技術報告

BWR 核設計コードによる MOX 臨界試験 EPICURE および MISTRAL の解析

石井 一弥^{1,*}, 伏見 篤¹, 日野 哲士¹, 丸山 博見²,
井筒 定幸², 笹川 勝², 岩田 豊³

Analysis of Mixed Oxide Fuel Critical Experiments EPICURE and
MISTRAL with Nuclear Analysis Code for BWR

Kazuya ISHII^{1,*}, Atsushi FUSHIMI¹, Tetsushi HINO¹, Hiromi MARUYAMA²,
Sadayuki IZUTSU², Masaru SASAGAWA² and Yutaka IWATA³

¹Power & Industrial Systems R & D Laboratory, Hitachi, Ltd., 7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1221, Japan

²Global Nuclear Fuel-Japan Co., Ltd., 2-3-1 Uchikawa, Yokosuka-shi, Kanagawa 239-0836, Japan

³Hitachi Works, Hitachi, Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 317-8511, Japan

(Received June 6, 2005 and accepted in revised form November 8, 2005)

For the purpose of verification of the nuclear analysis method of BWR for mixed oxide (MOX) cores, UO₂ and MOX fuel critical experiments EPICURE and MISTRAL were analyzed using nuclear design codes HINES and CERES with ENDF/B nuclear data file. The critical keffs of the absorber worth experiments, the water hole worth experiments and the 2D void worth experiments agreed with those of the reference experiments within about 0.1%Δk. The root mean square differences of radial power distributions between calculation and measurement were almost less than 2.0%. The calculated reactivity worth values of the absorbers, the water hole and the 2D void agreed with the measured values within nearly experimental uncertainties. These results indicate that the nuclear analysis method of BWR in the present paper give the same accuracy for the UO₂ cores and the MOX cores.

KEYWORDS: MOX, critical experiment, EPICURE, MISTRAL, experimental analysis, BWR type reactors, nuclear analysis code, nuclear characteristic

I. 緒 言

我が国において、ウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) 燃料の軽水炉での利用が計画されている。一方、現在、軽水炉に装荷されているウラン燃料においても、ウランの燃焼に伴いプルトニウム (Pu) が生成され、燃焼末期における Pu の核分裂反応への寄与割合は約60%に達する。これまでも、Pu の寄与が大きい燃焼末期においても、Pu の寄与が小さい燃焼初期と同じように安全に原子炉を運転できている。したがって、Pu の核特性評価に対する核設計手法の妥当性は、これまでの運転実績により確認されているといえる。しかしながら、核設計に対する信頼性向上の観点から、さらに核設計手法の検証を進めることは重要である。その目的で、これまでに日本原子力研究所で実施された TCA 試験の解析を BWR 核設計コードにより行ってきた¹⁾。その結果、ウラン炉心と MOX 炉心における臨界固有値は0.1%Δk 以内で一致し、径方向出力分布も

計算値は測定値と平均自乗差1%以内で一致した。したがって、この TCA 解析結果からも、BWR 核設計手法の解析精度が、ウラン炉心と MOX 炉心とで同等であることが確認できた。

MOX 燃料を用いた臨界試験としては、上記の TCA 試験のほかに、EPICURE 試験²⁾および MISTRAL 試験^{2~4)}がある。これらの試験は、フランスの臨界試験装置 EOLE を用いて実施されたもので、EPICURE はプルサーマル炉心を模擬した部分 MOX 炉心を対象とした試験、MISTRAL は高減速全 MOX 炉心を対象とした試験である。このうち、MISTRAL 試験は、財原子力発電技術機構 (NUPEC) とフランス原子力庁 (CEA) との共同研究として実施された。また、EPICURE 試験は、MISTRAL 試験より以前に CEA により実施されたもので、協定によりその試験データの一部を NUPEC が入手している。これらの試験においては、臨界質量、出力分布、吸収材価値、ボイド価値などが測定された。

本研究では、先に述べた TCA 試験解析に引続き、さらに核設計手法の検証を進める目的で、BWR 核設計コードにより EPICURE 試験および MISTRAL 試験を解析した。本報では、その解析結果について述べる。

¹ ㈱日立製作所 電力・電機開発研究所

² ㈱グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

³ ㈱日立製作所 日立事業所

* Corresponding author, E-mail: ishii@erl.hitachi.co.jp

II. 試験の概要

1. 試験装置

EPICURE 試験および MISTRAL 試験は、フランス原子力庁(CEA)カダラッシュ研究所に設置されている臨界試験装置 EOLE を用いて実施された。EOLE の炉心タンクは直径約 1 m、高さ約 1 m であり、燃料棒は格子板によって固定される。運転時には炉心タンク内に軽水が満たされ、その水位は燃料棒有効長の上端から上方約 20 cm の位置に保たれる。

臨界調整は、燃料棒本数や減速材中のホウ素濃度により行われ、微小な反応度調整は微調整棒(pilot rod)により行われる。炉停止用に 4 体のクラスタ型安全棒が設置されているが、通常の運転時では全引抜きされている。

