

高速パルスチョッパを用いたレーザー駆動イオンビームの核種選別手法の開発 DEVELOPMENT OF AN ION SELECTION TECHNIQUE FOR LASER-DRIVEN ION BEAMS USING A HIGH-SPEED PULSE CHOPPER

大石沙也加^{#A,B)}, 小島完興^{A)}, 青木宣篤^{A,C)}, タンフン ズン^{A)}, 松本悠椰^{A,C)}, 村川真宙^{A,C)}, 岡野朱莉^{B)}, 石井邦和^{B)}, 熊谷嘉晃^{B)}, 榊泰直^{A)}

Sayaka Oishi^{#A,B)}, Sadaoki Kojima^{A)}, Nobuatsu Aoki^{A,C)}, Dinh Thanh-Hung^{A)}, Haruya Matsumoto^{A,C)}, Mahiro Murakawa^{A,C)}, Akari Okano^{B)}, Kunikazu Ishii^{B)}, Yoshiaki Kumagai^{B)}, Hironao Sakaki^{A)}

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

^{B)} Nara Women's University

^{C)} Kyushu University

Abstract

Ion beams generated by laser-driven ion acceleration have the characteristics of ultrashort pulses and high density and are expected to be a next-generation ion beams technology. Using the beams, we will research the material surface interactions between low-flux ion beams generated by conventional accelerators and high-flux, ultrashort pulse, beams by laser-driven ion acceleration. To achieve this, it is essential to precisely control the ion composition and energy distribution of the laser-driven ion beam. We are developing ion beams selection method based on the time of flight. We will report the results of a preliminary experiment.

1. 序章

レーザー駆動イオン加速は、超高強度レーザーをターゲット薄膜に照射することで、ピコ秒以下の時間幅を持つ高密度イオンビームを生成する先端技術である。その中でも TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) 機構[1-3]は、最も広く研究され、実用化に近い加速方式とされる。一方、TNSA 由来のイオンビームは、イオン核種およびイオン価数が混在しているうえ、エネルギー分散が大きいという課題を抱えており、ビーム照射で求められる単一価数イオンを作り出すために、目的イオンの選別手法および診断手法の開発が求められている。

本研究では、量子科学技術研究開発機構関西光子科学研究所に設置された量子メス用原型機[4]を用い、飛行時間差を利用した選別手法(高速パルスチョッパ)と、RCF (Radiochromic Film)を用いた線量診断手法の高度化を通じて、レーザー駆動イオンビームの純度向上と計測精度の向上を目指した。

2. 高速パルスチョッパによる単一イオン核種選別

2.1 装置構成と原理

レーザーによって加速されたイオンビームは、三連式四重極電磁石(Q-トリプレット)と位相回転空洞を通じて輸送される。Figure 1 には、装置の外観およびレーザー駆動イオンビームの輸送ラインの概要を示す。偏向電磁石では磁場剛性 $B\rho$ ($B\rho = mv/qe$)に基づき、所定の運動量電荷比(mv/qe)帯域のイオンのみを輸送可能とするが、同一の磁場剛性を持つ不純物イオンは除去でき

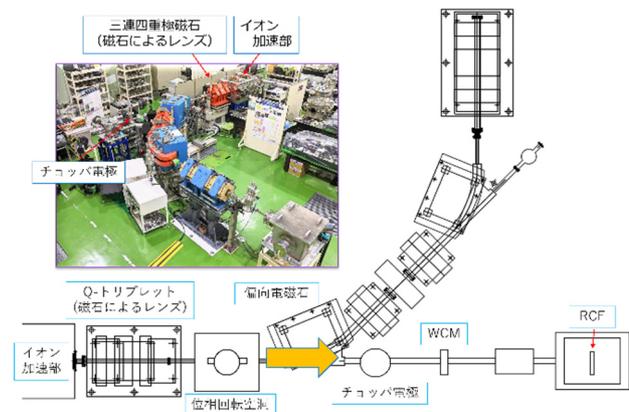


Figure 1: Schematic diagram of the beam transport system.

