

# He蓄積型中性子フルエンスモニタの測定精度

1998年1月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

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下さい。

〒311-1393 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, 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) 1998

## He 蓄積型中性子フルエンスモニタの測定精度

伊藤主税<sup>\*1</sup>、青山卓史<sup>\*1</sup>、吉川和伸<sup>\*2</sup>

### 要 旨

高速炉における中性子照射量の測定精度向上と高速炉用構造材の He 生成量の直接測定を目的として He 蓄積型中性子フルエンスモニタ (HAFM) の開発を行っている。本手法の測定精度については、これまでに He 含有試料を用いて HAFM 測定装置を較正し、誤差 5% 以内で He 原子数を測定できることを確認している。

本研究では、次のステップとして、HAFM による中性子照射量の測定精度を評価するため、東京大学「弥生」炉の標準中性子場で濃縮 B および Be 素子の HAFM を全中性子照射量で  $10^{15} \sim 10^{17} \text{ n/cm}^2$  照射し、He 原子数を測定して放射化箔法により別途求めた He 生成量と比較した。また、これらの HAFM の一部は九州大学において独立に測定され、両者の相互比較により測定値の確認を行った。

本研究で得られた主要な成果は以下のとおりである。

- (1) 濃縮 B 素子 HAFM の測定値 (M) と He 生成量評価値 (C) を比較した結果、10 keV ~ 1 MeV の中～高エネルギー領域、10 keV 以下の低エネルギー領域のいずれの中性子に対しても M/C は 0.98 ~ 1.03 であり、測定誤差 5% 以内で中性子照射量を測定できることがわかった。
- (2) Be 素子 HAFM の測定値と He 生成量評価値を比較した結果、1 MeV 以上の高エネルギー領域の中性子に対して M/C は 0.96 であり、B 素子と同様に測定誤差 5% 以内で中性子照射量を測定できることがわかった。
- (3) 動燃および九州大学による B 素子 HAFM の測定結果は、実験誤差の範囲内で一致し、測定値の信頼性が確認された。

---

<sup>\*1</sup> 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 実験炉部 技術課

<sup>\*2</sup> 検査開発株式会社

# Accuracy of Helium Accumulation Fluence Monitor

Chikara ITO<sup>\*1</sup>, Takafumi AOYAMA<sup>\*1</sup> and Kazumobu YOSHIKAWA<sup>\*2</sup>

## Abstract

A He accumulation fluence monitor (HAFM) has been developed for neutron dosimetry and the direct measurement of He production in structural component materials used for fast reactors. As to accuracy of measuring helium atoms by the HAFM measurement system, previous study using He ions implanted samples shows that this system could measure He atoms within 5% error.

In order to confirm the measurement accuracy of neutron fluence in the fast reactor, the HAFM samples were irradiated to a total fluence of  $10^{15} \sim 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup> in the standard fast neutron spectrum field of the Fast Neutron Source Reactor "YAYOI" at University of Tokyo. Irradiated samples were measured by the HAFM measurement system and the He Atoms Measurement System (HAMS) at Kyushu University, and the measured values were compared with the calculated He productions.

The principle results are summarized as follows:

- (1) It was confirmed that He production in <sup>10</sup>B could be measured within 5 % error by the HAFM system at the reactor core center or the experimental hole through the blanket where He were produced by neutron of 10 keV  $\sim$  1 MeV and at Fast Column where He were produced by neutron less than 10 keV.
- (2) It was also found that He production in <sup>9</sup>Be could be measured within 5 % at the experimental hole through the blanket. Thus it is expected that Be could be applied to measurements of fast neutron of its energy over 1 MeV.
- (3) The differences between the measured values by the HAFM measurement system and those by HAMS were less than the experimental error, therefore it was confirmed that the measured values was reliable.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. HAFM 測定装置の感度較正 .....	2
2.1 He 含有試料による感度較正 .....	2
2.2 HAFM 測定装置の He 原子数測定精度 .....	3
3. HAFM の較正照射 .....	9
3.1 グローリー孔 .....	9
3.2 ファーストカラム .....	9
3.3 ブランケット実験孔 .....	9
4. He 生成量の測定および計算 .....	11
4.1 $^{10}\text{B}$ の He 生成量 .....	11
4.1.1 グローリー孔 .....	11
4.1.2 ファーストカラム .....	11
4.1.3 ブランケット実験孔 .....	12
4.2 $^9\text{Be}$ の He 生成量 .....	13
5. HAFM による中性子照射量の測定精度 .....	28
5.1 $^{10}\text{B}$ .....	28
5.2 $^9\text{Be}$ .....	28
6. 結 言 .....	30
謝 辞 .....	31
参考文献 .....	32

## 表リスト

表 2.1	He 含有試料測定結果	4
表 2.2	He 原子数測定値のバラツキ	5
表 3.1	「弥生」で照射した HAFM の仕様と照射条件	10
表 4.1	グローリー孔で照射した濃縮 B の測定結果	14
表 4.2	ファーストカラムで照射した濃縮 B の測定結果	15
表 4.3	ブランケット実験孔で照射した濃縮 B の測定結果	16
表 4.4	ブランケット実験孔で照射した Be の測定結果	17
表 5.1	He 原子数測定値と生成量評価値の比の平均	29

## 図リスト

図 2.1	HAFM 測定装置の概略系統	6
図 2.2	測定装置の表示値と He 原子数の関係	7
図 2.3	較正曲線の例	8
図 4.1	「弥生」標準中性子場の中性子スペクトル	18
図 4.2	$^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 断面積 (JENDL-3.2 より作成)	19
図 4.3	「弥生」標準中性子場における $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応率のエネルギー依存性	20
図 4.4	ファーストカラムの中低速中性子束分布 (水平方向)	21
図 4.5	ファーストカラムの中低速中性子束分布 (鉛直方向)	22
図 4.6	ファーストカラムの中低速中性子束分布測定結果	23
図 4.7	ブランケット実験孔で照射した濃縮 B の He 生成量分布	24
図 4.8	ブランケット実験孔で照射した Be の He 生成量分布	25
図 4.9	$^9\text{Be}$ の He 生成断面積 (JENDL-3.2 より作成)	26
図 4.10	「弥生」標準中性子場における $^9\text{Be}$ の He 生成反応率のエネルギー依存性	27

## 1. 緒 言

高速実験炉「常陽」では、高速炉燃料・材料や核融合材料の照射試験およびサーベイランス試験における中性子照射量を測定・評価するために、原子炉ドシメトリー試験を実施している。ドシメトリー手法として、従来は多重放射化箔法を用いてきたが、測定精度の向上を目的として、これに加えて He 蓄積型中性子フルエンスモニタ (HAFM) の開発を進めている。

HAFM 法は、 $(n, \alpha)$  反応等で生成した He 量を測定して中性子照射量を求める手法であり、放射化箔法との併用によりその信頼性と精度を向上させることができる。また、高速炉用構造材や核融合材料の He 脆化の評価に重要な材料中の He 生成量を直接測定することも可能になる。

HAFM 法の測定では、照射済の HAFM を溶融して He を放出させ、その数を質量分析計で計測する。本手法の測定精度の確認については、第一ステップとして、既知量の He ガスを用いた質量分析計の感度較正を行い、次に、既知量の He イオンを撃ち込んだ He 含有標準試料を用いて HAFM 溶融部を含む測定装置全体の較正を行った。

本研究では、第二ステップとして、東京大学の「弥生」炉の標準中性子場において較正照射した B および Be 素子の HAFM の He 生成量を測定し、別途放射化箔法により求めた値と比較して HAFM による中性子照射量の測定精度を評価した。なお、照射試料の一部については、HAFM 測定装置と同じ測定原理である九州大学の微量 He 原子測定装置により測定し、動燃の HAFM 測定装置と相互比較することにより、測定の信頼性を確認した。



## 2. HAFM 測定装置の感度較正

HAFM 法では、 $(n, \alpha)$  反応等で生成・蓄積する He 原子数を測定することにより中性子照射量を求める<sup>1)</sup>。He 原子数の測定は、HAFM を溶融して He 原子を放出させ、質量分析計で計数することにより行われる。この測定装置は、HAFM 溶融用電気炉と質量分析計を主要部として、これに質量分析計の感度較正用 He ガス作成部が併設されている。平成 8 年には、HAFM 溶融用電気炉に HAFM 導入用前室を設置するとともに HAFM 溶融用電気炉を改造し、多種のサイズの HAFM の連続測定を可能とした。現在の HAFM 測定装置の概略系統を図 2.1 に示す。

本装置の測定精度については、これまでに He 含有試料および He ガスを用いた較正試験を実施し、 $10^{14}$  He atoms/sample 以上の He 原子数について誤差 5% 以内で測定できることを確認している<sup>2)3)</sup>。本研究では、HAFM 溶融用電気炉等の改造および測定方法の改良を行ったことから再度較正を行い、 $10^{12}$  He atoms/sample 以上の He 原子数について誤差 5% 以内で測定できることを確認した。

### 2.1 He 含有試料による感度較正

HAFM 測定装置による He 原子数の測定では、質量分析計で計測された質量数 4 のピーク電流を増幅して電圧に変換した値を読み取り、別途求めた He 原子数と質量分析計出力電圧値の関係（較正曲線）を用いて He 原子数を決定する。

較正曲線は、既知量の He を含有した試料を数個測定することにより作成している。この He 含有試料は、Cu、Al、V の金属片に加速器で既知量の He イオンを撃ち込んだもので、その He 含有量は、九州大学の微量 He 原子分析装置<sup>4)</sup> (HAMS) による測定により定量されている。

He 含有試料による測定装置の較正は、試料を溶融して He を放出し、その原子数を測定する HAFM の測定手順を模擬できるが、較正に時間を要するため詳細な感度の変動をモニタしにくいことおよび He 含有試料の在庫には限りがあることから、実際には、試料を溶融せずに簡便に行える He ガスの測定と組み合わせて較正を実施している。

具体的には、以下の手順で較正を行う。

- ① 定期的に He 含有試料を測定する。この時、別途 He ガス測定により質量分析計の出力電圧値と He 原子数の関係を求め、この関係を用いて、He 含有試料の He 原子数の測定値（測定装置が表示する He 原子数）と He 含有量（較正された He 原子数）の関係を求める。

- ② HAFM の測定時には、HAFM を 1 試料測定する毎に He ガスを数点測定して較正曲線を作成する。この時、He ガスの He 原子数は、上記①で求めた関係を用いて較正された He 原子数に換算する。

HAFM の測定の実際には、上記②で作成した較正曲線を用いて He 原子数を求めている。本研究のため行った He 含有試料の測定結果を表 2.1 に、測定装置が表示する He 原子数と較正された He 原子数の関係を図 2.2 に示す。測定装置が表示する He 原子数は、較正された He 原子数に対して 8 ~ 9 % 系統的に過大であり、HAFM の測定時に用いる較正曲線は、この系統誤差の補正が行われている。較正曲線の例を図 2.3 に示す。

