



# He蓄積型中性子フルーエンスモニタによる 「常陽」の中性子照射量評価

( 研 究 報 告 )



2002年3月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

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 4 9  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

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)  
2002

# He 蓄積型中性子フルーエンスモニタによる 「常陽」の中性子照射量評価 (研究報告)

伊藤主税\*1、吉川和伸\*2、青山卓史\*1

## 要 旨

高速炉での照射試験等における中性子照射量の測定精度及び信頼性の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た新型ドシメトリー法として、He 蓄積型中性子フルーエンスモニタ (HAFM) の開発を進めている。これまでに、He 含有標準試料を用いて HAFM 測定装置の質量分析計を感度校正するとともに、東大「弥生」炉で校正照射した HAFM により、種々の高速炉スペクトル場における中性子照射量を誤差約 7% で測定できることを確認した。

本研究では、「常陽」実機での照射試験により HAFM の高速炉ドシメトリーへの適用性を評価するため、低中速中性子と高速中性子のモニタリング用として濃縮 B と Be 素子の HAFM を「常陽」の燃料領域と反射体領域に装荷し、定格出力換算で約 117 日照射した。照射終了後、HAFM 測定装置を用いて HAFM 素子に蓄積された He 生成量を測定し、濃縮 B 型 HAFM から全中性子照射量を、Be 型 HAFM から 1 MeV 以上の高速中性子照射量を求め、精度検証のため同位置で照射した放射化箔法による中性子照射量と比較した。

その結果、濃縮 B 型 HAFM による全中性子照射量と放射化箔法の測定値との比は 1.01 ~ 1.04 であり、両者は測定誤差範囲内で一致し、HAFM 法の信頼性が確認された。一方、Be 型 HAFM による高速中性子照射量については、HAFM による測定値は放射化箔法のそれより系統的に 10 数%大きくなった。この原因は、Be の He 生成断面積の誤差によるものと考えられ、今後検討が必要である。

これらより、HAFM 法による「常陽」実機での中性子照射量の測定精度を確認した。今後は、B については「常陽」の中性子照射量のモニタリングに実用していくとともに、Be については測定データを蓄積し、断面積の誤差等をさらに検討していく予定である。

---

\*1 大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部

\*2 検査開発株式会社

# Neutron Fluence Measurement for JOYO Irradiation Field Using Helium Accumulation Fluence Monitor (Research Document)

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

## Abstract

A helium accumulation fluence monitor (HAFM) has been developed for fast reactor dosimetry and direct measurement of helium production in fast reactor structural component materials. The mass spectrometer of the HAFM measurement system has calibrated with helium-doped standard samples. The HAFM system measured neutron fluence of typical fast reactor spectrum fields and low energy neutron fields with an uncertainty of about 7 % by irradiating the enriched boron and beryllium-type HAFM in a standard neutron spectrum field of the YAYOI reactor.

This study confirmed the applicability of HAFM to fast reactors. These tests used irradiation testing rigs with enriched boron-type HAFMs for low energy neutron monitoring and beryllium-type HAFMs for high energy neutron monitoring. The HAFMs were loaded in the fuel and reflector regions of JOYO and irradiated with 117 EFPD. The neutron fluences were found by measuring helium production in the irradiated HAFMs. The tests compared the measure fluences with the evaluated values with adjustment by the foil activation method.

The ratio of measured neutron fluences for enriched boron-type HAFMs and foil activation method were from 1.01 to 1.04 and in good agreement within the experimental uncertainty. While measured values for beryllium-type HAFMs were more than ten percent greater than those by the foil activation method. This is probably due to the error in <sup>9</sup>Be helium production cross section, and this discrepancy needs to be examined.

As a result of this study, the accuracy of neutron fluence measured by the HAFM method was confirmed. Boron-type HAFMs will be used for JOYO dosimetry. For beryllium-type HAFMs, experimental data will be gathered and the error due to cross section will be investigated.

---

\*1 Experimental Reactor Division, Irradiation Center, O-arai Engineering Center

\*2 Inspection Development Company, Ltd.

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. HAFM 測定装置 .....	2
2.1 HAFM 測定装置の構成 .....	2
2.2 HAFM 測定装置の感度校正 .....	2
2.3 HAFM 測定装置の測定精度 .....	3
3. 「常陽」での HAFM 照射実験 .....	9
3.1 照射試験条件 .....	9
3.2 放射化箔法による中性子照射量評価 .....	9
3.3 HAFM による中性子照射量測定 .....	10
3.4 Be 型 HAFM の誤差要因の検討 .....	11
4. 結言 .....	22
謝辞 .....	23
参考文献 .....	24

## 表リスト

表 2.1	He 原子数の測定誤差	4
表 2.2	中性子照射量の測定誤差	5
表 3.1	全中性子照射量測定結果	12
表 3.2	高速中性子照射量(>1MeV)測定結果	13
表 3.3	断面積ライブラリの違いによる高速中性子照射量(>1MeV)測定結果の比較	14

## 図リスト

図 2.1	HAFM 測定装置	6
図 2.2	標準 He ガス作製装置	7
図 2.3	較正曲線	8
図 3.1	HAFM の照射位置	15
図 3.2	放射化箔の 90%感度範囲	16
図 3.3	中性子照射量解析フロー	17
図 3.4	HAFM 照射位置の中性子スペクトルと HAFM 素子の 90%感度範囲	18
図 3.5	中性子照射量測定結果	19
図 3.6	${}^9\text{Be}$ の He 生成断面積、炉中心の中性子束および反応率のエネルギー分布	20
図 3.7	${}^9\text{Be}$ の He 生成断面積	21

## 1. 緒 言

原子炉における燃料、材料等の照射試験や炉心周りのサーベイランス試験では、中性子照射量を精度良く評価することが重要であり、また、構造材料等の照射試験においては、材料の照射脆化の一因である材料中の He 生成量を精度良く評価することも必要である。このため、高速実験炉「常陽」では、高速炉での照射試験に対する中性子照射量の測定精度向上と、構造材中の He 生成量の直接測定を目的として、He 蓄積型中性子フルーエンスモニタ (Helium Accumulation Fluence Monitor: HAFM) の開発を進めている。

HAFM 法は、 $(n, \alpha)$  反応等で生成する He 原子数を質量分析により測定することで中性子照射量を求める手法であり、これを高速炉ドシメトリーに適用し、放射化箔法との併用により中性子照射量評価の精度と信頼性の向上を図るとともに、He 生成量が直接測定できる利点を高速炉用構造材中の He 生成量測定に用いるものである。

これまでに、HAFM 測定装置を設計・製作し、標準 He ガス及び He 含有標準試料により質量分析計の感度を校正した<sup>[1,2]</sup>。続いて、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炉「弥生」で校正照射した HAFM を用いて HAFM 法による中性子照射量の評価精度を確認した<sup>[1,3]</sup>。

本研究では、HAFM の開発の最終段階として、「常陽」実機の様々な中性子場で HAFM を照射し、He 生成量を測定して得られた中性子照射量を従来から実施している放射化箔法による評価値と比較することにより、HAFM 法の高速炉ドシメトリーへの適用性を確認した。

## 2. HAFM 測定装置

### 2.1 HAFM 測定装置の構成

HAFM 法は、中性子照射により(n, $\alpha$ )反応等で発生する He を HAFM 素子中または素子を装填したキャプセル中に蓄積し、照射終了後、He 原子数を測定することにより中性子照射量を評価する手法である。HAFM は、測定対象である He が安定核種であるため、照射中の飽和や照射後の崩壊に伴う減衰がなく、これらに起因する誤差が照射時間に依存しない単純な積分型のモニタである。このため、放射化箔法では考慮しなければならないこれらの補正が不要である。また、構造材の He 脆化の評価において重要な He 生成量を直接測定でき、中性子スペクトルにエネルギー依存の He 生成断面積を乗じて求める従来方法に比較して、計算誤差を除去できる利点を有する。

