

平成26年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

「長寿命核分裂核廃棄物の核変換データと
その戦略」

成果報告書

平成27年3月

独立行政法人 理化学研究所

本報告書は、文部科学省のエネルギー対策特別会計委託事業による委託業務として、独立行政法人理化学研究所が実施した平成26年度「長寿命核分裂核廃棄物の核変換データとその戦略」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	iii
1. はじめに	1.1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1
2.2 平成26年度の成果の目標及び業務の実施方法	2.2
3. 平成26年度の実施内容及び成果	
3.1 長寿命FP核種のビーム開発と核変換データの取得	3.1.1
3.2 将来に向けたデータ取得研究戦略の策定	3.2.1
3.3 研究推進	3.3.1
4. 結言	4.1

表一覧

表 3.1 Cs-137 および Sr-90 の BigRIPS パラメータ	3.1.3
表 3.2 BigRIPS 第二ステージの検出器	3.1.4
表 3.3 ZeroDegree のモード設定とスリット	3.1.6
表 3.4 Cs-137 ビームの場合の ZeroDegree の B \square 設定	3.1.7
表 3.5 Sr-90 ビームの場合の ZeroDegree の B \square 設定	3.1.7
表 3.6 ZeroDegree の検出器	3.1.8
表 3.7 BigRIPS、ZeroDegree 各設定での 1 次ビーム強度	3.1.9
表 3.8 BigRIPS、ZeroDegree 各設定でのトリガーとトリガー計数率	3.1.10
表 3.9 Cs-137 ビーム測定の実験取得時間 (時間)	3.1.10
表 3.10 Sr-90 ビーム測定の実験取得時間 (時間)	3.1.10
表 3.11 Cs-137 ビームの断面積数値データ	3.1.10
表 3.12 Sr-90 ビームの断面積数値データ	3.1.10

図一覧

図 3.1 実験装置および手法の概要	3.1.1
図 3.2 BigRIPS のセットアップ	3.1.2
図 3.3 BigRIPS 第二ステージで使用された検出器の写真および 粒子識別情報の取得法	3.1.4
図 3.4 各種標的厚とその写真	3.1.5
図 3.5 ZeroDegree のセットアップ	3.1.6
図 3.6 F11 に置かれた電離箱と LaBr3 の写真 (左)。LaBr3 は 直径 3 インチの大きな結晶を利用している (右)	3.1.8
図 3.7 Sr-90 ビームでの BigRIPS と ZeroDegree の粒子識別図	3.1.11
図 3.8 Cs-137 ビームでの BigRIPS と ZeroDegree の粒子識別図	3.1.12
図 3.9 TKE 情報を利用した荷電数 Q の決定	3.1.12
図 3.10 Cs-137+H、D による反応生成物の生成断面積	3.1.14
図 3.11 Sr-90+H、D による反応生成物の生成断面積	3.1.14

概略

広島・長崎・福島の歴史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るが、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決定的に不足している。

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、中性子ノックアウト、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、標的にすることが非常に困難なことによる。本研究で利用する方法は、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く、革新的かつ独創的である。

理化学研究所ではこの研究分野の将来性を見込み、逆運動学に基づいた様々な手法を開発してきた。2006 年にはこれまでの経験・技術を生かした、次世代重イオン加速器施設「RI ビームファクトリー」(RIBF) 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・RI ビームファクトリーで得られる 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。

当該年度はその2年目である。(1)のデータ取得を平成26年度初頭の4月10日～14日にRIビームファクトリーで行った。長寿命核分裂核種(FP) Sr-90、Cs-137をRIビームとして取り出し、中性子ノックアウト反応データ、核破砕反応データ、荷電交換反応データの世界初測定に成功した。Sr-90とCs-137のRIビームをC、CH₂、CD₂標的に照射し、反応生成物の粒子識別を行った。これらの標的から陽子、重陽子、炭素核標的の成分を取り出した。このうち、陽子、重陽子標的の成分を論文としてまとめ、学術雑誌に投稿した。

(2)のデータ取得計画については、平成25年度のワークショップ開催で明確になった問題点および構築された理工連携の人的ネットワークをもとに、状来に向けたデータ取得研究戦略をまとめ、藤田玲子氏がPMをつとめるImPACTプログラムに盛り込まれた。藤田ImPACTプログラムは平成26年10月より発足し、Pd-107、Zr-93、Se-79、Cs-135を中心とした、データ取得プログラムが開始されている。また、核変換システムに関する検討も藤田ImPACTで行うことになった。

研究代表者の下、研究項目1で実施した実験実績と研究項目2の将来展望およびネットワーク形成とが融合され、将来も引き続き藤田ImPACTプログラムで実施することになった。なお、研究項目1については本プログラム終了後も炭素核標的のデータや荷電交換反応などの成果発表を引き続き行う。

以上、最終年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

1. はじめに

広島・長崎・福島の歴史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るが、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。MA については加速器駆動型原子炉などが考慮され、エネルギー取得と核変換を同時に行うための基盤技術開発およびプロトタイプ施設の建設などが計画されている。他方、FP とくに Sr-90 や Cs-137 などの長寿命 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決定的に不足している。

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、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、標的にすることが非常に困難なことによる。従来の基礎データ取得法は、陽子、中性子、ガンマ線などをビームとして標的に照射し、標的核種の変換を観測する方法であった。本研究で利用する方法は、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く、革新的かつ独創的である。

この逆運動学的手法は、安定核種にくらべて陽子・中性子が多い短寿命原子核の構造およびダイナミクスを調べる手法として原子核物理学分野で発展してきた手法である。理化学研究所ではこの研究分野の将来性を見込み、1990 年初頭から放射性核種ビーム (RI ビーム) の生成法と利用法の開発を進め、逆運動学に基づいた様々な手法を開発してきた。2006 年にはこれまでの経験・技術を生かした、次世代重イオン加速器施設「RI ビームファクトリー」(RIBF) 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。RIBF が完成するまでは RI ビームとして供給できる核種は質量数 40 程度の軽い核の領域に限られていたが、RIBF では水素からウランまでのすべての元素について放射性核種を生成することができ、質量数 100 程度の中重核領域の原子核を利用することができるようになった。RIBF 施設は、RI ビーム発生系と基幹実験装置群とに分かれており、発生系、実験装置群が重い放射性核種を取り扱えるように工夫されている。RI ビーム発生系でつくられた RI ビームは基幹実験装置に送られ、2 次標的での核反

応などを利用した最先端研究が行われているが、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 世紀に入ったいま、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、以上のような背景のもと、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・RI ビームファクトリー（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する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

2.1.1 長寿命FP核種のビーム開発と核変換データの取得

本研究では長寿命FPとして、Sr-90やCs-137などの核種をビームとして用意する。

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、超伝導RIビーム生成分離装置(BigRIPS)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。

開発したRIビームを利用して中性子ノックアウト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で観測する。それぞれのFPに対し、2次標的としてCH₂、CD₂、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、重陽子破砕反応データ、炭素破砕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。

2.1.2 将来に向けたデータ取得研究戦略の策定

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。

2.1.3 研究推進

研究代表者の下、ネットワーク形成を図りつつ、研究項目1と研究項目2の将来展望とを融合し、将来の研究展開に向け、評価とまとめを行う。

項目	年度	平成25年度	平成26年度
(1) 長寿命FP核種のビーム開発と核変換データの取得 (理化学研究所)		実験準備・詳細検討	実験実施・データ解析・成果発表
(2) 将来に向けたデータ取得研究戦略の策定 (理化学研究所)		ワークショップ開催	ワークショップ開催・報告書完成
(3) 研究推進 (理化学研究所)		ネットワーク形成と 項目(1)、(2)の融合	ネットワーク拡大と 項目(1)、(2)の深化とまとめ

2.2 平成26年度の成果の目標及び業務の実施方法

2.2.1 長寿命FP核種のビーム開発と核変換データの取得

平成26年度は長寿命核分裂核種をビームとして取り出し、中性子ロックアウト反応などの世界初データを取得する。データ解析ののち、成果発表を行う。

2.2.2 将来に向けたデータ取得研究戦略の策定

平成25年度でまとめた検討事項をもとに原子力工学研究者および核物理研究者によるワークショップを開催し、データ取得戦略と核変換システムの技術目標を報告書としてまとめる。

