

## 回転ドラム型液体金属ターゲットを用いたレーザーイオン源の検討

### STUDY OF A LASER ION SOURCE WITH A LIQUID METAL TARGET FORMED IN A ROTATING DRUM

高橋 一匡<sup>#</sup>, 渡邊 駆大, 石川 創士, 近藤 勇仁, 佐々木 徹, 菊池 崇志

Kazumasa Takahashi<sup>#</sup>, Kakeru Watanabe, Soshi Ishikawa, Yuto Kondo, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi

Nagaoka University of Technology

#### Abstract

In laser ion sources, a pulsed laser is irradiated onto a target to generate plasma through ablation. This method can generate high-density plasma, making it possible to generate a high-current ion beam. However, each laser irradiation leaves ablation damage on the target surface, so the target must be moved for each laser irradiation. As a result, the number of laser irradiations is limited by the target's surface area, making periodic target replacement unavoidable. To achieve continuous and highly reproducible plasma generation, we propose a laser ion source system in which a liquid metal film is formed on the inner wall of a rotating drum and this film is used as a laser target. This method allows the ablated area to self-repair, enabling continuous laser irradiation of the same area and continuous generation of a high-current ion beam. We constructed a laser ion source system with a liquid metal target in a rotating drum and plasma generation was performed using the liquid metal target. As a result of continuous operation with a laser frequency of 10 Hz, it was demonstrated that the plasma ion current remained stable for 30 min.

#### 1. はじめに

レーザーイオン源は、所望の元素を含む固体ターゲットへレーザーを照射し、生成されたアブレーションプラズマからイオンを引き出す方式のイオン源である。この手法は真空チャンバー、レーザー光学系、引き出し電極など比較的簡易な構成でありながら、高価数イオンや大電流イオンビームを得られることから、多様な応用分野で用いられている。近年では、素粒子物理実験で用いられる金イオンや、放射線生物学に必要な各種金属イオンの供給手段として活用されている[1]。さらに、プラズマ中のイオンを低エネルギービーム輸送系 (Low Energy Beam Transport, LEBT) を介さずに直接 RFQ 線形加速器へ入射するプラズマ直接入射法 (Direct Plasma Injection Scheme, DPIS) [2-6] を導入することで、より大電流の加速が可能となる。この技術は、粒子線治療用の炭素ビーム[7]や、リチウムビームと水素標的の逆運動学反応[8]を利用して指向性の高い中性子を発生させる加速器駆動中性子源のリチウムドライバーなどへの応用が検討されている[9-11]。

加速器の実運転でレーザーイオン源が利用されている代表例として、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) における金属イオンの生成が挙げられる。ここでは、アブレーションプラズマ生成のしきい値近傍までレーザー出力密度を抑えた方式を採用し、大電流の低価数イオンを発生させている。その後、RFQ 加速前に電子ビームイオン源 (EBIS) へ入射し、電子衝突によって高価数化を行っている。このようにレーザー出力密度を低く保つことで、ターゲット表面の損耗を最小限に抑え、同一箇所への長時間照射によっても再現性の高いプラズマ生成を長期間維持している[1]。

一方で、レーザーイオン源単体で高価数イオンを得た

い場合や、単一元素ターゲットと比べて目的とするイオン種の生成割合が低下する複数元素を含む合金・化合物ターゲットを用いる場合には、所望のイオン種を大電流で得るためにレーザー出力密度を増大させる必要がある。しかし、そのような状況ではターゲット損傷も増加し、照射ごとに新しい表面を用意する必要が生じる。この結果、照射可能回数はターゲット面積によって制約され、安定した長時間運転においてはターゲット寿命が重要な課題となる。