HAFM 法における He 原子数の測定は、HAFM を溶融して He 原子を放出させ、質量分析計で測定することにより行う。この測定装置は、HAFM 素子をキャプセルごと溶融し、蓄積した He を放出させる電気炉、He 原子数を測定する質量分析計及び質量分析計の相対感度を校正するための標準 He ガス作製装置から構成され、これらに、装置の制御およびデータ処理を行うための計算機並びに各部位の真空排気系統が付属する。

この HAFM 測定装置は、導入以来、精度向上と操作性の改善を目的として改良を繰り返してきた。現在のシステム構成の概略を図 2.1 に示す。前回報告時<sup>[3]</sup>からの主要な改良点は、質量分析計を変更したことである。本手法の測定条件が、不純物の多価イオンや同重体の影響を無視でき、高分解能を要しないため、He 原子に相当する質量電荷比のピークを高感度で測定できる四重極型の質量分析計（アルバック社製 STANDUM）に改良した。これに併せて、データ処理系も一新し、操作性を向上させた。また、基本構成の変更はないが、図 2.2 に示す標準 He ガス作製装置を新規に製作し、各容器、配管部等の容積を精密に測定して、この誤差による測定精度の低下を低減させた。また、バックグラウンドのさらなる低減を目指して、真空ポンプをオイルフリー仕様のもに交換し、オイルによる真空度の低下や不純物の混入を低減させた。

### 2.2 HAFM 測定装置の感度校正

標準 He ガスを用いた装置の校正は、あくまでも標準 He ガス作製装置を仮の基準とした質量分析計の相対感度校正である。これは、質量分析計の感度の変動を補正するため行うもので、標準ガス作製装置を構成する容器、配管等の容積の誤差、圧力および温度の測定誤差、拡散、希釈の繰り返しによる上記誤差の累積等、標準ガス作製装置に伴う誤差要因を排除することはできない。そこで、質量分析計の絶対感度は、He 含有標準試料を定期的に測定することにより行う。

He 含有標準試料は、金属片に既知量の He 原子を撃ち込み、中性子反応で He が生成した状態を模擬したもので、HAFM 測定精度に関して九州大学と共同で実施して



きた研究<sup>[4]</sup>で用いたものと同種の試料で、Al、Cu、V の金属小片に  $10^{13} \sim 10^{15}$  atoms/sample の He イオンを撃ち込んだものである。

本研究では、測定装置の改良・整備後、質量分析系の二次電子増倍管の印加電圧や電流信号のサンプリング時間等の最適化条件を決定し、He 含有標準試料を測定して測定装置の絶対感度を校正した。これにより作成した校正曲線は、図 2.3 に示すように良好な直線性を有するとともに、バラツキを小さく抑えることができた。

### 2.3 HAFM 測定装置の測定精度

He 含有標準試料を用いた校正結果から、HAFM 測定装置による He 原子数の測定精度を評価した<sup>[4]</sup>。

He 原子数の測定誤差は表 2.1 に示すとおりであり、He 含有標準試料への He 撃ち込み量の誤差と HAFM 測定装置による測定誤差がある。He 撃ち込み量の誤差は、統計誤差が 2.3%、系統誤差が 2.0%である。HAFM 測定装置による測定誤差については、質量分析計の感度の変動が 1.0%、相対校正曲線の補正值のばらつきが 1.8%であり、全統計誤差は自乗和平均により 3.1%となり、これと系統誤差 2.0%の和をとって、He 原子数の測定誤差は 5.1%となった。

以上より、HAFM 測定装置により測定誤差約 5%の精度で He 原子数を測定できることを確認した。

さらに、「弥生」の標準照射場で HAFM の校正照射<sup>[5]</sup>試験を行い<sup>[6]</sup>、表 2.2 に示すように、高速中性子場における全中性子照射量及び高速中性子照射量を測定誤差約 7%の精度で測定できることを確認している。統計誤差については、まず、He 原子数の測定誤差のうち質量分析計の感度の変動分を除く誤差が 2.9%であり、これに、本校正照射における中性子照射量の HAFM による測定値と標準場の値の比のばらつき 3.9%を考慮し、両者の自乗和平均により 4.9%とした。系統誤差については、He 原子数の測定誤差 2.0%及び核データと He 生成断面積の誤差 1%を考慮し、両者の自乗和平均により 2.2%となり、統計誤差と系統誤差の和をとって、HAFM による中性子照射量の全測定誤差を 7.1%と評価されている。

表 2.1 He 原子数の測定誤差

統計誤差	
He 含有量の誤差	2.3 %
質量分析計の感度の変動	1.0 %
He 含有標準試料の He 含有量と測定値の比のばらつき	1.8 %
小計	3.1 %
系統誤差	
He 含有標準試料の He 含有量を決定した九大装置の較正曲線の誤差	2.0 %
小計	2.0 %
誤差合計	5.1 %

表 2.2 中性子照射量の測定誤差

統計誤差	
質量分設計の感度の変動を除く He 原子数の測定誤差	2.9 %
HAFM による中性子照射量測定値と標準場の値の比のバラツキ (質量分析計の感度の変動、照射前の HAFM 素子の原子数誤差、 照射場の中性子束の変動による誤差が含まれ、保守的に 3.9 %の 誤差すべてが HAFM による中性子照射量の測定誤差要因になる ものとした。)	3.9 %
小計	<b>4.9 %</b>
系統誤差	
He 含有標準試料の He 含有量を決定した九大装置の校正曲線の誤差	2.0 %
He 生成断面積の誤差	< 1.0 %
小計	<b>2.2 %</b>
誤差合計	<b>7.1 %</b>

