



N I R S - M - 2 9 0

平成 2 7 年度

# サイクロトロン利用報告書

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. NIRS-930 サイクロトロン <sup>2</sup> の運転状況	( 9)
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. 陽子線を用いた治療・診断時の動的イメージング技術の基礎開発	(19)
4-2. 核破砕片生成二重微分断面積の測定	(26)
4-3. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究	(31)
4-4. 最前方と最後方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定	(37)
4-5. 放射性遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験	(41)
4-6. 重粒子によるしきいエネルギー付近の核反応に関する研究	(43)
5. 粒子線検出器の開発	
5-1. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発	(47)
5-2. 固体飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造分析	(50)
5-3. 超小型アクティブ宇宙放射線線量計の開発	(55)
5-4. 陽子線ビームにおける蛍光ガラス線量計及び 熱ルミネセンス線量計( $Al_2O_3$ )のLET依存性に関する研究	(59)
6. 生物研究	
6-1. 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果	(63)
6-2. 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	(65)
6-3. 陽子線の生物効果の研究	(67)
7. 有料ビーム提供	
NIRS-930における有料提供の利用状況	(71)
8. 研究成果一覧	(73)
9. 関連資料	
平成27年度第I期・II期マシンタイム予定表	(95)



## 1. サイクロトロン<sup>1</sup>の運転実績と利用状況



# サイクロトロン<sup>A</sup>の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>、涌井 崇志<sup>A</sup>、岡田 高典<sup>B</sup>、高橋 勇一<sup>B</sup>、青山 功武<sup>B</sup>、井 博志<sup>B</sup>、神谷 隆<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>, Takashi Wakui<sup>A</sup>, Takanori Okada<sup>B</sup>, Yuichi Takahashi<sup>B</sup>, Isamu  
Aoyama<sup>B</sup>, Hiroshi Ii<sup>B</sup>, Takashi Kamiya<sup>B</sup>, Koji Noda<sup>A</sup>

<sup>A</sup> : 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 加速器工学部

<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]。小型サイクロトロンは放射性薬剤の製造・研究専用に、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、生物研究、粒子線検出器の開発、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27 MeV ヘリウムを新たに供給した。また、大型サイクロトロンでは月に1回程度で土曜日のビーム提供運転を行い、計11回行った。

本報告書では、平成27年度における2台のサイクロトロンの運用体制と運転実績、利用状況について報告する。

#### 1. 運用体制

大型および小型サイクロトロンでは、平日の8:30から17:00まで運転を行っている。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。なお、大型サイクロトロンでは月に1回程度の土曜日に運転を行っている。平成27年度は、第I期7回、第II期4回の計11回の土曜日運転を行った。

長期メンテナンス期間を9月及び3月に大型サイクロトロンは3週間、小型サイクロトロンは2週間とっている。今年度は大型サイクロトロンのデフレクターの更新及びマグネティックチャンネル電源の更新のため、3月の長期メンテナンス期間は例年より1週間長くした。大型サイクロトロンで4週間、小型サイクロトロンは2週間とした。

マシンタイムは第I期、第II期の毎年2回に分けて募集をしている。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月下旬に10月から2月までの第II期マシンタイムを募集している。

#### 2. 大型サイクロトロン

##### 2-1. 運転実績

平成27年度の総運転時間は1706.9時間であった。デフレクター更新の為、3月の長期メンテナンスをとったこと等により平成26年度の1789.6時間よりも少なくなっている。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34 MeV ヘリウムが464.4時間、物理研究、生物研究、粒子線検出器の開発、粒子線による損傷試験、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405.6時間となっている。この34 MeV ヘリウム陽子と70 MeV 陽子が多く利用されており、総運転時間の51.0%を占めている。

加速粒子別運転時間割合では、すべての分野で利用されている陽子が43.7%を占めている。また、放射線薬剤の製造・研究で主に利用されているヘリウムが36.8%を占めている。その他の粒子では、水素分子が10.4%、重陽子が5.6%、炭素が1.0%、ネオンが2.6%の割合となっている。平成26年度と比較して放射線薬剤の製造・研究において内用療法に向けた治療薬の開発の頻度がさらになくなったことから、ヘリウムの運転時間が増加している。その他の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 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	791.4	46.4
(2) 物理研究	277.7	16.2
(3) 粒子線検出器の開発	73.2	4.3
(4) 生物研究	68.0	4.0
(5) 有料ビーム提供	148.6	8.7
(6) ビーム開発	343.0	20.1
(7) 放射線安全測定	5.0	0.3
合計	1706.9	100.0

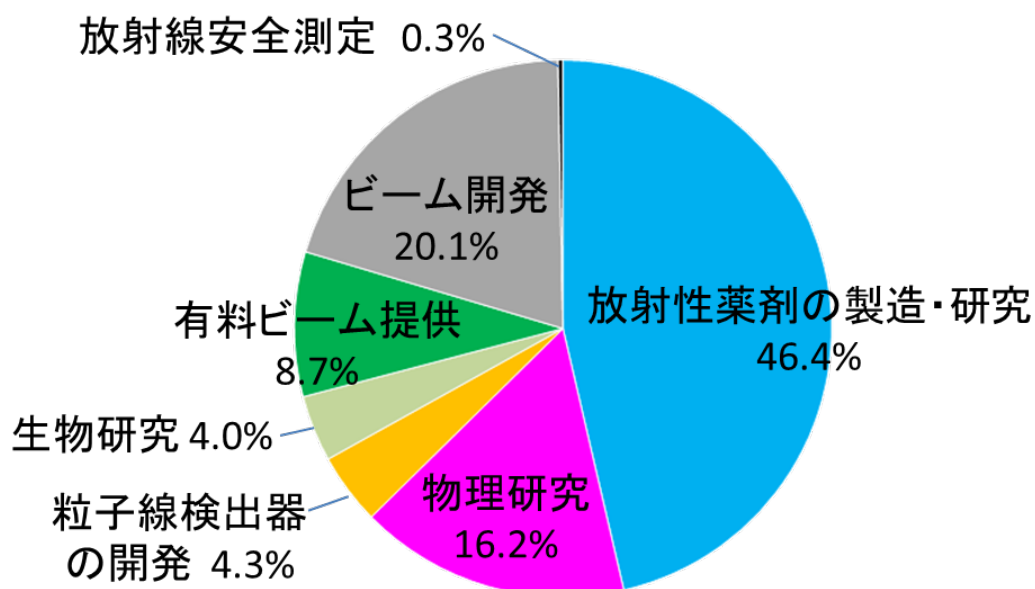


図 2.利用目的別運転時間割合

### (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 46.4%にあたる 791.4 時間が利用された。粒子・エネルギー別に集計した利用時間の割合を図 3 に示す。利用時間を粒子別に割合を見ると、ヘリウムが 60.5%、陽子が 17.4%、水素分子が 14.3%、重陽子が 7.9%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 31.7%となる。

主に使われたエネルギーは、 $^{211}\text{At}$  の製造に用いられた他  $^{43,47}\text{Sc}$ 、 $^{74}\text{As}$  の製造にも用いられた 34 MeV ヘリウムが 43.1%、 $^{64}\text{Cu}$  の製造に用いられた 24 MeV 水素分子が 11.4%、 $^{67}\text{Cu}$  の製造に用いられた 40 MeV ヘリウムが 11.2%、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{74}\text{As}$  の製造に用いられた 18 MeV 陽子が 10.2%となっている。その他に  $^{68}\text{Ge}$  の製造に用いられた 30 MeV 陽子が 0.9%、 $^{67}\text{Cu}$  に用いられた 60 MeV 陽子が 6.3%、 $^{124}\text{I}$  の製造に用いられた 27 MeV 水素分子が 2.9%、 $^{186}\text{Re}$  の製造に用いられた 20 MeV 重陽子が 7.9%、 $^{74}\text{As}$  の製造に用いられた 27 MeV ヘリウムが 0.5%、 $^{28}\text{Mg}$  の製造に用いられた 75 MeV ヘリウムが 5.7%であった。新たに供給を開始したエネルギーは 27 MeV ヘリウムとなっている。

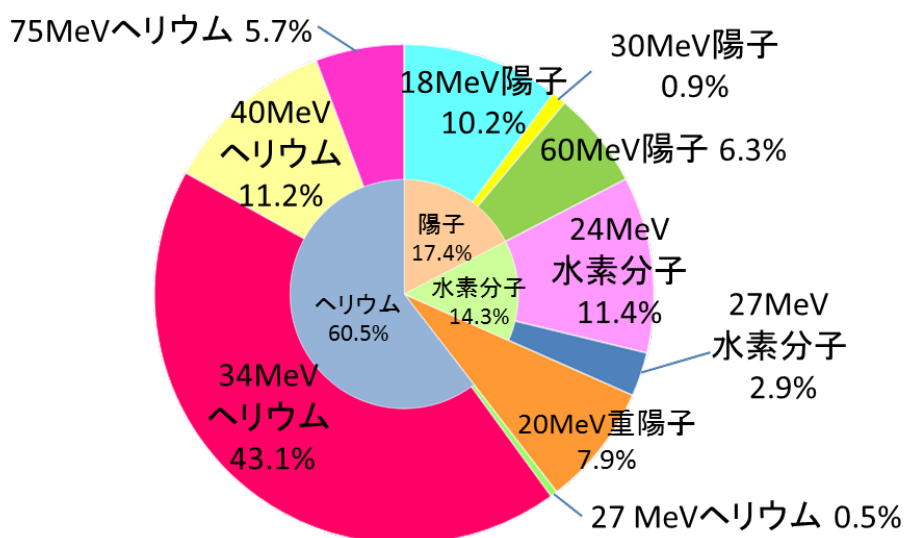


図3.放射性薬剤の製造・研究における粒子・エネルギー別利用割合

## (2) 物理研究

物理研究では、総運転時間の16.3%である277.7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、主に利用されている陽子が75.7%となっている。その他の粒子では、重陽子が3.9%、炭素が4.7%、ネオンが15.7%と様々な粒子が利用されている。

物理研究では、7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。

- |                                     |                           |
|-------------------------------------|---------------------------|
| 「陽子線を用いた治療・診断時の動的イメージング技術の基礎開発」 [3] | 70 MeV 陽子                 |
| 「核破碎片生成二重微分断面積の測定」 [4]              | 40, 70 MeV 陽子, 25 MeV 重陽子 |
| 「重粒子線の生物効果初期過程における基礎物理研究」           | 120 MeV ネオン               |
| 「高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究」 [5]      | 70 MeV 陽子                 |
| 「最前方と最後方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定」 [6]   | 40 MeV 陽子                 |
| 「放射性遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験」 [7]           | 50, 80 MeV 陽子             |
| 「重粒子によるしきいエネルギー付近の核反応に関する研究」 [8]    | 144 MeV 炭素                |

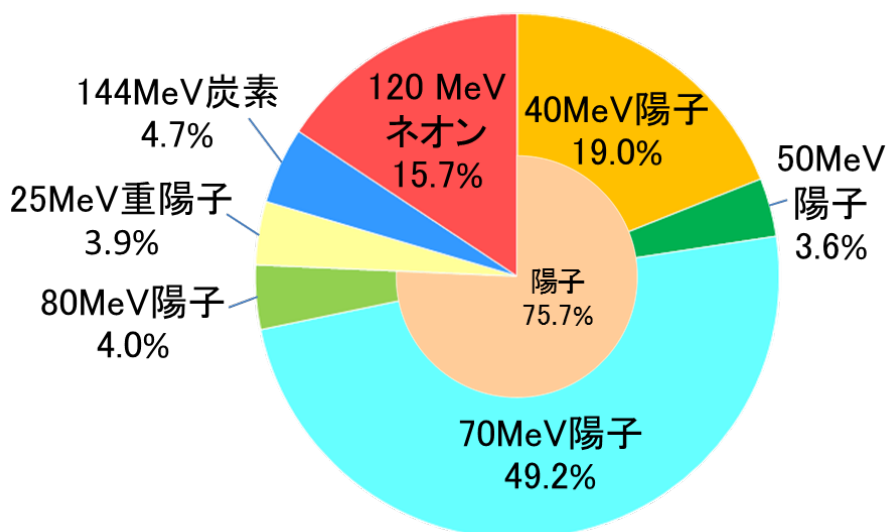


図4.物理研究における粒子・エネルギー別利用割合

### (3) 粒子線検出器の開発

粒子線検出器の開発では、総運転時間の4.3%に当たる73.2時間が利用された。粒子線検出器における粒子・エネルギー別利用割合を図5に示す。粒子別にみると、陽子が76.6%、重陽子が12.5%、ヘリウムが10.9%となっている。主に陽子70 MeVを基準に異なるエネルギーや核種を照射し、粒子線検出器の比較や性能評価に利用された。

粒子線検出器の開発では3課題のマシントイムが実施されており、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。

- 「宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発」[9] 70 MeV 陽子, 50 MeV 重陽子, 100 MeV ヘリウム
- 「固体飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造分析」[10] 20, 30, 70 MeV 陽子
- 「超小型アクティブ宇宙放射線線量計の開発」[11] 70 MeV 陽子
- 「陽子線ビームにおける蛍光ガラス線量計及び熱ルミネセンス線量計( $Al_2O_3$ )のLET依存性に関する研究」[12] 70 MeV 陽子

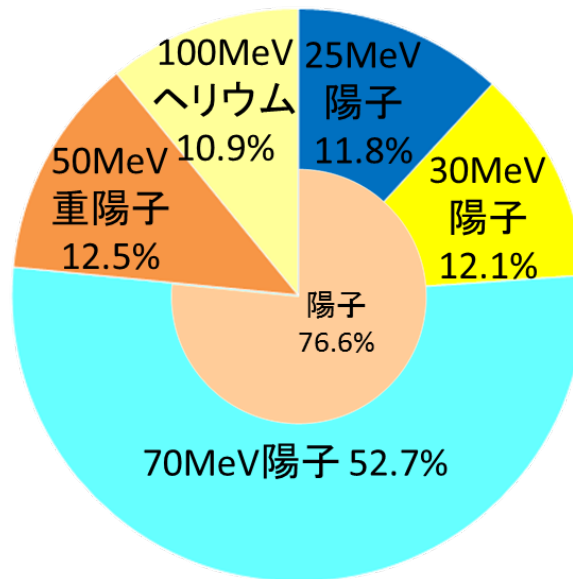


図5.粒子線検出器の開発における粒子・エネルギー別利用割合

### (4) 生物研究

生物研究では、総運転時間の4.0%にあたる68.0時間が利用された。生物研究では3課題のマシントイムが実施されており、利用された粒子はすべて70 MeV 陽子のみであった。

- 「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」[13]
- 「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」[14]
- 「陽子線の生物効果の研究」[15]

### (5) 有料ビーム提供

有料ビーム提供では、総運転時間の8.7%に当たる148.6時間が利用された。有料ビーム提供に利用された粒子は陽子のみであった。主に利用されたエネルギーは70 MeVで、その他のエネルギーでは25 MeVや50 MeVが利用された。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。[16]

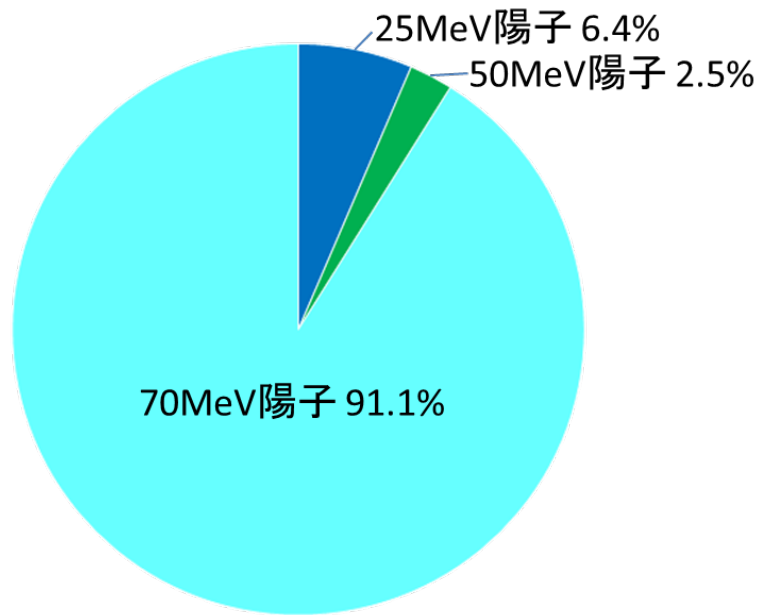


図6.有料ビーム提供における粒子・エネルギー別利用割合

## (6) ビーム開発

ビーム開発には、総運転時間の20.1%に当たる343.0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7に示す。粒子別にみると、陽子が35.2%、水素分子が18.7%、重陽子が4.0%、ヘリウムが41.2%、炭素が0.9%となっている。特に、放射性薬剤の製造・研究において診断及び内用療法への利用が期待される $^{211}\text{At}$ 、 $^{74}\text{As}$ 、 $^{43,47}\text{Sc}$ の製造等に利用される34 MeVヘリウムの調整及びビーム確認を行う頻度が高く全体の36.0%を占めている。平成27年度の新規ビームとして、放射性薬剤の製造・研究用に27 MeVヘリウムを供給した。

NIRS-930 サイクロトロンの運転状況[17]において、マグネティックチャンネルの電源の更新や、静電デフレクタシステムの更新、比較的高いエネルギーのビームの加速調整について記載する。

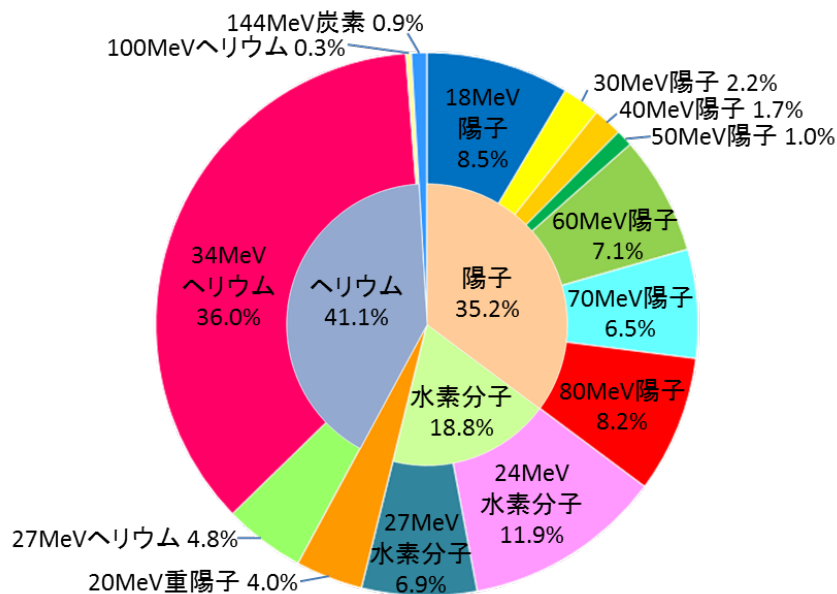


図7. ビーム開発における粒子・エネルギー別利用割合

### 3. 小型サイクロトロン

#### 3-1. 運転実績

平成 27 年度の総運転時間は 1541.9 時間であった。大型サイクロトロンのデフレクター更新の為、3 月の長期メンテナンスをとったことにより平成 26 年度の 1597.9 時間よりも少なくなっている。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 8 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 重陽子が供給可能である。18 MeV 陽子の利用は総運転時間の 95.3%に当たる 1470.3 時間であった。また、9 MeV 重陽子の利用は総運転時間の 3.7%に当たる 56.8 時間であった。その他には、調整運転で 18 MeV 陽子に 11.8 時間、9 MeV 重陽子に 3.0 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	計
放射性薬剤の製造・研究	1470.3	56.8	1527.1
調整運転	11.8	3.0	14.8
計	1482.1	59.8	1541.9

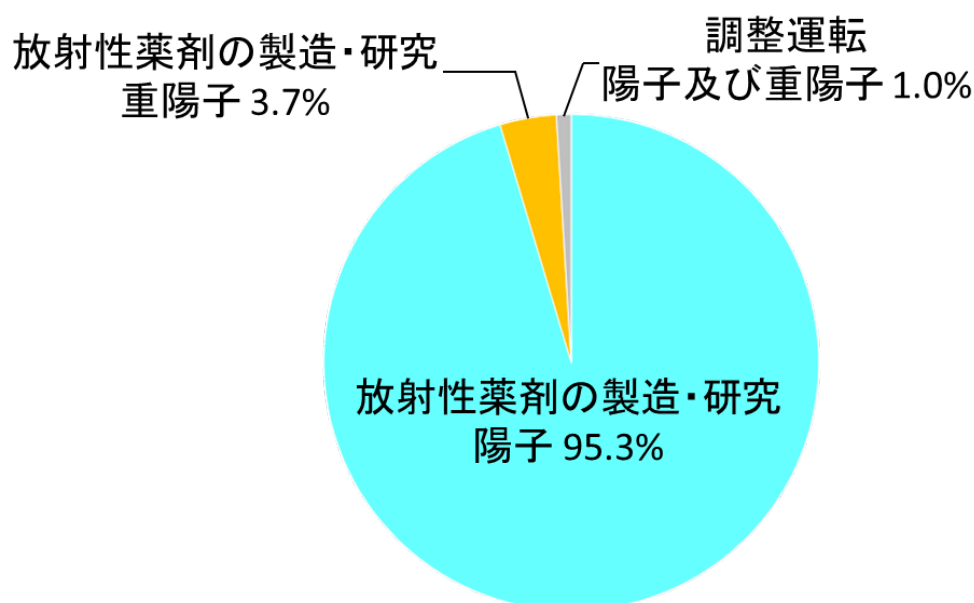


図 8. 小型サイクロトロンの運転時間割合

#### 3-2. 利用状況

小型サイクロトロンは放射性薬剤の製造・研究[2]専用に利用されている。総運転時間のほとんどが 18 MeV 陽子による  $^{11}\text{C}$  や  $^{13}\text{N}$ 、 $^{18}\text{F}$  などを用いた放射性薬剤の製造・研究に利用された。また、9 MeV 重陽子による  $^{15}\text{O}$  を用いた放射性薬剤の製造・研究が行われた。なお、調整運転時間は安全測定やメンテナンス後に伴うビーム確認に主に費やされている。

#### 参考文献

- [1] 北條 悟, 杉浦 彰則, 片桐 健, 中尾 政夫, 野田 章, 涌井 崇志, 岡田 高典, 高橋 勇一, 井 博志, 青山 功武, 野田 耕司: 放医研サイクロトロン(NIRS-930, HM-18)の現状報告, 第 12 回日本加速器学会年会, 福井県敦賀市, 2015 年 8 月 5 日~7 日, FSP021, p.340.
- [2] 武井 誠, 鈴木 寿, 根本 和義, 石井 英樹, 藤永 雅之, 破入 正行, 永津 弘太郎, 河村 和紀, 張 明榮: 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-p18
- [3] 片岡 淳, 岩本 康弘, 多屋 隆紀, 小出 絢子, 高部 美帆, 増田 孝充, 岸本 彩, 稲庭 拓, 西尾 禎治: 陽子線を用いた治療・診断時の動的イメージング技術の基礎開発, 本誌 p19-p25
- [4] 佐波 俊哉, 山口 雄二, 魚住 裕介, 古場 裕介: 核破砕片生成二重微分断面積の測定, 本誌 p26-p30

- [5] 西尾 禎治, 松下 慶一郎, 恒田 雅人, 田中 創大, 株木 重人, 中村 哲志, 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 p31-p36
- [6] 魚住 裕介, 米重 英成, 園田 暁史, 森 大樹, 山口 雄司, 荒木 優佑, 古場 裕介: 最前方と最後方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定, 本誌 p37-p40
- [7] 執行 信寛, 今富 宏祐, 三根 貴大, 池田 伸夫, 石橋 健二, 木村 健一, 池見 拓, 笹谷 輝勝, 高橋 定明, 平澤 勇人, 古場 裕介: 放射性遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験, 本誌 p41-p42
- [8] 八島 浩, 萩原 雅之, 佐波 俊哉, 米内 俊祐: 重粒子によるしきいエネルギー付近の核反応に関する研究, 本誌 p43-p45
- [9] 北村 尚, 小平 聡, 内堀 幸夫, Soenke Burmeister, Robert Elftmann, Jan Steinhagen, Eric Benton, Rachid Machrafi: 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発, 本誌 p47-p49
- [10] 山内 知也, 楠本 多聞, 上田 隆裕, 上野 琢也, 小平 聡, 北村 尚: 固体飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造分析, 本誌 p50-p54
- [11] 寺沢 和洋, 永松 愛子, 勝田 真登, 島田 健, 西 啓輔, 北村 尚: 超小型アクティブ宇宙放射線線量計の開発, 本誌 p55-p58
- [12] 張 維珊, 古場 裕介: 陽子線ビームにおける蛍光ガラス線量計及び熱ルミネセンス線量計( $Al_2O_3$ )のLET依存性に関する研究, 本誌 p59-p61
- [13] 平山 亮一, 小原 麻希, 鶴澤 玲子, 劉 翠華, 内堀 幸夫, 北村 尚: 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果, 本誌 p63-p64
- [14] 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 p65-p66
- [15] 前田 淳子, 藤井 羲大, 藤沢 寛, 平川 博一, Cartwright Ian, 上坂 充, 北村 尚, 藤森 亮, 加藤 宝光: 陽子線の生物効果の研究, 本誌 p67-p69
- [16] 杉浦 彰則, 北條 悟, 片桐 健, 中尾 政夫, 田代 克人, 鈴木 和年, 野田 章, 涌井 崇志, 岡田 高典, 高橋 勇一, 青山 功武, 井 博志, 野田 耕司: NIRS-930における有料提供の利用状況, 本誌 p71-p72
- [17] 北條 悟, 涌井 崇志, 片桐 健, 中尾 政夫, 杉浦 彰則, 野田 章, 岡田 高典, 高橋 勇一, 青山 功武, 井 博志, 野田 耕司: NIRS-930 サイクロトロン of 運転状況, 本誌 p9-p13

## 2. NIRS-930 サイクロトロンの運転状況





# NIRS-930 サイクロトロン<sup>の</sup>運転状況

## STATE OF THE NIRS-930 CYCLOTRON

北條 悟<sup>A</sup>、涌井 崇志<sup>A</sup>、片桐 健<sup>A</sup>、中尾 政夫<sup>A</sup>、杉浦 彰則<sup>A</sup>、野田 章<sup>A</sup>、  
岡田 高典<sup>B</sup>、高橋 勇一<sup>B</sup>、青山 功武<sup>B</sup>、井 博志<sup>B</sup>、野田 耕司<sup>A</sup>  
Satoru Hojo<sup>A</sup>, Takashi Wakui<sup>A</sup>, Ken Katagiri<sup>A</sup>, Masao Nakao<sup>A</sup>, Akinori Sugiura<sup>A</sup>, Akira Noda<sup>A</sup>,  
Takanori Okada<sup>B</sup>, Yuichi Takahashi<sup>B</sup>, Isamu Aoyama<sup>B</sup>, Hiroshi Ii<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

放医研の大型サイクロトロン NIRS-930 は、設置されてから既に 40 年を超えているが、放射性同位元素の製造を中心に様々な目的で利用されている。装置としては、高周波発生装置や真空排気装置、各電源等の老朽化した各機器を更新しながら運転を続けている。今年度は、ビームの取り出し機構であるマグネティックチャンネルの電源の更新や、静電デフレクタシステムの更新を行った。静電デフレクタは、電極、駆動、電源、制御システムの更新を行ったので、これについて報告する。また、放射性同位元素の製造以外の目的で利用される比較的高いエネルギーのビームの加速調整についても報告する。

### 1. デフレクタシステムの更新

これまでの静電デフレクタは、サイクロトロン建設当初の Thomson 製のデフレクタを用いていた。老朽化により駆動機構に位置の再現性の問題があり、さらに故障時の交換部品の入手も困難となっており、問題となっていた。そのため、駆動制御を含め、住友重機械工業 (SHI) 製のデフレクタシステム (写真 1, 2) への更新を行った。また、静電デフレクタ用の高電圧電源においても、電流モニターに不具合があり、高電圧印加時の暗電流が計測できなくなっていたため、併せて更新をおこなった。

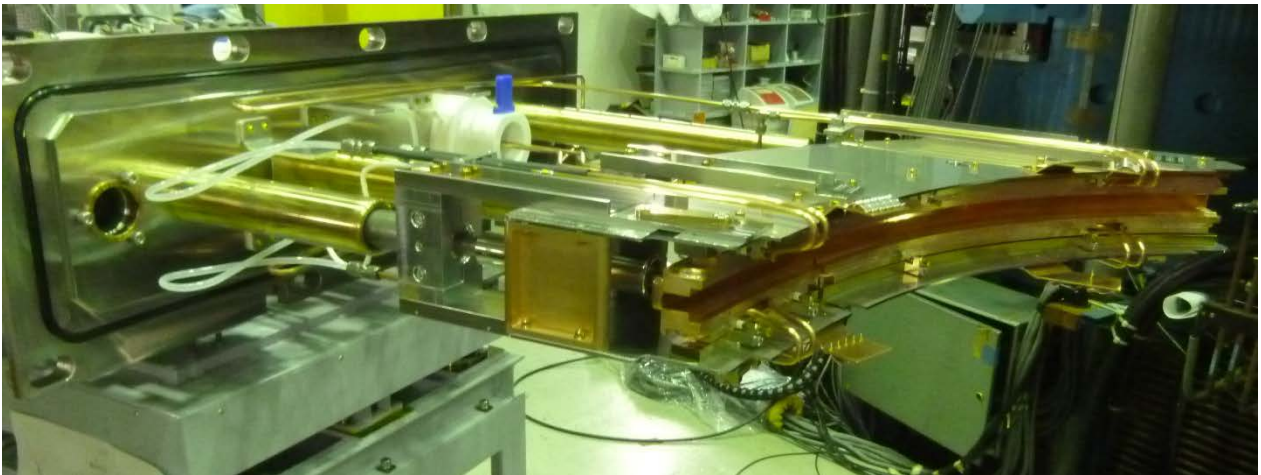


写真 1. SHI 製デフレクタシステム (真空内電極側)



写真 2. SHI 製デフレクタシステム (大気側駆動機構)

SHI 製のデフレクタシステム的设计において、発生する電場に影響があるデフレクタ電極の形状は、Thomson 製と同じ形状とした。セプタム電極の断面構造も最外周の周回軌道を阻害しないように、上下方向の開口も同様に確保した。NIRS-930 サイクロトロン の加速箱への取り付け面や位置決め用のガイドレール等にも対応した構造とし、Thomson 製のデフレクタとの互換性を保っている。一方、駆動制御装置においては、すべて新しいシステムとなっており、Thomson 製では、ダイヤル式ポテンシオメータ（写真3）およびデジタルボルトメータによる駆動位置制御を行っていたが、SHI 製では、PCからの PLC 制御となっている。メインの駆動画面の一例を写真4に示す。



写真3.Thomson 製  
デフレクタ位置駆動  
制御盤

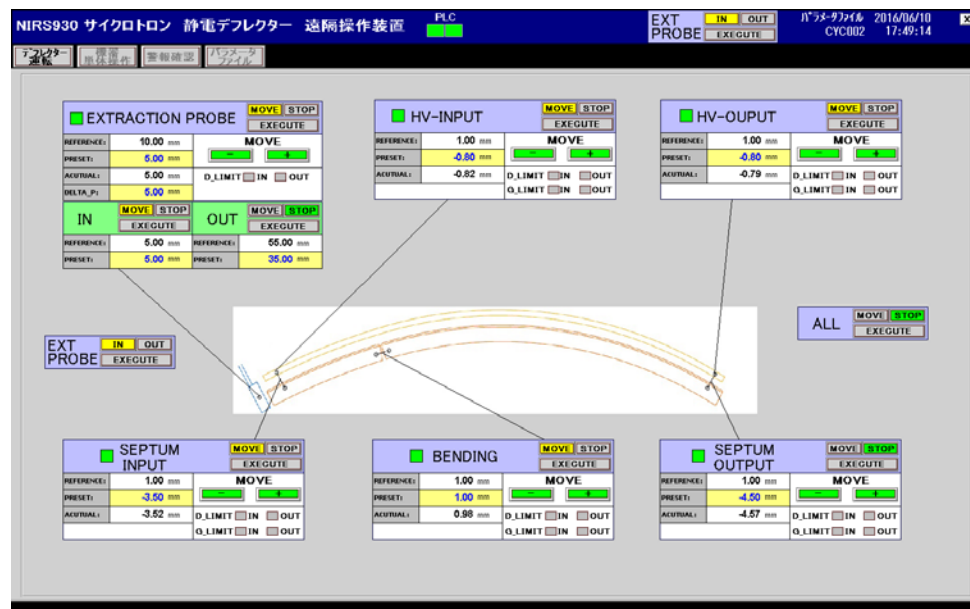


写真4.SHI 製デフレクタ位置駆動制御画面の1例  
(デフレクタ形状と駆動値を関連付けて表示されている。)

高圧電源においても同様に更新が行われた。絶縁油層を用いた外形寸法 W560xD700xH2005 mm の高さ 2m ラック 1 本分の高圧電源から、W483xD483xH88 mm の 19 インチラック 2U タイプの電源に小型化されている。さらに駆動制御と同様にダイヤル式ポテンシオメータとアナログメーターで行っていた電圧設定監視等の遠隔制御システムも PLC-タッチパネルでの遠隔制御へと更新を行った。高圧電源も更新されたため、暗電流の計測も可能となっている。また、デフレクタ用の高圧電源においては、デフレクタ電極保護のために Arc 検出機能により強制出力断となる Arc Trip 機能を追加した。しかしながら、サイクロトロンの大気解放作業後のエージング時において、小さな放電で電源停止がかかるため、オペレーションに不都合な点があり、今後の検討が必要となっている。

デフレクタシステムの更新後、18 MeV proton, 70 MeV proton, 34 MeV Helium によりビーム調整を行った。調整結果として、デフレクタ位置と電圧、取り出し効率を表1に示す。Septum Input はデフレクタ入口位置での、サイクロトロン中心からの距離を示す。GI、G0 は、それぞれデフレクタ入口と出口でのデフレクタ高圧電極とセプタム電極の間隔を示す。取り出し効率は、デフレクタ入口のプロブから、デフレクタ、マグネティックチャンネル、グラディエントコレクターを通過後にビームラインに入り、3連四重極マグネットを通った後のファラデーカップまでの効率である。

18 MeV proton, 34 MeV Helium では、取り出し効率において良好な結果が得られている。70 MeV proton においては、取り出し効率が低下しているが、デフレクタ通過後のマグネティックチャンネルが発熱の影響により通電可能な電流値が低下してしまっているため、取り出しの効率が低下しており、後述する 80 MeV proton と同様に今後の検討課題となっている。

各ビームにおける、位置の相違については、旧デフレクタシステムである Thomson 製デフレクタの老朽化による駆動機構のバックラッシュの増加、電気的な経年劣化による位置読み出しポテンシオメータ等の誤差の増加による位置精度の低下があったと考えている。

このように、デフレクタシステムを更新することにより、暗電流のモニターや正確な電極位置の把握など、デフレクタシステムの状態をこれまで以上に明確に把握することが出来るようになった。

表 1. デフレクタビーム調整結果比較表

18 MeV proton

	Septum Input [mm]	GI [mm]	GO [mm]	デフレクタ電圧 [kV]	取り出し効率 [%]
SHI Def.	903	6.3	8.4	20.4	63.4
Thomson Def.	909	10	10	20	58

70 MeV proton

	Septum Input [mm]	GI [mm]	GO [mm]	デフレクタ電圧 [kV]	取り出し効率 [%]
SHI Def.	909	5.2	7.5	47.8	12.5
Thomson Def.	907	10	9.5	47	25

34 MeV helium

	Septum Input [mm]	GI [mm]	GO [mm]	デフレクタ電圧 [kV]	取り出し効率 [%]
SHI Def.	904	6.3	12.1	27.8	82.2
Thomson Def.	909	13	15.5	28	90

## 2. ビーム調整について

### 2-1. 100 MeV He<sup>2+</sup> beam

荷電粒子検出器の開発において、100 MeV He<sup>2+</sup> beam の要求がありビーム調整を行った。以前より 100 MeV He<sup>2+</sup> の加速を行っていたが、高周波電場の放電が多発してしまう問題があったため、安定した供給ができるよう調整を試みた。

まず、サイクロトロン内部のビーム加速効率の確認を行った。各計測点でのビーム電流を表 2 に、各計測点間の効率を表 3 にそれぞれ調整前として示す。入射直前のファラデーカップ (FCN4) からインフレクタ (INF) までの効率 (INF/FCN4) は 72% と良好であった。また、入射の効率 (R=100mm/INF) が 35%、中心領域からのデフレクタ入口プローブ (Def\_P) までの加速の効率 (Def\_P/R=100mm) も、100% と良好な値であった。

表 2. 入射ラインおよびサイクロトロン内部の各ビーム計測点におけるビーム強度

	FCN4 [μA]	INF [μA]	R=100mm [μA]	Def_P [μA]	BSO [μA]
調整前	9.2	6.6	2.3	2.3	1.2
調整後	9.2	6.4	2.4	2.4	1.3

表 3. 各点における通過効率

	INF/FCN4 [%]	R=100mm/INF [%]	Def_P/R=100mm [%]
調整前	72	35	100
調整後	70	38	100

次に、位相プローブを用いて、加速領域における各半径でのビーム位相を確認した。位相プローブの最も内側の Probe No.1 から取り出し半径を含む最も外側の Probe No.10 までのビーム位相の測定結果を調整前として図 1 に示す。加速初期である Probe No.1 の位相が 20 度ずれており、さらに同じ方向に 20 度のずれが生じており、40 度以上の幅を持ってしまっていたため、トリムコイル磁場の調整を行った。トリムコイル磁場の調整後のビーム位相を図 1 に調整後として示す。Probe No.1 から Probe No.10 までを通して ±10 [degree] の幅とすることができた。その結果、高周波電場の放電が発生しなくなり、安定したビーム提供が可能となった。位相調整後の各計測点でのビーム電流と、計測点間の効率をそれぞれ表 2、3 に調整後として示す。位相の調整による各ビーム電流や効率は、調整前と変化はなく、ほぼ同じ値となっている。安定なビーム供給を行う為には、ビーム電流値や効率のみを改善するのは不十分で、ビームの位相も合わせる必要があることが分かった。

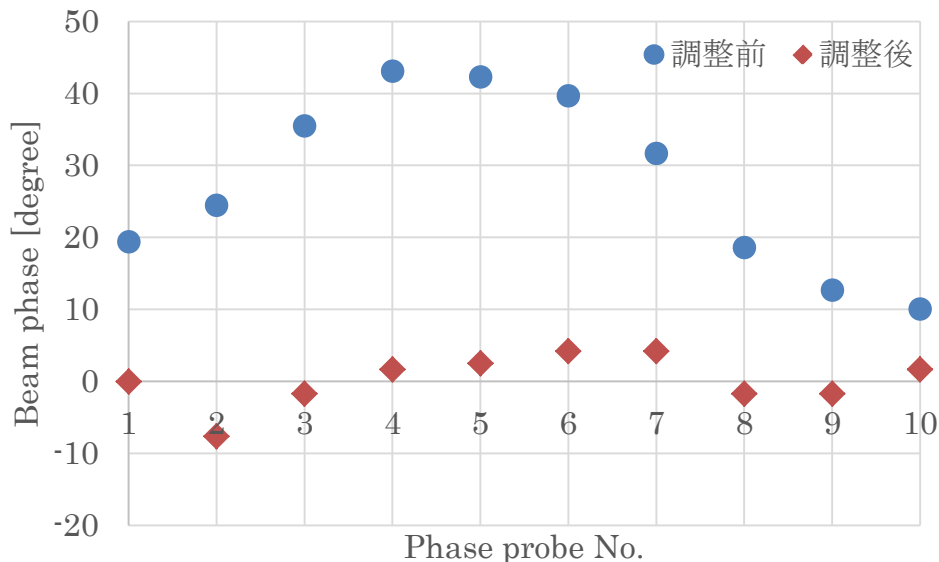


図 1. 100 MeV He<sup>2+</sup> beam phase

## 2-2. 80 MeV proton beam

宇宙放射線耐久試験や放射線検出器の開発、中性子特性測定等において、放射性薬剤製造等より比較的高いエネルギーの陽子線の要求が出されることが多い。NIRS-930 サイクロトロンでは、現在、提供可能な proton beam の最大ビームエネルギーは 80 MeV となっているが、取り出し効率が 1% 以下で、取り出せるビーム強度が低い状態になってしまっているため、取り出し効率改善を目指し調査を行った。各計測点でのビーム強度と、計測点間での効率をそれぞれ表 4、表 5 に示す。必要となるビーム電流は、ターゲット位置でのビーム確認を十分にできる強度として、取り出し後の BS0 で 50 nA 程度の強度を目標としている。

表 4. 80 MeV proton 各ビーム計測点におけるビーム強度

FCN4 [nA]	INF [nA]	R=100mm [nA]	Def_P [nA]	BS0 [nA]
810	680	308	220	1.5

表 5. 80 MeV proton の各点における通過効率

INF/FCN4 [%]	R=100mm/INF [%]	Def_P/R=100mm [%]	BS0/Def_P [%]
84	45	71	0.7

取り出し機構であるデフレクタおよびマグネティックチャンネルの通過後に設置されている Radial probe でのビームスキャン結果を 80 MeV proton と他の代表的なビームを併せて図 2 に示す。他のビームが主に R=1120 mm 付近を通過してグラディエントコレクターへ入っていくのに対し、80 MeV proton では、R=1090mm の位置と 30mm 程度内側を通過しており、取り出しの機構での偏向不足が大きな要因となっていることが分かった。

各プロトンのエネルギーにおける、デフレクタ電圧とマグネティックチャンネルの電流値をそれぞれ、図 4、図 5 に示す。60 MeV 以上でのデフレクタ電圧とマグネティックチャンネルの電流値は、最大値に近いので、取り出す proton beam のエネルギーが上がっても、デフレクタ電圧とマグネティックチャンネルの電流値を上げることが出来ていないのがわかる。デフレクタシステムに関しては、前述した通り更新が行われたため、今後、さらに調整を行っていく予定である。マグネティックチャンネルについては、遠隔での電流モニターに不具合があった。そのため、マグネティックチャンネル用の電源の更新を行い、遠隔制御システムも更新した。また、マグネティックチャンネルにおいては、コイルの電流損失による冷却水の温度上昇が問題となっている。これまで、サーマルセンサーは冷却水配管に取り付けられており、同じ配管温度の監視を行ってきた。今回、配管温度ではなく配管内の水温を直接検出するよう温度計測器を設置し導入した。これにより、電流と実水温を観測しながら、運転を行っている。



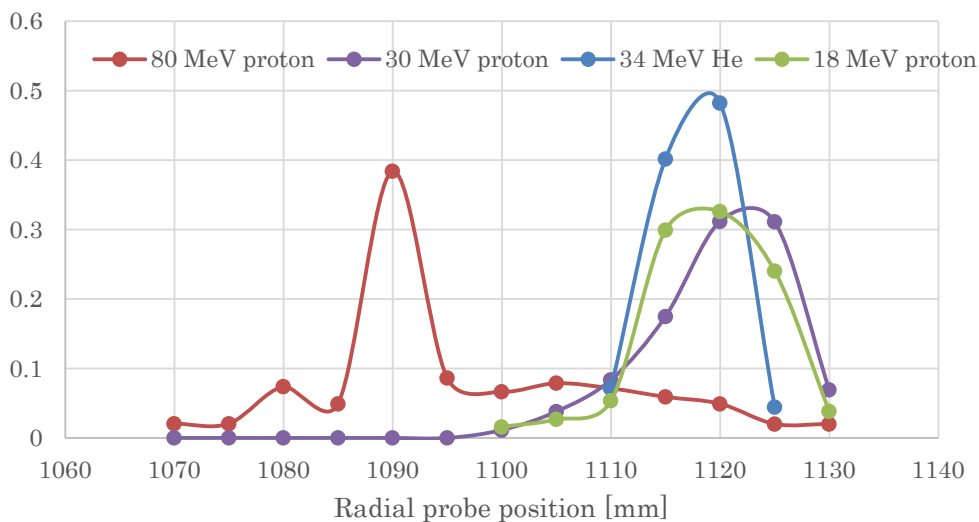


図2. Radial probe における各ビームの分布 (Total を1とした5 mm 毎の分布)

