

# レーザー駆動粒子線加速手法を用いた重イオン加速とその応用

(加速器とレーザーの融合による不安定核ビームの生成)

## LASER-DRIVEN HEAVY ION ACCELERATION AND ITS APPLICATIONS

榊 泰直<sup>#A)</sup>, 西内 満美子<sup>A)</sup>, エシュリケポフ チムール<sup>A)</sup>, 西尾 勝久<sup>A)</sup>, ピクツ タチアナ<sup>B)</sup>, ファエノフ アナトリー<sup>B)</sup>, オルランディール リカルド<sup>A)</sup>, ピロゾコフアレキサンダー<sup>A)</sup>, 佐甲 博之<sup>A)</sup>, 匂坂 明人<sup>A)</sup>, 小倉 浩一<sup>A)</sup>, 金崎 真聡<sup>A)</sup>, 福田 祐仁<sup>A)</sup>, 桐山 博光<sup>A)</sup>, 小浦 寛之<sup>A)</sup>, 神門 正城<sup>A)</sup>, 山内 知也<sup>C)</sup>, 渡辺 幸信<sup>D)</sup>, セルゲイ ブラノフ<sup>A)</sup>, 近藤 公伯<sup>A)</sup>, 今井 憲一<sup>A)</sup>, 永宮 正治<sup>E)</sup> Hironao Sakaki<sup>A)</sup>, Mamiko Nishiuchi<sup>A)</sup>, Timur Esirkepov<sup>A)</sup>, Katsuhisa Nishio<sup>A)</sup>, Tatiana Pikuz<sup>B)</sup>, Anatoly Faenov<sup>B)</sup>, Riccardo Orlandi<sup>A)</sup>, Alexander Pirozhkov<sup>A)</sup>, Hiroyuki Sako<sup>A)</sup>, Akito Sagisaka<sup>A)</sup>, Koichi Ogura<sup>A)</sup>, Masato Kanasaki<sup>A)</sup>, Yuji Fukuda<sup>A)</sup>, Hiromitsu Kiriya<sup>A)</sup>, Hiroyuki Koura<sup>A)</sup>, Masaki Kando<sup>A)</sup>, Tomoya Yamauchi<sup>C)</sup>, Yukinobu Watanabe<sup>D)</sup>, Bulanov Sergay<sup>A)</sup>, Kiminori Kondo<sup>A)</sup>, Kenichi Imai<sup>A)</sup> and Shoji Nagamiya<sup>E)</sup>  
A) Japan Atomic Energy Agency, B) Osaka University, C) Kobe University, D) Kyusyu University, E) RIKEN

### Abstract

The novel tool for the frontier of the exotic nucleus was proposed by fusing the high-intensity laser technology and the accelerator technology. We carried out its proof-of-concept experiments at the J-KAREN laser system. And, the iron which is simulated the produced exotic nucleus were extracted by the laser from aluminum membrane.

### 1. はじめに

2000年に米国ローレンスリバモア研究所で、最高エネルギー58MeV陽子が固体薄膜ターゲットとkJ・PWクラスのガラスレーザーの相互作用によって生成<sup>[1]</sup>した事を皮切りに、高強度レーザーと物質との相互作用によるレーザー駆動イオン加速研究の研究が始まった。

10<sup>20</sup>W/cm<sup>2</sup>を超えるようなエネルギー密度を持つ高強度レーザーと物質の相互作用によって発生する電荷分離電場を利用したイオン加速<sup>[2]</sup>、既存の高周波(RF: Radio Frequency)加速器施設におけるRFと加速空洞を用いた加速装置が作りだす電場と比較にならない電場強度(~1TV/m)が達成可能で、ターゲット裏面に生じる局所的な加速電場により陽子を数十MeVまで加速することが可能である。原子力機構関西研では、医療応用に向けたレーザー駆動型粒子線装置の開発を目指し<sup>[3]</sup>、様々な技術開発を行ってきており、2012年には繰り返しレーザーショットが可能なフェムト秒パルスをもつチタンサファイアレーザーにより40MeVを超える陽子発生に成功<sup>[4]</sup>、超小型サイズのレーザー駆動イオン加速器ベースの粒子線治療装置の実現可能性が現実味を帯びてきた。

