

ソレノイド磁場印加型レーザーイオン源のイオン価数分布の計測

MEASUREMENT OF ION CHARGE-STATE DISTRIBUTION OF LASER ION SOURCE WITH SOLENOIDAL MAGNETIC FIELD

高橋一匡^{#, A)}, 延命慧悟^{A)}, 松本友樹^{A)}, 片根弘登^{A)}, 宮崎翔^{A)}, 佐々木徹^{A)}, 菊池崇志^{A)}
Kazumasa Takahashi^{#, A)}, Keigo Enmei^{A)}, Yuki Matsumoto^{A)}, Hiroto Katane^{A)}, Kakeru Miyazaki^{A)},
Toru Sasaki^{A)}, Takashi Kikuchi^{A)}
^{A)}Nagaoka University of Technology

Abstract

A laser ion source supplies an ion beam extracted from a laser ablation plasma. A solenoidal magnetic field has been used for controlling or increasing ion beam current of laser ion source. On the other hand, the effect of the solenoidal magnetic field on the ion charge-state distribution of the laser ion source has not been understood. In this study, to investigate the effect of solenoidal magnetic field on the ion charge-state distribution of the laser ion source, we measured the ion charge-state distribution of the ablation plasma with a short solenoidal magnetic field as a function of magnetic flux density. As the results, ion current of each charge-state was maximized with the same magnetic flux density and similar amplification factor was obtained for all the charge-state. The results indicated that a short solenoidal magnetic field does not change the charge-state distribution of a laser ion source.

1. はじめに

レーザーイオン源はレーザーを固体ターゲットに照射して発生させたアブレーションプラズマからイオンビームを引き出すイオン源である。固体密度のレーザーターゲットから膨張するプラズマからイオンビームを引き出すレーザーイオン源は重イオンを大電流で供給できるため、高エネルギー密度科学や重イオン慣性核融合のドライバーとして検討されているほか、レーザー生成プラズマを直接 RFQ 線形加速器に入射して得られる大電流ビーム[1-5]を利用した粒子線治療のための炭素ビーム[6]やリチウムビームを加速して陽子に衝突させることで中性子を得る加速器中性子源のためのイオン源[7]として研究が行われている。

レーザーで生成したプラズマに対してソレノイド磁場を印加することによりプラズマの集束や横方向への膨張を制限した輸送が可能であり、プラズマ密度を増加させることで、そこから引き出されるイオンビーム電流を増加させることができる。レーザーイオン源ではビームのパルス幅はイオンビームを引き出すまでのプラズマの輸送距離に比例するがプラズマの膨張に伴い電流密度は急激に減少する。この減少を抑制しながらパルス幅を長くしたい場合はソレノイド磁場のガイディングによりプラズマの輸送距離を長くすれば良い。また、短いソレノイド磁場でもプラズマの膨張を抑制が可能であるため、短いソレノイドを用いたパルス磁場をプラズマに印加することによるイオンビームの電流波形の制御も試みられている[8]。

ここで、数メートルの長いソレノイドを用いてプラズマを輸送する際にはイオン価数の分布がソレノイドによるガイディングを用いない場合と異なることが示されているが[9]、ソレノイド磁場で数メー

ルほどの長い距離をガイディングした場合と数十ミリメートル程度の短いソレノイドでプラズマを制御した場合にはイオン価数の分布への影響が異なる可能性がある。そこで本研究では電磁石を用いた磁場偏向型のイオン価数分析器を構築し、短いソレノイド磁場を印加したレーザーアブレーションプラズマから引き出したイオンビームの価数分布の計測を行い、短いソレノイドで形成された磁場がイオンの価数毎のビーム電流へ与える影響を調べた。

2. 実験装置

本研究で使用したソレノイド磁場印加型レーザーイオン源の実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。Figure 1(a)は全イオンビーム電流を計測する実験系であり、Fig. 1(b)は磁場偏向型価数分析の実験系を示している。実験装置の構成は、Nd:YAG レーザー、集光レンズ、真空チャンバー、プラズマ制御のためのソレノイドコイル、イオンビーム引き出し電極、イオンビームを集束させる静電レンズ、価数分析用の偏向電磁石からなる。