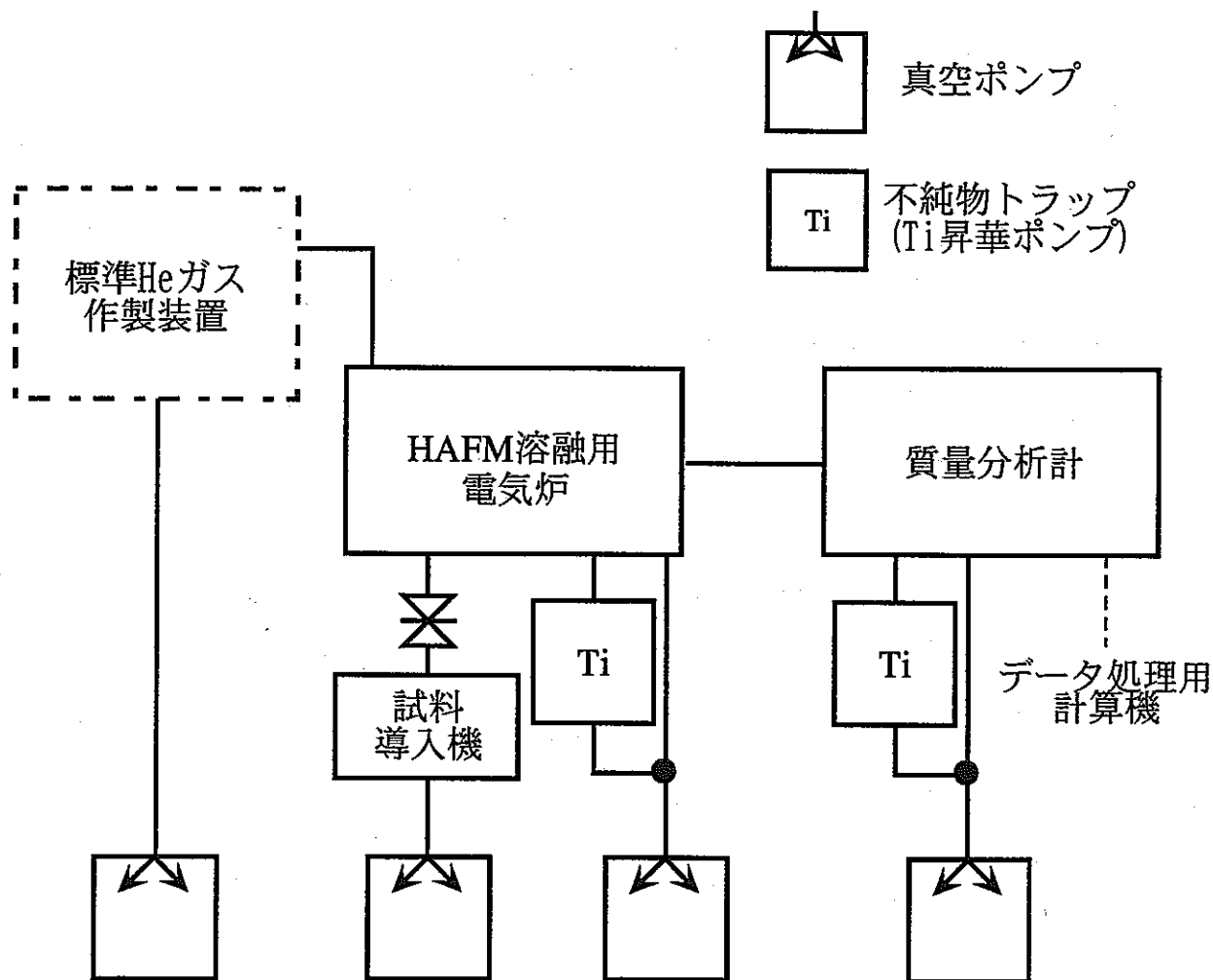


図2.1 HAFM測定装置

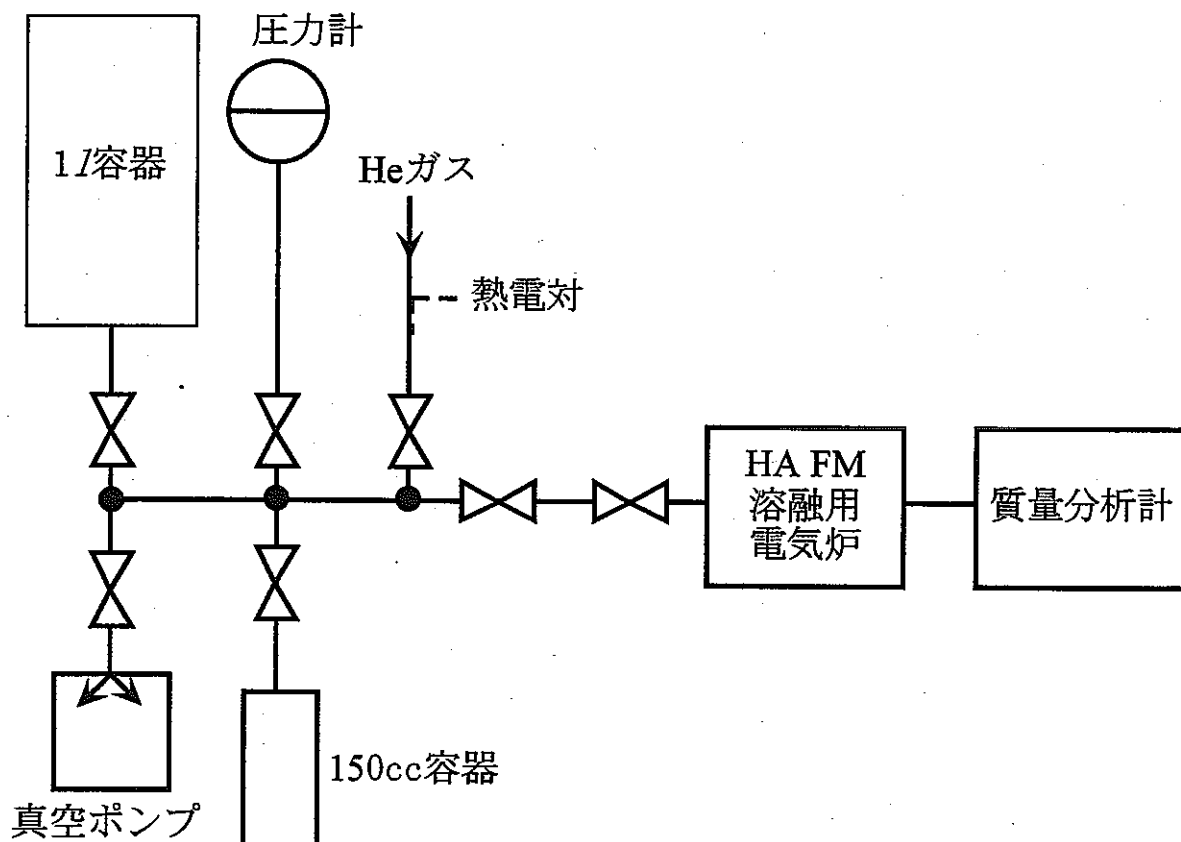


図2.2 標準Heガス作製装置

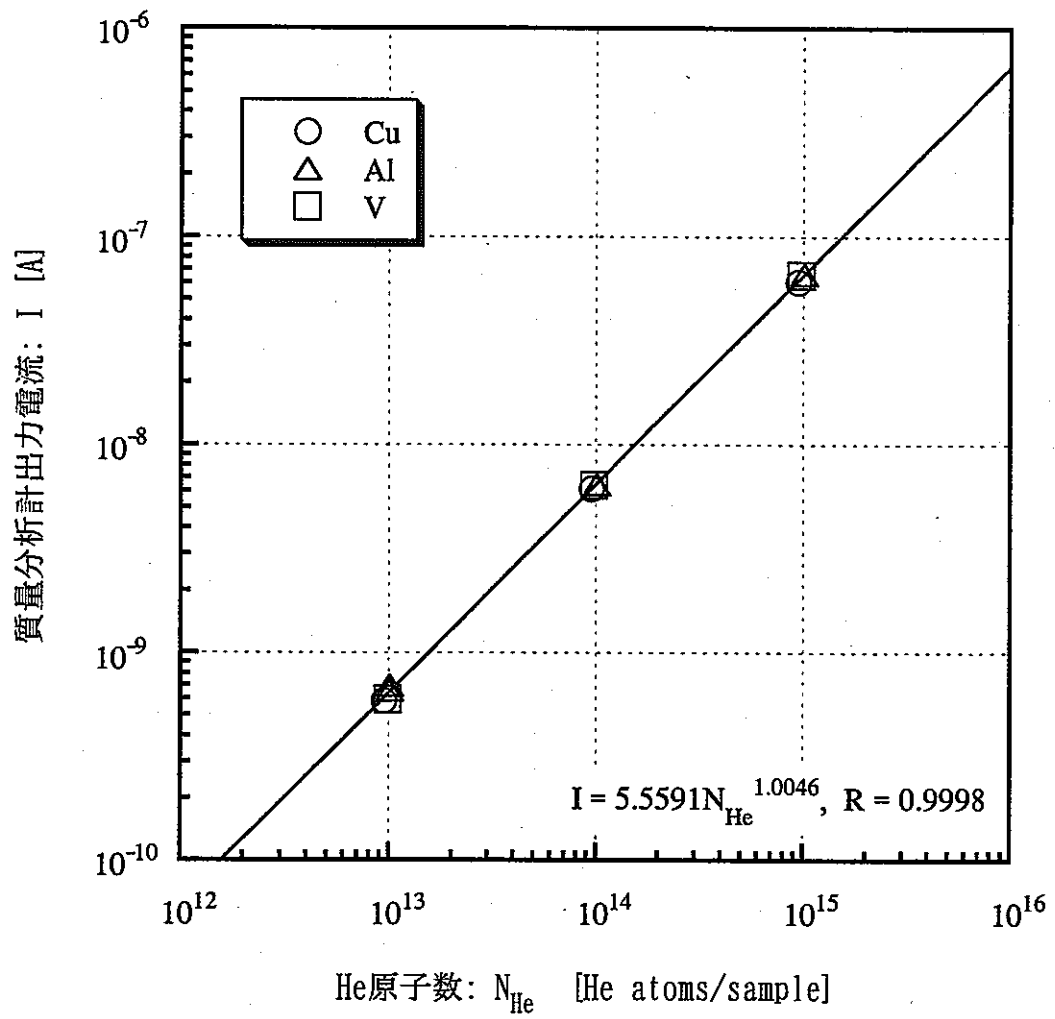


図2.3 較正曲線

### 3. 「常陽」での HAFM 照射実験

#### 3.1 照射試験条件

「常陽」実機で HAFM を照射し、得られた中性子照射量により高速炉ドシメトリーへの適用性を評価した。

本照射試験では、Be 素子を高速中性子モニタ用、 $^{10}\text{B}$  の存在比を 93%まで濃縮した B (濃縮 B) 素子を低中速中性子モニタ用として用いた。Be 型 HAFM は 2mg の Be 粉末、濃縮 B 型 HAFM は 0.1mg の濃縮 B 粉末を外径 1.3mm、全長 6~8mm の V 製キャプセルに封入したものである。これらの素子は、それぞれ微量天秤により重量を測定するとともに、素子のロットごとに純度および同位体比を分析しており、素子の原子数は誤差 1.1%以下の精度で求められている。

これらの「常陽」用 HAFM をサーベイランス条件評価用材料照射用反射体 (SVIR) に装荷して、1999 年 11 月 22 日から 2000 年 6 月 1 日まで、Mk-III 移行炉心である 100MW 第 34~35 サイクルにおいて原子炉積算運転時間 117.1EFPD (100MW 換算) 照射した。HAFM の照射位置は、図 3.1 に示すとおり、炉中心 (炉心アドレス[000]) に装荷した SVIR-1 の軸方向炉中心レベル (図中①) と燃料領域上端部の+258mm 位置 (図中②) 並びに炉心第 9 列 (炉心アドレス[9B1]) に装荷した SVIR-2 の軸方向炉中心レベル (図中③) を選定した。濃縮 B 型 HAFM はこの 3 箇所に、He 生成反応にしきいエネルギーを有する Be 型 HAFM はスペクトルの硬い燃料領域で照射される SVIR-1 の 2 箇所に装荷した。

なお、キャプセル材の V から生成した He 原子数が HAFM 測定時のバックグラウンドとなることから、これを差し引くため、素子を封入しない空の V キャプセル (ブランク材) も HAFM と同位置で同時に照射した。

#### 3.2 放射化箔法による中性子照射量評価

照射位置における中性子照射量等の照射条件は、HAFM と同時に照射した放射化箔を用いて、従来から「常陽」で実施している放射化箔法<sup>[6,7]</sup>により評価した。

放射化箔は、「常陽」の照射試験で標準的に使用しているドシメータセットを用いた。本試験に用いた箔の反応形式は、 $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)$ 、 $^{46}\text{Ti}(n,p)$ 、 $^{54}\text{Fe}(n,p)$ 、 $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 、 $^{237}\text{Np}(n,f)$ 、 $^{235}\text{U}(n,f)$ および $^{45}\text{Sc}(n,\gamma)$ であり、高速炉内の中性子の主要なエネルギー範囲をカバーするように選定している。炉中心位置および炉心第 9 列でのこれらドシメータの 90%感度範囲を図 3.2 に示す。

ドシメータの照射から中性子照射量を算出するまでの流れを図 3.3 に示す。照射後、炉内から取り出したドシメータの放射化量を高純度 Ge 半導体検出器で測定し、これと原子炉運転履歴データから反応率を測定した。この反応率測定値と断面積セットを用い、2次元輸送計算コード DORT<sup>[8]</sup>から求めた計算スペクトルを初期推定値として、中性子スペクトル解析コード NEUPAC-Jlog<sup>[9]</sup>によりアジャストし、中性子スペクトルの最適解を求めた。断面積セットには、JENDL-3 ドシメトリーファイル<sup>[10]</sup>から作

