

JAERI-Tech

JP0150727

2001-041



燃焼履歴が使用済燃料の反応度に及ぼす影響

2001年6月

林 高史^{*}・須山 賢也・望月 弘樹^{*}・野村 靖

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、お申し越し下さい。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
を行っております。

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, 2001
編集兼発行 日本原子力研究所

燃焼履歴が使用済燃料の反応度に及ぼす影響

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部
林 高史^{*1}・須山 賢也・望月 弘樹^{*2}・野村 靖

(2001年4月19日受理)

使用済燃料中の核種組成は、燃焼期間中の様々なパラメーターの変化に影響を受けることが知られている。本研究ではこれらのパラメーターのうち、これまで詳細に検討されていないホウ素濃度、ホウ素濃度変化、冷却材温度、冷却材温度分布、比出力、運転パターン、定期検査の時間に着目し、これらのパラメーターを現実的に考えられる変動幅で変化させた場合の、使用済燃料の組成の違いを統合化燃焼計算コード SWAT で計算した。次にこの組成の違いが中性子増倍率におよぼす影響を調べるために、使用済燃料の無限配列を想定して汎用核計算コード SRAC95 または連続エネルギー中性粒子輸送計算コード MVP を用いて臨界計算を行い、中性子増倍率を求めた。本報告ではこの計算結果を、中性子増倍率を高く評価するパラメーターは何か、という視点で整理した。これは燃焼度クレジットを導入する際の燃焼計算の計算条件の選定に有用な情報を与えると考えられる。

東海研究所：〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

*1 名古屋大学

*2 (株) 日本総合研究所

Reactivity Effect of Spent Fuel Depending on Burn-up History

Takafumi HAYASHI^{*1}, Kenya SUYAMA, Hiroki MOCHIZUKI^{*2}
and Yasushi NOMURA

Department of Fuel Cycle Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura,Naka-gun,Ibaraki-ken

(Received April 19, 2001)

It is well known that a composition of spent fuel depends on various parameter changes throughout a burn-up period. In this study we aimed at the boron concentration and its change, the coolant temperature and its spatial distribution, the specific power, the operation mode, and the duration of inspection, because the effects due to these parameters have not been analyzed in detail.

The composition changes of spent fuel were calculated by using the burn-up code SWAT, when the parameters mentioned above varied in the range of actual variations. Moreover, to estimate the reactivity effect caused by the composition changes, the criticality calculations for an infinite array of spent fuel were carried out with computer codes SRAC95 or MVP.

In this report the reactivity effects were arranged from the viewpoint of what parameters gave more positive reactivity effect. The results obtained through this study are useful to choose the burn-up calculation model when we take account of the burn-up credit in the spent fuel management.

Keywords: Burnup Credit, Boron Concentration, Coolant Temperature, Operating History, SWAT, SRAC95, MVP, Burnup Calculation

^{*1} Nagoya University

^{*2} The Japan Research Institute, Limited

目次

1 緒言	1
2 作業の概要	3
2.1 作業の流れ	3
2.2 解析に用いた計算コード	3
2.2.1 燃焼計算	3
2.2.2 臨界計算	3
3 計算条件	4
3.1 燃焼計算	4
3.1.1 パラメーター	4
3.1.2 計算体系	5
3.2 臨界計算	8
3.2.1 様々なパラメーター	8
3.2.2 計算体系	8
3.2.3 考慮する核種	8
4 ホウ素濃度変化の影響	11
4.1 計算手法	11
4.2 計算ケース	11
4.3 結果	15
4.3.1 ホウ素濃度を一定とした場合の使用済燃料の無限増倍率の差	15
4.3.2 ホウ素濃度変化パターンの違いによる使用済燃料の中性子増倍率の差	22
5 冷却材温度の影響	35
5.1 冷却材温度が使用済燃料の反応度に及ぼす影響	35
5.1.1 計算手法	35
5.1.2 冷却材温度	35
5.1.3 結果	38
5.2 冷却材温度分布がPWR 使用済燃料の反応度に及ぼす影響	49
5.2.1 計算条件	49
5.2.2 計算手順	51
5.2.3 結果	57
5.3 冷却材温度分布がBWR 使用済燃料の反応度に及ぼす影響	68
5.3.1 計算条件	68
5.3.2 計算手順	70

5.3.3 結果	72
6 運転履歴の影響	88
6.1 比出力が使用済燃料の反応度に及ぼす影響	88
6.1.1 計算手順	88
6.1.2 計算ケース	88
6.1.3 結果	90
6.2 運転パターンが使用済燃料の反応度に及ぼす影響	101
6.2.1 計算手順	101
6.2.2 計算ケース	101
6.2.3 結果	105
6.3 定期検査の時間が使用済燃料の反応度に及ぼす影響	130
6.3.1 計算手順	130
6.3.2 計算ケース	130
6.3.3 結果	134
7 結論	154
謝辞	156
参考文献	157

Contents

1	Introduction	1
2	Outline of this Work	3
2.1	Flow of this Work	3
2.2	Calculation Codes used for Analysis	3
2.2.1	Burnup Calculation	3
2.2.2	Criticality Calculation	3
3	Calculation Condition	4
3.1	Burnup Calculation	4
3.1.1	Parameters	4
3.1.2	Calculation Model	5
3.2	Criticality Calculation	8
3.2.1	Parameters	8
3.2.2	Calculation Model	8
3.2.3	Nuclides Considered in Calculation	8
4	Effect of Boron Concentration	11
4.1	Calculation Method	11
4.2	Calculation Case	11
4.3	Results of Calculation	15
4.3.1	Reactivity Effect Caused by the Difference of Average Boron Concentration	15
4.3.2	Reactivity Effect Caused by the Variation of Boron Concentration	22
5	Effect of Coolant Temperature	35
5.1	Reactivity Effect Caused by the Difference of Coolant Temperature	35
5.1.1	Calculation Method	35
5.1.2	Coolant Temperature	35
5.1.3	Results of Calculation	38
5.2	Reactivity Effect of PWR Spent Fuel Caused by the Coolant Temperature Distribution	49
5.2.1	Calculation Condition	49
5.2.2	Calculation Procedure	51
5.2.3	Results of Calculation	57
5.3	Reactivity Effect of BWR Spent Fuel Caused by the Coolant Temperature Distribution	68

5.3.1	Calculation Condition	68
5.3.2	Calculation Procedure	70
5.3.3	Results of Calculation	72
6	Effect of Operation History	88
6.1	Reactivity Effect Caused by the Difference of Specific Power	88
6.1.1	Calculation Procedure	88
6.1.2	Calculation Case	88
6.1.3	Results of Calculation	90
6.2	Reactivity Effect Caused by the Difference of Operation Mode	101
6.2.1	Calculation Procedure	101
6.2.2	Calculation Case	101
6.2.3	Results of Calculation	105
6.3	Reactivity Effect Caused by the Duration of Inspection	130
6.3.1	Calculation Procedure	130
6.3.2	Calculation Case	130
6.3.3	Results of Calculation	134
7	Conclusions	154
	Acknowledgement	156
	References	157

1 緒言

原子力発電所から出る使用済燃料は、再処理されるまでの間、十分に安全性を確認しながら貯蔵する必要がある。しかし、再処理事業の遅れから、使用済燃料貯蔵容量が不足するおそれがある。Table.1.1に使用済燃料の発生予想量、貯蔵対策必要量を示す¹⁾。使用済燃料貯蔵容量不足の対策の一つに燃焼度クレジットがある。使用済燃料の貯蔵・輸送体系の臨界安全解析の際には、そこにある使用済燃料は全て新燃料であるとして扱っている。しかし、一般に使用済燃料は燃焼により反応度が低下しているので、臨界安全解析時に新燃料と仮定することは安全マージンを多くとっていることになる。燃焼度クレジットとは、燃焼により燃料の反応度が低下していることを考慮することである。

使用済燃料貯蔵・輸送体系に燃焼度クレジットを取り入れる際には、使用済燃料の組成を評価する必要がある。また計算により求める場合には、燃焼度、初期濃縮度、ホウ素濃度、冷却材温度分布、冷却時間、さらには実際の燃焼履歴などの炉内状況をできる限り取り入れて計算することが望ましい。しかし、これらの条件をすべて計算に取り入れることは非常に煩雑でコストもかかる。そのために使用する計算コードの機能、モデル化の方法にもよるが、これらのパラメーターの変化によりもたらされる正の反応度効果を定量的に評価しておくことは、燃焼度クレジットを考慮した実際の施設の設計を効率的に行う上で重要となるであろう。

これまで使用済燃料の燃焼度・初期濃縮度・冷却時間が、使用済燃料の反応度に及ぼす影響についての調査はすでに行われており以下のような結果が得られている。

1. 使用済燃料の燃焼度が高くなるほど使用済燃料の反応度は低下する²⁾。ただし可燃性毒物（ガドリニウム）の入ったBWR燃料集合体に関しては、ガドリニウムが燃焼により減少するため、燃焼度が8GWd/tまでの間は燃焼度が高くなると反応度が高くなり、それ以上の燃焼度では燃焼度が高くなると反応度が低下する³⁾。
2. 初期濃縮度に関しては、使用済燃料の燃焼度が同じであっても、初期濃縮度が高いものほど使用済燃料の反応度は高い²⁾。
3. 冷却時間に関しては、冷却開始直後に短半減期のFPが崩壊するため使用済燃料の反応度は時間がたつにつれ高くなるが、冷却開始1年以降は²⁴¹Puの崩壊により反応度は時間がたつにつれ低下し続ける⁴⁾。

しかし、燃焼時のホウ素濃度、冷却材温度分布、運転履歴が使用済燃料の反応度に及ぼす影響についてのまとまった調査の例は少ない*。そこで本研究では、これらについて実際の原子炉で考え得る範囲で条件を変えて燃焼計算を行い、得られた使用済燃料の核種組成に基づいて中性子増倍率を計算することにより、ホウ素濃度、冷却材温度分布等のパラメータが使用済燃料の反応度に及ぼす影響を調べることを目的とする。

*ホウ素濃度、運転履歴についてはM.D.DeHartが一部行っている⁵⁾⁶⁾

Table 1.1 使用済燃料貯蔵対策必要量予想 (単位:トンU)

	1997～2010 年度	2011～2020 年度	2021～2030 年度
使用済燃料発生量	15200	16000	19100
六ヶ所搬出量	7600	8000	8000
海外搬出量	70	-	-
発電所内貯蔵量	5200	4200	2500
貯蔵対策必要量	2300	3800	8600
貯蔵対策必要量の合計	2300	6000	14600

2 作業の概要

2.1 作業の流れ

パラメータとして着目したホウ素濃度、冷却材温度分布、運転履歴について、文献サーベイにより国内の商業用原子炉に対する典型的な濃度、分布、履歴を定める。それを基準に実際の運転において実現されると考えられる各パラメータの変動幅を選定する。

次に各パラメータの変化に応じて統合化燃焼計算コード SWAT⁷⁾ を用いて燃焼計算を行い、燃焼度が PWR の場合は 50GWd/t、BWR の場合は 40GWd/t での使用済燃料核種組成を求める。

最後に汎用核計算コード SRAC95⁸⁾ または連続エネルギーモンテカルロ中性粒子輸送計算コード MVP⁹⁾ を用いて、SWAT で求めた燃焼後の核種組成から使用済燃料の中性子増倍率を計算する。

設定パラメータの変動による中性子増倍率の変化を比較し、設定パラメータが使用済燃料の反応度に与える影響を調査する。

2.2 解析に用いた計算コード

2.2.1 燃焼計算

本解析では燃焼計算には統合化燃焼計算コード SWAT を用いた。SWAT は 1000 以上の核種を取り扱うことができる ORIGEN2¹⁰⁾ と、照射環境に依存した中性子スペクトルによって燃焼計算を行うことができる SRAC95 を組み合わせたコードシステムである。

SWAT はまず SRAC95 を用いて計算対象の中性子スペクトルを 107 群で計算し、それを用いて各核種の断面積を一群に縮約し ORIGEN2 用の断面積ライブラリを作る。次にこのライブラリを用いて ORIGEN2 で燃焼計算を行う。さらに燃焼計算で求められた核種組成に基づいて SRAC95 により中性子スペクトルを計算し、ORIGEN2 のライブラリを作成する。以下これらの作業を目的の燃焼度に達するまで繰り返し行う。

2.2.2 臨界計算

本解析では使用済燃料の中性子増倍率の計算は主に汎用核計算コード SRAC95 を用い、軸方向冷却材温度分布を考慮した場合の中性子増倍率の計算にのみ連続エネルギーモンテカルロ中性粒子輸送計算コード MVP を用いた。SRAC95 は国内で標準的な炉心解析コードで、衝突確率計算モジュール、Sn 輸送計算モジュール、拡散計算モジュール、燃焼計算モジュールにより構成されている。本解析ではこれらのうち衝突確率計算モジュールを用いて、使用済燃料ピンセルの x,y 方向無限配列で無限増倍率を求めた。MVP は中性子の輸送計算問題をモンテカルロ法によって計算するコードである。

3 計算条件

3.1 燃焼計算

3.1.1 パラメーター

PWR 燃料の燃焼計算時の様々なパラメーターは、Table.3.1 に示すように決定した。

燃料集合体は、現在国内の PWR で多く使われている 17×17 の燃料配列とし、実際の燃料集合体と同様に制御棒クラスタ案内管と炉内計装用案内管を考慮した。また燃料温度、被覆管温度、平均ホウ素濃度については実際の炉内での値が不明なため、標準的な値とした。燃料初期濃縮度、ペレット密度については高浜 3 号の値を使用した¹¹⁾。燃焼サイクル、運転時間については、燃焼度が 50GWd/t となるように決定した。また定期点検の時間は一般に二ヶ月程度であるので 60 日とした。

また BWR については Table.3.2 に示すように決定した。燃料集合体は、現在国内の BWR で多く使われている新型 8×8 燃料集合体とした。また燃料温度、被覆管温度、燃料初期濃縮度は標準的な値を設定した。燃焼サイクル、運転時間については燃焼度が 40GWd/t となるように決定した。また定期点検の時間は PWR の場合と同様に 60 日とした。

Table 3.1 燃焼計算時の様々なパラメーター (PWR)

燃料配列	17×17
燃料棒数	264 本
制御棒クラスタ案内管数	24 本
炉内計装用案内管数	1 本
燃料温度	900K
被覆管温度	600K
冷却材温度	573.41K
平均ホウ素濃度	500ppm
ペレット密度	95%T.D.
燃料棒ピッチ	1.26cm
燃料棒外径	0.95cm
ペレット直径	0.822cm
実効燃料長	364.8cm
燃料初期濃縮度	4.1wt%
比出力	40MW/t
燃焼サイクル	3 サイクル
燃焼度	50GWd/t
運転時間	417 日 × 3
定期点検	60 日

Table 3.2 燃焼計算時の様々なパラメーター (BWR)

燃料配列	8 × 8
燃料棒本数	62 本
ウォーターロッド	2 本
燃料温度	900K
被覆管温度	600K
冷却材温度	557.62K
平均ボイド率	48.82%
ペレット密度	95%T.D.
燃料棒ピッチ	1.63cm
燃料棒外径	1.23cm
ペレット直径	1.06cm
実効燃料長	371.0cm
燃料初期濃縮度	3.9wt%
比出力	26MW/t
燃焼サイクル	4 サイクル
燃焼度	40GWd/t
運転時間	384 日 × 4
定期点検	60.0 日

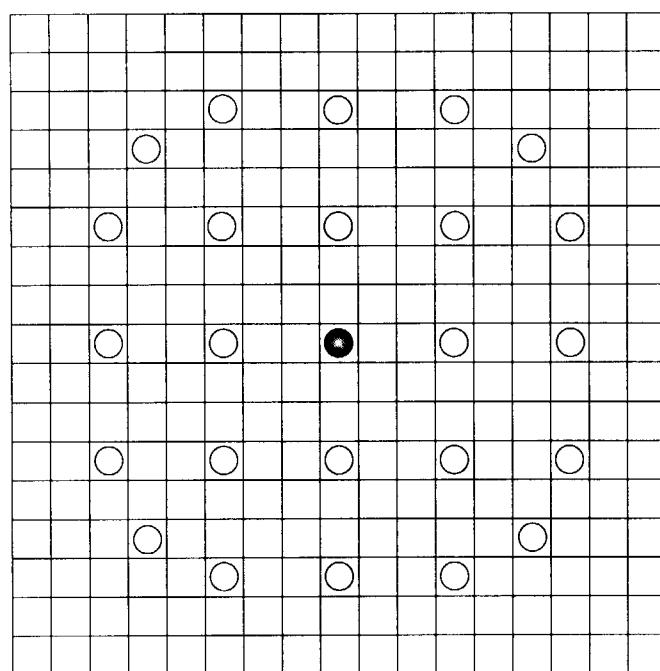
3.1.2 計算体系

燃焼計算は無限長の燃料棒が x,y 方向に無限に配列しているとして計算した。そのとき Table.3.1 や Table.3.2 の集合体の諸元をもとに以下のようにして燃料ピンセルを決めた。

PWR 燃料の場合には Fig.3.1 の上部に示すように制御棒クラスタ案内管、炉内計装用案内管が合わせて 25 本ある。本解析では燃料集合体の減速材と燃料の体積比を保つために、燃料ピンセルの水を制御棒クラスタ案内管と炉内計装用案内管の分だけ増加させ、本来 1.26cm の燃料ピンピッチを Fig.3.1 の左下に示すように 1.33cm とし、さらに Fig.3.1 の右下に示すように、水の体積を保って円形のピンセルとして燃焼計算を行った。

BWR 燃料の場合は Fig.3.2 の上部に示すように、2 本のウォーターロッドと燃料集合体間の水があり、これらを燃料ピンセルの決定時に考慮する必要がある。BWR の場合は運転時に冷却材にボイドが存在するが、一般にウォーターロッド内およびその周りと燃料集合体間の水は沸騰せずボイドが存在しないとされている。そこで Fig.3.2 の右下に示すように冷却材領域を 2 領域に分け、内側の水領域にはボイドが有るとし、外側の水領域にはボイドが無いとした。またこのときも PWR の場合と同様に体積を保存して燃料ピンセルは円形にモデル化した。

17×17燃料集合体



○ 制御棒クラスタ案内管

● 炉内計装用案内管

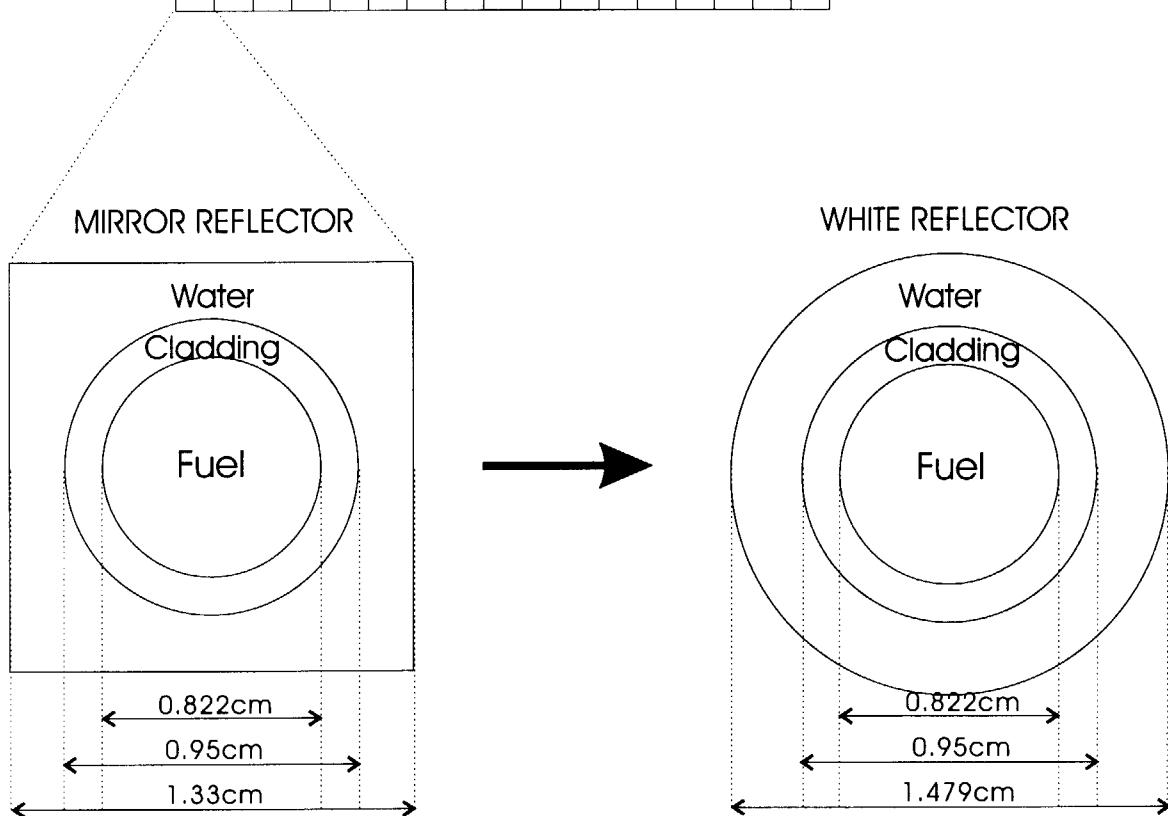


Fig. 3.1 PWR 燃料燃焼計算時の燃料ピンセル

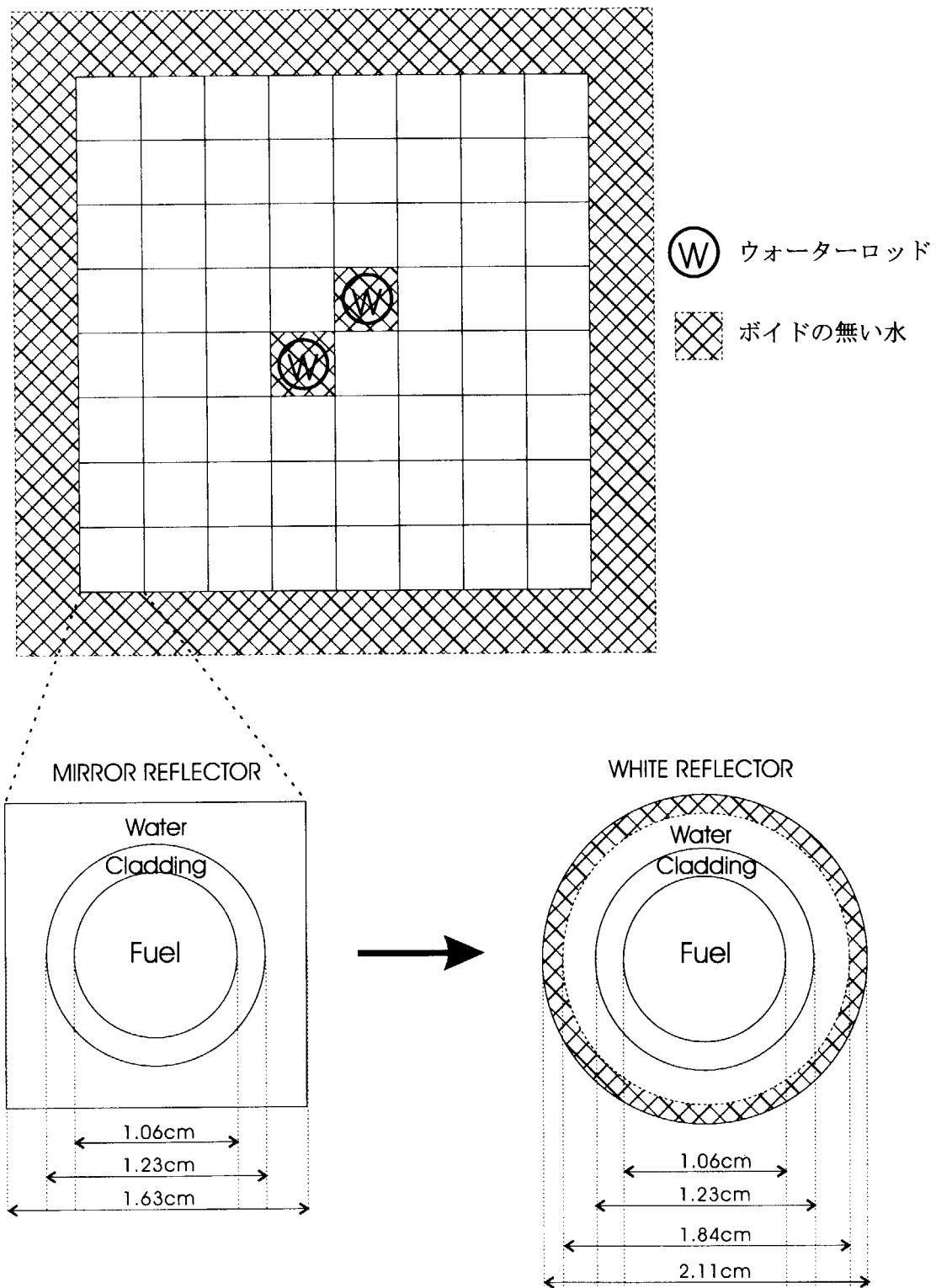


Fig. 3.2 BWR 燃料燃焼計算時の燃料ピンセル

3.2 臨界計算

3.2.1 様々なパラメーター

臨界計算は SRAC95 または MVP を用いて、使用済燃料の貯蔵体系を想定して行った。計算条件を PWR については Table 3.3 に、BWR については Table 3.4 に示す。本解析では使用済燃料を水中で貯蔵していると仮定し、各部の温度は 300K とした。SRAC95 を用いる場合の収束条件は、全て SRAC95 のデフォルトの値を使用した。

Table 3.3 臨界計算時の様々なパラメーター (PWR)

燃料温度	300K
被覆管温度	300K
冷却材温度	300K
燃焼度	50GWd/t
冷却時間	0 日

Table 3.4 臨界計算時の様々なパラメーター (BWR)

燃料温度	300K
被覆管温度	300K
冷却材温度	300K
燃焼度	40GWd/t
冷却時間	0 日

3.2.2 計算体系

計算体系は燃焼計算時と同様に、PWR の場合は Fig.3.1 の右下に示す断面の無限長のピンが無限に配列しているものとし、BWR の場合も同様に Fig.3.2 の右下に示す断面の無限長のピンが無限に配列しているものとした、ただしこのときは水は常温であるとしているのでボイドは存在していないとした。

MVP を用いた臨界計算の体系については 5 章で説明する。

3.2.3 考慮する核種

使用済核燃料中に存在する核種は多く、その全てを臨界計算時に考慮することは非常に煩雑であり、短半減期であったり揮発性であったりする核種はペレット中に存在し続ける保証が無いために、臨界計算で考慮することは安全側であるとは言えない。そのために燃焼度クレジットに

に関する解析では考慮して良い核種が選定されている。そこで本解析では SWAT により出力された核種から考慮して良い核種を選び出し、燃料中にはそれらの核種以外には存在しないものとして臨界計算を行った。

一般に燃焼度クレジットには以下の 2 種類がある。

1. アクチノイドのみを考慮
2. アクチノイドおよび核分裂生成物を考慮

本解析ではアクチノイドのみを考慮する際の核種として Table.3.5 に示す 9 核種を、アクチノイドおよび核分裂生成物（以下 FP と略記）を考慮する際の核種として Table.3.6 に示す 27 核種を選定した。

Table.3.5 に示す 9 核種は米国の原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission:NRC) が、アクチノイドのみを考慮する燃焼度クレジットに採用してよいとして認めたものである¹²⁾。²³⁶U はそれにより反応度が低下するという証拠に欠けるため考慮の対象から外されている、また²³⁷Np については計算値と測定値に大きな違いがあるため考慮の対象から外されている。以下ではこれらの 9 核種を NRC9 核種と呼ぶ。

Table.3.6 に示した 27 核種は、OECD/NEA 燃焼度クレジットワーキンググループが選定したものであり¹³⁾、FP 核種には臨界安全性実験データ検討ワーキンググループが選定した 12 核種を含む¹⁴⁾。この FP は以下のように選ばれている。

1. 中性子吸収断面積が大きいもの
2. 半減期の長いもの
3. 気体状または揮発性でないもの
4. 比較的揮発しにくいもの

ここで 1 に関しては、選ばれた FP による中性子吸収量の合計が全 FP による吸収量の 70 % 以上になるように決める。また 2 に関しては半減期が 3 万年以上のものとする。ただし、¹⁵¹Sm の半減期は約 90 年であるが考慮している。以下ではこれらの 27 核種を JAERI27 核種と呼ぶ。

Table 3.5 NRC の選んだ 9 核種

²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu
²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	²⁴¹ Am	

Table 3.6 JAERI の選んだ 27 核種

アクチノイド	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U	^{237}Np
	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
	^{241}Am	^{243}Am			
FP	^{95}Mo	^{99}Tc	^{101}Ru	^{103}Rh	^{109}Ag
	^{133}Cs	^{147}Sm	^{149}Sm	^{150}Sm	^{151}Sm
	^{152}Sm	^{143}Nd	^{145}Nd	^{153}Eu	^{155}Gd

4 ホウ素濃度変化の影響

4.1 計算手法

使用済燃料の組成を計算するため、3章で示した条件のうち、ホウ素濃度のみを4.2節に示すように様々に変えて、SWATを用いて燃焼計算を行う。得られた組成のうち3.2.3節に示したNRC9核種またはJAERI27核種の生成量をSRAC95の入力データとして使用し、SRAC95を用いて3章に示した燃料ピンの無限配列を想定した系の無限増倍率を算出する。

4.2 計算ケース

一般にPWRで反応度制御用に使用されるホウ素濃度は、炉心ごとに異なっておりどのような値をとるかは公開文献からは容易に確かめられないことが多い。そこで本章では燃焼期間中のホウ素濃度を現実的な範囲で様々に変え、使用済燃料の反応度への影響を調査する。調査は、平均ホウ素濃度が反応度に及ぼす影響と、ホウ素濃度変化パターンが反応度に及ぼす影響について行う。

Table.4.1に日本のPWRのホウ素濃度の一覧を示す¹¹⁾。これは取替炉心で通常運転時のサイクル初期とサイクル末期での値である。**Table.4.1**よりホウ素濃度はサイクル初期で約1300～1000ppm、サイクル末期はほとんどの炉心について公開データが無いが約50～0ppm程度であると考えられる。また一般にホウ素濃度はサイクル中、単調に減少することが知られている。よって平均ホウ素濃度は約700ppmから500ppmの範囲であると考えられる。

以上より本解析では、ホウ素濃度変化パターンが反応度に及ぼす影響を調べるために平均ホウ素濃度を500ppmから700ppmの間でホウ素濃度変化パターンを様々に変化させて使用済燃料の反応度への効果を調べることとする。ホウ素濃度の平均は500ppm、550ppm、600ppm、700ppmの4ケースとし、それぞれについて**Table.4.2**に示すような基本パターンをきめる。

さらに、平均ホウ素濃度は保存しつつホウ素濃度変化パターンを**Fig.4.1**のように変化させる。なお平均濃度500、550、600のケースについては**Table.4.3**に示すように、サイクル初期の濃度を基本より50ppm高くしサイクル末期の濃度を基本より50ppm低くしたパターン（つまり基本パターンより急激にホウ素濃度が変化するパターン）、サイクル初期の濃度を基本より50ppm低くしサイクル末期の濃度を基本より50ppm高くしたパターン（つまり基本パターンより緩やかにホウ素濃度が変化するパターン）、サイクル中、常にホウ素濃度を一定濃度とするパターンを考える。そして以下では、550-急、550-基本、550-緩、550-一定のように”平均濃度-ホウ素濃度変化のパターン”のように各計算を区別する。ただし、平均ホウ素濃度500ppmについては基本ケースのサイクル末期の濃度が0のため500-急は無い。

また、平均濃度700ppmのケースについては、**Table.4.4**に示すようにパターン1から11として、ホウ素濃度変化パターンを他の3ケースより詳細に決めたものと、700-一定としてホウ素濃度が700ppmで一定のパターンと合わせて12パターンの計算を行った。

これらの4ケースのほかに、平均ホウ素濃度が使用済燃料の反応度へ及ぼす影響を調べるために、特殊なケースとしてホウ素濃度を0ppmで一定としたものと、1000ppmで一定としたものに

についても計算を行った。以下ではこれらの特殊パターンを 0-一定, 1000-一定と呼ぶものとする。

Table 4.1 様々な原子炉のホウ素濃度

原子炉名	ホウ素濃度 (ppm)		申請年月
	サイクル初期	サイクル末期	
敦賀 2 号	1000	?	65-10
泊 1 号	1200	?	82-06
泊 2 号	1200	?	82-06
美浜 2 号	1100	?	87-02
高浜 1 号	1000	?	87-09
高浜 2 号	1000	?	87-09
高浜 3 号	1100	?	83-11
高浜 4 号	1300	?	89-03
高浜 4 号	1100	?	83-11
大飯 1 号	1000	?	81-12
大飯 1 号	1100	?	86-08
大飯 2 号	1000	?	81-12
大飯 2 号	1100	?	87-05
大飯 3 号	1300	?	89-04
大飯 4 号	1300	?	89-04
玄海 2 号	1000	?	81-09
玄海 3 号	1000	?	82-10
玄海 4 号	1000	?	82-10
川内 1 号	1100	?	84-05
川内 2 号	1100	?	84-05
伊方 1 号	?	10	81-08
伊方 2 号	?	10	81-08

?は値が不明のもの

Table 4.2 ホウ素濃度変化の基本パターン

平均濃度 (ppm)	サイクル初期 (ppm)	サイクル末期 (ppm)
500	1000	0
550	1050	50
600	1100	100
700	1200	200

Table 4.3 平均濃度 500, 550, 600ppm のホウ素濃度変化パターン

パターン	サイクル初期 (ppm)	サイクル末期 (ppm)
急	基本+50	基本-50
基本	基本	基本
緩	基本-50	基本+50
一定	一定濃度	一定濃度

Table 4.4 平均濃度 700ppm のホウ素濃度変化パターン

パターン	サイクル初期 (ppm)	サイクル末期 (ppm)
1	1400	0
2	1350	50
3	1300	100
4	1250	150
5	1200	200
6	1150	250
7	1100	300
8	1050	350
9	1000	400
10	900	500
11	800	600
一定	700	700

