

レーザーイオン源における生成されたプラズマの制御に関する研究 Study on Control of the Generated Plasma in Laser Ion Source

澁谷達則^{#,A)}, 吉田光宏^{B)}, 林崎規託^{C)}

Tatsunori Shibuya^{#,A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Noriyosu Hayashizaki^{A)}

^{A)} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

^{B)} Accelerator Division, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

Abstract

A laser ion source which can generate high intensity and high charge state ion beam is indispensable to a next-generation heavy ion use. However, the particle loss by plasma production process or transport process must be improved for efficiency improvement. In this study, we will optimize the transport process of laser ablation plasma and clarify scheme to generate high charge state ion effectively. As the first stage, the low energy laser irradiation experiment and the measurement of plasma density were carried out.

1. はじめに

重粒子線治療や重イオン慣性核融合、高エネルギー物理学実験用のイオン源には、従来よりも高輝度かつ多価イオンが生成可能なイオン源が必要である。現在も、ドイツ (FAIR) とアメリカ (FRIB) で RI ビーム施設が建設中であり、ウランビームの大強度化に必要な技術開発が求められている。高輝度多価イオンは、反応効率向上や加速器システムの小型化のために重要であり、また粒子損失の原因とされる荷電変換ストリッパ装置を削減できるなどの相乗効果も期待できる。

高輝度多価イオン源の候補のひとつとして、レーザーアブレーションを利用したレーザーイオン源が挙げられる。しかし、過去の研究報告例では CO₂ レーザー (出力 100 J, Wall Plug Efficiency~15 %, 波長 10.6 μm) を用いることが多く、高輝度多価イオンを生成するにはレーザーの効率とエネルギー密度が問題とされてきた。

2000 年代以降、これらの問題を解決するために Nd:YAG レーザー (出力~2 J, 波長 1064 nm) を使用してプラズマを生成した後、プラズマの輸送過程を最適化することで高輝度多価イオンの生成を試みる研究が行われている [1-2]。これまでにプラズマの輸送過程にはソレノイドコイルによるパルス制御、電子ビームやマイクロ波源による多価イオン生成などが適用された例がある。

東工大では 2002 年に、レーザーイオン源と高周波四重極線形加速器 (RFQ) を直結した、直接プラズマ入射法の原理実証に成功し、100 mA 級の大強度重イオンビーム加速の可能性を示した。本稿では直接プラズマ入射法へと転用可能な高輝度多価イオンを生成するためのプラズマ輸送に関する研究について報告する。

2. レーザー生成プラズマと輸送

2.1 原理

レーザー生成プラズマの基本的原理は、レーザー光による逆制動放射である。この過程でのレーザー光の吸収係数 K_{ab} (入射エネルギーと吸収エネルギーとの比) は、 $K_{ab} = vL/c$ で与えられる [3]。ここで、 v は電子-イオン衝突周波数、 L はアンダーデンスプラズマのスケール長、 c は光速を表す。典型的な入射エネルギーの吸収は 70~95 % である。この吸収されたエネルギーによって、逆制動放射やそれに起因する電子-電子衝突、電子-イオン衝突現象が誘発される。この衝突現象が繰り返されることで多価イオンを内包するプラズマが形成される。

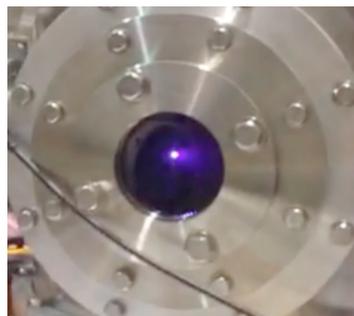


Fig.1 Laser ablation plasma

レーザー生成プラズマはピコ秒スケールで膨張し始め、ナノ秒からマイクロ秒にかけて粒子放出が起こる。プラズマ温度は放出時点において最高 100 eV 程度であり、時間の経過とともに低下する。このプラズマ温度の低下に伴って再結合率が $R_f \propto T_e^{-0.2}$ で増加する。上記のことから多価イオンを生成するには、ドリフト空間においてプラズマ温度を保持することが重要となる [4]。

2.2 プラズマ輸送の必要性

レーザー生成プラズマ内のイオン電流量は 10 A

[#] shibuya.t.ac@m.titech.ac.jp

級のピーク電流量を有することから、プラズマの膨張速度を利用して輸送中に電流量を平均化することが重要になる。

また、レーザー生成プラズマの放出には、角度分布 ($>20^\circ$) が存在する。イオン源に適用する場合にはこの角度分布と RFQ 入射部直径の制限から生成したプラズマの 1/1000 程度の電荷量を切り出して使用することしかできない。高い電荷量を得るために、プラズマを進行方向に平行な磁場中に束縛することで高密度状態を維持したまま輸送することも検討され始めている。しかし、強磁場中に束縛することは、エミッタンスの悪化へとつながるため、必要とするビームパラメータに応じて、磁場強度とプラズマ輸送距離を決定しなければならない。

