

平成 30 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

代理反応によるマイナーアクチノイド核分裂の  
即発中性子測定技術開発と  
中性子エネルギースペクトル評価

成果報告書

平成 31 年 3 月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

本報告書は、文部科学省の原子力システム  
研究委託事業による委託業務として国立研究開  
発法人 日本原子力研究開発機構が実施した  
平成 27-30 年度「代理反応によるマイナー  
アクチノイド核分裂の即発中性子測定技術開発  
と中性子エネルギースペクトル評価」  
の成果を取りとめたものです。

## 目次

概略	vii
1. はじめに	1
2. 業務計画	7
2.1 全体計画	7
2.2 平成 30 年度の成果の目標および業務の実施方法	8
3. 平成 27-30 年度の実施内容および成果	11
3.1 代理反応による即発中性子の測定	12
3.1.1 代理反応による核分裂即発中性子測定装置 (H27-28)	12
3.1.2 中性子検出器の開発 (H27)	16
3.1.3 $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 代理反応による即発中性子測定 (H29)	18
3.1.4 $^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による即発中性子測定 (H30)	24
3.1.5 核分裂片から放出される中性子数 (H29-30)	27
3.1.6 代理反応による即発中性子測定のまとめ	33
3.2 動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価 (再委託先：東京工業大学)	34
3.2.1 核分裂片の励起エネルギー計算 (H27-30)	34
3.2.2 核分裂片からの蒸発中性子スペクトル計算 (H29-30)	41
3.2.3 核分裂生成物の分布と即発中性子の関係 (H30)	43
3.2.4 スピン切断因子の効果 (H30)	46
3.2.5 ベータ崩壊への接続 (H29-30)	48
3.2.6 動力学計算と中性子放出計算のまとめ	50
3.3 研究推進	54
3.3.1 平成 27 年度ワークショップ (H27)	54
3.3.2 平成 28 年度ワークショップ (H28)	58
3.3.3 2017 年核データ研究会 (H29)	62
3.3.4 平成 30 年度ワークショップ (H30)	65
3.3.5 2018 年核データ研究会 (H30)	69
3.3.6 ワークショップおよび研究会のまとめ	69
結言	71

表一覧

表 3.3.3-1 「2017 年度核データ研究会」プログラム . . . . . 62

図一覧

図 1.0.0-1	$n+^{241}\text{Am}$ における即発中性子数	2
図 1.0.0-2	$n+^{235}\text{U}$ における即発中性子エネルギーの平均値	2
図 1.0.0-3	代理反応（多核子移行反応）による中性子入射核データ取得	3
図 1.0.0-4	核分裂過程	4
図 1.0.0-5	$^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$ の核分裂片に対する中性子放出数	4
図 1.0.0-6	$^{237}\text{Np}(n,f)$ の核分裂片に対する中性子放出数	5
図 1.0.0-7	核分裂過程の記述	6
図 2.1.0-1	本研究開発の年次ごとの計画	9
図 2.1.0-2	代理反応による即発中性子の測定装置	9
図 3.1.1-1	検出器のセットアップ (a) とシリコン $\Delta E-E$ 検出器 (b)	14
図 3.1.1-2	多芯線比例計数管 (a) とシリコン $\Delta E-E$ 検出器 (b)	15
図 3.1.1-3	核分裂真空散乱槽 (上) と真空散乱槽内の様子 (下)	15
図 3.1.2-1	有機液体シンチレーション検出器	16
図 3.1.2-2	中性子検出器の配置 (上) と一部の拡大図 (下)	17
図 3.1.3-1	$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 反応の散乱荷電粒子スペクトル	18
図 3.1.3-2	核分裂片の質量数分布	19
図 3.1.3-3	即発中性子と即発ガンマ線の識別	19
図 3.1.3-4	中性子飛行時間とパルス形状の相関	20
図 3.1.3-5	中性子飛行時間と核分裂片時間差の関係 (a) と時間補正後のスペクトル (b)	20
図 3.1.3-6	即発中性子エネルギースペクトル	21
図 3.1.3-7	即発中性子数の導出	21
図 3.1.3-8	$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 代理反応による即発中性子数の励起エネルギー依存性	22
図 3.1.3-9	$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 代理反応による熱中性子核分裂即発中性子数	22
図 3.1.4-1	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 反応の散乱荷電粒子スペクトル	25
図 3.1.4-2	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による核分裂片の質量数分布	25
図 3.1.4-3	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による即発中性子エネルギースペクトル	26
図 3.1.4-4	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による即発中性子数の励起エネルギー依存性	26
図 3.1.4-5	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による熱中性子核分裂即発中性子数	27
図 3.1.5-1	$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (1)	28
図 3.1.5-2	$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (2)	28
図 3.1.5-3	$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (3)	29
図 3.1.5-4	$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (4)	29
図 3.1.5-5	$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (5)	30
図 3.1.5-6	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (1)	30

図 3.1.5-7	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (2)	31
図 3.1.5-8	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (3)	31
図 3.1.5-9	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (4)	32
図 3.1.5-10	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による $\nu$ と収率 $Y$ の核分裂片依存性 (5)	32
図 3.1.6-1	(a) 熱中性子核分裂および (b) 自発核分裂における即発中性子数の文献値と本実験データとの比較	33
図 3.2.1-1	二中心殻模型における変数の定義	35
図 3.2.1-2	4次元 Langevin モデルで得られた複合核の変形度 $\delta$ 分布	35
図 3.2.1-3	変形度の平均値度 $\langle\delta\rangle$ と即発中性子多重度の平均値 $\bar{\nu}$	36
図 3.2.1-4	二中心殻模型における変数の定義	37
図 3.2.1-5	分裂直前の複合核の温度 $T$ とその平均値	37
図 3.2.1-6	Intrinsic な励起エネルギー $E_{ex}$	38
図 3.2.1-7	変形エネルギーと基底状態変形エネルギーおよびそれらの差	38
図 3.2.1-8	ネックパラメータ $\epsilon$ に対する変形度の変化	39
図 3.2.1-9	ネックパラメータ $\epsilon$ に対する励起エネルギーの変化	39
図 3.2.1-10	複合核励起エネルギーに対する $\delta$ 値の変化	40
図 3.2.2-1	Langevin 模型を取り入れた即発中性子スペクトル	41
図 3.2.3-1	$Z_P$ モデルの $\Delta Z(A)$	44
図 3.2.3-2	UCD 仮定の $\Delta Z(A)$	44
図 3.2.3-3	即発中性子多重度の質量数依存	45
図 3.2.3-4	即発中性子多重度の分布	45
図 3.2.3-5	即発中性子スペクトル	46
図 3.2.4-1	即発中性子スペクトルのスピン切断因子による変化	47
図 3.2.4-2	即発中性子多重度の質量数依存に対するスピン切断因子の効果	47
図 3.2.5-1	累積収率の質量数分布	48
図 3.2.5-2	累積収率の電荷分布	49
図 3.2.5-3	軽い核分裂生成物の収率分布	49
図 3.2.5-4	重い軽い核分裂生成物の収率分布	49
図 3.2.5-5	$^{95}\text{Zr}$ の累積収率	50
図 3.2.5-6	$^{97}\text{Zr}$ の累積収率	50
図 3.2.5-7	$^{99}\text{Mo}$ の累積収率	50
図 3.2.5-8	$^{132}\text{Te}$ の累積収率	50
図 3.2.5-9	$^{140}\text{Ba}$ の累積収率	51
図 3.2.5-10	$^{143}\text{Ce}$ の累積収率	51
図 3.2.5-11	$^{147}\text{Nd}$ の累積収率	51
図 3.3.1-1	第 27 回 ASRC 国際ワークショップの集合写真	54
図 3.3.1-2	第 27 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (1/2)	55
図 3.3.1-3	第 27 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (2/2)	56

図 3.3.2-1	第 40 回 ASRC 国際ワークショップの集合写真	58
図 3.3.2-2	第 40 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (1/2)	59
図 3.3.2-3	第 40 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (2/2)	60
図 3.3.3-1	2017 年核データ研究会の集合写真	63
図 3.3.3-2	2017 年度核データ研究会の若手ポスター賞受賞者	64
図 3.3.4-1	第 54 回 ASRC 国際ワークショップの集合写真	65
図 3.3.4-2	第 54 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (1/4)	66
図 3.3.4-3	第 54 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (2/4)	67
図 3.3.4-4	第 54 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (3/4)	68
図 3.3.4-5	第 54 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (4/4)	69
図 3.3.5-1	最優秀ポスター賞	69

## 略語一覧

**ADS (Accelerator-Driven System)** : 加速器駆動型炉

**ASRC (Advanced Science Research Center, JAEA)** : 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター

**ENDF (Evaluated Nuclear Data File)** : 米国で開発された評価済み核データライブラリ

**JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library)** : 日本で開発された評価済み核データライブラリ

**MA (Minor Actinide)** : マイナーアクチノイド

**MWPC (Multi-wire Proportional Counter)** : 多芯線式比例計数管

**Scission (Scission point)** : 核分裂によって原子核が切断した瞬間および状態を表す。ここでは通常、核分裂片は大きく変形し、変形エネルギーを有している。また、この状態におけるクーロン斥力によって2つの核分裂片が加速され、核分裂片が運動エネルギーを有することになる。

**SF (Spontaneous Fission)** : 自発核分裂

**TCSM (Two-center shell model)** : 二中心殻模型

**TKE (Total Kinetic Energy)** : 2つの核分裂片の運動エネルギーの和

**UCD (Unchanged Charge Density)** : 均一電荷密度 (2つの核分裂片の陽子数と中性子数の比は、複合核のそれと同じになるという考え)

## 概略

原子力発電によって発生する長寿命マイナーアクチノイド (MA: 例えば  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241,243}\text{Am}$ ) 原子核を核分裂によって核変換し、将来にわたって管理する廃棄物量と保管期間を縮減することは、原子力エネルギー利用を進める上で重要な課題である。核変換を目的とした高速炉や加速器駆動型炉 (ADS: Accelerator-Driven System) を設計するためには、MA の核データを精度よく測定し、これを核設計に反映させる必要があるものの、現状での MA の核データの精度は十分なレベルに達していない [1, 2]。原子炉の実効増倍率に影響を与える核データのうち、ここでは即発中性子数  $\nu$  および中性子エネルギースペクトル  $\chi(E_n)$  に着目した。

本研究では、MA やアクチノイド原子核の核分裂で放出される即発中性子数  $\nu$  とエネルギースペクトル  $\chi(E_n)$ 、およびこれらの入射中性子エネルギー ( $E_{n,i}$ ) 依存性 (最大  $E_{n,i} = 50$  MeV 程度) の実験データの取得を目指す。特に、ADS ではより高エネルギー領域までのデータが必要になる点に着目する。中性子源を用いた  $\nu$  や  $\chi(E_n)$  の測定では、散乱した中性子が検出器に入ることによるバックグラウンドの混入が問題となる。また、高エネルギー領域のデータを取得する場合、中性子源を単色化することも容易ではなく、さらに高エネルギー領域の中性子飛行時間分析では、十分な統計を取得することは困難と言える。本研究は、重イオン反応を用いた多核子移行反応手法によってこの問題を解決し、中性子入射データを重イオン反応で代理してデータを取得する。この方法を代理反応手法と言う [3]。具体的には、酸素 18 ( $^{18}\text{O}$ ) 等の重イオンビームを  $^{237}\text{Np}$  などアクチノイド標的に照射して多核子移行反応を起こす。これによって  $^{237}\text{Np}$  などの長寿命 MA はもとより、中性子源を用いた実験では測定が不可能な短寿命 MA 核種の中性子入射核分裂において、 $\nu$  値および  $\chi(E_n)$  を取得するとともに、特に  $\nu$  については入射中性子エネルギー  $E_{n,in}$  に対する変化を測定する。

また本研究では、核分裂過程で放出される即発中性子の起源を明らかにする測定に取り組む。即発中性子は、十分加速した後の核分裂片から放出されることがわかっている [7, 8]。これまで我々は、代理反応により、生成される核分裂片の質量数を核分裂事象ごとに決定できるシステムを構築してきた。実験では、2つの核分裂片と、即発中性子の同時計測を行うことで、個々の核分裂片から放出される中性子の数、およびこれらの複合核励起エネルギー依存性 (代理反応における入射中性子依存性と等価) の測定を目指し、即発中性子の起源を理解する。この取り組みは、物理的根拠に立脚して即発中性子数核データを評価することにつながる。

即発中性子の起源を説明するためには、さらにさかのぼって核分裂過程を理解する必要がある。より基本的な概念から核分裂を理解するため、核分裂理論の構築を行う。具体的には、動力学モデル (ランジェバン方程式 [9]) を用いる。これは、複合核をスタートとして、原子核の変形を時間を追って追跡していく手法であり、殻構造とよばれる原子核内部の準位構造や摩擦といった概念を取り入れ、より基本的な物理量に立脚したモデルの構築を行う。これにより、核分裂片の質量数分布、scission (原子核の切断直後の状態) における個々の核分裂片の変形度を計算する。変形エネルギーは、加速後に核分裂片が有すべき励起エネルギーを与えるもので、結果的に即発中性子を蒸発させる源となる。この蒸発過程は、統計モデルによって記述する。一連の理論計算から、個々の核分裂片から放出される即発中性子の数とエネルギースペクトルを決定する。核データとして最終的に得るべき  $\nu$  と  $\chi(E_n)$  は、個々の核分裂片から放出される即発中性子を積算して与え

ることとする。

上述の内容に沿い、以下の3つの項目を立てて研究を進めることとした。

1. 「代理反応による即発中性子測定」(日本原子力研究開発機構)
2. 「動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価」(東京工業大学[東工大])
3. 「研究推進」

これに対し、最終年度となる平成30年度の目標を以下のように設定した。

1. 「代理反応による即発中性子の測定」

マイナーアクチノイド原子核の中性子入射核分裂に伴って放出される即発中性子数とエネルギースペクトルを代理反応によって測定するための測定装置を用いて、 $^{18}\text{O}$ 等のビームと $^{243}\text{Am}$ 等の標的核との多核子移行反応によって生成される $^{244}\text{Am}$ 、 $^{245}\text{Cm}$ 、 $^{247}\text{Bk}$ といった複合核の核分裂における即発中性子の数とエネルギースペクトルを測定する。得られたデータを解釈し、最終年度としてのまとめを行う。

2. 「動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価」

核分裂片のアイソトープ分布やスピン分布の違いが即発中性子放出に与える影響を調べ、核分裂中性子スペクトルを決定する汎用性の高い方法を提案する。複合核の励起エネルギーの関数として核分裂片や複合核から放出される中性子の数を計算することにより、即発中性子の起源を考察する。

3. 「研究推進」

研究代表者の下で、各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

平成27-30年度の実施内容を以下にまとめる。

1. 「代理反応による即発中性子の測定」

多核子移行反応(代理反応)により、核子移行チャンネルを同定するシリコン $\Delta$ E-E検出器、核分裂を検出する多芯線比例計数管に加え、即発中性子を測定するため有機液体シンチレーション検出器を組み合わせた測定装置を平成28年度までに完成させた。これにより、様々な原子核に対し、最大励起エネルギー50MeVまでの複合核から放出される即発中性子、および即発中性子エネルギースペクトルを測定する実験ができるようになった。これを用いて、2つの反応系 $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  および  $^{18}\text{O}+^{237}\text{Am}$  の測定を平成29年度と30年度に行った。 $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  の反応からは $^{236-240}\text{Np}$ 、 $^{238-242}\text{Pu}$ 、 $^{239-243}\text{Am}$  の15核種について、 $^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$  の反応からは $^{242-246}\text{Am}$ 、 $^{244-248}\text{Cm}$ 、 $^{246-250}\text{Bk}$  の15核種のデータを得た。すなわち、長寿命核種 $^{236,237}\text{Np}$ 、 $^{239,240}\text{Pu}$ 、 $^{241,243}\text{Am}$ 、 $^{244,245,246}\text{Cm}$  および短寿命核種 $^{238}\text{Np}$ 、 $^{237,238}\text{Pu}$ 、 $^{239,240,242,244}\text{Am}$ 、 $^{243}\text{Cm}$ 、 $^{245,246,247,248}\text{Bk}$  の中性子入射核分裂における $\nu$ 値およ

びスペクトル  $\chi(E_n)$  を取得した。ここで、即発中性子の測定データとして、核種  $^{236,240}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240,241,243,245,246}\text{Am}$ ,  $^{246,247,248,249,250}\text{Bk}$  の 14 核種（複合核）は、EXFOR に登録されていない、本研究で初めて取得した新データとなった。個々の核分裂片から放出される中性子数  $\nu(m)$ 、およびこの分布の複合核励起エネルギー依存性を、平均の複合核励起エネルギー 10, 20, 30, 40, 50MeV に対して測定した。統計に課題はあるものの、このような即発中性子の詳細測定を実現する実験セットアップは他になく、核分裂過程を解明するためのベースを構築することができた。

## 2. 「動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価」

核分裂を記述する 4 次元 Langevin 計算モデルを開発した。ここで得られる核分裂片の変形度から変形エネルギーを求め、さらに変形振動のエネルギーや熱励起に対応する温度の情報と併せて二つの核分裂片の励起エネルギーを独立に求める方法を開発した。さらに、それを基に統計崩壊および  $\beta$ -崩壊まで接続する理論計算手法を開発、中性子数やエネルギースペクトルを核分裂の基礎過程から導出することに成功した。我々の知る限りこのような計算が可能なのは世界でも本研究のみである。現状では計算結果と実験値との完全な一致には至らないものの、多くの点でこれまでの理論に比べて現象論的パラメータを排除することで即発核分裂中性子の起源についての知見を基本的な立場から得られるようになった。

## 3. 「研究推進」

毎年度、東海において、国際ワークショップまたは核データに関する研究会を開催した。これにより、本研究開発における日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」とする）と東京工業大学（以下、「東工大とする」）の間で実験および理論計算の進捗について議論した。また、得られた成果を国際的に広く発信することができた。

主たる成果として、以下が挙げられる。

1. いずれの核種においても、複合核の励起エネルギーが高くなるにつれて即発中性子数が増加する結果を得た。また、この変化から、熱中性子エネルギー入射核分裂に対応する即発中性子数を導出したところ、Np, Pu, Am, Cm, Bk と元素が増えるに従って、放出される中性子数は系統的に多くなった。これは、LENDL-4.0 ライブラリーの傾向と一致した。これは、重い元素同位体ほど核分裂で解放されるエネルギーの Q 値が高いこと、これに応じて中性子の起源となっている核分裂片の励起エネルギーが増加していくためであると言える。
2. 複合核の励起エネルギーに対する核分裂片の変形パラメータ  $\delta$  を調べた。複合核の励起エネルギーが 7, 12, 20 MeV と大きくなると、軽い核分裂片のパラメータの値は常に一定であるものの、重い核分裂片の値はプラスに向かって増えてた。すなわち、複合核の励起エネルギーとともに、重い核分裂片の励起エネルギーだけがが増えることを意味するもので、低エネルギー核分裂における未解決問題を説明した成果と言える。
3. 国際ワークショップの開催において、多くの外国人研究者を集めることができた。核分裂の実験技術、および半古典的な理論計算において、日本が指導的な立場にあることを世界的

に認知されることにつながった。

## 1. はじめに

原子力発電によって発生する長寿命マイナーアクチノイド (MA: Minor Actinides, 例えば  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241,243}\text{Am}$ ) 原子核を核分裂によって核変換し、将来にわたって管理する廃棄物量と保管期間を縮減することは、原子力エネルギー利用を進める上で重要な課題である。核変換を目的とした高速炉や加速器駆動型炉 (ADS: Accelerator-Driven System) を設計するためには、MA の核データを精度よく測定し、これを核設計に反映させる必要がある。原子炉の実効増倍率に影響を与える核データとして、核分裂や捕獲断面積、即発中性子数  $\nu$  および中性子エネルギースペクトル  $\chi(E_n)$  等が重要である。MA を多量に含んだ核変換炉の実効増倍率 ( $k_{\text{eff}}$ ) の計算値は、利用する核データライブラリーによって大きく異なることがわかっており、十分な信頼度で ADS の核設計ができる状況ではない [1, 2]。  $k_{\text{eff}}$  に大きな計算誤算を与える原因の MA やアクチノイド核種として  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{241,243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  などがあるが、ライブラリー間に現れる数値の差異は、これら核種に対して十分な精度のデータが存在しないことを示している。

本研究では、MA やアクチノイド原子核の核分裂で放出される即発中性子数  $\nu$  と中性子エネルギースペクトル  $\chi(E_n)$ 、およびこれらの入射中性子エネルギー ( $E_{n,\text{in}}$ ) 依存性 (最大  $E_{n,\text{in}} = 50$  MeV 程度) の実験データの取得を目指す。特に、ADS ではより高エネルギー領域までのデータが必要になる点に着目する。これらデータの現状を図 1.0.0-1 に示す。図は  $n + ^{241}\text{Am}$  における  $\nu$  値を示したもので、 $E_{n,\text{in}}$  に対してプロットしている。実験データが少ないのに加え、 $E_{n,\text{in}} = 15$  MeV までしかない。図 1.0.0-2 は、 $\chi(E_n)$  の平均エネルギー  $\langle \chi(E_n) \rangle$  を示しているが、 $n + ^{235}\text{U}$  反応でさえ  $E_{n,\text{in}}$  に対して単調増加するのか、変動するのかもはっきりしていない。直接的に中性子源を用いた  $\nu$  や  $\chi(E_n)$  の測定の困難さは、(a) 散乱した中性子が検出器に入ることによるバックグラウンドの混入、(b) 高エネルギー中性子源の単色化の難しさまたは高エネルギー領域での中性子飛行時間分析の難しさにある。本研究は、重イオン反応を用いた多核子移行反応によってこの問題を解決し、中性子入射データを重イオン反応で代理してデータを取得する。この方法を代理反応手法と言う。我々は、これまで代理反応による核分裂測定装置を開発し、代理反応手法によって核分裂片の質量数分布を測定してきた [3, 4, 5]。これと中性子検出器を組み合わせることで、代理反応による即発中性子測定を目指す。

代理反応とは、図 1.0.0-3 に示すように、中性子入射反応の核データを、加速した重イオンを用いて同じ複合核を形成し、その後の崩壊過程を観測して核分裂等のデータを取得する方法である。図は、 $n + ^{238}\text{Np}$  のデータを取得する例を示している。 $^{238}\text{Np}$  の半減期は 2.1 日と短いため、実質的に標的を準備することは不可能であり、中性子源を使った直接測定は不可能である。多核子移行反応では、利用できる標的を使い (図では  $^{237}\text{Np}$ )、これに  $^{18}\text{O}$  を照射することで同じ複合核  $^{239}\text{Np}$  を合成することができ、核データが取得可能となる。当然のことながら、 $n + ^{243}\text{Am}$  といったデータも取得できるが、中性子ビームを用いた実験と異なり、重イオンビームを用いるために中性子バックグラウンドが少なく、即発中性子データの測定に適していると考えられる。さらにこの手法の特徴は、一回の実験で 10 核種以上にわたる複合核ができることから、複数の核種にわたる実験値の違いを系統だてて調べるのに適している。また、複合核の励起状態 (励起エネルギー  $E^*$ ) として、核分裂しきい値 (核分裂障壁に近い値) から、50MeV を超える領域まで測定が可能である。

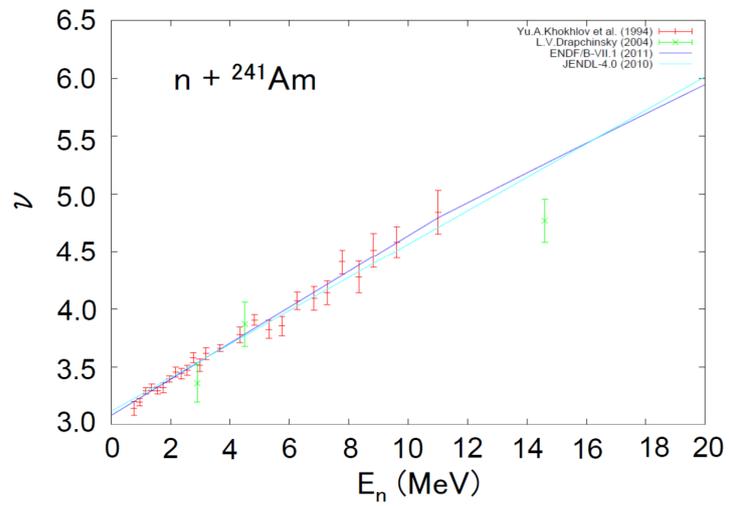


図 1.0.0-1:  $n + {}^{241}\text{Am}$  における即発中性子数

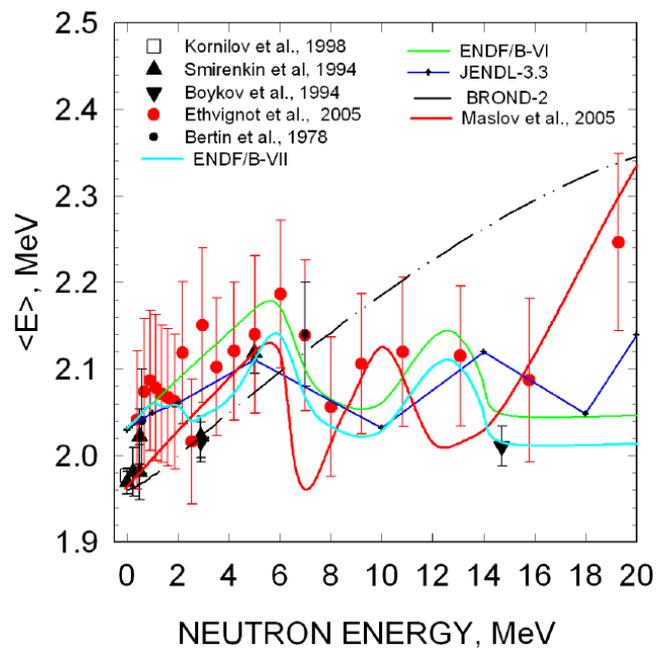


図 1.0.0-2:  $n + {}^{235}\text{U}$  における即発中性子エネルギーの平均値

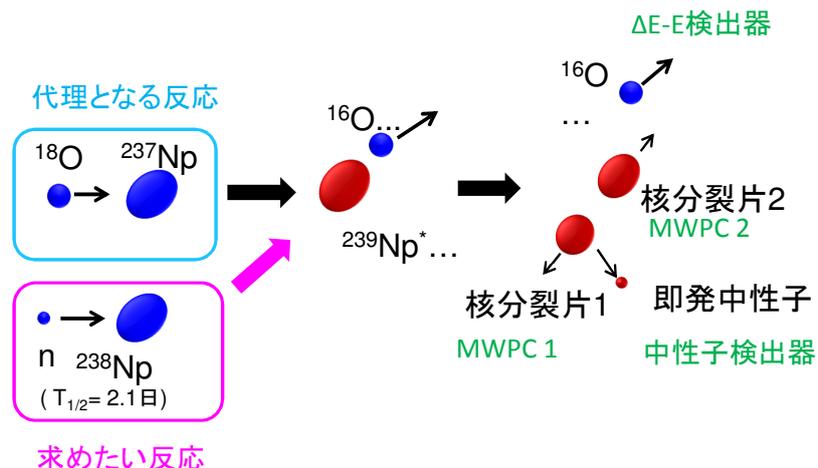


図 1.0.0-3: 代理反応（多核子移行反応）による中性子入射核データ取得

これらは、中性子入射エネルギー  $E_{n,\text{in}}$  を変化させることに対応する。実験では、イベントごとに生成される複合核核種と励起エネルギーを分析する必要がある。このため、本研究ではシリコン  $\Delta E$ -E 検出器を用いる。また、核分裂で生成される核分裂片を多芯線比例計数管（Multi-Wire Proportional Counter : MWPC）で検出するとともに、同時に生成する即発中性子を中性子検出器を用いて測定する。

本研究では、酸素 18 ( $^{18}\text{O}$ ) 等の重イオンビームを  $^{237}\text{Np}$  や  $^{243}\text{Am}$  に照射することで代理反応測定を行う。これによって  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{243}\text{Am}$  等の長寿命 MA から短寿命 MA に至る多くの核種において、 $\nu$  値および  $\chi(E_n)$  を取得するとともに、特に  $\nu$  値については入射中性子  $E_{n,\text{in}}$  に対する依存性を測定する。これら代理反応測定により、従来の中性子源を用いた従来の方法では達成されておらず、また今後の測定の見通しが無い核種や中性子エネルギー領域のデータの取得をめざす。

また、本研究では核分裂過程で放出される即発中性子の起源を明らかにし、この起源を考慮したモデルによって  $\chi(E_n)$  の評価方法を確立することを目指す。図 1.0.0-4 は、核分裂過程を模式的に示したものである。scission においては、2つの核分裂片は変形しており、変形エネルギーを有している。また、系はクーロンエネルギーを有しており、これを源として2つの核分裂片が加速される。核分裂片が加速されて運動エネルギーを有した後、scission 時に蓄積していた変形エネルギーは内部励起エネルギーに変換され、これに比例して即発中性子が放出される。すなわち、即発中性子の数は、scission における核分裂片の変形度を表しており、上流をたどれば原子核が有するポテンシャル曲面（図 1.0.0-7）の情報を与えることになる。すなわち、即発中性子の起源を知ることが、核分裂過程を理解することにつながる。核データ評価の視点に立てば、核分裂過程を理解することによって初めて物理的に根拠のある核データ評価が可能となる。