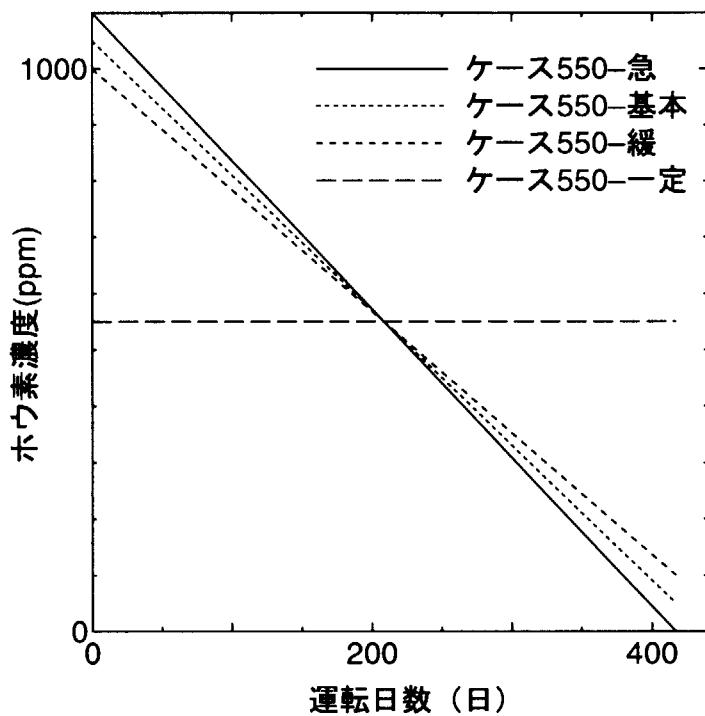


Fig. 4.1 平均ホウ素濃度が 550ppm の時のホウ素濃度変化パターン（平均ホウ素濃度 500ppm, 600ppm, 700ppm の時も同様）

4.3 結果

4.3.1 ホウ素濃度を一定とした場合の使用済燃料の無限増倍率の差

ホウ素濃度を一定として燃焼させた場合の、ホウ素濃度と無限増倍率の関係を Table.4.5, Table.4.6 に、またそれをグラフにプロットしたものを NRC9 核種で評価したものを Fig.4.2 に、JAERI27 核種で評価したものを Fig.4.3 に示す。

Fig.4.2, Fig.4.3 からわかるように、ホウ素濃度が高くなると、使用済燃料の無限増倍率は高くなる。この理由は燃焼計算を行った際にホウ素濃度が 0ppm 一定であるか、1000ppm 一定であるかにより使用済燃料の組成に変化が生じたためである。つまり、算出された無限増倍率の差は何らかの核種の生成量が変化したことにより生じているが、どの核種の生成量の変化が影響しているかは Table.4.5, Table.4.6 からは判定し難い。なぜなら、生成量の変化の量や、中性子吸収断面積などは各核種により様々であるからである。そこで、使用済燃料の無限増倍率の変化がどの核種の生成量の変化によって生じているかを、無限増倍率の差への各核種の寄与率として Fig.4.4 に示す。Fig.4.4 に示した寄与率とは、ホウ素濃度を 0ppm 一定として燃焼させた場合の無限増倍率 (=1.0446) と、ホウ素濃度を 1000ppm 一定として燃焼させた場合の無限増倍率 (=1.0721) の差、

$$1.0721 - 1.0446 = 0.0275$$

のうち、ある核種について 0ppm 一定として燃焼させた場合と、1000ppm 一定として燃焼させた場合の原子個数密度の差が、無限増倍率の差にどれだけ寄与しているかを示したものである。ここで寄与率は ^{234}U の場合を例にして式で示すと以下のよう定義した。

$$\text{寄与率} = \frac{k_{U234} - k_{0-\text{一定}}}{k_{1000-\text{一定}} - k_{0-\text{一定}}}$$

k_{U234} : ^{234}U の原子個数密度のみをホウ素濃度 1000ppm 一定として燃焼させた場合の値に置換し、他の核種の原子個数密度はホウ素濃度 0ppm 一定として燃焼させた場合の無限増倍率

$k_{0-\text{一定}}$: ホウ素濃度を 0ppm 一定とした時の燃焼後の核種組成から算出される無限増倍率

$k_{1000-\text{一定}}$: ホウ素濃度を 1000ppm 一定とした時の燃焼後の核種組成から算出される無限増倍率

Fig.4.4 よりホウ素濃度が高くなると $^{237}\text{Np} \cdot ^{238}\text{Pu} \cdot ^{240}\text{Pu} \cdot ^{149}\text{Sm} \cdot ^{151}\text{Sm} \cdot ^{143}\text{Nd}$ の影響で使用済燃料の無限増倍率は下がるが、 $^{235}\text{U} \cdot ^{239}\text{Pu} \cdot ^{241}\text{Pu}$ により無限増倍率があがる効果の方が大きいため、全体として無限増倍率は上がっていく。ホウ素濃度が高いと ^{235}U が多く残り $^{239}\text{Pu} \cdot ^{241}\text{Pu}$ の生成量が多くなるのは、中性子スペクトルが硬くなるためだと考えられる。

寄与率の概念を図で表したものを Fig.4.5 に示す。無限増倍率の増加に寄与する核種とは、核分裂性核種ならばホウ素濃度を 1000ppm 一定とした場合の方が生成量が多くなる核種、中性子吸収核種なら生成量が少なくなる核種のことである。この場合では ^{235}U は増加に 36% 寄与している、つまり 1000ppm 一定とした場合の方が ^{235}U の残存量が多く、生成量の差を無限増倍率の差にすると、0.0099 となりこれは全核種による差 0.0282 の 36% であることを示している。無限増倍率

の増加に寄与する核種の寄与率の合計は 100% を超えているが、減少に寄与する核種もあるので、考慮している全 27 核種の寄与率の合計が約 100% になる。

Table.4.5, Table.4.6 より、ホウ素濃度を 0ppm で一定とした場合の無限倍率に対する、ホウ素濃度を 1000ppm で一定とした場合の無限倍率の変化率は NRC9 核種の場合で 2.39% $\Delta k/k$, JAERI27 核種の場合で 2.63% $\Delta k/k$ となっている。この無限倍率の変化率は以下のように定義した。(これは反応度の定義と同じである)

$$\text{無限倍率の変化率} = \frac{k_{1000-\text{一定}} - k_{0-\text{一定}}}{k_{0-\text{一定}}}$$

$k_{1000-\text{一定}}$: ホウ素濃度を 1000ppm 一定とした時の燃焼後の核種組成から算出される無限倍率

$k_{0-\text{一定}}$: ホウ素濃度を 0ppm 一定とした時の燃焼後の核種組成から算出される無限倍率

ホウ素濃度が 0 から 1000ppm の間ではホウ素濃度と無限倍率が比例すると仮定すると、燃焼計算時に想定した平均ホウ素濃度が、実際の炉内での値と 100ppm 違っている場合、使用済燃料の無限倍率が 0.2% $\Delta k/k$ 程度変化すると考えられる。よって、ホウ素濃度の誤差が 100ppm 程度であれば、それによって生じる無限倍率の誤差はほぼ無視しうると考えられる。しかし、安全側の評価をするためには、燃焼期間中の平均ホウ素濃度は高めに設定するのがよいと考えられる。

**Table 4.5 ホウ素濃度一定で燃焼させた場合の核種組成と無限増倍率
(PWR,50GWd/t,0年冷却,300K)**

ケース名		0-一定	500-一定	550-一定
ホウ素濃度 (ppm)	サイクル初期	0	500	550
	サイクル末期	0	500	550
	平均	0	500	550
無限増倍率	NRC9 核種	1.1819	1.1969	1.1983
	JAERI27 核種	1.0446	1.0592	1.0605
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.984E-06	3.954E-06	3.951E-06
	²³⁵ U *	1.532E-04	1.608E-04	1.616E-04
	²³⁶ U	1.178E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.020E-02	2.019E-02	2.018E-02
	²³⁷ Np	1.453E-05	1.494E-05	1.498E-05
	²³⁸ Pu *	6.187E-06	6.473E-06	6.501E-06
	²³⁹ Pu *	1.250E-04	1.321E-04	1.328E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.165E-05	6.203E-05	6.207E-05
	²⁴¹ Pu *	3.710E-05	3.903E-05	3.922E-05
	²⁴² Pu *	1.916E-05	1.912E-05	1.912E-05
	²⁴¹ Am *	1.222E-06	1.302E-06	1.310E-06
	²⁴³ Am	4.279E-06	4.376E-06	4.386E-06
	⁹⁵ Mo	5.420E-05	5.402E-05	5.400E-05
	⁹⁹ Tc	6.253E-05	6.238E-05	6.237E-05
	¹⁰¹ Ru	5.900E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	2.998E-05	3.012E-05	3.013E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.260E-06	6.294E-06	6.297E-06
	¹³³ Cs	6.327E-05	6.308E-05	6.306E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.001E-06	3.945E-06	3.940E-06
	¹⁴⁹ Sm	7.586E-08	8.193E-08	8.253E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.445E-05	1.453E-05	1.454E-05
	¹⁵¹ Sm	4.762E-07	5.037E-07	5.064E-07
	¹⁵² Sm	6.001E-06	5.927E-06	5.920E-06
	¹⁴³ Nd	3.848E-05	3.906E-05	3.911E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.515E-05	3.508E-05	3.507E-05
	¹⁵³ Eu	5.523E-06	5.540E-06	5.541E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.461E-09	2.700E-09	2.724E-09

*のついたものは NRC9 核種

**Table 4.6 ホウ素濃度一定で燃焼させた場合の核種組成と無限増倍率
(2)(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)**

ケース名		600-一定	700-一定	1000-一定
ホウ素濃度 (ppm)	サイクル初期	600	700	1000
	サイクル末期	600	700	1000
	平均	600	700	1000
無限増倍率	NRC9 核種	1.1997	1.2024	1.2101
	JAERI27 核種	1.0619	1.0645	1.0721
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.948E-06	3.942E-06	3.924E-06
	²³⁵ U *	1.623E-04	1.637E-04	1.680E-04
	²³⁶ U	1.173E-04	1.173E-04	1.170E-04
	²³⁸ U *	2.018E-02	2.018E-02	2.017E-02
	²³⁷ Np	1.502E-05	1.509E-05	1.532E-05
	²³⁸ Pu *	6.529E-06	6.583E-06	6.745E-06
	²³⁹ Pu *	1.335E-04	1.348E-04	1.389E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.210E-05	6.218E-05	6.240E-05
	²⁴¹ Pu *	3.940E-05	3.977E-05	4.087E-05
	²⁴² Pu *	1.911E-05	1.910E-05	1.908E-05
	²⁴¹ Am *	1.318E-06	1.333E-06	1.380E-06
	²⁴³ Am	4.395E-06	4.412E-06	4.463E-06
	⁹⁵ Mo	5.399E-05	5.395E-05	5.385E-05
	⁹⁹ Tc	6.235E-05	6.233E-05	6.224E-05
	¹⁰¹ Ru	5.896E-05	5.896E-05	5.894E-05
	¹⁰³ Rh	3.014E-05	3.017E-05	3.024E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.300E-06	6.306E-06	6.325E-06
	¹³³ Cs	6.304E-05	6.300E-05	6.290E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.934E-06	3.924E-06	3.894E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.314E-08	8.434E-08	8.796E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.454E-05	1.456E-05	1.460E-05
	¹⁵¹ Sm	5.092E-07	5.145E-07	5.306E-07
	¹⁵² Sm	5.913E-06	5.900E-06	5.861E-06
	¹⁴³ Nd	3.917E-05	3.927E-05	3.958E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.507E-05	3.505E-05	3.501E-05
	¹⁵³ Eu	5.543E-06	5.546E-06	5.554E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.748E-09	2.797E-09	2.943E-09

*のついたものは NRC9 核種

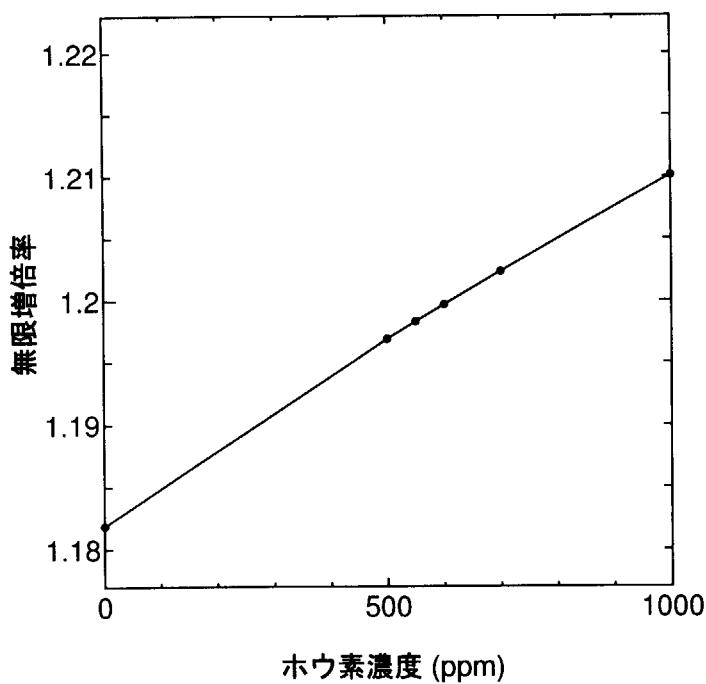


Fig. 4.2 ホウ素濃度一定の場合のホウ素濃度と NRC9 核種で評価した無限増倍率の関係 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

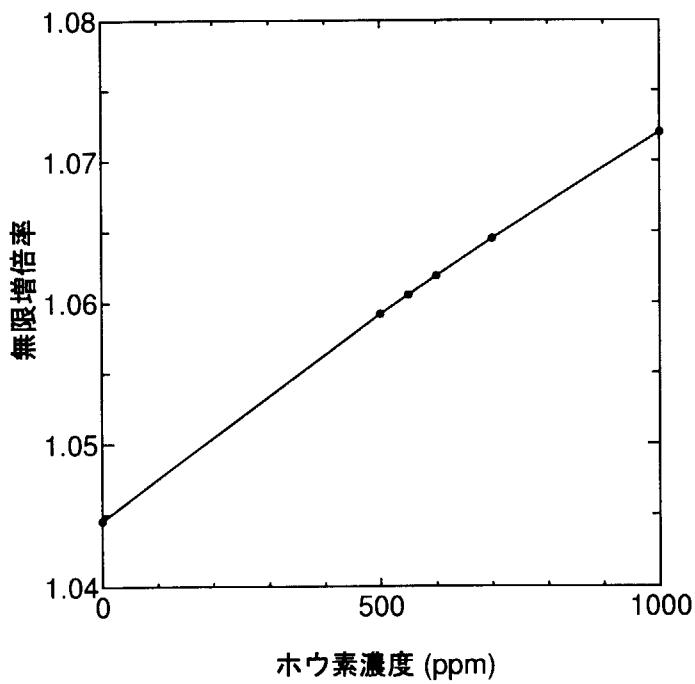


Fig. 4.3 ホウ素濃度一定の場合のホウ素濃度と JAERI27 核種で評価した無限増倍率の関係 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

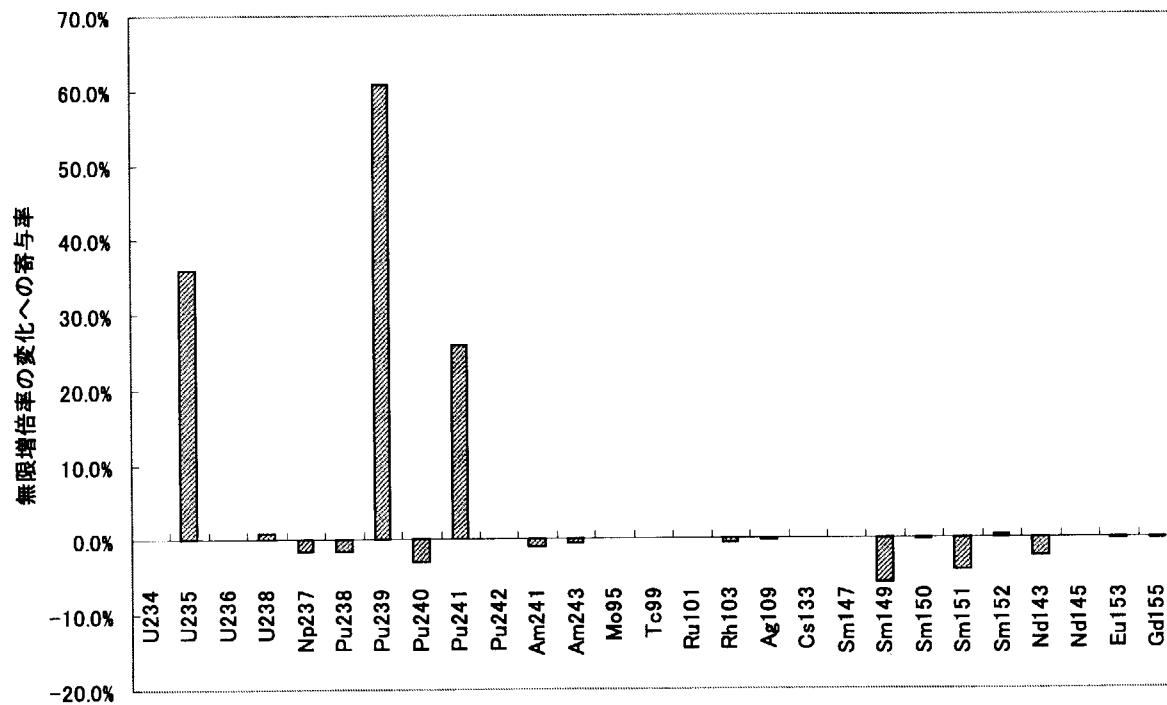


Fig. 4.4 平均ホウ素濃度が 0ppm の場合と、1000ppm の場合との無限増倍率の差への各核種の寄与率

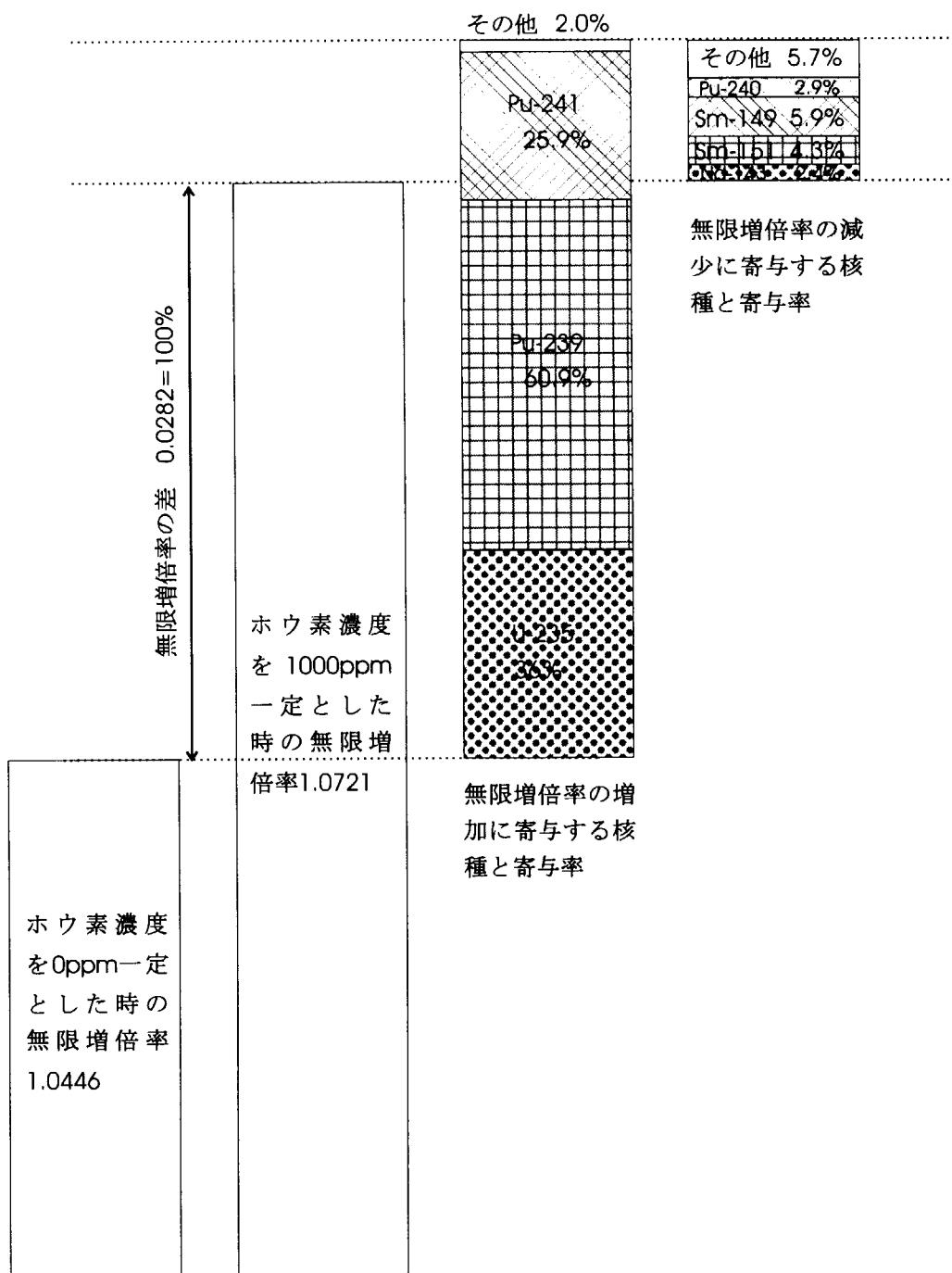


Fig. 4.5 寄与率の概念図

4.3.2 ホウ素濃度変化パターンの違いによる使用済燃料の中性子増倍率の差

平均ホウ素濃度が 500ppm から 700ppm のケースそれぞれについて、濃度変化パターンの違いによる、燃焼後の組成の違いとその組成より求めた無限増倍率とを Table.4.7 から Table.4.12, Fig.4.6 から Fig.4.13 に示す。これらの結果より、どの平均濃度の場合についてもホウ素濃度の変化が緩やかになるほど無限増倍率は高くなり、ホウ素濃度を一定とした場合が最も高くなっている。ここで、ホウ素濃度変化パターンによって無限増倍率が変わるために、無限増倍率の差への各核種の寄与率を Fig.4.14 に示す。Fig.4.14 は平均ホウ素濃度が 550ppm のケースでホウ素濃度変化が急激な場合の核種組成のうち、ある 1 核種の原子個数密度をホウ素濃度が 550ppm 一定の場合での値に変えて SRAC95 で無限増倍率を算出し、以下の式を用いて寄与率を算出したものである。(^{234}U の場合)

$$^{234}\text{U} \text{ の反応度への寄与率} = \frac{k_{U234} - k_{550-\text{急}}}{k_{550-\text{一定}} - k_{550-\text{急}}}$$

k_{U234} : ^{234}U の原子個数密度のみをホウ素濃度 550ppm で一定とした時の燃焼後の核種組成から算出される無限増倍率

$k_{550-\text{急}}$:平均ホウ素濃度が 550ppm でホウ素濃度変化が急激な場合とした時の燃焼後の核種組成から算出される無限増倍率

$k_{550-\text{一定}}$:ホウ素濃度を 550ppm 一定とした時の燃焼度の核種組成から算出される無限増倍率

Fig.4.14 よりホウ素濃度変化パターンが変化した場合の、無限増倍率の増加への影響は ^{239}Pu が最も大きく 82%, つづいて ^{241}Pu の 35% となっている。つまりホウ素濃度の変化を緩やかにすると無限増倍率が高くなるのは ^{239}Pu や ^{241}Pu の生成量が多くなることが主な原因である。

次に基本的なホウ素濃度変化パターンの場合の無限増倍率に対する、ホウ素濃度一定の場合の無限増倍率の変化率を Table.4.13 に示す。

Table.4.13 より、基本パターンとホウ素濃度一定の場合の無限増倍率の変化率は、どの平均ホウ素濃度でもほぼ等しく、NRC9 核種の場合で約 0.17% $\Delta k/k$, JAERI27 核種の場合で約 0.16% $\Delta k/k$ となっている。つまり、現実に基本パターンのようなホウ素濃度変化パターンで燃焼させた燃料の解析の際、ホウ素濃度を平均濃度で一定であると仮定して解析を行うことにより、約 0.16% $\Delta k/k$ 程度の安全マージンが得られることになる。

以上の結果から使用済燃料の核種組成を計算する際には、基本パターンのような現実的なホウ素濃度の変化を無視し、燃焼期間中は平均濃度で一定であると仮定する方が臨界安全評価上厳しい結果となることから、使用済燃料の核種組成を計算する際には、ホウ素濃度は燃焼期間中の平均値で一定とした、簡略化した扱いで良いと考えられる。

**Table 4.7 平均ホウ素濃度 500ppm の場合の核種組成と無限増倍率
(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)**

ケース名		500-基本	500-緩	500-一定
ホウ素濃度 (ppm)	サイクル初期	1000	950	500
	サイクル末期	0	50	500
	平均	500	500	500
無限増倍率	NRC9 核種	1.1948	1.1950	1.1969
	JAERI27 核種	1.0574	1.0576	1.0592
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.957E-06	3.957E-06	3.954E-06
	²³⁵ U *	1.611E-04	1.611E-04	1.608E-04
	²³⁶ U	1.175E-04	1.175E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.490E-05	1.491E-05	1.494E-05
	²³⁸ Pu *	6.450E-06	6.452E-06	6.473E-06
	²³⁹ Pu *	1.309E-04	1.310E-04	1.321E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.236E-05	6.233E-05	6.203E-05
	²⁴¹ Pu *	3.869E-05	3.872E-05	3.903E-05
	²⁴² Pu *	1.919E-05	1.918E-05	1.912E-05
	²⁴¹ Am *	1.306E-06	1.305E-06	1.302E-06
	²⁴³ Am	4.358E-06	4.360E-06	4.376E-06
	⁹⁵ Mo	5.403E-05	5.403E-05	5.402E-05
	⁹⁹ Tc	6.242E-05	6.241E-05	6.238E-05
	¹⁰¹ Ru	5.899E-05	5.898E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.018E-05	3.017E-05	3.012E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.308E-06	6.306E-06	6.294E-06
	¹³³ Cs	6.313E-05	6.312E-05	6.308E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.955E-06	3.953E-06	3.945E-06
	¹⁴⁹ Sm	7.949E-08	7.973E-08	8.193E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.452E-05	1.452E-05	1.453E-05
	¹⁵¹ Sm	4.957E-07	4.964E-07	5.037E-07
	¹⁵² Sm	5.958E-06	5.955E-06	5.927E-06
	¹⁴³ Nd	3.905E-05	3.906E-05	3.906E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.509E-05	3.509E-05	3.508E-05
	¹⁵³ Eu	5.534E-06	5.535E-06	5.540E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.644E-09	2.649E-09	2.700E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 4.8 平均ホウ素濃度 550ppm の場合の核種組成と無限増倍率
(PWR,50GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		550-急	550-基本	550-緩	550-一定
ホウ素濃度 (ppm)	サイクル初期	1100	1050	1000	550
	サイクル末期	0	50	100	550
	平均	550	550	550	550
無限増倍率	NRC9 核種	1.1960	1.1962	1.1964	1.1983
	JAERI27 核種	1.0586	1.0588	1.0590	1.0605
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.954E-06	3.954E-06	3.954E-06	3.951E-06
	²³⁵ U *	1.619E-04	1.619E-04	1.618E-04	1.616E-04
	²³⁶ U	1.175E-04	1.175E-04	1.175E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02	2.018E-02
	²³⁷ Np	1.494E-05	1.494E-05	1.494E-05	1.498E-05
	²³⁸ Pu *	6.475E-06	6.477E-06	6.480E-06	6.501E-06
	²³⁹ Pu *	1.314E-04	1.316E-04	1.317E-04	1.328E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.242E-05	6.239E-05	6.236E-05	6.207E-05
	²⁴¹ Pu *	3.885E-05	3.888E-05	3.891E-05	3.922E-05
	²⁴² Pu *	1.919E-05	1.918E-05	1.918E-05	1.912E-05
	²⁴¹ Am *	1.314E-06	1.314E-06	1.313E-06	1.310E-06
	²⁴³ Am	4.365E-06	4.367E-06	4.369E-06	4.386E-06
	⁹⁵ Mo	5.401E-05	5.401E-05	5.401E-05	5.400E-05
	⁹⁹ Tc	6.241E-05	6.240E-05	6.240E-05	6.237E-05
	¹⁰¹ Ru	5.898E-05	5.898E-05	5.898E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.019E-05	3.019E-05	3.018E-05	3.013E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.313E-06	6.311E-06	6.310E-06	6.297E-06
	¹³³ Cs	6.311E-05	6.311E-05	6.310E-05	6.306E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.950E-06	3.949E-06	3.948E-06	3.940E-06
	¹⁴⁹ Sm	7.985E-08	8.010E-08	8.033E-08	8.253E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.453E-05	1.453E-05	1.453E-05	1.454E-05
	¹⁵¹ Sm	4.976E-07	4.984E-07	4.992E-07	5.064E-07
	¹⁵² Sm	5.954E-06	5.951E-06	5.948E-06	5.920E-06
	¹⁴³ Nd	3.911E-05	3.911E-05	3.911E-05	3.911E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.509E-05	3.509E-05	3.508E-05	3.507E-05
	¹⁵³ Eu	5.535E-06	5.536E-06	5.536E-06	5.541E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.662E-09	2.668E-09	2.673E-09	2.724E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 4.9 平均ホウ素濃度 600ppm の核種組成と無限増倍率 (PWR, 50GWd/t, 0 年
冷却, 300K)

ケース名		600-急	600-基本	600-緩	600-一定
ホウ素濃度 (ppm)	サイクル初期	1150	1100	1050	600
	サイクル末期	50	100	150	600
	平均	600	600	600	600
無限増倍率	NRC9 核種	1.1974	1.1976	1.1978	1.1997
	JAERI27 核種	1.0600	1.0602	1.0603	1.0619
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.951E-06	3.951E-06	3.951E-06	3.948E-06
	²³⁵ U *	1.626E-04	1.626E-04	1.626E-04	1.623E-04
	²³⁶ U	1.175E-04	1.174E-04	1.174E-04	1.173E-04
	²³⁸ U *	2.018E-02	2.018E-02	2.018E-02	2.018E-02
	²³⁷ Np	1.498E-05	1.498E-05	1.498E-05	1.502E-05
	²³⁸ Pu *	6.503E-06	6.505E-06	6.508E-06	6.529E-06
	²³⁹ Pu *	1.321E-04	1.322E-04	1.324E-04	1.335E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.246E-05	6.243E-05	6.239E-05	6.210E-05
	²⁴¹ Pu *	3.903E-05	3.907E-05	3.910E-05	3.940E-05
	²⁴² Pu *	1.919E-05	1.918E-05	1.917E-05	1.911E-05
	²⁴¹ Am *	1.322E-06	1.321E-06	1.321E-06	1.318E-06
	²⁴³ Am	4.375E-06	4.376E-06	4.378E-06	4.395E-06
	⁹⁵ Mo	5.399E-05	5.399E-05	5.399E-05	5.399E-05
	⁹⁹ Tc	6.239E-05	6.239E-05	6.238E-05	6.235E-05
	¹⁰¹ Ru	5.898E-05	5.898E-05	5.898E-05	5.896E-05
	¹⁰³ Rh	3.021E-05	3.020E-05	3.020E-05	3.014E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.316E-06	6.314E-06	6.313E-06	6.300E-06
	¹³³ Cs	6.310E-05	6.309E-05	6.309E-05	6.304E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.945E-06	3.944E-06	3.943E-06	3.934E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.044E-08	8.069E-08	8.094E-08	8.314E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.454E-05	1.454E-05	1.454E-05	1.454E-05
	¹⁵¹ Sm	5.003E-07	5.011E-07	5.020E-07	5.092E-07
	¹⁵² Sm	5.947E-06	5.944E-06	5.940E-06	5.913E-06
	¹⁴³ Nd	3.916E-05	3.916E-05	3.916E-05	3.917E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.508E-05	3.508E-05	3.508E-05	3.507E-05
	¹⁵³ Eu	5.537E-06	5.537E-06	5.538E-06	5.543E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.686E-09	2.691E-09	2.697E-09	2.748E-09

*のついたものは NRC9 核種

**Table 4.10 平均ホウ素濃度 700ppm の場合の核種組成と無限増倍率
(1)(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)**

ケース名		700-1	700-2	700-3	700-4
ホウ素濃度 (ppm)	サイクル初期	1400	1350	1300	1250
	サイクル末期	0	50	100	150
	平均	700	700	700	700
無限増倍率	NRC9 核種	1.1995	1.1997	1.1999	1.2002
	JAERI27 核種	1.0622	1.0623	1.0625	1.0627
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.946E-06	3.946E-06	3.946E-06	3.946E-06
	²³⁵ U *	1.642E-04	1.641E-04	1.641E-04	1.641E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.018E-02	2.018E-02	2.018E-02	2.018E-02
	²³⁷ Np	1.504E-05	1.505E-05	1.505E-05	1.505E-05
	²³⁸ Pu *	6.551E-06	6.554E-06	6.555E-06	6.558E-06
	²³⁹ Pu *	1.331E-04	1.333E-04	1.334E-04	1.335E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.263E-05	6.260E-05	6.257E-05	6.253E-05
	²⁴¹ Pu *	3.931E-05	3.934E-05	3.938E-05	3.941E-05
	²⁴² Pu *	1.920E-05	1.919E-05	1.918E-05	1.918E-05
	²⁴¹ Am *	1.338E-06	1.338E-06	1.338E-06	1.337E-06
	²⁴³ Am	4.387E-06	4.389E-06	4.391E-06	4.393E-06
	⁹⁵ Mo	5.396E-05	5.396E-05	5.396E-05	5.396E-05
	⁹⁹ Tc	6.237E-05	6.237E-05	6.236E-05	6.236E-05
	¹⁰¹ Ru	5.898E-05	5.898E-05	5.898E-05	5.898E-05
	¹⁰³ Rh	3.025E-05	3.024E-05	3.024E-05	3.023E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.326E-06	6.325E-06	6.323E-06	6.322E-06
	¹³³ Cs	6.307E-05	6.307E-05	6.306E-05	6.306E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.937E-06	3.936E-06	3.935E-06	3.934E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.091E-08	8.115E-08	8.140E-08	8.165E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.455E-05	1.455E-05	1.455E-05	1.455E-05
	¹⁵¹ Sm	5.033E-07	5.041E-07	5.049E-07	5.058E-07
	¹⁵² Sm	5.942E-06	5.939E-06	5.936E-06	5.933E-06
	¹⁴³ Nd	3.927E-05	3.927E-05	3.927E-05	3.927E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.507E-05	3.507E-05	3.507E-05	3.506E-05
	¹⁵³ Eu	5.538E-06	5.539E-06	5.539E-06	5.540E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.716E-09	2.721E-09	2.728E-09	2.734E-09

