

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 9 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：

国立大学法人九州大学

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 RIBF における核破砕反応データの取得]

- 1) SAMURAI データ解析：H27 年度、理研・RI ビームファクトリー (RIBF) の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のデータ解析 (担当： ^{93}Zr) をさらに進め、110 及び 200 MeV/u での同位体生成断面積及び放出中性子の角度・エネルギー分布を導出する。合わせて、PHITS に実装されている核破砕反応理論モデル (INCL と GEM) の検証を行い、必要に応じて、モデルの改良に取り組む。
- 2) ZDS データ解析：H28 年度、理研 RIBF において BigRIPS と ZeroDegree スペクトロメータ ZDS を用いて実施した 50MeV/u 実験のデータ解析を進め、同位体生成断面積を導出する。H26,27 年度に測定した ^{93}Zr (105, 200 MeV/u) を含めた理論モデル解析も行い、核破砕反応の入射エネルギー依存性を調査する。また、H26～H27 年度の ZDS 実験で取得されている LLFP 周辺核 (例えば、 $^{91,92}\text{Y}$ 等) に対する実験データも解析し、核破砕反応に与える中性子魔法数 50 の殻効果を調査する。
- 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]

- 1) 前年度、阪大核物理研究センター(RCNP)で実施した 200 MeV 重陽子入射高速中性子生成実験データの解析を行い、Li 標的に対する中性子生成二重微分断面積 (角度・エネルギー分布) を導出する。さらに、九大加速器・ビーム応用科学センターにて、厚い LiF や C 等の標的に 5～14 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) 上記の新規データに、先行研究の実験データ (25, 40, 100MeV) を加え、理論モデル計算コードシステム DEURACS を用いた理論解析を行い、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と協働して、200MeV までの重陽子入射中性子生成二重微分断面積データベースを作成する。

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) SAMURAI データについては、200MeV/u の ^{93}Zr のデータ解析を実施。まずは同位体生成断面積の導出を完了し、前年度の 105MeV/u の測定結果や PHITS 計算との比較を行った。さらに、放出中性子データに対する解析方法の検討を開始した。
- 2) ZDS データについては、50 MeV/u の ^{93}Zr データ解析を実施し、同位体生成断面積のデータ導出に向けた予備解析を終了した。同時に、H26～H27 年度の ZDS 実験で取得されている LLFP 周辺核 ($^{91,92}\text{Y}$, ^{92}Zr , ^{94}Nb) に対するデータ解析を完了し、 ^{93}Zr と ^{93}Nb データも加え、核破砕反応に与える中性子魔法数 50 の殻効果の系統的な調査を進めている。

- 3) 核破砕反応データの理論モデル解析については、継続して PHITS コード搭載の INCL+GEM モデルを使って実施した。これまで取得した同位体生成断面積データの実験値を概ね再現できることを確認し、INCL および GEM におけるいくつかの問題点を抽出することで GEM の改良を継続して試みた。また、本測定データをプロジェクト 3 チームに提供し、中性子核データファイル ImPACT/LLFP-2018 作成に使用する CCONE コードの理論モデル改良やパラメータ決定に利用された。
- 4) 九大加速器・ビーム応用科学センターにおいて、厚い標的に対する 13.4MeV 重陽子入射中性子生成実験を実施した。標的に LiF, C, Si 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。本測定データを核子当たりの入射エネルギーが同じ(t,xn)反応データと比較し、中性子生成量に対する入射粒子（重陽子と三重陽子）の違いを検討した。
- 5) 前年度、阪大 RCNP で実施した 200MeV 重陽子入射中性子生成実験のデータ解析を完了し、前方角 0 度～25 度までの中性子生成二重微分断面積を導出した。先行研究の実験結果と合せて、25～200MeV 領域における入射エネルギー依存性を調査した。PHITS 計算や DEURCAS 計算との比較も行った。

2-2 成果

- 1) 前年度データ解析が完了した $^{93}\text{Zr}(105\text{MeV/u})$ データに対して Prog. Theor. Exp. Phys 誌に論文発表を行った。この論文の Web 公開時に実施したプレス発表の結果、新聞などで 4 件の報道に取り上げられた。
- 2) $^{93}\text{Zr}(200\text{MeV/u})$ の SAMURAI 実験データ解析を進め、最終的に陽子・重陽子入射核破砕反応による同位体生成断面積データを導出した。PHITS 計算は概ね実験値を再現することがわかった。
- 3) $^{93}\text{Zr}(50\text{MeV/u})$ の ZDS 実験データ解析を実施し、陽子・重陽子入射に対する同位体生成断面積の予備的な測定値を導出した。さらに、LLFP 周辺核 ($^{91,92}\text{Y}$, ^{92}Zr , ^{93}Zr , ^{93}Nb , ^{94}Nb) に対するデータ解析も完了し、中性子数 $N=50$ 近傍領域に対して、陽子・重陽子入射の同位体生成断面積の系統的な実験データを得ることができた。
- 4) PHITS に組み込まれている GEM モデルに対し、より適切な逆反応断面積経験式の選択と連続状態におけるガンマ線放出の導入を行うことで、同位体生成断面積の実験値に対する再現性が改善することを示した。
- 5) 高速中性子生成反応データ取得に関しては、厚い LiF, C, Si 標的に対する 13.4MeV の重陽子入射中性子生成実験を行い、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。核子当たりの入射エネルギーが同じ(t,xn)反応データ (LiF, と Si) と比較して、重陽子入射の中性子収量の方が大きいことを見出した。
- 6) 阪大 RCNP 実験に対するデータ解析を完了し、Li 標的の 200MeV 重陽子入射中性子生成二重微分断面積を導出した。DERACS 計算は PHITS 計算に比べ、実験値を良好に再現できることを示した。この結果に基づき、プロジェクト 3 との協働作業により、Li に対する PHITS 入力用 FragData が作成された。

2-3 新たな課題など

特に無し。

3. アウトリーチ活動報告

プレスリリースを実施(ジルコニウム-93の核変換 ～高レベル放射性廃棄物の低減化・資源化への挑戦～)を実施した。(2017年9月11日)