例えば、 $\chi(E_n)$  を与えるモデルとしてロスアラモスモデルがある [6]。このモデルは、重・軽2つの代表的な核分裂片を選んでエネルギースペクトル  $\chi_H(E_n)$  および  $\chi_L(E_n)$  を導き、これらを平均して  $\chi(E_n)$  を以下で求めている。

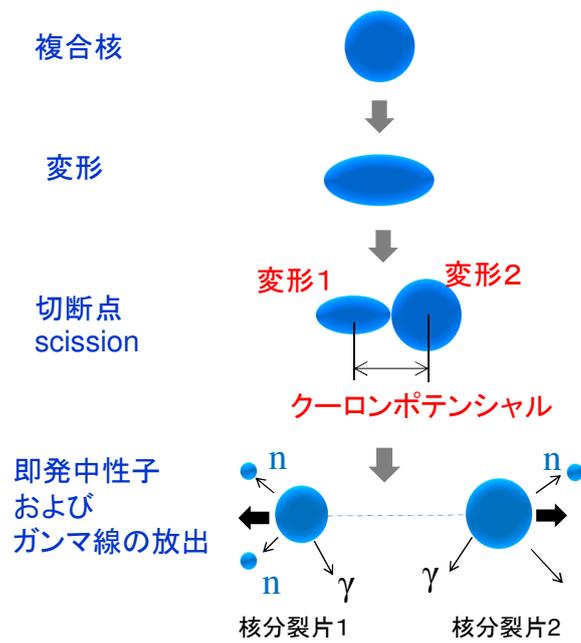


図 1.0.0-4: 核分裂過程

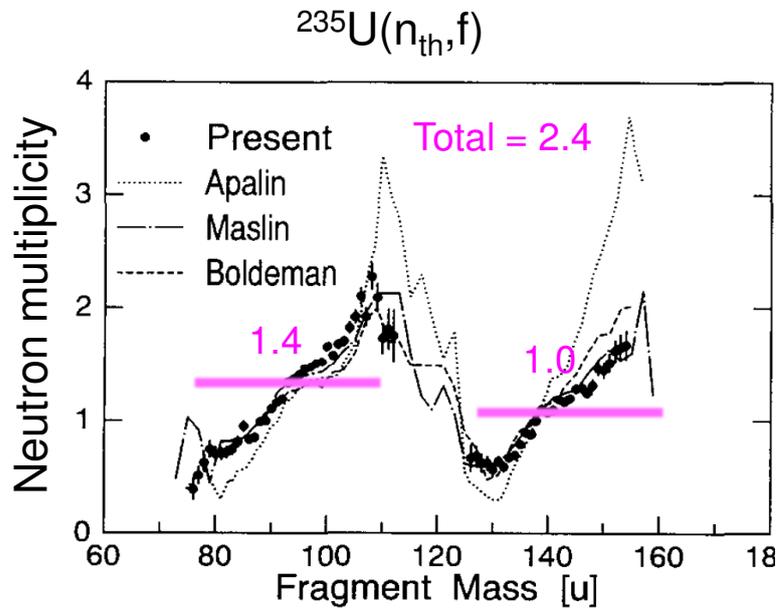


図 1.0.0-5:  $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$  の核分裂片に対する中性子放出数

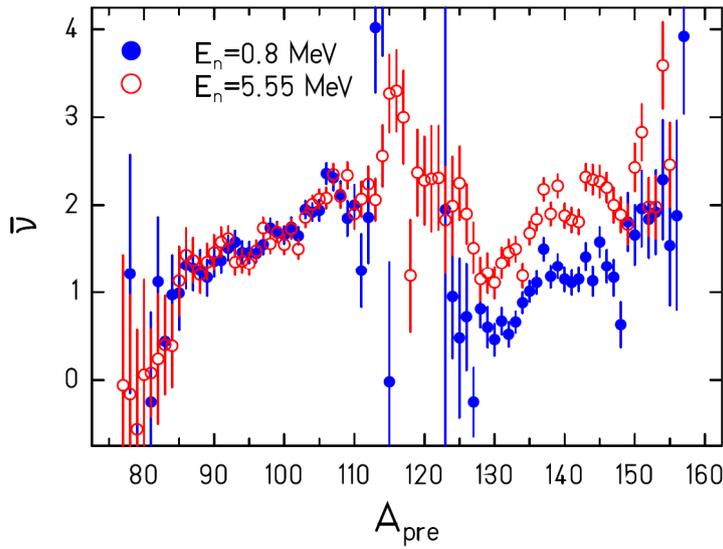


図 1.0.0-6:  $^{237}\text{Np}(n,f)$  の核分裂片に対する中性子放出数

$$\chi(E_n) = \frac{\chi_H(E_n) + \chi_L(E_n)}{2} \quad (1.1)$$

式 (1.1) は、重および軽核分裂片から放出される中性子数が等しいと仮定したものであるが、先の  $^{235}\text{U}(n_{th},f)$  の測定では、軽核分裂片から平均 1.4 個、重核分裂片からは 1.0 個と偏って放出されることがわかっている [7]。さらに、図 1.0.0-5 に示すように、それぞれの核分裂片から放出される中性子の数は大きく異なっており、質量数  $m$  に対して鋸歯状の形となっている。これは、即発中性子の起源の複雑さを示している。さらに、文献 [8] のデータ (図 1.0.0-6) が示すように、入射中性子エネルギーが  $E_n = 0.8\text{MeV}$  から  $5.5\text{MeV}$  に増加した場合 (複合核の励起エネルギー  $E^*$  は  $6.3\text{MeV}$  から  $11.1\text{MeV}$  に増加)、重核分裂片の方だけ中性子数が増加している。このような事実から、(1.1) 式は、実際に起きている現象を正しく取り込んでいない評価式と言える。このため、(1.1) 式は、入射中性子エネルギー依存性や他の核種へ適用する場合、大きな誤差を生む可能性がある。我々は、代理反応測定において核分裂事象ごとに核分裂片質量数 ( $m_1$  と  $m_2$ ) を決定することができる手法を確立してきた。本研究では、核分裂片と即発中性子の相関測定を行うことで図 1.0.0-5 および図 1.0.0-6 に示すような  $\nu(m)$  とその  $E_{n,\text{in}}$  に対する変化に着目し、即発中性子の起源にせまる。

さらに、この  $\nu(m)$  を決定するため、最新の核分裂理論モデルの開発も行う。具体的には、動力学モデル (ランジェバン方程式 [9]) を用いて核分裂を記述し、このモデルの高度化をはかる。このモデルは、図 1.0.0-7 が示すように、原子核の内部構造 (微視構造) を取り入れたポテンシャル曲面を計算し、原子核の形状の変化を時間を追って追跡する手法である。また、複合核の励起エネルギーの設定も可能である。この計算により、核分裂片の質量数分布を計算することができるほか、scission まで計算を進めることで、切斷時における 2 つの核分裂片の変形エネルギーを決定することができる。すなわち、核分裂片が十分加速された後に有すべき励起エネルギーを決定

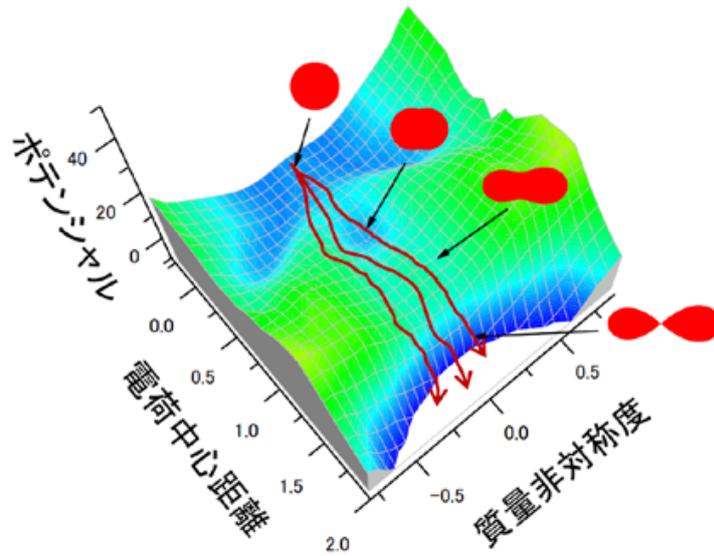


図 1.0.0-7: 核分裂過程の記述

し、統計モデルによって中性子蒸発による脱励起を計算して中性子エネルギー Spektral を核分裂片 ( $m$ ) ごとに計算する ( $\chi_m(E_n)$ )。生成されるすべての核分裂片からの中性子の寄与を積算することで、最終的な中性子エネルギー Spektral  $\chi(E_n)$  を決定する。

#### 参考文献

- [1] K. Nishihara *et al.*, Proceedings of 11th OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission and Products Partitioning and Transmutation; 2010, 1-5.Nov. San Francisco.
- [2] H. Iwamoto *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol., **50**, 856 (2013).
- [3] R. L eguillon *et al.*, Phys. Lett. B, **761**, 125 (2016).
- [4] K. Hirose *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 222501 (2017).
- [5] A.N. Andreyev, K. Nishio and K-H Schmidt, Rep. Prog. Phys. **81**, 016301 (2018).
- [6] D.G. Madland and J.R. Nix, Nucl. Sci. Eng., **81**, 213 (1982).
- [7] K. Nishio *et al.*, Nucl. Phys. **A632**, 540 (1998).
- [8] A.A. Naqvi *et al.*, Phys. Rev. C, **34**, 218 (1986).
- [9] Y. Aritomo *et al.*, Phys. Rev. C, **90**, 054609 (2014).

## 2. 業務計画

### 2.1 全体計画

代理反応手法により、核分裂に伴って放出される即発中性子数 $\nu$ とエネルギースペクトル $\chi(E_n)$ 、前者についてはこれらの入射中性子エネルギー $E_{n,i}$ 依存性（最大50MeV）のデータ取得することを目的とする。また、核分裂片と中性子数の相関データ $\nu(m)$ を取得する。測定対象核種として、長寿命から短寿命に至るMA核種の中性子入射核データの取得を目指す。また、動力学モデルによる核分裂理論を構築することで、即発中性子数とエネルギースペクトルの評価方法の構築を目指す。

この目的の達成のため、全体計画を以下の3つの項目で進める。

#### 1. 代理反応による即発中性子の測定

実験は、原子力機構タンDEM加速器施設に設置してある既存の代理反応・核分裂片質量数分布測定装置の周囲に、即発中性子を検出するための中性子検出器を設置することで即発中性子測定装置を完成させる。 $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  および  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  反応による多核子移行反応を用いることで、長寿命核種  $^{236,237}\text{Np}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{241,243}\text{Am}$ ,  $^{244,245,246}\text{Cm}$  および短寿命核種  $^{238}\text{Np}$ ,  $^{237,238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240,242,244}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Cm}$ ,  $^{245,246,247,248}\text{Bk}$  の中性子入射核分裂における $\nu$ 値およびスペクトル $\chi(E_n)$ の取得を目指す。また、即発中性子の起源を調べるため、核分裂片質量数 $m$ と即発中性子の相関から $\nu(m)$ の導出を目指す。

##### (a) 代理反応中性子測定装置の開発

設置する装置を図2.1.0-2に示す。多核子移行反応で生成される荷電粒子（図の例では $^{14}\text{N}$ ）を、前方に置いたシリコン $\Delta E$ - $E$ 検出器で測定し、多核子移行チャンネルを判別して生成される複合核（図の例では $^{241}\text{Pu}^*$ ）を同定するとともに、複合核の励起エネルギーを決定する。核分裂で生成される2つの核分裂片を多芯線比例計数管（MWPC）で検出し、運動学的に核分裂片の質量数を決定する。本研究では、このまわりに中性子検出器（液体シンチレータ）を増設して即発中性子を検出する。この装置により、核分裂片と中性子の相関測定が可能となり、 $\nu$ と $\chi(E_n)$ に加えて核分裂片ごとに即発中性子数 $\nu(m)$ を測定できるようにする。中性子検出器は、統計を上げるために33台とする。これらシステムの構築とテスト実験を平成27～28年度にかけて行う。

##### (b) 代理反応による即発中性子データの取得

平成29と30年度に、それぞれ $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  および  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  の実験を行ってデータ取得を完成させる。

#### 2. 動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価

核分裂過程を記述し、即発中性子の起源を考察するため、ランジェバン方程式に基づく動力学モデル [9] を高度化する。このモデルは、図1.0.0-7に示すように、原子核

の形状の時間発展を追跡して核分裂を記述するものである。切断直後の scission での変形度を決定することで、加速後の核分裂片が持つことになる励起エネルギーを決定する。このモデルでは、核分裂片の質量数分布も導出でき、本実験データと比較することでモデルの向上を行う。

(a) 動力学モデルの高度化

ランジェバン方程式において、原子核の形状を与えるパラメータを3次元から4次元に拡張する。すなわち、2つの核分裂片の変形度 ( $\delta_1$  と  $\delta_2$ ) を独立に扱うことで、原子核が切断した直後の核分裂の変形エネルギーを重・軽の核分裂片それぞれに独立に決定し、 $\nu(m)$  を計算できるようにする。特に、複合核の励起エネルギーが上昇した場合の  $\nu(m)$  の変化に着目し、理論の構築をめざす。

(b) 中性子エネルギースペクトルの評価

個々の核分裂片から放出される中性子のエネルギースペクトル  $\chi_m(E_n)$  の計算は、統計モデル計算を用いて行う。核分裂片は中性子過剰な原子核であるため、2重魔法数  $^{132}\text{Sn}$  近傍の原子核の構造を受けたスペクトル形状を示すと考えられる。すなわち、 $\chi_m(E_n)$  は、原子核の殻構造を反映している。 $\chi_m(E_n)$  は核分裂片の重心系で与えられるので、核分裂片の速度を考慮して実験室系に変換する。最終的に得られるスペクトル  $\chi(E_n)$  は、 $\nu(m)$  と  $\chi_m(E_n)$  を用いて記述する。 $\nu(m)$  は核分裂がたどる変形経路を反映し、また  $\chi_m(E_n)$  は中性子過剰核の構造を反映したものであり、本研究における取組みは、核データ評価にとどまらず、原子核物理上の重要な課題へのチャレンジとなる。

### 3. 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意見を聞きながら研究を進める。このため、核分裂に関する会合を開催する。

なお、平成27－30年度にわたる計画を、2.1.0-1に示す。

## 2.2 平成30年度の成果の目標および業務の実施方法

上記目的のため、最終年度となる平成30年度は以下の項目を実施し、最終まとめを行った。

### 1. 代理反応による即発中性子の測定

マイナーアクチノイド原子核の中性子入射核分裂に伴って放出される即発中性子数とエネルギースペクトルを代理反応によって測定するための測定装置を用いて、 $^{18}\text{O}$ 等のビームと $^{243}\text{Am}$ 等の標的核との多核子移行反応によって生成される $^{244}\text{Am}$ 、 $^{245}\text{Cm}$ 、 $^{247}\text{Bk}$ といった複合核の核分裂における即発中性子の数とエネルギースペクトルを測定する。

### 2. 動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価

核分裂片のアイソトープ分布やスピン分布の違いが即発中性子放出に与える影響を調べ、核分裂中性子スペクトルを決定する汎用性の高い方法を提案する。複合核の励起エネルギー

	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度
1. 代理反応による即発中性子の測定	即発中性子検出器の開発	代理反応即発中性子測定装置の開発と試験	$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 実験によるデータ取得	$^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 実験によるデータ取得とまとめ 全体まとめ
2. 動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価	核分裂ランジュバンモデル4次元化のためのポテンシャル及び輸送係数計算	核分裂ランジュバンモデル4次元化計算コードの構築	核分裂片から萌出される中性子を計算するための統計モデル計算の構築	4次元ランジュバンモデルと統計モデルの結合による即発中性子スペクトルの評価
3. 研究推進	ワークショップ開催と議論1	ワークショップ開催と議論2	ワークショップ開催と議論3	ワークショップ開催と議論4

図 2.1.0-1: 本研究開発の年次ごとの計画

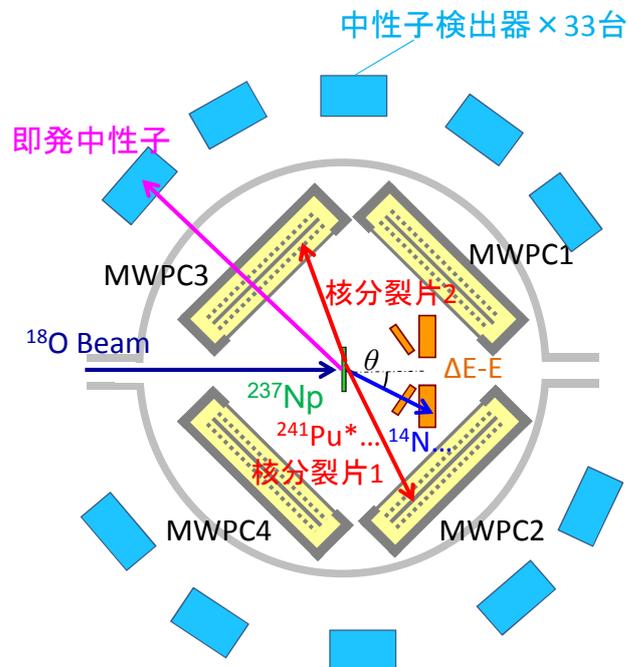


図 2.1.0-2: 代理反応による即発中性子の測定装置

の関数として核分裂片や複合核から放出される中性子の数を計算することにより、即発中性子の起源を考察する。

### 3. 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

### 3. 平成 27-30 年度の実施内容および成果

平成 27—30 年度に行った、「代理反応による即発中性子の測定」、「動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価」、「研究推進」の三項目全てについて事業を遂行した。以下、実施内容および成果について説明する。

### 3.1 代理反応による即発中性子の測定

#### 3.1.1 代理反応による核分裂即発中性子測定装置 (H27-28)

代理反応手法を用いて核分裂に伴う即発中性子データを取得するため、図 2.1.0-2 に示した装置開発を完成させた。この装置には、以下の機器と検出器等が含まれる。特に、中性子検出器は、本研究プログラムで開発する検出器に位置付けた。

- (1) 核分裂真空散乱槽
- (2) 核分裂片を検出するための多芯線比例計数管 (MWPC)
- (3) 多核子移行反応で生成される荷電粒子を識別して複合核核種を同定し、さらに励起エネルギーを決定するためのシリコン  $\Delta E$ -E 検出器
- (4) 即発中性子を検出するための中性子検出器

##### (1) 核分裂真空散乱槽

反応で生成される荷電粒子や核分裂片は、真空散乱槽内で検出する。真空排気装置や真空バルブなど、主要な装置は所有しているものを使用する。真空散乱槽の本体中心部分はステンレス材料で製作しているが、この両側に厚さ 4mm、内径 800mm のアルミニウム製のふたを取りつける構造とし、このふたとステンレス本体との間を O-リングによってシールできる構造となっている。薄いアルミニウムを採用したのは、核分裂に伴って放出される中性子を真空散乱槽の外側で検出するためである。核分裂真空散乱槽の入口は、真空用 4 象限スリットを設けてビームラインに接続している。これにより、水平方向および垂直方向に  $\pm 20$ mm の範囲でビームをコリメートする機能を持たせた。これにより、ビーム操作によってビームが検出器に当たるのを防ぐとともに、細いビーム形状を形成することができるようにした。

真空散乱槽中にセットした検出器の配置を図 3.1.1-1 に示す。検出器は、以下に示すように 4 台の MWPC と、シリコン  $\Delta E$ -E 検出器から構成した。なお、MWPC は、中心がビームに対して  $\pm 45^\circ$  と  $\pm 135^\circ$  の位置となるように設置し、標的と MWPC のカソード間の距離を 224mm とした。それぞれの検出器の写真を図 3.1.1-2 に示す。

##### (2) 多芯線比例計数管

核分裂片を検出するため、MWPC (図 3.1.1-1(a) および図 3.1.1-2(a)) を用いる。これにより、核分裂片の入射位置や検出した時間情報を得ることができる。ガスで動作させることから、シリコン検出器に比べて放射線による劣化がないこと、アバランシェ領域で動作させることから、早いパルス特性が得られる特徴がある。一般に、このようなガス検出器では、粒子のエネルギーを正確に読みとることはできない。しかし、本研究目的では、核分裂片とビーム散乱粒子など軽イオンとの分離ができればよく、MWPC でも目的を達成することができる。また、有感面積の大きな検出器を製作できることから、核分裂検出器として最適であり、大面積の MWPC を利用する。

MWPC の有感面積は 200mm $\times$ 200mm である。MWPC は 3 平面の電極から構成される。中心面電極は、負のバイアス電圧を印加するカソード面とした。これは 0.85 ミクロン厚のマイラーフィルムの両側に金を蒸着 (50  $\mu$  g/cm<sup>2</sup> 程度) したもので、面全体が電気伝導を持つようにした。こ

の両側をワイヤー平面で覆う構造となっており、ワイヤー面がグラウンドとなる。このため、ガス増幅はカソードとワイヤー面の間で起こることになる。カソードとワイヤー面の距離を 5.0mm とした。ワイヤーは直径 20 ミクロンのタングステン線（金でコーティングされたもの）を用いて製作してある。隣り合うワイヤーの間の距離を 20mm とした。前面のワイヤーは上下方向に、カソード後面のワイヤーは水平方向に張った。ガス増幅は、各ワイヤーの近傍で局所的に起こる。このため、電荷が集まったワイヤーの位置から、核分裂片の入射位置を決定することができる。位置決めはディレイラン方式で行うことにした。各ワイヤーどうしはディレイランで結ばれている。ディレイラインとして、タップ間のディレイを 3ns とした。2 本のワイヤを電氣的に接続し、2 本を 1 組として位置決めをすることにした。従って、位置分解能を 4.0mm とした。標的と MWPC の距離 224mm を用いた飛行時間分析で運動学的に核分裂片の質量数分布を決定するが、4mm の位置分解能は十分な精度となる。

MWPC は 1.5Torr のイソブタンガスで動作させた。また、各電極からの信号は、Lemo コネクタを用いて外部に取り出せるようにした。MWPC の中心カソードには、約  $-450\text{V}$  を印加してガス増幅を得る。パルスの立ち上がり時間として 5ns 未満の性能を有した。この値は、核分裂片の飛行時間分析を行う上で十分な性能と言える。

核分裂片が MWPC 内部に入射できるよう、入射窓として 2.0 ミクロンの厚さのマイラーフィルムを使用した。なお、このフィルムは、状況に応じて張り替えできるように、Oリングを使ってシールドするデザインとなっている。

図 3.1.1-3 (上) は、MWPC を設置した核分裂真空散乱槽を示したもので、(下) は真空散乱槽内を映したものである。写真のように MWPC の入射窓はアルミ蒸着された 2 ミクロンのマイラーフィルム面になっている。

### (3) シリコン $\Delta E$ -E 検出器

核子移行反応によって生成される荷電粒子の種類（同位体）を識別し、粒子のエネルギーを識別して複合核の励起エネルギーを決定するために  $\Delta E$ -E 検出器を用いる（図 3.1.1-1(b) および図 3.1.1-2(b)）。

薄いシリコンウェハを通過した荷電粒子は、入射エネルギーが同じであっても核種が異なればウエハにおけるエネルギー損失量は異なる。このエネルギー損失量を記録することで、特定の原子核（同位体）を分離する。ここでは、核子あたり約 10MeV の酸素同位体を分離するために、厚さ 75 ミクロンの  $\Delta E$  検出器を使用する。 $\Delta E$  検出器 1 台は、有感面積  $220\text{mm}^2$  を有する設計とし、中心角度  $22.5^\circ$ 、外形  $\phi 42.4\text{mm}$ 、内径  $\phi 26.0\text{mm}$  に近接する台形である。

$\Delta E$  検出器の厚さは  $75\mu\text{m}$  であるが、有感面積内において厚さの一様性が  $\pm 1\mu\text{m}$  内に収まる性能を持たせる。 $\Delta E$  検出器を最大 12 個使って図 3.1.1-1(b)、図 3.1.1-2(b) のように構成した。核子移行反応で放出される  $^{16}\text{O}$  などの粒子は、ビームに対して特定の角度まわりに放出される指向性を持つ。このように円環型の構造にすることで、この指向性にもとづいて効率よく荷電粒子を検出する。

$\Delta E$ -E 検出器を構成する E 検出器部分はマイクロン社製で、円環型の構造を有する。シリコンの厚さは  $300\mu\text{m}$  であり、検出器内で荷電粒子を完全に停止させ、全エネルギーを測定する。中心部には、直径 47.7mm の穴があいており、この中心がビーム軸になるように設置する。検出器の

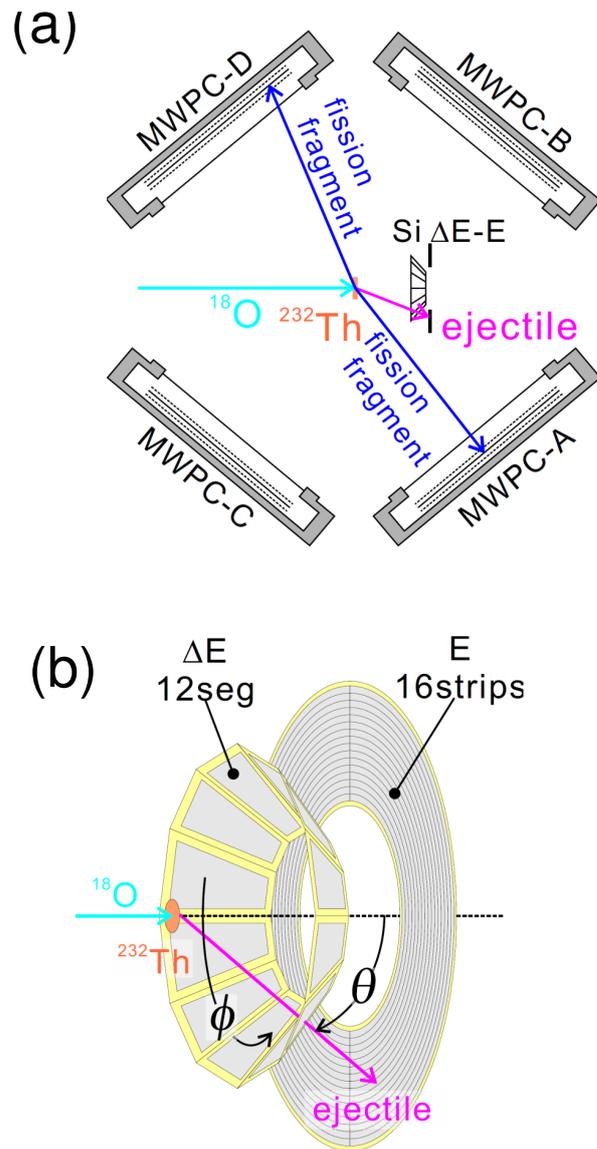
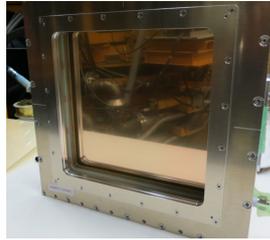


図 3.1.1-1: 検出器のセットアップ (a) とシリコン  $\Delta E-E$  検出器 (b)

(a) MWPC



(b)  $\Delta E$ -E

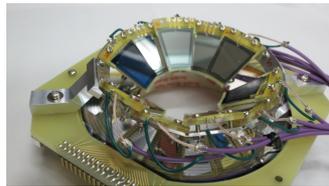


図 3.1.1-2: 多芯線比例計数管 (a) とシリコン  $\Delta E$ -E 検出器 (b)

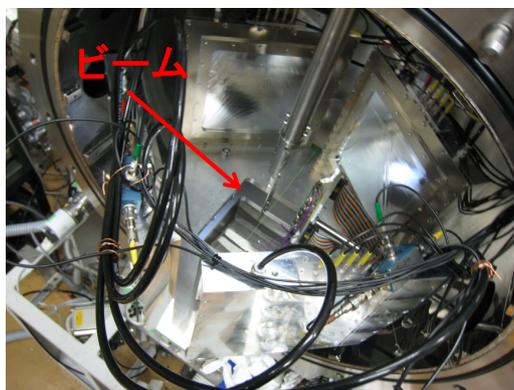
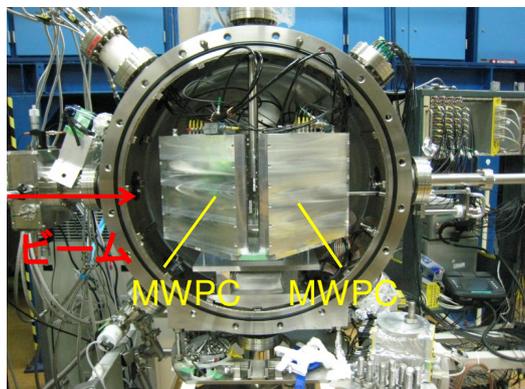


図 3.1.1-3: 核分裂真空散乱槽 (上) と真空散乱槽内の様子 (下)

