

J-PARC におけるレーザー荷電変換実験に向けたレーザー開発状況

STATUS OF LASER DEVELOPMENT FOR LASER STRIPPING EXPERIMENT AT J-PARC

原田寛之^{#, A)}, サハプラナブ^{A)}, 米田仁紀^{B)}, 道根百合奈^{B)}, 湊葵^{B)}, 佐藤篤^{C)}, 柴田崇統^{D)}, 金正倫計^{A)}
Hiroyuki Harada^{#, A)}, Pranab Kumar Saha^{A)}, Hiroki Yoneda^{B)}, Yurina Michine^{B)}, Aoi Fuchi^{B)}, Atsushi Sato^{C)},
Takanori Shibata^{D)}, Michikazu Kinsho^{A)}
^{A)} JAEA J-PARC, ^{B)} UEC ILS, ^{C)} NAT, ^{D)} KEK

Abstract

The high-intensity proton accelerator adopts a charge exchange injection scheme, which injects with exchanging from negative Hydrogen ion to proton by using carbon foil. This scheme is destructive-type method by using the foil and can accumulate high intensity proton beam. However, the uncontrolled beam losses by scattering at the foil and the foil breaking by the beam collision are a key issue of high-intensity proton accelerator. In order to realize higher intensity, new injection scheme of non-destructive type is needed instead of the foil. We newly propose laser stripping injection scheme by using laser pulse. We plan proof of principle experiment at J-PARC and are developing the laser system. In my presentation, we introduce the overview of laser stripping injection scheme and report the status of laser development.

1. 学術的背景

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、入射中に周回するビームが膜への衝突を繰り返すため、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)、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大強度の陽子ビームを生成している。そして RCS は、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 600 kW での定常供用運転を行っている。また、2018年7月から数度にわたり、数日程度ではあるが、設計出力 1 MW の安定な連続運転に成功している。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(1.5 MW)に向け、継続的に研究開発を進めている。

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、そのビーム損失起源が入射時の荷電変換膜におけるビームの散乱であることを突き止め、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、1粒子あたりの膜への平均衝突回数を41回から7回程度まで大幅に削減させてきた[5]。この放射化に加え、膜の変形が生じている。今後設計出力 1 MW へ徐々に増強していく過程で、膜の耐久性の向上に向けた開発や荷電変換膜を常時監視行っていく必要がある。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(衝突型)の課題克服に向け、解決策として新たな非衝突型の入射手法の必要性が国際的な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た[6]。その手法は、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非衝突型の荷電変換を目指したものであり、現在までに最終目標の1/100のH⁻ビームパルスに対して、定格の繰返し60 Hz に対し10 Hzのみ高出力レーザーを照射し、90%以上の荷電変換効率を達成している[7]。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。しかしながら、入射システムへの適用(実用化)には非常に大きな課題がある。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

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

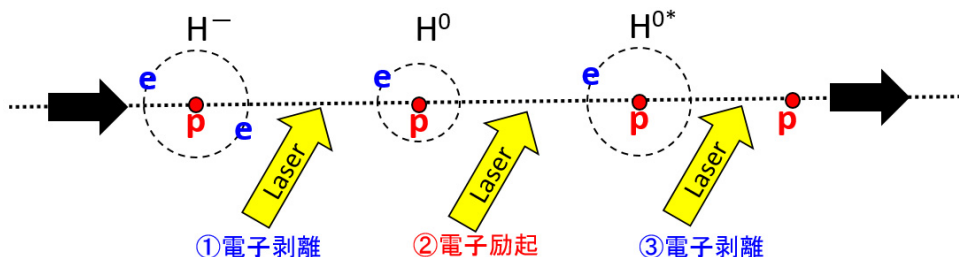


Figure 1: Principle of laser stripping injection.

[8-11]。また、レーザー・ビーム相互作用を用いた荷電変換研究や技術開発は、上述した米国 ORNL だけでなく世界中で拡大している。例えば、米国フェルミ加速器国立研究所では、線形加速器からブースターリング加速器への入射パルスを操作するために、レーザーを用いたビームノッチャと呼ばれるビームチョップシステムを開発し、実際のビーム運転で運用されている。さらに、金属ワイヤモニタに代わるレーザーワイヤプロファイルモニタの開発、レーザーを用いた縦方向ビームコリメータの開発などが進められている。そのため、本研究でもビーム・レーザー相互作用を利用した研究開発も視野に入れ、開発を進めている。本稿では、J-PARC で進めているレーザー荷電変換入射の原理と、その原理実証実験に向けたレーザー開発や準備状況、今後のスケジュールなどを報告する。

