

# 弥生炉の標準照射場を用いた H A F M等の校正照射

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

平成 8 年 3 月

東京大学 工学部

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 弥生炉の標準照射場を用いたHAFM等の校正照射

井口 哲夫

## 要 旨

高速炉の新型中性子ドシメトリ手法であるヘリウム蓄積型中性子フルエンスモニター (HAFM) の測定精度評価、及びタグガスの放射化分析による高速炉の燃料破損検出法への適用性評価を目的として、東京大学工学部附属原子力工学研究施設の高速中性子源炉「弥生」の標準照射場を用い、これらの試料の校正照射を行った。

HAFM試料の照射では、炉心中央 (Gy孔) に、93%濃縮ボロン1mg入りバナジウムカプセル、また高速中性子柱実験孔 (FC孔) に、同仕様の濃縮ボロンカプセル、天然ボロン10mg入りカプセル、天然ボロンチップ、96%濃縮 $^6\text{LiF}$ 熱蛍光線量計素子が装荷された。これらの照射場の中性子束及び中性子スペクトルは、Al, Fe, Co, Ni, Cu, Ti, In, Au,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ 等を用いた放射化箔法でモニターされ、平成8年3月末現在、照射された0.1MeV以上の中性子フルエンスは、Gy孔で $\sim 1.0 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$  (積算炉出力 $\sim 78\text{kWh}$ 相当)、またFC孔で $\sim 3.4 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  (積算炉出力 $\sim 160\text{kWh}$ 相当) に達している。

一方、ステンレス鋼製カプセルに封入されたKr, Xeベースのタグガス試料 (単体型と小径型の2種類) について、Gy孔で、積算炉出力 $\sim 9\text{kWh}$ 及び $\sim 7\text{kWh}$ の2回の標準照射を行い、照射直後から各試料のガンマ線スペクトル測定を行った。タグガスの封入されていないダミーカプセルの測定スペクトルと比較した結果、タグガスの放射化で生成された $^{79}\text{Kr}$ や $^{125}\text{Xe}$ などの放射性核種からのガンマ線光電ピークを明確に同定でき、燃焼計算の精度評価に有用なベンチマーク実験データが得られた。

---

本報告書は、東京大学工学部が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：070D0169

事業団担当部課室及び担当者：大洗工学センター実験炉部技術課  
青山 卓史

## Irradiation Test of HAFM and Tag Gas Samples at the Standard Neutron Field of "YAYOI"

Tetsuo IGUCHI\*

### ABSTRACT

To check the accuracy of helium accumulation neutron fluence monitoring (HAFM) technique and the applicability of tag gas activation analysis to fast reactor failed fuel detection, these samples were irradiated at the standard neutron field of the fast neutron source reactor "YAYOI" (Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo).

The HAFM samples of 93% enriched B powder of 1 mg contained in a V capsule were set up in the reactor core center (Glory hole :Gy) and another samples including V encapsulated natural B powder of 10 mg, natural B chips and 96% enriched  $^6\text{LiF}$  thermoluminescence dosimeters were in the leakage neutron field from the reactor core (Fast column :FC). These neutron fields were monitored by the activation foils consisting of Al, Fe, Co, Ni, Cu, Ti, In, Au,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  etc., which were used to derive the neutron flux and spectrum. At the end of March in 1996, the irradiated neutron fluence in the energy more than 0.1MeV reached up to  $\sim 1.1 \times 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup> at Gy and  $\sim 5.4 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> at FC, respectively.

Two kinds of tag gas samples, which are the mixed gases of isotopically adjusted Xe and Kr contained in stainless steel (SUS) capsules, were irradiated twice at Gy; one is up to  $\sim 9\text{kWh}$  and the other  $\sim 7\text{kWh}$ , and after the irradiation,  $\gamma$ -ray spectra were measured for each sample. Through comparison with the  $\gamma$ -ray spectrum from dummy capsule of no tag gas, the  $\gamma$ -ray peaks of  $^{79}\text{Kr}$ ,  $^{125}\text{Xe}$  etc., which would be produced from tag gas activation, were able to be clearly identified.

---

Work performed by University of Tokyo under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC  
Takafumi AOYAMA

\* Assoc. Professor, Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo

# 目 次

1. 緒 言	1
2. 照射実験	
2.1 高速中性子源炉「弥生」の照射場特性	3
2.2 HAFM試料の照射	9
2.3 タグガスの照射	10
2.4 放射化箔の照射	10
3. 実験結果	
3.1 放射化率の測定	22
3.2 中性子スペクトルの評価	26
3.3 タグガス放射化核種の同定	40
4. 結 言	47
謝 辞	48
参考文献	49

## 1. 諸 言

動力炉・核燃料開発事業団では、高速実験炉「常陽」において原子炉ドシメトリー手法の高度化に関する研究の一環として、He蓄積型中性子フルエンスモニター(HAFM)の系統的開発・整備が行われている。通常の原子炉ドシメトリーで用いられる放射化箔法では、放射化反応及び核分裂反応で生成した核種の放出する $\gamma$ 線を計測することによって照射期間中の中性子フルエンスや積算線量等を求めるのに対して、このHAFM法では、 $^{10}\text{B}$ 等の $(n, \alpha)$ 反応によって生じるHe原子数を質量分析計で測定することによって評価するものであり、研究炉及び臨界集合体の中性子量モニターとして、米国ロックウェル社等が既に実用化している方法である。

「常陽」では、現場測定に適した本測定装置の設計・製作を終了し、HAFM法の動作原理の確認及び測定精度評価を実施している段階にある。測定装置では、照射済み試料を電気炉に装着して電気炉内を真空にし、加熱して試料を溶融させ、試料中からHe原子を放出させて質量分析計でHe数を計測するが、測定精度評価上重要となるのは、質量分析計の校正と、電気炉内で溶融した試料からのHe放出率である。前者は、He濃度が既知の標準ガスを用いて校正曲線を求めており、ほぼ特性が把握された。また、後者の溶融試料からのHe放出率を実験的に評価するため、同種の装置を有する九州大学グループとの共同研究により、タンデム型加速器で既知量のHe数を撃ち込んだ標準試料を作成し、この標準試料を溶融させた時の放出He数測定の相互比較が実施され、良好な一致が確認された。

そこで、次段階の作業として、測定装置の総合的な精度評価を行うため、中性子束及びスペクトルが既知であるような標準照射場で照射した試料を用いた測定を実施することが望まれている。

一方、動力炉・核燃料開発事業団における中性子ドシメトリー技術の応用として、タグガスを用いた破損燃料等の同定に $\gamma$ 線スペクトロメトリーが適用されている。タグガス法は、燃料要素内にKr, Xeの安

定同位体の比を調整したガス（これをタグガスという）を封入しておき、万一燃料被覆管が破損した場合に、燃料要素から放出され、冷却材を経て一次カバーガス中に移行したガスを弁別定量して、破損した燃料を同定する方法である。この同定手段には、質量分析計による同位体の重量比を測定する方法と、放射化生成核種（例えば、Xeの同位体については、 $^{125}\text{Xe}$ ,  $^{127}\text{Xe}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{131\text{m}}\text{Xe}$ ）の $\gamma$ 線強度を測定して、得られた $\gamma$ 線スペクトル解析により同位体の放射能比を測定する方法がある。前者は、既に高速原型炉「もんじゅ」の破損燃料位置決め法として実用化されており、後者については、「常陽」で実施している炉心材料の炉内クリープ強度測定試験におけるクリープ破断時刻の検知に適用する計画がある。

ところで、これらタグガスに用いる安定同位体の中には、照射中に中性子捕獲反応によって転換するものや燃料の核分裂によって新たに生成するものがあるため、製造時の組成から変化し、燃焼度が高くなるにつれてタグガス組成の変化も大きくなる。従って、破損燃料あるいは破断試料を高い信頼度で同定するためには、精度の良い放射化断面積を用いてタグガス組成の燃焼による組成変化を予測しなければならないが、現在までに「常陽」で照射したタグガスの照射後試験データからは、予測したタグガスの組成が実測値と合わない同位体もあり、標準中性子場で校正照射したタグガスの放射化量の測定と解析により、燃焼計算に用いられる核データ（捕獲断面積、核分裂収率、崩壊データ等）を検証する必要性が生じている。

以上のような状況に対応して、本研究では、HAFMの測定精度評価、及びタグガスの放射化分析による高速炉燃料破損検出法への適用性、特にタグガスの燃焼による組成変化の予測精度評価を目的として、東京大学工学部附属原子力工学研究施設の高速中性子源炉「弥生」の標準照射場を用い、これらの試料の校正照射を行った。本報告書は、校正照射実験の概要、及び放射化法を用いた中性子ドシメトリーによる照射場特性の実験的評価結果についてまとめたものである。

## 2. 照射実験

### 2.1 高速中性子源炉「弥生」の照射場特性

東京大学工学部付属原子力工学研究施設の「弥生」炉は、日本で最初の研究用高速炉であり、炉心が重コンクリート遮蔽、鉛パイル、裸など6ヶ所の運転位置に水平移動可能な世界で唯一の汎用高速中性子源炉である。炉心部は93%濃縮金属ウラン、劣化ウランブランケット、鉛反射体等の重元素のみで構成され、空冷であることから、二次 $\gamma$ 線や熱中性子の割合が少なく、純粋な高速中性子が得られる。また、炉心近傍に多く(50以上)の実験孔やコラムを有しており、そこに各種の測定器や実験装置を近接・配置して、精密な照射実験やその場測定などを容易に行うことができる[1]。

特に、「弥生」の炉心燃料を貫通するグローリー孔をはじめとする高速及び中速中性子柱などの照射場は、核分裂中性子源から派生する典型的な中性子スペクトル場として、その特性が各種測定法を用いた実験及び理論的考察の両面から評価され、中性子検出器の校正や材料照射などの際の標準となる中性子場として確立されている。実際、国内の中性子計測法の相互比較研究に供されたり、IAEAに標準中性子場として登録され、放射化断面積、核分裂崩壊熱などの核データの積分的チェック、高速中性子遮蔽ベンチマーク実験データの提供などにおいて、国際的にも広く認められている[2], [3], [4]。

図2-1及び図2-2に、「弥生」原子炉室の概略と炉心部構成を示す。また、表2-1に「弥生」炉の主要な仕様諸元をまとめる。今回の校正照射では、グローリー(Gy)孔中央部と高速中性子柱(FC)内の漏洩中性子場が用いられた。図2-3及び図2-4に、過去に測定・評価された各々の中性子スペクトルの結果を示す。



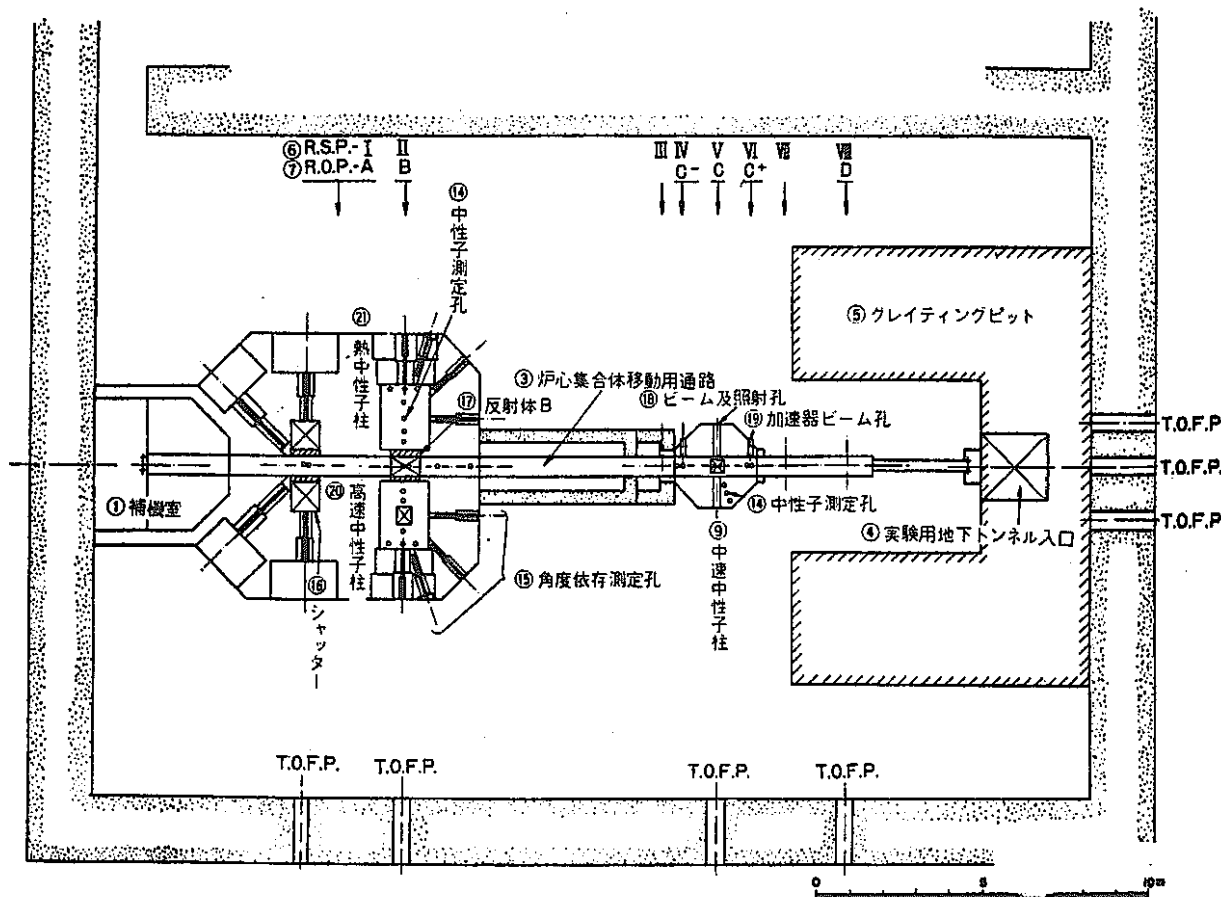
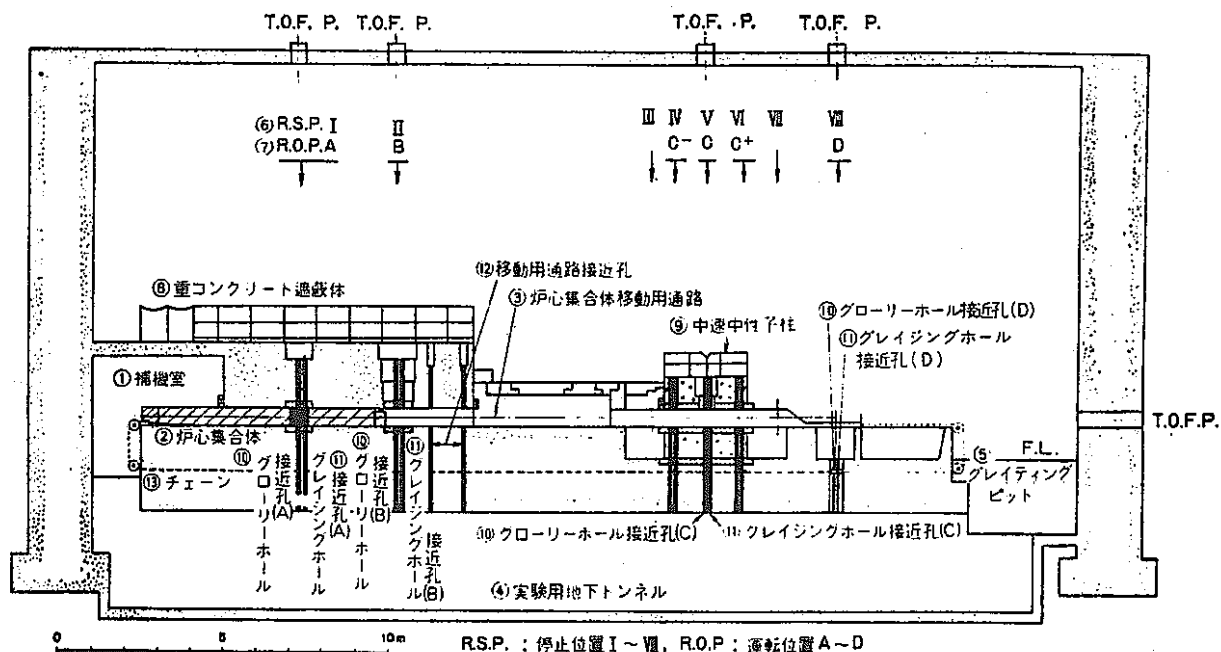
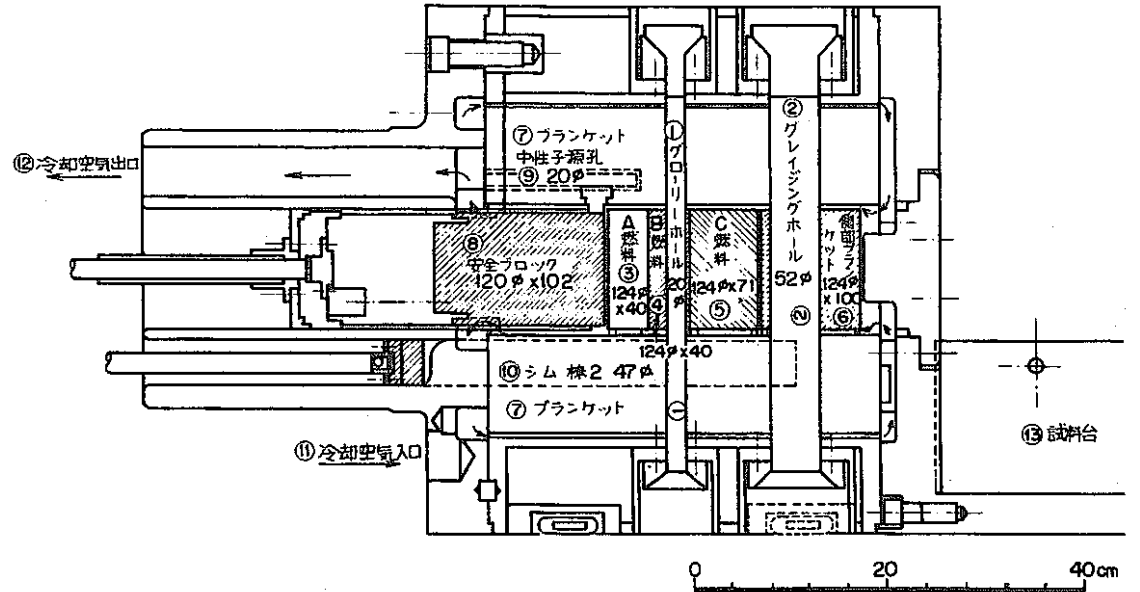
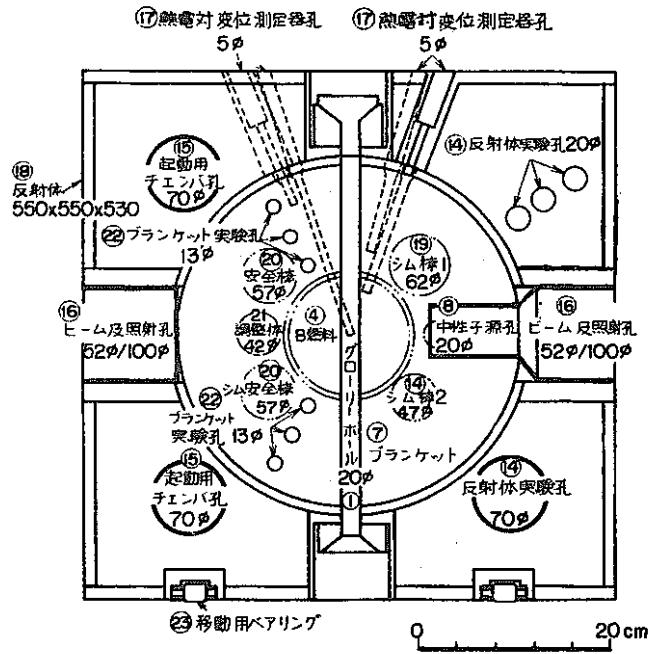
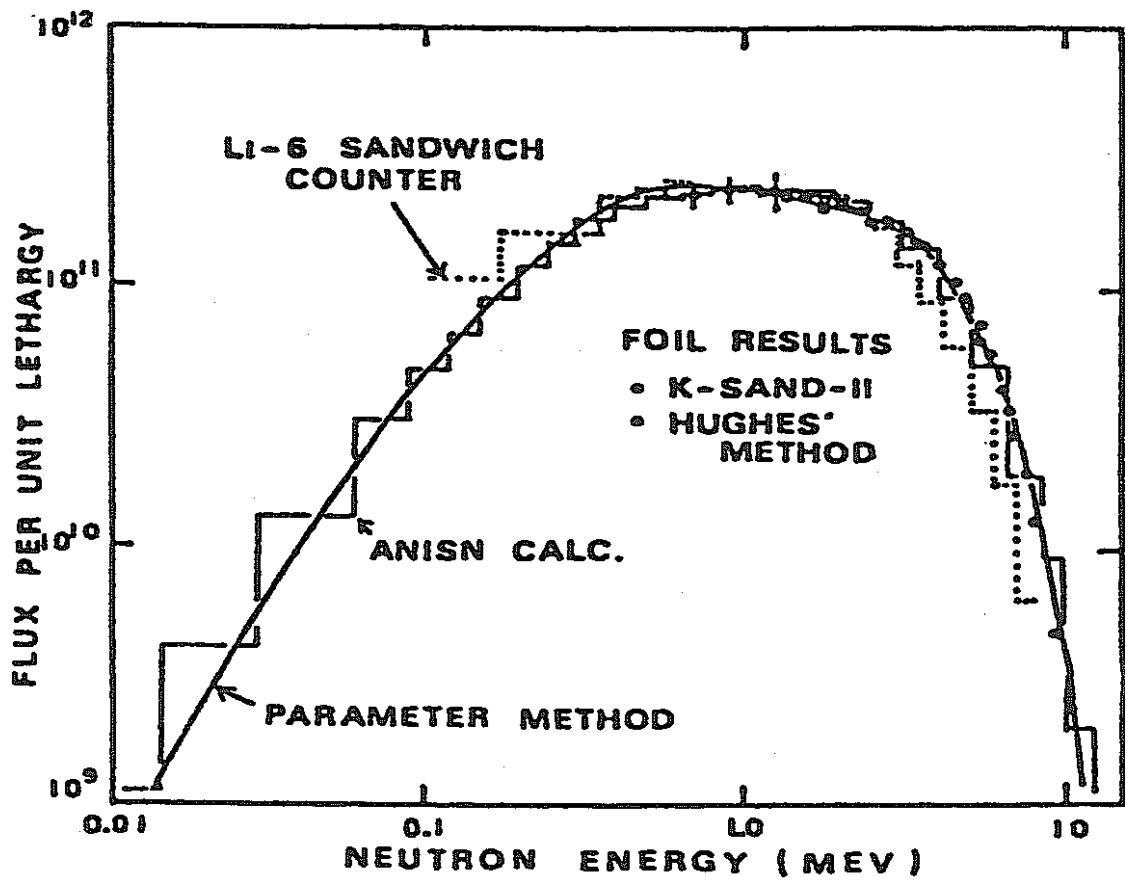