2.2.3 研究推進

研究代表者の下、ネットワーク形成を図りつつ、研究項目（1）の具体的な実験計画と研究項目（2）の将来展望とを融合し、評価とまとめを行う。

3. 平成26年度の実施内容及び成果

3.1 長寿命FP核種のビーム開発と核変換データの取得

3.1.1 概要

平成26年度の目的は、理化学研究所・RIビームファクトリー（RIBF）[1, 2]で得られるRIビームを利用して長寿命核分裂核種（FP）の中性子ロックアウト反応データの世界初取得を目指すことである。平成26年度初頭の4月10日～14日に、RIBFで長寿命核分裂核種（FP）Sr-90、Cs-137をRIビームとして取り出すことに成功し、中性子ロックアウト反応データ、核破砕反応データ、荷電交換反応データの世界初測定に成功した。

本測定では、主に三つの要素からなっている。一つは、RIビーム発生系装置によるRIビーム生成と識別である。図3.1に示したように、RIBFの超伝導リングサイクロトロン（SRC）から得られる核子当たり345 MeVのウランビームを生成標的に照射し、核分裂反応で生成された核分裂生成物を超伝導RIビーム生成分離装置（BigRIPS）[3]で収集分離し、目的核種をRIビームとして取り出す。同時にRIビームの純度は100%ではないため、ビームの粒子識別をして、ビームに含まれる核種の原子番号と質量数を測定する。BigRIPSで得られたビームは、Cs-137およびSr-90である。次の要素は2次標的であり、RIビームを2次標的に照射する。2次標的としてC、CH₂、CD₂標的を利用した。照射により生成された反応生成物は標的前方に配置されたゼロ度スペクトロメータ（ZeroDegree）[3]にはいり、そこで反応生成物の識別を行う。このようにRIビームの粒子識別と反応生成物の粒子識別によって入射ビーム核種と反応生成物核種をすべて特定でき、反応チャンネルを100%決定することができる。最終的に、入射核種の総数、標的厚、反応生成物総数から反応断面積を得ることができる。

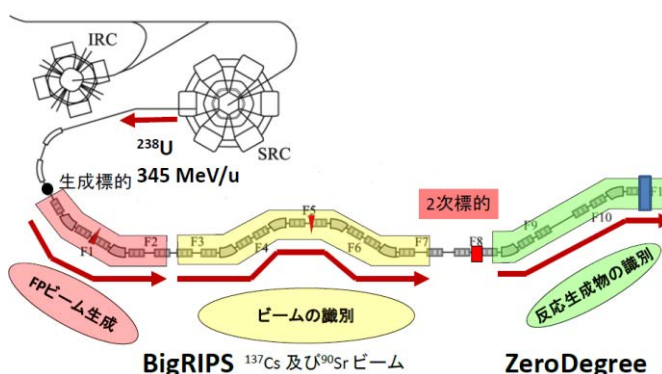


図 3.1 実験装置および手法の概要

以下に実験設定、解析、結果についての詳細を述べ、最後に核変換データ取得についてまとめる。

3.1.2 長寿命FP核種ビームの生成と設定

(1) BigRIPS 設定

平成25年度に行ったシミュレーション結果をもとに生成標的厚、BigRIPSの設定パラメータを決めた。実際にRIビームを出してみると、想像以上にRIビーム強度が低かったため、急きょベリリウム生成標的の厚さを0.1mmから1mmに変更した。この標的厚の変更に合わせて、BigRIPSの磁気剛性(Bp)などのパラメータをLISE++コード[4]を利用して、計算し直した。

BigRIPS は図 3.2 に示すように、生成標的から F2 までが第一ステージと呼ばれ、RI ビームの生成と分離が行われる [3, 5]。F3 から F7 までは第二ステージで、主に粒子識別を行うために設計されている。ビームライン上の偏向電磁石 (D1~D6) および F1、F2 等に置かれたスリット幅、F1 に設置したエネルギー減衰板 (degrader) 厚などの主要パラメータは表 3.1 にまとめてある。

BigRIPS の設定は純度を最大にするように決定されている。そのために、まず (1) D1 の $B\rho$ を収量が最大になる $B\rho$ に比べ低く設定し、中性子過剰側の核分裂生成物の混入を抑えた。また、(2) 運動量分散焦点面 F1 に置かれたスリット幅を ± 1 mm に設定し、運動量幅を狭くした。さらに (3) 質量分散焦点面 F2 のスリット幅を狭くし、さらに純度の向上を図った。

Cs-137 および Sr-90 のビーム強度は、それぞれウランビーム強度 10pnA 当たり毎秒 1200 個、7100 個であった。また純度は、それぞれ 14%、28%にすることができた。Cs-137 および Sr-90 のビームのエネルギーはそれぞれ 186 MeV/u、187 MeV/u である。

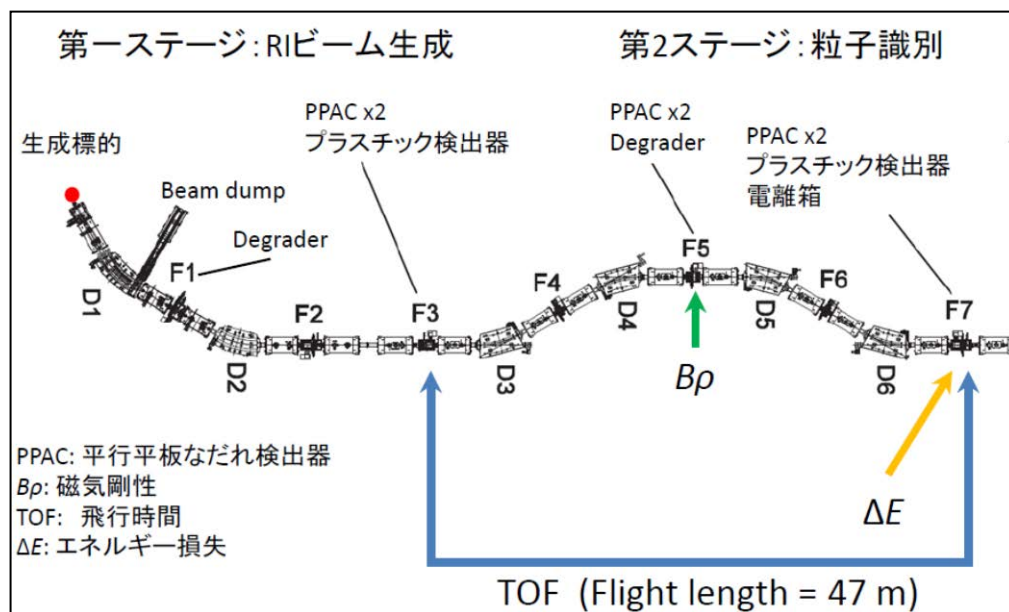


図 3.2 BigRIPS のセットアップ

表 3.1 Cs-137 および Sr-90 の BigRIPS パラメータ

	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Production target	1mm Be	1mm Be
F1 slit width [mm]	±1	±1
F1 degrader thickness [mm]	5	7
F2 slit width [mm]	±1	±5
F5 degrader thickness [mm]	1	5
F5 slit width [mm]	±30	±5
F7 slit width [mm]	±4	±20
Bρ01 (D1) [Tm]	6.884	7.012
Bρ12 (D2) [Tm]	5.698	6.006
Bρ34 (D3) [Tm]	5.653	5.976
Bρ45 (D4) [Tm]	5.656	5.978
Bρ56 (D5) [Tm]	5.351	5.045
Bρ67 (D6) [Tm]	5.351	5.046
Beam intensity [cps/10pnA U]	1200	7100
Purity	14	28
Energy [MeV/nucleon]	186	187

(2) BigRIPS 検出器

粒子識別を行うために第二ステージに配置された検出器は、表 3.2 にまとめてあるように F3、F5、F7 (図 3.2 参照) に平行平板なだれ検出器 (PPAC)、プラスチック検出器、電離箱が配置されている (図 3.3 参照)。