## 2.2 HAFM 測定装置の He 原子数測定精度

HAFM 測定装置の He 原子数測定精度は、He 含有試料の測定値の偶然誤差（バラツキ）から決定される。

従来、 $10^{14}$  He atoms/sample 未満の領域の測定では、約 10 % の測定値のバラツキがあった。He 原子数の測定では、分析管をダイナミックモード（真空排気を継続する）にして質量数 4 のイオン電流のピーク高さを連続的に計測する。このときのピーク高さの電流値（実際にはこれを電圧に変換して増幅した値）のサンプリング量を従来約 10 倍にする改良を行い、測定値のバラツキを減少させることができた。

He 含有試料中の He 原子数測定値を単位 He 含有量あたりの値に換算して、 $10^{13}$ ,  $10^{14}$ ,  $10^{15}$  He atoms/sample の桁毎に平均し、そのバラツキ（標準偏差）を表 2.2 に示す。本研究では、 $10^{12}$  He atoms/sample の領域まで、5 % のバラツキの精度で測定することが可能になった。

表 2.1 He 含有試料測定結果

試料材質	He 含有量 (He atoms/sample)	He 原子数測定値 (He atoms/sample)	測定値/含有量	バックグラウンド (%)
Cu	$9.50 \times 10^{14}$	$1.02 \times 10^{15}$	1.08	< 0.1
	$9.51 \times 10^{13}$	$1.04 \times 10^{14}$	1.09	< 0.1
	$9.49 \times 10^{12}$	$9.89 \times 10^{12}$	1.04	0.5
Al	$1.01 \times 10^{15}$	$1.11 \times 10^{15}$	1.10	< 0.1
	$1.01 \times 10^{14}$	$1.09 \times 10^{14}$	1.07	< 0.1
	$1.01 \times 10^{13}$	$1.17 \times 10^{13}$	1.16	0.8
	$1.01 \times 10^{13}$	$1.11 \times 10^{13}$	1.10	0.5
V	$9.81 \times 10^{14}$	$1.10 \times 10^{15}$	1.12	< 0.1
	$9.80 \times 10^{13}$	$1.08 \times 10^{14}$	1.10	0.1
	$9.91 \times 10^{12}$	$1.01 \times 10^{13}$	1.02	1.1

表 2.2 He 原子数測定値のバラツキ

He 原子数 (He atoms/sample)	He 原子数測定値のバラツキ (1 $\sigma$ %)	
	He 含有試料	標準 He ガス
$(0.95 \sim 1.01) \times 10^{15}$	$\pm 1.8$	$\pm 0.4$
$(0.95 \sim 1.01) \times 10^{14}$	$\pm 4.0$	$\pm 1.2$
$(0.95 \sim 1.01) \times 10^{13}$	$\pm 4.8$	$\pm 4.5$
全試料	$\pm 3.7$	$\pm 1.8$

