



QST-M-24



平成 30 年度

## 放医研サイクロトロン利用報告書

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

# 目 次

1. 放医研サイクロترون施設	
放医研サイクロترون施設の運用状況 (平成 30 年度) .....	2
放医研サイクロترون施設の運転状況および整備等について .....	8
2. 核医学研究	
サイクロترونの標識薬剤の製造・開発への利用状況 .....	12
3. 物理学/生物学研究 (課題番号順)	
核破碎片生成二重微分断面積の測定 .....	18
He ビームを用いた医療用 RI 製造技術にかかる基礎研究 .....	23
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 .....	27
最後方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定 .....	31
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 .....	35
陽子線治療の高度化へむけた放射線可視化技術の開拓 .....	39
高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究 .....	44
外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響評価 .....	50
4. 研究成果一覧 .....	55
5. 平成 30 年度マシンタイム予定表 .....	85



# 1. 放医研サイクロトロン施設



# 放医研サイクロترون施設の運用状況 (平成 30 年度)

## REPORT ON NIRS CYCLOTRON FACILITY

片桐 健,<sup>A)</sup> 涌井 崇志,<sup>A)</sup> 北條 悟,<sup>A)</sup> 河原 恵子,<sup>A)</sup> 杉浦 彰則,<sup>A)</sup>  
宮原 信幸,<sup>A)</sup> 白井 敏之,<sup>A)</sup> 岡田 高典,<sup>B)</sup> 立川 裕士<sup>B)</sup>

Ken Katagiri,<sup>A)</sup> Takashi Wakui,<sup>A)</sup> Satoru Hojo,<sup>A)</sup> Keiko Kawahara,<sup>A)</sup> Akinori Sugiura,<sup>A)</sup>

Nobuyuki Miyahara,<sup>A)</sup> Toshiyuki Shirai,<sup>A)</sup> Takanori Okada,<sup>B)</sup> Yuji Tachikawa<sup>B)</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, <sup>B)</sup> 加速器エンジニアリング株式会社  
<sup>A)</sup>QST/NIRS, <sup>B)</sup>Accelerator Engineering Corporation, Ltd.

### 概要

放射線医学総合研究所 (放医研) サイクロترون施設の特徴は、所内での活発な分子プローブ開発、その所内外での利用と供給のために、マシンタイムの多くの割合が放射性同位元素の生産に費やされることである。放医研サイクロترون施設は、2 台のサイクロترونを含む施設の運用・管理を本年度も順調に進めてきた。本年度の大型サイクロترونの総運転時間は前年度 (1645 時間)[1] から 6% 程増加し 1748 時間であった。核医学研究に費やす運転時間はこの数年増加傾向にあり、本年は全運転時間の 51.3% を占める 897 時間であった。小型サイクロترونの総運転時間は 1686 時間であり、前年度 (1547 時間) から 9% 程増加している。以下にこれらの詳細を示す。

### 1. はじめに

放射線医学総合研究所 (放医研) は大型・小型の 2 台のサイクロترونにより、核医学、物理学、生物学分野における基礎科学・応用研究のために、様々なイオンビームの供給を行ってきた [2]。特に、所内での活発な分子プローブ開発、その所内外での利用と供給のために、マシンタイムの多くの割合が放射性同位元素の生産に費やされることが放医研サイクロترون施設の特徴である。Fig. 1 に放医研サ

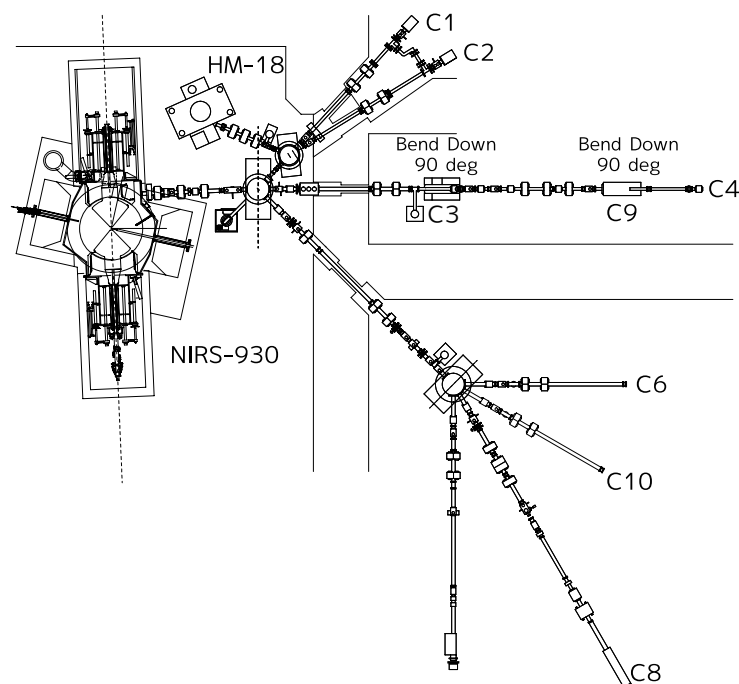


Figure 1: 放医研サイクロترون施設

Table 1: ビーム利用用途毎の運転時間, 及びその割合

	ビーム利用用途	運転時間 (h)	割合 (%)
(1)	核医学研究	897.0	51.3
(2)	物理学研究	311.7	17.8
(3)	生物学研究	0.0	0.0
(4)	有償ビーム提供	177.5	10.2
(5)	マシンスタディ・ビーム調整	361.8	20.7
	計	1748	100

Table 2: 大型サイクロトロンから供給されたイオンビームとそれに費やされた運転時間

イオン種	運転時間 (h)	割合 (%)	エネルギー (MeV)	運転時間 (h)	割合 (%)
陽子	909.2	52.0	18	129.5	7.4
			30	111.3	6.4
			40	37.8	2.2
			50	80.6	4.6
			60	89.3	5.1
			70	460.8	26.4
重陽子	78.2	4.5	20	78.2	4.5
水素分子イオン	253.1	14.5	24	186.1	10.6
			24.5	22.0	1.3
			27	45.0	2.6
ヘリウムイオン	416.3	23.8	24	18.8	1.1
			34	354.3	20.3
			75	42.9	2.5
			100	19.0	1.1
酸素イオン	23.6	1.3	230	23.6	1.3
ネオンイオン	49.0	2.8	190	49.0	2.8
計	1748	100		1748	100

イクロトロン施設のサイクロトロン, ビームトランスポート, 照射ポートを示す。大型サイクロトロン (Thomson-CSF 社製 930 型 AVF サイクロトロン) は, 1974 年に日本初の医療用のサイクロトロンとして建設されたものである。すでに運転開始から 44 年が経過しており, 制御システムや加速器の生命線とも言える電磁石用コイル等, 経年劣化のためにリプレイスが必要な箇所が生じている状況であるが, スタッフの保守・管理により現在でも運転が行えている。この大型サイクロトロンは, 陽子, 重陽子のみならず, ヘリウムイオン, 炭素イオン, 酸素イオン, ネオンイオン等, 多種多様なイオンビームの供給が可能である。もう一つの小型サイクロトロンは, PET 薬剤に用いる放射性核種の生産を目的として 20 年程前に導入されたものであり, 陽子, 重陽子のみ供給が可能である。これらの加速器からは, 合計 8 つの照射ポート (C1, C2, C3, C4, C6, C8, C9, C10) へとイオンビームが供給されている。C1, C2 は, 主に小型サイクロトロンからの陽子ビームが供給される照射ポートであり, PET 薬剤用の放射性核種 ( $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{18}\text{F}$ ) の製造にのみ用いられる。C3, C4, C9 は大型サイクロトロンからのビームが供給される照射ポートであり, 医療用の多種多様な放射性核種の製造に用いられている。C6, C8, C10 も同様に, 大型サイクロトロンからのビームが供給される照射ポートであり, 物理学・生物学分野の基礎科学実験のために用いられる。

Table 3: 核医学研究のために大型サイクロトロンから供給されたビームとそのための運転時間、及びそれにより生産された主たる放射性核種

イオン種	運転時間 (h)	割合 (%)	エネルギー (MeV)	運転時間 (h)	割合 (%)	生産された核種
陽子	298.6	33.3	18	104.6	11.7	<sup>225</sup> Ac, <sup>191</sup> Pt
			30	79.8	8.9	<sup>191</sup> Pt
			50	43.8	4.9	<sup>67</sup> Cu
			60	70.4	7.9	<sup>67</sup> Cu
重陽子	72.7	8.1	20	72.7	8.1	
水素分子イオン	183.0	20.4	24	116.0	12.9	<sup>64</sup> Cu
			24.5	22.0	2.5	<sup>89</sup> Zr
			27	45.0	5.0	<sup>124</sup> I
ヘリウムイオン	342.8	38.2	34	304.8	34.0	<sup>211</sup> At, <sup>74</sup> As
			75	37.9	4.2	<sup>28</sup> Mg
計	897	100		897	100	

本年度の大型サイクロトロンの総運転時間は 1748 時間であった。運転時間の増加が目立ったのは、物理学研究のためのビーム提供であり、本年度 (312 時間) は前年度 (281 時間) に比べて 11% 程増加した。核医学研究に費やす運転時間はこの数年増加傾向にあり、前々年度 (704 時間) からは 27%、前年度 (869 時間) からは 3.2% 増えて、本年は 897 時間であった。故障等による停止時間は前年度 (15 時間) と同程度の 17 時間に抑えられており、安定したビームの供給が大型サイクロトロンから行われた。小型サイクロトロンの総運転時間は 1686 時間であり、前年度 (1547 時間) から 9% 程増加した。以下に本年度における放医研サイクロトロン施設の運用に関する記録をまとめる。

## 2. 大型サイクロトロンの運用の記録

### 2.1 運転時間

本年度は、下記の通りに大型サイクロトロンを運用した:

- マシンタイム 第Ⅰ期: 4/2 – 9/14, 第Ⅱ期: 10/1 – 3/15
- 長期メンテナンス期間 9/18 – 9/28, 3/18 – 3/30
- 土曜日の運転回数 第Ⅰ期 6 回, 第Ⅱ期 7 回
- ビーム利用時間 8:30–17:00, ユーザーの要望により 19:00 まで延長の場合有り

本年度における、大型サイクロトロンから供給されるビームの利用用途とその時間、割合を示したものを Table 1 に示す。イオンビームの利用の用途は、ユーザーの利用目的に沿って、Table 1 の (1)–(5) に分けられる。(1) は診断用・治療用の放射性薬剤開発のために、様々な放射性核種の製造を行うものである。(2), (3) はそれぞれ、基礎的な物理学実験 (原子物理分野, 原子核分野, 検出器開発分野等) を行うもの、基礎的な生物学実験 (放射線生物学分野, 細胞照射実験等) を行うものである。これらは放医研の職員だけでなく、外部研究機関のユーザーによっても実施される。ユーザーは、得られた成果の報告書を提出し、無償にてビームを利用できる。(4) は成果の公表を控えたいユーザーを対象にしたもので、成果報告書の提出の必要は無く、有償にてビームを利用できる。ユーザーは、主に外部研究機関、一般企業の研究者・技術者である。(5) は、当施設のスタッフが、供給ビームの高強度化・安定化のために、ビームスタディ・調整を行うものである。運転時間として最も多いのは、(1) の核医学研究であり、その割合は 50% 以上にも達する。二番目に多いのは、(5) のマシンスタディ・ビーム調整である。前年度は 303 時間であり 20% 程増加している。この増加の一つの要因として、臨床研究用 <sup>64</sup>Cu の生産に備えた H<sub>2</sub><sup>+</sup> ビームの調整に時間を費やしたことが挙げられる。(4) の有償ビーム提供は 178 時間であり、平成

Table 4: 実施された物理研究のテーマ。各テーマの詳細に関しては本利用報告書を参照のこと。

	テーマ名	イオンビーム
物理研究	中高エネルギー粒子による核反応の研究	40, 70-MeV proton
	He ビームを用いた医療用 RI 製造技術にかかる基礎研究	24-MeV $^4\text{He}$
	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	24, 100-MeV $^4\text{He}$ , 230-MeV $^{16}\text{O}$
	最後方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定	70-MeV proton
	エッチング型飛跡検出器の閾値に対する化学的クライテリオンの確立	70-MeV proton, 100-MeV $^4\text{He}$
	陽子線治療の高度化にむけた放射線可視化技術の開拓	70-MeV proton
	高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究	70-MeV proton
	外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響評価	70-MeV proton

Table 5: 有償ビーム提供にて大型サイクロトロンから供給されたビームとそのための運転時間

イオン種	運転時間 (h)	割合 (%)	エネルギー (MeV)	運転時間 (h)	割合 (%)
陽子	178	100	30	19.8	11.2
			40	25.3	14.2
			50	14.8	8.3
			70	117.7	66.3
計	178	100		178	100

28 年以降から引き続き、多くの時間が費やされる傾向にある: H30 は 178 時間, H29 は 193 時間, H28 は 187 時間, H27 は 149 時間。以上を含めた大型サイクロトロンの総運転時間は 1748 時間であった。

Table 2 に、大型サイクロトロンから供給されたイオンビームとそれに費やされた運転時間、その割合を示す。この表中の運転時間は、Table 1 の用途 (1)–(5) の全てを勘定に入れたものである。運転時間のうち半分近くが陽子ビームの供給に使われている。そのなかでも割合が大きいのは、物理研究、生物研究、有償提供にてよく用いられる 70 MeV の陽子ビームである。続いて運転時間の割合が大きいのは、核医学研究にて使われる 34 MeV のヘリウムイオンビームである。

ビーム利用用途ごとの記録は下記の通りである:

- 核医学研究

Table 3 に核医学研究のために供給されたビームとそのための運転時間を示す。最も多く供給されたイオンビームは、本年度は全体の 38.2% を占めるヘリウムイオンビームであり、標的アイソトープ治療用薬剤開発に用いられる  $\alpha$  線放出核の  $^{211}\text{At}$  の生産のために主に供給された。続いて陽子ビームの運転時間が長く、標的アイソトープ治療用薬剤開発の関連研究として、 $\alpha$  線放出核の  $^{225}\text{Ac}$ 、オージェ電子放出核である  $^{191}\text{Pt}$ 、 $\beta$  線放出核の  $^{67}\text{Cu}$  の生産のために供給された。核医学研究に費やす運転時間はこの数年増加傾向にあり、前々年度 (704 時間) からは 27%、前年度 (869 時間) からは 3.2% 増えて、本年は 897 時間であった。

- 物理研究・生物研究

Table 4 に本年度実施に実施された物理研究のテーマを示す。本年度は、8 テーマについてビームの供給が行われた。

- 有償ビーム提供

Table 5 に、本年度実施された有償ビーム提供にて、供給されたビームとそのための運転時間を示す。66% もの時間が 70-MeV 陽子の供給に費やされている。有償ビーム提供に費やした時間は 178 時間であり、平成 28 年以降から引き続き、多くの時間が費やされる傾向にある: H30 は 178 時間, H29 は 193 時間, H28 は 187 時間, H27 は 149 時間。

Table 6: マシNSTAディ・ビーム調整として費やした大型サイクロトロンの運転時間

イオン種	運転時間 (h)	割合 (%)	エネルギー (MeV)	運転時間 (h)	割合 (%)
陽子	175.5	48.5	18	24.9	6.9
			30	11.7	3.2
			40	2.0	0.6
			50	22.0	6.1
			60	18.8	5.2
			70	96.1	26.6
重陽子	5.5	1.5	20	5.5	1.5
水素分子イオン	70.1	19.4	24	70.1	19.4
ヘリウムイオン	54.5	15.1	34	49.5	13.7
			75	5.0	1.4
酸素イオン	15.8	4.4	230	15.8	4.4
ネオンイオン	40.5	11.2	190	40.5	11.2
計	362	100		362	100

Table 7: 故障等による大型サイクロトロンの停止時間, 及びその原因 [3]

停止の原因	停止時間 (h)	割合 (%)	全運転時間に占める割合 (%)
電源系	13	76.5	0.7
取り出し装置系 (静電デフレクター)	3	17.6	0.2
冷却水系	< 1	< 6	< 0.1
イオン源系	< 1	< 6	< 0.1
計	17	100	1

#### ● マシNSTAディ・ビーム調整

Table 6 に, マシNSTAディ・ビーム調整として費やした大型サイクロトロンの運転時間を示す。運転時間は 362 時間であり, 前年度の 303 時間に比べて 20% 程増加している。この増加の要因として, 臨床研究用  $^{64}\text{Cu}$  の生産に備えた  $\text{H}_2^+$  ビームの調整, 物理研究新規課題のための 70-MeV 陽子ビームの調整に時間を費やしたことが挙げられる。

## 2.2 故障等による供給の停止 [3]

本年度, 故障等によって生じた大型サイクロトロンの停止時間及びその原因を Table 7 に示す。停止時間の最も大きな要因となっているのは, 電源系 (電磁石用直流電源, 電力管用高圧電源) であり, 全体の 76.5% を占めた。本年度も数日間供給が止まるような大きなトラブルはなく, 安定した運転が行われた。

## 3. 小型サイクロトロンの運用 [3]

小型サイクロトロンは陽子と重陽子を供給し, PET 薬剤に用いる放射性薬剤 ( $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ ) の生産のために用いられている。小型サイクロトロンに関するビーム利用用途別の運転時間, その割合を Table 8 に示す。総運転時間のうち, 3.4% はマシNSTAディ・ビーム調整に使用され, 残りの 96.6% は核医学研究のために使用された。総運転時間は 1686 時間であり例年 (前年度は 1547 時間) と同程度であった。Table 9 に故障等によって生じた小型サイクロトロンの停止時間及びその原因を示す。サイクロトロン内部に備わるイオン源の冷却系から水漏れが生じ, その修理に 1 時間, そしてサイクロトロン

Table 8: 小型サイクロトロンに関するビーム利用用途別の運転時間, 及びその割合 [3]

ビーム利用用途	運転時間 (h)	割合 (%)	イオンビーム	運転時間 (h)	割合 (%)
核医学研究	1628	96.6	18-MeV 陽子	1536	91.1
			9-MeV 重陽子	92	5.5
マシンスタディ・ビーム調整	58	3.4	–	58	3.4
計	1686	100	–	1686	100

Table 9: 故障等による小型サイクロトロンの停止時間, 及びその原因 [3]

停止の原因	停止時間 (h)	割合 (%)	全運転時間に
			占める割合 (%)
真空系	18	94.7	1.1
イオン源系	1	5.3	< 0.1
計	19	100	1.1

の運転が可能になるまでの加速箱の真空引きに 18 時間を要した。さらに, イオンビームを取り出し・ビームの供給が可能となるまで 48 時間費やし, その結果として Table 8 に示したマシンスタディ・ビーム調整の時間は, 前年度 (18 時間) に比べて大幅に増加している。この水漏れ故障以外には, 目立った故障は生じることなく, 安定した運転・供給が行われた。

## 参考文献

- [1] 片桐 他, 平成 29 年度放医研サイクロトロン利用報告書, 2018, pp. 2.
- [2] T. Honma et al., Proceedings of 18th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Giardini Naxos, Italy, 2007, pp. 137.
- [3] S. Hojo et al., the 15<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7–10, 2018, Nagaoka, Japan, pp. 1359.

# 放医研サイクロトロン施設の運転状況および整備等について STATE OF THE NIRS CYCLOTRONS

北條 悟<sup>A</sup>、涌井 崇志<sup>A</sup>、片桐 健<sup>A</sup>、宮原 信幸<sup>A</sup>、杉浦 彰則<sup>A</sup>、野田 章<sup>A</sup>、  
岡田 高典<sup>B</sup>、立川裕士<sup>B</sup>、白井 敏之<sup>A</sup>  
Satoru Hojo<sup>A</sup>, Takashi Wakui<sup>A</sup>, Ken Katagiri<sup>A</sup>, Nobuyuki Miyahara<sup>A</sup>, Akinori Sugiura<sup>A</sup>,  
Akira Noda<sup>A</sup>, Takanori Okada<sup>B</sup>, Yuji Tachikawa<sup>B</sup>, and Toshiyuki Shirai<sup>A</sup>

A：放射線医学総合研究所 物理工学部

B：加速器エンジニアリング株式会社

## 概要

放医研のサイクロトロン施設には、2 台のサイクロトロンが設置されている。1 台は、1974 年に運転開始をした大型サイクロトロン（NIRS-930）で、もう 1 台は、1994 年より PET 診断薬の製造を専門に行っている小型サイクロトロン（HM-18）である。2 台のサイクロトロンを含め、サイクロトロン施設では老朽化が進むなかで、各所修繕を繰り返しながら運転を続けている[1]。

本年度は、190 MeV Ne、230 MeV O のビーム供給の依頼があり新たなビームエネルギーとして供給対応することができた。また、昨年度製作したイオン源引き出し電極やビームバンチャー用のトランスの導入を行った。そのほか、電源の故障や、遮蔽扉の不具合に対する対処を行ったので、これらについて報告を行う。

## 1. ビーム調整

本年度は、新たなビームとして、190 MeV Ne と 230 MeV O のビーム供給を行った。NIRS-930 におけるマシンタイムの陽子から O や Ne までのすべてのマシンタイムは、永久磁石型 ECR イオン源 Kei-source 1 台で供給している[2]。O や Ne といった比較的重い粒子を加速する際には、価数を上げると有利であるが、価数の高いイオンは生成が困難なため、ビーム量との関係から価数を選択する必要がある。

新しいビーム要求として Ne<sup>10+</sup> 190 MeV をターゲット位置で 500 nA の要求があった。NIRS-930 で Ne を 190 MeV まで加速するためには、磁場と最大半径の関係から Ne を 6 価以上の価数にする必要がある。6 価で加速した場合には NIRS-930 サイクロトロンの最大励磁に近い磁場での加速となる。さらに高い価数の方が磁場を下げることができ、且つ、加速電圧や取出しデフレクタ電圧等の運転条件も有利になる。しかしながら、要求されたターゲット位置でのビーム強度を実現するために、Kei-source でビーム強度が得られる Ne<sup>6+</sup> を選択した。Ne<sup>6+</sup>イオンを多く生成するために、Ne ガスに加えて、サポートガスとして He ガスを用いた。Kei-source からの引き出し電圧は 19.3 kV で、10  $\mu$ A の Ne<sup>6+</sup>イオンを取り出すことができた。このビームを NIRS-930 へ入射、加速、取り出しをして、650 nA の Ne<sup>6+</sup> 190 MeV ビームを得ることができた。

NIRS-930 から取出し後のビームは Ne<sup>6+</sup>なので、要求されているフルストリップの Ne<sup>10+</sup>にするには荷電変換をする必要があった。そこで NIRS-930 の取出し直後の輸送ラインで 100  $\mu$ g/cm<sup>2</sup> の炭素膜（CFS）を用いて荷電変換を行った。Ne<sup>6+</sup>イオンを 650 nA 入射した際の各価数のビーム量とその割合を表 1 に示す。Ne<sup>10+</sup>は、要求されている強度が 500 nA であったのに対し 800 nA を確認することができた。Ne<sup>9+</sup>は 47 nA で Ne<sup>8+</sup>は 0.5 nA であった。Ne<sup>7+</sup>と Ne<sup>6+</sup>は検出されなかった。これらのビーム電流を各イオンの電価数で割った値では、入射した Ne<sup>6+</sup>の 74.1%が Ne<sup>10+</sup>へと変換されたことが分かる。それ以外の価数で見られたのは、Ne<sup>9+</sup>の 4.8%で、Ne<sup>10+</sup> と Ne<sup>9+</sup>の合計は、78.9%となっている。残りの 2 割程度のビームは、CFS を固定している  $\Phi$ 20 のフレームで損失していると考え

表 1. Ne<sup>6+</sup> 650 nA (108 pA)を CFS 100  $\mu$ g/cm<sup>2</sup> 入射

イオン	ビーム電流	ビーム量 (pA= ビーム電流/価数)	割合 (入射 108 pA に対し)
Ne <sup>10+</sup>	800 nA	80 pA	74.1%
Ne <sup>9+</sup>	47 nA	5.2 pA	4.8%
Ne <sup>8+</sup>	0.5 nA	0.06 pA	<0.1%
計			78.9%

えられる。また、 $\text{Ne}^{10+}$ に変換後にバンチモニターを用いた TOF 法[3]によるエネルギーの測定を行い、その結果は 188.7 MeV であった。

次に、230 MeV  $\text{O}^{8+}$ をターゲット位置で 300 nA のビーム要求があった。NIRS-930 において酸素を 230 MeV まで加速するためには、酸素を 6 価以上のイオンにする必要がある。イオン源からの引き出し電圧は 21.2 kV で、サポートガスは、Ne と同様に He ガスを用いた。その結果、イオン源から 7.5  $\mu\text{A}$  の  $\text{O}^{6+}$ イオンを取り出すことができた。この強度で、入射、加速、取り出しを行った結果、500 nA (83 pA) の 230 MeV  $\text{O}^{6+}$ が得られた。さらにフルストリップにするため、Ne と同様の CFS に通した結果、230 MeV  $\text{O}^{8+}$ が 440 nA (55 pA)を得ることができた。 $\text{O}^{6+}$ から  $\text{O}^{8+}$ へ荷電変換された割合は、CFS のフレームでの損失を含め、66%であった。また、TOF 法によるエネルギーの測定の結果は、230.0 MeV と公称値に非常に近い値であった。

## 2. 装置の改良や計画について

Kei-source の引き出し電極の駆動サポート部に不具合が生じていたため、昨年度に設計製作を行った引き出し電極を導入した。これまで使用してきた電極位置に設置し、各ビーム供給用のパラメーターでビーム供給に十分なビーム強度の確認をすることができた。今後、駆動用モーターの取り付けや、制御系の開発を進め、遠隔操作化を行っていく予定である。

また、高強度化にむけての改良開発を進めている。まず、入射ラインで用いているビームバンチャーにおいて、鋸歯状波を用いるために昨年度に製作したインピーダンス変換トランスを導入した。基本波による運転を行い、整合回路を用いた時と同様のバンチャー効率を得ることができている。今後、波形合成制御システムの構築を行い、鋸歯状波での高効率でのビームバンチャーの開発を行っていく予定である。さらに、設計検討を進めた高電圧入射化にむけて、NIRS-930 の中心領域の各電極の詳細設計を進めた。今後、製作、導入テストと進めていく予定である。

## 3. 故障事例対応等

ビーム供給に支障が出てしまった故障は、電力管用高圧電源や電磁石用直流電源で発生した。電力管用高圧電源では、電力管保護用のクローバー制御回路に用いられている基板に故障が発生した。汎用的なオペアンプの故障であったため、オペアンプの交換にて修理完了となった。電磁石用の直流電源では、トリムコイル電源とマグネティックチャンネル用直流電源 (CM1 電源) において、故障による供給停止が発生している。トリムコイル電源では、入力 AC 電源用大電流 NFB に故障が生じた。トリムコイル電源は、26 年間稼働を続けており、故障した NFB は、運転日には立上げ作業と立ち下げ作業で、毎回操作されるものであった。その動作回数は概算でも 5700 回以上となっている。NFB の故障原因は NFB 内部のコンダクタを駆動させる金属部品が割れてしまったことによるもので、この金属部品の割れにより操作レバーが動作できずに電源投入ができない状態となった。使用年数と動作回数からも金属疲労によるものと考えられ同年代の電源で、同様に立ち上げ、立ち下げ作業で操作される NFB をすべて交換することとした。また、CM1 電源にて、オー



写真 1. CM1 電源チョークコイル温度測定  
整して使用している。

バーヒートが発生した。オーバーヒートの詳細は Y 相、 $\Delta$  相それぞれの整流回路に使用しているチョークコイルの発熱によるものであった。電源の出力電流が高くなると Y 相、 $\Delta$  相のバランスが悪くなり、電流に偏りが生じてしまっていた。また、その条件として、NIRS-930 の主コイル電源の出力状態により、CM1 電源の Y 相  $\Delta$  相のバランス状況に変化が出てしまうことが分かったが、原因は、未だつかめておらず調査中となっている。現状は、NIRS-930 の運転条件の主コイル電源にあわせて、CM1 電源の出力バランスを調



また、HM-18 でも供給停止となる故障事例が発生した。これは、内部イオン源からの真空チェンバー内への水漏れによるものである。水漏れした内部イオン源を予備機と交換し、漏水処理後、数時間で真空排気を行った。しかしながら、真空ポンプのポンプヘッドでの真空度は通常の運転状態と同程度になったが、加速箱内部や中心領域の真空が局所的に悪いのか、取り出し半径 425 mm に対し、半径 150 mm にあるビームプローブまでもビームが加速されない状態が続いた。加速高周波電圧を印加しベークিংを続け、ビームを取り出して供給可能となるまでに 42 時間もの長時間を要してしまった。

#### 4. その他、施設設備メンテナンス作業等

サイクロトロン施設周りのメンテナンスとして、遮蔽扉のメンテナンスを行った。サイクロトロン棟には、電動の遮蔽扉が 6 基あり、4 基が遮蔽体としてコンクリートを用いており、3 基が遮蔽体に水を用いたものである。また、コンクリート 3 基のうち 2 基が屋外に設置されている。これらの遮蔽扉をメンテナンスするには、建設時の機械構造等の詳細な情報が不明確なため、分解調査を行い、部品の確認をしながら進めていく必要があった。本年度は、一番開閉頻度の高い扉で傾きが大きく状態が悪い RI 生産照射室の水扉と、屋外に設置されている本体室、汎用照射室の 2 台のコンクリート扉の計 3 台のメンテナンスをおこなった。一番状態の悪い RI 生産照射室の水扉は、駆動時の扉の傾きが大きく壁面と接触してしまっていた。そのため、壁面との接触部にガイドローラーが取り付けられており、このガイドローラーが壁面に当たり扉を支えて転がりながら動いている状態であった。水扉のメンテナンスは、まず、作業性を良くするために、内部の水をサンプリング測定した後、水抜きを行った。水抜き後、内部の防水塗装、腐食していた駆動軸のシールカップリングとフランジの交換、水位計の交換、上面給水用マンホールの更新、車輪周りの寸法確認とベアリング交換等を行った。また、車輪の高さ調整により、傾きを補正したが駆動の際に壁面とガイドローラーの接触が若干残っている。今後、壁面へ接触することなくレールに沿って駆動するよう車輪の改良を進めていく予定である。また、屋外の 2 台のコンクリート扉については、ケーブル滑車の交換、ベアリング部の清掃及びグリスアップを実施、車輪の高さ調整により、壁面との擦れを解消することができた。また、車輪寸法やベアリング型式等の部品の詳細を確認し、今後に備えるかたちとなった。



写真2 駆動軸受けフランジ部内側 メンテナンス前後



写真3 水位計 メンテナンス前後



写真4 給水用マンホール開口部 メンテナンス前後

#### 参考文献

- [1] 北條 悟, 涌井 崇志, 片桐 健, 杉浦 彰則, 宮原 信幸, 岡田 高典, 立川 裕士, 白井 敏之 “放医研サイクロトロン施設の現状報告” 第 16 回日本加速器学会年会 Kyoto, Japan, August 2019, FSPI017
- [2] S. Hojo, et al., “Status of a compact electron cyclotron resonance ion source for National Institute of Radiological Sciences-930 cyclotron”, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 85, 02A959 (2014)
- [3] S. Hojo, et al., “A beam energy measurement system at NIRS-930 cyclotron” in Proc. Cyclotrons'04, Tokyo, Japan, October 2004 p. 407.

## 2. 核医学研究

## サイクロトロン製の標識薬剤の製造・開発への利用状況

Production and Development of Radiopharmaceuticals Using Cyclotron in 2018

武井 誠、鈴木 寿、菊池 達矢、藤永 雅之、破入 正行、石井英樹、永津  
弘太郎、河村 和紀、張 明栄

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

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 標識薬剤開発部

### 概要

標識薬剤開発部では、臨床診断・治療や生体機能の計測に有用な放射性核種標識薬剤の開発、標識薬剤合成に必要な放射性核種の製造及び標識・分析技術の開発研究を行っている。また、安全で高品位な標識核種及び診断・治療用の放射性薬剤を供給しており、脳機能イメージング研究部、分子イメージング診断治療研究部のみならず放射線医学総合研究所付属病院や外部の大学・研究機関・企業の研究者に広く提供している。

これらの研究の主な用途は、放射性核種の効率的な製造法の確立、新規放射性薬剤及び標識技術(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) がん患者への診断/治療研究、3) 認知症や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。本報告書では新規標識薬剤の開発状況及び放射性核種・薬剤の安定製造状況を報告する。

### 1. 標識薬剤開発部の開発研究状況

新規標識薬剤の開発、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様々の短寿命放射性核種が製造されている。また、これらの核種及び標識技術を利用し、多数の有用な放射性プローブが開発され、3 種の新規薬剤の臨床利用が可能となった。以下にこれらの研究について代表的な成果を紹介する。

1) 新規標識合成中間体(R/S) [ $^{18}\text{F}$ ]epifluorohydrin の製造条件を確立し、数種の PET プローブの開発と製造に応用した。また、前臨床評価で有用性が認められた数種の診断/治療用放射性薬剤を開発した。また、ヨウ化 [ $^{131}\text{I}$ ]メチル、 [ $^{131}\text{I}$ ]ホスゲン、 [ $^{18}\text{F}$ ]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。さらに、正常及びモデル動物を用い、多数のプローブの有用性を

評価した。

2) 薬剤の定常提供を行いながら、さらに、3 種の診断用新規 PET 薬剤 ( $[^{11}\text{C}]\text{MePro}$ , (R)  $[^{18}\text{F}]\text{PM-PBB3}$ , (S)  $[^{18}\text{F}]\text{PM-PBB3}$ ) の製法及び分析法を確立し、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、これらの臨床への提供を開始した。また、がん治療用放射性薬剤  $[^{64}\text{Cu}]\text{Cu-ATSM}$  の製剤化に成功し、臨床研究への提供を行なっている。

3) 国際共同研究では、IAEA-CRP の研究課題を継続している。実践的な製造・品質評価並びに品質保証について、Cu-64 を高頻度に製造・提供し、治療臨床試験に供する Cu-64-ATSM の GMP 製造を実現した。また、治療用 RI として注目が集まる At-211 について、所内外のユーザーに対し約 20 回の提供を行うなど、基盤技術を担う部署としての出力を果たした。

新たな治療候補核種として Ac-225 の製造可能性を実証すると共に As-74 の製造法を確立し、As-74 については異なる 2 つの化学形を得ることに成功した。

## 2. 標識薬剤開発部の生産・提供状況

平成 30 年度に製造した放射性薬剤は、腫瘍診断 ( $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ )、脳機能測定 ( $[^{11}\text{C}]\text{BTA}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{PBB3}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{PMPBB3}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{FMeNER}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{ABP688}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{SCH}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{RAC}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{FLB}$ ) などの臨床利用、サル、ラット、マウスなどの動物実験 ( $[^{11}\text{C}]\text{AC-5216}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{GW2580}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{C22b}$ 、 $[^{11}\text{C}]\text{MeTrp}$ 、 $^{15}\text{O-H}_2\text{O}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{MAGL-X}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{PMPBB3}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{FEDAC}$ 、 $[^{18}\text{F}]\text{5-FU}$ 、 $[^{64}\text{Cu}]\text{TPP-1}$ 、 $[^{211}\text{At}]\text{AITM}$  など)、校正用ファントム線源 ( $^{18}\text{F}$  など) 等へ提供した。また、大型サイクロトロンを利用して製造を行った  $^{28}\text{Mg}$  水溶液、 $^{64}\text{Cu}$  水溶液、 $^{211}\text{At}$  水溶液などを数施設の研究機関に譲渡した。

設備関係では、サイクロトロン棟第二ホットラボ室でシアン合成装置を新たに導入し、臨床に向けた合成実験を行い、来年度から薬剤提供を行う予定である。また、サイクロトロン棟第一ホットラボ室では、放医研で開発した多目的合成装置 (3 台)、 $^{11}\text{C}$  合成装置 (1 台)、超高比放射能合成装置 (1 台) と  $^{18}\text{F}$ -有機合成装置 (1 台) を配置し、第二ホットラボ室では多目的合成装置 (2 台) を設置して多種多様な標識薬剤を合成している。

なお、平成 30 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30年度に製造した標識化合物および生産量

核種	化合物	生産量		診断供給量			動物供給量		譲渡	
		放射能 (GBq)	回数 (回)	放射能 (GBq)	回数 (回)	人数 (人)	放射能 (GBq)	回数 (回)	放射能 (GBq)	回数 (回)
<sup>11</sup> C	PBB3	82.733	48	37.431	39	39	3.150	13	—	—
	BTAA	209.880	71	135.173	70	117	0.352	1	—	—
	MTP38	160.567	45	—	—	—	12.250	30	—	—
	RAC	12.937	5	—	—	—	2.421	5	—	—
	FLB	53.415	18	28.081	15	15	—	—	—	—
	C22b	95.049	35	—	—	—	16.557	34	—	—
	GW2580	51.536	20	—	—	—	6.660	18	—	—
	ABP688	79.404	28	32.215	19	19	4.922	9	—	—
	MNAH	13.752	17	—	—	—	0.703	15	—	—
	AZD1283	18.570	10	—	—	—	1.850	5	—	—
	MP4A	13.237	15	—	—	—	2.886	13	—	—
	AC5216	78.072	27	—	—	—	10.815	27	—	—
	MAGL-1	78.045	46	—	—	—	16.650	45	—	—
	PP-Amide-3	13.321	15	—	—	—	2.812	9	—	—
	MET	37.180	4	—	—	—	—	—	—	—
	SCH	89.190	32	54.839	31	31	0.950	2	—	—
	MePro	13.360	3	—	—	—	—	—	—	—
	CH3I	18.700	51	—	—	—	1.850	50	—	—
	その他	587.232	354	—	—	—	59.913	218	—	—
<sup>15</sup> O	H2O	101.908	20	—	—	—	94.436	17	—	—
<sup>18</sup> F	PMPBB3	228.489	84	97.684	56	110	30.586	71	—	—
	R-PMPBB3	11.187	7	—	—	—	—	—	—	—
	S-PMPBB3	10.303	6	—	—	—	—	—	—	—
	FEAKT	17.971	16	—	—	—	4.945	16	—	—
	MNI-659	72.789	65	35.426	46	46	2.700	8	—	—
	T-401	52.748	26	12.586	11	11	5.900	15	—	—
	FETDAA	3.471	2	0.817	1	1	0.370	1	—	—
	FEDAC	33.962	33	—	—	—	3.395	7	—	—
	FETMP	25.624	19	—	—	—	5.402	19	—	—
	FMeNER	0.012	21	0.007	17	17	—	—	—	—
	FDG	160.074	20	72.165	16	36	—	—	—	—
	F-	44.584	19	—	—	—	0.999	14	—	—
	その他	136.164	143	—	—	—	12.613	49	—	—
<sup>28</sup> Mg	水溶液	0.050	6	—	—	—	—	—	0.043	6
<sup>64</sup> Cu	水溶液	257.875	19	—	—	—	55.222	50	12.568	11
<sup>67</sup> Cu	水溶液	0.037	1	—	—	—	0.037	1	—	—
<sup>74</sup> As	水溶液	0.325	3	—	—	—	0.270	2	—	—
<sup>89</sup> Zr	水溶液	1.867	3	—	—	—	0.570	5	0.146	3
<sup>111</sup> Ag	水溶液	0.020	1	—	—	—	0.020	1	—	—
<sup>124</sup> I	水溶液	0.020	1	—	—	—	—	—	—	—
<sup>191</sup> Pt	水溶液	0.020	1	—	—	—	—	—	—	—
<sup>211</sup> At	水溶液	8.329	23	—	—	—	2.499	19	0.515	4
合計		—	1,383	—	321	442	—	789	—	24

