

レーザー荷電変換入射の原理実証実験に向けたレーザーシステムの開発

DEVELOPMENT OF LASER SYSTEM FOR A PROOF-OF-PRINCIPLE EXPERIMENT OF LASER STRIPPING INJECTION

原田寛之^{#, A)}, サハプラナブ^{A)}, 米田仁紀^{B)}, 道根百合奈^{B)}, 井上峻介^{C)}, 佐藤篤^{D)}, 菅沼和明^{A)}, 山根功^{E)},
金正倫計^{A)}, 入江吉郎^{E)}

Hiroyuki Harada^{#, A)}, Pranab Kumar Saha^{A)}, Hiroki Yoneda^{B)}, Yurina Michine^{B)}, Shunsuke Inoue^{C)}, Atsushi Sato^{D)},
Kazuaki Suganuma^{A)}, Isao Yamane^{E)}, Michikazu Kinsho^{A)}, Yoshiro Irie^{E)}

^{A)} JAEA J-PARC, ^{B)} UEC ILS, ^{C)} Kyoto U. ICR, ^{D)} NAT, ^{E)} KEK

Abstract

The high-intensity proton accelerator adopts a charge exchange injection scheme, which injects with exchanging from negative Hydrogen ion (H^-) to proton by using carbon foil. This scheme can realize high intensity proton beam but the uncontrolled beam losses occur by scattering at the foil. Additionally, the beam collision at the foil may cause the break itself. Therefore, a new injection scheme for higher intensity is needed as an alternative to the foil. We newly propose and develop a laser stripping injection scheme. At the first step, we propose a proof-of-principle (POP) experiment of the scheme in J-PARC and develop a laser system. In this presentation, we will introduce the laser stripping injection scheme and describe an overview of a POP experiment. We will report a current status of the laser system.

1. 研究の学術的背景

1.1 大強度陽子加速器施設 J-PARC と荷電変換入射

加速器を用いた科学実験として、大強度陽子ビームの標的照射後に生成された 2 次粒子 (中性子、ミュー粒子、ニュートリノなど) を用いた最先端の実験のために、世界中で MW 級の大強度陽子加速器が稼働もしくは建設中である。大強度陽子加速器では、線形加速器で加速された負水素イオン (H^-) の 2 つの電子を円形加速器の入射点に設置された“荷電変換用炭素膜”にて剥ぎ取り、陽子へと変換しながら周回する陽子ビームに多周回にわたり重ねて入射することで、パルス状の大強度の陽子ビームを生成している。この入射手法を“荷電変換多重入射”と呼ぶ[1]。この入射手法は、大強度の陽子ビームを生成できる反面、周回する陽子ビームが膜への衝突を繰り返すことで、ビーム自身が散乱され、ビームエミッタンスの増大や大角度に散乱された粒子による制御不能なビーム損失が原理的に発生してしまう。加えて、ビームの衝突による膜へのエネルギー付与のため、大強度ビーム出力時には熱や衝撃による膜の変形や破壊が生じる。そのため、MW 級の大強度出力時の出力や運転効率率は、ビーム損失による残留線量や膜の寿命によって制限される可能性がある。

国内唯一の大強度陽子加速器施設である J-PARC は、400 MeV 線形加速器、3 GeV シンクロトロン (RCS)、50 GeV 主リングシンクロトロンの 3 基の大型加速器から構成され、大強度の陽子ビームを最先端の実験施設へと供給している[2]。J-PARC の心臓部である RCS は、線形加速器で 400 MeV まで加速された H^- ビームの 2 つの電子を剥ぎ取り、陽子ビームへと変換する“荷電変換多重

入射”で 307 周回にわたり貯めこみ、入射後 20 ms の短時間で 3 GeV のエネルギーまで加速する速い繰返しのシンクロトロン加速器である。設計出力は、1 MW を目指しており、現在は、出力 500 kW での定常供用運転を行っている。また、2018 年 7 月 3 日に 1 時間弱の短時間ではあるが、設計出力 1 MW の安定な連続運転に成功した。今後、供給先である中性子ビーム発生用の水銀標的の開発状況や照射時の損傷を確認しつつ、徐々に出力を上げ、1 MW 出力の安定運転を目指す。また、更なる大強度化に向け、継続的に研究開発を進めている。