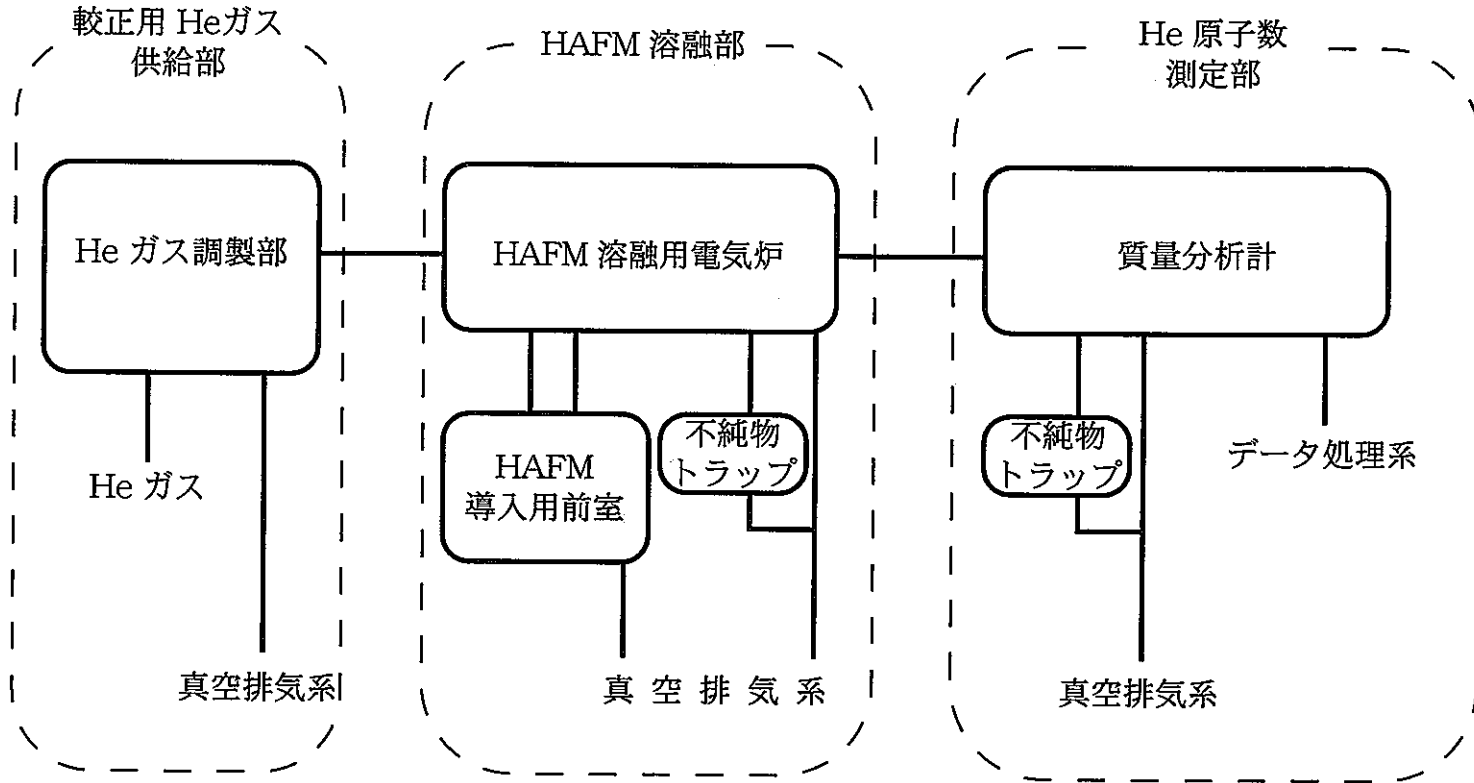


図 2.1 HAFM 測定装置の概略系統

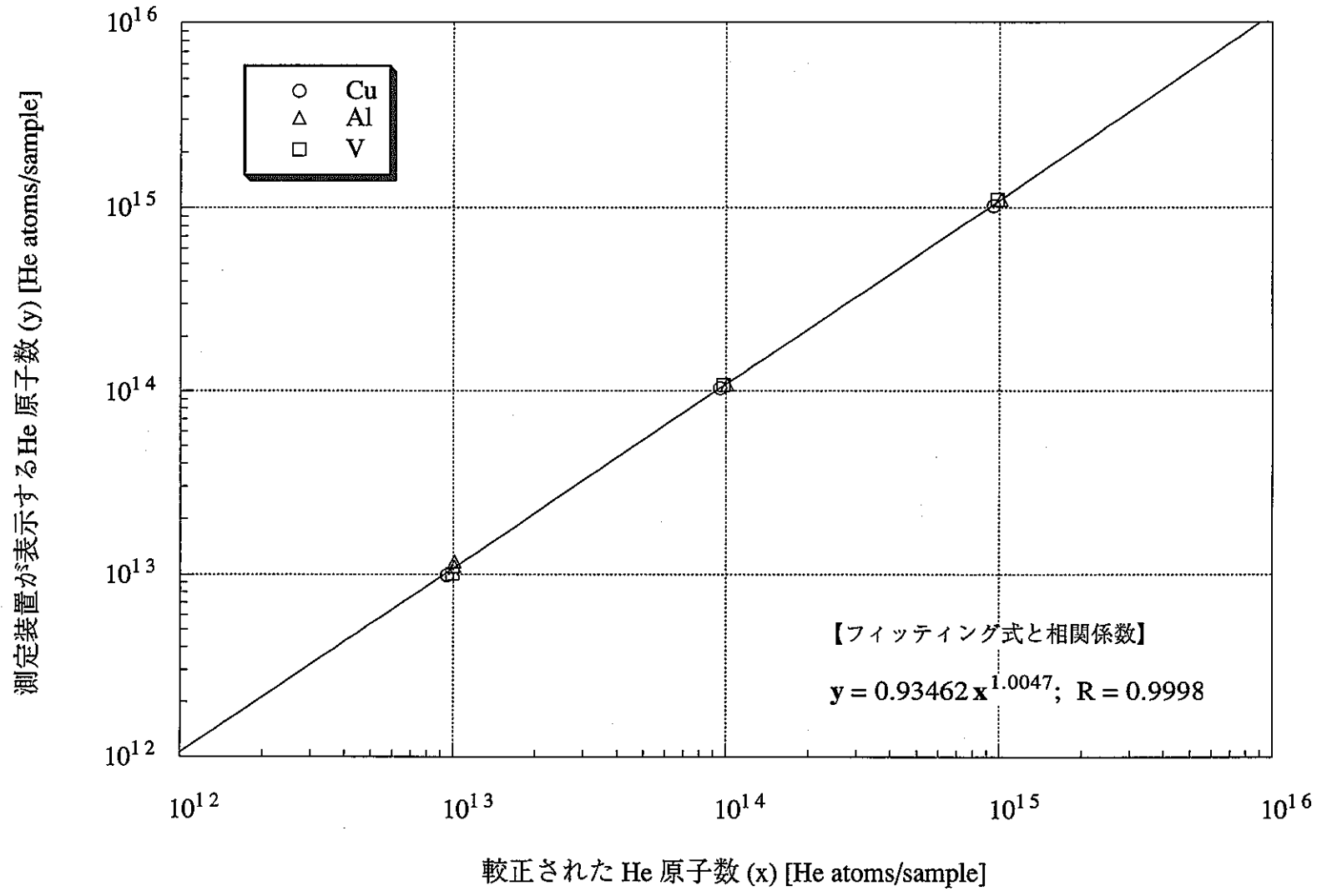


図 2.2 測定装置の表示値と He 原子数の関係

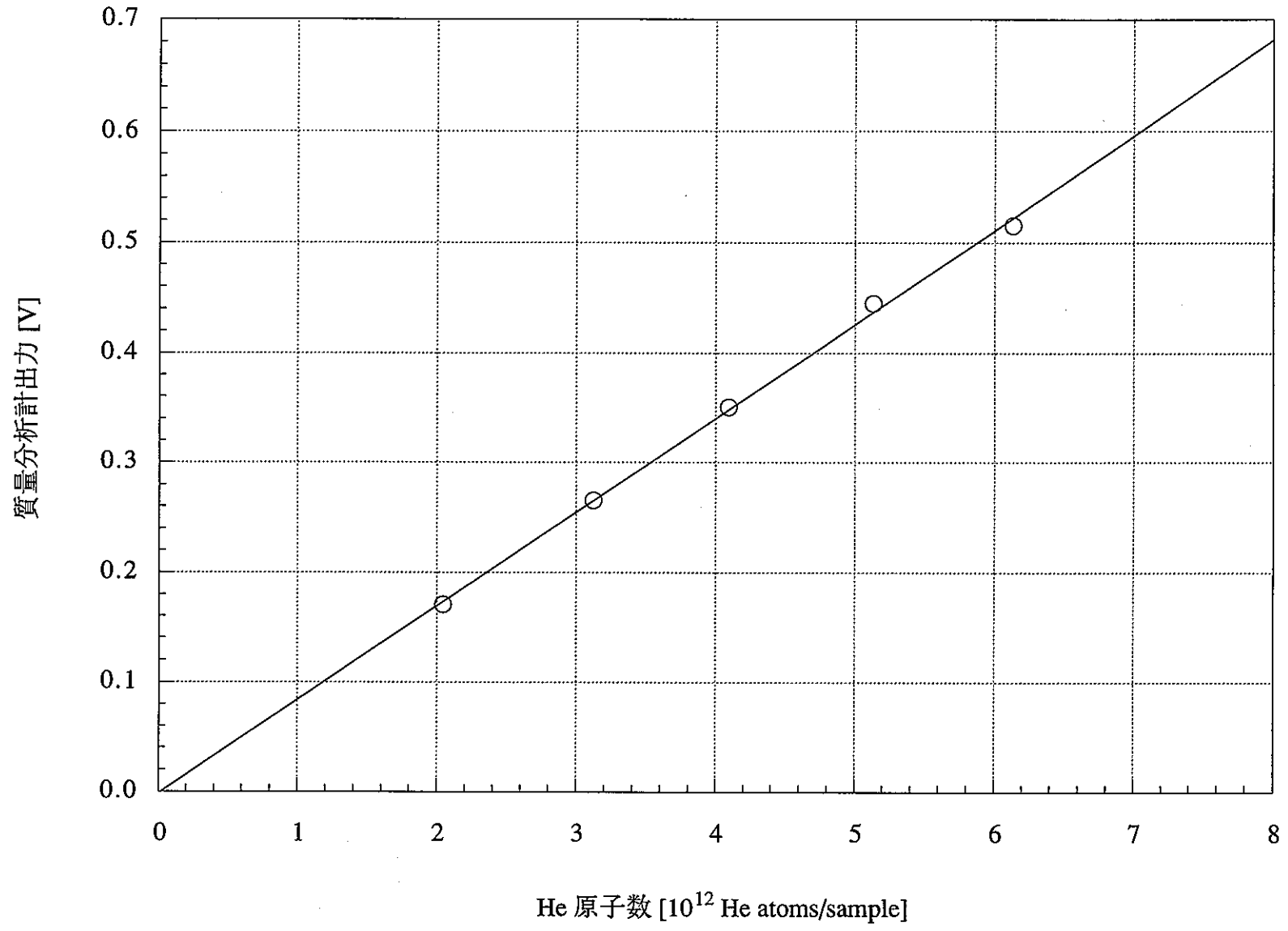


図 2.3 較正曲線の例

### 3. HAFM の校正照射

高速炉ドシメトリー用として HAFM の測定精度を評価するため、中性子スペクトルとその精度がよく知られている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」<sup>15)</sup> で HAFM を校正照射した。ここでは、高速炉スペクトルにおいて 1 MeV 以下の中性子に He 生成反応の感度を持つ B と概ね 2 MeV 以上の高速中性子に感度を持つ Be 素子の HAFM を用い、「弥生」の 3 箇所の照射場で実施した。HAFM の仕様と照射条件を表 3.1 に示す。

#### 3.1 グローリー孔

グローリー孔は、円柱炉心の中心を径方向に貫通する実験孔で、核分裂中性子が形成する標準高速中性子スペクトル場であり、低エネルギー中性子や二次  $\gamma$  線が少ない。グローリー孔では、 $^{10}\text{B}$  を 93 % 濃縮した B 1 mg を V キャプセルに封入した HAFM 6 個をグローリー孔中心に装荷し、平成 7 年 10 月から平成 9 年 3 月までに積算出力 192 kWh で全中性子照射量  $3.13 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$  の照射を行った。

#### 3.2 ファーストコラム

ファーストコラムには、円柱炉心を取り囲む劣化ウランブランケットを通過し、鉛反射体およびコンクリート遮へい体を貫通するビーム孔を通じて中性子が漏えいし、炉心に比べてスペクトルは軟化している。ファーストコラムでは、グローリー孔で照射した試料と同一仕様である 93 % 濃縮 B 1 mg の HAFM を照射した。ファーストコラムは中性子束がグローリー孔より約 2 桁程度低く、長期間の照射を要するため、平成 7 年 9 月に照射を開始し、最長で、平成 9 年 3 月までに積算出力 269 kWh で全中性子照射量  $2.54 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$  の照射を行った。

#### 3.3 ブランケット実験孔

ブランケット実験孔は、劣化ウランブランケットの軸方向に設けられた実験孔で、グローリー孔とほぼ同様のスペクトル特性を有するが、グローリー孔より若干軟らかい。ブランケット実験孔では、93 % 濃縮 B 40 mg に対して、平成 8 年 5 月から 10 月まで積算出力 93 kWh で全中性子照射量  $5.39 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$  (最大) の照射を行った。また、Be 100 mg に対しては、平成 8 年 5 月から平成 9 年 2 月まで積算出力 193 kWh で全中性子照射量  $1.02 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$  (最大) の照射を行った。



表 3.1 「弥生」で照射した HAFM の仕様と照射条件

H A F M の 仕 様			照 射 条 件		
素子 <sup>*1</sup>	化学的純度 (重量比)	同位体組成比 (原子数比)	照射場	積算出力 <sup>*2</sup> [kWh]	全中性子照射量 [n/cm <sup>2</sup> ]
濃縮 B 1mg	98.19 %	<sup>10</sup> B 93.01 %	グローリー孔	192	$3.13 \times 10^{17}$
			ファーストカラム	239 ~ 269	$(2.08 \sim 2.54) \times 10^{15}$
濃縮 B 40mg	98.19 %	<sup>10</sup> B 93.04 %	ブランケット実験孔	93.2	$(3.37 \sim 5.39) \times 10^{16}$
Be 100mg	99.99 %	<sup>9</sup> Be 100 %		193	$(7.29 \sim 10.2) \times 10^{16}$

\*1 個別に V キャプセルに封入されている。

\*2 「弥生」の定格出力は 2 kW である。

## 4. He 生成量の測定および計算

「弥生」で較正照射した HAFM の He 生成量を測定と計算で求めた。

測定では、HAFM 測定装置を用い、質量分析計により He のピークを計数して較正曲線から He 原子数を求めた。また、較正照射に用いた HAFM と同一仕様で未照射のものも測定し、バックグラウンドを求めた。また、相互比較を行うため、照射した HAFM の一部は九州大学の HAMS でも独立に測定された。

計算では、放射化箔による測定あるいは理論計算から評価した各中性子場の中性子束およびスペクトルと反応断面積から B および Be の He 生成反応率を求め、それを照射時間で積分して He 生成量を算出した。

### 4.1 $^{10}\text{B}$ の He 生成量

#### 4.1.1 グローリー孔

グローリー孔で照射した濃縮 B の He 原子数測定結果を表 4.1 に示す。5 試料の測定値の平均は  $1.39 \times 10^{16}$  He atoms/sample、九州大学の測定値は  $1.42 \times 10^{16}$  He atoms/sample であり、両者の差は 2% で、測定誤差の範囲内で一致した。また、5 試料の測定値のバラツキは測定誤差と同程度であり、照射条件に起因する誤差は無視できるものと考えられる。

グローリー孔の中性子スペクトルの算出には、過去の実験等により求められている核分裂と非弾性散乱の 2 スペクトルモードの線形和のパラメータフィッティング式<sup>10)</sup>を用い、中性子束の絶対値は、平成 8 年度に実施した反応率測定結果のうち、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応と感度領域が近い  $^{58}\text{Fe}(n, \gamma)$  および  $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$  の反応率測定値で規格化した。中性子スペクトルを図 4.1 に示す。全中性子束は  $4.70 \times 10^8$  n/cm<sup>2</sup>/s/W であった。

この中性子スペクトルと JENDL-3.2<sup>7)</sup> より作成した 103 群の  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  断面積を乗じて  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応率を求めた。 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  断面積を図 4.2 に、反応率のエネルギー依存性を図 4.3 に示す。 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応に寄与する中性子のエネルギーは 30 keV ~ 2 MeV であった。

得られた反応率を照射時間で積分して He 生成量を計算した。その結果を表 4.1 に示す。なお、計算値の誤差は、中性子束絶対値の決定に用いた  $^{58}\text{Fe}(n, \gamma)$ 、 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$  反応率測定値の誤差とした。

#### 4.1.2 ファーストコラム

ファーストコラムでは、数個の HAFM をビーム孔に垂直な面上に固定して照射した。ファーストコラムで照射した濃縮 B の He 原子数測定結果を表 4.2 に示す。

各試料の照射位置の中性子スペクトルは、ファーストコラムの中心位置について多重放射化箔法による中性子スペクトル測定を行った。その結果を図 4.1 に示す。中心以外の場

所については、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応と感度領域が近い  $^6\text{Li}(n, \alpha)$  反応を利用し、 $^6\text{LiF}$  をコンバータに用いた光ファイバ中性子検出器<sup>8)</sup> および  $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$  素子の熱蛍光線量計 (TLD) を用いて熱中性子束分布を測定した。光ファイバおよび TLD の測定結果を図 4.4 および図 4.5 に示す。中心を通る水平方向の分布はほぼ左右対称であるが、鉛直方向については中心から約 3 cm 上の位置が最大であった。TLD の測定結果については、小さい値の点が幾つかあるが、分布は概ね光ファイバと一致した。この光ファイバの測定結果を 2 次関数でフィッティングし、ファーストカラム中心の熱中性子束に対する HAFM 照射位置の値の比を求めた。中心を通る水平および鉛直方向上でない位置の値は、水平および鉛直方向のフィッティング値から内挿して求めた。これらの結果を図 4.6 に示す。中心位置の中性子束およびスペクトルにこれらの比を乗じて、それぞれの位置の中性子束およびスペクトルを求めた。

