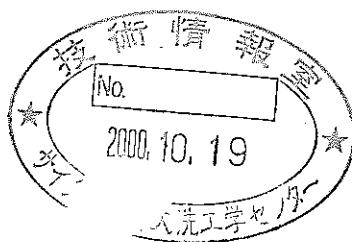


MCNPによる高速炉用MOX燃料 の線出力密度の解析精度向上

(研究報告書)

2000年7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 319-1184, Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

MCNPによる高速炉用MOX燃料の線出力密度の解析精度向上 (研究報告書)

関根 隆^{*1}、北村 了一^{*2}、青山 卓史^{*1}

要 旨

高速炉用MOX燃料の熱設計手法の合理化を目的として「常陽」で実施した燃料溶融限界線出力試験(B5D-2)における試験条件の解析精度を向上するため、連続エネルギーモンテカルロコード"MCNP"を用いて試験用燃料ピンの線出力密度を計算した。

MCNPによる解析では、試験用燃料ピンが装填されたB5D-2集合体内部の非均質な構造を詳細に模擬して中性子束分布及びスペクトルを計算し、各試験用燃料ピン位置における核分裂率を求め、これに核分裂当たりの発熱エネルギーを乗することにより、線出力密度を算出した。ここで、 γ 線による発熱分については、「常陽」MK-II炉心管理コードシステム" MAGI"を用いて γ 線発熱を計算し(遅発 γ 線を含む)、これをMCNPで求めた中性子発熱に加えることにより考慮した。

MCNPの解析精度を検証するため、当該試験用燃料ピンの破壊試験で測定された¹⁴⁸Nd生成量に基づく実測ベースでの線出力密度を求め、MCNPの計算値と比較した結果、計算値と実測値の比(C/E)は 0.955 ± 0.020 となり、両者は良く一致した。これにより、MCNPはMOX燃料ピンの線出力密度を精度良く計算できることを確認した。

得られたC/Eを用いてMCNPの計算値を補正することにより、B5D-2集合体に装填された各試験用燃料ピンの線出力密度を評価した結果、それらが最大となる炉心中心高さでの線出力密度は620~685W/cmとなった。

*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 技術課

*2 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 Linear Heat Rate Calculation for Fast Reactor MOX Fuel Using Monte Carlo Code "MCNP"

Takashi SEKINE^{*1}, Ryoichi KITAMURA^{*2} and Takafumi AOYAMA^{*1}

ABSTRACT

A three dimensional, continuous energy Monte Carlo code "MCNP" was applied to accurately evaluate the linear heat rate of mixed oxide (MOX) fuel used in a fast reactor. The test fuel pins to be analyzed were irradiated at the core center position in the experimental fast reactor JOYO MK-II core as the power-to-melt test, which was performed in order to optimize the thermal analysis method employed in the MOX fuel pin design.

In the calculation, the heterogeneous structure of the irradiation test subassembly (B5D-2) which accommodated test fuel pins inside was modeled precisely. The neutron flux distribution within the subassembly was calculated using MCNP with the neutron source which was based on the diffusion theory by the JOYO MK-II core management code system "MAGI". The linear heat rates of fuel pins were then obtained by multiplying the fission rate and fission energy of individual fissile nuclide. The gamma heating was calculated by MAGI considering the delayed fission gamma and it was included in the neutron heating obtained by MCNP.

The accuracy of MCNP was verified by the post irradiation examination. Using the fission product yields (¹⁴⁸Nd) measured for the melted part of test fuel pins, the linear heat rates were evaluated and compared with the MCNP results. The average ratios of MCNP calculations to the experimental values were 0.955 ± 0.020 , indicating MCNP can precisely calculate the linear heat rates.

By correcting the MCNP calculation results with the C/E values obtained above, the linear heat rates of test fuel pins were evaluated to be 620 - 685 W/cm at the core center height.

^{*1} Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center,
Oarai Engineering Center, JNC

^{*2} Irradiation and Administration Section, Irradiation Center, Oarai 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 中性子発生数	3
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	4
3.5 核分裂収率データ	4
3.6 照射履歴	5
3.7 線出力密度の計算方法	5
3.8 ヒストリ一数	6
4. ^{148}Nd 生成量の測定方法	6
5. 評価結果	7
5.1 MCNPによる線出力密度計算結果	7
5.2 ^{148}Nd 生成量に基づく線出力密度	7
6. 結 言	9
謝 辞	9
参考文献	9

表リスト

表 2.1	B5D-2試験用燃料ペレットの製造仕様	10
表 3.1	試験用燃料ペレット組成の比較	10
表 3.2	高速中性子による ¹⁴⁸ Ndの核分裂収率	11
表 3.3	EFPDの評価結果	11
表 3.4	核分裂当たりの発生エネルギー	11
表 4.1	¹⁴⁸ Nd生成量の測定結果	11
表 5.1	MCNPによる線出力密度計算結果	12
表 5.2	MCNPによる軸方向線出力密度分布	14
表 5.3	¹⁴⁸ Nd生成量に基づく線出力密度	16
表 5.4	C/E補正後の線出力密度評価結果	18

図リスト

図 2.1	「常陽」 MK-II第24' サイクル炉心構成図	20
図 2.2	B5D-2集合体の概略構造	21
図 2.3	¹⁴⁸ Nd生成量の測定対象ピンと測定位置	22
図 3.1	Watt型の核分裂中性子スペクトル	23
図 3.2	第24' サイクルの原子炉熱出力履歴	24
図 3.3	原子炉熱出力と出力系核計装の比較	25
図 3.4	集合体出口温度履歴	26
図 3.5	目標出力時の原子炉出力履歴	27
図 3.6	熱出力校正前後の出力系核計装による原子炉出力履歴	28
図 5.1	線出力密度の比較	29
図 5.2	γスキャン測定結果	30

1. 緒 言

燃料溶融限界線出力試験（高線出力試験）は、燃料溶融境界を温度指標としてペレットの熱伝導度、ペレット・被覆管間の熱伝達率等を評価することにより、高速炉用MOX燃料の熱設計手法を合理化することを目的として実施されたものである。この評価においては、線出力密度等の試験条件の解析精度が重要となるが、従来「常陽」で使用してきたMK-II用の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"¹⁾では、集合体の内部構造及び組成を均質モデルで取扱うことと拡散理論に基づく計算であるため、線出力密度を評価する上で重要となる各試験用燃料ピン位置での中性子束の計算精度が十分ではなかった。

本研究では、照射試験用集合体内の非均質な構造を詳細に模擬し、中性子のエネルギー分布を連続で取扱うことができるモンテカルロ計算コード"MCNP"²⁾を用いて線出力密度の解析精度を向上させることとした。今回の計算では、「常陽」MK-II炉心第24'サイクルで実施した燃料溶融限界線出力試験（B5D-2試験）を解析対象とし、各試験用燃料ピンの線出力密度を計算した。また、MCNPの解析精度は、照射後試験で測定されている核分裂生成物¹⁴⁸Ndの生成量から実測値ベースでの線出力密度を求め、これをMCNPの計算値と比較することにより検証した。

2. 評価対象集合体

解析対象とした燃料溶融限界線出力試験用集合体（B5D-2集合体）の装荷位置及び構造を図2.1、2.2に示す。B5D-2集合体は、「常陽」MK-II炉心第24'サイクルの炉中心位置[000]に装荷された。B5D-2集合体には6本のコンパートメント管と呼ばれるステンレス製の管が装填されており、試験用燃料ピンはこのコンパートメント管内に4本ずつ合計24本装填されている。B5D-2集合体の照射条件の概略を以下に示す。

照射サイクル	:	MK-II炉心第24'サイクル
照射期間	:	1992年6月16日～17日
装荷位置	:	炉心第0列 [000]
試験用燃料ピン本数	:	24本
最大出力時の全中性子束 (炉心中心高さ)	:	$4.55 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2/\text{s}$
燃焼率	:	0.004 atom%以下

また、照射後試験において、 ^{148}Nd 生成量が測定されている試験用燃料ピン及び試料ペレットの採取位置を図2.3に示す。B5D-2集合体では、6本の試験用燃料ピンについて、炉心中心高さ近傍のペレットが採取され、 ^{148}Nd 生成量が測定されている。これらのペレットの製造仕様を表2.1に示す。

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B5D-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体系の均質モデルで近似した。詳細を以下に示す。

(1) B5D-2集合体

B5D-2集合体の燃料ペレットが装填されている領域については、各試験用燃料ピン、コンパートメント、軸心管及びラッパ管等の集合体内の構造を詳細に模擬し、部材毎の組成を入力した。

燃料ペレットの組成については、製造時と照射後試験(PIE)時に測定が行われている。表3.1に製造時及びPIE時に測定したUとPuの同位体組成比を示す。ここで、 ^{241}Pu の原子数密度については、それぞれの測定時から照射試験時までの期間における β^- 崩壊による減少分を補正した。B5D-2集合体では燃焼による組成変化がわずかであり、両者の組成はほぼ一致しているが、一部の組成に若干の相違もみられる。このため、本解析では、PIEにおいて当該試験用燃料ピンのペレット組成が測定されているものについてはPIE時の組成、それ以外の試験用燃料ピンについては製造時の組成に基づき、それぞれ ^{241}Pu の崩壊分を補正した値を与えることとした。

また、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部等については、MAGIと同様にHex-Z体系の均質組成を用いた。

(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発生数を入力値として与えるため、内部構造をMAGIと同様にHex-Z体系で均質にモデル化し、組成については、MAGIの7群拡散計算による燃焼組成を使用した。MAGIの計算精度については、炉心燃料集合体の燃焼率を照射後試験で得られた測定値と比較し、

両者が炉内の装荷位置によらず5%以内で一致することを確認している。

反射体等についても、MAGIで用いているHex-Z体系での均質組成でモデル化した。

3.2 中性子発生数

中性子束は固定中性子源モードで解析した。ただし、B5D-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変化を詳細に解析するため、燃料ペレット内の核分裂により発生する中性子を考慮した。詳細を以下に示す。

- B5D-2集合体以外の集合体

B5D-2集合体以外の炉心燃料集合体等については、MAGIにより計算したノード毎の中性子発生数 ($\nu N \sigma_f \phi$) を入力値として与えた。ここで、これらの集合体内での核分裂反応については、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。

- B5D-2集合体

B5D-2集合体については、各試験用燃料ピンの線出力密度を評価するため、燃料ペレット内の核分裂によって発生する中性子を考慮した。

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で求めた中性子発生数を用いてMCNPの計算値を規格化した。

3.3 核分裂中性子スペクトル

「常陽」MK-IIの炉心燃料及び試験用燃料は、高濃縮ウランとプルトニウムの混合酸化物(MOX)燃料を使用しており、 ^{239}Pu と ^{235}U が主要な核分裂性核種である。MCNPにはこれらの核分裂中性子スペクトルとして、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いる。 ^{235}U と ^{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り、「常陽」炉内の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 及び ^{235}U の核分裂中性子スペクトルを比較した。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)

0.988 MeV (^{235}U) //

$$b = 2.842 \text{ / MeV} \quad (^{239}\text{Pu}) \qquad \qquad \qquad \parallel$$

2.249 / MeV (^{235}U) //

^{239}Pu 及び ^{235}U の核分裂中性子スペクトルの相対分布を図3.1に示す。両者の核分裂スペクトルは差がわずかであり、それぞれを用いた場合の中性子スペクトルの計算結果に大きく影響しないことから、本解析では ^{239}Pu の核分裂中性子スペクトルで代表させた。