2. 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unch長:約 100 ps、周波数:324 MHz、入射パルス長:0.5 ms、繰り返し:25 Hz の H⁻イオンビームが入射される。そして、その入射ビームの 2 つの電子を剥ぎ取り、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、SNS より 1.5 倍 (1.8 T 以上) の強磁場が必要となる。また、強磁場によるビーム拡がりの影響が大きいと、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

2.1 レーザー荷電変換入射の原理

“レーザー荷電変換入射”の原理を Fig. 1 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のみで行うのが先行研究との大きな違いである。まず、H⁻にレーザーを照射し、電子を1つ剥離する (Fig. 1 の①)。H⁰となった後、もう1つの電子は Fig. 2 の電子のエネルギー準位に示すように基底状態 (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約 91 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 (Fig. 1 の②)、直後に電子剥離 (Fig. 1 の③) を行う事も考えている。例えば、Fig. 2 に示すように 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、

どちらの手法でも真空紫外領域の短波長であるためレーザー光源の高平均出力化は非常に困難であるが、国内で唯一 400 MeV の H⁻または H⁰ビームは光速の 71% 近く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) 波長が照射角 α によって伸縮する。このため、このドップラー効果によりレーザー波長として 200nm 以上の長波長で対応できる。本研究では、レーザー光の高出力化が既存の技術で可能な YAG レーザー (波長:1064 nm) を用いて電子剥離、そしてその YAG レーザーの 5 倍波 (波長:212 nm) を用いて電子励起を行うべく、開発を進めている。その 5 倍波を使用し、照射角 $\alpha = 28$ 度で $\lambda_0 = 91\text{nm}$ (イオン化)、 $\alpha = 72$ 度で $\lambda_0 = 121\text{nm}$ (n=2 へ励起)、 $\alpha = 51$ 度で $\lambda_0 = 102\text{nm}$ (n=3 へ励起) が可能となる。これは、レーザー照射角でビームに作用する波長を可変、つまりエネルギー準位を走査可能であることも本研究の大きな特徴である。このような光速に近いイオンとレーザー光との相互作用を利用した荷電変換や電子励起は、これまでの静止系とは異なる新しい原子過程となり学術研究としても新しい提案ともなりうる。

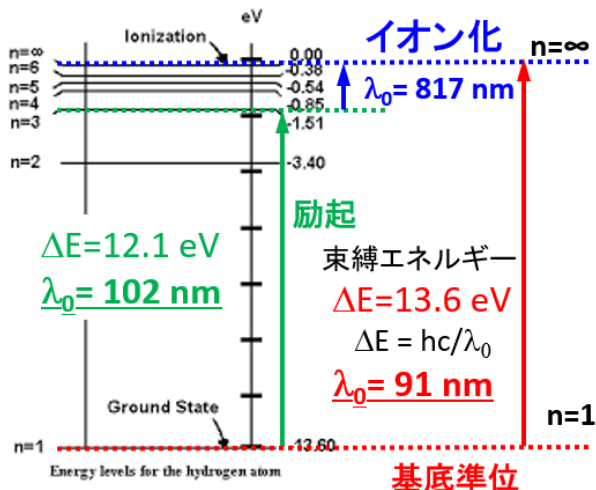


Figure 2: Energy level of hydrogen atom (H⁰).

2.2 原理実証実験 (POP)

光による「負水素イオン: $\text{H}^- \Rightarrow$ 中性水素: $\text{H}^0 \Rightarrow$ 陽子: p 」の荷電変換過程は、その波長依存の断面積はすでに明らかにされているが、見積計算では 324 MHz で到来するイオンビーム 1 パルスに対し、10 mJ 程度の赤外、深紫外レーザー光が 100 ps 程度のパルス幅が必要となり、1 秒あたりのレーザーエネルギー総量は 23 kJ となる。そのため、単に 2 段階のイオン化に対する 2 つのレーザー光とはならず、上述しているようにビームが相対論的速度を利用したドップラー効果による照射光の波長シフト、高効率でかつ高出力化が可能なレーザー波長の選択、励起準位を利用した段階的な励起・イオン化ルートの選択など、総合的な効率や実現性を実験的に評価する必要がある。つまり、光源の平均出力を如何にして抑制するのか、どのような効率的な荷電変換方式(イオン化へのルート)を選択するのか、が入射システムとしての実用化には重要課題となる。技術的な課題としては、光速に近いイオンビームに対するレーザー光のマッチング制御と、バースト高強度モードで高平均出力、さらに高エネルギーパルスといった様々なレーザー光にモード変換空間のリサイクリングをカップルさせたシステム開発、イオンビームの光に合わせた運動量空間・実空間での形状やパラメータの最適化など、多くの事を一つずつモデル計算と実測を比較しつつ、確立する必要がある。

