

RCNPにおける短パルスファイバーレーザーイオン源開発の検討

STUDY ON SHORT PULSE FIBER LASER ION SOURCE DEVELOPMENT IN RCNP

松井昇大朗^{#,A)}, 福田光宏^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 齋藤高嶺^{A)}, 田村仁志^{A)}, 安田裕介^{A)}, 友野大^{A)}, 荘浚謙^{A)}, ZHAO HANG^{A)}, Shali Ahsani Hafizhu^{A)}, 井村友紀^{A)}, 渡辺薫^{A)}, 石畑翔^{A)}, 板倉菜美^{A)}, 橘高正樹^{A)}, 岩下芳久^{B)}, 栗山靖敏^{B)}, 不破康裕^{C)},

Shotaro Matsui^{#,A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Takane Saito^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)}, Yusuke Yasuda^{A)}, Dai Tomono^{A)}, Tsun Him Chong^{A)}, Zhao Hang^{A)}, Shali Ahsani Hafizhu^{A)}, Tomoki Imura^{A)}, Kaoru Watanabe^{A)}, Sho Ishihata^{B)}, Nami Itakura^{A)}, Masaki Kittaka^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}, Yasutoshi Kuriyama^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{C)},

^{A)} Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University

^{B)} Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science (KURNS), Kyoto University

^{C)} Japan Proton Accelerator Research Complex / Japan Atomic Energy Agency (J-PARC/JAEA)

Abstract

High-intensity beams are increasingly in demand across a wide range of fields, including medicine, materials science. For example, MW-class cyclotrons are required for accelerator-driven nuclear transmutation systems (ADS), necessitating fundamental studies of space-charge effects due to high bunch density for their realization. To address this issue, our goal is to analyze the behavior of high-density single bunches inside cyclotrons in detail using a laser ion source generating an ultra-short beam pulse. A laser ion source is an ion source in which a solid or gas is irradiated with a laser, and ions are extracted directly from the generated plasma using an electric field. In this study, a fiber laser was used generate ultra-short femtosecond pulses with low power but high energy density. The ion source consists of a mode-locked fiber laser oscillated at 40 MHz, which is synchronized by an acousto-optic element a fiber amplifier, and a Ti target. Furthermore, the feasibility of axial beam injection into the RCNP K140 AVF cyclotron was studied by beam transport calculations using OPAL, which includes space-charge effects. A laser irradiation test is in progress and increase of laser power will be indispensable to observe an ion beam extracted from the Ti target. Reduction of the transversal spread of an axially injected 1 micro-A ion beam was confirmed by the beam transport calculations. However, it was found that the beam size in the longitudinal direction was elongated due to the space charge effect and didn't satisfy the requirement of phase acceptance of the cyclotron.

1. はじめに

大強度ビームは、医療、物質科学、エネルギー研究などの幅広い分野での需要が年々高まっている。特に、加速器駆動型核変換システム(ADS)は、放射性廃棄物の処理において有力な手段である。核変換のためには、1 GeVで10 mAの陽子ビーム、あるいは、数百 MeVで合計 1 A の重陽子ビームが必要とされ、サイクロトロンの場合には、ハイパワーのビーム加速と取り出しが大きな課題である。このため、サイクロトロン内部の高バンチ密度による空間電荷効果の基礎研究が必要であり、これを正確に理解し制御することが大強度ビームの安定供給には不可欠である。そこで、まずはサイクロトロン内部のシングルバンチ加速を詳細に解析するために、短パルスレーザーイオン源の開発に取り組んでいる。短パルスレーザーイオン源は、高時間分解能実験にも有効であり、ナノビーム生成イオン源としての活用も考えられている。本発表では、レーザーシステム開発の現状と、極小領域のプラズマを仮定して行った引出しシミュレーション後に、軸入射ライン上で多粒子軌道計算を行い、ビーム特性

を検討した結果について述べる。これにより、サイクロトロンへの入射に必要な課題を明らかにした。

2. 短パルスレーザーイオン源

本研究のイオン源は、レーザーを集光させることで、水素ガスや金属水素化合物に対して、数十 μm の領域でターゲットを直接プラズマ化し、空間電荷効果による発散前に、高電界で素早くイオンを引き出す (Fig. 1)。

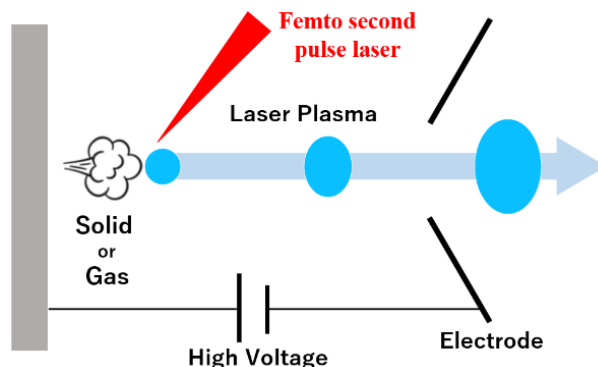


Figure 1: Conceptual diagram of the laser ion source.

[#] smatsui@rcnp.osaka-u.ac.jp

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 μm
Laser Intensity	$1.92 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$

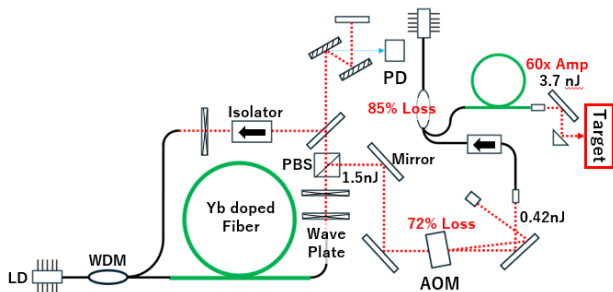


Figure 2: Current Configuration of the Laser System.

