

核変換特性試験用の陽子ビーム制御の技術開発



武井 早憲
Takei Hayanori

1 はじめに

原子力発電所の使用済み燃料には、燃え残ったウランや新たな燃料となるプルトニウムの他に、核分裂反応や中性子吸収により生成した放射性物質が含まれている。これらの放射性物質の中には、人体に対する有害度や環境負荷が比較的大きい物質も存在している。これらを選択的に分離し、その物質の特性に応じて処理・処分できれば、使用済み燃料からの環境負荷を大きく低減できる可能性がある。有害な元素を分離し、核反応により異なる核種に変換する技術を「分離変換技術」と呼んでいる¹⁾。

この技術の一環として、加速器と原子炉を組み合わせ、加速器からの高エネルギー陽子を鉛等のターゲットに照射し、発生した中性子による核分裂反応で連鎖的に核変換していくシステムを「加速器駆動核変換システム (Accelerator Driven nuclear transmutation System, ADS)」と呼んでいる¹⁾。ADSは、世界的に研究開発が進められている次世代の原子炉である。

(国研)日本原子力研究開発機構(理事長 児玉 敏雄, 以下、「原子力機構」)では、ADSによる分離変換技術の実現に向けて、大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) で基礎的な研究を行う核変換実験施設 (Transmutation Experimental Facility, TEF) を検討してきた。TEFは、図1に示すように、核変換物理実

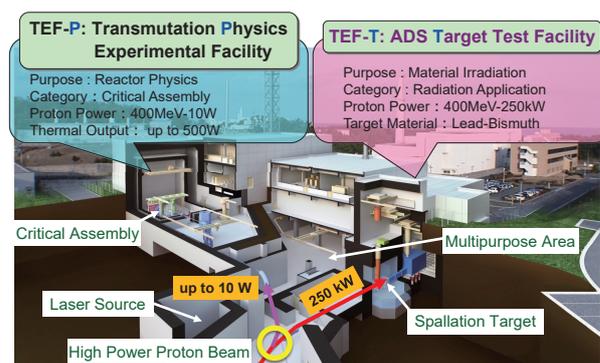


図1 核変換実験施設 (参考文献2の図1を転載)

黄色の丸印の場所で核変換特性試験用の微小出力陽子ビームを取り出す。
©Atomic Energy Society of Japan, reprinted by permission of Taylor & Francis Ltd, <http://www.tandfonline.com> on behalf of Atomic Energy Society of Japan.

験施設 (Transmutation Physics Experimental Facility, TEF-P)³⁾ 及び ADS ターゲット試験施設 (ADS Target Test Facility, TEF-T)⁴⁾ の2施設で構成されている。TEF-Tでは、ADSで大出力陽子ビームを受けるためのターゲット試験を行う。また、TEF-Pでは、実験用の小出力かつ未臨界の炉心に陽子ビームを導入し、核変換の対象となる放射性物質の核変換特性試験等を行う。

TEF-Tには、エネルギー400 MeV, 出力250 kWの陽子ビームを供給する。また、TEF-Pには、エネルギーは同じく400 MeVであるが、最大でも10 Wの陽子ビームを供給する。TEF-Pで行う核変換特性試験では、試験内容に応じ、ビームの出力や時間幅が数 ns から数十 μ s の範囲の多様な陽子ビームが必要

になる。そのために、J-PARCの特長である大出力の負水素イオン（1個の陽子の周りを2個の電子が回り、負の電荷を帯びた状態、 H^- ）ビームから最大でも2万5千分の1という極めて微小な出力の陽子（ H^+ ）ビームを安定して取り出さなければならぬ。

2 レーザー荷電変換技術による微小出力陽子ビームの取出し

実験に必要な陽子ビームの出力が大きく異なっている場合、通常は2台の独立した陽子加速器が必要になる。しかし、原子力機構では、J-PARCの陽子加速器からのビームを分岐することでこれらの試験を行うことにした。

