

# 大型FBRにおける高速中性子フルエンス 低減化の炉心設計検討

1998年 3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下さい。

〒311-1393 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-1393, Japan.

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

## 大型FBRにおける高速中性子フルエンス低減化の炉心設計検討

川島克之\*、池上哲雄\*

### 要 旨

大型FBR炉心では、燃料集合体が被る高速中性子照射量（フルエンス）が炉心高燃焼度化の制限要因となっている。そこで、取出平均燃焼度に対する最大フルエンスの比(PFB比:Peak Fast Fluence To Average Burnup比)を従来の炉心より小さくするための設計検討を行い、次の結論を得た。(1)PFB比低減に係る設計パラメータを抽出し、PFB比の評価式として、 $PFB比 \propto \frac{\text{注目点の出力ピーキング係数}}{\text{注目点 fissile 富化度}} \times \frac{\text{注目点の照射期間}}{\text{炉心平均照射期間}}$ を得た。(2)均質炉心の設計に適用できるPFB比低減方策を具体化した。粗調整棒運用（炉心中心よりの粗調整棒の挿入量を大）による中性子束分布平坦化および多段階バッチ燃料交換（炉心中心よりの燃料集合体ほどバッチ数を小）による照射期間短縮が有力である。(3)これらのPFB比低減方策を大型炉の炉心設計（1000MWe<sub>2</sub>領域均質炉心）に適用し、ピーク出力密度や燃焼度等、他の炉心特性への影響を抑えつつ、15～18%程度のPFB比低減効果を得た。

---

\*大洗工学センター システム開発推進部実証炉炉心グループ

## Core Design Consideration for Reduction of the Fast Neutron Fluence in Large Fast Reactors

Katsuyuki Kawashima\*

Tetsuo Ikegami\*

### Abstract

The fast neutron fluence plays the major role in limiting the higher fuel burnup in large fast reactor cores with austenitic stainless steel cladding and duct. Therefore, the core design considerations are performed to reduce the peak fast fluence to average burnup ratio (PFB ratio). The important findings include as follows: (1)Key design parameters are defined which are related to the PFB ratio, and the formula for evaluating the PFB ratio of the fuel is established as:  $\text{PFB ratio} \propto \text{power peaking factor} / \text{fissile enrichment} \times \text{irradiation time} / \text{core averaged irradiation time}$ . (2)Available design methods to reduce the PFB ratio include the flux shaping by the operating control rods and the decrease of irradiation time due to the multiple batch refueling scheme. (3)These design methods are applied to the 1000MWe homogeneous core design, resulting in the 15-18% reduction in the PFB ratio without significant penalties on the other core characteristics such as peak power density and discharge burnup.

---

\*Core & Fuel Eng. Gr., System Eng. Div., O-arai Eng. Ctr, PNC

## 目 次

1. 緒言 .....	1
2. ピークフルエンス対取出平均燃焼度比の定式化 .....	2
2.1 ピークフルエンス対取出平均燃焼度比の低減に係る設計パラメータの抽出...	2
2.2 設計パラメータの改善によるPFB比の低減 .....	4
3. 炉心設計に反映できるPFB比低減方策の具体化 .....	8
3.1 レファレンス炉心の設定 .....	8
3.2 PFB比低減方策の具体化 .....	11
4. 大型炉の炉心設計への適用 .....	20
4.1 感度解析 .....	20
4.2 粗調整棒の運用によるフルエンス平坦化炉心 .....	20
4.3 多段階バッチ燃料交換法によるフルエンス平坦化炉心 .....	23
5. 結言 .....	35
参考文献 .....	36

## 表図一覧

表3.1-1	レファレンス炉心の主要炉心・燃料仕様	9
表3.1-2	レファレンス炉心の核特性評価手法・条件	10
表3.1-3	レファレンス炉心の主要核特性	11
表4.1-1	レファレンス炉心において各方策を単独で適用した場合の感度解析	20
表4.2-1	制御棒運用法	21
表4.2-2	フルエンス平坦化炉心の主要核特性	23
表4.3-1	燃料交換法	24
図3.1-1	レファレンス炉心の炉心構成図	14
図3.1-2	レファレンス炉心の径方向中性子束分布	15
図3.1-3	レファレンス炉心の径方向フルエンス分布	16
図3.1-4	レファレンス炉心の径方向出力分布	17
図3.2-1	粗調整棒の運用によるフルエンス平坦化のアプローチ	18
図3.2-2	多段階バッチ燃料交換に基づくフルエンス平坦化のアプローチ	19
図4.2-1	粗調整棒の運用によるフルエンス平坦化炉心	26
図4.2-2	炉心径方向トラバースのライン	27
図4.2-3	粗調整棒運用によるフルエンス平坦化炉心の中性子束分布	28
図4.2-4	粗調整棒運用によるフルエンス平坦化炉心のフルエンス分布	29
図4.2-5	粗調整棒運用によるフルエンス平坦化炉心の径方向出力分布	30
図4.3-1	多段階バッチ燃料交換によるフルエンス平坦化炉心の概念	31
図4.3-2	多段階バッチ交換法によるフルエンス平坦化炉心の中性子束分布	32
図4.3-3	多段階バッチ交換法によるフルエンス平坦化炉心のフルエンス分布	33
図4.3-4	多段階バッチ交換法によるフルエンス平坦化炉心の径方向出力分布	34

## 1. 緒 言

実用化段階の大型高速炉では燃料サイクル費を低減するため炉心の高燃焼度化が望まれる。燃料の取出燃焼度を大きくしようとする、それに比例して燃料集合体の構成材が被る高速中性子照射量（フルエンス）も大きくなる傾向にある。現在最も一般的な炉心構成材料であるオーステナイト鋼製の被覆管とラッパ管を使用した炉心では、フルエンスが一定レベルを越えた燃料集合体において燃料ピンバンドルとラッパ管の照射変形が顕著となり、いわゆる燃料ピンバンドル・ラッパ管相互作用（BDI）、ラッパ管同士相互作用（DDI）が生じる可能性がある。この場合、燃料集合体の寿命がBDI量やDDI量が許容限度を越えない範囲に限定されるため、炉心高燃焼度化の制限要因になっている。

したがって、炉心の取出平均燃焼度を増大するためには、高いフルエンスに耐え得る材料の開発を進める一方で、平均燃焼度に対するピークフルエンスの比（ピークフルエンス対取出平均燃焼度比：Peak Fast Fluence to Average Burnup 比 →以下 PFB 比と呼ぶ）が小さい炉心を設計することが重要である。炉心設計の観点からは、PFB 比の低減に効果が期待できる炉心概念として従来より非均質炉心が提案されている<sup>1)</sup>が、今回の検討では、均質炉心における PFB 比の低減に注目した。

本検討の目的は、炉心設計の観点から PFB 比低減方策を抽出するとともに、その効果を定量的に評価することである。まず、ピークフルエンス低減に係る設計パラメータを抽出することにより PFB 比を定式化し、設計パラメータの改善により得られる PFB 比低減の効果と理論的限界を明らかにする。次にそれらを均質炉心の設計に適用できる PFB 比低減方策として具体化する。さらに大型炉の炉心設計（電気出力 1000MW クラスの均質炉心）に PFB 比低減方策を適用し、その効果を定量的に評価する。

なお、原電が進めている高速増殖実証炉の設計に対する動燃事業団の支援の一環として、実証炉燃料・炉心設計を平成 8 年度より実施しているが、初期段階炉心の燃料概略仕様設定に当り、本研究の成果に基づく実証炉フルエンス平坦化炉心を原電に提案中である。

## 2. ピークフルエンス対取出平均燃焼度比の定式化

ここではピークフルエンス対取出平均燃焼度比（PFB比）の低減に係る設計パラメータを抽出してPFB比の評価式として定式化し、設計パラメータの改善により得られるPFB比低減の効果と理論的下限を見通す。

### 2.1 ピークフルエンス対取出平均燃焼度比の低減に係る設計パラメータの抽出

#### (1) 取出平均燃焼度

照射期間にわたる時間平均を $\langle \quad \rangle$ で表わすものとする、取出平均燃焼度は次式で与えられる。

$$B_{av} = P \times \langle cpf \rangle \times T / M_{HM} \quad (1)$$

ここで、

$B_{av}$  : 取出平均燃焼度

$P$  : 炉出力

$cpf$  : 炉心出力分担率

$T$  : 燃料照射期間

$M_{HM}$  : 炉心燃料重金属重量

である。

#### (2) 注目燃料のフルエンス

フルエンスを注目する燃料におけるパラメータ値に\*を付けて表わす。注目燃料のフルエンス $F^*$ は、

$$F^* = \int \Phi^*_f dt = \langle \Phi^*_f \rangle \times T^* \quad (2)$$

となる。ここで、

$\Phi^*_f$  : 注目燃料の高速中性子束

$T^*$  : 注目燃料の照射期間

である。注目燃料の出力密度 $p_d^*$ は、

$$p_d^* = epf \times \int \Sigma^*_f \Phi^* dE = epf \times \Sigma g (\Sigma^*_{f,g} \Phi^*) \quad (3)$$

と表わせるが、1群縮約断面積 $\Sigma_{f0}$ を使用すると、

$$= epf \times \Sigma^*_{f0} \Phi^*_0 \quad (4)$$

となる。ここで、

$\Phi^*_0$  : 注目燃料の全中性子束

$epf$  : 核分裂当りの発生エネルギー

$E$  : 中性子エネルギー

$\Sigma g$  : エネルギー群の総和

$\Sigma^*_{f,g}$  : 注目燃料の第 $g$ 群マクロ核分裂断面積



である。これより $\Phi^*_0$ は下式で与えられる。

$$\Phi^*_0 = p_d^* / (\Sigma^*_{f0} \times \text{epf}) \quad (5)$$

したがって、注目燃料の高速中性子束 $\Phi^*_f$ は次式のように書ける。

$$\begin{aligned} \Phi^*_f &= \text{fff}^* \times \Phi^*_0 = \text{fff}^* \times p_d^* / (\Sigma^*_{f0} \times \text{epf}) \\ &= \text{fff}^* \times p_d^* / (N^*_{f0} \times \sigma^*_{f0} \times \text{epf}) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$\text{fff}^*$  : 高速中性子割合

$N^*_{f0}$  : fissile スミア原子数密度

$\sigma^*_{f0}$  : fissile ミクロ核分裂断面積

である。したがって、注目燃料のフルエンスを表す式として次式を得る。

$$F^* = \langle \text{fff}^* \times p_d^* / (N^*_{f0} \times \sigma^*_{f0} \times \text{epf}) \rangle \times T^* \quad (7)$$

### (3) PBF 比の評価式

以上より、フルエンスが最大となる燃料に注目すると、ピークフルエンスと炉心平均取出燃焼度の比は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{PBF 比} &= F_{\text{max}}^* / B_{\text{av}} \\ &= \max [\langle \text{fff}^* \times p_d^* / (N^*_{f0} \times \sigma^*_{f0} \times \text{epf}) \rangle \times T^*] \\ &\quad / [P \times \langle \text{cpf} \rangle \times T / M_{\text{HM}}] \end{aligned} \quad (8)$$

照射期間を通じて一定ないし変化の小さいパラメータを時間平均項の外に出すと、

$$\begin{aligned} &= \text{fff}^* / (\sigma^*_{f0} \times \text{epf}) \times \max(\langle p_d^* \rangle) / (P \times \langle \text{cpf} \rangle) \\ &\quad \times (M_{\text{HM}} / \langle N^*_{f0} \rangle) \times (T^* / T) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &= \text{fff}^* / (\sigma^*_{f0} \times \text{epf}) \times \max(\langle p_d^* \rangle) / (P \times \langle \text{cpf} \rangle / V_c) \\ &\quad \times [M_{\text{HM}} / (V_c \times \langle N^*_{f0} \rangle)] \times (T^* / T) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ここで、次の関係式

$$M_{\text{HM}} = \rho_{\text{HM}} \times V_c = m_{\text{HM}} \times (N_{\text{HM}} / N_{\text{AV}}) \times V_c \quad (11)$$

$V_c$  : 炉心体積

$\rho_{\text{HM}}$  : 燃料重金属スミア密度 (炉心平均)

$m_{\text{HM}}$  : 燃料重金属原子量

$N_{\text{HM}}$  : 燃料重金属スミア原子数密度 (炉心平均)

$N_{\text{AV}}$  : アボガドロ数

を使うことにより、PBF 比の評価式として次式を得る。

$$\begin{aligned}
 \text{PFB 比} &= F_{\text{max}}^* / B_{\text{av}} \\
 &= \text{fff}^* / (\sigma_{f_0}^* \times \text{epf}) \\
 &\quad \times \max(\langle p_d^* \rangle) / (P \times \langle \text{cpf} \rangle / V_c) \\
 &\quad \times [(m_{\text{HM}} / N_{\text{AV}}) \times (N_{\text{HM}} / \langle N_{f_0}^* \rangle)] \times (T^* / T) \tag{12}
 \end{aligned}$$

$$= C \times \langle \text{ppf}^* \rangle \times (N_{\text{HM}} / \langle N_{f_0}^* \rangle) \times (T^* / T) \tag{13}$$

$$= C \times \langle \text{ppf}^* \rangle / \langle e_{f_i}^* \rangle \times (T^* / T) \tag{14}$$

ただし、

ppf\* : 注目燃料の出力ピーキング係数

e\*<sub>f</sub> : 注目燃料の fissile 富化度

$$C = \text{fff}^* / (\sigma_{f_0}^* \times \text{epf}) \times (m_{\text{HM}} / N_{\text{AV}}) \tag{15}$$

である。

#### (4) PFB 比低減に係る設計パラメータ

(14)式より、PFB 比低減に係る主要な設計パラメータは、注目燃料の

- ・ fissile 富化度 (照射期間中の平均値)
- ・ 出力ピーキング係数 (照射期間中の平均値)
- ・ 照射期間
- ・ 高速中性子割合

であることがわかる。

## 2.2 設計パラメータの改善による PFB 比の低減

2.1 節で抽出した設計パラメータを改善することにより、PFB 比がどの程度まで低減可能であるかを (14)式を用いて検討し、均質炉心の PFB 比低減について炉心設計としての理論的境界を見通す。