図2-1 「弥生」原子炉室の概略

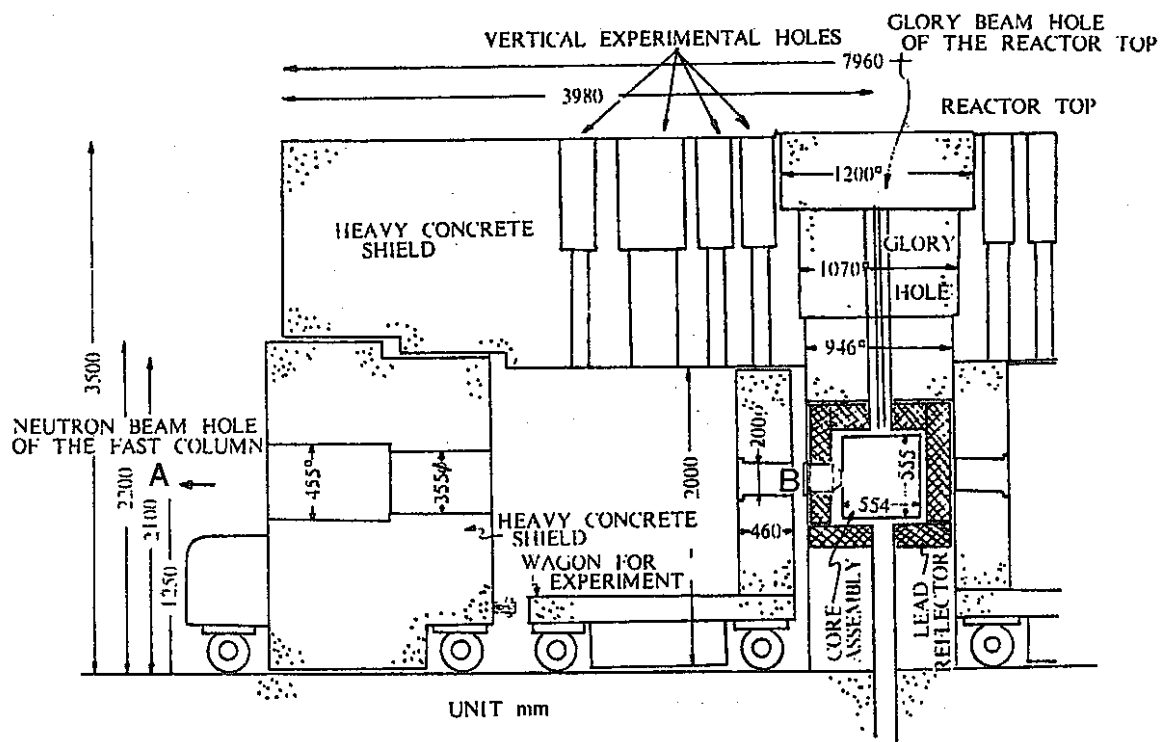
図2-2 「弥生」炉心部の構成



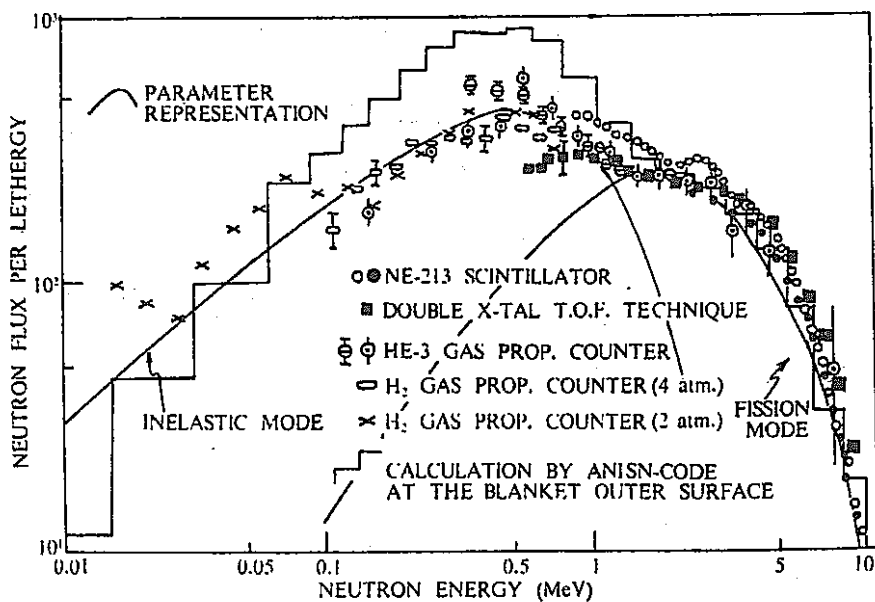


弥生炉心中央の高速中性子スペクトル標準場

図2-3 「弥生」炉グローリー孔（炉心中心部）の中性子スペクトル



Vertical Cross Section of the B-Operational Station of YAYOI Reactor (Glory and Fast Column Neutron Beam Holes).



Fast-Column Beam Neutron Spectrum in YAYOI on the 1 Watt Operation.

図2-4 高速中性子柱から漏洩する中性子スペクトル (50φ孔出口~1mのA点)

表2-1 高速中性子源炉「弥生」の主要諸元

Principal Design Parameters of YAYOI

1. Thermal output (max.)	2kw
2. Neutron flux (max.)	$0.8 \times 10^{12}$ n/cm <sup>2</sup> ·sec/2kW at the center of Gy hole
3. Core	
Material	Pure metallic uranium
Form and arrangement	Horizontal cylinder made up of three discs, one of which made up of thin discs
Dimension	124 mm dia. 155 mm high (summation of three discs)
Cladding	Stainless steel 0.7 mm thick
4. Blanket	
Material	Depleted uranium
Shape	Hollow cylinder
Cladding	Stainless steel { 0.7 mm thick (inside) 5 mm thick (outside)
Dimension	Approx. 100 mm thick
5. Reflector	
Material	Lead
Shape	Hollow cube
Cladding	Stainless steel approx. 10 mm thick
Dimension	Approx. 55 cm × 55 cm × 53 cm
6. Cooling	
Coolant channel	Ring cylinder (Surfaces of core and blanket fuels through plenums)
Channel width	Approx. 3 mm
Flow rate	3.6 Nm <sup>3</sup> /min
7. Control rods	
Material	Depleted uranium
Shape	Cylindrical
Location	Inside of blanket
Number	1 Safety block, 2 Safety rods, 2 Shim rods, 1 Regulating rod
Dimension	
Safety block	Approx. 124 mm dia. × 100 mm length
Safety rods	Approx. 55 mm dia. × 233 mm length
Shim rods	Approx. 66 mm dia. × 233 mm length
Regulating rod	Approx. 40 mm dia. × 233 mm length
8. Reactivity worth	
Safety block	2% Δk/k
Safety rods	0.83% Δk/k, and 0.85% Δk/k
Shim rods	0.97% Δk/k, and 0.67% Δk/k
Regulating rod	0.63% Δk/k
9. Other parameters	
Temperature coefficients	
Thermal expansion of core	Approx. $-1.25 \times 10^{-5}$ Δk/k/°c
Doppler	Approx. $-2.0 \times 10^{-8}$ Δk/k/°c (Calculation)
Prompt neutron life time	Approx. $2.9 \times 10^{-8}$ sec
Delayed neutron fraction	Approx. 0.725% (Calculation)
Excess reactivity	Approx. 1.1% Δk/k (in lead intermediate pile)

## 2.2 HAFM試料の照射

今回の校正照射に用いたHAFM試料は、動燃側より支給のバナジウム(V)カプセルにホウ素(B)粉末を封入したものであり、主な仕様は、表2.2の通りである。

表 2.2 校正照射に用いたHAFM試料の仕様概要

充填物	純度 [wt%]	同位体組成 [atom%]	重量 [mg]	Vカプセル形状 [mm]
濃縮ホウ素	99.9	B-10 93.04 B-11 6.96	~1.0	1.3φ×6.4 L
天然ホウ素	99.9	B-10 19.9 B-11 80.1	~10	1.3φ×12.7 L

HAFM測定装置の測定下限である $1 \times 10^{13}$ 個以上のHe原子数を生成できる中性子フルエンスの予備的な計算結果によると、弥生炉Gy孔中心の中性子束換算で、濃縮B試料(1mg)では~200kWh相当、また天然B試料(10mg)では~100kWh相当の積算照射が必要と見積もられた。

弥生炉の年間運転計画で予定されている総積算出力は、280kWh（このうち75kWhは業務運転用）であるので、他の照射実験との相乗りにより、積算中性子束を稼がなければならない。そこで、継続照射中に照射条件の変更ができるだけ生じないように、Gy孔では、6個の濃縮B試料を、同様の継続照射を行う鋼材モデル(Fe-C-Cu-Ni)合金、Auなどの金属薄膜試料の照射実験に合わせて照射することとした。全HAFM試料は、炉頂から20mmφのGy孔に、中空Alガイドチューブ（外径18mm、内径16mm）を挿入し、炉心中心±1cm以内に収まるよう装荷された。一方、中性子束がGy孔に比べて1桁以上低いものの、中性子スペクトルが柔らかく（即ち、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応率が上がる）、占有的に長期照射が可能であるFC内でも、相補的にHAFM試料の照射を行った。ここでは、図2-5に示されるように、約500mm角×

2mmtのAl板上に、上記HAFM試料とともに、天然Bチップ及び96%濃縮の $^6\text{LiF}$ 熱蛍光線量計素子がAlテープで固定され、図2-4におけるB点に取り付けられた。B点での漏洩中性子ビーム孔の直径は200mmであり、中央部 $\sim 100\text{mm}$   $\phi$ 内にセットされた試料は、ほぼ一様に照射されると考えられる。

因みに、平成7年9月中旬より、本HAFM試料の校正照射に充てられた積算炉出力は、平成8年3月末までで、Gy孔 $\sim 78\text{kWh}$ 、FC $\sim 160\text{kWh}$ となっており、現在も継続照射中である。

### 2.3 タグガスの照射

今回の校正照射に用いたタグガス試料は、動燃側より支給の同位体調整されたXe+Kr及びXe+Kr+He混合ガスの2種類であり、図2-6に示されるような各々 $4.0\text{mm}$   $\phi$   $\times$   $\sim 50\text{mmL}$  (小径型、常陽サイズ)、あるいは $5.3\text{mm}$   $\phi$   $\times$   $\sim 50\text{mmL}$  (単体型、もんじゅサイズ)のステンレス鋼製カプセルに封入されたものである。主な仕様諸元を表2-3 $\sim$ 2-5にまとめる。

校正照射実験は、Gy孔にて、平成7年11月10日(積算炉出力 $8.8\text{kWh}$ )及び平成8年1月18日(積算炉出力 $7.0\text{kWh}$ )の2回行われた。それぞれの照射試料配置を、図2-7、2-8に示す。照射後、Ge半導体検出器を用いて、タグガス試料の $\gamma$ 線スペクトロメトリーが行われ、生成放射性核種の同定が試みられた。

### 2.4 放射化箔の照射

以上の校正照射における中性子場特性を実験的に評価するため、多重放射化箔を用いた中性子ドシメトリーが行われた。放射化箔の照射実験は、下記の3回である。

#### I. 平成7年9月12日 $\sim$ 9月22日

- ・使用した放射化箔と典型的な形状

Fe( $40\phi \times 1.0\text{t}$  or  $35 \times 35 \times 1.0\text{t}$ )、Ni( $40\phi \times 0.2\text{t}$  or  $30\phi \times 0.2\text{t}$ )

Co( $30\phi \times 0.2t$ )、Cu( $50 \times 50 \times 1.0t$ )、Au( $30\phi \times 0.2t$ )

$^{237}\text{Np}$ ( $\text{NpO}_2 \sim 9\text{mg}$ 粉末、 $1.5\phi \times 8.0L$  Vカプセル入、動燃支給)

- ・ 設置場所及び照射配置：FC内B点近傍、図2-5参照
- ・ 照射パターン：積算炉出力 60kWh、図2-9参照

## II. 平成7年11月10日

- ・ 使用した放射化箔と典型的な形状

Al( $10\phi \times 0.1t$ )、Ti( $10\phi \times 0.1t$ )、Mn/Cu合金( $10\phi \times 0.25t$ )、

Fe( $10\phi \times 0.05t$ )、Co( $10 \times 10 \times 0.1t$ )、Ni( $10\phi \times 0.05t$ )、

Cu( $10 \times 10 \times 0.1t$ )、In( $10\phi \times 0.1t$ )、Au( $10\phi \times 0.02t$ )

$^{237}\text{Np}$ ( $\text{NpO}_2 \sim 9\text{mg}$ 粉末、 $1.5\phi \times 8.0L$  Vカプセル入、動燃支給)

$^{235}\text{U}$  (99.9%濃縮 $\text{UO}_2 \sim 1\text{mg}$ 粉末、 $1.5\phi \times 8.0L$  Vカプセル入、  
動燃支給)

- ・ 設置場所及び照射配置：Gy孔中心及び7.5cm上部、図2-7参照
- ・ 照射パターン：積算炉出力 8.8kWh、図2-10参照

## III. 平成8年1月18日

- ・ 使用した放射化箔と典型的な形状

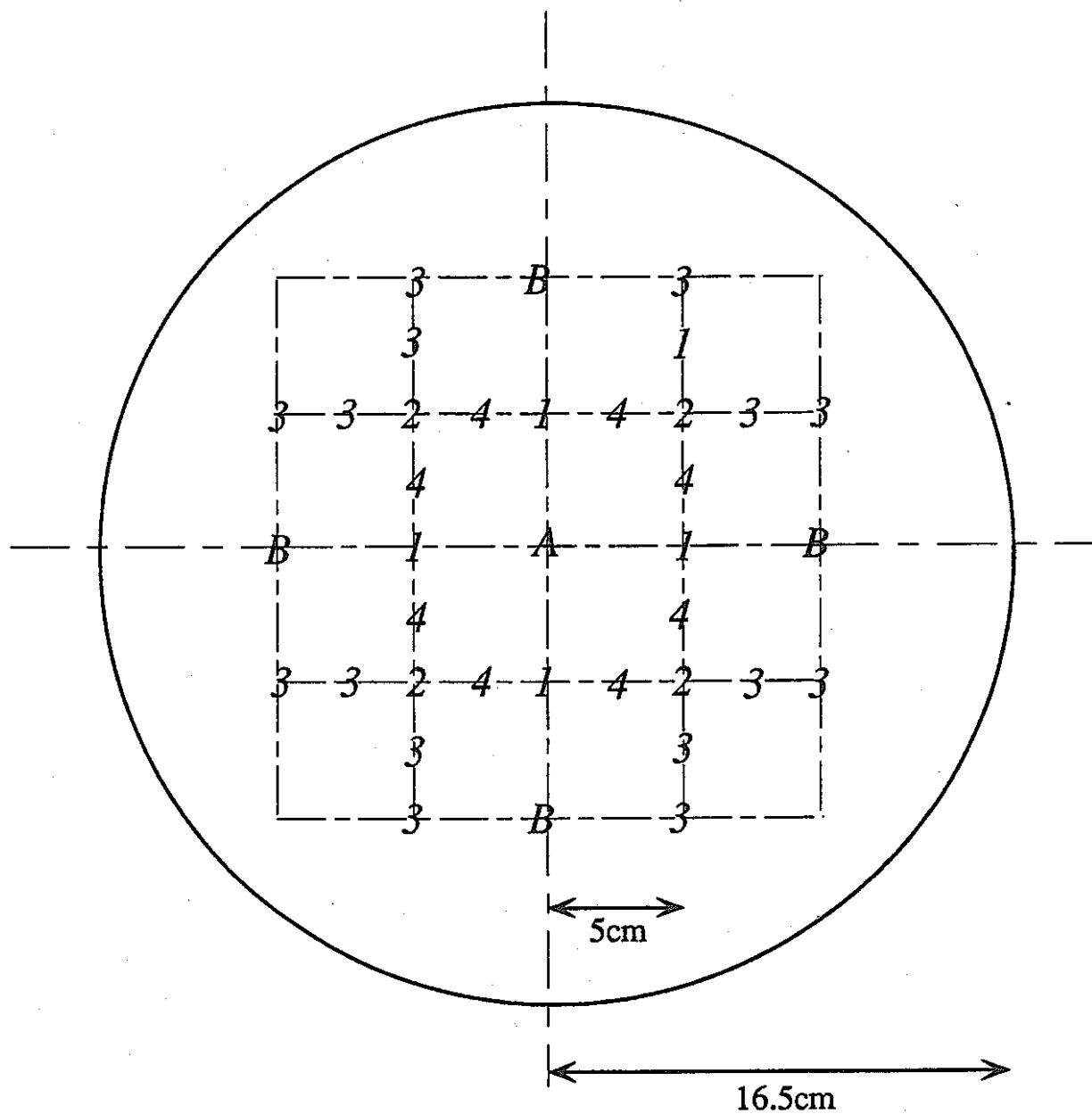
Fe( $10\phi \times 0.05t$ )、Ni( $10\phi \times 0.05t$ )、In( $10\phi \times 0.1t$ )、