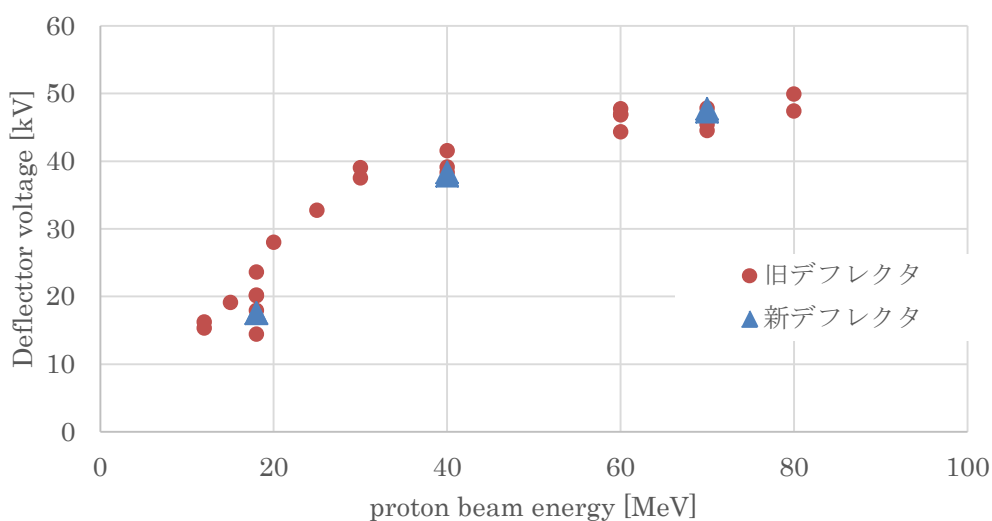


図3. プロトンエネルギーに対するデフレクタ電圧

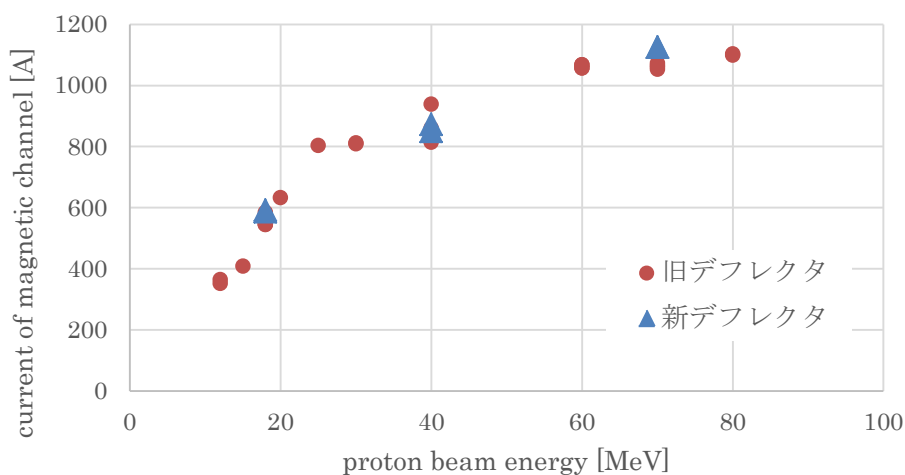


図4. プロトンエネルギーに対するマグネティックチャンネル電流

### 3. まとめ

今年度は、デフレクタシステムの更新を行った結果、ビーム取り出しは良好な状態を保つことが出来ている。放射性薬剤製造用に主流の比較的低エネルギーの大強度化のみならず、高いエネルギーのビーム供給も充実させるため、老朽化対策を行いつつ装置の改良を進めていく予定である。



### 3. サイクロトロン分子プローブの製造・開発への利用状況





# サイクロトロン分子プローブの製造・開発への利用状況

## PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF MOLECULAR PROBES USING CYCLOTRON IN 2015

武井 誠、鈴木 寿、根本 和義、石井 英樹、藤永 雅之、破入 正行、永津 弘太  
郎、河村 和紀、張 明榮

Makoto Takei, Hisashi Suzuki, Kazuyoshi Nemoto, Hideki Ishii, Masayuki Fujinaga, Masayuki Hanyu, Kotaro Nagatsu, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang

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) 認知症、統合失調症、などの各種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 $^{14}\text{C}$ メチル、 $^{14}\text{C}$ 一酸化炭素、 $^{18}\text{F}$ フルオロ臭化エチルを含む多様の標識合成中間体を安定製造し、完成した自動製造システムで 10 種以上の新規標識プローブを合成した。また、正常及びモデル動物を用い、これらのプローブの有用性を評価した。
- 2) 3 種の新規 PET 薬剤 ( $^{18}\text{F}$ FEDAC、 $^{18}\text{F}$ AMPBB3、 $^{14}\text{C}$ MePEPA) の安定的製造法及び品質検査法を確立し、前臨床試験である安全性試験、被ばく線量推定試験を実施、薬剤委員会に書類を作成、提出、審議の後、その内の $^{18}\text{F}$ AMPBB3 については、臨床研究に提供を開始した。
- 3) 治療用 $\beta$ 崩壊核種 Sc-47 及び Re-186 について、照射から精製に至る一連の製造方法を確立させることに成功し、同じく治療候補核種として認識される Cu-67 の分離精製について新たな分離精製技術を検討した。Ac-225 の製造について共同研究により分離精製法を確立し、細胞並びに動物実験を行った。

## 2. 分子プローブの生産・提供状況

平成 27 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）、脳機能測定（PBB3、BTA、TASP457、WAY、ABP688、ラクロプライド、MPPF、FMeNER、AMPBB3）等の臨床利用、サル、ラット、マウスなどの動物実験（PBB3、ABP688、AC5216、<sup>15</sup>O-H<sub>2</sub>O、Altanserin、AMPBB3、<sup>64</sup>Cu 水溶液、<sup>211</sup>At 水溶液など）、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 <sup>64</sup>Cu 水溶液、<sup>67</sup>Cu 水溶液、<sup>211</sup>At 水溶液などの金属核種の製造を行うと共に <sup>28</sup>Mg 水溶液、<sup>74</sup>As 水溶液などを 1 研究機関に 7 回の譲渡を行った。

設備関係では、高品位の臨床薬剤を提供するため、サイクロトロン棟、画像診断棟で日本核医学会 GMP 準拠施設認定を受けた。サイクロトロン棟では治験提供を 24 回行い、画像診断棟では無菌アイソレーターを用いた FDG 注射液製造を行っている。また、サイクロトロン棟第 1 ホットラボ室に <sup>18</sup>F-有機合成装置（1 台）、画像診断棟に <sup>18</sup>F-有機合成装置（1 台）、液相法 <sup>11</sup>C 合成装置（2 台）を導入したことによって、多種多様な薬剤合成が可能となり、臨床提供や新規薬剤合成を行っている。

なお、平成 27 年度に製造した標識化合物および生産量を表 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27年度に製造した標識化合物および生産量

核種	化合形	生産量		診断供給量			動物供給量		譲渡	
		GBq	(回数)	GBq	(回数)	(人数)	GBq	(回数)	GBq	(回数)
<sup>11</sup> C	PBB3	208.064	(110)	85.125	(80)	(83)	30.056	(53)		
	BTA	155.019	(79)	95.52	(71)	(76)	1.036	(3)		
	RAC	33.698	(12)	13.399	(8)	(8)				
	FLB	2.3	(1)				1.05	(1)		
	SCH	10.226	(3)							
	ABP688	94.331	(47)	8.699	(9)	(9)	37.399	(37)		
	WAY	38.305	(15)	19.7439	(14)	(14)	1.889	(3)		
	MNPA	3.454	(2)	1.33	(1)	(1)				
	TASP457	111.43	(37)	36.22	(24)	(24)				
	MET	1025.03	(150)	527.272	(170)	(280)	34.184	(13)		
	S-dThd	60.179	(19)	25.166	(18)	(18)				
	DASB	28.46	(8)	2.332	(1)	(1)				
	HMS011	9.549	(4)	1.482	(2)	(2)				
	Ro1788	8.41	(4)				3.567	(4)		
	PE2I	5.55	(1)							
	PK11195	3.804	(7)				0.2	(1)		
	Ac5216	63.693	(28)				26.925	(28)		
	BF227	1.724	(1)				0.675	(1)		
	CH3I	2.074	(22)							
その他	943.5401	(702)				75.735	(122)			
<sup>15</sup> O	H2O	53.77	(13)				45.31	(10)		
<sup>18</sup> F	FDG	475.635	(57)	150.349	(59)	(108)	2.146	(4)		
	FMeNER	14.721	(12)	7.09	(6)	(6)	1.321	(2)		
	AMPBB3	8.353	(6)	4.124	(5)	(5)				
	Altanserin	8.761	(8)				4.347	(8)		
	MPPF	14.063	(17)	9.295	(13)	(13)				
	FEDAC	2.677	(3)							
	FEtPE2I	0.926	(1)							
	FLT	3.756	(3)				0.612	(1)		
	F-	59.246	(18)				42.117	(14)		
その他	98.464	(93)				8.606	(26)			
<sup>28</sup> Mg	水溶液	0.02882	(6)					0.02882	(6)	
<sup>43</sup> Sc	水溶液	1.475	(3)				0.1964	(2)		
<sup>64</sup> Cu	水溶液	67.085	(19)				44.821	(29)		
<sup>67</sup> Cu	水溶液	0.37	(10)				0.37	(10)		
<sup>74</sup> As	水溶液	0.0006	(1)					0.00037	(1)	
<sup>124</sup> I	水溶液	0.814	(3)				0.804	(3)		
<sup>186</sup> Re	水溶液	0.035	(1)							
<sup>211</sup> At	水溶液	3.64085	(19)				2.5555	(18)		

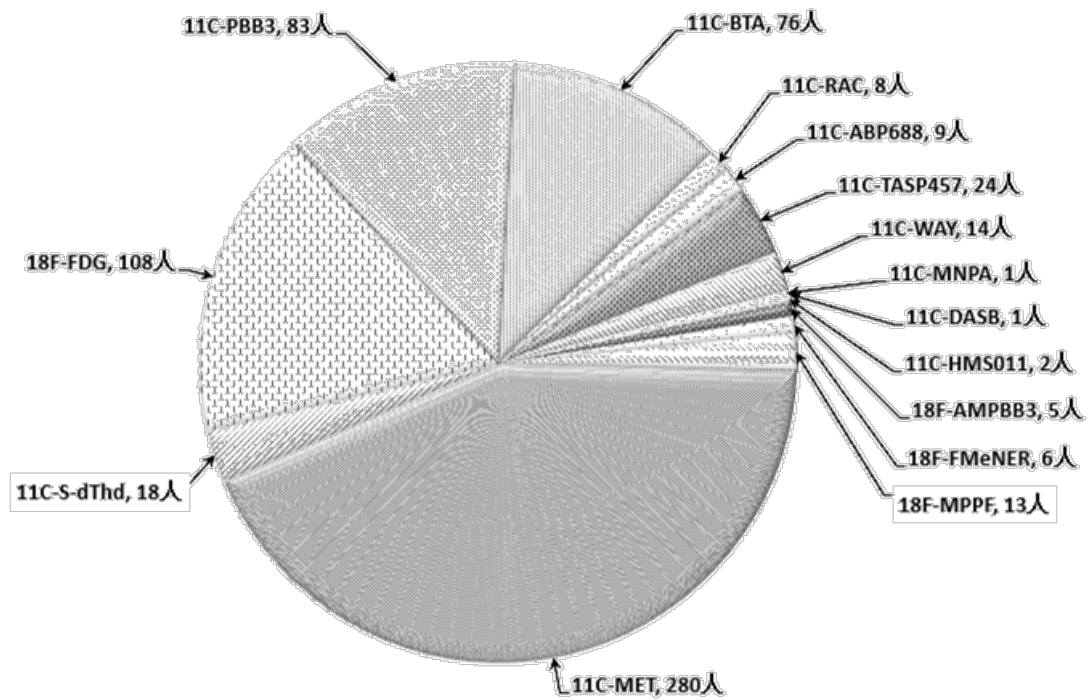


図1. 平成27年度における被験者数(648人)

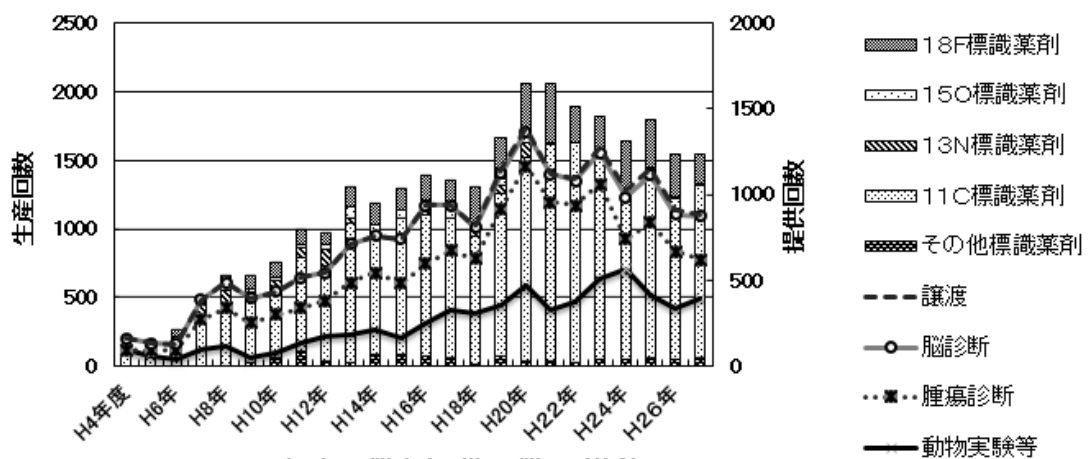


図2. 生産回数と提供回数の推移



## 4. 物理研究

- 4-1. 陽子線を用いた治療・診断時の動的イメージング技術の基礎開発
- 4-2. 核破砕片生成二重微分断面積の測定
- 4-3. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究
- 4-4. 最前方と最後方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定
- 4-5. 放射性遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験
- 4-6. 重粒子によるしきいエネルギー付近の核反応に関する研究



# 陽子線を用いた治療・診断時の動的イメージング技術の基礎開発

## Basic Study of Real-time Radiology Imaging during the Proton Therapy

片岡 淳<sup>A</sup>、岩本 康弘<sup>A</sup>、多屋 隆紀<sup>A</sup>、小出 絢子<sup>A</sup>、高部 美帆<sup>A</sup>、増田 孝充<sup>A</sup>、  
岸本 彩<sup>A</sup>、稲庭 拓<sup>B</sup>、西尾 禎治<sup>C</sup>

Jun Kataoka<sup>A</sup>, Yasuhiro Iwamoto<sup>A</sup>, Takanori Taya<sup>A</sup>, Ayako Koide<sup>A</sup>, Miho Takabe<sup>A</sup>, Takamitsu Masuda<sup>A</sup>, Aya Kishimoto<sup>A</sup>, Taku Inaniwa<sup>B</sup>, Teiji Nishio<sup>C</sup>

A: 早稲田大学理工学術院・先進理工学研究科、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、C: 広島大学大学院医歯薬保健学研究院

### 概要

がんは我が国における三大成人病の筆頭であり、死因の 1/3 を占める国民病である。治療法は手術療法・化学療法（抗がん剤治療）・放射線療法が大きく三つに分けられるが、とくに粒子線を用いる放射線治療はピンポイントかつ病巣への確実なダメージが期待でき、QOL（Quality of Life）が高い治療法として近年注目を集めつつある。とくに、陽子線治療施設はコストや小型化できるメリットから最も需要が高く、世界的な普及を始めている。一方で、粒子線治療はその線量集中性ゆえに正確な照射が不可欠であり、照射を間違えると正常組織にまで深刻なダメージを与えかねない。従来の X 線を用いた治療に比べ陽子線治療の歴史は浅く、より高精度な治療を可能とする精密かつ迅速な計測技術が求められている。そこで本研究では、将来の高精度陽子線治療にむけたイメージング技術の基礎開発を行う。2015 年度は (1) 陽子線照射中における即発ガンマ線の同定及び 1 次元分布評価 (2) コンプトンカメラを用いた即発ガンマ線撮影 (3) 陽電子放出核種の生成断面積測定 (4) 透過型陽子線 CT 技術の基礎開発に取り組んだ。

### 1. 目的

線量集中性の高い陽子線治療において照射線量を正確に把握することは極めて重要であるが、実際は非常に困難な課題である。現在、画像化に広く用いられている対消滅ガンマ線 (511keV) が陽子の線量を必ずしもトレースしないことは物理プロセスの違いから見て明らかであり、また PET 装置の構造上、ビームを当てつつ「オンラインで」ガンマ線を撮影することに技術的な困難が伴う。さらに、オフラインで撮影する場合、異なる半減期をもつ核種の寄与が複雑に混ざり合う。陽電子放出核種の正確な生成断面積が必要であるが、Geant-4 や PHITS といった世界的に広く用いられるシミュレータですらデータベースに不一致があり、相互に大きな差異が見られる。さらに、陽子線治療では被写体内の電子密度分布が必要であるが、現在は X 線 CT の画像をもとに陽子線の阻止能を算出しており、数パーセントの誤差が生ずる。この問題を解決するため、治療に使う陽子線そのもので CT 画像を得ることで、より正確な治療計画に還元できる可能性がある。そこで本研究では (1) 20keV から 5,000keV にわたる即発ガンマ線の同定と 1 次元分布の系統評価 (2) 任意の即発ガンマ線をリアルタイムで撮像可能なコンプトンカメラの開発 (3) チェレンコフ光を用いた陽電子放出核種の断面積決定 (4) CCD カメラと陽子線の飛程に対し十分薄いシンチレータを用いた「透過型」陽子線 CT システムの開発に着手した。

### 2. 実験方法

実験(1)–(3)については、C6 コースにおいて 1cm φ 程度に絞った 70 MeV 陽子線ビームをアクリルや水、Ca(OH)<sub>2</sub>などのファントムに照射することで実施した。ビーム電流は(1)(2)が最大で 400pA 程度、(3)はラジカル発光強度を上げる必要性から最大 50nA を照射した。実験(4)は C8 コースにおいて 10×10cm 程度にほぼ一様に広げたワブラービームをファントムに照射し、CT 画像を取得した。ビーム電流は最大 50nA を照射した。照射ファントムは放射能が 100cpm 以下になるまで照射室内で保管し、後日実験担当者が回収を行った。

#### (1) 即発ガンマ線の精密分光測定と 1 次元分布評価方法

陽子線を人体に照射した際に様々な核ガンマ線や制動放射 X 線が生ずるが、その種類や強度については必ずしも自明でない。そこで本研究では、人体構成核種を含む様々なファントム（水、PMMA、Ca(OH)<sub>2</sub>など）に 70MeV 陽子線を照射し、H-Ge 検出器を用いたガンマ線スペクトルの精密測定を実施した。H-Ge 検出器 (Seiko EG&G; GEM-40190-P-S)は HIMAC 共同利用から借用し、前日より窒素冷却を始めた。まずビーム照射中・照射後にファントム全体から生ずる X 線・ガンマ線スペクトルを取得し、その同定作業を行った。続いてファントムを X 軸ステージに乗せ、20-30cm 程度の鉛スリットでガンマ線入射位置を数 mm に絞った状態でスキャンし、ファントム端面からブラッグピークにいたる即発ガンマ線・X 線

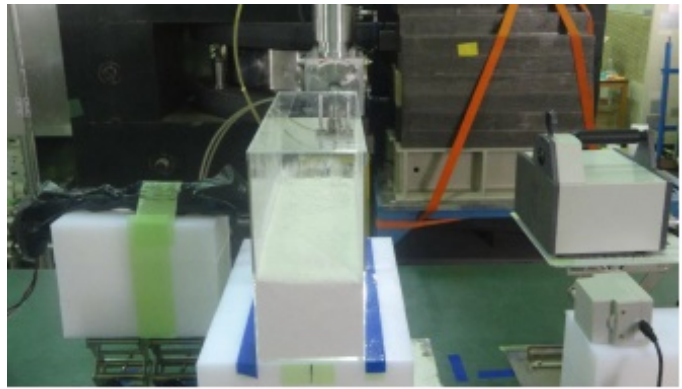
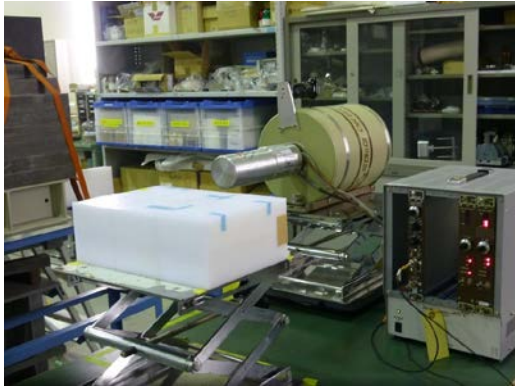


図 1: C6 コースにおける実験セットアップの様子。(左) H-Ge 検出器による高精度スペクトル測定 (実験 1)。(右) 高感度コンプトンカメラによる即発ガンマ線測定。ターゲットは  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (実験 2)

のスペクトル変化を調べた[1]。とくに照射中は、ビーム照射口や鉛コリメータ内での中性子反応などによるバックグラウンドが極めて高く、これらの低減が不可欠な要素となる。実験は複数回にわたって行い、ポリエチレンブロックをコリメータとして追加したもの、スリット幅を 2–5mm 程度で変更したものなど、シミュレーションにおける最適化と同時に実機でも様々なバリエーションを調べた。同様に、センサー部分も最適化が必要で、スリット幅に比べて不要に大きな体積を持つ検出器は余計なバックグラウンドの混入を招き好ましくない。そこで、H-Ge 検出器 (直径 51mm, 奥行き 80mm) はあくまで輝線の同定のみ用に用い、1 次元スキャンはより小型の  $\text{SrI}2(\text{Eu})$  シンチレータ (直径 25mm, 奥行き 25mm) ないしは、板状  $\text{Ce}:\text{GAGG}+\text{BGO}$  からなる小型フォスウィッチ検出器(GAGG は 5x30mm, 奥行き 50mm) を自作してバックグラウンドの低減化を図った。

### (2) コンプトンカメラを用いた即発ガンマ線の撮像方法

比較的エネルギーの高い、即発ガンマ線のイメージング用として、我々が浜松ホトニクス社と共同開発した小型コンプトンカメラ[2-4]を用いて各種ファントム (水, PMMA,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) の撮影を行った。PET と異なり、コンプトンカメラは約 200keV 以上の任意のガンマ線を測定可能である。一方で、実験(1)から 511keV のガンマ線がビーム照射時・照射後に最も強く、また現在臨床で用いられていることもありデータも多く得られている。そこで、まずは 511keV のオンライン・イメージ取得を目標とした。さらに PMMA や  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  は  $^{10}\text{B}$  からの 718keV ガンマ線が生ずるため、これらビーム照射時のみに発生する即発ガンマ線のイメージングも試みた [5]。コンプトンカメラはファントムから 30–50cm 程度離すため、陽子線のレンジ (PMMA の場合は 70MeV で 3.5cm 程度) に比べると既存のカメラ解像度 (約  $10^\circ$  FWHM @511keV) は分布を調べる上で十分といえない。しかしながら、ファントム内でガンマ線が発生する重心位置を求め、ブラッグピークと比較することは可能と見込まれる。

### (3) チェレンコフ光を用いた陽電子放出核種の断面積決定法

陽子線照射によってファントム内に生成された  $\beta^+$ 崩壊核種から陽電子が放出され、その一部はチェレンコフ光を発することが知られている[6,7]。微弱な光ではあるが高感度 CCD を用いれば撮影可能で、チェレンコフ光の空間分布、ひいては陽電子放出核種の空間分布を反映した重要なプローブとなる。本研究では様々なファントムに陽子線を照射し、その後に観測されるチェレンコフ光の時間発展を測定した。CCD カメラとしては BITRAN 社製 BU51LN を使用した。ここで実測した分布を一次元に投影し、

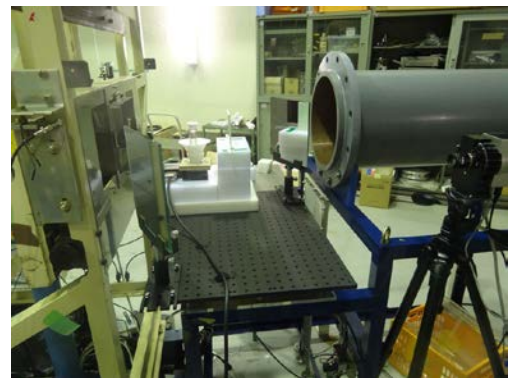
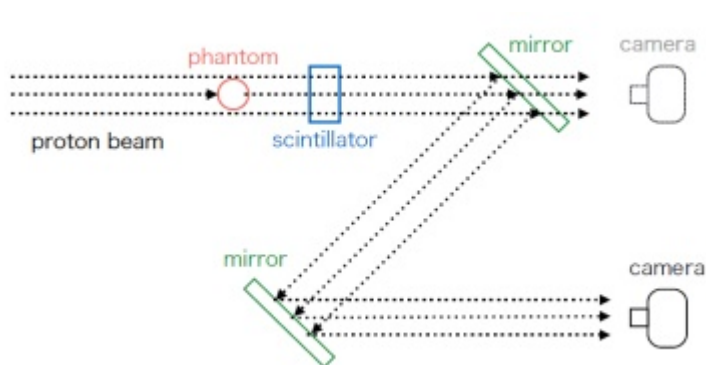


図 2: C8 コースにおける実験セットアップの様子 (左)測定システム構成と概念図 (右) 実際のセットアップの写真。CCD カメラは右手前にあり、ダメージを防ぐため鏡 2 枚を介して測定。



PHITS を用いたシミュレーションから期待される分布と比較することで元々の陽子線の線量分布を推定する方法を考案した。さらに、観測された一次元分布が様々な（異なる半減期をもつ）陽電子放出核種の発光分布の重ね合わせであることに着目した。すなわち、時刻  $t_j$  における核種  $i$  由来のチェレンコフ光 1 次元分布を  $y_i(x, t_j)$  とすると  $y_i(x, t_j) = F_i(t_j) I_i(x)$  であらわされる。ここで  $F_i$  は強度の時間変化を表す項、 $I_i(x)$  は核種  $i$  に固有の一次元チェレンコフ強度分布であり、陽子線が入射した際に生ずる陽電子放出核種の個数分布（1 次元）に比例する量である。実際に観測される時刻  $t_j$  における 1 次元分布は全ての核種  $i$  からの寄与を合算したものである、 $Y(x, t_j) = \sum y_i(x, t_j)$  で表される。これを時刻  $j = 1-N$  まで連立して解くことで、それぞれの核種における  $I_i(x)$  を求めることができる。さらに、位置  $x$  は陽子線エネルギー  $E$  に一意的に対応するため、 $I_i(x)$  をエネルギーの関数  $I_i(E)$  と焼き直すことができる。これはすなわち、陽電子放出核種の反応断面積に比例する量となる[8]。

#### (4) CCD カメラと薄いシンチレータを用いた「透過型」陽子線 CT の方法

シンチレータと CCD カメラを用いた陽子線 CT システムについては、既に各種報告がされている[9]。これらは陽子線に対して十分厚いプラスチックシンチレータを用いて陽子線を全吸収し、発光量の 2 次元分布を高感度 CCD カメラで捉えることで、陽子線自体の阻止能を算出するものである。陽子線の飛程はエネルギーとともに増加する。70MeV 陽子線のプラスチックシンチレータ内での飛程は 3cm 程度であるが、治療に使われる 200MeV ビームでの飛程は 25cm 程度にもなり、シンチレータ内での光の拡散や散乱の影響が深刻となる。そこで、本研究では飛程に対して「十分薄い」蛍光板を用いることで同様な陽子線 CT がより手軽に行えないか、基礎的な評価を行なった。セットアップを図 2 に示す。物理的には、陽子線の全エネルギー  $E$  を指標にするのではなく、陽子線が薄板中に落とすエネルギー  $\Delta E (= dE/dx \times \Delta x; \Delta x$  は薄板の厚み) から陽子線量を求め、画像化することに相当する。これにより、システムを軽量・簡略化できるほか、200MeV 陽子線での画像再構成にも容易に拡張できることが期待される。今回は蛍光板として  $10 \times 10$ cm で厚みが 3-5 ミリ程度のプラスチックシンチレータを使用した。10cm 視野に広げた陽子線を回転テーブル上の被写体に照射し、それぞれの回転位置 ( $0.5^\circ$  刻み)での投影画像から CT 画像を再構成した[10]。

### 3. 実験結果

#### (1) 即発ガンマ線スペクトルと 1 次元分布

図 3(左)は H-Ge 検出器で取得した PMMA への陽子線照射時（濃青）・照射後（水色）のスペクトルの例である。良く知られた陽電子放出核種による 511keV のほか、718keV, 4.4MeV などに顕著な即発ガンマ線ピークが見られる。これら即発ガンマ線は異なる核反応から生じ、それぞれが反応閾値を持つため、空間分布を予想することは必ずしも自明ではない。実際、研究が最も進んでいる陽電子放出核種ですら、Geant-4 や PHITS など複数の電磁シミュレータの結果が必ずしも一致せず、それが実験[2]の強い動機にもなっている。次に 511 keV 以下の連続成分に目を向けると、やはり照射中のフラックスがファクタ 2 以上大きく、これは電離電子による制動放射によるものと考えられる。70MeV 陽子線の場合、2 次電子による制動放射の上限値は 140keV と見込まれる。一般的に、制動放射の典型値は陽子のエネルギーに比例するため、陽子が止まる寸前で急激に減少する。従ってあるエネルギー帯（たとえば 50keV）

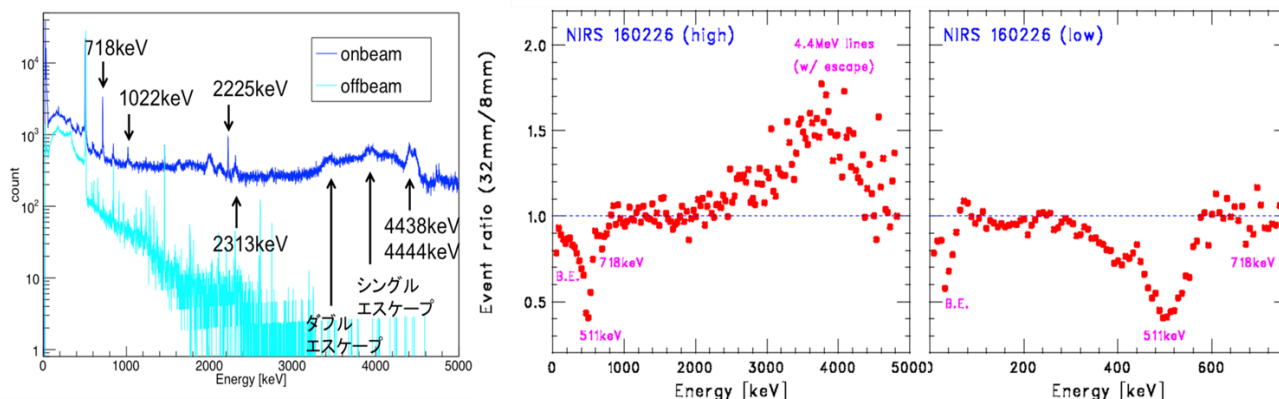


図 3: (左)H-Ge 検出器による陽子線照射中（濃青）照射後（水色）のスペクトル比較 (中) Ce:GAGG+BGO からなるフォスウィッチ検出器を用いてファントム入り口とブラッグピーク付近で取得したスペクトルの ratio (上限 5MeV) (右) 同・拡大図 (上限 1MeV)

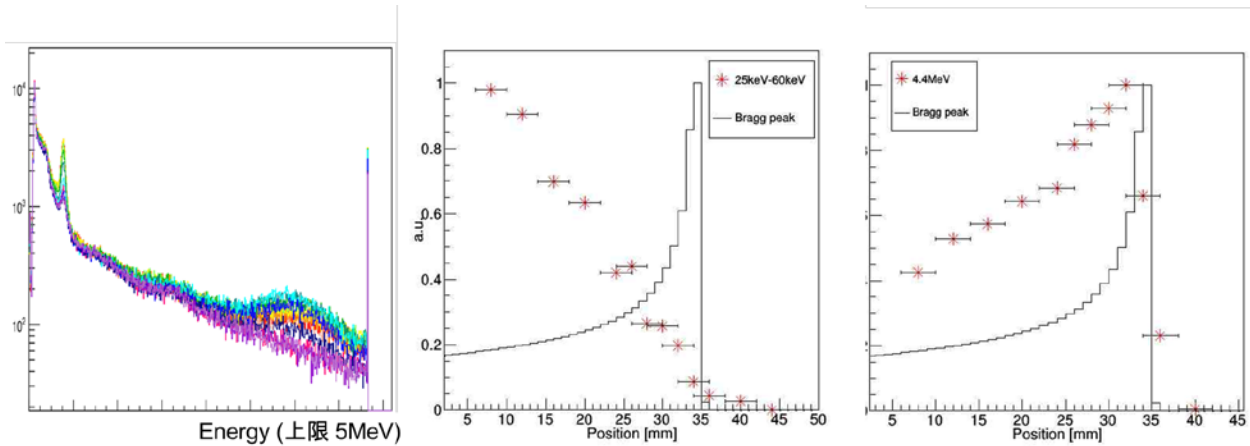


図 4: Ce:GAGG+BGO フォスウィッチ検出器で取得した(左)ファントム位置ごとの即発ガンマ線スペクトル変化 (中) 25-60 keV 制動放射の一次元分布 (右) 3-5 MeV ガンマ線の一次元分布。比較のため、シミュレーションによる陽子線のエネルギー損失を実線で示す。

で見た場合、フラックスがブラッグピーク付近で急激に減少することが期待される。これら混沌とした状況を整理し、どのエネルギー帯が陽子線量のモニタとして感度が高いか、まずは概観することが必要となる。そこでファントムへ陽子線が入射した直後とブラッグピーク付近でガンマ線スペクトルを取得し、比 (ratio) を求めた。図 3 (中) は 5 MeV までの全領域、図 3 (右) は 1MeV 以下の拡大を示している。検出器はバックグラウンドを極限まで下げるため、Ce:GAGG と BGO プレート 2 枚からなるフォスウィッチ検出器を用い、波形弁別により Ce:GAGG だけがヒットしたイベントを抽出している。これより明らかな通り、即発ガンマ線のうち  $^{12}\text{C}$  由来の 4.4MeV およびそのエスケープガンマ線が最もブラッグピークに感度が高く、一方で 511keV ガンマ線や制動放射は「負の」相関を示していることがわかる。図 4 に 25-60keV と 3-5MeV で取得した、ビーム軸方向の一次元プロファイルを示す[1]

## (2) コンプトンカメラによる即発ガンマ線撮影

水、PMMA,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の各ファントムに 70MeV 陽子線を照射し、照射中に発生する即発ガンマ線及び照射後に生ずる 511keV ガンマ線を撮像実験を行った。図 5 はそれぞれのファントムに照射中の 511keV ガンマ線イメージ、PMMA のみは  $^{10}\text{B}$  から生ずる 718keV の撮像を試みた。いずれの場合においても 511keV ガンマ線のピークはブラッグピークより手前に結像した。たとえば PMMA の場合、ブラッグピークの位置は 33mm であるが、511keV ガンマ線のピークは  $26 \pm 2\text{mm}$  であった。718keV に関しては、よりブラッグピークに近い傾向があり  $30 \pm 8\text{mm}$  であったが、統計が悪く有意な結論は得られなかった。ビーム照射後のイメージについても同様な傾向が得られ、511keV のピーク位置は水、PMMA,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  でそれぞれ  $22 \pm 3\text{mm}$ ,  $30 \pm 5\text{mm}$ ,  $21 \pm 3\text{mm}$  が得られた。統計不足のため、時間経過に伴うピーク位置変化の有無については有意な情報が得られなかった[5]。

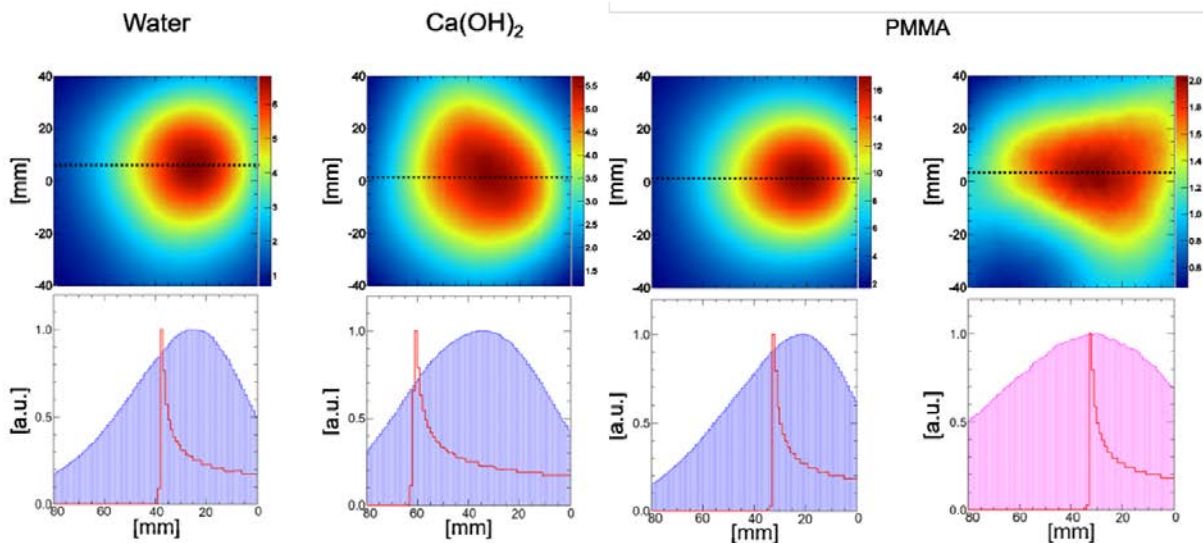


図 5: 高感度コンプトンカメラで測定した、即発ガンマ線の画像と一次元分布例。左から水、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , PMMA での測定。PMMA に限り、718keV のイメージも示したいずれの場合もガンマ線のピーク位置はブラッグピークより手前にあることが分かる。

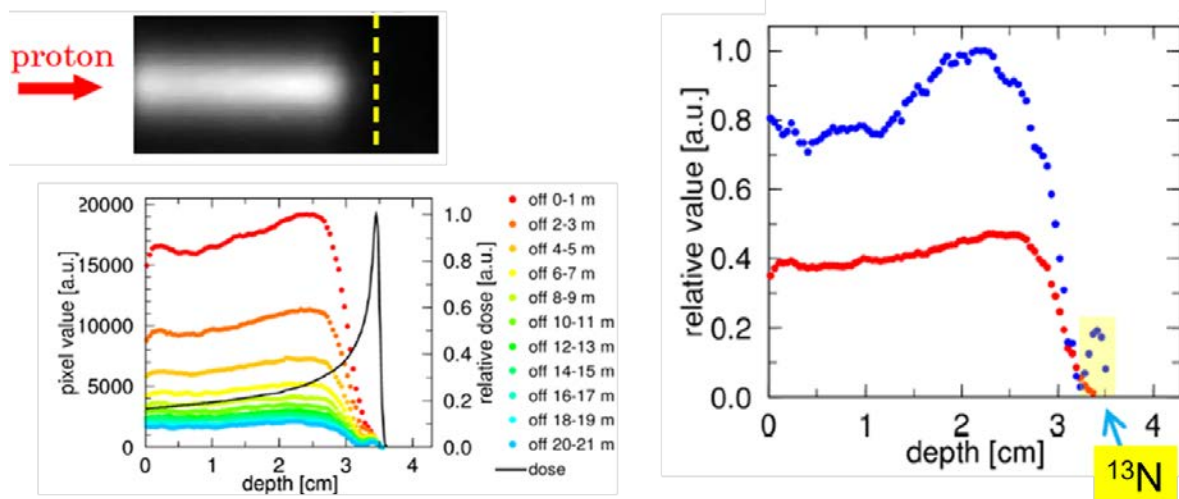


図 6: (左上) PMMA への陽子線照射直後に撮影した陽電子放出核種からのチェレンコフ画像 (左下) チェレンコフ画像から求めた 1 次元プロファイルの時間変化 (右) チェレンコフ光の時間発展から求めた超寿命 (青) 短寿命 (赤) 陽電子放出核種の一次元分布

### (3) チェレンコフ光を用いた陽電子放出核の分布測定と生成断面積

チェレンコフ光は原理的に全てのファントムで生ずるが、人体の構成元素の 95% を占める水素・酸素・炭素をふんだんに含み高い透明度があること、また取り扱いの簡便さを考慮して PMMA (組成は  $C_5O_2H_8$ ) における照射を実施した。図 6 (左) は陽子線照射後における PMMA のチェレンコフ発光イメージ変化をブラッグピークと比較したものである。陽電子からのチェレンコフ光はブラッグピークより十分手前で落ちているが、照射から 10 分以上が経過するとブラッグピーク付近に弱い盛り上がりを確認できる。これは半減期が 10 分と長い  $^{13}N$  からの寄与が浮き立ってきたもので、他の陽電子放出核種よりもブラッグピークを良く反映することはシミュレーションでも確認されている。すなわち、チェレンコフ光の観測においても、間接的ではあるが  $^{13}N$  の寄与が正しく輝度分布に反映されていることが分かる。この結果を元に、2 章で述べた手法で短寿命の成分 ( $^{14}O$  と  $^{15}O$  の和)、超寿命の成分 ( $^{13}N$  と  $^{11}C$  の和) を分離した結果を図 6 (右) に、これより推定した  $^{11}C$ ,  $^{15}O$ ,  $^{13}N$  の生成断面積をそれぞれ図 7 に示した。CCD カメラによる撮影のため、散断面積の絶対値を直接求めることは出来ないが、それぞれの核種における断面積の相対値はほぼ正しく決定できている。本手法は、これまで行われてきた 511keV ガンマ線から直接断面積を求める手法と相補的かつ独立であり、核反応によっては遥かに高精度かつ簡単に断面積を推定する新しい手法であることが実証できた[8]。

### (4) 「透過型」陽子線 CT への挑戦

陽子線 CT における画像再構成には、陽子線の水中での飛程を表す WEL (Water Equivalent Length) を正確に求める必要がある。WEL は陽子線の阻止能と比例関係にあり、まずは様々な厚みのポリエチレン材を用いてプラスチックシンチレータの発光量差 (CCD 画像上での明るさの差) と WEL の関係を表す「光量レンジ変換テーブル」を図 8(左) のように求めた。再構成したファントム画像 (ペンギン型) の一例を図 8(中) に示す。被写体の周囲が白く際立つ原因は、被写体自体での陽子線の多重クーロン散乱による影響と考えられる。上部に開いた目の大きさは直径 1mm であるが、再構成した画像から見積

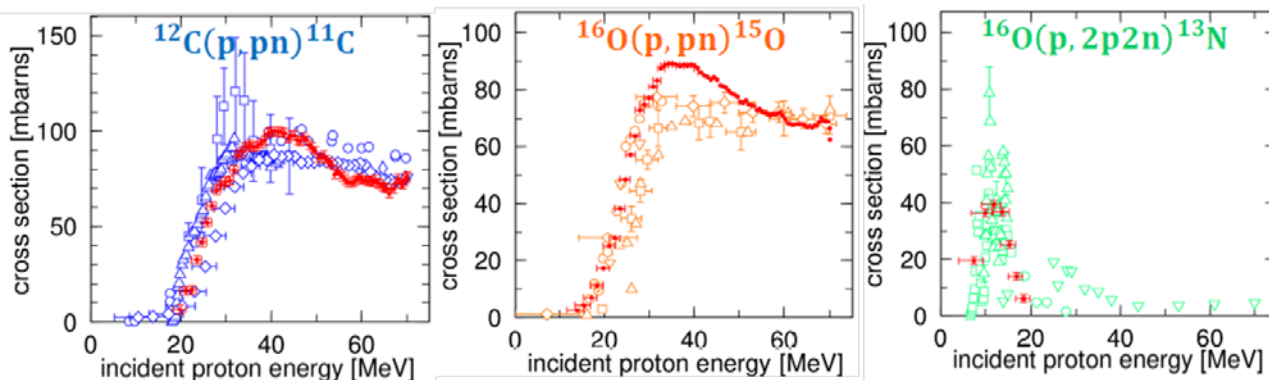


図 7: PMMA に 70MeV の陽子線照射を行った後、チェレンコフ光の時間発展から求めた、 $^{11}C$ ,  $^{15}O$ ,  $^{13}N$  の生成断面積