### (1) 注目燃料の fissile 富化度

PFB 比は、フルエンスを注目する燃料の fissile 富化度が高いほど小さくなる。一般に大型炉心では小型炉心より中性子の漏れが小さいため富化度が低いことから、大型炉心ほど PFB 比は高くなる。すなわち大型炉心ほど同じ取出燃焼度に対するフルエンスは高い。

大型炉心において、燃料富化度を高くするには、中性子の漏れの大きい炉心構成とする必要があり、平均出力密度を高めたコンパクトな均質炉心か、炉心内部に希釈材やブランケット領域を設けたいわゆる非均質炉心とすることが考えられる。炉心をコンパクトにした場合、最大線出力密度に対する設計マージンが小さくなる等の問題がある。また、内部ブランケットを設けた非均質炉心についてはピークフルエンス低減に有望な炉心概念に関する検討がなされている<sup>1)</sup>が、今回は均質炉心を対象とした検討であり、非均質炉心はスコープ外とした。

均質炉心では、通常、炉心径方向の出力分布を平坦化するため、燃料の富化度を領域ごとに変

える構成（内側／外側炉心）としている。そこで、富化度の低い内側炉心の出力ピーキングを改善することにより、富化度の高い外側炉心でフルエンスが最大となるように設計すればPFB比の低減に繋がる。これについては、内側炉心と外側炉心の出力ピーキング係数に係るので、次の(2)項でさらに詳述する。

## (2) 出力ピーキング係数

PFB比は、フルエンスを注目する燃料の出力ピーキング係数が小さいほど低減できる。均質炉心では、通常、炉心径方向の出力分布を平坦化するため、燃料の富化度を領域ごとに変える構成（内側／外側炉心）としている。この場合、炉心内に二つの出力ピークがあり、両者の出力ピーキング係数が同じになるように設計すると、PFB比は富化度の小さい内側炉心の方が外側炉心より大きくなる。すなわち、均質炉心では、富化度比調整により出力分布を平坦化しても中性子束分布は平坦化されない（中性子束分布≠出力分布）。逆に、内側炉心の富化度を外側炉心より極端に小さくすれば、中性子束分布はより平坦となるが、出力分布の平坦性は悪くなる。このように均質炉心では、富化度比調整だけでは出力分布平坦化とフルエンス平坦化は両立しない。なお、非均質炉心では内部ブランケットの適確な配置により中性子束分布が平坦化されるため、富化度が1領域でも出力分布を平坦化できる（中性子束分布≒出力分布）。

内側炉心のPFB比を外側炉心並に小さくするには、富化度比調整以外の方法（例えば炉心内に希釈物質や中性子吸収物質を設置）により、両者の富化度比に応じて内側炉心の出力ピーキング係数を外側炉心より小さくすることが必要である。内側炉心の出力ピーキング係数を十分小さくすれば、富化度の高い外側炉心と同程度までPFB比を低減できるであろう。すなわち、

$$ppf_{ic}/e_{ic} = ppf_{oc}/e_{oc} \quad (16)$$

$ppf_{ic}$  : 内側炉心の出力ピーキング係数（照射期間中の平均値）

$ppf_{oc}$  : 外側炉心の出力ピーキング係数（照射期間中の平均値）

$e_{ic}$  : 内側炉心の富化度（照射期間中の平均値）

$e_{oc}$  : 外側炉心の富化度（照射期間中の平均値）

となるように内側炉心と外側炉心の出力ピーキング係数を設定すればよい。径方向だけでなく軸方向も平坦化するとなおよい。したがって、PFB比の低減幅は、

$$\begin{aligned} (ppf_{ic}/e_{ic}) / (ppf_{ico}/e_{ico}) &\rightarrow (ppf_{oc}/e_{oc}) / (ppf_{ico}/e_{ico}) \\ &\equiv e_{ico}/e_{oc} \end{aligned} \quad (17)$$

となる。ここで添え字0は改善前のパラメータ値を表わす。均質炉心の外側／内側炉心の富化度比は一般に1.2～1.4程度であり、この場合、(17)式より理論的には15～30%程度の低減が可能と考えられる。

ところで、注目燃料の出力ピーキング係数と富化度の比は注目燃料の中性子束ピーキング係数に比例するパラメータと考えられるので、 $ppf_{ic}/e_{ic}$  を  $ppf_{oc}/e_{oc}$  並に小さくすることは内側炉心の中性子束分布を平坦化するものである。そこで、これを中性子束分布平坦化方式と呼ぶものとする。

## (3) 照射期間

PFB比は、フルエンスを注目している燃料の照射期間が短いほど小さい。炉心の全燃料集合体で照射期間を一定（交換バッチ数一定、運転サイクル長一定）とする設計では、PFB比は(14)式より明らかなように照射期間に依存しないが、中性子束レベルの高い内側炉心の燃料集合体の照射期間を部分的に短く（交換バッチ数を小さくする）することにより、注目する燃料のPFB比を小さくできる。PFB比の低減幅については、注目する燃料の交換バッチ数を例えばNからN-1に変更すれば、理論的には、PFB比を1/Nだけ低減できる可能性がある。因みに、大型炉心の設計にて採用されることが多い3バッチ交換炉心（N=3）の場合、注目燃料を2バッチ交換とすることによるPFB比の低減幅は約30%となる。

ところが、燃料交換バッチ数変更後の炉心では、Nバッチ交換のままの燃料集合体のうち、内側炉心で最も中性子束レベルが高い燃料集合体でPFB比の新たなピークが出る。この場合、バッチ数変更の前後で富化度調整量が小さいとするとPFB比の低減幅は、

$$\frac{ppf_{ic}(N)}{ppf_{ico}(N)} \quad (18)$$

で与えられる。ここで、

$ppf_{ic}(N)$  : 交換バッチ数変更後もNバッチ交換のままの内側炉心集合体の出力ピーキング係数（照射期間中の平均値）

$ppf_{ico}(N)$  : 交換バッチ数変更前（Nバッチ）の内側炉心の出力ピーキング係数（照射期間中の平均値）

である。大型均質炉心の設計例（第3章のレファレンス炉心）では、(18)式の出力ピーキング係数の比は約1.2/1.5であり、PFB比の低減幅は20%程度が限界と考えられる。

また、N-1バッチ交換とした燃料集合体の照射期間が短くなるため、炉心の取出平均燃焼度が低下するという問題がある。これを防ぐために、中性子束レベルの低い炉心外周部の燃料集合体については逆に照射期間を長く（交換バッチ数を大きくする：例えばN+1）して取出平均燃焼度の低下を防止するとよい。これを多段階バッチ燃料交換方式と呼ぶものとする。

## (4) 高速中性子割合

注目する燃料における高速中性子割合を小さくすると、PFB比を低減することが可能である。高速中性子割合は、炉心のサイズや炉心燃料、冷却材の種類に依存する。また、高速中性子割合をさらに小さくするには、炉心内に減速物質を導入することが考えられるが、増殖性など他特性への影響が大きいことが欠点である。

今回の検討では、酸化物燃料・Na冷却の大型炉心に焦点を絞るものとした。この場合、高速中性子割合は、炉心の燃焼度や制御棒挿入状態により若干変動するが、照射期間を通じてほぼ一定とみなせる（概ね0.6程度）。

## (5) 大型炉心におけるPFB比定量化の例

以上のことから、均質炉心のPFB比低減のための設計パラメータとしては、注目燃料の富化

度、出力ピーキング係数及び照射期間が重要であることが分った。ここでは、第3章で検討の対象としている1000MWe大型均質炉心を例にとり、これらの設計パラメータおよびPFB比を定量化してみる。

(15)式において、

$$fff^* = 0.55 \text{ (炉心中心)}$$

$$\sigma^*_{f_0} = 2 \text{ barn (Pu-239 + Pu241)}$$

$$epf = 1/(2.93 \times 10^{10}) \text{ J/fission}$$

$$m_{HM} = 238 \text{ g/mol}$$

$$N_{Av} = 6.023 \times 10^{23} \text{ n/mol}$$

とすると、定数Cは、

$$\begin{aligned} C &= 3.18 \times 10^{12} \text{ g/(J cm}^2\text{)} \\ &= 2.75 \times 10^{14} \text{ cm}^2\text{/(GWd/t)} \end{aligned} \quad (19)$$

となる。

炉心設計として可能なPFB比低減の限界は、出力ピーキング係数が1.0の理想的な炉心構成においてフルエンスのピークが外側炉心で起ると仮定すると、

$$ppf^* = 1.0 \text{ (外側炉心)}$$

$$e^*_{f_1} = 0.17 \text{ (外側炉心)}$$

$$T^* = 3 \times 456 \text{ day}$$

$$T = 3 \times 456 \text{ day}$$

であり、これらを(14)式に入れると、

$$\begin{aligned} \text{PFB比} &= F_{\max}^* / B_{av} \\ &= 1.60 \times 10^{15} \text{ cm}^2\text{/(GWd/t)} \end{aligned} \quad (20)$$

となる。この炉心の平均取出燃焼度は、

$$B_{av} = 89 \text{ GWd/t}$$

であるので、これに対するピークフルエンスは、

$$F_{\max}^* = 1.4 \times 10^{23} \text{ cm}^2 \quad (21)$$

となる。

しかるに、フルエンスを平坦化していない炉心(レファレンス炉心)では、フルエンスのピークは炉心中心で起り、

$$ppf^* = 1.52 \text{ (炉心中心)}$$

$$e^*_{f_1} = 0.12 \text{ (内側炉心)}$$

であり、これらを(14)式に入れると、

$$\text{PFB比} = 3.40 \times 10^{15} \text{ cm}^2\text{/(GWd/t)} \quad (22)$$

となる。炉心平均取出燃焼度 ( $B_{av} = 89 \text{ GWd/t}$ ) に対するピークフルエンスとして、

$$F_{\max}^* = 3.0 \times 10^{23} \text{ cm}^2 \quad (23)$$

を得る。(23)式で与えられる  $F_{\max}^*$  は、(21)式に比べ約2倍大きい。

### 3. 炉心設計に反映できる PFB 比低減方策の具体化

ここでは、まず評価検討用の大型均質炉心をレファレンス炉心として設定し、次に第2章の結果を踏まえて均質炉心の設計に適用できる PFB 比低減方策として具体化する。

#### 3.1 レファレンス炉心の設定

##### (1) 炉心・燃料仕様

評価検討用のレファレンス炉心の炉心構成図を図 3.1-1 に、主要な炉心・燃料仕様を表 3.1-1 に示す。炉心は富化度 2 領域の均質炉心とし、炉出力は 2424MWt/1000MWe、取出平均燃焼度は約 90GWd/t、運転サイクル長は 15 ヶ月、燃料交換バッチ数は 3 である。

レファレンス炉心を構成するに当たり、通常の炉心設計で行われているように出力分布の平坦化を最優先させ、内側炉心と外側炉心の出力ピーキング係数がほぼ等しくなるように内側／外側炉心の富化度比を設定した。制御棒は、炉心中心近くの第 1 リングと外側炉心に内接する第 3 リングを粗調整棒に、炉心径方向中央付近の第 2 リングを微調整棒と後備炉停止棒に割り当てた。粗調整棒第 1 リングと第 3 リングは同じ挿入深度を保ちながら運用するものとする。また、燃料交換法としては炉心燃料、径方向ブランケットともに均等 3 バッチ交換とする。

表 3.1-1 レファレンス炉心の主要炉心・燃料仕様

パラメータ	仕 様
電気出力/熱出力,MW	1000/2424
炉心構成	均質炉心 (富化度2領域)
燃料・構成材料	
炉心燃料	混合酸化物
ブランケット	劣化ウラン酸化物
構造材	改良オーステナイト鋼
目標取出燃焼度,GWd/t	90
運転サイクル長,EFPM	15
燃料交換バッチ数	3
集合体数	
炉心燃料 (内側/外側炉心)	229/126
径方向ブランケット	150
制御棒 (主/後備系)	30/6
燃料軸方向長さ,cm	
炉心燃料	100
軸方向ブランケット (上/下)	35/35
炉心燃料集合体	
集合体配列ピッチ,mm	176.2
ラッパ管外対面間距離,mm	169.8
ラッパ管肉厚,mm	4.3
集合体当り燃料ピン数	271
被覆管外径,mm	8.5
被覆管肉厚,mm	0.5
組成体積比 (燃料*/冷却材/構造材) ,%	
炉心	44.5/32.7/22.8
径方向ブランケット	50.8/31.2/18.0
燃料スミア密度 (炉心燃料/ブランケット) ,%TD	83.7/90.5
燃料同位体組成,%	
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$	1.7/58.1/25/9.2/4.7/1.3
$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$	0.3/99.7
制御棒 <sup>10</sup> B濃縮度 (主/後備系) ,%	80/90

\*ボイド部含む

(2)炉心核特性

(a)評価手法

レファレンス炉心の核特性評価手法・条件を表 3.1-2 に示す。

表 3.1-2 レファレンス炉心の核特性評価手法・条件

解析コード	MOSES : Tri-Z 拡散・燃焼計算 (制御棒運用/燃料交換考慮) CITATION : RZ 拡散・燃焼計算 (制御棒引抜き) SLAROM : 7 群実効定数作成
核データ	JFS-3-J2 ベース修正炉定数
炉心状態	平衡炉心
制御棒運用法	
BOEC	CCR40cm 挿入/FCR20cm 挿入/BCR 全引抜き
MOEC	CCR20cm 挿入/FCR20cm 挿入/BCR 全引抜き
EOEC	CCR 全引抜き/FCR20cm 挿入/BCR 全引抜き
燃料交換法	3 パッチ均等交換

(b)評価結果

レファレンス炉心の核特性評価結果を表 3.1-3 に示す。レファレンス炉心の径方向中性子束分布、径方向フルエンス分布および径方向出力分布を、夫々、図 3.1-2、図 3.1-3 および図 3.1-4 に示す。高速中性子束およびフルエンスは炉心中心に向かって単調に増加する分布となる。ピークフルエンスは炉心中心の燃料集合体で生じ、 $3.0 \times 10^{23}/\text{cm}^2$  となる。これより、炉心中心燃料の PFB 比として  $3.4 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}/(\text{GWd/t})$  を得る。この値は、第 2 章で定式化した PFB 比の評価式(14)式より算出された値(22)式とよく一致している。