通常の加速器施設では、大出力陽子ビームから電磁石や金属薄膜を用いて一部の陽子ビームを取り出している。しかしながら、この方法では時間幅の異なる陽子ビームを取り出せない。また、電磁石の異常や金属薄膜の変形等により想定以上の出力の陽子ビームが取り出されるおそれがあり、未臨界炉心を駆動するビームとしての安定性に課題がある。このため、安定して微小出力陽子ビームを取り出す方法を開発する必要があった。

この技術は、世界最高レベルの出力を誇るJ-PARCの H^- ビームから、多様な微小出力陽子ビームを安定して取り出す。例えて言うと、毎秒125Lの水の流れから2万5千分の1である毎秒スプーン1杯分、5 mLの水を正確にくみ取ることに相当する。そこで、 H^- ビームの形状等をレーザーで診断するレーザー荷電変換技術⁵⁾に着目した。このレーザー荷電変換は、 H^- イオンの第2電子が0.755 eVという低いエネルギーで中性水素（ H^0 ）に結合しているため、 H^- ビームに赤外線から可視光程度の波長を持つレーザー光を照射し、 H^- から第2電子のみを剥ぎ取り、荷電状態を変換する技術である。一方、 H^0 の場合、第1電子の結合エネルギーは2.3 eVと第2電子と比較して高いため、この波長域のレーザー光では第1電子を剥ぎ取れず、電磁石で制御しながらビームを輸送できない。そこで、 H^- ビームから H^0 ビームに変換後、更に荷電変換フォイル、すなわち数百 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の金属薄膜に H^0 ビームを入射させて第1電子を剥ぎ取って H^+ ビームに変換し、

未臨界炉心へと導くことにした。

また、微小出力陽子ビームを取り出すもう1つの課題は、真空のビーム輸送パイプ内等にごくわずかに残ったガスと H^- ビームが衝突し、弱く結合している電子が剥ぎ取られ生成する H^0 のバックグラウンドを除去することである。著者らの研究グループは、バックグラウンドを除去しながら所定の出力の H^+ ビームを取り出すため、電磁石内で H^- ビームと高出力レーザー光を衝突させる独自のアイデア⁶⁾に基づくレーザー荷電変換システムを開発した。

図2 (A) にレーザー荷電変換システムの模式図を示す。陽子加速器で加速された H^- ビームは電磁石で軌道を曲げられ、TEF-Tに供給される。電磁石で曲げられる途中の H^- ビームにレーザー光を照射すると、 H^0 ビームが生成する。 H^0 ビームは磁場で曲げられず直進し、そのまま荷電変換フォイルへ輸送され、 H^+ ビームに変換、TEF-Pに供給される。この時、荷電変換フォイルに入射する H^0 ビームの電流は H^+ ビームとほぼ等しく、わずかに数Wなので、荷電変換フォイルにおけるビームの散乱は問題にならず、機器等の放射化が避けられる。更に、何かしらの要因で大電流ビームが荷電変換フォイルに入射してもそれが熔融し、大出力 H^- ビームがTEF-Pに供給されることを未然に防ぐ。

一方、わずかに残ったガスと衝突して生成した H^0 （図中の混在 H^0 ビーム）は、磁場で曲げられず直進してビームダンプに向かうため、取り除かれ、TEF-Pには供給されない。仮に、図2 (B) に示したように、レーザー光を直線部分で H^- ビームに照射した場合、混在 H^0 ビームはレーザーで中性化された H^0 ビームと区別できず、 H^+ ビームのバックグラウンド成分が増加する。

3 レーザー荷電変換試験

今回、新たに構築したビームエネルギー3 MeVの陽子リニアック⁷⁾を用いて、レーザー荷電変換試験を実施した。3 MeV陽子リニアックは、負水素イオン源、低エネルギービーム輸送系（Low Energy Beam Transport, LEBT）、高周波四重極型リニアック（RFQ）、RFQ下流の中エネルギービーム輸送系（Medium Energy Beam Transport, MEBT）、及び、ビームダンプから構成されている。図3は3 MeV陽子