成した共分散誤差付きの 103 群（上限エネルギー 20MeV、下限エネルギー 0.001eV）断面積セットを用いた。

得られた中性子スペクトルと照射した HAFM の 90% 感度範囲を図 3.4 に示す。スペクトルの形状に応じて、濃縮 B の感度範囲は、SVIR-1 で照射した炉中心で  $10^3 \sim 10^5$ eV、燃料領域上端部で  $10^1 \sim 10^5$ eV、SVIR-2 で照射した反射体領域で  $10^{-1} \sim 10^3$ eV と異なった。しきいエネルギーを有する Be の感度範囲は、いずれの照射位置でも 1MeV 以上の高速中性子のエネルギー範囲であった。

得られた中性子束を「常陽」の運転履歴に基づいた定格出力換算の運転日数で積分して中性子照射量を求めた。濃縮 B 型 HAFM を照射した 3 箇所の全中性子照射量は  $(0.24 \sim 3.3) \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup>、Be 型 HAFM を照射した 2 箇所の高速中性子照射量(>1MeV) は  $(2.5 \sim 4.9) \times 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup> であった。

### 3.3 HAFM による中性子照射量測定

前述の HAFM を照射終了後に取り出して、HAFM 測定装置で He 原子数を測定し、同様に測定したブランク材からの He 生成量をバックグラウンドとして差し引き、HAFM 素子による正味の He 生成量を求めた。得られた He 生成量から以下の式により中性子照射量を求めた。

$$\Phi = -\ln(1-N/N_0)/\sigma_{ave}$$

$$\sigma_{ave} = \int F(E)\sigma(E)\phi(E)dE / \int \phi(E)dE$$

$$F(E) = (1-\exp(-\tau))/\tau$$

ここで、

- Φ：中性子照射量 (n/cm<sup>2</sup>)
- N：He 生成量 (atoms)
- N<sub>0</sub>：照射前の HAFM 素子の原子数 (atoms)
- σ<sub>ave</sub>：φ(E)により 1 群に縮約した He 生成断面積 (cm<sup>2</sup>)
- F(E)：自己遮へい補正係数
- σ(E)：He 生成断面積 (cm<sup>2</sup>)
- φ(E)：中性子束 (n/cm<sup>2</sup>/s)
- E：中性子のエネルギー (eV)
- τ：吸収平均自由行程単位で表した HAFM 素子の堆積厚

He 生成断面積は、JENDL-3.2<sup>[11]</sup>から作成した 103 群構造の無限希釈断面積を用い、中性子束は、3.2 項で放射化箔法により評価された同群構造のスペクトルを用いた。なお、自己遮へいに係る補正量の程度については、これで算出した中性子束を積分して全中性子照射量または高速中性子照射量に対する補正量を見積もると、表 3.1 および表 3.2 に示すように、スペクトルの硬い燃料領域では濃縮 B、Be とも 0.99 以上、



SVIR-2 の照射位置では B について 0.95 程度の値となった。

HAFM 法の放射化箔法による中性子照射量の測定結果を表 3.1 及び表 3.2 並びに図 3.3 に示す。濃縮 B 型 HAFM による全中性子照射量と放射化箔法の測定値との比は 1.01~1.04 であり、HAFM 測定装置の He 原子数測定誤差のみの範囲内で一致した。中性子照射量の測定誤差は、He 原子数の測定誤差に加え、照射前の HAFM 素子の原子数誤差、照射場の中性子束の誤差、He 生成断面積の誤差等が含まれるため、この結果は、HAFM と放射化箔法によい一致がみられたと言える。一方、Be 型 HAFM による高速中性子照射量 (>1MeV) については、HAFM による測定値は放射化箔法のそれより系統的に 10 数%過大となった。

