

プログラム名：核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化

PM名：藤田 玲子

プロジェクト名：核反応データ取得及び新核反応制御法

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 2 7 年 度

研究開発課題名：

レーザー駆動多価重イオン加速手法を用いた

核種分離等の基盤技術の開発

研究開発機関名：

日本原子力研究開発機構

研究開発責任者

榊泰直

# I 当該年度における計画と成果

## 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

### 核種分離を目指した既存のレーザー駆動多価重イオン加速手法の基本特性の定量評価

平成 27 年度では、レーザー駆動多価重イオン加速が有する基本能力を定量評価することを目指す。すなわち、既存のレーザー駆動加速技術で得られている知見を必要最低限のみ踏まえた照射ターゲットを設計・製作し、また、それらに対するレーザー照射条件を最適化しながら、引き出されるイオンのエネルギースペクトル、イオン価数分布、発散角度等を計測し、本技術の基本特性を定量的に評価する。(ただし、J-KAREN レーザーが現状高度化改修中であり、実験時期は平成 27 年度中旬くらいとなる予定)。ここでは LLFP を用いず、安定同位体で重イオン加速試験 (Au、Pd、Pt、Ag) を行う。加速効率を上げるために、炭素の母材 (厚みマイクロンレベル) に制御された厚みの被加速粒子 (安定同位体) のレイヤー (数十ナノメートルレベル) からなる 2 層構造の照射ターゲットを設計し、理研にて製作する。そして、照射ターゲットのパラメータ (母材厚み・被加速粒子のレイヤーの厚み) を変えて、様々なレーザー条件で実験を行う。この時、ターゲット上に生成された加速場を形成するプラズマの密度、プラズマより発生する電子線、X 線、重イオンビームの計測も同時に行い、目的核種引き出しに対してのエネルギー変換効率が良い最適条件を把握する。イオンの検出には、既存の固体飛跡検出器、及び銅 (シリコン) 等の放射化法の併用を考えている。

## 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

### 2-1 進捗状況

当該実験においては、利用する共用レーザーの改修が大幅に遅れ、進捗に半年程度の遅れを生じたが、実施された実験から得られたデータとシミュレーション計算によりフィージビリティ評価に必要な検討を実施した。

### 2-2 成果

#### 2-2-1 現時点で利用可能なレーザー駆動イオン加速手法による核変換手法とその変換量の評価

レーザー駆動イオン加速手法は、大きく分類するとレーザーをターゲットに照射することで「ターゲット表面上の不純物 (おもに陽子)」を加速する手法と、「ターゲット自身を加速する重イオン加速」の 2 種類がある。一般に、加速器ビームによる核変換手法としては、陽子による核変換手法が十分に議論されてきており、核変換を現実的に実施する際に要求される加速ビーム電流は、アンペアクラスであることが明確になっている。レーザー駆動加速手法による加速でアンペアクラスの加速ビームを生成することは、現状の技術では不可能であると言える。そこで、我々は、ターゲット自身を加速する「重イオン加速手法」に注目し、その核変換量を得ることにした。これは、図 1 で示すように、

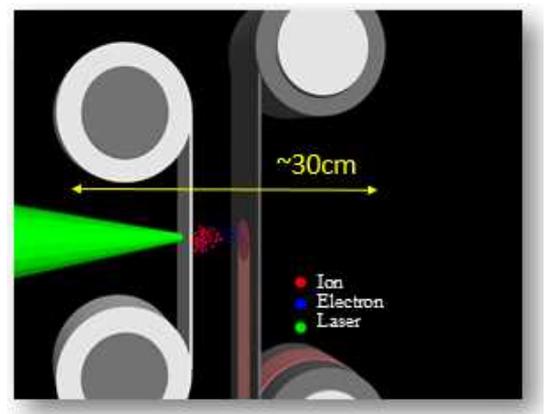


図 1 : 核変換装置イメージ

ロール状にまかれたターゲット中心部にレーザーを照射し重イオンを高エネルギーまで加速し、下流側に

設置されるリール上のキャッチャーに衝突させる手法である。レーザー加速ターゲットとキャッチャー間に、加速電圧発生装置やビーム収束用直流電磁石を設置が不要であり、レーザーで加速したターゲット物質をそのままキャッチャーに衝突させることが可能である。次に、この方法の基本能力の定量化のためのフィジビリティ評価としての核変換量の見積もりを実施した。具体的には、このような構造を持つ装置にて、準単色エネルギーの重イオン加速 ( $^{107}\text{Pd}$  について計算する) が行われ、炭素キャッチャーに衝突させて核変換を実施という想定で、粒子輸送コード PHITS にて計算した。また、検討条件として