1.2 さらに大強度化への障害と克服に向けた開発

ビーム利用運転開始以降、RCS の入射部において有意な残留線量が検出された。その入射システムの概要を Fig. 1 に示す。そのビーム損失起源が荷電変換膜による大角度散乱であることをビーム試験とシミュレーションの双方より突き止め、散乱粒子の回収機構の導入によるビーム損失の局所化などを行い、大強度化への道筋を付けてきた[3]。また、大強度出力時に顕著となる空間電荷効果の緩和に加え、膜への衝突粒子数を低減する“ペインティング入射”[4]と呼ばれる手法を確立させた。この入射は、多重入射中にペイント軌道を Fig. 1 の水色から青色の軌道に変化させることで、周回ビームを膜から遠ざけ当たらないようにする手法である。これにより、307 周回入射時において 1 粒子あたりの平均衝突回数を 7 回程度まで大幅に削減させてきた[5]。今後設計出力 1 MW へ徐々に増強していく過程で、荷電変換膜を常時監視し、膜厚など系統的なデータを取得していきながら、進めていく必要がある。膜の変形が分かる参考図として、300kW 出力での運転前後の膜の写真を Fig. 2 に示す。しかしながら、さらなる大強度出力 1 MW 以上には炭素膜を用いた荷電変換入射に代わる新たな入射手

[#] hharada@post.j-parc.jp

法が必要と考えられており、その障害克服に向けた解決策であると国際的にも共通認識となっている。

米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) の核破砕中性子源施設 (SNS) の線形加速器のビームラインにおいて、レーザーによる電子励起と強磁場による電子剥離を組み合わせた“レーザー補助荷電変換入射”の原理実証実験が実施されている[6]。次章で詳細は述べるが実用化には非常に多くの課題がある。一方、J-PARC においても荷電変換膜の代わりにレーザーのみを使用して、H⁻から陽子へと変換し入射する“レーザー荷電変換入射”を新たに考案し、実現を目指して研究開発を進めている[7, 8]。本稿では、炭素膜に代わる 2 つの荷電変換入射手法を紹介し、J-PARC で進めているレーザー荷電変換入射の原理実証実験に向けたレーザー開発状況を報告する。

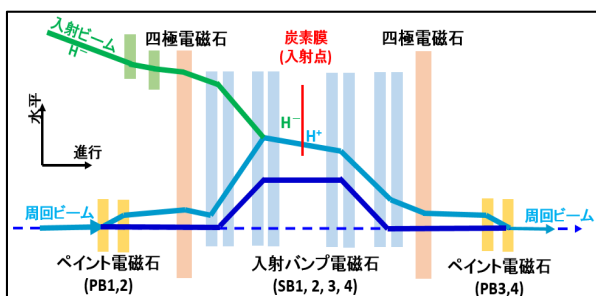


Figure 1: RCS injection system. Red line shows carbon foil at injection point. Light and dark blue lines show bump orbits of injection start and end in the circulating ring, respectively. Green line shows injection beam orbit.

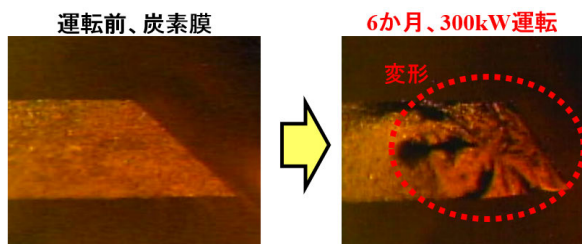


Figure 2: Pictures of carbon foil before (left) and after (right) user operation with 300 kW output.

