>89</sup> Zr所内)<br>P15,C9,15μA                               |                          | 12月17日<br>(火) | RI生産     |    | RI生産<br>He34MeV, 15μA, C9  |                          |
| 11月27日<br>(水) | RI生産        |      | 最前方における荷電粒子生成<br>二重微分断面積の測定 九大(魚住)<br>P40MeV / 1nA<br>C6                   |                          | 12月18日<br>(水) | RI生産     |    | RI生産<br>He34MeV, 2μA, C9   |                          |
| 11月28日<br>(木) | RI生産        |      | 最前方における荷電粒子生成<br>二重微分断面積の測定 九大(魚住)<br>P40MeV / 1nA<br>C6                   |                          | 12月19日<br>(木) | RI生産     |    | R&D  |                          |
| 11月29日<br>(金) | RI生産        |      | RI生産<br>( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30,C4,9:00~            | RI生産<br>P30MeV, 10μA, C9 | 12月20日<br>(金) | RI生産     |    | RI生産<br>( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30,C4,9:00~      | RI生産<br>P30MeV, 15μA, C9 |
| 11月30日<br>(土) |             |      | 陽子線の標的核破砕反応の<br>エネルギー依存性に関する実験的研究 小平<br>P30MeV / 10nA<br>C8                |                          | 12月21日<br>(土) |          |    |  |                          |
| 12月1日<br>(日)  |             |      |  |                          | 12月22日<br>(日) |          |    |  |                          |
| 12月2日<br>(月)  | メンテナンス      | RI生産 | メンテナンス   | R&D                      | 12月23日<br>(月) |          |    | 天皇誕生日  |                          |
| 12月3日<br>(火)  | RI生産        |      | RI生産<br>( <sup>64</sup> Cu所外)<br>P12,C4,10:00~                             | R&D                      | 12月24日<br>(火) | RI生産     |    | RI生産<br>He34MeV, 10μA, C9  |                          |
| 12月4日<br>(水)  | RI生産        |      | RI生産( <sup>28</sup> Mg所外)<br>He75, C4, 10:00~                              |                          | 12月25日<br>(水) | RI生産     |    | R&D (He40)   |                          |
| 12月5日<br>(木)  | RI生産        |      | 超小型衛星搭載電子機器の<br>シングルイベント評価試験 東京理科大<br>P70MeV / 1nA<br>C8                   |                          | 12月26日<br>(木) | RI生産     |    | 宇宙放射線の電子部品・材料・観測センサー<br>に与える影響に関する研究 JAXA(高島)<br>P70MeV / 10nA<br>C8 |                          |
| 12月6日<br>(金)  | RI生産        |      | RI生産<br>P30MeV, 15μA, C9   |                          | 12月27日<br>(金) | RI生産     |    | R&D  |                          |
| 12月7日<br>(土)  |             |      |  |                          | 12月28日<br>(土) |          |    |  |                          |
| 12月8日<br>(日)  |             |      |  |                          | 12月29日<br>(日) |          |    |  |                          |
| 12月9日<br>(月)  | 安全測定<br>本体室 | RI生産 | 安全測定<br>本体室・汎用照射室  | R&D                      | 12月30日<br>(月) |          |    |  |                          |
| 12月10日<br>(火) | RI生産        |      | RI生産<br>P18MeV, 5μA, C9  |                          | 12月31日<br>(火) |          |    |  |                          |
| 12月11日<br>(水) | RI生産        |      | 半導体素子の放射線の影響に関する研究<br>JAXA(久保山)<br>P70MeV / 10nA<br>C8                     |                          | 1月1日<br>(水)   |          |    | 元日   |                          |
| 12月12日<br>(木) | RI生産        |      | RI生産 ( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20μA, C4, 10:00~19:00 |                          | 1月2日<br>(木)   |          |    |  |                          |
| 12月13日<br>(金) | RI生産        |      | RI生産<br>P30MeV, 15μA, C9   |                          | 1月3日<br>(金)   |          |    |  |                          |
| 12月14日<br>(土) |             |      | 宇宙放射線の荷電粒子成分<br>検出器の開発 内堀<br>He100MeV / 1pA<br>C6                          |                          | 1月4日<br>(土)   |          |    |  |                          |
