

レーザー荷電変換入射実現に向けた高出力レーザー蓄積リング

LASER STORAGE RING WITH HIGH POWER FOR REALIZATION OF LASER STRIPPING INJECTION

原田寛之^{#, A)}, 山根功^{B)}, サハプラナブ^{A)}, 菅沼和明^{A)}, 金正倫計^{A)}, 入江吉郎^{B)}, 加藤新一^{*, A)}
Hiroyuki Harada^{#, A)}, Isao Yamane^{B)}, Pranab Kumar Saha^{A)}, Kazuaki Suganuma^{A)},
Michikazu Kinsho^{A)}, Yoshiro Irie^{B)}, Shinichi Kato^{*, A)}
^{A)} JAEA/J-PARC, ^{B)} 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 collision may cause the foil break. Therefore, a new injection scheme for higher intensity is needed as an alternative to the foil. In the J-PARC 3GeV RCS, we newly propose and develop a laser stripping injection scheme. However, it is necessary that laser power is two orders of magnitude higher than the latest laser one. To solve this big issue, we develop the laser storage ring, which can provide laser pulse of high repetition rate by recycling the laser pulse. In this presentation, we will introduce the laser stripping injection scheme and describe the concept of the laser storage ring for high repetition rate. We will report a current development status of the laser storage ring by using Nd:YAG laser and will mention the development contents of the laser storage ring in the near future.

1. 研究の学術的背景

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、大強度陽子ビームを形成している。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する。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、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。

現在アジアで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)、30 GeV メインリングシンクロトロン(MR)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^- を陽子へと変換する“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、現在まで出力 500 kW での利用運転の実績を持つ。また、ビーム試験では設計出力 1 MW 相当のビーム加速ならびに取り出しに成功した[3]。今後 1 MW

出力の安定運転やさらなる出力増強を目指し、継続的に研究開発を行っている。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た。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[4]。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”[5]と呼ばれる手法を確立させた。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[6]。今後利用運転の出力を増強しつつ、荷電変換膜を常時監視し、破壊による寿命など系統的なデータを取得していきながら、設計出力 1 MW への出力増強を目指す。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法が求められる。そこで RCS では、さらなる大強度出力へ障害となり得る大きな課題の克服に向けて、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”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]。これは、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手法である。また、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[9]。つまり、膜を用いた荷電変換入射に代わる新たな入射手法の開発は、さらなる大強度出力に向け国際的な共通認識として重要な研究課題である。しかしながら、これらの手法を実現するには、双方共に現存する高出力レーザー光源より平均出力が 2 桁以上高い、高繰返しのレー

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

* Mitsubishi Research Institute (MRI)

ザー光源が必須となる。そのため、H-ビームに照射したレーザーを再利用する形で、高出力でかつ高繰返しが可能な“高出力レーザー蓄積リング”の開発が本研究の目的である。

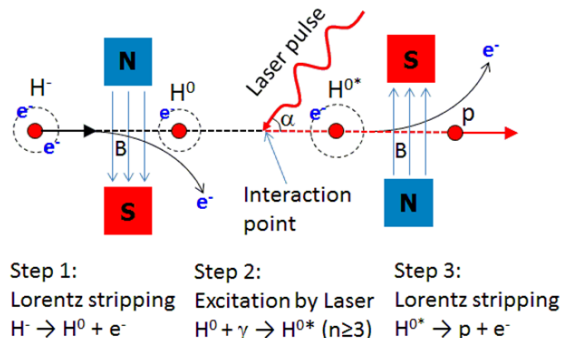


Figure 1: Principle of laser assisted stripping injection.

