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#A),金崎真聡 B),松井隆太郎 C.D),浅井孝文 B),坂本渓太 B),清水和輝 B),小田啓二 B),山内知也 B), 上坂充 A),岸本泰明 C),桐山博光 D),福田祐仁 D)

Satoshi Jinno^{A)}, Masato Kanasaki^{B)}, Ryutaro Matsui^{C)}, Takafumi Asai^{B)}, Keita Sakamoto^{B)}, Kazuki Shimizu^{B)},

Keiji Oda^B, Tomoya Yamauchi^B, Mitsuru Uesaka^A, Yasuaki Kishimoto^C, Hiromitsu Kiriyama^D, Yuji Fukuda^D

A) Nuclear Professional School, School of Engineering, The University of Tokyo,

B) Faculty of Maritime Science, Kobe University,

C) Graduate School of Energy Science, Kyoto University,

D) 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 micron size hydrogen clusters as a target 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. We have developed a method to measure the energy spectra of proton beams with a resolution of less than a few MeV using the CR-39, which is capable of detecting proton beams of tens of MeV. The nuclear emulsion was developed for sub-GeV proton detection. In the Thomson parabola spectrometer, the characteristics of the detectors were measured so that the fluence of the energy spectra can be accurately evaluated. In addition, the generation of argon clusters was carried out for future development.

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/µm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[1,2]。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[3,4]。しかしながら、薄膜ターゲ ットを用いた陽子加速は表面付着物質である水や炭 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 繰り返しの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、ミクロンサイズの水素クラスターを ターゲットに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おり、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[5]。

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ミクロンサイズの水素クラ スターを発生させる装置を開発した[6,7]。その上で、 関西光科学研究所J-KAREN施設[8]において水素ク ラスターをターゲットとした高繰返し陽子加速の実 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 イムトムソン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、2019年度に行った各検出器の 校正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。将来的に発生す



Figure 1. Schematic of the energy spectrometer using CR-39 detector with a step-wise energy filter.



Figure 2. The number of etch pits on CR-39 as a function of the reaching energy.

ると予測される数百 MeV 級のレーザー加速陽子線 に対して、昨年度は、CR-39 と減速材を交互に積層 したスタック型検出器を開発し、実際に作成した検 出器に対し HIMAC での校正実験を実施した。その 結果、100,160,230 MeV の陽子線に対して、10%以 下の誤差でエネルギーを決定可能なことが明らかと なった。これは、現在用いられているトムソンパラ ボラ等のレーザー加速イオン計測が可能な検出器の 中で最もエネルギー分解能が高い。

一方で、現在、レーザー駆動イオン加速実験にお いて発生が確認されている数十 MeV 級の陽子線に 対しては、詳細な加速メカニズムを明らかにするた めに、より分解能が高いエネルギースペクトル計測 が求められている。2019年度は、水素クラスタータ ーゲットから発生した 10 MeV 程度の陽子線に対し て、階段状の減速材とCR-39を用いた検出器体系で、 数 MeV 以下の分解能でエネルギースペクトル計測 可能な手法を開発した。CR-39によるイオン計測で は、元来、エッチピットの開口部形状から、イオン 種や入射エネルギーを決定可能である。即ち、エッ チピットを形成可能な検出閾値以下のエネルギーで 入射するイオンについては、減速材を必要とせず、 エッチピット一つ一つに対して丁寧な解析を行うこ とで、入射イオン一つ一つの情報を得ることができ る。しかしながら、このような解析には、習熟した 技術だけでなく極めて膨大な時間を要する。

そこで、本研究では、できる限り短時間で必要な エネルギー分解能を有したエネルギースペクトルを 明らかにし、実験にフィードバック可能なシステム を構築するため、CR-39の前面に階段状の減速材を 設置し、各厚みの減速材を通過後に形成されるエッ チピット数からエネルギースペクトルを求めること が可能な検出手法を開発した。Fig. 1 に、検出器の



Figure 3. Corrected energy spectrum of laseraccelerated protons from hydrogen clusters.

外観図を示す。検出器上の各領域で減速材の厚みが 異なるため、各領域に到達可能なエネルギーが異な る。即ち、各領域のエッチピット数は、到達可能エ ネルギー以上の陽子線の数であることがわかる。各 領域に到達可能なエネルギーについては PHITS を用いて計算した。実際に、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によって 得られた各領域のエッチピット数を Fig. 2 に示す。 これをエネルギースペクトルに変換するためには、 高エネルギー側のオーバーラップしている領域に属 するエッチピット数を差し引く必要がある。そこで、 到達可能エネルギーからCR-39への入射エネルギー 即ち、減速材通過後の陽子線のエネルギーを計算し、 各領域で計測すべき入射エネルギーの上限を決定し た。その結果、いずれの領域においても5 MeV 以下 であったため、HIMAC において陽子線に対する校 正を実施した。エネルギーの高い陽子線ほど開口部 径の小さなエッチピットを形成するため、エッチピ ット径からエネルギーを求めることが可能である。 レーザー駆動イオン加速実験で得られた各エッチピ ットに対して、校正曲線からエネルギーを求め、各 領域で計測すべきエッチピットのみ選別し計数した。 その結果、Fig. 3 に示す補正されたエネルギースペ クトルが得られた。

