

## 解 説

## 超高強度レーザー重イオン加速器の不安定核取り出しへの応用

西内 満美子\*・榊 泰直\*

## Towards a Novel Laser-driven Method of Exotic Nuclei Extraction-acceleration

Mamiko NISHIUCHI\* and Hironao SAKAKI\*

## Abstract

A combination of petawatt laser and nuclear physics techniques can facilitate studies for exotic nuclei properties. In this article, the Laser-driven Exotic Nuclei extraction-acceleration method is discussed. A femtosecond petawatt laser extracts the short-lived heavy exotic nuclei created by an external ion beam via nuclear reactions in a target, and accelerates them to high energy in a form of highly charged nuclei. This technique has a significant novelty comparing to the conventional method and facilitates studies for exotic nuclei which will make a big contribution to understand the cosmological nucleosynthesis and astronomical high energy phenomena.

## 1. はじめに

放射性同位元素の存在は、多岐にわたる科学技術分野において、基礎研究としてのみならず、応用としても非常に重要である<sup>1-4)</sup>。その中でも崩壊時間や捕獲確率等の不安定核の特性は、超新星爆発やX線バーストなどの宇宙における天体現象のダイナミクスを支配する元素合成過程を知るために必要不可欠である<sup>5)</sup>。これらの天体の内部においては、我々が通常目にするような、鉄よりも重いほとんどの元素が、r-processとして知られる連鎖的に起こる中性子捕獲現象により合成されることが知られている。しかしながら、この元素合成の過程に、例えば、中性子過剰アクチノイドの不安定核子がどのようにかかわっているのか等、まだ不明な点も多く、完全に理解されているというわけでは決していない<sup>6)</sup>。そこで、研究者たちは世界における大型の重イオン加速器施設を用いて、これらの不安定核子の特性を調査しようと日々熱心に研究を行っている。

現状これらの不安定核子を生成する技術としては、大きく分けて二つの方法がとられている。一つ目は Isotope separation on-line (ISOL) 法と呼ばれる方法、もう一つは Projectile fragmentation

(PF) 法と呼ばれる方法である。それぞれ CERN における ISOLDE<sup>7)</sup> や RIKEN における RIBF<sup>8)</sup> に代表される方式といえる。それぞれの方式の特徴により、取り出せる核種の特性に偏りがある。また、最新鋭の両技術をもってしても、取り出せない核種が多く存在することも事実である。そこで、超高強度レーザー技術をこれらの既存技術に融合させることで、これらの手法では迫ることができなかった領域に迫ることができるのではないだろうか？ という提案がこの解説の本題である。

## 2. 超高強度レーザーを用いた重イオン加速技術

近年における超高強度レーザー技術の発展により、ピークパワーがペタワット級の波長  $0.8 \mu\text{m}$  のレーザー光をほぼ回折限界に近い  $1 \mu\text{m}$  の直径に絞り込み、 $10^{22} \text{ Wcm}^{-2}$  という集光強度を達成することが可能となった。この集光強度に相当する、レーザーの持つ電場ピーク強度は水素原子内部電場をはるかに凌駕する値であり、物質とこのようなレーザー光が相互作用することで、物質は一気にプラズマ化され、その中の一番軽い電子はわずかレーザーの1サイクル内で相対論的速度に

\* 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (E-mail: nishiuchi.mamiko@qst.go.jp)

まで加速を受ける。生成されたプラズマの動きはレーザー電磁場によって支配され、集団的な挙動を示す。ターゲットとして薄膜を用いた場合、Target Normal Sheath 加速と呼ばれる加速機構 (TNSA 機構<sup>9)</sup>) においては、レーザー照射によって加速された高エネルギー電子が持ち去るチャージの分だけ、ターゲットがプラスにチャージアップし、そのプラスに帯電したターゲットと加速されてターゲットを離れようとする電子のうち、ターゲットのプラスのチャージに引き戻される電子成分との間に、強烈な電荷分離電場 (静電場) が生じる。その電場勾配は上記のレベルの強度のレーザーとの相互作用時において 100 TV/m 程度にも至る。まさに薄膜ターゲットが、レーザーの時間変動する光電場を準静的な電場に変換する、AC-DC コンバーターのような働きをする。このように強烈な電場に曝されれば、ターゲット内部の被加速粒子は、効率的に電子を剥がされ、そして瞬時に加速を受けて高エネルギーで飛び出すことになる。

