

ナノガンを利用した MeV 領域の陽子生成装置

TABLE-TOP MeV PROTON GENERATOR USING NANOGAN

依田哲彦^{#, A)}, 森田 康之^{A)}, 高久圭二^{B)}, 嶋達志^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 福田光宏^{A)}

Tetsuhiko Yorita^{#, A)}, Yasuyuki Morita^{A)}, Keiji Takahisa^{B)}, Tatsushi Shima^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

^{B)} Kobe Tokiwa University

Abstract

Table-top size proton generator of several MeV for some detector calibrations or short lifetime RI production might be expected instead of cyclotrons or electrostatic accelerators like Van de Graaff. For that purpose, 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 at RCNP was 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 a with thin aluminium window, for obtaining protons with energies in the atmosphere, by passing the protons through the window [4, 5]. Now we are trying to increase this proton intensity and also to get mono-energetic proton in atmosphere side via polyimide film window protected by thin metal foil.

1. 卓上型陽子生成装置の検討

十数 MeV の陽子ビームは、検出器の校正や、18F や 37Cu 等の短寿命 RI 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]を利用することを検討してきた。この核融合反応の結果放出される 14.67 MeV 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い卓上型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

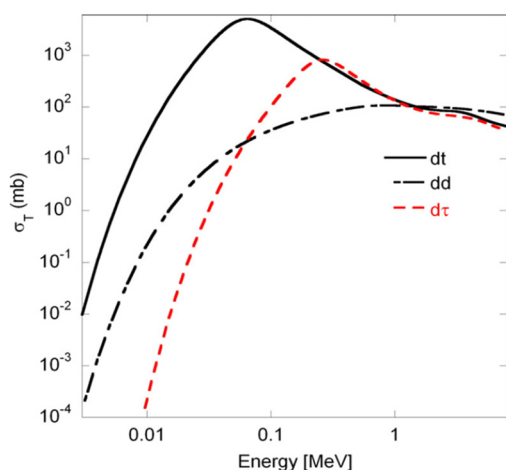


Figure 1: The energy dependence of fusion reaction cross section of ${}^3\text{He}+\text{d}$ shown as red dashed line with dt. This figure is cited from [1].

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

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している。

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 ${}^3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+{}^4\text{He}$ 反応実験では、deuterated polyethylene に ${}^3\text{He}2+$ ビームを、ビーム強度 200 ueA 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 40 keV (20 kV)、~200 ueA 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。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 0.3 mm 厚、φ 20 の窓構造とし、真空側に設置した deuterated polyethylene の薄膜標的での核融合反応の結果生成した陽子を窓の大気側に設置した陽子検出器で測定した。陽子検出器としては 14 x 10 x 14 のプラスチックシンチレーターを使用した。Deuterated polyethylene 標的に 40 keV (20 kV)、~400 ueA 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。この実験後標的の Deuterated Polyethylene が熱により変形した様子が確認された。

2. ${}^3\text{He}$ イオン源の大強度化

このように、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 MeV の陽子ビームが得られることは確かであり、また装置の工夫により大気中に取り出せることも明らかとなったので、次のステップとして、得られる陽子ビームの強度を高め、利用価値の高い装置の実現を目指す。陽子の強度を高めるための方策の一つとして、 ${}^3\text{He}$ ビームの大強度化と高エネルギー化を



Figure 2: The 10GHz permanent magnet ECR NANOGAN (PANTECHNIK): It has two extraction electrodes. It is possible to apply 15 kV between these electrodes, and it is also possible to apply 35 kV between first extraction electrode and plasma electrode.

実施する。具体的には既存のイオン源の引出電圧が 15~20 kV であったところを 50 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 ^3He のビーム電流自身が 6 倍程度増強される。また、 $^3\text{He}^{2+}$ の加速エネルギーが 30~40 keV から 100 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 (Fig. 1)。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 MeV 陽子の生成が増強されると見込まれる。とっかかりとして、まず、RCNP に既に設置されているイオン源の一つである 10 GHz の永久磁石型の ECR イオン源である NEOMAFIOS のビーム引出電圧を 50 kV まで加速できるように改造を施した[6]。RF 導入部の DC ブロックを 50 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 kV の引出電圧に耐えるイオン源となった。RF やガスの導入をしてビーム運転をしても 50 kV 耐圧試験に問題のないことを確認した。但し、高耐圧のための立ち入り禁止区域も含めると、卓上型というには大きいサイズとなったため、以下に示す通り、NANOGAN (Fig. 2) によって、よりコンパクトな装置の実現を目指した。

2.1 NANOGAN の導入

10 GHz の永久磁石型 ECR イオン源である NANOGUN (PANTECHNIK 社製) が最近、導入された。この導入された個体は前の所有者がテストしたときには $^3\text{He}^{2+}$, 40 kV で 3 mA の実績がある。RCNP において順次ビームテストを進めているが、 $^4\text{He}^{2+}$, 20 kV で約 400 μA のビーム生成が確認できている。また、50 kV に印加しうることも確認済みである。NANOGAN 用のテスト

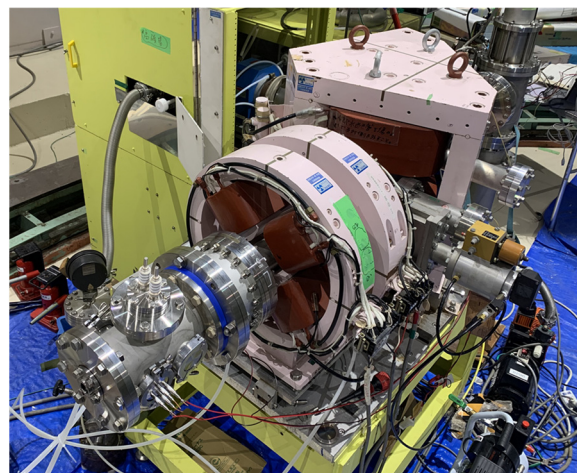


Figure 3: Schematic view of proton generator using NANOGAN. Only $^3\text{He}^{2+}$ can be introduced into the reaction chamber at the end of this system with using dipole magnet.