3.4 断面積ライブラリー

本解析に用いる断面積ライブラリーには、日本原子力研究所を中心に編集された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 核分裂収率データ

^{148}Nd 生成量評価に用いる核分裂収率データは、JNDC-V2ライブラリー⁵⁾を使用し、MCNPで計算した ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 及び ^{242}Pu の核分裂率に ^{148}Nd の核分裂収率を乗じてこれらの総和をとり、照射時間で積分して試験期間中の ^{148}Nd 生成量を求めた。本解析で使用したJNDC-V2に記載されている各核種の高速中性子による ^{148}Nd の核分裂収率を表3.2に示す。なお、 ^{238}Pu についてはJNDC-V2に収率データはないが、ENDF-VIのデータ等も参考にし、 ^{238}Pu と ^{240}Pu の核分裂収率に大差がないことから、 ^{240}Pu と同じ値とした。また、Am及びNpのマイナーアクチニドについては、これらの核分裂率はU及びPuの0.01%程度であり、 ^{148}Nd 生成量に与える影響は無視できるため、考慮しなかった。

3.6 照射履歴

後述するように、照射後試験で測定されている¹⁴⁸Nd生成量から線出力密度を評価するためには、100MWt換算の積算運転時間（EFPD：Effective Full Power Days）を正確に評価する必要がある。「常陽」MK-II炉心第24'サイクルの原子炉出力履歴は、燃料ペレットの組織変化を促進させないようにするために、50MWtから目標出力（98.5MWt）までは、図3.2に示すように通常運転時より出力上昇率が速く（約0.45MWt/分）、目標出力での照射時間も約10分と短い。従来、EFPDは冷却材流量と原子炉出入口温度差に基づくヒートバランスから算出した原子炉熱出力により評価してきたが、原子炉出口の冷却材の温度変化は急速な出力上昇に対しては応答が遅く、原子炉熱出力で評価したEFPDは精度が良くない。図3.3に50～75MWtにおける原子炉熱出力と出力系核計装信号を比較して示すが、原子炉出力を急速に上昇させた際、出力系核計装信号は制御棒操作直後にステップ状に上昇しているのに対して、原子炉熱出力はヒートバランスの時間遅れにより核計装信号変化よりなだらかに上昇している。また、図3.4に炉心燃料の集合体出口温度と出力系核計装、原子炉熱出力の履歴を併せて示すが、応答の速い集合体出口温度からも出力系核計装信号が試験用燃料の出力変化に対応していることが裏付けられる。

このため、本解析では、出力系核計装信号を用いてEFPDを評価した。ここで、各出力系核計装の校正は、22、50MWtでの出力保持時と、目標出力で原子炉熱出力が安定した際の値を用いて行った。すなわち、22、50MWtでは図3.2の熱出力安定値、目標出力では図3.5に示すように、原子炉熱出力が安定した後半の約3分間の値を用いて出力系核計装を校正した。校正前後の原子炉出力履歴を比較して図3.6に示す。

「常陽」データ処理装置（JOYDAS: JOYO Data Acquisition System）で記録された15、90秒間隔の出力系核計装及び原子炉熱出力の測定データに基づき、原子炉熱出力を用いて校正した出力系核計装信号からEFPDを評価した結果を表3.3に示す。各核計装によるEFPDの評価結果は良く一致しており、第24'サイクルのEFPDはこれらの平均値から0.1596日となった。なお、原子炉熱出力のみから評価したEFPDは0.1581日であり、両者の差は約0.9%であった。

3.7 線出力密度の計算方法

(1) 照射後試験位置での線出力密度評価

MCNPによる解析では、照射後試験で測定されている試験用燃料ピンのペレット採取位置での中性子束及びスペクトルをMCNPを用いて求め、これとペレット組成から各燃

料核種毎の核分裂率を計算し、これに核分裂当たりの発生エネルギーを乗じることにより線出力密度を求めた。ここで、中性子束及びスペクトルは、照射後試験で採取したペレット（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（トラックレンジス）から求めた。核分裂当たりの発生エネルギーは、 γ 線による発熱を除いた核分裂当たりの発生エネルギー（中性子発熱）についてはR.Sher⁶⁾の値を使用した。核種毎の発生エネルギーを表3.4に示す。また、 γ 線による発熱分については、MAGIを用いて修正New-POPOP4ライブラリー¹⁾による遅発核分裂 γ 線を考慮した場合の発熱量を計算し、これを上記の γ 線による発熱を除いた核分裂当たりの発生エネルギーに加えることにより考慮した。ここで、線出力密度として考慮する発熱については、ペレット内での発熱のみを考慮し、ラッパ管及び被覆管等の構造材による γ 線発熱は除外した。なお、線出力密度については98.5MWt時の値を求めた。

(2) 各試験用燃料ピンの線出力密度評価

全ての試験用燃料ピンの線出力密度についてはMCNPのF6タリーを用いて計算した。ここで、試験用燃料ピンの軸方向の計算領域（セル）は55cmの燃料領域をMAGIと同様に5cm／セルに分割して計算を行った。なお、核分裂当たりの発生エネルギーは、(1)と同じ値を用いた。

3.8 ヒストリー数

本計算に要したヒストリー数は約2000万ヒストリーであり、 ^{148}Nd 生成量の統計誤差は約1%となった。なお、計算時間は、Sun Sparc Station 20で10万ヒストリー／60分であった。

4. ^{148}Nd 生成量の測定方法

B5D-2集合体に装填された試験用燃料ピンの ^{148}Nd 生成量は、照射後試験において同位体希釈質量分析法⁷⁾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°C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°Cで6時間溶解する。次に、 ^{148}Nd 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。 ^{148}Nd 生成量は、分離後における

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。本解析は平成11年度までの測定値を用いて行った。

5. 評価結果

5.1 MCNPによる線出力密度計算結果

(1) 照射後試験位置での線出力密度評価

照射後試験で測定されている試験用燃料ピンのペレット採取位置での、原子数密度、核分裂率及び線出力密度の計算結果を表5.1に示す。MCNPによる線出力密度の計算結果は、639～656W/cmとなった。

(2) 各試験用燃料ピンの線出力密度評価

各試験用燃料ピンの線出力密度を計算した結果を表5.2に示す。ここで、線出力密度の誤差評価については、統計誤差（1σ）として、MCNPの計算における統計誤差（1%）、核分裂当たりの発生エネルギーの誤差（全核分裂性核種の平均で0.25%）を考慮してこれらの二乗和の平方根を求め、系統誤差として原子炉熱出力誤差（3σで3.6%であることから、1σで1.2%）を考慮し、両者を合計して2.2%とした。

5.2 ¹⁴⁸Nd生成量に基づく線出力密度

照射後試験で測定されている核分裂生成物である¹⁴⁸Nd生成量から線出力密度を求めた。照射後試験ではペレットを溶解した溶液中の¹⁴⁸Ndの原子数とU及びPuの原子数が測定されていることから、以下の手順で線出力密度を計算した。

- (1) 照射後試験で測定した溶液中の燃料組成、製造時に測定したペレットの理論密度比とO/M比から、ペレット高さ1cm当たりのU及びPuの原子数を計算する。
- (2) 試料溶液中の¹⁴⁸Nd、U及びPuの原子数と、(1)で求めたU及びPuの原子数から、ペレット高さ1cm当たりの¹⁴⁸Ndの原子数を以下の式を用いて計算する。

ペレット高さ1cm当たりの¹⁴⁸Nd原子数

= 試料溶液中の¹⁴⁸Nd原子数

×(ペレット高さ1cm当たりのU,Pu原子数/試料溶液中のU,Pu原子数)

- (3) MCNPで求めた各核種の核分裂率と¹⁴⁸Ndの核分裂収率データから、核分裂率で重みを付けた核分裂収率を求める。
- (4) (2)で求めたペレット高さ1cm当たりの¹⁴⁸Nd原子数を、(3)で求めた核分裂収率で除することにより、核分裂発生数を求める。
- (5) (4)で求めた核分裂発生数を照射時間（0.1596日）で除することにより、単位時間当たりの核分裂発生数を求める。これをMCNPによる各核種の核分裂率で重みづけすることにより、各核種毎の単位時間当たりの核分裂発生数を求める。
- (6) 各核種毎の核分裂発生数に、核分裂当たりの発生エネルギーを乗じて線出力密度を求める。ここで、核分裂当たりの発生エネルギーは5.1章と同じ値を使用した。

¹⁴⁸Nd生成量から評価した核分裂率と線出力密度を表5.3に示す。ここでは誤差として¹⁴⁸Nd生成量の測定誤差（ 1σ で1%）、核分裂当たりの発生エネルギーの誤差を考慮した。また、MCNPで計算した線出力密度との比較を図5.1に示す。MCNPによる計算値と実測値との比（C/E）は0.929～0.972で、平均値は 0.955 ± 0.020 となった。MCNPの計算結果は図5.1に示したように、ペレットの組成の違いによる影響を考慮すると線出力密度はほぼ一定であるのに対して、¹⁴⁸Nd生成量から求めた実測値ベースの線出力密度のはらつきが大きく、これがC/Eが0.929～0.972となった原因と考えられる。

各試験用燃料ピンの線出力密度については、¹⁴⁸Nd生成量が測定されている試験用燃料ピンについてはそれぞれのC/Eを用いてMCNPで計算した線出力密度を補正し、他の試験用燃料ピンについてはC/Eの平均値を用いて補正することとした。また、線出力密度の軸方向分布については、 γ スキャンで測定した各試験用燃料ピンの核分裂生成物の軸方向の相対分布（指標核種⁹⁵Zr）を用いて、これを炉心中心高さでの線出力密度に乘することにより求めた。 γ スキャンによる測定結果の一例として、B5D-2集合体に装填された試験用燃料ピンG801(B5214)の測定結果を図5.2に示す。相対分布はこの γ スキャンの測定結果を6次式でフィッティングすることにより求めた。C/Eと γ スキャンの測定値を用いて補正した線出力密度の評価結果を表5.4に示す。線出力密度の誤差については、¹⁴⁸Nd生成量が測定されている試験用燃料ピンについては5.1章で述べた誤差に、¹⁴⁸Nd生成量の測定誤差を統計誤差に含めることにより2.6%とし、それ以外の試験用燃料ピンについては、さらにC/Eのはらつき（ 1σ で2.0%）を統計誤差に含めることにより3.7%とした。

6. 結 言

「常陽」で実施した燃料溶融限界線出力試験（B5D-2集合体）の線出力密度の解析精度を向上するため、連続エネルギーモンテカルロコード"MCNP"を用いて計算し、¹⁴⁸Nd生成量の測定値から求めた線出力密度と比較した。

その結果、MCNPによる線出力密度と、¹⁴⁸Nd生成量から求めた実測ベースの線出力密度の比（C/E）は 0.955 ± 0.020 となり、両者は良く一致した。これによりMCNPを用いてB5D-2集合体内の線出力密度分布を精度良く評価できることを確認した。また、得られた線出力密度の比（C/E）を補正係数として使用し、全ての試験用燃料ピンの線出力密度を求めた結果、炉心中心高さにおける線出力密度は620～685W/cmとなった。

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 理氏及びサイクル機構・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サイクル機構・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) 関根隆, 他 : "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.19-29 (2000).
- 2) J. F. Brismeister 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) R.Sher , "Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides", NP-1771, Research Project 1074-1 (1981).
- 7) "Atom Percent Fission in Uranium and Plutonium Fuel (Neodymium) Annual Books of ASTM Standard ", E321-79 (1971).

