レーザー駆動イオン加速型ビーム入射器によるビーム試験

BEAM COMMISSIONING FOR INJECTOR BY LASER-DERIVEN ION ACCELERATION

榊 泰直[#, A)], 小島 完興[A)], ヂン タンフン[A)], 畑 昌育[A)], 松本 悠椰[A)B)],
大友 清隆[C)], 筒井 裕士[C)], 黒木 宏芳[D)], 井上 典弘[D)], 大石 沙也加[A) E)], 岡野 朱莉[A) E)], 石井 邦和[E)],
白井 敏之[F)], 近藤 公伯[A)]
Hironao Sakaki[#, A)], Sadaoki Kojima[A)], Thanhhung Dinh[A)], Masayasu Hata[A)], Yuya Matsumoto[A)B)],
Kiyotaka Ohtomo[C)], Hiroshi Tsutsui[C)], Hiroyoshi Kuroki[D)], Norihiro Inoue[D)], Sayaka Oishi[A) E)], Akari Okano[A) E)],
Kiyokazu Ishii[A) E)], Toshiyuki Shirai[F)], Kiminori Kondo[A)]
[A)] QST Kansai, [B)] Kyushu Univ., [C)] Sumitomo Heavy Industries, [D)] Hitachi Zosen, [E)] Nara Women's, univ.,
[F)] QST Inage

Abstract

We report that we have installed a phase rotation control device (80 MHz-Radio Frequency cavity) in the laser-driven ion accelerator at QST-Kansai and have begun to obtain basic data for energy control.

1. はじめに

レーザーとプラズマの相互作用によってイオン加速する手法が発見されてすでに過去四半世紀が経過した。この現象は、現代のイオン加速器を小型化するための重要な技術となる可能性があるため、世界的に基礎研究だけでなく応用研究も重要視されている。量研でも、この技術を医療分野での応用を目指し、いくつかのプロジェクトを立ち上げてきたが、それらのプロジェクトではレーザーエネルギーをイオン加速エネルギーへ変換するメカニズムを探求する基礎研究に主として注力したため、システムのバランスを考えた工学的開発が不十分で、あゆみの遅いものとなっていた。そのため、現在、量研にて進行中の「量子メス・プロジェクト」[1]においは、レーザーとプラズマ相互作用の効率的なエネルギー変換に関する基礎研究に加え、発生したイオンビームを余すところなく利用するシステム開発を目指す。つまり、既存加速器にて利用されている電磁気外場によるビーム制御装置を配置しビーム輸送効率を上げたうえで、今までにない特徴をもつビーム特性を作り出すことを考える。我々はレーザー駆動イオン加速部に収束磁石および偏向磁石で構成される実験装置(量子メス・入射器原型機)を作りあげ、工学的最適化検証のためのビーム試験を開始した。

2. 位相回転空胴の設置

2.1 イオンエネルギーの制御

2023 年度の本学会の発表[2]においては、原型機の完成およぎその時までに計測した Q トリプレットを使ったビーム収束の初期データのみを提示した。昨年報告した際の原型機は、実用におけるレーザー駆動イオン加速の一つの解決課題である「ブロードなエネルギー分散」には、まだ対応できていなかったためである。

レーザー駆動イオン手法のエネルギー制御に関しては、エネルギー効率のより加速制御手法[3]が提案されているが、それらの手法は現実問題としてイオン発生用ターゲットがナノメートル級の厚さが求められる等、ターゲット製作やハンドリング方法等の点において、我々が原型機で採用しているターゲット・シース・ノーマル加速(Target Normal Seath Acceleration: TNSA)手法とは比較にはならないほど実用化の障壁が高いものである。そこで、エネルギー制御の予備知見を得るために、陽子用 2 ギャップの空胴[4]を用いてビームのエネルギー制御の基礎データを取得することにした。

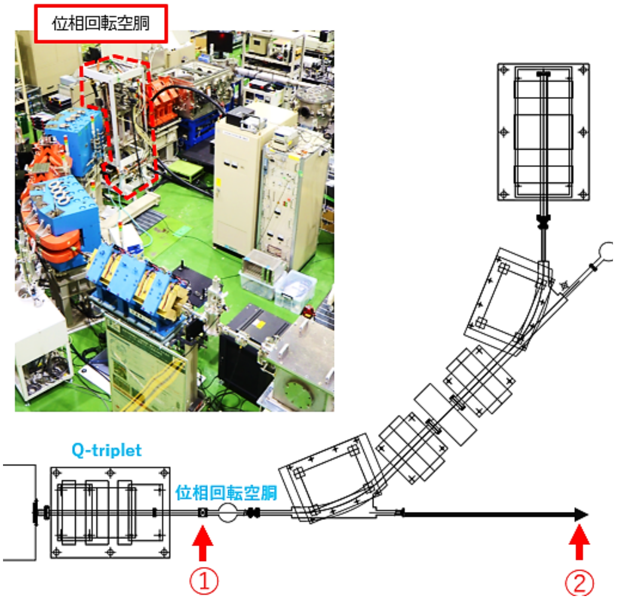

Figure 1: Phase rotator in QST laser-driven accelerator.

