

高エネルギーイオン荷電変換レーザーシステムの開発

米田研究室 瀧 葵

1. 序論

世界最大級の大強度陽子加速施設 J-PARC は一台の直線加速器と二台のシンクロトロンから成る施設である [1]。現在高いフラックスの中性子発生やハドロン計画などに使われている J-PARC では、最終的なシンクロトロン加速器に入射するイオンとして直線加速器からビームを入射させている。この際、周回する陽子ビームに対し効率よく入射するために、直線加速器部で H-イオンを、それを電荷変換させて最終的な H+イオンに変換させる方式が用いられている。現在、この荷電変換させるために炭素フィルムが用いられているが、300kW の運転で 6 ヶ月毎に交換が必要であり、今後予定されている 1 MW での運転での炭素膜の寿命は一週間程度にまで短くなってしまふ。よって物質を一切用いずに荷電変換をさせる手法が提案されている。

2. レーザー荷電変換システムの原理

光で負水素イオンの荷電変換を行う場合は大きく分けて① $n=3$ に位置する電子をレーザーで剥ぎ取る、② $n=1$ に位置する電子を $n=3$ にレーザーで励起する、③励起された電子をレーザーで剥ぎ取る、という 3 工程を必要とする。本章ではレーザー荷電変換で使用するパラメーターについて述べる。

2.1 使用するレーザー波長の決定

水素原子の光子吸収の観点から求められた各工程の必要フォトンエネルギーから①と③の工程で 743nm、②の工程で真空紫外域の波長の光源が必要とされることが分かった [2]。ここで、J-PARC で作られたイオンビームはほぼ光速まで加速されているので相対論から導かれる係数を用いてドップラー効果を適用すると使用するレーザー波長を長波長側にシフトさせると①と③の工程で 1064nm、②の工程で 216nm の光源で荷電変換可能であることが分かった。また、波長 216nm の光源は 1064nm の 5 倍波で作ることが可能であるのでレーザーシステムは二台 1064nm のレーザーで構築可能であり、本システムの概略図を以下に示した。



図 1 レーザーによる荷電変換方式

2.2 必要パワーと有効利用

J-PARC のイオンビーム量と相互作用断面積から見積ると、各過程に必要なパルスエネルギー量は $10 \sim 100 \text{mJ}$ になる。現在、JPARC のイオンビーム繰り返しは、最も密な部分で 324MHz あり、このままでは準定常モードであることを考えても、瞬間的な平均出力で 32MW のレーザーが必要になる。これらをどのように回避し、光の有効利用効率をあげ、現実に実現できるレーザーシステムをデザイン、原理実証を含めて進めていくかが重要になってくる。

実機である JPARC では、324MHz のビーム列が、1.32MHz のバンチになり、さらにそれが $500 \mu\text{s}$ 程度のバンチ長で 25Hz で繰り返されている。1 パルスの必要時間は 100ps であり、現在のモードロックレーザーのパルス幅に比べると格段に長い。このようなビームに同期したレーザーを発生させるために、ここでは、EO モジュレータを用いた発振器をベースに、製作することとした。次に、相互作用の大きさから、ほとんどの光はイオンを変化させることもなく透過していく。そのため、折り返し光学系を利用する。また、ビーム断面は矩形であるので光の照射形状を変形させる必要もある。これらを実現させるために、図 2 のような光学系を組んだ。ビーム成型に Beam0 Shaper (HOL00R 社、Top-Hat beam shaper, TH-231-Y-A) を使用し、相互作用点のアライメントのために散乱体として石英ガラスを置きそれを定盤に対して垂直に組んだ観測系で調整を行った。折り返し光学系は 16 回パターンをイオンビームとの相互作用点に重ね合わせることで必要エネルギーを $1/16$ にすることが期待できる。重ね合わせと Duty Factor から必要パワーを計算すると最密部 324MHz で一パルスに 7mJ 必要であると仮定すると全体で 1.8kW まで必要パワーを抑えることが可能である。