表2.1 B5D-2試験用燃料ペレットの製造仕様

項目	ピン番号	B5214	B5208	B5215	B5204	B5218	B5207
	PIE番号	G801	G802	G803	G804	G812	G819
U濃縮度 (wt%)		20.32	20.32	21.68	20.32	21.68	21.68
Pu富化度 (wt%)		19.50	19.50	19.37	19.50	19.37	19.37
O/M比		1.98	1.98	1.97	1.98	1.97	1.97
理論密度比 (%T.D.)		91.43	91.35	94.97	91.29	94.83	95.10
ペレット直径 (mm)		6.560	6.560	6.511	6.507	6.511	6.451

表3.1 試験用燃料ペレット組成の比較

ピン番号		PIE測定値	製造時測定値	ピン番号		PIE測定値	製造時測定値
B5214	PIE,ロット番号	G80124	B5D-202	B5204	PIE,ロット番号	G80424	B5D-201
	²³⁸ Pu	0.91	1.06		²³⁸ Pu	1.12	1.06
	²³⁹ Pu	65.97	66.08		²³⁹ Pu	65.88	66.08
	²⁴⁰ Pu	23.00	22.77		²⁴⁰ Pu	22.93	22.77
	²⁴¹ Pu	6.15	5.96		²⁴¹ Pu	6.13	5.96
	²⁴² Pu	3.97	3.81		²⁴² Pu	3.93	3.81
	²³⁵ U	21.42	20.32		²³⁵ U	21.35	20.32
B5208	PIE,ロット番号	G80224	B5D-202	B5218	PIE,ロット番号	G81224	B5D-206
	²³⁸ Pu	0.40	1.06		²³⁸ Pu	1.10	1.14
	²³⁹ Pu	66.33	66.08		²³⁹ Pu	65.91	65.49
	²⁴⁰ Pu	23.11	22.77		²⁴⁰ Pu	22.93	22.96
	²⁴¹ Pu	6.17	5.96		²⁴¹ Pu	6.14	6.10
	²⁴² Pu	3.99	3.81		²⁴² Pu	3.92	3.98
	²³⁵ U	21.50	20.32		²³⁵ U	21.77	21.68
B5215	PIE,ロット番号	G80324	B5D-206	B5207	PIE,ロット番号	G81924	B5D-205
	²³⁸ Pu	0.50	1.14		²³⁸ Pu	1.10	1.14
	²³⁹ Pu	66.23	65.49		²³⁹ Pu	65.90	65.49
	²⁴⁰ Pu	23.08	22.96		²⁴⁰ Pu	22.94	22.96
	²⁴¹ Pu	6.22	6.10		²⁴¹ Pu	6.13	6.10
	²⁴² Pu	3.98	3.98		²⁴² Pu	3.92	3.98
	²³⁵ U	21.79	21.68		²³⁵ U	21.47	21.68

表3.2 高速中性子による¹⁴⁸Ndの核分裂収率

核種	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu
¹⁴⁸ Ndの収率 (%)	1.6716	2.0816	1.6374	1.9150	1.9062	2.0633

(出典: JNDC-V2)

表3.3 EFPDの評価結果

	出力系核計装 Ch.6	出力系核計装 Ch.7	出力系核計装 Ch.8
EFPD (日)	0.1595	0.1597	0.1597

表3.4 核分裂当たりの発生エネルギー

	γ線による発熱を除いた 核分裂当たりの発生エネルギー (MeV/fission)
²³⁵ U	180.42±0.50
²³⁸ U	183.35±0.51
²³⁸ Pu	184.94±2.09
²³⁹ Pu	186.99±0.15
²⁴⁰ Pu	186.91±2.09
²⁴¹ Pu	187.94±0.70
²⁴² Pu	186.99±2.13

表4.1 ¹⁴⁸Nd生成量の測定結果

試験用燃料ピン番号	測定位置 (mm)	重金属元素数 (atoms/sample)	¹⁴⁸ Nd生成量 (atoms/sample)
B5214 (G801)	274.2~279.4	3.619E+21	2.530E+15
B5208 (G802)	273.6~279.5	4.147E+21	2.856E+15
B5215 (G803)	274.2~279.6	3.801E+21	2.663E+15
B5204 (G804)	274.5~279.9	3.180E+21	2.150E+15
B5218 (G812)	274.0~279.7	3.943E+21	2.732E+15
B5207 (G819)	274.8~279.8	3.276E+21	2.227E+15

表5.1 MCNPによる線出力密度計算結果

B5214(G801)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	6.858E+20	5.34E+12	180.42	609	28	637 ± 14
^{238}U	2.507E+21	6.10E+11	183.35			
^{238}Pu	6.847E+18	4.43E+10	184.94			
^{239}Pu	4.939E+20	4.03E+12	186.99			
^{240}Pu	1.722E+20	3.93E+11	186.91			
^{241}Pu	4.604E+19	4.65E+11	187.94			
^{242}Pu	2.970E+19	4.78E+10	188.69			

誤差として、MCNPの統計誤差、核分裂当たりの発生エネルギーの誤差、原子炉熱出力誤差を考慮した。

B5208(G802)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	7.800E+20	6.07E+12	180.42	608	28	637 ± 14
^{238}U	2.837E+21	6.89E+11	183.35			
^{238}Pu	3.439E+18	2.21E+10	184.94			
^{239}Pu	5.645E+20	4.58E+12	186.99			
^{240}Pu	1.967E+20	4.42E+11	186.91			
^{241}Pu	5.255E+19	5.30E+11	187.94			
^{242}Pu	3.392E+19	5.37E+10	188.69			

B5215(G803)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	7.390E+20	5.85E+12	180.42	637	29	665 ± 15
^{238}U	2.643E+21	6.48E+11	183.35			
^{238}Pu	3.978E+18	2.59E+10	184.94			
^{239}Pu	5.292E+20	4.36E+12	186.99			
^{240}Pu	1.844E+20	4.22E+11	186.91			
^{241}Pu	4.973E+19	5.09E+11	187.94			
^{242}Pu	3.178E+19	5.13E+10	188.69			

B5204(G804)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	6.930E+20	5.45E+12	180.42	599	28	627 ± 14
^{238}U	2.544E+21	6.11E+11	183.35			
^{238}Pu	8.794E+18	5.64E+10	184.94			
^{239}Pu	5.170E+20	4.20E+12	186.99			
^{240}Pu	1.800E+20	4.04E+11	186.91			
^{241}Pu	4.814E+19	3.93E+11	187.94			
^{242}Pu	3.083E+19	4.89E+10	188.69			

B5218(G812)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	7.823E+20	6.19E+12	180.42	622	28	650 ± 14
^{238}U	2.800E+21	6.69E+11	183.35			
^{238}Pu	9.075E+18	5.84E+10	184.94			
^{239}Pu	5.430E+20	4.43E+12	186.99			
^{240}Pu	1.889E+20	4.23E+11	186.91			
^{241}Pu	5.057E+19	4.16E+11	187.94			
^{242}Pu	3.232E+19	5.09E+10	188.69			

B5207(G819)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	6.652E+20	5.37E+12	180.42	622	28	650 ± 14
^{238}U	2.424E+21	5.90E+11	183.35			
^{238}Pu	7.901E+18	5.18E+10	184.94			
^{239}Pu	4.719E+20	3.93E+12	186.99			
^{240}Pu	1.642E+20	3.74E+11	186.91			
^{241}Pu	4.392E+19	3.68E+11	187.94			
^{242}Pu	2.810E+19	4.51E+10	188.69			

表5.2 MCNPによる軸方向線出力密度分布

コンパートメントNo. 1

単位 : W/cm

軸方向位置 (mm)	B5223 G809	B5216 G810	B5224 G811	B5218 G812
25	432 ± 10	456 ± 10	432 ± 10	453 ± 10
75	488 ± 11	511 ± 11	483 ± 11	506 ± 11
125	551 ± 12	576 ± 13	541 ± 12	573 ± 13
175	594 ± 13	623 ± 14	584 ± 13	613 ± 14
225	618 ± 14	646 ± 14	610 ± 14	638 ± 14
275	619 ± 14	645 ± 14	609 ± 14	638 ± 14
325	599 ± 13	625 ± 14	591 ± 13	621 ± 14
375	565 ± 13	589 ± 13	558 ± 12	583 ± 13
425	507 ± 11	524 ± 12	496 ± 11	520 ± 12
475	432 ± 10	454 ± 10	430 ± 10	449 ± 10
525	365 ± 8	383 ± 9	362 ± 8	378 ± 8

誤差として、MCNPの統計誤差、核分裂当たりの発生エネルギーの誤差、原子炉熱出力誤差を考慮した。

コンパートメントNo.2

軸方向位置 (mm)	B5213 G813	B5211 G814	B5206 G815	B5220 G816
25	434 ± 10	427 ± 10	463 ± 10	421 ± 9
75	491 ± 11	487 ± 11	523 ± 12	478 ± 11
125	544 ± 12	541 ± 12	579 ± 13	528 ± 12
175	586 ± 13	583 ± 13	622 ± 14	570 ± 13
225	614 ± 14	609 ± 14	648 ± 14	598 ± 13
275	614 ± 14	608 ± 14	656 ± 15	603 ± 13
325	593 ± 13	595 ± 13	634 ± 14	579 ± 13
375	554 ± 12	552 ± 12	593 ± 13	547 ± 12
425	500 ± 11	498 ± 11	528 ± 12	485 ± 11
475	429 ± 10	431 ± 10	459 ± 10	417 ± 9
525	357 ± 8	360 ± 8	384 ± 9	355 ± 8

コンパートメントNo.3

軸方向位置 (mm)	B5221 G817	B5203 G818	B5207 G819	B5202 G820
25	431 ± 10	422 ± 9	452 ± 10	425 ± 9
75	484 ± 11	474 ± 11	507 ± 11	474 ± 11
125	543 ± 12	529 ± 12	569 ± 13	532 ± 12
175	586 ± 13	575 ± 13	612 ± 14	570 ± 13
225	605 ± 14	593 ± 13	635 ± 14	593 ± 13
275	613 ± 14	605 ± 13	643 ± 14	595 ± 13
325	592 ± 13	578 ± 13	621 ± 14	581 ± 13
375	559 ± 12	544 ± 12	585 ± 13	545 ± 12
425	503 ± 11	491 ± 11	522 ± 12	487 ± 11
475	430 ± 10	424 ± 9	454 ± 10	423 ± 9
525	359 ± 8	347 ± 8	375 ± 8	353 ± 8

コンパートメントNo.4

軸方向位置 (mm)	B5219 G821	B5201 G822	B5205 G823	B5212 G824
25	417 ± 9	424 ± 9	461 ± 10	429 ± 10
75	472 ± 11	478 ± 11	519 ± 12	484 ± 11
125	525 ± 12	532 ± 12	579 ± 13	539 ± 12
175	572 ± 13	574 ± 13	624 ± 14	587 ± 13
225	594 ± 13	595 ± 13	653 ± 15	604 ± 13
275	596 ± 13	600 ± 13	657 ± 15	609 ± 14
325	578 ± 13	581 ± 13	634 ± 14	591 ± 13
375	542 ± 12	541 ± 12	589 ± 13	552 ± 12
425	488 ± 11	488 ± 11	532 ± 12	500 ± 11
475	420 ± 9	421 ± 9	457 ± 10	425 ± 9
525	351 ± 8	349 ± 8	386 ± 9	358 ± 8