一方で、原子力機構におけるミッションとしては原子力工学への貢献も踏まえた検討を行う必要があり、福島第一原発の収束に関わる研究もさることながら、今後国家プロジェクトとして推進していくことが見込まれている核変換用加速器駆動型未臨界炉システム(ADS)<sup>[5]</sup>を実現するにあたり、

・炉設計の精度向上のために必要なマイナーアクチ

ニドの高速中性子反応断面積

- ・未臨界炉での核変換後の核種生成量分布
- ・未臨界炉内での生成核種が高速中性子・高エネルギー陽子衝突反応によってさらに長寿命なアイソマーに変化することはないか?

などがまだ理論的にも実験的にも、明確なデータが示されていない状況で、ADSの工学的実証と並行してそれらの取得を目指していく必要がある。同様に、原子核工学以外の分野である原子核物理学や宇宙物理学などでは、短寿命核種や超重元素研究においても、現状の加速器技術では到達できないフロンティア領域にある原子核反応データや核構造データを包括に取得することが望まれている。そのため我々は、レーザーイオン加速手法を、医療応用を目指した陽子加速に限定することなく、重イオン加速手法にも適用することで工学や基礎科学で要望があるフロンティア領域にある重イオンを計測可能にするという新技術開発の提案ができないかを探ることにした。

### 2. 不安定核種ビーム生成

ここではADSを例に挙げて不安定核種ビーム生成について説明する。ADSのように、マイナーアクチニド燃料を核変換するに当たり、燃料や燃料から生成される核分裂生成物の核特性を精度よく把握するには、I)生成された核種ごとに純度の高いターゲットを作りあげ(たとえばセシウムの不安定同位体)、そのターゲットに加速器で高エネルギーの陽子ビームなどを照射して核データを取得、II)加速器で多種多様な核生成物ビームを作り高エネルギーに加速し、水素が多く含まれるターゲット

<sup>#</sup> sakaki.hironao@jaea.go.jp

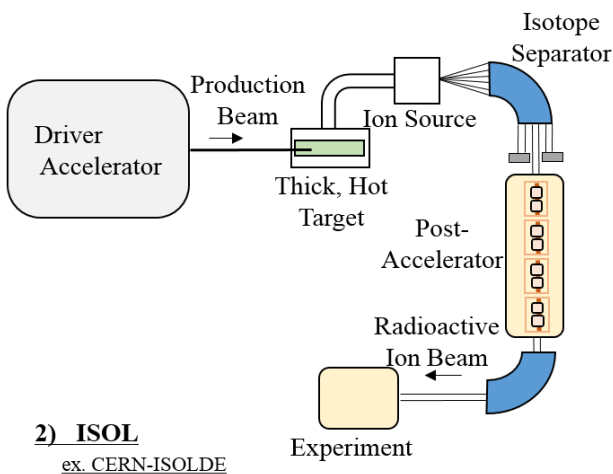
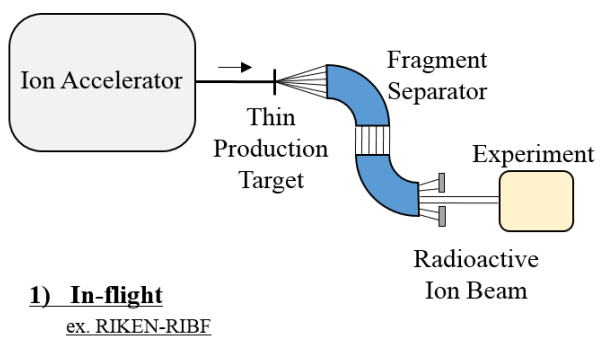


Figure 1: The in-flight (1) and ISOL (2) production mechanisms for radioactive beams.