2. レーザー補助荷電変換入射

Figure 3 にレーザーによる電子励起と強磁場による電子剥離を組み合わせた“レーザー補助荷電変換入射”の原理を示す。H⁻イオン中の 2 つの電子は、基底準位 (n=1) と高準位 (n>2) に存在する。H⁻イオンが強磁場で曲げられた際の遠心力によって、高準位の 1 つの電子は H⁻イオンから剥離し H⁰ へと変換する。これは、ローレンツストリッピングと呼ばれ、ビームの運動エネルギーと電子の励起準位に依存して電子剥離可能な磁場強度が決まる。もう 1 つの電子は基底状態 (n=1) にあるため、レーザーを用いて高準位 (n=3) に励起する。直後に再度強磁場によるローレンツストリッピングによって H⁰ から電子を剥離し、陽子へと変換する。SNS のビームエネ

ギー 1 GeV では電子剥離に 1 T 以上の磁場を必要とするため、最大 1.2 T の永久磁石を電子励起用のレーザーの上下流に配置している。上流側の磁石で 1 つめの電子を剥ぎ取り、H⁰ イオン中のもう 1 つの電子は、下流側の磁石で剥ぎ取るためにレーザーで n=1 から n=3 に励起している。SNS では、エネルギー 1 GeV、マイクロバンチ長 ~35 ps、周波数 402.5 MHz、入射パルス長 1.0 ms、繰り返し 60 Hz の H⁻イオンビームを荷電変換入射しているが、現在までに最終目標の 1/100 の H⁻ビームパルスに対して 10 Hz のみレーザーを照射し、90% 以上の荷電変換効率を達成している[9]。この成果は、次世代大強度加速器における膜に置き換わる荷電変換入射の実現に向けた原理を実証したもので、世界的にも評価が高い。

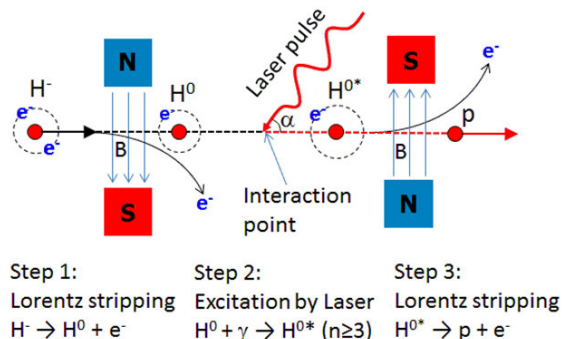


Figure 3: Principle of laser assisted stripping injection.

しかしながら、入射システムとして実現するには、“大口径磁石による強磁場 1.2 T の実現”、“強磁場 1.2 T を用いた際のビーム入射システムのビーム力学的な設計”、そして“高繰り返しと長パルス化による 600 倍以上高い平均出力のレーザー”が大きな課題となる。さらに、強磁場は陽子自身にも影響を与えるため、原理的に発生する入射ビームの角度広がり、ビーム入射を行う上で最大の課題となる可能性がある。Figure 4 の上図に進行方向に対するフリッジ領域の磁場 (40 T/m) と電子剥離 (H⁻から H⁰) の割合を示す。図中に示すように、磁場は進行方向に対して徐々に立ち上がる。そこに H⁻ビームが通過した際にある確率で電子剥離が起こる。H⁻時は磁気力を受け、剥離 (H⁰) 後はその力を受けないため、ビーム内の各粒子が進行方向の異なる位置で電子剥離が起こることにより、入射ビームに大きな角度広がりが生じる。計算によると 40 T/m の磁場では ±5 mrad の角度広がりとなる。Figure 4 の下図に入射点での周回ビームの位相空間における入射ビームと周回ビームの関係を示す。現在、入射ビーム (緑色楕円) をペインティング入射により要求される領域 (水色楕円) に広げながら多重入射を行っている。この角度広がり (赤色点線楕円) が生じた場合、ペインティング入射する以上の要求を超える非常に大きなエミッタンスを持つ周回ビームになってしまう。周回リングのアクセプタンスを変更することなく、要求の範囲内のビームサイズに抑えるためには、100 T/m 以上のハードエッジのフリッジ磁場が要求され、非常に大きな課題となる。また、大強度出力には空間電荷効果より蓄積ビーム