コンパートメントNo.5

軸方向位置 (mm)	B5214 G801	B5208 G802	B5215 G803	B5204 G804
25	440 ± 10	445 ± 10	461 ± 10	430 ± 10
75	500 ± 11	505 ± 11	519 ± 12	492 ± 11
125	561 ± 13	559 ± 12	572 ± 13	551 ± 12
175	602 ± 13	602 ± 13	622 ± 14	590 ± 13
225	622 ± 14	628 ± 14	651 ± 15	618 ± 14
275	628 ± 14	627 ± 14	650 ± 14	617 ± 14
325	613 ± 14	609 ± 14	626 ± 14	602 ± 13
375	570 ± 13	573 ± 13	587 ± 13	557 ± 12
425	515 ± 11	515 ± 11	527 ± 12	499 ± 11
475	439 ± 10	444 ± 10	460 ± 10	433 ± 10
525	373 ± 8	377 ± 8	386 ± 9	363 ± 8

コンパートメントNo.6

軸方向位置 (mm)	B5209 G805	B5217 G806	B5210 G807	B5222 G808
25	434 ± 10	449 ± 10	428 ± 10	432 ± 10
75	491 ± 11	505 ± 11	489 ± 11	485 ± 11
125	545 ± 12	565 ± 13	545 ± 12	542 ± 12
175	589 ± 13	617 ± 14	589 ± 13	587 ± 13
225	609 ± 14	638 ± 14	616 ± 14	607 ± 14
275	615 ± 14	636 ± 14	609 ± 14	614 ± 14
325	596 ± 13	614 ± 14	593 ± 13	591 ± 13
375	558 ± 12	580 ± 13	555 ± 12	560 ± 12
425	504 ± 11	523 ± 12	502 ± 11	505 ± 11
475	431 ± 10	447 ± 10	434 ± 10	430 ± 10
525	362 ± 8	377 ± 8	366 ± 8	363 ± 8

表5.3 ^{148}Nd 生成量に基づく線出力密度

B5214(G801)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	6.858E+20	5.344E+12	180.42	655	30	686 ± 7
^{238}U	2.507E+21	6.104E+11	183.35			
^{238}Pu	6.847E+18	4.429E+10	184.94			
^{239}Pu	4.939E+20	4.026E+12	186.99			
^{240}Pu	1.722E+20	3.930E+11	186.91			
^{241}Pu	4.604E+19	4.654E+11	187.94			
^{242}Pu	2.970E+19	4.784E+10	188.69			

誤差として、 ^{148}Nd の測定誤差、核分裂当たりの発生エネルギーの誤差を考慮した。

B5208(G802)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	7.800E+20	6.066E+12	180.42	645	30	675 ± 7
^{238}U	2.837E+21	6.894E+11	183.35			
^{238}Pu	3.439E+18	2.208E+10	184.94			
^{239}Pu	5.645E+20	4.585E+12	186.99			
^{240}Pu	1.967E+20	4.424E+11	186.91			
^{241}Pu	5.255E+19	5.301E+11	187.94			
^{242}Pu	3.392E+19	5.371E+10	188.69			

B5215(G803)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	7.390E+20	5.846E+12	180.42	671	30	701 ± 7
^{238}U	2.643E+21	6.480E+11	183.35			
^{238}Pu	3.978E+18	2.588E+10	184.94			
^{239}Pu	5.292E+20	4.361E+12	186.99			
^{240}Pu	1.844E+20	4.215E+11	186.91			
^{241}Pu	4.973E+19	5.091E+11	187.94			
^{242}Pu	3.178E+19	5.129E+10	188.69			

B5204(G804)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	6.930E+20	5.446E+12	180.42	624	29	653 ± 7
^{238}U	2.544E+21	6.114E+11	183.35			
^{238}Pu	8.794E+18	5.644E+10	184.94			
^{239}Pu	5.170E+20	4.204E+12	186.99			
^{240}Pu	1.800E+20	4.044E+11	186.91			
^{241}Pu	4.814E+19	3.934E+11	187.94			
^{242}Pu	3.083E+19	4.889E+10	188.69			

B5218(G812)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	7.823E+20	6.189E+12	180.42	663	30	693 ± 7
^{238}U	2.800E+21	6.693E+11	183.35			
^{238}Pu	9.075E+18	5.836E+10	184.94			
^{239}Pu	5.430E+20	4.435E+12	186.99			
^{240}Pu	1.889E+20	4.225E+11	186.91			
^{241}Pu	5.057E+19	4.159E+11	187.94			
^{242}Pu	3.232E+19	5.094E+10	188.69			

B5207(G819)

核分裂核種	原子数 (atoms/sample)	核分裂率 (fissions/sec/sample)	γ 線を除く 核分裂当たりの 発生エネルギー (MeV)	線出力密度 (W/cm)		
				中性子 発熱分	γ 線 発熱分	合 計
^{235}U	6.652E+20	5.374E+12	180.42	640	29	669 ± 7
^{238}U	2.424E+21	5.900E+11	183.35			
^{238}Pu	7.901E+18	5.178E+10	184.94			
^{239}Pu	4.719E+20	3.933E+12	186.99			
^{240}Pu	1.642E+20	3.741E+11	186.91			
^{241}Pu	4.392E+19	3.685E+11	187.94			
^{242}Pu	2.810E+19	4.508E+10	188.69			

表5.4 C/E補正後の線出力密度評価結果

コンパートメントNo.1

単位: W/cm

軸方向位置 (mm)	B5223 G809	B5216 G810	B5224 G811	B5218 G812
25	465 ± 17	493 ± 18	460 ± 17	483 ± 13
75	524 ± 19	545 ± 20	517 ± 19	544 ± 14
125	589 ± 22	606 ± 22	578 ± 21	605 ± 16
175	634 ± 23	653 ± 24	621 ± 23	650 ± 17
225	653 ± 24	677 ± 25	640 ± 23	672 ± 18
275	648 ± 24	675 ± 25	637 ± 23	673 ± 18
325	624 ± 23	651 ± 24	614 ± 23	650 ± 17
375	582 ± 21	606 ± 22	573 ± 21	606 ± 16
425	523 ± 19	543 ± 20	513 ± 19	541 ± 14
475	449 ± 16	467 ± 17	440 ± 16	464 ± 12
525	371 ± 14	385 ± 14	369 ± 14	391 ± 10

誤差として、MCNPの統計誤差、¹⁴⁸Nd生成量の測定誤差、
C/Eのばらつき、核分裂当たりの発生エネルギーの誤差、
原子炉熱出力誤差を考慮した。

コンパートメントNo.2

軸方向位置 (mm)	B5213 G813	B5211 G814	B5206 G815	B5220 G816
25	467 ± 17	464 ± 17	502 ± 18	467 ± 17
75	526 ± 19	512 ± 19	560 ± 21	528 ± 19
125	584 ± 21	571 ± 21	627 ± 23	593 ± 22
175	623 ± 23	616 ± 23	674 ± 25	631 ± 23
225	642 ± 24	638 ± 23	693 ± 25	641 ± 23
275	643 ± 24	637 ± 23	687 ± 25	632 ± 23
325	625 ± 23	614 ± 23	660 ± 24	611 ± 22
375	585 ± 21	573 ± 21	615 ± 23	577 ± 21
425	523 ± 19	513 ± 19	553 ± 20	523 ± 19
475	443 ± 16	440 ± 16	476 ± 17	446 ± 16
525	373 ± 14	365 ± 13	399 ± 15	370 ± 14

コンパートメントNo.3

軸方向位置 (mm)	B5221 G817	B5203 G818	B5207 G819	B5202 G820
25	463 ± 17	460 ± 17	479 ± 13	451 ± 17
75	519 ± 19	513 ± 19	533 ± 14	507 ± 19
125	584 ± 21	577 ± 21	598 ± 16	562 ± 21
175	629 ± 23	622 ± 23	643 ± 17	601 ± 22
225	647 ± 24	639 ± 23	661 ± 17	622 ± 23
275	642 ± 24	634 ± 23	654 ± 17	623 ± 23
325	617 ± 23	610 ± 22	629 ± 17	603 ± 22
375	575 ± 21	571 ± 21	586 ± 15	563 ± 21
425	517 ± 19	515 ± 19	526 ± 14	505 ± 18
475	444 ± 16	442 ± 16	451 ± 12	433 ± 16
525	366 ± 13	366 ± 13	377 ± 10	361 ± 13

コンパートメントNo.4

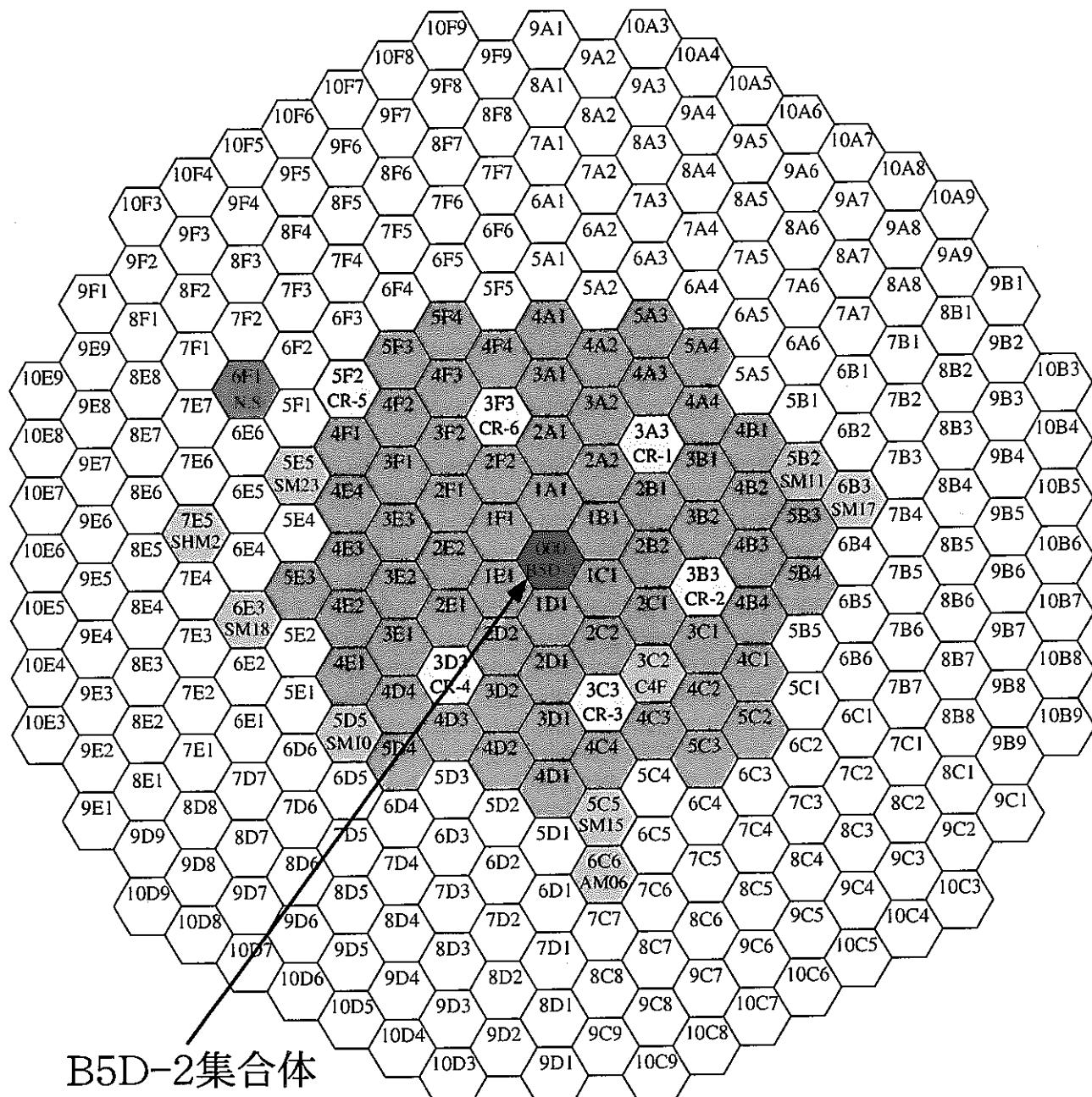
軸方向位置 (mm)	B5219 G821	B5201 G822	B5205 G823	B5212 G824
25	455 ± 17	461 ± 17	498 ± 18	463 ± 17
75	511 ± 19	512 ± 19	559 ± 20	520 ± 19
125	572 ± 21	567 ± 21	629 ± 23	575 ± 21
175	613 ± 22	608 ± 22	675 ± 25	616 ± 23
225	629 ± 23	629 ± 23	693 ± 25	638 ± 23
275	624 ± 23	628 ± 23	688 ± 25	637 ± 23
325	601 ± 22	607 ± 22	664 ± 24	615 ± 23
375	560 ± 21	566 ± 21	621 ± 23	572 ± 21
425	502 ± 18	505 ± 18	558 ± 20	512 ± 19
475	429 ± 16	430 ± 16	477 ± 17	441 ± 16
525	355 ± 13	358 ± 13	397 ± 15	366 ± 13