### 3.4 Be 型 HAFM の誤差要因の検討

前述のとおり、Be 型 HAFM の結果は放射化箔法のそれより 10 数%の差が生じた。放射化箔法では、しきいエネルギーを有し Be の He 生成反応と感度領域が近い放射化反応として  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)$ 、 $^{46}\text{Ti}(n,p)$ 、 $^{54}\text{Fe}(n,p)$ 、 $^{58}\text{Ni}(n,p)$  を採用しているが、評価後の中性子束及びスペクトルから求めた反応率に対する測定値の比は 0.96~1.00 とほぼ一致しており、Be の He 生成反応のみが 1.16~1.17 と大きく異なっている。

図 3.4 に  $^9\text{Be}$  の He 生成断面積、炉中心の中性子束及び反応率のエネルギー分布を示す。Be の He 生成反応が感度を有する 2~7MeV のエネルギー範囲では、照射場の中性子束のエネルギー勾配が大きく高エネルギー側に大きく落ち込んでいる一方で、Be 断面積はしきいエネルギーから 3MeV までの立ち上がりの勾配が大きくなっている。これより、He 生成反応率分布は、3MeV 付近を凸とするピーク形状を示し、この付近の B 断面積の誤差が 1 群に縮約して作成する He 生成断面積に影響する。参考までに、Be の He 生成断面積として ENDF/B-VI や JEF-2.2 を用いた場合の Be 型 HAFM による高速中性子照射量 (>1MeV) と放射化箔法のそれとの比を表 3.3 に示すが、ライブラリの違いにより差が生じている。図 3.5 に示す各ライブラリの Be の He 生成断面積をみると、断面積の勾配が大きく、かつ照射場の中性子勾配も大きい 2~3MeV のエネルギー範囲においてライブラリ間に差があり、これが 1 群に縮約して作成する He 生成断面積に影響を及ぼし、中性子照射量の算出結果に誤差を生じさせていると考えられる。

これらより、Be 型 HAFM による高速中性子照射量測定値の誤差要因は、Be 断面積の誤差にあるものと考えられる。なお、「弥生」の標準照射場での較正照射試験では、Be 型 HAFM は放射化箔法と良好な一致を示したが、照射場の中性子スペクトルは「常陽」の炉中心よりもさらに硬いため、2~3MeV より高エネルギー側が主要な感度範囲であったためと考えられる。

表 3.1 全中性子照射量測定結果

照射位置	自己遮へい 効果補正量	全中性子照射量 [ $n/cm^2$ ]		(H)/(F)
		HAFM(H)	放射化箱(F)	
① SVIR-1 炉中心	0.999	$3.41 \times 10^{22}$	$3.28 \times 10^{22}$	1.040
② SVIR-1 +258mm	0.995	$1.75 \times 10^{22}$	$1.74 \times 10^{22}$	1.006
③ SVIR-2 炉中心	0.953	$2.44 \times 10^{21}$	$2.37 \times 10^{21}$	1.030

表 3.2 高速中性子照射量(&gt;1MeV)測定結果

照射位置	自己遮へい 効果補正量	全中性子照射量 [n/cm <sup>2</sup> ]		(H)/(F)
		HAFM(H)	放射化箔(F)	
① SVIR-1 炉中心	0.998	$5.72 \times 10^{21}$	$4.93 \times 10^{21}$	1.160
② SVIR-1 +258mm	0.998	$2.92 \times 10^{21}$	$2.49 \times 10^{21}$	1.173

表 3.3 断面積ライブラリの違いによる高速中性子照射量(&gt;1MeV)測定結果の比較

断面積ライブラリ*	HAFM 法による測定値 / 放射化箔法による測定値	
	SVIR-1 炉中心	SVIR-1 軸方向+258mm 位置
JENDL-3.2	1.16	1.17
ENDF/B-VI	1.22	1.23
JEF-2.2	1.21	1.23

