

量子メス入射器に向けたレーザー駆動重イオンバンチの高繰り返し加速 HIGH-REPETITION-RATE ACCELERATION OF LASER-DRIVEN HEAVY ION BUNCHES TOWARD A QUANTUM SCALPEL INJECTOR

小島完興^{#, A)}, 榊泰直^{A), B)}, チンタンフン^{A)}, 畑昌育^{A)}, 青木宣篤^{B)}, 大石沙也加^{C)},
黒木宏芳^{D)}, 清水祐輔^{D)}, 原田寿典^{D)}, 井上典洋^{D)}, 近藤公伯^{A)}

Sadaoki Kojima^{#, A)}, Hironao Sakaki^{A), B)}, Thanh Hung Dinh^{A)}, Masayasu Hata^{A)}, Nobuatsu Aoki^{B)}, Sayaka Oishi^{C)},
Hiroyoshi Kuroki^{D)}, Yusuke Shimizu^{D)}, Hisanori Harada^{D)}, Norihiro Inoue^{D)}, Kiminori Kondo^{A)}

^{A)} National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

^{B)} Kyushu University

^{C)} Nara Women's University

^{D)} Kanadevia Corporation

Abstract

We report two key technologies for realizing a high-repetition laser-driven ion injector toward compact heavy ion therapy systems. First, a rapid induction heating method was developed to remove surface contaminants from nickel tape targets, effectively suppressing proton contamination and enabling stable carbon ion acceleration. Second, a roll-to-roll debris shield using 50 μm flexible glass (G-Leaf®) demonstrated high optical quality and durability under >4,000 laser shots. These advances improve target cleanliness and optical protection, addressing critical challenges in long-term laser ion source operation and supporting the development of practical systems like the “Quantum Scalpel”.

1. はじめに

世界におけるがん患者数は今後 20 年間で年間 2,200 万人に達すると予測されており、日本においても 1981 年以降、がんは死因の第 1 位を占め続けている。

がんの診断・治療技術の高度化は、医療分野における国際的な研究課題である。なかでも、炭素イオンなどの重粒子線を用いた放射線治療は、照射の空間的精度が高く、正常組織への影響を抑えられることから、身体的負担が小さく、非侵襲である点で注目を集めている。

重粒子線治療では、陽子よりも重い炭素イオンを光速の約 73% にまで加速し、身体の深部に存在する腫瘍へ高精度に照射する。そのためには大型の加速器と専用の施設が必要となる。現在、日本国内では千葉、兵庫、群馬、佐賀、神奈川、大阪、山形の 7 施設で治療装置が稼働しており、この稼働数は世界最多である。しかし、これらの施設で対応可能な年間患者数は約 5,000 人とどまり、国内における重粒子線治療の潜在的なニーズである約 7 万人には遠く及ばない。全国的な普及を実現するには、治療装置の小型化・高性能化が急務である。

この課題を解決すべく、量子科学技術研究開発機構 (QST) では 2016 年より、既存の HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) を約 1/40 の面積に小型化した次世代治療装置「量子メス」の開発に着手した。産官学連携による取り組みのもと、2030 年の実用化を目標に、装置構成の抜本的革新を進めている。

2. 次世代加速器 “量子メス”

図 1 に示す第 5 世代重イオン治療装置「量子メス」は、イオン入射器・シンクロトロン加速器・ビーム輸送系・回転

ガントリーから構成される。装置の大幅な小型化を実現するためには、体積の大半を占める入射器部分およびシンクロトロン加速器部分の構造革新が鍵となる。

このため本装置では、革新的な 2 つの技術として超伝導シンクロトロンとレーザー駆動イオン入射器を中核要素として採用する。前者は既の実証機の製作が進んでおり、後者はレーザー・プラズマ相互作用によって数 TV/m 級の極めて高い加速勾配を実現するもので、小型化の要件を根本的に満たす次世代技術として期待されている。

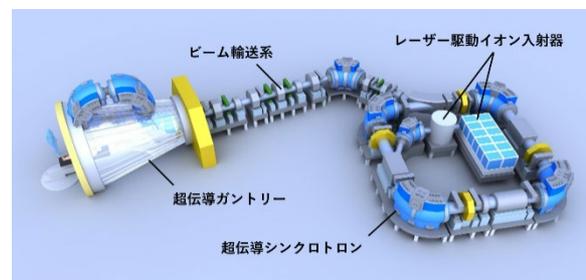


Figure 1: Next-generation heavy-ion cancer therapy system (Quantum Scalpel).