このように加速されたイオンの横エミッタンスは  $10^{-4} \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  と非常に小さく、時間幅もレーザーのパルス幅程度、すなわちピコ秒以下であることがわかっている<sup>9)</sup>。また、そのピーク電流も非常に高くメガアンペアにも達する。しかしながら加速できるイオンの最高エネルギーが 100 MeV/u 程度である<sup>9)</sup>、加速粒子の持つエネルギースペクトルが単色ではない、発生したビームが発散角を持つ、等という解決すべき課題も多々存在する。さらに、多くの場合被加速粒子として選択されているのは、加速が比較的容易な軽元素がほとんどであり、重イオンの加速はあまり行われていない。

いくつかの加速メカニズムが提案されている中で、上記の課題を解決することができ、最も加速効率が良いとされている加速に輻射圧加速機構というものがある<sup>10-13)</sup>。輻射圧加速機構においては、超高強度レーザーが薄膜ターゲットに照射されることで、一気に薄膜内部構成元素の電子を加速して「塊」として取り去ってしまうことで、全体としてプラスのチャージを持つイオンが残される。レーザーが照射され続ける間この電子塊は加速され続ける。一方これらの電子塊とイオン塊の間には強烈なクーロン力が形成されイオン塊も

電子に引きずられることで加速を受ける。この加速機構の兆候を計測したという実験結果はいくつか存在するものの、輻射圧加速機構を支配的に引き起こす条件を最適化するのが非常に難しいため、現在世界における数多くの研究所が、この実現に向け精力的に研究を行っている。

この加速機構が実現すれば、加速して取り出したい元素を、レーザーの照射野内部を全体として加速して取り出すことが可能となり、非常に効率が良い加速が実現する。また超高強度のレーザーを最適な厚みのターゲットと相互作用させることで、被加速粒子が重イオンでも、効率的に多価電離されたのち極高強度電場によって加速されるため、達成できるイオンのエネルギーは現状の数十 MeV/u と比較して格段に上がると考えられる<sup>10-13)</sup>。

以上のような特徴から、レーザー駆動イオンビームの質の改善を図ったうえで、例えばレーザー駆動型のイオンビームの応用先として、がん治療用の小型の加速器<sup>14-16)</sup>、または大型の重イオン加速器施設のためのインジェクター<sup>17)</sup>、高速点火用のビームへの応用<sup>18-20)</sup>、等が提案されている。

### 3. 超高強度レーザーを用いた不安定核取り出し手法

あまり着目されていないが、レーザー駆動型のイオン加速手法は、被加速イオンが重ければ重いほど、加速器を用いた従来型の加速手法に比してメリットが大きい。それは、前述のように、レーザーと物質との相互作用によって 100 TV/m 以上もの高勾配の電場をミクロンメートル以下の極小空間に生成できるという、レーザー駆動型のイオン加速手法の最大の特徴に起因する。この高勾配電場により重イオンの内核電子をも一気に引き剥がし、かつ同時に高エネルギーにして引き出せるため、極めてコンパクトな多価重イオン源が実現できる。さらに、この「イオン化および加速」の両ステップを、レーザーのパルス幅程度 (数十フェムトから数百フェムト程度) のごく短時間の間に実現できるという点も、従来型のイオン源には存在しない画期的な特徴である。

