

大強度イオンビーム加速器でのレーザー荷電変換システムの開発

米田仁紀 研究室 瀧葵

1. はじめに

我が国の大強度陽子加速器施設 J-PARC では、線形加速器から蓄積型のリング加速器にビームを移送する際に、H⁻イオンから H⁺イオンへの荷電変換を行っている。現在は炭素薄膜を用いているが、ビーム強度の増強化によりマテリアルフリーのシステムを開発し、導入することが望まれている。我々は、レーザーによる共鳴イオン化、共鳴励起などを3段階で行う方法を考え、その原理実証および、実機に使用できるレーザー開発を行っている。

本研究では、レーザー荷電変換システムの第一段階となる 1 μm 帯のピコ秒パルス列レーザーを開発し、J-PARC にある試験加速器を用いて原理実証を行っている。

2. レーザー荷電変換の原理

H⁻ビームを H⁺ビームに変換するには、電子を二つ剥ぎ取ることが必要である。ここでは①H⁻イオンから1つ目の電子を剥ぎ取る、②H⁰原子で、1sの電子を3p準位に光励起する、③3p電子を自由準位までイオン化させる、の3過程を光でのみ行うことを考える。通常、水素原子の n=1 から n=3 への励起は 10eV 程度の真空紫外光が必要になる。必要とされるレーザーパワーは 10kW ~100kW レベルになることを考えると、現在のレーザー技術でこのレーザーを開発することは非常に困難である。そこで、この過程では、イオンが十分に相対論的な速度ま

で加速されていることと、ドップラー効果を利用し、使用レーザーの長波長での実現を目指している。また、①と③の過程では、比較的高出力レーザーが得られやすい 1nm 帯のレーザーを用いられる方式にした。具体的な3つの過程は以下の図1の様になっている。

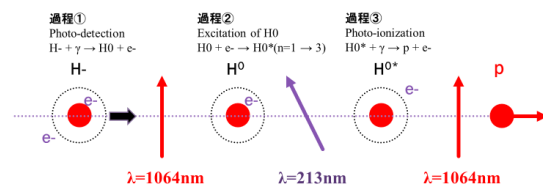


図1 レーザー荷電変換システムの原理

3. 1 μm 帯ピコ秒パルスレーザー開発

3.1 要求出力強度

第1, 第3ステップの荷電変換について、その必要とされるパルスエネルギーは、この変換の断面積データから 7~10mJ と見積もられている。イオンビームの繰り返しは最大で 324MHz であり、このままではリングへのローディング時間によるパルスの休止時間を考慮しても、30kW 平均出力のレーザーが必要になる。これはピコ秒パルスレーザーとしては現状のレーザー技術とはかけ離れているために、我々は、後で述べる像転送折り返し光学系を用いた 1/30 程度のレーザー要求出力の低減を行っていく。

対象となるイオンビームのパルス幅は 100ps となっている。このため、折り返し光学系によるピーク出力低減を入れても、ピ

ーク強度は 3MW を超えることになる。このような 300MHz を超える高繰り返しで平均出力も高いパルス列レーザーの場合、そこで使用するファイバーや光学素子の損傷閾値も評価し開発をしていく必要がある。また、荷電変換に使用するレーザーには、放射線管理区域内に設置され、安定に長期間メンテナンスフリーで稼働することが求められている。

これらのパラメータや要求事項を踏まえ、ここで開発するシステムでは光源の発振部から数 100mW までのプリアンプ部までは全て光ファイバー増幅器で構成することにした。その後、LD 励起の固体レーザーを用い、必要エネルギーの達成を目指すシステムとした。

3.2 レーザーシステム

具体的に、開発されたレーザーシステムは、図 2 のようになっている。J-PARC の複雑なパルス構成に合わせるために、100ps のパルスレーザーの発生には、連続発振の分布帰還型レーザー(DFBL)の出力を 10GHz に対応した EO モジュレータを用いてパルス列化する方法を用いた。電気パルスの発生には、50GHz クロックを持つ任意波形成形器を用い、J-PARC 施設からイオンビームに同期した最初の同期パルスをもとに、エンベロップで 500 μ s のパルス塊を発生可能にした。この出力は、EO モジュレータで制限され、ピーク強度でも 20mW 程度、パルスエネルギーで 2pJ 程度になっている。これをサブ mJ まで増幅するために、109 程度の増幅が必要となる。このような大きな増幅率を達成するためには、①増幅された自然放光 ASE の制御、②戻り光によるシ

