



タンデム加速器を用いたレーザー加速イオン計測用リアルタイムトムソンパラボラスペクトロメータの校正

清水, 和輝 ; 金崎, 真聡 ; 神野, 智史 ; 小田, 啓二 ; 山内, 知也 ; 古山, 雄一 ; 谷池, 晃 ; 福田, 祐二

(Citation)

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 16:20-26

(Issue Date)

2019

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD01)

<https://doi.org/10.24546/81011869>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011869>



タンデム加速器を用いたレーザー加速イオン計測用 リアルタイムトムソンパラボラスペクトロメータの校正

The Calibration Study of Real-time Thomson Parabola Spectrometer for Laser-accelerated Ions using a Tandem Accelerator

清水 和輝*, 金崎 真聡*, 神野 智史**, 小田 啓二*, 山内 知也*
古山 雄一*, 谷池 晃*, 福田 祐二***

Kazuki SHIMIZU*, Masato KANASAKI*, Satoshi JINNO**, Keiji ODA*,
Tomoya YAMAUCHI*, Yuichi FURUYAMA*, Akira TANIIKE*, Yuji FUKUDA***

(令和元年 7 月 12 日受付)

Abstract

The calibration study of real-time Thomson parabola spectrometer for laser-accelerated ions has been carried out by a tandem accelerator. The spectrometer consists of parallel aligned electromagnetic field and micro channel plate (MCP) or CR-39 track detector as ion detector units. To calibrate the incident positions of protons on the ion detector unit, 1~3 MeV protons and neutral particles from tandem accelerator are irradiated to the spectrometer. Based on the results of MCP signals and the etch pits on CR-39, the trajectories of protons with the energies more than 1.5 MeV coincide the theoretical calculations. Therefore, we have found that the developed spectrometer can be applied for the measurements of laser-accelerated ions shot-by-shot.

(Received 12 July 2019)

1. はじめに

各国の高強度レーザー施設では、新たな粒子加速手法の確立を目指して高強度レーザーとターゲット物質の相互作用を利用したレーザー駆動イオン加速実験が行われている。高強度レーザーをターゲット物質に集光すると、相互作用によって $\sim 10^{12}$ V/m という非常に大きな加速電場が生成されるため、加速器の小型化や低コスト化への応用が期待される[1]。量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所[2] (以下、関西研)

では、ターゲット物質に水素分子の集合体である水素クラスターターゲットを用いている。これに、関西研の高強度レーザーJ-KAREN-Pのレーザー光を集光することで瞬間的に電子が相対論的エネルギーまで加速される。その後、ターゲットに残った陽子同士のクーロン斥力によって陽子線が加速される。Fig.1 に示すように、これをクーロン爆発と呼ぶ[3]。従来、このようなレーザー加速イオンのエネルギースペクトル計測には、固体飛跡検出器 CR-39 などが用いられてきた。しかし、CR-39 は解析に強アルカリ溶液によるエッチング処理等が必要であるため、0.1 Hz の高繰り返し照射可能な J-KAREN-P を

*神戸大学大学院海事科学研究科

**東京大学大学院工学系研究科

***量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所

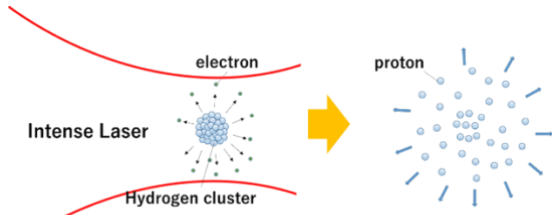


Fig.1 Schematic of the Coulomb explosion model. [3]

用いる実験において、レーザーショット毎に発生したイオンの特性を解析するには適していない。従って、関西研ではレーザーショット毎にイオンのエネルギースペクトル計測を行うため、磁場と電場を組み合わせたトムソンパラボラの検出部に Micro Channel Plate (MCP) とカメラを用いたリアルタイムトムソンパラボラスペクトロメータを開発した。本研究では、リアルタイムトムソンパラボラスペクトロメータに入射したイオンが、理論的に導出される検出器上の入射位置と差異がないかを確認するために、神戸大学所有のタンデム加速器を用いて校正実験を行なった。

