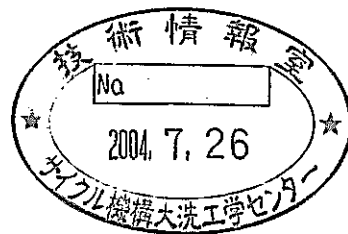


弥生炉を用いた
 ^{237}Np 核分裂断面積の測定
(共同研究報告)

2004年5月



核燃料サイクル開発機構
東 京 大 学

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

東京大学 (University of Tokyo)

2004

弥生炉を用いた ^{237}Np 核分裂断面積の測定

(共同研究報告)

大木 繁夫^{*1}、高嶋 秀樹^{*2}、若林 利男^{*3}
山口 憲司^{*4}、山脇 道夫^{*5}

要 旨

高速炉を用いたマイナーアクチナイド (MA) 核種の核変換研究の一環として、高速中性子源炉「弥生」において、 ^{235}U に対する ^{237}Np の核分裂断面積比をバック・ツー・バック (BTB) 核分裂検出器を用いて測定した。弥生炉の炉心中心、側部ブランケットをそれぞれ貫く、グローリーホール、グレイジングホールと呼ばれる実験孔における測定のため、小型 BTB 検出器を準備した。実験孔内の測定位置を変えることにより、核分裂断面積比の中性子スペクトル依存性を調べた。

核分裂断面積比の測定結果を、核データライブラリ (JENDL-3.2、ENDF/B-VI、JEF-2.2、JENDL-2) を用いて計算した値と比較した。炉心中心における計算値は、約 30% の系統的な過大評価となることがわかった。計算値における核データライブラリ間のバラツキは、測定値との相違に比べると小さいものであった。また、C/E 値には測定位置依存性が見られている。この 30% もの過大評価が核データの誤差に起因するとは考えにくい。

本測定結果には測定精度の面で課題がある。波高スペクトルに対するアンフォールディング等により誤差の原因を取り除くことができれば、 ^{237}Np だけでなく中性子スペクトル場を形成する ^{235}U 、 ^{238}U の核データ検証の参考情報として、本測定結果を活用できると考えられる。

-
- ※1 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター システム技術開発部 中性子工学グループ
 - ※2 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 安全管理部 放射線管理課
 - ※3 核燃料サイクル開発機構 (現 日本原子力研究所)
 - ※4 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設 (現 日本原子力研究所)
 - ※5 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 (現 東海大学、日本原子力研究所)

Measurement of ^{237}Np Fission Cross Section at YAYOI

Shigeo Ohki^{*1}, Hideki Takashima^{*2}, Toshio Wakabayashi^{*3},
Kenji Yamaguchi^{*4}, and Michio Yamawaki^{*5}

Abstract

In the framework of the study on transmutation of minor actinide (MA) nuclides with fast reactors, the fission cross section ratio ^{237}Np to ^{235}U has been measured by using a back-to-back (BTB) fission chamber at the YAYOI fast neutron source reactor. The compact BTB fission chamber was prepared for the measurements in the experimental holes called Glory hole and Grazing hole passing through the core center and the side blanket of YAYOI, respectively. Dependence of fission cross section ratio on neutron spectrum was investigated by changing the measurement position in these experimental holes.

The measured values of fission cross section ratio were compared with those calculated with the following nuclear data libraries: JENDL-3.2, ENDF/B-VI, JEF-2.2, and JENDL-2. It was found that the calculated values in the center of the core systematically overestimated the measurement by about 30%. Dispersion of the calculated values among the nuclear data libraries was smaller than the above difference from the measured value. We also faced the dependence of C/E value on the measurement positions. It is hardly said that uncertainty of nuclear data brings about the above overestimation of 30%.

The present result remained some issues in terms of the measurement accuracy. If we can get rid of those causes, for example, by means of the unfolding technique on pulse height distribution, the result could be utilized as expletive information in nuclear data validation not only for ^{237}Np , but also for ^{235}U and ^{238}U which characterize the neutron spectrum.

*1 Reactor Physics Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC

*2 Radiation Control Section, Health and Safety Division, OEC, JNC

*3 Japan Nuclear Cycle Development Institute (Present affiliation: Japan Atomic Energy Research Institute)

*4 Nuclear Engineering Research Laboratory, Graduate School of Engineering, University of Tokyo (Present affiliation: Japan Atomic Energy Research Institute)

*5 Department of Quantum Engineering and Systems Science, Graduate School of Engineering, University of Tokyo (Present affiliation: Tokai University, Japan Atomic Energy Research Institute)

目 次

1. はじめに	1
2. 弥生炉における MA 核種の核分裂断面積測定の概要	2
2.1 弥生炉の概要と照射位置	2
2.2 BTB 検出器と測定の原理	2
3. 測定試料の定量	6
3.1 ^{237}Np 試料の定量	6
3.2 ^{235}U 試料の定量	7
4. 実験孔中性子スペクトルの計算	9
4.1 実験孔中性子スペクトルの計算	9
4.2 検出器内中性子スペクトルの計算	9
5. 核分裂反応率比の測定データ処理	16
5.1 波高スペクトルの処理	16
5.2 核種の違いに対する補正	16
5.3 核分裂反応率比の測定結果	17
6. 核分裂断面積比の測定結果と計算値との比較	20
7. おわりに	29
謝辞	30
参考文献	30

表リスト

表 3-1	測定試料の仕様	8
表 3-2	2 π ガスフロー検出器による ^{237}Np 試料の定量	8
表 3-3	α 線スペクトロメータによる ^{235}U 試料の定量	8
表 4-1	弥生炉実験孔の中性子スペクトル (MVP コードによる計算値)	10
表 4-2	BTB 検出器内の中性子スペクトル (MVP コードによる計算値)	12
表 5-1	波高スペクトルに対する補正因子	18
表 5-2	$^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ 核分裂反応率比 (R_{exp})	18
表 6-1	^{237}Np 及び ^{235}U の核分裂断面積	23
表 6-2	$^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ 核分裂断面積比 ($\langle\sigma_{MA}\rangle/\langle\sigma_U\rangle$)	24

図リスト

図 2-1	弥生炉の炉心構造と BTB 検出器設置位置	4
図 2-2	BTB 検出器の構造図	5
図 2-3	弥生炉における核分裂断面積測定回路図	5
図 3-1	α 線スペクトロメータによる ^{235}U 試料の測定	9
図 4-1	弥生炉実験孔の中性子スペクトル (MVP コードによる計算値)	14
図 4-2	BTB 検出器内の中性子スペクトルを計算するための体系モデル	15
図 4-3	BTB 検出器による中性子スペクトルの変化	15
図 5-1	波高スペクトル分布の測定例	19
図 5-2	ガウス分布関数によるフィッティング	19
図 6-1	^{237}Np 及び ^{235}U の核分裂断面積	25
図 6-2	$^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ 核分裂断面積比の C/E 値の比較	26
図 6-3	弥生炉実験孔の中性子スペクトル 計算値 (MVP) と測定値 (放射化箔) の比較	27
図 6-4	位置決め誤差に関する考察	28

1. はじめに

高レベル廃棄物中に含まれるマイナーアクチナイド (MA: Np, Am, Cm 等) は、何千年にも渡り放射性毒性を持ち続ける。これらを高速炉を用いて核変換する研究が実施されているが、炉心特性及び MA 核変換特性を計算する上で重要な MA 核種の断面積には、現状では数十%を超える不確かさを伴っているものもあり、今後の研究開発において、より精度の高い断面積データが必要となってくる。そこで、本研究では、東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設の高速中性子源「弥生炉」を用い、MA 核種の核分裂反応断面積の高速中性子場における積分測定を行った。高速炉で MA 核種を核変換する利点の一つとして、それらが核分裂反応を起こす割合が高いことがあげられるが、MA 核種の核分裂反応は数百 keV に閾値を持ったものである。弥生炉の中性子スペクトルは 1 MeV 付近にピークを持っているため、弥生炉での測定はこれら閾値を持った核分裂反応断面積の検証に適したものであるといえる。

本研究は東京大学と動力炉・核燃料開発事業団 (現 核燃料サイクル開発機構) との共同研究として実施した。本研究が本格的に開始されたのは 1993 年であり、最初の 2 年間は主にバック・ツー・バック (BTB) 核分裂検出器の製作と特性試験に充てられた [1, 2]。ここでいう BTB 検出器とは、測定する MA 試料と標準試料を固着した円盤を背中合わせに装填し、それぞれの核分裂反応率を計測するものである。BTB 検出器に関する一連の特性試験の後、代表的な MA 核種である ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am の測定を実施した。本報告書は 1995 年に実施した ^{237}Np の測定結果をまとめたものである。

2. 弥生炉における MA 核種の核分裂断面積測定の概要

2.1 弥生炉の概要と照射位置

弥生炉は金属ウランからなる円筒形の小型高速炉である。炉心体系を図 2-1 に示す。炉心部は濃縮ウラン（金属）からなり、それを劣化ウランのブランケットが取り巻いている。弥生炉には様々な実験孔が設置されており、炉心部を貫く実験孔をグローリーホール（Gy）、側部ブランケットを貫く実験孔をグレイジングホール（Gz）という。グローリーホール及びグレイジングホールの実験孔口から炉心中心面までの距離は 1825 mm であり、本報告書においてはこの実験孔口からの距離で測定位置を表すことにする。例えばグローリーホールの軸方向中心位置を「Gy 1825 mm」と表記する。BTB 検出器の照射位置は、グローリーホール中心（Gy 1825 mm）、25 mm 上部（Gy 1800 mm）、50 mm 上部（Gy 1775 mm）、100 mm 上部（Gy 1725 mm）、グレイジングホール中心（Gz 1825 mm）の各点である。照射位置を複数設定した目的は、異なる中性子スペクトルで MA 核種の断面積を測定するためである。

原子炉出力は、Gy 1825 mm、Gy 1800 mm、Gy 1775 mm の測定においては 100 W に、Gy 1725 mm、Gz 1825 mm の測定では 200 W に設定した。なお、測定中の炉内温度は常温（約 25℃）である。

2.2 BTB 検出器と測定の原理

BTB 検出器を用いた核分裂断面積測定方法について述べる。BTB 検出器は測定対象の MA 試料と標準試料を背中合わせに装填した核分裂計数箱であり、MA 試料側と標準試料側それぞれ独立な 2 つの回路系が接続される。本測定では MA 試料として ^{237}Np を、標準試料としては核分裂断面積が精度良く分かっており、且つ高速エネルギー領域において断面積のエネルギー依存性が緩やかな ^{235}U を選択した。また、電離ガスとしては PR ガス（Ar: 90 vol%, CH₄: 10 vol%）を使用した。図 2-2 に今回測定に用いた直径 16 mm の小型 BTB 検出器の断面図を、図 2-3 に回路図を示す。

BTB 検出器の 2 つの測定系をそれぞれ A 系、B 系とよぶことにする。BTB 検出器の測定は、A 系に MA、B 系に U を入れた場合と、それらを入れ替えて A 系に U、B 系に MA を入れた場合の両方を行う。それぞれの測定で得られる反応率 R は、次のように書くことができる：

1 回目測定 A 系 (MA)

$$R_{MA,A,1} = \langle \sigma_{MA} \rangle \phi N_{MA} \epsilon_{MA} \epsilon_A \epsilon_1 \quad (1)$$

1 回目測定 B 系 (U)

$$R_{U,B,1} = \langle \sigma_U \rangle \phi N_U \epsilon_U \epsilon_B \epsilon_1 \quad (2)$$

2回目測定 A系 (U)

$$R_{U,A,2} = \langle \sigma_U \rangle \phi N_U \varepsilon_U \varepsilon_A \varepsilon_2 \quad (3)$$

2回目測定 B系 (MA)

$$R_{MA,B,2} = \langle \sigma_{MA} \rangle \phi N_{MA} \varepsilon_{MA} \varepsilon_B \varepsilon_2 \quad (4)$$

ここで、 $\langle \sigma_i \rangle$ は核種 i の縮約断面積

$$\langle \sigma_i \rangle = \frac{\int \sigma_i(E) \phi(E) dE}{\int \phi(E) dE} \quad (5)$$

を表す。また、 ϕ は全中性子束、 N_i は核種 i の原子数、 $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ は検出器 A 系及び B 系の違いを表す係数（検出効率等）、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ は 1 回目測定と 2 回目測定の違いを表す係数（中性子束レベルの違い等）、 $\varepsilon_{MA}, \varepsilon_U$ は核種の違いに起因する係数（試料の自己吸収率等）である。