EPICURE 試験および MISTRAL 試験で使用した燃料棒は、被覆管外径 9.5 mm の標準 17×17 PWR 燃料棒を短尺化したものであり、燃料有効長は約 80 cm である。UO₂ 燃料棒の濃縮度は 3.7 wt%，MOX 燃料棒の全 Pu 富化度は 7.0 wt% である。また、必要に応じ、全 Pu 富化度 8.7 wt% および 4.3 wt% の MOX 燃料棒も使用している。

2. EPICURE 試験

本解析では、UH1.2 炉心と MH1.2 炉心を対象とした。各炉心の特徴を **Table 1** に示す。これらの炉心は、燃料棒ピッチを現行 PWR と同じ 1.26 cm とした均質炉心であり、水素対重金属原子数比(H/HM)は 3.7 である。UH1.2 炉心は、UO₂ 燃料棒のみで構成したウラン均質炉心である。MH1.2 炉心は、炉心中央部に富化度 7.0 wt% の MOX 燃料棒を装荷した領域を設け、その周りに UO₂ 燃料棒を装荷した部分 MOX 均質炉心である。これらの炉心の炉心構成を **Fig. 1, 2** に示す。MH1.2 炉心における MOX 燃料棒と UO₂ 燃料棒の本数はほぼ同数である。

実施された試験の中から、基準体系試験、吸収材価値試験、2 次元ボイド価値試験を解析対象として選択した。基準体系試験では、**Fig. 1, 2** に示した体系において、臨界質量(実効増倍率)、径方向出力分布が測定されている。臨界質量の測定では、微調整棒を全引抜きとした若干臨界超過の状態では、余剰反応度を測定する。臨界質量の測定方法は、他の試験での測定においても同じである。吸収材価値

試験では、**Fig. 1, 2** に示した基準体系において、中央の燃料棒 1 本を吸収材に置換した体系で、臨界質量(実効増倍率)、径方向出力分布、吸収材価値が測定されている。解析対象とした吸収材は、UO₂-Gd₂O₃ および天然 B₄C である。2 次元ボイド価値試験では、**Fig. 1, 2** に示した基準体系において、中央の 7×7 の領域の燃料棒について、燃料棒に厚いオーバークラッドを装着することによりボイ

Fig. 1 Core configuration of EPICURE UH1.2

Fig. 2 Core configuration of EPICURE MH1.2

Table 1 Core characteristics of EPICURE

Items	UH1.2	MH1.2
Configuration	UO ₂ homogeneous	MOX homogeneous
H/HM (atomic ratio)	3.7	3.7
Volumetric moderator ratio (V_m/V_f)	1.3	1.3
Fuel pin pitch (cm)	1.26	1.26
Fuel loaded mainly	UO ₂ -3.7 wt%	MOX-7.0 wt%
Equivalent core diameter (cm)	54	69

Table 2 Core characteristics of MISTRAL

Items	Core 1	Core 2	Core 3
Configuration	UO ₂ homogeneous	MOX homogeneous	MOX homogeneous
H/HM (atomic ratio)	5.1	5.2	6.2
Volumetric moderator ratio (V_m/V_f)	1.8	1.8	2.1
Fuel pin pitch (cm)	1.32	1.32	1.39
Fuel loaded mainly	UO ₂ -3.7 wt%	MOX-7.0 wt%	MOX-7.0 wt%
Equivalent core diameter (cm)	41	60	59

Fig. 3 Core configuration of MISTRAL core 1

ド状態を模擬して、臨界質量(実効増倍率), 径方向出力分布, 2次元ボイド値が測定されている。解析対象としたのは, 模擬ボイド率が30%と50%の体系での試験である。なお, 2次元ボイド値試験での基準とするため, 改めてボイド率0%の体系での試験が行なわれており, それも解析対象とした。

3. MISTRAL 試験

MISTRAL 試験は, 4種類の炉心から成る。炉心1はウラン均質炉心, 炉心2と3はMOX均質炉心, 炉心4はPWRを模擬したMOX炉心である。ここでは, 炉心1~3を解析対象とした。Table 2に解析対象とした各炉心の特徴を示す。燃料棒ピッチは, 炉心1と2が1.32 cm, 炉心3が1.39 cmであり, H/HMはそれぞれ5.1, 5.2, 6.2である。これらの炉心の炉心構成をFig. 3~5に示す。

実施された試験の中から, 基準体系試験, 吸収材値試験, ウォータホール値試験を解析対象として選択した。基準体系試験では, EPICURE試験と同様, Fig. 3~5に示した体系において, 臨界質量(実効増倍率), 径方向出力分布が測定されている。吸収材値試験では, Fig. 3~5に示した基準体系において, 中央の燃料棒1本を吸収材に置換した体系で, 臨界質量(実効増倍率), 径方向出力分布, 吸収材値が測定されている。解析対象とした吸収材