*のついたものは NRC9 核種

**Table 4.11 平均ホウ素濃度 700ppm の場合の核種組成と無限増倍率
(2)(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)**

ケース名		700-5	700-6	700-7	700-8
ホウ素濃度 (ppm)	サイクル初期	1200	1150	1100	1050
	サイクル末期	200	250	300	350
	平均	700	700	700	700
無限増倍率	NRC9 核種	1.2004	1.2006	1.2008	1.2010
	JAERI27 核種	1.0629	1.0630	1.0632	1.0634
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.945E-06	3.945E-06	3.944E-06	3.944E-06
	²³⁵ U *	1.640E-04	1.640E-04	1.640E-04	1.640E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.173E-04	1.173E-04
	²³⁸ U *	2.018E-02	2.018E-02	2.018E-02	2.018E-02
	²³⁷ Np	1.506E-05	1.506E-05	1.507E-05	1.507E-05
	²³⁸ Pu *	6.561E-06	6.563E-06	6.566E-06	6.568E-06
	²³⁹ Pu *	1.336E-04	1.338E-04	1.339E-04	1.340E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.250E-05	6.246E-05	6.244E-05	6.240E-05
	²⁴¹ Pu *	3.944E-05	3.948E-05	3.951E-05	3.954E-05
	²⁴² Pu *	1.917E-05	1.916E-05	1.916E-05	1.915E-05
	²⁴¹ Am *	1.337E-06	1.337E-06	1.336E-06	1.336E-06
	²⁴³ Am	4.395E-06	4.396E-06	4.399E-06	4.400E-06
	⁹⁵ Mo	5.396E-05	5.396E-05	5.396E-05	5.396E-05
	⁹⁹ Tc	6.236E-05	6.236E-05	6.235E-05	6.235E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.023E-05	3.022E-05	3.021E-05	3.021E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.321E-06	6.319E-06	6.318E-06	6.316E-06
	¹³³ Cs	6.305E-05	6.305E-05	6.304E-05	6.304E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.933E-06	3.932E-06	3.931E-06	3.930E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.190E-08	8.214E-08	8.238E-08	8.263E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.455E-05	1.455E-05	1.455E-05	1.455E-05
	¹⁵¹ Sm	5.066E-07	5.074E-07	5.082E-07	5.090E-07
	¹⁵² Sm	5.930E-06	5.927E-06	5.923E-06	5.920E-06
	¹⁴³ Nd	3.927E-05	3.927E-05	3.927E-05	3.927E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.506E-05	3.506E-05	3.506E-05	3.506E-05
	¹⁵³ Eu	5.540E-06	5.541E-06	5.542E-06	5.542E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.740E-09	2.745E-09	2.750E-09	2.756E-09

*のついたものは NRC9 核種

**Table 4.12 平均ホウ素濃度 700ppm の場合の核種組成と無限増倍率
(3)(PWR,50GWd/t,0年冷却,300K)**

ケース名		700-9	700-10	700-11	700-一定
ホウ素濃度 (ppm)	サイクル初期	1000	900	800	700
	サイクル末期	400	500	600	700
	平均	700	700	700	700
無限増倍率	NRC9 核種	1.2012	1.2016	1.2020	1.2024
	JAERI27 核種	1.0635	1.0639	1.0642	1.0645
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.944E-06	3.943E-06	3.942E-06	3.942E-06
	²³⁵ U *	1.639E-04	1.639E-04	1.638E-04	1.637E-04
	²³⁶ U	1.173E-04	1.173E-04	1.173E-04	1.173E-04
	²³⁸ U *	2.018E-02	2.018E-02	2.018E-02	2.018E-02
	²³⁷ Np	1.507E-05	1.508E-05	1.509E-05	1.509E-05
	²³⁸ Pu *	6.570E-06	6.574E-06	6.579E-06	6.583E-06
	²³⁹ Pu *	1.341E-04	1.344E-04	1.346E-04	1.348E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.237E-05	6.231E-05	6.224E-05	6.218E-05
	²⁴¹ Pu *	3.958E-05	3.964E-05	3.971E-05	3.977E-05
	²⁴² Pu *	1.914E-05	1.913E-05	1.912E-05	1.910E-05
	²⁴¹ Am *	1.336E-06	1.335E-06	1.334E-06	1.333E-06
	²⁴³ Am	4.402E-06	4.405E-06	4.409E-06	4.412E-06
	⁹⁵ Mo	5.396E-05	5.395E-05	5.395E-05	5.395E-05
	⁹⁹ Tc	6.234E-05	6.234E-05	6.233E-05	6.233E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.896E-05	5.896E-05	5.896E-05
	¹⁰³ Rh	3.020E-05	3.019E-05	3.018E-05	3.017E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.315E-06	6.312E-06	6.309E-06	6.306E-06
	¹³³ Cs	6.303E-05	6.302E-05	6.301E-05	6.300E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.929E-06	3.928E-06	3.926E-06	3.924E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.288E-08	8.336E-08	8.386E-08	8.434E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.456E-05	1.456E-05	1.456E-05	1.456E-05
	¹⁵¹ Sm	5.098E-07	5.114E-07	5.130E-07	5.145E-07
	¹⁵² Sm	5.918E-06	5.912E-06	5.906E-06	5.900E-06
	¹⁴³ Nd	3.927E-05	3.927E-05	3.927E-05	3.927E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.506E-05	3.506E-05	3.505E-05	3.505E-05
	¹⁵³ Eu	5.543E-06	5.544E-06	5.545E-06	5.546E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.763E-09	2.774E-09	2.785E-09	2.797E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 4.13 各平均濃度での、基本的なホウ素濃度変化パターンの場合の無限増倍率とホウ素濃度一定の場合の無限増倍率の変化率

	平均ホウ素濃度				
	500ppm	550ppm	600ppm	700ppm	
基本パターンとホウ素濃度一定の場合の無限増倍率の変化率 % $\Delta k/k$	NRC9 核種 JAERI27 核種	0.177 0.165	0.175 0.163	0.174 0.162	0.168 0.156

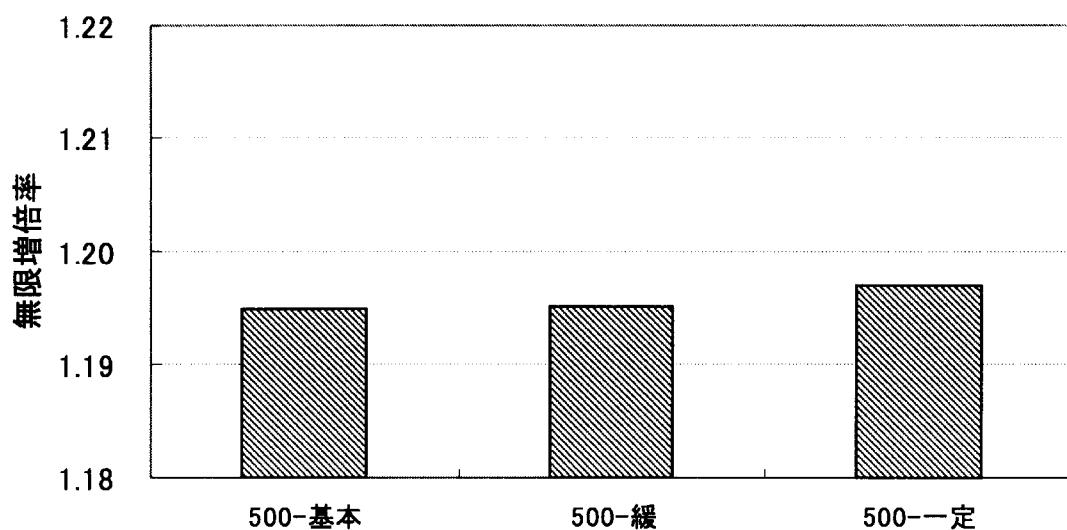


Fig. 4.6 平均ホウ素濃度 500ppm の場合の NRC9 核種で評価した無限増倍率の
ホウ素濃度変化パターンによる違い (PWR, 50GWd/t, 0 年冷却, 300K)

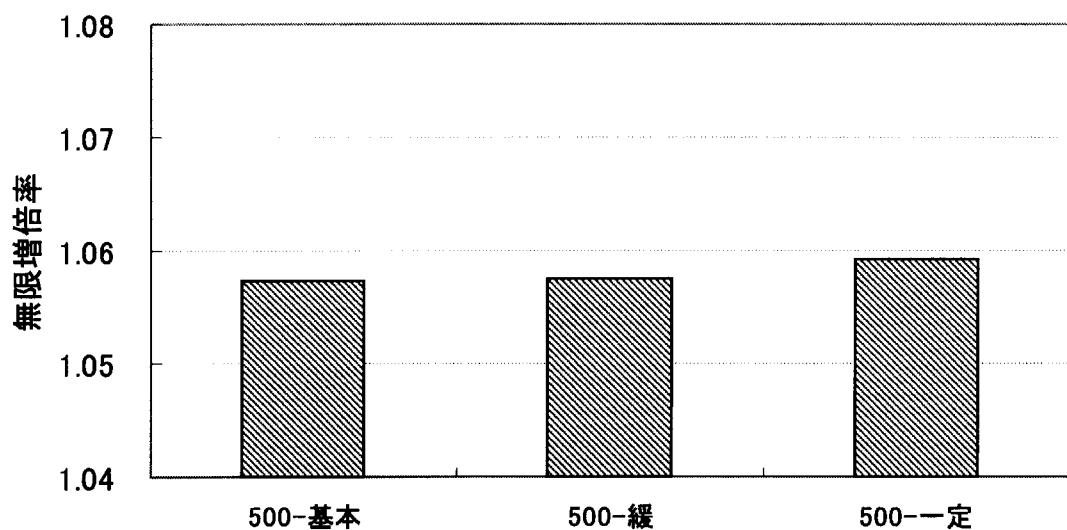


Fig. 4.7 平均ホウ素濃度 500ppm の場合の JAERI27 核種で評価した無限増倍率
のホウ素濃度変化パターンによる違い (PWR, 50GWd/t, 0 年冷却, 300K)

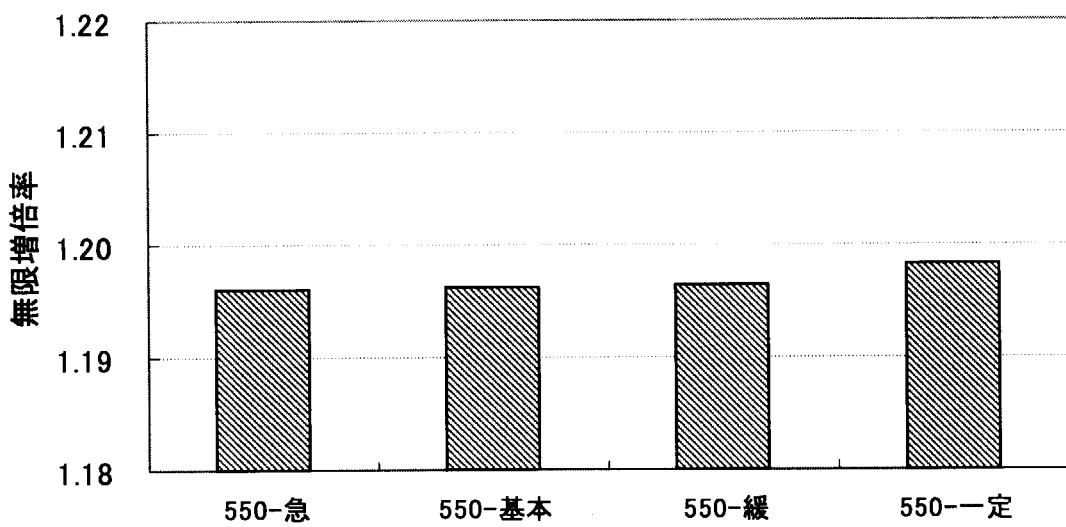


Fig. 4.8 平均ホウ素濃度 550ppm の場合の NRC9 核種で評価した無限増倍率の
ホウ素濃度変化パターンによる違い (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

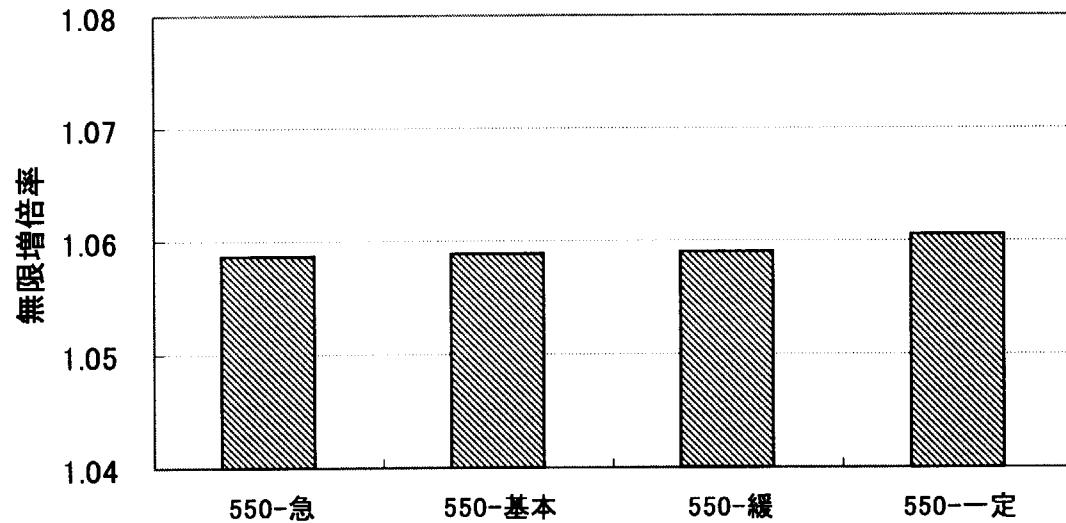


Fig. 4.9 平均ホウ素濃度 550ppm の場合の JAERI27 核種で評価した無限増倍率
のホウ素濃度変化パターンによる違い (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

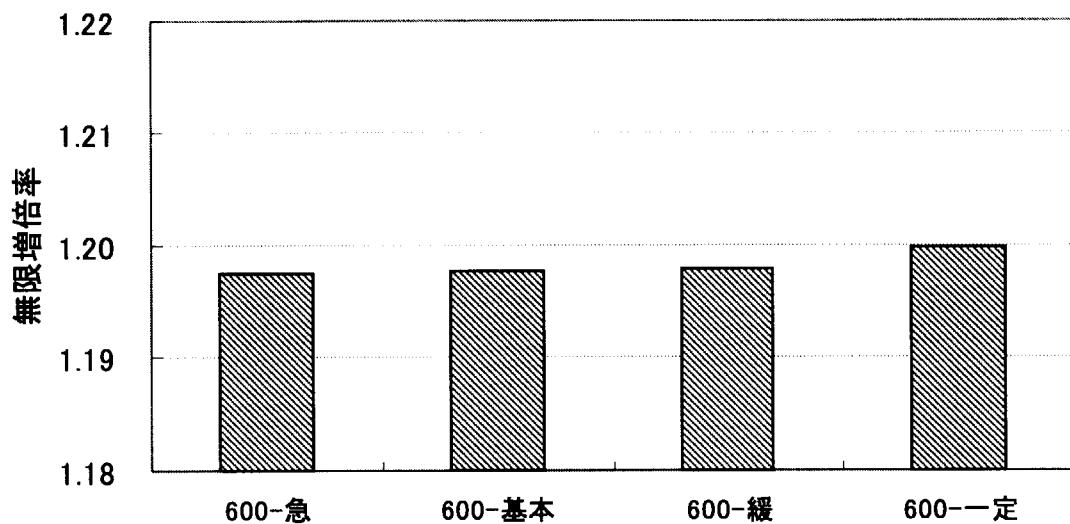


Fig. 4.10 平均ホウ素濃度 600ppm の場合の NRC9 核種で評価した無限増倍率の
ホウ素濃度変化パターンによる違い (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

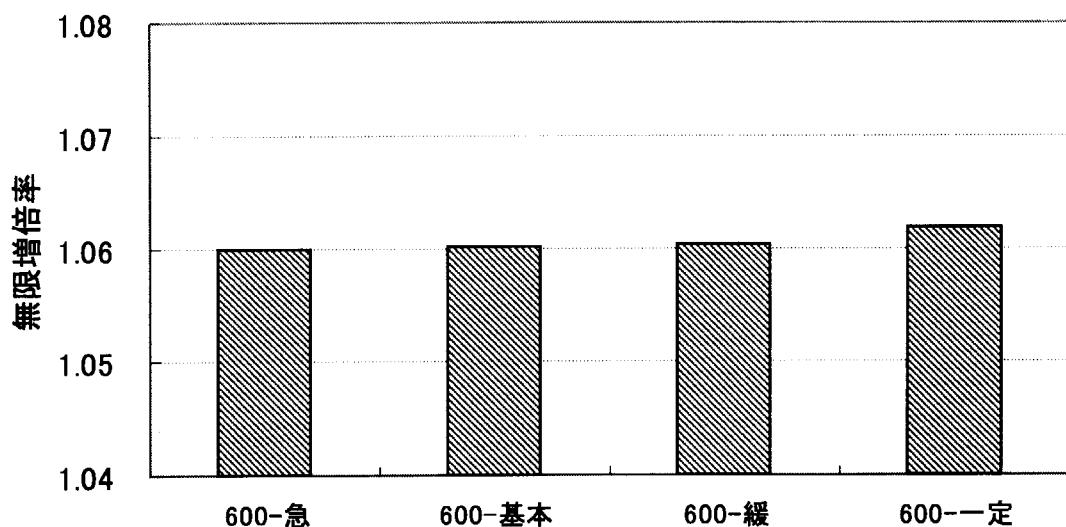


Fig. 4.11 平均ホウ素濃度 600ppm の場合の JAERI27 核種で評価した無限増倍率
のホウ素濃度変化パターンによる違い (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

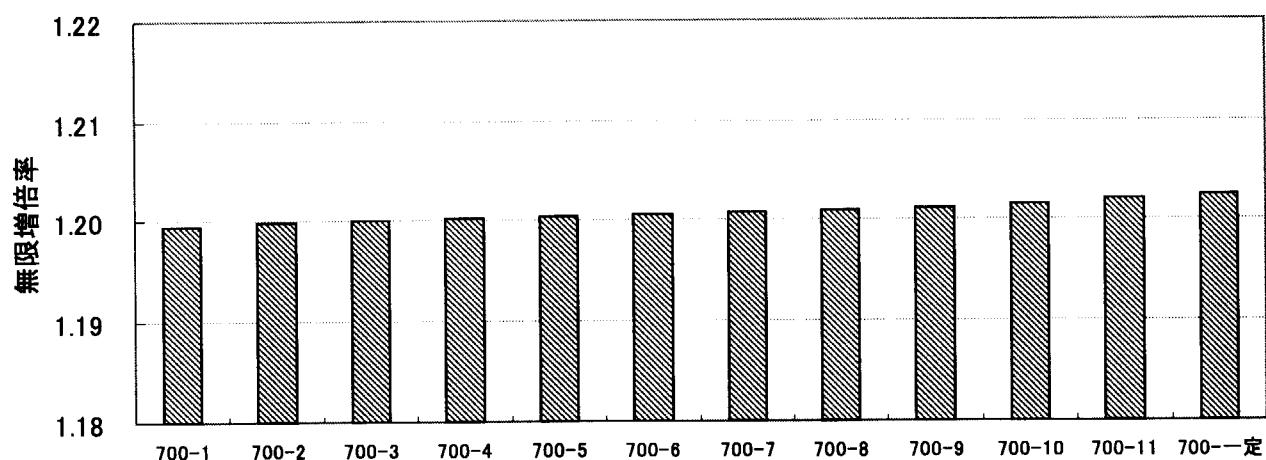


Fig. 4.12 平均ホウ素濃度 700ppm の場合の NRC9 核種で評価した無限増倍率の
ホウ素濃度変化パターンによる違い (PWR, 50GWd/t, 0 年冷却, 300K)

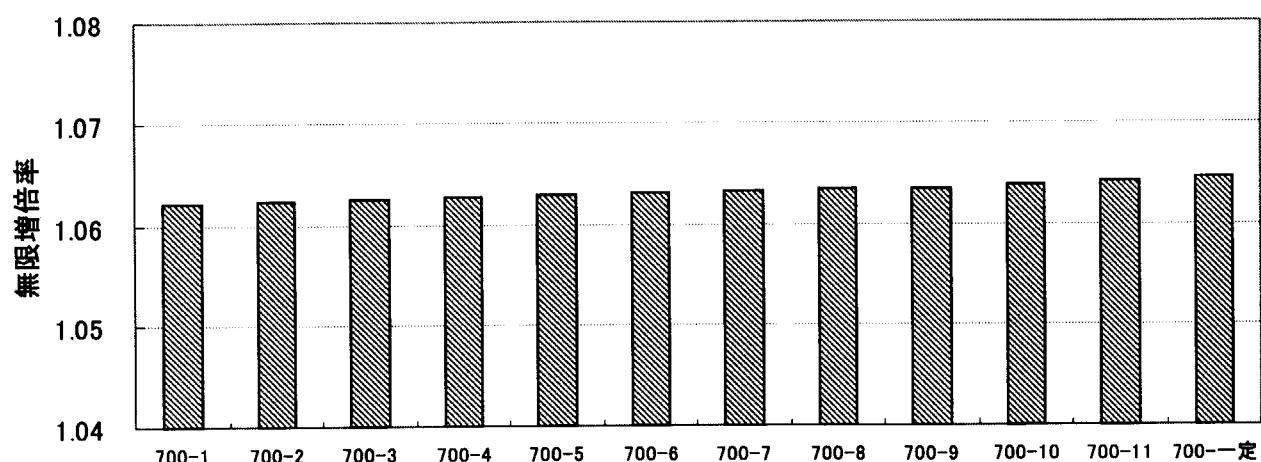


Fig. 4.13 平均ホウ素濃度 700ppm の場合の JAERI27 核種で評価した無限増倍率
のホウ素濃度変化パターンによる違い (PWR, 50GWd/t, 0 年冷却, 300K)

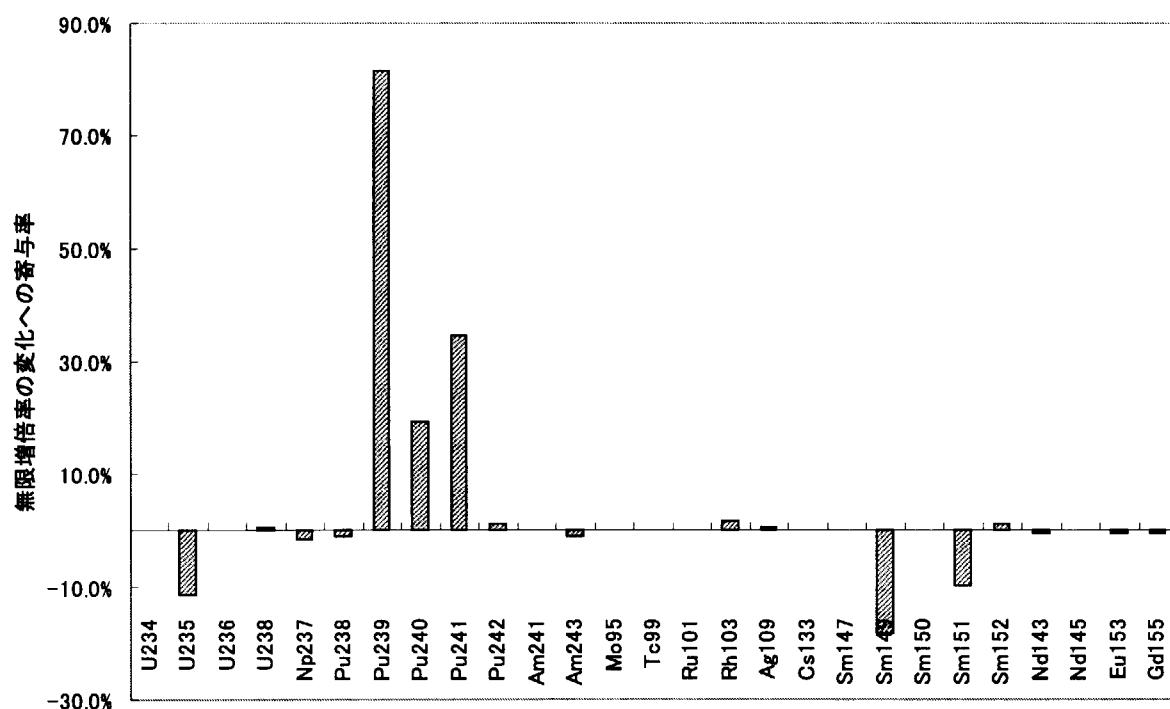


Fig. 4.14 ホウ素濃度変化が急激な場合とホウ素濃度一定の場合との無限増倍率の差への各核種の寄与率

5 冷却材温度の影響

5.1 冷却材温度が使用済燃料の反応度に及ぼす影響

5.1.1 計算手法

燃焼計算は3章で示した条件のうち、冷却材温度を次節で示す値に変えて SWAT を用いて行う。得られた組成のうち 3.2.3 節に示した NRC9 核種または JAERI27 核種を選び、SRAC95 を用いて 3 章に示した燃料ピンの無限配列で無限増倍率を求める。

5.1.2 冷却材温度

Table.5.1 に日本の PWR の冷却材温度を示す¹¹⁾。この表より PWR の冷却材温度は炉心入口で 557~567K、炉心出口で 593~598K、温度差で 28~37K の範囲に分布していることがわかる。そこで本節では、これらの値の平均を取って、冷却材の入口、出口温度および温度差を Table.5.2 のように決め、原子炉の軸方向の出力分布を cos 分布、冷却材の温度上昇の割合は軸方向出力積分値に比例していると仮定し、これに従う入口、出口の温度差が 35.1K になるように冷却材温度分布を決めた。軸方向出力から cos 分布と仮定した軸方向の冷却材温度上昇の割合を Fig.5.1 に、軸方向冷却材温度分布を Fig.5.2 に示す。次に全長 364.8cm の燃料棒を 24 ノードに分け、各ノードでの平均冷却材温度を Fig.5.2 の冷却材温度分布より決め、その冷却材温度ごとに、つまり各ノードごとに SWAT を用いて燃焼計算を行った。

Table 5.1 PWR の冷却材温度

原子炉	冷却材温度 (K)			
	入口	出口	温度差	平均
敦賀 2 号	562	598	36	580
泊 1 号	561	596	35	578.5
泊 2 号	561	596	35	578.5
美浜 1 号	567	595	28	581
美浜 2 号	566	597	31	581.5
美浜 2 号	562	593	31	577.5
美浜 3 号	560	595	35	577.5
高浜 1 号	560	595	35	577.5
高浜 2 号	560	595	35	577.5
高浜 3 号	557	594	37	575.5
高浜 4 号	557	594	37	575.5
大飯 1 号	562	598	36	580
大飯 2 号	562	598	36	580
大飯 3 号	562	598	36	580
大飯 4 号	562	598	36	580
伊方 1 号	561	596	35	578.5
伊方 2 号	561	596	35	578.5
玄海 1 号	561	596	35	578.5
玄海 2 号	561	596	35	578.5
玄海 3 号	562	598	36	580
玄海 4 号	562	598	36	580
川内 1 号	557	594	37	575.5
川内 2 号	557	594	37	575.5

Table 5.2 計算に用いた PWR の冷却材温度

原子炉入口温度	560.6K
原子炉出口温度	595.7K
温度上昇	35.1K

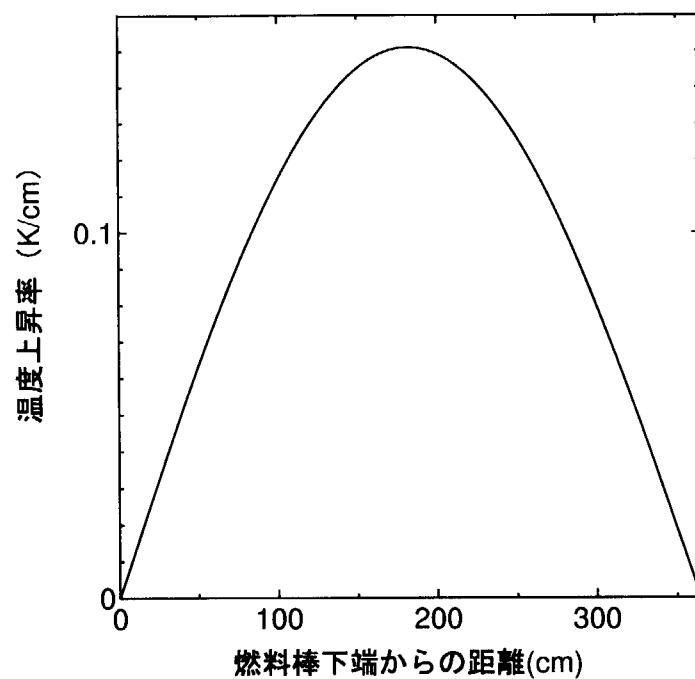


Fig. 5.1 軸方向冷却材温度上昇率分布 (PWR)

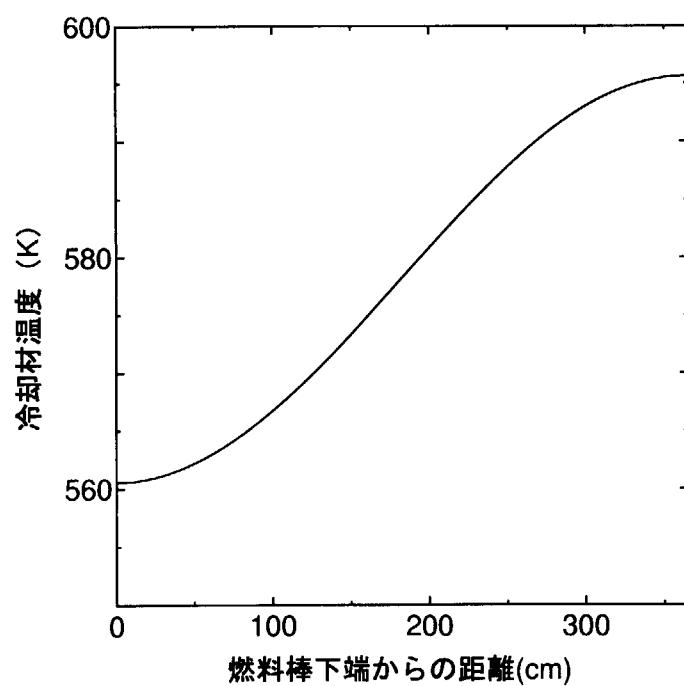


Fig. 5.2 軸方向冷却材温度分布 (PWR)

5.1.3 結果

24 ノードに対し指定した冷却材温度ごとに燃焼計算を行って 24 組の核種組成を求める。その各々の組成の燃料ピンが無限に配列した体系に対して無限増倍率を求めた。結果を Table.5.3 から Table.5.9 に示す。また冷却材温度を平均温度とした場合の核種組成と無限増倍率を Table.5.9 に示す。また、冷却材温度と無限増倍率の関係を NRC9 核種で評価したものと Fig.5.3 に、JAERI27 核種で評価したものと Fig.5.4 に示す。Fig.5.3, Fig.5.4 より燃焼中の冷却材温度が高いほど、使用済燃料の無限増倍率は高くなっていることがわかる。

Fig.5.5 に冷却材温度が変化した場合の無限増倍率の差への各核種の寄与率を示す。Fig.5.5 は冷却材温度を 560.6K (燃料棒下端のノードでの温度) とした場合の核種組成のうち、任意の 1 核種の原子個数密度を冷却材温度を 595.6K (燃料棒上端のノードでの温度) として求めた時の原子個数密度に変えて SRAC95 を用いて無限増倍率を算出し、以下の式を用いて寄与率を算出したものである。例として ^{234}U の場合の式を以下に示す。

$$^{234}\text{U} \text{ の反応度への寄与率} = \frac{k_{U234} - k_{560.6K}}{k_{595.6K} - k_{560.6K}}$$

k_{U234} : ^{234}U の原子個数密度のみを冷却材温度 595.6K として燃焼させた場合の値に置換し、その他の核種は、冷却材温度を 560.6K として燃焼させた場合の原子個数密度としたときの無限増倍率

$k_{560.6K}$: 冷却材温度を 560.6K として燃焼した組成による無限増倍率

$k_{595.6K}$: 冷却材温度を 595.6K として燃焼した組成による無限増倍率

Fig.5.5 より無限増倍率の増加は、主に ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu の寄与が大きく、反応度低下への寄与は主に ^{240}Pu が大きいことがわかる。つまり冷却材温度を高くして燃焼計算を行うと ^{235}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu が多くなり無限増倍率が高くなることになる。これは冷却材温度を高くすると、減速材を兼ねる水の密度が低くなり中性子スペクトルが硬くなるので、Pu の生成が多くなるためである。

1 ノードと 24 ノードの無限増倍率の差 ($1.2146 - 1.1891 = 0.0255$) を、温度差 ($595.6 - 560.6 = 35$) で割って、冷却材温度が 1K 上がった時の使用済燃料の無限増倍率の変化を求めると、NRC9 核種で評価した場合で約 $0.073\% \Delta k/k/K$, JAERI27 核種の場合で約 $0.070\% \Delta k/k/K$ である[†]。本解析で用いた条件では、冷却材温度は燃料棒下端と燃料棒上端では 35.1K の差があり、これは無限増倍率におすと、NRC9 核種で評価した場合で $2.6\% \Delta k/k$, JAERI27 核種の場合で $2.5\% \Delta k/k$ に相当し、大きな反応度になっている。また、Table.5.1 より冷却材の平均温度の原子炉による違いを見積もると、最大が 581.5K (美浜 2 号), 最小で 575.5K (高浜 3, 4 号・川内 1, 2 号) なのでその差は 6K となる。これを上と同じように無限増倍率に直すと、NRC9 核種の場合で約 $0.44\% \Delta k/k$, JAERI27 核種の場合で約 $0.42\% \Delta k/k$ と有意な差が見られる。以上のことから、燃焼計算の対象と

