

JAERI-Research  
2003-003



JP0350065



**PWR型低減速軽水炉心の設計研究**  
— シード・ブランケット燃料集合体  
採用炉心の検討 —

2003年3月

嶋田 昭一郎・久語 輝彦・大久保 努・岩村 公道

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

PWR 型低減速軽水炉心の設計研究  
—シード・ブランケット燃料集合体採用炉心の検討—

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部  
嶋田 昭一郎\*・久語 輝彦・大久保 努・岩村 公道

(2003年1月24日受理)

PWR 型低減速スペクトル炉心設計研究の一環として、軽水冷却のシード・ブランケット燃料集合体採用炉心の検討を行った。

燃料集合体に関する最適化検討の結果、シード 13 層・ブランケット 5 層の集合体を採用し、この集合体を 163 体配列した炉心について MVP-BURN による計算を行い、次の炉心性能が得られた。

3 バッチ取替え方式で、各サイクルの運転期間 15 ヶ月とすると、取り出し燃料燃焼度は集合体平均 (内部ブランケットを含む) 約 25GWd/t である。転換比は約 1.0 で、ボイド反応度係数は BOC で約 -26.1pcm/%void、EOC で -21.7pcm/%void である。

Pu 中に約 10% の MA を混入させると、同じ燃焼度を得るためには転換比が約 0.05 減少する。ボイド反応度係数は大幅に増加するので、対策が必要である。また、全 Pu 重量の約 2% の FP が同伴すると、反応度が約 0.5%  $\Delta k/k$  だけ減少し、ボイド反応度係数は多少正側に移行するが、いずれも設計余裕の範囲である。

プルトニウムマルチリサイクルの検討として、サイクル末期に取り出された燃料を再処理して得られるプルトニウムをリサイクルする計算を第 4 サイクルまで行った。MA、FP のリサイクルは考慮していない。反応度はリサイクルによって次第に減少し、第 3 サイクルから飽和の傾向があるが、4 サイクルでは平衡に達していない。4 サイクル後も燃焼度の条件を満たしており、核分裂性 Pu 富化度 15.5wt% でマルチサイクルが可能である。転換比はサイクルが進むと約 0.026 増加する。但しボイド反応度係数はサイクルが進むと正側に移行し、ボイド反応度係数対策が必要である。

Design Study on PWR-Type Reduced-Moderation Light Water Core  
– Investigation of Core Adopting Seed-blanket Fuel Assemblies –

Shoichiro SHIMADA\*, Teruhiko KUGO, Tsutomu OKUBO and Takamichi IWAMURA

Department of Nuclear Energy System  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

**(Received January 24,2003)**

As a part of the design study on PWR-type Reduced-Moderation Water Reactors (RMWRs), a light water cooled core with the seed-blanket type fuel assemblies has been investigated.

An assembly with seed of 13 layers and blanket of 5 layers was selected by optimization calculations. The core was composed with the 163 assemblies. The following results were obtained by burn-up calculations with the MVP-BURN code;

The cycle length is 15 months by 3-batch refueling. The discharge burn-up including the inner blanket is about 25 GWd/t. The conversion ratio is about 1.0. The void reactivity coefficient is about -26.1pcm/%void at BOC and -21.7pcm/%void at EOC.

About 10% of MA makes conversion ratio decrease about 0.05 to obtain the same burn-up. The void reactivity coefficient increases significantly and it is necessary to reduce it. FP amount corresponding to about 2 % of total plutonium weight makes reactivity decrease about 0.5 %  $\Delta k/k$  and void reactivity coefficient increase, however these changes are within the design margins.

Capability of multi-recycling of plutonium was confirmed, using discharged plutonium for 4 cycles, if fissile plutonium of 15.5wt% is used. The conversion ratio increases by about 0.026 with recycling. However, void reactivity coefficient increases and some effort to obtain negative void reactivity coefficient is necessary.

Keywords: Reduced-moderation Water Reactor, Light Water, PWR, Conversion Ratio, Void Reactivity Coefficient, Seed-blanket Fuel Assembly, MOX, Burn-up

---

\* On leave from Engineering Development

## 目次

1. 序論	1
2. プルトニウム組成の影響	1
2.1 計算条件	1
2.2 転換比の定義	2
2.3 プルトニウム組成の影響の評価	3
3. 各種影響評価	9
3.1 燃料棒径（水対燃料体積比）の影響評価	9
3.2 燃焼領域分割の影響評価	9
3.3 富化度の検討	10
3.4 燃料棒間ギャップの検討	10
4. 転換比の検討	17
4.1 Pu-241 崩壊の転換比への影響	17
4.2 格子燃焼における転換比（SRAC 計算）	17
5. 集合体の大型化とジルカロイ被覆管の採用	22
5.1 集合体燃焼計算（18 層モデル）	22
5.2 ブランケット燃料のシード燃料領域内への配置	22
6. ステンレススチールとジルカロイ被覆管の比較及び ZrH <sub>1.7</sub> の効果	29
6.1 ステンレススチールとジルカロイ被覆管の比較	29
6.2 ZrH <sub>1.7</sub> の効果	29
7. 炉心設計計算	35
7.1 集合体燃焼計算	35
7.2 炉心計算	35
8. MA、FP 混入の可能性評価	51
8.1 TRU 混合燃料炉心の性能評価	51
8.2 FP 混合炉心の性能評価	51
9. マルチリサイクルの検討	65
10. 結論	71
謝辞	71
参考文献	72

## Contents

1. Introduction	1
2. Effect of Plutonium Composition	1
2.1 Calculation Conditions	1
2.2 Definition of Conversion Ratio	2
2.3 Study on Effect of Plutonium Composition	3
3. Evaluation of Different Parameters	9
3.1 Water-to-fuel Volume Ratio	9
3.2 Burn-up Region	9
3.3 Enrichment	10
3.4 Fuel Rod Gap	10
4. Conversion Ratio	17
4.1 Effect of $^{241}\text{Pu}$ Decay on Conversion Ratio	17
4.2 Conversion Ratio by the SRAC Code	17
5. Larger Fuel Assembly and Zry-4 Cladding	22
5.1 Assembly Burn-up Calculation	22
5.2 Distribution of Blanket Fuel Rods in the Seed Region	22
6. Comparison Zry-4 Cladding with Sus Cladding and Effect of $\text{ZrH}_{1.7}$ Rods	29
6.1 Comparison Zry-4 Cladding with Sus Cladding	29
6.2 Effect of $\text{ZrH}_{1.7}$ Rod	29
7. Core Calculation	35
7.1 Assembly Burnup Calculations	35
7.2 Core Burnup Calculations	35
8. MA, FP	51
8.1 Evaluation of TRU Contained Fuel	51
8.2 FP Depletion	51
9. Multi-recycle	65
10. Conclusions	71
Acknowledgments	71
References	72

## 表一覧

- 表 2-1 燃料集合体計算条件 (燃料シード 15 層、ブランケット 4.5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 36 本、炉心 100cm×2、内部ブランケット 50cm、軸方向ブランケット上下 25cm×2、SUS 被覆管)
- 表 2-2 集合体組成 (×10<sup>24</sup> 個/cm<sup>3</sup>)
- 表 2-3 BOC,EOC 炉心に対するボイド反応度係数の計算  
1999 年度組成 Pu (Puf.17.99wt%) 燃料シード 15 層、ブランケット 4.5 層集合体  
炉心 集合体燃焼領域 6 (シード 2,ブランケット 6)、炉心領域 (シード 1,ブランケット 2/集合体) 集合体数 163 体/炉心、炉心外周にブランケット 1 層配置
- 表 2-4 BOC,EOC 炉心に対するボイド反応度係数の計算  
2000 年度組成 Pu (Puf.18.00wt%) 燃料シード 15 層、ブランケット 4.5 層集合体  
炉心 集合体燃焼領域 6 (シード 2,ブランケット 6)、炉心領域 (シード 1,ブランケット 2/集合体) 集合体数 163 体/炉心、炉心外周にブランケット 1 層配置
- 表 3-1 燃料集合体計算条件 (シード 11 層、ブランケット 4.5 層) 集合体燃焼計算用 8 領域 プルトニウム組成=2000 年度組成
- 表 4-1 燃料格子計算条件  
Puf 富化度 18.0wt%、プルトニウム組成=2000 年度組成
- 表 5-1 燃料集合体計算条件 (燃料 18 層モデル、シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管)  
プルトニウム組成=2000 年度組成
- 表 6-1 燃料集合体計算条件 (燃料 18 層モデル、シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、SUS 被覆管)  
プルトニウム組成=2000 年度組成
- 表 6-2 燃料集合体計算条件 (ブランケット燃料分散配置モデル、シード 312 本、ブランケット 361 本、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、SUS 被覆管)
- 表 7-1 集合体組成 (×10<sup>24</sup> 個/cm<sup>3</sup>)
- 表 7-2 BOC、EOC 炉心 (Puf.14.5wt%163 体、冷却材チャンネル 48 体) 計算結果
- 表 7-3 BOC、EOC 炉心 (Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体、冷却材チャンネル 48 体) 計算結果
- 表 7-4 集合体計算と炉心計算の比較
- 表 7-5 反応度、ボイド反応度係数の比較
- 表 7-6 燃料集合体シード部分の出力分布の比較
- 表 8-1 燃料組成比 (TRU 添加)
- 表 8-2 核分裂性核種残存比  
TRU 添加 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体(シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-3 Pu 組成比変化  
TRU 添加 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体(シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-4 核分裂性核種インベントリ  
TRU 添加 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-5 核分裂性核種,MA インベントリ  
TRU 添加 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合

- 体(シード 13, ブランケット 5,  $ZrH_{1.7}$  無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-6 改良湿式再処理からの装荷 FP 核種組成
- 表 8-7 BWR 取出使用済み  $UO_2$  燃料に対する Pu 組成評価結果
- 表 8-8 核分裂性核種残存比  
FP 混合 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、 $ZrH_{1.7}$  無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5,  $ZrH_{1.7}$  無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-9 Pu 組成比変化  
FP 混合 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、 $ZrH_{1.7}$  無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5,  $ZrH_{1.7}$  無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-10 核分裂性核種インベントリ  
FP 混合 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、 $ZrH_{1.7}$  無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5,  $ZrH_{1.7}$  無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-11 核分裂性核種, MA インベントリ  
FP 混合 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、 $ZrH_{1.7}$  無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5,  $ZrH_{1.7}$  無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-12 核分裂性核種残存比  
FP 混合 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、 $ZrH_{1.7}$  無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5,  $ZrH_{1.7}$  無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-13 Pu 組成比変化  
FP 混合 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、 $ZrH_{1.7}$  無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5,  $ZrH_{1.7}$  無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)
- 表 8-14 核分裂性核種インベントリ  
FP 混合 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、 $ZrH_{1.7}$  無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5,  $ZrH_{1.7}$  無し、燃料被覆管 Zry-4、flower=Zry-4)
- 表 8-15 核分裂性核種、MA インベントリ  
FP 混合 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、 $ZrH_{1.7}$  無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5,  $ZrH_{1.7}$  無し、燃料被覆管 Zry-4、flower=Zry-4)
- 表 9-1 Puf.14.5wt%シード燃料集合体マルチリサイクル Pu 組成変化 (装荷時)
- 表 9-2 Puf.15.5wt%シード燃料集合体マルチリサイクル Pu 組成変化 (装荷時)



## 図一覧

- 図 2-1 集合体体系図 (1/4) シード 15 層、ブランケット 4.5 層
- 図 2-2  $k_{eff}$ 、転換比、ボイド反応度係数の Pu 組成による比較 (転換比に Pu-241 の Decay 無視)
- 図 2-3 炉心体系図 (シード・ブランケット燃料集合体 163 体、ブランケット燃料集合体 48 体)
- 図 3-1 シード・ブランケット燃料集合体 (シード 11 層、ブランケット 4.5 層)
- 図 3-2  $k_{eff}$ 、転換比、ボイド反応度のシード燃料層数による比較 (2000 年度組成炉心)
- 図 3-3  $k_{eff}$ 、転換比の燃料集合体シード層数 11,12,13 (ブランケット層数 4.5,3.5,2.5) による比較 (燃焼領域数 8)
- 図 3-4  $k_{eff}$ 、転換比、ボイド反応度の燃焼領域数による比較  
(シード 11 層ブランケット 4.5 層, 2000 年度組成, 炉心高さ 110cm×2, 内部ブランケット 30cm)
- 図 3-5  $k_{eff}$ 、転換比、ボイド反応度の炉心 (シード部) 高さによる比較  
(燃焼領域シード部 2, ブランケット部 6)
- 図 3-6 シード・ブランケット集合体パラメータ計算 (集合体体系) Puf.18.0wt%  
 $k_{eff}$  or Int.C.R.
- 図 3-7 シード・ブランケット集合体パラメータ計算 (核分裂性 Pu 富化度)  
 $k_{eff}$  or Int.C.R.
- 図 3-8 シード・ブランケット集合体パラメータ計算 (パラメータ組み合わせ)  
 $k_{eff}$  or Int.C.R.
- 図 3-9 燃料集合体 (Puf.17.0wt%, シード 11 層、ブランケット 4.5 層、ZrH<sub>1.736</sub> 本)  
(燃焼領域 8) の燃焼による実効増倍率、転換比、ボイド反応度係数の変化の燃料棒間ギャップの差による比較
- 図 4-1 転換比定義による転換比の差  
シード 11, ブランケット 4.5, 核分裂 Pu18wt% (2000 年度組成 Pu) 炉心高さ =110cm×2
- 図 4-2 無限格子燃焼計算による  $k_{\infty}$  と転換比: シード燃料 (Puf.18.0wt%2000 年度組成)
- 図 4-3 無限格子燃焼計算による核分裂性物質生成量&消滅量: シード燃料  
(Puf.18.0wt%2000 年度組成)
- 図 4-4 無限格子燃焼計算による核種組成: シード燃料 (Puf.18.0wt%2000 年度組成)
- 図 4-5 無限格子燃焼計算による  $k_{\infty}$  と転換比: ブランケット燃料 (劣化 U-235 0.2wt%)
- 図 4-6 無限格子燃焼計算による核分裂性物質生成量&消滅量: ブランケット燃料  
(劣化 U-235 0.2wt%)
- 図 4-7 無限格子燃焼計算による核種組成: ブランケット燃料 (劣化 U-235 0.2wt%)
- 図 5-1 燃料集合体内ブランケット燃料ピン及び制御棒案内管配置 (18 層シード 13 層ブランケット 5 層)
- 図 5-2 燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果 (Puf.14.5wt%, Puf.18.5wt%集合体)
- 図 5-3 燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼度 (Puf.14.5wt%, Puf.18.5wt%集合体)
- 図 5-4 ブランケット燃料中央配置燃料集合体 (燃料ピン 16 層)
- 図 5-5 ブランケット燃料分散配置燃料集合体 (燃料ピン 16 層)
- 図 5-6 燃料ピン 16 層 (ブランケット中央または分散配置) 集合体燃焼計算結果  
 $k_{eff}$ , Int.C.R., ボイド反応度係数
- 図 5-7 燃料ピン 16 層 (ブランケット中央又は分散配置) 集合体燃焼度 (Puf.17.0wt%集合体)
- 図 6-1 燃料ピン 18 層 (Puf.14.5wt%, シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果

- 被覆管材質 (Zry-4, SUS) による差  
 燃料ピン 16 層 (ブランケット分散配置) 集合体燃焼計算結果  
 被覆管材質 (Zry-4, SUS) による差
- 図 6-2 燃料ピン 16 層 (ブランケット分散配置) 集合体燃焼計算結果  
 被覆管材質 (Zry-4, SUS) による差
- 図 6-3 ブランケット燃料分散配置燃料集合体 (燃料ピン 16 層) ZrH<sub>1.7</sub> 有り
- 図 6-4 燃料ピン 16 層 (ブランケット燃料ピン集合体内分散配置) 集合体燃焼計算結果  
 被覆管 (Zry-4, SUS) 及び ZrH<sub>1.7</sub> の影響(1) Puf17.0wt%一定
- 図 6-5 燃料ピン 16 層 (ブランケット燃料ピン集合体内分散配置) 集合体燃焼計算結果  
 被覆管 (Zry-4, SUS) 及び ZrH<sub>1.7</sub> の影響(2)  
 ZrH<sub>1.7</sub>31 本挿入の場合 Puf 富化度を 18.0wt%とした
- 図 7-1  $k_{eff}$ , Int.C.R., Void reactivity coef.  
 燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果
- 図 7-2 シード燃料部軸方向出力分布  
 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果
- 図 7-3 ブランケット燃料部軸方向出力分布  
 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果
- 図 7-4 シード燃料部軸方向出力分布  
 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果
- 図 7-5 ブランケット燃料部軸方向出力分布  
 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果
- 図 7-6 163 体 1 領域炉心体系 (Puf.14.5 燃料集合体 163 体)
- 図 7-7 163 体 2 領域炉心体系  
 (内側 Puf.14.5wt%燃料集合体 127 体、外側 Puf.18.5wt%燃料集合体 36 体)
- 図 7-8 163 体炉心体系 (炉心燃焼度計算領域分布)
- 図 7-9 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを除く炉心部分)  
 BOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系
- 図 7-10 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを含む)  
 BOC 炉心 (集合体径方向出力比) 集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系
- 図 7-11 炉心径方向出力分布 (シード平行部径方向出力比)  
 BOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系
- 図 7-12 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを除く炉心部分)  
 EOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系
- 図 7-13 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを含む)  
 EOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系
- 図 7-14 炉心径方向出力分布 (シード平行部径方向出力比)  
 EOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系
- 図 7-15 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを除く炉心部分)  
 BOC 炉心集合体 163 体(Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体)2 領域炉心体系
- 図 7-16 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを含む)  
 BOC 炉心集合体 163 体(Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体)2 領域炉心体系
- 図 7-17 炉心径方向出力分布 (シード平行部径方向出力比)  
 BOC 炉心集合体 163 体(Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体)2 領域炉心体系
- 図 7-18 炉心径方向出力分布 (上下ブランケットを除く炉心部分)  
 EOC 炉心集合体 163 体(Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体)2 領域炉心体系
- 図 7-19 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを含む)  
 EOC 炉心集合体 163 体(Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体)2 領域炉心体系
- 図 7-20 炉心径方向出力分布 (シード平行部径方向出力比)  
 EOC 炉心集合体 163 体(Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体)2 領域炉心体系
- 図 8-1 TRU 混合燃料集合体燃焼計算結果 ( $k_{eff}$ )
- 図 8-2 TRU 混合燃料集合体燃焼計算結果 (転換比 Inc.C.R.)
- 図 8-3 TRU 混合燃料集合体燃焼計算結果 (ポイド反応度係数)
- 図 8-4 FP 混合燃料集合体燃焼計算結果 ( $k_{eff}$ )

- 図 8-5 FP 混合燃料集合体燃焼計算結果 (k-eff)
- 図 8-6 FP 混合燃料集合体燃焼計算結果 (ポイド反応度係数)
- 図 9-1 多重サイクル k-eff 変化 (シード燃料 Puf.14.5wt%ベース)
- 図 9-2 多重サイクル転換比変化 (シード燃料 Puf.14.5wt%ベース)
- 図 9-3 多重サイクルポイド反応度係数の変化 (シード燃料 Puf.14.5wt%ベース)
- 図 9-4 多重サイクル k-eff 変化 (シード燃料 Puf.15.5wt%ベース)
- 図 9-5 多重サイクル転換比変化 (シード燃料 Puf.15.5wt%ベース)
- 図 9-6 多重サイクルポイド反応度係数の変化 (シード燃料 Puf.15.5wt%ベース)
- 図 9-7 多重サイクル Pu 組成化変化 (シード燃料 Puf.15.5wt%ベース)

This is a blank page.

## 1. 序論

日本原子力研究所では1997年から低減速スペクトル炉の研究を開始した。PWR型低減速スペクトル炉については当初重水を用いて高転換比を目指した炉心を開発したが、1999年度にシード・ブランケット燃料集合体を用いた軽水利用の炉心の成立性について検討を行い<sup>1)</sup>、この結果この炉心は転換比の点で改善を要することがわかった。

そこで、2000年度からは1999年度の結果の改善を目指した研究を行った。プルトニウム組成としては種々の値が使用されていたため、2000年度の研究において、プルトニウム組成を代表的なBWR組成<sup>2)</sup>に統一することにした。そこで、これまでに検討した炉心<sup>3)</sup><sup>4)</sup>を基本として、先ずプルトニウム組成(1999年度組成、2000年度組成)の影響評価を行った。さらに、燃料棒の太径化、集合体の大型化、ブランケット燃料の配置及びジルカロイ燃料被覆管の採用などを検討することによって、転換比の向上を目指した炉心の検討を行った。

その結果、転換比が約1.0でボイド反応度係数を負とする炉心を設計することができた。また、この集合体(炉心)に対して、TRUの燃焼、FPの燃焼及びプルトニウム多重サイクルの評価を行った。

本報告書ではこれらの設計研究の成果を述べると共に、転換比に対する定義の差影響、炉心特性に対するステンレススチールとジルカロイ被覆管の比較、ボイド反応度係数に対する $ZrH_{1.7}$ 棒挿入効果に等に関する検討についても述べる。

## 2. プルトニウム組成の影響

### 2.1 計算条件

#### 2.1.1 使用コード

本計算作業においては、原研で開発・整備されている「MVPコードシステム」<sup>5)</sup>を用いた。本計算で使用したMVPコードのバージョンは、以下の通りである。

- |                    |                                  |
|--------------------|----------------------------------|
| (1) 炉心計算及び非燃焼集合体計算 | : MVP v2.0beta5<br>MVP v2.0beta6 |
| (2) 集合体燃焼計算        | : MVP-BURN v1.0beta              |

#### 2.1.2 使用ライブラリ

MVPの中性断面積ライブラリはJENDL3.2を主として作成されたライブラリを用いた。<sup>7)</sup>

燃焼チェーンライブラリはMVP-BURNに用意されたもの<sup>8)</sup>を使用した。

#### 2.1.3 組成

燃料及び炉心構成要素の組成及び温度条件は各章に示した。

#### 2.1.4 計算体系

計算体系については、各章毎に示した。

### 2.2 転換比の定義

本計算においては、転換比の定義について下記の2種類を用いた。

MVP-BURNコードにおいては、標準の燃焼チェーンデータを使用すると、①のPu-241の崩壊を考慮しない式を使用する。本計算においては基本的に、U-235の吸収を考慮せずPu-241の崩壊を考慮した式②を使用する。転換比についての検討を第4章に示した。ただし、第2章においては一部定義①を使用しており、その場合には使用した転換比の定義を明示した。

#### ①MVP Default

$$\text{転換比}(t) = \frac{\text{U-238 Capture} + \text{Pu-240 Capture}}{\text{U-235 Absorption} + \text{Pu-239 Absorption} + \text{Pu-241 Absorption}}$$

#### ②本研究での統一定義

$$\text{転換比}(t) = \frac{\text{U-238 Capture} + \text{Pu-238 Capture} + \text{Pu-240 Capture}}{\text{Pu-239 Absorption} + \text{Pu-241 Absorption} + \text{Pu-241 Decay}}$$

(注) 1999年度の研究<sup>1)</sup> および2000年度の研究の初期段階まで、MVP-BURNコードにデフォルトとして組み込まれていたPu-241の崩壊が考慮されていない①の定義を使用していたため、それまでの結果は第4節で述べるように、転換比を大よそ0.05過大評価している。

### 2.3 プルトニウム組成の影響の評価

1999年度研究の2重炉心<sup>1)</sup>のプルトニウム組成を下記のように変更した計算を行った。

変更前： 1999年度組成はPWR取り出しプルトニウムを想定したもので

核分裂性Pu17.99wt%、全Pu28.0wt%で核分裂性割合65.6%

(238/239/240/241/242Pu/241Am=1.85/56.26/24.17/9.36/5.55/2.81wt%)

変更後： 2000年度組成はBWR取り出しプルトニウムを想定した組成<sup>2)</sup>で他の炉心の検討でも共通に使用することとした標準組成である。

核分裂性Pu18.00wt%、全Pu31.3wt%で核分裂性割合57.5%

(238/239/240/241/242Pu/241Am=2.7/47.9/30.3/9.6/8.5/1.0wt%)

#### (1) 集合体燃焼計算

計算した体系は、燃料ピン19.5層とし、シード燃料を15層、ブランケットは4.5層とし高さ方向にはシード部100cm×2、内部ブランケット50cm、上下に軸方向ブランケット25cmの2重炉心集合体とした。集合体の計算条件を表2-1に、集合体の体系を図2-1に示した。燃料組成としてシード燃料は1999年又は2000年組成のPu燃料とし、ブランケットは劣化U(U-235濃縮度0.2wt%)とし、被覆管はSUSとした。燃料組成と他の集合体構成要素の組成を表2-2に示した。

1999年組成、2000年組成によるk-eff、転換比、ボイド反応度の比較を図2-2に示した。反応度(k-eff)に大きな差はない。その理由は分裂性プルトニウムの富化度を同じにしているからである。転換比においては、2000年組成の場合の方が1999年組成の場合より<sup>240</sup>Puの割合が大きいいため、<sup>241</sup>Puの生成が多くなり、最大0.05大きく評価している。しかし、この<sup>240</sup>Pu割合の差がボイド反応度係数に付いては、1999年組成の場合が負であるのに対して、2000年組成の場合では正となっている。

#### (2) 炉心計算

前項(1)で計算された、シード15層、ブランケット4.5層の集合体における、0,15,30,45,60GWd/t燃焼時の組成を3バッチ取り替えを仮定した炉心の各バッチの組成とし、サイクル初期(BOC)炉心では0,15,30,45GWd/t、サイクル末期(EOC)について各バッチの組成を15,30,45,60GWd/tとした。炉心は集合体163体から成り、最外周にblanket集合体を48体配置した体系とした。炉心体系図を図2-3に示した。燃焼領域はシード部2、ブランケット部6の合計8領域とした。

上記組成を使用して、BOC、EOC炉心に対して0%ボイド及び99%ボイド状態の炉心計算を行った。1999年組成による結果を表2-3に、2000年組成による結果を表2-4に示した。1999年組成においては、BOC、EOC炉心共ボイド反応度係数は負となった。2000年組成においては、BOC、EOC炉心共ボイド反応度係数は正となり、2000年組成を用いると、集合体計算と同様にボイド反応度係数は厳しい結果となった。これは先に説明したように、<sup>240</sup>Pu割合の差による。

表 2-1 燃料集合体計算条件(燃料シード 15 層、ブランケット 4.5 層、 $ZrH_{1.7}$  36 本、炉心 100cm ×2、内部ブランケット 50cm、軸方向ブランケット上下 25cm×2、SUS 被覆管)

ケース	15-4.5( $ZrH_{1.7}$ 36 本)	
シード		
燃料ペレット	ペレット径(mm)	8.7
	材質	MOX
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	10.5
	ピン径(mm)	9.5
	被覆管肉厚(mm)	0.4
	被覆管材質	SUS316
	ギャップ(mm)	0.05
	$V_m/V_p$	0.42
ブランケット		
燃料ペレット	ペレット径(mm)	13.2
	材質	Depleted UO <sub>2</sub>
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	15
	ピン径(mm)	14.4
	被覆管肉厚(mm)	0.6
	被覆管材質	SUS316
	ギャップ(mm)	0.05
	$V_m/V_p$	0.24
燃料集合体		
燃料集合体	シード燃料棒本数	588
	ブランケット燃料棒本数	308
	$ZrH_{1.7}$ ロッド本数	36
	制御棒本数	6
	ダクト厚さ(mm)	1
	ダクト長さ(mm)	265-267
	集合体ピッチ(mm)	389.71
	炉心高さ(cm)	100×2
	中央(軸方向)ブランケット厚さ(cm)	50
	軸方向外側ブランケット厚さ(cm)	25×2
	熱出力(MW/燃料集合体)	23.52
シード部燃料体積 (cm <sup>3</sup> )		69909.42
ブランケット部燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )		161402.06
集合体燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )		231311.48
燃焼ステップ (日)	0. 3. 90. 180. 270. 360. 450. 540. 675. 810. 945. 1080. 1350.0 1620.0 1890.0 2160.0 3000.0	

炉心		
炉心条件	集合体本数	163
	炉心熱出力(MWt)	3834
	熱出力(MW/燃料集合体)	23.52



表 2-2 集合体組成 ( $\times 10^{24}$  個/cm<sup>3</sup>)

