



固体飛跡検出器CR-39を用いたレーザー加速陽子線エネルギースペクトル計測の高精度化

坂本, 溪太 ; 金崎, 真聡 ; 森井, 厚作 ; 神野, 智史 ; 小平, 聡 ; 山内, 知也 ; 小田, 啓二 ; 福田, 祐仁

(Citation)

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 16:34-40

(Issue Date)

2019

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.24546/81011871>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011871>



固体飛跡検出器 CR-39 を用いた

レーザー加速陽子線エネルギースペクトル計測の高精度化

Precise measurement of laser-accelerated protons using CR-39 track detectors

坂本溪太*, 金崎真聡*, 森井厚作*, 神野智史**, 小平 聡***, 山内知也*,
小田啓二*, 福田祐仁****

Keita Sakamoto*, Masato Kanasaki*, Kohsaku Morii*, Satoshi Jinno**,
Satoshi Kodaira***, Tomoya Yamauchi*, Keiji Oda*, Yuji Fukuda****

(令和元年 7月12日受付)

Abstract

In the laser-driven ion acceleration experiments using micron-sized hydrogen cluster targets, energetic protons are accelerated by Coulomb explosion. Because the laser-accelerated protons are simultaneously generated with high-energy electrons and X-rays, we have used CR-39 track detectors, which are insensitive for electrons and X-rays. The energy spectrum of protons which are accelerated by the interaction between J-KAREN-P laser with the intensity of 10^{20} W/cm² and hydrogen cluster targets have been measured by stack type detectors using CR-39 and energy moderators. In this detector, the energy spectrum can be measured with the energy resolution of several MeV from the number of etch pits in each region. To obtain the precise energy spectrum, we have developed the method which is the combination between the calibration data of protons for CR-39 and PHITS simulations.

1. はじめに

水素クラスターターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速実験では、クーロン爆発によって陽子線が加速される[1]。このとき発生する陽子線の最大エネルギーが水素クラスターのサイズによって変化するため、加速された陽子線のエネルギースペクトルを計測することが重要である[2-3]。レーザー駆動イオン加速では、電子線やX線もイオンと同時に発生するため、イオンのみに感度を有する固体飛跡検出器 CR-39 が計測に用いられている。

固体飛跡検出器 CR-39 は無色透明なプラスチック材料である。CR-39 にイオンが入射すると、

相互作用により CR-39 の化学結合が切断され、イオンの飛跡に沿った潜在飛跡と呼ばれる数 nm の損傷ができる。その後、強アルカリ溶液でエッチングすると、潜在飛跡が拡大され、潜在飛跡をエッチピットとして光学顕微鏡で直接観察することができ、イオン種や入射エネルギーを測定することができる[4-5]。

CR-39 には、陽子線のエネルギーに対する閾値が存在する[6]。検出閾値を超えるような高エネルギーの陽子線は、阻止能が小さく、即ち、CR-39 に付与するエネルギーが小さく、飛跡近傍に残る損傷領域が小さいため、エッチング処理を行ってもエッチピットが形成されない。検出閾値は CR-39 へ入射する陽子線のエネルギーだけでなく、CR-39 内部を通過し、裏面から射出する陽子線のエネルギーについてもあてはまる。

CR-39 の陽子線のエネルギーに対する検出閾

*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放射線医学総合研究所

****量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所

Table.1 Detection threshold of CR-39 for protons.

