

# 長寿命核分裂廃棄物の核変換データとその戦略

(受託者) 国立研究開発法人

(研究代表者) 櫻井博儀 仁科加速器研究センター

(研究期間) 平成 25 年度～26 年度

## 1. 研究の背景とねらい

広島・長崎・福島を背負う我が国では、原子力の平和利用と世界人類の福祉に特化した「発明」と「発見」を生み出すことによって世界的信用と信頼を得ることができる。この大きな歴史的背景のなかで様々な課題があり、とりわけ原子力発電などによって生じる長寿命放射性核種廃棄物の問題は我が国が取り組むべき最重要課題のひとつである。核廃棄物の処理処分については、核分離技術に基づいた地層処分処理などの現実的な方法が議論・開発されている一方、この問題を根本的に解決するためには長寿命放射性核種を安定化・短寿命化するための核変換技術の確立が必要になってくる。

長寿命放射性核種としては、マイナーアクチノイドMAと核分裂生成物FPの二種に分類される。長寿命FPは廃棄物のなかでも大きなウエートを占めるものの、燃料として利用することができないため、核変換に関連する基盤開発・技術開発はほとんど進んでいないのが現状であり、核変換基盤を支える反応データが不足している。

長寿命FPを短寿命化する方法として、中性子やガンマ線の照射などが過去に議論された経緯があるが、熱中性子捕獲以外の、中性子ロックアウト、中性子捕獲、ガンマ線吸収反応などの素反応過程に関わる基礎データが十分でない。これらの基礎データは、新しい核変換法を生み出す契機になるとともに、経済的な費用算出においても重要である。地層処分費用と核変換費用の算出とその比較には、具体的な数値計算を必要とするからである。

長寿命FPのデータが決定的に不足している背景は、研究対象となる核種の寿命が有限なため、標的にすることが困難なことによる。本事業で利用する方法は、逆運動学的手法である。この手法では、研究対象の核種をビームとして取り出し、陽子などの2次標的に照射して、反応過程を観測する。長寿命FPをビームとして取り出してから照射するまでの時間は、わずか数百ナノ秒であり、またビームに含まれる核種や反応をひとつひとつ同定しながら実験を行うことができるため、データの質もきわめて高い。この手法を利用した長寿命FPデータはいまだかつて取得されたことがない。

理化学研究所では逆運動学に基づいた様々な手法を開発してきた。2006年に次世代重イオン加速器施設「RI ビームファクトリー」(RIBF) [1, 2]が完成した。翌年には世界最高強度のRIビームを供給し、原子核物理学の分野では世界に冠絶した施設として世界的に有名であり、新しい研究成果を多数生み出している。本研究はこの施設を利用する。

現状では、理学系・工学系の研究者が一堂に会して議論する公の場は少なく、単発的であり、持続的な議論が必要である。時代的な背景を考えると、20世紀初頭にフェルミが原子炉のアイデアを出したのち、理学系と工学系との分化が広がってしまったが、21世紀に入った今、理学系と工学系の研究者がともに協力し、現在の人類が抱える難問に取り組み、挑戦していく必要が出てきた。

本計画では以上の背景のもと、平成 25、26 年度の 2 年間で、長寿命核分裂核廃棄物用核変換システムの検討に必要な核データを整備し、(1) 理化学研究所・RIBF で得られる RI ビームを利用

して長寿命核分裂核種 (FP) の中性子ノックアウト反応データの世界初取得を目指し、同時に (2) 核変換システムの工学的・経済的出口を見据え、ワークショップ等での議論を通して人的ネットワークを構築し、長寿命 FP 核データ取得計画を策定することを目的としている。

## 2. これまでの研究成果

### 2. 1 長寿命 FP 核種のビーム開発と核変換データの取得

#### 1) 概要

本研究では長寿命 FP として、Sr-90 や Cs-137 などの核種を RI ビームとしてとりだし、2 次標的での反応断面積を測定する。実験の概要は以下の通りである。

RIBF の重イオン加速器群を利用して U-238 ビームを核子当たり 345MeV まで加速し、これを Be 標的に照射して核分裂を起こさせ、長寿命 FP を生成する。生成された FP はウランビームとほぼ同じ速度をもって前方に放出される。標的前方には、図 1 のように超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) [3] が配置されており、これを利用して長寿命 FP をビームとして取り出す。BigRIPS では、FP それぞれに適したパラメータを設定し、長寿命 FP 核種をビーム化する。長寿命 FP のビームの大きさや角度広がり、純度を最適化する。