(1)シード燃料 2000 年度組成 889.4° K		1999 年度組成	2000 年度組成
Pu 富化度		全 Pu 28.0wt%	全 Pu 31.3wt%
fissile Pu		Pu-fis. 17.99wt%	Pu-fis. 18.00wt%
U-235	U05003J3	3.34250E-05	3.18964E-05
U-238	U08003J3	1.64684E-02	1.57391E-02
Pu-238	PU8003J3	1.90265E-04	1.94039E-04
Pu-239	PU9003J3	3.38517E-03	3.42967E-03
Pu-240	PU0003J3	1.52152E-03	2.16151E-03
Pu-241	PU1003J3	7.44609E-04	6.82319E-04
Pu-242	PU2003J3	4.60094E-04	6.01928E-04
Am-241	AM1003J3	1.15709E-04	7.10749E-05
O-16	O06003J3	4.58385E-02	4.58230E-02
(2)ブランケット燃料 U 富化度 0.2wt%		889.4K	
U-235	U05003J3	4.53648E-05	4.58716E-05
U-238	U08003J3	2.26371E-02	2.26350E-02
O-16	O06003J3	4.53648E-02	4.53618E-02
(3)被覆管(SUS-316)		626.0K	
Cr-nat.	CRN003J3	1.55546E-02	
Ni-nat.	NIN003J3	9.72490E-03	
Mo-nat.	MON003J3	1.24036E-03	
Fe-nat.	FEN003J3	5.83534E-02	
Mn-55	MN5003J3	1.32758E-03	
(4)冷却材(軽水)		580.5K	
H-1	H01H03J3	4.75305E-02	
O-16	O06003J3	2.37652E-02	
(5)チャンネルボックス(SUS-316)		580.5K	
Cr-nat.	CRN003J3	1.55546E-02	
Ni-nat.	NIN003J3	9.72490E-03	
Mo-nat.	MON003J3	1.24036E-03	
Fe-nat.	FEN003J3	5.83534E-02	
Mn-55	MN5003J3	1.32758E-03	
(6)ZrH <sub>1.7</sub>		580.5K	
Zr-nat.	ZRNZ03J3	3.62354E-02	
H-1	H01Z03J3	5.79766E-02	
(7)チューブ(SUS-316)		580.5K	
Cr-nat.	CRN003J3	1.55546E-02	
Ni-nat.	NIN003J3	9.72490E-03	
Mo-nat.	MON003J3	1.24036E-03	
Fe-nat.	FEN003J3	5.83534E-02	
Mn-55	MN5003J3	1.32758E-03	
(8-1)フォロワー(SUS-316)		580.5K	
C	C02C03J3	8.53137E-02	
(8-2)フォロワー(軽水)		580.5K	
H-1	H01H03J3	4.75305E-02	
O-16	O06003J3	2.37652E-02	
(9)インストルメンタル チューブ(SUS-316)		580.5K	
Cr-nat.	CRN003J3	1.55546E-02	
Ni-nat.	NIN003J3	9.72490E-03	
Mo-nat.	MON003J3	1.24036E-03	
Fe-nat.	FEN003J3	5.83534E-02	
Mn-55	MN5003J3	1.32758E-03	

表 2-3 BOC,EOC 炉心に対するボイド反応度係数の計算  
 1999 年度組成 Pu (Puf.17.99wt%) 燃料シード 15 層, ブランケット 4.5 層集合体  
 炉心 集合体燃焼領域 6 (シード 2, ブランケット 6)、炉心領域 (シード 1, ブラン  
 ケット 2/集合体) 集合体数 163 体/炉心、炉心外周にブランケット 1 層配置

BOC 炉心		
ボイド(%)	keff	error(%)
0	1.02558	0.05500
99	1.01748	0.04440
$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	-0.7762	
Pcm/%void	-7.84	
EOC 炉心		
ボイド(%)	keff	error(%)
0	1.01431	0.04950
99	1.00541	0.04530
$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	-0.8727	
pcm/%void	-8.82	
燃焼反応度	$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	1.083

表 2-4 BOC,EOC 炉心に対するボイド反応度係数の計算  
 2000 年度組成 Pu (Puf.18.00wt%) 燃料シード 15 層, ブランケット 4.5 層集合体  
 炉心 集合体燃焼領域 6 (シード 2, ブランケット 6)、炉心領域 (シード 1, ブラン  
 ケット 2/集合体) 集合体数 163 体/炉心、炉心外周にブランケット 1 層配置

BOC 炉心		
ボイド(%)	keff	error(%)
0	1.02623	0.04270
99	1.02953	0.04060
$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	0.3123	
Pcm/%void	3.15	
EOC 炉心		
ボイド(%)	keff	error(%)
0	1.01668	0.04640
99	1.01925	0.04790
$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	0.2480	
pcm/%void	2.51	
燃焼反応度	$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	0.915

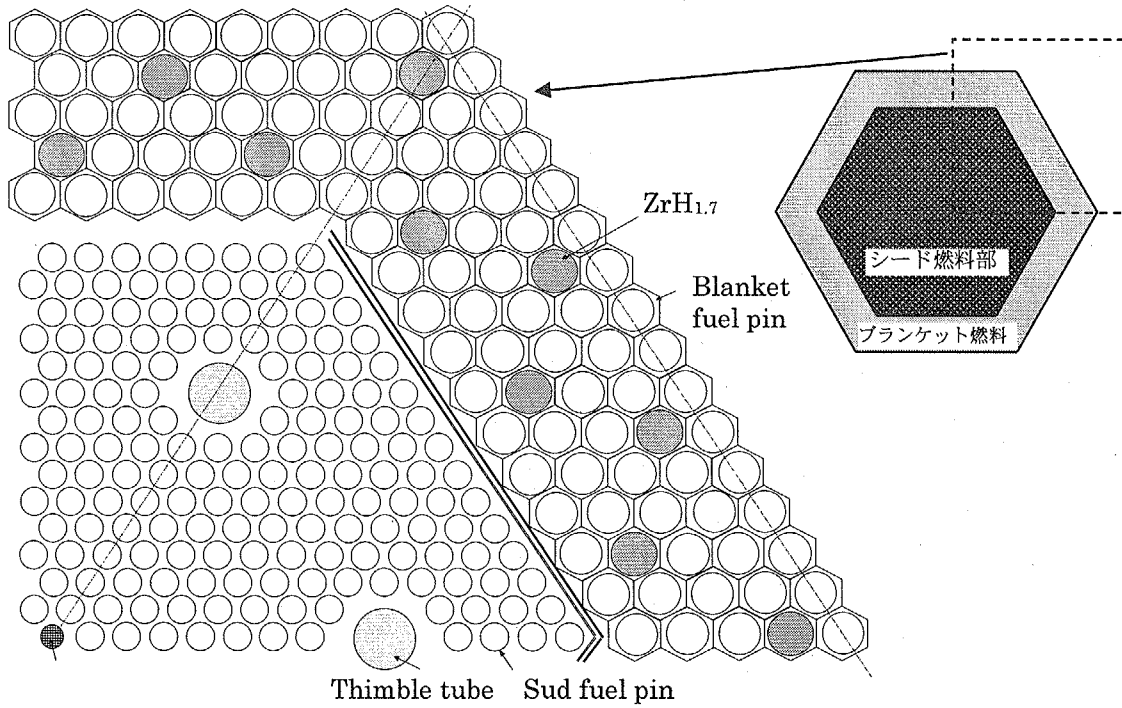


図 2-1 集合体系図 (1/4) シード 15 層、ブランケット 4.5 層

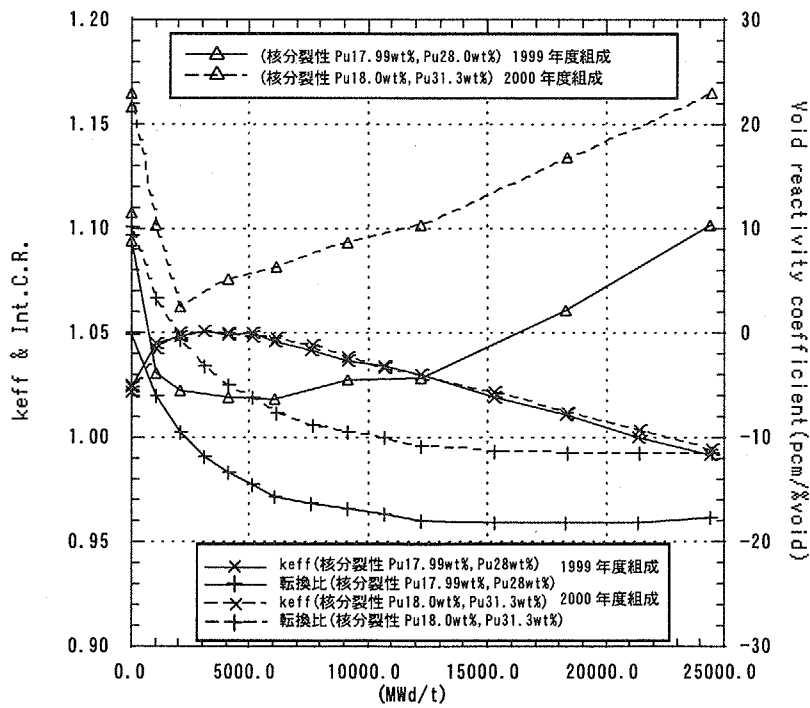


図 2-2 keff、転換比、ボイド反応度係数の Pu 組成による比較 (転換比に Pu-241 の Decay 無視)

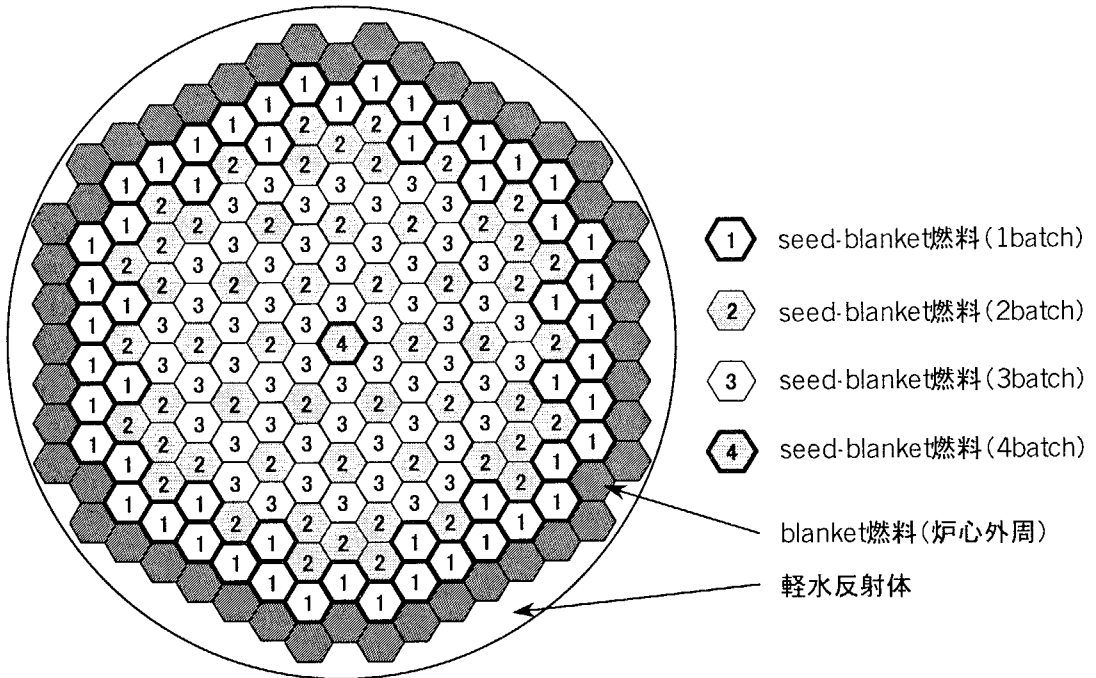


図 2-3 炉心体系図 (シード・ブランケット燃料集合体 163 体、ブランケット燃料集合体 48 体)

### 3. 各種影響評価

#### 3.1 燃料棒径（水対燃料体積比）の影響評価

太径の燃料棒を採用するために燃料棒径を 9.5 から 13.5mmに変更し ( $V_m/V_p=0.42 \rightarrow 0.33$ )、集合体のサイズを変えずにその分シード燃料棒配列を 15 層から 11 層に変更した。つまり、シード 15 層ブランケット 4.5 層の燃料集合体をシード 11 層ブランケット 4.5 層に変更して、プルトニウム組成は 2000 年度組成で富化度は核分裂性 Pu18.00wt% (全 Pu31.3wt%)

を使用して図 3-1 の燃料集合体について比較計算を行った。燃料集合体の高さ方向の形状については次の 2 種類を考えた。(シード 11 層ブランケット 4.5 層、ZrH<sub>1.7</sub>36 本)

- (1) 炉心 H=110cm×2, Inner ブランケット 30cm  
燃焼領域 8 (シード 2, ブランケット 6)
- (2) 炉心 H=100cm×2, Inner ブランケット 50cm (炉心長を 250cm に保持)  
燃焼領域 8 (シード 2, ブランケット 6)

炉心体系は(1)では、計算結果は、図 3-2 に示されているように転換比が約 0.02 改善されたが、ボイド反応度係数はほぼ同じで、期待したほどの転換比の改善が得られなかった。

更に燃料棒径は 13.5mm に固定してシード燃料ピン本数の効果を計算した。

計算した体系は、図 3-1 において燃料ピン 15.5 層とし、シード燃料を 11 層、12 層、13 層 (ブランケットは 4.5 層、3.5 層、2.5 層) とし、高さ方向には形状(1)のようにシード部 110cm×2、内部ブランケット 30cm、軸方向ブランケット (上下に) 25cm の集合体とした。

燃料組成はシード燃料は 2000 年組成の Puf 富化度 18wt%の Pu 燃料とし、ブランケットは劣化 U (U-235 濃縮度 0.2wt%) とした。

以上の条件で、無限集合体モデルによる集合体燃焼計算を行った。シード燃料 11 層、12 層、13 層(ブランケットは夫々 4.5 層、3.5 層、2.5 層)の集合体の計算結果として k-eff、転換比(Int.C.R.)の比較を図 3-3 に示した。(転換比の定義は、Pu-241 崩壊を考慮したもの。)

計算結果は、シード燃料棒数に比例し、シード燃料の割合が増加するので k-eff は大きくなるが、転換比は逆に小さくなる結果であった。また、すべてのケースにおいて転換比 1.0 以上を満たすことは出来なかった。

#### 3.2 燃焼領域分割の影響評価

燃焼領域の分割による結果への影響を見るために、シード 11 層、ブランケット 4.5 層、燃料棒径 13.5mm のケースにつき、シード部 10、ブランケット部 11 の合計 21 分割した

場合と、シード部 2、ブランケット部 6 の合計 8 分割した場合の比較を行った。k<sub>eff</sub> 及び転換比は図 3-4 に示されているように、8 分割でもよいことが分かる。ボイド反応度係数の影響も小さいが、燃焼が進んだ時点で詳細領域の方が正の方向である。更に炉心高さの影響を見るため、炉心(1)と(2)の体系につき比較計算を行った。結果は図 3-5 に示されているように燃焼度は 1 バッチ取替で 20,000MWd/t 以上、3 バッチ取替で 30,000MWd/t 以上であり、転換比は炉心長 110cm の場合約 1.01、100cm の場合約 1.02 である。但し転換比の定義に Pu-241 の崩壊の影響を入れていない(デフォルトの定義)。

### 3.3 富化度の検討

高さ方向形状(1)のシード 11 層、ブランケット 4.5 層、炉心高さ 110cm×2、内部ブランケット 30cm、軸方向ブランケット(上下に)25cm の集合体において、シード燃料富化度をパラメトリックとした検討を行った。比較した富化度は Puf.17.0wt%, 17.5wt%, 18.0wt%, 19.0wt% (共に 2000 年のプルトニウム組成) とした。また、計算条件を表 3-1、計算体系を図 3-1 に示した。

富化度の他に、ブランケット燃料層数(4.5 層から 5 層)、炉心高さ(100cm×2 と 110cm×2)の検討も行った。

Puf18.0wt%におけるブランケット燃料層数、炉心高さの差による k<sub>eff</sub> と転換比の比較を図 3-6 に、Pu 富化度による比較を図 3-7、シード燃料列数による比較を図 3-8 に示した。いずれも燃焼度の小さい領域での比較であるが、計算結果から、炉心高さを高くすると k<sub>eff</sub> は大きくなる(0.005)が、ブランケット部分の割合が減少するので転換比は小さくなる(約 0.03)、また、ブランケット燃料層数を増やすと、転換比はかなり大きくなる(約 0.05)が、反応度(k<sub>eff</sub>)は小さくなる(約 0.02)。富化度に関しては、k<sub>eff</sub> は富化度に比例し大きくなり(約 0.02/1wt%)、転換比は小さくなる(約 0.04/1wt%)。

### 3.4 燃料棒間ギャップの検討

シード燃料棒間ギャップを 1.0mm から 0.8mm に変えた場合の効果の検討を行った。計算条件は表 3-1 において、シード燃料のペレット径を 12.5mm、燃料ピン径を 13.7mm と 0.2mm 太くして、集合体サイズを同じにしたものである。計算結果を図 3-9 に示した。ギャップを 0.8mm とすると、k<sub>eff</sub>(約 0.01 の増加)、転換比(約 0.005 の増加)は良くなるが、ボイド反応度係数は正側(～5.0pcm/%void)となってしまう事が分かった。富化度を 0.5wt%下げることが出来るので、転換比は合計で約 0.025 向上する。

表 3-1 燃料集合体計算条件(シード 11 層、ブランケット 4.5 層)集合体燃焼計算用 8 領域  
 プルトニウム組成=2000 年度組成

項目		11-4.5(ZrH <sub>1.7</sub> 36 本)
シード		
燃料 ペレット	ペレット径(mm)	12.3
	材質	MOX
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	14.5
	ピン径(mm)	13.5
	被覆管肉厚(mm)	0.6
	被覆管材質	SUS316
	ギャップ(mm)	0.05
	Vm/Vp	0.33
ブランケット		
燃料 ペレット	ペレット径(mm)	13.2
	材質	Depleted UO2
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	15
	ピン径(mm)	14.4
	被覆管肉厚(mm)	0.6
	被覆管材質	SUS316
	ギャップ(mm)	0.05
	Vm/Vp	0.23
燃料集合体		
燃料 集合体	シード燃料棒本数	288
	ブランケット燃料棒本数	308
	ZrH <sub>1.7</sub> ロッド本数	36
	制御棒本数	6
	ダクト厚さ(mm)	1
	ダクト長さ(mm)	265-267
	集合体ピッチ(mm)	389.71
	炉心高さ(cm)	110×2
	中央(軸方向)ブランケット厚さ(cm)	30
	軸方向外側ブランケット厚さ(cm)	25×2
	熱出力(MW/燃料集合体)	23.52
	シード部燃料体積 (cm <sup>3</sup> )	75286.18
ブランケット部燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )	153824.14	
集合体燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )	229110.32	
燃焼ステップ (日)	0. 3. 90. 180. 270. 360. 450. 540. 675. 810. 945. 1080. 1350.0 1620.0 1890.0 2160.0 3000.0	

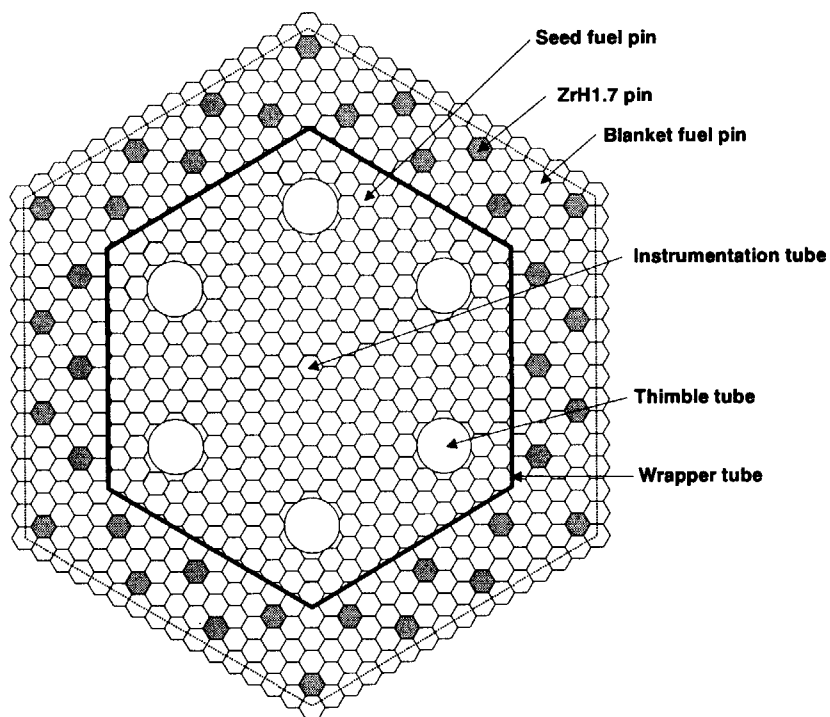


図 3-1 シード・ブランケット燃料集合体 (シード 11 層, ブランケット 4.5 層)

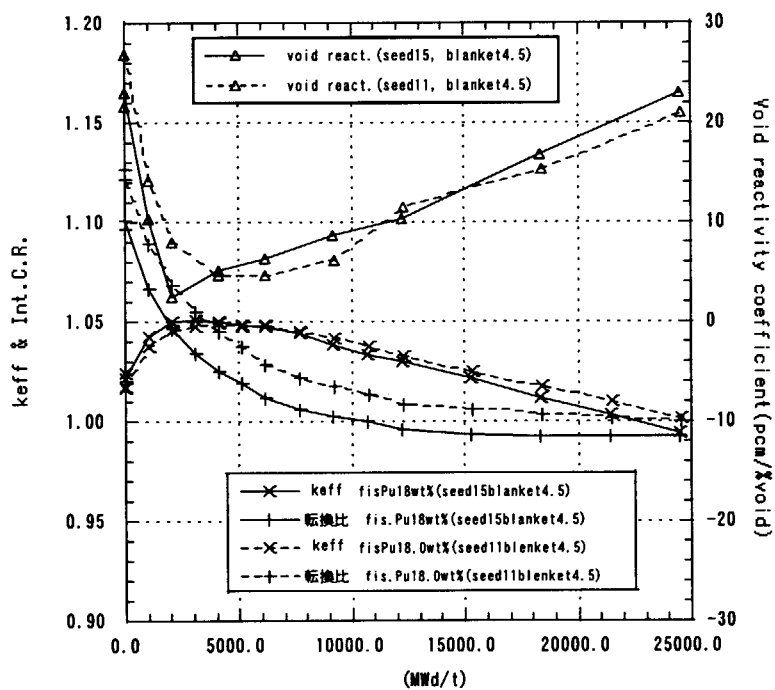


図 3-2 keff、転換比、ポイド反応度のシード燃料層数による比較 (2000 年度組成炉心)



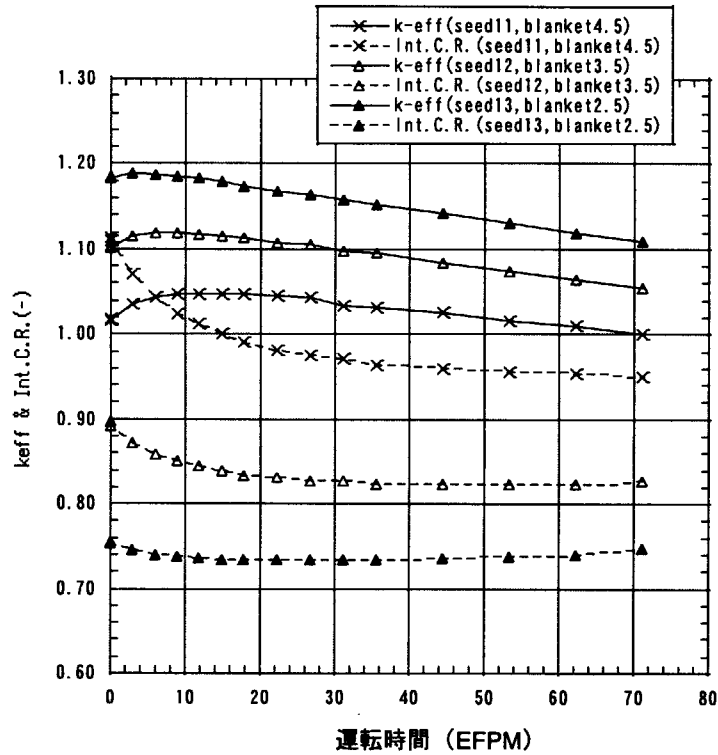


図 3-3 keff、転換比の燃料集合体シード層数 11,12,13 (ブランケット層数 4.5,3.5,2.5) による比較 (燃焼領域数 8)

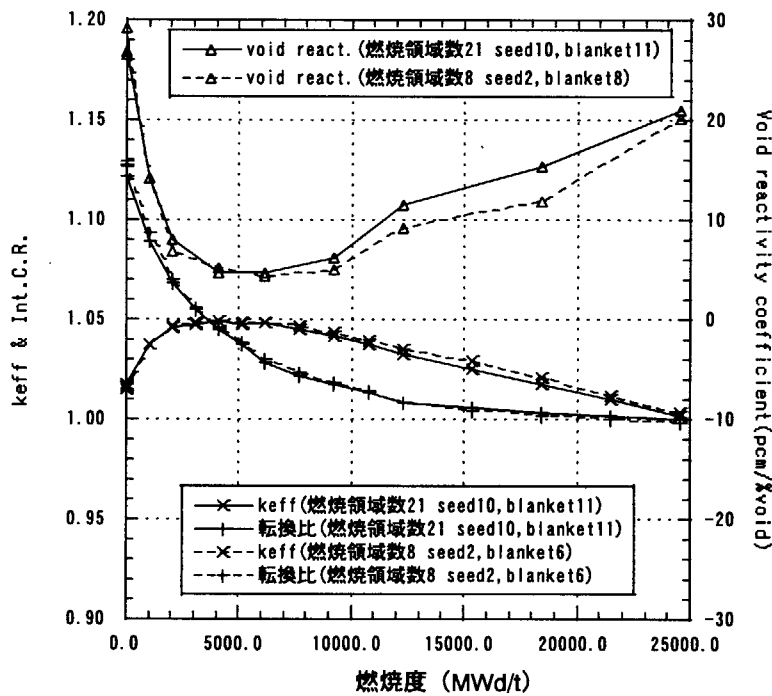


図 3-4 keff、転換比、ボイド反応度の燃焼領域数による比較  
(シード 11 層ブランケット 4.5 層, 2000 年度組成, 炉心高さ 110cm×2, 内部ブランケット 30cm)

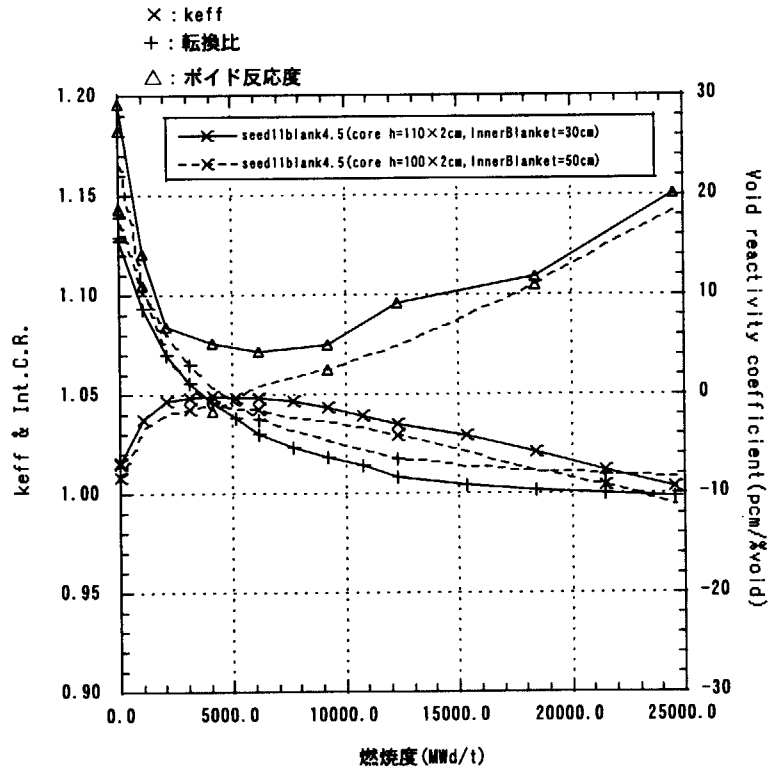


図 3-5 keff、転換比、ボイド反応度の炉心（シード部）高さによる比較  
 (燃焼領域シード部 2、ブランケット部 6)

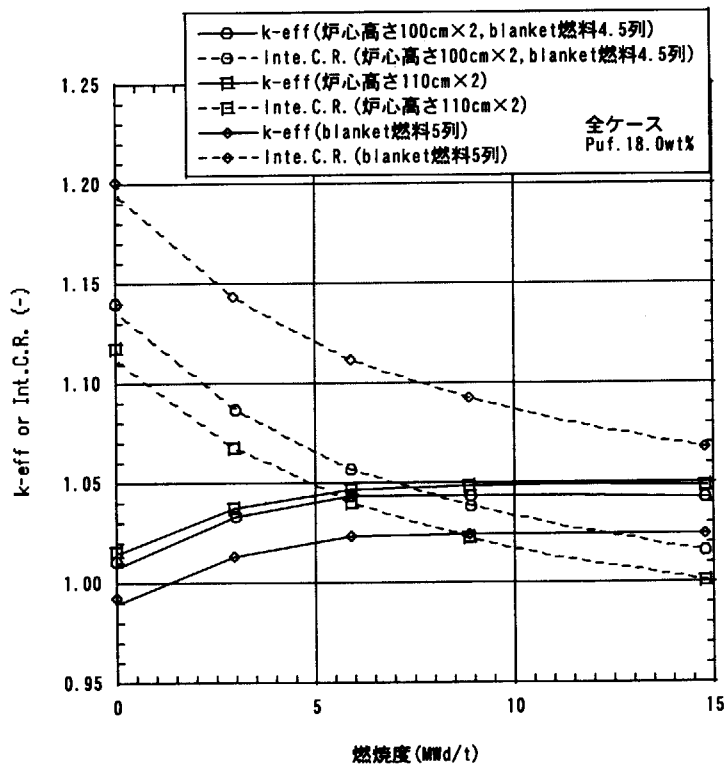


図 3-6 シード・ブランケット集合体パラメータ計算 (集合体体系) Puf.18.0wt%  
 k-eff or Int.C.R.