3. 原子核乾板

原子核乾板は荷電粒子の飛跡を三次元的に記録す ることができ、宇宙線ミューオンなどの最小電離粒 子まで検出可能な高い感度を有するため、陽子線に 対して最大でも 27 MeV までしか感度を示さない CR-39 に比べて、大幅にコンパクトなサイズのサブ GeV級レーザー加速陽子線計測器を実現できると考 えられる。しかしながら、その感度の高さ故に、電



Figure 4. Root mean square of proton-track scattering angle in each emulsion layer.

子線やX線が同時発生するレーザー駆動イオン加速 実験に適用した場合、それらノイズ成分によって陽 子線飛跡が埋もれてしまい、検出できないという問 題があった。そこで我々のグループは、原子核乾板 の現像液の pH と現像時間を調整し、原子核乾板の 感度の最適化を行うことで、電子線やX線によるノ イズ成分の低減を試みた。その結果、MeV 級のレー ザー加速陽子線計測に世界で初めて成功した。さら に、加速器を用いてその最適条件下の原子核乾板が サブ GeV 級の陽子線に対しても感度を有すること を確認し、将来のサブ GeV 級のレーザー加速陽子線 計測器として、原子核乾板が有効であることを確か めた[9]。

本研究では、原子核乾板と散乱体を交互に積層した Emulsion Cloud Chamber (ECC)内での陽子線の 多重クーロン散乱量から入射エネルギーを逆推定す る手法の開発を進めている。ECCは、素粒子実験な ど高エネルギー物理の分野で用いられてきた。ECC 内での多重クーロン散乱量から入射エネルギーの逆 推定を行うが、本研究で対象となるサブ GeV 級の陽 子線は ECC 内でのエネルギー減衰や原子核乾板自 体による散乱量も考慮する必要があり、取り扱いが 難しいため、これまで十分な研究が進められてこな かった。そこでまず、放射線医学総合研究所 HIMAC において、100、160、230 MeV の陽子線を ECC に 照射し、散乱角度に関する基礎データの取得を行っ た。散乱体には、厚さ 250 µm のタングステンを使 用した。モンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS を 用いて実験体系を再現し、実験データと直接比較を 行ったところ、Fig.4に示すように、PHITS が実験 値を半分程度に過小評価していることがわかった。 今後は理論式や他のシミュレーションも導入して、 この過小評価の原因を探り、実験値の再現を行う。 一方で、エネルギー逆推定手法については、機械学 習を取り入れた計算アルゴリズム開発に着手してお り、現段階で60%程度の精度が得られている。

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スペクト ル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^[10]。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 の陽子線を入射 して解析を行った。

偏向磁場 1.6 T、偏向電圧 2000 V で 0.4 MeV か ら 3.0 MeV までエネルギーを変えて陽子線を検出 した 11 枚の積算画像を Fig. 5 (a)に示す。紙面左右 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、つまり紙面左側に近づく。一方、電場に よる偏向方向は紙面上下方向である。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。尚、加速器中で 残留ガスとの衝突で中性化した粒子は、磁場にも電 場にも偏向を受けないので、中性粒子が検出された



Figure 5. (a) A stack of images of detected proton beams at different energies from 0.4 MeV to 3.0 MeV. (b) Spectrum of proton energies.

位置を原点とした。

次に、イオンのエネルギーと検出位置の関係を理 論式に当てはめ、エネルギースペクトルに変換した ものを Fig. 5 (b)に示す。その結果、全領域で良い一 致を示した。ただし高エネルギーになる程、エネル ギー分解能が低くなる様子も見て取れた。その理由 は、高エネルギーで原点に近いほど、わずかな検出 位置の違いがエネルギー測定に大きく反映されるた めである。この結果は、今後さらに高エネルギー領 域を測定するための装置改良の指針になる。

本研究では、偏向電圧を反転してプロトンが検出 される位置に、CR-39を置いた。こうすることで、 エッチピット数と光量を比較することができ、1粒 子あたりの光量が規格化できると考えた。現在、エ ッチング処理を進めている。

