

ボイド反応度に対するガドリニアポイズンの効果

1991年8月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

ボイド反応度に対するガドリニアポイズンの効果

小綿泰樹*

要 旨

燃料集合体内にガドリニア入燃料棒を数本組み込んだGd入燃料を、DCA炉心の中央部に少数体装荷した炉心を対象にして、圧力管型重水炉の冷却材ボイド反応度に及ぼすガドリニアの効果を実験及び解析によって考察した。ガドリニア濃度は0.0, 0.1, 0.5及び1.0wt%に変化させた。ボイド反応度の実験値と計算値の比較によって、解析に使用した核計算コードの計算精度は±0.2%となった。解析では、格子群定数計算に衝突確率法を用いた格子計算コードWIMS-D、炉心計算に少数群拡散計算コードCITATIONをそれぞれ使用した。

ガドリニアの添加はボイド反応度を正側へ移行させるが、0.5wt%以下の濃度で飽和させる。ボイド反応度の正側への変化量は、Gd入燃料の炉心への装荷割合が高いほど、またGd入燃料棒をクラスタの外側へ配置するほど大きい。しかしガドリニアを含まない標準燃料の核分裂性核種をウランからプルトニウムに変更すれば、この正側への変化量は緩和される。ガドリニアの添加がボイド反応度を正側へ移行させる主な理由は、ボイド発生によるGdの中性子吸収の増加が標準燃料領域で中性子インポートランスの増加を助長させて核分裂効果を高めるためである。

* 大洗工学センター 実験炉部 臨界工学試験室

Gadolinia-poison Effect on Coolant Void Reactivity

Yasuki Kowata*

The effect of the gadolinia-poison on coolant void reactivity in a pressure-tube-type heavy water reactor has been clarified by critical experiments and analyses. Experiments were carried out in the 25 cm lattice pitch DCA (Deuterium Critical Assembly) core in which few gadolinia-poisoned fuels were loaded in the central region. Four or three gadolinia-poisoned UO_2 fuel rods were used in the middle layer of 28 rod or 36 rod fuel cluster as the gadolinia-poisoned fuel respectively. The concentration of gadolinia in gadolinia-poisoned fuel pellets was changed from 0.0 to 0.1, 0.5 and 1.0 wt% in order.

Void reactivity calculated by the lattice code WIMS-D using the collision probability method and the diffusion code CITATION were compared with experimental ones. Calculated values for cores with gadolinia-poisoned fuels agree with experimental ones within $\pm 0.2\%$.

The void reactivity tends to shift toward positive side with adding gadolinia-poison, but it soon saturates around the 0.5wt% gadolinia concentration. These tendencies are remarkable as an increase in loading ratio of gadolinia-poisoned fuels in the core or as a location to the outer layer of gadolinia-poisoned fuel rods in the cluster. However, this tendency is relieved when fuel material of reference fuel without gadolinia-poisoned fuel rods changed from UO_2 to PuO_2-UO_2 mixed oxide.

The reason why the coolant void reactivity shifts to the positive side with the addition of gadolinia to the fuel is that an increase in the neutron absorption of gadolinium due to voiding make an increase in the neutron importance at the reference fuel region to promote, so that it tone up the fission yield component of the void reactivity.

* O-arai Engineering Center, Experimental Reactor Division, Criticality Engineering Section.

ボイド反応度に対するガドリニアポイズンの効果

目 次

1. はじめに
2. 実験及び解析
 - 2.1 評価手法
 - 2.2 実験体系
3. 結果
 - 3.1 ガドリニア反応度のボイド率効果
 - 3.2 ガドリニア濃度依存性とGd入燃料棒配置の効果
 - 3.3 Gd入燃料装荷割合の影響
 - 3.4 標準燃料中の核分裂性核種の影響
 - 3.5 摂動計算の結果
4. 考察
 - 4.1 ボイド変化に対する格子内中性子挙動
 - 4.2 ボイド変化に対する炉心内中性子挙動
 - 4.3 Gd入燃料装荷炉心でのボイド反応度
5. 結論

参考文献

1. はじめに

原子力発電の経済性を向上させる方策の1つが、核燃料の炉内滞在日数を増加させること、即ち燃料の高燃焼度化を図ることである。この方策が熱中性子炉の炉型の如何によらず不可欠の状況になっている。高燃焼度化を達成させるには、燃料中のウラン濃縮度（又はプルトニウム富化度）を増加させることだから、そのままでは必然的に燃焼初期には、炉心に大きな余剰反応度が投入されると同時に、大きな出力ピーキング及び出力ミスマッチが発生する。この2つの課題を同時に解決させるためには、現在の動力用熱中性子炉では燃料集合体中の数本の燃料棒にガドリニア（ Gd_2O_3 ）を添加することが一般的になっている。このガドリニアの使用によって、上述した2つの課題が解決されるだけでなく、反応度制御系等に大きな変更を行わなくても炉心設計ができる見通しが得られている。

ガドリニウムの熱中性子吸収断面積は数万バーンと極めて大きいので、抑制反応度はガドリニア濃度が1%未満の低濃度で飽和する傾向にある。反応度抑制の観点から、燃料集合体内の多くの燃料棒にガドリニアを添加すると、燃焼に伴ってガドリニウムが消滅した際の局所的出力ピーキングが過大になるので、集合体当たりのガドリニア入り燃料棒の本数も制限されている。このようなことからガドリニア入り燃料棒の配置は、炉型によってそれぞれ独自の定まった方法が考え出されている^{1,2}。このように、燃料の高燃焼度化に伴って、燃焼初期炉心では、核分裂性物質と中性子吸収物質とがそれぞれ高濃度で共存する。主にプルトニウムを燃料に使用する沸騰軽水冷却圧力管型重水炉（HWRs）では、ガドリニアの添加によって格子の非均質性がいっそう増大し、従来の核計算精度や炉の核的性能とは異なる課題が生じる。

燃料と減速材が圧力管とカランドリア管によって分離されているHWRは、軽水炉に比べてもともと非均質性が強く、炉心特性も大きく異なる。過出力時でも冷却材の軽水が減速材の重水と同時に状態変化を生じることはないHWRのボイド反応度は、格子条件によってはその符号も変化するため、運転制御特性の評価をする上でボイド反応度の挙動の解明が極めて重要である。HWRではプルトニウムの使用によってボイド反応度を負側に抑制することが可能になり、HWR実証炉のボイド係数はほぼ零近傍の値になるように設計されている。出力分布や反応度の制御に使用する通常の中性子吸収材であるホウ酸や制御棒は、HWRの場合すべて減速材中で用いられており、これらの中性子吸収材はボイド反応度を正側に移行させることが既に明らかにされている^{3,4}。燃料中にガドリニアを添加した場合、ガドリニアがボイド反応度に対して通常の中性子吸収材と同様の効果を示すか否かを臨界実験及び核計算コードによる結果を用いて考察した。

2. 実験及び解析

2.1 評価手法

DCA (Deuterium Critical Assembly) 炉心を用いた臨界実験及び圧力管型重水炉 (HWRs) の核設計コードによる実験解析結果をもとに、次のパラメータに着目してガドリニアがボイド反応度に及ぼす影響を考察した。①ガドリニア入燃料集合体 (Gd入燃料) 内のガドリニア濃度、②Gd入燃料の炉心内での装荷割合、③ガドリニアを含まない通常の燃料集合体 (標準燃料) 中の核分裂性核種の相異。解析では、格子計算にWIMS-Dコード⁵を、拡散計算にCITATIONコード⁶を使用した。ガドリニア添加によるボイド反応度に対するこれらの計算コードによる計算精度は、以下に示すようにGd入燃料を少数体装荷したDCA炉心における実験解析によって評価された。なお、ガドリニアは、燃料集合体内の一部の燃料棒に均一に添加された。

WIMS-Dによる格子計算では69群核データライブラリーを9群に分割して各メッシュ領域の衝突確率を求めた後、3群に縮約して高速群 (>5.53KeV)、中速群 (5.53KeV ~ 0.625eV) 及び熱群 (<0.625eV) の格子平均群定数を得た。ボイド反応度はこの3群定数を用いてCITATIONによる炉心拡散計算から求められた。Gd入燃料装荷炉心のボイド反応度に対するGd入燃料中のガドリニア濃度、Gd入燃料装荷割合及び標準燃料中の核分裂性核種の相異の効果調べるため、燃料領域毎のボイド反応度の成分を、摂動法により3群で計算した。格子計算で求めた群定数及び拡散計算で求めた中性子束・随伴中性子束を用いて、PERKYコード⁷によりボイド反応度の厳密摂動計算を行った。