- ・核変換の際に、加速ビームである  $^{107}\text{Pd}$  自身が、その変換処理過程において増えないこと
- ・ $^{107}\text{Pd}$  自身の反応率が 1 を超えること

の 2 点を尺度とした。

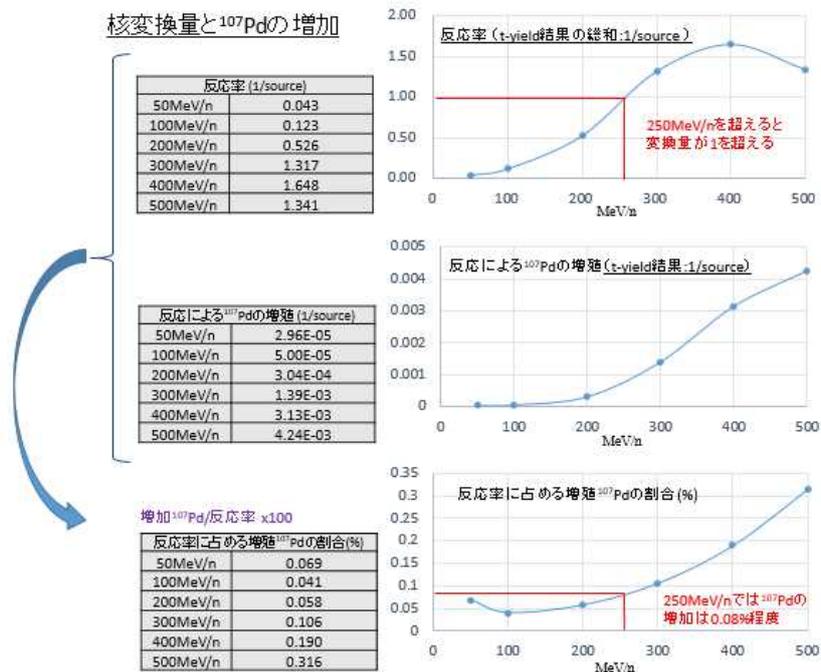


図 2 :  $^{107}\text{Pd}$  を加速ビームとして用いた際の核反応率の計算結果

表 1: 1PW レーザーでの  $^{107}\text{Pd}$  の変換数

1PW レーザーの能力		
ジュール数/shot	30	J
パルス幅	30	fs
集光径	5	um(radius)
ピーク電力	$1.27 \times 10^{21}$	W/cm2
$^{107}\text{Pd}$ 核子エネルギー	250	MeV/n
$^{107}\text{Pd}$ -Mass	107	
$^{107}\text{Pd}$ -Total energy	26750	MeV
30Jでの加速可能個数	$7.01 \times 10^9$	個
くり返し(0.1Hz⇒10Hz)	~10	Hz
加速可能個数	$7.01 \times 10^{10}$	個/s
ビーム量	11.215	pnA
	$2.21 \times 10^{18}$	個/年

図 2 に計算結果を示す。上図の反応率からは「 $^{107}\text{Pd}$  の加速エネルギーが 250MeV/n を超えると反応率が 1 を超えること」が理解され、中図からは「200MeV を超えると、キャプチャーとの反応によって  $^{107}\text{Pd}$  が再生成される」ことが理解される。最後に下図からは、上中図から「反応率に占める  $^{107}\text{Pd}$  が再生成される割合は 0.85%程度である」ということが理解される。以上より、反応率が 1 を超え最も  $^{107}\text{Pd}$  が増殖しないエネルギーを  $^{107}\text{Pd}$  の加速エネルギーの目標値として設定し、現在の技術で到達している 1PW (10Hz で 30J が照射ターゲット上に集中) のレーザー 1 台で、どの程度の数の  $^{107}\text{Pd}$  を加速することができるかを推測した。ここでは、すべてのレーザーエネルギーが  $^{107}\text{Pd}$  の加速エネルギーに変換されるといふ極限的な条件を与えて計算した。表 1 に結果を示すが、 $2.21 \times 10^{18}$