の電荷密度を抑制する必要があるが、このビームは中心の電荷密度が高くなってしまい、大強度出力時に大きなビーム損失が発生する可能性が高い。

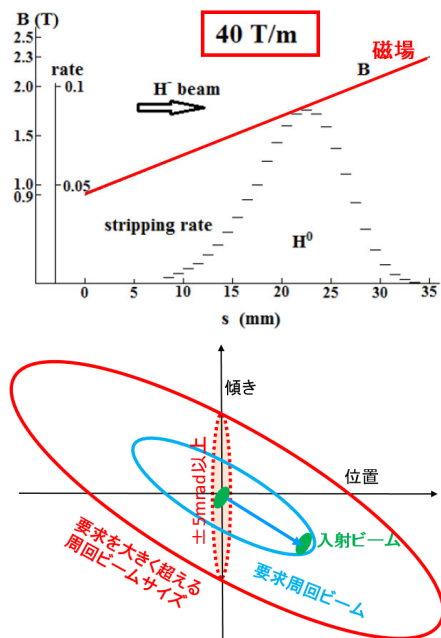


Figure 4: Top figure is magnetic field B (T) and stripping rate (H⁺ to H⁰) along beam longitudinal direction. Bottom figure is phase plot at injection point in the case of typical painting injection (light blue) and laser assisted stripping injection.

3. レーザー荷電変換入射

RCS では、前段の線形加速器からエネルギー400 MeV、マイクロバンチ長 100 ps、周波数 324 MHz、入射パルス長 0.5 ms、繰り返し 25 Hz の H⁺イオン入射ビームに対して電子を 2 つ剥ぎ取り、陽子へと荷電変換しなければならない。このエネルギー400 MeV の H⁺ビームは SNS の 1 GeV のエネルギーより遅いため、SNS と同様にローレンツストリッピングを用いた電子剥離には 1.8 T 以上の強磁場が必要となる。前章で述べたように入射ビームの角度広がりをなくすためにも強磁場を用いない手法を模索し、強磁場による電子剥離に替わり、レーザーのみで電子剥離を行う“レーザー荷電変換入射”を新たに考案し、研究開発を進めている[7, 8, 10]。

3.1 レーザー荷電変換入射

“レーザー荷電変換入射”の原理を Fig. 5 に示す。この手法では、H⁺もしくは H⁰ の電子剥離は強磁場を用いずレーザーで行うのが特徴である。まず、H⁺にレーザーを照射し、電子を1つ剥離する (Fig. 5 の①)。H⁰となった後、もう 1 つの電子は基底状態(n=1)にあり、その束縛エネルギーは 13.6 eV であり、レーザー波長にすると 90 nm である。非常に短波長となるため、SNS と同様に一度電子励起し、直後に電子剥離を行う事も考えている。例えば、102 nm (12.1 eV に相当) の波長を照射し、第 2 励起状態(n=3)に励起し、直後に 817 nm の波長のレーザー

を照射し電子剥離を行う。しかしながら、どちらの手法でも短波長であるが、国内で唯一 400 MeV の H⁺もしくは H⁰ ビームは光速の 70 %近い速度を持っているため、レーザーとの角度 α に依存するドップラー効果によって、静止系では異なるレーザー波長 λ_0 で相互作用する。

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{(1 + \beta \cos \alpha) \gamma} \quad (1)$$

ここでの β と γ はローレンツ係数であり、400 MeV の H⁺もしくは H⁰ ビームでは、 $\beta=0.713$ と $\gamma=1.426$ となる。このドップラー効果によって、ビームの感じる (静止系) 波長が伸びる。保有している 2 基のレーザー (Nd:YAG レーザー, 1064 nm, ArF エクシマレーザー, 193 nm) を用いた際の静止系での波長とその照射角、90%以上の変換効率に必要な 1 パルスあたりのレーザーエネルギー (計算) を Table 1 に示す。

想定している荷電変換過程の成否、必要なレーザーのパルスエネルギーの定量評価、H⁺ビームの縦・横方向のパラメータ依存性、レーザーの調整手法の確立などを実施すべく、J-PARC の線形加速器と RCS を結ぶ H⁺ビーム輸送ライン (L3BT ライン) において、10⁵ パルスを超える入射ビームの内の数パルスのみに対するレーザー荷電変換の原理実証実験を計画しており、2019 年度から Nd:YAG レーザーを用いた電子剥離から実験実施を予定している。その原理実証実験に向け、

1. レーザー照射用超高真空ビームラインの設置
2. レーザー調整・遠隔制御の整備
3. レーザーの照射位置を変えず照射角のみを遠隔で変更可能なシステムの開発
4. 荷電変換効率測定 (H⁺から H⁰、H⁰から H⁺) の開発

