

「常陽」照射試験における
照射条件評価精度の向上
(研究報告書)

1999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。

〒319-1194 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

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 319-1194,
Japan.

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

1999

「常陽」照射試験における照射条件評価精度の向上

関根 隆*、北村 了一**、青山 卓史*

要 旨

「常陽」の照射試験における照射条件評価精度の向上を目的として、連続エネルギーモンテカルロコード"MCNP"を導入し、炉心燃料集合体と反射体の境界における ^{148}Nd 生成量を評価し、照射後試験による実測値と比較した。

"MCNP"による計算では、「常陽」炉心管理コードシステム"MAGI"から求めた炉内の中性子源分布を用いて、評価対象としたINTA-2集合体内部の中性子束及びスペクトルを計算し、JNDC-V2の核分裂収率データを用いて ^{148}Nd 生成量を評価した。これを同位体希釈質量分析法により測定した結果と比較した。

その結果、"MCNP"は炉心中心方向から反射体に向かうにつれて軟らかくなる中性子スペクトルの変化を詳細に計算でき、"MCNP"による ^{148}Nd 生成量計算値と実測値の比(C/E)は0.99~1.00となり、両者は誤差範囲内で一致した。

これにより、従来のHex-Z 7群拡散計算に基づく評価方法では十分な精度が得られなかった炉心燃料集合体と反射体の境界での照射試験における照射条件を、"MCNP"により精度良く評価できることを確認した。

* 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部技術課

** 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 照射管理課

Improvement of Evaluation of Irradiation Test Condition in JOYO

Takashi SEKINE*, Ryoichi KITAMURA** and Takafumi AOYAMA*

ABSTRACT

In order to improve the calculation accuracy of the irradiation test conditions in the experimental fast reactor JOYO, a three dimensional, continuous energy Monte Carlo code "MCNP" was employed. The fission product yields (^{148}Nd) in the instrumented test assembly (INTA-2) which was loaded between the driver fuel subassemblies and reflectors were evaluated in this study. The results from the "MCNP" code were compared with the experimental values.

In the calculation of the "MCNP" code, the neutron source distribution data which was calculated with the JOYO core management code system "MAGI" was used to evaluate the neutron flux and spectrum inside the INTA-2 subassembly. The ^{148}Nd yields were evaluated with the calculated fission reactions and the fission yield data from JNDC-V2. The calculated ^{148}Nd yields were compared with the experimental values which were obtained from post irradiation examination results.

The ratios of the "MCNP" values to experimental values of ^{148}Nd yields are about 0.99~1.00 of all pins. The "MCNP" code calculation values were within the range of the experimental error. These results indicate that the irradiation condition of the subassembly which was loaded next to the reflector can be evaluated accurately with the "MCNP" code.

* Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center,
O-arai Engineering Center, JNC

** Irradiation and Administration Section, Irradiation Center,
O-arai Engineering Center, JNC

目 次

1. 緒 言	1
2. 評価対象集合体	1
3. “MCNP”による計算方法	2
3.1 集合体形状及び組成	2
3.2 中性子源分布	2
3.3 核分裂中性子スペクトル	3
3.4 断面積ライブラリー	3
3.5 照射履歴	3
3.6 核分裂収率データ	4
3.7 ヒストリー数	4
4. ^{148}Nd 生成量の測定方法	4
5. 計算結果	4
5.1 中性子束及び中性子スペクトルの評価結果	5
5.2 ^{148}Nd 生成量評価	5
5.3 線出力密度評価	6
6. 結 言	6
謝 辞	7
参考文献	7

表リスト

表 2.1	^{148}Nd 生成量評価対象燃料要素の仕様	8
表 3.1	高速中性子による ^{148}Nd の核分裂収率	9
表 4.1	INTA-2 集合体の ^{148}Nd 生成量測定結果	9
表 5.1	“MAGI” の中性子エネルギー群構造	9
表 5.2	“MCNP” によるINTA-2 集合体の ^{148}Nd 生成量	10
表 5.3	“MAGI” によるINTA-2 集合体の ^{148}Nd 生成量	11
表 5.4	“MCNP” によるINTA-2 集合体の線出力密度	12
表 5.5	INTA-2 集合体の線出力密度評価結果	13

図リスト

図 2.1	INTA-2 集合体装荷位置及び燃料要素装填位置	14
図 3.1	INTA-2 集合体のモデル化概略図	15
図 3.2	Watt型の核分裂中性子スペクトル	16
図 3.3	第23' サイクル運転中の原子炉熱出力履歴	17
図 5.1	“MCNP” による各燃料要素位置での中性子スペクトル	18
図 5.2	INTA-2 集合体内の全中性子束分布	19
図 5.3	INTA-2 集合体内の ^{148}Nd 生成量分布	20

1. 緒 言

「常陽」における照射試験では、Hex-Z体系の7群拡散計算に基づく炉心管理コードシステム"MAGI"及びポテンシャル理論に基づく「常陽」炉心要素照射評価システム"ESPRIT-J"により照射燃料集合体の照射条件を評価してきた¹⁾。これらの核計算では、集合体の組成を均質モデルで取扱うため、炉心燃料集合体と反射体との境界近傍で、中性子束勾配や中性子スペクトルの変化が大きな箇所や、非均質な構造を有する照射試験用集合体内に装填された燃料要素の照射条件評価については、燃料要素の装填位置によって評価結果と実測値の比(C/E)がばらつく等の問題点があった。

このため、照射試験用集合体の内部構造を詳細に模擬でき、中性子のエネルギー分布を連続で取扱えるモンテカルロ計算コード"MCNP"²⁾を導入し、照射条件評価精度の向上を図ることとした。

本研究では、"MCNP"により核分裂生成物である¹⁴⁸Ndの生成量を計算し、照射後試験において同位体希釈質量分析法で得られた実測値と比較することにより、"MCNP"の照射条件評価精度を検討した。

2. 評価対象集合体

今回は、炉心燃料集合体と反射体の境界である炉心第5列 [5F2] に装荷された計測線付燃料集合体 (INTA-2) を評価対象とした。INTA-2集合体の構造及び評価対象とした燃料要素の配置を図2.1に示す。INTA-2集合体には集合体中心付近に燃料要素が19本装填されている。今回評価対象とした燃料要素は、¹⁴⁸Nd生成量が測定されている燃料要素のうち、炉心中心側、集合体中心、反射体側の3本である。また、評価対象とした燃料要素のうち、燃料要素1及び2については、炉中心高さでの燃料ペレット中心温度測定用の熱電対を設置するため中空ペレットが使用されている。

評価対象とした燃料要素の主要仕様を表2.1に示す。また、INTA-2集合体の照射条件の概略を以下に示す。

装荷位置	: 炉心第5列 [5F2]
照射サイクル	: 第23"サイクル
照射時期	: 1991年9月2日～10日
照射日数	: 7.199 EFPD
全中性子照射量	: 1.07×10^{21} n/cm ²

なお、INTA-2集合体の照射日数 (EFPD : Effective Full Power Days) は約7日と短いため、炉中心高さにおいても燃焼率は0.1atom%以下であり、燃焼による組成変化は無視できる。このため、¹⁴⁸Nd生成量は、"MCNP"で計算した照射初期における各燃料核種の核分裂反

