

MeV領域のテーブルトップ陽子源の開発

DEVELOPMENT OF TABLETOP PROTON SOURCE IN MeV REGION

依田哲彦^{#,A)}, 福田光宏^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 嶋達志^{A)}, 高久圭二^{A)}, 武田佳次郎^{A)}, 原隆文^{A)}, 大本恭平^{A)}
Tetsuhiko Yorita^{#,A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Tatsushi Shima^{A)}, Keiji Takahisa^{A)},
Keijiro Takeda^{A)}, Takafumi Hara^{A)}, Kyohei Ohmoto^{A)}
^{A)} RCNP, Osaka Univ.

Abstract

Low cost proton generator of several MeV for short lifetime RI production or for detectors calibration is expected instead of cyclotrons or electrostatic accelerators like Van de Graaff. So a proton generating system which consists of ^3He ion source and deuteron (D) target has been developed at the Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University [1]. The $^3\text{He}^{2+}$ beam of 200euA has been provided by Superconducting (SC)-ECR ion source with 20 keV acceleration voltage and as a result of the experiment of $^3\text{He}+\text{D}$ fusion reaction, the protons of about 12 MeV have been obtained in 3.6Hz through the thin aluminum window to the air, successfully.

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。18F や 64Cu 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、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 14.67MeV 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。14.67MeV というエネルギーは 18F や 64Cu 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[2]、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が、近年、イオン源のビーム強度が今日技術が発展していることを受けて、PET 関連の研究に耐えうる量の RI 製造を $^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{p}+^4\text{He}$ 反応により行う装置の実現を今一度目指す。[3]

今回、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の開発を行った。0.3mm のアルミ窓を製作し、そこをとおして大気側に陽子を取り出せるかが開発の中心である。大気側に陽子を取り出せれば RI 生成だけでなく、検出器の校正や教育用原子核反応実験などへの応用も広がるのが期待できる。

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

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 ^3He のエネルギー依存性は既によく知られており[2]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、生成した陽子と他の物質との (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[1]。この実験は当初は粒子検出器の校正のための陽子源の開発の一環として実施された。ここでは D 標的として deuterated polyethylene を使用した。 $^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{p}+^4\text{He}$ 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ーと光電子増倍管により検出した。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。

4. PET用RI製造装置の開発状況

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とを受けて、次にその強度を桁違いに増強するための開発を行って、PET 薬剤のための短寿命 RI を生成する装置実現を目指すわけであるが、そのためには「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」が開発の 2 つの大きな柱となる。

このうち「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 ^3He 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

[#] yorita@rcnp.osaka-u.ac.jp

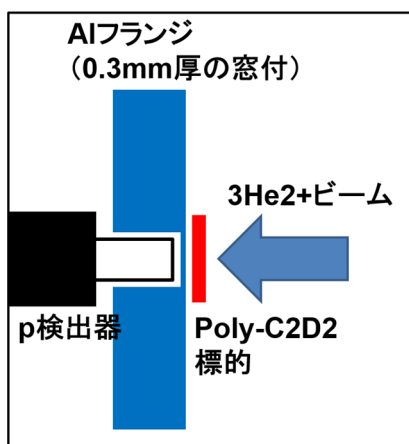


Figure 1: 実験セットアップ。イオン源のビームライン上に Al 窓を設置した。

ることが肝である。今回 $\phi 20\text{mm}$ で厚さが 0.3mm のアルミ窓を有する冷却水路付きのアルミフランジを製作し、アルミ窓をとおして陽子を取り出せるかを中心に実験を行った。

4.1 18GHz 超伝導(SC)-ECR イオン源

実験では 18GHz SC-ECR を照射用の 3He 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[4-6]。SC-ECR は重イオン生成のために設計され磁場強度などは 3He^{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にあるファラデーカップやスリットを有するビーム診断用チャ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

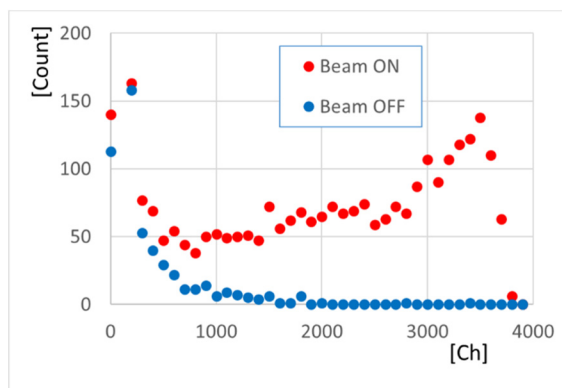


Figure 2: 実験結果。チャンネル数にして 3600Ch のあたりのピークが Al 窓を通過して出てきた陽子の最大エネルギー約 12MeV に相当する。

るイオン源であることなどが、今回使われた理由である。今回、定常的には $\sim 400\text{euA}$ の 3He^{2+} が得られた。この実験での加速電圧は 20kV であり 3He^{2+} のエネルギーは 40keV である。