Au( $10\phi \times 0.02t$ )、0.5t Cd被覆付きAu( $5 \times 7 \times 0.02t$ )

- ・ 設置場所及び照射配置：Gy孔中心及び±7.5cm上下部、図2-8参照
- ・ 照射パターン：積算炉出力 7.0kWh、図2-11参照

これらの放射化箔は、照射終了後、高純度同軸型Ge半導体検出器(EG & G ORTEC GMX-50220-P)を用いて、 $\gamma$ 線スペクトロメトリーが行われた。検出対象とした放射化反応が、表2-6に一覧としてまとめられている。ただし、冷却時間の設定や計測システムが利用可能な時間割振りの関係で、十分な計数統計が得られなかった反応もある。



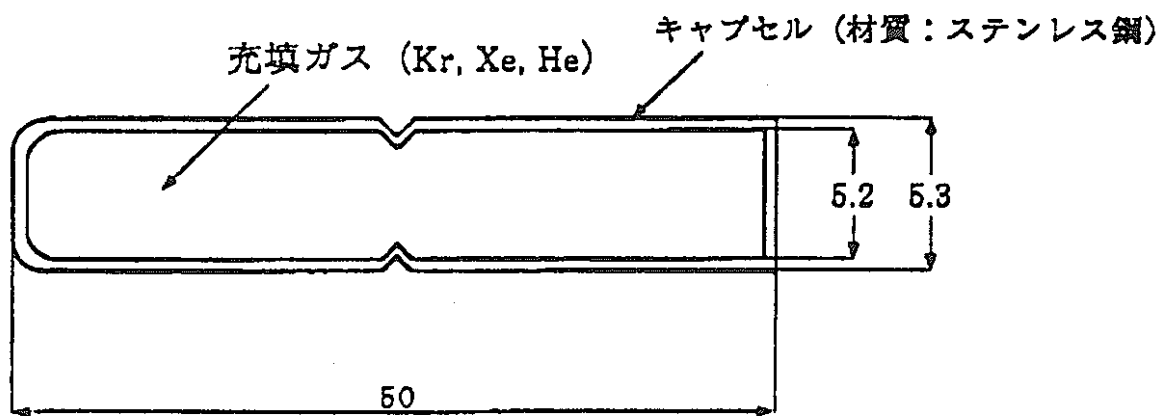


HAFM試料

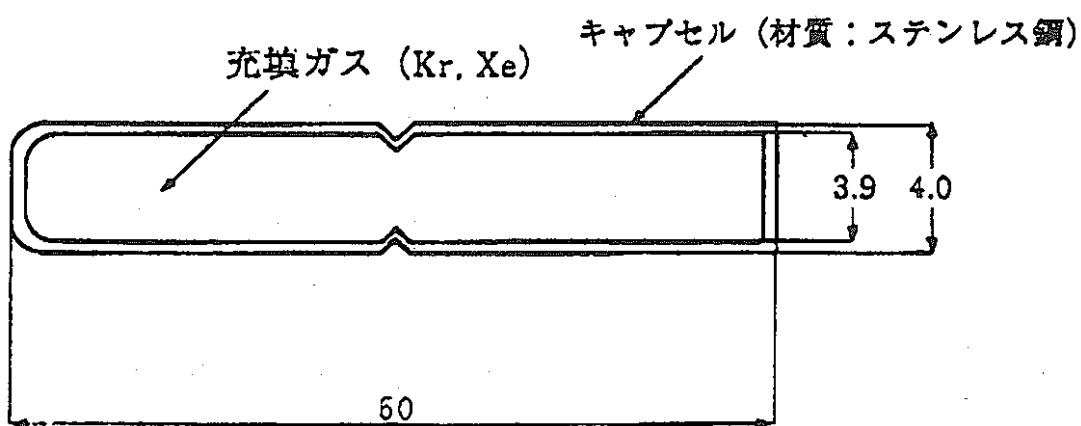
放射化箱

- |   |   |
|---|---|
| <p>1 天然ホウ素10mg</p> <p>2 濃縮ホウ素1mg</p> <p>3 天然ホウ素チップ</p> <p>4 フッ化リチウム(Li-6)</p> | <p>A Fe, Ni, Co, Au, Np-237 のセット</p> <p>B Fe, Ni, Co のセット</p> |
|---|---|

図2-5 FC内照射実験 I ('95 9/12~9/22)における試料の配置



キャプセル単体型



キャプセル単体小径型

図2-6 タグガスキャプセルの主要形状

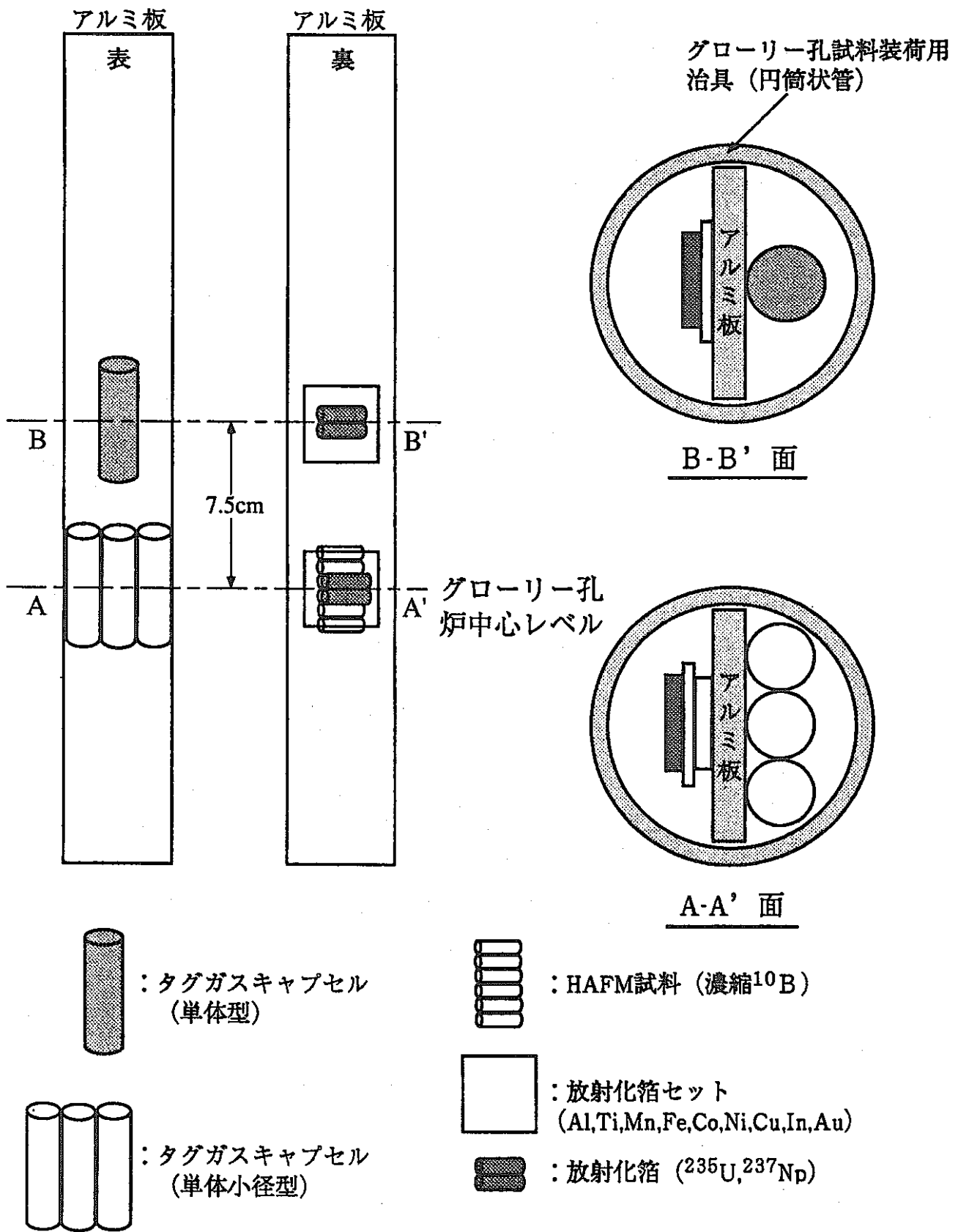
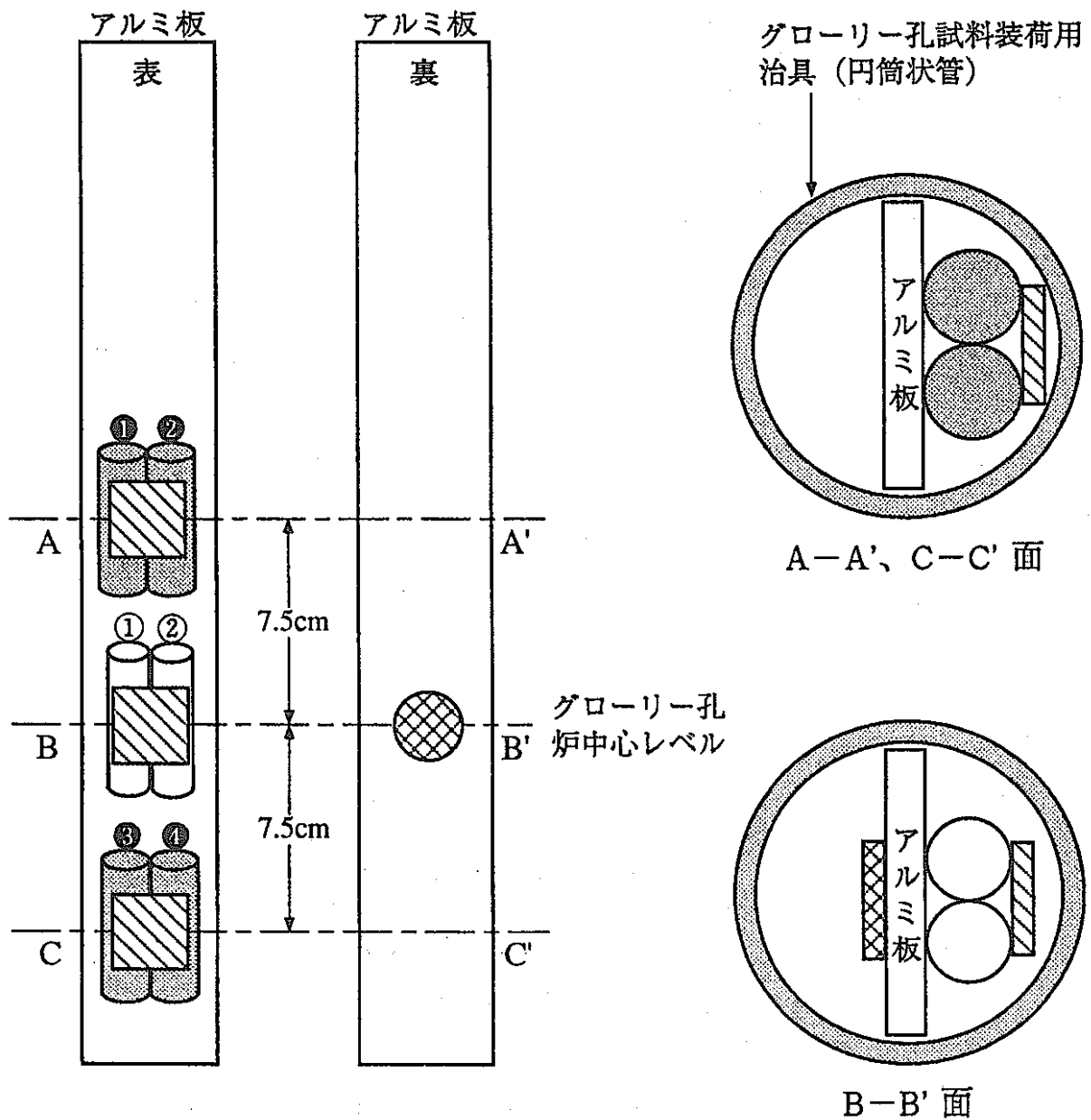


図2-7 Gy孔照射実験 II ('95 11/10)における試料配置



：タグガスキャプセル（単体型）



- ① S62Y2M0001
- ② 860604
- ③ 860506
- ④ 860206



：放射化箔セット  
(Fe, Ni, In, Au)



：タグガスキャプセル（単体小径型）

- ① J10
- ② J12



：放射化箔  
(Cdカバー付きAu)