Fig. 4 Core configuration of MISTRAL core 2

Fig. 5 Core configuration of MISTRAL core 3

は、 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 、天然 B_4C (炉心 1, 2 のみ) および 90% 濃縮 B_4C である。ウォータホール価値試験は炉心 1, 2 で実施され、Fig. 3, 4 に示した基準体系において、中央の 3×3 の領域の燃料棒 9 本を引抜いてウォータホールとした体系で、臨界質量(実効増倍率)、径方向出力分布、ウォータホール価値が測定されている。

III. 解析手法と解析方法

1. 解析手法

本解析では、BWR 核設計コードである HINES⁵⁻⁷⁾ と CERES⁸⁾ を用いた。

HINES は 2 次元燃料集合体核設計コードであり、核データライブラリーは ENDF/B に基づいている。HINES では、燃料集合体の核特性を 2 段階に分けて評価する。すなわち、エネルギー詳細群による中性子スペクトル計算とエネルギー少数群による燃料集合体全体を対象とした中性子束分布計算である。さらに、中性子スペクトル計算は、高速群と熱群の 2 段階に分けて実施する。高速群中性子スペクトル計算では、燃料、被覆管、減速材からなる燃料棒セルを対象に、エネルギー 68 群の衝突確率計算を実施する。また、熱群中性子スペクトル計算では、ガドリニウム含有しない燃料棒(以下、通常燃料棒)に対しては、高速群と同様の単一燃料棒セル体系を対象に、エネルギー 30 群の衝突確率計算を実施する。ガドリニウム含有する燃料棒に対しては、ガドリニウム含有燃料棒と通常燃料棒が隣接する非均質の効果を考慮するため、ガドリニウム含有燃料棒 1 本を通常燃料棒 8 本が取巻く体系を対象に、エネルギー 30 群の衝突確率計算を実施する。さらに、水ギャップやチャンネルボックス、水ロッドの存在、燃料棒の集合体内位置依存性を考慮するために、燃料集合体を模擬した体系を対象にエネルギー 30 群の衝突確率計算を実施する。

次に、燃料集合体全体を対象に、エネルギー 3 群の拡散計算を実施し中性子束分布を評価する。なお、輸送効果を考慮するために、上述の中性子スペクトル計算で評価した縮約均質化断面積を、輸送拡散補正して用いる。

CERES は、2 次元拡散コードである。HINES などでも評価した少数群核定数を用いて、拡散計算を実施する。HINES は、BWR 燃料集合体を対象とした解析コードであるため、試験体系全体をそのまま解析することはできない。そのため、本解析では、HINES におけるエネルギー 3 群拡散計算の代替として、CERES を用いて試験体系全体を対象とした解析を実施する。

2. 解析方法

まず、HINES により、燃料ベレット、被覆管、オーバークラッドおよび減速材からなる単位燃料棒セル体系を対象に、3 群均質化断面積を評価する。炉心周辺の水の 3 群均質化断面積については、燃料棒を 9×9 に配置し、そ

の周りを水が取り巻いた体系を対象とした解析により評価する。次に、これら HINES で評価した 3 群均質化断面積を用いて、CERES により全炉心体系を対象に、2 次元 3 群拡散計算を実施する。軸方向の中性子漏洩については、軸方向バックリング測定値によりマクロ吸収断面積に漏れの補正をすることで考慮した。

吸収材が装荷されたセルについては、吸収材と燃料棒が隣接する非均質効果を考慮するため、吸収材を中央に配置し、その周りを燃料棒が取巻いた 3×3 あるいは 5×5 のマルチセル体系を対象にした計算により、その 3 群均質化断面積を評価した。また、本解析は、燃料棒セルあるいは吸収材セルを均質化した拡散計算であるため、セルを均質化した影響と輸送効果を考慮する必要がある。前項で述べたように、HINES では、BWR 燃料集合体中のガドリニウム含有燃料棒に対して、ガドリニウム含有燃料棒と通常燃料棒が隣接する非均質効果を考慮するため、ガドリニウム含有燃料棒 1 本を通常燃料棒 8 本が取巻く体系を対象に衝突確率計算を実施し、さらにセル均質化の影響と輸送効果を考慮するための補正である輸送拡散補正を実施して、その縮約均質化断面積を評価する。しかし、HINES は、BWR 燃料集合体を対象とした解析コードであるため、その補正を試験を実施した全ての吸収材に適用することができない。そこで、本試験解析においては、HINES でガドリニウム含有燃料棒に対して実施している輸送拡散補正と同じ考え方の補正を別途実施することとした。すなわち、同じマルチセル体系を対象とした非均質輸送計算を別途実施し、同じマルチセル体系における CERES による均質拡散計算での吸収材セルと燃料棒セルの反応率の比が、非均質輸送計算のそれと一致するように、CERES による均質拡散計算を繰返し実施し、CERES に用いる 3 群均質化断面積を補正した。参照する非均質輸送計算には、モンテカルロ法による燃料集合体核特性解析コード VMONT⁹⁾ を用いた。VMONT は多群モンテカルロコードであり、その群数は 190 群である。補正した 3 群均質化断面積は、吸収材セルとそれを取り囲む 1 層の燃料棒セル(8 本)に用いた。補正因子(補正後と補正前の断面積の比)は、炉心、吸収材種類、エネルギー群により異なるが、おおむね 0.8~1.0 程度である。