ステム上流部の破壊の危険性排除、③寄生発振やシードがない時間帯での利得制御、などが重要になる。そこで、ここでは、ファイバー部では一定ゲインの状態を増幅段数を増やすことと、段間で ASE フィルターおよび複数のアイソレーターを入れることで、正常なパルス増幅を行うようにしている。増幅媒体は、最初の 3 段目までは、シングルクラッドの Yb ゲインファイバーを WDM とバタフライ型励起レーザーをパルス駆動させて増幅させている。その後、ダブルクラッドのゲインファイバーを用い、これをピーク励起強度 20W でパルス励起させ、増幅を行っている。このダブルクラッドファイバーでは、ファイバーがまかれた状態では、その重なった部分でファイバー被覆が融けダメージに至る現象が観測されたので、ダブルクラッドファイバーの部分は水中に入れ、冷却を行えるようにした。ここまでファイバーはすべて偏波面保持を使用し、その後のレーザーパルス制御が容易になるようにした。

次に、このファイバーの出力をコア径 40 μ m のフォトニッククリスタル(PCF)Yb ドープファイバーで増幅する。このファイバーの励起には、200 μ m コアのファイバーカップル 120W 出力 LD をパルス励起させることで行っている。最初に PCF を数 10cm の直径で曲げたメーカーが CW レーザー用に開発したものを使用し、全長 3m 程度の離党部分の長さで行ったが、曲率がついている部分で破壊が起きることが分かった。これは、平均出力は低いですが、100ps のパルス列となっており、ピーク強度が増加したためと考えられた。(実際に、25Hz, 500 μ s マクロパルス、324MHz ミクロパル

ス条件では、平均出力 500mW で破壊に至ることが再現よく確認された。) そこで、PCF ファイバーを 70~90cm の 2 つにわけ、間にファラデーアイソレーターなどを挿入させて、安定な増幅ができるようになった。

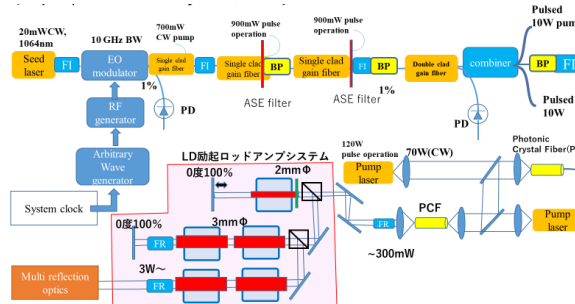


図2 ファイバー前置増幅器システム

3.3 パルス列の増幅波形の均一強度制御

本研究における克服すべき問題の一つにパルス列を均一強度に増幅することである。J-PARC のイオンビームのパルス構成は最密パルス 324MHz で構成された 500 μ s の長さのパルス列が 20Hz で構成されている。効率よく荷電変換を行うために、構築するレーザーはイオンビームのパルス構成に完全に同期の取れていて、パルス列全体の強度が均一である必要がある。パルス列を均一強度に増幅するためには単一パルス増幅のように、励起光で上準位に蓄積したエネルギーを引き抜く手法ではパルス列の尖頭パルスが著しく増幅されてしまうことが分かった。

本研究では①上準位にエネルギーが蓄積される状況を作らないために信号波形を励起波形より先に入れる、②励起波形も矩形に印加すると尖頭パルスの増幅に繋がってしまうので、緩やかな立ち上がりの台形に印加する、の以上二点を考慮して増幅を行う事にした。最終的な運転方法は、信号波

形を照射時に要求されるパルス列長より数倍長く入れ、台形の励起波形により増幅波形を切り出していくという手法を行った。図3は実際の増幅の様子であり、青線の波形に赤線のように励起波形を台形に印加すると緑線のように尖頭パルスの増幅を抑制した均一強度な波形に増幅することができた。

