

## MeV領域のテーブルトップ陽子源の大強度化

### DEVELOPMENT OF INTENSE TABLE-TOP SOURCE OF PROTONS IN MEV RESION

依田哲彦<sup>#, A)</sup>, 高久圭二<sup>B)</sup>, 嶋達志<sup>A)</sup>, 神田浩樹<sup>A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 大本恭平<sup>A)</sup>, 荘浚謙<sup>A)</sup>, 久松 万里子<sup>A)</sup>  
Tetsuhiko Yorita<sup>#, A)</sup>, Keiji Takahisa<sup>B)</sup>, Tatsushi Shima<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Kyohei Ohmoto<sup>A)</sup>,  
Tsun Him Chong<sup>A)</sup>, Mariko Hisamatsu<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

<sup>B)</sup> Kobe Tokiwa University

#### Abstract

Low cost proton generator of several MeV for short lifetime RI production is expected instead of cyclotrons or electrostatic accelerators like Van de Graaff. So we focused on the fusion reaction  ${}^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+{}^4\text{He}$ . The proton that are obtained from this reaction have the energy of 14.67 MeV. Moreover, the reaction occurs with  ${}^3\text{He}$  having the energy of only several dozens of keV, according to the reaction cross section [1]. Therefore, an experimental feasibility test using only existing equipment at RCNP was planned and carried out as a preliminary step in the process of developing a proton generator. Protons with the energy of 14.67 MeV were successfully obtained at 0.5Hz using  ${}^3\text{He}$  beams from SC-ECR and deuterated polyethylene target [2, 3]. The further development also was carried out using a novel target base with thin aluminium window, for obtaining protons with energies in the MeV region in the atmosphere, by passing the protons through the window [4, 5]. In present work, we are trying to increase proton intensity which would be used for RI productions.

#### 1. 卓上型 RI 生成装置のこれまでの検討

十数 MeV の陽子ビームは、PET 薬剤として利用される短寿命 RI である  ${}^{18}\text{F}$  や  ${}^{37}\text{Cu}$  等の生成に利用される。この陽子ビームをサイクロトロンなどの加速器を使わず、より手軽な方法として核融合反応  ${}^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{p}+{}^4\text{He}$  (D:重陽子、p:陽子)[1]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 の陽子により、研究室レベルで気軽に使用できる導入コストが低くテーブルトップサイズの小型陽子源の実現が期待される。この核融合反応自体は既知のもので、過去にもこの反応を使ったビーム生成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。本研究では最終的に 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、イオン源の大強度化や標的構造の最適化を検討することにより目指す。

これまでの研究において、まず、反応自体が確かに起こるかどうかの確認実験を行った[2, 3]。この  ${}^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+{}^4\text{He}$  反応実験の重水素標的としては Deuterated polyethylene が使用された。この deuterated polyethylene に  ${}^3\text{He}2+$  ビームを、ビーム強度 200uA で照射し、 ${}^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+{}^4\text{He}$  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 40keV (20kV)、~200uA の  ${}^3\text{He}2+$  で 15 分間照射した結果 499 個の陽子が検出された。なお、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 14.67MeV 陽子の周辺に余計なバックグラウンドがないことも確認されている。

そしてその次のステップとして、陽子ビームを大気中に取り出しできるか実験を行った[4, 5]。Al 製フランジをビーム軸上に設置する、そのフランジ中央は削り込みにより 0.3mm 厚、φ20 の窓構造とし、真空側に設置した重水素標的での核融合反応の結果生成した陽子を窓の下流側、即ち大気側に設置した陽子検出器で測定した。deuterated polyethylene の薄膜が重水素標的として Al フランジ中央にカプトンテープで張り付けられた。陽子検出器としては 14x10x14 のプラスチックシンチレーターを使用した。Deuterated polyethylene 標的に 40keV(20kV)、~400uA の  ${}^3\text{He}2+$  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。0.3mm のアルミをまっすぐに通過した陽子のイベントのほか、Al 窓を斜めに通過して大きくエネルギーを失った、あるいは検出器をかすめたと考えられるイベントも見られた。また、Deuterated Polyethylene が熱により変形する様子も見られた。

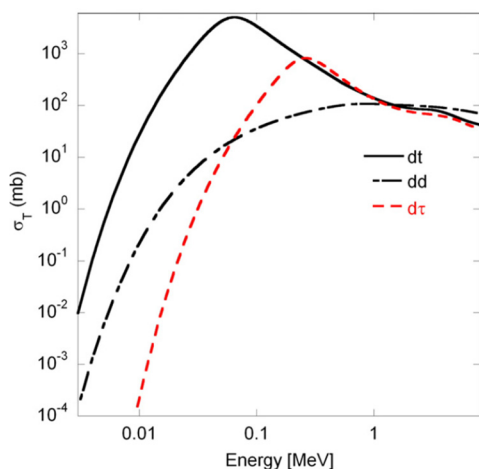


Figure 1: The energy dependence of fusion reaction cross section of  ${}^3\text{He}+\text{D}$  from [1]. The dt stands for  ${}^3\text{He}+\text{d}$  reaction.