BARYOTRAK	~3 MeV
HARZLAS (TD-1)	~20 MeV
HARZLAS (TNF-1)	~27 MeV

値は、CR-39 の種類に依って決定される。

陽子線のエネルギーに対する CR-39 各種の検出閾値を Table.1 に示す。HARZLAS(TNF-1)では最大で 27 MeV の陽子線をエッチピットとして観察することができる。エッチングによる CR-39 の表面荒れは BARYOTRAK が最も少なく、ついで HARZLAS(TD-1)、HARZLAS(TNF-1)の順となる。また、高エネルギーの陽子線の阻止能が小さいことから、生成されるエッチピットは小さくなり、低エネルギーの陽子線ではより大きいエッチピットが生成される。

2 レーザー加速イオン計測への適用

固体飛跡検出器 CR-39 は、レーザー駆動イオン加速実験でイオンと同時発生する電子線や X 線に対して感度を示さない[7]。エッチピットの形成には、イオンのように局所的に密度の高いエネルギーを付与する必要がある、広い領域に損傷を与える電子線や X 線ではエッチピットを形成するに至らない。そこで、現在は最も信頼性の高いレーザー加速イオン検出器として使用されている[8]。

レーザー駆動イオン加速では、幅広いエネルギースペクトルを有するイオンが加速されるため、イオン検出器にはエネルギー分解能を持たせなければならない。CR-39 は、エッチピットの形状や、その成長過程から精密にエネルギーを求めることが可能であるが、解析に時間を要する。そこで、CR-39 の前面に、階段状に減速材を重ねることで、各減速材の厚みを通り可能なエネルギーが異なることを利用して、簡易な解析でエネルギー分解能を求めることが可能なスタック検出器が開発されている。ここで、3 章に詳細を述べるが、各厚みの減速材間でエネルギー領域がオーバーラップしてしまい、正確なエネルギースペクトルを求めることができない

問題が生じていた。

本研究は、レーザー加速イオンの正確なエネルギースペクトルを求めることを目的とし、エッチピット径から簡便にエネルギーのオーバーラップを解消する手法を開発した。

3. 実験

3.1 実験体系

実験は量子科学技術研究開発機構関西光学科学研究所の高強度レーザー J-KAREN-P を利用した。J-KAREN-P は 1 PW 級の出力を誇る世界最高クラスの高強度レーザーであり、その最大集光強度は 10^{22} W/cm^2 である[9-10]。

Fig.1 に実験体系の模式図を示す。真空チャンバー内で水素クラスターを生成[11-12]、高強度レーザーの集光、および固体飛跡検出器 CR-39 による陽子線の計測を行った。

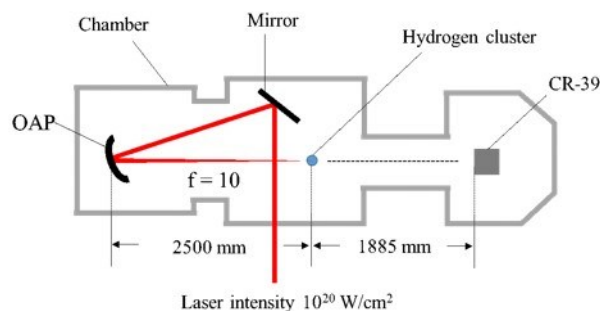


Fig.1 Schematic top view of the laser-driven ion acceleration experiments using hydrogen cluster targets.

水素クラスターターゲットにレーザー光を 10^{20} W/cm^2 で集光し、加速された陽子線のエネルギースペクトルを、スタック検出器を用いて計測した。スタック検出器の体系を Fig.2 に示す。スタック検出器は、CR-39(TD-1)上にエネルギーフィルターとしてラジオクロミックフィルム(RCF)を 3 枚階段状に重ね、前面をレーザー光の入射を防ぐためにアルミニウム箔で覆ったものを用いた[13]。この検出器では、CR-39 上の領域ごとにエネルギーフィルターの厚さが異なるため、各領域におけるエッチピット数からエネルギースペクトルを数 MeV 間隔で求めることができる。

