

## クラスターターゲットを用いた高効率なレーザー駆動イオン加速 Highly-Efficient Laser-Driven Ion Acceleration using Cluster Targets

福田祐仁  
Yuji Fukuda

日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所  
Kansai Photon Science Institute (KPSI), Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

### 1. はじめに

近年、高強度レーザーと物質との相互作用研究が急速に進展する中、レーザー駆動イオン加速研究が大きな注目を集めている。高強度レーザーと物質の相互作用によってプラズマ中に作り出される加速電場 ( $\sim 10 \text{ TV/m} \sim 10 \text{ MV}/\mu\text{m}$ ) は、従来型高周波加速器の加速電場 ( $\sim 10 \text{ MV/m}$ ) をはるかに超える。従って、この電場勾配を利用することで、従来型加速器を凌駕する超小型の「レーザー加速器」を実現することが出来る。例えば、80-250 MeV のイオンビームの発生が可能となれば、原子核物理研究や粒子線がん治療装置に用いることが出来、後者が実現されれば、治療装置の一層の小型化により、粒子線がん治療の普及の一助となると期待できる [1]。

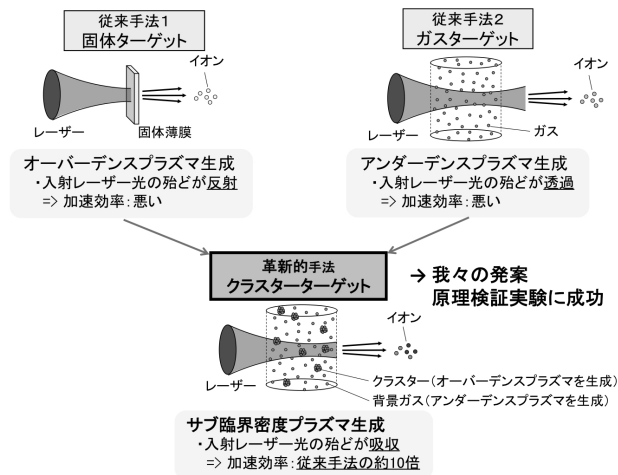


図1. クラスターターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速と従来法との比較。

我々は、数年前から、「レーザー加速器」の実用化を目指した研究を推進している。図1に示したとおり、従来、固体ターゲットやガスター

ゲットにレーザー光を照射し、イオン加速研究が行われていた。2008年に我々は、クラスターターゲットを用いることで、従来手法よりも約10倍高いエネルギーにまでイオンを加速することが出来る革新的なイオン加速手法の実証実験に成功した [2]。

### 2. 実験方法

実証実験では、原子力機構関西研の高強度チタンサファイアレーザーシステム JLITE-X を用いた。エネルギー150 mJ、パルス幅40 fs のレーザー光をクラスターターゲットに集光させた。クラスターターゲットの生成には、独自に設計した特殊構造の円錐形ノズルを用いた。真空容器中で、圧力60気圧のヘリウムガスと二酸化炭素ガスとの混合ガスをノズルから噴出させ、平均直径220 nm の二酸化炭素クラスターを生成させた。レーザー光照射により、5 mm にわたる自己収束によるレーザー光のガイディングが起これ、レーザー進行方向に高エネルギーのイオン加速が実現された。加速されたイオンのエネルギー計測は、固体飛跡検出器を用いた方法と飛行時間法との2つの方法を併用して行った。

### 3. 実験結果

固体飛跡検出器を用いた方法では、集光点から200 mm 下流のレーザービーム軸上に固体飛跡検出器のスタックを設置した。光学顕微鏡によるCR-39表面のエッチピット観察をおこない、11枚目のCR-39までイオンシグナル由来のエッチピットを確認した。SRIMコードを用いて、加速されたイオンの最大エネルギーを計算し、ヘリウム、炭素、酸素に対して、それぞれ、核子あたり10、18、20 MeV の値を得た。

一方、飛行時間法では、集光点から 930 mm 下流のレーザービーム軸上に MCP を設置した。MCP の手前に永久磁石 (0.15 T) を設置して 20 MeV 以下のエネルギーの電子を偏向させ、13  $\mu$ m 厚のアルミホイル 3 枚を設置して X 線を遮蔽し、MCP のノイズ低減を図った。図 2 に観測されたイオンのエネルギースペクトルを示した。観測されたイオンの最大エネルギーは、核子あたり 18.5 $\pm$ 1 MeV であり、固体飛跡検出器による結果とよく一致した。