[†] これは炉物理でいう減速材温度係数とは違うものである

している炉の冷却材温度がわからない場合は、冷却材温度を高めに設定すれば、臨界安全的により安全側の結果が得られる。

Table 5.3 各ノードの無限増倍率と核種組成 1(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		1	2	3	4
	冷却材温度 (K)	560.6	560.9	561.5	562.4
無限増倍率	NRC9 核種	1.1891	1.1893	1.1896	1.1901
	JAERI27 核種	1.0518	1.0519	1.0522	1.0527
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.971E-06	3.970E-06	3.970E-06	3.969E-06
	²³⁵ U *	1.556E-04	1.557E-04	1.560E-04	1.563E-04
	²³⁶ U	1.176E-04	1.176E-04	1.176E-04	1.176E-04
	²³⁸ U *	2.020E-02	2.020E-02	2.020E-02	2.020E-02
	²³⁷ Np	1.471E-05	1.472E-05	1.473E-05	1.474E-05
	²³⁸ Pu *	6.280E-06	6.285E-06	6.293E-06	6.306E-06
	²³⁹ Pu *	1.285E-04	1.285E-04	1.287E-04	1.289E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.123E-05	6.125E-05	6.128E-05	6.133E-05
	²⁴¹ Pu *	3.788E-05	3.790E-05	3.796E-05	3.803E-05
	²⁴² Pu *	1.908E-05	1.909E-05	1.909E-05	1.909E-05
	²⁴¹ Am *	1.257E-06	1.258E-06	1.260E-06	1.262E-06
	²⁴³ Am	4.301E-06	4.302E-06	4.306E-06	4.311E-06
	⁹⁵ Mo	5.415E-05	5.415E-05	5.414E-05	5.414E-05
	⁹⁹ Tc	6.246E-05	6.246E-05	6.246E-05	6.245E-05
	¹⁰¹ Ru	5.900E-05	5.900E-05	5.900E-05	5.900E-05
	¹⁰³ Rh	3.001E-05	3.001E-05	3.002E-05	3.003E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.258E-06	6.259E-06	6.260E-06	6.263E-06
	¹³³ Cs	6.319E-05	6.319E-05	6.318E-05	6.318E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.982E-06	3.982E-06	3.980E-06	3.977E-06
	¹⁴⁹ Sm	7.794E-08	7.803E-08	7.820E-08	7.845E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.447E-05	1.447E-05	1.448E-05	1.448E-05
	¹⁵¹ Sm	4.825E-07	4.829E-07	4.839E-07	4.853E-07
	¹⁵² Sm	5.973E-06	5.972E-06	5.970E-06	5.967E-06
	¹⁴³ Nd	3.867E-05	3.868E-05	3.870E-05	3.872E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.514E-05	3.514E-05	3.513E-05	3.513E-05
	¹⁵³ Eu	5.532E-06	5.532E-06	5.533E-06	5.533E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.524E-09	2.526E-09	2.534E-09	2.546E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.4 各ノードの無限増倍率と核種組成 2(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		5	6	7	8
	冷却材温度 (K)	563.5	564.9	566.5	568.4
無限増倍率	NRC9 核種	1.1908	1.1916	1.1925	1.1937
	JAERI27 核種	1.0533	1.0541	1.0550	1.0561
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.967E-06	3.965E-06	3.964E-06	3.961E-06
	²³⁵ U *	1.568E-04	1.573E-04	1.579E-04	1.587E-04
	²³⁶ U	1.175E-04	1.175E-04	1.175E-04	1.175E-04
	²³⁸ U *	2.020E-02	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.476E-05	1.479E-05	1.481E-05	1.485E-05
	²³⁸ Pu *	6.321E-06	6.341E-06	6.365E-06	6.393E-06
	²³⁹ Pu *	1.292E-04	1.296E-04	1.300E-04	1.305E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.140E-05	6.148E-05	6.158E-05	6.170E-05
	²⁴¹ Pu *	3.812E-05	3.824E-05	3.838E-05	3.855E-05
	²⁴² Pu *	1.910E-05	1.910E-05	1.911E-05	1.911E-05
	²⁴¹ Am *	1.266E-06	1.271E-06	1.276E-06	1.283E-06
	²⁴³ Am	4.317E-06	4.325E-06	4.335E-06	4.346E-06
	⁹⁵ Mo	5.412E-05	5.411E-05	5.409E-05	5.407E-05
	⁹⁹ Tc	6.245E-05	6.244E-05	6.243E-05	6.242E-05
	¹⁰¹ Ru	5.899E-05	5.899E-05	5.899E-05	5.898E-05
	¹⁰³ Rh	3.003E-05	3.005E-05	3.006E-05	3.007E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.266E-06	6.270E-06	6.274E-06	6.279E-06
	¹³³ Cs	6.317E-05	6.316E-05	6.314E-05	6.313E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.975E-06	3.971E-06	3.966E-06	3.961E-06
	¹⁴⁹ Sm	7.878E-08	7.919E-08	7.966E-08	8.026E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.448E-05	1.449E-05	1.450E-05	1.451E-05
	¹⁵¹ Sm	4.870E-07	4.892E-07	4.918E-07	4.950E-07
	¹⁵² Sm	5.963E-06	5.958E-06	5.953E-06	5.946E-06
	¹⁴³ Nd	3.875E-05	3.880E-05	3.884E-05	3.890E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.512E-05	3.512E-05	3.511E-05	3.510E-05
	¹⁵³ Eu	5.534E-06	5.535E-06	5.536E-06	5.537E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.560E-09	2.578E-09	2.600E-09	2.626E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.5 各ノードの無限増倍率と核種組成 3(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		9	10	11	12
	冷却材温度 (K)	570.4	572.5	574.7	577.0
無限増倍率	NRC9 核種	1.1949	1.1963	1.1978	1.1993
	JAERI27 核種	1.0573	1.0586	1.0600	1.0615
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.958E-06	3.955E-06	3.952E-06	3.948E-06
	²³⁵ U *	1.595E-04	1.604E-04	1.614E-04	1.624E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02	2.018E-02
	²³⁷ Np	1.488E-05	1.492E-05	1.497E-05	1.501E-05
	²³⁸ Pu *	6.425E-06	6.458E-06	6.494E-06	6.533E-06
	²³⁹ Pu *	1.311E-04	1.318E-04	1.325E-04	1.333E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.183E-05	6.197E-05	6.212E-05	6.227E-05
	²⁴¹ Pu *	3.874E-05	3.894E-05	3.916E-05	3.939E-05
	²⁴² Pu *	1.911E-05	1.912E-05	1.912E-05	1.913E-05
	²⁴¹ Am *	1.290E-06	1.299E-06	1.307E-06	1.317E-06
	²⁴³ Am	4.358E-06	4.371E-06	4.384E-06	4.399E-06
	⁹⁵ Mo	5.405E-05	5.403E-05	5.400E-05	5.398E-05
	⁹⁹ Tc	6.240E-05	6.239E-05	6.237E-05	6.236E-05
	¹⁰¹ Ru	5.898E-05	5.897E-05	5.897E-05	5.896E-05
	¹⁰³ Rh	3.009E-05	3.011E-05	3.013E-05	3.015E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.285E-06	6.291E-06	6.297E-06	6.304E-06
	¹³³ Cs	6.311E-05	6.309E-05	6.307E-05	6.304E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.954E-06	3.948E-06	3.941E-06	3.933E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.091E-08	8.162E-08	8.241E-08	8.324E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.451E-05	1.452E-05	1.453E-05	1.455E-05
	¹⁵¹ Sm	4.983E-07	5.021E-07	5.061E-07	5.104E-07
	¹⁵² Sm	5.939E-06	5.931E-06	5.922E-06	5.913E-06
	¹⁴³ Nd	3.896E-05	3.903E-05	3.910E-05	3.918E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.509E-05	3.508E-05	3.507E-05	3.506E-05
	¹⁵³ Eu	5.538E-06	5.539E-06	5.541E-06	5.542E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.655E-09	2.686E-09	2.720E-09	2.758E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.6 各ノードの無限増倍率と核種組成 4(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		13	14	15	16
	冷却材温度 (K)	579.3	581.5	583.7	585.9
無限増倍率	NRC9 核種	1.2010	1.2026	1.2043	1.2060
	JAERI27 核種	1.0631	1.0647	1.0663	1.0680
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.945E-06	3.941E-06	3.937E-06	3.933E-06
	²³⁵ U *	1.635E-04	1.646E-04	1.656E-04	1.668E-04
	²³⁶ U	1.173E-04	1.173E-04	1.173E-04	1.172E-04
	²³⁸ U *	2.018E-02	2.018E-02	2.018E-02	2.017E-02
	²³⁷ Np	1.506E-05	1.511E-05	1.516E-05	1.521E-05
	²³⁸ Pu *	6.574E-06	6.614E-06	6.655E-06	6.699E-06
	²³⁹ Pu *	1.341E-04	1.350E-04	1.358E-04	1.368E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.243E-05	6.260E-05	6.276E-05	6.293E-05
	²⁴¹ Pu *	3.964E-05	3.988E-05	4.014E-05	4.040E-05
	²⁴² Pu *	1.913E-05	1.913E-05	1.913E-05	1.913E-05
	²⁴¹ Am *	1.327E-06	1.336E-06	1.347E-06	1.358E-06
	²⁴³ Am	4.413E-06	4.427E-06	4.442E-06	4.456E-06
	⁹⁵ Mo	5.395E-05	5.392E-05	5.389E-05	5.386E-05
	⁹⁹ Tc	6.234E-05	6.232E-05	6.230E-05	6.228E-05
	¹⁰¹ Ru	5.895E-05	5.894E-05	5.894E-05	5.893E-05
	¹⁰³ Rh	3.017E-05	3.019E-05	3.021E-05	3.024E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.311E-06	6.318E-06	6.325E-06	6.333E-06
	¹³³ Cs	6.302E-05	6.299E-05	6.297E-05	6.294E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.926E-06	3.918E-06	3.909E-06	3.901E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.411E-08	8.499E-08	8.592E-08	8.690E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.456E-05	1.457E-05	1.458E-05	1.459E-05
	¹⁵¹ Sm	5.149E-07	5.193E-07	5.239E-07	5.287E-07
	¹⁵² Sm	5.904E-06	5.894E-06	5.884E-06	5.874E-06
	¹⁴³ Nd	3.925E-05	3.933E-05	3.941E-05	3.949E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.505E-05	3.504E-05	3.502E-05	3.501E-05
	¹⁵³ Eu	5.543E-06	5.544E-06	5.545E-06	5.547E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.797E-09	2.836E-09	2.877E-09	2.919E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.7 各ノードの無限増倍率と核種組成 5(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		17	18	19
	冷却材温度 (K)	587.8	589.7	591.3
無限増倍率	NRC9 核種	1.2076	1.2092	1.2106
	JAERI27 核種	1.0695	1.0710	1.0724
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.929E-06	3.925E-06	3.922E-06
	²³⁵ U *	1.678E-04	1.688E-04	1.697E-04
	²³⁶ U	1.172E-04	1.172E-04	1.171E-04
	²³⁸ U *	2.017E-02	2.017E-02	2.017E-02
	²³⁷ Np	1.525E-05	1.530E-05	1.534E-05
	²³⁸ Pu *	6.737E-06	6.777E-06	6.812E-06
	²³⁹ Pu *	1.376E-04	1.385E-04	1.393E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.309E-05	6.324E-05	6.337E-05
	²⁴¹ Pu *	4.064E-05	4.089E-05	4.111E-05
	²⁴² Pu *	1.912E-05	1.912E-05	1.911E-05
	²⁴¹ Am *	1.367E-06	1.377E-06	1.386E-06
	²⁴³ Am	4.469E-06	4.482E-06	4.493E-06
	⁹⁵ Mo	5.384E-05	5.381E-05	5.379E-05
	⁹⁹ Tc	6.227E-05	6.225E-05	6.223E-05
	¹⁰¹ Ru	5.892E-05	5.891E-05	5.891E-05
	¹⁰³ Rh	3.026E-05	3.028E-05	3.029E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.339E-06	6.346E-06	6.351E-06
	¹³³ Cs	6.292E-05	6.289E-05	6.287E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.893E-06	3.886E-06	3.879E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.778E-08	8.871E-08	8.951E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.460E-05	1.461E-05	1.462E-05
	¹⁵¹ Sm	5.331E-07	5.376E-07	5.415E-07
	¹⁵² Sm	5.865E-06	5.856E-06	5.847E-06
¹⁴³ Nd	3.956E-05	3.964E-05	3.970E-05	
¹⁴⁵ Nd	3.500E-05	3.499E-05	3.497E-05	
¹⁵³ Eu	5.548E-06	5.548E-06	5.549E-06	
¹⁵⁵ Gd	2.959E-09	3.000E-09	3.035E-09	

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.8 各ノードの無限増倍率と核種組成 6(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		20	21	22
	冷却材温度 (K)	592.7	593.8	594.7
無限増倍率	NRC9 核種	1.2119	1.2129	1.2137
	JAERI27 核種	1.0736	1.0746	1.0754
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.918E-06	3.916E-06	3.914E-06
	²³⁵ U *	1.705E-04	1.711E-04	1.717E-04
	²³⁶ U	1.171E-04	1.171E-04	1.171E-04
	²³⁸ U *	2.016E-02	2.016E-02	2.016E-02
	²³⁷ Np	1.538E-05	1.541E-05	1.543E-05
	²³⁸ Pu *	6.844E-06	6.869E-06	6.890E-06
	²³⁹ Pu *	1.401E-04	1.407E-04	1.412E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.350E-05	6.359E-05	6.368E-05
	²⁴¹ Pu *	4.130E-05	4.146E-05	4.159E-05
	²⁴² Pu *	1.911E-05	1.911E-05	1.910E-05
	²⁴¹ Am *	1.394E-06	1.401E-06	1.406E-06
	²⁴³ Am	4.503E-06	4.511E-06	4.517E-06
	⁹⁵ Mo	5.377E-05	5.375E-05	5.373E-05
	⁹⁹ Tc	6.222E-05	6.221E-05	6.220E-05
	¹⁰¹ Ru	5.890E-05	5.889E-05	5.889E-05
	¹⁰³ Rh	3.031E-05	3.032E-05	3.033E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.356E-06	6.361E-06	6.364E-06
	¹³³ Cs	6.285E-05	6.284E-05	6.282E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.873E-06	3.868E-06	3.863E-06
	¹⁴⁹ Sm	9.027E-08	9.085E-08	9.136E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.463E-05	1.463E-05	1.464E-05
	¹⁵¹ Sm	5.451E-07	5.480E-07	5.504E-07
	¹⁵² Sm	5.840E-06	5.834E-06	5.829E-06
	¹⁴³ Nd	3.976E-05	3.981E-05	3.984E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.496E-05	3.496E-05	3.495E-05
	¹⁵³ Eu	5.550E-06	5.550E-06	5.550E-06
	¹⁵⁵ Gd	3.069E-09	3.094E-09	3.116E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.9 各ノードの無限増倍率と核種組成 7(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		23	24	Ave.
	冷却材温度 (K)	595.3	595.6	578.1
無限増倍率	NRC9 核種	1.2143	1.2146	1.2001
	JAERI27 核種	1.0760	1.0763	1.0623
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.912E-06	3.912E-06	3.946E-06
	²³⁵ U *	1.720E-04	1.722E-04	1.629E-04
	²³⁶ U	1.171E-04	1.171E-04	1.173E-04
	²³⁸ U *	2.016E-02	2.016E-02	2.018E-02
	²³⁷ Np	1.545E-05	1.546E-05	1.503E-05
	²³⁸ Pu *	6.905E-06	6.912E-06	6.553E-06
	²³⁹ Pu *	1.415E-04	1.417E-04	1.337E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.373E-05	6.375E-05	6.235E-05
	²⁴¹ Pu *	4.168E-05	4.173E-05	3.951E-05
	²⁴² Pu *	1.910E-05	1.910E-05	1.913E-05
	²⁴¹ Am *	1.410E-06	1.412E-06	1.321E-06
	²⁴³ Am	4.521E-06	4.523E-06	4.406E-06
	⁹⁵ Mo	5.372E-05	5.372E-05	5.396E-05
	⁹⁹ Tc	6.219E-05	6.219E-05	6.235E-05
	¹⁰¹ Ru	5.889E-05	5.889E-05	5.895E-05
	¹⁰³ Rh	3.034E-05	3.034E-05	3.016E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.366E-06	6.367E-06	6.307E-06
	¹³³ Cs	6.281E-05	6.281E-05	6.303E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.861E-06	3.859E-06	3.930E-06
	¹⁴⁹ Sm	9.171E-08	9.188E-08	8.364E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.464E-05	1.464E-05	1.455E-05
	¹⁵¹ Sm	5.520E-07	5.528E-07	5.125E-07
	¹⁵² Sm	5.826E-06	5.824E-06	5.909E-06
¹⁴³ Nd	3.987E-05	3.988E-05	3.921E-05	
¹⁴⁵ Nd	3.495E-05	3.494E-05	3.506E-05	
¹⁵³ Eu	5.551E-06	5.551E-06	5.542E-06	
¹⁵⁵ Gd	3.133E-09	3.139E-09	2.777E-09	

*のついたものは NRC9 核種

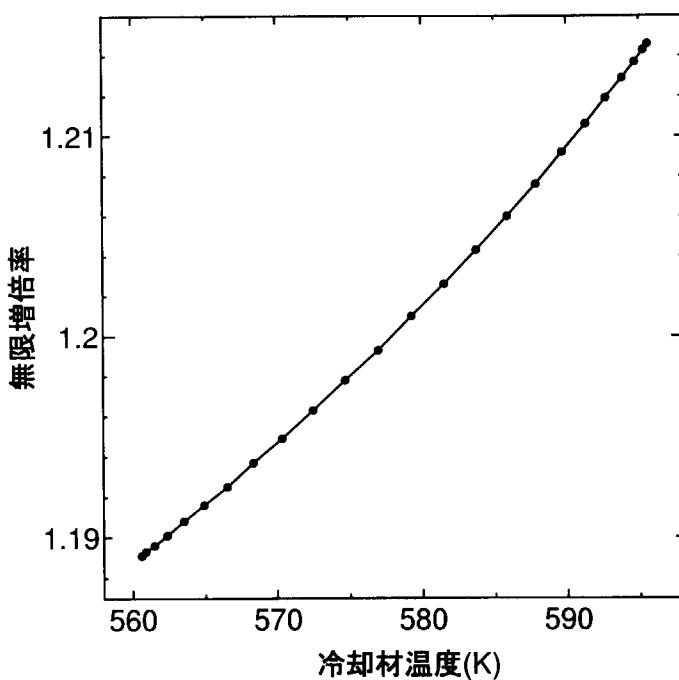


Fig. 5.3 冷却材温度と NRC9 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

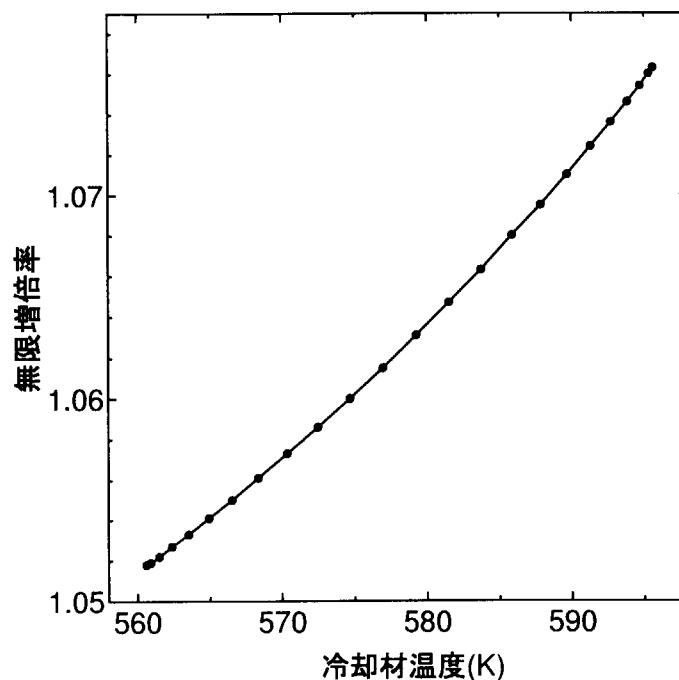


Fig. 5.4 冷却材温度と JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

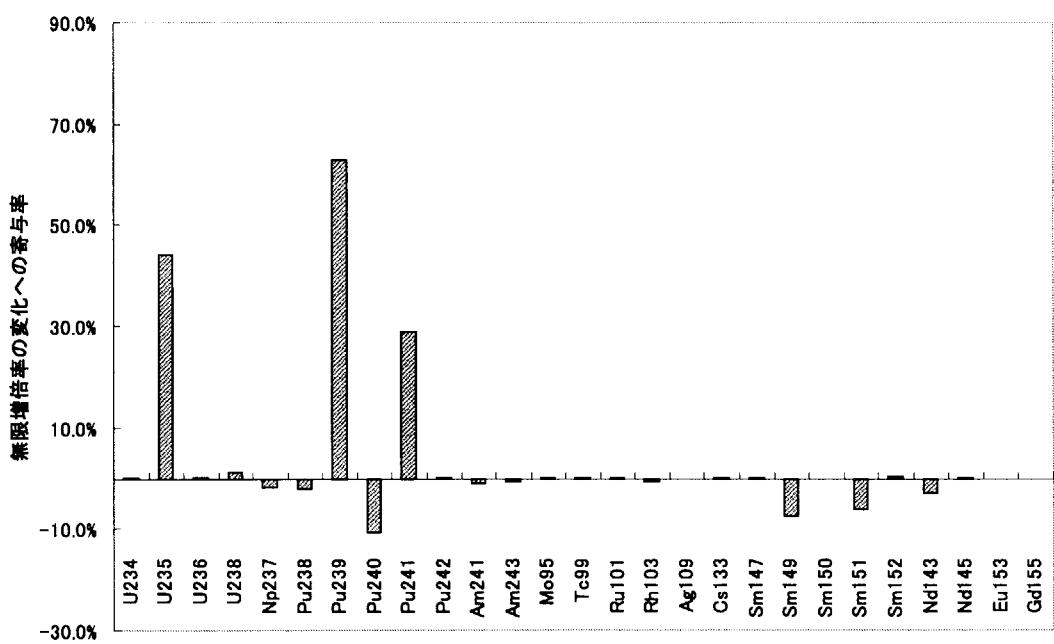


Fig. 5.5 冷却材温度が 560.6K の時と、595.6K の時の無限増倍率の差への各核種の寄与率

5.2 冷却材温度分布が PWR 使用済燃料の反応度に及ぼす影響

5.2.1 計算条件

一般に炉心の上下端部からは中性子が漏れるため中性子束が小さくなり、燃料の上下端部の燃焼度が低くなることから、使用済燃料には軸方向に燃焼度分布が存在する。本解析ではこの軸方向燃焼度分布を考慮する場合と考慮しない場合について、冷却材温度分布が使用済燃料の実効増倍率に及ぼす影響について調査する。つまり燃焼度分布を考慮する場合としない場合、冷却材温度分布を考慮する場合としない場合を組み合わせて計4ケースの比較を行う。また燃料棒の燃焼度が冷却材温度分布の反応度効果に及ぼす影響を調べるために、これらの4ケースについて燃焼度が0,10,20,30,40,50GWd/tの場合について比較を行った。

燃焼度分布の形状はOECD/NEAで行った燃焼度クレジットベンチマーク計算PHASE-IIAで採用された分布を使用した¹⁵⁾。実際には燃焼度分布の形状は照射時間によって変化する可能性があるが、ここでは燃焼度分布の形状の変化は小さいと仮定し、本解析ではすべての燃焼度点において燃焼度分布の形状は同じとした。平均燃焼度で規格化した燃焼度分布の形状をFig.5.6に示す。またこのベンチマーク計算では燃料集合体の寸法や燃料温度、運転サイクルなどが3章で示した値と異なっている。本節ではベンチマーク計算での条件を用いることとする。このときの計算条件をTable.5.10に示す。

また冷却材温度については5.1.2節と同様にTable.5.2で示す値とし、冷却材温度分布についても5.1.2節と同様に決定した。ただし、5.1.2節の場合と燃料棒の長さが異なっているので燃料棒の長さをTable.5.10の365.7cmにして冷却材温度分布を求めたものをFig.5.7に示す。

Table 5.10 OECD/NEA ベンチマーク計算の計算条件

燃料配列	17 × 17
燃料温度	811K
被覆管温度	620K
平均ホウ素濃度	550ppm
ペレット密度	94.5 % T.D.
燃料棒ピッチ	1.25984cm
燃料棒外径	0.94966cm
燃料棒内径	0.83566cm
ペレット直径	0.81915cm
実効燃料長	365.7cm
燃料初期濃縮度	4.5wt %
平均比出力	40MW/t
燃焼サイクル	5サイクル
運転時間	250日 × 5
定期点検	62.5日

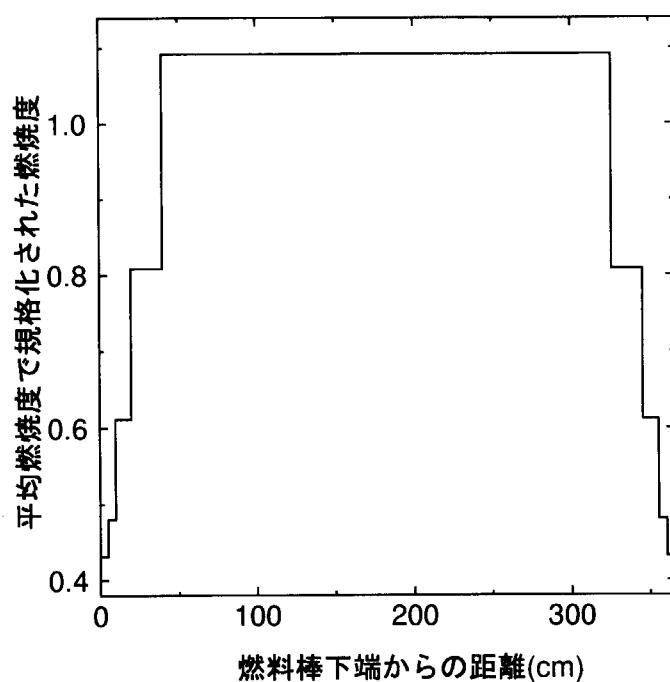


Fig. 5.6 PWR の軸方向燃焼度分布

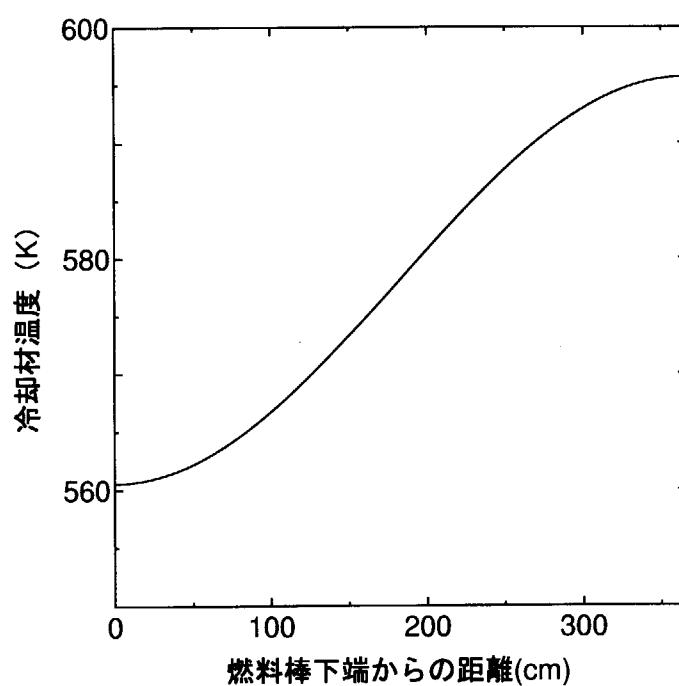


Fig. 5.7 燃料棒長 365.7cm の時の軸方向冷却材温度分布

5.2.2 計算手順

燃料棒を軸方向に数領域に分割し、燃焼度分布を考慮する場合は各領域の燃焼度を Fig.5.6 より求め、燃焼度分布を考慮しない場合は全領域を平均燃焼度とした。また、冷却材温度分布を考慮する場合は、各領域の冷却材温度を Fig.5.7 より求め、冷却材温度分布を考慮しない場合は全領域を平均温度の 578.1K とした。次に各領域毎に SWAT を用いて燃焼計算を行い、各領域の目的の燃焼度での使用済燃料核種組成を算出する。求められた組成のうち NRC9 核種または JAERI27 核種を選び、これらの組成からなる燃料棒が x,y 方向に無限配列している場合の実効増倍率を MVP を用いて算出する。

平均燃焼度が 50GWd/t で燃焼度分布有り・冷却材温度分布有りの時の各領域の長さ、燃焼度、冷却材温度を Table.5.11 に示す。このケースでは燃料を軸方向に 22 領域に分割している。各領域の長さは基本的には OECD/NEA ベンチマーク計算と同じである、しかし OECD/NEA ベンチマーク計算では燃焼度分布のみを考慮しているので、燃焼度分布の変化が小さい燃料棒中央の 285.7cm を 1 領域としているが、冷却材温度分布は燃焼度分布とは逆に燃料棒中央付近で変化が大きいので、本解析ではこの 285.7cm の領域を 14 領域に分割した。このときの MVP の計算体系を Fig.5.8 に示す。

平均燃焼度が 50GWd/t で燃焼度分布有り・冷却材温度分布無しの時の各領域の長さ、燃焼度、冷却材温度を Table.5.12 に示す。このときは各領域の長さは OECD/NEA ベンチマーク計算と同じである。燃料棒は 9 領域に分割したが、燃焼度分布は上下対称としているので、燃焼計算は 5 領域で行った。このときの MVP の計算体系を Fig.5.9 に示す。

平均燃焼度が 50GWd/t で燃焼度分布無し・冷却材温度分布有りの時の各領域の長さ、燃焼度、冷却材温度を Table.5.13 に示す。このときは各領域の長さは、燃焼度分布有り・冷却材温度分布有りのケースと同じとした。このときの MVP の計算体系は燃焼度分布有りの時と同じ Fig.5.8 となる。

平均燃焼度が 50GWd/t で燃焼度分布無し・冷却材温度分布無しの時の各領域の長さ、燃焼度、冷却材温度を Table.5.14 に示す。このときは燃料棒はすべて同一の燃焼履歴であるので燃焼計算は 1 領域で行った。このときの MVP の計算体系を Fig.5.10 に示す。

Table 5.11 燃焼度分布有り・冷却材温度分布有りの時の各領域の燃焼度と冷却材温度

領域 No.	領域長 (cm)	燃焼度 GWd/t	冷却材温度 (K)
1	5	21.565	560.56
2	5	24.023	560.59
3	10	30.580	560.70
4	20	40.424	561.15
5	20.4	54.605	562.18
6	20.4	54.605	563.70
7	20.4	54.605	565.67
8	20.4	54.605	568.01
9	20.4	54.605	570.66
10	20.4	54.605	573.55
11	20.5	54.605	576.57
12	20.4	54.605	579.65
13	20.4	54.605	582.67
14	20.4	54.605	585.55
15	20.4	54.605	588.20
16	20.4	54.605	590.54
17	20.4	54.605	592.51
18	20.4	54.605	594.03
19	20	40.424	595.05
20	10	30.580	595.50
21	5	24.023	595.61
22	5	21.565	595.64

Table 5.12 燃焼度分布有り・冷却材温度分布無しの時の各領域の燃焼度と冷却材温度

領域 No.	領域長 (cm)	燃焼度 GWd/t	冷却材温度 (K)
1	5	21.565	578.1
2	5	24.023	578.1
3	10	30.580	578.1
4	20	40.424	578.1
5	285.7	54.605	578.1

Table 5.13 燃焼度分布無し・冷却材温度分布有りの時の各領域の燃焼度と冷却材温度

領域 No.	領域長 (cm)	燃焼度 GWd/t	冷却材温度 (K)
1	5	50.0	560.56
2	5	50.0	560.59
3	10	50.0	560.70
4	20	50.0	561.15
5	20.4	50.0	562.18
6	20.4	50.0	563.70
7	20.4	50.0	565.67
8	20.4	50.0	568.01
9	20.4	50.0	570.66
10	20.4	50.0	573.55
11	20.5	50.0	576.57
12	20.4	50.0	579.65
13	20.4	50.0	582.67
14	20.4	50.0	585.55
15	20.4	50.0	588.20
16	20.4	50.0	590.54
17	20.4	50.0	592.51
18	20.4	50.0	594.03
19	20	50.0	595.05
20	10	50.0	595.50
21	5	50.0	595.61
22	5	50.0	595.64