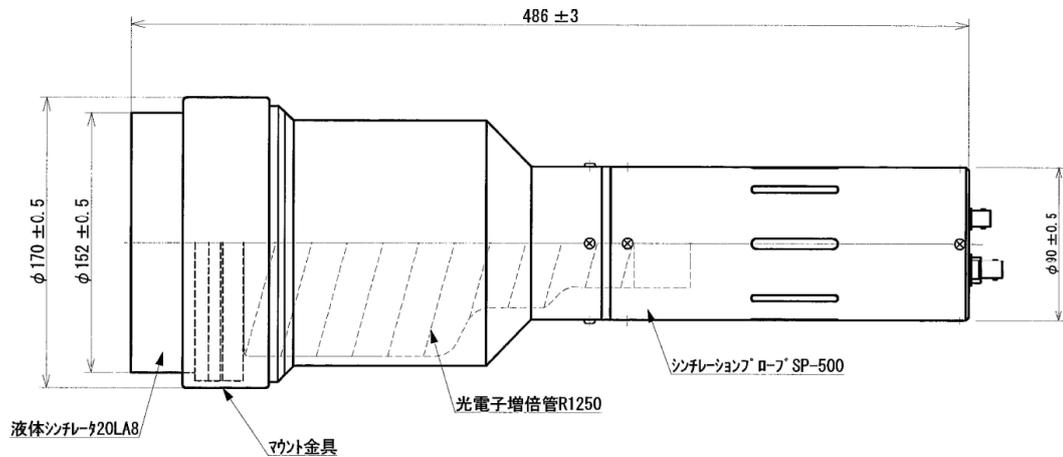


図 3.1.2-1: 有機液体シンチレーション検出器

有感面積は、内径 47.9mm と外径 96.1mm に囲まれた部分である。同心円状に 16 段のストリップ状の電極がある。このため、ビーム軸に対する荷電粒子の放出角度 ( $\theta$ ; 図 3.1.1-1(b)) を決定することができ、荷電粒子の運動エネルギーの角度依存性を補正することができる。

### 3.1.2 中性子検出器の開発 (H27)

#### 1. 中性子検出器のデザイン

即発中性子検出器として有機液体シンチレーション検出器を用いることにした。タイミング信号が早いため、高計数率に耐えるとともに時間分解能に優れる特徴がある。また、アノードの信号形状から、中性子とガンマ線の波形弁別が可能である。検出器の設計図を図 3.1.2-1 に示す。検出器サイズとして、厚さを 2 インチとした。これは、即発中性子のエネルギーを飛行時間分析法で分析するため、飛行距離の不確かさを小さくするためである。一方、検出効率を上げるために検出器の直径を 5 インチとした。これに浜松ホトニクス製の 5 インチ光電子増倍管 (R1250) を接続した。

#### 2. 中性子検出器のマウント

図 3.1.2-2(上) は、核分裂真空散乱槽のまわりに中性子検出器を設置した様子を示す。標的の中心から 700 mm の位置に中性子検出器のヘッド面が来るようにした。中性子検出器の設置位置に自由度を与えるため、これを取り付けるアームの機能として、検出器の高さ、標的位置からの距離、および向きを調整できるようにした。従来から所有していた 18 台の検出器に加え、新たに 15 台の検出器をマウントすることで合計 33 台の設置が完了した。



図 3.1.2-2: 中性子検出器の配置 (上) と一部の拡大図 (下)

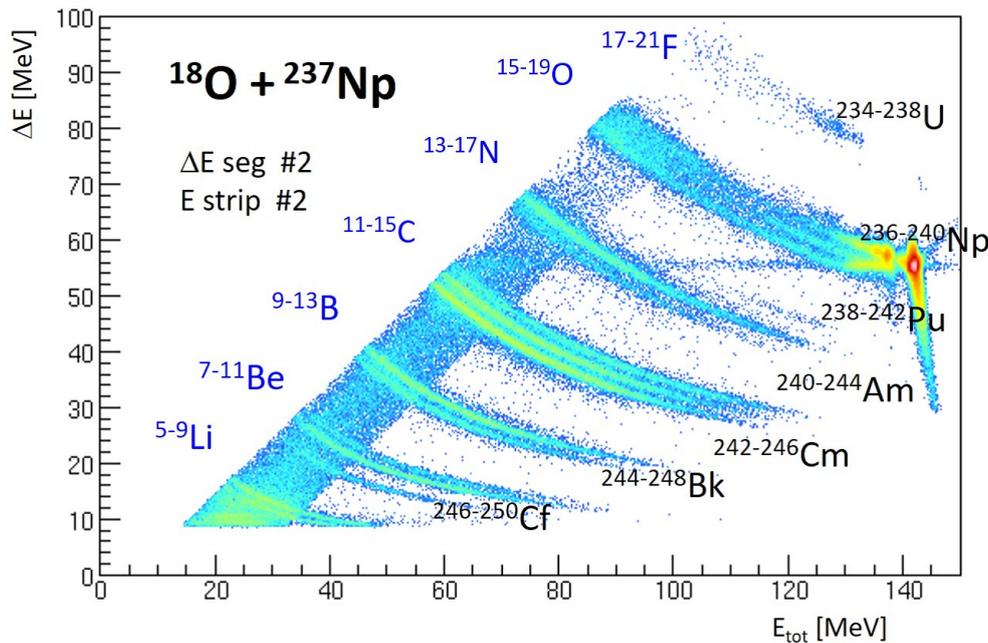


図 3.1.3-1:  $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  反応の散乱荷電粒子スペクトル

### 3.1.3 $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ 代理反応による即発中性子測定 (H29)

平成 29 年度は、前述のセットアップにより、原子力機構タンデム加速器で得られる  $^{18}\text{O}$  ビームを  $^{237}\text{Np}$  標的に照射することで、Np, Pu, Am の 15 核種の同位体について即発中性子数とエネルギースペクトルを得ることを目指した。タンデム電圧 16MV とし、イオン価数+8 の酸素を加速して 144 MeV のビームを得て実験を行った。実験は、4 日間行った。

図 3.1.3-1 は、本実験で得られた  $\Delta E$ -E スペクトルの例である。 $^{15-19}\text{O}$ 、 $^{13-17}\text{N}$ 、 $^{11-15}\text{C}$ 、といった散乱荷電粒子の同位体をきれいに弁別できている。それぞれのラインにゲートをかけて解析することにより、 $^{236-240}\text{Np}$ 、 $^{238-242}\text{Pu}$ 、 $^{239-243}\text{Am}$  の複合核の核分裂における即発中性子データを得た。

図 3.1.3-2 は、 $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  反応で得られた複合核の核分裂における核分裂片の質量数分布である。複合核の励起エネルギー範囲に応じ、励起エネルギー 10-20MeV、20-30MeV、30-40MeV、40-50MeV の領域ごとに分布を得た。励起エネルギーが低い場合、ふた山構造の質量非対称分裂を示す一方、励起エネルギーが高くなるとこの構造が弱まり、対称核分裂に変化していく様子がわかる。また、励起エネルギーが一定の場合、重い元素ほどふた山構造がつぶれ、対称核分裂成分が多いことがわかった。

図 3.1.3-3 は、有機液体シンチレーション検出器信号から得られた例で、シンチレーション検出器に接続した光電子増倍管のアノード信号のパルス形状（横軸）とパルス波高（縦軸）に対するイベントを記録したものである。ここに現れたイベントは、核分裂片と同時計測された事象である。図は、 $^{237}\text{Np}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{O})^{237}\text{Np}$  の非弾性散乱チャンネルによって励起された複合核  $^{237}\text{Np}$  の核分裂で得られたスペクトルである。図に示すように、即発中性子とガンマ線がきれいに弁別できているのがわかる。図から、即発中性子に加え、ガンマ線のデータも得られることがわかる。以

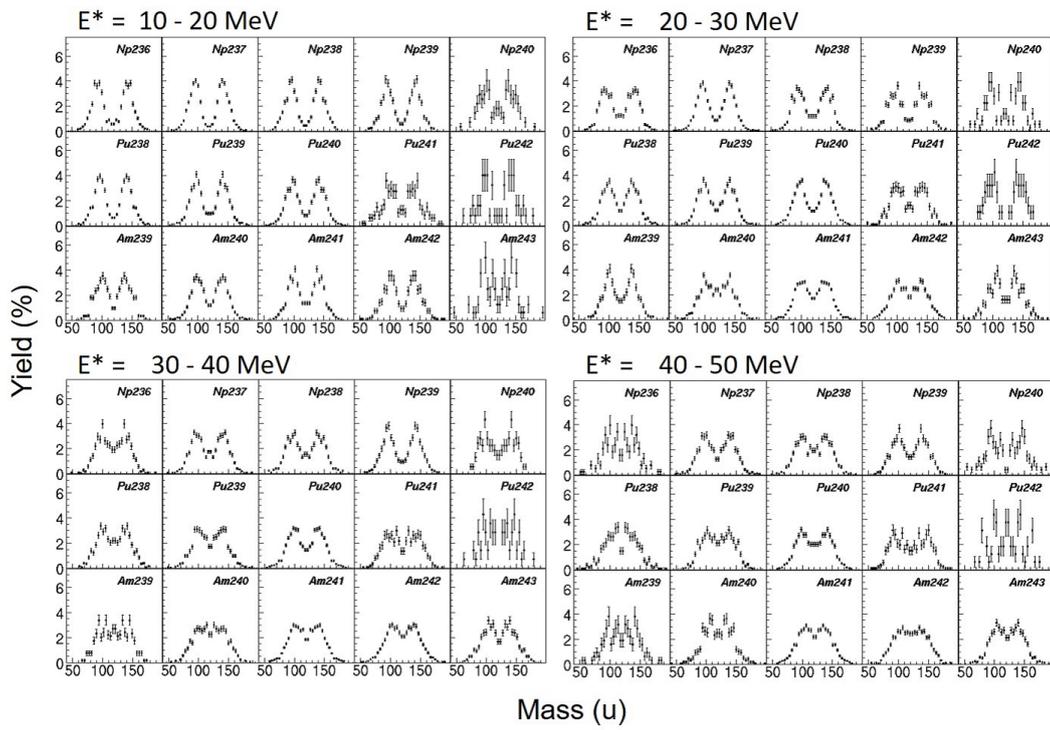


図 3.1.3-2: 核分裂片の質量数分布

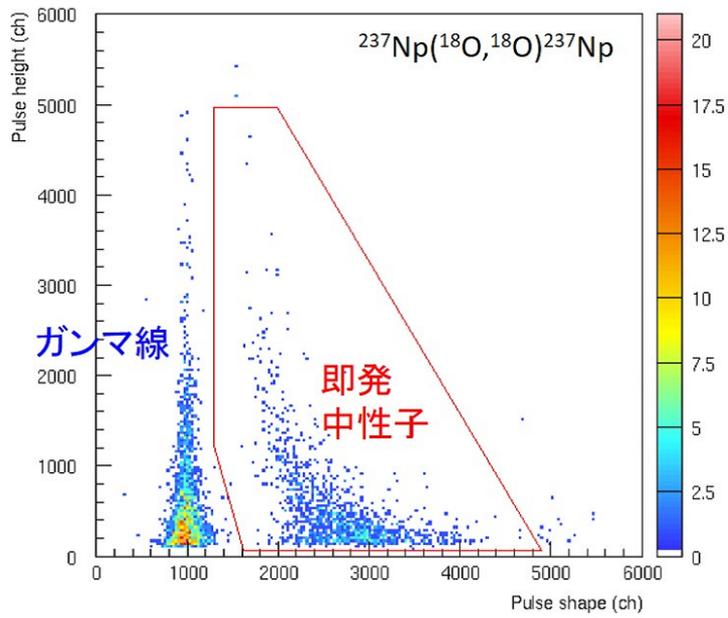


図 3.1.3-3: 即発中性子と即発ガンマ線の識別

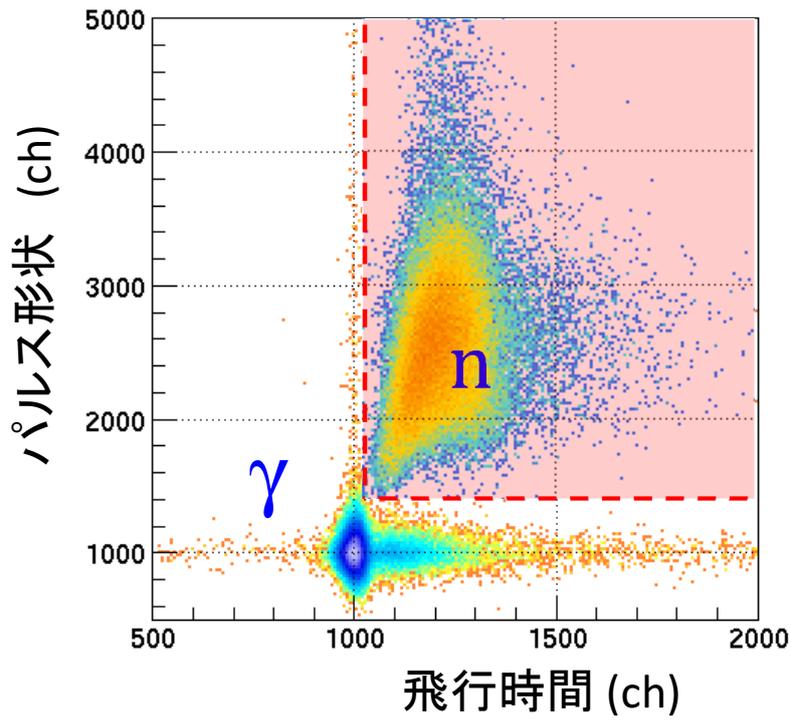


図 3.1.3-4: 中性子飛行時間とパルス形状の相関

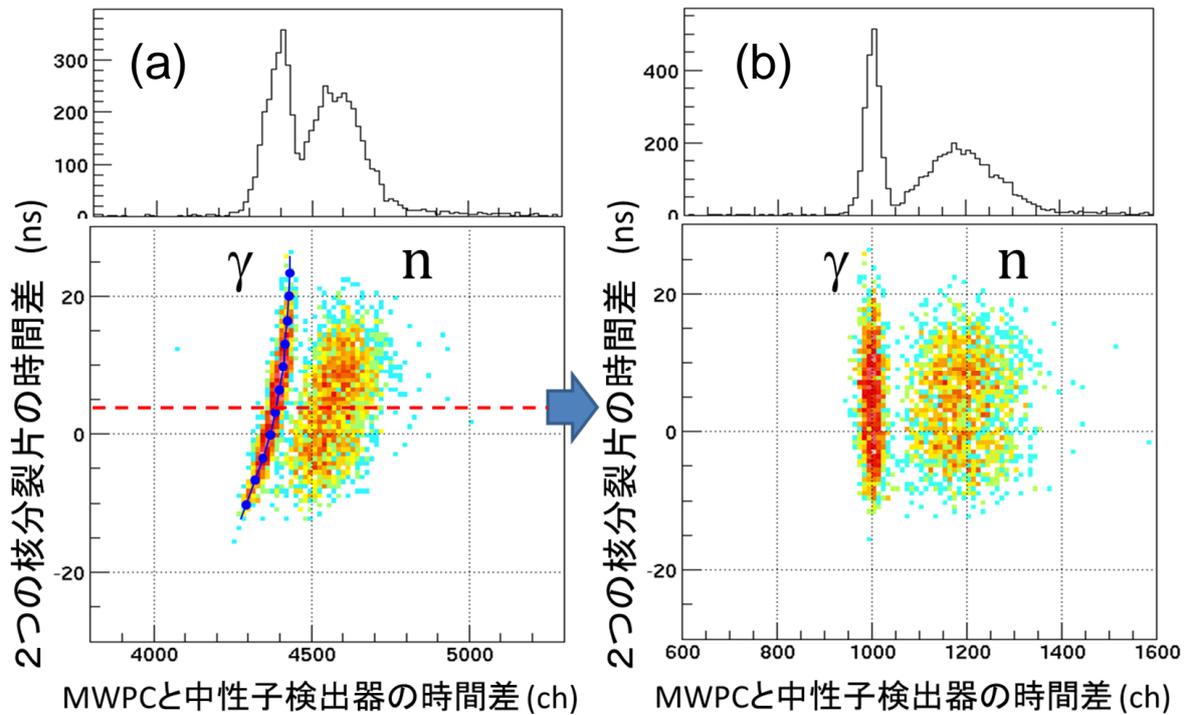


図 3.1.3-5: 中性子飛行時間と核分裂片時間差の関係 (a) と時間補正後のスペクトル (b)

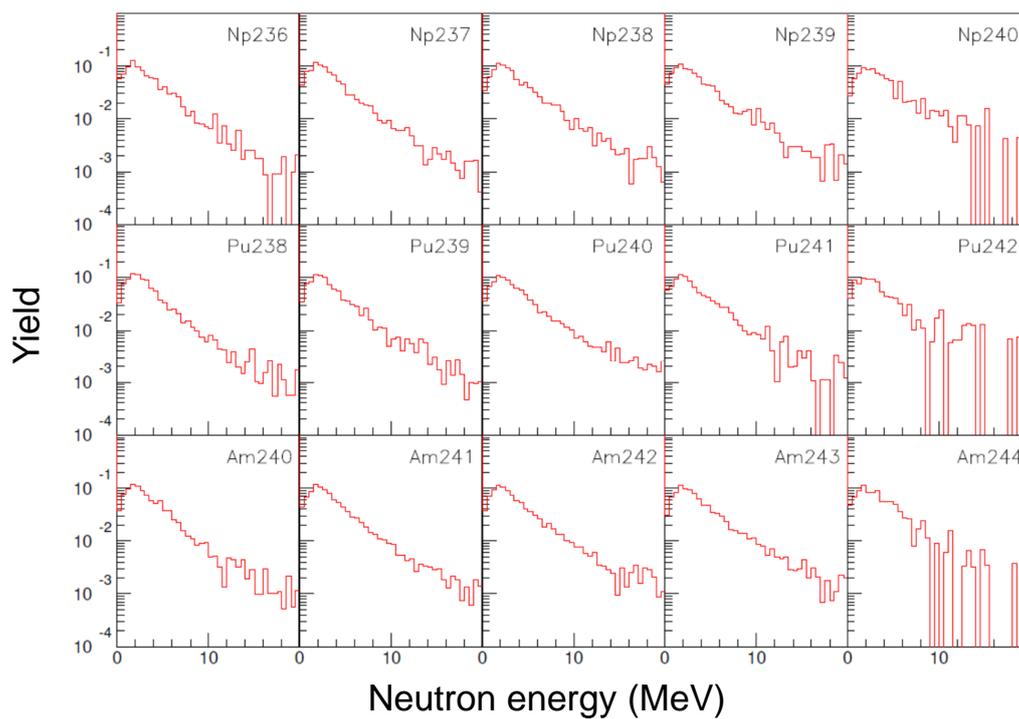


図 3.1.3-6: 即発中性子エネルギースペクトル

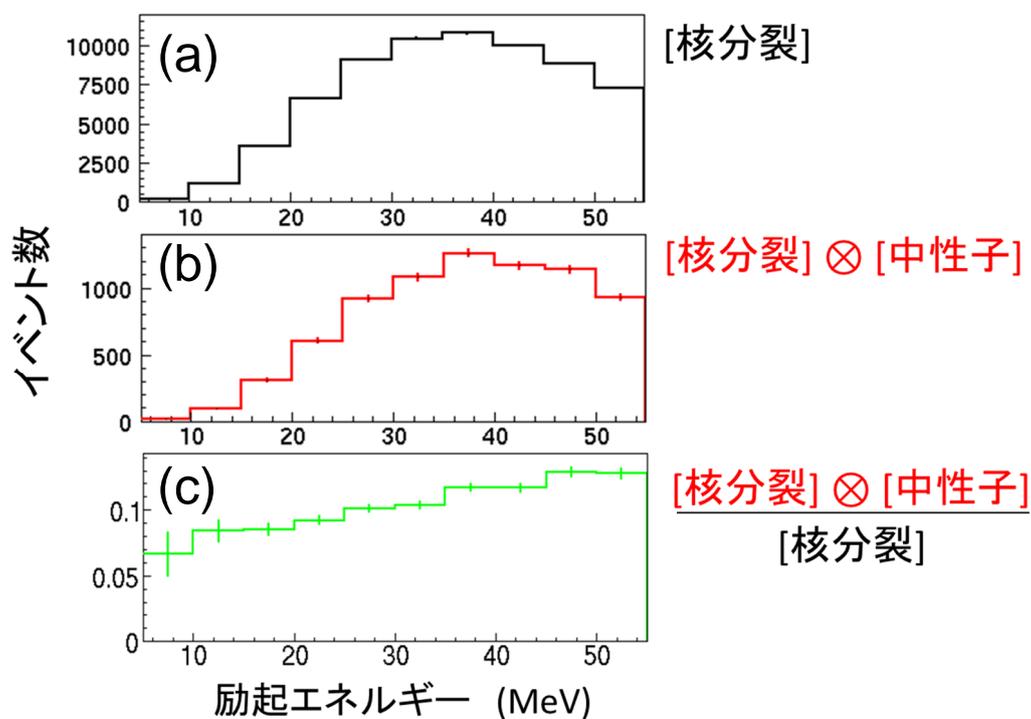


図 3.1.3-7: 即発中性子数の導出

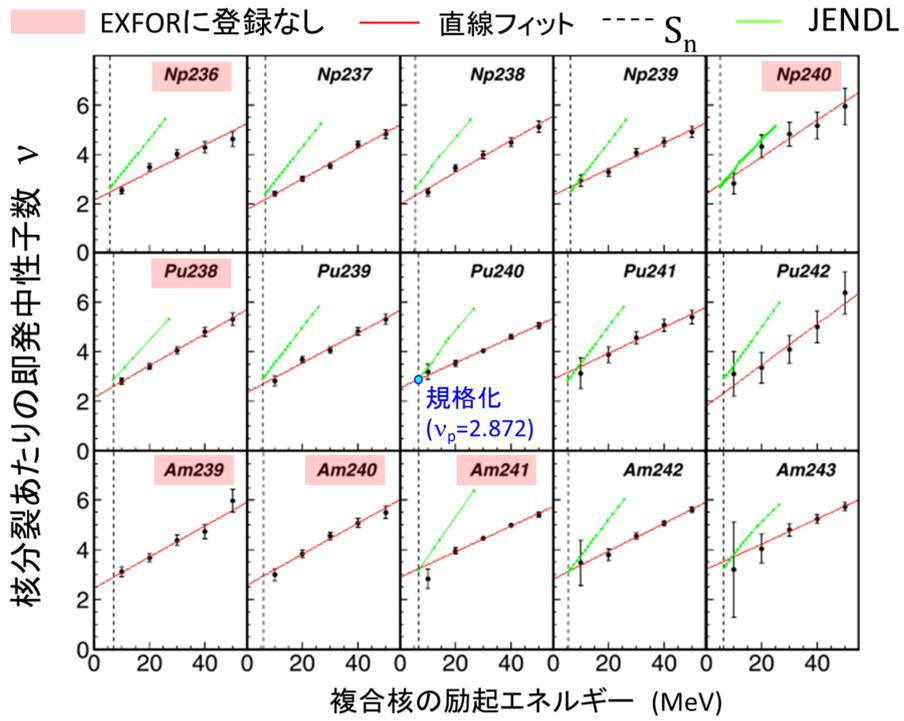


図 3.1.3-8:  $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  代理反応による即発中性子数の励起エネルギー依存性

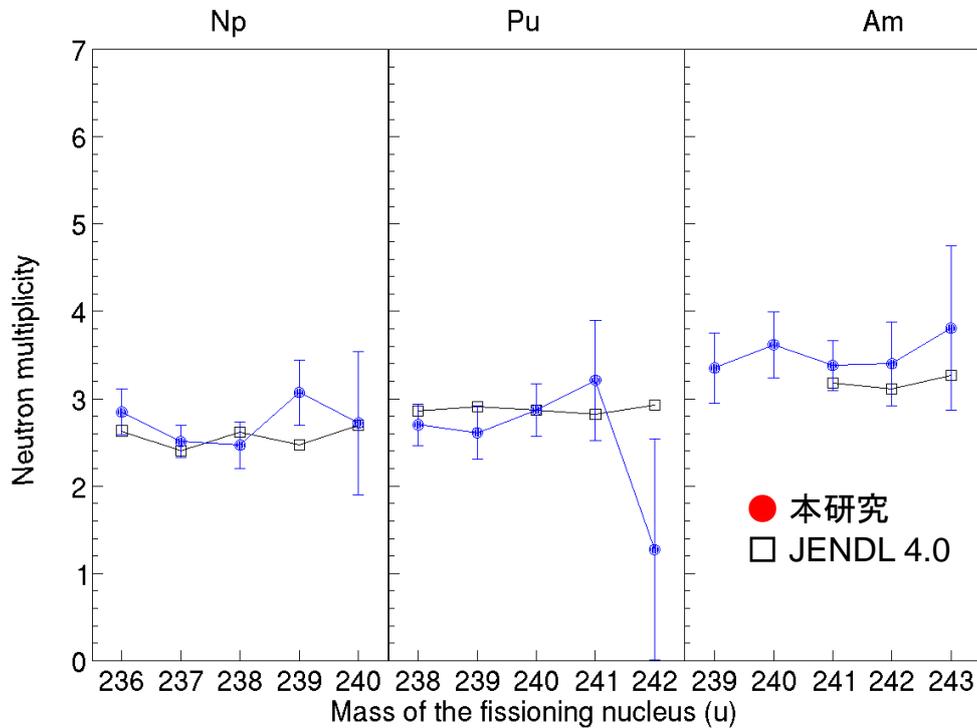


図 3.1.3-9:  $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  代理反応による熱中性子核分裂即発中性子数

下では、即発中性子データに着目して解析を進めた。

図 3.1.3-4 は、 $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  反応において、同じく全シンチレーション検出器から得られたものである。横軸は MWPC をスタート、シンチレーション検出器をストップとする飛行時間 (TOF)、縦軸はパルス形状を示している。左下の固まりは、即発ガンマ線を表す。これに対し、即発中性子は TOF 上で広く分布を有していることがわかる。図からわかることは、パルス波形で中性子と定義できる領域にあっても、即発ガンマ線に由来するイベントが存在することである。これは、即発ガンマ線が周囲の構造材に吸収され、ここで  $(\gamma, n)$  反応によって放出された中性子が検出されたものと言える。また、ガンマ線と定義される信号が、かなりの時間遅れを伴って検出されるものがある。核分裂生成物において、比較的寿命の長いアイソマーが存在し、この  $\beta^-$  崩壊に由来するガンマ線が検出されたものと考えられる。即発中性子の解析においては、図の色を付けた領域のイベントを選んで利用した。

図 3.1.3-5(a) は、MWPC とシンチレーション検出器信号間の飛行時間差 (横軸) と、MWPC で観測された 2 つの核分裂片の飛行時間差 (縦軸) を表している。ここで、ガンマ線のラインが曲がっているのは、スタート信号を与える MWPC が核分裂片を検出する際、核分裂片の速度に対応してスタート時間にずれが出るためである。質量対称核分裂の場合、2 つの核分裂片の MWPC への到達時間は等しくなる。ここで、核分裂片の速度の違いによるスタート時間のずれを (b) のように補正することで、即発中性子の飛行時間スペクトルが得られる。ガンマ線が距離 (約 52.5cm) を飛行する時間 1.75 ns を使って飛行時間キャリブレーションを行った。

以上の解析を進めて得られた 15 核種の複合核  $^{236,237,238,239,240}\text{Np}$ ,  $^{238,239,240,241,242}\text{Pu}$ , および  $^{239,240,241,242,243}\text{Am}$  の即発中性子エネルギースペクトルを図 3.1.3-6 に示す。いずれも中性子エネルギー 2 MeV あたりでピークを有し、高エネルギー側に向かって指数的に収率が下がっている。なお、このスペクトルは、核分裂の閾値に相当する励起エネルギーから、多核子移行反応によって取りうる最大約 50MeV までのさまざまな励起状態からの核分裂事象を含んでいる。

図 3.1.3-7 は、 $^{237}\text{Np}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{N})^{240}\text{Pu}$  につづく核分裂で得られたもので、即発中性子数の複合核  $^{240}\text{Pu}$  励起エネルギーに対する相対的な変化を導出する方法を示している。(a) は、核分裂事象を表し、このうち即発中性子とコインシデンスしたものは、(b) となる。(c) は、スペクトル (b) をスペクトル (a) で割ったもので、 $\nu$  の相対的な変化となる。

図 3.1.3-8 は、15 核種の複合核核分裂においてそれぞれ放出される即発中性子の数を、複合核の励起エネルギーに対してプロットしたものである。縦軸は、 $^{239}\text{Pu}(n_{th}, f)$  において知られている即発中性子数 2.872 で規格化した。赤線で示した直線フィットとの一致からもわかるように、すべての核種で、励起エネルギーに対して中性子数が直線的に増加しているのがわかる。また、励起エネルギーをゼロに外挿した点は、自発核分裂に相当する中性子数を表すが、いずれの核種も正の有意な値を持っている。データの中で、核種  $^{236,240}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240,241}\text{Am}$  は EXFOR に登録されていない新データとなる。実験データを、JENL ライブラリーの値を比較をした。励起エネルギーに対する直線的な増加傾向は一致しているものの、本実験データは、JENDL-4.0 に対して緩やかに増加する。なお、 $^{239,240}\text{Am}$  に関しては、JENDL-4.0 への登録もない。

図 3.1.3-8 に示した破線は、それぞれの原子核の中性子結合エネルギーに相当する。あるいは、熱中性子など低エネルギー中性子を吸収してこの原子核が形成されるときに励起エネルギーであ

る。この時の即発中性子数を読み取ったのが図 3.1.3-9 となる。図には、JENDL-4.0 の値も示している。Np, Pu, Am と元素が増えるに従って、放出される中性子数は系統的に多くなっており、JENDL の傾向と一致した。これは、重い元素同位体ほど核分裂で解放されるエネルギーの Q 値が高いこと、これに応じて中性子の起源となっている核分裂片の励起エネルギーが増加していくためと理解できる。

$^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  反応の実験では、本研究提案当初に計画していた  $^{237,238,239}\text{Np}$ ,  $^{238,239,240,241}\text{Pu}$ ,  $^{240,241,242,243}\text{Am}$  の 11 核種より多い 15 核種においてデータを取得することができた。