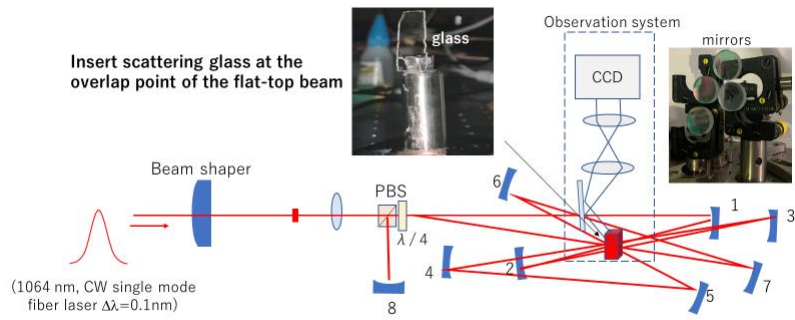


図2 イオン照射光学系

3. 実験結果

3.1 ビーム成型部

Beam Shaper に入射するレーザーの発散と口径を調整する光学系を使用して出力パターンが最もフラットである条件を調べたところ、入射ビームの半値幅が 2.84mm の時に最もフラットなパターンが得られることが分かった。しかし最適条件から 0.1mm ずれたり入射角が悪いと出力パターンのフラットさが 6 倍悪くなることが分かり、この素子は入射口径を高精度に合わせる必要があることが分かった。以下に実験装置の概略図と得られたパターンをそれぞれまとめた。

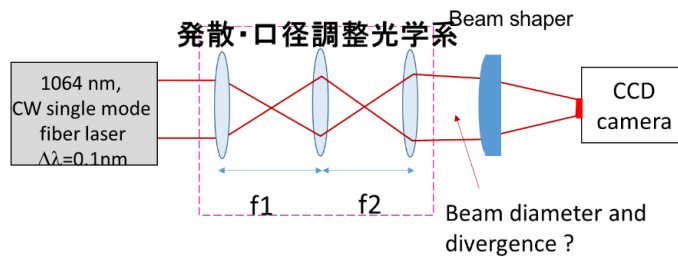


図3 Beam Shaper の最適入射口径調節系

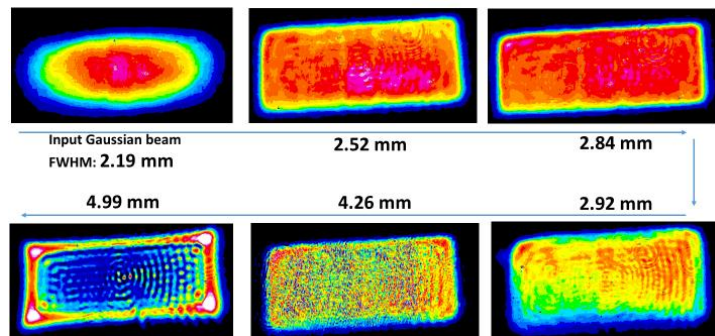


図4 Beam Shaper の入射口径依存性

今回使用した光源は 1μm のファイバーレーザーであるので光源をスペクトル幅可変のレーザーシステムを利用して出力パターンの変化を観察したところ、スペクトル幅依存性はないことが分かった。

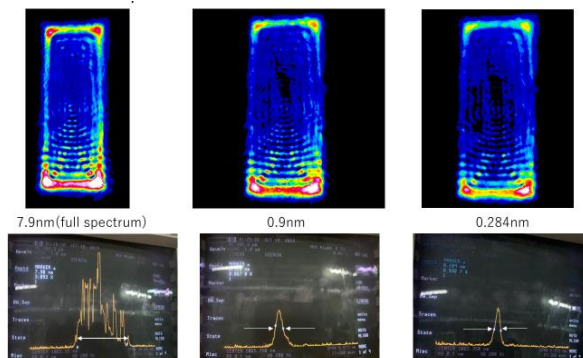


図5 Beam Shaper のスペクトル幅依存性

3.2 照射光学系

図2のような照射光学系を組み1枚目と16枚目のエッジの評価を行ったところ、最もフラットな条件でパターンの重ね合わせを行うとエッジがだれてしまうことが分かった。次に、初めからフ

