

JAERI-Data/Code

96-035



MOX燃料輸送体系の臨界安全解析への
SCALEコードシステムの適用性

1996年11月

山本俊弘・内藤倭孝・林 俊明^{*1}・高杉政博^{*2}・夏目智弘^{*3}・津田一明^{*4}

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 ㈱原子力資料サービス

MOX燃料輸送体系の臨界安全解析へのSCALEコードシステムの適用性

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

山本 俊弘 ・内藤 倣孝 ・林 俊明*¹ ・高杉 政博*²

夏目 智弘*³ ・津田 一明*⁴

(1996年10月14日受理)

MOX燃料輸送体系に対するSCALEコードシステムの適用性を確認するために、原研TCAで行われたMOX燃料(Pu富化度3.0wt.%)臨界実験の解析並びにPu富化度、燃料棒ピッチをパラメータとした燃料棒無限配列体系に対する解析を行った。連続エネルギーモンテカルロコードMCNPとJENDL-3.2とを組み合わせた計算と比較しても、GAM-THERMOS 123群ライブラリを用いたSCALEコードシステムは妥当な結果を与えている。また、HANSEN-ROACH16群ライブラリを用いた場合には、MOX燃料輸送体系の解析精度としては劣るものの、高富化度の場合を除けば、誤差の傾向は安全側である。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡那東海村白方白根2-4

*1 東京電力株式会社

*2 関西電力株式会社

*3 三菱重工業株式会社

*4 トランスニュークリア株式会社

Applicability of the SCALE Code System to MOX Fuel Transport Systems for
Criticality Safety Analysis

Toshihiro YAMAMOTO, Yoshitaka NAITO, Toshiaki HAYASHI*¹
Masahiro TAKASUGI*², Toshihiro NATSUME*³ and Kazuaki TSUDA*⁴

Department of Fuel Cycle Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 14, 1996)

In order to ascertain feasibilities of the SCALE code system for MOX fuel transport systems, criticality analyses were performed for MOX fuel (Pu enrichment; 3.0 wt.%) criticality experiments at JAERI's TCA and for infinite fuel rod arrays as parameters of Pu enrichment and lattice pitch. The comparison with a combination of the continuous energy Monte Carlo code MCNP and JENDL-3.2 indicated that the SCALE code system with GAM-THERMOS 123-group library can produce feasible results. Though HANSEN-ROACH 16-group library gives poorer results for MOX fuel transport systems, the errors are conservative except for high enriched fuels.

Keywords: MOX Fuel, Transportation, SCALE Code System, Hansen-Roach, GAM-THERMOS, MCNP, JENDL-3.2, TCA, Criticality Safety Analysis

*1 Tokyo Electric Power Company
*2 Kansai Electric Power Co., Inc.
*3 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
*4 Transnuclear Ltd.

目 次

1. 序 論	1
2. 計算体系	2
2.1 TCAでのMOX燃料実験	2
2.2 無限配列燃料の計算	3
3. 計算手法	5
3.1 SCALEコードシステム	5
3.2 連続エネルギーモンテカルロコード	9
4. 結果と考察	15
4.1 TCA実験解析	15
4.2 無限配列燃料の解析	16
5. 結 論	39
参考文献	40
付録 TCA実験解析に使用したMCNP入力データ	41

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation Models	2
2.1 MOX Fuel EXperiments at TCA	2
2.2 Calculations for Infinite Fuel Rod Array	3
3. Calculation Methods	5
3.1 SCALE Code System	5
3.2 Continuous Energy Monte Carlo Code	9
4. Results and Discussion	15
4.1 Analyses of TCA Experiments	15
4.2 Analyses of Infinite Arrays of Fuel Rods	16
5. Conclusions	39
References	40
Appendix Input Data of MCNP for TCA Experiment Analysis	41

1. 序 論

1994年に原子力委員会が策定した「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」、いわゆる原子力長計には、高速増殖炉の実用化までの間、軽水炉でのウラン・プルトニウム混合酸化物(MOX)燃料利用(いわゆるプルサーマル利用)を適切な規模で経済的に行っていく必要性が謳われている。具体的には、1990年代後半から加圧水型軽水炉(PWR)及び沸騰水型軽水炉(BWR)のそれぞれ少数基において利用を開始し、2000年頃に10基程度、2010年までには十数基程度の規模にまで計画的かつ弾力的に拡大するとされている。

軽水炉においてMOX燃料を利用するには、MOX燃料加工工場から軽水炉発電所まで、軽水炉燃料集合体の形でMOX燃料を輸送することが必要であり、輸送は法令で定められた臨界等の技術上の基準に適合する輸送容器を用いる。

二酸化ウラン(UO_2)燃料輸送体系の臨界安全解析については、従来より、米国ORNLで開発されたSCALEコードシステムがよく利用されている⁽¹⁾。そこで、MOX燃料輸送体系に対する同コードシステムの適用性を確認することができれば、使用経験の豊富な解析手法によってMOX燃料の臨界安全解析を行うことが可能となる。

以上のような観点から、SCALEコードシステムのMOX燃料輸送体系への適用性を調べるため、以下のような解析検討を実施した。

(1) 日本原子力研究所 軽水臨界実験装置(Tank-type Critical Assembly:TCA)で行われたMOX燃料棒による臨界実験の解析

(2) Pu富化度、燃料棒間隔をパラメータとした燃料棒無限配列体系に対する解析
(1)、(2)の両方に対して、比較のため、詳細解析手法(連続エネルギーモンテカルロ計算)による解析も実施した。(1)は臨界体系を解析することによって直接的にその精度を検証するものであるが、(2)では、計算手法の精度が中性子スペクトルの変化などによって、どの程度影響されるかを調べることを目的としている。

SCALEコードシステムで使用する断面積ライブラリとしては、ウラン燃料輸送体系の解析でよく用いられている

(1) HANSEN-ROACH 16群ライブラリ

(2) GAM-THERMOS 123群ライブラリ

の2種類を対象とする。

以下、解析検討の詳細について述べる。

2. 計算体系

前章で述べたように、SCALE コードシステム及び連続エネルギーモンテカルロコードを用いて MOX 燃料に対して臨界解析を実施した。以下に計算で対象とした体系について説明する。

2.1 TCA での MOX 燃料実験

日本原子力研究所の軽水臨界実験装置 TCA では、1972 年から 1975 年にかけて MOX 燃料を用いて、臨界量、減速材温度係数などの基本的な物理量を測定する実験が行われた⁽²⁾。

TCA は軽水を減速材とする臨界集合体であって、上部、下部、中間格子板によって支持された燃料棒の配列で炉心を構成する。原子炉の運転は、給水ポンプによって炉心下部より軽水減速材を、直径約 1.8 m、高さ約 2 m の炉心タンクに給水することで行われる。炉心部の概要を図 2-1 に示す。燃料棒ピッチ及び形状は、格子板を取り替えることで変化させることができる。ただし、一つの格子板における燃料棒ピッチは一定である。

使用した燃料棒はプルトニウム富化度が 3.01% で、密度が 6.056 g/cm³ である。燃料ペレット部分の長さは 70.6 cm で、被覆材はジルカロイ-2 で、上部及び下部の端栓はアルミニウムである。燃料の仕様を表 2-1 に示す。なお、²⁴¹Pu は 14.5 年の半減期で ²⁴¹Am に崩壊するため、分析データを基に、実験日に相当する ²⁴¹Pu、²⁴¹Am の原子個数密度を算出した。

表 2-1 計算に使用した燃料棒の仕様

富化度 (wt.%)	3.01±0.05	ペレット	
同位体組成 (wt.%)		直径 (mm)	10.65
ウラン	天然組成	密度 (g/cm ³)	6.056±0.076
プルトニウム*		被覆材	
Pu-238	0.494	内径 (mm)	10.83±0.06
Pu-239	68.18	肉厚 (mm)	0.70±0.07
Pu-240	22.02		
Pu-241	7.26		
Pu-242	2.04		
Am-241 ⁺	530 ppm		
O/M	2.07		

* 1971年8月19日測定

+ 1971年8月16日測定

臨界水位の測定は、中性子源を引き抜いた状態で出力が最低5分間一定になった状態で行った。燃料から発生する自発核分裂中性子の影響をなくすために、測定は5W以上

の出力で行われた。また、特定温度での臨界水位を求めるために、別途測定した温度反応度係数と水位反応度係数とから、20℃における臨界水位に外挿した。

本報告書では、燃料棒ピッチが 1.825, 1.956, 2.225, 2.474 cm のそれぞれ四つのケースについて 22 本×22 本の正方配列炉心を計算対象とした。これらの燃料棒ピッチに対応する水対燃料体積比は、それぞれ 2.42, 2.98, 4.24, 5.55 である。計算に使用した解析モデルを図 2-2 に示す。解析モデルでは燃料格子の横方向と下部に厚さ 40 cm の水反射体を付けた。ただし、下部反射体領域のうち燃料ペレット下端より 16.83 cm の部分は、アルミニウムの下部端栓が水反射体中に配列している体系となっている。水面より上で、かつ、燃料格子の内側の領域は、燃料棒がボイド中に配列している体系となっている。また、水面より上で、かつ、燃料格子の外側の領域はボイドとした。MCNP の入力データの一例を付録に示す。

2. 2 無限配列燃料の計算

計算コードの適用性を調べるには、前節のような臨界実験解析に加えて、より単純な体系でのコード/断面積ライブラリー間の比較をすることが望ましい。そこで、前節で使用した形状の燃料棒に対して、無限長の単位セルが無限に配列した体系における中性子増倍率（無限増倍率）を計算する。ここでは、プルトニウム富化度及び燃料棒ピッチの影響を調べるために、プルトニウム富化度は 0.0（天然ウラン）、1.0, 3.01, 6.0, 12.0 wt.% の 5 ケース、また、燃料棒ピッチは 1.630, 1.825, 1.956, 2.225, 2.474 cm の 5 ケースの計 25 ケースについて計算を行った。後述する SCALE コードシステムの XSDRNPM コードの計算では、単位正方格子を体積等価な円筒体系に近似する。そして外部境界条件は白色入力とする。一方、連続エネルギーモンテカルロ法を用いた計算では、有限長の単位正方格子で計算するが、外部境界条件は鏡面反射とすることで無限配列燃料の体系をモデル化する。

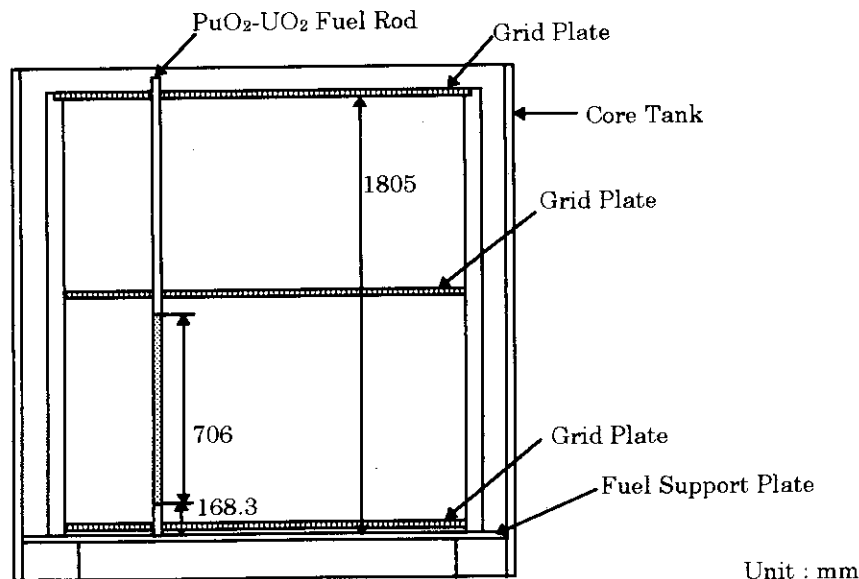


図 2-1 TCA 炉心タンク立面図

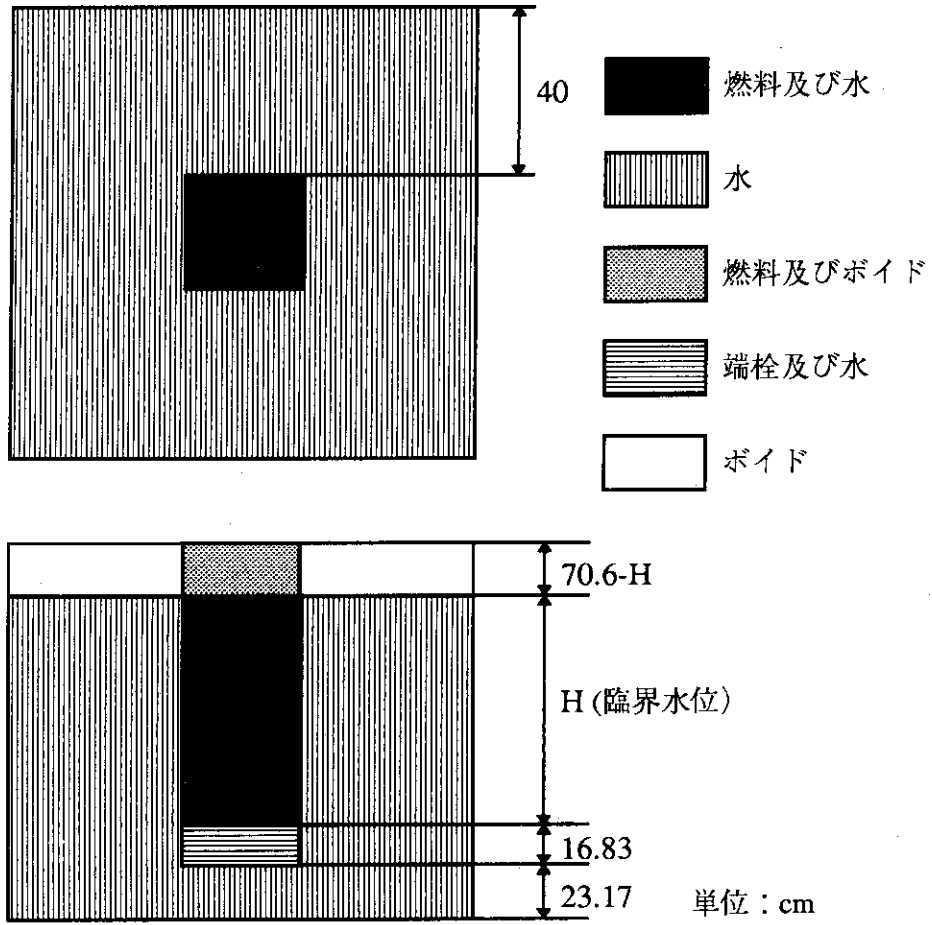


図 2 - 2 解析モデル

3. 計 算 手 法

3. 1 SCALE コードシステム⁽³⁾

SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) コードシステムは米国オークリッジ研究所 (ORNL) が原子力規制委員会 (NRC) 用に開発した核燃料施設、核燃料輸送・貯蔵容器の安全解析用コードパッケージであり、臨界安全解析の他、しゃへい解析、伝熱解析の機能も有している。現在は同コードシステムのバージョン4、即ち SCALE4 が一般に使用されている。

SCALE では各種解析作業を行う際の解析コードシーケンスが用意されており、ユーザはこのシーケンスを指定するだけで、一連の解析作業を行うことができる。SCALE4 での臨界解析コードとしては、一次元輸送計算コード XSDRNPM⁽⁴⁾ 及び三次元モンテカルロ計算コード KENO-V.a⁽⁵⁾ が用意されている。

臨界安全解析を行うシーケンスは CSAS (Criticality Safety Analysis Sequence) と呼ばれており、燃料集合体輸送体系の臨界解析には CSAS2X というシーケンスがよく用いられる。このシーケンスでは燃料棒格子を核的に均質化し、燃料領域を均質な領域としてモンテカルロ臨界計算を行う。前述の XSDRNPM はここでは格子均質化用に使用される。図3-1に CSAS2X のフローを示す。

解析に使用する断面積ライブラリは、ENDF/B-IVを基にした CSRL ライブラリ (Criticality Safety Reference Library) の他、輸送体系によく用いられる HANSEN-ROACH 16群ライブラリ⁽⁶⁾ または GAM-THERMOS 123群ライブラリも用意されている。ユーザは、これらのライブラリ名を指定することによって、いずれのライブラリをも利用できる。

今回の解析検討では、ウラン燃料集合体の輸送体系によく用いられる CSAS2X シーケンス及び HANSEN-ROACH 16群ライブラリまたは GAM-THERMOS 123群ライブラリの組み合わせの、MOX 燃料輸送体系に対する適用性について検討することとする。

