

# Ozaki Exchange Program 2025 報告書

大阪大学 核物理研究センター

松井 昇大朗

smatsui@rcnp.osaka-u.ac.jp

2025年(令和7年)11月25日

## 1 はじめに

Ozaki Exchange Program は、日米科学技術協力事業の一環として実施されている、大学院生を対象とした若手人材交流プログラムである。米国エネルギー省 (DOE) 傘下の研究所と日本の大学・研究機関の間で大学院生を相互に派遣することで、国際的な視野を持ちながら先端研究に携わる機会を提供している。

本報告書では、同プログラムを通じて 2025 年 6 月 25 日から 9 月 19 日まで米国ブルックヘブン国立研究所 (Brookhaven National Laboratory, BNL) に滞在し、研究活動に参加した経験について述べる。

筆者の博士研究テーマはガスターゲット型レーザーイオン源の開発であるが、所属研究室にはレーザーイオン源に関する見識や、加速器でレーザーを運用・応用するための十分な知見が蓄積されていない。そのため、レーザーを用いた研究や加速器応用について、実際の現場で学びたいと考えていた。

BNL では、固体ターゲットを用いたレーザーイオン源を実機として運用しており、さらに Direct Plasma Injection Scheme (DPIS) など新たなレーザーイオン源の研究開発も進められている。これらは筆者の研究テーマとも関連が深く、BNL の実験環境は、研究理解を一層深めるうえで最適な場であった。また、BNL のレーザーイオン源グループの岡村昌宏氏と、筆者の指導教員である阪大 RCNP の依田哲彦氏とのつながりもあり、Ozaki Exchange Program を通じて同グループで研修を行う機会を得た。

## 2 研究内容

### 2.1 研究概要

BNL 滞在中は、レーザーを固体ターゲットに照射して生成される陽子プラズマの特性評価に取り組んだ。今回使用したチタン水素化物( $\text{TiH}_2$ )は水素を多く含むため、レーザー照射によって効率よく陽子が得られる材料として知られている。レーザーイオン源が持つ短パルス・高ピーク電流という特徴は、次世代の加速器開発や医療応用 (FLASH 照射

など)にもつながる要素であり、 $\text{TiH}_2$ を用いた陽子生成を実験的に評価することは、レーザーイオン源に関する理解を深めるうえで有益な経験となった。BNLには、固体ターゲット照射実験を実施するための設備と計測環境が整っており、実際に装置を動かしながらイオン生成の挙動を理解することができた。これらの実践的な作業を通じて、研究テーマへの理解は大きく深まった。

### 2.2 実験装置と計測手法

実験は、垂直配置型の真空チャンバー内で固体ターゲットにレーザーを照射し、生成されたプラズマを上部に配置した検出器で測定する構成で行った。実験装置の全体図を Fig.1 に示す。レーザーには Nd:YAG レーザーを使用し、照射条件を変えながら  $\text{TiH}_2$ ターゲットからの陽子生成を評価した。陽子数と時間構造の測定には Faraday Cup (FC) を用い、さらに Electrostatic Ion Analyzer (EIA) と Secondary Electron Multiplier (SEM) を組み合わせてプラズマのエネルギー分布を確認した。これらの装置により、陽子の生成量や照射の繰り返しによるプラズマ挙動の変化を把握することができた。

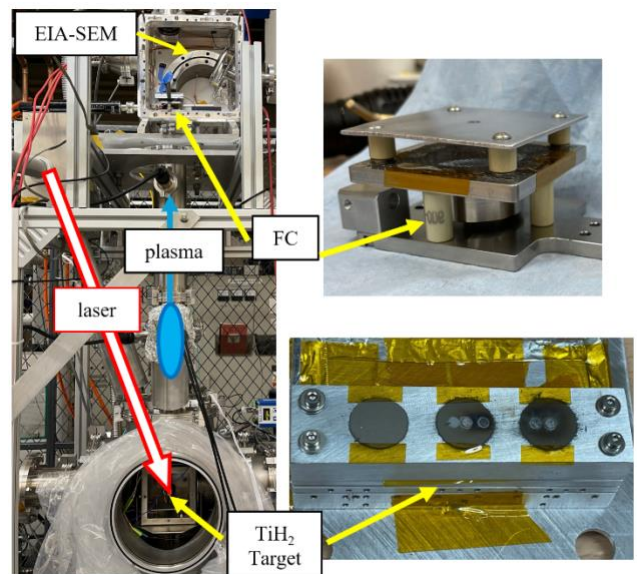


Fig.1 本実験で使用したレーザー照射部とプラズマ分析ラインの構成。 $\text{TiH}_2$ ターゲットで生成されたプラズマは上方の FC および EIA-SEM により時間構造とエネルギー分布を測定した。