コンパートメントNo.5

軸方向位置 (mm)	B5214 G801	B5208 G802	B5215 G803	B5204 G804
25	486 ± 13	478 ± 13	497 ± 13	458 ± 12
75	544 ± 14	540 ± 14	554 ± 15	515 ± 14
125	606 ± 16	604 ± 16	620 ± 16	575 ± 15
175	651 ± 17	647 ± 17	667 ± 18	616 ± 16
225	674 ± 18	667 ± 18	688 ± 18	635 ± 17
275	674 ± 18	663 ± 17	683 ± 18	634 ± 17
325	651 ± 17	640 ± 17	658 ± 17	613 ± 16
375	608 ± 16	599 ± 16	615 ± 16	574 ± 15
425	545 ± 14	539 ± 14	553 ± 15	516 ± 14
475	468 ± 12	463 ± 12	474 ± 13	442 ± 12
525	394 ± 10	383 ± 10	393 ± 10	367 ± 10

コンパートメントNo.6

軸方向位置 (mm)	B5209 G805	B5217 G806	B5210 G807	B5222 G808
25	469 ± 17	475 ± 17	463 ± 17	469 ± 17
75	531 ± 19	535 ± 20	519 ± 19	524 ± 19
125	586 ± 21	599 ± 22	580 ± 21	587 ± 22
175	625 ± 23	647 ± 24	622 ± 23	629 ± 23
225	644 ± 24	669 ± 24	640 ± 23	646 ± 24
275	644 ± 24	666 ± 24	637 ± 23	642 ± 24
325	624 ± 23	640 ± 23	616 ± 23	623 ± 23
375	584 ± 21	595 ± 22	576 ± 21	586 ± 21
425	524 ± 19	533 ± 20	518 ± 19	527 ± 19
475	451 ± 17	460 ± 17	444 ± 16	449 ± 16
525	381 ± 14	385 ± 14	371 ± 14	369 ± 14



: 炉心燃料集合体

: 制御棒

: 特殊燃料集合体

: 反射体

: 材料照射用反射体

: 中性子源

図2.1 「常陽」 MK-II 第24サイクル炉心構成図

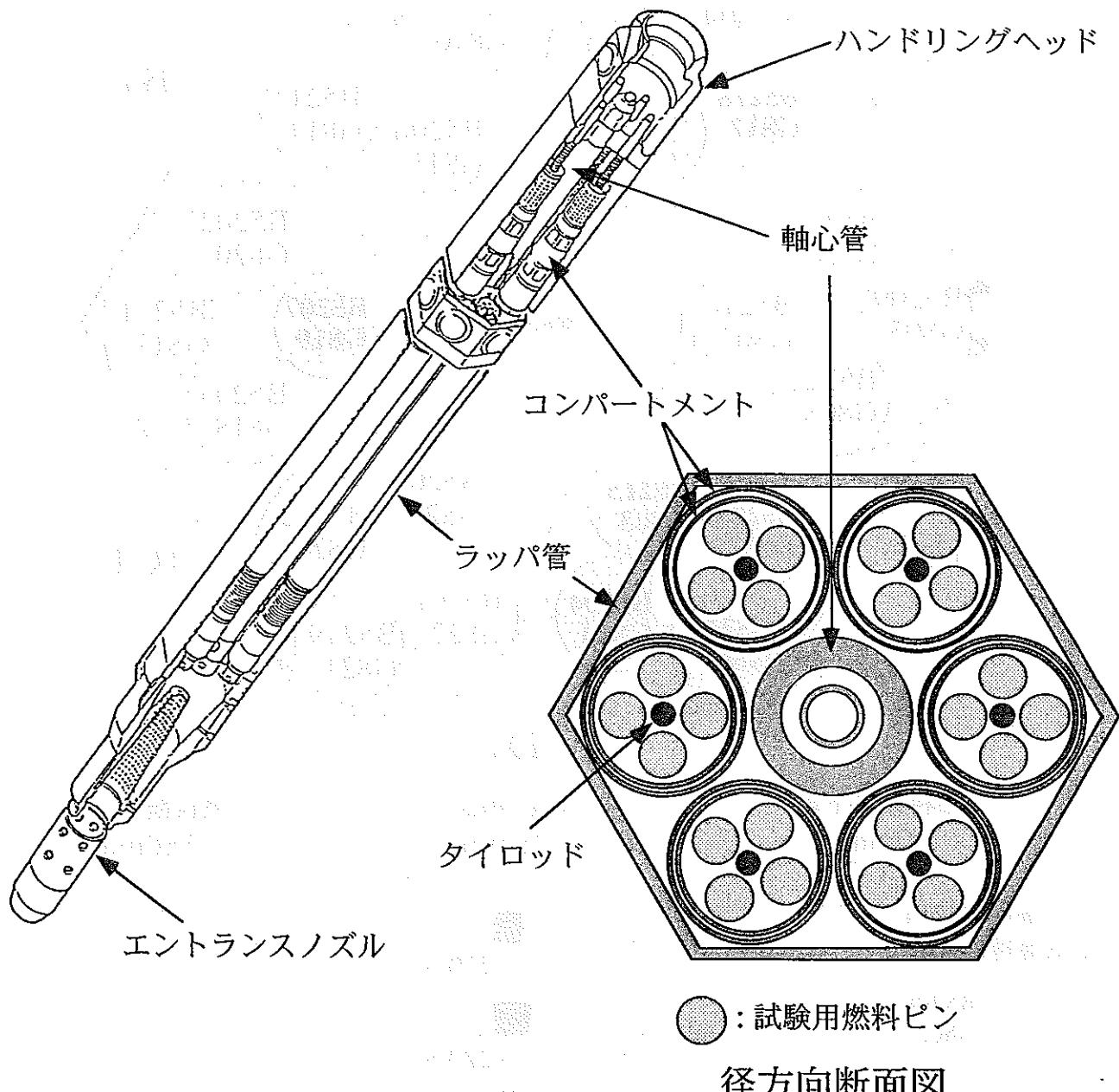
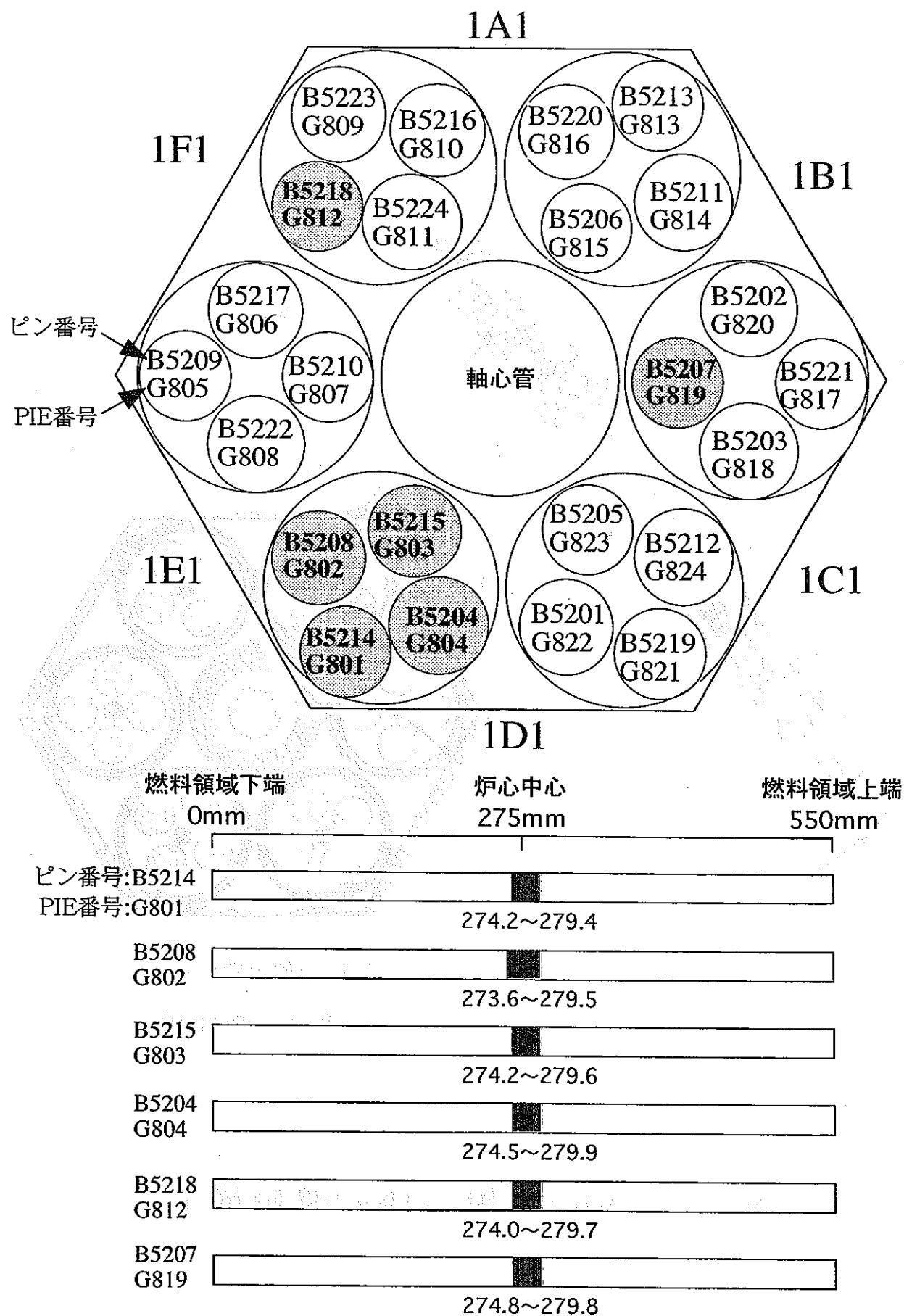


