

量子メスプロジェクトに向けたレーザーイオン入射器シミュレーションの進展 PROGRESS IN SIMULATION OF LASER ION INJECTOR FOR THE QUANTUM SCALPEL PROJECT

畑昌育[#], 小島完興, 榊泰直, 近藤公伯

Masayasu Hata[#], Sadaoki Kojima, Hironao Sakaki, Kiminori Kondo
National Institutes for Quantum Science and Technology

Abstract

The National Institutes for Quantum Science and Technology (QST) is currently conducting the quantum scalpel project, which aims to improve the performance and miniaturization of heavy ion cancer therapy devices, which are highly effective in treatment. The fifth generation of heavy ion cancer therapy devices, the Quantum Scalpel consists of the laser ion injector, super-conducting synchrotron, and super-conducting rotating gantry. The downsizing of the injector and synchrotron, which occupy most of the volume, is essential to reduce the device's size. Laser-driven ion acceleration is expected to meet this need for miniaturization because of its huge acceleration gradient. To replace existing ion injectors with laser-driven systems, it is necessary to develop compact laser modules and accelerate carbon ions with 4 MeV/u using these modules. We have evaluated the quantitative data of accelerated carbon ions using a three-dimensional PIC (Particle-In-Cell) code. The laser conditions for producing carbon ions with the charge state of 6+, which are favorable for acceleration, have been theoretically determined and validated by two-dimensional simulations including ionization and collisional processes.

1. はじめに

世界のがん患者数は、今後 20 年間で年間 2,200 万人に増加すると予想されている[1]。日本においてもがん患者数は年々増加傾向であり、1981 年以降、がんが死因の第 1 位となっている。

がんの治療方法としては、外科手術、薬物療法、放射線治療が挙げられる。その中で重粒子線による粒子線治療は治療者の身体への負担が小さく、治癒後の社会復帰が容易であることから Quality of Life の観点から、近年注目を集めている。日本では 1994 年に世界初の重粒子線がん治療施設“HIMAC”が稼働し、現在では国内で全国 6 箇所(千葉、兵庫、群馬、佐賀、神奈川、大阪)が稼働するに至り、他 1 箇所(山形)が建設中である。しかしながら、稼働中の 6 施設を合わせても行える治療は年間 3,600 人程度であり、1 年間に日本で新たにがん患者となる人の 0.4%に留まっている。そのため、今後の重粒子線治療の展開に向けては、治療装置の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。

2. 量子メス開発におけるレーザー加速イオン入射器

量子科学技術研究開発機構(QST)では、高い治療効果が明らかになっている重イオンがん治療装置の高性能化・小型化を目指す“量子メス”プロジェクトを進めている。量子メスとは、量子ビームによる腫瘍除去手術を喩えた名称である。量子メスは、実際に身体を切ることがなく副作用の小さい治療方法であるため、働きながら通院(日帰り手術)し、がんを治療することが可能である。現在提案されている第5世代重イオンがん治療装置“量子メス”は、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。量子メスでは、超伝導技術を使うことでシンクロトロンを小型化し、これまで直線型加速器を使っていた入射器にレーザー駆動イオン加速技術を導入し、入射器を小型化することを目指す。レーザー駆動イオン加速は非常に大きな加速勾配を持つことからこの小型化の要求に応える技術として期待されている。

量子メスの入射器開発において現在求められているレーザー加速イオンの仕様は次のとおりである。

- 電離度 6 価の炭素イオン
- 核子あたりエネルギー 4 MeV/u
- エネルギー幅 10%で 10^8 個以上
- 繰り返し 10 Hz で生成

そして、これらの炭素イオンビームを、輸送ラインでエネルギー幅 1%まで圧縮し、超伝導シンクロトロンに入射させることになっている。

3. 六価炭素イオン生成条件

入射器開発におけるイオンの加速手法として、よく知られている Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) スキームを採用した。TNSA では、超高強度レーザーにより加速された高速電子が裏面を突き抜ける際に生じる電荷分離電場(シース電場)によって裏面のイオンを電離・加速する。

