

## レーザー駆動イオン加速における炭素イオンのビーム特性診断

### DIAGNOSIS FOR CARBON BEAM CHARACTERISTIC IN LASER DRIVEN ION ACCELERATION

宮武 立彦<sup>#, A)</sup>, 小島 完興<sup>B)</sup>, 榑 泰直<sup>B)</sup>, 岩田 佳之<sup>C)</sup>, 近藤 康太郎<sup>B)</sup>, 西内 満美子<sup>B)</sup>, 白井 敏之<sup>C)</sup>,  
神門 正城<sup>B)</sup>, 近藤 公伯<sup>B)</sup>, 渡辺 幸信<sup>A)</sup>

Tatsuhiko Miyatake<sup>#, A)</sup>, Sadaoki Kojima<sup>B)</sup>, Hironao Sakaki<sup>B)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>C)</sup>, Kotaro Kondo<sup>B)</sup>,  
Mamiko Nishiuchi<sup>B)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>C)</sup>, Masaki Kando<sup>B)</sup>, Kiminori Kondo<sup>B)</sup>, Yukinobu Watanabe<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Kyushu University

<sup>B)</sup> Kansai Photon Science Institute (KPSI), National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>C)</sup> National Institute of Radiological Sciences (NIRS), National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

#### Abstract

At QST, a development plan for an ultra-compact heavy-ion beam therapy system using a superconducting synchrotron and a laser-driven heavy-ion injector called "quantum scalpel" is underway. We use a novel mechanism in the quantum scalpel, a laser-driven ion acceleration mechanism, the high energy ions are accelerated by the charge separation electric field generated when the target is irradiated with a high-intensity laser ( $>10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ ). This mechanism is characterized in that heavy ions such as protons, carbon, and oxygen ions are generated at various valences over a wide energy band depending on the conditions of the laser and target. When diagnosing the quality of the heavy-ion beam, signals from ions other than the target are mixed, so that measurement is difficult. In this study, we will report the progress of the carbon beam measurement by developing a beam purification transport system of  $\text{C}^{4+}$ , 10keV/u ions generated by a laser-driven ion acceleration mechanism.

#### 1. はじめに

量研(QST)では、小型重粒子線治療装置「量子メス」を目指して、小型超電導シンクロトロンと、シンクロトロンに高エネルギーな炭素イオンを直接入射可能な、レーザー駆動イオン加速を用いた数 MeV/u 級  $\text{C}^{6+}$ 用小型イオン入射器の実現に向けた開発が推進されている。レーザー駆動イオン加速[1]とは、固体薄膜に $>10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ の集光強度でレーザーを照射することによるポンドロモティブ力にて電子を固体薄膜から遊離させ、薄膜裏面に生成される強烈な電荷分離電場( $\sim\text{TV}/\text{m}$ )にてイオンを加速させるメカニズムのことを指す。この加速では陽子を初め、炭素イオン、酸素イオンなどが複数のイオン価数をもった幅広いエネルギー帯域で $\sim$ ピコ秒クラスの短いパンチ幅かつ数度程度の発散角を持って発生するという特徴がある。レーザー駆動イオン加速では、イオンの中で最も軽く、質量比電荷が大きい陽子ビームが支配的に加速され、エミッタンス計測などが行われた報告もあり、10MeVの陽子において0.004mm mradという非常にエミッタンスの低いビーム生成が可能であることが示されている[2]。一方で、量子メスにおけるレーザー駆動イオン入射器を実現するためには、下流の超電導シンクロトロンが要求する炭素イオンのエミッタンス、電流量を始めとするビーム入射条件を実測によって高精度に示す必要があるが、レーザー駆動加速によるイオンは、陽子ビームや酸素ビーム中に炭素ビームが混在しているため、炭素ビームだけを分離計測することは困難であり、これまでに炭素ビームに特化した特性について、実験的には未だ報告された例はない。よって本研究では、レーザー駆

動イオン加速で生成される「炭素イオンビームの特性計測」を行い、それらを「Particle In Cell (PIC)シミュレーションを用いたビーム解析」と組み合わせることで、レーザー駆動加速炭素ビームの生成に関する物理を世界に先駆けて体系化し、ビーム制御手法を開発していくことでレーザー駆動入射器の実現への貢献を目指す。本報告では、比較的低エネルギー帯(10keV/u)の4価炭素についての診断輸送系の開発を行ったため、それらの輸送系開発に関して進捗を報告する。