レーザー駆動型イオン加速の特徴をまとめると、

- 1) 従来型の技術では不可能な 100 TV/m を超える高勾配の電場をミクロンメートル以下

の極小空間に生成，かつイオンの加速を達成する．これにより，重元素のイオン源の小型化が可能

- 2) レーザーのパルス幅程度の数十フェムト秒時間内で多価重イオンの生成，および加速が可能
- 3) 加速イオン核種は，照射ターゲットに依存するため，照射ターゲット材料を変えるだけでどのようなイオンビームでも容易に加速可能となる．

以上のような特徴を考えると，例えばターゲットが安定核ではなく，不安定核で構成されていたとしても，または，ターゲットが非常に重い重イオンで構成されていたとしても，レーザーを用いることで問題なく引き出し得ると容易に想像がつく．例えば，薄膜ターゲットに対して，従来の加速器技術を駆使して，これまで地球上で実際観測することができなかった短寿命の重元素を，従来の加速器技術を駆使した元素合成により生成する．そして，それらが崩壊する前に，超高強度レーザーを照射することによって，瞬時に多価状態にすると同時に高エネルギー状態にして取り出すことが可能である<sup>21, 22)</sup>．超高強度レーザーによる重イオン加速技術の既存技術に対する特徴を鑑みると，短寿命核の取り出しおよび非常に重い元素の取り出しに向いている．すなわち既存技術で実現不可能な実験を，超高強度レーザーの技術を融合させることで実現できれば，原子核フロンティアにおける新たな基盤技術をもたらし，新しい物理的発見や原子力エネルギー産業に有用な成果が期待できる (図 1)．

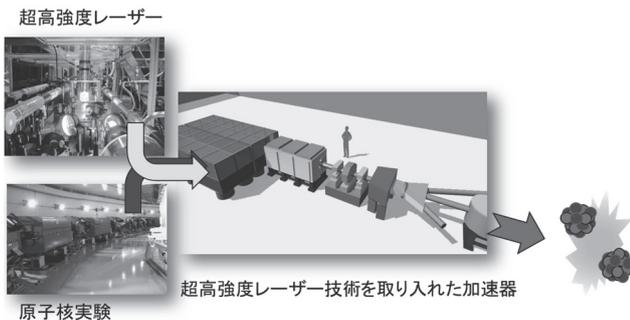


図 1 超高強度レーザーと既存加速器技術を融合させた新しい加速器のイメージ

## 4. 実証実験

量研関西研にある J-KAREN レーザーシステム<sup>23)</sup> (2018 年現在アップグレードされて J-KAREN-P と改名) を使用して，実際に重イオンを引き出して加速できるかどうかを実験的に調査した．

イオンを電離，かつ加速するための超高強度電場を生成するには，用いるレーザーとターゲットとの相性があるため，実際の実験によって極高強度電場が立つか否かを加速されて飛び出してくる陽子線をプローブとして用いて手法を決定する．超高強度レーザーパルス，といっても，理想的なガウシアン分布を持つパルスがやってくるわけではなく，プリパルスと呼ばれる低強度のパルスや，低強度の連続成分が存在する (図 2 (c) 左)．これらのレーザーの時間波形すべてが，レーザー