次に、グローリー孔の場合と同様の計算により  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応率を求めた。この反応率のエネルギー分布を図 4.3 に示す。ファーストカラムでは熱中性子の寄与が大きく、概ね  $10^4$  eV 以下のエネルギーの中性子が  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応に寄与している。得られた反応率を照射時間で積分して He 生成量を計算した。その結果を表 4.2 に示す。なお、計算値の誤差は、多重放射化箔法による中性子スペクトル測定値の誤差とした。

#### 4.1.3 ブランケット実験孔

ブランケット実験孔で照射した濃縮 B の He 原子数測定結果を表 4.3 に、その分布を図 4.7 に示す。He 原子数測定値の分布は、炉心中心付近であるブランケット実験孔先端から 5 cm の付近を中心に、実験孔先端から 10 cm 位置まではほぼ平坦であった。なお、九州大学で測定した結果は、動燃の測定値に良く内挿できる結果であった。

本実験孔では、濃縮 B を実験孔先端からおおよそ 2 cm 間隔に並べて較正照射した。一方、照射条件から He 生成量の計算値を求めるため、4 ~ 5 cm 間隔で多重放射化箔法による中性子スペクトル測定を行った。これらのうち、最も炉心中心に近い、実験孔先端から 5.2 cm の位置における中性子スペクトルの測定結果を図 4.1 に示す。グローリー孔ほど硬くはないものの、低エネルギー中性子の少ないスペクトルである。

次に、グローリー孔における計算と同様の計算により  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応率を求めた。なお、ここでは  $^{58}\text{Fe}(n, \gamma)$  反応率測定値を補正に用いた。この反応率のエネルギー分布を図 4.3 に示す。 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応に寄与する中性子のエネルギーは、グローリー孔より若干低エネルギー側にシフトした 10 keV ~ 800 keV であった。

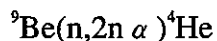
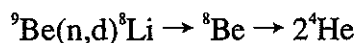
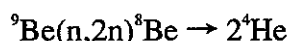
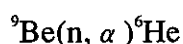
得られた反応率を照射時間で積分して He 生成量を計算して、これら 5 点の He 生成量計算値を最小自乗法で 2 次関数フィッティングし、各 HAFM 照射位置の He 生成量計算値を求めた。フィッティングの結果を図 4.1 に、He 生成量の計算結果を表 4.3 に示す。5 点の He 生成量計算値は、誤差の範囲内でフィッティングすることができた。なお、計算値

の誤差は、中性子束測定値の誤差に  $^{58}\text{Fe}(n, \gamma)$  反応率測定値の誤差を加えた（二乗和の平方根）ものとした。

#### 4.2 $^9\text{Be}$ の He 生成量

ブランケット実験孔で照射した Be の He 原子数測定結果を表 4.4 に、その分布を図 4.8 に示す。He 原子数測定値の分布は、炉心中心に最も近い 5 cm 付近位置の測定値が最大で、濃縮 B の測定結果に比較して勾配が大きい結果が得られた。

He 生成量の計算については、Be の He 生成反応には、概ね 1 MeV 以上のしきい値反応である、



等が存在する。したがって、それぞれの反応を合計した He 生成反応が測定の対象となる。そこで、 $^9\text{Be}$  の He 生成断面積は、1 反応あたりの He 原子生成個数を考慮してそれぞれの反応断面積を合算して作成した。これらの反応断面積を図 4.9 に示す。断面積ライブラリは B と同様に JENDL-3.2 である。

ブランケット実験孔内の 5 点の中性子束測定値をこれらの He 生成反応と感度領域の近い  $^{58}\text{Ni}(n, p)$  反応率測定値で補正し、上述の He 生成断面積を乗じて  $^9\text{Be}$  の He 生成反応率を求めた。この反応率のエネルギー分布を図 4.10 に示す。ブランケット実験孔で  $^9\text{Be}$  の He 生成反応に寄与する中性子のエネルギーは約 2 ~ 8 MeV であった。

得られた反応率を照射時間で積分して He 生成量を計算して、これらの He 生成量計算値を濃縮 B の場合と同様に最小自乗法で 3 次関数フィッティングし、各 HAFM 照射位置の He 生成量を計算値した。フィッティングの結果を図 4.8 に、He 生成量の計算結果を表 4.4 に示す。He 生成量計算値は、誤差の範囲内でフィッティングすることができた。なお、計算値の誤差は中性子束および  $^{58}\text{Ni}(n, p)$  反応率の測定値の誤差とした。

表 4.1 グローリー孔で照射した濃縮 B の測定結果

No.	測定機関	He 原子数測定値 (M) [ $10^{16}$ He atoms/ $^{10}$ B g]	He 生成量評価値 (C) [ $10^{16}$ He atoms/ $^{10}$ B g]	M/C
1	動燃	1.48 (5.0) <sup>*2</sup>	1.35 (2.3)	1.10 (5.5)
2	動燃	1.41 (5.0)		1.04 (5.5)
3	動燃	1.43 (5.0)		1.06 (5.5)
4	動燃	1.30 (5.0)		0.97 (5.5)
5	動燃	1.34 (5.0)		1.00 (5.5)
平均 <sup>*1</sup>	動燃	1.39 (2.2)		1.03 (3.2)
6	九大	1.42 (3.0)	1.05 (3.8)	

<sup>\*1</sup> 動燃で測定した No. 1 ~ 5 の平均を示す。

<sup>\*2</sup> ( ) 内の数値は相対誤差 (1 $\sigma$ %) 。

表 4.2 ファーストコラムで照射した濃縮 B の測定結果

素子	No.	測定機関	He 原子数測定値 (M) [ $10^{15}$ He atoms/ $^{10}\text{B}$ g]	He 生成量評価値 (C) [ $10^{15}$ He atoms/ $^{10}\text{B}$ g]	M/C
濃縮 B	1	九大	3.06 (3.0) <sup>*1</sup>	2.89 (5.5)	1.06 (6.3)
	2	動燃	3.17 (5.0)	3.23 (5.5)	0.98 (7.4)
	3	動燃	3.31 (5.0)	3.41 (5.5)	0.97 (7.4)

<sup>\*1</sup> ( )内の数値は相対誤差 (1 $\sigma$ %)。

表 4.3 ブランケット実験孔で照射した濃縮 B の測定結果

No.	照射位置 * <sup>1</sup> [cm]	測定機関	He 原子数測定値 (M) [ $10^{15}$ He atoms/ $^{10}$ B g]	He 生成量評価値 (C) [ $10^{15}$ He atoms/ $^{10}$ B g]	M/C
1	1.1	動燃	4.62 (5.0) * <sup>2</sup>	4.58 (7.7)	1.01 (9.2)
2	3.0	動燃	4.55 (5.0)	4.70 (7.6)	0.97 (9.1)
3	5.3	動燃	4.94 (5.0)	4.78 (7.5)	1.03 (9.0)
4	7.4	動燃	4.72 (5.0)	4.78 (7.6)	0.99 (9.1)
5	9.4	九大	4.50 (3.0)	4.72 (7.7)	0.95 (8.3)

\*<sup>1</sup> ブランケット実験孔先端から HAFM が照射された位置までの距離を示す。

\*<sup>2</sup> ( ) 内の数値は相対誤差 (1 $\sigma$ %) 。

表 4.4 ブランケット実験孔で照射した Be の測定結果

No.	照射位置 <sup>*1</sup> [cm]	測定機関	He 原子数測定値 (M) [ $10^{14}$ He atoms/Be g]	He 生成量評価値 (C) [ $10^{14}$ He atoms/Be g]	M/C
1	1.0	動燃	3.61 (5.0) <sup>*2</sup>	3.81 (7.8)	0.95 (9.3)
2	3.1	動燃	4.23 (5.0)	4.70 (7.8)	0.90 (9.3)
3	5.2	動燃	5.37 (5.0)	5.13 (7.8)	1.05 (9.3)
4	7.3	動燃	4.87 (5.0)	5.18 (7.8)	0.94 (9.3)
5	9.3	動燃	4.67 (5.0)	4.92 (7.8)	0.95 (9.3)