表 3.1-3 レファレンス炉心の主要核特性

特性パラメータ	レファレンス炉心
OC/IC 富化度,%	23.5/16.7
ピークフルエンス, $10^{23}/\text{cm}^2$	3.0
炉心平均取出燃焼度,GWd/t	89
ピークフルエンス/取出平均燃焼度比, $10^{15}\text{cm}^{-2}/(\text{GWd}/\text{t})$	3.4
ピーク線出力,W/cm	
IC	375(BOC)
OC	394(BOC)
燃焼反応度, $\% \Delta k/kk'$	2.9
増殖比(サイクル平均)	1.24

### 3.2 PFB 比低減方策の具体化

第2章で述べたように、ピークフルエンス ( $\propto$ PFB 比) は、ピーク高速中性子束を低減するか燃料集合体の照射期間を短縮することにより低減できる。前者の方法は中性子束分布の平坦化、後者は多段階バッチ燃料交換による。これらの方策を具体化するに当り、レファレンス炉心の基本的な炉心・燃料・制御棒仕様は変更しないことを条件とする。

#### (1) 中性子束分布平坦化

すでに述べたように、均質炉心では内側/外側炉心の富化度比を調整する方法では中性子束分布を平坦化できない。そこで、反応度制御用に運転中常時炉心に挿入されている粗調整棒 (CCR) を運用すること、さらに炉心内にスチール (SUS) やタングステン等の希釈物質を設置して炉心を非均質構造にすることにより、中性子束分布を平坦化することを考えた。

図 3.2-1 に、CCR 運用によるフルエンス平坦化のアプローチを示す。CCR 運用およびそれを補完するための SUS 集合体中心装荷並びに燃料富化度比の調整を採用した。

##### (a) 第1リング/第3リング粗調整棒の運用

粗調整棒 (CCR) 24 本の運用法 (挿入パターン) を変更する。レファレンス炉心では、CCR はバンク運用されるので全 CCR の挿入深さは同じであるが、この場合炉心中心に近い領域ほど中性子束が高くなる。そこで、炉心内側の CCR6 本 (第1リング CCR) を深く、炉心外側の CCR18 本 (第3リング CCR) を浅く挿入することにより、炉心中心のピーク中性子束を低減することを試みる。

##### (b) SUS 集合体中心装荷

第1リング CCR が引抜かれる MOC~EOC において炉心中心のピーク線出力が増大する可

能性があり、これを抑えるために炉心中心にSUS集合体を1体装荷する。また、これによりCCR第1リング深/第3リング浅挿入と同様に炉心中心のピーク中性子束を低減する効果も期待できる。

(c) 外側/内側炉心富化度比調整

CCR第1リング深/第3リング浅挿入により炉心径方向中性子束分布を平坦化した場合、レファレンス炉心の富化度比のままでは、必ずしも炉心径方向出力分布の平坦性が保たれない。とりわけBOCにおいて外側炉心のピーク線出力が増大する可能性がある。そこで外側/内側炉心(OC/IC)の富化度比をレファレンス炉心より小さくする必要がある。

(2)多段階バッチ燃料交換

レファレンス炉心では炉心中心に近いほど中性子束が高いため、同じ照射期間では内側炉心燃料集合体のフルエンスは外側炉心燃料集合体より高くなる。そこで、内側炉心燃料集合体の照射期間を短くする(燃料交換バッチ数を減)ことによりフルエンスを低減するものである。一方、中性子束が低い外側炉心では照射期間を長く(燃料交換バッチ数を増)して取出平均燃焼度を確保する。これが多段階バッチ燃料交換法であるが、さらに前項(1)と同様、炉心内に希釈物質を設置して炉心を非均質構造にすることによる中性子束分布平坦化との組合せを考えた。

図3.2-2に、多段階バッチ燃料交換法によるフルエンス平坦化のアプローチを示す。燃料集合体の中性子束レベルに応じた交換バッチ数およびそれを補完するSUS集合体中心装荷並びに燃料富化度比の調整を採用した。運転サイクル長はレファレンス炉心と同じ(15ヶ月)とする。

(a) 2/3/4バッチ燃料交換

レファレンス炉心は3バッチ燃料交換であることから、高中性子束の燃料集合体は2バッチ交換、低中性子束の燃料集合体は4バッチ交換、残りの集合体は3バッチ交換とする。運転サイクル長をレファレンス炉心と同じ(15ヶ月)とした場合、取出平均燃焼度と夫々のバッチの交換数の関係式は次のように近似できる。バッチ当たりの炉心燃料の交換総数を $N_B$ とすると、

$$\begin{aligned} N_B &= m_2/2 + (N - m_2 - m_4)/3 + m_4/4 \\ &= N/3 + (2m_2 - m_4)/12 \end{aligned} \quad (24)$$

ここで、

$N$  : 全炉心燃料集合体数

$m_2$  : 2バッチ交換燃料集合体数

$m_4$  : 4バッチ交換燃料集合体数

である。レファレンス炉心のバッチ当たりの炉心燃料の交換総数は $N/3$ であるから、レファレンス炉心に対する取出平均燃焼度 $B_{av}$ は、

$$\begin{aligned} B_{av} &\propto (N/3) / N_B \\ &\propto 1 / [1 + (2m_2 - m_4) / 4N] \end{aligned} \quad (25)$$

(25)式より、取出平均燃焼度の低下を防止するためには、

$$m_2 \leq m_1/2 \quad (26)$$

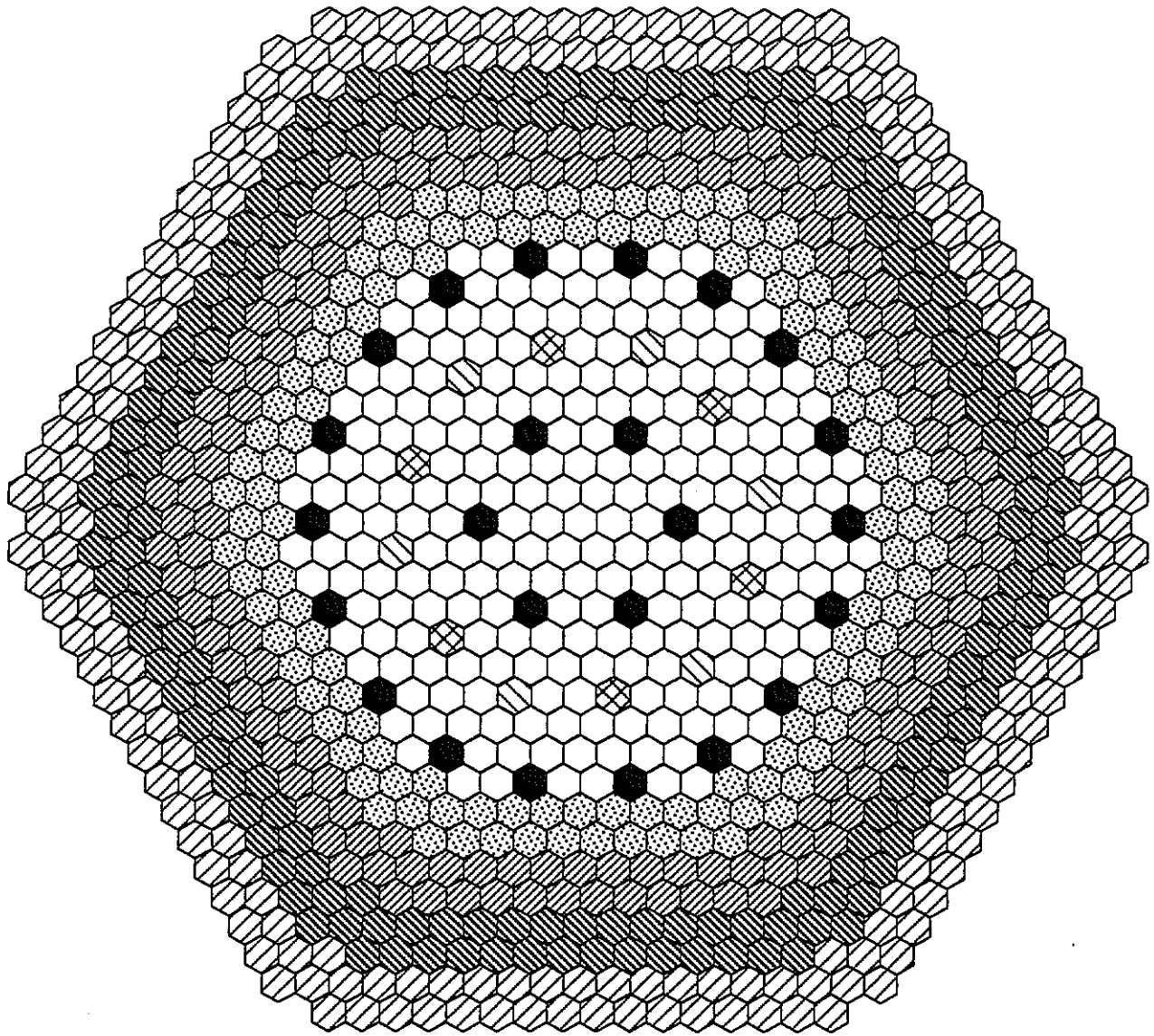
を満足する必要がある。

(b) SUS 集合体中心装荷

炉心中心付近の燃料集合体の照射期間を短くするとピーク線出力が増大する可能性があり、これを抑えるために炉心中心に SUS 集合体を 1 体装荷する。また、これは同時に炉心中心付近のピーク中性子束を低減する効果も期待できる。

(c) 外側/内側炉心富化度比調整

SUS 集合体を炉心中心に装荷しても炉心径方向出力分布の平坦性が保たれない場合は、外側/内側炉心 (OC/IC) の富化度比を調整する必要がある。











- |   |                              |
|---|------------------------------|
|  | 炉心燃料集合体 (内側炉心) : 229体        |
|  | 炉心燃料集合体 (外側炉心) : 126体        |
|  | ブランケット燃料集合体 : 150体           |
|  | SUSしゃへい体 : 174体              |
|  | B <sub>4</sub> Cしゃへい体 : 198体 |
| 主炉停止系制御棒集合体   |                              |
|  | 粗調整棒 : 24体                   |
|  | 微調整棒 : 6体                    |
|  | 後備炉停止系制御棒集合体 : 6体            |