2. レーザー補助荷電変換入射

Figure 1 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 H^0 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 ($n=1$)にあり、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 H^0 から電子を剥離し、陽子へと変換する。SNS のビームエネルギー 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、 H^0 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基底状態 ($n=1$)から高準位 ($n=3$)に励起する必要がある。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-イオンビームに対して、波長 355 nm レーザービームをパルス幅 35 ps、ピークパワー ~ 2 MW、周波数 402.5 MHz、ブースト時間 0.01 ms、繰り返し 10 Hz で照射している。現在までに最終目標の 1/100 の H-ビームパルスに対してのみ 90%以上の荷電変換効率を達成している[10]。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。特に 2 桁以上高いレーザー出力の増強は困難を極める。さらに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 2 の上図に進行方向 s に対するFRINGE領域の磁場(40 T/m)と電子剥離(H^- から H^0)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(H^0)後はその力は受けなため、ビーム内の各粒子が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 2 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サイズの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FRINGE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ある。

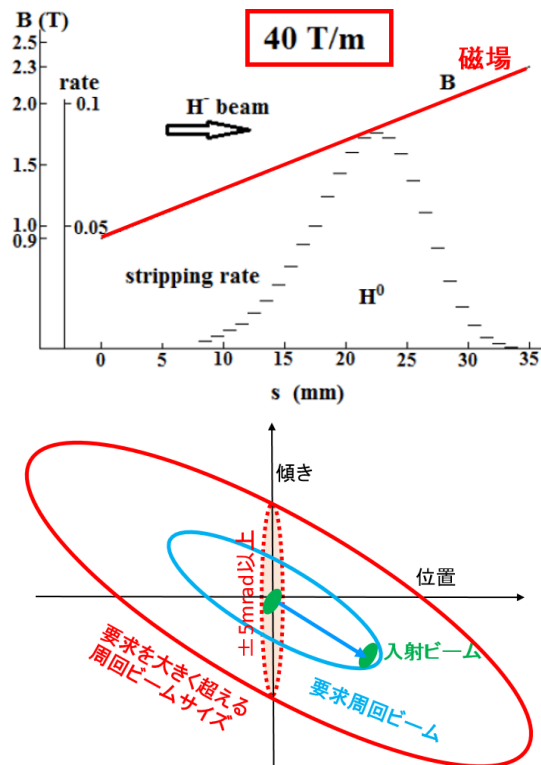


Figure 2: Top figure is magnetic field B (T) and stripping rate (H^- to H^0) along beam longitudinal direction s (mm). Bottom figure is phase plot at injection point in the case of typical painting injection (light blue) and laser assisted stripping injection.

3. レーザー荷電変換入射

RCS では、上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 以上のさらなる強磁場が必要となる。そのため、実装不可能な手法と言え。そこで、強磁場による電子剥離に替わり、高出力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。

3.1 レーザー荷電変換入射

“レーザー荷電変換入射”の原理の模式図を Fig. 3 に示す。原理や実証実験の詳細は、すでに報告済みである[7, 8, 11]。この手法では、レーザー“補助”荷電変換入射と同様に荷電変換を 3 段階で行うが、H⁰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。H⁻ビームは、H⁻ビームの運動エネルギーとレーザーとの角度 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。

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

ここ式(1)での β と γ はローレンツ係数である。このドップラー効果によって、Fig. 3 で示す第 1 段階では、Nd:YAG レーザーの 1064 nm の波長は、角度 90 度からの照射によって、743 nm の波長として H⁻ビームと相互作用を起こす。第 2 段階の H⁰ の電子励起(n=1 から n=3)には 12.1 eV のエネルギーが必要で波長に換算すると 102 nm の光が必要となる。現在想定している ArF のエキシマレーザーは、波長 193 nm を出力し、63.3 度の角度で照射した場合にドップラー効果で静止系では 102 nm の波長として H⁰ビームと相互作用する。第 3 段階では、第 1 段階同様 Nd:YAG レーザーの 1064 nm の基本波を励起 H⁰⁺ビームに 90 度から照射し、静止系で 743 nm の波長として作用させる。このように、荷電変換膜に代わり、3 つのレーザーを照射することで H⁻ビームから陽子へと変換することは原理的に可能であると考えている。2018 年より原理実証実験を開始すべく、研究開発を進めている。しかしながら、入射システムとして実現するには、レーザーパルスを入射されるすべての H⁻ビームへと照射するためには、高出力レーザー光源に対して技術的な大きな課題が残る。