2. 検出器の構成と原理

トムソンパラボラスペクトロメータ[4]は静電場と静磁場を用いて入射粒子をその質量電荷比とエネルギーによって入射方向から偏向させる働きを持つ。従って、検出面において、入射イオンの質量電荷比とエネルギーを明らかにすることが可能である。関西研において開発されたトムソンパラボラスペクトロメータは、Fig.2 で示すように、2 つのピンホール[5]、2 枚の平行板電極、磁石及び検出部から構成される。上流側のピンホールは直径 2 mm、下流側のピンホールは直径 300 μm であり、トムソンパラボ

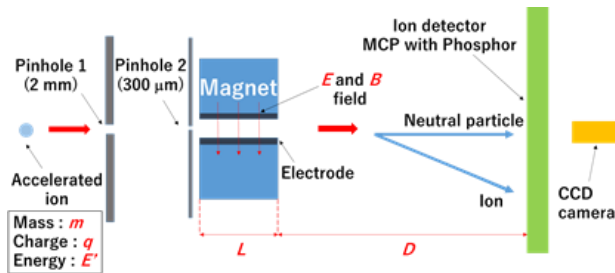


Fig.2 Schematic of the developed real-time Thomson parabola spectrometer. [4]

ラスペクトロメータ本体に対して正面からイオンが入射する様にビームをコリメートする働きを持つ。Fig.2 の体系で示すように、電場を E 、磁場を B 、磁石と電極それぞれの長さを L 、ドリフト距離（磁石出口から検出面までの距離）を D とし、粒子の質量を m 、電荷を q 、エネルギーを E' とすれば、電場及び磁場によって偏向された粒子は検出面にて、入射軸方向から、

$$x = \frac{qE}{2E'} L \left(\frac{1}{2}L + D \right) \quad (1)$$

$$y = \frac{qB}{\sqrt{2mE'}} L \left(\frac{1}{2}L + D \right) \quad (2)$$

だけ偏向された位置に入射する。ここで x は電場による偏差、 y は磁場による偏差である。また、式(1)及び式(2)より、

$$y^2 = \frac{q}{M} \frac{B^2 L D}{E} x \quad (3)$$

が得られ、入射したイオンは検出器上で質量電荷比に従う放物線を描くことが確認できる。一方で、ピンホールを抜けた粒子のうち中性粒子は電荷を持たないため、電場と磁場によって偏向されることなく検出器の入射軸上に入射する。レーザー駆動イオン加速実験では中性粒子が発生するため、中性粒子の入射位置を座標の原点として扱い、入射したレーザー加速イオンは、原点からの偏差によって質量電荷比とエネルギーを見積もる。検出部には蛍光体付きの Micro Channel Plate (MCP) を用いている[6]。MCP に

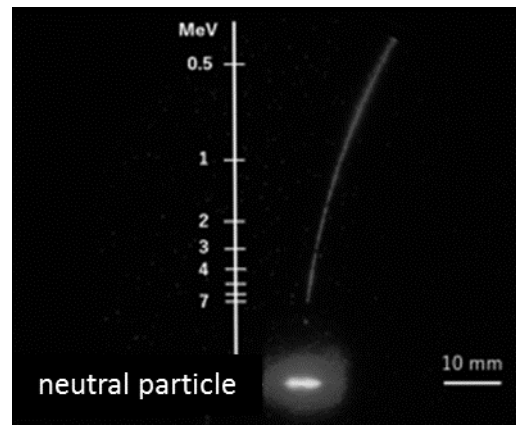


Fig.3 A trajectory image of laser-accelerated protons on phosphor screen.