上記核設計コードによるボイド反応度の計算精度を検証するため、Gd入燃料を装荷したDCA炉心でボイド反応度を臨界水位差法により測定した。ここに示すボイド反応度は、炉心内の全圧力管内の冷却材を軽水 (0%ボイド率) から空気 (100%ボイド率) に置換した際の反応度である。臨界水位差法によるボイド反応度 $\rho_{0 \rightarrow v}$ (\$ 単位) は

$$\rho_{0 \rightarrow v} = \int_{B_{z,v}^{z_0}}^{B_{z_0}^{z_0}} \left(\frac{\partial \rho}{\partial B_{z,v}^{z_0}} \right) dB_{z,v}^{z_0} \quad (2.1)$$

なる式で定義される。ここで、

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial B_{z,v}^{z_0}} \right) = 100\% \text{ボイド炉心における軸方向バックリングに対する反応度係数}$$

$B_{z_0}^{z_0}$, $B_{z,v}^{z_0} = 0\% \text{ボイド}$ 、 $100\% \text{ボイド}$ での臨界軸方向バックリング

実際に $\rho_{0 \rightarrow v}$ の実験値を得る場合には、直接測定できる臨界水位を用いて次式に変形して求めた³⁾。

$$\rho_{0 \rightarrow v} = \int_{H_v}^{H_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_v dH - \frac{A \cdot \delta \lambda_z}{(H_0 + \lambda_{zv})^3} \quad (2.2)$$

ただし、 $\delta \lambda_z = \lambda_{zv} - \lambda_{zo}$

ここで、

$H_0, H_v = 0\% \text{ボイド}, 100\% \text{ボイド}$ 各炉心の臨界水位

$\left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)_v = 100\% \text{ボイド}$ 炉心における水位に対する反応度係数

$\lambda_{zo}, \lambda_{zv} = 0\% \text{ボイド}, 100\% \text{ボイド}$ 各炉心の軸方向反射体節約

A = 定数

また、ガドリニア添加によるガドリニア反応度 ρ_{gd} も同様に臨界水位差法で測定した。 ρ_{gd} の測定では、ガドリニア濃度変化にともなう G d 入燃料集合体内の軸方向反射体節約の変化に有意の差がなかったため、(2.2) 式右辺第 2 項はゼロである。

2.2 実験体系

実験に使用した G d 入燃料は、2.1 図に示す同心円 3 層の断面構造をもつ 28 本又は 36 本の燃料棒を束ねたクラスタ型燃料である。いずれの G d 入燃料もクラスタの中間リング層に、回転対称になるように 3 本ないし 4 本のガドリニア入燃料棒 (G d 入燃料棒) が組み込まれ、その他はガドリニアを含まない燃料棒 (標準燃料棒) である。ガドリニアはペレットに均一に混合されている。実証炉に使用する G d 入燃料は、G d 入燃料棒をクラスタの中間リング層に組み込んだ設計である。原型炉「ふげん」(運転中) から実証炉 (計画中) に出力のスケールアップに伴い、クラスタ当たりの燃料棒本数はチャンネル出力を増加させるため、28 本から 36 本に増加した設計であるが、燃料棒直径は熱除去能力保持の観点から 16.46mm から 12.5mm に減少している。G d 入燃料棒を中間リング層に配置する理由は、G d による抑制反応度及び燃焼が進んで G d が消滅した際の出力ミスマッチがそれぞれ過大にならないようにするためである。

実験に使用した G d 入燃料及び G d の入らない標準燃料の仕様を 2.1 表に示す。実験に使用した燃料クラスタの燃料棒の直径はすべて 16.8mm であるが、ボイド反応度に対するク

クラスタ内燃料棒本数の影響を調べるため、G d入燃料、標準燃料ともに28本又は36本クラスタをそれぞれ使用した。28本クラスタの燃料物質はすべてUO₂燃料棒から成るが、36本クラスタの燃料物質はG d入燃料棒以外はMOX燃料棒である。ただし、G d入燃料棒の核分裂性核種はいずれのクラスタにおいてもウランである。なお、実証炉では全炉心でMOX燃料を使用する設計になっている。

2.1表に示す28本G d入燃料又は36本G d入燃料を標準燃料とともに25.0mmピッチ格子のDCA炉心にそれぞれ装荷し、ガドリニア濃度をそれぞれ0.0、0.1、0.5、1.0wt %に変化させてボイド反応度を測定した。28本クラスタ又は36本クラスタの各G d入燃料を装荷した2種類の実験炉心（それぞれG-1、G-2炉心）の形状を、2.2表及び2.2図に示す。2.2図に示すように、（G-1）炉心では28本G d入燃料が炉心中央領域（3×3）チャンネルのうち4つの角のチャンネルに4体、（G-2）炉心では36本G d入燃料が炉心中心チャンネルに1体それぞれ装荷された。G d入燃料の周辺チャンネルには、G d入燃料と構造が同一で、かつ核分裂性物質濃度がほぼ等しい1.2wt % UO₂（1.2UO₂）または0.87wt % PuO₂富化PuO₂-UO₂（0.87MOX）クラスタを使用した。ただし、2.2表に示すように各々の炉心で重水減速材中の¹⁰B濃度及び重水純度は若干異なっている。

3. 結果

3.1 ガドリニア反応度のポイド率効果

(G-1) 炉心で測定したガドリニア反応度 ρ_{Gd} の Gd_2O_3 濃度依存性を計算値とともに 3.1 表及び 3.1 図に示す。3.1 図より Gd の中性子吸収断面積は極めて大きいので、0.1 wt % の Gd_2O_3 濃度でも大きな反応度低下をもたらし、0.5 wt % でほぼ飽和する傾向にあることが分る。0 %、100 % の各ポイド率で計算値の評価の傾向は逆になっているが、計算値は実験値と $\pm 0.4 \$$ (相対値で $\pm 11.6\%$) で一致する。0 % ポイド率での ρ_{Gd} は 100 % ポイド率でのそれより 40 ~ 50 % 小さい (実験値比) ことが分る。これは、ポイド率が高いほど軽水による熱中性子遮蔽効果が小さくなり、Gd による中性子吸収が増大するためである。

3.2 ガドリニア濃度依存性と Gd 入燃料棒配置の効果

(G-1) 及び (G-2) 炉心におけるポイド反応度の実験値及び計算値を 3.1 表に示す。また各炉心のポイド反応度の Gd_2O_3 濃度依存性をそれぞれ 3.2、3.3 図に示す。いずれの炉心でも $\rho_{0 \rightarrow v}$ の Gd_2O_3 濃度依存性は同様の傾向を示した。実験値は、燃料クラスタの中間層に Gd 入燃料棒を配置した場合の結果だけであるが、計算値には、外層又は内層 ((G-1) 炉心のみ) に配置した場合の結果も示した。3.2 及び 3.3 図から分るように、ポイド反応度に関する計算精度は $\pm 0.2 \$$ であった。いずれの層に Gd 入燃料棒を配置しても、 $\rho_{0 \rightarrow v}$ は Gd_2O_3 の添加によって正側にジャンプし、0.5 wt % 未満の濃度で飽和する傾向にある。ガドリニア添加による $\rho_{0 \rightarrow v}$ の正側への移行量は、Gd 入燃料棒を外層に配置した方が大きく、内層に配置した場合は殆ど無視できる。この理由は、Gd 及び燃料の熱中性子吸収断面積が大きいため、ポイド発生に伴う熱中性子遮蔽効果の変化が重水減速材に近接しているクラスタの外側に位置した Gd 入燃料棒ほど大きくなるからである。Gd 入燃料棒が内層に配置された場合は、軽水による熱中性子遮蔽効果の変化が外層の場合に比べて相対的に小さくなるからである。

3.1 節で Gd 入燃料装荷炉心のポイド反応度計算精度が明らかになったので、3.2 節以降では Gd 入燃料棒をクラスタの中間層に配置した (G-1) 炉心を対象にして $\rho_{0 \rightarrow v}$ のガドリニア濃度による効果を摂動計算の結果も含めて考察する。

