

# Study of Isotope Production in Proton- and Deuteron-Induced Spallation Reactions on $^{93}\text{Nb}$ and $^{93}\text{Zr}$

中野, 敬太

<https://doi.org/10.15017/4060208>

---

出版情報 : Kyushu University, 2019, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 中野 敬太

Name

論文名 : Study of Isotope Production in Proton- and Deuteron-Induced Spallation Reactions on  $^{93}\text{Nb}$  and  $^{93}\text{Zr}$ Title ( $^{93}\text{Nb}$  及び  $^{93}\text{Zr}$  に対する陽子・重陽子入射核破碎反応における同位体生成に関する研究)

区 分 : 甲

Category

## 論文内容の要旨

## Thesis Summary

高レベル放射性廃棄物 (HLW) 処理問題は原子力エネルギー利用において解決すべき世界的に重要な課題の一つである。現在、日本において HLW は地層処分される予定となっているが、長期にわたる保管への不安が払拭されず、処分候補地の選定が滞っている。HLW の中でも特に長寿命核分裂生成物 (LLFP) と呼ばれる核種は長い半減期を持ち、長期的な放射能の一因となっている。そこで打開策として、LLFP を人工的な核反応を用いて短寿命または安定核種へ変換する核変換が提案されている。核変換技術の確立により、HLW の短寿命化・減容化を図ることで地層処分の負担軽減に繋がる。しかし、LLFP に対する核変換研究はいくつか前例があるものの、基礎核反応データ測定の難しさから効率的な核変換プロセスの概念設計が提案できない状況にあった。

そこで、革新的研究開発推進プログラム ImPACT にて「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」のテーマのもと、LLFP の基礎核反応データ測定から核反応計算理論モデルの高度化及び核変換プロセスの概念設計まで、一連の研究開発が実施された。これまでの研究から LLFP の中でも  $^{93}\text{Zr}$  (半減期: 151 万年) は中性子捕獲断面積が小さく、原子炉を用いた核変換はあまり有効でないことが示されている。そこで、新たな核反応の候補として加速器を用いた高速の陽子や重陽子による核破碎反応が提案されている。核破碎反応による核変換を検討する際に用いられる核反応理論モデルの高精度化に向け、 $^{93}\text{Zr}$  に対する系統的な核反応データの蓄積と核破碎反応そのものに対するより深い理解が要求されている。

これらを踏まえ本研究では、 $^{93}\text{Zr}$  の核破碎反応による核変換の実現に向け、 $^{93}\text{Nb}$  に対する核子あたり 113 MeV (以降、113 MeV/nucleon) の陽子・重陽子及び炭素入射反応による同位体生成断面積、及び  $^{93}\text{Zr}$  に対する 50 MeV/nucleon の陽子・重陽子入射反応による同位体生成断面積の測定を行った。前者は先行研究で得られた  $^{93}\text{Zr}$  に対する 105 MeV/nucleon の陽子・重陽子入射反応と比較することで、核破碎反応における同位体生成断面積の標的依存性を調査することが可能である。実験は理化学研究所 RI ビームファクトリーにて逆運動学法を用いて行った。 $^{93}\text{Nb}$  は  $^{93}\text{Zr}$  近傍の安定核種であるため理論計算のベンチマークに適しており、複数の核反応理論モデルと評価済み核データライブラリに対しベンチマークテストを実施した。さらに、先行研究である  $^{93}\text{Zr}$  に対する 105 MeV/nucleon の陽子・重陽子入射反応実験データと比較することで、異なる標的核種に対する同位体生成断面積の振る舞いの変化を考察した。後者は先行研究にて  $^{93}\text{Zr}$  に対する 105, 209 MeV/nucleon の陽子・重陽子入射反応の同位体生成断面積が測定されており、エネルギーに関

して系統的なデータの蓄積が可能である。また、得られたデータを先行研究のデータと合わせて核反応理論モデル、評価済み核データライブラリのベンチマークを行った。さらに INCL++/GEM 及び INCL++/ABLA07 両コードによる計算結果を分析することで、INCL4.6/GEM コードで見られた計算値の不一致の原因を探求した。

これらの測定から核破砕反応において主要な 2 つのパラメーターである標的の原子番号と質量数、及び入射エネルギーに対して系統的なデータの蓄積及び核反応理論モデルと評価済み核データライブラリのベンチマークを実施した。この結果、より高い普遍性を持つ高精度な理論モデルの開発にとって有益な知見を提供でき、核破砕反応の反応機構や生成同位体核種の原子番号・質量数分布に対する理解を深めることに大きく貢献した。

本論文は以下の 4 章から構成されている。

第 1 章では研究背景について述べており、HLW 処理問題の現状及び HLW の構成核種、さらに核変換研究のこれまでの進展について言及している。また、その現状を踏まえた ImPACT プログラムの全体像と目的を述べ、様々な核反応の中で核破砕反応に着目した理由と先行研究を提示した。それらの中での本研究の位置づけを明確にすることで、核変換研究及び核破砕反応研究における本研究の重要性を示した。

第 2 章では  $^{93}\text{Nb}$  に対する 113 MeV/nucleon の陽子・重陽子及び炭素入射反応による同位体生成断面積の測定について述べている。理化学研究所 RI ビームファクトリーにて生成した  $^{93}\text{Nb}$  の 2 次ビームを  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CD}_2$ , C 標的に照射する逆運動学法を用いて同位体生成断面積の測定を行った。その後、得られた実験データの解析とその結果を詳細に述べている。まず、測定データを過去に測定された放射化法による同一の反応データと比較し、統計誤差の範囲内で一致していることから両者の妥当性を示した。次に、陽子・重陽子入射反応の測定データを核反応理論モデルである INCL4.6/GEM 及び CCONE、また評価済み核データライブラリである JENDL-4.0/HE, JENDL/ImPACT-2018, TENDL-2017, ENDF/B-VIII.0 と比較しベンチマークを行った。炭素入射反応データは核反応理論モデル JQMD/GEM, 及び JQMD-2.0/GEM と比較した。さらに同一の実験で得られた  $^{93}\text{Zr}$  データと比較することで、両者に見られた生成同位体の中性子魔法数に起因する不連続な断面積の変化について考察を行った。この考察から、不連続な変化は蒸発過程において形成され、直接過程による生成量の分布とのバランスで見かけ上の有無が決定されることを明らかにした。

第 3 章では  $^{93}\text{Zr}$  に対する 50 MeV/nucleon の陽子・重陽子による同位体生成断面積の測定について述べている。理化学研究所 RI ビームファクトリーにて  $^{93}\text{Zr}$  を含む 2 次ビームを生成し、冷却気体水素・重水素に照射することで同位体生成断面積の測定を実施した。得られた実験データを解析し同位体生成断面積を導出した。まず、測定データは核反応理論モデルである INCL4.6/GEM と INCL++/ABLA07 及び CCONE、評価済み核データライブラリである JENDL/ImPACT-2018 と比較し、それぞれの核反応モデル及び核データライブラリの再現性検証を行った。次に、先行研究で得られた 105, 209 MeV/nucleon データと相互比較することで、生成断面積の同位体分布における相違点を見出した。さらに生成核種の半減期分布を各エネルギーで比較することで、基礎核反応データに基づく核変換の優位なエネルギー領域を考察した。最後に INCL++/GEM と INCL++/ABLA07 による計算値を比較することで、INCL4.6/GEM 計算で観測された過小評価の原因を探った。その結果、GEM におけるエネルギー準位密度が原因で過小評価が生じていることが示唆された。

第 4 章では本論文の総括を行うと共に、核変換及び核破砕反応研究における今後の展望を述べた。