3. 高輝度多価レーザーイオン源開発実験

本実験の目的は、最適な輸送を検討する上で重要となるプラズマ特性について十分な計測を行うことである。Fig.2 に実験装置の概略図を示す。ターゲット材料には炭素（グラファイト）を採用し、Nd:YAG レーザーをターゲット上に集光した。実験に用いたレーザーの特性については Table 1 に示した。生成されたビームを Slit（ビームスリット径 5 mm）にてコリメートした後イオンとして引き出した。ビーム電流量の計測はファラデーカップ（FC）を用いて行った。また、その他の実験条件を Table 2 に、本実験において測定したパルス波形の一例を Fig.3 に示す。

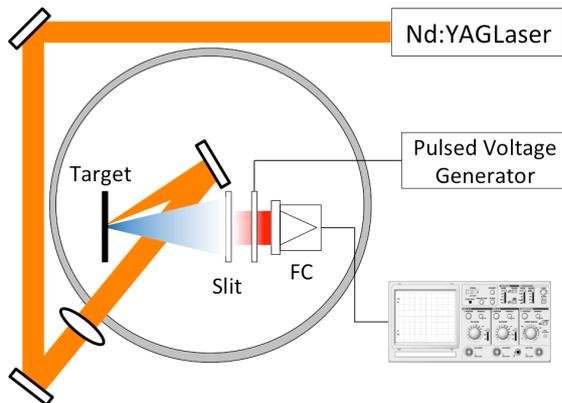


Fig.2 Layout of experiment

Vacuum Pressure	2.0×10^{-5} Pa
Drift Space	170 mm
Extractor Voltage	16 kV

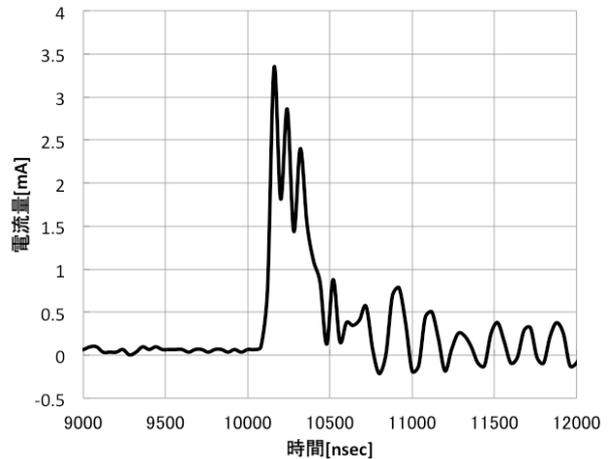


Fig.3 Example of pulse waveform

3.1 低エネルギーレーザー照射

過去の研究において、数百 mJ 程度のレーザーエネルギーによる電荷量の計測報告が見当たらないため、適切なプラズマ輸送過程を検討に必要な計測を行った。レーザーエネルギーを 20、40、80、95、110 mJ と変化させた場合の電荷量と電流量を計測した。Fig.4 には実験から得られた 1 パルスあたりの電荷量と平均電流量のレーザーエネルギー依存性を示す。

Table 2. The main features of the laser

Laser type	Nd:YAG
Wavelength	1064 nm
Pulse width	10 ns
Pulse energy	200 mJ
Laser beam diameter	10 mm
Beam spot	- 0.1 mm ²
Repetition rate	10 Hz

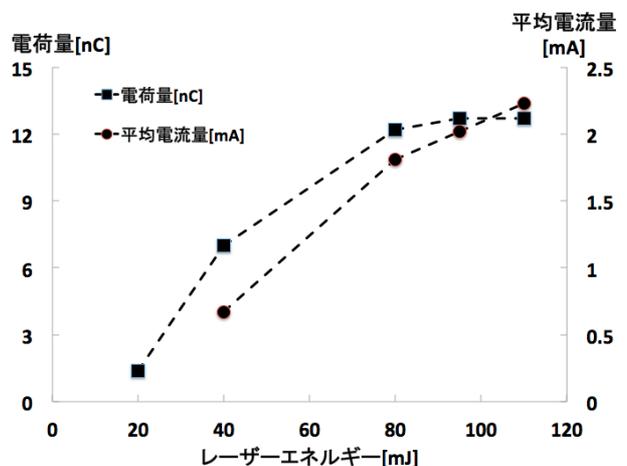


Fig.4 Laser energy of the average current and charge

3.2 プラズマ密度の測定

電流密度 I や粒子数 N は、一般的にスケージング則に従うことが知られているが[4-5]、半径方向における粒子の密度分布は、理論的に算出できないため計測が必要である。そこで、Fig.5 に示すように、各 ABCD 点に引出し点を移動して計測を行った。レーザーの入射角度は 45° とした。照射点から A 点までの距離を 170 mm とした。AB、BC、CD 間は、それぞれ 20 mm の等間隔に配置した。このとき、レーザーエネルギーは、10 mJ とした。