2.2 位相回転空胴

レーザー駆動イオン加速手法は瞬間的な加速時間でエネルギー分散が極めて大きいビームを生成する。加速時間は、PIC シミュレーションにて得られているレーザー・

sakaki.hironao@qst.go.jp

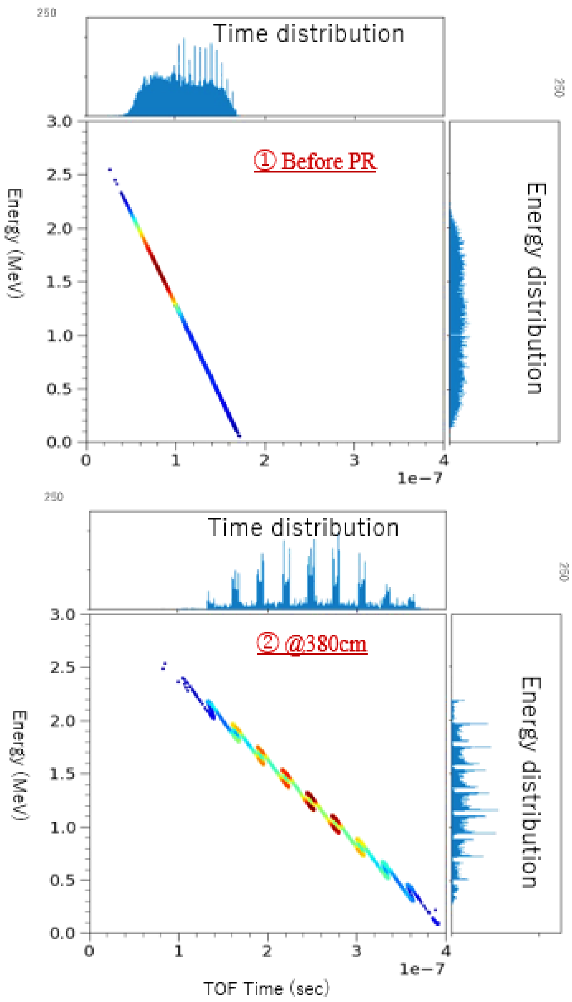

Figure 2: Simulation results of phase rotator.

プラズマ相互作用が創り出す加速電場の持続時間であるピコ秒オーダーであると考えられている。加速後は、エネルギー分散により縦方向に伸長するために、飛行時間差がそのまま(加速時間のピコ秒オーダーの分解能をもつ)エネルギー分散に対応する。このエネルギー分散を高周波空胴によりデバンチングすることでエネルギーをそろえ、対象エネルギーのイオンを集群させ収量を上げる。

これまでに、関西研ではこの原理を用いた陽子ビームのエネルギー制御とイオン収量増加の実験[4]に成功してきた。しかし、収量増加の実験に成功したものの、陽子の加速時間に関しての評価は実施されておらず、そのため炭素ビームのような重いイオンの加速時間については、1 ピコ秒のオーダーの現象なのかマイクロ秒に近いのかは全く理解できていない。そこで Fig. 1 に示すように、原型機の Q-Triplet 直後に位相回転空胴を設置し、ビーム運転を行いビーム特性データを取得する。

Figure 2 に、0～2.5 MeV の範囲のエネルギーの陽子をビーム輸送したシミュレーション結果(Fig. 1 の①と②の位置)の例を示す。このシミュレーションは、空胴ギャップ電圧を Vgap、RF位相をφとして、空胴を通過した際のエネルギー変化を dW=Vgap×cosφ(ただし TTF は未考慮)として、極めて単純に計算したものである。dW により、エネルギー変調が与えられ、それによりビーム時間も変調の影響を受ける。ビームエネルギーは空胴通過後に制御され、そのエネルギー変調により変化したビーム速度により 380 cm まで輸送された際には、ビームの時間分布が櫛の歯のような形になっている。この結果と実測の比較により、加速初期のビーム特性が予測できるようになると考えている。

3. おわりに

我々は、重粒子線治療装置の入射器の小型化を目標としている第 5 世代の量子メスの早期実現を目指して、昨年構築された原型機に位相回転空胴を設置し、それを利用したビーム運転を開始した。このデータをシミュレーションで再現させて解析していく。そして、それらの知見をもとに、重イオン用高周波空胴の設計を進め、レーザー駆動イオン加速の特徴が活かせるような工学的要素技術の確立を進める。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1 の支援を受けて実施された。

参考文献

[1] Y. Iwata *et al.*, “Design of a compact superconducting accelerator for advanced heavy-ion therapy”, Nucl. Inst. and Meth. A, 1053, 168312 (2023).

[2] 榊泰直ら, “DEVELOPMENT OF LASER-DRIVEN ION INJECTOR FOR THE QUANTUM SCALPEL”, 第 20 回日本加速器学会年会プロシーディングス, WEOB10 (2023).

[3] T. Esirkepov *et al.*, “Highly Efficient Relativistic-Ion Generation in the Laser-Piston Regime”, Phys. Rev. Lett. 92, 175003 (2004).

[4] S. Nakamura *et al.*, “High-quality laser-produced proton beam realized by the application of a synchronous RF electric field”, Jpn. J. Appl. Phys. 46 L717 (2007).