3.3 Gd 入燃料装荷割合の影響

Gd 入燃料の炉心への装荷割合を増加させて、そのインポートランスを増大させてもガド

リニア濃度を高めた場合と同様に $\rho_{0 \rightarrow v}$ が正側へ移行することは 3.1 節の結果から推察できる。ここで G d 入燃料と標準燃料は互いに隣り合わないよう分散的な配置を考え、

(G-1) 炉心の標準燃料を G d 入燃料で順次 4, 8, 12, 16, 及び 21 体置換した炉心における $\rho_{0 \rightarrow v}$ のガドリニア濃度依存性を計算により検討した。G d 入燃料の装荷割合をパラメータにして示した 3.4 図(1)の結果から、G d 入燃料の装荷割合の増加はガドリニア濃度の増加の場合と同様に $\rho_{0 \rightarrow v}$ をいっそう正側に移行させることが分る。

3.4 標準燃料中の核分裂性核種の影響

G d 入燃料装荷炉心の $\rho_{0 \rightarrow v}$ に及ぼす標準燃料中の核分裂性核種の影響を調べるため、標準燃料を 1.2 UO_2 と同一形状で、かつ同一核分裂物質割合をもつ $0.54 \text{ wt} \% \text{ PuO}_2$ 富化 $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ (0.54 MOX) 燃料に置き換えた炉心を取り上げ、さらに G d 入燃料の装荷割合を 3.3 節に示す方法と同様に变化させた各炉心における $\rho_{0 \rightarrow v}$ のガドリニア濃度依存性を計算した。その結果を、 1.2 UO_2 標準燃料の場合と同様に整理し、3.4 図(2)に示す。

標準燃料を UO_2 から MOX に変更しても、 $\rho_{0 \rightarrow v}$ のガドリニア濃度依存性の傾向は変わらないが、 $\rho_{0 \rightarrow v}$ の正側への移行量は抑制され、かつガドリニア濃度が増加するほどこの抑制効果が増大する。従って、G d 入燃料を装荷した炉心でも、プルトニウムはウランに比べて $\rho_{0 \rightarrow v}$ を抑制的に作用することを示している。

3.5 摂動計算の結果

(G-1) 炉心において摂動計算を行い、G d 入燃料(添字 G)、標準燃料(添字 N)各格子領域の $\rho_{0 \rightarrow v}$ の成分 (ρ_{0v}^G, ρ_{0v}^N) 及び吸収・減速による除去断面積 (Σ^{-v} 、 $-\Sigma_r$)、核分裂生成断面積 $\nu \Sigma_f$ 、中性子漏洩の変化による $\rho_{0 \rightarrow v}$ の各成分 ($\rho_{v,r}, \rho_{v,r}, \rho_{v,i}$) を、標準燃料が 1.2 UO_2 の場合及び 0.54 MOX の場合についてそれぞれ領域毎に求めた。標準燃料の種類毎に ρ_{0v}^G, ρ_{0v}^N を 3.5 図に示す。同様に $\rho_{v,r}, \rho_{v,r}$ を 3.6 図に示す。なお、G d 入燃料装荷炉心の $\rho_{0 \rightarrow v}$ に及ぼす標準燃料中のプルトニウム富化度の影響を詳細に調べるため、 $\rho_{v,r}, \rho_{v,r}$ 及び $\rho_{v,i}$ については標準燃料を 0.87 MOX にした場合も計算し、その結果を 3.6 図(3)に示す。これらの成分はいずれも Gd_2O_3 濃度 $0 \text{ wt} \%$ における各成分を基準として、ガドリニア添加によって生ずる各成分の変化量として示した。なお、摂動法で求めたボイド反応度は、固有値計算で求めたボイド反応度と 5% 以内で一致し、しかもそのガドリニア濃度に対する傾向は 3.5 図(1)に

示すように、3.2図の結果と同様であることが分る。

各燃料領域における ρ^{G_v} 及び ρ^{N_v} の Gd_2O_3 濃度依存性は逆の傾向を示す。つまり、 Gd 入燃料格子自らは $\rho_{o \rightarrow v}$ を負側に抑制させる性質を有するものの、隣接する標準燃料格子が Gd 入燃料の装荷によって $\rho_{o \rightarrow v}$ を正側に移行させるので、結果的にガドリニアの添加によって炉心の $\rho_{o \rightarrow v}$ が正側に移行するのである。

3.5図(1)及び(2)を比較すれば、 $\rho_{o \rightarrow v}$ に及ぼすガドリニアの効果は標準燃料の UO_2 又は MOX によって異なることが分る。 UO_2 から MOX に変更した炉心では、ガドリニア添加による $\rho_{o \rightarrow v}$ の正側への移行量が小さくなるとともに、 $\rho_{o \rightarrow v}$ が0.1wt%の Gd_2O_3 濃度で極大になる。これらの結果は、3.6図(1)~(3)を比較すれば明らかである。前者については、ガドリニア濃度に対する $\rho_{v, r}$ の依存性は燃料核種によって大きな変化はないが、 $\rho_{v, r}$ は標準燃料を UO_2 から MOX にすれば、大きく低下することに起因する。後者については、標準燃料が MOX の場合、 Gd 入燃料格子における $\rho_{v, r}$ 、 $\rho_{v, r}$ のガドリニア濃度に対する変化率が、 UO_2 の場合に比べて小さいからである。3.6図より、ガドリニアの添加によって炉心の $\rho_{o \rightarrow v}$ を正側に移行させる大きな理由は、ガドリニアの添加にともなって標準燃料領域での核分裂効果 $\rho^{N_v, r}$ が増加することである。

4. 考察

Gd入燃料中へのガドリニアの添加又はGd入燃料の炉心への装荷割合の増加は、減速材中の溶解性ボロンや制御棒のような中性子吸収材とは異なり、間接的に炉心の $\rho_{0 \rightarrow v}$ を正側へ移行させることが判明した。ボイド反応度に及ぼすガドリニアの影響を考察するため、ボイド発生に伴うGd入燃料及びそれに隣接する標準燃料の各格子領域内での中性子挙動を考え、次にGd入燃料装荷炉心での中性子挙動を考えてみる。

4.1 ボイド変化に対する格子内中性子挙動

一般にボイドが発生すれば、軽水による減速効果及び吸収が減少するので、燃料中の熱中性子スペクトルは硬化するとともに、熱中性子束が平坦化する。このためガドリニアを含まない標準燃料格子では、ボイド発生によって4因子のうち η 値の変化は小さいが、 f 値はやや増加する。ウランの標準燃料格子では、熱中性子に対する燃料吸収断面積 Σ_a の中性子エネルギー依存性はほぼ $1/V$ 特性なので、ボイド発生によって中性子スペクトル硬化が寄与し、中性子吸収が減少する($\rho_{0 \rightarrow v}$ は正側に移行する傾向にある)。MOXの標準燃料では、ウラン燃料に比べてスペクトルはより硬化しているので、ボイド発生によるスペクトル硬化の影響は比較的小さいが、 f 値の増加がプルトニウムの0.3 eVの共鳴吸収及び共鳴核分裂を増加させる。即ち、ボイド発生は中性子吸収も増加させるが核分裂も増加させる($\rho_{0 \rightarrow v}$ の正側への移行は抑制される^{9,10})。

Gd入ウラン燃料格子では、ボイド発生に伴うスペクトル硬化の影響は小さく、軽水の熱中性子遮蔽効果の減少によってガドリニアの中性子吸収が大幅に増加する(3.1図参照)。ボイド発生によってGdの中性子吸収が増加すれば、Gd入燃料中の熱中性子束が減少し、 f の増加の寄与も減殺されるので、核分裂効果も減少する(3.6図参照)。つまり、Gd入燃料ではボイド発生によって主に η 値の減少が寄与するため、 $\rho_{0 \rightarrow v}$ は負側に移行すると考えられる。

4.2 ボイド変化に対する炉心内中性子挙動

Gd入燃料が分散的に装荷された炉心では、もともとGd入燃料での熱中性子束が低い上に、上述したようにボイド発生によってGdの中性子吸収が更に増加するので、Gd入燃料格子の中性子インポートンスは隣接する標準燃料格子に比べていっそう低くなる。逆に標準燃料格子では、ボイド発生によって相対的にインポートンス増加が助長され、かつ、中性子スペクトルも影響を受けてスペクトル硬化が助長される。Gd入燃料の装荷によ