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

## 2. 3He イオン源の大強度化

ここまで見てきたように、数十 keV のエネルギーのイオン源を利用した  $3\text{He}+\text{D}$  反応により  $14.69\text{MeV}$  の陽子ビームが得られることは確かであり、装置を工夫すれば大気中にも取り出せることが明らかとなった。次のステップとして、得られる陽子ビームの強度を高め、RI 製造が実現することを目指す。陽子の強度を高めるための方策の一つとして、既存イオン源の改造による  $3\text{He}$  ビームの大強度化と高エネルギー化を実施した。具体的には既存のイオン源の引出電圧が  $15\sim 20\text{kV}$  であったところを  $50\text{kV}$  に増強した。イオン源のビーム電流と加速電圧の関係が Child-Langmuir 則に従うならば、この改造により  $3\text{He}$  のビーム電流自身が 6 倍程度増強される。また、Fig. 1 に示した通り  $3\text{He}^{2+}$  の加速エネルギーが  $30\sim 40\text{keV}$  から  $100\text{keV}$  と高くなることで、 $3\text{He}+\text{D}$  反応の断面積が 2 桁程度増える。これらの効果により、イオン源の加速電圧増強により 3 桁ほど陽子の反応が増強されると見込まれる。

### 2.1 NEOMAFIOS (10GHz, 永久磁石 ECR) の改造

RCNP に既に設置されているイオン源の一つである 10GHz の永久磁石型の ECR イオン源である NEOMAFIOS (Fig. 2 参照) のビーム引出電圧を  $50\text{kV}$  まで加速できるように改造を施した。RF 導入部の DC ブロックを  $50\text{kV}$  耐圧のものに入れ替え、本体架台を新しい絶縁材で全面改装し、引出電極の構造の見直しによる高耐圧化の改造をじっした。これらの結果、イオン源全体をターミナルに乗せることなく  $50\text{kV}$  の引出電圧に耐えるイオン源となった。ターミナルに乗っていないため運用も容易である。イオン源内部の真空引きをした状態で、且つ RF やガスの導入をしていない状態での  $50\text{kV}$  耐圧試験は無事終了し問題のないことを確認した。RF とガスを導入し渡連カレントが流れている状態での耐圧試験を、今後実施していく。

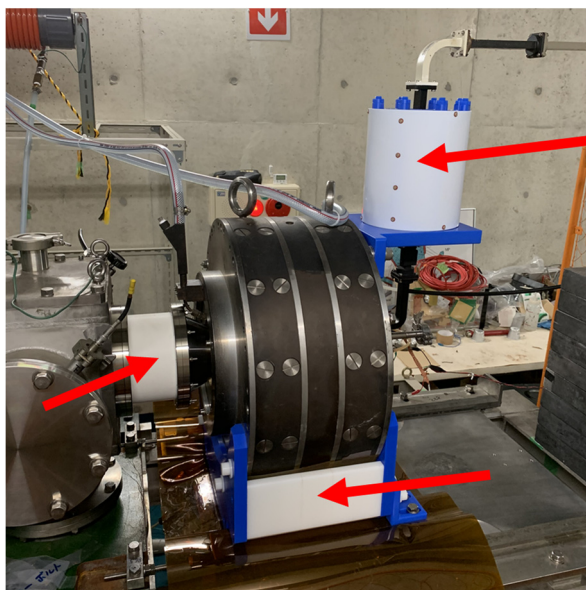


Figure 2: NEOMAFIOS: 10GHz ECR with permanent magnet, modified for  $50\text{kV}$  acceleration. DC block for RF injection, base and extraction electrode have been modified to insulate  $50\text{kV}$ .

