

# ATRにおけるGd入り燃料利用特性評価

1988年2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)

## ATRにおけるGd入り燃料利用特性評価

(筆者氏名 \*) 福村 信男\*, 川太 徳夫 \*\*  
若林 利男 \*\*

### 要 旨

#### (目的)

ATR炉心にガドリニア入り燃料を用いた場合の冷却材ボイド反応度の低減効果を定量的に評価し、その現象解明を行う。

#### (方法)

重水臨界実験により精度評価された核特性解析コードシステム WIMS-CITATION を用い、ATR 炉心でのガドリニア入り燃料の最適効果を冷却材ボイド反応度の低減量より評価する。

#### (結果)

ガドリニア濃度、ガドリニア入り燃料棒本数およびガドリニア入り燃料棒の集合体内配置をパラメータとして冷却材ボイド反応度の低減量を最大にする最適パラメータを決定した。この結果 36 本燃料集合体内の内・中間層にガドリニア濃度 5% のガドリニア入り燃料棒本数各 3 本を配置すると燃焼末期 (24 GWD/T) でも冷却材ボイド反応度を負の値にできることが判明した。

#### (結論)

冷却材ボイド反応度が正になりやすい ATR 型炉心でも、バーナブルポイズンとして有効なガドリニア入り燃料棒を効果的に燃料クラスタ内に配列することにより、燃焼期間を通じて冷却材ボイド反応度を常に負の値にする解が得られた。

Coolant Void Reactivity Estimation of  
ATR by Using Gadolinia Fuel Rod

Nobuo FUKUMURA\*, Norio KAWATA\*\*,  
and Toshio WAKABAYASHI\*\*

Abstract

It is a difficult problem to shift coolant void reactivity of ATR to more negative. However it has been clarified by critical experiments with using DCA that use of the fuel pins containing gadolinia is very effective for decreasing coolant void reactivity. Then the analytical study has been done in order to find the solution which has the negative coolant void reactivity of ATR. The lattice is composed of the 36-rod fuel cluster and the lattice pitch is 24.2 cm square. The average enrichment through the MOX fuel cluster is 2.53 or 2.88 w/o Pufis.. This lattice is almost the same one as the demonstration power plant of ATR which is now under designing. The calculation code which is used is WIMS ATR - CITATION code system.

The calculational input parameter is as follows:

- (1) Position of gadolinia poisoned fuel pin.
- (2) Number of gadolinia poisoned fuel pin.
- (3) Concentration of gadolinia contained in the fuel pin.
- (4) Concentration of  $^{10}\text{B}$  in the  $\text{D}_2\text{O}$  moderator.
- (5) 0, 20, 40, 60, 80 and 100% coolant void.

---

\* Experimental Reactor Division, Criticality Engineering Section,  
Oarai Engineering Center, PNC.

\*\* Technical Development Division, Plant Engineering Section.  
Oarai Engineering Center, PNC,

The burn up calculation is up to 20 GWD/T. This is the core average value. The output of calculation is as follows:

- (1) Coolant void reactivity.
- (2) Reactivity coefficient of coolant void.
- (3) Local power peaking.
- (4) Decay curve of gadolinia concentration through burn up.

According to the present study, the following understanding is clarified:

- (1) The best solution which has the negative coolant void reactivity value through burn up is the use of the 36-rod MOX fuel cluster which has the gadolinia poisoned fuel pin both in the inner and in the middle array of the cluster.
- (2) The number of the gadolinia poisoned fuel pin is 3 both in the inner and in the middle array.
- (3) Concentration of the gadolinia is 5 w/o.

It is explained that the above effect is due to decreasing the thermal neutron shielding of H<sub>2</sub>O coolant by the strong neutron absorber gadolinia.

## 目 次

	ページ
1. まえがき .....	1
2. 解析方法 .....	2
3. 解析ケース .....	3
4. 解析条件 .....	3
5. 解析結果および検討 .....	4
6. むすび .....	9
表 .....	11
図 .....	43
付録 .....	81

## 1. まえがき

現在 ATR では、軽水炉並みの長期運転サイクルを目指し種々の方策を検討している。

長期運転サイクルを目指す場合燃料富化度等の増加による燃焼度向上が必要となる。この場合、燃料交換の際、新燃料と燃焼の進んだ燃料との間の出力ミスマッチ（出力ピーキング）が大きくなる。この出力ピーキングを抑制する方策の一つとしてパーナブルポイズン（Gd）入り燃料が考えられる。

ATR で Gd 入り燃料を利用した場合考えられる効果として以下の事が予想される。

- (1) 燃料初期余剰反応度の抑制 …… 重水中<sup>10</sup>B 濃度の減少
- (2) 出力ミスマッチの抑制 ………… 高燃焼度化、熱的余裕度の向上
- (3) 反応度係数の改善 ……………… 運転余裕度の向上

Gd は中性子吸収断面積は非常に大きく Gd 入り燃料を使用した場合特に ATR は重水減速材と軽水冷却材による 2 重減速のため中性子挙動がより複雑となり、Gd 入り燃料棒の集合体内の配置、本数および濃度により核的特性が大巾に変化する可能性がある。

このような観点から最適な Gd 燃料の選択をサーベイし、ATR 実証炉の設計に役立てる。

本サーベイでは、重水臨界実験装置（DCA）を用いた重水臨界実験により精度評価された WIMS - ATR（格子計算）コードおよび CITATION（炉心計算）コードを用いた。

## 2. 解析方法

計算の手順を以下に示す。

### (1) Gd の燃料への添加方法

$\text{PUO}_2 + \text{UO}_2$  を 100 wt % として Gd の重量比を燃料に添加した。

また、WIMS ライブライアリには Gd の同位体（表 2.1 に示す。）のうち 4 核種（155 ~ 158）だけ登録されている（同位体組成重量比で 75.4 %）ので、この 4 核種の重量分を燃料に添加した。

Gd 燃料棒の集合体での配置及び濃度はそれぞれ、同一リングで等間隔、等濃度にした。また、複数のリングにまたがって配置する場合はなるべく等ピッチになるようにした。

### (2) 格子計算

Gd 燃料棒を配置した燃料集合体を定格出力（冷却材ボイド率 40 %、重水中ボロン濃度 0 ppm）で、取出し燃焼度まで燃焼させた。即ち、Gd の影響が無くなるまで燃焼計算を行い以後、取出しまでは通常燃料を代用した。

つぎに BOC および EOC の炉心燃焼度パターンの各燃焼度でボイド点を振り格子計算を行った。このとき、重水中のボロン濃度は 0 ppm 及び臨界ボロン濃度にした。

### (3) 炉心計算

Gd 入り燃料集合体の装荷パターンをパラメータとして炉心計算を行った。炉心計算モデルは 2 次元 X-Y 体系である。これを図 2.1 に示す。このときの炉心は平衡時の BOC または EOC（4 パッチ燃料交換）で、燃焼度は平均でそれぞれ、12 GWD/T と 20 GWD/T（燃焼度分布を図 2.2 に示す。）である。また、重水中ボロン濃度は臨界ボロン濃度である。即ち、0 ppm で、炉心計算を行い、この中から選択的に臨界ボロン濃度を振って再度炉心計算を行った。

### (4) ボイド反応度計算式

冷却材ボイド率を振って炉心計算を行い、以下の計算式でボイド反応度及び係数を求めた（ボイド率は 0, 20, 40, 60, 80, 100 % の 6 点）。

$$\text{ボイド反応度} : (K(v) - K(40\%)) / K(40\%)$$

$$\text{ボイド係数} : (K(v_{i+1}) - k(v_i)) / K(V_i) / (V_{i+1} - V_i)$$

注) K は実効増倍率。

K の( )内はボイド率計算点を示す。

### 3. 解析ケース

Gd入り燃料集合体の格子計算ケースを表3.1に示す。また、Gd入り燃料棒の配置パターンを図3.1に示す。

次にGd入り燃料集合体を装荷した炉心の炉心計算ケースを表3.2に示す。また、その炉心装荷パターンを図3.2に示す。

## 4. 解析条件

### (1) 格子計算

#### 1.1) 燃焼計算

- 使用コード WIMS - ATR
- エネルギー群 14 群
- 燃料格子 36 本 (6 / 12 / 18) PuO<sub>2</sub> + UO<sub>2</sub> 燃料格子  
炉心内側装荷燃料 ; (3.75 / 3.75 / 1.30) wt% Pu (f)  
炉心外側装荷燃料 ; (4.00 / 4.00 / 1.75) wt% Pu (f)
- 重水中ボロン濃度 0 ppm
- 冷却材ボイド率 40 %
- バックリング 0 ppm, Br<sup>2</sup> = 3.16 × 10<sup>-5</sup>, Bz<sup>2</sup> = 5.62 × 10<sup>-5</sup> cm<sup>-2</sup>
- 燃焼ステップ 表 4.1 に示す
- 燃焼度 表 3.1 参照
- その他の条件 定格出力

### (2) 炉心計算

- 使用コード CITATION
- エネルギー群 2 群
- 計算形状 2 次元 X-Y 計算モデル 1/4 鏡面対称 (図 2.1 参照)
- メッシュ分割 1 ピッチ 2 メッシュ
- 軸方向バックリング 格子計算の Bz<sup>2</sup> と同じ
- 半径方向境界条件 真空境界
- 炉心燃焼度パターン 平衡サイクル BOC (図 2.2 参照) 平均 12 GWd/t  
平衡サイクル EOC (図 2.2 参照) 平均 20 GWd/t
- 制御棒パターン 全引抜き
- 重水中ボロン濃度 0 ppm 及び臨界ボロン濃度
- 冷却材ボイド率 0, 20, 40, 60, 80, 100 %
- 使用核定数 WIMS - ATR 計算 2 群格子定数  
(図 4-1 に燃料チャンネルアドレスを示す。)

#### 1.2) 格子計算

- 使用コード WIMS - ATR
- エネルギー群 14 群
- 燃料格子 燃焼計算と同じ

- ・重水中ボロン濃度 0 ppm 及び臨界ボロン濃度
- ・冷却材ボイド率 0, 20, 40, 60, 80, 100 %
- ・パックリング 0 ppm  $Br^2 = 3.16 \times 10^{-5}$ ,  $Bz^2 = 5.62 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2}$   
4 ppm  $Br^2 = 3.68 \times 10^{-5}$ ,  $Bz^2 = 5.73 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2}$   
6 ppm  $Br^2 = 3.79 \times 10^{-5}$ ,  $Bz^2 = 5.76 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2}$
- ・燃焼度 平衡サイクル BOC 及び EOC の燃焼度パターン（図 2.2 参照）
- ・その他の条件 定格出力

注) 重水中ボロン濃度変化によるパックリングの変更は「ATR 実証炉基本設計初装荷燃料 WIMS 入力データ」から引用した。

## 5. 解析結果および検討

計算結果を以下に示す。また、表番・図番の他に計算ケースNo.(CASE No.)も合わせて示す。

- (1) Gd入り燃料集合体を装荷した炉心のボイド反応度及びボイド係数の表

表5-1-1～表5-1-9

- (2) (1)の図

図5-1-1～図5-1-9-2

- (3) 炉心出力ピーキング

表5.2

以上の結果の表及び図から以下の事がわかる。

- 1) 冷却材ボイド反応度 (% $\Delta K/k$ を単に%で表す。)

ガドリニウム入り燃料集合体を装荷した炉心の冷却材ボイド反応度(表5-1-1～表5-1-9参照)は内・中間層にガドリを配置した燃料を全炉心に装荷した炉心パターンがBOC及びEOCでそれぞれ、-0.9%k～-0.3%，-0.1%～0.5%である。中間層のみにガドリを配置した燃料を全炉心に装荷した炉心パターンがそれぞれ、0.5%と1%である。また、重水中にボロンが4～6ppm投入されると0.6%程正側に移行する。その他の装荷パターンのBOCでは0.1%～0.8%である。

- 2) 炉心出力ピーキング(表5.2参照)

ケース3.2及び3.3のRPFとTPFはそれぞれ、2.11, 2.63及び1.81, 2.12である。また、ケース3.1はケース3.2と同一炉心パターンで重水中にボロンが入っていない場合である。前者のTPFは後者のそれよりも10%弱低い。ケース3.1とケース1.1は後者が通常の燃料を装荷している以外は同一の炉心パターンである。前者のTPFは2.44で、後者のTPFが2.41であるとの比較するとほとんど同じである。

ケース2.1は炉心の外側に外側燃料を装荷した以外はケース1.1と同一炉心パターンである。前者のTPFは1.87で後者のそれが2.40であるとの比較すると20%強低い。

- 3) 固有値(Keff)

1)から冷却材ボイド反応度がBOC及びEOCで1ドル(表5.3参照)近傍、固有値(40%ボイド)が臨界に近いのはケース3.2(BOC)と3.3(BOC)である。

ケース3.2—ボイド反応度：0.19%，Keff：0.9997

ケース3.3—ボイド反応度：0.45%，Keff：0.9851

このケースは内層に3wt%ガドリ燃料棒を3本、中間層に同じく3wt%ガドリ燃料棒を3本配置した内側燃料集合体を全炉心に装荷した炉心である。

上記の結果について検討する。

ガドリニウム入り燃料集合体格子の冷却材ボイド反応度（表 5-4-1～表 5-4-11 及び図 5-2-1～11 参照）は、初期燃焼度 ( $^{10}\text{B} = 0 \text{ ppm}$ ) で、内・中間層にガドリを配置したパターンが  $-1.5\% \sim 1.3\%$ 、中間層のみが  $-0.4\% \sim -0.3\%$ 、中間・外層に配置したパターンでは  $-0.5\%$  である。ただし、いずれの配置パターンでもガドリ入り燃料棒の本数・濃度は最適であるとしている。また、重水中にボロンが  $4 \sim 6 \text{ ppm}$  投入されると、 $0.5\%$  程、正側に移行する。ここで単位は  $\% \Delta k / k$  を意味し、簡単のため % で表わす。

上記の傾向を更に詳細に検討する。

Gd 濃度依存性について比較する。中間層 3 本に Gd 入り燃料を配置し、Gd の濃度を  $3 \text{ W}/0$  (ケース 7-1) と  $5 \text{ W}/0$  (ケース 5) を比較する (表 5-4-6 と表 5-4-8 及び図 5-2-6 と図 5-2-8)。

冷却材ボイド反応度は、Gd の濃度が増加すると負側に移行するが、燃焼が進むとその差はより大きくなる。これは、図 5-3-1 から図 5-3-8 に示すように、Gd の濃度が多いと燃焼末期まで Gd が燃え残るためである。

従って Gd の量が多い程冷却材ボイド反応度は負側に移行する。このことは、図 5-4-5 と図 5-4-7 の局所出力ピーキング係数 (LPF) を比較すれば理解できる。即ち Gd の濃度が多くなると Gd 入り燃料ピンの LPF が BOC で逆に大きくなるが、他の燃料ピンは殆んど変化していない。これは冷却材である軽水の熱中性子遮蔽効果が Gd の濃度が増加すると少なくなり Gd 入り燃料ピンの出力が上がる為である。この状態でボイド化すると Gd の濃度が大きい Gd 入り燃料ピンの出力がより低下し冷却材ボイド反応度を負側に移行させる。

次に Gd 入り燃料ピンの位置依存性について検討する。中間層 3 本に  $5 \text{ W}/0$  Gd を入れた燃料格子 (ケース 5) と中間層 3 本に  $5 \text{ W}/0$  Gd を入れ更に内層 3 本に  $5 \text{ W}/0$  Gd を入れた燃料格子 (ケース 4) 及び中間層 6 本に  $5 \text{ W}/0$  Gd を入れ更に外層 9 本に  $0.5 \text{ W}/0$  の Gd を入れた燃料格子 (ケース 6) について比較する。

前述の Gd 濃度 (量) 依存の検討結果からは Gd の量が多い順に即ちケース 5 → ケース 4 → ケース 6 の順に冷却材ボイド反応度が負側となる筈である。しかし、表 5-4-5～7 の結果からケース 6 → ケース 5 → ケース 4 の順に負側となっていることが判る。これは前述の検討結果は、同一位置の場合の Gd 入り燃料の Gd 濃度に適用できるのであり、位置が変更される場合は適用できないことを意味している。ケース 4, 5, 6 の LPF の燃焼度依存性 (図 5-4-4～6) から位置依存性を検討する。ケース 6 の場合、外層に多数の Gd 入り燃料が装荷されているため外層の出力が低下し、内層で出力を上げている。これは図 5-4-5 (ケース 5) と図 5-4-6 の BOC の LPF の比較からケース 6 の外層の平均 LPF が 1.17 であるのに対しケース 5 の場合は 1.24 となり約 6 % の出力増となり、かつ内層の LPF も大であることからも明らかである。この状態でボイド化すると熱中性子は燃料集合体内部まで浸透しやすくなるがケース 6 の場合外層に

Gd がありかつ Gd の効果がボイド化した場合大きくなるため反応度が低下する。

ケース 5 の場合中間層に Gd 燃料があるため軽水冷却材がなくなると熱中性子遮蔽効果がなくなり Gd 燃料の吸収量が増加するため出力が低下し冷却材ボイド反応度は負側に移行する。

次に内層に Gd 入り燃料を入れたケース 4 とケース 5 を比較する。図 5-4-4 ~ 5 からケース 4 とケース 5 の LPF を比較した場合両者とも外層に出力ピーキングが生じその値は殆んど同じである。従って内層に Gd 入り燃料を入れた場合その効果はボイド化しない場合外層まで殆んど影響しない。これは、軽水冷却材の遮蔽効果が大きく Gd の効果は内層ほど小さいことを意味している。この状態でボイド化すると内層の Gd の中性子吸収量は増加し出力は低下しボイド反応度は負側となる。

燃料体の燃料富化度の変化によるボイド反応度の変化を検討する。ケース 3-1 が低富化度燃料（内側燃料），ケース 3-2 が高富化度燃料（外側燃料）である。両者を比較するとボイド反応度はケース 3-1 の方が負側となっている（表 5-4-3 と表 5-4-4）。LPF を特に Gd 入り燃料に隣接する燃料で比較すると（図 5-4-2 と図 5-4-3），内層，中間層ともに LPF はケース 3-1 の方が大きい。即ち Gd の効果が大きい。これは低富化度の方が相対的に Gd の効果が大きいためである。

最後に重水中の  $^{10}\text{B}$  の効果を検討する。ケース 1 とケース 2，ケース 7-1 とケース 8-1，ケース 7-2 とケース 8-2 は，いずれも  $^{10}\text{B}$  のみを変化させた場合である。表 5-4-1 ~ 2 と表 5-4-8 ~ 10 の結果からいずれも  $^{10}\text{B}$  を入れた方がボイド反応度は正側になっている。これは，Gd の効果が  $^{10}\text{B}$  によりうすめられた為である。

以上の検討結果より，ボイド反応度を Gd 入り燃料により低減するためには，内，中間層に同一濃度の Gd を各 3 本配置し，燃料体の富化度は少なくかつ重水中の  $^{10}\text{B}$  濃度を 0 にすればよいことが判る。これによりケース 3-2 とケース 3-3 が最適燃料体となり燃焼末期（EOC）でも冷却材ボイド反応度が 1 ドル近傍を確保できることが判明した。

しかし，この場合 EOC での余剰反応度が小さい。このため，燃料体の Pu (f) 富化度を高め，EOC 炉心状態でも必要な余剰反応度を補償し，かつ目標ボイド反応度及び熱的制限値の保持が，富化度を高める前の燃料体を装荷した炉心のそれと比べ，遙色ないことを検討する。

燃料体の燃料富化度の外層対内・中間層の比は LPF 制限値を保持するように決めた。燃料組成の計算方法を付録 1 に示す。

表 5-5 に Pu (f) 富化度を高めたガドリニウム入り燃料体格子の計算ケースを示す。また，表 5-6 に前述の燃料体を装荷した炉心の計算ケースを示す。

表 5-7 に格子ベースのボイド反応度を，表 5-8 に炉心のボイド反応度を示す。また，図 5-5 に局所出力ピーキング係数を，図 5-6 に Gd の消滅結果を示す。

固有値（Keff）及びボイド反応度の結果を表 5-9 に示す。ケース数は以下の通りである。

- 通常の燃料集合体（ガドリニウムなし，基準富化度）を装荷した炉心の BOC と EOC（ケー

ス 1.1 & 1.2 )

- ・ガドリニウム 3 wt %の燃料ピンを内・中間層にそれぞれ 3 本ずつ配置した燃料集合体（基準富化度）を装荷した炉心の BOC と EOC ( ケース 3.1 & 3.3 )
- ・ケース 3.1 & 3.3 と同様のガドリニウム添加方法で Pu(f) 富化度を高めた燃料集合体 ( 3.1 wt % Pu(f) を装荷した炉心の BOC と EOC ( ケース 1 × 1 & 1 × 2 )

Pu(f) 富化度を高めた燃料を装荷した EOC 炉心 ( ケース 1 × 2 ) での固有値は基準富化度の場合 ( ケース 3.3 ) より 2.5 % 高くなつたが、基準炉心 ( ケース 1.2 ) に較べるとまだ 1 % 低い。基準炉心程度の余剰反応度を補償するためには 3.4 wt % 程の Pu(f) 富化度が必要であると思われる。冷却材ボイド反応度については Pu(f) 富化度が 0.6 wt % 増加しても 0.02 %  $\Delta k/k$  高くなる程度であり、さらに富化度が増加しても問題ないと思われる。

参考の為  $\beta$  値と炉心のピーキング結果を表 5-10 と表 5-11 に示す。

炉心のピーキングは Pu(f) 富化度を高めた BOC 炉心 ( ケース 1 × 1 ) では基準富化度の場合 ( ケース 3.1 ) に較べ 2 % 大きくなる。また、EOC 炉心ではほぼ同程度である。

## 6. む す び

現在、実証炉の核設計で考えられている燃焼度約 30,000 MWd/T 程度のプルトニウム富化度燃料体を用い、サイクルの全期間を通じ冷却材ボイド反応度を 1 ドル近傍に確保できる方策を検討した。

その結果、燃料体を構成する燃料棒の 1 部をガドリニア入り燃料棒におきかえることにより、冷却材ボイド反応度を低減できることが判明した。

これは ATR の燃料体の構造の特徴であるクラスタ形状を考慮し、さらに重水減速材を使用しているため熱中性子が重水中で殆ど生成される事を考慮した解決策である。

即ち三層構造である燃料体の内層と中間層にガドリニア入り燃料棒 ( $3\text{W}/0\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) を各 3 本づつ配列する。これにより軽水冷却材による熱中性子遮蔽効果がガドリニアにより相対的にうすめられ、軽水冷却材が喪失した場合ガドリニア入り燃料棒による熱中性子吸収量が増加する。このため軽水冷却材の有無による反応度差が小さくなり、冷却材ボイド反応度が負側に移行する。

表 2.1 ガドリニウム同位体の存在比

核 種	原子量	存 在 比 (%)
$_{64}^{152}\text{Gd}$	151.91980	0.20
$_{64}^{154}\text{Gd}$	153.92088	2.1
$_{64}^{155}\text{Gd}$	154.92263	14.8
$_{64}^{156}\text{Gd}$	155.92213	20.6
$_{64}^{157}\text{Gd}$	156.92397	15.7
$_{64}^{158}\text{Gd}$	157.92411	24.8
$_{64}^{160}\text{Gd}$	159.92706	21.8

注) 昭和 62 年度の理科年表より抜粋

表 3.1 ガドリニウム入り燃料集合体の格子計算ケース

ケース*	燃 料	ガドリニウムの配置・本数・濃度	備 考
1	炉心内側燃料	内 層 3 本に 3 wt % 中間層 3 本に 3 wt %	燃焼計算 0 ~ 16 GWd/t 格子計算 $^{10}\text{B}$ 0 ppm
2	炉心内側燃料	内 層 3 本に 3 wt % 中間層 3 本に 3 wt %	格子計算 $^{10}\text{B}$ 4 ppm
3 - 1	炉心内側燃料	内 層 3 本に 2 wt % 中間層 3 本に 5 wt %	燃焼計算 0 ~ 24 GWd/t 格子計算 $^{10}\text{B}$ 0 ppm
3 - 2	炉心外側燃料	内 層 3 本に 2 wt % 中間層 3 本に 5 wt %	燃焼計算 0 ~ 24 GWd/t 格子計算 $^{10}\text{B}$ 0 ppm
4	炉心内側燃料	内 層 3 本に 5 wt % 中間層 3 本に 5 wt %	燃焼計算 0 ~ 24 GWd/t 格子計算 $^{10}\text{B}$ 0 ppm
5	炉心内側燃料	中間層 3 本に 5 wt %	燃焼計算 0 ~ 24 GWd/t 格子計算 $^{10}\text{B}$ 0 ppm
6	炉心内側燃料	中間層 6 本に 5 wt % 外 層 9 本に 0.5 wt %	燃焼計算 0 ~ 16 GWd/t 格子計算 $^{10}\text{B}$ 0 ppm
7 - 1	炉心内側燃料	中間層 3 本に 3 wt %	燃焼計算 0 ~ 16 GWd/t 格子計算 $^{10}\text{B}$ 0 ppm
7 - 2	炉心外側燃料	中間層 3 本に 3 wt %	燃焼計算 0 ~ 16 GWd/t 格子計算 $^{10}\text{B}$ 0 ppm
8 - 1	炉心内側燃料	中間層 3 本に 3 wt %	格子計算 $^{10}\text{B}$ 6 ppm
8 - 2	炉心外側燃料	中間層 3 本に 3 wt %	格子計算 $^{10}\text{B}$ 6 ppm

注) 炉心内側燃料: ( 3.75 / 3.75 / 1.30 ) wt % Pu ( f )

炉心外側燃料: ( 4.00 / 4.00 / 1.75 ) wt % Pu ( f )

\* 図 3.1 参照

表 3.2 ガドリニウム入り燃料集合体装荷炉心の炉心計算ケース (1/2)

ケース No.	サイクル <sup>10</sup> B 濃度	燃料集合体装荷パターン (ガドリニウム配置・本数・濃度)	パターン図
1. 1	B O C 0 ppm	内側炉心：通常内側燃料 外側炉心：通常内側燃料	
1. 2	E O C 0 ppm	内側炉心：通常内側燃料 外側炉心：通常内側燃料	
2. 1	B O C 0 ppm	内側炉心：通常内側燃料 外側炉心：通常外側燃料	
2. 2	E O C 0 ppm	内側炉心：通常内側燃料 外側炉心：通常外側燃料	
3. 1	B O C 0 ppm	内炉：内燃－内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 % 外炉：内燃－内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 %	図 3.2.①
3. 2	B O C 4 ppm	内炉：内燃－内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 % 外炉：内燃－内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 %	図 3.2.①
3. 3	E O C 0 ppm	内炉：内燃－内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 % 外炉：内燃－内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 %	図 3.2.①
4. 1	B O C 0 ppm	内炉：内燃－内層 3 本 2 %, 中層 3 本 5 % 外炉：内燃－内層 3 本 2 %, 中層 3 本 5 %	図 3.2.①
4. 2	E O C 0 ppm	内炉：内燃－内層 3 本 2 %, 中層 3 本 5 % 外炉：内燃－内層 3 本 2 %, 中層 3 本 5 %	図 3.2.①
4. 3	B O C 0 ppm	内炉：内燃－内層 3 本 2 %, 中層 3 本 5 % 外炉：外燃－内層 3 本 2 %, 中層 3 本 5 %	図 3.2.①
4. 4	E O C 0 ppm	内炉：内燃－内層 3 本 2 %, 中層 3 本 5 % 外炉：外燃－内層 3 本 2 %, 中層 3 本 5 %	図 3.2.①

表 3.2 ガドリニウム入り燃料集合体装荷炉心の炉心計算ケース (2/2)

ケース No.	サイクル $^{10}$ B 濃度	燃料集合体装荷パターン (ガドリニウム配置・本数・濃度)	パターン図
5. 1	B O C 0 ppm	内炉：内燃－内層 3 本 5 %, 中層 3 本 5 % 外炉：内燃－内層 3 本 5 %, 中層 3 本 5 %	図 3.2.①
5. 2	E O C 0 ppm	内炉：内燃－内層 3 本 5 %, 中層 3 本 5 % 外炉：内燃－内層 3 本 5 %, 中層 3 本 5 %	図 3.2.①
6. 1	B O C 0 ppm	内炉：内燃－中層 3 本 5 % 外炉：通常外側燃料	図 3.2.②
6. 2	B O C 0 ppm	内炉：内燃－中層 3 本 5 % 外炉：外燃－中層 3 本 5 %	図 3.2.①
6. 3	B O C 0 ppm	内炉の 1/2 : 内燃－中層 3 本 5 % 内炉の 1/2 : 通常内側燃料 外炉：外燃－中層 3 本 3 %	図 3.2.③
7. 1	B O C 0 ppm	内炉：内燃－中層 6 本 5 %, 外層 9 本 0.5 % 外炉：外燃－中層 3 本 3 %	図 3.2.①
8. 1	B O C 0 ppm	内炉：内燃－中層 3 本 3 % 外炉：外燃－中層 3 本 3 %	図 3.2.①
8. 2	B O C 6 ppm	内炉：内燃－中層 3 本 3 % 外炉：外燃－中層 3 本 3 %	図 3.2.①
8. 3	E O C 0 ppm	内炉：内燃－中層 3 本 3 % 外炉：外燃－中層 3 本 3 %	図 3.2.①

注) 内炉：内側炉心 (装荷燃料集合体数：324 体)

外炉：外側炉心 (装荷燃料集合体数：292 体)

内燃：内側燃料：( 3.75 / 3.75 / 1.30 ) wt % Pu (f)

外燃：外側燃料：( 4.00 / 4.00 / 1.75 ) WT% Pu (f)

中層：中間層

表 4.1 燃焼計算ステップ<sup>o</sup>

ステップ	燃焼度 (MWh/t)
1	0
2	50
3	200
4	500
5	1000
6	2000
以下、取出しまで 1000MWh/tの燃焼ステップ	
• • • • • • •	
• • • • • • •	
• • • • • • •	

TABLE 5 - 1 - 1 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 1.1 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-NOGD  
 OUTER CORE IN.FUEL-NOGD

