

[H30-5]

## 水素クラスターをターゲットとした 100 MeV を超えるレーザー陽子加速の実証

### Demonstration of laser-driven proton acceleration above 100 MeV using hydrogen clusters

神野智史<sup>#A)</sup>, 金崎真聡<sup>B)</sup>, 松井隆太郎<sup>C,D)</sup>, 浅井孝文<sup>B)</sup>, 坂本溪太<sup>B)</sup>, 清水和輝<sup>B)</sup>, 小田啓二<sup>B)</sup>, 山内知也<sup>B)</sup>,  
上坂充<sup>A)</sup>, 岸本泰明<sup>C)</sup>, 桐山博光<sup>D)</sup>, 福田祐仁<sup>D)</sup>

Satoshi Jinno<sup>A)</sup>, Masato Kanasaki<sup>B)</sup>, Ryutaro Matsui<sup>C,D)</sup>, Takafumi Asai<sup>B)</sup>, Keita Sakamoto<sup>B)</sup>, Kazuki Shimizu<sup>B)</sup>, Keiji  
Oda<sup>B)</sup>, Tomoya Yamauchi<sup>B)</sup>, Mitsuru Uesaka<sup>A)</sup>, Yasuaki Kishimoto<sup>C)</sup>, Hiromitsu Kiriya<sup>D)</sup>, Yuji Fukuda<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Nuclear Professional School, School of Engineering, The University of Tokyo, <sup>B)</sup> Faculty of Maritime Science, Kobe  
University, <sup>C)</sup> Graduate School of Energy Science, Kyoto University, <sup>D)</sup> Kansai Photon Science Institute, National  
Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

#### Abstract

We have proposed a method to generate multi-MeV pure proton beam using Coulomb explosion of micron size hydrogen clusters in a laser driven ion acceleration technology. A demonstration experiment of high repetition proton acceleration using hydrogen cluster targets was carried out at the J-KAREN facility. The energy spectrum of the protons was obtained using various detectors: CR-39, a nuclear emulsion, and a real-time Thomson parabola spectrometer. These detectors were calibrated using ion accelerators. In the energy measurement using the Thomson parabola spectrometer, pure proton beam of 19 MeV maximum was observed. In a particle-in-cell (PIC) simulation of the interaction process between high power laser pulses and micron-sized hydrogen clusters, proton generation exceeding 100 MeV accelerated in the direction of laser propagation is predicted, and this is a promising candidate as a laser-driven proton source by a multi-PW laser in the future.

**Keyword:** Laser-driven proton acceleration, Thomson Parabola Spectrometer, CR-39, Nuclear emulsion

#### 1. はじめに

レーザー駆動イオン加速は、従来の RF 加速器における放電領域をはるかに超える MV/ $\mu\text{m}$  オーダーの加速勾配を発生させることが可能であり、コンパクトな加速器として注目されてきた<sup>[1,2]</sup>。薄膜ターゲットを用いたペタワットレーザーによる陽子加速では、最大エネルギーが 100 MeV に迫る陽子線発生が報告されている<sup>[3,4]</sup>。しかしながら、薄膜ターゲットを用いた陽子加速は表面汚染物質である水や炭化水素からの陽子発生であり、薄膜を構成する高 Z 成分も加速される。そのため、応用研究に資する高繰り返し純陽子線の実現に必要な手法が必要とされる。

本研究では、マイクロサイズの水素クラスターのクーロン爆発を利用して高繰り返しで multi-MeV の純陽子線を発生する方法を提案しているが、我々の最近のシミュレーション研究によって、詳細な加速メカニズムが判明しつつある。それは、高強度レーザーをマイクロメートルスケールの球形の物質に照射した場合、球表面に発生した衝撃波が球の中心に向かって伝播・収束する過程でその強度が増強され、この増強された衝撃波により単色イオンが短時間で効率よく加速されるという衝撃波加速の新現象を発見したことである<sup>[5]</sup>。