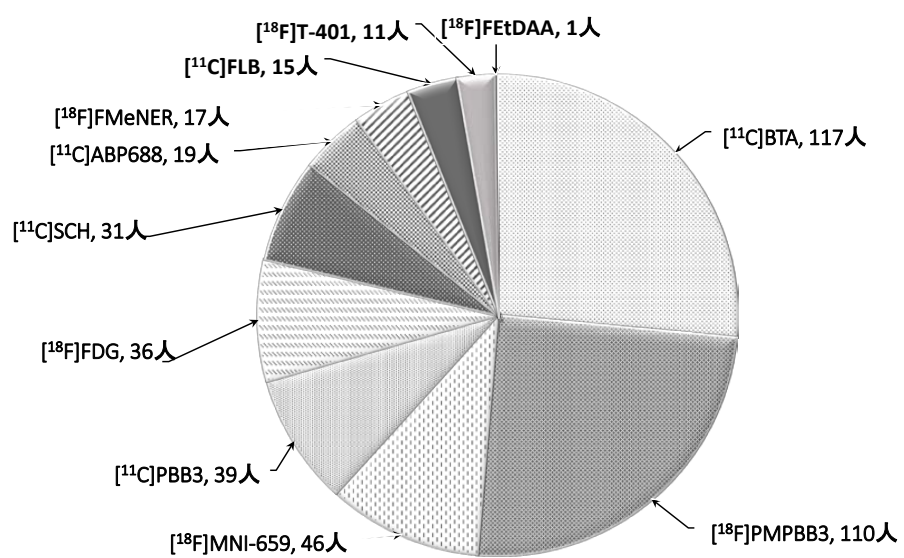


図1. 平成30年度における被験者数(442人)

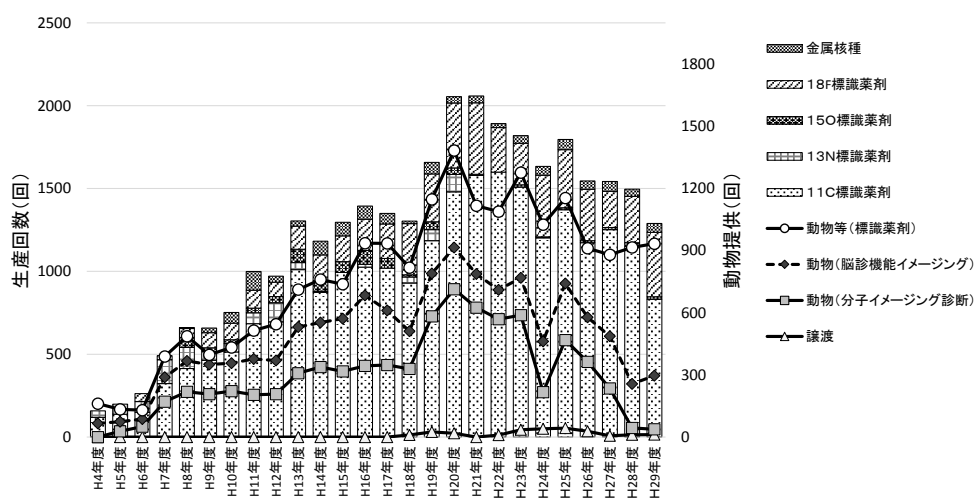


図2. 生産回数と提供回数の推移

### 3. 物理学/生物学研究



# 核破碎片生成二重微分断面積の測定

## DOUBLE DIFFERENTIAL CROSS SECTION OF FRAGMENT PRODUCTION

山口 雄司<sup>A</sup>, 佐波 俊哉<sup>B</sup>, 魚住 裕介<sup>C</sup>, 古場 裕介<sup>D</sup>  
Yuji Yamaguchi<sup>A</sup>, Toshiya Sanami<sup>B</sup>, Yusuke Uozumi<sup>C</sup>, Yusuke Koba<sup>D</sup>

<sup>A</sup>九州大学大学院工学府

<sup>B</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>C</sup>九州大学大学院工学研究院

<sup>D</sup>量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所

### 概要

平成 30 年度の放医研サイクロトロンの実験では, (p, p'x)反応における蒸発過程からの陽子のエネルギースペクトルの取得を目的として, 70 MeV 陽子入射に対する炭素, アルミニウム, 銅, 銀, タンタル, 金ターゲットからの陽子および核破碎片生成二重微分断面積(DDX)測定をおこなった。

### 1. はじめに

九州大学, 高エネルギー加速器研究機構, 放射線医学総合研究所からなる当グループでは(p, p'x)反応における蒸発過程からの陽子の角度分布とエネルギースペクトルを取得することを目的として, 放医研サイクロトロンを利用した実験データの取得をおこなっている。これまでの研究[1-10]により, 陽子, 重陽子, ヘリウム原子核, 炭素入射に対するベリリウム, 炭素, アルミニウム, チタン, 銅ターゲットからの核破碎片生成二重微分断面積が得られている。これらの実験データと理論計算の結果を比較することにより, 核破碎片生成にはその前段階に当たる核子-核子散乱過程でのエネルギーと核子の放出が寄与していることがわかってきた。核子-核子散乱過程で放出される粒子は陽子, 重陽子, 三重陽子, ヘリウム原子核などの比較的軽い粒子であり, これまである程度の実験データが得られているが, 核破碎片と同時に測定された例はほとんどない。そこで, 測定対象粒子の拡充を目的とした検出器の改良, 測定角度の拡充を目的とした散乱チェンバーの改良と改良型検出器の増設をおこない, 核破碎片と同時に陽子やヘリウム原子核などの軽粒子の測定が可能となった。昨年度には, 60度方向に放出した陽子のエネルギースペクトルを取得し, 先行研究データ[11, 12]との整合も確認できた。本年度, 最前方角での陽子測定のために, ビームコリメータを導入してサンプルフレーム散乱を抑制し, データ取得を図った。本報告では, 改良型検出器, 散乱チェンバーの概要と今年度の測定結果について述べる。

### 2. 実験

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 コースにておこなった。(p, p'x)反応における蒸発過程からの陽子のエネルギースペクトルの取得を目的として, 70 MeV 陽子入射による炭素, アルミニウム, 銅, 銀, タンタル, 金ターゲットからの陽子および核破碎片生成二重微分断面積を測定した。実験体系の写真を図 1 に示す。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。ここでは軽粒子および核破碎片測定のための改良型検出器と測定角度拡充のための改良型散乱チェンバーおよびサンプルフレーム散乱抑制のためのビームコリメータについて記述する。

核破碎片の測定にはブラッグカーブカウンター(BCC)を用いており, これに独自に開発した, カソード信号を用いた低エネルギー粒子弁別能力の改善[2], 突き抜け粒子のエネルギー補正による高エネルギー粒子の測定[3]という手法を適用し, 核破碎片の測定のために必要とされる効率と可測定エネルギー域の確保をおこなっている。BCC で測定可能な粒子はリチウム以上の粒子であり, これより軽い粒子では検出器厚

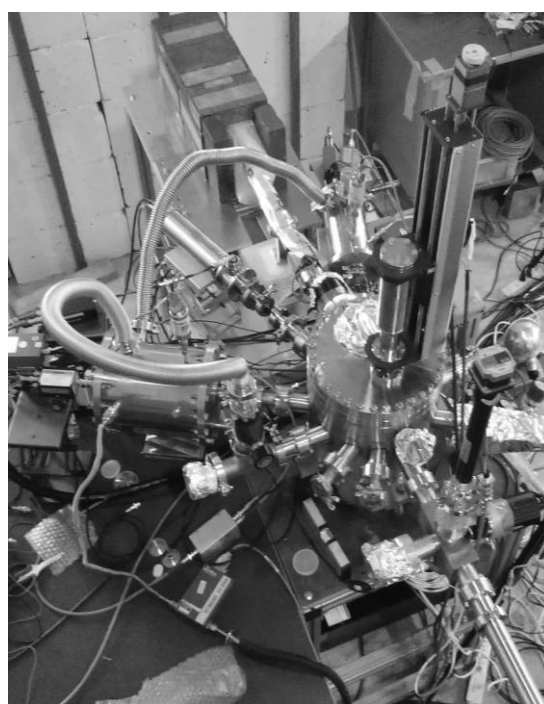


図 1 C6 コースに構築した実験体系の写真

みと分解能が十分ではなく、十分に測定がおこなえない。そこで1台のBCCに対し、(1) 前置増幅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) Si 半導体検出器(SSD)を組み合わせることにより軽粒子を測定可能にし、(3) 全体を小型化して測定角度の拡充をおこなっている。

図2に改良型BCCの断面図を示す。アノードと検出器フランジの間に70 mm程度のスペースを設けて、アノード用前置増幅器とSi半導体検出器を組み込み可能な形状とした。アノード用前置増幅器としては、これまで用いているクリアパルス社製581型を利用した。Si半導体検出器にはセイコーEG&G社製のTB-023-450-400 (1st SSD 400  $\mu\text{m}$ ), TB-019-300-1000 (2nd SSD 1000  $\mu\text{m}$ )を組み込んだ。さらに後段に2nd SSD 突き抜け粒子を測定できるようにBGOシンチレータを取りつけた。この改良型BCCを用いることで、核破砕片と同時に陽子の測定が可能となったため、後述の散乱チェンバーを用いた測定系の利用によって、蒸発過程からの陽子の角度分布とエネルギースペクトルを取得できる。

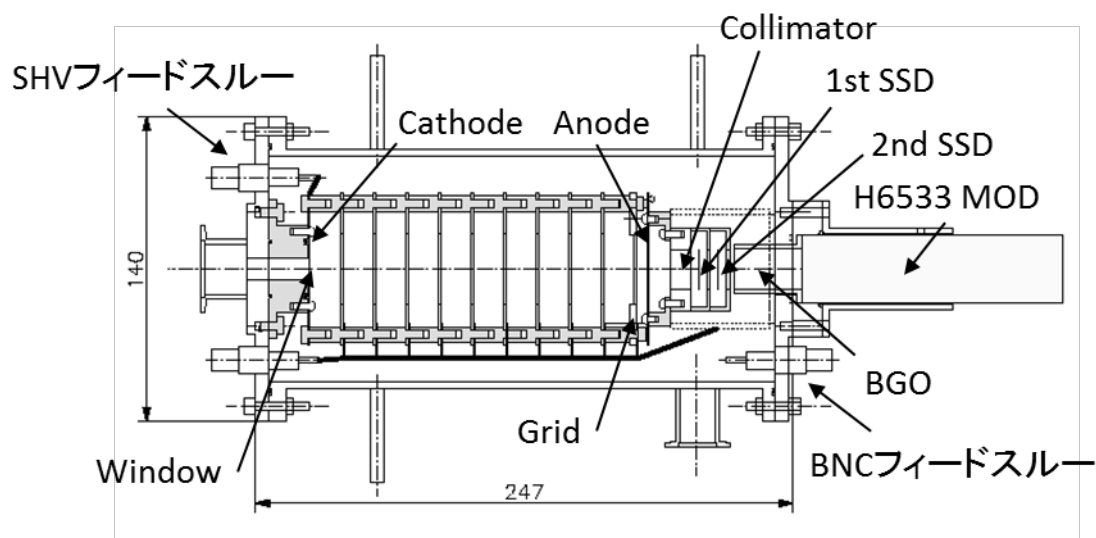


図2 改良型BCCの断面図

上記BCCと組み合わせて用いる散乱チェンバーの縦断面図と平面図を図3に示す。散乱チェンバーについては(1) 検出器に関して最前方のみ小型の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) 散乱チェンバーの真空を効率的に引くために、チェ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) 専用の架台に配して容易に設置できるようにした。改良型散乱チェンバーの使用は2014/12/19からである。

本年度の測定では図3の体系におけるチェンバー上流側に、サンプルフレーム散乱抑制のためのビームコリメータを導入した。コリメータはステンレス製で、サンプル径 $\phi 20$ に対してアパーチャー径 $\phi 15$ , 70 MeV陽子を全停止させることができる厚さ10 mmである。

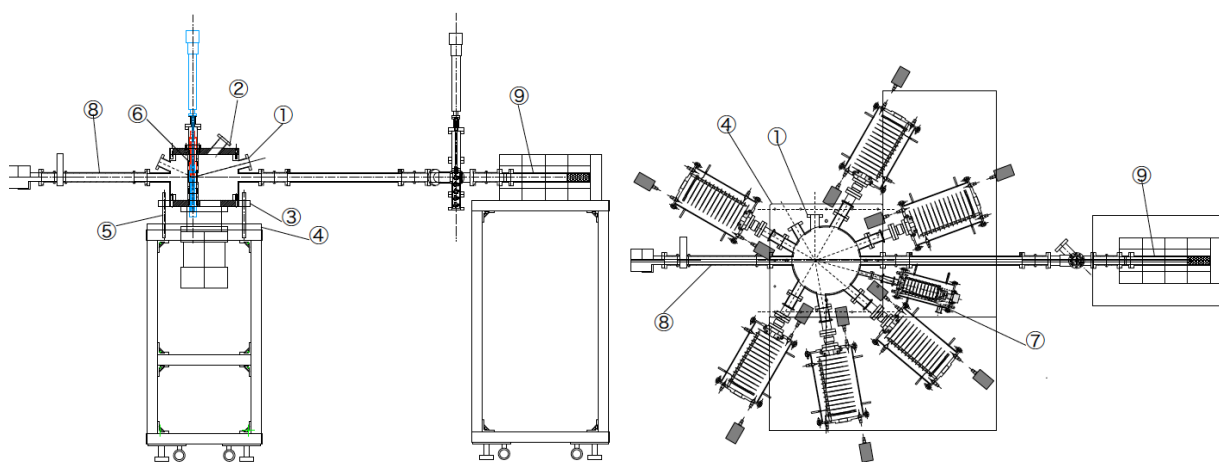


図3 散乱チェンバーの縦断面図(左)と平面図(右)

### 3. 結果と考察

図4にアルミニウムターゲットを用いた15度での測定におけるサンプルフレーム散乱の成分を、コリメータ使用時、不使用時について示す。コリメータを使用することで、コリメータを使用しない場合に強くあらわれる50, 60 MeVのピークや数MeVの低エネルギー領域の成分を1, 2桁抑えられることがわかる。ここで、高エネルギー領域のピークは、サンプルフレーム板または板とサンプルおさえによる入射陽子の散乱成分である。コリメータ不使用時にあらわれるサンプルフレーム散乱成分は、図5右上に示すDDXと同程度の大きさを示すので、サンプルフレーム散乱成分を抑制することで15度での測定が可能である。

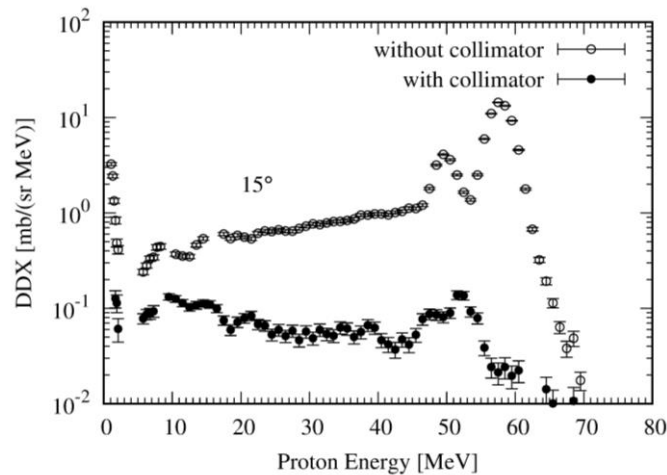


図4 アルミニウムターゲットを用いた測定におけるサンプルフレーム散乱の成分

図5に炭素、アルミニウム、銅、銀、タンタル、金ターゲットから15度方向に放出した陽子のDDXの測定結果と計算値を示す。計算値はPHITSコード3.02によるものである。物理オプションにはデフォルト値を用いてある。取得したスペクトルは12 MeV以上においてすべてのターゲットについて同様の傾向を示し、エネルギーの増加とともに増加し、70 MeVに弾性散乱ピークをもつ。一方、12 MeV以下ではターゲットによってスペクトルの傾向が異なる。炭素、アルミニウムターゲットではDDXは1 MeVから12 MeVまで同程度の値を示すが、銅、銀ターゲットまで重くなると7 MeV程度にピークをもち、さらに重いタンタル、金ターゲットではエネルギーの減少とともに減少する。タンタル、金ターゲットでのDDXの減少は、陽子放出がクーロン障壁によって抑制されることによるものと考えられる。

計算結果はすべてのターゲットについて15 MeV以上の高エネルギー領域で過小評価することがわかる。15 MeV以下の低エネルギー領域では銀より軽いターゲットについて、計算結果はおおむね測定結果を再現する。一方、タンタル、金ターゲットについて計算結果は15 MeV程度で急激に減少し、エネルギーの減少とともに減少、8 MeV程度でピークを示しており、測定結果の傾向を再現しない。この15 MeV程度での急激な減少の原因として、カスケード過程を計算する物理モデルのエネルギー下限が蒸発過程を計算する物理モデルと整合していないことが考えられる。

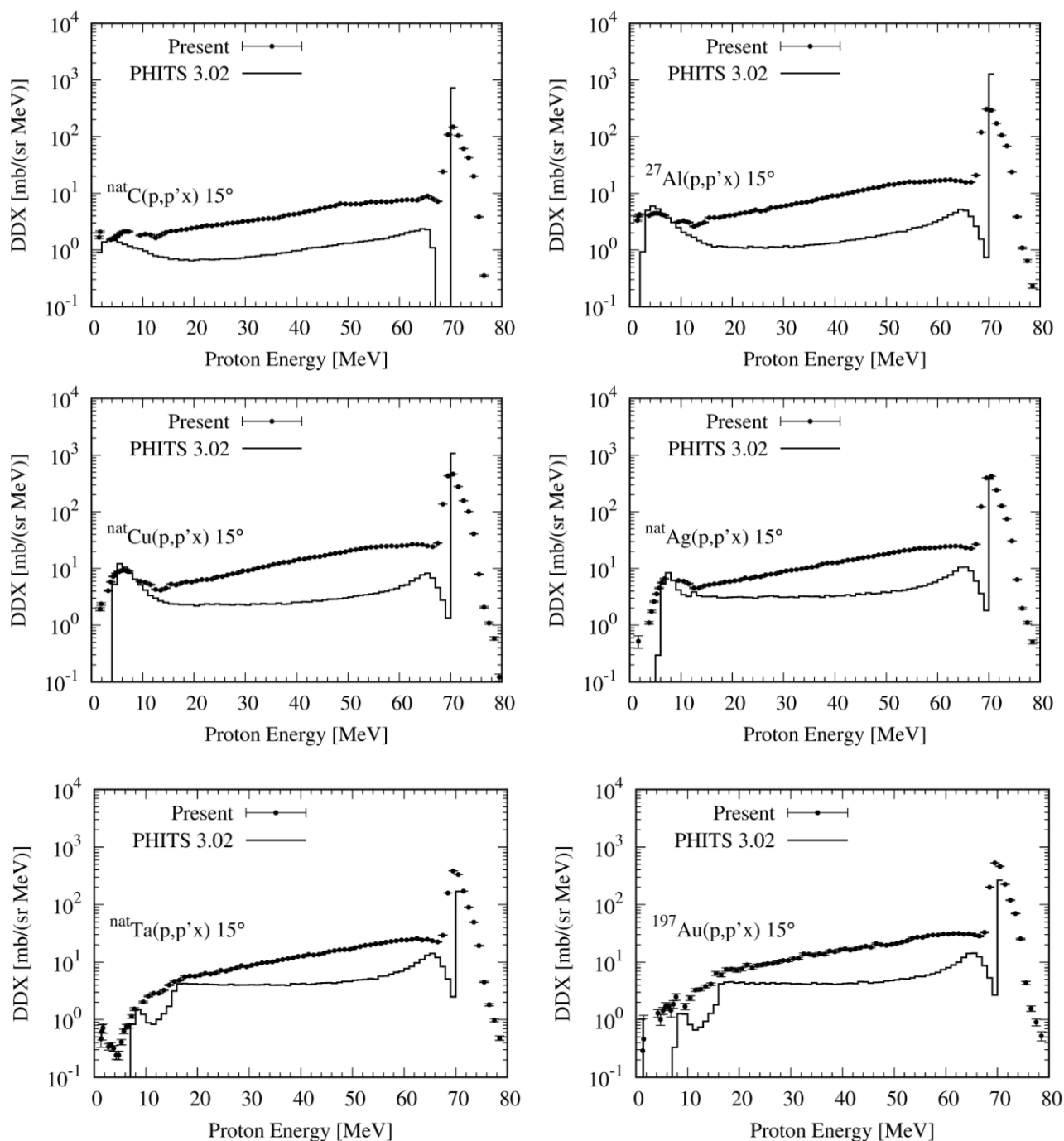


図5 炭素, アルミニウム, 銅, 銀, タンタル, 金ターゲットからの放出陽子エネルギースペクトルの測定値と計算値

#### 4. まとめ

平成 30 年度のマシンタイムにおいてはビームコリメータを用いてサンプルフレーム散乱を抑え, 最前方角 15 度で陽子のエネルギースペクトルを取得した。今後, 後方角における陽子, 軽粒子のデータも取得していく。

#### 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. Instrum. Meth.* **A589** 193 (2008).
- [3] M. Hagiwara *et al.*, *Nucl. Instrum. 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).
- [11] F. E. Bertrand and R. W. Peele, “Complete Hydrogen and Helium Particle Spectra from 30- to 60-MeV Proton Bombardment of Nuclei with  $A = 12$  to 209 and Comparison with the Intranuclear Cascade Model”, *Phys. Rev. C* **8**, 1045 (1973).
- [12] M. Harada *et al.*, “Light Charged-Particle Production in Proton-Induced Reactions on  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{197}\text{Au}$ , and  $^{209}\text{Bi}$  at 42 and 68 MeV”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **39:sup 2**, 393-396 (2002).

# He ビームを用いた医療用 RI の製造技術にかかる基礎研究 Feasibility Study on a Medical Radioisotope Production Using He Beam

萩原 雅之<sup>A</sup>, 八島 浩<sup>B</sup>, 佐波 俊哉<sup>A</sup>, 米内 俊祐<sup>C</sup>

Masayuki Hagiwara<sup>A</sup>, Hiroshi Yashima<sup>B</sup>, Toshiya Sanami<sup>A</sup>, Shunsuke Yonai<sup>C</sup>

<sup>A</sup> 高エネルギー加速器研究機構

<sup>B</sup> 京都大学複合原子力科学研究所

<sup>C</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

## 概要

原子炉の老朽化や核不拡散上の問題等のため世界的な供給不足が危惧されている放射性医薬品（テクネチウム製剤）の原料となるモリブデン 99 (<sup>99</sup>Mo) の長期的な安定供給のために、高濃縮ウランや原子炉に依存しない小型加速器を利用した新たな <sup>99</sup>Mo 製造技術開発にかかる基礎検討を行っている。今年度は、放医研サイクロトロン C6 コースにおいて、しきいエネルギー近傍の 24.5 MeV と 24.6 MeV に加速した He ビームを <sup>nat</sup>Zr 標的に照射し、それぞれ中性子・γ 線生成量の測定と放射性核種生成断面積の測定を行った。

## 1. はじめに

国内で最も多く利用されている放射性医薬品（テクネチウム：<sup>99m</sup>Tc 製剤）の原料となるモリブデン 99 (<sup>99</sup>Mo) については、現在その供給量のほぼ 100%を輸入に依存しており、製造元の原子炉の老朽化や空輸でのトラブルによる供給不足が深刻な問題となっている。<sup>99</sup>Mo の国内自給自足を想定すると、既存の原子炉を用いて、高濃縮ウランの核分裂反応や <sup>98</sup>Mo の熱中性子吸収反応を利用する手法が供給量や技術的成立性の観点で最も有望と考えられるが、多大の費用と時間、社会的理解が不可欠である原子炉の新規制基準対応や、核不拡散上の懸念から、原子炉に依存しない加速器を用いた新たな <sup>99</sup>Mo 製造技術の確立が期待されている。[1]

本研究では、5 MeV/u 程度の低エネルギーヘリウムビームを用いて <sup>96</sup>Zr(α,n)<sup>99</sup>Mo 反応により <sup>99</sup>Mo を製造する手法を検討している。この手法では反応しきい値付近のエネルギーを利用するため、他の手法に比べて副産物 RI が少なく高い比放射能を有する <sup>99</sup>Mo が製造できる可能性がある。本報告書では 2018 年度に実施した 24.5 MeV と 24.6 MeV の He ビームを用いた <sup>nat</sup>Zr 照射実験の結果について報告する。

## 2. 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。<sup>nat</sup>Zr 箔（純度 99.2%）をスタック状に重ねた厚い照射試料を真空容器内に配置し、核子当り 6 MeV 程度の <sup>2+</sup>He ビームを照射した。放射性核種生成断面積の測定実験では、22 枚の 5 μm 厚の <sup>nat</sup>Zr 箔を IAEA らの評価[2]によって反応断面積が精度良く分かっている <sup>nat</sup>Ti 箔(99.9%)で挟みこみ照射試料とした。照射ターゲットをスタック状に分割することで、それぞれの試料から、入射エネルギーの異なったヘリウムイオンにより生成された放射能のデータが得られる。<sup>nat</sup>Ti 箔は反応断面積が良く分かっているため、モニター箔としてヘリウムイオンの入射量やエネルギーの確認に用いられる。24.5 MeV <sup>2+</sup>He イオンをビーム電流約 100nA で 1 時間、ターゲットに照射した。照射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の補正が可能となる。照射終了後、高純度 Ge 検出器を用いて照射されたサンプルから放出される γ 線を測定し、得られた γ 線スペクトルからサンプルに生成した核種の生成断面積を求めた。SRIM コード[3]で計算された阻止能を用いて入射イオンのターゲット内でのエネルギー損失を補正することで励起関数を導出した。また、中性子・γ 線生成量の測定では、2 インチ径×2 インチ長の NE213 有機液体シンチレータを 0°、30°、60°、90°の角度点に設置して、24.5 MeV のヘリウム照射に伴って厚い <sup>nat</sup>Zr 標的から発生する中性子や即発 γ 線のエネルギースペクトルをアンフォールディング法によって導出した。室内散乱等のバックグラウンドイベントを除去するため、各角度点において、検出器と標的の間に鉄 30 cm 厚のシャドーバーを設置した測定も行い、シャドーバー無の測定値からシャドーバー有の測定値を差し引くことで標的から直接検出器に入射する寄与を評価した。

### 3. 実験結果

#### 3-1. 放射性核種の励起関数

図1～3に $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Zr}(\alpha, x)^{93\text{m}}\text{Mo}$ ,  $^{92, 95, 95\text{m}, 96, 97}\text{Nb}$ ,  $^{89}\text{Zr}$  反応の励起関数を他の実験値[4-9]や計算値(TENDL-2017[10])とともにそれぞれ示す。また、TENDL-2017 データの中で主要な反応を塗りつぶして明示している。本実験結果は、近年に測定された最新の実験値[4, 5]と良い一致を示した。一方で過去に測定された実験値[6-9]については、反応によって一致するものと一致しないものがあり、ばらつきがみられた。TENDL-2017 は TALYS コードによって計算された理論計算値であるが、 $^{\text{nat}}\text{Zr}$  の主要核種である  $^{90}\text{Zr}$  (天然存在比：51.45%) に対しては実験値をよく再現するが、 $^{92}\text{Zr}$  (天然存在比：17.15%),  $^{94}\text{Zr}$  (天然存在比：17.38%),  $^{96}\text{Zr}$  (天然存在比：2.8%) に関しては、実験値を過小評価していることが分かった。

#### 3-2. 中性子・ $\gamma$ 線生成量

図4, 5に24.5 MeV He 入射によって厚い  $^{\text{nat}}\text{Zr}$  から生成した中性子や $\gamma$ 線の角度ごとのエネルギースペクトルとそのエネルギー積分量を TENDL-2017 データとともにそれぞれ示す。本実験値と TENDL-2017 はよい一致を示した。図6に TENDL-2017 の中性子・ $\gamma$ 線生成の各同位体からの寄与を示すが、 $^{\text{nat}}\text{Zr}$  から生成した中性子や $\gamma$ 線は  $^{\text{nat}}\text{Zr}$  の主要核種である  $^{90}\text{Zr}$  (天然存在比：51.45%) からの寄与が支配的であることが分かる。このことから、TENDL-2017 は、 $^{\text{nat}}\text{Zr}$  の主要核種である  $^{90}\text{Zr}$  (天然存在比：51.45%) に対して実験値をよく再現することが分かる。

### 4. まとめ

24.5 MeV と 24.6 MeV に加速した He ビームを  $^{\text{nat}}\text{Zr}$  標的に照射し、それぞれ中性子・ $\gamma$ 線生成量の測定と放射性核種生成断面積や放射性核種生成量の測定を行った。本実験結果は、近年に測定された最新の実験値と良い一致を示した。TENDL-2017 は、 $^{\text{nat}}\text{Zr}$  の主要核種である  $^{90}\text{Zr}$  (天然存在比：51.45%) に対しては実験値をよく再現するが、 $^{92}\text{Zr}$  (天然存在比：17.15%),  $^{94}\text{Zr}$  (天然存在比：17.38%),  $^{96}\text{Zr}$  (天然存在比：2.8%) に関しては、実験値を過小評価する結果となった。

### 参考文献

- [1] Van Noorden R (2013) Nature. 504(7479): 202–204
- [2] IAEA, “Charged particle cross-section database for medical radioisotope production: diagnostic radioisotopes and monitor reactions”, IAEA-TECDOC-1211 (2011).
- [3] Ziegler JF: The stopping and range of ions in matter (SRIM). <http://www.srim.org>.
- [4] M. Hagiwara, H. Yashima, T. Sanami, S. Yonai, “Measurement of the excitation function of  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  for an alternative production source of medical radioisotopes”, Radioanal. Nucl. Chem. 318(1), 569-573 (2018).
- [5] T. Murata, M. Aikawa, M. Saito, N. Ukon, Y. Komori, H. Haba, S. Takács, “Production cross sections of Mo, Nb and Zr radioisotopes from  $\alpha$ -induced reaction on  $^{\text{nat}}\text{Zr}$ ”, Appl. Rad. Iso., 144 (2019) 47-53.
- [6] D.P. Chowdhury, S. Pal, S.K. Saha, S. Gangadharan, “Determination of cross section of  $\alpha$ -induced nuclear reaction on natural Cr and Zr by stacked foil activation for thin layer activation analysis”. Nucl. Instrum. Meth. B. 103 (3): 261–266 (1995).
- [7] G. Pupillo, J. Esposito, M. Gambaccini, F. Haddad, N. Michel, “Experimental cross section evaluation for innovative  $^{99}\text{Mo}$  production via the  $(\alpha, n)$  reaction on  $^{96}\text{Zr}$  target”, J. Radioanal. Nucl. Chem. 302(2): 911–917(2014).
- [8] M. De la Vega Vedoya, C. Wasilevsky, S.J. Nassiff, “Alpha particle induced reactions on zirconium, J Radioanal Chem”, 67 (1981) 165-181.
- [9] Y.-W. Yu, M. Blann, “Excitation Functions, Recoil Ranges, and Statistical-Theory Analysis of Reactions Induced in  $^{90}\text{Zr}$  with 25- to 80-MeV Helium Ions”, Phys Rev, 170 (1968) 1131-1141.
- [10] A. J. Koning and D. Rochman, “Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System”, Nuclear Data Sheets 113, 2841(2012)  
[https://tendl.web.psi.ch/tendl\\_2017/tendl2017.html](https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html)

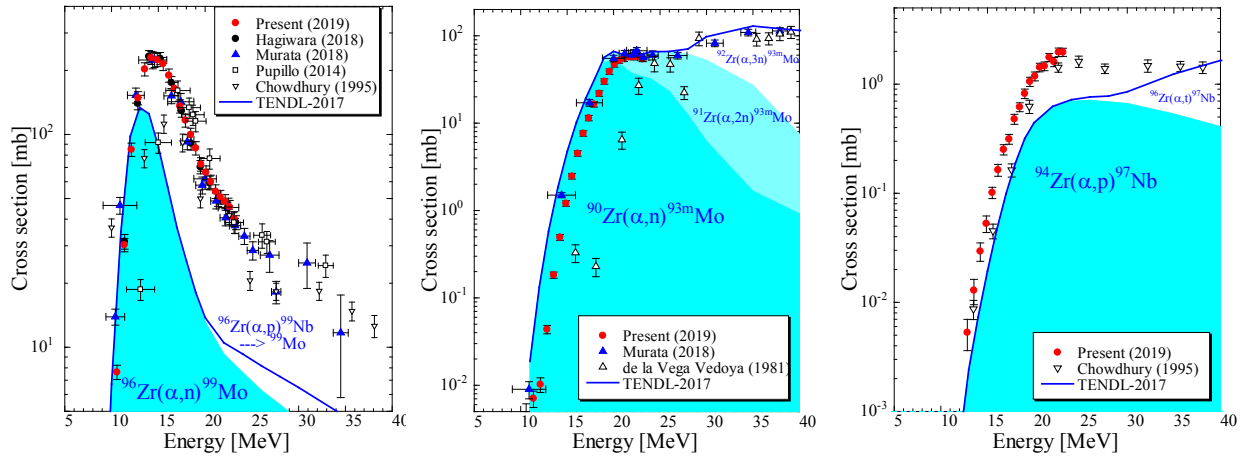


図1 He 入射によって  $^{nat}\text{Zr}$  中に生成する放射性核種の励起関数、左図は  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  反応、中央図は  $^{nat}\text{Zr}(\alpha, x)^{93m}\text{Mo}$  反応、右図は  $^{nat}\text{Zr}(\alpha, x)^{97}\text{Nb}$  反応、実線は TENDL-2017 の評価値を表し、その中で主要な反応を塗りつぶしている。

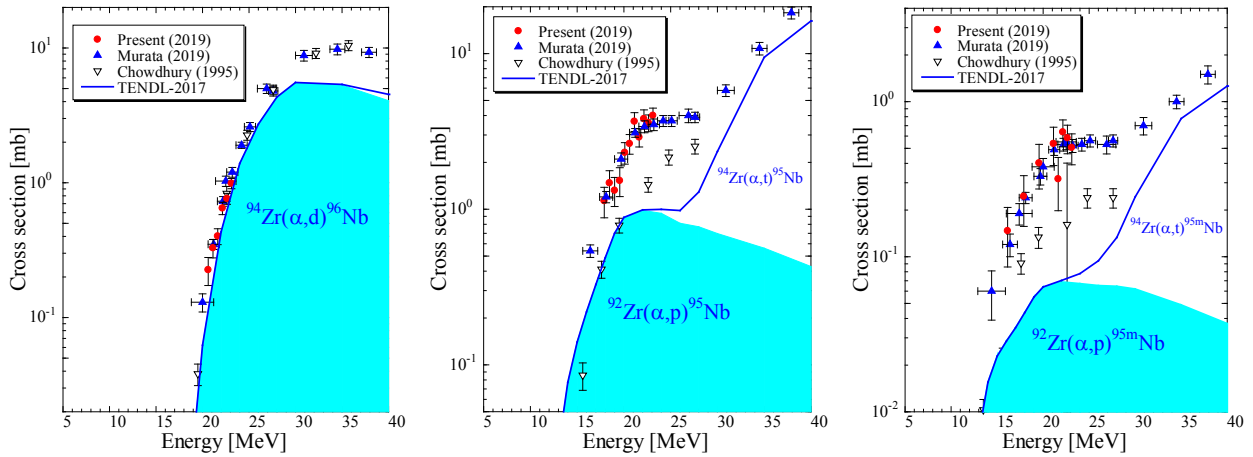


図2 He 入射によって  $^{nat}\text{Zr}$  中に生成する放射性核種の励起関数、左図は  $^{nat}\text{Zr}(\alpha, x)^{96}\text{Nb}$  反応、中央図は  $^{nat}\text{Zr}(\alpha, x)^{95}\text{Nb}$  反応、右図は  $^{nat}\text{Zr}(\alpha, x)^{95m}\text{Nb}$  反応、実線は TENDL-2017 の評価値を表し、その中で主要な反応を塗りつぶしている。

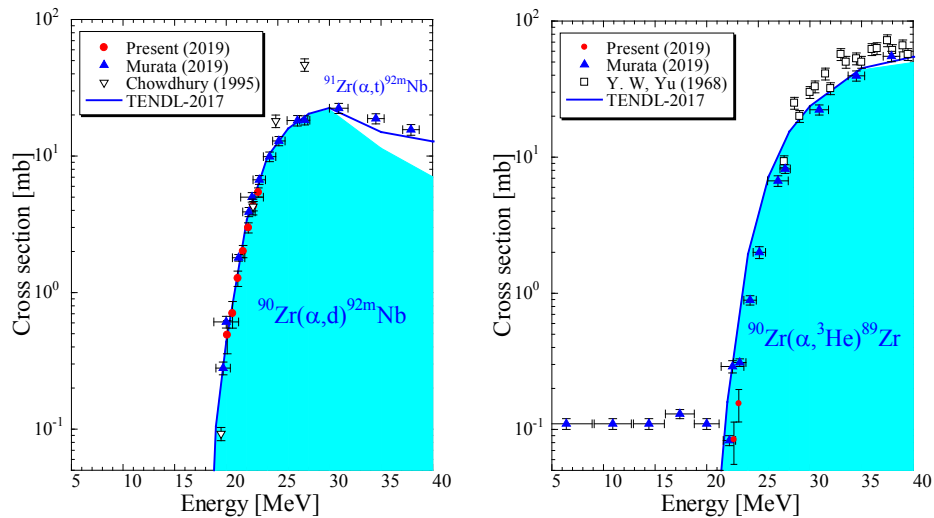


図3 He 入射によって  $^{nat}\text{Zr}$  中に生成する放射性核種の励起関数、左図は  $^{nat}\text{Zr}(\alpha, x)^{92m}\text{Nb}$  反応、右図は  $^{nat}\text{Zr}(\alpha, x)^{89}\text{Zr}$  反応、実線は TENDL-2017 の評価値を表し、その中で主要な反応を塗りつぶしている。



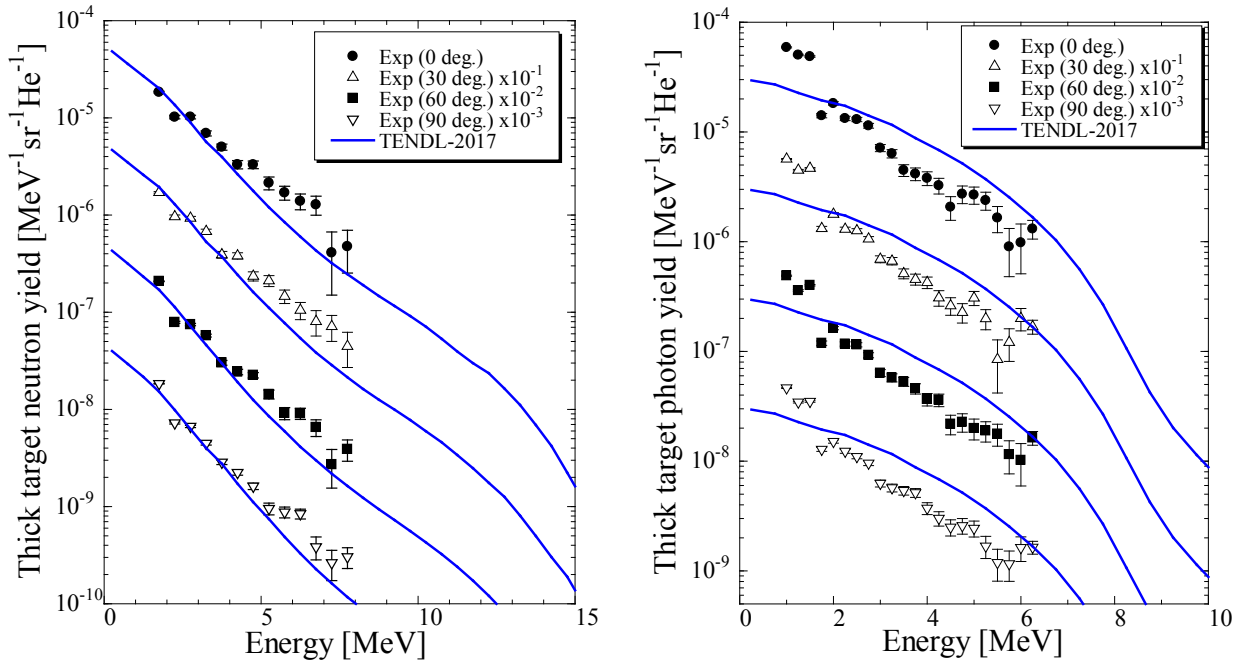


図4 24.5 MeV He 入射によって厚い  $^{nat}\text{Zr}$  から生成した中性子や  $\gamma$  線の角度ごとのエネルギースペクトル、左図は中性子のエネルギースペクトル、右図は  $\gamma$  線のエネルギースペクトル