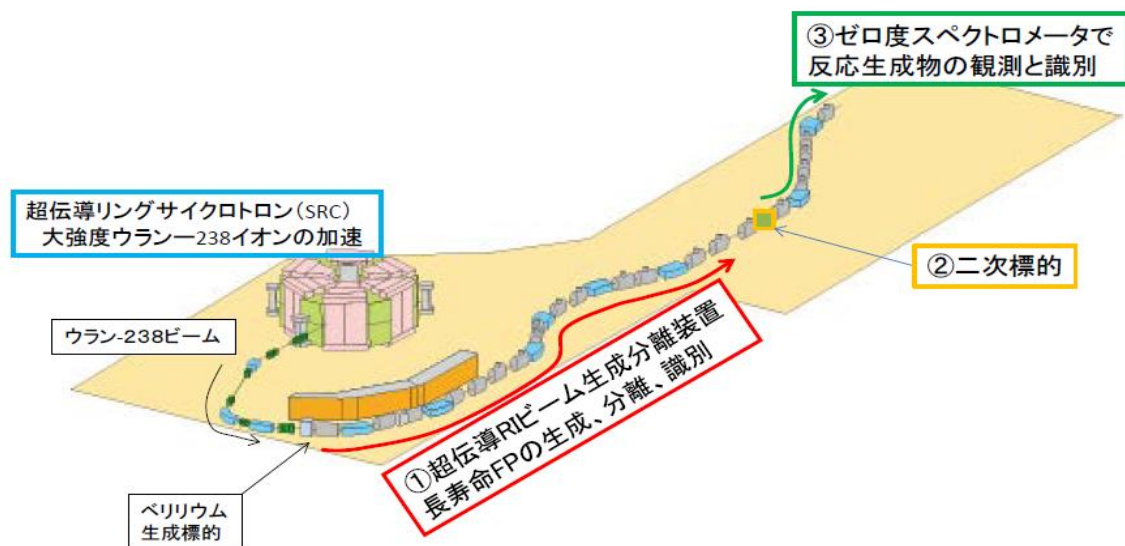


図 1 RIBF での実験セットアップ

開発した RI ビームを利用して中性子ノックアウトなどの反応データを取得する。RI ビームを 2 次標的に照射し、反応生成物を 2 次標的の下流に配置したゼロ度スペクトロメータ [3] で観測する。それぞれの FP に対し、2 次標的として CH<sub>2</sub>、CD<sub>2</sub>、C の三つの標的を用意し、これらの標的で得られたデータを組み合わせることにより、最終的に中性子ノックアウト反応データを取得する。この他、陽子ノックアウト反応データ、重陽子破碎反応データ、炭素破碎反応データも得ることが可能である。2 次標的厚やゼロ度スペクトロメータのパラメータを詳細に検討してから実験を行う。

#### 2) 平成 25 年度実績

平成 26 年度のデータ取得にむけ、①超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) の詳細パラメー

タの決定、②反応生成物を観測・識別するゼロ度スペクトロメータの詳細パラメータの決定、③標的厚の決定、④検出器などの高度化による実験準備、を行った。これらのパラメータを決定する際、RI ビームに含まれる長寿命 FP 核種の純度をあげるために、FP 核種の低運動量領域を選択することが肝要であることがわかった。

#### 4) 平成 26 年度の実験成果

平成 25 年度の準備をうけ、平成 26 年 4 月に世界で初めて逆運動学による長寿命 FP の反応データの取得に成功した。

超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) で Cs-137、Sr-90 をビームとして取り出した。これら FP を生成するために 1 mm 厚の Be 標的を採用した。ビームのエネルギーは核子あたり 190MeV 程度であり、純度、強度は、Cs-137 でそれぞれ 14%、1.2k/s、Sr-90 では、28%、7.1k/s であった。Cs-137 および Sr-90 ビームは BigRIPS の下流に置かれた 2 次標的に照射し、2 次標的で生成された反応生成物は下流のゼロ度スペクトロメータで検出し、粒子識別を行った [4]。2 次標的としては、C、CH<sub>2</sub>、CD<sub>2</sub> の三種の標的を用意し、これら標的の組合せから、炭素核、陽子、中性子による中性子ノックアウト、核破砕、荷電交換反応データを大量に取得した。

取得されたデータは核破砕片の断面積を予想する経験公式 EPAX [5] との比較や PHITS [6] などの微視的反応モデルの予想と比較し、このエネルギーでの反応メカニズムや標的のアイソスピン依存性などを議論する。また純度が 100% でないため、他のビーム核種の反応データも取得している。本実験は、九大ー宮崎大ー東大ー北大との共同研究として行った。なお、陽子標的、重陽子標的データは Physics Letters B に論文として投稿し、平成 27 年 11 月現在、査読中である。この論文が受理された後は、順次炭素標的データ、核反応モデル、荷電交換反応データを順次論文として発表する予定である。