そこで我々は、理想的なターゲットを生成するために、クライオスタットで冷却した高圧水素ガスをパルスバルブに接続した円錐形ノズルを介して真空中に噴射することによりマイクロサイズの水素クラスターを発生させる装置を開発した<sup>[6,7]</sup>。その上で、

関西光科学研究所 J-KAREN 施設<sup>[8]</sup>において水素クラスターをターゲットとした高繰り返し陽子加速の実証実験を実施した。陽子のエネルギースペクトルは、固体飛跡検出器 CR-39 および原子核乾板とリアルタイム Thomson パラボラスペクトロメーターを用いて取得した。ここでは、2018 年度に行った各検出器の校正実験と、実際に J-KAREN 施設で行ったレーザー駆動プロトン加速実験について報告する。

#### 2. CR-39

レーザー駆動イオン加速では、電子線や X 線が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 CR-39 が計測に用いられている。しかし、CR-



Figure 1. CR-39 stack detector.

<sup>#)</sup> jinno@tokai.t.u.tokyo.ac.jp

[H30-5]

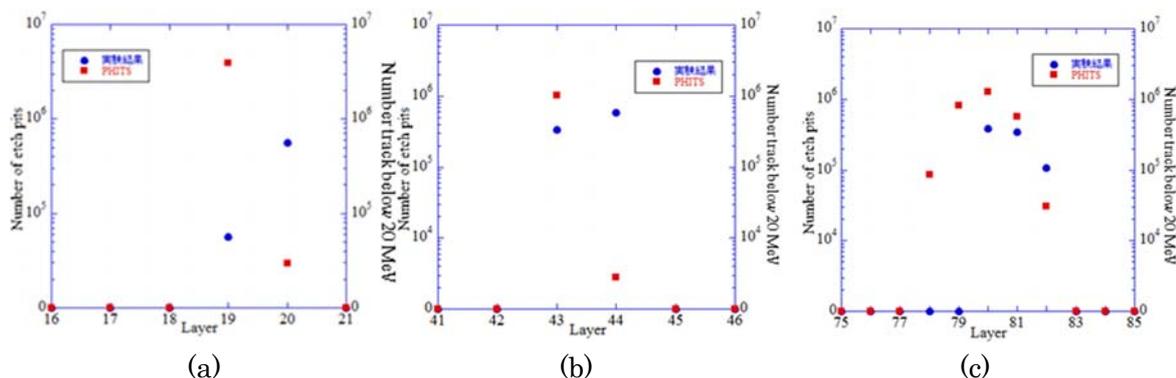


Figure 2. Comparison between the number of etch pits and the results of PHITS simulations for (a) 100 MeV, (b) 160 MeV, and (c) 230 MeV.

39 は数百 MeV 級のプロトンに対して感度を持たないため、減速材が必要である。また、エネルギー Spektrum を計測するためには、1 つのプロトンに対して 1 つのエッチピットが生成される必要があるため、減速材を適切な厚みに調整する必要がある。そこで、CR-39 の検出閾値を 20 MeV と仮定し、CR-39 と適切な厚みの PTFE を交互に重ねるスタック検出器をモンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS によって設計した。Figure 1 に示すように、これを実際に作成し、放射線医学総合研究所内の HIMAC 物理汎用照射室にて、高エネルギープロトンを照射し、校正実験を行った。

スペクトロメータに 100, 160, 230 MeV のプロトンを照射した。照射後、CR-39 をエッチングし、エッチピットが生成される層について、PHITS による計算結果との比較を行った。その結果を Fig. 2 に示す。実験結果では 100 MeV のプロトンは 20 層目の CR-39 にエッチピットが生成され、PHITS による計算結果では 19 層目に CR-39 で計測可能な 20 MeV 以下のプロトンが入射している。19 層目と 20 層目で計測可能なエネルギーが 97.5 MeV~103.8 MeV であることから、100 MeV のプロトンを  $\Delta E < 7$  MeV で計測可能なスペクトロメータと言える。同様に 160, 230 MeV でも PHITS による計算結果と実験結果の比較を行った。それぞれのエネルギーでエッチピットが生成される層は PHITS の結果とおおよそ一致していることがわかる。これらの結果から作成したスペクトロメータの数百 MeV 級のプロトンに対する分解能は  $\Delta E < 10$  MeV であり、現存するレーザー加速イオン計測用エネルギー Spektrum の中で最も分解能が高い計測体系の設計に成功した。