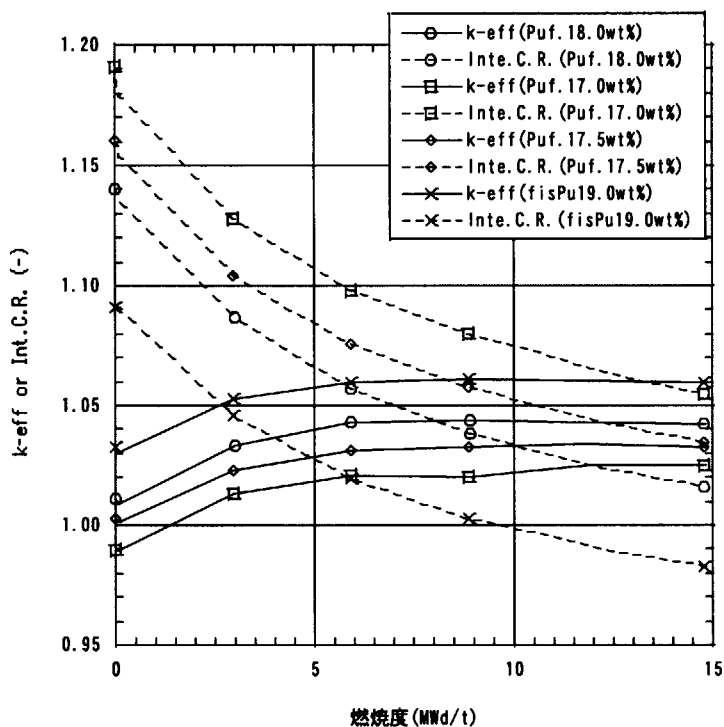


図 3-7 シード-ブランケット集合体パラメータ計算 (核分裂性 Pu 富化度)  
k-eff or Int.C.R

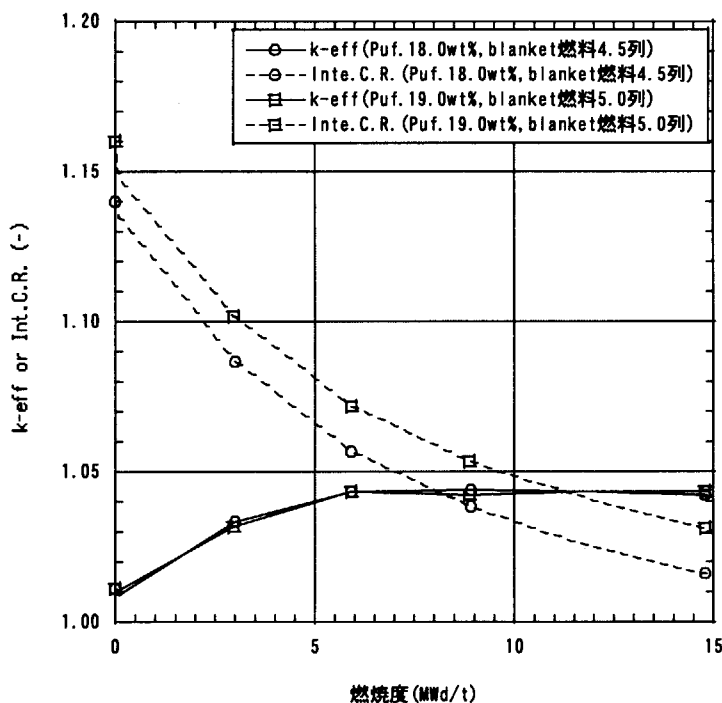


図 3-8 シード-ブランケット集合体パラメータ計算 (パラメータ組み合わせ)  
k-eff or Int.C.R.

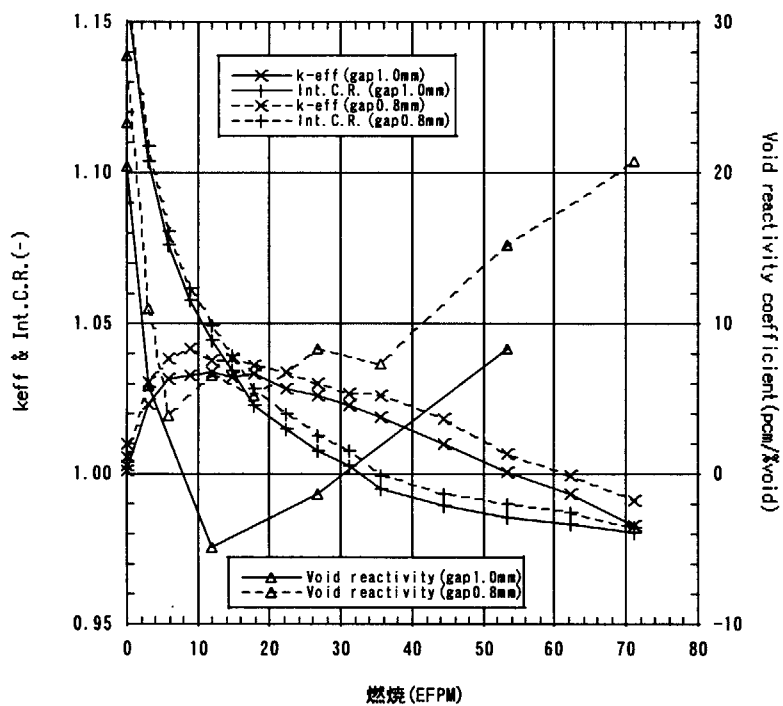


図 3-9 燃料集合体 (Puf.17.0wt%, シード 11 層、ブランケット 4.5 層、ZrH<sub>1.736</sub> 本) (燃焼領域 8) の燃焼による実効増倍率、転換比、ボイド反応度係数の変化の燃料棒間ギャップの差による比較

## 4. 転換比の検討

## 4.1 Pu-241 崩壊の転換比への影響

シード 11 層、ブランケット 4.5 層、炉心高さ 110cm×2、内部ブランケット 30cm、軸方向ブランケット(上下に)25cm の集合体において Pu-241 の崩壊を考慮の有無等(2.2 節の式①、②)による差を評価した。計算条件は表 3-1、計算体系は図 3-1 である。

計算結果を図 4-1 に示した。Pu-241 の崩壊を考慮した場合(式②)は考慮しない場合(式①)と比較して、転換比が 0.05 程度低くなる。Pu-241 の影響が大きいことを示している。

## 4.2 格子燃焼における転換比(SRAC 計算)

シード燃料及びブランケット燃料の格子燃焼計算を SRAC コード<sup>6)</sup> を用いて行い、燃料別、核種毎の影響を検討した。計算条件を表 4-1 に示した。

計算結果として、シード燃料の  $k_{\text{inf}}$ 、転換比を図 4-2、転換比の式の各因子を図 4-3、組成変化を図 4-4 に示した。ブランケット燃料の  $k_{\text{inf}}$ 、転換比を図 4-5、転換比の式の各因子を図 4-6、組成変化を図 4-7 に示した。図 4-2 と図 4-5 より、シード の転換比は炉心末期でも 0.6 に達しておらず、一方ブランケットの転換比は炉心末期でも 2.0 を越えており、炉心全体としての転換比にはブランケットの役割が大きいことが分かる。

表 4-1 燃料格子計算条件  
Puf 富化度 18.0wt%、プルトニウム組成=2000 年度組成

項目	単位	シード燃料ピン	ブランケット燃料ピン
燃料ペレット径	mm	12.3	13.2
被覆管厚さ	mm	0.6	0.6
ピン径	mm	13.5	14.4
格子ピッチ	mm	14.5	15
燃料ペレット体積	cm <sup>2</sup>	1.18823	1.36848
燃料棒体積	cm <sup>2</sup>	1.43139	1.62860
燃料ペレット体積	cm <sup>2</sup>	1.82082	1.94856
燃料棒体積	cm <sup>2</sup>	0.38943	0.31996
H 原子数	(#×10 <sup>24</sup> /cm <sup>3</sup> )	1.8051E-02	1.5208E-02
HM 原子数	(#×10 <sup>24</sup> /cm <sup>3</sup> )	2.8239E-02	3.2522E-02
H/HM	(-)	0.655	0.468
Vm/Vf	(-)	0.328	0.234
格子メッシュ (cm)	1(燃料)	0.3897	0.4157
	2(燃料)	0.5511	0.5879
	3(燃料)	0.6150	0.6600
	4(被覆管)	0.6750	0.7200
	5(減速材)	0.7250	0.7500
線出力	(W/cm)	200.0	70.0

対象燃料集合体(シード 11 層、ブランケット 4.5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 36 本、炉心 110cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 25cm×2)

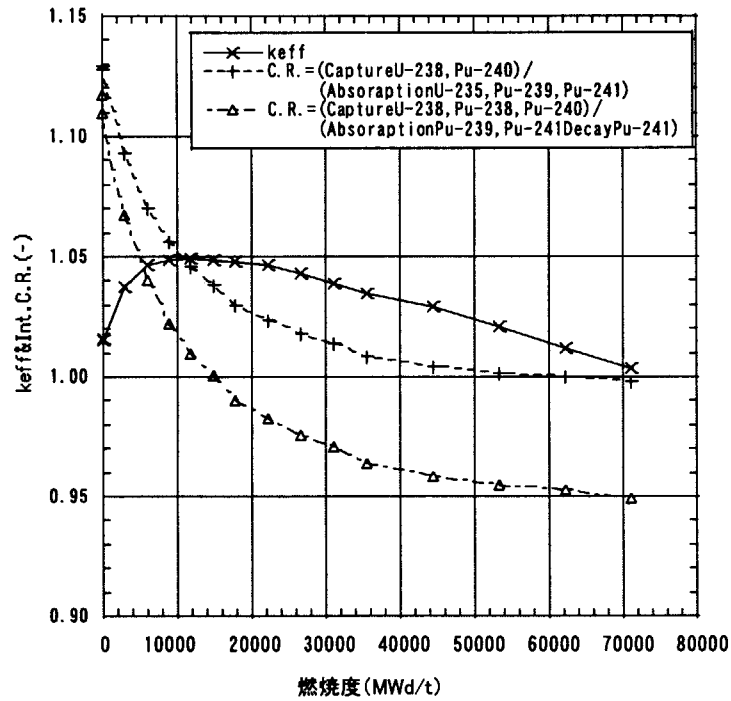


図 4-1 転換比定義による転換比の差  
シード 11, ブランケット 4.5, 核分裂 Pu18wt%(2000 年度組成 Pu)  
炉心高さ=110cm×2

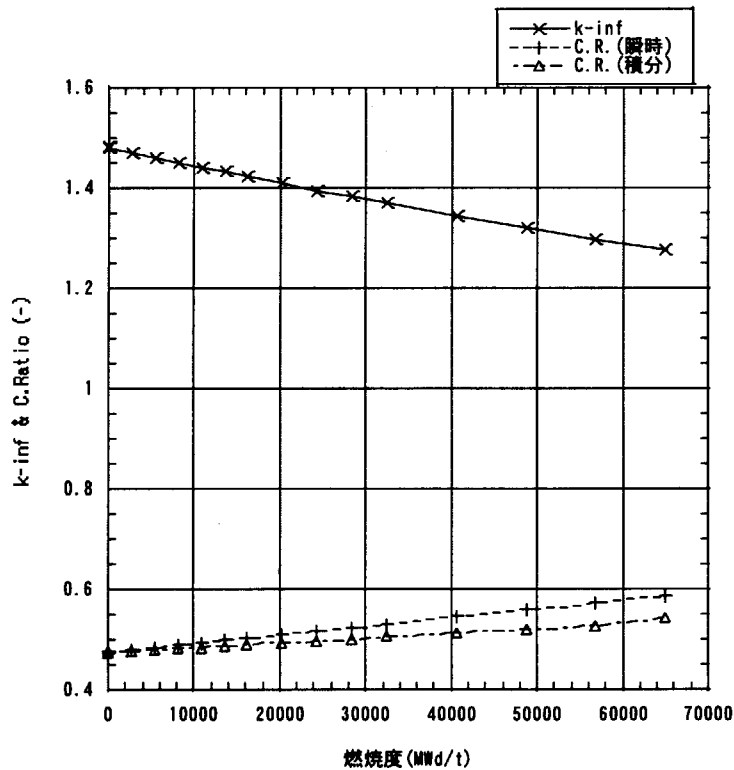


図 4-2 無限格子燃焼計算による  $k_{\infty}$  と転換比：シード燃料 (Pu18.0wt%2000 年度組成)

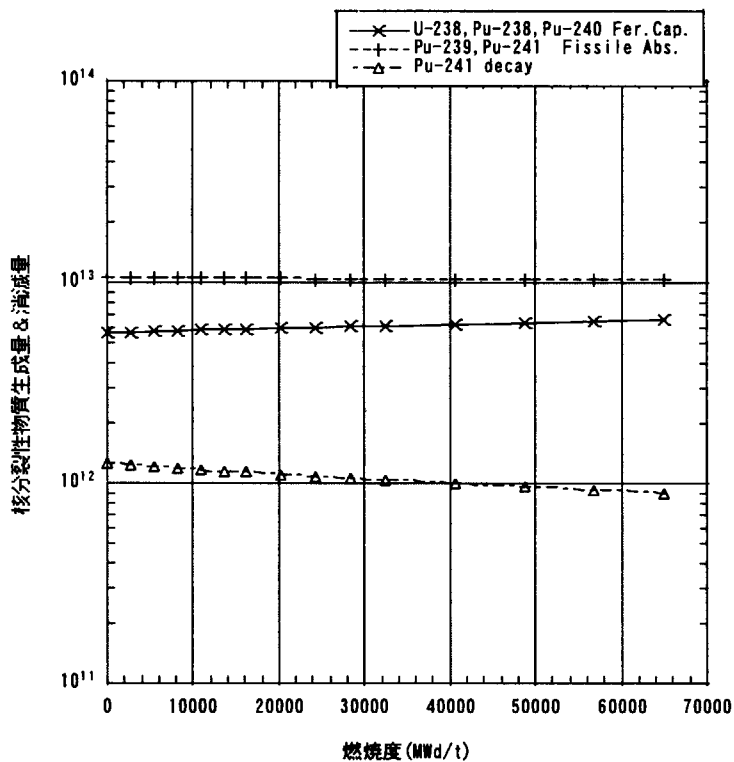


図 4-3 無限格子燃焼計算による核分裂性物質生成量&消費量：シード燃料 (Puf.18.0wt%2000 年度組成)

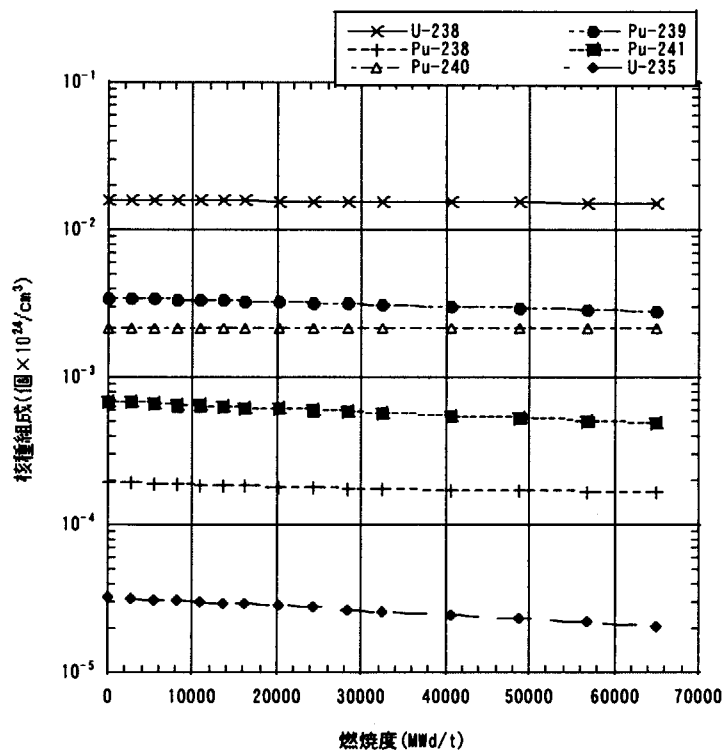


図 4-4 無限格子燃焼計算による核種組成：シード燃料 (Puf.18.0wt%2000 年度組成)

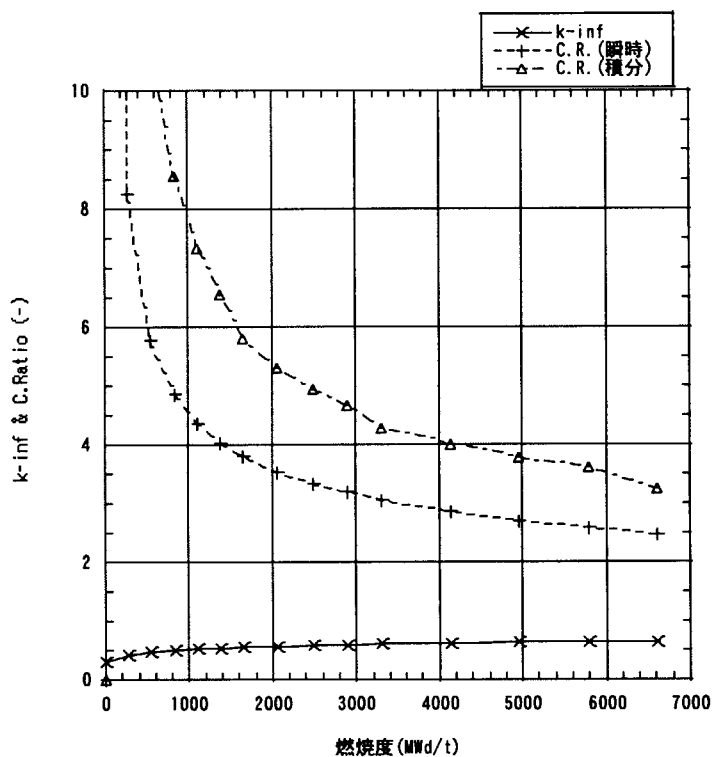


図 4-5 無限格子燃焼計算による  $k_{\infty}$  と転換比：ブランケット燃料（劣化 U-235 0.2wt%）

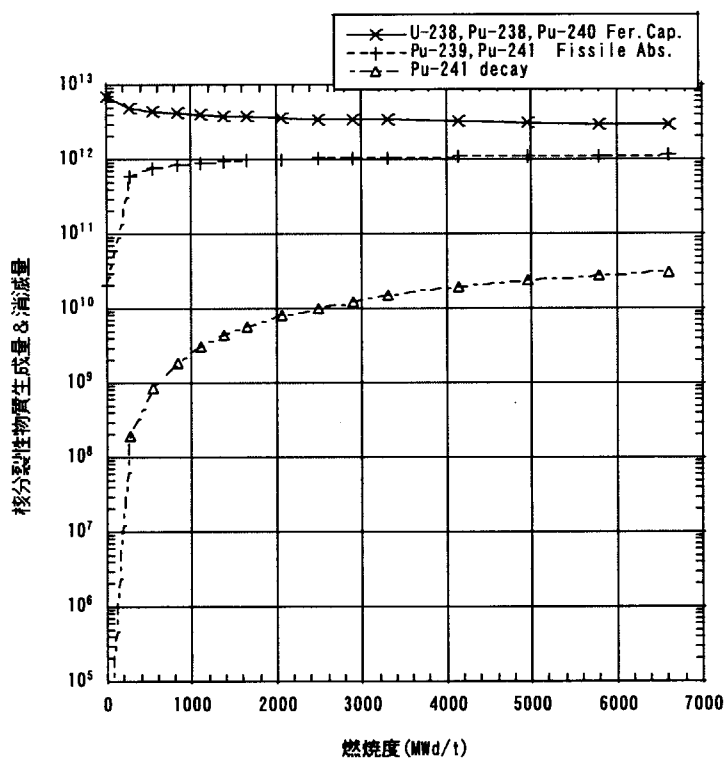


図 4-6 無限格子燃焼計算による核分裂性物質生成量&消滅量：ブランケット燃料（劣化 U-235 0.2wt%）



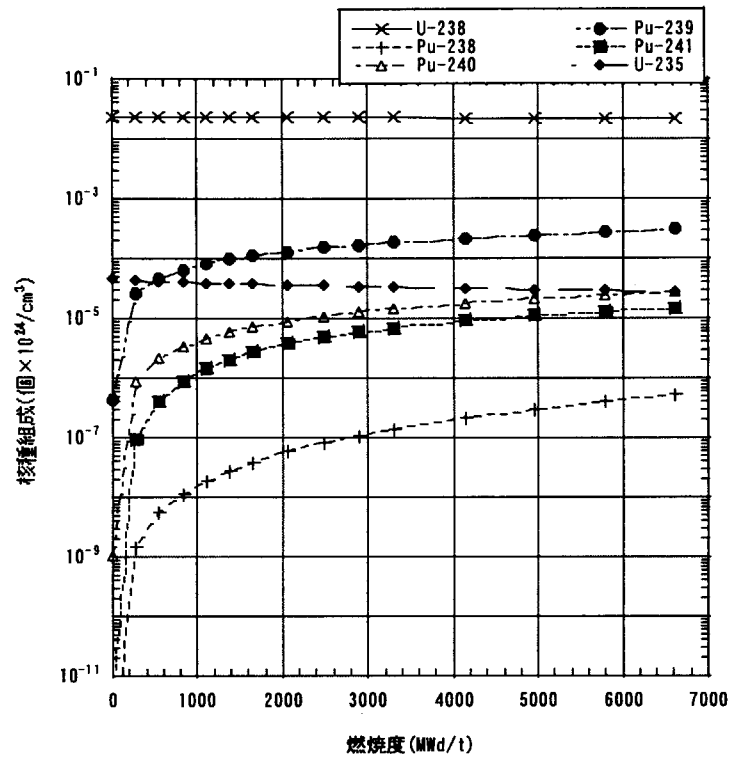


図 4-7 無限格子燃焼計算による核種組成：ブランケット燃料（劣化 U-235 0.2wt%）

## 5. 集合体の大型化とジルカロイ被覆管の採用

### 5.1 集合体燃焼計算(18層モデル)

前章までの結果では、転換比の改善が見込まれないと考えられるため、新たな集合体の検討を行うこととした。

18層(シード13層、ブランケット5層)とし、シード燃料とブランケット燃料のピン径を同じとし、被覆管をSUSからZry-4に変更した集合体の評価を行った。

計算条件を表5-1に、集合体の形状を図5-1に示した。シード燃料について2種類の富化度について検討しているが163体集合体の炉心体系において外側36体を富化度18.5wt%、内側127体を14.5wt%の配置とすることを想定したためである。163体集合体炉心体系は図2-3に示した体系と同じである。keff、転換比、ボイド反応度係数について結果を図5-2に示す。図5-2にはシード燃料のプルトニウム富化度としては、図2-3の163体集合体炉心において想定している18.5wt%(外側36体)、14.5wt%(内側127体)の他に富化度が15.5wt%の場合の結果も参考のため示している。富化度14.5wt%の場合は転換比が1.0を超え、ボイド反応度係数は炉心寿命を通じて負に保たれることが分かる。富化度が上昇するとkeffは大きくなるが、転換比は減少し、ボイド反応度係数は正側に移行する。各領域の燃焼度を図5-3に示す。シード部の燃焼度に比べて集合体平均(ブランケット、軸方向内部ブランケットを含む)の燃焼度は約1/2である。シード部に軸方向内部ブランケットのみ含めた平均はシード平均よりわずかに小さい。60EFPM、つまり5年間連続運転してもシード部の燃焼度は約40,000MWd/t、集合体平均燃焼度は約20,000MWd/tと小さい。

### 5.2 ブランケット燃料のシード燃料領域内への配置

計算は前節の計算の他に、ブランケット燃料をシード燃料領域に配置した集合体<sup>4)</sup>についてMVP-BURNによる燃焼計算を実施した。

- (1) 16層の集合体(199集合体炉心)中心にブランケット領域が在る集合体(図5-4)
- (2) 16層の集合体(199集合体炉心)中にブランケットが分散配列された集合体(図5-5)

の2ケースに対して行った。

(1)及び(2)については図5-2と同様な結果を同時に図5-6に示す。各領域の燃焼度を図5-7に示す。(2)のブランケット分散配置は中心配置に比べてkeffが約0.01Δk低下しているがボイド反応度係数が負になっており、明らかに分散配置の方が優れていることが分かる。

燃料ピン16層の集合体の場合、ブランケットを集合体中心に配置した場合と分散配置した場合は富化度17wt%では燃焼度に余裕があり(図5-6で60EFPM以上3バッチ

取替を想定すると、図5-6で40 EFPMあれば取り出し燃焼度は60 EFPM相当になる。)、15wt%程度に下げることが可能で、この場合いずれのケースもポイド係数、転換比の設計条件を満たすと予想される。明らかに分散配置の方がポイド係数を負にする効果が大きい。

表 5-1 燃料集合体計算条件 (燃料 18 層モデル、シード 13 層、ブランケット 5 層、 $ZrH_{1.7}$  無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) プルトニウム組成=2000 年度組成

ケース		集合体 163 体炉心
シード		
燃料 ペレット	ペレット径(mm)	10.38
	材質	MOX
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	13
	ピン径(mm)	12
	被覆管肉厚(mm)	0.76
	被覆管材質	Zry-4
	ギャップ(mm)	0.05
	$V_m/V_p$ (ピンセル平均)	0.39
ブランケット		
燃料 ペレット	ペレット径(mm)	10.38
	材質	Depleted UO2
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	13
	ピン径(mm)	12
	被覆管肉厚(mm)	0.76
	被覆管材質	Zry-4
	ギャップ(mm)	0.05
	$V_m/V_p$ (ピンセル平均)	0.39
燃料集合体		
燃料 集合体	シード燃料棒本数	427
	ブランケット燃料棒本数	444
	タイロッド本数	6
	$ZrH_{1.7}$ ロッド本数	0
	制御棒本数	6
	内対面間距離(mm)	398
	外対面間距離(mm)	400
	ラッパ管肉厚(mm)	1
	ラッパ管間ギャップ(mm)	1
	炉心高さ(cm)	100×2
	中央(軸方向)ブランケット厚さ(cm)	30
	軸方向外側ブランケット厚さ(cm)	20×2
	熱出力(MW/燃料集合体)	17.79
シード部燃料体積 (cm <sup>3</sup> )		72267.40
ブランケット部燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )		126738.75
集合体燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )		199006.15
シード体積率		36.314
炉心		
炉心条件	集合体本数	163
	炉心熱出力(MWt)	2900
	熱出力(MW/燃料集合体)	17.79