| 12月15日<br>(日) |             |      |  |                          | 1月5日<br>(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   |
| 1月6日<br>(月)  | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス   | R&D | 1月27日<br>(月) | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス   | RI生産   |
| 1月7日<br>(火)  | RI生産     |      | 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果 平山<br>P70MeV / 5nA<br>C8                            |     | 1月28日<br>(火) | RI生産     |      | 小型衛星用データ処理系部品の放射線環境に対する評価 JAXA(森下)<br>P70MeV / $1 \times 10^9$ pps<br>C8         |  |
| 1月8日<br>(水)  | RI生産     |      | RI生産<br>He34MeV, 10 $\mu$ A, C9  |     | 1月29日<br>(水) | RI生産     |      | RI生産<br>He34MeV, 10 $\mu$ A, C9  |  |
| 1月9日<br>(木)  | RI生産     |      | R&D (He40)   |     | 1月30日<br>(木) | RI生産     |      | RI生産<br>P30MeV, 10 $\mu$ A, C9   | R&D  |
| 1月10日<br>(金) | RI生産     |      | 重粒子線の生物効果初期課程における基礎物理研究 京大(大澤)<br>O <sup>8+5+</sup> 96MeV / 500 nA<br>C10        |     | 1月31日<br>(金) | RI生産     |      | RI生産<br>( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30,C4,9:00~                  | RI生産   |
| 1月11日<br>(土) |          |      |  |     | 2月1日<br>(土)  |          |      |  |  |
| 1月12日<br>(日) |          |      |  |     | 2月2日<br>(日)  |          |      |  |  |
| 1月13日<br>(月) |          |      | 成人の日   |     | 2月3日<br>(月)  | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス   | R&D  |
| 1月14日<br>(火) | RI生産     |      | RI生産<br>P18MeV, 10 $\mu$ A, C9   |     | 2月4日<br>(火)  | RI生産     |      | RI生産<br>( <sup>64</sup> Cu所内)<br>P12,C4,10:00~                                   | R&D  |
| 1月15日<br>(水) | RI生産     |      | RI生産<br>P12MeV, 8 $\mu$ A, C4  |     | 2月5日<br>(水)  | RI生産     |      | RI生産<br>P18MeV, 10 $\mu$ A, C9   |  |
| 1月16日<br>(木) | RI生産     |      | 中高エネルギー粒子による核反応の研究<br>KEK(佐波)<br>P25MeV / 40nA<br>C6                             |     | 2月6日<br>(木)  | RI生産     |      | RI生産<br>He34MeV, 10 $\mu$ A, C9  |  |
| 1月17日<br>(金) | RI生産     |      | 中高エネルギー粒子による核反応の研究<br>KEK(佐波)<br>P50MeV / 40nA<br>C6                             |     | 2月7日<br>(金)  | RI生産     |      | 重粒子線の生物効果初期課程における基礎物理研究 京大(大澤)<br>O <sup>8+5+</sup> 96MeV / 500 nA<br>C10        |  |
| 1月18日<br>(土) |          |      |  |     | 2月8日<br>(土)  |          |      |  |  |
| 1月19日<br>(日) |          |      |  |     | 2月9日<br>(日)  |          |      |  |  |
| 1月20日<br>(月) | メンテナンス   |      | メンテナンス   |     | 2月10日<br>(月) | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス   | RI生産<br>P18MeV, 17 $\mu$ A, C2<br>P18MeV, 15 $\mu$ A, C1 |
| 1月21日<br>(火) | RI生産     |      | RI生産<br>He34MeV, 10 $\mu$ A, C9  |     | 2月11日<br>(火) |          |      | 建国記念の日   |  |
| 1月22日<br>(水) | RI生産     |      | RI生産<br>P18MeV, 10 $\mu$ A, C9   |     | 2月12日<br>(水) | RI生産     |      | CCDセンサのプロトン・ディスプレイメントダメージ評価 HIREC<br>P40MeV / 30nA<br>C8                         |  |
| 1月23日<br>(木) | RI生産     |      | RI生産 ( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20 $\mu$ A, C4, 10:00~19:00 |     | 2月13日<br>(木) | RI生産     |      | RI生産 ( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30, 20 $\mu$ A, C4, 10:00~19:00 |  |
| 1月24日<br>(金) | RI生産     |      | 重粒子線の生物効果初期課程における基礎物理研究 京大(大澤)<br>O <sup>8+5+</sup> 96MeV / 500 nA<br>C10        |     | 2月14日<br>(金) | RI生産     |      | 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾)<br>P70MeV / 50nA<br>C6                          |  |
| 1月25日<br>(土) |          |      |  |     | 2月15日<br>(土) |          |      | 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究 東病院(西尾)<br>P70MeV / 50nA<br>C8                          |  |