個という数が加速される。

$^{107}\text{Pd}$  は 1 基の炉内では 1 年間で約 7kg 生成される ( $4.12 \times 10^{25}$  個) ので、現状技術では 1 年間では変換率 1 として  $2 \times 10^{18}$  個が処理される計算で、つまり『炉 1 基の 1 年分の  $^{107}\text{Pd}$  の全量変換には  $10^7$  年』かかるという評価となり現実的でないことが明らかとなった。

### 2-2-2 照射ターゲットの開発

目標値の 250MeV/n の重イオンを効率的に発生させるには、レーザー照射ターゲット表面に加速電場が最も高くなる部分に加速対象の元素を集中させることが一つの解として考えられる。これは、図 3 に示すような、ターゲット表面に有機体のマイクロドットを設置したターゲットで、電場集中による局所加速を発生させ準単色の陽子ビームを得たという先行研究からの知見を応用したアイディアである。そこで、重イオン加速に適したレーザー集光サイズ (数  $\mu\text{m}$ ) の金属マイクロドットをターゲット表面に設置する手法を検討し、理研にて、硬度と熱伝導効率の両方が高く、マスク穴を開けても変形しにくいカーボングラフェン・マスクを用いたマイクロドット金属ターゲットの試作を行った。

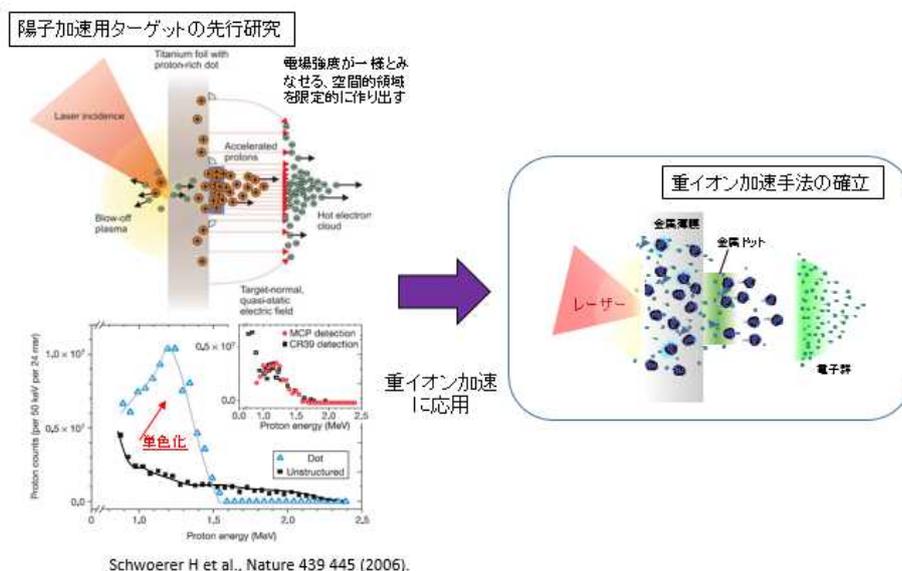


図3: ドットターゲットによる準単色化の例(左)と、それを重イオン加速に応用した際のイメージ(右)