この原理実証に加え、レーザーの総合的な効率や実現性、技術的な課題の明確化や確立を目指し、レーザー荷電変換入射($\text{H}^- \rightarrow \text{H}^+$)の原理実証実験(POP 実験; a proof of principle)を計画している。400 MeV の H⁻ビームを用いた POP 実験は、2021 年度冬からの開始を予定しており、その実験に向けた準備に関しては、他の発表にて詳細を説明している[12]。本章では、2020 年冬から開始予定の 3 MeV の H⁻ビームを用いた第一段階の電子剥離実験($\text{H}^- \rightarrow \text{H}^0$)の準備状況に関して述べる。その実験は、J-PARC 施設内にある 3 MeV のテストビームラインである RFQ テストスタンドにおいて実施予定である。Figure 3 にそのセットアップを示す。イオン源から出射され RFQ で加速された 3 MeV の H⁻ビームに対し、レー

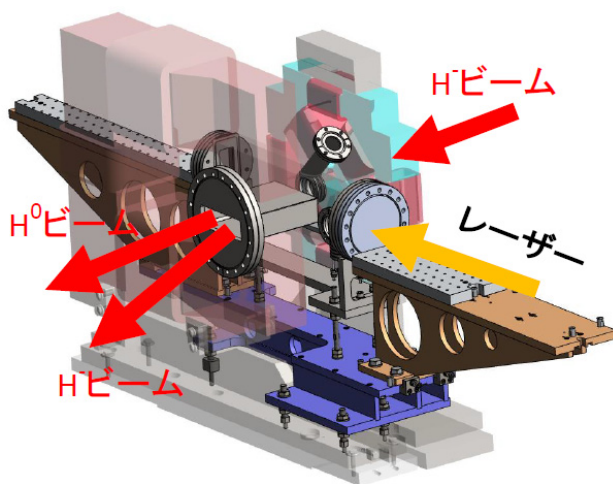


Figure 3: Setup of electron stripping experiment by using laser at RFQ test stand.

ザーを照射する。照射点の下流に設置された偏向電磁石にて、H⁻ビームと H⁰ビームを分離し計測することで、電子剥離過程($\text{H}^- \rightarrow \text{H}^0$)を理解する事ができる。この実験の目的は、第一に 3 章で後述する開発するレーザー光源による加速器同期でのレーザー照射の実現、第二に電子剥離率のレーザー出力依存性の測定、第三に 4 章で後述するトップハットシェイプのレーザー光学系によるレーザー出力低減に向けた高効率な電子剥離の実証、第四に 4 章で後述するレーザー出力低減に向けた像転送マルチパス光学共振器による高効率な電子剥離の実証である。これらの結果は、400 MeV の POP 実験にも直接繋がるものとなる。

3. レーザー光源

RCS の入射システムにおいて実用化するためには、前段の線形加速器から入射される H⁻ビームに、レーザーパルスを時空間でのマッチングが必須となる。そのため、最終的なレーザー光源には、加速器のビームタイミングに同期し、パルス幅:100 ps、周波数:324 MHz、時間:0.5 ms、繰返し:25 Hz で、パルスエネルギーが数 mJ から数 10 mJ の高出力が要求される。レーザーの高出力化が比較的容易であること、非線形結晶にて 212 nm の波長に変換可能であること、などから波長 1064 nm の YAG レーザーを基本として開発を進めている。

