

# レーザーイオン源におけるプラズマ集束のための テーパー型ソレノイド電磁石の設計検討

## DESIGN STUDY OF THE TAPER SOLENOID MAGNET FOR PLASMA FOCUSING IN A LASER ION SOURCE

細谷青児#, 柏木啓次, 山田圭介

Seiji Hosoya #, Hirotsugu Kashiwagi, Keisuke Yamada

Takasaki Institute for Advanced Quantum Science, National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

### Abstract

A laser ion source generates plasma by focusing pulse laser onto a solid target. It can produce ion beams of various elements. We are developing the laser ion source for use in a ion implanter. It is important to focus the diffuse laser plasma efficiently to achieve high beam current. A liner solenoid is usual method for focusing plasma. However, this solenoid is often installed at a distance from the target due to the limitation of the laser beam path. Thus the plasma is lost between a target and a liner solenoid. Therefore, we are examining the usefulness of the taper solenoid. The taper solenoid can install near a target and focus the plasma with high efficiency. The taper solenoid will reduce the large divergence angle of the laser plasma due to the law of conservation of magnetic moment. In this paper, we present the results of ion simulations using CST studio. The magnetic field required to focus the  $C^+$ ,  $Ti^+$  and  $Ta^+$  was calculated. In addition, we investigated the geometry of the taper solenoid with high transport efficiency.

### 1. はじめに

レーザーイオン源(LIS)はレーザーアブレーションによって生成されたプラズマから正イオンを引き出し、ビームとして利用するイオン源である。固体試料からプラズマを直接生成できるため、多種多様なイオンを簡単に生成できるのが特徴である。特にガスイオン源では難しい高融点金属のイオン生成も可能である。また、真空容器内の移動式ステージ上に複数の試料を装填することによって、真空を破ることなく数秒以内の高速なイオン種切り替えが行える[1]。これらの特徴をもつ LIS をイオン注入装置のイオン源として利用できれば、多種多様なイオンを迅速に切り替えて注入することが可能になる。イオン注入装置のイオン源は安定的に大電流のビームを供給することが要求される。LIS ではレーザーのエネルギーを上げればビーム電流を増やすことができるが、試料の消耗も激しくなる。加えて、試料表面の状態が変わることにより安定的にビームを供給することが難しくなる。よって、なるべく低いレーザーエネルギーで LIS を運用させることが望ましい。そこでレーザーのエネルギーを上げる事以外でのビーム大電流化の手法が必要になる。

LIS で生成されるプラズマは生成直後から広い角度分布を持って 3 次元的に拡散し発散する。そして生成されたプラズマの大部分はイオン源内で損失し、その一部のみをビームとして利用している。このプラズマの発散を抑えながら輸送することができればビームの大電流化が可能になる。これまでに直線ソレノイド電磁石を用いてドリフトするプラズマの発散を抑えながら輸送することによって数倍程度プラズマを増加できることが分かっている[2-4]。レーザー光路の干渉やコイルの冷却等の制限から、直線ソレノイドは LIS チャンバー下流の大気中に設置することが多いが、直線ソレノイドにプラズマが入るまでの

間にも発散し損失が発生している。この損失を低減するために我々は LIS チャンバー内にテーパー型ソレノイド電磁石の導入を検討している(Fig. 1 参照)。レーザーの入射角より大きいテーパー形状にすれば標的試料表面付近に設置してもレーザー光路を妨げずプラズマを収束させることができる。また、入口と出口での磁場の強度の違いから磁気モーメントの保存則により発生したプラズマの大きな発散角を小さくして高効率に輸送することができる。また、ソレノイド磁石内で断熱的に磁場が変化するためエネルギーアクセプタンスが大きいという利点もある。これまでに、テーパーソレノイドと直線ソレノイドを組み合わせたプラズマ輸送系を採用することによって輸送効率が約 45 倍増加する見込みがシミュレーションから得られている[5]。本研究では電磁場解析シミュレーションソフトを用いてテーパーソレノイド電磁石の形状等について検討した。

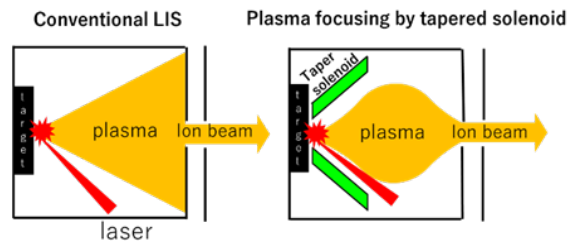


Figure 1: Plasma focusing method in this study.