#### 3.1.4 $^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$ 代理反応による即発中性子測定 (H30)

平成 30 年度は、 $^{18}\text{O}$  ビームを  $^{243}\text{Am}$  標的に照射することで、Am, Cm, Bk の同位体について即発中性子数とエネルギースペクトルを得ることを目指した。タンデム電圧 16MV とし、イオン価数+8 の酸素を加速して 144 MeV のビームを使って実験を行った。

データ解析は、3.1.3 に示した方法に従った。

図 3.1.4-1 は、本実験で得られた  $\Delta E-E$  スペクトルの例である。 $^{15-19}\text{O}$ 、 $^{13-17}\text{N}$ 、 $^{11-15}\text{C}$ 、といった散乱荷電粒子の同位体をきれいに弁別できている。それぞれのラインにゲートをかけて解析することにより、 $^{242,243,244,245,246}\text{Am}$ 、 $^{244,245,246,247,248}\text{Cm}$ 、 $^{246,247,248,249,250}\text{Bk}$  の複合核の核分裂における即発中性子データを得た。

図 3.1.4-2 は、本反応実験で得られた核分裂片の質量数分布で、核種ごと、また励起エネルギーごとに示した。核種として、 $^{242,243,244,245,246}\text{Am}$ 、 $^{244,245,246,247,248}\text{Cm}$ 、 $^{246,247,248,249,250}\text{Bk}$  の合計 15 核種を得た。低励起エネルギーでは、いずれの核種も質量非対称なふた山の分布を示している。一方、励起エネルギーが上がると構造がくづれ、ひと山分布に漸近していく。特に、重い元素ほど構造の消滅が顕著であることを、 $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  の実験結果と同様、確認できた。

図 3.1.4-3 は、即発中性子エネルギースペクトルを表す。このスペクトルには、励起エネルギー 50MeV までの複合核・核分裂の中性子イベントが含まれている。

図 3.1.4-4 は、15 核種について、核分裂で放出される中性子の数を複合核の励起エネルギーに対してプロットしたものである。ここで、中性子数は、 $^{245}\text{Cm}(n_{\text{th}},f)$  の  $\nu=3.590$  (JENDL-4.0) で規格した。赤線はデータ点を直線フィットした結果である。 $^{246}\text{Am}$  を除いて、増加傾向にある。 $^{246}\text{Am}$  の直線フィットが右肩下がりなのは、統計的な揺らぎのためと考えられる。励起エネルギーに対する変化を JENDL-4.0 と比べると、傾きが緩やかである。なお、 $^{246}\text{Am}$  は、JENDL に登録されていない核種となっている。データの中で、核種  $^{243,245,246}\text{Am}$ 、 $^{246,247,248,249,250}\text{Bk}$  は、EXFOR に登録されていない新データとなる。図に示した破線は、それぞれの原子核の中性子結合エネルギーに相当する。あるいは、熱中性子など低エネルギー中性子を吸収してこの原子核が形成されときの励起エネルギーである。この時の即発中性子数を読み取ったのが図 3.1.4-5 となる。図には、JENDL-4.0 の値も示している。Am, Cm, Bk と元素が増えると、実験データは平均的に中性子数が増えている。JENDL-4.0 も、同様の傾向を示した。

以上のように、 $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  反応においては、本研究提案時に予定していた核種  $^{243,244,245}\text{Am}$ 、 $^{244,245,246,247}\text{Cm}$ 、 $^{246,247,248,249}\text{Bk}$  よりも 4 核種多いデータ取得を行うことができた。

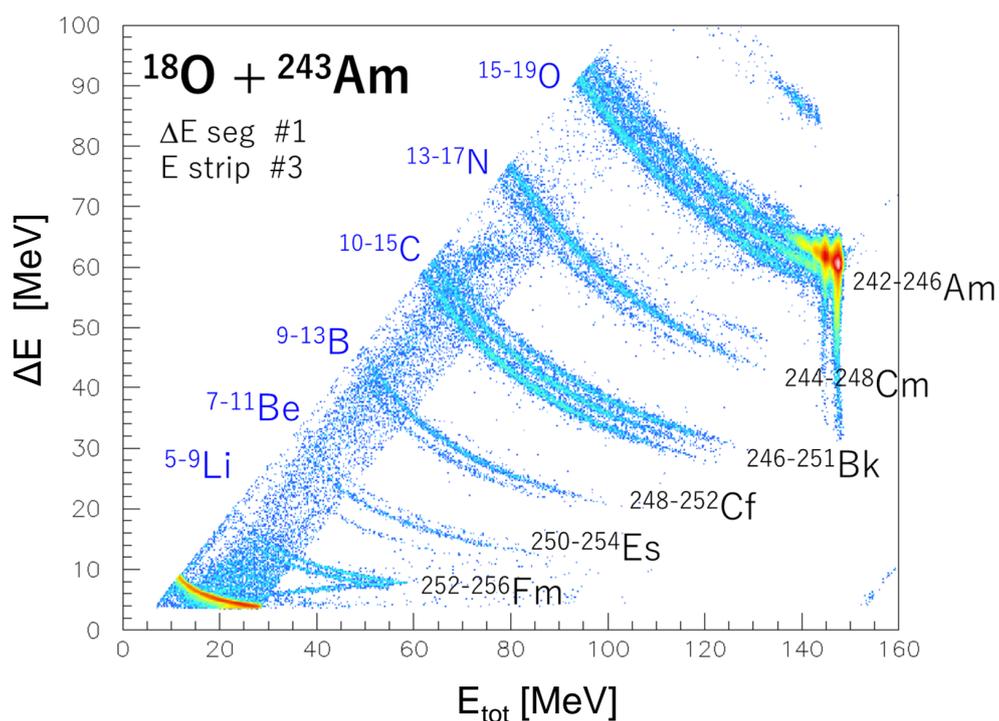


図 3.1.4-1:  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  反応の散乱荷電粒子スペクトル

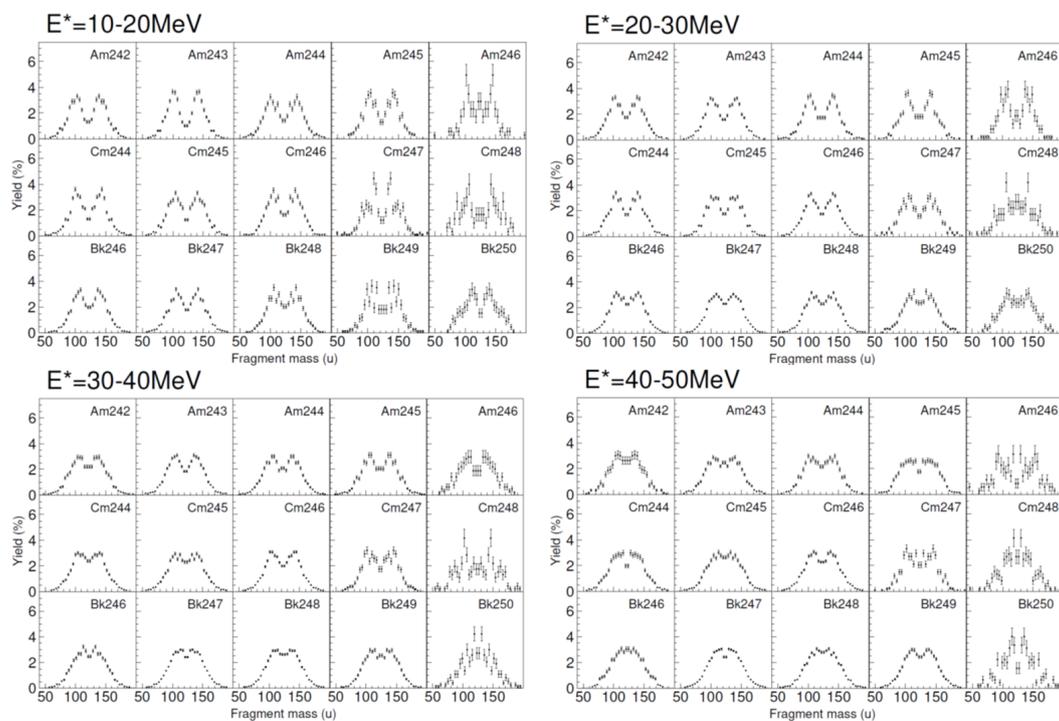


図 3.1.4-2:  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  代理反応による核分裂片の質量数分布

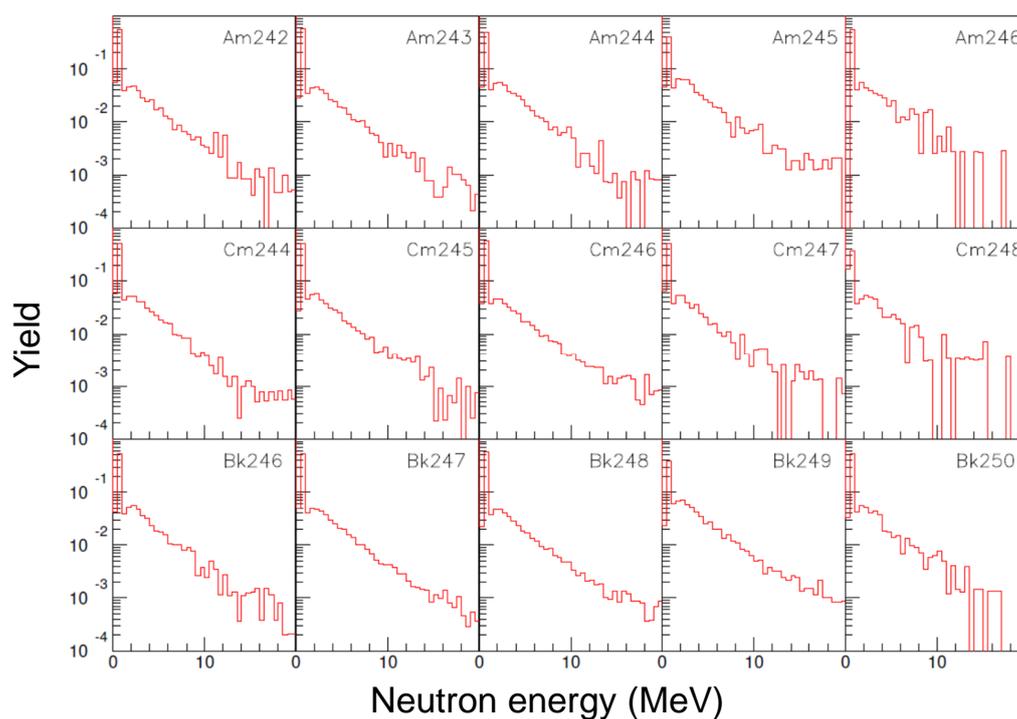


図 3.1.4-3:  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  代理反応による即発中性子エネルギースペクトル

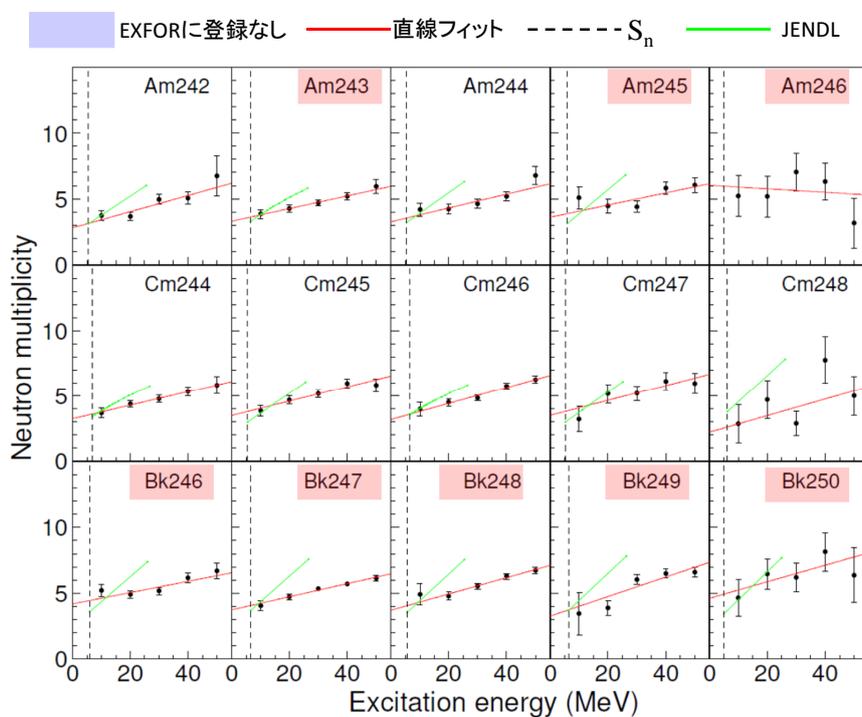


図 3.1.4-4:  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  代理反応による即発中性子数の励起エネルギー依存性

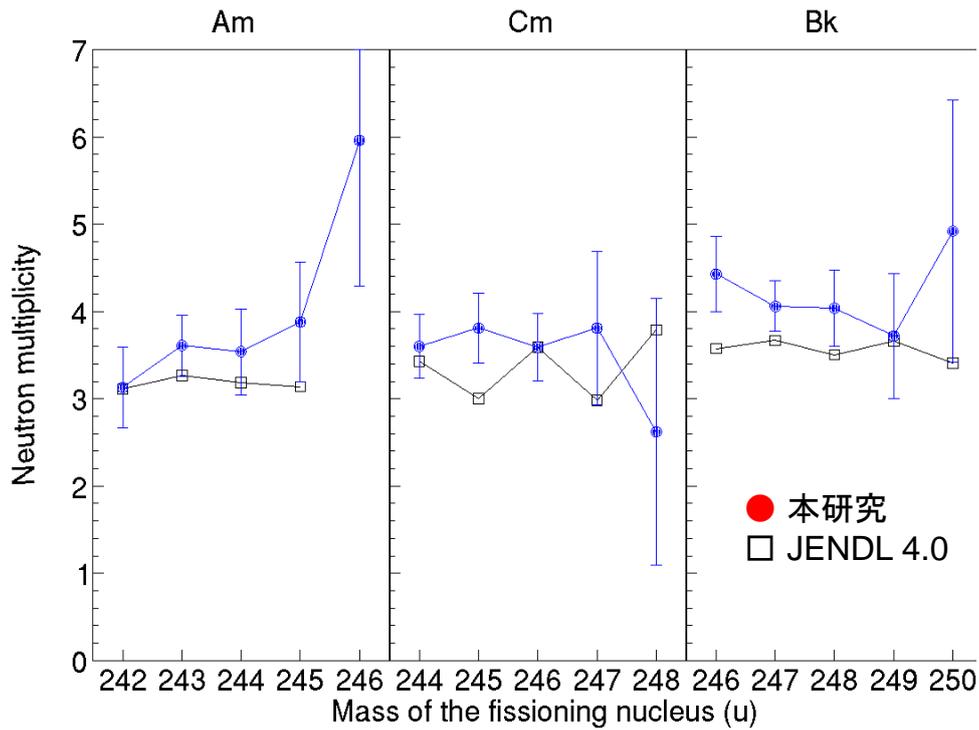


図 3.1.4-5:  $^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$  代理反応による熱中性子核分裂即発中性子数

### 3.1.5 核分裂片から放出される中性子数 (H29-30)

次に、個々の核分裂片から放出される中性子の数  $\nu(m)$  を決定した。図 3.1.5-1 から図 3.1.5-5 は、 $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  反応で得られたもので、複合核の励起エネルギーに分けて図示してある。同様に、図 3.1.5-6 から図 3.1.5-10 までの図は、 $^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$  で得られた結果である。

現在の段階では、データ間に統計的にばらつきが多く、励起エネルギーに対する構造の変化の詳細の議論にはいまのところ至っていないが、さらに統計を上げた測定を行う予定である。

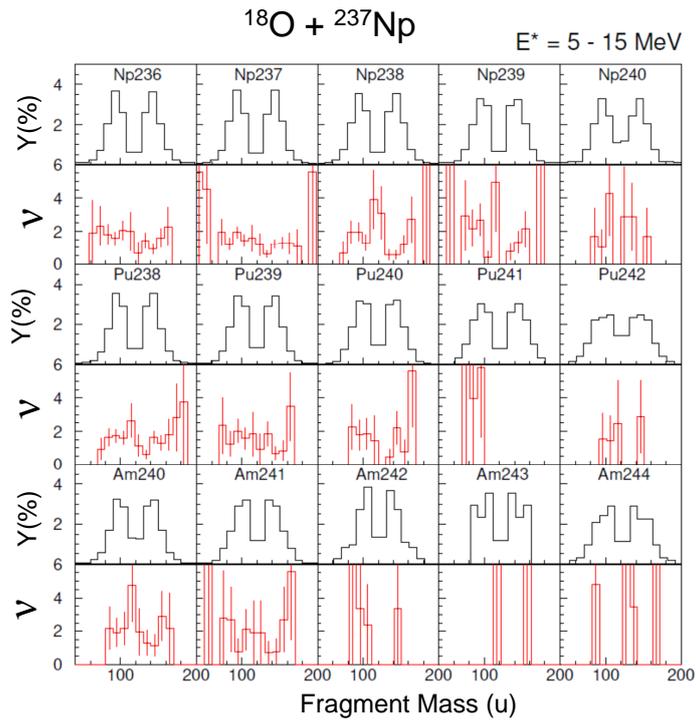


図 3.1.5-1:  $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (1)

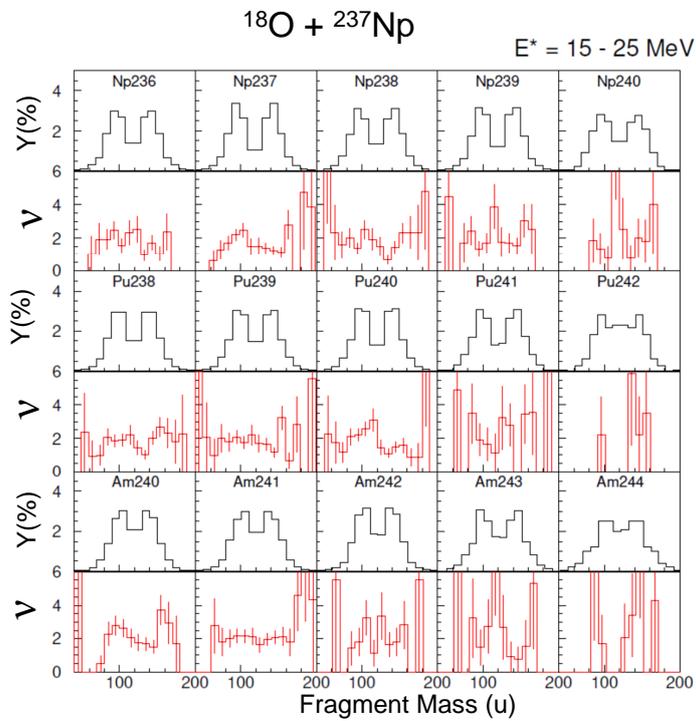


図 3.1.5-2:  $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (2)

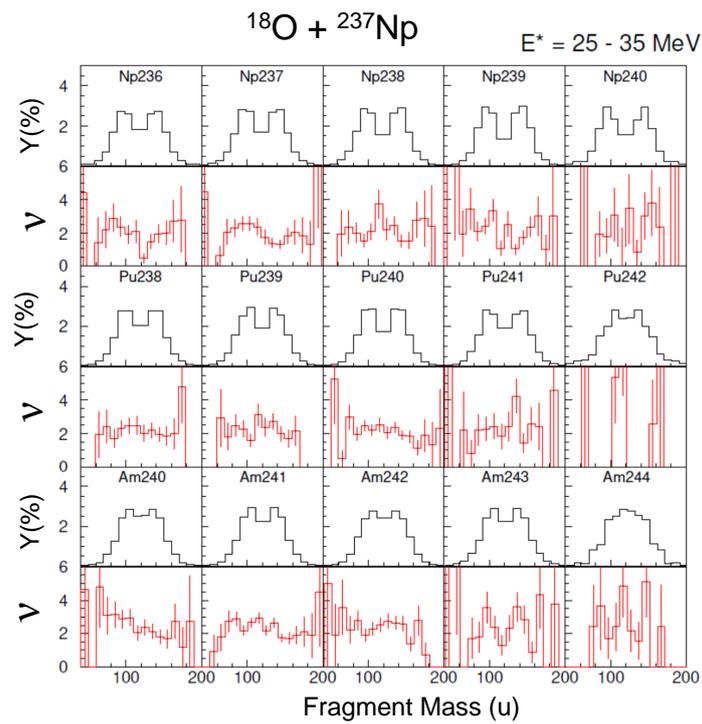


図 3.1.5-3:  $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (3)

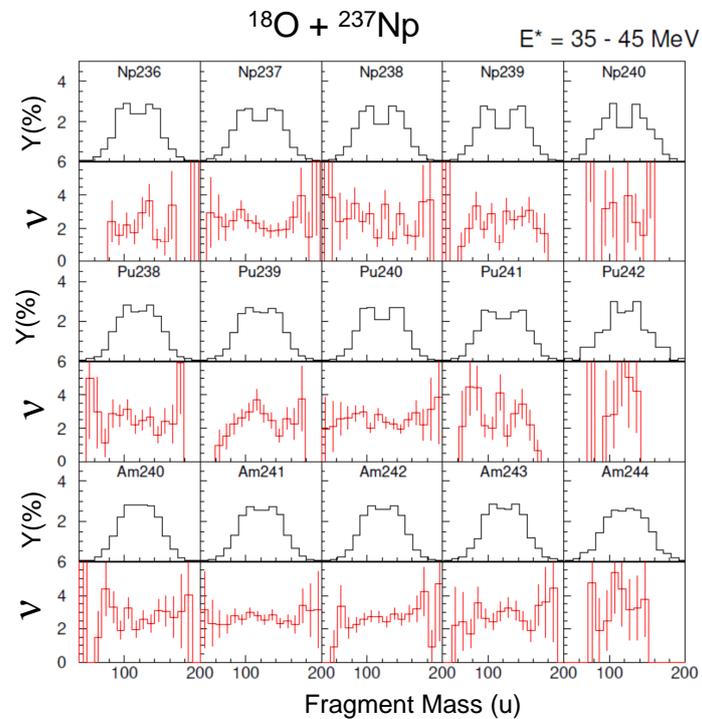


図 3.1.5-4:  $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (4)

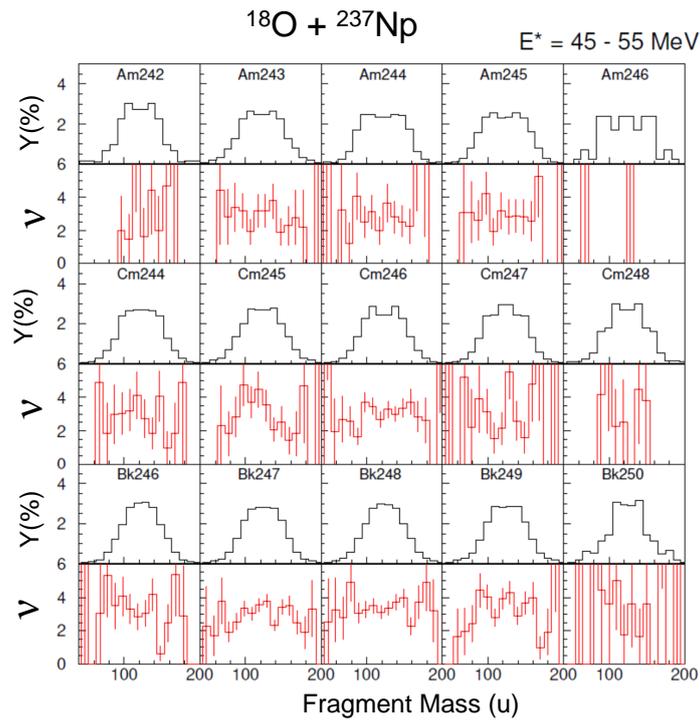


図 3.1.5-5:  $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (5)

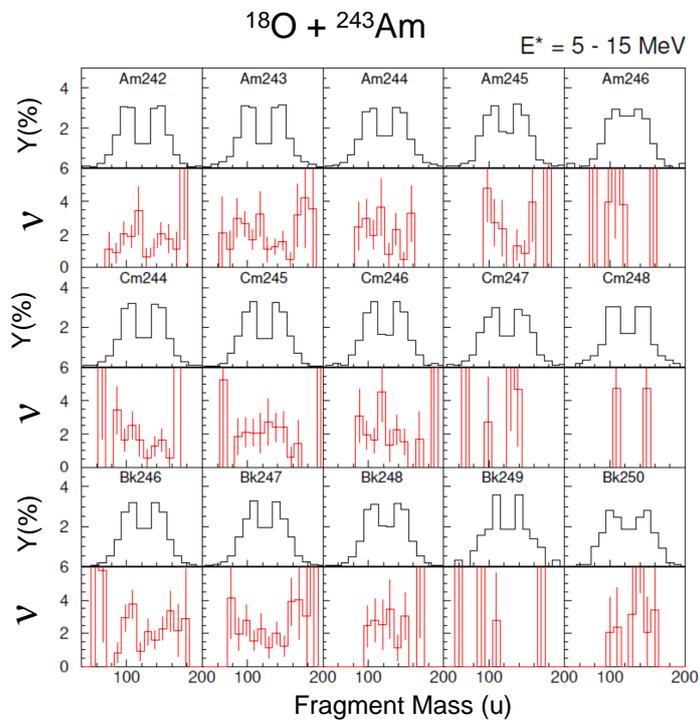


図 3.1.5-6:  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (1)

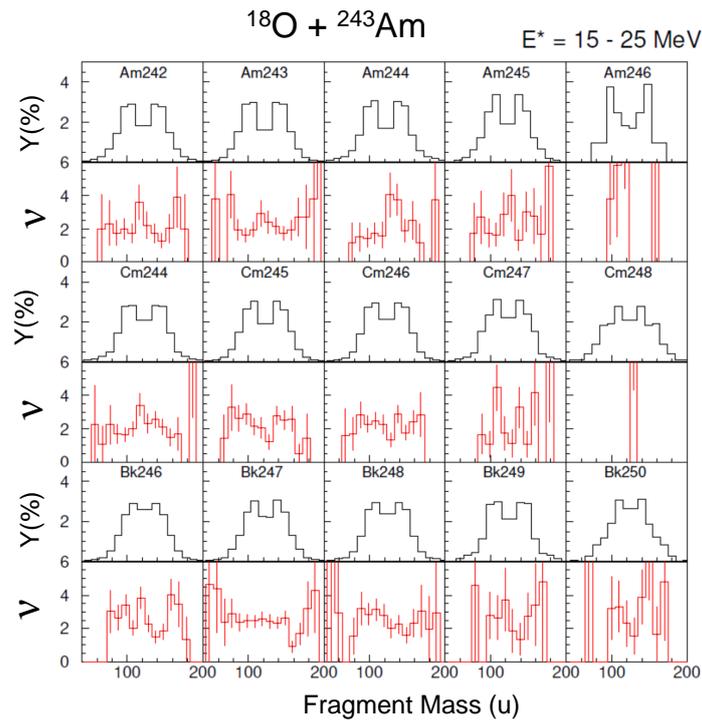


図 3.1.5-7:  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (2)

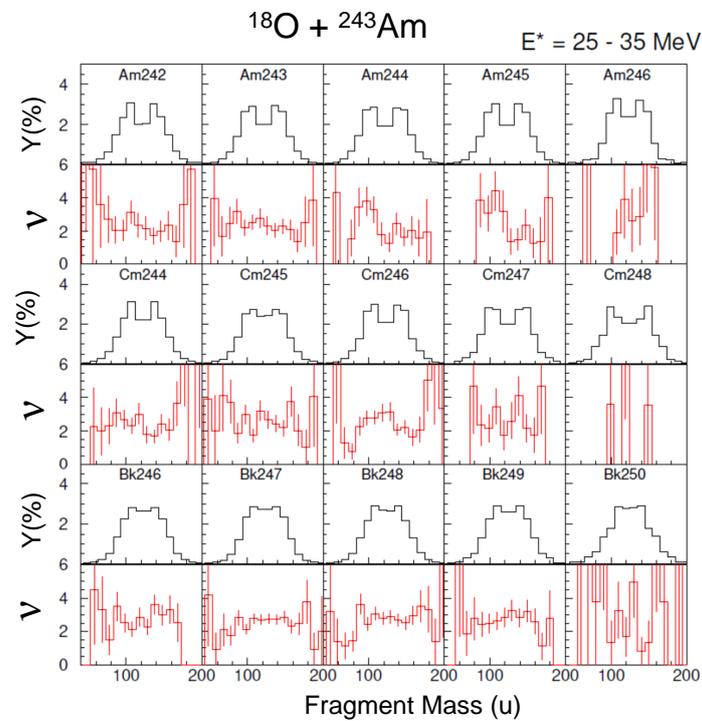


図 3.1.5-8:  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (3)