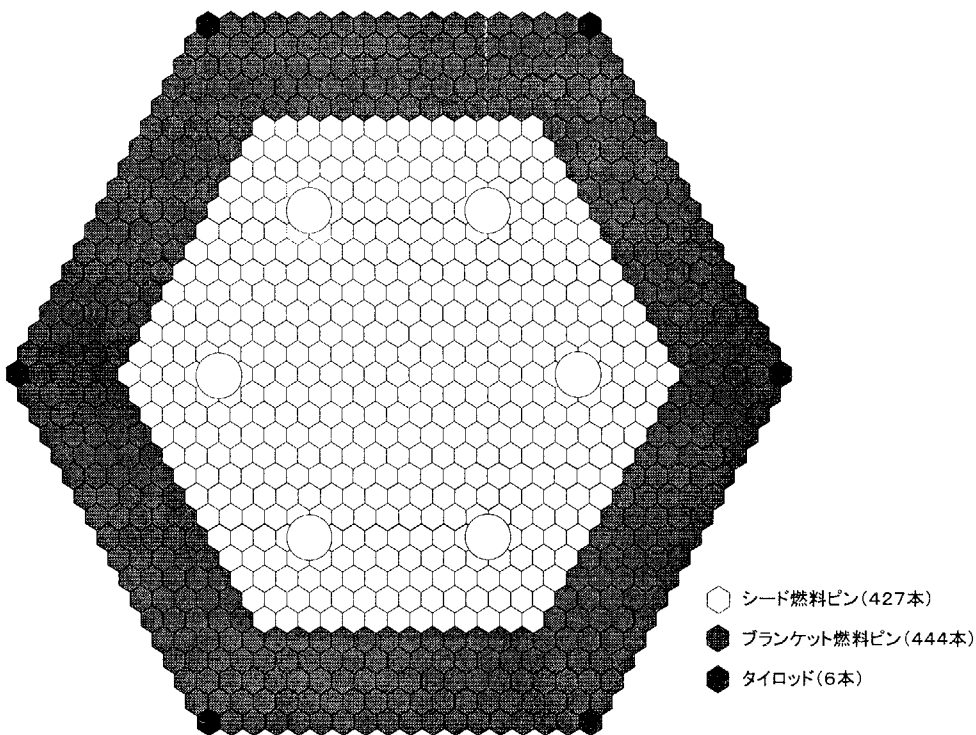


図 5-1 燃料集合体内ブランケット燃料ピン及び制御棒案内管配置 (18層シード13層ブランケット5層)

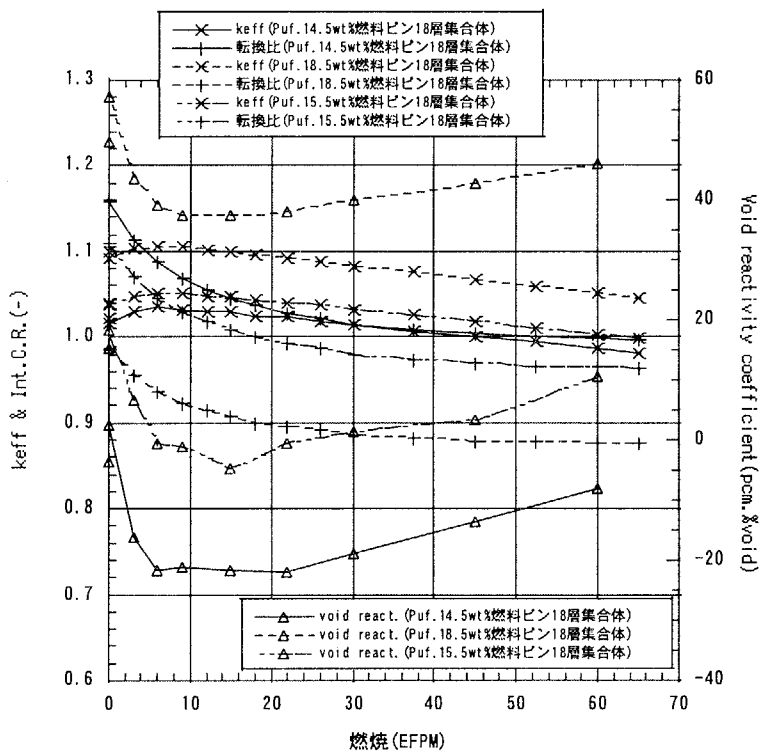


図 5-2 燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果 (Puf.14.5wt%, Puf.18.5wt%集合体)

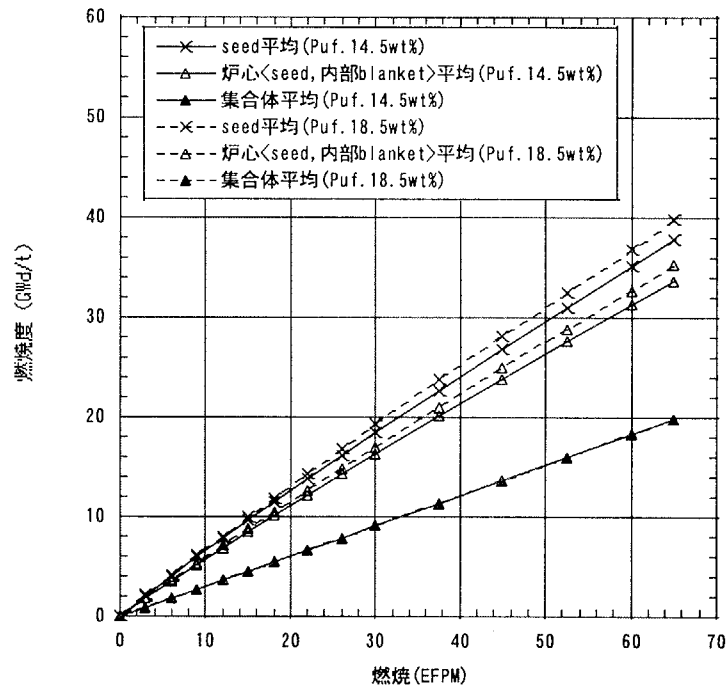


図 5-3 燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼度 (Puf.14.5wt%, Puf.18.5wt%集合体)

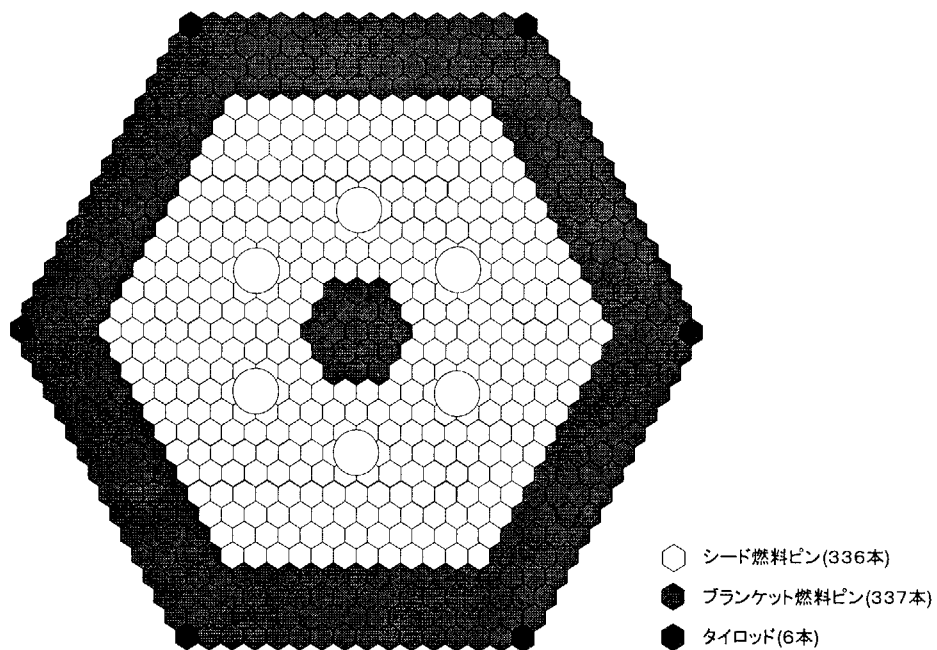


図 5-4 ブランケット燃料中央配置燃料集合体 (燃料ピン 16 層)

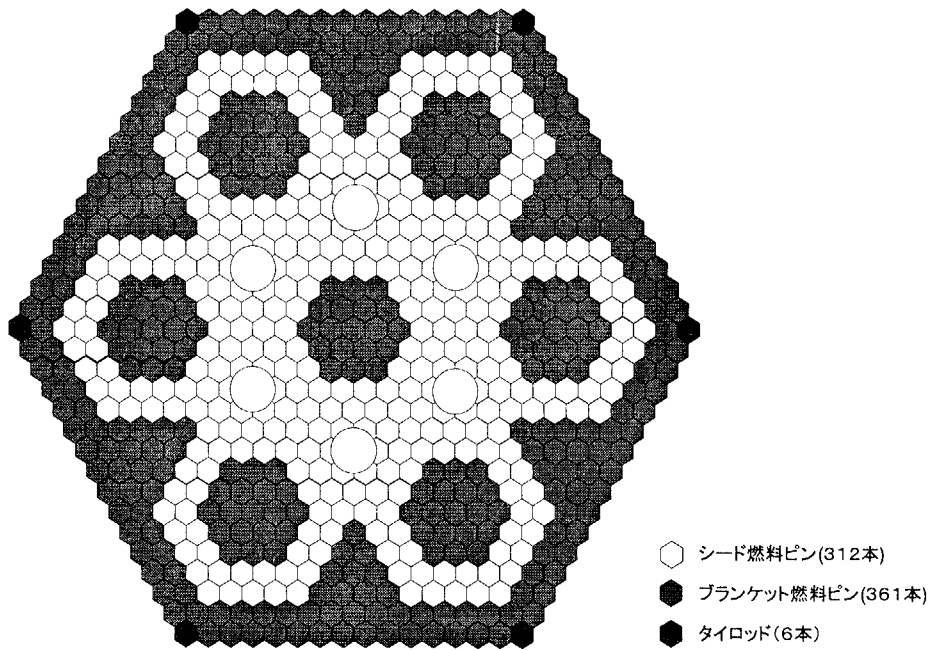


図 5-5 ブランケット燃料分散配置燃料集合体 (燃料ピン 16 層)

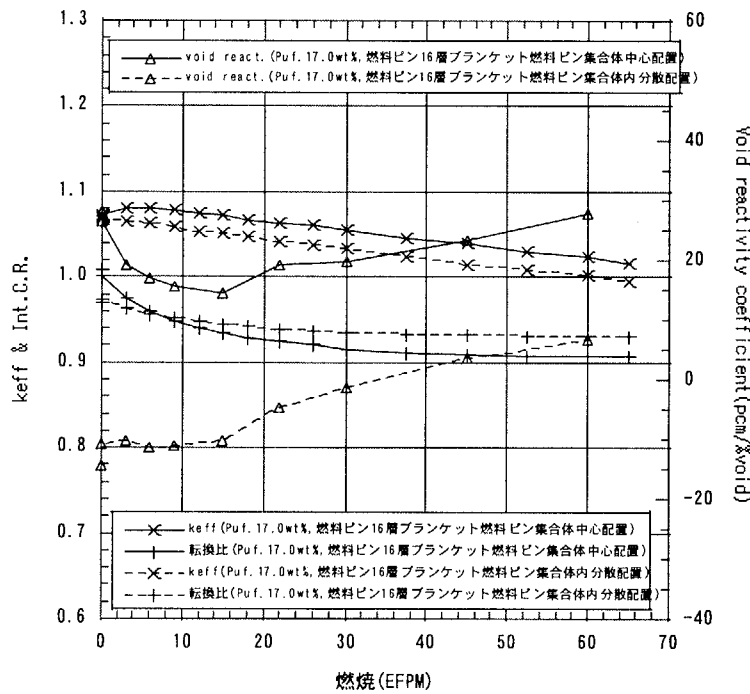


図 5-6 燃料ピン 16 層 (ブランケット中央または分散配置) 集合体燃焼計算結果 keff, Int.C.R., ボイド反応度係数

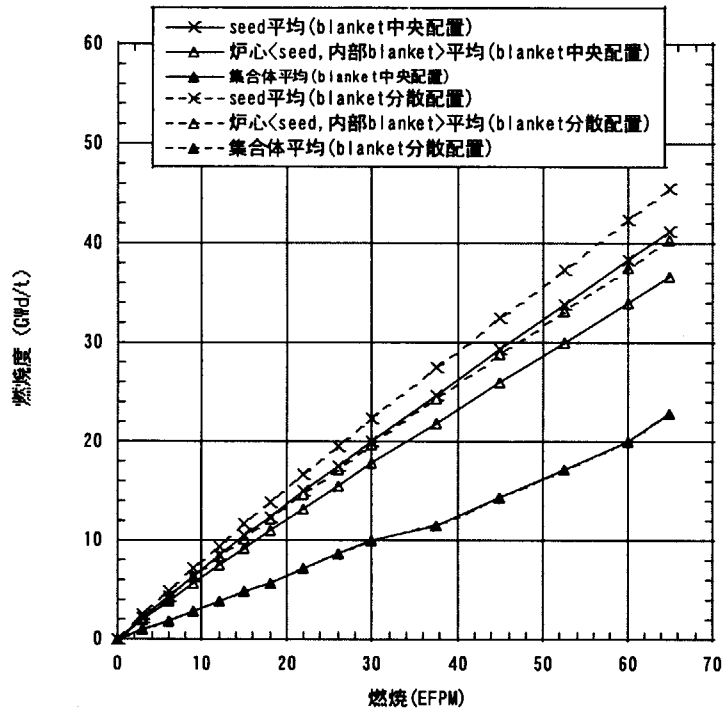


図 5-7 燃料ピン 16 層 (ブランケット中央又は分散配置) 集合体燃焼度 (Pu f.17.0wt% 集合体)



## 6. ステンレススチールとジルカロイ被覆管の比較及び ZrH<sub>1.7</sub>の効果

### 6.1 ステンレススチールとジルカロイ被覆管の比較

被覆管を Zry-4 にした方が炉心核的性能は向上するが、材料面から SUS は有望なので 5.1 節で計算した集合体のうち、Puf.14.5wt%の集合体と、5.2 節の(1)のシード燃料富化度 Puf.17.0wt%でブランケットを分散配置した集合体において、被覆管を Zry-4 から SUS にした場合の評価を行った。

Puf.14.5wt%集合体において被覆管を SUS にした場合の計算条件を表 6-1 に、ブランケット分散配置集合体において被覆管を SUS にした場合の計算条件を表 6-2 に示した。

Zry-4 被覆管との比較を図 6-1 に示した。SUS 被覆管の場合 Zry-4 と比較して、反応度は BOL で約  $0.04 \Delta k$ 、EOL で約  $0.02 \Delta k$  下がり、転換比は若干良くなる(約 0.02)が、ボイド反応度係数は Zry-4 で負だったものが正となる結果であった。

そこで分散配置の計算を行った。シード燃料富化度 Puf.17.0wt%でブランケット 分散配置集合体の計算結果について Zry-4 被覆管との比較を図 6-2 に示した。SUS 被覆管の場合 Zry-4 と比較して、反応度は大きく下がり(BOL で  $0.04 \Delta k$ 、EOL で  $0.02 \Delta k$ )、転換比は 0.02 良くなるが、ボイド反応度係数は Zry-4 で負であったものが正となる結果であった。これらは概ね図 6-1 に示した結果と同じ傾向にある。

被覆管材質において、Zry-4 と SUS を比較すると、Zry-4 は反応度、ボイド反応度係数において効果があり、SUS は同じ燃料富化度の場合転換比で比較すると多少メリットが有るのみで、反応度の低下を補うべく燃料富化度を調整する必要があり、この場合逆に転換比は減少する。したがって、炉心性能上は明らかに Zry-4 が有利である。

### 6.2 ZrH<sub>1.7</sub>の効果

シード燃料富化度 Puf.17.0wt%でブランケットを分散配置し、被覆管を SUS とした集合体において、blanket 燃料 31 本を ZrH<sub>1.7</sub>に置き換えた計算を行い、ボイド反応度が改善されるか評価を行った。計算体系を図 6-3 に示した。

計算結果として、ZrH<sub>1.7</sub>無しの Zry-4 被覆管、SUS 被覆管の結果との比較を図 6-4 に示した。ボイド係数は ZrH<sub>1.7</sub>無しの SUS 被覆管の結果より 15~20pcm/%void 改善されたが、Zry-4 被覆管のボイド反応度係数ほどには改善されなかった。反応度は ZrH<sub>1.7</sub>の挿入により約  $1.6\% \Delta k/k$  低下した。

そこで、ZrH<sub>1.7</sub>を入れた炉心において、シード燃料の核分裂性富化度を 17.0wt%から 18.0wt%とした場合の評価も行った。計算結果として、ZrH<sub>1.7</sub>無しの Zry-4 被覆管、SUS 被覆管でシード燃料富化度 17.0wt%の結果との比較を図 6-5 に示した。ボイド係数は ZrH<sub>1.7</sub>無しの SUS 被覆管の結果より若干改善されたが、Pu 富化度の増加による効果をうち消す程度であった。

結局 ZrH<sub>1.7</sub>の挿入効果は得られなかった。

表 6-1 燃料集合体計算条件 (燃料 18 層モデル、シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、SUS 被覆管) プルトニウム組成=2000 年度組成

ケース		集合体 163 体炉心
シード		
燃料 ペレット	ペレット径(mm)	10.9
	材質	MOX
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	13
	ピン径(mm)	12
	被覆管肉厚(mm)	0.5
	被覆管材質	SUS
	ギャップ(mm)	0.05
	Vm/Vp(ピンセル平均)	0.36
ブランケット		
燃料 ペレット	ペレット径(mm)	10.9
	材質	Depleted UO2
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	13
	ピン径(mm)	12
	被覆管肉厚(mm)	0.5
	被覆管材質	SUS
	ギャップ(mm)	0.05
	Vm/Vp(ピンセル平均)	0.36
燃料集合体		
燃料 集合体	シード燃料棒本数	427
	ブランケット燃料棒本数	444
	タイロッド本数	6
	ZrH <sub>1.7</sub> ロッド本数	0
	制御棒本数	6
	内対面間距離(mm)	398
	外対面間距離(mm)	400
	ラップ管肉厚(mm)	1
	ラップ管間ギャップ(mm)	1
	炉心高さ(cm)	100×2
	中央(軸方向)ブランケット厚さ(cm)	30
	軸方向外側ブランケット厚さ(cm)	20×2
	熱出力(MW/燃料集合体)	17.79
シード部燃料体積 (cm <sup>3</sup> )		79689.44
ブランケット部燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )		139755.11
集合体燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )		219444.55
シード体積率		36.314
炉心		
炉心条件	集合体本数	163
	炉心熱出力(MWt)	2900
	熱出力(MW/燃料集合体)	17.79

表 6-2 燃料集合体計算条件 (ブランケット燃料分散配置モデル、シード 312 本、ブランケット 361 本、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、SUS 被覆管)

Puf 富化度 17.0wt%、プルトニウム組成=2000 年度組成

ケース		集合体 199 体炉心
シード		
燃料 ペレット	ペレット径(mm)	10.9
	材質	MOX
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	13
	ピン径(mm)	12
	被覆管肉厚(mm)	0.5
	被覆管材質	SUS
	ギャップ(mm)	0.05
	Vm/Vp(ピンセル平均)	0.36
ブランケット		
燃料 ペレット	ペレット径(mm)	10.9
	材質	Depleted UO <sub>2</sub>
	密度(%T.D.)	95
燃料棒	燃料棒ピッチ(mm)	13
	ピン径(mm)	12
	被覆管肉厚(mm)	0.5
	被覆管材質	SUS
	ギャップ(mm)	0.05
	Vm/Vp(ピンセル平均)	0.36
燃料集合体		
燃料 集合体	シード燃料棒本数	312
	ブランケット燃料棒本数	361
	タイロッド本数	6
	ZrH <sub>1.7</sub> ロッド本数	0
	制御棒本数	6
	内対面間距離(mm)	353
	外対面間距離(mm)	355
	ラッパ管肉厚(mm)	1
	ラッパ管間ギャップ(mm)	1
	炉心高さ(cm)	100×2
	中央(軸方向)ブランケット厚さ(cm)	30
	軸方向外側ブランケット厚さ(cm)	20×2
	熱出力(MW/燃料集合体)	14.57
シード部燃料体積 (cm <sup>3</sup> )		58227.41
ブランケット部燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )		111331.93
集合体燃料体積合計(cm <sup>3</sup> )		169559.34
シード体積率		34.340
炉心		
炉心条件	集合体本数	199
	炉心熱出力(MWt)	2900
	熱出力(MW/燃料集合体)	14.57

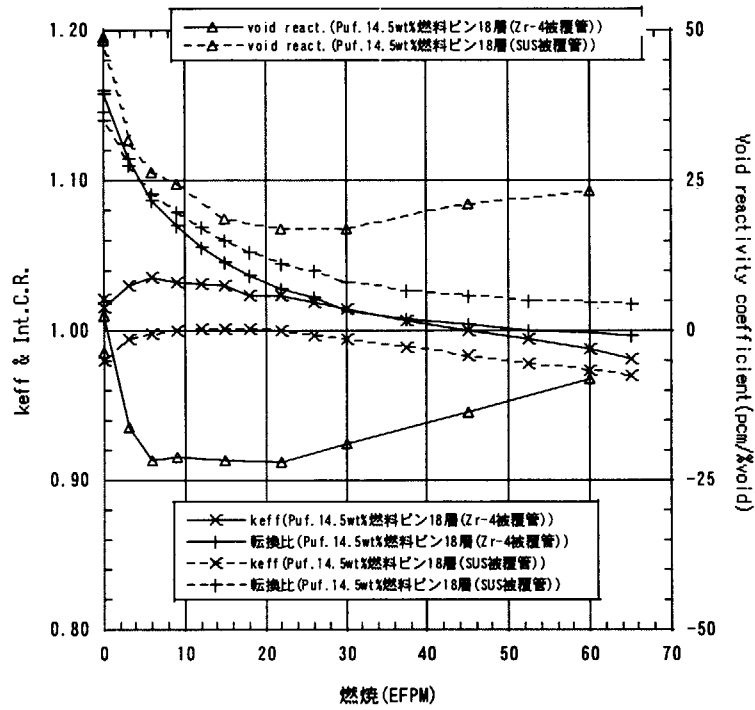


図 6-1 燃料ピン 18 層 (Puf.14.5wt%, シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果被覆管材質 (Zry-4, SUS) による差

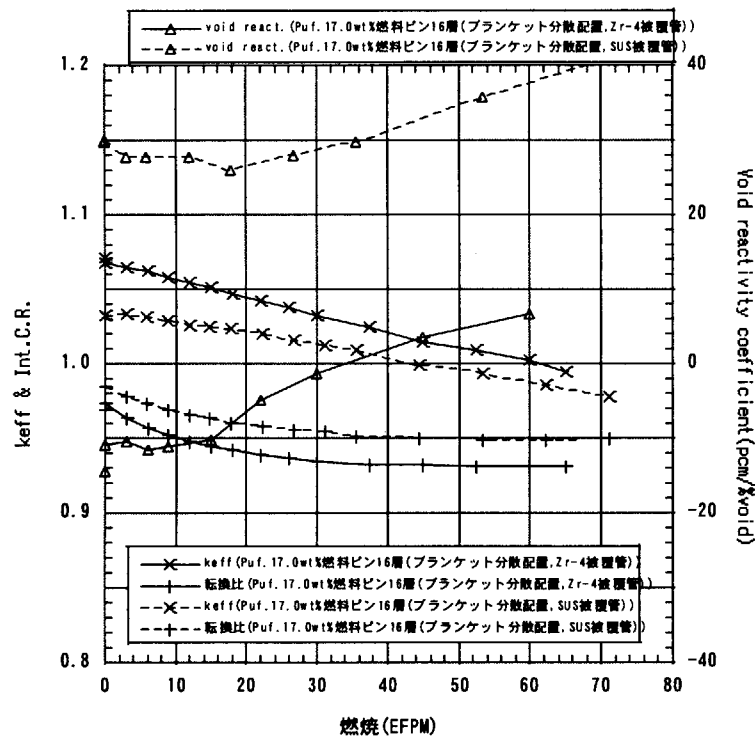


図 6-2 燃料ピン 16 層 (ブランケット分散配置) 集合体燃焼計算結果被覆管材質 (Zry-4, SUS) による差

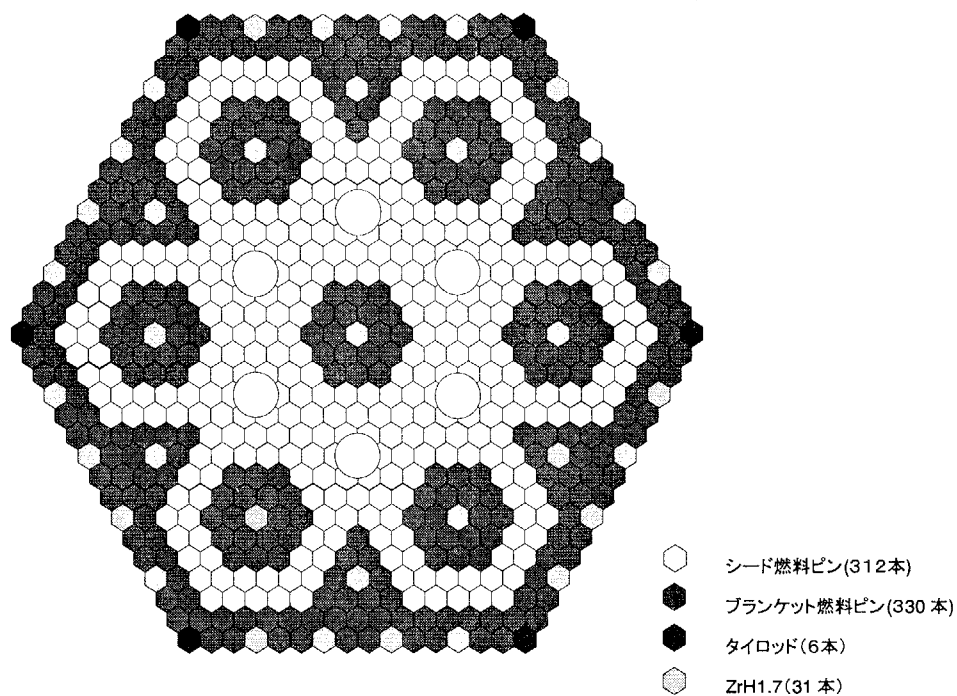


図 6-3 ブランケット燃料分散配置燃料集合体 (燃料ピン 16 層) ZrH<sub>1.7</sub>有り

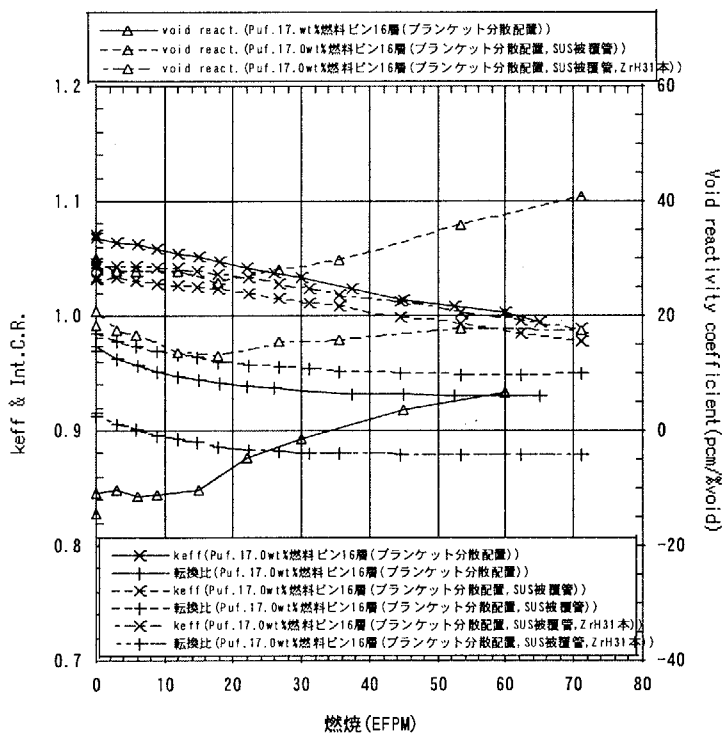


図 6-4 燃料ピン 16 層 (ブランケット燃料ピン集合体内分散配置) 集合体燃焼計算結果 被覆管 (Zry-4, SUS) 及び ZrH<sub>1.7</sub> の影響(1) Puf17.0wt%一定

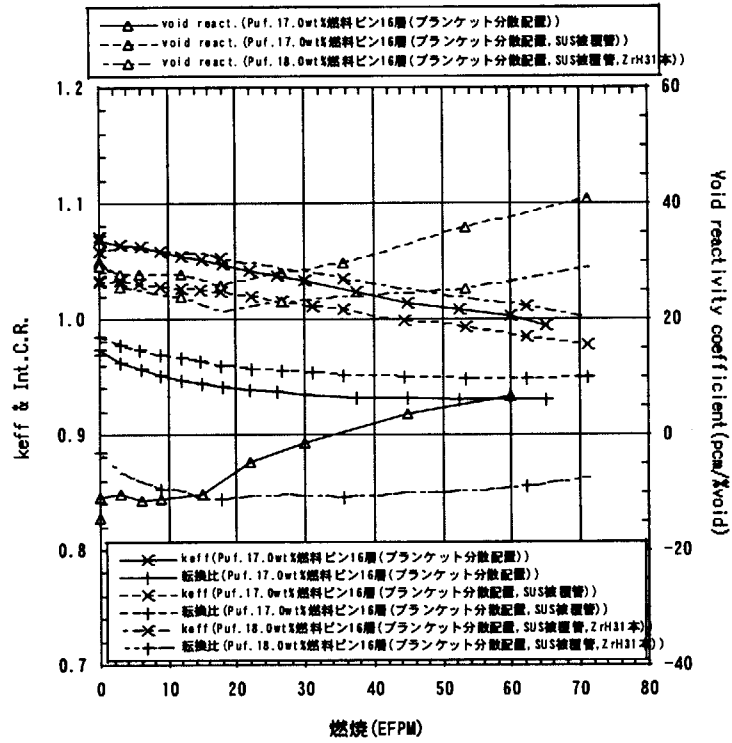


図 6-5 燃料ピン 16 層 (ブランケット燃料ピン集合体内分散配置) 集合体燃焼計算結果  
被覆管 (Zry-4, SUS) 及び ZrH<sub>1.7</sub> の影響(2)  
ZrH<sub>1.731</sub> 本挿入の場合 Puf 富化度を 18.0wt%とした