て標準燃料領域で、ボイド発生に伴うインポートランス増加が助長されれば、主に核分裂効果が助長される。3.6図に示すように、標準燃料領域での核分裂効果 $\rho^{N_{v,r}}$ がGd入燃料中のガドリニア濃度の増加とともに正側に大きくなるのが、Gd入燃料の装荷が $\rho_{o \rightarrow v}$ を正側に移行させる支配的理由である。ボイド発生によって標準燃料でスペクトル硬化が助長されれば、ウラン又はプルトニウム含有量の少ない0.54MOXでは中性子吸収を減少させるので、3.6図(1)及び(2)に示すように $\rho^{N_{v,r}}$ がガドリニア濃度の増加とともに正側へ移行する。しかし、プルトニウム含有量の多い0.87MOXでは、スペクトル硬化によって0.3eVの共鳴吸収の変化が目立ってくるので、中性子吸収効果の増加が顕著になり、3.6図(3)に示すように $\rho^{N_{v,r}}$ がガドリニア濃度の増加とともに負側に移行する。このため、プルトニウムの富化度が高くなるほど、ガドリニアの添加による $\rho_{o \rightarrow v}$ の正側への移行は減少する。標準燃料にMOXを使用した場合、低いGd₂O₃濃度で $\rho_{o \rightarrow v}$ が極大になる理由は、プルトニウム自体熱中性子吸収断面積が大きいいため、ウランに比べてMOXではGd入燃料が装荷されれば、ボイド発生に伴ってスペクトル硬化が助長されて共鳴吸収効果が負側に利き出すからである(3.6図参照)。

4.3 Gd入燃料装荷炉心でのボイド反応度

Gd入燃料自らは $\rho_{o \rightarrow v}$ を負側へ移行させるものの、その程度は隣接する標準燃料の組成に影響される。中性子吸収の強い高濃縮ウランやプルトニウムが標準燃料に使われると、ボイド発生による標準燃料及びGd入燃料の各格子領域の核分裂効果や吸収効果が相殺されるように作用し合うことになる(3.5図(2)及び3.6図(2)及び(3))。このため3.5図に示すように、標準燃料をUO₂からMOXにすれば、結果的にガドリニア添加による $\rho_{o \rightarrow v}$ の正側への移行が減少するのである。

5. 結論

圧力管型重水炉において、燃料中に添加したガドリニアがボイド反応度に及ぼす効果が、臨界実験体系での実験及び解析から明らかになった。

Gd入燃料を炉心に装荷すればボイド反応度は0.1wt%のGd₂O₃濃度で正側にジャンプし、ボイド反応度は0.5wt%以下の濃度で飽和する。ガドリニアの添加によるボイド反応度の正側への変化量は、Gd入燃料棒をクラスタの外側に配置するほど、またGd入燃料の炉心での装荷割合が高いほど大きくなるが、クラスタ内層への配置ではその変化量は無視できる。しかし、この正側への移行量は標準燃料の核分裂性核種をウランからプルトニウムに変更すれば緩和される。

摂動解析によれば、Gd入燃料それ自体はボイド反応度を負側に移行させるものの、ガドリニア添加がボイド反応度を正側への移行させる主な理由は、ボイド発生によるGd入燃料の大幅な中性子吸収の増加が、Gd入燃料に隣接する標準燃料領域での中性子インポートランスの増加及び中性子スペクトルの硬化を助長させ、その結果、主に標準燃料の核分裂効果が増大するためである。

Gd入燃料のように中性子吸収の大きな燃料が他の燃料と混在する炉心のボイド反応度へ及ぼす影響を考察する場合、格子計算結果だけではなく炉心計算結果を含めて評価する必要がある。

参 考 文 献

1. A. GALPERIN, "Gd Burnable Poison System for Reactivity Control of the First Cycle of a PWR," Ann. Nucl. Energy, Vol. 14, No. 1, 53(1987) .
2. K. P. TERMAAT, "Reactivity Behavior of a Reactor Core Loaded with Gadolinium-Poisoned Fuel Assemblies," Nucl. Technol., 38, 367(1978) .
3. Y. KOWATA and N. FUKUMURA, Nucl. Sci. Eng., 108, 308(1991) .
4. 小綿泰樹、福村信男 : P N C 報告書、TN9410 89-168, (1989) .
5. M. J. HALSALL, "The Use of WIMSD4 and LWRWIMS, READWT and FILSIX, to Generate Two-Group Data for Reactor Calculations," AEEW-M 1785, United Kingdom Atomic Energy Authority (1980) .
6. T. B. FOWLER, D. R. VONDY, and G. W. CUNNINGHAM, " Nuclear Reactor Core Analysis Code :CITATION," TM-2496, Rev. 2, Oak Ridge National Laboratory(1971) .
7. S. IJIMA, Y. YOSHIDA, and H. SAKURAGI, "Calculation Program for Fast Reactor Design. 2(Multi-Dimensional Perturbation Theory Code Based on Diffusion Approximation:PERKY)," Japan Atomic Energy Research Institute(1977) .
8. 小綿泰樹、若林利男、他 : P N C 報告書、TN941 83-163, (1983) .
9. Y. KOWATA and N. FUKUMURA, Nucl. Sci. Eng., 99, 299(1988) .
10. 小綿泰樹 : P N C 報告書、TN941 82-185, (1982) .

Table 2.1 Specification for normal and gadolinia-poisoned fuel rods

Fuel Rod Specification	Normal Rod		Gd-poisoned Rod (1.5wt%UO ₂ rod)			
	UO ₂ rod (28rod fuel)	MOX rod (36rod fuel)	0wt% Gd ₂ O ₃	0.1wt% Gd ₂ O ₃	0.5wt% Gd ₂ O ₃	1.0wt% Gd ₂ O ₃
1. Pellet						
Density(g/cm ³)	10.36	10.17	10.38	10.30	10.30	10.30
PuO ₂ or U ^f enrichment(wt%)	1.20	0.87	1.5	1.5	1.5	1.5
Gd ₂ O ₃ Content(wt%)	-	-	0.0	0.1	0.5	1.0
Diameter(mm)	14.80	14.70	14.77	14.78	14.78	14.78
Nuclide Content(wt%)						
U-235	1.057	0.6194	1.317	1.328	1.323	1.316
U-238	86.793	86.5030	86.563	86.384	86.042	85.612
Pu-238	-	0.0014	-	-	-	-
Pu-239	-	0.6849	-	-	-	-
Pu-240	-	0.0658	-	-	-	-
Pu-241	-	0.0069	-	-	-	-
Pu-242	-	0.0005	-	-	-	-
Gd-155	-	-	0.0	0.0128	0.0634	0.1269
Gd-156	-	-	0.0	0.1776	0.0881	0.1763
Gd-157	-	-	0.0	0.0136	0.0675	0.1350
Gd-158	-	-	0.0	0.0422	0.212	0.4237
O-16	12.15	12.12	12.12	12.201	12.205	12.210
2. Cladding						
Material	Al-Mg Alloy	Zircaloy-2	Al-Mg Alloy	←	←	←
Density(g/cm ³)	2.674	6.523	2.674	←	←	←
Inner Diameter(mm)	15.03	15.06	15.03	14.98	←	←
Outer Diameter(mm)	16.73	16.68	16.73	16.69	←	←
Nuclide Content(wt%)						
Al	96.98	-	96.98	←	←	←
Mg	2.60	-	2.60	←	←	←
Zr	-	98.22	-	-	-	-
Sn	-	1.48	-	-	-	-
Fe	-	0.14	-	-	-	-
Cr	-	0.10	-	-	-	-
Ni	-	0.06	-	-	-	-

Table 2.2 Core condition for measurement of void reactivity

Core with Gd-poisoned Fuel Assembly	Core No.	
	G-1	G-2
Gadolinia-poisoned Fuel Assembly		
Loaded Number	4	1
Location of Assemblies	2A-B-C-D2 ch. ^a	0 ch.
Gd-poisoned Rod	1.5wt%UO ₂ +Gd ₂ O ₃	1.5wt%UO ₂ +Gd ₂ O ₃
Position & Number of Gd-poisoned Rod in Assembly	Middle Layer .4	Middle Layer .3
Normal Rod in Assembly	1.2wt%UO ₂	0.87wt%PuO ₂ -UO ₂
Total Rods in Assembly	28	36
Normal Fuel Assembly	28rod-1.2wt%UO ₂	①36rod-0.87wt%PuO ₂ -UO ₂ ②28rod-1.2wt%UO ₂
Loaded Number	93	① 8 ② 88
Lattice Pitch (cm)	25.0	25.0
Soluble ¹⁰ B content in D ₂ O(ppm)	2.64	0.0
Purity of D ₂ O Moderator(mol%)	99.2	99.4

^a 2A-B-C-D2 means 2A2, 2B2, 2C2 and 2D2.