\*1 ブランケット実験孔先端から HAFM が照射された位置までの距離を示す。

\*2 ( )内の数値は相対誤差 (1 $\sigma$ %)。



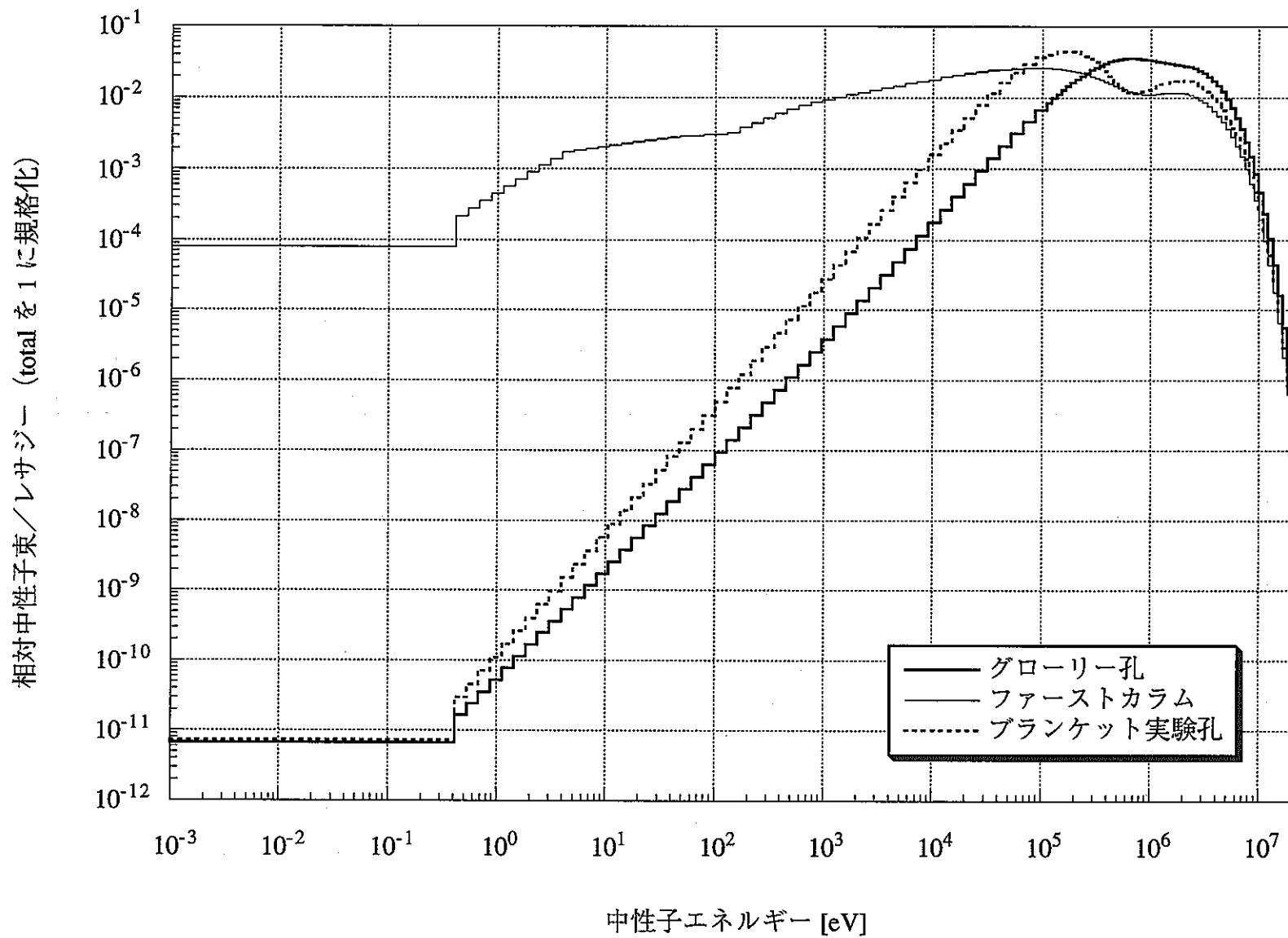
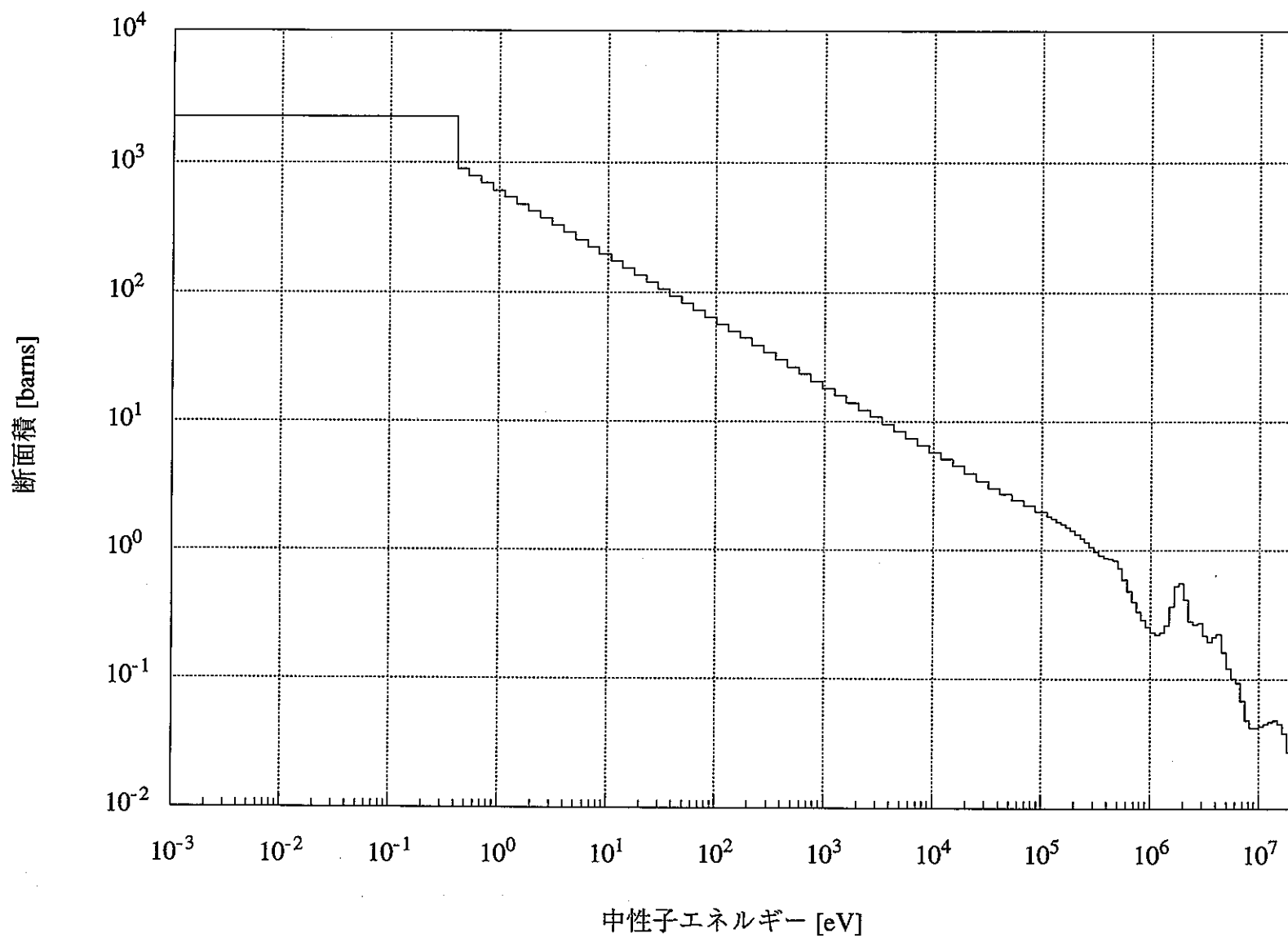


図 4.1 「弥生」標準中性子場の中性子スペクトル

図 4.2  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  断面積 (JENDL-3.2 より作成)

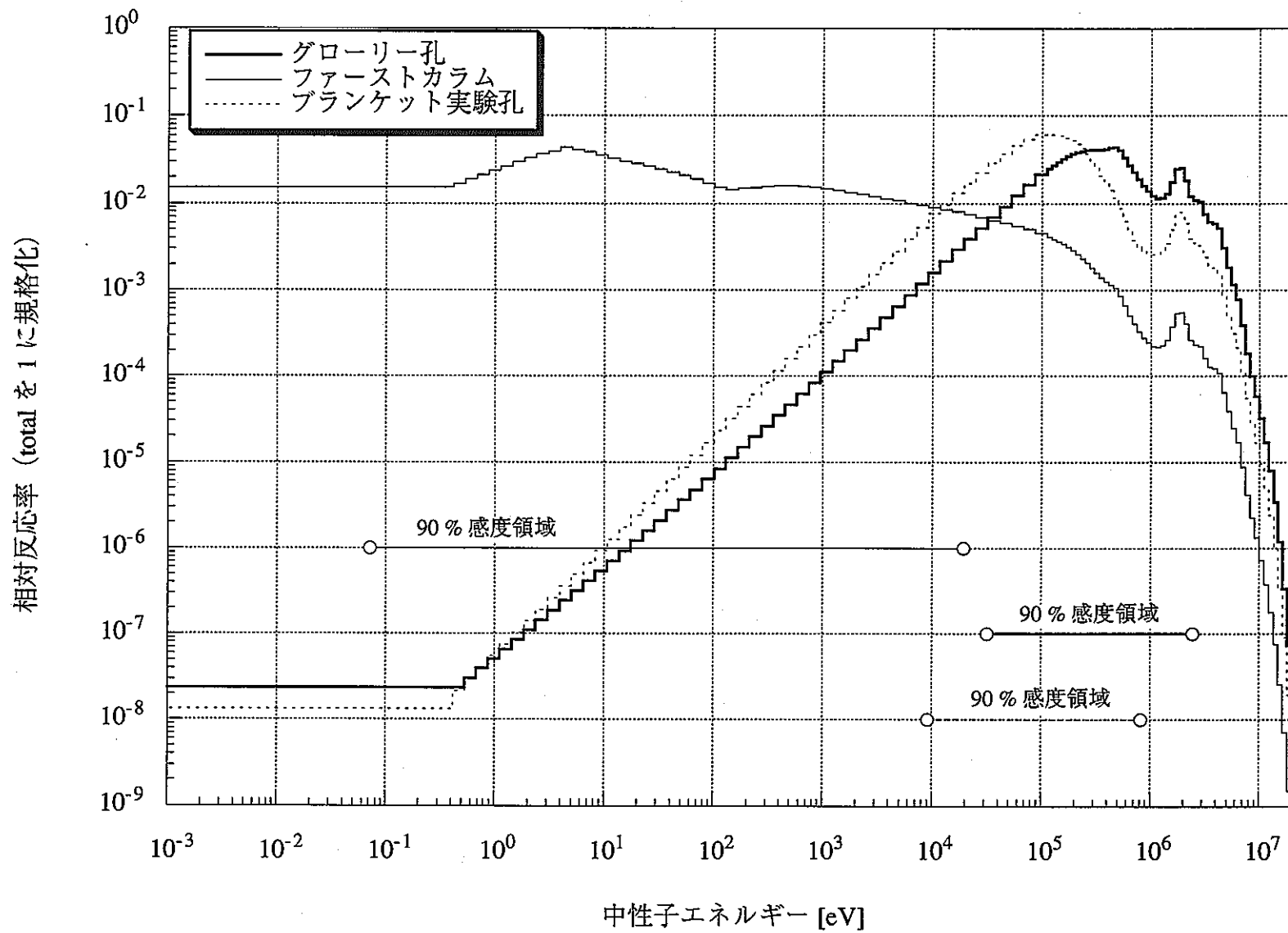


図 4.3 「弥生」標準中性子場における  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応率のエネルギー依存性