## 7. 炉心設計計算

### 7.1 集合体燃焼計算

前章の18層(シード13層、ブランケット5層)集合体計算を使用し、炉心計算を行う事とした。

集合体の計算条件を表5-1に、集合体の体系を図5-1に示した。また、燃料(Puf.14.5wt%、Puf.18.5wt%)及び構成要素の組成を表7-1に示した。

集合体燃焼燃焼計算結果として、図5.2からPuf.14.5wt%とPuf.18.5wt%の比較のみを取り出して図7-1に示した。Puf.14.5wt%の場合30EFPM時点で $k_{eff}=1.0143$ であり、サイクル長15ヶ月の3サイクル運転の可能性を示している。又転換比は45EFPM時で $\sim 1.0$ である。

また、Puf.14.5wt%燃料集合体の0,15,30,45,60(EFPM)における軸方向出力分布をシード燃料部について図7-2に、ブランケット燃料について図7-3に示した。シード燃料部の軸方向ピーキングは約2.5である。同様に、Puf.18.5wt%燃料集合体の0,15,30,45,60EFPMにおける軸方向出力分布をシード燃料部について図7-4に、ブランケット燃料について図7-5に示した。シード燃料部のピーキングは富化度が高くなったので、約2.7と高くなっている。

### 7.2 炉心計算

18層(シード13層、ブランケット5層)集合体計算を使用し、炉心計算を行った。つまり、炉心燃焼計算を直接行う代わりに集合体計算により集合体の燃焼度をBOC炉心においては、各バッチの燃焼度を炉滞在バッチ数に応じて0,15,30,45(EFPM)とし、EOC炉心では、各バッチの燃焼度を15,30,45,60(EFPM)とした。集合体の計算条件は表5-1と同様である。Puf.14.5wt%集合体163体炉心(炉心1)の体系を図7-6に、Puf.14.5wt%集合体127体(炉心内側)とPuf.18.5wt%集合体36体(炉心外側)の163体の集合体からなる炉心(炉心2)の体系図を図7-7示した。両炉心とも炉心外側に48体の板厚10mmのステンレス製冷却材チャンネル集合体を配置した。

炉心内の燃料集合体の滞在バッチ数分布と燃焼度計算領域分布を図7-8に示した。炉心中心にのみ4バッチ燃料集合体を配置した。

Puf.14.5wt%集合体163体から成る炉心のBOC、EOC及びボイド99%の結果を表7-2に示した。EOCでの $k_{eff}$ は1.0087であり、約0.9% $\Delta k/k$ の余裕を持ってサイクル長15ヶ月の3サイクル運転が可能である。ボイド反応度はBOC、EOCとも負となった。又取り出し燃料の内部ブランケットを含む集合体平均燃焼度は24.8Gwd/tである。

出力分布を求めるにあたり、下記の3種類の出力分布を算出した。

- ① 集合体内シード部平均/炉心平均、集合体内ブランケット部平均/炉心平均

- ② (集合体内シード部+シード上中下ブランケット)平均/炉心平均、集合体内径方向ブランケット平均/炉心平均
- ③ 集合体内シード部平均/炉心シード平行部分平均、集合体内シード燃料と平行なブランケット平均/炉心シード平行部分平均

BOC 炉心①による出力分布マップを図 7-9 に、②による出力分布マップを図 7-10 に、③による出力分布マップを図 7-11 に、また、EOC 炉心①による出力分布マップを図 7-12 に、②による出力分布マップを図 7-13 に、③による出力分布マップを図 7-14 に示した。図 7-9 によると出力分布では、BOC の 2 バッチ目燃料で最大(4.85)と成っている。

Puf.14.5wt%集合体 127 体、Puf.18.5wt%集合体 36 体(合計 163 体)から成る 2 領域炉心の BOC、EOC 及びボイド 99%の結果を表 7-3 に示した。EOC での  $k_{eff}$  は炉心外周部に 18.5wt%の燃料集合体を配置したので 14.5wt%の 1 領域炉心に比べて  $k_{eff}=1.0124$  と高くなっている。出力分布を求めるにあたり、Puf.14.5wt%163 体炉心と同様の 3 種類の出力分布を算出した。

BOC 炉心①による出力分布マップを図 7-15 に、②による出力分布マップを図 7-16 に、③による出力分布マップを図 7-17 に、また、EOC 炉心①による出力分布マップを図 7-18 に、②による出力分布マップを図 7-19 に、③による出力分布マップを図 7-20 に示した。

図 7-15 によると出力分布では、BOC の 1 バッチ目燃料で最大(3.27)と成っている。1 領域炉心の最大値 4.85 と比べて、2 領域炉心による出力分布の平坦化が得られている。

炉心計算と集合体計算の比較は、富化度 14.5wt%の 1 領域炉心の場合に対して表 7-4 に示す。炉心計算では炉心周方向からの中性子のもれにより反応度が約 0.6%  $\Delta k/k$  減少し、ボイド反応度係数は EOC で約 -12pcm/%void だけ負側に移向している。

(1) 富化度 14.5wt%の 1 領域炉心と(2) 富化度 14.5 及び 18.5wt%の 2 領域炉心に対する炉心計算の結果の比較を表 7-5 に示す。炉心 (1)、(2) 両方の結果は予想されたより反応度、ボイド反応度係数への影響が小さいことを示している。

反応度では、約 0.5%  $\Delta k/k$ 、2 領域炉心方が大きく、ボイド反応度係数は 2 領域炉心の方が BOC で -2.6pcm/%ボイドだけ負側で、EOC で逆に +4.4pcm/%ボイドだけ正側である。ボイド反応度係数に関しては炉心計算ベースでは十分な余裕がある。また、反応度にも多少余裕があるので、ブランケットにチューブインシエル型燃料を採用して転換比を上げられる可能性がある。

図 7-9~図 7-20 から得られた出力分布最大値の比較を表 7-6 に示す。



表 7-1 集合体組成 ( $\times 10^{24}$  個/cm<sup>3</sup>)

(1)シード燃料		原子密度	
fissile Pu		Pu-fis. 14.5wt%	Pu-fis. 18.5wt%
U-235	U05003J3	3.42210E-05	3.10377E-05
U-238	U08003J3	1.68606E-02	1.52922E-02
Pu-238	PU8003J3	1.53951E-04	1.96421E-04
Pu-239	PU9003J3	2.71976E-03	3.47003E-03
Pu-240	PU0003J3	1.71325E-03	2.18587E-03
Pu-241	PU1003J3	5.40554E-04	6.89672E-04
Pu-242	PU2003J3	4.76634E-04	6.08120E-04
Am-241	AM1003J3	5.63077E-05	7.18408E-05
O-16	O06003J3	4.51106E-02	4.50904E-02
(2)ブランケット燃料 U 富化度 0.2wt%			
U-235	U05003J3	4.57607E-05	4.57607E-05
U-238	U08003J3	2.25462E-02	2.25462E-02
O-16	O06003J3	4.51838E-02	4.51838E-02
(3)被覆管(Zry-4)		626.0K	
Zr-nat.	ZRN003J3	4.20668E-02	
Fe-nat.	FEN003J3	2.64655E-04	
Cr-nat.	CRN003J3	7.52205E-05	
H-01	H01003J3	9.70022E-05	
C-12	C02003J3	8.79186E-05	
(4)冷却材(軽水)		580.5K	
H-1	H01H03J3	4.75305E-02	
O-16	O06003J3	2.37652E-02	
(5)チャンネルボックス(Zry-4)		580.5K	
Zr-nat.	ZRN003J3	4.20668E-02	
Fe-nat.	FEN003J3	2.64655E-04	
Cr-nat.	CRN003J3	7.52205E-05	
H-01	H01003J3	9.70022E-05	
C-12	C02003J3	8.79186E-05	
(6)ZrH <sub>1.7</sub>		580.5K	
Zr-nat.	ZRZN03J3	3.62354E-02	
H-1	H01Z03J3	5.79766E-02	
(7)チューブ(Zry-4)		580.5K	
Zr-nat.	ZRN003J3	4.20668E-02	
Fe-nat.	FEN003J3	2.64655E-04	
Cr-nat.	CRN003J3	7.52205E-05	
H-01	H01003J3	9.70022E-05	
C-12	C02003J3	8.79186E-05	
(8)フォロワー(軽水)		580.5K	
H-1	H01H03J3	4.75305E-02	
O-16	O06003J3	2.37652E-02	
(9)構造材その他(SUS-316)		580.5K	
Cr-nat.	CRN003J3	1.55546E-02	
Ni-nat.	NIN003J3	9.72490E-03	
Mo-nat.	MON003J3	1.24036E-03	
Fe-nat.	FEN003J3	5.83534E-02	
Mn-55	MN5003J3	1.32758E-03	

U-235 濃縮度 0.2wt%

Pu 組成

Pu-238 2.7wt%

Pu-239 47.9wt%

Pu-240 30.3wt%

Pu-241 9.6wt%

Pu-242 8.5wt%

Am-241 1wt%

表 7-2 BOC、EOC 炉心 (Puf.14.5wt%163 体、冷却材チャンネル 48 体) 計算結果

炉心				
燃料集合体		シード 13 層、ブランケット 5 層		
集合体数 (本)		163		
Pu 富化度 核分裂性 Pu(wt%)		14.5		
炉心高さ(cm)		100cm×2		
軸方向ブランケット		中央 30cm、上下各 20cm		
フォロワー		H <sub>2</sub> O		
BOC 炉心			error(%)	CPU
keff	ボイド 0(%)	1.01687	0.0512	2h58m22s
	ボイド 99(%)	0.99443	0.0677	5h57m21
反応度	$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	-2.2195		
反応度係数	pcm/%void	-22.42		
EOC 炉心			error(%)	CPU
keff	ボイド 0(%)	1.00874	0.0479	3h6m59s
	ボイド 99(%)	0.98307	0.0691	6h2m36s
反応度	$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	-2.5883		
反応度係数	pcm/%void	-26.14		
燃焼反応度		$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	0.793	

計算ヒストリー数	
ボイド 0%	NPART(1200000) NHIST(10000) NSKIP(20)
ボイド 99%	NPART(1200000) NHIST(10000) NSKIP(20)

炉心平均燃焼度

		BOC	EOC
燃焼(EFPM)		15.18	30.18
燃焼度 (GWd/t)	シード燃料平均	9.49	18.46
	シード燃料+内部ブランケット	8.40	16.37
	集合体平均	4.62	9.19

注) 取り出し 45EFPM、3 バッチ燃料交換を仮定、但し中心燃料集合体のみ 4 バッチ燃料集合体各バッチ燃焼月数 (EFPM) は

BOC	0,15,30,(45)
EOC	15,30,45,(60)

表 7-3 BOC、EOC 炉心 (Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体、冷却材チャンネル 48 体) 計算結果

炉心				
燃料集合体		シード 13 層、ブランケット 5 層		
集合体数	(本)	163	( 127	36 )
Pu 富化度	核分裂性 Pu(wt%)	14.5	18.5	
炉心高さ(cm)	100cm×2			
軸方向ブランケット	中央 30cm、上下各 20cm			
フォロー	H <sub>2</sub> O			
BOC 炉心			error(%)	CPU
keff	ボイド 0(%)	1.02262	0.0540	3h1m47s
	ボイド 99(%)	0.99738	0.0571	5h56m21
反応度	$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	-2.4745		
反応度係数	pcm/%void	-24.99		
EOC 炉心			error(%)	CPU
keff	ボイド 0(%)	1.01244	0.0571	3h9m7s
	ボイド 99(%)	0.99093	0.0759	5h55m3s
反応度	$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	-2.1442		
反応度係数	pcm/%void	-21.66		
燃焼反応度	$\Delta \rho$ (% $\Delta k/k$ )	0.983		

計算ヒストリー数	
ボイド 0%	NPART(1200000) NHIST(10000) NSKIP(20)
ボイド 99%	NPART(1200000) NHIST(10000) NSKIP(20)

炉心平均燃焼度

		BOC	EOC
燃焼(EFPM)		15.18	30.18
燃焼度 (GWd/t)	シード燃料平均	9.58	18.64
	シード燃料+内部ブランケット	8.47	16.51
	集合体平均	4.62	9.19

注) 取り出し 45EFPM、3 バッチ燃料交換を仮定、但し中心燃料集合体のみ4バッチ燃料集合体各バッチ燃焼月数(EFPM)は

BOC	0,15,30,(45)
EOC	15,30,45,(60)

表 7-4 集合体計算と炉心計算の比較

	keff		ポイド反応度係数 (pcm/%void)	
	@BOC	@EOC	@BOC	@EOC
集合体	1.0216	1.0143	-18.8	-13.7
炉心(1)	1.0169	1.0087	-22.4	-26.1
差	0.0047	0.0056	-4.6	-12.4

表 7-5 反応度、ポイド反応度係数の比較

	keff				ポイド反応度係数 (pcm/%void)	
	@BOC	Void	@EOC	Void	@BOC	@EOC
炉心(1)*	1.0169	0.9944	1.0087	0.98307	-22.4	-26.1
炉心(2)*	1.0226	0.9909	1.0124	0.9900	-25.0	-21.7
(2) - (1)	0.0057		0.0037		-2.6	+4.4

\* 構造材+水反射体をあらわす。

表 7-6 燃料集合体シード部分の出力分布の比較  
出力分布最大値

	BOC				EOC	
	(図 7.9)	(図 7.10)	(図 7.11)	(図 7.12)	(図 7.13)	(図 7.14)
炉心(1)*	4.85	3.62	3.63	4.51	3.37	3.39
炉心(2)*	3.27	2.24	2.45	3.73	2.45	2.46
	(図 7.15)	(図 7.16)	(図 7.17)	(図 7.18)	(図 7.19)	(図 7.20)

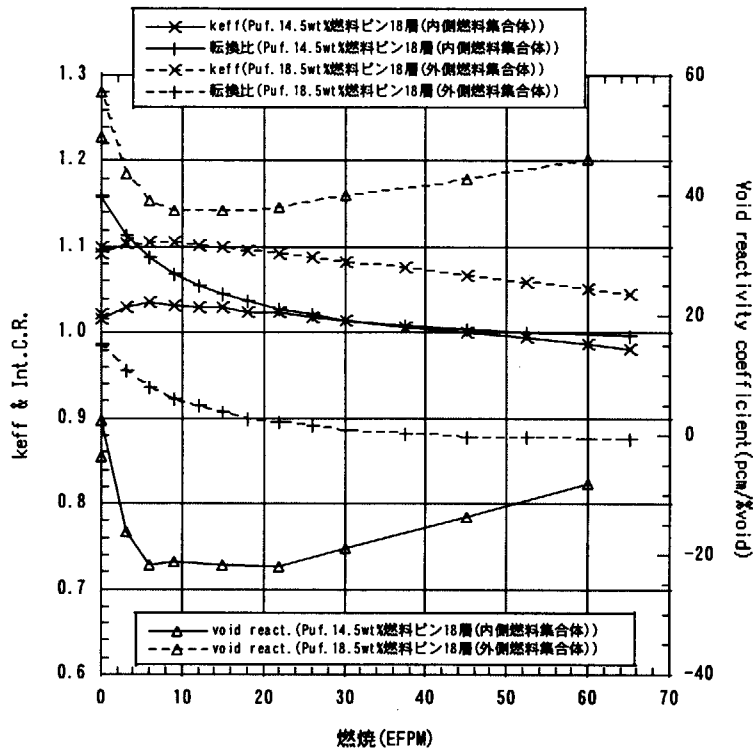


図 7-1 keff, Int.C.R., Void reactivity coef.  
燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果

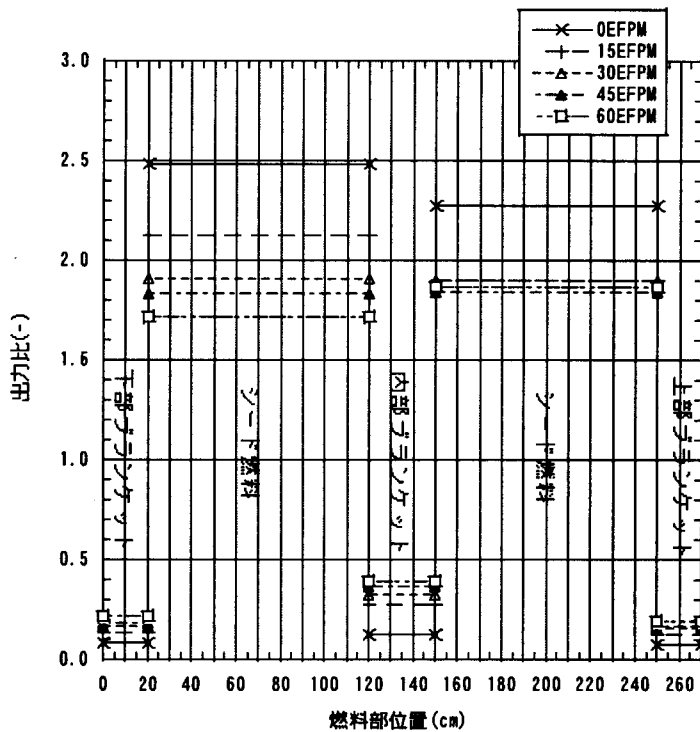


図 7-2 シード燃料部軸方向出力分布  
Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果

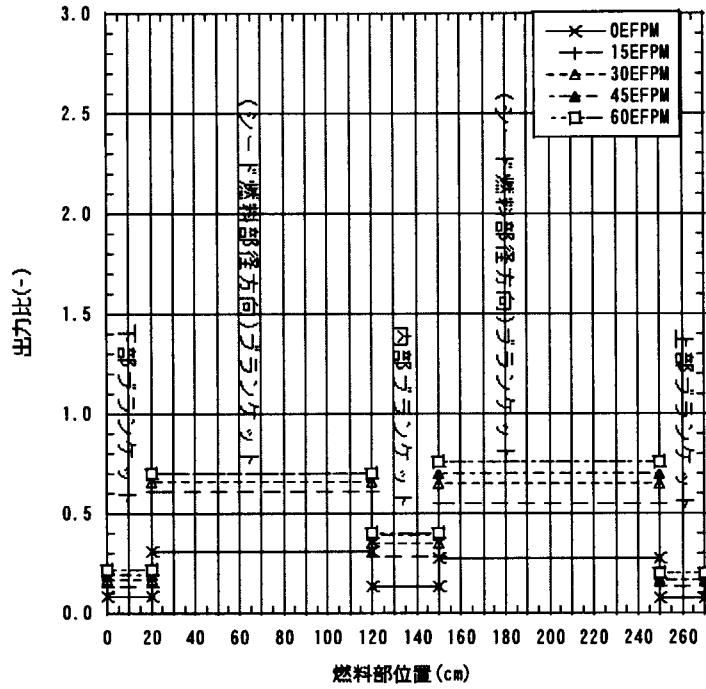


図 7-3 ブランケット燃料部軸方向出力分布  
Puf.14.5wt%燃料 18層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果

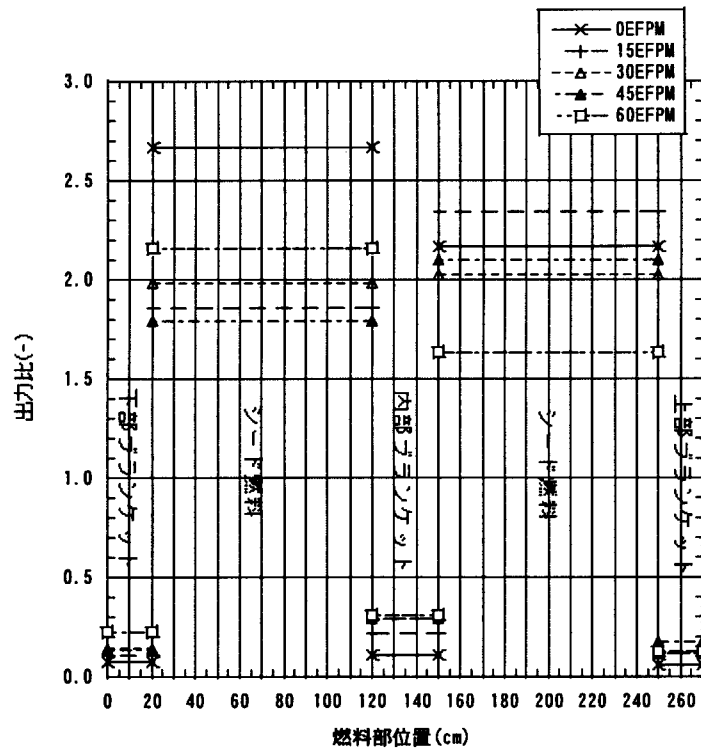


図 7-4 シード燃料部軸方向出力分布  
Puf.18.5wt%燃料 18層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果

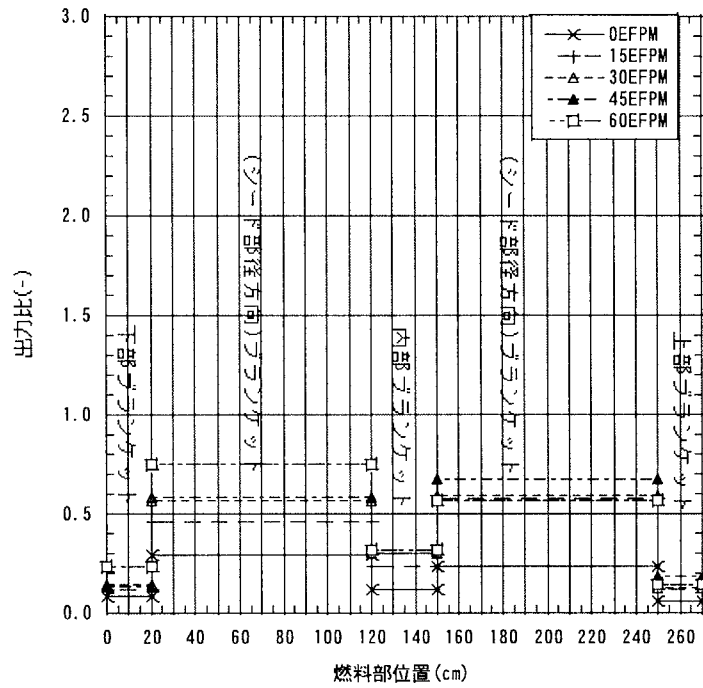


図 7-5 ブランケット燃料部軸方向出力分布  
Puf.18.5wt%燃料 18層 (シード 13, ブランケット 5) 集合体燃焼計算結果

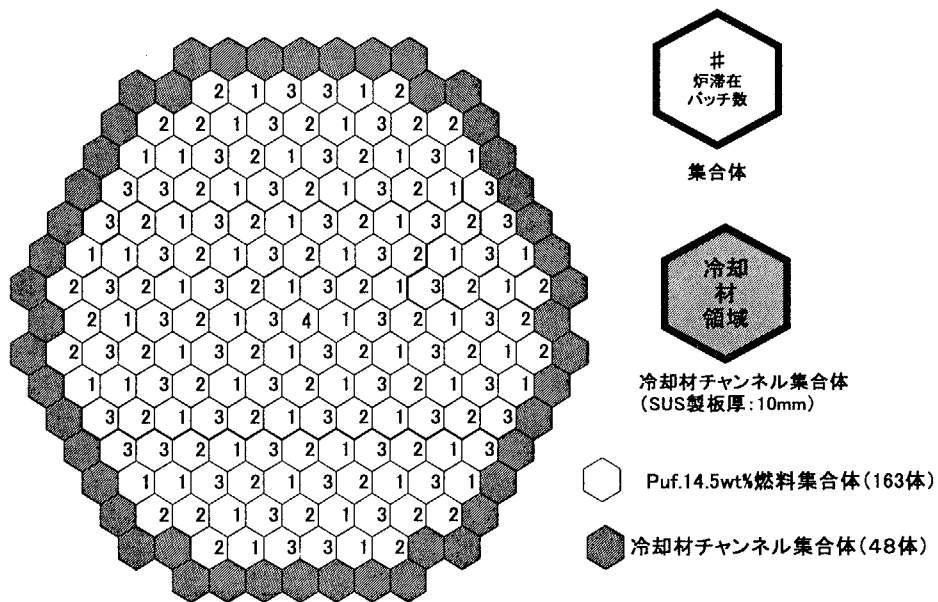


図 7-6 163体1領域炉心体系 (Puf.14.5wt%燃料集合体 163体)

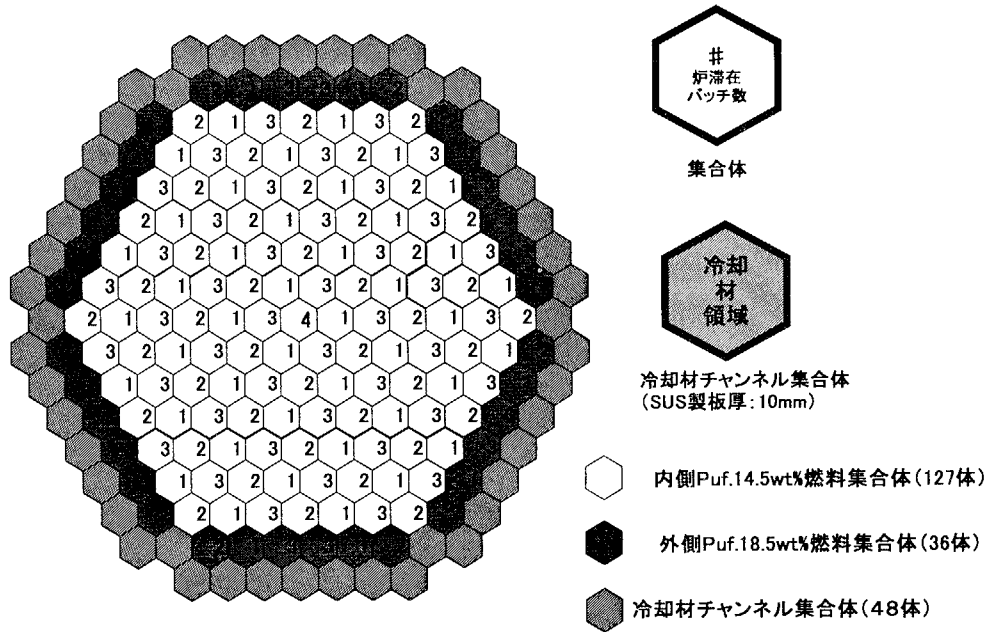


図 7-7 163 体 2 領域炉心体系  
(内側 Puf.14.5wt%燃料集合体 127 体、外側 Puf.18.5wt%燃料集合体 36 体)

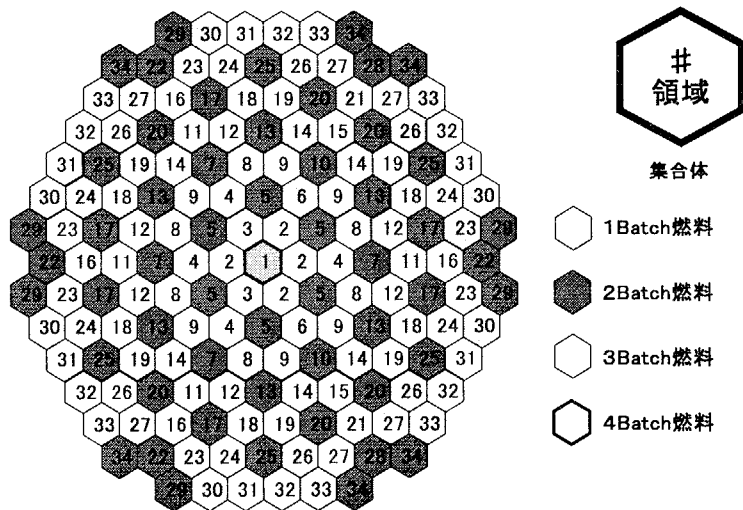


図 7-8 163 体炉心体系 (炉心燃焼度計算領域分布)