#### 2. 研究概要

本研究は、QST 関西研に構築中のレーザーシステムを用いてイオン加速実験を行う。レーザーは量子メスのイオン加速試験に利用することを主眼として立ち上げられたものであり、医療用として信頼が得られるレベルまでレーザーの安定性を高めることを目指している。今後、段階的にレーザーエネルギーを上昇させていき、最終的に2025年頃には数 MeV/u クラスの  $\text{C}^{6+}$ を加速させるのに十分なエネルギーを供給する計画となっている。そのため、現在のレーザーエネルギー(約 1.5J)では、集光強度が  $10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$  程度であり、数 10keV/u クラスのイオンが、支配的に加速(約  $10^5$  個/msr/shot)されている状況である。そこで、まず 10keV/u の  $\text{C}^{4+}$ を対象として、一般的な ECR イオン源クラスのエネルギー帯のビームにおいて、その特性(エミッタンス、電流量)を計測する手法を確立し、ビーム特性解析を試みる。

ここでは、様々な元素が混在しているビームの中から炭素イオンを計測するが、加速エネルギーが 10keV/u と

低いため、元素分析手法で用いられるイオン弁別手法である、速度収束のための電場と方向収束のための磁場を用いた二重収束型質量分析手法[3]にて、対象エネルギー・価数の炭素のみを分離計測することを提案する。提案手法では、三連静電レンズ(アインツェルレンズ)と偏向磁石(可変磁場式永久磁石)を用いたビーム診断用輸送部の構造とする。ビーム診断は、エミッタンスを計測する方法としてペッパーポット法[4]、電流量にはファラデーカップを用いた電荷量計測、及び時間掃引電場を用いた時間構造計測を採用し、偏向磁石下部部に設置する。それらの概要図を Fig. 1 に示す。

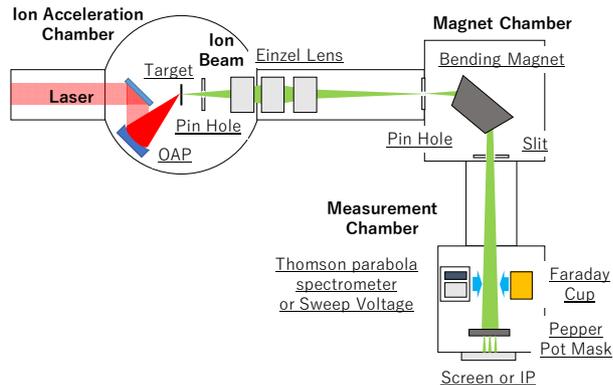


Figure 1: 10keV/u, C<sup>4+</sup>純化輸送系概要図。

### 3. ビーム診断用輸送系開発

#### 3.1 アインツェルレンズの開発

静電レンズ効果による速度弁別にて C<sup>4+</sup>, 10keV/u イオン収束をさせるためにアインツェルレンズの開発を行った。設計には PIC コード「WARP」を用い、実験室内真空槽のスペースに収まることを条件として、ビームの軌道解析計算を行いレンズ条件の最適値を探索することで、それを実現する形状のレンズを製作した。レンズの電位分布及び C<sup>4+</sup>, 10keV/u 輸送シミュレーションの結果を Fig. 2 に示す。ビームの取得発散角は±2° であり、レンズ直径Φは 80mm、レンズ長 L は 80mm、レンズ間隔 d は 30mm、ターゲットからのレンズ開始距離は 150mm としている。第一、第三レンズは同電位の陰極、第二電極を陽極としており、その電圧をそれぞれ-9.5kV、19kV とした

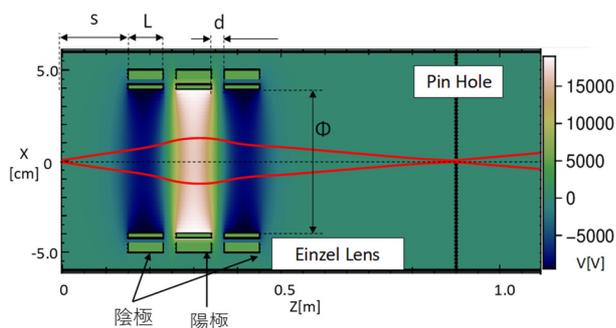


Figure 2: レンズ電場分布及び軌道解析結果。

場合、レンズ通過後のビーム発散角が±1° で輸送されることをシミュレーションにより確認した。照射ターゲット位置から 100mm の後方にアイリスを配置し、発散角を±2° に制限し、ターゲットから 900mm の位置に集光スリットを設ける。

#### 3.2 可変磁場式偏向磁石の開発

静電レンズにより速度弁別されたものに対して、最終的に磁場による質量分離及びビーム収束を行うことで、診断対象の炭素を高精度に弁別する。ここでは、C<sup>4+</sup>, 10keV/u を偏向角 90°、曲率半径 100mm で輸送できる磁場をもつ可変磁場式永久磁石を開発する。磁場は磁極間のギャップを可変にすることで微調が可能な仕様とした。磁石は、入出射角に傾斜(28.5°)をつけており、エッジフォーカスによる垂直方向収束を行う設計とし、炭素弁別の精度を上げる。Figure 3 には、3D 磁場解析コード「Femtet」にて磁場計算された、磁極間ギャップ 22mm、磁場中心強度 490mT での C<sup>4+</sup>, 10keV/u 軌道計算結果を示す。レンズから発散角±1° で輸送された C<sup>4+</sup>, 10keV/u は磁石を通過後にも等しい発散角のまま輸送される設計としている。