### 3. 原子核乾板

CR-39 は、最大検出可能イオンエネルギー閾値を有する。例えば、エネルギーが 27 MeV 以上の陽子は、もっとも感度の高い CR-39 を使用しても検出できない。なぜなら、損傷を受ける領域が小さくなりすぎ、エッチピットを形成できなくなるからである。従って、CR-39 検出器で 100 MeV 以上の陽子を検出

するには、減速材によって陽子を適切に減速する必要がある。低 Z の物質からなる CR-39 スタックのサイズは、必然的に長さ数十 cm のオーダーになる。これに対して、原子核乾板は 100 MeV を超える陽子エネルギーに対して、数 cm のコンパクトな検出システムを実現できる可能性がある。

しかしながら、原子核乾板はレーザー駆動イオン加速実験には利用されたことはなかった。これは、放射線の混成場に曝された原子核乾板に作られるイオントラックが、X 線によって誘導される二次電子を含む電子によって作られるトラックと区別できないからである。ところが、このような混成場において、現像液の pH レベルを変化させて感度を減じた現像条件により、陽子を検出できることが報告されている。

そこで本研究において、ベンチマークのために HIMAC による 100 MeV 陽子を原子核乾板に照射し、現像液の pH を変化させて感度を低下させた現像条件で、最適な現像時間を統計解析に基づいて決定した。この結果、原子核乾板が 100 MeV 級レーザー加速陽子の同定に適用できることを確認した。

この現像条件に基づき、レーザー駆動陽子を照射した原子核乾板から陽子のエネルギー Spektrum を取得した。このエネルギー Spektrum は CR-39 で得られた結果と良く一致し、原子核乾板がレーザーイオン加速実験で発生した multi-MeV 陽子線に対して十分信頼できる検出器であることを確認した<sup>9)</sup>。

### 4. リアルタイムトムソンパラボラスペクトロメーター

レーザー駆動イオン加速実験では、実験条件を次々に変えてイオン加速の最適条件を迅速に探索できるように、イオン検出部に蛍光板付き MCP を用いて、リアルタイムでイオン種とエネルギー Spektrum を取得可能なトムソンパラボラスペクトロメーターを使用している (Fig. 3) <sup>10)</sup>。本研究では、イオン計測の高精度化のために、校正を目的とし、神戸大学所有のタンデム加速器 5SDH2 を用いて、トムソンパラボラスペクトロメーターに 0.5~3.0 MeV の陽子

[H30-5]

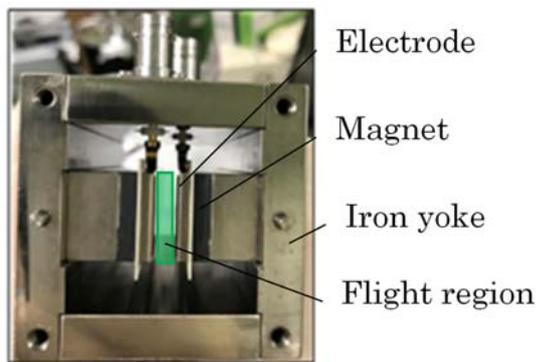


Figure 3. Front view of a Thomson parabola spectrometer.

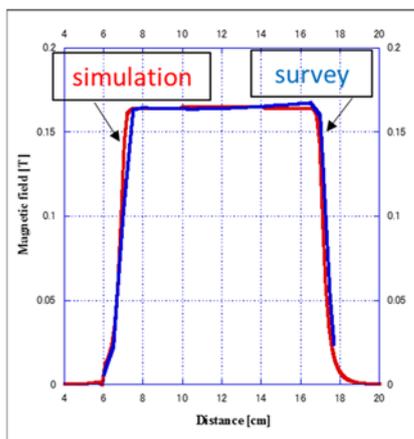


Figure 4. Longitudinal magnetic field distribution.