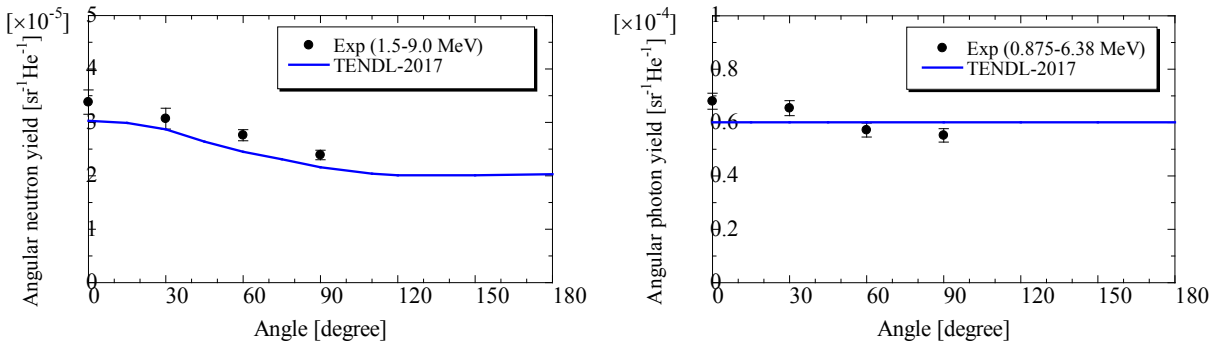


図5 24.5 MeV He 入射によって  $^{nat}\text{Zr}$  から生成した中性子や  $\gamma$  線の角度ごとの生成量、左図は 1.5 MeV から 9 MeV の中性子の生成量、右図は 0.875 MeV から 6.38 MeV の  $\gamma$  線の生成量

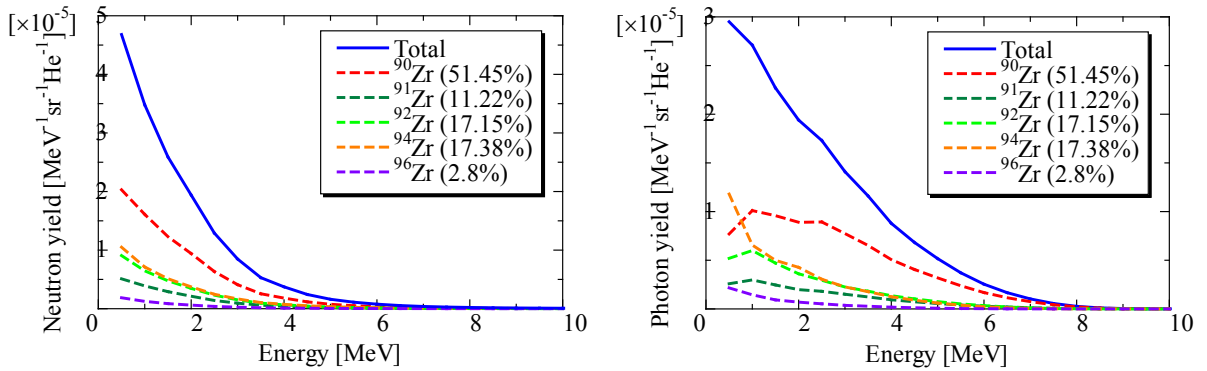


図6 TENDL-2017 による 24.5 MeV He 入射によって  $^{nat}\text{Zr}$  から生成した中性子や  $\gamma$  線の各同位体からの寄与、左図は  $30^\circ$  に放出される中性子の寄与割合、右図は  $0^\circ$  に放出される  $\gamma$  線の寄与割合

# 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>

<sup>A</sup> 京都大学複合原子力科学研究所

<sup>B</sup> 高エネルギー加速器研究機構

<sup>C</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

## 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 46 MeV He ビーム及び 126, 189 MeV Ne ビームを用いた照射実験を行い、生成核種の励起関数測定を行った。

## 1. はじめに

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 10 MeV 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。そこで、本研究では箔放射化法を用いて低エネルギー重粒子入射による誘導放射能データの系統的測定を進めている。本報告書では 2017 年度に行われた 46 MeV He ビーム及び 2016, 2018 年度に行われた 126, 189 MeV Ne ビームを用いた照射実験の結果について報告する。

## 2. 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。

加速器施設においてよく使用される銅箔を重ねてターゲットとした。46 MeV He ビーム照射実験では銅箔(99.9%、0.010mm 厚)に加え、モニタ箔としてチタン箔(99.9%、0.010mm 厚)を照射ターゲットに挿入した。50 MeV  $^2\text{He}$  イオンをビーム電流約 300 nA で短半減期核種測定のための短時間照射(約 10 分)、長半減期核種測定のための長時間照射(約 4 時間)の 2 回、ターゲットに照射した。126 MeV Ne ビーム照射実験では銅箔(99.96%、0.02mm 厚)を重ねてターゲットとした。126 MeV  $^{10}\text{Ne}$  イオンをビーム電流約 180 nA で短半減期核種測定のための短時間照射(約 1 時間)、長半減期核種測定のための長時間照射(約 4 時間)の 2 回、ターゲットに照射した。189 MeV Ne ビーム照射実験では銅箔(99.96%、

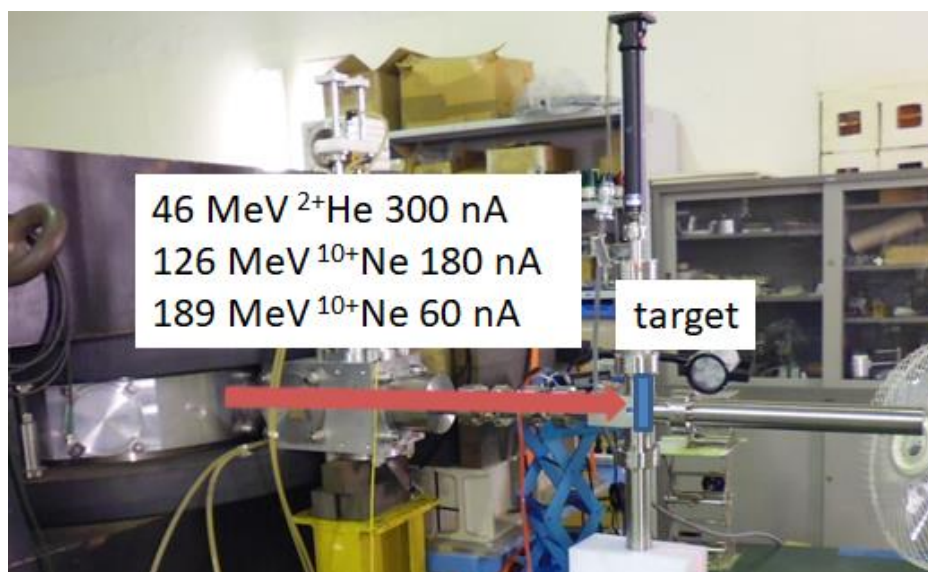


図 1 放医研サイクロトロン C6 コースでの実験体系

0.03mm 厚)を重ねてターゲットとした。189 MeV  $^{10}\text{Ne}$  イオンをビーム電流約 60nA で約 3 時間、ターゲットに照射した。照射実験では、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、高純度 Ge 検出器を用いて照射されたサンプルから放出されるガンマ線を測定し、得られたガンマ線スペクトルからサンプルに生成した核種の生成断面積を求めた。SRIM コード[1]で計算された阻止能を用いて入射イオンのターゲット内でのエネルギー損失を補正することで励起関数を導出した。126 MeV  $^{10}\text{Ne}$  イオン照射実験については  $\text{natCu}(^{20}\text{Ne},\text{X})^{65}\text{Zn}$  反応の励起関数が 189MeV  $^{10}\text{Ne}$  イオン照射実験の結果に合うように入射 Ne イオンのターゲット内でのエネルギー分布を補正することで励起関数を導出した。

### 3. 実験結果

#### 3-1. He 入射によって銅、チタンに生成した放射性核種の励起関数

図 2(a)-(b)に  $\text{natTi}(\alpha, \text{X})^{51,48}\text{Cr}$  反応の励起関数、図 2(c)-(f)に  $\text{natCu}(\alpha, \text{X})^{66}\text{Ga}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{58}\text{Co}$  反応の励起関数を他の実験値[2-7]や計算値(TENDL-2017[8], ACSELAM Library[9])、IAEA が提供している標準断面積[10]とともにそれぞれ示す。本実験結果は IAEA 標準断面積や他の実験値と良い一致を示した。一方で TENDL-2017, ACSELAM Library といった計算値は実験結果と励起関数のピークエネルギーやピーク断面積値に違いが見られ、特に Co 同位体生成に関しては実験結果を過小評価する結果となっている。

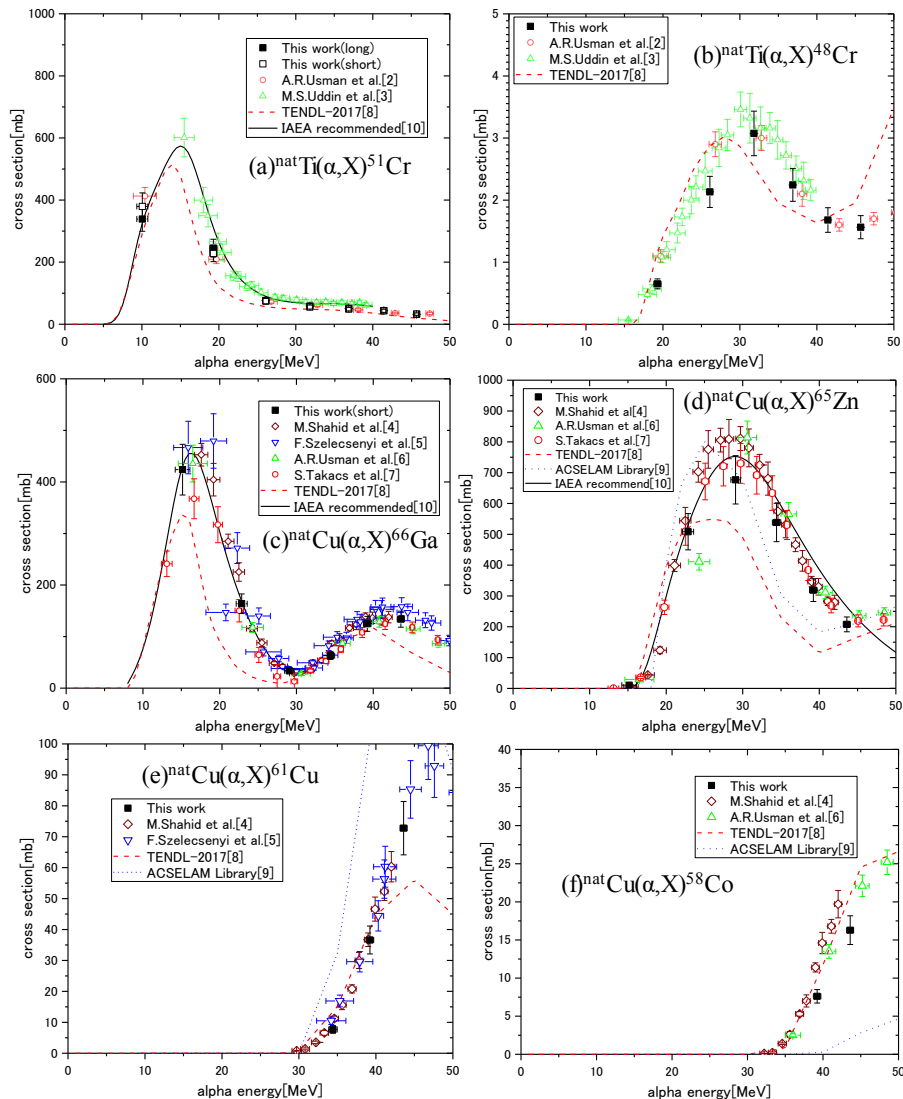


図 2 He 入射によって銅、チタンに生成した放射性核種の励起関数

#### 3-2. Ne 入射によって銅に生成した放射性核種の励起関数

図 3(a)-(h)に  $\text{natCu}(\text{Ne}, \text{X})^{73}\text{Se}$ ,  $^{71}\text{As}$ ,  $^{68,69}\text{Ge}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{60,58,56}\text{Co}$  反応の励起関数を ACSELAM Library の計算

値とともにそれぞれ示す。エネルギー補正後の 126MeV Ne 入射と 189 MeV Ne 入射の結果はよく一致している。Zn, Co といったターゲットである Cu と同じか軽い質量数の生成核種の場合、エネルギーの増加とともに断面積も増加している。Se, As, Ge といったターゲットである Cu より重い質量数の生成核種の場合は励起関数に構造が見られる。また、ACSELAM Library の計算値と本実験結果は大きく異なっている。

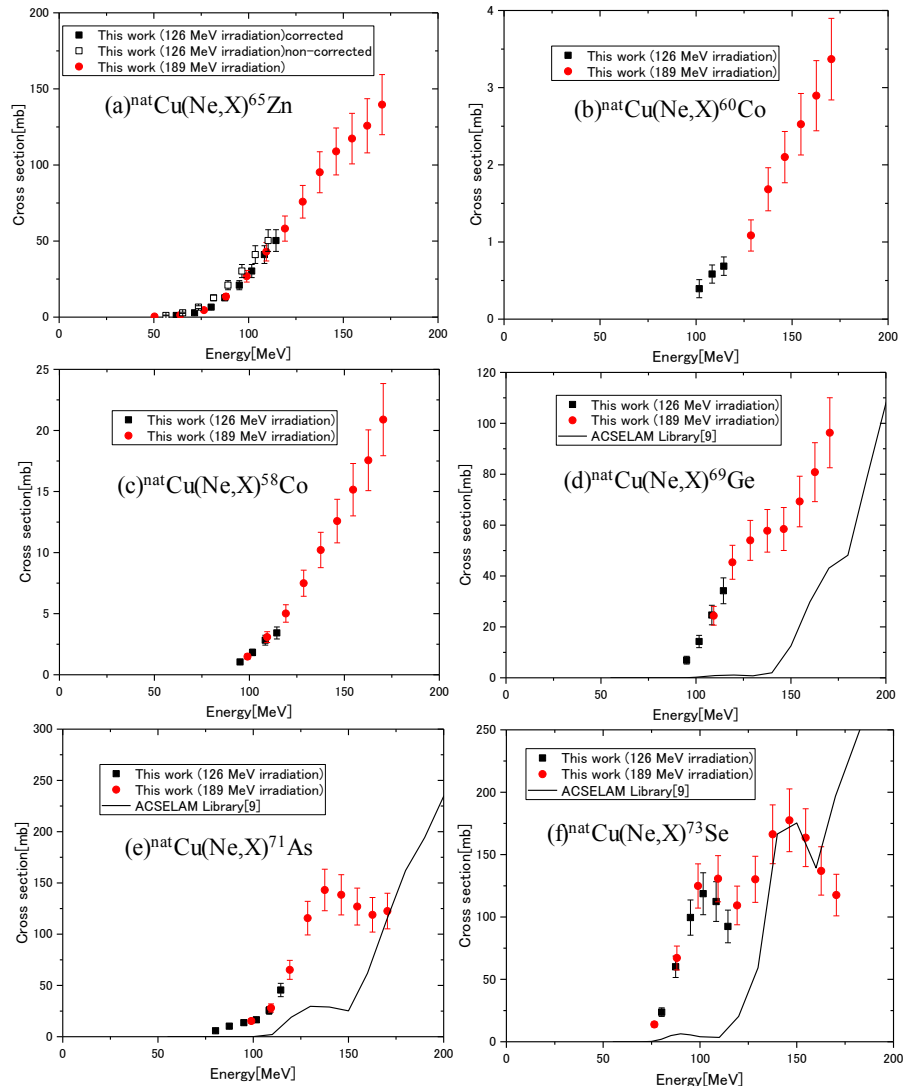


図 3 Ne 入射によって銅に生成した放射性核種の励起関数

#### 4. まとめ

46 MeV He ビーム入射によって銅、チタンに生成した放射性核種及び 126, 189MeV Ne ビーム入射によって銅に生成した放射性核種の励起関数測定を行った。今後も入射粒子、エネルギー、ターゲットについて幅広い範囲で系統的測定を行い、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] Ziegler JF: The stopping and range of ions in matter (SRIM). <http://www.srim.org>.
- [2] A.R.Usman et al, “Excitation functions of alpha particles induced nuclear reactions on natural titanium in the energy range of 10.4-50.2 MeV”, Nucl. Instrum. Methods **B399**, 34(2017).
- [3] M.S.Uddin et al, “Excitation functions of alpha particle induced reactions on natTi up to 40 MeV”, Nucl. Instrum. Methods **B380**, 15(2016)
- [4] M. Shahid et al., “Measurement of excitation functions in alpha induced reactions on  $^{nat}\text{Cu}$ ”, Nucl. Instrum. Methods **B358**, 160(2015)

- [5] F.Szelecsenyi et al., “Alpha beam monitoring via  $^{nat}\text{Cu}$  + alpha processes in the energy range from 40 to 60 MeV”, Nucl. Instrum. Methods **B184(4)**, 589(2001)
- [6] A.R.Usman et al, “Production cross-sections of radionuclides from  $\alpha$ -induced reactions on natural copper up to 50 MeV”, Appl. Radiat. Isotopes **114**, 104(2016)
- [7] S.Takacs et al., “Crosschecking of alpha particle monitor reactions up to 50 MeV”, Nucl. Instrum. Methods **B397**, 33(2017)
- [8] A. J. Koning and D. Rochman, “Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System”, Nuclear Data Sheets **113**, 2841(2012)  
[https://tendl.web.psi.ch/tendl\\_2017/tendl2017.html](https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html)
- [9] S. Tanaka et al., “IRACM:イオン及び中性子による生成放射能計算コードシステム”, JAERI-Data/Code 97-019(1997) (in Japanese)  
<http://www.wndc.jaea.go.jp/ftpnd/sae/acl.html>
- [10] IAEA, “Charged particle cross-section database for medical radioisotope production : diagnostic radioisotopes and monitor reactions”, IAEA-TECDOC-1211 (2011).



# 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 BACKWARD ANGLES

魚住 裕介<sup>A</sup>、山口雄司<sup>B</sup>、今村亮太<sup>B</sup>、福田雄基<sup>B</sup>、吉田和人<sup>B</sup>、  
古場 裕介<sup>D</sup>

Yusuke Uozumi<sup>A</sup>, Yuji Yamaguchi<sup>B</sup>, Ryota Imamura<sup>B</sup>, Yuki Fukuda<sup>B</sup>,  
Kazuhito Yoshida<sup>B</sup>, Yusuke Koba<sup>C</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>: 放射線医学総合研究所放射線防護情報統合センター

## 概要

原子核反応モデルの開発と検証に用いる目的で、過去に測定例のない最後方角度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継続している。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 71MeV の陽子を使用して、散乱角度 150° から 171° までの範囲で二重微分断面積を測定した。積層型検出器の境界によって生じる連続スペクトルの欠落部分を補正した。理論計算を適切に改良した結果、得られた測定データを再現する事が分かった。

## 1. 目的

粒子輸送コードPHITS [1]は加速器核破砕中性子源の設計研究や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° より前方の二重微分断面積 (DDX) において強く現れる傾向にある。回折効果は150° より後方において特に顕著になると予想される。このため、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、最後方の角度における二重微分断面積データの測定例は過去になく、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。29年度から171°での測定とともに、入射エネルギーを40MeVから71MeVに引き上げて実験を開始した。ターゲットとして<sup>12</sup>C、<sup>27</sup>Al、<sup>181</sup>Taの3種類として最後方でのデータ測定を実施した。本報告ではこれらの結果の概略を述べる。

## 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100μm の<sup>12</sup>C と <sup>27</sup>Al、厚さ30μm の<sup>59</sup>Co バックグラウンド測定用の Blank ターゲットを使用した。71MeV の陽子ビームをターゲットに照射し、生成粒子を150, 160, 165, 171度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(ΔE 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。各検出器の接合部分の影響で連

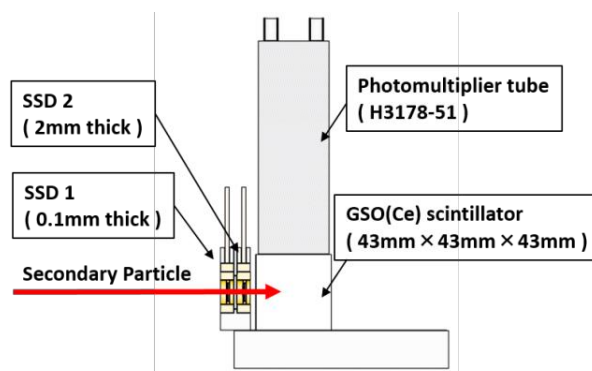


図1. カウンターテレスコープ断面図  
様々な厚さの SSD を用いた。

続スペクトルに欠落部分が出る事が分かったため、図中の SSD1 と SSD2 の厚さを変えて測定して欠落部分を埋めるように測定を繰り返し行った。SSD 厚さの組合せは、0.1-2mm、0.1mm-0.4mm、および 0.15mm のみの 3 種類とした。

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。陽子ビームのエネルギーは 71MeV とした。

二重微分断面積 (DDX : Double-Differential Cross-section) を求めるため、データ解析ではまず粒子弁別を行った。取得したデータには陽子以外の生成粒子の情報も含まれるため、粒子識別の PI 値を利用しそれら粒子を弁別した。PI 値は任意係数を指定することで同種の粒子間で一定をとる。以下の式から算出できる。

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

ここで、 $\Delta E$  : 透過型検出器への付与エネルギー [ MeV ]、 $E_{\text{total}}$  : 全検出器への付与エネルギー [ MeV ]、 $b$  : 任意係数とした。解析結果の例は省略する。前年度までの報告書には示しているが、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。

### 3. 結果と考察

図 2 には示すデータは 71MeV  $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}'\text{x})$  反応の 160, 165, 171 度での DDX である。実験値の誤差は示していない。昨年度までのデータには検出器境界の影響に因るデータ点の欠落が 17MeV~20MeV の範囲で見られたが、今回の結果では大きく改善する事が出来たことが分かる。測定エネルギーの下限は約

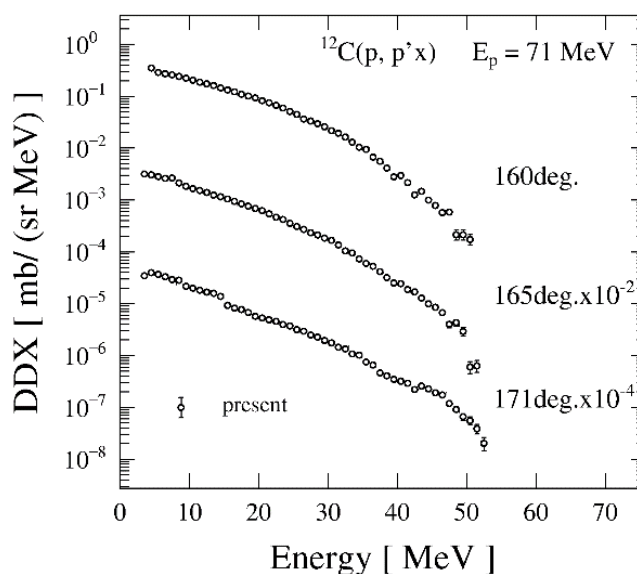


図 2 71 MeV  $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}'\text{x})$  の二重微分断面積

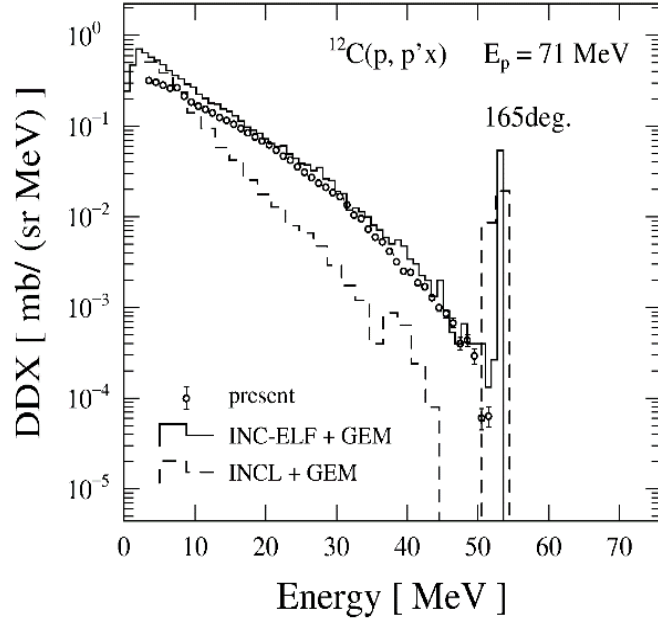


図 3. 165 度での 71MeV  $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}'\text{x})$  反応 DDX の測定結果および INC-ELF+GEM、PHITS(INCL+GEM)の結果をそれぞれ示している。

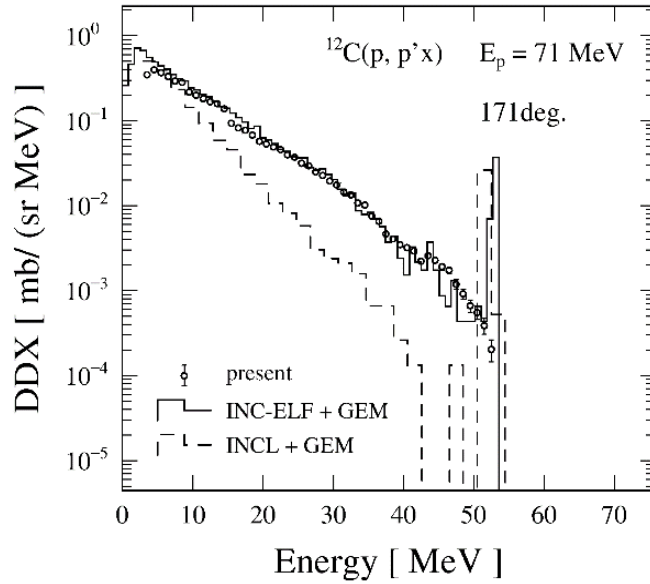


図 4. 171 度での 71MeV  $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}'\text{x})$  反応 DDX の測定結果および INC-ELF+GEM、PHITS(INCL+GEM)の結果をそれぞれ示している。

### 3. 結果と考察

入射エネルギー71MeVでの  $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}'\text{x})$  反応の DDX のうち 165 度と 171 度でのスペクトルをそれぞれ図 3 と 4 に示している。さらに理論計算の結果も比較のため示している。図中の破線は PHITS (INCL + GEM) の結果である。実線は核ポテンシャルによる偏向の角分布[2,3]を取入れた INC-ELF+GEM [5]



の結果を示している。ただし、INC-ELF の角度分布パラメータは、従来は図 5 の破線のように前方を重視していたが、後方への回折を再現するため実線のようなパラメータに修正したものを使った。

角分布を修正する前の INC-ELF は昨年の本報告で示したように PHITS (INCL) に似た傾向を示した。すなわち、蒸発領域は実験値に近いが、放出陽子エネルギーが高くなっていくと実験値を大きく過小評価して行き、直接反応が支配的な低励起領域では実験値との差が最大となり 1 桁から 2 桁程度の違いとなっている。PHITS では弾性散乱は INCL で計算できないため核データ値を直接使用しており、71MeV の計算結果に見られる INCL のカスケード計算と弾性散乱ピークとの間が不連続となっているのは INCL で低励起領域が計算できていないためである。昨年までの INC-ELF は PHITS (INCL) よりもやや良好な結果であったが、実験値との差異は大きかった。

図 5 の後方への回折を考慮した新しい角分布を取入れた結果は、図 3 と 4 に実線で示した INC-ELF である。実験値はゼロエネルギーから 50MeV を超えるエネルギーの範囲で DDX は 3 桁程度下がっているが、今回の計算は極めて良い一致となっている。

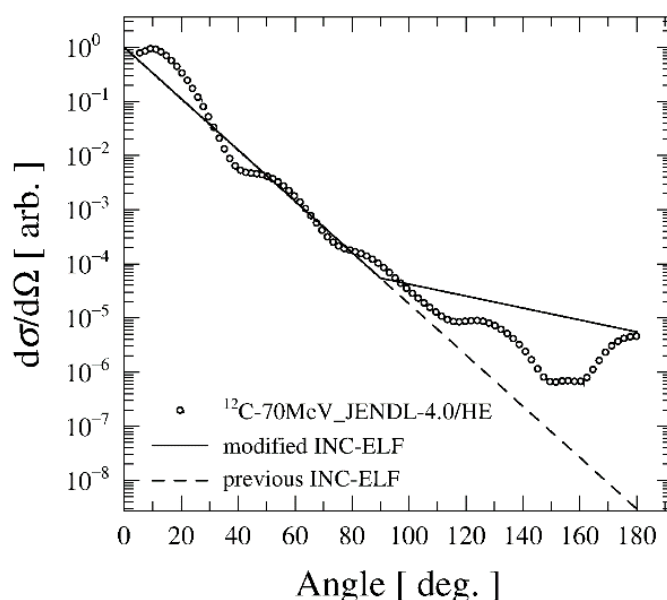


図 5. 70MeV 陽子の  $^{12}\text{C}$  による弾性散乱の角度分布。

## 5. まとめ

本研究では 71MeV での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  $^{12}\text{C}$ 、 $^{27}\text{Al}$ 、 $^{181}\text{Ta}$  の 3 種類で、測定角度は 150, 160, 165, 171 度の 4 点であった。これまで欠落していたデータ点を取得して (p, p'x) 反応 DDX を決定することができた。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があったが、これを修正することができた。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] Y. Sawada, Y. Uozumi et al.: Nucl. Instr. Methods, B291, 38-44 (2012).

# 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>B</sup> 東 和樹,<sup>A</sup> 大谷 拓也,<sup>A</sup> 酒井 盛寿,<sup>B</sup>  
濱野 拳,<sup>A</sup> 千葉 昌寛,<sup>A</sup> 岡田 智暉,<sup>A</sup> 金崎 真聡,<sup>A</sup> 小平 聡,<sup>B</sup>  
Tomoya Yamauchi,<sup>A</sup> Tamon Kusumoto,<sup>B</sup> Kazuki Azumaa,<sup>A</sup> Takuya Otani,<sup>A</sup>  
Morikazu Sakai,<sup>A</sup> Ken Hamano,<sup>A</sup> Masahiro Chiba,<sup>A</sup> Tomoki Okada,<sup>A</sup> Tomoki Okada,<sup>A</sup>  
Satoshi Kodaira,<sup>B</sup>

<sup>A</sup> 神戸大学 大学院 海事科学研究科

<sup>B</sup> 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  
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) 中に形成されるエッチピットを形成しないプロトン及び He イオンのトラックについて赤外線分光法を用いた構造分析を進めている。2018 年度には 100 MeV の He イオンの照射実験を 2 回実施した (ターゲットに入射した He イオンのエネルギーは 70 MeV であった)。これは前年度までの結果を追試するものであった。イオントラック構造の特性を表現するために、3 種類の化学的損傷パラメータを用いている。それらは、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 (損傷密度) と着目する官能基が失われている径方向の広がり (実効的トラックコア半径)、および、放射線化学収率 (G 値) である。CH 基損失の阻止能依存性は、重イオンが示す傾向とは異なる。G 値の阻止能依存性については明瞭なステップ状の阻止能依存性が確認され、検出閾値以下の G 値がより大きな値を示す。このことは検出閾値以下では損傷の広がりが放射線感受性の高い領域に限られていることを示唆する。PADC 中の CH 基は大きく 3 つのグループに分けられる。ひとつ目はエーテルとカーボネートエステルに挟まれたメチレン基であって放射線感受性の高い部分にある。ふたつ目は 3 次元ネットワークを構成するポリエチレン状の部分にあるメチレン基であり、最後のものは 3 次元ネットワークの三叉路に存在するメチン基である。これらのうちメチン基のみを評価する手法についても検討を進めている。

### 1. はじめに

エッチング型飛跡検出器の中で最も高い感度をもつポリアリルジグリコールカーボネート (PADC) は、CR-39 とよばれる。小型・軽量で電源を要しない受動型線量計として、宇宙放射線計測やラドン計測、中性子線量計測に利用されている。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 100 kGy 程度まで不感であることから、複雑な混成放射線場である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]。期待される。

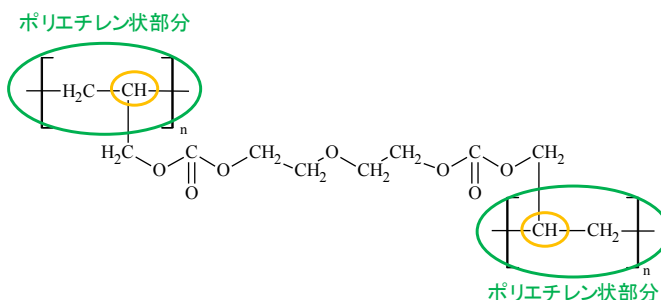


Fig. 1. A repeat unit of PADC.

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 6 MeV/u 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や He イオ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ている。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される。

## 2. 方法

PADC の繰り返し構造を図に示す (Fig. 1.)。繰り返し構造の中央にエーテル結合が存在し、その両側のエチレン基を介した対称位置にカーボネートエステルが2つある。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実験的に示されている[4]。カーボネートエステルがイオン照射されると脱カルボニル反応が進行し、二酸化炭素が放出される。繰り返し構造の両端にはポリエチレン状の3次元ネットワークが重合反応の結果として生まれており (Fig.1. 中、緑色で囲んでいる)、高分子材料としてはこちらが全体の骨格である。CH 基は繰り返し構造のなかに 18 個あるが、うち 16 個はメチレン基であり 2 個はメチン基である。メチン基はネットワークの三叉路にのみに存在する (Fig.1. 中、黄色で囲んでいる)。

実験に用いた PADC 薄膜試料は、フクビ化学社製の公称厚さ 100  $\mu\text{m}$  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たものである (厚さ 3  $\mu\text{m}$  以下)。薄膜にすることでランベルト・ベール則に基づいた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) を使用したので、空気中の水分や二酸化炭素の影響を事実上排除した。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。照射前後で試料厚さは変化しないので、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 ( $A / A_0 = N / N_0$ )。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 54 MeV/u の He イオンを照射した場合について、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 ( $\text{C}=\text{O}$ )、CH (メチン基及びメチレン基) 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、次の実験式が適用できる：

$$A/A_0 = 1 - \sigma F, \quad (1)$$

ここに  $\sigma$  は、面積の次元をもつ実験定数であり、図中の最適直線の勾配である。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、着目する官能基の除去断面積と見なせる。

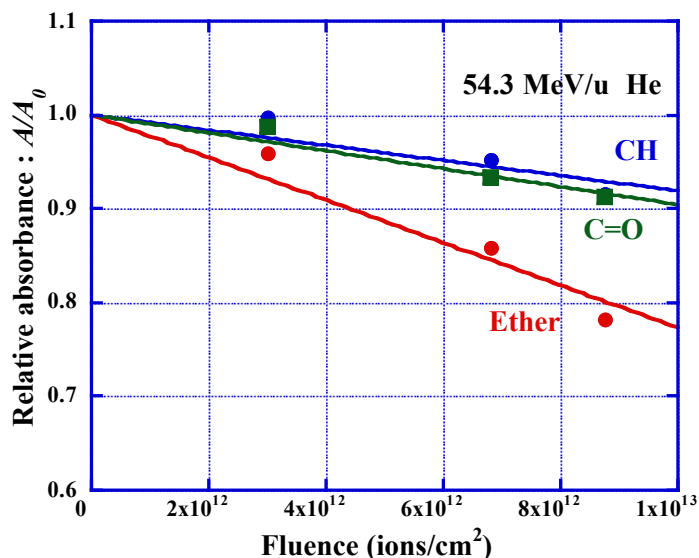


Fig. 2. Reduction behaviors of the relative absorbance of CH, C=O and ether in PADC films exposed to 22 MeV/u He ions.

## 3. 結果と考察

### 3-1. 放射線化学収率

概要に述べたように、3種類の化学的損傷パラメータを用いて損傷構造についての結果をまとめている。これら3つの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している[4-8]。例えば、放射線化学収率に阻止能依存性がない場合には、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。プロトンの検出閾値は 17 eV/nm であり He イオンのそれは 37 eV/nm である[9,10]。Fig.3.に示すように、検出閾値の両側での損傷構造の違いは、CH 基損失の G 値

と阻止能との関係を見るとはっきりする。検出閾値を境にして、そこには明確なステップがあり、検出閾値以下の領域（低阻止能側）で高くなっている。同じ吸収エネルギーで比べると、阻止能が低い方が、損傷が生じやすいことになり、直感的には分かりにくいかも知れない。しかし、放射線感受性が異なる2種類のCH基が存在するとすれば、この阻止能依存性は容易に説明できる。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のCH基は他のものと比べて高い感受性を持つ。CH基そのものが破壊されるのではなく、エーテル基やカーボネートエステルで生じる切断によって、それらに挟まれたCH基は低分子となって容易に系外に失われるからである。先に述べた検出閾値との比較で言えば、それらよりも阻止能が高くなると感受性の低いCH基に損傷を起こさなければならいのでG値は低くなると考えられる。高分子鎖の骨格を成しているポリエチレン状の部分が感受性の低いグループのCH基に相当する。したがって、径方向に2つ以上の繰り返し構造にまたがった損傷が生じるとエッチピットが生じる（検出閾値を超える）と考えることができる[8]。

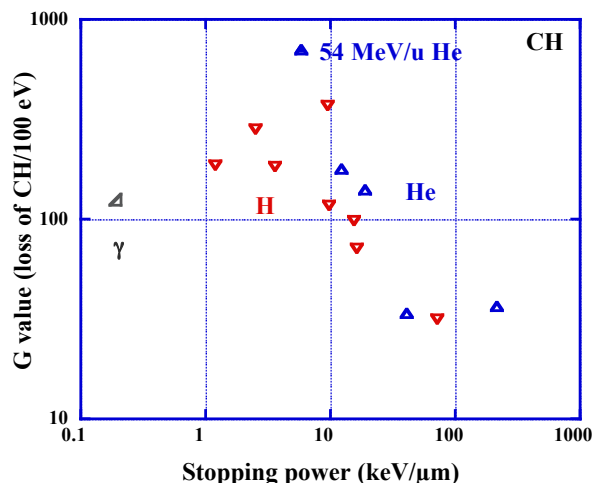


Fig. 3. G value for loss of CH groups as a function of the stopping power.

### 3-2. OH基の生成密度でエッチング特性を記述する可能性

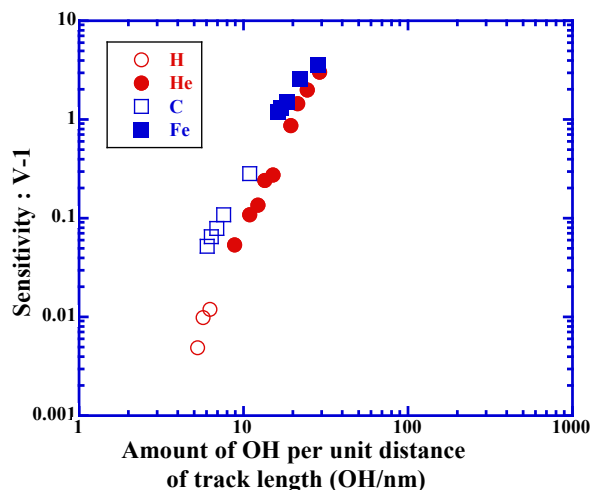


Fig. 4. Response of PADC detector against OH density.