実験によって得られる MA と U の反応率比 R_{exp} を次のように定義する：

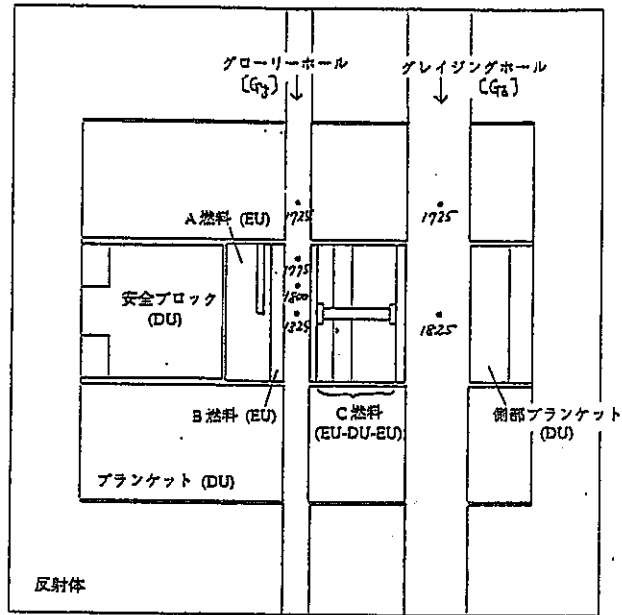
$$R_{\text{exp}} \equiv \sqrt{\frac{R_{MA,A,1} R_{MA,B,2} \varepsilon_U}{R_{U,B,1} R_{U,A,2} \varepsilon_{MA}}} \quad (6)$$

式(1)～式(4)を式(6)に代入し整理すると、MA の核分裂反応断面積は次式によって導かれる：

$$\langle \sigma_{MA} \rangle = \frac{N_U}{N_{MA}} R_{\text{exp}} \langle \sigma_U \rangle \quad (7)$$

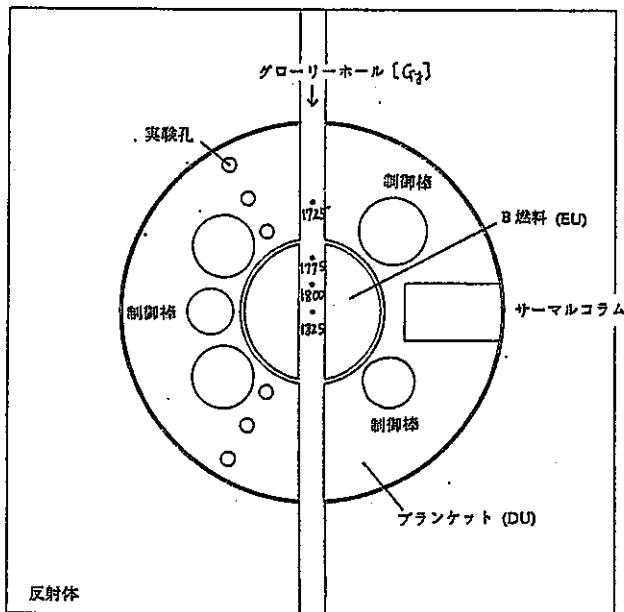
このように、BTB 検出器を用いた測定においては、検出器 A 系・B 系の検出効率の違いや、1 回目測定と 2 回目測定の中性子束レベルの違いなどの影響がキャンセルすることがわかる。ただし、核種の違いによって生じる因子については、式(6)のように補正する必要がある。

本報告書における MA 核種の核分裂断面積の積分測定は、式(7)に基づいて行う。以下、第 3 章において、試料の定量方法について述べ、MA 及び U の原子数を求める。第 4 章においては、断面積を縮約するのに必要な弥生炉実験孔における中性子スペクトルの計算を行う。第 5 章において、測定したフィッション・フラグメントのパルス波高スペクトルを処理し、 R_{exp} を求める。そして、第 6 章でそれまでの結果を総合して式(7)により核分裂断面積比 $\langle \sigma_{MA} \rangle / \langle \sigma_U \rangle$ を求め、評価済み核データライブラリとの比較を行う。

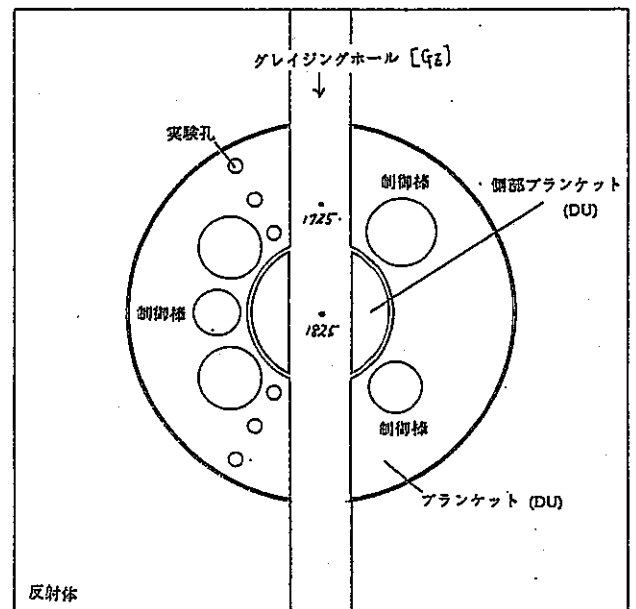


(a) 縦方向垂直断面図

0 100mm



(b) 横方向垂直断面図
(グローリーホール)



(c) 横方向垂直断面図
(グレイジングホール)

図 2-1 弥生炉の炉心構造と BTB 検出器設置位置

本図はモンテカルロ計算用の体系モデルであり、ブランケット及び反射体の詳細構造は無視している。

検出器設置位置 (黒丸) の数字は実験孔口からの距離 (単位mm) を表す。

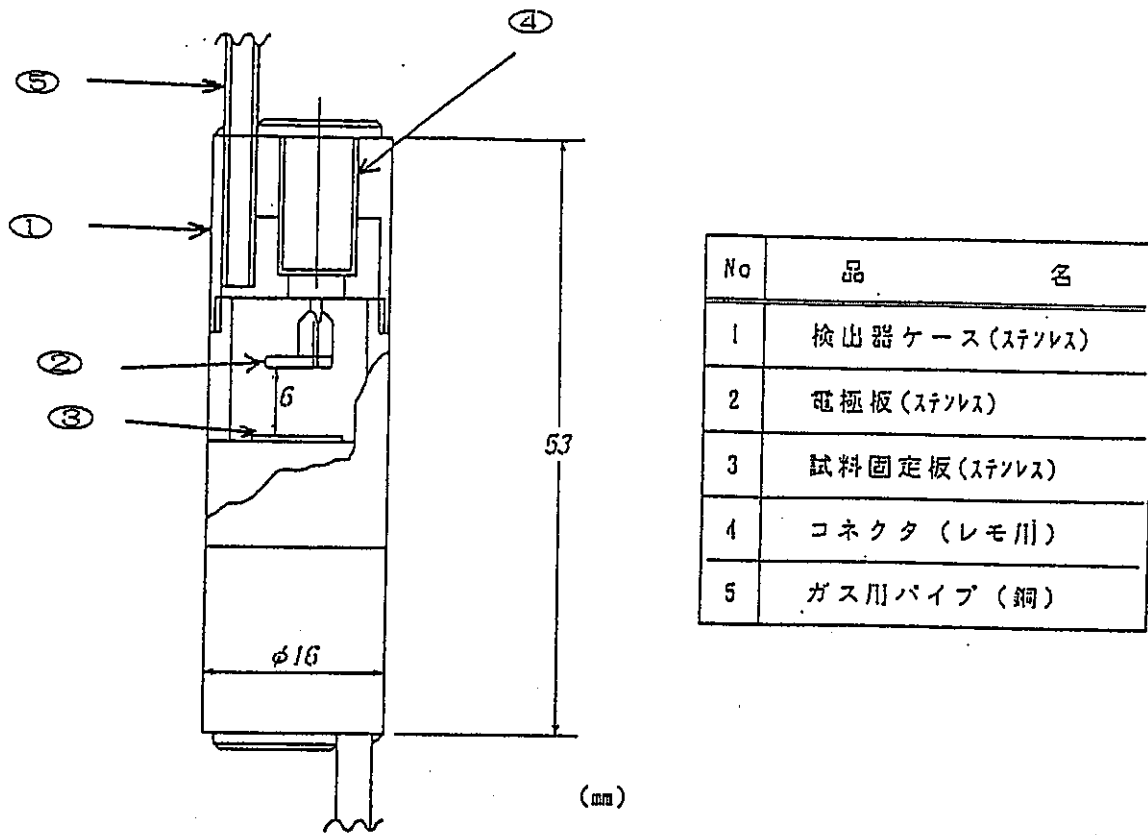


図 2-2 BTB 検出器の構造図

(PNC TN9410 95-357 より転載)

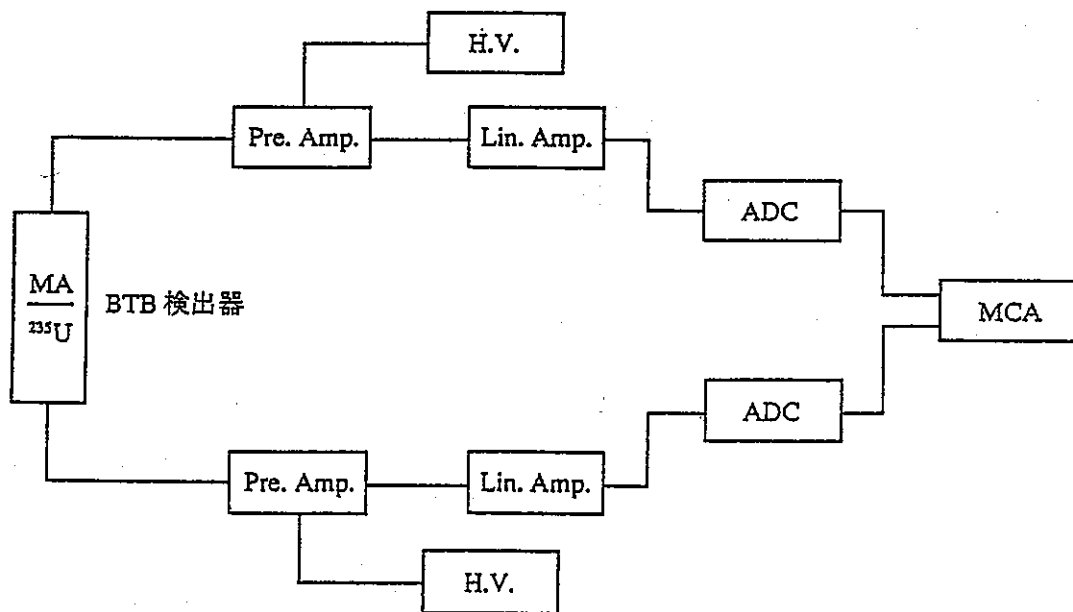


図 2-3 弥生炉における核分裂断面積測定回路図

3. 測定試料の定量

本測定で用いた試料は直径 8 mm の白金板に ^{237}Np あるいは ^{235}U を酸化物の形態で薄く固着したものである。各試料の仕様を表 3-1 に示す。 ^{237}Np 試料は(株)アマシヤムより(社)日本アイソトープ協会を通して購入したものであり、 ^{235}U 試料は動燃大洗工学センター照射燃料試験室 (AGS) において作製したものである。本章ではこれら試料に固着した核種の定量について述べる。

3.1 ^{237}Np 試料の定量

^{237}Np 試料の定量はガスフロー検出器を用いた 2π 方向の α 線測定により行った。試料中の核種 i の原子数 N_i は次式により与えられる：

$$N_i = \frac{C r_i}{\lambda_i \varepsilon} \quad (8)$$

ここで、 C は α 線の計数率、 λ_i は核種 i の崩壊定数、 ε は検出器の効率を表す。 r_i は核種 i の α 線割合

$$r_i = \frac{\lambda_i N_i}{\sum_j \lambda_j N_j} \quad (9)$$

であり、不純物の寄与を取り去るために乗せられる。 2π ガスフロー検出器の検出効率 は $\varepsilon = 1/2$ である。なお、測定に用いた電離ガスは、PR ガス (Ar: 90 vol%, CH₄: 10 vol%) である。計数率 C に対しては、以下で述べるように、試料の自己吸収、白金板の後方散乱について補正を行った。

(a) 試料の自己吸収の補正

α 線が試料自身に吸収される割合は、試料中の α 線の飛程を $R[\text{length}]$ 、試料の厚さを $t[\text{length}]$ とすると、近似的に

$$\text{吸収される割合} = \frac{\int_0^t dt' \int_0^{t'/R} d(\cos \theta)}{\int_0^t dt' \int_0^1 d(\cos \theta)} = \frac{t}{2R} \quad (10)$$