ウォータホールとしたセルについては、 3×3 のウォータホールセルを燃料棒が取り巻いた 5×5 のマルチセル体系を対象にした計算により、その 3 群均質化断面積を評価した。また、吸収材セルと同様の、輸送効果を考慮する補正をした。

2 次元ボイド価値試験におけるボイドを模擬した燃料棒セルについては、ボイド模擬の領域が 7×7 と比較的大きいため、単位燃料棒セル体系で評価した 3 群均質化断面積に、別途評価した位置依存性を補正した。3 群均質化断面積の位置依存性は、以下の方法で評価した。まず、 7×7 のボイド模擬領域を通常の燃料棒が取り巻いた 15×15 の

マルチセル体系を対象に, VMONT により各セルの 3 群均質化断面積を評価し, 各セルにおける単位燃料棒セル体系での 3 群均質化断面積との比を求める。次に, その比を上述の単位燃料棒セル体系で評価した HINES の 3 群均質化断面積に乗ずることにより, 輸送効果を考慮した位置依存の 3 群均質化断面積を評価する。

IV. 解析結果

1. 基準体系試験

(1) 臨界固有値

本解析では, 臨界状態から微調整棒を全引抜きとした若干超臨界の体系を対象として, 実効増倍率を評価した。その実効増倍率から測定された余剰反応度を差し引き, 臨界状態に対する実効増倍率(臨界固有値)を求めた。EPICURE および MISTRAL 試験での基準体系試験における臨界固有値を Table 3 に示す。全体的に過大評価であり, また, 全 MOX 炉心である MISTRAL 炉心 2, 炉心 3 の臨界固有値を他の炉心に比べ高く評価する傾向がある。さらに, MOX 炉心で比較すると, EPICURE MH1.2 炉心, MISTRAL 炉心 2, 炉心 3 の順に高くなる。しかし, このような臨界固有値の傾向は本解析だけではなく, 原子力発電技術機構(NUPEC)で実施された解析でも同様の傾向が報告されている^{4,10)}。NUPEC では, 詳細解析コードである連続エネルギーモンテカルロコード MVP¹¹⁾により, 様々な核データライブラリー(JENDL-3.2, JENDL-3.3, JENDL-3.1, ENDF/B-VI, JEF-2.2)を用いて解析を実施しているが, すべてのライブラリーにおいて本解析と同様な傾向を生じている。そこで, ここでは, その NUPEC での MVP による解析値と比較する。本解析において, 最も臨界固有値の高い MISTRAL 炉心 3 と最も低い EPICURE MH1.2 炉心との臨界固有値の差は, 約 0.7% Δk である。それに対し, MVP における EPICURE 試験と MISTRAL 炉心 1 から炉心 3 までの範囲での臨界固有値の最大と最小の差は, JENDL-3.2 で約 0.5% Δk , JENDL-3.3 で約 0.9% Δk , ENDF/B-VI で約 0.8% Δk である^{4,10)}。したがって, 炉心間における臨界固有値の変動量は本解析と MVP とではほぼ同等であり, 詳細解析コードである MVP での臨界固有値の傾向と本解析での傾向は整合しているといえる。また, 臨界固有値の絶対値については, 本解析は JENDL-3.2 を用いた MVP による解析値とおおむね 0.2% Δk 以内で一致している^{4,10)}。

Table 3 Critical k_{eff} ^{a)} (reference experiments)

EPICURE		MISTRAL		
UH1.2	MH1.2	Core 1	Core 2	Core 3
1.0037	1.0011	1.0019	1.0060	1.0085

^{a)} k -effective corresponding to critical state

(2) 径方向出力分布

EPICURE UH1.2 炉心の基準体系試験における, 炉心の対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の比較を Fig. 6 に示す。また, 計算値と測定値の差を Fig. 7 に示す。さらに同様に, EPICURE MH1.2 炉心および MISTRAL 炉心 1~3 の基準体系試験における, 対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の比較を Fig. 8~15 に示す。なお, 比較する全燃料棒の出力の平均値が, 測定値と計算値それぞれで 1.0 になるように規格化している。測定誤差は, UO_2 燃料棒で 1.0%, MOX 燃料棒で 1.5% である。また, MH1.2 炉心では, 中央の MOX 燃料を装荷した領域のみで出力分布が測定されている。図に示すように, いずれの炉心においても, 計算値は測定値をよく再現できている。