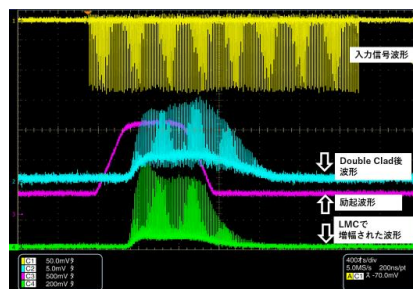


図3 ファイバー前置増幅器における励起波形と増幅波形

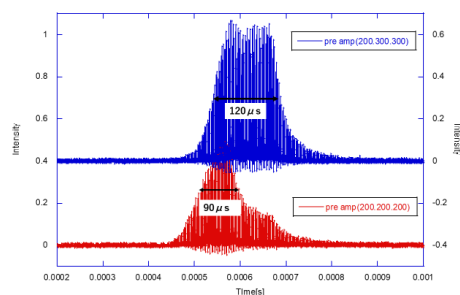


図4 LD 励起固体レーザーシステムの励起タイミング操作による増幅波形の変化

4. 照射光学系

高効率な荷電変換手法を行うにあたって、光源の要求出力パワーの抑制が重要である。光とイオンビームの相互作用によるロスほぼ 0 なので球面鏡を用いて光をリサイクルする折り返し光学系を開発した。折り返し光学系を用いると、独立に入射されたパルス群を球面鏡を用いて照射点で重ね合わせることができる。例えば 16 個の独立したパルスを入射した時、照射点で全てのパル

スが重なる合わせ 7 りことが可能であり、レーザーの要求エネルギーも最大 1/16 に抑えることが期待できた。

また、イオンビームは矩形のビームプロファイルを持っているため、照射点で矩形に成型したレーザーのプロファイルを像転送するという役割をしている。照射時に像が回転してしまうのを防止するために独立した球面鏡で光学調整を行った。

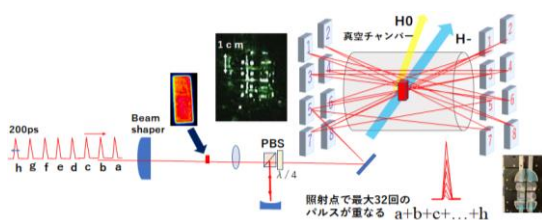


図 5 像転送折り返し照射光学系

5. 第一回原理実証実験の結果

2020 年 10 月に J-PARC でレーザーとイオンビームと相互作用させる原理実証を行った。実験場所は直線加速器の実機に隣接されたテストスタンドで行い、エネルギーは劣るがほぼ実機と同じ条件で実験を行った。

第一回の実験では最密部 324MHz のパルスが 1Hz, 500 μ s で入射するイオンビームに対して、1Hz, 100 μ s のパルス幅の長い光を相互作用した結果、最大 0.57% の荷電変換効率を達成した。

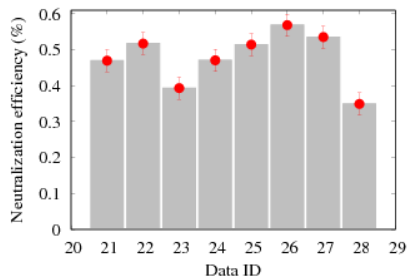


図 6 第一回原理実証実験における変換効率のヒストグラム

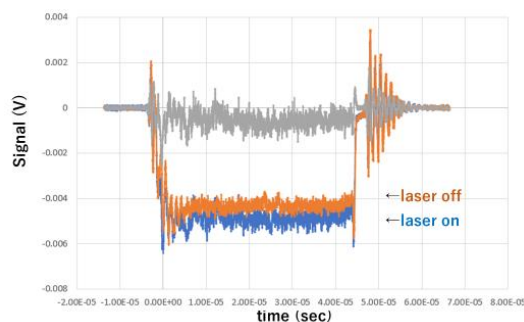


図 7 laser-on 時と laser-off 時の FCT シグナルの変化

6. 第二回原理実証実験の結果

2021 年 6 月に第一回原理実証実験と同様の条件で原理実証実験を行った。相互作用させるレーザーはイオンビームの最密部 324MHz のマイクロパルスに同期したパルス光を相互作用させた。