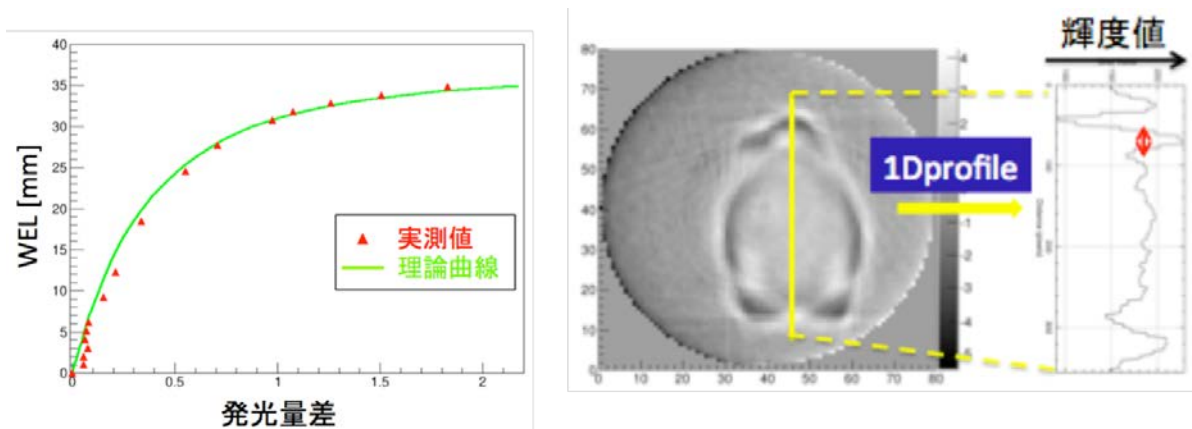


図 8 : (左) 70MeV 陽子線による光量レンジ変換テーブル (右) 陽子線 CT の撮影例

もった直径は 1.7 mm (FWHM)であり、十分な精度が得られている。最後に、陽子線を用いる長所として、通常の X 線 CT では困難な、線減弱計数(CT 値)が近い物質の同定が本当に可能であるかを調べた。水・アクリル・イソプロパノールの 3 種類の物質に対し X 線照射で CT 値を取得し、70MeV における陽子線照射時の WEL 値と比較した。図 8(右)に結果を示す。図から明らかなように、三つの物質は X 線では殆ど区別できないが、陽子線を用いた WEL 値としては大きな差として現れ、陽子線 CT の意義を再確認することができた[10]。

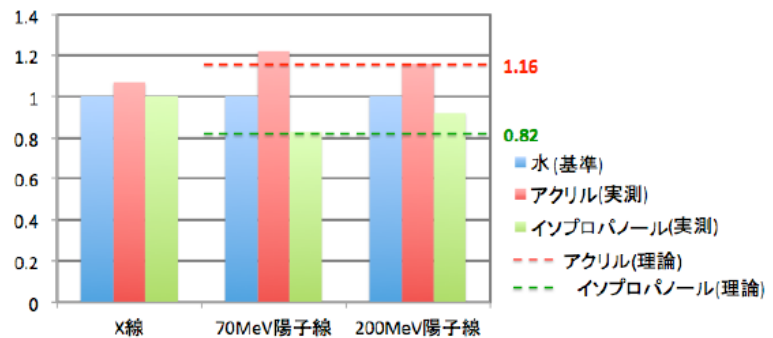


図 9 : CT 値が近い三種類の物質における、(左)X 線 CT 値、(中) 70MeV 陽子線での WEL 値 (右)200MeV 陽子線での WEL 値。200MeV は名古屋陽子線治療センターで実施

#### 4. まとめと今後

サイクロトロン照射室の綿密かつ丁寧なご指導、また AEC 物理実験サポートのお陰もあり、当初予定していた実験項目をほぼ 100%消化し、期待した以上の成果を得ることが出来た。実験 (1) においては、即発ガンマ線モニターとして使用するのに最適なエネルギー帯を 3-5MeV と一意に決定し、また 100keV 以下の制動放射 X 線を新たなプローブとして使用できる可能性が示せた。制動放射のオンラインモニターとしての利用は過去に例がなく、低バックグラウンドかつ高解像度のピンホールカメラの製作を目指したい。より高エネルギーに関しては、実験 (2) においてビーム照射時において 511keV, 718keV の即発ガンマ線イメージングに成功したものの、解像度が十分とは言いがたい。実験 (1) と併せ、3-5MeV の即発ガンマ線イメージングをより高解像度かつ簡便に行える新しいコンプトンカメラの開発を目指す。実験 (3) は PMMA のみならず、様々なファントムに陽子線を照射した場合についてデータベースを拡張し、全く新しい側面から原子核物理の基礎データ還元を目指す。CCD における積分時間短縮のため、PMMA にかわりプラスチックシンチレータなどの利用を考え、時間精度を向上する予定である。最後に、実験 (4) の陽子線 CT については、初めてのトライアルにもかかわらず CT 画像を得ることができ、また CT 値が近い物質同定における陽子線使用の意義を再確認することができた。今後は、検出器側(蛍光版の最適化)と画像再構成プログラムの双方から多重クーロン散乱の影響を軽減することが必要で、既に大きな改善を見込めるアイデアが蓄積している。

いずれにおいても、平成 28 年度以降も引続きサイクロトロンで実験を進めることで更なる大きな飛躍が期待でき、基礎物理学と医学物理の両分野に発展に大きなフィードバックが見込まれる。

**謝辞** 本実験の遂行に当たり、サイクロトロン照射室の杉浦彰則様、北條悟様、またオペレータの皆様へ深く感謝いたします。また、H-Ge 検出器の使用に関しましては AEC 実験サポートチームの神谷様ほか関係者様へ大変お世話になりました。紙面をお借りして御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 小出絢子「陽子線治療オンラインモニタに向けた即発ガンマ線の 1 次元分布評価」 稲田大学理工学術院・先進理工学部, 卒業論文 (2016 年 3 月)
- [2] J.Kataoka et al., “Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators couples with large-area monolithic MPPC array”, NIM-A, vol.732, p.403, (2013)
- [3] A.Kishimoto et al., “Performance and field tests of a handheld Compton camera using 3-D position-sensitive scintillators coupled to multi-pixel photon counter arrays”, J-INST, vol.9., P11025
- [4] J.Kataoka et al., “Recent progress of MPPC-based scintillation detectors in high precision X-ray and gamma-ray imaging”, NIM-A, vol.784, p.248, (2015)
- [5] T.Taya et al., “First demonstration of real-time gamma imaging by using a handheld Compton camera for particle therapy”, NIM-A, submitted, (2016)
- [6] S.Yamamoto et al., “High resolution Cerenkov light imaging of induced positron distribution in proton therapy”, Medical Physics, vol.41, 11913, (2014)
- [7] Y.Helo et al., “Imaging Cerenkov emission as a quality assurance tool in electron radiotherapy”, Physics in Medicine and Biology, vol.59, p.1963, (2014)
- [8] 増田孝充「陽電子放出核種を用いた陽子線線量分布の高精度推定法」, 早稲田大学理工学術院・先進理工学部, 卒業論文 (2016 年 3 月)
- [9] 西尾禎二ほか 「高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究」, 平成 26 年度サイクロトロン利用報告書、放射線医学総合研究所, p.17 (2014)
- [10] 高部美帆 「高精度陽子線治療に向けた CCD カメラ陽子線 CT システムの開発」, 早稲田大学理工学術院・先進理工学部, 卒業論文 (2016 年 3 月)

# 核破砕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>、山口 雄二<sup>B</sup>、魚住 裕介<sup>B</sup>、古場 裕介<sup>C</sup>

Toshiya. Sanami<sup>A</sup>), Yuji Yamaguchi<sup>B</sup>), Yusuke Uozumi<sup>B</sup>), Yusuke Koba<sup>C</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>: 九州大学工学府

<sup>C</sup>: 放射線医学総合研究所

### 概要

平成 27 年度の放医研サイクロトロンの実験では、核破砕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 重陽子入射と 40, 70 MeV 陽子入射に対するベリリウム、炭素、アルミニウム、銅、銀ターゲットからの核破砕片生成二重微分断面積測定を行った。

### 1. 目的

高エネルギー加速器研究機構、九州大学、放射線医学総合研究所からなる当グループでは核破砕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及び(p,p)反応における蒸発過程からの陽子の角度分布測定を目的として、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、核破砕片生成二重微分断面積の入射粒子依存性については陽子、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砕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、核破砕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、核破砕片と同時に測定された例は殆どない。昨年度までに、これまでの核破砕片生成二重微分断面積測定と平行して、検出器の改良を行い測定対象粒子の拡充し、散乱チェンバーの改良を行い測定角度の拡充を図った。本報告では、本年度実施した実験のうち、25 MeV重陽子入射実験の結果について、これまでの測定結果と合わせて述べる。

### 2. 実験手法

核破砕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、核破砕片の測定のために必要とされる効率と可測定エネルギー域の確保を行っている。この手法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、測定が行えない。そこで本研究で用いる BCC のうち 1 台について、(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

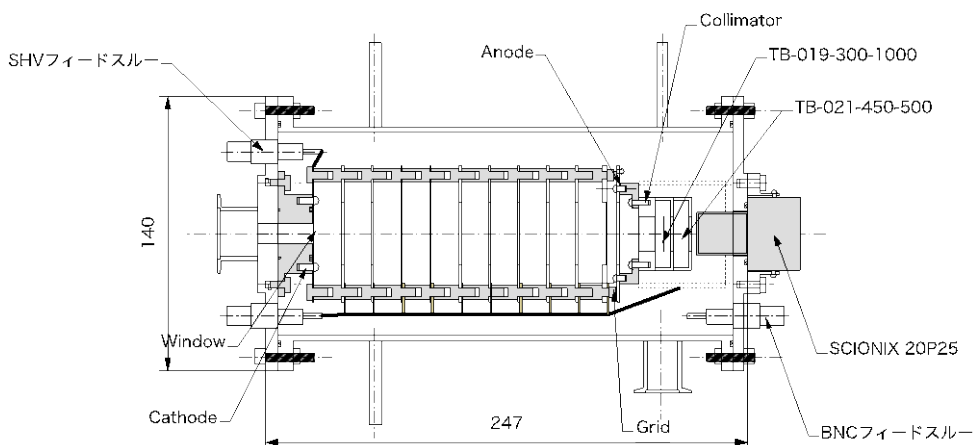


図 1 BCC の断面図

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っている。

図1にBCCの模式図を示す。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シンチレータは未実装である。

このBCCに組み合わせる散乱チャンバーの縦断面図と平面図を図2に示す。この散乱チャンバーは(1)検出器は最前方のみ小型のBCCを想定し、それ以外の角度では既存のBCCが使用できるようにする、(2)散乱チャンバーの真空を効率的に引くために、チャンバーにターボ分子ポンプを取り付ける、(3)測定角度を減らさずにターゲットを覗けるように、散乱面でない方向にビューポートを設ける、(4)半導体検出器の使用を考慮し、ビームダンプまでの距離を延長する、(5)ビームダンプ直前にデマルケストを設置し、ダンプに入射するビームのモニターを行う、(6)これらを専用の架台に配して容易に設置ができるようにした。図3に新たな散乱チャンバーをC6コースのビームラインに設置した写真を示す。

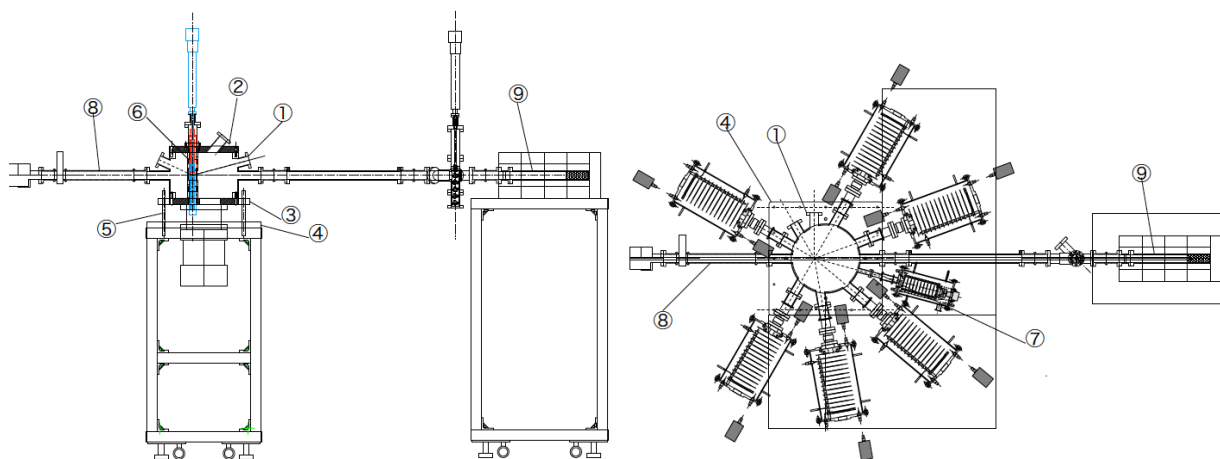


図2 BCCと散乱チャンバーを接続した状態の縦断面図(左)と平面図(右)

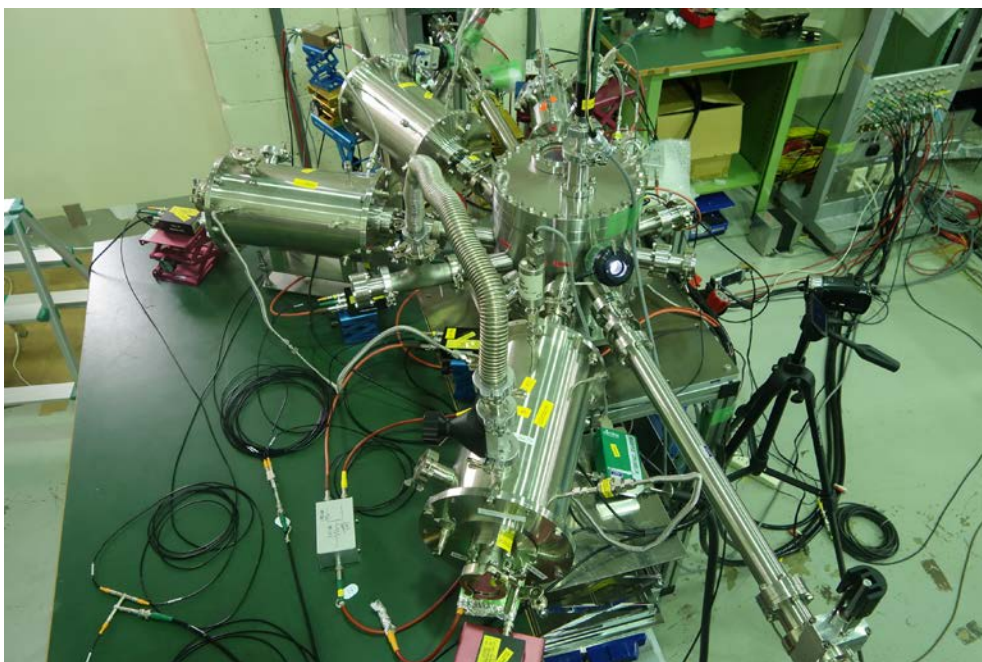


図3 実験セットアップの写真



### 3. ビーム実験

核破砕片生成の入射粒子種による依存性の解明を目的として、今年度は 25 MeV 重陽子、70 MeV 陽子入射によるベリリウム、炭素、アルミニウム、銅、銀ターゲットからの核破砕片生成二重微分断面面積測定を行った。本測定及びこれまでに測定したビーム種とエネルギーについて表 2 にまとめる。

表 2 入射粒子種を変えた核破砕片生成二重微分断面面積測定の測定エネルギーと粒子種

エネルギー 入射粒子	粒子あたり同一エネルギー			核子あたり同一エネルギー	
	50MeV	70MeV	140MeV	12MeV/n	25MeV/n
p	2014/ 1/17 2013/ 8/ 8	Ref[8] 2016/ 1/ 7	2010/ 7/ 4 (RCNP)		2013/ 6/ 7
d	2012/11/13			2015/ 8/11	2012/11/13
He	2014/ 7/ 4	2013/ 1/11		2014/ 7/ 4	2014/ 7/ 5
C	2014/12/19	2013/ 7/ 3	2009/ 7/ 9	2009/ 7/ 9	

陽子 140MeV を除くビーム実験は放射線医学総合研究所の大型サイクロトロン(NIRS-930)の C6 コースにて行った。実験装置の配置、手法については参考文献 [1-10] に詳細な記述がある。前述の通り、2014 年 1 月の実験より BCC に半導体検出器を併用している。改良した散乱チェンバーの使用は 2014/12/19 からである。2015 年に行った重陽子の測定により、放射線医学総合研究所の大型サイクロトロンを用いて行える粒子種、エネルギー種の測定は網羅された。

### 4. 実験結果

図 4 にこれまでの測定結果の比較の例として、70 MeV 粒子の入射に対する、30 度方向での核破砕片生成二重微分断面面積を炭素とアルミニウムターゲットについて示す。図中の実線は計算値であり、PHITS コードバージョン 2.76 によるものである。物理オプションはデフォルト値を用いた。

炭素ターゲットに炭素原子核を入射したために、直接過程成分により炭素放出が多い。また、ボロン放出と酸素放出はストリッピング及びピックアップ過程による寄与があると考えられる。これらの直接過程成分による収量の変化は陽子、ヘリウム入射に対しては見られない。

計算値は概ね実験値を再現するが、上記直接過程とみられる成分については過小評価している。同様な比較をすべての入射エネルギー、ターゲット原子核について行った結果、ターゲット原子核が重くなるにつれて過小評価傾向が大きくなることがわかった。

図 5 に図 4 と同様の粒子がアルミニウムターゲットに入射した場合に放出される核破砕片の 30 度方向の二重微分断面面積を示す。この場合は計算値が実験値を過小評価していることがわかる。一方で放出粒子のエネルギー分布は実験値と類似の形状を示していることから、放出機構の記述ではなく、その絶対値を決めるパラメータについて検討が必要であることが示唆されている。

同様の比較を 50MeV,140MeV 入射の各ターゲットについて行い、同様の傾向を示すことが明らかになった。

二重微分断面面積をエネルギー積分し、その値のターゲット依存性を示したものを図 6 に示す。実験値はゼロエネルギーまでのデータが得られていないという問題点はあるが、入射粒子の近傍の核破砕片の放出が直接過程成分として生成量を押上げている様子がわかる。直接過程は入射粒子とターゲット原子核、残留核のエネルギー準位、核子の拾い上げと剥ぎ取りを取り入れることにより、実験データをよく再現することが近年報告されている。この成果を用いて本実験値の非直接過程成分の系統性を評価することにより、核破砕片の記述の精度が改善することが期待出来る。



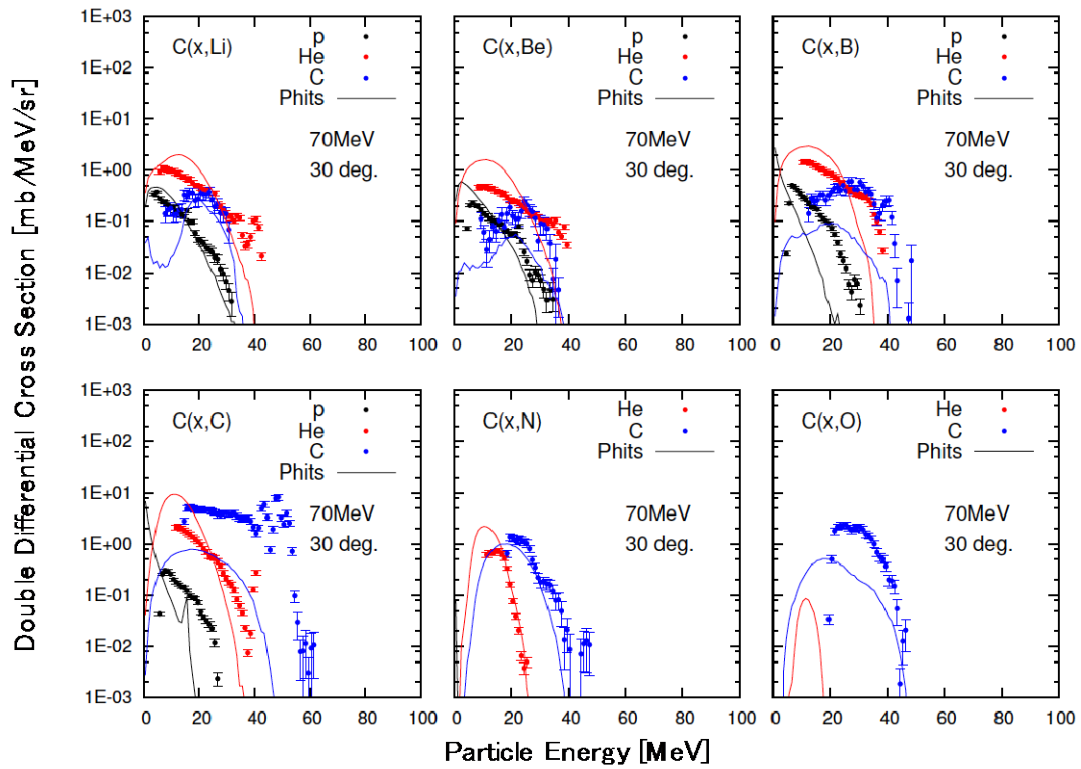


図4 70 MeVの陽子、ヘリウム、72 MeVの炭素が炭素ターゲットに入射した場合に放出される核破砕片の30度方向の二重微分断面積

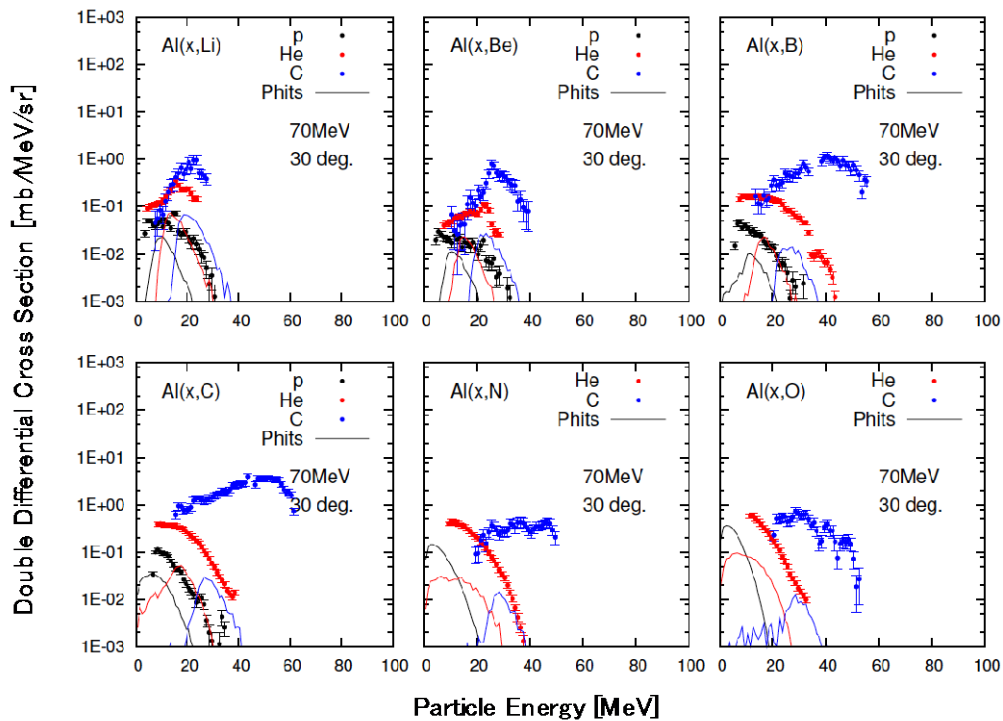


図5 70 MeVの陽子、ヘリウム、72 MeVの炭素がアルミニウムターゲットに入射した場合に放出される核破砕片の30度方向の二重微分断面積

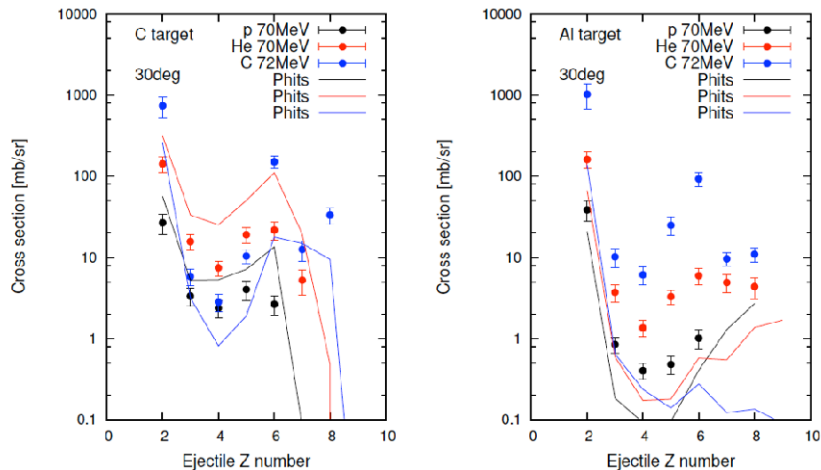


図6 70 MeV の陽子、ヘリウム、72 MeV の炭素が炭素およびアルミニウムターゲットに入射した場合に30度方向に放出される核破断片のターゲット原子核依存性

## 5. まとめ

平成27年度までのマシンタイムにより核破断片生成二重微分断面積の入射粒子依存性にかかわるデータ取得を一通り終えることができた。また、この測定系を用いて、核は再編と同時に陽子の測定が可能になったために、蒸発過程からの陽子の角度依存性にかかわるデータ取得が可能であることがわかった。次年度は、現在1台しかない陽子まで測定が可能なBCCを増やし、広い角度範囲にわたり同時測定を試みる。

## 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).

# 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>、恒田 雅人<sup>A</sup>、田中 創大<sup>C</sup>、株木重人<sup>D</sup>、中村 哲志<sup>B</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>, Shigeto Kabuki<sup>E</sup>, Taku Inaniwa<sup>F</sup>,  
Akinori Sugiura<sup>G</sup>, Satoru Hojo<sup>G</sup>

A : 広島大学大学院医歯薬保健学研究院

B : 立教大学大学院理学研究科

C : 東京大学大学院工学系研究科

D : 東海大学医学部

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法へ進化を遂げる必要がある。高精度陽子線治療のために、陽子線照射技術や計測技術を中枢とする基盤技術の構築が必要不可欠である。

### 1. 目的

腫瘍に対する線量集中性を更に向上させた高精度陽子線治療を実現するために、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、これまでと同様に陽子線治療において、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の研究を目指す。その実現のために、照射領域可視化システム用の原子核破砕反応断面積を決定するための陽子線照射実験、治療計画において患者体内中での陽子線レンジ位置を精度良く算出するための陽子線CT画像取得法の確立に関する陽子線照射実験を実施する。

### 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、マシントイムの割

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 10-30 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。

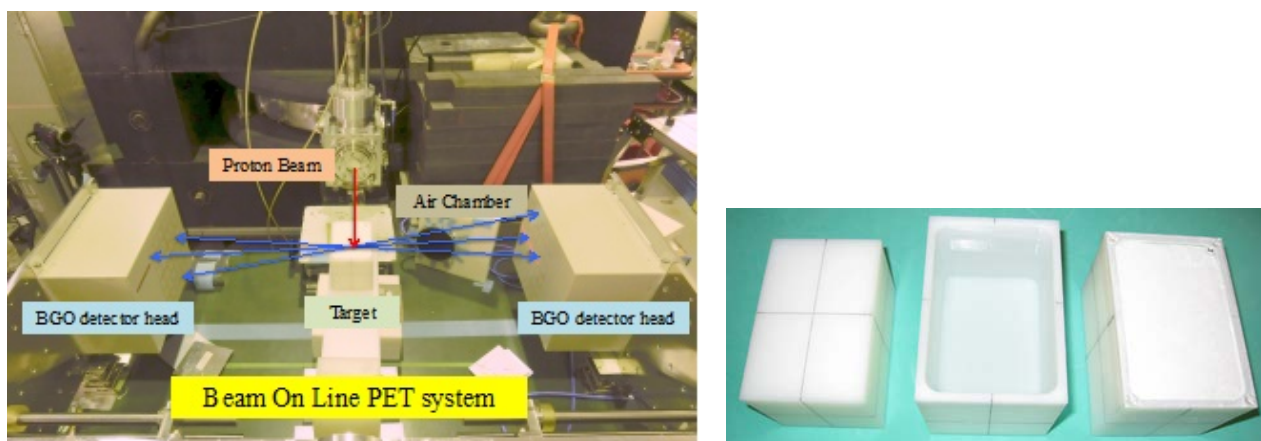


図 1 : C6 コースにおける BOLPs のセットアップ写真 (左) と照射ターゲット ; 左からポリエチレン、水、酸化カルシウムの写真 (右)。

## 2-2. 陽子線CT画像取得法確立のための実験

本実験では、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) 検出器と電気冷却式 CCD カメラ、シンチレーション光反射鏡、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



ごとで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できる。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 2 分ほど陽子線を照射し、その PS 検出器の発光量を計測した。被写体回転テーブルの中心から 1 cm の位置に設置した 2.5cmφ 円筒形容器に封入した水、エタノール、40%リン酸水素二カリウム水溶液、そして 4、3、2、1.5、1、0.5 mm の穴の空いた 32 mmφ アクリル円柱について陽子線 CT 画像を取得した。

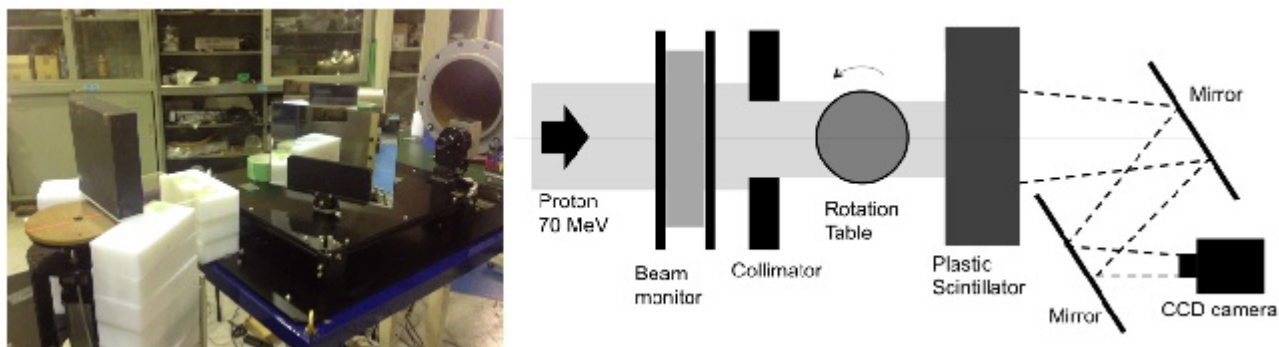


図 2：陽子線CT画像取得システムの概念図（左）及びC8コースに設置した改良版プロトタイプ陽子線CT画像取得システムの写真（右）。

### 3. 実験結果

#### 3-1. 標的原子核破碎反応断面積値

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 分布の計測を行った。特に、今回はポリエチレンターゲット及び水ターゲットに対する実験データを詳細に解析する。

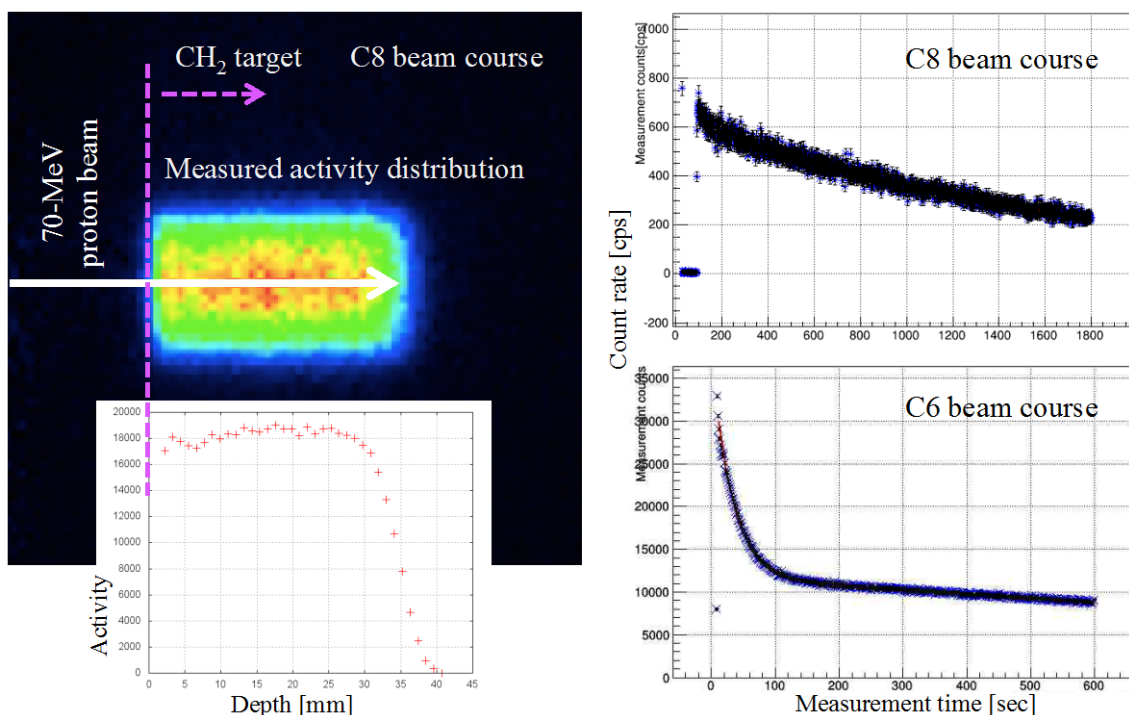


図 3：C8 コースでのポリエチレンターゲットへの陽子線照射より実測された activity 分布の計測結果（左）及び C8 コース、C6 コースでの実測より得られた activity の計測率結果（右）。

図 3 左は C8 コースの陽子線照射実験より得られた、ポリエチレンターゲット中での activity 分布である。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 右は C8 コースで 30 分間及び C6 コースで 10 分間の実測より得られた activity の計測率結果である。C8 コースでの照射実験では、基礎研究用 BOLPs をビームライン上に設置せずに (beam off Line)、陽子線照射後のポリエチレンターゲットを移動させて基礎研究用 BOLPs で計測する実験系のため、図 3 右の計数率結果では、陽子線照射後 100 秒ほど経過してからの計測開始となっていることが判る。それに対して、C6 コースでの照射実験では、基礎研究用 BOLPs をビームライン上に設置しているため、陽子線照射中から継続した計測が実施出来ていることを示している。

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。測定された Activity 分布は近似的に断面積の形状を示しており、これを測定された生成ポジトロン放出核の崩壊曲線を用いて生成核種ごとに分離した深部方向 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。

水ターゲットについても同様の測定を行い、測定された activity 分布と崩壊曲線を用いて断面積の導出を行った。入射陽子核と酸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  $^{15}\text{O}$ 、 $^{13}\text{N}$  及び  $^{11}\text{C}$  核である。 $^{15}\text{O}$  は半減期約 2 分、 $^{13}\text{N}$  及び  $^{11}\text{C}$  は半減期が約 10 分と 20 分と大きく差があるため  $^{15}\text{O}$  由来の activity の分離が比較的容易であり  $^{15}\text{O}$  の断面積を導出した。しかし  $^{13}\text{N}$  と  $^{11}\text{C}$  については今回の測定時間(10-30 分間)では分離が難しくこの 2 つをマージした実効断面積を導出した。

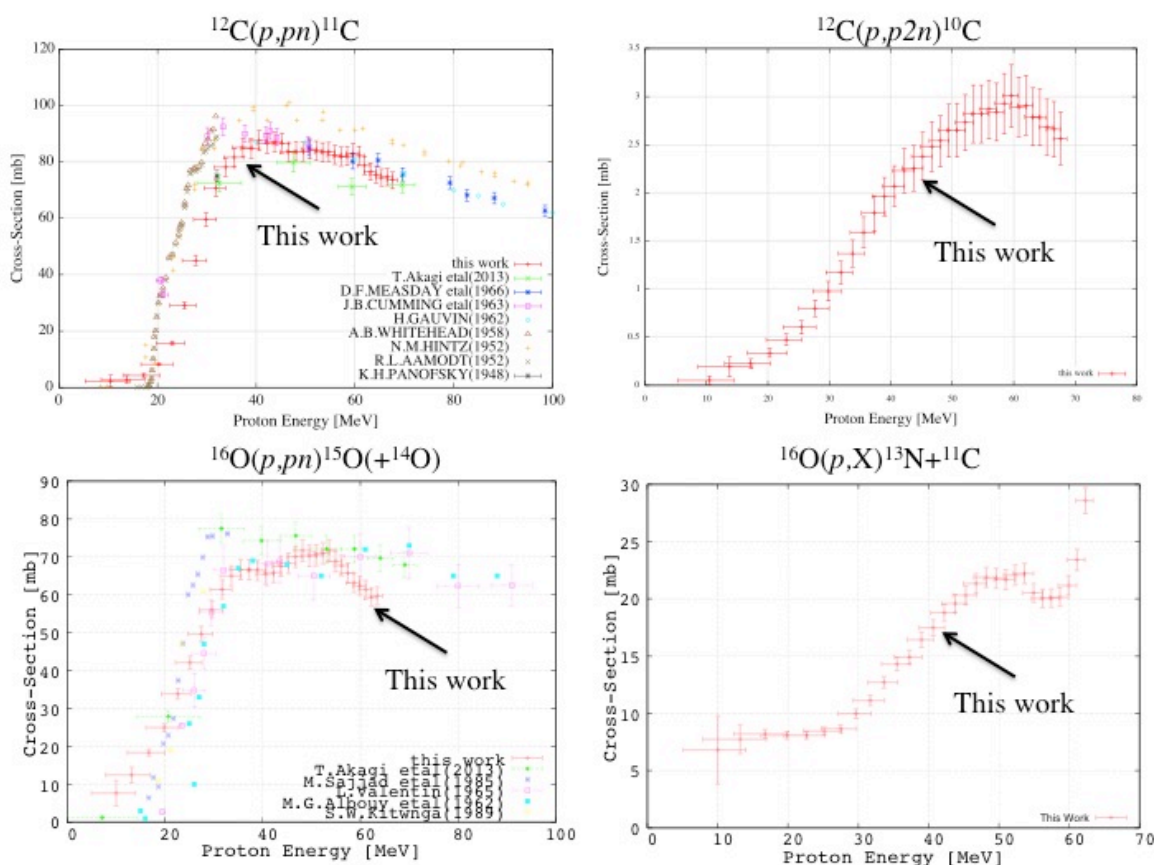


図 4：陽子線エネルギーに対する標的原子核破砕反応断面積値の実験結果。

図 4 は、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標的原子核破砕反応断面積値の実験結果である。NNDC に報告されている  $^{12}\text{C}(p,pn)^{11}\text{C}$  の反応断面積データは、大別すると最大値が 100mb 程となる高い傾向を示す分布と 80mb 程となる低い傾向を示す分布の 2 つに大別されているが、本研究より取得したデータは低い傾向を示す分布との一致度が高かった。また、 $^{12}\text{C}(p,p2n)^{10}\text{C}$  の反応断面積データ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った。 $^{16}\text{O}(p,pn)^{15}\text{O}$  反応についても NNDC に報告されている

データとよく一致する結果となった。しかし、本測定ではポジトロン放出核の1つである $^{14}\text{O}$ も生成されている可能性があるため今後 $^{14}\text{O}$ の生成、影響について検証する必要がある。また、本研究ではマーキングした断面積を導出した $^{13}\text{N}$ と $^{11}\text{C}$ についても今後分離した断面積の導出する必要がある。炭素核の結果については Nuclear Physics A に投稿、掲載済みである[5]。

### 3-2. 陽子線 CT 画像

図5左に示す2.5cmφ円筒形容器に封入した水、エタノール、40%リン酸水素二カリウム水溶液の照射サンプルに対し、プロトタイプ陽子線 CT 画像取得システムによる計測された発光量による Protonography データを用いた FBP (Filtered Back Projection) 法により画像化し、別に撮影した X 線 CT 値に対する陽子線 CT 画像の画素値を図5右に示す。また比較のため、実際に陽子線治療で用いられている X 線 CT 値水等価長係数変換テーブルを図5右に示す。空気、水、エタノール、40%リン酸水素二カリウム水溶液に対する陽子線 CT 値は  $0.019 \pm 0.022$ 、 $0.957 \pm 0.015$ 、 $0.796 \pm 0.015$ 、 $1.268 \pm 0.015$  であった。X 線 CT 値水等価長係数変換テーブルとは水において 4.3%の誤差が生じている。

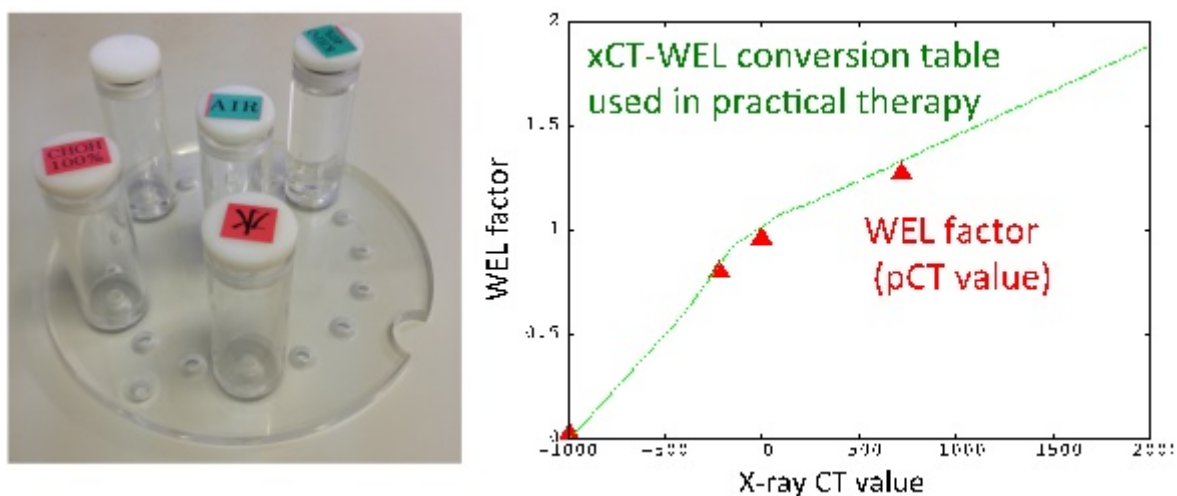


図5：陽子線 CT 画像用照射サンプル（左）及び4種類の物質（空気、水、エタノール、40%リン酸水素二カリウム水溶液）の X 線 CT 値に対する陽子線 CT 値の結果と実際に陽子線治療で用いられている X 線 CT 値水等価長係数変換テーブル（右）。

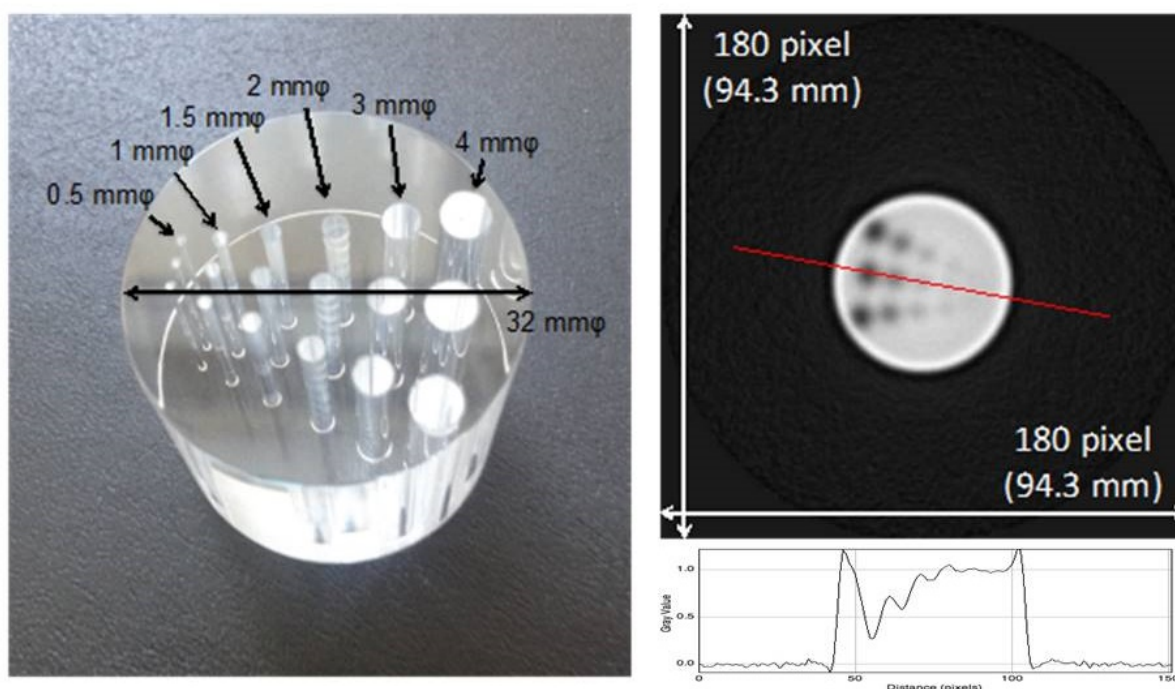


図6：4、3、2、1.5、1、0.5 mmφの穴の空いた32 mmφアクリル円柱サンプル写真（左）及びその陽子線 CT 画像の結果（右上）及び陽子線 CT 画像中赤線部分のプロファイル（右下）。



また、空間分解能の評価結果として、4、3、2、1.5、1、0.5 mmφ の穴の空いた 32 mmφ アクリル円柱サンプルを図 6 左に示し、その陽子線 CT 画像の結果及び陽子線 CT 画像中赤線部分のプロファイルを図 6 右に示す。1.5 mmφ の穴まで認識することができた。ここまでの一部結果は *Physics in Medicine and Biology* に投稿、掲載済みである[6]。

#### 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、これまで報告数が少ない  $^{11}\text{C}$  の生成反応断面積値の結果を導出することが出来た。また、これまでの報告が全く無い  $^{10}\text{C}$  の生成反応断面積値の結果を導出することに成功した。陽子線 CT 画像については、構築した陽子線 CT 画像取得システムでの実験を繰り返し行い各種パラメータの最適化を行い、陽子線 CT 画像の精度を向上し、その陽子線 CT 画像の空間分解能の評価を実施することが出来た。

平成 28 年度も引き続き実験を継続することで、2 つの大別されたテーマを主軸とする研究を遂行することで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).
- [5] K. Matsushita, T. Nishio, S. Tanaka, M. Tsuneda, A. Sugiura, K. Ieki, "Measurement of proton-induced target fragmentation cross-section in carbon," *Nucl. Phys. A* 946, 104-116 (2016).
- [6] S. Tanaka, T. Nishio, K. Matsushita, M. Tsuneda, S. Kabuki, M. Uesaka, "Development of proton CT imaging system using plastic scintillator and CCD camera," *Phys. Med. Biol.* 61, 4156-4167 (2016).