荷電粒子が入射し、 $25\text{ }\mu\text{m}$ の細孔に衝突すると、細孔内の光電面から電子が発生する。発生した電子は、バイアス電圧により加速され、光電面への衝突を繰り返し、電子数が増幅される。その後、MCP の後段に付属している蛍光体に電子が衝突することにより、発光位置から荷電粒子の入射位置を特定可能となる。我々のシステムでは、発光を CMOS カメラで撮像し、コンピュータに取り込んでいる。レーザー駆動イオン加速実験では、幅広いエネルギーを有するイオンが同時に加速されるが、カメラの露光時間内に検出部に入射するため、ピンホールを通過したほぼ全ての粒子の情報が得られる。Fig.3 に本システムによるレーザー加速陽子線の計測結果の一例を示す。画面下側に中性粒子が検出されており、これを原点として $\sim 7\text{ MeV}$ の陽子線が二次曲線を描いていることがわかる。

2.1. 漏れ磁場の影響評価

式(3)に含まれる磁場強度の値 B は、磁石の存在する空間のみに磁場が一様に働くと仮定した理想的な値を用いている。しかし、実際には磁石の両端付近で漏れ磁場が発生しており、この漏れ磁場がイオンの偏向に影響を与えている可能性がある。これを評価するために、三次元電磁場シミュレーションソフトウェア AMaze[7] を用いて磁場構造を再現し、シミュレーションにより求められる検出位置と式(3)を用いて求められる理論曲線に差異がないか調べた。AMaze によるシミュレーションでは、Fig.4 に示すように、トムソンパラボラスペクトロメー

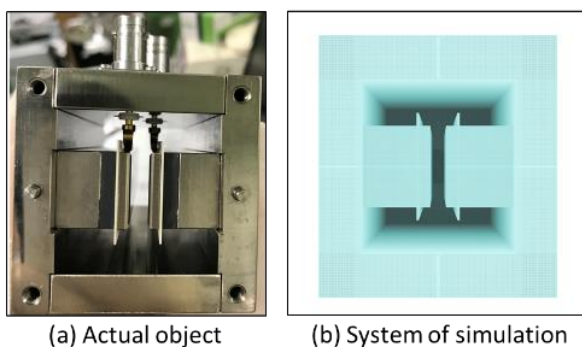


Fig.4 A photograph of Thomson parabolaspectrometer (a), and an image of reconstructed the system by AMaze (b).

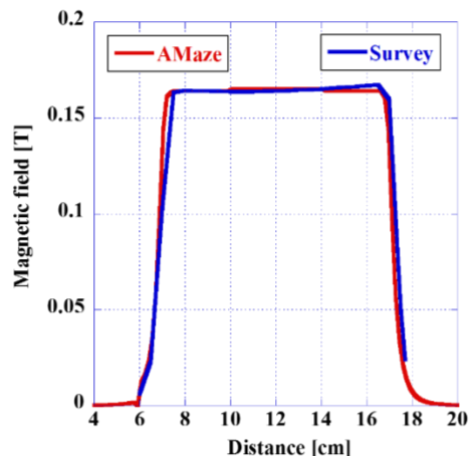


Fig.5 Comparison between the measured magnetic field and the result of simulation by AMaze.

タ本体の体系を模擬し、有限要素法による磁場分布のシミュレーションを行い、磁石中心部における磁場の強度分布を導出した。Fig.5 にガウスメータを用いて計測した磁場の実測値とシミュレーションによって得られた磁場の強度分布を示す。両端で磁場が外側に広がっていることから、漏れ磁場の存在を確認することが出来る。

次に、シミュレーションで得られた漏れ磁場を考慮した体系に $0.6\text{--}12\text{ MeV}$ のエネルギーを持った陽子線を入射させ、検出面で描かれる軌跡を求めた。Fig.6 にシミュレーションで求められた検出器上の軌跡と式(3)によって求められた理論曲線を示す。Fig.6 に示すように、双方の軌跡はよく一致しており、低エネルギー側のイオンに対して 0.1 MeV 以上の差は見られない。