そこで、まず、このシース電場によって裏面の炭素イオンを六価まで電離するためのレーザー・ターゲット条件について調べる。先行研究[2]によると、ターゲット裏面において作られるシース電場は次式で表される。

$$E_s = E_L \sqrt{\frac{\eta_1 \eta_2}{2}} \quad (1)$$

[#] hata.masayasu@qst.go.jp

ここで、 E_s, E_L は裏面シース電場およびレーザー電場、 η_1 はレーザーから高速電子へのエネルギー変換効率、 $\eta_2 = r_L^2 / (r_L + d \tan \theta)^2$ は高速電子流の密度減少率である。また、 r_L はレーザースポット径、 d はターゲット厚、 θ は高速電子流発散角である。この式を使って、裏面シース電場のレーザー強度およびターゲット厚とスポット径の比に対する依存性を図示したものが Fig. 1 である。また、粗い見積もりとして、イオン化に必要な電場の強さを、イオン化ポテンシャルを電子軌道スケール ($\sim 1 \text{ \AA}$) で割ることで求め、三～六価炭素イオンの生成に必要なシース電場の等高線を黒線で引いた。TNSA スキームを採用しているため、ターゲット厚はマイクロオーダーである。また、投入レーザーエネルギーはなるべく小さく抑えたいので、スポット径もあまり大きくはならずマイクロオーダー程度と想定されるため、ターゲット厚とスポット径の比はおおよそ1となる。したがって、六価炭素イオン生成のためにレーザー強度は 10^{20} W/cm^2 程度が必要とされることがわかる。そこで、これらの見積もりの妥当性を評価するために、衝突・電離過程を組み込んだ二次元電磁粒子コードを用いて、固体密度ターゲットのシミュレーション (Fig. 1 中の丸が準一次元、逆三角が二次元計算、四角は衝突・電離過程なしの低密度標的の三次元計算の結果) を行ったところ、シース電場の値について理論予測との良い一致を示した。また、最も加速される炭素イオンの価数を確認したところ、イオン化のおおよその閾値として引いた等高線も概ね良い一致を示した。

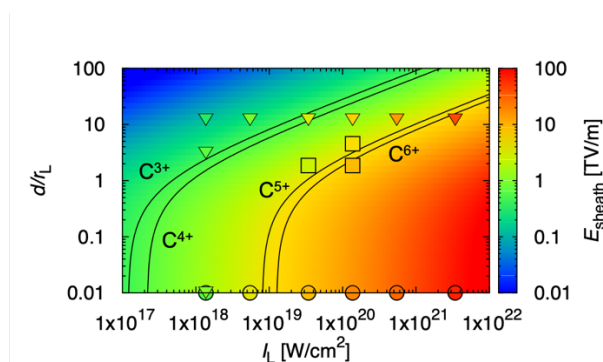


Figure 1: Behavior of rear sheath field against laser intensity and ratio between target thickness and laser spot radius. Black lines indicate threshold sheath field needed to generate C3+, C4+, C5+ and C6+. Colors inside circles, inverted triangles, and squares represents measured maximum sheath field in quasi 1D, 2D, 3D PIC simulations, where ionization and collisional processes are considered only for quasi 1D and 2D simulations.