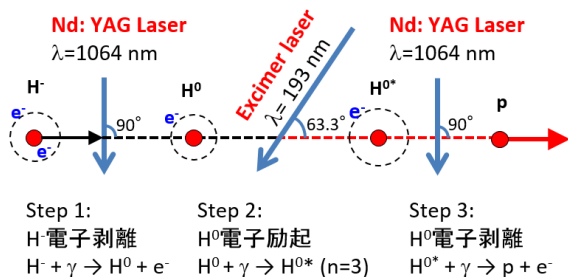


Figure 3: Principle of laser stripping injection.

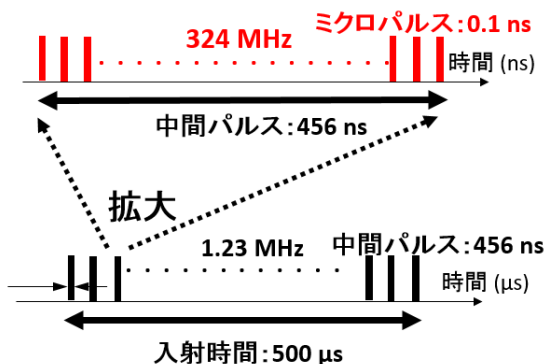


Figure 4: Time structure of H⁻ injection pulses from LINAC to RCS.

3.2 要求されるレーザースペック

RCS においてレーザー荷電変換入射を実現するために要求されるレーザースペックを説明する。最初に RCS に線形加速器から入射される H⁻ビームの時間構造を Fig. 4 に示す。負水素イオン源より 0.5 ms の時間取り出された H⁻ビームは、各種加速空洞で加速・バンチ化され、RCS への入射直前でパルス幅 100 ps 以下で周波数 324 MHz のマイクロパルス構造を持つ。RCS での RF 捕獲時のビーム損失低減のため、横方向 RF にて 44% のビームを加速初段で廃棄し、中間パルス構造となる。その中間パルスは、456 ns のパルス幅を持ち、2 バンチ分を 307 周回にわたって入射するため、入射時の周回周波数の 2 倍の 1.23 MHz の中間パルス構造となる。レーザー荷電変換入射を実現するためには、入射されるすべての H⁻ビームにレーザーパルス照射しなければならない。1 繰り返しあたりのレーザーパルス数は 10⁵ パルスを超える。現在、検討しているレーザー荷電変換入射に必要なレーザースペックを Table 1 に示す。レーザーパワーは 99% 以上の変換効率を目指している。Nd:YAG レーザーに関しては、高額ではあるがピコ秒レーザー光源が現存しており、100 ps のパルス幅でパルスあたりのエネルギーも数 100 mJ を超えている。しかしながら、パルスエネルギー数 mJ、パルス構造 324 MHz、バースト時間 0.5 ms、繰り返し 25 Hz のレーザーとなると、平均出力が現存の最高出力レーザーの 2 桁以上になってしまう。また、短波長の ArF エキシマレーザーは、数 ns のパルス幅となり、ビームのパルス幅より十分長い時間、レーザーのエネルギーとしてビームと相互作用をしない無駄な部分が多い。加えて、短波長特有のミラー反射率の低さやミラー損傷などの課題もある。こちらも多くの課題はあるが一番大きな課題は、2 桁以上高い高出力レーザー光源である。

4. 高出力レーザー蓄積リング

4.1 高出力レーザー蓄積リングの最終目標

RCS においてレーザー荷電変換入射を実現するためには、現存の高出力レーザー源と比較して 2 桁以上高い高出力レーザー光源が必要となるが、非現実である。この大きな課題を克服すべく、“高出力レーザー蓄積リング”を開発する。レーザー蓄積リング自体は、すでに考案され、He-Ne レーザーで実証されている[12]。

