

## 量子メスに向けたレーザー駆動イオン型ビームインジェクターの開発

### DEVELOPMENT OF LASER-DRIVEN ION INJECTOR FOR THE QUANTUM SCALPEL

榑 泰直<sup>#, A)</sup>, 小島 完興<sup>A)</sup>, 畑 昌育<sup>A)</sup>, チン タンフン<sup>A)</sup>, 宮武 立彦<sup>B)</sup>, 松本 悠椰<sup>B)</sup>, 野田 悦夫<sup>C)</sup>,  
大友 清隆<sup>D)</sup>, 筒井 裕士<sup>D)</sup>, 野村 真史<sup>D)</sup>, 黒木 宏芳<sup>E)</sup>, 清水 祐輔<sup>E)</sup>, 原田 寿典<sup>E)</sup>, 井上 典弘<sup>E)</sup>,  
白井 敏之<sup>C)</sup>, 近藤 公伯<sup>A)</sup>

Hironao Sakaki<sup>#, A)</sup>, Sadaoki Kojima<sup>A)</sup>, Masayasu Hata<sup>A)</sup>, Thanhhung Dinh<sup>A)</sup>, Tatsuhiko Miyatake<sup>B)</sup>, Yuya Matsumoto<sup>B)</sup>,  
Etsuo Noda<sup>C)</sup>, Kiyotaka Ohtomo<sup>D)</sup>, Hiroshi Tsutsui<sup>D)</sup>, Sinji Nomura<sup>D)</sup>, Hiroyoshi Kuroki<sup>E)</sup>, Yusuke Shimizu<sup>E)</sup>, Hisanori  
Harada<sup>E)</sup>, Norihiro Inoue<sup>E)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>C)</sup>, Kiminori Kondo<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> QST Kansai

<sup>B)</sup> Kyushu Univ.

<sup>C)</sup> QST Inage

<sup>D)</sup> Sumitomo Heavy Industries

<sup>E)</sup> Hitachi Zosen

#### Abstract

Heavy ion radiotherapy is extremely effective in treating cancer; however, a major problem is the size of the treatment device, a particle accelerator. To overcome this problem, QST with industry, government and academia, is developing a heavy ion therapy device using a laser-driven ion injector, called a "fifth-generation quantum scalpel". In this report, we describe the development process of the prototype laser-driven ion injector.

#### 1. はじめに

重イオンによる重粒子線治療は、高ブラッグピークと体内通過中の散乱の少なさに起因する腫瘍への高い線量集中特性をもつため、極めて QOL の高い治療法として認められ、部位によっては保険適応されるまでになって

きた。しかし、重粒子線治療に用いる粒子加速器装置は、治療装置の面積が巨大である点が問題であり、人口の多い都市部にある医療施設内に設置することが難しい。重粒子線治療のさらなる普及を目指すには都市部に設置可能なサイズにまで装置の小型化をすることが不可欠である。

そこで、量子科学技術研究開発機構(量研)では2016年の量研の発足以来、後述する量子メスプロジェクトを立ち上げ、第一世代重粒子線治療装置の1/6程度のサイズとなる重粒子線治療装置の開発を進めている[1]。この装置では、現状の常伝導シンクロトロンと既存の高周波イオン加速型入射器の組み合わせを超伝導シンクロトロン既存の高周波イオン加速型入射器の組み合わせに入れ替えることで小型化を目指している(Figure 1)。高周波イオン加速型入射器をそのまま利用する理由は、入射器の小型化を目指して高周波空洞に供給するパワーを増力しても、パワーの増力に比例して放電する確率が向上することは避けられず、小型化には物理的な限界が存在するためである。

一方、レーザー技術の分野では、フェムト秒時間幅にエネルギーを集中させる高強度レーザーの進歩とともに、西暦2000年頃から「レーザー駆動イオン加速」が発見され[2]、粒子加速器を小型化するブレイクスルー技術として世界各国で基礎研究が進んできた。レーザー駆動イオン加速とは、レーザーシステムが発生するレーザー光を、空間的・時間的に絞りこみ  $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$  を超える光を創り出し、ターゲット薄膜に照射することでレーザー光の電磁場をイオン加速電場にエネルギー変換して、イオンを  $\mu\text{m}$  のオーダーで瞬間的に MeV 領域まで到達させることができる技術である。