以下に、XSDRNPM コード及び KENO-V.a コード及び上記ライブラリについて解説する。

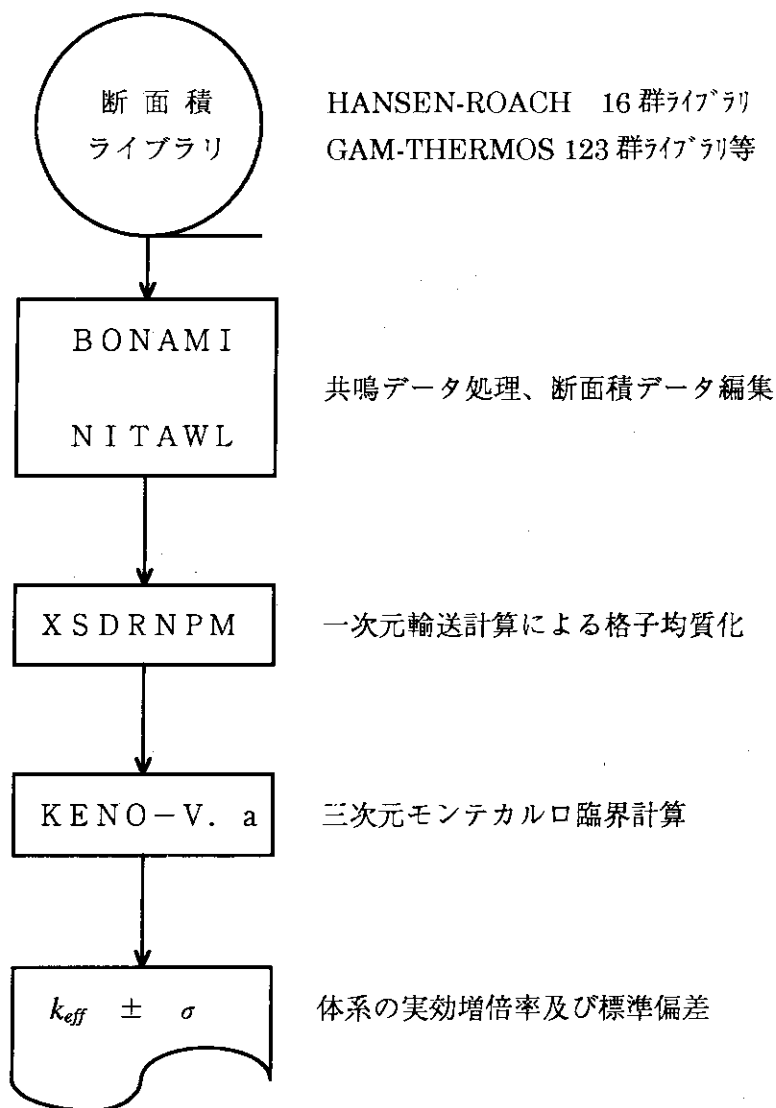


図3-1 臨界安全解析シーケンス CSAS2X のフロー

3. 1. 1 計算コード

(1) XSDRNPM

SCALE4 コードシステムに納められている XSDRNPM は、正確には XSDRNPM-S と称するものであり、一次元 S_n 輸送計算コード XSDRN の系列での最新版である。種々の機能が追加されてはいるが、多群 Boltzmann 方程式の解を求める基本的な手法は全バージョン共通であり、ANISN コードで用いられている手法と類似のものである。

XSDRNPM の機能は、大きく分けると以下の 2 種類となる。

- ① 平板、無限円柱あるいは球体系での一次元 S_n 輸送計算（一次元拡散計算、無限媒質での B_n 計算の機能もオプションとして有する）。
- ② 計算した中性子束を用いて、断面積データの空間縮約、エネルギー縮約を行い、各種のフォーマットで出力する。

CSAS2X では、上記の②の機能を利用して空間縮約を行い、燃料格子の均質化断面積を作成する。

その他、XSDRNPM の特徴を以下に示す。

- 平板、円柱、球のいずれの体系についても、任意の次数で S_n 定数を自動計算する。
- 媒質に依存した核分裂スペクトルを体系中の核分裂性核種を考慮して計算する。
- 任意のオーダでの散乱の非等方性を扱うことができる。
- 随伴解析が可能である。
- 固有値解析では、 k -サーチの他、領域厚さ、外径等の臨界寸法やバックリングのサーチ計算をオプションで行うことができる。
- 中性子-ガンマ線結合計算が行える。
- 実行中のデータ格納を効率的に行うため、大型の問題にも対応可能である。
- 熱中性子束のスケーリング手法を改良し、収束性を改善している。

計算に必要なパラメータの多くにデフォルト値を設定し、ユーザが使い易いように改善している。

(2) KENO-V.a

KENO-V.a は、多群法に基づく三次元モンテカルロ解析コードである KENO コードのバージョンの一つであり、以下のような機能を備えたことにより非常に多様な形状の体系の取扱いを可能としている。

- ① ユニット配列の任意のレベルでのネスティングが可能 (ARRAY of ARRAYs)。
 - ② ユニット内部に他のユニットが入り込んだ「穴 (HOLE)」を設けることができる。
 - ③ 円柱体系、球体系の任意の位置に弦を設定して物質の存在領域を限定することにより、半円柱面、半球面を有する構造物をモデル化できる。(Variable CHORD)
- 上記のような特徴のため、複雑な構造を有する輸送容器等の解析にはよく用いられて

いる。

解析手法上の特徴としては、非等方散乱における散乱角の取扱いが挙げられる。

散乱角は離散的に取り扱われ、散乱角とその出現確率の組み合わせは、当該エネルギー群間遷移に対応した散乱角分布のモーメントを保存するように設定される。モーメント値は Legendre 展開における P_n 係数から求めることができる。 P_n 係数とモーメント値には 1 対 1 の対応関係が存在する。 n 個の離散化散乱角に対しては、 $2n-1$ 次までのモーメントが全て保存されることになる。

また、各種の反射材を模擬するものとして離散アルベドが用意されており、反射体を陽にモデル化せず、アルベドとして扱うことで計算時間の短縮を図ることができる。

3. 1. 2 断面積ライブラリ

(1) HANSEN-ROACH 16 群ライブラリ

SCALE4 での HANSEN-ROACH 16 群ライブラリは、Hansen 及び Roach によるオリジナルの Los Alamos レポート⁽⁶⁾に基づいている。オリジナルライブラリにない重要核種については、ENDF/B-IV ベースの 218 群ライブラリの縮約によって補っている。ENDF/B-IV からの追加核種は、

He-4, B-10, B-11, Mg, Si, Ca, V, Cr, Fe, Ni, Zircalloy-2, Ag-107, Ag-109, Cd, In-113, In-115, Gd, Dy-164, Lu-175, Lu-176, Hf, W-182, W-183, W-184, W-186, Re-185, Re-187, Au-197, Pb, Pa-233, U-234, U-236, Np-237, Pu-241, Pu-242, Am-241, Am-243, Cm-244

である。表 3-1 に群構造を示す。

HANSEN-ROACH 16 群ライブラリは、第一義的には高速体系用に開発された。16 群は高速 12 群及び熱 4 群 (3 eV 以下) からなり、オリジナルの HANSEN-ROACH のデータには熱領域での上方散乱データが含まれていない。散乱断面積は漏れの効果による輸送補正を施した P_0 データを全般に用いているが、水素 (H) 及び重水素 (D) のみは P_1 データを有している。追加した核種は全て P_3 データまで有している。

低濃縮ウラン体系に対する計算精度向上のため、オリジナルライブラリの U-238 のデータに対して修正が施されている。これが Knight 修正と呼ばれるもので、2% 濃縮 UF₄-パラフィンブロックの実験を正確に再現するよう、U-238 のポテンシャル散乱断面積データを補正したものである⁽⁷⁾。元来、高速体系用に開発されたライブラリではあるが、この Knight 修正によって汎用のものとなった。

(2) GAM-THERMOS 123 群ライブラリ

GAM-THERMOS 123 群ライブラリは、高速エネルギー領域用 GAM-II コード⁽⁸⁾ 付属ライブラリ及び熱エネルギー領域用 THERMOS コード⁽⁹⁾ 付属ライブラリからなる混成ライブラリである。群構造は表 3-1 に示すが、高速 93 群+熱 30 群 (カットオフ 1.86 eV) からなる。熱領域の群構造は 1960 年代後半に ORNL の炉物理グループによって開発されたものである。高速群構造は、概ね等レサジーの構造となっ

ている。オリジナル GAM ライブラリは 1964 年に ORNL が General Atomic 社から入手したものである。ENDF/B データを SUPERTOG⁽¹⁰⁾ で処理したのも一部追加されている。THERMOS ライブラリのデータも複数のデータソースから集められたものであるが、主に BNL-325 から収集されたとオリジナル文献⁽⁸⁾には記載されている。構造材核種の大部分及び重い核種は自由ガスモデルに基づく散乱カーネルを有している。拘束水素あるいは水の散乱カーネルは、Nelkin モデル及び結晶質減速材散乱カーネルに基づいている。

ENDF/B から追加したことが明らかな核種は、Cr, Ca, Ti, Gd である。

3. 2 連続エネルギーモンテカルロコード

米国ロスアラモス国立研究所で開発された連続エネルギーモンテカルロコード MCNP⁽¹¹⁾ は現在 MCNP 4A までが公開されている。日本では 1984 年頃から遮蔽計算に使用され始めた。現在では、臨界安全解析においても世界的に最もよく使われる計算コードの一つとなっている。

MCNP の最大の特徴である連続エネルギーでの中性子-核反応の取り扱いを生かして、本来の ENDF ライブラリーの代わりに日本の評価済み核データライブラリーの最新版 JENDL-3.2 を MCNP 用に編集する作業も行われている⁽¹²⁾。

以下に MCNP 4A と使用した核データライブラリーについて説明する。

3. 2. 1 MCNP 4A

MCNP は中性子、ガンマ線及び電子の輸送計算を行う多目的のモンテカルロコードである。MCNP は「記録」を意味する Tally を用いることにより、検出器の応答、フラックスの評価、そして核分裂系における固有値計算を柔軟に行うことができる。また、線源は、線源の種類、エネルギー、発生位置、方向などの指定が可能であり、線源に関する記述がかなり詳細に行えるようになっている。分散の低減についても利用者の必要に応じて多くの手法が使えるようになっている。

形状の記述は、最初に「面」を定義し、次にその「面」によって囲まれる「セル」を定義し、さらにそれらの「セル」を組み合わせることによって定義される。断面積はポイントワイズまたは多群のデータが利用可能であり、これにより他の計算コードとの比較が行える。低エネルギー中性子散乱の分子結合効果を考慮するために $S(\alpha, \beta)$ 形式の断面積データも利用可能となっている。

3. 2. 2 JENDL-3.2 核データライブラリー

1990 年に評価済み核データライブラリー JENDL-3.1 が公開され、それに基づいた MCNP 用のポイントワイズの断面積ライブラリー FSXLIB-J3⁽¹³⁾ が作成された。作成手順としては、まず、核データ処理システム NJOY コード⁽¹⁴⁾ を用いて ACE (A Compact ENDF) フォーマットに変換する。次に、このフォーマットの断面積データを MCNP ライブラリー編集・検証コード MACROS⁽¹³⁾ を用いて連続エネルギー断

面積ライブラリーFSXLIB-J3を作成する。FSXLIB-J3R2は1994年に公開されたJENDL-3.2をベースに作成されたものである。現在340核種が利用可能となっている。

表3-1 各断面積ライブラリのエネルギー群構造 (1/4)

Hansen-Roach	GAM-THERMOS	上限エネルギー (eV)
1	1	1.4919E+07
	2	1.3499E+07
	3	1.2214E+07
	4	1.1052E+07
	5	1.0000E+07
	6	9.0484E+06
	7	8.1873E+06
	8	7.4082E+06
	9	6.7032E+06
	10	6.0653E+06
	11	5.4881E+06
	12	4.9659E+06
	13	4.4933E+06
	14	4.0657E+06
	15	3.6788E+06
	16	3.3287E+06
	17	3.0119E+06
2		3.0000E+06
	18	2.7253E+06
	19	2.4660E+06
	20	2.2313E+06
	21	2.0190E+06
	22	1.8268E+06
	23	1.6530E+06
	24	1.4957E+06
3		1.4000E+06
	25	1.3534E+06
	26	1.2246E+06
	27	1.1080E+06
	28	1.0026E+06
4	29	9.0718E+05
		9.0000E+05
	30	8.2085E+05
	31	7.4274E+05
	32	6.7206E+05
	33	6.0810E+05
	34	5.5023E+05
	35	4.9787E+05
36	4.5049E+05	

表3-1 各断面積ライブラリのエネルギー群構造 (2/4)

Hansen-Roach	GAM-THERMOS	上限エネルギー(eV)
5	37	4.0762E+05
		4.0000E+05
	38	3.6883E+05
	39	3.3373E+05
	40	3.0197E+05
	41	2.7324E+05
	42	2.4724E+05
	43	2.2371E+05
	44	2.0242E+05
	45	1.8316E+05
	46	1.6573E+05
	47	1.4996E+05
	48	1.3569E+05
	49	1.2277E+05
6	50	1.1109E+05
		1.0000E+05
	51	8.6517E+04
	52	6.7379E+04
	53	5.2475E+04
	54	4.0868E+04
	55	3.1828E+04
	56	2.4788E+04
7	57	1.9305E+04
		1.7000E+04
	58	1.5034E+04
	59	1.1709E+04
	60	9.1188E+03
	61	7.1017E+03
	62	5.5308E+03
	63	4.3074E+03
8	64	3.3546E+03
		3.0000E+03
	65	2.6126E+03
	66	2.0347E+03
	67	1.5846E+03
	68	1.2341E+03
	69	9.6112E+02
	70	7.4852E+02
71	5.8295E+02	

表 3-1 各断面積ライブラリのエネルギー群構造 (3/4)

Hansen-Roach	GAM-THERMOS	上限エネルギー (eV)
9		5.5000E+02
	72	4.5000E+02
	73	3.5357E+02
	74	2.7536E+02
	75	2.1445E+02
	76	1.6702E+02
	77	1.3007E+02
	78	1.0130E+02
10		1.0000E+02
	79	7.8893E+01
	80	6.1442E+01
	81	4.7851E+01
	82	3.7267E+01
11		3.0000E+01
	83	2.9023E+01
	84	2.2603E+01
	85	1.7603E+01
	86	1.3710E+01
	87	1.0677E+01
12		1.0000E+01
	88	8.3153E+00
	89	6.4760E+00
	90	5.0435E+00
	91	3.9279E+00
	92	3.0590E+00
13		3.0000E+00
	93	2.3824E+00
	94	1.8600E+00
	95	1.7100E+00
	96	1.5600E+00
	97	1.4400E+00
	98	1.2900E+00
	99	1.1250E+00
14	100	1.0000E+00
	101	8.7600E-01
	102	7.7600E-01
	103	6.5000E-01
	104	5.5000E-01

表3-1 各断面積ライブラリのエネルギー群構造 (4/4)

Hansen-Roach	GAM-THERMOS	上限エネルギー (eV)
15	105	4.5000E-01
		4.0000E-01
	106	3.5000E-01
	107	3.0000E-01
	108	2.5000E-01
	109	2.0000E-01
	110	1.8000E-01
	111	1.6000E-01
	112	1.4000E-01
	113	1.2000E-01
16	114	1.0000E-01
	115	8.0000E-02
	116	7.0000E-02
	117	6.0000E-02
	118	5.0000E-02
	119	4.0000E-02
	120	3.0000E-02
	121	2.0000E-02
	122	1.5000E-02
	123	1.0000E-02

4. 結果と考察

4. 1 TCA実験解析

4. 1. 1 解析ケース

TCAでのMOX燃料の実験は2.1で示した通り、燃料棒を格子板によって炉心タンク内に正方格子状に配列し、タンク内の水位を調節することによって臨界を達成する実験である。

実験は、燃料棒配列と燃料棒ピッチをパラメータとして数多く行われているが、ここでは、燃料棒ピッチすなわち体系の減速状態が解析精度に与える影響をみるために、表4-1に示す4ケースを解析の対象とした。

表4-1 TCA実験解析ケース

ケース	格子名	燃料棒配列	燃料棒ピッチ (cm)	臨界水位 (cm)	実験日
1	2.42 PU	22×22	1.825	69.41	1972.6.5
2	2.98 PU	22×22	1.956	56.88	1973.6.6
3	4.24 PU	22×22	2.225	51.74	1974.6.6
4	5.55 PU	22×22	2.474	58.08	1973.6.6

4. 1. 2 解析結果

SCALEコードシステム(計算コード:KENO-V.a、ライブラリ:HANSEN-ROACH およびGAM-THERMOS)および連続エネルギーモンテカルロ計算(計算コード:MCNP、ライブラリ:JENDL-3.2)により解析した結果を表4-2及び図4-1に示す。

表4-2 TCA 実験解析結果

ケース	燃料棒ピッチ (cm)	解析結果 $k_{\text{eff}} \pm \sigma$		
		KENO-V.a HANSEN-ROACH	KENO-V.a GAM-THERMOS	MCNP JENDL-3.2
1	1.825	0.992 ± 0.004	0.995 ± 0.004	0.998 ± 0.002
2	1.956	1.004 ± 0.004	1.003 ± 0.004	0.998 ± 0.002
3	2.225	1.004 ± 0.004	1.008 ± 0.004	1.000 ± 0.002
4	2.474	1.018 ± 0.004	1.003 ± 0.004	0.999 ± 0.002

表4-2の解析結果より、MCNPでは、実効増倍率は1.0に非常に近い値を示しており、また、燃料棒ピッチに対する依存性も殆ど見られない。その他の解析結果も、実効増倍率として1.0に近い値を示しており、妥当な結果を与えているといえる。ただし、MCNP以外では解析結果に燃料棒ピッチの依存性が見られ、燃料棒ピッチが大きくなるにつれて、解析結果も大きくなる傾向がある。とりわけ過減速体系でのHANSEN-ROACHの解析結果は系統的に過大評価となる傾向がみられるが、その程度は約1~2% Δk である。

4. 2 無限配列燃料の解析

4. 1に示した結果及びTCAのMOX燃料の他の燃料配列や他の実験日での実験結果に対して行った計算結果⁽¹⁵⁾によると、MCNPとJENDL-3.2の組み合わせは、燃料棒ピッチが1.825及び1.956 cmの体系に対しては約0.3% Δk 過小評価している。一方、燃料棒ピッチが2.225及び2.474 cmの体系に対しては、実効増倍率はほぼ1.0であった。従って、MCNPとJENDL-3.2の組み合わせは、MOX燃料の解析に対して他の計算コードやライブラリーの検証に用いることができるだけの精度を有していると言える。そこで以下にMCNPの結果を参照値として、SCALEコードシステムの適用性の確認をMOX燃料の無限配列体系に対して行う。

4. 2. 1 無限増倍率

2. 2で示した、TCAのMOX燃料を用いた無限長セル計算による無限増倍率を、SCALEコードシステム(計算コード:XSDRNPM、ライブラリ:HANSEN-ROACHおよびGAM-THERMOS)および連続エネルギーモンテカルロ計算(計算コード:MCNP、ライブラリ:JENDL-3.2)により解析した結果を表4-3及び図4-2~6に示す。

表4-3よりSCALEコードシステム(計算コード:XSDRNPM、ライブラリ:GAM-THERMOS)による解析結果と連続エネルギーモンテカルロ計算(計算コード:MCNP、ライブラリ:JENDL-3.2)を用いた解析結果は非常によく一致している。