# 最前方と最後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 AND BACKWARD ANGLES

魚住 裕介<sup>A</sup>、米重 英成<sup>B</sup>、園田暁史<sup>B</sup>、森 大樹<sup>B</sup>、山口雄司<sup>B</sup>、荒木優佑<sup>B</sup>、  
古場 裕介<sup>D</sup>

Yusuke Uozumi<sup>A</sup>, Hidenaru Yoneshige<sup>B</sup>, Akifumi Sonoda<sup>B</sup>, Taiki Mori<sup>B</sup>,  
Yuji Yamaguchi<sup>B</sup>, Yusuke Araki<sup>C</sup>, Yusuke Koba<sup>D</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医療被ばく研究プロジェクト

## 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および最後方角での陽子入射荷電粒子生成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  $6^\circ$  から  $30^\circ$  までの 6 点で二重微分断面積を測定した。さらに最後方角でのデータも重要であることから  $150^\circ$ 、 $160^\circ$ 、 $165^\circ$  での測定も行った。得られた測定データは、過去の実験データと比較検証した。さらに理論計算の結果とも比較を行った。

## 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 [2,3] 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 $20^\circ$  より前方の二重微分断面積 (DDX) において強く現れ、 $10^\circ$  より前方で特に顕著となる。回折効果は最前方だけでなく、 $150^\circ$  より後方においても顕著になると考えられる。このため、最前方・最後方角度での(p,p'x)反応実験データを用いた検証が重要となる。しかし、これらの角度における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。また、モデルの一般化のためには幅広い質量数領域にわたるターゲットについてデータを取得する必要がある。今年度はターゲットは $^{12}\text{C}$ 、 $^{27}\text{Al}$ 、 $^{59}\text{Co}$ 、 $^{93}\text{Nb}$ 、 $^{181}\text{Ta}$ の5種類として最後方でのデータ測定を実施した。本報告ではその結果を述べる。

## 2. 実験とデータ解析

実験には放射線医学総合研究所サイクロトロン棟の C6汎用照射コースを利用した。C6コースのビーム取出し口に真空散乱槽を設置して、その中にターゲットを置いた。ターゲットには厚さ  $100\mu\text{m}$  の  $^{12}\text{C}$ 、 $^{27}\text{Al}$ 、厚さ  $50\mu\text{m}$  の  $^{59}\text{Co}$ 、 $^{93}\text{Nb}$ 、厚さ  $30\mu\text{m}$  の  $^{181}\text{Ta}$ 、バックグラウンド測定用の Blank ターゲットを使用した。40MeV の陽子ビームをターゲットに照射し、生成粒子を  $150^\circ$ 、 $160^\circ$ 、 $165^\circ$  に設置したカウンターテレスコープで測定した。図 1 のようにカウンターテレスコープは透過型検出器 ( $\Delta E$  検出器) のシリコン型半導体検出器 (SSD) と、全停止型検出器 (E 検出器) の機能する GSO(Ce) シンチレーション検出器で構成した。GSO(Ce) シンチレータの側面はテフロンシートとアルミニウムテープ、二重の反射材で覆った。

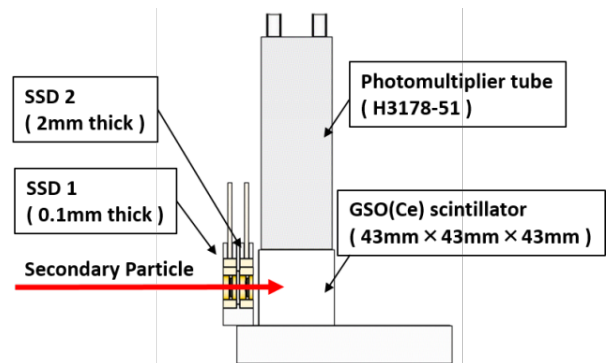


図1. カウンターテレスコープ断面図

C6 コースではターゲットの上流にファラデーカップが設置されているため、測定中のビーム電流値を求める事が出来ない。このため、ビーム電流値の計測用にビームモニターを製作、設置して使用した。ビームモニターはチェンバー下流に置いた厚さ 500  $\mu\text{m}$  の  $^{12}\text{C}$  板からの散乱線を、そこから  $30^\circ$  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の範囲において、ビーム強度を変化させていき、それに対応するビームモニターのカウント数を測定して、ビーム強度とカウント数と関係を求め、これを用いた。実験で使用するビーム強度の範囲において、良好な線形性が確認できた。実験方法の詳細およびデータ解析については、平成 23 年度の報告 [4] を参照されたい。

### 3. 結果と考察

図 2 に粒子弁別解析結果の例を示している。これは、 $^{27}\text{Al}(p, p'x)$  反応の角度  $150$  度で取得したデータについて、SSD 二枚に対する検出粒子付与エネルギーと PI 値の 2 次元プロットである。PI 値の低い方から順に、陽子、重陽子、三重陽子の帯を確認することが出来る。ここから生成陽子のデータを抜き出し、1MeV のエネルギー幅ごとに収量を求め DDX を決定した。

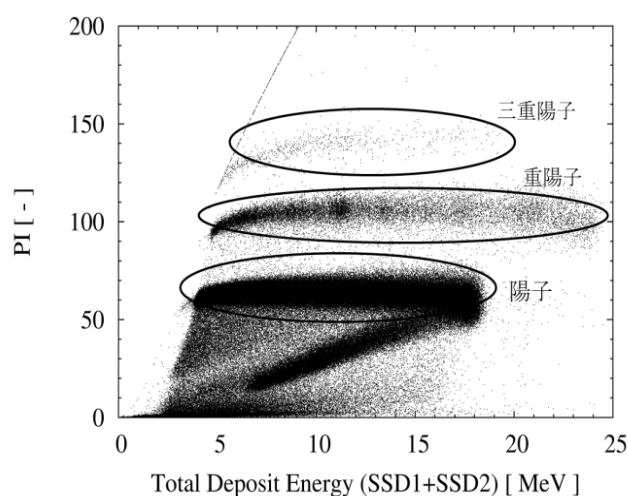


図 2. 粒子識別解析の結果

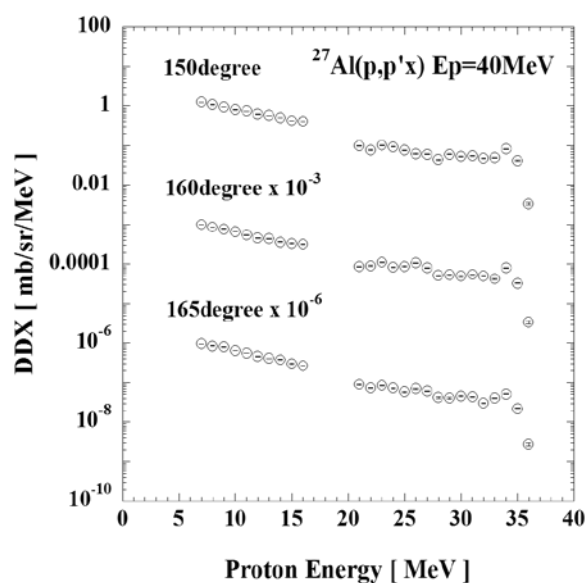


図 3. 決定した DDX スペクトルの例

図3に示すデータは $^{27}\text{Al}(p, p'x)$  反応の DDX である。エラーバーは解析時の統計誤差(最大 3.5%)を示している。6MeV 以下のエネルギー領域は、一枚目の SSD1 の厚さのため測定出来ていない。17MeV~20MeV の範囲は SSD2 と GSO(Ce)との境界に相当する部分であり、不感物質や PMT ノイズの影響等により DDX は取得できなかった。不感物質は図1に示したカウンターテレスコープを構成する各検出器間の反射材や空気層である。各角度において最大エネルギー付近に小さいピークが見られるが、これは弾性散乱に対応しており、エネルギーは一致している。各角度でスペクトルは互いに類似した傾向を示した。21MeV より高いエネルギー範囲でスペクトル形状に凹凸が見られた。これは標的核の低励起成分が離散的に現れているためである。

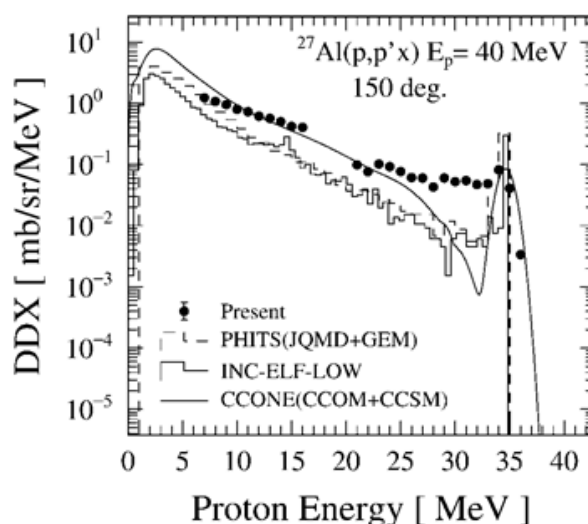


図4.  $^{27}\text{Al}(p, p'x)$  反応 DDX および CCONE、PHITS(JQMD)、INC-LOW の結果をそれぞれ実線、波線ヒストグラム、実線ヒストグラムで示している。

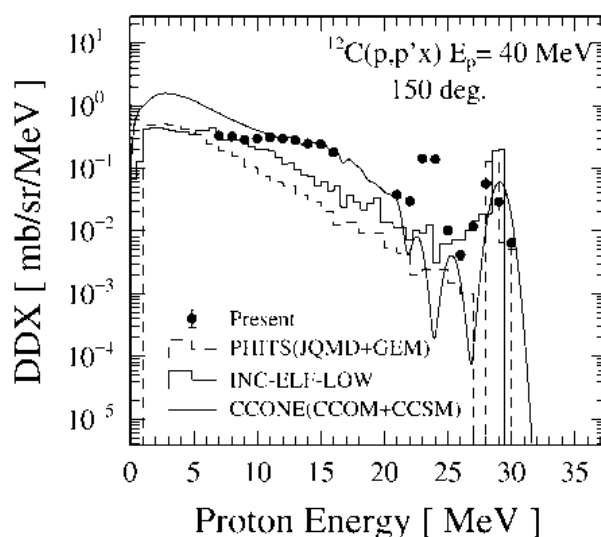


図5.  $^{12}\text{C}(p, p'x)$  反応 DDX および CCONE、PHITS(JQMD)、INC-LOW の結果をそれぞれ実線、波線ヒストグラム、実線ヒストグラムで示している。

理論計算との比較結果の例として 40 MeV での  $^{27}\text{Al}(p, p'x)$  反応と  $^{12}\text{C}(p, p'x)$  反応の  $150^\circ$  での DDX スペクトルを図 4 と 5 にそれぞれ示している。図中には CCONE [5] および PHITS (JQMD) コードによる計算結果を実線と波線ヒストグラムで示している。我々が開発した INC-LOW の結果は実線ヒストグラムで示している。CCONE は、弾性散乱は光学模型で計算しており、検出器分解能を考慮して幅を広げている。Al と C の両方のターゲットにおいて弾性散乱は実験値とよく一致している。連続スペクトル領域はエキシトンモデルにより計算しており、低励起非連続状態は DWBA で計算した強度を検出器の分解能を考慮して幅を広げて表示している。両方のターゲットにおいて CCONE は連続領域で他の計算コードよりも良い一致を示したが、低励起領域では著しい過小評価を示している。さらに CCONE は蒸発領域において過大評価が大きくなっていく傾向が見られる。

一方、INC-LOW と PHITS (JQMD) は互いにほぼ同じ値を示しており、連続領域では実験値のほぼ 2 分の 1 で、放出陽子エネルギーが下がると違いが小さくなっている。直接反応が支配的な低励起領域では大きく過小評価している。弾性散乱ピークは共に検出器分解能を考慮していないが、よく一致していると考えられる。PHITS は核データライブラリから直接弾性散乱データを参照して出力しており、JQMD で計算した値ではないが、CCONE の結果と一致するはずである。

## 5. まとめ

本研究では 40 MeV 陽子入射反応について、これまで報告がない後方角領域での陽子生成 DDX を測定した。ターゲットは  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{181}\text{Ta}$  の 5 種類で、測定角度は 150, 160, 165 度の 3 点であった。(p, p'x) 反応 DDX を決定し、実験値と各種計算コードを比較したところ、計算の再現性が十分ではない点を確認することができた。低エネルギー領域での高精度計算コードを確立するため、反応モデルの改良とさらなる実験データの取得が必要である。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] Y. Uozumi et al.: Jour. Nucl. Sci. Tech. 52:2, 263-272 (2015).
- [4] 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).
- [5] O. Iwamoto: J. Nucl. Sci. Technol., 44, 5 (2007) 687.

# 放射線遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験

## NEUTRON TRANSMISSION EXPERIMENT FOR FLEXIBLE MATERIAL FOR RADIATION SHIELDING

執行 信寛<sup>A</sup>、今富 宏祐<sup>A</sup>、三根 貴大<sup>A</sup>、池田 伸夫<sup>A</sup>、石橋 健二<sup>A</sup>  
木村 健一<sup>B</sup>、池見 拓<sup>B</sup>、笹谷 輝勝<sup>B</sup>、高橋 定明<sup>C</sup>、平澤 勇人<sup>C</sup>、古場 裕介<sup>D</sup>  
Nobuhiro Shigyo<sup>A</sup>, Kosuke Imatomi<sup>A</sup>, Takahiro Mine<sup>A</sup>, Nobuo Ikeda<sup>A</sup>,  
Kenji Ishibashi<sup>A</sup>, Ken-ich Kimura<sup>B</sup>, Hiroshi Ikemi<sup>B</sup>, Terukatsu Sasaya<sup>B</sup>,  
Sadaaki Takahashi<sup>C</sup>, Hayato Hirasawa<sup>C</sup>, Yusuke Koba<sup>D</sup>,  
A : 九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門

B : 株式会社フジタ技術センター

C : 中国塗料株式会社

D : 放射線医学総合研究所

### 概要

加速器施設用の放射線遮蔽用に開発された可とう性を有する材料の中性子遮蔽能力を調べるために、80 MeV 陽子を鉄板に入射して生成される中性子の透過量の材料厚さに対する変化を測定した。その結果 80 MeV までの連続エネルギー中性子の線減弱係数は、 $0.052 \text{ cm}^{-1}$ であることが分かった。

#### 1. 目的

加速器施設の放射線遮蔽では一般的にコンクリートが使用されるが、可とう性を有する材料が使用できれば、局所遮蔽や施設の柔軟な設計に寄与できる。本研究では、放射線の中でも特に中性子遮蔽に主眼を置いて開発された可とう性材料の中性子透過量を測定し、中性子の遮蔽能力を評価することを目的とする。

#### 2. 実験方法

使用した可とう性材料は中国塗料株式会社と株式会社フジタで開発されたラディシールと呼ばれるウレタンをベースにしたのもで、密度が  $1.0 \text{ g/cm}^3$  で水素含有量を一般的なコンクリートに近い  $87.3 \text{ mg/cm}^3$  に増やしたものを使用した。この試料は 1 枚が  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  の大きさで、厚さを 0 cm から 20 cm まで 10 cm 毎に変化させた。

実験はサイクロトロン施設の C-8 ビームラインで行った。このビームラインの ST2 電磁石の下流のビームダクトを外し、ST2 のすぐそばにビーム量測定用の NE102A プラスチックシンチレータと中性子生成用の直径 5 cm、厚さ 2 cm の鉄を置いた。この鉄で陽子ビームは完全に停止する。その下流約 1.9 m のところに可とう性材料試料を透過した中性子を計測するための直径 12.7 cm、長さ 12.7 cm の NE213 有機シンチレータを置いた。このシンチレータの上流側に荷電粒子識別用の厚さ 2 mm の NE102A プラスチックシンチレータを置いた。試料となる可とう性材料は鉄板から約 70 cm 下流に設置した。図 1 に実験のセットアップを示す。

ビーム電流は  $0.7 \text{ pA}$  程度とし、それぞれの厚さで 30 分程度測定した。



図 1. 実験のセットアップ

#### 3. データ解析

試料を透過する荷電粒子事象を NE102A シンチレータの発光量分布から取り除いた後、NE213 有機シンチレータの波形減衰成分の違いからガンマ線事象を取り除き、中性子事象のみを抽出した。ビー

ム量測定用プラスチックシンチレータと NE213 シンチレータ間の粒子の飛行時間から中性子のエネルギーを決定した。その後 SCINFUL-QMD コード[1]による検出効率と鉄板に入射した陽子数で規格化することで、中性子エネルギースペクトルを導出した。中性子透過量は厚さ 0 cm の時の値で規格化した。シンチレータからの信号の処理回路とサイクロトロンからの陽子ビームの出射間隔の関係でエネルギースペクトルとして利用できるものは、約 10 MeV 以上の中性子であった。

#### 4. 実験結果

図2に厚さ 0 cm で規格化した中性子透過量の測定結果を示す。この図から 10 MeV から 80 MeV までの連続エネルギー中性子の線減弱係数は  $0.052 \text{ cm}^{-1}$  であることが分かった。比較のために実験と同等の体系を設定して中性子透過量を PHITS[2]コードで計算した結果を合わせて示す。PHITS では陽子と 20 MeV 以上の中性子は INCL モデル[3]、20 MeV 以下の中性子に対しては JENDL-4.0 [4]を使用した。その結果、PHITS で計算した場合の線減弱係数は  $0.053 \text{ cm}^{-1}$  となり、実験をほぼ再現していることが分かった。

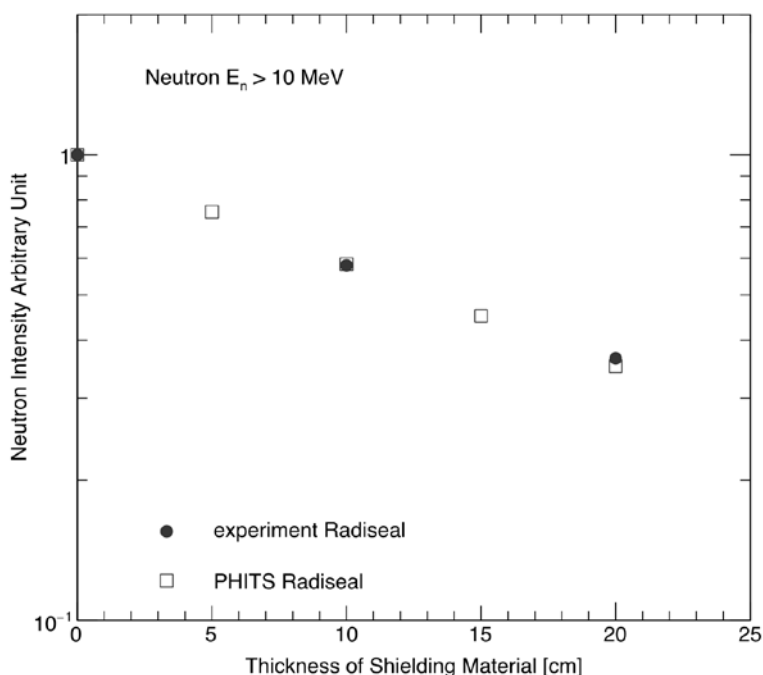


図2. 10 MeV 以上の中性子の透過量を厚さ 0 cm で規格化した結果

#### 5. まとめ

加速器施設での使用を想定した可とう性を有する遮蔽材料の中性子遮蔽性能を測定した。10 MeV から 80 MeV までの連続エネルギー中性子に対する線減弱係数を求めることができた。次年度は、この可とう性材料と同時に開発された類似の遮蔽材料などに対しても減弱係数の測定を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] D. Satoh, T. Sato, N. Shigyo, K. Ishibashi: SCINFUL-QMD; Monte Carlo based computer code to calculate response function and detection efficiency of a liquid organic scintillator for neutron energies up to 3 GeV, JAEA-Research 2006-023 (2006).
- [2] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta, L. Sihver: Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913-923 (2013).
- [3] A. Boudard, J. Cugnon, J.-C. David, S. Leray, and D. Mancusi: New potentialities of the Liège intranuclear cascade model for reactions induced by nucleons and light charged particles, Phys. Rev C87, 014606 (2013).
- [4] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura: JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl. Sci. Technol. 48, 1-30 (2011).

# 重粒子によるしきいエネルギー付近の核反応に関する研究 STUDY ON HEAVY-ION INDUCED NUCLEAR REACTION NEAR THRESHOLD ENERGY

八島 浩<sup>A</sup>、萩原 雅之<sup>B</sup>、佐波 俊哉<sup>B</sup>、米内 俊祐<sup>C</sup>  
Hiroshi Yashima<sup>A</sup>, Masayuki Hagiwara<sup>B</sup>, Toshiya Sanami<sup>B</sup>, Shunsuke Yonai<sup>C</sup>

A：京都大学原子炉実験所

B：高エネルギー加速器研究機構

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

## 概要

重イオン加速器施設における誘導放射能評価や理論計算の検証に資するデータの取得を目的として、放医研サイクロトロン C6 コースにおいて 148 MeV  $^{6+}\text{C}$  ビームを用いた照射実験を行い、アルミニウム、銅ターゲット中の生成放射能分布の測定を行った。

## 1. 目的

近年、老朽化した加速器施設の廃止措置計画が進められている。加速器施設の廃止措置においては加速器本体や施設構造物等に生成した誘導放射能の評価が重要となる。誘導放射能は実験データや理論計算をもとに評価されるが、サイクロトロン施設等で用いられる核子当たり数 10MeV 以下の低エネルギー重粒子に対しては実験データが整備されておらず理論計算も十分には検証されていない。また、核破砕片生成の入射粒子依存性の解明を目的として、陽子及び重粒子に対する核破砕片生成二重微分断面積の系統的測定を行い理論計算の検証を進めているが、低エネルギー重粒子入射に対する計算結果が実験結果を著しく過小評価することが分かった。[1]そこで、箔放射化法を用いて低エネルギー重粒子入射による放射性核種の収量を測定した。

## 2. 実験方法

照射実験は放医研サイクロトロン C6 コースで行った。図 1 に実験体系を示す。

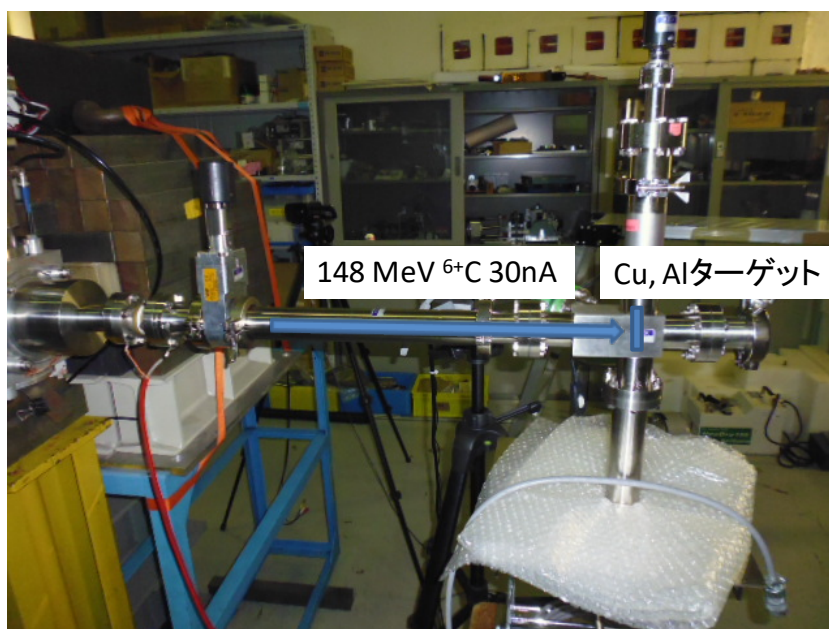


図 1.放医研サイクロトロン C6 コースでの実験体系

加速器施設においてよく使用されるアルミニウム箔(99+%、0.018mm 厚)、銅箔(99.9%、0.010mm 厚)をそれぞれ重ねて照射ターゲットとした。ターゲットの厚さは入射粒子の飛程より厚くなるようにした。(アルミニウム：0.324mm、銅：0.15mm) 148 MeV  $^{6+}\text{C}$  イオンをビーム電流約 30nA で約 1 時間、ターゲットにそれぞれ照射した。ターゲットからの電流信号をカレントインテグレータに入力し、照

射粒子数を求めた。また、カレントインテグレータの出力を Multi channel Scaler で記録することで照射中のビーム強度変動を補正した。照射終了後、照射箱から放出されるガンマ線を高純度 Ge 検出器を用いて測定し、得られたガンマ線スペクトルからターゲットに生成した核種の放射能を求めた。

### 3. 実験結果

図 2、3 に 148 MeV C イオン入射によって Cu 及び Al ターゲットに生成した放射性核種のターゲット内での放射能分布をそれぞれ示す。縦軸はターゲットに入射した C イオン 1 つ当たり生成する放射性核種の収量を示している。

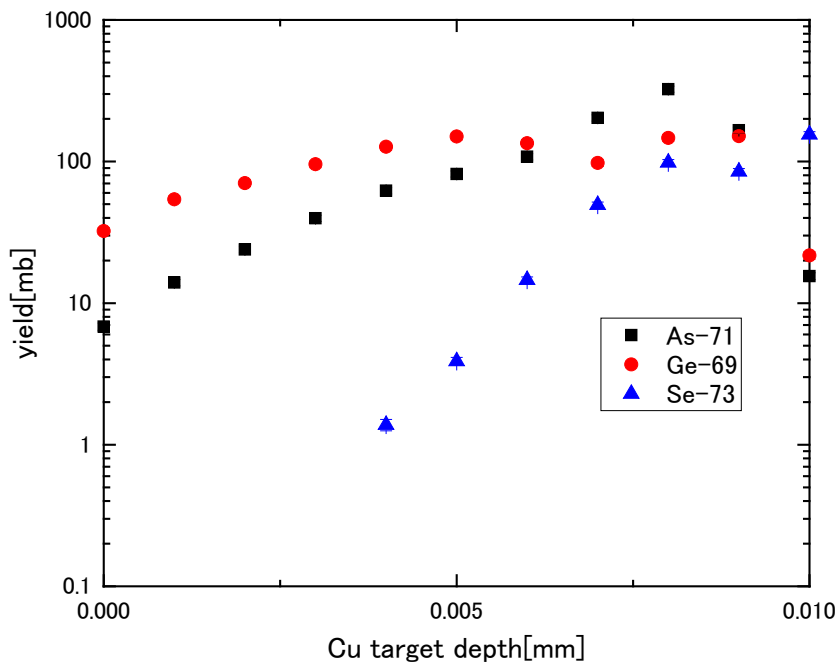
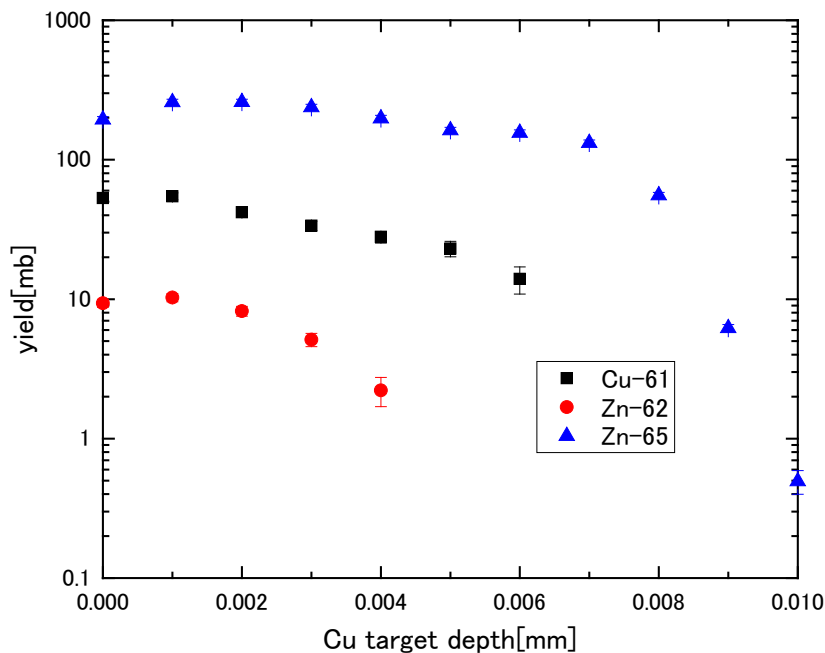


図 2.148MeV C イオン入射によって Cu ターゲットに生成した放射性核種のターゲット内放射能分布



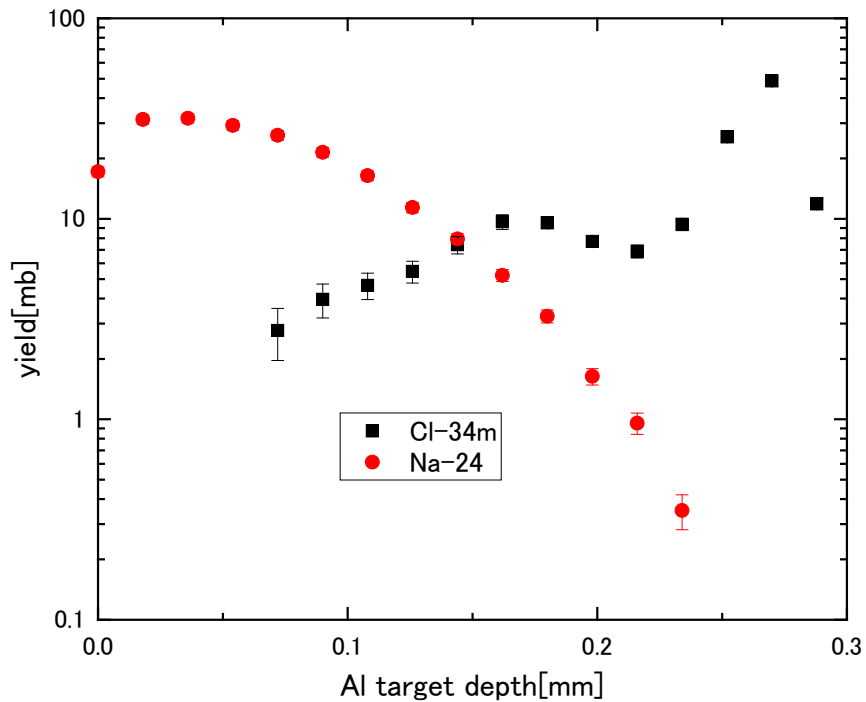


図 3.148MeV C イオン入射によって Al ターゲットに生成した放射性核種のターゲット内放射能分布

ターゲット内での放射能分布は大まかにターゲットの深部にいくにつれて放射能が減少しているものとターゲットの深部にいくにつれて放射能が増大しているものとの 2 通りの傾向が見られた。前者はターゲットと質量数が同じくらいか軽い核種の放射能分布、後者はターゲットよりも重い核種の放射能分布に見られた。

#### 4. まとめ

148 MeV C ビーム入射によってアルミニウム、銅ターゲット中に生成した核種のターゲット内放射能分布の測定を行った。今後、入射粒子、エネルギー、ターゲットについて幅広い範囲で実験を行い、重イオン加速器施設における誘導放射能評価や理論計算の検証に資するデータを収集する予定である。

#### 参考文献

- [1] 佐波俊哉他: 平成 26 年度サイクロトロン利用報告書, NIRS-M-284, 29 (2015).



## 5. 粒子線検出器の開発

- 5-1. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発
- 5-2. 固体飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造分析
- 5-3. 超小型アクティブ宇宙放射線線量計の開発
- 5-4. 陽子線ビームにおける蛍光ガラス線量計及び  
熱ルミネセンス線量計 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の LET 依存性に関する研究



# 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

北村尚<sup>A</sup>、小平聡<sup>A</sup>、内堀幸夫<sup>A,B</sup>、  
ゾンケ ブルマイスター<sup>C</sup>、ロバート エルフトマン<sup>C</sup>、ヤン シュタインハーゲン<sup>C</sup>、  
エリック ベントン<sup>D</sup>、ラシッド マクラフィ<sup>E</sup>  
Hisashi Kitamura<sup>A</sup>, Satoshi Kodaira<sup>A</sup>, Yukio Uchihori<sup>B</sup>,  
Soenke Burmeister<sup>C</sup>, Robert Elftmann<sup>C</sup>, Jan Steinhagen<sup>C</sup>,  
Eric Benton<sup>D</sup>, Rachid Machrafi<sup>E</sup>

A: 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 計測・線量評価部

B: 量子科学技術研究開発機構 イノベーションセンター

C: キール大学 (ドイツ)

D: オクラホマ州立大学 (アメリカ合衆国)

E: オンタリオ工科大 (カナダ)

A: Division of Radiation Measurement and Dose Assessment, NIRS, QST

B: Innovation Center, QST

C: Kiel University, German, D:

Oklahoma State University (USA)

E: University of Ontario Institute of Technology (Canada)

### 概要

宇宙飛行士が宇宙空間においてさらされる問題の一つに、宇宙放射線の被ばくの問題がある。宇宙放射線は、宇宙ステーションなどの宇宙飛行体の軌道や飛行時期、また、飛行体内の位置などによっても変化するために、宇宙飛行士の被ばく線量をシミュレーション等で計算は難しいのが現状である。そのため各宇宙飛行士に対して宇宙放射線が測定可能な携行型の線量計が必要となっている。我々のグループでは、そのような携行型の放射線検出器の宇宙放射線中で最もフラックスの高い陽子線に対する感度を知るために、放医研サイクロトロン陽子線・重陽子線を照射し、性能評価試験を行っている。本報告書では、放医研を中心に開発を行っている宇宙放射線用スペクトロメーターA-DREAMS のサイクロトロンにおける試験について報告する。

### 1. 目的

地上の放射線環境が放射性核種から放射される  $\alpha, \beta, \gamma$  線や宇宙線  $\mu$  粒子がその主成分であるのに対して、宇宙の放射線環境は高エネルギーの陽子・重粒子などがその主成分であり、宇宙飛行士は、地上では被ばくすることがない高エネルギーの陽子・重粒子に被ばくすることになる。そのため、宇宙放射線測定には、地上で用いられている検出器では測定ができないような放射線までも測定する能力が求められている。また、そのような性能の評価には、宇宙放射線が模擬できる高いエネルギーの加速器で作られるビームを使うことが必須である。放医研を中心とするグループでは、A-DREAMS (Active Dosimeter for Radiation Environment and Astronautic Monitoring in Space) と称する宇宙飛行士が携行可能な小型の宇宙放射線検出器を開発している。プロトタイプの1号機として制作されたA-DREAMS-1 (AD-1)、外形が  $135 \times 75 \times 35 \text{ mm}^3$  とコンパクトで携行可能で、 $300 \mu\text{m}$  厚のシリコン半導体検出器を12bit ADCで読み出しを行うスペクトロメーター型の線量計である。これまでに放医研サイクロトロンを中心に照射試験を行い、アンプ及びADCの線形性の評価等を行った[1]。

現在、A-DREAMS 計画では、国際宇宙ステーションにおいて人体ファントムを用いた宇宙放射線線量評価実験 (MATROSHKA 実験[2])に能動型検出器として参加するため、A-DREAMS-MTR (AD-M) と呼ばれる検出器の開発を開始している。AD-M は、ファントム内での深部線量を測定するために、複数枚の半導体検出器からなるテレスコープ型となる計画である。今回、テレスコープとしての性能を評価するために、プロトタイプ2号機としてA-DREAMS-2 (AD-2)を製作した(図1)。AD-2は、AD-1で用いた半導体検出器を2枚重ねにすることで、テレスコープ型の放射線検出器となっている。AD-2では、両半導体検出器間の同時測定回路 (コインシデンス回路) でテレスコープを実現しているが、

この同時検出の検証を行うには加速器のビームが最適で、サイクロトロンでの陽子線の照射を行い、同時検出の動作確認を行った。



図 1 AD-1(左)とAD-2(右)の外観。AD-1では本体に制御用のスイッチやスペクトル標示用ディスプレイがついているが、AD-2では、USB 接続によって PC からの制御やモニタリングを行っている。

## 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 ポートにおいて 70 MeV の陽子線ビームを用いた。形状は 0.5 から 1 cm 直径程度のペンシルビームとした。強度は約 500 ions/sec で調整したが、実際には 500 - 20000 ions/sec 程度であった。

AD-2 は、ビーム軸に対して垂直な面を水平及び垂直に動く自動ステージ上に、半導体検出器面ビームに対して水平になるように設置した。また、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。

## 3. 実験結果

図 2 は陽子線ビームを用いて同時検出性能の評価を行った際の波高分スペクトルである。AD-2 では、各二枚の半導体検出器で独立に測定したスペクトルと、そこから同時測定回路で任意のゲート時間幅内で検出されたイベントのみを抽出し、それぞれの半導体検出器において作成したスペクトルの計 4 つがある。陽子線ビームを二枚の半導体検出器を通過するように照射すると、ほぼすべての粒子が同時検出されるので、同時検出前後でスペクトル形状がほとんど変わらなくなるが、ゲート時間を 300nSec にすることで、図 2 に示すようにスペクトル形状がほぼ一致した。また、同時計測されたイベント数は、独立で測定したイベント数の約 99.5% となっており、ノイズや陽子の散乱等を考慮すると、十分な性能を持っていることが確認できた。

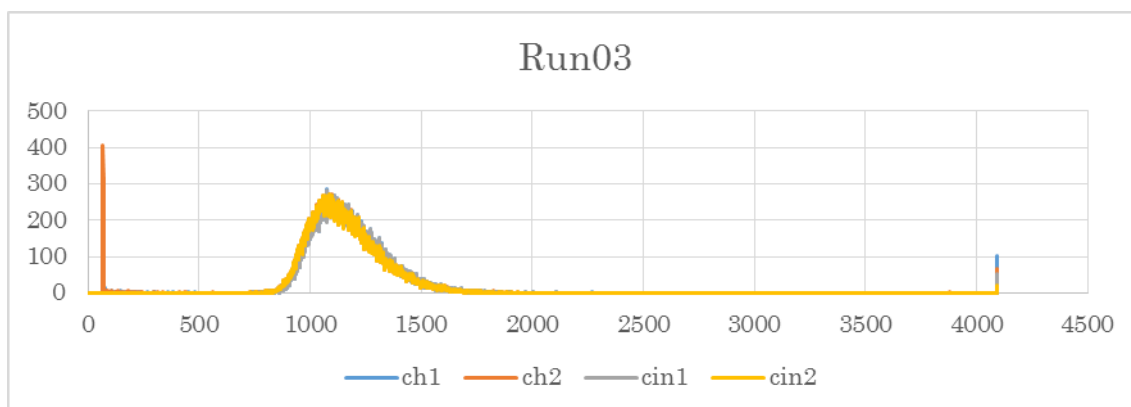


図 2 陽子線 70MeV を二枚の半導体検出器に対して照射した時の各半導体検出器の波高分布(ch1/2)と同時計測回路によって抜き出した波高分布(cin1/2)。横軸は ADC 値。

#### 4. まとめ

今回の照射実験では、前項で記述した同時計測回路の評価を行い、十分な性能を持っていることが確認できた。また、アンプ/ADC の線形性など基本的な AD-2 の評価も行った。実際に、アンプのダイナミックレンジが低 pulse 高のシグナルで線形性がなくなっていることが見えたり、放射線あるいは発熱が原因と推測されるような、ソフトウェアのトラブルが発生したり、問題点を洗い出すことができた。今後、このような知見を活かして、宇宙ステーション実験用の ADREAMS-MTR の開発を進めていく予定である。

#### 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メンバーの皆様に、深く感謝の意を表したいと思います。

#### 参考文献

- [1] 北村尚、他、「宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発」、平成 26 年度サイクロトロン利用報告書 P57-59
- [2] G. Reitz, et al., “Astronaut's organ doses inferred from measurements in a human phantom outside the international space station”, *Radiat. Res.* 171(2), pp. 225-235, 2009

# 固体飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造分析

## Modified structure along nuclear tracks in etched track detectors

山内 知也<sup>A</sup>、楠本 多聞<sup>A</sup>、上田 隆裕<sup>A</sup>、上野 琢也<sup>A</sup>、小平 聡<sup>B</sup>、北村 尚<sup>B</sup>  
Tomoya Yamauchi<sup>A</sup>, Tamon Kusumoto<sup>A</sup>, Takahiro Ueda<sup>A</sup>, Takuya Ueno<sup>A</sup>,  
Satoshi Kodaira<sup>B</sup>, Hisashi Kitamura<sup>B</sup>

A : 神戸大学大学院海事科学研究科

B : 放射線医学総合研究所 計測・線量評価部 放射線計測技術開発チーム

### 概要

ポリアリルジグリコールカーボネート (PADC) は、エッチング型飛跡検出器としては最も高い感度を有する高分子材料であり、そこに形成されるプロトンのイオントラック構造について赤外線分光法を用いた分析を実施した。照射したプロトンのエネルギーは検出閾値以下であり、エッチピットは形成されない (20、30、70 MeV)。PADC に関しては、HIMAC 共同利用研究として、5.7 MeV プロトンと He から Xe までの重イオン照射後の分析を行っているので、阻止能としては、1.2 から 12,000 keV/μm の範囲をカバーする充実したデータが蓄積された。イオントラック構造の特性を表現するために、三種類の化学的損傷パラメータを用いた。それらは損傷密度 (イオントラックの単位長さあたりの着目する官能基の損失数) と実効的トラックコア半径 (着目する官能基が失われている径方向の広がり)、そして、放射線化学収率 (G 値) である。これらの阻止能依存性に着目すると、PADC 中の放射線感受性の高い部分であるエーテルとカーボネートエステルについては、損傷形成の傾向は重イオンのものと同様であった。一方、メチン基損失の阻止能依存性は、重イオンが示す傾向とは異なり、特に G 値の阻止能依存性については明瞭なステップが確認された。このステップとエッチピット形成の閾値はよく一致しており、エッチピットが形成される分子構造上の条件を知るための手がかりになると期待される。

### 1. 目的

ポリアリルジグリコールカーボネート (PADC) は高い感度を有するエッチング型飛跡検出器の素材であり、CR-39 という登録商標でよばれることも多い。積算型線量計として、宇宙放射線計測やラドン計測、中性子線量計測に実用されている。高い電荷分解能を有するとともに X 線や電子線に対しては、数百 kGy 程度まで、事実上不感であることから、慣性核融合プラズマの診断やレーザー駆動イオン加速実験にも利用されている [1-3]。これらの応用分野からの要請として、より高いエネルギーのプロトンや中性子を検出できる素材開発が望まれている。従来の PADC 中イオントラック構造の研究は 5.7 MeV 以下のエネルギーのプロトンや重イオンを対象に実施されてきており、検出閾値周辺におけるイオントラック構造の変化、特にエッチピットが形成される場合とされない場合のイオントラック内部での構造変化にどのような差異があるのかを明らかにすることを主眼にした分析は行われていなかった [4-7]。そこで検出閾値周辺のエネルギーを有するプロトン照射に最適な加速性能を有する大型サイクロトロン (NIRS-930) を利用して照射実験を行った (20, 30, 70 MeV)。その目的はエッチピットが形成されないイオントラックの損傷構造を理解し、ピットが形成される損傷構造との差異を明らかにすることである。このような基礎的知見はより高い検出感度 (より低い検出閾値) を有する素材開発につながると期待できる。

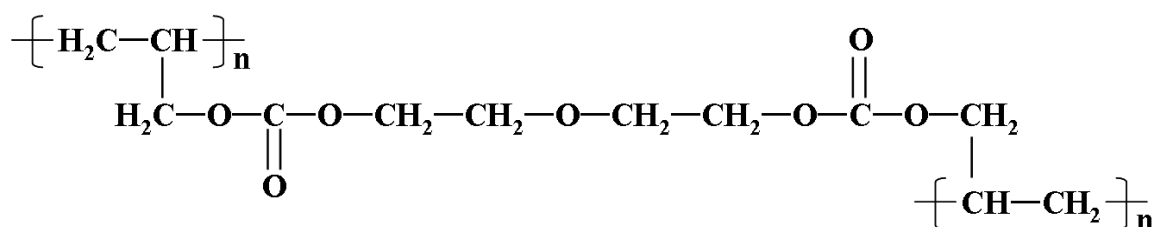


Fig. 1. A repeat unit of PADC.