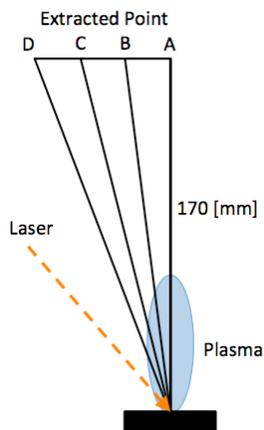


Fig.5 Layout of extracting point

Fig.6 の結果からイオンの引出位置 0 mm を基準とすると、20、40、60 mm の位置でそれぞれ透過率は 78.8、56.2、46.1 % となった。

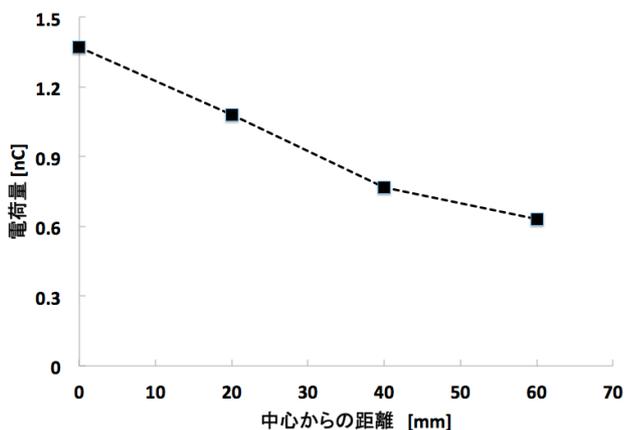


Fig.6 The amount of charge in the radial direction

4. 今後の予定

本研究の最終目的は、レーザー生成プラズマの輸送過程を最適化し、多価イオンを効率的に生成することである。多価イオンの生成にはプラズマ温度の低下を防ぐこと、さらにレーザー生成プラズマの再加熱を行うことが考えられる。再加熱には、外部からの電子ビーム照射や電子サイクロトロン共鳴などが考えられる。

今後の予定として、まず 110~300 mJ 程度のレー

ザーエネルギーにおいて、3.1 と同様の測定を行う予定である。また、3.2 の測定結果から AB 間での詳細な電荷量の計測が必要である。

そして最終的には、フェムト秒とナノ秒のパルスレーザーを用いた Double Pulse Laser System を用いてプラズマの再加熱を行うことを計画している。プラズマ再加熱実験の概念図を Fig.7 に示す。

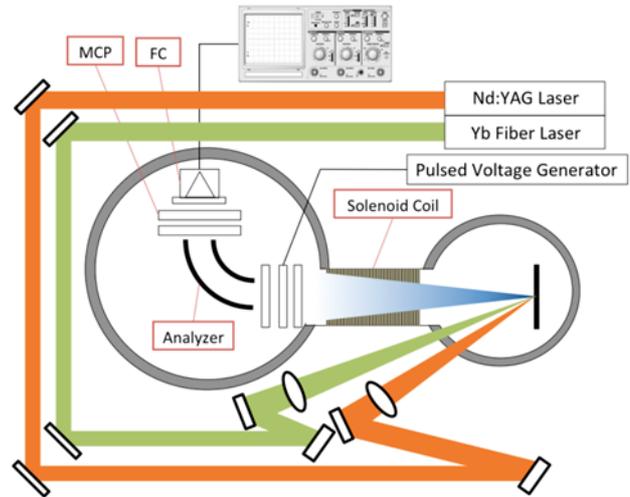


Fig.7 Layout of future plan

参考文献

- [1] M.Okamura, et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 02A510 (2010)
- [2] S.Gammino, et al., J.Appl.Phys.96, 2961 (2004)
- [3] T.W.Johnston, et al., Phys.Fluids,16, 722 (1973)
- [4] Ian.G.Brown(Ed.), "The Physics and Technology of Ion Sources" WILEY-VCH Verlag GmbH., (2004)
- [5] B.Sharkov Proc. EPAC96, p.1550, (1996)