線を入射して解析を行った。

磁石の漏れ磁場を考慮しない理論式をイオンのエネルギーの同定に使用することへの妥当性を評価するために、三次元電磁場シミュレーションによって磁石の漏れ磁場の評価を行った。Figure 4 に示すのがシミュレーションによって得られた磁石の入り口から出口までの磁場強度のグラフとガウスメータで実測した値との比較である。赤線のシミュレーション結果と青線の実測値はほぼ一致しており、磁石の両端で漏れ磁場が生じていることが読み取れる。

実際に、0.6 MeV から 12 MeV の陽子線をトムソンパラボラスペクトロメーターに入射した場合に検出面で観測される軌跡を、漏れ磁場を考慮したシミュレーションと漏れ磁場を考慮しない理論式とで比較した。この結果、軌跡の位置からエネルギーを同定する際、漏れ磁場を考慮しない理論式を用いてもエネルギースペクトルの算出への影響は小さいということが分かった。

次に、実験的にエネルギー校正を行うため、タンデム加速器の 0 度方向のビームラインにトムソンパラボラスペクトロメーターを設置し、陽子線及び中性粒子が入射するように調整した。Figure 5 に陽子線が検出された様子を示す。上段は偏向電圧 0 V、下段が偏向電圧 3000 V を示しており、それぞれに対して 1 MeV、2 MeV、3 MeV の陽子線を入射した結果である。上下方向が磁場による偏向であり、高エネルギーになる程原点側、つまり紙面下側に近づく。一方、電場による偏向方向は紙面左右方向である。加速器から入射する陽子線は、単色エネルギーであるため、蛍光体上の軌跡を点として観測できる。しかしながら本来の入射エネルギーのおよそ半分の位置にも輝点が観測された。これは何らかの理由でタンデム加速器のターミナル付近でイオン化され加速された陽子があったためと考えられるが、原因は不明である。

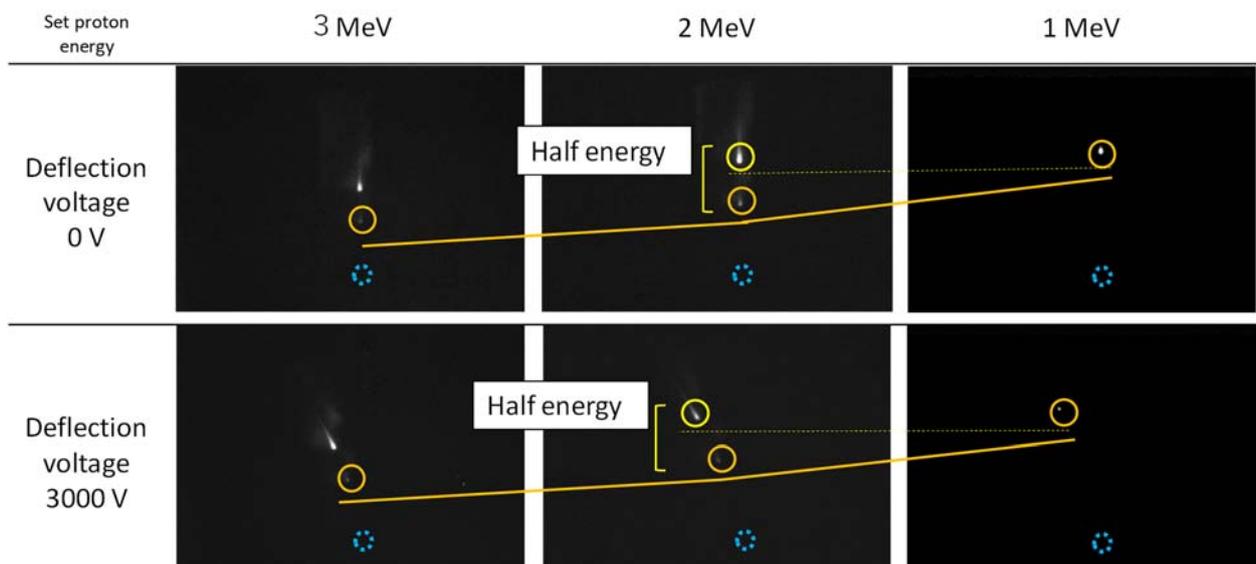


Figure 5. Detected images of protons analyzed by the Thomson parabola spectrometer.

