



このレーザーイオン源の特徴は、フェムト秒の短パルスレーザーを用いることで、照射ごとにプラズマ化し引き出すため、バンチ化されたビーム生成を行うことができる[1]。さらに、パルス幅がフェムト秒であるため、ターゲットへの熱拡散を抑えながらプラズマ化することが可能なため、ナノ秒レーザーと比べて、温度が低いプラズマを生成することができる。

### 3. レーザーイオン源開発の現状

#### 3.1 レーザーシステム

ターゲットをプラズマ化させるために使用するレーザーには、空間的にコンパクトなレーザーシステムの構築が可能なモード同期 Yb ファイバーレーザーを採用した[2]。発振器には光響製の FL-MLYb-kit を用いた[3]。現在のレーザーシステムの構成およびパラメータについては、Fig. 2 と Table 1 に示す。発振器の半導体レーザーの注入電流は 400 mA であり、増幅器の半導体レーザーの注入電流は 1000 mA である。

Table 1: Laser Parameters During Irradiation

Parameters	
Repetition Rate	39.097 MHz
Laser Wavelength	1030 nm
Pulse Energy	3.7 nJ
Pulse Duration	427 fs
Spot Size	240 $\mu\text{m}$
Laser Intensity	$1.92 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$

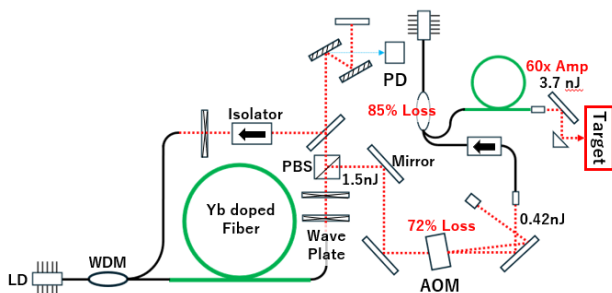


Figure 2: Current Configuration of the Laser System.

Figure 2 のレーザーシステムでは、モード同期レーザー、RF を入力することで任意のタイミングで回折させる音響光学素子(AOM)、および Yb 添加ファイバーを励起して入力したレーザー光を増幅させるファイバーアンプの3つで構成されている。レーザー光のパルスエネルギーは、発振器の段階では、1.5 nJ であるが、AOM で切り出した後は、0.42 nJ となり、ファイバーアンプで増幅した後には、3.7 nJ となる。現在のシステムでは、AOM によるレーザー光の切り出し、ファイバーアンプの融着部分において、エネルギーロスが発生している。今後、エネルギーロスが発生している箇所の見直しと、多段増幅、およびコンプレッサーの増設を行う予定である。

#### 3.2 照射制御システム

レーザーで生成したイオンビームをサイクロトロンに入射させるためには、バンチ間隔を加速器の RF に合わせる必要がある。そこで、レーザー光、RF 基準信号、および AOM を制御するためのパルスジェネレータを同期させることにより、サイクロトロンと同期したビームバンチを生成することができる。回路の同期には NIM の Discriminator(N-TM 103)を使用した。Figure 3 に同期信号生成システムの構成図を示す。

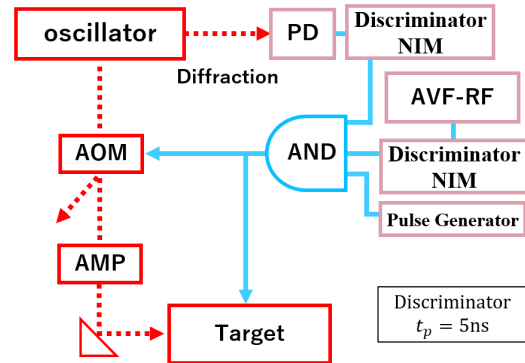


Figure 3: Configuration of the Synchronization Signal Generation System.