図 3.2 に示してあるように粒子識別は、F3-F7 間の飛行時間 (TOF)、F5 での Bp測定、F7 での電離損失 (ΔE) の情報を用いる。TOF は時間分解能にすぐれたプラスチック検出器を利用し、粒子の Bp値は PPAC 検出器による粒子の位置測定から得られる。 ΔE は F7 に置かれた電離箱で測定する。これらの情報を組み合わせ、図 3.3 のように原子番号 (Z) および質量数/電荷量 (A/Q) を解析で得ることができる。

表 3.2 BigRIPS 第二ステージの検出器

	検出器	
F3	PPAC x 2	240 (H) x 150 (V) mm ² (area)
	プラスチック	0.2 mm-thick
F5	PPAC x 2	240 (H) x 150 (V) mm ² (area)
F7	PPAC x 2	240 (H) x 150 (V) mm ² (area)
	プラスチック	0.2 mm-thick
	電離箱	

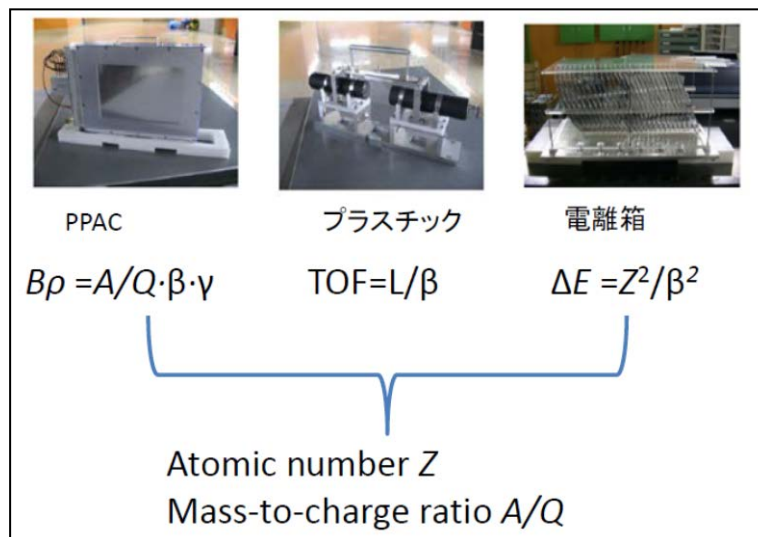


図 3.3 BigRIPS 第二ステージで使用された検出器の写真および粒子識別情報の取得法

3.1.3 2次標的

本測定で利用した2次標的は、C、CH₂、CD₂の三種類である。それぞれの標的厚は、図3.4に示されているように約200 mg/cm²である。標的厚は、面積と重量による測定とビームを利用した電離損失による測定によって系統誤差を調べた。

これらの標的厚は、標的でのエネルギー損失が同じになるように決定されているため、標的交換毎に標的下流のZeroDegreeのBpを再設定する必要がない。CH₂およびCD₂で得たデータからCのデータを引き算することで陽子標的、重陽子標的のデータを得ることができる。

標的は、図3.4に示したようにアクリルのホルダーに装着してあり、ビームダクト内に設置する。アクリルホルダーやその他の物質の寄与を測定するために標的が装着されていない空標的(Empty)も準備し、データを取得した。

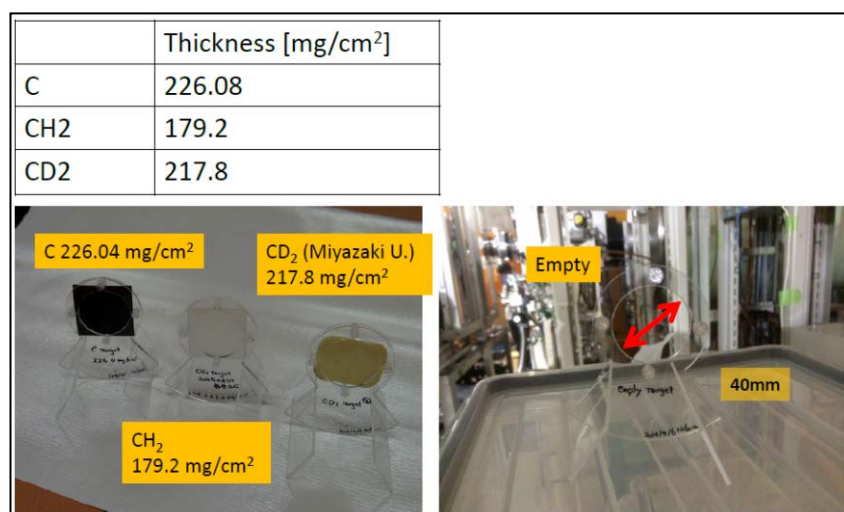


図 3.4 各種標的厚とその写真

3.1.4 反応生成物の測定と設定

(1) ZeroDegree 設定

ZeroDegree スペクトロメータは図 3.5 のように 2 次標的での反応生成物をとらえ、検出器を利用して、 ΔE 、 $B\rho$ 、TOF、全運動エネルギー (TKE) を測定し、反応生成物の粒子識別を行うことができる磁気分析装置である。ZeroDegree には複数のモードがあるが、本測定では、「Large Acceptance」モードを採用し、表 3.3 のように運動量、角度アクセプタンスがともに最大になるようにし、反応生成物の検出効率を最大にした。

ZeroDegree の $B\rho$ は、多種多様な反応生成物をとらえるために 3% 間隔で変え、データを取得した。 $B\rho$ のアクセプタンスは 6% あるため、 $B\rho$ を 3% ごとに変えてサンプリングすることでオーバーラップをとり、系統誤差を小さくすることに配慮した。Cs-137 ビーム、Sr-90 ビームそれぞれの、D7、D8 の $B\rho$ 設定値を表 3.4、3.5 に示した。表中の $B\rho$ は 2 次ビームの標的通過後の $B\rho$ 値である。空標的の場合の $B\rho$ は標的上流の物質によって生成されたものを考慮して、 $B\rho$ 値を決定している。

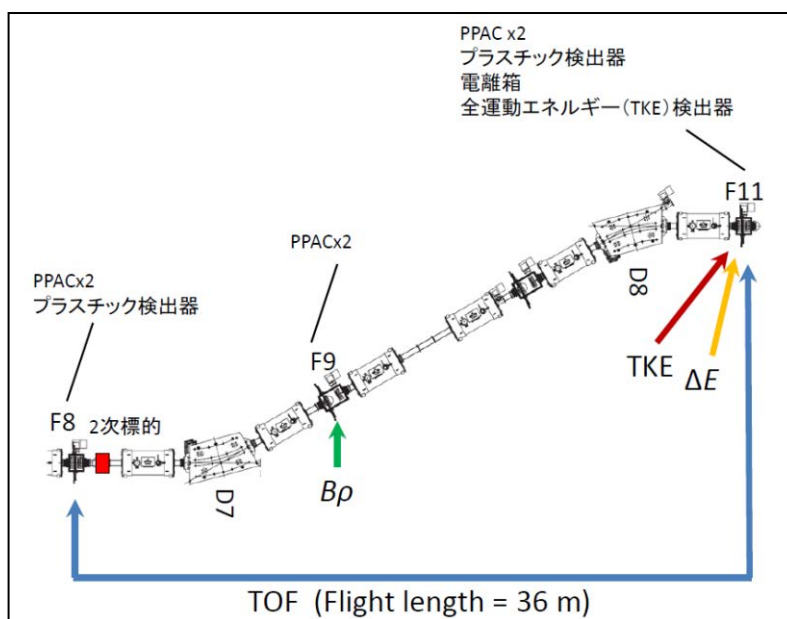


図 3.5 ZeroDegree のセットアップ

表 3.3 ZeroDegree のモード設定とスリット

	^{137}Cs	^{90}Sr
ZeroDegree mode	Large acceptance	Large acceptance
運動量アクセプタンス	6%	6%
角度アクセプタンス	90 mrad (H) x 60 mrad (V)	90 mrad (H) x 60 mrad (V)
F9 スリット幅 [mm]	±120	±120