真空チャンバー内はディフュージョンポンプを用いて約 3.0×10^{-3} Pa 以下の真空状態を維持している。本研究のターゲットには、純度 99.99% で厚さ 1 mm のアルミニウムを用いた。また、フォトダイオードを用いてレーザーの散乱光を観測することでプラズマが生成された時刻を測定している。

本実験で使用したレーザーは Quantel 社製の Nd:YAG Laser (Brio) であり、波長 1064 nm、パルス幅 5 ns、エネルギーは 90 mJ である。レーザーは、大気中に設置してあるレンズを通して真空チャンバー内に設置したターゲットへと集束される。レーザー照射面積はターゲット上で直径 1 mm となるようにして実験をおこなった。このときレーザーの照射強度は 1.8×10^9 W/cm² である。

ソレノイドコイルは 320 回巻であり、外径 55 mm

[#]kazumasa@vos.nagaokaut.ac.jp

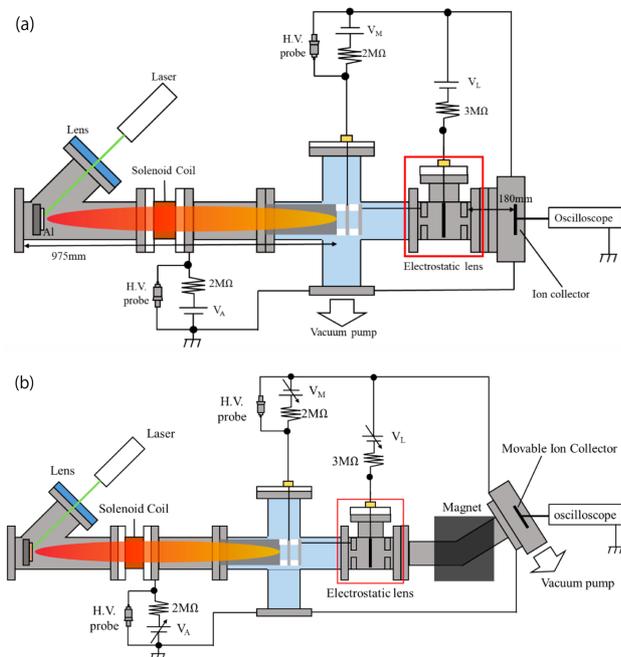


Figure 1: Schematic of experimental setup for (a) measurement of the total ion beam current (b) ion charge-state analysis of laser ion source with solenoidal magnetic field.

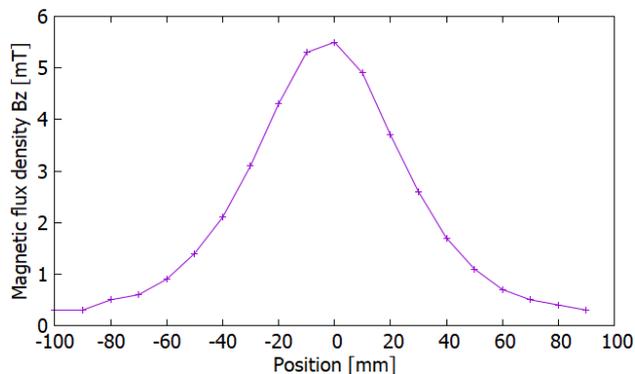


Figure 2: Profile of magnetic flux density generated with solenoidal current of 1 A.

のデルリン製の輸送管に巻いている。また、ソレノイドコイルの長さは 30 mm である。ソレノイドコイルに電流 1.0 A を流した時のソレノイドで形成された磁場の軸方向の磁束密度分布を Fig. 2 に示す。このとき、横軸はソレノイドコイルの中心を 0 mm として測定を行った。磁場の測定は、ガウスメーターを用い、プラズマの進行方向を z 方向として測定した。

ターゲットからイオンビーム引き出し電極までの距離は 975 mm とし、ソレノイドはプラズマに磁場を印加するために引き出し電極に到達する前に設置されている。プラズマからイオンビームの引き出しには 3 枚の電極を用い、それぞれ加速電圧 $V_A=11.0$ kV、中間電極電圧 $V_M=9.0$ kV、0 V を印加することによって、イオンビームを引き出している。また、