図3.1-1 レファレンス炉心の炉心構成図

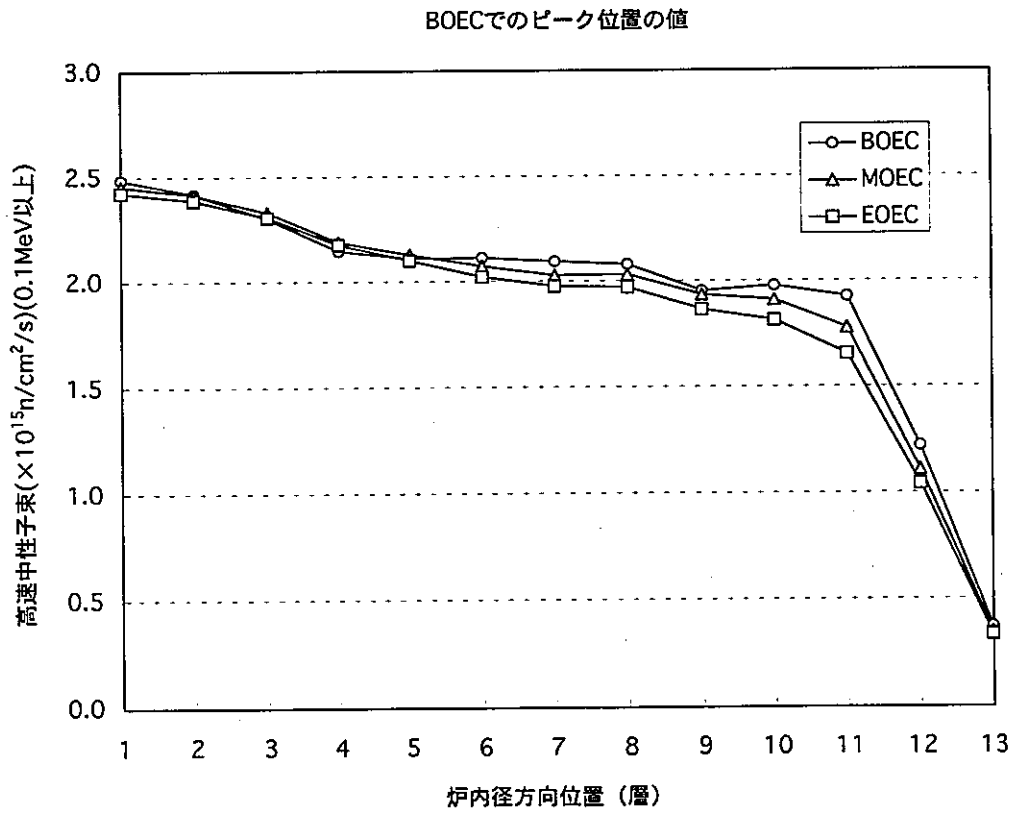
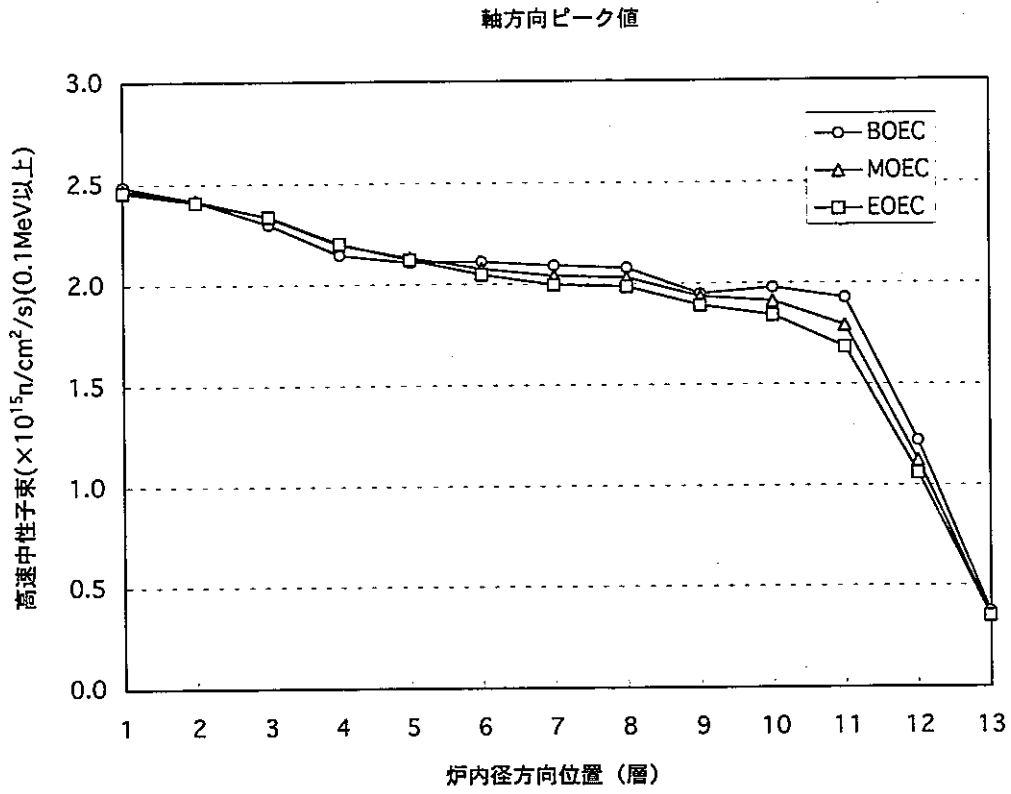
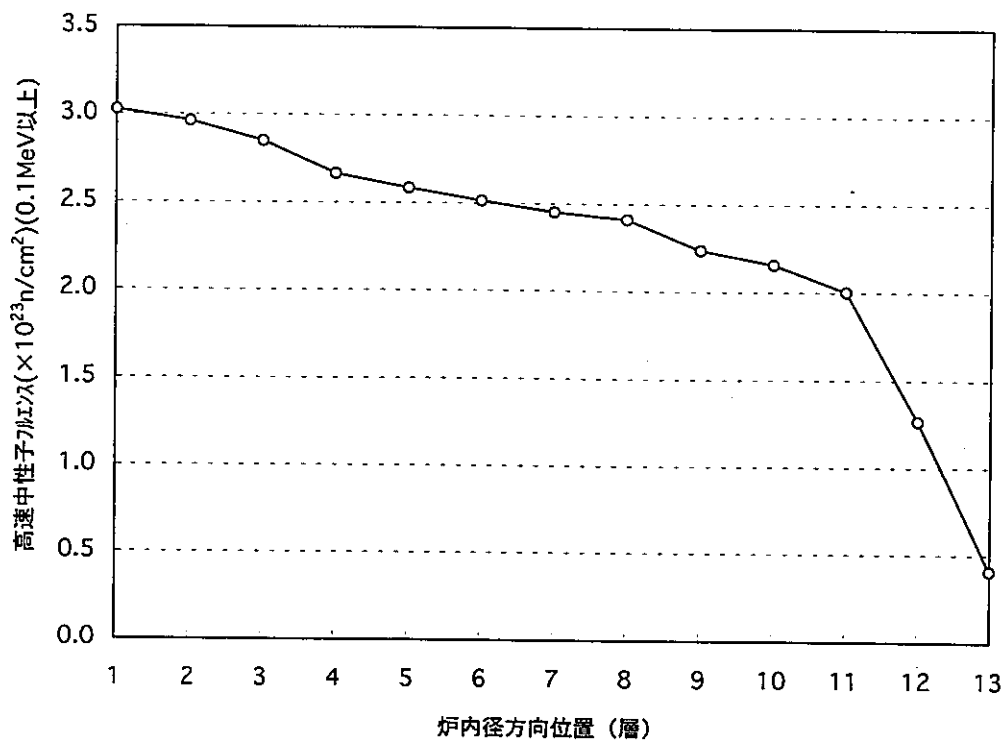