表 3.4 Cs-137 ビームの場合の ZeroDegree の B ρ 設定

BigRIPS 設定	標的	ZeroDegree 設定	D7 [Tm]	D8 [Tm]
137Cs	C, CH ₂ , CD ₂	B ρ +0%	4.7186	4.7096
		B ρ -3%	4.5772	4.5684
		B ρ -6%	4.4357	4.4207
		B ρ -9%	4.2941	4.2857
		B ρ +3%	4.8604	4.8509
	Empty	B ρ +7% (B ρ +0% w/target)	5.0481	5.0383
		B ρ +10% (B ρ +3% w/target)	5.2050	5.1949
		B ρ +4% (B ρ -3% w/target)	4.9211	4.9115
		B ρ +1% (B ρ -6% w/target)	4.7791	4.7698
		B ρ -2% (B ρ -9% w/target)	4.6371	4.6281

表 3.5 Sr-90 ビームの場合の ZeroDegree の B ρ 設定

BigRIPS 設定	標的	ZeroDegree 設定	D7 [Tm]	D8 [Tm]
90Sr	C, CH ₂ , CD ₂	B ρ +0%	4.6082	4.6030
		B ρ -3%	4.4700	4.4649
		B ρ -6%	4.3317	4.3268
		B ρ -9%	4.1935	4.1887
		B ρ +3%	4.7464	4.7411
	Empty	B ρ +4.7% (Brho+0% w/target)	4.8248	4.8193
		B ρ +7.7% (Brho+3% w/target)	4.9680	4.9748
		B ρ +1.7% (Brho-3% w/target)	4.6912	4.6976
		B ρ -1.3% (B ρ -6% w/target)	4.5528	4.5591
		B ρ -4.3% (B ρ -9% w/target)	4.100	4.4051
		B ρ -7.3% (B ρ -12% w/target)	4.2718	4.2670
		B ρ -10.3% (B ρ -15% w/target)	4.1336	4.1289

(2) ZeroDegree 検出器

ZeroDegree での粒子識別に利用した検出器は、表 3.6 にまとめられている。粒子識別の基本的な原理は、BigRIPS と同様であるが、ZeroDegree の B_p 決定精度は、BigRIPS とくらべてよくないため、 A/Q の分解能がよくない。そこで、 B_p 、TOF、 ΔE に加え、全運動エネルギー (TKE) を測定し、粒子の Z と A を決定する。

図 3.5 にも示してあるように、TOF は時間分解能のよいプラスチック検出器で F8-F11 間の時間を取り、 B_p は運動量分散焦点面 F9 での位置情報から得た。 ΔE と TKE は F11 に置かれた電離箱と LaBr_3 検出器を用いて測定した (図 3.6 参照)。 LaBr_3 は直径 3 インチの大きな結晶を利用した。2 次標的によるエネルギー損失の影響で F11 に分散が生じ、反応生成物の位置分布が広がるため、この分布を十分にカバーできる検出器を採用することで検出効率を 100%にすることができる。

表 3.6 ZeroDegree の検出器

	検出器	
F8	PPAC x 2	240 (H) x 150 (V) mm ² (area)
	プラスチック	0.2 mm-thick
F9	PPAC x 2	240 (H) x 150 (V) mm ² (area)
	プラスチック	0.2 mm-thick
F11	PPAC x 2	240 (H) x 150 (V) mm ² (area)
	プラスチック	0.2 mm-thick
	電離箱	
	全運動エネルギー検出器	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

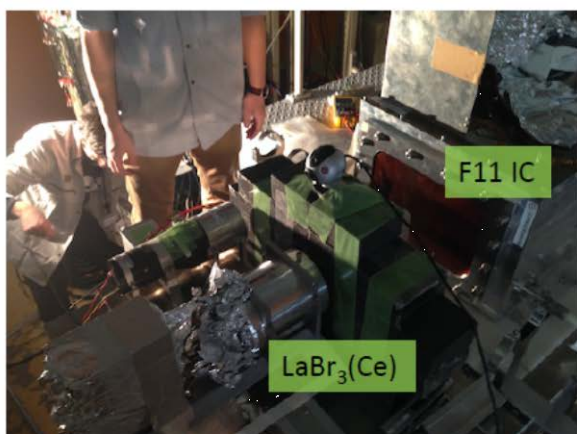


図 3.6 F11 に置かれた電離箱と LaBr_3 の写真 (左)。 LaBr_3 は直径 3 インチの大きな結晶を利用している (右)

3.1.5 実験実施条件

この節では種々の実験条件をまとめておく。

ウランの1次ビームについては、エネルギーは345 MeV/uで、ビーム強度は、表3.7に示したように、ZeroDegreeのBp条件に応じて変えている。ZeroDegreeのBpが2次ビームに近いばあいは、2次ビームがそのままZeroDegreeにはいるために計数率があがるためである。

2次ビームの標的中心でのエネルギーは180 MeV/uである。

トリガーは、F7のプラスチック検出器が信号を発した条件(F7トリガー)、F7とF11のプラスチック検出器がともに信号を出した条件(F7xF11トリガー)およびF7の計数率をダウンスケールしたDSF7トリガーの三つのトリガーを用意している。全体の計数率がほぼ1kcpsになるようにトリガー計数率を調整し、データ収集時のデッドタイムを20%以下にしている[6]。ZeroDegreeの各Bp、各標的でのデータ収集時間を表3.9(Cs-137ビーム)と3.10(Sr-90ビーム)にまとめた。各Bp、各標的ではほぼ1時間から3時間程度でデータ取得を行っている。

表 3.7 BigRIPS、ZeroDegree 各設定での1次ビーム強度

BigRIPS 設定	標的	ZeroDegree 設定	U ⁸⁶⁺ 1次ビーム 強度 [pA]
137Cs	C,CH2, CD2, empty	Bp+3%	~2.5
		Bp-0%	~2.5
		Bp-3%	~2.5
		Bp-6%	~13 (full beam)
		Bp-9%	~13 (full beam)
90Sr	C,CH2, CD2, empty	Bp+3%	~0.5
		Bp-0%	~0.5
		Bp-3%	~0.5
		Bp-6%	~5
		Bp-9%	~5
		Bp-12%	~5
		Bp-15%	~5

表 3.8 BigRIPS、ZeroDegree 各設定でのトリガーとトリガー計数率

BigRIPS 設定	標的	ZeroDegree 設定	トリガー	トリガー計数率 [kcps]
137Cs	C,CH2, CD2, empty	B ρ +3%	F7	~1.1
		B ρ -0%	F7	~1.1
		B ρ -3%	F7	~1.1
		B ρ -6%	DSF7 (DS=1/20) + F7xF11	~0.8
		B ρ -9%	DSF7 (DS=1/20) + F7xF11	~0.8
90Sr	C,CH2, CD2, empty	B ρ +3%	F7	~1.1
		B ρ -0%	F7	~1.1
		B ρ -3%	F7	~1.1
		B ρ -6%	DSF7 (DS=1/50) + F7xF11	~0.8
		B ρ -9%	DSF7 (DS=1/50) + F7xF11	~0.8
		B ρ -12%	DSF7 (DS=1/50) + F7xF11	~0.8
		B ρ -15%	DSF7 (DS=1/50) + F7xF11	~0.8

表 3.9 Cs-137 ビーム測定 of データ取得時間 (時間)

Cs-137		2次標的			
		C	CH2	CD2	Empty
B ρ 設定	+3%	1.5	3	1.5	1
	$\pm 0\%$	1.5	3	2	1
	-3%	1.5	2	1.5	1
	-6%	1.5	1.5	1.5	1
	-9%	1.5	1.5	1.5	1

表 3.10 Sr-90 ビーム測定 of データ取得時間 (時間)

Sr-90		2次標的			
		C	CH2	CD2	Empty
B ρ 設定	+3%	1	1	1	1
	$\pm 0\%$	1.5	1	1	1
	-3%	1	1	1	1
	-6%	1	1	1	1
	-9%	1	1	1	1
	-12%	-----	-----	-----	1
	-15%	-----	-----	-----	1