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.1209669	8.551E-04	0.000E+00
20.0	1.1202235	1.913E-04	-3.316E-05
40.0	1.1200092	0.000E+00	-9.565E-06
60.0	1.1210683	9.456E-04	4.728E-05
80.0	1.1245717	4.074E-03	1.563E-04
100.0	1.1327881	1.141E-02	3.653E-04

TABLE 5 - 1 - 1 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 1.2 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-NOGD  
 OUTER CORE IN.FUEL-NOGD

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0217545	4.021E-04	0.000E+00
20.0	1.0213112	-3.192E-05	-2.169E-05
40.0	1.0213438	0.000E+00	1.596E-06
60.0	1.0225243	1.156E-03	5.779E-05
80.0	1.0259577	4.517E-03	1.679E-04
100.0	1.0336915	1.209E-02	3.769E-04

TABLE 5 - 1 - 2 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 2.1 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-NOGD  
 OUTER CORE OUT.FUEL-NOGD

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.1260815	1.097E-03	0.000E+00
20.0	1.1251894	3.036E-04	-3.961E-05
40.0	1.1248479	0.000E+00	-1.518E-05
60.0	1.1258249	8.686E-04	4.343E-05
80.0	1.1293005	3.958E-03	1.544E-04
100.0	1.1375219	1.127E-02	3.640E-04

TABLE 5 - 1 - 2 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 2.2 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-NOGD  
 OUTER CORE OUT.FUEL-NOGD

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0278061	6.576E-04	0.000E+00
20.0	1.0272115	7.867E-05	-2.893E-05
40.0	1.0271307	0.000E+00	-3.933E-06
60.0	1.0282607	1.100E-03	5.501E-05
80.0	1.0317118	4.460E-03	1.678E-04
100.0	1.0395345	1.208E-02	3.791E-04

TABLE 5 - 1 - 3 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 3.1 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 3% MID-3PINS 3%  
 OUTER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 3% MID-3PINS 3%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0459223	3.438E-03	0.000E+00
20.0	1.0442745	1.857E-03	-7.877E-05
40.0	1.0423389	0.000E+00	-9.268E-05
60.0	1.0404395	-1.822E-03	-9.111E-05
80.0	1.0390864	-3.120E-03	-6.503E-05
100.0	1.0392502	-2.963E-03	7.882E-06

TABLE 5 - 1 - 3 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 3.2 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 4PPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 3% MID-3PINS 3%  
 OUTER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 3% MID-3PINS 3%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0018861	2.202E-03	0.000E+00
20.0	1.0007895	1.105E-03	-5.473E-05
40.0	0.9996846	0.000E+00	-5.520E-05
60.0	0.9989572	-7.276E-04	-3.638E-05
80.0	0.9992129	-4.718E-04	1.280E-05
100.0	1.0015625	1.878E-03	1.176E-04

TABLE 5 - 1 - 3 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 3.3 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM					
INNER CORE	IN.FUEL-GD	IN-3PINS	3%	MID-3PINS	3%
OUTER CORE	IN.FUEL-GD	IN-3PINS	3%	MID-3PINS	3%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.9868703	1.762E-03	0.000E+00
20.0	0.9859754	8.536E-04	-4.534E-05
40.0	0.9851345	0.000E+00	-4.264E-05
60.0	0.9848194	-3.199E-04	-1.599E-05
80.0	0.9858182	6.940E-04	5.071E-05
100.0	0.9895788	4.511E-03	1.907E-04

TABLE 5 - 1 - 4 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 4.1 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%  
 OUTER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0374451	3.714E-03	0.000E+00
20.0	1.0356649	1.992E-03	-8.580E-05
40.0	1.0336064	0.000E+00	-9.938E-05
60.0	1.0315832	-1.957E-03	-9.787E-05
80.0	1.0301119	-3.381E-03	-7.131E-05
100.0	1.0301155	-3.377E-03	1.747E-07

TABLE 5 - 1 - 4 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 4.2 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%  
 OUTER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.9788979	1.982E-03	0.000E+00
20.0	0.9778986	9.588E-04	-5.104E-05
40.0	0.9769619	0.000E+00	-4.789E-05
60.0	0.9765451	-4.266E-04	-2.133E-05
80.0	0.9774400	4.894E-04	4.582E-05
100.0	0.9810405	4.175E-03	1.842E-04

TABLE 5 - 1 - 4 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 4.3 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%  
 OUTER CORE OUT.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0438175	3.857E-03	0.000E+00
20.0	1.0419409	2.053E-03	-8.989E-05
40.0	1.0398065	0.000E+00	-1.024E-04
60.0	1.0377331	-1.994E-03	-9.970E-05
80.0	1.0362407	-3.429E-03	-7.191E-05
100.0	1.0362139	-3.455E-03	-1.293E-06

TABLE 5 - 1 - 4 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 4.4 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%  
 OUTER CORE OUT.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.9844618	2.222E-03	0.000E+00
20.0	0.9833274	1.067E-03	-5.762E-05
40.0	0.9822789	0.000E+00	-5.331E-05
60.0	0.9817817	-5.062E-04	-2.531E-05
80.0	0.9826216	3.489E-04	4.277E-05
100.0	0.9861807	3.972E-03	1.811E-04

TABLE 5 - 1 - 5 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 5.1 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 5% MID-3PINS 5%  
 OUTER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 5% MID-3PINS 5%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0176173	4.835E-03	0.000E+00
20.0	1.0154351	2.681E-03	-1.072E-04
40.0	1.0127203	0.000E+00	-1.337E-04
60.0	1.0096698	-3.012E-03	-1.506E-04
80.0	1.0066041	-6.039E-03	-1.518E-04
100.0	1.0041459	-8.467E-03	-1.221E-04

TABLE 5 - 1 - 5 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 5.2 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 5% MID-3PINS 5%  
 OUTER CORE IN.FUEL-GD IN-3PINS 5% MID-3PINS 5%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.9612612	2.950E-03	0.000E+00
20.0	0.9599391	1.571E-03	-6.877E-05
40.0	0.9584334	0.000E+00	-7.843E-05
60.0	0.9570893	-1.402E-03	-7.012E-05
80.0	0.9565086	-2.008E-03	-3.034E-05
100.0	0.9577930	-6.682E-04	6.714E-05

TABLE 5 - 1 - 6 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 6.1 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD MID-3PINS 5%  
 OUTER CORE OUT.FUEL-NOGD

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0977051	2.686E-03	0.000E+00
20.0	1.0960059	1.134E-03	-7.740E-05
40.0	1.0947647	0.000E+00	-5.662E-05
60.0	1.0947225	-3.855E-05	-1.927E-06
80.0	1.0969405	1.987E-03	1.013E-04
100.0	1.1034460	7.930E-03	2.965E-04

TABLE 5 - 1 - 6 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 6.2 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD MID-3PINS 5%  
 OUTER CORE OUT.FUEL-GD MID-3PINS 3%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0654566	3.278E-03	0.000E+00
20.0	1.0636361	1.563E-03	-8.543E-05
40.0	1.0619759	0.000E+00	-7.804E-05
60.0	1.0610527	-8.693E-04	-4.347E-05
80.0	1.0617852	-1.796E-04	3.452E-05
100.0	1.0659194	3.713E-03	1.947E-04

TABLE 5 - 1 - 6 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 6.3 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE 1/2(IN.FUEL-GD MID-3PINS 5%) 1/2(IN.FUEL-NOGD)  
 OUTER CORE OUT.FUEL-GD MID-3PINS 3%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0872731	2.371E-03	0.000E+00
20.0	1.0858484	1.057E-03	-6.552E-05
40.0	1.0847016	0.000E+00	-5.281E-05
60.0	1.0844742	-2.096E-04	-1.048E-05
80.0	1.0861676	1.352E-03	7.807E-05
100.0	1.0917302	6.480E-03	2.561E-04

TABLE 5 - 1 - 7 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 7.1 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD MID-6PINS 5% OUT-9PINS 0.5%  
 OUTER CORE OUT.FUEL-GD MID-3PINS 3%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0332839	4.911E-03	0.000E+00
20.0	1.0306837	2.382E-03	-1.258E-04
40.0	1.0282343	0.000E+00	-1.188E-04
60.0	1.0265560	-1.632E-03	-8.161E-05
80.0	1.0264483	-1.737E-03	-5.246E-06
100.0	1.0295626	1.292E-03	1.517E-04

TABLE 5 - 1 - 8 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 7.1 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-GD MID-3PINS 3%  
 OUTER CORE OUT.FUEL-GD MID-3PINS 3%

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0715582	2.817E-03	0.000E+00
20.0	1.0699637	1.324E-03	-7.440E-05
40.0	1.0685485	0.000E+00	-6.613E-05
60.0	1.0679226	-5.857E-04	-2.929E-05
80.0	1.0690358	4.560E-04	5.212E-05
100.0	1.0737210	4.841E-03	2.191E-04

INNER CORE IN.FUEL-GD MID-3PINS 3%  
 OUTER CORE OUT.FUEL-GD MID-3PINS 3%

TABLE 5 - 1 - 9 GD FUEL CORE VOID REACTIVITY ( CASE 8.2 )  
 ( BOC )  $^{10}\text{B} = 6 \text{ ppm}$

VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K%
0.0	1.0049269	1.596E-03	0.000E+00
20.0	1.0038606	5.335E-04	-5.331E-05
40.0	1.0033253	0.000E+00	-2.677E-05
60.0	1.0040078	6.802E-04	3.412E-05
80.0	1.0069479	3.611E-03	1.470E-04
100.0	1.0141103	1.075E-02	3.581E-04

TABLE 5 - 1 - 9 GD FUEL CORE VOID REACTIVITY ( CASE 8.3 )  
 ( BOC )  $^{10}\text{B} = 0 \text{ ppm}$

VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K%
0.0	1.0096447	1.186E-03	0.000E+00
20.0	1.0088619	4.102E-04	-3.914E-05
40.0	1.0084482	0.000E+00	-2.069E-05
60.0	1.0090444	5.912E-04	2.981E-05
80.0	1.0117134	3.238E-03	1.334E-04
100.0	1.0184170	9.885E-03	3.352E-04

表 5.2 炉心のピーキング

CASE #	CYCLE	<sup>10</sup> B	VOID	RPF (行, 列)	LPF(RING)	TPF
1.1	BOC	0 ppm	40 %	2.1285(16.3)	1.128(3)	2.401
1.2	EOC	0 ppm	40 %	2.0010(16.3)	1.109(2)	2.219
2.1	BOC	0 ppm	40 %	1.6540(16.3)	1.128(3)	1.866
2.2	EOC	0 ppm	40 %	1.4628(16.3)	1.109(2)	1.622
3.1	BOC	0 ppm	40 %	1.9467(15.1)	1.254(3)	2.441
3.2	BOC	0 ppm	40 %	2.1108(15.1)	1.246(3)	2.630
3.3	EOC	0 ppm	40 %	1.8126(16.3)	1.172(2)	2.124
4.1	BOC	0 ppm	40 %	2.0031(15.1)	1.258(3)	2.520
4.2	EOC	0 ppm	40 %	1.7902(16.3)	1.180(2)	2.112
4.3	BOC	0 ppm	40 %	1.4285(13.1)	1.258(3)	1.797
4.4	EOC	0 ppm	40 %	1.3339(16.3)	1.180(2)	1.574
5.1	BOC	0 ppm	40 %	2.0484(15.1)	1.266(3)	2.593
5.2	EOC	0 ppm	40 %	1.8181(16.3)	1.191(2)	2.165
6.1	BOC	0 ppm	40 %	2.1414( 5.1)	1.209(3)	2.589
6.2	BOC	0 ppm	40 %	1.3563( 6.3)	1.209(3)	1.640
6.3	BOC	0 ppm	40 %	2.2975(15.1)	1.128(3)	2.592
7.1	BOC	0 ppm	40 %	2.2585( 4.3)	1.319(3)	2.979
8.1	BOC	0 ppm	40 %	1.3528(16.3)	1.248(3)	1.688

注) 1 ピッチ 2 メッシュでのピーキングをチャンネルのピーキングとした。

RPF のアドレスは図 5.2 を参照。

( RING ) は, LPF が最大となる層で, 2 は中間層, 3 は外層である。

TPF の定義は, TPF = RPF × LPF である。

表 5.3 ガドリニウム入り燃料格子の遅発核分裂中性子生成割合 ( $\beta$ ) (1/2)

WIMS. ボイド率: 40 %

ケース No.	燃 料 $^{10}$ B ( ppm )	ガドリの配置・濃度	燃焼度 ( GWd/t )	$\beta$ ( % )
1	炉心内側燃料 0 ppm	内 層 3本に 3 wt % 中間層 3本に 3 wt %	0 8 16	0.364(0.370) 0.371(0.376) 0.373(0.378)
2	炉心内側燃料 0 ppm	内 層 3本に 3 wt % 中間層 3本に 3 wt %	0 8 16	0.366(0.371) 0.372(0.378) 0.375(0.380)
3-1	炉心内側燃料 0 ppm	内 層 3本に 2 wt % 中間層 3本に 5 wt %	0 8 16 24	0.365 0.371 0.373 0.375
3-2	炉心内側燃料 0 ppm	内 層 3本に 2 wt % 中間層 3本に 5 wt %	0 8 16 24	0.353 0.363 0.370 0.372
4	炉心内側燃料 0 ppm	内 層 3本に 5 wt % 中間層 3本に 5 wt %	0 8 16 24	0.365 0.372 0.375 0.376
5	炉心内側燃料 0 ppm	中間層 3本に 5 wt %	0 8 16 24	0.364 0.370 0.372 0.375

注)  $\beta$  の ( ) 値は 100 % ボイド時

炉心内側燃料: ( 3.75 / 3.75 / 1.30 ) wt % Pu (f)

炉心外側燃料: ( 4.00 / 4.00 / 1.75 ) wt % Pu (f)

表 5.3 ガドリニウム入り燃料格子の遅発核分裂中性子生成割合 ( $\beta$ ) (2/2)

WIMS. ボイド率: 40 %

ケース No.	燃 料 $^{10}\text{B}$ ( ppm )	ガドリの配置・濃度	燃焼度 ( GWd/t )	$\beta$ ( % )
6	炉心内側燃料 0 ppm	中間層 6本に 5 wt % 外 層 9本に 0.5 wt %	0	0.381
			8	0.373
			16	0.373
7-1	炉心内側燃料 0 ppm	中間層 3本に 3 wt %	0	0.372
			8	0.385
			16	0.390
7-2	炉心外側燃料 0 ppm	中間層 3本に 3 wt %	0	0.360
			8	0.375
			16	0.385

TABLE 5 - 4 - 1 CELL VOID REACTIVITY ( CASE 1 )

B10 OPPM  
IN.FUEL-GD IN-3PINS 3% MID-3PINS 3%

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.0	1.1581530	4.790E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1558430	2.786E-03	-9.973E-05
0.0	40.0	1.1526320	0.000E+00	-1.389E-04
0.0	60.0	1.1484260	-3.649E-03	-1.825E-04
0.0	80.0	1.1432700	-8.122E-03	-2.245E-04
0.0	100.0	1.1369830	-1.358E-02	-2.750E-04
8.0	0.0	1.0650440	3.047E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.0636480	1.732E-03	-6.554E-05
8.0	40.0	1.0618090	0.000E+00	-8.645E-05
8.0	60.0	1.0597650	-1.925E-03	-9.625E-05
8.0	80.0	1.0579390	-3.645E-03	-8.615E-05
8.0	100.0	1.0569240	-4.601E-03	-4.797E-05
16.0	0.0	1.0401930	1.481E-04	0.000E+00
16.0	20.0	1.0400400	9.615E-07	-7.354E-06
16.0	40.0	1.0400390	0.000E+00	-4.808E-08
16.0	60.0	1.0407110	6.461E-04	3.231E-05
16.0	80.0	1.0430480	2.893E-03	1.123E-04
16.0	100.0	1.0486950	8.323E-03	2.707E-04

TABLE 5 - 4 - 2 CELL VOID REACTIVITY ( CASE 2 )

B10 4PPM  
IN.FUEL-GD IN-3PINS 3% MID-3PINS 3%

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.0	1.1120480	3.041E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1106580	1.787E-03	-6.250E-05
0.0	40.0	1.1086770	0.000E+00	-8.918E-05
0.0	60.0	1.1060960	-2.328E-03	-1.164E-04
0.0	80.0	1.1030470	-5.078E-03	-1.378E-04
0.0	100.0	1.0995240	-8.256E-03	-1.597E-04
8.0	0.0	1.0213390	1.486E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.0206540	8.139E-04	-3.353E-05
8.0	40.0	1.0198240	0.000E+00	-4.066E-05
8.0	60.0	1.0191680	-6.432E-04	-3.216E-05
8.0	80.0	1.0191890	-6.227E-04	1.030E-06
8.0	100.0	1.0206170	7.776E-04	7.006E-05
16.0	0.0	0.9951085	-1.124E-03	0.000E+00
16.0	20.0	0.9954497	-7.815E-04	1.714E-05
16.0	40.0	0.9962283	0.000E+00	3.911E-05
16.0	60.0	0.9980492	1.828E-03	9.139E-05
16.0	80.0	1.0019940	5.788E-03	1.976E-04
16.0	100.0	1.0098080	1.363E-02	3.899E-04

TABLE 5 - 4 - 3 CELL VOID REACTIVITY ( CASE 3 - 1 )

B10 OPPM  
IN.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.0	1.1527080	5.025E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1502690	2.898E-03	-1.058E-04
0.0	40.0	1.1469450	0.000E+00	-1.445E-04
0.0	60.0	1.1426570	-3.739E-03	-1.869E-04
0.0	80.0	1.1374380	-8.289E-03	-2.284E-04
0.0	100.0	1.1311180	-1.380E-02	-2.778E-04
8.0	0.0	1.0493520	3.502E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.0477360	1.957E-03	-7.700E-05
8.0	40.0	1.0456900	0.000E+00	-9.764E-05
8.0	60.0	1.0434450	-2.147E-03	-1.073E-04
8.0	80.0	1.0413870	-4.115E-03	-9.862E-05
8.0	100.0	1.0400480	-5.395E-03	-6.429E-05
16.0	0.0	1.0236700	6.393E-04	0.000E+00
16.0	20.0	1.0232740	2.522E-04	-1.934E-05
16.0	40.0	1.0230160	0.000E+00	-1.261E-05
16.0	60.0	1.0234140	3.890E-04	1.945E-05
16.0	80.0	1.0254260	2.356E-03	9.830E-05
16.0	100.0	1.0305130	7.328E-03	2.480E-04
24.0	0.0	0.9944616	-1.740E-03	0.000E+00
24.0	20.0	0.9950479	-1.152E-03	2.948E-05
24.0	40.0	0.9961954	0.000E+00	5.766E-05
24.0	60.0	0.9985552	2.369E-03	1.184E-04
24.0	80.0	1.0033480	7.180E-03	2.400E-04
24.0	100.0	1.0128140	1.668E-02	4.717E-04

TABLE 5 - 4 - 4 CELL VOID REACTIVITY ( CASE 3 - 2 )

B10 OPPM  
 OUT.FUEL-GD IN-3PINS 2% MID-3PINS 5%

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.0	1.1875190	4.767E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1851090	2.728E-03	-1.015E-04
0.0	40.0	1.1818850	0.000E+00	-1.360E-04
0.0	60.0	1.1778470	-3.417E-03	-1.708E-04
0.0	80.0	1.1731300	-7.408E-03	-2.002E-04
0.0	100.0	1.1674760	-1.219E-02	-2.410E-04
8.0	0.0	1.0769560	4.308E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.0748610	2.355E-03	-9.726E-05
8.0	40.0	1.0723360	0.000E+00	-1.175E-04
8.0	60.0	1.0695940	-2.557E-03	-1.279E-04
8.0	80.0	1.0669530	-5.020E-03	-1.235E-04
8.0	100.0	1.0648830	-6.950E-03	-9.701E-05
16.0	0.0	1.0348090	2.200E-03	0.000E+00
16.0	20.0	1.0336240	1.053E-03	-5.726E-05
16.0	40.0	1.0325370	0.000E+00	-5.258E-05
16.0	60.0	1.0320380	-4.833E-04	-2.416E-05
16.0	80.0	1.0330490	4.959E-04	4.898E-05
16.0	100.0	1.0368600	4.187E-03	1.845E-04
24.0	0.0	1.0137090	-6.526E-04	0.000E+00
24.0	20.0	1.0137380	-6.240E-04	1.430E-06
24.0	40.0	1.0143710	0.000E+00	3.122E-05
24.0	60.0	1.0163310	1.932E-03	9.661E-05
24.0	80.0	1.0209050	6.441E-03	2.250E-04
24.0	100.0	1.0302290	1.563E-02	4.567E-04

TABLE 5 - 4 - 5 CELL VOID REACTIVITY ( CASE 4 )

B10 OPPM  
IN.FUEL-GD IN-3PINS 5% MID-3PINS 5%

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.0	1.1423190	5.594E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1396140	3.213E-03	-1.184E-04
0.0	40.0	1.1359640	0.000E+00	-1.601E-04
0.0	60.0	1.1312820	-4.122E-03	-2.061E-04
0.0	80.0	1.1255450	-9.172E-03	-2.536E-04
0.0	100.0	1.1185000	-1.537E-02	-3.130E-04
8.0	0.0	1.0314400	4.301E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.0295540	2.464E-03	-9.143E-05
8.0	40.0	1.0270230	0.000E+00	-1.229E-04
8.0	60.0	1.0240070	-2.937E-03	-1.468E-04
8.0	80.0	1.0207180	-6.139E-03	-1.606E-04
8.0	100.0	1.0173340	-9.434E-03	-1.658E-04
16.0	0.0	0.9946649	2.216E-03	0.000E+00
16.0	20.0	0.9937075	1.251E-03	-4.813E-05
16.0	40.0	0.9924657	0.000E+00	-6.248E-05
16.0	60.0	0.9912625	-1.212E-03	-6.062E-05
16.0	80.0	0.9907380	-1.741E-03	-2.646E-05
16.0	100.0	0.9917546	-7.165E-04	5.131E-05
24.0	0.0	0.9676918	-5.218E-05	0.000E+00
24.0	20.0	0.9676538	-9.145E-05	-1.963E-06
24.0	40.0	0.9677423	0.000E+00	4.573E-06
24.0	60.0	0.9684381	7.190E-04	3.595E-05
24.0	80.0	0.9706827	3.038E-03	1.159E-04
24.0	100.0	0.9763470	8.892E-03	2.918E-04

TABLE 5 - 4 - 6 CELL VOID REACTIVITY ( CASE 5 )

B10 OPPM  
IN.FUEL-GD MID-3PINS 5%

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.0	1.1719290	4.869E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1692040	2.533E-03	-1.163E-04
0.0	40.0	1.1662500	0.000E+00	-1.263E-04
0.0	60.0	1.1633900	-2.452E-03	-1.226E-04
0.0	80.0	1.1614110	-4.149E-03	-8.505E-05
0.0	100.0	1.1617170	-3.887E-03	1.317E-05
8.0	0.0	1.0749950	2.376E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.0736490	1.121E-03	-6.260E-05
8.0	40.0	1.0724470	0.000E+00	-5.598E-05
8.0	60.0	1.0719510	-4.625E-04	-2.312E-05
8.0	80.0	1.0731250	6.322E-04	5.476E-05
8.0	100.0	1.0776490	4.851E-03	2.108E-04
16.0	0.0	1.0498250	-5.360E-04	0.000E+00
16.0	20.0	1.0498680	-4.951E-04	2.048E-06
16.0	40.0	1.0503880	0.000E+00	2.477E-05
16.0	60.0	1.0520760	1.607E-03	8.035E-05
16.0	80.0	1.0561510	5.487E-03	1.937E-04
16.0	100.0	1.0646310	1.356E-02	4.015E-04

TABLE 5 - 4 - 7 CELL VOID REACTIVITY ( CASE 6 )

B10 OPPM  
IN.FUEL-GD MID-6PINS 5% OUT-9PINS 0.5%

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.0	0.7267534	8.464E-03	0.000E+00
0.0	20.0	0.7236814	4.201E-03	-2.114E-04
0.0	40.0	0.7206537	0.000E+00	-2.092E-04
0.0	60.0	0.7179798	-3.710E-03	-1.855E-04
0.0	80.0	0.7163601	-5.958E-03	-1.128E-04
0.0	100.0	0.7170419	-5.012E-03	4.759E-05
8.0	0.0	1.0086970	5.782E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.0059760	3.069E-03	-1.349E-04
8.0	40.0	1.0028980	0.000E+00	-1.530E-04
8.0	60.0	0.9998056	-3.083E-03	-1.542E-04
8.0	80.0	0.9972377	-5.644E-03	-1.284E-04
8.0	100.0	0.9961038	-6.775E-03	-5.685E-05
16.0	0.0	1.0078480	1.396E-03	0.000E+00
16.0	20.0	1.0070690	6.220E-04	-3.865E-05
16.0	40.0	1.0064430	0.000E+00	-3.108E-05
16.0	60.0	1.0065120	6.856E-05	3.428E-06
16.0	80.0	1.0082520	1.797E-03	8.644E-05
16.0	100.0	1.0131150	6.629E-03	2.412E-04

表 5 - 4 - 8 Gd 燃料ボイド反応度 ( 3.75/3.75/1.30 ) pu ( f ) ( CASE 7 - 1 )  
 ( 3 % Gd 燃料を 3 本中間層に配置した格子計算 )  $^{10}\text{B} = 0 \text{ ppm}$

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K%
0.0	0.0	1.1719470	4.372E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1695110	2.285E-03	-1.218E-04
0.0	40.0	1.1668450	0.000E+00	-1.333E-04
0.0	60.0	1.1644020	-2.094E-03	-1.221E-04
0.0	80.0	1.1629470	-3.341E-03	-7.275E-05
0.0	100.0	1.1638740	-2.546E-03	4.635E-05
8.0	0.0	1.1020550	1.240E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.1012540	5.124E-04	-4.005E-05
8.0	40.0	1.1006900	0.000E+00	-2.820E-05
8.0	60.0	1.1009760	2.598E-04	1.430E-05
8.0	80.0	1.1032800	2.353E-03	1.152E-04
8.0	100.0	1.1094870	7.992E-03	3.104E-04
16.0	0.0	1.0703700	-1.576E-03	0.000E+00
16.0	20.0	1.0709290	-1.055E-03	2.795E-05
16.0	40.0	1.0720600	0.000E+00	5.655E-05
16.0	60.0	1.0745060	2.282E-03	1.223E-04
16.0	80.0	1.0796280	7.059E-03	2.561E-04
16.0	100.0	1.0897820	1.653E-02	5.077E-04

表 5 - 4 - 9 Gd 燃料ボイド反応度 ( 4.00/4.00/1.75 ) pu ( f ) ( CASE 7 - 2 )  
 ( 3 % Gd 燃料を 3 本中間層に配置した格子計算 )  $^{10}\text{B} = 0 \text{ ppm}$

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K%
0.0	0.0	1.2055980	4.616E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.2029200	2.385E-03	-1.339E-04
0.0	40.0	1.2000580	0.000E+00	-1.431E-04
0.0	60.0	1.1974080	-2.208E-03	-1.325E-04
0.0	80.0	1.1957440	-3.595E-03	-8.320E-05
0.0	100.0	1.1964170	-3.034E-03	3.365E-05
8.0	0.0	1.1191220	2.818E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.1174520	1.322E-03	-8.350E-05
8.0	40.0	1.1159770	0.000E+00	-7.375E-05
8.0	60.0	1.1153060	-6.013E-04	-3.355E-05
8.0	80.0	1.1165210	4.875E-04	6.075E-05
8.0	100.0	1.1214120	4.870E-03	2.446E-04
16.0	0.0	1.0928220	-1.016E-04	0.000E+00
16.0	20.0	1.0925540	-3.468E-04	-1.340E-05
16.0	40.0	1.0929330	0.000E+00	1.895E-05
16.0	60.0	1.0947610	1.673E-03	9.140E-05
16.0	80.0	1.0994270	5.942E-03	2.333E-04
16.0	100.0	1.1092180	1.490E-02	4.895E-04

表 5 - 4 - 10 Gd 燃料ボイド反応度 ( 3.75/3.75/1.30 ) pu ( f ) ( CASE 8 - 1 )  
 ( 3 % Gd 燃料を 3 本中間層に配置し, B 濃度を 6 ppm にした格子計算 )

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K %
0.0	0.0	1.1050350	2.455E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1035990	1.152E-03	-7.180E-05
0.0	40.0	1.1023290	0.000E+00	-6.350E-05
0.0	60.0	1.1017600	-5.162E-04	-2.845E-05
0.0	80.0	1.1027520	3.837E-04	4.960E-05
0.0	100.0	1.1068360	4.089E-03	2.042E-04
8.0	0.0	1.0364380	-3.077E-04	0.000E+00
8.0	20.0	1.0362870	-4.533E-04	-7.550E-06
8.0	40.0	1.0367570	0.000E+00	2.350E-05
8.0	60.0	1.0385510	1.730E-03	8.970E-05
8.0	80.0	1.0429360	5.960E-03	2.192E-04
8.0	100.0	1.0519260	1.463E-02	4.495E-04
16.0	0.0	1.0022900	-2.805E-03	0.000E+00
16.0	20.0	1.0032130	-1.886E-03	4.615E-05
16.0	40.0	1.0051090	0.000E+00	9.480E-05
16.0	60.0	1.0088080	3.680E-03	1.850E-04
16.0	80.0	1.0157630	1.060E-02	3.477E-04
16.0	100.0	1.0284940	2.327E-02	6.366E-04

表 5 - 4 - 11 Gd 燃料ボイド反応度 ( 4.00/4.00/1.75 ) pu ( f ) ( CASE 8 - 2 )  
 ( 3 % Gd 燃料を 3 本中間層に配置し, B 濃度を 6 ppm にした格子計算 )