Table 5.14 燃焼度分布無し・冷却材温度分布無しの時の各領域の燃焼度と冷却材温度

領域 No.	領域長 (cm)	燃焼度 GWd/t	冷却材温度 (K)
1	365.7	50.0	578.1

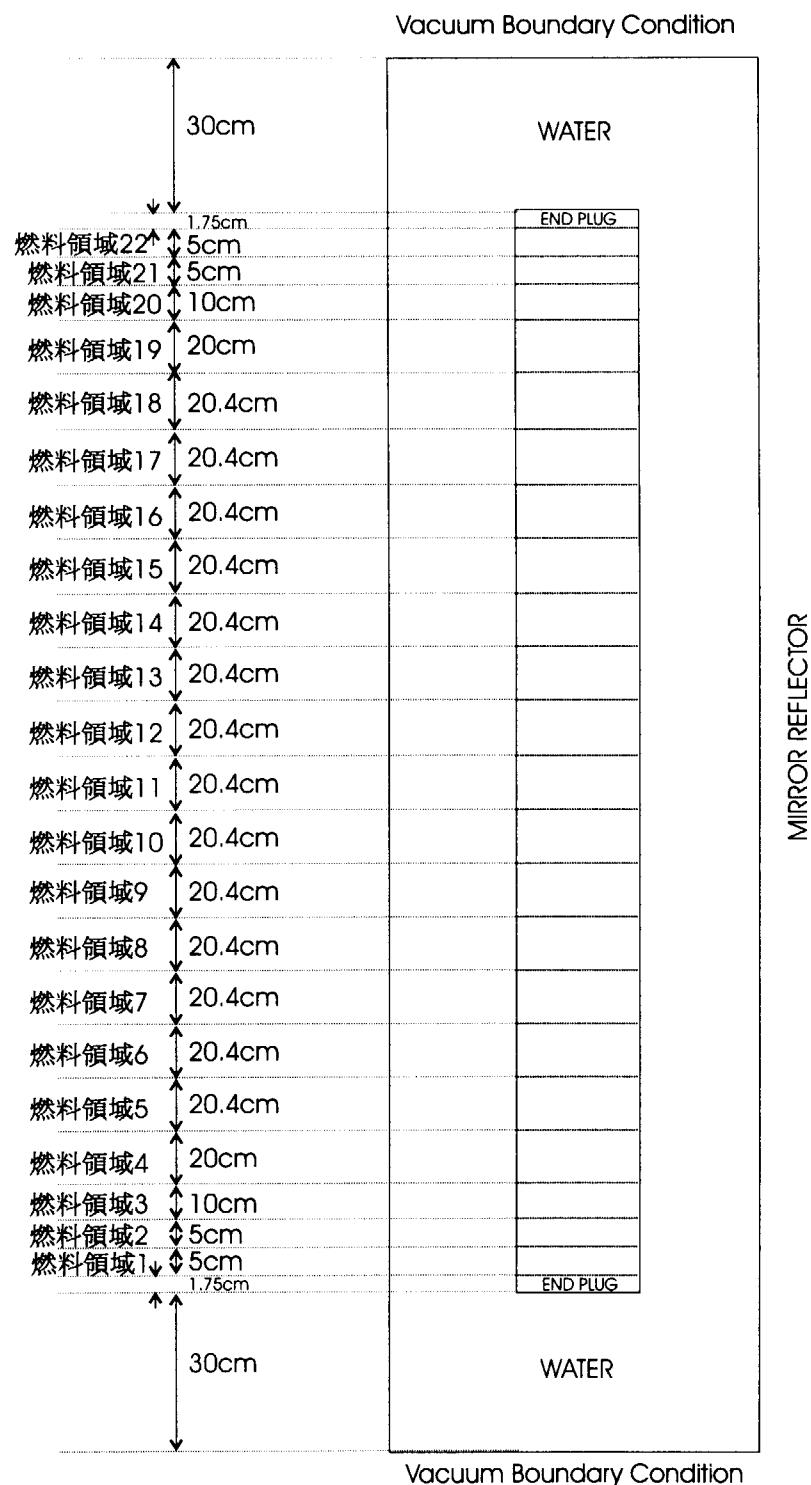


Fig. 5.8 冷却材温度分布有りの場合の MVP 計算体系の x,z 断面図

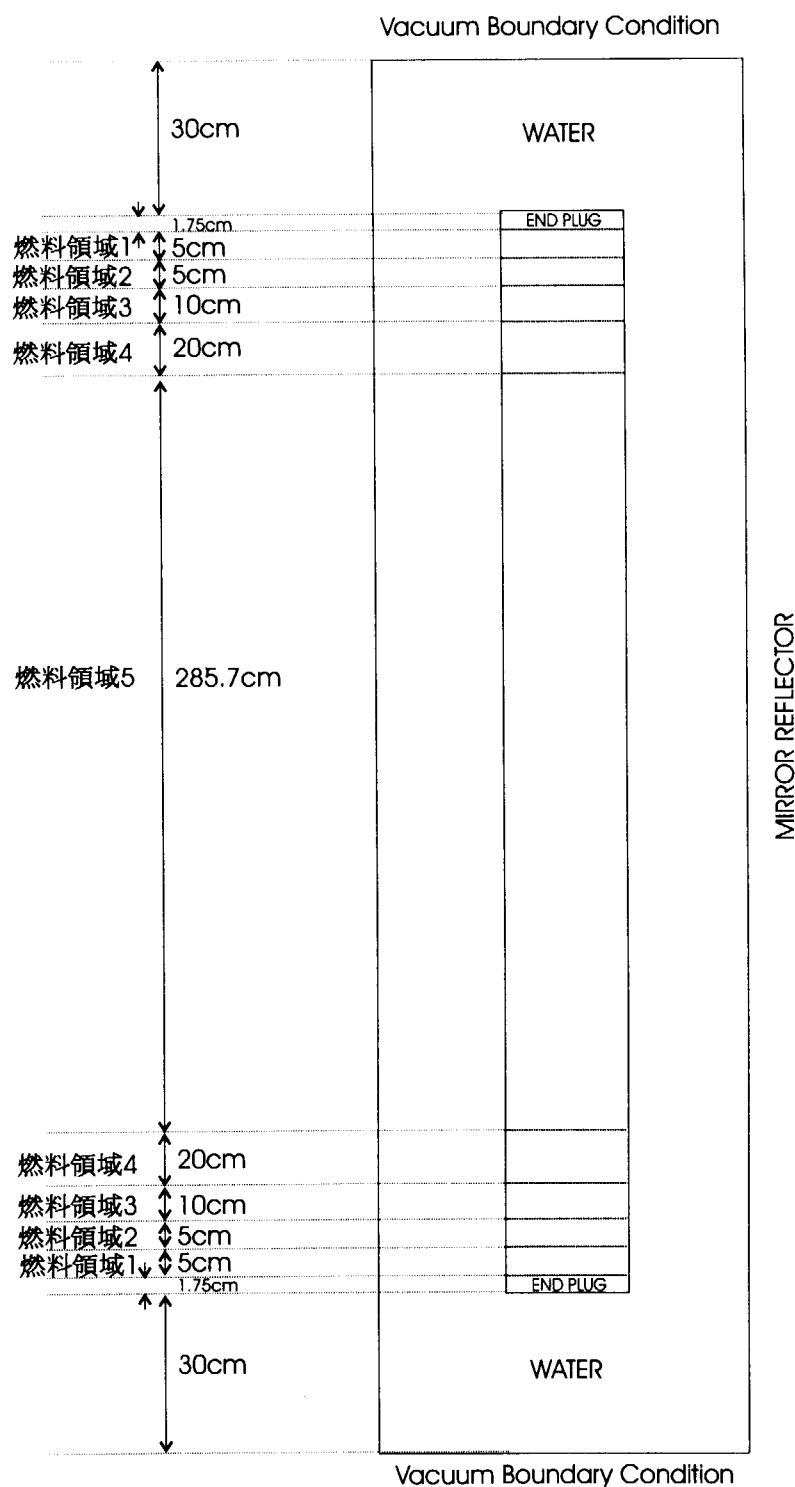


Fig. 5.9 燃焼度分布有り、冷却材温度分布無しの場合の MVP 計算体系の x,z 断面図



Fig. 5.10 燃焼度分布無し、冷却材温度分布無しの場合の MVP 計算体系の x,z
断面図

5.2.3 結果

それぞれのケースで軸方向に有限長の使用済燃料棒を x, y 方向に無限配列した体系で燃焼度が 0, 10, 20, 30, 40, 50GWd/t の時の実効増倍率を MVP を用いて求めた結果と、冷却材温度分布を考慮した場合と考慮しない場合の各燃焼度での実効増倍率の変化率を、燃焼度分布を考慮し NRC9 核種で評価したものをそれぞれ Fig.5.11 と Fig.5.12 に、燃焼度分布を考慮せず NRC9 核種で評価したものと Fig.5.13 と Fig.5.14 に、燃焼度分布を考慮し JAERI27 核種で評価したものと Fig.5.15 と Fig.5.16 に、燃焼度分布を考慮せず JAERI27 核種で評価したものを Fig.5.17 と Fig.5.18 に示す。MVP の計算の時のヒストリー数は 10000×180 バッチで 180 万ヒストリーとし、捨てバッチは 30 バッチとした。また冷却材温度分布を考慮した場合と考慮しない場合の実効増倍率の変化率は以下のように定義した。

$$\text{実効増倍率の変化率} = \frac{k_{\text{分布考慮}} - k_{\text{分布無視}}}{k_{\text{分布無視}}}$$

$k_{\text{分布考慮}}$:冷却材温度分布を考慮した場合の実効増倍率

$k_{\text{分布無視}}$:冷却材温度分布を無視した場合の実効増倍率

つまり実効増倍率の変化率が正の時は、冷却材温度分布を考慮したほうが実効増倍率が高いという事になる。また、モンテカルロ計算による統計誤差は、実効増倍率のグラフ中ではそれぞれのマークよりも小さい。実効増倍率の変化率のグラフ中の誤差棒はモンテカルロ計算の統計誤差を伝播し以下の様に算出している。

$$\varepsilon_{\Delta k/k} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{分布無視}}^2 + \varepsilon_{\text{分布考慮}}^2}}{k_{\text{分布無視}}} \right)^2 + \left(\frac{k_{\text{分布考慮}} - k_{\text{分布無視}}}{k_{\text{分布無視}}^2} \varepsilon_{\text{分布無視}} \right)^2}$$

$k_{\text{分布考慮}}$:冷却材温度分布を考慮した場合の実効増倍率

$k_{\text{分布無視}}$:冷却材温度分布を無視した場合の実効増倍率

$\varepsilon_{\Delta k/k}$:実効増倍率の変化率の誤差（絶対誤差）

$\varepsilon_{\text{分布考慮}}$:冷却材温度分布を考慮した場合の実効増倍率の統計誤差（絶対誤差）

$\varepsilon_{\text{分布無視}}$:冷却材温度分布を無視した場合の実効増倍率の統計誤差（絶対誤差）

すべてのケースの実効増倍率の変化率のグラフより次のような共通の傾向がわかる。新燃料の時は実効増倍率の変化率は当然 0 である。そして燃焼度が 10GWd/t の時は実効増倍率の変化率は負であるが、燃焼度が 10GWd/t～30GWd/t の間に変化率は正になり、50GWd/t の時に実効増倍率の変化率は最大になる。例外的な傾向となっているのは Fig.5.12 の 20GWd/t と Fig.5.18 の 20GWd/t であるが、これらは MVP の統計誤差が原因であると考えられる。

実効増倍率の変化率が最大になる燃焼度が 50GWd/t の時の各ケースの実効増倍率とその変化率を Table.5.15, Table.5.16 に示す。これらの表より冷却材温度分布の考慮の有無による実効増倍

率の変化率は、燃焼度分布のそれと比較して小さい。また、分布の形状が類似しているようなものであれば、燃焼計算時の燃焼領域の区切り方を共通させることができるが、燃焼度分布は燃料端部の変化が著しく、この部分を詳細に分けて燃焼計算をする必要があるのに対し、冷却材温度分布は燃料棒中央部での変化が著しく、この部分を詳細にする必要があり、これらの分布の形状は同時に考慮しても計算領域の共有はできず、単純に計算時間、計算労力が増加する。以上の理由から燃焼計算の際には冷却材温度分布を考慮せず、燃焼度分布のみを考慮して燃焼計算を行い、その組成での実効増倍率に冷却材温度分布の実効増倍率のバイアスを加える方法がよいと考えられる。本解析の結果から得られた実効増倍率バイアスは誤差を含めると、NRC9核種で評価した場合で $0.28\%\Delta k/k$ 、JAERI27核種で評価した場合で $0.50\%\Delta k/k$ である。ただし、この実効増倍率バイアスの値は、冷却材出口温度、冷却材入口温度、初期濃縮度、冷却時間、臨界計算を行う体系の形状などによって変化すると考えられるので、これらの条件ごとに求める必要がある。

また参考のため Table.5.15, Table.5.16 に示した 8 つの場合について、燃焼度が 50GWd/t の時の軸方向の中性子束空間分布を Fig.5.19 から Fig.5.26 に示す。Fig.5.19 から Fig.5.22 は軸方向燃焼度分布を考慮したケースで、燃料棒上下端部の燃焼度が低い部分の中性子束が大きくなっているのがわかる。Fig.5.23 から Fig.5.26 は軸方向燃焼度分布を考慮しなかったケースで、燃料棒中央部の中性子束が大きくなっている。また冷却材温度分布を考慮した 4 つのケースについては、冷却材温度が高かった燃料棒上部（図では右端）の中性子束が大きくなっているが、冷却材温度分布を考慮しなかった 4 つのケースについては、中性子束が上下対称（図では左右対称）の形になっていることがわかる。

Table 5.15 各ケースでの実効増倍率とその差 (NRC9 核種)(PWR, 50GWd/t, 0 年
冷却, 300K)

		軸方向燃焼度分布		
		考慮	無視	考慮と無視の変化率 $\%\Delta k/k$
冷却材温度分布	考慮	1.2184 ± 0.0006	1.2232 ± 0.0005	-0.39 ± 0.06
	無視	1.2159 ± 0.0005	1.2203 ± 0.0004	-0.37 ± 0.05
	考慮と無視の変化率 $\%\Delta k/k$	0.21 ± 0.06	0.23 ± 0.05	

**Table 5.16 各ケースでの実効増倍率とその差 (JAERI27 核種)(PWR,50GWd/t,0
年冷却,300K)**

		軸方向燃焼度分布		
		考慮	無視	考慮と無視の変化率 % $\Delta k/k$
冷却材温度分布	考慮	1.1047 ± 0.0006	1.0830 ± 0.0004	2.00 ± 0.07
	無視	1.1000 ± 0.0006	1.0795 ± 0.0004	1.90 ± 0.07
	考慮と無視の変化率 % $\Delta k/k$	0.43 ± 0.08	0.32 ± 0.05	

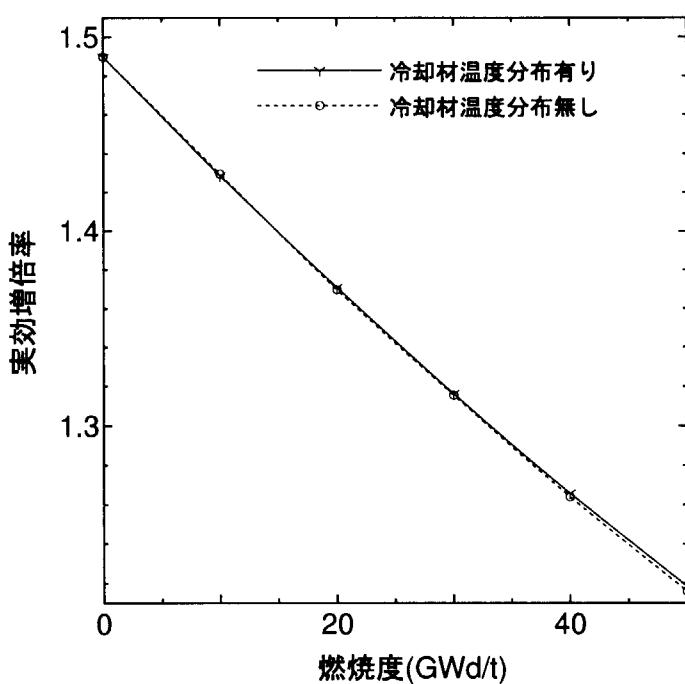


Fig. 5.11 軸方向燃焼度分布を考慮し NRC9 核種で評価した実効増倍率と燃焼度の関係 (PWR, 0 年冷却, 300K)

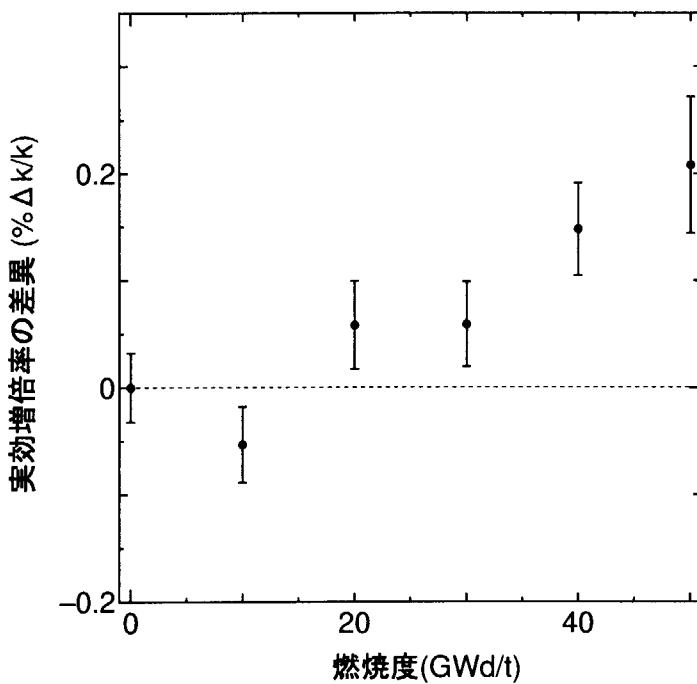


Fig. 5.12 軸方向燃焼度分布を考慮し NRC9 核種で評価した時の、冷却材温度分布を考慮した場合と考慮しない場合の実効増倍率の変化率と燃焼度の関係 (PWR, 0 年冷却, 300K)

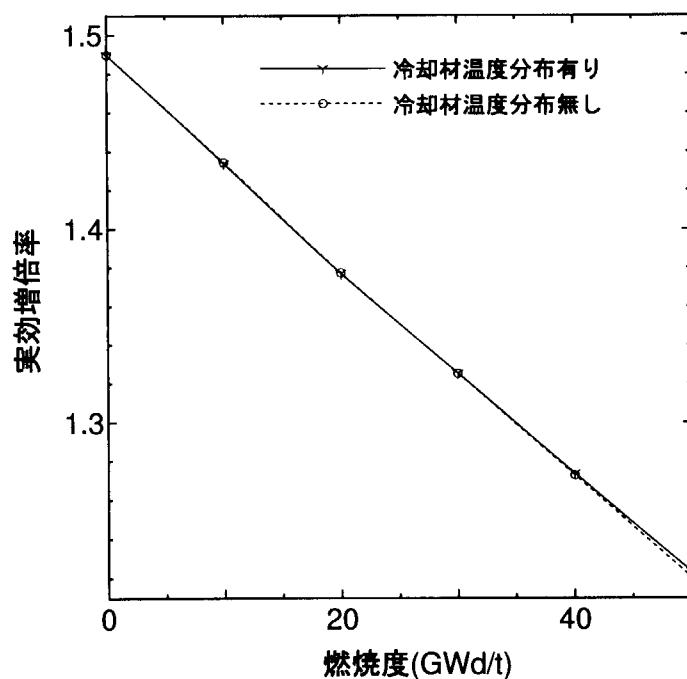


Fig. 5.13 軸方向燃焼度分布を考慮せず NRC9 核種で評価した実効増倍率と燃焼度の関係 (PWR, 0 年冷却, 300K)

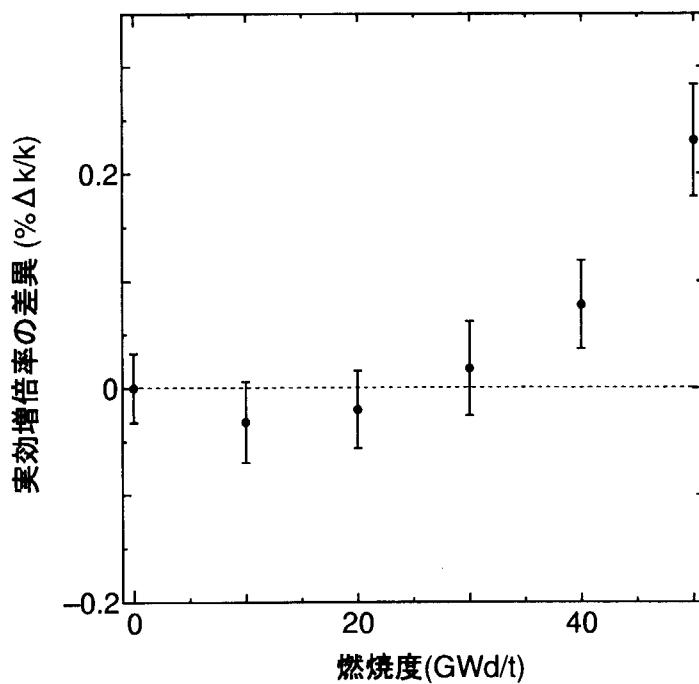


Fig. 5.14 軸方向燃焼度分布を考慮せず NRC9 核種で評価した時の、冷却材温度分布を考慮した場合と考慮しない場合の実効増倍率の変化率と燃焼度の関係 (PWR, 0 年冷却, 300K)

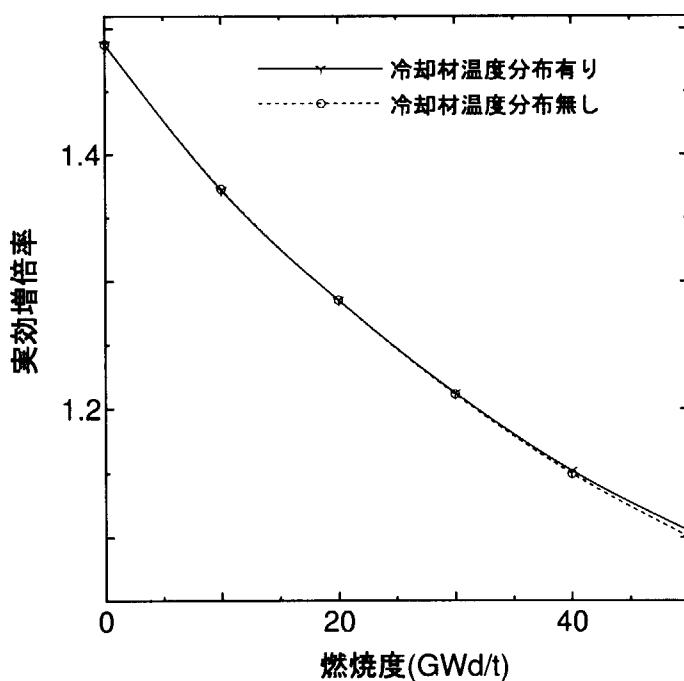


Fig. 5.15 軸方向燃焼度分布を考慮し JAERI27 核種で評価した実効増倍率と燃焼度の関係 (PWR, 0 年冷却, 300K)

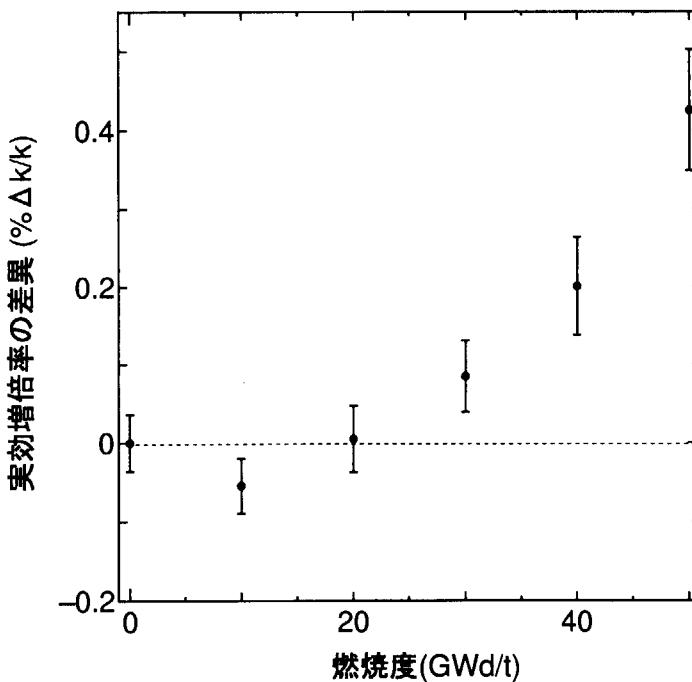


Fig. 5.16 軸方向燃焼度分布を考慮し JAERI27 核種で評価した時の、冷却材温度分布を考慮した場合と考慮しない場合の実効増倍率の変化率と燃焼度の関係 (PWR, 0 年冷却, 300K)

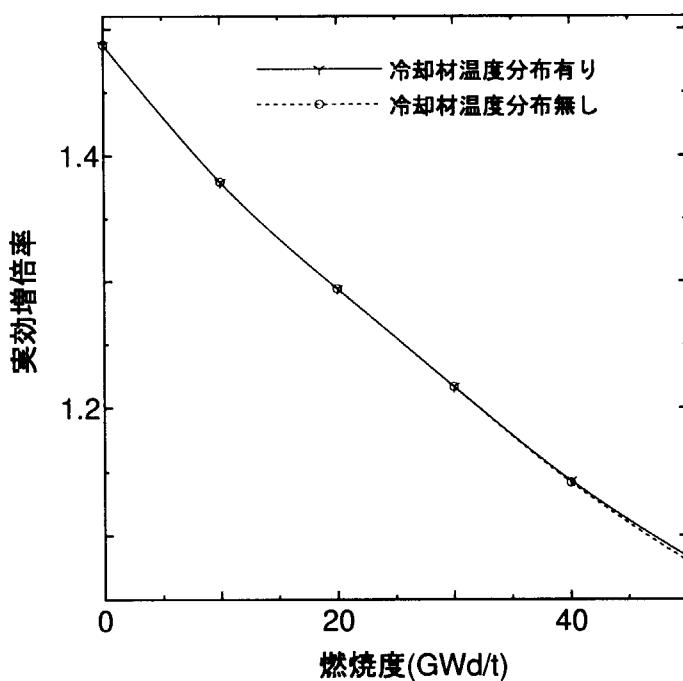


Fig. 5.17 軸方向燃焼度分布を考慮せず JAERI27 核種で評価した実効増倍率と燃焼度の関係 (PWR, 0 年冷却, 300K)

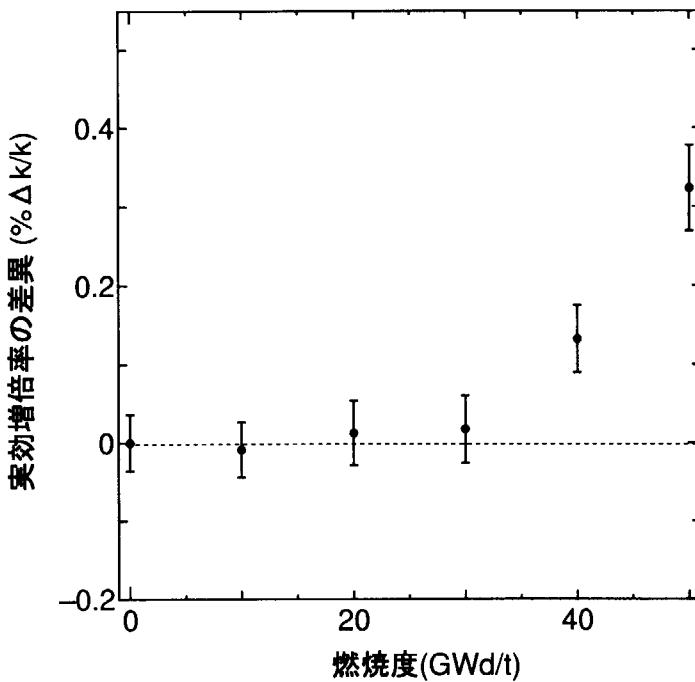


Fig. 5.18 軸方向燃焼度分布を考慮せず JAERI27 核種で評価した時の、冷却材温度分布を考慮した場合と考慮しない場合の実効増倍率の変化率と燃焼度の関係 (PWR, 0 年冷却, 300K)

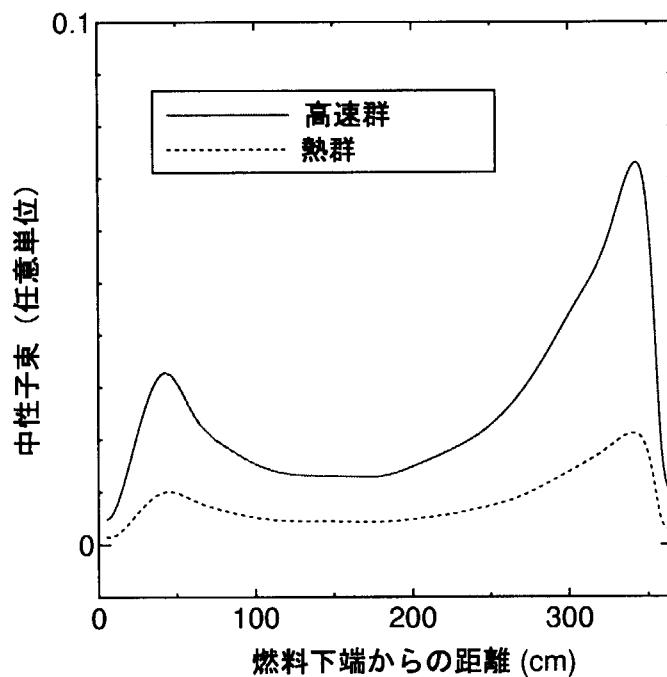


Fig. 5.19 燃焼度分布有り, 冷却材温度分布有りの場合の NRC9 核種で評価した軸方向中性子束分布 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

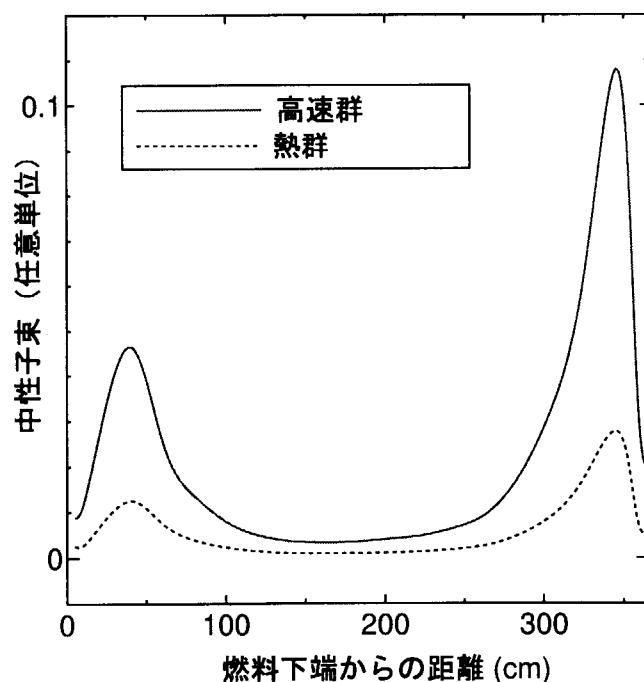


Fig. 5.20 燃焼度分布有り, 冷却材温度分布有りの場合の JAERI27 核種で評価した軸方向中性子束分布 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

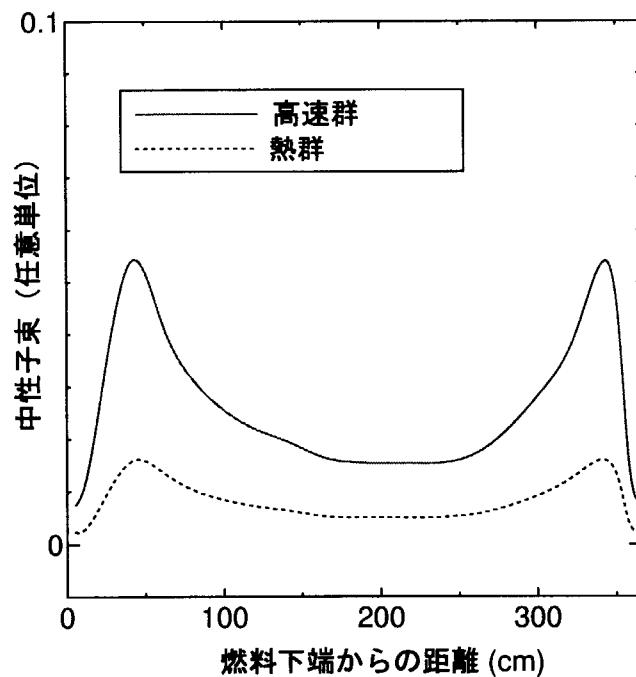


Fig. 5.21 燃焼度分布有り, 冷却材温度分布無しの場合の NRC9 核種で評価した軸方向中性子束分布 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

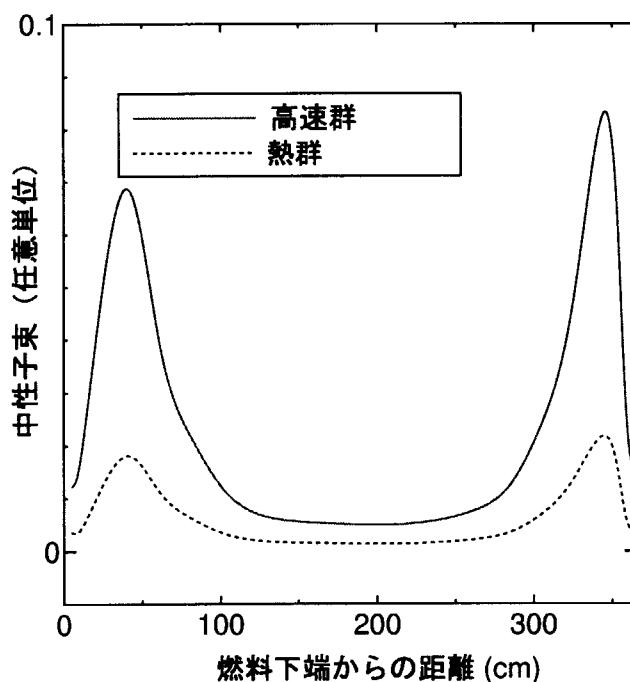


Fig. 5.22 燃焼度分布有り, 冷却材温度分布無しの場合の JAERI27 核種で評価した軸方向中性子束分布 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

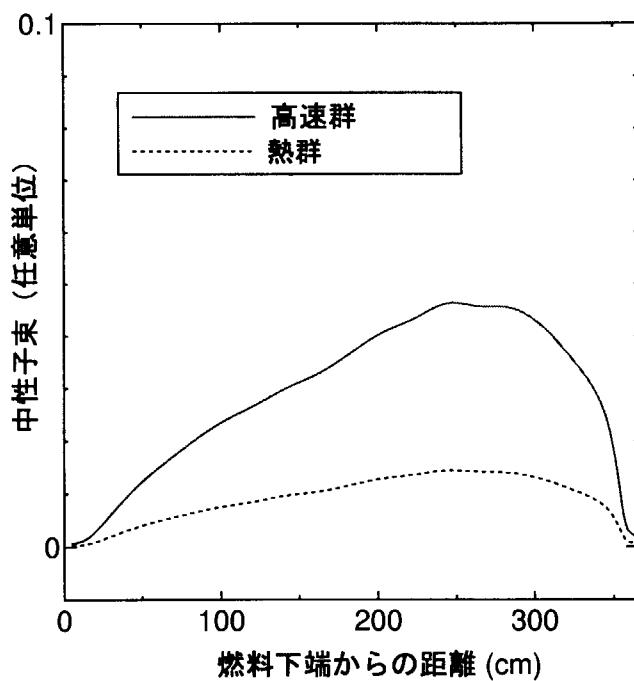


Fig. 5.23 燃焼度分布無し, 冷却材温度分布有りの場合の NRC9 核種で評価した軸方向中性子束分布 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

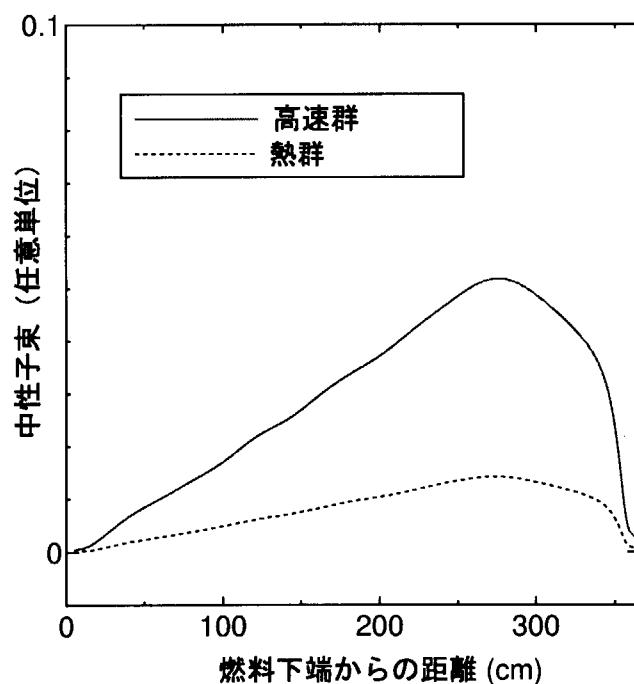


Fig. 5.24 燃焼度分布無し, 冷却材温度分布有りの場合の JAERI27 核種で評価した軸方向中性子束分布 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

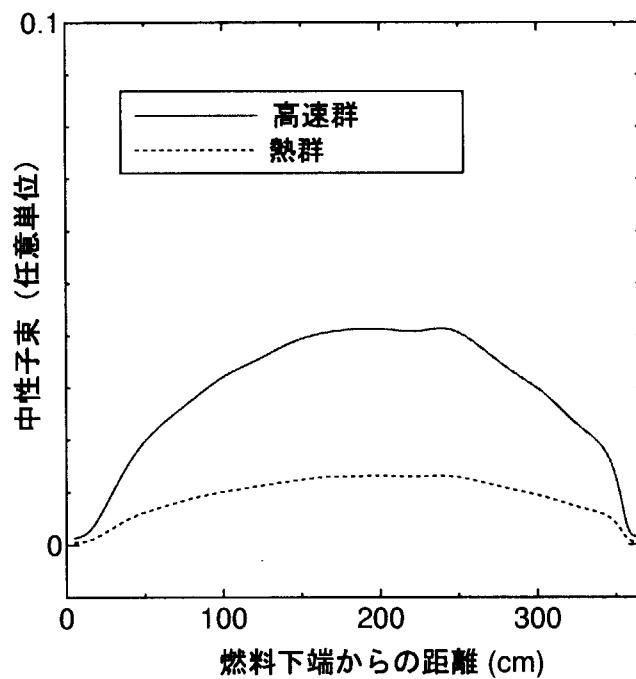


Fig. 5.25 燃焼度分布無し, 冷却材温度分布無しの場合の NRC9 核種で評価した軸方向中性子束分布 (PWR, 50GWd/t, 0 年冷却, 300K)