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。

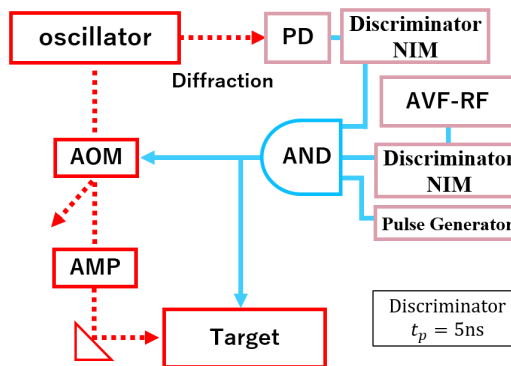


Figure 3: Configuration of the Synchronization Signal Generation System.

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。

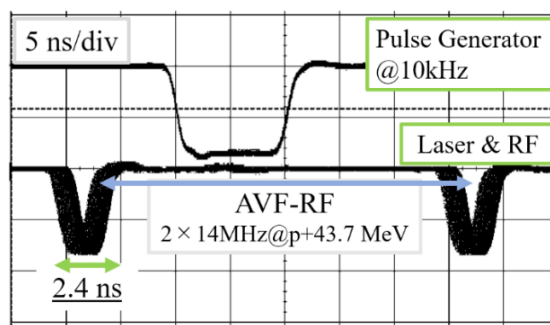


Figure 4: The state of synchronization between the laser, RF, and pulse generator signals.

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、真空チャンバー、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 Ω 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。

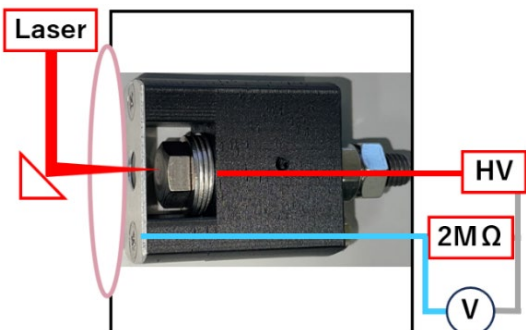


Figure 5: Laser Irradiation of Ti Target and Circuit Diagram.

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。

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

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

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

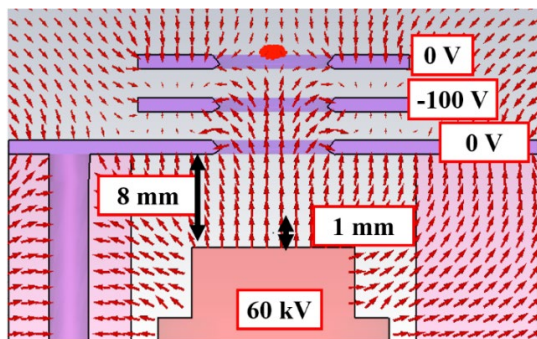


Figure 6: Electrode Model for Extraction Simulation.

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 of the 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]。

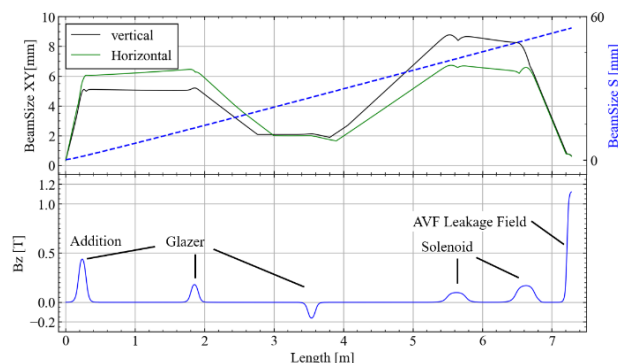


Figure 7: Axial-Injected Beam Envelope at Current Values of 1 μA.

インフレク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。

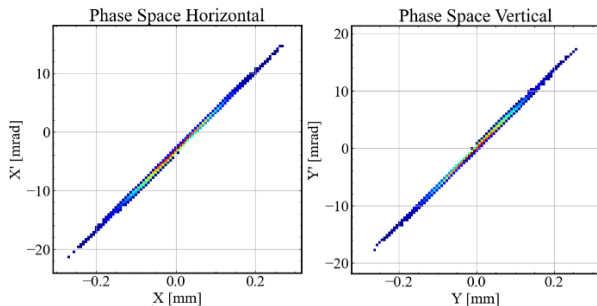


Figure 8: Transverse phase space of the initial beam.

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、インフレクター直後のビーム形状は Fig. 9 のように、歪んでしまった。

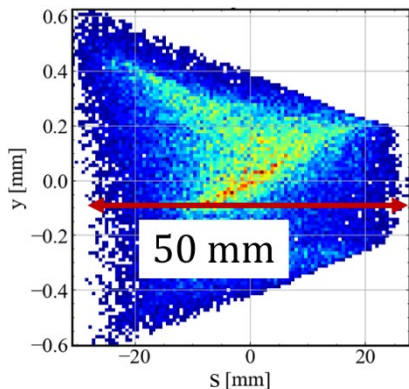


Figure 9: Real space beam shape before the inflector.

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 μm 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、サイクロトロンの 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 μA のビームでもビーム長が 50 mm に伸びる。そのため、サイクロトロンの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.