

# kJ クラス超高強度レーザーパルスを用いたイオン加速実験

Ion acceleration with kilojoule-class ultrahigh-intensity laser pulses

余語覚文<sup>1)</sup>、A. Morace<sup>1)</sup>、有川安信<sup>1)</sup>、藤岡慎介<sup>1)</sup>、戸崎翔太<sup>1)</sup>、岩田夏弥<sup>1)</sup>、Z. Zhang<sup>1)</sup>、小島完興<sup>1)</sup>、  
坂田匠平<sup>1)</sup>、安部勇輝<sup>1)</sup>、李昇浩<sup>1)</sup>、K. F. Law<sup>1)</sup>、松尾一樹<sup>1)</sup>、側貴行<sup>1)</sup>、西村博明<sup>1)</sup>、白神宏之<sup>1)</sup>、  
中井光男<sup>1)</sup>、長友英夫<sup>1)</sup>、山ノ井航平<sup>1)</sup>、時田茂樹<sup>1)</sup>、藤本靖<sup>1)</sup>、河仲準二<sup>1)</sup>、中田芳樹<sup>1)</sup>、宮永憲明<sup>1)</sup>、  
乗松孝好<sup>1)</sup>、砂原淳<sup>2)</sup>、城崎知至<sup>3)</sup>、尾崎哲<sup>4)</sup>、坂上仁志<sup>4)</sup>、匂坂明人<sup>5)</sup>、小倉浩一<sup>5)</sup>、S. V. Bulanov<sup>5)</sup>、  
T. Zh. Esirkepov<sup>5)</sup>、A.S. Pirozhkov<sup>5)</sup>、錦野将元<sup>5)</sup>、近藤公伯<sup>5)</sup>、三間園興<sup>1)</sup>、疇地宏<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、<sup>2)</sup>レーザー技術総合研究所、

<sup>3)</sup>広島大学、<sup>4)</sup>核融合科学研究所、<sup>5)</sup>日本原子力研究開発機構関西光科学研究所

A. Yogo<sup>1\*</sup>, A. Morace<sup>1</sup>, Y. Arikawa<sup>1</sup>, S. Fujioka<sup>1</sup>, S. Tosaki<sup>1</sup>, N. Iwata<sup>1</sup>, Z. Zhang<sup>1,6</sup>, S. Kojima<sup>1</sup>, S. Sakata<sup>1</sup>,  
Y. Abe<sup>1</sup>, S-H. Lee<sup>1</sup>, K.F. Law<sup>1</sup>, K. Matsuo<sup>1</sup>, T. Gawa<sup>1</sup>, H. Nihsimura<sup>1</sup>, M. Nakai<sup>1</sup>, H. Shiraga<sup>1</sup>, H. Nagatomo<sup>1</sup>,  
K. Yamanoi<sup>1</sup>, S. Tokita<sup>1</sup>, Y. Fujimoto<sup>1</sup>, Y. Nakata<sup>1</sup>, T. Jitsuno<sup>1</sup>, J. Kawanaka<sup>1</sup>, N. Miyanaga<sup>1</sup>, T. Norimatsu<sup>1</sup>,  
S. V. Bulanov<sup>2</sup>, A. Sagisaka<sup>2</sup>, A. S. Pirozhkov<sup>2</sup>, T. Zh. Esirkepov<sup>2</sup>, K. Ogura<sup>2</sup>, M. Nishikino<sup>2</sup>, K. Kondo<sup>2</sup>,  
T. Johzaki<sup>3</sup>, T. Ozaki<sup>4</sup>, H. Sakagami<sup>4</sup>, A. Sunahara<sup>5</sup>, K. Mima<sup>1</sup> and H. Azechi<sup>1</sup>

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita, Osaka, Japan, Kansai Photon Science Institute,

Japan Atomic Energy Agency, Kizugawa, Kyoto, Japan, Hiroshima University, Higashihiroshima, Hiroshima, Japan,

National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu, Japan, Institute of Laser Technology, Suita, Osaka, Japan

高強度レーザーによるイオン加速[1,2]では、 $10^{18}$  Wcm<sup>-2</sup> を超える集光強度のレーザーを薄膜に集光することにより、薄膜の裏面に TVm<sup>-1</sup> を超える強力な荷電分離を発生させることで、ミクロン程度の加速長でイオンが MeV オーダーまで加速される。このレーザーイオン加速を利用して、イオン加速器の抜本的な小型化・省電力化・低コスト化を目指す研究や、高速点火核融合におけるドライバービームとして活用する研究が進められている。

近年、比較的小型のフェムト秒レーザーによる研究では、レーザーパルスのピークと背景光の強度比（コントラスト）が 12 桁を超える高コントラストレーザーを、ナノメートル級の極薄膜に集光することで、より効率的なイオン加速が可能となることが実証されつつある。しかしながら、キロジュール級ピコ秒パルス幅の大型レーザーにおいては、高コントラストのレーザーパルスによるイオン加速研究はこれまでほとんど行われていなかった。

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは、キロジュール級ピコ秒パルスレーザー装置 LFEX の全 4 ビームが完成し、on target エネルギーでキロジュールに届く大出力エネルギーを実現すると共に、メインパルスの 200 ps 手前におけるコントラスト比として  $10^9$  におよぶ良質なレーザーパルスを用いた先端的な研究を行うことが可能となった。そこで本研究では、この世界的にも類を見ない、キロジュール・ピコ秒・高コントラストなレ