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K %
0.0	0.0	1.1392110	2.737E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1375600	1.284E-03	-8.255E-05
0.0	40.0	1.1361010	0.000E+00	-7.295E-05
0.0	60.0	1.1353060	-6.998E-04	-3.975E-05
0.0	80.0	1.1360510	-4.401E-05	3.725E-05
0.0	100.0	1.1398210	3.274E-03	1.885E-04
8.0	0.0	1.0554330	1.241E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.0544900	3.463E-04	-4.715E-05
8.0	40.0	1.0541250	0.000E+00	-1.825E-05
8.0	60.0	1.0550030	8.329E-04	4.390E-05
8.0	80.0	1.0582990	3.960E-03	1.648E-04
8.0	100.0	1.0659220	1.119E-02	3.812E-04
16.0	0.0	1.0262280	-1.352E-03	0.000E+00
16.0	20.0	1.0264110	-1.174E-03	9.150E-06
16.0	40.0	1.0276170	0.000E+00	6.030E-05
16.0	60.0	1.0307200	3.020E-03	1.552E-04
16.0	80.0	1.0372250	9.350E-03	3.252E-04
16.0	100.0	1.0495250	2.132E-02	6.150E-04

表 5-5 ガドリニウム入り燃料集合体の格子計算ケース

ケース	燃 料	ガドリニウムの配置・本数・濃度	備 考
1 X	炉心内側燃料	内層 3 本に 3 wt% 中間層 3 本に 3 wt%	燃焼計算 0 ~ 32 GWd/t 格子計算 $^{10}\text{B}$ 0 ppm

注) 炉心内側燃料: ( 4.63 / 4.63 / 1.57 ) wt% Pu (f)

表 5-6 ガドリニウム入り燃料集合体装荷炉心の炉心計算ケース

ケース No.	サイクル $^{10}\text{B}$ 濃度	燃料集合体 装荷パターン ( ガドリニウム配置・本数・濃度 )	備 考
1.1 X	BOC 0 ppm	内炉: 内燃 - 内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 % 外炉: 内燃 - 内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 %	全炉心装荷
1.2 X	EOC 0 ppm	内炉: 内燃 - 内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 % 外炉: 内燃 - 内層 3 本 3 %, 中層 3 本 3 %	同 上

注) 内炉 : 内側炉心(装荷燃料集合体数: 324 体)

外炉 : 外側炉心(装荷燃料集合体数: 292 体)

内燃 : 内側燃料; ( 4.63 / 4.63 / 1.57 ) wt% Pu (f)

中層 : 中間層

TABLE 5 - 7 CELL VOID REACTIVITY ( CASE 1 X )

B10 OPPM  
IN.FUEL-GD IN-3PINS 3% MID-3PINS 3%

EXP (GWD/T)	VOID (%)	K-INF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	0.0	1.1934550	4.022E-03	0.000E+00
0.0	20.0	1.1914490	2.335E-03	-8.404E-05
0.0	40.0	1.1886740	0.000E+00	-1.165E-04
0.0	60.0	1.1852000	-2.923E-03	-1.461E-04
0.0	80.0	1.1811960	-6.291E-03	-1.689E-04
0.0	100.0	1.1764410	-1.029E-02	-2.013E-04
8.0	0.0	1.0944780	2.677E-03	0.000E+00
8.0	20.0	1.0931640	1.473E-03	-6.003E-05
8.0	40.0	1.0915560	0.000E+00	-7.355E-05
8.0	60.0	1.0898090	-1.600E-03	-8.002E-05
8.0	80.0	1.0884410	-2.854E-03	-6.276E-05
8.0	100.0	1.0881900	-3.084E-03	-1.153E-05
16.0	0.0	1.0592470	4.798E-04	0.000E+00
16.0	20.0	1.0589010	1.530E-04	-1.633E-05
16.0	40.0	1.0587390	0.000E+00	-7.649E-06
16.0	60.0	1.0592870	5.176E-04	2.588E-05
16.0	80.0	1.0613470	2.463E-03	9.724E-05
16.0	100.0	1.0662910	7.133E-03	2.329E-04
24.0	0.0	1.0109190	-8.836E-04	0.000E+00
24.0	20.0	1.0111280	-6.770E-04	1.034E-05
24.0	40.0	1.0118130	0.000E+00	3.387E-05
24.0	60.0	1.0136250	1.791E-03	8.954E-05
24.0	80.0	1.0177070	5.825E-03	2.014E-04
24.0	100.0	1.0258310	1.385E-02	3.991E-04
32.0	0.0	0.9610367	-1.655E-03	0.000E+00
32.0	20.0	0.9615375	-1.135E-03	2.606E-05
32.0	40.0	0.9626300	0.000E+00	5.681E-05
32.0	60.0	0.9649751	2.436E-03	1.218E-04
32.0	80.0	0.9697704	7.418E-03	2.485E-04
32.0	100.0	0.9790600	1.707E-02	4.790E-04

TABLE 5 - 8 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 1 X. 1 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-NOGD  
 OUTER CORE IN.FUEL-NOGD

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0715115	3.396E-03	0.000E+00
20.0	1.0698169	1.809E-03	-7.908E-05
40.0	1.0678850	0.000E+00	-9.029E-05
60.0	1.0660835	-1.687E-03	-8.435E-05
80.0	1.0649022	-2.793E-03	-5.540E-05
100.0	1.0651973	-2.517E-03	1.386E-05

TABLE 5 - 8 CORE VOID REACTIVITY ( CASE 1 X. 2 )  
 ( CYCLE BOC )

B10 OPPM  
 INNER CORE IN.FUEL-NOGD  
 OUTER CORE IN.FUEL-NOGD

VOID (%)	K-EFF	DEL-K/K	DEL-K/K/%V
0.0	1.0120377	1.872E-03	0.000E+00
20.0	1.0110247	8.688E-04	-5.005E-05
40.0	1.0101471	0.000E+00	-4.340E-05
60.0	1.0098744	-2.700E-04	-1.350E-05
80.0	1.0109838	8.283E-04	5.493E-05
100.0	1.0148932	4.698E-03	1.933E-04

表5-9 炉心のKeff及びボイド反応度

CASE #	CYCLE	$^{10}\text{B}$	VOID	燃料タイプ	Keff	ボイド反応度
1.1	BOC	0 ppm	40 %	基準富化度	1.1200092	1.14 % $\Delta K/K$
1.2	EOC	0 ppm	40 %	同上	1.0213438	1.21 % $\Delta K/K$
3.1	BOC	0 ppm	40 %	基準富化度	1.0423389	- 0.30 % $\Delta K/K$
3.3	EOC	0 ppm	40 %	同上	0.9851345	0.45 % $\Delta K/K$
1 X. 1	BOC	0 ppm	40 %	3.1 WT %	1.0678850	- 0.25 % $\Delta K/K$
1 X. 2	EOC	0 ppm	40 %	同上	1.0101471	0.47 % $\Delta K/K$

注) 基準富化度:  $2.525 (3.75 / 3.75 / 1.30) \text{ wt\% Pu(f) 燃料}$ 3.1 WT %:  $3.1 (4.63 / 4.63 / 1.57) \text{ wt\% Pu(f) 燃料}$ 

ボイド反応度: ボイド率 40 % -----&gt; 100 %での反応度

表5-10 ガドリニウム入り燃料格子の遅発核分裂中性子生成割合(β)

WIMS, ボイド率: 40 %

ケース No.	燃 料 $^{10}\text{B}$ ( ppm )	ガドリニウムの 配置・本数・濃度	燃焼度 ( GWd/t )	$\beta$ ( % )
1 X	炉心内側燃料 0 ppm	内層 3 本に 3 wt%	0	0.353
		中間層 3 本に 3 wt%	8	0.361
			16	0.365
			24	0.369
			32	0.372

注) 炉心内側燃料: ( 4.63 / 4.63 / 1.57 ) wt% Pu ( f )

表5-11 炉心のピーキング

CASE #	CYCLE	$^{10}\text{B}$	VOID	RPF ( 行, 列 )	LPF ( RING )	TPF
1.1	BOC	0 ppm	40 %	2.129 ( 16,3 )	1.128 ( 3 )	2.401
1.2	EOC	0 ppm	40 %	2.001 ( 16,3 )	1.109 ( 2 )	2.219
3.1	BOC	0 ppm	40 %	1.947 ( 15,1 )	1.254 ( 3 )	2.441
3.3	EOC	0 ppm	40 %	1.813 ( 16,3 )	1.172 ( 2 )	2.124
1 X. 1	BOC	0 ppm	40 %	1.958 ( 15,1 )	1.269 ( 3 )	2.485
1 X. 2	EOC	0 ppm	40 %	1.831 ( 16,3 )	1.154 ( 2 )	2.113

616 体炉心（内側燃料 324 体，外側燃料 292 体）

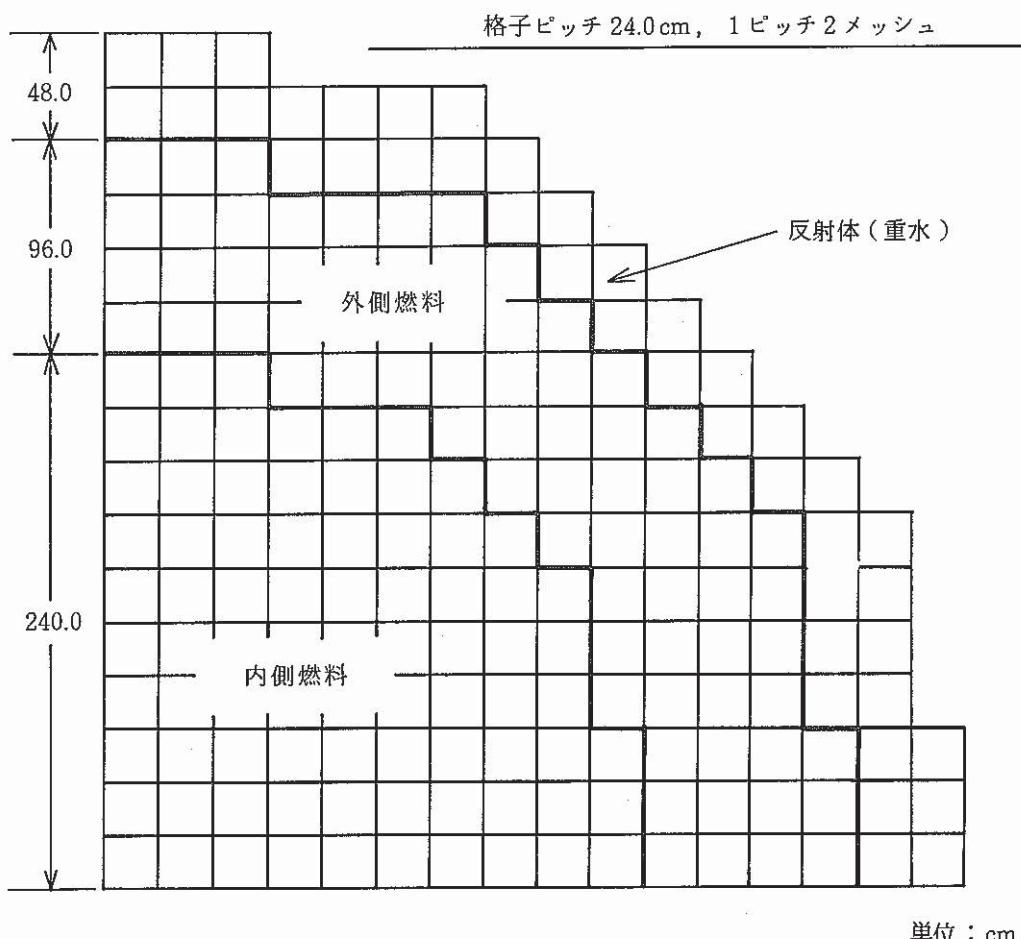


図 2.1 炉心計算モデル図

616 体炉心（内側燃料 324 体，外側燃料 292 体）

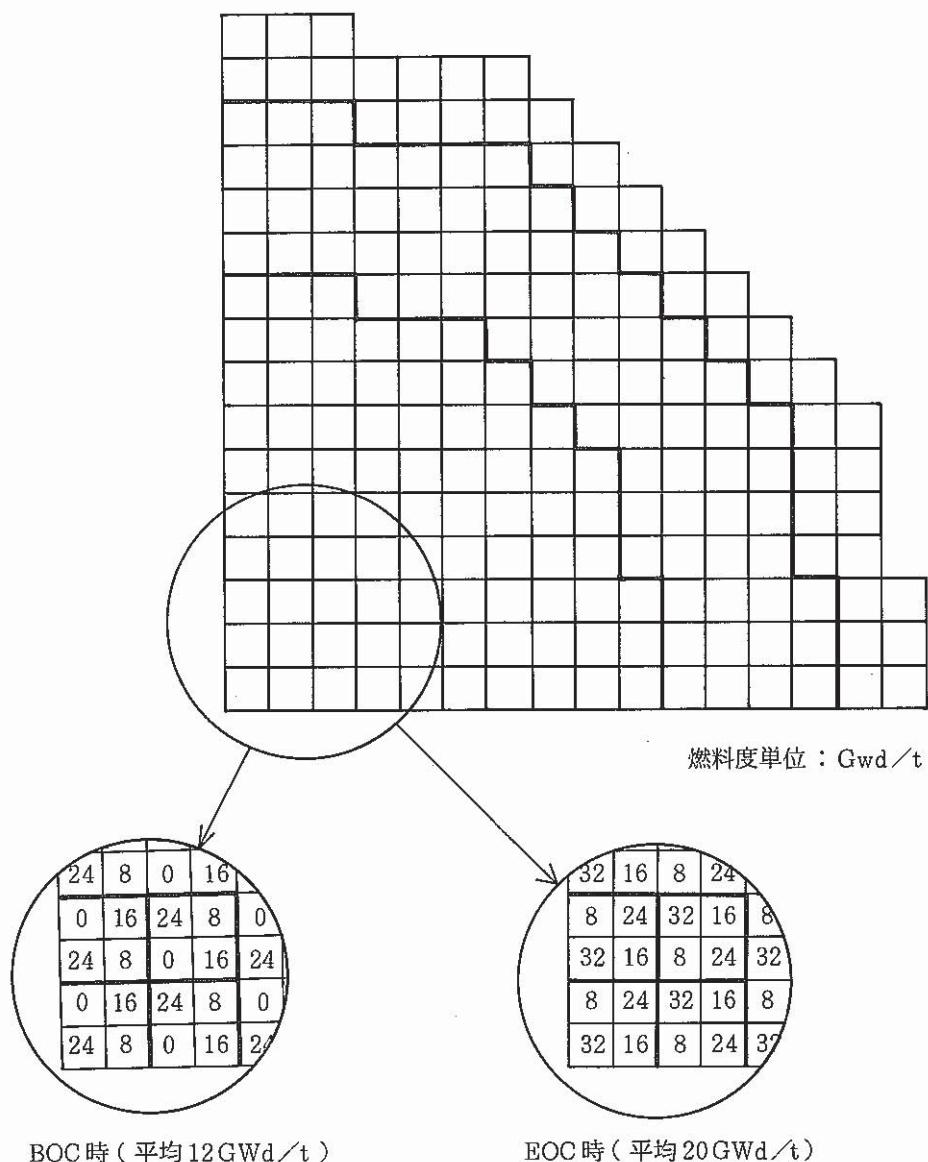
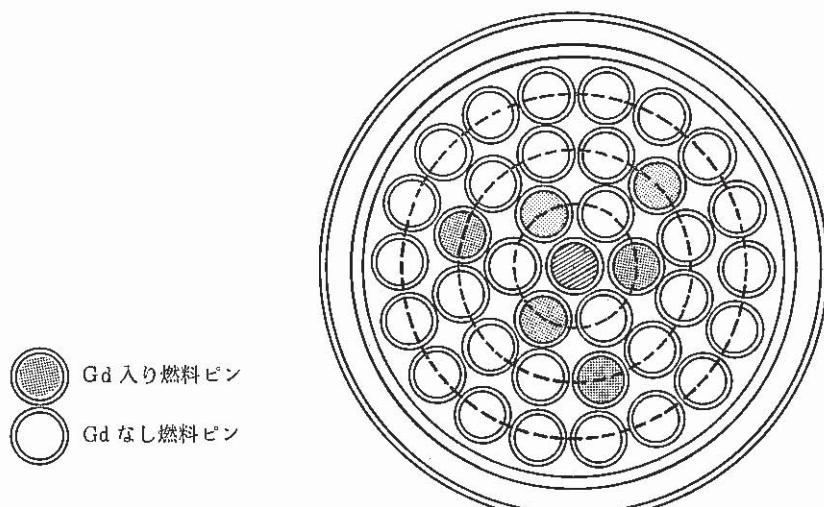
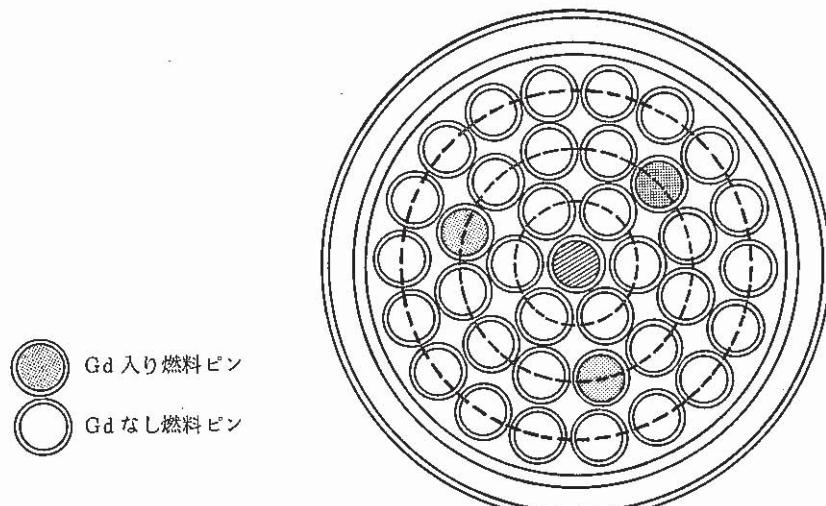


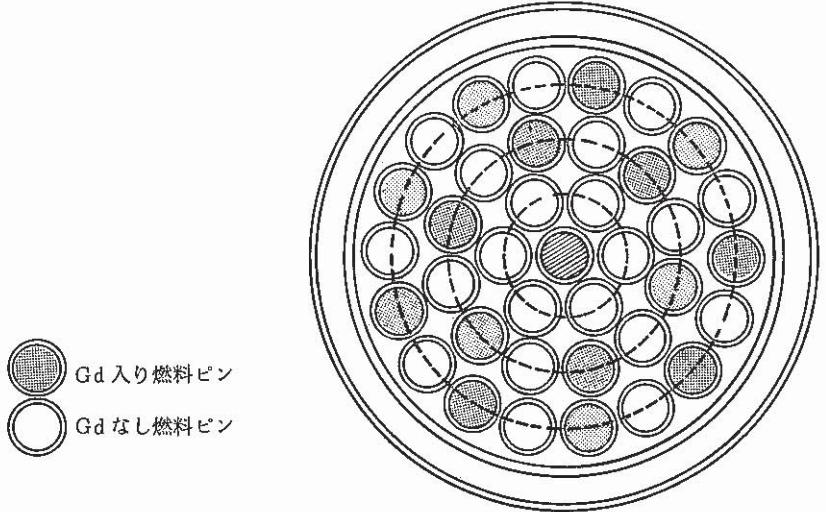
図 2.2 燃料度パターン



Gd入り燃料ピンの配置パターン（内層3本，中間層3本）



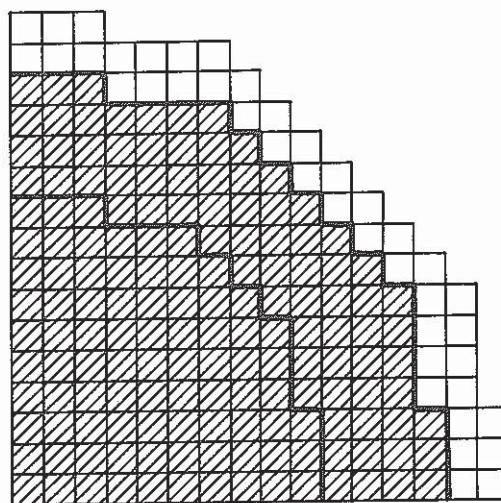
Gd入り燃料ピンの配置パターン（中間層3本のみ）



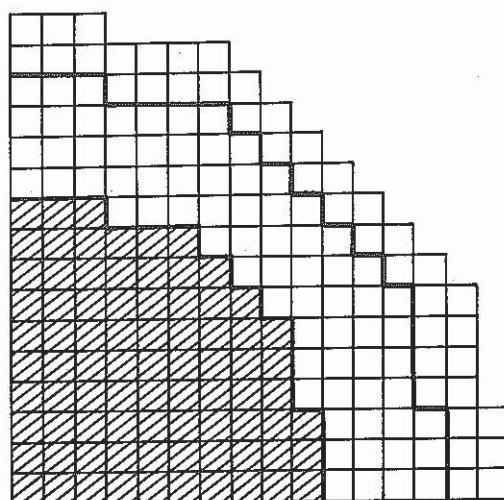
Gd入り燃料ピンの配置パターン（中間層6本，外層9本）

図 3.1 Gd入り燃料ピンの配置パターン

① 内側燃料，外側燃料とも全装荷



② 内側燃料のみ全装荷



③ 内側燃料1/2 装荷，外側燃料全装荷

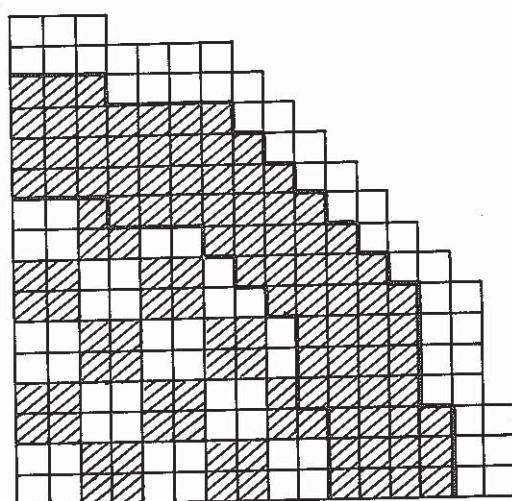


図 3.2 Gd入り燃料装荷パターン（斜線がGd入り燃料）

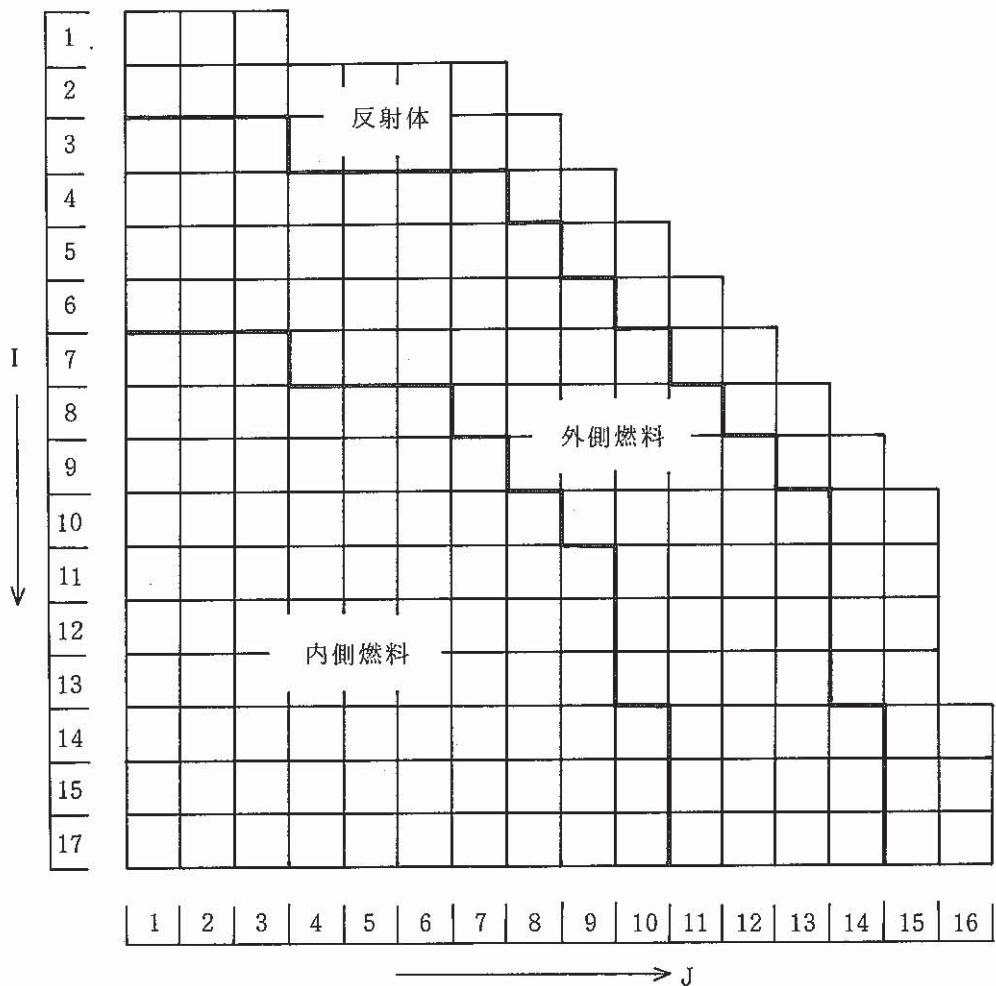


図 4.1 燃料チャンネル・アドレス (I, J) の定義

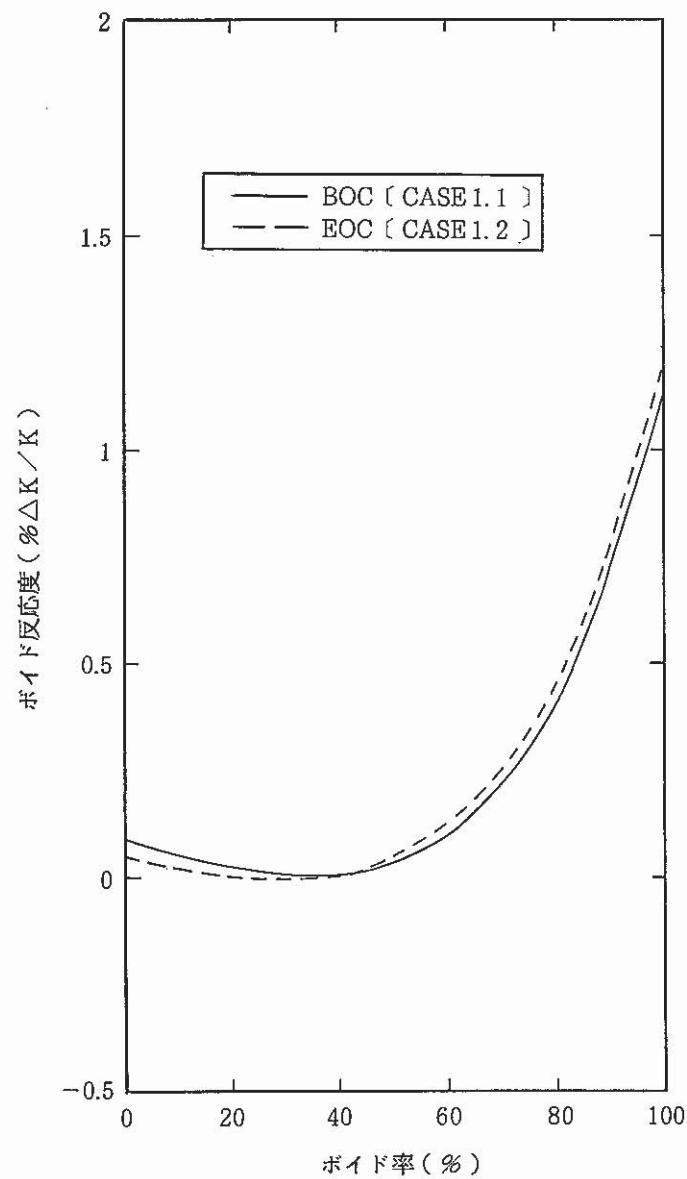


図 5-1-1-1 炉心のボイド反応度 ( CITATION )

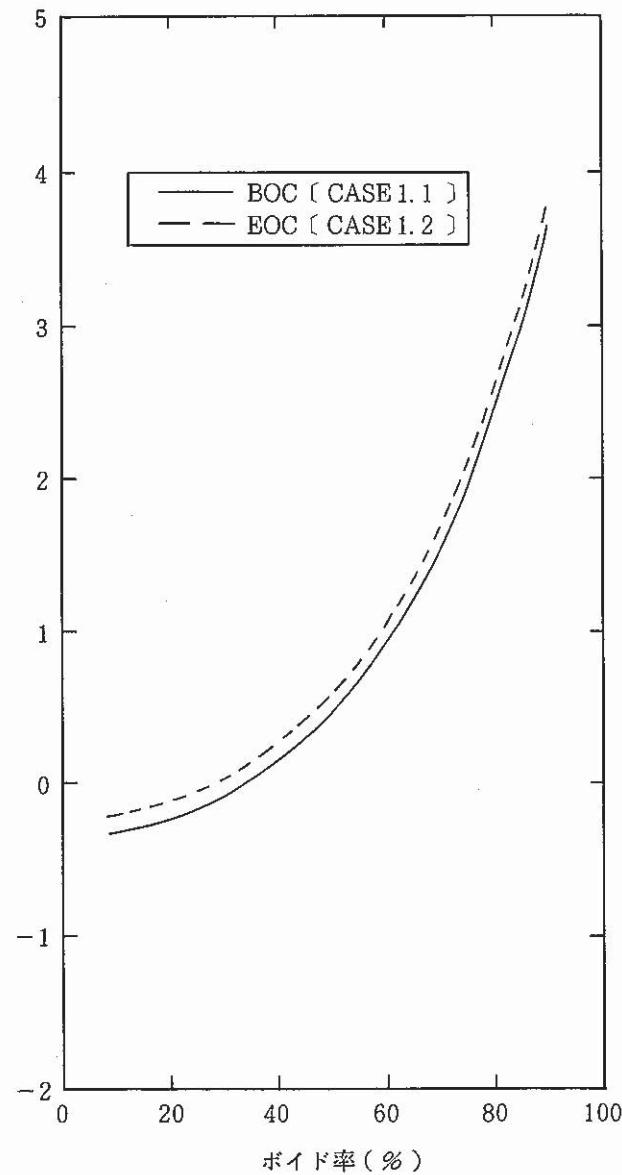


図 5-1-1-2 炉心のボイド係数 ( CITATION )

