

J-PARC 3MeV リニアックにおけるレーザー荷電変換試験の結果(速報)

PRELIMINARY RESULTS OF THE LASER CHARGE EXCHANGE TEST USING THE 3-MEV LINAC IN J-PARC

武井早憲^{#, A)}, 平野耕一郎^{A)}, 堤和昌^{A)}, 千代悦司^{A)}, 三浦昭彦^{A)}, 近藤恭弘^{A)}, 森下卓俊^{A)},
小栗英知^{A)}, 明午伸一郎^{A)}

Hayanori Takei^{#, A)}, Koichiro Hirano^{A)}, Kazuyoshi Tsutsumi^{A)}, Etsuji Chishiro^{A)}, Akihiko Miura^{A)},
Yasuhiro Kondo^{A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Hidetomo Oguri^{A)}, Shin-ichiro Meigo^{A)}

^{A)} J-PARC/JAEA

Abstract

Accelerator-driven system (ADS) is one of candidates to transmute long-lived nuclides such as minor actinide (MA) produced at nuclear reactor. For efficient transmutation of the MA, precise prediction of neutronics of ADS is indispensable. In order to obtain the neutronics data for the ADS, J-PARC has a plan to build the Transmutation Physics Experimental Facility (TEF-P), which will be delivered 400-MeV H⁺ beam with 25Hz extracted from LINAC. Since the TEF-P requires stable power of the beam and will operate with thermal power less than 500 W and the proton beam power of 10 W so that a stable and meticulous beam extraction method is required to extract small amount of the beam from the high power LINAC beam with 250 kW. To fulfill requirement, Laser charge exchange method (LCE) has been developed for delivery of 400-MeV proton beam to the TEF-P. The LCE strips the electron of H⁺ beam and H₀ will separate at the bending magnet at the proton beam transport. The LCE device consists of YAG-laser with high power as 1.6 J/shot and 25 Hz and transport control system with high accuracy of the beam position. For the demonstration of the charge exchange of the H⁺, the further LCE tests is conducted using H⁺ beam with energy of 3-MeV at RFQ test stand in J-PARC. In this paper, present status of LCE tests is presented.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構では、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素や放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離するとともに、マイナーアクチノイド(MA)などを加速器駆動システム(Accelerator Driven System: ADS)で短寿命核種または安定な核種に変換する研究開発を進めている。この ADS として、核破砕ターゲットとして優れた特性を持つ鉛ビスマス共晶(Lead-Bismuth Eutectic, LBE)合金をターゲット材および冷却材に、主に MA を燃焼する鉛ビスマス冷却・ターゲット ADS を提案している[1]。

実用 ADS の開発には、MA 燃料製造および再処理を含む核変換専用サイクル技術の開発、ならびに MA 装荷炉心の炉物理、LBE ターゲット、加速器およびプラント全体の安全・制御技術などの開発が必要である。これらの開発課題のうち、炉物理・MA 核データに係る課題、また LBE 熱流動・ターゲットおよび LBE 材料に係る課題に取り組むために必要な実験施設として、大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の核変換実験施設 (Transmutation Experimental Facility, TEF, Fig. 1) を位置付けている。

Fig. 1 に示す通り、TEF は ADS ターゲット試験施設 (ADS Target Test Facility, TEF-T) 及び核変換物理実験施設 (Transmutation Physics Experimental Facility, TEF-P) の 2 施設で構成される。TEF-T[2]は、大強度陽子ビーム(エネルギー400MeV、出力 250kW)での核破砕ターゲット技術開発および材料の研究開発を行う施設である。

TEF-P[3]は、実験用の小出力の原子炉である臨界実験装置に陽子ビームを導入し、核破砕中性子源で未臨界状態の原子炉を駆動した際の様々な特性を実験的に検証するための施設である。TEF-P で行う炉物理実験では、最大核分裂出力を 500W に抑えるため、入射する陽子ビーム出力は最大でも 10W で十分である。このため、TEF-T に向かう 250kW の負水素イオン(H⁻)ビームからレーザー荷電変換[4]により10Wの微弱の水素イオン(H⁺)ビームを切り出し、TEF-P に向けて輸送する予定である。