### 2. テーパー型ソレノイド電磁石の形状検討

実験装置の概念図を Fig. 2 に示す。円筒形の真空チャンバー内に設置された固体試料標的に 25 度の角度でレーザーを照射する設計となっている。また、真空チャンバー内にもう一つ内円筒が設置されており、この円筒に

# hosoya.seiji@qst.go.jp

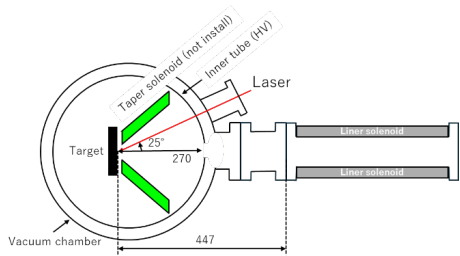


Figure 2: Conceptual diagram of experimental setup (Taper solenoid not yet installed).

高電圧をかけることによってプラズマからイオンを引き出せる構造となっている。この真空チャンバー内に設置するテーパソレノイドについて、電磁場解析シミュレーションソフト CST studio suite[6]を用いたイオン軌道計算により形状の検討を行った。イオンの発生条件としては C+ イオンを ± 25 度の発散角を持った粒子を φ 10 mm の範囲内にランダムに複数発生させている。形状のパラメータとして、長さ、テーパ角度、入口内径の3つについてそれぞれ比較検討を行った。その結果を Fig. 3 に示す。

イオンの集束効果を評価するために、直線ソレノイドへ入るイオンの割合を輸送効率(TE)として比較の指標とした。長さは 200 mm、角度は 50 度、入口径は 10 mm として、比較するパラメータ以外はすべて固定している。シミュレーションではテーパソレノイドによって最大 12 倍輸送効率の向上が見込まれることが分かった。それぞれのパラメータについて比較したところ、テーパソレノイドの長さについては長くすれば最大輸送効率を得られる磁場が低くなる、つまり低磁場で集束が可能になることがわかった。テーパ角度についても角度を小さくすればするほど低磁場での集束が可能になる。ただし、イオンの発散角よりも小さくしてしまうと有効磁場領域が小さくなり逆に輸送効率下がってしまう。入口径については変化させても輸送効率に大きな変化は見られなかった。

以上のことから入口径については、レーザーのスポットサイズより大きくする必要はあるが、レーザーの調整等を考えると 30 mm 程度が妥当である。テーパソレノイドの長さについては、長いほど集束に必要な磁場は低くなるが実験装置に組み込む都合上 200 mm 程度が限度となる。テーパ角度については、なるべく小さい角度のほうが好ましいが、レーザーアブレーションプラズマは約 30 度程度の広がりを持っているため[7]プラズマ発散角より

大きく取る必要がある。またレーザー入射角度よりは大きく取る必要があるので、レーザー入射角度と同じ 50 度とした。

### 3. テーパーソレノイドのデザインとイオン集束シミュレーション

前項の計算を基にした現時点での設計案のテーパソレノイドを Fig. 4 に示す。コイルの巻数をより多くするために外形は円筒状にして、内側だけテーパ形状になっている。また、製作上の観点よりコイルをテーパ形状に巻くことが困難であるので、図のように内径の異なる短い円筒状に巻いたコイルを複数繋げることによってテーパ形状を構築している。

このデザインのテーパソレノイドを用いて C+, Ti+, Ta+ のイオン軌道計算を行った。それぞれの計算結果を Fig. 5 に示す。それぞれのイオン速度は実際に実験から得られたパラメータを用いており、50 度の発散角を持って発生させている。エミッタンスやビームエンベロップの値は直線ソレノイド入口(ターゲットから 447 mm)での値である。質量の重い元素ほど集束させる磁場強度が高くなり、この形状のテーパソレノイドでは Ta+ を集束させるには約 9000 Gauss 必要になることが分かった。本研究でデザインしたテーパソレノイドにおいて 5 mm 角のホローコンダクターを使用した場合、最大で約 500 turn 巻く事ができる。そしてこの巻数で Ta+ を集束させるためには 360 A の電流を流すことが必要になることが分かった。

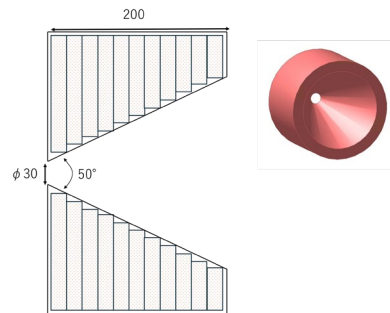
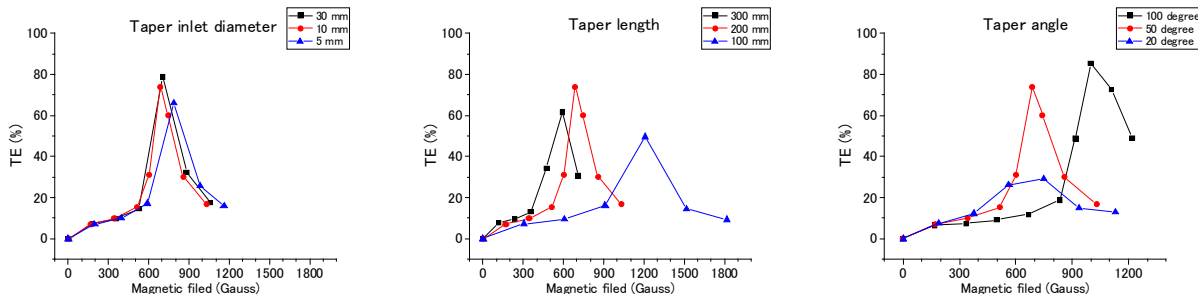