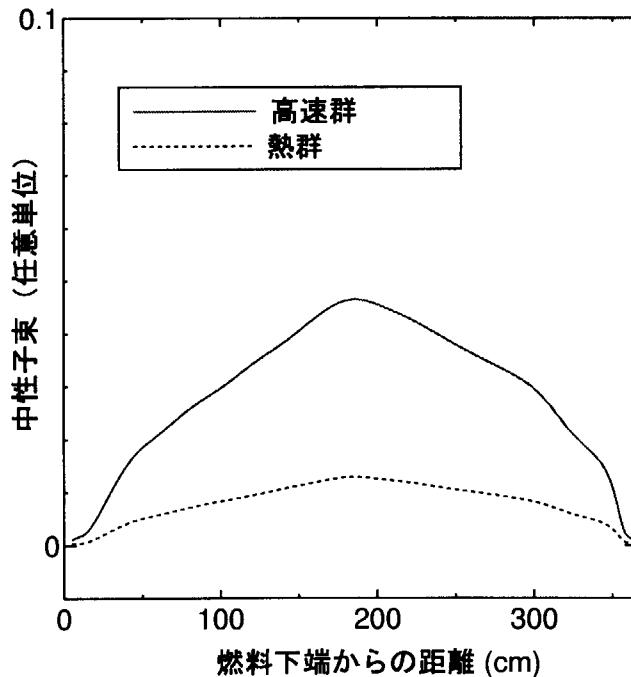


Fig. 5.26 燃焼度分布無し, 冷却材温度分布無しの場合の JAERI27 核種で評価した軸方向中性子束分布 (PWR, 50GWd/t, 0 年冷却, 300K)

5.3 冷却材温度分布が BWR 使用済燃料の反応度に及ぼす影響

5.3.1 計算条件

BWR では軸方向にボイド率分布が存在する。そこで本節では、このボイド率分布を考慮して冷却材温度分布が使用済燃料の実効増倍率に及ぼす影響について調査する。つまりボイド率分布と冷却材温度分布の両方を考慮する場合と、ボイド率分布のみを考慮し冷却材温度分布を考慮しない場合の 2 ケースの比較を行う。このとき用いたボイド率分布を Fig.5.27 に示す¹⁶⁾。

冷却材温度分布は以下のように決定した。まず冷却材の炉心入口温度と炉心出口温度を Table.5.17 に示すように決定する。これは福島第一の 1 号機の原子炉設置許可申請書に記載された値である¹⁷⁾。ボイド率の実測値は存在しないが、典型的な値としては十分に利用できる値であると考えられる。次に燃料棒を軸方向に 24 ノードに分割し、5 ノードより上では発生した熱はボイドの生成に使われ、冷却材の温度は上昇しないものとする¹⁸⁾。軸方向の出力分布は cos 分布になっていると仮定し、4 ノードまでは PWR の冷却材温度分布と同じ形とし、4 ノードまでの温度上昇の積分値が Table.5.17 の温度上昇 (8.4K) と等しくなるようにして冷却材温度分布を決定した。冷却材温度分布を Fig.5.28 に示す。

Table 5.17 計算に用いた BWR の冷却材温度

原子炉入口温度	550.15K
原子炉出口温度	558.55K
温度上昇	8.4K

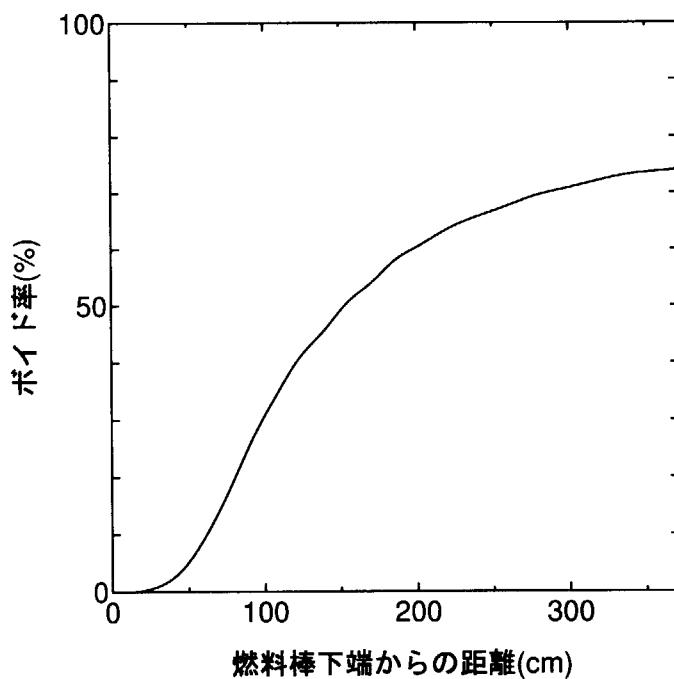


Fig. 5.27 軸方向ボイド率分布

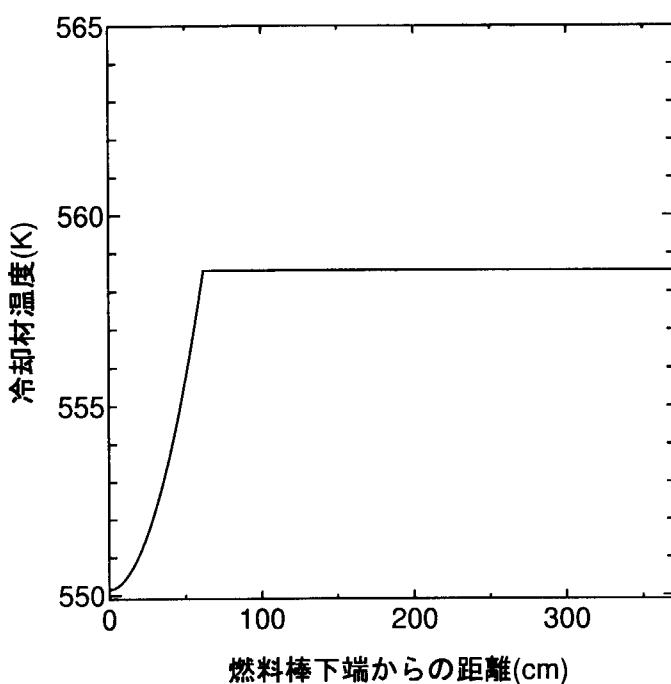


Fig. 5.28 BWR の軸方向冷却材温度分布

5.3.2 計算手順

まず、燃料棒を 24 ノードに分割し、各ノードのボイド率を Fig.5.27 により決める。また冷却材温度分布を考慮する場合は各ノードの冷却材温度を Fig.5.28 より決める。冷却材温度分布を考慮しない場合、全ノードの冷却材温度は平均温度の 557.6K とした。

次に各ノード毎に SWAT を用いて燃焼計算を行い、各ノードの使用済燃料核種組成を算出する。求められた組成のうち NRC9 核種または JAERI27 核種を選び、MVP を用いて燃料棒の x,y 方向無限配列での実効増倍率を算出する。

冷却材温度分布有りの場合の各ノードのボイド率と冷却材温度を Table.5.18 に示す。冷却材温度分布無しの場合の各ノードのボイド率と冷却材温度を Table.5.19 に示す。

Table 5.18 各ノードのボイド率と冷却材温度（冷却材温度分布有り）

Node	ボイド率 (%)	平均温度 (K)
1	0	550.3
2	1	551.4
3	4	553.5
4	10	556.7
5	18	558.6
6	27	558.6
7	34.5	558.6
8	41	558.6
9	45.5	558.6
10	50.5	558.6
11	54	558.6
12	58	558.6
13	60.5	558.6
14	63	558.6
15	65	558.6
16	66.5	558.6
17	68	558.6
18	69.5	558.6
19	70.5	558.6
20	71.5	558.6
21	72.5	558.6
22	73.3	558.6
23	73.7	558.6
24	74.1	558.6

Table 5.19 各ノードのボイド率と冷却材温度（冷却材温度分布無し）

Node	ボイド率(%)	平均温度(K)
1	0	557.6
2	1	557.6
3	4	557.6
4	10	557.6
5	18	557.6
6	27	557.6
7	34.5	557.6
8	41	557.6
9	45.5	557.6
10	50.5	557.6
11	54	557.6
12	58	557.6
13	60.5	557.6
14	63	557.6
15	65	557.6
16	66.5	557.6
17	68	557.6
18	69.5	557.6
19	70.5	557.6
20	71.5	557.6
21	72.5	557.6
22	73.3	557.6
23	73.7	557.6
24	74.1	557.6

5.3.3 結果

各ノードの使用済燃料核種組成を Table.5.20 から Table.5.31 に示し, MVP を用いて冷却材温度分布有りの場合と無しの場合について実効増倍率を求めた結果を Table.5.32 に示す。Table.5.32 より, 冷却材温度分布を考慮した場合と考慮しない場合とでは, 実効増倍率の変化率は NRC9 核種で評価した場合は $0.03 \pm 0.05\% \Delta k/k$, JAERI27 核種で評価した場合は $0.09 \pm 0.05\% \Delta k/k$ どちらも非常に小さく, またこの変化率は統計誤差の範囲と考えられるので冷却材温度分布が使用済燃料の反応度に及ぼす影響は無視しうると考えられる。また参考のため, 各計算での軸方向中性子束分布を Fig.5.29 から Fig.5.32 に示す。

Table 5.20 各ノードの核種組成 1(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		1		2	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.606E-06	4.603E-06	4.603E-06	4.600E-06
	²³⁵ U *	1.597E-04	1.612E-04	1.606E-04	1.618E-04
	²³⁶ U	1.081E-04	1.080E-04	1.080E-04	1.079E-04
	²³⁸ U *	2.053E-02	2.053E-02	2.053E-02	2.053E-02
	²³⁷ Np	8.871E-06	8.920E-06	8.906E-06	8.949E-06
	²³⁸ Pu *	2.889E-06	2.922E-06	2.908E-06	2.937E-06
	²³⁹ Pu *	8.388E-05	8.400E-05	8.430E-05	8.439E-05
	²⁴⁰ Pu *	4.803E-05	4.825E-05	4.810E-05	4.830E-05
	²⁴¹ Pu *	2.184E-05	2.202E-05	2.196E-05	2.212E-05
	²⁴² Pu *	1.174E-05	1.182E-05	1.176E-05	1.183E-05
	²⁴¹ Am *	9.413E-07	9.492E-07	9.481E-07	9.547E-07
	²⁴³ Am	1.762E-06	1.786E-06	1.773E-06	1.794E-06
	⁹⁵ Mo	4.677E-05	4.674E-05	4.675E-05	4.672E-05
	⁹⁹ Tc	5.210E-05	5.209E-05	5.209E-05	5.208E-05
	¹⁰¹ Ru	4.754E-05	4.754E-05	4.754E-05	4.754E-05
	¹⁰³ Rh	2.480E-05	2.482E-05	2.481E-05	2.483E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.366E-06	4.379E-06	4.372E-06	4.384E-06
	¹³³ Cs	5.373E-05	5.371E-05	5.372E-05	5.370E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.929E-06	4.919E-06	4.922E-06	4.914E-06
	¹⁴⁹ Sm	4.529E-08	4.580E-08	4.564E-08	4.606E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.072E-05	1.073E-05	1.073E-05	1.074E-05
	¹⁵¹ Sm	3.008E-07	3.049E-07	3.028E-07	3.061E-07
	¹⁵² Sm	5.419E-06	5.411E-06	5.413E-06	5.406E-06
	¹⁴³ Nd	3.151E-05	3.159E-05	3.156E-05	3.163E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.982E-05	2.980E-05	2.981E-05	2.980E-05
	¹⁵³ Eu	4.064E-06	4.070E-06	4.067E-06	4.073E-06
	¹⁵⁵ Gd	1.541E-09	1.569E-09	1.556E-09	1.580E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.21 各ノードの核種組成 2(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		3		4	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.594E-06	4.592E-06	4.575E-06	4.574E-06
	²³⁵ U *	1.629E-04	1.637E-04	1.676E-04	1.678E-04
	²³⁶ U	1.079E-04	1.078E-04	1.076E-04	1.076E-04
	²³⁸ U *	2.053E-02	2.053E-02	2.052E-02	2.052E-02
	²³⁷ Np	9.008E-06	9.036E-06	9.214E-06	9.220E-06
	²³⁸ Pu *	2.962E-06	2.981E-06	3.071E-06	3.075E-06
	²³⁹ Pu *	8.555E-05	8.562E-05	8.824E-05	8.826E-05
	²⁴⁰ Pu *	4.834E-05	4.846E-05	4.876E-05	4.879E-05
	²⁴¹ Pu *	2.232E-05	2.242E-05	2.306E-05	2.309E-05
	²⁴² Pu *	1.181E-05	1.185E-05	1.189E-05	1.190E-05
	²⁴¹ Am *	9.674E-07	9.718E-07	1.008E-06	1.009E-06
	²⁴³ Am	1.803E-06	1.816E-06	1.861E-06	1.863E-06
	⁹⁵ Mo	4.670E-05	4.668E-05	4.659E-05	4.659E-05
	⁹⁹ Tc	5.206E-05	5.205E-05	5.199E-05	5.198E-05
	¹⁰¹ Ru	4.753E-05	4.753E-05	4.752E-05	4.752E-05
	¹⁰³ Rh	2.485E-05	2.486E-05	2.493E-05	2.493E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.391E-06	4.398E-06	4.426E-06	4.428E-06
	¹³³ Cs	5.367E-05	5.366E-05	5.358E-05	5.357E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.902E-06	4.896E-06	4.861E-06	4.859E-06
	¹⁴⁹ Sm	4.661E-08	4.691E-08	4.856E-08	4.868E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.075E-05	1.076E-05	1.079E-05	1.080E-05
	¹⁵¹ Sm	3.078E-07	3.102E-07	3.180E-07	3.188E-07
	¹⁵² Sm	5.396E-06	5.391E-06	5.361E-06	5.360E-06
	¹⁴³ Nd	3.170E-05	3.175E-05	3.198E-05	3.199E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.978E-05	2.978E-05	2.974E-05	2.974E-05
	¹⁵³ Eu	4.077E-06	4.080E-06	4.095E-06	4.095E-06
	¹⁵⁵ Gd	1.598E-09	1.615E-09	1.686E-09	1.690E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.22 各ノードの核種組成 3(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		5		6	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.548E-06	4.549E-06	4.516E-06	4.516E-06
	²³⁵ U *	1.737E-04	1.735E-04	1.808E-04	1.806E-04
	²³⁶ U	1.072E-04	1.072E-04	1.068E-04	1.068E-04
	²³⁸ U *	2.051E-02	2.051E-02	2.049E-02	2.049E-02
	²³⁷ Np	9.488E-06	9.482E-06	9.809E-06	9.804E-06
	²³⁸ Pu *	3.217E-06	3.213E-06	3.392E-06	3.388E-06
	²³⁹ Pu *	9.224E-05	9.223E-05	9.740E-05	9.738E-05
	²⁴⁰ Pu *	4.930E-05	4.927E-05	4.994E-05	4.991E-05
	²⁴¹ Pu *	2.408E-05	2.406E-05	2.531E-05	2.528E-05
	²⁴² Pu *	1.197E-05	1.196E-05	1.203E-05	1.202E-05
	²⁴¹ Am *	1.064E-06	1.063E-06	1.133E-06	1.132E-06
	²⁴³ Am	1.934E-06	1.931E-06	2.015E-06	2.012E-06
	⁹⁵ Mo	4.645E-05	4.646E-05	4.628E-05	4.629E-05
	⁹⁹ Tc	5.189E-05	5.189E-05	5.178E-05	5.178E-05
	¹⁰¹ Ru	4.750E-05	4.750E-05	4.748E-05	4.748E-05
	¹⁰³ Rh	2.503E-05	2.502E-05	2.514E-05	2.513E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.471E-06	4.470E-06	4.522E-06	4.521E-06
	¹³³ Cs	5.345E-05	5.345E-05	5.330E-05	5.330E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.805E-06	4.806E-06	4.739E-06	4.740E-06
	¹⁴⁹ Sm	5.139E-08	5.131E-08	5.492E-08	5.484E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.085E-05	1.085E-05	1.091E-05	1.091E-05
	¹⁵¹ Sm	3.319E-07	3.315E-07	3.488E-07	3.482E-07
	¹⁵² Sm	5.314E-06	5.315E-06	5.259E-06	5.260E-06
	¹⁴³ Nd	3.233E-05	3.232E-05	3.272E-05	3.271E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.967E-05	2.968E-05	2.960E-05	2.960E-05
	¹⁵³ Eu	4.117E-06	4.117E-06	4.142E-06	4.141E-06
	¹⁵⁵ Gd	1.808E-09	1.804E-09	1.962E-09	1.958E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.23 各ノードの核種組成 4(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		7		8	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.485E-06	4.485E-06	4.456E-06	4.456E-06
	²³⁵ U *	1.872E-04	1.871E-04	1.932E-04	1.931E-04
	²³⁶ U	1.065E-04	1.065E-04	1.062E-04	1.062E-04
	²³⁸ U *	2.048E-02	2.048E-02	2.047E-02	2.047E-02
	²³⁷ Np	1.010E-05	1.010E-05	1.038E-05	1.037E-05
	²³⁸ Pu *	3.556E-06	3.552E-06	3.715E-06	3.711E-06
	²³⁹ Pu *	1.024E-04	1.024E-04	1.074E-04	1.074E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.053E-05	5.050E-05	5.111E-05	5.109E-05
	²⁴¹ Pu *	2.647E-05	2.644E-05	2.759E-05	2.756E-05
	²⁴² Pu *	1.207E-05	1.206E-05	1.210E-05	1.210E-05
	²⁴¹ Am *	1.198E-06	1.196E-06	1.260E-06	1.259E-06
	²⁴³ Am	2.087E-06	2.084E-06	2.153E-06	2.151E-06
	⁹⁵ Mo	4.613E-05	4.614E-05	4.599E-05	4.599E-05
	⁹⁹ Tc	5.167E-05	5.168E-05	5.158E-05	5.158E-05
	¹⁰¹ Ru	4.745E-05	4.745E-05	4.743E-05	4.743E-05
	¹⁰³ Rh	2.523E-05	2.523E-05	2.532E-05	2.532E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.567E-06	4.566E-06	4.609E-06	4.608E-06
	¹³³ Cs	5.315E-05	5.316E-05	5.302E-05	5.302E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.679E-06	4.680E-06	4.622E-06	4.623E-06
	¹⁴⁹ Sm	5.837E-08	5.830E-08	6.185E-08	6.178E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.097E-05	1.097E-05	1.102E-05	1.101E-05
	¹⁵¹ Sm	3.651E-07	3.644E-07	3.812E-07	3.807E-07
	¹⁵² Sm	5.208E-06	5.208E-06	5.159E-06	5.160E-06
	¹⁴³ Nd	3.307E-05	3.306E-05	3.338E-05	3.338E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.952E-05	2.952E-05	2.945E-05	2.945E-05
	¹⁵³ Eu	4.163E-06	4.163E-06	4.182E-06	4.182E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.115E-09	2.111E-09	2.271E-09	2.267E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.24 各ノードの核種組成 5(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		9		10	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.433E-06	4.434E-06	4.407E-06	4.407E-06
	²³⁵ U *	1.976E-04	1.975E-04	2.028E-04	2.026E-04
	²³⁶ U	1.060E-04	1.060E-04	1.058E-04	1.058E-04
	²³⁸ U *	2.046E-02	2.046E-02	2.044E-02	2.044E-02
	²³⁷ Np	1.058E-05	1.057E-05	1.082E-05	1.081E-05
	²³⁸ Pu *	3.835E-06	3.830E-06	3.978E-06	3.974E-06
	²³⁹ Pu *	1.112E-04	1.112E-04	1.159E-04	1.159E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.155E-05	5.151E-05	5.207E-05	5.205E-05
	²⁴¹ Pu *	2.843E-05	2.841E-05	2.944E-05	2.941E-05
	²⁴² Pu *	1.212E-05	1.211E-05	1.212E-05	1.211E-05
	²⁴¹ Am *	1.308E-06	1.307E-06	1.364E-06	1.363E-06
	²⁴³ Am	2.201E-06	2.198E-06	2.255E-06	2.253E-06
	⁹⁵ Mo	4.588E-05	4.588E-05	4.575E-05	4.575E-05
	⁹⁹ Tc	5.150E-05	5.150E-05	5.142E-05	5.142E-05
	¹⁰¹ Ru	4.741E-05	4.741E-05	4.738E-05	4.738E-05
	¹⁰³ Rh	2.538E-05	2.538E-05	2.545E-05	2.545E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.639E-06	4.638E-06	4.674E-06	4.673E-06
	¹³³ Cs	5.292E-05	5.292E-05	5.280E-05	5.280E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.580E-06	4.581E-06	4.530E-06	4.531E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.458E-08	6.452E-08	6.799E-08	6.791E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.105E-05	1.105E-05	1.109E-05	1.109E-05
	¹⁵¹ Sm	3.938E-07	3.932E-07	4.091E-07	4.086E-07
	¹⁵² Sm	5.123E-06	5.124E-06	5.081E-06	5.082E-06
	¹⁴³ Nd	3.361E-05	3.360E-05	3.387E-05	3.386E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.940E-05	2.940E-05	2.933E-05	2.933E-05
	¹⁵³ Eu	4.195E-06	4.195E-06	4.209E-06	4.209E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.395E-09	2.391E-09	2.551E-09	2.547E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.25 各ノードの核種組成 6(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		11		12	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.387E-06	4.388E-06	4.363E-06	4.363E-06
	²³⁵ U *	2.066E-04	2.064E-04	2.110E-04	2.109E-04
	²³⁶ U	1.056E-04	1.056E-04	1.055E-04	1.055E-04
	²³⁸ U *	2.044E-02	2.044E-02	2.043E-02	2.043E-02
	²³⁷ Np	1.099E-05	1.099E-05	1.120E-05	1.120E-05
	²³⁸ Pu *	4.086E-06	4.082E-06	4.217E-06	4.214E-06
	²³⁹ Pu *	1.196E-04	1.196E-04	1.241E-04	1.241E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.246E-05	5.243E-05	5.294E-05	5.292E-05
	²⁴¹ Pu *	3.020E-05	3.018E-05	3.111E-05	3.110E-05
	²⁴² Pu *	1.212E-05	1.212E-05	1.212E-05	1.211E-05
	²⁴¹ Am *	1.407E-06	1.406E-06	1.459E-06	1.459E-06
	²⁴³ Am	2.294E-06	2.292E-06	2.340E-06	2.338E-06
	⁹⁵ Mo	4.565E-05	4.566E-05	4.554E-05	4.554E-05
	⁹⁹ Tc	5.135E-05	5.135E-05	5.128E-05	5.128E-05
	¹⁰¹ Ru	4.736E-05	4.736E-05	4.734E-05	4.734E-05
	¹⁰³ Rh	2.550E-05	2.550E-05	2.556E-05	2.556E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.700E-06	4.698E-06	4.730E-06	4.729E-06
	¹³³ Cs	5.271E-05	5.271E-05	5.260E-05	5.260E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.494E-06	4.495E-06	4.450E-06	4.450E-06
	¹⁴⁹ Sm	7.063E-08	7.056E-08	7.404E-08	7.397E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.112E-05	1.112E-05	1.115E-05	1.115E-05
	¹⁵¹ Sm	4.210E-07	4.205E-07	4.359E-07	4.354E-07
	¹⁵² Sm	5.050E-06	5.051E-06	5.013E-06	5.013E-06
	¹⁴³ Nd	3.405E-05	3.405E-05	3.427E-05	3.427E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.928E-05	2.928E-05	2.922E-05	2.922E-05
	¹⁵³ Eu	4.219E-06	4.219E-06	4.230E-06	4.230E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.674E-09	2.669E-09	2.829E-09	2.824E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.26 各ノードの核種組成 7(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード 冷却材温度分布	13		14		
	有り	無し	有り	無し	
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.348E-06	4.348E-06	4.331E-06	4.332E-06
	²³⁵ U *	2.139E-04	2.138E-04	2.169E-04	2.168E-04
	²³⁶ U	1.054E-04	1.054E-04	1.053E-04	1.053E-04
	²³⁸ U *	2.042E-02	2.042E-02	2.041E-02	2.041E-02
	²³⁷ Np	1.134E-05	1.134E-05	1.148E-05	1.148E-05
	²³⁸ Pu *	4.304E-06	4.301E-06	4.394E-06	4.391E-06
	²³⁹ Pu *	1.271E-04	1.271E-04	1.303E-04	1.304E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.326E-05	5.324E-05	5.360E-05	5.357E-05
	²⁴¹ Pu *	3.172E-05	3.171E-05	3.235E-05	3.234E-05
	²⁴² Pu *	1.211E-05	1.210E-05	1.210E-05	1.209E-05
	²⁴¹ Am *	1.493E-06	1.493E-06	1.529E-06	1.529E-06
	²⁴³ Am	2.368E-06	2.367E-06	2.397E-06	2.396E-06
	⁹⁵ Mo	4.546E-05	4.546E-05	4.538E-05	4.539E-05
	⁹⁹ Tc	5.123E-05	5.123E-05	5.118E-05	5.118E-05
	¹⁰¹ Ru	4.733E-05	4.733E-05	4.731E-05	4.731E-05
	¹⁰³ Rh	2.560E-05	2.560E-05	2.564E-05	2.564E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.750E-06	4.749E-06	4.770E-06	4.769E-06
	¹³³ Cs	5.253E-05	5.253E-05	5.246E-05	5.246E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.421E-06	4.422E-06	4.392E-06	4.392E-06
	¹⁴⁹ Sm	7.631E-08	7.625E-08	7.876E-08	7.870E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.118E-05	1.117E-05	1.120E-05	1.120E-05
	¹⁵¹ Sm	4.460E-07	4.456E-07	4.567E-07	4.562E-07
	¹⁵² Sm	4.988E-06	4.989E-06	4.963E-06	4.964E-06
	¹⁴³ Nd	3.441E-05	3.440E-05	3.455E-05	3.455E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.918E-05	2.919E-05	2.914E-05	2.915E-05
	¹⁵³ Eu	4.237E-06	4.237E-06	4.243E-06	4.243E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.936E-09	2.931E-09	3.052E-09	3.048E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.27 各ノードの核種組成 8(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		15		16	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.318E-06	4.318E-06	4.307E-06	4.307E-06
	²³⁵ U *	2.194E-04	2.193E-04	2.212E-04	2.212E-04
	²³⁶ U	1.052E-04	1.052E-04	1.051E-04	1.051E-04
	²³⁸ U *	2.041E-02	2.041E-02	2.040E-02	2.040E-02
	²³⁷ Np	1.160E-05	1.160E-05	1.169E-05	1.169E-05
	²³⁸ Pu *	4.469E-06	4.467E-06	4.528E-06	4.526E-06
	²³⁹ Pu *	1.331E-04	1.331E-04	1.352E-04	1.352E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.387E-05	5.386E-05	5.409E-05	5.408E-05
	²⁴¹ Pu *	3.288E-05	3.287E-05	3.328E-05	3.327E-05
	²⁴² Pu *	1.208E-05	1.208E-05	1.207E-05	1.207E-05
	²⁴¹ Am *	1.559E-06	1.559E-06	1.582E-06	1.582E-06
	²⁴³ Am	2.421E-06	2.419E-06	2.438E-06	2.437E-06
	⁹⁵ Mo	4.532E-05	4.532E-05	4.527E-05	4.527E-05
	⁹⁹ Tc	5.113E-05	5.113E-05	5.110E-05	5.110E-05
	¹⁰¹ Ru	4.730E-05	4.730E-05	4.729E-05	4.729E-05
	¹⁰³ Rh	2.568E-05	2.567E-05	2.570E-05	2.570E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.786E-06	4.786E-06	4.799E-06	4.798E-06
	¹³³ Cs	5.240E-05	5.240E-05	5.235E-05	5.235E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.368E-06	4.368E-06	4.349E-06	4.349E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.084E-08	8.078E-08	8.249E-08	8.243E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.121E-05	1.121E-05	1.123E-05	1.123E-05
	¹⁵¹ Sm	4.657E-07	4.652E-07	4.727E-07	4.723E-07
	¹⁵² Sm	4.943E-06	4.943E-06	4.927E-06	4.927E-06
	¹⁴³ Nd	3.466E-05	3.466E-05	3.475E-05	3.475E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.911E-05	2.911E-05	2.908E-05	2.909E-05
	¹⁵³ Eu	4.248E-06	4.248E-06	4.252E-06	4.252E-06
	¹⁵⁵ Gd	3.152E-09	3.148E-09	3.230E-09	3.225E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.28 各ノードの核種組成 9(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		17		18	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.297E-06	4.297E-06	4.286E-06	4.286E-06
	²³⁵ U *	2.231E-04	2.231E-04	2.251E-04	2.250E-04
	²³⁶ U	1.051E-04	1.051E-04	1.050E-04	1.050E-04
	²³⁸ U *	2.040E-02	2.040E-02	2.039E-02	2.039E-02
	²³⁷ Np	1.178E-05	1.178E-05	1.187E-05	1.187E-05
	²³⁸ Pu *	4.587E-06	4.585E-06	4.649E-06	4.647E-06
	²³⁹ Pu *	1.374E-04	1.375E-04	1.397E-04	1.398E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.431E-05	5.429E-05	5.454E-05	5.452E-05
	²⁴¹ Pu *	3.370E-05	3.369E-05	3.412E-05	3.411E-05
	²⁴² Pu *	1.206E-05	1.206E-05	1.205E-05	1.204E-05
	²⁴¹ Am *	1.606E-06	1.606E-06	1.630E-06	1.630E-06
	²⁴³ Am	2.456E-06	2.454E-06	2.473E-06	2.472E-06
	⁹⁵ Mo	4.522E-05	4.522E-05	4.517E-05	4.517E-05
	⁹⁹ Tc	5.107E-05	5.107E-05	5.104E-05	5.104E-05
	¹⁰¹ Ru	4.728E-05	4.728E-05	4.727E-05	4.727E-05
	¹⁰³ Rh	2.573E-05	2.573E-05	2.575E-05	2.575E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.811E-06	4.811E-06	4.824E-06	4.823E-06
	¹³³ Cs	5.231E-05	5.231E-05	5.226E-05	5.226E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.330E-06	4.330E-06	4.311E-06	4.311E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.420E-08	8.416E-08	8.601E-08	8.594E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.124E-05	1.124E-05	1.125E-05	1.125E-05
	¹⁵¹ Sm	4.800E-07	4.796E-07	4.876E-07	4.872E-07
	¹⁵² Sm	4.911E-06	4.911E-06	4.895E-06	4.895E-06
	¹⁴³ Nd	3.484E-05	3.483E-05	3.492E-05	3.492E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.906E-05	2.906E-05	2.903E-05	2.903E-05
	¹⁵³ Eu	4.256E-06	4.255E-06	4.259E-06	4.259E-06
	¹⁵⁵ Gd	3.311E-09	3.309E-09	3.399E-09	3.395E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.29 各ノードの核種組成 10(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		19		20	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.279E-06	4.279E-06	4.271E-06	4.271E-06
	²³⁵ U *	2.263E-04	2.263E-04	2.277E-04	2.276E-04
	²³⁶ U	1.050E-04	1.050E-04	1.050E-04	1.050E-04
	²³⁸ U *	2.039E-02	2.039E-02	2.038E-02	2.038E-02
	²³⁷ Np	1.193E-05	1.193E-05	1.200E-05	1.200E-05
	²³⁸ Pu *	4.691E-06	4.689E-06	4.734E-06	4.732E-06
	²³⁹ Pu *	1.413E-04	1.413E-04	1.429E-04	1.430E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.469E-05	5.468E-05	5.486E-05	5.484E-05
	²⁴¹ Pu *	3.441E-05	3.440E-05	3.470E-05	3.469E-05
	²⁴² Pu *	1.204E-05	1.203E-05	1.202E-05	1.202E-05
	²⁴¹ Am *	1.647E-06	1.647E-06	1.664E-06	1.663E-06
	²⁴³ Am	2.485E-06	2.484E-06	2.497E-06	2.495E-06
	⁹⁵ Mo	4.513E-05	4.514E-05	4.510E-05	4.510E-05
	⁹⁹ Tc	5.101E-05	5.101E-05	5.099E-05	5.099E-05
	¹⁰¹ Ru	4.726E-05	4.726E-05	4.725E-05	4.725E-05
	¹⁰³ Rh	2.577E-05	2.577E-05	2.579E-05	2.579E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.833E-06	4.832E-06	4.841E-06	4.840E-06
	¹³³ Cs	5.223E-05	5.223E-05	5.219E-05	5.219E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.298E-06	4.298E-06	4.285E-06	4.285E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.724E-08	8.720E-08	8.851E-08	8.848E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.126E-05	1.126E-05	1.127E-05	1.127E-05
	¹⁵¹ Sm	4.928E-07	4.924E-07	4.981E-07	4.977E-07
	¹⁵² Sm	4.883E-06	4.884E-06	4.872E-06	4.872E-06
	¹⁴³ Nd	3.498E-05	3.498E-05	3.504E-05	3.504E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.901E-05	2.901E-05	2.899E-05	2.899E-05
	¹⁵³ Eu	4.261E-06	4.261E-06	4.263E-06	4.263E-06
	¹⁵⁵ Gd	3.458E-09	3.455E-09	3.523E-09	3.519E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.30 各ノードの核種組成 11(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		21		22	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.263E-06	4.263E-06	4.257E-06	4.257E-06
	²³⁵ U *	2.290E-04	2.289E-04	2.301E-04	2.300E-04
	²³⁶ U	1.049E-04	1.049E-04	1.049E-04	1.049E-04
	²³⁸ U *	2.038E-02	2.038E-02	2.038E-02	2.038E-02
	²³⁷ Np	1.206E-05	1.206E-05	1.211E-05	1.211E-05
	²³⁸ Pu *	4.777E-06	4.776E-06	4.812E-06	4.811E-06
	²³⁹ Pu *	1.446E-04	1.446E-04	1.459E-04	1.460E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.501E-05	5.500E-05	5.515E-05	5.513E-05
	²⁴¹ Pu *	3.500E-05	3.499E-05	3.524E-05	3.523E-05
	²⁴² Pu *	1.201E-05	1.201E-05	1.200E-05	1.200E-05
	²⁴¹ Am *	1.681E-06	1.681E-06	1.695E-06	1.695E-06
	²⁴³ Am	2.508E-06	2.507E-06	2.518E-06	2.517E-06
	⁹⁵ Mo	4.506E-05	4.506E-05	4.503E-05	4.503E-05
	⁹⁹ Tc	5.097E-05	5.097E-05	5.095E-05	5.095E-05
	¹⁰¹ Ru	4.724E-05	4.724E-05	4.724E-05	4.724E-05
	¹⁰³ Rh	2.581E-05	2.580E-05	2.582E-05	2.582E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.850E-06	4.849E-06	4.857E-06	4.856E-06
	¹³³ Cs	5.216E-05	5.216E-05	5.213E-05	5.213E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.271E-06	4.271E-06	4.260E-06	4.261E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.986E-08	8.982E-08	9.094E-08	9.089E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.128E-05	1.128E-05	1.129E-05	1.129E-05
	¹⁵¹ Sm	5.037E-07	5.033E-07	5.081E-07	5.077E-07
	¹⁵² Sm	4.861E-06	4.861E-06	4.852E-06	4.852E-06
	¹⁴³ Nd	3.510E-05	3.510E-05	3.515E-05	3.515E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.897E-05	2.897E-05	2.896E-05	2.896E-05
	¹⁵³ Eu	4.265E-06	4.265E-06	4.267E-06	4.267E-06
	¹⁵⁵ Gd	3.585E-09	3.583E-09	3.638E-09	3.637E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.31 各ノードの核種組成 12(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ノード		23		24	
冷却材温度分布		有り	無し	有り	無し
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.254E-06	4.254E-06	4.251E-06	4.251E-06
	²³⁵ U *	2.306E-04	2.305E-04	2.311E-04	2.311E-04
	²³⁶ U	1.049E-04	1.049E-04	1.049E-04	1.049E-04
	²³⁸ U *	2.038E-02	2.038E-02	2.037E-02	2.037E-02
	²³⁷ Np	1.214E-05	1.214E-05	1.217E-05	1.217E-05
	²³⁸ Pu *	4.830E-06	4.829E-06	4.848E-06	4.847E-06
	²³⁹ Pu *	1.466E-04	1.467E-04	1.473E-04	1.474E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.521E-05	5.520E-05	5.528E-05	5.526E-05
	²⁴¹ Pu *	3.536E-05	3.536E-05	3.548E-05	3.548E-05
	²⁴² Pu *	1.200E-05	1.199E-05	1.199E-05	1.199E-05
	²⁴¹ Am *	1.702E-06	1.702E-06	1.709E-06	1.709E-06
	²⁴³ Am	2.522E-06	2.521E-06	2.527E-06	2.526E-06
	⁹⁵ Mo	4.502E-05	4.502E-05	4.500E-05	4.500E-05
	⁹⁹ Tc	5.094E-05	5.094E-05	5.093E-05	5.093E-05
	¹⁰¹ Ru	4.723E-05	4.723E-05	4.723E-05	4.723E-05
	¹⁰³ Rh	2.583E-05	2.583E-05	2.583E-05	2.583E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.860E-06	4.860E-06	4.864E-06	4.863E-06
	¹³³ Cs	5.212E-05	5.212E-05	5.210E-05	5.210E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.255E-06	4.255E-06	4.250E-06	4.250E-06
	¹⁴⁹ Sm	9.150E-08	9.145E-08	9.204E-08	9.203E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.129E-05	1.129E-05	1.129E-05	1.129E-05
	¹⁵¹ Sm	5.104E-07	5.100E-07	5.127E-07	5.124E-07
	¹⁵² Sm	4.847E-06	4.847E-06	4.842E-06	4.842E-06
	¹⁴³ Nd	3.517E-05	3.517E-05	3.520E-05	3.520E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.895E-05	2.895E-05	2.894E-05	2.894E-05
	¹⁵³ Eu	4.268E-06	4.267E-06	4.268E-06	4.268E-06
	¹⁵⁵ Gd	3.666E-09	3.662E-09	3.693E-09	3.691E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 5.32 冷却材温度分布の実効増倍率への影響 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