対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の二乗平均平方根の差(以下, 平均自乗差と記す)を Table 4 に示す。計算値と測定値の平均自乗差は, EPICURE UH1.2 炉心と MH1.2 炉心で 1.0%, MISTRAL 炉心 1 で 1.3%, 炉心 2 で 1.4%, 炉心 3 で 1.6% である。測定誤差が 1.5% であることを考慮すると, いずれの炉心においても計算値

Fig. 6 Radial power distribution of reference experiment in EPICURE UH1.2

Fig. 7 Difference of power distribution between calculation and measurement (reference experiment in EPICURE UH1.2)

Fig. 8 Radial power distribution of reference experiment in EPICURE MH1.2

Fig. 9 Difference of power distribution between calculation and measurement
(reference experiment in EPICURE MH1.2)

Fig. 10 Radial power distribution of reference experiment in MISTRAL core 1

Fig. 11 Difference of power distribution between calculation and measurement
(reference experiment in MISTRAL core 1)

Fig. 12 Radial power distribution of reference experiment in MISTRAL core 2

Fig. 13 Difference of power distribution between calculation and measurement
(reference experiment in MISTRAL core 2)

は測定値とよく一致している。また、ウラン炉心と MOX 炉心で解析精度はほぼ同等である。

2. 吸収材価値試験

(1) 臨界固有値

EPICURE MH1.2 炉心および MISTRAL 炉心 1～3 に

おける吸収材価値試験での臨界固有値を、基準体系試験と比較して **Table 5** に示す。なお、EPICURE UH1.2 炉心における吸収材価値試験では、臨界質量は測定されていない。表に示すように、基準体系試験と同様、MISTRAL 炉心 2 と炉心 3 の臨界固有値を他の炉心に比べ高く評価する傾向にある。しかし、各吸収材について、EPICURE

Fig. 14 Radial power distribution of reference experiment in MISTRAL core 3

Fig. 15 Difference of power distribution between calculation and measurement (reference experiment in MISTRAL core 3)

MH1.2 炉心では0.01% Δk 以内, MISTRAL 炉心 1 と炉心 2 では0.05% Δk 以内, 炉心 3 では0.06% Δk 以内で基準体系試験とよく一致している。したがって, ウラン炉心, MOX 炉心とも, 吸収材を装荷した体系において臨界固有値を精度良く評価できているといえる。

(2) 径方向出力分布

吸収材価値試験における, 対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の平均自乗差を, 基準体系試験と比較して Table 6 に示す。なお, 基準体系試験以外の試験においては, 測定された全燃料棒の出力の平均値が, 測定値と計算値それぞれで1.0となるように規格化している。また, EPICURE UH1.2 炉心の天然 B_4C 試験および MH1.2 炉心の $UO_2-Gd_2O_3$ 試験では, 出力分布は測定されていない。表に示すように, 吸収材価値試験では, 基準体系試験と比較して, MISTRAL 炉心 1 で測定値との平均自乗差が若干大きくなる傾向にあるが, 2.0% 以内で測定値と一致している。それ以外の炉心における測定値との平均自乗差は, EPICURE MH1.2 炉心で1.2%, MISTRAL 炉心 2 で0.9% 以内, 炉心 3 で1.5% 以内であり, 基準体系試験とほぼ同等である。これらの試験のうち, EPICURE MH1.2 炉心の天然 B_4C 試験と MISTRAL 炉心 1~3 の濃

Table 4 Root mean square difference (%) of power distribution between calculation and measurement (reference experiments)

EPICURE		MISTRAL		
UH1.2	MH1.2	Core 1	Core 2	Core 3
1.0	1.0	1.3	1.4	1.6

Table 5 Critical k_{eff} (absorber worth experiments)

Experiment	EPICURE		MISTRAL		
	UH1.2	MH1.2	Core 1	Core 2	Core 3
Reference	1.0037	1.0011	1.0019	1.0060	1.0085
Absorber					
$UO_2-Gd_2O_3$	—	1.0012	1.0019	1.0065	1.0081
Natural B_4C	—	1.0012	1.0014	1.0064	—
Enriched B_4C	—	—	1.0014	1.0064	1.0079

Table 6 Root mean square difference (%) of power distribution between calculation and measurement (absorber worth experiments)

Experiment	EPICURE		MISTRAL		
	UH1.2	MH1.2	Core 1	Core 2	Core 3
Reference	1.0	1.0	1.3	1.4	1.6
Absorber					
$UO_2-Gd_2O_3$	—	—	1.4	0.9	1.3
Natural B_4C	—	1.2	1.8	0.8	—
Enriched B_4C	—	—	1.9	0.9	1.5

縮 B_4C 試験における, 対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の比較を Fig. 16~19 に示す。図に示すように, 吸収材が装荷された体系においても, 計算値は測定値をよく再現できている。以上より, 本核設計コードは, 吸収材が装荷された体系に対しても, 吸収材を装荷しない基準体系と同等の解析精度を有しているといえる。