この課題を解決するため、近年では液体をターゲットとしたレーザーイオン源が研究されており、容器に入れた液体金属に対してレーザーを連続的に照射する実験では良好なプラズマの再現性が示されている[12, 13]。一方で、実際に液体金属をレーザーターゲットとしたレーザーイオン源では水平方向にプラズマを発生できる方式が望ましい。そこで、本研究では液体金属を回転するドラムにいれ、回転の遠心力によりドラム内壁に薄い膜の液体金属ターゲット形成を検討した。通常のレーザーイオン源ではあらゆる固体がターゲットになりうるが、液体金属をターゲットにする場合、利用可能な元素は比較的低融点の金属に限られる。例えば、ガリウム (30°C)、リチウム (180°C)、錫 (232°C)、鉛 (328°C)、ビスマス (271°C)、インジウム (157°C) などが挙げられる (カッコ内の数値は大気圧における融点)。あるいは合金を選択肢に含めると金錫 (Au-20Sn, 280°C) など単体では融点が高温度の金などの元素のイオンも供給可能である。

本研究ではビスマスを利用した液体金属ターゲットレーザーイオン源を製作した。また、液体金属表面に繰り返しレーザーを照射し、得られたプラズマのイオン電流を計測することでイオン電流波形の再現性を調べ、連続供給の可能性を検討した。

#### 2. 実験装置

Figure 1 に示すように、ドラムの内径は直径 84 mm と

<sup>#</sup> kazumasa@vos.nagaokaut.ac.jp

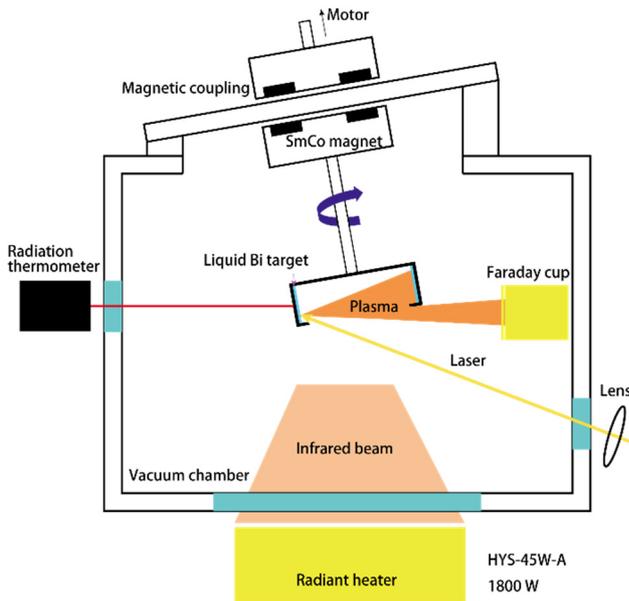


Figure 1: Schematic of experimental setup.

なっており、ドラム内に 10 g の液体ビスマスを投入した際に厚みが 1 mm になるように設計されている。このドラムを用いたときの回転速度に対する遠心力の関係が Fig. 2 に示されている。回転速度が 146 rpm のとき、径方向に対する加速度が重力と同じ 9.8 m/s<sup>2</sup> となり、これよりも回転速度が高く、遠心力が重力より十分大きくなると液体がドラム内壁に押し付けられてレーザーターゲットが形成できると期待される。ドラムの加熱には輻射ヒーターを用い、ドラムを 300 °C にすることで溶けたビスマスを利用した。液体金属の濡れ性の試験結果により、銅製のドラムを用いることでビスマスがドラム内壁に良好に付着することが示されたため、ドラムの材質は銅とした。

プラズマの生成には、パルス幅 5 ns の Nd:YAG レーザー(波長 1064 nm)を用い、エネルギー 77 mJ、スポットサイズ 1.5 mm × 3 mm でターゲットに照射した。照射時の真空度は 3 × 10<sup>-3</sup> Pa に維持した。レーザーは 10 Hz 動作で 30 分間連続照射し、イオン電流を観測した。生成したプラズマのイオン電流はアパーチャ径 18 mm のファラデーカップを用いて測定した。ファラデーカップはターゲットから 100 mm の位置に設置し、プラズマから電子を追い返すため -50 V のリターディング電圧を印加した。イオンの計測はリターディング電圧印加のためのカップリングコンデンサの充電時定数が  $\tau = 0.33$  s および  $\tau = 0.0033$  s となるような抵抗 1 M $\Omega$  および 1 k $\Omega$  の 2 条件で行い、それぞれで連続運転時のイオン電流波形の再現性の確認を行った。