3. レーザー駆動イオン入射器の高繰り返し・長期安定動作に向けた要素技術

3.1 レーザー駆動イオン加速

レーザー駆動イオン加速は、固体ターゲットに超短パルス高強度レーザーを照射し、主に TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) 機構を介してイオンを加速する。加速勾配が非常に大きく、入射器の小型化には極めて有効であるが、一方で 1 ショットごとにターゲットが損

[#] kojima.sadaoki@qst.go.jp

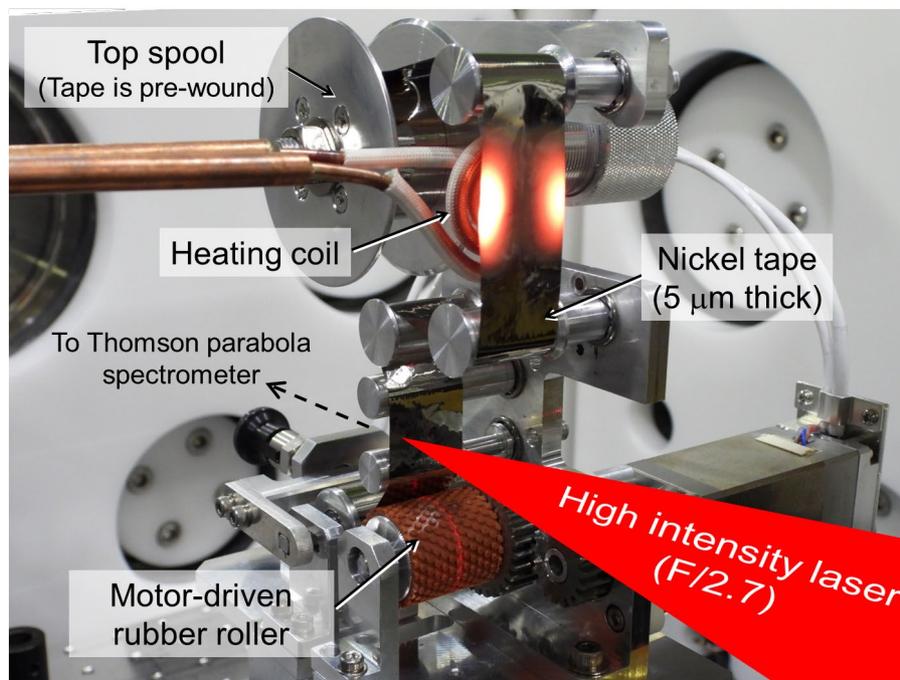


Figure 2: Target surface cleaning and rapid delivery system.

耗する性質から、高繰り返し動作と長期安定性の確保が最大の技術課題とされている。本研究では、その解決に向けて以下の2つの要素技術を開発・実証した。

(1) ターゲット表面の汚染除去と連続供給を実現する誘導加熱技術

(2) 高繰り返し照射に耐え、光学性能を維持する超薄ガラス製のデブリシールド

以下、それぞれの技術について述べる。

3.2 ターゲット表面の汚染除去と供給の高速化

レーザー駆動イオン加速の効率と安定性は、ターゲットの初期状態、特にその表面状態に大きく依存する。真空中であっても、数 nm レベルで水分や炭化水素などの分子がターゲット表面に吸着し、照射時にはそれがプロトン源となる。このため、本来加速したい炭素のような重イオンの加速が阻害され、加速ビームの純度や制御性に大きな影響を与える。

このような汚染層に対する既存の除去手法、例えばレーザーアブレーションやイオンスパッタはデブリ発生や装置汚染の懸念があり、また CW レーザー加熱や抵抗加熱では応答性や最高温度に限界がある。本研究ではこれらの課題を克服すべく、誘導加熱 (Induction Heating) に基づく新たな除去技術を開発した (図 2)。