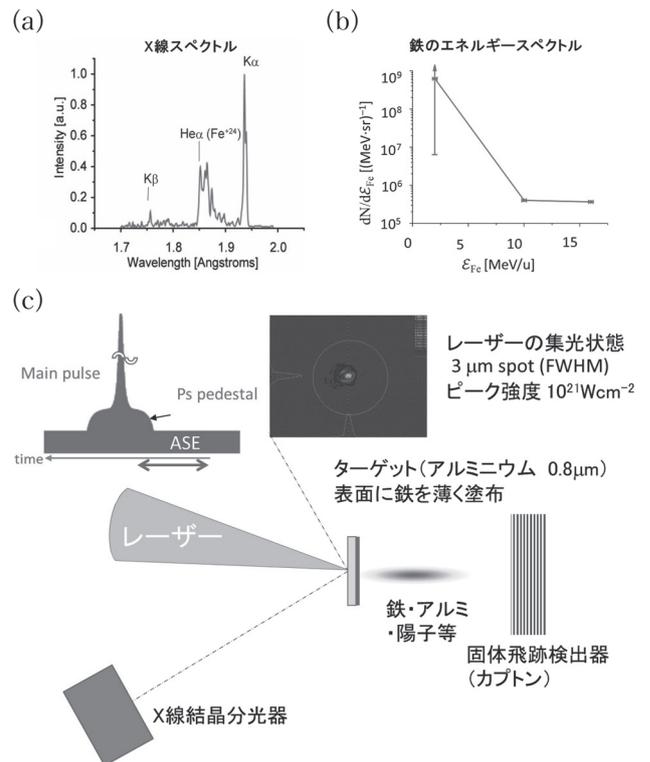


図 2 実験の概要  
 (a) 加速された鉄イオンの価数が少なくとも 25 価まで進んでいることを示す X 線結晶分光器の結果．  
 (b) 加速された鉄イオンを固体飛跡検出器で検出後，スペクトルを再構成した．最高で 0.9 GeV/total まで加速されていることを確認．  
 (c) 実験のセットアップ．J-KAREN レーザーパルス固体薄膜ターゲットに照射し，加速されて取り出された鉄イオンをカプトン膜で検出し，鉄イオンの価数を X 線結晶分光器で計測．

プラズマ相互作用に影響する。ちなみにこれらの背景光と、メインパルスの強度比をコントラストと呼び、コントラストが高い状態は、背景光が低く、より理想に近いレーザーの時間波形であることを意味する。常温常圧下でのターゲットの物性が、これらの低強度のパルスによって徐々に変化し、プラズマ化していくが、その過程は完全に理解されているわけではないため、最適なターゲット材質や形状をシミュレーション等により予測するにも限界がある。そこで、我々は、比較的価格面で安価であり、扱いやすいアルミニウムターゲットの厚みを変えながら、J-KAREN レーザーを照射し、加速される陽子線の最高エネルギーができるだけ高くなる厚みを最適な条件として実験的に決定した<sup>24)</sup>。そのうえで、ターゲットの裏面に鉄を薄く塗布し、不安定核の加速を模擬した。

波長 800 nm, エネルギー 8 J, パルス幅 30 fs のレーザー光を上記のターゲット上に伝送し、最高で  $2 \times 10^{21} \text{ Wcm}^{-2}$  のピーク強度に集光した。またレーザーのコントラストはナノ秒レベルの時間領域で  $10^{10}$  程度であった。

この分野でよく用いられる分光法として、トムソンパラボラスペクトロメーターがある。本手法は、計測したいイオンビームに対して、同じ方向に電場と磁場をかけ、磁場によってイオンのエネルギーを、電場によってイオンの価数を分別する手法である<sup>25)</sup>。比較的小型であるのが利点だが、同じ価数と質量の比 (Q/M) を持つ核子は同じパラボラ軌道を検出器上に描くため、鉄、アルミ、炭素、酸素、陽子などが混ざって出てくる場合にはそれらの分別が困難となる。高ノイズ環境化においても、ネオンよりも重い原子核にしか感度がないカプトンを固体飛跡検出器に用いることで、様々な種類のイオンが混ざって飛んできても、鉄のみを検出できる。カプトンを何層も積層させることで、各層でイオンが落とすエネルギー分布によってエネルギースペクトルを得る。本手法によって得られた鉄のエネルギースペクトルを図 2 (b) に記す。最高で 16 MeV/u まで加速されていることがわかる。また、加速された鉄イオンの価数は X 線結晶分光器によって計測したところ、最高で 25 価であった (図 2 (a))。鉄の原子番号が 26 番であることより、ほぼ完全電離に近いところまで電離が進んでいることがわかる。

## 5. さらに高効率の重イオン加速を目指して

さらに重いイオンを高エネルギーに加速するには、いかに早期に重イオンを多価まで電離するかにかかるといえる。レーザープラズマ相互作用において、イオンの電離過程として考えられるのは、レーザーの電場によるイオン化、準静電場 (加速場) によるイオン化、高速電子による電子衝突電離、高速電子等が励起する X 線による光子電離等がある。加速されて取り出されるイオンの電離過程に支配的なのは、裏面における準静電場における電離と考えられるためこの電場をいかに強くできるかが、多価イオンを生成するカギとなる。