レーザー荷電変換技術の導入にあたり、荷電変換された H⁺ビームの強度やその安定性を評価することは、臨界集合体の熱出力を一定に保つために必要不可欠である。そこで、新たに構築した3MeVリニアックを用いて、H⁺ビーム強度などを測定するレーザー荷電変換試験を実施した。本報告では、レーザー荷電変換試験の概要及び2016年6月末に実施した試験結果を速報として報告する。

2. レーザー荷電変換の原理

レーザー荷電変換の原理[4]を Fig. 2 に示す。レーザー光を H⁻ビームに照射することにより、H⁻ビームを中性水素(H₀)ビームに荷電変換する。H⁻イオンの第 2 電子は 0.755eV という低いエネルギーで H₀ に結合しているため、赤外線から可視光程度の波長を持つレーザー光で容易に電子を引き離すことができる。一方、H₀ の場合、第 1 電子の結合エネルギーは 2.3eV と、第 2 電子と比較して高いため、レーザー光では第 1 電子を引き離すことは難しい。

[#] takei.hayanori@jaea.go.jp



Figure 1: Transmutation Experimental Facility.

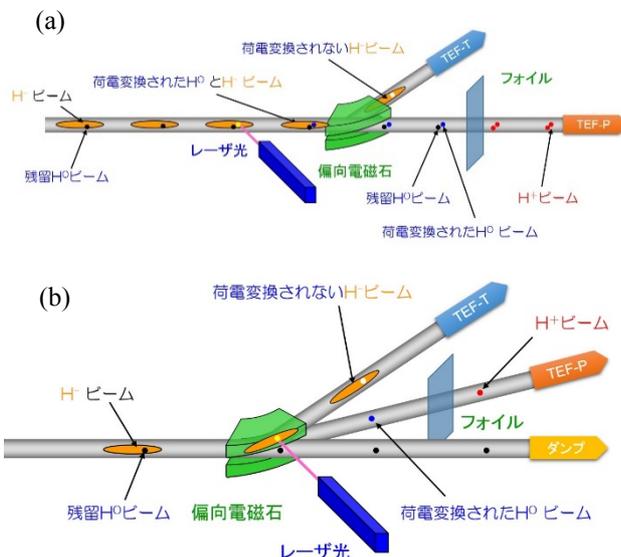


Figure 2: Conceptual diagram of Laser charge exchange method. For (a), the laser light is injected in the straight section of the H^- beam line. On the other hand, for (b), the laser light is injected in the bending section of the magnet.

よって、 H_0 の第 1 電子を剥ぎ取るため(ストリッピング)、 H_0 ビームを荷電変換箔、すなわち数百 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の金属箔に入射させ、 H^+ ビームに荷電変換する。この時、荷電変換箔に入射する H_0 ビームの電流は H^+ ビームとほぼ等しく、僅か数 W であるため、荷電変換箔におけるビームの散乱は問題とならない。さらに、何かしらの要因で大電流ビームが荷電変換箔に入射してもそれが溶融し、大電流ビームが TEF-P に入射することを未然に防ぐことが可能となる。

ところで、レーザー光を H^- ビームに照射しなくても、 H^- ビームが真空中の残留ガスとの相互作用により、 H_0 ビームに荷電変換され、TEF-P に入射する。この成分はバックグラウンドになり得るため、極力取り除く必要がある。TEF-P へのビーム輸送ラインは、偏向電磁石による曲線部分とそれ以外の直線部分から成り立っているが、直線部分にレーザー荷電変換部を設置することは望ましくない。すなわち、残留ガスとの相互作用で中性化された H_0 は、

レーザーで中性化された H_0 と区別されず、TEF-P に輸送される。このため、レーザー荷電変換部を偏向電磁石内に設置する (Fig. 2(b)参照)。この方法によって、偏向電磁石より上流の直線部で残留ガスとの相互作用で生じた H_0 は偏向電磁石内を直進することになり、TEF-P へ輸送されるレーザー荷電変換された H_0 ビームのバックグラウンド成分が減少することになる。