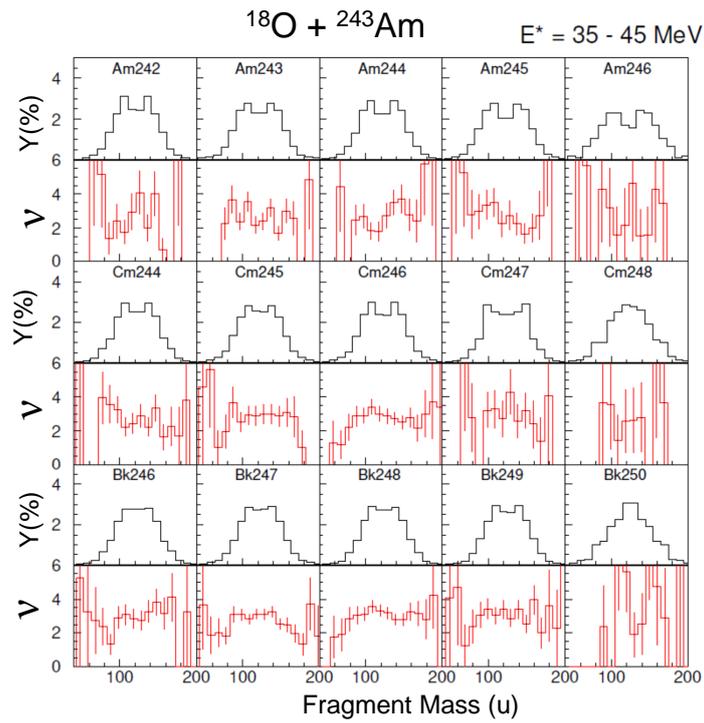


図 3.1.5-9:  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (4)

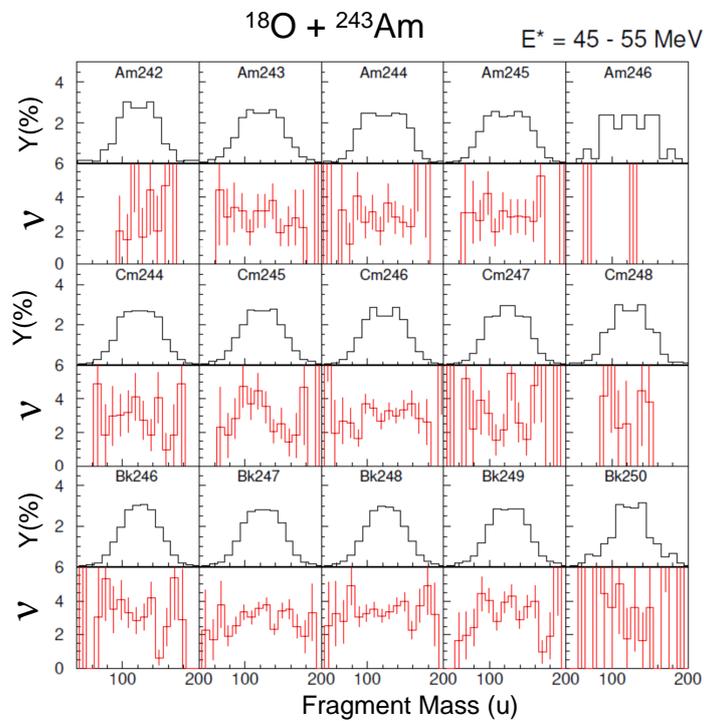


図 3.1.5-10:  $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  代理反応による  $\nu$  と収率  $Y$  の核分裂片依存性 (5)

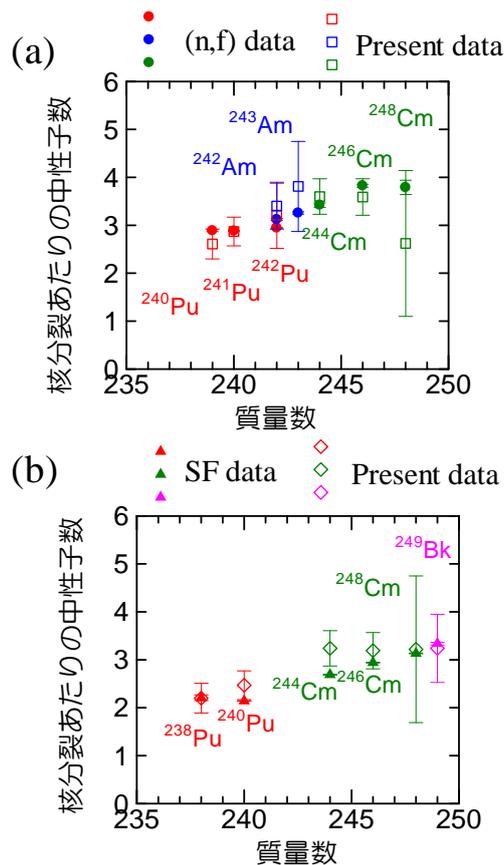


図 3.1.6-1: (a) 熱中性子核分裂および (b) 自発核分裂における即発中性子数の文献値と本実験データとの比較

### 3.1.6 代理反応による即発中性子測定のみとめ

本研究で得られた即発中性子数の複合核励起エネルギー依存性（図 3.1.3-8 および図 3.1.4-4）から、熱中性子入射核分裂と自発核分裂についての中性子数を導出できる。熱中性子核分裂については図 3.1.3-9 および図 3.1.4-5 に示したとおりである。いくつかの核種については、他の実験データがあり、これと比較したのが図 3.1.6-1(a) である。図では、即発中性子数を複合核の質量数に対してプロットした。複合核  $^{240,241,242}\text{Pu}$ ,  $^{242,243}\text{Am}$ ,  $^{244,246,248}\text{Cm}$  について、本研究で得られた結果は、他の実験値とよい一致を示した。また、文献データから中性子数が複合核の質量数とともに増加していることがわかるが、本研究でもこの傾向を見出した。

図 3.1.3-8 および図 3.1.4-4 において、励起エネルギーをゼロに外挿した値が、自発核分裂のデータを与える。実際にこの値を導出し、他の実験値と比べたのが図 3.1.6-1(b) である。ここでは、文献値のある  $^{238,240}\text{Pu}$ ,  $^{244,246,248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$  について示した。いずれも誤算内で文献値に一致している。自発核分裂に関しても、本実験データにおいて、即発中性子数が核分裂する原子核の質量数に対して直線的に増加していくのが分かる。

本研究により、1 回の実験で多くの核種の即発中性子データを取得できるようになった。さらに、この実験手法を用いれば、複合核の励起エネルギー、すなわち代理反応としての入射中性子エネルギー依存性に対しても、広いエネルギー範囲で測定できることを示した。熱中性子核分裂および自発核分裂における即発中性子数は文献値と一致した。

### 3.2 動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価 (再委託先：東京工業大学)

平成 27 年度から取り組んだ理論モデル構築の最終年度としての 30 年度は、核分裂片のアイソトープ分布やスピン分布の違いが即発中性子放出に与える影響を調べ、核分裂中性子スペクトルを決定する汎用性の高い方法を提案する。複合核の励起エネルギーの関数として核分裂片や複合核から放出される中性子の数を計算することにより、即発中性子の起源を考察した。

具体的には、4次元ランジュバン計算の結果を用いて各核分裂片の励起エネルギーを推定し、それを基に即発中性子放出を計算する手法を提案し作成した。核分裂片の荷電偏極の違いによるアイソトープ分布の違いやスピン切断因子を変化させた場合の即発中性子多重度の違い、複合核の励起エネルギーの関数として核分裂片や複合核から放出される中性子の多重度を計算し、即発中性子放出の起源についての考察を行った。以下、実施内容および成果について説明する。

#### 3.2.1 核分裂片の励起エネルギー計算 (H27-30)

平成 29 年度までに、核分裂や核融合を記述する方法として原子核を構成する個々の核子の座標のかわりに複合核の形状を二中心殻模型 (TCSM) で表し、その複合核が核分裂するまでの時間発展を後述のランジュバン方程式により求める形状 4 次元 Langevin モデルを開発してきた。また、平成 29 年度には、形状 4 次元のポテンシャルおよび輸送係数、またそれを用いた核分裂収率、全運動エネルギーおよび変形エネルギーを計算し、得られた核分裂収率、全運動エネルギーを用いた Hauser-Feshbach 統計崩壊による即発中性子多重度およびスペクトル計算手法を開発してきた。

TCSM 模型では、二中心殻模型では図 3.2.1-1 の下段中に示される  $a_i$  から  $b_i (i = 1, 2)$  を用いた次の 4 つの変数により原子核の形状を表す。

$$\begin{aligned} ZZ_0 &= \frac{Z_0}{R_0}, \quad R_0 = 1.2 \times A_{CN}^{1/3} \\ \delta_i &= \frac{3(a_i - b_i)}{2a_i + b_i}, \\ \alpha &= \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \end{aligned}$$

この変数  $q_i$  およびその共役運動量  $p_i$  の運動方程式が次に示すランジュバン方程式である。

$$\begin{aligned} \dot{q}_i &= m_{ij}^{-1} p_j \\ \dot{p}_i &= -\frac{\partial V}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} m_{jk}^{-1} p_j p_k - \gamma_{ij} m_{jk}^{-1} p_k + g_{ij} R_j(t) \end{aligned}$$

ここで、 $ZZ_0$  は原子核の伸長、 $\delta_1$  および  $\delta_2$  は左右で独立な変形度  $\alpha$  は質量非対称度である。TCSM では、 $\delta_1$  および  $\delta_2$  は左右の核分裂片の外側の形状を表すのに用いている。

中性子エネルギースペクトルの評価には、核分裂片の励起エネルギーを知る必要がある。しかし、核分裂直後の核分裂片の励起エネルギーについては未解明のことも多く、異なる仮定のもとに議論されてきた。このため、励起エネルギーと即発中性子多重度の鋸歯構造の起源は未だ不明確である。

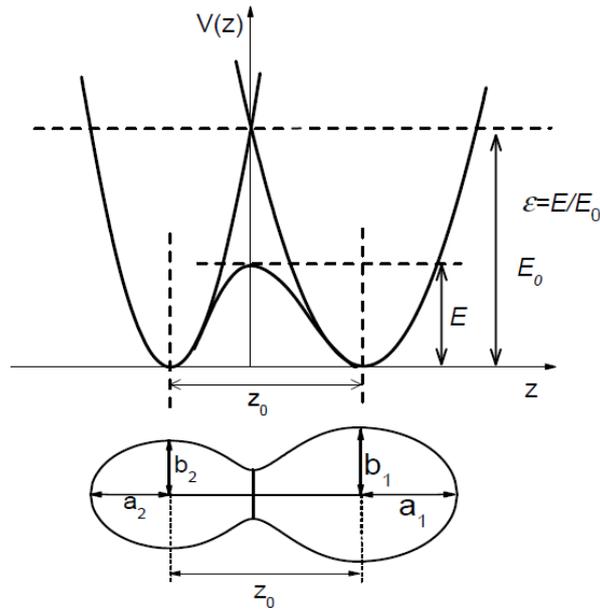


図 3.2.1-1: 二中心殻模型における変数の定義

図 3.2.1-2 に示すのは、 $^{236}\text{U}$  ( $^{235}\text{U}+n$ ) の  $E_n = 7$  MeV の系について、Woods-Saxon 型ポテンシャルを用い potential minimum (基底状態の形状) もしくは second minimum から形状 4 次元 Langevin 模型計算を行なった核分裂片の変形度の分布とその平均値  $\langle \delta \rangle$  である。この計算では、一次収率の質量数分布  $Y_P(A)$  をよく再現するような固定パラメータ  $\epsilon$  および  $\hbar\omega$  の調査結果に基づく  $(\epsilon, \hbar\omega) = (0.35, 6.00)$  の条件を用い、 $3 \times 10^5$  イベントを蓄積したものである。ここで横軸の Fragment mass number は、質量非対称度から得られた質量数である。

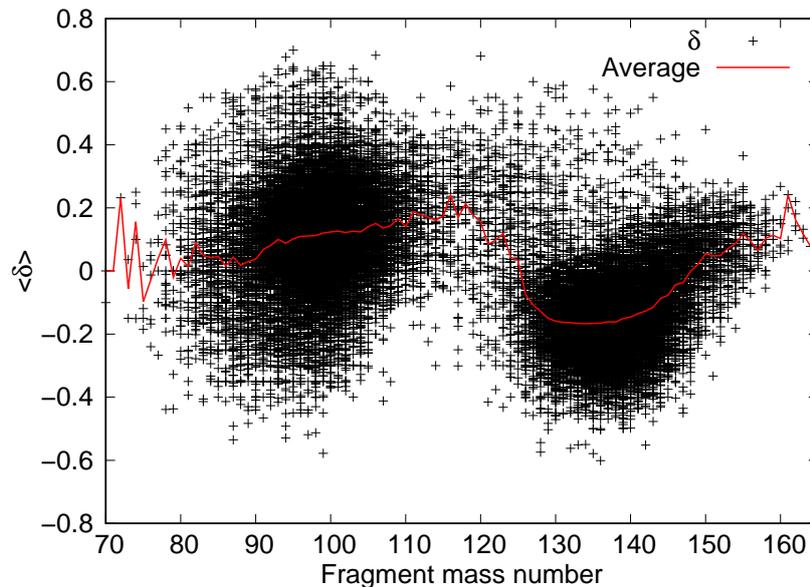


図 3.2.1-2: 4 次元 Langevin モデルで得られた複合核の変形度  $\delta$  分布

図 3.2.1-3 に示すように、この変形度の平均値  $\langle \delta \rangle$  には、即発中性子多重度の平均値  $\bar{\nu}$  の鋸歯構造との類似性が見られる。このような類似性については、以前から指摘 [1] されていたが十分に議

論されてこなかった。そこで今年度は、即発中性子の起源をさぐるべく、この点に着目し、平成 29 年度までに開発したこれらの計算コードをさらに発展させ、形状 4 次元 Langevin モデルで得られた複合核の変形度から、核分裂片（フラグメント）の変形エネルギーを求める手法を開発した。

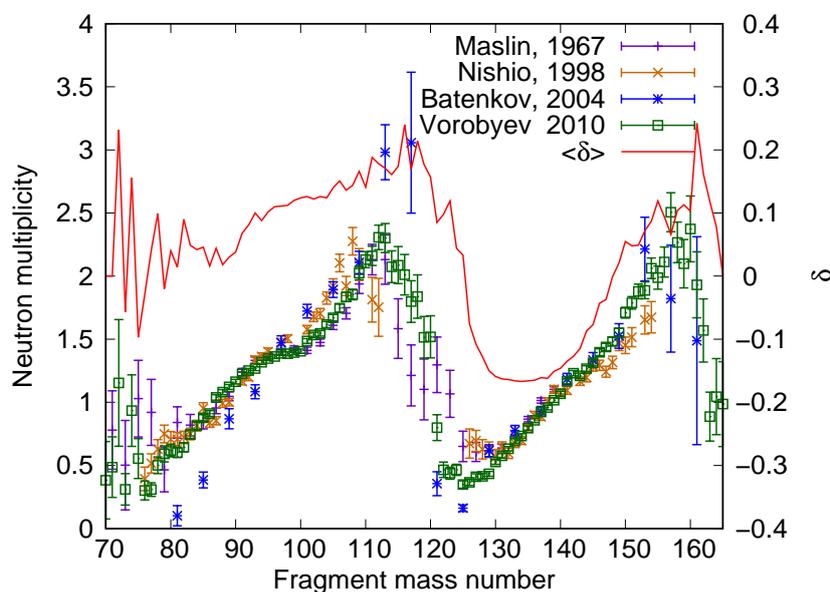


図 3.2.1-3: 変形度の平均値度  $\langle \delta \rangle$  と即発中性子多重度の平均値  $\bar{\nu}$

通常、核分裂片の励起エネルギーを計算するには、形状だけでは不十分であり各分裂片へのエネルギー分配についての情報が必要となる。昨年度までに Hauser-Feshbach 統計崩壊計算では、非等温モデル (anisothermal model) [2, 3, 4] で用いられる非等温パラメータ  $R_T$  により核分裂片に非対称にエネルギーを分配する方法を採用した。この時、パラメータサーベイの結果に基づき、 $R_T$  は 1.2 を標準として軽い核分裂片によりエネルギーが分配されるようにしていた。

一方、Langevin 模型計算からは、分裂直前の原子核全体の励起エネルギーのみを知ることができる。このため、まず Langevin モデルから得られる分裂後の形状および分裂直前の複合核の温度を両核分裂片の共通の温度として、Intrinsic な励起エネルギーを求めた。このようにして求めた励起エネルギーを、Hauser-Feshbach 統計崩壊計算で利用するためである。このような断裂直後の高い励起状態にある原子核に関する情報を実験的に得ることは非常に難しく、多くの Hauser-Feshbach 統計崩壊計算においても何らかの仮定による分布を元に計算しているにすぎない。

$$E_{ex} = E_{def} + aT^2 + E_{vib} + E_{rot} \quad (3.1)$$

ただし、Langevin 模型計算からは回転エネルギーを得ることができないので、 $E_{rot} = 0$  とおいた。

この計算を行うために、はじめに、Langevin モデルの計算により得られる、指定したネックパラメータに至った時点断裂点とする時の断裂直前の 2 つの核分裂片の形状パラメータを元に原子核の形状のフィッティングを行った。図 3.2.1-4 にフィッティングの一例を示す。この例に示した通り、フィッティングは非常によく形状を再現していることがわかる。各核分裂片について、Langevin モデルから得られた形状と温度を用いて Intrinsic な励起エネルギー  $E_{ex}$  を求めた。

図 3.2.1-5 に示す通り、Langevin モデルから得られた分裂直前の複合核の温度  $T$  とその平均値

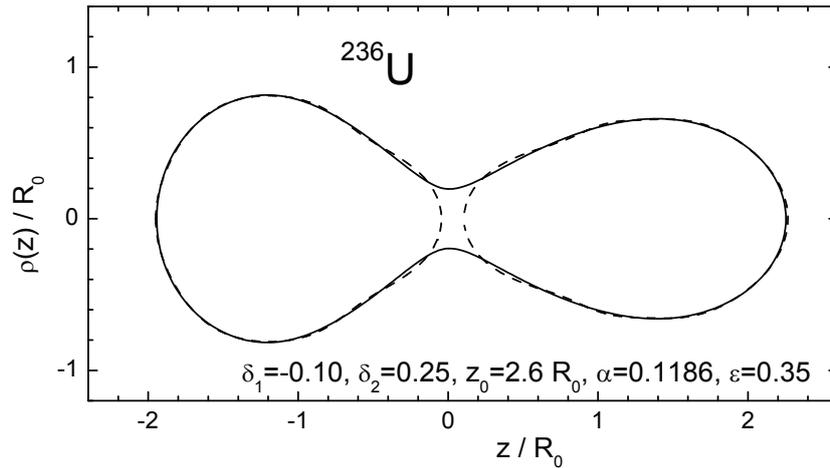


図 3.2.1-4: 二中心殻模型における変数の定義

は、軽い核分裂片が重い核分裂片よりも”熱い”という状況にはないことがわかる。一方、図 3.2.1-6 に、計算により求めた Intrinsic な励起エネルギー  $E_{ex}$  を示す。赤線で示した  $E_{ex}$  の平均値は、軽いフラグメントがより”熱い”という仮定を用いずとも励起エネルギーにおける鋸歯構造を再現することができた。

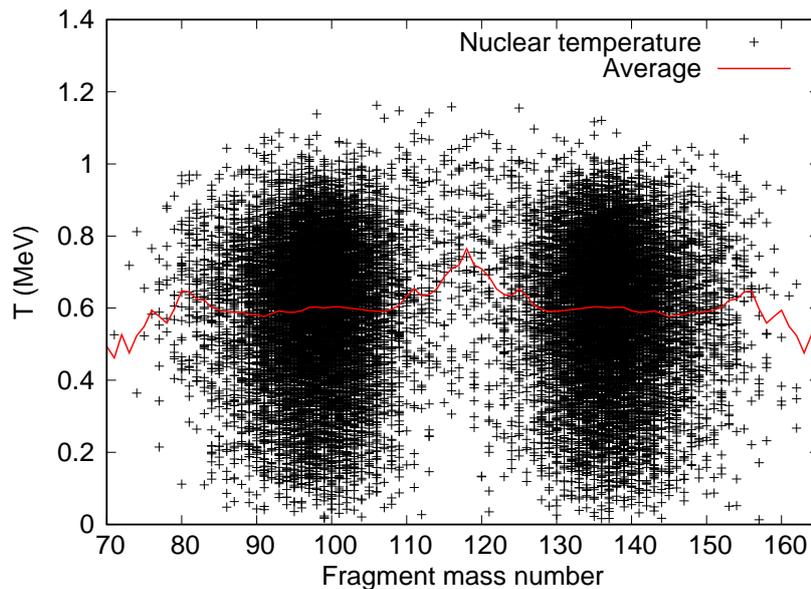


図 3.2.1-5: 分裂直前の複合核の温度  $T$  とその平均値

この鋸歯構造の特徴の起源についてさらに詳しく調べるため、変形エネルギーについて調べた。図 3.2.1-7 には、分裂片の形状から求めた断裂直後の形状からの変形エネルギー  $E_{ias}$  と、基底状態 ( $T = 0$ ) における変形エネルギー  $E_{gs}$  およびそれらの差  $E_{ias} - E_{eg}$  を示した。既に図 3.2.1-3 で示したように、変形度の平均値  $\langle \delta \rangle$  は、 $A = 132$  周辺で最低値を示しており、分裂片は球形に近い分布を有している。これは、 $^{132}\text{Sb}$  がダブルマジック核であり、基底状態の変形エネルギー  $E_{gs}$  がもっとも低いことから説明が可能である。一方、 $A = 120$  付近の原子核は非常に変形している。図 3.2.1-7 に示された  $E_{ias}$  の変化は、分裂片の形状（変形度）を直接的に反映した鋸歯の

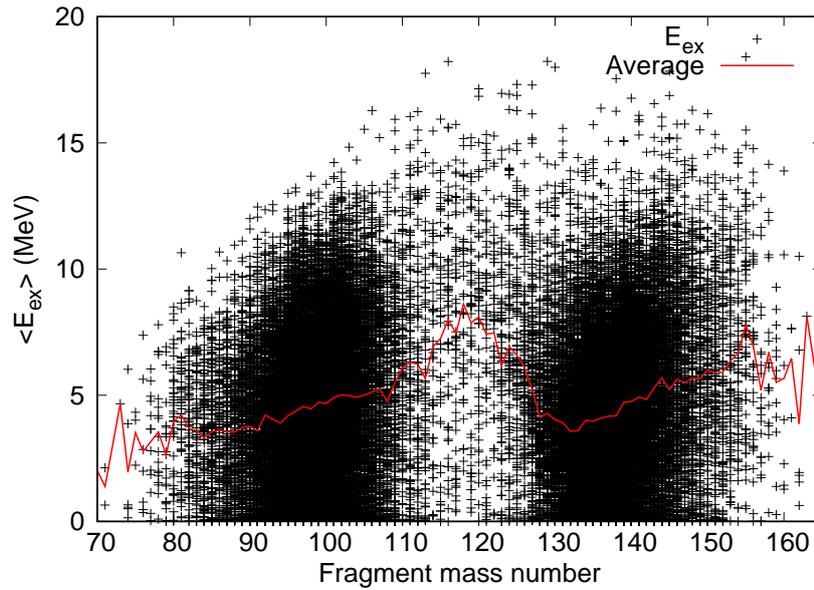


図 3.2.1-6: Intrinsic な励起エネルギー  $E_{ex}$

構造を有していることが示された。

以上により、即発中性子多重度における鋸歯構造との関係を、Intrinsic な励起エネルギー  $E_{ex}$  が断裂直後の形状からの変形エネルギー  $E_{ias}$  に由来している可能性を類比することができる。

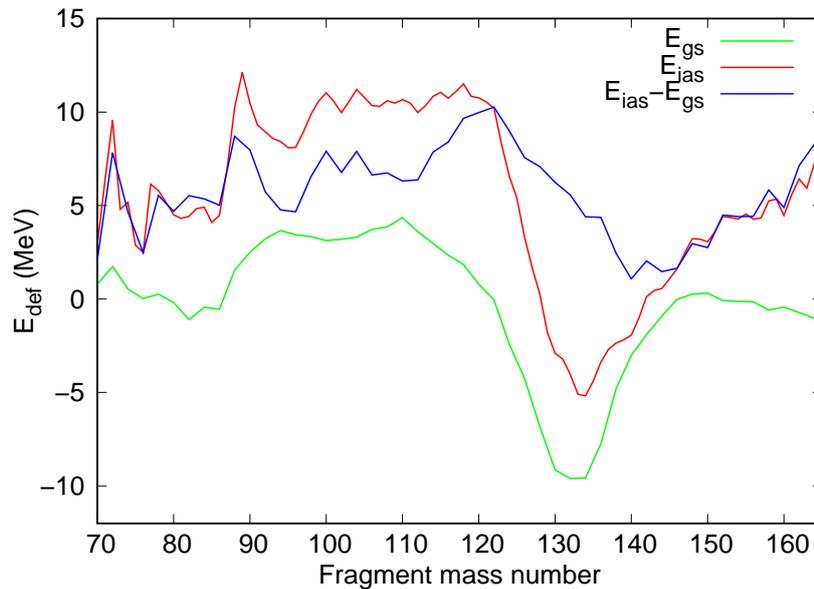


図 3.2.1-7: 変形エネルギーと基底状態変形エネルギーおよびそれらの差

また、比較のため、同じ  $^{236}\text{U}$  ( $^{235}\text{U}+n$ )、 $E_n = 7$  MeV 系において、ネックパラメータ  $\epsilon$  を変更し、 $(\epsilon, \hbar\omega) = (0.25, 6.00)$  の条件における変形度の平均値  $\langle \delta \rangle$  と、励起エネルギー  $E_{ex}$  の計算結果を図 3.2.1-8、図 3.2.1-9 にそれぞれ示す。少しの形状状態の変化が2つの分裂片の励起エネルギーの分布に大きく影響を与えることがわかる。エネルギーの分布に大きく影響を与えることがわかる。

次に、複合核の励起エネルギーに対する核分裂片の変形パラメータ  $\delta$  を調べた。結果を図 3.2.1-10

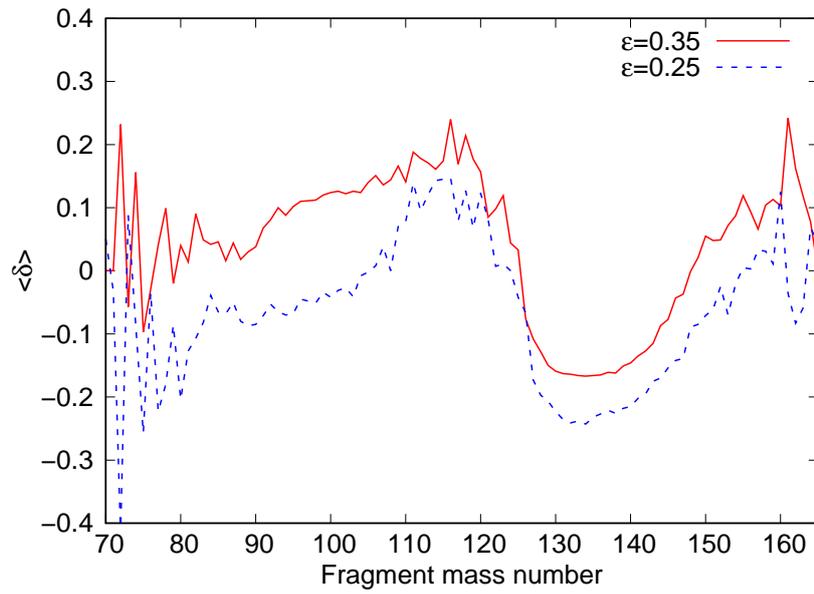


図 3.2.1-8: ネックパラメータ  $\epsilon$  に対する変形度の変化

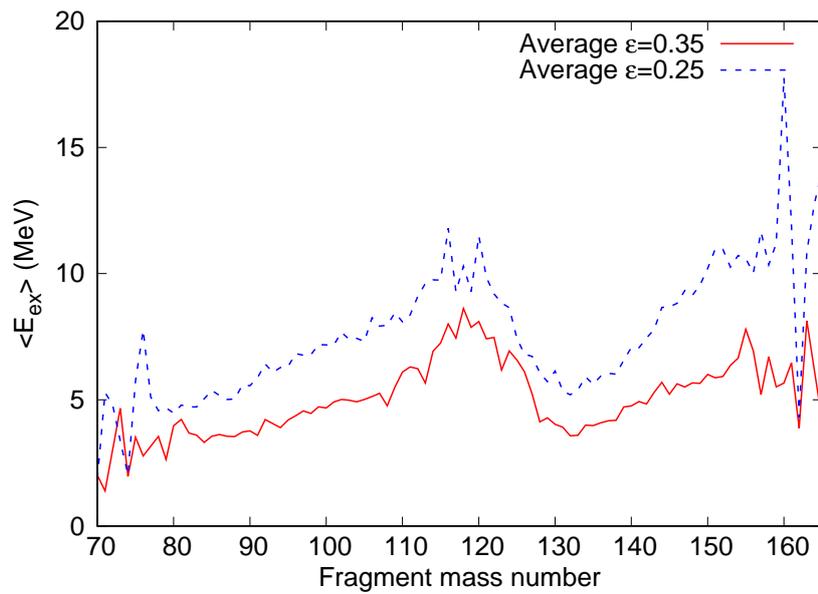


図 3.2.1-9: ネックパラメータ  $\epsilon$  に対する励起エネルギーの変化

に示す。軽い核分裂片のパラメータの値は常に一定であるもの、複合核の励起エネルギーが 7, 12, 20 MeV と大きくなるにつれて重い核分裂片の変形パラメータの値がプラスに向かって増えている。すなわち、複合核の励起エネルギーとともに、最終的に核分裂片が得る励起エネルギーが増えることを意味するもので、低エネルギー核分裂における未解決問題を説明した成果と言える。