実験では入力信号を制御してマイクロパルスの二つに一つパルス光が照射するという条件で相互作用実験を行った。その結果、ファラデーカップの信号に FFT をかけたとき、H-ビームの周波数 324MHz の半分の周波数である 162MHz の信号が確認できた。この手法により、レーザーによるシグナルの変化がリアルタイムで観測できるようになったことで、レーザーの時間タイミングを最適な条件に調整することができた。その結果、荷電変換効率が最大で 16.8% を達成した。

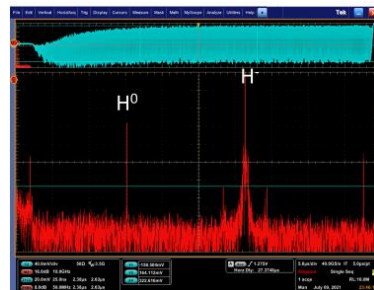


図 8 荷電変換効率の高 S/N 比リアルタイム計測

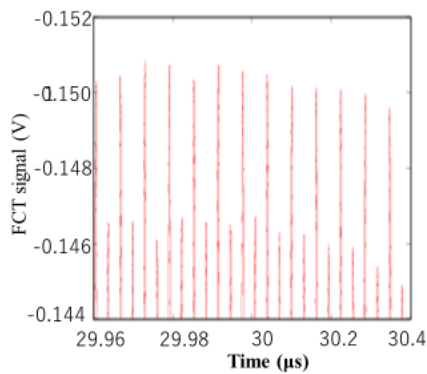


図9 FCT シグナルのレーザー照射による信号強度の変化

また、荷電変換効率の向上に大きく貢献したのは上記4章に示した像転送折り返し光学系である。図8に照射点に重ね合わせたパルス数と変換効率の変化を示した。折り返し光学系により照射点で重ねたパルス数が増えると変換効率が向上することが分かった。よって、今後は重ね合わせる回数を増やすよう再設計することで荷電変換効率の向上を目指すことができると考えた。また、今回は光学調整の容易さにより、真空チャンバーの外に光学系を設置していたためウィンドウによって各パス0.13%のロスが生じていた。よって今後は照射光学系を真空チャンバー内に設置する予定であるため、変換効率もより効果的に向上させることができると考える。

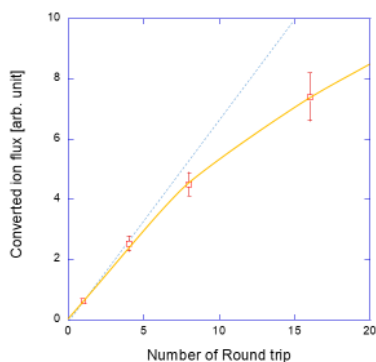


図10 折り返し光学系による変換効率の変化

次に、レーザーの delay を 20 ps ずつ変化させ、162MHz のピークの信号強度を計測した。イオンビームとレーザーの最密パルスは共に 100ps のパルス幅であり、それらがオーバーラップする時は $\sigma = \sqrt{(100ps)^2 + (100ps)^2} \approx 140ps$ と計算できる。しかし得られた σ は 261ps であった。これは計測用のケーブルが 20m の長さでノイズの対策が不足していたためにおよそ 300ps のジッターが生じていた影響であると考えられた。また、このシステムは非破壊型のイオンビーム最密パルスのパルス幅測定が可能になった。従来の計測方法はイオンビームの伝送路でワイヤスキャンを行っていたが、計測時にワイヤが放射化し周辺機器に影響を及ぼすことが問題とされている。本手法は非破壊手法でかつイオンビームをダンプする必要がなく S/N 比の高い計測方法であり、現在 J-PARC 内部から大きく注目されている。