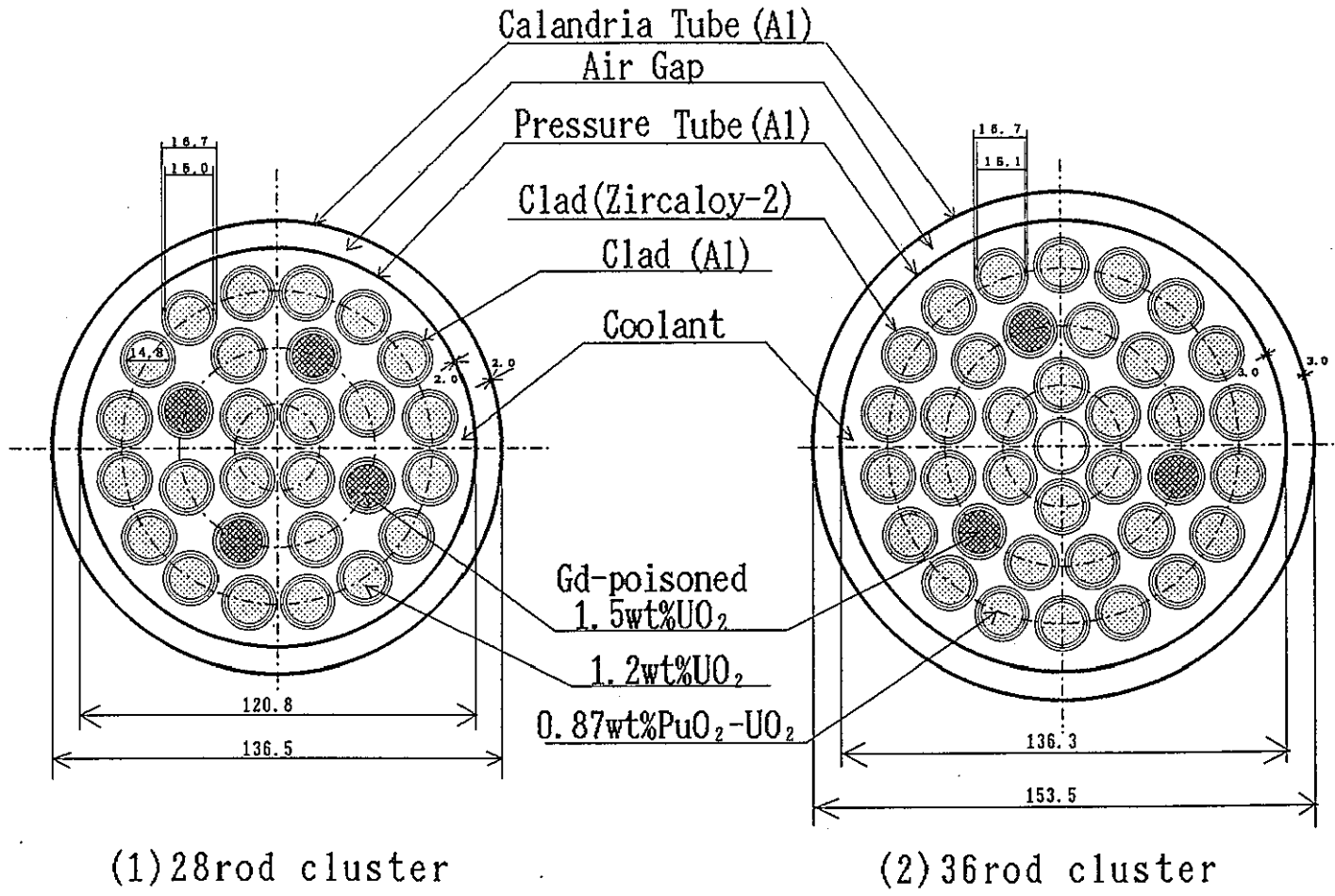


Fig.2.1 Cross sectional view of gadolinia-poisoned fuel assembly having Gd₂O₃-UO₂ rods.

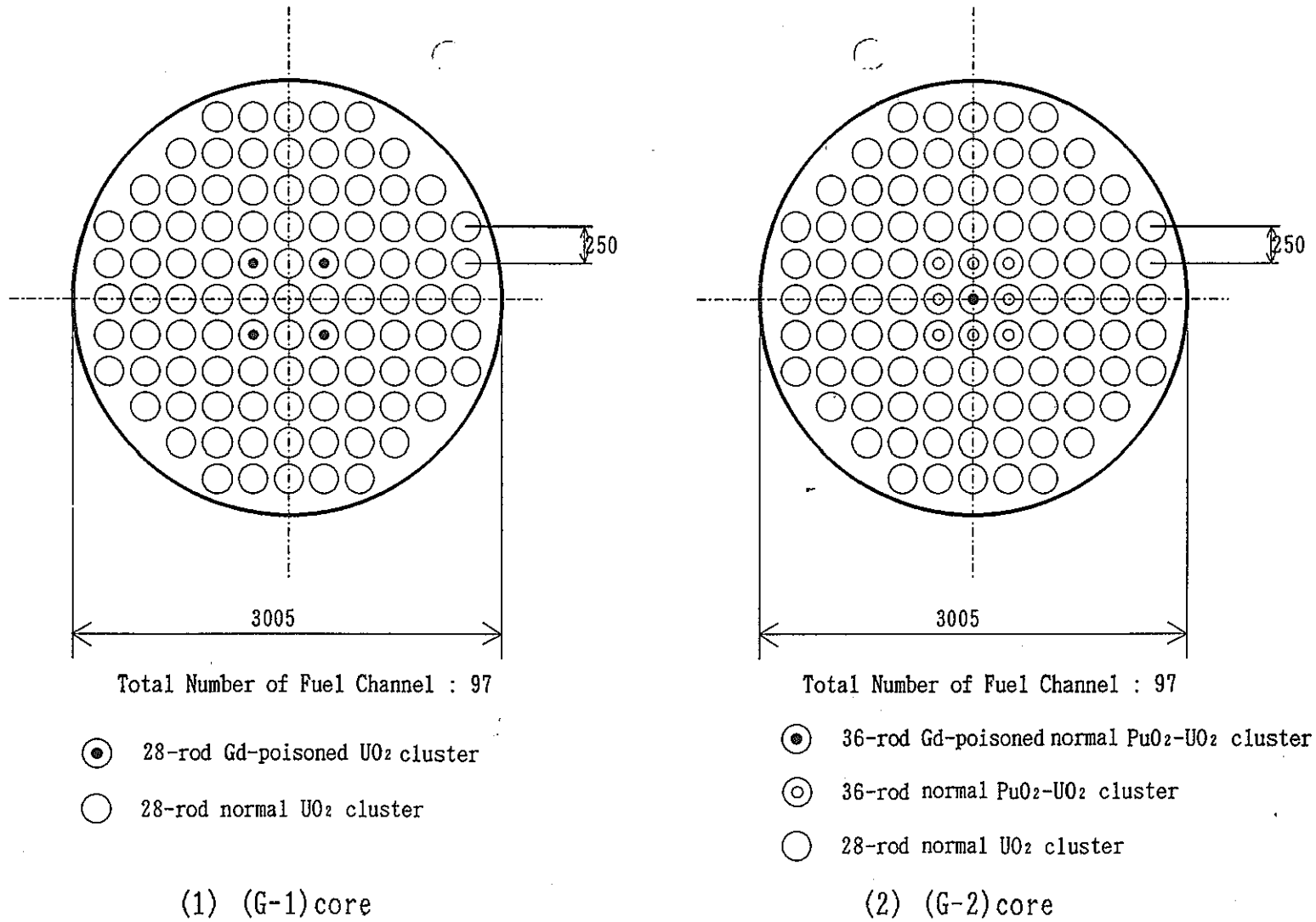


Fig.2.2 Configuration of 25cm pitch lattice core fueled with gadolinia-poisoned clusters.