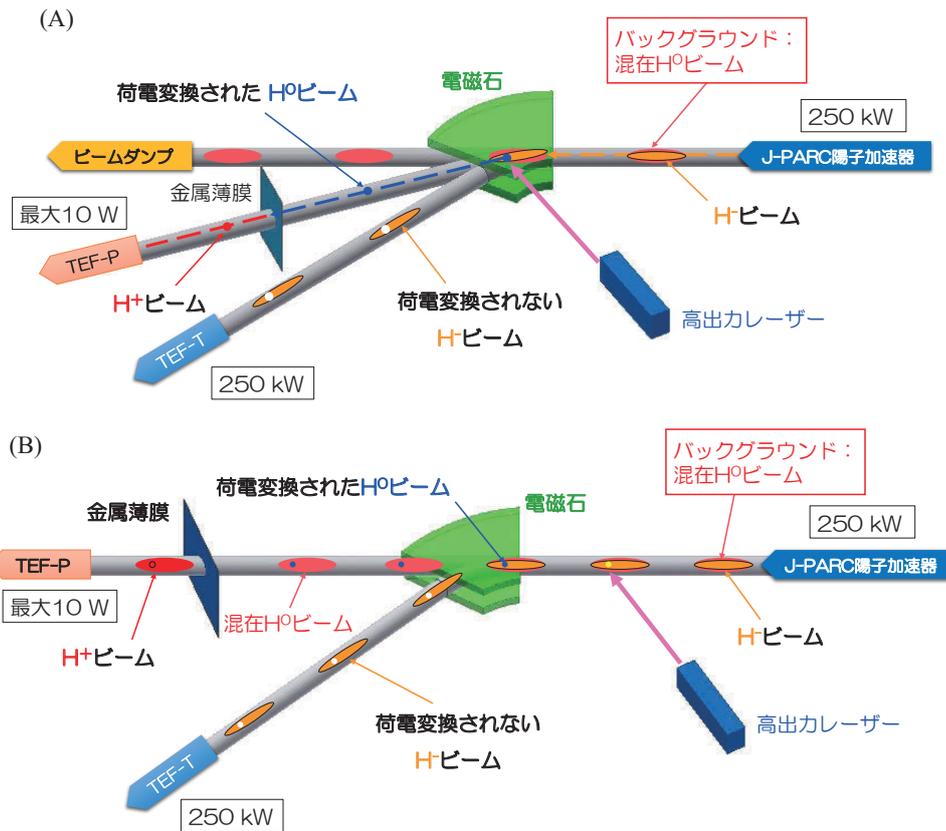


図2 レーザー荷電変換システムの模式図（参考文献2の図2を転載）

(A)は電磁石中でレーザー光を H^- ビームに照射した場合、(B)は直線部分でレーザー光を H^- ビームに照射した場合を示す。©Atomic Energy Society of Japan, reprinted by permission of Taylor & Francis Ltd, <http://www.tandfonline.com> on behalf of Atomic Energy Society of Japan.

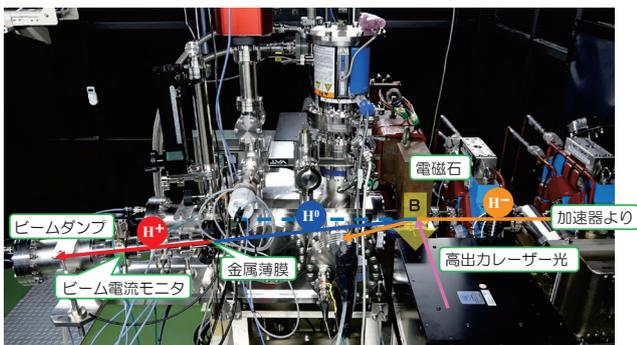


図3 新たに構築したレーザー荷電変換システム（参考文献9の図5を転載）

3 MeV 陽子リニアックの下流に高出力レーザーと照射位置の変動が極めて小さいレーザー光輸送系を設置し、電磁石中で H^- ビーム（橙色）にレーザー光（桃色）を照射する

リニアックの下流に設置したレーザー荷電変換システムである。

レーザー荷電変換試験では、RFQからピーク電流30 mA、マクロパルス幅50 μ s、繰り返し数5 Hz又は25 Hzの H^- ビームをMEBTへ輸送し、電磁石