[H30-5]

また、本来であれば、原点の位置に中性粒子が確認できるはずであるが、今回この位置に観測されなかったため、アライメントの不具合が原因の一つと考えられる。

次に、蛍光体上に描かれる軌跡が電場と磁場により決定される軌跡に従うのかを確認するため、検出部を固体飛跡検出器 CR-39 に変更しイオンのエネルギーと入射位置の関係を理論式による軌跡と比較した。その結果、1.5 MeV 以上の範囲では良い一致を示したが、1.5 MeV 未満の低エネルギー領域では軌跡が一致しているのにも関わらずエネルギーのズレが大きくなった。エッチピット径とエネルギーの関係式に用いたデータは 2 時間のエッチングに基づいたものであり、1 MeV 以下の陽子線に関してはエッチピットがラウンドアウトしているため正しい情報を得られていないからと考えられる。この問題は、エッチング時間を調節することにより改善されると考えている。

#### 4. J-KAREN-P レーザー照射実験

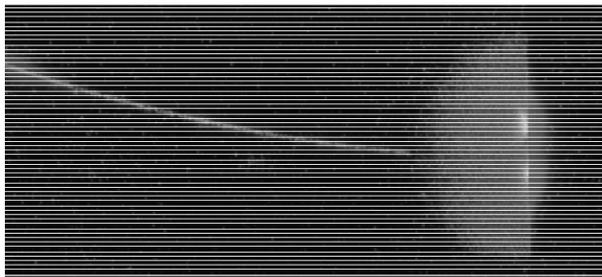


Figure 6. Detected image of protons analyzed by the Thomson parabola spectrometer in a laser-driven proton acceleration experiment.

レーザー駆動陽子加速実験は量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所 (QST-KPSI) において 0.1 Hz の PW 級のレーザー施設である J-KAREN-P を用いて行われた。供給されるレーザーは波長 810 nm、コントラスト比  $10^{-11}$ 、エネルギー 10 J、パルス幅 40 fs である。レーザーパルスは軸外し f/1.4 放物面鏡を用いて集束され、ターゲット上で  $5 \times 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> のピーク強度を生じさせる。

イオンのエネルギーを測定するために、トムソンパラボラスペクトロメーターをレーザー伝搬方向に対して 45 度の角度で設置し、陽子線のリアルタイムエネルギー分析を行った。Figure 6 は典型的な陽子線検出画像とエネルギースペクトルである。このとき、ターゲットである水素クラスターの生成条件は、噴射する水素の圧力 6 MPa、温度 25 K である。原点の信号は、照射されたターゲットから発生した中性粒子による信号である。このとき、最大エネルギー 19 MeV の純陽子線が検出された。繰り返し測定すると、5 MeV 以上の高エネルギー成分が観測される割合は約 5% であった。このように水素クラスターターゲッ

トを用いることで不純物のない multi-MeV 陽子発生を高繰り返しで実現した。

一方、レーザー伝搬 (0 度) 方向に設置した CR-39 のスタック検出器では、22 MeV を超える準単色の陽子線発生を観測した。これは、クーロン爆発加速のメカニズムとは異なる、0 度方向に指向性を持った加速メカニズムである衝撃波加速の存在を示唆している。シミュレーション研究では、下記に述べるように、エネルギーが 1 桁大きい準単色成分の存在を予言している。