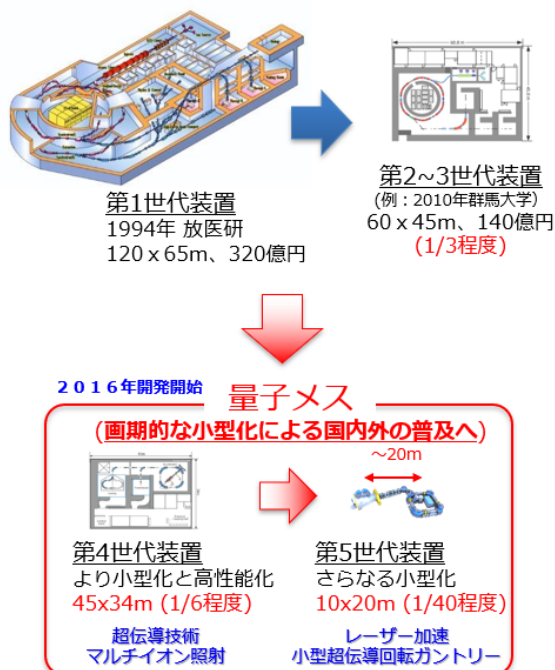


Figure 1: History of heavy ion radiotherapy.

<sup>#</sup> sakaki.hironao@qst.go.jp

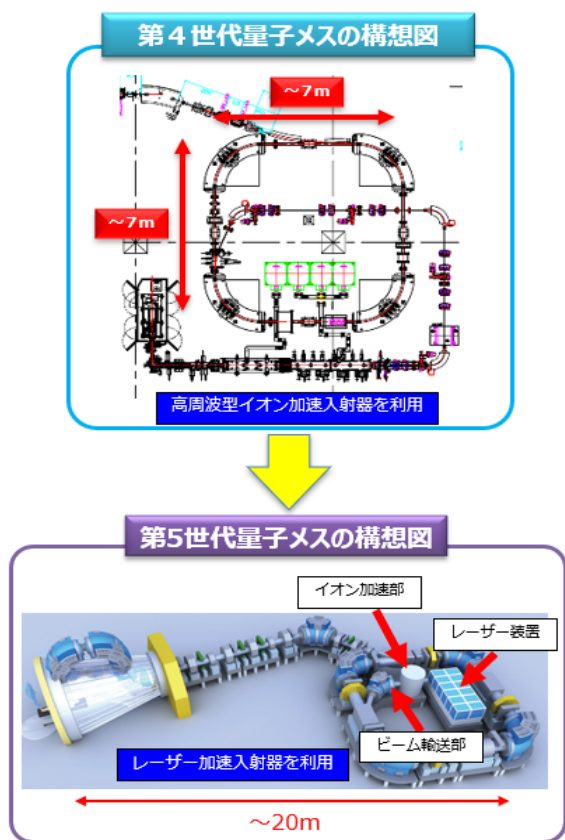


Figure 2: Image for a four and a five generation of heavy ion radiotherapy.

## 2. 第5世代重粒子線治療装置

重粒子線治療装置は、その技術進歩の世代に応じた呼び方がされており、量研が進めている『高周波イオン加速型入射器を利用する量子メス』は「第4世代」と呼ばれる世代に当たる。第4世代の治療装置をさらに小型化

するには、入射器をさらに小型化することが必要であるが、第4世代の量研は超伝導シンクロトロン早期実現とともに、その先の小型化を見据えたレーザー駆動イオン加速を用いてさらなる第5世代の量子メスの技術開発を進めている。

Figure 2 に第4世代および第5世代の量子メスの概要図を示す。第4世代では、四角形の超伝導シンクロトロンの外側に、15mほどの第3世代で利用されている高周波型イオン加速器が設置されている。第5世代になれば、その入射器をレーザー駆動イオン入射器に置き換え、シンクロトロンの内側に設置していくことになる。

### 2.1 レーザー駆動イオン入射器に必要な開発

レーザー駆動イオン入射器の開発を始めた2016年当初は、レーザーとプラズマの相互作用実験から得られる物理データの取得を主とする基礎研究段階にあり、入射装置を作るうえで必要な技術を洗い出すことから始める必要があった。量子メスでは、数MeV/核子の炭素イオンを10Hzで $10^8$ 個/秒以上シンクロトロンに入射しなければならない。そのため