### 3. 実験結果

回転中のドラム内の液体ビスマスの様子を Fig. 3 に示す。ドラム回転速度に対する液膜形成の様子の観察から、低速回転では重力が優勢で液体がドラム底部に溜まる傾向が見られ、重力と遠心力が釣り合う 150 rpm 付近でも液体がドラム内を流れて下に溜まる傾向が見られたが、約 250 rpm 以上の回転速度で液体ビスマスが内壁全周にわたり均一な膜として付着することが確認された。

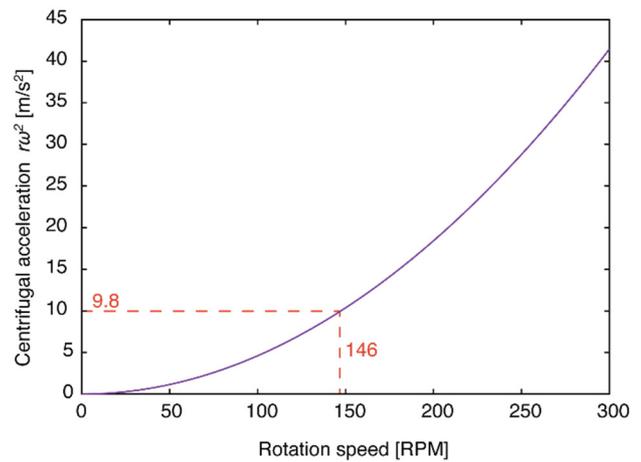


Figure 2: Centrifugal acceleration as a function of the rotation speed of the drum.

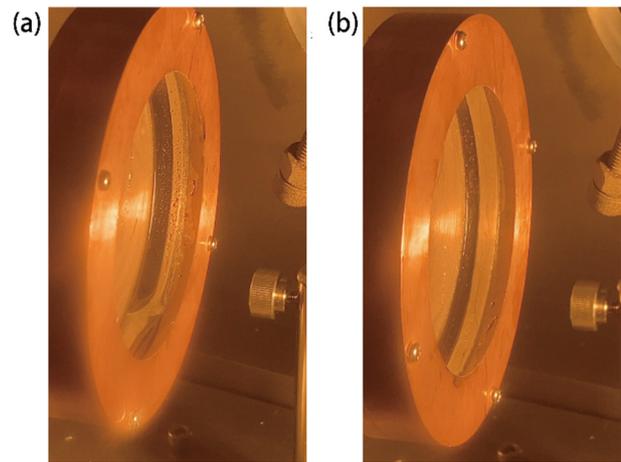


Figure 3: The liquid metal behaviors with drum rotating speed of (a) 20 rpm and (b) 300 rpm.

続いて形成した液体金属をターゲットにレーザー照射を行い、イオン電流を計測した。Figure 4 は 10 k $\Omega$  の抵抗を用いてコンデンサの充電時定数が  $\tau = 0.0033$  s となる際の測定結果を示している。この条件では電子を追い返すための電圧を印加するために必要な電荷を供給する時定数がレーザー周期 0.1 s より十分小さいため、ファラデーカップに到達するプラズマの全イオンが観測される。複数の波形は最初のレーザー照射から 30 分経過するまで 3 分おきに計測されたイオン電流が重ねて示されている。また、Fig. 5 はレーザー照射時間に対する電流波形のピーク値の変化を示している。そのばらつきは、標準偏差でピーク値の 12% 程度であったが、概ね同程度の電流値を維持してイオンを連続供給できることが示された。なお、本実験では回転するドラムのわずかなブレが観測されており、レーザースポットサイズの最適化なども行っていないため、イオン電流の再現性についてはさらに改善の余地があると考えられる。

また、1 M $\Omega$  の充電抵抗を使用した条件では、コンデンサ充電時定数が  $\tau = 0.33$  s とレーザー周期よりやや長く、引き出し可能な電荷量が制限される。このため、ファラデーカップに到達するイオンのうちの一部分が観測され、