SCALE コードシステムにおいてライブラリとして HANSEN-ROACH を用いた場合は、燃料棒ピッチに解析結果が依存しており、燃料棒ピッチが大きくなるにつれ、解析結果が連続エネルギーモンテカルロ計算の解析結果に比較して大きくなる傾向がある。すなわち、過減速体系（燃料棒ピッチ約 2cm 以上）では、連続エネルギーモンテカルロ計算の解析結果よりも系統的に過大評価となる傾向がみられるが、その程度は約 1~2% Δk である。この傾向は富化度が低い領域（Pu 富化度 3.0wt% 以下）でより顕著になっている。この理由については後述する。

一方、富化度が 12wt% で、燃料棒ピッチが狭い体系（中性子スペクトルの硬い体系）では、HANSEN-ROACH を用いた結果は MCNP の結果より約 0.7% Δk 過小評価している。

表 4-3 無限配列燃料の解析結果（無限増倍率）

Pu 富化度 (wt%)	燃料棒ピッチ (cm)	解析結果 (無限増倍率)		
		XSDRNPM HANSEN-ROACH	XSDRNPM GAM-THERMOS	MCNP JENDL-3.2
0.0	1.630	0.861	0.839	0.84429 \pm 0.00083
	1.825	0.793	0.771	0.77736 \pm 0.00071
	1.956	0.745	0.723	0.72709 \pm 0.00057
	2.225	0.650	0.628	0.63120 \pm 0.00052
	2.474	0.572	0.550	0.55284 \pm 0.00050
1.0	1.630	1.202	1.179	1.18599 \pm 0.00109
	1.825	1.179	1.156	1.16199 \pm 0.00113
	1.956	1.149	1.125	1.12949 \pm 0.00104
	2.225	1.070	1.044	1.04766 \pm 0.00091
	2.474	0.989	0.961	0.96411 \pm 0.00090
3.01	1.630	1.331	1.322	1.32701 \pm 0.00138
	1.825	1.357	1.347	1.34745 \pm 0.00121
	1.956	1.355	1.344	1.34392 \pm 0.00135
	2.225	1.323	1.305	1.30690 \pm 0.00122
	2.474	1.271	1.246	1.24795 \pm 0.00093
6.0	1.630	1.365	1.363	1.36463 \pm 0.00147
	1.825	1.413	1.413	1.41256 \pm 0.00113
	1.956	1.428	1.426	1.42567 \pm 0.00134
	2.225	1.428	1.418	1.41769 \pm 0.00136
	2.474	1.400	1.383	1.38302 \pm 0.00104

表4-3 無限配列燃料の解析結果（無限増倍率）（続き）

Pu 富化度 (wt%)	燃料棒ピッチ (cm)	解析結果 (無限増倍率)		
		XSDRNPM HANSEN-ROACH	XSDRNPM GAM-THERMOS	MCNP JENDL-3.2
12.0	1.630	1.379	1.385	1.38632±0.00142
	1.825	1.437	1.444	1.44224±0.00127
	1.956	1.462	1.467	1.46782±0.00146
	2.225	1.483	1.482	1.47894±0.00137
	2.474	1.476	1.466	1.46446±0.00127

4. 2. 2 中性子スペクトル

無限配列燃料の解析における燃料ペレット平均の中性子スペクトルについて、SCALE コードシステム（計算コード：XSDRNPM、ライブラリ：HANSEN-ROACH および GAM-THERMOS）による解析結果をそれぞれ連続エネルギーモンテカルロ計算（計算コード：MCNP、ライブラリ：JENDL-3.2）を用いた解析結果と比較した。MCNP は連続エネルギーであるため、計算された中性子スペクトルは比較対象の群構造に合わせて縮約した。検討したケースは次の通りである。

- ① 燃料棒ピッチ：1.825cm
Pu 富化度：0.0, 3.01, 12.0 wt%
- ② Pu 富化度：3.01 wt%
燃料棒ピッチ：1.630, 1.956, 2.225, 2.474cm

SCALE コードシステム（計算コード：XSDRNPM、ライブラリ：HANSEN-ROACH）による解析結果と連続エネルギーモンテカルロ計算（計算コード：MCNP、ライブラリ：JENDL-3.2）による解析結果の比較を図4-7～13に示す。SCALE コードシステムに HANSEN-ROACH ライブラリーを用いた場合には、7、8群（0.55-17 keV）と15群（0.1-0.4eV）のスペクトルがMCNPのそれと大きく異なっている。4.1及び4.2.1の計算では、過減速体系（燃料棒ピッチが2cm以上）、あるいは富化度が低い燃料に対して、HANSEN-ROACHは過大評価する傾向が見られた。このようなスペクトルが柔らかくなる体系では15群での不確かさの影響が大きくなり、これが実効増倍率を過大評価する原因であると考えられる。

また、SCALE コードシステム（計算コード：XSDRNPM、ライブラリ：GAM-THERMOS）による解析結果と連続エネルギーモンテカルロ計算（計算コード：MCNP、ライブラリ：JENDL-3.2）による解析結果の比較を図4-14～20に示す。SCALE コードシステムに GAM-THERMOS ライブラリーを用いた場合には、各々のスペクトルは全体的によく一致している。