高強度レーザーパルスとマイクロンサイズの水素クラスターの相互作用を、EPIC3D コード<sup>[11]</sup>を用いて 3D Particle-in-Cell (PIC) シミュレーションにより調べた。ここで、直径 1.6  $\mu\text{m}$ 、電子密度  $4.6 \times 10^{22}$  cm<sup>-3</sup> (= 26.8  $n_c$ ) の単一水素クラスターをターゲットとした。レーザーパルスのピーク強度は  $1.0 \times 10^{22}$  Wcm<sup>2</sup> (レーザーの規格化振幅  $a_0 = 69$  ( $a_0 = eE/mc\omega$ )) に相当する。このシミュレーションにおいて、電子がレーザー伝搬方向に運動するため、イオンと電子間のクーロン力により、陽子のクーロン爆発は非等方的になる。最大エネルギーは 115 MeV と高く、これは相対論効果を含まない簡単なクーロン爆発モデル<sup>[12]</sup>で予測された 100 MeV より大きい結果であった。

さらに、集光強度とクラスターサイズが最適化されていると、加速されている陽子線に対して、相対論的透明化の効果でクラスターの中心部まで侵入したレーザーによる電子の掃き出しと、クラスター外部でプラズマが作る電場により追加速される効果が同期することが分かった。この加速機構により、300 MeV 近くの指向性の高い純単色の陽子バンチが発生することが予測された<sup>[5]</sup>。

#### 5. 展望

以上のように、水素クラスターターゲットを用いることにより、レーザー駆動陽子加速において、高繰り返しで multi-MeV の純陽子線発生を実証した。レーザー駆動陽子線は原理的に極めて高い加速電場を発生することができるとして、加速器の入射器といった利用の他に、極めて短い陽子パルスという特性から、陽子照射誘起局所加熱<sup>[13]</sup>、陽子線パルスラジオリシス、励起電子の緩和の時分解分析<sup>[14]</sup>などの応用研究が考えられる。例えば、高エネルギーイオンが固体へ入射すると、飛跡に沿って高密度の電離を生じさせる。急峻な電離密度は急速な拡散に伴い、ピコ秒スケールで、二次イオン化のカスケード及び長寿命励起状態や化学反応種の形成をもたらす。高密度電離に反応して、物質がどのように回復するか、あるいは相互作用中に生成される反応種による反応経路についての実験的研究は、従来の加速器を用いても行われているが<sup>[15]</sup>、その時間分解能はパルス長やプローブタイミングのジッターにより制限されている。このような中間状態の寿命を研究することは、イオン照射された物質における欠陥濃度の時間依存性や放射線生物学における細胞死や修復速度との関係を理解するために重要である。本手法は、ビーム

## [H30-5]

に不純物を含まず、再現性が高く、ロバストであることから、応用研究の発展のために、極めて有望である。

## 参考文献

- [1] H. Daido, et al., Rev. Prog. Phys. **75**, 056401 (2012).
- [2] A. Macchi, et al., Rev. Mod. Phys. **85**, 751 (2013).
- [3] F. Wagner, et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 205002 (2016).
- [4] I. J. Kim, et al., Phys. Plasmas **23**, 070701 (2016).
- [5] R. Matsui, et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 014804 (2019).
- [6] S. Jinno, et al., Optics Express **25**, 18774 (2017).
- [7] S. Jinno, et al., Plasma Phys. Control. Fusion. **60**, 044021 (2018).
- [8] H. Kiriya, et al., IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron **21**, 1601118 (2015).
- [9] T. Asai, et al., High Energy Density Physics **32**, 44-50 (2019).
- [10] 神野智史, 福田祐仁, 放射線化学, とびくす 第 104 号, 41 (2017).
- [11] Y. Kishimoto, et al., J. Plasma Phys. **72**, 971 (2006).
- [12] K. Nishihara, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **464**, 98 (2001).
- [13] T. G. White, et al., Sci. reports **2**, 889 (2012).
- [14] B. Dromey, et al., Nat. Commun. **7**, 10642 (2016).
- [15] G. Baldacchino, Rad. Phys. Chem. **77**, 1218 (2008).