現在、POP 実験に向けて開発を進めているプロトタイプのレーザー光源のシステムを Fig. 4 に示す。ファイバーレーザーから連続的(CW)に出力された 20 mW のレーザーに対して、電気光学変調器(EO modulator)で任期のパルス構造に変調し 0.1 nJ 程度のパルスエネルギーを持つレーザーパルスを生成する。その際、加速器同期のシステムクロックを任意波形発生器(AWG)に外部トリガーとして送り、そこで生成された波形の電気信号を高周波発生器(RF generator)で生成し、その電気光学変調器に入力することで、加速器のビームパルス構造に同期した低出力ながら高品質のレーザーパルス列を生成する。その後、全てファイバーで構成された 3 段階の増幅器にて平均出力を上げていく。この AWG は、1 つ 1 つのパルス波高値を調整可能であるため、増幅後のパルス列の出力の一様性を調整することができる。レーザーの繰返し 25 Hz のほとんど(40 ms のうち 39.5 ms)は休止期間となるため、そのファイバー増幅部での寄生発振や自然放射増幅光を抑えるために、高繰返し定常プリアンプ部とパルス励起を行うプリアンプ部を同時に用いる設計となっている。平均高出力パルス列のレーザーをファイバー輸送から空間輸送に切り替え、高エネルギー増幅が可能なランプ励起増幅器により、POP 実験で要求されるパルスエネルギーを実現できるシステムとなっている。前章で述べた 2020 年冬から開始される 3 MeV の H⁻ビームを用いた第一段階の電子剥離実験($\text{H}^- \rightarrow \text{H}^0$)に向け、電気通信大学新世代レーザー研究センター(UEC ILS)にて開発が進んでいる。

4. レーザー出力低減に向けた光学系

2 章で述べたように、レーザーの平均出力を如何に低減できるのかが、レーザー荷電変換入射の実用化に向け、重要な課題となる。POP 実験では、原理実証に加え、

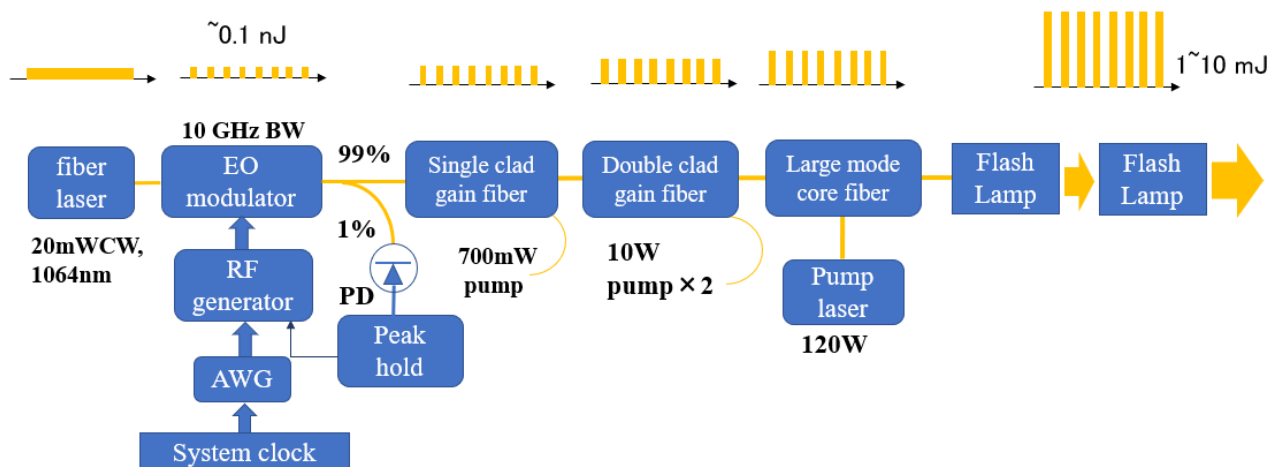


Figure 4: Prototype laser system for laser stripping injection. AWG; Arbitrary Waveform Generator, EO; Electro Optic.

実用化に向けたレーザーシステムの現実的な設計に必要なパラメータ、特に1パルスあたりに必要なレーザーエネルギーの低減や導出が重要となる。

4.1 トップハットシェイプのレーザー照射

レーザーのパルスエネルギーの低減を目指し、トップハットシェイプのレーザー照射の実現に向けたレーザー光学システムを開発した。イオンビームとレーザーの横方向分布の関係を示す模式図を Fig. 5 に示す。図のように、横方向に正規分布を持つイオンビームに対し、 4σ (99.7%) まで要求されるレーザー出力レベルが必要な場合について考える。正規分布を持つレーザーで 2σ がそのレベルに到達している場合と比較し、矩形分布(トップハットシェイプ)の場合は、レーザーパルスのピークは約 $1/7$ 、積分値(エネルギー)は約 $1/4$ とすることができ、ミラー損傷やレーザー出力の低減に直接寄与する。そこで、UEC ILS にて非線形回折素子であるビームシェイパーを用いたトップハットシェイプ照射の光学システムを開発した。ビームシェイパーは、Holoor 社製トップハット回折素子(型式: TH-231-I-Y-A)を採用した。このビームシェイパーに入射するレーザーの重心位置や幅がトップ