図 3 に示すのは、例えばイオンを電場に曝した際に、原子核周りに存在するイオンが電離されるのに必要な時間 (すなわち確率の逆数) をウラン (Z=92) に対して示したものである<sup>26)</sup>。レーザーのパルス幅が 30 fs 程度だとして、ターゲットの裏面に生成される電場が同等程度だと仮定すると、図中の薄緑色の部分の領域であれば、イオン化されることになる。例えば、 $10^{21} \text{ Wcm}^{-2}$  の集光強度のレーザーの電場の強度は約 100 TV/m に相当し (図中赤■), 実際にレーザーのパルス幅内で電離が可能なのは 57 価程度であることが予測される。すなわち、これよりも多価電離をするには、さらに高強度の電場が必要となり、それを生成するにはさらに高強度のレーザーが必要にな

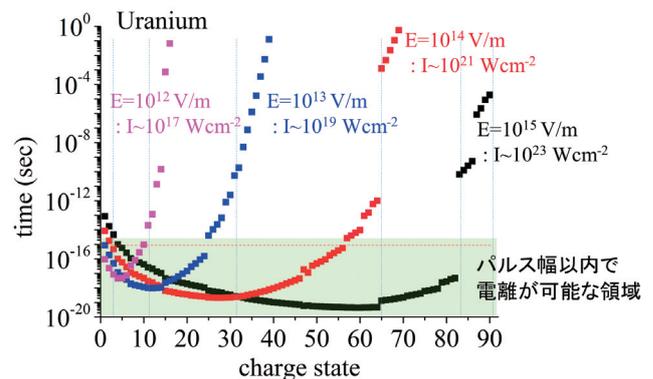


図 3 ウランの周りに存在する電子を電離するのに必要な電場強度と電離に必要な時間をチャージ毎に示した図。それぞれ  $10^{12}$ ,  $10^{13}$ ,  $10^{14}$ ,  $10^{15}$  TV/m の電場に対して (ピンク, 青, 赤, 黒の■で示す) プロットされている。例えば、 $10^{21} \text{ Wcm}^{-2}$  相当の電場においては、パルス幅の 30 fs 程度の時間内では、57 価までしか電離が進まないことがわかり、さらに高強度レーザーが必要であると推測できる。

ることがわかる。

量研関西研においては、さらなる高エネルギーイオン加速を一つの目標として、2013年よりJ-KAREN レーザーの高度化作業を行ってきた。その高度化作業もほぼ完了し、2017年には世界で最高強度のレーザー ( $10^{22} \text{ Wcm}^{-2}$ ) を実験に資する環境が整った<sup>27, 28)</sup>。また、2017年度後半には、薄膜との相互作用実験を行う際に必要不可欠な条件である高コントラストレーザーパルスの条件が、レーザーの集光強度を保ったままターゲット上に実現できるよう、時間波形の改善が行われ、薄膜との相互作用実験環境がほぼ整った。今後このレーザーを用いて重イオンの加速実験に取り込んでいく予定である。

## 6. まとめと今後の展望

3章で述べたように超高強度レーザー技術を既存の最新鋭の加速器技術や原子核実験技術を組み合わせることで、今まで見ることができなかったような核種の取り出しを可能とする新しい技術が生まれる可能性がある。現状では、望む核種を望む個数、望む状態で得るには、課題が多い。5章で述べたように、例えばイオン化プロセス一つをとっても、重イオンを効率良くイオン化するために必要不可欠な高強度のレーザーがやっと実験に資する状況になったばかりで、これから制御する手法を確立しなければならない。また、レーザーの強度が上がることで、重イオンのイオン化のメカニズムも変化すると予想できるため、それらについても踏み込んだ研究が必要である。加速されて出てきたイオン価数の単一化、エネルギーの単一化、空間分布など制御する項目は多いが、それらを一つ一つ解決することで、レーザーのエネルギー等を欲しいイオン種、価数、スペクトルのバンドに最適化できると考えている。