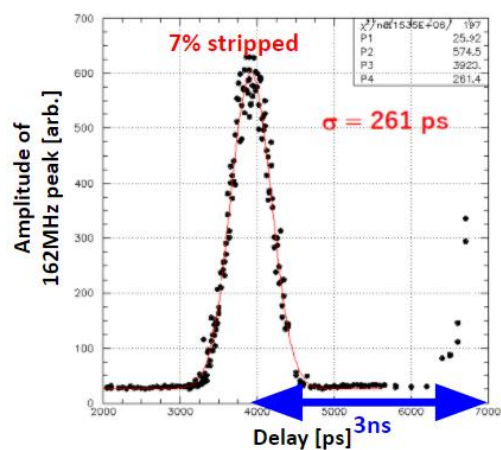


図11 イオンビームの最密パルスのパルス幅測定

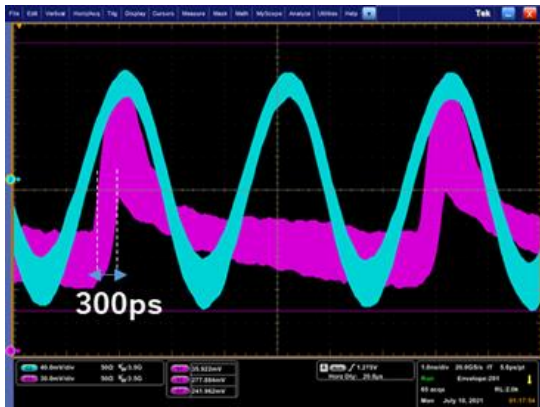


図12 レーザーパルス(赤線)と J-PARC のシステムクロックパルス(青線)のジッター

また、EOモジュレータで光源のパルス構成を制御できるため、イオンビームの最密パルス324MHzと少し周波数が異なるレーザーを入射することでイオンビームの最密パルスのパルス長をシングルショットで測定できた。従来は直線加速器下流のイオンビームはシミュレーションにより最密パルスのパルス長を決定していた。本手法ではビームをダンプすることなく稼働させながらリアルタイムでイオンビームのパルス状況が測定できる。従って、J-PARCにおけるイオンビームの調整に大きく貢献する手法を確立することができたと考える。

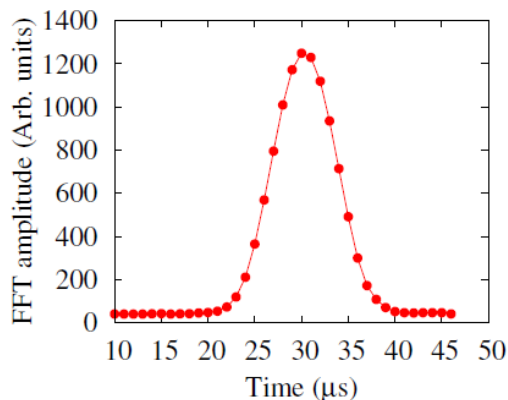


図13 イオンビームのシングルショットパルススキャン

7. まとめと今後の展望

J-PARC のイオンビームに同期の取れたピコ秒パルス列レーザーシステム構築し、均一強度にパルス列を増幅する手法を確立した。

第一回の原理実証実験ではイオンビームにパルス幅 $100\mu\text{s}$ の光源を照射したところ最大 0.57% の変換効率が得られた。また、第二回の原理実証実験ではイオンビームの最密パルスに同期した光源を相互作用させ、最大 16.8% の変換効率を達成した。原理実証実験から、折り返し像転送光学系により荷電変換効率の向上を確認することができた。また、光源を EO モジュレータでパルス制御を行ったことで、周波数を操作してイオンビームの波形モニターとしても本システムが J-PARC 内で大きく注目される結果を得ることができた。

今後は、赤外レーザーシステムでは変換効率向上に向けてより精度の高いパルス同期を行うことと、出力波形の CW 成分の抑制を行うことが必要であると考えます。また、紫外レーザーシステムの開発として企業と協力して波長変換用結晶の開発や紫外域の光学素子の開発を行う。

参考文献

- [1] H. Kalaycıoğlu, Y. B. Eldeniz et.al., OPTICS LETTERS, Vol. 37. No. 13, July 1, 2012
- [2] A. HANUKA, et.al., Optics Express, Vol. 26. No. 23, 12 Nov 2018
- [3] A. Rakhman†, Y. Liu, JACoW Publishing, IPAC2018