3. レーザ荷電変換試験

3.1 試験体系

J-PARC では、レーザー荷電変換試験、ビームスクレーパーへの照射試験[5]、及びビームコンポーネントのビーム試験等を行うため、3MeV リニアックを設置した。3MeV リニアックは、負水素イオン源、低エネルギービーム輸送系 (Low Energy Beam Transport)、高周波四重極型リニアック (RFQ)、RFQ 下流の MEBT (Medium Energy Beam Transport)、及び、ビームダンプで構成される。これらの機器の仕様及び配置については、文献[5]を参照のこと。

ところで、 H^- イオンの第 2 電子をレーザー光で引き離す荷電変換断面積は波長約 900nm で最大になるため、基本波長 1,064nm の Nd:YAG レーザを使用すると効率的に荷電変換を行うことができる (Fig. 3)。このレーザーを用いて、エネルギー400MeV の H^- ビームを荷電変換する場合、ローレンツ収縮による影響を考慮しても荷電変換断面積は基本波長 1,064nm の場合とほぼ同じである。従って、3MeV リニアックでレーザー荷電変換試験を実施することは、TEF-P のためのレーザー荷電変換効率などを実験的に予想することが可能である。

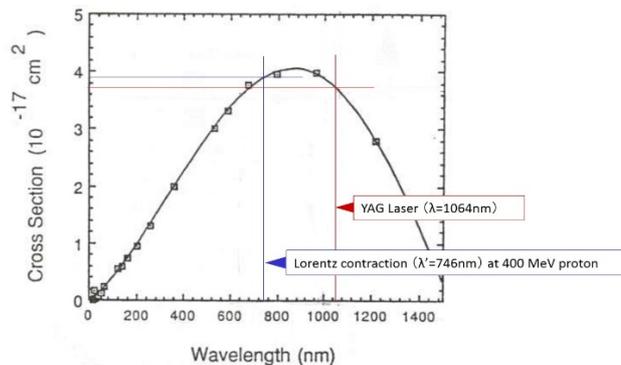


Figure 3: Cross section for H^- photoneutralization as a function of photon wavelength [6].

レーザー荷電変換試験では大出力レーザーを使用するため、レーザー光路を遮光ボックスや遮光パイプで覆い、レーザー光が漏れない構造とした。万一、これらの遮光物からレーザー光が漏れた場合、人的な障害を防止するため、アルミ樹脂複合板(厚さ 3mm)を用いてレーザー使用室を設置し、レーザー使用室の外部にレーザー光が漏れないような構造とした。また、レーザー使用室内をレーザー管理区域に設定するとともに、レーザー運転時やリニアック運転

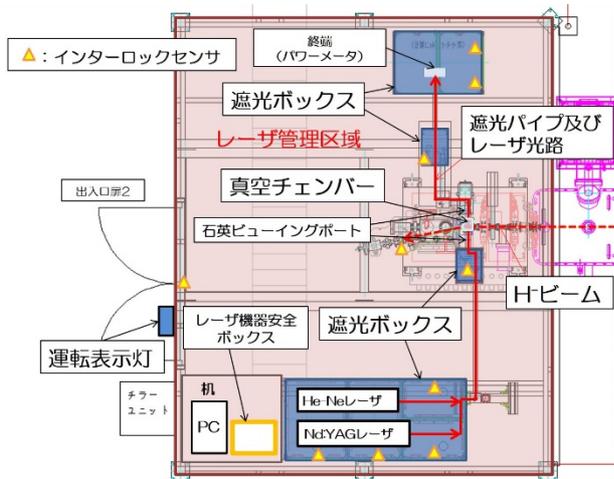


Figure 4: Layout of the laser use room.