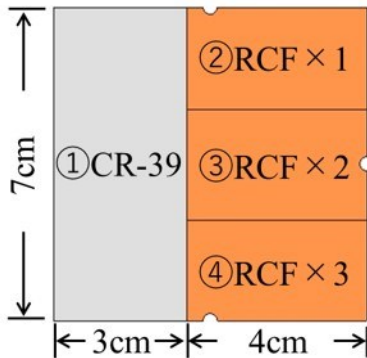
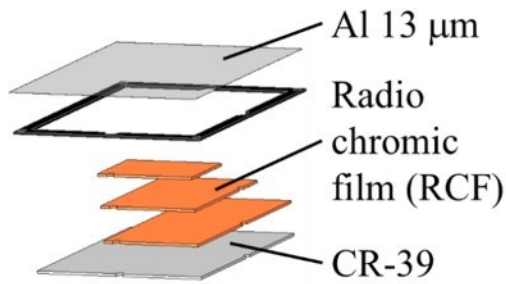
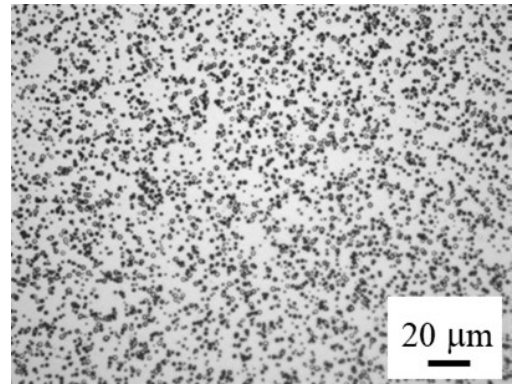


Fig.2 Schematic of the stack detector using CR-39 track detector and radiochromic film (RCF) as the energy moderator.

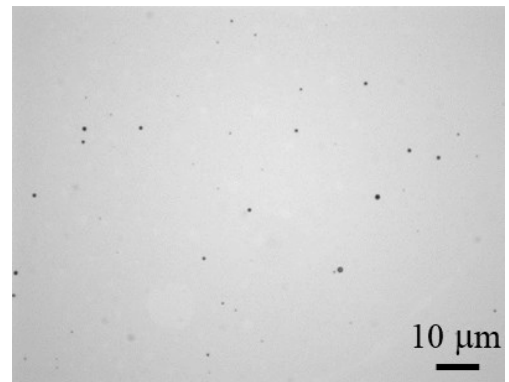
この計測体系は、CR-39 表側の各領域で①930 keV, ②4.6 MeV, ③6.7 MeV, ④8.4 MeV の陽子線、裏側の各領域では①9.2 MeV, ②10.5 MeV, ③11.8 MeV, ④12.9 MeV の陽子線を検出器することが可能である。これらのエネルギーを各領域への到達エネルギーとする。

3.2 実験結果

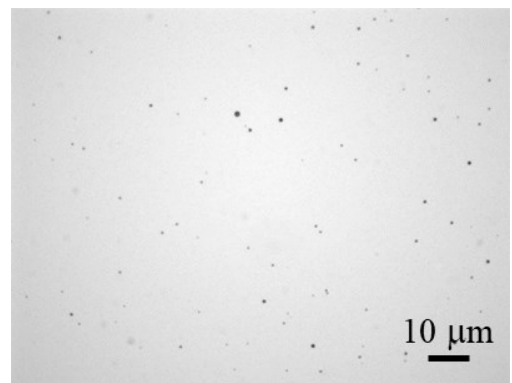
実験後の CR-39 を 70 °C、6 mol/L の KOH 溶液で 2 時間エッチングを行い、光学顕微鏡でエッチピットを観察した。その結果を Fig.3 に示す。Fig.3 の①～④の画像は Fig.2 の①～④の領域に対応している。CR-39 の全ての領域でエッチピットが確認された。各領域を 10 箇所ずつ光学顕微鏡によって観察し、その箇所のエッチピットを数えた。その結果を Fig.4 に示す。縦軸はエッチピットの数、横軸は陽子線のエネルギーを示す。縦軸のエラーバーは標準偏差、横軸のエラーバーは各領域が計測しているエネルギー範囲を示している。