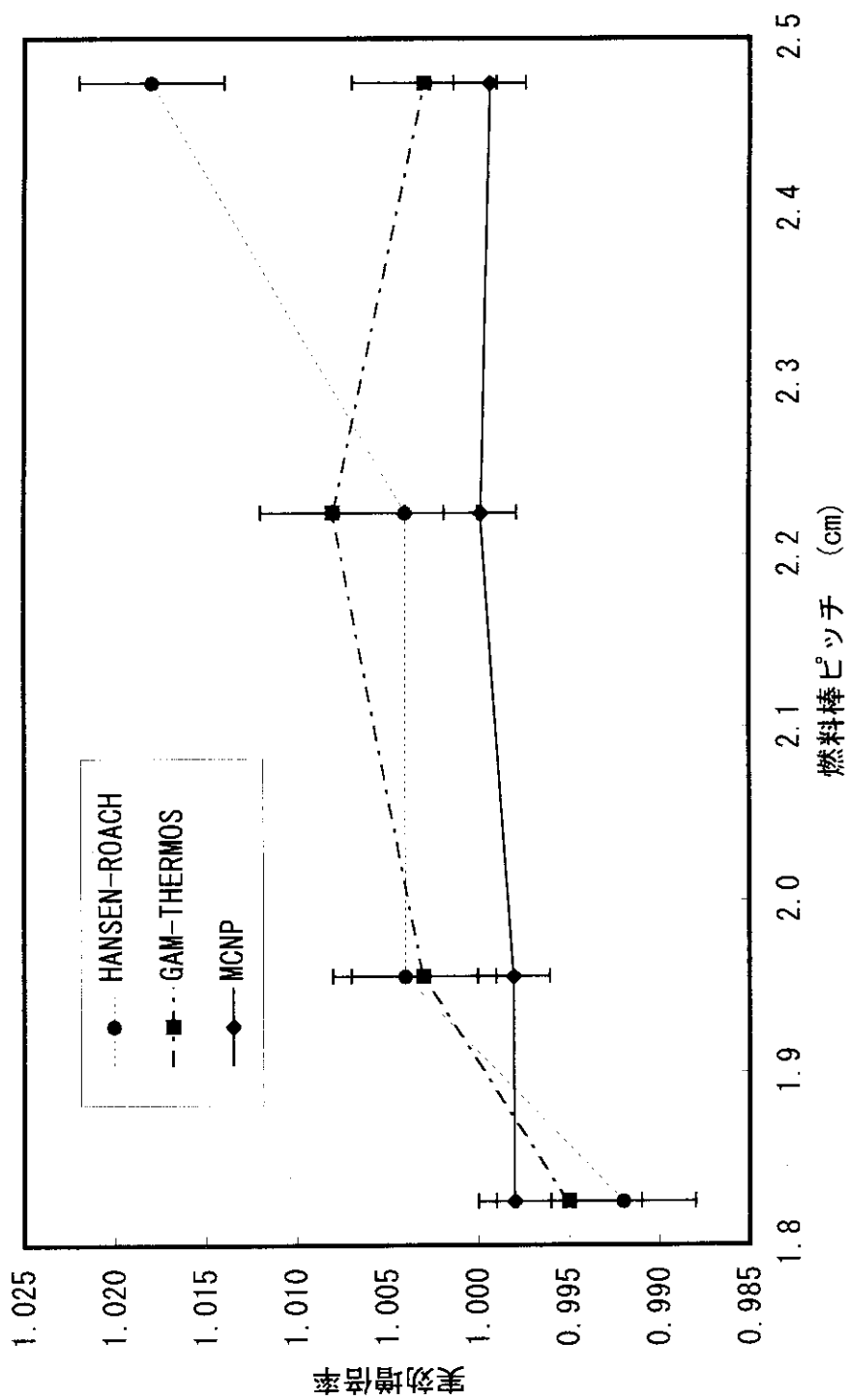


図4-1 TCA実験解析結果

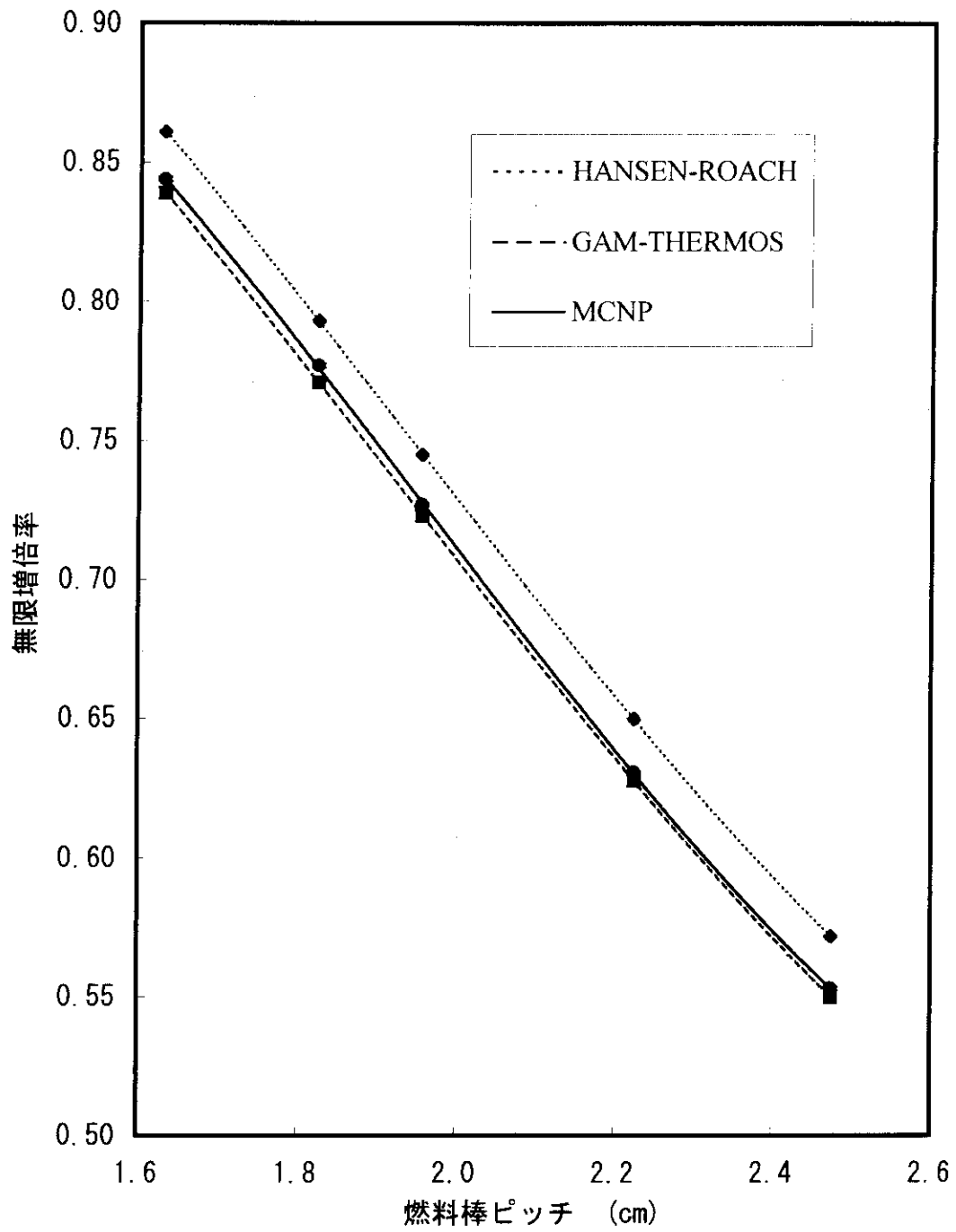


図4-2 無限増倍率計算値 (富化度0.0 wt.%)と燃料棒ピッチとの関係

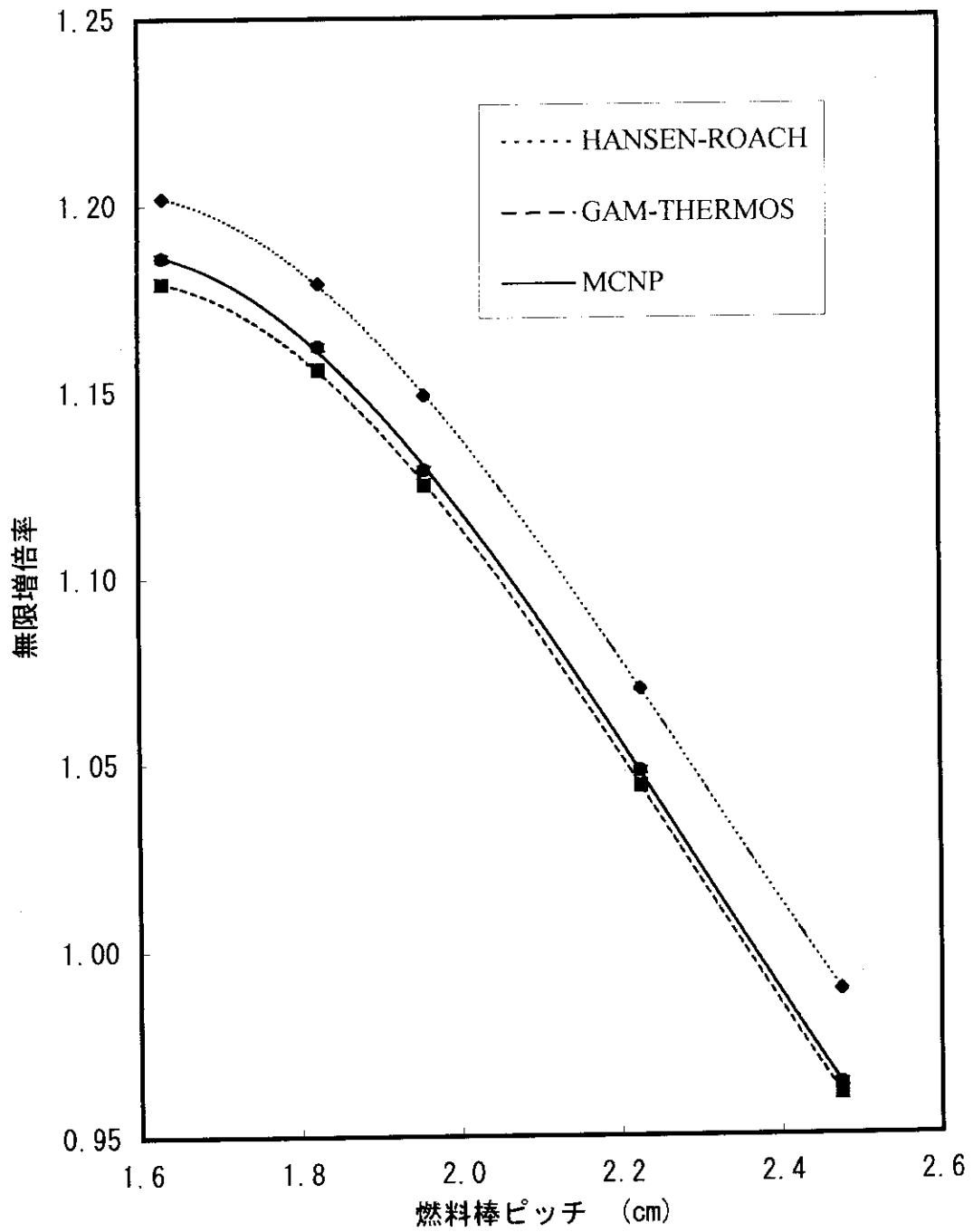


図4-3 無限増倍率計算値 (富化度1.0 wt.%)と燃料棒ピッチとの関係

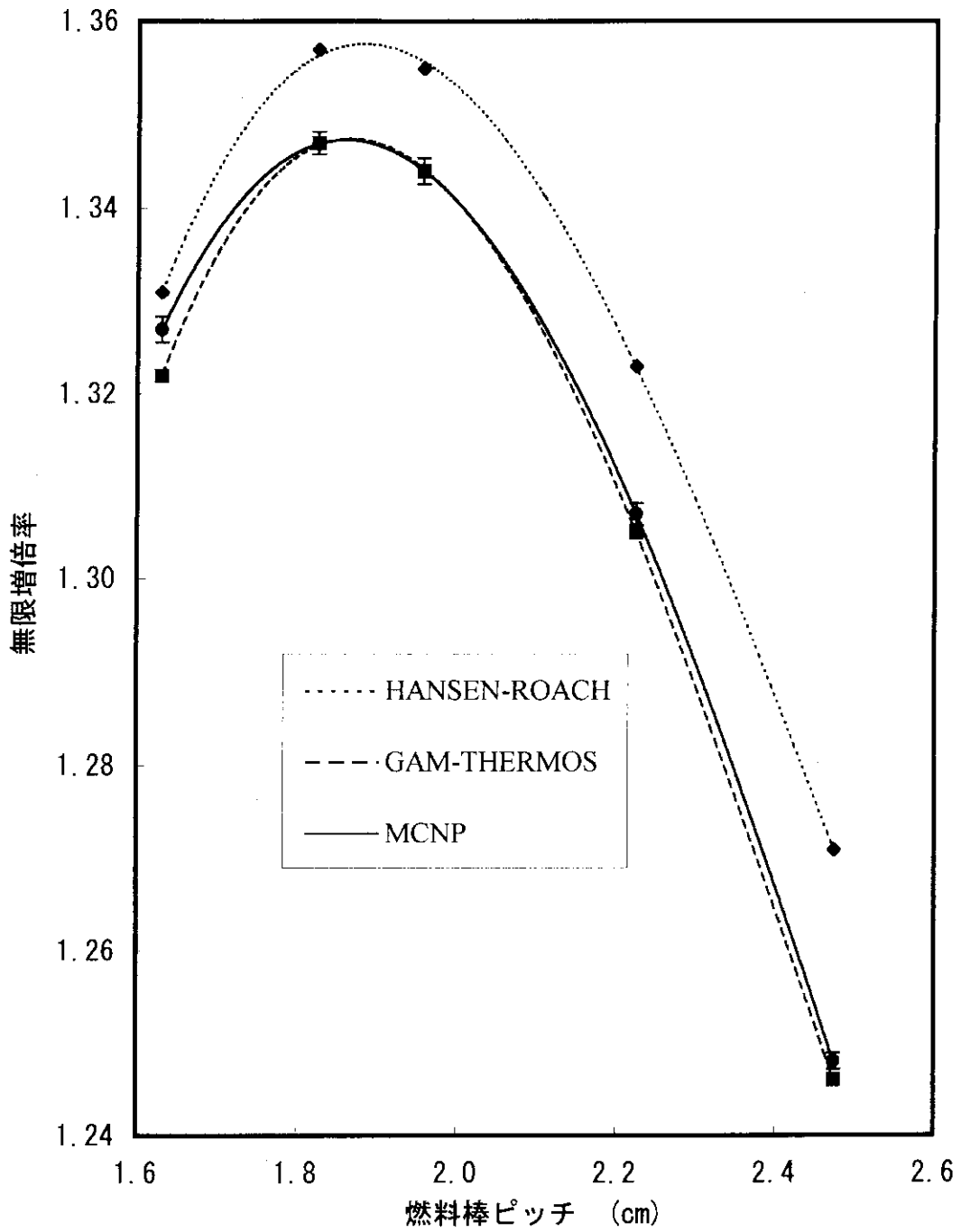


図 4-4 無限増倍率計算値 (富化度3.01 wt.%)と燃料棒ピッチとの関係

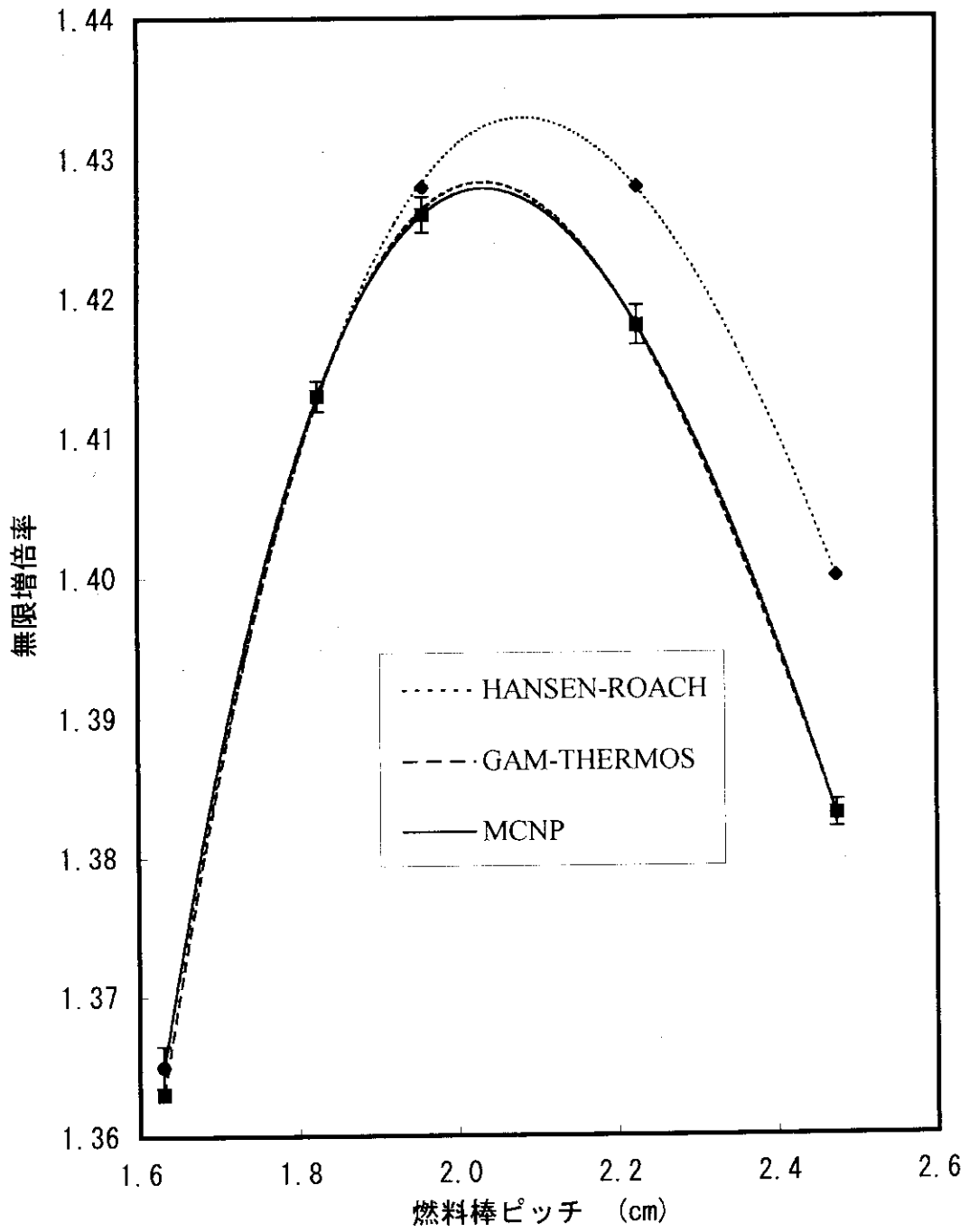


図4-5 無限増倍率計算値 (富化度6.0 wt.%)と燃料棒ピッチとの関係

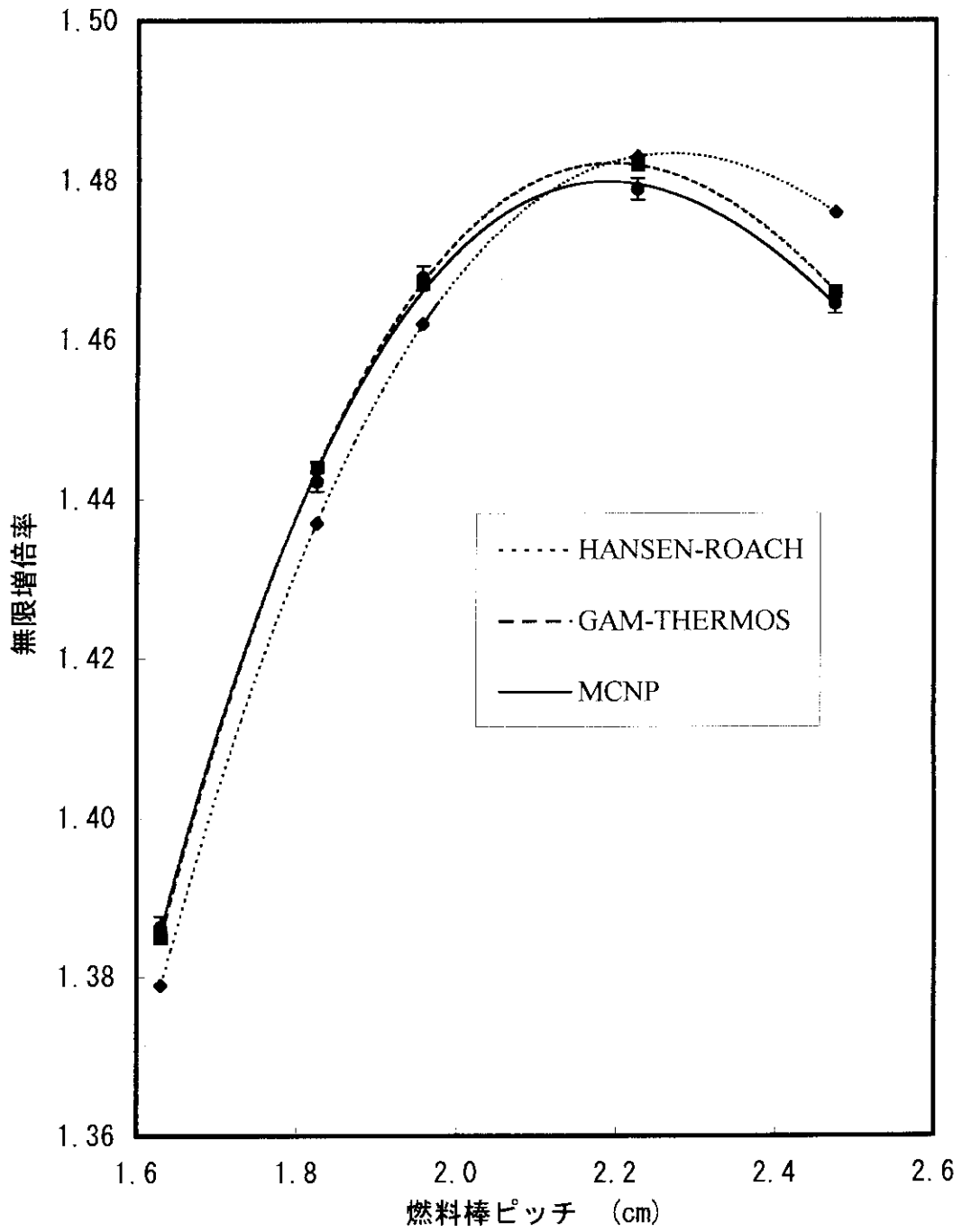
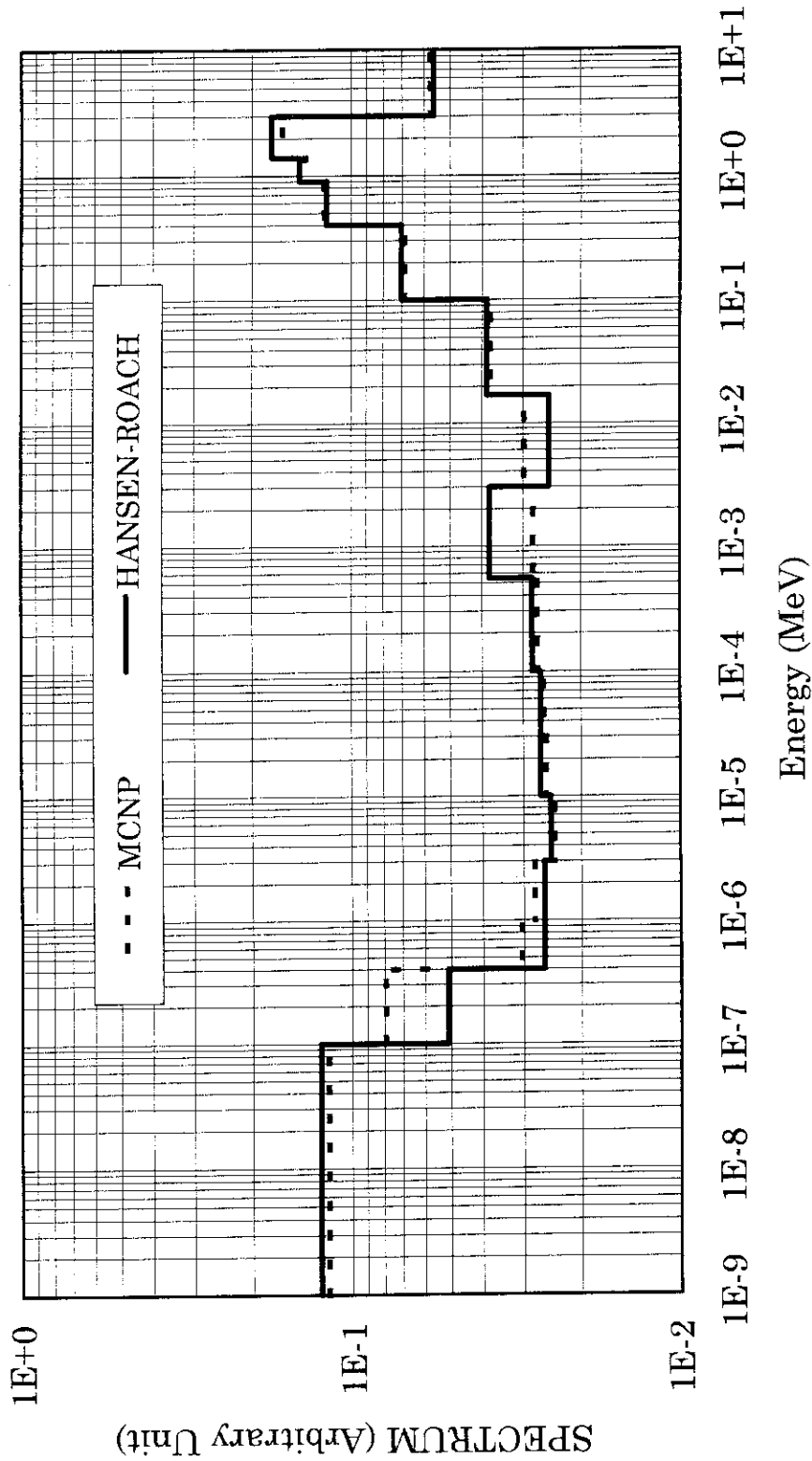