図2-8 Gy孔照射実験 III ('96 1/18)における試料配置

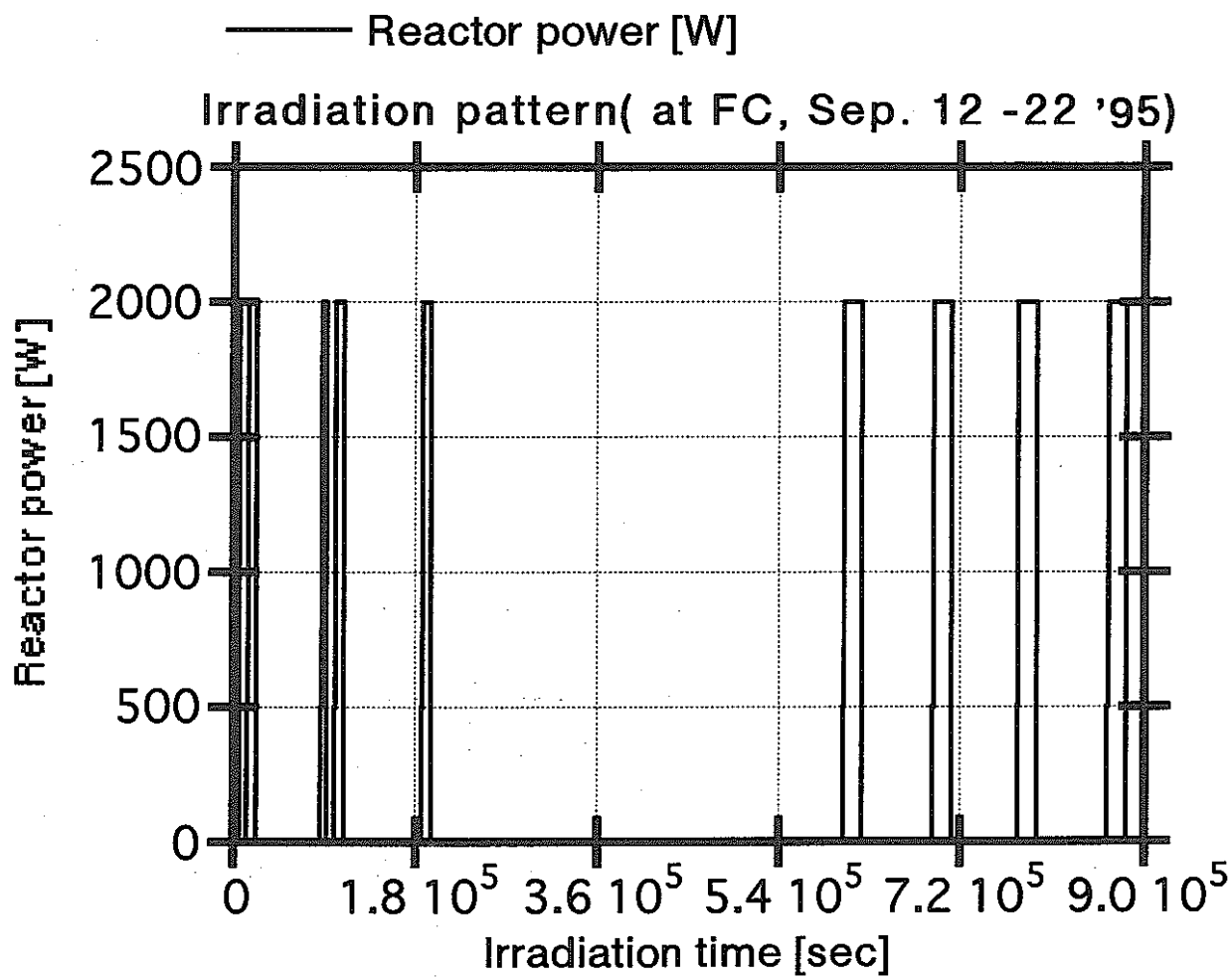


図2-9 FC内照射実験 I における原子炉運転（出力）履歴

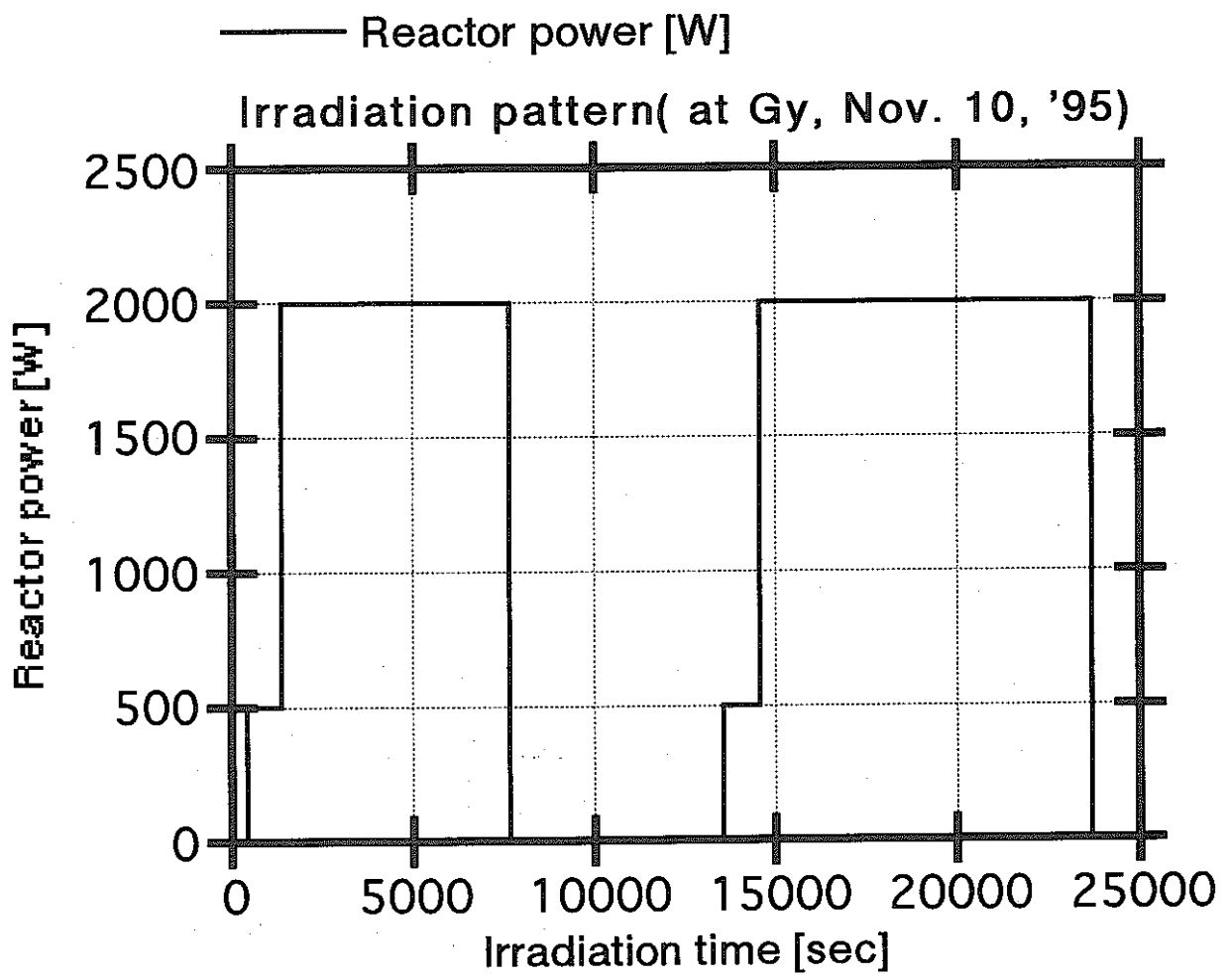


図2-10 Gy孔照射実験 II における原子炉運転（出力）履歴

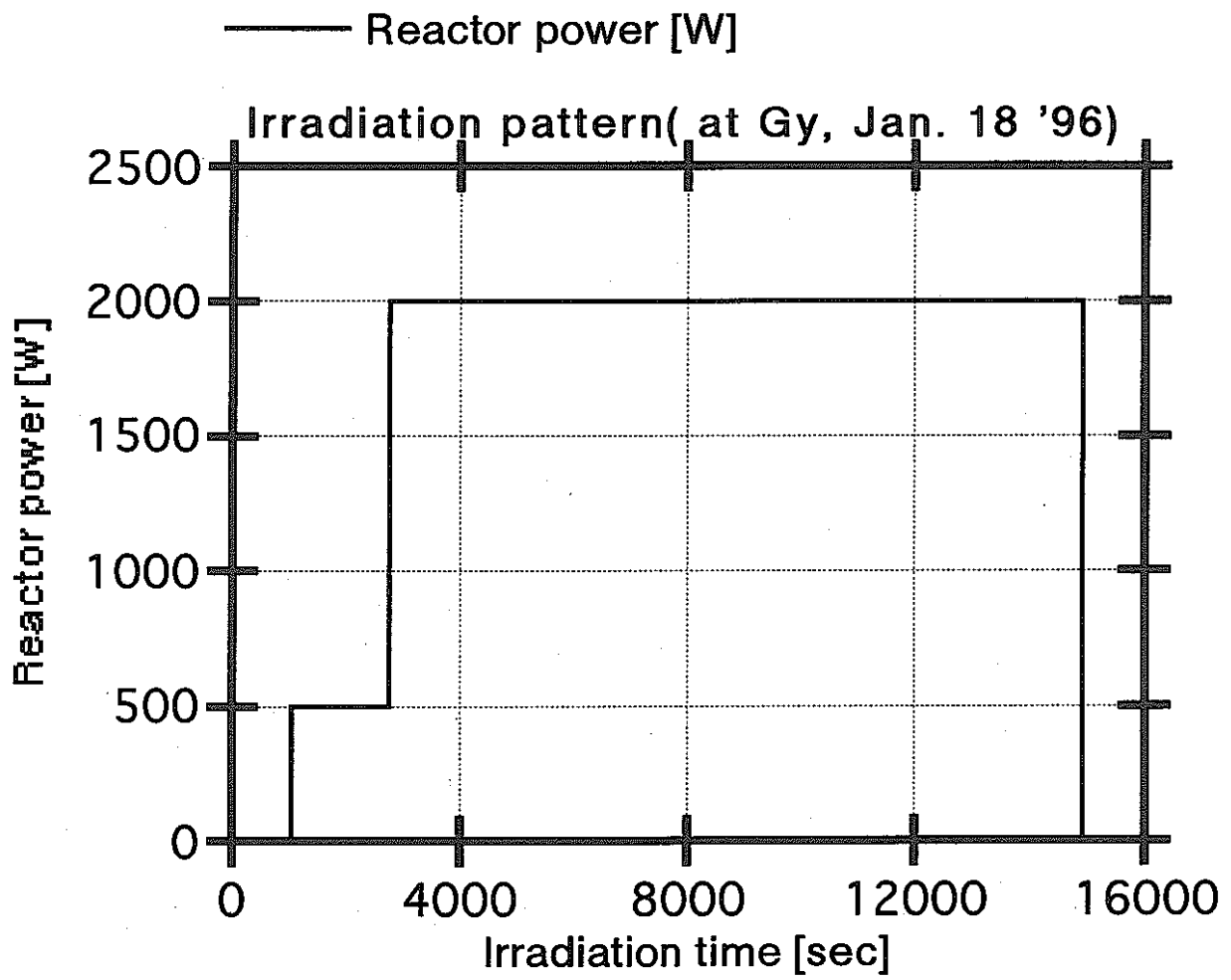


図2-11 Gy孔照射実験 III における原子炉運転（出力）履歴

表2-3 校正照射に用いられたタグガスカプセルの仕様

仕 様	タグガスカプセルの型式	
	カプセル単体型	カプセル 単体小径型
個 数	1 0	4
カプセル外径 (mm)	5. 3	4. 0
カプセル長さ (mm)	5 0	5 0
カプセル内容積 (cc)	0. 6 4	0. 3 9
充填ガス種類、組成	濃縮Kr(46%), Xe (44%), He(10%)	濃縮Kr(50.1%), Xe (49.9%)
充填ガス同位体組成	表2-4に示す	表2-5に示す
ガス封入圧 (kg/cm <sup>2</sup> . G)	2. 5	5. 8
ガス封入量 (Ncc)	2. 5 ~ 2. 6	2. 3 ~ 2. 6
カプセル気密度	1 × 10 <sup>-8</sup> atom. cc/s以下	
カプセル重量 (g)	3. 2	1. 6 ~ 1. 7
耐圧 (kg/cm <sup>2</sup> . G)	5	8



表2-4 単体型タグガス試料の同位体組成

No.	同位体組成					
	Kr-78	Kr-80	Kr-78/Kr-80	Xe-126	Xe-129	Xe-126/Xe-129
1	8.9%	34.8%	0.254	2.8%	64.8%	0.0404
2	"	"	"	1.7	50.7	0.0331
3	"	"	"	1.1	42.4	0.0259
4	"	"	"	0.8	37.1	0.0208
5	"	"	"	0.4	31.9	0.0125
6	0.9%	4.5%	0.196	2.8	68.4	0.0404
7	"	"	"	1.7	50.7	0.0331
8	"	"	"	0.8	37.1	0.0208
9	"	"	"	0.4	31.9	0.0125
10	"	"	"	1.1	42.0	0.0264

表2-5 小径型タグガス試料の同位体組成

	組 成 (%)									
濃縮Kr	Kr-78	Kr-80	Kr-82	Kr-83	Kr-84	Kr-86				
	9.0	34.5	46.7	7.5	2.3	<0.1				
濃縮Xe	Xe-124	Xe-126	Xe-128	Xe-129	Xe-130	Xe-131	Xe-132	Xe-134	Xe-136	
	5.4	3.3	12.7	68.5	3.9	4.1	1.7	0.4	<0.1	

表 2-6 中性子ドシメトリーで対象とされた放射化反応と関連核データ

反応型式	半減期	同位体存在比 [%]	γ線エネルギー [keV]	γ線分岐率 [%]	しきいエネルギー [MeV]
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	15.02 h	100.0	1368.6	100.0	7.3
$\text{NatTi}(n, x)^{46}\text{Sc}$	83.83 d	100.0	889.3	99.98	4.4
$\text{NatTi}(n, x)^{47}\text{Sc}$	3.341 d	100.0	159.4	68.3	2.2
$\text{NatTi}(n, x)^{48}\text{Sc}$	1.821 d	100.0	983.5	100.0	7.0
$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$	2.579 h	100.0	846.8	98.87	nth
$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	312.2 d	5.8	834.8	99.98	2.8
$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	2.579 h	91.72	846.8	98.87	6.1
$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$	44.51 d	0.28	1099.3	56.3	nth
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	70.92 d	68.26	810.8	99.44	2.6
$^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$	5.271 y	26.10	1332.5	99.98	5.9
$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	5.271 y	100.0	1332.5	99.98	nth
$^{59}\text{Co}(n, p)^{59}\text{Fe}$	44.51 d	100.0	1099.3	56.3	4.1
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	12.70 h	69.17	1345.9	0.47	nth
$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$	5.271 y	69.17	1332.5	99.98	6.2
$^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$	4.486 h	95.70	336.3	45.9	1.3
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	2.694 d	100.0	411.8	95.56	nth
$^{197}\text{Au}(n, 2n)^{196}\text{Au}$	6.183 d	100.0	355.7	86.9	9.4
$^{235}\text{U}(n, f) [^{140}\text{Ba}]^1)$	12.75 d	99.9	537.3	24.7(×6.12) <sup>2)</sup>	nth
$^{237}\text{Np}(n, f) [^{140}\text{Ba}]^1)$	12.75 d	100.0	537.3	24.7(×5.49) <sup>2)</sup>	0.6

1) 核分裂生成物核種のうち、 $^{140}\text{Ba}$ からのγ線を測定

2) ( )内は、高速炉における累積核分裂収率の値 [7]

### 3. 実験結果

#### 3.1 放射化率の測定

放射化箔の照射実験I~IIIで得られた放射化反応率の測定結果を表3-1~3-3に示す。本測定では、HPGe計測システムの割り振られた利用時間内で、統計的に十分有意な光電ピーク面積（2500カウント以上を目安）の得られる反応のみを選択した。また、本測定における誤差評価では、計数統計誤差の他に、主として、重量測定（感度の低い電子天秤使用のため、最大誤差~2%）の検出効率（使用した $^{152}\text{Eu}$ 標準 $\gamma$ 線源から派生する系統誤差~0.6%及び偶然誤差2.5%）からの寄与を考慮している。

まず、FC内照射場について、表3-1の $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応率の結果から、高速中性子束は、照射位置ID A, Bで、周辺が若干高めの結果にみえるものの、誤差の範囲でほぼ一様とみなせる。また、A点での $^{54}\text{Fe}(n,p)$ 反応率を信じると、中心部の中性子スペクトルはやや硬めであることが推察される。一方、熱及び熱外中性子束も、 $^{59}\text{Co}(n,\gamma)$ 及び $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)$ 反応率から、中心部は周辺部に比べて若干高い程度であり、下方側の床からの散乱線の影響を除くと、ほぼ一様と言える。

次に、Gy孔照射場について、表3-2の炉心中央(照射位置ID A)の反応率測定結果は、全般的に過去に測定された結果とよい一致を示す。また、炉心中心と上側7.5cm離れた点(照射位置ID B)での $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 及び $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ 反応率の比も、過去の測定結果[2]をほぼ再現している。しかしながら、表3-3の結果との比較では、同一照射位置A, Bでの $^{54}\text{Fe}(n,p)$ 及び $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応率の比較において、系統的に~10%程度の差がみられる。また、照射位置AとCでは、中性子束分布の対称性が期待されたが、意に反して、高速中性子束に関して、~35%程度の大きな差を生じている。これらの原因として、照射実験IIとIIIで

表3-1 F C内照射実験 ('95 9/12~9/22) における放射化反応率の測定結果

照射位置ID	反応型式	重量[g]	冷却時間[sec]	計数時間[sec]	光電ピーク計数	検出効率 [%]	反応率[1/sec/W]
A	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	10.35	2167163	3000	59340 ± 267	1.76	$(9.29 \pm 0.16) \times 10^{-20}$
	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$	10.35	2167163	3000	35266 ± 159	1.32	$(5.72 \pm 0.10) \times 10^{-19}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	2.31	2170305	3000	192831 ± 444	1.82	$(3.35 \pm 0.06) \times 10^{-20}$
	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	1.15	10229088	9000	2144160 ± 2144	1.03	$(6.39 \pm 0.11) \times 10^{-18}$
	$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$	21.83	2265577	40000	6016 ± 87	1.08	$(3.06 \pm 0.07) \times 10^{-22}$
	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	0.28	2248344	600	123751 ± 358	3.68	$(4.86 \pm 0.13) \times 10^{-17}$
B (上)	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	9.59	2173462	3000	16927 ± 142	1.76	$(2.80 \pm 0.05) \times 10^{-20}$
	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$	9.59	2173462	3000	14418 ± 125	1.32	$(2.20 \pm 0.04) \times 10^{-19}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	1.16	2176590	3000	109741 ± 444	1.82	$(3.48 \pm 0.06) \times 10^{-20}$
	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	1.17	10238876	9000	1774610 ± 823	1.03	$(5.20 \pm 0.09) \times 10^{-18}$
B (右)	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	9.07	2179730	3000	15768 ± 98	1.76	$(2.76 \pm 0.05) \times 10^{-20}$
	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$	9.07	2179730	3000	14094 ± 124	1.32	$(2.27 \pm 0.04) \times 10^{-19}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	1.17	2182856	3000	108426 ± 661	1.82	$(3.41 \pm 0.06) \times 10^{-20}$
	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	1.17	10248443	9000	1769140 ± 1769	1.03	$(5.19 \pm 0.09) \times 10^{-18}$
B (下)	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	9.05	2185995	3000	14095 ± 114	1.76	$(2.47 \pm 0.05) \times 10^{-20}$
	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$	9.05	2185995	3000	15448 ± 131	1.32	$(2.50 \pm 0.05) \times 10^{-19}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	1.14	2189120	3000	112854 ± 339	1.82	$(3.64 \pm 0.06) \times 10^{-20}$
	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	1.17	10258879	9000	2104560 ± 1684	1.03	$(6.17 \pm 0.10) \times 10^{-18}$
B (左)	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	9.63	2192260	3000	17804 ± 144	1.76	$(2.94 \pm 0.05) \times 10^{-20}$
	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$	9.63	2192260	3000	14613 ± 124	1.32	$(2.22 \pm 0.04) \times 10^{-19}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	1.30	2195386	3000	138967 ± 375	1.82	$(3.94 \pm 0.08) \times 10^{-20}$
	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	1.15	10269064	9000	1810570 ± 1448	1.03	$(5.38 \pm 0.09) \times 10^{-18}$

表 3-2 Gy 孔照射実験 II ('95 11/10) における放射化反応率の測定結果

照射位置ID	反応型式	重量[g]	冷却時間[sec]	計数時間[sec]	光電ピーク計数	検出効率[%]	反応率[1/sec/W]
A	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	0.023	187369	4000	14983 ± 124	0.26	$(4.89 \pm 0.08) \times 10^{-20}$
	$\text{Nat-Ti}(n, x)^{47}\text{Sc}$	0.038	212395	4000	587476 ± 881	2.08	$(4.21 \pm 0.05) \times 10^{-18}$
	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	0.032	73282	4000	6600 ± 87	0.46	$(1.36 \pm 0.02) \times 10^{-17}$
	$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	0.032	73282	4000	7401 ± 93	0.46	$(1.78 \pm 0.04) \times 10^{-19}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	0.034	228922	4000	537494 ± 752	0.48	$(2.13 \pm 0.02) \times 10^{-17}$
	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	0.090	203964	4000	6240 ± 97	0.30	$(8.72 \pm 0.18) \times 10^{-18}$
	$^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$	0.049	179102	4000	131376 ± 381	1.11	$(4.20 \pm 0.11) \times 10^{-17}$
	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	0.034	451481	300	17167 ± 132	0.028	$(5.35 \pm 0.08) \times 10^{-17}$
	$^{235}\text{U}(n, f) [^{140}\text{Ba}]^*$	0.0012	436481	5000	2674 ± 106	0.0022	$(3.98 \pm 0.41) \times 10^{-14}$ *
	$^{237}\text{Np}(n, f) [^{140}\text{Ba}]^*$	0.0092	360729	5000	26281 ± 318	0.71	$(1.68 \pm 0.03) \times 10^{-16}$ *
B	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	0.023	191501	4000	38162 ± 202	0.26	$(6.95 \pm 0.13) \times 10^{-20}$
	$\text{Nat-Ti}(n, x)^{47}\text{Sc}$	0.039	216551	4000	233796 ± 538	2.08	$(1.65 \pm 0.03) \times 10^{-18}$
	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	0.032	76406	3000	2373 ± 49	0.46	$(6.51 \pm 0.17) \times 10^{-18}$
	$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	0.032	76406	3000	2110 ± 52	0.46	$(8.26 \pm 0.28) \times 10^{-20}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	0.034	233146	4000	200827 ± 462	0.48	$(7.96 \pm 0.14) \times 10^{-18}$
	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	0.092	208195	4000	4577 ± 52	0.30	$(6.82 \pm 0.15) \times 10^{-18}$
	$^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$	0.059	183239	4000	50756 ± 233	1.11	$(1.61 \pm 0.05) \times 10^{-17}$
	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	0.033	451781	300	13483 ± 117	0.028	$(4.33 \pm 0.08) \times 10^{-17}$
	$^{235}\text{U}(n, f) [^{140}\text{Ba}]^*$	0.0012	442081	5000	1122 ± 79	0.0022	$(1.66 \pm 0.20) \times 10^{-14}$ *
	$^{237}\text{Np}(n, f) [^{140}\text{Ba}]^*$	0.0092	366071	5000	11573 ± 187	0.71	$(7.41 \pm 0.20) \times 10^{-17}$ *

\* 核分裂率の測定結果は、照射前の残留放射化量の補正を行っていないため、参考データに留める。

表 3-3 Gy 孔照射実験III('96 1/18) における放射化反応率の測定結果

照射位置ID	反応型式	重量[g]	冷却時間[sec]	計数時間[sec]	光電ピーク計数	検出効率[%]	反応率[1/sec/W]
A	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	0.031	1311307	10000	2259 ± 48	1.55	$(5.96 \pm 0.15) \times 10^{-18}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	0.036	1413272	10000	147354 ± 385	1.59	$(7.60 \pm 0.18) \times 10^{-18}$
	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	0.031	1372649	10000	298415 ± 546	2.89	$(4.63 \pm 0.13) \times 10^{-17}$
B	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	0.034	1321435	10000	6186 ± 79	1.55	$(1.49 \pm 0.04) \times 10^{-17}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	0.037	1423564	10000	367936 ± 607	1.59	$(1.85 \pm 0.05) \times 10^{-17}$
	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	0.034	1382937	10000	390344 ± 625	2.89	$(5.69 \pm 0.15) \times 10^{-17}$
	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}^*$	0.015	1393287	10000	170377 ± 413	2.89	$(5.63 \pm 0.16) \times 10^{-17}$
C	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	0.033	1331566	10000	1502 ± 40	1.55	$(3.72 \pm 0.10) \times 10^{-18}$
	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	0.036	1434129	10000	101164 ± 318	1.59	$(5.23 \pm 0.13) \times 10^{-18}$
	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	0.032	1403507	10000	265304 ± 515	2.89	$(4.11 \pm 0.10) \times 10^{-17}$