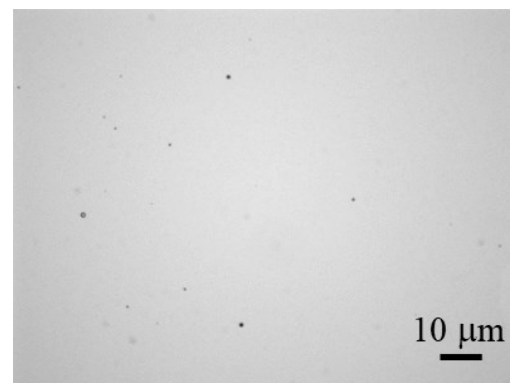
① Al 13 μm



② Al 13 μm + 1 layer of RCF



③ Al 13 μm + 2 layers of RCF



④ Al 13 μm + 3 layers of RCF

Fig.3 Optical microscope image of the etch pits on each region.

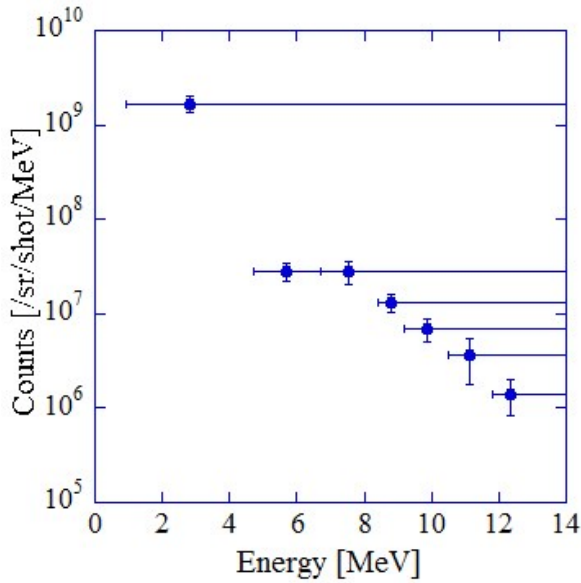


Fig.4 The number of etch pits on each energy region.

この結果は、詳細は4章に示すが、例えば Fig. 2 の②の領域では、到達エネルギーで 4.6~6.7 MeV の陽子線、すなわち②の領域への入射エネルギーが 0~4.5 MeV の陽子線を計測すべきであるが、検出閾値が 20 MeV であるため、それ以上のエネルギーの陽子線も計測してしまう。即ち、本実験で使用した計測体系では低エネルギー側の領域で高エネルギーの陽子線も計測しているため、エネルギー領域がオーバーラップしていることがわかる。そこで、このような計測体系においてもエネルギー領域がオーバーラップしないエネルギースペクトルを求める手法を開発した。

4. エネルギースペクトルの高精度化

3章より、本実験で用いた計測方法では、使用した CR-39 が 10 MeV を超える陽子線に対しても感度を示すため、高エネルギーの陽子線が到達エネルギーの低い領域にもエッチピットを形成しているという問題点が生じている。例えば、到達エネルギーが 930 keV の領域①には、領域②でエッチピットを形成する 4.7 MeV の陽子線もエッチピットを形成している。そのため領域①に形成されたエッチピットを数えると、4.7 MeV や 8.4 MeV の陽子線が形成するエッチピットも数えてしまうため、求めたエネルギー

スペクトルが不正確になってしまう。

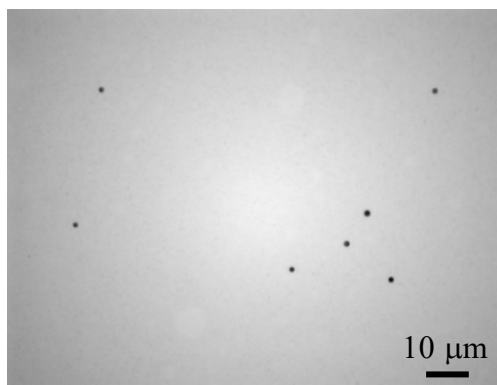
そこで、計測すべき到達エネルギーの領域よりも高い到達エネルギーでエッチピットを形成する陽子線について、エッチピットとして数える対象から除外し、エネルギースペクトルを求めた。領域①では領域②の到達エネルギーである 4.7 MeV 以上の陽子線が形成するエッチピットを除外してエッチピットを数える。同様に領域②では領域③の到達エネルギーである 6.7 MeV 以上の陽子線が形成するエッチピットを除外してエッチピットを数える。領域③以降についても同様にしてエッチピットを数える。これによって、精密にエネルギースペクトルを求めることができる。