Table 1: Laser Requirements to Realize a Laser Stripping Injection

過程	$H^- \Rightarrow H^0$	$H^0 \Rightarrow H^{0*}$	$H^{0*} \Rightarrow H^+$
レーザー	Nd:YAG	ArF Excimer	Nd:YAG
波長	1064 nm	193 nm	1064 nm
照射角度	90°	63.3°	90°
エネルギー	> 1 mJ/p	> 1 mJ/p	> 2 mJ/p
パルス幅	0.1 ns	0.3 ns	0.1 ns
パルス構造	324 MHz	324 MHz	324 MHz
バースト	0.5 ms	0.5 ms	0.5 ms
繰り返し	25 Hz	25 Hz	25 Hz

このリングは、レーザー入射用のビームスプリッターミラーの対角線上に反射平面ミラー、反対の対角線上に収束レンズと反射を兼ねたトロイダルミラー2枚の計4枚のミラーの配置で構成された4ミラー共振器である。レーザーの周回周波数が324MHzになるようにレーザーが周回するリングの光路長を決め、“レーザーを再利用する形で連続的にビームへの照射を可能”とする。しかしながら、周回するレーザーの出力がミラーで減衰してしまう。そのため、リング内に“レーザー増幅器”を配置し、周回中にレーザー出力を継続的に増幅させることで、“高出力レーザー蓄積リング”となる。この“高出力レーザー蓄積リング”の開発が、本研究の目的である。この高出力レーザー蓄積リングの概要図をFig. 5に示す。レーザー光源より数100mJで出力されたレーザーを透過率1%のビームスプリッターミラーで数mJだけ蓄積リングに入射する。レンズとトロイダルミラーで焦点でのレーザーサイズを制御する。周回するレーザーは、スプリッターミラーで周回毎に1%ずつ蓄積リングから抜けていき出力損失となるが、そこに出力モニタを配置することでリング内の出力を観測できる。透過率が大きい場合は、レーザー光源から入射される出力も大きくなるが周回毎の出力損失も大きくなるため、レーザー光源が高出力の場合には透過率は小さくする方がよい。他のミラーなどは高反射率のコーティングを行うが、合計で数%の出力損失が予想される。これら全てのミラーの損失分を補うためにリング内に増幅器を配置し、減衰した分だけを増幅させることで数mJを保持する。蓄積リング内のレーザーは、リングの光路長で決まる周回周波数で周回するため、リング内の焦点でH⁻ビームやH⁰ビームへレーザーを高繰り返しで照射することが可能となる。

4.2 高出力レーザー蓄積リングの初期開発と現状

高出力レーザー蓄積リングの初期段階として、産業界でよく使用されているNd:YAGレーザーの高出力レーザー蓄積リングの開発から進めている。レーザー光源として、半導体レーザー型ピコ秒パルスレーザーは高額であるため、現在保有しているエネルギー200mJ、パルス幅20ns、繰り返し25Hzのランプ励起型Nd:YAGレーザー(continuum社製)を用いる。このレーザー光源はカスタムレーザーで直接光学台の上に取り付けてあった。

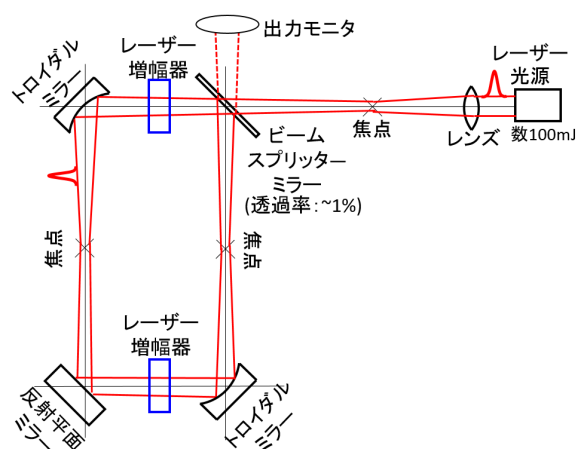


Figure 5: Schematic view of high-power laser storage ring.

