

量子メスに向けたレーザー駆動イオン型入射器の開発



榎 泰直
Sakaki Hironao

1 はじめに

身体の奥深くにあるがん細胞を炭素等の重い元素によって狙い撃ちする重粒子線治療は、ブラッグピークの高ピーク特性と治療時にビームが体内を通過する際の散乱の少なさにより、がん細胞に線量を集中させることができるため、放射線治療の中でも優良治療に位置づけられる。しかし、この治療に用いられる粒子加速器装置は直径20mほどの設置床面積になることに加えて、装置の放射線遮蔽対策から分厚い遮蔽壁が求められる。そのため巨大な装置建屋が必要になるため、医療施設に導入する際、新たな建屋の建設という困難が伴う。重粒子線治療の

更なる普及を目指すには、都市部に、容易に設置可能なサイズまで装置を小型化することが不可欠となる。

量子科学技術研究開発機構（QST）では2016年の量研の発足以来、「量子メス」と名付けた小型重粒子線治療装置の開発プロジェクト¹⁾を立ち上げ、第1世代装置といわれる旧放医研 HIMAC の1/6程度のサイズを目指している。量子メスは、2段階で開発を進める。第1段階（第4世代）の開発では「現状の常伝導磁石を用いたシンクロトロンと高周波加速型イオン入射器」から、「超伝導シンクロトロンと高周波加速型イオン入射器」の組み合わせをすることを目指す（図1）。その間に、小型化の足かせとなっ

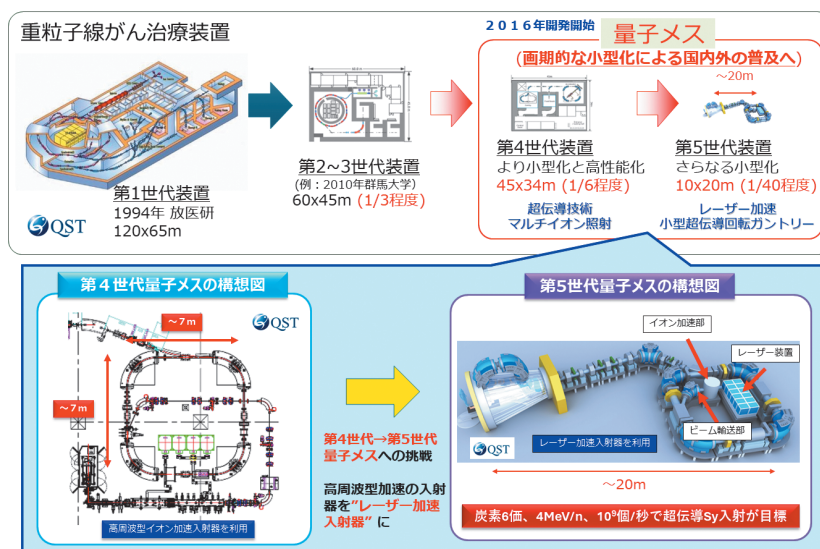


図1 各世代の重粒子線装置と量子メス構想との比較

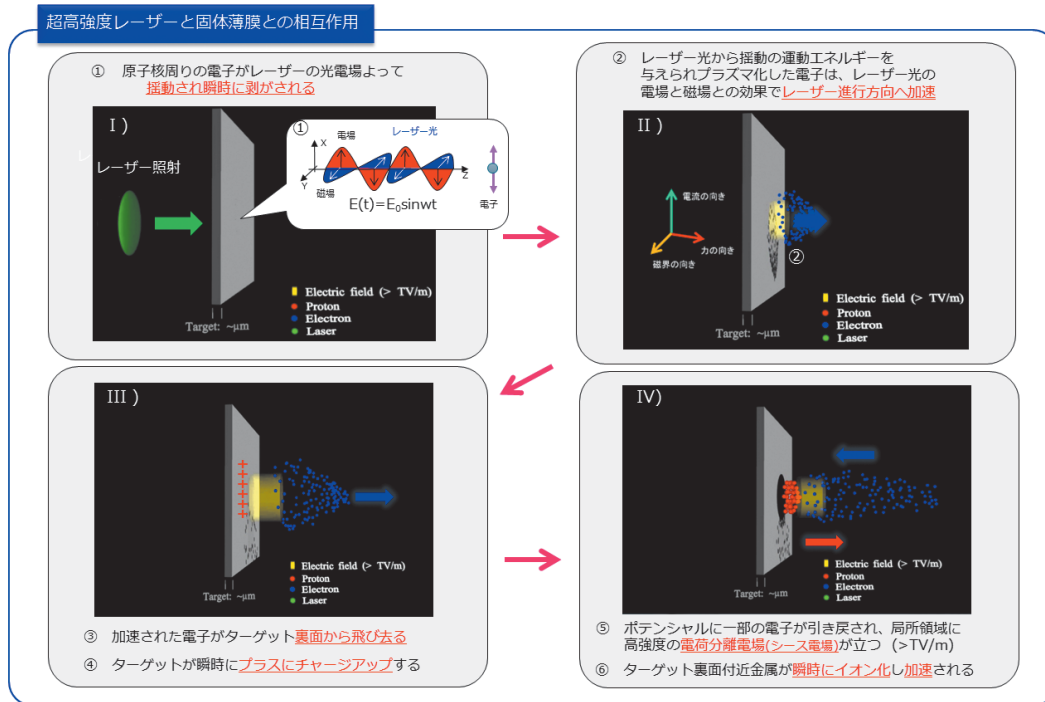


図2 レーザー駆動イオン加速の原理についての説明図

ている高周波イオン加速法から新機軸のレーザー駆動イオン加速法に切り替えるために、この手法を社会実装可能なレベルまで技術成熟させて、「超伝導シンクロトロンとレーザー駆動型イオン加速入射器」の組み合わせによる第2段階（第5世代）の開発に移行させる。本稿では、量子メスに向けたレーザー駆動イオン加速技術を利用した小型イオン入射器の開発状況について報告する。

