

連続運用可能な MeV 領域の陽子生成装置の開発

LONG TERM OPERATION OF TABLE-TOP MeV PROTON GENERATOR

依田 哲彦^{#,A)}, 森田 康之^{A)B)}, 神田 浩樹^{A)}, 高久 圭二^{C)}, 嶋 達志^{A)}, 福田 光宏^{A)}

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

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

^{B)} RIKEN Nishina Center

^{C)} Kobe Tokiwa University

Abstract

Table-top size proton generator of several MeV might be expected instead of cyclotrons or electrostatic accelerators like Van de Graaff for some detector calibration use or short lifetime RI production. For that purpose, we focused on the fusion reaction $3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+4\text{He}$. The protons that are obtained from this reaction have the energy of 14.67 MeV. Moreover, the reaction occurs with 3He having the energy of only several dozens of keV, according to the reaction cross section [1]. Several experimental feasibility tests at RCNP have been carried out and protons with the energy of 14.67 MeV were successfully obtained in the atmosphere with 3He beams and deuterated polyethylene target [1-6]. Further study has been performed and we have succeeded to get mono-energetic proton in atmosphere side via polyimide film window protected by thin metal foil this time. We were also trying to make deuteron gas target on Ti evaporation on the thin metal foil to obtain long term stable target.

1. はじめに

十数 MeV の陽子ビームは、検出器の校正や、 ^{18}F や ^{37}Cu 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うよりも、より手軽に得る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。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 $3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{p}+4\text{He}$ 反応により実施できる装置の実現を目指し、イオン源の大強度化や標的構造の最適化を進めている。

これまでの研究において、 $3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+4\text{He}$ 反応自体が確かに起こるかどうかの確認実験[2]及び、陽子ビームを大気中に取り出しできるか実験を行った[3]。この大気への陽子取り出し実験では Al 製フランジをビーム軸上に設置し、そのフランジ中央は削り込みにより 0.3 mm 厚、 $\phi 20$ の窓構造とし、真空側に設置した deuterated polyethylene 標的で起きた核融合反応からの陽子を窓の大気側で測定した。このとき得られた陽子には、大きなエネルギー損失が見られ、また、標的の Deuterated Polyethylene が熱により変形した様子が確認された。

上記の結果を踏まえて、大強度の陽子ビーム生成を目指して、イオン源の改良、大気への窓構造の改良、及び、Deuterated Polyethylene 以外の重水素標的構造の検討開発を行ってきた[4, 5]。

2. 3He イオン源の大強度化

陽子の強度を高めるための方策の一つとして、 3He ビームの大強度化と高エネルギー化を実施した。具体的

にはイオン源の引出電圧を 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、 3He^{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[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。

以下に示す通り、NANOGAN の高電圧化によって、大強度ビームの実現を目指した。

• NANOGAN の高電圧化

RCNP ではいくつか 3He^{2+} イオンビームを生成可能なイオン源があるが、サイズなコンパクトな 10 GHz の永久磁石型 ECR イオン源 NANOGAN (PANTECHNIC 社製) の高電圧化を、今回実施した。RCNP におけるビームテストでは、 4He^{2+} , 20 kV で約 400 μA のビーム生成が確認できている。NANOGAN 用のテストベンチは偏向電磁石 1 台、四重極電磁石 2 台の LEPT 及び反応用のチェンバーで構成されており(Fig. 1)、特定の価数のイオンのみ標的に輸送可能である。なお、ビーム輸送の最適化やイオン源本体の運転最適パラメータの導出はバイズ推定による機械学習により進めている[6]。

この NANOGAN を 50 kV で運転するため、架台の絶縁機構で放電が起こりやすい場所周辺にポリイミドシートによる絶縁強化を施した。また RF 導波管の DC Block の絶縁材の半径を約 2 倍にする改造も実施した(Fig. 2)。その結果、特に DC Block の改造が功を奏し、カタログ値 20 kV より大きい 50 kV での安定な加速が実現した。

3. 陽子取り出し窓の最適化

これまでの実験[3]により、反応の結果生成した陽子を 0.3 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

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



Figure 1: Schematic view of proton generator using NANOGAN. Only 3He^{2+} can be introduced into the reaction chamber at the end of this system with using dipole magnet and quadrupole magnets.