| 1月26日<br>(日) |          |      |  |     | 2月16日<br>(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   |
| 2月17日<br>(月) | メンテナンス   |      | メンテナンス  |  | 3月10日<br>(月) | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス  |  |
| 2月18日<br>(火) | RI生産     |      | RI生産<br>( <sup>64</sup> Cu所外)<br>P12,C4,10:00～                                | RI生産<br>P18MeV, 10 μA, C9                                  | 3月11日<br>(火) | RI生産     |      | 人工衛星搭載用電子デバイス<br>シングルイベント評価試験 アクセルスペース<br>P80MeV / 1nA<br>C8        |  |
| 2月19日<br>(水) | RI生産     |      | RI生産( <sup>28</sup> Mg所外)<br>He75, C4, 10:00～                                 |  | 3月12日<br>(水) | RI生産     |      | 宇宙放射線の電子部品・材料・観測センサー<br>に与える影響に関する研究 JAXA(高島)<br>P70MeV / 1nA<br>C8 |  |
| 2月20日<br>(木) | RI生産     |      | CCDセンサのプロトン・ディスプレイメント<br>ダメージ評価 HIREC<br>P40MeV / 30nA<br>C8                  |  | 3月13日<br>(木) | RI生産     |      | メンテナンス  | 小型衛星用データ処理系部品の放<br>射線環境に対する評価 JAXA(森下)<br>P70MeV / 1×10 <sup>9</sup> pps<br>C8 |
| 2月21日<br>(金) | RI生産     |      | RI生産<br>P60MeV, 5 μA, C9  |  | 3月14日<br>(金) | RI生産     |      | メンテナンス  |  |
| 2月22日<br>(土) |          |      |   |  | 3月15日<br>(土) |          |      | 全所停電  |  |
| 2月23日<br>(日) |          |      |   |  | 3月16日<br>(日) |          |      |   |  |
| 2月24日<br>(月) | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス  | RI生産( <sup>124</sup> I所内)<br>H <sub>2</sub> 27, C9, 11:00～ | 3月17日<br>(月) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 2月25日<br>(火) | RI生産     |      | RI生産<br>P18MeV, 10 μA, C9   | R&D  | 3月18日<br>(火) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 2月26日<br>(水) | RI生産     |      | RI生産<br>He34MeV, 15 μA, C9  |  | 3月19日<br>(水) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 2月27日<br>(木) | RI生産     |      | 宇宙放射線の電子部品・材料・観測センサー<br>に与える影響に関する研究 JAXA(高島)<br>P70MeV / 10nA<br>C8          |  | 3月20日<br>(木) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 2月28日<br>(金) | RI生産     |      | RI生産<br>( <sup>62</sup> Zn/ <sup>62</sup> Cu所外)<br>P30,C4,9:00～               | RI生産<br>He30MeV, 3 μA, C4                                  | 3月21日<br>(金) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 3月1日<br>(土)  |          |      |   |  | 3月22日<br>(土) |          |      |   |  |
| 3月2日<br>(日)  |          |      |   |  | 3月23日<br>(日) |          |      |   |  |
| 3月3日<br>(月)  | メンテナンス   | RI生産 | メンテナンス  | RI生産   | 3月24日<br>(月) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 3月4日<br>(火)  | RI生産     |      | RI生産<br>( <sup>64</sup> Cu所内)<br>P12,C4,10:00～                                | RI生産   | 3月25日<br>(火) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 3月5日<br>(水)  | RI生産     |      | RI生産  |  | 3月26日<br>(水) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 3月6日<br>(木)  | RI生産     |      | RI生産  |  | 3月27日<br>(木) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 3月7日<br>(金)  | RI生産     |      | 重粒子線の生物効果初期課程における<br>基礎物理研究 京大(大澤)<br>O <sup>8+5+</sup> 96MeV / 500 nA<br>C10 |  | 3月28日<br>(金) | 長期メンテナンス |      |   |  |
| 3月8日<br>(土)  |          |      |   |  | 3月29日<br>(土) |          |      |   |  |
| 3月9日<br>(日)  |          |      |   |  | 3月30日<br>(日) |          |      |   |  |



## 平成25年度サイクロトロン利用報告書

- ・発行年月 2015年 3月
- ・編集 独立行政法人放射線医学総合研究所  
重粒子医科学センター 物理工学部
- 住所 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4丁目9番1号
- 連絡先 独立行政法人放射線医学総合研究所  
重粒子医科学センター 物理工学部
- TEL:043-206-3173 FAX:043-287-6146
- メールアドレス cyc\_ope@nirs.go.jp
- ホームページ <http://www.nirs.go.jp>
- ・印刷 株式会社 さくら印刷

Printed in Japan

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