\* 1mmt Cd被覆付き

は、使用したHPGe検出器が異なることにより、検出効率評価値の系統的なズレが考えられる。また、後者に関して、炉心中心から±7.5cm離れた点は、93%濃縮ウランの中核燃料部と0.2%劣化ウランブランケット部の境界近傍に相当し、Gy孔軸方向の高速中性子束分布の勾配が急であるため、放射化箔をセットした位置が微妙に対称位置からズレたことも考えられる。いずれにせよ、HPGe計測系の検出効率を再評価し、放射化箔照射の追試実験によって真偽を確認する必要がある。ただし、炉心中央のAu箔のCd比はほぼ1.0であり、熱中性子束がほとんどないということで、過去の測定結果とも一致している。

また、 $^{235}\text{U}(n,f)$  及び $^{237}\text{Np}(n,f)$  核分裂箔の測定において、FC内照射では、中性子照射量不足で、着目した核分裂生成物( $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ など)からの $\gamma$ 線を観測できなかった。一方、Gy孔照射では、得られた核分裂率の結果が異常に高く、照射前の残留放射化量が無視できないほど大きかったことに起因すると考えられる。従って、今回の結果は参考データに留め、再照射実験を検討したい。

### 3.2 中性子スペクトルの評価

FC内及びGy孔照射場の中性子スペクトルを評価するため、照射実験IのA及び照射実験IIのA, Bの放射化反応率データセットをもとに、'NEUPAC-JLOG'[8],[9],[10]コードを用いて、中性子スペクトルアジャストメントを行った。用いたドシメトリー反応断面積ライブラリーは、JENDLドシメトリーファイル[11]から作成された103群のものである(群構造は、表3-4~3-5中を参照)。入力として必要な初期推定スペクトルは、図2-3及び2-4に示される中性子スペクトルを関数フィッティングした結果から作成した。また、その共分散行列は、全エネルギー群に渡って、一律30%の $1\sigma$ 誤差を対角成分に仮定し、正規分布的に群間の共分散関係を自動作成するコード内蔵の機能とデフォルト値を採用した。

まず、FC内照射場の中性子スペクトル導出において、当初、表3-1 Aに示される6個の放射化反応率を入力して解析を進めたが、初期推定スペクトルの条件を妥当な範囲で修正しても、最終解の整合性を判定する $\chi^2$ 検定（信頼レベル10%）をクリアすることが困難を窮めた。そこで、初期推定スペクトル及び他の測定結果と大きく矛盾する放射化反応率データを1つずつ消去していく方式で、中性子スペクトルのアジャストを試み、 $\chi^2$ 検定をクリアしたところで最終解と判断した。結局、 $^{58}\text{Ni}(n,p)$ ,  $^{59}\text{Co}(n,\gamma)$ ,  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ の3反応率のみのアジャストとなり、得られたFC内中性子スペクトルを図3-1に示す。また、図3-2に初期推定スペクトルと最終解との比較結果を示すが、初期値がFC外への漏洩スペクトル（図2-4 A点）であるのに対し、今回の照射点はFC内（図2-4 B点）で散乱中性子の寄与が増すため、若干柔らかい方へスペクトルが修正されていることが分かる。ただし、高エネルギー側のスペクトル形状の妥当性をより詳しくチェックするためには、さらに閶型放射化箔の種類を増やした再測定・解析が必要である。

次に、同様の手順により得られたGy孔照射場 A, B点の中性子スペクトル評価結果を図3-3~3-6に示す。炉心中央のGy孔A点では、図3-4の初期推定スペクトル（過去の評価結果）と最終解との比較から分かるように、 $\sim 5\text{MeV}$ 以上の高エネルギー側が若干軟化されて、 $500\text{keV}$ から $2.5\text{MeV}$ 領域に盛り上がりを生じている。ただし、 $0.1\text{MeV}$ 以上の積算中性子束は、 $2\text{kW}$ あたり $7.71 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ と評価され、過去の結果  $(7.5 \pm 0.5) \times 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ とよく一致している。一方、Gy孔B点では、図3-6から分かるように、かなりスペクトルが軟化している。これは、Gy孔内中性子スペクトルが、核分裂スペクトルと1回非弾性散乱スペクトルの重み付き和で構成されると仮定したとき、炉心中心から $\sim 7.5\text{cm}$ 点（濃縮ウラン燃料部と劣化ウランブランケットの境界近傍）では、非弾性散乱スペクトル成分が $\sim$