### カーボン膜による蒸着マスク法の開発

#### ドットターゲット開発 (蒸着マスク法)

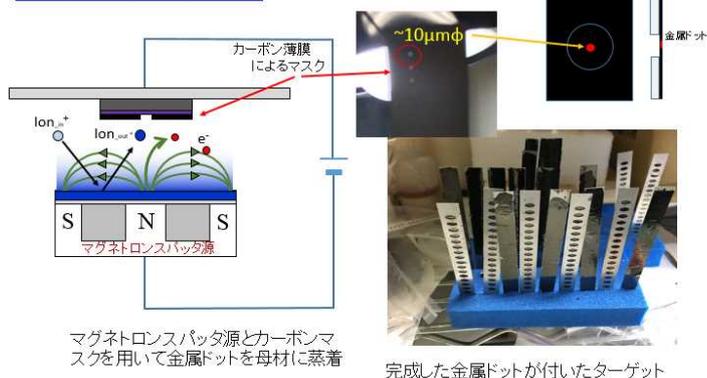


図4: カーボングラフェン・マスクによる蒸着法

マイクロドット金属を生成させる方法として、ミクロン厚さのカーボンシートにレーザー加工にて  $\mu\text{m}\phi$  の穴をあけたものを用意し、そのシートを蒸着用マスクとして利用する方法を検討し、試作した。穴のサイズは、 $100\mu\text{m}\phi$  から  $5\mu\text{m}\phi$  まで用意し、Au 10.5nm、Ti 17.7nm 厚さのドットを基板上に作製することに成功した。

### 2-2-3 実験計測系の準備と陽子加速による加速電場の最適化

加速される重イオンビームの加速効率等の定量化に向けて、レーザー駆動加速実験を行った。

#### 実験計測系の準備

レーザー改修終了後のレーザー加速実験を行うために計測装置（イオン、電子、X線線量等）を準備し、平成27年12月に2日間のマシンタイムを得て、レーザー駆動陽子加速による陽子ビームを用いて、計測器およびレーザー光パラメータ条件の問題点の洗い出しを実施した。この期間では、陽子が最大7MeV程度のエネルギーまで加速された。その後、再び、レーザーの問題点についての改修に入った。

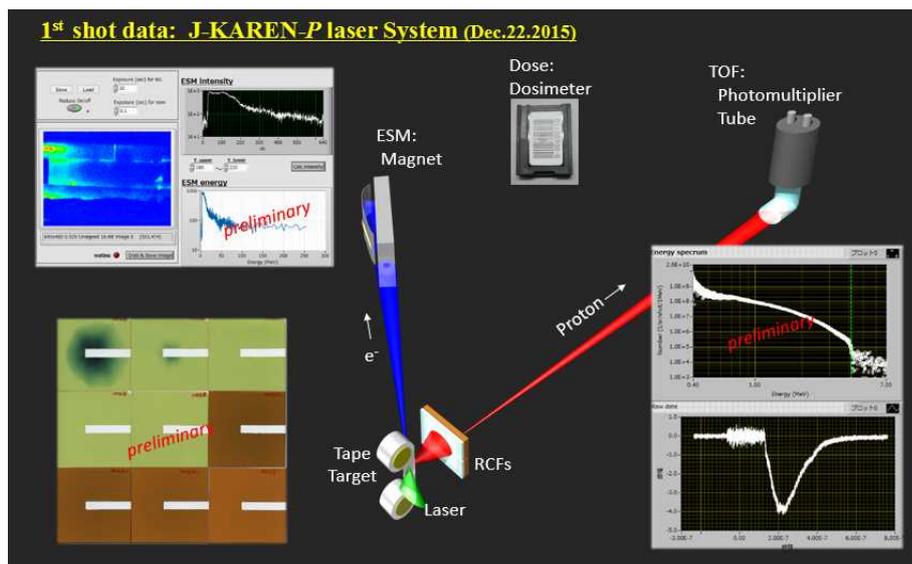


図5: 問題点洗い出しのためのファーストショット時の計測システム図

#### 陽子計測による加速電場の最適化

平成28年3月に1週間のマシンタイムを得て、陽子計測を行いながら加速電場の最適化を実施した。最適化実験では、レーザー集光点最適化、レーザー強度に対するターゲット種類およびその厚さのパラメータスキャンを実施することで、大改修後のレーザー光の特性および、イオン加速電場の最適状態が調査され、重イオン加速に向けた知見が得られた。