が必須となる。入射システムとしての実用化に向けた開発も並行して進める。原理実証実験の結果に大きく依存するが、324 MHz の繰返しでリニアックから輸送される 10⁵ パルス (1 パルスあたりのパルス幅 : < 0.1 ns) の全てへのレーザー照射という大きな課題は変わらず存在する。そのため、高繰返しレーザー光源の開発やレーザー蓄積リングの開発[11]も行う。本稿では、上記 1~4 の内 1~3 に関して次章で報告する。原理実証実験を実施するビームラインや H⁺ビームの光学系、上記 4 に向けた開発に関しては、この会議の別の報告書で纏めている[12]。

Table 1: Laser, Charge-Exchange Process, Wave Length of Static System, Collision Angle and Pulse Energy

Laser	荷電変換過程	波長	照射角	エネルギー
Nd:YAG	①剥離	743 nm	90°	> 1 mJ
ArF Excimer	②励起	102 nm	63.3°	> 2 mJ
Nd:YAG	③剥離	817 nm	97°	> 1 mJ
ArF Excimer	②+③剥離	90 nm	45°	数 mJ

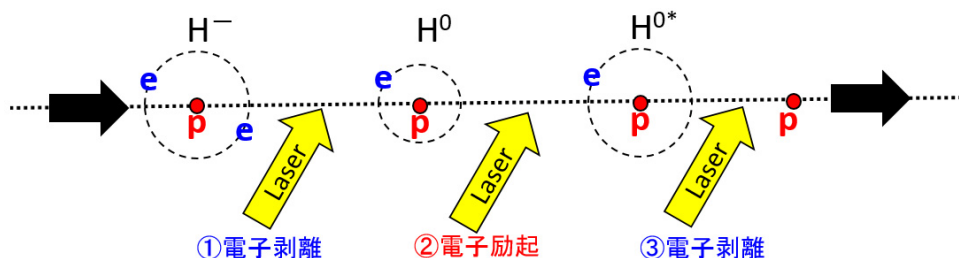


Figure 5: Principle of laser stripping injection.

4. 原理実証実験に向けた開発

4.1 レーザー照射用超高真空ビームライン

前章で上述したように、レーザー荷電変換に必要なレーザーや H⁻ビームが検討・想定しているパラメータで正しいかどうかを検証すべく、原理実証実験の実施を計画している。実施に向けて、400 MeV の H⁻ビームラインにレーザー照射用超高真空チャンバを製作し、設置した。その装置の構造図を Fig. 6 に示す。Table 1 で表記した H⁻ビームに対する全ての照射角でレーザー照射が可能な構造である。

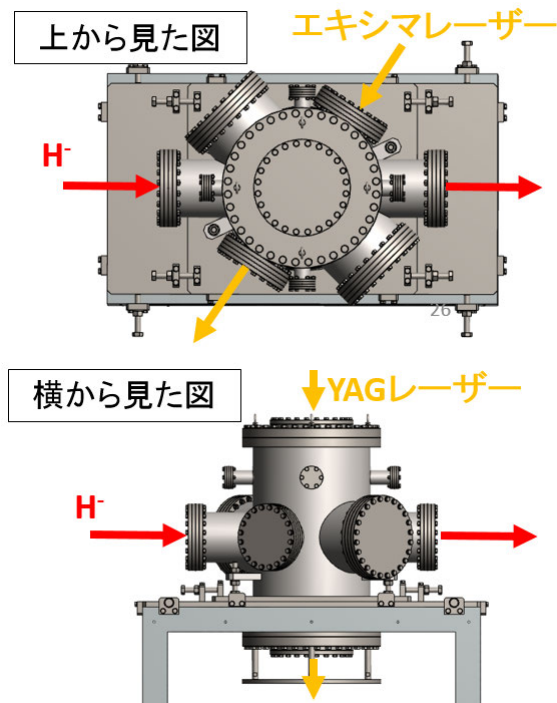


Figure 6: Vacuum chamber for a POP experiment.