時などに人員を保護するインターロックシステムを構築した[7]. Fig. 4 にレーザー使用室内の機器配置及びインターロックシステムのインターロックセンサー等を示す。また、Fig. 5 はレーザー荷電変換部の機器配置を示す。

陽子ビームラインは、ステアリング電磁石を有する四重極電磁石 3 台、偏向電磁石、ビーム位置モニター、ビーム電流モニター、及びビームダンプで構成される。偏向電磁石の磁極間に、H⁻ビームとレーザー光が衝突するチタン製真空チェンバーを設置した。特に、真空チェンバーには高出力レーザー光が入射する石英ビューイングポート(超高真空窓、窓有効径 ϕ 35.6mm、ガラス厚 3.2mm、Nd:YAG レーザ損傷閾値 10J/cm²)を設けた。

除振台上の遮光ボックス内に市販の高出力 Nd:YAG レーザ(Continuum 製、Powerlite DLS 9025)を設置し、そのレーザー光(波長 1,064nm、繰り返し 25Hz、定格出力 1.6J/pulse)を石英ビューイングポートから入射させる。入射したレーザー光は H⁻ビームと衝突したあと、再び石英ビューイングポートを透過し、除振台上の遮光ボックスへ輸送される。この遮光ボックスには、Nd:YAG レーザ光の状態を計測する三種類の機器が置かれている。すなわ

ち、レーザー光の出力を測定するパワーメーター(Gentec-EO 製、UP55N-50S-VR)、レーザー光のプロファイルと位置を測定するプロファイラー(Gentec 製、Beamage 4M)、及びレーザー光の時間構造を測定するパイプナ光電管(浜松フォトニクス製、R12290U-51)である。なお、パワーメーターには高出力レーザー光の吸収を兼ねている。

Nd:YAG レーザから衝突点までの光路長は 425cm で、レーザー光を反射する平面ミラーは 10 枚である。また、衝突点からパワーメーターまでの光路長は 316cm で、平面ミラーは 5 枚である。H⁻ビームの出力を安定に保つため、衝突点における Nd:YAG レーザ光の位置を一定に保つ必要がある。このため、Nd:YAG レーザ光のガイド光として、市販の He-Ne レーザ(LASOS 製)からのレーザー光(波長 632.8nm、連続波、定格出力 20mW)を用いた。両者の光軸は石英ビューイングポート上で ± 1 mm 以内で一致するように調整した。石英ビューイングポートを透過する He-Ne レーザ光の位置は、真空チェンバーの上流側及び下流側に設置したカメラで計測し、コンピュータを用いて He-Ne レーザ近傍に設置した平面ミラーをピコモーターで微動させ、その位置が一定になるように制御した。

石英ビューイングポートに入射する He-Ne レーザ光の垂直方向(H⁻ビームの垂直方向)の位置は、事前に四重極電磁石の中心と一致するように調整した。同じく、He-Ne レーザ光の水平方向(H⁻ビームの進行方向)の位置は、偏向電磁石の磁極中心となるように調整した。

ところで、RFQ で加速された H⁻ビームは偏向電磁石で曲げられ、23 度ビームライン最下流の 23 度ビームダンプで停止する。Nd:YAG レーザ光は偏向電磁石の磁極中心に入射するため、荷電変換した H₀ ビームは、11 度ビームラインに輸送され、荷電変換foil(コバルトベースの金属箔、ハーバーfoil)によって H⁺ビームに変換される。その後、ビーム位置モニター(BPM)、SCT(slow current transformer)を通過した後、ビームダンプを兼ねたファラデーカップ(FC、「11 度ビームダンプ」と記す)で停止する。