PADC中に形成されるイオントラックはエーテルの切断やカーボネートエステルからの二酸化炭素の放出、それらの間のメチレンクラスの低分子の放出の結果として生まれる低密度領域として理解される[4,5,7]。照射後数時間でフリーラジカルが消失することも確認している。この消失は再結合を意味するが、多くの場合変性を伴う再結合である。このような再結合と競合する過程としてヒドロキシル基（OH基）が生成することも確認している[7]。これまでに求めてきたエーテルの損傷密度とOH基の生成密度との関係[7]、及び、エーテルの損傷密度と阻止能との関係、並びに、感度と阻止能の関係に基づいて[9]、感度とOH基との関係を評価した（Fig. 4.）。

プロトンからFeイオンまでの感度を対象にしているが、阻止能域にすると10から600 keV/μm程度の範囲に相当する。Fig. 4.に示すようにOH基の生成密度が同じであればイオン種が異なってもほぼ同じ感度を有している。これはOH基の濃度によってエッチング溶液の進入速度が高くなる、すな

わち、トラックエッチング速度が大きくなることを示している。OH 基生成密度が同じであればイオンの原子番号が大きい方が、感度がやや高くなる傾向も確認できる。トラック構造との関係で感度を議論する展望が得られたと考えている。

#### 4. まとめ

検出閾値以下のイオントラックの構造がどうなっているのかという問題を、感度が最も高い飛跡検出器である PADC を対象にして評価した。エッチピットを形成しないイオントラックはプロトンと He イオンであり、分析方法は赤外線分光であった。PADC 中に存在する官能基の中で最も放射線感受性の高いエーテルとそれに次ぐ感受性を持つ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、エッチピットを形成するイオントラックが示している傾向の延長線上にあるものであった。一方で、CH 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 CH 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。新たな端点として生まれる OH 基の定量的な評価を進めているが、この生成密度によってエッチング型飛跡検出器としての PADC の感度を記述できる可能性が見えてきている。

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(Allyl 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.
- [10] Tamon Kusumoto: Radial Electron Fluence around Ion Tracks as a New Physical Concept for the Detection Threshold of PADC Detector, PhD Thesis, Kobe University, 2018.3.



# 陽子線治療の高度化へむけた放射線可視化技術の開拓

## Innovative Radiology Imaging toward High Precision Proton Therapy

片岡 淳,<sup>A</sup> 田川 怜央,<sup>A</sup> 望月 早駆,<sup>A</sup> 藤枝 和也,<sup>A</sup> 栗原 拓也,<sup>A</sup>

佐藤 将吾,<sup>A</sup> 田中 稜,<sup>A</sup> 西 郁也,<sup>A</sup> 小出 絢子,<sup>A</sup>

高部 美帆,<sup>A</sup> 増田 孝充,<sup>A,B</sup> 稲庭 拓<sup>C</sup>

<sup>A</sup> 早稲田大学理工学術院 先進理工学研究科

<sup>B</sup> 東京女子医科大学医学研究科

<sup>C</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

### 概要

陽子線治療はコストや小型化できるメリットから粒子線治療の中で最も需要が高く、世界的にも普及している。一方で、その線量集中性ゆえに正確な照射が不可欠であり、照射範囲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。本研究では、陽子線治療の高精度化にむけた各種イメージング技術の基礎開発と関連実験を行った。2017-18 年度は (1)チェレンコフ光を用いた核反応可視技術の開拓と線量分布推定 (2) 高精度陽子線治療に向けた CCD カメラ陽子線 CT システムの開発と評価 (3) 陽子線照射中に生ずる即発ガンマ線イメージング (4) 治療中の 2 次被ばく低減にむけた中性子イメージング評価を実施した。以下では各実験項目の詳細を述べる。

## 1. チェレンコフ光を用いた核反応可視技術の開拓と線量分布推定

### 1.1 目的

陽子線治療時の線量分布推定として、現在は PET(Positron Emission Tomography)装置が用いられている。PET 装置は入射陽子線と体内原子核との反応で生じる陽電子放出核種 (図 1) の分布を可視化できる。しかし、電離過程による陽子線のエネルギー損失と陽電子放出核種の生成は全く異なるプロセスであるため、両者の空間分布は一致しない。PET 画像から線量分布を定量的に算出するためには、

(1) 陽電子放出核種が生成する確率(核反応断面積)を正確に把握

(2) 核反応データと PET 画像をもとに線量分布を推定

する必要があるが、十分なデータ・実用的な手法が存在しない。そこで、本研究では核反応が起こる際に生ずるチェレンコフ光 (図 1) を可視化することで、核反応断面積を正確に導出する手法を確立した。さらに、得られた核反応データをもとに、PET 画像から線量分布を推定する新たなアルゴリズムを作成した。

### 1.2 方法

陽子と酸素原子核の間で起こる核反応を調べるため、ターゲットとして石英ガラス  $\text{SiO}_2$  を選定した。70MeV 陽子線照射後に石英ガラス中で発生するチェレンコフ光を CCD カメラで撮影した(図 2)。チェレンコフ画像の時間発展を逐次的に解くことで、酸素原子核  $^{16}\text{O}$  から生成された 3 種類の陽電子放出核種  $^{15}\text{O}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{11}\text{C}$ (半減期は順に 122 秒、598 秒、1222 秒) を分離し、それぞれの生成分布を導出することに成功した。陽子はエネルギーを失いながら石英ガラス中を進む

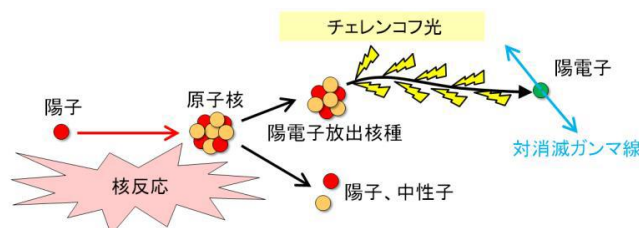


図 1: 陽電子放出核種の生成と反応の模式図

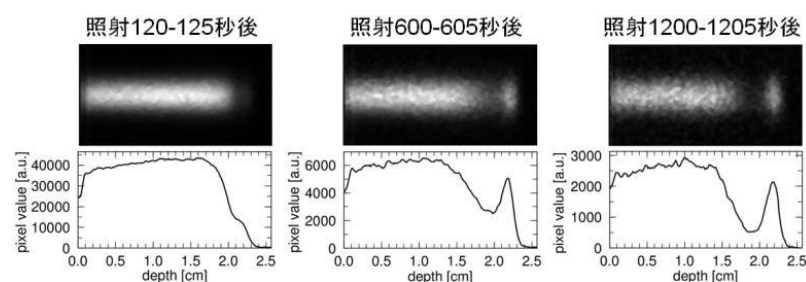


図 2:  $\text{SiO}_2$  ターゲット中で発生したチェレンコフ光を CCD で撮影。顕著な時間変化が確認できる

ため、その深度分布はエネルギー分布に変換することができる。

### 1.3 結果と考察

実験データより導出した核反応断面積に一例を図 3(左) に示す。本手法は CCD を用いるため、簡単かつ高精度に多くのデータを取得することができ、過去に測定された実験値に比べてばらつきや誤差が小さいことがわかる。得られた核反応データを、独自に考案した PET 画像 - 線量分布推定アルゴリズムに組み込んだ。国立がん研究センター東病院において測定された水の PET 画像より、照射した陽子線の線量分布を推定した(図 3 右)。推定した線量分布には PET 画像に由来するばらつきと系統的な誤差が存在するものの、概形を正しく再現することができた。今後は陽子線治療中に生じる様々な核反応データを網羅的に取得し、臨床応用を見据えた線量分布推定アルゴリズムの改良を行う。

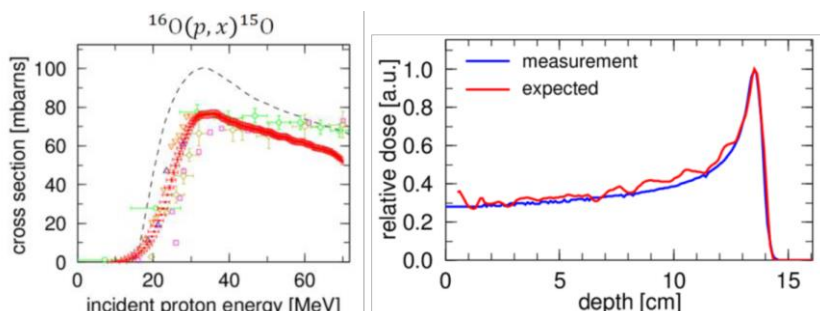


図 3: (左) チェレンコフ光の画像より求めた  $^{16}\text{O}(p,x)^{15}\text{O}$  の生成断面積 (右) PET 画像に本研究で求めた断面積を適用推定した陽子線の線量分布

## 2. 高精度陽子線治療に向けた CCD カメラ陽子線 CT システムの開発と評価

### 2.1 目的

陽子線治療計画において、現状は X 線 CT 画像から得られた線減弱係数 (CT 値) をもとに体内の陽子阻止能分布を近似的に算出し、治療計画の策定に利用している。しかしながら、X 線と陽子線は相互作用の過程が全く異なるため、治療計画には最大で 3-4% の不定性が生ずる。したがって、治療に用いる陽子線そのもので CT 画像を取得し、治療計画を立てることが望ましい。先行研究として、被写体の前後にシリコンストリップ検出器を配置し、陽子の飛跡を追跡する手法が提案されているが、システムは高価かつ複雑となり、治療時の高レートに耐えない、また費用が高いという普及への課題が残っている。本研究では、陽子線を透過する薄板シンチレータと CCD カメラを用いたシンプルな陽子線 CT システムを構築し、性能評価を行った。また、陽子線の被写体内での多重クーロン散乱の影響を評価し、陽子線 CT 画像を補正する新たな手法を開発した。

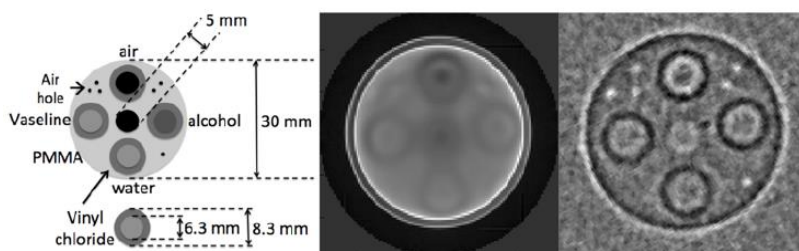


図 4(左) 被写体の模式図 (中) 70MeV 陽子線による CT 画像 (右) 200MeV 陽子線による CT 画像

### 2.2 方法

画像再構成における物理量として、水等価な物質中での陽子線の飛程を表す WEL (water equivalent length) という指標を用いる。被写体を透過して減速した陽子線は、後方に置かれた薄板シンチレータでエネルギーの一部を落とす。シンチレータの発光量と WEL の関係性を実験前に取得しておくことで、CCD カメラで取得した投影画像を WEL に変換することが可能である。

### 2.3 結果

図 4 に 70 MeV(放医研)と 200MeV(名古屋陽子線治療センター)で取得した CT 画像を示す。70 MeV 陽子線を用いた CT 画像は陽子線の

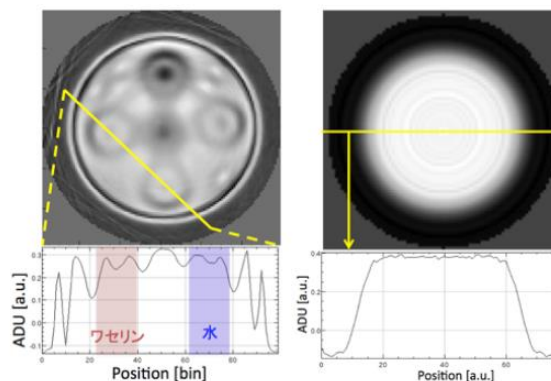


図5 散乱補正を施したCT画像 (左)ブロードビームを図4のファントムに照射 (右) ペンシルビームを一樣な水ファントムに照射

散乱の影響で画像が不鮮明であるが、200 MeV 陽子線は被写体の輪郭を識別出来る。これは、高エネルギー陽子線ほど直進性があるためである。そこで、本研究では散乱の影響が大きい 70MeV 陽子線において、散乱補正法を検討した。陽子線治療では、陽子線を一様照射する手法(ブロードビームを利用)と、細いビームをそのまま利用する手法(ペンシルビームを利用)がある。両者において、陽子線の散乱補正法を検討した。図 5 は補正を行った CT 画像を示しており、左図はブロードビームを、右図は直径 25 mm の円柱型水ファントムにペンシルビームを照射した。前者の補正は被写体とシンチレータ間の距離をかえて複数枚の画像を取得することで散乱線の影響を評価し、後者の補正ではペンシルビームからの広がり方を散乱成分として評価した。いずれも被写体内部のコントラストが明瞭になり、より詳細な構造を把握することが可能となった。補正前は 3 種の物質の WEL 値に差異が認められなかったが、補正により誤差の範囲内で理論値と一致する結果を得ることができ、補正が有効であることが分かった。

### 3. 陽子線照射中に生ずる即発ガンマ線イメージング

#### 3.1 目的

陽子線治療において、照射確認には PET(陽電子断層撮影)装置が広く用いられているが、リング構造のため治療ビームとの共存が難しく、照射中(オンライン)の照視野確認には不向きである。また、陽電子放出核種を生成する核反応と、電離相互作用による陽子線のエネルギー損失には直接的な関連性が無く、得られる画像も類似性に乏しい。そこで近年、治療中にオンラインかつ線量を正確に可視化する手法として即発ガンマ線イメージングが注目されている。先行するシミュレーション研究によれば、 $^{12}\text{C}$  や  $^{16}\text{O}$  由来の 4.4MeV ガンマ線はブラッグピークを最も良くトレースすることが期待されるが、未だ実験的な検証は行われていない。本研究では MeV ガンマ線のイメージングを可能にする新型のコンプトンカメラの開発を行い、陽子線治療モニタに向けたイメージング実験に挑戦した。

#### 3.2 方法

4.4MeV 即発ガンマ線のイメージング装置として、新たにコンプトンカメラを開発した。カメラは 2 層の散乱体と 10 層の吸収体からなり、検出器には GAGG シンチレータと光検出器として MPPC アレイを用いた。また、アクティブシールドとして BGO シンチレータ、パッシブシールドとしてタングステンを図 6 のように配置した。このコンプトンカメラの基本性能としては、角度分解能が 4.4MeV において  $6^\circ$  (FWHM)、FOV が  $\pm 60^\circ$  程度である。MeV 領域のガンマ線においては吸収体での全吸収の確率が小さく、カメラ内で複数回散乱してしまう多重散乱イベントや、散乱ガンマ線が吸収されずにカメラ外に逃げってしまうエスケープイベントなどの割合が増えてしまう。そのため従来のコンプトンカメラではイメージングの感度も悪く、ノイズの割合も高くなってしまいう問題があった。そこで今回新たに開発したコンプトンカメラにおいては、これらのノイズイベントを排除するための手法を確立した。多重散乱イベントについては吸収体両面の MPPC 信号をストリップ読み出しにすることで 9 割以上の確率で除去可能であることを確認した。エスケープイベントについては画像再構成に用いるイベントをエネルギーカット条件によって選択し、BGO シンチレータの veto 信号を合わせて用いることで 9 割程度の割合で排除可能であることを実証した。

#### 3.3 結果

サイクロトロン棟において、70MeV 陽子線照射時の即発ガンマ線イメージング実験を行った。セッ

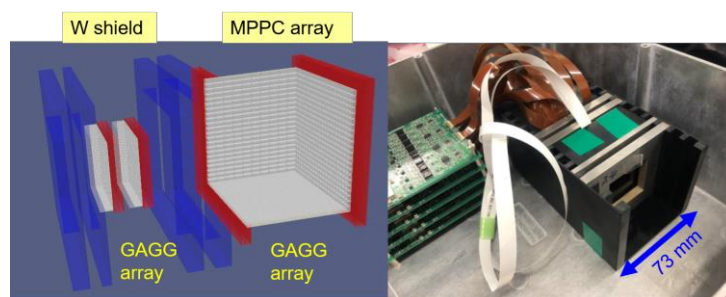


図 6 (左)コンプトンカメラの構成 (右)実機写真

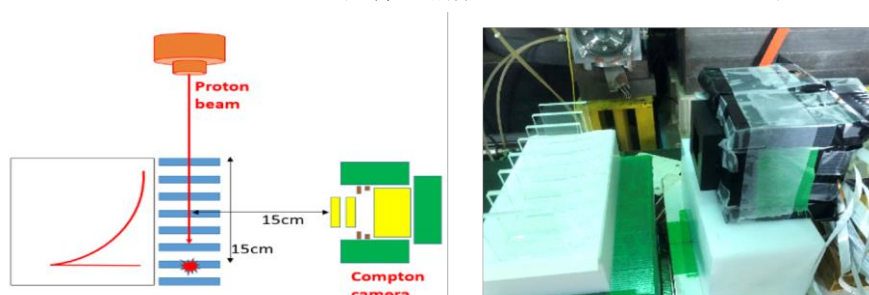


図 7 (左)サイクロトロン C6 における実験のセットアップの概観(右)実機システムの写真



トアップを図 7 に示す。陽子線の入射エネルギーは 70MeV で、ペンシルビーム(10mm $\phi$ )を約 1000 万発照射した。MLEM(iteration:10)を用いて画像再構成を行った結果を図 8 に示す。左図が 511keV 対消滅ガンマ線による再構成画像で使用イベント数は 78828 である。イメージは中央に広がったものとなり、ブラッグピークは再現しなかった。右図は 4.4MeV の再構成結果であり、使用イベント数は 3712 となった。1 次元スライスを見るとシミュレーションによる陽子線量を高い精度で再現する結果が得られた。今後はリアルタイムでのモニタに向けたシステムの開発や、より複雑なファントムでのイメージング実験などを行い、医療応用を目指していきたい。

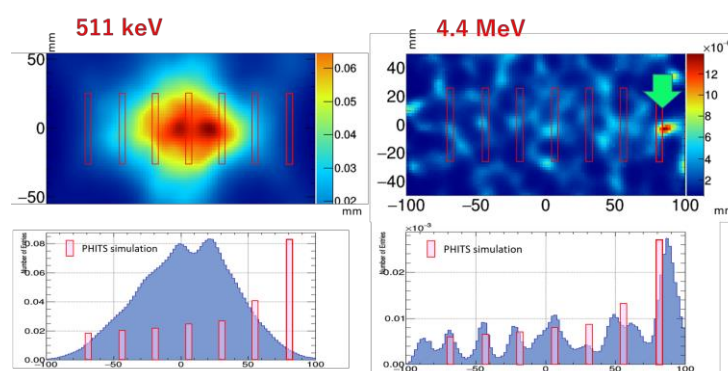


図 8 本実験で得られた、70MeV 陽子線照射時の即発ガンマ線イメージ (左) 511 keV (右) 4.4 MeV 緑の矢印がブラッグピーク位置

## 4. 治療中の 2 次被ばく低減にむけた中性子イメージング評価

### 3.1 目的

陽子線治療は従来の放射線治療に比べて正常細胞への影響が少ないとされている。しかし、治療中に意図せず放出される 2 次中性子による被ばく量は陽子線によるその 10% に及ぶという研究結果が出ている。そのため、治療現場では中性子による 2 次被ばくの様相を可視化する装置が切望されている。そこで本研究では陽子線治療時に発生する 2 次中性子の発生分布を可視化することを目的とし、可搬型の中性子カメラ装置の開発を行った。

### 3.2 方法

図 9 に示す通り、開発したカメラはプラスチックシンチレータ(EJ299-34)と光電子増倍管(R9880U)を組み合わせたシンチレーション検出器のユニットを最大 13 個並べて構成されている。構造としては前段のユニット群と後段のユニット群からなり前後段間の距離は 30cm とした。取得するデータは 1) 前段で反跳した陽子のエネルギーデポジット、2) 前後段間の中性子の TOF(Time ofFlight) である。これらのデータを用いて中性子線源の線源方向を撮像するためには

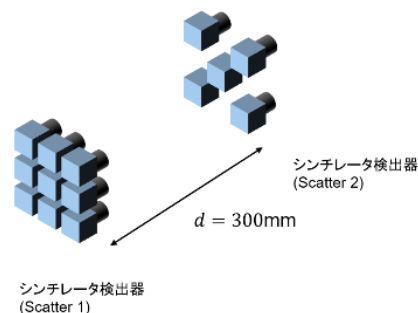


図 9 開発した中性子カメラの構成

1. PSD(PulseShapeDiscrimination) と TOF を用いた中性子/ガンマ線イベントの弁別

2. 物理現象にもとづいた数式で到来方向の角度を算出

3. MLEM(MaximumLikelihood-ExpectationMaximization) で画像再構成

の 3 つの過程が必要となる

### 3.2 結果

実験で得られた TOF、PSD、そして得られたデータをもとに ML-EM を用いて画像再構成を行った線源方向の撮像結果を図 10 に示す。TOF と PSD の結果より  $n/\gamma$  弁別が可能であることが示された。また、 $0^\circ$  方向に真鍮がある場合の撮像結果は  $0.1 \pm 0.4^\circ$ 、 $15^\circ$  方向に真鍮がある場合の撮像結果は  $14.3 \pm 0.8^\circ$  であり今回使用した中性子カメラで正しく線源方向を特定できることが分かった。

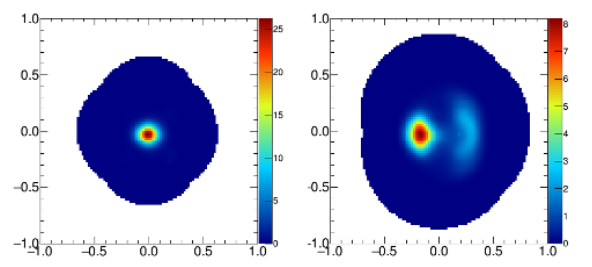


図 10: 中性子カメラで撮影した、陽子線照射中の真鍮ファントム画像 (左)正面方向 (右)20° 方向

**謝辞** 本実験の遂行に当たり、サイクロトロン照射室の北條悟様、またオペレータの皆様に深く感謝いたします。紙面をお借りして御礼申し上げます。

## 本実験による研究成果（原著論文）

- [1] Mochizuki,S.; Kataoka,J.; Koide,A.; Fujieda,K.; Maruhashi,T.; Kurihara,K.; Sueoka,K.; Tagawa,L.; Yoneyama,M.; Inaniwa,T. High-precision Compton imaging of 4.4 MeV prompt gamma-ray toward an on-line monitor for proton therapy, NIM-A, (2019), in press
- [2] Tagawa,L.; Kataoka,J.; Sueoka,K.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Mochizuki,S.; Maruhashi,T.; Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T., Development of novel neutron camera to estimate secondary particle dose for safe proton therapy, NIM-A, (2019), in press
- [3] Koide,A.; Kataoka,J.; Taya,T.; Iwamoto,Y.; Sueoka,K.; Mochizuki,S.; Arimoto,M.; Inaniwa,T. Spatially resolved measurement of wideband prompt gamma-ray emission toward on-line monitor for the future proton therapy, NIM-A, (2018), vol.912, pp.24-28
- [4] Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Koide,A.; Sueoka,K.; Morita,H.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Ohsuka,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Yamaguchi,M.; Kurita,K.; Kawachi,N. Ultracompact Compton camera for innovative gamma-ray imaging, NIM-A, (2018), vol.912, pp.1-5
- [5] Koide,A.; Kataoka,J.; Masuda,T.; Mochizuki,S.; Taya,T.; Sueoka,K.; Tagawa,L.; Fujieda, K.; Maruhashi,T.; Kurihara, T.; Inaniwa,T. Precision imaging of 4.4 MeV gamma rays using a 3-D position sensitive Compton camera, Nature Scientific Reports, vol.8, No.8116
- [6] Masuda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Takabe,M.; Nishio,T.; Matsushita,K.; Miyake,T.; Yamamoto,S.; Inaniwa,T; Toshito,T. Measurement of nuclear reaction cross sections by using Cherenkov radiation toward high-precision proton therapy, Nature Scientific Reports, 2018, vol.8, 2570
- [7] Taya,T.; Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Tagawa,L.; Mochizuki,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Kurita,K.; Yamaguchi,M.; Kawachi,N. Optimization and verification of image reconstruction for a Compton camera towards application as an on-line monitor for particle therapy, Journal of Instrumentation, 2017, vol.12, P07015 (17 pages)

# 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>、恒田 雅人<sup>A</sup>、増田 孝充<sup>A</sup>、佐野 碧<sup>A</sup>、宮川 真<sup>A</sup>、黒澤 知征<sup>A</sup>、  
松下 慶一郎<sup>B</sup>、株木 重人<sup>C</sup>、田原 智祐<sup>D</sup>、北條 悟<sup>H</sup>、稲庭 拓<sup>G</sup>  
Teiji Nishio<sup>A</sup>, Masato Tsuneda<sup>A</sup>, Soudai Tanaka<sup>B</sup>, Keiichiro Matsushita<sup>C</sup>, Shigeto Kabuki<sup>D</sup>,  
Takamitsu Masuda<sup>E</sup>, Miho Takabe<sup>E</sup>, Jun Kataoka<sup>E</sup>, Tasuku Miyaka<sup>F</sup>, Satoshi Nakamura<sup>F</sup>,  
Satoru Hojo<sup>G</sup>, Taku Inaniwa<sup>G</sup>

A：東京女子医科大学大学院医学研究科、B：京都府立医科大学放射線医学教室、  
C：東海大学医学部、D：東京工業大学環境・社会理工学院、  
E：放射線医学総合研究所加速器工学部

### 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ンシヤ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心とする基盤技術の構築が必要不可欠である。

### 1. 目的

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

本年度の研究では、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、陽子線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、マシンタイムの割り当て時間に応じて調整しながら実験を実施して行く。全ての実験において、利用する陽子線のエネルギーは最大（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、標的原子核破砕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

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 PET 装置を用いて実験を行った(図1)。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、2 mm×2 mm×20 mm サイズの BGO 結晶が 7,920 個マウントされている。入射陽子線と体内原子核間の標的原子核破碎反応によって患者体内中でポジトロン放出核が生成し、その対消滅ガンマ線(180 度方向に放出される一対の 511 keV 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(activity 分布)を観測することが可能である。

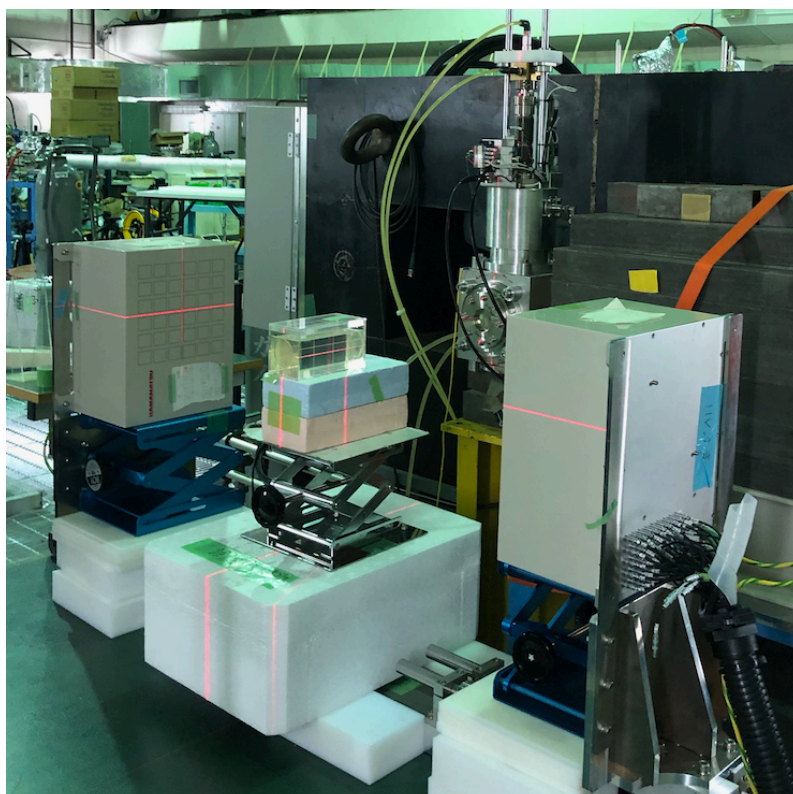


図1：C6 コースにおける PET 装置のセットアップ写真。

本実験では C6 コースを用いて照射領域の可視化において人体構成元素の中で最も重要な酸素核に対するポジトロン放出核の生成断面積を測定した。水( $\text{H}_2\text{O}$ ：ゼラチン質にした物)をターゲットとし 70 MeV の陽子線を照射した際に酸素核から生成する主なポジトロン放出核として  $^{15}\text{O}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{11}\text{C}$ (半減期は順に 122.2 秒、597.9 秒、1222 秒)の 3 種類が挙げられる。これまでの実験では陽子線を 5 nA で 3 秒間照射し、陽子線の進行方向における activity 分布の時間変化を減衰曲線によってフィッティングすることで、3 種のポジトロン放出核の生成断面積をそれぞれ導出しようとしていた[5]。生成量が非常に多く半減期が他の 2 つと大きく異なる  $^{15}\text{O}$  の生成断面積を求めることには成功していたが、 $^{13}\text{N}$  と  $^{11}\text{C}$  はともに生成量が小さく、半減期も比較的近いためにそれぞれの生成断面積を求めることができていなかった。解析結果より  $^{13}\text{N}$  と  $^{11}\text{C}$  を分離し正しい断面積を導出するためには照射後数十分以降での統計量を大幅に上げる必要性が示唆された。そこで、50 nA の大強度陽子線を 5 秒間照射し、照射終了から 60 分間 PET 計測を行う実験(実験①)、5 nA の陽子線を 3 秒間照射し、照射終了から 30 分間 PET 計測を行う実験(実験②)及びアクリル板(2 mm)へ陽子線を照射し、照射終了から 30 分間 PET 計測を行う実験(実験③)によって、酸素核から生成される  $^{15}\text{O}$ 、 $^{13}\text{N}$  及び  $^{11}\text{C}$  のポジトロン放出核の断面積の導出を行った。

陽子線の照射野形状は 5mm (FWHM) ×8mm (FWHM) のガウス分布に近い形状であった。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 PET を設置した(図1)。実験①では多量のポジトロン放出核が生成



するため、照射直後は PET 装置の計数限界を超えてしまう。しかし、十分に時間が経てば PET 装置での計数が可能な放射線量まで下がり、半減期の短い  $^{15}\text{O}$  は減衰しきっているため、 $^{13}\text{N}$  と  $^{11}\text{C}$  の断面積を高い精度で導出できると考えた。実験②では実験①で求めた  $^{13}\text{N}$  と  $^{11}\text{C}$  の断面積結果を用いてフィッティングを行うことで  $^{15}\text{O}$  の断面積を導出した。また、前年度までは厚みのあるターゲットへ陽子線を照射しターゲットへの入射エネルギーから停止するまでの全エネルギーの断面積を測定していた。この手法の弱点として、PET の位置分解能及び陽子線のエネルギーストラグリングによる誤差が大きく影響するといったことが挙げられる。そこで今回は新たに、薄いアクリル板 (2 mm) へ陽子線を照射し、特定のエネルギーの断面積のみを測定する実験③を加えた。これにより PET の位置分解能に依存した誤差を取り除くことが可能である。薄いアクリル板の測定から特定のエネルギーの断面積を導出し、その他のエネルギーの断面積は、水ターゲットへの照射から得られる消滅ガンマ線分布が近似的に断面積の形状 (相対値) を表していることを利用して求める。

## 2-2. 陽子線CT画像取得法確立のための実験

本実験は、陽子線 CT 画像取得システムを 10 cm×10 cm×1.2 cm の BGO シンチレータと電気冷却式 CCD カメラ (Bitran, BU-51LN)、シンチレーション光反射鏡、被写体を載せる並進回転ステージ、5 cm×10 cm×1 cm の真鍮をベースに 5 mm 間隔の格子状に 1 mmφ の穴が開いたマルチホールコリメータ (MHC) を用いて構築した (図 2) [6-9]。本システムでは陽子線を BGO シンチレータ内で全て停止させる。BGO シンチレータの発光量はシンチレータ内で失う陽子線のエネルギーに相当し、陽子線の被写体通過前後でのエネルギーの差分量が被写体におけるエネルギー損失に等しいと考えることで、被写体の投影データを得ることができる。MHC はこれまで問題となっていた陽子線の側方散乱線[6,7]の除去を目的としており、穴の大きさを微細加工限界の 1 mmφ とし、穴を通過した 70-MeV 陽子線のシンチレータ内における側方散乱が 2.5 mm 以下になるというシミュレーション結果から穴の間隔を 5 mm として設計した。この MHC により各穴において陽子線側方散乱を除去して、独立した物理量を取得できる。本システムのメリットは 1 度の撮影で多数のポイントの情報を取得可能である点であり、二次元投影データ取得にかかる時間を短縮できる。本実験における空間分解能を得る手法として、MHC の 5 mm 間隔の穴に対して 0.5 mm ピッチでステージを移動させ被写体を測定する操作を 10 回繰り返すことで二次元投影データが完成し、各位置で被写体を回転させながら測定を行うと二次元 CT 画像が取得できる。また、MHC の異なる活用法として、MHC を上流に置くことで細いペンシルビームを擬似的に生成して陽子線の側方散乱線の影響を除去する手法を考案した。

本実験では、C-8 コースにおいてワブラー照射法によって形成された 10 cm×10 cm 照射野の 70-MeV 陽子線 (強度 5 nA) を並進回転ステージ上の被写体に照射した。MHC による影響を評価するため、MHC を置かない場合 (実験 I)、MHC を被写体の下流でシンチレータの上流においた場合 (実験 II)、さらに MHC を被写体より上流においた場合 (実験 III) のそれぞれについて測定を行った。BGO シンチレータの発光量を CCD カメラで取得し、光量レンジ変換テーブルを用いて陽子線の飛程 (エネルギー) 情報を得た。被写体として、円柱アクリル容器 (直径 2.4 cm、壁厚 2 mm) に封入された (a) 空気、(b) 99.5% エタノール、(c) 水、(d) 40%リン酸水素二カリウム水溶液の 4 種類の物質を用いて陽子線 CT 画像を取得した。

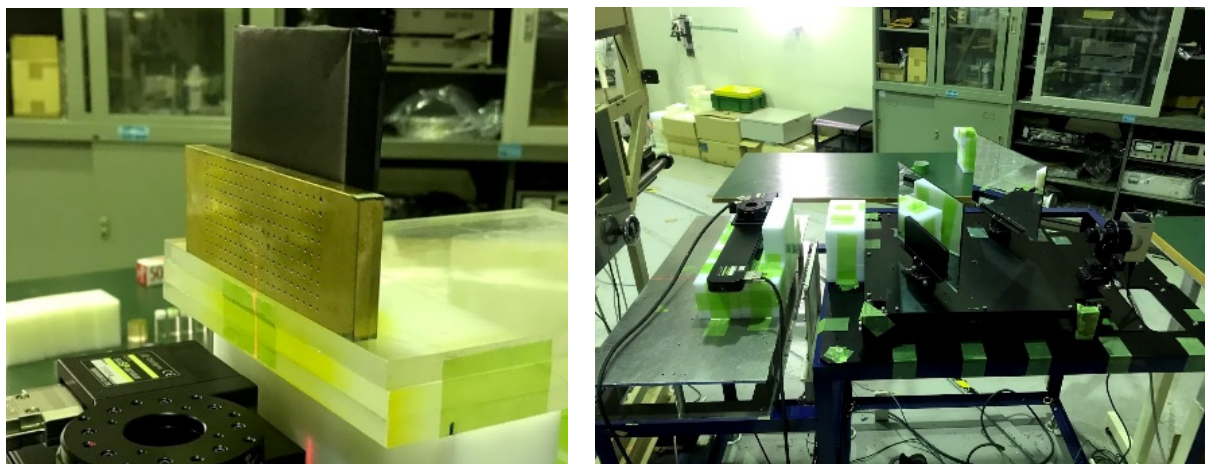


図 2 : MHC (金色の真鍮板) と BGO シンチレータが設置されている写真 (左) 及び C8 コースに設置した陽子線 CT 画像取得システムの写真 (右)。

### 3. 実験結果

#### 3-1. 標的原子核破碎反応断面積値

図2はC6コースの陽子線照射実験より得られた、水ターゲット中での activity 分布の例である。図中の activity 分布において、左側から右側が陽子線の進行方向となる。activity 分布の横方向はそれぞれのターゲットでの深部位置での activity を示しており、深部位置がゼロ（左端）の位置では70MeVの陽子線照射による activity 計測の結果に相当し、ターゲットごとの陽子線の阻止能計算に基づくエネルギー減衰によって、それぞれの深部位置での陽子線エネルギーを算出できる。そのため、深部位置が深くなるに連れて低い陽子線エネルギーに対する activity 計測の結果を示していることになる

実験①のデータを解析した結果、陽子線照射終了から25分経過後にはPET装置が正しく計数できていることが確認できた。 $^{15}\text{O}$ の半減期はおおよそ2分であるため、25分経過後にはその影響は無視できる。そこで、実験①では陽子線の照射終了25分後から60分後までのPET計測データを用いて $^{13}\text{N}$ （図3右）と $^{11}\text{C}$ （図3左）の断面積を導出した。この導出結果を用いて実験②のデータより $^{15}\text{O}$ の断面積を導出した（図4）。PET装置の分解能及び陽子のエネルギーストラグリングの影響により、20 MeV 以下の低エネルギー領域では断面積の測定誤差が比較的大きくなってしまったものの、0-70 MeV の広範囲なエネルギー領域に渡り断面積を導出することに成功した。NNDCに報告されている過去のデータともよく一致する結果となった。今後、実験③のデータを解析、追加することでより精度の高い断面積の導出を目指す。