で曲げられながら、波長1,064 nmの高出力レーザー光と衝突させた。レーザー光と衝突しない H^- ビームは、偏向角が23度のビームラインにあるビームダンプで停止する。レーザー光で荷電変換された H^0 ビームは偏向角が11.5度のビームラインに輸送され、荷電変換フォイルで H^+ ビームに変換、ビームダンプで停止する。

ところで、 H^- イオンの第2電子をレーザー光で剥ぎ取る荷電変換断面積は波長約900 nmで最大になる⁸⁾。このため、レーザー荷電変換試験では、この波長に近く、レーザーや光学部品の汎用性が高い波長1,064 nmのレーザー光を用いた。また、安定した H^+ ビームを取り出すために、半径が約2 mm (1σ)の H^- ビームと半径が約3 mm (1σ)のレーザー光を衝突させ、衝突点におけるレーザー光の位置を高い精度 ($\pm 50 \mu$ m) で制御するシステムも構築した。更に、レーザー荷電変換試験では、時間幅の異なる H^+ ビームを取り出すため、2種類のレーザー

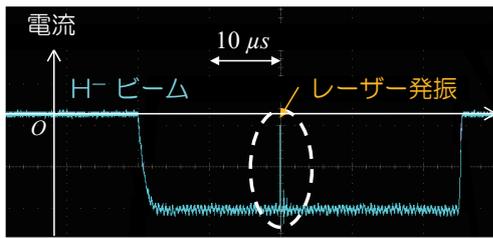


図4 レーザーにより欠損したH⁻ビームの波形(参考文献9の図9を転載)

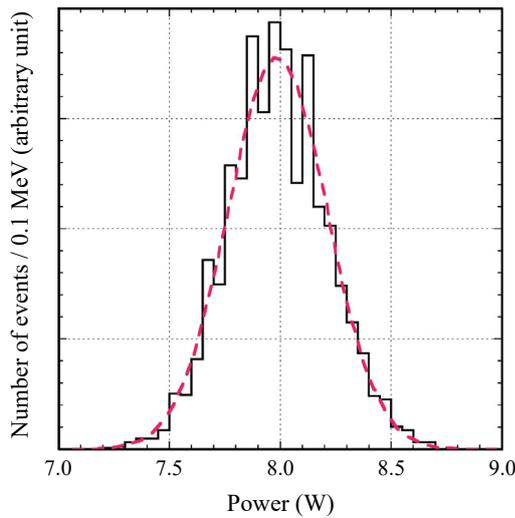


図5 取り出したH⁺ビームの出力分布(参考文献9の図11を転載)

図中のビーム出力は、J-PARCのH⁻ビーム条件(400 MeV, 250 kW)に換算した場合のH⁺ビーム出力である

(高出力パルス発振レーザーと高出力連続発振レーザー)を使用した。

まず、時間幅が短い(数 ns) H⁺ビームを取り出すため、高出力パルス発振レーザー(25.6 W, 1 J/pulse, 25 Hz)を用いた実験を実施した⁹⁾。この試験の目標は、核変換特性試験の要求より取り出したH⁺ビーム出力が5~10 W相当、出力変動が5%以下とした。更に、J-PARCの運転スケジュールとの整合を図るため、取出し時間を7日(延べ56時間)以上とした。図4は、試験中、偏向角23度のビームダンプで測定されたH⁻ビームの電流波形(水色)を表す。H⁻ビームにレーザー光を照射すると、生成したH⁰が磁場中を直進するため、H⁻ビームの電流がゼロになり、図中央の破線で囲まれた部分に示したように、欠損する。図5は、取り出したH⁺ビームの出力分布を表している。図中のビーム出力は、J-PARCのH⁻ビーム条件(400 MeV, 250 kW)に