34 MHz の RF 基準信号とレーザー光を同期させた信号、および AOM に入力する 10 kHz の間引き信号の同期の様子を Fig. 4 に示す。現状のレーザー照射制御システムでは、同期信号に対するジッターが RF 基準信号の 35 ns の間に、2.4 ns 存在するため、入射加速位相幅には、25 度の振れ幅がある。そのため、サイクロトロンに入射させて加速することは可能だが、入射ごとに位相幅が異なると、加速されたバンチ特性も異なるため、ジッターをさらに減少させる必要がある。

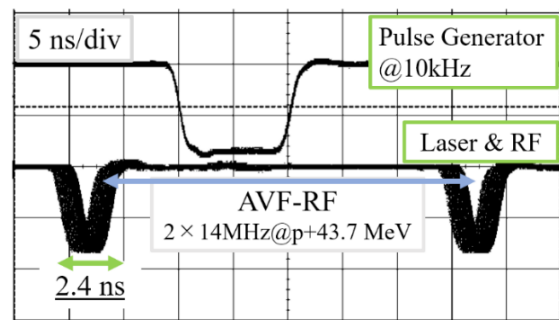


Figure 4: The state of synchronization between the laser, RF, and pulse generator signals.

#### 3.3 Ti 照射結果

上記のレーザーシステムを用いて、Ti に照射イオン生成を試みた。照射ターゲットは、真空チェンバー、内に配置された Ti 製の六角ボルトとアルミニウム枠の電極で構成されており、Fig. 5 でその配置が示した。サファイアガラス製の入射窓を通してレーザー光を六角ボルトに照射し、その際にボルトには数 kV の高電圧をかける。これにより発生した金属イオンを引き出すことができる。その後、イオンが飛び出すと、高電圧側の電荷が欠乏することで電圧降下が発生し、2 M $\Omega$ の抵抗に並列に接続され

た電圧計でイオン生成を検出することができる。今回得られた信号のノイズが約 4 mV 程度であったため、測定できるピーク電流の下限値は2 nAである。しかし、20 mV程度の周期的なノイズが確認されたが、AOM を使用して、10 kHzで切り出したレーザー照射時に有意なピークを確認することができなかった。

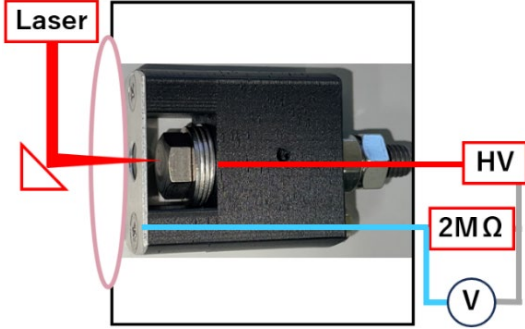


Figure 5: Laser Irradiation of Ti Target and Circuit Diagram.

## 4. 輸送計算

### 4.1 イオン引出しシミュレーション

レーザー生成プラズマは、レーザー集光領域で生成される。そこで、CST-STUDIO[4]を用いて、直径20 μmの球体の領域で水素ガスがプラズマ化したと仮定し、作成したイオン生成引出し電極において静電場による運動エネルギー50 keVの陽子ビーム引出し計算を行った。この時、生成プラズマの陽子および電子の数は、RF 周波数34 MHzで加速する平均電流1 μAに相当するバンチ電荷数とした。初期プラズマ温度はそれぞれ1 eV, 10 eV, 100 eVを仮定し、速度分布には、マクスウェル分布を使用した。Equation (1)は、初期プラズマの粒子密度を示す。

$$\rho_{i=e} = \frac{1 \mu\text{A}}{\frac{34 \text{ MHz}}{V \cdot e}} \quad (1)$$

$$= 4.3825 \times 10^{19} [1/\text{m}^3]$$

$$\left\{ V = \frac{4}{3} \pi (10 \times 10^{-6})^3 \right\}$$

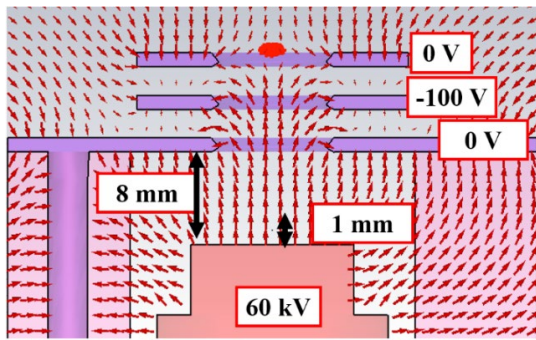


Figure 6: Electrode Model for Extraction Simulation.