	実効増倍率 $\pm\sigma$		実効増倍率の変化率
	冷却材温度分布有り	冷却材温度分布無し	% $\Delta k/k$
NRC9 核種	1.2541 ± 0.0003	1.2537 ± 0.0004	0.03 ± 0.05
JAERI27 核種	1.1414 ± 0.0003	1.1404 ± 0.0004	0.09 ± 0.05

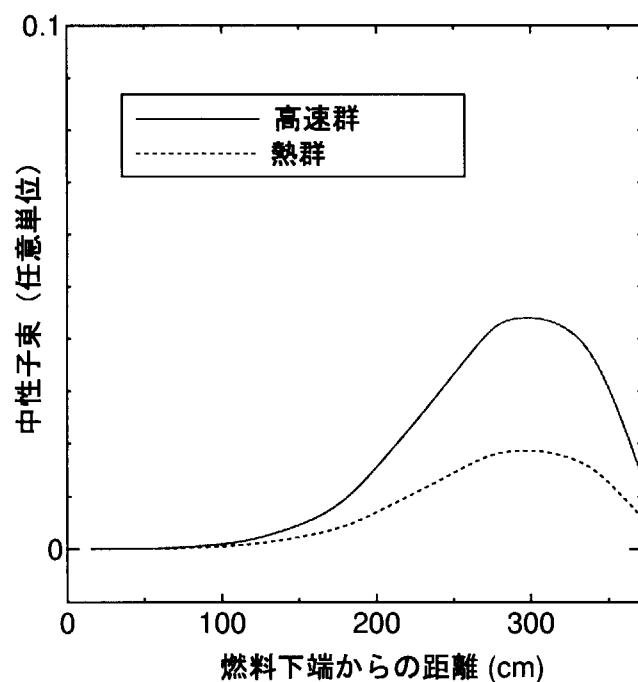


Fig. 5.29 冷却材温度分布無しの時の NRC9 核種で評価した軸方向中性子束分布 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

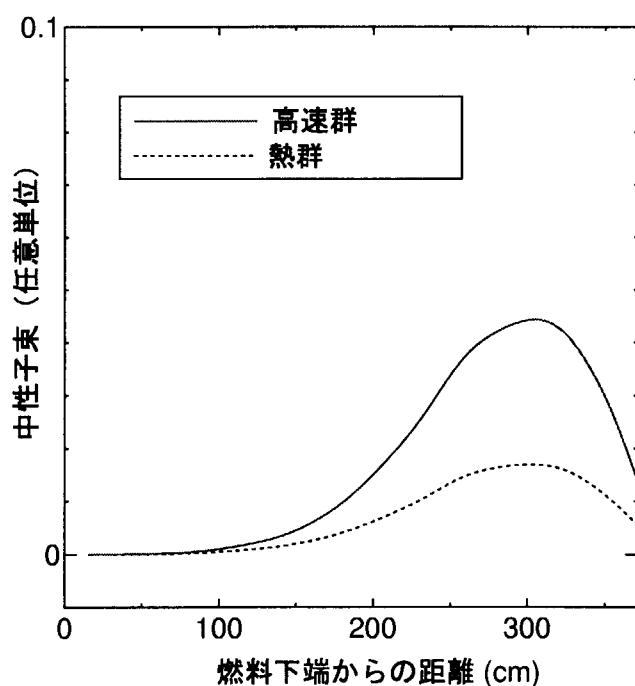


Fig. 5.30 冷却材温度分布無しの時の JAERI27 核種で評価した軸方向中性子束分布 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

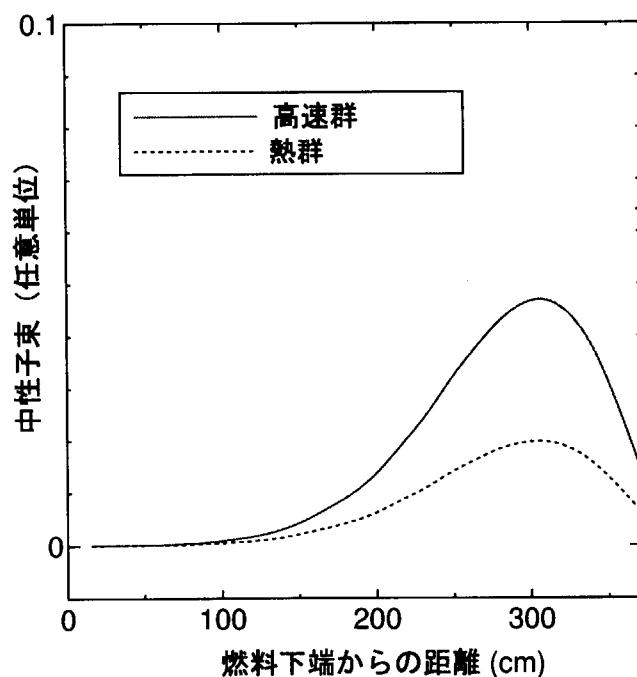


Fig. 5.31 冷却材温度分布有りの時の NRC9 核種で評価した軸方向中性子束分布 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

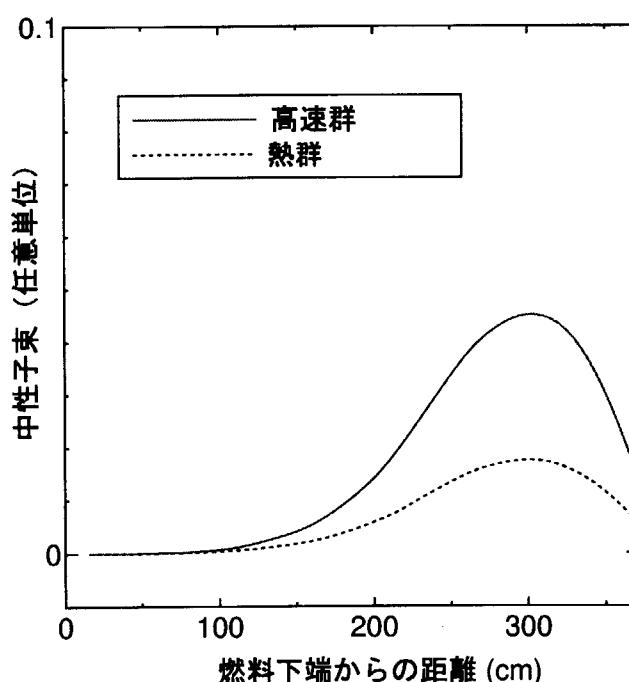


Fig. 5.32 冷却材温度分布有りの時の JAERI27 核種で評価した軸方向中性子束分布 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

6 運転履歴の影響

6.1 比出力が使用済燃料の反応度に及ぼす影響

6.1.1 計算手順

燃焼計算は3章で示した計算条件のうち、比出力を変化させた燃焼計算を SWAT を用いて行う。得られた組成のうち NRC9 核種または JAERI27 核種を選び、SRAC95 を用いて前章までと同様に燃料ピンの無限配列を想定して、系の無限増倍率を求める。

6.1.2 計算ケース

一般に原子炉の比出力は定格出力時で、PWR の場合 30~40MW/t、BWR の場合 20~30MW/t であることが知られている。これまでの計算では比出力を PWR は 40MW/t、BWR は 26MW/t と固定して解析を行ってきたが、ここでは燃焼期間中の比出力の変化が使用済燃料の無限増倍率に及ぼす影響を調べることとする。

PWR の比出力は Table.6.1 に示すように 20MW/t から 45MW/t まで、5MW/t きざみで変化させた。このとき 1 サイクルの燃焼度が変わらないように、比出力にあわせて 1 サイクルの時間を変更した。また、各運転期間や検査期間を区別するために最初のサイクルの運転期間を運転 I、次のサイクルの運転期間を運転 II のように、また、運転 I と運転 II の間の検査期間を検査 I のように呼ぶものとする。ただし、検査期間はいずれの場合も 60 日としている。

BWR の比出力は Table.6.2 に示すように 10MW/t から 35MW/t まで 5MW/t きざみとした、ただし、25MW/t についてはこれまで使っていた基本ケースの値が 26MW/t であるので、計算を行わなかった。また、この場合の検査期間も PWR 同様 60 日とした。

Table 6.1 各計算ケースでの運転パターン (PWR)

比出力 (MW/t)		20	25	30	35	40	45
運転時間 (日)	運転 I	834	667.2	556.01	476.57	417	370.66
	検査 I	60	60	60	60	60	60
	運転 II	834	667.2	556.01	476.57	417	370.66
	検査 II	60	60	60	60	60	60
	運転 III	834	667.2	556.01	476.57	417	370.66

Table 6.2 各計算ケースでの運転パターン (BWR)

比出力		10	15	20	26	30	35
運転時間 (日)	運転 I	998.4	665.6	499.2	384	332.8	285.26
	検査 I	60	60	60	60	60	60
	運転 II	998.4	665.6	499.2	384	332.8	285.26
	検査 II	60	60	60	60	60	60
	運転 III	998.4	665.6	499.2	384	332.8	285.26
	検査 III	60	60	60	60	60	60
	運転 IV	998.4	665.6	499.2	384	332.8	285.26

6.1.3 結果

PWRにおいて比出力を 20MW/t から 45MW/t まで変えていったときの運転 III 終了時点の使用済燃料の組成と無限増倍率を Table.6.3 と Table.6.4 に、無限増倍率と比出力の関係をプロットしたものを NRC9 核種で評価した場合を Fig.6.1 に、JAERI27 核種で評価した場合を Fig.6.2 に示す。Fig.6.1 と Fig.6.2 より比出力が高くなるほど使用済燃料の無限増倍率は高くなっていることがわかる。

ここで、無限増倍率の変化への各核種の寄与率を Fig.6.3 に示す。Fig.6.3 は比出力が 20MW/t のケースの核種組成のうち、ある 1 核種の原子個数密度を比出力が 45MW/t の時の値に変えて SRAC95 で無限増倍率を算出し、以下の式を用いて寄与率を算出したものである。(^{234}U の場合)

$$^{234}\text{U} \text{ の反応度への寄与率} = \frac{k_{U234} - k_{20\text{MW}/t}}{k_{45\text{MW}/t} - k_{20\text{MW}/t}}$$

k_{U234} : ^{234}U の原子個数密度のみを比出力 45MW/t として燃焼させた時の値に置換し、その他の核種は比出力 20MW/t とした時の無限増倍率

$k_{20\text{MW}/t}$: 比出力 20MW/t として燃焼させた組成での無限増倍率

$k_{45\text{MW}/t}$: 比出力 45MW/t として燃焼させた組成での無限増倍率

Fig.6.3 より、比出力を変えた場合、主に ^{241}Pu , ^{241}Am によって使用済燃料の無限増倍率が変化することがわかる。つまり、比出力が高い場合は 1 サイクルの時間が短いので ^{241}Pu あまり崩壊せず、また ^{241}Pu の崩壊により生成する ^{241}Am の量も少なくなるため、使用済燃料の無限増倍率が高くなると考えられる。つまりこの解析では燃焼度一定の条件を課しているため比出力とサイクル日数は反比例の関係にあり、無限増倍率の変化は比出力ではなく、サイクルの時間に基づいて解釈した方が考えやすい。

ここで Fig.6.1 と Fig.6.2 の横軸を比出力から 1 サイクルの時間としたものを Fig.6.4 と Fig.6.5 に示す。ただし、Fig.6.1, Fig.6.2 の右上がりのグラフと対応させるため Fig.6.4 と Fig.6.5 では横軸を右に行くほど小さい値にとってある。Fig.6.4 と Fig.6.5 では無限増倍率は 1 サイクルの日数に対して直線的に変化していることがわかる。そこで、1 サイクルの時間が 1 日変化した場合の、無限増倍率の変化を求めると、NRC9 核種で評価した場合で約 $-1.39 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/\text{day}$ 、JAERI27 核種で評価した場合で約 $-1.53 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/\text{day}$ である。これによると、燃焼計算時に想定した 1 サイクルの時間が、実際より 100 日短かった場合、無限増倍率の変化率は NRC9 核種の場合で約 $0.139 \% \Delta k/k$ 、JAERI27 核種の場合で約 $0.153 \% \Delta k/k$ 高くなる程度である。実際に 1 サイクルの時間が 100 日も狂う可能性は低いことを考慮すると、1 サイクルの時間が使用済燃料の無限増倍率に及ぼす影響は無視しうると考えられる。しかし、より安全側の評価をするためには、燃焼計算時の 1 サイクルの時間は短めに、つまり比出力は高めに想定する方が良いと考えられる。

BWRにおいて比出力を 10MW/t から 35MW/t まで変えていったときの使用済燃料の組成と無限増倍率を Table.6.5 と Table.6.6 に、無限増倍率と比出力の関係をプロットしたものを NRC9 核

種で評価したものを Fig.6.6 に、 JAERI27 核種で評価したものを Fig.6.7 に示す。また、 PWR の場合と同様に Fig.6.6 と Fig.6.7 の横軸を比出力から 1 サイクルの時間としたものを Fig.6.8 と Fig.6.9 に示す。いずれの結果も PWR の場合と同じ傾向を示している。そこで BWR の場合も PWR の場合と同様に 1 サイクルの時間が 1 日変化したときの、無限増倍率の変化は NRC9 核種で評価した場合で約 $-1.37 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/day$ 、JAERI27 核種で評価した場合で約 $-1.43 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/day$ である。これは PWR の値とほぼ同じである。従って、BWR の場合もサイクルの時間が使用済燃料の無限増倍率に及ぼす影響は無視しうると考えられる。また、より安全側の評価をするためには、燃焼計算時の 1 サイクルの時間は短めに、つまり比出力は高めに設定すべきである。

Table 6.3 各比出力での無限増倍率と原子個数密度 (1) (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

比出力 (MW/t)		20	25	30
1 サイクルの時間 (日)		834.00	667.20	556.01
無限増倍率	NRC9 核種	1.1900	1.1927	1.1945
	JAERI27 核種	1.0525	1.0549	1.0568
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.008E-06	3.986E-06	3.971E-06
	²³⁵ U *	1.596E-04	1.601E-04	1.604E-04
	²³⁶ U	1.175E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.511E-05	1.506E-05	1.502E-05
	²³⁸ Pu *	7.464E-06	7.086E-06	6.824E-06
	²³⁹ Pu *	1.315E-04	1.317E-04	1.319E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.205E-05	6.204E-05	6.203E-05
	²⁴¹ Pu *	3.782E-05	3.828E-05	3.860E-05
	²⁴² Pu *	1.894E-05	1.900E-05	1.905E-05
	²⁴¹ Am *	2.457E-06	2.003E-06	1.695E-06
	²⁴³ Am	4.350E-06	4.359E-06	4.367E-06
	⁹⁵ Mo	5.710E-05	5.633E-05	5.555E-05
	⁹⁹ Tc	6.216E-05	6.229E-05	6.237E-05
	¹⁰¹ Ru	5.896E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.083E-05	3.066E-05	3.049E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.273E-06	6.284E-06	6.291E-06
	¹³³ Cs	6.486E-05	6.516E-05	6.322E-05
	¹⁴⁷ Sm	6.366E-06	5.509E-06	4.859E-06
	¹⁴⁹ Sm	7.425E-08	7.683E-08	7.887E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.365E-05	1.394E-05	1.418E-05
	¹⁵¹ Sm	4.865E-07	4.926E-07	4.971E-07
	¹⁵² Sm	5.860E-06	5.884E-06	5.903E-06
	¹⁴³ Nd	3.926E-05	3.923E-05	3.918E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.511E-05	3.510E-05	3.510E-05
	¹⁵³ Eu	5.532E-06	5.537E-06	5.539E-06
	¹⁵⁵ Gd	5.116E-09	4.176E-09	3.531E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.4 各比出力での無限増倍率と原子個数密度(2) (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

比出力(MW/t)		35	40	45
1サイクルの時間(日)		476.57	417.00	370.66
無限増倍率	NRC9 核種	1.1959	1.1969	1.1977
	JAERI27 核種	1.0581	1.0592	1.0600
原子個数密度 (× 10 ²⁴ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.961E-06	3.954E-06	3.948E-06
	²³⁵ U *	1.607E-04	1.608E-04	1.610E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.498E-05	1.494E-05	1.490E-05
	²³⁸ Pu *	6.626E-06	6.473E-06	6.348E-06
	²³⁹ Pu *	1.320E-04	1.321E-04	1.321E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.203E-05	6.203E-05	6.203E-05
	²⁴¹ Pu *	3.884E-05	3.903E-05	3.918E-05
	²⁴² Pu *	1.909E-05	1.912E-05	1.914E-05
	²⁴¹ Am *	1.471E-06	1.302E-06	1.169E-06
	²⁴³ Am	4.372E-06	4.376E-06	4.380E-06
	⁹⁵ Mo	5.478E-05	5.402E-05	5.327E-05
	⁹⁹ Tc	6.235E-05	6.238E-05	6.240E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.030E-05	3.012E-05	2.993E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.296E-06	6.294E-06	6.295E-06
	¹³³ Cs	6.315E-05	6.308E-05	6.301E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.352E-06	3.945E-06	3.612E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.054E-08	8.193E-08	8.310E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.437E-05	1.453E-05	1.466E-05
	¹⁵¹ Sm	5.008E-07	5.037E-07	5.061E-07
	¹⁵² Sm	5.916E-06	5.927E-06	5.936E-06
	¹⁴³ Nd	3.912E-05	3.906E-05	3.899E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.509E-05	3.508E-05	3.507E-05
	¹⁵³ Eu	5.540E-06	5.540E-06	5.538E-06
	¹⁵⁵ Gd	3.059E-09	2.700E-09	2.417E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.5 各比出力での無限増倍率と原子個数密度 (1) (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

比出力 (MW/t)		10	15	20
1 サイクルの時間 (日)		998.40	665.60	499.20
無限増倍率	NRC9 核種	1.2028	1.2082	1.2115
	JAERI27 核種	1.0926	1.0972	1.1005
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.487E-06	4.447E-06	4.428E-06
	²³⁵ U *	1.989E-04	1.997E-04	2.004E-04
	²³⁶ U	1.060E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.084E-05	1.079E-05	1.077E-05
	²³⁸ Pu *	5.069E-06	4.463E-06	4.153E-06
	²³⁹ Pu *	1.134E-04	1.138E-04	1.141E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.190E-05	5.183E-05	5.186E-05
	²⁴¹ Pu *	2.735E-05	2.820E-05	2.871E-05
	²⁴² Pu *	1.186E-05	1.198E-05	1.206E-05
	²⁴¹ Am *	3.133E-06	2.186E-06	1.696E-06
	²⁴³ Am	2.206E-06	2.217E-06	2.228E-06
	⁹⁵ Mo	4.840E-05	4.757E-05	4.675E-05
	⁹⁹ Tc	5.092E-05	5.117E-05	5.133E-05
	¹⁰¹ Ru	4.738E-05	4.738E-05	4.739E-05
	¹⁰³ Rh	2.600E-05	2.583E-05	2.566E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.624E-06	4.641E-06	4.654E-06
	¹³³ Cs	5.390E-05	5.397E-05	5.424E-05
	¹⁴⁷ Sm	7.928E-06	6.412E-06	5.393E-06
	¹⁴⁹ Sm	5.530E-08	6.165E-08	6.435E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.053E-05	1.059E-05	1.085E-05
	¹⁵¹ Sm	3.886E-07	3.919E-07	3.987E-07
	¹⁵² Sm	5.062E-06	5.070E-06	5.082E-06
	¹⁴³ Nd	3.428E-05	3.442E-05	3.385E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.939E-05	2.938E-05	2.937E-05
	¹⁵³ Eu	4.210E-06	4.205E-06	4.204E-06
	¹⁵⁵ Gd	5.877E-09	4.105E-09	3.169E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.6 各比出力での無限増倍率と原子個数密度(2)(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

比出力(MW/t)		26	30	35
1サイクルの時間(日)		384.00	332.80	285.26
無限増倍率	NRC9核種	1.2137	1.2147	1.2150
	JAERI27核種	1.1028	1.1039	1.1041
	²³⁴ U *	4.416E-06	4.411E-06	4.408E-06
	²³⁵ U *	2.009E-04	2.011E-04	2.007E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.073E-05	1.071E-05	1.066E-05
	²³⁸ Pu *	3.925E-06	3.820E-06	3.707E-06
	²³⁹ Pu *	1.143E-04	1.144E-04	1.143E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.187E-05	5.187E-05	5.181E-05
	²⁴¹ Pu *	2.907E-05	2.924E-05	2.934E-05
	²⁴² Pu *	1.211E-05	1.214E-05	1.215E-05
	²⁴¹ Am *	1.344E-06	1.185E-06	1.032E-06
	²⁴³ Am	2.234E-06	2.238E-06	2.237E-06
原子個数密度 (× 10 ²⁴ 個/cm ³)	⁹⁵ Mo	4.580E-05	4.518E-05	4.445E-05
	⁹⁹ Tc	5.145E-05	5.150E-05	5.155E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.739E-05	4.740E-05
	¹⁰³ Rh	2.542E-05	2.527E-05	2.505E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.661E-06	4.665E-06	4.664E-06
	¹³³ Cs	5.284E-05	5.278E-05	5.272E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.548E-06	4.128E-06	3.713E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.673E-08	6.797E-08	6.910E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.108E-05	1.120E-05	1.132E-05
	¹⁵¹ Sm	4.033E-07	4.055E-07	4.070E-07
	¹⁵² Sm	5.096E-06	5.103E-06	5.112E-06
	¹⁴³ Nd	3.377E-05	3.372E-05	3.362E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.935E-05	2.935E-05
	¹⁵³ Eu	4.204E-06	4.203E-06	4.201E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.491E-09	2.183E-09	1.884E-09

*のついたものはNRC9核種

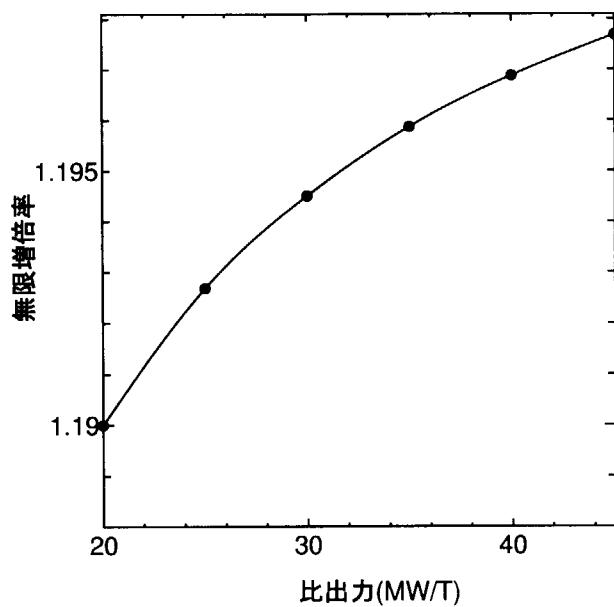


Fig. 6.1 比出力と NRC9 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

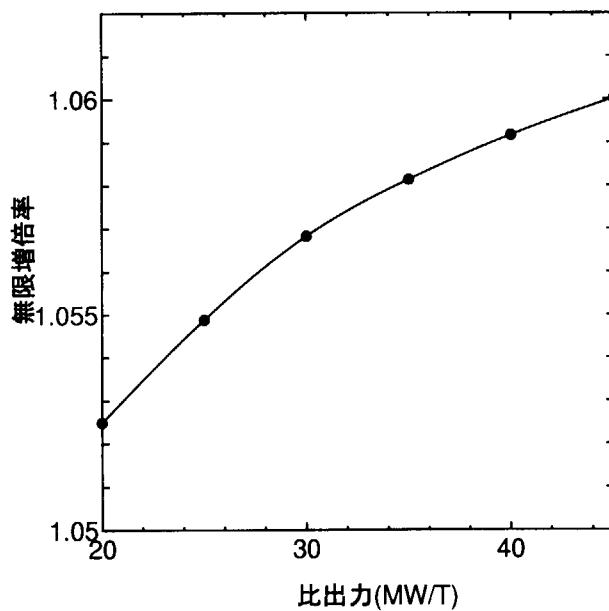


Fig. 6.2 比出力と JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

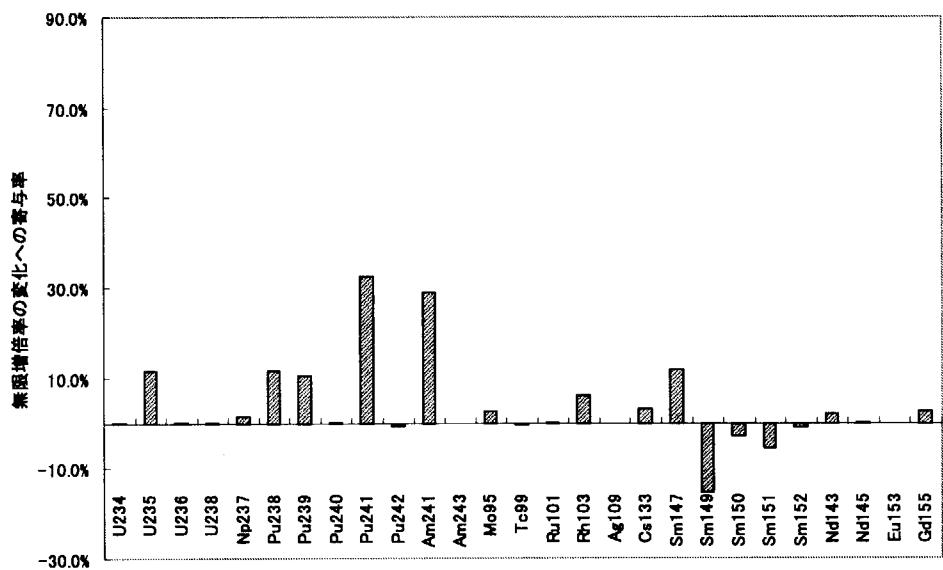


Fig. 6.3 比出力が 20MW/t の時と、45MW/t の時の無限増倍率の差への各核種の寄与率

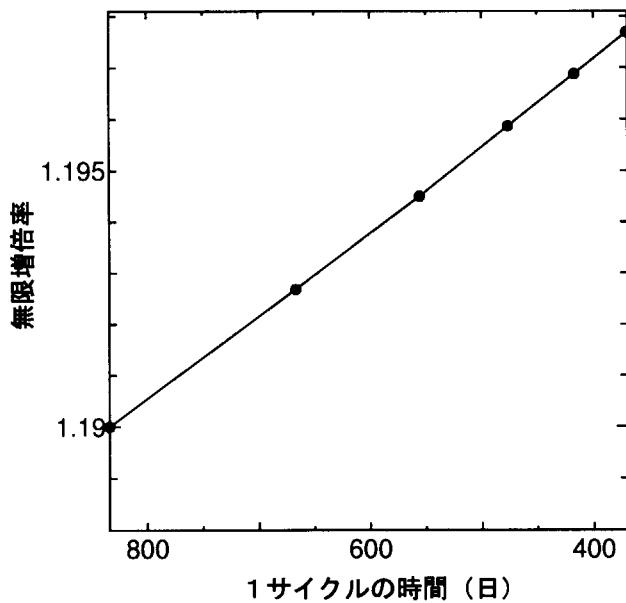


Fig. 6.4 1サイクルの時間と NRC9 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

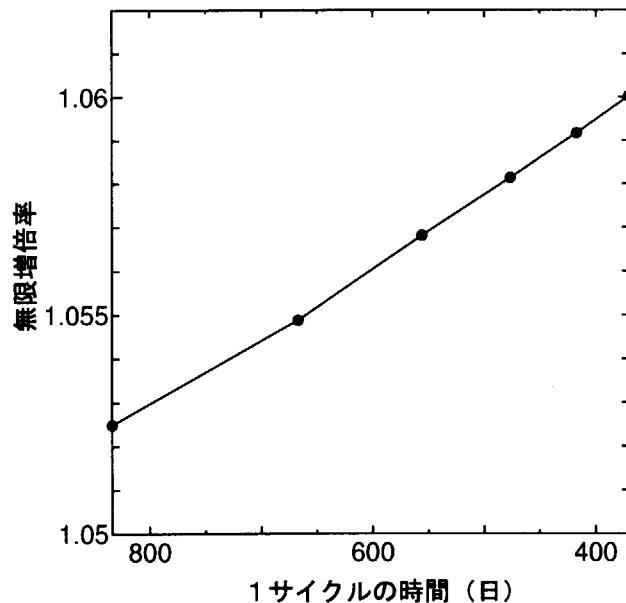


Fig. 6.5 1サイクルの時間と JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

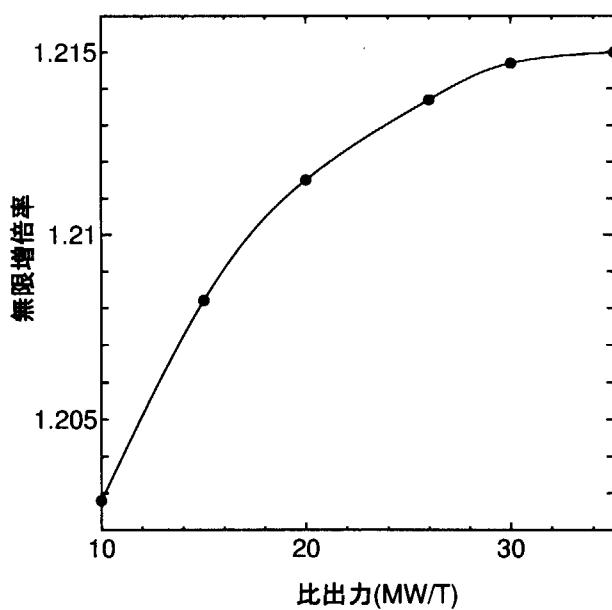


Fig. 6.6 比出力と NRC9 核種で評価した無限増倍率 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

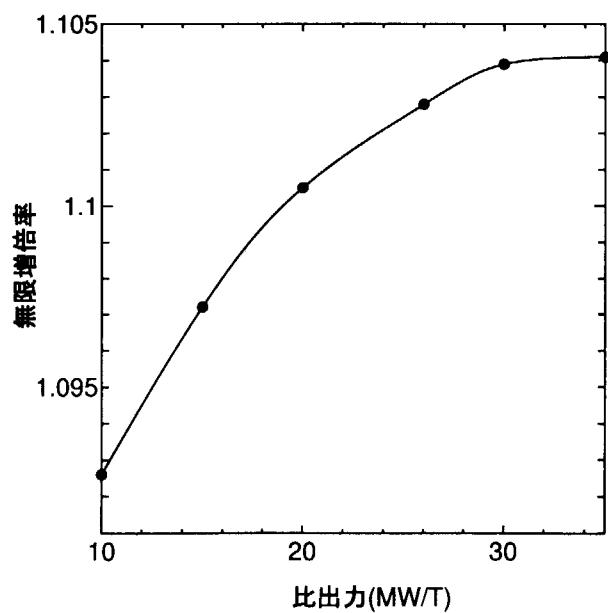


Fig. 6.7 比出力と JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

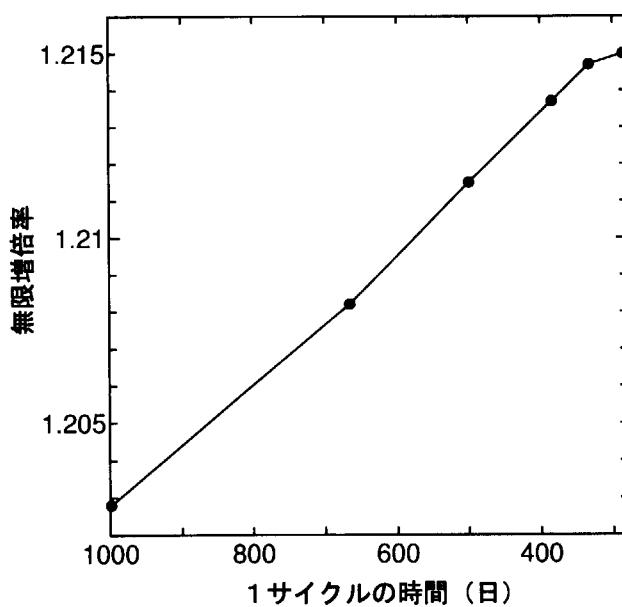


Fig. 6.8 1サイクルの時間とNRC9核種で評価した無限増倍率(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