### 2.3 実験の取り組みと工夫

BNL での実験中では、計測系の調整や装置の安定化に加え、測定作業の効率化にも取り組んだ。今回の実験では、 $\text{TiH}_2$  に対して数百~千ショットのレーザー照射を繰り返す必要があるため、照射のたびに Q スイッチ信号のトリガー同期やオシロスコープ波形の確認を手動で繰り返す必要があった。これは作業負担が大きく、レーザーの繰り返し照射による熱的影響もあるため、データ取得の再現性にも影響が生じる恐れがあった。

そこで、Python と EPICS を用いて、レーザーの発振制御や EIA の電圧設定、トリガー管理などの操作を半自動化し、簡単な GUI を作成して運用した。これにより、測定条件の切り替えや連続照射時の操作が簡単になり、安定したデータ取得が可能になった。また、EIA-SEM 系では、高電圧印加により放電が発生しやすかったため、SEM の動作チェック、ケーブル配置の見直し、スリット位置の調整などの対策を行って安定動作を図った。さらに FC についても、電子成分の混入を抑えるためのメッシュ調整を繰り返し、より安定した信号取得を目指した。こうした一連の作業を通して、装置ごとの特性を理解しながら改良を進めることができ、レーザーイオン源の実験運用に関する実践的な知見を得る貴重な経験となった。

### 2.4 結果の概要

$\text{TiH}_2$  ターゲットを用いたレーザー照射実験では、FC および EIA-SEM を用いて、プラズマのエネルギー分布、電荷状態、電荷量の評価を行った。FC の測定では、レーザー照射のトリガー信号を基準とした TOF (Time-of-Flight) 解析により、イオンの到達時間から運動エネルギー分布を求めるとともに、アパーチャーで切り出された領域におけるイオン数を推定することができた。また、繰り返し照射を行うことで、陽子ピークの振幅や時間幅が徐々に変化していく様子も確認された。

Fig.2 に、ピーク強度がおおよそ  $10^9$  [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ] の条件下で取得した FC 信号の例として、照射 50, 100, 500, 1000 回目の波形を示す。いずれのケースでも、最初に水素に対応するピークが現れ、その後チタン由来の成分が続く典型的な時間構造が得られた。照射回数が増えるにつれて陽子ピークの減少や、パルス幅の広がりが見られたものの、全体としては安定した陽子生成が維持されていることが分かった。

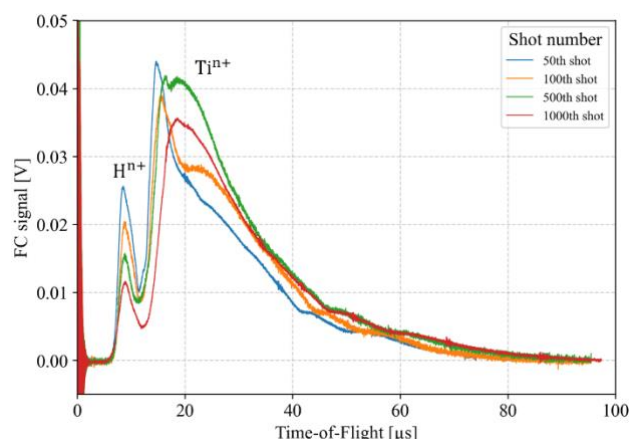


Fig.2 Faraday Cup (FC) による TOF 信号の例

EIA-SEM の測定例を Fig.3 に示す (例として、照射 500 回の状態で 20 ショット分のエネルギー分布を取得)。ここでは、水素イオンに対応する成分に加え、1~4 価のチタンイオンが観測され、固体ターゲット由来の複数価数のイオンが生成されていることが確認できた。また、陽子ピークの時間幅やパルス形状にも変化が見られ、照射条件やターゲットの状態に応じてプラズマの時間発展が変動する様子も把握できた。