応率（100MWt出力時の値）を照射時間（EFPD）で積分することにより照射期間中の核分裂反応数を求め、これと ^{148}Nd の核分裂収率から評価した。

3. "MCNP"による計算方法

3.1 集合体形状及び組成

"MCNP"による計算は全炉心体系で行った。ここで、評価対象であるINTA-2集合体については集合体の内部構造を詳細に模擬し、他の集合体については"MAGI"と同様にHex-Z体系での均質モデルとした。詳細を以下に示す。

(1) INTA-2集合体

INTA-2集合体の形状を図3.1に示す。燃料ペレットが装填されている燃料領域については、各燃料要素及びラッパ管等の配置及び構造を模擬し、部材毎の組成を入力した。なお、燃料ペレットの組成は、燃焼率が測定された燃料要素については照射後試験での測定値を、また、その他の燃料要素については製造時のデータを使用した。

燃料ペレット装填部分よりも上部及び下部に位置する熱遮へいペレット、反射体ペレット及びプレナム等については、"MAGI"で用いている均質モデルの値とした。

(2) その他の集合体

炉心燃料集合体については、3.2項に示すように"MAGI"で評価した集合体のノード毎の中性子源分布を入力値として与えるため、"MAGI"と同様にHex-Z体系で均質にモデル化した。なお、各集合体の組成は"MAGI"による7群拡散計算で得られた集合体毎の燃焼組成を使用した。その他の集合体（制御棒、反射体他）についても、"MAGI"で用いているHex-Z体系での均質組成を使用した。

3.2 中性子源分布

"MCNP"では中性子源として、

- (1) 入力値として中性子源分布を与える。
- (2) 核分裂によって発生する中性子を中性子源とする。

の2通りの方法がある。今回の計算では、INTA-2集合体については(2)、その他の集合体については(1)の方法により、それぞれの中性子源を考慮した。詳細を以下に示す。

・INTA-2集合体以外の集合体

INTA-2集合体以外については、"MAGI"と同様にHex-Z体系で均質にモデル化し、中性子源分布は"MAGI"により計算した各集合体のノード毎の中性子発生個数（ $\nu N \sigma_f \phi$ ）を入力値として与えた。ここで、これらの集合体内における核分裂による発生中性子は、吸

収反応と同様に、中性子の生成を伴わないものとして取扱った。

・INTA-2集合体

INTA-2集合体については、集合体内の中性子束分布及びスペクトルを詳細に評価するため、中性子源は燃料ペレット内の核分裂によって発生する中性子とした。

なお、「MCNP」の計算結果は中性子1個当たりの確率として求められるため、「MAGI」による100MWt出力時の中性子源総数を用いて「MCNP」の計算結果を規格化した。

3.3 核分裂中性子スペクトル

「MCNP」には熱中性子、1MeV、14MeVのエネルギーを有する中性子が入射した場合のWatt型の核分裂中性子スペクトルが内蔵されており、 ^{239}Pu については1MeV及び熱中性子による核分裂中性子スペクトルが同じであること及び「常陽」の炉内中性子の平均エネルギーが約0.4MeVであることから、1MeVの中性子が入射した場合の ^{239}Pu の核分裂中性子スペクトルを使用した。

評価式及びパラメータを以下に示す。

$$f(E) = \sqrt{\frac{4}{\pi}} a^3 b \cdot \exp\left(-\frac{ab}{4}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E}{a}\right) \cdot \sinh(\sqrt{bE})$$

ここで、

- $f(E)$: E MeV のエネルギーを有する中性子の発生確率
 a : 0.966 MeV (^{239}Pu に1 MeVの中性子が入射した場合のパラメータ)
 b : 2.842 / MeV (")

使用したWatt型の核分裂中性子スペクトルを図3.2に示す。

3.4 断面積ライブラリー

断面積ライブラリーとして、日本原子力研究所の評価済核データライブラリーJENDL-3.2³⁾から「MCNP」用に作成された中性子断面積ライブラリーFSXLIB⁴⁾を使用した。

3.5 照射履歴

INTA-2集合体の照射試験時（「常陽」MK-II炉心第23^{'''}サイクル）の原子炉熱出力履歴を図3.3に示す。これは、「常陽」データ処理装置(JOYDAS: JOYO Data Acquisition System)で記録された1時間間隔のデータであり、これより、第23^{'''}サイクルのEFPDは7.199日で

あった。また、第23rdサイクル運転時の原子炉熱出力の平均値は96.9MWtであった。

3.6 核分裂収率データ

シグマ研究委員会崩壊熱評価WGにより編集された核分裂生成物核データライブラリーJNDC-V2⁵⁾を使用した。"MCNP"による¹⁴⁸Nd生成量は、"MCNP"で計算した²³⁵U、²³⁸U、²³⁹Pu、²⁴⁰Pu、²⁴¹Pu及び²⁴²Puの核分裂率と、JNDC-V2に記載されている各核種の高速中性子による¹⁴⁸Ndの核分裂収率及び照射時間から評価した。表3.1に各核種の高速中性子による¹⁴⁸Ndの核分裂収率を示す。なお、Am及びNpのマイナーアクチニドによる核分裂反応数はU及びPuと比較すると0.01%程度であり、¹⁴⁸Ndの生成量に与える影響は無視できるため、考慮しなかった。

3.7 ヒストリー数

本計算に要したヒストリー数は5000万ヒストリーであり、¹⁴⁸Nd生成量の統計誤差は約2~3%となった。なお、計算時間は、Sun Sparc Station 20で10万ヒストリー/70分であった。

4. ¹⁴⁸Nd生成量の測定方法

INTA-2集合体に装填された燃料要素の¹⁴⁸Nd生成量は、照射後試験において同位体希釈質量分析法⁶⁾により測定されている。同位体希釈質量分析法の測定プロセスは、①ペレットの溶解、②対象元素の分離、③質量分析に大別される。まず、照射済燃料を8モルの硝酸により100℃で6時間溶解し、さらにPuの難溶性を考慮して、フッ酸を微量添加し、100℃で6時間溶解する。次に、¹⁴⁸Ndのイオン交換分離を行うため、硝酸系陰イオン交換分離法によりFP、U及びPuフラクションに分離し、さらにFPフラクションから硝酸メタノール系陰イオン交換分離法によりNdを単離する。¹⁴⁸Nd生成量は、分離後におけるNdの同位体希釈質量分析から得られるNdの同位体組成及び原子数データから求める。なお、¹⁴⁸Nd生成量の主な測定誤差は試料分取誤差であり、これを含めて1%と評価されている。

¹⁴⁸Nd生成量の測定結果を表4.1に示す。ここで、照射後試験で測定された試料中の重金属元素当たりの¹⁴⁸Nd生成量を評価した。

5. 計算結果

"MCNP"を用いて、図2.1に示したように炉心中心側から反射体側に向かって装填された燃料要素1、2、3について、各燃料要素位置における中性子束、中性子スペクトル、¹⁴⁸Nd生成量及び線出力密度を評価した。なお、"MCNP"による計算では、照射後試験で採取した燃料ペレット（直径約6.5mm、高さ約5mm）を詳細に模擬して領域（セル）を設

定し、このセル内の中性子の飛跡（トラックレングス）から、中性子束等を評価した。詳細について以下に示す。

5.1 中性子束及び中性子スペクトルの評価結果

INTA-2集合体の3本の燃料要素の炉中心高さにおける中性子スペクトルを"MCNP"を用いて評価した。"MCNP"で評価した中性子スペクトルを炉心管理コード"MAGI"による7群スペクトルと比較した結果を図5.1に示す。なお、"MAGI"で用いている中性子エネルギー群構造を表5.1に示す。