(3) 吸収材価値

Table 7 に, 吸収材価値の計算値と測定値の比(C/E)を示す。なお, 表中の括弧内の値は測定誤差である。表に示すように, 計算値と測定値の差は, EPICURE UH1.2 炉心で5% 以内, MH1.2 炉心で1% 以内, MISTRAL 炉心 1 と炉心 2 で3% 以内であり, これらの炉心ではいずれの吸収材においても, 計算値は測定値とほぼ測定誤差の範囲内で一致している。炉心 3 の $UO_2-Gd_2O_3$ 価値では, 計算値と測定値に11% の差があるが, 測定誤差8% を考慮すると, これもほぼ測定誤差の範囲内で一致しているといえる。また, 炉心 3 の $UO_2-Gd_2O_3$ 価値の計算値と測定値の差は0.02% $\Delta k/k'$ と小さく, 解析精度上問題にはならない。一方, 炉心 3 の濃縮 B_4C 価値については, 計算値と測定値の差は5% であり, 測定誤差の範囲内である。以上より, 吸収材の違い, あるいはウラン炉心と MOX 炉心

Fig. 16 Radial power distribution of absorber worth experiment (natural B₄C) in EPICURE MH1.2

Fig. 18 Radial power distribution of absorber worth experiment (enriched B₄C) in MISTRAL core 2

Fig. 17 Radial power distribution of absorber worth experiment (enriched B₄C) in MISTRAL core 1

Fig. 19 Radial power distribution of absorber worth experiment (enriched B₄C) in MISTRAL core 3

Table 7 Comparison between calculated and measured values for absorber worth (C/E)

Experiment	EPICURE		MISTRAL		
	UH1.2	MH1.2	Core 1	Core 2	Core 3
Absorber					
UO ₂ -Gd ₂ O ₃	—	0.99 (7%)	0.97 (13%)	1.00 (7%)	1.11 (8%)
Natural B ₄ C	0.95 (4%)	1.00 (4%)	1.02 (12%)	1.03 (7%)	—
Enriched B ₄ C	—	—	1.01 (12%)	1.00 (7%)	1.05 (6%)

(): Measurement error

で、解析精度に有意な差はないといえる。

3. ウォータホール値試験

(1) 臨界固有値

MISTRAL 炉心 1, 2 におけるウォータホール値試験での臨界固有値を、基準体系試験と比較して Table 8 に示す。表に示すように、基準体系試験と同様、炉心 1 に比べ炉心 2 の臨界固有値を高く評価する。しかし、炉心 1 での基準体系試験との差は 0.02%Δk であり、炉心 2 では基準体系試験と一致している。したがって、ウォータホールを設置した体系においても、臨界固有値を精度よく評価

できている。

(2) 径方向出力分布

ウォータホール値試験における、対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の平均自乗差を、基準体系試験と比較して Table 9 に示す。表に示すように、MISTRAL 炉心 1 で測定値との平均自乗差が 2.6% と若干大きくなるが、炉心 2 では 0.5% と非常によく測定値と一致している。また、対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の比較を Fig. 20, 21 に示す。図に示すように、いずれの炉心においても、計算値はウォータホールを設置したことによる出力分布の歪みをよく再現できている。

Table 8 Critical k_{eff} (water hole worth experiments)

Experiment	MISTRAL	
	Core 1	Core 2
Reference	1.0019	1.0060
Water hole	1.0021	1.0060

Table 9 Root mean square difference (%) of power distribution between calculation and measurement (water hole worth experiments)

Experiment	MISTRAL	
	Core 1	Core 2
Reference	1.3	1.4
Water hole	2.6	0.5

Fig. 20 Radial power distribution of water hole worth experiment in MISTRAL core 1 **Fig. 21** Radial power distribution of water hole worth experiment in MISTRAL core 2

(3) ウォータホール価値

Table 10 に、ウォータホール価値の計算値と測定値の比(C/E)を示す。なお、表中の括弧内の値は測定誤差である。表に示すように、MISTRAL 炉心 1 で C/E が 0.92, 炉心 2 で 0.94 と、どちらの炉心とも過小評価の傾向である

Table 10 Comparison between calculated and measured values for water hole worth (C/E)

Experiment	MISTRAL	
	Core 1	Core 2
Water hole	0.92 (13%)	0.94 (6%)

(): Measurement error

Table 11 Critical k_{eff} (2D void worth experiments)

Experiment	EPICURE	
	UH1.2	MH1.2
Reference	1.0037	1.0011
2D void		
0%	1.0038	1.0015
30%	1.0030	1.0013
50%	1.0048	1.0008

Table 12 Root mean square difference (%) of power distribution between calculation and measurement (2D void worth experiments)

Experiment	EPICURE	
	UH1.2	MH1.2
Reference	1.0	1.0
2D void		
30%	1.6	0.9
50%	1.6	1.6