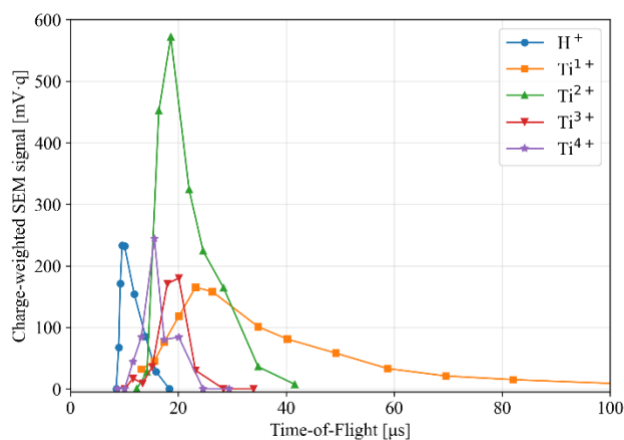


Fig.3 EIA-SEM によるイオンエネルギー分布の例

これらの結果から、 $\text{TiH}_2$  ターゲットを用いたレーザーイオン源における陽子生成の基本的特性と、その照射条件依存性を把握することができた。特に、陽子プラズマの空間分布を一樣と仮定し、実際に実現可能な範囲で幾何学的スケールリングを行うと、ピーク電流が約 100 mA 程度となる条件では、周長 20 m 程度の陽子シンクロトロンに対してシングルターン入射が可能である。この場合、レーザー 1 ショットで陽子線治療に必要な線量を供給しうる電荷量に相当し、レーザーイオン源の医療応用 (特に FLASH 照射など) に向けた将来的な可能性を示している。

### 3 派遣中の生活

BNL 滞在中は、実験以外の時間にも、実際に稼働しているレーザーイオン源 (LION) の調整作業を見学する機会があった。急な作業が入った際にも声をかけていただき、実際の運用手順や設備の扱いを間近で見ることができたことは、研究設備の理解に大いに役立った。

また、夏季には、BNL でサマーインターンが開催され、アメリカ各地から多くの大学生が参加していた。レーザーイオン源グループにもカリフォルニアからのインターン生が在籍しており、席が近かったこともあって互いの研究や文化について多くの会話を交わした。食事や買い物、マンハッタンへの観光などに一緒に出かける機会もあり、日常の中でも多様な価値観に触れることができた。また、彼らのポスター発表会にも参加したが、国際会議さながらの活気と熱量があり、刺激を受ける場となった。

生活面では、BNL 周辺は典型的な車社会で、運転免許がないと移動手段が限られてしまう場面が多かった。今回滞在した研究所内のアパートは先払い制で、1ヶ月あたりの費用も高額であったため、クレジットカードの限度額には注意が必要であった。私は事前にデビットカードを準備し、必要に応じて円からドルへ両替して使用することで問題なく生活することができた。

そして、日々の食生活も印象的だった。アメリカの外食は量が多く、気が付けばほぼ毎日のようにハンバーガーを食べていた。最初のうちは食べるたびに具がこぼれてしまっていたが、滞在が終わる頃には「どんな厚さのハンバーガーでも具を落とさず、手を汚さずに食べられる」ようになった。これは、研究以外で得た数少ない「実践的スキル」だ。

### 4 まとめ

今回の研修は、私にとって初めての長期海外滞在であり、英語や生活環境への不安も大きかった。しかし、Ozaki Exchange Program という機会がなければ、そもそも挑戦することすらなかったと思う。実際に現地で生活し研究に携わる中で、海外で経験を積む重要性を強く実感した。学生向けの旅費支援制度も多く用意されており、学生のうちに積極的に海外経験を重ねることは、研究者として大きな財産になると感じた。

この研修を通して得られたのは、英語力といった個別の技能にとどまらず、未知の環境に身を置き、観察し、考え、行動するという「研究者としての姿勢」であった。研究は常に前例の少ない領域を扱うものであり、完璧な準備が整ってから取り組める場面は多くない。だからこそ、不安や迷いを抱えたままでも一歩を踏み出すことが、次の展開を切り開く大きなきっかけになる。

不安を理由に立ち止まるのではなく、それを抱えたまま現地に飛び込むことをぜひ勧めたい。実際にその場に身を置くことで得られる感覚や納得は、机上では決して得られない貴重な経験だからである。

海外での研究経験に関心はあるものの最初の一步をためらっている学生にとって、Ozaki Exchange Program は挑戦を後押しする有意義な機会となり得る。以上の経験を踏まえ、後輩学生にも参加を勧めたい。



約3か月間お世話になった 930 Building