各領域で除外するエッチピットの大きさを求めるために、PHITS によるシミュレーションを用いて、各領域における CR-39 表面と裏面を通過時の陽子線のエネルギーを求めた[14]。領域①では領域②の到達エネルギーである 4.7 MeV の陽子線が厚さ 13 μm の Al を通過後の CR-39 表面でのエネルギーを求める。このエネルギーを入射エネルギーとする。領域②では、領域③の到達エネルギーである 6.7 MeV の陽子線が厚さ 13 μm の Al と RCF1 枚を通過後の CR-39 表面でのエネルギーを求める。領域③以降についても同様にエネルギーを求めた。その結果を Table.2 に示す。Table.2 に示す各領域の入射エネルギー以下のエネルギーの陽子線を除外することで、エネルギースペクトルの高精度化が行える。そのためにはさらに、陽子線のエネルギーとエッチピットの大きさの関係を求める必要がある。

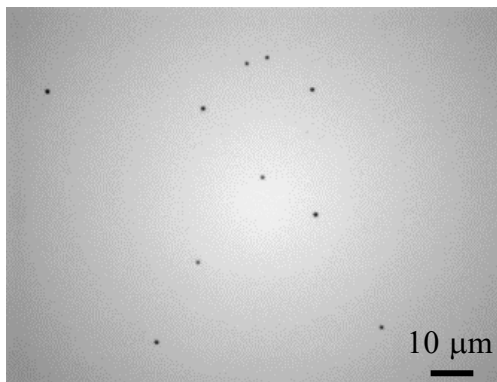
Table.2 Calculation result of PHITS.

Region	Proton energy (MeV)	Incident energy (MeV)
①front	4.7 MeV	4.45 MeV
②front	6.7 MeV	4.5 MeV
③front	8.4 MeV	4.45 MeV
④front	9.2 MeV	3 MeV
①rear	10.5 MeV	4.3 MeV
②rear	11.8 MeV	4.4 MeV
③rear	12.9 MeV	4.3 MeV

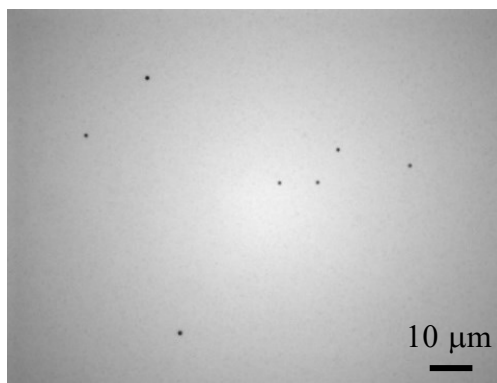
そこで、放射線医学総合研究所 HIMAC 中エネルギービーム照射室で 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 MeV の陽子線を CR-39 に照射し、陽子線の較正曲線を作成した。陽子線を照射した CR-39 をエッチングし、光学顕微鏡で撮像した結果を Fig.5 に示す。エッチピット径は阻止能に依存するため、低エネルギーの陽子線ほど大きなエッチピットを形成し、エネルギーの高い陽子線ほど小さなエッチピットを形成する。これらの画像から、各エッチピットの面積を測定し、エネルギーとの対応関係を得た。