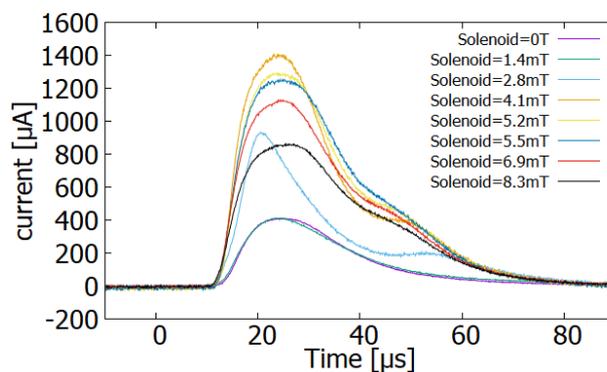


Figure 3: Ion beam current with solenoidal magnetic fields varying with 0-8.3 mT.

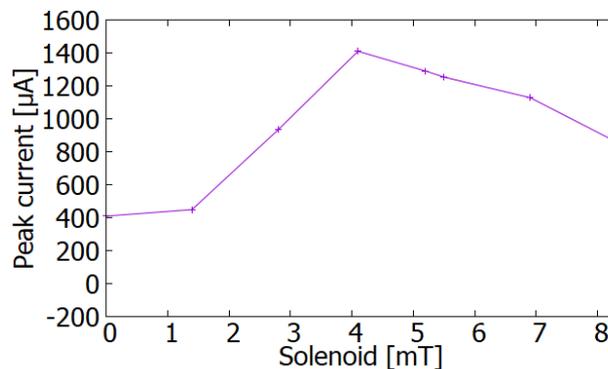


Figure 4: Variation of the peak current as a function of magnetic flux density of the solenoidal field.

価数分析器にビームを入射するため静電レンズによりイオンビームの広がりを抑制した。

磁場偏向型価数分析を行うために、電磁石を用いた。電磁石の大きさは、ビームの進行方向に 180 mm、ビームの径方向に 140 mm である。この電磁石の動作電源として、菊水電子工業の直流電源である PAT160-150T を用いた。

イオンビーム電流の測定には、1.0 mm スリット付イオンコレクタを用い、イオンコレクタはチャンバーの中心に設置して偏向電磁石の磁場を 0-220 mT の範囲で変化させてチャンバーの中心を通過するイオンビームの電流を計測した。

3. 実験結果と考察

まずソレノイド磁場印加による全イオンビーム電流値の変化を測定するためにソレノイド磁場を印加してイオンビームの引き出しを行った。本実験では、ソレノイドコイルの磁場を 0-8.3 mT の範囲で変化させた。ソレノイド磁場印加によるイオンビーム引き出しの変化を Fig. 3 に示し、それぞれのイオンビーム電流波形のピークをとったものを Fig. 4 に示す。これらの結果より、ソレノイド磁場が 0 mT から 4.1 mT まではイオンビーム電流値が増加しており、4.1 mT 以上はイオンビーム電流が減少していくことが分かる。これは、ソレノイドコイルによるプラズマ

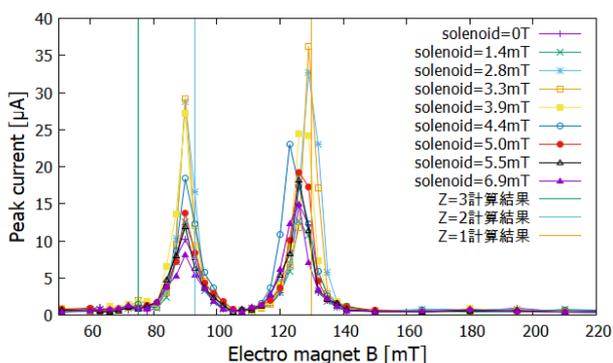


Figure 5: Variation of the peak current of each ion charge-state as a function of magnetic flux density of the solenoidal field.

