

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の開発

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

原田寛之^{#, A)}, サハプラナブ^{A)}, 山根功^{B)}, 加藤新一^{A)}, 金正倫計^{A)}, 入江吉郎^{B)}
Hiroyuki Harada^{#, A)}, Pranab Kumar Saha^{A)}, Isao Yamane^{B)}, Shinichi Kato^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)}, Yoshiro Irie^{B)}
^{A)} J-PARC/JAEA
^{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 are caused by scattering between beams and the foil. Additionally, the collision may occur 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 order higher than latest laser one. To realize 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.

1. 研究の学術的背景

世界における加速器を用いた科学実験の一つとして、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、 μ 粒子、K中間子、ニュートリノなど)を用いた実験があり、MW級の強度陽子加速器が計画・建設・稼働中である。世界の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破壊が生じる。そのため、大強度陽子ビームの出力や運転効率、ビーム損失による残留線量や膜の寿命によって厳しく制限される。

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。RCS の設計出力は、KEK

の同型のブースターリングの2桁以上高い大出力 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。ビーム試験では、ペインティングのエミッタンス範囲を従来の 100π mm mrad から 200π mm mrad までの拡幅に成功し、307 周回入射時において 1 粒子あたり 40 回程度の平均衝突回数を 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。3 章で詳細を述べるが、レーザー荷電変換入射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。しかしながら、その手法を実現するには、現存する高出力レーザー光源より出力が 2 桁以

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

上高いレー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。また、高出力レーザーは精密加工や高速溶接などの“産業利用”、宇宙・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”に用いられており、高出力かつ高繰返しが可能な“高出力レーザー蓄積リング”は本研究目的の達成のみならず、幅広い分野への応用が期待される。

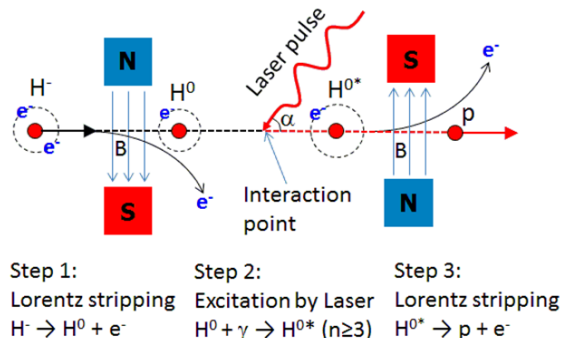


Figure 1: Principle of laser assisted stripping injection.

2. 世界の動向:レーザー補助荷電変換入射

1990年代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”が考案され、原理実証実験が米国ブルックヘブン国立研究所などで行われてきた。Figure 1にレーザー補助荷電変換の原理を示す。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H⁰から電子を剥離し、陽子へと変換する。現在、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、実証実験が行われている[7]。Figure 2にSNSでの実験の概要図を示す。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、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。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。

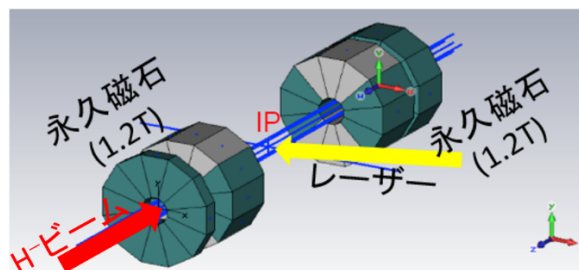


Figure 2: Schematic view of POP experiment setup at SNS facility.

3. 新たなレーザー荷電変換入射の考案

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、繰返し25 HzのH-イオンビームが入射される。この全てのビームパルスに対して電子を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る。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

新たに考案している“レーザー荷電変換入射”の原理の模式図をFigure 3に示す。考案中の原理や提案中の原理実証実験の詳細は、出版された加速器学会誌の解説(日本語)や国際会議HB2016のプロシーディングス(英語)で公開している[8][9]。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、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。第1段階のH-ビームの電子剥離には、Nd:YAGレーザーの基本波 $\lambda=1064$ nmの波長を用いる。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 の光として相互作用する。

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

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、Figure 1で示す第1段階では、レーザー光は90°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° 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 H^0 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 H^0 ビームに 90° 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。2017 年秋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、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。

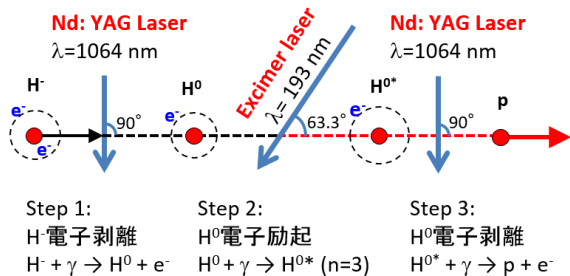


Figure 3: Principle of laser stripping injection.