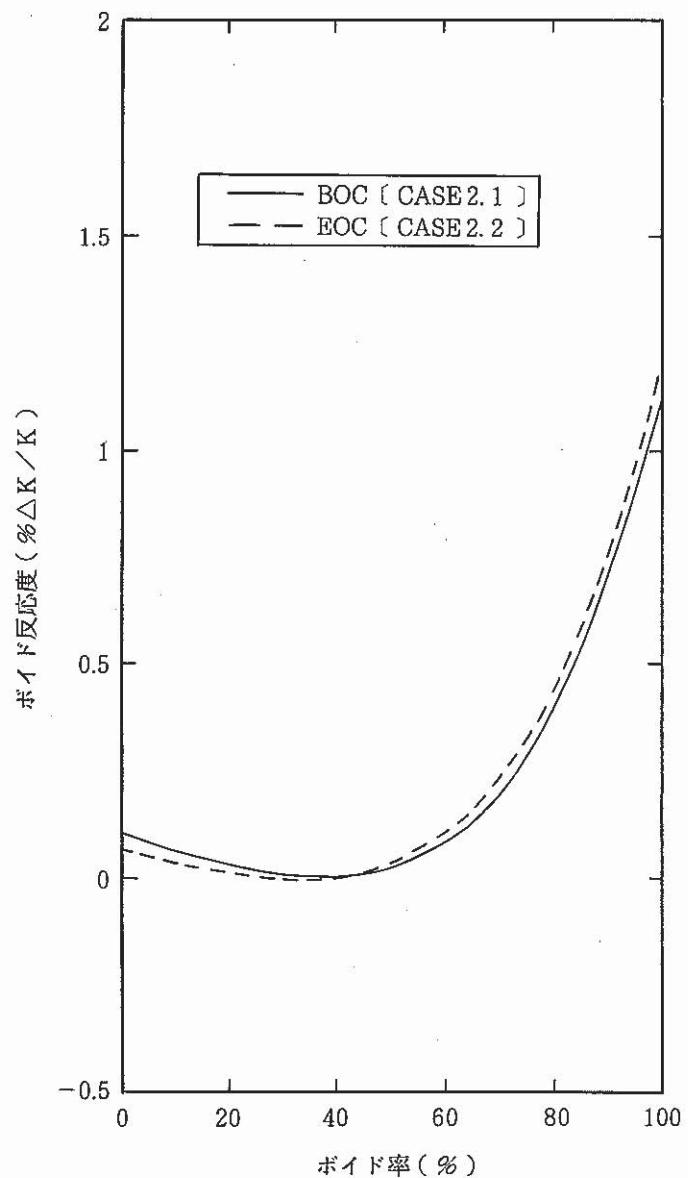


図 5-1-2-1 炉心のボイド反応度 ( CITATION )

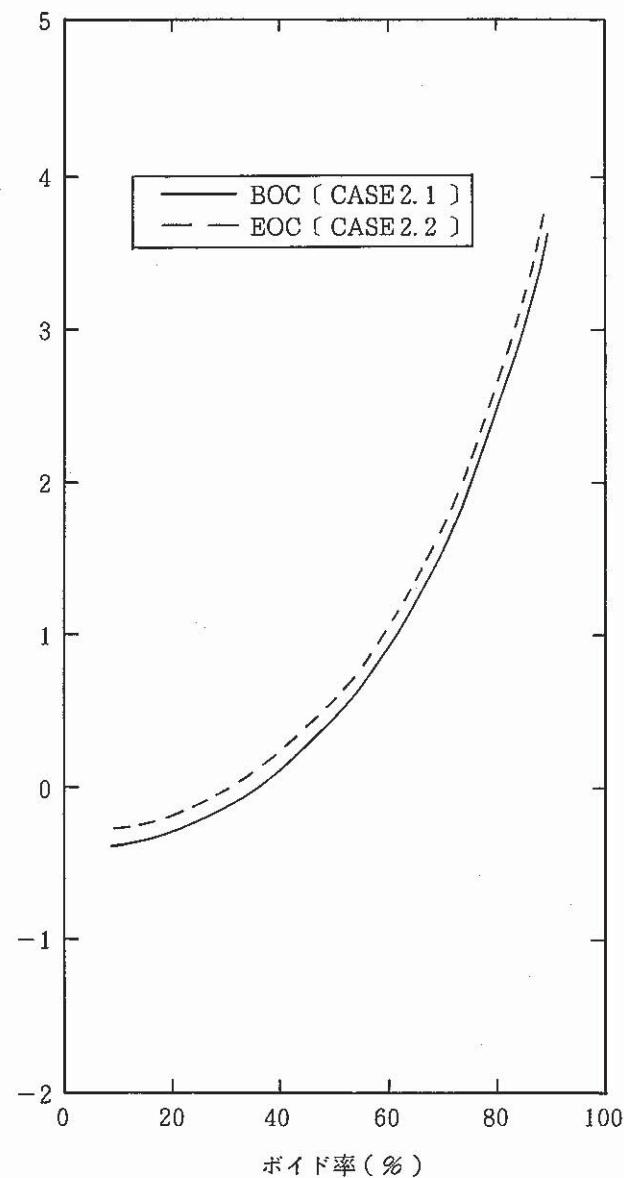


図 5-1-2-2 炉心のボイド係数 ( CITATION )

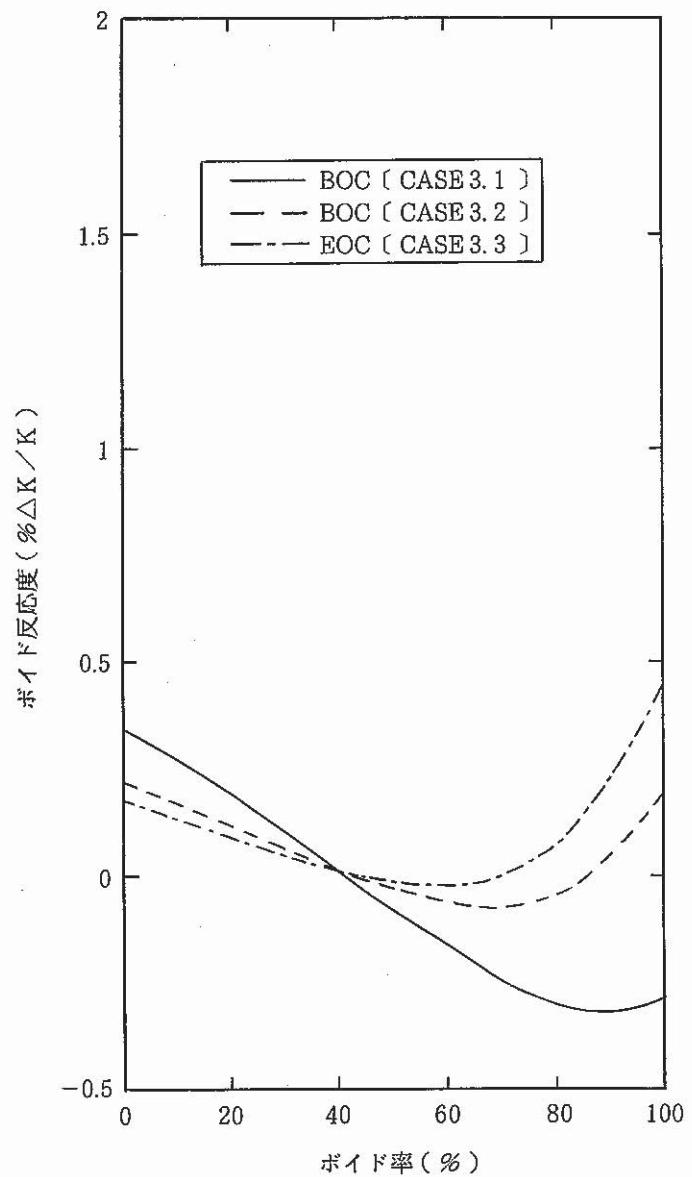


図 5-1-3-1 炉心のボイド反応度 ( CITATION )

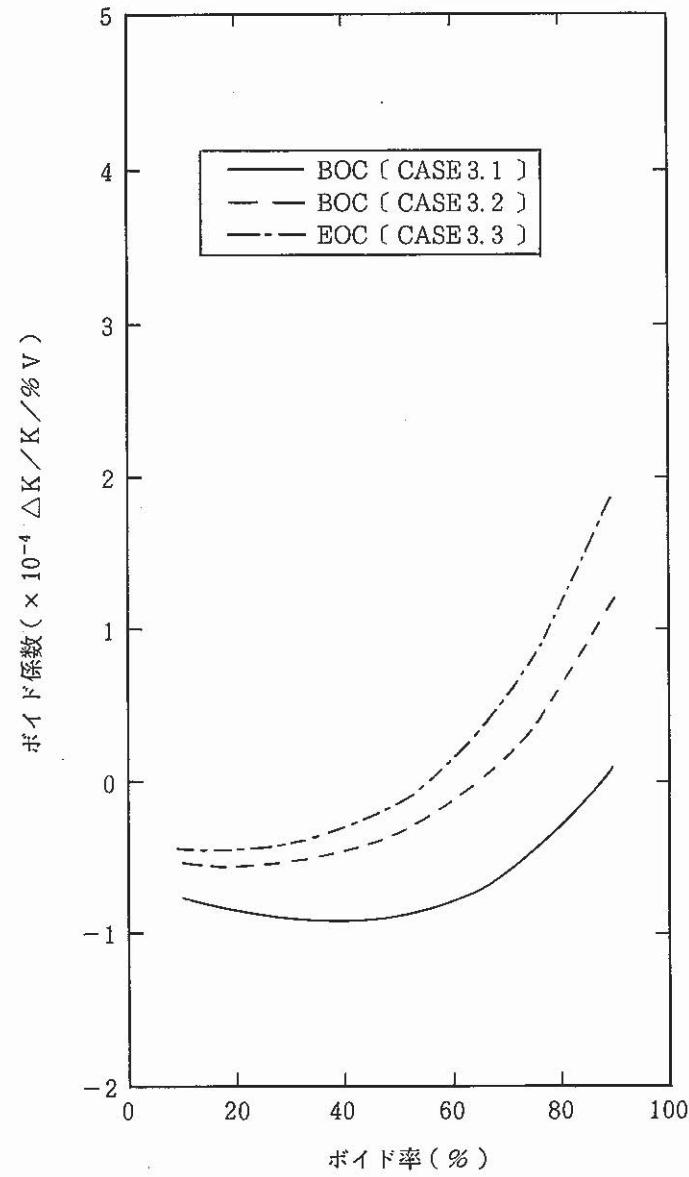


図 5-1-3-2 炉心のボイド係数 ( CITATION )

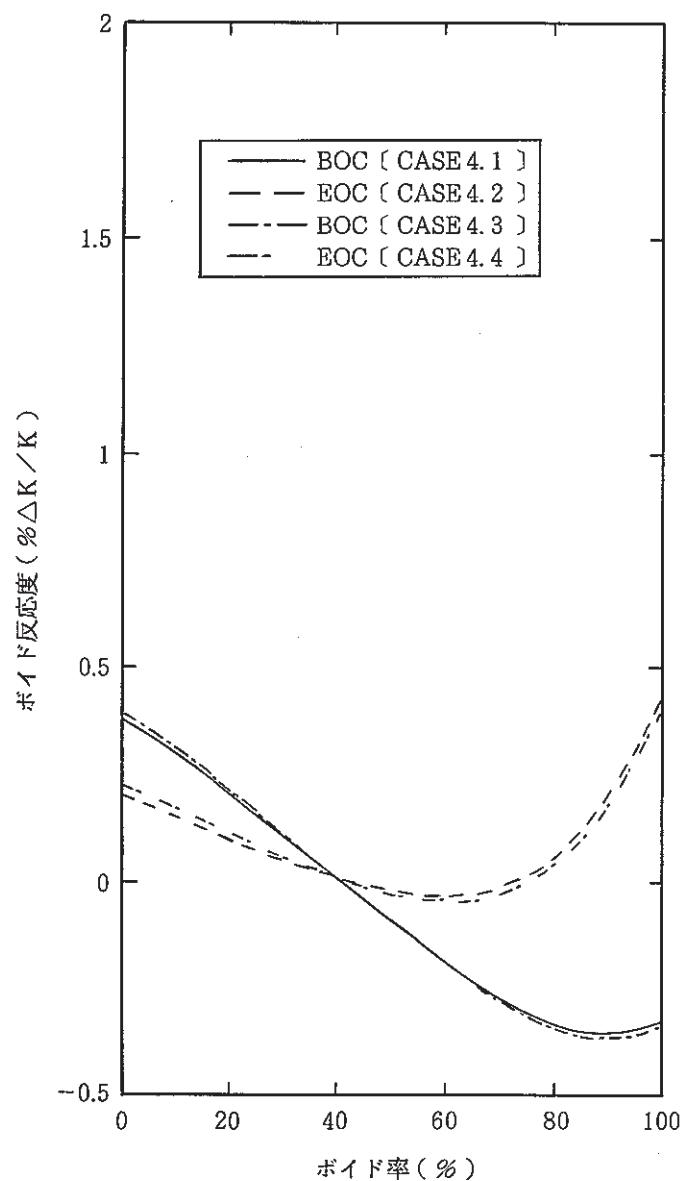


図 5-1-4-1 炉心のボイド反応度 ( CITATION )

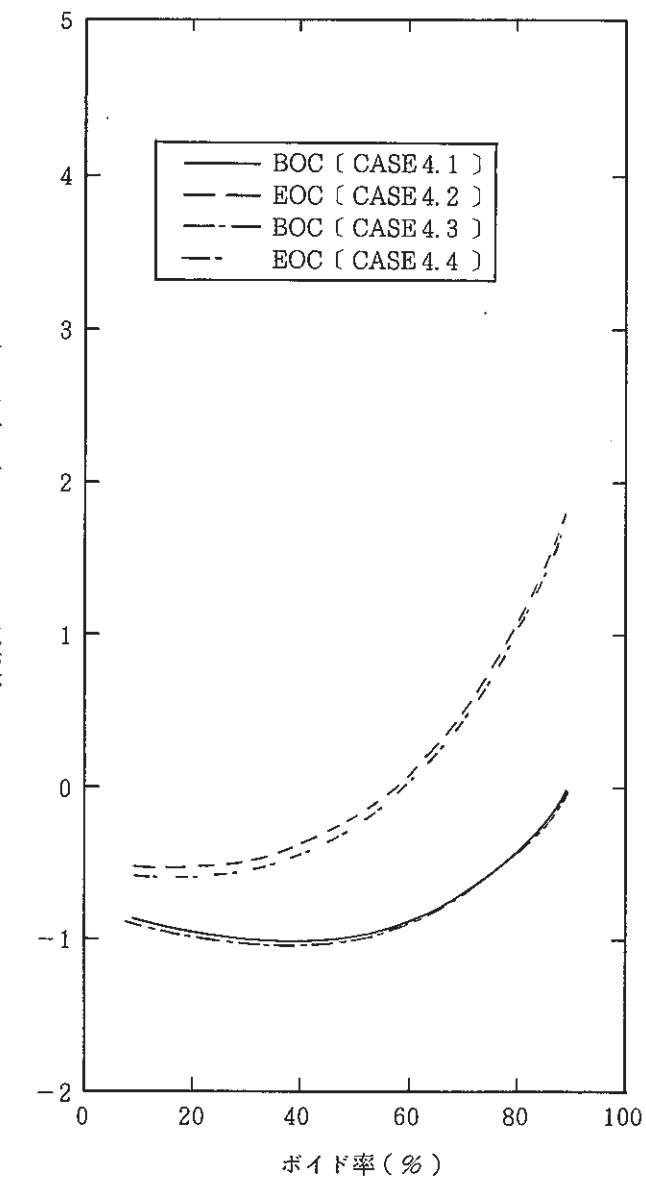


図 5-1-4-2 炉心のボイド係数 ( CITATION )

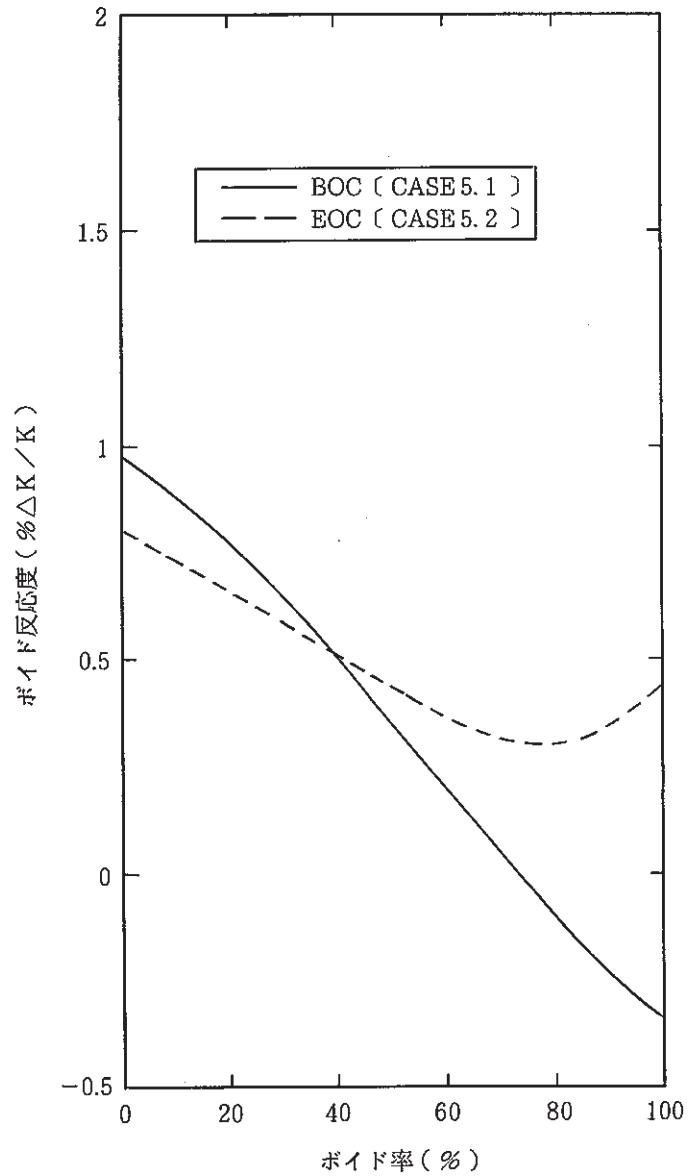


図 5-1-5-1 炉心のボイド反応度 ( CITATION )

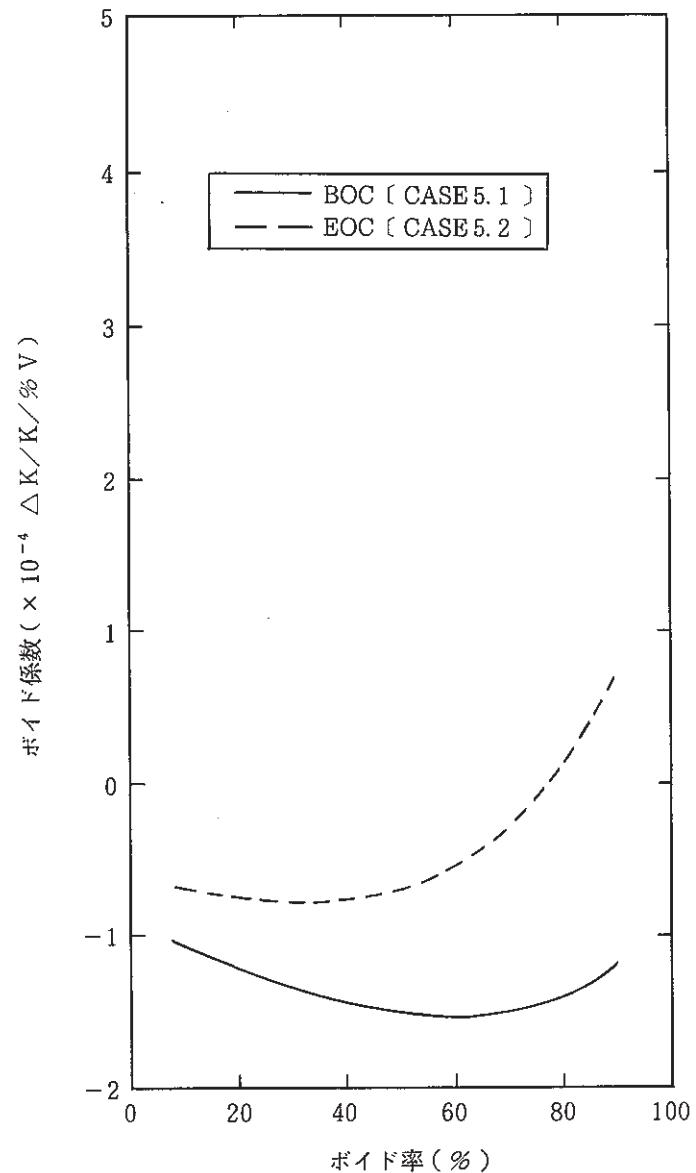


図 5-1-5-2 炉心のボイド係数 ( CITATION )

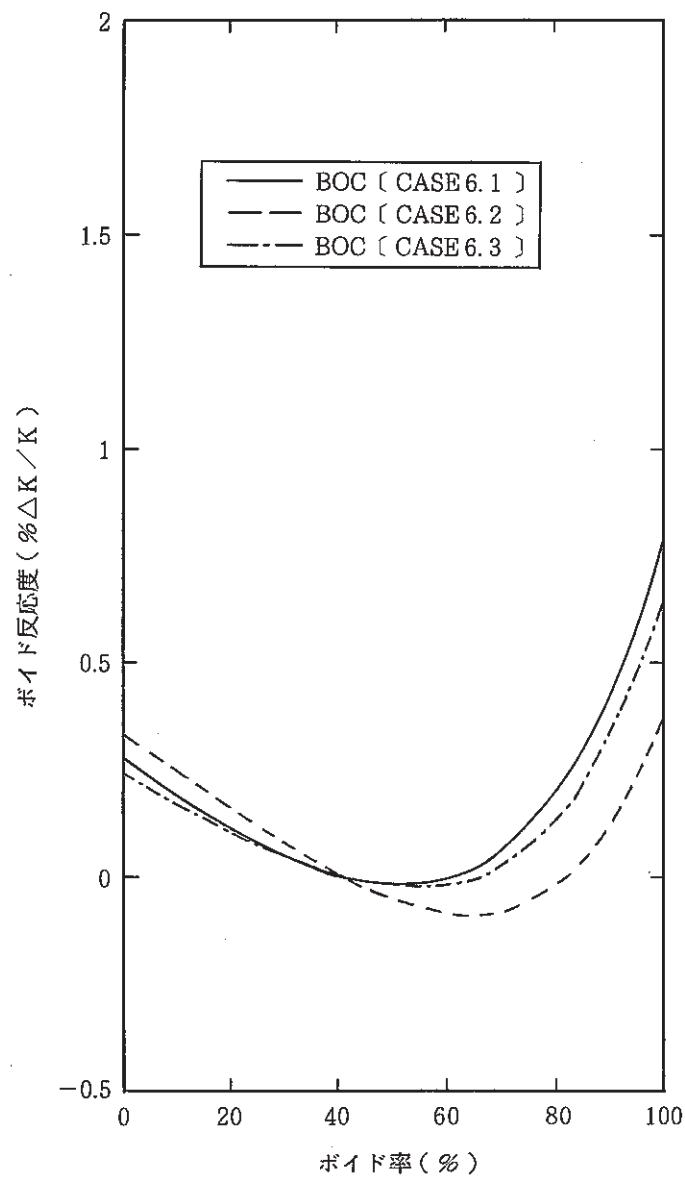


図 5-1-6-1 炉心のボイド反応度 ( CITATION )

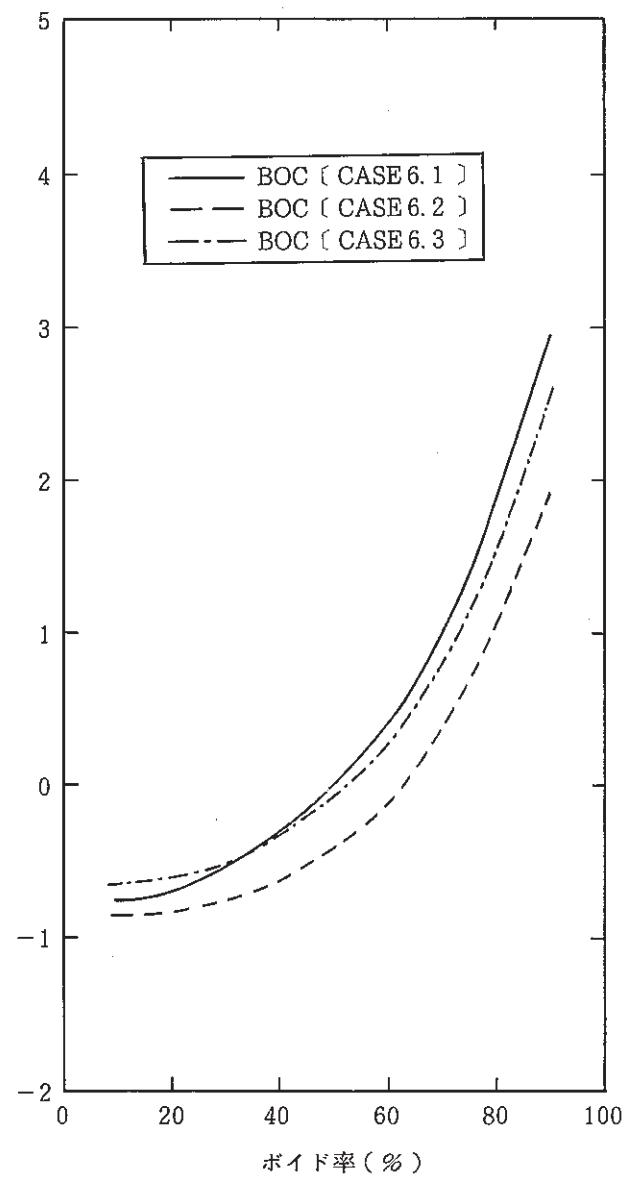


図 5-1-6-2 炉心のボイド係数 ( CITATION )

- 4 -

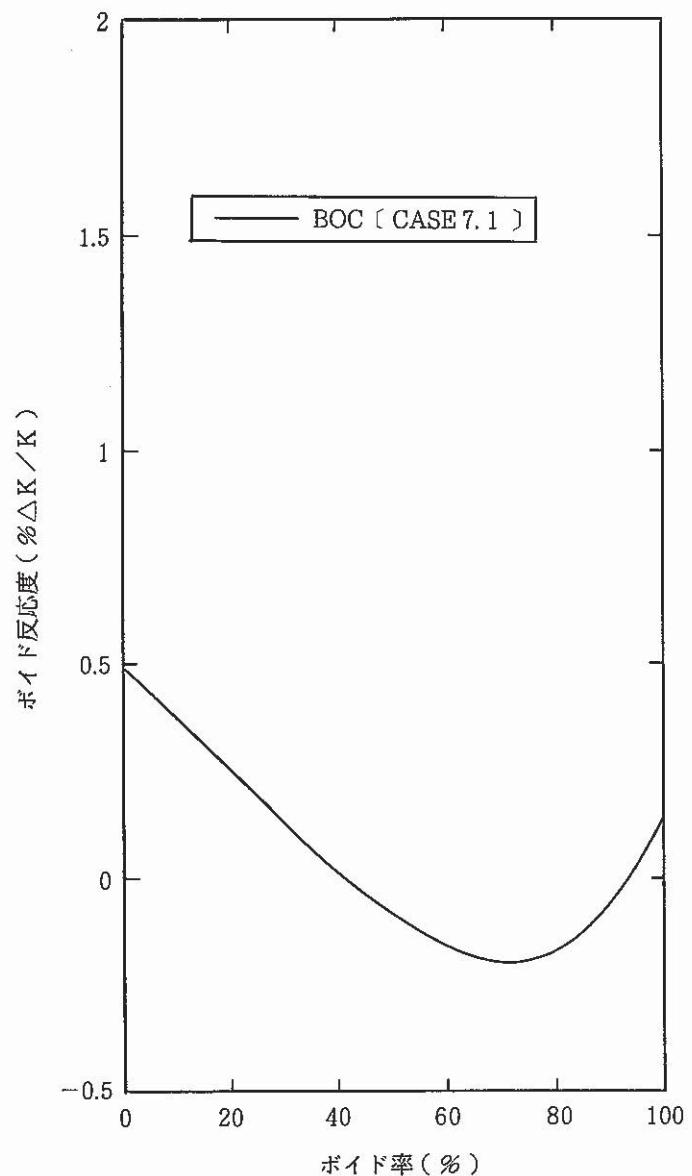


図 5-1-7-1 炉心のポイド反応度 ( CITATION )