### 2. 実験方法

PADC の繰り返し構造を Fig. 1. に示す。中央にエーテル結合があり、エチレン基を介して対称の位



置に二つのカーボネートエステル基を有している。従来の分析ではエーテルの放射線感受性が最も高く、カーボネートエステルがそれに次ぐことが知られている[4]。カーボネートエステルが損傷を受けるとそこから二酸化炭素が放出されることも知られている。繰り返し構造の両端を見るとポリエチレン状の3次元ネットワークが重合の結果として生じており、高分子材料としてはむしろこちらが全体の骨格になっている。純粋なポリエチレンにイオンを照射すると水素ガスが発生するが、PADCではそれは認められず、もっぱら放射線感受性の高いエーテルやカーボネートエステルが優先的に損傷を受ける。ポリエチレン状の部分は比較的放射線耐性のある領域とみなされている。

本研究で試料として採用したPADC薄膜(厚さ3μm以下)は、フクビ化学社製の公称厚さ100μm厚さのBARYOTRAKを出発物質として化学エッチングによって減肉させることで得た。ここまで薄くすると最も赤外線の吸収が強いカーボネートエステルのC=OやC-O-Cのピークについても未飽和のスペクトルが得られるので、定量分析が可能となる。分光分析には真空密閉型のFT/IR-6100(日本分光社製)を使用した。これを用いると試料を真空雰囲気中で測定できるので、空気中の水分や二酸化炭素のスペクトルへの影響は事実上無視できる。ある着目する官能基についてその吸収ピークの吸光度が照射によって $A_0$ から $A$ に変化した場合に、その比を相対吸光度と呼ぶ( $A/A_0$ )。その官能基の密度が照射によって $N_0$ から $N$ に変化したとする。ランベルト・ベールの法則によれば、照射前後で試料厚さは無変化なので、相対吸光度は着目する官能基の照射前後の密度比に等しいと見なせる( $A/A_0=N/N_0$ )。したがって、相対吸光度のフルエンス依存性からイオントラック構造に関する化学的損傷パラメータを導くことができる。Fig. 2.には70 MeVプロトンを照射した場合について、代表的な官能基であるエーテルとカーボネートエステルを構成するカルボニル(C=O)、メチン基(CH)の相対吸光度をフルエンスの関数として示している。イオントラックの重なりが無視できるフルエンス域では、損傷数はフルエンス $F$ に比例するので、次の実験式を適用することができる：

$$A/A_0 = 1 - \sigma F, \tag{1}$$

ここに $\sigma$ は、面積の次元を有する実験定数であり、各官能基の相対吸光度に対する最適直線の勾配として決定される。これはイオントラック1本あたりの相対吸光度変化なので、放射線化学的には、着目する官能基の除去断面積と見なせる。

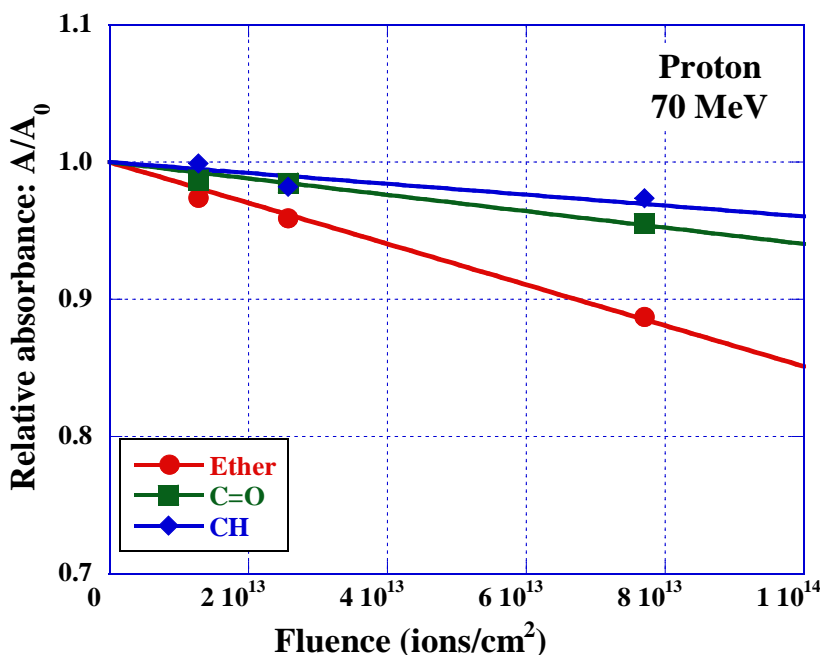


Fig. 2. Reduction behaviors of the relative absorbance of ether, C=O and CH groups in PADC films exposed to 70 MeV protons [8].

### 3. 実験結果

#### 3-1. 除去断面積

Table 1 に本研究において得られた除去断面積の結果を示す。プロトンのエネルギーは薄膜試料への入射エネルギーであり、阻止能は薄膜中の平均値である。除去断面積の偏差は最適直線を得る過程で生じる統計偏差である[8]。いずれのエネルギーにおいてもエーテルの除去断面積が最も大きく、次い

でカルボニル (C=O)、メチン (CH) の順番である。放射線感受性もエーテル、カーボネートエステル、メチンの順番で高いと考えられる。エネルギーが高くなるにつれて、あるいは、阻止能が低くなるにつれて除去断面積はいずれの官能基についても小さくなっているが、これは物理的にも自然な結果である。以下でも見るように、エーテルとカーボネートエステルについては、5.7 MeV プロトンや重イオンから得られた阻止能依存性の延長線上に今回のプロトン照射結果はのっている。HIMACの実験ではフルエンス校正に飛跡検出器としての PADC を活用したが、エッチピットが形成されない NIRS-930 での照射では、平行平板型の大型電離箱を利用した。ここで確認された整合性は双方のフルエンス評価の妥当性を間接的に証明したことにもなるだろう。

Table 1. Removal cross sections  $\sigma_i$  ( $\times 10^{-15} \text{ cm}^2$ ) of ether, carbonyl (C=O) and methine(CH) groups for protons.

Energy (MeV)	20	30	70
Stopping power (keV/ $\mu\text{m}$ )	3.6	2.5	1.2
$\sigma_{\text{ether}}$	3.22 $\pm$ 1.02	2.10 $\pm$ 0.15	1.89 $\pm$ 0.10
$\sigma_{\text{C=O}}$	1.58 $\pm$ 0.36	0.92 $\pm$ 0.25	0.62 $\pm$ 0.10
$\sigma_{\text{CH}}$	1.52 $\pm$ 0.87	0.81 $\pm$ 0.30	0.44 $\pm$ 0.08

### 3-2. 実効的トラックコア半径

エーテル損失の実効的トラックコア半径を阻止能の関数として Fig. 3. に示す。塗りつぶした正方形のシンボルが本研究でのプロトンに対する結果であり、白抜ききのシンボルが HIMAC 共同利用研究で得られた結果である。重イオンの傾向を見ると、800 keV/ $\mu\text{m}$  付近を境にして阻止能依存性に異なる傾向が見られる。図中に示したように、阻止能のべき関数として最適曲線を得たが、そのべき数に顕著な違いが認められる。この境界に対応するコア半径は 2 nm 程度であり、PADC の繰り返し構造の長さに対応する。これについてはコア半径内に繰り返し構造を 2 つ以上含むか否かによって損傷形成の効率が変わってくるのでないかとの考察を以前に行った[4]。今回の結果では、エッチピットが形成されるか否かに関わらず、プロトンのコア半径が同じ阻止能依存性を示している点に着目したい。カーボネートエステル損失のトラックコア半径も同様な阻止能依存性を示した[8]。

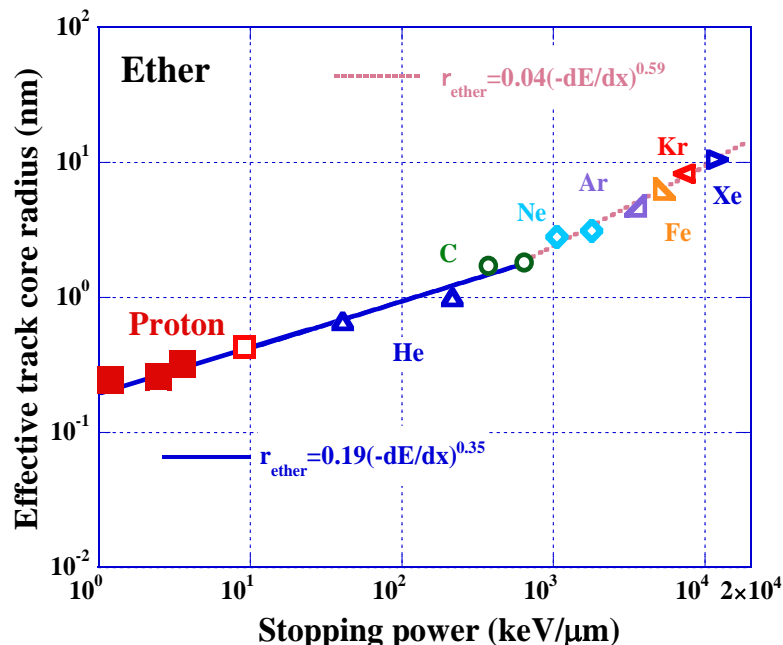


Fig. 3. Effective track core radius for loss of ether bond as a function of the stopping power, solid square symbols are present work, open symbols are previous ones [4,6]. The effective track core radius is about 2 nm at the boundary of the two regions, which corresponded to the length of the repeat unit of PADC [8].

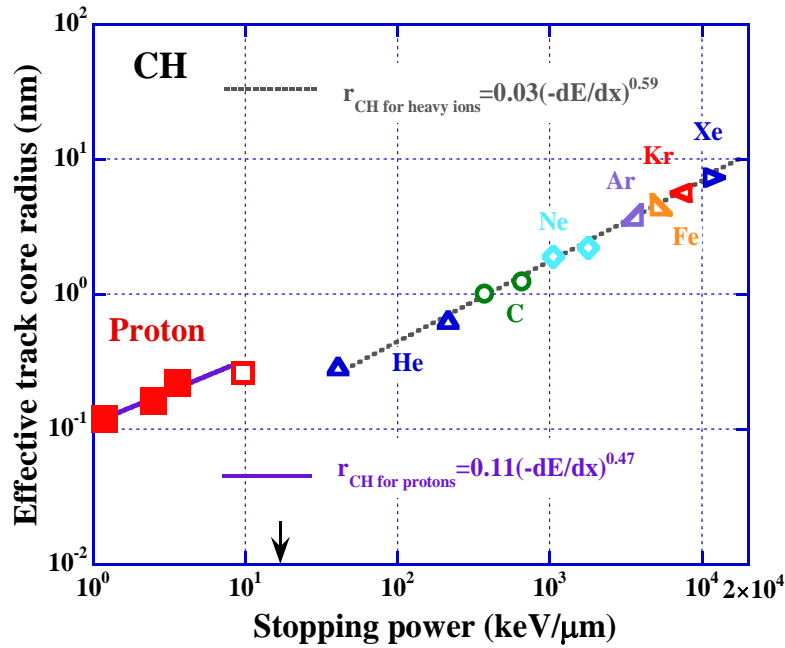


Fig. 4. Effective track core radius for loss of CH groups as a function of the stopping power, solid square symbols are present work, open symbols are previous ones [7]. The arrow is the detection threshold of protons [8].

エーテルとカーボネートエステルは、阻止能の増加とともに連続的にトラックコア半径が増大したが、メチン基の阻止能依存性はそれらとは大きく異なった。Fig. 4.に示すように、プロトンの阻止能依存性と重イオンの阻止能依存性との間に明確なギャップが存在する。5.7 MeVのプロトンの結果も今回の高エネルギープロトンの傾向に近い。このギャップは BARYOTRAK の阻止能上の検出閾値である 17 keV/μm を内に含んでいる[9]。エッチピットが形成するイオントラックとそうでないトラックの構造上の違いがここに示された。対応するトラックコア半径は 0.3 nm であり、損傷の径方向への広がり、一つの繰り返し構造内に限られていると考えられる。

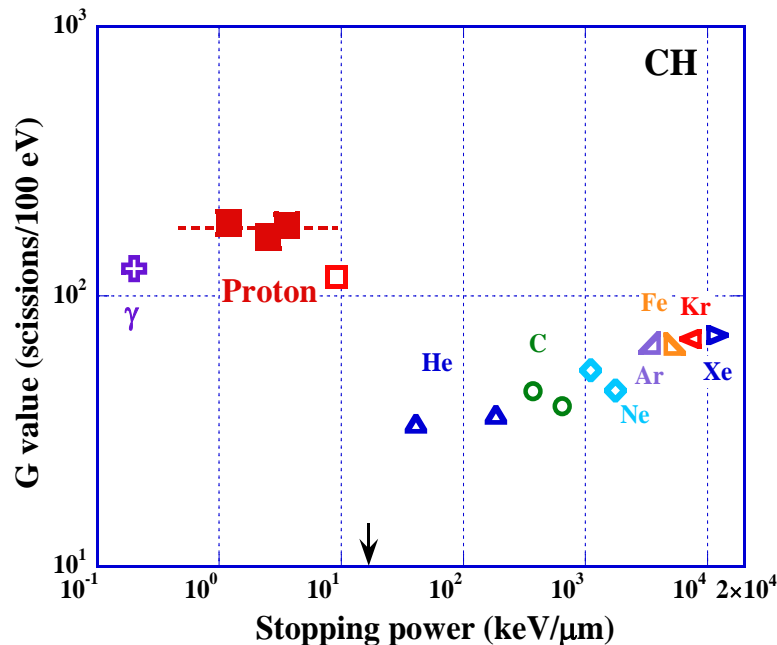


Fig. 5. G value for loss of CH groups as a function of the stopping power. The broken line is for eye guide.

### 3-3. 放射線化学収率

ここで議論に用いている三種類の化学的損傷パラメータの間には、阻止能を介した、一定の諸関係が成立する[4]。その内の典型的なものとして、G 値に阻止能依存性がない場合、損傷密度は阻止能に

比例し、実効的トラックコア半径は阻止能の平方根に比例する、というものがあげられる。このような関係を意識して Fig. 4.を見ると、最適曲線のべき数がプロトンも重イオンも 0.5 に近く、ほぼ平方根と見なせることが分かる。Fig. 5.に示すように、検出閾値の両側での損傷構造の違いは、G 値と阻止能との関係を見るといっそうはっきりする。先に述べた 17 keV/μm 付近を境にして、そこには明確なステップが確認できる。参考値としてガンマ線照射に対する G 値もプロットしているが、それはプロトンの値と同程度である。G 値には検出域値の前後で 6 倍程度の違いがあり、域値以下では放射線感受性の高いメチン基のみが損傷を受けている。放射線感受性の低いメチン基も損傷を受けることが、エッチピットが形成可能なイオントラックであることの必要条件であるとも表現できるだろう。

以上は現象論であり、放射線感受性の異なる二種類のメチン基が存在することになる。Fig. 1.に示したように、エーテルとカーボネートエステルに挟まれたエチレン基が高感受性のそれに相当すると見られる。そして骨格を成しているポリエチレン状のネットワークが感受性の低いグループのメチン基に相当すると見てよいだろう。プロトンに対するエーテルやカーボネートエステル損失の G 値はガンマ線のそれよりも高くなっている[8]。再結合を考慮した損傷モデルの創出が必要となっている。

#### 4. まとめ

最も感度の高い飛跡検出器である PADC 中のエッチピットを形成しないプロトンのトラック構造を赤外線分光によって評価した。放射線感受性の高いエーテルとカーボネートエステルの損失挙動は、阻止能依存性から判断すると、重イオン照射時に観察されていた傾向の延長線上にあるものであった。一方で、メチン基の損失挙動は検出域値の両側で明確に異なり、G 値に着目すると低阻止能側で 6 倍以上高い値となった。検出域値以下では放射線感受性の高いグループに属するメチン基のみが損傷を受けていると考えられ、そのグループとは繰り返し構造内のエーテルとカーボネートエステルとの間に挟まれたエチレン基であると考えられる。

謝辞 サイクロトロンの利用に際し多大なご協力をいただいたスタッフの皆様に感謝します。

#### 参考文献

- [1] A.B. Zylstra, J.A. Frenje, F.H. Séguin, M. Gatu Johnson, D.T. Casey, M.J. Rosenberg, C. Waugh, N. Sinenian, M.J.-E. Manuel, C.K. Li, R.D. Petrasso, Y. Kim, H.M. Herrmann: A new model to account for track overlap in CR-39 data, *Nucl. Instrum. Meth. A*, **68** (2012) 184.
- [2] Y. Fukuda, A. Ya. Faenov, M. Tampo, T. A. Pikuz, T. Nakamura, M. Kando, Y. Hayashi, A. Yogo, H. Sasaki, T. Kameshima, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, M. Mori, T. Zh. Esirkepov, J. Koga, A. S. Boldarev, V. A. Gasilov, A. I. Magunov, T. Yamauchi, R. Kodama, P. R. Bolton, Y. Kato, T. Tajima, H. Daido, S. V. Bulanov: Energy Increase in Multi-MeV Ion Acceleration in the Interaction of a Short Pulse Laser with a Cluster-Gas Target, *Physical Review Letters* **103** (2009) 165002.
- [3] M Kanasaki, S Jinno, H Sakaki, K Kondo, K Oda, T Yamauchi, Y Fukuda: The precise energy spectra measurement of laser-accelerated MeV/n-class high-Z ions and protons using CR-39 detectors, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **58** (2016) 35.
- [4] Y. Mori, T. Yamauchi, M. Kanasaki, Y. Maeda, K. Oda, S. Kodaira, H. Kitamura, T. Konishi, N. Yasuda, R. Barillon: Radiation chemical yields for loss of ether and carbonate ester bonds in PADC films exposed to proton and heavy ion beams, *Radiation Measurements*, **46** (2011) 1147.
- [5] Y. Mori, T. Ikeda, T. Yamauchi, A. Sakamoto, H. Chikada, Y. Honda, K. Oda: Radiation chemical yields for loss of carbonate ester bonds in PADC films exposed to gamma ray, *Radiation Measurements*, **44** (2009) 211.
- [6] Y. Mori, T. Yamauchi, M. Kanasaki, A. Hattori, Y. Matai, K. Matsukawa, K. Oda, S. Kodaira, H. Kitamura, T. Konishi, N. Yasuda, S. Tojo, Y. Honda, R. Barillon: Greater Radiation Chemical Yields for Losses of Ether and Carbonate Ester Bonds at Lower Stopping Powers along Heavy Ion Tracks in Poly(Alllyl diglycol carbonate) Films, *APPLIED PHYSICS EXPRESS* **5** (2012) 086401.
- [7] T. Kusumoto, Y. Mori, M. Kanasaki, T. Ueno, Y. Kameda, K. Oda, S. Kodaira, H. Kitamura, R. Barillon, T. Yamauchi: Yields of the formation of OH groups and the loss of CH groups along nuclear tracks in PADC films, *Radiation Measurements*, **83** (2015) 59.
- [8] T. Kusumoto, Y. Mori, M. Kanasaki, R. Ikenaga, K. Oda, S. Kodaira, H. Kitamura, R. Barillon, T. Yamauchi: Radiation chemical yields for the losses of typical functional groups in PADC films for high energy protons registered as unetchable tracks, *Radiation Measurements*, **87** (2016) 35.
- [9] N. M. Hassan, Y. Matai, T. Kusumoto, Y. Mori, M. Kanasaki, K. Oda, H. Kitamura, T. Konishi, S. Kodaira, N. Yasuda, T. Yamauchi: On the mechanism of the sensitization of PADC (poly(allyl diglycol carbonate)) track detectors by carbon dioxide treatment, *Radiation Measurements*, **59** (2013) 23.

# 超小型アクティブ宇宙放射線線量計の開発

## Development of a small-size active space dosimeter

寺沢和洋<sup>A,B</sup>、永松愛子<sup>A</sup>、勝田真登<sup>A</sup>、島田健<sup>C</sup>、西啓輔<sup>C</sup>、北村尚<sup>D</sup>  
Kazuhiro Terasawa<sup>A,B</sup>, Aiko Nagamatsu<sup>A</sup>, Masato Katsuta<sup>A</sup>,  
Ken Shimada<sup>C</sup>, Keisuke Nishi<sup>C</sup>, Hisashi Kitamura<sup>D</sup>

A: 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

B: 慶應義塾大学・医学部 (Keio Univ.)

C: 株式会社エイ・イー・エス

D: 放射線医学総合研究所 (NIRS)

### 概要

現在あるいは将来にわたって計画されている様々な衛星や宇宙探査ミッションにおいては、宇宙放射線線量計に限らず、各搭載機器に対して容量・重量・電力等に大きな制限が与えられるため、たとえ ISS 上に搭載可能であっても、そのままか或いは少々の改修で探査機への搭載は実現しないことも多く、これまでも搭載の機会を見送っているケースがある。

そこで、測定精度等の性能にはある程度目をつむり、有人探査輸送機・居住モジュールや船外活動、衛星等の厳しい搭載制約環境下（ポータビリティ、外部バッテリー供給無し等）における測定を最優先することを検討し、被曝管理に最低限必要な計測項目である吸収線量が測定できる超小型線量計を開発し、搭載することを目的とする。

具体的には、3.11 以降に福島用として開発された、超小型・軽量・省電力個人線量計の D-shuttle を宇宙放射線線量計として改良することを目的とし、照射試験を通して得られる知見から改修を行い、どの程度の測定精度が確保できるか検討する。そのための実験の一部として、サイクロトロンより供給される陽子ビームを照射する。

### 1. 目的

3.11 以降に福島用として産業技術総合研究所が開発した Si ベースの個人線量計の D-shuttle は、超小型・軽量・省電力を実現し、ガンマ線用として実用化されている<sup>1)</sup>。これを宇宙放射線線量計として改良することを目的とし、どの程度の測定精度が確保できるか検討し、照射試験を通して得られる知見から改修を行い、宇宙機搭載による軌道上検証を実施し、最終的に実用化することを目的としている。これまでの宇宙放射線線量計の開発においては、線量データの正確性に主眼におき、半導体検出器をベースとした能動型線量計として最も分解能の高い Real-time Radiation Monitoring Device-III (RRMD-III)<sup>2)</sup> や荷電粒子だけでなく中性子にも感度のある Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC)<sup>3)</sup> の開発を行ってきたが、本研究では測定精度にはある程度目をつむり、探査機や衛星等の厳しい搭載制約環境下においても実測可能な線量計の開発を目指す。

宇宙放射線中の銀河宇宙線には数百 MeV/n 付近にエネルギー分布のピークがあり、地球周回低軌道において存在する放射線帯陽子は数十から数百 MeV の範囲にエネルギーピークを持ち、太陽フレアに伴う陽子のエネルギーの一部もこのエネルギー領域に入るため、サイクロトロンから供給されるビームを模擬宇宙放射線として使用することができる。本研究の第一歩は、地上用ガンマ線線量計測用に作られた D-shuttle の陽子・荷電粒子に対する応答を確認することである。

## 2. 実験方法

### 2-1 ビーム強度一様性の測定

できるだけ広い照射野を確保するために、本実験ではサイクロトロン C8 ビームラインを使用した。照射粒子は 70MeV の陽子線で、まず、検出器の照射位置を決定するための必要な情報として、ビーム強度の各照射位置（ビーム方向と垂直な面）における位置依存性の測定を行った。10 cm×10 cm×3 mm の大きさを持つプラスチックシンチレータの面をビーム軸に対して垂直に設置し、ビーム強度のモニタリングを行い、下流 10 cm のところに、1 cm×1 cm×1 mm の大きさのプラスチックシンチレータを設置し、水平方向に 5 mm ずつ移動させ、2 つのシンチレータのカウントの相対値によりビームの一様性を確認した。この時のビーム中心位置は、施設に設置のレーザーを使用し、その位置を中心と仮定している。

### 2-2 D-shuttle の照射

D-shuttle の外観写真を Fig.1 に示す。重量は 23 g、大きさ 68×32×14 mm<sup>3</sup> で、コイン型のリチウム電池（3V）を電源としており、大きさ、重量、電力の面での搭載性は格段に優れており、年単位で外部バッテリー供給無しでの長期間駆動が実現でき、ミッション期間中



Fig.1 Photo of the D-shuttle  
([http://www.c-technol.co.jp/radiation\\_monitoring/monitoring03](http://www.c-technol.co.jp/radiation_monitoring/monitoring03))

の宇宙飛行士の個人被曝線量計測にも適した仕様を持っている。カウント値による校正によって、ガンマ線に対する応答は 70 keV から 1.2 MeV の範囲で 70 ~ 120 % 程度の範囲に収まっている。通常、宇宙放射線線量計としては、検出器から付与エネルギーに依存した波高値データから LET 等の情報を得て線量を導くが、カウントのみを取得することにより簡易化を図り全体としてコンパクトな設計を実現している。

まず、検出器に対する付与エネルギーがガンマ線に近い粒子として、陽子に対する応答評価の一部を行った。

## 3. 実験結果

### 3-1 ビーム強度一様性の測定

Fig.2 にビーム方向と垂直な面におけるビーム強度に対する水平方向の位置依存性を示す。横軸でマイナス側がビーム下流側から上流側を見た際の左側、プラスが右側を示している。例えば、-40 mm から +20 mm の範囲に絞ると、ビーム強度の揺らぎは  $\sigma = 2.5\%$  となるので、この範囲に検出器を置くことにした。この結果を受け、ビーム強度のモニタリングには、前述の 2 つのシンチレータのうち、小型のものを中心から +15 mm のところに設置し、それ以外の照射位置については検出器のみが置けるようにした。

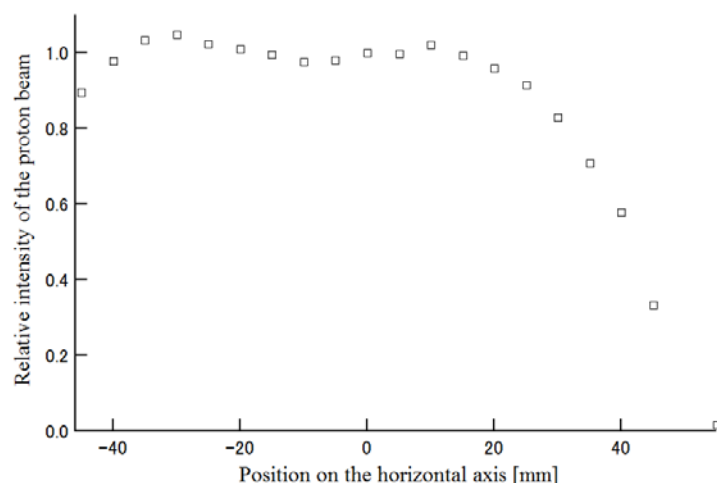


Fig.2 Position dependence of the proton beam intensity on the horizontal axis

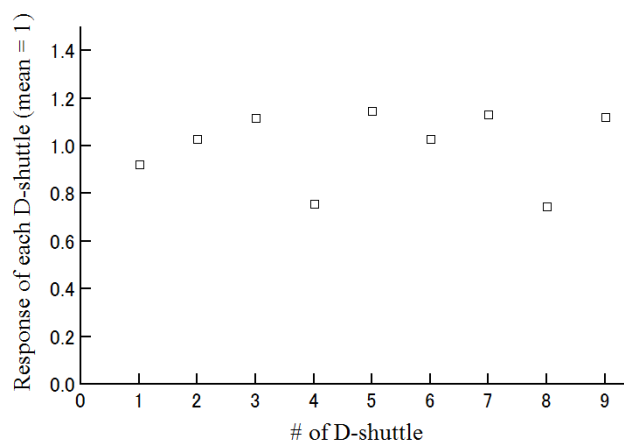


Fig.3 Fluctuation of the response from each D-shuttle

### 3-2 D-shuttle の照射

照射実験直後の preliminary な結果として、9個の D-shuttle の 0.1 mGy の線量（ビームエネルギーから算出）を照射した際の各読み出しカウント値を Fig.3 に示す。平均を 1 に取っているが、 $\sigma = 16\%$  となった。一方、TLD を 7 本組み合わせた場合の測定 3 回分については、 $\sigma = 7 \sim 10\%$  となり、ビーム強度の位置依存性を含め、ほぼ同様のばらつきとなった。線量の絶対値については、TLD による実測に比べ 1/2~1/3 程度になっており、電子と陽子の阻止能を考慮すると妥当な値といえそうだが、確認には前述の波高値データを取得する必要がある、これ以外の結果を含め現在解析と改修を進めており、順次報告する予定である。

### 4. まとめ

ガンマ線線量計測用に開発された D-shuttle に 70MeV の陽子線を照射し応答評価を行った。概ねガンマ線による応答から予想される結果を示し、宇宙放射線線量計として使用するた



めの評価実験の一部を実施した。通用は Si 検出器単体から測定を開始し、その後小型化の検討という順序になるが、本研究では D-shuttle が実現している小型化・軽量化・省電力化をそのまま活かした上で、システム全体としてどのような応答を示すか調べる必要があり、順序が逆になっている。

今後は、線量の絶対値の比較のために D-shuttle を改修し、threshold detector として複数台使用した際の応答などの原理的な検討を行い、引き続き陽子や重イオンによる照射を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 鈴木良一、検査技術、2013.7 (2013) 62.
- 2) T. Doke et al., *Radiat. Meas.*, 33 (2001) 373.
- 3) K. Terasawa et al., *KEK Proc.*, 2005-12 (2005) 63.

# 陽子線ビームにおける蛍光ガラス線量計及び

## 熱ルミネセンス線量計( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )の LET 依存性に関する研究

### LET dependence of radiophotoluminescence glass dosimeter and thermoluminescence dosimeter ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in proton beam

張維珊<sup>A,B</sup>、古場裕介<sup>B</sup>

Weichan Chang<sup>A,B</sup>, Yusuke Koba<sup>B</sup>

<sup>A</sup>首都大学東京、<sup>B</sup>放射線医学総合研究所

#### 概要

一般的な放射線治療(光子線治療、電子線治療)の線量検証に使用されている多くの検出器は LET 依存性を持つため、粒子線治療の線量検証に使用できる検出器が少ない。粒子線治療の線量検証に固体蛍光検出器(蛍光ガラス線量計, RGD 及び熱ルミネセンス線量計, TLD)を応用するために放射線医学総合研究所のサイクロトロン C-8 コースから発生した 70MeV 陽子線を用いて RGD 及び TLD ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) の LET 依存性について調査を行った。

#### 1. 目的

陽子線による放射線治療には優れた物理特性と生物効果を持つため、注目されており近年では数十の施設で治療が行われている。陽子線治療では標的に集中した線量分布を形成することができるが、正確な照射を行うために、治療を行う前に十分な線量検証が必要とされている。

蛍光ガラス線量計(radiophotoluminescence glass dosimeter, RGD; GD-302M)は線量応答直線性を有する、繰り返し読み取り可能、フェーディングが小さい(年間 1%未満)、非常に小型などの理由で、近年光子線治療の in vivo 線量計や郵送調査の線量計として利用されてきたが、粒子線を対象とする応答特性の報告が少ない。Rah らは RGD が陽子線における再現性、線量直線性、線量率依存性と角度依存性などの基礎特性を調べ結果、それぞれの変化は 2%以内ため、陽子線での使用が期待されてきた[1]。一方、過去では RGD の発光効率 LET 依存性があると報告された[2], [3]。安田らは、数種類の粒子を用いてについて調査したが、陽子線に関しては 150MeV 陽子線での発光効率のみ調査した[2]。陽子線は深さによってエネルギーが変わるため、陽子線での RGD の発光効率の LET 依存性について更なる調査が必要だ。

また、セラミックタイプ熱ルミネセンス線量計(Thermoluminescence dosimeter, TLD;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )に関しては、過去我々が HIMAC で行った実験の結果によってグロー曲線の低温側のピークは低 LET 領域において発光効率の LET 依存性が小さい可能性がある。つまり、陽子線治療での利用が期待できるため、陽子線での RGD の発光効率の LET 依存性について更なる調査が必要だ。今回の実験では RGD と TLD が陽子線での発光効率を調査することを目的とする。

#### 2. 実験方法

陽子線での実験を行う前に、RGD 及び  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の線量変換係数を得るため、コバルト校正を行った。陽

子線の実験は NIRS のサイクロトロン C-8 コースから発生した 70MeV 陽子線を用いて、照射野 10 cm × 10 cm で行った。

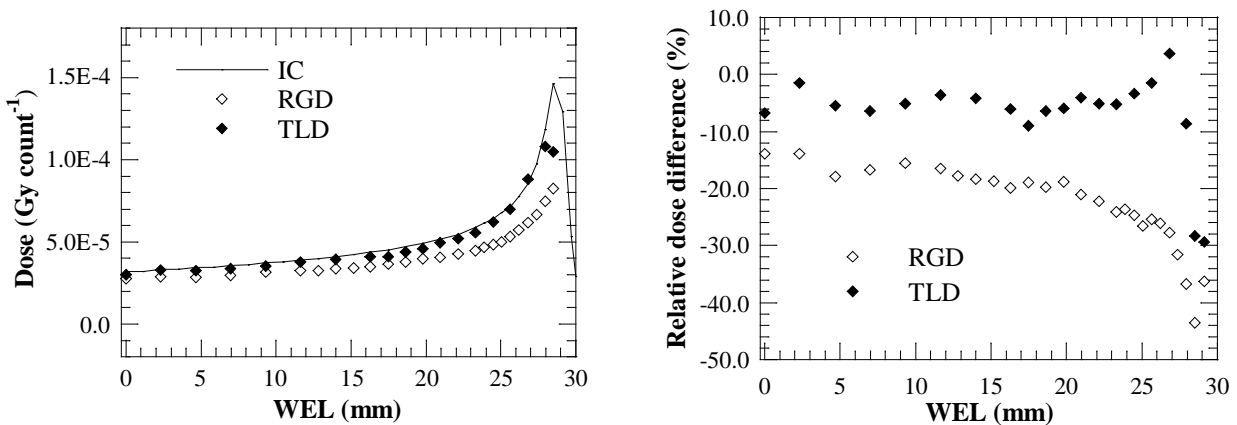
照射線量は C8 コース下流にある大型平行平板電離箱のカウント値により制御できるため、照射位置での吸収線量とこの電離箱の関係を明らかにする必要がある。まず、照射位置に Advanced Markus 電離箱を設置して、ビーム電流は 1nA 程度に設定して照射を行った。次に、バイナリフィルタ（水等価の PMMA 板）を利用して、RGD に入射するエネルギー、つまり LET、を変換する。各エネルギーに 4 本の RGD 及び三つの Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を照射した。

本研究での発光効率率は RGD で測定した線量(D<sub>RGD</sub>)または Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>で測定した線量(D<sub>TLD</sub>)と電離箱で測定した線量(D<sub>IC</sub>)の比とする。

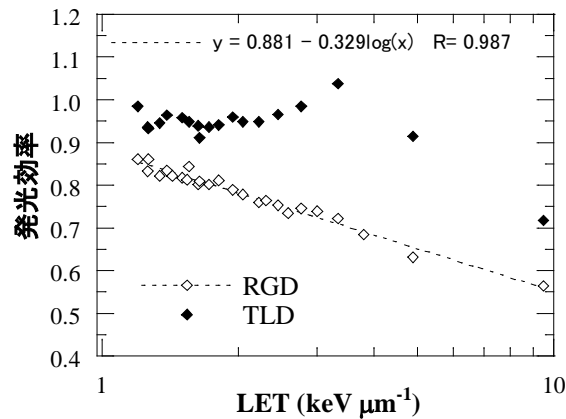
### 3. 実験結果と考察

図一に電離箱、RGD 及び Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を用いた深さごとの線水吸収線量及び深さごとに RGD と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が電離箱に対する相対線量差を示した。今回使用した RGD も Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>も密度が高いため、ブラッグピークのような線量変化が大きい領域は体積平均効果によって正確に線量測定ができない。D<sub>TLD</sub> と D<sub>IC</sub>の差はあまり深さによって変わらないことに対し、D<sub>RGD</sub>は深さが大きくなるにつれて D<sub>IC</sub>との差が大きくなる。ブラッグピーク以外では、D<sub>TLD</sub>と D<sub>IC</sub>の差の変化は±5%以内に収まっていることから、二次元の線量分布計測に向いていると言える。

実用のために、水等価深さを LET に変換して、RGD と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の LET ごとの発光効率を図二に示した。RGD の発光効率は LET が大きくなるにつれて小さくなる。また、log 関数で近似できるため、LET と残余飛程(residual range, R<sub>res</sub>)[4]との関係を利用し R<sub>res</sub>と発光効率のを見積もって臨床での使用が期待できる。一方、LET が 5 keV μm<sup>-1</sup>以下なら、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の発光効率は±5%以内であることがわかった。一般治療に使用する陽子線の LET は 5 keV μm<sup>-1</sup>より小さいことが多くため[5]、将来的にはそのまま陽子線の相対線量測定に利用できる可能性を示した。



図一(a) 異なる検出器による深部線量分布の比較 (b) 深さごとの相対線量差



図二 蛍光ガラス線量計及び熱ルミネセンス線量計( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )の LET 依存性

#### 4. まとめ

蛍光ガラス線量計と熱ルミネセンス線量計( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )に異なるエネルギーの陽子線を照射し、それぞれ検出器の発光効率の LET 依存性を調査した。蛍光ガラス線量計は顕著に LET 依存性を示したが、熱ルミネセンス線量計( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )には LET が  $5 \text{ keV mm}^{-1}$  以下ではあまり示さなかった。今後この情報を生かして、臨床的陽子線ビームでの線量計測に向けて研究すすめていく予定である。

#### 参考文献

- [1] J. E. Rah, D. H. Oh, D. Shin, D.-H. H. Kim, Y. H. Ji, J. W. Kim, and S. Y. Park, “Dosimetric evaluation of a glass dosimeter for proton beam measurements.,” *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 70, no. 8, pp. 1616–1623, 2012.
- [2] H. Yasuda and K. Fujitaka, “Responses of TLD  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Tb}$  and radiophotoluminescent glass to heavy charged particles and space radiation.,” *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 87, no. 2, pp. 115–119, 2000.
- [3] 野元大輔, “炭素線治療場での体内線量測定に向けた ガラス線量計の荷電粒子応答特性に関する研究,” 横浜市立大学大学院, 2011.
- [4] S. Vynckier, D. E. Bonnett, and D. T. L. Jones, “Supplement to the code of practice for clinical proton dosimetry,” *Radiother. Oncol.*, vol. 32, no. 2, pp. 174–179, 1994.
- [5] D. A. Granville, N. Sahoo, and G. O. Sawakuchi, “Calibration of the  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  optically stimulated luminescence (OSL) signal for linear energy transfer (LET) measurements in therapeutic proton beams.,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 59, no. 15, pp. 4295–310, 2014.