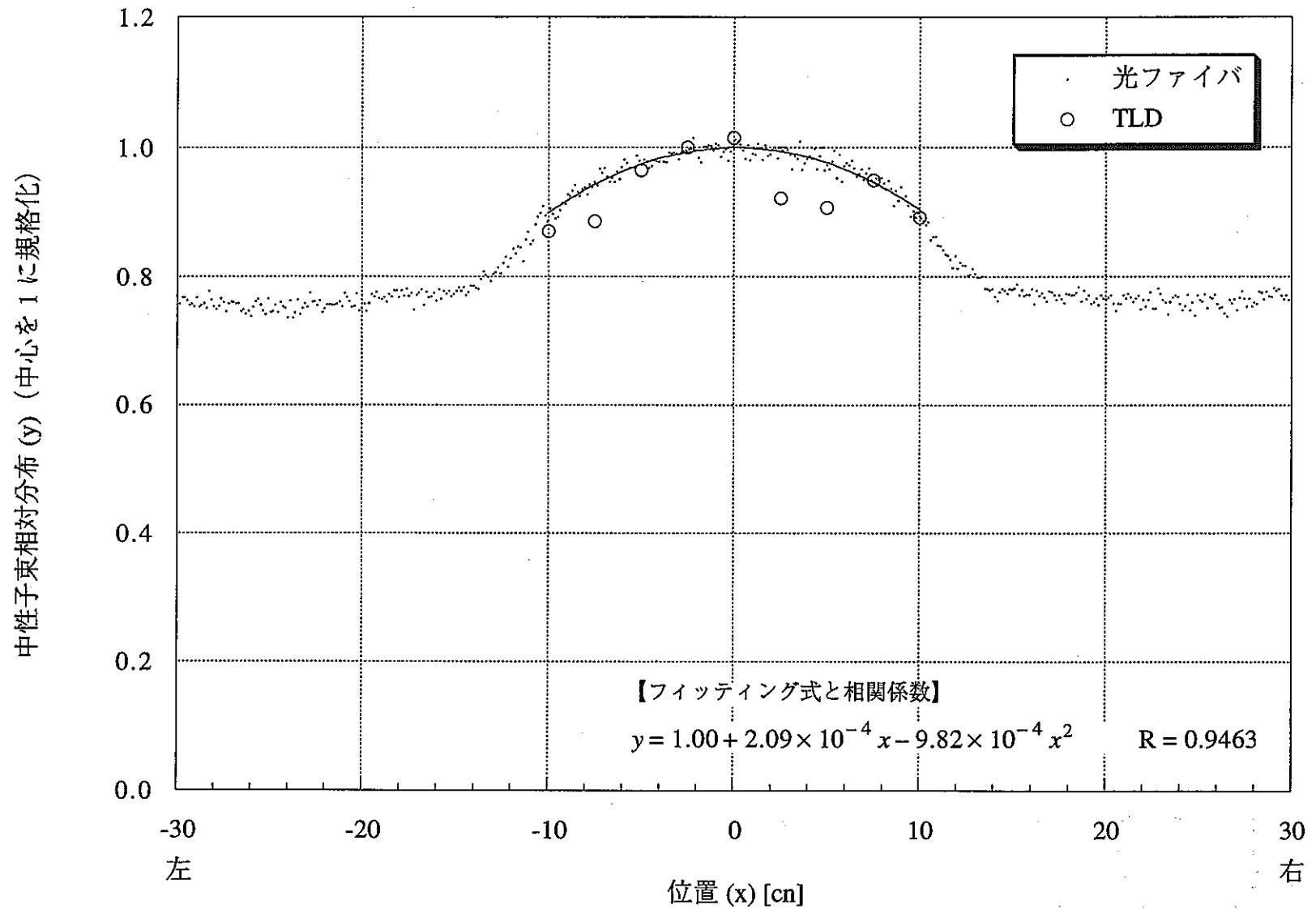


図 4.4 ファーストカラムの中低速中性子束分布 (水平方向)

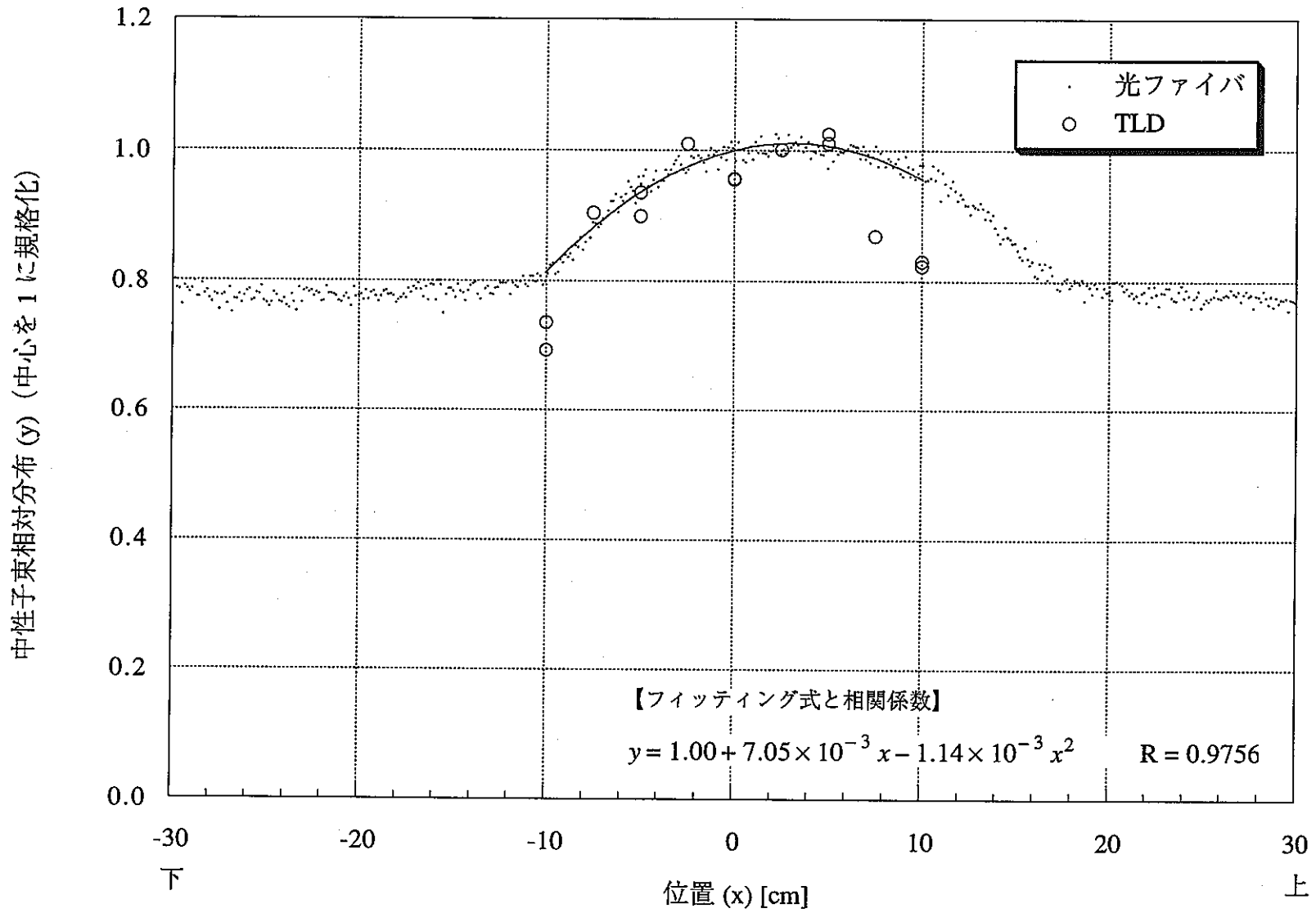
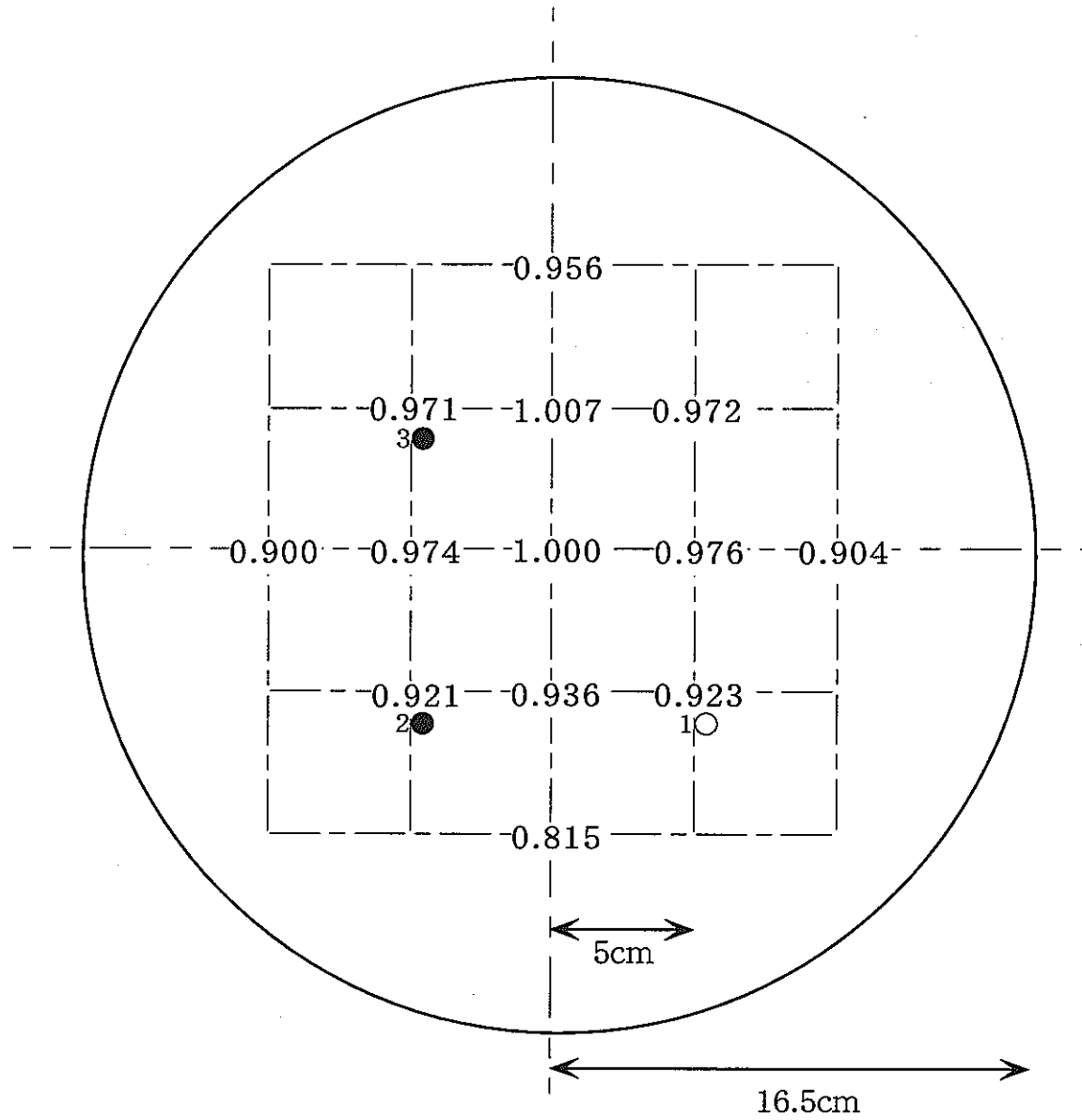


図 4.5 ファーストカラムの中低速中性子束分布 (鉛直方向)



