

量子メスに向けたレーザー駆動大強度イオンバンチの全電荷量測定

TOTAL CHARGE MEASUREMENT OF LASER-DRIVEN HIGH-INTENSE ION BUNCH FOR QUANTUM SCALPEL

小島 完興^{#, A)}, 榊 泰直^{A)}, チン タンフン^{A)}, 石井 邦和^{B)}, 熊谷 嘉晃^{B)},
大石 沙也加^{B)}, 岡野 朱莉^{B)}, 近藤 公伯^{A)}

Sadaoki Kojima^{#, A)}, Hironao Sakaki^{A)}, Thanhhuu Dinh^{A)}, Kunikazu Ishii^{B)}, Yoshiaki Kumagai^{B)},
Sayaka Oishi^{B)}, Akari Okano^{B)}, Kiminori Kondo^{A)},

^{A)} Kansai Institute for Photon Science, QST

^{B)} Nara Women's University

Abstract

Laser-driven ion beam is accelerated by the instantaneous and localized electric field generated when a high-intensity laser is irradiated onto a thin-film target. The emitted ion beam has a large divergence angle due to the gradient of the accelerating electric field and the space charge effect, making it difficult to measure the total charge of ions. At QST, we developed a test bench with a laser section, an ion acceleration section, and an ion transport section. The diameter of the ion beam, which expands as it moves away from the target, is focused by a magnetic field into a Faraday cup about 5 m downstream, and the total charge is measured. The results showed that laser-driven ion acceleration can essentially accelerate many particles that meet the requirements for medical applications.

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 万人にまで増加すると予測されている。日本においても死因の第 1 位は 1981 年以降、継続してがんとなっており、がんの診断や治療に関する研究開発は世界的に重要な研究課題となっている。その中で重粒子線を用いたがんの放射線治療は、治療を受ける患者さんの身体に与える負担が小さく、また非侵襲的な治療であることから、治療後の社会復帰が容易であり、近年は Quality of Life の観点でさらに注目を集めている。

重粒子線がん治療では、身体の深部にあるがん細胞に炭素イオン(陽子線に比べて重いイオン種)を照射して死滅させる。炭素イオンを身体深部へ届けるため、炭素イオンを光速の約 73 パーセントにまで加速する必要があるため、大規模な加速装置や専用建屋が必要となる。関連する研究者や企業の尽力によって現在、日本では全国 7 箇所(千葉、兵庫、群馬、佐賀、神奈川、大阪、山形)で治療装置が稼働するに至り、これは米国、独国、中国などを超えて世界最大の稼働数である。

しかしながらこれら 7 つの施設を合わせても治療を行える患者数は年間 4000 人程度に限られている。一方で、重粒子線による治療が望まれる国内患者は年間 70000 人程度と見積もられており、治療装置の台数が足りていないのが現状である。今後の重粒子線治療の展開に向けては、治療装置の高性能化・小型化による全国的な普及が不可欠であると考えられている。

そこで、2016 年から QST では既存する装置(重粒子線がん治療装置 HIMAC)を約 1/40(面積比)に小型化する“量子メス”と呼ばれる次世代重粒子線がん治療装置の開発を産官学連携で進め、2030 年の実用化を目指している。

2. 次世代加速器 “量子メス”

Figure 1 は現在、提案されている第 5 世代重粒子線がん治療装置(量子メス)の概念図である。この装置は、レーザー駆動イオン入射器・超伝導シンクロトロン・ビーム輸送系・超伝導回転ガントリーから構成されている。装置を小型化するためには、体積の大部分を占める入射器とシンクロトロンの小型化が不可欠である。量子メスの小型化は、革新的 2 つの新規技術(超伝導シンクロトロンとレーザー駆動イオン入射器)の導入で達成される計画である。量子メスに導入される革新的な 2 大技術の 1 つである超伝導技術を利用したシンクロトロンは、すでに実証機の製作段階にある。2 大技術のもう 1 つ、レーザー・プラズマ加速を用いた新型イオン入射器が我々の開発目標である。

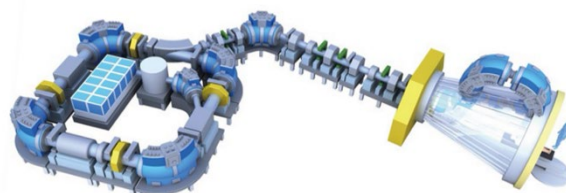


Figure 1: Quantum scalpel.

3. レーザー駆動イオンの全電荷量測定

レーザー駆動イオン入射器に必要なイオンビームパラメータは、高周波加速を使用する HIMAC の既存のイオン入射器を参考に決定された。患者の治療時の負荷を考えると、レーザー駆動イオン入射器は核子あたり 4 MeV の準単色エネルギー(10% 帯域幅)の炭素イオン(C^{4+} または C^{6+})を 10^9 個以上を下流のシンクロトロンへ 2 秒以内に入射させる性能が必要となる。高強度レーザーを照射した際に加速されるイオンの最大エネルギー

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

はこれまでの研究においてそのスケーリング則が示されている一方で、加速されるイオンの総粒子数については有効な計測結果はほとんど示されてこなかった。

レーザー駆動イオンビームは、高強度レーザーを薄膜標的に照射した際に、標的裏面に瞬時的・局在的に発生する加速電場によって加速される。この際、加速されるイオンはさまざまなイオン種(陽子、炭素、酸素など)、多価数(1価から完全電離まで)、連続エネルギーを持つものが知られている。そのため、これらのイオンの分析にはイオン種と価数の分別とエネルギー分解が同時に可能なトムソンパラボライオン分析器が使用されることが一般的であるが、その観測立体角は小さく、加速されるイオンの総粒子数を評価することができなかった。