ない。これを補うため、位相回転空洞によるエネルギー圧縮と高速パルスチョッパを導入し、イオンのエネルギー単色化するとともにイオン到達時間の差に基づく選別を行う。

チョッパ電極は上下2枚の金属板から構成され、上部にはDC電圧、下部には遅延時間とパルス幅を設定したチョッピング用パルス電圧(chopper)を印加する。このパルス時間によって設定されたタイミングでのみ目的のイオンが通過可能となり、不要なイオンを空間的に分離できる。

2.2 実験結果

3つの印加条件(①無電圧、②DCのみ、③DC+chopper)で比較実験を行った。この結果をFig. 2に示す。図中の緑線はチョッパ前に設置されている壁面電流モニタ(WCM)の計測信号、赤線はチョッパ後に置かれているファラデーカップ(FC)による計測信号である。DC電源、チョッパ電源ともに電圧をかけない①の条件で

[#] oishi.sayaka@qst.go.jp

は、WCM および FC ともに、位相回転空洞通過に伴うエネルギー単色化によりバンチ化された多数のピークを有する信号が観測されている。DC のみの②の条件では、ビームが DC 電源による電圧で偏向され壁面に衝突し、下流に届くことがないため WCM のみの信号が観測されている。③の条件では、FC と WCM の波形が異なり、チョップで多数のピークのうちの一つのピークのみが切り出されたことが確認された。これは、イオンの飛行時間に基づくイオンビームバンチ選別が実効的であることを示しており、チョップと位相回転空洞の併用により、飛行時間・エネルギーの両軸でのイオンバンチ選別が実証できた。

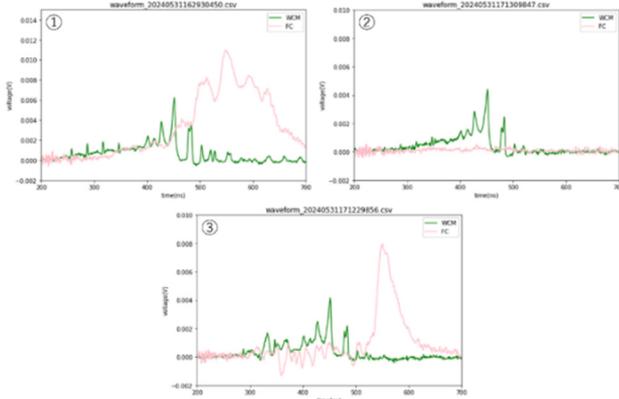


Figure 2: Oscilloscope waveforms under each of the following conditions: ① No voltage, ② DC only, ③ DC+chopper voltage applied.

3. RCF を用いたビーム線量評価検証

3.1 RCF 線量解析

RCF (Gafchromic HD-V2) は、自己現像型の高空間分解能フィルムであり、イオンビームの線量分布を二次元的に取得できる特長を持つ。レーザー駆動イオン加速のように瞬間的かつ高線量のビームに対して、空間照射像から線量を診断する手法として極めて有用である。しかし、正確な線量定量には、空間照射像における光学密度 (OD) と吸収線量 (D) との対応関係を記述するキャリブレーション関数が必要となる。特に RCF では、線量に対する光学密度 OD の応答が非線形であり飽和特性を示すため、この関係式には注意を要する。本研究では、Eq. (1) に示す非線形関数を用いて、netOD (照射領域 OD - 未照射領域 OD) から吸収線量 D を算出した。

$$\text{netOD} = \frac{4.358D + 0.391D^2}{0.951 + 2.187D + 0.162D^2} \quad (1)$$

この式は、光学密度 OD と吸収線量 D 間の関係における高線量域での非線形応答や飽和挙動を適切に補正する経験式であり、RCF の特性を精度良く反映している。

ここでは、RCF を用いて、チョッピングしたビーム個数を線量から把握することを目的に、以下に示す定式化された関数をもとに、厚さが異なる HD-V2 フィルムへの適用可能性を検証しつつ、取得データからイオン数を精密に算出する校正手法を取り入れた[5]。