により与えられる³⁾。この式は試料中の α 線の飛程 $\rho[\text{mass/area}]$ 及び試料の面密度 $m[\text{mass/area}]$ を用いて、次のように書き直すことができる：

$$\text{吸収される割合} = \frac{t}{2R} = \frac{m}{2\rho} \quad (11)$$

式(11)の右边を用いる方が、試料の厚さ t が未知のままでも良いため便利である。

α 線の飛程は Bragg-Kleeman の法則⁴⁾

$$\frac{\rho}{A} = \text{const.} \quad (12)$$

を用いて、空気中の飛程から相対的に算出した。ここで、 A は阻止物質の原子量であり、阻止物質が混合物であるときは、

$$\sqrt{A} = \left(\sum_i \frac{w_i}{\sqrt{A_i}} \right)^{-1} \quad (13)$$

が用いられる。 w_i は混合物中の核種 i の重量割合である。基準となる空気中の α 線の飛程は評価式^[4]

$$R[\text{mm}] = (0.05T_\alpha[\text{MeV}] + 2.85)(T_\alpha[\text{MeV}])^{3/2} \quad \text{for } 4\text{MeV} < T_\alpha < 15\text{MeV} \quad (14)$$

を用いた。ここで T_α は α 線の運動エネルギーである。

以上の方法による計算の結果、今回使用した μg オーダーの試料では自己吸収の割合は 0.1% 以下と十分小さく、自己吸収の影響は無視できることがわかった。

(b) 白金板の後方散乱の補正

白金板の後方散乱補正係数として文献には 1.02~1.04 の値が記載されている^[8]。本測定においては、経験的に 1.03 ± 0.01 を用いた。

測定結果を表 3-2 に示す。本測定は電力総合研究所で行ったものである。なお、弥生炉での照射（中性子束レベル： 10^{10} n/cm² sec、照射時間：数十時間）あるいは核種の崩壊（測定を実施する期間：数年間）による試料中の核種数の変化は十分無視でき、補正の必要はない。

3.2 ²³⁵U 試料の定量

²³⁷Np 試料と同様に、 2π ガスフロー検出器を用いた ²³⁵U 試料の定量を試みたが、²⁴¹Am 試料の測定時に ²³⁵U 試料に付着した極めて微量の ²⁴¹Am による大きなバックグラウンドのため、定量は困難であった。そこで、 α 線スペクトロメータにより、²³⁵U の α 線ピークを弁別することにより、²³⁵U の原子数を決定した^[6]。

試料中の核種 i の原子数 N_i は次式により与えられる：

$$N_i = \frac{C}{\lambda_i \varepsilon} \quad (15)$$

ここで、 C は α 線の計数率、 λ_i は核種 i の崩壊定数、 ε は検出器効率である。検出器効率は、 2π ガスフロー検出器によって定量された ²³⁷Np を測定することにより求めた。表 3-3 に測定結果をまとめる。²³⁷Np 試料と同じく、試料の自己吸収、測定実施中の核種数の変化は無視することができる。

表 3-1 測定試料の仕様

	^{237}Np	^{235}U (標準試料)
純度	99.9%	99.943%*
化学形	酸化物	酸化物
固着方法	白金板(8 mm ϕ)に蒸着	白金板(8 mm ϕ)に焼き付け
固着面積	0.28 cm ² (6 mm ϕ)	0.28 cm ² (6 mm ϕ)
作成箇所	アマシャム	動燃大洗 AGS
購入元	アマシャム	UKAEA
製造番号	EE 632	—
不純物	^{238}Pu (< 0.02%) ^{241}Am (< 0.02%) ^{239}Pu (< 0.05%)	^{233}U (0.001%)* ^{234}U (0.037%)* ^{236}U (0.009%)* ^{238}U (0.011%)*

* 動燃大洗 AGS における測定結果 (PNC TN9410 94-236)
%: atom%

表 3-2 2 π ガスフロー検出器による ^{237}Np 試料の定量

	^{237}Np
計数率 C [cps]	66.12 \pm 0.17%
崩壊定数 λ [sec ⁻¹]	1.026 \times 10 ⁻¹⁴
検出効率 ϵ	0.5
α 線割合 r	1.0
後方散乱係数	1.03 \pm 0.01
試料による吸収	0.08%
原子数 N (個)	1.25 \times 10 ¹⁶ \pm 1.0%
質量 [μ g]	4.92 \pm 1.0%

表 3-3 α 線スペクトロメータによる ^{235}U 試料の定量

	^{235}U (標準試料)
計数率 C [cps]	0.0387 \pm 1.3%
崩壊定数 λ [sec ⁻¹]	3.12 \times 10 ⁻¹⁷
検出効率 ϵ	0.202 \pm 2.0%
試料による吸収	0.03%
原子数 N (個)	6.14 \times 10 ¹⁵ \pm 2.4%
質量 [μ g]	2.40 \pm 2.4%

4. 実験孔中性子スペクトルの計算

4.1 実験孔中性子スペクトルの計算

弥生炉実験孔内の中性子スペクトルは連続エネルギーモンテカルロコード MVP⁶⁾を用いて計算した。計算に用いた体系モデルでは、炉心部の金属ウランとそれを被覆する SUS、さらにノックピン、実験孔、熱電対用の孔など細かい構造を忠実に模擬した。なお、ブランケット部については制御棒及び実験孔の主要なものについてのみ考慮し、反射体については詳細構造を無視した。中性子スペクトルの評価タリーはグローリーホール及びグレイジングホールの BTB 検出器設置位置にとった。なお、使用した断面積ライブラリは JENDL-3.2 に基づく MVP 用ライブラリである。

中性子スペクトルの計算結果を図 4-1 及び表 4-1 に示す。グローリーホールの軸方向上部やグレイジングホールにおいて中性子スペクトルの軟化が見られるが、これはブランケットの主成分である ^{238}U の非弾性散乱によるものと考えられる。

モンテカルロ計算コードは体系を細かく模擬できるというメリットがあるが、本計算のような小さな領域に着目する場合、十分な統計精度を得るのは難しい。今回は中性子スペクトルの統計誤差が 1~2% に到達するまでに 10^8 ヒストリーの計算が必要であった。さらに誤差を低減するため、金属ウラン燃料炉心である弥生炉には共鳴吸収によるスペクトルの歪みが無いことを利用して、中性子スペクトルにスムージングを施し最終結果とした。

4.2 検出器内中性子スペクトルの計算

次に BTB 検出器本体による中性子スペクトルの変化を、MVP を用いて計算した。体系は図 4-2 に示すように BTB 検出器をモデル化したものであり、実験孔周りに 4.1 節で求めた中性子スペクトルを発生する中性子源を配置し、タリーを検出器内の試料位置にとった。

計算の結果、検出器本体の影響で中性子スペクトルがわずかに軟化することがわかった(図 4-3)。これにより ^{237}Np と ^{235}U の核分裂反応率比は約 1% 程度小さくなる。中性子スペクトルの計算結果を表 4-2 にまとめる。ここで、統計誤差の大きくなるスペクトルの裾野部分については、高エネルギー側、低エネルギー側それぞれについてスペクトルを外挿して算出した。 ^{237}Np 及び ^{235}U の核分裂断面積を縮約するためのスペクトルは検出器の寄与を含むこの結果を用いることにする。

表4-1 弥生炉実験孔の中性子スペクトル
(MVPコードによる計算値)

(1/2)

Upper Energy [eV]	Neutron flux per lethargy (arbitrary unit)					
	Gy 1825mm	(std.)	Gy 1800mm	(std.)	Gy 1775mm	(std.)
2.0000E+07	4.18522E-06	16.054%	5.06577E-06	18.385%	2.72327E-06	37.108%
1.0000E+07	5.53793E-05	8.201%	5.26580E-05	8.173%	3.86703E-05	20.284%
7.7880E+06	1.89458E-04	4.289%	1.65781E-04	4.665%	1.10352E-04	11.951%
6.0653E+06	4.09473E-04	2.952%	3.67145E-04	3.181%	2.50876E-04	8.158%
4.7237E+06	6.70685E-04	2.281%	6.02934E-04	2.456%	4.22688E-04	6.240%
3.6788E+06	9.26628E-04	1.958%	8.34404E-04	2.046%	5.85702E-04	4.962%
2.8650E+06	1.13682E-03	1.729%	1.03400E-03	1.854%	7.12537E-04	4.733%
2.2313E+06	1.27888E-03	1.621%	1.17838E-03	1.762%	8.03474E-04	4.590%
1.7377E+06	1.36276E-03	1.570%	1.26500E-03	1.687%	8.68737E-04	3.832%
1.3534E+06	1.40964E-03	1.555%	1.30611E-03	1.641%	9.24183E-04	3.348%
1.0540E+06	1.45043E-03	1.485%	1.31730E-03	1.568%	9.78525E-04	2.904%
8.2085E+05	1.45309E-03	1.451%	1.31012E-03	1.531%	1.02139E-03	2.392%
6.3928E+05	1.39771E-03	1.430%	1.27022E-03	1.543%	1.01690E-03	2.034%
4.9787E+05	1.26759E-03	1.475%	1.18364E-03	1.611%	9.61477E-04	2.003%
3.8774E+05	1.11866E-03	1.514%	1.06559E-03	1.575%	8.84632E-04	2.058%
3.0197E+05	9.71920E-04	1.581%	9.45323E-04	1.625%	7.98853E-04	2.067%
2.3518E+05	8.30282E-04	1.644%	8.13660E-04	1.749%	6.96584E-04	2.149%
1.8316E+05	6.76680E-04	1.766%	6.58591E-04	1.879%	5.79107E-04	2.217%
1.4264E+05	5.25059E-04	1.921%	4.99411E-04	2.041%	4.64762E-04	2.411%
1.1110E+05	3.87684E-04	2.234%	3.63610E-04	2.464%	3.52662E-04	2.620%
8.6517E+04	2.74708E-04	2.578%	2.62493E-04	2.682%	2.57081E-04	2.930%
6.7379E+04	1.91175E-04	2.872%	1.88676E-04	3.094%	1.83208E-04	3.164%
5.2475E+04	1.31084E-04	3.338%	1.32177E-04	3.579%	1.30977E-04	3.049%
4.0868E+04	8.61191E-05	4.388%	8.65891E-05	4.470%	8.78936E-05	3.869%
3.1828E+04	5.47254E-05	5.314%	5.56772E-05	5.278%	5.65140E-05	4.869%
2.4788E+04	3.56498E-05	6.017%	3.57049E-05	7.350%	3.56042E-05	5.194%
1.9305E+04	2.30332E-05	7.846%	2.09242E-05	7.998%	2.25674E-05	6.457%
1.5034E+04	1.40904E-05	10.543%	1.05029E-05	10.985%	1.42543E-05	8.762%
1.1709E+04	8.44133E-06	13.080%	8.64820E-06	14.525%	8.58592E-06	12.383%
9.1188E+03	1.24674E-07	10.302%	1.46680E-07	13.121%	1.39137E-07	10.472%
1.0000E-05						

注 Gy：グローリーホール、Gz：グレイジングホール
距離は炉上部実験孔口からの長さで、1825mmが炉中心面である。

表4-1 (続き)

(2/2)