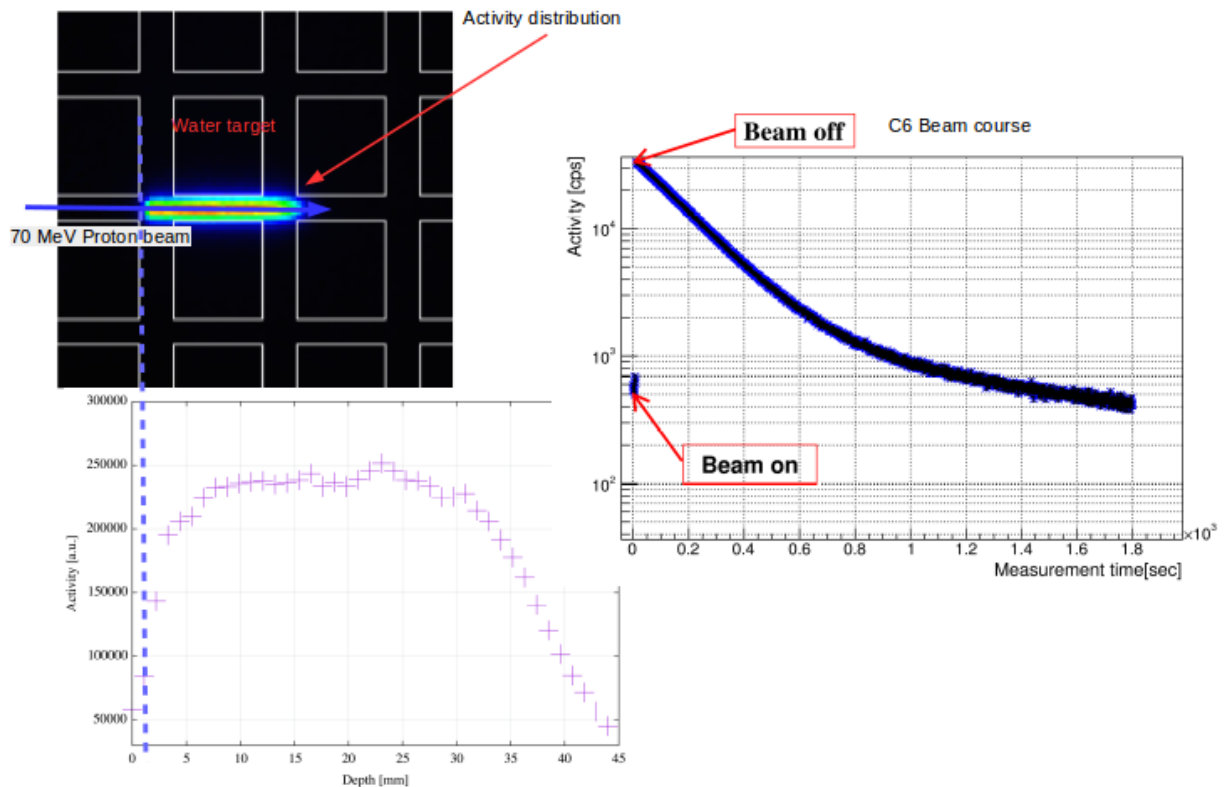


図2: 水ターゲットへの陽子線照射より実測された activity 分布及び計数率結果。

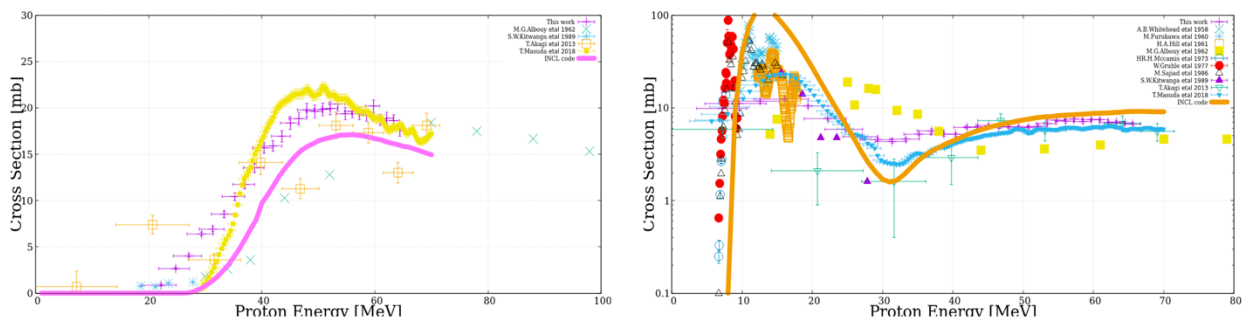


図3: 実験①により求めたポジトロン放出核 $^{13}\text{N}$ （左図）及び $^{11}\text{C}$ （右図）の生成反応断面積。

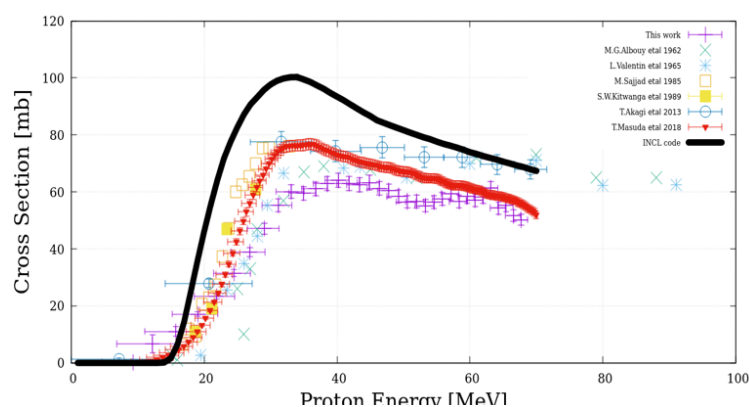
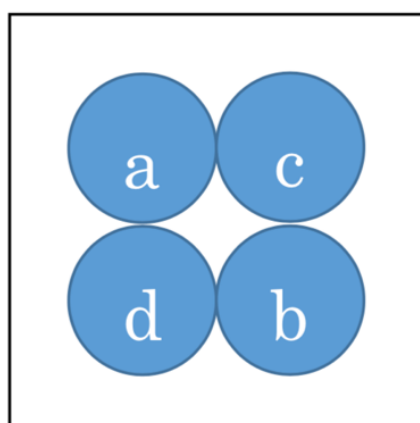


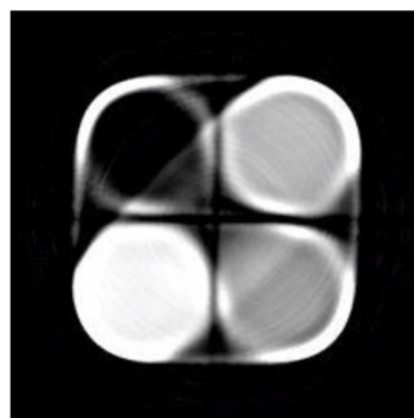
図 4：実験②により求めたポジトロン放出核  $^{15}\text{O}$  の生成反応断面積。

### 3-2. 陽子線 CT 画像

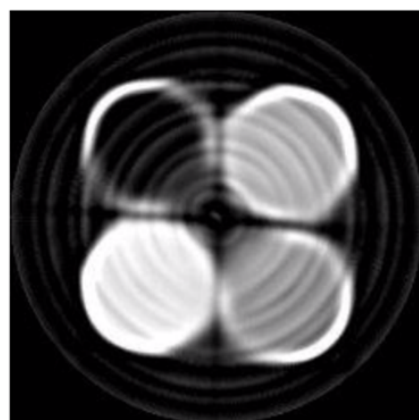
それぞれの実験体系について、陽子のエネルギーに対応する光量画像から光量レンジ変換の処理を行い、多数の方向からスキャンしたデータを再構成することで陽子線 CT 画像を得た（図 5）。実験Ⅲの場合が最も明瞭に被写体の輪郭を画像化することができた。また、それぞれの実験体系について、陽子線 CT 画像の画素値として得られた 4 種の物質の Water Equivalent Length factor (WELF) を表 1 に示した。計算値と実験値の最大誤差は、実験Ⅲの場合で 0.9% と最も小さかった。MHC を被写体上流に置き、擬似的な細いペンシルビームで陽子線 CT 画像を得た実験Ⅲの場合が、輪郭の描画と画素値について最も高精度であった。



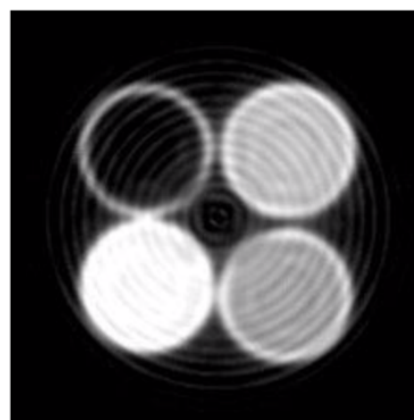
4 種の物質のレイアウト



実験Ⅰで取得した陽子線 CT 画像



実験Ⅱで取得した陽子線 CT 画像



実験Ⅲで取得した陽子線 CT 画像

図 5：それぞれの実験体系に対する、4 種の物質の陽子線 CT 画像；(a) 空気、(b) 99.5%エタノール、(c) 水、(d) 40%リン酸水素二カリウム水溶液。

表 1：それぞれの実験体系に対する、4 種の物質の WELF。

実験	物質	計算値	実験値	相対誤差
I	空気	0.000	-0.046	-
	エタノール	0.821	0.803	2.2%
	水	1.000	0.953	4.7%
	リン酸水素二カリウム	1.294	1.258	2.8%
II	空気	0.000	0.053	-
	エタノール	0.821	0.749	8.8%
	水	1.000	0.929	7.1%
	リン酸水素二カリウム	1.294	1.180	8.8%
III	空気	0.000	0.019	-
	エタノール	0.821	0.825	0.5%
	水	1.000	0.991	0.9%
	リン酸水素二カリウム	1.294	1.286	0.6%

#### 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砕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した。標的原子核破砕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  $^{16}\text{O}$  の生成反応断面積値の結果を導出することが出来た。陽子線 CT 画像については、実験より取得された陽子線 CT 画像の空間分解能及び画素値の評価を行った。

令和元年度も引き続き陽子線照射実験を継続して行い、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).
- [7] S. Tanaka, T. Nishio, M. Tsuneda, K. Matsushita, S. Kabuki, M. Uesaka, “Improved proton CT imaging using a bismuth germanium oxide scintillator,” Phys. Med. Biol. 63, 035030 (2018).
- [8] 田中創大. 陽子線治療の高精度化のための陽子線 CT 画像取得法の研究開発. 東京大学, 2018, Ph.D. thesis.
- [9] 田原智祐. 陽子線 CT 画像の画質向上に関する基礎研究. 東京工業大学, 2019, M.S. thesis.



# 外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響評価

## Effects of external magnetic fields on cell-inactivation efficiency of proton beams

稲庭 拓,<sup>A</sup> 鈴木 雅雄,<sup>B</sup> 佐藤 眞二,<sup>A</sup> 野田 章<sup>A</sup>

Taku Inaniwa,<sup>A</sup> Masao Suzuki,<sup>B</sup> Shinji Sato,<sup>A</sup> Akira 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 物理工学部

<sup>B</sup> 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 放射線障害治療研究部

### 概要

本研究では、陽子線の進行方向に直交または平行する外部磁場が、陽子線の細胞殺傷効果にどのような影響を与えるかを評価する。平行磁場発生器としてソレノイド電磁石を、直交磁場発生器としてダイポール電磁石を用い、それらをサイクロトロン棟 C8 コースに設置した。ソレノイド電磁石のボア内またはダイポール電磁石の磁極間に人のがん細胞と正常細胞を設置し、二種の LET (1.1 keV/μm または 3.3 keV/μm) の陽子線を照射した。外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響を細胞生残率の変化で評価した。平行磁場では、どちらの細胞種についても、磁場を印加することで細胞生残率が優位に低下した。一方、直交磁場では、磁場の有無によって細胞生残率に有意な変化はなかった。また、低 LET 陽子線よりも高 LET 陽子線においてより顕著な生残率の低下が観測された。

外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響は、磁場の方向と強度に依存し、平行磁場によって有意に増強される。

### 1. はじめに

近年、X 線治療用ライナックと磁気共鳴撮像 (MRI) 装置を組み合わせた MRI ライナックが開発され、MRI 画像誘導放射線治療が普及しつつある。これに倣い、陽子線治療装置と MRI 装置を組み合わせた MRI 画像誘導陽子線治療が研究され始めている。これは、MRI により腫瘍の位置を確認しながら、それに対して高精度に陽子線を照射するための治療技術である。この MRI 画像誘導陽子線治療では、MRI の強力な外部磁場により陽子線が偏向する。そこで、MRI 磁場が患者体内での陽子線線量分布に与える影響について盛んに評価が進められている[1]。しかしながら、MRI 装置の強力な磁場下で、陽子線の細胞殺傷効果がどのように変化するかを調べた研究例はない。稲庭等は、HIMAC を用いた炭素線照射実験を通して、外部磁場が炭素線の細胞殺傷効果に与える影響を評価し、炭素線に平行する磁場を印加することによって炭素線の細胞殺傷効果が有意に増強されること[2]、また、炭素線に直交する磁場を印加しても炭素線の細胞殺傷効果に有意な変化はないことを確認した[3]。しかしながら、世界的に荷電粒子線治療で最も多く用いられている線種は陽子線であることから、外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響を評価することは重要である。

そこで本研究では、外部磁場を印加することで陽子線の細胞殺傷効果がどのように変化するかを確認し、また、印加する外部磁場の方向や強度と細胞殺傷効果との関係を明らかにすることを目的とする。炭素線と同様に平行磁場による陽子線の細胞殺傷効果の増強が確認されれば、全く新しい荷電粒子線の治療方法を提案できる。この治療方法では、“適切な方向”に“適切な強度”の外部磁場を掛けながら陽子線を照射することで、例えば、陽子線照射装置でヘリウム線や炭素線と同等の殺細胞効果を達成できる可能性がある。このことは、陽子線治療の治療効果を高めるだけでなく、治療施設の小型化およびコストダウンにもつながり、その発展性や波及効果は非常に大きい。

### 2. 方法

全ての陽子線照射実験はサイクロトロン棟の C8 コースで行った[4]。図 1 に平行磁場および直交磁場の実験セットアップを示した。平行磁場発生器としてソレノイド電磁石 (ボア径: 10.5 cm) を、直交磁場発生器としてダイポール電磁石 (磁極径: 25 cm, 磁極間隔: 8.3 cm) を用い、それらを C8 コースのアイソセンターに設置した。アイソセンター位置 (ボア内または磁極間) での磁場強度は設定する電流値で変更可能であり、最大磁場は各電磁石で 0.6 T と 0.67 T である。NIRS-930 サイクロトロンで加速された 70 MeV 陽子線の LET は約 1.1 keV/μm であるが、照射試料 (細胞) の上流に 3.3 cm 厚のアクリルブロックを設置することで LET を 3.3 keV/μm に増加させることが可能である。二つの LET をもつ陽子線をワブラー電磁石と散乱体により 8 cm 径に広げて照射実験に用いた。照射線量は、ビームライン上の線量モニターで管理され、照射線量と設定線量との 5 回繰り返し測定における最大誤差は 1.2% であった。

線量率は各 LET の陽子線で  $\sim 5$  Gy/min と  $\sim 9$  Gy/min であった。

人の耳下腺癌細胞 (HSGc-C5) と皮膚線維芽細胞 (NB1RGB) を培養した 3.5 cm 径の培養皿をソレノイド電磁石のボア内またはダイポール電磁石の磁極間に設置する。これにより、平行磁場または直交磁場を印加した状態で細胞に陽子線を照射することができる。各磁場条件において、細胞への照射線量を 0.5 Gy  $\sim$  7 Gy で変化させ、コロニー形成法により生残率を決定し、線量—生残率関係を求めた。一連の細胞照射実験は独立した別日に 3 回行った。各条件で測定した線量—生残率関係を LQ モデルでフィッティングし、10%生残線量 (生残率 10%を実現するのに必要な線量) を求める。外部磁場による陽子線の細胞殺傷効果の変化は、磁場無しでの 10%生残線量  $D_{w0}$  の、磁場有での 10%生残線量  $D_w$  に対する比 (10%生残線量比:  $R_{10}=D_{w0}/D_w$ ) で評価した。

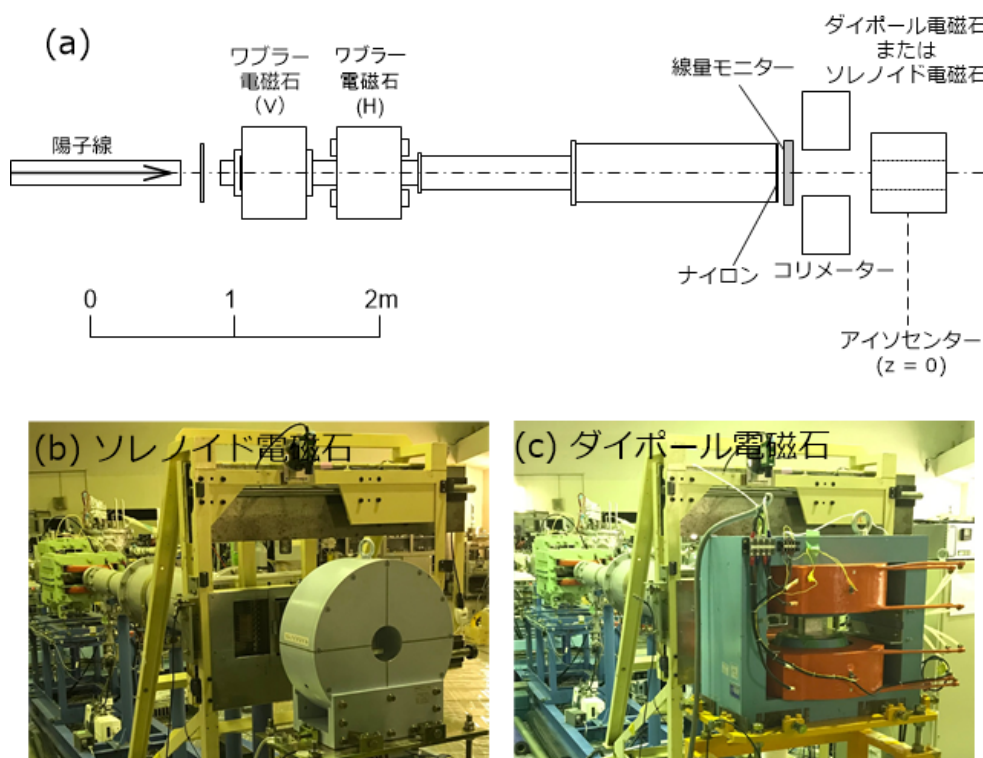


図 1. (a) C8 コースでの実験セットアップ。 (b) 平行磁場発生用ソレノイド電磁石の写真、 (c) 直交磁場発生用ダイポール電磁石の写真。

### 3. 結果と考察

#### 3-1. 平行磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響

平行磁場下で 3.3 keV/ $\mu$ m の陽子線を照射した HSGc-C5 細胞と NB1RGB 細胞の線量—生残率関係を図 2 に示した。どちらの細胞についても、平行磁場によって細胞生残率が低下することが分かる。平行磁場下で測定した線量—生残率関係から求めた 10%生残線量比  $R_{10}$  を表 1 にまとめた。HSGc-C5 細胞では、1.1 keV/ $\mu$ m と 3.3 keV/ $\mu$ m 陽子線の  $R_{10}$  は  $B_L = 0.3$  T で 1.08 と 1.11 となったが、磁場強度を  $B_L = 0.6$  T に上げて  $R_{10}$  はそれ以上には上がらなかった。一方、NB1RGB 細胞では、 $R_{10}$  は  $B_L = 0.3$  T で 1.13 と 1.16 であり、磁場強度を  $B_L = 0.6$  T に上げると  $R_{10}$  は 1.17 と 1.28 に増大した。t 検定から、陽子線の細胞殺傷効果は平行磁場により有意に増強されると言える。

表 1. 平行磁場下で HSGc-C5 細胞と NB1RGB 細胞に 1.1 keV/ $\mu$ m と 3.3 keV/ $\mu$ m の陽子線を照射したときの 10%生残線量比  $R_{10}$ 。括弧内の値は、 $R_{10}=1$  に対する t 検定の p 値。p < 0.05 で有意差有の判定。

	HSGc-C5		NB1RGB	
	1.1 keV/ $\mu$ m	3.3 keV/ $\mu$ m	1.1 keV/ $\mu$ m	3.3 keV/ $\mu$ m
$R_{10}$ [ $B_L = 0.3$ T]	1.08 $\pm$ 0.03 (0.045)	1.11 $\pm$ 0.04 (0.037)	1.13 $\pm$ 0.03 (0.018)	1.16 $\pm$ 0.01 (0.001)
$R_{10}$ [ $B_L = 0.6$ T]	1.08 $\pm$ 0.04 (0.081)	1.12 $\pm$ 0.02 (0.011)	1.17 $\pm$ 0.06 (0.033)	1.28 $\pm$ 0.07 (0.020)

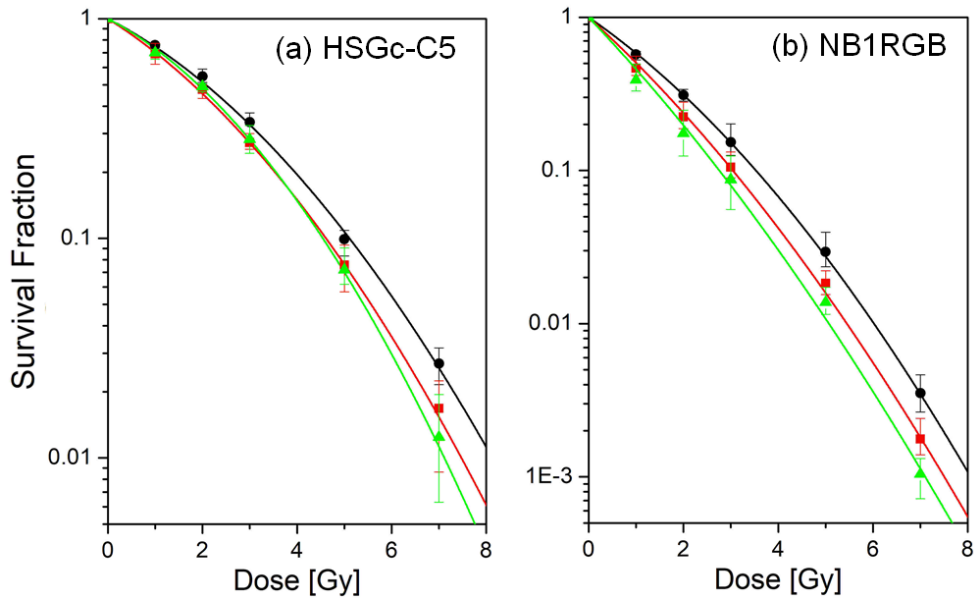


図2. 平行磁場下で3.3 keV/μmの陽子線を照射した (a) HSGc-C5 細胞と(b) NB1RGB 細胞の線量—生存率関係。黒色は磁場無し、赤色は平行磁場  $B_L = 0.3$  T、黄緑色は平行磁場  $B_L = 0.6$  Tを印加した場合の線量—生存率関係を表す。

### 3-2. 直交磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響

直交磁場下で3.3 keV/μmの陽子線を照射したHSGc-C5細胞とNB1RGB細胞の線量—生存率関係を図3に示した。どちらの細胞についても、直交磁場の有無によって細胞生存率はほとんど変化しなかった。直交磁場下で測定した線量—生存率関係から求めた10%生存線量比  $R_{10}$ を表2にまとめた。直交磁場を印加することで10%生存線量比  $R_{10}$ はHSGc-C5細胞で2-3%減少した。しかし、t検定によれば全ての条件で  $R_{10}=1$  に対して有意差はなかった。即ち、直交磁場は陽子線の細胞殺傷効果に有意な影響を与えないと言える。

表2. 直交磁場下でHSGc-C5細胞とNB1RGB細胞に1.1 keV/μmと3.3 keV/μmの陽子線を照射したときの10%生存線量比  $R_{10}$ 。括弧内の値は、 $R_{10}=1$  に対するt検定のp値。p<0.05で有意差有の判定。

	HSGc-C5		NB1RGB	
	1.1 keV/μm	3.3 keV/μm	1.1 keV/μm	3.3 keV/μm
$R_{10}$ [ $B_P = 0.3$ T]	0.97±0.01 (0.052)	0.99±0.02 (0.482)	0.99±0.01 (0.137)	1.00±0.01 (0.617)
$R_{10}$ [ $B_P = 0.6$ T]	0.98±0.01 (0.111)	1.00±0.01 (0.199)	0.99±0.01 (0.057)	1.00±0.01 (0.694)

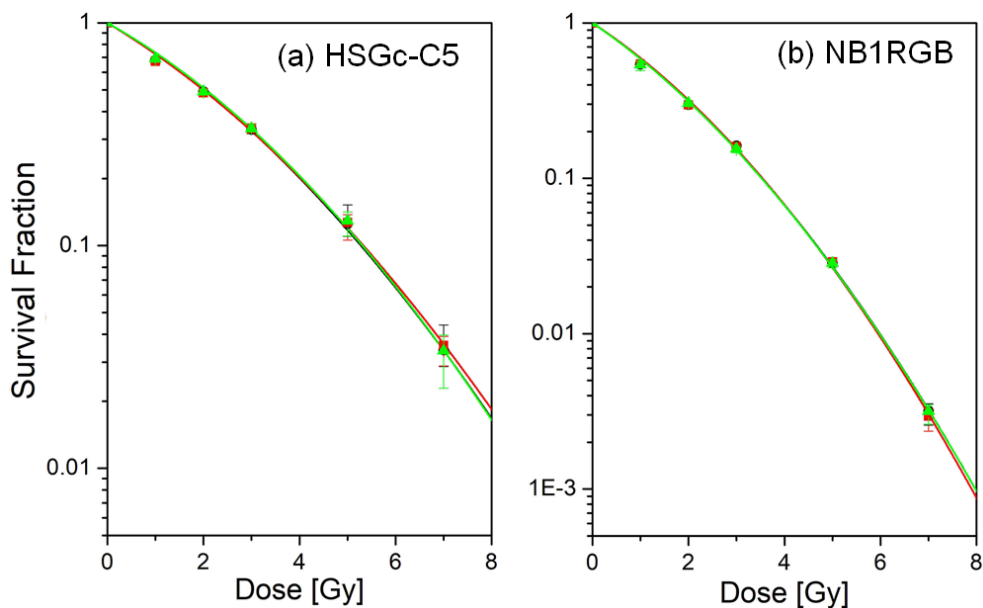


図3. 直交磁場下で  $3.3 \text{ keV}/\mu\text{m}$  の陽子線を照射した (a) HSGc-C5 細胞と(b) NB1RGB 細胞の線量—生存率関係。黒色は磁場無し、赤色は平行磁場  $B_L = 0.3 \text{ T}$ 、黄緑色は平行磁場  $B_L = 0.6 \text{ T}$  を印加した場合の線量—生存率関係を表す。

#### 4. まとめ

本研究では、外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響を調べた。細胞殺傷効果への影響は、磁場の方向とその強度に依存することが分かった。直交磁場では、磁場強度に依らず陽子線の細胞殺傷効果は変わらない。一方、平行磁場では、陽子線の細胞殺傷効果は磁場強度や細胞の種類によって10%-30%程度増強された。これらの実験結果は、原著論文としてまとめ、英文誌 *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* に投稿予定である。

これまでの研究結果は、新たな粒子線治療への可能性を示すものである。しかし、本現象の機序については未だ明確になっていない。今後は、他の細胞種を用いて実験データを拡充させるとともに、機序の解明に向けた研究を進めていく予定である。

#### 参考文献

- [1] H. Fuchs, P. Moser, M. Gröschl, D. Georg, “Magnetic field effects on particle beams and their implications for dose calculation in MR-guided particle therapy”, *Med. Phys.* **44**, 1149-56 (2017).
- [2] T. Inaniwa, M. Suzuki, S. Sato, *et al.*, “Enhancement of biological effectiveness of carbon-ion beams by applying a longitudinal magnetic field”, *Int. J. Radiat. Biol.* **95**, 720-24 (2019).
- [3] T. Inaniwa, M. Suzuki, S. Sato, *et al.*, “Influence of a perpendicular magnetic field on biological effectiveness of carbon-ion beams”, *Int. J. Radiat. Biol.* in press (2019).
- [4] A. Sugiura, S. Hojo, K. Katagiri, *et al.*, “Design study for improvement of irradiation field at NIRS-930 cyclotron”, *Proceeding of the 10<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*: 434-436 (2013).



## 4. 研究成果一覽

# 研究成果一覧

## 1. サイクロトロン施設

### [ 原著論文 ]

- (1) K. Katagiri et al., “Singly-charged ion source designed using three-dimensional particle-in-cell method,” Rev. Sci. Instrum., 89 (2018) 113302-1-10.

### [ プロシーディングス ]

- (1) S. Hojo et. al, Proceedings of 15<sup>th</sup> Particle Accelerator Society, 2018, pp. 1359.
- (2) K. Katagiri et. al, Proceedings of 15<sup>th</sup> Particle Accelerator Society, 2018, pp. 711.

### [ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) 北條 悟, 他, “放医研サイクロトロン (NIRS-930, HM-18) の現状報告 (2019),” 日本加速器学会年会 2018 年 8 月 長岡産業交流会館, 長岡市
- (2) 片桐 健, 他, “RI ビームがん治療用 ISOL システムの開発: 1 価 C-11 イオン生成実験,” 日本加速器学会年会 2018 年 8 月 長岡産業交流会館, 長岡市

## 2. 核医学研究

### 2.1. 標識薬剤開発

### [ 原著論文 ]

- (1) Katsushi Kumata, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Yiding Zhang, Wakana Mori, Masayuki Fujinaga, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of 4-(2-fluoro-4-[11C]methoxyphenyl)-5-((2-methylpyridin-4-yl)methoxy)picolinamide for PET imaging of the metabotropic glutamate receptor 2 in the rat brain, Bioorganic & Medicinal Chemistry, 27(3), 483 - 491, 2019-02.
- (2) Kazunori Kawamura, Wakana Mori, Masayuki Fujinaga, Tomoteru Yamasaki, Yiding Zhang, Hidekatsu Wakizaka, Akiko Hatori, Lin Xie, Katsushi Kumata, Takayuki Ohkubo, Yusuke Kurihara, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Radiosynthesis and in vivo evaluation of 11C-labeled BMS-193885 and its desmethyl analog as PET tracers for neuropeptide Y1 receptors, EJNMMI Radiopharmacy and Chemistry, 4, 4, 2019-02.
- (3) Zhe Li, Hu Kuan, Mengyan Yang, Yang Zou, Jinbin Yan, Huaying Wang, Xuecheng Qu, Puchuan Tan, Chan Wang, Xuechang Zhou, Zhou Li: Elastic Cu@PPy sponge for hybrid device with energy conversion and Storage Nano Energy, 58, 852 - 861, 2019-04.
- (4) Xiaoyun Deng, Akiko Hatori, Zhen Chen, Katsushi Kumata, Tuo Shao, Xiaofei Zhang, Tomoteru Yamasaki, Hu Kuan, Qingzhen Yu, Longle Ma, Gangqiang Wang, Wang Lu, Yihan Shao, Lee Joseph-

- son, Shaofa Sun, Ming-Rong Zhang, Huan Liang: Synthesis and Preliminary Evaluation of  $^{11}\text{C}$  - Labeled VU0467485/AZ13713945 and Its Analogues for Imaging Muscarinic Acetylcholine Receptor Subtype 4, *ChemMedChem*, 14(3), 303 - 309, 2019-03.
- (5) Cai-Ling Fan, Hu Kuan, Jing-Lin Wang, Xin-Qi Hao, Jun-Jie Wei, Mao-Ping Song, Chao Zheng: Synthesis of quaternary succinimides promoted by Ferric Nitrate, *Tetrahedron Letters*, 59(52), 4606 - 4610, 2018-12.
  - (6) Toshimitsu Okamura, Maki Okada, Tatsuya Kikuchi, Hidekatsu Wakizaka, Ming-Rong Zhang: Mechanisms of glutathione-conjugate efflux from the brain into blood: Involvement of multiple transporters in the course, *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, doi: 10.1177/0271678X18808399, 2018-12.
  - (7) Wakana Mori, Tomoteru Yamasaki, Masayuki Fujinaga, Masanao Ogawa, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Lin Xie, Katsushi Kumata, Hidekatsu Wakizaka, Yusuke Kurihara, Takayuki Ohkubo, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Development of 2-(2-(3-(4-([ $^{18}\text{F}$ ]Fluoromethoxy- $\text{d}_2$ )phenyl)-7-methyl-4-oxo-3,4-dihydroquinazolin-2-yl)ethyl)-4-isopropoxyisoindoline-1,3-dione for Positron Emission Tomography Imaging of Phosphodiesterase 10A (PDE10A) in Brain, *Journal of Medicinal Chemistry*, 62(2), 688 - 698, 2018-12.
  - (8) Seock-Jin Chung, Hyewon Youn, Eun Jin Jeong, Cho Rong Park, Mi Jeong Kim, Keon Wook Kang, Ming-Rong Zhang, Gi Jeong Cheon: In vivo imaging of activated macrophages by 18F-FEDAC, a TSPO targeting PET ligand, in the use of biologic disease-modifying anti-rheumatic drugs (bDMARDs), *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 506(1), 216 - 222, 2018-11.
  - (9) Osamu Inoue, Toshiyuki Sato, Kaoru Kobayashi, Antony Gee, Miho Shukuri, Ming-Rong Zhang: Unexpected decrease in in vivo binding of [ $^3\text{H}$ ]QNB in the mouse cerebral cortex in the developing brain – A comparison with [ $^{11}\text{C}$ ]NMPB, *Nuclear Medicine and Biology*, 67, 15 - 20, 2018-12.
  - (10) Masayuki Fujinaga, Katsushi Kumata, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Tomoteru Yamasaki, Wakana Mori, Takayuki Ohkubo, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Synthesis of Two Novel [ $^{18}\text{F}$ ]Fluorobenzene-Containing Radiotracers via Spirocyclic Iodonium Ylides and Positron Emission Tomography Imaging of Translocator Protein (18 kDa) in Ischemic Brain, *Organic & Biomolecular Chemistry*, 2018(16), 8325 - 8335, 2018-09.
  - (11) Katsushi Kumata, Yiding Zhang, Masayuki Fujinaga, Takayuki Ohkubo, Wakana Mori, Tomoteru Yamasaki, Masayuki Hanyu, Lin Xie, Akiko Hatori, Ming-Rong Zhang: [ $^{18}\text{F}$ ]DAA1106: automated radiosynthesis using spirocyclic iodonium ylide and preclinical evaluation for positron emission tomography imaging of translocator protein (18 KDa), *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 26(17), 4817 - 4822, 2018-09.
  - (12) Cuiping Jiang, Lin Xie, Yiding Zhang, Masayuki Fujinaga, Wakana Mori, Yusuke Kurihara, Tomoteru Yamasaki, Feng Wang, Ming-Rong Zhang: Pharmacokinetic Evaluation of [ $^{11}\text{C}$ ]CEP-32496 in Nude Mice Bearing BRAFV600E Mutation-Induced Melanomas, *Molecular Imaging*, 17, 2018-09.
  - (13) Zhen Chen, Wakana Mori, Xiaofei Zhang, Tomoteru Yamasaki, Patrick J. Dunn, Genwei Zhang, Hualong Fu, Tuo Shao, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Longle Ma, Masayuki Fujinaga, Lin Xie, Xiaoyun Deng, Hua Li, Qingzhen Yu, Jian Rong, Lee Josephson, Jun-An Ma, Yihan Shao, Susumu Tomita, Ming-Rong Zhang, Huan Liang: Synthesis, pharmacology and preclinical evaluation of  $^{11}\text{C}$ -labeled 1,3-dihydro-2H-benzo[d]imidazole-2-ones for imaging  $\gamma$  8-dependent transmembrane AMPA receptor regulatory protein, *European Journal of Medicinal Chemistry*, 157, 898 - 908, 2018-09.



- (14) Masayuki Fujinaga, Takayuki Ohkubo, Tomoteru Yamasaki, Yiding Zhang, Wakana Mori, Masayuki Hanyu, Katsushi Kumata, Akiko Hatori, Lin Xie, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Automated Synthesis of (rac) -, (R) -, and (S) - [18F]Epifluorohydrin and Their Application for Developing PET Radiotracers Containing a 3 - [18F]Fluoro - 2 - hydroxypropyl Moiety, *ChemMedChem*, 13, 1723 - 1731, 2018-08.
- (15) Kazunori Kawamura, Tomoteru Yamasaki, Yiding Zhang, Hidekatsu Wakizaka, Akiko Hatori, Lin Xie, Masayuki Fujinaga, Ming-Rong Zhang: Change in the Binding of [11C]BU99008 to Imidazoline I2 Receptor using Brain PET in Zucker Rats, *Molecular Imaging and Biology*, 21(1), 105-112. 2019-02.
- (16) Tomoteru Yamasaki, Wakana Mori, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Masayuki Fujinaga, Hidekatsu Wakizaka, Yusuke Kurihara, Wang Lu, Nobuki Nengaki, Tomoyuki Ohya, Huan Liang, Ming-Rong Zhang: First demonstration of in vivo mapping for regional brain monoacylglycerol lipase using PET with [11C]SAR127303, *NeuroImage*, 176, 313 - 320, 2018-08.
- (17) Tomoyuki Ohya, Katsuyuki Minegishi, Hisashi Suzuki, Kotaro Nagatsu, Masami Fukada, Masayuki Hanyu, Ming-Rong Zhang: Development of a remote purification apparatus with disposable evaporator for the routine production of high-quality <sup>64</sup>Cu for clinical use, *Applied Radiation and Isotopes*, 146, 127 - 132, 2019-04.
- (18) Obata Honoka, Mayeen uddin Khandaker, Etsuko Furuta, Kotaro Nagatsu, Ming-Rong Zhang: Excitation functions of proton- and deuteron-induced nuclear reactions on natural iridium for the production of <sup>191</sup>Pt, *Applied Radiation and Isotopes*, 137, 250 - 260, 2018-07.
- (19) Natsuko I. Kobayashi, Takaaki Ogura, Keiko Takagi, Ryohei Sugita, Hisashi Suzuki, Ren Iwata, Tomoko M. Nakanishi, Keitaro Tanoi: Magnesium deficiency damages the youngest mature leaf in rice through tissue-specific iron toxicity, *Plant and Soil*, 428, 137 - 152, 2018-07.
- (20) Takaaki Ogura, Natsuko I. Kobayashi, Hisashi Suzuki, Ren Iwata, Tomoko M. Nakanishi: Magnesium uptake characteristics in Arabidopsis revealed by <sup>28</sup>Mg tracer studies, *Planta*, 248(3), 745 - 750, 2018-09.

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) 謝 琳: <sup>211</sup>At-AITM を用いた標的アイソトープ治療効果の評価, 平成 30 年度戦略的理事長ファンド「萌芽的研究・創成的研究」及び「ダイバーシティ推進連携助成金研究」報告会, 量子科学技術研究開発機構, 2019-03-14.
- (2) 大久保 崇之, 藤永 雅之, 熊田 勝志, 念垣 信樹, 張 明榮: [18F] エピフルオロヒドリンによる [18F]FMISO の標識合成, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (3) 破入 正行, 謝 琳, 藤永 雅之, 張 一鼎, 羽鳥 晶子, 峯岸 克行, 李 惠子, 諸越 幸恵, 長谷川 純崇, 永津 弘太郎, 張 明榮: 小分子放射性薬剤 <sup>211</sup>At-AITM の合成と評価, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-16.
- (4) 羽鳥 晶子, 張 一鼎, 森 若菜, 栗原 雄祐, 脇坂 秀克, 張 明榮: 脳虚血モデルラットを用いた PET プロブ [11C]SAR1 による脳内 MAGL の画像化, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (5) 山崎 友照, 大矢 智幸, 森 若菜, 張 一鼎, 脇坂 秀克, 小川 政直, 張 明榮: Quantitative analysis for fatty acid amide hydrolase (FAAH) using PET with [11C]DFMC, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-16.

- (6) 謝 琳, 破入 正行, 張 一鼎, 羽鳥 晶子, 峯岸 克行, 李 惠子, 諸越 幸恵, 長谷川 純崇, 永津 弘太郎, 張 明栄: 小分子薬剤 211At-AITM による標的アイソトープ治療への実証第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-16.
- (7) 藤永 雅之, 大久保 崇之, 熊田 勝志, 森 若菜, 張 明栄: 18F-エピフルオロヒドリンを用いるアニリン誘導体の N-フルオロアルキル化反応, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (8) 森 若菜, 栗原 雄祐, 羽鳥 晶子, 張 一鼎, 藤永 雅之, 張 明栄: モノアシルグリセロールリパーゼを標的とした新規 PET イメージング剤の合成と評価, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (9) 河村 和紀, 森 若菜, 山崎 友照, 張 一鼎, 藤永 雅之, 熊田 勝志, 大久保 崇之, 栗原 雄祐, 小川 政直, 念垣 信樹, 張 明栄: 神経ペプチド Y-Y1 受容体アンタゴニスト BMS193885 及び脱メチル体の 11C 標識合成及びインビボ評価, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (10) Hu Kuan: Develop a peptide-based PET radiotracer for imaging PD-L1 expression in cancer, The 10th China-Japan-Korea Symposium on Radiopharmaceutical Sciences (CJKSRS 2018), The Committee of the 10th China-Japan-Korea Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, 2018-11-03.
- (11) 大久保 崇之, 藤永 雅之, 熊田 勝志, 念垣 信樹, 張 明栄: [18F] エピフルオロヒドリンの自動合成と PET トレーサーへの応用, 第 2 回日本核医学会分科会 放射性薬品科学研究会第 18 回放射性医薬品・画像診断研究会, 日本核医学会, 2018-09-08.
- (12) 森 若菜, 栗原 雄祐, 羽鳥 晶子, 張 一鼎, 藤永 雅之, 張 明栄: 11C-ホスゲンによる MAGL をターゲットとした PET トレーサーの開発, 第 2 回日本核医学会分科会放射性薬品科学研究会 第 18 回放射性医薬品・画像診断研究会, 日本核医学会, 2018-09-08.
- (13) Hu Kuan, 謝 琳, 破入 正行, 張 明栄: PD-L1 をターゲットする PET 診断及びがん免疫治療用の新規標識ペプチドの開発研究, 第 2 回日本核医学会分科会 放射性薬品科学研究会 第 18 回放射性医薬品・画像診断研究会, 日本核医学会, 2018-09-08.
- (14) Zhen Chen, Ran Cheng, Jing Yang, Tuo Shao, Neil Vasdev, Chongzhao Ran, Ming-Rong Zhang, Steven Liang: A novel 18F-labeled MAG lipase biomarker for differentiating brown and white adipose tissue in the lipid network, SNMMI 2018 Annual Meeting, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2018-06-25.
- (15) Rui Luo, Feng Wang, Ming-Rong Zhang: 18F-FEDAC Translocator Protein PET/CT for the early detection of mitochondria dysfunction secondary to myocardial ischemia, SNMMI 2018 Annual Meeting, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2018-06-25.
- (16) 大矢 智幸, 永津 弘太郎, 峯岸 克行, 破入 正行, 鈴木 寿, 深田 正美, 張 明栄: Pd をターゲットとした放射性 Ag の分離精製に関する検討, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (17) 鈴木 寿, 大矢 智幸, 永津 弘太郎, 深田 正美, 武井 誠, 峯岸 克行, 張 明栄: Development of a novel evaporator for radiopharmaceuticals preparation, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (18) Kotaro Nagatsu, Hisashi Suzuki, Atsushi Suzuki, Katsuyuki Minegishi, Mikio Matsumoto, Takuya Shiina, Kasumi Arai, Shogo Akabori, Tatsuya Higashi, Ming-Rong Zhang: Feasibility study for the production of Ac-225 from Ra-226 target / ラジウム 226 を利用したアクチニウム 225 の製造可能性評価, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-16.
- (19) 尾幡 穂乃香: Production of 191Pt from an iridium target, The 10th China-Japan-Korea Symposium on Radiopharmaceutical Sciences (CJKSRS 2018), The Committee of the 10th China-Japan-Korea

Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, 2018-11-03.