4.2 原理実証実験に向けたレーザー調整

現有しているレーザーの性能を把握する事が、原理実証実験における各々の反応度を知るうえで必須となる。そこで、2 台のレーザーに関して共に調整を行い、横方向・縦方向のプロファイルを測定した。その結果を Fig. 7, 8, 9 に示す。Nd:YAG レーザーからパルスエネルギー

200 mJ で出力されるレーザーをガラス板で数%程度に間引きプロファイラーに入力して測定した。出力口直後は 5 mm 径の円形で傾きも持っていないビームであったが、4 m 以上離れた場所での測定結果は Fig. 7 の上図のようにスパイク状の構造が見られた。また、Fig. 8 に縦方向の測定結果を示す。仕様の通り、パルス幅 10 ns 程度であったが、高分解能のバイプラナ管で測定した結果、フォトダイオードを用いた測定ではわからなかったスパイク状でパルス毎に変化する縦モードが見られた。今後、シードレーザーによる成形か、新たなレーザーが必要である。中心位置の安定性に関しては、空気の流れを遮断するようにカバーをする事で 1 mm 以上あった位置揺らぎが 0.1 mm 以下となり、十分な安定性を持っている事が判明した。時間揺らぎに関しては、有意なものも観測されなかった。

次に、パルスエネルギー 13 mJ の ArF エキシマレーザーは予想通り Fig. 7 の下図のように台形型のプロファイルであったが、垂直方向のみ +4 mrad の傾きを持っており、今後これを考慮した輸送系の構築が必要である。一方、Fig. 9 の上図で示すように 180 ns 以上の大きな時間揺らぎを持っている事が判明した。エキシマレーザー本体の電気回路における揺らぎの可能性を疑い、サイラトロンへ直接光信号トリガーを入力し、下図のように時間揺らぎを 3 ns 以下に補正した。

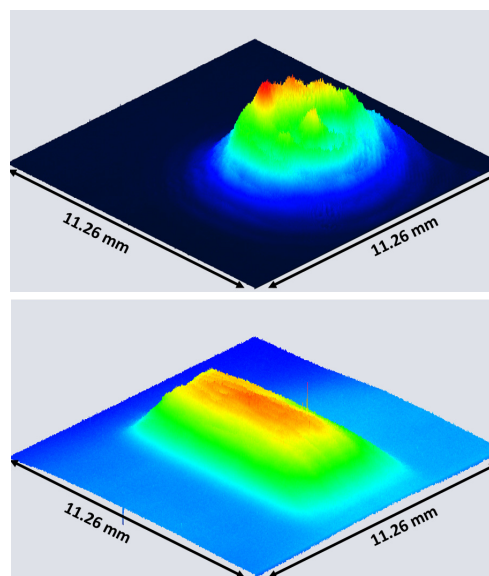


Figure 7: Measured transverse profiles of Nd:YAG (top) and ArF excimer (bottom) lasers.

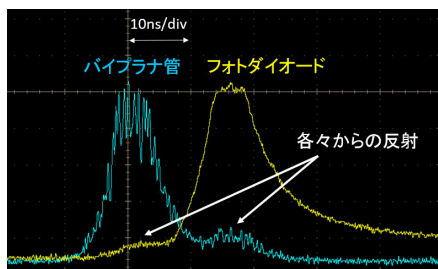


Figure 8: Measured longitudinal profiles of Nd:YAG by high (blue) and low (yellow) resolution detectors.

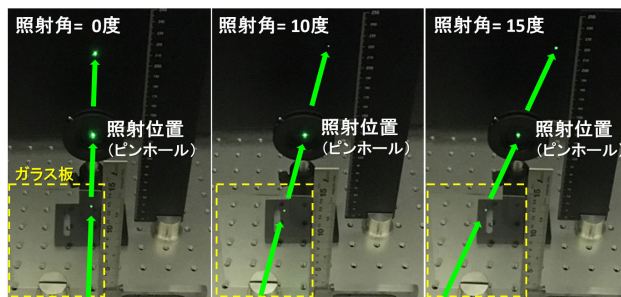


Figure 11: Result of laser angle control.