"MCNP"による各燃料要素の中性子スペクトルを比較すると、炉心中心側に位置する燃料要素1から、反射体に隣接する最外周の燃料要素3に向かうにつれて中性子スペクトルが軟らかくなっている。一方、"MAGI"はHex-Zで均質化した組成を用いて評価するため、集合体中心に装填されている燃料要素2に比較的近いスペクトルとなっている。

各燃料要素の炉中心高さでの全中性子束を図5.2に示す。"MCNP"による中性子束は炉心中心側の燃料要素1から反射体側の燃料要素3へ向かうにつれて単調に減少している。

5.2 ^{148}Nd 生成量評価

"MCNP"で評価した ^{148}Nd 生成量と同位体希釈質量分析法による測定値を比較して表5.2及び図5.3に示す。"MCNP"では、各燃料要素の核分裂率を核種毎に計算し、核種の原子数及び照射時間から核分裂発生数を評価し、これに ^{148}Nd の核分裂収率を乗じ、燃料核種について総和をとることにより重金属元素あたりの ^{148}Nd 生成量の評価した。また、"MAGI"で使用する各核種の核分裂断面積、照射初期の中性子束（いずれも7群）及び燃料組成から評価した ^{148}Nd 生成量も図5.2に併せて示した。計算に使用した"MAGI"の原子数及び核分裂率データ等を表5.3に示す。

図5.3からわかるように、実測されている ^{148}Nd 生成量の径方向分布は、集合体中心の燃料要素で最小となり、炉心中心側及び反射体側で大きくなっている。これは、炉心中心側の燃料要素については、図5.2に示した"MCNP"の計算結果からもわかるように中性子束が高いためであり、また、反射側の燃料要素については中性子束は減少するが、図5.3に示したように、中性子スペクトルが軟らかくなることにより相対的に核分裂率が増加するためと考えられる。"MCNP"で評価した ^{148}Nd 生成量の径方向分布は、実測値と同様に炉心中心側及び反射体側の燃料要素の方が集合体中心に装填した燃料要素よりも大きくなっている（図5.3参照）。その結果、 ^{148}Nd 生成量の"MCNP"による計算値と実測値との比(C/E)は、0.99～1.00となり、両者は誤差範囲内で一致した。一方、"MAGI"はHex-Zで均質化した組成を用いて評価しており、 ^{148}Nd 生成量の評価結果は3本の燃料要素の平均値に近い値となっている。

以上、5.1及び5.2の結果より、"MCNP"を用いてINTA-2集合体内の照射条件を精度良く評価できることが確認できた。

5.3 線出力密度評価

"MCNP"を用いて燃料要素1、2及び3の線出力密度を評価した結果を表5.4に示す。理論密度比、O/M比、照射後試験時に測定したU及びPuの同位体組成比を用いて各核種の核分裂数を求め、これと各核種の1核分裂当たりのエネルギーから線出力密度を評価した。ここで、 γ 線及びニュートリノによる発熱を除いた核分裂当たりの発生エネルギーは"MCNP"に内蔵されている値 (^{235}U :180.88MeV、 ^{238}U :181.31MeV、 ^{238}Pu :186.65MeV、 ^{239}Pu :189.44MeV、 ^{240}Pu :186.36MeV、 ^{241}Pu :188.99MeV、 ^{242}Pu :185.98MeV)を使用した。また、 γ 発熱については、"MAGI"で用いている修正New-POPOP4ライブラリー⁷⁾による遅発核分裂 γ 線を考慮した場合の発熱割合を使用した。なお、燃料要素1及び2の燃焼率測定位置では中空ペレットが使用されているため、中実ペレットの燃料要素3で線出力密度が最大となっている。

なお、最終的な線出力密度の評価値は、"MCNP"で求めた線出力密度を ^{148}Nd 生成量のC/Eで補正した値とする。計算結果を表5.5に示す。ここで線出力密度の誤差は、 ^{148}Nd 生成量の測定誤差と"MCNP"の中性子束計算における統計誤差により評価した。

6. 結 言

「常陽」の照射試験における照射条件評価精度の向上を目的として、"MCNP"コードにより炉心燃料集合体と反射体の境界における ^{148}Nd 生成量を評価し、照射後試験による実測値と比較した。

その結果、"MCNP"は炉心中心方向から反射体に向かうにつれて軟らかくなる中性子スペクトルの変化を詳細に計算でき、"MCNP"による ^{148}Nd 生成量計算値と実測値の比(C/E)は0.99~1.00となり、両者は誤差範囲内で一致した。

これにより、従来のHex-Z 7群拡散計算に基づく評価方法では十分な精度が得られなかった炉心燃料集合体と反射体の境界での照射試験における照射条件を、"MCNP"により精度良く評価できることを確認した。また、"MCNP"を用いてINTA-2集合体に装填された燃料要素の線出力密度を計算した結果、評価対象とした3本の燃料要素の線出力密度293~327W/cmが得られた。

今後は、"MCNP"により計算ドシメトリーの精度を向上し、照射試験後の評価等に反映させていく予定である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり、"MCNP"による計算手法について助言いただいた(株)三菱総合研究所の佐藤 理氏及び炉心技術開発グループの横山賢治研究員、Nd生成量の測定手法等について助言いただいた照射燃料試験室の逢坂正彦研究員に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 有井祥夫、他：原子力学会誌39[4],315～325 (1997)
- 2) J. F. Brismester Ed., "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A", LA-12625-M (1993).
- 3) Nakagawa, T. et al., "J. Nucl. Sci. Technol., 32(12) ", 1259-1271 (1995).
- 4) 小迫和明、他 「JENDL3.2に基づいたMCNP用連続エネルギー断面積ライブラリ」 JAERI-DATA-CODE-94-20 (1994).
- 5) TASAKA, K. et al., "JNDC Nuclear Data Library of Fission Products -Second Version-", JAERI 1320 (1990).
- 6) "Atom Percent Fission in Uranium and Plutonium Fuel (Neodymium) Annual Books of ASTM Standard ", E321-79 (1971)
- 7) 長沖吉弘、他 「高速実験炉「常陽」の炉内 γ 発熱の解析・評価」 PNC ZN 9410 95-191 (1995)

表2.1 ^{148}Nd 生成量評価対象燃料要素の仕様

		燃料要素1	燃料要素2	燃料要素3	備 考
試料採取位置 (mm)		289.6~294.2	288.5~293.0	289.4~294.2	燃料ペレットスタック下端からの距離
燃 料 組 成 比 (%)	^{234}U	0.119	0.124	0.120	PIE測定値
	^{235}U	17.068	16.790	16.769	＃
	^{236}U	0.121	0.121	0.115	＃
	^{238}U	64.292	64.547	64.518	＃
	^{238}Pu	0.193	0.159	0.182	＃
	^{239}Pu	12.150	12.197	12.160	＃
	^{240}Pu	4.212	4.256	4.246	＃
	^{241}Pu	1.136	1.074	1.159	＃
	^{242}Pu	0.709	0.732	0.731	＃
Pu富化度 (atom%)		18.400	18.418	18.478	PIE測定値
O/M比		1.96	1.96	1.99	製造時測定値
理論密度比 (%TD)		91.28	91.35	91.51	＃
ペレット外径 (mm)		6.546	6.546	6.546	＃
ペレット内径 (mm)		1.903*	1.903*	—	＃