\* HAFM 法による中性子照射量測定値の算出に用いた  $^9\text{Be}$  の He 生成断面積

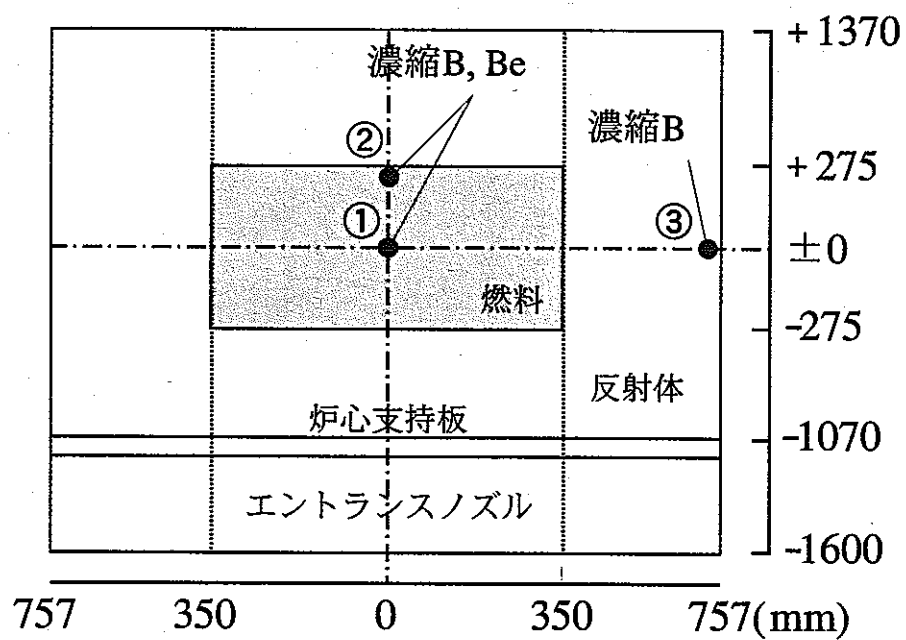


図3.1 HAFMの照射位置

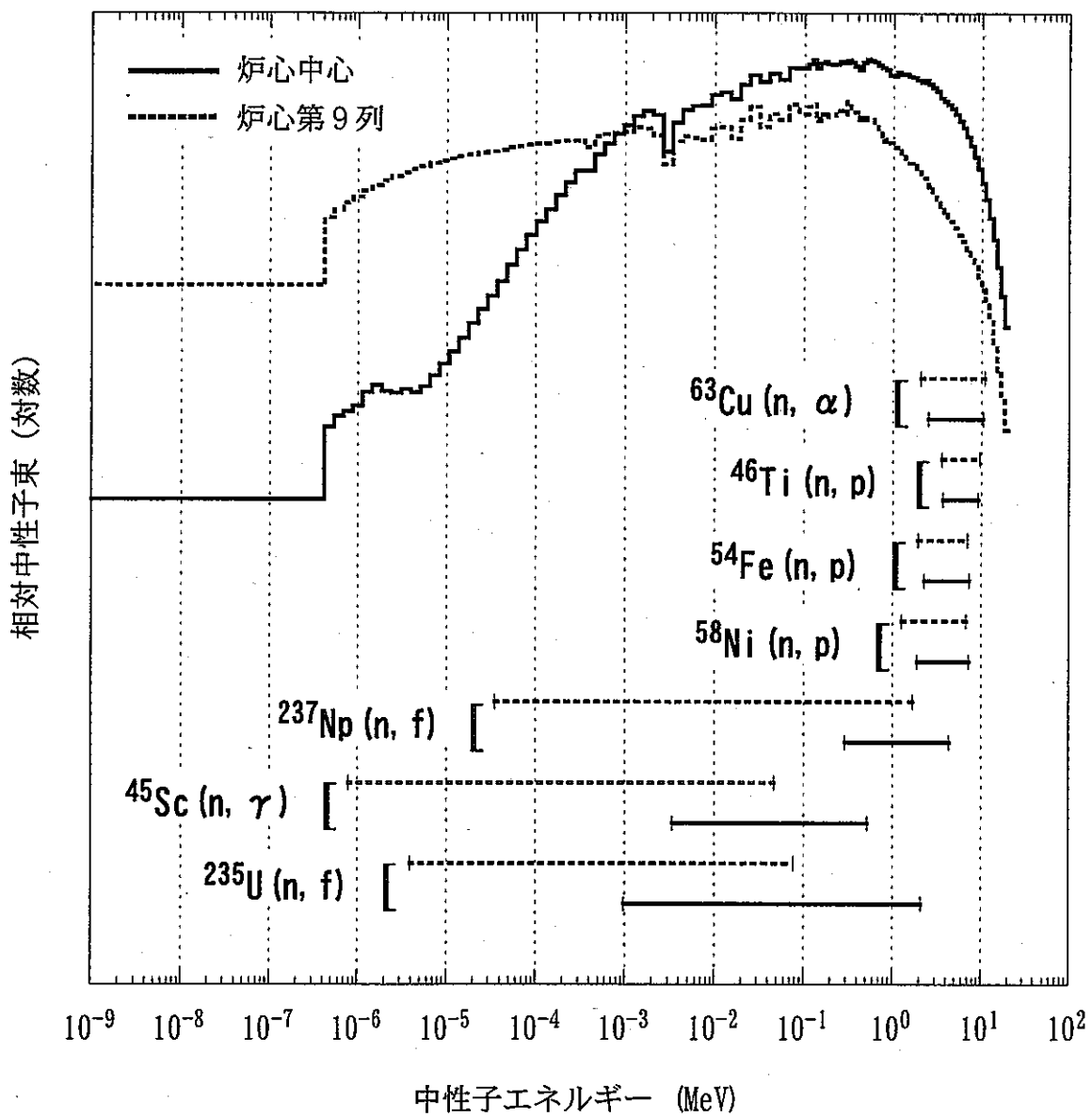


図3.2 放射化箔の90%感度範囲

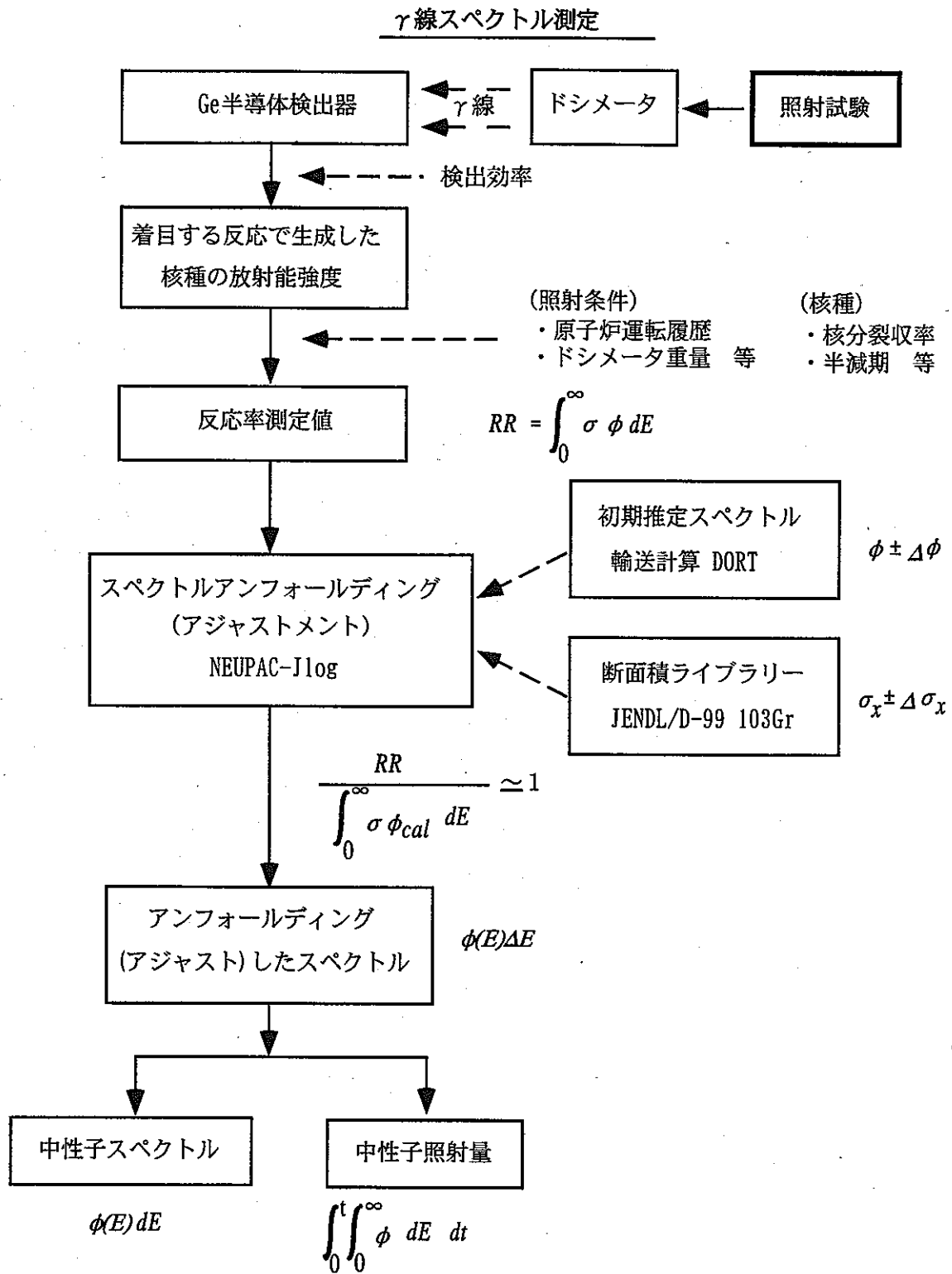


図3.3 中性子照射量解析フロー

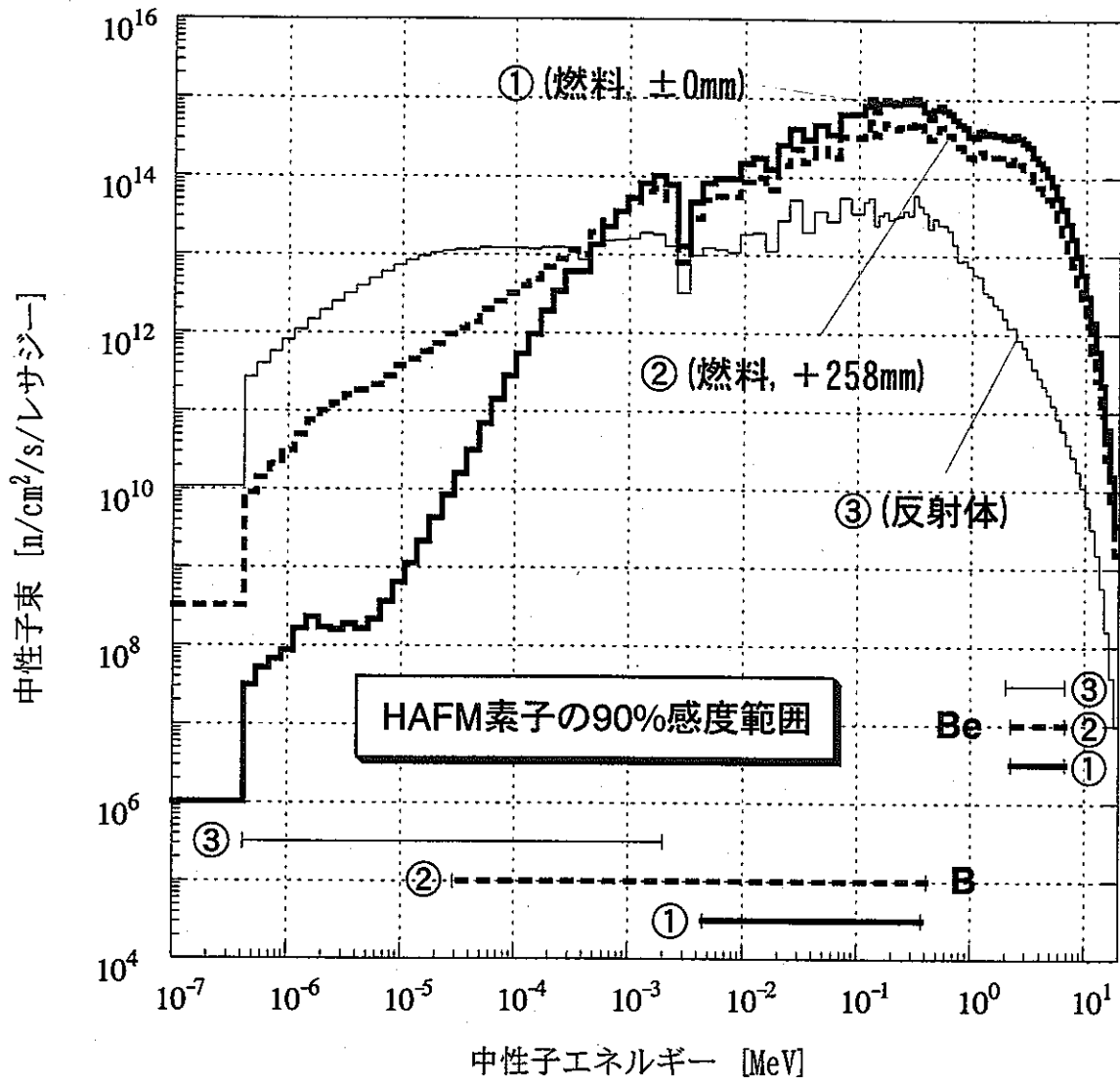


図3.4 HAFM照射位置の中性子スペクトルとHAFM素子の90%感度範囲



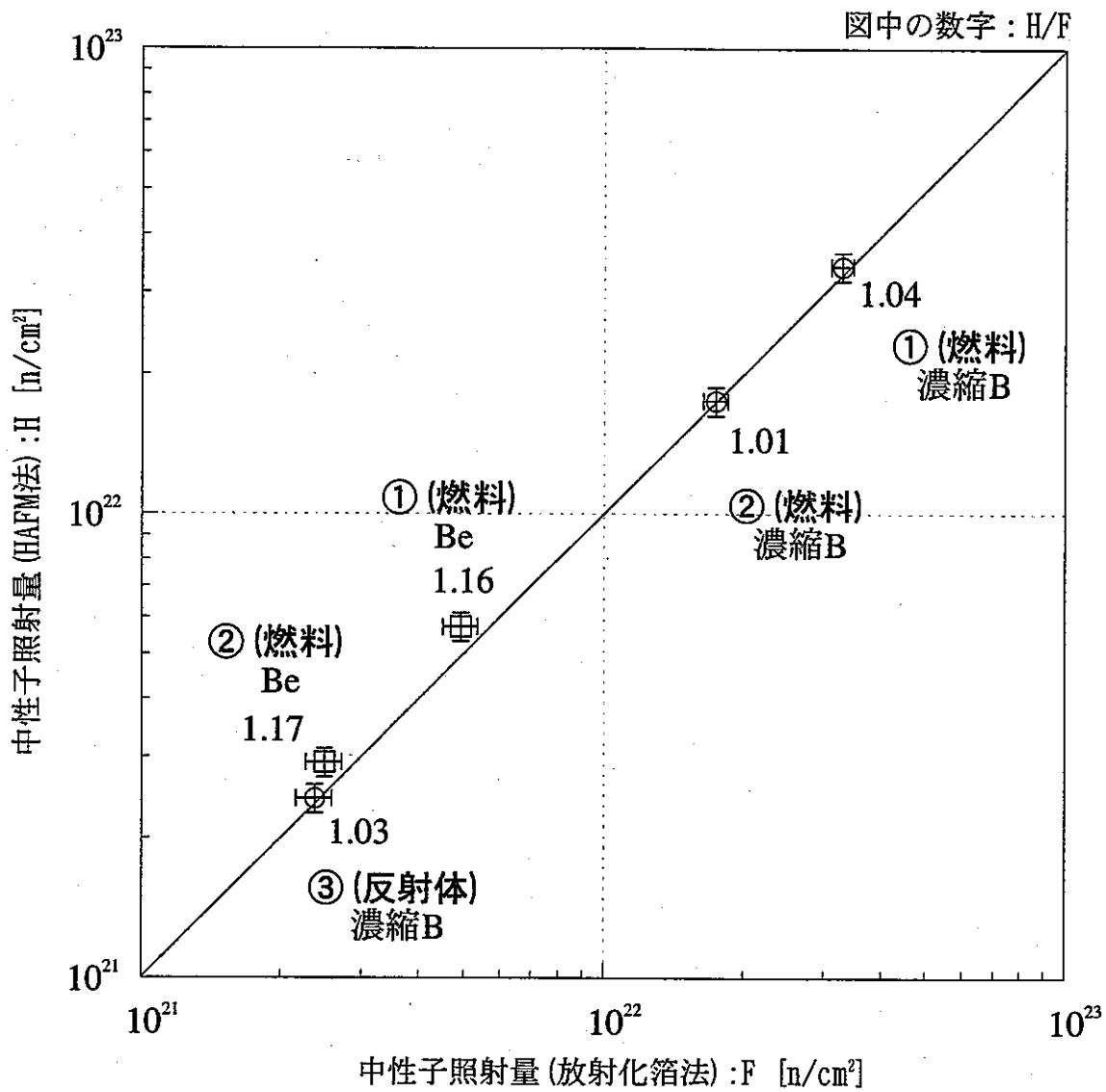


図3.5 中性子照射量測定結果

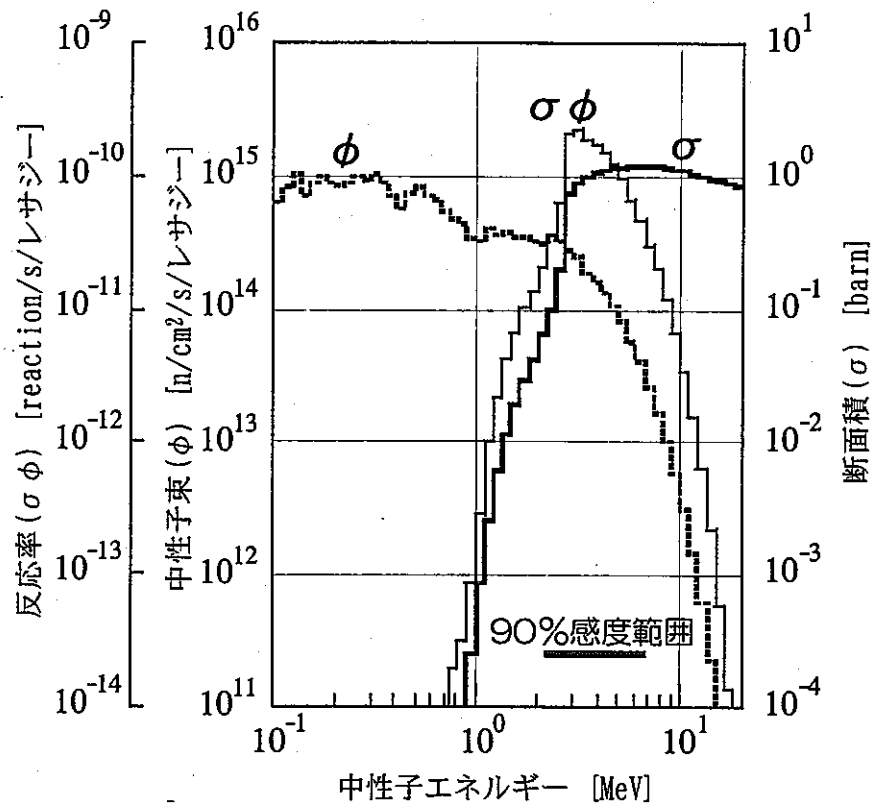


図3.6  ${}^9\text{Be}$ のHe生成断面積、炉中心の中性子束および反応率のエネルギー分布

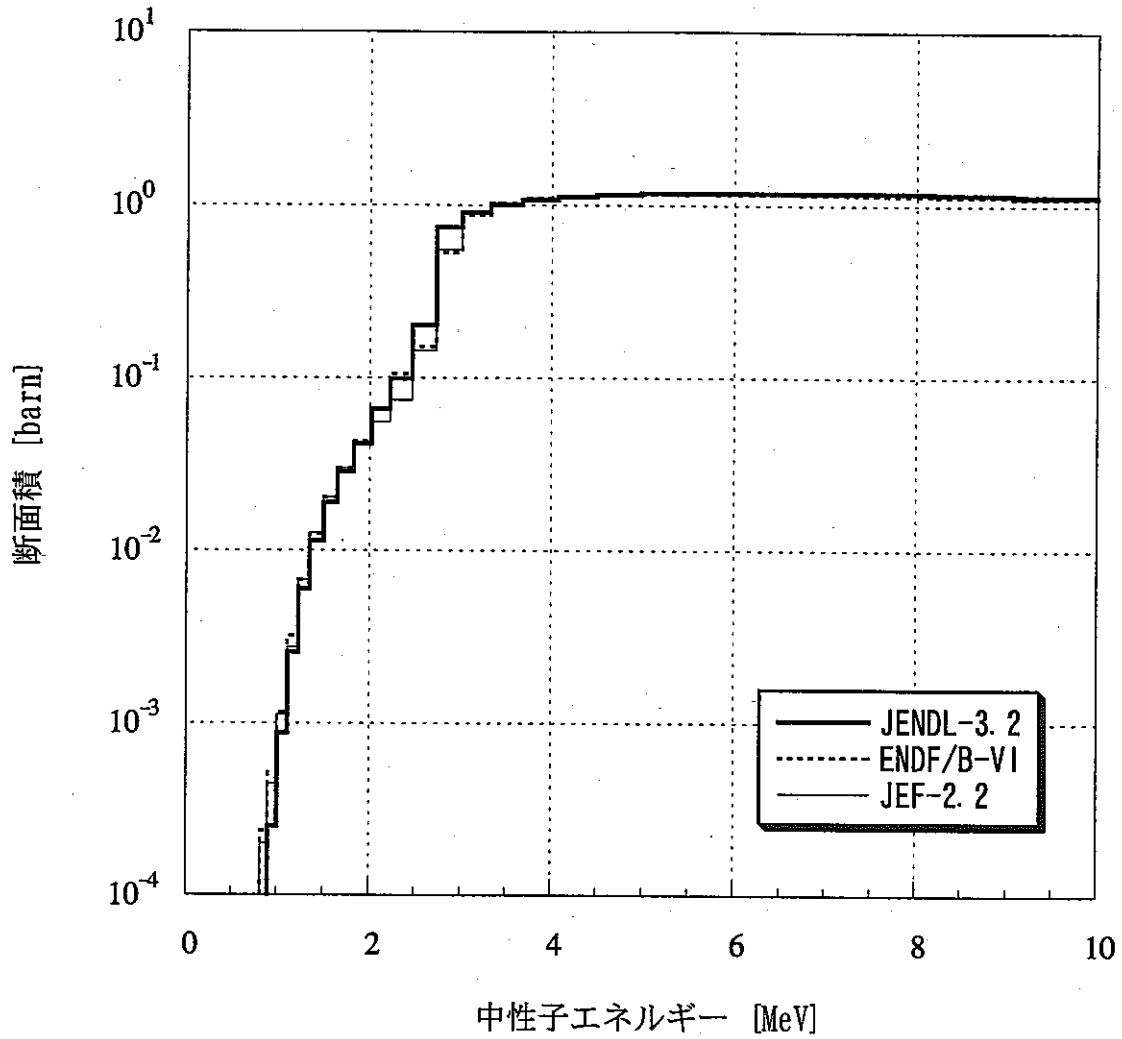


図3.7  $^9\text{Be}$ のHe生成断面積

#### 4. 結 言

高速炉の中性子照射量の測定精度向上と構造材中の He 生成量の直接測定を目的とした HAFM 開発の最終段階として、高速実験炉「常陽」で濃縮 B 型及び Be 型 HAFM を照射し、得られた中性子照射量により高速炉ドシメトリーへの適用性を評価した。

本研究では、濃縮 B 型 HAFM から全中性子照射量を、Be 型 HAFM から 1 MeV 以上の高速中性子照射量を求め、精度検証のため同位置で照射した放射化箔法による中性子スペクトルから求めた中性子照射量と比較した。その結果、濃縮 B 型 HAFM による全中性子照射量と放射化箔法の測定値との比は He 原子数の測定誤差範囲内で一致し、HAFM 法の信頼性が確認された。一方、Be 型 HAFM による高速中性子照射量については、HAFM の測定値は放射化箔法より系統的に 10 数%大きくなり、この原因はしきい反応を有する Be の He 生成断面積の誤差によるものと考えられる。