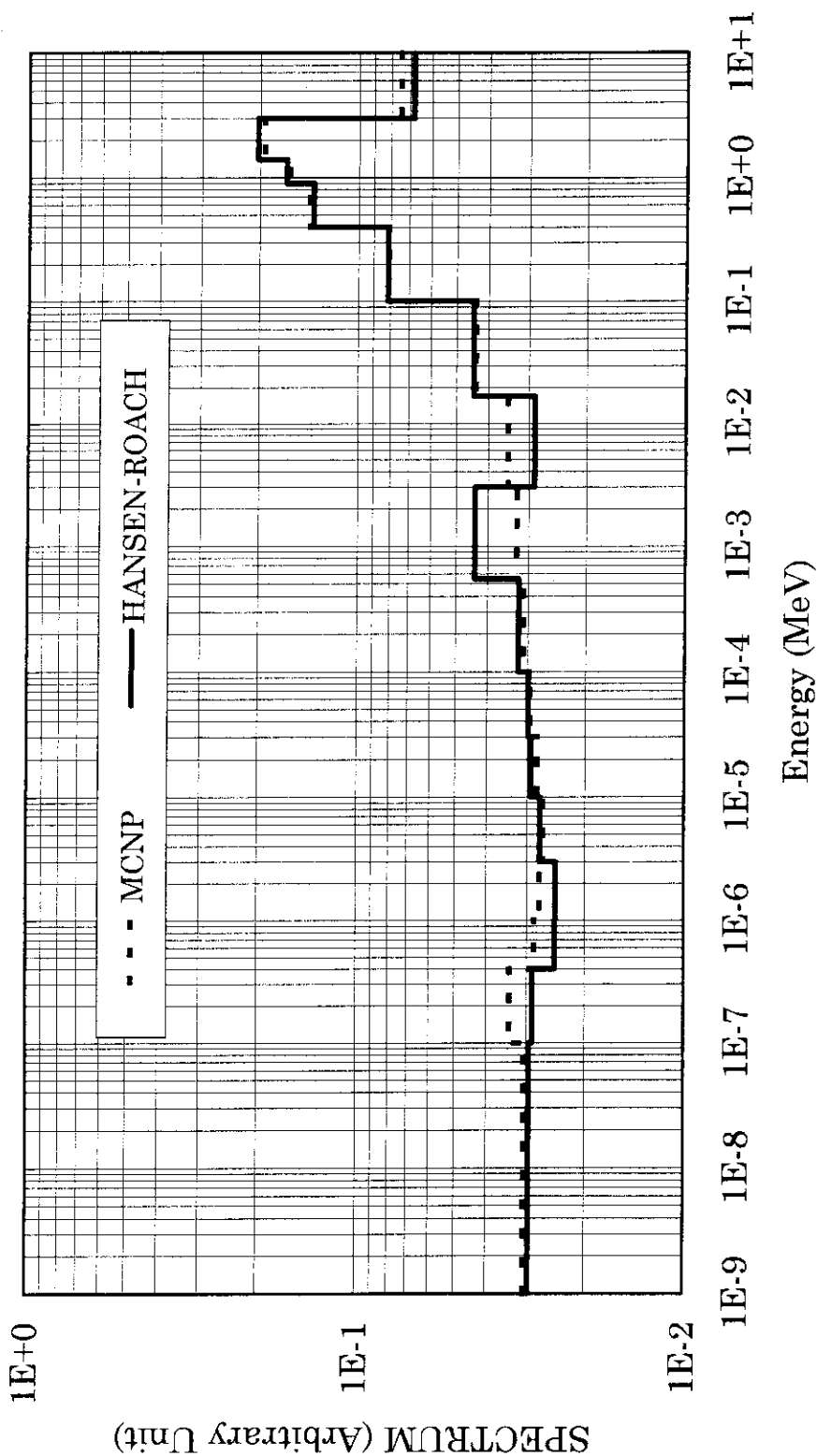
図4-6 無限増倍率計算値 (富化度12 wt.%)と燃料棒ピッチとの関係



Pu富化度：0.0wt.% 燃料棒ピッチ：1.825 cm

図4-7 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

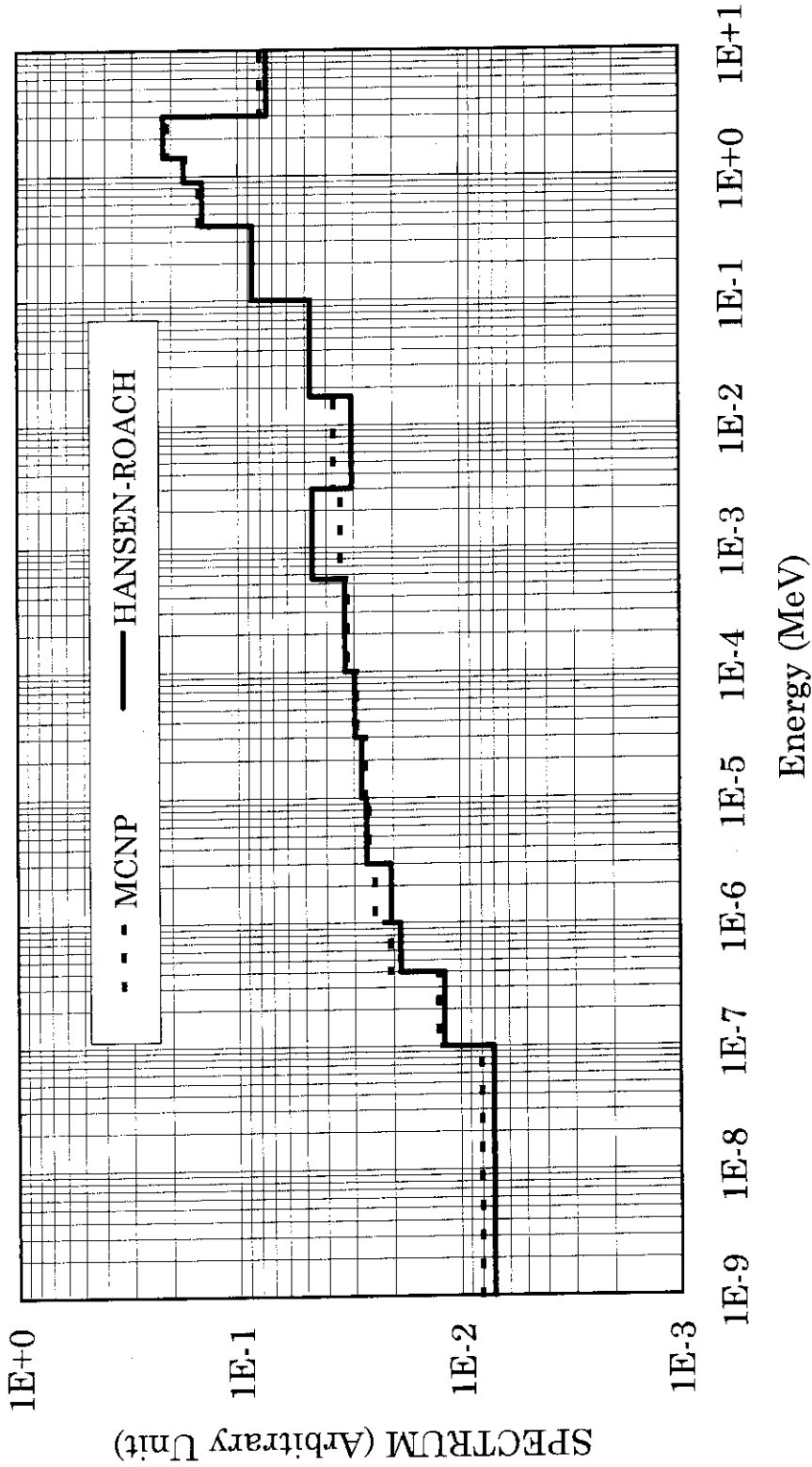
SCALEコードシステム (XSDRNPM & HANSEN-ROACH) 及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：3.01 wt.% 燃料棒ピッチ：1.825 cm

図4-8 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

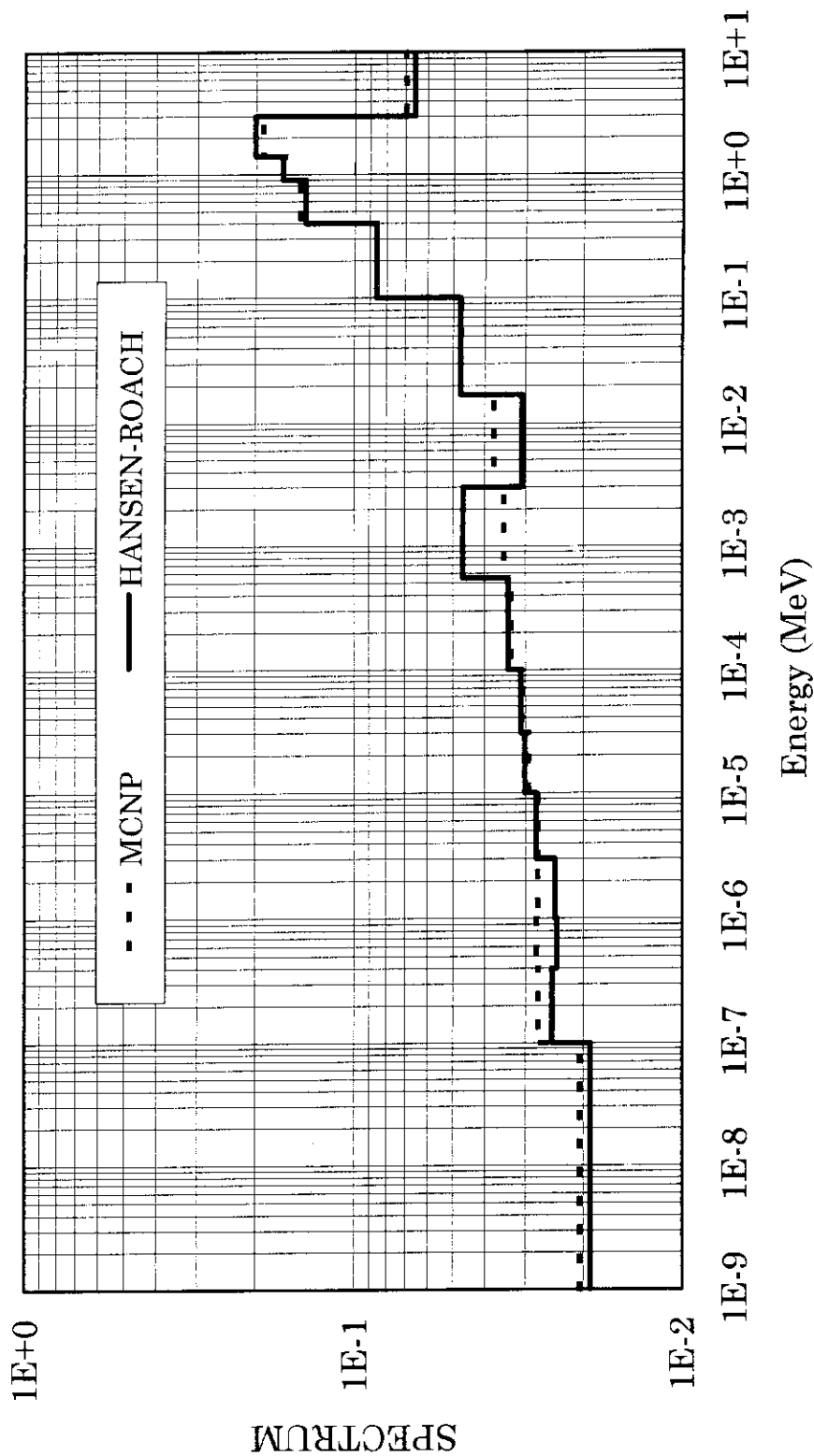
SCALEコードシステム (XSDRPM & HANSEN-ROACH)及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：12wt.% 燃料棒ピッチ：1.825 cm

図4-9 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

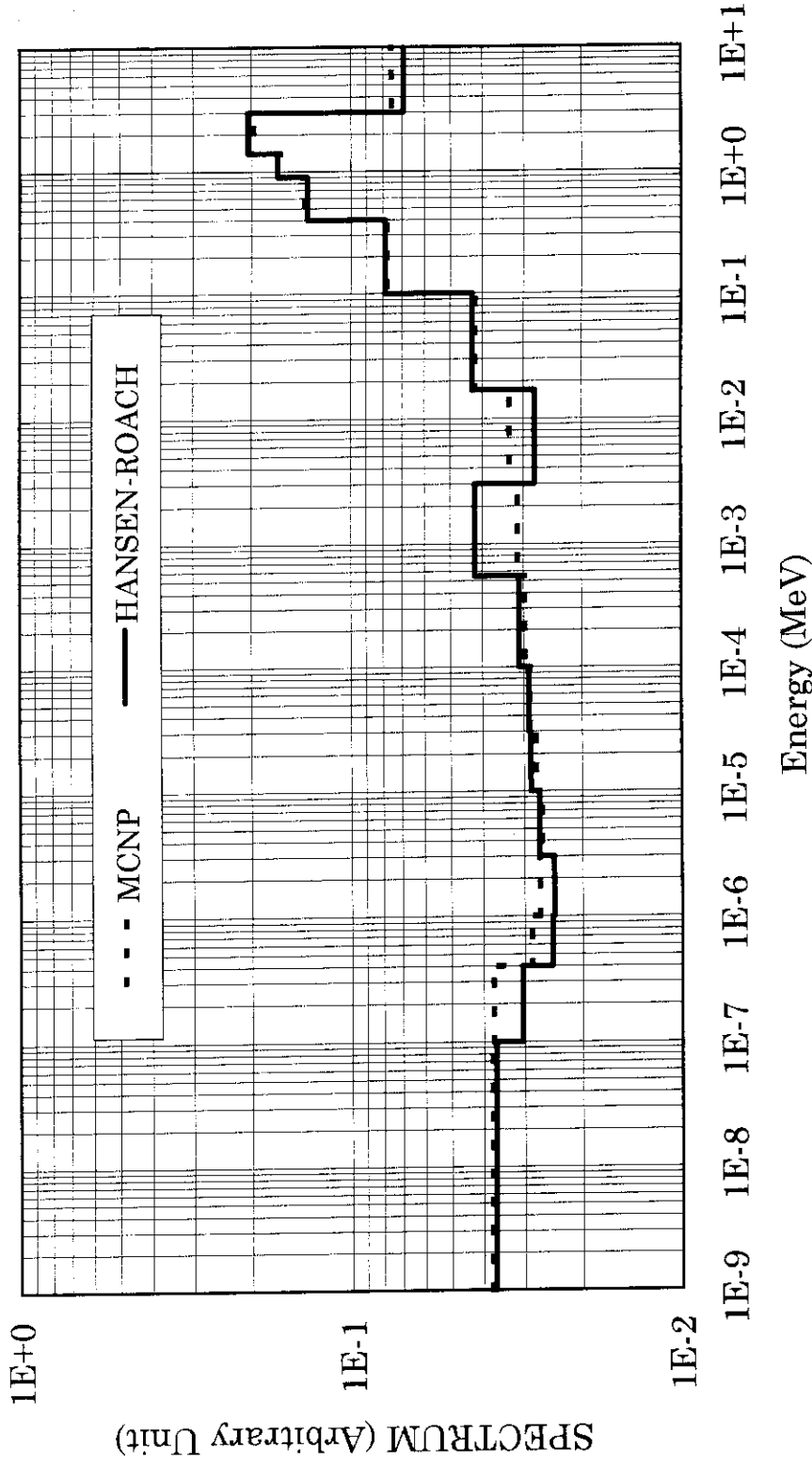
SCALEコードシステム (XSDRPM & HANSEN-ROACH) 及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：3.01 wt.% 燃料棒ピッチ：1.630 cm

図4-10 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

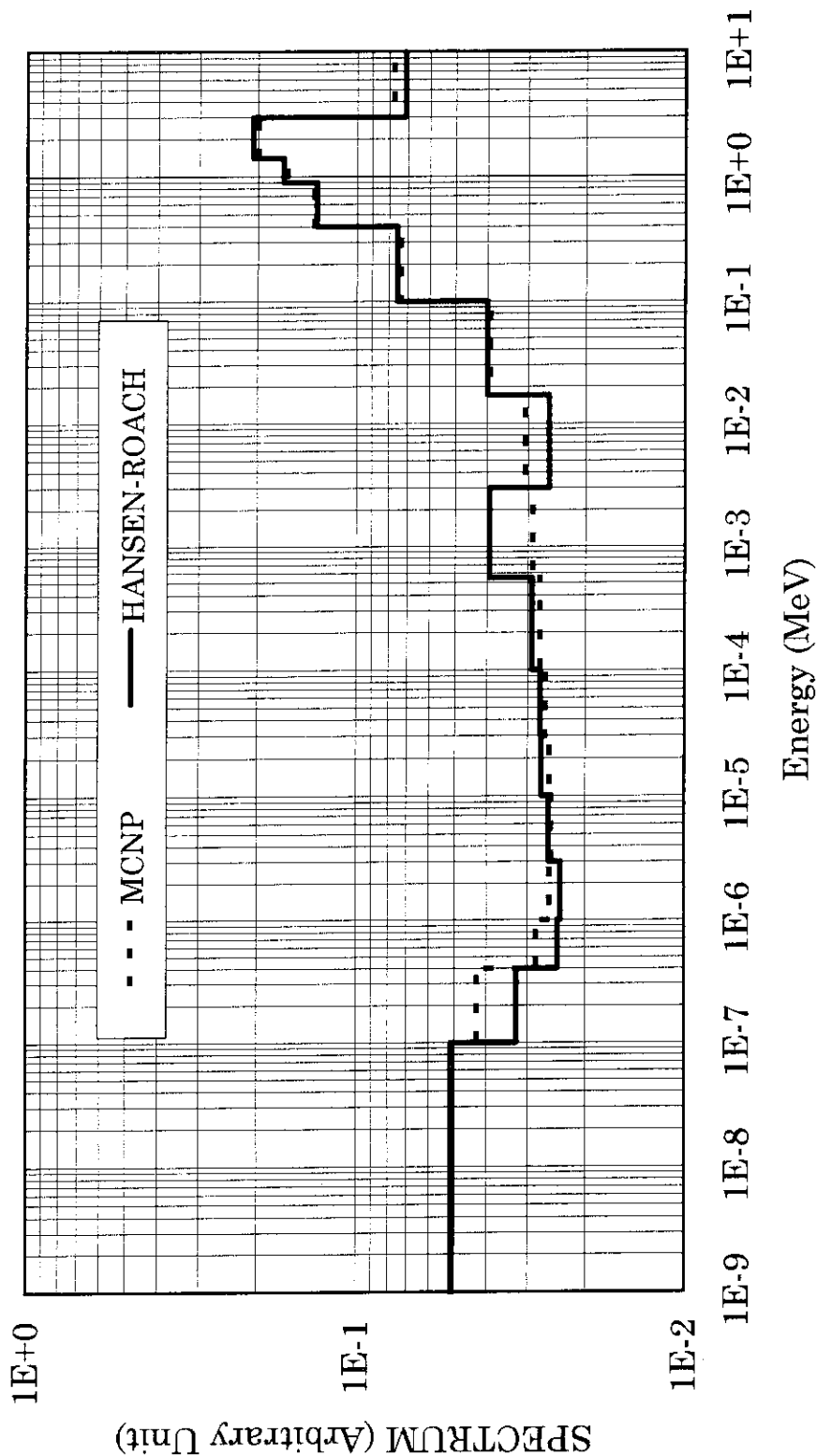
SCALEコードシステム (XSDRPM & HANSEN-ROACH)及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：3.01 wt.% 燃料棒ピッチ：1.956 cm

図4-11 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

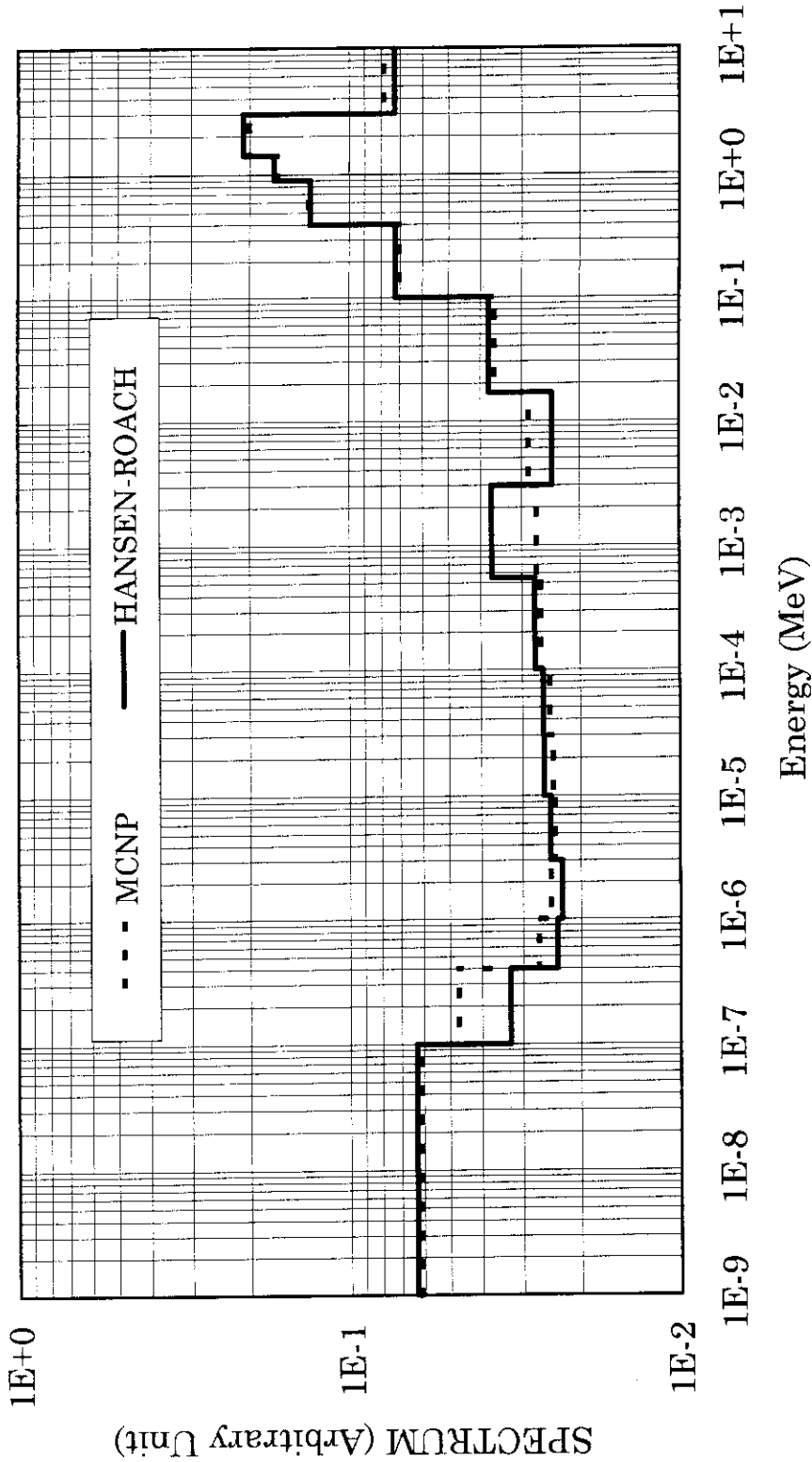
SCALEコードシステム (XSDRPM & HANSEN-ROACH)及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：3.01 wt.% 燃料棒ピッチ：2.225 cm