* 燃料要素1及び2については、燃料ペレット中に熱電対を設置するため、中空ペレットが使用された。

表 3.1 高速中性子による ^{148}Nd の核分裂収率

核種	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
^{148}Nd 核分裂収率 (%)	1.6716	2.0816	1.6374	1.9150	1.9062	2.0633

(出典：JNDG-V2)

表 4.1 INTA-2 集合体の ^{148}Nd 生成量測定結果

	燃料要素 1	燃料要素 2	燃料要素 3
測定位置 (mm)	289.6~294.2	288.5~293.0	289.4~294.2
^{148}Nd 原子数 (atoms)	5.128E+16	3.765E+16	4.428E+16
重金属元素数 (atoms)	3.226E+21	2.487E+21	2.892E+21
^{148}Nd / 重金属	1.59E-05	1.51E-05	1.53E-05

表 5.1 “MAGI” の中性子エネルギー群構造

群	Upper Energy	Lower Energy
1	10MeV	1.3534MeV
2	1.3534MeV	0.38774MeV
3	0.38774MeV	86.517keV
4	86.517keV	9.1188keV
5	9.1188keV	961.12eV
6	961.12eV	101.3eV
7	101.3eV	0.00001eV

表5.2 “MCNP” によるINTA-2集合体の¹⁴⁸Nd生成量

燃料要素1

核分裂核種	核分裂反応率評価結果 (reactions/s/100MWt)	原子数密度 (atoms/cc)	核分裂数*1	¹⁴⁸ Nd核分裂 収率 (%)	¹⁴⁸ Nd生成量*2 (atoms/cc)
²³⁵ U	4.492E-09	3.816E+21	1.066E+19	1.6716	1.782E+17
²³⁸ U	1.024E-10	1.438E+22	9.153E+17	2.0816	1.905E+16
²³⁹ Pu	4.496E-09	2.717E+21	7.597E+18	1.6374	1.244E+17
²⁴⁰ Pu	9.913E-10	9.417E+20	5.806E+17	1.9150	1.112E+16
²⁴¹ Pu	5.890E-09	2.541E+20	9.308E+17	1.9062	1.774E+16
²⁴² Pu	6.920E-10	1.586E+20	6.827E+16	2.0633	1.409E+15
合計		2.236E+22	2.075E+19		3.519E+17
¹⁴⁸ Nd生成量/重金属元素×10 ⁻⁵		MCNP評価結果			1.576±0.030
		実測値			1.590±0.016
		MCNP評価結果/実測値			0.991

燃料要素2

核分裂核種	核分裂反応率評価結果 (reactions/s/100MWt)	原子数密度 (atoms/cc)	核分裂数*1	¹⁴⁸ Nd核分裂 収率 (%)	¹⁴⁸ Nd生成量*2 (atoms/cc)
²³⁵ U	4.393E-09	3.757E+21	1.027E+19	1.6716	1.716E+17
²³⁸ U	9.906E-11	1.444E+22	8.899E+17	2.0816	1.852E+16
²³⁹ Pu	4.337E-09	2.729E+21	7.363E+18	1.6374	1.206E+17
²⁴⁰ Pu	9.155E-10	9.523E+20	5.423E+17	1.9150	1.038E+16
²⁴¹ Pu	5.703E-09	2.403E+20	8.524E+17	1.9062	1.625E+16
²⁴² Pu	6.404E-10	1.637E+20	6.522E+16	2.0633	1.346E+15
合計		2.238E+22	1.998E+19		3.387E+17
¹⁴⁸ Nd生成量/重金属元素×10 ⁻⁵		MCNP評価結果			1.515±0.036
		実測値			1.514±0.015
		MCNP評価結果/実測値			1.001

燃料要素3

核分裂核種	核分裂反応率評価結果 (reactions/s/100MWt)	原子数密度 (atoms/cc)	核分裂数*1	¹⁴⁸ Nd核分裂 収率 (%)	¹⁴⁸ Nd生成量*2 (atoms/cc)
²³⁵ U	4.505E-09	3.778E+21	1.059E+19	1.6716	1.770E+17
²³⁸ U	8.069E-11	1.454E+22	7.295E+17	2.0816	1.519E+16
²³⁹ Pu	4.454E-09	2.740E+21	7.589E+18	1.6374	1.243E+17
²⁴⁰ Pu	7.869E-10	9.567E+20	4.682E+17	1.9150	8.967E+15
²⁴¹ Pu	6.075E-09	2.611E+20	9.868E+17	1.9062	1.881E+16
²⁴² Pu	5.552E-10	1.646E+20	5.685E+16	2.0633	1.173E+15
合計		2.253E+22	2.042E+19		3.454E+17
¹⁴⁸ Nd生成量/重金属元素×10 ⁻⁵		MCNP評価結果			1.534±0.043
		実測値			1.531±0.015
		MCNP評価結果/実測値			1.002

* 1 : 核分裂数=核分裂反応率×原子数×照射時間(7.199d×24h×60×60)

* 2 : ¹⁴⁸Nd生成量=核分裂数×¹⁴⁸Nd生成率

表5.3 “MAGI” によるINTA-2集合体の¹⁴⁸Nd生成量

	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu
原子数 (atoms/cm ³)	4.051E+20	1.534E+21	2.962E+20	1.028E+20	3.068E+19	1.750E+19
核分裂反応率 (reactions/s)	4.303E-09	2.439E-09	4.087E-09	8.811E-10	5.734E-09	6.274E-10
核分裂数(reactions/cm ³)	1.081E+18	1.017E+17	7.511E+17	5.629E+16	1.091E+17	6.826E+15
¹⁴⁸ Nd核分裂収率 (%)	1.6716	2.0816	1.6374	1.9150	1.9062	2.0633
¹⁴⁸ Nd生成数(atoms/cm ³)	1.807E+16	2.118E+15	1.230E+16	1.078E+15	2.080E+15	1.408E+14
重金属元素当たりの ¹⁴⁸ Nd生成量		1.50E-05				

表5.4 “MCNP” によるINTA-2集合体の線出力密度

燃料要素1

核分裂核種	核分裂反応率 (reactions/s/100MWt)	ペレット1cm当たり の原子数	核分裂当たりのエ ネルギー(MeV)	発熱量 (寄与率) (W/cm) *1
²³⁵ U	4.492E-09	1.176E+21	180.88	148 (50.3%)
²³⁸ U	1.024E-10	4.429E+21	181.31	13 (4.3%)
²³⁹ Pu	4.496E-09	8.370E+20	189.44	111 (37.6%)
²⁴⁰ Pu	9.913E-10	2.901E+20	186.36	8 (2.8%)
²⁴¹ Pu	5.890E-09	7.828E+19	188.99	14 (4.6%)
²⁴² Pu	6.920E-10	4.887E+19	185.98	1 (0.3%)
合 計				295±6 W/cm
線出力 (γ線による発熱 (約3%) *2を含む)				304±6 W/cm

