

表面相互作用のためのレーザー駆動加速を備えた 超短パルスビーム入射装置の開発

DEVELOPMENT OF ULTRA-SHORT-PULSE BEAM INJECTOR WITH THE LASER-DRIVEN ACCELERATION FOR INTERACTIONS AT SURFACE

大石沙也加^{A, B)}, 小島完興^{A)}, Thannhung Dinh^{A)}, 松本悠椰^{A, C)}, 村川真宙^{A, C)}, 岡野朱莉^{A, B)},
石井邦和^{B)}, 榊泰直^{A)}
Sayaka Oishi^{A, B)}, Sadaoki Kojima^{A)}, Thannhung Dinh^{A)}, Haruya Matsumoto^{A, C)}, Mahiro Murakawa^{A, C)},
Akari Okano^{A, B)}, Kunikazu Ishii^{B)}, Hironao Sakaki^{A)}

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

^{B)} Nara Women's University

^{C)} Kyushu University

Abstract

Development of irradiation systems using laser-driven ion acceleration is underway. In parallel, we plan to compare ion interactions with DC beams from a tandem Van de Graaff and interactions with short-pulse beams from laser ion acceleration to explore new applications that take advantage of the short-pulse characteristics. These comparative studies require a new method for controlling the temporal characteristics of laser-driven beams. In this talk, we will first describe the principle of laser-driven ion acceleration and the characteristics of the ion beam, and then present the principles of novel temporal control system using the time-of-flight method and ion species separation using pulsed electric fields.

1. 序章

1.1 はじめに

量子科学技術研究開発機構(QST)では、先端的なレーザー加速技術を利用し、次世代重粒子線がん治療装置の入射器の実用化を目指しており、量子メス原型機を完成させた。一方で、医療用装置イオン入射器としての機能に限定することなく、レーザー駆動イオン加速の特徴を活かした新しい利用分野の開発も視野に入れており、その研究開発も並行して進めている。奈良女子大学は、大学内にタンデム加速器を所有していることから、その従来型加速器のビーム(直流ビーム)とレーザー駆動イオン加速によるビーム(超短パルスビーム)照射による物質表面相互作用に差異を生じるかを計測することで、新規利用分野を探索することにした。

既存加速器ビーム実験と比較するには、レーザー駆動によるイオンビーム特性を明確に制御できなければならない。具体的には、モノクロマティックエネルギー・単一イオン核種のビームとなるように制御することが必要となる。本研究では、同一の磁場剛性を持つイオンビームから単一イオン核種のビームを、その飛行時間の違いから切り出すパルスチョップを作ることを考え、装置設計を進めるとともに予備実験を開始した。

1.2 レーザー駆動イオン加速

個々では、レーザー駆動イオン加速の基礎原理として知られているTNSA(Target Normal Sheath Acceleration)と呼ばれるレーザー駆動イオン加速機構について説明する。TNSAは、これまでに提案されているすべてのレーザー駆動イオン加速方式の中で最も実用化に近い加速機構である。高強度レーザーを薄膜に入射すると薄膜内

の電子が薄膜裏面にとどまり、準静的な加速電場(シース電場)が形成される。この加速電場により、ターゲット裏面の原子はイオン化が進み加速されるという物理で成立している[1]。

従来の高周波加速手法と比較すると、シース電場による加速勾配により μm 程度の非常に短い空間での加速が可能という利点があるのに対し、照射ターゲット表面に付着する不純物も加速されてしまうため、ビーム中に多種のイオン(実験では不純物イオン)が多く含まれる欠点がある[2, 3]。また、TNSAによるビームは、モノクロマティックエネルギーになっておらず、エネルギー分散が極めて大きいビームとなっている。

2. 電場利用型高速イオン切り出し装置

エネルギー分散が大きく、また不純物イオンを含むレーザー駆動イオンビームから、単一核種のモノクロマティックエネルギーを持つイオンビームを切り出す手法が必要となる。我々は、レーザー駆動イオンビームから不純物イオンを取り除くために、磁場剛性を指定したレーザー駆動イオンビームとそれに含まれる不純物イオンのビーム輸送ラインを通過する時間差を利用しパルス電場により制御する手法を提案する。このイオンビームの高純度化を目指した提案装置をQST 関西光量子科学研究所実験棟に設置されている量子メス原型機に設置した。

図1に量子メス原型機の写真とレーザー駆動イオンビーム輸送ラインの概略図を示す。イオン加速部において、チタンサファイア媒体のレーザーを、5ミクロン厚のポリイミドターゲットに照射することで、様々なイオン核種が混在したレーザー駆動イオンビームを発生させることができる。レーザー駆動イオンビームは、三連四重極磁石によりビームの発散角を抑え込み、偏向電磁石を通過すると

いうビーム輸送ラインの構成になっている。この偏向電磁石の磁場を調整することにより、量子メス用の入射器で求められるエネルギーの広がり1%程度のビームのみを輸送することが可能となる。

偏向電磁石の磁場中におけるイオンの通過特性は磁場剛性という物理量で表される。磁場剛性 $B\rho$ は、 $B\rho = mv/qe$ で与えられ、ここで q はイオン価数、 e は電気素量、 B は磁束密度、 ρ は曲率半径、 m は質量、 v は速度である。エネルギー分散が広く、不純物イオンも混在するイオンビームの特性を持つレーザー駆動イオンビームが偏向電磁石を通過する際、利用したいイオン以外の不純物イオンも磁場剛性が同じイオンであれば通過してしまう。