- (20) 尾幡 穂乃香, 峯岸 克行, 永津 弘太郎, 張 明榮, 篠原 厚: 191Pt 製造法の開発, 第 2 回日本核医学会分科会 放射性薬品科学研究会 第 18 回放射性医薬品・画像診断研究会, 日本核医学会, 2018-09-08.
- (21) 謝 琳: 癌蛋白質 mGluR1 を標的とする治療用 131I 及び 211At 標識小分子化合物の開発, 平成 29 年度戦略的理事長ファンド採択課題報告会, 量子科学技術研究開発機構, 2018-03-08.
- (22) 橋本 裕輝, 狩谷 香, 河村 和紀, 脇 厚生, 張 明榮: [18F]FDG 注射液中の残留有機溶媒濃度の合成装置間による差異第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (23) 熊田 勝志, 山崎 友照, 張 一鼎, 森 若菜, 羽鳥 晶子, 藤永 雅之, 念垣 信樹, 張 明榮: 代謝型グルタミン酸受容体 2 に選択的な新規 11C-標識 PET リガンドの合成と評価, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (24) Hu Kuan: Constrained  $\beta$ -hairpin peptide-stabilized BP nanosheets for theranostics in PD-L1(+) tumors The 10th China-Japan-Korea Symposium on Radiopharmaceutical Sciences (CJKSRS 2018), The Committee of the 10th China-Japan-Korea Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, 2018-11-03.
- (25) 藤永 雅之: Development of Scandium-catalyzed [18F]fluoroalkylation of aniline analogs with [18F]epifluorohydrin under a mild condition, The 10th China-Japan-Korea Symposium on Radiopharmaceutical Sciences (CJKSRS 2018), Committee of the 10th China-Japan-Korea Symposium on Radiopharmaceutical Sciences, 2018-11-03.
- (26) Hideki Ishii, Tomoteru Yamasaki, Yiding Zhang, Ming-Rong Zhang: Synthesis and evaluation of novel positron emission tomography probe for metabotropic glutamate receptor 5, WMIC2018(World Molecular Imaging Congress), World Molecular Imaging Society, 2018-09-15.
- (27) 張 一鼎, 破入 正行, 謝 琳, 藤永 雅之, 羽鳥 晶子, 諸越 幸恵, 李 恵子, 峯岸 克行, 長谷川 純崇, 永津 弘太郎, 張 明榮:  $\alpha$ 線を用いた RI 療法による担がんマウスの治療効果及び体内分布の評価, Free Radical Summer School 2018, 日本酸化ストレス学会, 2018-08-04.
- (28) 黒澤 ふき, 謝 琳, 藤崎 真吾, 下川 卓志: 重粒子線を用いたがん治療のための基礎研究: 照射後の免疫応答に関する治療効果予測マーカーの探索, フリーラジカルサマースクール 2018 in Kusatsu, 日本酸化ストレス学会, 2018-08-04.
- (29) Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Hideki Ishii, Nobuki Nengaki, Maiko Ono, Toshimitsu Okamura, Takafumi Minamimoto, Makoto Higuchi, Ming-Rong Zhang: Sulfate conjugation of [11C]PBB3, a Tau imaging agent, in the brain, The XII International Symposium of Functional Neuroreceptor Mapping of the Living Brain, King's College London, 2018-07-10.
- (30) Zhen Chen, Xiaofei Zhang, Tuo Shao, Yihan Shao, Susumu Tomita, Ming-Rong Zhang, Steven Liang: Synthesis and preclinical evaluation of 11C-labeled 1,3-dihydro-2H-benzo[d]imidazol-2-ones for development of TARP  $\gamma$ -8 dependent AMPAR PET tracers, SNMMI 2018 Annual Meeting, Society of Nuclear Medicine and Molecular imaging, 2018-06-25.
- (31) Zhen Chen, Xiaofei Zhang, Tuo Shao, Neil Vasdev, Yihan Shao, Susumu Tomita, Ming-Rong Zhang, Steven Liang: Preclinical evaluation of 11C-JNJ55511118 and 11C-JNJ56022486 for imaging subtype-selective AMPA receptor, SNMMI 2018 Annual Meeting, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2018-06-24.
- (32) Xiaofei Zhang, Zhen Chen, Hye Jin Kang, Douglas Sheffler, Nicholas Cosford, Neil Vasdev, Yihan Shao, Ming-Rong Zhang, Steven Liang: Development of 11C-labeled mGluR2negative allosteric modulators for PET imaging, SNMMI 2018 Annual Meeting, Society of Nuclear Medicine and Molecular

Imaging, 2018-06-24.

- (33) Tomoteru Yamasaki, Wakana Mori, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Yusuke Kurihara, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Hidekatsu Wakizaka, Masayuki Fujinaga, Wang Lu, Steven Liang, Ming-Rong Zhang: In vivo mapping for monoacylglycerol lipase activity using PET with [11C]SAR127303, 12th Congress of the World Federation of Nuclear Medicine and Biology, World Federation of Nuclear Medicine and Biology, 2018-04-23.
- (34) Hiroki Hashimoto, Kazunori Kawamura, Kenji Furutsuka, Kaori Kariya, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: The simultaneous measurement method for the molar radioactivity, radiochemical purity, and chemical impurity of the [11C]choline injection, 12th World Congress of the World Federation of Nuclear Medicine and Biology, World Federation of Nuclear Medicine and Biology, 2018-04-21.
- (35) Kazunori Kawamura, Wakana Mori, Tomoteru Yamasaki, Yiding Zhang, Masayuki Fujinaga, Akiko Hatori, Lin Xie, Katsushi Kumata, Takayuki Ohkubo, Yusuke Kurihara, Masanao Ogawa, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: In vivo characterizations of [11C]BMS193885 and [11C]Desmethyl-BMS193885 as a PET tracer for neuropeptide Y Y1 receptors, 12th World Congress of the World Federation of Nuclear medicine and Biology, World Federation of Nuclear Medicine and Biology, 2018-04-22.
- (36) Masayuki Hanyu, Lin Xie, Masayuki Fujinaga, Yiding Zhang, Akiko Hatori, Yukie Morokoshi, Huizi Li, Katsuyuki Minegishi, Sumitaka Hasegawa, Kotaro Nagatsu, Ming-Rong Zhang: Development and radiotherapeutic effect of two novel I-131 or At-211 labelled radioprobes for melanoma with overexpressed metabotropic glutamate receptor 1, 12th Congress of the World federation of Nuclear Medicine and Biology, World Federation of Nuclear Medicine and Biology, 2018-04-23.
- (37) Lin Xie, Takashi Shimokawa, Yiding Zhang, Cuiping Jiang, Hidekatsu Wakizaka, Katsushi Kumata, Nobuki Nengaki, Ming-Rong Zhang: Visualizing the dynamics of checkpoint protein IDO1 reveals host antitumor responses activated by a combination of immunotherapy and chemotherapy with 11C-L-1MTrp PET, 12th World Congress of the World Federation of Nuclear Medicine and Biology, World Federation of Nuclear Medicine and Biology, 2018-04-23.
- (38) 黒澤 ふき: 放射線照射による PD-L1 発現誘導への線質の影響, 卒業論文発表会, 東邦大学, 2019-02-18.
- (39) 張 明榮: Development and Production of Radioprobes for Positron Emission Tomography and Targeted Radionuclide Therapy in Japan, 第 10 回日越原子力研究人材フォーラムでの招待発表, ベトナム原子力研究機構, 2019-03-28.
- (40) 張 明榮: Development of Radiolabeling Techniques and Clinically Useful PET Tracers for Neuroimaging The 1st International Symposium on PET Ligand Development and Molecular NeuroImagng & The 5th PET/MR, 招待発表, The First Affiliated Hospital of Jinan University, 2018-12-09.
- (41) 張 明榮: Practical radiolabelling techniques with 18F for development of PET radiotracers for clinical use 第 5 8 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 招待発表, 2018-11-16.
- (42) 張 明榮: Development of Useful Radioprobes for Targeted Radionuclide Therapy and PET Imaging Studies, The 4th International Symposium on Molecular Imaging and Nanomedicine, ISMIN Organizing Committee, 招待発表, 2018-11-06.
- (43) 張 明榮: Development and Application of radiotracers for Metabotropic Glutamate Receptor Subtype 1: from PET Imaging to Targeted Radionuclide Therapy, The 3rd China-America Nuclear Medicine Academic Forum (8/17-19), Chinese Society of Nuclear Medicine / China-America College

of Nuclear Medicine, 招待発表, 2018-08-19.

- (44) 張 明榮: Production and Application of Radioisotopes for Targeted Cancer Therapy, The 13th Nanjing Symposium of Molecular Marker and Nuclear Medicine Theranostics, Nanjing First Hospital, Nanjing Medical University, 招待発表, 2018-06-09.
- (45) 永津 弘太郎: Ac-225 production status and future in Japan, The 57th Annual Meeting of the Korean Society of Nuclear Medicine, 招待発表, The Korean Society of Nuclear Medicine, 2018-10-25.

[ その他 (特許, 解説, 単行本等) ]

- (1) 鈴木 寿, 永津 弘太郎, 張 明榮: 移動式放射性核種製造用照射装置
- (2) 鈴木 寿, 張 明榮, 小川 政直: 短寿命放射性薬剤製造用自動合成装置合成ユニット

## 2.2. 脳機能イメージング研究

[ 原著論文 ]

- (1) Hironobu Endo, Hitoshi Shimada, Naruhiko Sahara, Maiko Ono, Shunsuke Koga, Soichiro Kitamura, Fumitoshi Niwa, Shigeki Hirano, Yasuyuki Kimura, Masanori Ichise, Hitoshi Shinoto, Ming-Rong Zhang, Satoshi Kuwabara, Dennis W. Dickson, Tatsushi Toda, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, In-vivo binding of a tau imaging probe, [11C]PBB3, in patients with progressive supranuclear palsy Movement Disorders, 34(5), 744 - 754, 2019-05, DOI:10.1002/mds.27643.
- (2) Hitoshi Shinoto, Hitoshi Shimada, Yasumasa Kokubo, Kenji Tagai, Fumitoshi Niwa, Soichiro Kitamura, Hironobu Endo, Maiko Ono, Yasuyuki Kimura, Shigeki Hirano, Maya Mimuro, Masanori Ichise, Naruhiko Sahara, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, Tau imaging detects distinctive distribution of tau pathology in ALS/PDC on the Kii Peninsula Neurology, 92(2), e136 - e147, 2019-01, DOI:10.1212/WNL.0000000000006736.
- (3) Naruhiko Sahara, Jun Maeda, Ai Ishikawa, Masaki Tokunaga, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, Microglial Activation During Pathogenesis of Tauopathy in rTg4510 Mice: Implications for the Early Diagnosis of Tauopathy, Journal of Alzheimer's Disease, 64(S1), S353 - S359, 2018-06, DOI:10.3233/JAD-179933.
- (4) Takehito Ito, Yasuyuki Kimura, Chie Seki, Masanori Ichise, Keita Yokokawa, Kazunori Kawamura, Hidehiko Takahashi, Makoto Higuchi, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara, Makiko Yamada, Histamine H3 receptor density is negatively correlated with neural activity related to working memory in humans, European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging Research (EJNMMI Research), , 2018-06, DOI:10.1186/s13550-018-0406-4.
- (5) Soichiro Kitamura, Hitoshi Shimada, Fumitoshi Niwa, Hironobu Endo, Hitoshi Shinoto, Keisuke Takahata, Manabu Kubota, Yuhei Takado, Shigeki Hirano, Yasuyuki Kimura, Ming-Rong Zhang, Satoshi Kuwabara, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, Tau-induced focal neurotoxicity and network disruption related to apathy in Alzheimer's disease J Neurol Neurosurg Psychiatry, 89(11), 1208 - 1214, 2018-11, DOI:10.1136/jnnp-2018-317970
- (6) Shigeki Hirano, Hitoshi Shinoto, Hitoshi Shimada, Tsuneyoshi Ota, Koichi Sato, Noriko Tanaka, Ming-Rong Zhang, Makoto Higuchi, Kiyoshi Fukushi, Toshiaki Irie, Satoshi Kuwabara, Tetsuya Suhara, Voxel-Based Acetylcholinesterase PET Study in Early and Late Onset Alzheimer's Disease.

Journal of Alzheimer's Disease, 62(4), 1539 - 1548, 2019-03, DOI:10.3233/JAD-170749

- (7) Ruiqing Ni, Bin Ji, Maiko Ono, Naruhiko Sahara, Ming-Rong Zhang, Ichio Aoki, Agneta Nordberg, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, Comparative in-vitro and in-vivo quantifications of pathological tau deposits and their association with neurodegeneration in tauopathy mouse models, The Journal of Nuclear Medicine, 59(6), 960 - 966, 2018-06, DOI:10.2967/jnumed.117.201632

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) Naruhiko Sahara, Gen Matumoto, Yoshiki Yamaguchi, Tau filaments in cellular and mouse models of tauopathy, 第 40 回日本生物学的精神医学会・第 61 回日本神経化学学会大会 合同年会, 日本生物学的精神医学会・日本神経化学学会, 2018-09-07.
- (2) 島田 斉, In vivo uptake of 18F-PM-PBB3 in patients with diverse 4-repeat tauopathies, ADPD2019, ADPD, 2019-03-31.
- (3) 南本 敬史, A chemogenetic toolbox for primates, New Directions in Systems Neuroscience, AMED-FDG, 2019-03-21.
- (4) 南本 敬史, 新規 DREADD リガンド Deschloroclozapine (DCZ) による霊長類脳回路のイメージングと活動操作, 平成 30 年度 京都大学霊長類研究所 共同利用研究会, 高田昌彦, 2019-03-16.
- (5) 下條 雅文, 樋口 真人, 記憶光プローブを用いた非侵襲的画像化法の開発, CREST サイトビジット, JST, 2019-03-08.
- (6) 山田 真希子, 量子認知脳科学グループ研究内容発表会, 量子科学技術研究開発機構, 2019-01-24.
- (7) 島田 斉, In vivo distribution pattern of 18F-PM-PBB3 (18F-APN-1607) and its relationship with clinical features in diverse 4-repeat tauopathies, Huma Amyloid Imaging Conference 2019, HAI, 2019-01-18.
- (8) 下條 雅文, CREST 研究成果報告, CREST オプトバイオ H30 年度 成果報告会, 河西春郎, 2019-01-08.
- (9) 高堂 裕平, 量研・放医研におけるトランスレーショナルリサーチ: タウ PET の有用性, 新潟大学脳研究所神経内科同窓会, 2018-12-22.
- (10) 島田 斉, In vivo tracking of 4-repeat tauopathies using PET with 18F-PM-PBB3, 第 1389 回千葉医学会例会/第 36 回脳神経内科教室例会, 千葉医学会&千葉大脳神経内科, 2018-12-15.
- (11) 南本 敬史, サルの脳回路を特異的に操作する化学遺伝学とイメージングの融合手法, 第三回脳情報の解読と制御研究会, 第三回脳情報の解読と制御研究会, 2018-11-24.
- (12) 関 千江, 服部 靖志, 前田 純, 永井 裕司, 内田 翔子, 徳永 正希, 張 明栄, 小池竜樹, 樋口 真人, 新規モノアシルグリセロールリパーゼ PET リガンド [18F]T-401 の前臨床評価, 社団法人日本核医学会, 2018-11-15.
- (13) 久保田 学, 島田 斉, 高畑 圭輔, 互 健二, 関 千江, 佐野 康徳, 山本 保天, 高堂 裕平, 篠遠 仁, 本井 ゆみ子, 鈴木 寿臣, 女屋 光基, 河村 和紀, 張 明栄, 須原 哲也, 樋口 真人, 前頭側頭葉変性症における脳内タウ蓄積および代謝型グルタミン酸受容体 5 型の変化に関する PET 研究, 日本臨床精神神経薬理学会・日本神経精神薬理学会, 2018-11-14.
- (14) Masafumi Shimojo, Maiko Ono, Hiroyuki Takuwa, Masayuki Fujinaga, Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Koki Mimura, Yuji Nagai, Chie Seki, Masaki Tokunaga, Jun Maeda, Yuhei Takado, Manami Takahashi, Takeharu Minamihisamatsu, Ming-Rong Zhang, Yutaka Tomita, Norihiro Suzuki, Takafumi Minamimoto, Anton Maximov, Tetsuya Suhara, Naruhiko Sahara, Makoto Higuchi, Genetically encoded reporter for bimodal optical and PET imaging in the mammalian brain, Society for Neuroscience, 2018-11-07.

- (15) 佐原 成彦, 田桑 弘之, 高堂 裕平, 漆畑 拓弥, 下條 雅文, 高橋 真奈美, 小野 麻衣子, 木村 妙子, 関 千江, 前田 純, 季 斌, 富田 裕, 張 明栄, 須原 哲也, 樋口 真人, Microglia engulfment of tangle-bearing neurons in a living tauopathy model, Society for Neuroscience Annual meeting 2018, Society for Neuroscience , 2018-11-05.
- (16) 佐原 成彦, Microglia engulfment of tangle-bearing neurons in a living tauopathy model, Society For Neuroscience, 2018-11-05.
- (17) 田桑 弘之, Engulfment of tangle-bearing neurons by microglia in a living tauopathy model, Society for Neuroscience, 2018-11-04.
- (18) Masafumi Shimojo, Maiko Ono, Hiroyuki Takuwa, Masayuki Fujinaga, Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Koki Mimura, Yuji Nagai, Chie Seki, Masaki Tokunaga, Jun Maeda, Yuhei Takado, Manami Takahashi, Takeharu Minamihisamatsu, Ming-Rong Zhang, Yutaka Tomita, Norihiro Suzuki, Takafumi Minamimoto, Anton Maximov, Tetsuya Suhara, Naruhiko Sahara, Makoto Higuchi, Genetically encoded reporter for bimodal optical and PET imaging in the mammalian brain, International Meeting on Bioimaging for Young Researchers, 新学術レゾナンスバイオ, 2018-10-29.
- (19) 下條 雅文, レポーター蛋白質を用いた神経回路の可視化と制御, 量子イメージング創薬アライアンス・脳とこころ, 2018-09-27.
- (20) 久保田 学, 統合失調症の脳構造および分子神経基盤に関する統合的画像研究 - 疾患解明を目指した基礎から応用までの包括的研究, 第 40 回日本生物学的精神医学会・第 61 回日本神経化学学会大会 合同年会, 日本生物学的精神医学会・日本神経化学学会大会との合同年会, 2018-09-07.
- (21) 久保田 学グループディスカッション: 画像研究, 第 40 回日本生物学的精神医学会・第 61 回日本神経化学学会大会 合同年会, 日本生物学的精神医学会・日本神経化学学会, 2018-09-06.
- (22) 下條 雅文, 田桑 弘之, 小野 麻衣子, 樋口 真人, 記憶光プローブ可視化に向けた進捗状況, CREST オプトバイオ、河西グループミーティング, 河西春郎, 2018-08-30.
- (23) Masafumi Shimojo, Maiko Ono, Hiroyuki Takuwa, Masayuki Fujinaga, Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Koki Mimura, Yuji Nagai, Chie Seki, Masaki Tokunaga, Jun Maeda, Yuhei Takado, Manami Takahashi, Takeharu Minamihisamatsu, Ming-Rong Zhang, Yutaka Tomita, Norihiro Suzuki, Takafumi Minamimoto, Anton Maximov, Tetsuya Suhara, Naruhiko Sahara, Makoto Higuchi, Genetically encoded reporter for bimodal optical and PET imaging in the mammalian brain, 第 41 回 日本神経科学大会, 日本神経科学学会, 2018-07-26.
- (24) 南本 敬史, 質感認知に伴う情動惹起の神経機構, 第 6 回多元質感知領域班会議, 新学術領域多元質感知, 2018-06-28.
- (25) 南本 敬史, 化学遺伝学イメージング: 神経路の可視化と操作による意思決定ネットワークの解明, 脳プロ意思決定 H 3 0 年度分科会, AMED, 2018-06-25.
- (26) 佐原 成彦, Jun Maeda, Takeharu Minamihisamatsu, Maiko Ono, Masafumi Shimojo, Hiroyuki Takuwa, Yuhei Takado, Taeko Kimura, Bin Ji, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, Neuroinflammatory process during pathogenesis of tauopathy in rTg4510 mice, Advances in Neurodegenerative Disease Research and Therapy, Keystone Symposia, 2018-06-20.
- (27) 久保田 学, 木村 泰之, 市瀬 正則, 関 千江, 島田 斉, 篠遠 仁, 高畑 圭輔, 北村 聡一郎, 森口 翔, 石井 辰弥, 互 健二, 高堂 裕平, 徳永 正希, 前田 純, 張 明栄, 須原 哲也, 樋口 真人, PET を用いた摂食に伴う脳内代謝型グルタミン酸受容体 5 型発現の変化に関する研究, 第 57 回千葉核医学研究会, 千葉核医学研究会, 2018-06-09.
- (28) Makoto Higuchi, In-vivo multimodal PET and optical imaging of pathological protein deposi-

- tions in humans and animal models of neurodegenerative disorders, International Symposium of Brain/MINDS, RIKEN Brain/MINDS office & AMED, 2019-01-29.
- (29) 下條 雅文, 小野 麻衣子, 田桑 弘之, 湊原 圭一郎, 樋口 真人, 記憶光プローブを用いた非侵襲的画像化法の開発成果報告, CREST オプトバイオ第3回領域会議, JST, 2019-01-17.
- (30) 島田 斉, Tau PET imaging in atypical parkinsonian disorders, Takeda PD Symposium, 武田薬品, 2019-01-12.
- (31) 下條 雅文, H30 年度 CREST 研究成果報告, CREST オプトバイオ H30 年度 成果報告会, 河西春郎, 2019-01-08.
- (32) 宮川 尚久, 永井 裕司, 南本 敬史, 扁桃体からの入力が腹側視覚野顔応答領域の顔表情表現に及ぼす影響, 顔・身体学, 2018-12-26.
- (33) 橋本 聡華, 前田 純, 田桑 弘之, 高堂 裕平, 下條 雅文, 高橋 真奈美, 漆畑 拓弥, 三平 和明, 南久松 丈晴, 稲次 基希, 熊田 勝志, 張 明榮, 須原 哲也, 樋口 真人, Abnormal tryptophan metabolism can accelerate the pathology of epilepsy via astrocyte functional failure, American Epilepsy Society Annual Meeting 2018, American Epilepsy Society, 2018-12-03.
- (34) 橋本 聡華, Jun Maeda, Yuhei Takado, Hiroyuki Takuwa, Masafumi Shimojo, Takahashi Manami, Takuya Urushihata, Katsushi Kumata, Motoki Inaji, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, Involvements of tryptophan metabolism in the pathogenesis of epilepsy, Neurosciense 2018, Society for Neuroscience, 2018-11-07.
- (35) Masafumi Shimojo, Maiko Ono, Hiroyuki Takuwa, Masayuki Fujinaga, Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Koki Mimura, Yuji Nagai, Chie Seki, Masaki Tokunaga, Jun Maeda, Yuhei Takado, Manami Takahashi, Takeharu Minamihisamatsu, Ming-Rong Zhang, Yutaka Tomita, Norihiro Suzuki, Takafumi Minamimoto, Anton Maximov, Tetsuya Suhara, Naruhiko Sahara, Makoto Higuchi, Genetically encoded reporter for bimodal optical and PET imaging in the mammalian brain, International Meeting on Bioimaging for Young Researchers, 新学術レゾナンスバイオ, 2018-10-29.
- (36) 島田 斉, Alzheimer 病における側頭葉内側タウ蓄積は後部帯状回を含む投射先脳領域の糖代謝低下と関連する, 第 61 回日本脳循環代謝学会学術集会, 日本脳循環代謝学会, 2018-10-19.
- (37) Masafumi Shimojo, Hiroyuki Takuwa, Yuhei Takado, Masaki Tokunaga, Urushihata Takuya, Tsukamoto Satoshi, Jun Maeda, Takeharu Minamihisamatsu, Ming-Rong Zhang, Ichio Aoki, Tetsuya Suhara, Naruhiko Sahara, Makoto Higuchi, In vivo assessment of synaptic properties in rTg4510 tauopathy transgenic mouse model by positron emission tomography, 第 37 回認知症学会, 日本認知症学会, 2018-10-12.
- (38) 高堂 裕平, 田桑 弘之, 漆畑 拓弥, 高橋 真奈美, 小野 麻衣子, 前田 純, 下條 雅文, 新田 展大, 柴田 さやか, 青木 伊知男, 佐原 成彦, 須原 哲也, 樋口 真人, Tau protein induced neural dysfunction in tauopathy mice: tau PET and H-MRS study, 第 37 回日本認知症学会学術集会において国内学会での研究発表, 日本認知症学会, 2018-10-12.
- (39) 宮川 尚久, 永井 裕司, 南本 敬史, 扁桃体からのフィードバックが腹側視覚野の視覚表現に及ぼす影響, 「質感のつどい」において発表および研究打ち合わせ, 「質感のつどい」世話人, 2018-10-10.
- (40) 三村 喬生, 永井 裕司, Ken-ichi Inoue, Jumpei Matsumoto, 須原 哲也, Hisao Nishijo, Masahiko Takada, 南本 敬史, Using PET imaging to monitor chemogenetic manipulation of nigrostriatal dopamine system in common marmoset, Monitoring and manipulating brain function in non-human primates, 2018-07-31.
- (41) Masafumi Shimojo, Maiko Ono, Hiroyuki Takuwa, Masayuki Fujinaga, Tatsuya Kikuchi, Maki



- Okada, Koki Mimura, Yuji Nagai, Chie Seki, Masaki Tokunaga, Jun Maeda, Yuhei Takado, Manami Takahashi, Takeharu Minamihisamatsu, Ming-Rong Zhang, Yutaka Tomita, Norihiro Suzuki, Takafumi Minamimoto, Anton Maximov, Tetsuya Suhara, Naruhiko Sahara, Makoto Higuchi, Genetically encoded reporter for bimodal optical and PET imaging in the mammalian brain, 国際ワークショップ「遺伝子導入技術の利用による霊長類脳機能操作とイメージング」, 2018-07-31.
- (42) 堀 由紀子, 永井 裕司, 須原 哲也, 南本 敬史, 菊池 瑛理佳, Barry J. Richmond, Single caudate neurons encode temporally discounted value for formulating motivation of action Monitoring and manipulating brain function in non-human primates, 2018-07-31.
- (43) Koki Mimura, Yuji Nagai, Ken-ichi Inoue, Tetsuya Suhara, Masahiko Takada, Takafumi Minamimoto, Using PET imaging to monitor chemogenetic manipulation of nigrostriatal dopamine system in common marmoset, 第 41 回日本神経科学大会, 日本神経科学学会, 2018-07-28.
- (44) Yuji Nagai, Naohisa Miyakawa, Bin Ji, Yukiko Hori, Xi-Ping Huang, Sam Slocum, Xiong Yan, Maiko Ono, Masafumi Shimojo, Justin English, Jing Liu, Ken-Ichi Inoue, Katsushi Kumata, Toshiyuki Hirabayashi, Chie Seki, Atsushi Fujimoto, Koki Mimura, Kei Oyama, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara, Masahiko Takada, Makoto Higuchi, Jian Jin, Bryan Roth, Takafumi Minamimoto, PET imaging of selective control of neural activity with a novel DREADD agonist, 第 41 回日本神経科学大会, 日本神経科学学会, 2018-07-28.
- (45) 島田 斉, Maiko Ono, Kenji Tagai, Manabu Kubota, Soichiro Kitamura, Hiroyuki Takuwa, Chie Seki, Yasuyuki Kimura, Masanori Ichise, Hitoshi Shinoto, Keisuke Takahata, Naoyoshi Yamamoto, Yasunori Sano, Yuhei Takado, Paul Tempest, Ming-Kuei Jang, John Seibyl, Oliver Barret, David Alagille, Kenneth Marek, Naruhiko Sahara, Kazunori Kawamura, Ming-Rong Zhang, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, Preclinical And Clinical Characterization Of 18f-PM-PBB3, A PET Ligand For Diverse Tau Pathologies, The Alzheimer's Association International Conference, 2018-07-21.
- (46) 高畑 圭輔, 木村 泰之, 島田 斉, 市瀬 正則, 佐原 成彦, 森口 翔, 北村 聡一郎, 久保田 学, 水島 仁, 田淵 肇, 河村 和紀, 張 明榮, 三村 將, 須原 哲也, 樋口 真人, Association between tau neuropathology in TBI patients and late-onset psychiatric symptoms: A PET study, 12nd International Symposium of Functional Neuroreceptor Mapping of the Living Brain (NRM2018), NeuroReceptor Mapping, 2018-07-11.
- (47) Masafumi Shimojo, Maiko Ono, Hiroyuki Takuwa, Masayuki Fujinaga, Tatsuya Kikuchi, Maki Okada, Koki Mimura, Yuji Nagai, Chie Seki, Masaki Tokunaga, Jun Maeda, Yuhei Takado, Manami Takahashi, Takeharu Minamihisamatsu, Ming-Rong Zhang, Yutaka Tomita, Norihiro Suzuki, Takafumi Minamimoto, Anton Maximov, Tetsuya Suhara, Naruhiko Sahara, Makoto Higuchi, Genetically encoded reporter for bimodal optical and PET imaging in the mammalian brain, FENS Forum2018, FENS, 2018-07-11.
- (48) 南本 敬史, 小山 佳, 永井 裕司, 堀 由紀子, 平林 敏行, サル前頭眼窩野の抑制は視覚刺激の好ましさに基づく行動を障害する, 第 6 回多元質感知領域班会議, 新学術領域多元質感知, 2018-06-27.
- (49) 高堂 裕平, 田桑 弘之, 漆畑 拓弥, 高橋 真奈美, 小野 麻衣子, 前田 純, 下條 雅文, 新田 展大, 柴田 さやか, 青木 伊知男, 佐原 成彦, 須原 哲也, 樋口 真人, Correlations between brain metabolites and tau protein accumulation assessed by H-MRS and tau PET in Alzheimer's disease model mice, JOINTANNUAL MEETING ISMRM-ESMRMB 2018, 2018-06-20.
- (50) 久保田 学, 木村 泰之, 市瀬 正則, 関 千江, 島田 斉, 篠遠 仁, 高畑 圭輔, 北村 聡一郎, 森口 翔, 石井 辰弥, 互 健二, 高堂 裕平, 佐野 ひろみ, 小畠 隆行, 徳永 正希, 前田 純, 張 明榮, 須原

- 哲也, 樋口 真人, Alterations of central metabotropic glutamate receptor 5 binding and glutamate concentrations by food intake, The 31st CINP World Congress, CINP, 2018-06-19.
- (51) 竹内 潤, 北村 聡一郎, 島田 斉, 樋口 真人, 須原 哲也, [11C]PBB3-PET を用いた神経原線維変化優位型認知症の脳内タウ蓄積分布に関する検討, 第 59 回日本神経学会学術大会, 日本神経学会, 2018-05-25.
- (52) 高堂 裕平, 田桑 弘之, 漆畑 拓弥, 高橋 真奈美, 小野 麻衣子, 前田 純, 下條 雅文, 新田 展大, 柴田 さやか, 青木 伊知男, 佐原 成彦, 須原 哲也, 樋口 真人, Correlations between altered brain metabolites and tau protein accumulation in a tauopathy mouse model, 第 59 回日本神経学会学術大会, 佐々木秀直, 2018-05-23.
- (53) BIN JI, Ruiqing Ni, Maiko Ono, Naruhiko Sahara, Ming-Rong Zhang, Ichio Aoki, Tetsuya Suhara, Makoto Higuchi, The associations of comparative in-vitro and in-vivo quantifications of tau deposits with neurodegeneration in tauopathy mouse, 12th World congress of the world federation of nuclear medicine and biology, WFNMB, 2018-04-22.
- (54) 島田 斉, 見えない異常をつかまえて! -The catcher in the early stage-, 第 19 回日本早期認知症学会学術集会, 日本早期認知症学会, 2019-10-06.
- (55) 平林 敏行, Chemogenetic functional imaging & electrophysiology: 局所干渉による大域ネットワーク作動変容のマルチスケールな理解, 京都大学霊長類研究所 共同利用研究会, 京都大学 霊長類研究所, 2019-03-16.
- (56) 島田 斉, ニュロイメーシングが照らし出す認知症病態カスケードと次世代型認知症診療への道程, 日本における認知症研究の最前線, 公開シンポジウム, 国立長寿医療研究センター, 2019-02-24.
- (57) 島田 斉, あらためて考える パーキンソン病診療における MAO-B 阻害薬の意義, Takeda Parkinson's Disease Web Symposium, 武田薬品, 2019-02-18.
- (58) 島田 斉, タウイメーシング, AD 研究会画像診断サブコミッティ, AD 研究会, 2019-02-02.
- (59) 島田 斉, 『認知症予防』を疑似科学としないために, 日本認知症予防学会神奈川県支部 第 4 回学術集会, 日本認知症予防学会神奈川県支部, 2019-02-01.
- (60) 南本 敬史, A chemogenetic toolbox for primates, International Symposium of Brain/MINDs (ISBM2019), 革新脳事務局, 2019-01-29.
- (61) 島田 斉, だからあなたは誤診する-高齢者タウオパチーを中心に-, Brain Function Imaging Forum in MAKUHARI, 日本メジフィジックス株式会社, 2019-01-24.
- (62) 島田 斉, Paving the way for precision medicine with neuroimaging biomarkers, Takeda PD Symposium, 武田薬品, 2019-01-12.
- (63) 島田 斉, その検査の意義、わかりますか? -認知症画像診断の課題と展望-, 日本核医学技術学会関東地方会第 38 回インフォーマルミーティング, 日本核医学技術学会, 2019-01-05.
- (64) 南本 敬史, サルに学ぶ意欲の脳内メカニズム, 第 3 回 Science Pioneers Consortium, Science Pioneers Consortium / 大正富山医薬品株式会社, 2018-12-22.
- (65) 山田 真希子, 脳イメーシングを用いた精神症状と認知機能の理解, 発達障害研究所公開セミナー 2018, 愛知県心身障害者コロニー発達障害研究所, 2018-12-21.
- (66) 樋口 真人, 病態を攻めるイメーシング脳科学, 次世代脳プロジェクト 冬のシンポジウム, 「次世代脳」プロジェクト, 2018-12-13.
- (67) 南本 敬史, A novel ligand C22b enables selective and rapid chemogenetic neuronal modification in monkeys, Genetic Technologies for Systems Neuroscience in NHP, NIMH, 2018-12-13.
- (68) 三村 喬生, 南本 敬史, 須原 哲也, 井上 謙一, 西条 寿夫, 高田 昌彦, 小型霊長類における動作のマーカレス測定と化学遺伝学の実装, 行動を制御する神経ネットワーク機能の解明に向けて, 2018-12-01.