燃料要素2

核分裂核種	核分裂反応率 (reactions/s/100MWt)	ペレット1cm当たり の原子数	核分裂当たりのエ ネルギー(MeV)	発熱量 (寄与率) (W/cm) *1
²³⁵ U	4.393E-09	1.158E+21	180.88	143 (50.4%)
²³⁸ U	9.906E-11	4.450E+21	181.31	12 (4.4%)
²³⁹ Pu	4.337E-09	8.409E+20	189.44	107 (37.8%)
²⁴⁰ Pu	9.155E-10	2.934E+20	186.36	8 (2.7%)
²⁴¹ Pu	5.703E-09	7.404E+19	188.99	12 (4.4%)
²⁴² Pu	6.404E-10	5.044E+19	185.98	1 (0.3%)
合 計				284±7 W/cm
線出力 (γ線による発熱 (約3%) *2を含む)				293±7 W/cm

燃料要素3

核分裂核種	核分裂反応率 (reactions/s/100MWt)	ペレット1cm当たり の原子数	核分裂当たりのエ ネルギー(MeV)	発熱量 (寄与率) (W/cm) *1
²³⁵ U	4.505E-09	1.272E+21	180.88	161 (50.8%)
²³⁸ U	8.069E-11	4.892E+21	181.31	11 (3.5%)
²³⁹ Pu	4.454E-09	9.220E+20	189.44	121 (38.1%)
²⁴⁰ Pu	7.869E-10	3.220E+20	186.36	7 (2.3%)
²⁴¹ Pu	6.075E-09	8.789E+19	188.99	16 (4.9%)
²⁴² Pu	5.552E-10	5.540E+19	185.98	1 (0.3%)
合 計				317±9 W/cm
線出力 (γ線による発熱 (約3%) *2を含む)				327±9 W/cm

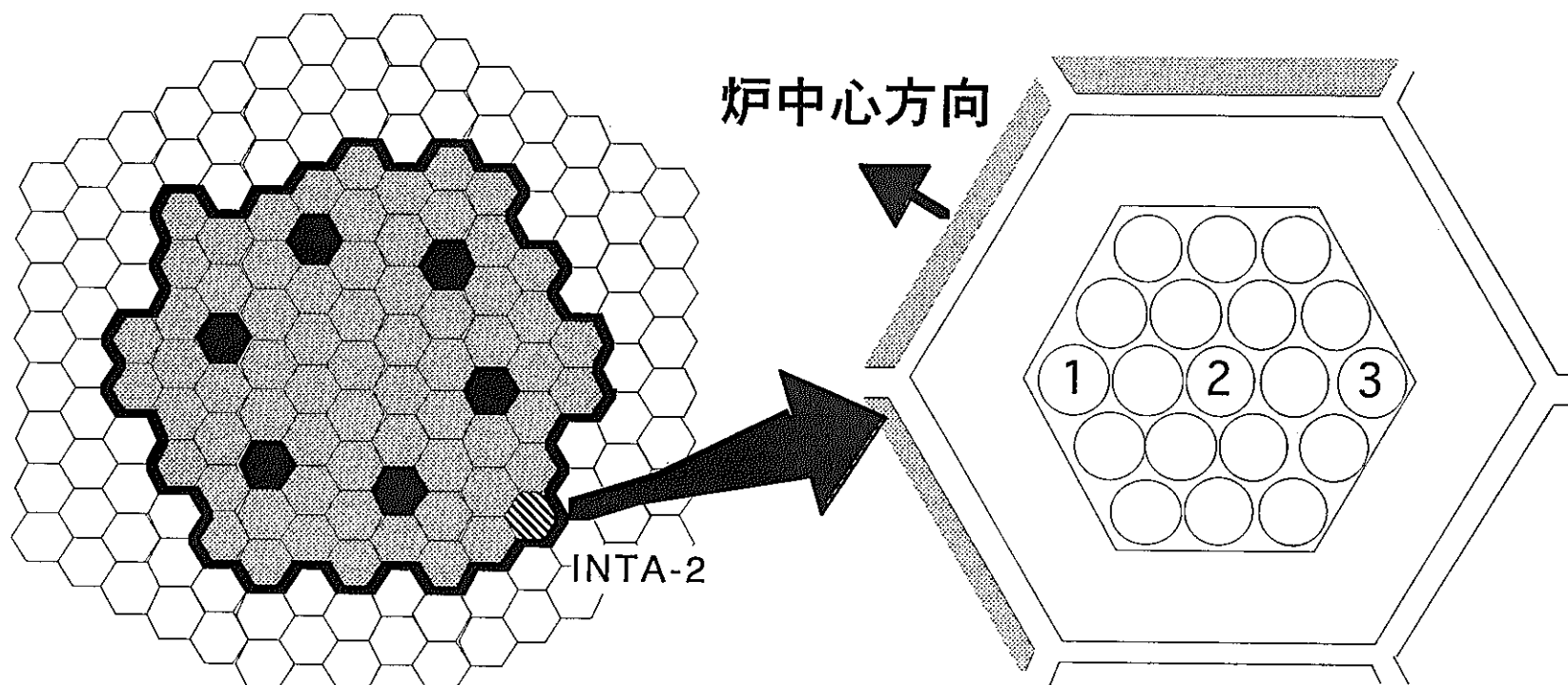
*1 線出力は第23rdサイクルの平均原子炉熱出力である96.9MWtで評価した。

発熱量=核分裂反応率×原子数×核分裂当たりのエネルギー×1.6E-19(J/eV)×96.9/100
として計算した。

*2 γ線による発熱割合については、修正New-POPOP4による遅発γ線による発熱を考慮した。

表5.5 INTA-2集合体の線出力密度評価結果

燃料要素	^{148}Nd 生成率のC/Eで 補正した線出力 (W/cm)	^{148}Nd 生成量 のC/E
燃料要素1	307 ± 7	0.991
燃料要素2	293 ± 8	1.001
燃料要素3	327 ± 10	1.002



炉心燃料集合体

 制御棒

 反射体

燃焼率が測定され、今回MCNPで評価対象とした燃料要素は、右図に示した炉心中心側に装填された燃料要素1、集合体中心に装填された燃料要素2及び反射体に隣接した燃料要素3である。