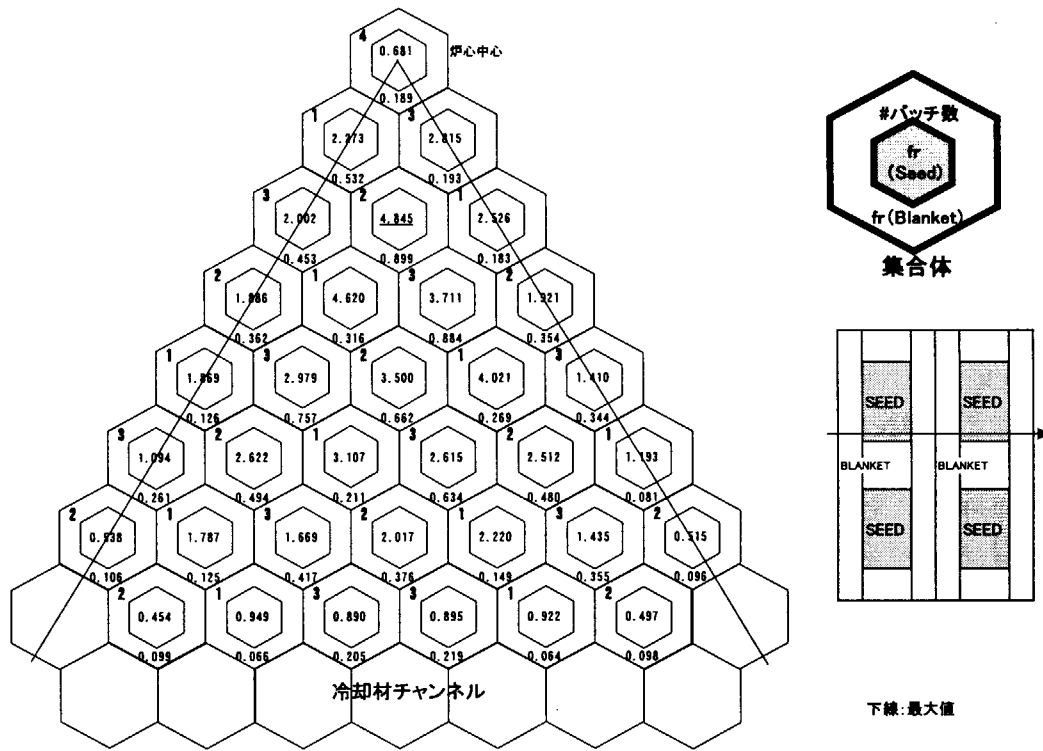


図 7-9 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを除く炉心部分)  
BOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系

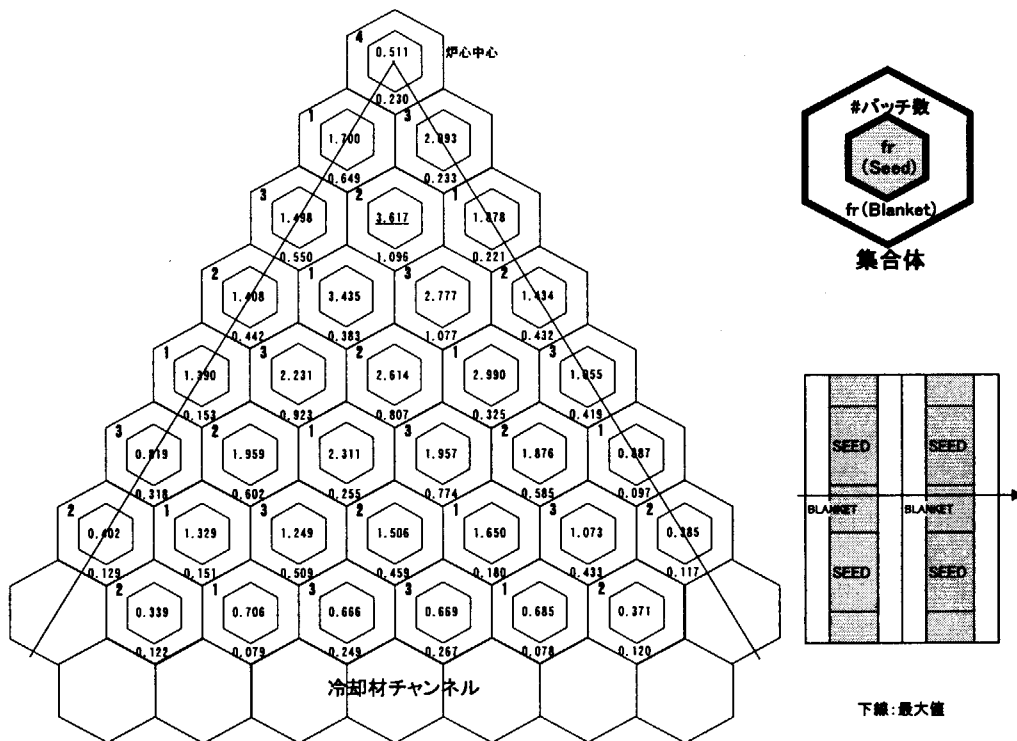


図 7-10 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを含む)  
BOC 炉心 (集合体径方向出力比) 集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系

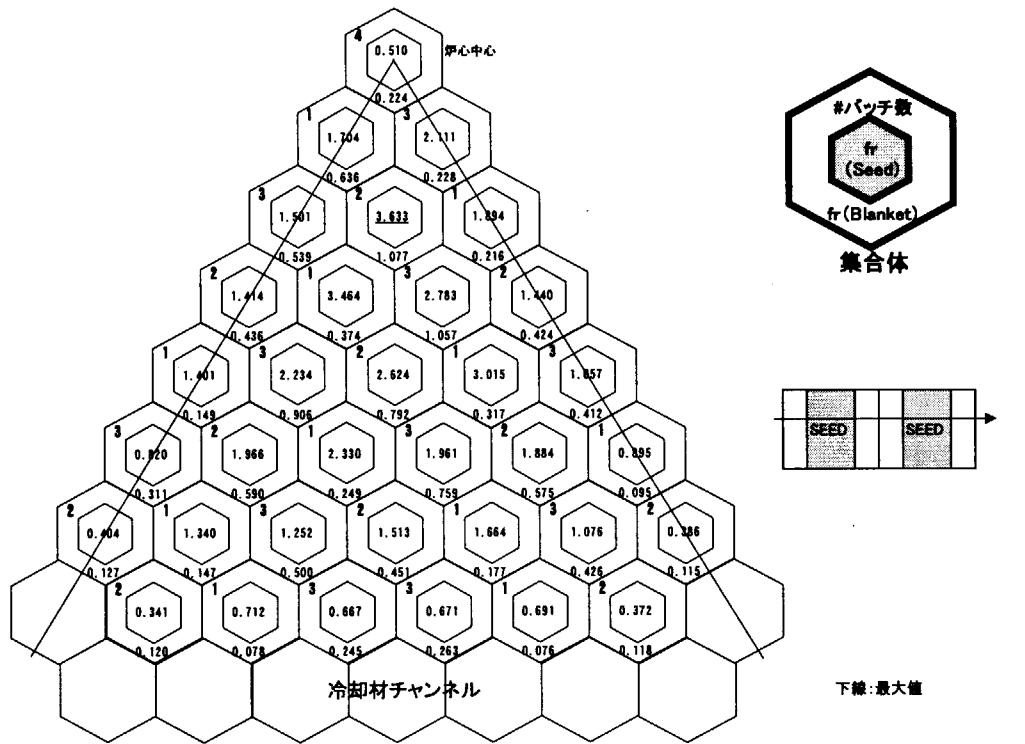


図 7-11 炉心径方向出力分布 (シード平行部径方向出力比)  
BOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系

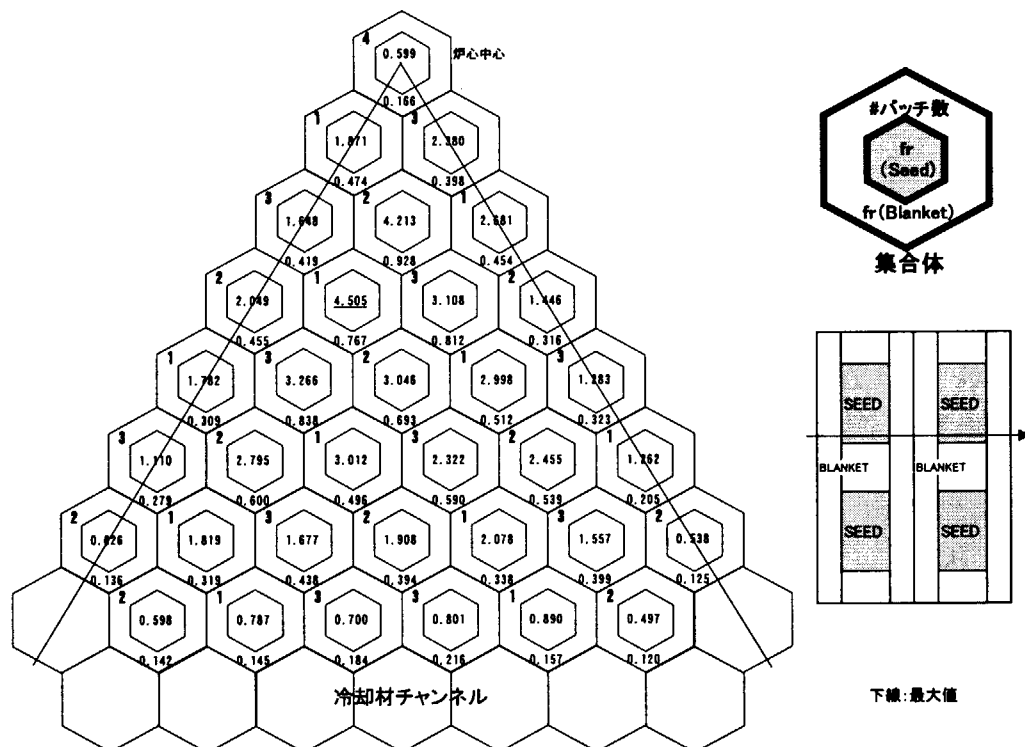


図 7-12 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを除く炉心部分)  
EOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系

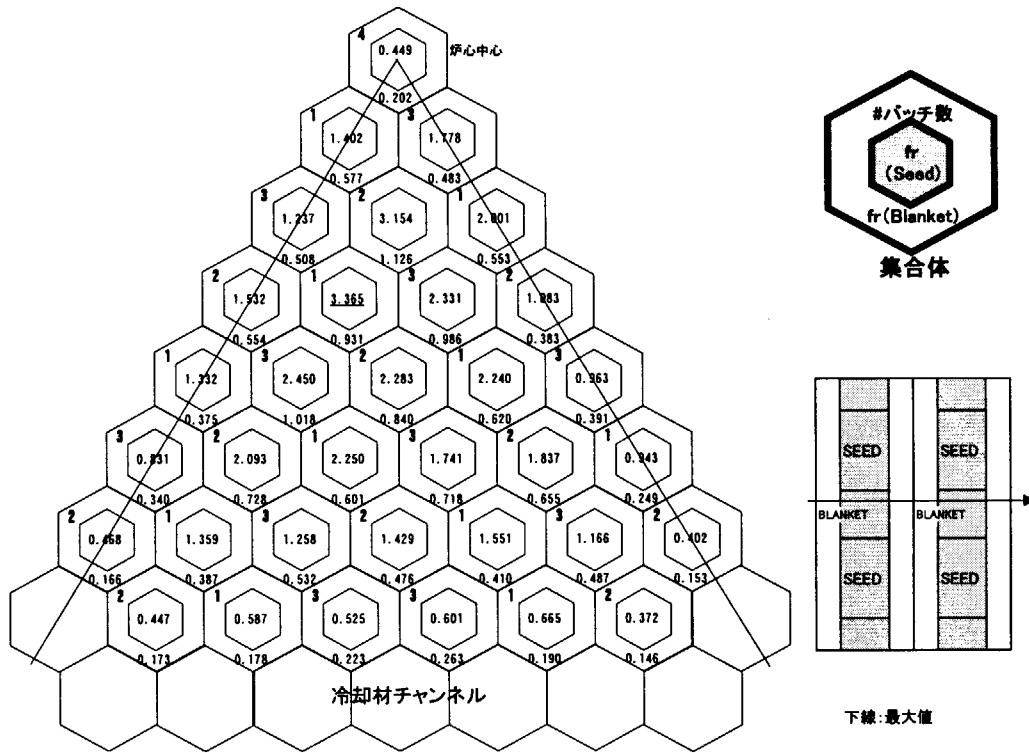


図 7-13 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを含む)  
EOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系

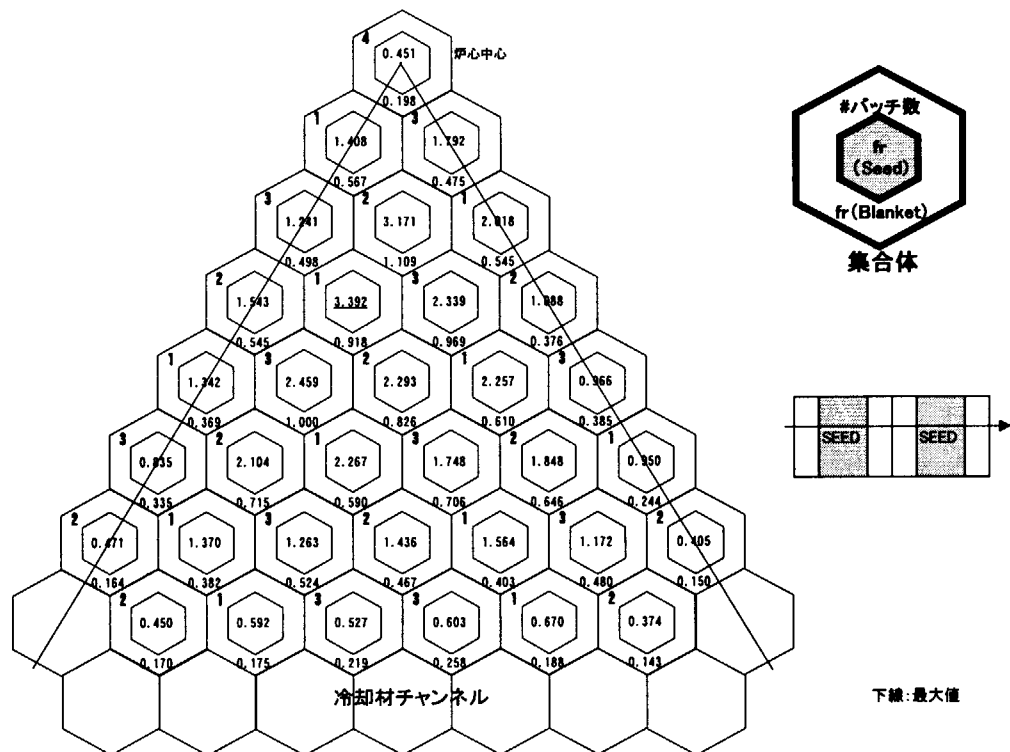


図 7-14 炉心径方向出力分布 (シード平行部径方向出力比)  
EOC 炉心集合体 163 体(Puf.14wt%163 体)炉心体系

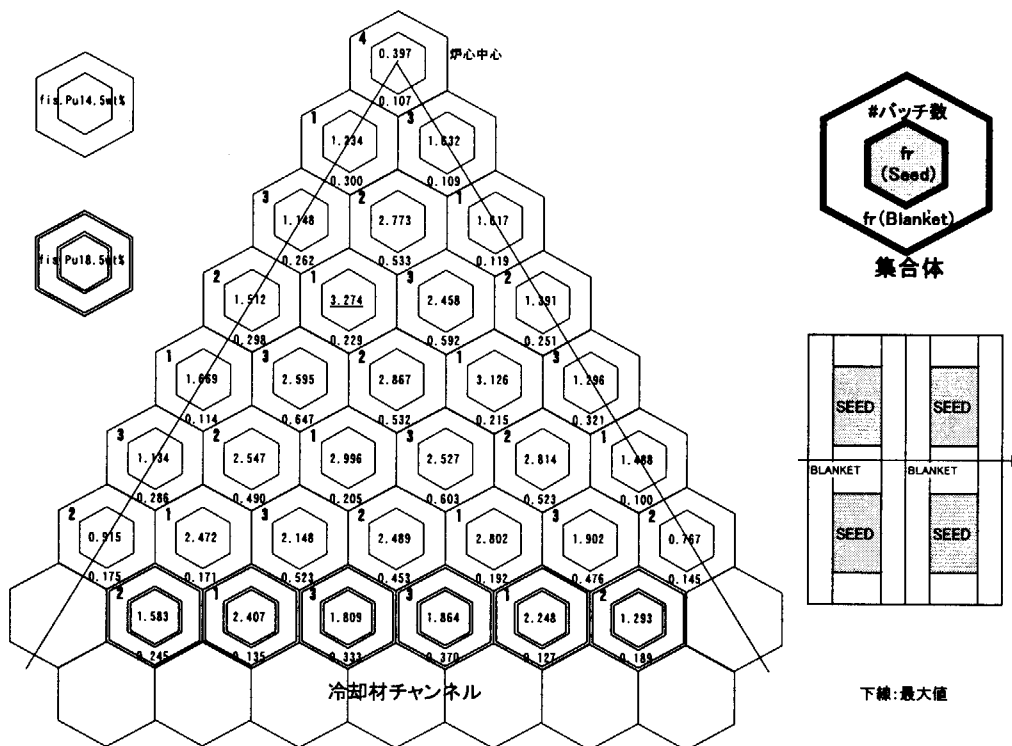


図 7-15 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを除く炉心部分)  
BOC 炉心集合体 163 体 (Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体) 2 領域炉心体系

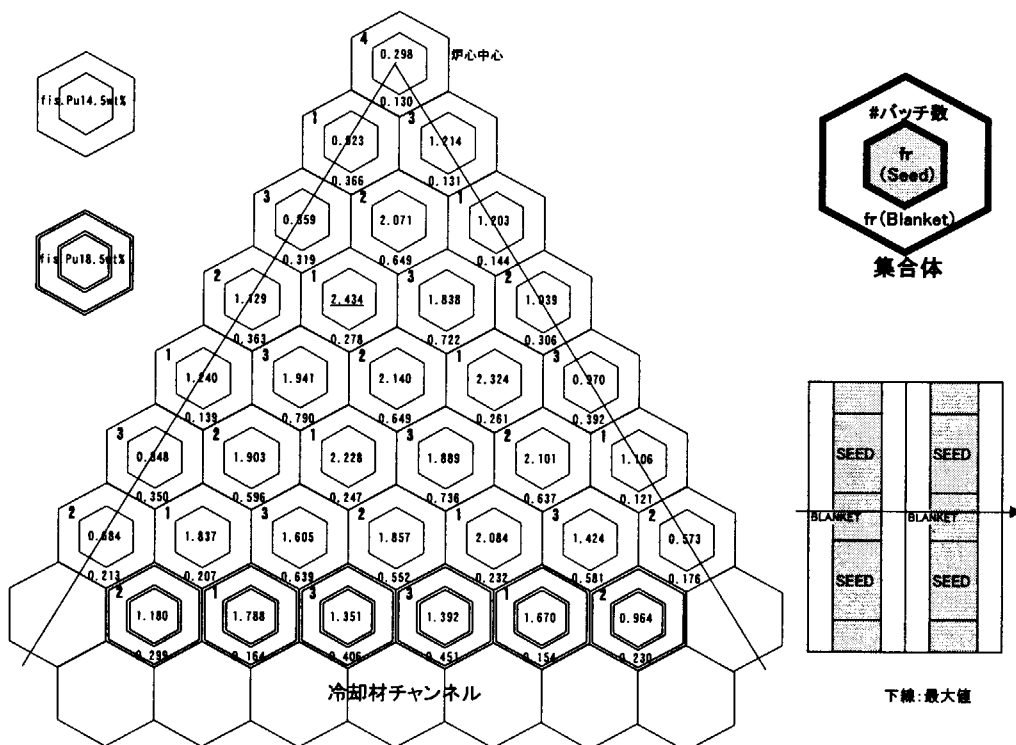


図 7-16 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを含む)  
BOC 炉心集合体 163 体 (Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体) 2 領域炉心体系

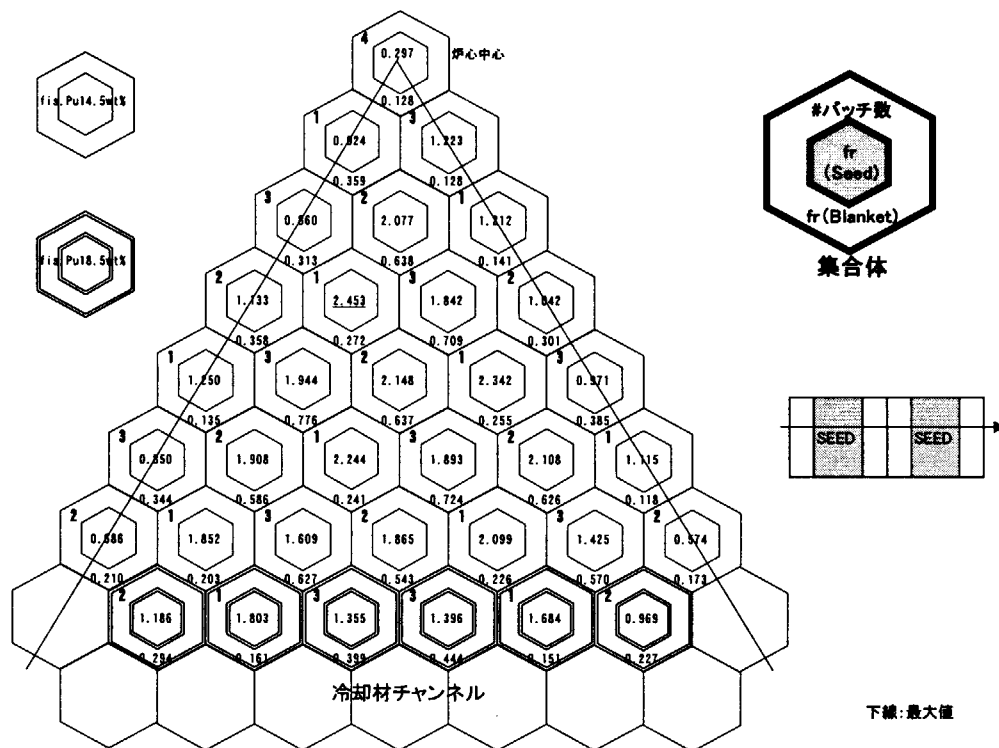


図 7-17 炉心径方向出力分布 (シード平行部径方向出力比)  
BOC 炉心集合体 163 体 (Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体) 2 領域炉心体系

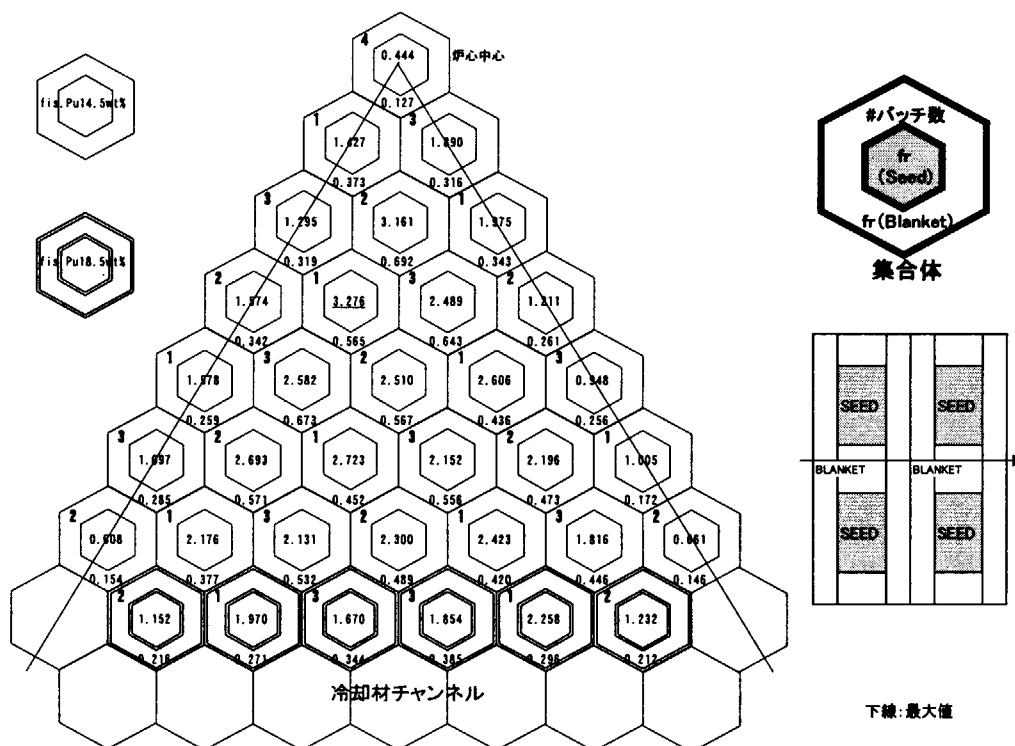


図 7-18 炉心径方向出力分布 (上下ブランケットを除く炉心部分)  
EOC 炉心集合体 163 体 (Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体) 2 領域炉心体系

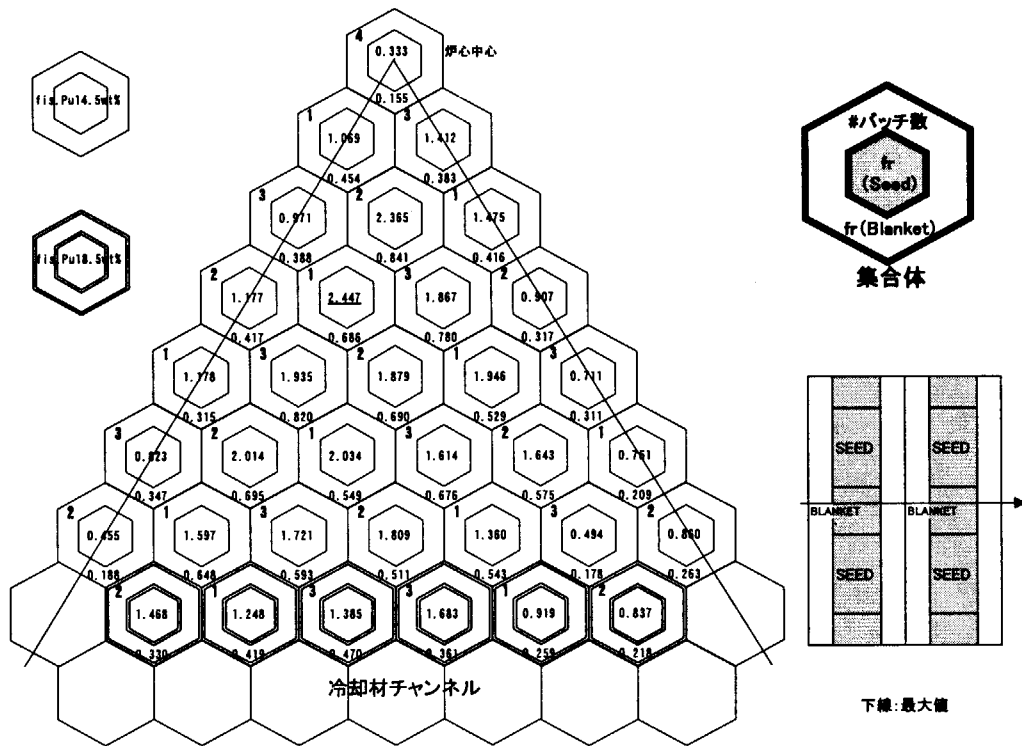


図 7-19 炉心径方向出力分布 (上下軸方向ブランケットを含む)  
EOC 炉心集合体 163 体 (Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体) 2 領域炉心体系