図2.2 B5D-2集合体の概略構造

図2.3 ^{148}Nd 生成量の測定対象ピンと測定位置

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)

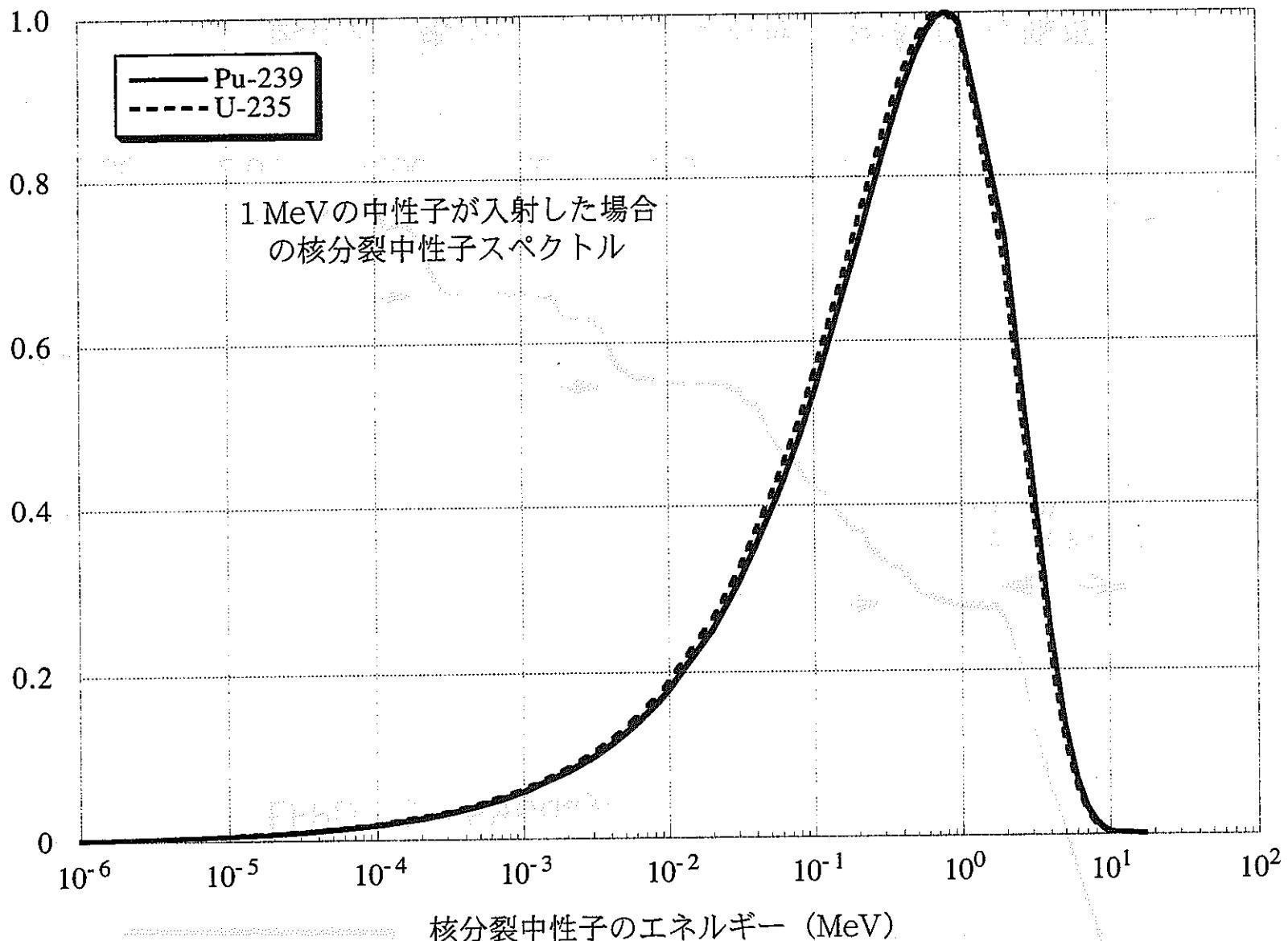


図3.1 Watt型の核分裂中性子スペクトル

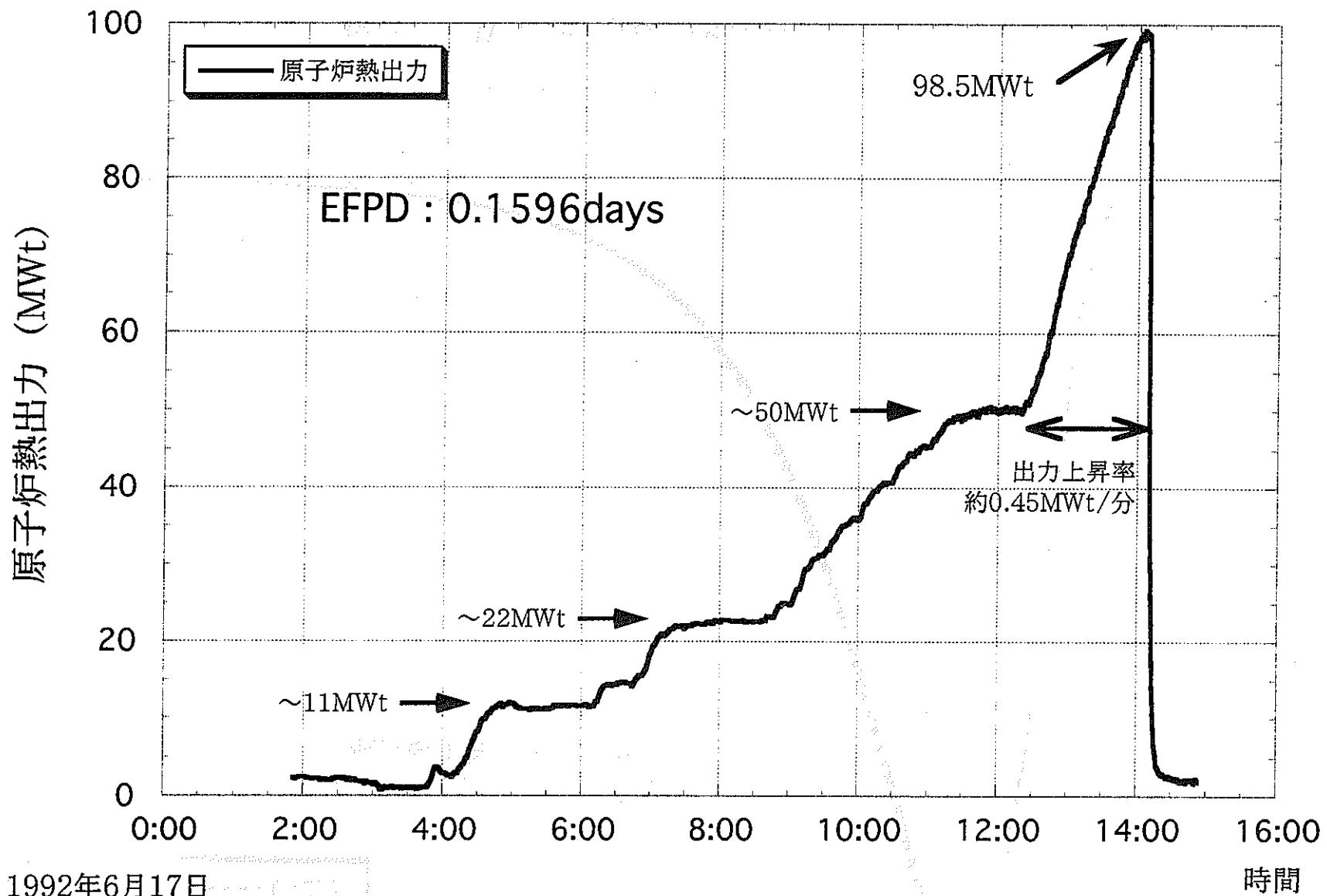