4.2 実験セットアップ

実験のセットアップの様子を Fig. 1 に示す。アルミ窓付フランジはイオン源のビーム軸上に窓部分が乗るように設置された。アルミ窓の真空側に薄膜状の deuterated polyethylene をカプトンテープで張り付けた。deuterated polyethylene の薄膜は、チップ状の試料を高圧プレス機にかけて制作した。窓部の大気側には生成した陽子検出器としてプラスチック・シンチレータを設置した。使用したシンチレータのサイズはビーム軸方向に 14mm 、ビーム軸に垂直な方向は $14\text{mm} \times 10\text{mm}$ である。プラスチック・シンチレータからの光は光電子増倍管により信号として読みだされる。シンチレータと光電子増倍管はアクリルのライトガイドを介して接続されている。

4.3 実験結果

$3\text{He} + \text{D} \rightarrow \text{P} + 4\text{He}$ 反応の結果放出される陽子の測定結果を Fig. 2 に示す。赤丸は He ビームを照射した状態でのデータ、青丸は He ビームを停止した状態でのデータである。Deuterated polyethylene 標的に $\sim 400\text{euA}$ の 3He^{2+} を 10 分間照射した結果、大気側において 2204 個の陽子が検出された。ここでグラフ中の 500Ch 以上のイベント数を陽子イベントとしている。3600Ch に見えるピークは 0.3mm のアルミを通過した陽子の最大エネルギー約 12MeV に相当する。また、エネルギーの低いイベントは Al 窓を斜めに通過して大きくエネルギーを失った陽子、及びシンチレータをくすめて通過した陽子によるイベントと考えられる。

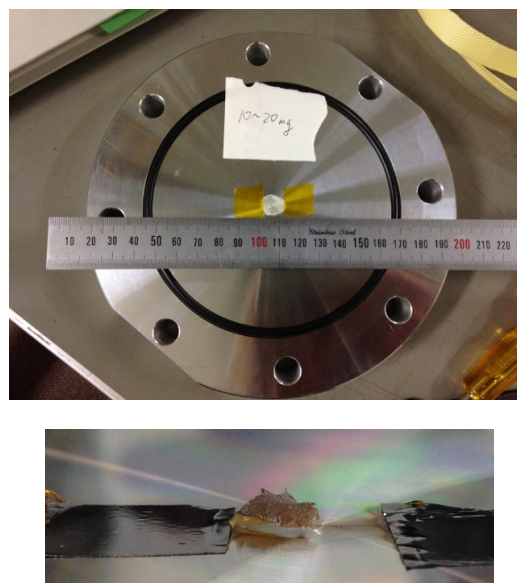


Figure 3: Deuterated polyethylene のビーム照射前後の様子。上が照射前、下が照射後である。

また、Deuterated polyethylene 標的を照射後取り出してみたところ熱変形しているのが見られた。Figure 3 にビーム照射前後の標的の様子を示す。あまり熱負荷の高くない状態でも標的の変形が起こることがわかったので、フランジとの熱接触方式について今後検討することが非常に重要である。また、標的構造についての別の方法である、Ti 蒸着膜に D ビームを照射して D 標的とする方式についても検討していく。

5. まとめ

今回 $3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{p}+4\text{He}$ による陽子生成装置の実現に向けた開発として、主に大気への陽子取り出しを実現する 0.3mm 厚の Al 窓の開発を中心に実験を行った、その結果エネルギーロスが少ない陽子を約 3.6Hz で取り出すことに成功した。今後、さらなる標的構造の検討や、 3He イオン源の大強度化により、生成陽子ビームの大強度化を目指す。

謝辞

本発表は科研費の補助のもと実施された研究の成果である。

参考文献

- [1] T. Yorita *et al.*, T8_We_71, Proc. of International Conference of Ion Sources 2017.
- [2] M. Nocente *et al.*, Nucl. Fusion 50 (2010) 055001.
- [3] T. Yorita *et al.*, Proceedings of PASJ2018, WEP126.
- [4] T. Yorita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 79, 02A311 (2008).
- [5] T. Yorita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 81, 02A332 (2010).
- [6] T. Yorita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 83, 02A335 (2012).