3.1.6 データ解析による反応チャンネルの同定

BigRIPS では、Bp、DE、TOF、TKE の情報から A/Q と Z 、 A と Z の決定をする [7]。

Sr-90 ビームの場合での BigRIPS および ZeroDegree で得られた粒子識別の一例を図 3.7 に示した。図 3.7 の図は左右とも横軸は A/Q 、縦軸は Z である。島状の領域がみえるが、このひとつひとつが核種に対応している。図 3.7 の左側の図は BigRIPS 第二ステージでの粒子識別の結果で、丸で囲っている領域が Sr-90 である。この領域にある Sr-90 の個数を数えることで、ビーム強度を見積もることができる。右側の図は ZeroDegree で得られた粒子識別の結果で、丸で囲っている領域は同じく Sr-90 に相当する。BigRIPS で Sr-90 を選択し、この条件で ZeroDegree の識別図から Sr-90 以外の反応生成物の個数を数えることで反応断面積を得ることができる。

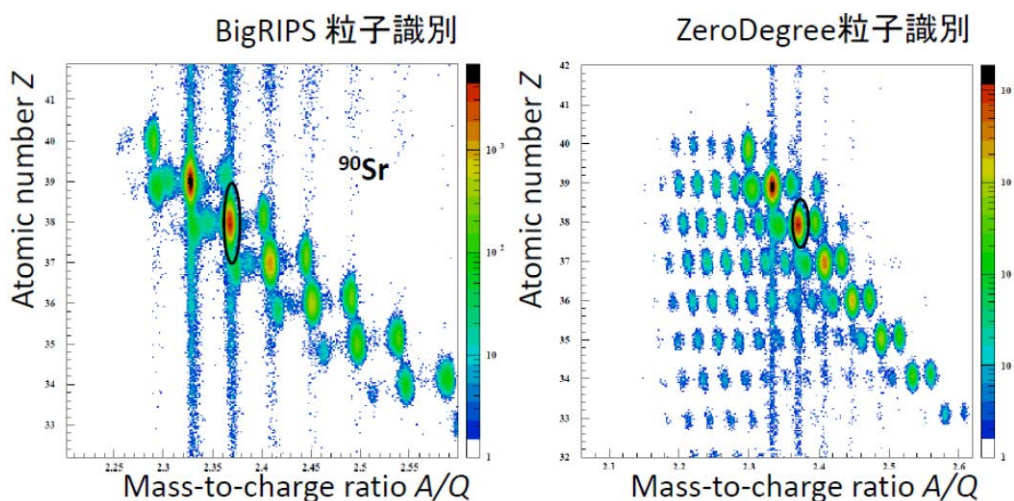


図 3.7 Sr-90 ビームでの BigRIPS と ZeroDegree の粒子識別図

図 3.8 は Cs-137 ビームの場合である。左側の図は、図 3.7 と同様に BigRIPS での粒子識別の図である。丸の領域は Cs-137 に相当する。図 3.8 の右側は、BigRIPS で Cs-137 を選んだ条件下での ZeroDegree の粒子識別結果である。右側の図の島状の核種は、すべて Cs-137 ビームで生成された反応生成物である。

Cs-137 ビームの場合は Sr-90 と異なり、電子が一つついたイオンが反応生成物の中に含まれる。図 3.9 は TKE 情報を利用して、 Q の同定ができることを示している。まず図 3.9 の右側の図で、例えば、 $Z=55$ の原子番号をもつ生成物を抜出してくる。抜出したものに対して、TKE の情報を利用して得られた質量数をもとめ、これを縦軸にしてプロットしたものが左側の図である。図からわかるように $Q=Z$ の集団と $Q=Z-1$ の集団が分離できている。解析では $Q=Z$ の条件、すなわち、電子が一つもついていない生成物を ZeroDegree で選択し、その数を数えることで反応断面積を求める。

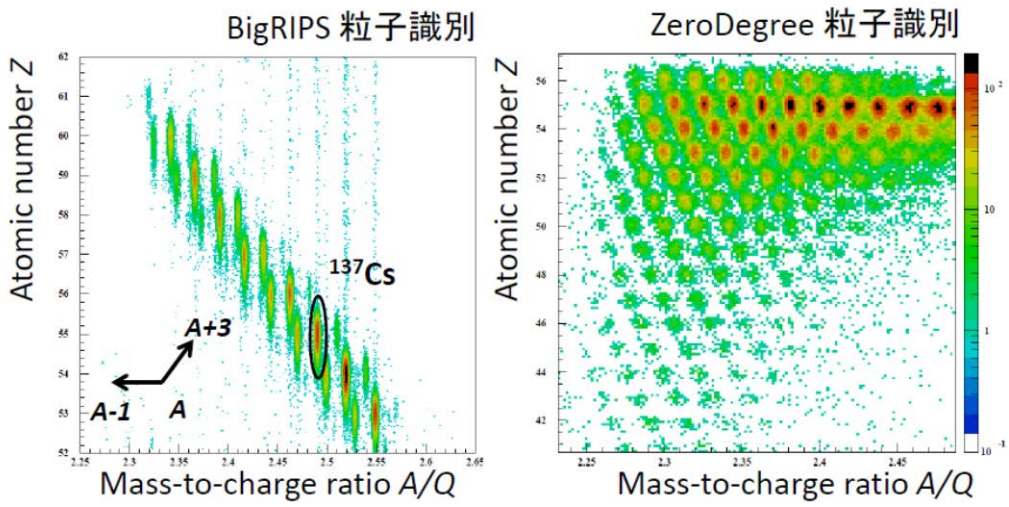


図 3.8 Cs-137 ビームでの BigRIPS と ZeroDegree の粒子識別図

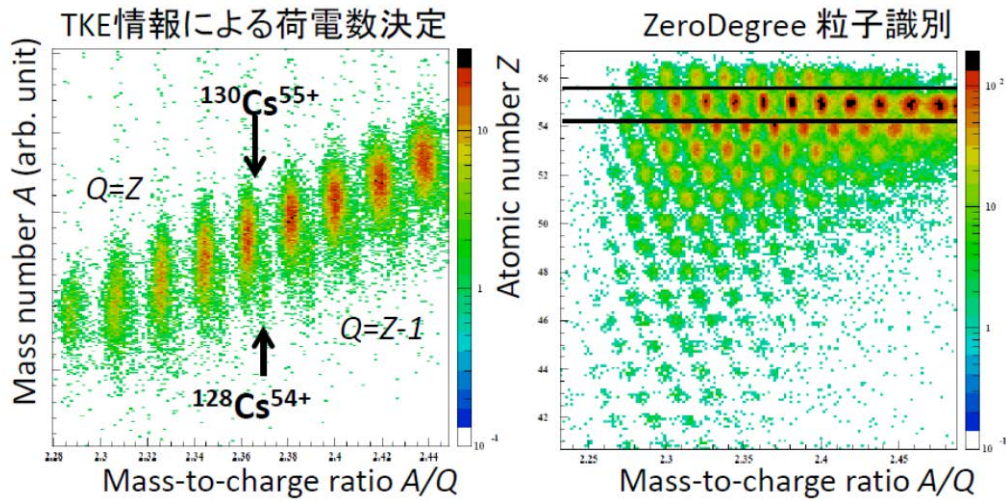


図 3.9 TKE 情報を利用した荷電数 Q の決定

このように、BigRIPS および ZeroDegree での粒子識別をおこなってビーム核種と反応生成核種の個数を数え上げ、反応断面積を導出する。反応断面積 s は以下の式を利用して求める。

$$\sigma = Y/N_{\text{tgt}}/I_{\text{beam}}/\epsilon_{\text{pid}}/Accept/r$$

上記式の各変数の意味は以下の通りである。

Y	反応生成物の個数	
I_{beam}	ビームの個数($^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$)	
N_{tgt}	標的の個数	
ϵ_{PID}	反応生成物の検出効率	>95%
$Accept$	ZeroDegreeの運動量アクセプタンス	100%
r	荷電数分布	85%