ラットではない条件でパターンの重ね合わせを行ったところ最終的に得られたパターンのエッジのシャープさを改善することができた。よって Beam Shaper はシングルパスでも flat-top なパターンを得ることができるが、マルチパスの場合では最適条件から外して使用することで任意のパターンを得られることが分かった。

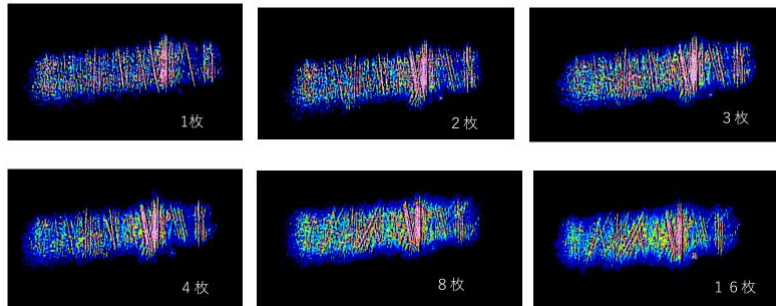


図 6 最適条件で最大 16 回重ね合わせ時のパターン

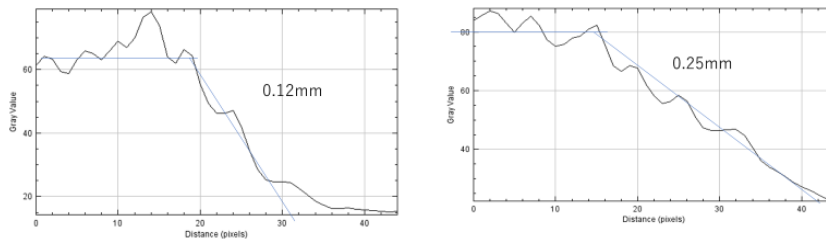


図 7 最適入射条件で 16 回パターンを重ね合わせたときのエッジの評価(左図:1 枚目:16 枚目)

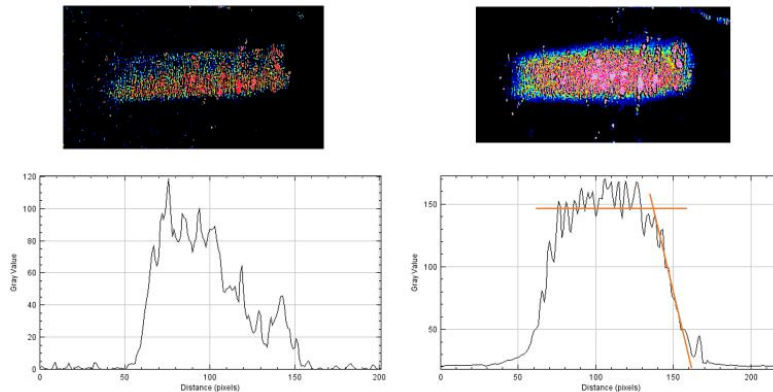


図 8 最適条件から外して重ね合わせたときのエッジの評価(左図:1 枚目:16 枚目)