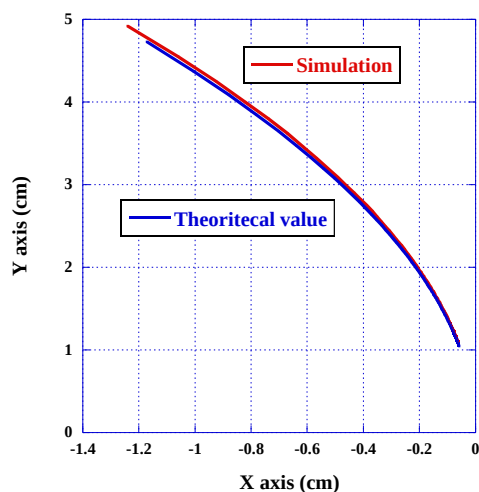


Fig.6 Comparison between the trajectory by the simulation and theoretical trajectory.

従って、リアルタイムトムソンパラボラスペクトロメータにおけるイオン種とそのエネルギーの同定には、導出の容易な、即ち、漏れ磁場を考慮しない理論曲線を用いて問題ないと考えられる。

3. トムソンパラボラシステムの校正

神戸大学のタンデム静電加速器 5SDH2[8]を使用し、本トムソンパラボラシステムの校正実験を行った。実験では、5SDH2 のセシウムスパッタ負イオン源を使用し、カソードの水素吸蔵チタンから発生した負イオンを、インジェクションマグネットで選別し、陽子を加速した。水素の負イオンを高電圧ターミナルまで加速した後、窒素分子との電荷ストリッピング反応により正イオンに変換した後再度加速する。加速電圧を 0.5, 1.0, 1.5 MV に設定し、1, 2, 3 MeV の陽子線を発生させた。トムソンパラボラスペクトロメータの校正実験において、中性粒子の入射によって得られる原点が必要となるため、Fig.7 に示すように加速器の 0° のビームポートを使用した。Fig.7 中に示す電源は、トムソンパラボラスペクトロメータの 2 枚の電極電圧と、MCP、

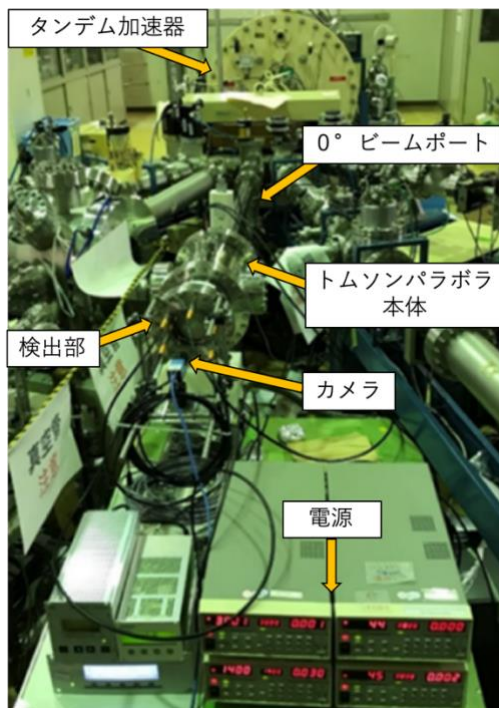


Fig.7 Overview of the calibration experiment using tandem accelerator 5SDH2.

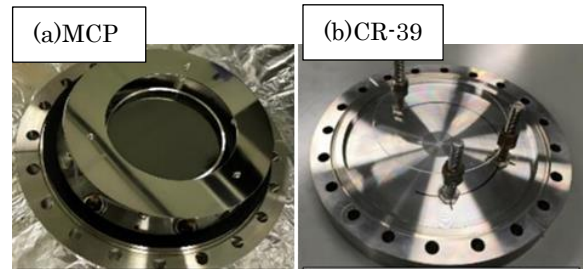


Fig.8 Ion detectors(a)MCP and (b)CR-39.