## 6. 生物研究

- 6-1. 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果
- 6-2. 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
- 6-3. 陽子線の生物効果の研究





# 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 LOW-LET PROTON BEAMS UNDER OXIC AND HYPOXIC CONDITIONS

平山亮一<sup>A</sup>、小原麻希<sup>A</sup>、鵜澤玲子<sup>A</sup>、劉翠華<sup>B</sup>、内堀幸夫<sup>C</sup>、北村尚<sup>D</sup>  
Ryoichi Hirayama<sup>A</sup>, Maki Obara<sup>A</sup>, Akiko Uzawa<sup>A</sup>, Cuihua Liu<sup>B</sup>, Yukio Uchihori<sup>C</sup>, Hisashi  
Kitamura<sup>D</sup>

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

B：放射線医学総合研究所放射線防護研究センターリスク低減化研究プログラム

C：放射線医学総合研究所企画部経営戦略室

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

サイクロトロンから供給された 70 MeV/n 陽子線を用いて、相同組換え (homologous recombination: HR) 修復欠損細胞である 51D1 細胞の細胞致死における陽子線の間接作用を、ラジカルスカベンジャーを用いて推定し、陽子線の細胞致死機序について放射線化学の観点から明らかにした。

### 1. 目的

大気下で 51D1 細胞に陽子線を照射し、OH ラジカル由来の間接作用が細胞致死にどの程度寄与しているかを明らかにする。

### 2. 実験方法

チャイニーズハムスター卵巣由来の CHO 細胞を親株に持つ HR 修復欠損細胞である 51D1 細胞を照射 12~18 時間前に、ガラスシャーレ上で培養した。照射 1 時間前に DMSO を加え (濃度は 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 1 M)、陽子線 (70 MeV/n) を CHO 細胞に照射した。照射線量は 3, 4, 6 Gy とし、照射後培養細胞をガラスシャーレから回収し、コロニー形成法で細胞の生存率を測定した。各 DMSO 濃度において、保護された細胞生存率を求め、DMSO 濃度と細胞保護率の両逆数から DMSO 濃度無限大時の最大保護率を求めることで、細胞致死への間接作用を見積もることとした[1-4]。

### 3. 実験結果

#### 3-1. 細胞生存率

51D1 細胞を各 DMSO 濃度で処理後に調べた細胞生存率の線量効果関係を図 1 に示した。DMSO 濃度増加に伴い、OH ラジカルが捕捉され、細胞生存率が上昇することが確認できた。また、高濃度の DMSO では細胞保護効果は飽和状態になっていることも確認できた。

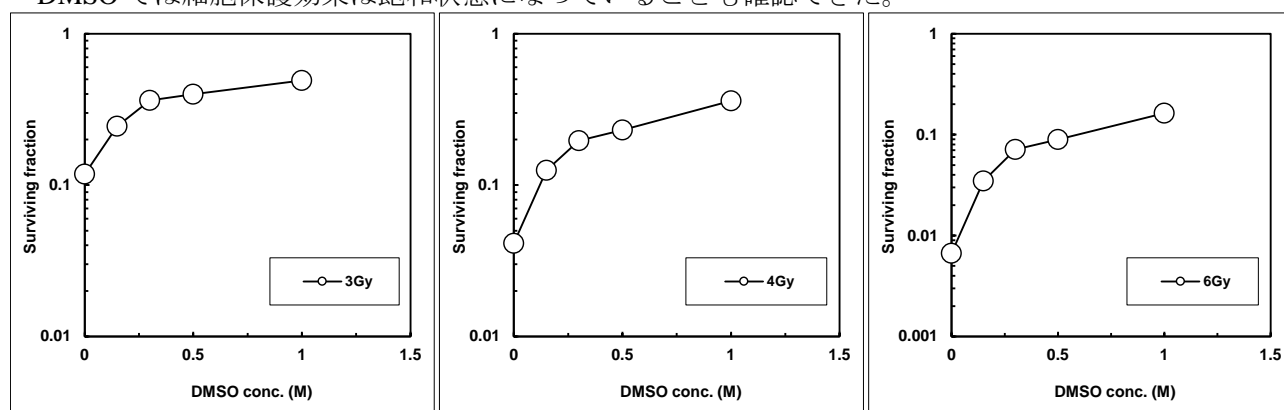


図 1 各 DMSO 濃度における 51D1 細胞の生存率

#### 3-2. 間接作用の寄与率

図 1 から細胞保護率を算出し、各 DMSO における細胞保護率を図 2A に示した。細胞保護率は DMSO 濃度増加に伴い上昇し、高濃度領域では飽和する傾向を示した。任意の線量 3 点の違いは観察されなかったため、線量依存性が無いことを確認できた。また図 2A の両軸の逆数を図 2B に取り直し (両逆数プロット法)、回帰直線の切片の逆数から細胞致死における陽子線の間接作用寄与率を  $46 \pm 10\%$  (1/切片  $\times 100\%$ ) と推定した。

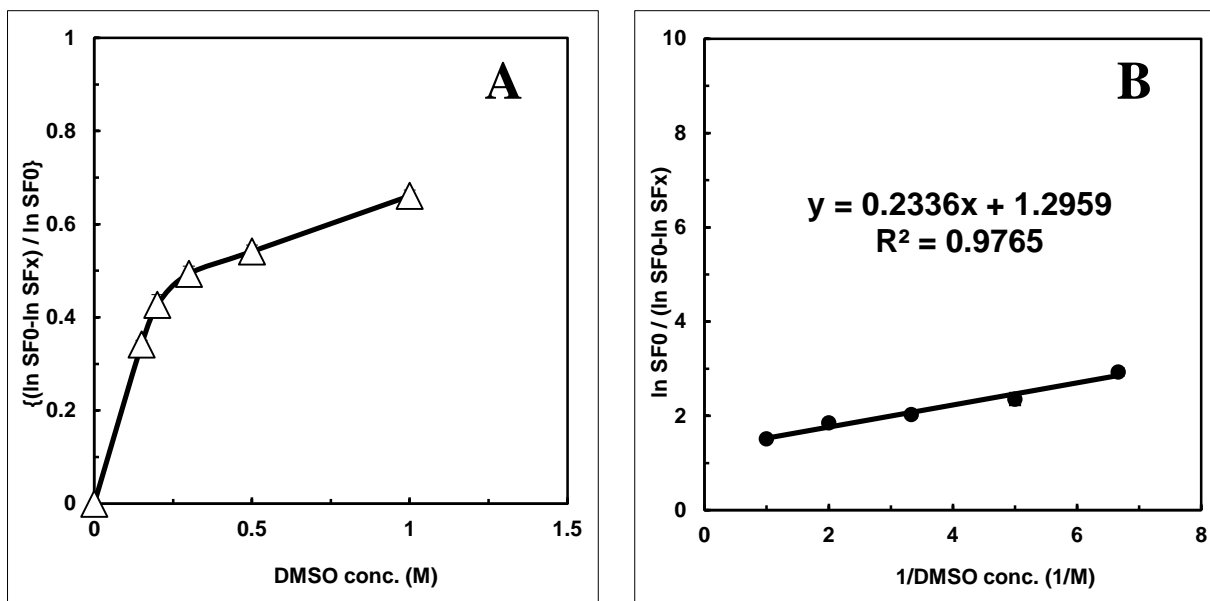


図 2 間接作用の推定 細胞保護率の DMSO 濃度依存性 (A)。両逆数プロット法による直線回帰 (B)。

#### 4. まとめ

51D1 細胞を大気下で陽子線照射した場合、細胞致死の約 77%は OH ラジカル由来の間接作用であることがわかった。CHO 細胞では陽子線照射による細胞致死における間接作用の寄与率は約 80%であったため、DNA 損傷修復の一つである HR と間接作用による細胞致死の直接的な関連性は明らかにならなかった。今後は低酸素環境下での細胞致死における間接作用の寄与率を求め、細胞致死における放射線作用と DNA 損傷修復機構の関連性について調べる予定である。

#### 参考文献

- [1] Atsushi Ito, Hisako Nakano, Yohsuke Kusano, Ryoichi Hirayama, Yoshiya Furusawa, Chieko Murayama, Tomoyuki Mori, Yosuke Katsumura, Kunio Shinohara: Contribution of Indirect Action to Radiation Induced Mammalian Cell Inactivation: Dependence on Photon Energy and Heavy ion LET. Radiation Research, 165, 703-712, 2006.
- [2] Ryoichi Hirayama, Atsushi Ito, Masanori Tomita, Teruyo Tsukada, Fumio Yatagai, Miho Noguchi, Yoshitaka Matsumoto, Yuki Kase, Koichi Ando, Ryuichi Okayasu, Yoshiya Furusawa: Contributions of Direct and Indirect Actions in Cell Killing by High LET Radiations. Radiation Research, 171, 212-218, 2009
- [3] Ryoichi Hirayama, Yoshitaka Matsumoto, Yuki Kase, Miho Noguchi, Koichi Ando, Atsushi Ito, Ryuichi Okayasu, Yoshiya Furusawa: Radioprotection by DMSO in Nitrogen Saturated Mammalian Cells Exposed to Helium Ion Beams. Radiation Physics and Chemistry, 78, 1175-1178, 2009
- [4] Ryoichi Hirayama, Atsushi Ito, Miho Noguchi, Yoshitaka Matsumoto, Akiko Uzawa, Gen Kobashi, Ryuichi Okayasu, Yoshiya Furusawa: OH radicals from the indirect actions of X-rays induce cell lethality and mediate the majority of the oxygen enhancement effect. Radiation Research, 180, 514-523, 2013

# 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プログラム

B: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

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

重イオンからプロトンの広範囲に渡る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最終目的として、モデル解析・シミュレーションに必要となる生物学的基礎実験データ集積を進めている。3年目の平成27年度は、細胞損傷の修復能の基となるヒト由来正常細胞を用いて、平成25年度に設定した一回照射で生存率が約5%となる線量を0から3時間程度の比較的短時間間隔で二分割照射し、それに対する細胞致死効果を調べ、これまでにいったヒト由来がん細胞株のデータとの比較から、分割照射に対する回復現象の違いを明らかにした。

### 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が、粒子線治療を念頭においた分割照射に対する生物学的基礎データは非常に限られているのが現状である。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、治療モデル MKM (the microdosimetric kinetic model) [1]に適用して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に寄与することを目的として計画し平成25年度より研究を進めている。本研究で得られた実験データと現在 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

平成27年度の実験には、公的な細胞バンクより入手したヒト皮膚由来正常線維芽細胞 (NB1RGB) を用いた。C8 コースで得られる70MeVプロトンを用いて、平成25年度に設定した単一照射に対する生存率が5%程度となる線量を十数分から3時間の比較的短い時間間隔で等分割照射を行い、コロニー形成法にて細胞増殖死を検出し、いわゆる Elkind recovery [2]を調べた。

### 3. 実験結果

図1に HSGc-C5 細胞および NB1RGB 細胞に対する Elkind recovery 曲線を示す。いずれの細胞に関してもプロトンに対する二分割照射では、X線で報告されている分割間隔が100-120分で致死効果からの回復が最大となるような Elkind recovery 曲線と同様な致死損傷からの回復が観察されたが、がん細胞と正常細胞では生存率の上昇の程度が大きく異なる事が判った。また得られた Elkind recovery 曲線は、HIMAC の炭素イオン (LET=13keV/μm) に対する Elkind recovery 曲線とほぼ同一であることが判った。

### 4. まとめ

平成25-27年度の3年間で実施した実験から、70MeVプロトン (LET=0.95keV/μm) においても、X線で観察されたような Elkind recovery が存在する事が判った。しかしながら、ヒト由来のがん細胞株と正常細胞とでは、生存率の上昇度合いが全く異なり、がん細胞株の方がより高い分割照射に対する回復を示した。これは、がん細胞と正常細胞の間の細胞損傷の修復能の違いを明確に反映したものであり、この違いを MKM (the microdosimetric kinetic model) に適用して解析することにより、粒子線に対

する感受性の異なるがん細胞の細胞致死効果や細胞損傷修復に関するパラメーターの決定が可能となり、生物学的基礎データを用いて粒子線治療の高度化に資する論理の構築に寄与するものとする。

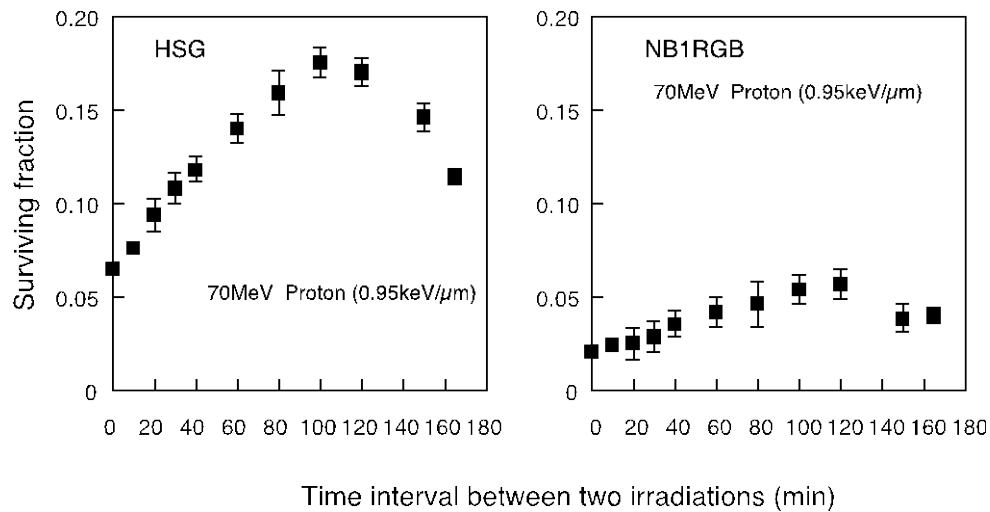


図1. 平成26年度に報告したヒト唾液腺由来がん細胞株(HSGc-C5)とヒト正常細胞(NB1RGB)における70MeVプロトン照射に対するElkind recovery曲線。等分割照射は、がん細胞は2.70Gy-interval-2.70Gy、正常細胞は2.95Gy-interval-2.95Gyのスケジュールで行った。データは、3回の独立した照射実験の平均値とその標準誤差を示す。

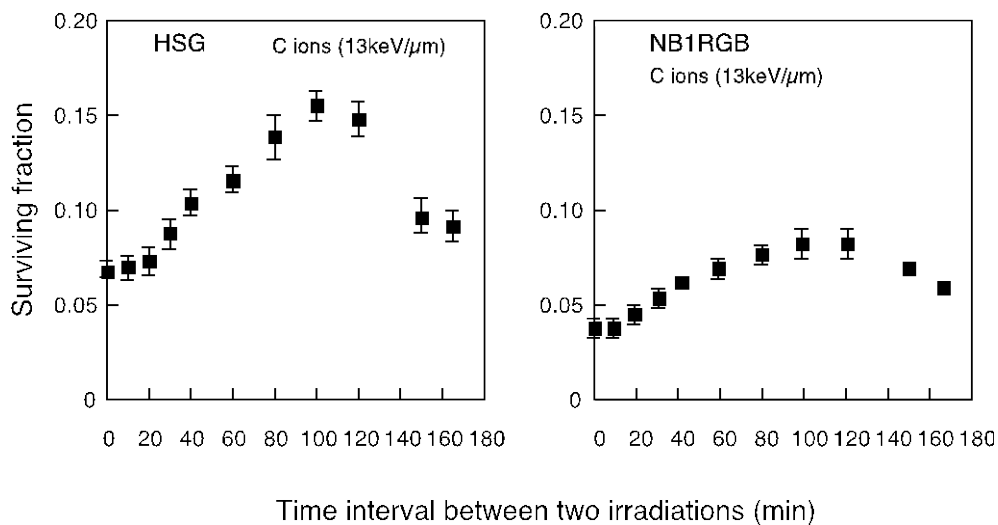


図2. HIMAC炭素イオンビーム(LET 13keV/μm)照射に対するElkind recovery曲線。等分割照射は、がん細胞は2.5Gy-interval-2.5Gy、正常細胞は2.0Gy-interval-2.0Gyのスケジュールで行った。データは、4回の独立した照射実験の平均値とその標準誤差を示す。

### 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).
- [2] M.M.Elkind, H.Sutton-Gilbert, W.B.Moses, T.Alescio and R.W. Swain Radiation Response of Mammalian Cells Grown in Culture. V.Temperature Dependence of the Repair of X-Ray Damage in Surviving Cells (Aerobic and Hypoxic). *Radiat. Res.*, **25**, 359-376 (1965).

# 陽子線の生物効果の研究

## Investigation of biological effects after proton exposure.

前田淳子<sup>a</sup>、藤井義大<sup>b</sup>、藤沢寛<sup>c,d</sup>、平川博一<sup>c</sup>、Cartwright Ian<sup>a</sup>、上坂充<sup>d</sup>、北村尚<sup>c</sup>、  
藤森亮<sup>c</sup>、加藤宝光<sup>a</sup>

Junko Maeda<sup>a</sup>、Yoshihiro Fujii<sup>b</sup>、Hiroshi Fujisawa<sup>c,d</sup>、Hirokazu Hirakawa<sup>c</sup>、Cartwright Ian<sup>a</sup>、  
Mitsuru Uesaka<sup>d</sup>、Hisashi Kitamura<sup>c</sup>、Akira Fujimori<sup>c</sup>、Takamitsu Kato<sup>a</sup>

<sup>a</sup>コロラド州立大学、<sup>b</sup>茨城県立医療大、<sup>c</sup>放医研、<sup>d</sup>東京大学

### 概要

The DNA repair mechanisms involved in hyperthermia-induced radiosensitization with proton and carbon ion radiation exposure were investigated in the present study. In a previous study, Chinese hamster ovary (CHO) cells were exposed to low linear energy transfer (LET) photon radiation. These cells can be sensitized by hyperthermia as a result of inhibition of homologous recombination (HR) repair. The present study used wild-type, non-homologous end joining (NHEJ) and HR repair-deficient CHO cells to define the contributions of each repair pathway to cellular lethality following hyperthermia-induced hadron radiation sensitization. The cells were exposed to ionizing radiation, followed by hyperthermia treatment (42.5°C for 1 h). Hyperthermia-induced radiosensitization was determined by the colony formation assay and thermal enhancement ratio. HR repair-deficient cells exhibited no hyper-sensitization to X-rays, protons, or low and high LET carbon ions when combined with hyperthermia. Wild-type and NHEJ repair-deficient cells exhibited significant hyperthermia-induced sensitization to low LET photon and hadron radiation. Hyperthermia-induced sensitization to high LET carbon-ion radiation was less than at low LET radiation. Relative biological effectiveness (RBE) between radiation alone and radiation combined with hyperthermia cell groups was not significantly different in any of the cell lines, with the exception of wild-type cells exposed to high LET radiation, which exhibited a lower RBE in the combined group.

The present study investigated additional cell lines to confirm the lower RBE observed in DNA repair-deficient cell lines. These findings suggested that hyperthermia-induced hyper-sensitization to hadron radiation is also dependent on inhibition of HR repair, as was observed with photon radiation in a previous study.

### 1. 序章

放射線医学総合研究所の大型サイクロトロン施設 (NIRS-930) において、70MeV に加速された粒子線を、汎用照射室 C-8 で照射を行い (1)、温熱効果による増感を X 線、炭素線照射と比較した。放医研ではこのエネルギーの陽子線を用いて、過去には治療も行われた (2)。これまで汎用照射室では生物実験に向けた線量測定、装置の開発などが行われていた (3, 4, 5)。

陽子線の Relative Biological Effectiveness (RBE) は古典的におよそ 1.1 程度とされ、他の低 LET (Linear Energy Transfer) 放射線である X 線やガンマ線と似た性質をもつとされている。しかし、ガンマ線、陽子線、炭素線の温熱による増感作用を網羅的に行った研究はない。放医研の HIMAC およびサイクロトロンの場合における TER (Thermal Enhancement Ratio) を再検証する必要があると考えた。我々は、NIRS-930 で得られる陽子線の温熱増感効果を検証するために、70MeV に加速された粒子線を用いて、DNA 修復欠損細胞、特に DNA-PKcs タンパク質を欠損した細胞、Rad51D タンパク質を欠損した細胞を使用した。結果は、X 線、および炭素線照射されたものと比較した。

### 2. 実験材料と方法

#### A) Cell Culture Condition

CHO wild-type (CHO 10B2) cells and the DNA repair-deficient CHO mutants, the DNA repair-deficient CHO mutants, V3 (DNA-PKcs) and 51D1 (Rad51D) were kindly supplied by Dr Larry Thompson of Lawrence Livermore National Laboratory (Livermore, CA, USA) (19). CHO cells were maintained in Alpha MEM (GE Healthcare Life Sciences, Logan, UT, USA) with 10% fetal bovine serum (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), antibiotics (Antibiotic-Antimycotic; Life Technologies, Grand

#### B) Radiation Condition

X-ray irradiations were performed using a TITAN X-ray generator (Shimadzu Corp., Tokyo, Japan) using 5-mm Al and Cu filters at 200 kVp and 20 mA. The dose rate was ~1 Gy/min at room temperature. Hadron irradiations were conducted at the National Institute of Radiological Sciences (NIRS) in Chiba, Japan. Carbon and iron ions were accelerated to 290 and 500 MeV/n, respectively, using the Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC), and protons were accelerated to 70 MeV using the NIRS-930 cyclotron. The dose rates for carbon ions and protons were set at 3 Gy/min. Monoenergetic 290 MeV/n

carbon ions have a LET value of 13 keV/ $\mu\text{m}$  on entrance. Different LET values were achieved by varying the thickness of poly(methyl methacrylate). Monoenergetic 70 MeV protons have a LET value of 1 keV/ $\mu\text{m}$  on entrance. For hyperthermia experiments, tightly sealed cell culture containers were immersed in a pre-heated temperature-controlled water bath (Lauda, Delran, NJ, USA) at a temperature of 42.5°C for 1 h. Hyperthermia treatment was carried out immediately following radiation exposure.

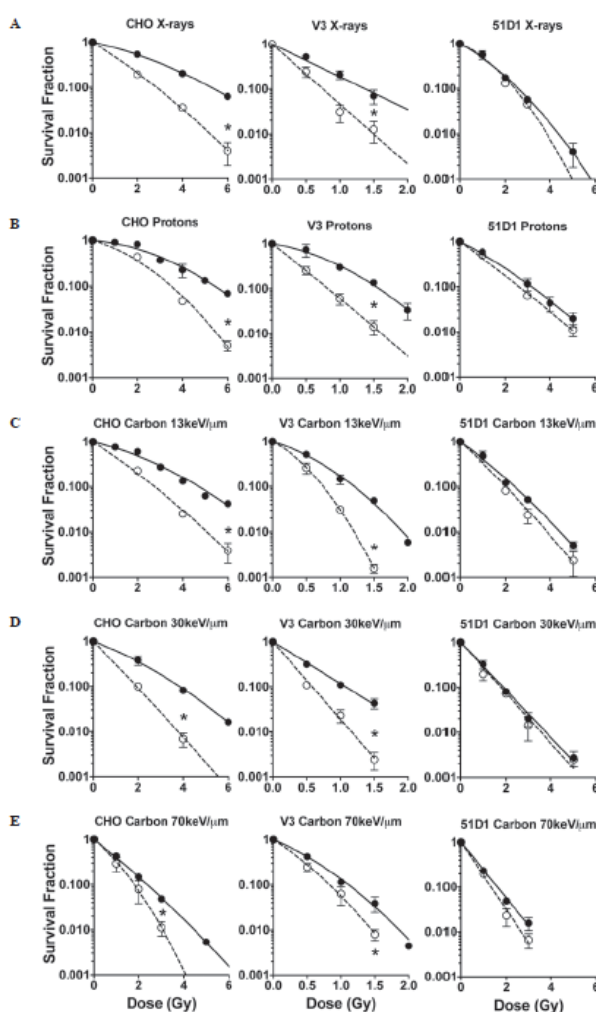
For the radiation and hyperthermia experiment, following exposure to radiation, the cells were kept at either 37°C or hyperthermia of 42.5°C for 1 h, and subsequently trypsinized and plated to form colonies. For the radiation experiment with the additional cell lines, the cells were immediately plated following irradiation. Colonies were fixed and stained 7-10 days later using 100% ethanol, followed by 0.1% crystal violet. Macroscopic colonies containing >50 cells were marked as survivors. Cell survival curves were constructed from cell survival fraction data using Graphpad Prism 6 (GraphPad Software Inc., La Jolla, CA, USA) and a linear quadratic regression model. D10 values (radiation dose to achieve 10% cell survival) were determined, and the relative biological effectiveness (RBE) and thermal enhancement ratio (TER) were calculated from the D10 values. X-ray was the standard radiation for RBE calculations.

### 3. 結果

#### A) Cell survival curves

In line with previous studies, cell survival curves demonstrated that hyperthermia treatment of 42.5°C for 1 h post irradiation, sensitized CHO wild-type cells and V3 cells but not 51D1 cells (Fig. 1). In low LET radiation including proton, X-ray and carbon 13 keV/ $\mu\text{m}$ , the cell survival curves of CHO wild-type and V3 [non-homologous end-joining (NHEJ) repair deficient] cells demonstrated significant and large differences between the control group (radiation only) and the combined group (radiation plus hyperthermia). However, the cells exposed to carbon 30 and 70 keV/ $\mu\text{m}$  LET showed significant but small differences in the cell survival curves between the control and combined groups. HR repair-deficient 51D1 cells exhibited no radiosensitization from the hyperthermia treatment in all the radiation conditions used in this study.

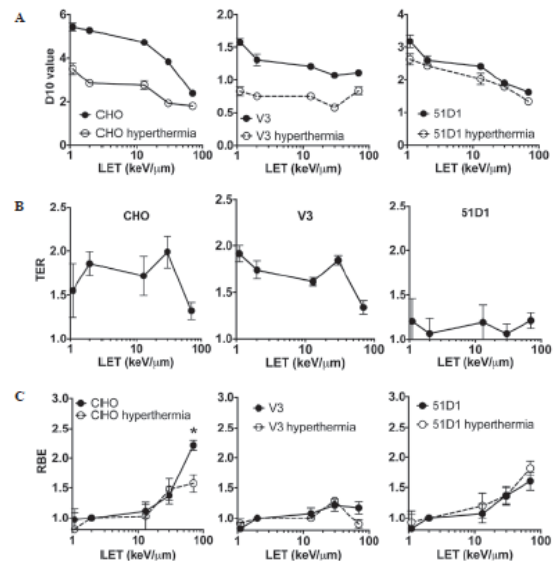
**Figure 1:** Cell survival curves for CHO wild-type, V3, and 51D1 cells exposed to (A) X-ray, (B) protons, (C) carbon 13 keV/ $\mu\text{m}$ , (D) carbon 30 keV/ $\mu\text{m}$  or (E) carbon 70 keV/ $\mu\text{m}$ . Solid lines are the control group (radiation alone). Dashed lines are the combined group (radiation with post-irradiation hyperthermia). Error bars are standard error of the mean values of at least three independent experiments. Trendlines were constructed using GraphPad Prism 6 with linear quadratic regression. \* $P < 0.05$ . CHO, Chinese hamster ovary.



#### B) D10, RBE, and TER analysis

Analysis of the D10 values taken from the CHO wild-type and 51D1 cell survival data (Fig. 2A) revealed a clear trend in reduction of D10 values in the higher LET radiation for the control group (radiation only) and combined group (radiation plus hyperthermia). For the V3 cells, the control group had very small reductions in D10 values when LET increased. The combined group exhibited no observable changes in D10 values for the different values of LET. Comparison of the D10 values between the control and combined groups revealed the differences of each D10 were greatest in low LET radiation such as proton and X-rays, and at high LET radiation, these differences were smaller. Hyperthermia-induced radiosensitization in HR-deficient (51D1) cells (Fig. 1) resulted in no statistically significant differences in the D10 values of the control and combined groups. The D10 values were used to analyze the thermal sensitization. TER was obtained from D10 values of the control group of cells

and the radiation plus hyperthermia (combined) group of cells (Fig. 2B). This analysis revealed that the data from the CHO wild-type and V3 cells followed a similar trend. In the LET range 1-30 keV/μm, TER was calculated as 1.5-2.0. At the highest LET used in the present study, 70 keV/μm, TER reduced to 1.3. By contrast, there was no LET-dependent TER decrease for the HR repair mutant cells. The 51D1 group had a TER range of 1.0-1.2. Wild-type and NHEJ mutants have HR repair capacity, and the high TER values suggested that cells have a high HR repair capacity in low LET <30 keV/μm. RBE was also calculated from D10 values (Fig. 2C), and no statistically significant differences in RBE values were detected between control and hyperthermia-exposed cells among the three cell lines, with the exception of wild-type CHO cells exposed to carbon LET 70 keV/μm (high LET; P<0.05, t-test). The wild-type combined group RBE value at LET 70 keV/μm showed a significant reduction compared to the control group. This result suggested hyperthermia does not inhibit repair of the DNA damage produced by high LET radiation, or the DNA repair pathway targeted by hyperthermia does not contribute to the repair of high LET radiation-induced DNA damage.



**Figure 2:** (A) D10 values of the control group (radiation alone, closed circles) and combined group (radiation combined with post-irradiation hyperthermia, open circles). (B) TER values of the control and combined groups. (C) RBE values of the control and combined groups. \*P<0.05. CHO, Chinese hamster ovary; LET, linear energy transfer, RBE, relative biological effectiveness; TER, thermal enhancement ratio; D10, radiation dose to achieve 10% cell survival.

#### 4. 考察

We have shown in this study that the hyperthermia can enhance radiosensitivities of proton exposed cells. The enhancement mechanisms were common in photon, protons, and carbon ions. When homologous recombination repair was lost, cells could not be enhanced any from hyperthermia induced radiosensitization. Since proton exposure has advantage for dose distribution than photon exposure, hyperthermia can be an attractive adjunct therapy method for proton therapy. For carbon ion exposure, TER decreased with LET increased. The carbon ion therapy has less benefit from combination of hyperthermia.

#### 参考文献

1. T.Honma, et al., RECENT STATUS OF THE NIRS CYCLOTRON FACILITY, The 18th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, pp137-139
2. Tsunemoto et al., Proton Therapy in Japan, Radiation Research, 104 (2) 1985, 235-243
3. 北村尚、内堀幸夫、放医研サイクロトロン of 広範囲照射場のプロファイル測定とモデル化、放射線医学総合研究所技術報告書、20-27, 2010
4. 北村尚 et al. 汎用照射室 C-8 コースにおけるビーム制御
5. 内堀幸夫 et al. 宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発





## 7. 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

## PROPRIETARY RESEARCH 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>、涌井 崇志<sup>A</sup>、岡田 高典<sup>B</sup>、高橋 勇一<sup>B</sup>、青山 功武<sup>B</sup>、井 博志<sup>B</sup>、神谷 隆<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>, Takashi Wakui<sup>A</sup>, Takanori Okada<sup>B</sup>, Yuichi Takahashi<sup>B</sup>, Isamu  
Aoyama<sup>B</sup>, Hiroshi Ii<sup>B</sup>, Koji Noda<sup>A</sup>

<sup>A</sup> : 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 加速器工学部

<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ime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、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が引き起こされる。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トータルドーズ効果と呼ばれる材料の劣化やシングルイベント効果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[1]。このため、宇宙空間において利用実績のない電子機器を宇宙空間で使用する際には、あらかじめ宇宙放射線による影響を調査する必要がある。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、耐放射線の評価が行われた。

### 2. 利用状況

平成 27 年度に行った有料提供日数は 19 日となった。当初有料提供に配分されたマシントime日数は 20 日分であったが、3 日分のキャンセルがあり、2 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 157.3 時間となった。このうち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。実際の有料となったビーム利用時間の合計は 105 時間だった。有料提供における利用された粒子はすべて陽子だった。主に利用されたエネルギーは 70 MeV 陽子で、その他のエネルギーでは 25 MeV 陽子や 50 MeV 陽子も利用された。

昨年度に引き続き 80 MeV 陽子を照射したいとの要望がありビーム調整を行っている。取出し可能になったが耐放射線の評価を行うにはビーム強度が足りていない。80 MeV の提供を再開できるようビーム調整を行っていく予定である。

### 3. ビームコースおよび照射条件

有料提供では、C6 コースと C8 コースが利用された。C6 コースは照射野を  $\phi 10\sim 20$  mm 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  $\phi 70$  mm 程度に均一に広げたコースとなっている。主に利用されたコースは、C8 コースであり 142.1 時間であった。C6 コースでは 15.2 時間利用された。

C8 コースで利用されたビーム強度は 1 pA 以下から 800 nA であり、C6 コースでは 0.4 nA から 1 nA のビーム強度が利用された。

### 4. 有料提供の手続きについて

NIRS-930 を使用した有料提供を行うには、放医研と利用者間で契約を交わす必要がある。平成 27 年度は 8 件の契約を元に 10 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 5~8 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 27 年度は 62 名の登録を行い、のべ 81 名の利用者が有料提供の実験に参加した。  
新規に利用をご希望の方はサイクロトン運転室([cyc\\_sec@qst.go.jp](mailto:cyc_sec@qst.go.jp))までご連絡ください。

## 参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構,耐放射線設計標準,JERG-2-143

## 8. 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運転状況

#### <原著論文等>

1. K. Katagiri, A. Noda, K. Suzuki, K. Nagatsu, A. Yu. Boytsov, D. E. Donets, E. D. Donets, E. E. Donets, A. Yu. Ramzdorf, M. Nakao, S. Hojo, T. Wakui, and K. Noda: Cryogenic molecular separation system for radioactive <sup>11</sup>C ion acceleration, Rev. Sci. Instrum., 86 (2015) 123303-1-7.
2. K. Katagiri, A. Noda, K. Nagatsu, M. Nakao, S. Hojo, M. Muramatsu, K. Suzuki, T. Wakui, and K. Noda: A singly charged ion source for radioactive <sup>11</sup>C ion acceleration, Rev. Sci. Instrum., 87 (2016) 02B509-1-4.

#### <Proceedings等>

1. Satoru Hojo, Ken Katagiri, Masao Nakao, Akira Noda, Koji Noda, Akinori Sugiura, Takashi Wakui, Koutarou Nagatsu, Hisashi Suzuki: Progress on the Upgrade for TRT at NIRS Cyclotron Facility, HIAT2015, YOKOHAMA, JAPAN, September 7 – 11, MOPA07.
2. Masao Nakao, Satoru Hojo, Ken Katagiri, Akira Noda, Koji Noda, Akinori Sugiura, Takashi Wakui, et al.: The Multi Particle Simulation for the Cyclotron NIRS-930, HIAT2015, YOKOHAMA, JAPAN, September 7 – 11, MOPA08.

#### <学会及び研究会口頭発表等>

1. 北條 悟, 涌井 崇志, 杉浦 彰則, 中尾 政夫, 岡田 高典, 高橋 勇一, 青山 功武, 野田 章: AVF-930 サイクロトロン用高調波ビームバンチャーの開発(III), 第 12 回日本加速器学会年会, 福井県敦賀市, 2015 年 8 月 5 日~7 日, THOL03, p.94.
2. 中尾 政夫, 北條 悟, 片桐 健, 杉浦 彰則, 涌井 崇志, 野田 章, 後藤 彰, Smirnov Victor, Vorozhtsov Sergey: サイクロトロン NIRS-930 におけるビームのシミュレーション, 第 12 回日本加速器学会年会, 福井県敦賀市, 2015 年 8 月 5 日~7 日, THOL04, p.97.
3. 北條 悟, 杉浦 彰則, 片桐 健, 中尾 政夫, 野田 章, 涌井 崇志, 岡田 高典, 高橋 勇一, 井 博志, 青山 功武, 野田 耕司: 放医研サイクロトロン(NIRS-930, HM-18)の現状報告, 第 12 回日本加速器学会年会, 福井県敦賀市, 2015 年 8 月 5 日~7 日, FSP021, p.340.
4. 片桐 健, 北條 悟, 中尾 政夫, 永津 弘太郎, 鈴木 寿, 杉浦 彰則, 涌井 崇志, 野田 章, 野田 耕司: NIRS サイクロトロン施設 RI 生成用照射ポートのための Wobbling beam 照射システムの設計, 第 12 回日本加速器学会年会, 福井県敦賀市, 2015 年 8 月 5 日~7 日, THP130, p.1380.

### 3. サイクロトロン<sup>1</sup>の分子プローブの製造・開発への利用状況

#### <原著論文等>

1. Yoko Shimoda, Masayuki Fujinaga, Akiko Hatori, Joji Yui, Yiding Zhang, Nobuki Nengaki, Yusuke Kurihara, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Katsushi Kumata, Hideki Ishii, Ming-Rong Zhang: N-(3,4-Dimethylisoxazol-5-yl)piperazine-4-[4-(2-fluoro-4-[(<sup>11</sup>C)methylphenyl]thiazol-2-yl)]-1-carboxamide : A promising positron emission tomography ligand for fatty acid amide hydrolase. Bioorganic & medicinal chemistry, 24(4), 627 - 634, 2016-02.
2. Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Nobuki Nengaki, Masanao Ogawa, Katsushi Kumata, Yoko Shimoda, Joji Yui, Lin Xie, Yiding Zhang, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis and



evaluation of 5-methyl-N-(4-[(11C)methylpyrimidin-2-yl]-4-(1H-pyrazol-4-yl)thiazol-2-amine ([11C]ADX88178) as a novel radioligand for imaging of metabotropic glutamate receptor subtype 4 (mGluR4). *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 26(2), 370 - 374, 2016-01.

3. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Kazunori Kawamura, Kenji Furutsuka, Nobuki Nengaki, Yoko Shimoda, Satoshi Shiomi, Makoto Takei, Hiroki Hashimoto, Joji Yui, Hidekatsu Wakizaka, Akiko Hatori, Lin Xie, Katsushi Kumata, Ming-Rong Zhang: Dynamic Changes in Striatal mGluR1 but not mGluR5 During Pathological Progression of Parkinson's Disease in Human Alpha-Synuclein A53T Transgenic Rats: A Multi-PET Imaging Study, *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 36(2), 375 - 384, 2016-01.
4. Anjani Tiwari, Joji Yui, Yiding Zhang, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Yoko Shimoda, Katsushi Kumata, Akiko Hatori, Ming-Rong Zhang: [18F]FPBMP: - a potential new positron emission tomography radioligand for imaging of translocator protein (18 KDa) in peripheral organs of rat, *RSC Advances*, 5(123), 101447 - 101454, 2015-12.
5. Akiko Hatori, Joji Yui, Lin Xie, Katsushi Kumata, Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Hidekatsu Wakizaka, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Feng Wang, Ming-Rong Zhang: Utility of Translocator Protein (18 kDa) as a Molecular Imaging Biomarker to Monitor the Progression of Liver Fibrosis, *Scientific Reports (Online Only URL: <http://www.nature.com/srep/index.html>)*, 5, 17327, 2015-12.
6. Yoko Shimoda, Joji Yui, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Masanao Ogawa, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Katsushi Kumata, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis and evaluation of N-(3,4-dimethylisoxazol-5-yl)piperazine-4-[4-(4-fluorophenyl)thiazol-2-yl]-1-[11C]carboxamide for in vivo positron emission tomography imaging of fatty acid amide hydrolase in brain, *RSC Advances*, 5, 106122 - 106127, 2015-12.
7. Hiroki Hashimoto, Kazunori Kawamura, Makoto Takei, Nobuyuki Igarashi, Tomoya Fujishiro, Satoshi Shiomi, Watanabe Ryuji, Masatoshi Muto, Kenji Furutsuka, Takehito Ito, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Kazuyoshi Nemoto, Yasuyuki Kimura, Makoto Higuchi, Ming-Rong Zhang: Identification of a major radiometabolite of [11C]PBB3, *Nuclear Medicine and Biology*, 42(12), 905 - 910, 2015-12.
8. Maki Okada, Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Yoko Ikoma, Atsushi Tsuji, Hidekatsu Wakizaka, Ichio Aoki, Ming-Rong Zhang, Koichi Kato, Tomoo Kamakura: In vivo imaging of blood-brain barrier permeability using positron emission tomography with 2-amino-[3-11C]isobutyric acid, *Nuclear Medicine Communications*, 36(12), 1239 - 1248, 2015-12.
9. Lin Xie, Jun Maeda, Katsushi Kumata, Joji Yui, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Nobuki Nengaki, Hidekatsu Wakizaka, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Yoko Shimoda, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara, Feng Wang, Ming-Rong Zhang: Development of 1-N-(11C)-Methyl-l- and -d-Tryptophan for pharmacokinetic imaging of the immune checkpoint inhibitor 1-Methyl-Tryptophan, *Scientific Reports* 5, 16417, 2015-11.
10. Lu Wang, Joji Yui, Qifan Wang, Yiding Zhang, Wakana Mori, Yoko Shimoda, Masayuki Fujinaga, Katsushi Kumata, Tomoteru Yamasaki, Akiko Hatori, Benjamin H Rotstein, Thomas Lee Collier, Chongzhao Ran, Neil Vasdev, Ming-Rong Zhang, Steven H Liang: Synthesis and Preliminary PET Imaging Studies of a FAAH Radiotracer ([11C]MPPO) Based on  $\alpha$ -Ketoheterocyclic Scaffold, *ACS chemical neuroscience*, 7(1), 109 - 118, 2015-11.

11. Maki Okada, Kazuhiko Yanamoto, Tomohiko Kagawa, Keiko Yoshino, Rie Hosoi, Kohji Abe, Ming-Rong Zhang, Osamu Inoue: Kinetic study of benzyl [1-14C]acetate as a potential probe for astrocytic energy metabolism in the rat brain: Comparison with benzyl [2-14C]acetate, *Journal of cerebral blood flow and metabolism : official journal of the International Society of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 36(2), 442 - 450, 2015-09.
12. Katsushi Kumata, Joji Yui, Lin Xie, Yiding Zhang, Nobuki Nengaki, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Yoko Shimoda, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis and preliminary PET evaluation of glycogen synthase kinase 3 $\beta$  (GSK-3 $\beta$ ) inhibitors containing [(11)C]methylsulfanyl, [(11)C]methylsulfinyl or [(11)C]methylsulfonyl groups, *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 25(16), 3230 - 3233, 2015-08.
13. Toshimitsu Okamura, Maki Okada, Tatsuya Kikuchi, Hidekatsu Wakizaka, Ming-Rong Zhang: A (11)C-labeled 1,4-dihydroquinoline derivative as a potential PET tracer for imaging of redox status in mouse brain, *Journal of cerebral blood flow and metabolism : official journal of the International Society of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 35, 1930 - 1936, 2015-06.
14. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Hidekatsu Wakizaka, Tomoyuki Ohya, Nobuki Nengaki, Masanao Ogawa, Yoko Ikoma, Akiko Hatori, Lin Xie, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Improved Visualization and Specific Binding for Metabotropic Glutamate Receptor Subtype 1 (mGluR1) Using [11C]ITMM with Ultra-High Specific Activity in Small-Animal PET, *PloS one*, 10(6), e0130006, 2015-06.
15. Anjani Tiwari, Bin Ji, Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Rui Luo, Yoko Shimoda, Katsushi Kumata, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Jun Maeda, Makoto Higuchi, Feng Wang, Ming-Rong Zhang: [(18)F]FEBMP: Positron Emission Tomography Imaging of TSPO in a Model of Neuroinflammation in Rats, and in vitro Autoradiograms of the Human Brain, *Theranostics*, 5(9), 961 - 969, 2015-05.

#### <Proceedings等>

1. Masayuki Hanyu, Sugyou Aya, Tsuji Atsushi, Kawamura Kazunori, Saga Tsuneo, Ming-Rong Zhang, Fukumura Toshimitsu : Preliminary PET Study of Carbon-11 Labeled RGD Peptide by Using Carbon-11 Formaldehyde, *PEPTIDE SCIENCE* 2015, , 663 - 668, 2016-03.

#### <学会及び研究会口頭発表等>

1. 永津 弘太郎: 国立研究施設が果たす RI 製造の役目 : 捉え方及び製造能力について, ELPH 研究会, 東北大学, 2016-02-08.
2. 張 明榮: P E T化学 ISRS2015 報告その 1 脳神経 20, PET 化学ワークショップ, 神戸, 2016-02-06.
3. 藤永 雅之: P E T化学 ISRS2015 報告 その 1 [18 F] 標識法 標識法 20, PET 化学ワークショップ, 神戸, 2016-02-06.
4. 永津 弘太郎: PET 化学 ISRS2015 報告その 1 金属核種 20, PET 化学ワークショップ, 神戸, 2016-02-06.
5. 永津 弘太郎: 第 10 回画像診断セミナー, 放射線医学総合研究所, 2016-02-02.
6. 河村 和紀: 第 10 回画像診断セミナー, 放射線医学総合研究所, 2016-02-01.
7. Kotaro Nagatsu, Katsuyuki Minegishi, Hisashi Suzuki, Tomoyuki Ohya, Masami Fukada, Masayuki Hanyu, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: PRODUCTION OF NON-CONVENTIONAL RADIONUCLIDES WITH EMPHASIS ON TARGETRY SYSTEM DEVELOPMENT, Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.
8. Hideki Ishii, Katsuyuki Minegishi, Kotaro Nagatsu, Ming-Rong Zhang: Pd(0)-MEDIATED

[11C]CARBOXYLATION OF BORONIC ACID ESTERS WITH [11C]CARBON MONOXIDE, Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.