の集束をしていることを示していると考えられる。すなわち、ソレノイド磁場が 4.1 mT 以下では、集束する焦点が引き出し電極よりも後方にあり、4.1 mT の時に最も引き出し電極に近い位置が焦点となるため、イオンビーム電流が最も引き出せていると考えられる。一方、ソレノイド磁場が 4.1 mT 以上では、引き出し電極より前でプラズマが集束し、発散後のプラズマからイオンビームを引き出していると考えられる。

次にソレノイド磁場の印加による価数毎のイオンビーム電流への影響を明らかにするため、ソレノイド磁場をプラズマに印加して引き出したイオンビームの価数分析を行った。加速電圧は 11.0 kV とし、中間電極電圧はソレノイド磁場によって最も引き出せる電圧とした。また、静電レンズに -2.0 kV を印加して実験を行った。ソレノイド磁場を 0–6.9 mT の範囲で変化させたときの偏向電磁石の磁場に対する価数毎のイオンビーム電流を測定した結果を Fig. 5 に示す。イオンビームはパルス的に得られるので、各々のイオンビーム電流波形のピーク値をプロットしている。この結果より、1 価から 3 価のイオンが生成されていることがわかり、ソレノイドの磁束密度によっていずれの価数のビーム電流も変化していることが示された。

さらに磁束密度に対して各価数毎のイオン電流の増幅率を算出した結果を Fig. 6 に示す。この結果、いずれの価数のイオンも 3.3 mT 付近で最大の電流値となった。また、この結果によりイオン価数によって最大電流となる磁束密度に変化がないことが示され、さらに各価数毎の増加率にはほとんど違いがないことが明らかになった。このため短いソレノイドによるプラズマ制御ではイオンの価数分布に大きな変化を与えないことがわかった。数メートルの長いソレノイドで輸送した場合にはイオン価数分布は変化する結果が示されており、ソレノイドの長さによって磁場がイオン価数分布に与える影響が異なる可能性がある。

4. まとめ

レーザーイオン源のビーム電流の制御や増加を目

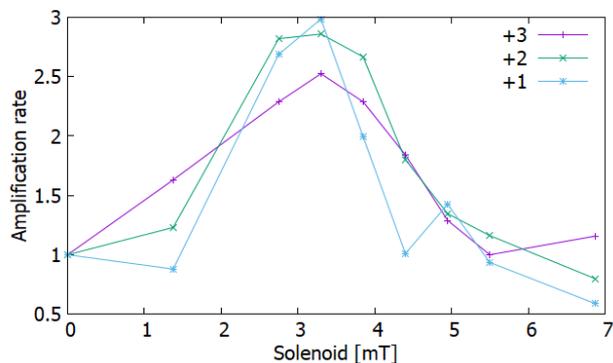


Figure 6: Variation of the amplification factor of the peak current for each ion charge-state as a function of magnetic flux density of the solenoidal field.

的としたソレノイド磁場印加による価数毎のイオンビーム電流への影響を調べるために電磁石を用いた磁場偏向型のイオン価数分析器を構築し、短いソレノイド磁場を印加したレーザーアブレーションプラズマから引き出したイオンビームの価数分布の計測を行った。その結果、イオン価数毎のイオンビーム電流の変化はソレノイド磁場の磁束密度に対して同じ傾向を示し、ビーム電流の増加の割合はイオン価数に依存しないことが分かった。また、これによりソレノイドの長さによってプラズマのイオン価数分布に対する影響が異なることが示唆された。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP19K20599 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] M. Okamura *et al.*, “Simulation of direct injection scheme for RFQ linac”, *Rev. Sci. Instrum.* 73, 2002, pp. 761-763.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] H. Kashiwagi *et al.*, “Nd-YAG laser ion source for direct injection scheme”, *Rev. Sci. Instrum.* 87, 2004, pp. 1569-1571.
- [5] M. Okamura *et al.*, “Direct plasma injection scheme in accelerators (invited)”, *Rev. Sci. Instrum.* 79, 2008, pp. 02B314-1-5.
- [6] T. Sako *et al.*, “Development of C6+ laser ion source and RFQ linac for carbon ion radiotherapy”, *Rev. Sci. Instrum.* 87, 2016, pp. 02C109-1-3.
- [7] S. Ikeda *et al.*, “Neutron generator based on intense lithium beam driver”, *Rev. Sci. Instrum.* 91, 2020, pp. 023304-1-5.
- [8] K. Takahashi *et al.*, “Control of current waveform of laser ion source using pulsed magnetic field”, *Rev. Sci. Instrum.* 91, 2020, pp. 033310-1-4.
- [9] K. Takahashi *et al.*, “Effect of Solenoidal Magnetic Field on Charge-State Purity in Laser Ion Source”, *High Energy Density Phys.* 36, 2020, pp. 100812-1-4.