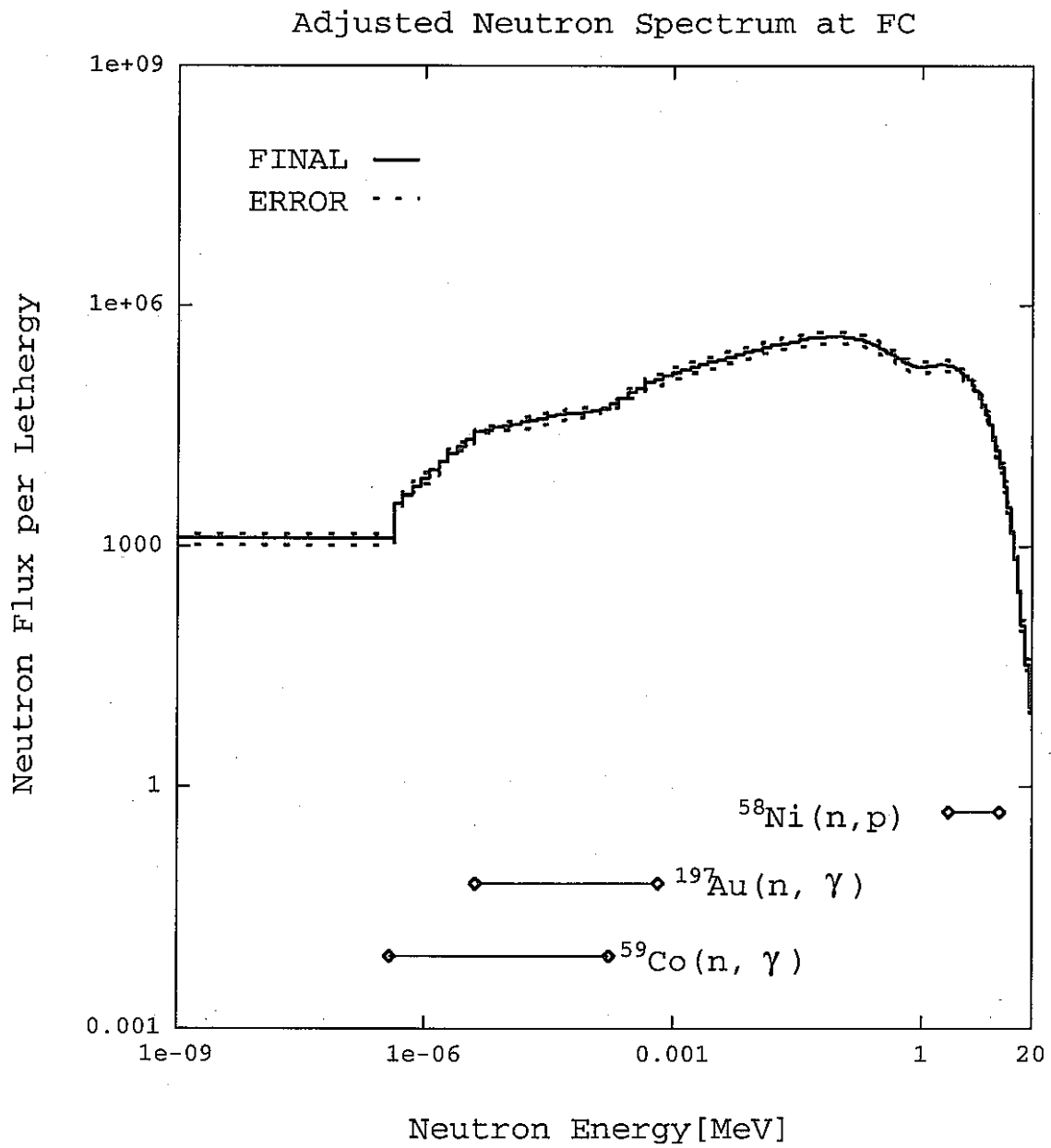


図3-1 FC-A点の中性子スペクトルアジャストメント結果

Comparison between Initial and Final Neutron Spectrum at FC

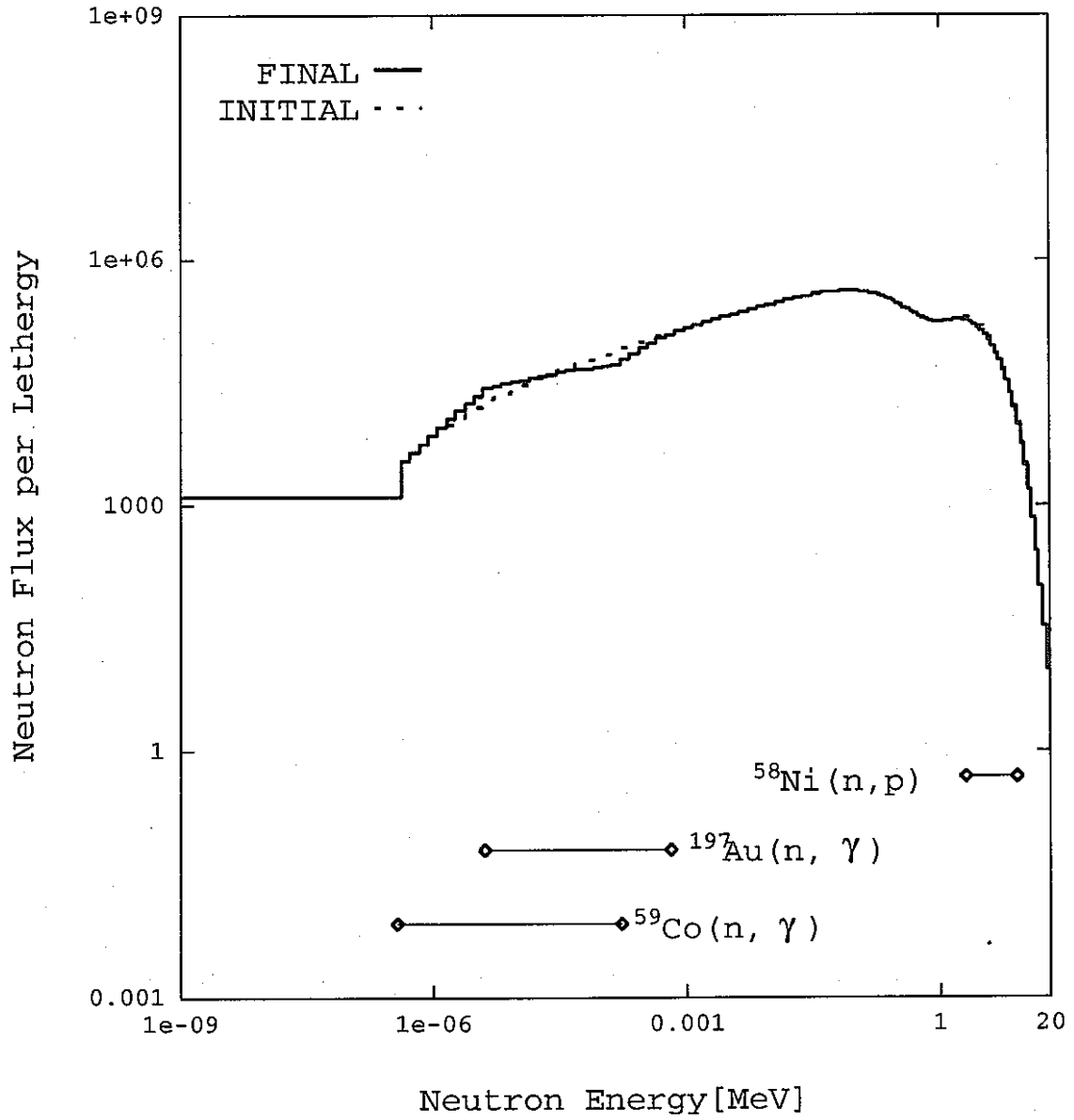


図3-2 FC-A点における初期推定スペクトルと解スペクトルの比較

Adjusted Neutron Spectrum at Gy-A

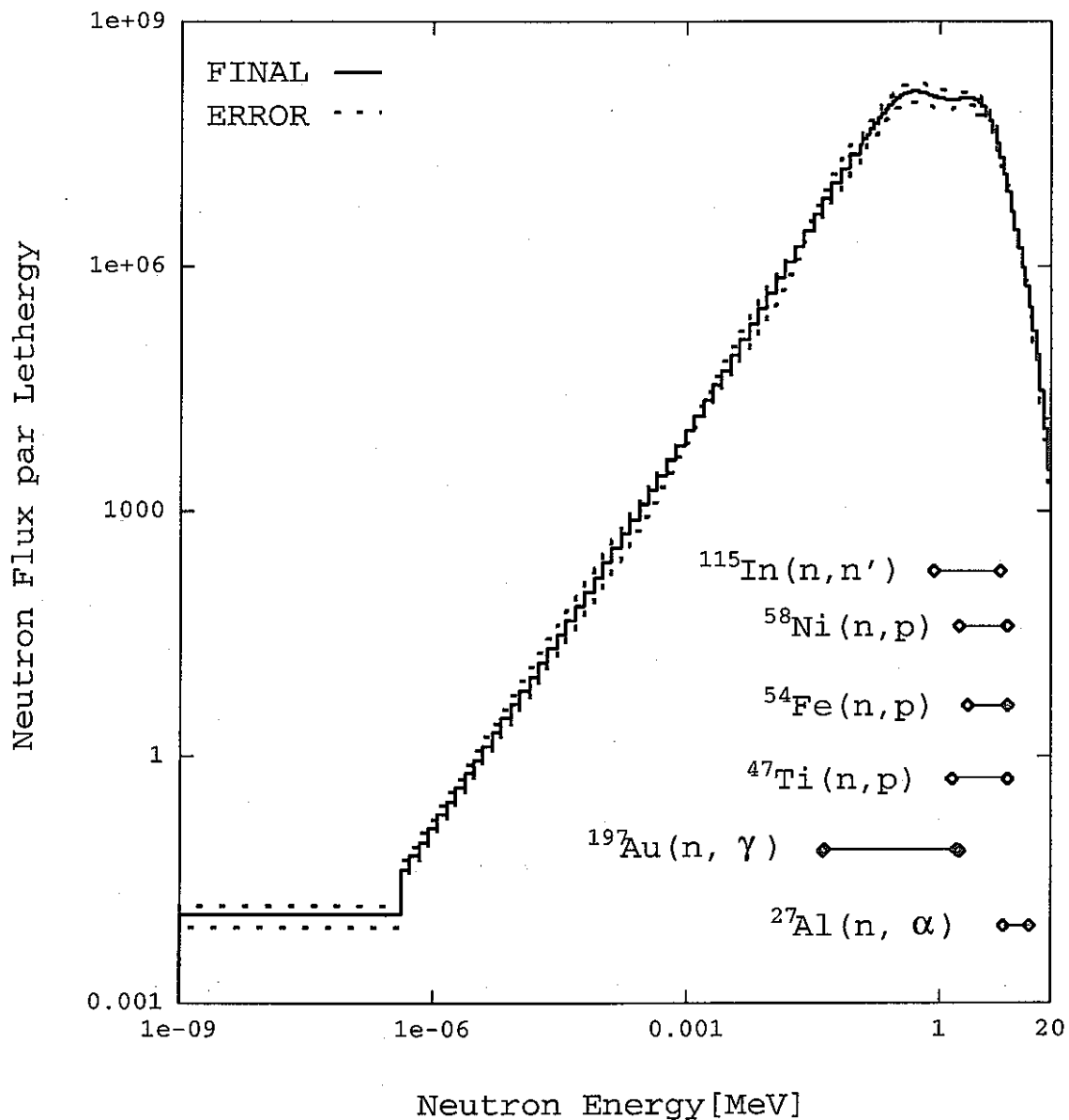


図3-3 Gy-A点の中性子スペクトルアジャストメント結果

Comparison between Initial and Final Neutron Spectrum at Gy-A

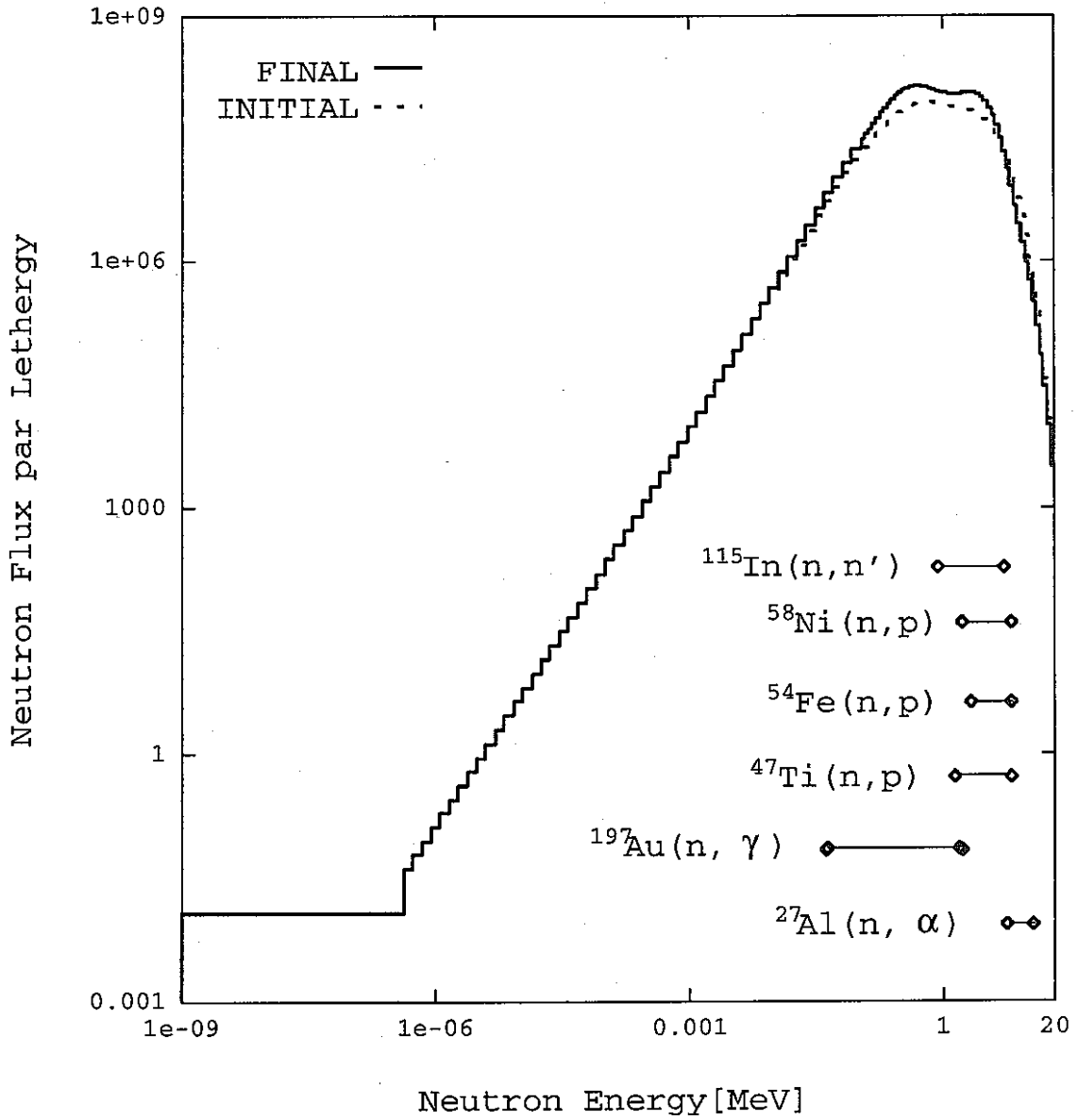


図3-4 Gy-A点における初期推定スペクトルと解スペクトルの比較

Comparison between Initial and Final Neutron Spectrum at Gy-B

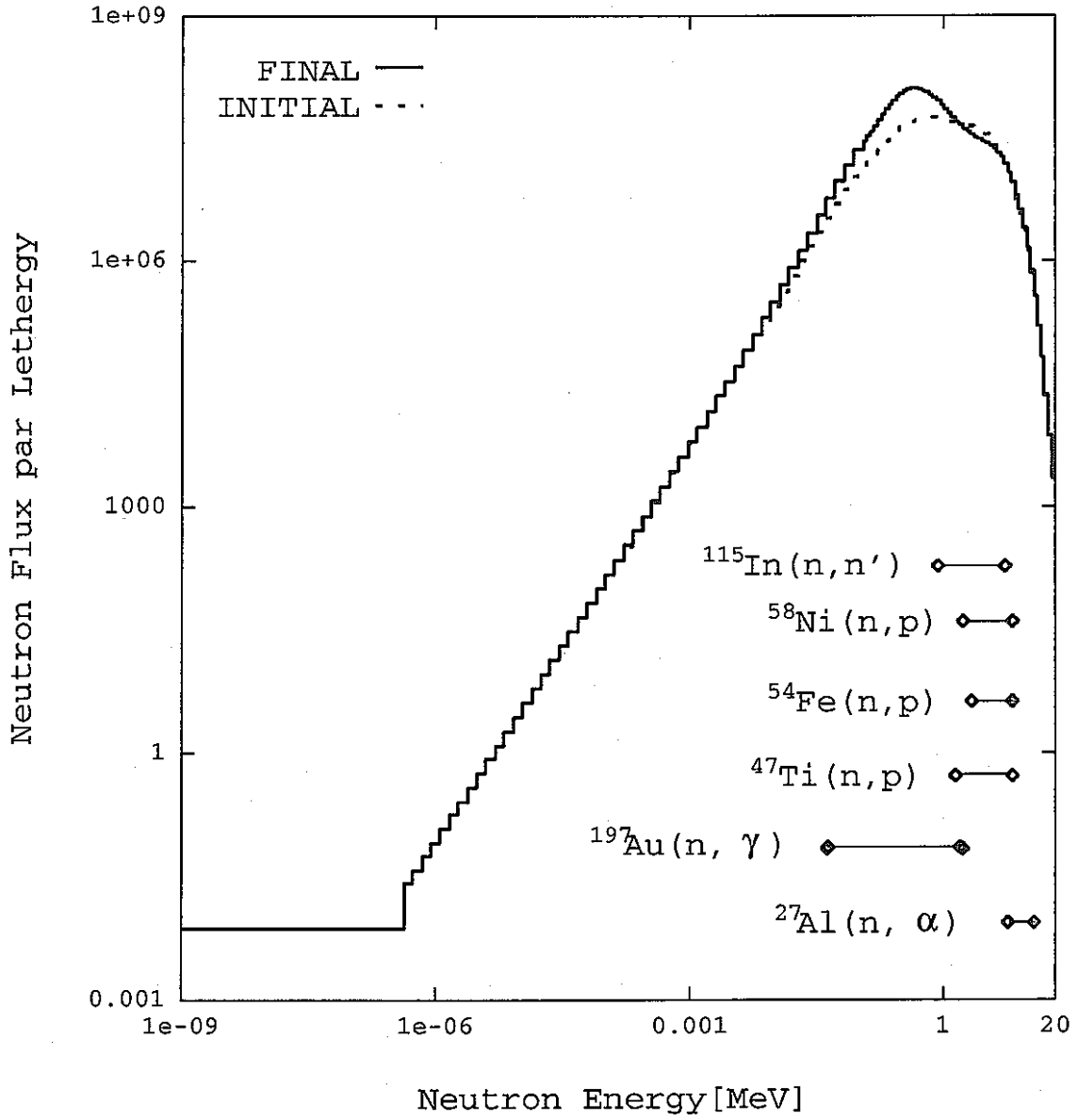


図3-5 Gy-B点の中性子スペクトルアジャストメント結果

Adjusted Neutron Spectrum at Gy-B

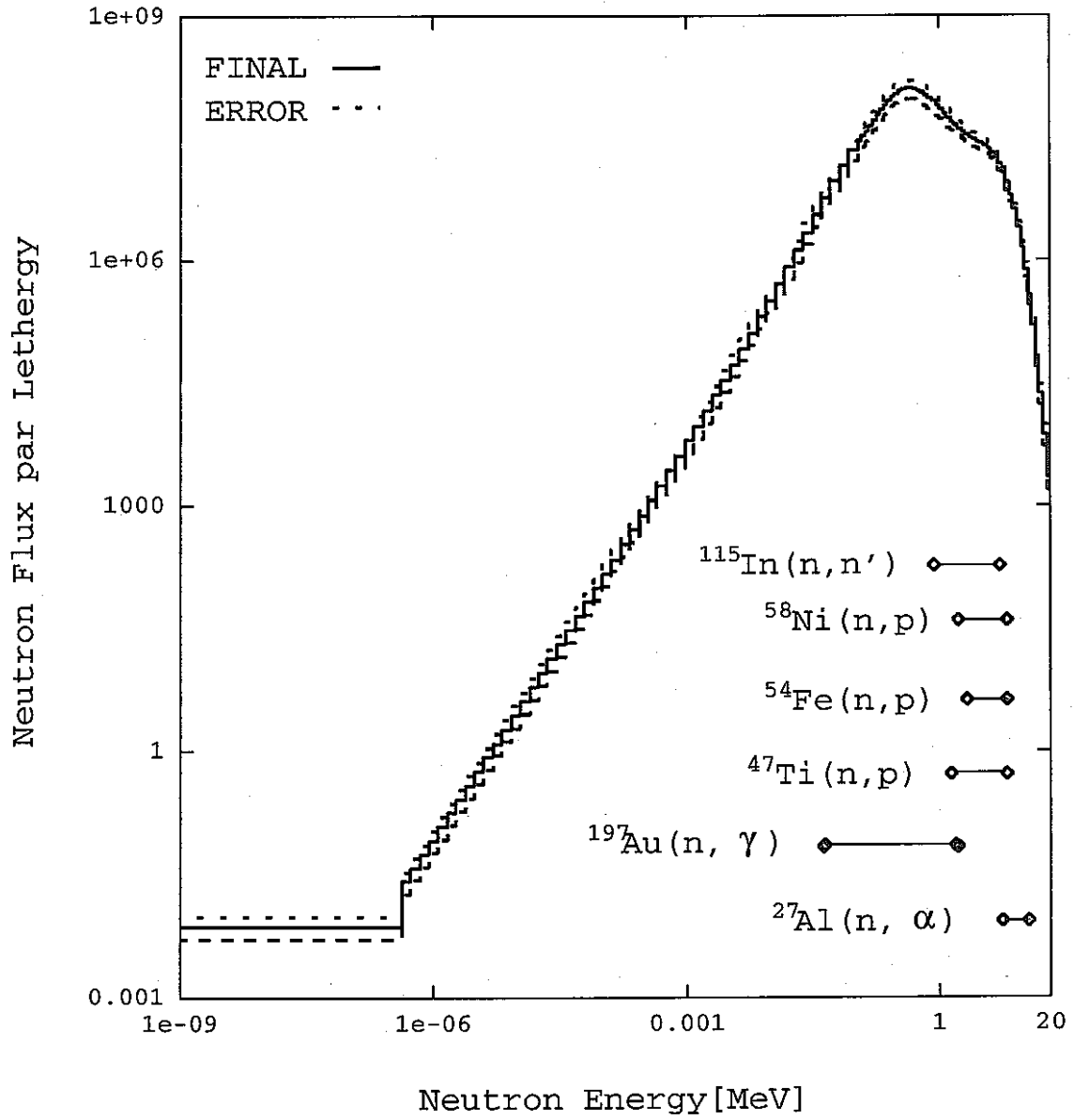


図3-6 Gy-B点における初期推定スペクトルと解スペクトルの比較

表3-4 FC-A (FC 内照射場B点中央) の中性子スペクトル評価結果

GROUP NO.	ENERGY RANGE		SOLUTION SPECTRUM	UNCERTAINTY	GROUP NO.	ENERGY RANGE		SOLUTION SPECTRUM	UNCERTAINTY
	Upper	Lower				Upper	Lower		
	[MeV]		[n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]	[%]		[MeV]		[n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]	[%]
1	2.000E+01	1.822E+01	9.89448E+00	2.981E+01	27	1.496E+00	1.353E+00	1.82763E+05	2.969E+01
2	1.822E+01	1.649E+01	3.34531E+01	2.981E+01	28	1.353E+00	1.225E+00	1.79906E+05	2.975E+01
3	1.649E+01	1.492E+01	1.03276E+02	2.981E+01	29	1.225E+00	1.108E+00	1.76945E+05	2.979E+01
4	1.492E+01	1.350E+01	2.81442E+02	2.981E+01	30	1.108E+00	1.003E+00	1.74678E+05	2.981E+01
5	1.350E+01	1.221E+01	6.86951E+02	2.979E+01	31	1.003E+00	9.072E-01	1.73775E+05	2.981E+01
6	1.221E+01	1.105E+01	1.52309E+03	2.975E+01	32	9.072E-01	8.209E-01	1.74766E+05	2.981E+01
7	1.105E+01	1.000E+01	3.05095E+03	2.966E+01	33	8.209E-01	7.427E-01	1.78034E+05	2.981E+01
8	1.000E+01	9.048E+00	5.65663E+03	2.949E+01	34	7.427E-01	6.721E-01	1.83769E+05	2.981E+01
9	9.048E+00	8.187E+00	9.68315E+03	2.918E+01	35	6.721E-01	6.081E-01	1.91983E+05	2.981E+01
10	8.187E+00	7.408E+00	1.54648E+04	2.867E+01	36	6.081E-01	5.502E-01	2.02542E+05	2.981E+01
11	7.408E+00	6.703E+00	2.32039E+04	2.791E+01	37	5.502E-01	4.979E-01	2.15207E+05	2.981E+01
12	6.703E+00	6.065E+00	3.29499E+04	2.689E+01	38	4.979E-01	4.505E-01	2.29556E+05	2.981E+01
13	6.065E+00	5.488E+00	4.45402E+04	2.567E+01	39	4.505E-01	4.076E-01	2.45220E+05	2.981E+01
14	5.488E+00	4.966E+00	5.77501E+04	2.442E+01	40	4.076E-01	3.688E-01	2.61782E+05	2.981E+01
15	4.966E+00	4.493E+00	7.21763E+04	2.332E+01	41	3.688E-01	3.337E-01	2.78710E+05	2.981E+01
16	4.493E+00	4.066E+00	8.74437E+04	2.264E+01	42	3.337E-01	3.020E-01	2.95685E+05	2.981E+01
17	4.066E+00	3.679E+00	1.03163E+05	2.258E+01	43	3.020E-01	2.732E-01	3.12205E+05	2.981E+01
18	3.679E+00	3.329E+00	1.18801E+05	2.315E+01	44	2.732E-01	2.472E-01	3.28040E+05	2.981E+01
19	3.329E+00	3.012E+00	1.33922E+05	2.417E+01	45	2.472E-01	2.237E-01	3.42815E+05	2.981E+01
20	3.012E+00	2.725E+00	1.47898E+05	2.541E+01	46	2.237E-01	2.024E-01	3.56401E+05	2.981E+01
21	2.725E+00	2.466E+00	1.60252E+05	2.662E+01	47	2.024E-01	1.832E-01	3.68626E+05	2.981E+01
22	2.466E+00	2.231E+00	1.70417E+05	2.766E+01	48	1.832E-01	1.657E-01	3.79378E+05	2.981E+01
23	2.231E+00	2.019E+00	1.78013E+05	2.846E+01	49	1.657E-01	1.500E-01	3.88552E+05	2.981E+01
24	2.019E+00	1.827E+00	1.82804E+05	2.901E+01	50	1.500E-01	1.357E-01	3.96152E+05	2.981E+01
25	1.827E+00	1.653E+00	1.84879E+05	2.937E+01	51	1.357E-01	1.228E-01	4.02219E+05	2.981E+01
26	1.653E+00	1.496E+00	1.84655E+05	2.958E+01	52	1.228E-01	1.111E-01	4.06776E+05	2.981E+01

表3-4 FC-A (FC 内照射場B点中央) の中性子スペクトル評価結果 (続き)

GROUP NO.	ENERGY RANGE Upper - Lower [MeV]	SOLUTION SPECTRUM [n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]	UNCERTAINTY [%]	GROUP NO.	ENERGY RANGE Upper - Lower [MeV]	SOLUTION SPECTRUM [n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]	UNCERTAINTY [%]
53	1.111E-01 - 8.662E-02	4.11219E+05	2.981E+01	79	1.670E-04 - 1.301E-04	5.17045E+04	8.540E+00
54	8.662E-02 - 6.738E-02	4.11186E+05	2.981E+01	80	1.301E-04 - 1.013E-04	4.91411E+04	1.436E+01
55	6.738E-02 - 5.248E-02	4.04596E+05	2.981E+01	81	1.013E-04 - 7.889E-05	4.79875E+04	2.042E+01
56	5.248E-02 - 4.087E-02	3.93063E+05	2.981E+01	82	7.889E-05 - 6.144E-05	4.67061E+04	2.415E+01
57	4.087E-02 - 3.183E-02	3.77996E+05	2.981E+01	83	6.144E-05 - 4.785E-05	4.57500E+04	2.692E+01
58	3.183E-02 - 2.479E-02	3.60589E+05	2.981E+01	84	4.785E-05 - 3.727E-05	4.41886E+04	2.853E+01
59	2.479E-02 - 1.931E-02	3.41817E+05	2.981E+01	85	3.727E-05 - 2.902E-05	4.22379E+04	2.930E+01
60	1.931E-02 - 1.503E-02	3.22377E+05	2.981E+01	86	2.902E-05 - 2.260E-05	3.99409E+04	2.954E+01
61	1.503E-02 - 1.171E-02	3.02852E+05	2.981E+01	87	2.260E-05 - 1.760E-05	3.76450E+04	2.947E+01
62	1.171E-02 - 9.119E-03	2.83628E+05	2.981E+01	88	1.760E-05 - 1.371E-05	3.56536E+04	2.899E+01
63	9.119E-03 - 7.102E-03	2.65096E+05	2.981E+01	89	1.371E-05 - 1.068E-05	3.40306E+04	2.780E+01
64	7.102E-03 - 5.531E-03	2.47326E+05	2.981E+01	90	1.068E-05 - 8.315E-06	3.26156E+04	2.554E+01
65	5.531E-03 - 4.307E-03	2.30444E+05	2.981E+01	91	8.315E-06 - 6.476E-06	3.09941E+04	2.228E+01
66	4.307E-03 - 3.355E-03	2.14663E+05	2.981E+01	92	6.476E-06 - 5.044E-06	2.90768E+04	1.793E+01
67	3.355E-03 - 2.613E-03	1.99836E+05	2.981E+01	93	5.044E-06 - 3.928E-06	2.74962E+04	7.775E+00
68	2.613E-03 - 2.035E-03	1.85831E+05	2.981E+01	94	3.928E-06 - 3.059E-06	2.17823E+04	1.968E+01
69	2.035E-03 - 1.585E-03	1.72612E+05	2.981E+01	95	3.059E-06 - 2.382E-06	1.78372E+04	2.315E+01
70	1.585E-03 - 1.234E-03	1.59942E+05	2.979E+01	96	2.382E-06 - 1.855E-06	1.42506E+04	2.622E+01
71	1.234E-03 - 9.611E-04	1.47641E+05	2.979E+01	97	1.855E-06 - 1.445E-06	1.12664E+04	2.819E+01
72	9.611E-04 - 7.485E-04	1.35243E+05	2.975E+01	98	1.445E-06 - 1.125E-06	8.90167E+03	2.920E+01
73	7.485E-04 - 5.830E-04	1.22493E+05	2.966E+01	99	1.125E-06 - 8.764E-07	7.04835E+03	2.960E+01
74	5.830E-04 - 4.540E-04	1.09156E+05	2.931E+01	100	8.764E-07 - 6.826E-07	5.57365E+03	2.971E+01
75	4.540E-04 - 3.536E-04	9.55807E+04	2.840E+01	101	6.826E-07 - 5.316E-07	4.37904E+03	2.973E+01
76	3.536E-04 - 2.754E-04	8.24589E+04	2.654E+01	102	5.316E-07 - 4.140E-07	3.39794E+03	2.973E+01
77	2.754E-04 - 2.145E-04	7.07934E+04	2.345E+01	103	4.140E-07 - 1.000E-09	1.25630E+03	2.971E+01
78	2.145E-04 - 1.670E-04	6.13903E+04	1.960E+01				



表3-5 Gy-A (Gy 孔照射場炉心中央) の中性子スペクトル評価結果

GROUP NO.	ENERGY RANGE		SOLUTION SPECTRUM	UNCERTAINTY [%]	GROUP NO.	ENERGY RANGE		SOLUTION SPECTRUM	UNCERTAINTY [%]
	Upper	Lower				Upper	Lower		
	[MeV]		[n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]			[MeV]		[n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]	
1	2.000E+01	1.822E+01	3.19102E+03	2.924E+01	27	1.496E+00	1.353E+00	1.10942E+08	2.259E+01
2	1.822E+01	1.649E+01	1.02448E+04	2.903E+01	28	1.353E+00	1.225E+00	1.10951E+08	2.422E+01
3	1.649E+01	1.492E+01	2.93701E+04	2.855E+01	29	1.225E+00	1.108E+00	1.12179E+08	2.555E+01
4	1.492E+01	1.350E+01	7.26589E+04	2.756E+01	30	1.108E+00	1.003E+00	1.14550E+08	2.651E+01
5	1.350E+01	1.221E+01	1.58220E+05	2.581E+01	31	1.003E+00	9.072E-01	1.17910E+08	2.711E+01
6	1.221E+01	1.105E+01	3.11655E+05	2.313E+01	32	9.072E-01	8.209E-01	1.22010E+08	2.740E+01
7	1.105E+01	1.000E+01	5.62517E+05	1.965E+01	33	8.209E-01	7.427E-01	1.26422E+08	2.743E+01
8	1.000E+01	9.048E+00	9.74592E+05	1.615E+01	34	7.427E-01	6.721E-01	1.30792E+08	2.724E+01
9	9.048E+00	8.187E+00	1.65010E+06	1.431E+01	35	6.721E-01	6.081E-01	1.34746E+08	2.686E+01
10	8.187E+00	7.408E+00	2.79200E+06	1.545E+01	36	6.081E-01	5.502E-01	1.37764E+08	2.636E+01
11	7.408E+00	6.703E+00	4.76446E+06	1.845E+01	37	5.502E-01	4.979E-01	1.39359E+08	2.579E+01
12	6.703E+00	6.065E+00	8.15802E+06	2.115E+01	38	4.979E-01	4.505E-01	1.39118E+08	2.520E+01
13	6.065E+00	5.488E+00	1.35562E+07	2.196E+01	39	4.505E-01	4.076E-01	1.36737E+08	2.466E+01
14	5.488E+00	4.966E+00	2.14703E+07	2.092E+01	40	4.076E-01	3.688E-01	1.32108E+08	2.423E+01
15	4.966E+00	4.493E+00	3.21755E+07	1.872E+01	41	3.688E-01	3.337E-01	1.25380E+08	2.396E+01
16	4.493E+00	4.066E+00	4.54590E+07	1.648E+01	42	3.337E-01	3.020E-01	1.16813E+08	2.388E+01
17	4.066E+00	3.679E+00	6.03416E+07	1.540E+01	43	3.020E-01	2.732E-01	1.06936E+08	2.400E+01
18	3.679E+00	3.329E+00	7.52314E+07	1.583E+01	44	2.732E-01	2.472E-01	9.62582E+07	2.429E+01
19	3.329E+00	3.012E+00	8.94663E+07	1.723E+01	45	2.472E-01	2.237E-01	8.54241E+07	2.472E+01
20	3.012E+00	2.725E+00	1.01475E+08	1.828E+01	46	2.237E-01	2.024E-01	7.48913E+07	2.520E+01
21	2.725E+00	2.466E+00	1.10092E+08	1.846E+01	47	2.024E-01	1.832E-01	6.50540E+07	2.570E+01
22	2.466E+00	2.231E+00	1.15091E+08	1.802E+01	48	1.832E-01	1.657E-01	5.61706E+07	2.616E+01
23	2.231E+00	2.019E+00	1.16527E+08	1.769E+01	49	1.657E-01	1.500E-01	4.83874E+07	2.654E+01
24	2.019E+00	1.827E+00	1.15788E+08	1.803E+01	50	1.500E-01	1.357E-01	4.16444E+07	2.685E+01
25	1.827E+00	1.653E+00	1.14053E+08	1.914E+01	51	1.357E-01	1.228E-01	3.57827E+07	2.709E+01
26	1.653E+00	1.496E+00	1.12129E+08	2.079E+01	52	1.228E-01	1.111E-01	3.06417E+07	2.732E+01