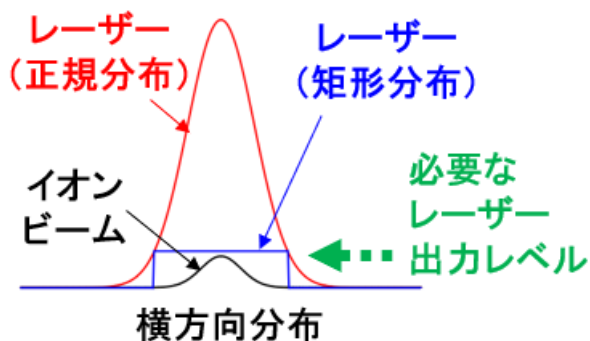


Figure 5: Schematic view of transverse beam shape for ion and lasers. Red and blue lines mean laser shape of gaussian and rectangle for required laser power (green), respectively. Black line means ion beam shape of gaussian.

ハットシェイプの平坦度に大きく影響することを見出し、ビームエキスパンダーを用いて入射レーザーの幅を最適化することで、2次元の実空間(x, y)において、90%以上の平坦度を実現した。入射レーザーの半値幅を2.84 mm から 2.92 mm に変更すると、その平坦度は 60%程度となったため、レーザー光源の安定性が重要な要素となる。

4.2 像転送マルチパス光学共振器

イオンビームに照射したレーザーパルスは大半がイオンビームと相互作用せずに通過する。そこで、一度照射したレーザーをミラーなどで折り返し、再び照射点に戻し、再利用することでレーザー出力を低減できる。しかしながら、前項で述べたトップハットシェイプを維持したまま、折り返したレーザーパルス同士を時間的にも空間的にも重ねなければ低減効果は少なくなってしまう。そこで、UEC ILS にて設計し開発した凹面鏡や偏光素子で構成された像転送マルチパス光学共振器の概要図を Fig. 6 に示す。図のように、前項で述べたビームシェイパーでトップハットシェイプに収束されたレーザーをレンズと凹面鏡(concave mirror)にて、照射点(IP)に像転送する。そして、照射点を通じたレーザーを2枚の凹面鏡で再度照射点に像転送し、次のパルスと重ねる。それを計3回繰り返して、4パルスを重ねる。次に、凹面鏡で逆経路を折り返すことで、さらに4パルスを重ねることができ、計8パルスとなる。この共振器への入射の際に偏光ビームスプリッター(PBS)で横波(P偏光)もしくは縦波(S偏光)のみを通過させ、直後に $1/4$ 波長板($\lambda/4$)を追加させ、45度偏光し、さらに8回反射し戻ってきた際にさらに45度偏光することで、PBSで反射し凹面鏡で再度共振器に戻ることが可能となる。これにより、トップハットシェイプを維持したまま16パルスのレーザーを照射点で重ねることができる。時間的に重ねるためには、再度照射点に戻る周波数をレーザーパルスの周波数と一致するように、各光路長を調整することで可能となる。また、照射点における横方向のサイズは、ビームシェイパー直後の焦点におけるサイズをレンズ(f_1)と凹面鏡(f_2)の焦点距離比(f_2/f_1)で像転送されたサイズとなり、調整が可能である。結果として、この共振器を用いることで、レーザーのパルスエネルギーを $1/16$ に低減することが原理的に可能となる。