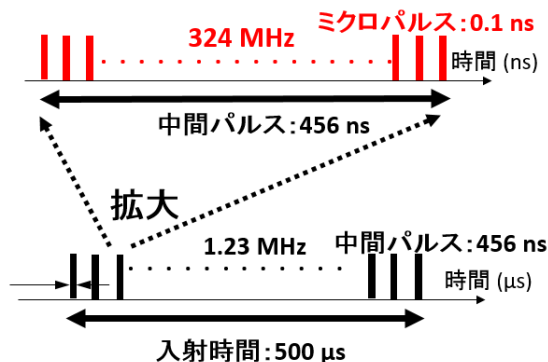


Figure 4: Time structure of H^- injection pulses from LINAC to RCS.

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 Figure 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 0.1 ns、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を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 10^5 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、0.1 ns 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 桁以上となってしまふ。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いため、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。

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	> 1 mJ	> 2 mJ
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

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・実証されている[10]。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 枚の配置で構成される。レーザーの周回周波数が 324 MHz 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必要がある。現在までに Nd:YAG レーザーに対しては、半導体レーザー励起によるレーザー増幅技術が確立し、製品化も完了している。このレーザー蓄積リングと増幅器を組み合わせることで、“高出力レーザー蓄積リング”と可能となる。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 Figure 5 に示す。レーザー光源より数 100 mJ 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である。

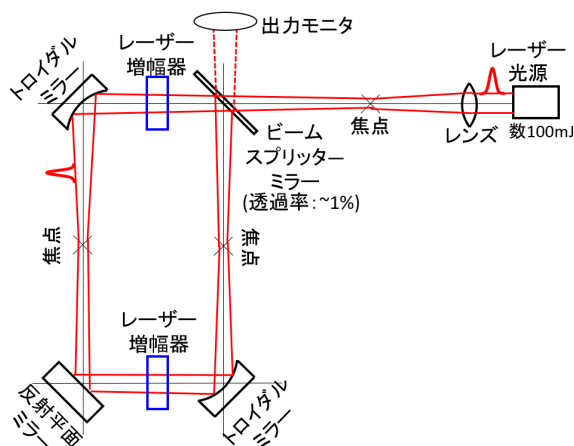


Figure 5: Schematic view of high-power laser storage ring.

4.2 高出力レーザー蓄積リングの初期開発

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 200 mJ、パルス幅 20 ns、繰り返し 25 Hz のランプ励起型 Nd:YAG レーザーを用いる。周長を 925.3 mm にすることで 324 MHz 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 600 mm のトロイダルミラーを採用する。そのため、周長は 2400 mm、周回周波数は 125 MHz となる。高反射率は必要であるため、コーティング膜をアルミ膜から金膜にする。ビームスプリッターミラーは、特注の誘多膜プレートスプリッターで透過率 $1 \pm 0.5\%$ を用いる。増幅器導入前に各ミラーでの損失率や透過率を実測し、増幅器での増幅率を算出する。その後、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[11]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。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。熱負荷を抑えるため、開発初期ではバースト時間は最終目標の 1/50 の 0.01 ms 程度から進める予定である。

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、エキシマレーザー用増幅器の開発を進めていく。

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ように、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

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 2033-004 and KEK Report No. 2002-13.
- [3] H. Hotchi, in Proc. of PASJ2015, p.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 this proceedings.
- [7] S. Cousineau *et al.*, in Proc. of HB2014, p. 299.
- [8] I. Yamane *et al.*, Journal of PASJ, Vol. 13, No. 2, 2016 (80-90).
- [9] P.K Saha *et al.*, in Proc. of HB2016, Pre-Release.
- [10] I. Yamane *et al.*, Journal of PASJ, Vol. 10, No. 1, 2013 (20-31).
- [11] T. Kawashima *et al.*, OYOBUTURI, Vol. 85, No. 5, 2016 (411-416).