

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 8 年 度

研究開発課題名：

高速中性子核破碎反応に関する研究

研究開発機関名：

九州大学

研究開発責任者

渡辺 幸信

# 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

本研究開発課題では、高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命核分裂生成物(LLFP)の核変換の合理的な反応経路を提案するために、高速中性子及び陽子・重陽子入射核破砕反応の新規データを取得すること、並びに高速中性子ビーム発生に必要な核反応データを取得することを目的とする。それぞれの項目に対する当該年度の目標・計画は以下の通りである。

### [理研 RIB F における核破砕反応データの取得]

- 1) 前年度、インフライトセパレータ BigRIPS と広アクセプタンス多粒子スペクトロメータ SAMURAI を用いて実施した実験 ( $^{93}\text{Zr}$  および  $^{79}\text{Se}$  ビームと陽子・重陽子標的との核破砕反応で生成した残留核と中性子との同時計測を行い、両者の関連データを取得) のデータ解析を進め、110 および 200 MeV/u での同位体生成断面積および放出中性子の角度・エネルギー分布を導出する。
- 2)  $^{93}\text{Zr}$  および  $^{79}\text{Se}$  に対して、入射 RI ビームエネルギー50 MeV/u における陽子・重陽子標的による核破砕同位体生成のデータ測定を行う。さらに、LLFP として測定が要望されている  $^{126}\text{Sn}$  に対しても 100 及び 200MeV/u 入射の追加データ取得を行う。
- 3) これまで理研 RIBF で取得した測定データの理論モデル解析を継続して行い、プロジェクト3の核反応理論モデル・シミュレーション担当チームの研究開発成果に基づいて、陽子と重陽子に対する実験データから中性子入射に対する断面積データを導出する解析手法を検討する。

### [高速中性子生成反応データの取得]

- 4) 大強度加速器を利用した高速中性子ビーム生成に必要な核反応データである重陽子入射中性子生成の実験を、阪大核物理研究センター (RCNP) と九大加速器・ビーム応用センターにて行う。前者では、200 MeV の重陽子ビームを用いて Li に対する高速中性子生成二重微分断面積(角度・エネルギー分布)の測定を行う。後者では、厚い Li や C 等の標的に 5~15 MeV まで加速した重陽子を入射して、放出される高速中性子収量のエネルギー・角度分布を測定する。

## 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

- 1) SAMURA データ解析については 200MeV/u の  $^{93}\text{Zr}$  のデータ解析を優先し、まずは同位体生成断面積の導出に向け、各検出器の較正を行い、生成同位体イオン識別の分解能向上に向けた検討を進めている段階で最終的な断面積データ導出までは至っていない。また、中性子データの解析の方は未着手の状況である。
- 2) 平成28年10月17日~27日までの期間、理研 RIBF において ZeroDegree スペクトロメータを使用して、 $^{93}\text{Zr}$  および  $^{79}\text{Se}$  (入射エネルギー50 MeV/u) と  $^{126}\text{Sn}$  (100, 200MeV/u) の核破砕同位体生成のデータ取得実験をプロジェクト2の理研及び東工大グループとの共同実験として実施した。 $^{93}\text{Zr}$  の予備的な実験データ解析を行った段階で、最終的な断面積データ導出には至っていない。
- 3) 核破砕データの理論モデル解析の方は、PHITS コードを INCL+GEM モデルを使って実施しており、前年度に同位体生成断面積データの導出を終えた 100MeV/u の  $^{93}\text{Zr}$  と  $^{93}\text{Nb}$  の陽子・重陽子入射核破砕反応の理論モデル解析で概ね実験値を再現できることを示したが、INCL および GEM におけるいくつか

の問題点を明らかにした。また、陽子と重陽子に対する実験データから中性子入射に対する断面積データを導出する解析手法については、INCL+GEMモデルを改良しながら検討している段階である。

- 4) 平成29年1月18日～19日、九大加速器・ビーム応用研究センターにおいて、厚い標的からの12MeV重陽子入射中性子生成の予備実験を実施した。標的にLiFとCを選択し、有機液体シンチレータを用いて0度における放出中性子エネルギー分布を測定した。C標的については、先行実験データとの良い一致が得られ、本測定の妥当性を確認できた。また、平成29年3月9日～12日の期間、阪大RCNPにてLiに対する200MeV重陽子入射中性子生成二重微分断面積測定実験を実施した。有機液体シンチレータを用いた飛行時間法を適用して、放出角度0度から25度まで5度おきでの放出中性子エネルギー分布を測定した。

## 2-2 成果

- 1)  $^{93}\text{Zr}(200\text{MeV/u})$ のSAMURAI実験データ解析を進め、各検出器の較正や生成同位体イオン識別の分解能向上に向けた検討を行い、同位体生成断面積導出の見通しを得た。また、最終的な断面積導出に向け必要な詳細解析の内容を整理した。
- 2) ZDSスペクトロメータを用いて、 $^{93}\text{Zr}$ 及び $^{79}\text{Se}$ （いずれも入射エネルギー50MeV/u）、 $^{126}\text{Sn}$ （100MeV/uと200MeV/u）と陽子・重陽子標的との核反応による同位体生成実験を実施した。 $^{93}\text{Zr}$ （50MeV/u）に対するデータ解析を行い、予備的な同位体生成断面積（ZrとY同位体のみ）の測定値を得た。
- 3) PHITSに組み込まれているINCL+GEMモデルは、昨年度測定した $^{93}\text{Zr}(105\text{MeV/u})$ と $^{93}\text{Nb}(113\text{MeV/u})$ の陽子・重陽子入射核破砕反応データを概ね再現できることが分かった。しかし、詳細な比較・解析から、中性子や陽子ノックアウト反応後の生成同位体の断面積を過大評価することがわかり、これはINCLモデル中の核子運動量分布の扱いに問題があることを見出した。さらに、計算には、同位体の質量数が奇数・偶数で断面積値がジグザクする効果（even-odd staggering）が見られるが、実験データにはそのような効果は顕著に観測されていない。これは、GEMにガンマ線と粒子放出の競合が考慮されていないことが一因であることを明らかにした。
- 4) 高速中性子生成反応データ取得に関しては、LiFおよびC標的等に対する12MeVの重陽子入射中性子生成予備実験を行い、アンフォールディング法によるデータ解析によって0度における放出中性子エネルギー分布データを得た。阪大RCNPでは、Li標的に対する200MeV重陽子入射中性子生成二重微分断面積の測定を行い、予備的なデータ解析を終え、0度における二重微分断面積データを導出できた。

## 2-3 新たな課題など

特になし。

## 3. アウトリーチ活動報告

今年度の研究開発成果に対して行ったアウトリーチ活動は特になし。