本実験で達成されたイオンエネルギーの最大値は、従来手法による同規模クラスのレーザー装置を用いた場合よりも、約 10 倍高いエネルギーに匹敵し、従来手法では到達することはできなかったものである (図 3 参照)。

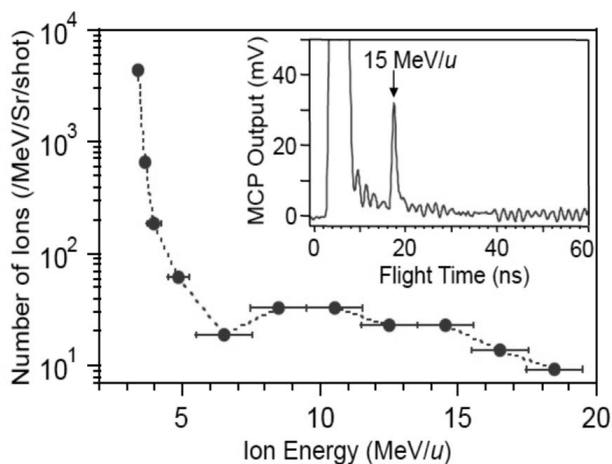


図 2. 飛行時間法によって計測したイオンのエネルギー分布。挿入図は、レーザー 1 ショットの MCP シグナルで、5 ns 付近のピークは X 線、18 ns 付近のピークは核子あたり 15 MeV のイオンに由来するシグナルを示している。

#### 4. イオン加速機構

原子力機構関西研の中村、ブラノフらは、イオン加速のメカニズムを明らかにするために、二次元粒子コードを用いた計算機シミュレーションによる実験結果の詳細な解析を行った [2]。その結果、以下のようなメカニズムでイオン加速が起こることが示唆された。すなわち、レーザー照射されたクラスターターゲット中にサブ臨界密度プラズマが生成し、自己収束によるレーザー光のガイディングと高エネルギー電子の発生が促される。プラズマの密度構造とレーザー光強度などの諸条件が整うと、高エネルギー電子流に伴って生成する 100 MG 級の磁気渦がターゲット裏面付近に留まり、ターゲ

ット裏面付近に 10 TV/m 級の強い電場を生成し、イオンを非常に高いエネルギーにまで加速する。すなわち、電子エネルギーの一部を磁場のエネルギーに変換し、これをイオン加速に有効利用した、といえる。

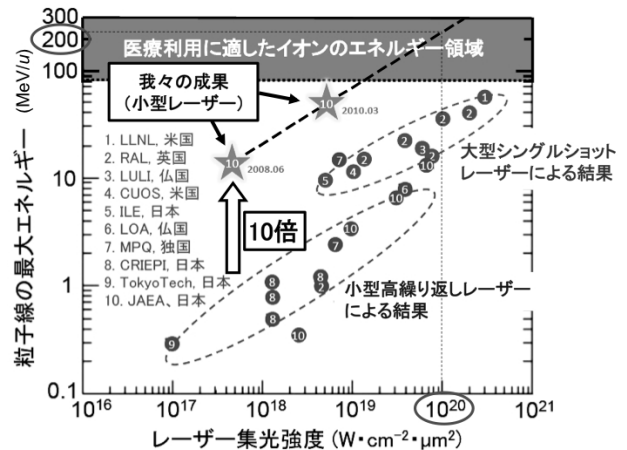


図 3. クラスターターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速と固体ターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速における、イオンの最大エネルギーの比較。

#### 5. まとめ

我々は、世界で初めて、クラスターターゲットをレーザー駆動イオン加速研究に導入し、従来手法よりも、約 10 倍高いエネルギーにまでイオンを加速することに成功した。最近、実証実験に用いたレーザーよりもさらに高いエネルギーを有する原子力機構関西研の J-KAREN レーザーシステム (エネルギー 1 J、パルス幅 40 fs) を用いて同様の実験を行い、核子あたり 50 MeV のイオン加速を達成した [3]。このことから大雑把に見積ると、図 3 示すように、10<sup>20</sup> W/cm<sup>2</sup> の集光強度での実験で、核子あたり 200 MeV のイオン加速が可能と考えられる。これは、上記の磁気渦加速メカニズムによるエネルギースケールともよく一致している。

現在、我々は、クラスターターゲットを用いて、医療応用可能な 80-250 MeV のイオン加速の実現を目指した研究に取り組んでいる。

#### 参考文献

- 1) T. Tajima *et al.*, Rev. Accel. Sci. Tech. **2**, 201 (2009).
- 2) Y. Fukuda, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 165002 (2009).
- 3) Y. Fukuda, *et al.*, Radiat. Meas. **50**, 92 (2013).