図3.2 第24' サイクルの原子炉熱出力履歴

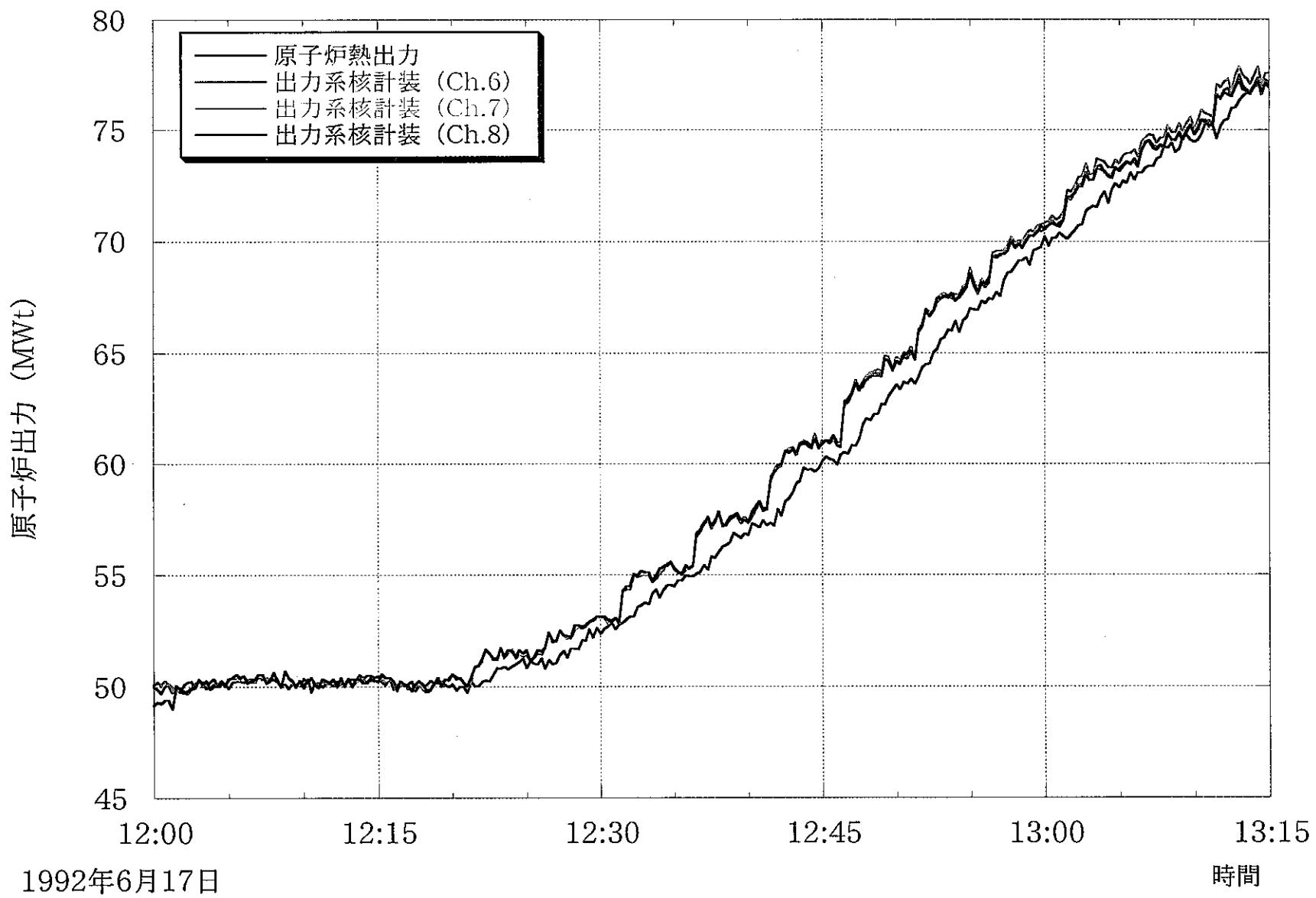


図3.3 原子炉熱出力と出力系核計装の比較

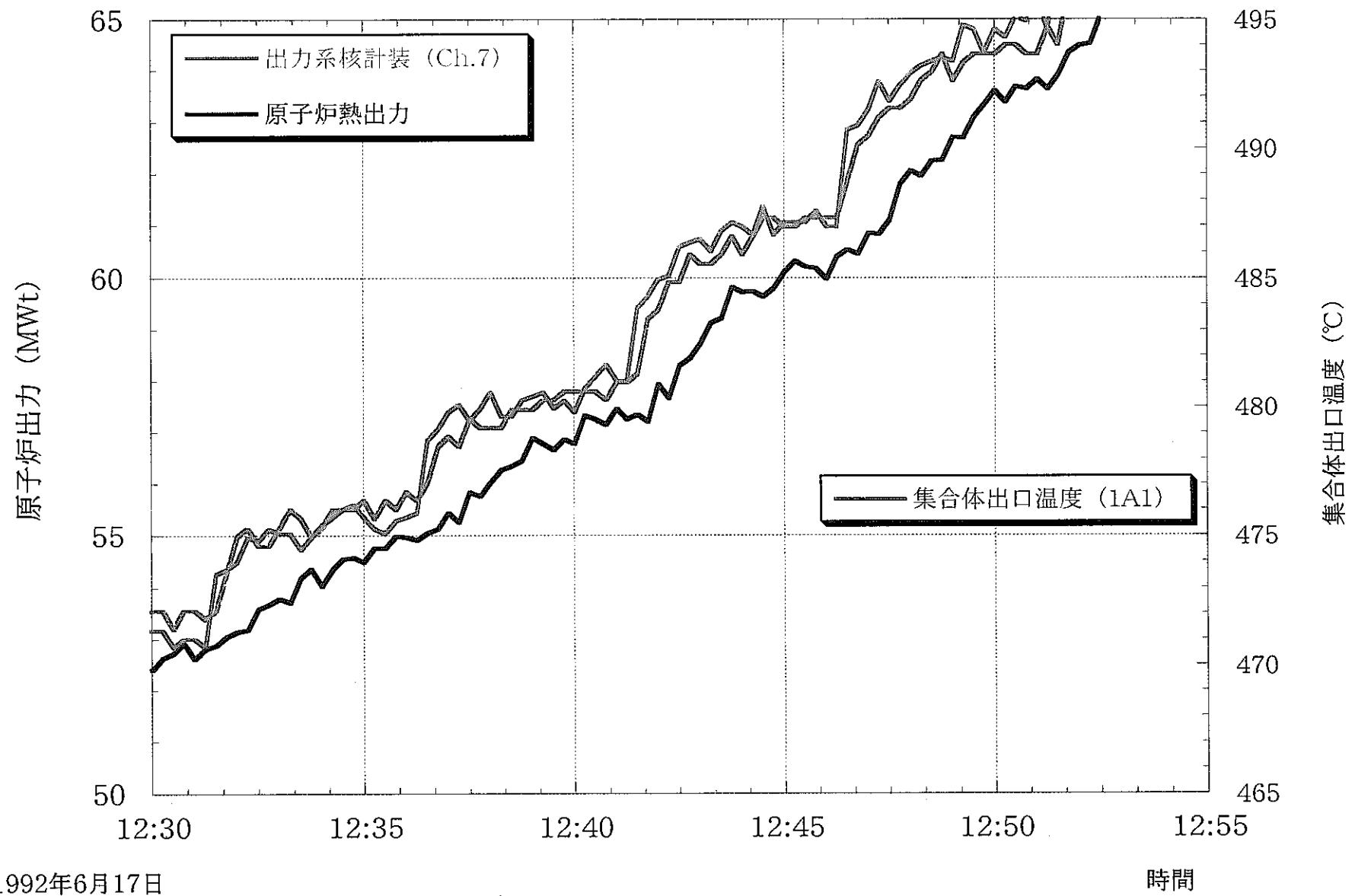


図3.4 集合体出口温度履歴

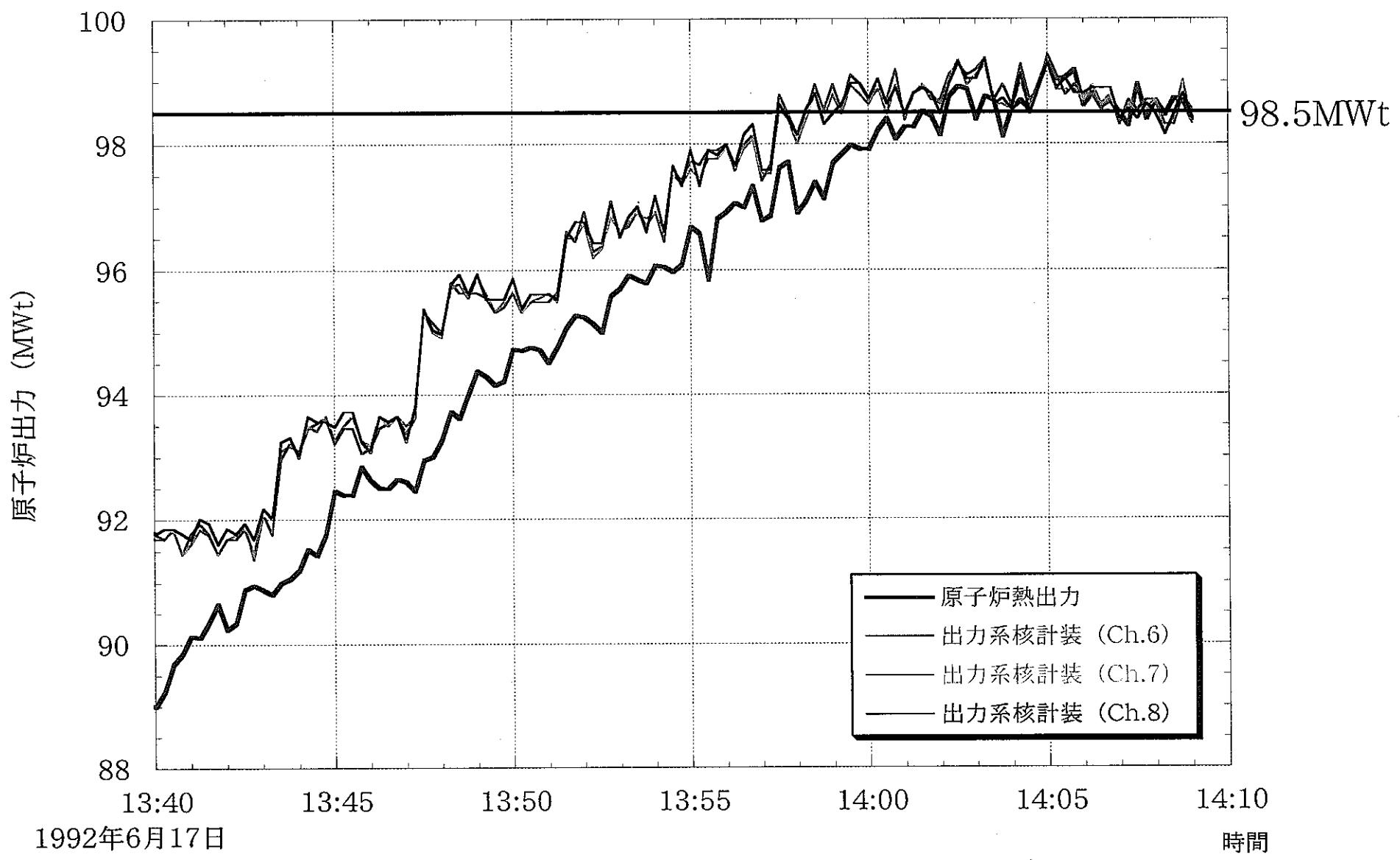
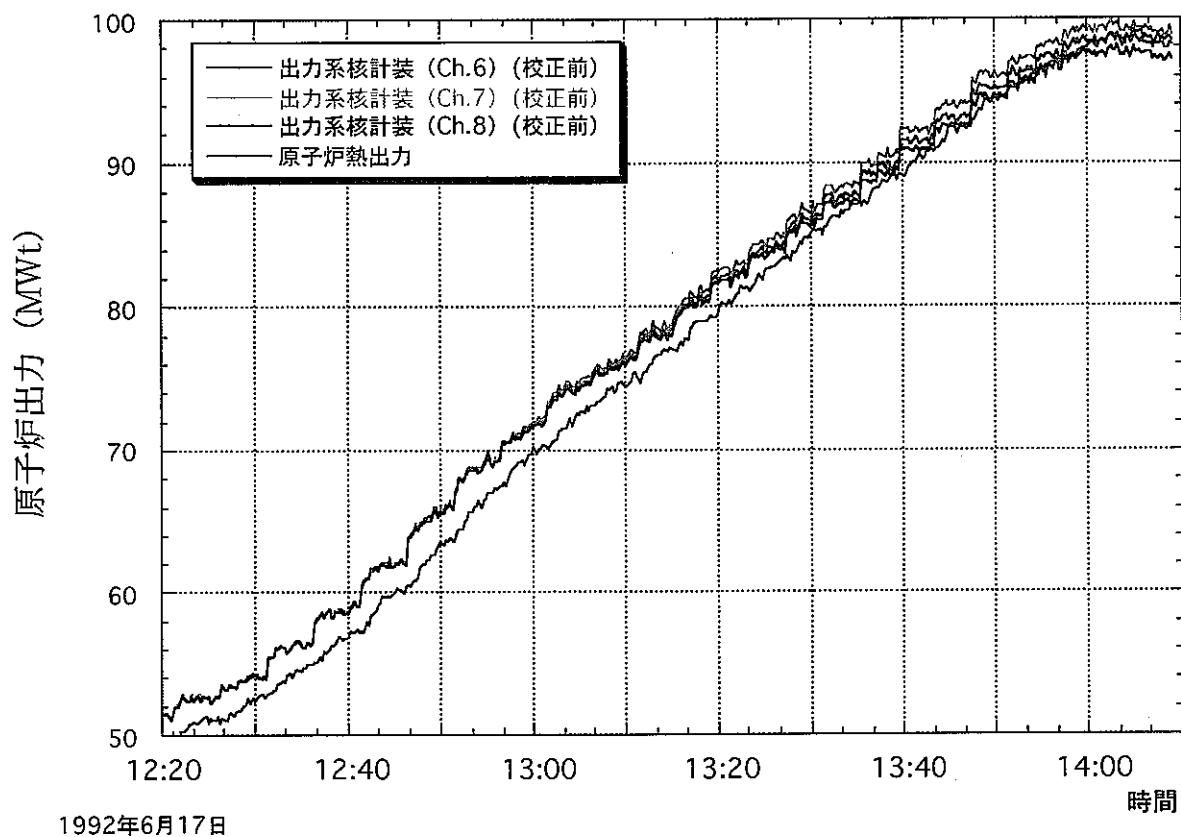