スの効果が大きいことも分かった。このエネルギーロスを低減し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検討してきた[4, 5]。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造とした。今回、金属箔としては Ni 箔を利用した。Ni 箔はチェンバーから電氣的に浮かせて電流読み出しができる構造としているが、熱の逃げ場が制限されるために、大電流照射では破損してしまうことがわかっている[4, 5]。将来的には水冷機構を導入するが、今回は Ni 箔の熱破損を避けるため、ある程度、熱が逃げやすいよう読み出し線を、1 mm の銅線とした。

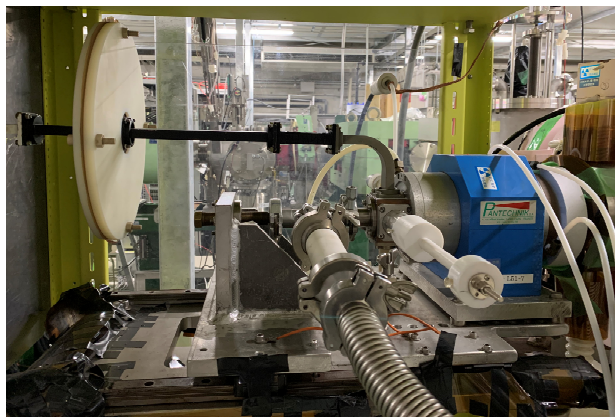


Figure 2: The 10 GHz permanent magnet ECR NANOGAN (PANTECHNIK): It has two extraction electrodes. It is possible to apply 15 kV between these electrodes, and it is also possible to apply 35 kV between first extraction electrode and plasma electrode.

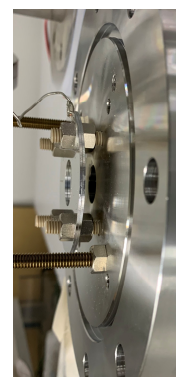
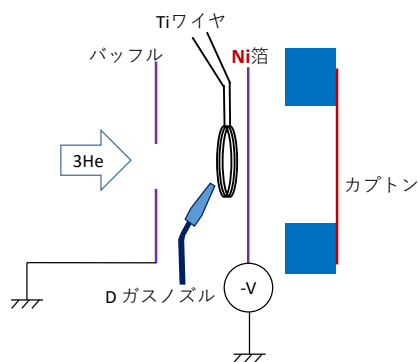


Figure 3: Left is the conceptual figure of deuteron target using Ti evaporation on metal foil. The Ti can adsorb deuteron. This figure is cited from [4, 5]. Ti evaporation can be done by electrically heated Ti wire. Right figure shows the target.

● 陽子取り出し実験

この窓がうまく機能するか確認するため、陽子の取り出し実験を実施した。ここでは Fig. 4 のように Deuterated Polyethylene を Ni 箔に設置し重水素標的とすることで、 $3\text{He} + \text{D} \rightarrow \text{P} + 4\text{He}$ 反応実験を実施した。過去の実験の経験上、Deuterated Polyethylene は熱変形の問題があるため 3He^{2+} のエネルギーを 20 kV、照射電流を 20 euA に制限して実験を実施した。カプトンから出てくる陽子の測定は大気側に設置した Plastic Scintillator により行った (Fig. 5 上図)。Figure 5 の下図は測定結果である。赤線は 3He^{2+} ビームを重水素標的に照射した場合、青線は偏向電磁石の値を調整して 3He^{2+} ビームを標的から外した場合の、それぞれの測定結果を示している。どちらも 20 分間の測定によるものである。実験の結果、低強度であるが大気側でほぼ単色の陽子が得られることが確認された。なお、Fig. 4 の右図は実験後の Deuterated Polyethylene の様子である。炭素の付着、もしくは炭化が見られるものの、低強度照射のおかげで実験を通して熱変形は生じなかった。

4. 重水素標的

大強度の陽子ビーム生成を目指すにあたり、重陽子標的について、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]。長期運用可能な装置を実現するために、Deuterated Polyethylene を使用しない重陽子標的として、Ti を金属箔に蒸着して、



Figure 4: Left figure shows a deuterated polyethylene foil on Ni foil. Right shows the polyethylene after 3He irradiation.

そこに重陽子ガスを吸着させる方式を検討している。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。Ti の代りに Ni を水素吸着に利用することも可能である。

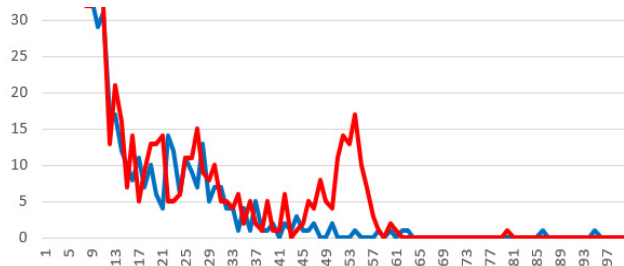


Figure 5: Top figure shows the proton detector consists with plastic scintillator and photomultiplier. Bottom shows the energy spectra measured by the detector.