購入より15年以上経過しており、経年劣化によるレーザー発振ができない状況であった。そこで、全部品を点検し、光学ミラーのクリーニングや交換・修理を行った。修理後、レーザー発振の確認やパルスエネルギーやプロファイルの測定を性能の健全性を確認した。また、新たな光学盤に配置させ、今後実施予定のレーザー荷電変換入射の原理実証実験での使用に向けてレーザー装置を持ち運び可能に改良した。さらに、放射口に2倍高調波変換用のクリスタルを取り付け・取り外しを可能にし、1064nmの波長を532nmの可視できる緑色の光に変換し、光軸調整やレーザー発振状況が容易にできるようにした。光学防振台に設置したレーザー光源の写真をFig. 6に示す。光学防振台には黒アルマイト処理を施したリミットスイッチ付きの保護ボックスで覆い、作業に光軸上に作業者の目が入らないようにし、安全性を確保した。

光学部品に関しては、周長を925.3mmにすることで324MHzの周回周波数になるが、特注のトロイダルミラーは高額となるため、開発初期段階では市販品で焦点距離600mmのトロイダルミラーを採用した。そのため、周長は2400mm、周回周波数は125MHzとなる。高反射率は必要であるため、入射角45度のトロイダルミラーのコーティング膜をアルミ膜(反射率90%程度)から金膜(99%程度)にした。ビームスプリッターミラーに関しては、入射角45度に対して透過率0.8%の誘多膜プレートスプリッターを製作した。その他の2枚の高反射ミラーについても入射角45度に対して99.9%以上の誘多膜平面ミラーを製作した。また、レーザー光源を持ち運び可能とするため、光学盤上に乗せたため、光学台からの光軸の高さが大きく変わった。そこで、現在光軸を合わせるための各光学部品の治具の製作を行っている。

4.3 高出力レーザー蓄積リング開発の今後

今後、Nd:YAGレーザー用のレーザー蓄積リングの構築を最優先で行う。その際に各ミラーでの反射率もしくは損失率や透過率を実測する。現在保有している増幅器は、光源と同様にランプ型のNd:YAG増幅器であり、一度の通過時にパルスエネルギー200mJのレーザー光を600mJに増幅できる。この増幅器をレーザー蓄積リン

グに導入する予定である。導入前に、入切状態の増幅器を一度通過した際の損失率と増幅率を測定する。最終的には、増幅器はレーザーメーカーと協力し開発する予定である。半導体レーザー(LD)励起スラブレーザー増幅器[13]を第一候補としている。スラブ式の増幅器は増幅器の中をジグザグと進み、光路長が長くなるため蓄積リングの周長を調整する必要があるが、温度を制御することで熱レンズの特性が緩和し、色収差が少なくなるため、高繰り返し増幅器として適していると考えている。高繰り返しで周回するレーザーによってミラーへの熱負荷が想定されるため、各種ミラーでの熱負荷除去のために冷却機能を付加したミラーホルダーの開発も必要となると考えている。

電子励起用の ArF エキシマレーザーの高出力蓄積リングの開発に関しては、紫外線領域の波長のため、ミラーの損傷率が高いことが予想される。その上、エキシマ機構による増幅は、入力エネルギーに対する蓄積能が低いため、蛍光寿命が短い。そのため、増幅器の開発が一番大きな課題となり時間を要するため、Nd:YAG レーザーの高出力レーザー蓄積リングの開発と並行して、エキシマレーザー光の特性把握やエキシマレーザー用増幅器の開発を進めていく。