表3-5 Gy-A (Gy 孔照射場炉心中央) の中性子スペクトル評価結果 (続き)

GROUP NO.	ENERGY RANGE		SOLUTION SPECTRUM	UNCERTAINTY [%]	GROUP NO.	ENERGY RANGE		SOLUTION SPECTRUM	UNCERTAINTY [%]
	Upper	Lower				Upper	Lower		
	[MeV]		[n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]			[MeV]		[n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]	
53	1.111E-01	8.662E-02	2.38969E+07	2.745E+01	79	1.670E-04	1.301E-04	3.51130E+02	2.936E+01
54	8.662E-02	6.738E-02	1.60290E+07	2.777E+01	80	1.301E-04	1.013E-04	2.33831E+02	2.936E+01
55	6.738E-02	5.248E-02	1.05145E+07	2.811E+01	81	1.013E-04	7.889E-05	1.55835E+02	2.936E+01
56	5.248E-02	4.087E-02	6.79247E+06	2.845E+01	82	7.889E-05	6.144E-05	1.04027E+02	2.936E+01
57	4.087E-02	3.183E-02	4.34285E+06	2.874E+01	83	6.144E-05	4.785E-05	6.95490E+01	2.936E+01
58	3.183E-02	2.479E-02	2.76242E+06	2.897E+01	84	4.785E-05	3.727E-05	4.65586E+01	2.936E+01
59	2.479E-02	1.931E-02	1.75652E+06	2.912E+01	85	3.727E-05	2.902E-05	3.12050E+01	2.936E+01
60	1.931E-02	1.503E-02	1.11916E+06	2.922E+01	86	2.902E-05	2.260E-05	2.09491E+01	2.936E+01
61	1.503E-02	1.171E-02	7.15799E+05	2.928E+01	87	2.260E-05	1.760E-05	1.40809E+01	2.936E+01
62	1.171E-02	9.119E-03	4.59632E+05	2.932E+01	88	1.760E-05	1.371E-05	9.48292E+00	2.936E+01
63	9.119E-03	7.102E-03	2.96564E+05	2.933E+01	89	1.371E-05	1.068E-05	6.38518E+00	2.936E+01
64	7.102E-03	5.531E-03	1.91864E+05	2.934E+01	90	1.068E-05	8.315E-06	4.30946E+00	2.936E+01
65	5.531E-03	4.307E-03	1.24477E+05	2.935E+01	91	8.315E-06	6.476E-06	2.91090E+00	2.936E+01
66	4.307E-03	3.355E-03	8.09476E+04	2.935E+01	92	6.476E-06	5.044E-06	1.96810E+00	2.936E+01
67	3.355E-03	2.613E-03	5.27600E+04	2.935E+01	93	5.044E-06	3.928E-06	1.33206E+00	2.936E+01
68	2.613E-03	2.035E-03	3.44456E+04	2.935E+01	94	3.928E-06	3.059E-06	9.02103E-01	2.936E+01
69	2.035E-03	1.585E-03	2.25265E+04	2.935E+01	95	3.059E-06	2.382E-06	6.11907E-01	2.936E+01
70	1.585E-03	1.234E-03	1.47439E+04	2.936E+01	96	2.382E-06	1.855E-06	4.15234E-01	2.936E+01
71	1.234E-03	9.611E-04	9.68226E+03	2.936E+01	97	1.855E-06	1.445E-06	2.81956E-01	2.936E+01
72	9.611E-04	7.485E-04	6.35742E+03	2.936E+01	98	1.445E-06	1.125E-06	1.91652E-01	2.936E+01
73	7.485E-04	5.830E-04	4.18336E+03	2.936E+01	99	1.125E-06	8.764E-07	1.30419E-01	2.936E+01
74	5.830E-04	4.540E-04	2.75754E+03	2.936E+01	100	8.764E-07	6.826E-07	8.87640E-02	2.936E+01
75	4.540E-04	3.536E-04	1.82029E+03	2.936E+01	101	6.826E-07	5.316E-07	6.04667E-02	2.936E+01
76	3.536E-04	2.754E-04	1.20370E+03	2.936E+01	102	5.316E-07	4.140E-07	4.12116E-02	2.936E+01
77	2.754E-04	2.145E-04	7.96996E+02	2.936E+01	103	4.140E-07	1.000E-09	1.17028E-02	2.936E+01
78	2.145E-04	1.670E-04	5.28560E+02	2.936E+01					

表3-6 Gy-B (Gy 孔照射場炉心上部7.5cm点) の中性子スペクトル評価結果

GROUP NO.	ENERGY RANGE Upper - Lower [MeV]	SOLUTION SPECTRUM [n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]	UNCERTAINTY [%]	GROUP NO.	ENERGY RANGE Upper - Lower [MeV]	SOLUTION SPECTRUM [n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]	UNCERTAINTY [%]
1	2.000E+01 - 1.822E+01	2.19936E+03	2.927E+01	27	1.496E+00 - 1.353E+00	5.09696E+07	2.265E+01
2	1.822E+01 - 1.649E+01	7.50373E+03	2.908E+01	28	1.353E+00 - 1.225E+00	5.71604E+07	2.412E+01
3	1.649E+01 - 1.492E+01	2.34630E+04	2.863E+01	29	1.225E+00 - 1.108E+00	6.42752E+07	2.535E+01
4	1.492E+01 - 1.350E+01	6.50497E+04	2.767E+01	30	1.108E+00 - 1.003E+00	7.22000E+07	2.627E+01
5	1.350E+01 - 1.221E+01	1.62294E+05	2.592E+01	31	1.003E+00 - 9.072E-01	8.07612E+07	2.686E+01
6	1.221E+01 - 1.105E+01	3.69342E+05	2.316E+01	32	9.072E-01 - 8.209E-01	8.97956E+07	2.716E+01
7	1.105E+01 - 1.000E+01	7.61320E+05	1.950E+01	33	8.209E-01 - 7.427E-01	9.89041E+07	2.722E+01
8	1.000E+01 - 9.048E+00	1.45248E+06	1.576E+01	34	7.427E-01 - 6.721E-01	1.07704E+08	2.707E+01
9	9.048E+00 - 8.187E+00	2.55045E+06	1.386E+01	35	6.721E-01 - 6.081E-01	1.15744E+08	2.678E+01
10	8.187E+00 - 7.408E+00	4.15148E+06	1.514E+01	36	6.081E-01 - 5.502E-01	1.22391E+08	2.641E+01
11	7.408E+00 - 6.703E+00	6.28886E+06	1.800E+01	37	5.502E-01 - 4.979E-01	1.27037E+08	2.600E+01
12	6.703E+00 - 6.065E+00	8.91787E+06	1.999E+01	38	4.979E-01 - 4.505E-01	1.29219E+08	2.560E+01
13	6.065E+00 - 5.488E+00	1.19202E+07	1.998E+01	39	4.505E-01 - 4.076E-01	1.28657E+08	2.526E+01
14	5.488E+00 - 4.966E+00	1.51015E+07	1.852E+01	40	4.076E-01 - 3.688E-01	1.25337E+08	2.500E+01
15	4.966E+00 - 4.493E+00	1.82045E+07	1.676E+01	41	3.688E-01 - 3.337E-01	1.19517E+08	2.484E+01
16	4.493E+00 - 4.066E+00	2.10412E+07	1.592E+01	42	3.337E-01 - 3.020E-01	1.11569E+08	2.479E+01
17	4.066E+00 - 3.679E+00	2.35387E+07	1.650E+01	43	3.020E-01 - 2.732E-01	1.02096E+08	2.486E+01
18	3.679E+00 - 3.329E+00	2.57038E+07	1.788E+01	44	2.732E-01 - 2.472E-01	9.16796E+07	2.503E+01
19	3.329E+00 - 3.012E+00	2.74476E+07	1.926E+01	45	2.472E-01 - 2.237E-01	8.10205E+07	2.527E+01
20	3.012E+00 - 2.725E+00	2.89798E+07	1.989E+01	46	2.237E-01 - 2.024E-01	7.06358E+07	2.557E+01
21	2.725E+00 - 2.466E+00	3.05836E+07	1.968E+01	47	2.024E-01 - 1.832E-01	6.09725E+07	2.588E+01
22	2.466E+00 - 2.231E+00	3.24961E+07	1.904E+01	48	1.832E-01 - 1.657E-01	5.23382E+07	2.617E+01
23	2.231E+00 - 2.019E+00	3.48596E+07	1.860E+01	49	1.657E-01 - 1.500E-01	4.49023E+07	2.641E+01
24	2.019E+00 - 1.827E+00	3.77846E+07	1.879E+01	50	1.500E-01 - 1.357E-01	3.85694E+07	2.659E+01
25	1.827E+00 - 1.653E+00	4.13426E+07	1.969E+01	51	1.357E-01 - 1.228E-01	3.31079E+07	2.674E+01
26	1.653E+00 - 1.496E+00	4.57088E+07	2.108E+01	52	1.228E-01 - 1.111E-01	2.82729E+07	2.689E+01

表3-6 Gy-B (Gy 孔照射場炉心上部7.5cm点) の中性子スペクトル評価結果 (続き)

GROUP NO.	ENERGY RANGE		SOLUTION SPECTRUM	UNCERTAINTY [%]	GROUP NO.	ENERGY RANGE		SOLUTION SPECTRUM	UNCERTAINTY [%]
	Upper	Lower				Upper	Lower		
	[MeV]		[n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]			[MeV]		[n/cm <sup>2</sup> /s/W/Lethargy]	
53	1.111E-01	8.662E-02	2.21069E+07	2.694E+01	79	1.670E-04	1.301E-04	2.21960E+02	2.936E+01
54	8.662E-02	6.738E-02	1.45395E+07	2.727E+01	80	1.301E-04	1.013E-04	1.47751E+02	2.936E+01
55	6.738E-02	5.248E-02	9.26502E+06	2.766E+01	81	1.013E-04	7.889E-05	9.84408E+01	2.936E+01
56	5.248E-02	4.087E-02	5.76819E+06	2.807E+01	82	7.889E-05	6.144E-05	6.57023E+01	2.936E+01
57	4.087E-02	3.183E-02	3.53651E+06	2.844E+01	83	6.144E-05	4.785E-05	4.39224E+01	2.936E+01
58	3.183E-02	2.479E-02	2.15490E+06	2.875E+01	84	4.785E-05	3.727E-05	2.93995E+01	2.936E+01
59	2.479E-02	1.931E-02	1.31589E+06	2.898E+01	85	3.727E-05	2.902E-05	1.97030E+01	2.936E+01
60	1.931E-02	1.503E-02	8.09065E+05	2.913E+01	86	2.902E-05	2.260E-05	1.32267E+01	2.936E+01
61	1.503E-02	1.171E-02	5.02287E+05	2.922E+01	87	2.260E-05	1.760E-05	8.89001E+00	2.936E+01
62	1.171E-02	9.119E-03	3.14906E+05	2.928E+01	88	1.760E-05	1.371E-05	5.98695E+00	2.936E+01
63	9.119E-03	7.102E-03	1.99426E+05	2.931E+01	89	1.371E-05	1.068E-05	4.03123E+00	2.936E+01
64	7.102E-03	5.531E-03	1.27185E+05	2.933E+01	90	1.068E-05	8.315E-06	2.72079E+00	2.936E+01
65	5.531E-03	4.307E-03	8.16244E+04	2.934E+01	91	8.315E-06	6.476E-06	1.83784E+00	2.936E+01
66	4.307E-03	3.355E-03	5.26503E+04	2.935E+01	92	6.476E-06	5.044E-06	1.24262E+00	2.936E+01
67	3.355E-03	2.613E-03	3.41091E+04	2.935E+01	93	5.044E-06	3.928E-06	8.41055E-01	2.936E+01
68	2.613E-03	2.035E-03	2.21693E+04	2.935E+01	94	3.928E-06	3.059E-06	5.69560E-01	2.936E+01
69	2.035E-03	1.585E-03	1.44477E+04	2.935E+01	95	3.059E-06	2.382E-06	3.86331E-01	2.936E+01
70	1.585E-03	1.234E-03	9.43094E+03	2.935E+01	96	2.382E-06	1.855E-06	2.62153E-01	2.936E+01
71	1.234E-03	9.611E-04	6.17959E+03	2.935E+01	97	1.855E-06	1.445E-06	1.78005E-01	2.936E+01
72	9.611E-04	7.485E-04	4.04980E+03	2.936E+01	98	1.445E-06	1.125E-06	1.20991E-01	2.936E+01
73	7.485E-04	5.830E-04	2.66054E+03	2.936E+01	99	1.125E-06	8.764E-07	8.23326E-02	2.936E+01
74	5.830E-04	4.540E-04	1.75106E+03	2.936E+01	100	8.764E-07	6.826E-07	5.60358E-02	2.936E+01
75	4.540E-04	3.536E-04	1.15444E+03	2.936E+01	101	6.826E-07	5.316E-07	3.81718E-02	2.936E+01
76	3.536E-04	2.754E-04	7.62549E+02	2.936E+01	102	5.316E-07	4.140E-07	2.60162E-02	2.936E+01
77	2.754E-04	2.145E-04	5.04434E+02	2.936E+01	103	4.140E-07	1.000E-09	7.38782E-03	2.936E+01
78	2.145E-04	1.670E-04	3.34289E+02	2.936E+01					

10%程度しか減衰しないことに対し、核分裂スペクトル成分は～70%近く減衰してしまうためと解釈される。

以上、3点の中性子スペクトル評価結果の数値データを表3-4～3-6に掲げる。また、参考までに、炉出力1Wあたりの総積算中性子束と0.1MeV以上の積算中性子束の評価結果を下表3-7にまとめる。

表3-7 1Wあたりの積算中性子束の評価結果

照射位置ID	総積算中性子束 [n/cm <sup>2</sup> /s/W]	0.1MeV以上の積算中性子束 [n/cm <sup>2</sup> /s/W]
FC-A (FC内B点中央)	(2.61±0.14)×10 <sup>6</sup>	(9.39±0.59)×10 <sup>5</sup>
Gy-A (炉心中心)	(4.01±0.19)×10 <sup>8</sup>	(3.86±0.20)×10 <sup>8</sup>
Gy-B(炉心より上7.5cm点)	(2.53±0.12)×10 <sup>8</sup>	(2.40±0.13)×10 <sup>8</sup>

### 3.3 タグガス放射化核種の同定

Gy孔で照射したタグガス試料のγ線スペクトル測定から、タグガス中に生成された放射性核種の同定を試みた。図3-7～3-9に、タグガスの封入されていないダミーカプセル、単体型タグガス試料、小径型タグガス試料から得られた典型的なγ線スペクトルの測定結果を示す。180keVから500keVの範囲内でスペクトルに差異を生じることが分かる。本測定では、<sup>152</sup>Eu標準γ線源を用いて、エネルギー軸の校正及び検出効率曲線の評価を行ったが、200keV以下の低エネルギー領域では、両者ともに高エネルギー側データからの線形的内外挿で十分な精度を得ることが困難と考えられる。

表3-8と3-9に、2回のタグガス照射実験で同定された放射性核種をまとめるが、<sup>125</sup>Xeと<sup>79</sup>Krの生成は明確に確認できた。<sup>127</sup>Xe、<sup>135</sup>Xe、<sup>85m</sup>Krに相当するγ線ピークも観測されたが、これらに付随する他のエネルギーのγ線ピークがみえないため、確実に同定でき

たというには疑問が残る。

また、希ガス放射性核種の生成数を概算した結果も、参考までに表 3-8、3-9 に示しているが、本来、同一核種については、ほぼ同じ値を採らなければならないにも拘わらず、かなり大きなばらつきがみられる。低エネルギー側の検出効率曲線（エネルギー依存性）の評価に問題があると思われるが、カプセル材の $^{56}\text{Fe}(n,p)$ 反応で生成された $^{56}\text{Mn}$ の評価結果が妥当なことを考えると、 $\gamma$ 線分岐率などの基礎核データの精度に起因するかもしれない。