Figure 6の引き出し電極モデルの印加電圧は、最大70 kV/cmに設定し、引出し直後のイオンバンチの平均運動エネルギーが50 keVになるように調整を行った。また、レーザー照射位置は、電極から1 mm上と仮定した。

Table 2には、それぞれ初期プラズマ温度における引出し直後のイオンバンチの特性を示した。Table 2によれば、初期プラズマ温度がバンチ特性に影響を与えることが確認できる。具体的には、初期プラズマが直径20 μmの球を仮定した場合、初期温度が1 eVであってもビームバンチの進行方向の長さは14倍に増大された。一方で、初期温度が100 eVだと、そのバンチの長さはさらに140倍にまで伸びる。空間電荷効果によるビームの発散を抑制するためには、引出し電極に十分な高電圧を印加することが必要である。しかしながら、高い電圧を使用しても、プラズマ密度が高すぎると、イオンバンチが十分に集束されない。したがって、ビームの品質を維持し、適切なバンチ特性を確保するためには、生成時のプラズマ温度をできるだけ低く保つことが重要な課題となる。これには、プラズマ生成に必要なレーザー特性の最適化や、電極設計の改良が求められる。

Table 2: The Characteristics of the Bunch After Extraction

Initial Temperature $T_i = T_e$	Emittance $\epsilon_{3\sigma_x}$	Energy dispersion $\Delta E/E$	Beam length $3\sigma_z$
1 eV	0.15 πmm mrad	0.4 %	0.28 mm
10 eV	0.85 πmm mrad	0.7 %	0.88 mm
100 eV	18 πmm mrad	3.2 %	2.82 mm

### 4.2 軸入射ビーム輸送計算

本研究のレーザーイオン源は、AVFサイクロトロン内の軸入射ライン上に設置することを計画している。そこで、プラズマ温度が1 eVのときの電流値1 μAでのイオン引出しシミュレーションの結果をビームの初期値として使用し、多粒子軌道計算コードOPAL[5]を用いて、Inflector入口までのビーム輸送計算を行った。計算したビームラインは、既存の軸入射ラインの配置と同じであるが、レーザーイオン源直後に追加でグレーザーレンズを設置した。これは、引出し後のバンチの発散角が非常に大きいため、バンチをコリメートさせるために使用した。Figure 7には、この輸送計算結果として得られた横方向のビームエンベロープと、進行方向のビームサイズが示されている。また、基準粒子が感じたソレノイド磁場も同時に示した[6]。

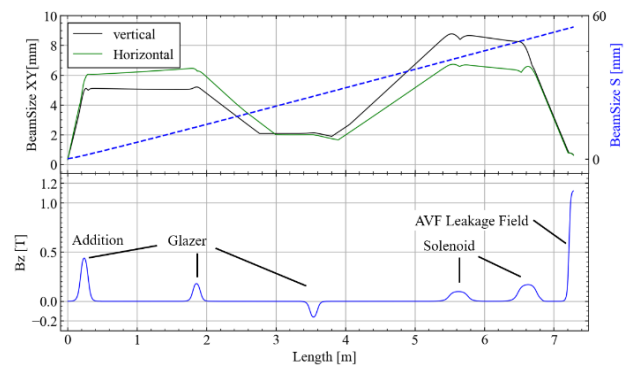


Figure 7: Axial-Injected Beam Envelope at Current Values of 1 μA.