図3.1-2 レファレンス炉心の径方向中性子束分布

軸方向ピーク値



BOECでのピーク位置の値

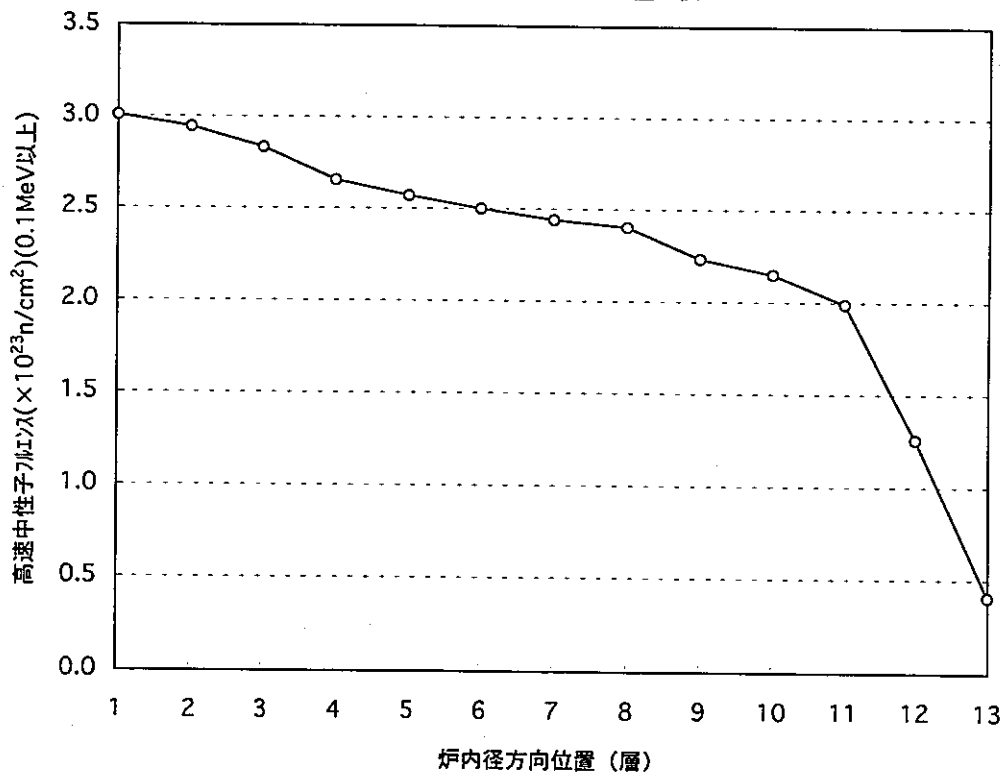


図3.1-3 レファレンス炉心の径方向フルエンス分布

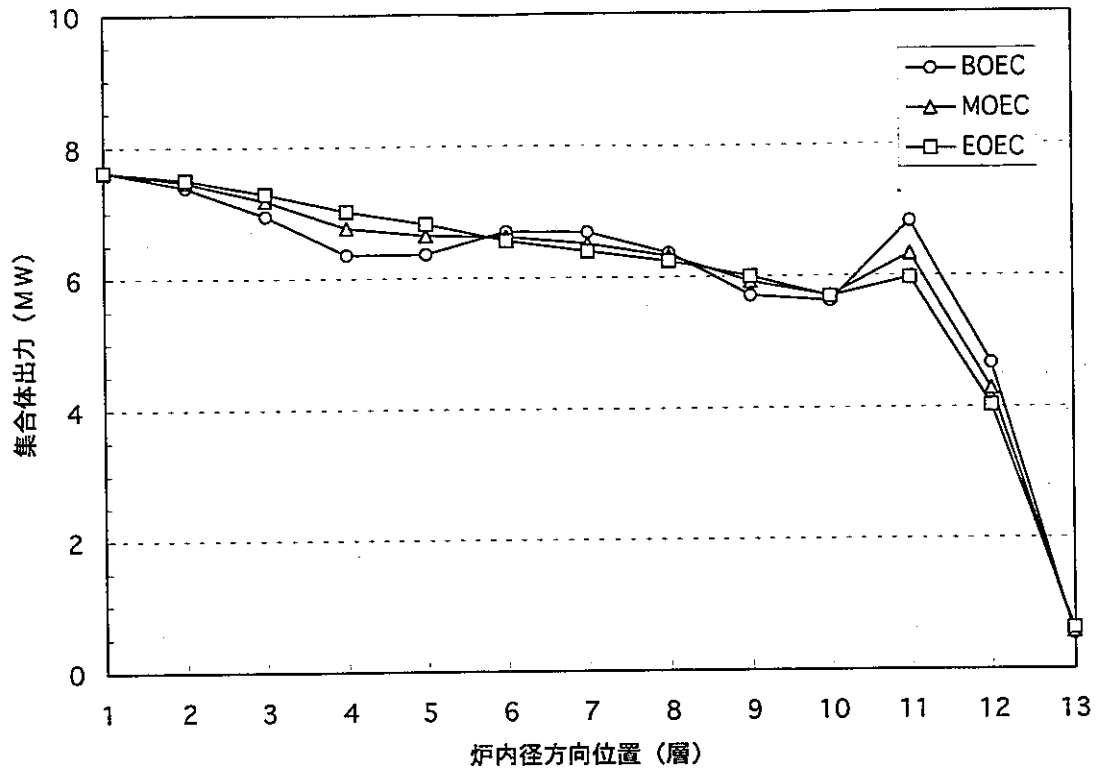


図3.1-4 レファレンス炉心の径方向出力分布

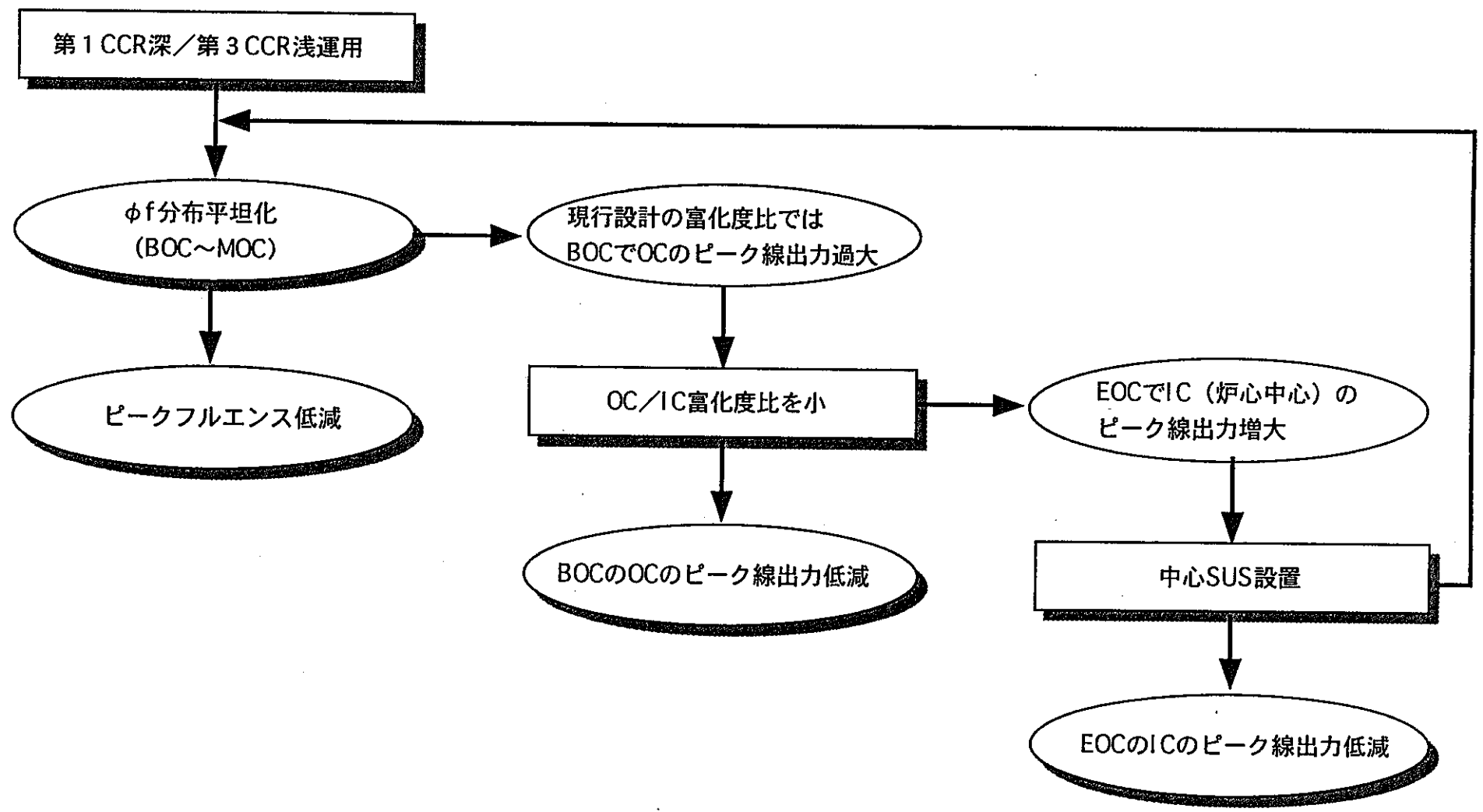


図3. 2-1 粗調整棒の運用によるフルエンス平坦化のアプローチ



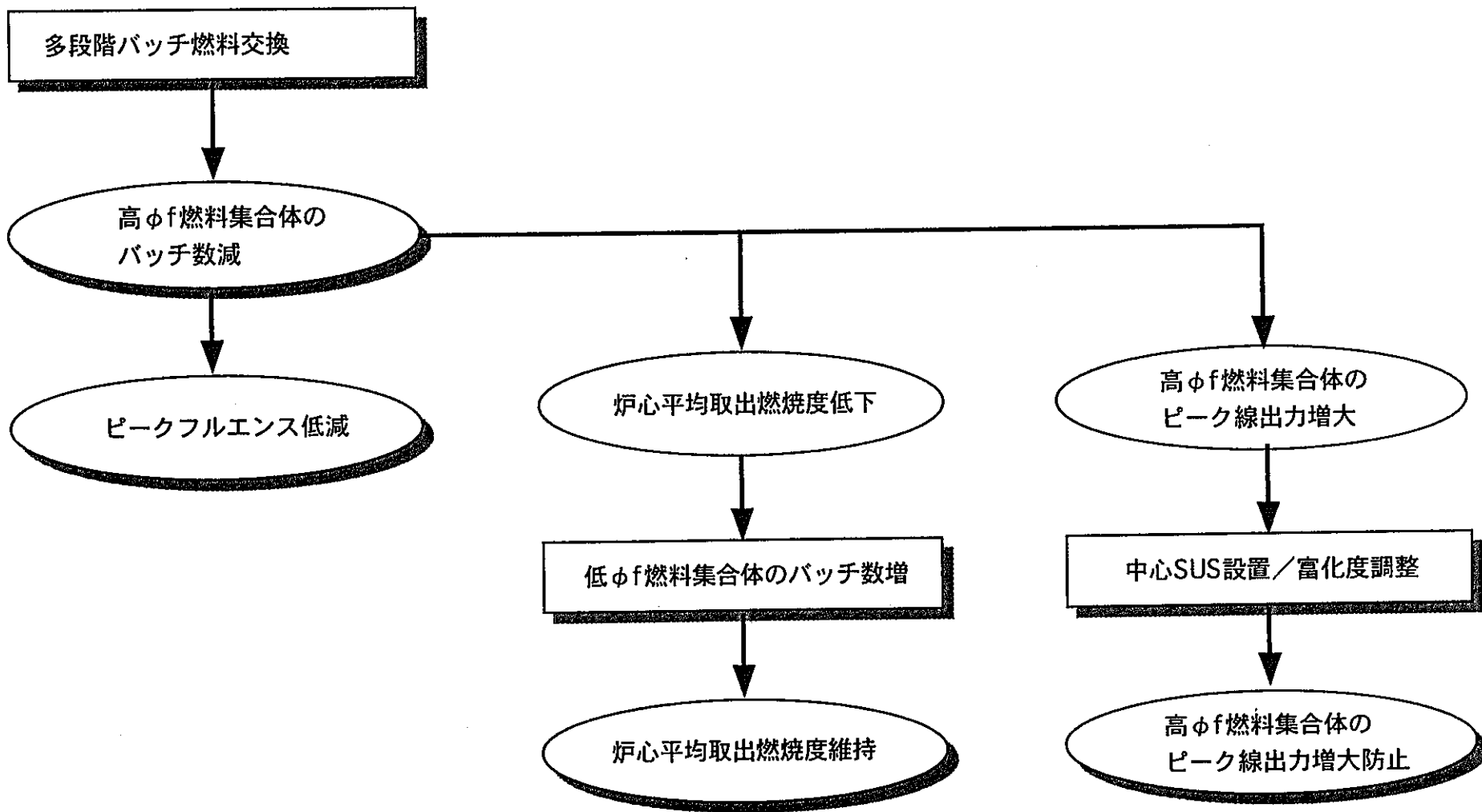


図3.2-2 多段階バッチ燃料交換に基づくフルエンス平坦化のアプローチ

#### 4. 大型炉の炉心設計への適用

ここでは、第3章で具体化したPFB比低減方策をレファレンス炉心に適用し、他特性への影響を抑えつつピークフルエンス（PFB比）がどの程度まで低減可能であるかを検討する。制約条件は、運転サイクル長、取出平均燃焼度等の炉心性能及び炉停止余裕、ピーク線出力余裕等の安全余裕をレファレンス炉心と同程度に保つことである。

##### 4.1 感度解析

レファレンス炉心において各方策を単独で適用した場合のピーク線出力とピーク $\phi f$ に及ぼす影響について感度解析した結果を表4.1-1に示す。

CCR第1リング深／第3リング浅挿入とSUS集合体中心装荷が与える影響は同様な傾向を示す。外側炉心のピーク線出力増大を抑えるためにOC/IC富化度比低減は必須である。CCR深／浅挿入とOC/IC富化度比低減の組合せによりBOECのピーク線出力とピーク $\phi f$ 同時に低減できる。また、EOECでCCR深／浅挿入の効果が無くなることを考慮すると、炉心中心ピーク線出力を抑えるためにはSUS集合体中心装荷が効果的といえる。したがって、CCR深／浅挿入、OC/IC富化度比低減およびSUS集合体中心装荷の組合せにより、ピーク線出力を許容値以下に保ちつつピーク $\phi f$ を低減できそうだ。

多段階バッチ燃料交換については、2バッチ交換の燃料集合体（内側炉心）でピーク線出力が増大するが、これを抑えるためにSUS集合体中心装荷と組合せる必要がある。

表4.1-1 レファレンス炉心において各方策を単独で適用した場合の感度解析

方 策	ピーク線出力 (W/cm)		ピーク $\phi f$ ( $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ )	
	IC	OC	IC	OC
CCR 運用*1	-37	+12	-0.26	+0.04
多段階バッチ燃料交換*2	+20	—	+0.07	—
SUS 集合体中心装荷	-43	+9	-0.37	—
OC/IC 富化度比低減*3	+28	-16	+0.18	—

\*1 CCR 第1リング深／第3リング浅挿入：40/40→45/35；45/35→50/30cm

\*2 炉心中心から第6列までの燃料集合体を2バッチ交換

\*3 OC/IC 富化度比低減：23.5/16.7→22.8/17.0%

#### 4.2 粗調整棒の運用によるフルエンス平坦化炉心

##### (1) 炉心核特性評価手法

本炉心では、前章で述べたCCR第1リング深挿入／第3リング浅挿入なる制御棒運用およびそれを補完するための燃料富化度比の調整並びにSUS集合体中心装荷を採用しているが、これ

以外の炉心・燃料および制御棒の仕様はレファレンス炉心と同じとする。CCR運用によるフルエンス平坦化炉心の構成図を図4.2-1に示す。炉心核特性評価手法・条件は、制御棒運用法を除いてレファレンス炉心の場合と同じである。制御棒運用法を表4.2-1に示す。運転サイクルを通じて $K_{eff}$ とピーク出力密度が、レファレンス炉心と同程度となるように第1リングCCRと第3リングCCRの挿入深さを調整する。第1リングCCRと第3リングCCRの挿入深さは、BOECで45/35cm、MOECでは第3リングCCRは炉心上端まで引抜かれ40/0cmとした。

表 4.2-1 制御棒運用法

	制御棒挿入深度
BOEC	CCR挿入/FCR20cm挿入/BCR全引抜き
MOEC	第1リングCCR挿入/第3リングCCR挿入～全引抜きFCR20cm挿入 BCR全引抜き
EOEC	CCR全引抜き/FCR20cm挿入/BCR全引抜き

## (2)評価結果

表4.2-2に、本フルエンス平坦化炉心の核特性をレファレンス炉心と比較して示す。

## (a) フルエンス

フルエンス平坦化炉心の中性子束とフルエンスの炉心径方向トラバース（図4.2-2の炉心マップに示すラインに沿った）を、図4.2-3と図4.2-4に示す。レファレンス炉心（図3.1-2、図3.1-3）に比べ、フルエンス平坦化炉心の中性子束（BOC～MOC）とフルエンスの分布は極めて平坦である。ピークフルエンスは、レファレンス炉心の $3.0 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ に対して本炉心では $2.6 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ まで低減される。

なお、ピーク $\phi f$ の炉心径方向トラバースの図で、図4.2-2のライン上にある集合体以外の集合体においてもっと大きいピーク $\phi f$ が現れる場合があるが、そのフルエンス値はライン上の集合体のピークフルエンスを上回らないことを確認している。また、今回のピークフルエンス評価では、集合体内ピーキングを考慮していないが、フルエンスがピークとなる内側炉心集合体では集合体内ピーキングは小さく（サイクル平均で高々2%程度）、その影響は比較的小さいと考える。

## (b) PFB比

取出平均燃焼度89GWd/tに対するPFB比は $2.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}/(\text{GWd/t})$ となり、レファレンス炉心より15%小さい。なお、本炉心の外側炉心最外周の集合体のフルエンスにはまだ余裕があるので、バッチ数を3から4に増大できる。この場合、取出平均燃焼度は94GWd/tに増えるため、PFB比は $2.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}/(\text{GWd/t})$ となり、レファレンス炉心より18%小さくなる。

## (c) ピーク出力密度

フルエンス平坦化炉心の集合体出力の炉心径方向トラバースを図4.2-5に示す。レファレンス炉心に比べ、とくに内側炉心で燃焼に伴う出力変動が大きい。サイクル平均の径方向出力分布は比較的平坦である。ピーク線出力は、レファレンス炉心のICで375W/cm、OCで394W/cmに対し、本炉心ではICで392W/cm、OCで369W/cmとなる。ここで出力ミスマッチファクターについては、平衡サイクル燃焼計算（制御棒操作と燃料交換を考慮）より求めた値（ICで1.03、OCで1.08）を使用した。

## (d) 燃焼特性

取出平均燃焼度はレファレンス炉心と同じ89GWd/tである。集合体最大燃焼度は、ICで102GWd/t、OCで95GWd/tとなり、集合体取出し燃焼度の炉心径方向分布はレファレンス炉心（IC：112GWd/t、OC：96GWd/t）より平坦化されている。なお、本炉心の外側炉心最外周の集合体のバッチ数を3から4に増大した場合、取出平均燃焼度は約5%大きくなり、94GWd/tとなる。

燃焼反応度は、炉心中心にSUS集合体を設置したことにより、レファレンス炉心より0.1%  $\Delta k/kk'$  大きい。サイクル平均の増殖比はレファレンス炉心と同じである。

なお、CCR先端部の $^{10}\text{B}$ の $\text{cap}/\text{cm}^3$ の評価指標としてCCR先端部の全中性子束に注目すると、フルエンス平坦化炉心の第1リングCCR先端部の全中性子束（サイクル平均）はレファレンス炉心より約7%大きくなる。

以上より、本フルエンス平坦化炉心では、レファレンス炉心に比べてPFB比を約15~18%低減できるとともに、レファレンス炉心と同程度の炉心核特性を得られることが分った。

表 4.2-2 フルエンス平坦化炉心の主要核特性

特性パラメータ	フルエンス 平坦化炉心		レファレンス炉心
	CCR運用	多段階バッチ	
OC/IC 富化度,%	21.7/17.2	23.8/16.7	23.5/16.7
ピークフルエンス, $10^{23}/\text{cm}^2$	2.6	2.5	3.0
取出燃焼度,GWd/t			
炉心平均	89 (94)* <sup>1</sup>	89	89
IC 集合体ピーク	102	68/97* <sup>2</sup>	112
OC 集合体ピーク	95	99/108* <sup>2</sup>	96
ピークフルエンス/取出平均燃焼度比, $10^{21}\text{cm}^{-2}/(\text{GWd}/\text{t})$	2.9 (2.8)* <sup>1</sup>	2.8	3.4
ピーク線出力,W/cm			
IC	392(EOC)	361(BOC)	375(BOC)
OC	369(BOC)	400(BOC)	394(BOC)
燃焼反応度,% $\Delta k/kk'$	3.0	3.0	2.9
増殖比(サイクル平均)	1.24	1.23	1.24

\*<sup>1</sup> ( )は炉心最外周燃料集合体4バッチ交換

\*<sup>2</sup> IC : 2/3バッチ交換、OC : 3/4バッチ交換

### 4.3 多段階バッチ燃料交換法によるフルエンス平坦化炉心

#### (1) 炉心核特性評価手法

本炉心では、前章で述べた多段階バッチ燃料交換法およびそれを補完するための燃料富化度の調整並びにSUS集合体中心装荷を採用しているが、これ以外の炉心・燃料および制御棒の仕様はレファレンス炉心と同じとした。多段階バッチ燃料交換法によるフルエンス平坦化炉心の構成図を図4.3-1に示す。炉心核特性評価手法・条件は、燃料交換法を除いてレファレンス炉心の場合と同じである。燃料交換法を表4.3-1に示す。レファレンス炉心において中性子束の高い内側炉心第2列～第4列集合体(30体)を2バッチとするとともに、中性子束の低い外側炉心最外列集合体(66体)を4バッチとした。この交換法は(26)式の条件を満足していることから、取出平均燃焼度の低下を防ぐことができる。運転サイクルを通じて $K_{\text{eff}}$ とピーク出力密度が、レファレンス炉心と同程度となるように富化度を調整する。

表 4.3-1 燃料交換法

燃料集合体列	バッチ数
内側炉心第2列～第4列 (30体)	2
内側炉心第5列～外側炉心第1列	3
外側炉心最外列 (66体)	4

## (2) 評価結果

前出の表 4.2-2 に、多段階バッチ燃料交換法によるフルエンス平坦化炉心の核特性をレファレンス炉心と比較して示した。

## (a) フルエンス

フルエンス平坦化炉心の中性子束とフルエンスの炉心径方向トラバース（図 4.2-2 の炉心マップに示すラインに沿った）を、図 4.3-2 と図 4.3-3 に示す。レファレンス炉心（図 3.1-2、図 3.1-3）に比べ、フルエンス平坦化炉心の中性子束分布は炉心中心 SUS により平坦化されている。ピークフルエンスは、レファレンス炉心の  $3.0 \times 10^{23} \text{cm}^{-2}$  に対して本炉心では  $2.5 \times 10^{23} \text{cm}^{-2}$  まで低減される。

なお、今回のピークフルエンス評価では、集合体内ピーキングを考慮していないが、フルエンスがピークとなる内側炉心集合体では集合体内ピーキングは小さく、その影響は比較的小さいと考える。

## (b) PFB 比

取出平均燃焼度 89GWd/t に対する PFB 比は  $2.8 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}/(\text{GWd/t})$  となり、レファレンス炉心より 18% 小さい。