図4-12 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

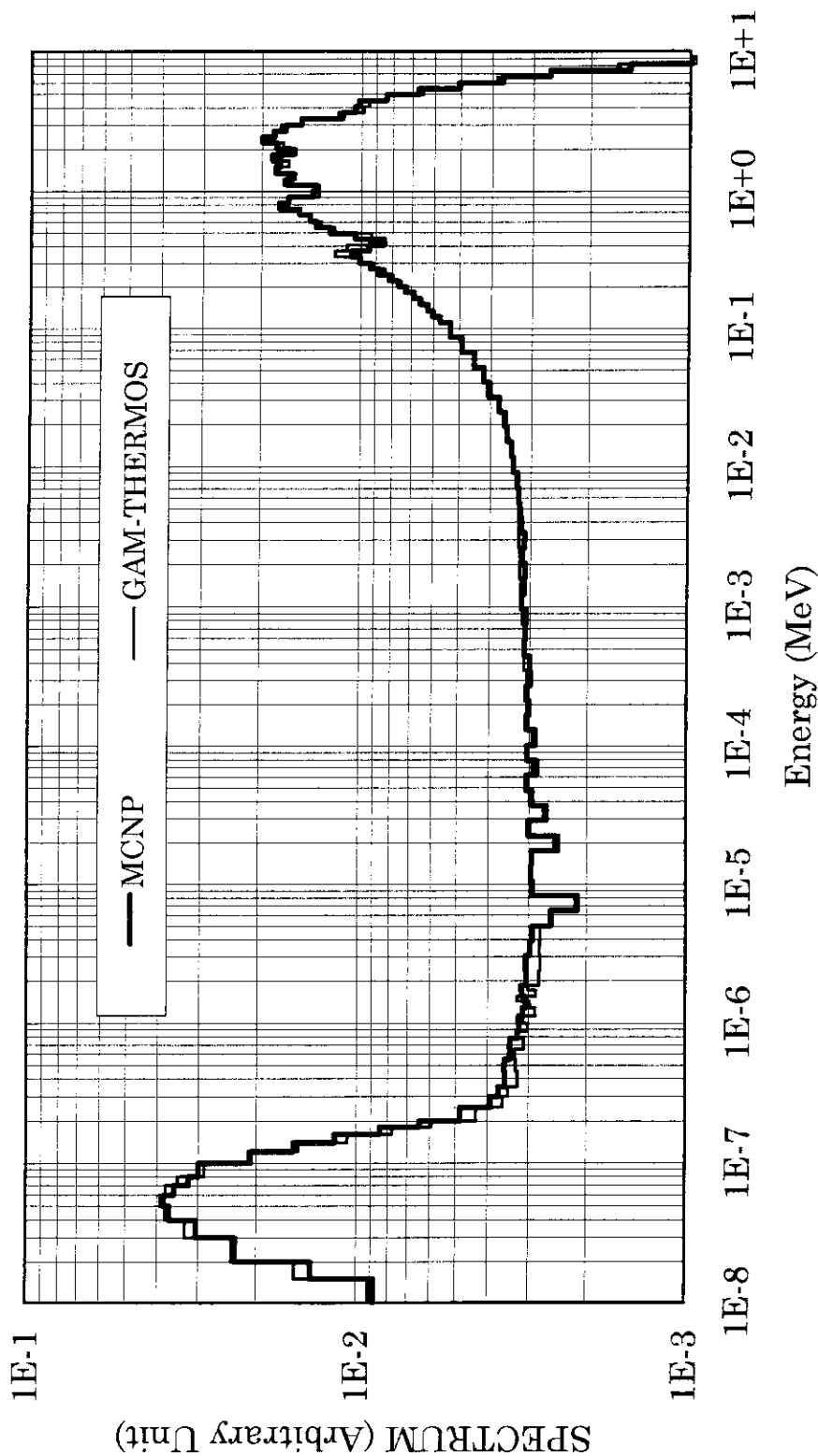
SCALEコードシステム (XSDRNP & HANSEN-ROACH) 及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



PU富化度: 3.01 wt.% 燃料棒ピッチ: 2.474 cm

図4-13 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

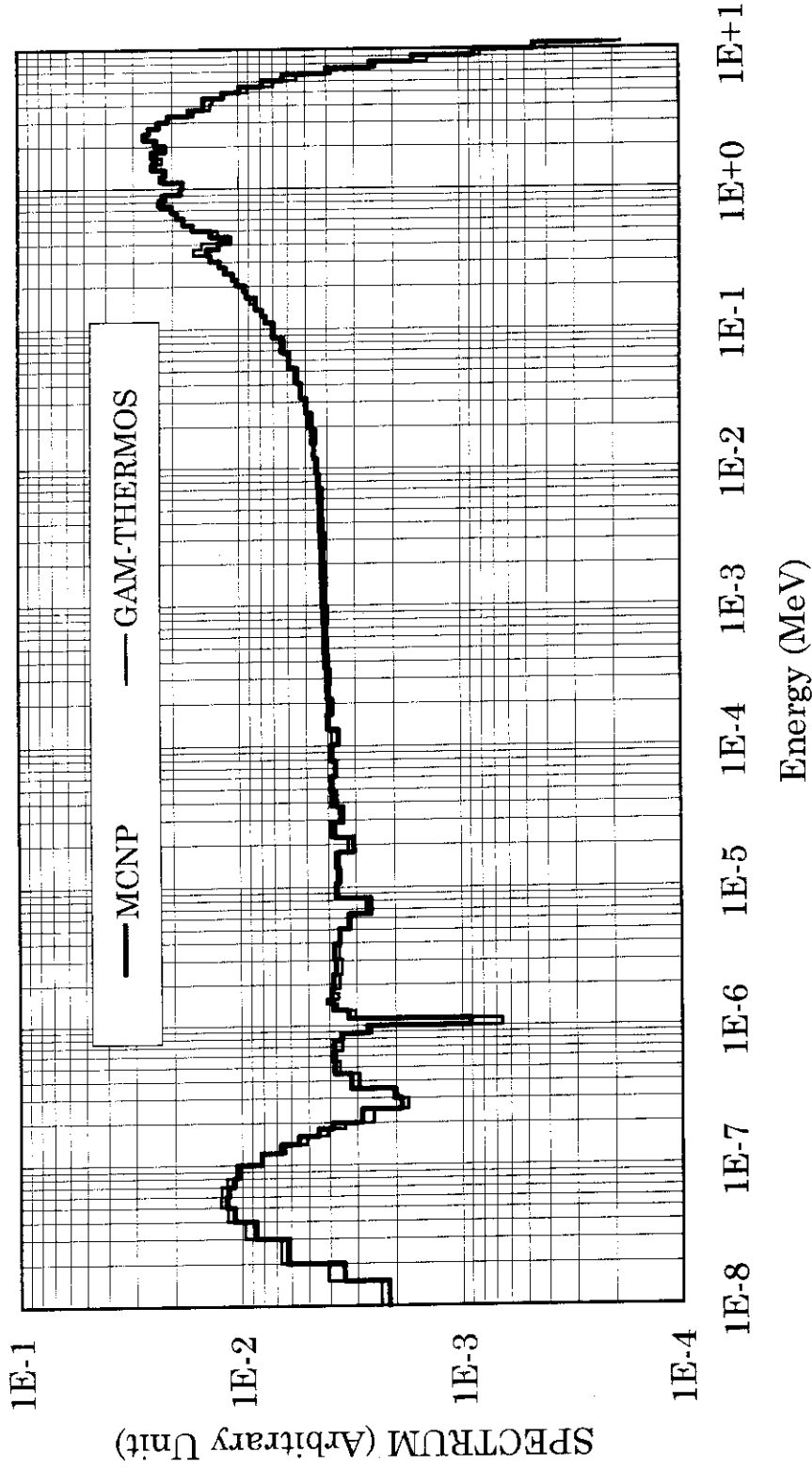
SCALEコードシステム (XSDRPM & HANSEN-ROACH) 及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度: 0.0 wt.% 燃料棒ピッチ: 1.825 cm

図4-14 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

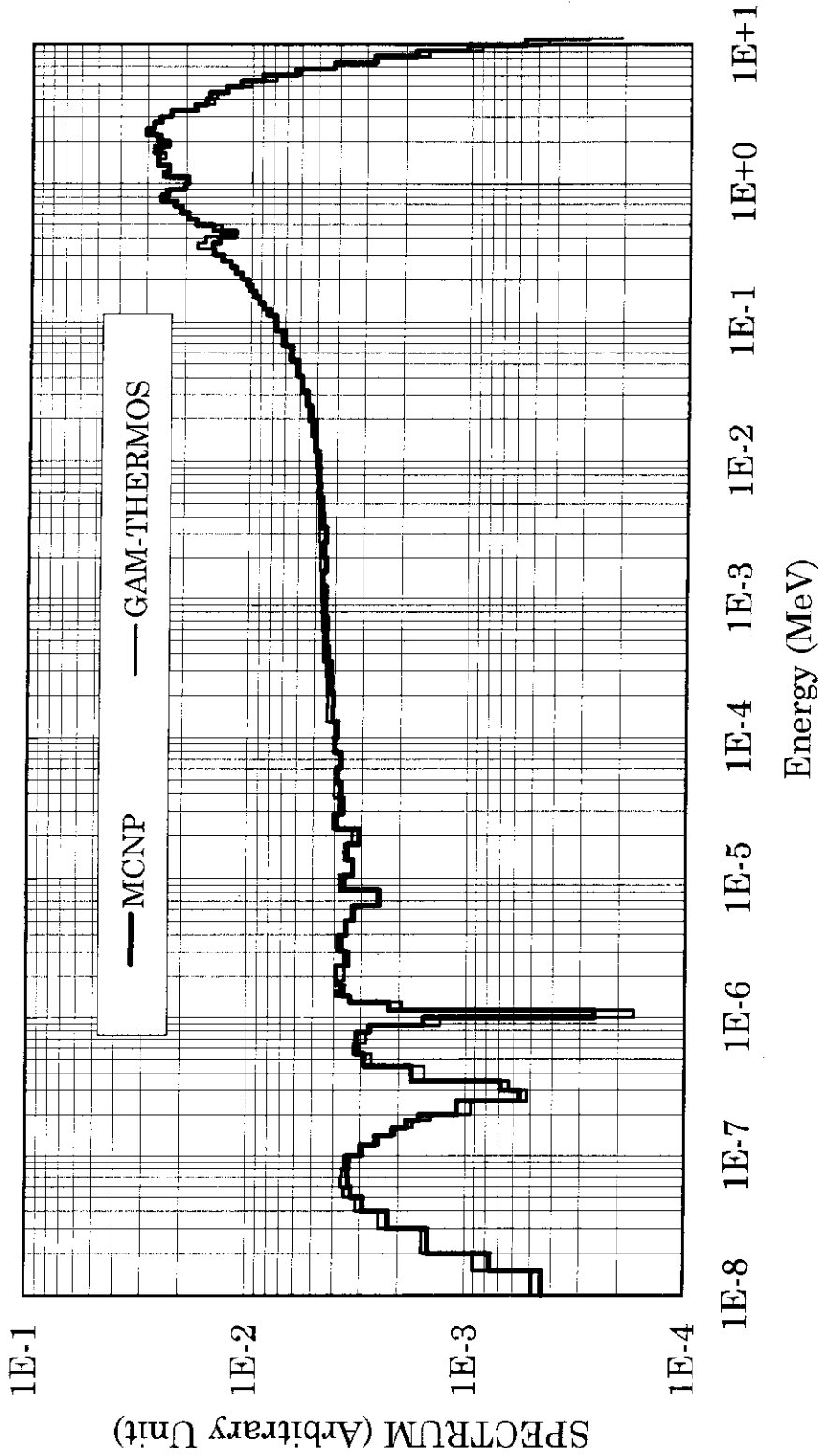
SCALEコードシステム (XSDRPM & GAM-THERMOS) 及び連続エネルギーモニターカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：3.01 wt.% 燃料棒ピッチ：1.825 cm

図 4-15 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

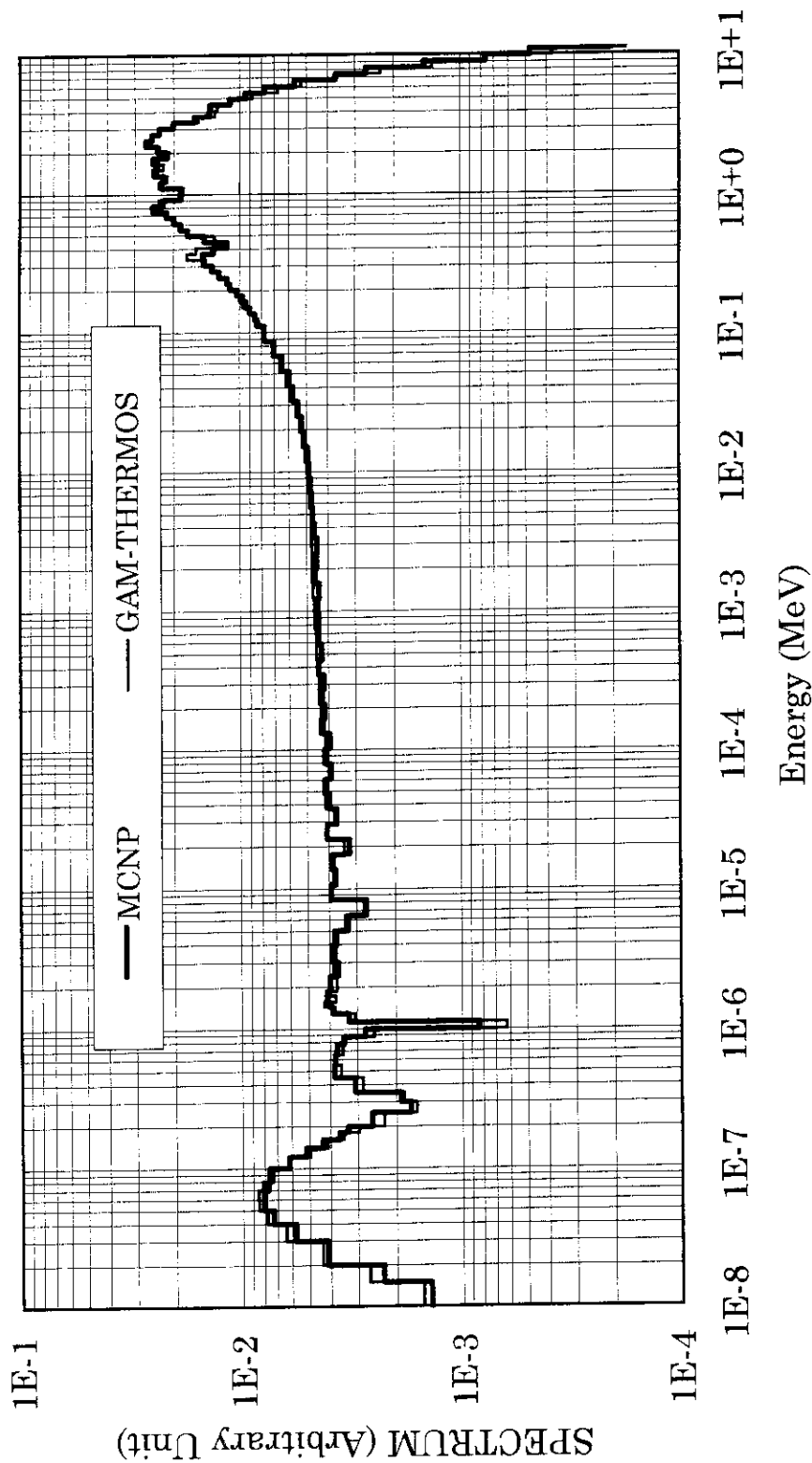
SCALEコードシステム (XSDRPM & GAM-THERMOS) 及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：12 wt.% 燃料棒ピッチ：1.825 cm