ここでは、0.45 MeVの陽子と同じ磁場剛性を持つ複数のイオン核種が、0°ライン終端部(全長 5.45 m)へ到達する時間を計算し、高速チョップの設計についての検討を行った結果について報告する。図2は算出した複数イオン核種の飛行時間分布を示す。この結果から、イオン核種により飛行時間に差があることがわかり、高速チョップにより特定のイオン核種だけ取り出せばよいことがわかる。また、高速チョップの性能として10 ns程度の立ち上がりが必要と判断した。

次に、目的のイオンを分離する際に、高速の立ち上がりの磁場もしくは電場による軌道偏向の手法を検討した。磁場偏向と電場偏向における偏向量 x, y の式はそれぞれ

$$x = qeBlL/mv \text{ (磁場偏向)}, \quad (1)$$

$$y = qeElL/mv^2 \text{ (電場偏向)}, \quad (2)$$

となる。ここで E : 電場[V/m]、 l : 電極の長さ[m]、 L : 計測地点までの距離[m]である。

これらの式より、同じ速度 v の場合は $1/v^2$ 比例の電場偏向よりも磁場偏向のほうが効率的であると判断できる。しかし先の項にて計算したように、飛行時間分析におけるイオン核種分離では、偏向のための磁場もしくは電場を10 nsec程度の応答速度で制御しなければならない。磁場偏向は μsec 以下の応答が物理的に難しいことから、この応答速度を実現するには、10 nsecレベルの高速応答が得意な電場偏向による手法を選択するべきと判断した。

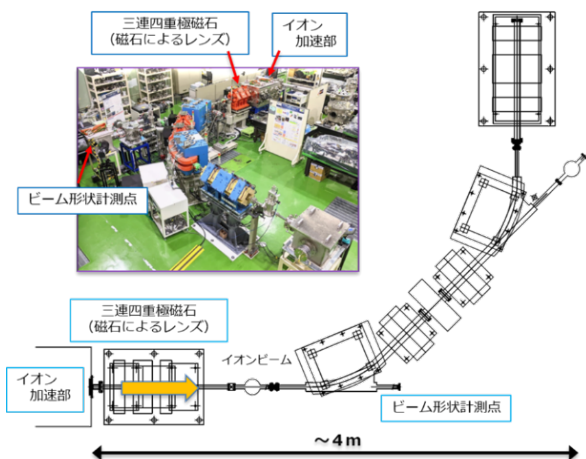


Figure 1: Schematic diagram of the beam transport system. A high-speed chopper is installed near the branch point of the line.

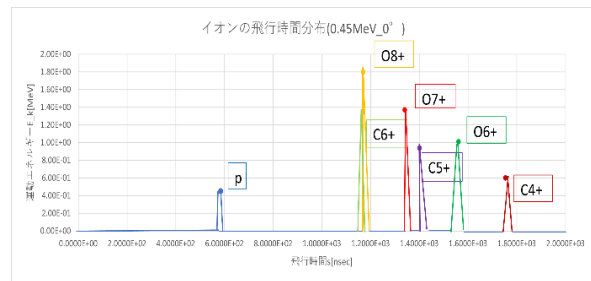


Figure 2: Arrival time of various ions to 5.45 m.

チョップ電極を実際のビーム輸送ラインに取り付け実験を行う前に、電極と High voltage power supply(PS)、High voltage pulse Genelator(PG)、Degital delay Genelator(DG)、Oscilloscope(OSC)を組み合わせ、高周波回路を形成した。図3に高速チョップ電源回路の概念図を示す。レーザー駆動イオンビームが電極を通過する際に、上の電極に常時、下の電極に特定の時間のみ電圧をかけることで、単一イオンのみを切り出すことができる。図3は組み立てた回路図を示す。実験では photo Diode の信号をもとにパルスの遅延時間を調整するが、この段階では DG の特性を探るため、遅延時間を変えながら OSC で観測を行った。また高周波回路の過渡現象による矩形波の立ち上がりの様子も観察した。これにより、入力信号から210 nsほど遅れがあることが分かった。この時間をもとに輸送ラインにおける遅延時間を調整していく。

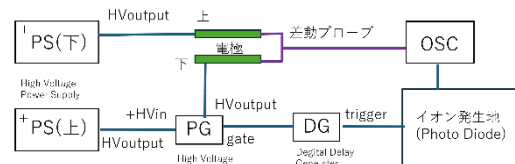


Figure 3: High frequency circuit diagram.

3. 今後の展望

本研究では、加速器の下流にパルス電源装置による偏向電場にて、特定のイオンを取り出すことを目的に、高速チョップの設計方法について検討を行った。今後は今回求めた原理と組み立てた高周波回路をもとに、電圧の値と遅延時間、パルス時間幅を設定し実験を行う。

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] S. Kojma, M. Hata and K. Kondo, J. Particle Accelerator Society of Japan, 19, 214 (2022).
[2] E. L. Clark *et al.*, Phys. Rev. Lett. 85, 1654 (2000).
[3] R. A. Snavely *et al.*, Phys. Rev. Lett. 85, 2945 (2000).