Upper Energy (eV)	Neutron flux per lethargy (arbitrary unit)					
	Gy 1725mm	(std.)	Gz 1825mm	(std.)	Gz 1725mm	(std.)
2.0000E+07	1.01024E-06	37.108%	5.87435E-07	28.896%	1.13456E-07	36.021%
1.0000E+07	8.42345E-06	20.284%	7.51801E-06	12.347%	1.95945E-06	17.670%
7.7880E+06	2.65451E-05	11.951%	2.62626E-05	7.141%	8.25029E-06	9.356%
6.0653E+06	6.39420E-05	8.158%	5.48029E-05	4.932%	1.99124E-05	6.963%
4.7237E+06	1.06750E-04	6.240%	9.12873E-05	3.761%	3.25436E-05	4.889%
3.6788E+06	1.42128E-04	4.962%	1.27891E-04	3.126%	4.42084E-05	4.258%
2.8650E+06	1.67709E-04	4.733%	1.56954E-04	2.851%	5.44065E-05	3.853%
2.2313E+06	1.94276E-04	4.590%	1.77343E-04	2.652%	6.40335E-05	3.582%
1.7377E+06	2.27806E-04	3.832%	2.01984E-04	2.406%	7.83231E-05	3.223%
1.3534E+06	2.80419E-04	3.348%	2.45106E-04	2.186%	1.03953E-04	2.693%
1.0540E+06	3.68812E-04	2.904%	3.13858E-04	1.840%	1.50014E-04	2.313%
8.2085E+05	4.80425E-04	2.392%	3.90069E-04	1.586%	2.11208E-04	1.932%
6.3928E+05	5.68867E-04	2.034%	4.41679E-04	1.374%	2.67412E-04	1.623%
4.9787E+05	5.93214E-04	2.003%	4.51312E-04	1.350%	2.93081E-04	1.561%
3.8774E+05	5.64878E-04	2.058%	4.31308E-04	1.357%	2.89386E-04	1.543%
3.0197E+05	5.13590E-04	2.067%	3.98175E-04	1.349%	2.70291E-04	1.557%
2.3518E+05	4.62160E-04	2.149%	3.59326E-04	1.410%	2.50808E-04	1.672%
1.8316E+05	4.04448E-04	2.217%	3.13442E-04	1.485%	2.28134E-04	1.714%
1.4264E+05	3.39013E-04	2.411%	2.61396E-04	1.510%	1.98317E-04	1.761%
1.1110E+05	2.72012E-04	2.620%	2.06072E-04	1.725%	1.62937E-04	1.924%
8.6517E+04	2.19510E-04	2.930%	1.61696E-04	1.886%	1.34153E-04	2.042%
6.7379E+04	1.78428E-04	3.164%	1.29447E-04	2.053%	1.12609E-04	2.140%
5.2475E+04	1.38115E-04	3.049%	1.01030E-04	2.162%	9.02957E-05	2.291%
4.0868E+04	9.68185E-05	3.869%	7.07947E-05	2.390%	6.41900E-05	2.520%
3.1828E+04	6.14656E-05	4.869%	4.60182E-05	2.917%	4.11396E-05	2.968%
2.4788E+04	3.74896E-05	5.194%	3.00033E-05	3.434%	2.58280E-05	3.539%
1.9305E+04	2.21979E-05	6.457%	1.93911E-05	4.687%	1.60243E-05	5.052%
1.5034E+04	1.36631E-05	8.762%	1.16325E-05	5.978%	9.23499E-06	6.363%
1.1709E+04	9.06479E-06	12.383%	6.34848E-06	7.405%	4.75784E-06	8.443%
9.1188E+03	9.61730E-08	10.472%	8.20947E-08	7.841%	8.05489E-08	8.563%
1.0000E-05						

注 Gy : グローリーホール、Gz : グレイジングホール
距離は炉上部実験孔口からの長さで、1825mmが炉中心面である。

表4-2 BTB検出器内の中性子スペクトル
(MVPコードによる計算値)

(1/2)

Upper Energy (eV)	Normalized flux per lethargy					
	Gy 1825mm	(std.)	Gy 1800mm	(std.)	Gy 1775mm	(std.)
1.6487E+07	2.63924E-04		2.84465E-04		2.51109E-04	
1.2840E+07	1.66143E-03		1.87895E-03		1.65765E-03	
1.0000E+07	1.04589E-02	8.201%	1.24110E-02	8.173%	1.09427E-02	9.233%
7.7880E+06	3.86186E-02	4.289%	3.80866E-02	4.665%	3.16140E-02	5.867%
6.0653E+06	8.54298E-02	2.952%	8.04691E-02	3.181%	7.13536E-02	3.943%
4.7237E+06	1.40265E-01	2.281%	1.33371E-01	2.456%	1.20799E-01	2.908%
3.6788E+06	1.93171E-01	1.958%	1.87800E-01	2.046%	1.70235E-01	2.546%
2.8650E+06	2.38927E-01	1.729%	2.35666E-01	1.854%	2.10303E-01	2.283%
2.2313E+06	2.72945E-01	1.621%	2.73292E-01	1.762%	2.38537E-01	2.122%
1.7377E+06	2.95866E-01	1.570%	2.98686E-01	1.687%	2.58568E-01	2.015%
1.3534E+06	3.10259E-01	1.555%	3.11034E-01	1.641%	2.78036E-01	1.965%
1.0540E+06	3.19811E-01	1.485%	3.13904E-01	1.568%	2.96695E-01	1.879%
8.2085E+05	3.21082E-01	1.451%	3.10490E-01	1.531%	3.09062E-01	1.806%
6.3928E+05	3.08037E-01	1.430%	3.00125E-01	1.543%	3.08161E-01	1.700%
4.9787E+05	2.80369E-01	1.475%	2.80116E-01	1.611%	2.94407E-01	1.778%
3.8774E+05	2.46141E-01	1.514%	2.53625E-01	1.575%	2.72268E-01	1.761%
3.0197E+05	2.12039E-01	1.581%	2.23215E-01	1.625%	2.43602E-01	1.804%
2.3518E+05	1.80624E-01	1.644%	1.90313E-01	1.749%	2.10787E-01	1.899%
1.8316E+05	1.49313E-01	1.766%	1.54299E-01	1.879%	1.75417E-01	2.021%
1.4264E+05	1.18773E-01	1.921%	1.19114E-01	2.041%	1.40970E-01	2.143%
1.1110E+05	8.86116E-02	2.234%	8.78504E-02	2.464%	1.07645E-01	2.588%
8.6517E+04	6.28241E-02	2.578%	6.33973E-02	2.682%	7.85619E-02	2.865%
6.7379E+04	4.23992E-02	2.872%	4.48991E-02	3.094%	5.57397E-02	3.282%
5.2475E+04	2.85559E-02	3.338%	3.12875E-02	3.579%	3.88382E-02	3.485%
4.0868E+04	1.88976E-02	4.388%	2.08004E-02	4.470%	2.61522E-02	4.177%
3.1828E+04	1.24931E-02	5.314%	1.31893E-02	5.278%	1.68118E-02	5.273%
2.4788E+04	7.95669E-03	6.017%	7.97733E-03	7.350%	1.09205E-02	5.800%
1.9305E+04	5.17907E-03	7.846%	4.71364E-03	7.998%	7.35204E-03	8.506%
1.5034E+04	3.54192E-03	10.543%	2.81559E-03	10.985%	5.16607E-03	12.555%
1.1709E+04	1.94412E-03	13.080%	1.97167E-03	14.525%	3.07327E-03	16.085%
9.1188E+03	1.31737E-03		1.14037E-03		2.11774E-03	
7.1017E+03	8.37469E-04		7.02654E-04		1.39882E-03	
5.5308E+03	5.32394E-04		4.32950E-04		9.23964E-04	
4.3074E+03	3.38452E-04		2.66768E-04		6.10305E-04	
3.3546E+03	2.15162E-04		1.64375E-04		4.03128E-04	
2.6126E+03	1.36784E-04		1.01283E-04		2.66281E-04	
2.0347E+03	8.69552E-05		6.24064E-05		1.75885E-04	
1.5846E+03	5.52786E-05		3.84523E-05		1.16176E-04	
1.2341E+03	3.51420E-05		2.36932E-05		7.67386E-05	
9.6112E+02						

注1 Gy：グローリーホール、Gz：グレイジングホール
距離は炉上部実験孔口からの長さで、1825mmが炉中心面である。

注2 スペクトルの裾野部分は外挿値である。

表4-2 (続き)

(2/2)

Upper Energy (eV)	Normalized flux per lethargy					
	Gy 1725mm	(std.)	Gz 1825mm	(std.)	Gz 1725mm	(std.)
1.6487E+07	1.67984E-04		1.24783E-04		2.27910E-05	
1.2840E+07	9.29588E-04		8.08546E-04		1.79301E-04	
1.0000E+07	5.14416E-03	20.284%	5.23910E-03	12.347%	1.41060E-03	17.670%
7.7880E+06	1.57045E-02	11.951%	1.82364E-02	7.141%	1.07405E-02	9.356%
6.0653E+06	3.63985E-02	8.158%	4.00574E-02	4.932%	2.55718E-02	6.963%
4.7237E+06	5.95341E-02	6.240%	6.61306E-02	3.761%	4.04172E-02	4.889%
3.6788E+06	8.03482E-02	4.962%	9.21764E-02	3.126%	5.26876E-02	4.258%
2.8650E+06	9.86194E-02	4.733%	1.15236E-01	2.851%	6.45216E-02	3.853%
2.2313E+06	1.16618E-01	4.590%	1.35159E-01	2.652%	7.79637E-02	3.582%
1.7377E+06	1.37796E-01	3.832%	1.56215E-01	2.406%	9.68249E-02	3.223%
1.3534E+06	1.71622E-01	3.348%	1.87420E-01	2.186%	1.28985E-01	2.693%
1.0540E+06	2.26451E-01	2.904%	2.35602E-01	1.840%	1.86266E-01	2.313%
8.2085E+05	2.92905E-01	2.392%	2.92004E-01	1.586%	2.61339E-01	1.932%
6.3928E+05	3.44913E-01	2.034%	3.34479E-01	1.374%	3.30263E-01	1.623%
4.9787E+05	3.61428E-01	2.003%	3.46015E-01	1.350%	3.63423E-01	1.561%
3.8774E+05	3.46171E-01	2.058%	3.30618E-01	1.357%	3.59437E-01	1.543%
3.0197E+05	3.14074E-01	2.067%	3.03819E-01	1.349%	3.31408E-01	1.557%
2.3518E+05	2.80607E-01	2.149%	2.74401E-01	1.410%	3.03902E-01	1.672%
1.8316E+05	2.45670E-01	2.217%	2.39660E-01	1.485%	2.77389E-01	1.714%
1.4264E+05	2.08248E-01	2.411%	1.98266E-01	1.510%	2.46079E-01	1.761%
1.1110E+05	1.68934E-01	2.620%	1.57198E-01	1.725%	2.05491E-01	1.924%
8.6517E+04	1.35477E-01	2.930%	1.25838E-01	1.886%	1.69896E-01	2.042%
6.7379E+04	1.07708E-01	3.164%	1.01936E-01	2.053%	1.41467E-01	2.140%
5.2475E+04	8.30207E-02	3.049%	7.94913E-02	2.162%	1.13385E-01	2.291%
4.0868E+04	5.94466E-02	3.869%	5.60789E-02	2.390%	8.06309E-02	2.520%
3.1828E+04	3.91802E-02	4.869%	3.70060E-02	2.917%	5.11606E-02	2.968%
2.4788E+04	2.36553E-02	5.194%	2.37947E-02	3.434%	3.04973E-02	3.539%
1.9305E+04	1.40599E-02	6.457%	1.63288E-02	4.687%	1.94613E-02	5.052%
1.5034E+04	9.29340E-03	8.762%	1.16741E-02	5.978%	1.34535E-02	6.363%
1.1709E+04	6.10467E-03	12.383%	6.32002E-03	7.405%	5.85360E-03	8.443%
9.1188E+03	3.69482E-03		4.48561E-03		4.01967E-03	
7.1017E+03	2.32027E-03		2.93350E-03		2.40075E-03	
5.5308E+03	1.45708E-03		1.91846E-03		1.43386E-03	
4.3074E+03	9.15021E-04		1.25464E-03		8.56376E-04	
3.3546E+03	5.74622E-04		8.20522E-04		5.11479E-04	
2.6126E+03	3.60857E-04		5.36615E-04		3.05488E-04	
2.0347E+03	2.26608E-04		3.50933E-04		1.82451E-04	
1.5846E+03	1.42305E-04		2.29503E-04		1.08969E-04	
1.2341E+03	8.93658E-05		1.50093E-04		6.50828E-05	
9.6112E+02						