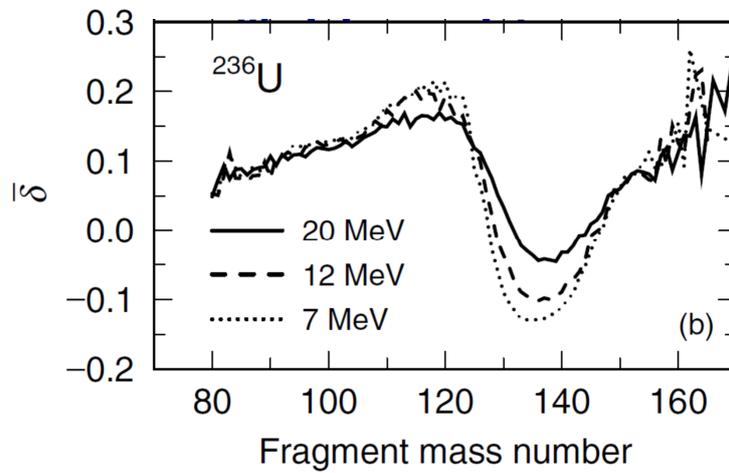


図 3.2.1-10: 複合核励起エネルギーに対する  $\delta$  値の変化

### 3.2.2 核分裂片からの蒸発中性子スペクトル計算 (H29-30)

以上により、4次元 Langevin 模型計算の結果を用いて各核分裂片の励起エネルギーを推定することができた。本章では、得られた励起エネルギーを基に即発中性子放出を計算する手法について報告する。

Langevin 模型に代表される核分裂を記述する理論模型では、実験的に測定が困難な断裂直後の核分裂片に関する情報を得ることができる。一方で、高励起状態にある原子核の脱励起過程は、Langevin 模型自身により求めることはできない。このため、即発中性子や  $\gamma$  線放出による脱励起過程とその後に続く  $\beta$  崩壊過程については、Hauser-Feshbach 統計模型理論等を用いて別途計算が必要となる。東工大は、平成 29 年度までに米国ロスアラモス国立研究所で開発された CoH<sub>3</sub>/BeoH コード [5] をベースとしている HF<sup>3</sup>D (Hauser-Feshbach Fission Fragment Decay) [6] を使用し、核分裂片一核種ずつの崩壊仮定を精緻な計算を行なうことにより、全ての中性子・ $\gamma$  線放出過程を勘案し、確率を足し上げるとこで、この核分裂片 (A,Z) 核の脱励起による即発中性子や  $\gamma$  線の多重度やスペクトルを計算し、さらに即発中性子放出数から独立収率を計算する手法を開発してきた。

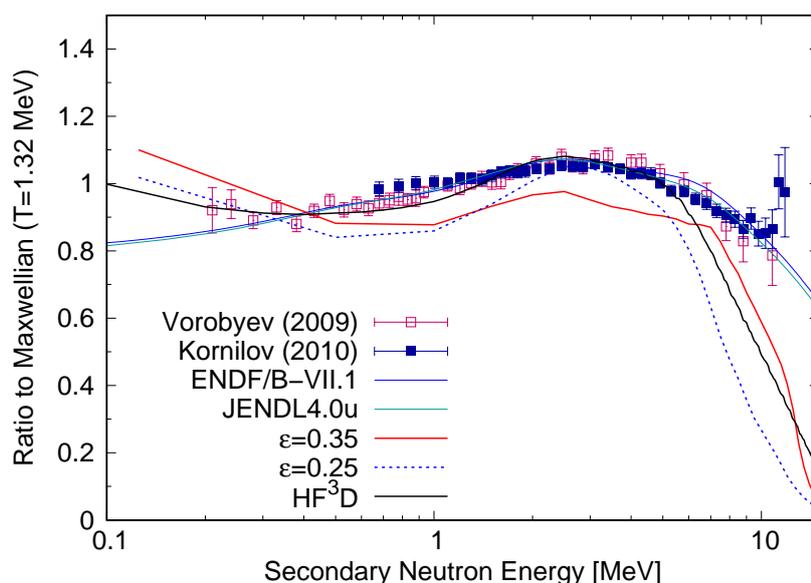


図 3.2.2-1: Langevin 模型を取り入れた即発中性子スペクトル

核分裂片からの Hauser-Feshbach 統計崩壊計算は、核分裂片の重心系 (CMS) で与えられるので、核分裂片の速度を考慮して実験室系に変換しなければならない。初期状態としてスピン  $J$ 、パリティ  $\Pi$ 、励起エネルギー  $E_x$  で特徴付けられる初期状態からの、動いている核分裂片に対する実験室系即発中性子スペクトル  $\chi(E_n)$  は、CMS スペクトル  $\phi(J, \Pi, E_x, \epsilon)$  から、以下のように計算される。

$$\chi(E_n) = \int dE_x \int_{(\sqrt{E}-\sqrt{E_k})^2}^{(\sqrt{E}+\sqrt{E_k})^2} \sum_{J, \Pi} \frac{1}{4\sqrt{E_k\epsilon}} \phi(J, \Pi, E_x, \epsilon) R(J, \Pi) G(E_x) d\epsilon, \quad (3.2)$$

ここで、 $\epsilon$  は出て行く中性子の CMS におけるエネルギーで、 $E_k$  はフラグメントの核子あたりでの運動エネルギーで  $E_n$  は実験室系における中性子エネルギーである。 $\chi(E_n)$  は、核分裂片ごとに与えられ、最終的に得られるスペクトルは、核分裂片収率で重み付けされた  $\chi(E_n)$  の合計で与え

られる。

平成 29 年度の報告では、この時、全励起エネルギー (TXE) は、

$$\begin{aligned} \text{TXE}(Z_l, A_l, Z_h, A_h) &= Q - \text{TKE}(Z_l, A_l, Z_h, A_h) \\ &= M_n(Z_l, A_l) + M_n(Z_h, A_h) - M_n(Z_c, A_c) + E_{inc} + B_n(Z_c, A_c) \quad (3.3) \end{aligned}$$

としてエネルギー保存により関連づけられるとし、Langevin 模型で得られた核分裂片の一次収率の質量数分布  $Y_p(A)$  と全運動エネルギー (TKE(A)) を HF<sup>3</sup>D モデルに取り込み、即発中性子多重度およびスペクトル計算を報告していた。

本年度は、HF<sup>3</sup>D モデルを拡張し、前章で得られた励起エネルギー分布を用いてスペクトルを計算できるよう改良を加えた。図 3.2.2-1 に本計算により得られた即発中性子スペクトルを示す。純粹に励起エネルギー分布による影響を確認するため、本報告においては、 $Y_p(A)$  および TKE(A) の分布は、HF<sup>3</sup>D モデルで最適化したものを用い、励起エネルギー分布のみ Langevin 模型で得られた図 3.2.1-9 の分布に置き換えた。比較のため、ネックパラメータ  $\epsilon$  だけを変えた 2 つのケースを示した。HF<sup>3</sup>D モデル計算と比較するとスペクトルの形状の再現性は悪化しているものの、両ケース共に概ねの傾向は再現することができた。

### 3.2.3 核分裂生成物の分布と即発中性子の関係 (H30)

さらに即発中性子の起源をさぐるため、核分裂片の荷電偏極の違いによるアイソトープ分布の違いやスピン切断因子を変化させた場合の即発中性子多重度の違い、複合核の励起エネルギーの関数として核分裂片や複合核から放出される中性子の多重度を計算し、即発中性子放出の起源についての考察を行った。以下、実施内容および成果について説明する。

はじめに荷電偏極の違いによる即発中性子多重度およびスペクトルを確認した。

荷電分布は、核分裂生成物における同じ質量数を物核種の中での個々の同位体の生成割合を決定する基本的な量である。荷電分布（荷電密度）が核分裂の全過程で変化しない（複合核の荷電密度が保たれる）という仮定を荷電密度不変（Unchanged Charge Distribution, UCD）と呼ぶ。この過程では、最確荷電  $Z_p$  は、核分裂片の質量数  $A_i$  に比例し、

$$Z_p(UCD) = (Z_F/A_F) \times A_i \quad (3.4)$$

で与えられる。ここで、 $Z_F$  および  $A_F$  は、複合核の原子番号と質量数を表す。実際の実験値では、 $Z_p(UCD)$  と異なり、0.5 程度ズレが生じることが知られている。このズレは、独立収率およびその後の  $\beta$  崩壊過程に大きな影響を及ぼすことがわかっている [7]。このため、現在の JEDNL や ENDF では、Wahl らが実験データから導かれた経験式、Wahl Systematics による  $Z_p$  モデル [8] が広く用いられている。HF<sup>3</sup>D モデルにおいても、 $Z_p$  モデルを用いて荷電分布を生成している。 $Z_p$  モデルによると独立収率は、

$$Y_I(Z, A) = \frac{1}{2} F(A) N(A) [\text{erf}(V) - \text{erf}(W)], \quad (3.5)$$

$$V = \frac{Z(A) - Z_p(A) + 0.5}{\sigma_Z(A')\sqrt{2}}, \quad (3.6)$$

$$W = \frac{Z(A) - Z_p(A) - 0.5}{\sigma_Z(A')\sqrt{2}}, \quad (3.7)$$

と計算され、式 (3.7) 中の  $F(A)$  は、核分裂生成物の質量の偶奇により決まるパラメータで、 $N(A)$  は規格化因子である。 $\sigma_Z$  は荷電分布の分布幅、 $A'$  は  $A' = A + \nu(A)$  で表される即発中性子放出後の質量数、 $Z_p$  は荷電分布の中心に位置する電荷（Most probable charge）であり、

$$Z_p = (Z_F/A_F) \times A' + \Delta Z(A'), \quad (3.8)$$

として表される。ここで、 $\Delta Z(A')$  は、核分裂片の電荷についての複合核の電荷密度からのずれを示している。

実際に荷電偏極の違いによるアイソトープ分布が、即発中性子多重度およびスペクトルに与える影響を確認するため、 $Z_p$  モデルにより  $\Delta Z(A')$  を考慮した場合と、UCD 仮定のみとした ( $\Delta Z(A') = 0$ ) アイソトープ分布を生成した場合を比較することにした。

図 3.2.3-1 に示すのは、 $Z_p$  モデルにより生成されたアイソトープ分布の  $\Delta Z(A')$  の即発中性子放出前 (Pre) と放出後 (Post) の比較である。一方、図 3.2.3-2 に示すのは、UCD 仮定のみとした場合の同様のプロットである。即発中性子放出後のアイソトープ分布の UCD からのズレは 2 条

件で大きく異なっていることがわかる。

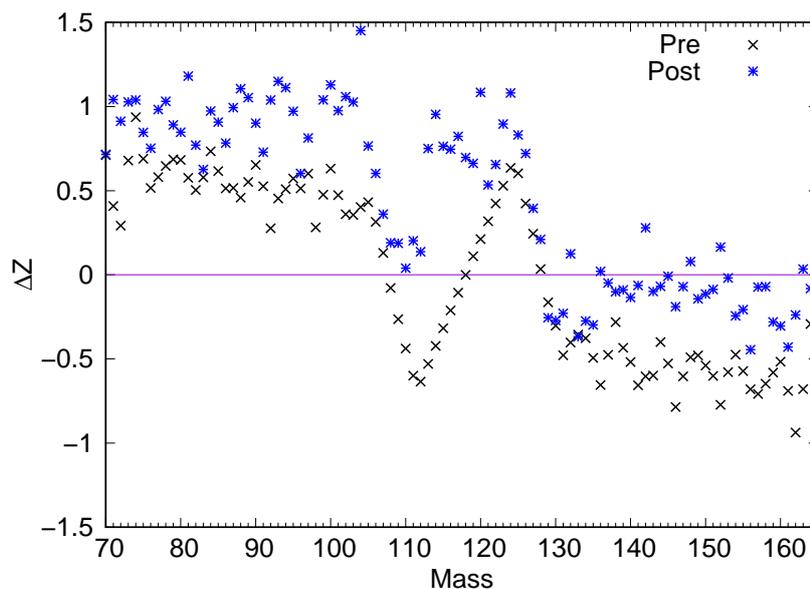


図 3.2.3-1:  $Z_P$  モデルの  $\Delta Z(A)$

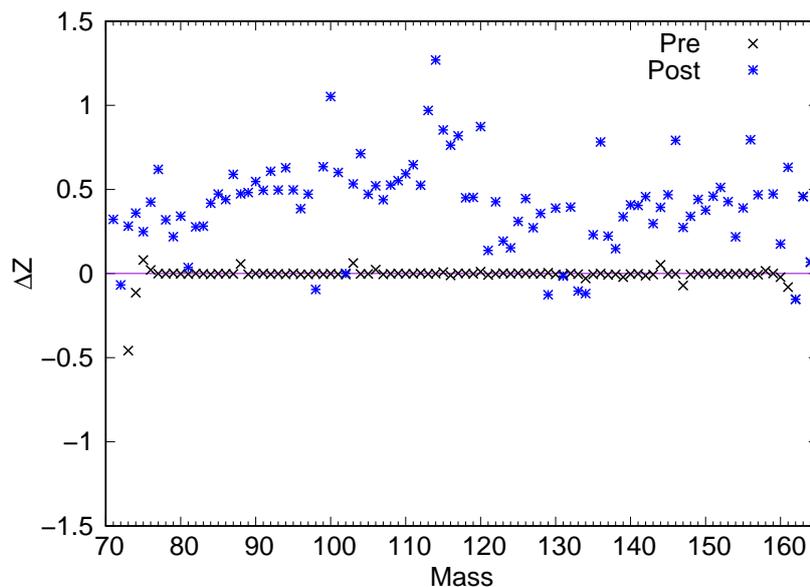


図 3.2.3-2: UCD 仮定の  $\Delta Z(A)$

このような一次収率におけるアイソトープ分布を用いた場合の即発中性子多重度およびスペクトルを比較した。図 3.2.3-3 に示した即発中性子多重度は、 $Z_P$  モデルにより生成された  $\Delta Z(A')$  を用いた場合 (HF<sup>3</sup>D モデル) と UCD 仮定のみとした場合において、軽い核分裂片は大きな変化が見られなかった。一方、重い核分裂片では、UCD 仮定のみの場合に即発中性子多重度が減少した。HF<sup>3</sup>D モデルと UCD 仮定における平均多重度  $\bar{\nu}$  は、2.384 と 2.251 となった。図 3.2.3-4 に示した多重度の分布では、UCD 仮定を用いた場合に多重度の大きな放出が減少し、多重度の少ない放出が増加していることがわかる。

また、図 3.2.3-5 に示したスペクトルは、UCD 仮定を用いた場合に 0.5 MeV から 2 MeV に特

微的なディップが現れた。重いフラグメントからの即発中性子放出の減少によるものであると考えられる。HF<sup>3</sup>D モデルが有する 0.2 MeV 以下における評価済み核データとの相違については、UCD 仮定を用いた場合にさらに大きく見積もられる傾向にある。これは、収率の低い核を計算に含めるとさらに大きく為る傾向が見られるため、計算上の過大評価の可能性も考えられる。

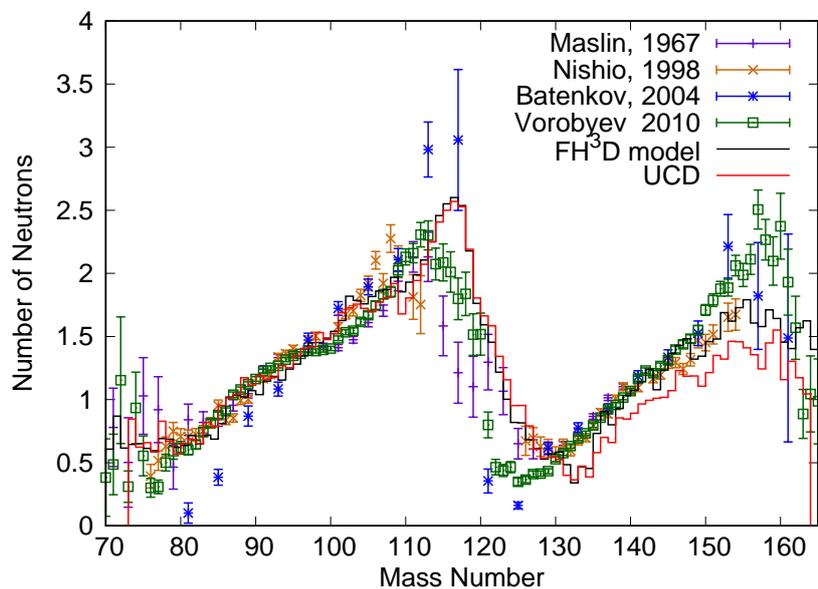


図 3.2.3-3: 即発中性子多重度の質量数依存

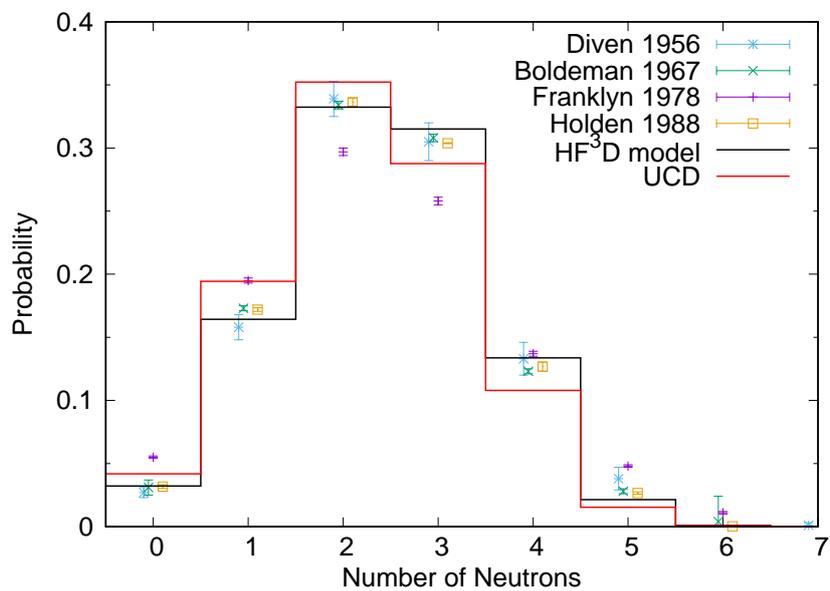


図 3.2.3-4: 即発中性子多重度の分布

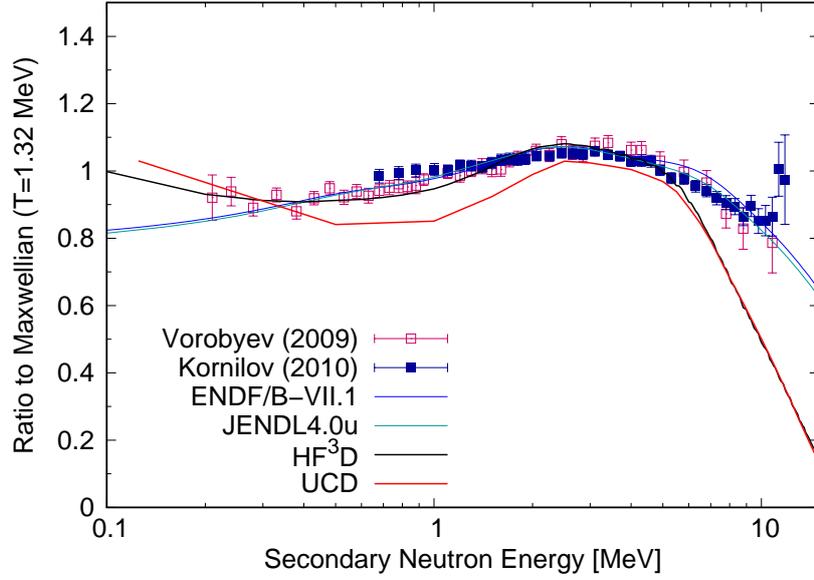


図 3.2.3-5: 即発中性子スペクトル

### 3.2.4 スピン切断因子の効果 (H30)

次に、スピン切断因子を変化させた場合の即発中性子多重度の違いについて確認した。平成 29 年度に詳細を報告の通り、HF<sup>3</sup>D モデルでは、即発中性子の放出量  $\bar{\nu}$  は、核分裂片の収率で重みがかかった積算量として以下のように計算される。

$$\bar{\nu} = \sum_{k=1}^N Y_k \left( \bar{\nu}_l^{(k)} + \bar{\nu}_h^{(k)} \right), \quad (3.9)$$

ここで  $N$  は核分裂片のペア  $k$  の数で、即発中性子多重度  $\bar{\nu}_{l,h}^{(k)}$  は、重心系における軽・重核分裂片それぞれからの即発中性子スペクトル  $\phi_{l,h}^{(k)}$  の積分により以下のように与えられる。

$$\bar{\nu}_{l,h}^{(k)} = \int dE_x \sum_{J\Pi} \int d\epsilon R(J, \Pi) G(E_x) \phi_{l,h}^{(k)}(J, \Pi, E_x, \epsilon), \quad (3.10)$$

ここで  $R(J, \Pi)$  は、スピン  $J$  とパリティ  $\Pi$  状態を有する確率で、 $G(E_x)$  は励起エネルギーの分布である。これらは、規格化条件、 $\sum_{J\Pi} R(J, \Pi) = 1$  および  $\int G(E_x) dE_x = 1$  を満たす。スピンとパリティの分布については、過去の研究例 [4] により、スピンパリティの分布が

$$R(J, \Pi) = \frac{J + 1/2}{2f^2\sigma^2(U)} \exp \left\{ -\frac{(J + 1/2)^2}{2f^2\sigma^2(U)} \right\}, \quad (3.11)$$

で表されるとした。ここで、パリティの分布は  $1/2$ 、 $\sigma^2(U)$  は cut-off parameter、 $U$  はペアリングエネルギー  $U = E_x - \Delta$  により補正される励起エネルギーである。ここで  $f$  はスピン切断因子と呼ばれるパラメータで、調整パラメータとして用いている。図 3.2.4-1 は、スピン切断因子の違いによるスペクトルの形状への影響を示したものである。スペクトルの形状は 5 MeV 程度まではほとんど変化が見られないが、5 MeV を越えるとスピン切断因子により高いエネルギー側が全体的にシフトする傾向が見られる。一方、図 3.2.4-2 に示した多重度の分布では、ほとんど変化を見

て取ることができず、スピン切断因子による影響は断定的であると言え、それよりもUCD仮定などによる収率そのものの変化や励起エネルギー分布の直接的な変化がより強い影響を与えることがわかった。

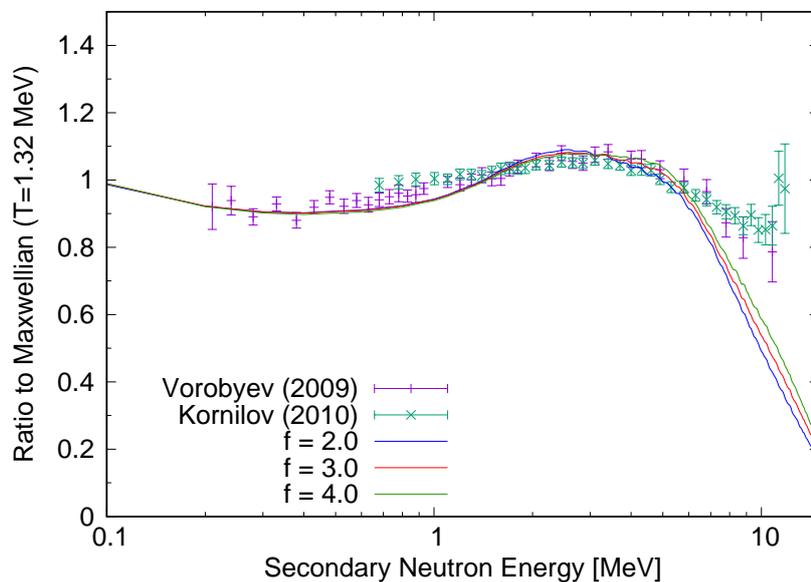


図 3.2.4-1: 即発中性子スペクトルのスピン切断因子による変化

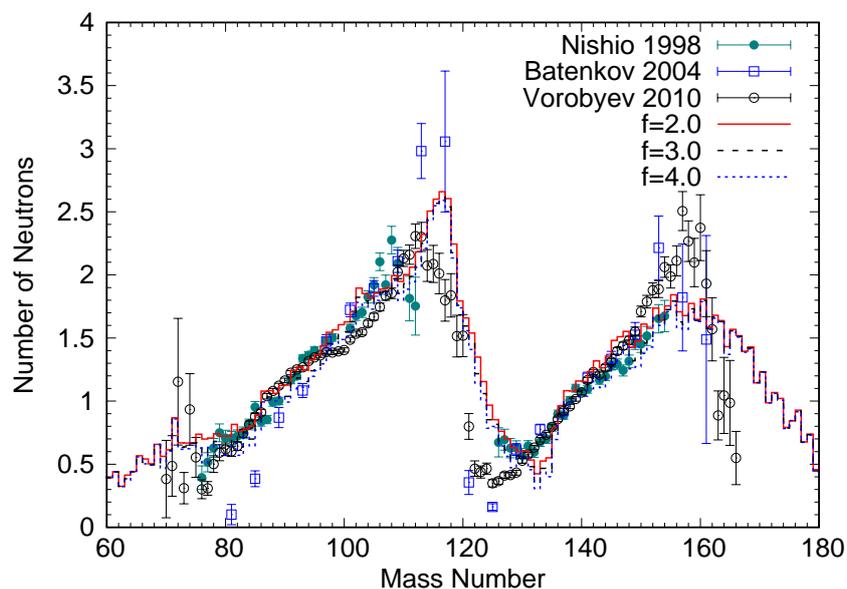


図 3.2.4-2: 即発中性子多重度の質量数依存に対するスピン切断因子の効果

### 3.2.5 ベータ崩壊への接続 (H29-30)

また、実験値とのさらなる比較を可能にするため、統計崩壊についてベータ崩壊までの核分裂の一連の流れを全て接続して計算する手法も開発した。

核分裂過程は、一般に（１）複合核の形成から断裂、（２）断裂直後の高く励起した核分裂片の即発中性子およびガンマ線放出による脱励起（統計崩壊）、および（３）脱励起後の核分裂片（核分裂生成物）の $\beta$ 崩壊の３つの過程から為る。本事業では、平成 29 年までに前半の 2 過程を形状 4 次元 Langevin 模型と Hauser-Feshbach 統計崩壊理論を接続するモデルを確立してきた。しかしながら、多くの比較可能な実験値、特に核分裂収率については、 $\beta$ 崩壊後の測定値が多く、Langevin 模型が生成した、もしくは HF<sup>3</sup>D モデルが仮定した一次収率分布の正しさは、 $\beta$ 崩壊過程まで考慮する必要がある。

そこで我々は、平成 29 年に開発した HF<sup>3</sup>D モデルを拡張し、 $\beta$ 崩壊までを統合的に計算することができるフレームワークを確立した。ENDF Decay Data Library から最新の崩壊データを読み込み可能な形式に変換し、HF<sup>3</sup>D モデルが出力した独立収率のデータから核分裂生成物データを読み取り、1 つ 1 つの核分裂生成物についての  $\beta$ 崩壊パスを追いかけることにより積算し累積収率を得た。

質量数分布、電荷分布で見た場合においても核データを概ね再現するという結果を得た。図 3.2.5-1 には、累積収率の質量数分布の JENDL との比較を示す。計算値は比較的よく評価値を再現していることがわかる。また、図 3.2.5-2 には、電荷分布を比較した図を示す。核分裂では、主に中性子過剰の核が  $\beta$ 崩壊することから独立収率 ( $Y_I$  と表記) の分布から累積収率 ( $Y_C$  と表記) が重い電荷側にシフトしていることが確認できる。

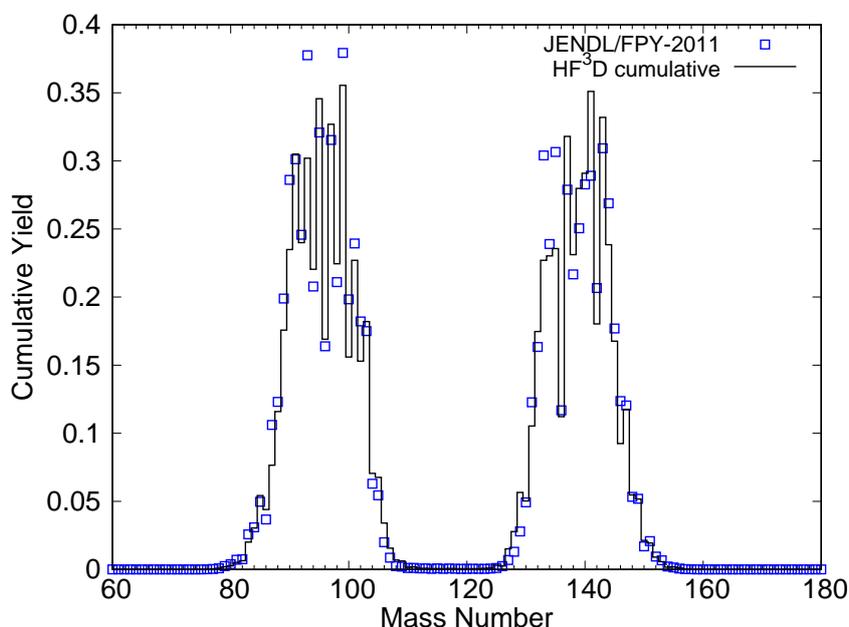


図 3.2.5-1: 累積収率の質量数分布

さらに分布を細かく比較するために、軽・重それぞれの核分裂生成物累積収率の元素ごとのアイソトープ分布を実験値との比較を行なった。図 3.2.5-3 および図 3.2.5-4 に結果を示す。HF<sup>3</sup>D モ