そして蛍光体に電圧を印加するものである。電極電圧を操作することで、イオンの偏向を自由に变化させることができる。検出部には、Fig.8 に示すように MCP 検出器と、結果の比較を行うために固体飛跡検出器 CR-39 を用いた[9]。

CR-39 はイオンを照射した後に強アルカリ溶液でエッチング処理を行うことで、検出器上のイオンの入射位置を知ることができる。また、エッチピット径を解析することによってイオンの入射エネルギーを導出することが出来る。

CR-39 は円形にカットし、MCP 検出器を用いた場合とドリフト距離が変わらないように調整した。

4. 結果

MCP 検出器に 1, 2, 3 MeV、CR-39 検出器に 3 MeV の陽子線を照射したが、本実験では中性粒子が検出されず、また、陽子線のエネルギーは単色ではなく複数確認された。前者に関しては、トムソンパラボラスペクトロメータを設置する際のアライメントの不具合により生じるものだと考えられる。一方で、後者は加速器の特性上の問題であると考えられるが、明確な原因は明らかになっていない。検出部に蛍光体付きの MCP 検出器を接続したトムソンパラボラスペクトロメータに、1, 2, 3 MeV の陽子線を照射し、それぞれの陽子線に対してトムソンパラボラの電極電圧を印加しない場合と、3000 V を印加した場合のデータを取得した。Fig.9 にそれぞれの場合に取得された画像を示す。これにより、エネルギーの高いイオンほど中性粒子の入射位置と想定される原点側に近づき、電場によって入射軌道から水平方向に偏向されることが確認で

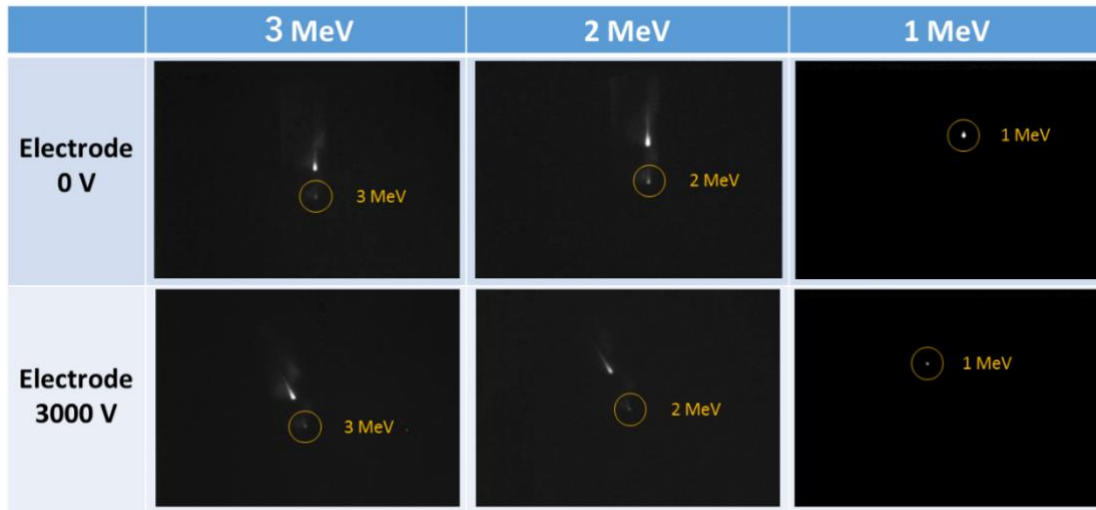


Fig.9 Trajectory images of 1, 2, 3 MeV protons with the electrode voltage 0 and 3000 V.

きる。また、Fig.10 に、電極電圧 0 及び 3000 V で 3 MeV の陽子線を照射した 2 枚の画像を重ね合わせてコントラストを調整したものに、青で示す理論曲線を重ねたものを示す。これらを比較すると、両者がよく一致していることがわかる。

次に、MCP 検出器の代わりにフランジに固定した CR-39 検出器を接続した。電極に電圧を印加しない場合、及び 3000 V を印加した場合のそれぞれに対して 3 MeV の陽子線を照射した。CR-39 はイオン照射後に、70℃に加熱した 6M-KOH 溶液で 2 時間エッチング処理し、高速画像取得顕微鏡 HSP-1000 を用いてエッチピットの空間分布を取得した。エッチピット及び顕