9. 永津 弘太郎, 峯岸 克行, 張 明榮: 標的アイソトープ治療用 Re-186 の製造検討, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-06.
10. 古塚 賢士, 河村 和紀, 熊田 勝志, 橋本 裕輝, 潮見 聡, 藤代 智也, 渡辺 竜二, 武井 誠, 山崎 友照, 由井 譲二, 謝 琳, 張 一鼎, 羽鳥 晶子, 張 明榮: 技術移転を考慮した TSPO イメージング用 PET プローブ[18F]FEDAC の製造, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
11. 橋本 裕輝, 狩谷 香, 古塚 賢士, 伊藤 岳人, 加藤 孝一, 河村 和紀, 張 明榮: 2-Amino-3-11C-isobutyric acid 分析法の検討, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
12. 下田 陽子, 藤永 雅之, 山崎 友照, 熊田 勝志, 由井 譲二, 脇坂 秀克, 羽鳥 晶子, 謝 琳, 栗原 雄祐, 河村 和紀, 張 明榮: 代謝型グルタミン酸受容体 5 を標的とした新規 PET プローブの開発, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
13. 破入 正行, 須堯 綾, 辻 厚至, 河村 和紀, 張 明榮, 福村 利光: 炭素 11 標識した RGD ペプチド誘導体の合成と評価, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
14. 藤永 雅之, 山崎 友照, 由井 譲二, 謝 琳, 念垣 信樹, 羽鳥 晶子, 熊田 勝志, 下田 陽子, 河村 和紀, 張 明榮: 代謝型グルタミン酸受容体 4 の新規イメージング剤[11C]ADX88178 の合成開発と評価, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
15. 河村 和紀, 下田 陽子, 由井 譲二, 張 一鼎, 山崎 友照, 脇坂 秀克, 藤永 雅之, 熊田 勝志, 小川 政直, 張 明榮: イミダゾリン I2 受容体選択的 PET 用リガンド[11C]BU99008 の超高比放射能化による有用性検討, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
16. 山崎 友照, 藤永 雅之, 由井 譲二, 脇坂 秀克, 河村 和紀, 念垣 信樹, 潮見 聡, 張 明榮: パーキンソン病モデルラットにおけるグループ I 代謝型グルタミン酸受容体を標的とした PET イメージング, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
17. 張 明榮: Molecular probe and drug discovery, 2015 seminar in biomarker and theranostics of urologic cancer, Nanjing First Hospital, Nanjing Medical University, 2015-10-18.
18. 河村 和紀: 学会製造施設認証取得に向けた施設の改善報告, PET サマーセミナー2015in 東京ベイ, 舞浜, 2015-09-05.
19. Lin Xie, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Yoko Shimoda, Akiko Hatori, Katsushi Kumata, Yiding Zhang, Nobuki Nengaki, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Developing 4-iodo-N-[4-[6-(isopropylamino)pyrimidin-4-yl]-1,3-thiazol-2-yl]-N- 11C-methylbenzamide for imaging of metabotropic glutamate 1 receptor in melanoma, SNMMI 2015 Annual Meeting, Baltimore, 2015-06-10.
20. Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Akiko Hatori, Katsushi Kumata, Yoko Shimoda, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Synthesis of [11C]ADX88178 via C-[11C]methylation with [11C]CH3I as a PET ligand for imaging of the metabotropic glutamate 4 receptor, 21st International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Columbia, 2015-05-31.
21. Hideki Ishii, Katsuyuki Minegishi, Kotaro Nagatsu, Ming-Rong Zhang: Pd(0)-mediated [11C]carbonylation of boronic acid pinacol esters with [11C]carbon monoxide and the facile conversion of [carbonyl-11C]esters to [carbonyl-11C]amides, 21st International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Columbia, 2015-05-29.
22. 張 明榮: 放医研について, 分子認識研究プログラム研究成果, Asian Nuclear Medicine Academic

Forum of 2015, 上海, 2015-05-15.

23. 永津 弘太郎, 峯岸 克行, 鈴木 寿, 深田 正美, 大矢 智幸, 破入 正行, 河村 和紀, 張 明榮: 加速器による診断・治療用放射性核種製造技術の確立, 放射線医学総合研究所第3期中期計画成果発表会, 千葉市稲毛区, 2016-01-26.
24. 藤永 雅之, 山崎 友照, 由井 譲二, 熊田 勝志, 下田 陽子, 謝 琳, 羽鳥 晶子, 小川 政直, 河村 和紀, 張 明榮: 臨床有用なPETイメージング剤の開発と応用, 放射線医学総合研究所第3期中期計画成果発表会, 千葉市稲毛区, 2016-01-26.
25. 河村 和紀: 日本核医学会 GMP に準拠した PET 薬剤の標準化製造と製造技術の普及, 放射線医学総合研究所第3期中期計画成果発表会, 千葉市稲毛区, 2016-01-26.
26. Masayuki Hanyu, Aya Sugyou, Atsushi Tsuji, Kazunori Kawamura, Tsuneo Saga, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura: Preliminary PET Study of Carbon-11 Labeled RGD Peptide by Using Carbon-11 Formaldehyde, 第52回ペプチド討論会, 日本ペプチド学会, 平塚, 2015-11-17.
27. Masayuki Hanyu, Aya Sugyou, Atsushi Tsuji, Kazunori Kawamura, Tsuneo Saga, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura: Carbon-11 Formaldehyde: Development of radiolabeling technique for carbon-11 labeled peptides, Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.
28. Yoko Shimoda, Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Masanao Ogawa, Kurihara Yusuke, Nobuki Nengaki, Katsushi Kumata, Joji Yui, Akiko Hatori, Lin Xie, Yiding Zhang, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: DEVELOPMENTS OF NEW PET LIGANDS BASED ON 3-[5-(PYRIDINE-2-YL)-2H-TETRAZOL-2-YL]BENZONITRILE FOR METABOTROPIC GLUTAMATE RECEPTOR 5 (mGluR5) IMAGING, Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.
29. Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Nobuki Nengaki, Masanao Ogawa, Katsushi Kumata, Yoko Shimoda, Joji Yui, Lin Xie, Yiding Zhang, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis of [11C]ADX88178 via direct [11C]methylation as a novel radioligand for imaging of metabotropic glutamate receptor subtype 4, Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.
30. Lin Xie, Jun Maeda, Katsushi Kumata, Joji Yui, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Nobuki Nengaki, Hidekatsu Wakizaka, Masayuki Fujinaga, Ming-Rong Zhang: Development of 1-N-[11C]-Methyl-L- and -D-Tryptophan for Pharmacokinetic Imaging of the Immune Checkpoint Inhibitor 1-Methyl-Tryptophan, Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.
31. Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Joji Yui, Hidekatsu Wakizaka, Tomoyuki Ohya, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: SMALL-ANIMAL PET STUDY: [11C]ITMM WITH ULTRA-HIGH SPECIFIC ACTIVITY IMPROVED AVAILABILITY FOR METABOTROPIC GLUTAMATE RECEPTOR SUBTYPE 1 (mGluR1), Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.
32. Hiroki Hashimoto, Kazunori Kawamura, Makoto Takei, Nobuyuki Igarashi, Tomoya Fujishiro, Satoshi Shiomi, Watanabe Ryuji, Masatoshi Muto, Kenji Furutsuka, Takehito Ito, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Kazuyoshi Nemoto, Yasuyuki Kimura, Makoto Higuchi, Ming-Rong Zhang: IN VIVO, IN VITRO, AND IN SILICO EVALUATION OF RADIOMETABOLITE OF [11C]PBB3 AS A CLINICALLY USEFUL PET PROBE FOR IMAGING OF TAU PATHOLOGY, Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.
33. Toshimitsu Okamura, Maki Okada, Tatsuya Kikuchi, Hidekatsu Wakizaka, Ming-Rong Zhang:

Development of a PET tracer for imaging of redox status in the brain, Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.

34. Maki Okada, Tatsuya Kikuchi, Toshimitsu Okamura, Atsushi Tsuji, Hidekatsu Wakizaka, Ming-Rong Zhang, Koichi Kato: Quantitative PET for monitoring blood-brain barrier opening induced by focused ultrasound by 2-amino-[3-11C]isobutyric acid, Ninth Japan-China Joint Seminar on Radiopharmaceutical Chemistry, Chiba, 2015-11-09.
35. 古塚 賢士, 河村 和紀, 橋本 裕輝, 武井 誠, 潮見 聡, 藤代 智也, 金子 いづみ, 岩隈 佳寿子, 脇 厚生, 藤林 康久, 張 明栄: 学会 GMP に準拠した 11C 標識薬剤製造による製造及び品質管理技術の向上, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-06.
36. 橋本 裕輝, 脇 厚生, 河村 和紀, 鈴木 寿, 岩隈 佳寿子, 金子 いづみ, 藤林 康久, 張 明栄: 学会 製造基準適合のための無菌アイソレーターの導入について, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-06.
37. 武井 誠, 河村 和紀, 橋本 裕輝, 加藤 孝一, 武藤 正敏, 潮見 聡, 藤代 智也, 古塚 賢士, 脇 厚生, 藤林 康久, 張 明栄: 日本核医学会 GMP 準拠を目指した 2-Amino-3-11C-isobutyric acid 製造法の確立, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-06.
38. 熊田 勝志, 藤永 雅之, 下田 陽子, 由井 譲二, 張 一鼎, 小川 政直, 張 明栄: 新規 mGlu2 受容体選択的 PET リガンドの標識合成, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
39. 羽鳥 晶子, 由井 譲二, 熊田 勝志, 張 一鼎, 脇坂 秀克, 武井 誠, 張 明栄: 糖尿病モデル ZDF ラットにおける褐色脂肪の[18F]FEDAC-PET イメージング, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
40. 大矢 智幸, 鈴木 寿, 深田 正美, 永津 弘太郎, 峯岸 克行, 破入 正行, 張 明栄: 共沈を用いた  $^{67}\text{Cu}$  製造法についての検討, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
41. 鈴木 寿, 深田 正美, 大矢 智幸, 永津 弘太郎, 峯岸 克行, 破入 正行, 山崎 慎之介, 張 明栄: 臨床利用を目的とした  $^{64}\text{Cu}$  の大量製造と品質評価, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
42. 河村 和紀, 橋本 裕輝, 狩谷 香, 伊藤 岳人, 古塚 賢士, 脇 厚生, 藤林 康久, 張 明栄: [18F]FDG 注射液の pH の相違による品質検査への影響, 第 55 回日本核医学会学術総会, 新宿, 2015-11-05.
43. Kazunori Kawamura: Efficient synthesis of [18F]FEDAC, and evaluation of non-clinical safety and stability tests for clinical application, Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine 2015, Hamburg, 2015-10-11.
44. Kazunori Kawamura: PET imaging of a feeding center using [11C]BU99008 with ultra-high specific activity, Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine, Hamburg, 2015-10-11.
45. Akiko Hatori, Joji Yui, Lin Xie, Katsushi Kumata, Masanao Ogawa, Ming-Rong Zhang: PET imaging of liver fibrosis in rats with 18F-FEDAC, a radiotracer for translocator protein (18 kDa), SNMMI 2015 Annual Meeting, Baltimore, 2015-06-07.
46. Masayuki Fujinaga, Masanao Ogawa, Katsushi Kumata, Yoko Shimoda, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Development of efficient construction of [11C]carbamate moiety using [11C]COCl<sub>2</sub>, 21st International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Columbia, 2015-05-30.
47. Kotaro Nagatsu, Katsuyuki Minegishi, Ming-Rong Zhang: A study on remote production of  $^{43}\text{Sc}$  from natCaO target via the natCa( $\alpha, x$ )-reaction, 21st International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Columbia, 2015-05-30.

48. Kotaro Nagatsu, Katsuyuki Minegishi, Ming-Rong Zhang: A feasibility study on  $^{68}\text{Ge}$  production from elemental natGa by in-situ extraction process, 21st International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Columbia, 2015-05-30.
49. Kazunori Kawamura, Katsushi Kumata, Kenji Furutsuka, Satoshi Shiomi, Tomoya Fujishiro, Watanabe Ryuji, Makoto Takei, Hiroki Hashimoto, Takehito Ito, Masanao Ogawa, Nobuyuki Igarashi, Masatoshi Muto, Nobuki Nengaki, Kazuyoshi Nemoto, Ming-Rong Zhang: One-pot radiosynthesis of  $^{18}\text{F}$ FEDAC as a clinically applicable PET ligand for imaging TSPO, 21st International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Columbia, 2015-05-28.
50. Katsushi Kumata, Lin Xie, Joji Yui, Akiko Hatori, Yiding Zhang, Nobuki Nengaki, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Yoko Shimoda, Jun Maeda, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis and pharmacokinetic comparison of 1-N-[ $^{11}\text{C}$ methyl]-L- and -D-tryptophan, 21st International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Columbia, 2015-05-28.
51. Anjani Tiwari, Masayuki Fujinaga, Katsushi Kumata, Yoko Shimoda, Joji Yui, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Akiko Hatori, Masanao Ogawa, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of two  $^{18}\text{F}$ -labeled novel acetamidobenzoxazolone radioligands for PET imaging of translocator protein (18 kDa), 21st International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Columbia, 2015-05-27.
52. Kazunori Kawamura, Yoko Shimoda, Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Akiko Hatori, Lin Xie, Yiding Zhang, Katsushi Kumata, Masanao Ogawa, Kurihara Yusuke, Nobuki Nengaki, Hidekatsu Wakizaka, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis and evaluation of [ $^{11}\text{C}$ ]BU99008 with ultra-high specific activity as a PET ligand for imaging I2-imidazoline receptors, 21st International Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, Columbia, 2015-05-27.

#### <その他：執筆、プレス発表、特許登録>

1. 永津 弘太郎: 医療における診断応用, 日本加速器学会誌, 2016-01.
2. 永津 弘太郎: PET用放射性薬剤開発の最新動向, 月刊インナービジョン, 2015-11.
3. 永津 弘太郎: 高濃縮ウランを利用しない加速器による  $\text{Mo-99}/\text{Tc-99m}$  の代替製法, 核データニュース, 2015-10.
4. 永津 弘太郎: 加速器による核医学検査用  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  の安定供給に向けて, 原子核研究, 2015-09.
5. 山崎 友照: パーキンソン病の進行に伴い変化する新しいバイオマーカーを発見 - 異常タンパクの蓄積が引き起こす脳神経疾患の病態背景の解明に期待 -, 投げ込み, HP 掲載, 2016-01-29.
6. 張 明榮, 山崎 友照, 河村 和紀, 藤永 雅之: 乳癌耐性蛋白質に選択的な核医学診断薬, 特許番号: 5807856, 2015-09-18.

### 4—1. 陽子線を用いた治療・診断時の動的イメージング技術の基礎開発

#### <原著論文等>

1. T. Taya et al.: First demonstration of real-time gamma imaging by using a handheld Compton camera for particle therapy, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, submitted (2016).

#### <学会及び研究会口頭発表等>

1. 小出 絢子: Evaluation of 1D-profile of wideband prompt gamma-ray emission and optimization toward on-line monitor for the future proton therapy, 日本医学物理学会, パシフィコ横浜, 2016年4月14日 - 17日.

2. 増田 孝充: 高精度陽子線治療に向けた陽電子放出核種生成断面積の決定, 応用物理学会, 東京工業大学, 2016年3月19日-22日.
3. T. Taya: First demonstration of real-time gamma imaging by using a handheld Compton camera for particle therapy, 10th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Xi'an, China, 2015, Sep. 25-29.
4. 多屋 隆紀: Verification of real-time gamma imaging by using a handheld Compton camera for particle therapy, 日本医学物理学会, 北海道大学, 2015年9月18日-20日.

#### <その他：学位論文>

1. 高部 美帆: 高精度陽子線治療に向けたCCDカメラ陽子線CTシステムの開発, 早稲田大学理工学術院・先進理工学部, 2016年3月.
2. 小出 絢子: 陽子線治療オンラインモニタに向けた即発ガンマ線の1次元分布評価, 稲田大学理工学術院・先進理工学部, 2016年3月.
3. 増田 孝充: 陽電子放出核種を用いた陽子線線量分布の高精度推定法, 早稲田大学理工学術院・先進理工学部, 2016年3月.

### 4—3. 核破碎片生成二重微分断面積の測定

#### <原著論文等>

1. S. Tanaka, T. Nishio, K. Matsushita, M. Tsuneda, S. Kabuki, M. Uesaka: Development of proton CT imaging system using plastic scintillator and CCD camera, *Phys. Med. Biol.* 61, 4156-4167 (2016).
2. K. Matsushita, T. Nishio, S. Tanaka, M. Tsuneda, A. Sugiura, K. Ieki: Measurement of proton-induced target fragmentation cross-section in carbon, *Nucl. Phys. A* 946, 104-116 (2016).

#### <Proceedings等>

1. T. Nishio, T. Okamoto, S. Kabuki, T. Tanimori, T. Aso, S. Nakamura, M. Hiraoka, K. Matsushita, A. Miyatake: Development of Tumor Response Observation System for Dose-volume delivery Guided Particle Therapy: TROS-DGPT, *Jpn. J. Med. Phys. Proc.*, 35 Supple. 3, 92 (2015).
2. S. Tanaka, T. Nishio, K. Matsushita, M. Tsuneda, S. Kabuki, A. Sugiura, M. Uesaka: Improvement of Proton CT Imaging System, *Jpn. J. Med. Phys. Proc.*, 35 Supple. 3, 93 (2015).
3. K. Matsushita, T. Nishio, S. Tanaka, M. Tsuneda, A. Sugiura, K. Ieki: Measurement of the production cross-section in target nuclear fragmentation reactions for proton therapy, *Jpn. J. Med. Phys. Proc.*, 35 Supple. 3, 137 (2015).

#### <学会及び研究会口頭発表等>

1. T. Nishio, T. Okamoto, S. Kabuki, T. Tanimori, T. Aso, S. Nakamura, M. Hiraoka, K. Matsushita, A. Nishio-Miyatake: Research and development of tumor response observation system for dose-volume delivery guided particle therapy (TROS-DGPT), European Congress of Radiology 2016, Vienna, March 2 – 6, 2016.
2. Nishio-Miyatake, T. Nishio: Development of activity pencil beam algorithm using measured distribution data of positron emitter nuclei generated by target nuclear fragmentation reaction for innovative proton therapy, European Congress of Radiology 2016, Vienna, March 2 – 6, 2016.
3. S. Tanaka, T. Nishio, K. Matsushita, M. Tsuneda, S. Kabuki, M. Uesaka: Development of proton CT imaging system, European Congress of Radiology 2016, Vienna, March 2 – 6, 2016.
4. T. Nishio, T. Okamoto, S. Kabuki, T. Tanimori, T. Aso, S. Nakamura, M. Hiraoka, A. Miyatake: Research

and development of dose delivered tumor damage monitoring system in an innovative proton therapy technology, 15 th International Congress of Radiation Research, Kyoto, May 25 – 29, 2015.

5. K. Matsushita, T. Nishio, S. Tanaka, S. Kabuki, M. Tsuneda, A. Sugiura, K. Ieki: Measurement of Reaction Cross Section in the Target Nuclear Fragmentation Reactions Required for Proton Therapy, 15 th International Congress of Radiation Research, Kyoto, May 25 – 29, 2015.
6. S. Tanaka, T. Nishio, K. Matsushita, M. Tsuneda, Y. Aono, S. Kabuki, A. Sugiura, M. Uesaka: Study on Proton CT for Evaluation of Water Equivalent Length Factor, 15 th International Congress of Radiation Research, Kyoto, May 25 – 29, 2015.
7. S. Kabuki, S. Hirai, K. Iijima, S. Nakamura, A. Takada, Y. Matsuoka, S. Komura, M. Oda, T. Kishimoto, S. Miyamoto, T. Takemura, H. Kubo, E. Kunieda, T. Tanimori, T. Nishio: Basic Study on Prompt Gamma-ray Imaging with Electron-tracking Compton Camera for Medical Use, 15 th International Congress of Radiation Research, Kyoto, May 25 – 29, 2015.
8. 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, 松下 慶一郎, 宮武 彩: 革新的Adaptive Radiation Therapyを目指した粒子線治療における腫瘍線量応答性観測システムの開発, 日本放射線腫瘍学会第29回日本高精度放射線外部照射部会学術大会, 東京, 2016年2月27日.
9. 田中 創大, 西尾 禎治, 松下 慶一郎, 恒田 雅人, 株木 重人, 上坂 充: 陽子線CT画像取得法の確立, 日本放射線腫瘍学会第29回日本高精度放射線外部照射部会学術大会, 東京, 2016年2月27日.
10. 西尾禎治: 粒子線治療における照射領域可視化・腫瘍線量応答性の研究. Geant4医学応用研究会, 富山, 2015年12月19日.
11. 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, 松下 慶一郎, 宮武 彩: 粒子線治療における腫瘍線量応答性観測システムの開発, 日本医学物理学会第110回学術大会, 札幌, 2015年9月19–20日.
12. 田中 創大, 西尾 禎治, 松下 慶一郎, 恒田 雅人, 株木 重人, 杉浦 彰則, 上坂 充: 陽子線CT画像取得システムの向上, 日本医学物理学会第110回学術大会, 札幌, 2015年9月19–20日.
13. 松下 慶一郎, 西尾 禎治, 田中 創大, 恒田 雅人, 杉浦 彰則, 家城 和夫: 陽子線治療のための標的原子核破碎反応における陽電子放出核生成断面積の測定, 日本医学物理学会第110回学術大会, 札幌, 2015年9月19–20日.
14. 山下 諄, 飯島 康太郎, 平井 早紀, 株木 重人, 高田 惇史, 窪 秀利, 谷森 達, 西尾 禎治, 国枝 悦夫: 電子飛跡検出型コンプトンカメラに用いるガス検出器の基礎的性能評価, 日本医学物理学会第110回学術大会, 札幌, 2015年9月19–20日.
15. 西尾禎治: 核医学画像情報を活用した新たな粒子線治療法の研究, 指名講演, 第54回千葉核医学研究会, 千葉, 2015年6月20日.
16. S. Hirai, K. Iijima, S. Kabuki, A. Takada, S. Komura, H. Kubo, T. Tanimori, T. Okamoto, T. Nishio, E. Kunieda: Performance evaluation of GSO pixel scintillator array for an Electron-tracking Compton camera, The 109th Scientific Meeting of JSMP, Yokohama, April 16-19, 2015.
17. K. Iijima, S. Hirai, S. Kabuki, A. Takada, H. Kubo, T. Tanimori, T. Okamoto, T. Nishio, E. Kunieda: A basic study of an electron-tracking algorithm for an electron-tracking Compton camera, The 109th Scientific Meeting of JSMP, Yokohama, April 16-19, 2015.

#### <その他：学位論文>

1. 松下 慶一郎: 陽子線がん治療の実照射線量評価のための体内中 $^{12}\text{C}$ 核及び $^{16}\text{O}$ 核の標的原子核破碎



反応の研究, 立教大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程後期課程博士論文, 2016年3月.

#### 4—4. 最前方と最後方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定

##### <Proceedings等>

1. Yusuke Uozumi, T. Hashiguchi, H. Yoneshige, S. Sonoda, Y. Koba: Small-angle measurements of proton-carbon nuclear reaction for secondary dose estimation, Proceedings on SCIS & ISIS 2014 Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, Pages: 1017-1020, DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2014.7044907, 2015年7月.

##### <学会及び研究会口頭発表等>

1. 米重 英成, 魚住 裕介, 園田 暁史: 低エネルギー領域における陽子入射陽子生成二重微分断面積の測定, 第28回バイオメディカル・ファジィ・システム学会年次大会 (BMFSA2015), 東海大学熊本キャンパス, 2015年11月.

##### <その他: 学位論文>

1. 米重 英成: 後方角における(p,p'x)反応二重微分断面積に関する研究, 九州大学大学院工学府, 修士論文, 2016年2月.

#### 5—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, et al.: Development of Active Space Radiation Detector, A-DREAMS-2 at NIRS, 20th Workshops on Radiation Monitoring for the International Space Station, Sep. 11th, 2015, Cologne, German.

#### 5—2. 固体飛跡検出器中に形成される重イオントラックの構造分析

##### <原著論文等>

1. Tamon Kusumoto, Yutaka Mori, Masato Kanasaki, Ryunosuke Ikenaga, Keiji Oda, Satoshi Kodaira, Hisashi Kitamura, Remi Barillon, Tomoya Yamuuchi: Radiation chemical yields for the losses of typical functional groups in PADC films for high energy protons registered as unetchable tracks, Radiation Measurements, 87 (2016) 35-42.

##### <学会及び研究会口頭発表等>

1. 楠本 多聞, 森 豊, 金崎 真聡, 小田 啓二, 小平 聡, 北村 尚, 誉田 義英, 藤乗 幸子, 山内 知也: PADC検出器中重イオントラック形成機構における低エネルギー電子の役割, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015.9.
2. 楠本 多聞, 森 豊, 金崎 真聡, 小田 啓二, 小平 聡, 北村 尚, 山内 知也: PADC検出器中高エネルギープロトントラックの構造分析, 第30回固体飛跡検出器研究会, 福井大学敦賀キャンパス, 2016.3.

#### 5—3. 超小型アクティブ宇宙放射線線量計の開発

##### <学会及び研究会口頭発表等>

1. Aiko Nagamatsu: JAXA D-Space and PADLES for MATROSHKA-III, MATROSHKA-III 3rd TECHNICAL INTERFACE MeetING @ DLR, Institute of Aerospace Medicine, Building 24, 7, 11 September 2015.

## <その他>

1. 寺沢和洋、他: 超小型アクティブ宇宙放射線線量計の開発と遮へい効果の実測, 平成27年度放射線医学総合研究所・重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書, 平成28年2月提出, 印刷中.

## 5—4. 陽子線ビームにおける蛍光ガラス線量計及び 熱ルミネセンス線量計(AI203)のLET依存性に関する研究

### <学会及び研究会口頭発表等>

1. W Chang, T Katayose, M Hariu, K Yasui, Y Koba, H Saitoh: Absorbed dose measurement using radiophotoluminescent glass dosimeter in therapeutic proton beam, AAPM 2016 Annual Meeting, Washington, 2016-07-31~08-04.

## 6—1. 陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果

### <その他: 執筆>

1. 窪田 宜夫, 平山 亮一, 藤井 義大, 大西 健, 浜田 信行, 真里 谷靖, 松本 孔貴: 新版 放射線生物学, 医療科学社, 3-13, 2015.

## 6—3. 陽子線の生物効果の研究

### <原著論文等>

1. Maeda J, Cartwright IM, Haskins JS, Fujii Y, Fujisawa H, Hirakawa H, Uesaka M, Kitamura H, Fujimori A, Thamm DH, Kato TA: Relative biological effectiveness in canine osteosarcoma cells irradiated with accelerated charged particles, *Oncology Letters* In Press 2016.
2. Maeda J, Yurkon CR, Fujii Y, Fujisawa H, Kato S, Brents CA, Uesaka M, Fujimori A, Kitamura H, Kato TA: Solution radioactivated by hadron radiation can increase sister chromatid exchange, *PLOS ONE*, 2015 Dec 14;10(12):e0144619. doi: 10.1371/journal.pone.0144619. eCollection 2015.
3. McMillan DD, Maeda J, Bell JJ, Genet MD, Phoonswadi G, Mann KA, Kraft SL, Kitamura H, Fujimori A, Yoshii Y, Furukawa T, Fujibayashi Y, Kato TA: Validation of <sup>64</sup>Cu-ATSM damaging DNA via high-LET Auger electron emission. *J Radiat Res.* 2015 Sep;56(5):784-91. doi: 10.1093/jrr/trv042. Epub 2015 Aug 6.
4. Maeda J, Fujii Y, Fujisawa H, Hirakawa H, Cartwright IM, Uesaka M, Kitamura H, Fujimori A, Kato TA: The hyperthermia induced radiosensitization in CHO wild type, NHEJ and HR repair mutant after proton and carbon-ion exposure, *Oncology Letters*, 2015 10: 2828-2834.
5. Cartwright IM, Bell JJ, Maeda J, Genet MD, Fujii Y, Fujimori A, Kitamura H, Kamada T, Chen DJ, Kato TA: Effects of targeted phosphorylation site mutations in DNA-PKcs phosphorylation domain on low and high LET radiation sensitivity, *Oncology Letters*, 2015, Apr, 9(4):1621-1627. Epub 2015 Feb 17.

## 研究成果一覧(分子プローブを用いた研究開発)

平成 27 年度に分子プローブを用いて行われた様々な研究開発の成果をここにまとめる。本覧の掲載に当たり、脳機能イメージング研究部の皆様、分子イメージング診断治療研究部の皆様、イメージング物理研究チームの皆様から研究成果を提供して頂きました。

### 1. 脳イメージング研究

#### <原著論文等>

1. Yasuyuki Kimura, Hironobu Endo, Masanori Ichise, Hitoshi Shimada, Chie Seki, Yoko Ikoma, Hitoshi Shinotoh, Makiko Yamada, Makoto Higuchi, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara: A new method to quantify tau pathologies with (11)C-PBB3 PET using reference tissue voxels extracted from brain cortical gray matter, *EJNMMI research*, 6(1), 24, 2016-03, DOI:10.1186/s13550-016-0182-y.
2. Yasuyuki Kimura, Chie Seki, Yoko Ikoma, Masanori Ichise, Kazunori Kawamura, Keisuke Takahata, Sho Moriguchi, Tomohisa Nagashima, Tatsuya Ishii, Soichiro Kitamura, Fumitoshi Niwa, Hironobu Endo, Makiko Yamada, Makoto Higuchi, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara: [(11)C]TASP457, a novel PET ligand for histamine H3 receptors in human brain, *European journal of nuclear medicine and molecular imaging*, 43(9), 1653 - 1663, 2016-08, DOI:10.1007/s00259-016-3332-6.
3. Kazumi Koga, Jun Maeda, Masaki Tokunaga, Masayuki Hanyu, Kazunori Kawamura, Mari Ohmichi, Toshio Nakamura, Yuji Nagai, Chie Seki, Yasuyuki Kimura, Takafumi Minamimoto, Ming-Rong Zhang, Toshimitsu Fukumura, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi: Development of TASP0410457 (TASP457), a novel dihydroquinolinone derivative as a PET radioligand for central histamine H3 receptors, *EJNMMI Research*, 6(1), 11, 2016-02, DOI:10.1186/s13550-016-0170-2.
4. Hiroyuki Takuwa, Jun Maeda, Yoko Ikoma, Masaki Tokunaga, Hidekatsu Wakizaka, Shouko Uchida, Iwao Kanno, Junko Taniguchi, Hiroshi Ito, Makoto Higuchi: [(11)C]Raclopride binding in the striatum of minimally restrained and free-walking awake mice in a positron emission tomography study, *Synapse (New York, N.Y.)*, 69(12), 600 - 606, 2015-12, DOI:10.1002/syn.21864.
5. Hitoshi Shimada, Shigeki Hirano, Hitoshi Shinotoh, Toshiaki Irie, Tetsuya Suhara :PET measurement of brain acetylcholinesterase activities in cortex and subcortical areas, *International journal of geriatric psychiatry*, , 2015-11, DOI:10.1002/gps.4385.
6. Lin Xie, Jun Maeda, Katsushi Kumata, Joji Yui, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Nobuki Nengaki, Hidekatsu Wakizaka, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Yoko Shimoda, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara, Feng Wang, Ming-Rong Zhang: Development of 1-N-(11)C-Methyl-1- and -d-Tryptophan for pharmacokinetic imaging of the immune checkpoint inhibitor 1-Methyl-Tryptophan, *Scientific Reports (Online Only URL: <http://www.nature.com/srep/index.html>)*, 5, 16417, 2015-11, DOI:doi:10.1038/srep16417.
7. Norihito Oi, Masaki Tokunaga, Michiyuki Suzuki, Yuji Nagai, Yosuke Nakatani, Noboru Yamamoto, Jun Maeda, Takafumi Minamimoto, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi: Development of Novel PET Probes for Central 2-Amino-3-(3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazolyl)propionic acid (AMPA) Receptors, *Journal of Medicinal*

Chemistry Manuscript, 58(21), 8444 - 8462, 2015-11, DOI:10.1021/acs.jmedchem.5b00712.

8. Hiroki Hashimoto, Kazunori Kawamura, Makoto Takei, Nobuyuki Igarashi, Tomoya Fujishiro, Satoshi Shiomi, Watanabe Ryuji, Masatoshi Muto, Kenji Furutsuka, Takehito Ito, Tomoteru Yamasaki, Joji Yui, Kazuyoshi Nemoto, Yasuyuki Kimura, Makoto Higuchi, Ming-Rong Zhang: Identification of a major radiometabolite of [<sup>11</sup>C]PBB3, Nuclear Medicine and Biology, 42(12), 905 - 910, 2015-12, DOI:doi:10.1016/j.nucmedbio.2015.08.006.\*
9. Yoko Ikoma, Takeshi Sasaki, Yasuyuki Kimura, Chie Seki, Yoshiro Okubo, Tetsuya Suhara, Hiroshi Ito: Evaluation of semi-quantitative method for quantification of dopamine transporter in human PET study with 18F-FE-PE2I, Annals of Nuclear Medicine, 29(8), 697 - 708, 2015-10, DOI:10.1007/s12149-015-0993-3.
10. Bin Ji, Chun-Jen Chen, Kazunori Bando, Hiroki Ashino, Hideaki Shiraishi, Hiroaki Sano, Hiroyuki Kasahara, Takao Minamizawa, Kazutaka Yamada, Maiko Ono, Ming-Rong Zhang, Chie Seki, Lars Farde, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi: Distinct Binding of Amyloid Imaging Ligands to Unique Amyloid- $\beta$  Deposited in the Presubiculum of Alzheimer's Disease, Journal of Neurochemistry, 135(5), 859 - 866, 2015-12.
11. Yasuyuki Kimura, Masanori Ichise, Hiroshi Ito, Hitoshi Shimada, Yoko Ikoma, Chie Seki, Harumasa Takano, Soichiro Kitamura, Hitoshi Shinotoh, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang, Naruhiko Sahara, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi: PET Quantification of Tau Pathology in Human Brain with <sup>11</sup>C-PBB3, Journal of nuclear medicine : official publication, Society of Nuclear Medicine, 56(9), 1359 - 1365, 2015-09, DOI:10.2967/jnumed.115.160127.
12. Hitoshi Shimada, Hitoshi Shinotoh, Tsuneyoshi Ota, Koichi Sato, Makiko Yamada, Kiyoshi Fukushi, Toshiaki Irie, Ming-Rong Zhang, Makoto Higuchi, Satoshi Kuwabara, Tetsuya Suhara, Shigeki Hirano, et al.: Dementia with Lewy bodies can be well-differentiated from Alzheimer's disease by measurement of brain acetylcholinesterase activity - A [<sup>11</sup>C]MP4A PET study, International Journal of Geriatric Psychiatry, 30(11), 1105 - 1113, 2015-11, DOI:10.1002/gps.4338.
13. Anjani Tiwari, Bin Ji, Joji Yui, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Lin Xie, Rui Luo, Yoko Shimoda, Katsushi Kumata, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Jun Maeda, Makoto Higuchi, Feng Wang, Ming-Rong Zhang: [(18)F]FEBMP: Positron Emission Tomography Imaging of TSPO in a Model of Neuroinflammation in Rats, and in vitro Autoradiograms of the Human Brain, Theranostics, 5(9), 961 - 969, 2015-05.

#### <学会及び研究会口頭発表等>

1. 小野 麻衣子: PETトレーサーPBB3およびT807の各種タウ病変への結合特性比較, 新学術領域研究「脳タンパク質老化と認知症制御」第3回班員会議, 2016-02-13.
2. Hitoshi Shimada, Yasuyuki Kimura, Masanori Ichise, Hiroshi Ito, Hironobu Endo, Keisuke Takahata, Fumitoshi Niwa, Soichiro Kitamura, Shigeki Hirano, Hitoshi Shinotoh, Naruhiko Sahara, Makiko Yamada, Ming-Rong Zhang, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara: Quantification and reference optimization of tau PET imaging with [<sup>11</sup>C] PBB3 in PSP patients, 10th Human Amyloid Imaging, World Events Forum, 2016-01-13.
3. 島田 斉, 須原 哲也, 篠遠 仁: 紀伊ALS/PDC患者の脳内タウ蓄積と臨床症状との関連—陽電子放射断層撮影 (PET) による検討—, 平成27年度「紀伊ALS/PDC 診療ガイドラインの作製と臨床研究の推進」班会議, 三重大学大学院地域イノベーション学研究所, 紀伊神経難病研究センター, 小久保康

昌, 2016-01-09.

4. Makoto Higuchi: Molecular imaging of neurotoxic signaling in neurodegenerative disorders, 「新学術領域研究」脳内環境：恒常性維持機構とその破綻, H27年度冬の班会議, 領域代表：高橋良輔, 2016-01-07.
5. 島田 斉, 篠遠 仁, 遠藤 浩信, 古賀 俊介, 北村 聡一郎, 丹羽 文俊, 石川 愛, 平野 成樹, 木村 泰之, 市瀬 正則, 山田 真希子, 佐原 成彦, 樋口 真人, 須原 哲也: Recent advances in clinical tau PET imaging with [11C]PBB3, 千葉大神経内科教室例会, 千葉大学, 2015-12-12.
6. 木村 泰之, 市瀬 正則, 伊藤 浩, 島田 斉, 生駒 洋子, 関 千江, 高野 晴成, 北村 聡一郎, 篠遠 仁, 須原 哲也, 樋口 真人: 11C-PBB3を用いたタウ病変のPET定量解析, 第55回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2015-11-05.
7. Naruhiko Sahara, Ai Ishikawa, Masaki Tokunaga, Takeharu Minamihisamatsu, Jun Maeda, Masafumi Shimojo, Maiko Ono, Shoko Uchida, Izumi Matsumoto, Hiroyuki Takuwa, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi: Longitudinal In vivo imaging of tau pathology, microglial activation and neuronal loss in a mouse model of tauopathy, Society for Neuroscience 2015 Annual Meeting, 2015-10-20.
8. 佐原 成彦: Utility of tau imaging probe PBB3 in human and mouse brains, 脳タンパク質老化と認知症制御第1回国際シンポジウム, 新学術領域脳タンパク質老化と認知症制御, 2015-10-10.
9. 樋口 真人: 認知症モデルマウス開発とイメージングバイオマーカー開発の相互促進, 第34回日本認知症学会学術集会, 日本認知症学会, 2015-10-04.
10. 小野 麻衣子: Tau PETリガンドとしてのPBB3ならびにT807の結合特性に関する研究, 2015 タウ研究ミーティング, 宮坂知宏 同志社大学 生命医科学部, 2015-09-03.
11. 佐原 成彦: FTDP-17-MAPT 患者の[11C]PBB3-PET画像とタウ病理との相関解析を中心とした研究, 2015 タウ研究ミーティング, 宮坂 知宏 (同志社大学 生命医科学部 医生命システム学科 神経病理学), 2015-09-03.
12. Naruhiko Sahara, Ai Ishikawa, Masaki Tokunaga, Takeharu Minamihisamatsu, Jun Maeda, Maiko Ono, Shoko Uchida, Izumi Matsumoto, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi: Utility of Tau Imaging Probe PBB3 on a Mouse Model of Tauopathy, Alzheimer's Association International Conference 2015, Alzheimer's Association, 2015-07-22.
13. Prita Asih, Bin Ji, Andrew Katsifis, Filomena Mattner, Donatella Caruso, Roberto Melcangi, Makoto Higuchi, Ralph N Martins, Anna Barron: In vivo evaluation of the therapeutic potential of novel Translocator protein (TSPO) ligands for the treatment of Alzheimer's disease, Alzheimer's Association International Conference, Alzheimer's Association, 2015-07-19.
14. 佐原 成彦: 脳イメージングを基軸としたタンパク質老化モデルの治療評価系の開発 マルチモードルイメージングによるタウオパチー病態評価系の開発, 新学術領域研究(研究領域提案型)「脳タンパク質老化と認知症制御」第2回班員会議・リトリート, 新学術領域研究(研究領域提案型)「脳タンパク質老化と認知症制御」, 2015-06-13.
15. 木村 泰之, 市瀬 正則, 生駒 洋子, 島田 斉, 関 千江, 北村 聡一郎, 篠遠 仁, 伊藤 浩, 須原 哲也, 樋口 真人: Parametric visualisation and quantification of tau pathology in human brain using PET with [C-11]PBB3, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging annual meeting 2015, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2015-06-08.
16. Hitoshi Shinotoh, Hitoshi Shimada, Wszolek Zbigniew, Takeshi Ikeuchi, Fumitoshi Niwa, Hironobu Endo,

- Soichiro Kitamura, Shigeki Hirano, Shunsuke Koga, Naruhiko Sahara, Dickson Dennis, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara: Tau accumulation in patients with MAPT gene mutation measured by [11C]PBB3 PET, 第56回日本神経学会学術大会, 日本神経学会, 2015-05-21.
17. 遠藤 浩信, 島田 斉, 篠遠 仁, 丹羽 文俊, 北村 聡一郎, 平野 成樹, 古川 彰吾, 樋口 真人, 須原 哲也: Progressive supranuclear palsy患者における臨床症候と[11C]-PBB3 PET集積の関係, 第56回日本神経学会学術大会, 日本神経学会, 2015-05-21.
  18. 丹羽 文俊, 島田 斉, 篠遠 仁, 遠藤 浩信, 北村 聡一郎, 平野 成樹, 古川 彰吾, 樋口 真人, 須原 哲也: 高血圧症はアルツハイマー型認知症のタウ蓄積に寄与するか? ~PET画像を用いた検討, 第56回日本神経学会学術大会, 日本神経学会, 2015-05-20.
  19. Keisuke Takahata, Hitoshi Shimada, Makoto Higuchi, Hitoshi Shinotoh, Yasuyuki Kimura, Soichiro Kitamura, Hironobu Endo, Fumitoshi Niwa, Sho Moriguchi, Masanori Ichise, Naruhiko Sahara, Masaru Mimura, Motoichiro Kato, Makiko Yamada, Tetsuya Suhara: Imaging of Tau and Amyloid Pathology in Patients with Traumatic Brain Injury: A PET Study Usinig [11C]PBB3 and [11C]PIB, Annual Meeting of Society of Biological Psychiatry, Organization of biological psychiatry, 2015-05-16.
  20. 石川 愛, 古川 彰吾, 平野 成樹, 島田 斉, 篠遠 仁, 佐原 成彦, 樋口 真人, 須原 哲也: タウイメージング用PET製剤[11C]PBB3を用いた\_臨床研究の現状と汎用化体開発の展望, 第1303回千葉医学会例会/第32回神経内科教室例会, 千葉大学神経内科, 2014-12-06.
  21. 南本 敬史: PETイメージングと化学遺伝学的手法の融合によるサル脳科学研究の展開, 平成27年度京都大学霊長類研究所共同利用研究会「霊長類脳科学の新しい展開とゲノム科学との融合」, 京都大学霊長類研究所, 2016-03-16.
  22. Makoto Higuchi, Hitoshi Shimada, Naruhiko Sahara, Tetsuya Suhara: Conformational heterogeneity of tau lesions captured by PET and its clinical significance, 14th International Athens/Springfield Symposium on Advances in Alzheimer Therapy, 14th International Athens/Springfield Symposium, 2016-03-11.
  23. 須原 哲也: 画像でみる脳の老化と認知症の早期診断, 放射線医学総合研究所福島復興支援本部いわき出張所 開設記念講演会, いわき市, 国立研究開発法人放射線医学総合研究所, 2016-02-20.
  24. 樋口 真人: タウイメージングと神経変性 Tau Imaging and Neurodegeneration, 第6回国際放射線神経生物学会大会, 国際放射線神経生物学会, 2016-02-13.
  25. 樋口 真人: Protein imaging focusing on tau and alpha-synuclein, The 15th International Parkinson's Disease Symposium in Takamatsu, International Parkinson's Disease Symposium in Takamatsu, 2016-02-06.
  26. 樋口 真人: Imaging tau: lessons learned relevant to alpha-synuclein imaging, Symposium in Nobel Forum: In vivo molecular imaging of alpha-synuclein, Karolinska Institutet, 2015-12-18.
  27. 佐原 成彦: ヒトならびに動物モデルを用いたタウPETイメージング: 創薬ツールとしての可能性, 北陸認プロFD講演会, 北陸認知症プロフェッショナル医養成プランプロジェクト, 2015-12-15.
  28. 島田 斉: 分子イメージングは認知症克服への道程を描けるか?\_アミロイド&タウPETの最前線, 33回日本神経治療学会, 名古屋大学大学院, 2015-11-26.
  29. 樋口 真人: 認知症イメージングのこれから: 次世代イメージングで何が分かるか, 第4回 東北信神経変性疾患治療研究会, ノバルティスファーマ株式会社, 2015-11-20.
  30. 佐原 成彦: タウPETイメージングが認知症研究にもたらしたもの, 第223回つくばブレインサイエンスセミナー, つくばブレインサイエンス協会, 2015-11-10.
  31. Hitoshi Shimada: Clinical significance of tau PET imaging, 第55回日本核医学会学術総会, 日本核医学会

学術総会, 2015-11-06.