4. 三次元 PIC によるレーザー加速六価炭素イオンの定量評価

最大エネルギーと個数について定量的な評価を行うために、三次元 PIC シミュレーションを実施した。固体密度のマイクロサイズの炭素ターゲットを三次元コードで計算する場合、莫大な計算資源が必要となるため、固体密度ではなく臨界密度の 60 倍を電子密度上限とした。また、上の議論をもとに六価の炭素イオンを生成できる

レーザー・ターゲット条件でシミュレーションを行うこととし、最初から六価の状態の炭素ターゲットを配置して、三次元電磁粒子コードによるシミュレーションを、計算量を抑えて実施した。ここで、レーザーパラメータは、波長 800 nm 、強度 $2.1 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 、パルス幅 40 fs 、スポット径 $1.2 \text{ }\mu\text{m}$ 、エネルギー 1.7 J 、垂直入射とした。標的は、厚み $1 \text{ }\mu\text{m}$ 、電子密度 $60n_c$ (n_c は臨界密度) の矩形炭素プラズマの前面にスケール長 $1 \text{ }\mu\text{m}$ の指数関数型のプリプラズマをつけたものを置いた。Figure 2 にシミュレーションにより得られた六価炭素イオンのエネルギースペクトルを示す。赤線は、ターゲット垂直方向に加速された炭素イオン全てのエネルギースペクトルで、緑、青、紫、水色はそれぞれ炭素イオンの捕集角 (半角) を $1, 3, 5, 10$ 度とした場合の炭素イオンのエネルギースペクトルを示す。この結果から、半角 3 度の捕集角であれば、 4 MeV/u の六価炭素イオンを 25% のエネルギーバンド幅で 3×10^8 個生成できることがわかった。これは、 10% のエネルギーバンド幅で 10^8 個以上の六価炭素イオンを生成できることを示している。

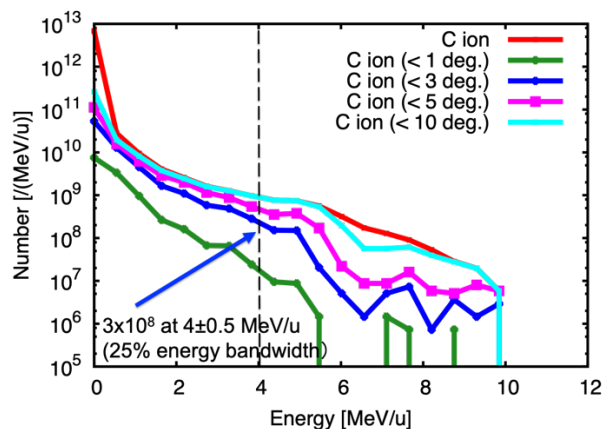


Figure 2: Carbon ion energy spectrum.

5. まとめ

衝突・電離過程を組み込んだ二次元電磁粒子シミュレーションにより、マイクロサイズの炭素薄膜ターゲットの場合、六価炭素イオン生成のためにレーザー強度は 10^{20} W/cm^2 程度以上が必要であることを示した。さらに、加速炭素イオンの定量的な評価のために、三次元電磁粒子シミュレーションを実施した。その際、計算量の低減のために、衝突・電離過程は考慮せず、標的の密度を下げたシミュレーションを実施した。その結果、 1.7 J のレーザーで半角 3 度の捕集角で炭素イオンを集めると、 4 MeV/u の六価炭素イオンを 10% エネルギー幅で 10^8 個以上生成できることがわかった。今後の課題としては、より正確に生成炭素イオンの定量評価を行うために、三次元シミュレーションにおいて衝突・電離過程の影響を評価すること、また固体密度での三次元シミュレーションを実施することが挙げられる。

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。本研究の一部は、HPCI システム利用研究課題 (課題番号:hp220124)を通じて、名古屋大学が提供するスーパーコンピュータ不老の計算資源の提供を受け、実施しました。本研究の一部は、量子科学技術研究開発機構の2022、2023年度大型計算機利用課題を通じて、SGI8600の計算資源の提供を受け、実施しました。

参考文献

- [1] World Cancer Report 2014 (World Health Organization, 2014).
<http://publications.iarc.fr/Non-Series-Publications/World-Cancer-Reports/World-Cancer-Report-2014>
- [2] M. Nishiuchi *et al.*, Phys. Rev. Res. 2, 033081 (2020).