5. アルゴンクラスターの生成

水素クラスターと平行してアルゴンクラスターを ターゲットにすることを検討している。高強度レー ザーとアルゴンクラスターとの相互作用により、自 己磁場生成をともなう高温・高密度プラズマの生成 が予測されており、そのようなプラズマ中における アルゴン多価イオン生成過程、及び、イオン加速過 程は興味深い。もし、レーザー駆動により、このよ うな重イオンを加速することができるのであれば、 レーザー集光により到達する TV/cm 電場勾配によ って重イオンの多価イオンが生成され、数マイクロ メートルという短い距離で加速される故に、極めて 有用である。さらにターゲットを変えるだけで容易 に加速するイオン種を変更することができる。この ような特徴から、加速器の入射器といった利用の他 に、材料照射における照射誘起局所加熱[11]、イオン パルスラジオリシス、材料中の励起電子の緩和の時 分解分析[12]などの応用研究への利用が考えられる。 さらには、多価イオンの中でも極めてまれな状態で ある He-like あるいは Hydrogen-like の Hollow Atom (中空原子)の生成が期待されており X 線分光 学において注目されている。この存在を確かめるた めに、X 線分光器を用いた実証実験も計画している。

本節では、準備状況にある、アルゴンの液体、気体、超臨界状態からのパルスジェットによるクラス ター生成におけるクラスターサイズ分布の違いについて紹介する。

アルゴンクラスターの生成は、水素クラスターの 生成と同様、冷却機構付パルスバルブを用いて行わ れた。クラスターサイズ分布の取得には、Nd:YAG レーザーの2倍高調波である波長532 nm のパルス レーザーをクラスターターゲットに照射し、そこか らの散乱光の角度分布測定し、Mie 散乱理論を用い て数値解析することにより行った[13, 14]。

噴射前のアルゴンの状態を臨界点(150.87 K, 4.894 MPa)近くで気相、液相、超臨界状態と条件 を変えて、パルスバルブから噴射し、それぞれの条 件で生成されたアルゴンクラスターにレーザーを照



Figure 6. Angular distribution of light scattering for argon clusters produced by injecting argon in the gas phase, liquid phase, and supercritical state, respectively.



Figure 7. Size distribution of argon clusters produced by injecting argon in the gas phase, liquid phase, and supercritical state, respectively.

射して散乱光角度分布を取得した。Fig. 6 に示すよ うに、液体、超臨界状態から生成されたターゲット に対しては、前方散乱の強い Mie 散乱と見なせる ことから、レーザー波長サイズ、若しくはより大き いサイズのクラスターが存在することを示唆してい る。一方、液体(2 MPa, 128 K)から僅か3 K の 上昇で相転移により気体(2 MPa, 131 K)になる と、散乱角度分布が平らになり、散乱高強度も大き く低下する。これはレイリー散乱に近いことから、 大きいクラスターは存在しないことを示唆してい る。

この結果に基づいて、それぞれの実験条件に対応 するクラスターサイズ分布を Fig. 7 に示す。液体と 超臨界状態を比較すると、超臨界状態では、1 µm を超えるアルゴンクラスターが存在しないことが分 かった。一方、液体状態では、1 µm を超えるアル ゴンクラスターが存在し、その存在量は 2 MPa に 比べ、6 MPa では 2 倍程度多く存在した。気体状 態では、散乱角度分布で示唆されたとおり、大きい クラスターは存在しないことが分かった。このよう に、水素クラスター生成成にした。

6. 展望

以上のように、レーザー駆動イオン加速において 使用する CR-39、原子核乾板、トムソンパラボラス ペクトロメーターなどの各種検出器の校正実験を行 った。CR-39 では数十 MeV の陽子線に対し、数 MeV 以下の分解能でエネルギースペクトルを計測できる 手法を開発した。原子核乾板ではサブ GeV 級の陽子 線検出に対応できるように開発を進めている。トム ソンパラボラスペクトロメーターでは、リアルタイ ムにエネルギースペクトルのフルエンスを正確に評 価できるように検出器の特性を取得している。この ように、各検出器の長所をより高度化し、お互いの 検出器の特性を補完するような検出体系を構築し、 レーザー駆動イオン加速研究に適用する。また、や 来展開を見据えてアルゴンクラスターと高強 度レーザーとの相互作用による、重粒子加速や多価 イオン生成などの進展に寄与することを期待してい 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. Kiriyama, 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, とぴっくす 第 104

[H30-5]

- 号, 41 (2017). [11] T. G. White, et al., Sci. reports 2, 889 (2012). [12] B. Dromey, et al., Nat. Commun. 7, 10642 (2016).
- [13] S. Jinno et al., Appl. Phys. Lett. 102, 164103 (2013)
- [14] S. Jinno, et al., Optics Express 21, 20656 (2013).
- [15] P. C. Hansen, SIAM 34, 561 (1992).