4.1 Ti 膜生成試験1

まず Ti の膜が期待通りに生成するかの確認を実施した。Ti 膜ができた場合、チタンサブレーションポンプのように何らかのポンプ効果が真空度の変化に現れることを期待して、Ni 箔近傍で Ti ワイヤを加熱する試験を実施した。Figure 6 の左図は 0.5 mm の Ti ワイヤを設置した様子である。真空度が 1.1×10^{-4} Pa になった時点で通電により加熱してみたところ、2~3 A の電流にて、もの数分で熔融断線してしまった。Figure 6 の右図に断線したワイヤを示す。また、Fig. 6 右図の矢印は断線直後の熱いワイヤが銅に触れた際に Ti を蒸着したと思われる痕跡である。

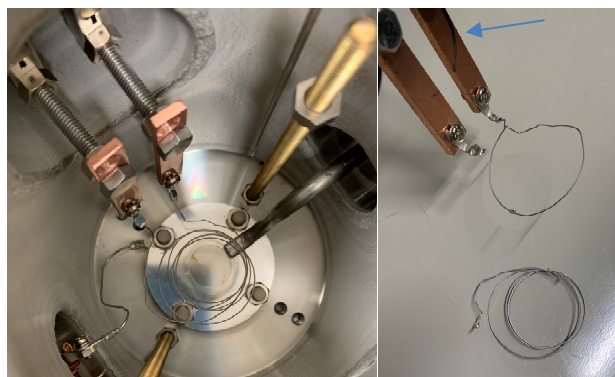


Figure 6: Left figure shows the evaporation system with 0.5 mm Ti wire. Right shows the wire broken after energization with 2 A.



Figure 7: Schematic view of evaporation system with 2 mm Ti wire.

4.2 Ti 膜生成試験2

0.5 mm のワイヤでは断線してしまうということで、続いて 2 mm の Ti ワイヤを使用して同様の試験を実施した。Figure 7 は 2 mm のワイヤを設置した様子である。通電の際は真空度が悪化しすぎないように注意しながら 15 分程度かけて最大 30 A まで通電した。通電中、ワイヤを設置した真空チェンバーが温まっておき、ワイヤが加熱されていることが確認された。また、試験後に真空層内を確認すると Ni 箔を固定している樹脂ネジが熔融しているのが確認された。Figure 8 の矢印は通電終了直後に一瞬真空悪化したピークを指示しており、この現象は何らかのポンプ効果に対応する可能性がある。ただし、通電前後の真空度はどちらも 1.4×10^{-4} Pa と変化がなく、Ti 膜の形成を間接的に見ることはできなかった。もっとも、ベースの真空度がさほど良くないため、Ti 膜によるポンプ効果を見ることはそもそも難しいということはあるので、別の確認方式を考える必要がある。なお、目視で Ti 膜を確認することも試みたが、このテストの際に利用した Ni 箔はビーム照射テストに利用したものをそのまま使ったため、ビームによる変色か Ti 膜による変色かわからない状況であったので、まっさらの Ni 箔や銅箔などで再度試験をする予定である。

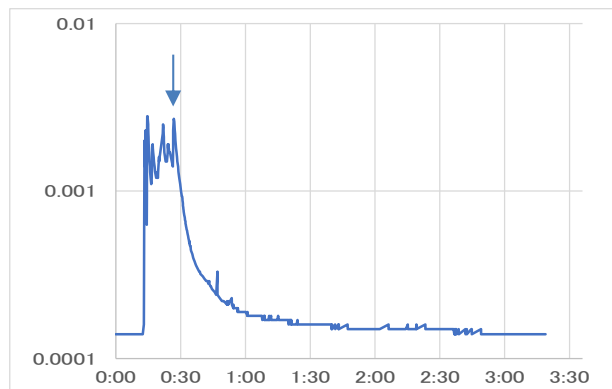


Figure 8: Vacuum transition when the 2 mm Ti wire energized up to 30 A. Vertical axis shows the vacuum in Pa.

5. まとめ

$3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+4\text{He}$ 核融合反応を利用した、コンパクトな大強度の陽子ビーム生成装置の実現を目指して、イオン源の改良、大気への窓構造の改良、及び重水素標的構造の検討開発を行った。今回、コンパクトな ECR イオン源 NANOGAN の加速電圧の高電圧化を実施し 50 kV の加速が実現した。核融合反応の結果生成する陽子の取り出し窓の改良も実施され、単色エネルギーの陽子の取り出しにも成功した。連続運用可能な陽子源実現のため Ti 蒸着膜に重水素ガスを吸着させるタイプの標的を開発検討し、そのための Ti 膜生成の予備試験を実施した。膜の生成については直接的な証拠は得られなかったが、今後、D₂ ガスを導入して、 $3\text{He}+\text{D}\rightarrow\text{P}+4\text{He}$ 反応実験を実施し間接的に D 標的が形成されたかを確認していく。

参考文献

- [1] M. Nocente *et al.*, Nucl. Fusion 50 (2010) 055001.
- [2] T. Yorita *et al.*, AIP Conference Proceedings 2011, 090021 (2018).
- [3] T. Yorita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 91, 033307 (2020).
- [4] T. Yorita *et al.*, Proc. of PASJ2020, THPP50.
- [5] T. Yorita *et al.*, Proc. of PASJ2021, WEP003.
- [6] Y Morita *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 2244 (2022) 012105.