### 2.2 その他の使用予定のイオン源

$10\text{GHz}$  の永久磁石型 ECR イオン源である NANOGUN (PANTECHNIC 社製) が最近、導入された。この導入された個体は  $3\text{He}^{2+}$ ,  $40\text{kV}$  で  $3\text{mA}$  の実績がある。こちらのイオン源も利用していく。そのほか、既に導入されている Duoplasmatron (National Electrostatics Corp. 製) も高圧ターミナルの改造をしたうえで利用していくことを考えている。

## 3. 標的構造等の最適化

これまでの実験[4, 5]により、反応の結果生成した陽子を  $0.3\text{t}$  の Al 窓を通して大気側に取り出せることが分かったが、Al 窓に対して直角に出ない陽子のエネルギーロスの効果が大きいことも分かった。エネルギーの高い陽子の収率を高めるため、大気に取り出す窓の物質質量をさらに少なくしつつ、且つイオン源からの大電流ビームで破損しない窓構造を考えた。Figure 3 のとおり、大気との境目をカプトン膜としカプトンのビームによる破損を避けるため、数十ミクロンの金属箔で保護する構想とした。なお金属箔を負印加することでビームエネルギーをさらに高めることも可能である。

重陽子標的について、これまでの実験のように Deuterated Polyethylene を使用する場合、熱変形の問題があることがわかっている[3, 4]。Deuterated Polyethylene を使用しない重陽子標的として、Ti を上記金属箔に蒸着して、そこに重陽子ガスを吸着させる方式を試験してみることにした。Ti 蒸着は Fig. 3 で示すように、Ti ゲッターポンプの要領で標的部近傍に Ti ワイヤを配置し、電流で加熱するものとする。Ti が蒸着された金属箔表面近傍に重水素ガスを導入することで、重水素標的が金属箔表面に吸着され重水素標的を形成することが期待される。

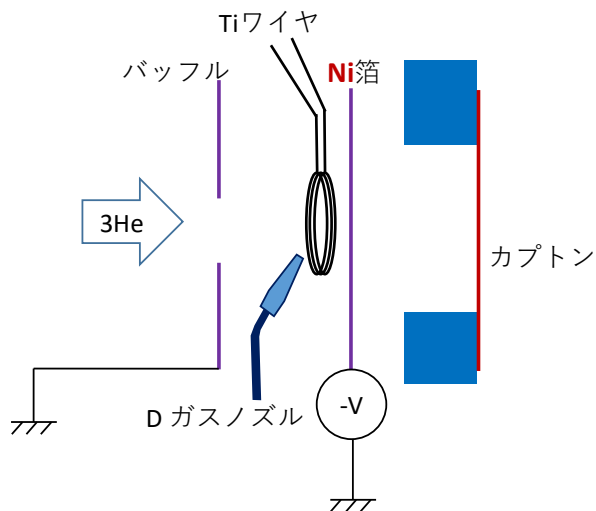


Figure 3: The schematic view of deuteron target on metal plate with Ti vapor deposition. The deposition is made by Ti wire with electric current.

## 4. RI 生成試験用試料

$3\text{He}+\text{D} \rightarrow \text{p}+4\text{He}$  反応の結果生成した陽子による RI 生成の実証実験も同時に進めるため、Fig. 3 で示した重陽

子標的を生成する金属箔をNiとし、Ni(p,n)Cu反応が起こるようにする。この場合、また、 $3\text{He}+\text{D}$  反応で生成する陽子の50%が、Ni箔に当たるジオメトリーをなっているため、大気側でRI生成試験をするよりNi試料への照射の立体角が1桁以上大きいと、より大きな反応率が期待される。なお、先述のとおり真空と大気を隔てる部分の物質量を提言しているため、主にRIとして生成すると考えられる $58\text{Cu}$ や $60\text{Cu}$ が $\beta$ +崩壊し電子陽電子対消滅の結果放出される $0.511\text{MeV}$ のガンマ線を測定することにより反応が起こったかどうかの確認が可能である。

## 5. まとめ

過去の実験により、数十keVのエネルギーのイオン源を利用した $3\text{He}+\text{D}$ 反応により $14.69\text{MeV}$ の陽子ビームが得られ、また、装置を工夫すれば大気中にも取り出せることが明らかとなったので、今回、次のステップとして、得られる陽子ビームの強度を高め、RI製造が実現することを目指した。実施したことの一つはイオン源の引出電圧の増強である。引出電圧の高電圧化によりビーム電流の増大と反応断面積の増加が期待される。また、標的構造の見直しも実施した。取り出されるビームのロスが低減する窓構造、熱変形に強い標的システム、そして試料に陽子が最大限照射される構造である。これらの標的構造により、安定にRI生成試験が実施されることが期待される。これらのシステムは部品製作が終わり、現在、組み立てとイオン源ビームラインへの組み込みを実施しているところである。今後、実際の陽子ビーム生成試験及びRI生成試験を実施する。

## 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.
- [3] T. Yorita *et al.*, Proceedings of PASJ2018, WEP126.
- [4] T. Yorita *et al.*, Proceedings of PASJ2019, THP033.
- [5] T. Yorita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 91, 033307 (2020).