が、いずれも測定誤差の範囲内で計算値は測定値と一致している。したがって、ウラン炉心と MOX 炉心で解析精度に有意な差はないといえる。

4. 2次元ボイド価値試験

(1) 臨界固有値

EPICURE UH1.2 炉心および MH1.2 炉心における 2 次元ボイド価値試験での臨界固有値を、基準体系試験と比較して **Table 11** に示す。UH1.2 炉心の 50% ボイド試験で基準体系試験と 0.11% Δk の差があるが、MH1.2 炉心では 0.04% Δk 以内で基準体系試験とよく一致している。したがって、ボイドを模擬した領域を設置した体系においても、臨界固有値を精度よく評価できているといえる。

(2) 径方向出力分布

2 次元ボイド価値試験における、対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の平均自乗差を、基準体系試験と比較して **Table 12** に示す。表に示すように、基準体系試験と比較して、測定値との平均自乗差が若干大きくなる傾向にあるが、EPICURE UH1.2 炉心、MH1.2 炉心とも 1.6% 以内で測定値と一致しており、測定誤差を考慮すると良好な解析精度であるといえる。50% ボイド試験における対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の比較

Fig. 22 Radial power distribution of 2D void worth experiment (50%) in EPICURE UH1.2

Fig. 23 Radial power distribution of 2D void worth experiment (50%) in EPICURE MH1.2

を Fig. 22, 23 に示す。図に示すように、計算値はボイド模擬領域における出力分布の歪みをよく再現できている。

(3) 2次元ボイド値

Table 13 に、2次元ボイド値の計算値と測定値の比 (C/E) を示す。なお、表中の括弧内の値は測定誤差である。表に示すように、EPICURE UH1.2 炉心で C/E が 1.03 と 1.01、MH1.2 炉心で 1.02 と 1.04 と、どちらの炉心とも過大評価の傾向があるが、計算値と測定値は測定誤差の範囲内で一致している。したがって、ウラン炉心と MOX 炉心で解析精度に有意な差はないといえる。

5. まとめ

(1) 臨界固有値

Table 14 に、これまでに述べた各炉心の各試験における臨界固有値と、各炉心ごとの臨界固有値の平均値および標準偏差を示す。表に示すように、全体的に過大評価であり、さらに、ウラン炉心に比べ全 MOX 炉心で高い傾向がある。しかし、このような傾向は詳細解析コードである MVP でも生じており、炉心間における臨界固有値の変動量も MVP とほぼ同等である。一方、各試験における臨界

Table 13 Comparison between calculated and measured values for 2D void worth (C/E)

Experiment	EPICURE	
	UH1.2	MH1.2
2D void		
30%	1.03(10%)	1.02(7%)
50%	1.01(5%)	1.04(4%)

(): Measurement error

Table 14 Critical k_{eff}

Experiment	EPICURE		MISTRAL		
	UH1.2	MH1.2	Core 1	Core 2	Core 3
Reference	1.0037	1.0011	1.0019	1.0060	1.0085
Absorber					
UO ₂ -Gd ₂ O ₃	—	1.0012	1.0019	1.0065	1.0081
Natural B ₄ C	—	1.0012	1.0014	1.0064	—
Enriched B ₄ C	—	—	1.0014	1.0064	1.0079
Water hole	—	—	1.0021	1.0060	—
2D void					
0%	1.0038	1.0015	—	—	—
30%	1.0030	1.0013	—	—	—
50%	1.0048	1.0008	—	—	—
Average	1.0038	1.0012	1.0017	1.0063	1.0082
Standard deviation (%)	0.07	0.02	0.03	0.02	0.02

Table 15 Root mean square difference (%) of power distribution between calculation and measurement

Experiment	EPICURE		MISTRAL		
	UH1.2	MH1.2	Core 1	Core 2	Core 3
Reference	1.0	1.0	1.3	1.4	1.6
Absorber					
UO ₂ -Gd ₂ O ₃	—	—	1.4	0.9	1.3
Natural B ₄ C	—	1.2	1.8	0.8	—
Enriched B ₄ C	—	—	1.9	0.9	1.5
Water hole	—	—	2.6	0.5	—
2D void					
30%	1.6	0.9	—	—	—
50%	1.6	1.6	—	—	—

固有値の炉心ごとの平均値からの差は 0.1% Δk 以下である。また、炉心ごとの臨界固有値の標準偏差も、EPICURE UH1.2 炉心以外では 0.03% 以下と非常に小さく、UH1.2 炉心でも 0.07% である。以上より、本核設計コードは、臨界固有値に関して、絶対値についてはウラン炉心と MOX 炉心で差が生じるものの、その炉心間の変動量は詳細解析コードである MVP とほぼ同等であり、同一炉心での各試験間の差については MOX 炉心に対してもウラン炉心と同等の解析精度を有していることが確認できた。

Table 16 Comparison between calculated and measured values for reactivity worth (C/E)