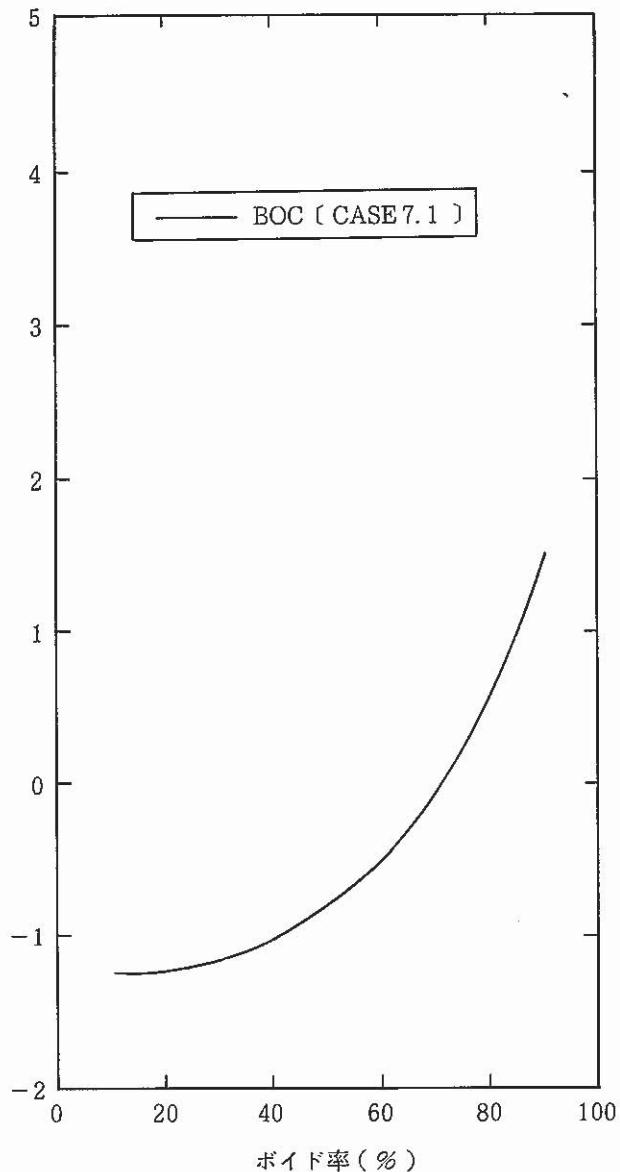


図 5-1-7-2 炉心のポイド係数 ( CITATION )

- 99 -

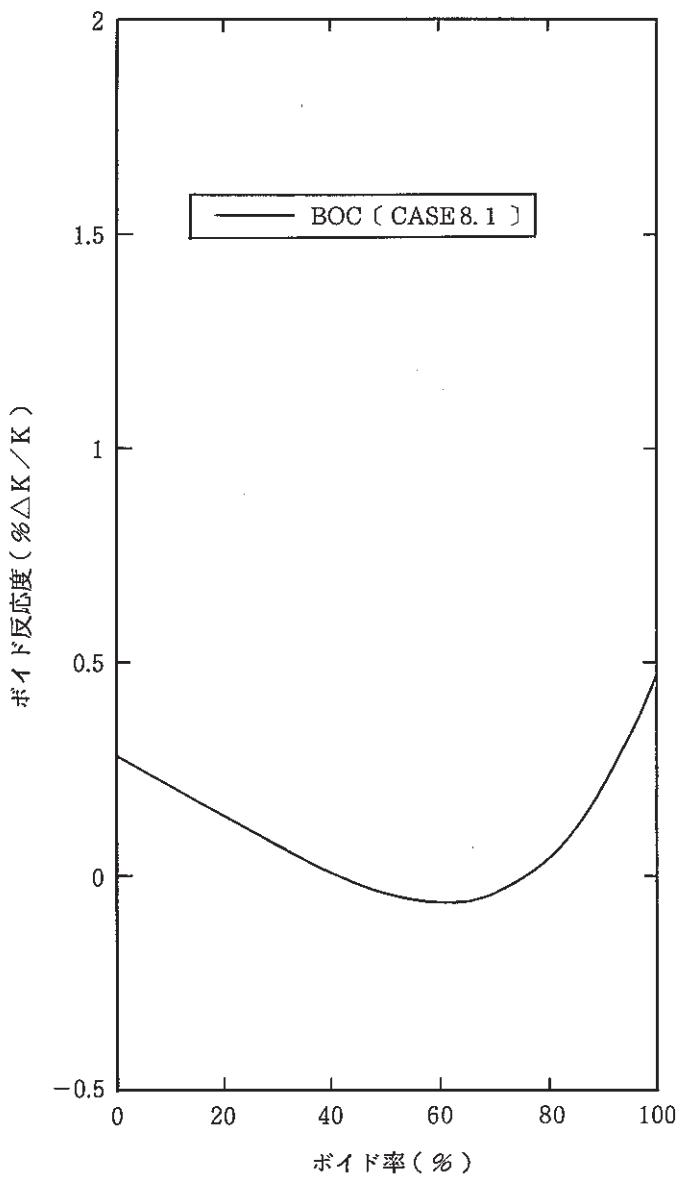


図 5-1-8-1 炉心のポイド反応度 ( CITATION )

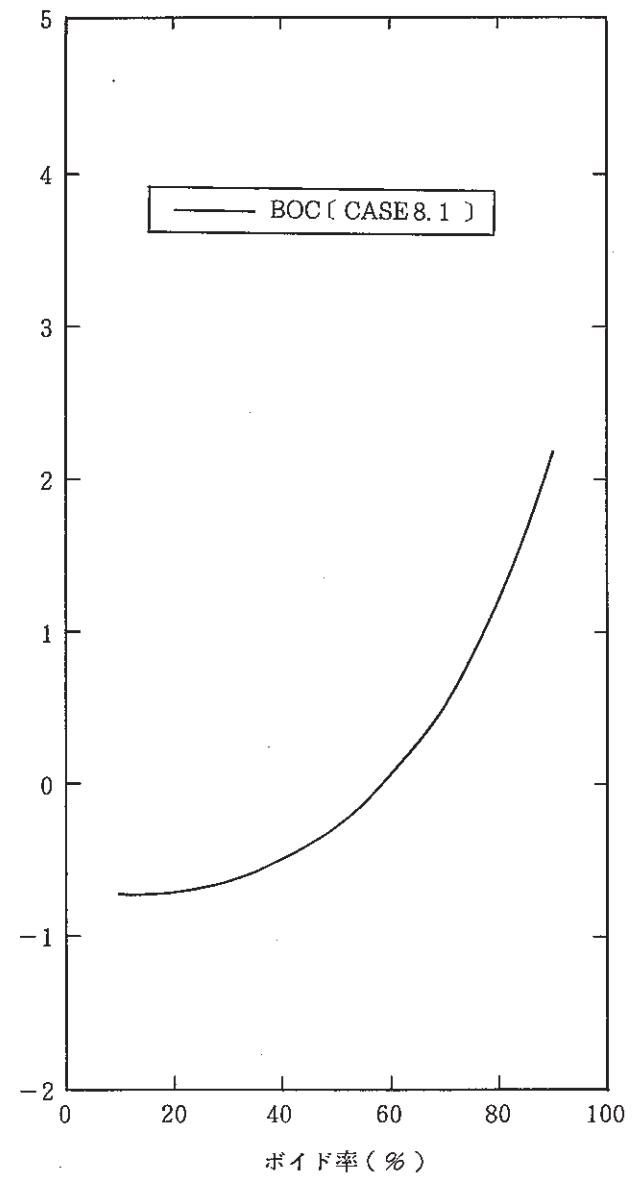


図 5-1-8-2 炉心のポイド係数 ( CITATION )

- 96 -

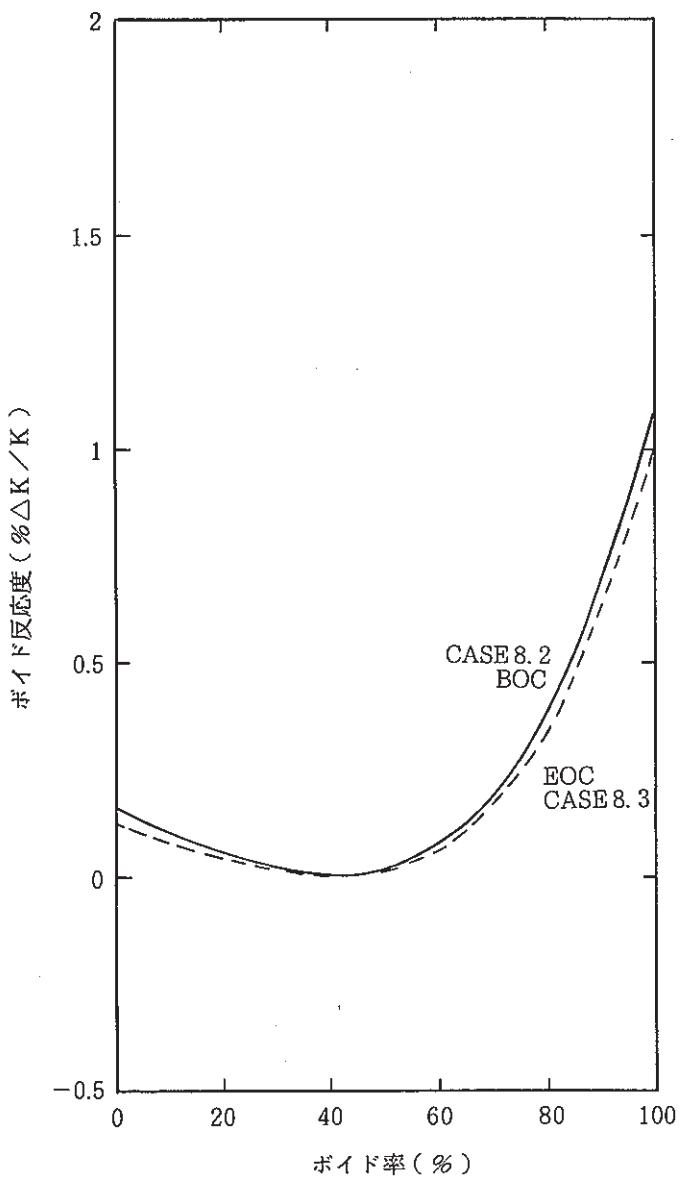


図 5-1-9-1 炉心のボイド反応度 ( CITATION )

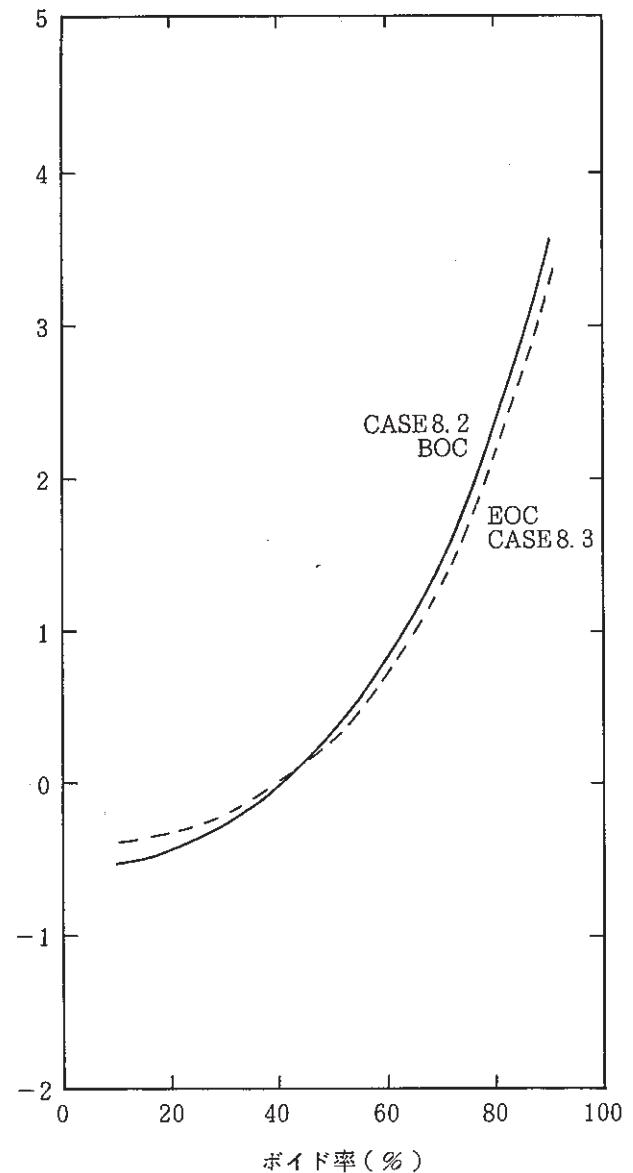


図 5-1-9-2 炉心のボイド係数 ( CITATION )

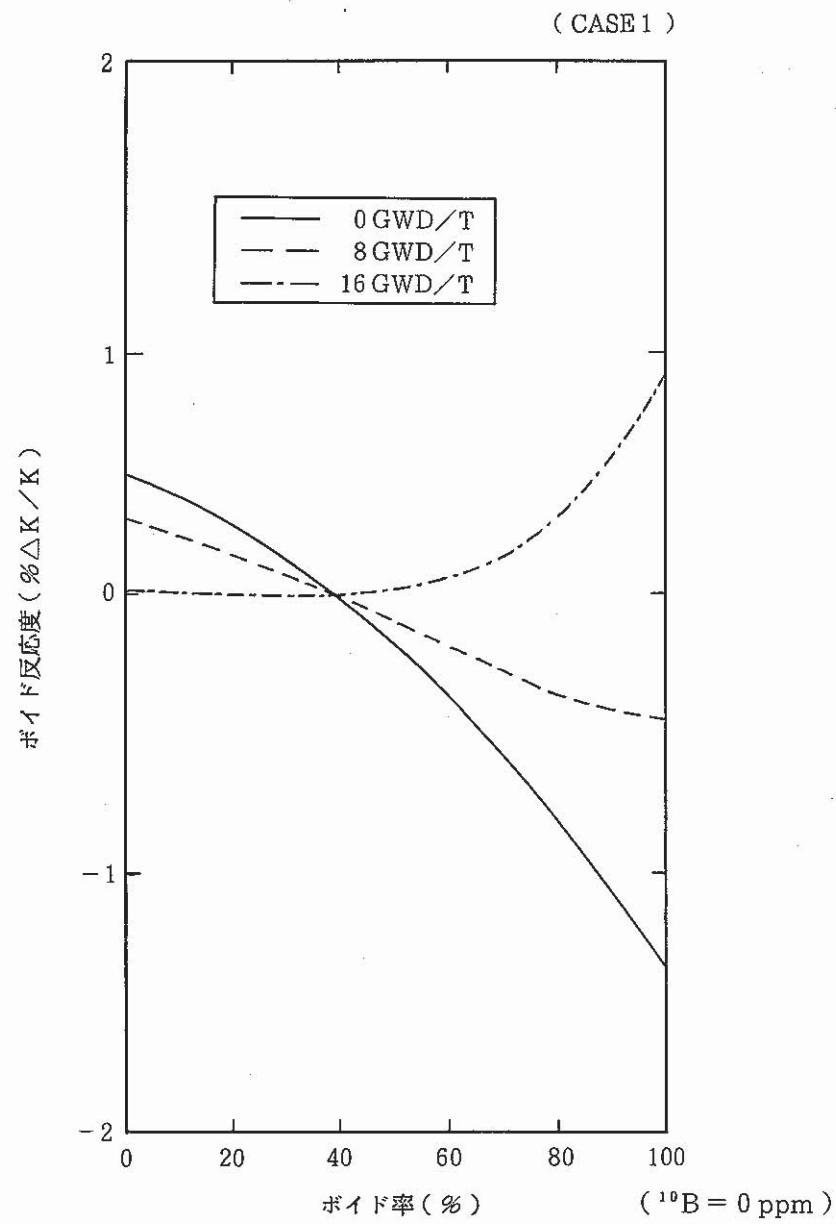


図 5-2-1 Gd 入り炉心内側燃料格子のボイド反応度  
( Gd 3 wt %入り燃料ピンが内層に 3 本挿入 )  
( Gd 3 wt %入り燃料ピンが中間層に 3 本挿入 )

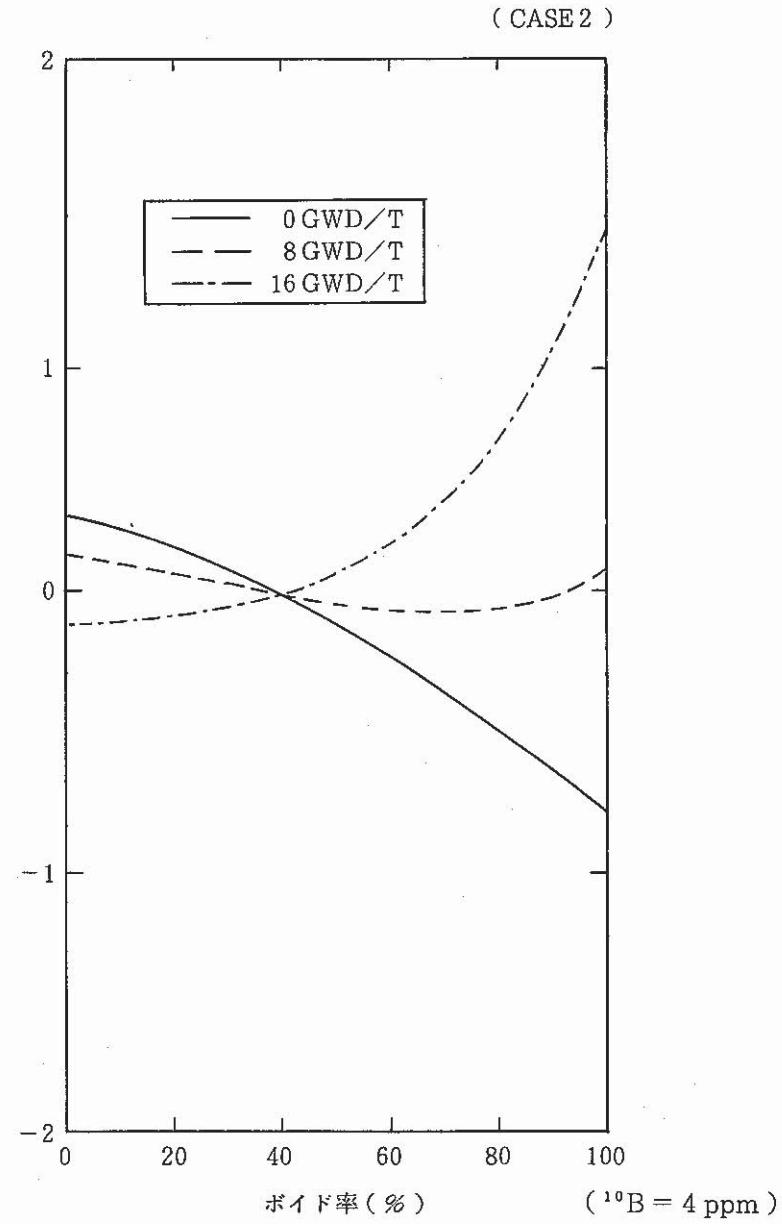
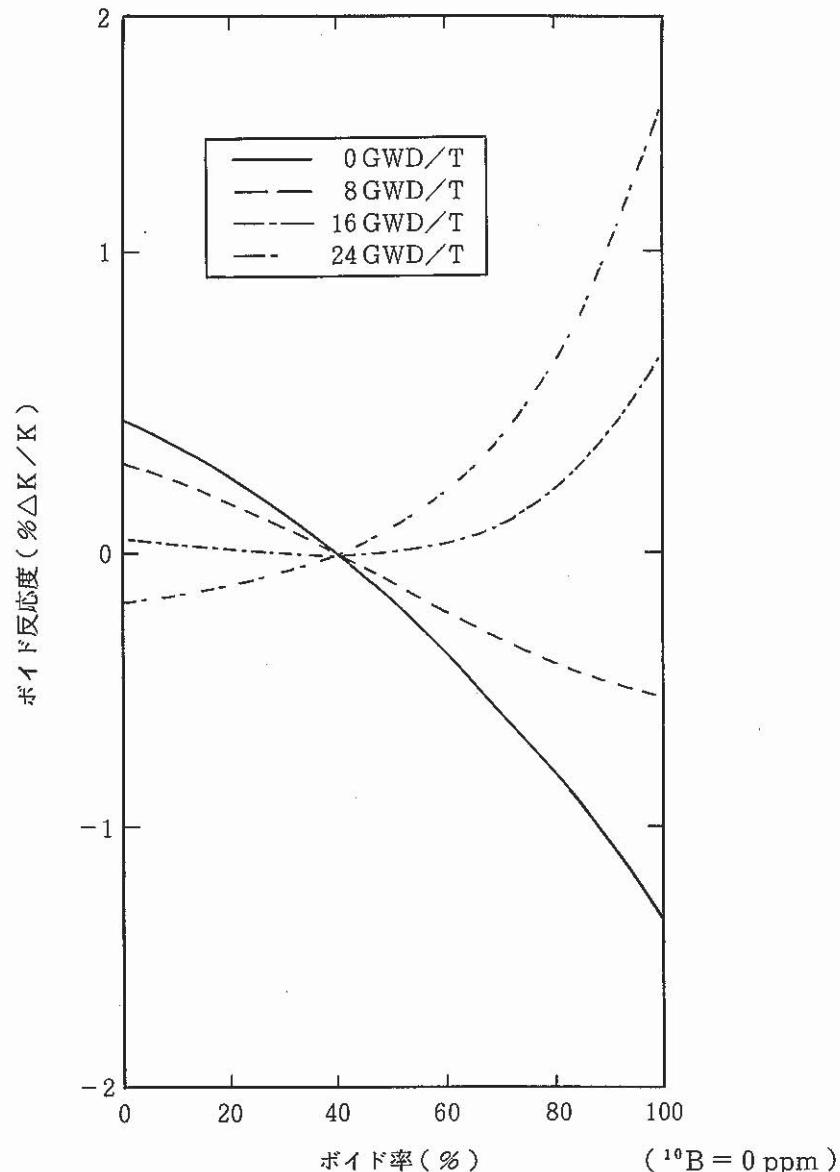


図 5-2-2 Gd 入り炉心内側燃料格子のボイド反応度  
( Gd 3 wt %入り燃料ピンが内層に 3 本挿入 )  
( Gd 3 wt %入り燃料ピンが中間層に 3 本挿入 )

( CASE 3 - 1 )



( CASE 3 - 2 )

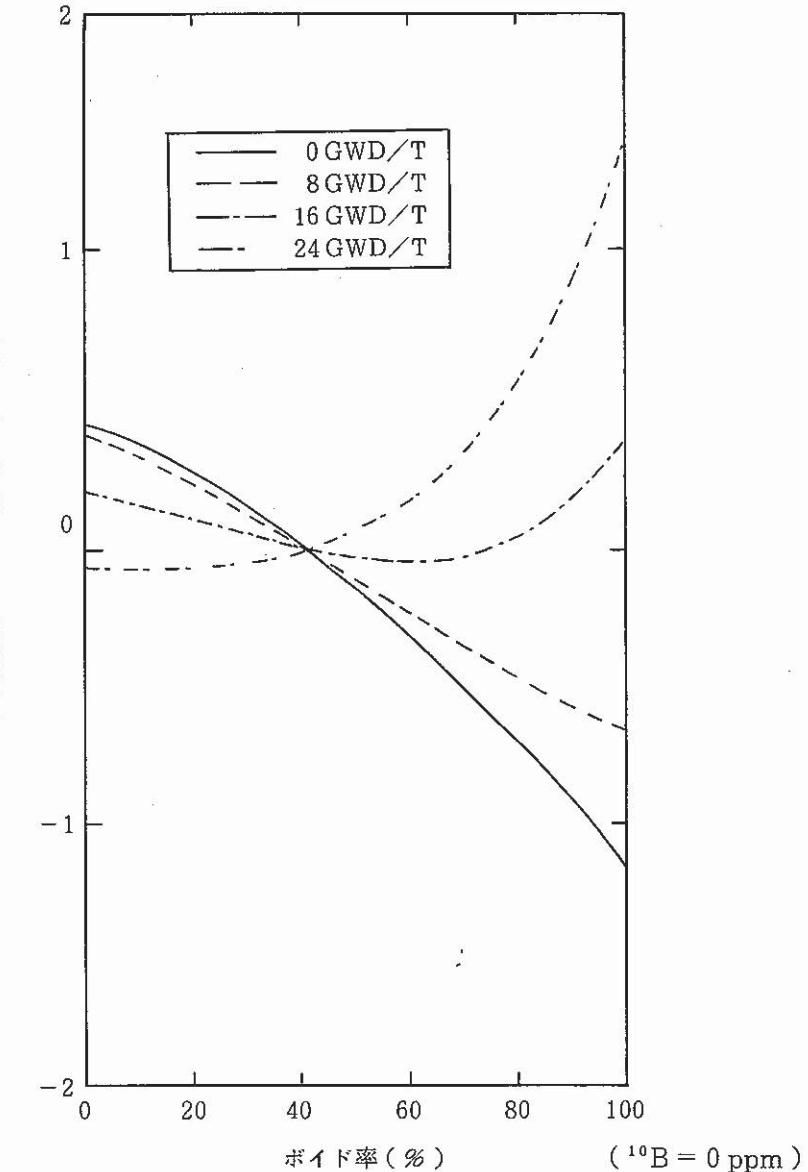


図 5-2-3 Gd 入り炉心内側燃料格子のボイド反応度  
 ( Gd 2 wt %入り燃料ピンが内層に 3 本挿入 )  
 ( Gd 5 wt %入り燃料ピンが中間層に 3 本挿入 )

図 5-2-4 Gd 入り炉心外側燃料格子のボイド反応度  
 ( Gd 2 wt %入り燃料ピンが内層に 3 本挿入 )  
 ( Gd 5 wt %入り燃料ピンが中間層に 3 本挿入 )

- 69 -

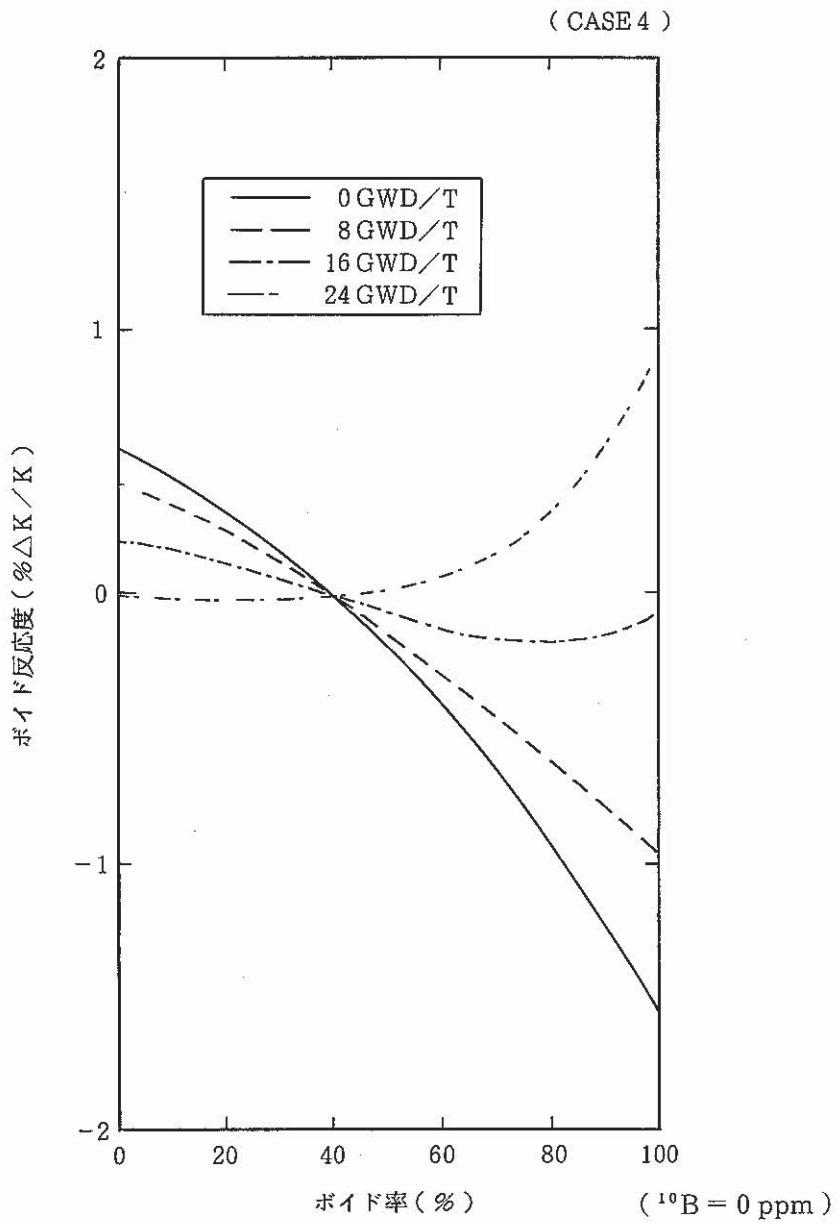


図 5-2-5 Gd入り炉心内側燃料格子のボイド反応度  
( Gd 5 wt %入り燃料ピンが内層に 3 本挿入 )  
( Gd 5 wt %入り燃料ピンが中間層に 3 本挿入 )

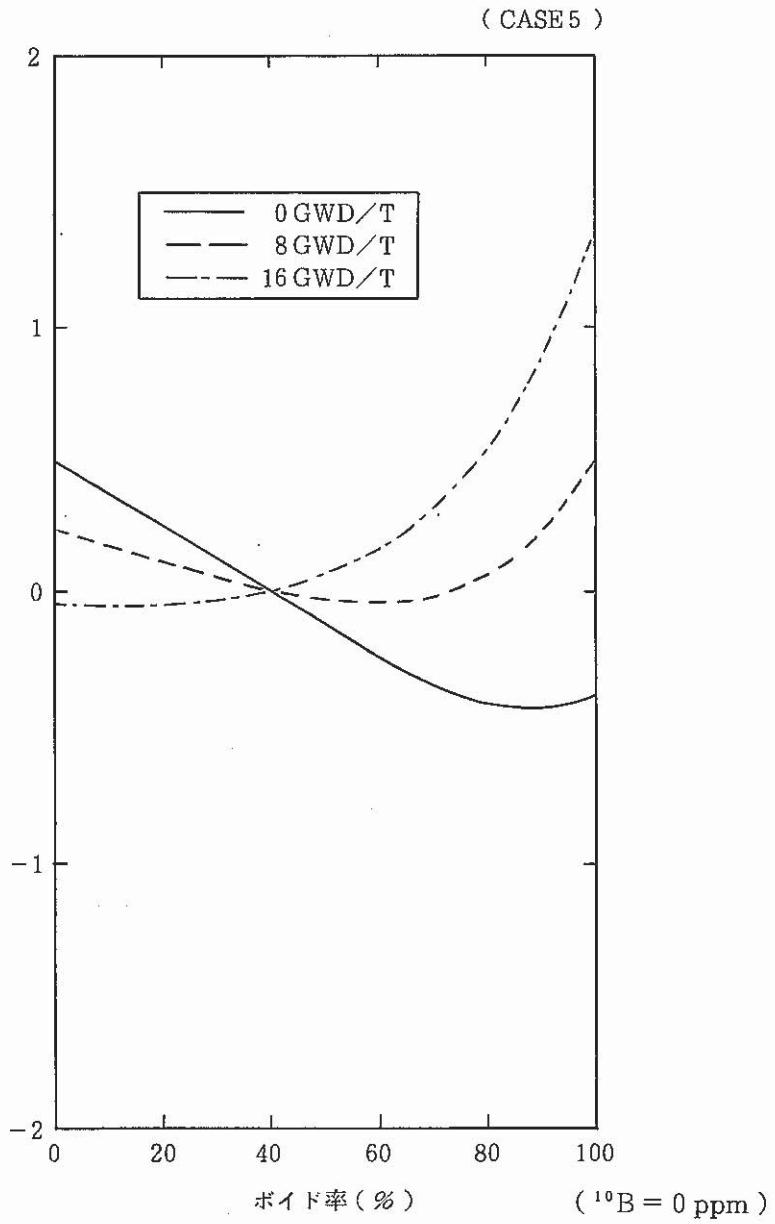


図 5-2-6 Gd入り炉心内側燃料格子のボイド反応度  
( Gd 5 wt %入り燃料ピンが中間層に 3 本挿入 )