CH_2 、 CD_2 標的で得られた断面積 $\sigma(\text{CH}_2)$ 、 $\sigma(\text{CD}_2)$ と陽子、重陽子、炭素標的での断面積、 $\sigma(\text{p})$ 、 $\sigma(\text{d})$ 、 $\sigma(\text{C})$ の関係は以下の式で与えられる。

$$\sigma(\text{CH}_2) = \sigma(\text{C}) + 2\sigma(\text{p})$$

$$\sigma(\text{CD}_2) = \sigma(\text{C}) + 2\sigma(\text{d})$$

3.1.7 反応断面積の結果

Cs-137、Sr-90 ビームによる反応生成物の断面積を図 3.10、3.11 に、また数値データを表 3.11、3.12 にそれぞれ示した。なお、炭素データは未発表なためこの報告書にはデータを示していない。

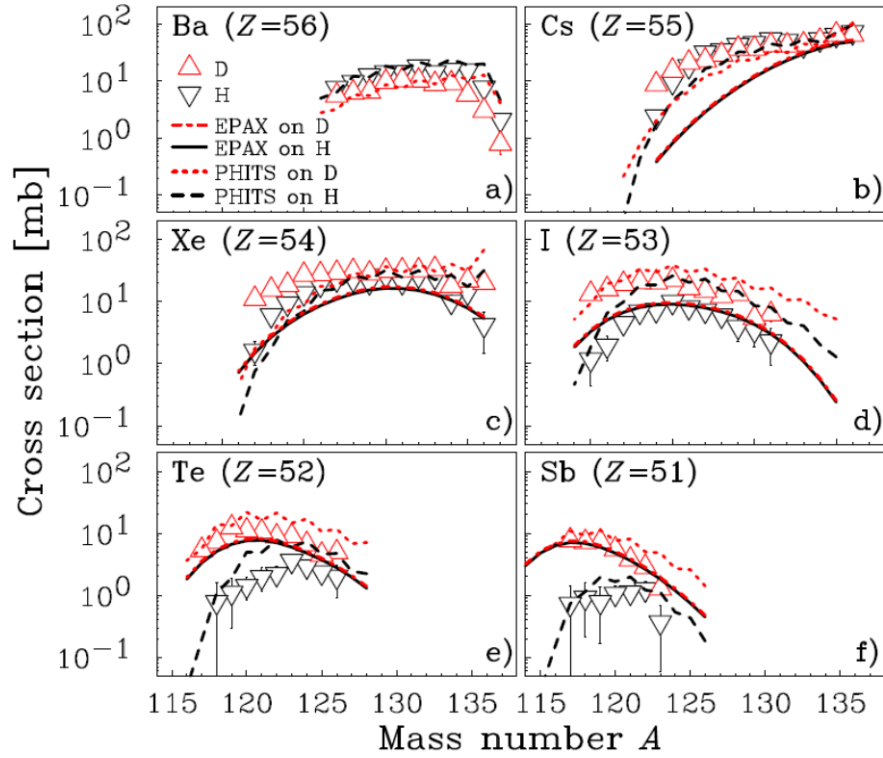


図 3.10 Cs-137+H、D による反応生成物の生成断面積

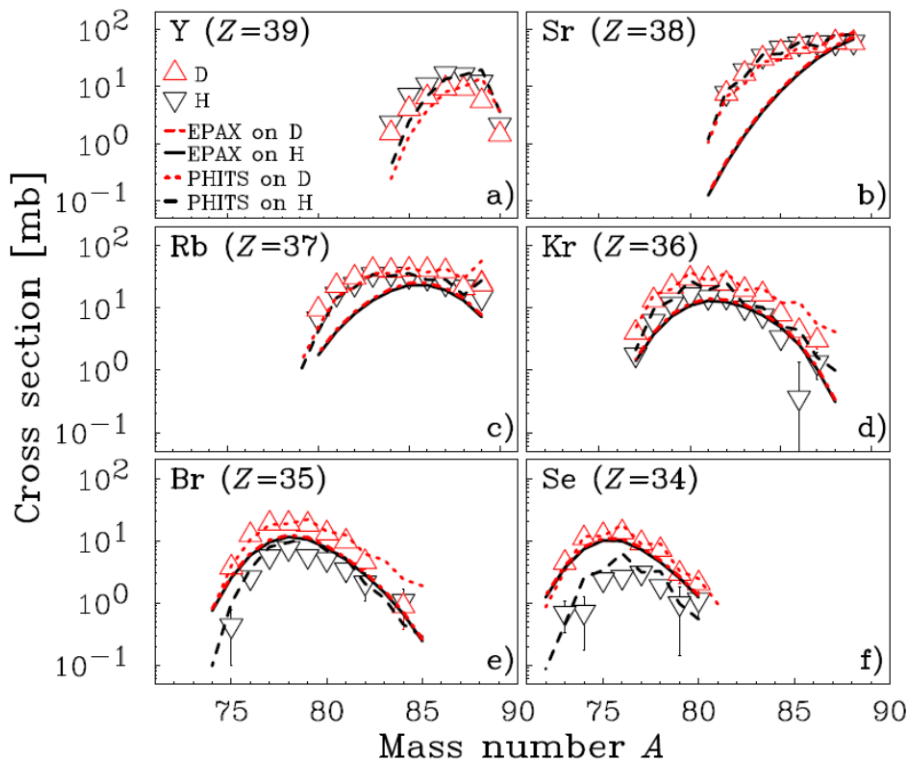


図 3.11 Sr-90+H、D による反応生成物の生成断面積

表 3.11 Cs-137 ビームの断面積数値データ

Reaction channel	Proton number	Mass number	Xsec_H [mb]	Xsec_H [mb]_err	Xsec_D [mb]	Xsec_D [mb]_err
Neutron removal	55	136	7.12E+01	7.14E+00	6.51E+01	6.37E+00
	55	135	6.39E+01	6.01E+00	6.53E+01	5.46E+00
	55	134	5.34E+01	5.32E+00	5.05E+01	4.75E+00
	55	133	4.21E+01	5.02E+00	4.36E+01	4.58E+00
	55	132	5.27E+01	5.14E+00	5.19E+01	4.64E+00
	55	133	4.80E+01	2.11E+00	4.31E+01	1.29E+00
	55	132	5.02E+01	2.09E+00	4.19E+01	1.25E+00
	55	131	5.33E+01	2.04E+00	4.24E+01	1.19E+00
	55	130	4.58E+01	1.89E+00	3.69E+01	1.10E+00
	55	129	4.28E+01	1.76E+00	3.67E+01	1.85E+00
	55	128	3.43E+01	1.57E+00	2.86E+01	1.64E+00
	55	127	3.16E+01	1.46E+00	2.31E+01	1.48E+00
	55	126	1.81E+01	1.17E+00	2.11E+01	1.33E+00
	55	125	9.61E+00	8.83E-01	1.52E+01	1.09E+00
55	124	2.39E+00	6.16E-01	8.73E+00	8.52E-01	
Charge exchange	56	137	2.09E+00	4.75E-01	7.94E-01	2.72E-01
	56	136	7.66E+00	7.63E-01	3.03E+00	3.98E-01
	56	135	1.53E+01	1.07E+00	5.80E+00	5.53E-01
	56	134	1.57E+01	1.12E+00	9.09E+00	6.27E-01
	56	133	1.42E+01	1.09E+00	8.80E+00	6.22E-01
	56	132	1.80E+01	1.12E+00	1.01E+01	6.00E-01
	56	131	1.43E+01	1.03E+00	1.04E+01	1.04E+00
	56	130	1.42E+01	9.51E-01	9.65E+00	9.40E-01
	56	129	1.25E+01	8.97E-01	6.52E+00	8.36E-01
	56	128	9.57E+00	7.94E-01	6.26E+00	7.80E-01
56	127	7.55E+00	6.68E-01	5.57E+00	6.71E-01	
1p removal from 137Cs	54	136	4.20E+00	2.73E+00	2.00E+01	2.70E+00
	54	135	1.41E+01	3.08E+00	2.19E+01	2.71E+00
	54	134	9.97E+00	3.10E+00	1.79E+01	2.76E+00
	54	133	2.54E+01	3.44E+00	3.36E+01	3.37E+00
	54	132	2.64E+01	3.69E+00	3.22E+01	3.52E+00
	54	131	2.06E+01	1.44E+00	3.22E+01	9.87E-01
	54	130	2.65E+01	1.52E+00	3.14E+01	9.75E-01
	54	129	2.06E+01	1.45E+00	2.86E+01	9.66E-01
	54	128	2.29E+01	1.45E+00	3.11E+01	9.61E-01
	54	127	2.28E+01	1.43E+00	2.92E+01	1.65E+00
	54	126	1.89E+01	1.34E+00	2.76E+01	1.58E+00
	54	125	1.37E+01	1.17E+00	2.71E+01	1.49E+00
	54	124	9.37E+00	1.04E+00	1.86E+01	1.30E+00
	54	123	6.07E+00	8.69E-01	1.56E+01	1.15E+00
54	122	1.61E+00	6.70E-01	1.11E+01	9.72E-01	
2p removal from 137Cs	53	131	2.28E+00	1.35E+00	6.30E+00	1.51E+00
	53	130	3.45E+00	1.60E+00	5.47E+00	1.00E+00
	53	129	3.94E+00	1.63E+00	1.32E+01	2.02E+00
	53	128	5.98E+00	8.10E-01	1.23E+01	5.86E-01
	53	127	7.17E+00	9.31E-01	1.51E+01	6.77E-01
	53	126	8.11E+00	1.00E+00	1.67E+01	7.27E-01
	53	125	9.85E+00	7.40E-01	2.23E+01	8.00E-01
	53	124	7.32E+00	1.05E+00	2.30E+01	1.41E+00
	53	123	6.89E+00	1.02E+00	2.23E+01	1.38E+00
	53	122	4.52E+00	9.37E-01	1.94E+01	1.30E+00
	53	121	1.95E+00	8.58E-01	1.59E+01	1.21E+00
53	120	1.17E+00	7.34E-01	1.34E+01	1.08E+00	