インфлекター電極の入り口は直径 8 mm であるため、ビームのすべてがロスなく輸送できることを確認した。しかし、進行方向のビームサイズが 50 mm 以上伸びてしまった。このとき、サイクロトロン RF 周波数が 34 MHz の場合、位相幅 20 度のときのビーム長は Eq. (2) のように計算される。

$$v\Delta t = v_{50 \text{ keV}} \cdot \frac{1}{34 \times 10^6} \frac{20}{360} = 5 \text{ mm} \quad (2)$$

したがって、バンチングしたビームを入射させる必要があるため、バンチャーを使い圧縮させる必要がある。また、ビーム初期値である引出しシミュレーション直後の横方向位相空間を Fig. 8 に示す。

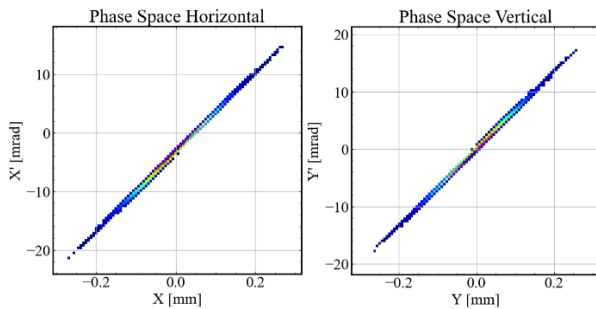


Figure 8: Transverse phase space of the initial beam.

横方向の位相空間は、左側に偏っている。これは、ビーム引出しシミュレーションを行った際に、電極の左側のアースに電場が偏っていたために生じた歪みである。そのため、インфлекター直後のビーム形状は Fig. 9 のように、歪んでしまった。

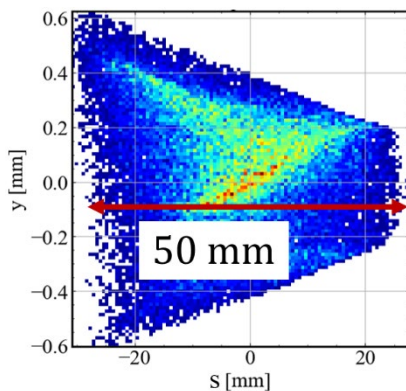


Figure 9: Real space beam shape before the inflector.

さらに、ビームの分布が非常に複雑になった。これは空間電荷効果と、ビームの分布の偏りによる影響と考えられるが、この解析は今後の研究で行う予定である。

## 5. まとめと課題

### 5.1 レーザーシステム

レーザー発振器と1段の増幅後、1パルスあたり 3.7 nJ のエネルギーを Ti ターゲットに照射したが、Ti のプラズマ化を確認できなかった。フェムト秒レーザーによる金属アブレーションに必要なエネルギー強度は定式化されていないが、先行研究では  $10^{12} [\text{W}/\text{cm}^2]$  以上が閾値とされている。このため、レーザーを数十  $\mu\text{m}$  まで集光し、数 100 倍のレーザー増幅が必要である。制御システムにおいては、サイクロトロン RF と同期に成功したが、RF のジッターがあるため、サイクロトロンによる加速において、エネルギー獲得効率の変化が目的の解析には不適であるため、より精密な制御システムの構築が必要である。

### 5.2 引出し・輸送シミュレーション

軸入射ラインでは、ビームの発散角が非常に大きいため、引出し直後でソレノイドによるコリメートが必要であることが判明した。しかし、軸入射ラインでは空間電荷効果とソレノイドの影響により、1  $\mu\text{A}$  のビームでもビーム長が 50 mm に伸びる。そのため、サイクロトロン加速位相に適合するように入射させるためには、バンチャーが必要であることが分かった。

## 参考文献

- [1] Y. Fuwa *et al.*, “短パルスレーザー生成イオンの RF 同期加速によるイオン源”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan.
- [2] M. Kittaka *et al.*, “短パルスレーザーイオン源の開発”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29-September 1, 2023, Funabashi.
- [3] <https://www.symphotony.com/products/ultrashort/fl-mlyb-kit/>
- [4] <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>
- [5] A. Adelman *et al.*, “OPAL a Versatile Tool for Charged Particle Accelerator Simulations”, arXiv e-prints, p.arXiv:1905.06654, May 2019.
- [6] T. Imura *et al.*, “機械学習によるサイクロトロン調整手法の検討”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29-September 1, 2023, Funabashi.