( CASE 7 - 1 )

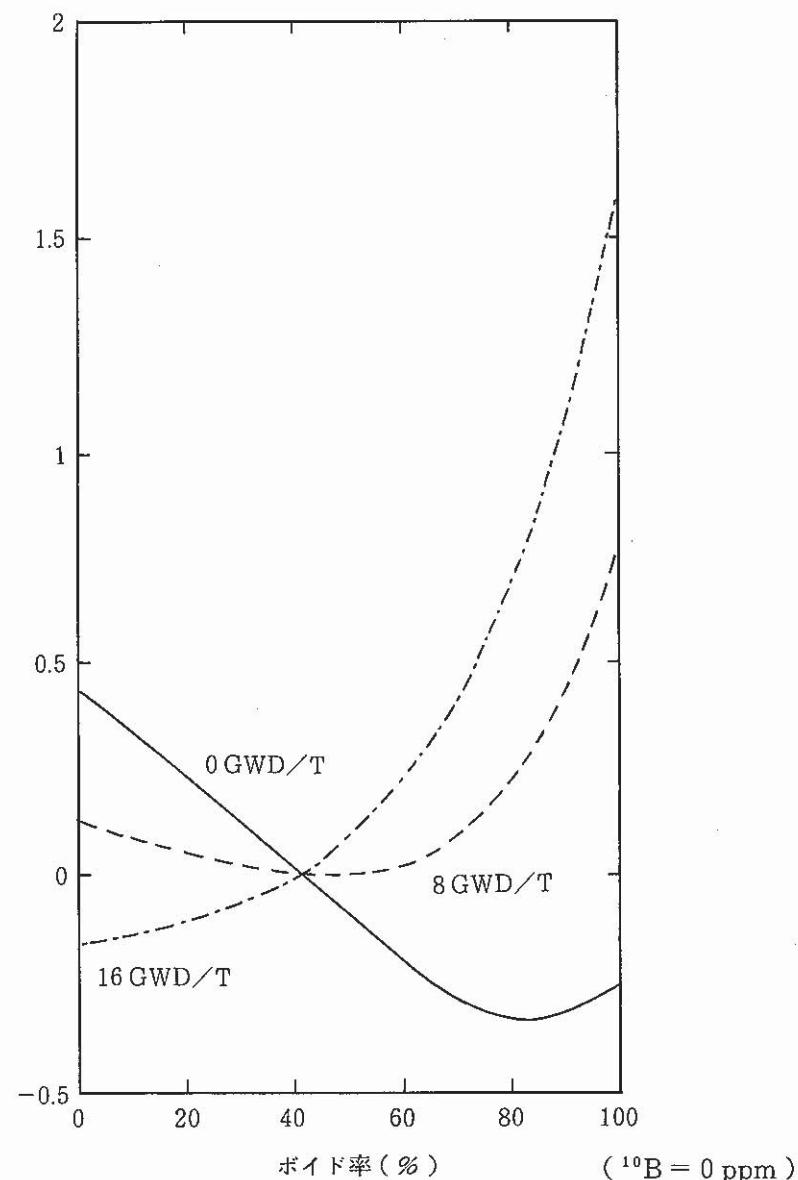


図 5-2-8 Gd 燃料ボイド反応度 ( 3.75 / 3.75 / 1.30 ) Pu(f)  
( 3 % Gd 燃料を 3 本中間層に配置した格子計算 )

( CASE 6 )

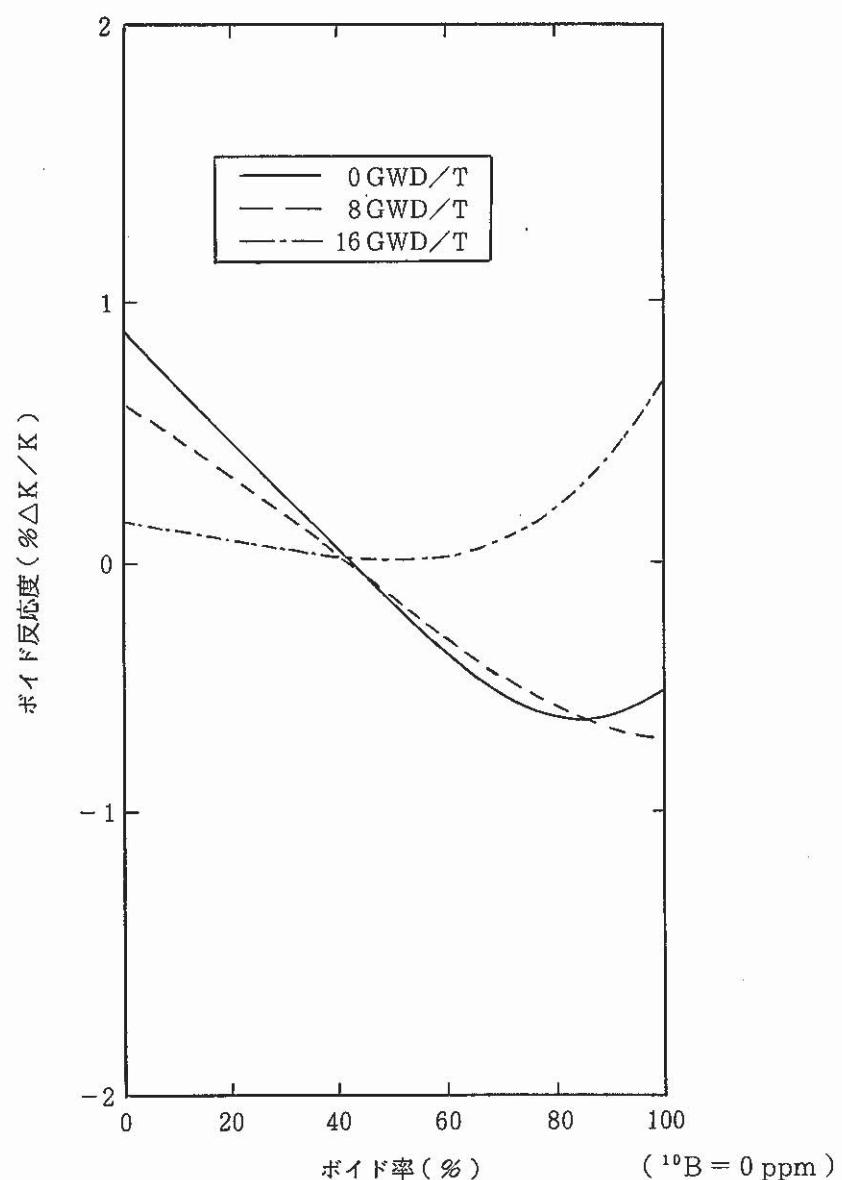


図 5-2-7 Gd 入り炉心内側燃料格子のボイド反応度  
( Gd 5 wt % 入り燃料ピンが中間層に 6 本挿入 )  
( Gd 0.5 wt % 入り燃料ピンが外層に 9 本挿入 )

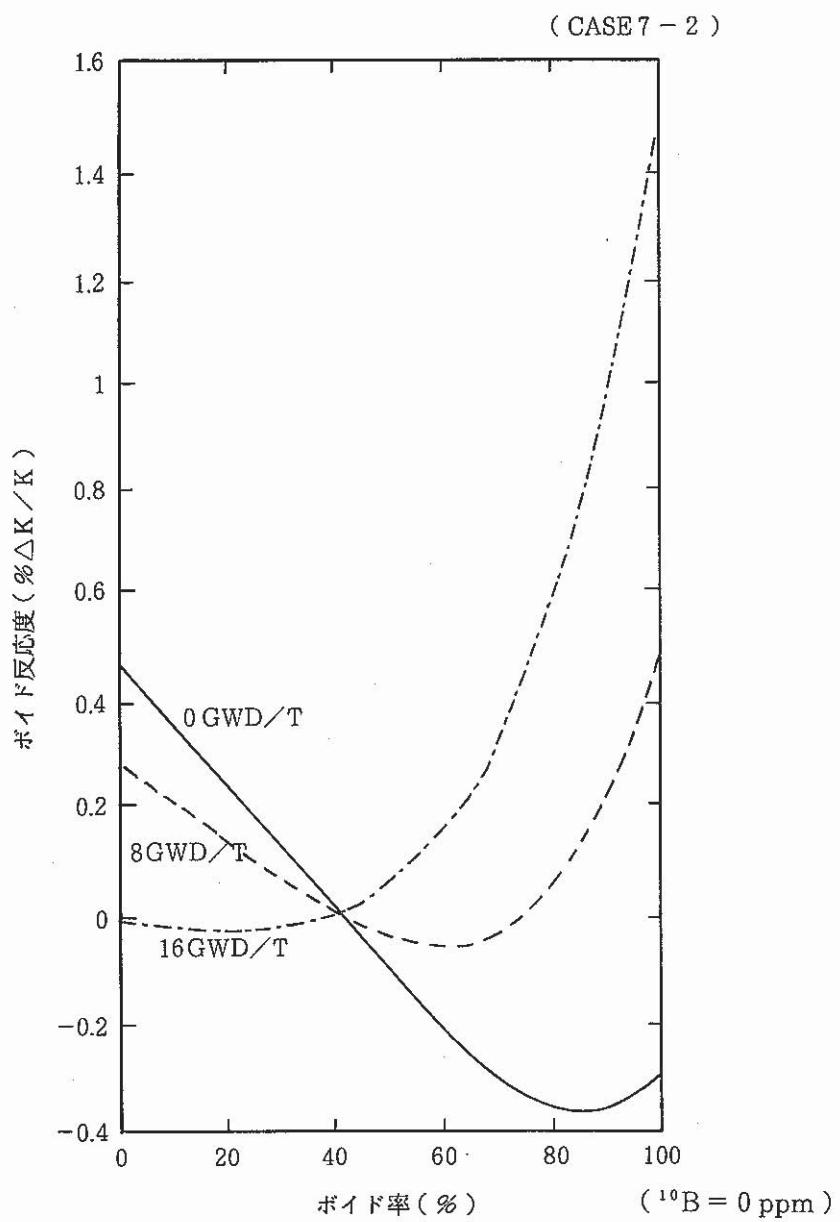


図 5-2-9 Gd 燃料ボイド反応度 ( 4.00 / 4.00 / 1.75 ) Pu(f)  
( 3 % Gd 燃料を 3 本中間層に配置した格子計算 )

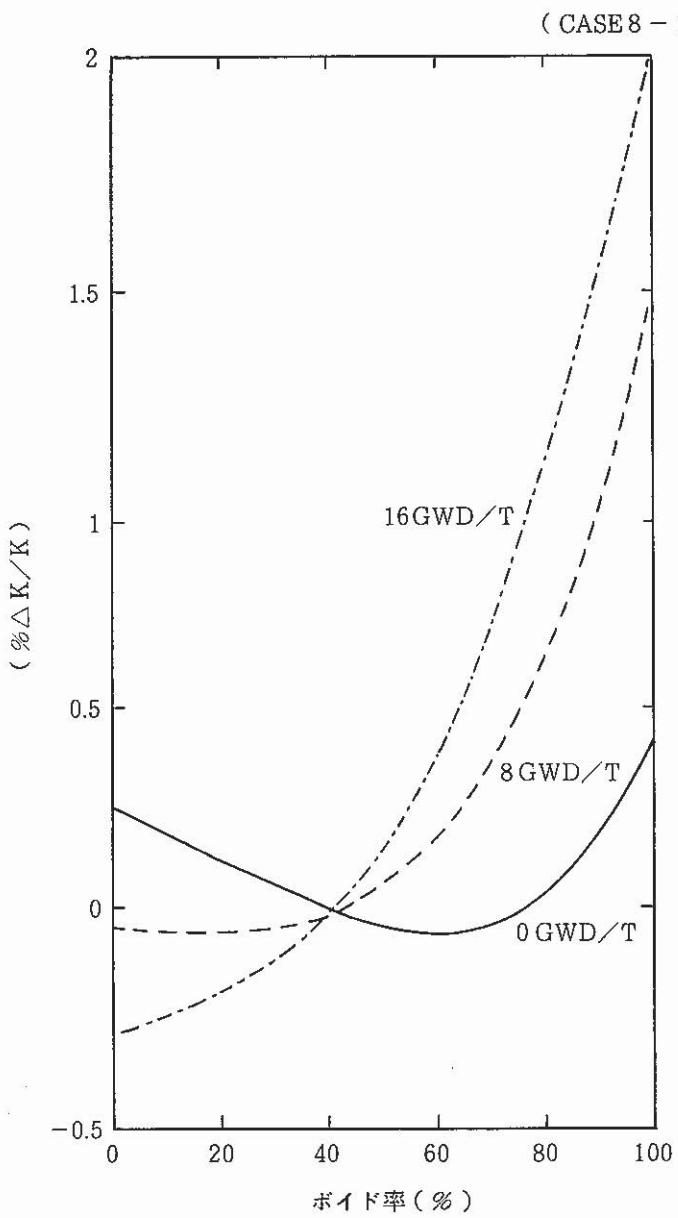


図 5-2-10 Gd 燃料ボイド反応度 ( 3.75 / 3.75 / 1.30 ) Pu(f)  
( 3 % Gd 燃料を 3 本中間層に配置し,  $^{10}B$  濃度を  
6 ppm にした格子計算 )

( CASE 8 - 2 )

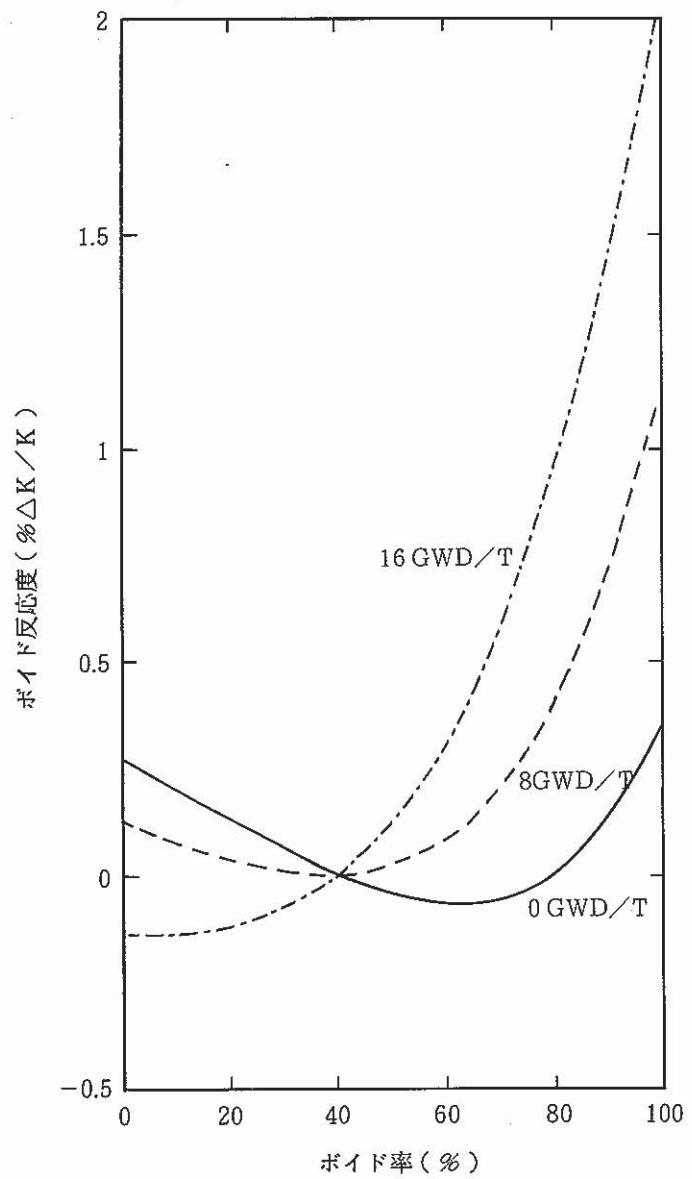


図 5-2-11 Gd 燃料ボイド反応度 ( 4.00 / 4.00 / 1.75 ) Pu ( f )  
 ( 3 % Gd 燃料を 3 本中間層に配置し,  $^{10}\text{B}$  濃度を  
 6 ppm にした格子計算 )

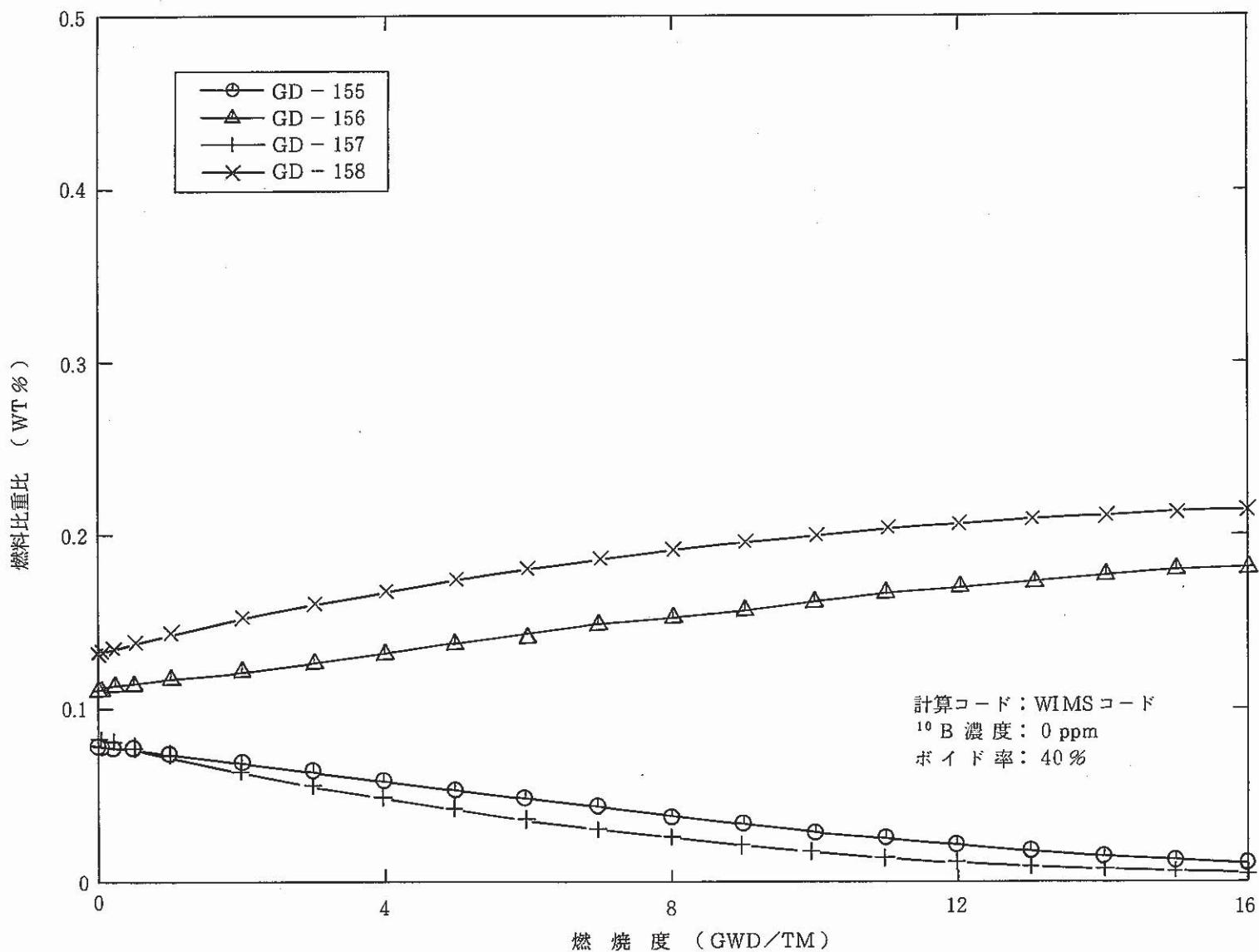


図 5 - 3 - 1 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料のGd組成の燃焼変化  
(Gdw%入り燃料ピンが3本挿入)(Gd3wt%入り燃料ピンが中間層に3本挿入)(CASE 1)

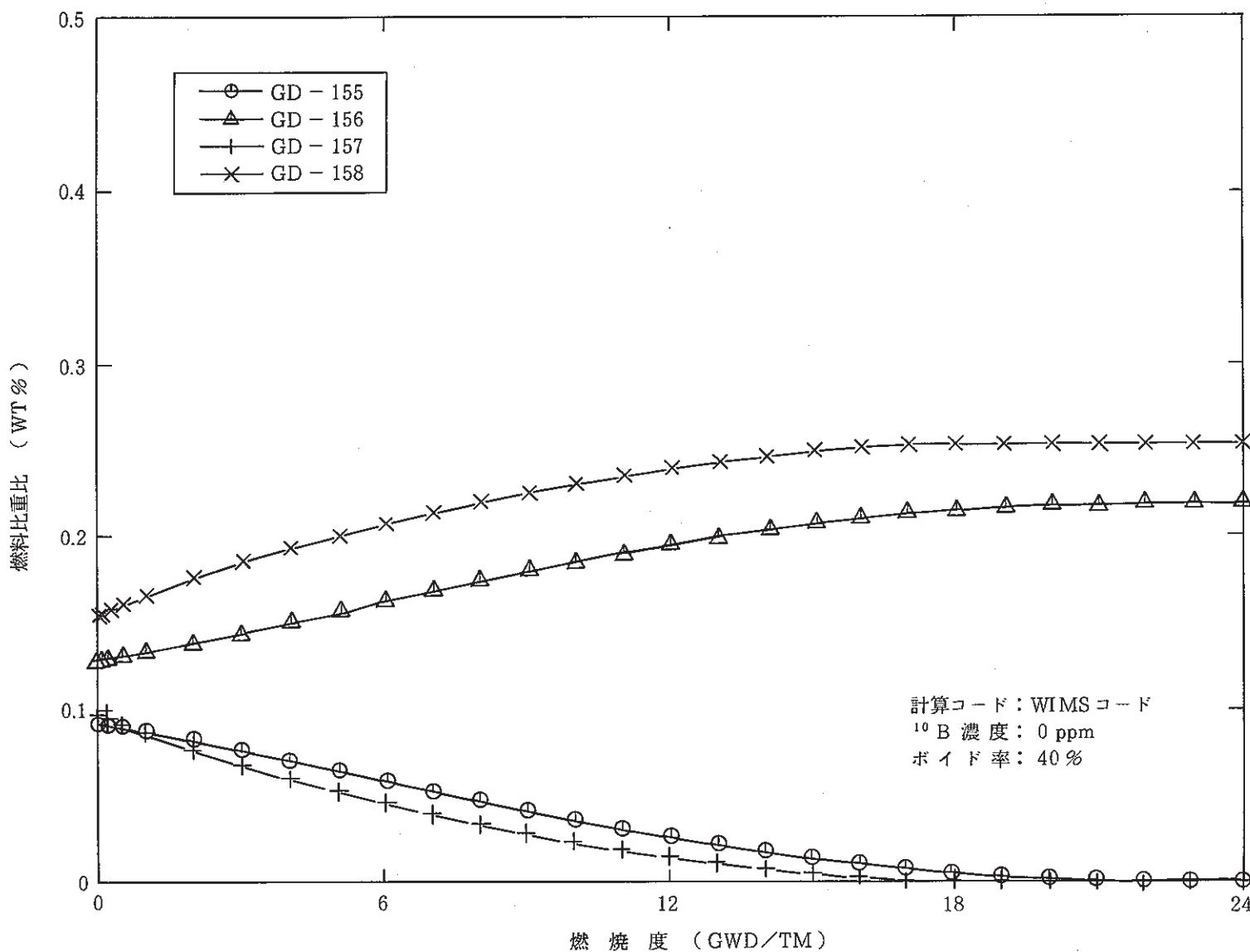


図 5 - 3 - 2 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料のGd組成の燃焼変化  
 (Gd 2wt %入り燃料ピンが内層に3本挿入)(Gd 5wt %入り燃料ピンが中間層に3本挿入)(CASE 3 - 1)

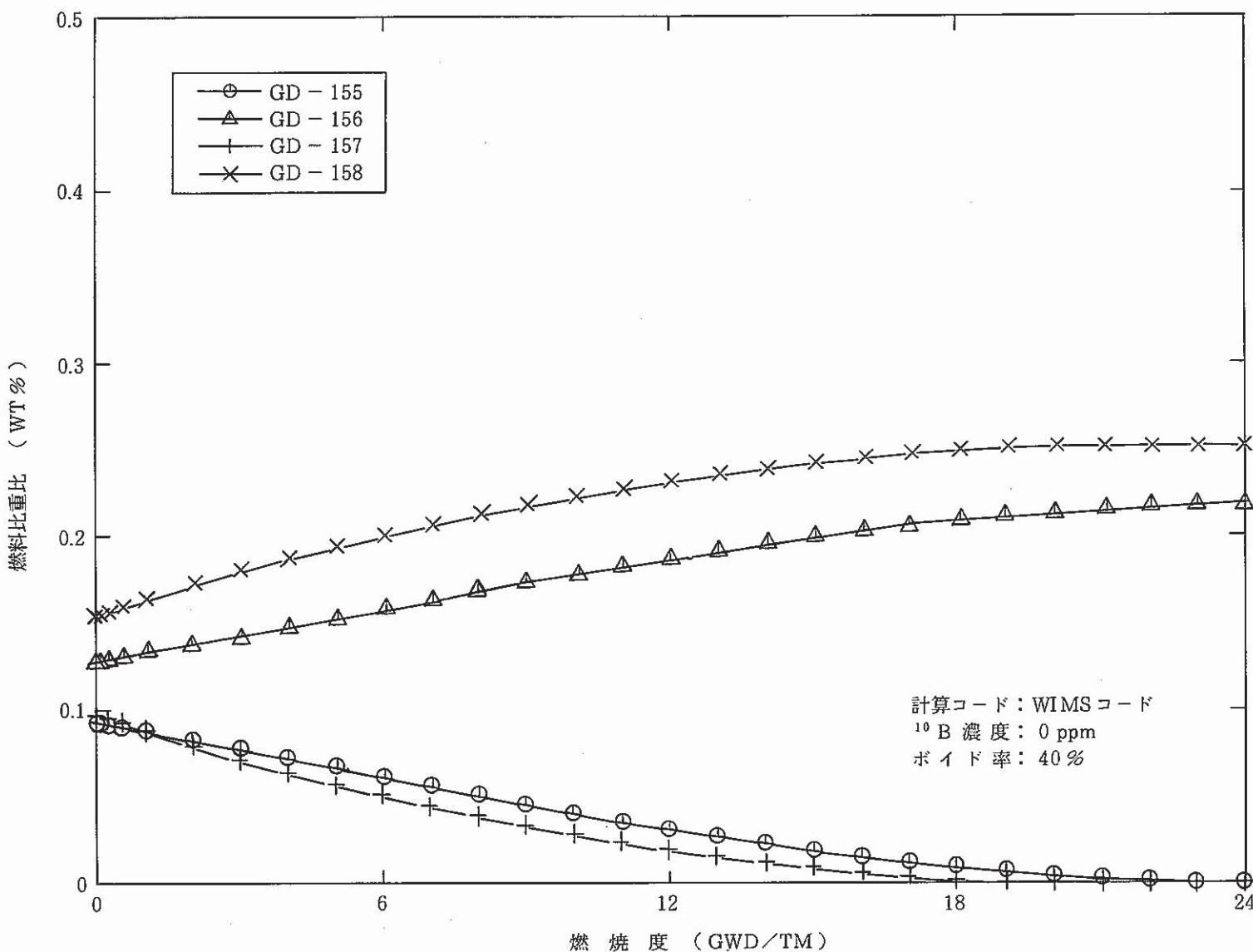


図 5 - 3 - 3 Gd入り(4.00/4.00/1.75)Pu(f)(炉心外側)燃料のGd組成の燃焼変化  
 (Gd 2wt %入り燃料ピンが内層に3本挿入)(Gd 5wt %入り燃料ピンが中間層に3本挿入)(CASE 3 - 2)