## (c) ピーク出力密度

フルエンス平坦化炉心の集合体出力の炉心径方向トラバースを図 4.3-4 に示す。サイクル期間中の径方向出力分布はレファレンス炉心と同程度である。ピーク線出力は、レファレンス炉心の IC で 375W/cm、OC で 394W/cm に対し、本炉心では IC で 361W/cm、OC で 400W/cm となる。出力ミスマッチファクターについては、別途行った平衡サイクル燃焼計算（制御棒操作と燃料交換を考慮）より求めた値（IC で 1.02/1.03、OC で 1.08/1.10）を用いた。

## (d) 燃焼特性

取出平均燃焼度は、外側炉心最外列集合体を 4 バッチとしたことによりレファレンス炉心と同じ 89GWd/t を確保できた。集合体最大取出燃焼度は、IC で 97GWd/t、OC で 108GWd/t となり、集合体取出し燃焼度の炉心径方向分布はレファレンス炉心より平坦化されている。

燃焼反応度は、レファレンス炉心より  $0.1\% \Delta k/kk'$  大きい。サイクル平均の増殖比はレファレンス炉心とほぼ同じである。

以上より、本フルエンス平坦化炉心では、レファレンス炉心に比べてPFB比を18%低減できるとともに、レファレンス炉心と同程度の炉心核特性を得られることが分った。

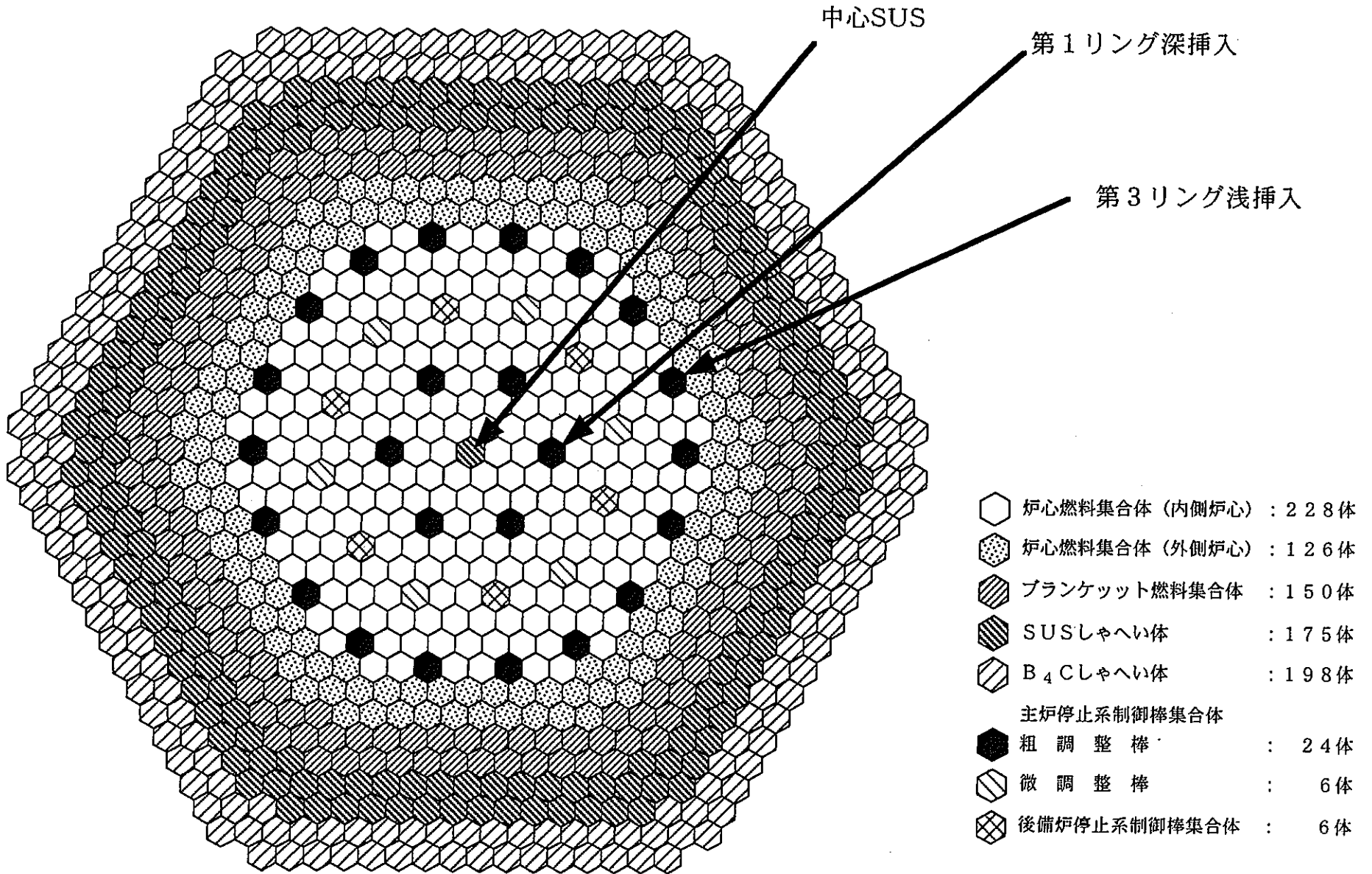


図4.2-1 粗調整棒の運用によるフルエンス平坦化炉心



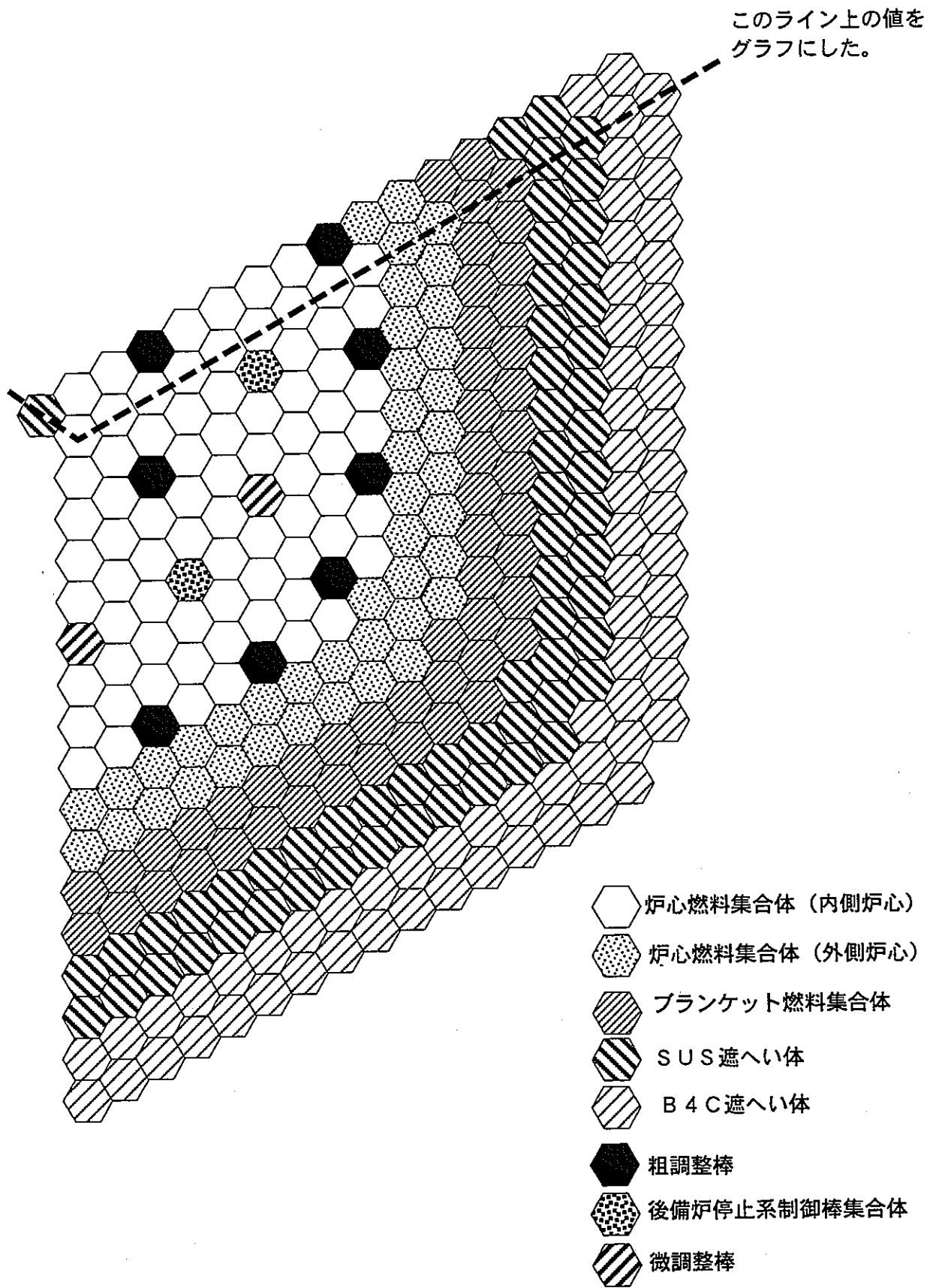
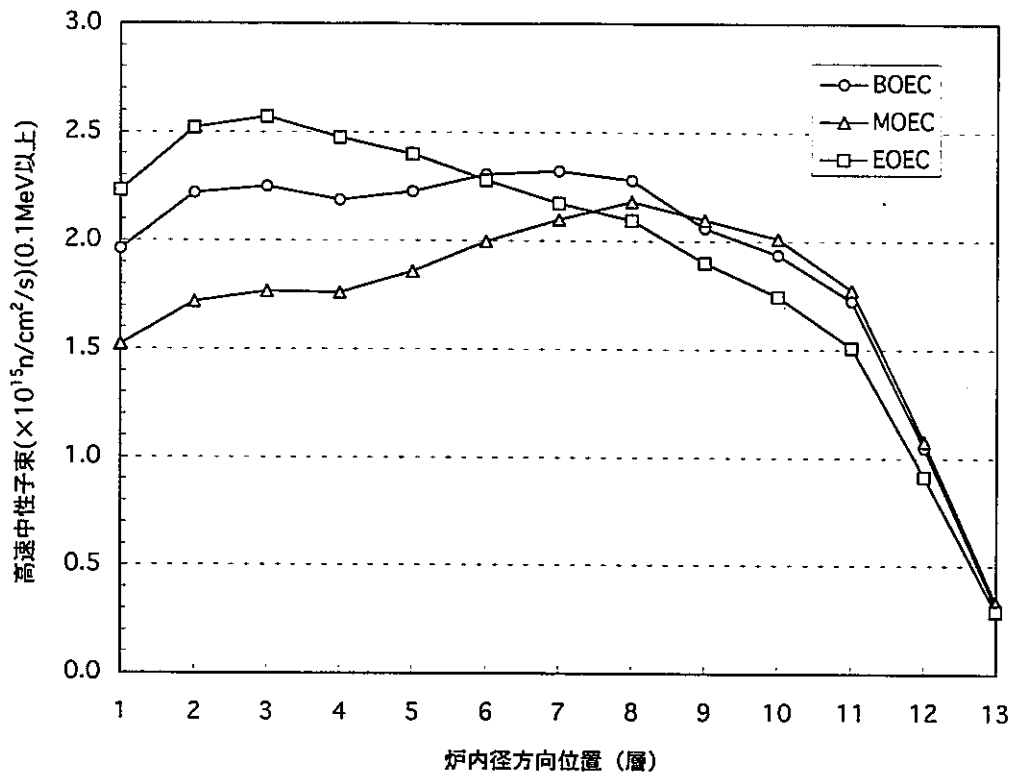