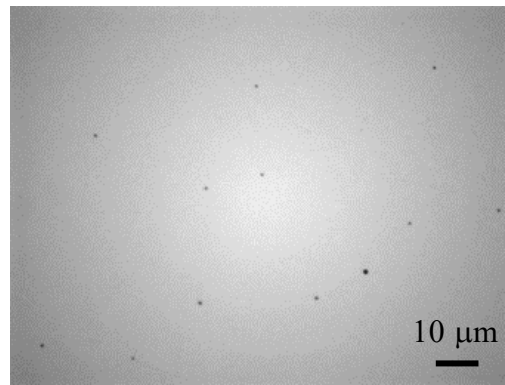
(a) 0.5 MeV



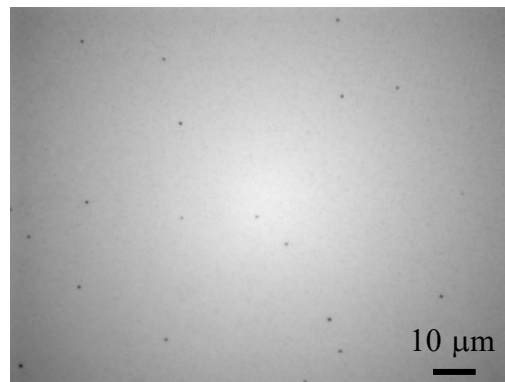
(b) 1 MeV



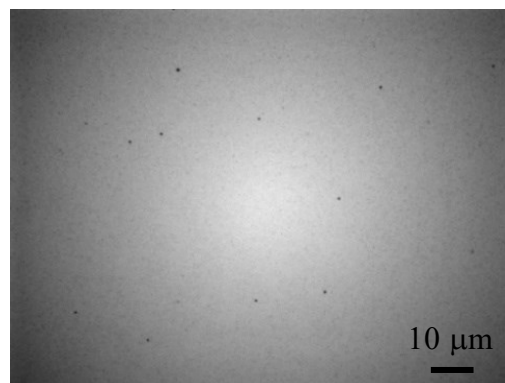
(c) 2 MeV



(d) 3 MeV



(e) 4 MeV



(f) 5 MeV

Fig.5 Optical microscope image of the etch pit with the energies of 0.5~5 MeV, which irradiated by conventional accelerator.

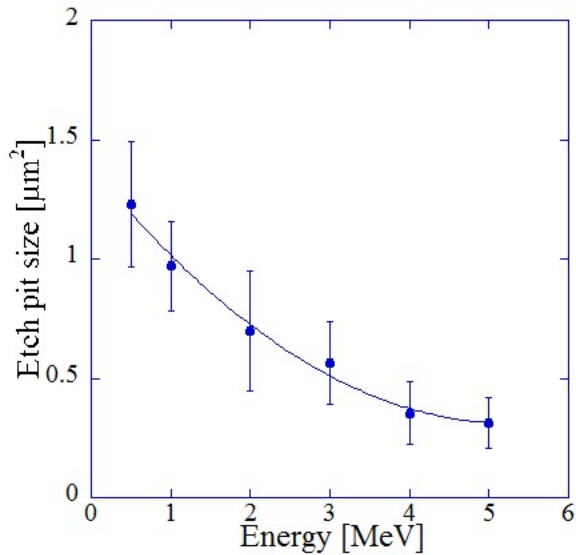


Fig.6 Calibration curve for protons obtained by the images on Fig.5.

Fig.6 に横軸に陽子線のエネルギー、縦軸にエッチピットの面積をとったグラフを示す。これに対し、二次関数で近似曲線を求めると、

$$y = 0.0389x^2 - 0.409x + 1.386 \quad (1)$$

という結果が得られた。(1)式に Table.2 で求めた陽子線の入射エネルギーを代入し、形成されるエッチピットの面積を求めた。その結果を Table.3 に示す。

Table.3 The energy of protons and etch pits area.