- 注1 ファーストコラム中心を1に規格化した。
- 注2 1～3の数字はHAFMの照射位置を示す(表4.2参照)。
- 注3 ●は動燃、○は九州大学の結果。

図 4.6 ファーストコラムの中低速中性子束分布測定結果

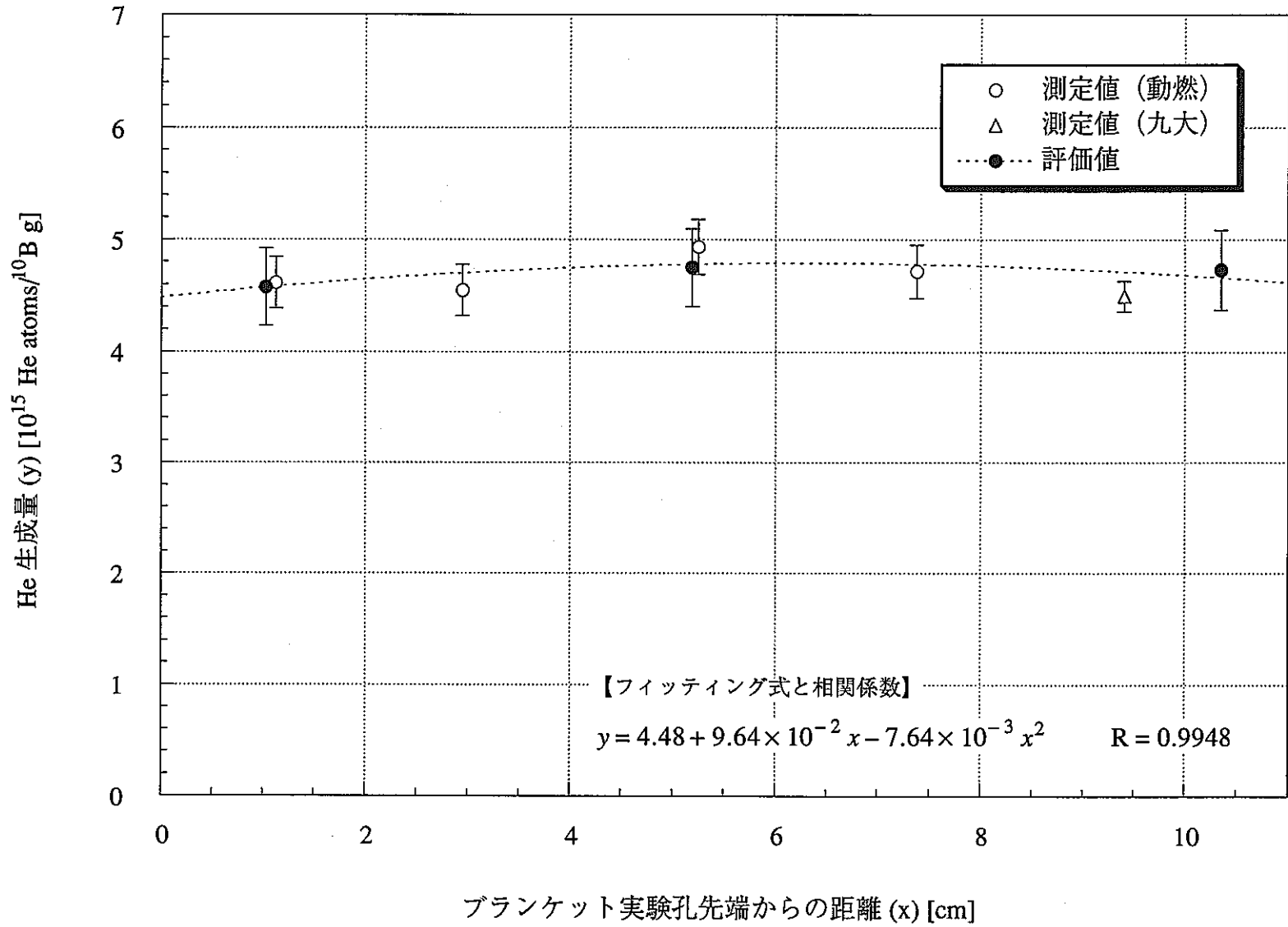


図 4.7 ブランケット実験孔で照射した濃縮 B の He 生成量分布

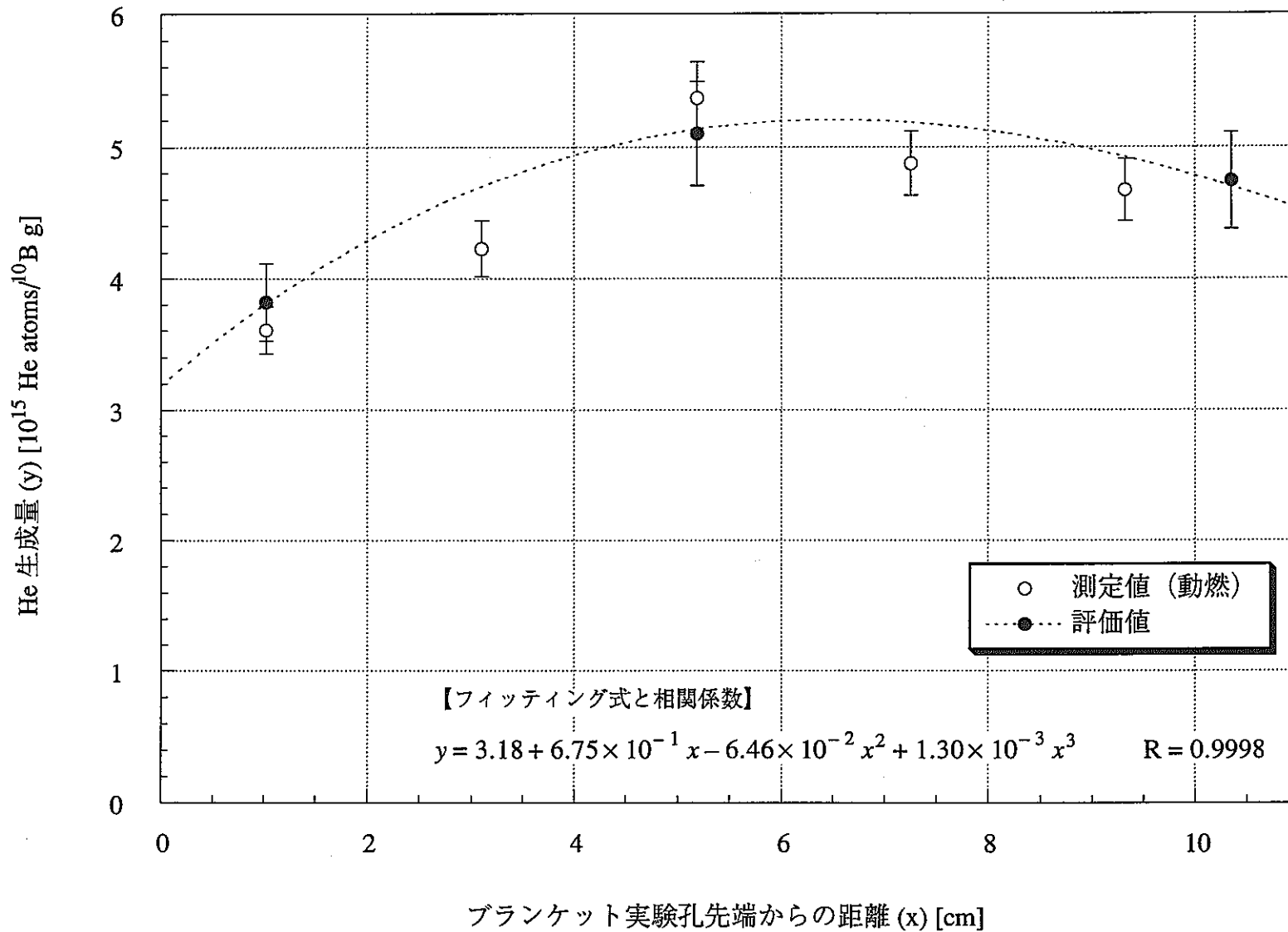
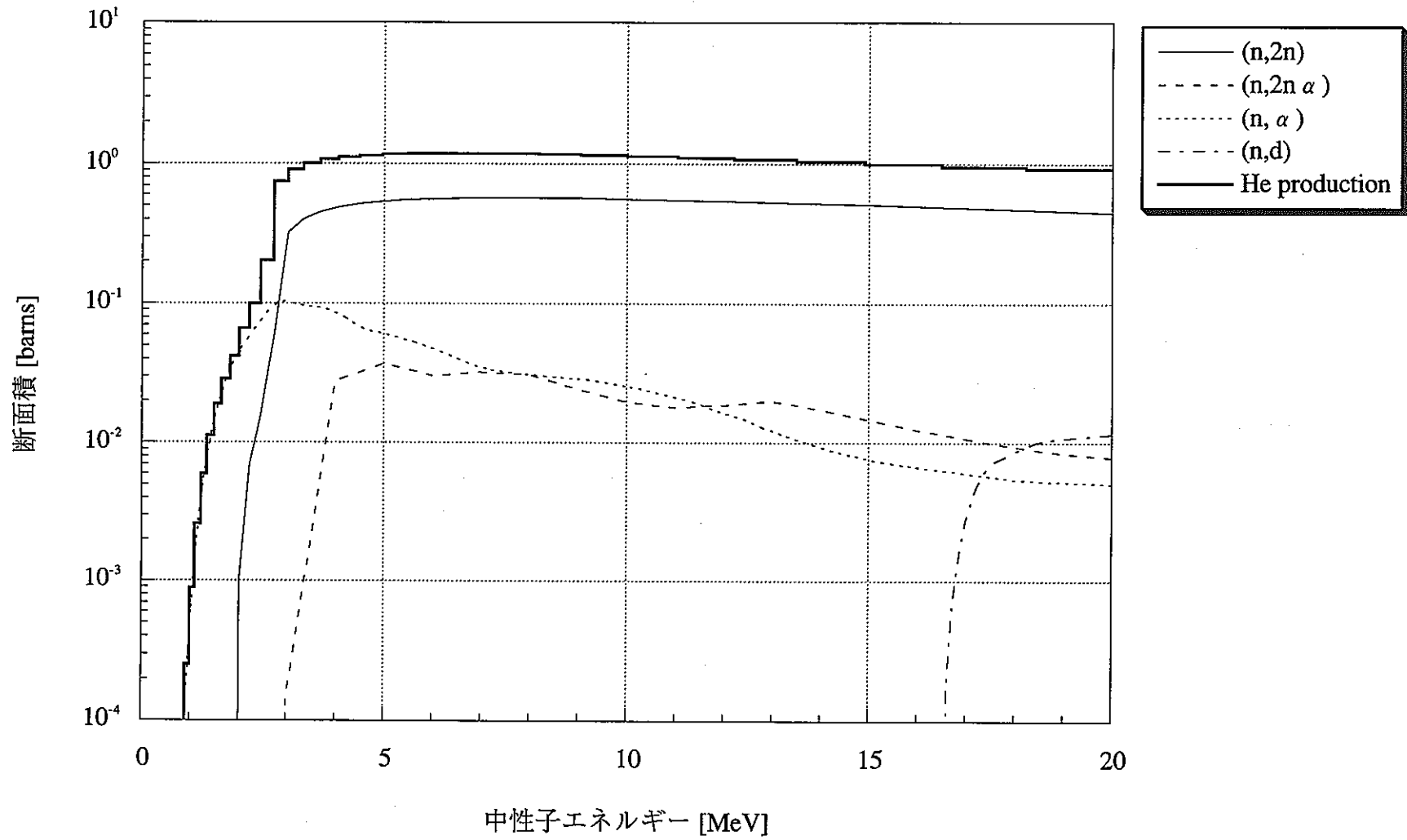