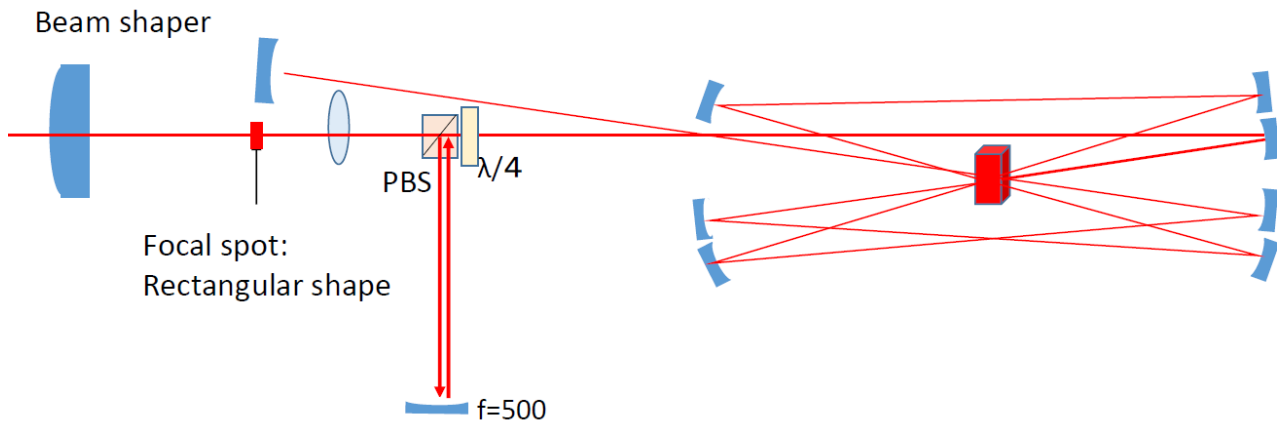


Figure 6: Laser cavity system with 16 pass multi reflection. PBS; Polarizing Beam Splitter. Red lines mean laser passes. Red cubic area means focal spot of laser pulse and interaction point (IP) for ion beam.

UEC ILSにて、この16パスの共振器の開発を進めた。現在までにファイバーレーザーで出力したCWレーザーを入射し、トップハットシェイプを維持したまま16パスが空間的に重なることを実現した。3章で述べたレーザー光源の開発完了後、パルスレーザーを用いて、時間的にも重なる共振器の開発を目指す。

5. まとめ

本研究では、大強度陽子加速器のさらなる大強度化を目指し、ビーム強度を制限する従来の炭素膜に代わる非衝突型のレーザー荷電変換入射を考案し、実現すべく研究開発を進めている。この手法の原理実証に加え、レーザーの総合的な効率や実現性、技術的な課題の明確化や解決を目指し、レーザー荷電変換入射(H⁺→H⁺)の原理実証実験(POP実験)を計画している。また、本研究で確立する技術やレーザー・ビーム相互作用の知見は、米国を中心に開発を進めているレーザーを利用したビームモニタや縦方向コリメータの開発の観点からも、注目度の高い研究である。

400 MeVのHビームを用いたPOP本実験の前に、2020年冬から3 MeVのHビームを用いた第一段階の電子剥離実験(H⁺→H⁰)の開始を予定している。その実験に向け、加速器同期で要求されるパルスエネルギーを実現できるレーザー光源の開発を進めており、完成間近である。レーザーの平均出力を如何に低減できるかが、レーザー荷電変換入射の実用化に向けた重要な課題であるため、レーザー出力低減に向け、トップハットシェイプのレーザー照射が可能なビームシェイパーを用いたレーザー光学システムを開発した。平坦度90%以上を達成し、POP実験ではレーザー出力が約1/4に低減することが見込める結果となった。さらなる出力低減を目指し、そのトップハットシェイプを維持したまま、照射点でレーザーを繰り返し重ねることが可能な像転送マルチパス共振器の開発を進めた。現在までにファイバーレーザーによるCWレーザーを入射し、トップハットシェイプを維持したまま16パスが空間的に重なることを実現した。今後パルスレーザーを用いて、時間的にも重なる共振器を開発し、レーザー出力が約1/16に低減できることの実験的な実証を目指す。また、実験開始に向け必要な施

設準備も多くの研究協力者の力を借りつつ進めている。

400 MeVのHビームを用いたPOP本実験に向けては、電子励起用のYAGレーザーの波長変換による5倍波(212 nm)を高効率で高出力に生成する必要がある。それに向けた基礎開発も進めている。その本実験は、2021年冬からの開始を予定している。

謝辞

J-PARC 加速器ディビジョンの皆様、J-PARC 施設工務セクションの皆様には実験準備に向けた多くのご協力をいただきました。本当に感謝いたします。

本研究は JSPS 科研費 JP16K17542、JP20H04456 の助成を受けたものです。

本研究は、日米科学技術協力事業(高エネルギー物理)、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] S. Cousineau *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 074801 (2017).
- [8] I. Yamane *et al.*, Journal of PASJ, Vol. 13, No. 2, 2016, pp. 80-90.
- [9] P.K Saha *et al.*, in Proc. of HB2016, Malmo, Sweden, Jul. 3-8, 2016, pp. 310.
- [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.