ザーパルスによるレーザーイオン加速研究を開始したので、最新の成果を報告する。

実験では、エネルギー最大 1 kJ、パルス幅 1.5 ps のレーザーパルスを薄膜上に照射し、薄膜裏面方向に加速されるイオンのエネルギー分析を行った。集光強度はエネルギー 1 kJ の場合で  $1 \times 10^{19}$  Wcm<sup>-2</sup> であった。薄膜ターゲットとしては厚さ 5 ないし 10  $\mu$ m のアルミニウムを使用しており、質量電荷比 (q/M) の最も大きい陽子（ターゲット裏面の表面不純物に起因）が優勢に加速される。

図 1 には集光強度を  $2 \times 10^{18} - 1 \times 10^{19}$  Wcm<sup>-2</sup> の範囲で変化させた際に加速された陽子の最大エネルギーを示す。その結果、52 MeV の陽子加速に成功した。図中には比較として、LFEX と同クラスのペタワットレーザーによる陽子加速の結果[3]を示すが、LFEX では 1 桁以上低い集光強度で同等のエネルギーの陽子が加速されており、圧倒的に加速効率が良いことが判る。図中の 2 本の実線は、典型的なイオン加速機構である 1 次元 TNSA モデル[4,5]による予想値を示すが、従来の実験結果（青丸）は常に 1 次元モデル（青線）より低い加速エネルギーとなるのに対し、LFEX では 1 次元モデル（赤線）を上回る加速が発生している。加えて、集光強度を  $2 \times 10^{18}$  Wcm<sup>-2</sup> に固定したままレーザーのパルス時間幅を 1.5 ps から 3 ps および 6 ps に伸長すると、陽子エネルギーが最大 32 MeV まで増加することが明らかになった。

このようなイオン加速を可能にする物理的機構と

しては、(1) 1 ショットあたり 1 kJ におよぶターゲット入射エネルギーの利点として、集光径を大きくすることで横方向のエネルギー散逸を抑え、理想的な 1 次元のプラズマ膨張が実現された (2) 電子がターゲットの表裏を往復することで繰り返し加速され、通常のスケーリング則を超える電子加速が発生した、の 2 点であると考察している。特に近年、パルス時間幅の増加に伴って電子加熱が促進されることを示す理論的研究 [6-8] が提案されてきており、本講演ではこれらとの関連性を議論する。

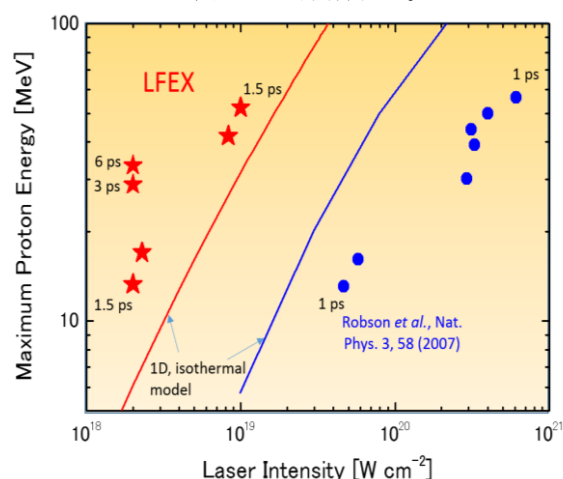


図 1 : 陽子の最大エネルギーに関する成果。赤星が本グループの結果を示し、従来値（青丸）に比べて圧倒的に効率が良いのが分かる。

さらに、LFEX レーザーの高コントラスト性を活か

して、厚さ  $0.1\mu\text{m}$  の金属薄膜を用いたイオン加速も実施している。陽子エネルギーおよびエネルギースペクトルのターゲット厚さ依存性についても考察する予定である。

本研究は大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの共同利用・共同研究、および核融合科学研究所との双方向型共同研究のもとに実施された。本研究の一部は科学研究費補助金 (No. 50421441, 50421441) による助成のもと実施された。レーザー運転、ターゲット製作及びプラズマ計測など、激光 XII 号および LFEX 装置の職員からの技術支援に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] H. Daido, M. Nishiuchi, and A. S. Pirozhkov, Reports Prog. Phys. **75**, 056401 (2012).
- [2] A. Macchi, M. Borghesi, and M. Passoni, Rev. Mod. Phys. **85**, 751 (2013).
- [3] L. Robson, P. McKenna, D. Neely, M. Zepf, R. J. Clarke, K. W. D. Ledingham, T. McCanny, P. T. Simpson, F. Lindau, O. Lundh, P. Mora, and C. Wahlstrom, Nat. Phys. **3**, (2007).
- [4] P. Mora, Phys. Rev. Lett. **90**, 5 (2003).
- [5] J. Fuchs, P. Antici, E. d'Humières, E. Lefebvre, M. Borghesi, E. Brambrink, C. a. Cecchetti, M. Kaluza, V. Malka, M. Manclossi, S. Meyroneinc, P. Mora, J. Schreiber, T. Toncian, H. Pépin, and P. Audebert, Nat. Phys. **2**, 48 (2006).
- [6] A. J. Kemp and L. Divol, Phys. Rev. Lett. **109**, 1 (2012).
- [7] S. V. Bulanov, A. Yogo, T. Z. Esirkepov, J. K. Koga, S. S. Bulanov, K. Kondo, and M. Kando, Phys. Plasmas **22**, 063108 (2015).
- [8] A. Yogo et al., to be published in Plasma Physics and Controlled Fusion