3p removal from 137Cs	52	126	2.71E+00	5.21E-01	4.97E+00	3.72E-01
	52	125	2.32E+00	5.65E-01	4.51E+00	4.03E-01
	52	124	2.92E+00	6.65E-01	6.69E+00	4.87E-01
	52	123	3.60E+00	7.14E-01	9.03E+00	5.35E-01
	52	122	2.29E+00	7.42E-01	1.12E+01	5.99E-01
	52	121	1.97E+00	7.78E-01	9.26E+00	6.04E-01
	52	120	2.20E+00	7.45E-01	8.93E+00	9.71E-01
	52	119	1.97E+00	8.21E-01	1.06E+01	1.08E+00
52	118	1.41E+00	5.70E-01	1.11E+01	1.12E+00	
4p removal from 137Cs	51	123	3.66E-01	3.07E-01	1.29E+00	2.34E-01
	51	122	1.25E+00	4.32E-01	2.88E+00	3.01E-01
	51	121	1.10E+00	3.15E-01	3.79E+00	3.72E-01
	51	120	1.05E+00	3.60E-01	5.51E+00	4.07E-01
	51	119	7.76E-01	6.08E-01	7.43E+00	5.06E-01
	51	118	1.57E+00	6.54E-01	7.20E+00	5.15E-01
	51	117	1.18E+00	7.38E-01	7.70E+00	9.57E-01

表 3.12 Sr-90 ビームの断面積数値データ

Reaction channel	Proton number	Mass number	Xsec_H [mb]	Xsec_H [mb]_err	Xsec_D [mb]	Xsec_D[mb]_err
Neutron removal	38	89	5.53E+01	4.98E+00	6.14E+01	4.74E+00
	38	88	6.22E+01	4.54E+00	6.36E+01	4.28E+00
	38	87	5.60E+01	4.00E+00	5.62E+01	3.77E+00
	38	86	5.81E+01	3.88E+00	4.93E+01	3.52E+00
	38	85	4.47E+01	1.21E+00	3.70E+01	1.05E+00
	38	84	3.40E+01	1.01E+00	3.07E+01	8.88E-01
	38	83	1.89E+01	7.45E-01	1.68E+01	6.55E-01
	38	82	7.61E+00	4.83E-01	7.51E+00	4.36E-01
Charge exchange	39	90	1.69E+00	6.57E-01	1.33E+00	5.93E-01
	39	89	1.10E+01	1.54E+00	4.47E+00	1.22E+00
	39	88	1.41E+01	6.30E-01	8.31E+00	5.11E-01
	39	87	1.70E+01	6.77E-01	9.15E+00	5.36E-01
	39	86	1.08E+01	5.51E-01	6.45E+00	4.48E-01
	39	85	7.13E+00	4.22E-01	4.05E+00	3.34E-01
	39	84	2.32E+00	2.59E-01	1.53E+00	2.15E-01
1p removal from 90Sr	37	89	1.47E+01	2.27E+00	2.41E+01	2.77E+00
	37	88	2.20E+01	2.47E+00	2.10E+01	2.74E+00
	37	87	2.46E+01	2.81E+00	3.94E+01	3.45E+00
	37	86	3.04E+01	2.94E+00	4.10E+01	3.50E+00
	37	85	3.24E+01	1.11E+00	4.16E+01	1.18E+00
	37	84	3.53E+01	1.08E+00	4.02E+01	1.12E+00
	37	83	3.49E+01	1.07E+00	4.10E+01	1.12E+00
	37	82	2.44E+01	9.24E-01	3.10E+01	8.78E-01
	37	81	1.69E+01	7.68E-01	2.27E+01	7.39E-01
2p removal from 90Sr	36	87	1.32E+00	6.00E-01	3.04E+00	8.28E-01
	36	86	3.61E-01	1.00E+00	4.30E+00	1.32E+00
	36	85	3.36E+00	1.23E+00	7.97E+00	1.58E+00
	36	84	7.60E+00	1.58E+00	1.67E+01	2.09E+00
	36	83	1.02E+01	6.84E-01	1.97E+01	7.84E-01
	36	82	1.51E+01	8.00E-01	2.47E+01	8.90E-01
	36	81	1.50E+01	8.02E-01	2.92E+01	8.27E-01
	36	80	1.65E+01	8.58E-01	2.97E+01	8.67E-01
	36	79	1.17E+01	7.17E-01	2.21E+01	7.34E-01
	36	78	6.20E+00	5.64E-01	1.34E+01	5.85E-01
3p removal from 90Sr	35	84	1.07E+00	6.01E-01	8.94E-01	5.28E-01
	35	82	2.10E+00	1.01E+00	4.54E+00	1.06E+00
	35	81	3.44E+00	4.54E-01	9.68E+00	5.48E-01
	35	80	5.03E+00	5.50E-01	1.31E+01	6.52E-01
	35	79	5.63E+00	6.05E-01	1.82E+01	6.64E-01
	35	78	7.49E+00	6.58E-01	1.88E+01	6.95E-01
	35	77	5.57E+00	6.57E-01	1.89E+01	7.11E-01
	35	76	2.56E+00	5.05E-01	1.23E+01	5.66E-01
4p removal from 90Sr	34	80	1.12E+00	5.68E-01	2.07E+00	6.18E-01
	34	79	9.81E-01	8.38E-01	2.95E+00	9.06E-01
	34	78	1.85E+00	4.06E-01	7.12E+00	4.94E-01
	34	77	3.04E+00	4.84E-01	9.14E+00	5.72E-01
	34	76	2.60E+00	5.69E-01	1.37E+01	6.27E-01
	34	75	2.37E+00	5.81E-01	1.23E+01	6.27E-01
	34	74	7.13E-01	5.36E-01	1.09E+01	5.97E-01
	34	73	6.92E-01	3.67E-01	4.41E+00	3.94E-01