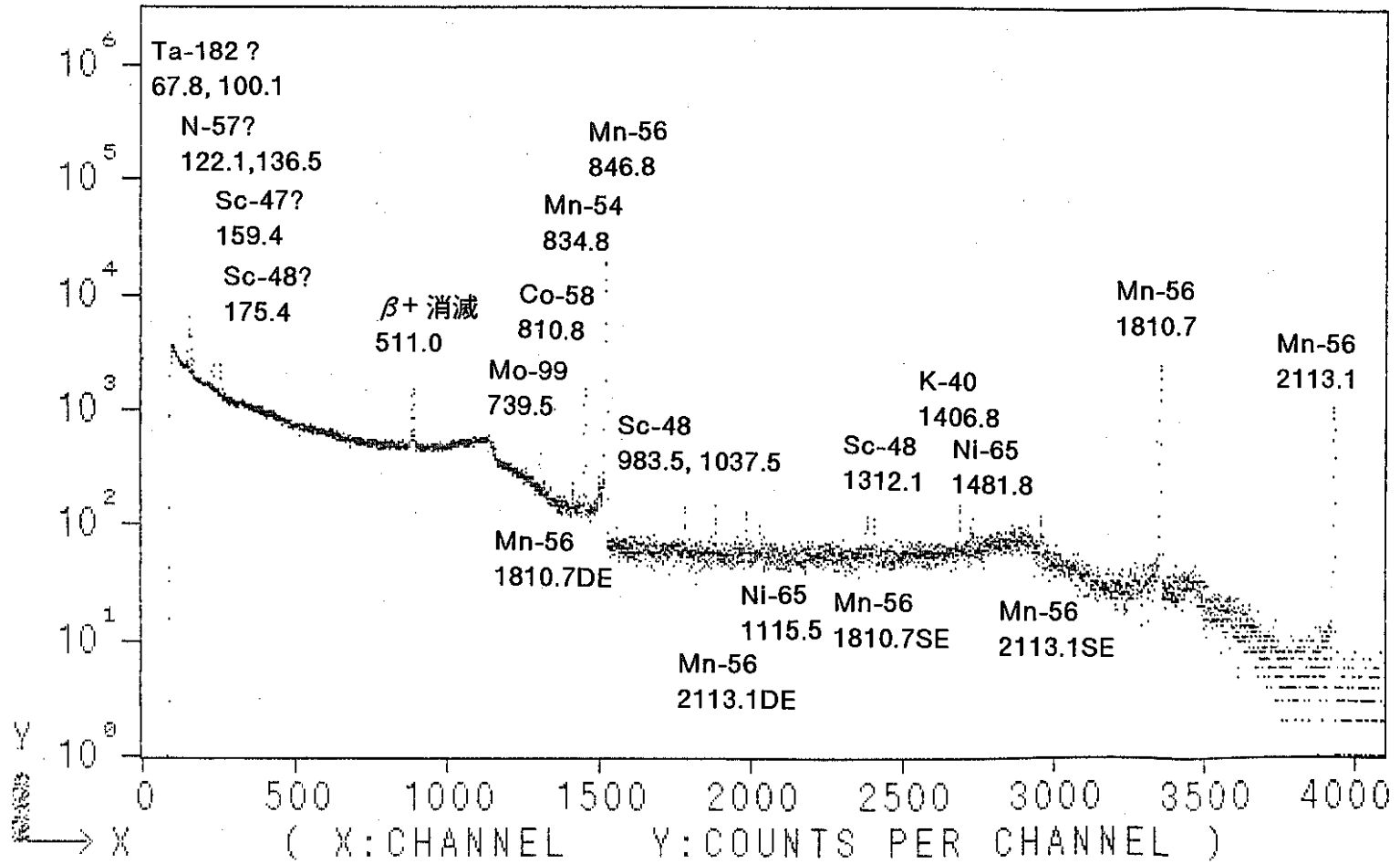


図 3-7 タグガスダミー試料の典型的な照射後誘導 $\gamma$ 線スペクトル例  
( '96 1/18 照射 単体型 C-1 試料 )

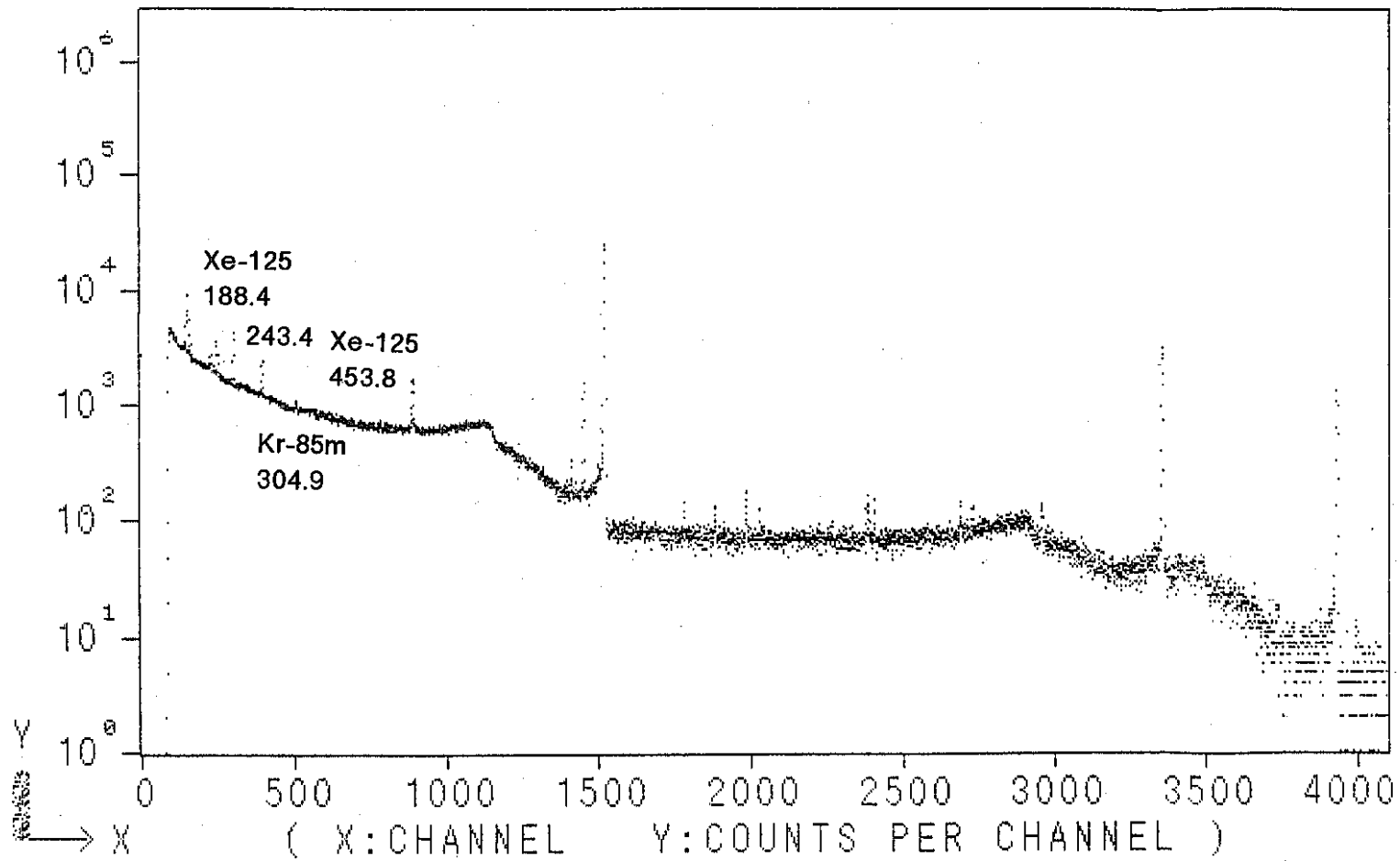


図 3-8 単体型タゲガス試料の典型的な照射後誘導 $\gamma$ 線スペクトル例  
( '96 1/18 照射 単体型 C-2 試料 )



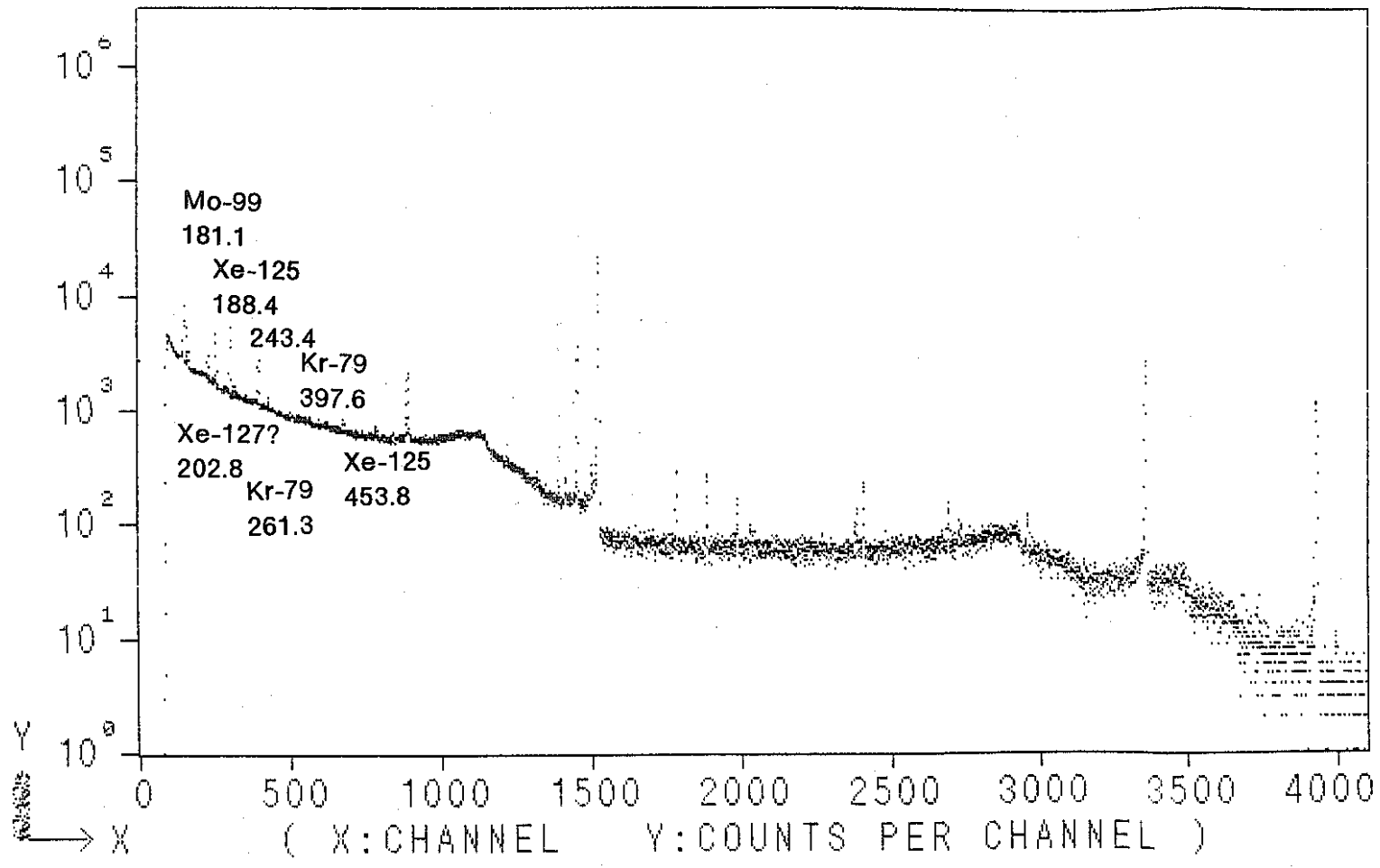


図 3-9 小径型タグガス試料の典型的な照射後誘導 $\gamma$ 線スペクトル例  
( '96 1/18 照射 小径型B-1 試料 )

表3-8 タグガス試料の放射性核種の同定結果 I ('95 11/10 照射 at Gy 孔)

照射試料 I D		小径型 A-1 (Dummy)		小径型 A-2		小径型 A-3		単体型 B		
冷却時間 [s]		6 7 6 0 1		6 2 3 8 1		6 5 2 0 1		6 9 9 4 1		
計数時間 [s]		2 0 0 0		2 0 0 0		2 0 0 0		2 0 0 0		
光電ピーク		ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/s/W]*	ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/s/W]*	ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/s/W]*	ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/s/W]*	同定核種の候補と対応 $\gamma$ 線エネルギー [keV]
チャンネル	換算エネルギー [keV]									
209.53	185.1	1316		2436		2512		1676		Mo-99, 181.1
216.00	190.7			31111	285	30075	285	20888	209	Xe-125, 188.4
223.85	197.4			3948	707	4162	746	1603	288	Xe-127, 202.8?
271.29	238.3			14149	325	13719	326	9356	234	Xe-125, 243.4
291.00	255.3			3148	219	2843	216	1779	139	Kr-79, 261.3
454.45	396.2			1404	219	1659	262	806	131	Kr-79, 397.6
525.02	457.0			1222	366	1187	367	955	312	Xe-125, 453.8
598.19	507.2	31573		37576		36897		22280		$\beta^+$ 消滅, 511.0
893.30	735.0	851		1395		1302		818		Mo-99, 739.5
986.31	806.7	63838		69967		67128		41693		Co-58, 810.8
1017.75	831.0	2882		3112		3035		2355		Mn-54, 834.8
1033.31	843.0	6619	3156	9490	2916	7860	2981	4923	2659	Mn-56, 846.8
1212.24	981.1	2685		3049		2915		1500		Sc-48, 983.5
1283.09	1035.8	2549		2819		2669		1377		Sc-48, 1037.5
1643.77	1314.8	2102		2318		2207		1165		Sc-48, 1312.1
2300.90	1821.3	968	3215	1287	2895	1075	2984	680	2689	Mn-56, 1810.7

\*照射直後に試料中に生成された希ガス放射性核種の崩壊総数(飽和放射能)推定値。

なお、Mn-56は、測定結果の妥当性チェックのために算出している。

表3-9 タグガス試料の放射性核種の同定結果 II ('96 1/18 照射 at Gy 孔)

照射試料ID		単体型C-1 (Dummy)		単体型C-2		単体型A-1		単体型A-2		小径型B-1		小径型B-2		
冷却時間[sec]		11250		7650		22050		25650		14850		18450		
計数時間[sec]		3000		3000		3000		3000		3000		3000		
光電ピーク		ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/W/s]*	ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/W/s]*	ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/W/s]*	ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/W/s]*	ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/W/s]*	ピーク面積	生成核種の崩壊概数 [1/W/s]*	同定核種の候補と対応γ線エネルギー[keV]
チャンネル	換算エネルギー [keV]													
289.82	184.8			473		449		382		902				Mo-99, 181.1
301.66	191.3			8562	203	1422	39.7	4371	127	11449	295	11115	298	Xe-125, 188.4
315.44	198.8									1290	1128	1106	968	Xe-127, 202.8?
395.76	242.8			4041	229	534	35.6	1921	133	5331	327	4974	318	Xe-125, 243.4
407.45	249.2					727	11.3							Xe-135, 249.8?
427.99	260.4					773	214	608	172	1000	266	1219	331	Kr-79, 261.3
505.88	303.0			1115	66.9									Kr-85m 304.9
676.73	396.4					378	203	255	139	466	240	385	202	Kr-79, 397.6
781.71	453.8			650	435			175	144	582	422	481	364	Xe-125, 453.8
888.40	512.2	7212		7785		6070		5485		11275		9965		β+ 消滅, 511.0
1068.05	604.4					129	118					238	213	Kr-79, 606.1
1319.19	737.5	256				273		229		235		269		Mo-99, 739.5
1454.11	809.0	5707		5730		6452		6564		13458		12016		Co-58, 810.8
1499.34	832.9	514		505		484		420		669		836		Mn-54, 834.8
1522.29	845.1	82018	2055	106715	2044	39743	2230	30889	2268	90145	2955	68807	2952	Mn-56, 846.8
1781.36	982.3	317		295		321		351		950		777		Sc-48, 983.5
1884.10	1036.8	364		371		413		366		976		766		Sc-48, 1037.5
2032.22	1115.2	161		209						232		127		Ni-65, 1115.5
2406.02	1313.3	285		326		309		335		724		591		Sc-48, 1312.1
2689.13	1463.3	410		400		416		433		424		516		K-40, 1406.8
2728.93	1484.3	243		271				89		226		89		Ni-65, 1481.8
3354.86	1815.9	11636	2069	15359	2087	5707	2272	4479	2333	12577	2926	9671	2943	Mn-56, 1810.7
3930.40	2120.8	5353		6938		2566		2070		6032		4427		Mn-56, 2113.1

\*照射直後に試料中に生成された希ガス放射性核種の崩壊総数(飽和放射能)推定値。

#### 4. 結 言

東京大学工学部附属原子力工学研究施設の高速中性子源炉「弥生」の2つの標準照射場(Gy孔及びFC内)を用いて、HAFM試料及びタグガス試料の校正照射が進行中である。放射化法を用いた中性子ドシメトリーにより、照射場特性が実験的に評価された。その結果、中性子スペクトル情報とともに、平成8年3月末現在、照射された0.1MeV以上の中性子フルエンスは、Gy孔で $(1.08 \pm 0.06) \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$  (積算炉出力 $\sim 78 \text{ kWh}$ 相当)、またFC内で $(5.41 \pm 0.34) \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  (積算炉出力 $\sim 160 \text{ kWh}$ 相当)と見積もられた。FC内のHAFM試料は、若干積算中性子束の不足が懸念されるが、少なくともGy孔で継続照射中のHAFM試料は、測定装置の総合的な精度評価を行うために有効に利用できるであろう。ただし、FC内中性子スペクトルの高エネルギー側情報やGy孔内中性子束分布について、追試により確認することが必要である。

一方、Gy孔で照射されたタグガス試料のガンマ線スペクトル測定において、タグガスの放射化で生成された $^{79}\text{Kr}$ 及び $^{125}\text{Xe}$ の放射性核種を明確に同定でき、燃焼計算に用いられる核データ(捕獲断面積、核分裂収率、崩壊データ等)の精度評価に有用なベンチマーク実験データが得られたと考えられる。今後、HPGe検出器における500keV以下のエネルギー校正と検出効率曲線の精密評価、及びLEPS (Low Energy Photon Spectrometer)などを用いた低エネルギー $\gamma$ 線の詳細な測定・解析により、本校正実験の追試と高精度化が望まれる。

## 謝 辞

最後になりましたが、本研究を遂行するにあたり、下記の方々には多大なご協力、並びに有益なご議論を賜りました。

佐藤 泰 氏（東大・工）、門藤健司 氏（東大・工、現 動燃大洗）、  
岩井岳夫 助手（東大・原総センター）、  
青山卓史 氏、伊藤主税 氏、鈴木惣十 氏（以上、動燃大洗実験炉  
部）、梶井智彦 氏（検査開発（株））

ここに記して、心から感謝申し上げます。

平成8年3月20日

井口哲夫

## 参考文献

- [1] 東京大学工学部原子力工学研究施設 原子炉管理部編  
「高速中性子源炉 '弥生' 機器概要」(1974).
- [2] M. Nakazawa and A. Sekiguchi: 'Dosimetry Data Collection in the Fast Neutron Source Reactor YAYOI', UTNL-R0037 (1976) (in Japanese).
- [3] M. Nakazawa, et al., 'The YAYOI Blind Intercomparison on Multiple-Foil Reaction Rate Measurements', UTNL-R 0099, (1981).
- [4] A. Sekiguchi, M. Nakazawa et al., 'Several Dosimetry Studies in the Fast Neutron Source Reactor YAYOI', Proc. 2nd ASTM-EURATOM Symp. on Reactor Dosimetry, Palo-Alto, 1977, NUREG-CP-0004, Vol.3 (1977) 1223-1236.
- [5] W.L. Zijp, et al., 'Interim Report on the REAL-80 Exercise', ECN-82-65 (1982).
- [6] J.H. Baard, et al., 'Nuclear Data Guide for Reactor Neutron Metrology', Kluwer Academic Pub., ISBN 0-7923-0486-1 (1989).
- [7] K. Tasaka et al., 'JNDC Nuclear Data Library of Fission Products - 2nd Version-', JAERI 1320 (1990).
- [8] M. Nakazawa and A. Sekiguchi, 'The Basic Reports of J1-Unfolding Code "NEUPAC"', UTNL-R 0096 (1981).
- [9] M. Nakazawa and A. Sekiguchi, 'A New Data Processing Technique for Reactor Neutron Dosimetry', Proc. 2nd ASTM-EURATOM Symp. on Reactor Dosimetry, Palo-Alto, 1977, NUREG-CP-0004, Vol.3 (1977) 1449-1459.
- [10] 関口 晃、中沢正治 他、「高速炉ドシメトリー手法に関する研究-NEUPACコード開発研究(III)-」、昭和59年度動力炉核燃料開発事業団受託研究報告書、PNC J260 85-01 (1985).
- [11] M. Nakazawa et al., 'JENDL Dosimetry File', JAERI 1325 (1992).