ベンチは偏向電磁石 1 台、四重極電磁石 2 台の LEPT 及び反応のチェンバーで構成されており (Fig. 3)、特定の価数のイオンのみ標的に輸送可能である。ビーム輸送の最適化はベイズ推定による機械学習により進めている[7]。

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 0.3t 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てこ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[6]。Figure 4 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。なおこの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も、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たことにした。Ti 蒸着は Figure 4 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。Ti の代りに Ni を水素吸着に利用することも可能である。

まず標的なしの状態では金属箔にテスト的に ^4He ビームを照射してみた。金属箔は 30 μm の Ni とした。積極的な徐熱機構は設置しない状態であり、金属箔へ接続した銅線から逃げる熱と、輻射熱が主な徐熱ルートとなる。

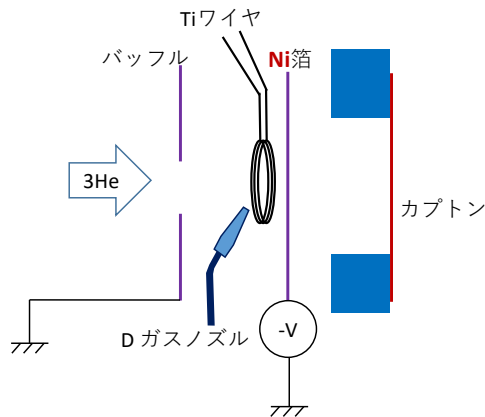


Figure 4: Conceptual figure of deuteron target using Ti deposited on metal foil. The Ti can adsorb deuteron. This figure is cited from [6]. Ti deposition can be done by electrically heated Ti wire.

4He^+ を 20 kV、3 mA 程度で照射したところ、Ni箔破損が生じ続いて下流のカプトン膜の破損が生じ真空が破れた(Fig. 5)。今後の大電流テストに向けて積極的冷却機構の導入が必須であるという至極まっとうな結論が得られた。

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. 4 で示した重陽子標的を生成する金属箔を Ni とし、 $\text{Ni}(\text{p},\text{n})\text{Cu}$ 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 桁以上大きいため、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 58Cu や 60Cu が β +崩壊し電子陽電子対消滅の結果放出される 0.511 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。今後試験を進めていく。また、この試験はとりあえずはエンリッチされていない Ni 標的で実施するので、金属箔を Al などにし、Ti の代わりに水素吸着金属として Ni そのものを蒸着してもよい。いずれにしても、ビームの入熱により吸着水素の再放出が促されるので、やはり積極的否冷却構造は必須と考えられる。

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 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、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

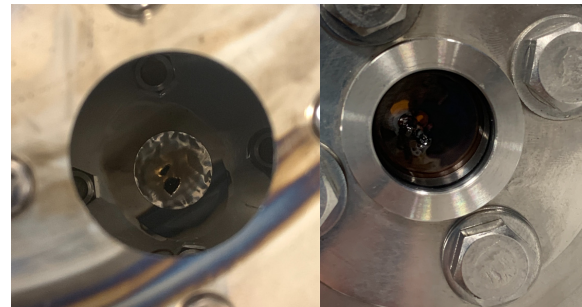


Figure 5: Ni foil and Polyimide film broken by 4He beam of 20 kV and 3 mA.

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、に卓上型陽子生成装置による RI 生成試験が実施されることが期待される。これらのシステムの部品製作を終え、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、まず、金属箔へのビーム照射を実施したところ。冷却構造は必須であることが明らかとなった。今後、改良を順次進めていく。

参考文献

- [1] M. Nocente *et al.*, “Cross section of the $\text{d} + 3\text{He} \rightarrow \alpha + \text{p}$ reaction of relevance for fusion plasma applications”, Nucl. Fusion 50 (2010) 055001; <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0029-5515/50/5/055001/pdf>
- [2] T. Yorita *et al.*, “ 3He beam development of 18 GHz SCECR-IS for proton generator at RCNP”, AIP Conference Proceedings 2011, 090021 (2018); <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5053402>
- [3] T. Yorita *et al.*, “DEVELOPMENT OF TABLETOP RI MAKING EQUIPMENT FOR PET”, Proceedings of PASJ2018, WEP126; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP1/WEP126.pdf
- [4] T. Yorita *et al.*, “DEVELOPMENT OF TABLETOP PROTON SOURCE IN MeV REGION”, Proceedings of PASJ2019, THP033; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPI/THPI033.pdf
- [5] T. Yorita *et al.*, “Development of an MeV proton generator using a 3He ion source at the Research Center for Nuclear Physics”, Rev. Sci. Instrum. 91, 033307 (2020); <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5129577>
- [6] T. Yorita *et al.*, “DEVELOPMENT OF INTENSE TABLETOP SOURCE OF PROTONS IN MEV REGION”, Proceedings of PASJ2020, THPP50; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/THPP/THPP50.pdf
- [7] Y. Morita *et al.*, “Development of ion source control method using machine learning”, Proceedings of PASJ2021, WEP005.