32. 南本 敬史: The role of dopamine and serotonin in value-based decision-making in normal and disease state, Symposium on Prediction and Decision Making 2015., Symposium on Prediction and Decision Making 2015., 2015-10-31.
33. 島田 斉: Frontiers of neuropathological imaging 脳神経画像診断の新たな進展, 第27回日本脳循環代謝学会総会, 日本脳循環代謝学会, 2015-10-30.
34. 樋口 真人: 3合目から頂上へ: モデル動物からヒトへつながる認知症イメージングと創薬, 第34回日本認知症学会学術集会, 日本認知症学会, 2015-10-03.
35. 須原 哲也: ニューロイメージングバイオマーカーと装薬開発, CINP/JSNP 合同向精神薬開発のための産学官連携 (PPPs) タスクフォース拡大委員会, 日本神経精神薬理学会, 日本生物学的精神医学会, 2015-09-23.
36. 佐原 成彦: タウ蛋白質を標的とした治療薬開発の現状, 創薬薬理フォーラム第23回シンポジウム, 創薬薬理フォーラム, 2015-09-16.
37. 樋口 真人: Tracking tau pathogenesis in living brains, The 9th International Congress of the Asian Society Against Dementia, Asian Society Against Dementia (ASAD), 2015-09-15.
38. 季 斌: Current State of Clinical Imaging for Neuroinflammation, World Molecular Imaging Congress, World Molecular Imaging Society, 2015-09-02.
39. 樋口 真人: 認知症におけるタウイメージング, 第12回 新潟県脳機能解析研究会, 新潟大学, 富士フィルムRIファーマ株式会社, 2015-08-20.
40. 山田 真希子: 認知バイアスの分子・神経メカニズムから「抑うつの実現主義」の脳病態を探る, 第12回うつ病学会総会, 2015-07-17.
41. 島田 斉: タウイメージングで望む\_認知症診療の近未来, バイオマーカーによる認知症診断への挑戦, ヤンセンファーマ株式会社, 2015-06-25.
42. 樋口 真人: 認知症病態の分子イメージング. 第11回岐阜脳神経研究会, 岐阜薬科大学, 岐阜大学, エーザイ株式会社, 2015-06-22.
43. Makoto Higuchi: Novel proteinopathy based tracers for diagnosis, 19th International Congress of Parkinson's Disease and Movement Disorders, International Parkinson and Movement Disorder Society, 2015-06-17.
44. 島田 斉: 分子イメージングによる認知症病態の理解と治療戦略の創生, 第71回秋田脳神経画像研究会, 秋田脳神経画像研究会, 2015-06-05.
45. 篠遠 仁: Tau imaging in corticobasal syndrome, 第56回日本神経学会学術大会, 日本神経学会, 2015-05-20.
46. 島田 斉: Tau PET imaging in Alzheimer's disease, 第56回日本神経学会学術大会, 第56回日本神経学会学術大会, 2015-05-20.
47. 樋口 真人: 認知症を分子イメージングで診る, 第83回北陸核医学カンファレンス, 北陸核医学カンファレンス, 富士フィルムRIファーマ, 2015-05-16.
48. 島田 斉: タウイメージングは認知症診断をどう変えるか?, バイオマーカーによる認知症診断への挑戦, ヤンセンファーマ株式会社, 2015-04-24.
49. 樋口 真人: 認知症分子病理の生体画像化, 第29回日本医学会総会, 日本医学会, 2015-04-12.
50. 島田 斉: 分子イメージングによる認知症治療戦略の創世 タウイメージングを中心に, 認知症の診断、早期治療のために, 武田薬品工業株式会社, 2015-04-02.

51. 南本 敬史: DREADD-PETが可視化する霊長類脳科学の新展開, 平成26年度京都大学霊長類研究所共同利用研究会「霊長類脳科学の新しい展開とゲノム科学との融合」, 京都大学霊長類研究所共同利用研究会, 2015-03-14.
52. 島田 斉: タウイメージングは\_認知症診療の明日を変えるのか?, 第9回熊本核医学フォーラム, 熊本核医学フォーラム, 2015-03-06.
53. Hitoshi Shimada: Neuroimaging-Tau PET imaging with [11C]PBB3 in diverse tauopathies-, The 14th International Parkinson's Disease Symposium in Takamatsu, 日本神経学会, 2015-02-27.
54. 島田 斉: 分子イメージングが切り拓く\_認知症診療の最前線, 第50回RI・放射線利用促進セミナー, 中部原子力懇談会, 2015-02-13.
55. 島田 斉: 分子神経イメージングによる\_臨床的暗黙知の可視化と治療戦略の創生, 第82回日本核医学会関東甲信越地方会, 日本核医学会, 2015-01-23.
56. 島田 斉: 分子病態-症候連関に基づく\_認知症治療戦略の確立を目指して, 第21回New Horizon for Neurosciences (NHNS), New Horizon for Neurosciences, 2014-12-06.

#### <その他：執筆>

1. 樋口真人: 脳の可視化からみた認知症治療戦略, BIO Clinica, 31(4), 38 - 42, 2016-03.
2. 山田 真希子: 線条体D2受容体とポジティブ錯覚, 週刊 医学のあゆみ, 265(5), 629 - 633, 2016-01.
3. 丹羽 文俊, 島田 斉: 認知症診断におけるタウPETの意義, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, 22 - 25, 2016-01.
4. 佐原 成彦, 樋口 真人: タウPETイメージングによる認知症研究の新展開, 認知症の脳画像診断: 早期検出と鑑別を目指して, 162 - 167, 2015-09.
5. 樋口 真人: 神経科領域におけるPET/CTの有用性 - 認知症に対するアミロイドイメージング・タウイメージングによる早期診断を中心に, Innervision, 30(12), 14 - 18, 2015-12.
6. 前田 純, 樋口 真人, 須原 哲也: 抗精神病薬の臨床開発における分子神経イメージングの役割, 分子精神医学, 15(4), 22 - 28, 2015-10.
7. 島田 斉: 糖尿病患者の脳画像, PROGRESS IN MEDICINE, 35(9), 63 - 67, 2015-09.
8. 遠藤 浩信, 佐原 成彦, 島田 斉: Tau PET, Clinical Neuroscience, 33(10), 1156 - 1158, 2015-10.
9. 島田 斉: 検査からみる神経疾患—タウイメージング—, Clinical Neuroscience, 32(4), 456 - 457, 2014-04.
10. 島田 斉, 丸山 将浩, 樋口 真人, 須原 哲也: 認知症診断におけるtau, amyloid imagingの役割, 臨床画像, 30(2), 177 - 186, 2015-09.
11. 北村 聡一郎, 島田 斉: タウイメージング, 最新医学, 70(9), 1872 - 1876, 2015-09.
12. 遠藤 浩信, 島田 斉: 進行性核上性麻痺と大脳皮質基底核症候群のtau PET, 神経内科, 82(2), 153 - 159, 2015-02.
13. 篠遠 仁, 須原 哲也: 先制医療に向かっているアルツハイマー病の発症前画像診断, 実験医学, 33(増刊), 151 - 158, 2015-05.
14. 島田 斉: パーキンソン病関連疾患タウイメージング, MDSJ Letters, 8(1), 4 - 5, 2015-04.



## 2. 分子病態イメージング研究

### <原著論文等>

1. Tsuneo Saga, Masayuki Inubushi, Mitsuru Koizumi, Kyosan Yoshikawa, Ming-Rong Zhang, Takayuki Obata, Katsuyuki Tanimoto, Rintaro Harada, Takashi Uno, Yasuhisa Fujibayashi: Prognostic value of PET/CT with (18)F-fluoroazomycin arabinoside for patients with head and neck squamous cell carcinomas receiving chemoradiotherapy, *Annals of nuclear medicine*, 2015-12.
2. Qinghua Yuan, Takako Furukawa, Takahiro Tashiro, Kouki Okita, Zhao-Hui Jin, Winn Aung, Aya Sugyo, Koutaro Nagatsu, Hiroko Endo, Atsushi B Tsuji, Ming-Rong Zhang, Takashi Masuko, Masahiro Inoue, Yasuhisa Fujibayashi, Tsuneo Saga: Immuno-PET Imaging of HER3 in a Model in which HER3 Signaling Plays a Critical Role, *PloS one*, 2016-01.
3. Tsuneo Saga, Masayuki Inubushi, Mitsuru Koizumi, Kyosan Yoshikawa, Ming-Rong Zhang, Katsuyuki Tanimoto, Atsushi Horiike, Noriko Yanagitani, Fumiyoshi Ohyanagi, Makoto Nishio: Prognostic value of (18) F-fluoroazomycin arabinoside PET/CT in patients with advanced non-small cell lung cancer, *Cancer science*, 2015-08.
4. Zhao-Hui Jin, Takako Furukawa, Katsushi Kumata, Lin Xie, Joji Yui, Hidekatsu Wakizaka, Yasuhisa Fujibayashi, Ming-Rong Zhang, Tsuneo Saga; Development of the fibronectin-mimetic peptide KSSPHSRN(SG)5RGDSP as a novel radioprobe for molecular imaging of the cancer biomarker  $\alpha 5\beta 1$  integrin *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 38(11), 1722 - 1731, 2015-11.
5. Chie Suzuki, Atsushi Tsuji, Koichi Kato, Hitomi Sudo, Ming-Rong Zhang, Tsuneo Saga: Preclinical evaluation of 2-amino-2-[11C]methyl-butanoic acid as a potential tumor-imaging agent in a mouse model. *Nuclear medicine communications*, 36(11), 1107 - 1112, 2015-11.
6. Dayton D. McMillan, Junko Maeda, Bell Justin, Matthew D. Genet, Garrett Phooswadi, Kelly A. Mann, Susan L. Kraft, Hisashi Kitamura, Akira Fujimori, Yukie Yoshii, Takako Furukawa, Yasuhisa Fujibayashi, Takamitsu Kato: Validation of  $^{64}\text{Cu}$ -ATSM damaging DNA via high-LET Auger electron emission, *Journal of Radiation Research*, 56(4), 2015-08.
7. Kenta Miwa, Masayuki Inubushi, Yasuto Takeuchi, Tetsuro Katafuchi, Mitsuru Koizumi, Tsuneo Saga, Masayuki Sasaki: Performance characteristics of a novel clustered multi-pinhole technology for simultaneous high-resolution SPECT/PET, *Annals of nuclear medicine*, 29(5), 460 - 466, 2015-06.
8. Takako Furukawa, Qinghua Yuan, Zhao-Hui Jin, Winn Aung, Yukie Yoshii, Sumitaka Hasegawa, Hiroko Endo, Masahiro Inoue, Ming-Rong Zhang, Yasuhisa Fujibayashi, Tsuneo Saga: A limited overlap between intratumoral distribution of 1-(5-fluoro-5-deoxy- $\alpha$ -D-arabinofuranosyl)-2-nitroimidazole and copper-diacetyl-bis[N(4)-methylthiosemicarbazone]. *Oncology reports*, 34(3), 1379 - 1387, 2015-09.
9. Yukie Yoshii, Takako Furukawa, Atsuo Waki, Hiroaki Okuyama, Masahiro Inoue, Manabu Itoh, Ming-Rong Zhang, Hidekatsu Wakizaka, Chizuru Sogawa, Yasushi Kiyono, Hiroshi Yoshii, Yasuhisa Fujibayashi, Tsuneo Saga: High-throughput screening with nanoimprinting 3D culture for efficient drug development by mimicking the tumor environment, *Biomaterials*, 51, 278 - 289, 2015-05.
10. Atsushi B Tsuji, Aya Sugyo, Hitomi Sudo, Chie Suzuki, Hidekatsu Wakizaka, Ming-Rong Zhang, Koichi Kato, Tsuneo Saga, Preclinical assessment of early tumor response after irradiation by positron emission tomography with 2-amino-[3-11C]isobutyric acid. *Oncology reports*, 33(5), 2361 - 2367, 2015-05.

### ＜学会及び研究会口頭発表等＞

1. Keiichiro Yoshinaga: Role and future contribution to All Japan Targeted Radionuclide Therapy, 第2回核医学治療国際シンポジウム, 福島県立医科大学, 2015-12-19.
2. Yukie Yoshii, Takako Furukawa, Hironori Aoyama, Naoya Adachi, Ming-Rong Zhang, Hidekatsu Wakizaka, Yasuhisa Fujibayashi, Tsuneo Saga: Selection of effective adjuvant therapy agent for colon cancer with a novel 3D culture screening system: Evaluation with molecular imaging technique, The International Chemical Congress of Pacific Basin Socie 2015, The American Chemical Society, 2015-12-18.
3. Tsuneo Saga: Theranostic application of cancer targeting probes labeled with various copper radioisotopes, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015, The American Chemical Society, 2015-12-16.
4. 李 恵子, 長谷川 純崇, 永津 弘太郎, 佐賀 恒夫:  $\alpha$ 線放出核種 $^{211}\text{At}$ を用いた放射免疫療法, 第55回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2015-11-06.
5. 吉井 幸恵, 古川 高子, 松本 博樹, 吉本 光喜, 清野 泰, 張 明栄, 藤林 康久, 佐賀 恒夫: 腫瘍内 $^{64}\text{Cu}$ -ATSM集積領域の生物学的特徴に基づく増感内照射治療法の開発, 第55回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2015-11-06.
6. Tsuneo Saga: Targeted Imaging and Therapy of Cancer with Molecular Probes Labeled with Copper Radioisotopes, The 11th Hangzhou International Molecular Imaging Conference (HIMIC), Zhejiang University, 2015-09-19.
7. 吉井 幸恵, 古川 高子, 藤林 康久, 佐賀 恒夫: 放射性 $\text{Cu}$ -ATSM一汎用性の高いPETトレーサーとしての可能性, 日本核医学会PET核医学分科会 PETサマーセミナー2015 in東京ベイ, 日本核医学会PET核医学分科会, 2015-09-05.
8. Yukie Yoshii, Takako Furukawa, Hiroki Matsumoto, Mitsuyoshi Yoshimoto, Ming-Rong Zhang, Yasushi Kiyono, Yasuhisa Fujibayashi, Tsuneo Saga:  $^{64}\text{Cu}$ -ATSM internal radiotherapy targeting tumor malignant regions: sensitization based on its biological characteristics, The Society of Nuclear Medicine (SNM) annual meeting 2015, The Society of Nuclear Medicine, 2015-06-09.
9. 佐賀 恒夫: Molecular imaging of cancer hypoxia and its application for internal radiotherapy targeting hypoxic microenvironment, 15th International Congress of Radiation Research(ICRR2015), ICRR, 2015-05-26.
10. 吉井 幸恵, 古川 高子, 脇 厚生, 伊藤 学, 張 明栄, 脇坂 秀克, 清野 泰, 藤林 康久, 佐賀 恒夫: 効果的ながん治療薬・PETモニタリング診断薬を効率よく選択できる..第10回日本分子イメージング学会総会・学術集会, 日本分子イメージング学会, 2015-05-21.

### ＜その他：執筆＞

1. 吉永 恵一郎, 辻 厚至, 永津 弘太郎: 標的アイソトープ治療 -最近の進歩と今後の展望-, PET Journal, 31, 16 - 18, 2015-09(総説).

### 3. 先端生体計測研究

#### <原著論文等>

1. Thonnapong Thongpraparn, Yoko Ikoma, Takahiro Shiraishi, Taiga Yamaya, Hiroshi Ito; Effects of point spread function-based image reconstruction on neuroreceptor binding in positron emission tomography study with [11C]FLB 457, Radiol Phys Technol, 9, pp. 127-137, 2016.

#### <Proceedings等>

1. E. Yoshida, K. Shimizu, T. Shinaji, F. Nishikido, T. Yamaya: Development of a Singles-Based Scalable Data Acquisition System for the Whole-Body OpenPET, Conf. Rec. IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (NSS-MIC), M11-7, 2014.
2. Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Fumihiko Nishikido, Hideaki Tashima: PET Innovations for High Resolution Diagnosis and Treatment Imaging, Proceedings of the World Engineering Conference and Convention (WECC2015), OS7-2-3, 2015.

#### <学会及び研究会口頭発表等>

1. Fumihiko Nishikido, Hideaki Tashima, Mikio Suga, Naoko Inadama, Yoshida Eiji, Takayuki Obata, Taiga Yamaya: Imaging Performance of a Full-Ring Prototype PET-MRI System Based on Four-Layer DOI-PET Detectors Integrated with a RF Coil, 4th Conference on PET/MR and SPECT/MR (PSMR2015) Book of abstracts, p. 3, 2015, 2015/5/18, Isola d'Elba, Italy.
2. Taiga Yamaya, Fumihiko Nishikido, Hideaki Tashima, Eiji Yoshida, Mikio Suga, Hideaki Haneishi, Keiji Shimizu, Tomio Inoue, Takayuki Obata: A prototype 'add-on' PET: a head coil with PET to upgrade existing MRI to PET/MRI, the Journal of Nuclear Medicine, Vol. 56, Supplement 3, Abstract Book Supplement to the Journal of Nuclear Medicine, p. 100P, 2015, SNMMI 2015 Annual Meeting Scientific Abstracts, #316, Baltimore, 2015/6/9.
3. Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Naoko Inadama, Tetsuya Shinaji, Hidekatsu Wakizaka, Munetaka Nitta, Shusaku Tazawa, Tetsuya Suhara, Yasuhisa Fujibayashi: First prototype of a compact helmet- chin PET for high-sensitivity brain imaging, the Journal of Nuclear Medicine, Vol. 56, Supplement 3 (Abstract Book Supplement to the Journal of Nuclear Medicine, p. 100P, 2015, SNMMI 2015 Annual Meeting Scientific Abstracts, #317, Baltimore, 2015/6/9.
4. Hiroyuki Takuwa, Hidekatsu Wakizaka, Eiji Yoshida, Tetsuya Shinaji, Taiga Yamaya, Yoko Ikoma: Development of a simultaneous optical /PET imaging system for awake mice, The 9th ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME2015), OS23-3(CME\_120), 2015/6/20.
5. Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Naoko Inadama, Tetsuya Shinaji, Hidekatsu Wakizaka, Munetaka Nitta, Shusaku Tazawa, Tetsuya Suhara, Yasuhisa Fujibayashi: Development of a compact helmet- chin PET for high-sensitivity brain imaging, Abstract Book of 2015 World Molecular Imaging Congress (WMIC), SS174, 2015, 2015/9/5, Honolulu.
6. Eiji Yoshida, Tetsuya Shinaji, Hideaki Tashima, Taiga Yamaya: Development of flexible data acquisition system with 4-layered DOI detector, the Journal of Nuclear Medicine, Vol. 56, Supplement 3, (Abstract Book Supplement to the Journal of Nuclear Medicine), p. 461P, 2015, SNMMI 2015 Annual Meeting Scientific Abstracts, #1840, Baltimore, 2015/6/9.
7. H. Tashima, E. Yoshida, F. Nishikido, H. Wakizaka, M. Nitta, A. M. Ahmed, A. Mohammadi, S. Tazawa, Y. Kimura, T. Suhara, Y. Fujibayashi, T. Yamaya: Development of the Helmet-Chin PET Prototype, 2015 IEEE

- Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M3CP-97, 2015, 2015/11/4, San Diego.
8. E. Yoshida, H. Tashima, F. Nishikido, M. Nitta, K. Shimizu, T. Inaniwa, T. Yamaya: Development of a Whole- Body Single-Ring OpenPET for in-Beam Particle Therapy Imaging, 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M4CP-314, 2015, 2015/11/5, San Diego.
  9. Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Naoko Inadama, Fumihiko Nishikido, Tetsuya Shinaji, Munetaka Nitta, Yasunori Nakajima, Shinji Sato, Taku Inaniwa: Development of a whole-body OpenPET, 医学物理, 第35巻, Sup. 1, p. 123, 2015, 第 109 回日本医学物理学会学術大会報文集, O-091, 2015/4/17.
  10. Eiji Yoshida, Keiji Shimizu, Tetsuya Shinaji, Taiga Yamaya: Development of a singlesbased flexible data acquisition system for the OpenPET, 医学物理, 第 35 巻, Sup. 1, p. 135, 2015, 第 109 回日本医学物理学会学術大会報文集, O-106, 2015/4/18.
  11. 錦戸 文彦, 田島 英朗, 菅 幹生, 小島 隆行, 山谷 泰賀: PET/MRI 一体型検出器の開発:1 リング試作機 を用いた同時測定下でのイメージング性能評価, 日本磁気共鳴医学会雑誌, Vol. 35, Supp., p. 205, 2015, 第 43 回日本磁気共鳴医学会大会講演抄録集, 2015/9/10-12, 東京ドームホテル.
  12. 山谷 泰賀, 吉田 英治, 田島 英朗, Ahmed Abdella M, 岩男 悠真, 錦戸 文彦, 新田 宗孝, 脇坂 秀克, 木村 泰之, 田沢 周作: ヘルメット型 PET 装置の開発, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-2W-4, 2015, 放射線分科内招待講演, 名古屋国際会議場 2015/9/16.
  13. 吉田 英治, 田島 英朗, 岩男 悠真, 錦戸 文彦, 新田 宗孝, 蛭海 元貴, 清水 啓司, 稲庭 拓, 山谷 泰賀: シングルリング型ヒトサイズ OpenPET の開発, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-2W-3, 2015, 名古屋国際会議場, 2015/9/16
  14. 山谷 泰賀, 吉田 英治, 田島 英朗, 錦戸 文彦, Mohammadi Akram, 新田 宗孝, 北川 敦志, 稲庭 拓: 全身用single ring OpenPETの試作, 医学物理, 第 35 巻, Sup. 3, p. 94, 2015, 第 110 回日本医学物理学会 学術大会, O-053, 北海道大学, 2015/9/19.
  15. 田島 英朗, 吉田 英治, 錦戸 文彦, 脇坂 秀克, アーメッド アブデラ, 田沢 周作, 木村 泰之, 山谷 泰賀: 高感度ヘルメット型 PET 装置の試作, 医学物理, 第 35 巻, Sup. 3, p. 102, 2015, 第 110 回日本医学物理学会学術大会, O-061, 北海道大学, 2015/9/20.
  16. 田桑 弘之, 脇坂 秀克, 吉田 英治, 山谷 泰賀, 生駒 洋子: 覚醒マウスを用いた PET と光イメージングの同時測定システムの開発, 核医学, 第 52 巻, 第 3 号, p. S204, 2015, 第 55 回日本核医学会総会, M1VIC6, 2015/11/6.
  17. 山谷 泰賀, 吉田 英治, 田島 英朗, 錦戸 文彦, 藤林 康久: 全身用Single-ring OpenPETの開発, 核医学, 第 52 巻, 第 3 号, p. S216, 2015, 第 55 回日本核医学会総会, M1IXA5, 2015/11/5.
  18. 山谷 泰賀, 吉田 英治, 田島英朗, 木村泰之, 須原哲也, 田沢周作, 藤林康久: ヘルメット型 PET 試作機による高感度脳イメージング, 核医学, 第 52 巻, 第 3 号, p. S216, 2015, 第 55 回日本核医学会総会, M1IXA6, 2015/11/5.



## 9. 関連資料

平成27年度第I期・II期マシンタイム予定表



月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
3月30日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	4月20日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
3月31日 (火)	RI生産		R&D		4月21日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) α 40, 15 μA, C4, 10:00~17:00	
4月1日 (水)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9		4月22日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg所外) α 75, C4, 10:00~14:00	
4月2日 (木)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9		4月23日 (木)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9	
4月3日 (金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9		4月24日 (金)	RI生産		設備利用 P70MeV / 1nA C8	
4月4日 (土)					4月25日 (土)				
4月5日 (日)					4月26日 (日)				
4月6日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	4月27日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
4月7日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00		4月28日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00	
4月8日 (水)	RI生産		RI生産 H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4		4月29日 (水)			昭和の日	
4月9日 (木)	RI生産		陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 10nA C8		4月30日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00	
4月10日 (金)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μA, C9		5月1日 (金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9	
4月11日 (土)					5月2日 (土)				
4月12日 (日)			一般公開		5月3日 (日)				
4月13日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	5月4日 (月)			みどりの日	
4月14日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00		5月5日 (火)			こどもの日	
4月15日 (水)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9		5月6日 (水)			振替休日	
4月16日 (木)	RI生産		陽子線治療および診断中のオンラインモニタ に関する基礎開発 早稲田大学(片岡) P70MeV / 1nA C6		5月7日 (木)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9	
4月17日 (金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9		5月8日 (金)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μA, C9	
4月18日 (土)					5月9日 (土)			高分子系飛跡検出器の応答特性を表す 化学的クライテリアの確立 神戸大(山内) P25MeV / 100nA C8	
4月19日 (日)					5月10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11日(月)	メンテナンス		メンテナンス		6月1日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 μA, C1
5月12日(火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00		6月2日(火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00	
5月13日(水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~12:00		6月3日(水)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発 北村 P70MeV / 10nA C8	陽子線の生物効果の研究 北村(加藤) P70MeV / 3nA C8
5月14日(木)	RI生産		設備利用 P70MeV / 100nA C8		6月4日(木)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μA, C9	
5月15日(金)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μA, C9		6月5日(金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9	
5月16日(土)					6月6日(土)			高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 広大(西尾) P70MeV / 50nA C8	
5月17日(日)					6月7日(日)				
5月18日(月)	安全測定 本体室	RI生産	安全測定 本体室・汎用照射室	R&D	6月8日(月)	メンテナンス		メンテナンス	
5月19日(火)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9		6月9日(火)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9	
5月20日(水)	RI生産		RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) α 40, 15 μA, C4, 10:00~17:00		6月10日(水)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg所外) α 75, C4, 10:00~14:00	
5月21日(木)	RI生産		RI生産( <sup>124</sup> I所内) H <sub>2</sub> 27, 10 μA, C9, 11:00~		6月11日(木)	RI生産		陽子線の生物効果の研究 北村(加藤) P70MeV / 3nA C8	
5月22日(金)	RI生産		設備利用 P70MeV / 1nA C8		6月12日(金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9	
5月23日(土)					6月13日(土)				
5月24日(日)					6月14日(日)				
5月25日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 17 μA, C1,2	6月15日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
5月26日(火)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00		6月16日(火)	RI生産		RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) α 40, 15 μA, C4, 10:00~17:00	
5月27日(水)	RI生産		最前方と最後方における荷電粒子生成 二重微分断面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 10nA C6		6月17日(水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00 D20, 10 μA, C9	
5月28日(木)	RI生産		最前方と最後方における荷電粒子生成 二重微分断面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 10nA C6		6月18日(木)	RI生産		陽子線照射における大気下ならびに 低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 10nA C8	
5月29日(金)	RI生産		RI生産 P60MeV, 5 μA, C9		6月19日(金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9	
5月30日(土)					6月20日(土)			高分子系飛跡検出器の応答特性を表す 化学的クライテリアの確立 神戸大(山内) P70MeV / 100nA C8	
5月31日(日)					6月21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22日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	7月13日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 μA, C1
6月23日(火)	RI生産		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 鈴木 P70MeV / 1nA C8		7月14日(火)	RI生産		RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) α 40, 15 μA, C4, 10:00~17:00	
6月24日(水)	RI生産		RI生産( <sup>124</sup> I所内) H <sub>2</sub> 27, 10 μA, C9, 11:00~		7月15日(水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00 α 34MeV, 15 μA, C9	
6月25日(木)	RI生産		RI生産 P60MeV, 5 μA, C9		7月16日(木)	RI生産		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 鈴木 P70MeV / 1nA C8	
6月26日(金)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における基礎物理研究 京大(大澤) Ne <sup>10+,6+</sup> 120MeV / 500 nA C10		7月17日(金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9	
6月27日(土)					7月18日(土)				
6月28日(日)					7月19日(日)				
6月29日(月)	メンテナンス		メンテナンス		7月20日(月)			海の日	
6月30日(火)	RI生産		RI生産 H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4		7月21日(火)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9	
7月1日(水)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μA, C9		7月22日(水)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00	
7月2日(木)	RI生産		陽子線治療および診断中のオンラインモニタに関する基礎開発 早稲田大学(片岡) P70MeV / 10nA C8		7月23日(木)	RI生産		高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究 広大(西尾) P70MeV / 50nA C8	
7月3日(金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9		7月24日(金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9	
7月4日(土)					7月25日(土)			陽子線治療および診断中のオンラインモニタに関する基礎開発 早稲田大学(片岡) P70MeV / 1nA C6	
7月5日(日)					7月26日(日)				
7月6日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産	7月27日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
7月7日(火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00		7月28日(火)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00 α 34MeV, 10 μA, C9	
7月8日(水)	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 広大(西尾) P70MeV / 50nA C6		7月29日(水)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9	
7月9日(木)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 15 μA, C9		7月30日(木)	RI生産		放射線遮蔽用可撓性材料の中性子透過実験 九大(執行) P50MeV / 10pA C8	
7月10日(金)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子成分検出器の開発 北村 D50MeV / 1nA C6		7月31日(金)	RI生産		RI生産 P30MeV, 20 μA, C9	
7月11日(土)					8月1日(土)				
7月12日(日)					8月2日(日)				

月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
8月3日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 μA, C1	8月24日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
8月4日 (火)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9		8月25日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) α 40, 15 μA, C4, 10:00~17:00	
8月5日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg所外) α 75, C4, 10:00~14:00		8月26日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00 P18, 5 μA, C9	
8月6日 (木)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) Ne <sup>10+,6+</sup> 120MeV / 500 nA C10		8月27日 (木)	RI生産		R&D	
8月7日 (金)	RI生産		RI生産 P18 MeV, 10 μA, C9 α 34 MeV, 10 μA, C9		8月28日 (金)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) Ne <sup>10+,6+</sup> 120MeV / 500 nA C10	
8月8日 (土)					8月29日 (土)				
8月9日 (日)					8月30日 (日)				
8月10日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		8月31日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
8月11日 (火)	メンテナンス		中高エネルギー粒子による核反応の研究 KEK(佐波) D25MeV / 40nA C6		9月1日 (火)	RI生産		メンテナンス	
8月12日 (水)	メンテナンス		中高エネルギー粒子による核反応の研究 KEK(佐波) P70MeV / 40nA C6		9月2日 (水)	RI生産		設備利用 P50MeV / 1nA C8	
8月13日 (木)	メンテナンス		R&D		9月3日 (木)	RI生産		メンテナンス	
8月14日 (金)	メンテナンス		R&D		9月4日 (金)	RI生産		設備利用 P70MeV / 1nA C6	
8月15日 (土)					9月5日 (土)				
8月16日 (日)					9月6日 (日)				
8月17日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 μA, C1	9月7日 (月)	長期メンテナンス			
8月18日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00		9月8日 (火)	長期メンテナンス			
8月19日 (水)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9		9月9日 (水)	長期メンテナンス			
8月20日 (木)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9		9月10日 (木)	長期メンテナンス			
8月21日 (金)	RI生産		重粒子線の生物効果初期課程における 基礎物理研究 京大(大澤) Ne <sup>10+,6+</sup> 120MeV / 500 nA C10		9月11日 (金)	長期メンテナンス			
8月22日 (土)					9月12日 (土)			停電	
8月23日 (日)					9月13日 (日)				

月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
9月14日(月)	長期メンテナンス				10月5日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
9月15日(火)	長期メンテナンス				10月6日(火)	RI生産		設備利用 P70MeV / 5nA C8	
9月16日(水)	長期メンテナンス				10月7日(水)	RI生産		RI生産 ( <sup>211</sup> At-MABG) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00	陽子線治療および診断中のオンラインモニタに関する基礎開発 早稲田大学(片岡) P70MeV, 50nA, C6, 14:00~
9月17日(木)	長期メンテナンス				10月8日(木)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00 α 34, 10 μA, C9	
9月18日(金)	長期メンテナンス				10月9日(金)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μA, C9	
9月19日(土)					10月10日(土)				
9月20日(日)					10月11日(日)				
9月21日(月)	敬老の日				10月12日(月)			体育の日	
9月22日(火)	国民の休日				10月13日(火)	RI生産		陽子線照射における大気下ならびに低酸素下での細胞致死効果 平山 P70MeV / 10nA C8	
9月23日(水)	秋分の日				10月14日(水)	RI生産		RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) α 40, 15 μA, C4, 10:00~17:00	
9月24日(木)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	10月15日(木)	RI生産		RI生産 H <sub>2</sub> 24MeV, 20 μA, C4	
9月25日(金)	RI生産		R&D	RI生産 α 34, 10 μA, C9, 13:30~15:30	10月16日(金)	RI生産		RI生産 P60MeV, 5 μA, C9	
9月26日(土)					10月17日(土)			停電(旧ベータートロン棟系)	
9月27日(日)					10月18日(日)				
9月28日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	10月19日(月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 μA, C1
9月29日(火)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00		10月20日(火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00 α 34, 10 μA, C9	
9月30日(水)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9		10月21日(水)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg所外) α 75, C4, 10:00~14:00	
10月1日(木)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00		10月22日(木)	RI生産		設備利用 P70MeV / 100nA C8	
10月2日(金)	RI生産		設備利用 P70MeV / 20nA C8		10月23日(金)	RI生産		RI生産 D20, 10 μA, C9	陽子線治療および診断中のオンラインモニタに関する基礎開発 早稲田大学(片岡) P70MeV, 50nA, C6, 14:00~
10月3日(土)					10月24日(土)			陽子線治療および診断中のオンラインモニタに関する基礎開発 早稲田大学(片岡) P70MeV / 50nA C6	
10月4日(日)					10月25日(日)				

月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
10月26日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		11月16日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
10月27日 (火)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9		11月17日 (火)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9 P18MeV, 15 μA, C9	
10月28日 (水)	RI生産		RI生産 D20MeV, 10 μA, C9		11月18日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>124</sup> I所内) H <sub>2</sub> 27, 10 μA, C9, 11:00~	
10月29日 (木)	RI生産		設備利用 P70MeV / 10nA C8		11月19日 (木)	RI生産		RI生産 P60MeV, 5 μA, C9	
10月30日 (金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9		11月20日 (金)	RI生産		高分子系飛跡検出器の応答特性を表す 化学的クライテリオン確立 神戸大(山内) P30MeV / 100nA C8	
10月31日 (土)					11月21日 (土)				
11月1日 (日)					11月22日 (日)				
11月2日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 D20, 10 μA, C9	11月23日 (月)			勤労感謝の日	
11月3日 (火)			文化の日		11月24日 (火)	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 広大(西尾) P70MeV / 50nA C8	
11月4日 (水)	RI生産		設備利用 P25MeV / 500nA C8		11月25日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00	
11月5日 (木)	メンテナンス		メンテナンス		11月26日 (木)	RI生産		RI生産 ( <sup>211</sup> At-MABG) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00	陽子線治療および診断中のオ ンラインモニタに関する基礎開 発 早稲田大学(片岡) P70MeV, 50nA, C6, 14:00~
11月6日 (金)	メンテナンス		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 鈴木 P70MeV / 1nA C8		11月27日 (金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 10 μA, C9 P18MeV, 15 μA, C9	
11月7日 (土)					11月28日 (土)			陽子線治療および診断中のオンラインモニタ に関する基礎開発 早稲田大学(片岡) P70MeV / 30nA C8	
11月8日 (日)					11月29日 (日)				
11月9日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	11月30日 (月)	安全測定 本体室	RI生産	安全測定 本体室・汎用照射室	R&D
11月10日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) α 40, 15 μA, C4, 10:00~17:00		12月1日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-MABG) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00	
11月11日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 μA, C4, 9:00~11:00		12月2日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg所外) α 75, 10 μA, C4, 10:00~14:00	
11月12日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00~12:00		12月3日 (木)	RI生産		設備利用 P70MeV / 1nA C8	
11月13日 (金)	RI生産		最前方と最後方における荷電粒子生成 二重微分面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 10nA C6		12月4日 (金)	RI生産		RI生産 α 34MeV, 12 μA, C9	
11月14日 (土)			最前方と最後方における荷電粒子生成 二重微分面積の測定 九大(魚住) P40MeV / 10nA C6		12月5日 (土)				
11月15日 (日)					12月6日 (日)				

月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午前	午後	午前	午後		午前	午後	午前	午後
12月7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 $\mu$ A, C1 P18, 20 $\mu$ A, C1	12月28日 (月)	メンテナンス	メンテナンス	メンテナンス	R&D
12月8日 (火)		RI生産	RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) $\alpha$ 40, 15 $\mu$ A, C4, 10:00~17:00		12月29日 (火)				
12月9日 (水)		RI生産	RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 $\mu$ A, C4, 9:00~11:00 $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 15:00~17:00		12月30日 (水)				
12月10日 (木)		RI生産	設備利用 P70MeV / 10nA C8		12月31日 (木)				
12月11日 (金)		RI生産	RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9 P18MeV, 20 $\mu$ A, C9		1月1日 (金)				元日
12月12日 (土)			ガラス線量計及び板状蛍光線量計の 線質依存性に関する研究 張維珊 P70MeV / 1nA C8		1月2日 (土)				
12月13日 (日)					1月3日 (日)				
12月14日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		1月4日 (月)	メンテナンス			メンテナンス
12月15日 (火)		RI生産	RI生産 ( <sup>211</sup> At-MABG) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00~12:00	重粒子によるしきいエネルギー 付近の核反応に関する研究 KEK(萩原) C144MeV, 30nA, C6, 14:00 ~	1月5日 (火)	RI生産			中高エネルギー粒子による核反応の研究 KEK(佐波) P40MeV / 30nA C6
12月16日 (水)		RI生産	重粒子によるしきいエネルギー付近の 核反応に関する研究 KEK(萩原) C144MeV / 30nA C6		1月6日 (水)	RI生産			RI生産( <sup>211</sup> At所内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00~12:00
12月17日 (木)		RI生産	RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9		1月7日 (木)	RI生産			中高エネルギー粒子による核反応の研究 KEK(佐波) P70MeV / 30nA C6
12月18日 (金)		RI生産	RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9 D20MeV, 20 $\mu$ A, C9		1月8日 (金)	RI生産			R&D
12月19日 (土)					1月9日 (土)				
12月20日 (日)					1月10日 (日)				
12月21日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 $\mu$ A, C1 P18, 20 $\mu$ A, C1	1月11日 (月)				成人の日
12月22日 (火)		RI生産	設備利用 P70MeV / 5nA C8		1月12日 (火)	RI生産			宇宙放射線の荷電粒子 成分検出器の開発 北村 He100MeV / 1nA C8
12月23日 (水)			天皇誕生日		1月13日 (水)	RI生産			RI生産( <sup>124</sup> I所内) H <sub>2</sub> 27, 10 $\mu$ A, C9, 11:00~
12月24日 (木)		RI生産	RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9		1月14日 (木)	RI生産			設備利用 P70MeV / 10nA C8
12月25日 (金)		RI生産	R&D		1月15日 (金)	RI生産			R&D H <sub>2</sub> 24MeV, 3 $\mu$ A, C3
12月26日 (土)					1月16日 (土)				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 鈴木 P70MeV / 1nA C8
12月27日 (日)					1月17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
1月18日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		2月8日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 15 $\mu$ A, C1
1月19日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) $\alpha$ 40, 15 $\mu$ A, C4, 10:00~17:00		2月9日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 $\mu$ A, C4, 9:00~11:00	
1月20日 (水)	RI生産		設備利用 P70MeV / 10nA C8		2月10日 (水)	RI生産		設備利用 P70MeV / 10nA C8	
1月21日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 $\mu$ A, C4, 9:00~11:00		2月11日 (木)			建国記念の日	
1月22日 (金)	RI生産		RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9		2月12日 (金)	RI生産		RI生産 P60MeV, 5 $\mu$ A, C9	
1月23日 (土)					2月13日 (土)			超小型アクティブ宇宙放射線線量計の開発 慶應大(寺沢) P70MeV / 1nA C8	
1月24日 (日)					2月14日 (日)				
1月25日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産 P18, 20 $\mu$ A, C1	2月15日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
1月26日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At所内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00~12:00		2月16日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu所内) H <sub>2</sub> 24, 10 $\mu$ A, C4, 9:00~11:00	
1月27日 (水)	RI生産		RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9		2月17日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg所外) $\alpha$ 75, C4, 10:00~14:00	
1月28日 (木)	RI生産		RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9		2月18日 (木)	RI生産		宇宙放射線の荷電粒子 成分検出器の開発 北村 P70MeV / 1nA C6	
1月29日 (金)	RI生産		設備利用 P70MeV / 1nA C8		2月19日 (金)	RI生産		RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9	
1月30日 (土)					2月20日 (土)				
1月31日 (日)					2月21日 (日)				
2月1日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	2月22日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
2月2日 (火)	RI生産		RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9		2月23日 (火)	RI生産		RI生産 ( <sup>211</sup> At-MABG) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00~12:00	高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 広大(西尾) P70MeV, 50nA, C8, 14:00~
2月3日 (水)	RI生産		RI生産 $\alpha$ 27MeV, 10 $\mu$ A, C9		2月24日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>67</sup> Cu所内) $\alpha$ 40, 15 $\mu$ A, C4, 10:00~17:00	
2月4日 (木)	RI生産		RI生産 $\alpha$ 34MeV, 10 $\mu$ A, C9		2月25日 (木)	RI生産		設備利用 P70MeV / 100nA C8	
2月5日 (金)	RI生産		放射線遮蔽用可撓性材料の 中性子透過実験 九大(執行) P80MeV / 10pA C8		2月26日 (金)	RI生産		RI生産 $\alpha$ 34, 10 $\mu$ A, C9	陽子線治療および診断中のオ ンラインモニタに関する基礎開 発 早稲田大学(片岡) P70MeV, 50nA, C8, 14:00~
2月6日 (土)					2月27日 (土)				
2月7日 (日)					2月28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
2月29日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		3月21日 (月)	長期メンテナンス			
3月1日 (火)	RI生産		メンテナンス		3月22日 (火)	長期メンテナンス			
3月2日 (水)	RI生産		メンテナンス		3月23日 (水)	長期メンテナンス			
3月3日 (木)	RI生産		メンテナンス		3月24日 (木)	長期メンテナンス			
3月4日 (金)	RI生産		メンテナンス		3月25日 (金)	長期メンテナンス			
3月5日 (土)			全所停電		3月26日 (土)				
3月6日 (日)					3月27日 (日)				
3月7日 (月)	長期メンテナンス				3月28日 (月)	来期マシンタイム			
3月8日 (火)	長期メンテナンス				3月29日 (火)	来期マシンタイム			
3月9日 (水)	長期メンテナンス				3月30日 (水)	来期マシンタイム			
3月10日 (木)	長期メンテナンス				3月31日 (木)	来期マシンタイム			
3月11日 (金)	長期メンテナンス				4月1日 (金)	来期マシンタイム			
3月12日 (土)					4月2日 (土)				
3月13日 (日)					4月3日 (日)				
3月14日 (月)	長期メンテナンス				4月4日 (月)	来期マシンタイム			
3月15日 (火)	長期メンテナンス				4月5日 (火)	来期マシンタイム			
3月16日 (水)	長期メンテナンス				4月6日 (水)	来期マシンタイム			
3月17日 (木)	長期メンテナンス				4月7日 (木)	来期マシンタイム			
3月18日 (金)	長期メンテナンス				4月8日 (金)	来期マシンタイム			
3月19日 (土)					4月9日 (土)				
3月20日 (日)					4月10日 (日)				





## 平成27年度サイクロトロン利用報告書

- ・発行年月 2016年 10月
- ・編集 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構  
放射線医学総合研究所 加速器工学部
- 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 放射線医学総合研究所 加速器工学部  
TEL:043-206-3173 FAX:043-287-6146  
メールアドレス cyc\_sec@qst.go.jp
- ホームページ <http://www.nirs.qst.go.jp>
- ・印刷 株式会社 さくら印刷

©2016 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

Printed in Japan

NIRS-M-290





<http://www.nirs.qst.go.jp>