Table3.1 Measured and calculated gadolinia worths in the core with four 28rod gadolinia-poisoned fuel clusters in which four gadolinia-poisoned fuel rods are located in middle layer.

Gd ₂ O ₃ concentration (wt%)	Void fraction (%)	Gadolinia worth(\$)		β_{eff} (%)
		Experiment	Calculation	
0.1	0	-2.17±0.09	-2.37	0.771
	100	-3.01±0.12	-2.74	0.784
0.5	0	-2.93±0.09	-3.27	0.771
	100	-4.32±0.12	-4.03	0.784
1.0	0	-3.11±0.09	-3.47	0.771
	100	-4.63±0.12	-4.33	0.784

Table3.2 Measured and calculated void reactivities in the core with four 28rod gadolinia-poisoned fuel clusters.

Gd-poisoned fuel rod		Void reactivity(\$)		β_{eff} (%) at voided core
Gd ₂ O ₃ concentration (wt%)	Location(Number)	Experiment	Calculation	
0.0	Middle(4)	3.48±0.19	3.31	0.783
	Outer (4)	————	3.26	0.783
	Inner (2)	————	3.35	0.783
0.1	Middle(4)	3.88±0.14	3.90	0.784
	Outer (4)	————	4.47	0.784
	Inner (2)	————	3.46	0.783
0.5	Middle(4)	3.71±0.13	3.89	0.784
	Outer (4)	————	4.65	0.784
	Inner (2)	————	3.35	0.784
1.0	Middle(4)	3.67±0.12	3.87	0.784
	Outer (4)	————	4.65	0.784
	Inner (2)	————	3.33	0.784

Table 3.3 Measured and calculated void reactivities in the core with one 36rod gadolinia-poisoned fuel cluster.

Gd-poisoned fuel rod		Void reactivity(\$)		β_{eff} (%) at voided core
Gd ₂ O ₃ concentration (wt%)	Location(Number)	Experiment	Calculation	
0.0	Middle(3)	-6.48 ± 0.24	-6.35	0.653
	Outer (3)	————	-6.50	0.655
	Inner (6)	————	-6.41	0.657
0.1	Middle(3)	————	-5.73	0.660
	Outer (3)	————	-5.35	0.665
	Inner (6)	————	-4.44	0.674
0.5	Middle(3)	————	-5.47	0.664
	Outer (3)	————	-4.86	0.670
	Inner (6)	————	-3.84	0.682
1.0	Middle(3)	-5.62 ± 0.22	-5.41	0.664
	Outer (3)	————	-4.77	0.671
	Inner (6)	————	-3.74	0.683

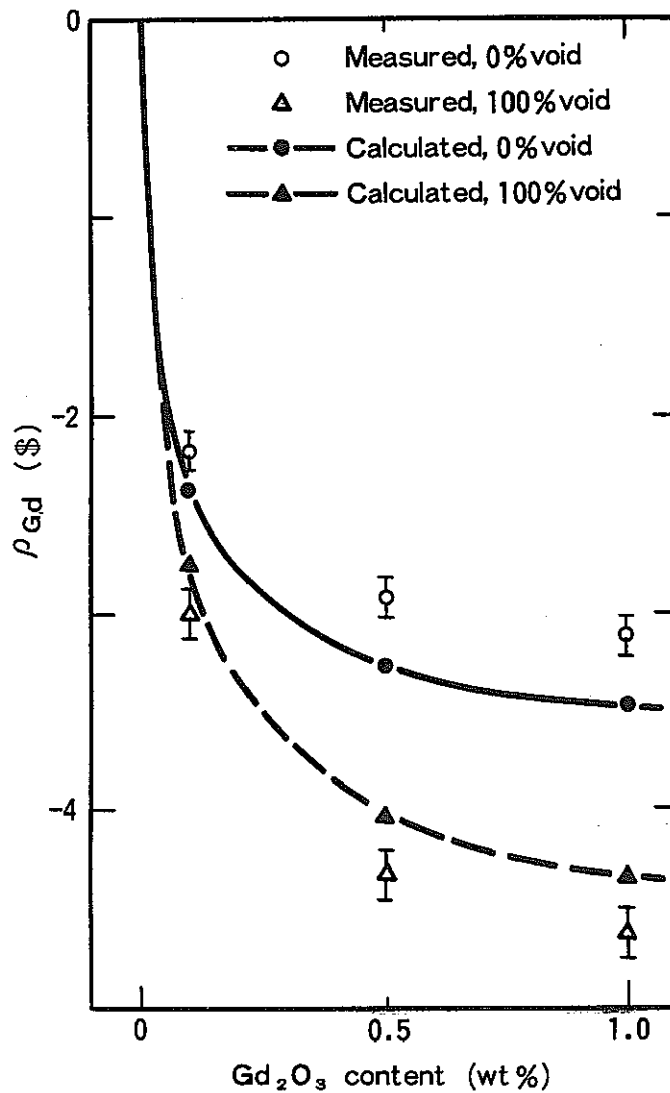


Fig. 3.1 Calculated and measured gadolinia worths as a function of Gd_2O_3 content in the core with four 28 rod gadolinia-poisoned fuel clusters.

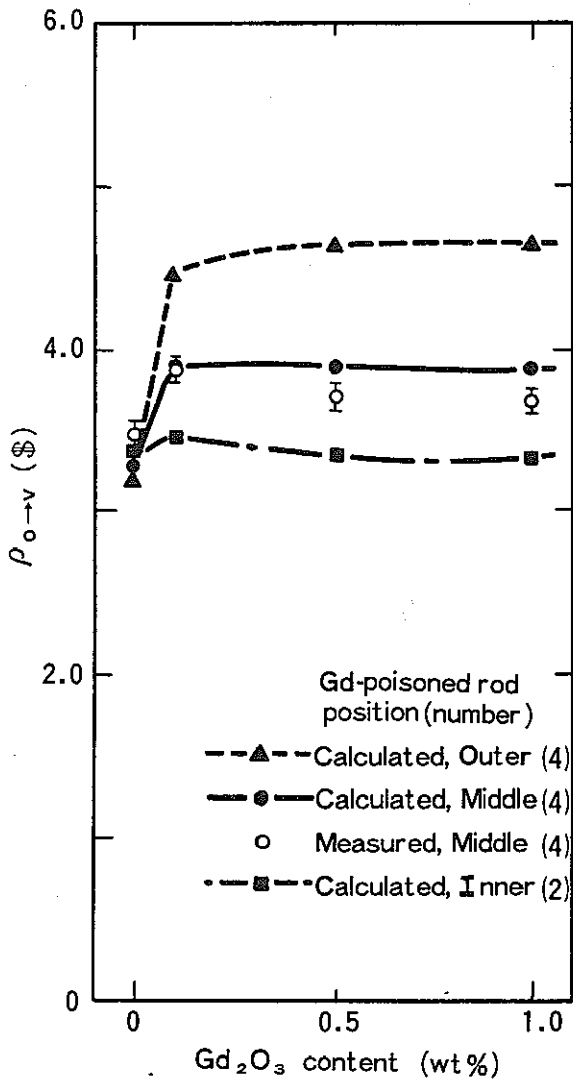


Fig. 3.2 Calculated and measured void reactivities as a function of Gd_2O_3 content in the core with four 28 rod gadolinia-poisoned fuel clusters.