図3.5 目標出力時の原子炉出力履歴

(出力系核計装校正前)



(出力系核計装校正後)

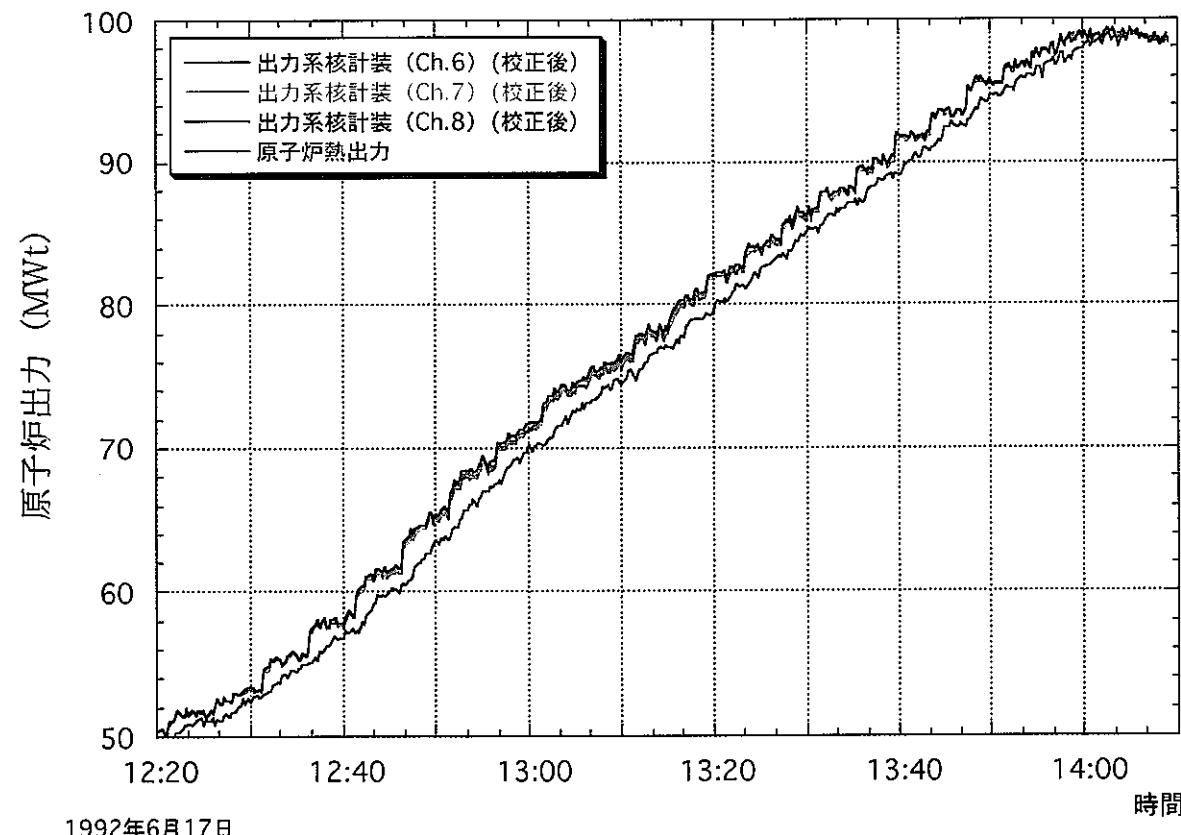
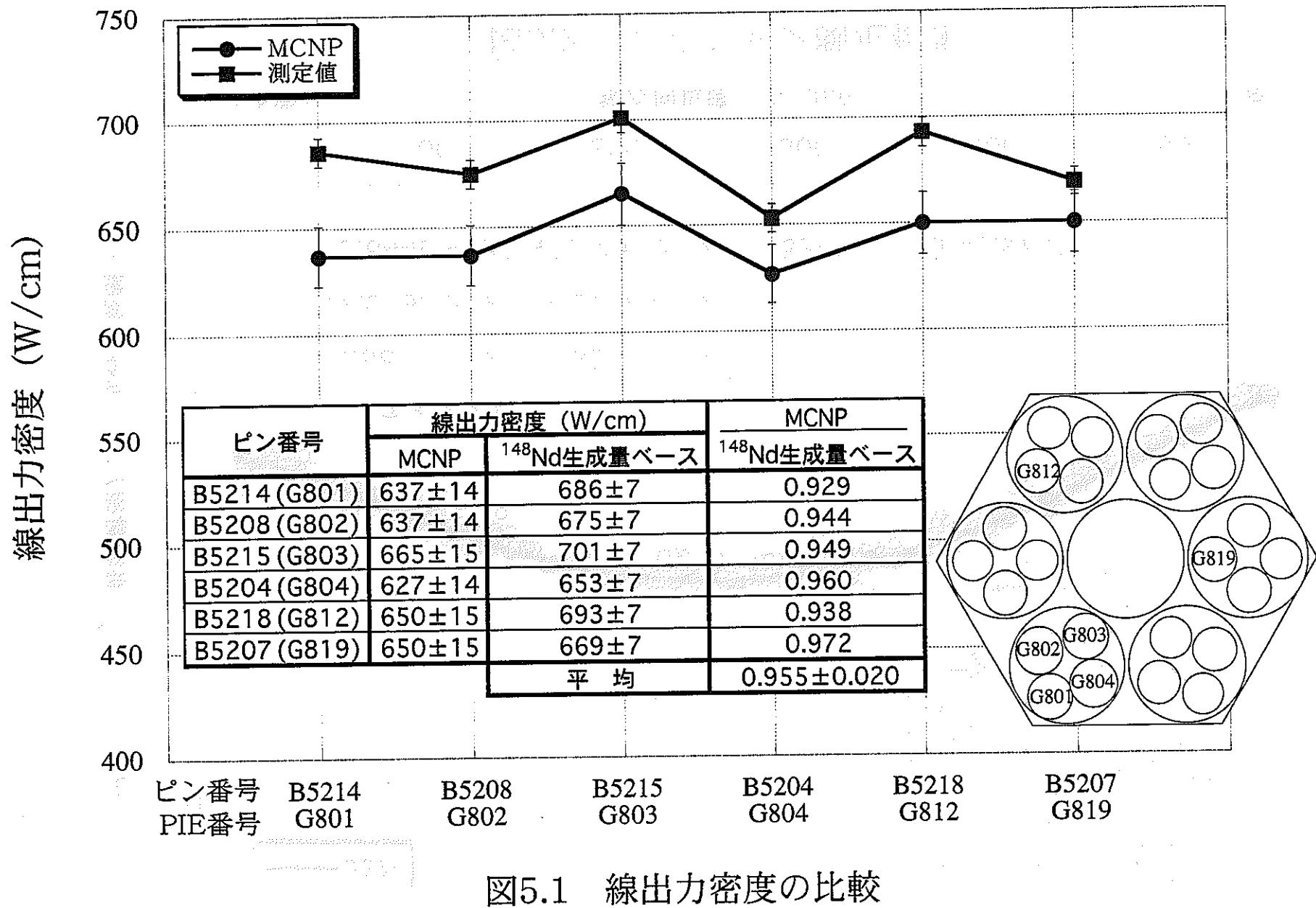


図3.6 熱出力校正前後の出力系核計装による原子炉出力履歴



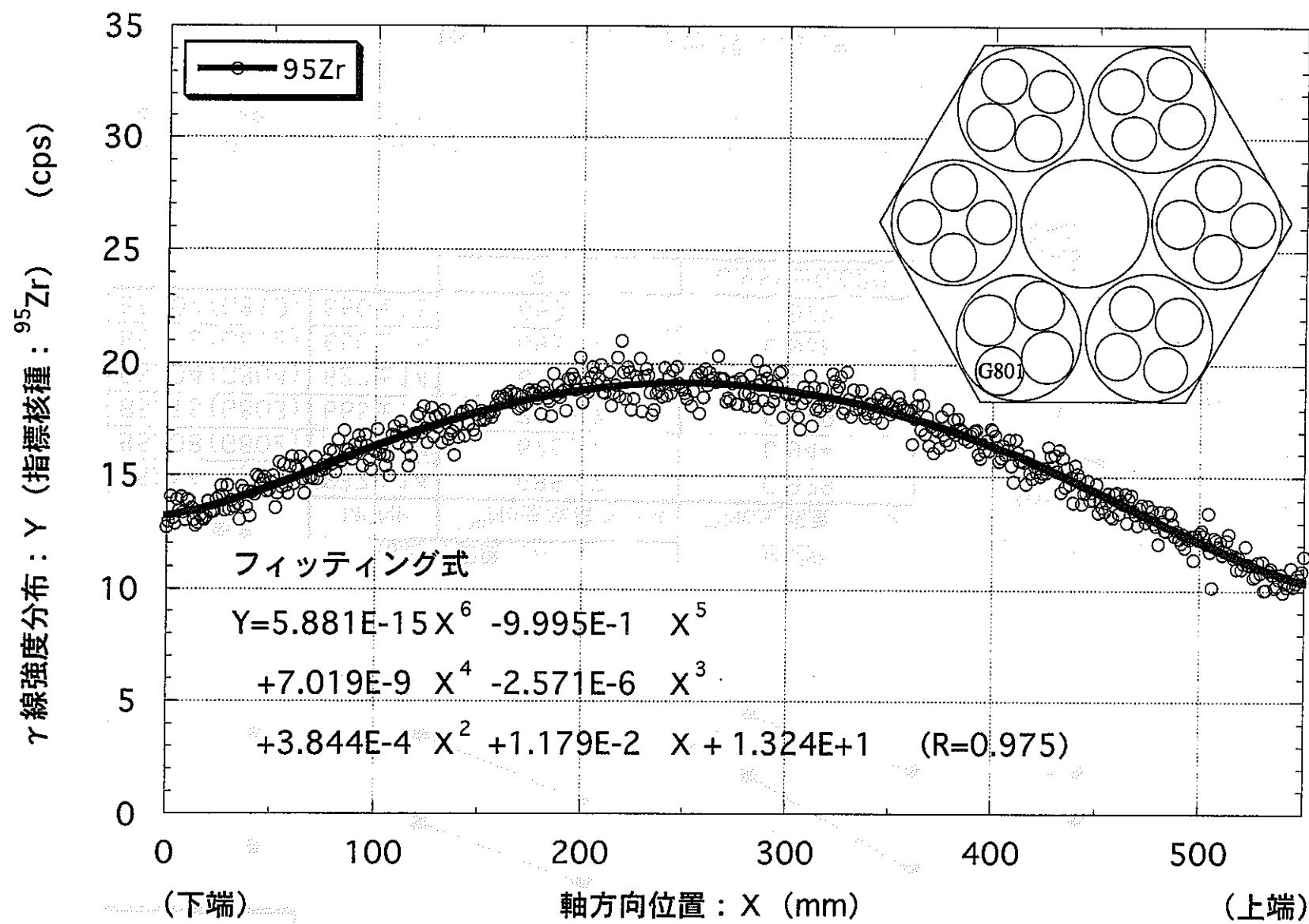


図5.2 ガスキャン測定結果