図 4.8 ブランケット実験孔で照射した Be の He 生成量分布



図 4.9  ${}^9\text{Be}$  の He 生成断面積 (JENDL-3.2 より作成)

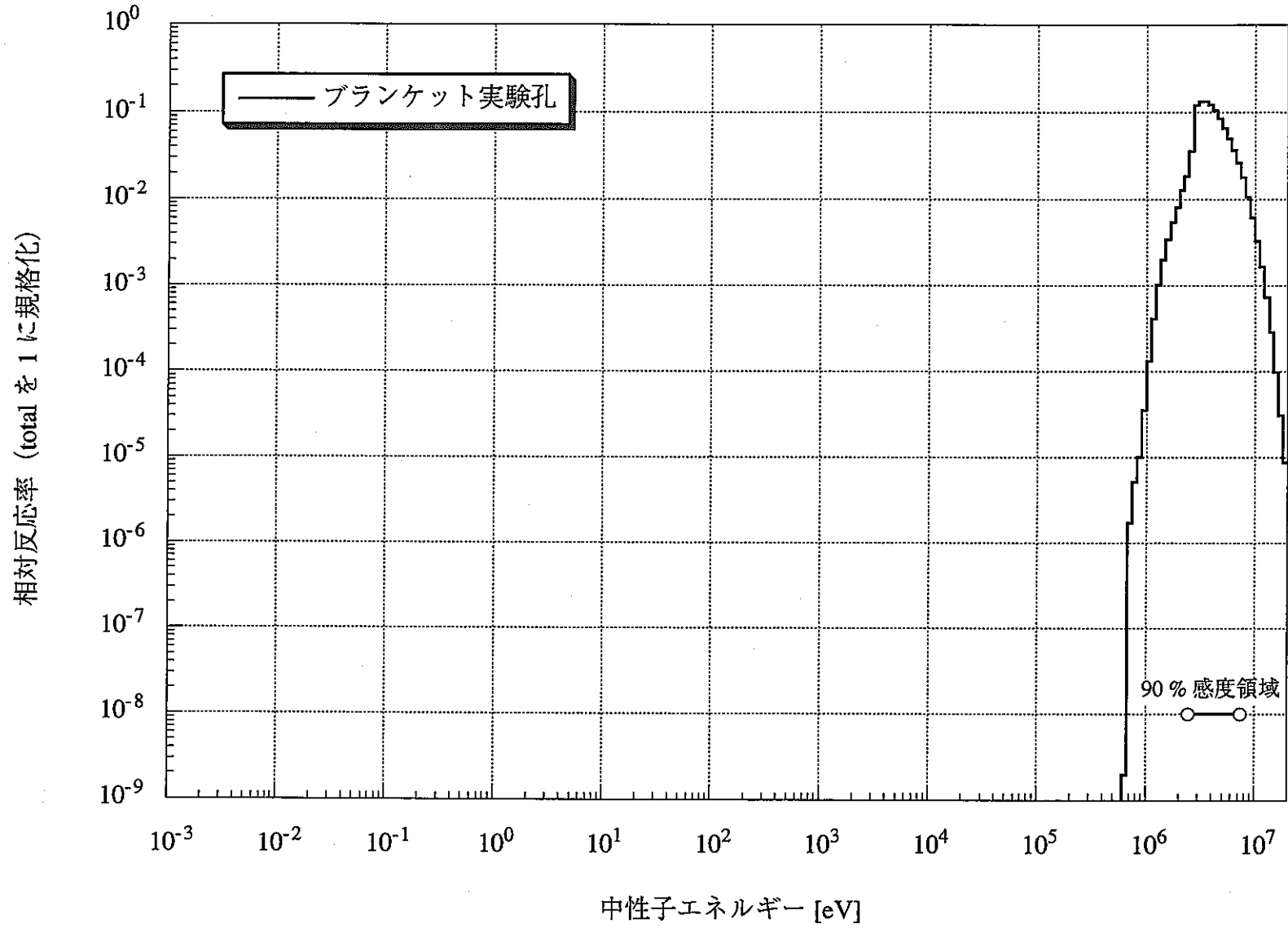


図 4.10 「弥生」標準中性子場における  ${}^9\text{Be}$  の He 生成反応率のエネルギー依存性

## 5. HAFM による中性子照射量の測定精度

He 原子数の測定値と He 生成量評価値を比較し、 $^{10}\text{B}$  および  $^9\text{Be}$  素子の HAFM による中性子照射量の測定精度を評価した。

### 5.1 $^{10}\text{B}$

各中性子場で照射した濃縮 B の He 生成量について、評価値に対する測定値の比（[測定値]/[評価値]）を表 4.1 ~ 4.3 に、それらの平均を表 5.1 に示す。

グローリー孔では、5 試料のうち、No.1 試料のみは測定値が評価値を 10% 上回ったが、その他の 4 試料については、測定および計算の誤差約 6% の範囲内で測定値と評価値は一致した。これらはグローリー孔中央の 1 点で照射されており、照射条件は全て同一であるので、測定結果を誤差の重みを考慮して平均した結果を計算値と比較することができる。その結果は  $1.03 \pm 0.03$  であり、測定のための誤差である 5% 以内で測定値と評価値は一致した。また、5 試料の測定結果のバラツキは No.1 試料を含めて 5% であり、He 原子数の測定誤差で説明できる。また、九州大学の HAMS による測定値の [測定値]/[評価値] は、1 試料のみに対する値であるが  $1.05 \pm 0.05$  で、動燃の平均値とは、両者の測定誤差（動燃 5%、九州大学 3%）の範囲内である 2% 以内で一致した。

ファーストカラムでの [測定値]/[評価値] は 0.97 ~ 0.98 で、測定誤差の 5% 以内で計算値と一致し、また、両者の誤差の範囲内で、九州大学の測定値とも一致した。

ブランケット実験孔での [測定値]/[評価値] は 0.97 ~ 1.03 であり、測定誤差 5% の範囲内で測定値は評価値に一致した。9.4 cm 位置で照射された HAFM の九州大学での測定結果についても、誤差の範囲内で動燃の測定値と一致している。

以上より、10 keV ~ 1 MeV の中性子が He 生成に大きく寄与する典型的な高速中性子場や 10 keV 以下の中性子の寄与が大きい軟スペクトル場の高速炉の様々な照射場における中性子照射量を誤差 5% の精度で測定できることがわかった。

### 5.2 $^9\text{Be}$

ブランケット実験孔で照射した Be の He 生成量について、[測定値]/[評価値] を測定結果と併せて表 4.4 に示す。これと図 4.2 の分布図からわかるように、[測定値]/[評価値] は、炉心中心から最も離れた位置で 0.86 であった他は 0.90 ~ 1.05 であり、測定および計算誤差約 9% の範囲内で概ね一致した。[測定値]/[評価値] の平均は表 5.1 に示すように 0.96 であり、測定誤差 5% の範囲内で一致し、高速中性子の照射量を誤差 5% で測定できることがわかった。

表 5.1 He 原子数測定値と生成量評価値の比の平均

HAFM 素子	照射場	[測定値/評価値] の平均	
		動燃	九州大学
B	グローリー孔	1.03 ± 0.03	1.05 ± 0.04
	ファーストコラム	0.98 ± 0.05	1.06 ± 0.07
	ブランケット実験孔	1.00 ± 0.05	0.95 ± 0.08
Be	ブランケット実験孔	0.96 ± 0.04	—

## 6. 結 言

高速炉における HAFM の測定精度を評価するため、東京大学「弥生」炉の標準中性子場で照射した B および Be 素子の HAFM の He 原子数を測定し、放射化箔法による He 生成量評価値と比較した。また、照射した HAFM の一部は九州大学においても測定され、両者の相互比較により測定値の確認を行った。

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 濃縮 B 素子 HAFM の測定値 (M) と He 生成量評価値 (C) を比較した結果、10 keV ~ 1 MeV の中～高エネルギー領域、10 keV 以下の低エネルギー領域のいずれの中性子に対しても M/C は 0.98 ~ 1.03 であり、測定誤差 5 % 以内で中性子照射量を測定できることがわかった。
- (2) Be 素子 HAFM の測定値と He 生成量評価値を比較した結果、1 MeV 以上の高エネルギー領域の中性子に対して M/C は 0.96 であり、B 素子と同様に測定誤差 5 % 以内で中性子照射量を測定できることがわかった。
- (3) 動燃および九州大学による B 素子 HAFM の測定結果は、実験誤差の範囲内で一致し、測定値の信頼性が確認された。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、名古屋大学工学部井口哲夫教授には東京大学高速中性子源炉「弥生」における HAFM の較正照射と照射条件評価を、九州大学大学院総合理工学研究科鷹尾良行助手には微量 He 原子測定装置による HAFM の測定を実施して頂き、また、有益な助言と御指導を賜りました。心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Edited by ASTM: 1994 Annual Books of ASTM Standards Vol. 12.02, American Society for Testing and Materials, p. 507 (1994)
- [2] 伊藤主税、青山卓史：「He 蓄積法による中性子照射量の測定精度－標準試料を用いた測定装置の相互較正と精度向上策－」、PNC TN9410 96-115、動力炉・核燃料開発事業団（1996）
- [3] C. Ito: "Calibration of a He Accumulation Fluence Monitor for Fast Reactor Dosimetry," JAERI-Conf 97-005, Japan Atomic Energy Research Institute, p. 96 (1997)
- [4] Y. Takao and Y. Kanda: "A system for measurement of sub parts-per trillion helium in solids," Review of Scientific Instruments Vol. 67, No. 1, American Institute of Physics, p. 198 (1996)
- [5] 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）
- [6] M. Nakazawa and A. Sekiguchi: "Dosimetry Data Collection in the Fast Neutron Source Reactor YAYOI," UTNL-R0037 (1976)
- [7] T. Nakagawa et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2," Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 32, No. 12, p. 1259 (1995)
- [8] 森千鶴夫、中沢正治：「放射線計測における光ファイバーの利用」、日本原子力学会誌 Vol. 38, No. 1, p. 33 (1996)