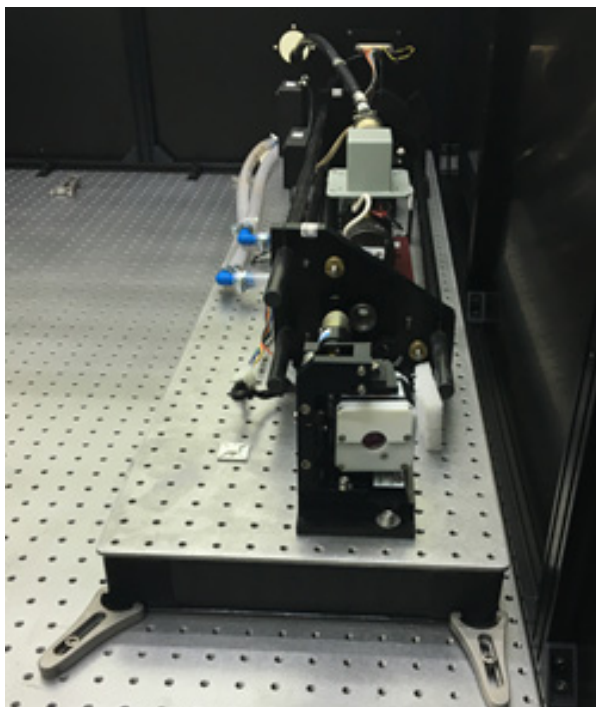


Figure 6: Photograph of Nd:YAG laser device on optical bench.

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。確立した場合には大強度化に向けた新たな“世界基準”となりうる入射手法である。その入射手法の実現に向けて、高出力でかつ高繰り返し可能な“高出力レーザー蓄積リング”の開発を進めている。

高出力レーザー蓄積リングの初期段階として、産業界でよく使用されている Nd:YAG レーザーを用いて、周回周波数や増幅時間を抑えた高出力レーザー蓄積リングの開発から進める。各ミラーでの損失率や熱負荷の把握、増幅器の開発を進め、最終目標に向けた道筋をつける。

この高出力レーザー蓄積リングを確立した際には、レーザー光を再利用する形で連続的に高出力レーザーを高繰り返しで利用できるため、本研究目的の達成のみならず、精密加工や高速溶接などの“産業利用”、レーザー核融合研究・レーザー加速研究・新物理探索などの“基礎科学研究”への応用も期待できる。

謝辞

J-PARC 加速器の長谷川和男加速器ディビジョン長、内藤富士雄加速器副ディビジョン長、林直樹加速器第三セクションリーダー、山本風海加速器第二セクションリーダーには、研究体制を構築するにあたり、様々なサポートをいただきました。本当に感謝いたします。

J-PARC 加速器第四セクションの菊池一夫氏、飯村武二氏、仲田守浩氏、高村裕貴氏、鈴木博氏、宇佐美力氏には、レーザー開発室や冷却水配管を整備していただきました。本当に感謝いたします。

オプトテック社の木下孝一氏、オプトシステムズ社の永井健彦氏には、レーザー制御・インターロックシステムや保護ボックスの設計・製作をしていただき、安全なレーザー試験ができています。本当に感謝いたします。

AMPLITUDE JAPAN 合同会社の佐々木岳人氏には、レーザー光源の点検・修理に加えて、レーザー調整の指導をいただきました。本当に感謝いたします。

本研究は [JSPS 科研費 JP16K17542](#) 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] H. Hotchi, in Proc. of PASJ2015, Tsunaga, Aug. 5-7, 2015, pp. 103.
- [4] S. Kato *et al.*, PRST-AB **16**, 071003 (2013).
- [5] H. Harada, Ph.D thesis of Hiroshima University / KEK report 2009-7, 2009.
- [6] H. Hotchi *et al.*, in Proc. of PASJ2016, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp. 61.
- [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.*, in Proc. of HB2014, East Lansing, MI, Nov. 10-14, 2014, pp. 299.
- [10] S. Cousineau *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 074801 (2017).
- [11] H. Harada *et al.*, in Proc. of PASJ2016, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp. 983.
- [12] I. Yamane *et al.*, Journal of PASJ, Vol. 10, No. 1, 2013, pp. 20-31.
- [13] T. Kawashima *et al.*, OYOBUTURI, Vol. 85, No. 5, 2016, pp. 411-416.