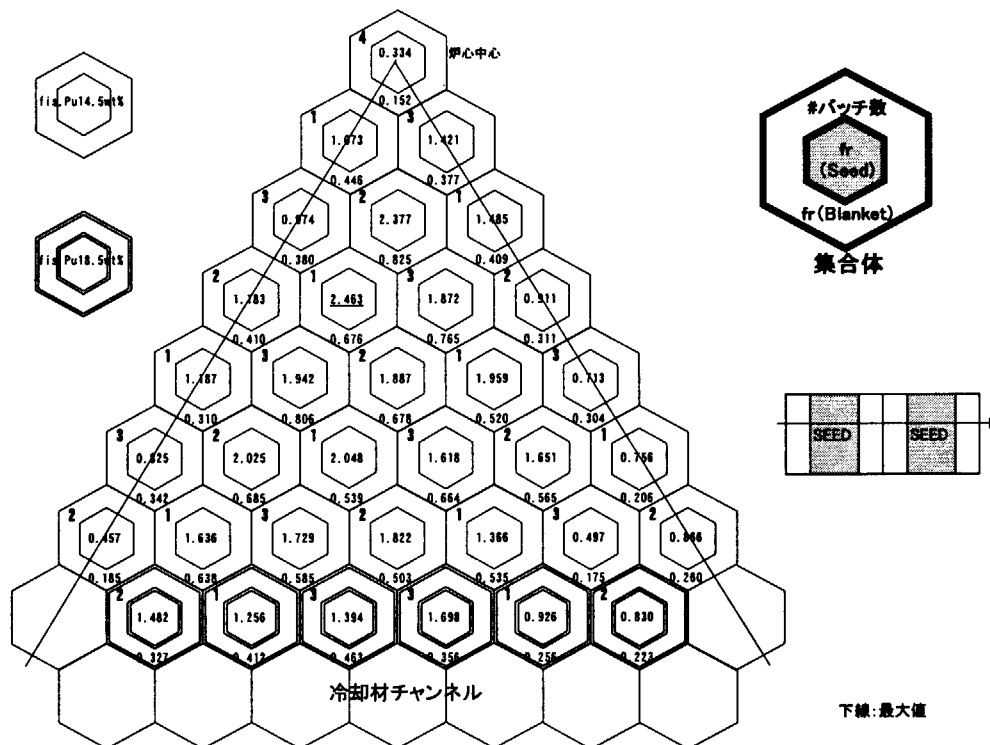


図 7-20 炉心径方向出力分布 (シード平行部径方向出力比)  
EOC 炉心集合体 163 体 (Puf.14.5wt%127 体、Puf.18.5wt%36 体) 2 領域炉心体系

## 8. MA,FP 混入の可能性評価

### 8.1 TRU 混合燃料炉心の性能評価

#### (1) TRU(MA)混合燃料

TRU 混合燃料の組成比を表 8-1 に示した。組成算出においては、燃料密度を保存する事とし、TRU 混合により増加した分を Pu 燃料より減らすものとした。

#### (2) 集合体燃焼計算

集合体の計算条件は表 7-1 に、集合体の体系は図 5-1 に示したものである。TRU 混合の有無による、反応度(k-eff)の比較を図 8-1 に、転換比(Int.C.R.)の比較図を図 8-2 に、ポイド反応度比較図を図 8-3 に示した。反応度に関しては、TRU を混合することにより、k-eff で 0.05 から 0.02 低下する。転換比に関しては、TRU を混合すると 0.02 程度逆に大きくなる。ポイド反応度に関しては、TRU を混入することにより、ポイド反応度係数が 50pcm/%void 程度正側になる。

反応度において図 8-1 より、Puf.14.5wt%TRU 混合無しと同じ反応度を、TRU を混合した燃料で得るには、Puf.16.5wt%程度の富化度が必要であることが分かった。

#### (3) 組成

3 バッチ取り替えを仮定した BOC 炉心の燃焼度を 0、15、30、45(EFPM)、EOC 炉心の燃焼度を 15、30、45、60(EFPM)をとって、TRU を混合した Puf.14.5wt%の計算結果について、核分裂性核種残存比を表 8-2、Pu 組成比変化を表 8-3、核分裂性核種インベントリを表 8-4、TRU(MA)を含めたインベントリを表 8-5 に示した。表 8-2 より初期炉心及び平衡炉心の装荷量と取り出し量の比較で、 $^{235}\text{U}$  を含める場合は多少減少しているが、 $^{235}\text{U}$  を含めないプルトニウム $^{239}\text{Pu}$ と $^{241}\text{Pu}$ 合計では増加していることが分かる。表 8-3 よりプルトニウム組成は初期と取り出し時でほとんど変化していないことが分かる。表 8-4 は表 8-2 の平衡炉心で $^{235}\text{U}$ を含む場合をインベントリーの形で表したものであるが、トータルインベントリーは多少減少しており、表 8-2 と矛盾がない。表 8-5 によると、TRU の量は BOC と EOC であまり変化していない。

### 8.2 FP 混合炉心の性能評価

#### (1) FP 混合燃料

FP 燃料の組成比を表 8-6 に示した。この FP 組成が表 8-7 に示した取り出し 7 年後の Am-241 を除いた組成の Pu に対して、全 Pu 重量 9180g に対して、FP163g が同伴するものとした。ここに FP は改良湿式再処理法による FP データを利用した。

TRU を混合した燃料の組成算出においては、燃料密度を保存する事とし、FP 混合により増加した分を Pu 燃料より減らすものとした。

MVP-BURN の計算において、FP 核種すべてのライブラリーが整備されているわけではないので、ライブラリーに無い核種の質量を、質量が減じた分ライブラリーの有る核種の合計質量に加える (FP の質量を保存し、ライブラリーの有る核種のみで組成を再調整。) 事とした。

## (2) 集合体燃焼計算

FP を混合した燃料を使用した集合体燃焼計算を、Puf.14.5wt%および Puf.18.5wt%について行った。FP 混合の有無による、反応度( $k$ -eff)の比較を図 8-4 に、転換比(Int.C.R.)の比較図を図 8-5 に、ポイド反応度比較図を図 8-6 に示した。反応度に関しては、FP を混合することにより、若干低下する結果であった。転換比に関しては、FP を混合しても変わらない結果であった。ポイド反応度に関しては、FP を混入することにより反応度係数で 2~3pcm/%void 程度正側になるが、Puf.14.5wt%の場合は負の条件を満たしている。

## (3) 組成

3 バッチ取り替えを仮定した BOC 炉心の燃焼度を 0、15、30、45(EFPM)、EOC 炉心の燃焼度を 15、30、45、60(EFPM)をとって、各バッチの組成及び Pu 組成変化、インベントリ等をまとめた。

FP を混合した Puf.14.5wt%の結果について、核分裂性核種残存比を表 8-8、Pu 組成比変化を表 8-9、核分裂性核種インベントリを表 8-10、TRU(MA)を含めたインベントリを表 8-11 に示した。同様に、FP を混合した Puf.18.5wt%の計算結果は、核分裂性核種残存比を表 8-12、Pu 組成比変化を表 8-13、核分裂性核種インベントリを表 8-14、TRU(MA)を含めたインベントリを表 8-15 に示した。

表 8-8 によると、核分裂残存比は FP 混入によりほとんど変化しない。表 8-9 より Pu の組成変化は非常に小さい。核分裂性核種インベントリは表 8-10 より表 8-8 と同様に BOC と EOC で極くわずかに減少することが分かる。核分裂性核種及び MA インベントリの変化は表 8-11 により非常に小さいことがわかる。表 8-12~表 8-15 は Puf.18.5wt%に対応する結果であり、表 8-8~表 8-11 と同様な結果であるが、富化度が高い分だけ転換比、インベントリの BOC から EOC への減少は多少大きい。



表 8-1 燃料組成比 (TRU 添加)

項目	単位	TRU 無し	TRU 有り
UO <sub>2</sub> 密度	g/cc	10.96	10.96
理論密度	%	95.00	95.00
Dish 率	%	1.20	1.20
燃料温度	Degree K	889.40	889.40
U-235 濃縮度	wt%	0.20	0.20
Pu <sub>f</sub> 富化度	wt%	14.5 or 18.5	14.5 or 18.5
Pu 組成			
Pu-238	wt%	2.70	2.40
Pu-239	wt%	47.90	42.90
Pu-240	wt%	30.30	27.20
Pu-241	wt%	9.60	8.60
Pu-242	wt%	8.50	7.60
Am-241	wt%	1.00	3.90
Am-242m	wt%		0.10
Am-243	wt%		1.30
Cm-244	wt%		0.40
Np-237	wt%		5.60

表 8-2 核分裂性核種残存比

TRU 添加 Pu<sub>f</sub>14.5wt%燃料 18 層(シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管)集合体 (シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

(1)fissile(U-235,Pu-239,Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
初装荷 0EFPM (0GWd/t)	U-235	4.1082E-05
	Pu-239	9.8759E-04
	Pu-241	1.9633E-04
	total	1.2250E-03
取り出し 45EFPM (13.7GWd/t)	U-235	2.6694E-05
	Pu-239	1.0082E-03
	Pu-241	1.7728E-04
	total	1.2122E-03
残存比		0.9896

(3)BOC,EOC 炉心 fissile(U-235,Pu-239,Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
BOC (平均燃焼度 4.62GWd/t)	U-235	3.4867E-05
	Pu-239	9.9858E-04
	Pu-241	1.8835E-04
	BOC total	1.2218E-03
EOC (平均燃焼度 9.19GWd/t)	U-235	3.0085E-05
	Pu-239	1.0054E-03
	Pu-241	1.8201E-04
	EOC total	1.2175E-03

(2)fissilePu(Pu-239,Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
初装荷 0EFPM (0GWd/t)	Pu-239	9.8759E-04
	Pu-241	1.9633E-04
	total	1.1839E-03
取り出し 45EFPM (13.7GWd/t)	Pu-239	1.0082E-03
	Pu-241	1.7728E-04
	total	1.1855E-03
残存比		1.0013

(4)BOC,EOC 炉心 fissilePu(Pu-239,Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
BOC (平均燃焼度 4.62GWd/t)	Pu-239	9.9858E-04
	Pu-241	1.8835E-04
	BOC total	1.1869E-03
EOC (平均燃焼度 9.19GWd/t)	Pu-239	1.0054E-03
	Pu-241	1.8201E-04
	EOC total	1.1874E-03

表 8-3 Pu 組成比変化

TRU 添加 Puf.14.5wt%燃料 18 層(シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、  
炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管)集合体  
(シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

<Pu 組成比>

初期燃料						
核種	シード燃料領域平均		ブランケット領域平均		集合体領域平均	
	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)
Pu-238	1.5279E-04	2.73	0.0000E+00	0.00	5.5483E-05	2.73
Pu-239	2.7196E-03	48.51	0.0000E+00	0.00	9.8759E-04	48.51
Pu-240	1.7171E-03	30.63	0.0000E+00	0.00	6.2355E-04	30.63
Pu-241	5.4065E-04	9.64	0.0000E+00	0.00	1.9633E-04	9.64
Pu-242	4.7580E-04	8.49	0.0000E+00	0.00	1.7278E-04	8.49
Pu total	5.6059E-03	100.00	0.0000E+00	0.00	2.0357E-03	100.00
45ヶ月燃焼燃料(取り出し)						
核種	シード燃料領域平均		ブランケット領域平均		集合体領域平均	
	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)
Pu-238	2.2062E-04	4.16	4.0669E-07	0.18	8.0376E-05	3.88
Pu-239	2.4507E-03	46.20	1.8574E-04	80.56	1.0082E-03	48.63
Pu-240	1.6985E-03	32.02	2.7532E-05	11.94	6.3432E-04	30.60
Pu-241	4.6138E-04	8.70	1.5281E-05	6.63	1.7728E-04	8.55
Pu-242	4.7372E-04	8.93	1.5967E-06	0.69	1.7304E-04	8.35
Pu total	5.3049E-03	100.00	2.3055E-04	100.00	2.0733E-03	100.00

表 8-4 核分裂性核種インベントリ

TRU 添加 Puf.14.5wt%燃料 18 層(シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、  
炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管)集合体  
(シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

核分裂性核種	BOC 炉心(163 体)合計		EOC 炉心(163 体)合計	
	炉心平均組成 (×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )	インベントリ (ton)	炉心平均組成 (×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )	インベントリ (ton)
U-235	3.4867E-05	0.441	3.0085E-05	0.381
Pu-239	9.9858E-04	12.858	1.0054E-03	12.946
Pu-241	1.8835E-04	2.446	1.8201E-04	2.363
total	1.2218E-03	15.7451	1.2175E-03	15.6905

表 8-5 核分裂性核種,MA インベントリ  
 TRU 添加 Pu f.14.5wt%燃料 18 層(シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、  
 炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管)集合体  
 (シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

核種	BOC 炉心(163 体)合計	EOC 炉心(163 体)合計
	インベントリ	インベントリ
	(ton)	(ton)
U-234	0.007	0.015
U-235	0.441	0.381
U-236	0.017	0.030
U-237	0.0001	0.0002
U-238	258.035	256.575
Np-237	1.556	1.459
Np-239	0.006	0.009
Pu-238	0.8179	0.9242
Pu-239	12.858	12.946
Pu-240	8.109	8.155
Pu-241	2.446	2.363
Pu-242	2.2540	2.2551
Am-241	1.200	1.241
Am-242G	0.000	0.000
Am-242M	0.034	0.038
Am-243	0.4073	0.4281
Cm-242	0.021	0.033
Cm-243	0.000	0.001
Cm-244	0.140	0.162
Cm-245	0.0053	0.0106
FP	0.3148	0.6178
total	288.356	287.027

表 8-6 改良湿式再処理からの装荷 FP 核種組成

FP 核種	組成	MVP 計算ライブラリー
Y 89	46.59%	
MO 95	0.756%	
MO 97	0.806%	ライブラリー無し
TC 99	0.779%	
RU101	0.782%	
RH103	0.417%	
PD105	0.389%	
CS133	1.116%	
ND145	0.668%	
SM147	6.075%	
SM148	5.392%	
SM150	8.244%	
SM151	0.255%	
EU153	0.028%	ライブラリー無し
SM152	3.653%	
EU153	7.838%	
SM154	1.084%	ライブラリー無し
EU154	0.715%	
GD154	0.956%	
GD155	0.439%	
GD156	10.729%	
GD158	1.911%	
TB159	0.254%	ライブラリー無し
DY160	0.030%	ライブラリー無し
DY161	0.036%	ライブラリー無し
DY162	0.032%	ライブラリー無し
DY163	0.027%	ライブラリー無し
DY164	0.004%	ライブラリー無し
合計	100.000%	

表 8-7 BWR 取出使用済み UO<sub>2</sub> 燃料に対する Pu 組成評価結果

Pu 核種	取出7年後 (g/BWR 装荷新燃料重金属1トン)	ORIGEN-2 により 評価された Pu 組成 (wt%)	基準 Pu 組成 (wt%)
PU236	3.10E-04	0.0	-
PU237	3.32E-21	0.0	-
PU238	2.21E+02	2.4	2.7
PU239	4.64E+03	50.5	48.4
PU240	2.61E+03	28.4	30.6
PU241	9.45E+02	10.3	9.7
PU242	7.66E+02	8.3	8.6
PU243	1.56E-13	0.0	-
PU244	4.15E-02	0.0	-
PU245	0.00E+00	0.0	-
PU246	1.95E-17	0.0	-
取出 Pu 合計	9.18E+03	100.0	100.0

表 8-8 核分裂性核種残存比

FP 混合 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、  
炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体  
(シード 13、ブランケット 5、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

(1)fissile(U-235,Pu-239,Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
初装荷 0EFPM(0GWd/t)	U-235	4.1538E-05
	Pu-239	9.8765E-04
	Pu-241	1.9629E-04
	total	1.2255E-03
取り出し 45EFPM (13.7GWd/t)	U-235	2.7096E-05
	Pu-239	9.9952E-04
	Pu-241	1.8045E-04
	total	1.2071E-03
残存比		0.9850

(3)BOC,EOC 炉心 fissile(U-235,Pu-239,Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
BOC (平均燃焼度 4.63GWd/t)	U-235	3.5320E-05
	Pu-239	9.9534E-04
	Pu-241	1.8958E-04
	BOC total	1.2202E-03
EOC (平均燃焼度 9.20GWd/t)	U-235	3.0520E-05
	Pu-239	9.9926E-04
	Pu-241	1.8432E-04
	EOC total	1.2141E-03

(2)fissilePu(Pu-239,Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
初装荷 0EFPM(0GWd/t)	Pu-239	9.8765E-04
	Pu-241	1.9629E-04
	total	1.1839E-03
取り出し 45EFPM (13.7GWd/t)	Pu-239	9.9952E-04
	Pu-241	1.8045E-04
	total	1.1800E-03
残存比		0.9966

(4)BOC,EOC 炉心 fissilePu(Pu-239,Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
BOC (平均燃焼度 4.63GWd/t)	Pu-239	9.9534E-04
	Pu-241	1.8958E-04
	BOC total	1.1849E-03
EOC (平均燃焼度 9.20GWd/t)	Pu-239	9.9926E-04
	Pu-241	1.8432E-04
	EOC total	1.1836E-03

表 8-9 Pu 組成比変化

FP 混合 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

<Pu 組成比>

初期燃料						
核種	シード燃料領域平均		ブランケット領域平均		集合体領域平均	
	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)
Pu-238	1.5236E-04	2.72	0.0000E+00	0.00	5.5329E-05	2.72
Pu-239	2.7198E-03	48.55	0.0000E+00	0.00	9.8765E-04	48.55
Pu-240	1.7123E-03	30.57	0.0000E+00	0.00	6.2182E-04	30.57
Pu-241	5.4054E-04	9.65	0.0000E+00	0.00	1.9629E-04	9.65
Pu-242	4.7726E-04	8.52	0.0000E+00	0.00	1.7331E-04	8.52
Pu total	5.6023E-03	100.00	0.0000E+00	0.00	2.0344E-03	100.00
45ヶ月燃焼燃料(取り出し)						
核種	シード燃料領域平均		ブランケット領域平均		集合体領域平均	
	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)
Pu-238	1.3490E-04	2.60	3.9322E-07	0.17	4.9237E-05	2.43
Pu-239	2.4328E-03	46.90	1.8227E-04	80.68	9.9952E-04	49.30
Pu-240	1.6808E-03	32.41	2.6582E-05	11.77	6.2730E-04	30.94
Pu-241	4.7043E-04	9.07	1.5105E-05	6.69	1.8045E-04	8.90
Pu-242	4.6794E-04	9.02	1.5592E-06	0.69	1.7092E-04	8.43
Pu total	5.1868E-03	100.00	2.2591E-04	100.00	2.0274E-03	100.00

表 8-10 核分裂性核種インベントリ

FP 混合 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

核分裂性核種	BOC 炉心(163 体)合計		EOC 炉心(163 体)合計	
	炉心平均組成 (×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )	インベントリ	炉心平均組成 (×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )	インベントリ
		(ton)		(ton)
U-235	3.5320E-05	0.447	3.0520E-05	0.386
Pu-239	9.9534E-04	12.816	9.9926E-04	12.867
Pu-241	1.8958E-04	2.462	1.8432E-04	2.393
total	1.2202E-03	15.7252	1.2141E-03	15.6465

表 8-11 核分裂性核種,MA インベントリ  
 FP 混合 Puf.14.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、  
 炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体  
 (シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

核種	BOC 炉心(163 体)合計	EOC 炉心(163 体)合計
	インベントリ	インベントリ
	(ton)	(ton)
U-234	0.006	0.012
U-235	0.447	0.386
U-236	0.017	0.031
U-237	0.0001	0.0002
U-238	260.924	259.467
Np-237	0.007	0.013
Np-239	0.006	0.009
Pu-238	0.6765	0.6506
Pu-239	12.816	12.867
Pu-240	8.063	8.086
Pu-241	2.462	2.393
Pu-242	2.2482	2.2378
Am-241	0.138	0.263
Am-242G	0.000	0.000
Am-242M	0.001	0.003
Am-243	0.0563	0.1082
Cm-242	0.003	0.007
Cm-243	0.000	0.000
Cm-244	0.005	0.013
Cm-245	0.0001	0.0005
FP	0.5256	0.8275
total	287.877	286.548

表 8-12 核分裂性核種残存比

FP 混合 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5, ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

(1) fissile(U-235, Pu-239, Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
初装荷 0EFPM (0GWd/t)	U-235	4.0373E-05
	Pu-239	1.2601E-03
	Pu-241	2.5044E-04
	total	1.5509E-03
取り出し 45EFPM (13.7GWd/t)	U-235	2.7265E-05
	Pu-239	1.2395E-03
	Pu-241	2.1953E-04
	total	1.4863E-03
残存比		0.9583

(3) BOC, EOC 炉心 fissile(U-235, Pu-239, Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
BOC (平均燃焼度 4.63GWd/t)	U-235	3.4779E-05
	Pu-239	1.2564E-03
	Pu-241	2.3828E-04
	BOC total	1.5294E-03
EOC (平均燃焼度 9.20GWd/t)	U-235	3.0422E-05
	Pu-239	1.2495E-03
	Pu-241	2.2800E-04
	EOC total	1.5079E-03

(2) fissilePu(Pu-239, Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
初装荷 0EFPM (0GWd/t)	Pu-239	1.2601E-03
	Pu-241	2.5044E-04
	total	1.5106E-03
取り出し 45EFPM (13.7GWd/t)	Pu-239	1.2395E-03
	Pu-241	2.1953E-04
	total	1.4590E-03
残存比		0.9659

(4) BOC, EOC 炉心 fissilePu(Pu-239, Pu241)合計

	核種	組成(×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )
BOC (平均燃焼度 4.63GWd/t)	Pu-239	1.2564E-03
	Pu-241	2.3828E-04
	BOC total	1.4947E-03
EOC (平均燃焼度 9.20GWd/t)	Pu-239	1.2495E-03
	Pu-241	2.2800E-04
	EOC total	1.4775E-03

表 8-13 Pu 組成比変化

FP 混合 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13, ブランケット 5, ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、follower=Zry-4)

初期燃料						
	シード燃料領域平均		ブランケット領域平均		集合体領域平均	
核種	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)
Pu-238	1.9439E-04	2.72	0.0000E+00	0.00	7.0591E-05	2.72
Pu-239	3.4700E-03	48.55	0.0000E+00	0.00	1.2601E-03	48.55
Pu-240	2.1847E-03	30.57	0.0000E+00	0.00	7.9336E-04	30.57
Pu-241	6.8966E-04	9.65	0.0000E+00	0.00	2.5044E-04	9.65
Pu-242	6.0892E-04	8.52	0.0000E+00	0.00	2.2112E-04	8.52
Pu total	7.1477E-03	100.00	0.0000E+00	0.00	2.5956E-03	100.00
45ヶ月燃焼燃料(取り出し)						
	シード燃料領域平均		ブランケット領域平均		集合体領域平均	
核種	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)	×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup>	(%)
Pu-238	1.7380E-04	2.62	3.2429E-07	0.16	6.3319E-05	2.49
Pu-239	3.1150E-03	47.02	1.7003E-04	81.55	1.2395E-03	48.83
Pu-240	2.1549E-03	32.53	2.3833E-05	11.43	7.9772E-04	31.42
Pu-241	5.8165E-04	8.78	1.3048E-05	6.26	2.1953E-04	8.65
Pu-242	5.9958E-04	9.05	1.2564E-06	0.60	2.1853E-04	8.61
Pu total	6.6249E-03	100.00	2.0849E-04	100.00	2.5386E-03	100.00



表 8-14 核分裂性核種インベントリ

FP 混合 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、flower=Zry-4)

核分裂性核種	BOC 炉心(163 体)合計		EOC 炉心(163 体)合計	
	炉心平均組成 (×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )	インベントリ (ton)	炉心平均組成 (×10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> )	インベントリ (ton)
U-235	3.4779E-05	0.440	3.0422E-05	0.385
Pu-239	1.2564E-03	16.177	1.2495E-03	16.088
Pu-241	2.3828E-04	3.094	2.2800E-04	2.960
total	1.5294E-03	19.7117	1.5079E-03	19.4340

表 8-15 核分裂性核種、MA インベントリ

FP 混合 Puf.18.5wt%燃料 18 層 (シード 13 層、ブランケット 5 層、ZrH<sub>1.7</sub> 無し、炉心 100cm×2、ブランケット内部 30cm 上下 20cm×2、Zry-4 被覆管) 集合体 (シード 13,ブランケット 5,ZrH<sub>1.7</sub> 無し、燃料被覆管 Zry-4、flower=Zry-4)

核種	BOC 炉心(163 体)合計		EOC 炉心(163 体)合計	
	インベントリ (ton)		インベントリ (ton)	
U-234	0.008	0.016		
U-235	0.440	0.385		
U-236	0.016	0.028		
U-237	0.0001	0.0002		
U-238	253.748	252.465		
Np-237	0.006	0.012		
Np-239	0.006	0.008		
Pu-238	0.8671	0.8362		
Pu-239	16.177	16.088		
Pu-240	10.276	10.295		
Pu-241	3.094	2.960		
Pu-242	2.8713	2.8600		
Am-241	0.176	0.337		
Am-242G	0.000	0.000		
Am-242M	0.001	0.003		
Am-243	0.0553	0.1069		
Cm-242	0.003	0.007		
Cm-243	0.000	0.000		
Cm-244	0.004	0.010		
Cm-245	0.0001	0.0003		
FP	0.5860	0.8906		
total	287.749	286.419		

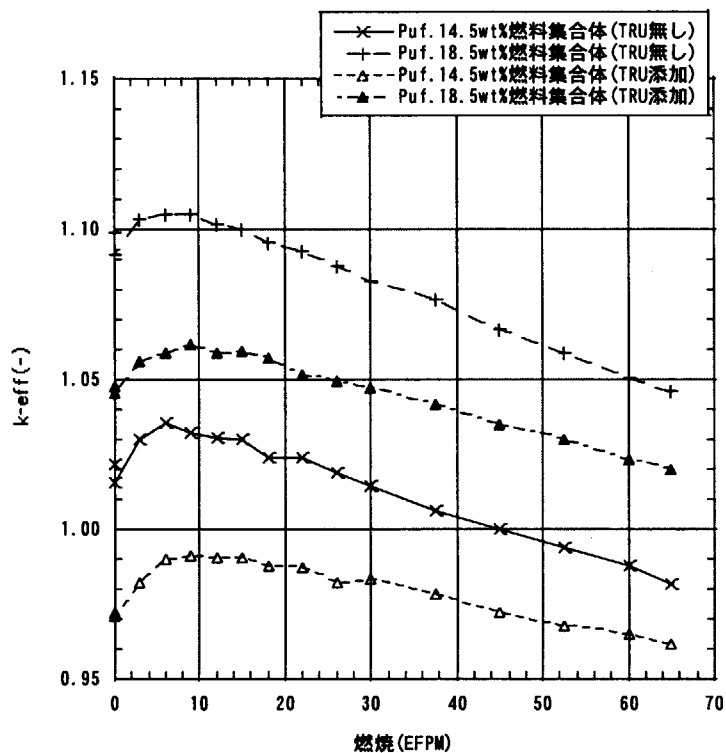


図 8-1 TRU 混合燃料集合体燃焼計算結果 ( $k_{\text{eff}}$ )

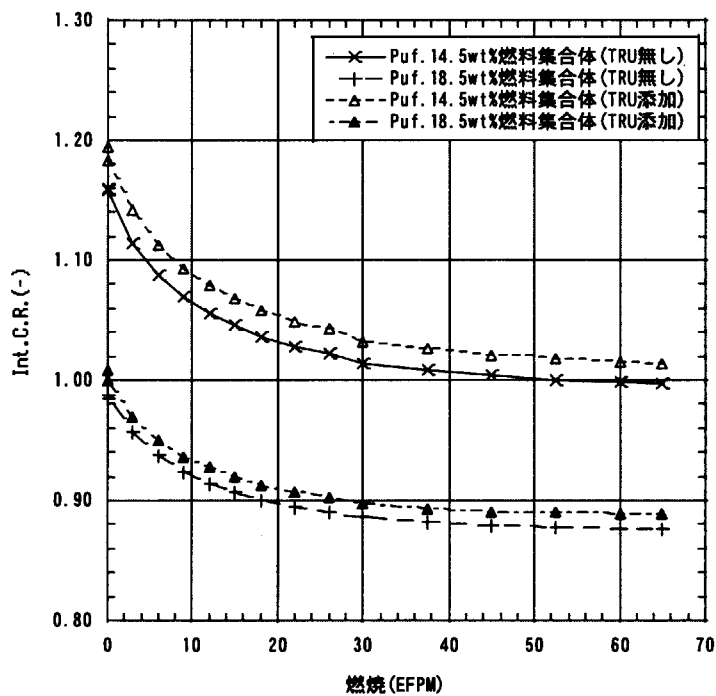


図 8-2 TRU 混合燃料集合体燃焼計算結果 (轉換比 Inc.C.R.)