注1 Gy: グローリーホール、Gz: グレイジングホール
距離は炉上部実験孔口からの長さで、1825mmが炉中心面である。

注2 スペクトルの裾野部分は外挿値である。

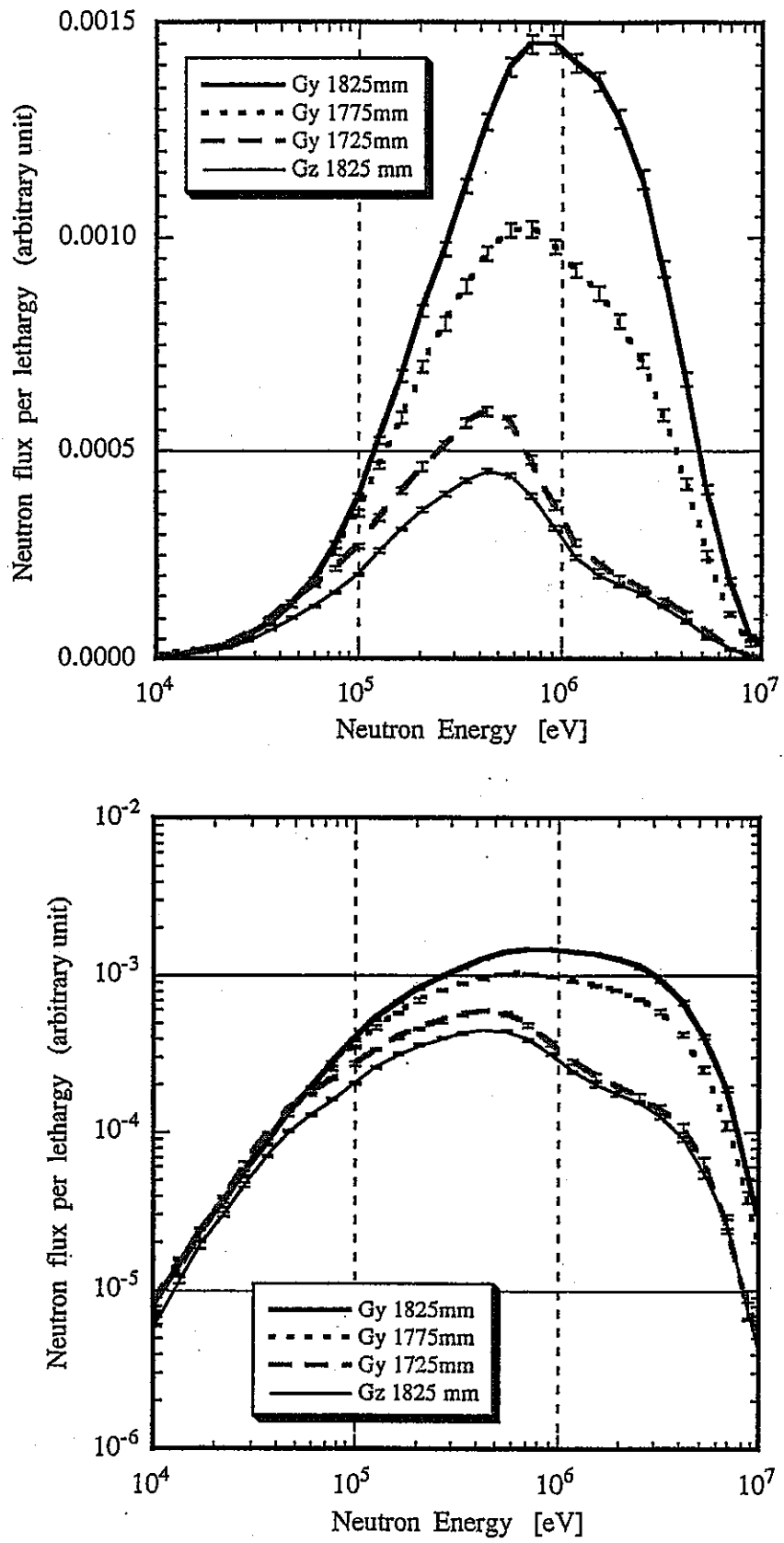


図 4-1 弥生炉実験孔の中性子スペクトル
(MVPコードによる計算値)

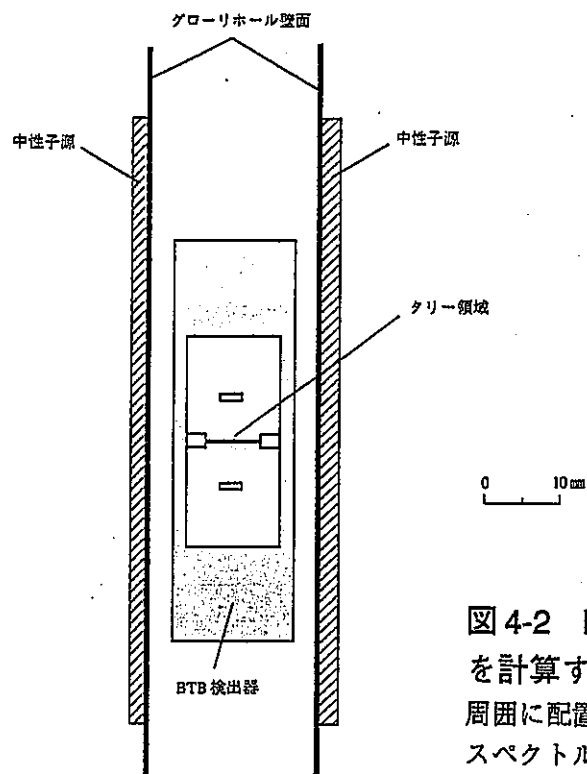


図4-2 BTB 検出器内の中性子スペクトルを計算するための体系モデル
 周囲に配置した中性子源からは、全炉心計算で求めたスペクトル分布の中性子を発生させる。

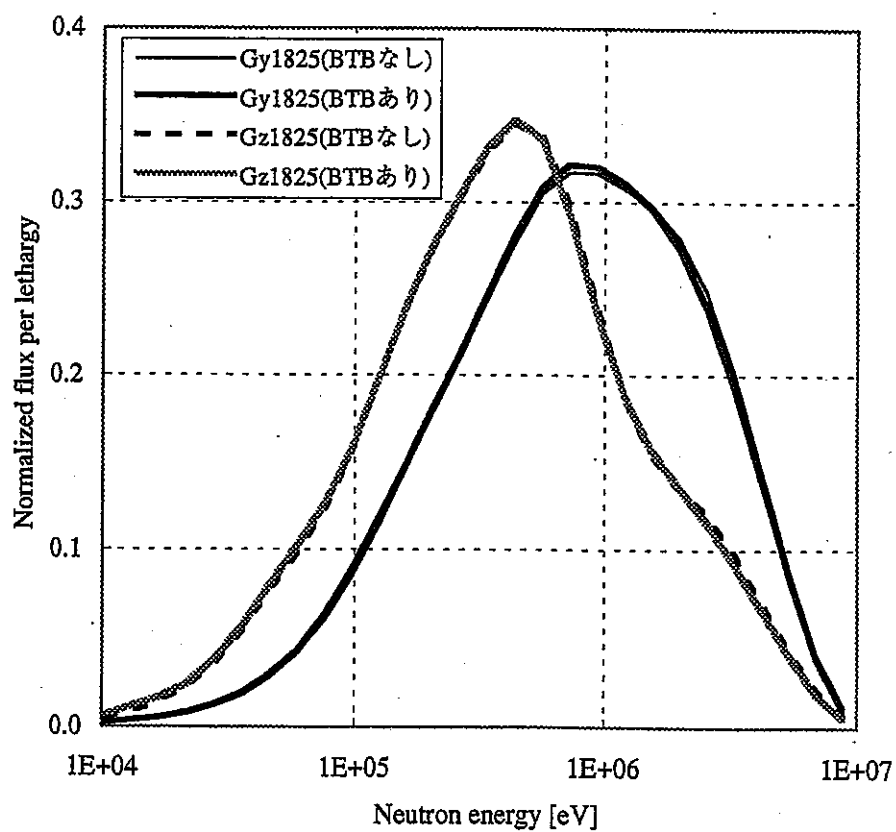


図4-3 BTB検出器による中性子スペクトルの変化

5. 核分裂反応率比の測定データ処理

5.1 波高スペクトルの処理

BTB 検出器によって得られるフィッション・フラグメントの波高スペクトルを図 5-1 に示す。今回測定に用いた小型 BTB 検出器では、波高スペクトルのテイルがロア弁別レベルにまでかかっているため、グロス計数率を求めることが難しくなっている。この問題は検出器をグローリーホールに挿入可能とするために小型化したために生じたものである。ここからグロス計数率を求めるためには、波高スペクトルのアンフォールディング等の工夫が必要であるが、今回の測定データ処理においては、図 5-2 に示すように波高スペクトルの山をガウス分布でフィッティングし、それ以下の低エネルギー側のカウントをカットする方法をとった。

反応率比 R_{exp} を求める手順は次のとおりである。

- ① デッドタイム補正後の計数値からバックグラウンドを引き去る (図 5-1)。バックグラウンドは試料を固着していない白金板を検出器に入れることで測定した。バックグラウンドの原因は、白金板や検出器壁面からの (n, α) , (n, p) 反応あるいは電気回路のノイズと考えられる。
- ② バックグラウンドを引き去った後の正味計数についてスムージングを行う (図 5-2)。
- ③ スペクトルのピークの前後約 20 チャンネルをガウス分布関数でフィッティングする (図 5-2)。フィッティングを行うチャンネル幅は、残差が小さくなるように設定した。なお、ゲインの変化に合わせてチャンネル幅を変えることで、各測定ケースが同一条件でフィッティングされるよう配慮した。
- ④ フィッティング曲線の高エネルギー側を積分し、グロス計数率を求める。
- ⑤ 複数回の測定について平均化を行う。
- ⑥ 式(6)に従って反応率比 R_{exp} を算出する。ここで、核種の違いに対する補正を行う (5.2 節参照)。

5.2 核種の違いに対する補正

^{237}Np と ^{235}U の反応率比 R_{exp} は、第 2 章で述べたように、核種の違いによって生じる因子について補正する必要がある。そのような核種に依存する因子として、試料によるフィッション・フラグメントの吸収、それぞれの試料中の不純物の影響を考える。

(1) 試料の自己吸収の補正

試料による自己吸収の補正は、第 3 章で述べたアルファ線に関する自己吸収の補正と同様にして行う。フィッション・フラグメントの飛程については、次の評価式⁷⁾を用いる：

$$\rho_i[\text{mg/cm}^2] = \left(0.03910 + 0.02020 \frac{A_i}{\sqrt{Z_i}} \right) (T_{FF}[\text{MeV}])^{2/3} \quad (16)$$

ここで、 A_i は阻止物質中の核種*i*の原子量、 Z_i は原子番号である。 T_{FF} はフィッション・フラグメントの運動エネルギーを表しており、本解析においては $T_{FF} \approx 89\text{MeV}$ とした。混合物中の飛程は

$$\rho = \left(\sum_i \frac{w_i}{\rho_i} \right)^{-1} \quad (17)$$

より求める。 w_i は混合物中の核種*i*の重量割合である。

以上の方法による計算の結果を表 5-1 にまとめる。今回使用した ^{237}Np 及び ^{235}U 試料では自己吸収の割合は大きくても 0.1%程度であり、影響は無視できることがわかった。

(2) 不純物の影響

試料中の不純物が反応率に与える影響を表 5-1 に示す。 ^{237}Np 及び ^{235}U ともに高純度であるため、不純物による影響は十分無視できる。

5.3 核分裂反応率比の測定結果

各測定のプロス計数率から求めた ^{237}Np と ^{235}U の核分裂反応率比 R_{exp} の結果を表 5-2 に示す。中性子スペクトルの軟化に伴い、核分裂反応率比が減少するようすがわかる。なお、誤差には計数の統計誤差のみ示しており、波高スペクトルのカットオフに伴う誤差は含まれていない。

表 5-1 波高スペクトルに対する補正因子

	^{237}Np	^{235}U (標準試料)
試料による吸収	0.12%	0.04%
不純物の影響	^{238}Pu (< 0.04%)	^{234}U (0.028%)
	^{241}Am (< 0.02%)	^{236}U (0.003%)
	^{239}Pu (< 0.09%)	^{238}U (0.002%)

表 5-2 $^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ 核分裂反応率比 (R_{exp})

検出器位置	$^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$
グローリーホール中心 (Gy 1825 mm)	1.101±0.2%
同 25 mm 上 (Gy 1800 mm)	1.119±0.2%
同 50 mm 上 (Gy 1775 mm)	0.994±0.3%
同 100 mm 上 (Gy 1725 mm)	0.595±0.3%
グレイジングホール中心 (Gz 1825 mm)	0.605±0.3%