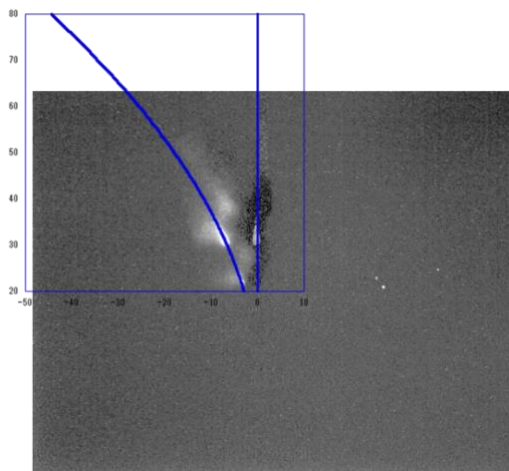


Fig.10 Comparison between the trajectories on phosphor screen and theoretical curve.

微鏡で観察されたノイズを点として、その位置をマッピングすると Fig.11 のように分布が現れた。縦方向の直線が電極電圧 0 V、左側の放物線が電極電圧 3000 V を印加した際の陽子線エッチピットによるものである。

4.1. 入射位置の校正

電場と磁場によって偏向されるイオンが検出面で入射する位置は、本来であれば軌跡の原点からの距離で求めることが出来る。しかし、本実験では中性粒子が検出されなかったため、CR-39 上の 2 本の軌跡の外形を利用する。

Fig.11 に示すように、理論式より求められる電極電圧 0 V と 3000 V の軌跡の一部を CR-39

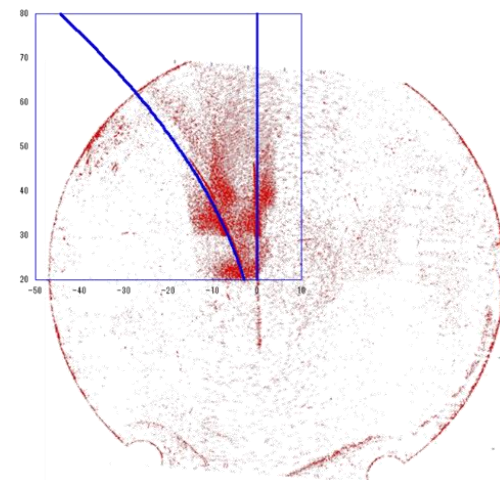


Fig.11 Comparison of etch pits distributions of protons and theoretical curves. Each red dot corresponds to an etch pit.

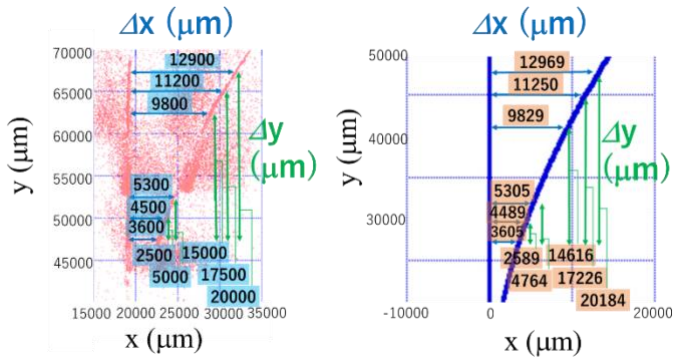


Fig.12 Shape comparison of trajectories between CR-39 and theoretical curves.

上のエッチピットに重ねると、おおよそ一致していることが分かる。これをより詳細に確認するため、電場による偏差を Δx とおき、電極電圧 0 V の軌跡と 3000 V を印加した軌跡の電場による偏差が 3600 μm の位置を基準に取った。そこから磁場による偏差 Δy とおき、 Δx 、 Δy の値をそれぞれ CR-39 と理論曲線で比較した。結果を Fig. 12 に示す。

任意の Δx に対する CR-39 と理論曲線における Δy の差は 200 μm 以下に収まることが分かり、電場と磁場によるイオンの偏向が正確に作用していることがより明らかになった。