図4-16 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

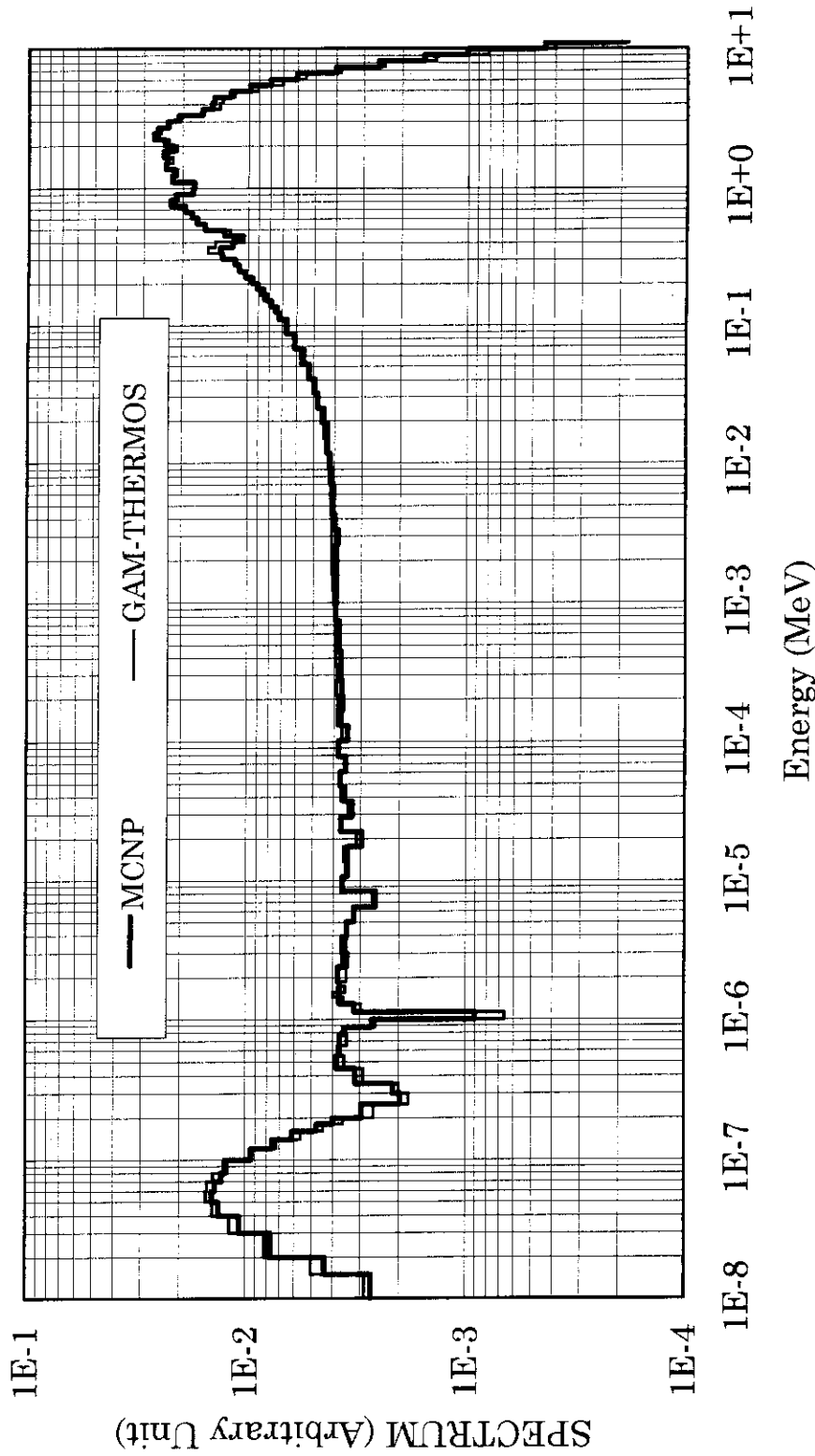
SCALEコードシステム (XSDRPM & GAM-THERMOS) 及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：3.01 wt.% 燃料棒ピッチ：1.630 cm

図 4-17 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

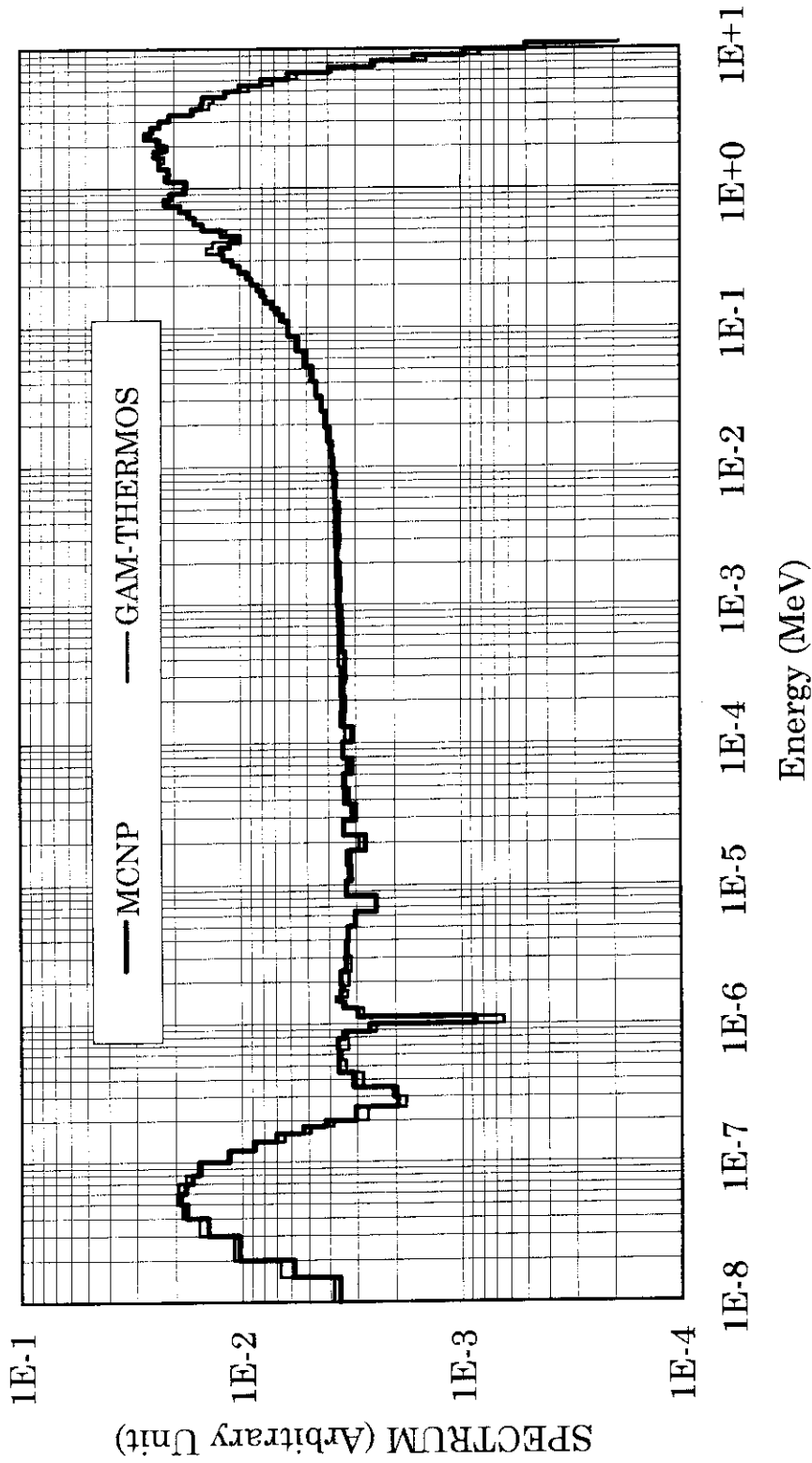
SCALEコードシステム (XSDRPM & GAM-THERMOS) 及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：3.01 wt.% 燃料棒ピッチ：1.956 cm

図4-18 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

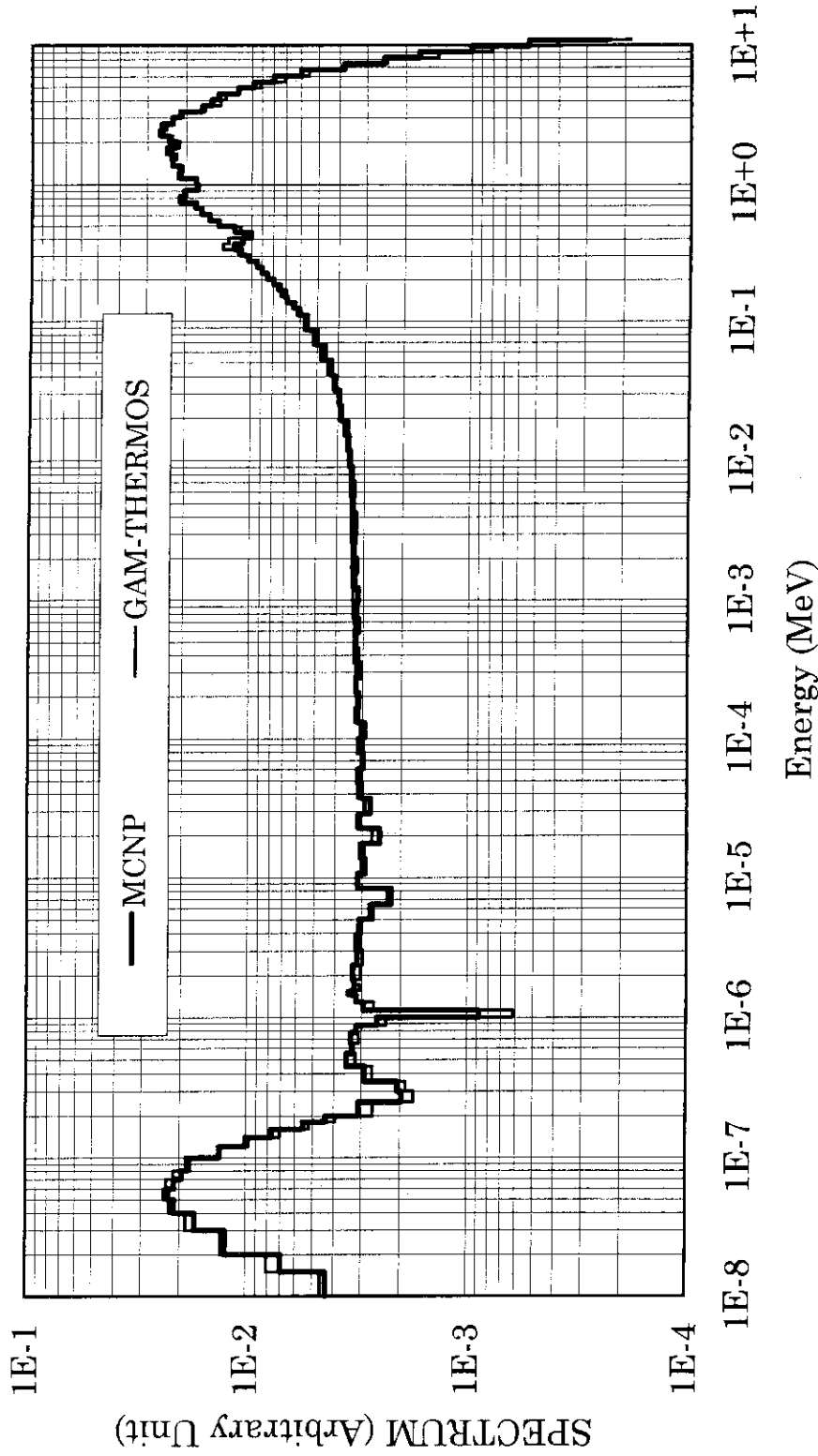
SCALEコードシステム (XSDRNPM & GAM-THERMOS)及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：3.01 wt.% 燃料棒ピッチ：2.225 cm

図4-19 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

SCALEコードシステム (XSDRNPM & GAM-THERMOS) 及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)



Pu富化度：3.01 wt.% 燃料棒ピッチ：2.474 cm

図 4-20 燃料ペレット平均の中性子スペクトルの比較

SCALEコードシステム (XSDRPM & GAM-THERMOS) 及び連続エネルギーモンテカルロ (MCNP & JENDL-3.2)

5. 結 論

ウラン燃料輸送体系の臨界解析によく用いられている SCALE コードシステムの MOX 燃料輸送体系への適用性を調べるため、一連の解析検討を行った。

MOX 燃料棒を用いた臨界実験の解析及び MOX 燃料棒の無限配列体系に対する解析を行った結果、GAM-THERMOS 123 群ライブラリを用いた場合には、SCALE コードシステムの解析結果は連続エネルギーモンテカルロ法に基づく詳細解析のものとはほとんど同等であり、臨界実験の再現精度も燃料棒ピッチにほとんど依存せず、良好なものであった。

HANSEN-ROACH 16 群ライブラリを用いた場合の中性子増倍率計算値は、低富化度 (Pu 富化度 3.0wt% 程度以下) 及び過減速体系 (燃料棒ピッチ約 2 cm 以上) で詳細解析値よりも系統的に過大評価となる傾向がみられたが、その程度は約 1~2% Δk である。一方、富化度 12 wt% で燃料棒ピッチが 2 cm 以下の場合では、HANSEN-ROACH 16 群ライブラリの結果は詳細解析値よりも約 0.7% Δk 過小評価している。

以上の結果から、GAM-THERMOS 123 群ライブラリを用いた場合には、SCALE コードシステムの MOX 燃料輸送体系への適用性はウラン燃料輸送体系に適用する場合と同等のものであると考えられる。

一方、HANSEN-ROACH 16 群ライブラリを用いた場合には、MOX 燃料輸送体系の解析精度としては劣るものの、高富化度の場合を除けば、誤差の傾向は安全側である。

参 考 文 献

- (1) S.M. Bowman et al., "Validation of SCALE-4 for LWR Fuel in Transportation and Storage Cask Conditions," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **62**, 338 (1990).
- (2) H. Tsuruta et al., "Critical Sizes of Light-Water Moderated UO₂ and PuO₂-UO₂ Lattices," JAERI 1254 (1978).
- (3) RSIC COMPUTER CODE COLLECTION, "SCALE4: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation," CCC-545(1990)
- (4) N.M.Greene and L.M.Petrie, "XSDRNPM-S: A One-Dimensional Discrete Ordinates Code for Transport Analysis," CCC-545 Section F3 (1990)
- (5) L.M.Petrie and N.F.Landers, "KENO-V.a: An Improved Monte Carlo Criticality Program with Supergrouping," CCC-545 Section F11 (1990)
- (6) G.E.Hansen and W.S.Roach, "Six and Sixteen Group Cross-Sections for Fast and Intermediate Critical Assemblies," LA-2543-MS (1961)
- (7) J.T.Mihalezo et al., "Preliminary Report on 2% ²³⁵U Enriched UF₄-C₂₅H₂₅ Critical Assemblies," ORNL/CF-59-4-210 (1956)
- (8) G.D.Joanou and J.S.Dudek, "GAM-II: A B₃ Code for the Calculation of Fast Neutron Spectra and Associated Multigroup Constants," GA-4265(1963)
- (9) H.C.Honeck, "THERMOS: A Thermalization Transport Theory Code for Reactor Lattice Calculation," BNL-5826(1961)
- (10) R.Q.Wright et al., "SUPERTO: A Program to Generate Fine Group Constants and Pn Scattering Matrices from ENDF/B," ORNL/TM-2679(1969)
- (11) J. F. Briesmeister (Ed.), "MCNP - A General Monte Carlo N - Particle Transport Code, Version 4A," LA - 12625 (1993).
- (12) K. Kosako et al., "FSXLIB - J3R2: A Continuous Energy Cross Section Library for MCNP Based on JENDL-3.2," JAERI-Data/Code 94-020 (1994).
- (13) K. Kosako et al., "FSXLIB - J3: A Continuous Energy Cross Section Library for MCNP Based on JENDL-3," JAERI-M 91-187 (1991).
- (14) R. E. MacFarlane et al., "The NJOY Nuclear Data Processing System," LA-9303-M (ENDF-324) (1982).
- (15) T. Yamamoto et al., "Critical Arrays of Mixed Plutonium-Uranium Fuel Rods with Water-to-Fuel Volume Ratios Ranging from 2.4 to 5.6," MIX-COMP-THERM-004, *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments*, OECD-NEA (to be published).

