

## テーブルトップ PET 用 RI 製造装置の開発

### DEVELOPMENT OF TABLETOP RI MAKING EQUIPMENT FOR PET

依田哲彦<sup>#,A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 神田浩樹<sup>A)</sup>, 嶋達志<sup>A)</sup>, 高久圭二<sup>A)</sup>, 森田泰之<sup>A)</sup>, 武田佳次郎<sup>A)</sup>, 原隆文<sup>A)</sup>  
Tetsuhiko Yorita<sup>#,A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Tatsushi Shima<sup>A)</sup>, Keiji Takahisa<sup>A)</sup>,  
Yasuyuki Morita<sup>A)</sup>, Keijiro Takeda<sup>A)</sup>, Takafumi Hara<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> RCNP, Osaka Univ.

#### Abstract

Low cost proton generator with the energy of several MeV for short lifetime RI production is expected instead of cyclotrons or electrostatic accelerators like Van de Graaff. A proton generating system which consists of 18 GHz superconducting (SC)-ECR ion source and deuterated polyethylene target has been developed at the Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University. The  $^3\text{He}^{2+}$  beam of 200  $\mu\text{A}$  has been provided by SC-ECR ion source with 20 keV acceleration voltage and as a result of feasibility test of  $^3\text{He}+\text{deuteron}$  (D) fusion reaction, the protons of 14.67 MeV have been obtained in 0.5 Hz successfully. According to this result and energy dependence of fusion reaction cross section, etc., it is possible that the table top size RI producer of several hundred kBq/h is constructed with developments of high intense  $^3\text{He}$  ion source and stable D target.

#### 1. はじめに

PET 診断は癌診断を中心とした臓器の代謝診断方法として 1980 年代より大きく発展してきた。近年では陽電子放出核である  $^{64}\text{Cu}$  で分子標的薬を標識することでがんに対する分子標的薬の治療効果を針生検に頼らず非侵襲的に調べる方法の開発なども進んできている。 $^{18}\text{F}$  や  $^{64}\text{Cu}$  といった陽電子放出核である短寿命の放射性同位体(RI)は通常サイクロトロンなどで得られる十数 MeV のエネルギーの陽子ビームにより(p,n)反応を経て生成される。近年の加速器の研究の進展によりサイクロトロンを利用した場合の1時間当たりのRIの生産能力は、現在、数 GBq と非常に大きなものとなっており、また、コンパクトで自己遮蔽できるサイクロトロンが広く普及している。一方、コンパクトになったとはいえ、このサイクロトロンの導入コストは依然高いものである。

ここで、PET 薬剤のための短寿命 RI を生成する新たな手段として核融合反応である  $^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{p}+^4\text{He}$  を利用することを考えた。この核融合反応の結果放出される 14.67 MeV の陽子を利用すると RI 生産能力はサイクロトロンに及ばずとも、導入コストの低減と装置の小型化により研究室レベルで気軽に使用できる RI 製造装置の実現が期待される。14.67 MeV というエネルギーは  $^{18}\text{F}$  や  $^{64}\text{Cu}$  といった陽電子放出核を生成するのに十分なエネルギーである。

この核融合反応自体は古くから知られているもので[1]、恐らくは過去にもこの反応を使ったビーム生成装置の検討がなされたであろうが、反応率の低さが足枷であったであろうことは想像に難くない。今回、PET 関連の研究に耐えうる量の RI 製造を  $^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{p}+^4\text{He}$  反応により実現できる装置の実現を今一度目指す。そのため、大強度  $^3\text{He}$  ビームイオン源及び高耐熱の重水素標的、そして生成した陽子を資料に照射させる窓構造などについて検討を行った。

#### 2. $^3\text{He}+\text{D}$ 反応による陽子生成

PET 薬剤生成のための陽子線を核融合反応である  $^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{p}+^4\text{He}$  反応を利用する。この反応の断面積の  $^3\text{He}$  のエネルギー依存性は既によく知られており[1]数百 keV で反応率が最大となる。このエネルギー領域のイオンビームは静電印加されたイオン源によって供給可能であり、大強度のイオン源を中心とする装置の構築によりテーブルトップサイズのPET薬剤生成装置の実現が期待される。また、この反応は中性子の生成を伴わないので遮蔽が簡便な設置コストも低減可能な陽子源の実現という側面もある。ただし、RI 生成の際の(p,n)反応に伴う中性子は考慮する必要がある。

#### 3. $^3\text{He}+\text{D}$ 反応の予備実験

$^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{p}+^4\text{He}$  反応による陽子が利用可能かどうかの予備的な実験を行った[2]。この実験の詳細は[2]に記載したが、当初はプラスチックシンチレーターなどの粒子検出器の校正のための陽子源として開発された。以下にこの予備実験の概要を[2]より引用する。