3.2 解析手順とキャリブレーション

使用したフィルムは Ashland 社製 Gafchromic HD-V2 を、スキャナは EPSON GT-X980 を使い、16 bit 解像度、600 dpi、赤チャンネル γ 補正 ($\text{red} = 0.45$) で TIFF 画像を取得した。照射領域と未照射領域の矩形 ROI (66 × 66 ピクセル) を設定し、画像解析ソフトウェア ImageJ にて平均輝度値を計測した。これらの値から次式に従って netOD を算出した。

$$\text{OD}_{\text{exp}} = -\log_{10} \left(\frac{\frac{1}{I_{\text{film}}} - \frac{1}{I_{\text{min}}}}{\frac{1}{I_{\text{max}}} - \frac{1}{I_{\text{min}}}} \right) \quad (2)$$

ここで、 I_{film} は計測輝度値、 I_{min} と I_{max} はスキャナ条件における最小と最大透過時の輝度値、 γ は透過率換算の補正係数を示す。得られた netOD 値を Eq. (1) の非線形関数に代入し、線量 D [Gy] を求めた。

次に、PHITS より算出した陽子 1 個当たりの線量 [Gy/source] を用いて、RCF 面に堆積した総線量からイオン個数を算出する。本研究では、対象とする 0.8 MeV プロトンに対して、粒子輸送コード PHITS を用いてスキャナで得られた RCF の 1 ピクセルあたりの面積に対して陽子 1 個が与える吸収線量を $D' = 3.236 \times 10^{-3}$ Gy/source と評価し、この値を用いて総線量からイオン個数への換算を行った。

3.3 妥当性検証と比較評価

RCF 解析によって得られた陽子数を、同一ショットで取得された FC 波形データからの導出値と比較することで、手法の妥当性を評価した。FC 信号はオシロスコープのインピーダンス値 (50 Ω) と時間積分によりイオン数へと変換された。具体的には、同一実験条件で取得されたオシロスコープの FC 波形を用い、バンチごとの電流量をシャント抵抗に基づき電荷量へと換算し、各バンチのイオン個数を算出し、対象バンチについて合計することで全体のイオン個数を得た。これより、実験条件② (DC のみ) で得られた RCF 画像に対し、ImageJ 解析により得られたイオン数は約 1.942×10^8 個であり、対応する FC 信号からの導出値は約 1.935×10^8 個であった。この結果より、独立した測定手法の間で極めて高く一致した。またこの結果は、RCF 線量解析が高繰り返し実験やイオン種選別評価においても有効な定量ツールとして機能することを示しており、今後のビーム診断の標準的手法としての有望性を示唆している。

4. 実験 RCF と多段階シミュレーションの比較検証

様々な核種のイオンに対するチョップ条件を求めるためには、実際のチョップ動作条件の検証が必要となる。そこで、チョップ動作によって生成される RCF 上での空間分布および線量分布をシミュレーション上で再現させることでチョップ条件の検証を行った。我々は、位相回転空洞[6]、AMAZE 粒子追跡、PHITS モンテカルロ輸送という 3 段階の統合シミュレーションを開発し、そのシミュレーション結果と実験による RCF 観測結果を照合し、実験

と理論の一致性を検証することにした。

4.1 シミュレーション構成

まず、指数分布に従う約 10^7 個の陽子を対象とし、これらの粒子が位相回転空洞通過後のエネルギーと時間との相関を持つ陽子ビームとなることを仮定した。つまり、位相回転空洞通過の効果を含めた実際の実験条件下におけるビームの時空間的な広がりを模擬した。

次に、AMAZEにて位相回転空洞通過後のビームラインにおける三次元電場中のビーム軌道を再現し、上記で仮定したそれぞれの粒子ごとの空間運動量を追跡した。そして最後に、チョッパによる時間選別は、特性の飛行時間を持つ粒子のみを通過させるシーケンスを導入することで再現させ、ファラデーカップまで到達する粒子を抽出した。

その後、AMAZEにより抽出された粒子の出力をPHITS入力形式に変換し、それぞれの粒子の位置および方向余弦に基づき、照射面(RCF)におけるエネルギー別の線量分布を計算したうえで、ヒートマップにて表示することにより、実験におけるRCF画像との比較を可能とした。