3.1.8 考察

Cs-137、Sr-90 の中性子ノックアウト反応、荷電交換反応、核破碎反応などの断面積を世界で初めて取得し、示唆に富む非常に興味深いデータが得られた。

これまでの原子核反応の研究は、順反応、すなわち陽子や重陽子などの核変換誘発粒子をビームとした研究が殆どであった。実験室系に静止した標的核の反応生成物の断面積は放射化法などによって測定されていたが、比較的寿命の長い生成物に限定されるなど制限があった。今回採用した、RI ビームを利用した逆運動学手法では、RI ビームとほぼ同じスピードで反応生成物が前方に飛び出すため、反応生成物の粒子識別が容易であり、RI ビーム核種の中性子ノックアウト反応、荷電交換反応、核破碎反応の情報を一度に取得することができた。さらに逆運動学法の利点として、RI ビームのエネルギーは、RI ビーム生成分離装置で設定された磁気剛性 (Bp) で決まるため、ビームのエネルギーを一定にし、標的依存性、すなわち核変換誘発粒子依存性を系統的に調べることも容易となった。従来の手法では、同一の加速器から核子当たりのエネルギーが同一の多種加速粒子を得ることは困難であり、複数の加速器で異なったセットアップで実験せざるを得なかった。本事業では、世界初のデータ取得という観点だけでなく、核変換誘発粒子依存性を系統的に調べる新しい手法を提示することができた。

図 3.10 および 3.11 をみてわかることは、ビームから中性子のみを抜き出す反応は、陽子と重陽子がほぼ同じであることがわかる。一方で荷電交換反応をとまなう反応すなわち反応生成物の陽子数がひとつ増える反応をみてみると、陽子の断面積が大きいことがわかる。これは、一般に陽子と中性子間の相互作用が陽子-陽子、中性子-中性子間の相互作用に比べ大きいためだと考えられる。さらに興味深いのは、陽子、中性子ともにビームから数多く拔出す反応、すなわち核破碎反応の場合には、重陽子と陽子でまったく様相が変わる点である。重陽子は、2 核子系であり、陽子にくらべてほぼ 2 倍の断面積を与えると考えていたが、予想以上に重陽子は破碎能力があることがわかり、非常に興味深い。

次に以上のような測定結果に対して理論的な予想と比較してみる。図 3.10 および 3.11 に二つの断面積予想計算、EPAX[8]と PHITS[9]の計算結果を載せた。EPAX は比較的重い標的による核破碎反応の断面積予想を得意とする経験公式であるが、EPAX では陽子、重陽子の差がなく、破碎反応領域の断面積もよく再現していない。一方、PHITS は中性子や陽子標的にも対応できる計算ソフトであり、コード内に微視的な核内カスケード [10]や蒸発過程 [11]を取り入れている。PHITS による予想は、比較的よく実験データを再現していると言える。

これら陽子、重陽子データは平成 26 年度末に米国の物理学学術雑誌「Physical Review Letters」に投稿した [12]。

炭素標的データも興味深い振る舞いを示しており、陽子、重陽子データ出版後、すみやかに論文として世に提示したい。

3.1.9 まとめ

所期の目標通り Cs-137、Sr-90 を RI ビームとして取り出し、核子当たり 180 MeV での陽子、重陽子、炭素標的照射により、世界で初めて中性子ノックアウト反応、荷電交換反応、核破碎反応のデータ取得に成功した。陽子および重陽子標的のデータは、平成 26 年度末に学術雑誌に投稿し、現在査読中の状態である。引き続き、炭素標的データや荷電交換反応などについてのデータも論文投稿して出版する予定である。

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] <http://lise.nsl.msui.edu/lise.html>
- [5] J.P. Dufour et al., Nucl. Instr. and Meth. A 248 267-281 (1986).
- [6] H. Baba et al., Nucl. Instr. and Meth. A 616 65-68 (2010).
- [7] He Wang et al., Chinese Phys. Lett. 30, 042501 (2013).
- [8] K. Suemmerer et al., Phys. Rev. C 86, 014601 (2012).
- [9] T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol 50, 913 (2013).
- [10] A. Boudard et al., Phys. Rev. C 66, 044615 (2002).
- [11] S. Furihata, Nucl. Instru. Methods B171, 251 (2000).
- [12] He Wang, H. Otsu, H. Sakurai et al., submitted to Physical Review Letters.

3.2 将来に向けたデータ取得研究戦略の策定

平成25年度のワークショップ開催で明確になった問題点および構築された理工連携の人的ネットワークをもとに、将来に向けたデータ取得研究戦略をまとめ、藤田玲子氏がプログラムマネージャをつとめるImPACTプログラム「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」[1]に盛り込まれた。藤田ImPACTプログラムは平成26年10月2日より発足し、Pd-107、Zr-93、Se-79、Cs-135を中心とした、データ取得プログラムが開始されている。また、核変換システムに関する検討も藤田ImPACTで行うことになった。

(1) 研究項目1との関連性

研究項目1の平成26年4月の実験では、平成26年3月のワークショップに参加した九州大学の研究者が参加し、またデータ解析結果がほぼ出そろった平成26年7月頃には、ワークショップに参加した理論研究者、数値計算研究者との議論を開始している。

(2) データ取得戦略と核変換システム

平成26年3月のワークショップで得た人的ネットワークおよび研究項目1での実験実績を基盤として、長寿命FP核廃棄物に関連したデータ取得戦略や核変換システムの検討を進めた。これらの内容は、藤田ImPACTに取り上げられることになった。

参考文献

[1] <http://www.jst.go.jp/impact/program08.html>.

3.3 研究推進

研究代表者の下、ネットワーク形成を図りつつ、研究項目1の具体的な実験計画と研究項目2の将来展望とを融合し、最終年度の評価とまとめを行った。

研究項目1

- Cs-137、Sr-90ビームを生成することに成功し、核子当たり180 MeVでの陽子、重陽子、炭素標的で、中性子ノックアウト反応、荷電交換反応、核破碎反応の断面積を世界で初めて測定することに成功した。
- 陽子、重陽子標的データは、平成26年度末に学術雑誌に投稿した。現在査読中である。
- 本プログラム終了後も炭素核標的データや荷電交換反応などの論文発表を引き続き行う。

研究項目2

- 平成26年3月6日～8日に行ったワークショップに参加した一部の研究者と研究項目1に関連した共同研究を推進した。
- 研究項目1の実験実績とワークショップで得たネットワークを基盤にして、長寿命FP核廃棄物に関連したデータ取得戦略や核変換システムの検討を進めた。
- 検討内容は、藤田玲子氏がプログラムマネージャをつとめるImPACTプログラム「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」に盛り込まれた。

上記のように、研究代表者の下、研究項目1で実施した実験実績と研究項目2の将来展望およびネットワーク形成とが融合され、将来も引き続き藤田ImPACTプログラムで研究開発を実施することになった。

4. 結言

本原子力システム研究開発事業で平成25、26年の2年間、「長寿命核分裂核廃棄物の核変換データとその戦略」を推進することができ、理工連携の重要性を改めて感じる事となった。

平成25年度に本プログラムが開始し、様々な関係者と胸襟を開いて語る事ができ、福島原発事故後に対する研究者の思いは共通していることを再認識し、多くの方とネットワークを構築することができた。

平成26年度は、本プログラムの要の年であり、理研・RIビームファクトリーで、Cs-137、Sr-90を世界で初めてビームとして取り出し、逆運動学的手法で中性子ノックアウト、荷電交換反応、核破砕反応のデータを世界で初めて取得することに成功した。取得したデータは、工学的に重要なだけでなく原子核物理学においても未知の新しい情報を含んでおり、まさに工学的出口を意識した基礎研究の重要性を、身を以て実感することとなった。また反応学における逆運動学手法の利点をあらためて再認識した次第である。平成26年度末に、最初の研究成果をジャーナルに投稿し、査読結果をまっている状態であるが、出版がきまった段階で炭素標的や荷電交換反応のデータなど次のデータを出版する予定である。

長寿命FPデータ取得戦略およびFP核廃棄物の核変換システムについては、将来も引き続き藤田ImPACTプログラムで検討することになった。このImPACTプログラムにまい進し、廃棄物の放射能低減化と資源化に挑戦したいと思う。

なお、今回、原子力システムで本プログラムを取り上げていただき、これをきっかけにして人的ネットワークの拡大と様々なことを考える機会をいただいた。この場をお借りして、感謝申し上げます。