具体的には、5 μm 厚のニッケル製テープターゲットを用い、コイルに流した高周波交流電流によって発生する磁束により、テープ内部に渦電流を誘起した。ニッケルは高透磁率かつ強磁性体であるため、表皮効果によって表層に集中した電流が効率的なジュール加熱を引き起こす。これにより、非接触・短時間で表面を 400°C 超まで加熱できる装置を試作した。

加熱プロセスは FEMTET を用いた有限要素解析により詳細にシミュレートし、磁場分布・電流経路・温度時間

変化を評価した。実験では赤外線サーモグラフィにより、シミュレーション予測と同様に左右 2 点にホットスポットが形成される様子と、加熱の停止後にはホットスポットの温度が数秒で 180°C まで急激に低下する放射冷却挙動と、12 秒程度で室温近くまでゆっくり低下する熱伝導冷却挙動の 2 つを確認した。

最後に誘導加熱処理を施したターゲットにレーザーを照射し、トムソンパラボラで生成イオンを分析した結果、80°C 以下ではプロトンが優勢だった一方、150°C 以上ではプロトン成分が劇的に減少し、C⁴⁺や C⁵⁺などの高電荷状態炭素イオンが主要成分となった。また、加速される最大エネルギーも 6.5 MeV に達し、加熱によるイオン種の変化が定量的に示された。

さらに特筆すべきは、ニッケル表面に予め吸着されていた炭化水素が、加熱によって分解・固定され、レーザー照射に適した炭素供給源として自然に形成される点である。これにより、高価で精製工程の多い高純度炭素薄膜ターゲットを別途準備せずとも、ニッケル+残留ガスの組み合わせで高品質炭素ターゲットを自律的に構成できるという新しいターゲット供給戦略が可能となった。

この誘導加熱法は、真空環境下での 10 Hz 以上の繰り返し動作にも対応可能な、非接触・高速・高信頼な汚染除去技術であり、プロトン汚染を抑えた高純度炭素イオン加速の実現において極めて有効である。今後、他種イオン (O, He, Ne など) への適用や、多層構造ターゲットへの展開にも応用可能であり、多イオン種治療の実現にもつながる基盤技術となる。