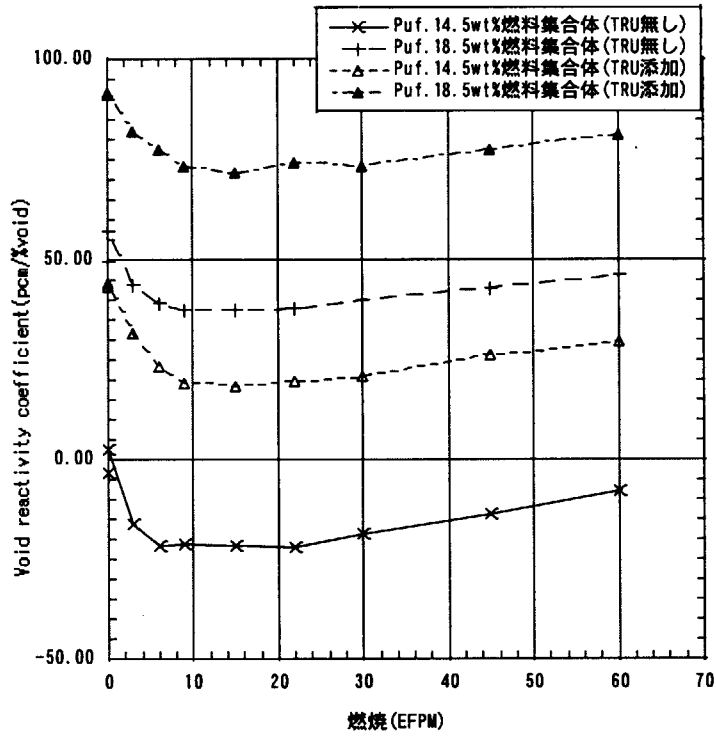


図 8-3 TRU 混合燃料集合体燃焼計算結果 (ボイド反応度係数)

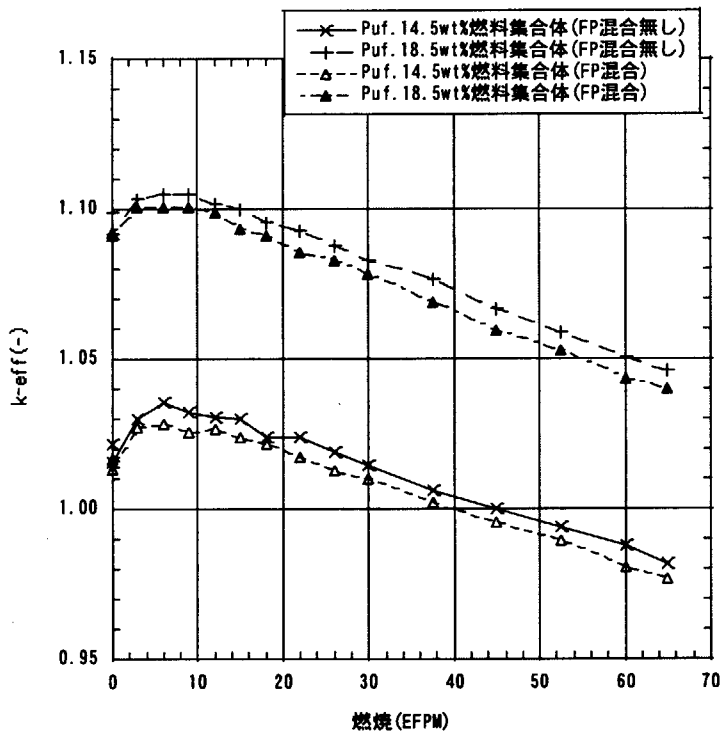


図 8-4 FP 混合燃料集合体燃焼計算結果 ( $k_{eff}$ )

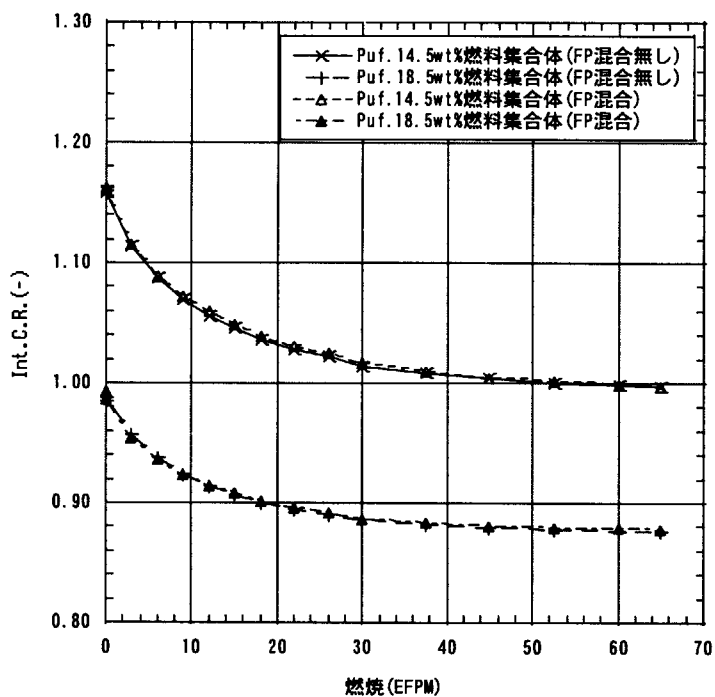


図 8-5 FP 混合燃料集合体燃焼計算結果 (k-eff)

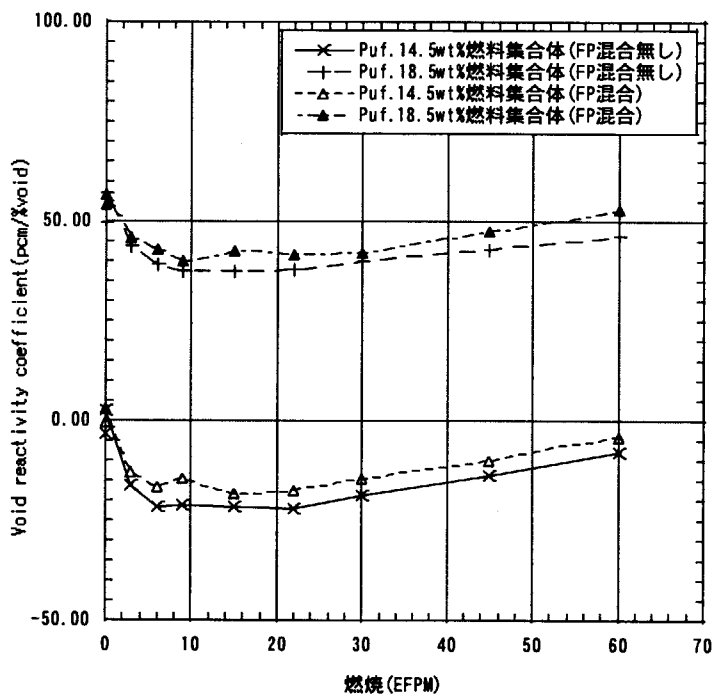


図 8-6 FP 混合燃料集合体燃焼計算結果 (ボイド反応度係数)

## 9. マルチリサイクルの検討

シード 13 層、ブランケット 5 層、核分裂性 Pu18.24wt%を対象として 1999 年度に行ったマルチサイクル計算<sup>1)</sup>と同様に、核分裂性 Pu の富化度を 14.5wt%及び 15.5wt%にして MVP のみで繰り返し計算を行うようにして、4 サイクル計算することにした。

Puf.14.5wt%、及び Puf.15.5wt%燃料集合体において、45(EFPM)取り出し時のシード燃料及びブランケット燃料から Pu を取り出し、次サイクルの Pu 燃料とし(母材は Depleted U U-235 0.2wt%)、リサイクル計算を 4 サイクルまで行った。

Puf.14.5wt%燃料集合体について、各サイクルにおける反応度(k-eff)の比較を図 9-1 に、転換比の比較を図 9-2 に、ポイド反応度係数の比較を図 9-3 に示した。反応度(k-eff)はサイクルが進むに従い前サイクルとの差が小さくとなっている。サイクル 4 では炉心寿命が $\sim$ 30EFPM で 3 バッチ取出し燃焼度 45EFPM に対して余裕が少ない。転換比についても同様の傾向である。ただ、ポイド反応度係数は、サイクルが進むに従い正側へと変化し、平衡には至らない。

また、Puf.15.5wt%燃料集合体について、各サイクルにおける反応度(k-eff)の比較を図 9-4 に、転換比の比較を図 9-5 に、ポイド反応度係数の比較を図 9-6 に示した。反応度(k-eff)はサイクルが進むに従い前サイクルとの差が小さくなっている。サイクル 4 での炉心寿命は 40EFPM で、3 バッチ取出し燃焼度は 60EFPM が期待できる。転換比についても keff とは逆に上昇して平衡に向うが 4 サイクルでは完全には平衡になっていない。但しサイクル 3 以上では 1.0 を上まわっている。ただ、ポイド反応度係数は、サイクルが進むに従い正側へと変化し、平衡には至らない。

各サイクル装荷時の Pu 組成を Puf.14.5wt%燃料集合体について表 9-1 に示し、Puf.15.5wt%燃料集合体について表 9-2 及び図 9-7 に示した。Pu-239 の組成比はサイクル燃焼においてほぼ一定となっている。サイクルが進むにつれ、Pu-241、Pu-242 が減少し、Am-241 が増加する傾向にある。

表 9-1 Puf.14.5wt%シード燃料集合体マルチリサイクル Pu 組成変化 (装荷時)

	サイクル 0		サイクル 1		サイクル 2	
	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)
Pu-238	1.53951E-04	2.700	1.44074E-04	2.503	1.43545E-04	2.469
Pu-239	2.71976E-03	47.900	2.75169E-03	48.004	2.78083E-03	48.023
Pu-240	1.71325E-03	30.300	1.72874E-03	30.284	1.74566E-03	30.273
Pu-241	5.40554E-04	9.600	4.95900E-04	8.724	4.68400E-04	8.157
Pu-242	4.76634E-04	8.500	4.71656E-04	8.332	4.67102E-04	8.168
Am-241	5.63077E-05	1.000	1.22392E-04	2.153	1.67098E-04	2.910

	サイクル 3		サイクル 4	
	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)
Pu-238	1.48254E-04	2.524	1.55737E-04	2.625
Pu-239	2.80735E-03	47.992	2.83267E-03	47.938
Pu-240	1.76409E-03	30.284	1.78336E-03	30.307
Pu-241	4.51048E-04	7.776	4.40496E-04	7.517
Pu-242	4.62795E-04	8.011	4.58806E-04	7.862
Am-241	1.97980E-04	3.413	2.19823E-04	3.751

表 9-2 Puf.15.5wt%シード燃料集合体マルチリサイクル Pu 組成変化 (装荷時)

	サイクル 0		サイクル 1		サイクル 2	
	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)
Pu-238	1.64569E-04	2.700	1.53953E-04	2.516	1.52883E-04	2.486
Pu-239	2.90733E-03	47.900	2.91497E-03	47.846	2.92290E-03	47.734
Pu-240	1.83141E-03	30.300	1.84646E-03	30.435	1.86212E-03	30.538
Pu-241	5.77833E-04	9.600	5.21991E-04	8.640	4.87645E-04	8.031
Pu-242	5.09506E-04	8.500	5.04584E-04	8.386	4.99424E-04	8.259
Am-241	6.01910E-05	1.000	1.31487E-04	2.176	1.79298E-04	2.953

	サイクル 3		サイクル 4	
	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)	密度(#E24/cm <sup>3</sup> )	組成比(wt%)
Pu-238	1.57245E-04	2.543	1.64613E-04	2.647
Pu-239	2.93065E-03	47.595	2.93849E-03	47.445
Pu-240	1.87816E-03	30.630	1.89387E-03	30.707
Pu-241	4.65856E-04	7.629	4.53037E-04	7.376
Pu-242	4.94580E-04	8.133	4.89763E-04	8.007
Am-241	2.11892E-04	3.470	2.34464E-04	3.818

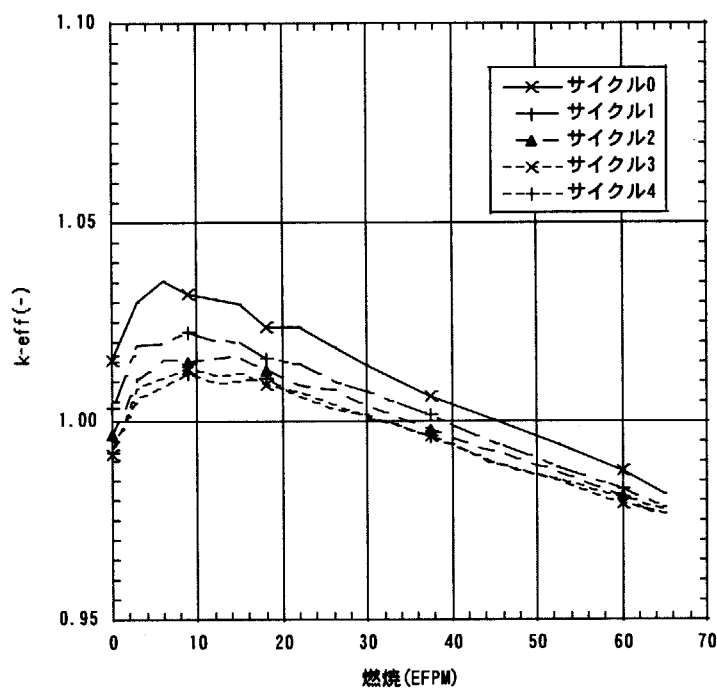


図 9-1 多重サイクル k-eff 変化 (シード燃料 Puf.14.5wt%ベース)

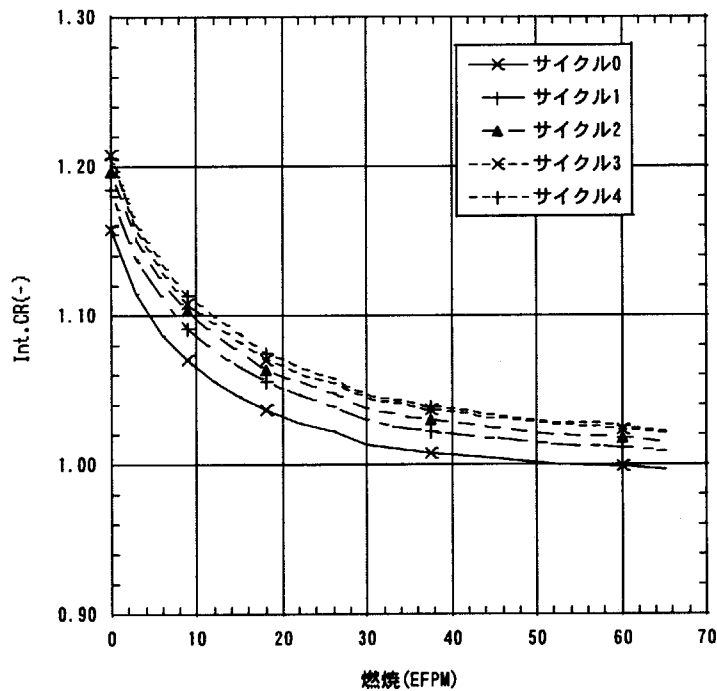


図 9-2 多重サイクル転換比変化 (シード燃料 Puf.14.5wt%ベース)

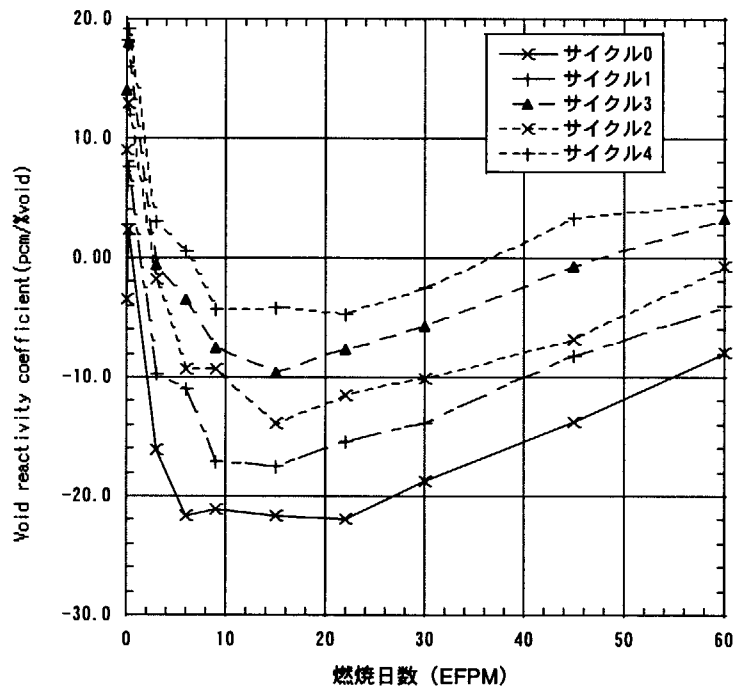


図 9-3 多重サイクルボイド反応度係数の変化 (シード燃料 Puf.14.5wt%ベース)

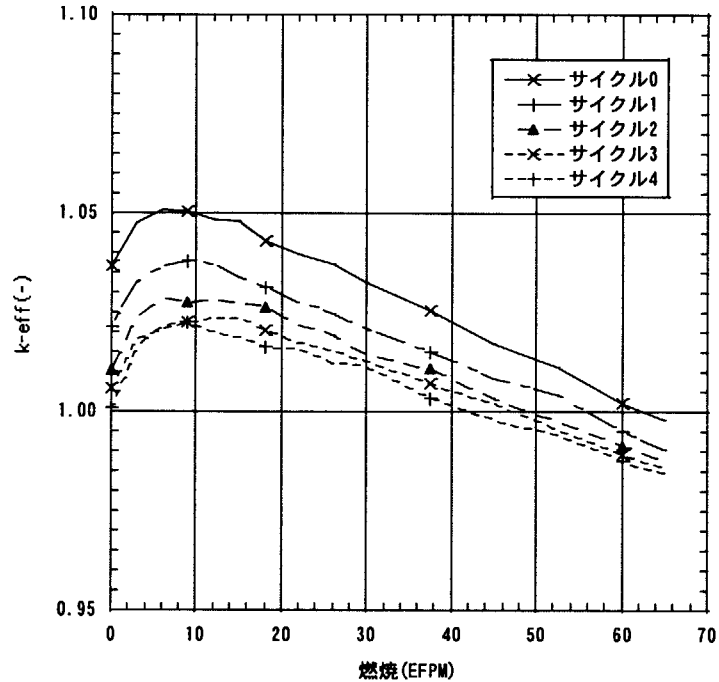


図 9-4 多重サイクル k-eff 変化 (シード燃料 Puf.15.5wt%ベース)



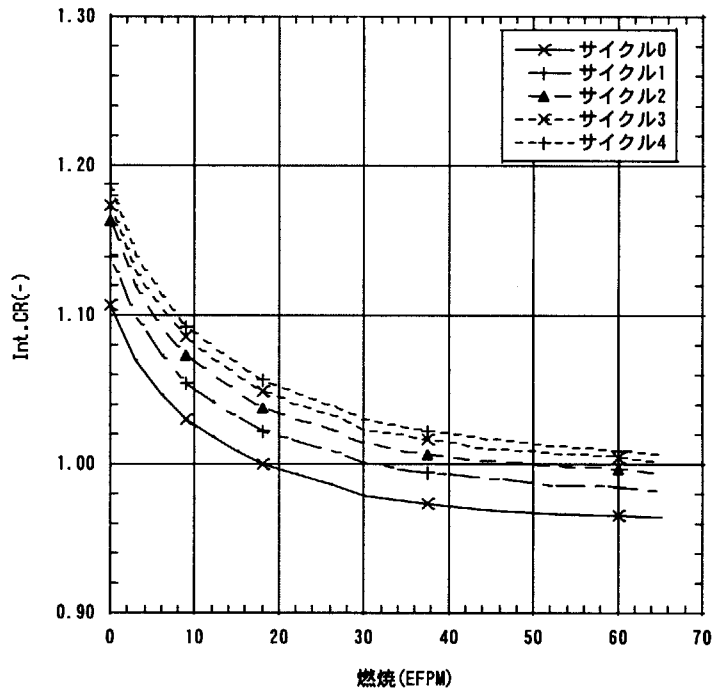


図 9-5 多重サイクル転換比変化 (シード燃料 Puf.15.5wt%ベース)

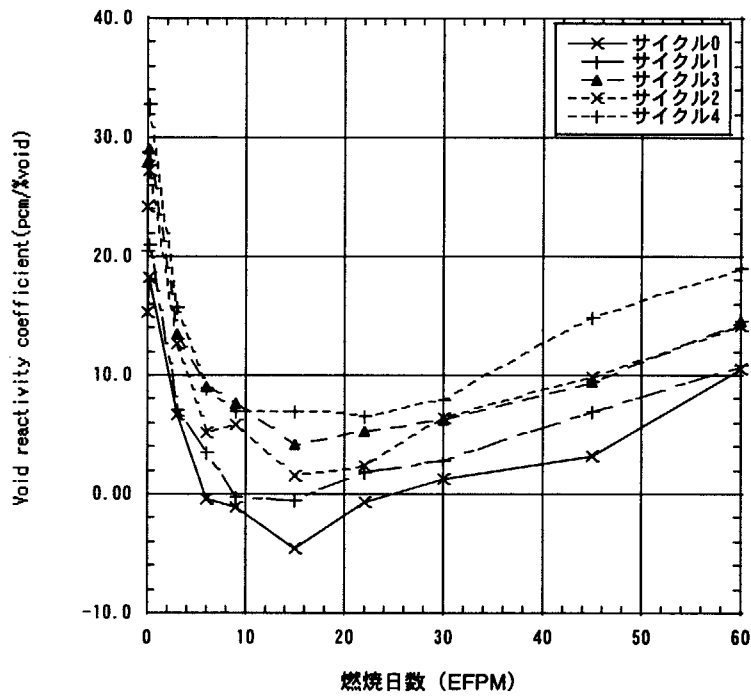


図 9-6 多重サイクルボイド反応度係数の変化 (シード燃料 Puf.15.5wt%ベース)

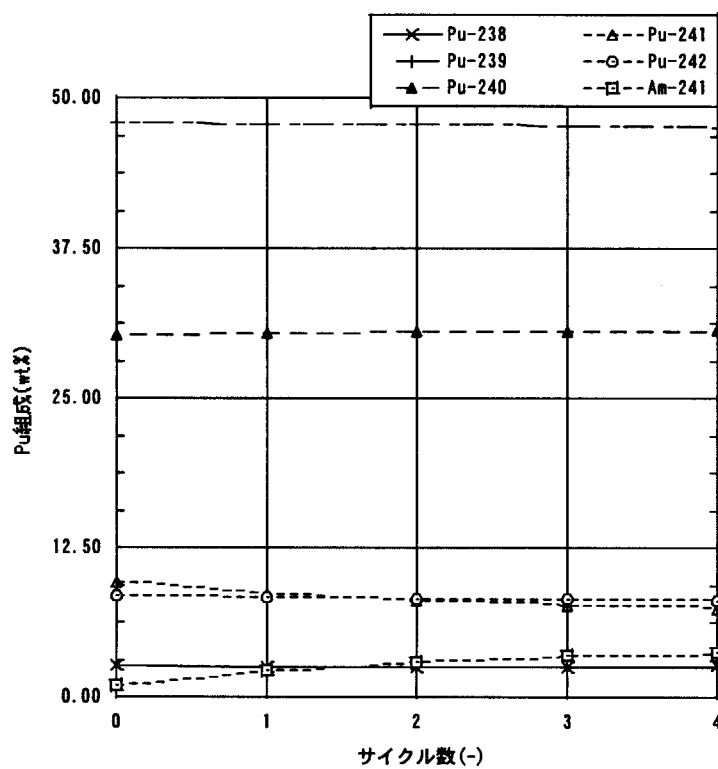


図 9-7 多重サイクル Pu 組成変化 (シード燃料 Pu-15.5wt%ベース)

## 10. 結論

図 5-1 の集合体を採用し、表 5-1、図 7-6 または図 7-7 の炉心に対して MVP-BRURN による計算を行った結果、表 7-2、表 7-3 に示されているように、次の炉心性能が得られた。

- (1) 3 バッチ取替え方式で、各サイクルの運転期間 15 ヶ月。
- (2) 炉心末期の反応度は約  $1.2\% \Delta k/k$  (図 7-7 の 2 領域炉心)
- (3) 取り出し燃料燃焼度は集合体平均 (内部ブランケットを含む) 約 25GWd/t
- (4) 転換比 約 1.0
- (5) ボイド反応度係数 約  $-26.1\text{pcm}/\%\text{void @BOC}$   
 $-21.7\text{pcm}/\%\text{void @EOC}$
- (6) プルトニウム中に約 10% の MA 混入させると、同じ燃焼度を得るためには転換比が約 0.05 減少する。ボイド反応度係数は大幅に増加するので、対策が必要である。
- (7) 全 Pu 重量 9180 g に対し 163 g の FP が同伴すると、反応度が約  $0.5\% \Delta k/k$  減少するが燃焼度末期の反応度に余裕があるので問題ない。ボイド反応度係数は多少正側に移行するが、設計余裕の範囲である。
- (8) プルトニウムマルチサイクル 45 ヶ月後に取り出された燃料を再処理して得られるプルトニウムをリサイクルする計算を第 4 サイクルまで行った。計算結果によりプルトニウム富化度 14.5wt% では反応度的に成立しないことが明らかとなったため、15.5wt% にして検討した。MA、FP のリサイクルは考慮していない。反応度はリサイクルによって次第に減少し、第 3 サイクルから飽和の傾向があるが、4 サイクルでも平衡に達していない。第 1 サイクルと平衡サイクルとの反応度の差異は寿命初期で約  $2.6\% \Delta k/k$ 、燃焼度 60 ヶ月で約  $1.5\% \Delta k/k$  である。4 サイクル後も燃焼度の条件を満たしており、富化度 15.5wt% でマルチサイクルが可能である。転換比はサイクルが進むと約 0.026 増加する。但しボイド反応度係数はサイクルが進むと正側に移行し、ボイド反応度係数対策が必要である。

この結果、転換比を 1.0 以上の条件を満足させるには、この炉心ではこれ以上の燃焼度は望めない。しかしながら、ボイド反応度係数にはまだ余裕があるので、ブランケットに更なる稠密格子を採用して転換比を上げるとともに燃焼度を上げること等を今後さらに検討する。

## 謝辞

本検討を行うにあたり、有益な情報、データを提供していただいた三菱重工の日比宏基氏に感謝します。

参考文献

- 1) 久語輝彦、嶋田昭一郎、大久保努、岩村公道：低減速スペクトル炉の研究（6）－ブルトニウム多重サイクルPWR型炉心の設計－、日本原子力学会「2000年春の年会」O6（2000）
- 2) Tsugio Yokoyama, et al., : “Study on Fast Spectrum BWR Core with Breeding Characteristics”, Advanced Reactors with Innovative Fuels Workshop Proceedings Villigen, Switzerland 21-23 October 1998 (1998)
- 3) Kohki Hibi, et al., : “Conceptual Desining of Reduced-Moderation Water Reactors(2) -Design for PWR-Type Reactors-” Proceeding of ICONE 8 8<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering April 2-6, 2000, Baltimore, MD USA(2000)
- 4) 日比宏基、小林達夫、嶋田昭一郎、大久保努、岩村公道、山本一彦：低減速スペクトル炉の研究（18）－軽水冷却PWR型炉心の設計、日本原子力学会「2001年春の年会」H46（2000）
- 5) 森貴正、他：“MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子／光子輸送計算モンテカルロコード”， JAERI-Data/Code 94-007 (1994)
- 6) 奥村啓介、他：“SRAC95：汎用核計算コードシステム”， JAERI-Data/Code 96-015 (1996)
- 7) T.Nakagawa, et al., : “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3, Rev.2:JENDL-3.2,” J. Nucl. Sci. Technol., 32[12], 1259(1995)
- 8) K.Okumura, et al., : “Validation of a Continuous-Energy Monte Carlo Burn-up Code MVP-BURN and Its Application to Analysis of Post Irradiation Experiment”, J. Nucl. Sci. and Tech., Vol.37, No.2, p.128-138(2000)

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10<sup>-19</sup>J  
1 u=1.66054×10<sup>-27</sup>kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バー	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10<sup>-10</sup>m  
1 bar=100fm<sup>2</sup>=10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>  
1 bar=0.1MPa=10<sup>5</sup>Pa  
1 Gal=1cm/s<sup>2</sup>=10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup>  
1 Ci=3.7×10<sup>10</sup>Bq  
1 R=2.58×10<sup>-4</sup>C/kg  
1 rad=1cGy=10<sup>-2</sup>Gy  
1 rem=1cSv=10<sup>-2</sup>Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10 P (ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 <sup>1</sup>	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 <sup>-4</sup>	1.35951×10 <sup>-3</sup>	1.31579×10 <sup>-3</sup>	1	1.93368×10 <sup>-2</sup>
	6.89476×10 <sup>-3</sup>	7.03070×10 <sup>-2</sup>	6.80460×10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813×10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150×10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>
	3.6×10 <sup>6</sup>	3.67098×10 <sup>5</sup>	1	8.59999×10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072×10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>
	1.60218×10 <sup>-19</sup>	1.63377×10 <sup>-20</sup>	4.45050×10 <sup>-26</sup>	3.82743×10 <sup>-20</sup>	1.51857×10 <sup>-22</sup>	1.18171×10 <sup>-19</sup>	1

1 cal= 4.18605J (計量法)  
= 4.184J (熱化学)  
= 4.1855J (15℃)  
= 4.1868J (国際蒸気表)  
仕事率 1 Ps(仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 73.5.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 <sup>-11</sup>
	3.7×10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 <sup>-3</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

PWR型低減速軽水炉心の設計研究 — シード・ブランケット燃料集合体採用炉心の検討 —

**R100**

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています