

# レーザープラズマ集束のためのテーパ型ソレノイド電磁石の設計・製作

## DEVELOPMENT OF A TAPERED SOLENOID FOR LASER-PLASMA FOCUSING

柏木啓次#, 細谷青児, 山田圭介

Hirotsugu Kashiwagi, Seiji Hosoya, Keisuke Yamada

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

### Abstract

A tapered solenoid electromagnet was developed to efficiently focus plasma generated in a laser ion source (LIS). The objective is to improve beam generation efficiency from the plasma to achieve microampere-class beam currents for ion implantation in materials development, even with a low-energy laser. The solenoid was designed to produce a magnetic field of several thousand gauss within the limited space of the vacuum chamber, sufficient for focusing plasmas up to titanium. Three coil winding configurations were evaluated through magnetic field calculations, and the optimal design was selected based on field strength and cooling performance. The fabricated solenoid, consisting of ten stacked coils using hollow conductors, achieved a maximum magnetic field of 3750 G at an excitation current of 232.5 A. These results demonstrate the successful realization of a tapered solenoid electromagnet capable of generating the magnetic field strength required for focusing plasmas up to titanium within the spatial constraints of the LIS chamber.

### 1. はじめに

イオン注入法は、加速したイオンを量・深さ・位置を制御して材料に注入することで、材料に新たな物性を付与する技術である。例えば、磁性元素注入による磁性半導体の形成や、ダイヤモンドへの窒素等の注入による量子材料の創成が挙げられる。QST 高崎量子技術基盤研究所のイオン照射研究施設 TIARA[1]では、400 kV イオン注入装置を用いて、様々な材料への多様なイオンの注入により材料開発が行われている。

TIARA イオン注入装置で提供可能なイオン種は軽イオンから重イオンまで多岐にわたるが、これらの多くは常温で固体の物質から生成される。現在使用しているフリーマン型イオン源では、常温気体の物質は外部からガスとしてプラズマチェンバーに導入するのに対し、固体物質の大部分はイオン源内のオープンで加熱・気化して導入する必要がある[2]。このため、イオン種の切り替えには、オープンの冷却・試料交換・再加熱などに数時間を要し、1日に使用できるイオン種は1種類に制限されている。材料開発を加速するためには、複数のイオン種を短時間で切り替えて照射することが有用である。

この課題を解決するため、我々は新たなイオン源としてレーザーイオン源の開発を進めている。レーザーイオン源は、真空中の固体ターゲットにパルスレーザーを集光照射してプラズマを生成し、そこからイオンを引き出してビームを生成する装置である。あらゆる固体からプラズマを生成できるため、イオン源内のステージに複数のターゲットを装填し[3]、目的の試料をレーザー照射位置に移動させることで、迅速なイオン種切り替えが可能となる。

一方、レーザーイオン源はパルスイオン源であるため、材料開発に必要なマイクロアンペア級のビーム電流を得るには、kHz 程度の高繰り返しでプラズマを生成する必要がある[3, 4]。しかし、ターゲットはレーザーアブレーションにより徐々に消費され、表面状態が変化するため、

安定したプラズマ生成にはターゲットを徐々に移動させる必要がある。ターゲット面積とビーム生成可能時間はトレードオフの関係にあるため、イオン注入装置の限られた空間に搭載する多種イオン生成レーザーイオン源では、ターゲット消費の低減が課題である。

この課題に対し、我々はレーザープラズマのビームへの変換効率を向上させることで、低エネルギーレーザーでアブレーション量を低減しても必要なビーム電流を確保するための技術開発を進めている。レーザーイオン源で生成されるプラズマは広い角度分布で三次元的に拡散するため、引出電極孔付近に到達する中心軸近傍のプラズマのみがビームとして利用され、その他はイオン源内で損失する。そこで、イオン源内のプラズマ生成領域に磁場を印加し、発散プラズマを集束させることで、引出領域に多くのプラズマを導いてビーム強度を高めるため、テーパ型ソレノイド電磁石によるプラズマ集束、及び集束プラズマを直線ソレノイドで輸送する技術の開発を行っている。これまで、シミュレーションにより本方法の有効性を確認しており[5]、現在は実証実験に向けた装置開発を進めている。本稿では、イオン源内に設置するテーパ型ソレノイド電磁石の設計および製作について報告する。

### 2. テーパ型ソレノイド電磁石の設計

#### 2.1 TIARA レーザーイオン源

図1にTIARA レーザーイオン源チェンバー(LIS チェンバー)の内部を示す。LIS チェンバーは二重構造で、内径 550 mm の設置電位の真空チェンバー内に内径 470 mm の高電圧チェンバーが設置されている。高電圧チェンバーにはアブレーションターゲットを搭載するXYZ 三軸ステージが設置されている。

レーザーは LIS チェンバー外部から 25° の角度でターゲット上に集光照射されることでプラズマが生成される。生成されたプラズマは、パルス幅を延長しながら引き出し領域まで導かれ、イオンビームが引き出される。

# kashiwagi.hirotsugu@qst.go.jp



Figure 1: The TIARA laser ion source chamber.

## 2.2 テーパー型ソレノイド電磁石の設計要件

図 2 にテーパー型ソレノイド電磁石を用いた Ti プラズマ集束のシミュレーション結果と磁場分布を示す。磁場は狭い口径側から立ち上がり最大値に達した後、広い口径側に向かって徐々に減衰する分布である。プラズマ集束に必要な最大磁場は炭素で約 700 ガウス、Ti で約 3500 ガウス、Ta で約 9000 ガウスである。設置空間の制約から 10000 ガウス級の磁場生成は困難であるため、原理実証機として Ti 程度の質量数まで対応可能な数千ガウス級の磁場を生成するテーパーソレノイドを製作することとした。設計条件は、真空内への設置が可能であり、チェンバー内の限られた設置空間で数千ガウスの磁場を生成できることである。

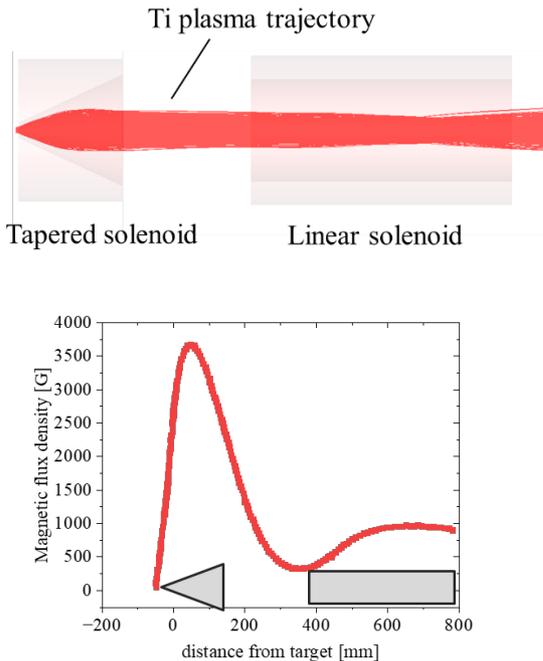


Figure 2: (Top) Simulation of Ti plasma focusing using tapered and linear solenoids. (Bottom) Axial magnetic flux density distribution perpendicular to the target surface.

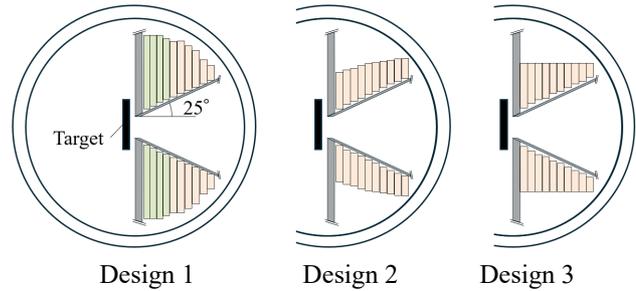


Figure 3. Coil winding configurations (Design 1–3) with hollow conductor indicated by color (orange: 3.5×6.4 mm, t = 1 mm, green: 5×5 mm, t = 1 mm).

高磁場を得るためには水冷構造が必要であり、ホローコンダクターを用いた巻線が採用される。しかし、真空中にエポキシ含浸したホローコンダクター及びその他の構成物を含むテーパーソレノイド全体を設置する場合、励磁時の温度上昇に伴うアウトガスが問題となる。本ソレノイドはプラズマ生成部近傍に設置するため、ソレノイドのアウトガスのプラズマへの影響は避けなければならない。そこで、内部を大気圧とした非磁性 SUS316L 製のチェンバーを LIS チェンバー内に設置し、その中にテーパー型ソレノイド電磁石を設置する構造とした。

## 2.3 テーパーソレノイドの設計

図 3 に、ホローコンダクター巻き線の設計案を示す。テーパー形状を形成するため、内径を段階的に増加させた 10 個のソレノイド積層する方式を採用した。案 1 は巻線数を最大化し、高起磁力を目指す設計、案 2 は各層のホローコンダクターの長さを均一化し、圧力損失を均等にした設計、案 3 は外径を同一にした円筒型設計である。

ホローコンダクターは断面 3.5 mm × 6.4 mm (厚さ 1 mm) の矩形で、案 1 の狭い口径側のみ 5 mm × 5 mm (厚さ 1 mm) を使用した。

水圧 0.2 MPa における許容温度上昇が 30°C の条件

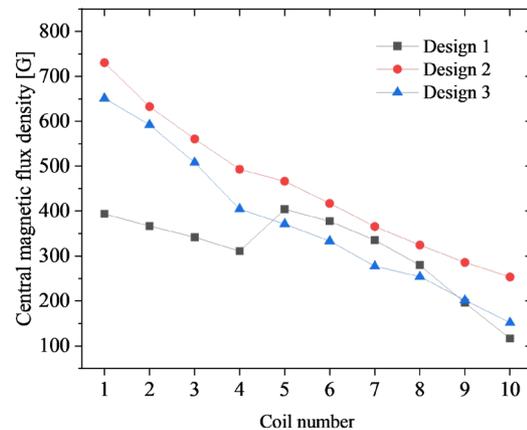


Figure 4: Central magnetic flux density versus solenoid number under a 30°C temperature rise condition for each design (Design 1: 141 A, Design 2: 233 A, Design 3: 193 A).

で各コイル単体の中心磁場を評価した結果を図 4 に示す。励磁電流は、最も温度上昇が高いコイルに合わせ、全てコイルで同一とした。コイル番号は狭い口径側から No. 1~No. 10 である。結果として、案 1 は、巻線数は多いものの、温度上昇が大きく、励磁電流が低くなり、プラズマ集束に重要となるプラズマ発生部側の磁場は最も低かった、案 2 は狭い口径側のコイル長が短く、冷却が効率的に行われるため最も高い励磁電流を許容でき、最大の磁場が得られた。案 3 は特に狭い開口側のホローコンダクターが長く圧力損失が大きいため、案 2 より磁場が低かった。

以上より、冷却水流量が均一で、最大の磁場を形成可能な案 2 を最終設計として採用した。主な設計仕様は、コイル長 144 mm、ターゲット側内径 82 mm、ターゲット側外径 224 mm、広口側内径 195 mm、広口側外径 275 mm、開き角 $\pm 25^\circ$  である。

### 3. テーパー型ソレノイド電磁石の製作

図 5 にテーパーソレノイドコイルの製作過程及び完成

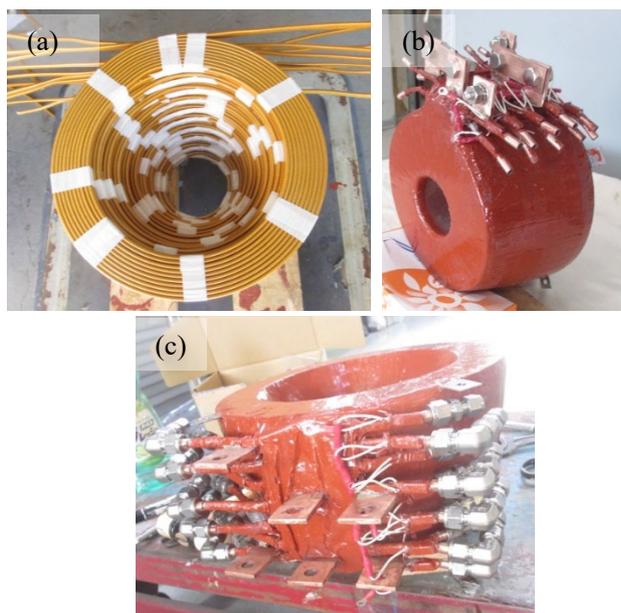


Figure 5: Fabrication process of the tapered solenoid coil: (a) Stacked configuration of 10 solenoid coils. (b) After epoxy impregnation with current electrodes and temperature sensors. (c) Final assembly with water-cooling fittings.

品の外観を示す。10 個のコイルを積層し、テーピングおよびエポキシ樹脂含浸により一体化した。冷却水配管は各コイルに並列接続し、励磁電流の導入端子は 3 系統 (No. 1-2, No. 3-6, No. 7-10) に分割した。

磁場測定の結果、励磁電流 200 A にて最大磁場 3220 G を得た。これにより、設計励磁電流 232.5 A では約 3750 gauss が得られることを確認した。以上により、レーザーイオン源内の限られた空間において Ti までの質量数のプラズマの集束に必要な磁場強度を満たすテーパー型ソレノイド電磁石を実現できた。

### 4. まとめ

本研究では、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および製作を行った。設計に際しては、限られた真空チェンバー内の空間で十分な磁場強度を得るため、冷却性能と磁場強度を考慮し、圧力損失が均一となるよう設計した 10 個のソレノイドを積層する構成を採用した。製作したテーパーソレノイドは設計励磁電流 232.5 A にて約 3750 G が得られることが確認され、Ti プラズマの集束に必要な磁場強度を満たす性能を有することが確認された。

今後は、本電磁石を用いたプラズマ集束の実証実験を行い、プラズマからの高効率なビーム生成技術の開発を進める予定である。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H03749、23K21834 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, “Irradiation Facilities of the Takasaki Advanced Radiation Research Institute”, *Quantum Beam Sci.* 2017, 1(1), 2, pp. 1-19.
- [2] K. Yamada *et al.*, “Ion generation method for TIARA ion implanter”, *JAEA-Technology* 2008-090, 2008.
- [3] K Yamada *et al.*, “Generation of plasma from multiple targets by laser ion source for TIARA ion implanter”, *Journal of Physics: Conference Series* 2743 012094, 2024, pp. 1-5.
- [4] H Kashiwagi *et al.*, “Ti beam extraction from a laser plasma focused by a magnetic field of a solenoid”, *Journal of Physics: Conference Series* 2743 012062, 2024, pp. 1-5.
- [5] S Hosoya *et al.*, “Simulation of laser-plasma focusing using taper solenoid”, *Journal of Physics: Conference Series* 2743 012009, 2024, pp. 1-5.