3.3 光学素子保護と長時間照射対応のための超薄ガラスデブリシールドの開発と実証

レーザー駆動イオン加速では、照射ごとにターゲット表面でプラズマ爆発が生じ、金属蒸気・イオン・微粒子と

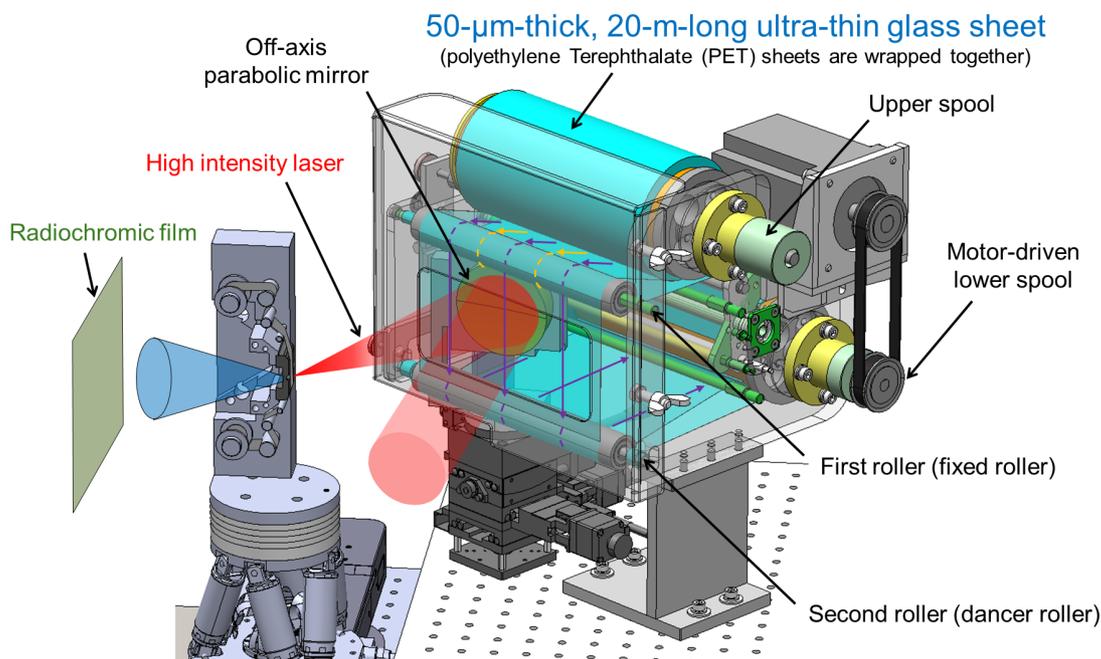


Figure 3: Ultra-thin glass debris shield system.

いったデブリ(破片)が周囲へ飛散する。特に、前方に位置するレーザー光の最終集光光学系(放物面鏡やレンズ)はこの影響を直接受けるため、ビーム品質の劣化や反射率の低下を防ぐためのデブリシールドが必要不可欠である。従来は、厚い石英ガラスによる高精度シールドや、交換しやすいポリマー膜が使われてきたが、前者は固く巻き取りができないため、長期運転に必要な多数のシールドの確保が困難である。後者はロール状にして長期運転に必要なシールド保管できる一方で、一度巻き取ると恒久的なしわが発生し、その結果、波面精度が低下し、回折限界での集光が求められるイオン加速用途では制約が大きかった。

本研究では、これらの問題を同時に解決可能な材料として、フレキシブルディスプレイ用に開発された 50 μm 厚の超薄ガラス(G-Leaf[®])を採用し、その性能と実用性を多面的に評価した。G-Leaf[®]はアルミノボロシリケート系の無アルカリガラスであり、BK7 に類似した光学特性を有しながらも、薄いため極めて柔軟で、ロール状での長尺供給が可能である。一方でガラスとしての硬さもあるため、巻き取った後も恒久的なしわは発生しない。すなわち、従来の2種類のシールドの長所を掛け合わせたシールドである。

光学評価では、可視～近赤外領域において高い透過率を維持しつつ、波面誤差は PV で $\lambda/5$ 、RMS で $\lambda/20$ を達成した。この波面誤差はストレーリング比換算で 0.88 という高い集光性能を確認した。さらに、偏光カメラによる複屈折評価でも、応力誘起の歪みが認められず、偏光保持性にも優れることがわかった。

シールドガラスを真空中で連続的に交換するため、ロール to ロール搬送機構を試作し、実際に真空チャンバー内で 1 m/min の速度で搬送しながら、Ti:sapphire レーザー(1 J, 40 fs, 10 Hz)を集光照射する実験を行った(図3)。結果、レーザーフォーカスのスポット形状やポインテ

ィングの安定性には変化がなく、移動中でも高精度なビーム制御が維持された。最後にシールド有無によるイオン放出特性への影響を検証したが、RCFに記録されたイオン分布には優位な違いがみられず、高強度・超短パルスレーザーに対して優れたデブリシールドとして機能することが実証された。

このように、超薄ガラスは高光学性能とロール搬送性を兼ね備えた唯一の材料であり、従来の石英ガラスやポリマー膜の弱点を補完する次世代のデブリシールド候補として極めて有望である。

4. まとめ

本研究では、次世代小型重粒子線治療装置「量子メス」において不可欠となるレーザー駆動イオン加速の実用化に向けて、高繰り返し動作と長期安定性の課題に対処するための基盤技術を提案し、実証した。具体的には、誘導加熱によるターゲット表面のリアルタイム清浄化により、プロトン汚染を抑えた安定的な炭素イオン加速を実現するとともに、超薄ガラスを用いたロール搬送型デブリシールドの導入により、光学系を損傷から守りながら長時間の連続照射を可能とした。これら2つの技術は、今後の医療用加速器の実装のみならず、高繰り返しレーザー応用全般にわたる展開可能性を持ち、産業応用や多イオン種治療にも貢献し得る汎用性を備えている。本成果は、レーザー駆動イオン入射器の信頼性と持続運用性を飛躍的に高めるものであり、「量子メス」の社会実装に向けた重要な一歩である。

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」の支援のもとで進められた。