##### 3.1 18GHz 超伝導(SC)-ECR イオン源

実験では 18GHz SC-ECR を  $^3\text{He}$  イオンビーム源として使用した。SC-ECR はRCNPでは 2005 に導入されて以降様々な大強度で多価の重イオンビームの供給に利用されてきた[3-5]。SC-ECR は重イオン生成のために設計され磁場強度などは  $^3\text{He}^{2+}$  に対してはオーバースペックであるが、SC-ECR 直下のビーム輸送ライン上にあるフェラデーカップやスリットを有するビーム診断用チェンバーが実験用の検出器などをインストールするのに十分な大きさを有していること、また、年間の重イオンのマシンタイムの割合が小さいため比較的自由に使えるイオン源であることなどが、今回使われた理由である。

RFパワー300 W の運転により定期的には $\sim 200 \mu\text{A}$  の  $^3\text{He}^{2+}$  が得られた。この実験での加速電圧は 20 kV であり  $^3\text{He}^{2+}$  のエネルギーは 40 keV であった。

<sup>#</sup> yorita@rcnp.osaka-u.ac.jp

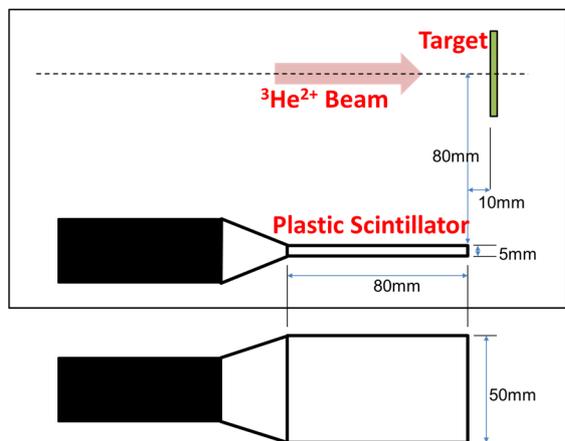


Figure 1: 実験セットアップ。[1]より引用。

### 3.2 実験セットアップ

${}^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+{}^4\text{He}$  反応実験のセットアップを Figure 1 に示す。D標的として deuterated polyethylene を使用した。この deuterated polyethylene は徐熱及び電流検出のための銅版上に貼り付けられ設置された。上記の通り、ビーム強度は実験を通して  $200\text{ e}\mu\text{A}$  で維持した。

${}^3\text{He}^{2+}$  の標的上でのビームサイズは炭素の付着状況から  $20\text{mm}\times 20\text{mm}$  であったと判断された。またビームと deuterated polyethylene のオーバーラップの状況から約 70% の  ${}^3\text{He}^{2+}$  ビームが deuterated polyethylene に照射されたと考えられる。

${}^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+{}^4\text{He}$  反応の結果放出される陽子はプラスチックシンチレータと光電子増倍管により検出した。光電子増倍管の HV は  $930\text{ V}$  であった。

### 3.3 実験結果

Deuterated polyethylene を  ${}^3\text{He}^{2+}$  で 15 分間照射した結果 499 個の陽子が検出された。Figure 2 の実線で示したとおりである。15 分間の  ${}^3\text{He}^{2+}$  ビーム無しでのバックグラウンドの測定も実施し  $14.67\text{ MeV}$  陽子の周辺に余計

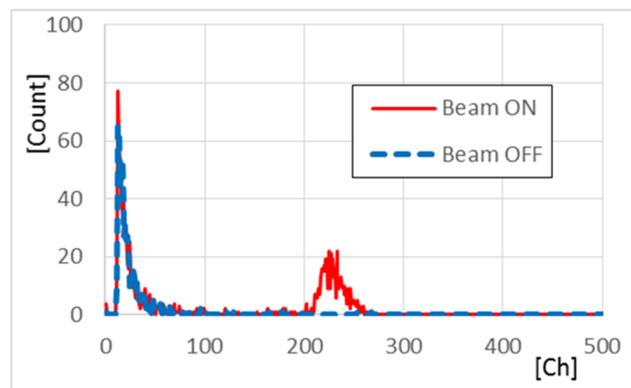


Figure 2: 実験結果。[1]より引用。チャネル数にして 299~300Ch のところにある赤色で示されたピークが  $14.67\text{ MeV}$  の陽子による信号である。