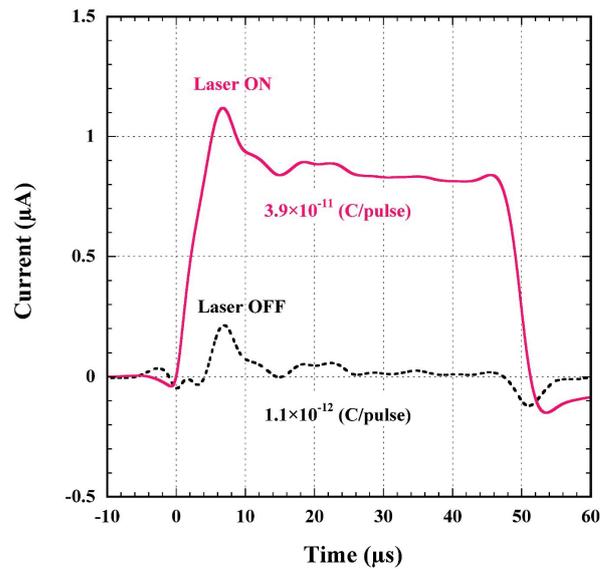


図6 偏向角11.5度のビームダンプで測定された信号波形(参考文献2の図14を転載)

赤色の線と黒色の点線は、各々高出力連続発振レーザーを発振した場合としない場合の信号波形を表す。©Atomic Energy Society of Japan, reprinted by permission of Taylor & Francis Ltd, <http://www.tandfonline.com> on behalf of Atomic Energy Society of Japan.

換算した場合のビーム出力であり、ビーム出力変動は2.8%となった。したがって、高出力パルス発振レーザーを用いた結果、ビーム出力変動を2.8%に抑えながら、約8 W相当の時間幅が短いH⁺ビームを約8日間(延べ65.5時間)にわたり取り出すことができ、目標をクリアした。

次に、時間幅が長い(数十 μs) H⁺ビームを取り出すため、高出力パルス発振レーザーを高出力連続発振レーザー(出力196 W)に置き換えて実験を実施した²⁾。この試験の目標は、核変換特性試験の要求より取り出したH⁺ビーム出力が1 W相当以下とした。図6は、レーザーを発振した場合と発振しなかった場合における、偏向角11.5度のビームダンプで測定された信号波形を表している。図中の2つの波形の差が取り出されたH⁺ビームの出力となり、入射するH⁻ビーム出力の約36万分の1となった。この値はJ-PARCの出力250 kWのH⁻ビームから約0.7 WのH⁺ビームを取り出すことに相当する。したがって、高出力連続発振レーザーを用いた結果、約0.7 W相当の時間幅が約50 μsのH⁺ビームを取り出すことができ、目標をクリアした。

また、取り出されたこれらのビームの出力が理論的な予測値と一致することを確認した。すなわち、

理論どおりに H^+ ビームを取り出せたことから、所定の出力と時間構造を有する H^+ ビームの取り出す技術を確認した。

4 将来の展望

この技術により、J-PARC を活用して ADS の研究開発を推進するための1つのマイルストーンを達成した。

この技術は、今後、極短パルス陽子ビームや低出力長パルス陽子ビーム等、多様なニーズへの対応が必要となる加速器ビーム利用技術の発展に繋がると期待している。

謝辞

本研究は原子力機構 J-PARC センターの多くの方々に御協力を賜りました。ここに謝意を表します。特に、核変換ディビジョンの前川藤夫氏、明午

伸一郎氏、佐々敏信氏、堤和昌氏に深謝いたします。

本研究は文部科学省核変換技術研究開発補助事業によって得られた成果であり、その支援に感謝いたします。

参考文献

- 1) 大井川 宏之, *RADIOISOTOPES*, **61**, 571-586 (2012)
- 2) Takei, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **58**, 588-603 (2021)
- 3) Partitioning and Transmutation Technology Division, JAEA-Technology 2017-033 (2017)
- 4) Nuclear Transmutation Division, JAEA-Technology 2017-003 (2017)
- 5) Connolly, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **312**, 415-419 (1992)
- 6) Meigo, *et al.*, JAERI-Tech 2002-095 (2002)
- 7) Kondo, *et al.*, *Proc. LINAC2016*, 298-300 (2016)
- 8) Broad, *et al.*, *Phys. Rev. A*, **14**, 2159-2173 (1976)
- 9) Takei, *et al.*, *Plasma Fusion Res.*, 2406012 (2018)

((国研)日本原子力研究開発機構 J-PARC センター)