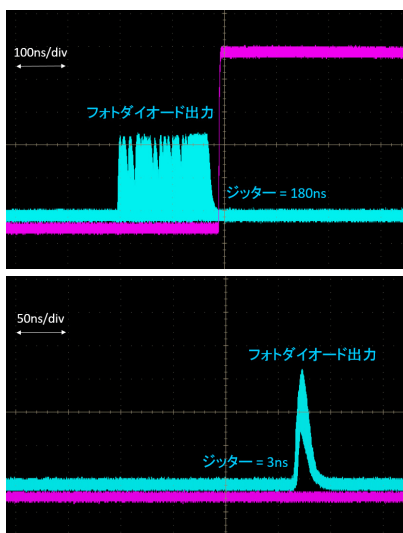


Figure 9: Measured longitudinal profiles (blue) of ArF Excimer before (top) and after (bottom) jitter correction.

4.3 レーザー照射角駆動システム

Table 1 に示すように、レーザー照射角によって、H-ビームが感じる静止系の波長が異なる。この照射角を遠隔制御しなければならぬ。そのため、照射位置を変えずに照射角のみを変更するレーザー照射角駆動システムを構築した。そのシステムは、加速器運転中に遠隔で制御可能で精密に動作する直線型と回転型自動ステージ 2 台を組み合わせた構造 (Fig. 10) である。構築後、目標の照射位置に絞りを設置し、そのピンホールの前方にガラス板、後方に黒アルマイト板を配置し Nd:YAG レーザーを用いて、性能を確認した。その結果を Fig. 11 に示すように、照射角のみ制御可能な事を実証した。

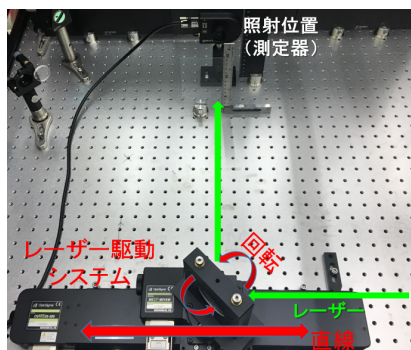


Figure 10: Laser angle tuning system.

5. まとめ

本研究では、数 MW 級の大強度陽子加速器において必須となる円形加速器への革新的な入射手法である“レーザー荷電変換入射”の実現を目指している。その原理実証実験を計画し、レーザー開発を進めている。これまでにレーザー照射用ビームラインの設置、現有するレーザーの性能の確認、照射角駆動システムの構築が完了した。レーザー性能確認によって、新たな課題が見つかり、今後 2019 年度から実験を開始すべく、新たなレーザー光源の開発も視野に入れ、開発を進めていく。

謝辞

J-PARC 加速器ディビジョンの長谷川和男ディビジョン長、林直樹第三セクションリーダー、山本風海第二セクションリーダーをはじめとして、施設工務セクション、業務ディビジョンの皆様には多くのサポートをいただきました。本当に感謝いたします。

VIC インターナショナル社の飯田淳氏、小野淳氏、万田賢一氏、横谷真弘氏には、レーザー照射用真空チャンバの設計・製作・設置をしていただきました。本当に感謝いたします。

本研究は [JSPS 科研費 JP16K17542](#)、[日米科学技術協力事業 \(高エネルギー物理分野\)](#)、[日本原子力研究開発機構・萌芽研究開発制度](#) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Harada, OHO'10, KEK, 2010.
- [2] Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, JAERI Report No. JAERI-Tech 2003-004 and KEK Report No. 2002-13.
- [3] S. Kato *et al.*, PRST-AB **16**, 071003 (2013).
- [4] H. Harada, Ph.D thesis of Hiroshima University / KEK report 2009-7, 2009.
- [5] H. Hotchi *et al.*, in Proc. of PASJ2016, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp. 61.
- [6] S. Cousineau *et al.*, in Proc. of HB2014, East Lansing, MI, Nov. 10-14, 2014, pp. 299.
- [7] I. Yamane *et al.*, Journal of PASJ, Vol. 13, No. 2, 2016, pp. 80-90.
- [8] P.K Saha *et al.*, in Proc. of HB2016, Malmo, Sweden, Jul. 3-8, 2016, pp. 310.
- [9] S. Cousineau *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 074801 (2017).
- [10] P.K Saha *et al.*, in Proc. of HB2018, Daejeon, Korea, June 17-22, 2018.
- [11] H. Harada *et al.*, in Proc. of PASJ2017, Hokkaido, Aug. 1-3, 2017, pp. 684-688.
- [12] P.K Saha *et al.*, in this proceedings.