に照射、反応を計測し逆運動学的に解析する手法となる。ADS に関わる元素において網羅的に核データを取る際、I) 手法においては、ADS の核変換で生成される多種多様の核種（特に短寿命核種）のターゲットを個別に生成していくことは困難であると容易に想像できる。不安定核種ビーム生成の II) 手法においては、一般に図 1 の In-flight 法と ISOL 法が使われるが、両者には一長一短があり、核データを整備する上で取得できない核種も存在する。そのため、不安定核種データ収集に関する新規基盤技術の提案が望まれる。

### 3. レーザー駆動イオン加速を用いたオンライン・イオン引き出し技術の提案

我々は、不安定核種の核データ取得のために、レーザー駆動イオン加速技術を利用した、「In-flight 法や ISOL 法による技術の欠点を補完する新規基盤技術」を提案する<sup>[6]</sup>。これは図 2 に示すように、In-flight 法と ISOL 法の両者技術を、レーザー技術で補完したようなシステムであり、ターゲットに加速器からプロダクト生成用ビームを照射し、そこに生成された短寿命核種のプロダクトを、レーザー加速技術で一気に引き出し、下流のセパレータ

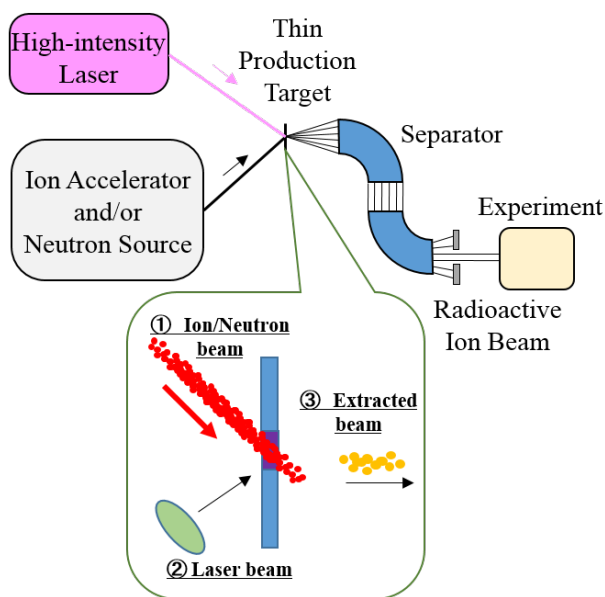


Figure 2: Online beam extraction method for the exotic nuclei.

で核種を弁別し計測を行うという、レーザー技術と既存加速器技術が融合されたアイデアである。

### 4. 提案手法の概念実証実験

本手法の概念実証実験を原子力機構関西研の J-KAREN レーザーで行った。今回は  $0.8 \mu\text{m}$  厚さのアルミ薄膜に、加速器ビームによる生成核種を見立てた鉄を表面近傍に微量付着させ、それを高エネルギーかつ指向性を持たせて引き出すことで実証実験とした。本概念実証実験の詳細および結果については、ここでは記載しない。我々の Arxiv 投稿<sup>[6]</sup>を参照していただきたい。

### 5. おわりに

今回、重イオン加速の新たな基盤技術を提案し、その概念実証実験の成功によって、この技術の応用展開の可能性を示すことに成功した。今後は、詳細な実験を繰り返し、最適パラメータを求めたうえで、加速器を用いた原理実証試験を目指し、原子力工学や基礎科学のフロンティアに貢献、新たな知見を創成していくことで、次の世代の発展を支える。

### 参考文献

- [1] R. A. Snavely, et al., Phys. Rev. Lett. **85**, (2000) 2945.
- [2] S. P. Hatchett, et al., Phys. Plasmas **7**, (2000) 2076.
- [3] H.Sakaki, et al., Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010) 312.
- [4] Koichi Ogura, et al., Optics Letters, Vol. 37, **14**, (2012) 2868.
- [5] K.Tsujimoto, H.Oigawa, K.Kikuchi, et al., Nucl. Tech., **161**, (2008) 315.
- [6] M.Nishiuchi, H.Sakaki, K.Nishio, et al., <http://arxiv.org/abs/1402.5729> (2014).