## 2. 2 将来に向けたデータ取得研究戦略の策定

### 1) 概要

RIBF では上記中性子ノック反応以外の反応、クーロン分解反応、核子移行反応など、様々な反応を測定することができる。また同時に中性子放出閾値近傍の非束縛状態の観測も行うことができる。これらの反応データや核構造データから中性子捕獲反応、ガンマ線吸収反応の断面積を導出することができる。上記プログラムと並行しながら将来のデータ収集戦略を練り上げ、工学的な核変換の出口との整合性がとれた計画書を作成する。このため、全国の工学系・理学系の研究者を集めたワークショップなどを開催する。

### 2) 平成 25 年度実績

平成 26 年度の具体的な検討へとつなげるため、必要となる FP 関連データのリストアップ、中性子源の現状、核変換システムのモデル、など核変換に関連する要素を広くサーベイしたのち、検討事項を整理した。これらの検討は原子力工学研究者および核物理研究者による検討会とワークショップで行った。

平成 25 年 10 月から 12 月にかけて、コアメンバー 23 名を選定した。コアメンバーとしては、中性子ビームによる核変換だけでなく、ガンマ線、ミューオン核変換の専門家も選定した。また加速器中性子源だけでなく核融合炉中性子源の専門家や高速炉設計に必要なベータ遅発中性子測定の専

門家、核データおよびその評価活動に従事している専門家、核反応シミュレーションの専門家にも参加依頼を行った。

検討会はコアメンバーを中心に平成26年2月1日に開催した。場所は、理化学研究所の東京連絡事務所で、欠席者は23名中、4名のみであった。長きにわたり核変換に関与してきた向山氏に過去どのような検討が行われたのか基調講演をお願いし、その後ワークショップや今後の進め方について広く議論を行った。

ワークショップは3月6日～8日に理化学研究所で開催し、コアメンバーを中心にした意見交換および活発な議論が行われた。登壇者を公募することでプログラムに厚みができ、所期の目標以上に幅広い視点で議論を展開することができた。ワークショップ本来の主旨、コアメンバーの専門的立場から核変換に対する過去の取り組みや将来展望が発表され、理工連携の大きな一歩を踏み出したと言える。

### 3) 平成 26 年度

平成25年度のワークショップをうけて平成26年度は以下の3点を検討した。①平成26年度におこなうワークショップでは、本事業で取得したデータを利用したバルク計算を実施し、中性子生成システムの検討をさらにすすめる。バルク計算では核廃棄物の元素成分情報が必要となるため、核廃棄物の群分離の専門家を招き、分離後の物質形態に関する検討も行う。②高速炉の専門家も招き、高速中性子源や炉設計に必要なデータもあわせて検討する。③技術目標をさらに精査するために、典型的な核変換反応を想定して、核変換誘発粒子発生源に関する検討をすすめる。

このうち、①と③は藤田玲子氏が代表を務めるImPACTプロジェクト（平成26年度発足）[7]での検討が進んでいる。②については過去の研究開発結果を調査したうえで、③の目標としては加速器を利用したシステムに特化した検討が進んでいる。

## 3. 今後の展望

本事業では、Sr-90 や Cs-137 といった FP 核種を理研の RI ビームファクトリーでビームとして取り出し、逆運動学的手法で世界初の反応データを取得することができた。また、平成 25 年のワークショップの開催を通して、理工連携のコアグループがつけられた。これらの活動が契機となり、長寿命核分裂生成物の放射能低減化と資源化を目指した ImPACT プロジェクト（PM 藤田玲子氏）[7] が平成 26 年度から始まった。本事業は平成 26 年度で終了するが、今後の発展はこの ImPACT プロジェクトに継承されている。

## 4. 参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instr. Meth. B 261, 1009-1013 (2007)
- [2] H. Sakurai, Eur. Phys. J Special Topics 150, 249-254 (2007)
- [3] T. Kubo, Nucl. Instr. and Meth., B 204, 97-113 (2003); T. Kubo et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, 1069 (2007).
- [4] He Wang et al., Chinese Phys. Lett. 30, 042501 (2013).
- [5] K. Suennerer et al., Phys. Rev. C 86, 014601 (2012)
- [6] <http://phits.jaea.go.jp/indexj.html>
- [7] <http://www.jst.go.jp/impact/program08.html>