Figure 4: Design of taper solenoid in this study.



(a) Taper Inlet diameter

(b) Taper Inlet diameter

(c) Taper angle

Figure 3: Results of ion simulation about the shape of tapered solenoids. The vertical axis is transportation efficiency (TE).

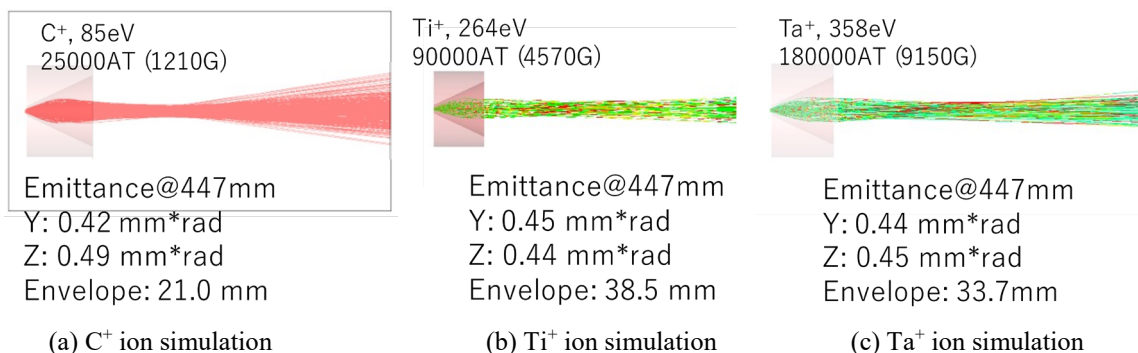


Figure 5: Simulation results of ion transport in the designed tapered solenoid.

#### 4. まとめと今後の展望

LIS におけるレーザーアブレーションプラズマの新たな高効率な輸送系として、テーパソレノイドを用いたプラズマ輸送系を提案し、その形状について検討を行った。イオン輸送シミュレーションを用いて、形状を変えて輸送効率の変化を調べたところ、テーパの角度は小さく、長さが長いほど低い磁場で高効率な輸送が可能になることが分かった。しかし、プラズマは発散角度を持って生成されるため、プラズマの生成角度よりは角度は大きく取らなければならない。また、レーザーの入射角よりも大きく取る必要もあり、実際に真空チャンバー内に収められる長さにする必要がある。我々の実験装置に設置可能な設計案として、テーパ角度 50 度、長さ 200 mm、入口径 30 mm のテーパソレノイドを検討した。このテーパソレノイドで C<sup>+</sup>、Ti<sup>+</sup>、Ta<sup>+</sup>のイオン輸送シミュレーションを行ったところすべてのイオンを集束することが確認できた。一番質量数の大きい Ta<sup>+</sup>に関して、集束させるのに必要な磁場は約 9000 Gauss であり、デザインしたテーパソレノイドでこの磁場を実現するためには 360 A の電流を流す必要であることが分かった。しかし、真空中に設置するテーパソレノイドでは、使用できるホローコンダクターのサイズや冷却水配管に大きな制限があるため、この磁場を実現することは非常に困難になる。そのため

これを解決する手法の検討が必要になる。また、イオン輸送シミュレーションに加えて、プラズマ輸送シミュレーションによってテーパソレノイドの詳細な検討を行い、プラズマ輸送に関して最適なテーパソレノイドのデザインを決定する予定である。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21H03749 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] T. Kanesue *et al.*, 2022 J. Phys. Conf. Ser. 2244 012101.
- [2] H. Kashiwagi *et al.*, 2024 J. Phys.: Conf. Ser. 2743 01206.
- [3] T. Kanesue *et al.*, Appl. Phys. Lett. 10 November 2014; 105 (19): 193506. <https://doi.org/10.1063/1.4902021>.
- [4] M. Okamura *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A., 733 (2014) 97-102.
- [5] S. Hosoya *et al.*, 2024 J. Phys.: Conf. Ser. 2743 012009.
- [6] <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [7] K. Kondo *et al.*, Proceedings, 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), IPAC-2010-THPEC054.