## 謝 辞

本論文を執筆するにあたって、多くの皆様のご助力をいただいた。高強度レーザー科学研究グループ、先端レーザー技術開発グループ、J-KAREN レーザー運転チームの各位、放医研加速器工学部の各位および文献(21, 22)の共著者の方々に多大なるご助力をいただいた。ここに記して感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) M. Thoennessen and B. Sherrill: *Nature*, 473, 25 (2011).
- 2) C.D. Bowman et al.: *Nucl. Instrum. Methods A*, 320, 336 (1992).
- 3) I. Tanihata et al.: *Phys. Rev. Lett.*, 55, 2676 (1985).
- 4) L.E. Williams: *Am. Assoc. Phys. Med.*, 35, 3020 (2008).
- 5) E.M. Burbidge et al.: *Rev. Mod. Phys.*, 29, 547 (1957).
- 6) J. Erler et al.: *Nature*, 486, 509 (2012).
- 7) <http://isolde.web.cern.ch/>
- 8) T. Motobayashi and H. Sakurai: *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 03C001 (2012).
- 9) H. Daido et al.: *Rep. Prog. Phys.*, 75, 056401 (2012).
- 10) T. Esirkepov et al.: *Phys. Rev. Lett.*, 92, 175003 (2004).
- 11) O. Klimo et al.: *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 11, 031301 (2008).
- 12) A. Macchi et al.: *Phys. Rev. Lett.*, 103, 085003 (2009).
- 13) S. V. Bulanov et al.: *Phys. Rev. Lett.*, 104, 135003 (2010).
- 14) S.V. Bulanov and V.S. Khoroshkov: *Plasma Phys. Rep.*, 28, 453 (2002).
- 15) S.V. Bulanov et al.: *Phys. Usp.*, 57, 1149 (2014).
- 16) S.S. Bulanov et al.: *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 18, 061302 (2015).
- 17) A.V. Korzhimanov et al.: *Phys. Rev. Lett.*, 109, 245008 (2012).
- 18) M. Roth et al.: *Phys. Rev. Lett.*, 86, 436 (2001).
- 19) V.Y. Bychenkov et al.: *Plasma Phys. Rep.*, 27, 1017 (2001).
- 20) S.Yu. Gus'kov: *Plasma Phys. Rep.*, 39, 1 (2013).
- 21) M. Nishiuchi et al.: "Acceleration of highly charged GeV Fe ions from a low-Z substrate by intense femtosecond laser", *Phys. Plasmas*, 22, 033107 (2015).
- 22) M. Nishiuchi et al.: "Towards a novel laser-driven method of exotic nuclei extraction-acceleration for fundamental physics and technology", *Plasma Phys. Rep.*, 42, 327 (2016).
- 23) H. Kiriya et al.: *Opt. Lett.*, 35, 1497 (2010).
- 24) K. Ogura et al.: "Proton acceleration to 40 MeV using a high intensity, high contrast optical parametric chirped-pulse amplification/Ti:sapphire hybrid laser system", *Opt. Lett.*, 37, 2868 (2012).
- 25) H. Sakaki et al.: *Rev. Sci. Instrum.*, 84, 013301 (2013).
- 26) S. Kato et al.: *Phys. Plasmas*, 5, 292 (1998).
- 27) M. Nishiuchi et al.: "High contrast high intensity petawatt J-KAREN-P laser facility at QST", *SPIE Proceedings*, 10241, Research Using Extreme Light: Entering New Frontiers with Petawatt-Class Lasers III; 102410N (2017).
- 28) A.S. Pirozhkov et al.: "Approaching the diffraction-limited, bandwidth-limited Petawatt", *Opt. Express*, 25, 20486 (2017).