付 録 T C A 実験解析に使用したMCNP入力データ

燃料棒ピッチが 1.825 cm の場合について TCA 実験解析に使用した MCNP の入力データを示す。

```

file name=tea242
c   single 22* 22
c   critical water level 69.410(cm)
c   lattice pitch 1.825(cm);PuO2
c   reflect water 40.000(cm)
c
c   cellcards
1   1 4.128737e-2      -7      10      -12      imp:n=1 u=1
2   2 3.840342e-2      7  -8  10      -12      imp:n=1 u=1
3   3 1.001400e-1      8  10 -11      imp:n=1 u=1
4   4 0                8      11 -12      imp:n=1 u=1
40  4 -2.699           -8      13 -10      imp:n=1 u=1
41  3 1.001400e-1      8      13 -10      imp:n=1 u=1
5   0                1  -2  3  -4  41  -6  imp:n=1 u=2 lat=1
      fill=-21:0 -21:0 0:0
      1 483r
6   0                21 -22 23 -24 27 -26  imp:n=1      fill=2
7   3 1.001400e-1      #6 (31 -32 33 -34 35 -36) imp:n=1
8   0                #6 #7                imp:n=0

c   surface cards (origin x=0.9125 y=0.9125 z=0.0)
c   parallelepiped
1   px 0.00000
2   px 1.82500
3   py 0.00000
4   py 1.82500
5   pz 0.00000
6   pz 70.60000
41  pz -16.83000
c
c   cylinder
7   c/z 0.9125 0.9125 0.5325
8   c/z 0.9125 0.9125 0.6115
c   critical water level= 69.410(cm)
10  pz 0.0
11  pz 69.410
12  pz 70.60
13  pz -16.8300
c   pitch* 22=40.15000(cm)
c   (40.15000*40.15000*144.15)
c   parallelepiped
21  px 0.00001
22  px 40.14999
23  py 0.00001
24  py 40.14999
25  pz 0.00001
26  pz 70.59999
27  pz -16.82999
c
c   water reflect= 40.000(cm)
c   parallelepiped
31  px -39.99999
32  px 80.14999
33  py -39.99999
34  py 80.14999
35  pz -39.99999
36  pz 69.40999

```

```

c      data cards
mode  n                $ transfort neutrons only
c      material cards
c      PuO2 pellet
m1    92234.37c 7.436e-7      $ u-234
      92235.37c 9.393e-5      $ u-235
      92238.37c 1.295e-2      $ u-238
      94238.37c 2.000e-6      $ Pu-238
      94239.37c 2.749e-4      $ Pu-239
      94240.37c 8.843e-5      $ Pu-240
      94241.37c 2.796e-5      $ Pu-241
      94242.37c 8.124e-6      $ Pu-242
      95241.37c 1.279e-6      $ Am-241
      8016.37c 2.784e-2      $ h
c
c      Zircaloy-2 cladding (with an air gap)
m2    40000.37c 3.821e-2      $ zr
      26000.37c 8.985e-5      $ fe
      24000.37c 6.721e-5      $ cr
      28000.37c 3.636e-5      $ ni
c
c      water(300k)
m3    1001.37c 6.676e-2      $ h
      8016.37c 3.338e-2      $ o
mt3   lwtr.01t
c
c      default energy bins; hansen-roach structure
m4    13027.37c 1.0          $ al
c
e0    1.0e-7 4.0e-7 1.0e-6 3.0e-6 1.0e-5 3.0e-5 1.0e-4 5.5e-4 3.0e-3
      1.7e-2 0.1 0.4 0.9 1.4 3.0 20.0
c
c      tallies
f4:n  1                    $ ave flux in cell 1
c
c      criticality cards
kcode 1000 1.0 30 130
sdef  cel=d1 erg=d2 rad=d3 ext=d4 pos=0.9125 0.9125 0 axs=0 0 1
sil   1
      6:5(-21 -21 0):1 6:5(-21 -20 0):1 6:5(-21 -19 0):1
      6:5(-20 -21 0):1 6:5(-20 -20 0):1 6:5(-20 -19 0):1
      6:5(-19 -21 0):1 6:5(-19 -20 0):1 6:5(-19 -19 0):1
      6:5(-18 -21 0):1 6:5(-18 -20 0):1 6:5(-18 -19 0):1
      6:5(-17 -21 0):1 6:5(-17 -20 0):1 6:5(-17 -19 0):1
      6:5(-16 -21 0):1 6:5(-16 -20 0):1 6:5(-16 -19 0):1
      6:5(-15 -21 0):1 6:5(-15 -20 0):1 6:5(-15 -19 0):1
      6:5(-14 -21 0):1 6:5(-14 -20 0):1 6:5(-14 -19 0):1
      6:5(-13 -21 0):1 6:5(-13 -20 0):1 6:5(-13 -19 0):1
      6:5(-12 -21 0):1 6:5(-12 -20 0):1 6:5(-12 -19 0):1
      6:5(-11 -21 0):1 6:5(-11 -20 0):1 6:5(-11 -19 0):1
      6:5(-10 -21 0):1 6:5(-10 -20 0):1 6:5(-10 -19 0):1
      6:5(-9 -21 0):1 6:5(-9 -20 0):1 6:5(-9 -19 0):1
      6:5(-8 -21 0):1 6:5(-8 -20 0):1 6:5(-8 -19 0):1
      6:5(-7 -21 0):1 6:5(-7 -20 0):1 6:5(-7 -19 0):1
      6:5(-6 -21 0):1 6:5(-6 -20 0):1 6:5(-6 -19 0):1
      6:5(-5 -21 0):1 6:5(-5 -20 0):1 6:5(-5 -19 0):1
      6:5(-4 -21 0):1 6:5(-4 -20 0):1 6:5(-4 -19 0):1
      6:5(-3 -21 0):1 6:5(-3 -20 0):1 6:5(-3 -19 0):1
      6:5(-2 -21 0):1 6:5(-2 -20 0):1 6:5(-2 -19 0):1
      6:5(-1 -21 0):1 6:5(-1 -20 0):1 6:5(-1 -19 0):1
      6:5( 0 -21 0):1 6:5( 0 -20 0):1 6:5( 0 -19 0):1
      6:5(-21 -18 0):1 6:5(-21 -17 0):1 6:5(-21 -16 0):1
      6:5(-20 -18 0):1 6:5(-20 -17 0):1 6:5(-20 -16 0):1
      6:5(-19 -18 0):1 6:5(-19 -17 0):1 6:5(-19 -16 0):1
      6:5(-18 -18 0):1 6:5(-18 -17 0):1 6:5(-18 -16 0):1

```

6:5(-17 -18 0):1	6:5(-17 -17 0):1	6:5(-17 -16 0):1
6:5(-16 -18 0):1	6:5(-16 -17 0):1	6:5(-16 -16 0):1
6:5(-15 -18 0):1	6:5(-15 -17 0):1	6:5(-15 -16 0):1
6:5(-14 -18 0):1	6:5(-14 -17 0):1	6:5(-14 -16 0):1
6:5(-13 -18 0):1	6:5(-13 -17 0):1	6:5(-13 -16 0):1
6:5(-12 -18 0):1	6:5(-12 -17 0):1	6:5(-12 -16 0):1
6:5(-11 -18 0):1	6:5(-11 -17 0):1	6:5(-11 -16 0):1
6:5(-10 -18 0):1	6:5(-10 -17 0):1	6:5(-10 -16 0):1
6:5(-9 -18 0):1	6:5(-9 -17 0):1	6:5(-9 -16 0):1
6:5(-8 -18 0):1	6:5(-8 -17 0):1	6:5(-8 -16 0):1
6:5(-7 -18 0):1	6:5(-7 -17 0):1	6:5(-7 -16 0):1
6:5(-6 -18 0):1	6:5(-6 -17 0):1	6:5(-6 -16 0):1
6:5(-5 -18 0):1	6:5(-5 -17 0):1	6:5(-5 -16 0):1
6:5(-4 -18 0):1	6:5(-4 -17 0):1	6:5(-4 -16 0):1
6:5(-3 -18 0):1	6:5(-3 -17 0):1	6:5(-3 -16 0):1
6:5(-2 -18 0):1	6:5(-2 -17 0):1	6:5(-2 -16 0):1
6:5(-1 -18 0):1	6:5(-1 -17 0):1	6:5(-1 -16 0):1
6:5(0 -18 0):1	6:5(0 -17 0):1	6:5(0 -16 0):1
6:5(-21 -15 0):1	6:5(-21 -14 0):1	6:5(-21 -13 0):1
6:5(-20 -15 0):1	6:5(-20 -14 0):1	6:5(-20 -13 0):1
6:5(-19 -15 0):1	6:5(-19 -14 0):1	6:5(-19 -13 0):1
6:5(-18 -15 0):1	6:5(-18 -14 0):1	6:5(-18 -13 0):1
6:5(-17 -15 0):1	6:5(-17 -14 0):1	6:5(-17 -13 0):1
6:5(-16 -15 0):1	6:5(-16 -14 0):1	6:5(-16 -13 0):1
6:5(-15 -15 0):1	6:5(-15 -14 0):1	6:5(-15 -13 0):1
6:5(-14 -15 0):1	6:5(-14 -14 0):1	6:5(-14 -13 0):1
6:5(-13 -15 0):1	6:5(-13 -14 0):1	6:5(-13 -13 0):1
6:5(-12 -15 0):1	6:5(-12 -14 0):1	6:5(-12 -13 0):1
6:5(-11 -15 0):1	6:5(-11 -14 0):1	6:5(-11 -13 0):1
6:5(-10 -15 0):1	6:5(-10 -14 0):1	6:5(-10 -13 0):1
6:5(-9 -15 0):1	6:5(-9 -14 0):1	6:5(-9 -13 0):1
6:5(-8 -15 0):1	6:5(-8 -14 0):1	6:5(-8 -13 0):1
6:5(-7 -15 0):1	6:5(-7 -14 0):1	6:5(-7 -13 0):1
6:5(-6 -15 0):1	6:5(-6 -14 0):1	6:5(-6 -13 0):1
6:5(-5 -15 0):1	6:5(-5 -14 0):1	6:5(-5 -13 0):1
6:5(-4 -15 0):1	6:5(-4 -14 0):1	6:5(-4 -13 0):1
6:5(-3 -15 0):1	6:5(-3 -14 0):1	6:5(-3 -13 0):1
6:5(-2 -15 0):1	6:5(-2 -14 0):1	6:5(-2 -13 0):1
6:5(-1 -15 0):1	6:5(-1 -14 0):1	6:5(-1 -13 0):1
6:5(0 -15 0):1	6:5(0 -14 0):1	6:5(0 -13 0):1
6:5(-21 -12 0):1	6:5(-21 -11 0):1	6:5(-21 -10 0):1
6:5(-20 -12 0):1	6:5(-20 -11 0):1	6:5(-20 -10 0):1
6:5(-19 -12 0):1	6:5(-19 -11 0):1	6:5(-19 -10 0):1
6:5(-18 -12 0):1	6:5(-18 -11 0):1	6:5(-18 -10 0):1
6:5(-17 -12 0):1	6:5(-17 -11 0):1	6:5(-17 -10 0):1
6:5(-16 -12 0):1	6:5(-16 -11 0):1	6:5(-16 -10 0):1
6:5(-15 -12 0):1	6:5(-15 -11 0):1	6:5(-15 -10 0):1
6:5(-14 -12 0):1	6:5(-14 -11 0):1	6:5(-14 -10 0):1
6:5(-13 -12 0):1	6:5(-13 -11 0):1	6:5(-13 -10 0):1
6:5(-12 -12 0):1	6:5(-12 -11 0):1	6:5(-12 -10 0):1
6:5(-11 -12 0):1	6:5(-11 -11 0):1	6:5(-11 -10 0):1
6:5(-10 -12 0):1	6:5(-10 -11 0):1	6:5(-10 -10 0):1
6:5(-9 -12 0):1	6:5(-9 -11 0):1	6:5(-9 -10 0):1
6:5(-8 -12 0):1	6:5(-8 -11 0):1	6:5(-8 -10 0):1
6:5(-7 -12 0):1	6:5(-7 -11 0):1	6:5(-7 -10 0):1
6:5(-6 -12 0):1	6:5(-6 -11 0):1	6:5(-6 -10 0):1
6:5(-5 -12 0):1	6:5(-5 -11 0):1	6:5(-5 -10 0):1
6:5(-4 -12 0):1	6:5(-4 -11 0):1	6:5(-4 -10 0):1
6:5(-3 -12 0):1	6:5(-3 -11 0):1	6:5(-3 -10 0):1
6:5(-2 -12 0):1	6:5(-2 -11 0):1	6:5(-2 -10 0):1
6:5(-1 -12 0):1	6:5(-1 -11 0):1	6:5(-1 -10 0):1
6:5(0 -12 0):1	6:5(0 -11 0):1	6:5(0 -10 0):1
6:5(-21 -9 0):1	6:5(-21 -8 0):1	6:5(-21 -7 0):1
6:5(-20 -9 0):1	6:5(-20 -8 0):1	6:5(-20 -7 0):1
6:5(-19 -9 0):1	6:5(-19 -8 0):1	6:5(-19 -7 0):1

6:5(-18 -9 0):1	6:5(-18 -8 0):1	6:5(-18 -7 0):1
6:5(-17 -9 0):1	6:5(-17 -8 0):1	6:5(-17 -7 0):1
6:5(-16 -9 0):1	6:5(-16 -8 0):1	6:5(-16 -7 0):1
6:5(-15 -9 0):1	6:5(-15 -8 0):1	6:5(-15 -7 0):1
6:5(-14 -9 0):1	6:5(-14 -8 0):1	6:5(-14 -7 0):1
6:5(-13 -9 0):1	6:5(-13 -8 0):1	6:5(-13 -7 0):1
6:5(-12 -9 0):1	6:5(-12 -8 0):1	6:5(-12 -7 0):1
6:5(-11 -9 0):1	6:5(-11 -8 0):1	6:5(-11 -7 0):1
6:5(-10 -9 0):1	6:5(-10 -8 0):1	6:5(-10 -7 0):1
6:5(-9 -9 0):1	6:5(-9 -8 0):1	6:5(-9 -7 0):1
6:5(-8 -9 0):1	6:5(-8 -8 0):1	6:5(-8 -7 0):1
6:5(-7 -9 0):1	6:5(-7 -8 0):1	6:5(-7 -7 0):1
6:5(-6 -9 0):1	6:5(-6 -8 0):1	6:5(-6 -7 0):1
6:5(-5 -9 0):1	6:5(-5 -8 0):1	6:5(-5 -7 0):1
6:5(-4 -9 0):1	6:5(-4 -8 0):1	6:5(-4 -7 0):1
6:5(-3 -9 0):1	6:5(-3 -8 0):1	6:5(-3 -7 0):1
6:5(-2 -9 0):1	6:5(-2 -8 0):1	6:5(-2 -7 0):1
6:5(-1 -9 0):1	6:5(-1 -8 0):1	6:5(-1 -7 0):1
6:5(0 -9 0):1	6:5(0 -8 0):1	6:5(0 -7 0):1
6:5(-21 -6 0):1	6:5(-21 -5 0):1	6:5(-21 -4 0):1
6:5(-20 -6 0):1	6:5(-20 -5 0):1	6:5(-20 -4 0):1
6:5(-19 -6 0):1	6:5(-19 -5 0):1	6:5(-19 -4 0):1
6:5(-18 -6 0):1	6:5(-18 -5 0):1	6:5(-18 -4 0):1
6:5(-17 -6 0):1	6:5(-17 -5 0):1	6:5(-17 -4 0):1
6:5(-16 -6 0):1	6:5(-16 -5 0):1	6:5(-16 -4 0):1
6:5(-15 -6 0):1	6:5(-15 -5 0):1	6:5(-15 -4 0):1
6:5(-14 -6 0):1	6:5(-14 -5 0):1	6:5(-14 -4 0):1
6:5(-13 -6 0):1	6:5(-13 -5 0):1	6:5(-13 -4 0):1
6:5(-12 -6 0):1	6:5(-12 -5 0):1	6:5(-12 -4 0):1
6:5(-11 -6 0):1	6:5(-11 -5 0):1	6:5(-11 -4 0):1
6:5(-10 -6 0):1	6:5(-10 -5 0):1	6:5(-10 -4 0):1
6:5(-9 -6 0):1	6:5(-9 -5 0):1	6:5(-9 -4 0):1
6:5(-8 -6 0):1	6:5(-8 -5 0):1	6:5(-8 -4 0):1
6:5(-7 -6 0):1	6:5(-7 -5 0):1	6:5(-7 -4 0):1
6:5(-6 -6 0):1	6:5(-6 -5 0):1	6:5(-6 -4 0):1
6:5(-5 -6 0):1	6:5(-5 -5 0):1	6:5(-5 -4 0):1
6:5(-4 -6 0):1	6:5(-4 -5 0):1	6:5(-4 -4 0):1
6:5(-3 -6 0):1	6:5(-3 -5 0):1	6:5(-3 -4 0):1
6:5(-2 -6 0):1	6:5(-2 -5 0):1	6:5(-2 -4 0):1
6:5(-1 -6 0):1	6:5(-1 -5 0):1	6:5(-1 -4 0):1
6:5(0 -6 0):1	6:5(0 -5 0):1	6:5(0 -4 0):1
6:5(-21 -3 0):1	6:5(-21 -2 0):1	6:5(-21 -1 0):1
6:5(-20 -3 0):1	6:5(-20 -2 0):1	6:5(-20 -1 0):1
6:5(-19 -3 0):1	6:5(-19 -2 0):1	6:5(-19 -1 0):1
6:5(-18 -3 0):1	6:5(-18 -2 0):1	6:5(-18 -1 0):1
6:5(-17 -3 0):1	6:5(-17 -2 0):1	6:5(-17 -1 0):1
6:5(-16 -3 0):1	6:5(-16 -2 0):1	6:5(-16 -1 0):1
6:5(-15 -3 0):1	6:5(-15 -2 0):1	6:5(-15 -1 0):1
6:5(-14 -3 0):1	6:5(-14 -2 0):1	6:5(-14 -1 0):1
6:5(-13 -3 0):1	6:5(-13 -2 0):1	6:5(-13 -1 0):1
6:5(-12 -3 0):1	6:5(-12 -2 0):1	6:5(-12 -1 0):1
6:5(-11 -3 0):1	6:5(-11 -2 0):1	6:5(-11 -1 0):1
6:5(-10 -3 0):1	6:5(-10 -2 0):1	6:5(-10 -1 0):1
6:5(-9 -3 0):1	6:5(-9 -2 0):1	6:5(-9 -1 0):1
6:5(-8 -3 0):1	6:5(-8 -2 0):1	6:5(-8 -1 0):1
6:5(-7 -3 0):1	6:5(-7 -2 0):1	6:5(-7 -1 0):1
6:5(-6 -3 0):1	6:5(-6 -2 0):1	6:5(-6 -1 0):1
6:5(-5 -3 0):1	6:5(-5 -2 0):1	6:5(-5 -1 0):1
6:5(-4 -3 0):1	6:5(-4 -2 0):1	6:5(-4 -1 0):1
6:5(-3 -3 0):1	6:5(-3 -2 0):1	6:5(-3 -1 0):1
6:5(-2 -3 0):1	6:5(-2 -2 0):1	6:5(-2 -1 0):1
6:5(-1 -3 0):1	6:5(-1 -2 0):1	6:5(-1 -1 0):1
6:5(0 -3 0):1	6:5(0 -2 0):1	6:5(0 -1 0):1
6:5(-21 0 0):1		
6:5(-20 0 0):1		

```

6:5(-19  0  0):1
6:5(-18  0  0):1
6:5(-17  0  0):1
6:5(-16  0  0):1
6:5(-15  0  0):1
6:5(-14  0  0):1
6:5(-13  0  0):1
6:5(-12  0  0):1
6:5(-11  0  0):1
6:5(-10  0  0):1
6:5(-9   0  0):1
6:5(-8   0  0):1
6:5(-7   0  0):1
6:5(-6   0  0):1
6:5(-5   0  0):1
6:5(-4   0  0):1
6:5(-3   0  0):1
6:5(-2   0  0):1
6:5(-1   0  0):1
6:5(  0  0  0):1
sp1    1 483r
c
sp2    -3
c
si3    h  0.0 0.5325
sp3    -21  1
c
si4    0.0 70.6
sp4    -21  0
c
prtmp  j-100 1 3
c
print

```