製作した磁石の磁場精度を確認するため、中心位置での磁力測定を行い、同じ位置のシミュレーション結果と比較した。ギャップを 22mm に設定した場合の結果を Fig. 4 に示す。磁場分布は概ね一致し、誤差の大きな地点でも 10%以内に収まっていることが確認できた。

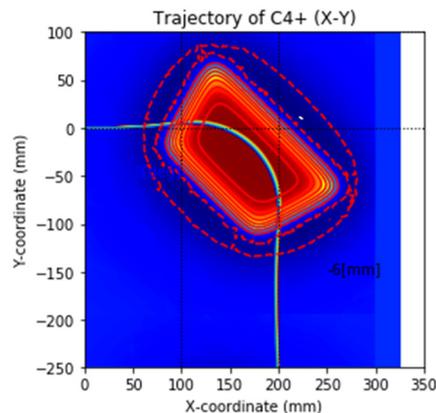


Figure 3: 磁場分布及び軌道解析結果。

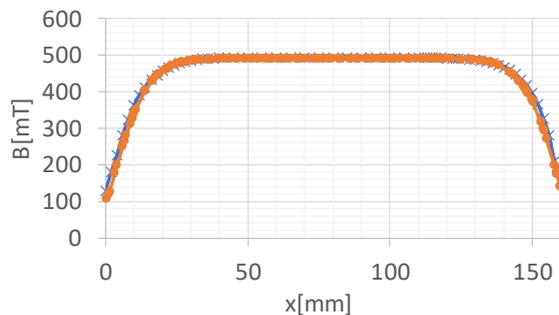


Figure 4: ギャップ 22mm における、製作した磁石の磁場測定結果(青)とシミュレーション結果(オレンジ)。

### 3.3 ビーム輸送系装置の設置

製作された輸送系装置を、イオン加速試験用真空槽の後方に設置した(Fig. 5)。円筒型のイオン加速真空槽後方にアインツェルレンズ、偏向磁石をそれぞれ設計位置に設置し、90° 偏向後に特性計測器設置用真空槽を配置した。レンズ前方(150mm 点)及び後方 (900mm 点)にはアイリスを設置し、磁石通過後に可変スリットを設置することで計測対象のイオン軌道のみを選別し、その軌道を計測部まで導く設計となっている。

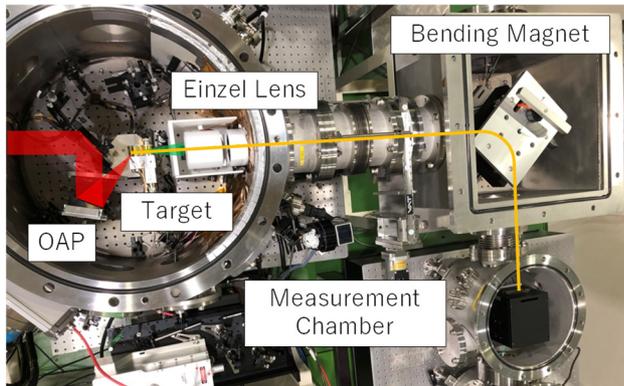


Figure 5:  $C^{4+}$ , 10keV/u 診断用ビーム輸送系。

## 4. まとめと今後の予定

これまで、 $C^{4+}$ , 10keV/u ビーム特性診断のためのアインツェルレンズ、偏向磁石を用いたビーム診断用輸送系を提案・開発・製作してきた。今後は、照射レーザー・ターゲットをパラメータとしてビーム品質データを体系的に実測する。特に、加速器ビーム特性として最重要な値であるエミッタンスは、レーザー駆動イオン加速では炭素を始めとする重イオンに関して計測された報告がなされておらず、どの程度の分解能を持つモニタを用意すればよいのかなどの情報がない。ファーストデータが得られたら、高精度な計測が可能なベッパポットマスク式のエミッタンスモニタの幾何学条件を決定・製作し、計測を行う。その後、J-PARC や HIMAC という既存加速器施設のイオンビームのエミッタンスデータと比較し報告を行うことを予定している。計測によって得た体系的なデータを、PIC レーザープラズマシミュレーションコード EPOCH と、大電流加速器設計コード WARP を組み合わせたシミュレーション値と比較し、定性的な特性の把握に挑戦していく予定である。

## 参考文献

- [1] Hatchett *et al.*, Phys Plasmas, 7, 2076 (2000).
- [2] T. E. Cowan *et al.*, Phys. Rev. Lett. 92, 204801 (2004).
- [3] W. Aston, Nature, 107, 334-338(1921).
- [4] L. E. Collins and P. T. Stroud, Nucl. Instrum. Methods 26, 157 (1964).