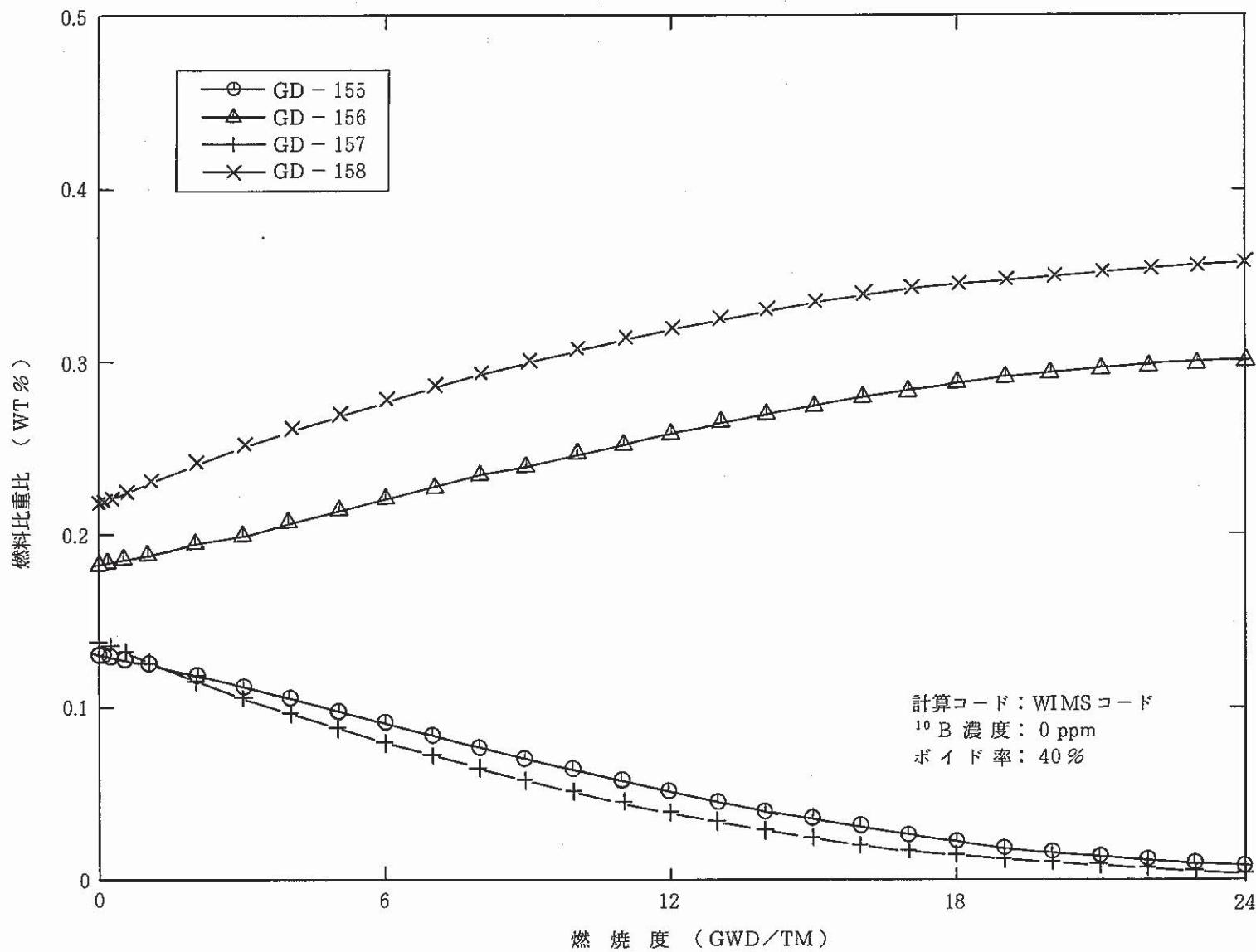


図 5-3-4 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料のGd組成の燃焼変化  
 (Gd 5wt%入り燃料ピンが内層に3本挿入)(Gd 5wt%入り燃料ピンが中間層に3本挿入)(CASE 4)

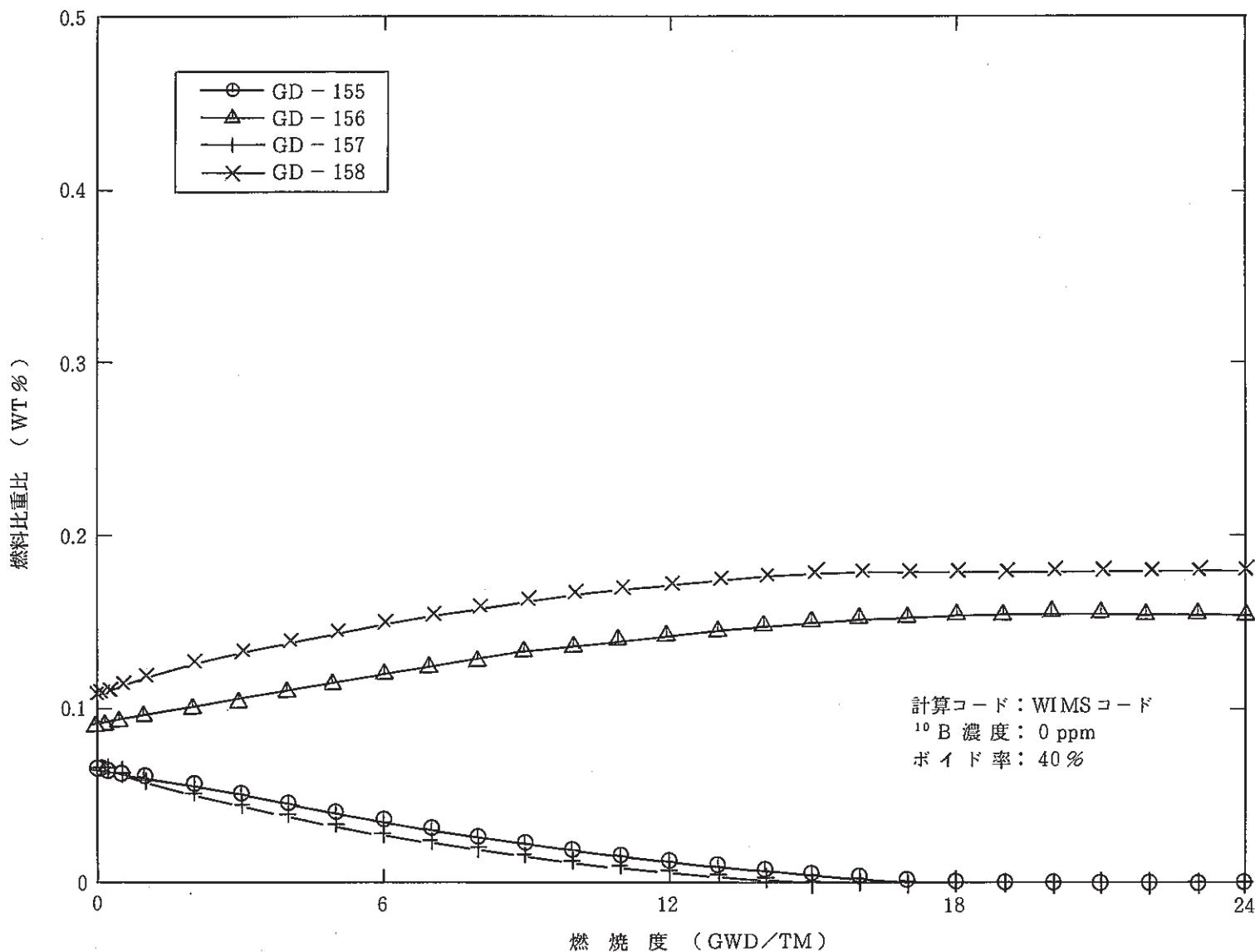


図 5 - 3 - 5 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料のGd組成の燃焼変化 (CASE 5)  
 (Gd 5wt %入り燃料ピンが中間層に3本挿入)

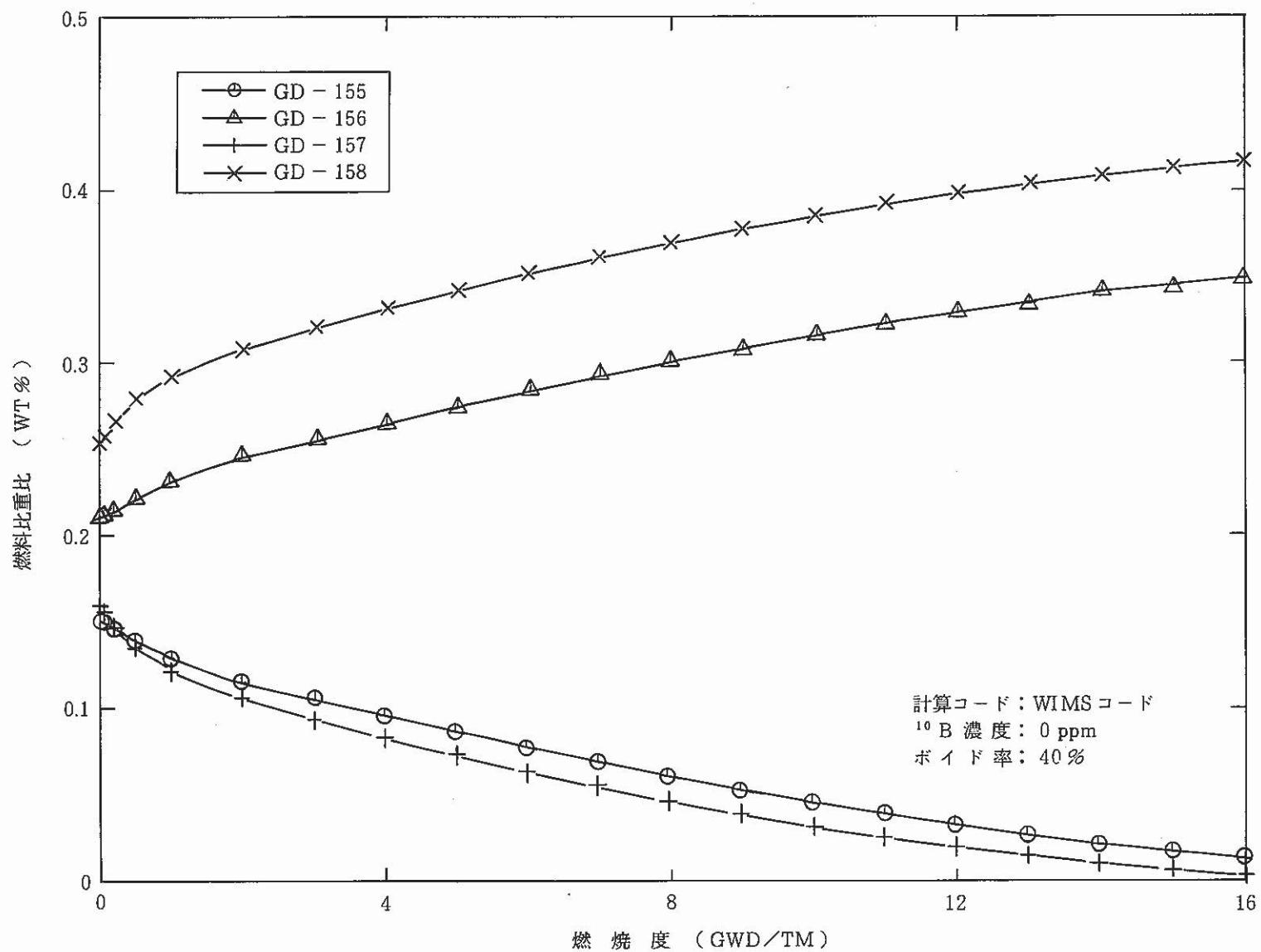


図 5 - 3 - 6 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料のGd組成の燃焼変化  
 (Gd 5wt %入り燃焼ピンが中間層に6本挿入(Gd 0.5wt %入り燃焼ピンが外層に9本挿入)(CASE 6))

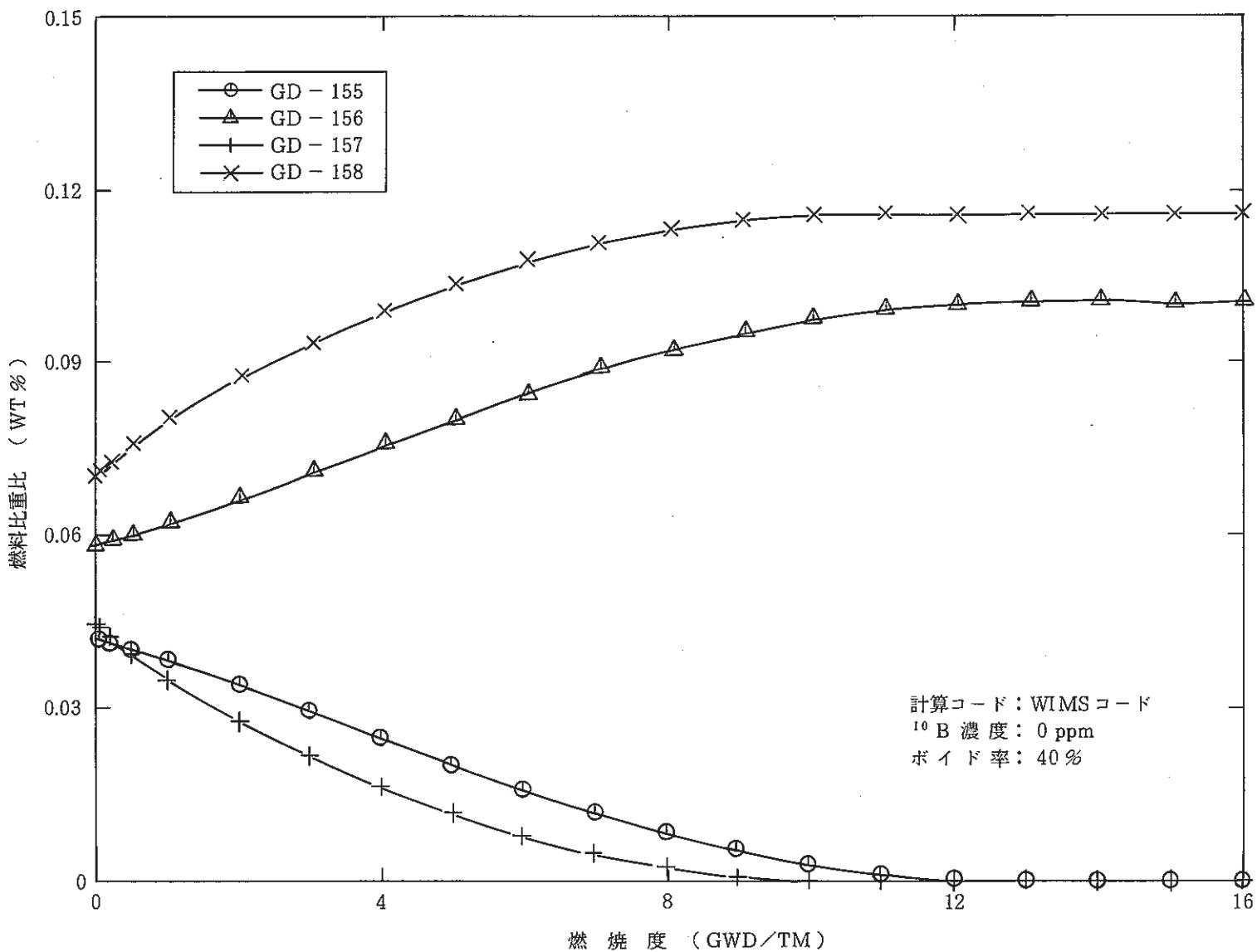


図 5 - 3 - 7 Gd入り (3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料のGd組成の燃焼変化  
 (Gd 3wt % + 3.6 UO<sub>2</sub>燃料ピンが中間層に3本挿入)

( CASE 7 - 1 )

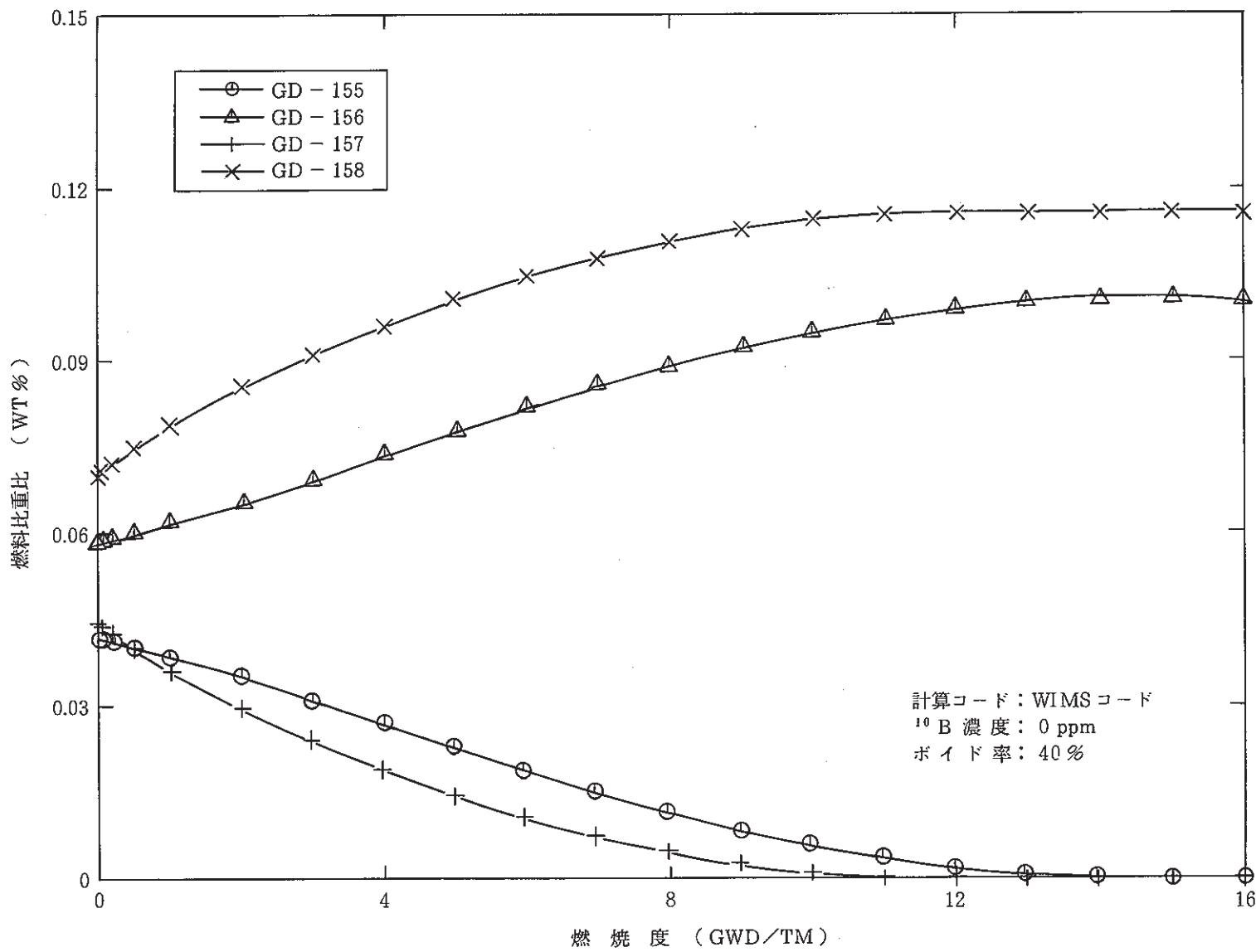


図 5-3-8 Gd入り(4.00/4.00/1.75)Pu(f)(炉心外側)燃料のGd組成の燃焼変化  
 (Gd 3wt% + 3.6% UO<sub>2</sub>燃料ピンが中間層に3本挿入)

( CASE 7 - 2 )

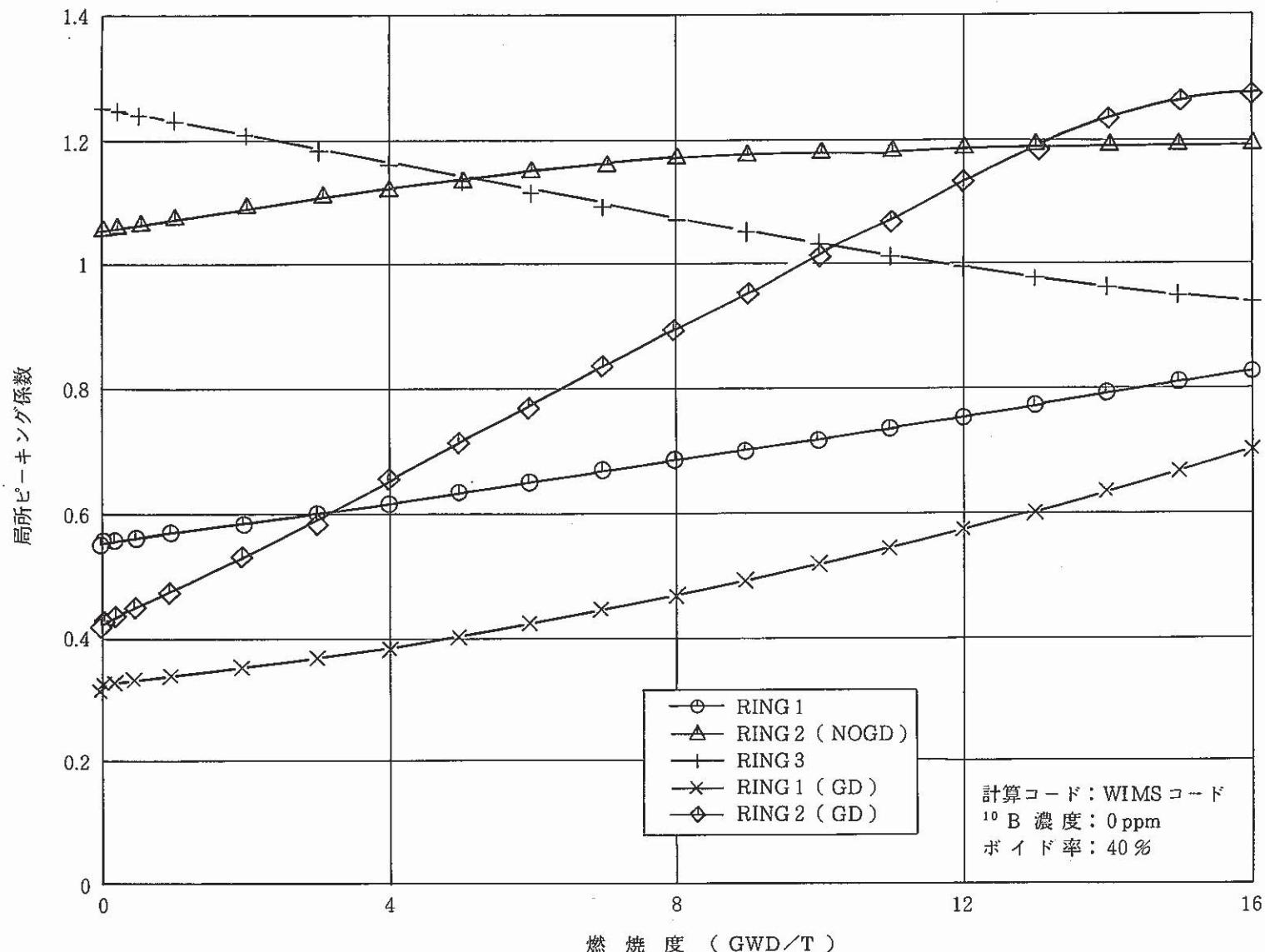


図 5-4-1 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料の局所ピーキング係数の燃焼度依存性  
(Gd 3wt %入り燃料ピンが内層に3本插入)(Gd 3wt %入り燃料ピンが中間層に3本插入)(CASE 1)

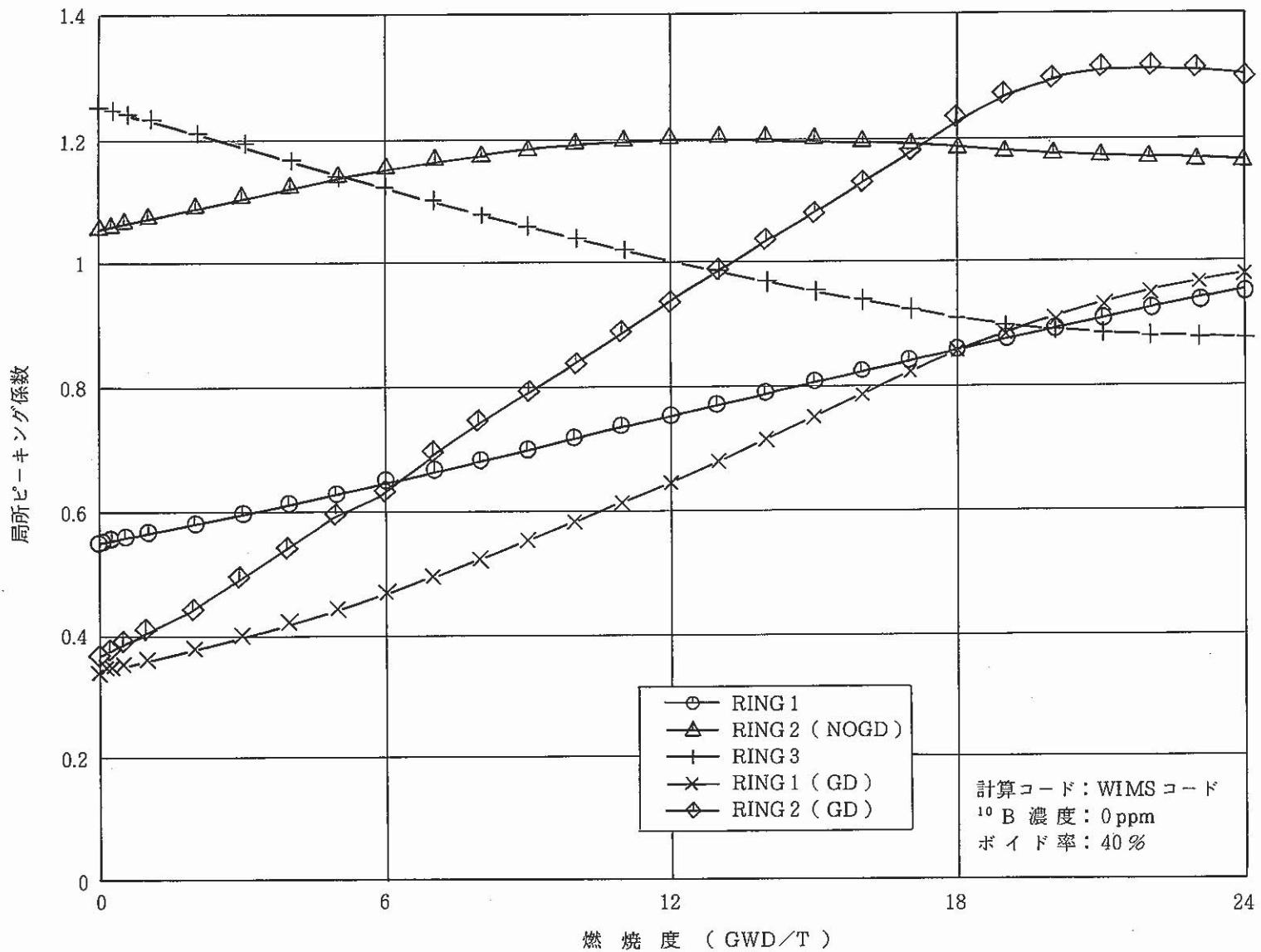


図 5-4-2 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料の局所ピーキング係数の燃焼度依存性  
(Gd 2wt %入り燃料ピンが内層に3本挿入)(Gd 5wt %入り燃料ピンが中間層に3本挿入)(CASE 3-1)

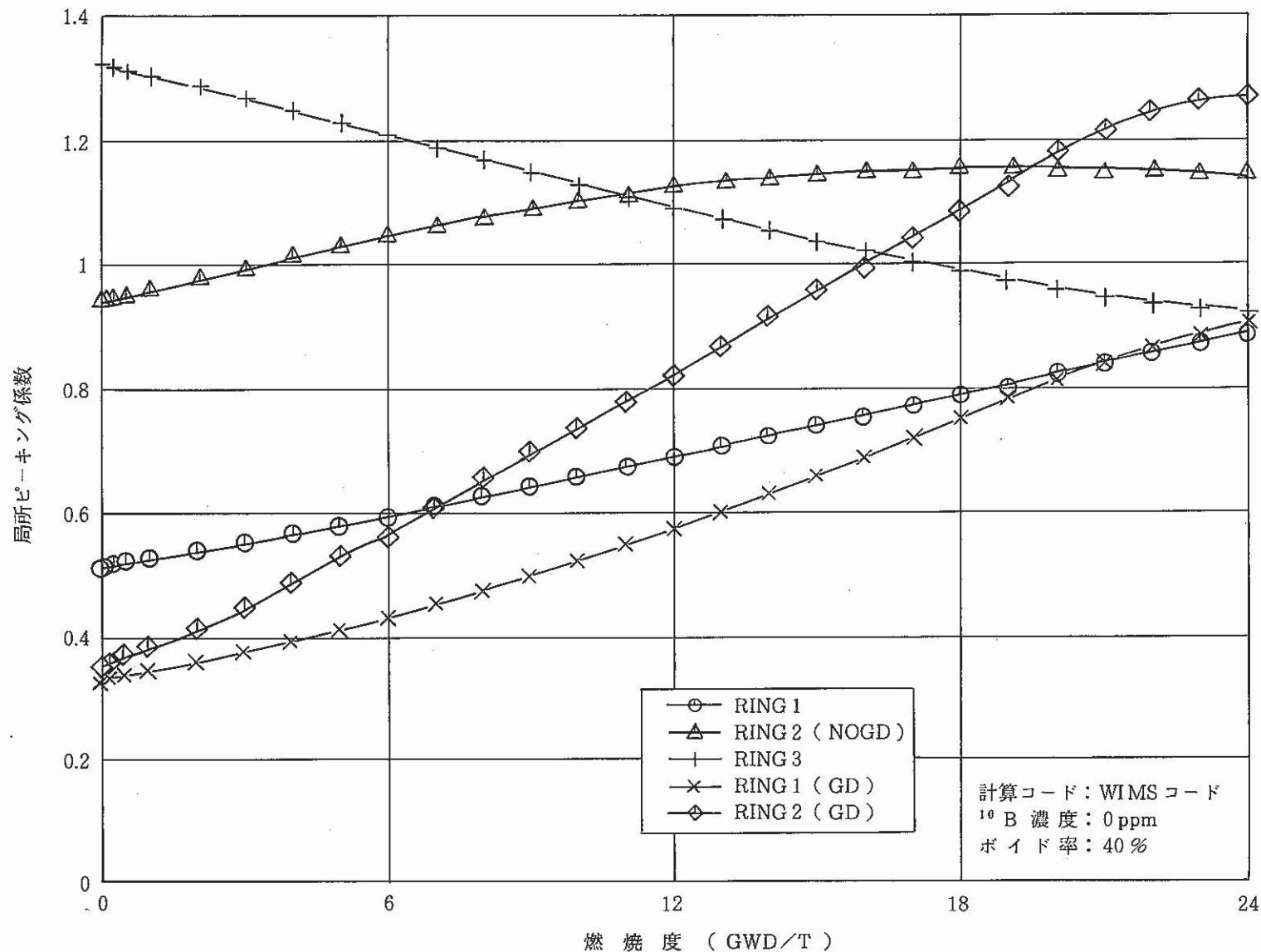


図 5-4-3 Gd入り(4.00/4.00/1.75)Pu(f)(炉心外側)燃料の局所ピーキング係数の燃焼度依存性  
(Gd 2wt %入り燃料ピンが内層に3本挿入)(Gd 5wt %入り燃料ピンが中間層に3本挿入) (CASE 3-2)