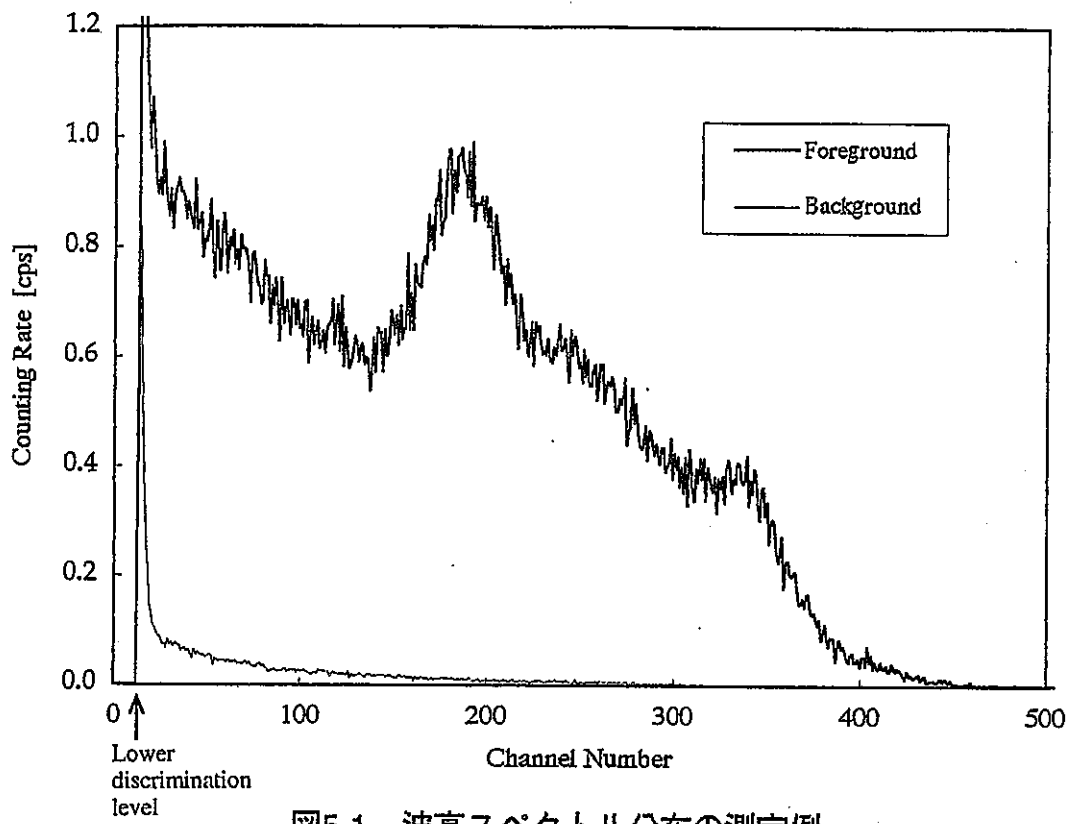


図5-1 波高スペクトル分布の測定例

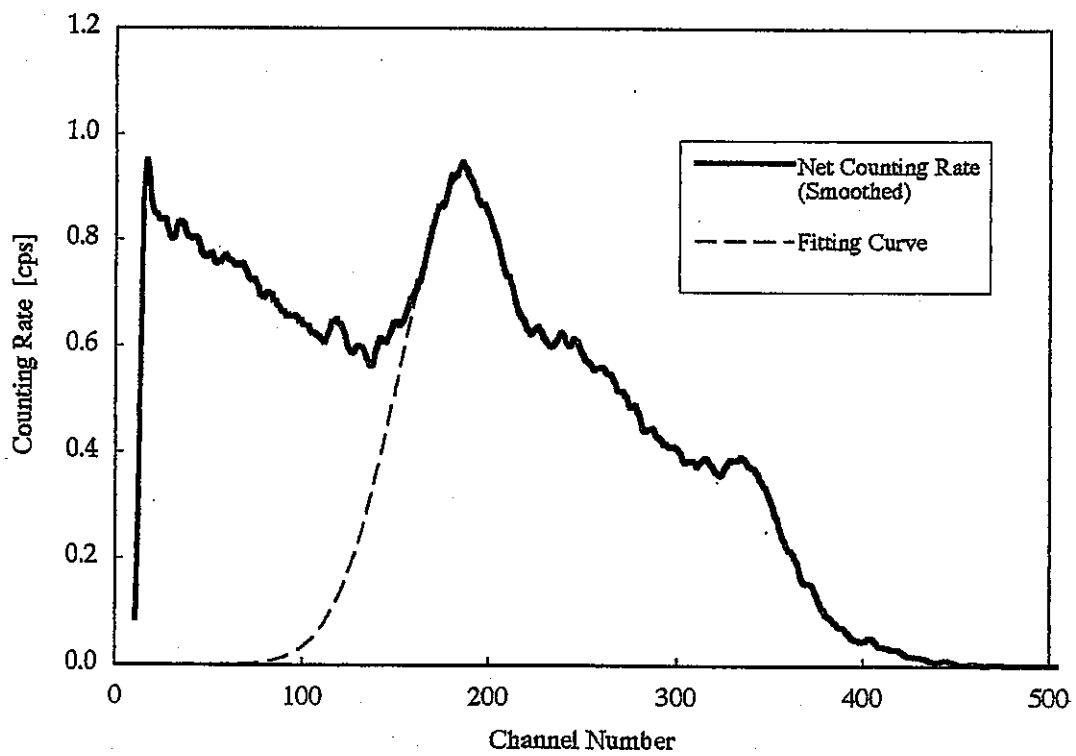


図5-2 ガウス分布関数によるフィッティング

6. 核分裂断面積比の測定結果と計算値との比較

以上において求めた測定試料の原子数、核分裂反応率比の測定結果から、式(7)に基づき核分裂断面積比 $\langle\sigma_{MA}\rangle/\langle\sigma_U\rangle$ の測定値を得ることができる。それらを評価済み核データライブラリより求めた計算値と比較することにする。

^{237}Np についての核データライブラリは、JENDL-3.2^[8]、ENDF/B-VI^[9]、JEF-2.2^[10]、JENDL-2^[11]を参照した。 ^{235}U に関しては、JENDL-3.2 を用いた。表 6-1 及び図 6-1 にレサジー幅 0.25 の群分割で縮約した各ライブラリの核分裂断面積を示す。縮約の際の重み関数には、グローリーホール中心の中性子スペクトルを使用した。ここで、 ^{237}Np の断面積は無限希釈断面積である。 ^{235}U についても、弥生炉実験孔で着目するエネルギー領域が共鳴領域から離れているため、無限希釈断面積とした。各測定位置の検出器内スペクトルを群縮約断面積に乘じそれらを積分し、 ^{237}Np と ^{235}U の比をとれば、核分裂断面積比の計算値を得る。

表 6-2 に核分裂断面積比の測定値と計算値をまとめた。図 6-2 に測定位置と核データライブラリ間の C/E 値 (Calculation/Experiment) の比較を図示した。図中のエラーバーは測定誤差を示したものであり、試料の定量に伴う誤差が主なものである。大きな誤差要因になると考えられる波高スペクトルのカットオフに伴う誤差は考慮されていない。

C/E 値は 1.3~1.5 であり、系統的な過大評価となっている。また、グローリーホール上部に向かうにつれて C/E 値が大きくなる位置依存性が見られる。グレイジングホール中心の C/E 値は、中性子スペクトルの類似したグローリーホール上部のものに近い。

一方、 ^{237}Np 試料と同じ方法で ^{235}U との核分裂断面積比を測定した ^{241}Am 、 ^{243}Am 試料では、C/E 値は 0.8~0.9 の過小評価となっており^[6]、ほぼ同じ断面積形状であるにもかかわらず、矛盾した結果となっている。ただし、位置依存性については両者で共通の現象として現われている。

C/E 値の位置依存性が生じる原因として、中性子スペクトルの計算誤差、検出器の位置決め誤差について考えてみた。

(a) 中性子スペクトルの計算誤差

MVP を用いて計算した弥生炉実験孔の中性子スペクトルを放射化箔による測定値と比較し、計算値の持つ不確かさを考察した。放射化箔による測定結果は次のように与えられている^[12]：

$$\phi(u) = 11.73aE^{1.82}e^{-3.74E} + 0.77bE^{1.50}e^{-0.776E} \quad (E \text{ in MeV})$$

$$\begin{cases} a = 0.432, b = 0.568 & \text{for Gyホール中心} \\ a = 0.7443, b = 0.2557 & \text{for Gzホール中心} \end{cases} \quad (18)$$

ここで $\phi(u)$ は単位レサジーあたりの規格化された中性子束であり、 E は中性子エネルギー（単位: MeV）である。MVPによる計算値と放射化箱による測定値の比較を図6-3に示す。グローリーホール中心において両者は比較的一致しているが、グレイジングホール中心では相違が大きくなっている。これらの違いは、 $^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ 核分裂断面積比に対してそれぞれ約3%、約20%の影響をもたらす。この結果は、炉心中心から離れるほど中性子スペクトルの計算値に誤差が生じる可能性を示唆している。しかし、仮に放射化箱による測定値が正しいとすると、C/E値の位置依存性はより拡大する方向にある。

(b) 検出器の位置決めの誤差

検出器の位置決めは注意して行ったが、実験孔に挿入する際の検出器治具のたわみにより、1回目測定と2回目測定とで検出器位置にズレが生じた可能性がある。そこで、次のようにして実験孔軸方向の位置決めの誤差を見積もることにした。

実験孔の軸方向座標 z に対して、一回目測定の検出器位置を $z+dz_1$ 、二回目測定の検出器位置を $z+dz_2$ とし、位置の違いをあらわにして式(1)~式(4)を書き直すと、

$$\textcircled{1} \quad R_{Np,A}^{z+dz_1} = \langle \sigma_{Np}^{z+dz_1} \rangle \phi^{z+dz_1} N_{Np} \varepsilon_{Np} \varepsilon_A \quad (19)$$

$$\textcircled{2} \quad R_{U,B}^{z+dz_1} = \langle \sigma_U^{z+dz_1} \rangle \phi^{z+dz_1} N_U \varepsilon_U \varepsilon_B \quad (20)$$

$$\textcircled{3} \quad R_{U,A}^{z+dz_2} = \langle \sigma_U^{z+dz_2} \rangle \phi^{z+dz_2} N_U \varepsilon_U \varepsilon_A \quad (21)$$

$$\textcircled{4} \quad R_{Np,B}^{z+dz_2} = \langle \sigma_{Np}^{z+dz_2} \rangle \phi^{z+dz_2} N_{Np} \varepsilon_{Np} \varepsilon_B \quad (22)$$

となる。 ^{235}U の核分裂断面積の検出器位置のズレによる変化はゆるやか $\langle \sigma_U^{z+dz_1} \rangle \equiv \langle \sigma_U^{z+dz_2} \rangle$ と仮定し、上の4式より次の量を計算する（簡単のため①~④の番号で表す）：

$$\sqrt{\frac{\textcircled{1} \times \textcircled{2}}{\textcircled{3} \times \textcircled{4}}} \equiv \sqrt{\frac{\langle \sigma_{Np}^{z+dz_1} \rangle \phi^{z+dz_1}}{\langle \sigma_{Np}^{z+dz_2} \rangle \phi^{z+dz_2}}} \quad (23)$$

$$\sqrt{\frac{\textcircled{1} \times \textcircled{3}}{\textcircled{2} \times \textcircled{4}}} \equiv \sqrt{\frac{\langle \sigma_{Np}^{z+dz_1} \rangle \varepsilon_A}{\langle \sigma_{Np}^{z+dz_2} \rangle \varepsilon_B}} \quad (24)$$

式(23)と式(24)が、一回目測定と二回目測定の検出器位置のズレに関する情報を導く。測定値より得た値と、 $dz = dz_1 - dz_2$ をパラメータとした計算値との比較を図 6-4 に示す。一番目の図は式(23)について、二番目の図は式(24)について示したものである。二番目の図において、検出効率の比を $\varepsilon_A/\varepsilon_B = 1.06$ として計算値を求めた。三番目の図は、核分裂断面積比 $\langle\sigma_{Np}\rangle/\langle\sigma_U\rangle$ に対する dz の影響を示したものである。

比較結果より、 $dz = -5\text{ mm}$ 程度のズレがあったと推測することができる。これは十分にあり得る大きさである。しかし、 $dz = -5\text{ mm}$ のズレが引き起こす核分裂断面積比の変化は、三番目の図より最大でも2~3%程度に過ぎず、10%にも及ぶ位置依存性を説明することはできない。

なお、グレイジングホール中心については、実験孔径より細径の検出器を挿入したため、径方法の位置決めの不確かさも考えられる。軸方向のズレだけでは説明できない図 6-4 の比較結果が、その可能性を示唆する。

軸方向の C/E 値の位置依存性は、 ^{237}Np だけでなく、 ^{241}Am や ^{243}Am の測定結果にも共通して見られている。3 核種の測定で、いつも同じ方法に位置決めのズレが生じたというのは、偶然にしてはおかしい。位置決めの誤差以外に、例えば ^{238}U の非弾性散乱の不確かさの影響といった共通の要因があるのかもしれない。

以上、中性子スペクトルの計算誤差、検出器の位置決めの誤差より、C/E 値の位置依存性を考察したが、位置依存性を説明する明確な原因を見出すことはできなかった。少なくともグローリーホール中心部付近の測定については、双方の誤差要因の影響が少なく、より確からしいと考えられる。

^{237}Np の C/E 値に見られる 30%の系統的な過大評価は、10~20%の過小評価となった ^{241}Am , ^{243}Am の測定との不整合を考えると、本測定に重大なミスがあると考えるのが自然である。最も疑わしいのは、波高スペクトルのカットオフに伴う誤差である。波高スペクトルの山をガウス分布でフィッティングする方法は、 ^{237}Np と ^{235}U の波高スペクトルがほぼ同じ形をしているという仮定に基づいている。しかし、波高スペクトルの分布は実際には全く同一ではなく、さらに計測不可能なディスクリレベル以下に相当の計数が落ち込んでしまっている。波高スペクトルの山と谷間の分離の良好な検出器を用いることが望まれる。