図4.2-2 炉心径方向トラバースのライン

軸方向ピーク値



BOECでのピーク位置の値

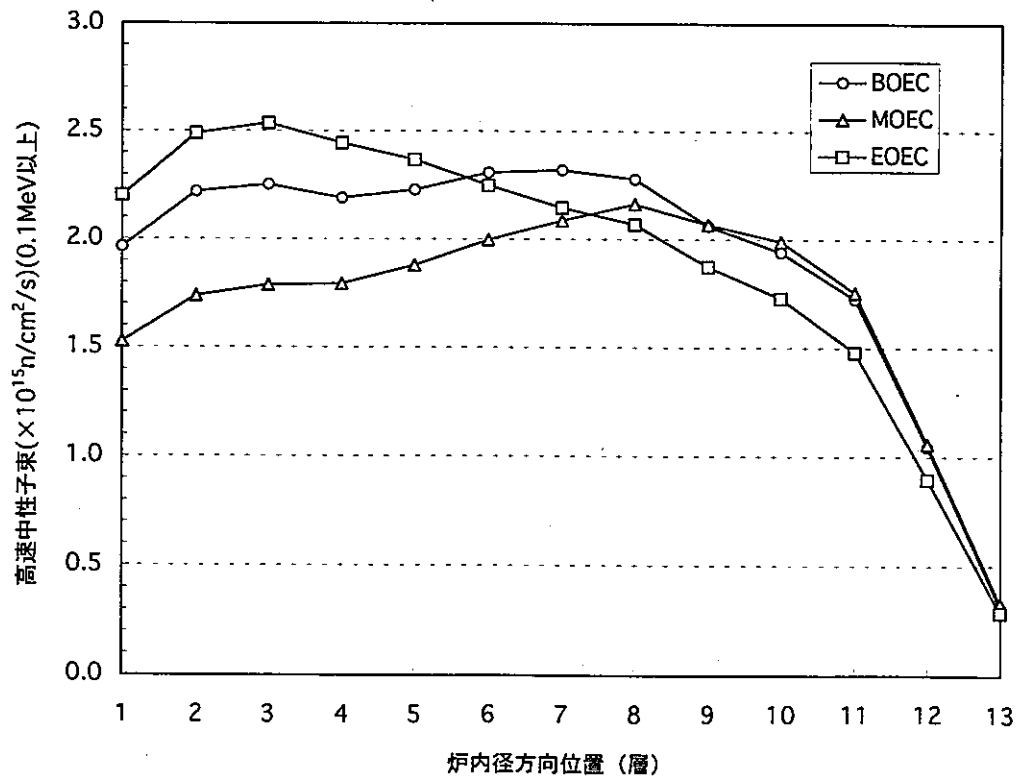


図4.2-3 粗調整棒運用によるフルエンス平坦化炉心の中性子束分布

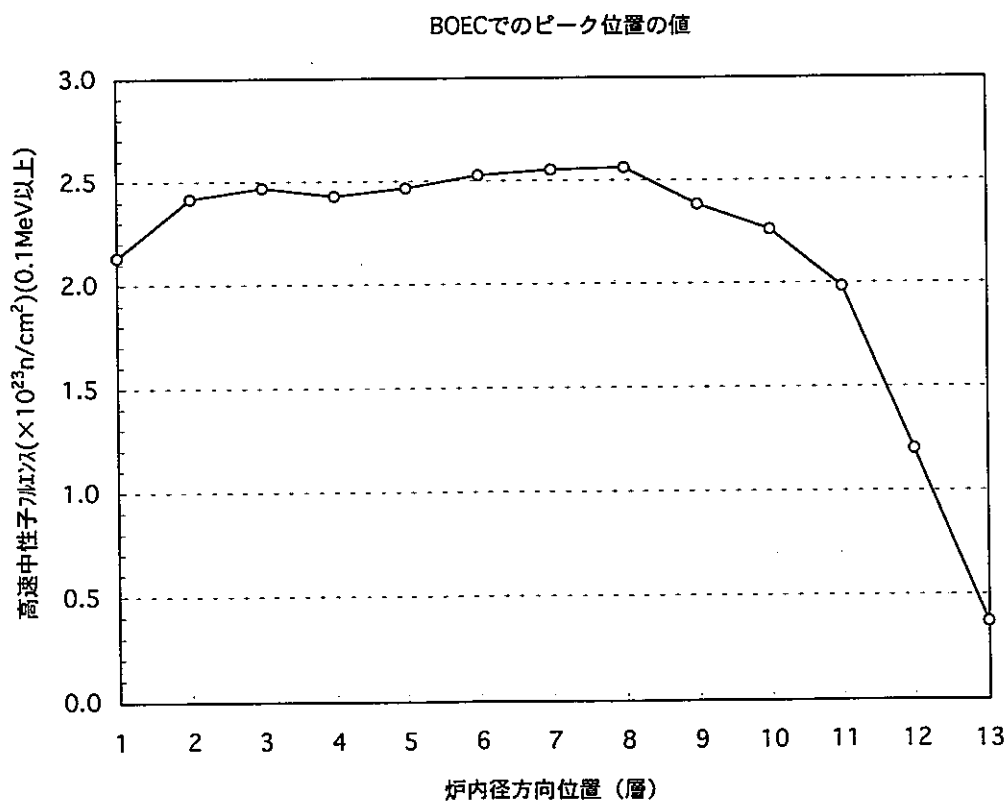
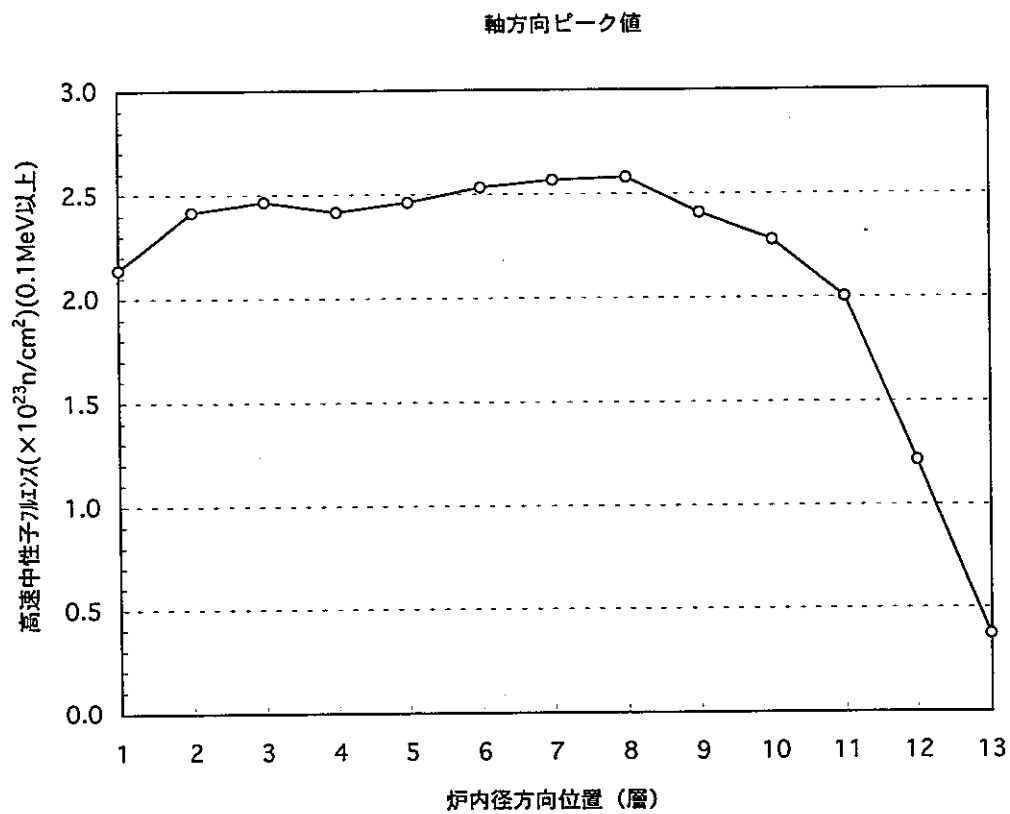


図4.2-4 粗調整棒運用によるフルエンス平坦化炉心のフルエンス分布

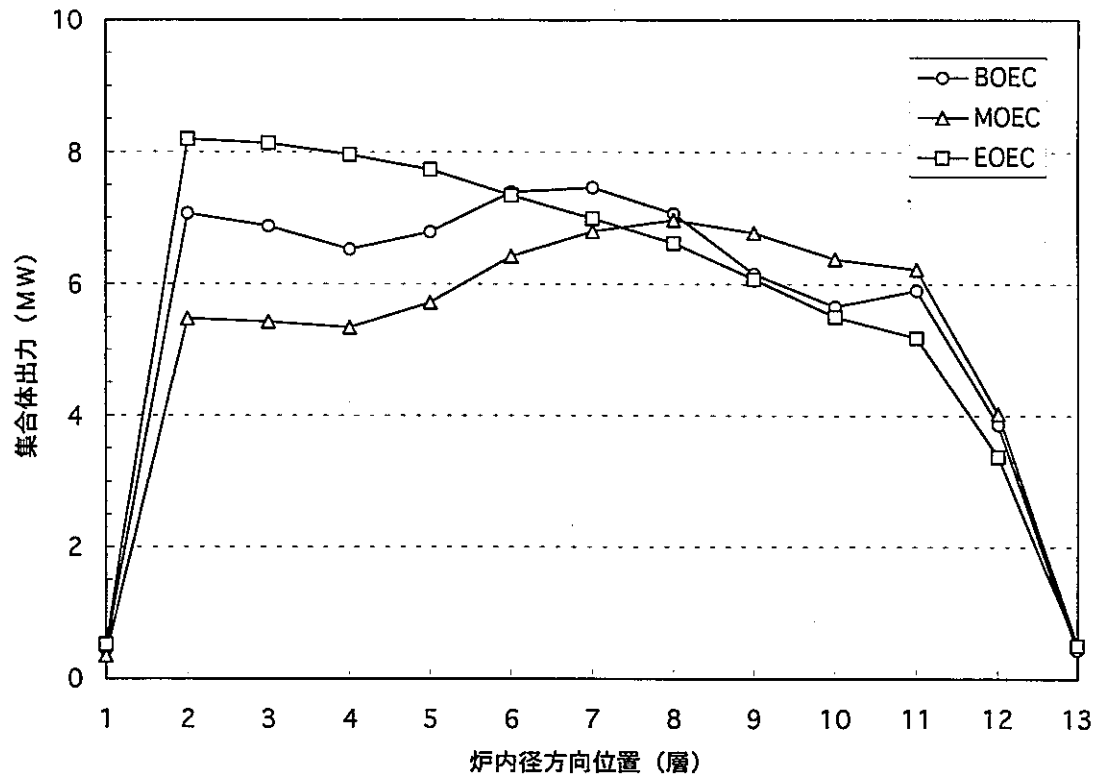
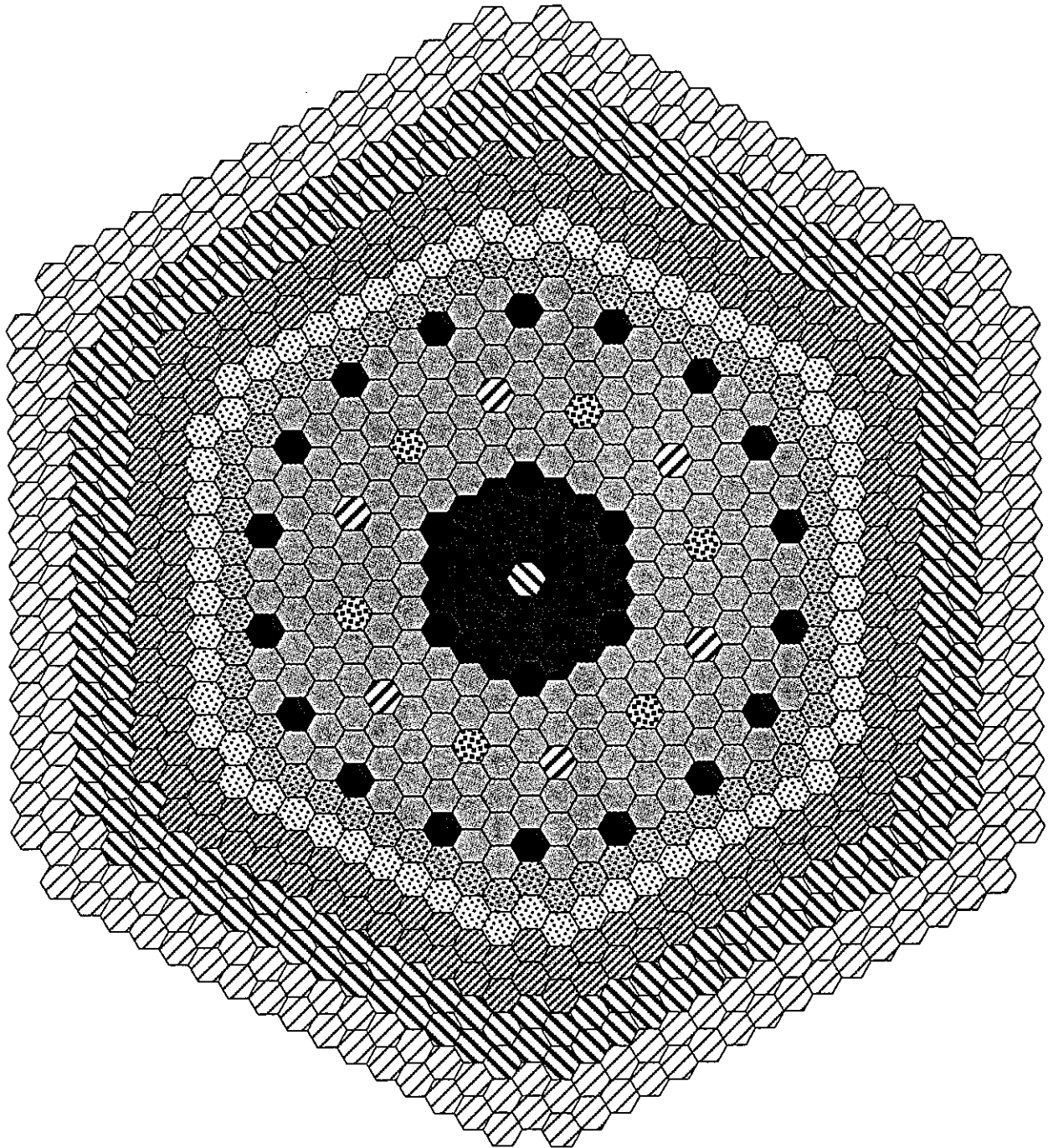


図4.2-5 粗調整棒運用によるフルエンス平坦化炉心の径方向出力分布



- 2バッチで燃料交換を行った集合体
- 3バッチで燃料交換を行った集合体
- 4バッチで燃料交換を行った集合体

- 炉心燃料集合体 (内側炉心)
- 炉心燃料集合体 (外側炉心)
- ▨ プランケット燃料集合体
- ▨ SUS遮へい体
- ▨ B4C遮へい体
- 粗調整棒
- 後備炉停止系制御棒集合体
- ▨ 微調整棒