QST ではレーザー部、イオン加速部、イオン輸送部を備えたテストベンチを開発し、この課題に統合的に取り組んでいる。実験では 5 μm 厚のニッケル薄膜へ高強度レーザーを照射し、標的の裏面から垂直方向へレーザー駆動イオンビームを加速した。標的から 400 mm 離れた場所には、三連四重極磁石のイオン用レンズを設置し、標的を離れると同時に拡大するイオンビームのビーム直径を磁場によって約 5000 mm 下流のファラデーカップへ収束した。磁場による収束効果を利用することで最大 6 msr の立体角に加速されたすべてのイオンビームを収束し、ファラデーカップでその総電荷量を計測することが可能となった。実験はファラデーカップ上で収束されるエネルギーが異なるような 8 個の条件 (0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 MeV) で行われた。Figure 2(a) はオシロスコープで計測したイオンビームによってファラデーカップに印加される電圧の時間発展を示している。プロトンのエ

ネルギーが上昇すると共に、信号の観測される時間が後ろにずれる一方で、観測される電圧信号のピークが徐々に高くなることがわかり、低エネルギーのイオン数が多いことがわかるエネルギー分布をより直感的に理解するために、続いて、Fig. 2(b) では、電圧信号をオシロスコープの終端抵抗値 (50 Ω)、サンプリングタイム (4.0 ns)、プロトンの電荷量で割ることでファラデーカップへ到達したプロトンの粒子数へと変換した。また横軸も TOF 法の計算によって到達時間からエネルギーへと変換した。収束パラメータとして指定されたエネルギー帯のプロトンが漏れなく計測されていると仮定すると、各条件のエネルギー分布のピークを結んで補間することで、レーザー駆動で加速されたイオンビームの総粒子のエネルギー分布推定が可能になった。エネルギー分布はプロトンのエネルギーが上昇と共に、勾配温度 0.3 MeV の勾配を持ち指数関数的に減少することが示された。1 MeV の準単色エネルギー (10% 帯域幅) の領域ではプロトンは量子メスの目標である 10^8 を超える粒子数で加速されており、カットオフに近い 2 MeV の準単色エネルギー (10% 帯域幅) の領域においても量子メスの目標に迫る 10^7 以上のプロトンが加速されていることがわかった。

4. 考察

今回の観測で得られたプロトンの総粒子数についてその妥当性を加速メカニズムから考察する。レーザー駆動イオン加速では、標的裏面に局在的に発生する分極電場によってプロトンを加速する。そのため加速されるプロトンの総量は、分極電場の発生する領域に元々存在した水素原子の数で制限されると考えられる。

これまでの研究から標的裏面に発生する分極電場の面積は、直径 25 μm 程度と複数の方法によって計測されている。一方で、深さは低真空下 (10^{-2} Pa 程度) に置かれた標的の表面に吸着される炭化水素 (CH_2 など) や水 (H_2O) などの層の厚みで決まる。Allen らが行った X 線光電子分光法の解析によるこれらの表面吸着層の厚みは 1.2 nm 程度であり、水分子の大きさが 0.38 nm 程度のことから 3 分子層程度の厚みとなる。水素の原子密度が 2×10^{23} atom/cm³ とすると上記の条件で決まる体積内 (6×10^{-13} cm³) に含まれる水素の原子数は 10^{11} atom 程度と予測することができる。今回の計測で得られたプロトンを全エネルギー領域で積分した粒子数は 10^{11} atom 程度と簡単なモデルによる推定とよく一致した。

重粒子線がん治療においては今回観測したプロトンより重い炭素イオンを加速する必要があるため、今回の結果の評価は注意深く行う必要があるが、レーザー駆動イオン加速という加速方式が量子メスの目標パラメータを満たす粒子数を加速できる性能を本質的に有していることが示された。

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。

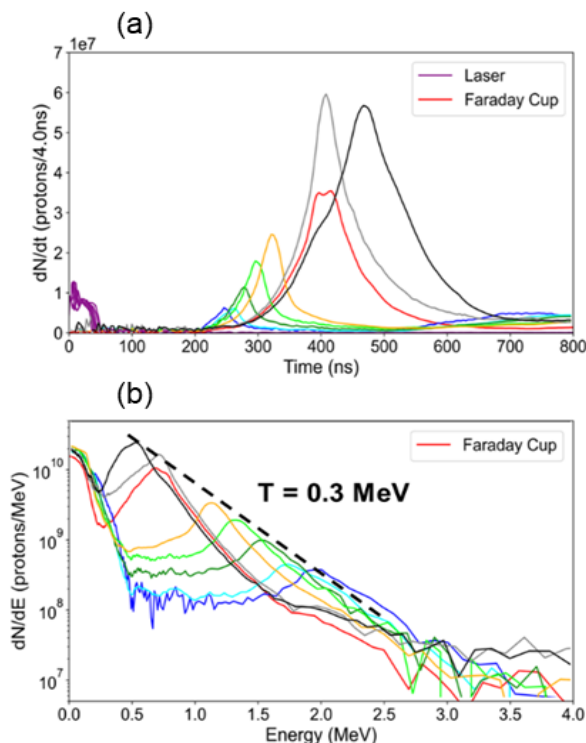


Figure 2 (a) Time evolution of voltage induced by ions.
 (b) Ion energy distribution.