このように、本測定には波高スペクトルのカットオフに伴う不確かさなど測定精度の面で課題がある。波高スペクトルのアンフォールディング等により系統的な誤差を取り除くことができれば、 ^{237}Np や中性子スペクトル場を形成する ^{235}U , ^{238}U の核データ検証に、本測定結果を活用できると考えられる。

表6-1 ^{237}Np 及び ^{235}U の核分裂断面積

(JFSライブラリで用いられている等レサジー群に縮約)

Upper Energy [eV]	Grouped Cross Section [barn]				
	JENDL-3.2	^{237}Np			^{235}U
	JENDL-3.2	ENDF/B-VI	JEF-2.2	JENDL-2	JENDL-3.2
1.6487E+07	2.13224E+00	2.12284E+00	2.18667E+00		2.03381E+00
1.2840E+07	1.98915E+00	2.10427E+00	2.18667E+00		1.73225E+00
1.0000E+07	2.16920E+00	2.21580E+00	2.14377E+00	2.15010E+00	1.77030E+00
7.7880E+06	1.97620E+00	1.99108E+00	1.90531E+00	1.88820E+00	1.46000E+00
6.0653E+06	1.46470E+00	1.48955E+00	1.46847E+00	1.46290E+00	1.05890E+00
4.7237E+06	1.55270E+00	1.54513E+00	1.47452E+00	1.47460E+00	1.14760E+00
3.6788E+06	1.62690E+00	1.60893E+00	1.57870E+00	1.55270E+00	1.20480E+00
2.8650E+06	1.67170E+00	1.66495E+00	1.64685E+00	1.58250E+00	1.26470E+00
2.2313E+06	1.69510E+00	1.67021E+00	1.64444E+00	1.60610E+00	1.29840E+00
1.7377E+06	1.61190E+00	1.59449E+00	1.57005E+00	1.57950E+00	1.25680E+00
1.3534E+06	1.52860E+00	1.48022E+00	1.48562E+00	1.49930E+00	1.23860E+00
1.0540E+06	1.36860E+00	1.35605E+00	1.36352E+00	1.36660E+00	1.17570E+00
8.2085E+05	1.08320E+00	1.07280E+00	1.07326E+00	1.11140E+00	1.11500E+00
6.3928E+05	6.61950E-01	6.45392E-01	6.49171E-01	6.68720E-01	1.13100E+00
4.9787E+05	3.02240E-01	2.86723E-01	2.85740E-01	2.79540E-01	1.17670E+00
3.8774E+05	1.06620E-01	1.07101E-01	1.08442E-01	1.00910E-01	1.22530E+00
3.0197E+05	6.15590E-02	5.56226E-02	5.62705E-02	4.97640E-02	1.26160E+00
2.3518E+05	4.36020E-02	3.60564E-02	3.65629E-02	3.28490E-02	1.32190E+00
1.8316E+05	3.63750E-02	2.64102E-02	2.64029E-02	2.85750E-02	1.39450E+00
1.4264E+05	3.28760E-02	1.97782E-02	2.00929E-02	2.15860E-02	1.48820E+00
1.1110E+05	2.99130E-02	1.64704E-02	1.60306E-02	1.80290E-02	1.56440E+00
8.6517E+04	2.77610E-02	1.37752E-02	1.37764E-02	1.66150E-02	1.66540E+00
6.7379E+04	2.62040E-02	1.22193E-02	1.23676E-02	1.47800E-02	1.76780E+00
5.2475E+04	2.49730E-02	1.16001E-02	1.13936E-02	1.41440E-02	1.84850E+00
4.0868E+04	2.38220E-02	1.07129E-02	1.07017E-02	1.25860E-02	1.98290E+00
3.1828E+04	2.36530E-02	1.02258E-02	1.01655E-02	9.93190E-03	2.02970E+00
2.4788E+04	2.28130E-02	9.71659E-03	9.72083E-03	9.01600E-03	2.20400E+00
1.9305E+04	2.25510E-02	9.48630E-03	9.48855E-03	8.79670E-03	2.32250E+00
1.5034E+04	2.25840E-02	9.30037E-03	9.30432E-03	8.84590E-03	2.53260E+00
1.1709E+04	2.23350E-02	9.04391E-03	9.08389E-03	8.70740E-03	2.77600E+00
9.1188E+03	2.20840E-02	8.80466E-03	8.86400E-03	8.60070E-03	2.92030E+00
7.1017E+03	2.17250E-02	8.80466E-03	8.68694E-03	8.50080E-03	3.22620E+00
5.5308E+03	2.37570E-02	8.64644E-03	8.61060E-03	8.38420E-03	3.67430E+00
4.3074E+03	2.62020E-02	9.05449E-03	8.82951E-03	8.23340E-03	4.13320E+00
3.3546E+03	2.79790E-02	9.53900E-03	9.63741E-03	8.11110E-03	4.43870E+00
2.6126E+03	2.94300E-02	8.67846E-03	8.17614E-03	8.01570E-03	4.79180E+00
2.0347E+03	3.28380E-02	1.00737E-02	9.28495E-03	7.86460E-03	5.48020E+00
1.5846E+03	3.86330E-02	1.46442E-02	1.38742E-02	7.60640E-03	5.85460E+00
1.2341E+03	4.09870E-02	1.35804E-02	1.35985E-02	6.84550E-03	6.64960E+00
9.6112E+02					

表 6-2 $^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ 核分裂断面積比 ($\langle\sigma_{MA}\rangle/\langle\sigma_U\rangle$)

検出器位置	測定値	計算値 (C/E 値)			
		JENDL-3.2	ENDF/B-VI	JEF-2.2	JENDL-2
グローリーホール中心 (Gy 1825 mm)	0.541 ±2.6%	0.732 (1.35)	0.721 (1.33)	0.714 (1.32)	0.712 (1.32)
同 25 mm 上 (Gy 1800 mm)	0.550 ±2.6%	0.722 (1.31)	0.711 (1.29)	0.704 (1.28)	0.702 (1.28)
同 50 mm 上 (Gy 1775 mm)	0.488 ±2.6%	0.655 (1.34)	0.645 (1.32)	0.639 (1.31)	0.637 (1.31)
同 100 mm 上 (Gy 1725 mm)	0.292 ±2.6%	0.418 (1.43)	0.409 (1.40)	0.407 (1.39)	0.407 (1.39)
グレイジングホール中心 (Gz 1825 mm)	0.297 ±2.6%	0.447 (1.51)	0.437 (1.47)	0.434 (1.46)	0.434 (1.46)

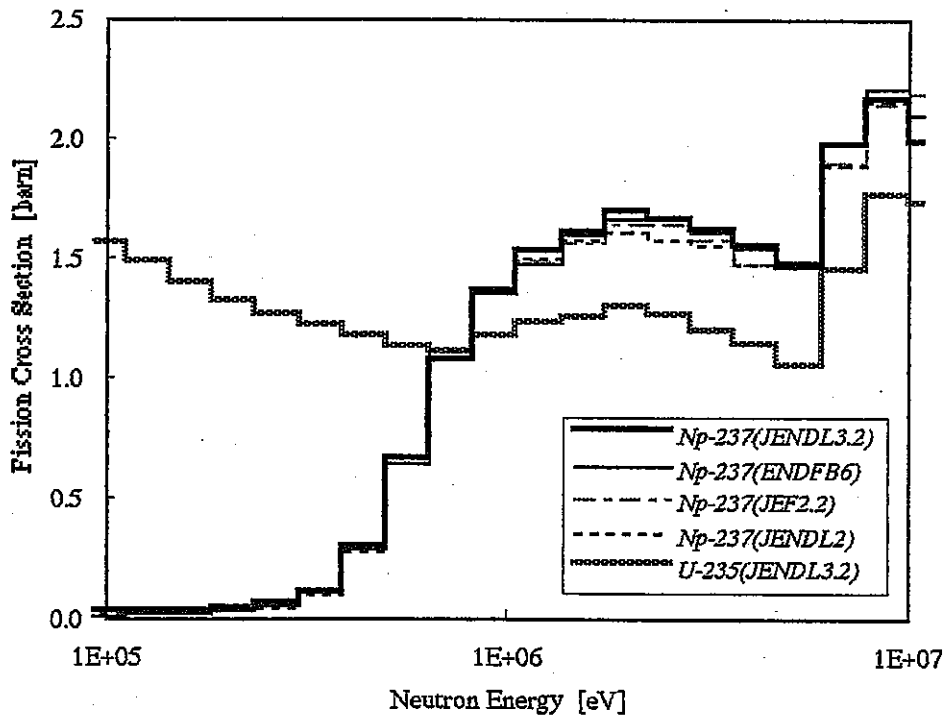
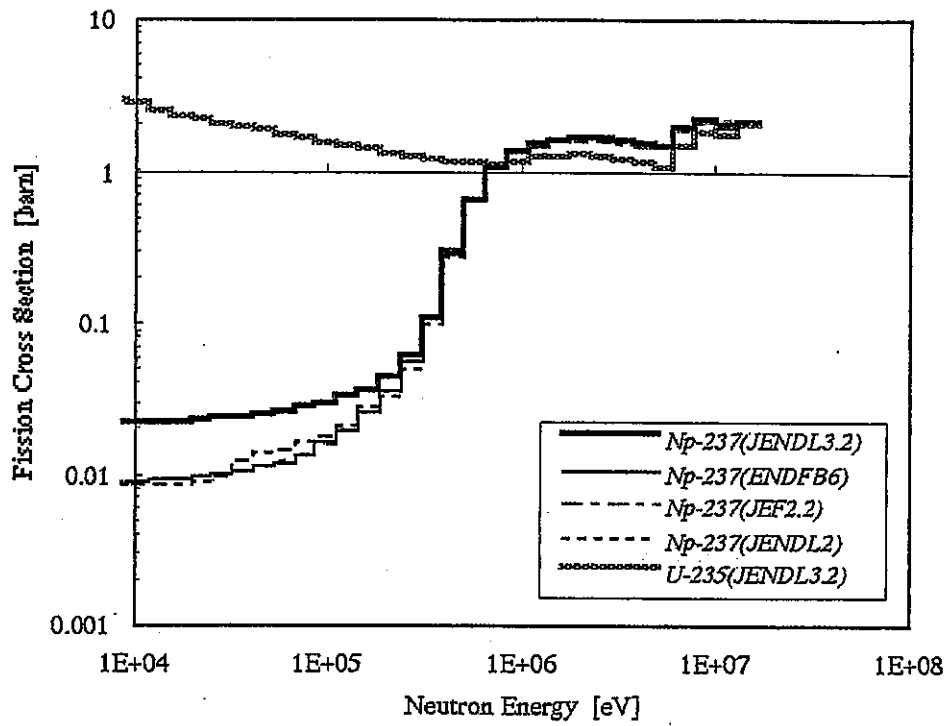


図 6-1 ^{237}Np 及び ^{235}U の核分裂断面積

各ライブラリーの断面積をJFSライブラリーで用いられている等レサジー群に縮約した。

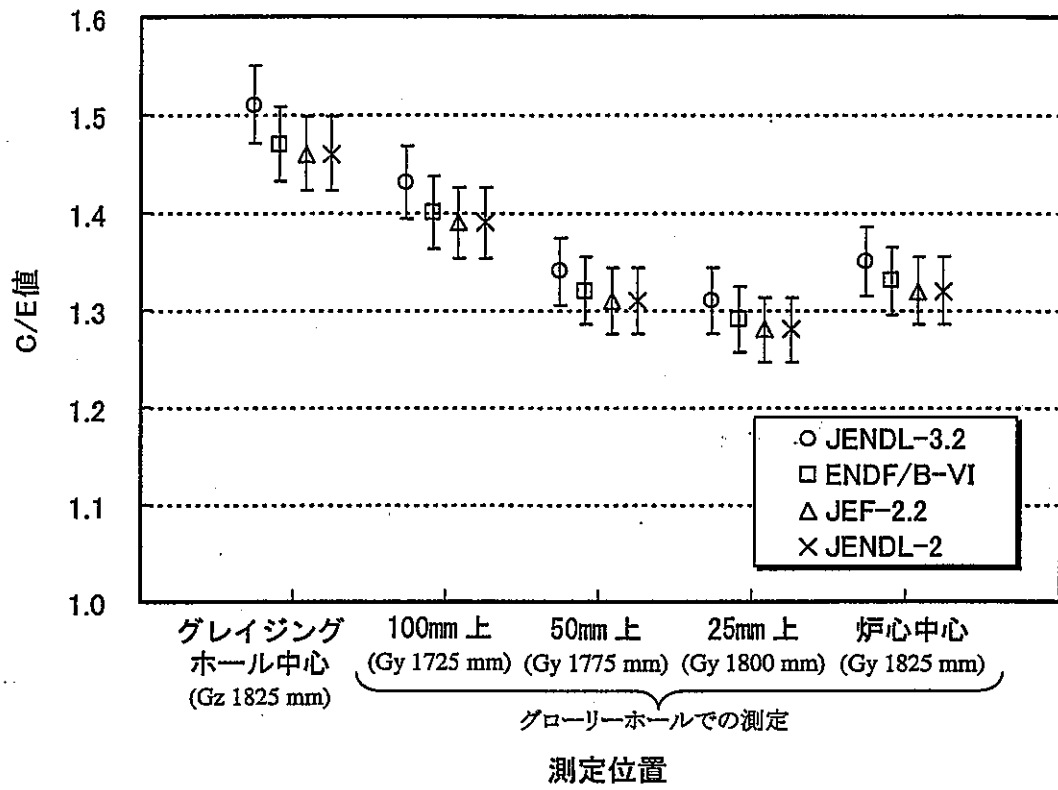


図 6-2 $^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ 核分裂断面積比の C/E 値の比較
 エラーバーは測定誤差を表す。