- (69) 小野 麻衣子, タウから見たアルツハイマー病の診断から治療の可能性 In vivo tau imaging as an objective index for the progression of pathology and therapeutic efficiency, 第 41 回日本分子生物学会年会, 日本分子生物学会, 2018-11-30.
- (70) Hitoshi Shimada, Current issues and future prospects of precision medicine with neuropathological PET, The 58th Annual Scientific Meeting of the JSNM, 日本核医学会, 2018-11-16.
- (71) Makoto Higuchi, Visualization of proteinopathies in Alzheimer's disease and allied neurodegenerative disorders, KSCPT-JSCPT Joint Symposium, Korean Society for Clinical Pharmacology and Therapeutics, 2018-11-16.
- (72) 高畑 圭輔, 堀口 隆司, 島田 斉, 樋口 真人, 須原 哲也, ニューロイメージングバイオマーカーを用いた創薬とプレジジョン・メティシンの現況, 第 28 回日本臨床精神神経薬理学会 第 48 回日本神経精神薬理学会 合同年会, 日本臨床精神神経薬理学会 日本神経精神薬理学会, 2018-11-15.
- (73) 樋口 真人, 精神神経疾患の分子病態イメージング, 第 28 回東京臨床脳画像解析研究会, 東京臨床脳画像解析研究会, 2018-11-07.
- (74) 高畑 圭輔, Late-life psychosis and tau neuropathology: Epidemiology, clinical symptoms and in vivo quantification of neuropathology, International Consortium on Hallucination Research (ICHR2018), International Consortium on Hallucination Research, 2018-10-19.
- (75) 小野 麻衣子, 認知症疾患のタウ病理とイメージング, 第 37 回認知症学会学術集会, 日本認知症学会, 2018-10-14.
- (76) 田桑 弘之, 脳の自浄システムとしてのアストロサイトと glymphatic システム, 第 37 回日本認知症学会学術集会, 日本認知症学会, 2018-10-12.
- (77) 南本 敬史, 感性的質感認知のしくみをサル脳科学の先端技術で探る, 質感のつどい第 4 回公開フォーラム, 質感のつどい, 2018-10-10.
- (78) Makoto Higuchi, New Frontiers in Molecular Imaging, The 22nd International Congress of Parkinson's Disease and Movement Disorders, International Parkinson and Movement Disorder Society, 2018-10-08.
- (79) 島田 斉, ホットトピックをつまみ食い! パーキンソン病関連疾患と認知症, 第 19 回日本早期認知症学会, 日本早期認知症学会, 2018-10-07.
- (80) 島田 斉, 既知の未知たる高齢者タウオパチー, Dementia Summit 2018, Dementia Summit 2018, 2018-10-06.
- (81) Makoto Higuchi, Tau PET Ligands, MDS-AOS Neuroimaging Course, International Parkinson and Movement Disorder Society, 2018-10-04.
- (82) 島田 斉, 機能画像は慢性外傷性脳症の病態基盤にどこまで迫れるか?, 第 34 回ブレイン・ファンクション・イメージング・カンファレンス, ブレイン・ファンクション・イメージング・カンファレンス, 2018-09-29.
- (83) 島田 斉, 次世代認知症画像診断を踏まえた実地医家のための認知症診療クイックレシピ, 第 15 回県北地区認知症を語る会, ひたちなか市医師会, 2018-09-27.
- (84) 南本 敬史, Chemogenetic imaging: monitoring and manipulating neural circuits in monkeys, Viral Manipulation in Monkey, ICM, 2018-09-26.
- (85) 島田 斉, 『君達は一切何を望んでいる? アミロイド PET 撮像を望むか? よろしいならば質問だ』 アミロイド PET の実践に向けて, PET サマーセミナー 2018, 山口大学大学院医学系研究科 放射線医学講座, 2018-08-25.
- (86) 須原 哲也, PET 研究から見たうつ病の治療標的としてのセロトニンおよびノルアドレナリントランス

- ポーター, 第3階 CNS サミット, ファイザー株式会社 大日本住友製薬株式会社, 2018-08-05.
- (87) 平林 敏行, Network effect and behavioral impact of local perturbation: chemogenetic functional imaging and electrophysiology in macaques, 国際ワークショップ「遺伝子導入技術の利用による霊長類脳機能操作とイメージング」, 南本敬史・井上謙一, 2018-07-31.
  - (88) 永井 裕司, PET imaging of selective control of neural activity with a novel DREADD agonist International Workshop “Monitoring and manipulating brain function in non-human primates”, 2018-07-31.
  - (89) 南本 敬史, PET imaging-guided chemogenetic modification of reward-related circuits in monkeys, The 41st Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 日本神経科学学会, 2018-07-29.
  - (90) 田桑 弘之, 二光子メゾスコープを用いた生体脳マルチスケールイメージング In vivo multi-scale brain imaging with the Multiphoton Mesoscope, 日本神経科学学会, 2018-07-27.
  - (91) 島田 斉, Let's update your "Dementia OS"! -ポストタウ PET 時代の認知症診療-, 第33回埼玉認知症研究会, 埼玉認知症研究会, 2018-07-13.
  - (92) Makoto Higuchi, Molecular imaging for diagnosis and treatment of neurodegenerative disorders at a prodromal stage, 18th World Congress of Basic and Clinical Pharmacology (WCP2018), Japanese Pharmacological Society, 2018-07-02.
  - (93) 須原 哲也, Visualizing drug target in living brain using, WCP2018 Satellite Symposium, WCP/Korean Brain Research Institute, 2018-06-29.
  - (94) 高畑 圭輔, 老年期精神障害の背景病理に関する新たな知見ータウ・アミロイド PET による検討 Tau and amyloid PET study for late-life depression and psychosis, 第1114回日本精神神経学会学術総会, 社団法人 日本精神神経学会, 2018-06-21.
  - (95) Tetsuya Suhara, The role of imaging biomarker in the drug development process, CINP 2018 Vienna, CINP, 2018-06-17.
  - (96) 島田 斉, 千葉核トークライブ2018 なんでも聞いちゃおう! アミロイド PET のえとせとら, 第57回千葉核医学研究会, 千葉核医学研究会&千葉核医学技術研究会, 2018-06-09.
  - (97) 島田 斉, 高齢者疾患トータルケア研究会セミナー講師ならびにシンポジストとしての登壇, 高齢者疾患トータル研究会, 武田薬品/ヤンセン, 2018-05-31.
  - (98) 島田 斉, Alzheimer 病診断における画像検査-概要, 特徴とその限界-, 第59回日本神経学会学術大会, 日本神経学会, 2018-05-25.
  - (99) 島田 斉, Can we find clues of emergent dementia in Parkinson's disease using functional imaging?, 第59回日本神経学会学術大会, 日本神経学会, 2018-05-24.
  - (100) 島田 斉, 身体所見と画像診断-納得の症例、意外な症例- “Who tells lies?”, MDSJ ビデオフォーラム, MDSJ, 2018-05-13.
  - (101) 高畑 圭輔, 三村 将, Late-life neurodegenerative disorders due to traumatic brain injury: Epidemiology, clinical symptoms and in vivo quantification of neuropathology, 3rd Japan-US Technical Information Exchange Forum on BLAST INJURY (JUFBI 2018), National Defense Medical College (NDMC), 2018-05-10.
  - (102) Makoto Higuchi, Hitoshi Shimada, Tetsuya Suhara, Imaging of tau pathologies and tau-induced neurodegeneration, 2018 International Conference on Neurodegenerative Disorders, Chang Gung Memorial Hospital-Linkou, 2018-04-28.
  - (103) 樋口 真人, Molecular imaging of Alzheimer's disease and related disorders, The 32nd Korean Academy of Science and Technology International Symposium, The 32nd Korean Academy of Science

and Technology, 2018-04-18.

- (104) 島田 齊, 明日はきっと、あの症例を見直したくなる -State-of-the-art imaging of neurodegenerative disorders- Neurology and Neuroscience Lecture in KOBE, 神戸大学神経内科, 2018-04-13.

[ 学位論文 ]

- (1) Keita Yokokawa, Takehito Ito, Keisuke Takahata, Harumasa Takano, Yasuyuki Kimura, Masanori Ichise, Yoko Ikoma, Ayako Isato, Ming-Rong Zhang, Kazunori Kawamura, Hiroshi Ito, Hidehiko Takahashi, Tetsuya Suhara, Makiko Yamada, Neuromolecular basis of faded perception associated with unreality experience.

[ その他 (特許, 解説, 単行本等) ]

- (1) 島田 齊, アルツハイマー病における意欲低下の原因を解明—脳内タウ病変を標的にした新たな治療戦略の創出に期待—QST ニュースレター, 2018-09.
- (2) 島田 齊, 認知症診療の発展を妨げるものは何か? , クリニシアン, 667(65), 2018-09.
- (3) 佐原 成彦, タウオパチーマウスモデルを用いた脳タンパク質老化モデル評価系の確率, 日本薬理学雑誌, 152(1), 4 - 9, 2018-07.
- (4) 佐原 成彦, タウオパチーマウスモデルと生体脳イメージング, 月刊細胞, 50(6), 17 - 20, 2018-05.
- (5) 久保田 学, 統合失調症の脳構造および分子神経基盤, 日本生物学的精神医学会誌, 29(4), 190 - 190, 2018-12.
- (6) 島田 齊, PBB3 タウイメージングの現状と課題, Dementia Japan, 32(4), 530 - 537, 2018-04.
- (7) 小野 麻衣子, 島田 齊, シヌクレイン 機能画像, Clinical Neuroscience, 37(1), 2018-12.
- (8) 樋口 真人, PET 研究の最先端, BIO Clinica, 33(14), 11 - 15, 2018-12.
- (9) 島田 齊, 神経内科 Clinical Questions&Pearls パーキンソン病, 2019-02.
- (10) 樋口 真人, Annual Review 神経 2019, やさしい高次脳機能障害用語事典, 2018-12.
- (11) 樋口 真人, アルツハイマー病発症メカニズムと新規診断法・創薬・治療開発, 2018-08.
- (12) 樋口 真人, 小野 麻衣子, 須原 哲也, 張 明栄,  $\alpha$ シヌクレイン凝集体結合剤及びイメージング方法 (出願)
- (13) 南本 敬史, 永井 裕司, 季 斌, 宮川 尚久, 樋口 真人, 須原 哲也人工受容体に結合する新規化合物、人工受容体のイメージング方法、アゴニストまたはアンタゴニスト、治療薬、コンパニオン診断薬、神経細胞のイメージング方法 (出願)
- (14) Iwao Kanno, Takayuki Obata, Taiga Yamaya, Kazuya Okamoto, Takuzo Takayama, Hitoshi Yamagata, PET-MRI APPARATUS (登録)

### 2.3. イメージング物理研究

[ 原著論文 ]

- (1) Hideaki Tashima, Eiji Yoshida, Yuma Iwao, Hidekatsu Wakizaka, Takamasa Maeda, Chie Seki, Yasuyuki Kimura, Yuhei Takado, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara, Taichi Yamashita, Taiga Yamaya, First prototyping of a dedicated PET system with the hemisphere detector arrangement, Physics in Medicine and Biology, 64, 065004, 2019.
- (2) G Akamatsu, H Tashima, Y Iwao, H Wakizaka, T Maeda, E Yoshida and T Yamaya, A 3-dimensional

hemispherical brain phantom for compact dedicated brain PET scanners, Biomedical Physics & Engineering Express, 5, 025013, 2019.

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) Go Akamatsu, Hideaki Tashima, Yuma Iwao, Hidekatsu Wakizaka, Takamasa Maeda, Eiji Yoshida, Taichi Yamashita, Taiga Yamaya, "Standardized performance evaluation of a brain-dedicated PET scanner with hemispherical detector arrangement," J. Nucl. Med., 59, supplement 1, 575, 2018. (SNMMI 2018 Annual Meeting, oral, 2018/6/26, Philadelphia)
- (2) E. Yoshida, H. Tashima, G. Akamatsu, Y. Iwao, M. Takahashi, T. Yamashita, T. Yamaya, "250 ps-TOF brain-dedicated PET prototype with the hemispherical detector arrangement," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-11-04. (2018/11/15, oral, Sydney)
- (3) Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Go Akamatsu, Yuma Iwao, Hidekatsu Wakizaka, Takamasa Maeda, Yuhei Takado, Chie Seki, Makoto Higuchi, Tetsuya Suhara, Taichi Yamashita, "Imaging performance evaluation of a "helmet-neck" brain PET prototype," 12th Congress of the World Federation of Nuclear Medicine and Biology (WFNMB), WFNMB18-ABS-1887, 2018 (2018/4/22, poster, Melbourne, WFNMB2018 Best Poster Award)
- (4) Hideaki Tashima, Go Akamatsu, Yuma Iwao, Hidekatsu Wakizaka, Eiji Yoshida, Taichi Yamashita, Taiga Yamaya, "A new hollow-dome phantom for normalization of the helmet-neck PET," J. Nucl. Med., 59, supplement 1, 1768, 2018. (SNMMI 2018 Annual Meeting, poster, 2018/6/26, Philadelphia)
- (5) Taiga Yamaya, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Go Akamatsu, Iwao Yuma, Miwako Takahashi, Taichi Yamashita, "Development of a brain-dedicated TOF-PET prototype with a hemispherical geometry," WMIC2018 World Molecular Imaging Congress, LBAP 056, 2018. (2018/9/13, poster, Seattle)
- (6) H. Tashima, G. Akamatsu, Y. Iwao, H. Wakizaka, E. Yoshida, T. Yamashita, T. Yamaya, "Normalization for brain-dedicated PET with the hemispherical detector arrangement," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-07-329. (2018/11/15, poster, Sydney)
- (7) G. Akamatsu, H. Tashima, Y. Iwao, H. Wakizaka, T. Maeda, A. Mohammadi, S. Takyu, F. Nishikido, H. J. Rutherford, A. Chacon, M. Safavi-Naeini, E. Yoshida, T. Yamaya, "NEMA-NU2 performance evaluation of a whole-body PET prototype with four-layer DOI detectors," 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, M-14-147. (2018/11/16, poster, Sydney)
- (8) Go Akamatsu, Sodai Takyu, Eiji Yoshida, Munetaka Nitta, Yuma Iwao, Akram Mohammadi, Hideaki Tashima, Taiga Yamaya, "Intrinsic performance evaluation of a new TOF-PET detector module with 256-ch 3-mm-pitch MPPC array," 医学物理, 第 38 巻, Sup. 1, p. 156, 2018 (第 115 回日本医学物理学会学術大会, O-116, 2018/4/15, パシフィコ横浜, CyPos 大会長賞受賞)
- (9) 高橋美和子, 吉田英治, 田島英朗, 赤松剛, 岩男悠真, 山下大地, 山谷泰賀, "ヘルメット型 TOF-PET 装置の試作," ヘルメット型 TOF-PET 装置の試作, 第 58 回日本核医学会学術総会, M2B6B5, 2018. (2018/11/16@沖縄コンベンションセンター)
- (10) Taiga Yamaya, Katia Parodi, "NIRS-IOL Whole Gamma Imaging (WGI) Core," IOL symposium, 2018 (NIRS, 2018/6/15).
- (11) Taiga Yamaya, "Introduction of PET imaging physics research at NIRS," Proceedings of the 5th NIRS-SNU Workshop on Nuclear Medicine Imaging Science and Technology, pp. 1-2, 2018. (2018/8/28, oral, Oxide corp.)
- (12) Go Akamatsu, Hideaki Tashima, Yuma Iwao, Hidekatsu Wakizaka, Takamasa Maeda, Taichi Ya-

mashita, Eiji Yoshida, Taiga Yamaya, "Basic performance evaluation of a helmet-type PET prototype with four-layer DOI detectors," Proceedings of the 5th NIRS-SNU Workshop on Nuclear Medicine Imaging Science and Technology, pp. 53-55, 2018. (2018/8/28, poster, Oxide corp.)

#### 2.4. 分子イメージング診断治療研究

[ 原著論文 ]

- (1) Therapeutic efficacy evaluation of radioimmunotherapy with <sup>90</sup>Y-labeled anti-podoplanin antibody NZ-12 for mesothelioma, Hitomi Sudo, Atsushi Tsuji, Aya Sugyo, Tsuneo Saga, Mika K Kaneko, Yukinari Kato, Tatsuya Higashi, Cancer science, 110(5), 1653 - 1664, 2019-05, DOI:10.1111/cas.13979.
- (2) 放射性薬剤 <sup>64</sup>Cu-ATSM による内用療法における退出基準・病室に係る基準に関する検討, 吉井 幸恵, 吉本 光喜, 東 達也, 細野 真, 核医学, 55(1), 77 - 87, 2018-07, DOI:10.18893/kakuigaku.tr.1801.
- (3) Anti - tissue factor antibody - mediated immuno - SPECT imaging of tissue factor expression in mouse models of pancreatic cancer, Aya Sugyo, Winn Aung, Atsushi Tsuji, Hitomi Sudo, Hiroki Takashima, Masahiro Yasunaga, Yasuhiro Matsumura, Tsuneo Saga, Tatsuya Higashi, Oncology reports, 41(4), 2371 - 2378, 2019-02, DOI:10.3892/or.2019.7017.
- (4) Near-infrared photoimmunotherapy of pancreatic cancer using an indocyanine green-labeled anti-tissue factor antibody, Winn Aung, Atsushi Tsuji, Aya Sugyo, Hiroki Takashima, Masahiro Yasunaga, Yasuhiro Matsumura, Tatsuya Higashi, World journal of gastroenterology, 24(48), 5491 - 5504, 2018-12, DOI:10.3748/wjg.v24.i48.5491.
- (5) Differential Diagnosis between Low-Grade and High-Grade Astrocytoma Using System A Amino Acid Transport PET Imaging with C-11-MeAIB: A Comparison Study with C-11-Methionine PET Imaging, Ryuichi Nishii, Tatsuya Higashi, Shinya Kagawa, Maya Arimoto, Yoshihiko Kishibe, Masaaki Takahashi, Shigeki Yamada, Masaaki Saiki, Yoshiki Arakawa, Hiroshi Yamauchi, Chio Okuyama, Masato Hojo, Toshihiro Munemitsu, Masahiro Sawada, Masato Kobayashi, Keiichi Kawai, Shigeki Nagamachi, Toshinori Hirai, Contrast Media & Molecular Imaging, , 2018-06, DOI:doi: 10.1155/2018/1292746. eCollection 2018.
- (6) Reduction of <sup>223</sup>Ra retention in the large intestine during targeted alpha therapy with <sup>223</sup>RaCl<sub>2</sub> by oral BaSO<sub>4</sub> administration in mice, Sayaka Hanadate, Yukie Yoshii, Washiyama Koushin, Mitsuyoshi Yoshimoto, Yamamura Tomoo, Watanabe Makoto, Hiroki Matsumoto, Mineko Igarashi, Tatsuya Higashi, International Journal of Sciences:Basic and Applied Research, 42(2), 95 - 105, 2018-10.
- (7) Efficacy Evaluation of Combination Treatment Using Gemcitabine and Radioimmunotherapy with <sup>90</sup>Y-Labeled Fully Human Anti-CD147 Monoclonal Antibody 059-053 in a BxPC-3 Xenograft Mouse Model of Refractory Pancreatic Cancer, Aya Sugyo, Atsushi Tsuji, Hitomi Sudo, Mitsuru Koizumi, Yoshinori Ukai, Gene Kurosawa, Tsuneo Saga, Tatsuya Higashi, International Journal of Molecular Sciences., 19(10), 2979, 2018-09.
- (8) 甲状腺癌に対する新しい核医学治療の将来展望, 東 達也, 日本内分泌・甲状腺外科学会雑誌, 35(3), 196 - 199, 2018-09.
- (9) Direct comparison of 2 - amino[3 - <sup>11</sup>C]isobutyric acid and 2 - amino[<sup>11</sup>C]methyl - isobutyric acid uptake in eight lung cancer xenograft models, Hitomi Sudo, Atsushi B Tsuji, Aya Sugyo, Maki Okada, Koichi Kato, Ming-Rong Zhang, Tsuneo Saga, Tatsuya Higashi, International journal of

oncology, 53(6), 2737-2744, 2018-12, DOI:10.3892/ijo.2018.4596.

- (10) Clinical Studies Using in Vivo Diagnostic Radiopharmaceuticals under the Clinical Research Law  
Komei Washino, Natsue Ito, Keiichiro Yoshinaga, Annals of Nuclear Cardiology, 4(1), 88 - 93, 2018-08, DOI:10.17996/anc.18-00083.
- (11) Updated Japanese Ministry of Health, Labour and Welfare Reimbursement Policy for Cardiac Positron Emission Tomography and Coronary Intervention, Keiichiro Yoshinaga, Hirotaka Maruno, Taishiro Chikamori, Annals of Nuclear Cardiology , 4(1), 42 - 45, 2018-08, DOI:10.17996/anc.18-00070.
- (12) Integrated treatment using intraperitoneal radioimmunotherapy and positron emission tomography-guided surgery with <sup>64</sup>Cu-labeled cetuximab to treat early- and late-phase peritoneal dissemination in human gastrointestinal cancer xenografts, Yukie Yoshii, Mitsuyoshi Yoshimoto, Hiroki Matsumoto, Hideaki Tashima, Yuma Iwao, Hiroyuki Takuwa, Eiji Yoshida, Hidekatsu Wakizaka, Taiga Yamaya, Ming-Rong Zhang, Aya Sugyo, Sayaka Hanadate, Atsushi Tsuji, Tatsuya Higashi, Oncotarget, 9(48), 28935 - 28950, 2018-06, DOI:10.18632/oncotarget.25649.
- (13) Uniform intratumoral distribution of radioactivity produced using two different radioagents, <sup>64</sup>Cu-cyclam-RAFT-c(-RGDfK)-4 and <sup>64</sup>Cu-ATSM, improves therapeutic efficacy in a small animal tumor model, Zhao-Hui Jin, Atsushi Tsuji, M é lissa Degardin, Aya Sugyo, Yukie Yoshii, Kotaro Nagatsu, Ming-Rong Zhang, Yasuhisa Fujibayashi, Pascal Dumy, Didier Boturyn, Tatsuya Higashi, EJNMMI Research , , 2018-06, DOI:10.1186/s13550-018-0407-3.
- (14) Absolute quantification of myocardial blood flow, Keiichiro Yoshinaga, Osamu Manabe, Nagara Tamaki, Journal of nuclear cardiology : official publication of the American Society of Nuclear Cardiology, 25(2), 635 - 651, 2018-05, DOI:10.1007/s12350-016-0591-3.

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) 腎細胞癌に対する重粒子線治療における <sup>99m</sup>Tc-MAG3 レノグラム検査の有用性 Usefulness of <sup>99m</sup>Tc-MAG3 renogram after CIRT in patients with renal carcinoma, 山崎 香奈, 西井 龍一, 吉永 恵一郎, 粕谷 吾朗, 牧島 弘和, 辻 比呂志, 東 達也, 第 90 回日本核医学会関東甲信越地方会, 日本核医学会関東甲信越地方会, 2019-01-26.
- (2) <sup>99m</sup>Tc-MAG3 レノグラムを用いた腎細胞癌重粒子線治療前後の腎機能評価, 山崎 香奈, 西井 龍一, 吉永 恵一郎, 粕谷 吾朗, 牧島 弘和, 辻 比呂志, 東 達也, 第 90 回日本核医学会関東甲信越地方会, 日本核医学会関東甲信越地方会, 2019-01-26.
- (3) FDG-PET Radiomics による肺がんと重粒子線治療後放射線肺炎の鑑別, 西井 龍一, 山崎 香奈, 東 達也, 菅 満喜人, 上高 祐人, 第 90 回日本核医学会関東甲信越地方会, 日本核医学会関東甲信越地方会, 2019-01-26.
- (4) 膀胱癌重粒子線治療前後の FDG-PET/CT 変化, Ryuichi Nishii, Tatsuya Higashi, Shigeru Yamada, Yuka Isozaki, Shohei Kawashiro, Keiichiro Yoshinaga, Tadashi Kamada, 第 77 回日本医学放射線学会総会, 日本医学放射線学会, 2018-04-14.
- (5) 硫酸バリウムを用いた <sup>223</sup>RaCl<sub>2</sub> 治療における大腸への <sup>223</sup>Ra 集積軽減法の開発, 花館 明香, 吉井 幸恵, 鷺山 幸信, 吉本 光喜, 松本 博樹, 山村 朝雄, 渡部 信, 辻 厚至, 東 達也, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (6) 膀胱がん同所移植モデルにおける <sup>64</sup>Cu 標識セツキシマブを用いた PET ガイド手術の開発, 桜井 皓平, 吉井 幸恵, 田島 英朗, 岩男 悠真, 吉田 英治, 山谷 泰賀, 吉本 光喜, 松本 博樹, 張 明栄, 辻 厚



- 至, 東 達也, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (7) 胃がんに対する  $^{64}\text{Cu}$  標識抗 CDH17 ミニボディの PET イメージング, 藤原 健太郎, 須藤 仁美, 須堯 綾, 辻 厚至, 百瀬 敏光, 浜窪 隆雄, 東 達也, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
  - (8) 位置特定困難な腹腔内大腸がん転移巣を正確に摘出する  $^{64}\text{Cu}$  標識セツキシマブによる PET ガイド手術の開発, 吉井 幸恵, 田島 英朗, 岩男 悠真, 吉田 英治, 山谷 泰賀, 吉本 光喜, 松本 博樹, 張 明栄, 辻 厚至, 東 達也, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
  - (9) 正常マウスにおける  $^{211}\text{At}$ -MABG の体内分布および安全性の検討, 須藤 仁美, 須堯 綾, 辻 厚至, 峯岸 克行, 永津 弘太郎, 石岡 典子, 東 達也, 吉永 恵一郎第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-16.
  - (10) メタボローム解析技術を利用した新規膵癌 PET プローブの開発研究, 辻 厚至, 第 12 回メタボロームシンポジウム, 第 12 回メタボロームシンポジウム実行委員会, 2018-10-17.
  - (11) PIP と RI 複合体の創出と量子イメージング及び量子治療への応用研究, 辻 厚至, 2018 年度千葉県がんセンター研究所リトリート, 千葉県がんセンター研究所, 2018-08-31.
  - (12) 正常マウスを用いた  $^{211}\text{At}$ -MABG の体内分布の検討 Biodistribution of alpha-emitting  $^{211}\text{At}$ -MABG in normal mice, 須藤 仁美, 須堯 綾, 辻 厚至, 峯岸 克行, 永津 弘太郎, 石岡 典子, 東 達也, 吉永 恵一郎, 第 89 回日本核医学会関東甲信越地方会, 日本核医学会関東甲信越地方会, 2018-07-14.
  - (13) 胃がんに対する  $^{64}\text{Cu}$  標識抗 CDH17 ミニボディの PET イメージング, 藤原 健太郎, 須藤 仁美, 須堯 綾, 辻 厚至, 東 達也, 第 14 回小動物インビボイメージング研究会, 小動物インビボイメージング研究会, 2018-07-28.
  - (14) 量子科学技術研究開発機構における分子イメージング研究の紹介, 辻 厚至, 第 7 回分子イメージング夏季集中セミナー, 香川大学医学部放射線医学講座, 2018-07-29.
  - (15) 小細胞肺癌に対する放射免疫療法と治療後の病理学的変化, 藤原 健太郎, 辻 厚至, 東 達也, 第 27 回日本癌病態治療研究会, 日本癌病態治療研究会, 2018-06-01.
  - (16) Feasibility of a PET-guided surgery system with  $^{64}\text{Cu}$ -labeled-cetuximab in an orthotopic mouse model of pancreatic cancer, Kohei Sakurai, Yukie Yoshii, Hideaki Tashima, Yuma Iwao, Yuko Oe, Mineko Igarashi, Sayaka Hanadate, Eiji Yoshida, Hidekatsu Wakizaka, Taiga Yamaya, Mitsuyoshi Yoshimoto, Hiroki Matsumoto, Ming-Rong Zhang, Atsushi Tsuji, Tatsuya Higashi, SNMMI 2018 Annual Meeting, SNMMI, 2018-06-24.
  - (17) Efficacy of combination use of intraperitoneal radioimmunotherapy and PET-guided surgery with  $^{64}\text{Cu}$ -labeled-cetuximab in a mice model of colon cancer peritoneal dissemination, Yukie Yoshii, Mitsuyoshi Yoshimoto, Hiroki Matsumoto, Hideaki Tashima, Yuma Iwao, Hiroyuki Takuwa, Eiji Yoshida, Hidekatsu Wakizaka, Taiga Yamaya, Ming-Rong Zhang, Aya Sugyo, Sayaka Hanadate, Atsushi Tsuji, Tatsuya Higashi, SNMMI 2018 Annual Meeting, SNMMI, 2018-06-24.
  - (18) PET-guided surgery system with  $^{64}\text{Cu}$ -PCTA-cetuximab for accurate resection of intraperitoneal tumors in a mice model, Yukie Yoshii, Hideaki Tashima, Yuma Iwao, Hiroyuki Takuwa, Eiji Yoshida, Hidekatsu Wakizaka, Taiga Yamaya, Mitsuyoshi Yoshimoto, Hiroki Matsumoto, Ming-Rong Zhang, Aya Sugyo, Atsushi Tsuji, Tatsuya Higashi, 第 13 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, 2018-05-31,
  - (19) Assessment of 4DST uptake and Ki-67 index in patients with lung tumor in comparison with FDG uptake, Ryuichi Nishii, Tsuneo Saga, Hitomi Sudo, Keiichiro Yoshinaga, Tatsuya Higashi, 世界核医学会 (WFNMB2018), WFNMB, 2018-04-21.

- (20) Near-infrared Photoimmunotherapy Targeting Pancreatic Cancer With Tissue Factor Antibody U W i n n A u n g , Atsushi Tsuji, Aya Sugyo, Hitomi Sudo, Hiroki Takashima, Masahiro Yasunaga, Yasuhiro Matsumura, Tatsuya Higashi, Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine 2018, European Association of Nuclear Medicine, 2018-10-13.
- (21) Development of a noninvasive imaging technique to detect the expression of CD73 mediating immunosuppression in cancer, Hitomi Sudo, Atsushi Tsuji, Aya Sugyo, Mitsuru Koizumi, Gene Kurosawa, Yoshikazu Kurosawa, Tsuneo Saga, Tatsuya Higashi, 第 77 回日本癌学会学術総会, 日本癌学会, 2018-09-27.
- (22) Molecular Determinants of Functional and Fibrotic Changes by Novel Automated Oscillometric Approach to Measure Brachial Artery Vascular Volume Elastic Modulus, Keiichiro Yoshinaga, Satoshi Fujii, Yoichi M Ito, Saori Nishino, Noriki Ochi, Chietsugu Katoh, Mamiko Inoue, Mutsumi Nishida, Osamu Manabe, Nagara Tamaki, The 10th Congress of the Asian-Pacific Society on Thrombosis and Hemostasis, Asian-Pacific Society on Thrombosis and Hemostasis, 2018-06-30.
- (23) Biodistribution and safety evaluation of alpha-emitting meta-211At-astato-benzylguanidine (211At-MABG) in normal mice, Hitomi Sudo, Aya Sugyo, Atsushi Tsuji, Katsuyuki Minegishi, Kotaro Nagatsu, Noriko Ishioka, Tatsuya Higashi, Keiichiro Yoshinaga, SNMMI2018, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2018-06-24.
- (24) Evaluation of a PET-guided surgery with 64Cu-labeled cetuximab to resect tumors deeply located in the mouse peritoneal cavity, Yukie Yoshii, Hideaki Tashima, Yuma Iwao, Hiroyuki Takuwa, Eiji Yoshida, Hidekatsu Wakizaka, Taiga Yamaya, Mitsuyoshi Yoshimoto, Hiroki Matsumoto, Ming-Rong Zhang, Aya Sugyo, Atsushi Tsuji, Tatsuya Higashi, 12th World congress of the world federation of nuclear medicine and biology, World Federation of Nuclear Medicine and Biology , 2018-04-22.
- (25) Assessment of PERCIST criteria of FDG-PET/CT to predict progression-free survival after carbon-ion radiotherapy in patients with locally advanced pancreas cancer, Ryuichi Nishii, Tatsuya Higashi, Shigeru Yamada, Yuka Isozaki, Shohei Kawashiro, Keiichiro Yoshinaga, Tadashi Kamada, SNMMI2018, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (SNMMI), 2018-06-25.
- (26) Metabolic Changes of FDG-PET/CT parameters after carbon-ion radiotherapy (CIRT) for pancreas cancer, Ryuichi Nishii, Tatsuya Higashi, Shigeru Yamada, Yuka Isozaki, Shohei Kawashiro, Keiichiro Yoshinaga, Tadashi Kamada, 2018 Annual Congress of East Asia Nuclear Medicine Association (EANMA2018), Taipei, Taiwan, EANMA, 2018-11-18.
- (27) Role of cardiac metabolic imaging for therapeutic strategies for heart failure, Keiichiro Yoshinaga, 第 58 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2018-11-15.
- (28) 悪性神経内分泌腫瘍に対する標的アイソトープ治療 近年の発展と新たな治療開発, 吉永 恵一郎, 福島県立医科大学附属病院放射線科 特別セミナー, 福島県立医科大学, 2018-06-19.
- (29) 心臓サルコイドーシスの 18F-FDG PET 診断に関する委員会報告 - 2018 年改訂に関する委員会報告 -, 吉永 恵一郎, 汲田 伸一郎, 第 28 回日本心臓核医学会総会・学術大会, 日本心臓核医学会, 2018-07-07.
- (30) ミニ松下村塾 -PET は循環器臨床の Question に答えられるか?-, 吉永 恵一郎, PET サマーセミナー 2018, 日本核医学会 PET 核医学分科会, 2018-08-24.
- (31) From Basic Aspects to Clinical Values of Myocardial Blood Flow and Myocardial Flow Reserve Measurements, Keiichiro Yoshinaga, 第 77 回日本医学放射線学会総会, 日本医学放射線学会, 2018-04-13.

[ その他 (特許, 解説, 単行本等) ]

- (1) 核医学診断から核医学診療へ - 撮像機器、解析技術、治療応用の発展と今後の展望-, 吉永 恵一郎, 月刊インナービジョン 2018 年 11 月号 Vol. 33 No.11, 33(11), 2018 出版社: インナービジョン.

### 3. 物理学・生物学研究 (以下, 課題番号順)

#### 3.1. 中高エネルギー粒子による核反応の研究

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) 山口雄司, 「低エネルギー測定下限二次粒子検出器の開発と 70 MeV 陽子入射反応への応用」, 『日本原子力学会 2018 年秋の大会』, 岡山大学, 2018 年 9 月山口雄司, ” Measurement of Low Threshold Energy Spectra of Secondary Protons for 70-MeV Proton-Induced Reactions” , 『2018 年度核データ研究会』, 東京工業大学, 2018 年 11 月.

#### 3.2. He ビームを用いた医療用 RI 製造技術にかかる基礎研究

[ 原著論文 ]

- (1) M. Hagiwara, H. Yashima, T. Sanami, S. Yonai, Measurement of the excitation function of  $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$  for an alternative production source of medical radioisotopes, J. Radioanal. Nucl. Chem., 318, 569-573, 2018.

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) M. Hagiwara, H. Yashima, T. Sanami, S. Yonai, Measurement of the excitation functions on zirconium induced by alpha particles up to 46 MeV, the 6th. International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics (CNR\*18), LBNL, Berkeley, CA, USA, 2018 年 9 月.
- (2) Hiroshi Yashima, Masayuki Hagiwara, Toshiya Sanami, Shunsuke Yonai, Excitation function measurements of alpha-induced reaction on natural copper and titanium up to 46 MeV, the 6th. International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics (CNR\*18), LBNL, Berkeley, CA, USA, 2018 年 9 月.
- (3) 萩原雅之 他、He ビームを用いた医療用 Mo-99/Tc-99m の製造技術の基礎研究, 日本原子力学会 2018 年秋の年会, 岡山大学津島キャンパス, 岡山県岡山市, 2018 年 9 月.
- (4) 萩原雅之 他、Zr 標的に対する He 照射による RI 生成と励起関数の測定、日本原子力学会 2018 年秋の年会, 岡山大学津島キャンパス, 岡山県岡山市, 2018 年 9 月.

#### 3.3. 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

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) Hiroshi Yashima, Masayuki Hagiwara, Toshiya Sanami, Shunsuke Yonai, MEASUREMENTS OF THE ALPHA-INDUCED ACTIVATION CROSS SECTIONS FOR CU, 11th Methods and Applica-

tion of Radioanalytical Chemistry (MARC-XI)、Sheraton Kona Hotel, Kailua-Kona HI, USA、2018 年 4 月。

- (2) Hiroshi Yashima, Masayuki Hagiwara, Toshiya Sanami, Shunsuke Yonai, Excitation function measurements of alpha-induced reaction on natural copper and titanium up to 46 MeV, the 6th. International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics (CNR\*18), LBNL, Berkeley, CA, USA, 2018 年 9 月。
- (3) M. Hagiwara, H. Yashima, T. Sanami, S. Yonai, Measurement of the excitation functions on zirconium induced by alpha particles up to 46 MeV, the 6th. International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics (CNR\*18), LBNL, Berkeley, CA, USA, 2018 年 9 月。

### 3.4. 最後方における荷電粒子生成二重微分断面積の測定

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) R. Imamura, K. Yoshida, Y. Fukuda, Y. Yamaguchi, Y. Uozumi, Double-Differential Cross Sections in the Vicinity of 180 Degrees for Medium-Energy ( $p, p'$  x) Reactions, 2018 Symposium on Nuclear Data.

### 3.5. エッチング型飛跡検出器の閾値に対する化学的クライテリオンの確立; 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 ]

- (1) Michel Fromm, Satoshi Kodaira, Tamon Kusumoto, R é mi Barillon, Tomoya Yamauchi: Role of intermediate species in the formation of an energetic ion latent track in PADC: A review, *Polymer Degradation and Stability* 161, 213-224 (2019).
- (2) Tamon Kusumoto, Ziad EL Bitar, Shogo Okada, Pierre Gillet, Nicolas Arbor, Masato Kanasaki, Yutaka Mori, Keiji Oda, Abdel-Mjid Nourreddine, Hisaya Kurashige, Michel Fromm, Pierre Cloutier, Andrew D Bass, L é on Sanche, Satoshi Kodaira, R é mi Barillon, Tomoya Yamauchi: Radial electron fluence around ion tracks as a new physical parameter for the detection threshold of PADC using Geant4-DNA toolkit, *Radiation Measurements* 118, 50-53 (2018).
- (3) Tomoya Yamauchi, Tamon Kusumoto, Takuya Ueno, Yutaka Mori, Masato Kanasaki, Keiji Oda, Satoshi Kodaira, Remi Barillon: Distinct step-like changes in G values for the losses of typical functional groups in poly(ethylene terephthalate) along boron ion tracks around the detection threshold, *Radiation Measurements* 116, 51-54 (2018).
- (4) N. Ludwig, Tamon Kusumoto, C. Galindo, P. Peaupardin, S. Pin, J.-P. Renault, D. Muller, Tomoya Yamauchi, Satoshi Kodaira, Remi Barillon, Quentin Raffy: Radiolysis of phenylalanine in solution with Bragg-Peak energy protons, *Radiation Measurements* 116, 55-59 (2018).
- (5) Tamon Kusumoto, Michel Fromm, Pierre Cloutier, Andrew D. Bass, Leon Sanche, Remi Barillon, Tomoya Yamauchi: Elucidation of the Two-Step Damage Formation Process of Latent Tracks in Poly(allyl Diglycol Carbonate), PADC: Role of Secondary Low-Energy Electrons, *The Journal of Physical Chemistry C* 122, 36, 21056-21061 (2018).

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) 千葉昌寛、楠本多聞、大谷拓也、酒井盛寿、金崎真聡、小田啓二、小平聡、山内知也：赤外分光法とエッチング実験によるポリエチレンテレフタレートを検出閾値近傍の損傷評価、第 33 回固体飛跡検出器研究会、ES 館、名古屋大学、2019.3.
- (2) 山内知也、楠本多聞、東和樹、小平聡、金崎真聡、小田啓二、蔵岡孝治、レミバリオン：ヒドロキシル基生成密度による PADC 飛跡検出器応答特性の記述、第 33 回固体飛跡検出器研究会、ES 館、名古屋大学、2019.3.
- (3) 岡田智暉、東和樹、大谷拓也、酒井盛寿、千葉昌寛、濱野拳、金崎真聡、小田啓二、小平聡、楠本多聞、山内知也：PADC 中に形成されるイオントラックの構造分析とエッチング特性評価、第 33 回固体飛跡検出器研究会、ES 館、名古屋大学、2019.3.
- (4) 濱野拳、楠本多聞、東和樹、大谷拓也、酒井盛寿、金崎真聡、小田啓二、小平聡、山内知也：重イオン照射によるポリカーボネート薄膜中放射線損傷の面分布特性、第 33 回固体飛跡検出器研究会、ES 館、名古屋大学、2019.3.
- (5) 山内知也、楠本多聞、酒井盛寿、吉田敦、神原正、小平聡、金崎真聡、小田啓二、蔵岡孝治、レミバリオン：ポリイミド樹脂のウランイオンを含む重イオンに対する応答特性、第 33 回固体飛跡検出器研究会、ES 館、名古屋大学、2019.3.
- (6) 濱野拳、楠本多聞、東和樹、大谷拓也、酒井盛寿、金崎真聡、小田啓二、小平聡、山内知也：重イオンを照射したポリカーボネート薄膜中放射線損傷の面分布、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019.3.
- (7) 大谷拓也、千葉昌寛、濱野拳、金崎真聡、小田啓二、小林一雄、譽田義英、藤乗幸子、山内知也：ESR 法を用いたガンマ線照射による PADC 検出器中損傷評価 (2)、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019.3.
- (8) 酒井盛寿、千葉昌寛、濱野拳、楠本多聞、小平聡、金崎真聡、小田啓二、山内知也：ポリカプロラクタムとポリヘキサメチレンアジパミド中カルボニル基に見られるイオン照射下の放射線感受性の相違、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019.3.
- (9) 千葉昌寛、楠本多聞、東和樹、大谷拓也、酒井盛寿、金崎真聡、小田啓二、小平聡、山内知也：検出閾値周辺におけるポリエチレンテレフタレート中イオントラック構造の研究、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019.3.
- (10) Akihiro Chiba, Tamon Kusumoto, Kazuki Azuma, Takuya Otani, Morikazu Sakai, Masato Kanasaki, Keiji Oda, Satoshi Kodaira, Tomoya Yamauchi : A study on latent track structure in polyethylene terephthalate around the detection threshold, The 14th International Workshop on Ionizing Radiation Monitoring, Chiyoda Technol Corporation, Oarai Research Center, Ibaraki, 2018.12.
- (11) Ken Hamano, Tamon Kusumoto, Kazuki Azuma, Takuya Otani, Morikazu Sakai, Masato Kanasaki, Keiji Oda, Tomoya Yamauchi : Areal distribution of radiation damage in bisphenol A polycarbonate films caused by heavy ions, The 14th International Workshop on Ionizing Radiation Monitoring, Chiyoda Technol Corporation, Oarai Research Center, Ibaraki, 2018.12.
- (12) 大谷拓也、楠本多聞、金崎真聡、小田啓二、小林一雄、譽田義英、藤乗幸子、山内知也：ESR 法を用いたガンマ線照射による PADC 検出器中の損傷評価、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2018.9.
- (13) 東和樹、楠本多聞、千葉昌寛、濱野拳、金崎真聡、小田啓二、小平聡、山内知也：イオントラックに沿ったヒドロキシル基密度による PADC 飛跡検出器の応答特性、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋

屋国際会議場、2018.9.