①4MeV/n、 $10^8$ 個/秒のイオンを加速できるエネルギーを有するレーザーシステム

②高純度の炭素が繰り返し供給できるターゲット装置

③加速した炭素イオンビームを効率的に伝送する装置の課題が挙げられる。量研では、①についての技術やノウハウはこれまでの研究活動の中で十分蓄積してきたため、開発を進めるうえでは問題がなかった。その一方、②および③に関しては、技術の十分な蓄積が無く、早急な技術開発においては、技術を有する企業の協力(産官学連携)が不可欠であった。

### 2.2 産官学連携による入射器原型機開発

産官学連携を考えて、②については薄膜の高速加工技術を有する日立造船、③については小型イオンライナックの設計・製作技術をもつ住友重機に共同開発を依頼した。日立造船は、IHヒーターを用いた不純物除去手法を取り入れた高純度ターゲット装置を開発[3]、ま

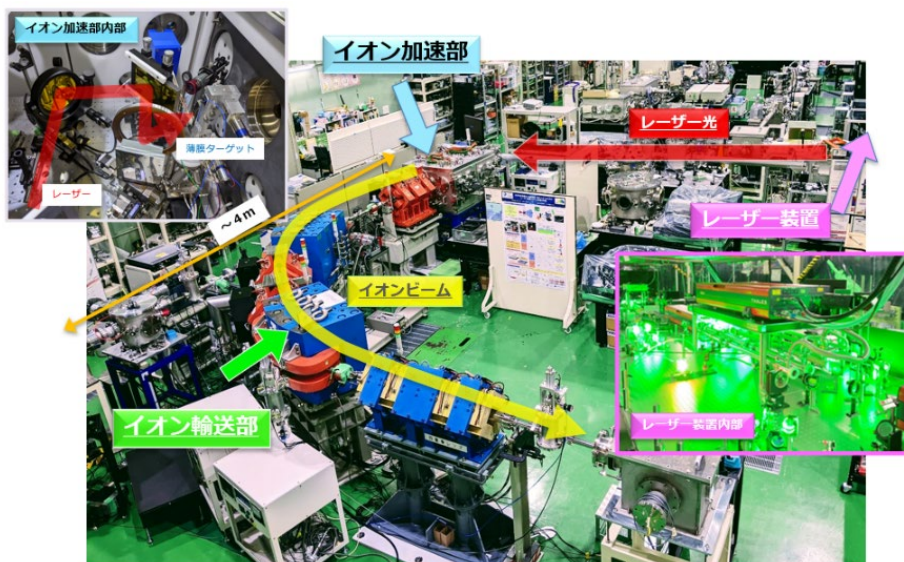


Figure 3: Photograph of prototype of laser-driven ion injector.

た、住友重機はビームシミュレーション技術にて、SPRING-8で利用されていた電子用ビームラインが、我々のイオン加速実験の仕様にあうように最適化し、原型機の開発に向けたビーム試験方法などの検討を行った。

### 3. レーザー駆動イオン入射器原型機の完成

2023年6月には、量研関西研内のレーザー装置と各企業が開発した装置と、SPRING-8線型加速器から移管された電磁石群を組み合わせ、レーザー駆動イオン入射器原型機を完成させた。Figure 3には、完成したレーザー駆動イオン入射器の写真を示す。写真右に3m×1.5mほどのチタンサファイアレーザー装置(パワー3J)が設置され、そこから発せられたレーザーをイオン加速部まで伝送し、レーザープラズマ相互作用にて高エネルギーイオンを作り出す。そして、加速されたイオンビームは、Q磁石、偏向電磁石で構成されたビーム輸送系にて下流まで伝送されていく。我々は、2023年6月末から原型機による統合試験を開始し、現在はQスキャン法によるビームエミッタンス診断などを行っている。

### 4. 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、産官学連携にて、それぞれの特技技術を終結することでレーザー駆動イオン入射器の原型機を完成させたうえ、その統合試験を開始した。今後は、原型機の統合実験によって得られる実験データおよび知見より、第5世代の重粒子線治療用入射器の実証機を設計する手法を確立させていく。

### 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, Nucl. Inst. and Meth. , A, 1053, 168312 (2023).
- [2] S.C. Wilks *et al.*, Phys. Plasmas 8 542 (2001).
- [3] S.Kojima, Matter and Radiation at Extremes 8, 054002 (2023).