Region	Proron energy (MeV)	Etch pit area (μm ²)
①front	4.45 MeV	0.337 μm ²
②front	4.5 MeV	0.334 μm ²
③front	4.45 MeV	0.337 μm ²
④front	3 MeV	0.510 μm ²
①rear	4.3 MeV	0.347 μm ²
②rear	4.4 MeV	0.341 μm ²
③rear	4.3 MeV	0.347 μm ²

Table.3 で求めたエッチピット面積以下のエッチピットを各領域で除外し、エネルギースペクトルの高精度化を行った。その結果を Fig.7 に示す。ここでは、Fig.4 で示したエッチピット数の最大で約 20%のエッチピットを各領域で除外した。また、最大で 11.6 MeV の陽子線が

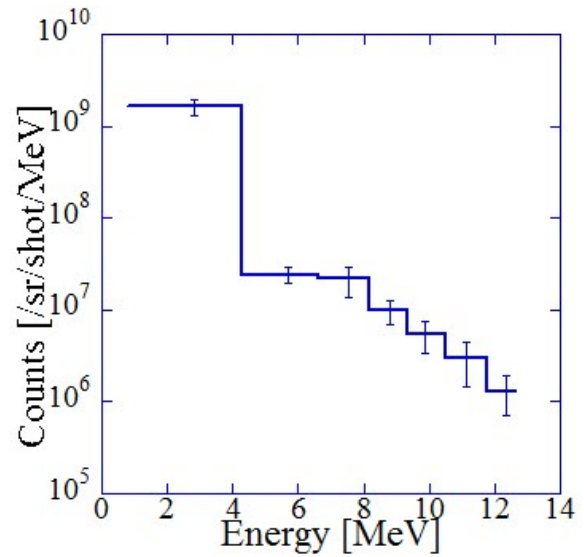


Fig.7 Proton energy spectrum.

加速されていたことが明らかとなった。

4. まとめ

水素クラスターターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速実験において、固体飛跡検出器 CR-39 と減速材として RCF を用いたスタック検出器で発生する陽子線のエネルギースペクトルの計測を行った。その結果、最大エネルギー 11.6 MeV の領域まで陽子線が到達していることがわかった。しかし、この検出体系では CR-39 が 10 MeV を超える陽子線に対しても感度を示すため、高エネルギーの陽子線が到達エネルギーの低い領域にもエッチピットを形成しているという問題が生じており、各領域のエッチピットを数えるだけでは、エネルギースペクトルを求めることができなかった。そこで、CR-39 の陽子線に対する校正データと PHITS によるシミュレーションを組み合わせ、低エネルギー側に入射する高エネルギーの陽子線を除外した。これによって、エネルギー領域がオーバーラップしない高精度なエネルギースペクトルを求める手法の開発に成功した。

参考文献

- [1]Y. Fukuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. 103, 165002 (2009).
- [2]K.Nishihara *et al.*, Nucl. Instrum. Methods.

- 464, 98 (2001).
- [3]S.Jinno *et al.*, PPCF, 60, 4 (2018).
- [4]B.G.Cartwright *et al.*, Nucl. Instrum. Methods. 153, 457 (1987).
- [5]Y. Mori *et al.*, Radiat. Mess. 46, 1147 (2011).
- [6]M.Kanasaki *et al.*, J. Plasma Fusion Res. 88, 5, 261 (2012).
- [7]T.Yamauchi *et al.*, Radiat. Meas.34, 37 (2001).
- [8]M.Kanasaki, *et al.*, PPCF. 58, 034013 (2016).
- [9]H.Kiriyama *et al.*, IEEE. Journal.21, 1 (2015).
- [10]A.S.Pirozhkov *et al.*, Opt. Express. 25, 20486 (2017).
- [11]U, Even, Advances in Chemistry 2014, 636042, (2014).
- [12]O.F.Hagena, Rev. Sci. Instrum., 63, 4 (1992).
- [13]森井 厚作, 修士論文 (2018).
- [14]Tatsuhiko Sato *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol., 14, 19890 (2018).