図2.1 INTA-2集合体装荷位置及び燃料要素装填位置

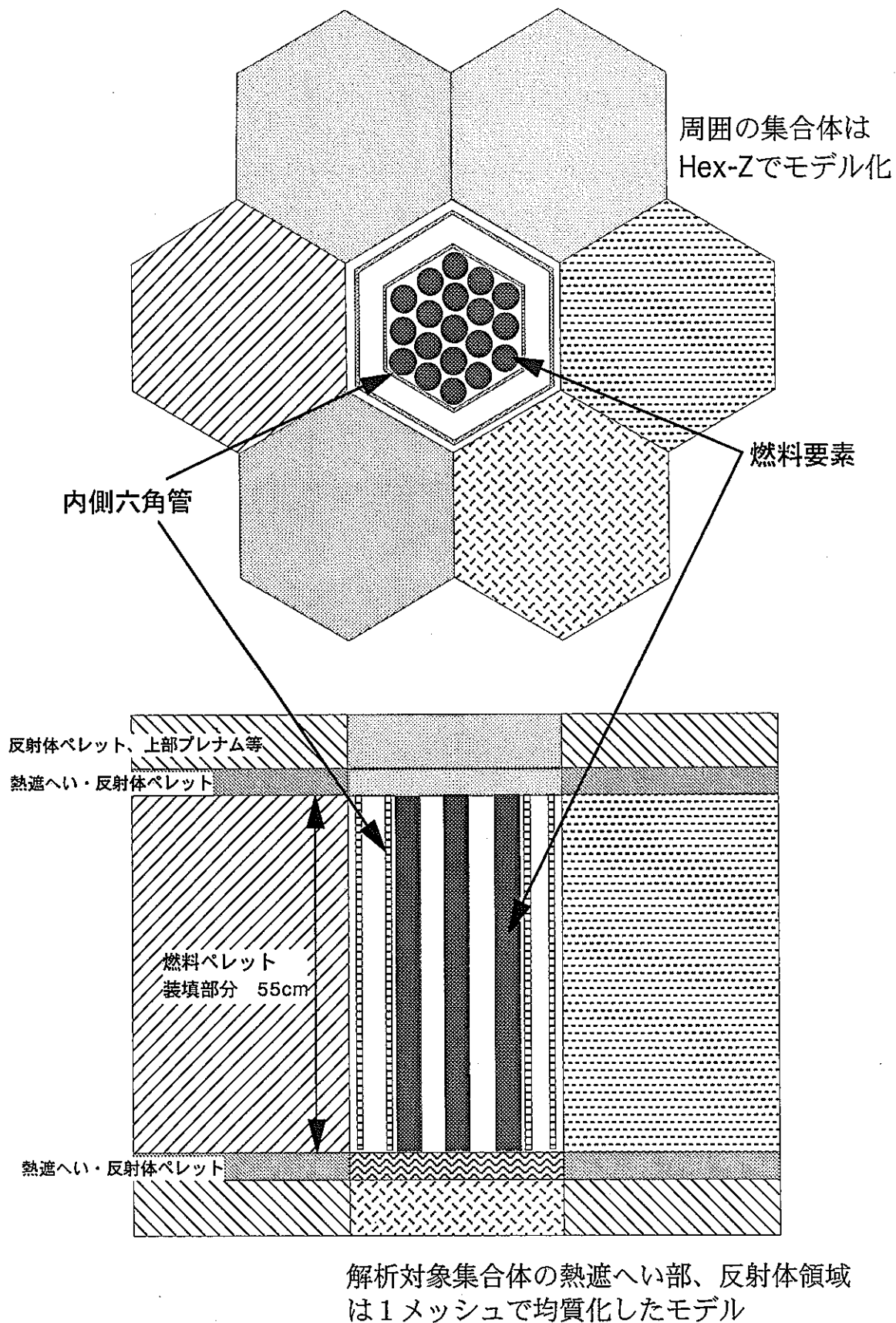


図3.1 INTA-2集合体のモデル化概略図

核分裂中性子の相対分布

(最大となる0.8MeVの中性子の発生を1とした)