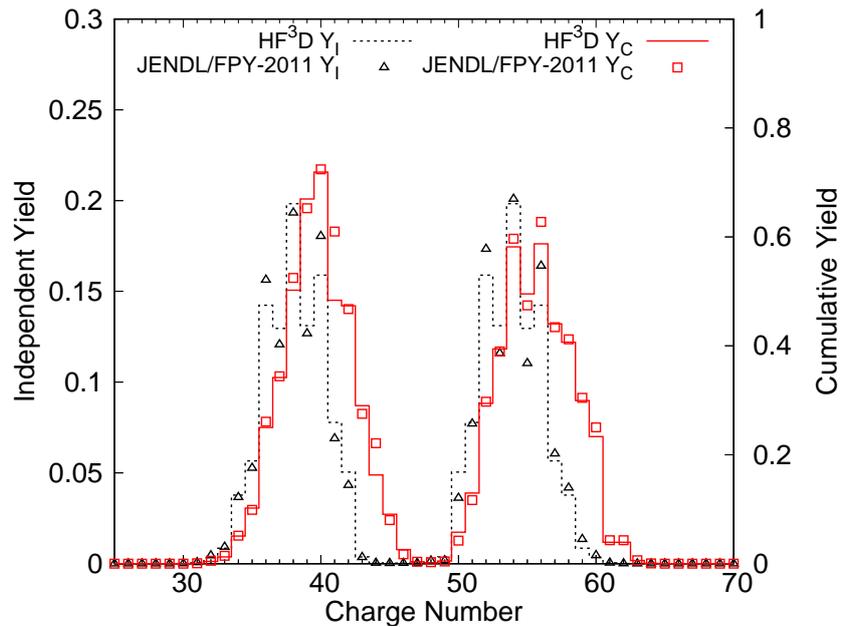


図 3.2.5-2: 累積収率の電荷分布

デルの一次収率を起点として、Hauser-Feshbach 統計崩壊により独立収率を得て、さらに  $\beta$  崩壊計算を行なったにも関わらず、不完全ではあるものの軽・重核分裂生成物ともに概ね実験値の傾向を再現するという結果を得た。

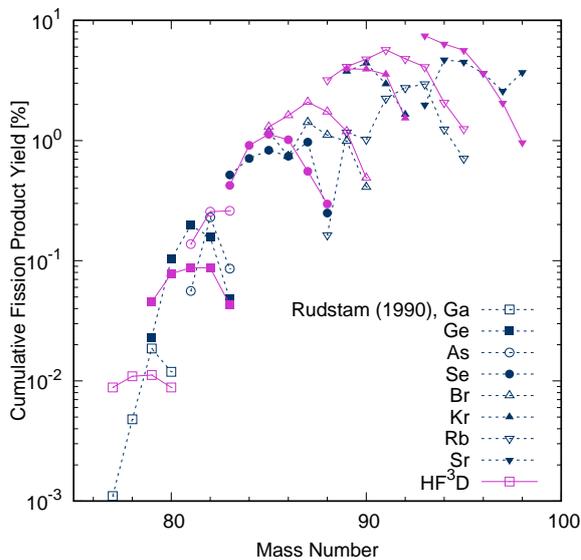


図 3.2.5-3: 軽い核分裂生成物の収率分布

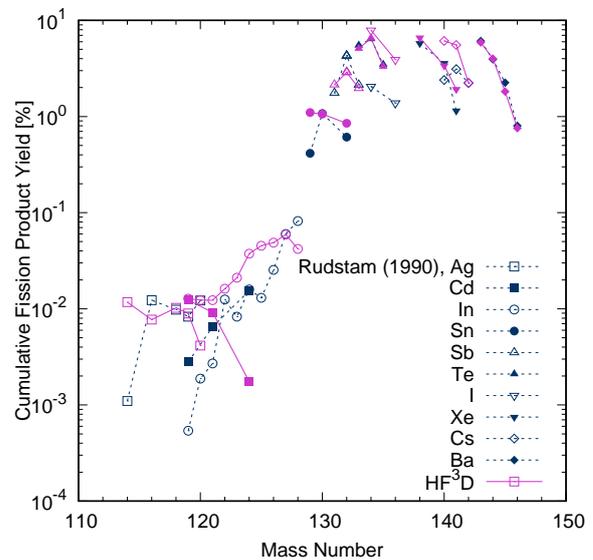


図 3.2.5-4: 重い核分裂生成物の収率分布

また、平成 29 年に報告の通り、HF<sup>3</sup>D モデルでは、入射中性子のエネルギーが 5 MeV までの領域についてエネルギー依存での独立収率の計算を行なっている。昨年度に計算済みの独立収率を用いて  $\beta$  崩壊計算を行った。エネルギー依存での累積収率の報告があるいくつかの核分裂生成物について、計算値と実験値の比較を行なった。結果を図 3.2.5-5(<sup>95</sup>Zr)、図 3.2.5-6(<sup>97</sup>Zr)、図 3.2.5-7(<sup>99</sup>Mo)、図 3.2.5-8(<sup>132</sup>Te)、図 3.2.5-9(<sup>140</sup>Ba)、図 3.2.5-10(<sup>143</sup>Ce)、および図 3.2.5-11(<sup>147</sup>Nd) に示す。<sup>99</sup>Mo および <sup>147</sup>Nd の計算は、実験データ誤差以上にずれているものの、その他の核種では

おおむねよい再現に達している。

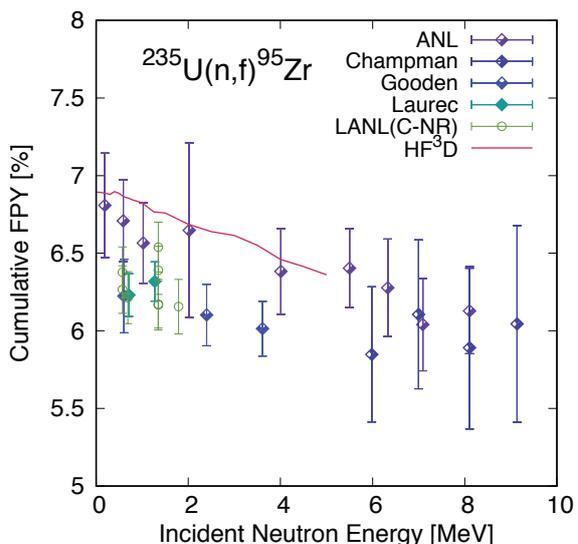


図 3.2.5-5:  $^{95}\text{Zr}$  の累積収率

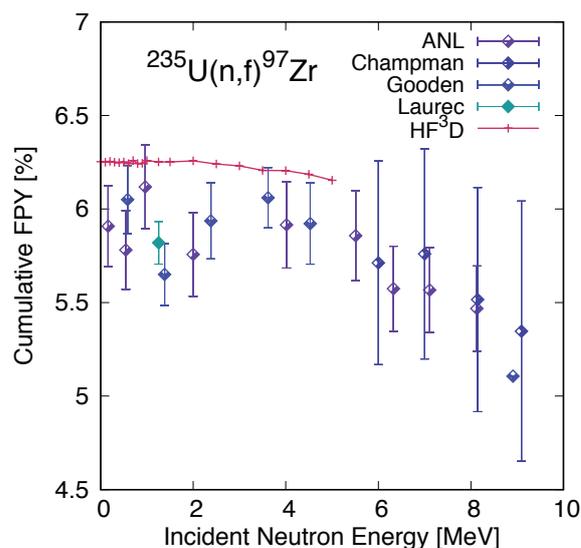


図 3.2.5-6:  $^{97}\text{Zr}$  の累積収率

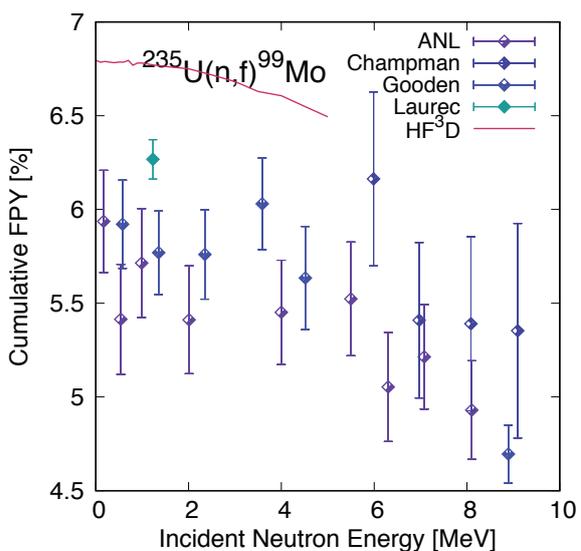


図 3.2.5-7:  $^{99}\text{Mo}$  の累積収率

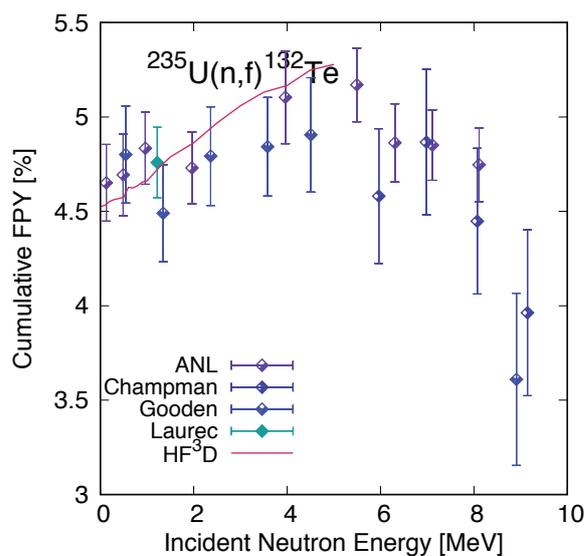


図 3.2.5-8:  $^{132}\text{Te}$  の累積収率

### 3.2.6 動力学計算と中性子放出計算のまとめ

平成 28 年度までに開発した形状 4 次元 Langevin 模型および平成 29 年度に開発した Hauser-Feshbach 統計崩壊理論に基づく即発中性子多重度・スペクトルおよび収率の計算手法を統合し、柔軟に 4 次元 Langevin 模型により得られる分布を取り込み計算する手法を開発した。最終年度、形状 4 次元 Langevin 模型から得られる核分裂片の変形に関する情報を元に核分裂片の励起エネルギーを求め、これを Hauser-Feshbach 統計崩壊理論のインプットとして中性子蒸発を計算した。本開発により、核分裂の基礎過程の記述を取り入れた上で中性子蒸発を計算できるようになった。またさらに、これらの計算を  $\beta$  崩壊計算まで接続することにより、異なる 3 つの物理過程で

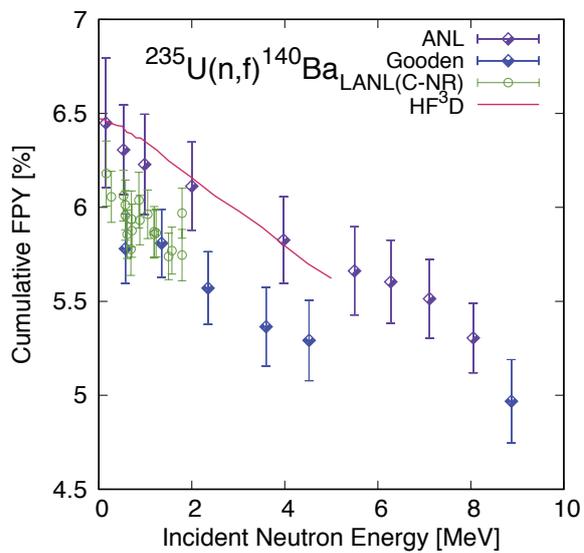


図 3.2.5-9:  $^{140}\text{Ba}$  の累積収率

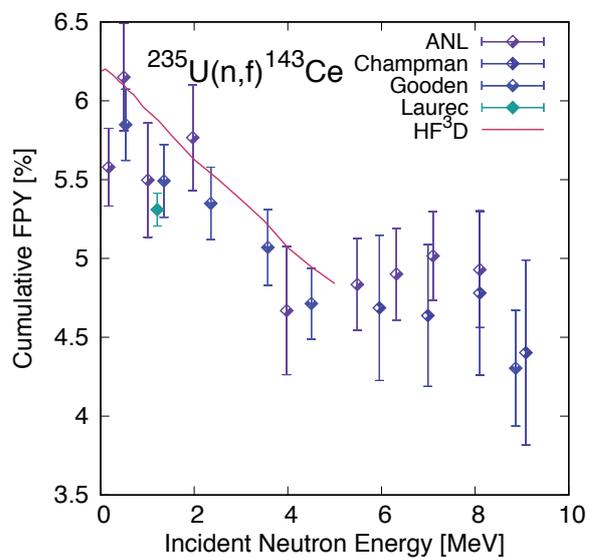


図 3.2.5-10:  $^{143}\text{Ce}$  の累積収率

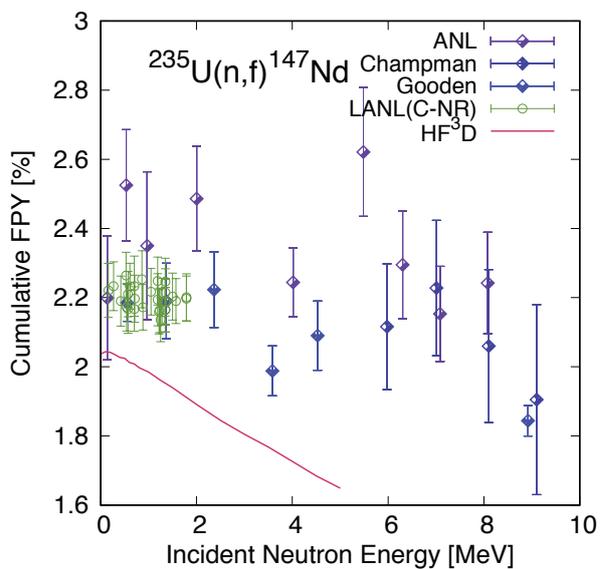


図 3.2.5-11:  $^{147}\text{Nd}$  の累積収率

ある (1) 複合核の形成から断裂、(2) 断裂直後の高く励起した核分裂片の即発中性子およびガンマ線放出による脱励起 (統計崩壊)、および (3) 脱励起後の核分裂片 (核分裂生成物) の  $\beta$  崩壊までの全核分裂過程について統合的に計算を行うフレームワークを構築することができた。

## 参考文献

- [1] B.D. Wilkins, E.P. Steinberg, and R.R. Chasman. Scission-point model of nuclear fission based on deformed-shell effects. *Phys. Rev. C*, **14**, 1832 (1976).
- [2] T. Ohsawa, T. Horiguchi, and H. Hayashi. Multimodal analysis of prompt neutron spectra for  $^{237}\text{Np}(n,f)$ . *Nuclear Physics A*, **653**, 16 (1999).
- [3] T. Ohsawa, T. Horiguchi, and M. Mitsuhashi. Multimodal analysis of prompt neutron spectra for  $^{238}\text{Pu}(sf)$ ,  $^{240}\text{Pu}(sf)$ ,  $^{242}\text{Pu}(sf)$  and  $^{239}\text{Pu}(n_{th},f)$ . *Nuclear Physics A*, **665**, 3 (2000).
- [4] T. Kawano, P. Talou, I. Stetcu, and M.B. Chadwick. Statistical and evaporation models for the neutron emission energy spectrum in the center-of-mass system from fission fragments. *Nuclear Physics A*, **913**, 51 (2013).
- [5] T. Kawano, P. Talou, M.B. Chadwick, and T. Watanabe. Monte carlo simulation for particle and  $\gamma$ -ray emissions in statistical Hauser-Feshbach model. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **47**, 462 (2010).
- [6] S. Okumura, T. Kawano, P. Jaffke, P. Talou, and S. Chiba.  $^{235}\text{u}(n, f)$  independent fission product yield and isomeric ratio calculated with the statistical Hauser-Feshbach theory. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **55**, 1009 (2018).
- [7] S. Okumura, T. Kawano, P. Jaffke, P. Talou, and S. Chiba. Hauser-feshbach statistical decay and beta decay calculation for primary fission fragments. *Proceedings of the 15th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, CERN Proceedings*, 173 (2019).
- [8] A.C. Wahl. Systematics of fission-product yields. LA-13928, (2002).



図 3.3.1-1: 第 27 回 ASRC 国際ワークショップの集合写真

### 3.3 研究推進

本研究成果を世界レベルで議論するため、国際会議を主催した。ここでは、共同研究者、連携研究者との連携を密にして研究を進める確認の場とするとともに、世界の最先端の核分裂研究に関する情報を集める場とした。以下、年度ごとに会議と議論の内容のエッセンスを示す。

#### 3.3.1 平成 27 年度ワークショップ (H27)

平成 27 年 12 月 1 日、2 日の日程で茨城県・東海村の茨城量子ビームセンターにおいて第 27 回 ASRC (Advanced Science Research Center) 国際ワークショップ「核分裂とエキゾチック原子核」を主催した (写真 3.3.1-1)。外国からの参加者 12 名を含む計 46 名の参加者があり、本研究開発に関する議論を含めて情報交換を行うとともに、核分裂研究に関する議論を行った。ワークショップのプログラムを図 3.3.1-2 (初日) および 3.3.1-3 (2 日目) に示す。

本ワークショップにおいて、以下の議論があった。

##### 1. Brownian 運動による核分裂の記述

ローレンス・バークレー国立研究所の J. Randrup 博士は、原子核のポテンシャルエネルギー曲面を 5 次元の変形座標で計算し、ブラウン運動を取り入れた計算によって核分裂過程の記述を行った。アクチノイド原子核などへの応用が示された。変形座標数 (パラメータの数) は、本研究の目標とする 4 次元より大きい、原子核の摩擦項など、動力学モデルにおいて省略化された部分もあった。

##### 2. 陽子過剰核の核分裂

27<sup>th</sup> ASRC International Workshop  
**“Nuclear Fission and Exotic Nuclei”**  
 Ibaraki Quantum Beam Research Center, Tokai, Japan  
 1<sup>st</sup> – 2<sup>nd</sup> December (2015)

<http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/HENS-gr/workshop5/index5.html>

**1st December (Tuesday)**

8:40 – 9:20	Registration at Ibaraki Quantum Beam Research Center	
9:20 – 9:25	Katsuhisa Nishio JAEA	Opening
9:25 – 9:30	Sadamichi Maekawa Director General of ASRC, JAEA	Welcome address
Chair : Katsuhisa Nishio, JAEA		
9:30 – 9:55	Jorgen Randrup (25) LBNL	Fission dynamics as Brownian Shape Motion : Foundation, Utility and Energy Dependence
9:55 – 10:15	Andrei Andreyev (20) Univ. of York / JAEA	Experimental fission study of proton-rich nuclei
10:15 – 10:40	Michal Warda (25) Maria Curie-Sklodowska Univ.	Fission barriers in the neutron-deficient isotopes
Coffee break ( 10:40 – 11:10)		
Chair : Akira Iwamoto, JAEA		
11:10 – 11:30	Satoshi Chiba (20) Tokyo Institute of Technology	Effects of microscopic transport coefficients in fission observables
11:30 – 11:50	Hiroyuki Makii (20) JAEA	Measurement of high-energy $\gamma$ -rays in $^{235}\text{U}(n_{th},f)$
11:50 – 12:10	Fedir Ivaniuk (20) Institute of Nuclear Research, Kiev	Fission of transactinide nuclei described within the scission point model
Lunch ( 12:10 -13:30 )		
Chair : Andrei Andreyev, University of York / JAEA		
13:30 – 13:55	Thierry Stora (25) CERN	New Beams at HIE-ISOLDE and CERN-MEDICIS
13:55 – 14:20	Hiroyoshi Sakurai (25) RIKEN	Recent results and plans at RIBF
14:20 – 14:45	Lucia Popescu (25) SCK-CEN	Radioactive isotopes production at the future MYRRHA facility
14:45 – 15:10	Byoung-Hwi Kang (25) IBS/RISP	Current status of ISOL system development for RAON facility
Coffee break (15:10 – 15:40)		
Chair : Krzysztof Rykaczewski, ORNL		
15:40 – 16:00	Fujio Maekawa (20) JAEA	J-PARC transmutation experimental facility program
16:00 – 16:20	Katsuhisa Nishio (20) JAEA	Future facility using proton beam at J-PARC
16:20 – 16:40	Atsushi Tamii (20) RCNP, Osaka University	Study of nuclear structure with implanted or activated targets
16:40 – 17:00	Tetsuya Sato (20) JAEA	Measurement of the first ionization potential of Lr

図 3.3.1-2: 第 27 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (1/2)

Coffee break (17:00 – 17:20)		
Chair : Tsutomu Ohtsuki, Kyoto University		
17:20 – 17:40	Masaki Sasano (20) RIKEN	Status of fission experiments at RIKEN RIBF
17:40 – 18:00	Takahiro Wada (20) Kansai University	Dynamical study of fission in actinide region
18:00 – 18:20	Nicolae Carjan (20) FLNR	Fission of transfermium elements described in terms of generalized Gassimi ovals : fragment mass and total kinetic energy distributions
Workshop Banquet : Restaurant “Ikoï” (19:00 – 21:00 )		

### 2nd December (Wednesday)

Chair : Satoshi Chiba, Tokyo Institute of Technology		
9:15 – 9:40	Shigeru Kubono (25) RIKEN/IMP/CNS	Dynamically deformed resonances in nuclear astrophysics
9:40 – 10:05	Takatoshi Ichikawa (25) YITP, Kyoto Univ.	Universal damping mechanism of quantum vibrations in deep sub-barrier fusion reactions
10:05 – 10:30	Michiharu Wada (25) KEK / RIKEN	Mass & Laser Spectroscopy at SLOWRI and GARIS-II
(10:30 - 11:00 ) Coffee break		
Chair : Yutaka Utsuno, JAEA		
11:00 – 11:25	Takaharu Otsuka (25) University of Tokyo	Shape coexistence, fission and tensor force
11:25 – 11:50	Krzysztof Rykaczewski (25) ORNL	Recent results and research plans on super heavy nuclei of Russia-US collaboration
11:50 – 12:15	Yoshihiro Aritomo (25) Kinki University	Fusion-fission dynamics in super-heavy mass region
(12:15 - 13:30) Lunch		
Chair : Masato Asai, JAEA		
13:30 – 13:55	Robert Grzywacz (25) Univ. Tennessee / ORNL	Recent results on beta delayed neutron emission with VANDLE
13:55 – 14:20	Kentaro Hirose (25) JAEA	Study of fission using multi-nucleon transfer reactions
14:20 – 14:40	Costel Petrache (20) CSNSM	Exotic collective modes of excitation in lanthanides
(14:40 – 15:00 ) Coffee Break		
Chair : Hiroyuki Koura, JAEA		
15:00 – 15:25	Michael Bentley (25) University of York	Isospin-non conserving interactions in nuclei measured studies of isobaric multiplets
15:25 – 15:45	Shintaro Go (20) Univ. of Tennessee	Search for the heaviest alpha emitters around N~Z nuclei
15:45 – 16:05	Yutaka Utsuno (20) JAEA	Shell model calculations for Gamow-Teller strength function
16:05– 16:10	Andrei Andreyev (5) Univ. of York / JAEA, Closing	

図 3.3.1-3: 第 27 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (2/2)

水銀 180 領域を代表とする陽子過剰核の核分裂の記述があった。この領域においても、質量非対称な核分裂が観測されており、本研究が目指す核分裂モデルの適用性を調べる上でも価値あるデータが紹介された。

### 3. 微視的輸送計数

東工大は、ランジェバン方程式を記述する輸送計数に微視的な効果を取り入れており、進展状況が発表された。

### 4. 多核子移行反応を用いた核分裂

原子力機構は、酸素ビームを多様なアクチノイド原子核に照射することで多岐の核種にわたるマイナーアクチノイド原子核の核分裂片質量数分布を測定することに成功していることを紹介した。新規の実験手法として、多くの関心を集めた。

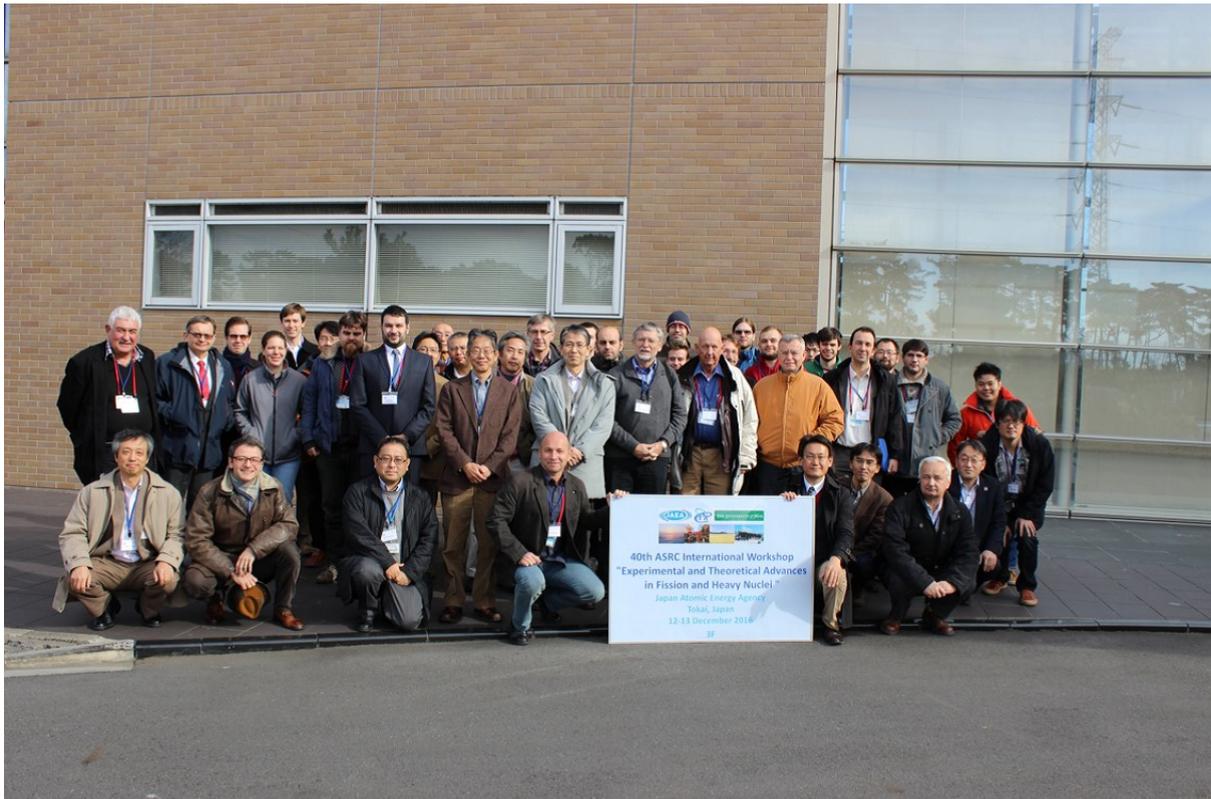


図 3.3.2-1: 第 40 回 ASRC 国際ワークショップの集合写真

### 3.3.2 平成 28 年度ワークショップ (H28)

平成 28 年 12 月 12 日、13 日の日程で原子力機構・原子力科学研究所において第 40 回 ASRC 国際ワークショップ「核分裂と重原子核の実験および理論研究の進展」を主催した。外国からの参加者 22 名を含む計 48 名の参加者があり、本研究開発に関する議論を含めて情報交換を行うとともに、核分裂研究に関する議論を行った。(図 3.3.2-1)。ワークショップのプログラムを図 3.3.2-2 および図 3.3.2-3 に示す。

本ワークショップにおいて、以下の議論があった。

#### 1. SOFIA 実験による即発中性子数の導出

ドイツ GSI では、1GeV/u に加速した  $^{238}\text{U}$  をベリリウム標的に照射してさまざまな複合核を生成し、これをクーロン励起させることで核分裂を起こす研究を進めている。この手法の特徴は、核分裂片が高速で飛び出すことを利用し、核分裂片の質量  $A$  と原子番号  $Z$  を分離できる点にある。発表では、データ解析を進めることで、核分裂片から放出される即発中性子数  $\nu(A)$  が報告された。このデータは、本研究においても取得をめざしているものであるが、ウラン以下の軽い原子核しか測定できない欠点もある。また、本研究は、励起エネルギー依存性を観測できる点も特徴である。双方のデータを突き合わせることで、核分裂モデルの検証になると考えている。

#### 2. VAMOS/GANIL における逆運動学核分裂研究

フランス GANIL では、 $^{238}\text{U}$  を MeV/u 程度に加速器して炭素 ( $^{12}\text{C}$ ) 標的に照射し、多核子

40<sup>th</sup> ASRC International Workshop  
**“Experimental and Theoretical Advances in Fission and Heavy Nuclei”**  
 Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Japan  
 12 – 13<sup>th</sup> December, 2016  
<http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/HENS-gr/workshop6/index6.html>