これらより、「常陽」実機での中性子照射量に対する HAFM 法の測定精度を確認した。今後は、濃縮 B 型 HAFM を「常陽」のドシメトリーに用いて放射化箔法を補完するとともに、Be 型 HAFM に係る断面積の誤差等を検討し、高速中性子モニタとしての適用性を評価する予定である。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、HAFMによるHe生成量測定値からの中性子照射量の算出及び放射化箔法による中性子照射量測定について、検査開発株式会社の柘井智彦氏、佐井川拓也氏にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 伊藤主税、関根隆、青山卓史、鷹尾良行、神田幸則、井口哲夫：“高速炉ドシメトリー用 He 蓄積型中性子フルエンスモニタの開発”、日本原子力学会和文論文誌, Vol. 1, No. 1, p. 48 (2002)
- [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 (1996)
- [3] 伊藤主税、青山卓史、吉川和伸：“He 蓄積型中性子フルエンスモニタの測定精度”、PNC TN9410 98-008 (1998)
- [4] 鷹尾良行、神田幸則：“ヘリウム蓄積法による中性子照射量の測定精度に関する研究”、PNC TJ9606 98-001 (1997)
- [5] 井口哲夫：“弥生炉の標準照射場を用いた HAFM、タゲガスの校正照射”、PNC TJ9603 98-003 (1997)
- [6] 伊藤主税、青山卓史、枘井智彦、佐井川拓也：“「常陽」の照射試験における中性子照射量の精度向上”、JNC TN9400 99-029 (1999)