4.2. エネルギーの校正

CR-39 上のエッチピットからは、入射位置とエネルギーの情報が同時に得られるが、エネルギーを求める際には、エッチピット径とエネルギーに関する校正曲線が必要となる。Fig.13 に示す過去の研究で得られた陽子線のエッチピット径に対するエネルギーの校正データを示す。ここから、校正曲線として

$$y = 0.0331x^2 - 0.5161x + 2.813 \quad (4)$$

を得た。この校正曲線を用いて、レーザー加速陽子線のエッチピット径から入射イオンのエネルギーを導出した。これを、理論曲線で求められる各入射位置のエネルギーと比較した。この結果、Table 1 に示すように、1.5 MeV 以上のエネルギーに関しては双方で良い相関がみられた。一方、1.5 MeV を下回るものに関しては、エッチピットから導出するエネルギーが低く見積もられる結果となった。これは、エッチングを行

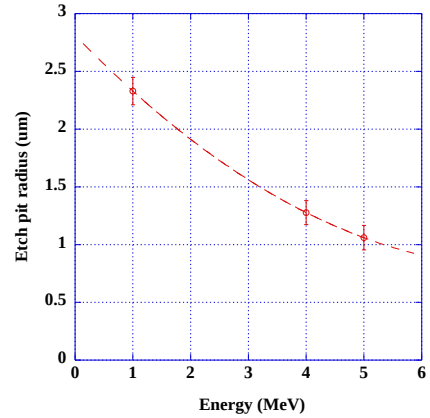


Fig.13 Calibration curve of CR-39 for protons.

う過程でのラウンドアウトという現象が影響していると考えられる。ラウンドアウトとは、イオンの飛程を超えた部分までエッチングが進行した状態を指し、エッチピット径とエネルギーの関係は保存されない。従って、エッチング時間を調整することにより改善できると考えられ、今後の課題である。また、1.5 MeV 以上に関してイオンの入射位置と入射エネルギーの関係がおおよそ一致するため、リアルタイムトムソンパラボラスペクトロメータから得られるレーザー加速イオンのエネルギースペクトルは、1 MeV 未満の精度で確からしいことが明らかとなった。

5. 結論

レーザー加速イオン計測用に開発されたリアルタイムトムソンパラボラスペクトロメータの校正を行うため、タンデム加速器を用いた校正実験を行った。リアルタイム計測用の MCP 検出器の他に、固体飛跡検出器 CR-39 を用いたと

Table 1. Difference between theoretical energies and results of CR-39

Δx (μm)	Theoretical E (MeV)	E on CR-39 (MeV)
3600	2.59	1.8~2.5
4500	2.08	1.3~2.3
5300	1.76	0.5~1.5
9800	0.95	~0.4
11200	0.83	~0.4
12900	0.72	~0.1

ころ、双方において理論曲線と良い相関が得られた。また、三次元電磁場シミュレーションにより、イオンのエネルギーの導出に理論曲線を用いることの妥当性を評価することができた。レーザー駆動イオン加速実験において、開発されたリアルタイムトムソンパラボラスペクトロメータはレーザーショット毎のリアルタイム計測に適用可能である。

参考文献

- [1] S.V. Bulanov *et al.*, Phys. Lett. A 299, 240, (2002).
- [2] Kiminori Kondo *et al.*, Quantum Beam Sci. 1(1),7, (2017)
- [3] K.Nishihara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 464, 98, (2001).
- [4] S.Sakabe *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 51, 1314 (1980)
- [5] K. Harres *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 79, 093306 (2008)
- [6] J.L. Wiza, Nucl. Instr. and Meth. 162 (1979) 587-601
- [7] Advanced Science Laboratory, Inc. (2019 年 7 月 9 日アクセス)
<http://www.asl-i.jp/contents/about/>
- [8] 神戸大学海事科学部 ホームページ (2019 年 7 月 9 日アクセス)
<http://www.maritime.kobe-u.ac.jp>
- [9] T.Yamauchi *et al.*, Radiat. Meas. 34, 37 (2001).