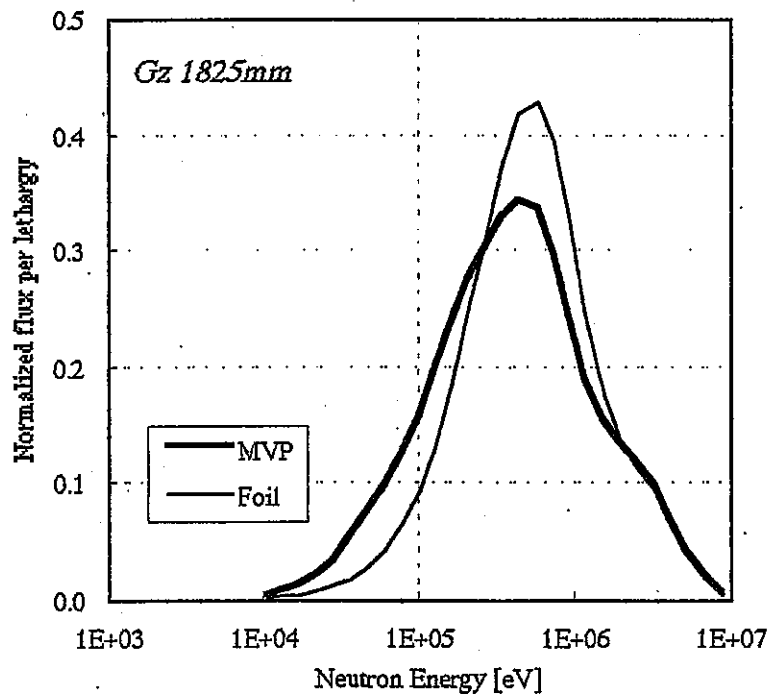
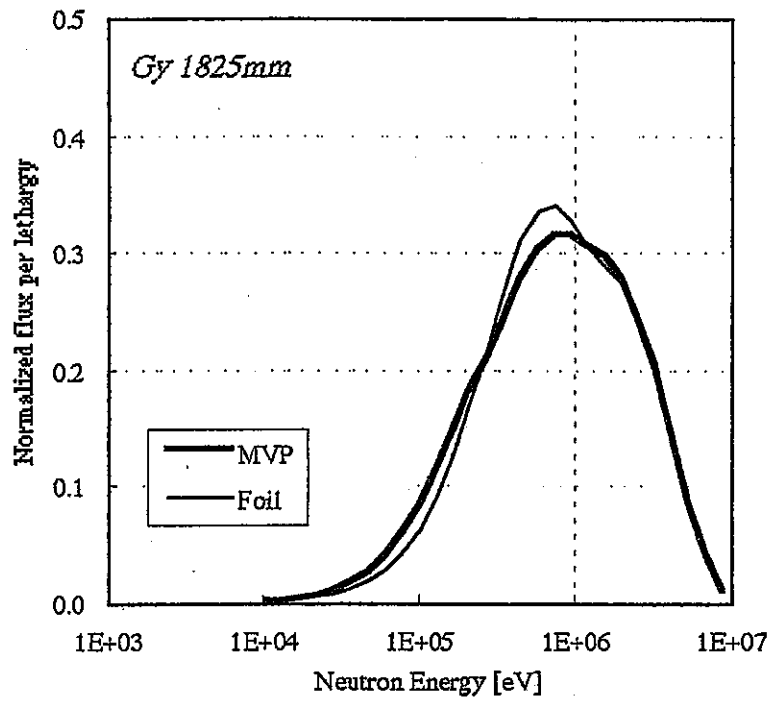
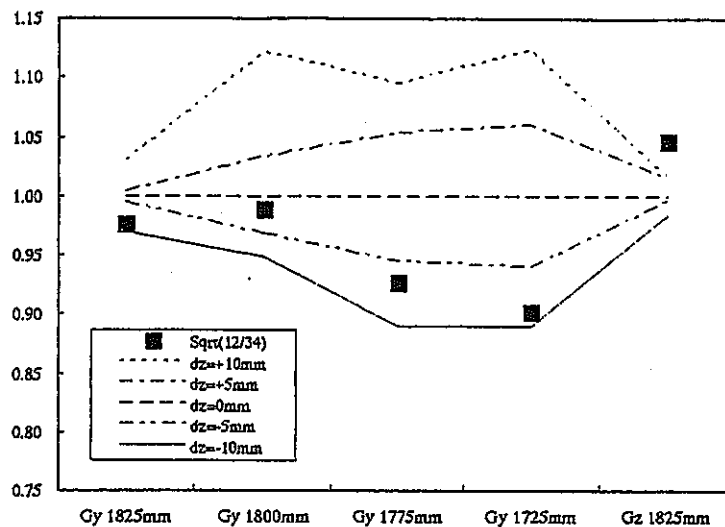
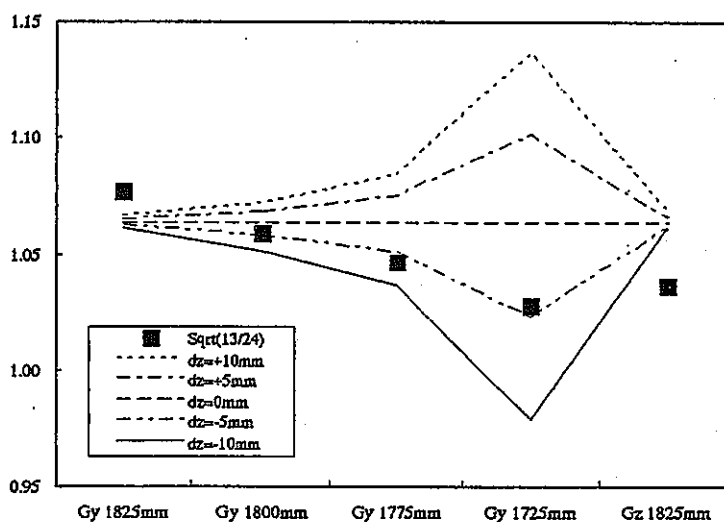


図 6-3 弥生炉実験孔の中性子スペクトル
計算値 (MVP) と測定値 (放射化箔) の比較

$$\sqrt{\frac{\langle \sigma_{Np}^{z+dz_1} \rangle}{\langle \sigma_{Np}^{z+dz_2} \rangle}} \phi^{z+dz_1}$$



$$\frac{\sqrt{\langle \sigma_{Np}^{z+dz_1} \rangle} \varepsilon_A}{\sqrt{\langle \sigma_{Np}^{z+dz_2} \rangle} \varepsilon_B}$$



$$\Delta \left(\frac{\langle \sigma_{Np} \rangle}{\langle \sigma_U \rangle} \right)$$

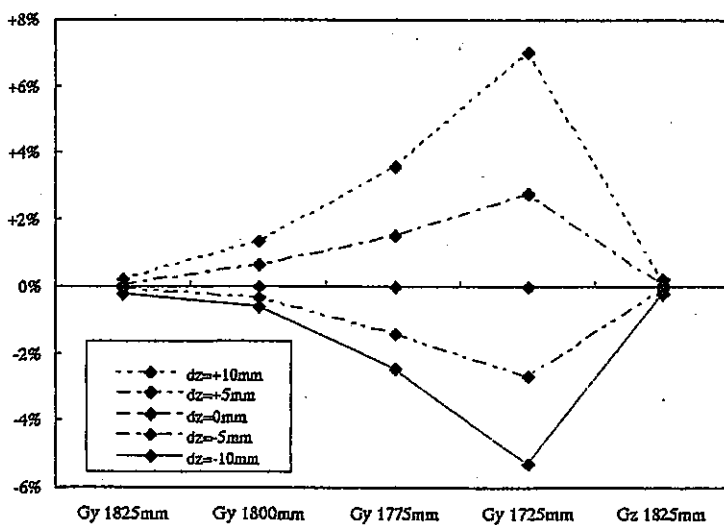


図 6-4 位置決め誤差に関する考察

7. おわりに

マイナーアクチナイドの核変換研究の一環として、弥生炉を用いた ^{237}Np 核分裂反応断面積の積分測定を行った。核分裂検出器としては ^{237}Np 試料と標準試料である ^{235}U を背中合わせにセットした直径 16 mm の円筒型の小型バック・ツー・バック (BTB) 検出器を用いた。BTB 検出器を弥生炉の炉心部を貫通するグローリーホールならびに側部ブランケットを貫通するグレイジングホールに挿入し、 ^{237}Np と ^{235}U の核分裂断面積比を測定した。測定値を評価済み核データライブラリ (JENDL-3.2, ENDF/B-VI, JEF-2.2, JENDL-2) による計算値と比較した結果、炉心中心の測定位置について次の C/E 値を得た：

$^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ 核分裂断面積比の C/E 値 (弥生炉中心)

1.35 ± 2.6%	(JENDL-3.2)
1.33 ± 2.6%	(ENDF/B-VI)
1.32 ± 2.6%	(JEF-2.2)
1.32 ± 2.6%	(JENDL-2)

測定値に対し計算値は約 30%の過大評価となった。なお、C/E 値には軸方向の測定位置依存性が見られている。この 30%もの過大評価が核データの誤差に起因するとは考えにくい。本測定には波高スペクトルのカットオフに伴う不確かさなど測定精度の面で課題がある。波高スペクトルのアンフォールディング等により系統的な誤差を取り除くことができれば、 ^{237}Np や中性子スペクトル場を形成する ^{235}U , ^{238}U の核データ検証に、本測定結果を活用できると考えられる。

謝辞

本研究は東京大学と動力炉・核燃料開発事業団（現 サイクル機構）との共同研究として実施した。弥生炉での実験においては放射線管理部の寺門技術官を始めとする多くの方々のご指導・ご協力をいただいた。ここに感謝の言葉を申し上げる。

参考文献

- [1] 野村 紀男, 他：“バック・ツー・バック (BTB) 核分裂検出器を用いた TRU 核種の断面積の測定 検出器の開発及び特性試験”, PNC TN9410 94-087, (1994).
- [2] 高嶋 秀樹, 他：“BTB 検出器の開発及び特性試験 (Part II)”, PNC TN9410 95-357, (1995).
- [3] 浜田 達二：“放射能標準体・標準線源とその使用法”, (社)日本アイソトープ協会, p.47~55 (1981).
- [4] ニコラス ツルファニディス (阪井 英次 訳)：“放射線計測の理論と演習”, 現代工学社, (1986).
- [5] 大川内 靖, 大木 繁夫, 他：“弥生炉を用いた ^{241}Am , ^{243}Am 核分裂断面積の測定”, JNC TY9400 2004-004, (2004).
- [6] 森 貴正, 中川 正幸：“MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード”, JAERI-Data/Code 94-007, (1994).
- [7] P. W. Frank：“Recoil Range of Fission Fragments”, Bettis Technical Review, WAPD-BT-30, (1964).
- [8] T. Nakagawa, *et al.*：“Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32**, 1259 (1995).
- [9] Cross Section Evaluation Working Group：“ENDF/B-VI Summary Documentation”, BNL-NCS-17541 (ENDF-201), (1991).
- [10] OECD/NEA (Ed.)：“The JEF-2.2 Nuclear Data Library”, JEFF Report 17, (2000).
- [11] T. Nakagawa：“Summary of JENDL-2 General Purpose File”, NEANDC(J)99/AU, JAERI-M 84-103, (1984).
- [12] 五藤 博 編：“国内照射用中性子場データ集”, JAERI-memo 9613, (1981).