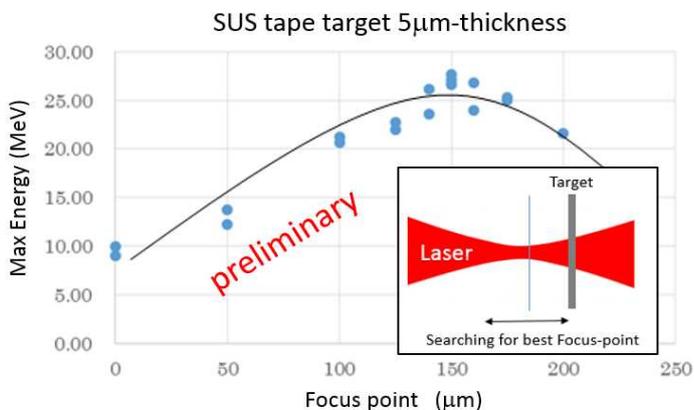


図6: レーザー焦点の最適化時の陽子エネルギーの変化

最適状態が調査され、重イオン加速に向けた知見が得られた。図6に、SUS-5 $\mu$ m厚さのテープターゲットを使った陽子加速実験の結果の1例を示す。横軸にレーザー集光点を移動させた際の距離、縦軸にその時の陽子の最高エネルギーを示す。SUS-5 $\mu$ m厚では150 $\mu$ mの点に最適電場を発生させる条件が見て取れる。物理メカニズムの解析等を行い、電場強度の制御法を確立していく。

### 金薄膜によるレーザー駆動重イオン加速の予備実験

金は単体では光沢のある黄色い金属であるが、金コロイド状微粒子にすると主に黄色と赤色を反射し青を吸収することで、10 ナノメートル程度の微粒子の場合は概ね赤色（ルビー色）に見える（図7）。この現象を利用すれば、レーザーを金薄膜に照射するによって金イオンが加速されているかを容易に目視できる。しかし、レーザーによって加速された金が、実際に赤色の微粒子としてキャッチできるかは、加速される金の個数分布に依存するので、実際に計測できるかどうかについては理解されていなかった。



図7: 金の粒子サイズによる色の違い

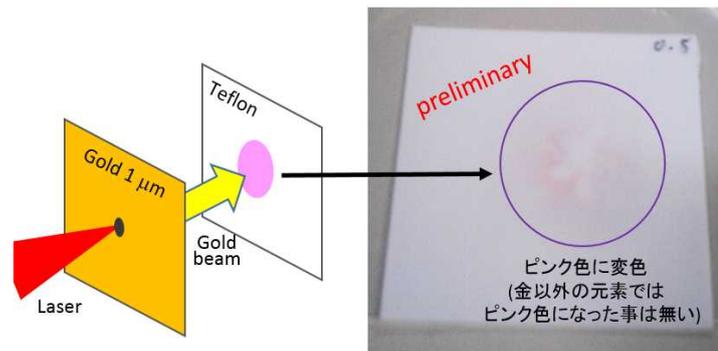


図8: テフロンシート上で観測された金ビームプロファイル

そこで、本格的に重イオン（金）を加速する前の予備実験として、金薄膜（1 $\mu$ m厚）に対して、高強度レーザーを照射して金を加速し、そのビームプロファイルをテフロンシートでキャッチすることを行った。

図8に、その結果を示す。金ビームプロファイルは、テフロンシートで受け止められた。その結果、図8の右に示されるように、金イオンが照射された部分がピンク色に変色し、その形がくっきりと認識できることがわかった。金以外の元素、例えば鉄やアルミを同様にキャッチしても色の変化は起こらない。これらのデータの解析手法を確立しなければならないが、確立することが出来れば、どの程度の金が加速されたのかが定量化可能となる。

なお、今年度は2-2-2節で製作したPdのドットターゲット、また、PtやAgのターゲットで計画したが、施設の状況を考慮し、金薄膜で必要な試験を実施した。

### 2-3 新たな課題など

今後本技術を核変換へ適用する場合には、重イオンのイオン価数とエネルギー分布が同時に求められる求める手法（トムソンパラボラ）を使って、更に詳細なビーム性能を把握しながら、順次PdやPt等のターゲットを加速していくことで、レーザー駆動による重イオン制御手法の知見を得なければならない。さらに、新しい核変換現象の探求として、金ビーム自身が、レーザー加速メカニズムの中で核変換した後に加速するような現象が存在しないのか？等も確認する必要がある。

## 3. アウトリーチ活動報告

特になし。