- (14) 濱野拳、楠本多聞、東和樹、大谷拓也、酒井盛和、金崎真聡、小田啓二、小平聡、山内知也：ホウ素イオンを照射したポリカーボネート薄膜中放射線損傷の面分布、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2018.9.
- (15) 酒井盛寿、楠本多聞、小平聡、千葉昌寛、濱野拳、金崎真聡、小田啓二、山内知也：FT-IR を用いたナイロン 6 の水素イオン照射による吸光度変化と化学的損傷パラメータ、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2018.9.
- (16) 千葉昌寛、楠本多聞、東和樹、大谷拓也、酒井盛寿、金崎真聡、小田啓二、小平聡、山内知也：検出閾値周辺におけるポリエチレンテレフタレート中イオントラック構造の研究、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2018.9.
- (17) Tamon Kusumoto, Yutaka Mori, Masato Kanasaki, Keiji Oda, Satoshi Kodaira, , Remi Barillon, Tomoya Yamauchi: Drastic decrease of carbonyl group following the loss of ether in PADC exposed to 222 nm UV photons, The 13th meeting of the “Ionizing Radiation and Polymers” symposium, Russia, 2018.8.
- (18) Tamon Kusumoto, Morikazu Sakai, A. Yoshida, T. Kambara, Y. Yanagisawa, Satoshi Kodaira, Keiji Oda, Remi Barillon, Tomoya Yamauchi: An up-to-date local dose distribution theory for describing the track registration property of Kapton film irradiated with heavy ions, including U ion, 10th International symposium on Swift Heavy Ions in Matter and 28th International Conference on Atomic Collisions in Solids, Caen, France, 2018.7.

[ 学位論文 ]

- (1) 東和樹：ヒドロキシル基密度による PADC 飛跡検出器の応答特性の記述、神戸大学、修士論文、2019 年 3 月.
- (2) 大谷拓也：PADC 検出器中の放射線感受領域に見られる多段階損傷形成過程の検討、神戸大学、修士論文、2019 年 3 月.
- (3) 酒井盛寿：局所線量分布の現代的更新とポリアミド薄膜中イオントラックの構造分析、神戸大学、修士論文、2019 年 3 月.
- (4) 岡田智樹：ポリアリルジグリコールカーボネート中に生成するイオントラックの構造分析とエッチング特性評価、神戸大学、卒業論文、2019 年 3 月.

[ その他 (特許, 解説, 単行本等) ]

- (1) 酒井盛寿、楠本多聞、金崎真聡、小田啓二、山内知也：実効電荷を考慮した局所線量分布の更新、神戸大学大学院海事科学研究科紀要 15、31-42 (2018).

### 3.6. 陽子線治療の高度化にむけた放射線可視化技術の開拓

[ 原著論文 ]

- (1) Mochizuki, S.; Kataoka, J.; Koide, A.; Fujieda, K.; Maruhashi, T.; Kurihara, K.; Sueoka, K.; Tagawa, L.; Yoneyama, M.; Inaniwa, T. High-precision Compton imaging of 4.4 MeV prompt gamma-ray toward an on-line monitor for proton therapy, NIM-A, (2019), in press
- (2) Tagawa, L.; Kataoka, J.; Sueoka, K.; Fujieda, K.; Kurihara, T.; Arimoto, M.; Mochizuki, S.; Maruhashi, T.;

- Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T., Development of novel neutron camera to estimate secondary particle dose for safe proton therapy, NIM-A, (2019), in press
- (3) Koide,A.; Kataoka,J.; Taya,T.; Iwamoto,Y.; Sueoka,K.; Mochizuki,S.; Arimoto,M.; Inaniwa,T. Spatially resolved measurement of wideband prompt gamma-ray emission toward on-line monitor for the future proton therapy, NIM-A, (2018), vol.912, pp.24-28.
  - (4) Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Koide,A.; Sueoka,K.; Morita,H.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Ohsuka,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Yamaguchi,M.; Kurita,K.; Kawachi,N. Ultracompact Compton camera for innovative gamma-ray imaging, NIM-A, (2018), vol.912, pp.1-5.
  - (5) Koide,A.; Kataoka,J.; Masuda,T.; Mochizuki,S.; Taya,T.; Sueoka,K.; Tagawa,L.; Fujieda, K.; Maruhashi,T.; Kurihara, T.; Inaniwa,T. Precision imaging of 4.4 MeV gamma rays using a 3-D position sensitive Compton camera, Nature Scientific Reports, vol.8, No.8116.
  - (6) Masuda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Takabe,M.; Nishio,T.; Matsushita,K.; Miyake,T.; Yamamoto,S.; Inaniwa,T.; Toshito,T. Measurement of nuclear reaction cross sections by using Cherenkov radiation toward high-precision proton therapy, Nature Scientific Reports, 2018, vol.8, 2570.
  - (7) Taya,T.; Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Tagawa,L.; Mochizuki,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Kurita,K.; Yamaguchi,M.; Kawachi,N. Optimization and verification of image reconstruction for a Compton camera towards application as an on-line monitor for particle therapy, Journal of Instrumentation, 2017, vol.12, P07015.

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) 細越 裕希、片岡 淳、望月 早駆、米山 昌樹、棚田 和玖、藤枝 和也、伊藤 颯一郎、木地 浩章、西 郁也、宮本 修治、「MeV ガンマ線コンプトンカメラの最適化および性能評価、第 66 回応用物理学会 東京工業大学 2019 年 3 月 9 日 12 日
- (2) Mochizuki,S. et al. High-precision Compton imaging of 4.4MeV prompt gamma-ray toward on-line monitor for proton therapy, IEEE MIC/NSS, Nov.10-17, 2018, Sydney, Australia [Oral]
- (3) Tagawa,L. et al. Development of novel neutron camera to estimate secondary particle dose for safe proton therapy, IEEE MIC/NSS, Nov.10-17, 2018, Sydney, Australia [Poster]
- (4) 片岡 淳、アイソトープ協会・放射線基礎セミナー：2018 年 7 月 6 日@東大工学部、「核医学や高精度陽子線治療にむけたイメージング装置の開発」(招待講演)
- (5) Kataoka,J. et al. Precision imaging of 4.4MeV gamma rays using 3-D position sensitive Compton camera, SORMA XVII, June.12-15, 2018, Michigan, USA [Oral]
- (6) Tagawa, L. et al. Development of new compact neutron camera for safe proton therapy, 14th PISA meeting, May 27-June 2, Elva, Italy [Poster]
- (7) Mochizuki, S. et al. Development of high-resolution Compton camera for prompt gamma-ray imaging during proton therapy, 14th PISA meeting, May 27-June 2, Elva, Italy [Poster]
- (8) 片岡 淳,「宇宙から医療まで：放射線イメージングの最前線」,“物質と宇宙の基礎研究とそれがもたらす最先端産業技術”, 特別シンポジウム、第 65 回 応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日-20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス (招待講演)
- (9) 望月 早駆; 片岡 淳; 小出 絢子; 藤枝 和也; 丸橋 拓也; 栗原 拓也; 末岡 晃紀; 米山 昌樹; 稲庭 拓, 陽子線



治療オンラインモニタに向けた即発ガンマ線イメージングの実証, 第 65 回 応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日-20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス

- (10) 田川 怜央 ; 片岡 淳; 末岡 晃紀; 藤枝和也; 栗原拓也; 有元誠; 望月早駆; 丸橋拓也; 歳藤利行; 木村充宏, 粒子線治療下でのイメージングに向けた中性子カメラの開発, 第 65 回 応用物理学会・春季学術講演会, 2018, 3 月 17 日-20 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス
- (11) Takabe,M.; Masuda,T.; Arimoto,M.; Kataoka,J.; Sueoka,K.; Maruhashi,T.; Tanaka,S.; Nishio,T.; Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T. Development of simple proton CT system with novel correction methods of proton scattering, 11th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD11) , 2017, 10-15 December, OIST, Okinawa, Japan (Poster)
- (12) Masuda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Takabe,M.; Nishio,T.; Matsushita,T.; Miyake,T.; Yamamoto,S.; Inaniwa,T.; Toshito,T. A novel method of measuring nuclear reaction cross sections by using Cherenkov light toward high-precision proton therapy. IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct – 28 Oct, Atlanta, USA (Poster)
- (13) Takabe,M.; Masuda,T.; Arimoto,M.; Kataoka,J.; Tanaka,S.; Nishio,T.; Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T. Development of simple proton CT system with novel MCS correction methods, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017, 21 Oct – 28 Oct, Atlanta, USA (Poster)
- (14) 片岡 淳「手のひらサイズ」コンプトンカメラを用いた 3D in vivo イメージングへの挑戦, 第 13 回小動物インビボイメージング研究会, 日本核医学会, 2017, 7 月 29 日, 大阪大学医学部 (招待講演)
- (15) Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Koide,A.; Sueoka,K.; Morita,H.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Ohsuka,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Yamaguchi,M.; Kurita,K.; Kawachi,N. Ultracompact Compton camera for innovative gamma-ray imaging, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)
- (16) Koide,A.; Kataoka,J.; Taya,T.; Iwamoto,Y.; Sueoka,K.; Mochizuki,S.; Arimoto,M.; Inaniwa,T. Spatially resolved measurement of wideband prompt gamma-ray emission toward on-line monitor for the future proton therapy, New Developments in Photodetection, 2017, 3-7 July, Tours, France (Oral)

[ 学位論文 ]

- (1) 望月 早駆 「陽子線治療オンラインモニタに向けた MeV ガンマ線高精度イメージングの実証」, 早稲田大学理工学術院・先進理工学研究科, (2019 年 2 月: 修士論文)
- (2) 田川 怜央 「陽子線治療における二次中性子イメージングカメラの開発」, 早稲田大学理工学術院・先進理工学研究科, (2019 年 2 月: 修士論文)
- (3) 細越 裕希 「MeV ガンマ線観測用コンプトンカメラの性能評価及び最適化」, 早稲田大学理工学術院・先進理工学部, (2019 年 2 月: 卒業論文)
- (4) 高部 美帆「高精度陽子線治療に向けた CCD カメラ陽子線 CT システムの構築と性能評価」, 早稲田大学理工学術院・先進理工学研究科, (2018 年 2 月: 修士論文)
- (5) 増田 孝充「高精度陽子線治療に向けた核反応可視化技術の開拓と線量分布推定への応用」, 早稲田大学理工学術院・先進理工学研究科, (2018 年 2 月: 修士論文)
- (6) 出 絢子「粒子線治療オンラインモニタに向けた即発ガンマ線イメージングの実証」, 早稲田大学理工学術院・先進理工学研究科, (2018 年 2 月: 修士論文)

[ その他 (特許, 解説, 単行本等) ]

- (1) 世界初！ 4.4 MeV ガンマ線 の高精度イメージングに成功 — 先端医療と宇宙をつなぐ、新しい 架け橋へ (早大、量研機構), <https://www.waseda.jp/top/news/59259>
- (2) 「陽子線が体内で起こす核反応を光で可視化 陽子線治療の精度向上に大きく貢献」 (早大、量研機構、東京女子医科大学、名古屋大学) <https://www.waseda.jp/top/news/57078>
- (3) 「ガンマ線検出のカメラ〜陽子線治療など応用」, 2018 年 6 月 6 日, 日経産業新聞, [https://twitter.com/nikkei\\_bizdaily](https://twitter.com/nikkei_bizdaily)
- (4) 「4.4MeV のガンマ線可視化」, 2018 年 6 月 1 日, 科学新聞, <https://sci-news.co.jp/>
- (5) 化学工業日報、医療ニュースほか, 「陽子線治療精度を向上 早大が体内進路可視化」, <http://www.chemicaldaily.co.jp/>
- (6) 増田孝充, 優秀研究賞, 第 116 回医学物理学会学術大会 (2018 年 9 月 18 日) .
- (7) 高部 美帆, 優秀ポスター賞 11th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (2017 年 12 月 22 日) .

### 3.7. 高精度陽子線治療のための基盤技術構築に関する研究

[ 原著論文 ]

- (1) M. Takabe, T. Masuda, M. Arimoto, J. Kataoka, K. Sueoka, T. Maruhashi, S. Tanaka, T. Nishio, T. Toshito, M. Kimura, T. Inaniwa, “Development of simple proton system with novel correction methods of proton scattering,” Nucl. Instrum. Method. 10.1016/j.nima.2018.05.034 (2018).
- (2) T. Nishio, A. Nishio, “Study of innovating new proton therapy using distribution image of positron emitters generated in patient’ s body by target nuclear reaction,” JSMI Rep., 3-8 (2018).
- (3) T. Masuda, J. Kataoka, M. Arimoto, M. Takabe, T. Nishio, K. Matsushita, T. Miyake, S. Yamamoto, T. Inaniwa, T. Toshito, “Measurement of nuclear reaction cross sections by using Cerenkov radiation toward high-precision proton therapy,” Sci. Rep. 8:2570 (2018).
- (4) S. Tanaka, T. Nishio, M. Tsuneda, K. Matsushita, S. Kabuki, M. Uesaka, “Improved Proton CT Imaging using a Bismuth Germanium Oxide Scintillator,” Phys. Med. Biol. 63(3):035030 (2018).

[ プロシーディングス ]

- (1) T. Masuda, T. Nishio, J. Kataoka, M. Arimoto, K. Karasawa, “Developing a novel method of estimating proton dose from proton induced PET images,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 38 Supple. 3, 51 (2018).
- (2) T. Tahara, S. Tanaka, M. Tsuneda, T. Nishio, K. Karasawa, N. Hayashizaki, “Study on image acquisition method by pencil beam for high accuracy of proton beam therapy,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 38 Supple. 3, 24 (2018).
- (3) T. Nishio, “Activity of Medical Physics Working Group in clinical trial for radiotherapy,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 38 Supple. 2, 35-39 (2018).
- (4) Y. Sugama, M. Araya, H. Fujimoto, Y. Ito, I. Maeshima, Y. Seki, T. Shimada, G. Shibagaki, T. Nishio, H. Onishi, “Evaluation of interplay effect in the line scanning method for moving targets with small respiratory motion,” Jpn. J. Med. Phys. Proc., 38 Supple. 1, 113 (2018).

[ 学会・研究会での口頭発表及びポスター発表 ]

- (1) 西尾禎治、岡本俊、増田孝充、西尾彩、恒田雅人、佐野碧、山下晴男、友澤弘充、永田毅、前川秀正、唐澤久美子、“陽子線照射領域可視化観測システムの研究開発”、日本放射線腫瘍学会第32回高精度放射線外部照射部会学術大会、2019年3月2日。
- (2) 増田孝充、西尾禎治、片岡淳、有元誠、佐野碧、西尾彩、恒田雅人、友澤弘充、永田毅、前川秀正、山下晴男、岡本俊、唐澤久美子、“PETを用いた陽子線線量分布推定法の開発”、日本放射線腫瘍学会第32回高精度放射線外部照射部会学術大会、2019年3月2日。
- (3) 恒田雅人、西尾禎治、江面崇智、唐澤久美子、“シンチレータイメージングシステムを用いた4次元線量分布測定”、日本放射線腫瘍学会第32回高精度放射線外部照射部会学術大会、2019年3月2日。
- (4) 佐野碧、西尾禎治、増田孝充、友澤弘充、西尾彩、恒田雅人、岡本俊、山下晴男、永田毅、前川秀正、唐澤久美子、“Convolutional neural networkを用いたActivity分布画像の高画質化手法の開発”、日本放射線腫瘍学会第32回高精度放射線外部照射部会学術大会、2019年3月2日。
- (5) M. Tsuneda, T. Nishio, S. Tanaka, K. Hotta, T. Akimoto, K. Karasawa, Y. Nagata, “A novel verification method using a plastic scintillator imaging system for evaluation of the 3D central beam axis in proton therapy,” The 18th AOCMP Meeting, Kuala Lumpur, November 11 – 14, 2018.
- (6) M. Tsuneda, K. Karasawa, T. Nishio, “Commissioning study of SBRT with the respiratory gating technique using Varian RPM system in our institute,” The 18th AOCMP Meeting, Kuala Lumpur, November 11 – 14, 2018.
- (7) A. Nishio, T. Nishio, T. Okamoto, S. Kabuki, H. Yamashita, T. Mizowaki, M. Tsuneda, T. Masuda, K. Karasawa, “Research and development of neo beam ON-LINE PET system for dose-volume delivery guided proton therapy,” 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Sydney, November 10 – 17, 2018.
- (8) T. Masuda, T. Nishio, J. Kataoka, M. Arimoto, “High-accuracy and high-speed estimation of proton dose from PET images by using ML-EM algorithm,” 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Sydney, November 10 – 17, 2018.
- (9) 西尾禎治、“小型陽子線治療装置 PROTEUS® ONE の物理特性”、ランチョンセミナー7、日本放射線腫瘍学会第31回学術大会、2018年10月11 – 13日。
- (10) 西尾禎治、増田孝光、西尾彩、恒田雅人、佐野碧、友澤弘充、永田毅、前川秀正、唐澤久美子、“患者体内中での「陽子線線量の観える化」観測技法の研究”、日本放射線腫瘍学会第31回学術大会、2018年10月11 – 13日。
- (11) 恒田雅人、西尾禎治、齋藤明登、小澤修一、唐澤久美子、永田靖、“3次元・4次元ビーム照射位置計測法“こんべいとうショット法”システムの構築2”、日本放射線腫瘍学会第31回学術大会、2018年10月11 – 13日。
- (12) 松下慶一郎、西尾禎治、田中創大、増田孝光、恒田雅人、山田恵、山崎秀哉、鈴木弦、尾方俊至、武中正、“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2”、日本放射線腫瘍学会第31回学術大会、2018年10月11 – 13日。
- (13) 西尾禎治、岡本俊、増田孝光、西尾彩、恒田雅人、佐野碧、山下晴男、友澤弘充、永田毅、前川秀正、唐澤久美子、“陽子線照射領域可視化用 new Beam ON-LINE PET system (nBOLPs) の研究開発”、第15回日本粒子線治療臨床研究会、大阪、2018年10月7日。
- (14) T. Masuda, T. Nishio, J. Kataoka, M. Arimoto, K. Karasawa, “Developing a novel method of estimationg proton dose from proton induced PET images,” The 116th Scientific Meeting of JSMP, Morioka, September 15 – 17, 2018.
- (15) T. Tahara, S. Tanaka, M. Tsuneda, T. Nishio, K. Karasawa, N. Hayashizaki, “Study on image

acquisition method by pencil beam for high accuracy of proton beam therapy,” The 116th Scientific Meeting of JSMP, Morioka, September 15 – 17, 2018.

- (16) Y. Sugama, M. Araya, H. Fujimoto, Y. Ito, I. Maeshima, Y. Seki, T. Shimada, G. Shibagaki, T. Nishio, H. Onishi, “Evaluation of interplay effect in the line scanning method for moving targets with small respiratory motion,” The 115th Scientific Meeting of JSMP, Yokohama, April 12 – 15, 2018.

[ 学位論文 ]

- (1) 田原智祐、“陽子線 CT 画像の画質向上に関する基礎研究”、東京工業大学環境・社会理工学院融合理工学系原子核工学コース、修士論文、2018 年.
- (2) 橋本弥一郎、西尾禎治、唐澤久美子、“総説 悪性腫瘍の最先端”、東京女子医科大学雑誌、第 88 巻 3 号、72 – 80 頁、2018 年.

### 3.8. 外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に与える影響評価

[ 特許 ]

- (1) 稲庭拓，野田耕司，岩田佳之，粒子線治療装置、粒子線治療システム、照射計画装置、および粒子線照射方法，2018-115601.

## 5. 平成30年度マシンタイム予定表

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
4月2日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	4月23日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
4月3日 (火)		RI生産		R&D	4月24日 (火)		RI生産	RI生産( <sup>225</sup> Ac-②所内) P18.3 $\mu$ A, C3, 10:00～13:00	
4月4日 (水)		RI生産	RI生産( <sup>211</sup> At-①所内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00		4月25日 (水)		RI生産	RI生産( <sup>64</sup> Cu-①所内,外) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 10:00～12:00	
4月5日 (木)		RI生産	RI生産		4月26日 (木)		RI生産	Heビームを用いた医療用RIの製造技術 にかかると基礎研究 KEK(萩原) $\alpha$ 24MeV / 500nA C6	
4月6日 (金)		RI生産	RI生産( <sup>225</sup> Ac-①所内) P18.3 $\mu$ A, C3, 10:00～13:00		4月27日 (金)		RI生産	RI生産 H <sub>2</sub> 27, 10 $\mu$ A, C9, 10:30～11:30	
4月7日 (土)					4月28日 (土)				
4月8日 (日)					4月29日 (日)			昭和の日	
4月9日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産	4月30日 (月)			振替休日	
4月10日 (火)		RI生産	RI生産( <sup>28</sup> Mg-①所外) $\alpha$ 75, C4, 10:00～14:00		5月1日 (火)		RI生産	RI生産	
4月11日 (水)		RI生産	RI生産		5月2日 (水)		RI生産	RI生産	
4月12日 (木)		RI生産	R&D		5月3日 (木)			憲法記念日	
4月13日 (金)		RI生産	RI生産		5月4日 (金)			みどりの日	
4月14日 (土)			実験可能日		5月5日 (土)			こどもの日	
4月15日 (日)					5月6日 (日)				
4月16日 (月)	6ヵ月測定	RI生産	6ヵ月測定 P70 C8 10:00-	R&D	5月7日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
4月17日 (火)		RI生産	RI生産( <sup>211</sup> At-①部内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00		5月8日 (火)		RI生産	RI生産( <sup>211</sup> At-②所内) $\alpha$ 34, 15 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00	
4月18日 (水)		RI生産	RI生産 H <sub>2</sub> 27, 1 $\mu$ A, C9, 11:00～11:30 D20, 10 $\mu$ A, C9, 15:00～17:00		5月9日 (水)		RI生産	RI生産( <sup>64</sup> Cu-②所内,外) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 10:00～12:00	
4月19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 女子医大(西尾) P70MeV / 5 nA C8		5月10日 (木)		RI生産	設備利用 18CH103 P70MeV / 0.5nA C8	
4月20日 (金)		RI生産	RI生産 P50, 4 $\mu$ A, C9, 10:00～17:00		5月11日 (金)		RI生産	RI生産	
4月21日 (土)					5月12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 女子医大(西尾) P70MeV / 50 nA C6	
4月22日 (日)					5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
5月14日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	6月4日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
5月15日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>124</sup> I-①所内) H <sub>2</sub> +27, 10 $\mu$ A, C9, 10:00～14:00		6月5日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-③所内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00	
5月16日 (水)	RI生産		RI生産( <del><sup>64</sup>Cu臨床1</del> ) H <sub>2</sub> 27, 5 $\mu$ A, C4, 10:30～11:30 P60 4 $\mu$ A, C9, 15:30～17:00		6月6日 (水)	RI生産		RI生産( <del><sup>64</sup>Cu臨床1</del> )	
5月17日 (木)	RI生産		設備利用 18CH104 P70MeV / 1nA C8		6月7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 女子医大(西尾) P70MeV / 50 nA C8	
5月18日 (金)	RI生産		RI生産 P50 4 $\mu$ A, C9, 10:00～17:00		6月8日 (金)	RI生産		RI生産	
5月19日 (土)					6月9日 (土)			陽子線治療の高度化にむけた 放射線可視化技術の開拓 早大(片岡) P70MeV / 10 nA C6	
5月20日 (日)					6月10日 (日)				
5月21日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	6月11日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
5月22日 (火)	RI生産		設備利用 18CH101 P70MeV / 20 nA C8		6月12日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg-②所外) $\alpha$ 75, C4, 10:00～14:00	
5月23日 (水)	RI生産		RI生産( <del><sup>64</sup>Cu臨床1</del> ) H <sub>2</sub> 24, 5 $\mu$ A, C4, 10:30～11:30		6月13日 (水)	RI生産		RI生産( <del><sup>64</sup>Cu臨床予備</del> )	
5月24日 (木)	RI生産		R&D He 34 MeV		6月14日 (木)	RI生産		R&D W P70MeV / 10 nA C8	
5月25日 (金)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-③所内) P18 MeV 6 $\mu$ A, C3, 10:00～13:00		6月15日 (金)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-④所内) P18.3 $\mu$ A, C3, 10:00～13:00	
5月26日 (土)					6月16日 (土)				
5月27日 (日)					6月17日 (日)				
5月28日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		6月18日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
5月29日 (火)	RI生産		R&D		6月19日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-②部内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00	
5月30日 (水)	RI生産		RI生産( <del><sup>64</sup>Cu臨床1</del> )		6月20日 (水)	RI生産		RI生産( <del><sup>64</sup>Cu臨床予備</del> ) H2 24MeV, 20 $\mu$ A, C4, 10:00～17:00	
5月31日 (木)	RI生産		RI生産		6月21日 (木)	RI生産		RI生産	
6月1日 (金)	RI生産		RI生産		6月22日 (金)	RI生産		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) P70MeV / 10nA C6	
6月2日 (土)					6月23日 (土)			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) P70MeV / 10nA C6	
6月3日 (日)					6月24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25日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	7月16日 (月)			海の日	
6月26日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>124</sup> I-②所内) H <sub>2</sub> +27, 10 $\mu$ A, C9, 10:00～14:00		7月17日 (火)	RI生産		RI生産	
6月27日 (水)	RI生産		RI生産( <del><sup>64</sup>Cu臨床予備</del> )		7月18日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床2) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00	
6月28日 (木)	RI生産		設備利用 18CH101 P40MeV / 20 nA C8		7月19日 (木)	RI生産		エッチング型飛跡検出器の閾値に対する 化学的クライテリアの確立 神戸大(山内) P70MeV / 100nA C8	
6月29日 (金)	RI生産		RI生産		7月20日 (金)	RI生産		RI生産	
6月30日 (土)					7月21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 女子医大(西尾) P70MeV / 50 nA C6	
7月1日 (日)					7月22日 (日)				
7月2日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産	7月23日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
7月3日 (火)	RI生産		陽子線治療の高度化にむけた 放射線可視化技術の開拓 早大(片岡) P70MeV / 10 nA C6		7月24日 (火)	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 京大原子炉(八島) Ne 190 MeV / 300 nA C6	
7月4日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00		7月25日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床2) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00	
7月5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 / 40nA C6		7月26日 (木)	RI生産		RI生産	
7月6日 (金)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-⑤所内) P18.3 $\mu$ A, C3, 10:00～13:00		7月27日 (金)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-⑥所内) P18.3 $\mu$ A, C3, 10:00～13:00	
7月7日 (土)			中高エネルギー粒子による核反応の研究 KEK(佐波) P70MeV / 40nA C6		7月28日 (土)				
7月8日 (日)					7月29日 (日)				
7月9日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		7月30日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
7月10日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-④所内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00		7月31日 (火)	RI生産		R&D	
7月11日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床2、所内) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00		8月1日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床2、所内) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00	
7月12日 (木)	RI生産		設備利用 18CH106 P70MeV / 10 nA C8		8月2日 (木)	RI生産		RI生産	
7月13日 (金)	RI生産		RI生産		8月3日 (金)	RI生産		RI生産	
7月14日 (土)					8月4日 (土)				
7月15日 (日)					8月5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6日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	8月27日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D I P70 MeV / 10nA C8
8月7日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-⑤所内) α 34, 12 μ A, C9, 10:00～13:00		8月28日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-③部内) α 34, 12 μ A, C9, 10:00～13:00	
8月8日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 12 μ A, C4, 10:00～11:00 D20, 12 μ A, C9, 15:00～17:00		8月29日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 μ A, C4, 9:00～11:00	
8月9日 (木)	RI生産		R&D I P70MeV / 10 nA C8		8月30日 (木)	RI生産		設備利用 18CH106 P70MeV / 10 nA C8	
8月10日 (金)	RI生産		RI生産 α 34, 12 μ A, C9, 10:00～17:00		8月31日 (金)	RI生産		RI生産	
8月11日 (土)					9月1日 (土)				
8月12日 (日)					9月2日 (日)				
8月13日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		9月3日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D I P70 MeV / 10nA C8
8月14日 (火)	RI生産		R&D I P70MeV / 10 nA C8		9月4日 (火)	RI生産		R&D I P70MeV / 10 nA C8	
8月15日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 μ A, C4, 9:00～11:00		9月5日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 μ A, C4, 9:00～11:00	
8月16日 (木)	RI生産		RI生産		9月6日 (木)	RI生産		RI生産	
8月17日 (金)	RI生産		R&D I P70MeV / 10 nA C8		9月7日 (金)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-⑧所内) P18.3 μ A, C3, 10:00～13:00	
8月18日 (土)					9月8日 (土)				
8月19日 (日)					9月9日 (日)				
8月20日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	9月10日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	
8月21日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg-①所外) α 75, 10 μ A, C4, 10:00～14:00 α 34, 10 μ A C9, 16:00～17:00		9月11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) P70MeV / 40nA C6	
8月22日 (水)	RI生産		RI生産 P60, 10 μ A, C9, 10:00～17:00		9月12日 (水)	RI生産		メンテナンス	
8月23日 (木)	RI生産		設備利用 18CH104 P70MeV / 10 nA C8		9月13日 (木)	RI生産		メンテナンス	
8月24日 (金)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-⑦所内) P18.3 μ A, C3, 10:00～13:00		9月14日 (金)	RI生産		メンテナンス	
8月25日 (土)			陽子線治療の高度化にむけた 放射線可視化技術の開拓 早大(片岡) P70MeV / 10 nA C8		9月15日 (土)				
8月26日 (日)					9月16日 (日)			(長期メンテナンス 9/18～)	

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1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	10月22日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
10月2日 (火)	RI生産		R&D		10月23日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-H①所内) α 34, 12 μ A, C9, 10:00～13:00	
10月3日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床2) H <sub>2</sub> 24, 20 μ A, C4, 9:00～11:00		10月24日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床2) H <sub>2</sub> 24, 20 μ A, C4, 9:00～11:00	
10月4日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-S①所内) α 34, 12 μ A, C9, 10:00～13:00		10月25日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-②所内) P18, 3 μ A, C3, 10:00～13:00	
10月5日 (金)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-①所内) P18, 3 μ A, C3, 10:00～13:00		10月26日 (金)	RI生産		高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 女子医大(西尾) P70MeV / 50 nA C8	
10月6日 (土)					10月27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 女子医大(西尾) P70MeV / 50 nA C8	
10月7日 (日)					10月28日 (日)				
10月8日 (月)			体育の日		10月29日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D M P70 MeV / 1 nA C8
10月9日 (火)	RI生産		設備利用 18CH103 P70MeV / 0.5 nA C8		10月30日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>74</sup> As-①所外) α 34, 12 μ A, C9, 10:00～14:00	
10月10日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床2) H <sub>2</sub> 24, 20 μ A, C4, 9:00～11:00		10月31日 (水)	RI生産		RI生産 P 30MeV 10 μ A, C9, 10:30～11:30, 14:00～17:00	
10月11日 (木)	RI生産		RI生産(PF課題At-211①) α 34, 12 μ A, C9, 10:00～13:00		11月1日 (木)	RI生産		RI生産 D20 MeV 5 μ A, C9, 14:00～17:00	
10月12日 (金)	RI生産 (15時まで)	メン テナ ンス	RI生産	メンテナ ンス	11月2日 (金)	RI生産		エッチング型飛跡検出器の閾値に対する 化学的クライテリアの確立 神戸大(山内) He 100MeV / 100nA C8	
10月13日 (土)			停電		11月3日 (土)				
10月14日 (日)					11月4日 (日)				
10月15日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		11月5日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
10月16日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg-①所外) α 75, C4, 10:00～14:00		11月6日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-H②所内) α 34, 12 μ A, C9, 10:00～13:00	
10月17日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床2) H <sub>2</sub> 24, 20 μ A, C4, 9:00～11:00		11月7日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 μ A, C4, 9:00～11:00	
10月18日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-実験①) α 34, 12 μ A, C9, 10:00～17:00		11月8日 (木)	RI生産		設備利用 18CH102 P40MeV / 20 nA C8	
10月19日 (金)	RI生産		設備利用 18CH107 P30MeV / 20 nA C8		11月9日 (金)	RI生産		設備利用 18CH102 P40MeV / 20 nA C8	
10月20日 (土)					11月10日 (土)			実験可能日	
10月21日 (日)					11月11日 (日)				

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
11月12日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		12月3日 (月)	メンテナンス		メンテナンス	
11月13日 (火)	RI生産		RI生産(PF課題At-211②) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00		12月4日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>74</sup> As-②所外) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00	
11月14日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00		12月5日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床3) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00	
11月15日 (木)	RI生産		設備利用 18CH104 P70MeV / 1 nA C8		12月6日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-実験②) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～17:00	
11月16日 (金)	RI生産		R&D		12月7日 (金)	RI生産		設備利用 18CH111 P50MeV / 5 nA C8	
11月17日 (土)					12月8日 (土)				
11月18日 (日)					12月9日 (日)				
11月19日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産	12月10日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
11月20日 (火)	RI生産		設備利用 18CH109 P50MeV / 1 nA C8		12月11日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg-②所外) $\alpha$ 75, C4, 10:00～14:00	
11月21日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床3) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00		12月12日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床3) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00	
11月22日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-③所内) P18, 3 $\mu$ A, C3, 10:00～13:00		12月13日 (木)	RI生産		RI生産	
11月23日 (金)			勤労感謝の日		12月14日 (金)	RI生産		陽子線治療の高度化にむけた 放射線可視化技術の開拓 早大(片岡) P70MeV / 10 nA C6	
11月24日 (土)					12月15日 (土)			陽子線治療の高度化にむけた 放射線可視化技術の開拓 早大(片岡) P70MeV / 10 nA C8	
11月25日 (日)					12月16日 (日)				
11月26日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	12月17日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D M P70 MeV / 1 nA C8
11月27日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-S②所内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00		12月18日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-H③所内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00	
11月28日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床3) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00		12月19日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00	
11月29日 (木)	RI生産		RI生産		12月20日 (木)	RI生産		超小型衛星搭載電子機器のシングルイベント 評価試験 東京理科大(木村) P70MeV / 0.1nA C8	
11月30日 (金)	RI生産		設備利用 18CH107 P70MeV / 20 nA C8		12月21日 (金)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-④所内) P18, 3 $\mu$ A, C3, 10:00～13:00	
12月1日 (土)			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 京大原子炉(八島) O 230 MeV / 300 nA C6		12月22日 (土)				
12月2日 (日)					12月23日 (日)			天皇誕生日	

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24日 (月)			振替休日		1月14日 (月)			成人の日	
12月25日 (火)	RI生産		RI生産(PF課題Zr-89②) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00		1月15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) P70MeV / 40nA C6	
12月26日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00		1月16日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床4) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00	
12月27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 女子医大(西尾) P70MeV / 50 nA C6		1月17日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-⑤所内) P18, 3 $\mu$ A, C3, 10:00～13:00	
12月28日 (金)	RI生産		高精度陽子線治療のための 基盤技術構築に関する研究 女子医大(西尾) P70MeV / 50 nA C6		1月18日 (金)	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 / 40nA C6	
12月29日 (土)					1月19日 (土)			中高エネルギー粒子による核反応の研究 KEK(佐波) P40MeV / 40nA C6	
12月30日 (日)					1月20日 (日)				
12月31日 (月)					1月21日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
1月1日 (火)					1月22日 (火)	RI生産		RI生産(PF課題At-211③) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00	
1月2日 (水)					1月23日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床4) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00	
1月3日 (木)					1月24日 (木)	RI生産		RI生産	
1月4日 (金)	RI生産		RI生産		1月25日 (金)	RI生産		設備利用 18CH110 P80MeV / 10 nA C8	
1月5日 (土)					1月26日 (土)				
1月6日 (日)					1月27日 (日)				
1月7日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		1月28日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
1月8日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-H④所内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00		1月29日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-S③所内) $\alpha$ 34, 12 $\mu$ A, C9, 10:00～13:00	
1月9日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00		1月30日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床4) H <sub>2</sub> 24, 20 $\mu$ A, C4, 9:00～11:00	
1月10日 (木)	RI生産		R&D		1月31日 (木)	RI生産		RI生産	
1月11日 (金)	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 / 40nA C6		2月1日 (金)	RI生産		外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に 与える影響評価 稲庭 P70MeV / 1 nA C8	
1月12日 (土)					2月2日 (土)			外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に 与える影響評価 稲庭 P70MeV / 1 nA C8	
1月13日 (日)					2月3日 (日)				

月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン		月 日	小型サイクロトロン		大型サイクロトロン	
	午 前	午 後	午 前	午 後		午 前	午 後	午 前	午 後
2月4日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D	2月25日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	RI生産
2月5日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-実験③) α 34, 12 μA, C9, 10:00～17:00		2月26日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-実験④) α 34, 12 μA, C9, 10:00～17:00	
2月6日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床4) H <sub>2</sub> 24, 20 μA, C4, 9:00～11:00		2月27日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 μA, C4, 9:00～11:00	
2月7日 (木)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-⑥所内) P18, 3 μA, C3, 10:00～13:00		2月28日 (木)	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 京大原子炉(八島) He 100 MeV / 100 nA C6	
2月8日 (金)	RI生産		設備利用 18CH104 P70MeV / 1 nA C8		3月1日 (金)	RI生産		RI生産( <sup>225</sup> Ac-⑦所内) P18, 3 μA, C3, 10:00～13:00	
2月9日 (土)					3月2日 (土)			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 京大原子炉(八島) He 24 MeV / 10 nA C6	
2月10日 (日)					3月3日 (日)				
2月11日 (月)			建国記念の日		3月4日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	R&D
2月12日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>28</sup> Mg-③所外) α 75, C4, 10:00～14:00		3月5日 (火)	RI生産		RI生産(PF課題At-211④) α 34, 12 μA, C9, 10:00～13:00	
2月13日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 μA, C4, 9:00～11:00		3月6日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 μA, C4, 9:00～11:00	
2月14日 (木)	RI生産		RI生産(PF課題Zr-89③) α 34, 12 μA, C9, 10:00～13:00		3月7日 (木)	RI生産		外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に 与える影響評価 稲庭 P70MeV / 1 nA C8	
2月15日 (金)	RI生産		外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に 与える影響評価 稲庭 P70MeV / 1 nA C8		3月8日 (金)	RI生産		外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に 与える影響評価 稲庭 P70MeV / 1 nA C8	
2月16日 (土)			外部磁場が陽子線の細胞殺傷効果に 与える影響評価 稲庭 P70MeV / 1 nA C8		3月9日 (土)				
2月17日 (日)					3月10日 (日)				
2月18日 (月)	メンテナンス		メンテナンス		3月11日 (月)	メンテナンス	RI生産	メンテナンス	
2月19日 (火)	RI生産		RI生産( <sup>211</sup> At-H⑤所内) α 34, 12 μA, C9, 10:00～13:00		3月12日 (火)	RI生産		メンテナンス	
2月20日 (水)	RI生産		RI生産( <sup>64</sup> Cu臨床予備) H <sub>2</sub> 24, 20 μA, C4, 9:00～11:00		3月13日 (水)	RI生産		メンテナンス	
2月21日 (木)	RI生産		設備利用 18CH103 P70MeV / 0.5 nA C8		3月14日 (木)	RI生産		メンテナンス	
2月22日 (金)	RI生産		RI生産		3月15日 (金)	RI生産		メンテナンス	
2月23日 (土)					3月16日 (土)				
2月24日 (日)					3月17日 (日)			(長期メンテナンス 3/18～)	

## 平成 30 年度 放医研サイクロトロン利用報告書

発行年月 2019 年 12 月

編集発行 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

連絡先 〒263-8555

千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

放射線医学総合研究所

加速器工学部部 サイクロトロン運転室

TEL : 043-206-3171 Fax : 043-287-6146

Email : [cyc\\_mt@qst.go.jp](mailto:cyc_mt@qst.go.jp)

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

印刷 株式会社 弘報社印刷

©2019 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

Printed in Japan

QST-M-24



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