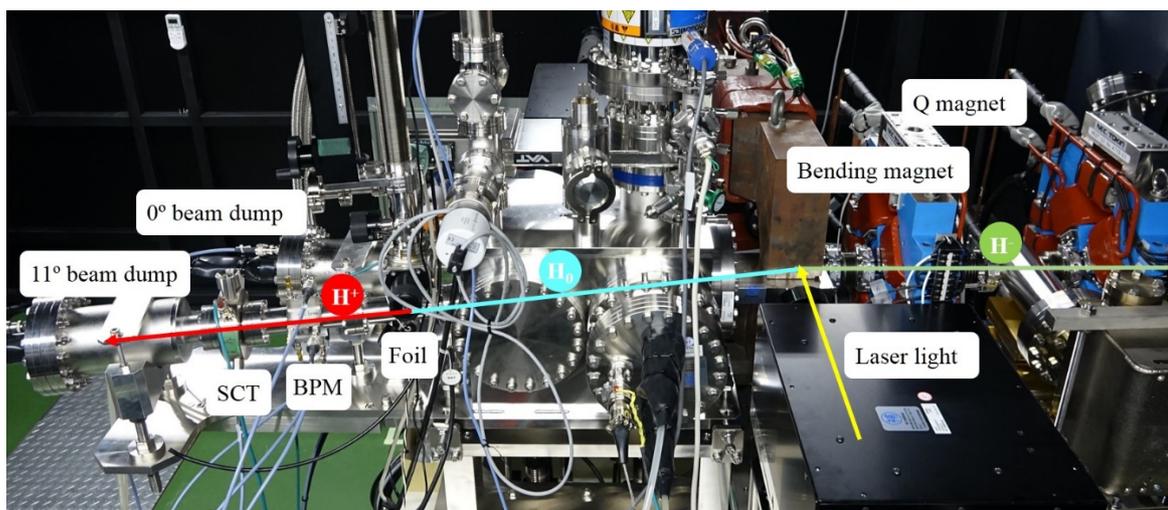


Figure 5: Photograph of the laser charge exchange system at the 3MeV linac.

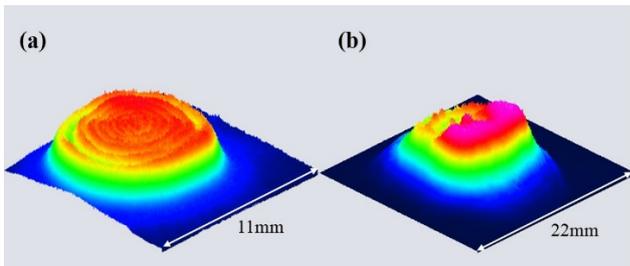


Figure 6: Three-dimensional profile of the Nd:YAG laser light at (a) the exit of the laser main body and (b) the termination point.

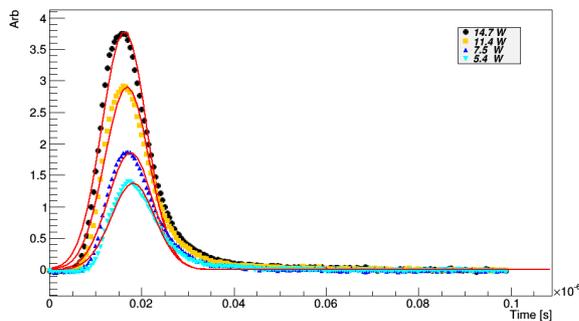


Figure 7: Time structure of the Nd:YAG laser light as a function of the laser power.

3.2 試験方法

2016年6月末に、荷電変換された H^+ ビームの強度を調べることを目的としたレーザー荷電変換試験を実施した。この試験では、ピーク電流 30mA、マクロパルス幅 50 μ s、繰り返し数 25Hz の H^- ビームをRFQからMEBTへ輸送した。まず始めに、偏向電磁石を励磁せず、 H^- ビームの位置をビーム位置モニターで測定し、ビームライン中心となるようにステアリング電磁石を調整した。次に、Q-scanによってビームサイズを測定するため、四重極電磁石の磁場強度を変化させながら、四重極電磁石の下流に設置した邪魔板を垂直方向に移動させ、0度ビームダンプの電流を測定した。その結果、Nd:YAGレーザー光との衝突点における H^- ビームのプロファイルは約2.8mm(σ_v)であった。