**12<sup>th</sup> December (Monday)**

8:40 – 9:20	Registration	
9:20 – 9:25	Katsuhisa Nishio JAEA	Opening
9:25 – 9:30	Sadamichi Maekawa Director General of ASRC, JAEA	Welcome address
Chair : Katsuhisa Nishio, JAEA		
9:30 – 9:55	Julien Taieb (25) CEA	Neutron emission from the SOFIA experiment
9:55 – 10:20	Diego Ramos (25) IPN Orsay	Inverse-Kinematics Fission at VAMOS/GANIL
10:20 – 10:40	Horia Pasca (20) JINR, BLTP	Energy dependence of the shape of the fission fragment charge distribution
Coffee break ( 10:40 – 11:10)		
Chair : Krzysztof Rykaczewski, ORNL		
11:10 – 11:35	Kentaro Hirose (25) JAEA	Study of fission using multi-nucleon transfer reactions
11:35 – 11:55	Antonio Di Nitto (20) University of Mainz	Identification of multi-nucleon transfer reaction products in $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf}$ reactions
11:55 – 12:15	Shouya Tanaka (20) Kindai University	Study of multi-chance fission in Langevin calculation
Workshop Photo Lunch ( 12:15-13:30 )		
Chair : Yuichiro Nagame, JAEA		
13:30 – 13:55	Hiroari Miyatake (25) KEK-WNSC	Recent progress of the KISS project at KEK-WNSC
13:55 – 14:20	Dimiter Balabanski (25) ELI-NP	Photofission at ELI-NP: The future is emerging
14:20 – 14:45	Jorgen Randrup (25) LBNL	Fission dynamics with microscopic level densities
14:45 – 15:10	Eiji Ideguchi (25) RCNP, Osaka University	CAGRA project at RCNP
Coffee break (15:10 – 15:40)		
Chair : Masato Asai, JAEA		
15:40 – 16:00	Hiroyuki Makii (20) JAEA	Measurement of high-energy prompt fission gamma-rays in $^{235}\text{U}(n_{th},f)$
16:00 – 16:20	Antalic Stanislav (20) Comenius University	Nuclear structure studies of seaborgium and rutherfordium isotopes
16:20 – 16:40	Toshiyuki Shizuma (20) QST	Nuclear resonance fluorescence measurements with mono-energetic, linearly polarized photons
16:40 – 17:00	Igor Tsekhanovich (20) University of Bordeaux	New fission data in the sub-lead region

図 3.3.2-2: 第 40 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (1/2)

Coffee break (17:00 – 17:20)		
Chair : Jorgen Randrup, LBNL		
17:20 – 17:40	Tobias Wright (20) Manchester University	Recent results from measurements at n_TOF, CERN of prompt gamma-ray energies and multiplicities of $^{235}\text{U}$ using STEFF
17:40 – 18:00	Alf Göök (20) European Commission, JRC	Prompt neutron emission correlations with fission fragment properties
18:00 – 18:20	Hiroaki Utsunomiya (20) Konan University	Photoneutron measurements at NewSUBARU and an extension to photofission
18:20 – 18:40	Takaharu Otsuka (20) University of Tokyo	Quantum Self Organization and Nuclear Shapes
Social Dinner : Restaurant "Uoyasu" (19:00 – 21:00 )		

### 13<sup>th</sup> December (Tuesday)

Chair : Riccardo Orlandi, JAEA		
9:15 – 9:40	Peter Möller (25) LANL	Calculation of Fission Yields versus proton and neutron number
9:40 – 10:05	Kathrin Wimmer (25) University of Tokyo	Shape coexistence and isospin symmetry in A=70 nuclei: Spectroscopy of the $T_Z = -1$ nucleus $^{70}\text{Kr}$
10:05 – 10:30	Shigeru Kubono (25) RIKEN/IMP/CNS	Problems in BigBang nucleosynthesis; Heavy element synthesis and Li problem
(10:30 - 11:00 ) Coffee break		
Chair : Hiroyuki Koura, JAEA		
11:00 – 11:25	Masaki Sasano (25) RIKEN	Development of the missing mass (p,2p) setup for fission experiments at RIBF
11:25 – 11:50	Taiki Tanaka (25) RIKEN /Kyushu University	Study of barrier distribution in heavy reaction system at the RIKEN-GARIS
11:50 – 12:15	Takahiro Wada (25) Kansai University	Angular distribution and energy of scission neutrons
(12:15 - 13:30) Lunch		
Chair : Yutaka Utsuno, JAEA		
13:30 – 13:55	Krzysztof Rykaczewski (25) ORNL	Beta decay strength in fission products from total absorption spectroscopy
13:55 – 14:20	Brett Manning (25) LANL	Fission Fragment Studies at LANSCE
14:20 – 14:40	Fedir Ivaniuk (20) Institute of Nuclear Research, Kiev	The energy- and mass-distributions of fission fragments of some actinides and super-heavy nuclei
(14:40 – 15:00 ) Coffee Break		
Chair : Andrei Andreyev, University of York / JAEA		
15:00 – 15:20	P.A. Söderström (20) University of York	Ground state and isomer decay properties of heavy neutron-rich nuclei produced from $^{238}\text{U}$ fission within the EURICA project at RIKEN
15:20 – 15:40	Masato Asai (20) JAEA	Fission studies for neutron-rich Fm, Md, No, and Lr isotopes using ISOL
15:40 – 16:05	Costel Petrache (25) University Paris Süd	New view on wobbling and chirality in A~130 nuclei
16:05 – 16:10	Andrei Andreyev (5) Univ. of York / JAEA, Closing	

図 3.3.2-3: 第 40 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (2/2)

移行反応で複合核を生成して核分裂を調べる研究が行われている。生成される核分裂片は、VAMOS とよばれる真空セパレータで分析され、SOFIA と同様に核分裂片の  $(A, Z)$  分布を調べることが可能になっている。多核子移行反応という視点では、本研究と同様の手法であるが、本研究では酸素までの同位体分離に成功しているのに対し、VAMOS 実験では元素の分析までにとどまっている。この方法でも、即発中性子数  $\nu(A)$  の導出を試みており、相補的な実験として注目に値する。

### 3. ランジェバン計算におけるマルチチャンス核分裂

近畿大学は原子力機構で得られたデータをランジェバンモデルで解析した。原子力機構は、多核子移行反応を用いて 15 核種以上にわたる原子核の核分裂片質量数分布、およびこれらの励起エネルギー（最大 60MeV 程度）依存性の測定に成功させてきた。実験データは、複合核の励起エネルギーが 60MeV に至っても、質量数分布の非対称度が残っていることを示している。これを考察するため、マルチチャンス核分裂、すなわち中性子を複数個放出した後核分裂する成分を考慮した。例えば  $^{240}\text{U}$  の核分裂では、最初の励起エネルギーが 45MeV であっても実験は顕著な質量非対称性を有していた。これを解析したところ、4 つ中性子を放出してから核分裂する割合が 27% もあり、これが質量非対称性の原因であることがわかった。すなわち、中性子を放出することで原子核が冷却され、殻構造が回復するために質量非対称性が出現する。この成果は、高励起状態からの核分裂の解釈とモデル化に大きなインパクトを与える。また、本研究結果と密接に関係ある現象である。

### 4. 核分裂における高エネルギー即発ガンマ線スペクトル

原子力機構は、フランス・グルノーブルのラウエランジェバン研究所にある研究用原子炉から中性子ビームを用いることにより、 $^{238}\text{U}$  の熱中性子入射核分裂における即発ガンマ線スペクトルの測定をおこなった。従来は、7 MeV までしかデータが得られていなかったが、JAEA チームは、測定感度を  $10^5$  倍上げることで、20MeV までのガンマ線スペクトルの測定に成功した。この結果、およそ 15MeV を中心とし、核分裂片の巨大双極子振動に由来する構造を明らかにした。このような高エネルギーガンマ線は、核分裂片の脱励起過程において即発中性子と競合するものである。核分裂直後に分裂片が持つスピンなど、理論に制限を与えられる可能性があり、平行して議論することでより信頼あるモデル構築が可能になると考えた。

### 3.3.3 2017年核データ研究会 (H29)

平成29年11月16日、17日の日程で、東海村にある情報・産業プラザ「アイヴィル」において、「2017年核データ研究会」を開催した。代表者はこの会議の組織委員長となり、組織委員とともにプログラムの立案と遂行を行った。

表 3.3.3-1: 「2017年度核データ研究会」プログラム

11月16日(木)	
開会式 10:30-10:40	
核物理と核データ 10:40-12:10	
浅井雅人 (JAEA)	$^{254}\text{Es}$ を用いた核分裂・構造研究
静間俊行 (量研機構)	核共鳴蛍光散乱データの現状
木村敦 (JAEA)	$^{244,246}\text{Cm}$ の中性子捕獲断面積測定の実況
チュートリアル $\beta$ 崩壊 13:10-14:10	
K. Rykaczewski (ORNL)	全エネルギー 吸収ガンマ線測定と遅発中性子に関する新しいデータ
原子核理論と核データ 14:30-16:00	
千葉 敏 (東工大)	核分裂理論研究の最近の動向
西村 信哉 (京大基研)	原子核物理の不定性が星の重元素生成に与える影響
清水 則孝 (東大 CNS)	殻模型計算による核準位密度の微視的記述
ポスターセッション 16:00-17:30	
11月17日(金)	
核変換および質量測定 9:10-10:40	
今井 伸明 (東大 CNS)	OEDO を用いた低エネルギー LLFP の核反応データ取得
西原 健司 (JAEA)	ADS 核データの現状と積分実験
和田 道治 (KEK/理研)	MRTOF 質量分光器を用いた重元素の網羅的高精度質量測定
原子炉 11:00-12:30	
三澤 毅 (京大炉)	KUCA での反応度測定法による各種材料の核特性積分評価
竹田 敏 (阪大)	軽水炉における水の熱中性子散乱則データの違いによる核計算結果への影響評価
奥村 啓介 (JAEA)	福島第一原子力発電所の廃炉への核データの応用
核データと応用 13:30-14:30	
渡辺 幸信 (九大)	半導体ソフтвер研究の最近の動向
田所 孝広 (日立製作所)	電子線形加速器を利用した医療用放射性核種の製造
核データと応用 14:50-15:50	
佐藤 達彦 (JAEA)	PHITS を用いた宇宙線挙動解析
岩本 修 (JAEA)	JENDL の現状と今後の計画
ポスター賞授賞式 15:50-16:05	
閉会式 16:05-16:10	

本研究会は、日本原子力学会・核データ部会および日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センターが主催し、日本原子力学会・北関東支部および日本原子力学会・シグマ特別専門委員会が共催となって開催した。参加者は合計 79 名であった。このうち 18 名に講演を行っていただいた (う



図 3.3.3-1: 2017 年核データ研究会の集合写真

ちチュートリアル1名)。チュートリアルとして、米国オークリッジ国立研究所の K. Rykaczewski 教授に講演をしていただいた。核分裂片の  $\beta$  崩壊に伴う測定で、全吸収型ガンマ線測定による崩壊ガンマ線のエネルギースペクトルの測定、さらに最新の遅発中性子測定のデータが示された。会議では、ポスター発表を企画した。ポスター発表は合計 25 件あった。40 歳未満の若手研究者を目安にポスター賞を与えることとした。この結果、採点を希望する課題 16 件、採点を希望しない課題 9 件となった。審査の希望課題 16 件に関して組織委員が採点を行い、ポスター賞を決定した。ワークショップのプログラムを表 3.3.3-1 に示す。

本ワークショップにおいて、以下の議論があった。

#### 1. 東工大における核分裂理論成果の発表

本研究プログラムにも関連し、東工大の千葉教授により核分裂を記述する揺動散逸理論の成果が発表された。原子核の形状を表すパラメータを 4 次元に拡大することに成功し、論文としても成果が発表された。これに加え、QMD モデルによる多核子移行反応過程について考察があった。これによると、核反応ののち、ほとんどは 2 体で放出される事象であることがわかり、3 粒子目となる中性子などが飛び出る確率は少ないことがわかった。一方で、入射核と標的核が反応して生成した散乱粒子もいくらかの励起エネルギーを有することが示唆された。

#### 2. 多核子移行反応による核分裂片質量数分布の測定

原子力機構では、多核子移行反応による核分裂データを代理反応として取得するプログラムを進めている。 $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$  反応により、27 核種の核分裂片質量数分布の取得技術が紹介された。本発表者は、若手ポスターの優秀賞に選ばれた。

#### 3. マルチチャンス核分裂による核分裂片質量数分布の解釈



図 3.3.3-2: 2017 年度核データ研究会の若手ポスター賞受賞者

マルチチャンス核分裂は、核分裂する前に中性子が複数個蒸発する現象である。このため、中性子を放出した後の軽い同位体、かつ低励起状態からの核分裂が実験データに混在する。原子力機構のデータを解析した結果、高励起状態からスタートする核分裂において観測された核分裂片の質量非対称分布は、いくつかの中性子を蒸発した後の冷えた核分裂によってもたらされると結論づけられた。原子力機構のデータを解析して得られた結果であり、発表者は若手ポスターの優秀賞に選ばれた。



図 3.3.4-1: 第 54 回 ASRC 国際ワークショップの集合写真

### 3.3.4 平成 30 年度ワークショップ (H30)

平成 31 年度 3 月 25 - 27 日の日程で、研究代表者らは、原子力機構・東海の先端基礎研究センター（東海）において ASRC 国際ワークショップ「核分裂とエキゾチック原子核の構造」を主催した(写真 3.3.4-1)。会議参加者数は 70 名であり、このうち、外国からの参加者は 60 名となった。プログラムを図 3.3.4-2-図 3.3.4-5 に示す。以下、代表的な議論の内容を示す。

#### 1. 東工大における核分裂理論成果の発表

東工大の石塚助教から、本テーマに関連し、揺動散逸理論による核分裂理論の成果が発表された。原子核の形状を表すパラメータを 4 次元に拡大することにより、ウランからフェルミウムに至る原子核の質量数および全運動エネルギー分布の計算が示された。重いフェルミウム同位体になると、質量数分布が際立った対称分裂を示すことが 1980 年代の実験で知られていたが、本モデルはこれをよく再現された。

#### 2. 原子力機構における多核子移行反応による核分裂実験

原子力機構では、多核子移行反応による核分裂データを代理反応として取得するプログラムを進めている。今期までに終了した  $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ 、 $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$  反応実験に加え、米国オークリッジ国立研究所から入手した原子番号 99 のアインスタイニウム  $^{254}\text{Es}$  を標的原子核に用いることで、上記のフェルミウム領域におけるユニークな核分裂特性を調べるプログラムを紹介した。

54<sup>th</sup> ASRC International Workshop  
**Sakura-2019 “Nuclear Fission and Structure of Exotic Nuclei”**  
 Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Japan  
 25 – 27 March 2019  
<https://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/HENS-gr/workshop9/index9.html>

**25<sup>th</sup> March (Monday)**

8:40 – 9:15	Registration	
9:15 – 9:20	Katsuhisa Nishio ASRC, JAEA	Opening
9:20 – 9:25	Makoto Oka Director General of ASRC, JAEA	Welcome address
Chair : Katsuhisa Nishio, JAEA		
9:25 – 9:50	Mamiko Nishiuchi (25) Kansai Photon Science Institute, QST	Extreme plasma as an ion source produced by high intensity laser pulses interaction with solid density targets
9:50 – 10:15	Kentaro Hirose (25) ASRC, JAEA	Fission experiments using <sup>254</sup> Es target at the JAEA tandem
10:15 – 10:35	Paul Stevenson (20) University of Surrey	Superheavy dynamics with time-dependent Hartree-Fock
Coffee break (10:35 – 11:00)		
11:00 – 11:20	Eiji Ideguchi (20) RCNP, Osaka University	Nuclear structure studies of <sup>254</sup> Es region by Coulomb excitation gamma-ray spectroscopy
11:20 – 11:40	Jørgen Randrup (20) LBNL	Fission studies with microscopic level densities I: Fragment mass distributions and kinetic energies
11:40 – 12:00	Sven Åberg (20) Lund University	Fission studies with microscopic level densities II: Microscopic description of energy partition in fission
Lunch (12:00 – 13:00)		
Chair : Masato Asai, JAEA		
13:00 – 13:25	Andrei Andreyev (25) Univ. of York / JAEA	β-delayed fission study of isomers in <sup>188</sup> Bi employing isomer-selective laser ionization
13:25 – 13:50	Cedric Simenel (25) Australian National University	Role of octupole deformed shell effects on the fission of nuclei in the mercury region
13:50 – 14:10	Igor Tsekhanovich (20) Bordeaux University / CENBG	Fission modes in <sup>178</sup> Pt
Coffee break (14:10 – 14:35)		
14:35 – 15:00	Jutta Escher (25) LLNL	Cosmic cauldrons and exotic nuclei: New reaction theory developments for determining unknown cross sections
15:00 – 15:20	Ana Henriques (20) Bordeaux University / CENBG	Present and future investigations using the surrogate-reaction method
15:20 – 15:40	Satoshi Chiba (20) Tokyo Institute of Technology	Study on formation mechanisms of Z=120 elements with a hybrid model
15:40 – 16:00	Gurgen Adamian (20) Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics	Suggestion for examination of a role of multi-chance fission
Coffee break (16:00 – 16:25)		

図 3.3.4-2: 第 54 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (1/4)

Chair : Kazuki Yoshida, JAEA		
16:25 – 16:50	Peter Möller (25) PMSCG, Los Alamos	Asymmetric fission across the chart: From its saddle origins to fragment isotopic yields
16:50 – 17:10	Andreas Oberstedt (20) ELI-NP	Systematic study of prompt gamma-ray emission from various fission reactions
17:10 – 17:30	Chikako Ishizuka (20) Tokyo Institute of Technology	Correlated transitions in TKE and mass distributions of fission fragments described by 4-D Langevin equation
17:30 – 17:50	Julien Taieb (20) CEA/DAM	Prompt fission neutrons in $^{239}\text{Pu}(n,f)$ reaction
Social Dinner : Restaurant “Uoyasu”, Tokai (18:30 – 20:30)		

### 26<sup>th</sup> March (Tuesday)

Chair : Andrei Andreyev Univ. of York /JAEA		
9:00 – 9:25	Kouji Morimoto (25) RIKEN Nishina Center	Superheavy element research at RIKEN Nishina Center
9:25 – 9:50	Jacklyn Gates (25) LBNL	Superheavy element studies at LBNL
9:50 – 10:10	Roderick Clark (20) LBNL	Alpha decay and fission of high-K Isomers
Coffee break (10:10 – 10:35)		
10:35 – 11:00	Takaharu Otsuka (25) RIKEN Nishina Center / University of Tokyo	Heavy nuclei and monopole-quadrupole correlations
11:00 – 11:20	Stanislav Antalic (20) Comenius University in Bratislava	Decay spectroscopy in rutherfordium region (Z=104) at SHIP
11:20 – 11:40	Kouichi Hagino (20) Tohoku University	Heavy-ion fusion reactions of deformed nuclei: from the medium-heavy to the superheavy regions
11:40 – 12:00	Zachary Matheson (20) Michigan State University	Cluster formation and emission in $^{294}\text{Og}$
Workshop Photo (12:00 – 12:05) Lunch (12:05 – 13:10)		
Chair : Hiroyuki Koura, JAEA		
13:10 – 13:35	David Hinde (25) Australian National University	Recent experimental results from Australia investigating quasifission dynamics
13:35 – 13:55	Yoshihiro Aritomo (20) Kindai University	Dynamical model of the nuclear transfer reaction in heavy system
13:55 – 14:15	Oleg Tarasov (20) NSCL /Michigan State University	Recent study of fission in inverse kinematics
14:15 – 14:35	Alexander Svirikhin (20) Flerov Laboratory of Nuclear Reactions	Velocity filter SHELS at the U400 FLNR cyclotron: performance and experimental results
Coffee Break (14:35 – 15:00)		
15:00 – 15:25	Sophia Heinz (25) GSI Helmholtz Centre	Quasi-fission as a source for new exotic nuclei ?
15:25 – 15:45	Nikolai Antonenko (20) Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics	Charge distributions of fission fragments of low- and high-energy fission of Fm, No, and Rf isotopes

図 3.3.4-3: 第 54 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (2/4)

15:45 – 16:05	Joonas Konki (20) CERN	The new isotopes $^{240}\text{Es}$ and $^{236}\text{Bk}$ : towards saturation of the EC-delayed fission probability
16:05 – 16:25	Pavol Mošat' (20) Comenius University in Bratislava	Total kinetic energy distribution for spontaneous fission of rutherfordium isotopes
Coffee Break (16:25 – 16:50)		
Chair : Yuta Ito, JAEA		
16:50 – 17:15	Timo Dickel (25) GSI Helmholtz centre	Spontaneous fission studies with the FRS Ion Catcher
17:15 – 17:35	Shuichiro Ebata (20) Tokyo Institute of Technology	Theoretical study on formation mechanisms of Z=120 super-heavy elements
17:35 – 17:55	Taiki Tanaka (20) RIKEN Nishina Center / Kyushu University	Fusion dynamics for hot fusion reactions revealed in quasielastic fusion barrier distributions
17:55 – 18:15	Gavin Smith (20) The University of Manchester	Fission with STEFF at n_TOF: Current status and future perspectives

### 27<sup>th</sup> March (Wednesday)

Chair : Riccardo Orlandi, JAEA		
9:00 – 9:25	Shigeru Kubono (25) RIKEN Nishina Center	Heavy element synthesis under explosive conditions on neutron stars
9:25 – 9:50	Samuel Giuliani (25) NSCL /Michigan State University	R-process nucleosynthesis: fingerprints from fissioning nuclei
9:50 – 10:10	Naohito Iwasa (20) Tohoku University	Experimental study of possible $^7\text{Be}$ -destruction channel $^7\text{Be}(n,p)^6\text{Li}^+$ to improve the cosmological lithium problem in the big bang nucleosynthesis
Coffee break (10:10 – 10:35)		
10:35 – 11:00	Audrey Chatillon (25) CEA/DAM	New insight into the transition from asymmetric fission to symmetric fission along the thorium chain
11:00 – 11:20	Nathalie Pillet (20) CEA/DAM	Role of the tensor force in the asymmetric to symmetric fission transition in the neutron-deficient Thoriums
11:20 – 11:40	Huiming Jia (20) China Institute of Atomic Energy	Fusion and fission dynamics at near- and sub-barrier energies
11:40 – 12:00	Ali Al-Adili (20) Uppsala University	Isomeric yield ratios at IGISOL – in the quest of probing the angular momenta of fission fragments
Lunch (12:00 – 13:00)		
Chair : Yutaka Utsuno, JAEA		
13:00 – 13:25	Chengjian Lin (25) China Institute of Atomic Energy	Experimental research on the reactions and decays of exotic nuclei
13:25 – 13:45	Sophie Péru (20) CEA/DAM	Spectroscopy and beta decay of fission fragments within QRPA approach using the Gogny force
13:45 – 14:05	Martin Venhart (20) Slovak Academy of Sciences	Nuclear structure of neutron-deficient odd-Au isotopes
14:05 – 14:25	Yuta Ito (20) ASRC, JAEA	Precision mass measurements of superheavy nuclei with MRTOF and its application at JAEA
Coffee Break (14:25 – 14:50)		

図 3.3.4-4: 第 54 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (3/4)

14:50 – 15:15	Xiaoding Tang (25) Institute of Modern Physics	Heavy ion fusion reactions in stars
15:15 – 15:40	Ushasi Datta (25) Saha Institute of Nuclear Physics	Weakly bound neutron-rich nuclei and cosmic phenomena
15:40 – 16:00	Alain Astier (20) CSNSM Orsay	Population of $^{212}\text{Po}$ cluster-states from the $^{12}\text{C}+^{208}\text{Pb}$ alpha-transfer reaction
16:00 – 16:05	Andrei Andreyev, Univ. of York / JAEA: Concluding Remarks	
Coffee Break (16:05 – 16:20)		
16:20 – 17:30	Tandem Accelerator Facility Tour	

図 3.3.4-5: 第 54 回 ASRC 国際ワークショップ・プログラム (4/4)



図 3.3.5-1: 最優秀ポスター賞

### 3.3.5 2018 年核データ研究会 (H30)

日本原子力学会核データ部会、日本原子力学会「シグマ」特別専門委員会、日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター、東工大科学技術創成研究院先導原子力研究所共催の「2018 年度核データ研究会」が、2018 年 11 月 29 日 (木) 10:30 - 30 日 (金) の日程で、東工大デジタル多目的ホール・コラボレーションルームで行われた。委員長は、本プログラム再委託先・東工大の千葉敏教授が務めた。ここでポスター発表が行われ、14 件の若手ポスタープレゼンテーションの中から、最優秀ポスター賞として、本実験データを解析した大学修士課程 2 年の学生が「マルチチャンス核分裂を採用した高励起エネルギー核分裂の理論研究」に関する成果で最優秀ポスター賞を受賞した。

### 3.3.6 ワークショップおよび研究会のまとめ

国際ワークショップや核データ研究会を通じて、本研究に関する以下の新たな指針を得た。

#### (1) 複合核からの中性子蒸発

励起エネルギーが高くなると、マルチチャンス核分裂、すなわち核分裂が起こる前に中性子が蒸発する現象が、高励起エネルギーでも重要になることがわかってきた。本実験データをより詳細解析することにより、この成分を引き出すことができる。このためには、核分裂片の飛行方向

と中性子が飛び出す方向の相関から、核分裂片の進行方向に依存しない中性子成分を取り出す必要がある。本期間中では、この解析まで進めることはできなかったが、データとして記録されているので、解析を進める計画である。

### (2) 核分裂ガンマ線の測定

本研究では、核分裂片から放出される即発中性子を理論記述した。当研究グループでは、他の実験で核分裂ガンマ線を測定しており、また世界的にもこの測定がさかんになってきている。即発中性子もガンマ線も、励起状態にある核分裂片が脱励起する過程で放出されるが、両者をあわせて考察することにより、核分裂片のスピ分布と励起エネルギー分布をより詳しく調べることができるので、理論モデルのさらなる高度化が可能になる。

### (3) 代理反応と中性子入射反応の整合性

中性子入射核分裂を代理反応によって取得する場合、着目する核分裂核種のスピ分布がどの程度マッチングしているかが重要な情報となる。実験では、核分裂片の角度分布からある程度の情報が得られることがわかりつつあり、解析を進めている。一方、会議では、ランジェバン方程式や QMD モデルにより、この効果を記述する成果が示されてきた。実験データと比較することでこの課題を進めていく予定である。

## 結言

研究開発課題「代理反応によるマイナーアクチノイド核分裂の即発中性子測定技術開発と中性子エネルギースペクトル評価」に関して、平成 27-30 年度の成果を以下にまとめる。

### 1. 「代理反応による即発中性子の測定」

多核子移行反応（代理反応）により、核子移行チャンネルを同定するシリコン  $\Delta$  E-E 検出器、核分裂を検出する多芯線比例計数管に加え、即発中性子を測定するため有機液体シンチレーション検出器を組み合わせた測定装置を平成 28 年度までに完成させた。これにより、様々な原子核に対し、最大励起エネルギー 50MeV までの複合核から放出される即発中性子、および即発中性子エネルギースペクトルを測定する実験ができるようになった。これを用いて、2 つの反応系  $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  および  $^{18}\text{O}+^{237}\text{Am}$  の測定を平成 29 年度と 30 年度に行った。 $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$  の反応からは  $^{236-240}\text{Np}$ ,  $^{238-242}\text{Pu}$ ,  $^{239-243}\text{Am}$  の 15 核種について、 $^{18}\text{O}+^{243}\text{Am}$  の反応からは  $^{242-246}\text{Am}$ ,  $^{244-248}\text{Cm}$ ,  $^{246-250}\text{Bk}$  の 15 核種のデータを得た。すなわち、長寿命核種  $^{236,237}\text{Np}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{241,243}\text{Am}$ ,  $^{244,245,246}\text{Cm}$  および短寿命核種  $^{238}\text{Np}$ ,  $^{237,238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240,242,244}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Cm}$ ,  $^{245,246,247,248}\text{Bk}$  の中性子入射核分裂における  $\nu$  値およびスペクトル  $\chi(E_n)$  を取得した。即発中性子の測定データとして、核種  $^{236,240}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240,241,243,245,246}\text{Am}$ ,  $^{246,247,248,249,250}\text{Bk}$  の 14 核種（複合核）は、EXFOR に登録されていない、本研究で初めて取得した新データとなった。個々の核分裂片から放出される中性子数  $\nu(m)$ 、およびこの分布の複合核励起エネルギー依存性を、平均の複合核励起エネルギー 10, 20, 30, 40, 50MeV に対して測定した。統計に課題はあるものの、このような即発中性子の詳細測定を実現する実験セットアップは他になく、核分裂過程を解明するためのベースを構築することができた。

### 2. 「動力学モデルによる核分裂の記述と中性子エネルギースペクトルの評価」

核分裂を記述する 4 次元 Langevin 計算モデルを開発した。ここで得られる核分裂片の変形度から変形エネルギーを求め、さらに変形振動のエネルギーや熱励起に対応する温度の情報と併せて二つの核分裂片の励起エネルギーを独立に求める方法を開発した。さらに、それを基に統計崩壊および  $\beta$ -崩壊まで接続する理論計算手法を開発、中性子数やエネルギースペクトルを核分裂の基礎過程から導出することに成功した。我々の知る限りこのような計算が可能なのは世界でも本研究のみである。現状では計算結果と実験値との比較で改良の余地が認められるものの、多くの点でこれまでの理論に比べて現象論的パラメータを排除することで即発核分裂中性子の起源についての知見を基本的な立場から得られるようになった。

### 3. 「研究推進」

毎年度、東海において、国際ワークショップまたは核データに関する研究会を開催した。これにより、本研究開発における原子力機構と東工大の間で実験および理論計算の進捗について議論した。また、得られた成果を国際的に広く発信することができた。

以上、本事業の業務項目を実施し、すべての項目について計画目標を達成するとともに、本テーマに関する 4 年間のプログラムを計画どおり行った。