

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 27 年度

研究開発課題名：

クーロン分解法による核反応データの取得

研究開発機関名：

東京工業大学

研究開発責任者

中村 隆司

# 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

原子炉で生成される長寿命の核分裂生成物(LLFP)の反応率の中でも、光吸収反応断面積や中性子捕獲断面積の導出は重要である。しかし、LLFP に対するこうした断面積を直接測定することは LLFP が放射性物質であることから技術的に難しいため、代替方法の検討が必要である。そこで、本研究では、LLFP そのものを不安定核ビームとしたクーロン分解反応を用い、LLFP の光吸収断面積の導出を行う。さらに逆反応の中性子捕獲反応断面積の評価法の確立も目指している。実際には、理化学研究所の仁科加速器研究センターの世界的な不安定核拠点施設 RI ビームファクトリー(RIBF)において、LLFP( $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{79}\text{Se}$ )を不安定核ビームとして生成し、RIBF の ZeroDegree Spectrometer および SAMURAI Spectrometer を使用してクーロン分解反応を測定し、得られるクーロン分解反応断面積から LLFP の光吸収断面積の導出を行う。

平成 27 年度は、前期に RIBF の ZeroDegree Spectrometer によって  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{107}\text{Pd}$  のクーロン分解反応を測定し、後期には SAMURAI Spectrometer によって  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{93}\text{Zr}$  のクーロン分解反応を測定する。後者の実験では、平成 26 年度に導入したドイツ GSI 研究所の中性子検出装置 NeuLAND を使用する。これらの実験研究は、プロジェクト 2 の研究開発機関、理化学研究所、九州大学と共同で行う。

## 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

LLFP である  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{107}\text{Pd}$  とその周辺核( $^{80}\text{Se}$ ,  $^{94}\text{Zr}$ ,  $^{108}\text{Pd}$ )を研究対象とし、光吸収反応( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, xn$ )の断面積取得を目的としたクーロン分解反応実験を RIBF において前期・後期と分けて行った。前期は平成 27 年 3 月 26 日から 4 月 7 日にかけて実施し、ZeroDegree Spectrometer を使用して反応後の励起状態を特定しないインクルーシブ測定を行った。後期は平成 27 年 10 月 20 日から 11 月 3 日にかけて実施し、SAMURAI Spectrometer を使用して反応後の励起状態を特定するエクスクルーシブ測定を行った。後者の実験では反応後に放出される中性子を同時測定し、荷電粒子測定と合わせて励起状態を特定し、LLFP と周辺核の電気双極子励起のスペクトルを得ることが目的である。そのために、既存の中性子検出器 NEBULA に加えてドイツ重イオン研究所 (GSI) より新型の中性子検出器 NeuLAND を導入し、中性子検出効率の増強を図った。NeuLAND は GSI の研究者・技術者により整備が行われ、本実験で使用した。

前期に行った実験の解析はおおむね終了し最終結果をまとめる段階となっている。また後期に行った実験データについては現在解析コードの整備などを進めており、データ解析を平成 28 年度に行う予定である。

### 2-2 成果

研究対象の  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{107}\text{Pd}$  およびその周辺同位体( $^{80}\text{Se}$ ,  $^{94}\text{Zr}$ ,  $^{108}\text{Pd}$ )は、RIBF の重イオン加速器で加速した  $^{238}\text{U}$  ビーム(核子あたり 345MeV)の飛行核分裂により生成され、RI ビーム生成分離装置 BigRIPS で分離・識別した。これらの LLFP および同位体を核子あたり約 200MeV の二次ビームとして供給し、反応標的である鉛と炭素に照射して分解反応を測定した。分解反応により複数個の中性子と重い荷電粒

子が放出される。前期の実験では、荷電粒子のみを ZeroDegree Spectrometer を用いて同定し、インクルーシブなクーロン分解断面積を測定した。また後期の実験では、SAMURAI Spectrometer を使用し、荷電粒子を荷電粒子検出器、中性子を中性子検出器 NEBULA と NeuLAND で測定した。

・  $^{93,94}\text{Zr}$  および  $^{107,108}\text{Pd}$  のクーロン分解反応実験

平成 27 年 3 月 26 日から 4 月 7 日にかけて  $^{93,94}\text{Zr}$  および  $^{107,108}\text{Pd}$  のクーロン分解反応の実験を行い、約 2 日間のマシンタイムで計画通り効率よく測定することができた。これまでに行った解析から、各データセットが期待通りに取得できていることを確認した。

実験データを解析し、鉛および炭素標的における分解反応断面積を導出した。鉛標的を使った分解反応では、クーロン力による反応と核力による反応が含まれる。この核力の寄与を差し引くために炭素標的の断面積を用いて補正を行い、クーロン分解反応断面積を導出した。

得られたクーロン分解反応断面積を評価するために、グローバルパラメータで計算できる光吸収断面積や先行研究との比較を行った。特に、先行研究がある  $^{94}\text{Zr}$  の光吸収断面積と比較を行い、実験で得られたクーロン分解反応断面積の結果を説明するには、従来から重要と考えられてきた E1 励起（電気双極子励起）に加えて、E2 励起（電気四重極励起）の効果を考慮する必要があることを明らかにした。以上の成果を 2015 年秋と 2016 年春の日本物理学会で報告した。

・  $^{79,80}\text{Se}$  および  $^{93,94}\text{Zr}$  のクーロン分解反応実験

平成 27 年 10 月 20 日から 11 月 3 日にかけて  $^{79,80}\text{Se}$  および  $^{93,94}\text{Zr}$  のクーロン分解反応実験を SAMURAI Spectrometer を用いて行った。約 3.5 日間のマシンタイムで測定を行い、荷電粒子検出器・中性子検出器 NeuLAND, NEBULA が正常に稼働していることを確認し、計画通りに測定を行うことができた。

現在、解析コードの整備などを進めており、平成 28 年度に解析を始める予定である。

## 2-3 新たな課題など

鉛と炭素を標的とした分解反応断面積からクーロン分解反応断面積を導出するが、このときに核力の寄与を差し引く必要がある。これまで幾何学的方法を用いて見積もりを行ってきたが、系統誤差が大きくなってしまふ。系統誤差の低減を図るため、反応計算などを用いた方法などを検討し精度の向上を狙う。

前期の実験データ評価では断面積を積分値で導出しているため、クーロン分解反応に含まれる E2 励起の寄与の見積もりには理論的予測が必要である。プロジェクト 3 と共同研究によって理論的予測の精度を向上するとともに、E2 励起の寄与を実験的に知ることのできる後期の実験データ解析を進め、今後の断面積導出の精度を向上させる。

平成 28 年度以降には、光吸収断面積から中性子捕獲反応断面積の導出を行う手法の確立を目指している。そのため、核反応計算に必要な計算コードの整備、計算過程に必要な  $\gamma$  線強度関数や準位密度などについての先行研究をまとめ、問題点や課題を調査し、中性子捕獲反応断面積の導出手法を確立する。

## 3. アウトリーチ活動報告

なし