次に、偏向電磁石を励磁し、 H^- ビームを23度ビームダンプに入射させた後、 H^- ビームとNd:YAGレーザーを衝突させた。この時、 H^+ ビームが11度ビームラインにあるBPMの中心を通過するように、偏向電磁石の磁場強度を微調整し、 H^- ビームの曲げ角を決定した。そして、SCT及びFCなどのビーム電流モニターを用いて H^+ ビームの電流量を求めた。

ところで、プロファイラーによって測定されたNd:YAGレーザー光のプロファイルを図6に示す。図より、Nd:YAGレーザー本体の出口では直径9mm(FWHM)、終端では直径15mm(FWHM)となった。Nd:YAGレーザー光の広がりが光路長に比例すると仮定すると、 H^- ビームとの衝突点におけるNd:YAGレーザー光の直径は12mm

(FWHM)となる。従って、 H^- ビームの垂直方向で見ると、広いレーザー光に細い H^- ビームが衝突している。また、石英ビューイングポートを保護するため、Nd:YAGレーザー光の出力を定格出力の半分(0.8J/pulse)とした。この出力のNd:YAGレーザー光が石英ビューイングポートへ入射する単位面積当たりのエネルギーは0.71J/cm²となり、Nd:YAGレーザー損傷閾値10J/cm²よりも低い。さらに、Nd:YAGレーザー光は、終端までの間、平面ミラー15枚で反射され、石英ビューイングポート2枚を透過するため、レーザー出力は徐々に減衰し、終端におけるレーザー出力は14.7Wとなり、全体の透過率は74%となった。

Fig. 7は、Nd:YAGレーザー光の出力を変化させた時のNd:YAGレーザー光の時間構造を示す。図中のレーザー出力は終端における値を示す。これより、レーザー出力14.7WにおけるNd:YAGレーザー光の時間的なプロファイルは1 σ が約4.8ns(FWHM=11.3ns)となり、また、プロファイルはレーザー出力に余り依存しなかった。

今まで述べたプロファイルなどの衝突条件で、 H^- ビームの1マイクロバッチが H^+ ビームにレーザー荷電変換した場合、TEF-Pに1.5W相当の H^+ ビームが取り出せると予想される。また、 H^- ビームは周波数324MHzの高周波で加速されるため、マイクロバッチの間隔は3.09nsであり、Nd:YAGレーザー光1パルスの時間幅がFWHMで11.3nsであるから、Nd:YAGレーザー光1パルスが H^- ビームのマイクロバッチ4.98個と重なる。従って、ビーム横方向の効率を100%と仮定した場合7.5W相当の取り出しが可能となる。

3.3 試験結果(速報)

Fig. 8に23度ビームダンプで測定された H^- ビームの電流波形(青色)を示す。青色の波形は1マクロパルスを表しているが、中央の急激な立ち上がり立ち下り部分はレーザー荷電変換によって欠落した H^- ビームである。この欠落は、Nd:YAGレーザー光のファーストショットから観測され、 H^- ビームとNd:YAGレーザー光が衝突していることが確認された。Fig. 9は、バイプラナ光電管で測定されたレーザー光とSCTで測定された H^+ ビームの波形を示す。図より、レーザー光に起因して H^+ ビームが取り出され、図中赤枠内の電流量を積分すると、 H^+ ビームの出力は0.026Wとなった。この値はTEF-Tのビーム条件に換算すると約5Wとなり、要求出力(最大10W)を概ね満足する結果となった。

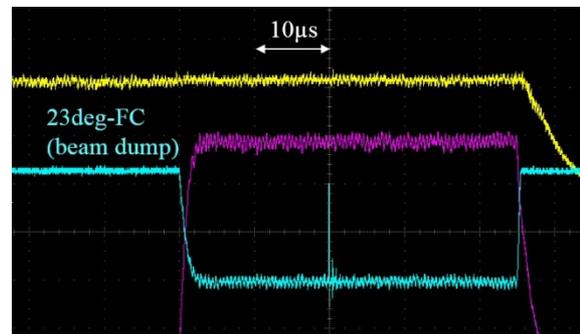


Figure 8: Current waveform of H^- beam observed at the 23 degree beam dump.