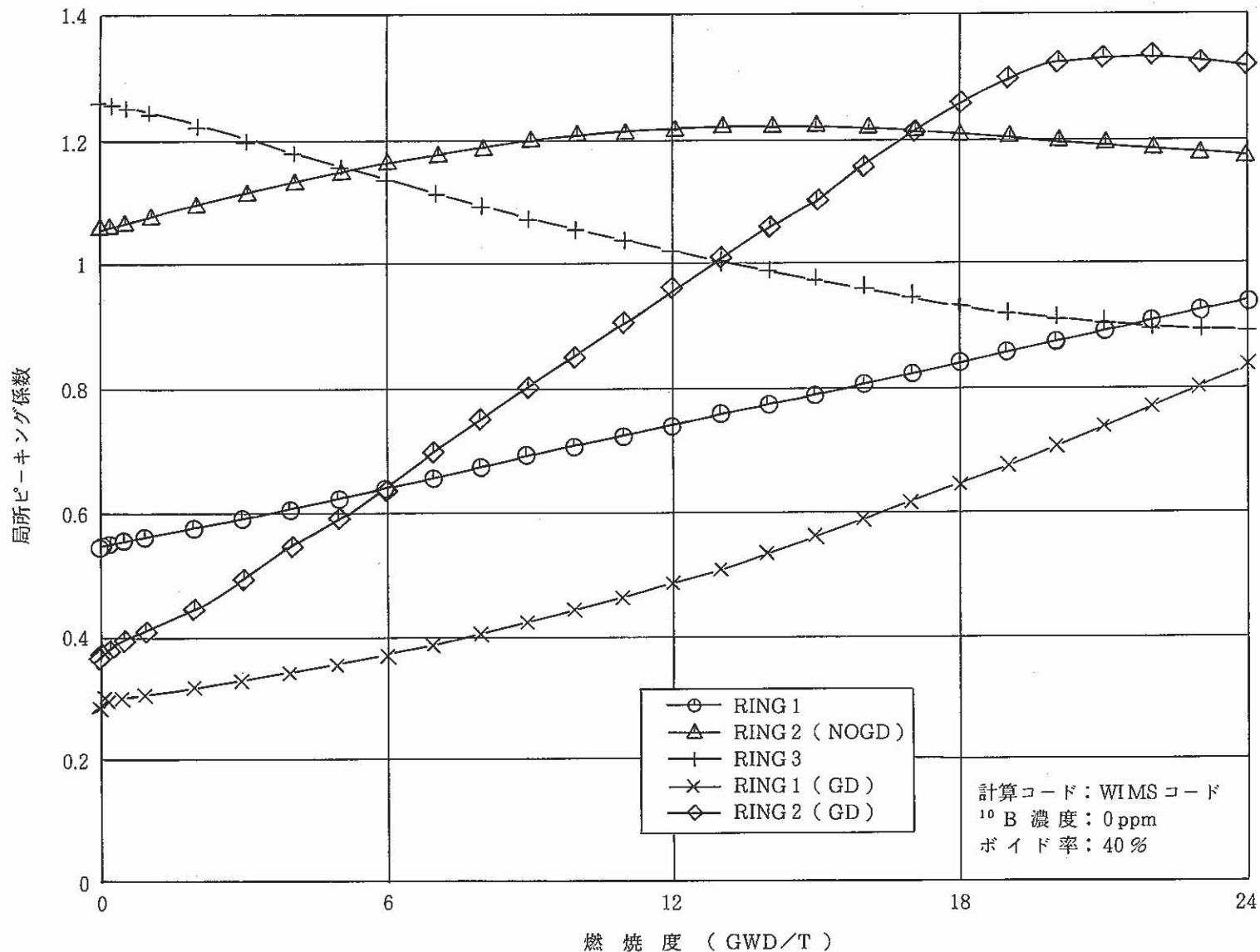


図 5-4-4 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料の局所ピーキング係数の燃焼度依存性  
(Gd 5wt %入り燃料ピンが内層に 3本挿入) (Gd 5wt %入り燃料ピンが中間層に 3本挿入) (CASE 4)

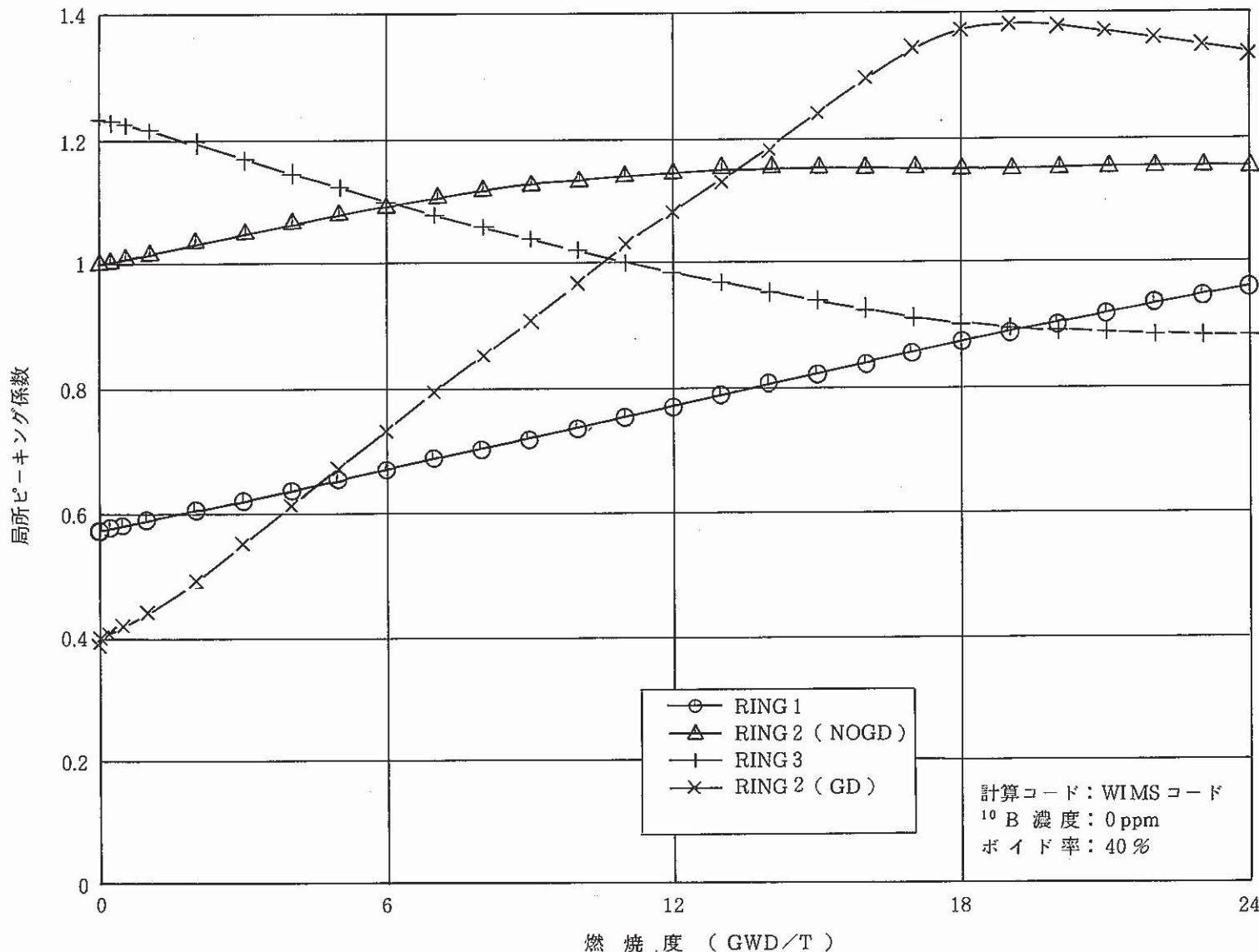


図 5-4-5 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料の局所ピーキングの燃焼度依存性  
(Gd 5wt %入り燃料ピンが中間層に3本挿入)

(CASE 5)

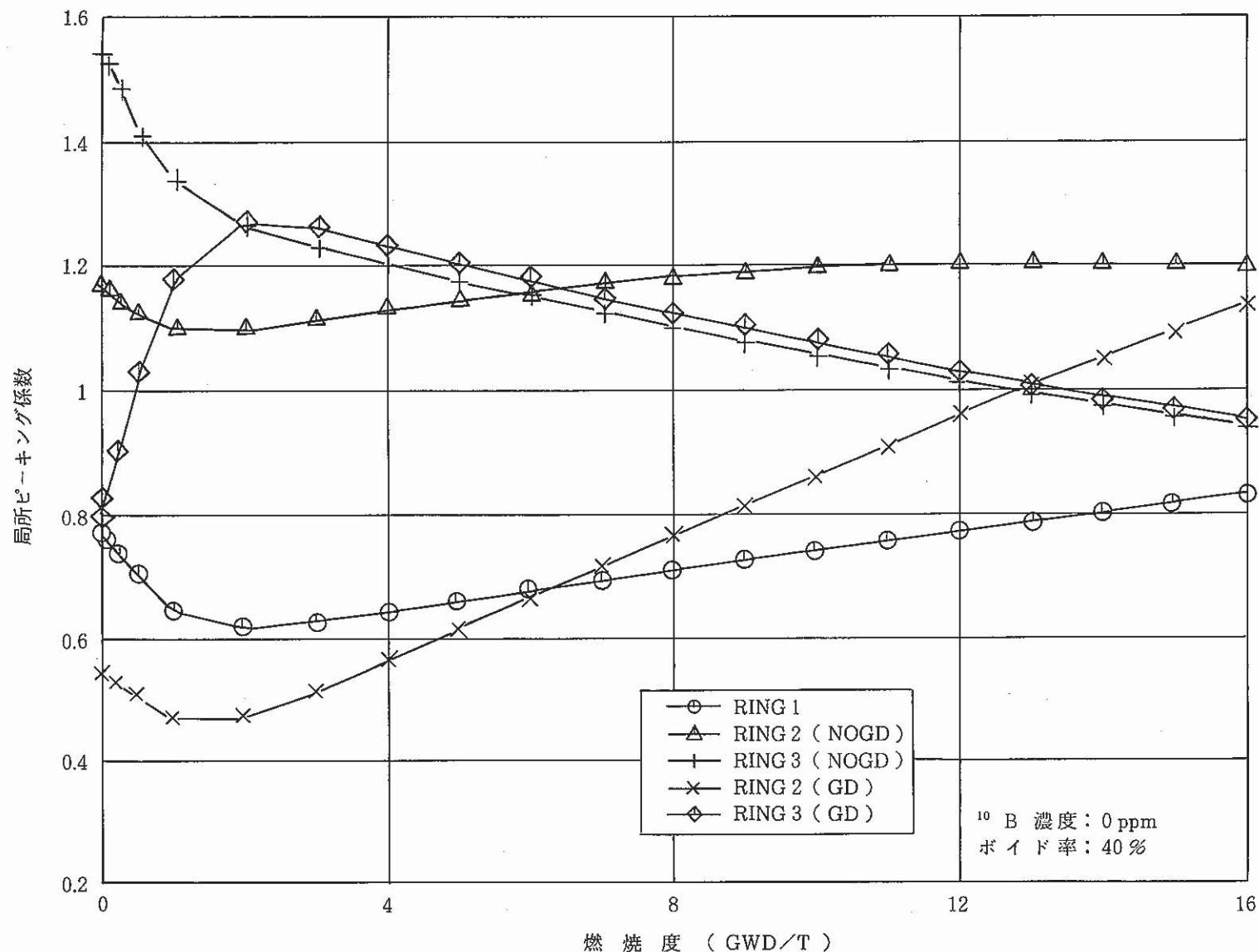
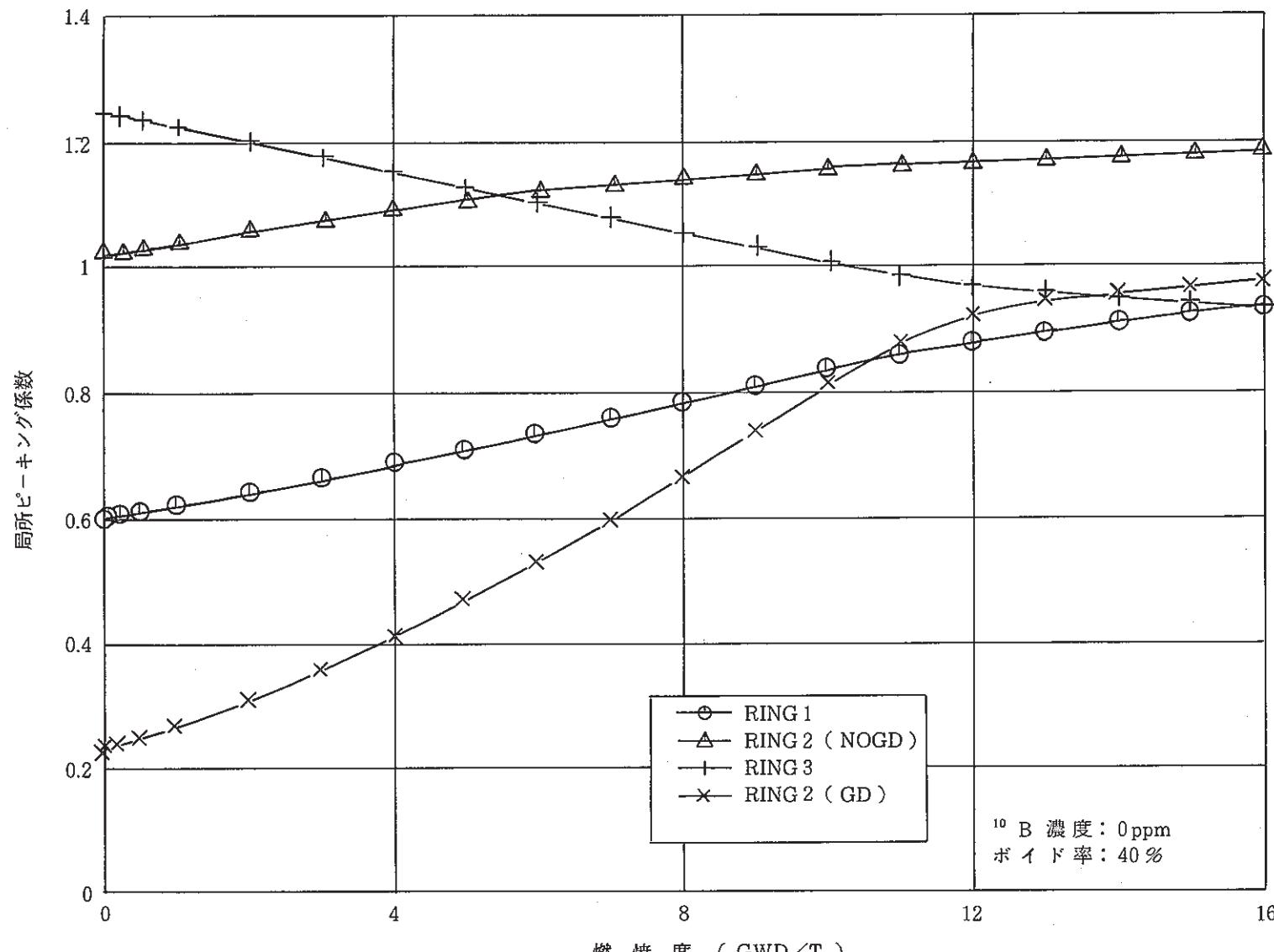
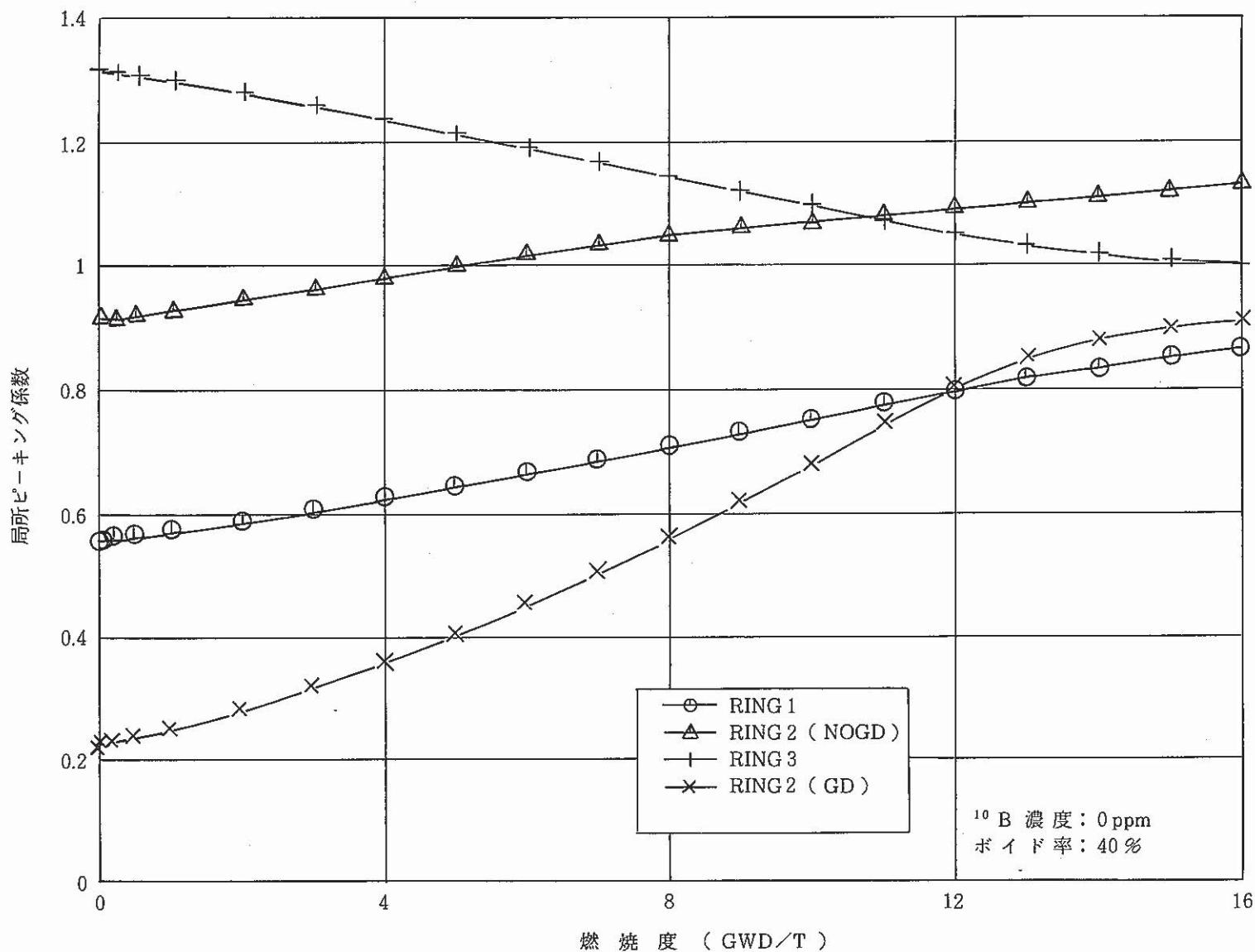


図 5-4-6 Gd入り(3.75/3.75/1.30)Pu(f)(炉心内側)燃料の局所ピーキング係数の燃焼度依存性 (CASE 6)  
(Gd 5wt %入り燃料ピンが中間層に 6 本挿入)(Gd 0.5wt %入り燃料ピンが外層に 9 本挿入)(計算コード:WIMS-SP)



( CASE 7 - 1 )

図 5-4-7 Gd入り (3.75/3.75/1.30)Pu(f) (炉心内側) 燃料の局所にピーキング係数の燃焼度依存性  
(Gd 3wt % + 3.6 %UO<sub>2</sub>燃料ピンが中間層に3本挿入) (計算コード: WIMS-SP)



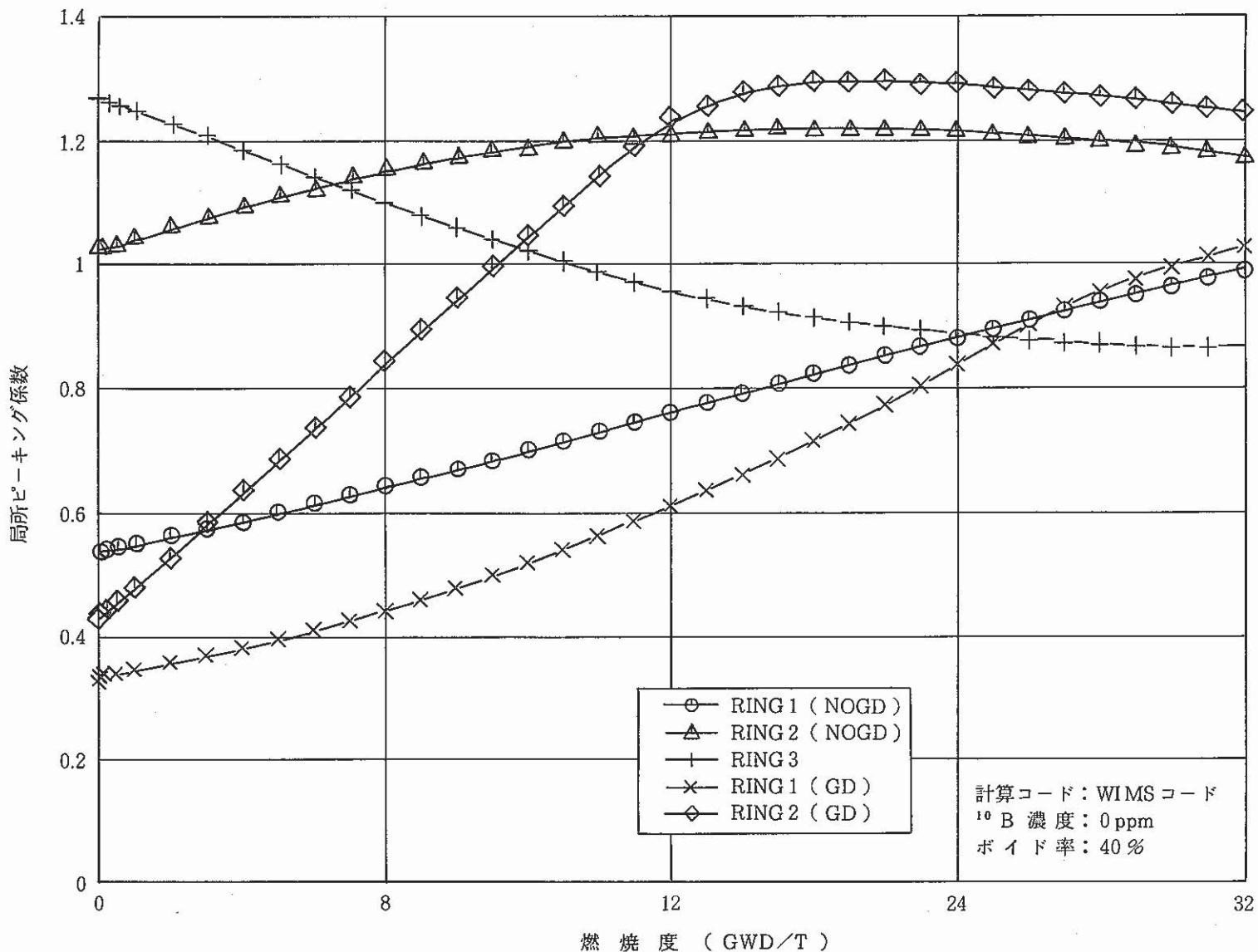


図 5-5 Gd入り(4.63/4.63/1.57)Pu(f)(炉心内側)燃料の局所ピーキング係数の燃焼度依存性  
 (Gd 3wt %入り燃料ピンが内層に3本挿入)(Gd 3wt %入り燃料ピンが中間層に3本挿入)

- 80 -

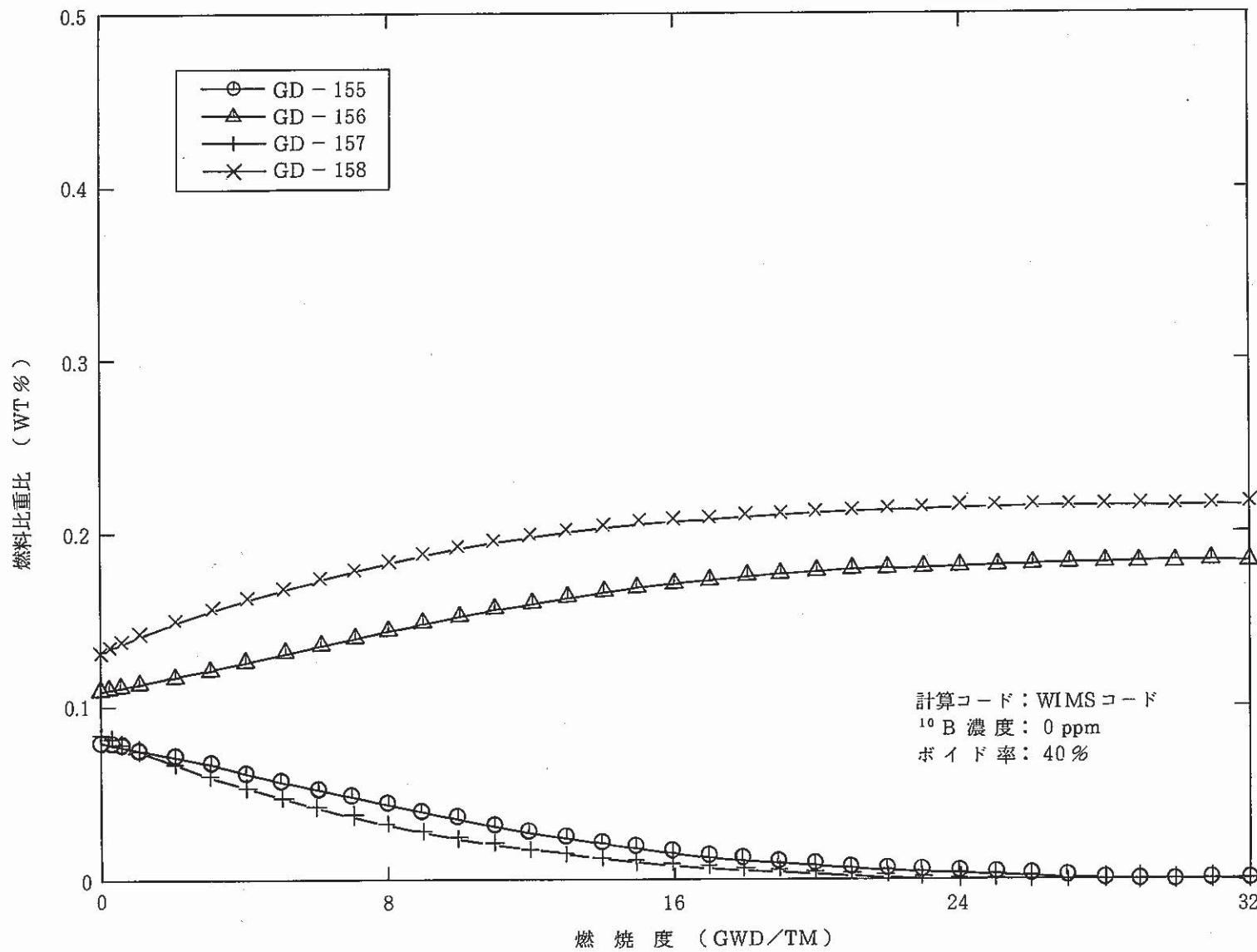


図 5-6 Gd入り(4.63/4.63/1.57)Pu(f)(炉心内側)燃料のGd組成の燃焼変化  
 (Gd 3wt%入り燃料ピンが内層に3本挿入)(Gd入り燃料ピンが中間層に3本挿入)

## 付録1. 燃料組成の算出方法

実証炉燃料の組成、密度をベースとし、<sup>16</sup>Oの量は変えず、天然U(<sup>235</sup>U: 0.71)にPu(f)を入れて、Pu(f)富化度になるよう各組成を求め、Pu組成のみベースの値と入替えた組成とする。

付表1 実証炉燃料組成及び密度

核種	内・中間層	外層
	3.4 Pu (f)	1.2 Pu (f)
<sup>235</sup> U	0.6141	0.6163
<sup>238</sup> U	85.8847	86.1883
<sup>239</sup> Pu	2.4144	0.8521
<sup>240</sup> Pu	0.9991	0.3526
<sup>241</sup> Pu	0.5828	0.2057
<sup>242</sup> Pu	0.1665	0.0588
<sup>16</sup> O	11.8483	11.8486
密度(g/cm <sup>3</sup> )	9.83603	9.83448

Pu同位体組成比：<sup>239</sup>Pu 58 (wt%)

<sup>240</sup>Pu 24 "

<sup>241</sup>Pu 14 "

<sup>242</sup>Pu 4 "

## 組成算出式

$$P_i = \frac{P_f \cdot T \cdot F_i}{72} \times 0.01$$

ここで、P<sub>f</sub>：富化度

T : 燃料 Material 量

内・中間層 88.1517

外層 88.1514

F<sub>i</sub> : Pu 同位体比