なバックグラウンドがないことも確認した。バックグラウンドについては Figure 2 の破線で示したとおりである

## 4. PET用RI製造装置の検討

上記のとおり低強度ながらも  ${}^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+{}^4\text{He}$  の結果放出される陽子を検出できることを確認し、少なくとも粒子検出器の校正などには有用であることが確認された。この強度をあげることで PET 薬剤のための短寿命 RI を生成する新たな手段として利用可能かの検討を行った。装置実現のためには「He イオン源の大強度ビーム開発」と「D 標的及び生成陽子取出しの構造の最適化」が 2 つの大きな柱となる。

「He イオン源の大強度ビーム開発」に関して、 ${}^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+{}^4\text{He}$  反応の結果出てくる陽子のエネルギーは  $14.67\text{ MeV}$  であるため、RI の生成に好都合な反応である、反応断面先は  ${}^3\text{He}$  のエネルギーが数十から数百 keV の領域ではエネルギーが高いほど大きくなる[1]。先述の予備実験では  $40\text{ keV}$  の  ${}^3\text{He}$  を使ったが、このエネルギーを  $200\sim 300\text{ keV}$  にあげるだけで 3~4桁高い反応率が期待される[1]。近年  ${}^3\text{He}$  ではなく重陽子源ではあるが  $100\text{ kV}$  で  $140\text{ mA}$  性能を持つものが CEA-Saclay で開発されているが[6]、 ${}^3\text{He}$  についても  $200\text{ keV}$  前後のエネルギーで数十 mA といった重陽子源と同等の強度のイオン源が開発できれば上記、予備実験の結果と核融合反応断面積、検出器の立体角等から RI 生成能力が数百 kBq 程度の装置が制作可能と見込まれる。

「D 標的及び生成陽子取出しの構造の最適化」に関して、大強度の  ${}^3\text{He}$  ビームによる高い熱負荷の下で D 標的をいかに実現するかということ、標的と試料の間の真空の仕切りを熱負荷に耐えうる範囲でいかに薄くすることが肝である。D 標的は予備実験同様 Deuterated Polyethylene を溶けないように冷却しながら使用する、強冷却下で固体重水素を使用する、あるいは Ti による重水素吸着を高い熱負荷の下で冷却しながら実現する方法が考えられる。Figure 3 には重水素吸着金属を使った場合の装置概念図を示している。この場合は重水素吸着金属に向けて別のイオン源から D ビームを低エネルギーで供給することを想定している。このときの D ビームのエネルギーは D+D 反応によって中性子が放出しない

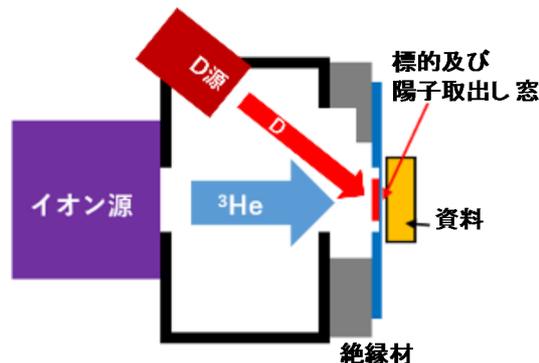


Figure 3: 卓上型 PET 生成装置の概念図。

程度に低いものとする。いずれの標的の場合も標的は耐熱負荷構造をもつ冷却構造つき陽子取り出し窓に設置される。窓は熱伝導性の高いアルミなどの金属で作成する。標的で生成した陽子は窓の薄い部分より大気側に出てくる。大気側にRI生成用試料を設置することでRIを生成する。RI生成用の試料に生成した陽子の大部分が照射する構造により効率的RI生成が実現する。

このようなテーブルトップ型で且つそれなりのRI生成能力を持つ装置は今後の $^3\text{He}$ イオン源の開発、D標的の開発及び陽子取出し窓の開発によって実現されていくが、実現した暁には実験室レベルでのマウスなどを使ったPETの基礎研究現場に広く普及すれば、PETに関する基礎研究の大きな躍進につながると期待される。

## 謝辞

本発表は科研費及び、「国立研究開発法人科学技術振興機構 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム」の補助のもと実施された研究の成果である。

## 参考文献

- [1] M. Nocente *et al.*, Nucl. Fusion 50 (2010) 055001.
- [2] T. Yorita *et al.*, T8\_We\_71, Proc. of International Conference of Ion Sources 2017, to be published.
- [3] T. Yorita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 79, 02A311 (2008).
- [4] T. Yorita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 81, 02A332 (2010).
- [5] T. Yorita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 83, 02A335 (2012).
- [6] R. Gobin *et al.*, Proceedings of ECRIS2010 (Grenoble, France), TUPOT017.