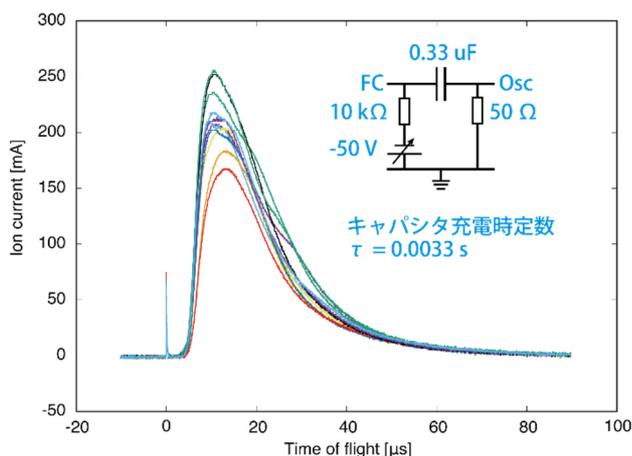


Figure 4: The ion current waveforms obtained at 10 Hz laser operation using a charging resistor of 10 kΩ to a coupling capacitor to apply the electron retarding voltage.

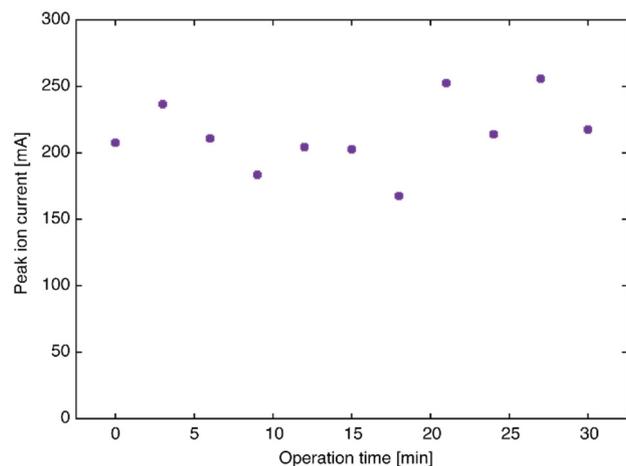


Figure 5: The peak ion current obtained at 10 Hz laser operation using a charging resistor of 10 kΩ to a coupling capacitor to apply the electron retarding voltage.

Fig. 6 に示されるように比較的なだらかでピーク値が低い電流波形となる。このときのピーク値のばらつきは標準偏差で 1.9% であり、再現性の高いパルスが得られ、Fig. 7 に示されるように電流ピーク値の時間的な変化も小さい結果が得られた。

これらの結果から、レーザー照射によりアブレーションした液膜がドラムの回転とともに更新され、照射部位が自己修復されることを示している。さらに、連続動作においてイオン電流波形に大きな変動がないことから、液体金属の液膜状態が運転時間を通して安定していたことを示していると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、レーザーイオン源における高強度レーザー照射での長期間安定な連続動作のため、回転ドラム内壁に形成した液体金属膜をレーザー標的とする新しい方式を提案し、液体ビスマスを用いて実証実験を行った。遠心力が重力を十分上回るようなドラム回転速

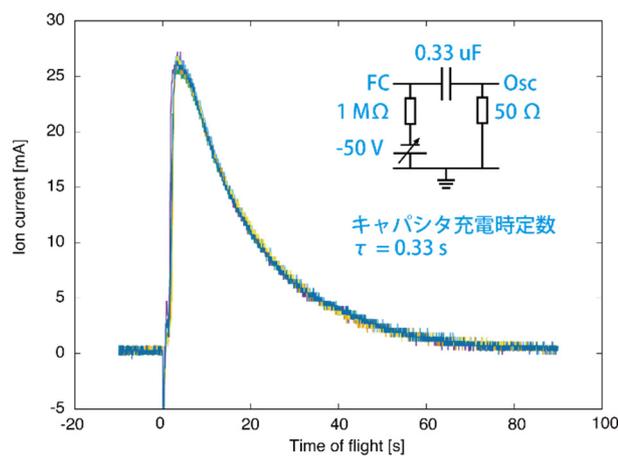


Figure 6: The ion current waveforms obtained at 10 Hz laser operation using a charging resistor of 1 MΩ to a coupling capacitor to apply the electron retarding voltage.