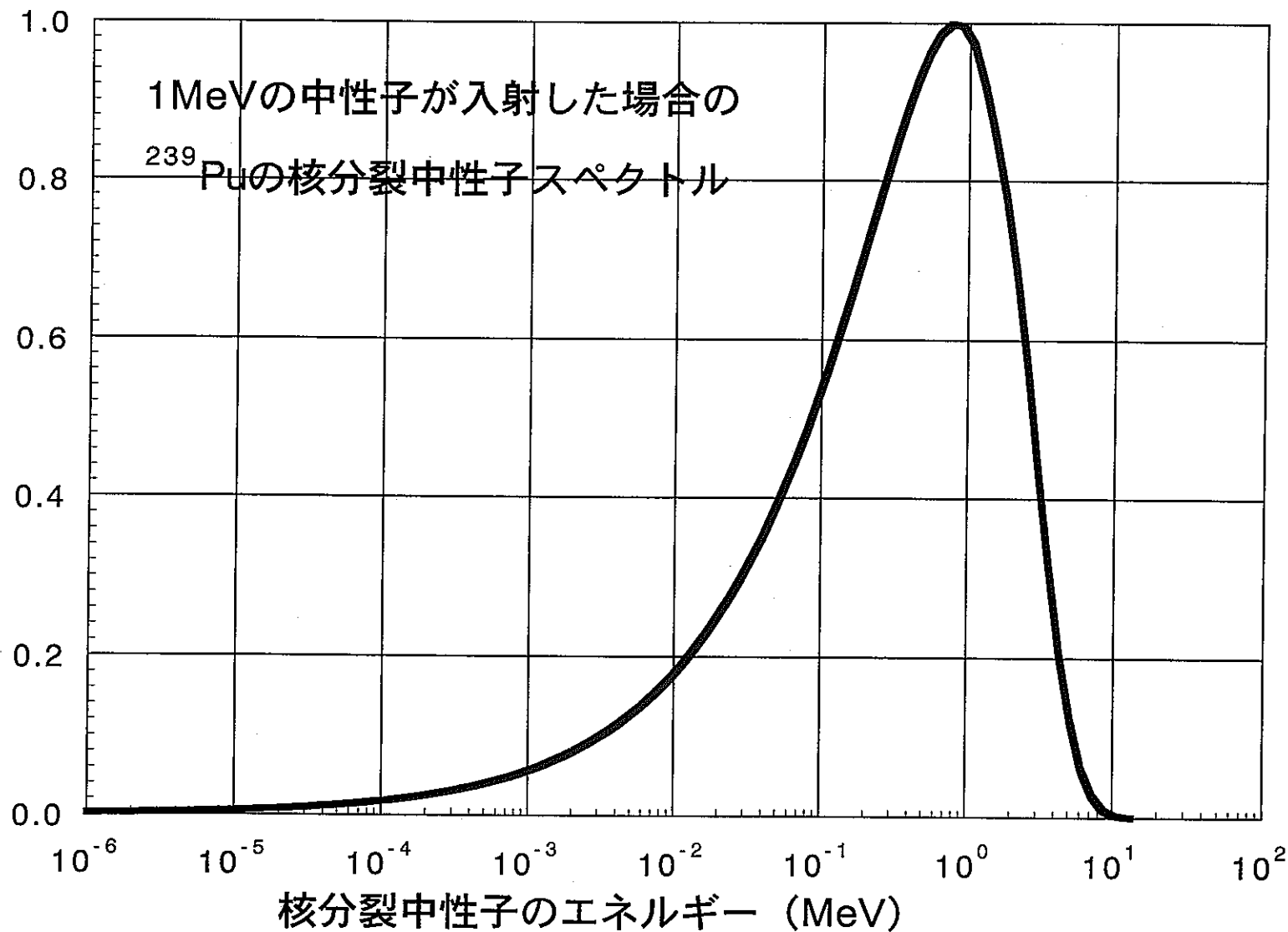


図3.2 Watt型の核分裂中性子スペクトル

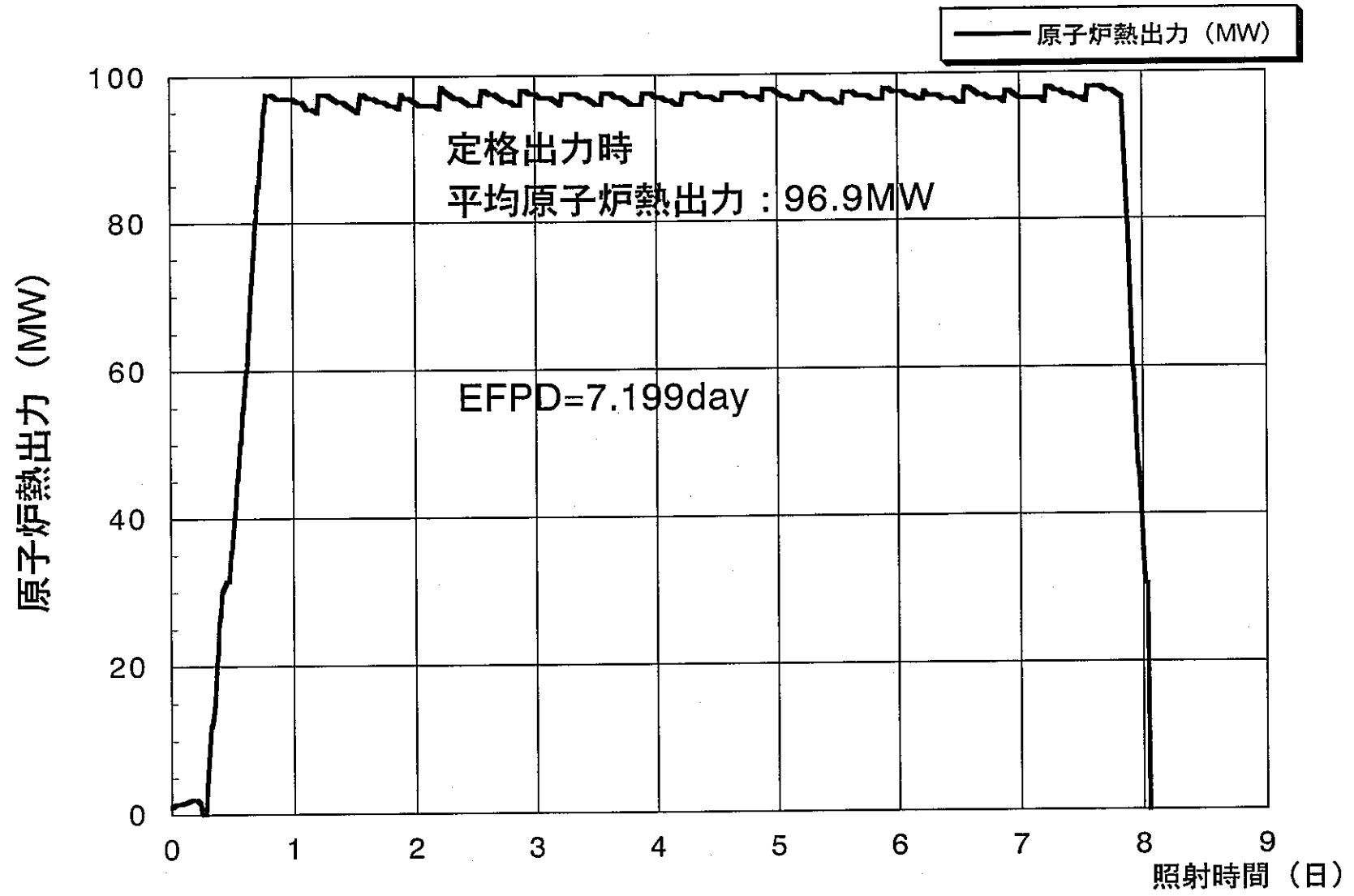


図3.3 第23^回サイクル運転中の原子炉熱出力履歴

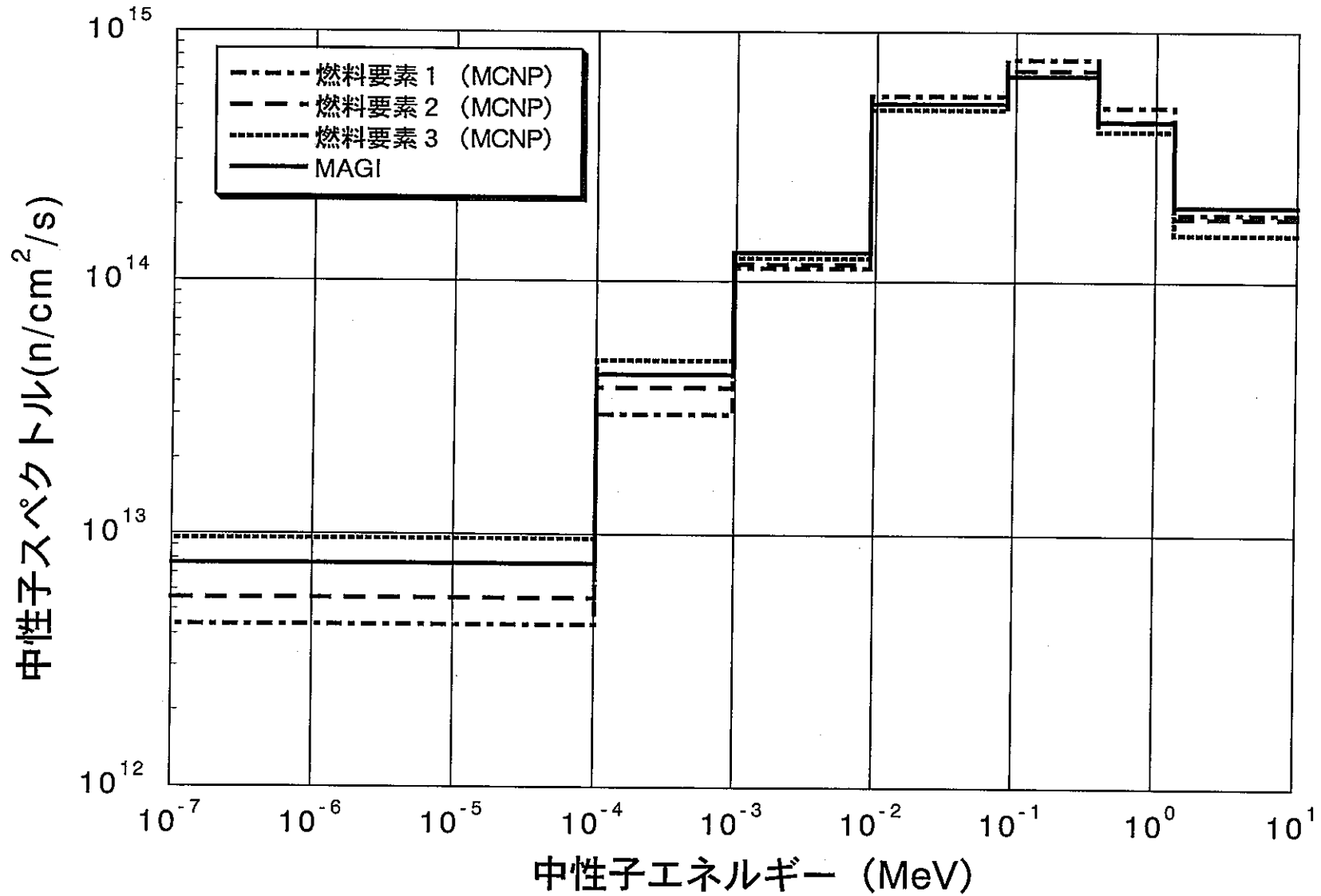