4.2 実験とシミュレーション結果との比較

Figure 3に、実測値であるRCF画像(①)と、シミュレーションで得られたPHITSのヒートマップ図(②)を示す。

RCF画像では、x軸上に強い照射が集中したうえで、中心からx軸方向に、Q-トリプレットが作り出した横方向に広がる構造がエネルギー分布ごとに複数あることが確認された。これらの構造は、位相回転空洞によるビームの時空間的に圧縮およびその後のチョッパにおけるDC電圧印加による偏向量の差により生じた結果であり、RCF上におけるy軸方向のエネルギー選別的な構造を作り出す。一方、PHITSシミュレーションにおいても類似の分布が作り出された。

各エネルギー分布の個数評価のために、シミュレーションの定量性を確認する。まず、RCF画像のODから導出される1個のイオンあたりの線量(⑥)と、PHITSにおける1個のイオンあたりの線量(⑦)の計算結果を比較した。結果、⑥ = 3.236×10^{-3} Gy および ⑦ = 3.243×10^{-3} Gyとなり、両者は相対誤差0.22%という高い一致を示した。ブロードなエネルギー分布では、各エネルギーがRCFの1ピクセルに与える線量は異なるが、その平均値は $2.200 \times 10^{-3} \sim 3.610 \times 10^{-3}$ Gyの範囲に収まり、平均値との差分割合は約±20%となる。この平均線量を用いてRCFから求められる陽子個数と、FCで得られた個数を比較したところ、両者は相対誤差0.36%で一致した。この誤差の大きさは、PHITSで得られる線量の最大・最小値と平均値との差分割合(約20%)と比べて十分小さいため、各エネルギー分布における空間分布の個数評価法として、PHITSでの線量計算以外の誤差は無視できると仮定し、その平均値を利用しても良いと結論付けられる。この結果は、今回開発を行った3段階のシミュレーション(RF→AMAZE→PHITS)を活用した統合モデルが、実験による照射分布と統計量を精度よく再現できていることを示している。

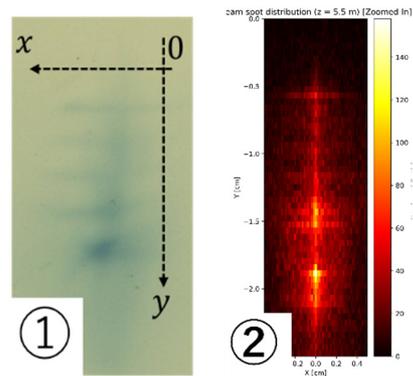


Figure 3: ① Measured RCF image and ② simulated heatmap obtained from PHITS.

5. 今後の展望

本研究では、レーザー駆動イオンビームの高純度化手法として、飛行時間選別チョッパをデモンストレーションした。3段階からなる統合シミュレーションを開発し、実験によるRCF画像の線量評価および画像解析を行い、実験とシミュレーションが定量的にも一致していることが確認できた。これにより、これからはシミュレーションを先行させることにより、目的イオン選別に対する実験条件検証が、効率的となる。今後の展開としては、今回は主にプロトンを対象としたが、炭素イオンなどの重イオンへの応用可能性を評価する必要があるため、複数イオン核種への応用を考えている。

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] E. L. Clark *et al.*, "Energetic Heavy-Ion and Proton Generation from Ultraintense Laser-Plasma Interactions with Solids," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 8, pp. 1654-1657, 2000.
- [2] R. A. Snavely *et al.*, "Intense High-Energy Proton Beams from Petawatt-Laser Irradiation of Solids," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 14, pp. 2945-2948, Oct., 2000.
- [3] S. Kojima *et al.*, "Laser-Driven Ion Acceleration and Its Applications", *J. Particle Accelerator Society of Japan*, 19, 214 (2022).
- [4] H. Sakaki and T. Shirai, "Development of a Compact Laser-Driven Ion Accelerator for Medical Applications", *J. Particle Accelerator Society of Japan*, 21, 112 (2024).
- [5] Y. Abe *et al.*, "Dosimetric calibration of GafChromic HD-V2, MD-V3, and EBT3 films for dose ranges up to 100 kGy," *Rev. Sci. Instrum.*, 92(6), 063301 (2021).
- [6] M. Murakawa *et al.*, "Development of Beam Transport Simulations for Laser Driven Ion Acceleration Using Transfer Matrices", Master's thesis, Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, 2024.