- [7] 関根隆、青山卓史、吉田昌宏、鈴木惣十：“高速中性子照射場としての高速実験炉「常陽」のキャラクタリゼーション－照射条件評価技術の現状と今後－”、サイクル機構技報, No. 6, p. 19 (2000)
- [8] W. A. Rhoades and R. L. Childs: “DORT Two-dimensional Discrete Ordinates Transport Code,” CCC-484 (1989)
- [9] M. Nakazawa and A. Sekiguchi: “The Basic Reports of J1-Unfolding Code “NEUPAC”,” UTNL-R0096 (1981)
- [10] K. Kobayashi, T. Iguchi, S. Iwasaki, T. Aoyama, S. Shimakawa, Y. Ikeda, N. Odano, K. Sakurai, K. Shibata, T. Nakagawa and M. Nakazawa: “JENDL Dosimetry File 99 (JENDL/D-99),” JAERI 1344 (2002)
- [11] T. Nakagawa, K. Shibata, S. Chiba, T. Fukahori, Y. Nakajima, Y. Kikuchi, T. Kawano, Y. Kanda, T. Ohsawa, H. Matsunobu, M. Kawai, A. Zukeran, T. Watanabe, S. Igarashi, K. Kosako and T. Asami: “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version-3 Revision-2: JENDL-3.2,” Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 32, p. 1259 (1995).