Experiment	EPICURE		MISTRAL		
	UH1.2	MH1.2	Core 1	Core 2	Core 3
Absorber					
UO ₂ -Gd ₂ O ₃	—	0.99(7%)	0.97(13%)	1.00(7%)	1.11(8%)
Natural B ₄ C	0.95 (4%)	1.00(4%)	1.02(12%)	1.03(7%)	—
Enriched B ₄ C	—	—	1.01(12%)	1.00(7%)	1.05(6%)
Water hole	—	—	0.92(13%)	0.94(6%)	—
2D void					
30%	1.03(10%)	1.02(7%)	—	—	—
50%	1.01 (5%)	1.04(4%)	—	—	—

(): Measurement error

(2) 径方向出力分布

これまでに述べた各炉心の各試験における, 対角線方向の径方向出力分布の計算値と測定値の平均自乗差を Table 15 にまとめて示す。表に示すように, 計算値と測定値は平均自乗差はほぼ 2% 以内で一致した。また, ウラン炉心と MOX 炉心で有意な差はない。

(3) 反応度価値

Table 16 に, これまでに述べた吸収材価値, ウォータホール価値および 2 次元ボイド価値の計算値と測定値の比(C/E)をまとめて示す。なお, 表中の括弧内の値は測定誤差である。表に示すように, 吸収材価値, ウォータホール価値および 2 次元ボイド価値のいずれについても, 計算値は測定値とほぼ測定誤差の範囲内で一致した。また, ウラン炉心と MOX 炉心で, 有意な差はない。したがって, 本設計コードは, 反応度価値に関して, MOX 炉心に対してもウラン炉心と同等の解析精度を有しているといえる。

V. 結 言

MOX 炉心に対する BWR 核設計手法の検証を目的として, MOX 燃料を用いた臨界試験 EPICURE および MISTRAL を BWR 核設計コードにより解析した。EPICURE 試験は, ウラン炉心および部分 MOX 炉心での試験であり, 基準体系試験, 吸収材価値試験および 2 次元ボイド価値試験を解析した。また, MISTRAL 試験は, 高減速のウラン炉心および全 MOX 炉心での試験であり, 基準体系試験, 吸収材価値試験およびウォータホール価値試験を解析した。

臨界固有値については, ウラン炉心に比べ全 MOX 炉心で高い傾向があるが, 炉心間における臨界固有値の変動量は, 詳細解析コードである MVP とほぼ同等である。一方, それぞれの炉心において, 各試験での臨界固有値は基準体系試験とほぼ 0.1% Δk 以内で一致した。また, 炉心毎の臨界固有値の標準偏差は, すべての炉心で 0.07% Δk 以下であり, 吸収材を装荷した体系, ウォータホールを設置

した体系, あるいはボイドを模擬した領域を設置した体系においても, 臨界固有値を精度良く評価できることを確認できた。径方向出力分布については, いずれの炉心においても, 計算値と測定値の平均自乗差がほぼ 2% 以内で一致した。また, 反応度価値については, いずれの炉心においても, 計算値と測定値はほぼ測定誤差以内で一致した。さらに, 上記の臨界固有値(同一炉心での各試験間の差), 径方向出力分布および反応度価値の解析結果に関して, ウラン炉心と MOX 炉心で有意な差はなかった。

以上により, BWR 核設計手法は, MOX 炉心に対してもウラン炉心と同等の解析精度を有していることが確認できた。

— 参考文献 —

- 1) M. Tamitani, H. Maruyama, K. Ishii, *et al.*, "Analysis of mixed oxide fuel critical experiments with neutronics analysis codes for boiling water reactor," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**[3], 316 (2000).
- 2) 神田啓治, 山本 徹, 松浦秀文, 他, "MOX 燃料炉物理試験と解析の現状—プルトニウムの有効利用に向けて," 日本原子力学会誌, **40**[11], 834 (1998).
- 3) S. Cathalau, *et al.*, "MISTRAL: An experimental programme in the EOLE facility devoted to MOX core physics," *Proc. Int. Conf. on Physics of Reactor, Physor'96*, Mito, Japan, Sept. 16-20, 1996, Vol. H, p. 84 (1996).
- 4) 石井一弥, 巽 雅洋, 菅 太郎, 他, "MOX 燃料炉物理試験 MISTRAL の解析," 日本原子力学会和文論文誌, **2**[1], 39 (2003).
- 5) 榎日立製作所, HLR-005, (1977).
- 6) 榎日立製作所, HLR-052 訂 1, (1999).
- 7) 榎日立製作所, HLR-066, (1999).
- 8) 榎日立製作所, HLR-031, (1979).
- 9) Y. Morimoto, H. Maruyama, K. Ishii, *et al.*, "Neutronic analysis code for fuel assembly using a vectorized monte carlo method," *Nucl. Sci. Eng.*, **103**, 351 (1989).
- 10) 石井一弥, 安藤良平, 高田直之, 他, "高減速 BWR 全 MOX 燃料炉物理試験 BASALA の解析," 日本原子力学会和文論文誌, **4**[1], 45 (2005).
- 11) 森 貴正, 中川正幸, JAERI-Data/Code 94-007, (1994).