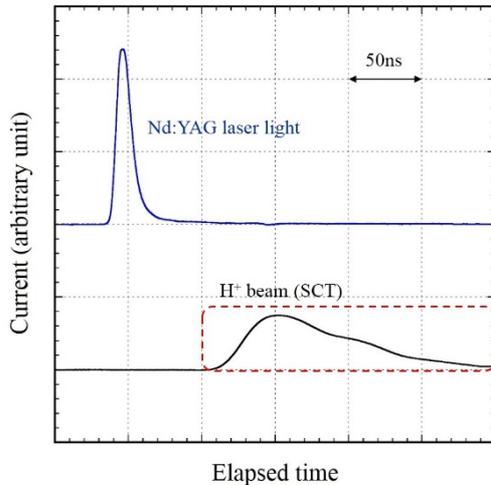


Figure 9: Waveform of the Nd:YAG laser pulse and the H⁺ beam observed at the SCT of the 23rd beam line.

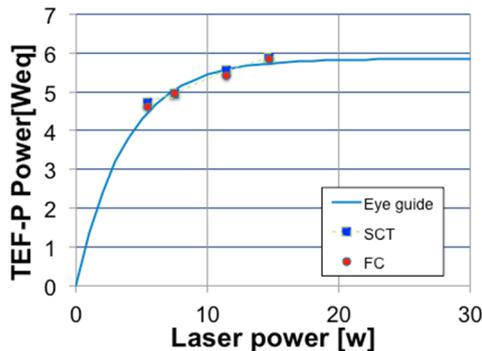


Figure 10: H⁺ beam power as a function of the Nd:YAG laser power.

Fig. 10 は、SCT 及び FC で測定された、TEF-T のビーム条件に換算した H⁺ビームの出力と Nd:YAG レーザ光の出力の関係を表したものである。SCTとFCで測定された H⁺ビームの出力はほぼ一致しており、現有の Nd:YAG レーザシステムを用いて、レーザ出力を 5W まで低くしても、5W 相当の H⁺ビームは得られる見込みである。

4. まとめ

大強度 H⁻ビーム(400MeV, 250kW)から微弱の H⁺ビーム(最大 10W)をレーザ荷電変換によって取り出すため、J-PARC 3MeV リニアックを用いて、H⁺ビーム強度などを測定するレーザ荷電変換試験を実施した。その結果、取り出された H⁺ビームの強度は TEF-T のビーム条件に換算すると約 5W となり、要求出力(最大 10W)を概ね満足する結果となった。

今回の試験では、取り出された H⁺ビームの強度に着目したが、今後、H⁻ビーム及びレーザ光の特性をさらに確認するとともに、H⁺ビームの長時間の安定性について

試験する予定である。

参考文献

- [1] K. Tsujimoto *et al.*, “Feasibility of Lead-Bismuth-Cooled Accelerator-Driven System for Minor-Actinide Transmutation”, Nucl. Tech. **161**, 315 (2008).
- [2] T. Sasa *et al.*, “Conceptual Study of Transmutation Experimental Facility (2) Study on ADS Target Test Facility”, JAERI-Tech 2005-021 (2005).
- [3] H. Oigawa *et al.*, “Conceptual Design of Transmutation Experimental Facility”, Proc. Global2001, Paris, France (CD-ROM, 2001).
- [4] S. Meigo *et al.*, “YAG レーザを用いた H⁻ビーム取出し法の概念検討”, JAERI-Tech 2002-095.
- [5] K. Hirano *et al.*, “J-PARC 3 MeV リニアックを用いたビームスクレーパの開発”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016.
- [6] John T. Broad and William P. Reinhardt, “One- and two-electron photoejection from H⁻: A multichannel J-matrix calculation”, Phys. Rev. A **14**, 2146 (1976).
- [7] Y. Sawabe *et al.*, “J-PARC 3 MeV リニアック用制御システム開発”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016.