図 4.3-1 多段階バッチ燃料交換によるフルエンス平坦化炉心の概念

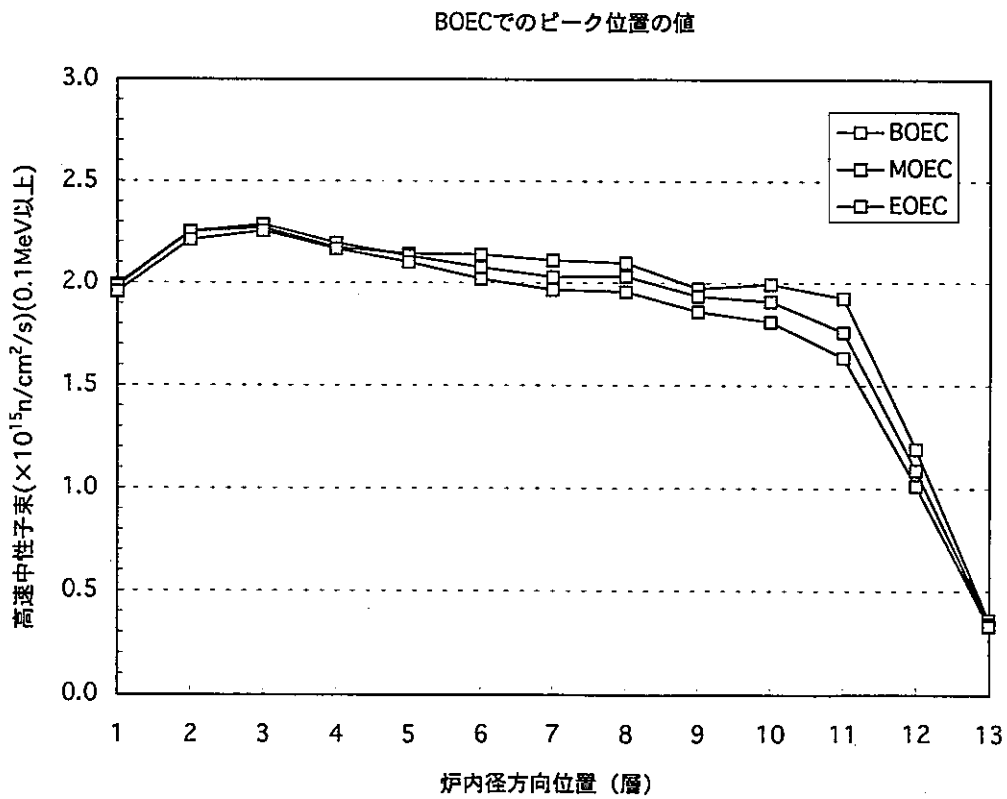
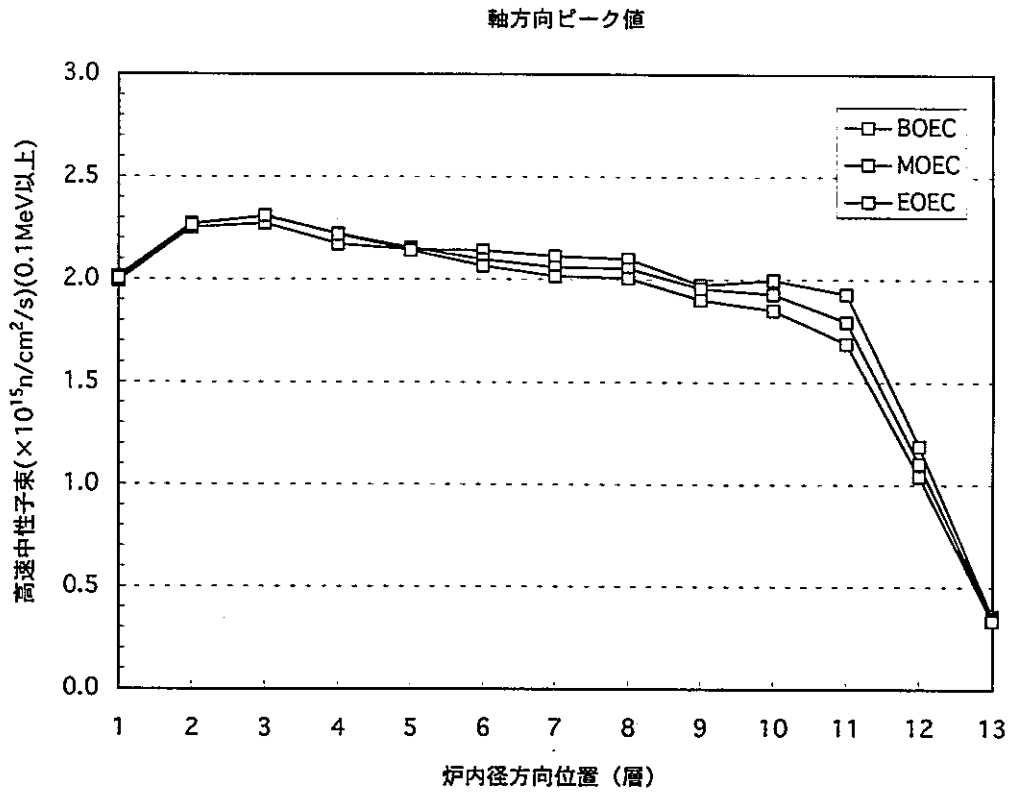


図4.3-2 多段階バッチ交換法によるフルエンス平坦化炉心の中性子束分布

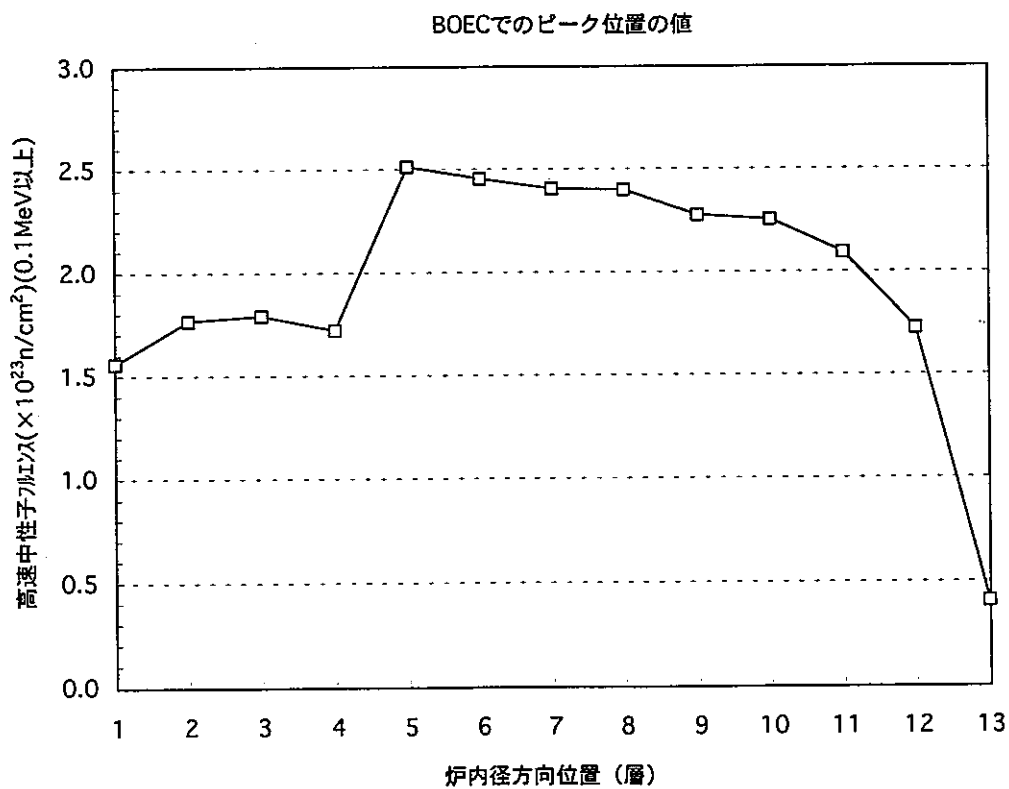
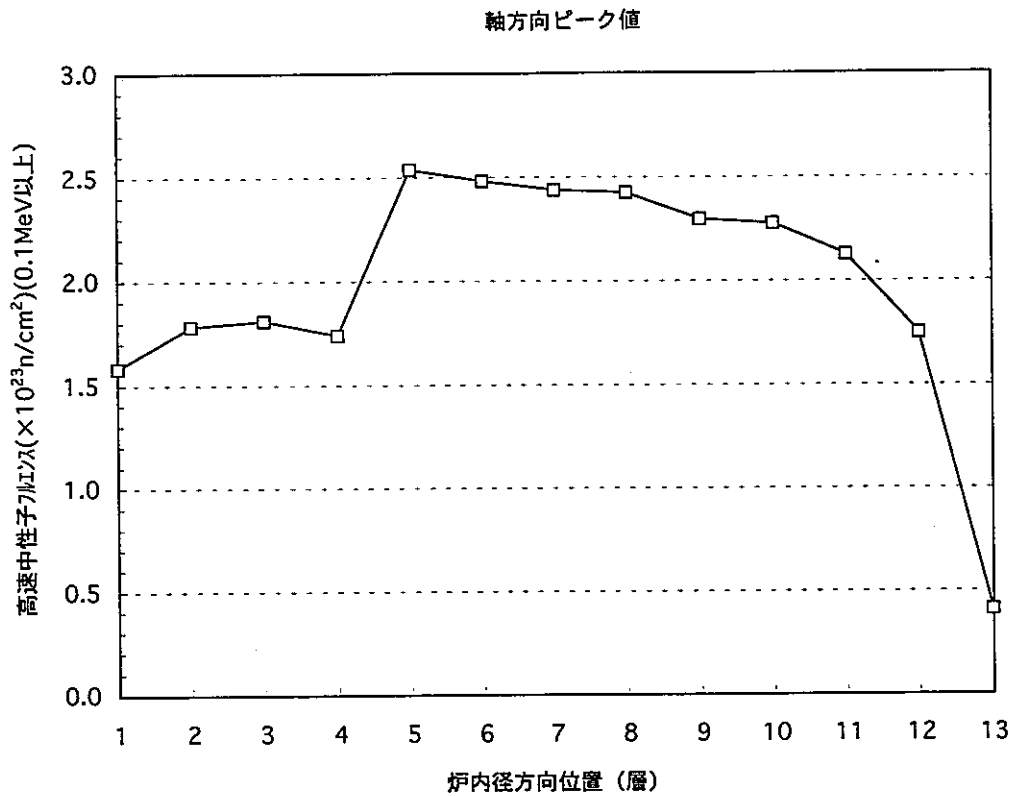


図4.3-3 多段階バッチ交換法によるフルエンス平坦化炉心のフルエンス分布

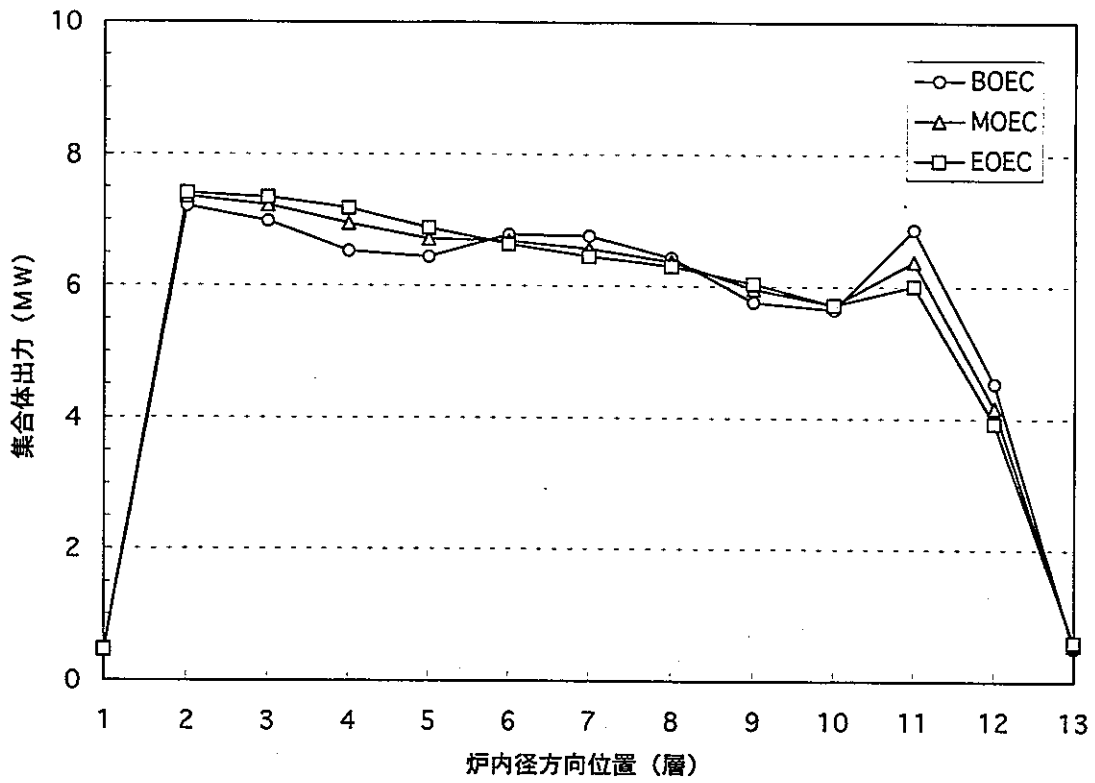


図4.3-4 多段階バッチ交換法によるフルエンス平坦化炉心の径方向出力分布



## 5. 結 言

### (1)結論

大型FBR炉心では、燃料集合体が被る高速中性子照射量（フルエンス）が炉心高燃焼度化の制限要因となっている。そこで、取出平均燃焼度に対する最大フルエンスの比(PFB比:Peak Fast Fluenceto Average Burnup比)を従来の炉心より小さくするための設計検討を行い、以下の結論を得た。

- a. PFB比低減に係る設計パラメータを抽出し、PFB比の評価式として定式化した。PFB比低減のための設計パラメータとして、注目燃料の富化度、出力ピーキング係数及び照射期間が重要であり、 $PFB比 \propto \text{注目点の出力ピーキング係数} / \text{注目点 fissile 富化度} \times \text{注目点の照射期間} / \text{炉心平均照射期間}$ なる評価式を得た。さらに、この評価式に基づき、炉心設計として可能な均質炉心のPFB比低減の限界を示した。
- b. 均質炉心の設計に適用できるPFB比低減方策を具体化した。粗調整棒運用（炉心中心よりの粗調整棒の挿入量を大）による中性子束分布平坦化および多段階パッチ燃料交換（炉心中心よりの燃料集合体ほどパッチ数を小）による照射期間短縮が有力である。どちらも出力分布平坦化のためSUS集合体中心装荷と組み合わせるのがよい。
- c. これらのPFB比低減方策を大型炉の炉心設計（1000MWe2領域均質炉心）に適用し、ピーク出力密度や燃焼度等、他の炉心特性への影響を抑えつつ、15～18%程度のPFB比低減効果を得た。

### (2)今後の課題

現在、実証炉初期段階炉心の燃料仕様の評価を実施中であるが、本研究の成果をもとにして、実証炉用のフルエンス平坦化炉心を検討中である。これまでのところ、概略評価により原電設計炉心に比べ約20%のPFB比低減効果を得ているが、今後は、さらにラッパ管にフェライト鋼を使用した炉心の核熱設計の詳細化を進めていく。

参考文献

1. 例えば、K. Kawashima, et al., Conceptual Core Design to Enhance Safety Characteristics in MOX Fueled Large LMFBRs, Proc Int Conf on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, AESJ (1992)