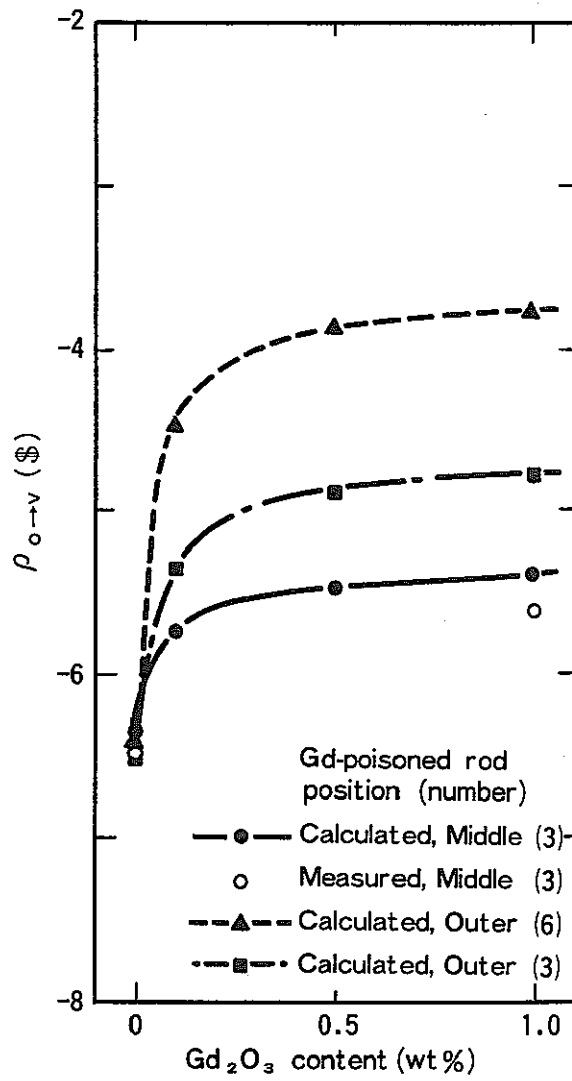
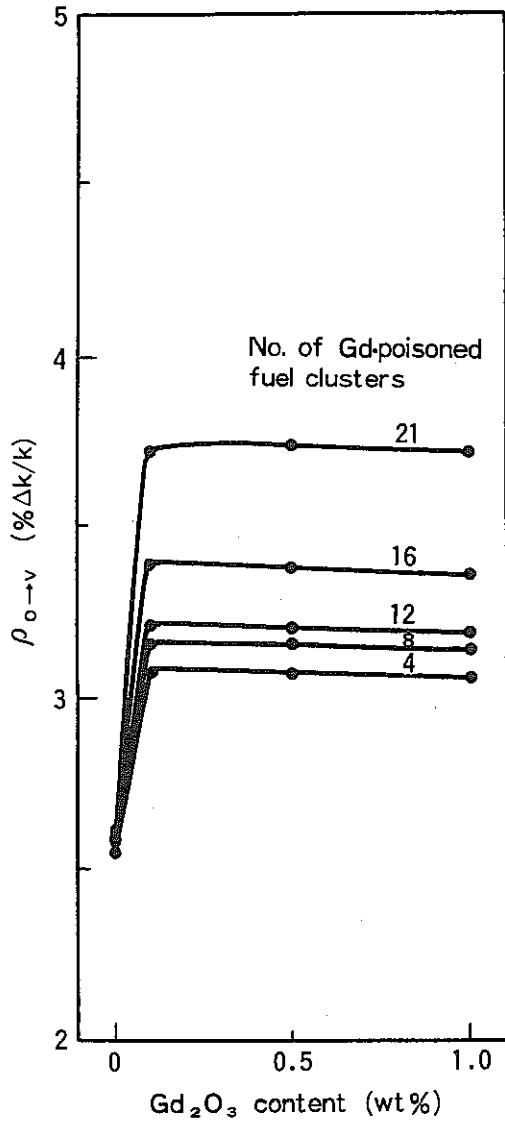
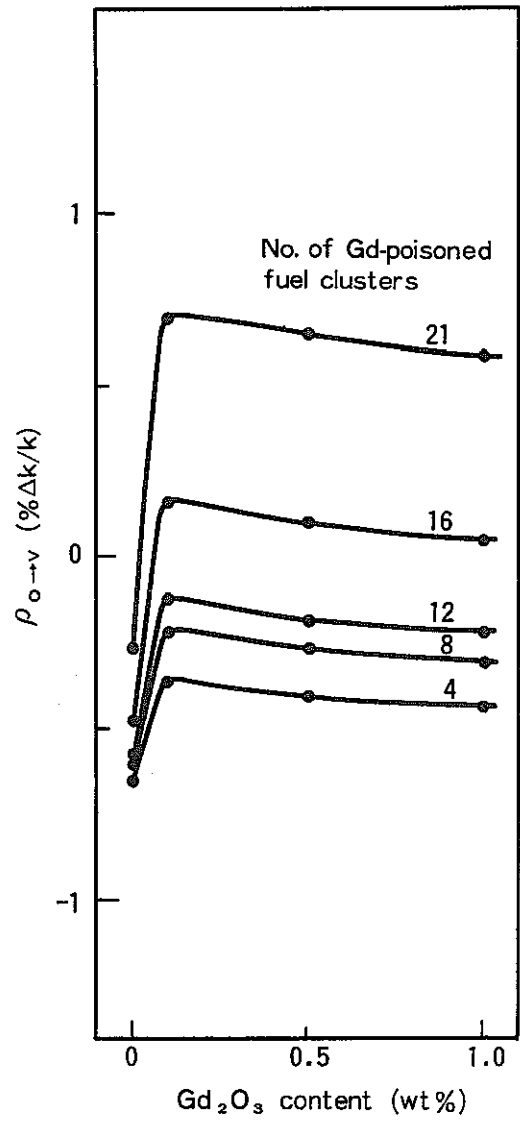


Fig. 3.3 Calculated and measured void reactivities as a function of Gd_2O_3 content in the core with a 36 rod gadolinia-poisoned cluster.