図5.1 "MCNP"による各燃料要素位置での中性子スペクトル

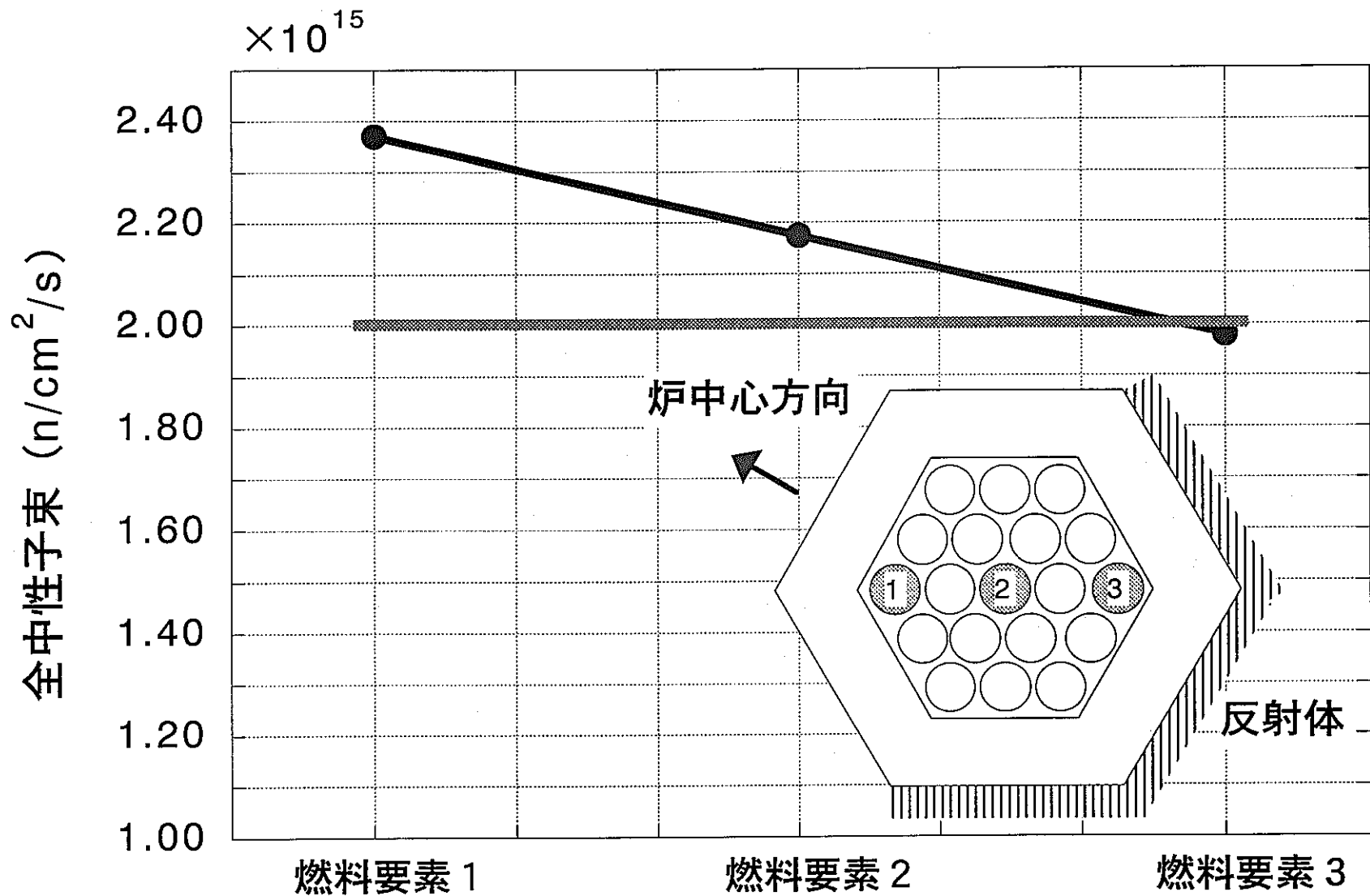


図5.2 INTA-2集合体内の全中性子束分布

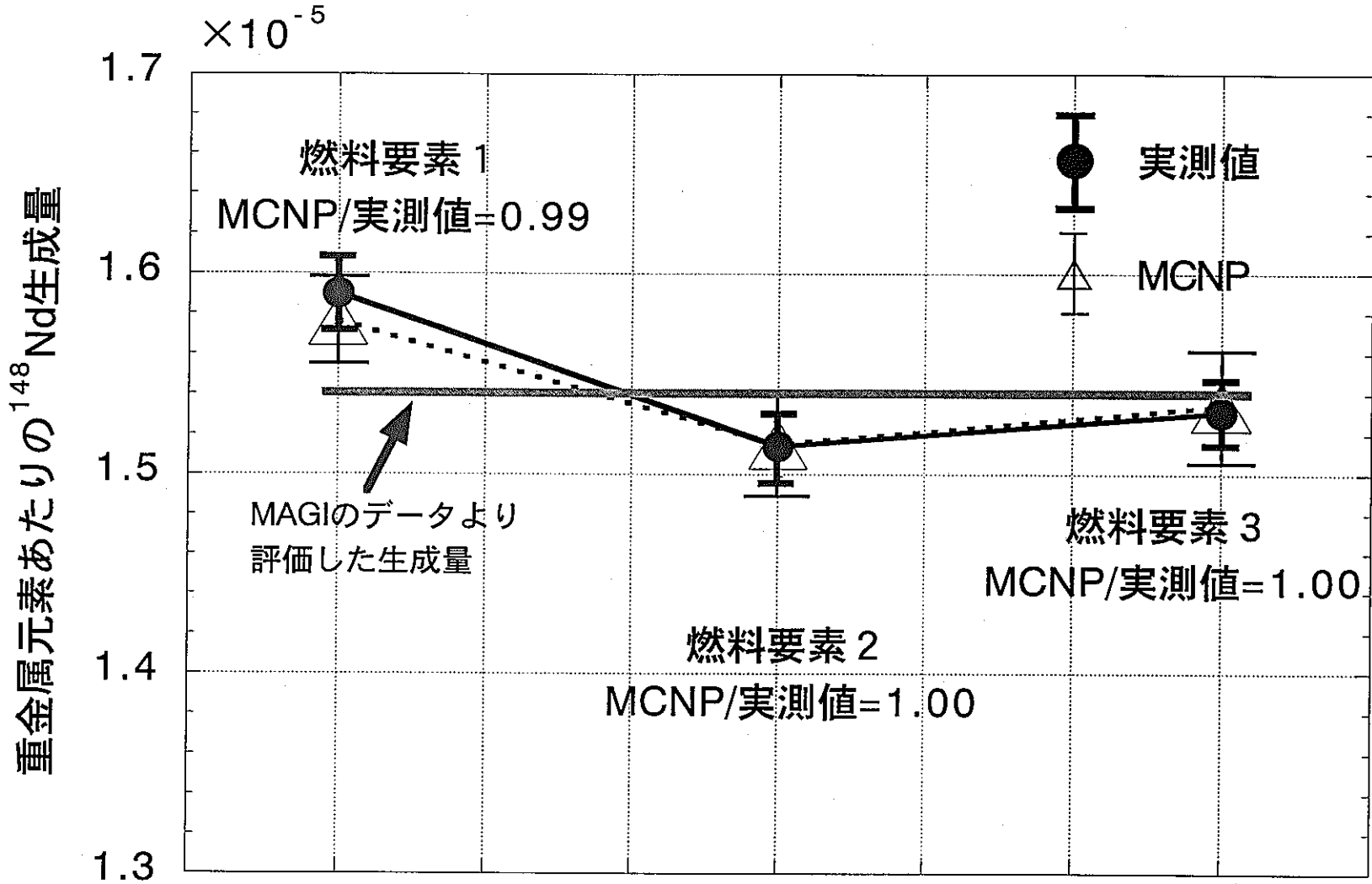


図5.3 INTA-2集合体内の ^{148}Nd 生成量分布