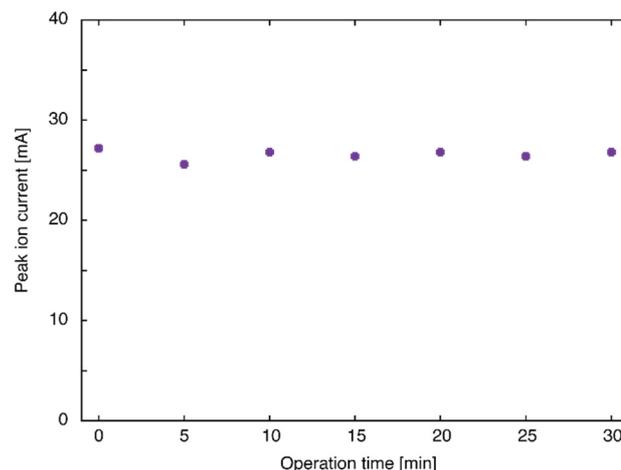


Figure 7: The peak ion current obtained at 10 Hz laser operation using a charging resistor of 1 MΩ to a coupling capacitor to apply the electron retarding voltage.

度にするこで、均一な膜厚の液体金属ターゲットが形成できることを確認した。また、Nd:YAG レーザーを用いた 10 Hz 連続照射試験では、30 分間にわたりイオン電流波形が大きな変化を示さなく連続的にイオンを供給できることが実証された。これらの結果は、回転ドラムにより形成した液体金属ターゲットがレーザーイオン源の長時間連続運転において有効な手法であることを実証した。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23K28347 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] M. Okamura *et al.*, "Performance of the low charge state laser ion source in BNL", in Proc. 2nd North American Particle Accelerator Conference (NAPAC2016), Chicago, IL, USA, 2016, pp. 49-53.

- [2] M. Okamura *et al.*, “Simulation of direct injection scheme for RFQ linac”, Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, pp. 761-763.
- [3] T. Takeuchi *et al.*, “Acceleration of heavy ion beams by means of direct injection into RFQ Linac”, Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, pp. 764-766.
- [4] T. Takeuchi *et al.*, “Measurement of the laser plasma properties of the direct plasma injection method to the RFQ LINAC on the RIKEN laser ion source”, Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, pp. 767-769.
- [5] H. Kashiwagi *et al.*, “Nd-YAG laser ion source for direct injection scheme”, Rev. Sci. Instrum. 87, 2004, pp. 1569-1571.
- [6] M. Okamura *et al.*, “Direct plasma injection scheme in accelerators (invited)”, Rev. Sci. Instrum. 79, 02B314-1-5, 2008.
- [7] T. Sako *et al.*, “Development of C6+ laser ion source and RFQ linac for carbon ion radiotherapy”, Rev. Sci. Instrum. 87, 02C109-1-3, 2016.
- [8] M. Lebois *et al.*, “Development of a kinematically focused neutron source with the p (7Li, n) 7Be inverse reaction”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip., vol. 735, 2014, pp. 145-151.
- [9] S. Ikeda *et al.*, “Neutron generator based on intense lithium beam driver”, Rev. Sci. Instrum. 91, 023304-1-5, 2020.
- [10] A. Cannavò *et al.*, “Optimization of laser-target parameters for the production of stable lithium beam”, Rev. Sci. Instrum. 91, 033317-1-5, 2020.
- [11] M. Okamura *et al.*, “Demonstration of an intense lithium beam for forward-directed pulsed neutron generation,” Sci. Rep., 12(1), 2022, p. 14016.
- [12] A. Cannavò *et al.*, “Performance of a liquid Ga target for Laser Ion Source”, JINST, 19, 2024, P06017.
- [13] K. Takahashi *et al.*, “Study on behavior of ablation plasma from liquid metal target for laser ion source”, Progress in Nuclear Science and Technology, 7, 2025, pp. 257-260.