3.3 レーザー装置

光源は 4. 1 のように任意波形発生器で作ったパルス列の光電気変調を行い、ゲインファイバーを通した後に再生増幅器で事前増幅を行うという光学系を作成した。以下に実験装置の概略図とフラッシュランプで増幅した前後の出力波形を示した。増幅前後の波形から作成した再生増幅器は一周でおおよそ四倍の増幅をすることが可能であることが分かった。これは光が周回するごとに 4 倍の増幅が起こることなのでミラーの反射等による損失を考慮しても増幅器内に多くの光を溜め込めることが期待される。また、増幅系の seed 光は連続波であるため、そのまま増幅してしまうとパルスが出ていない時間は CW 成分が増幅されてしまい、ノイズになってしまうことが問題となるので seed 光の調整を行う必要があると考えられた。また、増幅に使用しているシングルモードの Yb 添加のゲインファイバーを使用していたところ、光源の波長 1064nm に対してゲインファイバーのスペクトルのピークが 1030nm 付近にあるため半導体レーザーの注入電流を増やしたときに 1064nm の光が増幅される量が増えるよりも先にゲインファイバーが発振してしまい、出力波形が不安定かつノイズが大きくなってしまった。これによりゲインファイバーのスペクトルピークが光源波長の 1064nm と同等でなければならぬことが分かったため、次はダブルクラッドのゲインファイバーを用いて増幅を行うことが必要であることが分かった。

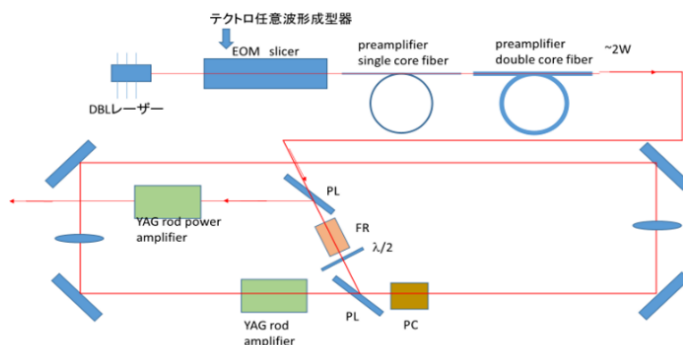


図 9 : 増幅システム概略図



図 10 : 再生増幅器の増幅前後の波形比較(上:増幅後 下:増幅前)

4. 結論

はじめにレーザー荷電変換に必要な波長、エネルギーなど様々なパラメーターを決定したところ実現可能であると考えられ、荷電変換 3 工程の①である最外の電子を剥ぐ部分の発振器部・照射光学系・増幅部・ビーム成型部の開発を行った。ビーム成型部では入射ビーム口径を操作するとシングルパスでもマルチパスでもフラットな強度分布のパターンを得られることが分かった。発振器部と増幅部ではイオンビームにマッチしたパルス構成の光源をつくり、再生増幅器を用いて十分に増幅することができることが確認できた。照射光学系からイオンビームとの相互作用点で折り返し光学系を用いて 16 回パターンを重ね合わせることで光の利用効率を上げ、かつ必要入射パワーを 1.8kW まで減らせることが期待できることが分かった。

以上の結果から、波長 1064nm 部のシステム構築の見通しが立ったので、今後は紫外波長域のシステム構築を行う予定である。紫外レーザーを使用する電子励起システムの実現には波長変換用の結晶と紫外域対応の光学素子が従来の性能では常時運転される実地での荷電変換では問題になることが予測されるので開発に尽力する必要がある。また、来年度の秋に実地での試験が予定されるのでそれに向けて準備を行いたいと考える。

5. 参考文献

1. An Experimental plan for 400 MeV H - stripping to protons by using only laser system in the J-PARC RCS

Pranab K. Saha, H. Harada, S. Kato, M. Kinsho, Y. Irie and I. Yamane J-PARC (KEK & JAEA), Japan

2. 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

Hiroyuki Harada, Pranab Kumar Saha, Hiroki Yoneda, Yurina Michine, Shunsuke Inoue, Atsushi Sato, Kazuaki Saganuma, Isao Yamane, Michikazu Kinsho, Yoshiro Irie
JAEA J-PARC, UEC ILS, Kyoto U. ICR, NAT, KEK