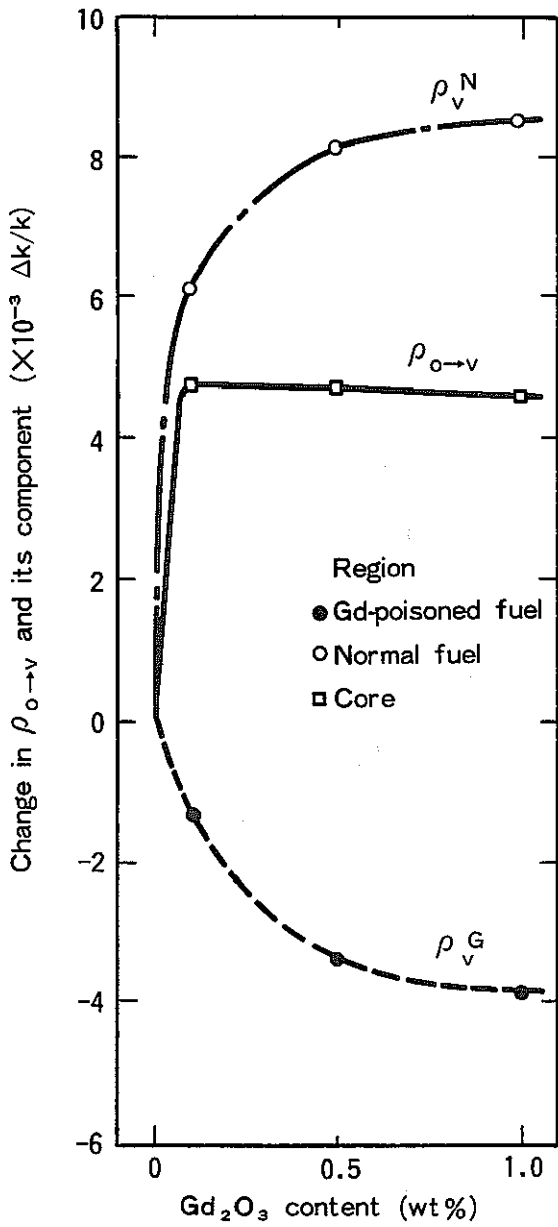


(1) Normal fuel : 1.2wt%UO₂

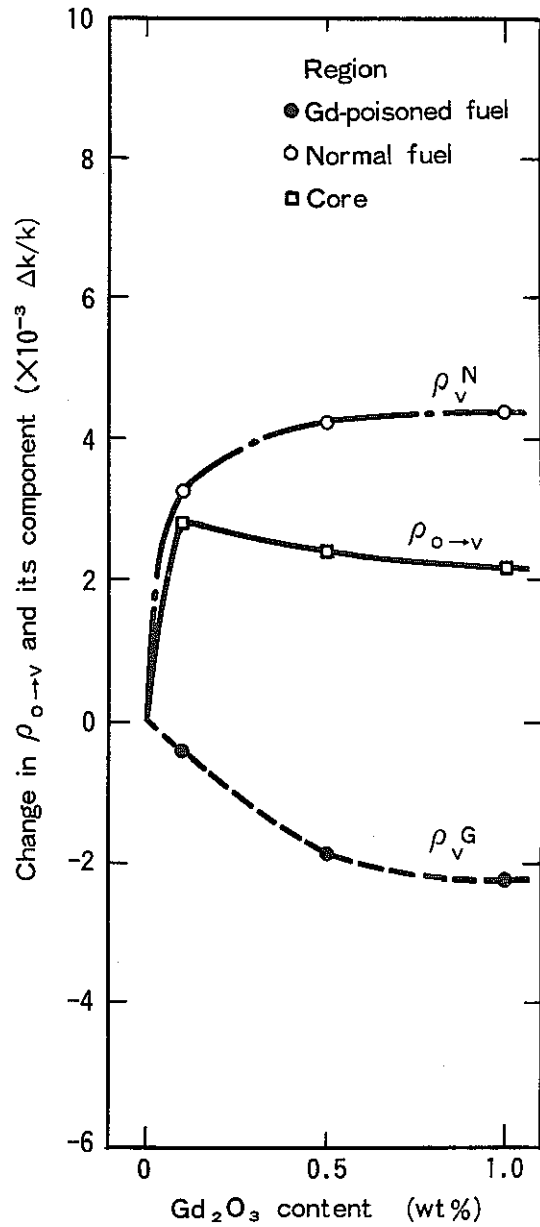


(2) Normal fuel : 0.54wt%MOX

Fig. 3.4 Dependence of calculated void reactivity as functions of Gd₂O₃ content and number of loaded gadolinia-poisoned fuel clusters.

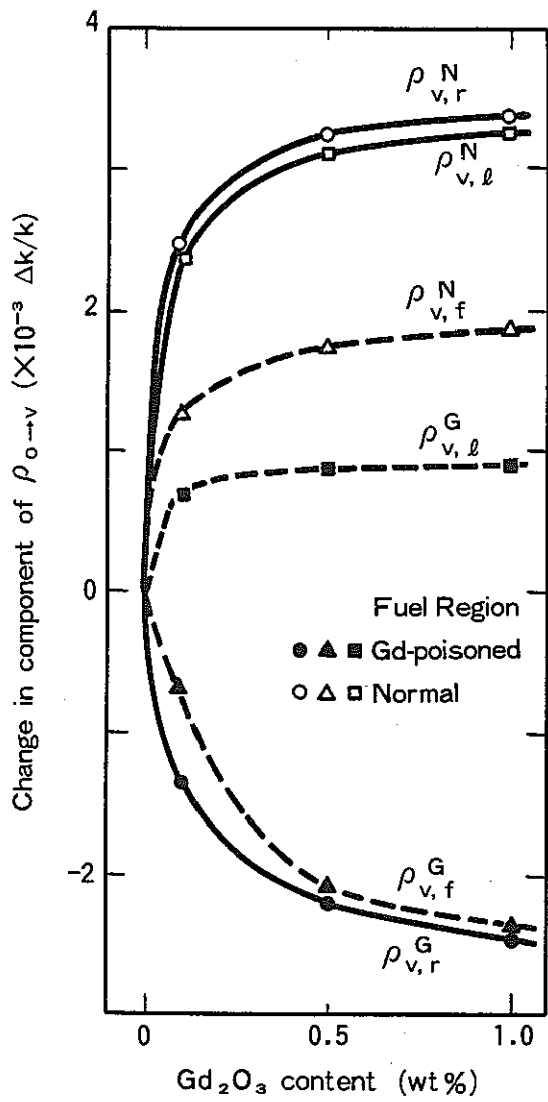


(1) Normal fuel : 1.2wt%UO₂

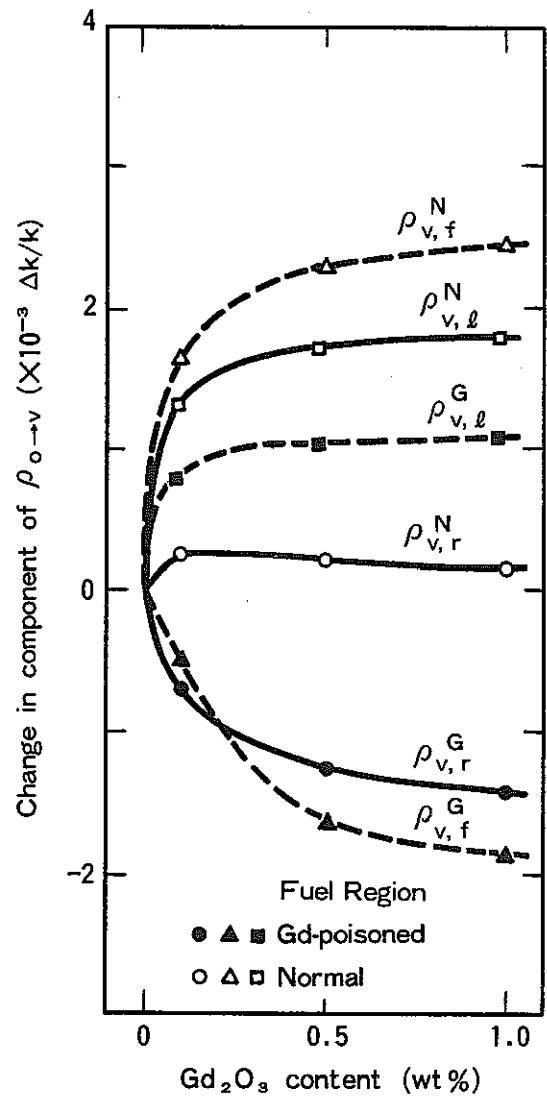


(2) Normal fuel : 0.54wt%MOX

Fig 3.5 Deviation of void reactivity and its components due to addition of Gd₂O₃ into middle layer's rods in the core with four 28 rod gadolinia-poisoned clusters.

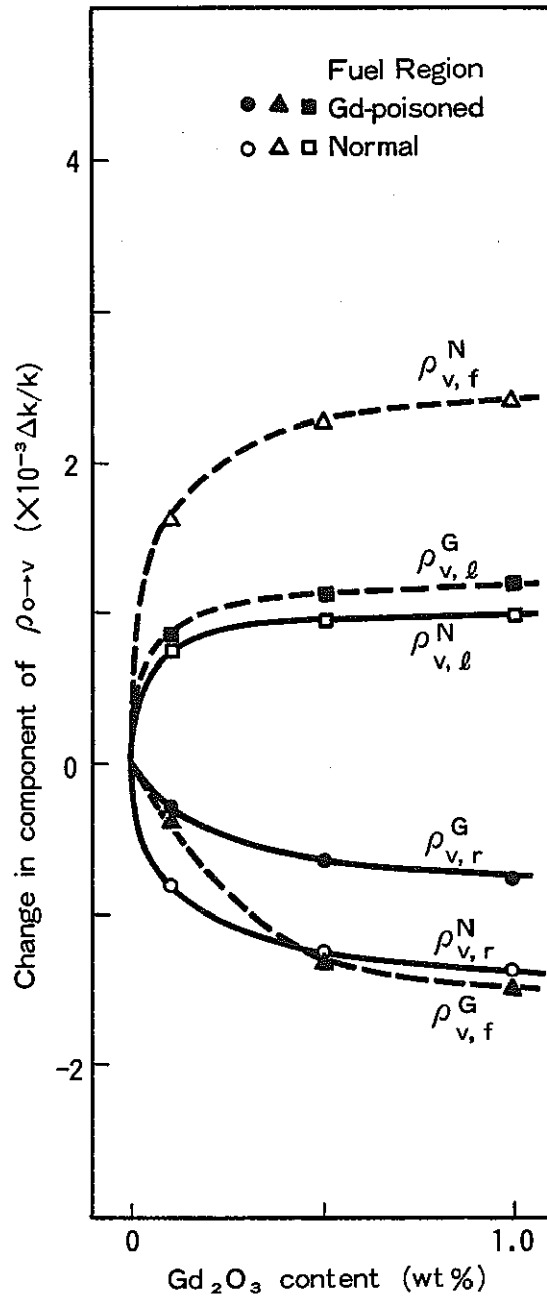


(1) Normal fuel : 1.2wt% UO₂



(2) Normal fuel : 0.54wt% MOX

Fig. 3.6 Deviation of components of void reactivity due to addition of Gd₂O₃ into middle layer's rods in the core with 28 rod gadolinia-poisoned fuel.



(3) Normal fuel : 0.87wt%MOX