2 レーザー駆動イオン加速の原理

現状の高周波加速型イオン入射器は、高い駆動周波数の高強度電場をイオンに与えて加速する加速器である。このタイプの入射器は、キルパトリックの経験則という駆動周波数で決定される放電限界電場強度が存在するために加速電場の増力には限度がある。そのため、ある一定のサイズ以下に小型化することができないことが既に認識されブレークスルーが期待されていた。ゆえに、2000年前後に発見された「レーザー駆動イオン加速」²⁻⁴⁾は、粒子加速器を小型化するブレークスルー技術として脚光を浴びた。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^{18} W/cm^2 を超える超高強度な光を創り出

しターゲット薄膜に照射することで相互作用させ『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させてイオンを μm のオーダーの距離にて瞬時的に MeV 領域まで加速する技術』である。

このイオン加速原理は次のとおりである（図2）。①薄膜ターゲットに高強度レーザーを照射すると、レーザーが持つ電場にて電子が元素から剥がされプラズマ化する。②電子は相対論的なレーザーの電場と磁場の影響を受けて $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ 効果により MeV 級まで高い密度で加速され、レーザー進行方向へ向かって指向性を持って照射面から薄膜内へ放出される。③照射面から放出された電子は薄膜を貫通し真空中へ飛び出していくが、レーザー照射面で発生した電荷バランスを埋めるための回帰電流を通して④薄膜裏面がプラスにチャージアップし、⑤ターゲット裏面に電子が引き戻されて局所領域に強力な電荷分離電場が形成される。これが薄膜後方への強力なシース電場となって、⑥薄膜裏面に存在する原子をイオン化させて正イオンとなり、同時に MeV 級のエネルギーまで一気に加速される。このように高強度のレーザーと物質の相互作用にて高温高密度のプラズマをつくり出すと同時に、発生した MeV 級電子による薄膜裏面のシース電場が持続すると考えられている ps オーダー時間でイオンを発生し加速するこ



図3 QST 関西研に完成した「レーザー駆動イオン加速入射器原型機」

とができる。このメカニズムによりレーザーエネルギーを加速されたイオンのエネルギーに変換することが可能となる。

3 量子メス用レーザー加速器の開発

量子メス用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イオン加速やプラズマの物理データの取得を主とする基礎研究段階にあり、まずは量子メスに向けたイオン入射器を作るために必要な技術課題を明確にする必要があった。量子メスでは、4 MeV/核子程度の炭素イオンを10 Hzで 10^8 個/秒以上シンクロトロンに入射することが求められる。そこで、

I) 4 MeV/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

II) 高純度の炭素が繰り返し供給できるターゲット装置

III) 加速した炭素イオンビームを効率的に伝送する装置

を主とした要素技術開発課題とした。まず、I) 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ているが、必要なレーザーの

スペックの検討や実際にそのスペックのレーザー開発が可能なのか等、特にレーザーのパルスエネルギーや繰り返しレートが高くなった場合の検討や新たな開発課題について検討をする必要がある。一方で、II) と III) の開発に必要なレーザー装置については十分なスペックまで開発が進められ、イオン加速に必要なレーザーパルスの供給が可能となっている。II) と III) に関してはQSTに技術の十分な蓄積が無かったために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。産官学連携を考えて、II) については薄膜の高速加工技術を有する日立造船、III) については小型イオンライナックの設計・製作技術を有する住友重機に共同開発を依頼した。日立造船は、IHヒータ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⁵⁾、また、住友重機はビームシミュレーション技術にて原型機の開発に向けたイオンビームの制御法の開発を進めた。

4 レーザー駆動イオン入射器原型機の完成

2023年6月には、QST 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て、図3で示す

写真のレーザー駆動イオン入射器原型機を完成させた。図3右に3m×1.5mほどのチタンサファイアレーザー装置が設置され、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、レンズ効果を持つ四重極電磁石と方向を変える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。そして、本原型機にて2023年6月末からレーザーイオン加速の統合試験を開始した⁶⁾。

5 おわりに

筆者らは、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、それぞれの得意とする技術を集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及び知見より、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、本原型機による開発から次のステージである量子メス用実証

機の完成を早期に目指す。

謝辞

本研究は、QST 関西研並びに量医研の関係者、日立造船(株)、住友重機械工業(株)のご協力により行われたものである。また、研究実施にあたり、JST 未来社会創造事業大規模プロジェクト型JPMJMI17A1、並びにQST 革新プロジェクトの支援を受けて進めてきたものである。

参考文献

- 1) Y. Iwata, *Nucl. Inst. and Meth. A*, **1053**, 168312 (2023)
- 2) A. Maksimchuk, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 4108 (2000)
- 3) E. L. Clark, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 1654 (2000)
- 4) R. A. Snavely, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 2495 (2000)
- 5) S.Kojima, *et al.*, *Matter and Radiation at Extremes*, **8**, 054002 (2023)
- 6) 量研プレスリリース (2023年8月30日) <https://www.qst.go.jp/site/press/20230830.html>

(量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所
量子応用光学研究部)