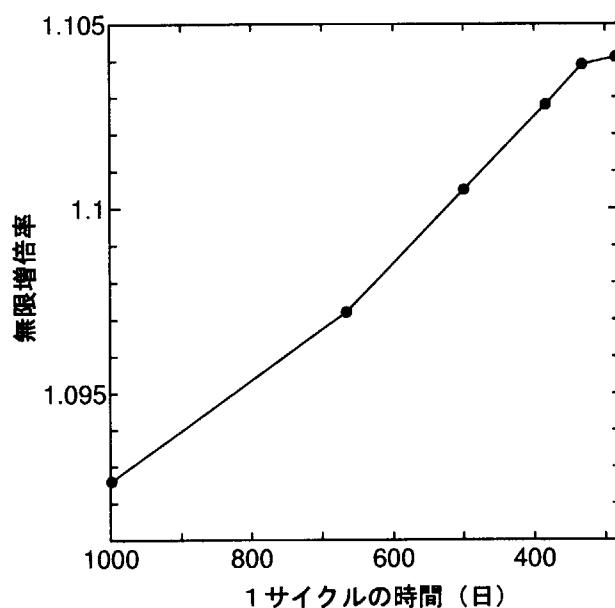


Fig. 6.9 1サイクルの時間とJAERI27核種で評価した無限増倍率(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

6.2 運転パターンが使用済燃料の反応度に及ぼす影響

6.2.1 計算手順

本節では運転サイクル毎に比出力とそれに応じて運転日数が異なる場合を「運転パターンの変化」と考え、これが使用済燃料の核種組成に及ぼす影響を調べる。燃焼計算は3章で示した計算条件のうち、比出力と運転期間を次節に示す組み合わせで変更して、SWATを用いて行う。得られた組成のうちNRC9核種またはJAERI27核種を選び、SRAC95を用いてこれまでと同じように燃料ピンの無限配列で無限増倍率を求める。

6.2.2 計算ケース

一般にある燃料集合体の炉心内での位置はサイクルごとに変わる。炉心内には出力分布があるので、その燃料集合体の比出力は、サイクルごとに変化することになる。そこで、ここでは最終的な燃焼度をPWRは50GWd/t、BWRは40GWd/tに固定して、全サイクルを同じ比出力で運転した場合と、全サイクルのうち、いくつかのサイクルで比出力を低くして運転した場合とを比較し、両者の使用済燃料の無限増倍率の差を調べることとする。ただし、比出力を低くするサイクルでは、燃焼度を保つように運転期間を長くした。

また、実際の炉では1サイクルの時間が変わらずに各サイクルで比出力が異なる運転パターンが存在する可能性がある。これが使用済燃料の無限増倍率に及ぼす影響を調べるために、1サイクルの時間と最終的な燃焼度を変えずに比出力を低くして運転するサイクルを、全サイクルのどの部分に入れるかの違いによって区別される運転パターンによる無限増倍率の違いをPWRについてのみ調べた。

PWRの計算に用いた運転パターンをTable.6.7、Table.6.8に示す。基本の比出力は40MW/tとし、それより低い比出力として30MW/tを採用した。Table.6.7に示した運転パターン1-1から1-3は3サイクルのうちの1つが低い比出力になっている場合、Table.6.8に示したパターン2-1から2-3は3サイクルのうちの2つが低い比出力になっている場合、パターン3は3サイクルとも低い比出力である場合を表している。

BWRの計算に用いた運転パターンをTable.6.9からTable.6.13に示す。基本の比出力は26MW/tとし、それより低い比出力を20MW/tとした。またBWRの場合も比出力が低いときは1サイクルの燃焼度が変わらないように運転時間を長くした。パターン1-1から1-4は4サイクルのうちの1つが低い比出力になっている場合、パターン2-1から2-6は4サイクルのうちの2つが低い比出力になっている場合、パターン3-1から4は3サイクルのうちの3つが低い比出力になっている場合、パターン4は4サイクルとも低い比出力である場合とした。

1サイクルの時間を変えずに比出力のみを変化させた場合の、運転パターンをTable.6.14に示す。運転期間はすべて417日で、燃焼度はすべて50GWd/tである。

Table 6.7 各計算ケースでの運転パターン(1) (PWR)

ケース名	基本		パターン 1-1		パターン 1-2		パターン 1-3	
	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)
運転 I	417	40	556	30	417	40	417	40
検査 I	60	-	60	-	60	-	60	-
運転 II	417	40	417	40	556	30	417	40
検査 II	60	-	60	-	60	-	60	-
運転 III	417	40	417	40	417	40	556	30

Table 6.8 各計算ケースでの運転パターン(2) (PWR)

ケース名	パターン 2-1		パターン 2-2		パターン 2-3		パターン 3	
	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)
運転 I	556	30	556	30	417	40	556	30
検査 I	60	-	60	-	60	-	60	-
運転 II	556	30	417	40	556	30	556	30
検査 II	60	-	60	-	60	-	60	-
運転 III	417	40	556	30	556	30	556	30

Table 6.9 各計算ケースでの運転パターン(1) (BWR)

ケース名	基本		パターン 4	
	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)
運転 I	384	26	499.2	20
検査 I	60	-	60	-
運転 II	384	26	499.2	20
検査 II	60	-	60	-
運転 III	384	26	499.2	20
検査 III	60	-	60	-
運転 IV	384	26	499.2	20

Table 6.10 各計算ケースでの運転パターン(2)(BWR)

ケース名	パターン1-1		パターン1-2		パターン1-3		パターン1-4	
	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)
運転I	499.2	20	384	26	384	26	384	26
検査I	60	-	60	-	60	-	60	-
運転II	384	26	499.2	20	384	26	384	26
検査II	60	-	60	-	60	-	60	-
運転III	384	26	384	26	499.2	20	384	26
検査III	60	-	60	-	60	-	60	-
運転IV	384	26	384	26	384	26	499.2	20

Table 6.11 各計算ケースでの運転パターン(3)(BWR)

ケース名	パターン2-1		パターン2-2		パターン2-3	
	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)
運転I	499.2	20	499.2	20	499.2	20
検査I	60	-	60	-	60	-
運転II	499.2	20	384	26	384	26
検査II	60	-	60	-	60	-
運転III	384	26	499.2	20	384	26
検査III	60	-	60	-	60	-
運転IV	384	26	384	26	499.2	20

Table 6.12 各計算ケースでの運転パターン(4)(BWR)

ケース名	パターン2-4		パターン2-5		パターン2-6	
	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)
運転I	384	26	384	26	384	26
検査I	60	-	60	-	60	-
運転II	499.2	20	499.2	20	384	26
検査II	60	-	60	-	60	-
運転III	499.2	20	384	26	499.2	20
検査III	60	-	60	-	60	-
運転IV	384	26	499.2	20	499.2	20

Table 6.13 各計算ケースでの運転パターン(5)(BWR)

ケース名	パターン3-1		パターン3-2		パターン3-3		パターン3-4	
	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)	時間 (日)	比出力 (MW/t)
運転I	499.2	20	499.2	20	499.2	20	384	26
検査I	60	-	60	-	60	-	60	-
運転II	499.2	20	499.2	20	384	26	499.2	20
検査II	60	-	60	-	60	-	60	-
運転III	499.2	20	384	26	499.2	20	499.2	20
検査III	60	-	60	-	60	-	60	-
運転IV	384	26	499.2	20	499.2	20	499.2	20

Table 6.14 1サイクルの時間を変えずに比出力をえた場合の運転パターン

	各サイクルでの出力(MWd/t)		
	運転I	運転II	運転III
パターン1	35	40	45
パターン2	40	35	45
パターン3	35	45	40
パターン4	45	35	40
パターン5	40	45	35
パターン6	45	40	35
基本パターン	40	40	40

6.2.3 結果

Table.6.15 から **Table.6.17** に PWR で運転パターンを変えたときの、使用済燃料核種組成と無限増倍率を示す。また 3 サイクルのうちどれか 1 サイクルのみ比出力を低くするパターン 1 の結果を **Fig.6.10**, **Fig.6.11** に示す。これらの図からわかるように考慮する核種が NRC9 核種の場合も、JAERI27 核種の場合もパターン 1-1 から 1-3 の無限増倍率は、基本ケースより低くパターン 3 より高くなっている。6.1 節で示したように、比出力が低くなると使用済燃料の無限増倍率は低くなるので、1 つだけ比出力が低くなったサイクルの影響で、パターン 1 は基本ケースより無限増倍率が低くなっていると考えられる。またパターン 1 の間でも、無限増倍率はパターン 1-1, 1-2, 1-3 の順に低くなっている。つまり、比出力を低くしたサイクルが後になるほど無限増倍率が低くなっていることになる。

パターン 1-1 とパターン 1-2 の無限増倍率の変化率(NRC9 核種の場合約 $-0.031\%\Delta k/k$, JAERI27 核種の場合約 $-0.026\%\Delta k/k$)より、パターン 1-2 とパターン 1-3 の無限増倍率の変化率(NRC9 核種の場合約 $-0.117\%\Delta k/k$, JAERI27 核種の場合約 $-0.159\%\Delta k/k$)の方が大きい。つまり 3 番目のサイクルで比出力を低くして運転した方が 1 番目、2 番目のサイクルを低比出力で運転する場合より無限増倍率の変化は大きい。

パターン 2 について、パターン 1 と同様に無限増倍率を比較したものを **Fig.6.12**, **Fig.6.13** に示す。これらの図からわかるように考慮する核種が NRC9 核種の場合でも、JAERI27 核種の場合でもパターン 2-1 から 2-3 の無限増倍率は、基本ケースより低くなっている。これはパターン 2 は 3 サイクルのうち、2 サイクルを低比出力としたものであるので、パターン 1 と同様に低比出力のサイクルの影響で無限増倍率が小さくなっていると考えられる。またパターン 2 の間でも、無限増倍率はパターン 2-1 からパターン 2-3 へ順に低くなっている。パターン 2-1 は運転 I と運転 II で、パターン 2-2 は運転 I と運転 III で、パターン 2-3 は運転 II と運転 III で比出力を低くしたものである。つまり、パターン 1 と同様に、比出力を低くしたサイクルが後になるほど無限増倍率が低くなっていることになる。また、パターン 2-1 とパターン 2-2 の無限増倍率の変化率(NRC9 核種の場合約 $-0.085\%\Delta k/k$, JAERI27 核種の場合約 $-0.132\%\Delta k/k$)より、パターン 2-2 とパターン 2-3 の無限増倍率の変化率(NRC9 核種の場合約 $-0.030\%\Delta k/k$, JAERI27 核種の場合約 $-0.0246\%\Delta k/k$)の方が小さい。これもパターン 1 と同様に、後のサイクルでの運転が無限増倍率に及ぼす影響が大きいためと考えられる。

Table 6.15 各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度(1)(PWR,50GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		基本	パターン3
各サイクル での比出力 (MWd/t)	運転 I	40	30
	運転 II	40	30
	運転 III	40	30
無限増倍率	NRC9 核種	1.1969	1.1945
	JAERI27 核種	1.0592	1.0568
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.954E-06	3.971E-06
	²³⁵ U *	1.608E-04	1.604E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.494E-05	1.502E-05
	²³⁸ Pu *	6.473E-06	6.824E-06
	²³⁹ Pu *	1.321E-04	1.319E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.203E-05	6.203E-05
	²⁴¹ Pu *	3.903E-05	3.860E-05
	²⁴² Pu *	1.912E-05	1.905E-05
	²⁴¹ Am *	1.302E-06	1.695E-06
	²⁴³ Am	4.376E-06	4.367E-06
	⁹⁵ Mo	5.402E-05	5.555E-05
	⁹⁹ Tc	6.238E-05	6.237E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.012E-05	3.049E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.294E-06	6.291E-06
	¹³³ Cs	6.308E-05	6.322E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.945E-06	4.859E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.193E-08	7.887E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.453E-05	1.418E-05
	¹⁵¹ Sm	5.037E-07	4.971E-07
	¹⁵² Sm	5.927E-06	5.903E-06
	¹⁴³ Nd	3.906E-05	3.918E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.508E-05	3.510E-05
	¹⁵³ Eu	5.540E-06	5.539E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.700E-09	3.531E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.16 各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度(2)(PWR,50GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		パターン1-1	パターン1-2	パターン1-3
各サイクル での比出力 (MWd/t)	運転I	30	40	40
	運転II	40	30	40
	運転III	40	40	30
無限増倍率	NRC9核種	1.1967	1.1963	1.1953
	JAERI27核種	1.0590	1.0588	1.0574
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.954E-06	3.957E-06	3.967E-06
	²³⁵ U *	1.607E-04	1.606E-04	1.608E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.494E-05	1.494E-05	1.502E-05
	²³⁸ Pu *	6.495E-06	6.592E-06	6.675E-06
	²³⁹ Pu *	1.320E-04	1.319E-04	1.321E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.198E-05	6.198E-05	6.211E-05
	²⁴¹ Pu *	3.899E-05	3.896E-05	3.870E-05
	²⁴² Pu *	1.911E-05	1.910E-05	1.908E-05
	²⁴¹ Am *	1.303E-06	1.354E-06	1.643E-06
	²⁴³ Am	4.374E-06	4.373E-06	4.372E-06
	⁹⁵ Mo	5.398E-05	5.398E-05	5.564E-05
	⁹⁹ Tc	6.236E-05	6.236E-05	6.242E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.006E-05	3.000E-05	3.066E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.291E-06	6.289E-06	6.297E-06
	¹³³ Cs	6.307E-05	6.307E-05	6.322E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.039E-06	4.231E-06	4.507E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.178E-08	8.139E-08	7.946E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.446E-05	1.437E-05	1.439E-05
	¹⁵¹ Sm	5.023E-07	5.008E-07	5.012E-07
	¹⁵² Sm	5.918E-06	5.912E-06	5.927E-06
	¹⁴³ Nd	3.903E-05	3.902E-05	3.925E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.508E-05	3.509E-05	3.509E-05
	¹⁵³ Eu	5.535E-06	5.534E-06	5.549E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.702E-09	2.741E-09	3.490E-09

*のついたものはNRC9核種

Table 6.17 各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度(3)(PWR,50GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		パターン 2-1	パターン 2-2	パターン 2-3
各サイクル での比出力 (MWd/t)	運転 I	30	30	40
	運転 II	30	40	30
	運転 III	40	30	30
無限増倍率	NRC9 核種	1.1961	1.1951	1.1947
	JAERI27 核種	1.0586	1.0572	1.0570
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.958E-06	3.967E-06	3.970E-06
	²³⁵ U *	1.605E-04	1.606E-04	1.606E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.494E-05	1.502E-05	1.502E-05
	²³⁸ Pu *	6.613E-06	6.697E-06	6.802E-06
	²³⁹ Pu *	1.318E-04	1.320E-04	1.319E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.194E-05	6.207E-05	6.207E-05
	²⁴¹ Pu *	3.893E-05	3.867E-05	3.864E-05
	²⁴² Pu *	1.909E-05	1.908E-05	1.906E-05
	²⁴¹ Am *	1.356E-06	1.644E-06	1.694E-06
	²⁴³ Am	4.371E-06	4.371E-06	4.369E-06
	⁹⁵ Mo	5.394E-05	5.560E-05	5.559E-05
	⁹⁹ Tc	6.234E-05	6.240E-05	6.240E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	2.994E-05	3.060E-05	3.055E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.287E-06	6.295E-06	6.293E-06
	¹³³ Cs	6.307E-05	6.322E-05	6.322E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.319E-06	4.597E-06	4.775E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.126E-08	7.932E-08	7.901E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.431E-05	1.433E-05	1.424E-05
	¹⁵¹ Sm	4.995E-07	4.999E-07	4.984E-07
	¹⁵² Sm	5.903E-06	5.917E-06	5.911E-06
	¹⁴³ Nd	3.899E-05	3.922E-05	3.921E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.509E-05	3.509E-05	3.509E-05
	¹⁵³ Eu	5.530E-06	5.545E-06	5.544E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.743E-09	3.492E-09	3.529E-09

*のついたものは NRC9 核種

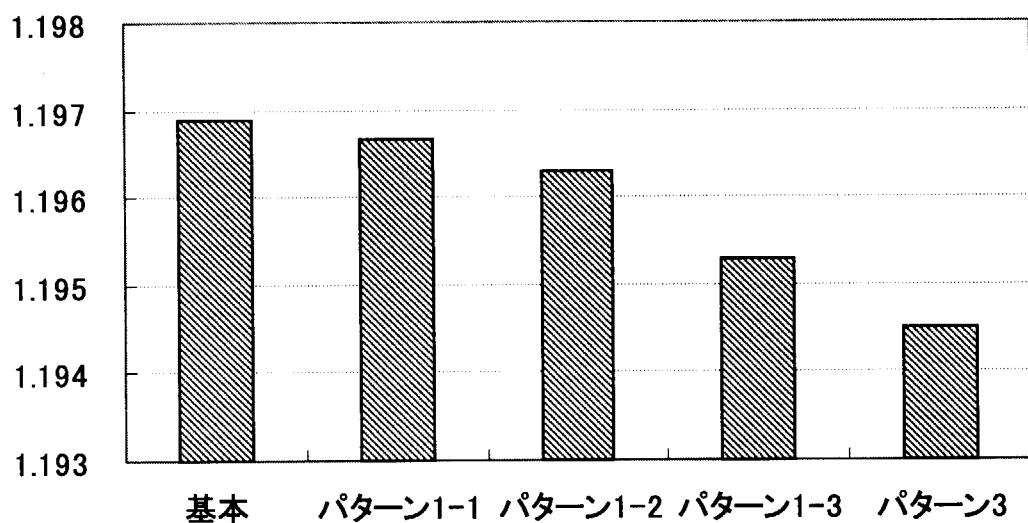


Fig. 6.10 パターン 1 の各々の運転パターンの NRC9 核種で評価した無限増倍率の比較 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

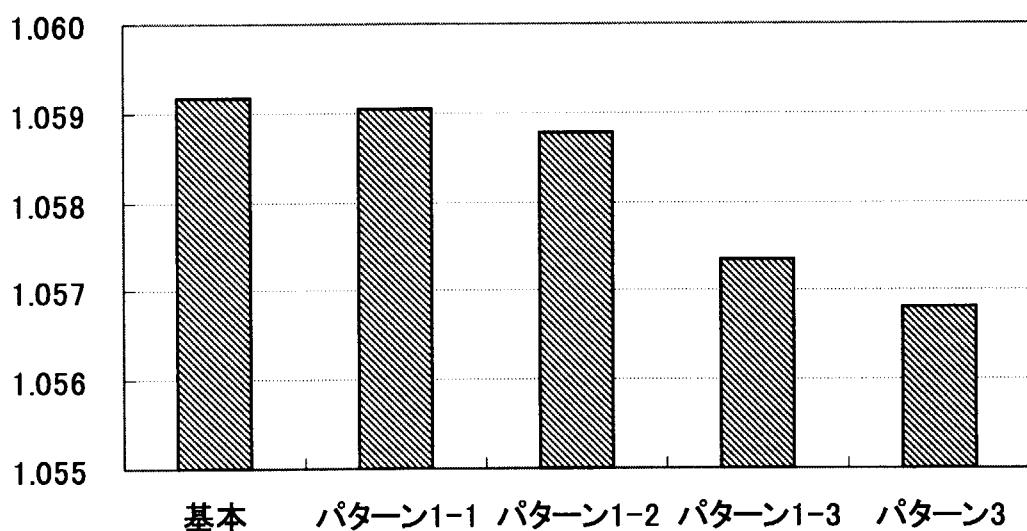


Fig. 6.11 パターン 1 の各々の運転パターンの JAERI27 核種で評価した無限増倍率の比較 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

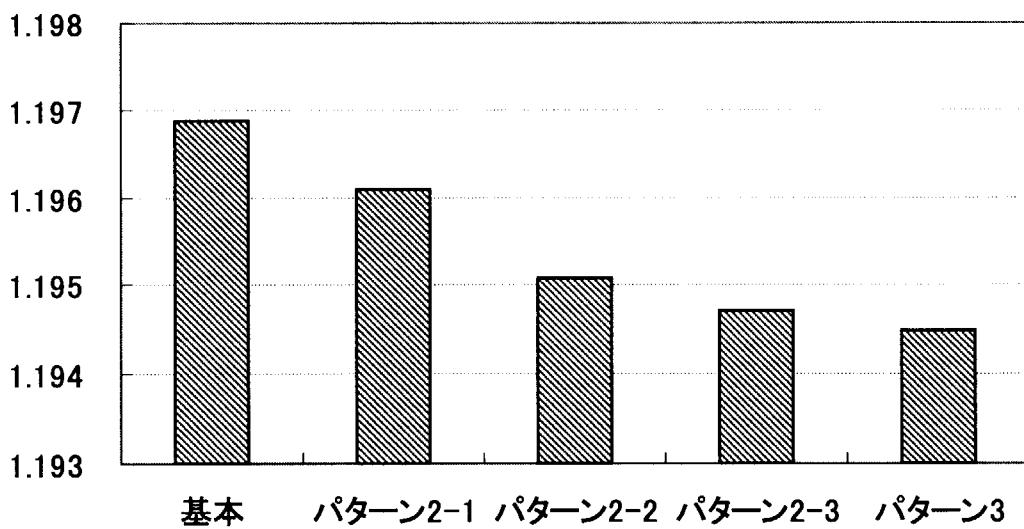


Fig. 6.12 パターン 2 の各々の運転パターンの NRC9 核種で評価した無限増倍率の比較 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

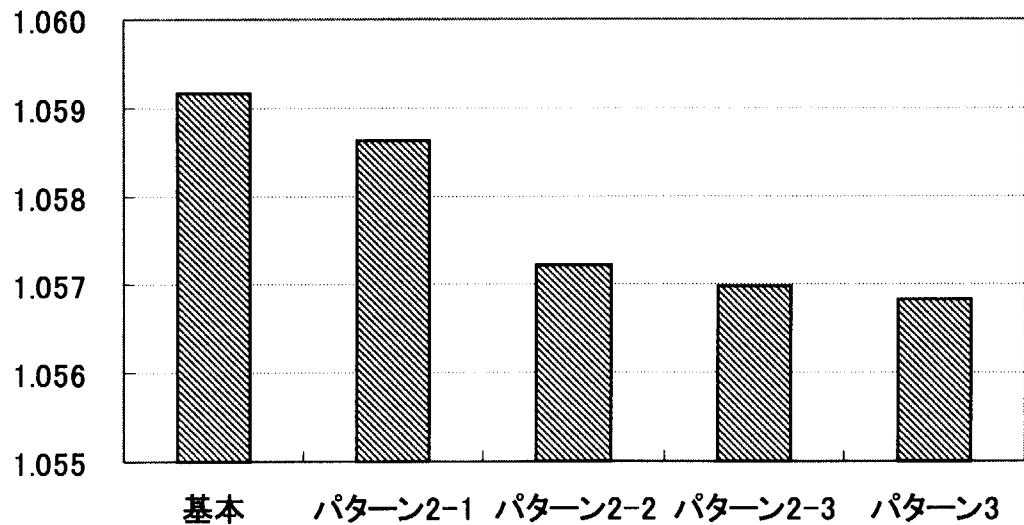


Fig. 6.13 パターン 2 の各々の運転パターンの JAERI27 核種で評価した無限増倍率の比較 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

Table.6.18 から **Table.6.22** に BWR で運転パターンを変えたときの、使用済燃料核種組成と無限増倍率を示す。またどれか 1 サイクルのみ比出力が低いパターン 1 の無限増倍率を基本ケース、パターン 4 と比較したものを **Fig.6.14**, **Fig.6.15** に示す。

これらの図からわかるように考慮する核種が NRC9 核種の場合も、JAERI27 核種の場合もパターン 1-1 から 1-4 の無限増倍率は、PWR の場合と同様に基本ケースより低くなっている。パターン 1 は基本ケースに対し、4 サイクル中のどれか 1 サイクルの比出力を低く設定したものであるが、6.1 節で示したように、比出力が低くなると使用済燃料の無限増倍率は低くなるので、パターン 1 は 1 つだけ比出力が低くなったサイクルの影響で基本ケースより無限増倍率が低くなつたと考えられる。またパターン 1 の間でも、無限増倍率はパターン 1-1 が最も高く、パターン 1-4 が最も低くなっている。パターン 1-1 は最初のサイクルで、パターン 1-2 は 2 番目のサイクルで、パターン 1-3 は 3 番目のサイクルでパターン 1-4 は 4 番目のサイクルで比出力を低くしたものである。つまり、これも PWR と同様に比出力を低くしたサイクルが後になるほど無限増倍率が低くなっていることになる。

また PWR の場合と同様にパターン 1-1 とパターン 1-2 の無限増倍率の変化率とパターン 1-3 とパターン 1-4 の変化率が異なっている。パターン 1 の各ケースの無限増倍率の変化率を **Table.6.23** に示す。**Table.6.23** よりパターン 1-1 とパターン 1-2 の変化率よりパターン 1-3 とパターン 1-4 の変化率の方が大きく、最後の運転サイクルが大きく影響していることがわかる。

パターン 2 について、パターン 1 と同様に無限増倍率を比較したものを **Fig.6.16**, **Fig.6.17** に示す。これらの図からわかるように考慮する核種が NRC9 核種の場合でも、JAERI27 核種の場合でもパターン 2-1 から 2-3 の無限増倍率は、基本ケースより低くなっている。これはパターン 2 は 4 サイクルのうち、2 サイクルの比出力を低くした場合なので、パターン 1 と同様に低い比出力のサイクルの影響で無限増倍率が小さくなつたと考えられる。

しかし、**Fig.6.16**, **Fig.6.17** ではパターン 2-4 が 2-3 より無限増倍率が高く、無限増倍率の順番がわかりにくいので、パターン 2 を無限増倍率の順番に並べ替えたものを、その運転パターンとともに **Table.6.24** に示す。**Table.6.24** からわかるように一番最後のサイクルが低い比出力で運転されたパターン 2-3, 2-5, 2-6 の無限増倍率が低く、その中では 3 サイクルも低比出力運転としたパターン 2-6 が最も低い無限増倍率となっている。つまり、後のサイクルを低い比出力で運転するほど無限増倍率が低くなっていることがわかる。

次に無限増倍率の順に並べた 6 つのパターンの間の無限増倍率の変化率を **Table.6.25** に示す。**Table.6.25** からは次のようなことが言える。まず最も大きな差となつているのは、パターン 2-4 とパターン 2-3 との変化率で、これはパターン 2-4 が 4 サイクル目を高い比出力で運転としたのに対しパターン 2-3 では 4 サイクル目を低い比出力で運転としたからであると考えられる。次に大きな差となつているのは、パターン 2-1 とパターン 2-2 の変化率とパターン 2-5 とパターン 2-6 の変化率である。どちらも、3 サイクルでの比出力が異なつてゐるのが原因であると考えられる。つまり、3 サイクル目の比出力が異なる場合より、4 サイクル目の比出力が異なつてゐる場合の方が無限増倍率の変化率が大きくなるので、PWR の場合と同様に後ろのサイクルでの影響が大きいと考えられる。

えられる。

次にパターン3の無限増倍率を比較したものを Fig.6.18, Fig.6.19 に示す。パターン3は4サイクルのうちのいずれか3サイクルを低い比出力で運転した場合で、ここでもこれまでと同様により後ろのサイクルで低い比出力の運転を行ったものほど無限増倍率が低くなる。

以上より、PWRについてもBWRについても運転パターンを変えると次のことが言える。

運転サイクルのうちのいずれかのサイクルを低い比出力で運転した場合

1. 低比出力運転を行ったサイクル数が多いほど無限増倍率は低くなる。
2. 低比出力運転を行ったサイクルが後ろのサイクルであるほど無限増倍率は低くなる。
3. 低比出力運転を行ったサイクルが後ろのサイクルであるほど無限増倍率の低下幅が大きくなる。

また、これとは逆に運転サイクルのうちのいずれかのサイクルを高い比出力で運転した場合については、PWRの場合はそれぞれのパターンをパターン3と比較することにより、BWRの場合はパターン4と比較することにより、以下の様な結論が得られる。

1. 高比出力運転を行ったサイクル数が多いほど無限増倍率は高くなる。
2. 高比出力運転を行ったサイクルが後ろのサイクルであるほど無限増倍率は高くなる。
3. 高比出力運転を行ったサイクルが後ろのサイクルであるほど無限増倍率の上昇幅が大きくなる。

Table 6.18 各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度(1)(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		基本	パターン4
各サイクル での比出力 (MW/t)	運転 I	26	20
	運転 II	26	20
	運転 III	26	20
	運転 IV	26	20
無限増倍率	NRC9 核種	1.2137	1.2115
	JAERI27 核種	1.1028	1.1005
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.416E-06	4.428E-06
	²³⁵ U *	2.009E-04	2.004E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.073E-05	1.077E-05
	²³⁸ Pu *	3.925E-06	4.153E-06
	²³⁹ Pu *	1.143E-04	1.141E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.187E-05	5.186E-05
	²⁴¹ Pu *	2.907E-05	2.871E-05
	²⁴² Pu *	1.211E-05	1.206E-05
	²⁴¹ Am *	1.344E-06	1.696E-06
	²⁴³ Am	2.234E-06	2.228E-06
	⁹⁵ Mo	4.580E-05	4.675E-05
	⁹⁹ Tc	5.145E-05	5.133E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.739E-05
	¹⁰³ Rh	2.542E-05	2.566E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.661E-06	4.654E-06
	¹³³ Cs	5.284E-05	5.424E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.548E-06	5.393E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.673E-08	6.435E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.108E-05	1.085E-05
	¹⁵¹ Sm	4.033E-07	3.987E-07
	¹⁵² Sm	5.096E-06	5.082E-06
	¹⁴³ Nd	3.377E-05	3.385E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.937E-05
	¹⁵³ Eu	4.204E-06	4.204E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.491E-09	3.169E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.19 各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度(2)(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		パターン 1-1	パターン 1-2	パターン 1-3	パターン 1-4
各サイクル での比出力 (MW/t)	運転 I	20	26	26	26
	運転 II	26	20	26	26
	運転 III	26	26	20	26
	運転 IV	26	26	26	20
無限増倍率	NRC9 核種	1.2136	1.2134	1.2131	1.2125
	JAERI27 核種	1.1027	1.1026	1.1023	1.1014
原子個数密度 (× 10 ²⁴ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.417E-06	4.417E-06	4.419E-06	4.424E-06
	²³⁵ U *	2.008E-04	2.007E-04	2.007E-04	2.008E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.073E-05	1.073E-05	1.073E-05	1.077E-05
	²³⁸ Pu *	3.930E-06	3.967E-06	3.999E-06	4.025E-06
	²³⁹ Pu *	1.143E-04	1.142E-04	1.142E-04	1.143E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.183E-05	5.183E-05	5.185E-05	5.192E-05
	²⁴¹ Pu *	2.906E-05	2.905E-05	2.900E-05	2.881E-05
	²⁴² Pu *	1.211E-05	1.211E-05	1.210E-05	1.209E-05
	²⁴¹ Am *	1.344E-06	1.360E-06	1.421E-06	1.605E-06
	²⁴³ Am	2.234E-06	2.233E-06	2.233E-06	2.232E-06
	⁹⁵ Mo	4.578E-05	4.578E-05	4.579E-05	4.679E-05
	⁹⁹ Tc	5.141E-05	5.141E-05	5.141E-05	5.145E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05
	¹⁰³ Rh	2.540E-05	2.539E-05	2.537E-05	2.577E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.659E-06	4.658E-06	4.658E-06	4.662E-06
	¹³³ Cs	5.313E-05	5.315E-05	5.317E-05	5.330E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.597E-06	4.692E-06	4.807E-06	4.979E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.665E-08	6.651E-08	6.627E-08	6.498E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.105E-05	1.101E-05	1.099E-05	1.101E-05
	¹⁵¹ Sm	4.027E-07	4.020E-07	4.017E-07	4.019E-07
	¹⁵² Sm	5.093E-06	5.089E-06	5.091E-06	5.098E-06
	¹⁴³ Nd	3.376E-05	3.376E-05	3.375E-05	3.390E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.203E-06	4.202E-06	4.203E-06	4.209E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.491E-09	2.501E-09	2.521E-09	3.135E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.20 各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度(3)(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		パターン 2-1	パターン 2-2	パターン 2-3
各サイクル での比出力 (MW/t)	運転 I	20	20	20
	運転 II	20	26	26
	運転 III	26	20	26
	運転 IV	26	26	20
無限増倍率	NRC9 核種	1.2133	1.2129	1.2123
	JAERI27 核種	1.1024	1.1021	1.1013
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.418E-06	4.420E-06	4.424E-06
	²³⁵ U *	2.006E-04	2.006E-04	2.007E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.073E-05	1.073E-05	1.077E-05
	²³⁸ Pu *	3.972E-06	4.004E-06	4.031E-06
	²³⁹ Pu *	1.142E-04	1.141E-04	1.143E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.182E-05	5.183E-05	5.189E-05
	²⁴¹ Pu *	2.903E-05	2.899E-05	2.880E-05
	²⁴² Pu *	1.210E-05	1.209E-05	1.209E-05
	²⁴¹ Am *	1.360E-06	1.421E-06	1.605E-06
	²⁴³ Am	2.232E-06	2.232E-06	2.232E-06
	⁹⁵ Mo	4.577E-05	4.578E-05	4.678E-05
	⁹⁹ Tc	5.138E-05	5.137E-05	5.141E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05
	¹⁰³ Rh	2.536E-05	2.535E-05	2.575E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.657E-06	4.656E-06	4.660E-06
	¹³³ Cs	5.344E-05	5.347E-05	5.359E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.738E-06	4.854E-06	5.025E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.646E-08	6.619E-08	6.492E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.098E-05	1.097E-05	1.099E-05
	¹⁵¹ Sm	4.016E-07	4.012E-07	4.014E-07
	¹⁵² Sm	5.086E-06	5.087E-06	5.094E-06
	¹⁴³ Nd	3.374E-05	3.374E-05	3.389E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.200E-06	4.201E-06	4.208E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.501E-09	2.520E-09	3.134E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.21 各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度(4)(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		パターン 2-4	パターン 2-5	パターン 2-6
各サイクル での比出力 (MW/t)	運転 I	26	26	26
	運転 II	20	20	26
	運転 III	20	26	20
	運転 IV	26	20	20
無限増倍率	NRC9 核種	1.2128	1.2122	1.2118
	JAERI27 核種	1.1021	1.1012	1.1009
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.420E-06	4.425E-06	4.427E-06
	²³⁵ U *	2.006E-04	2.007E-04	2.007E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.073E-05	1.077E-05	1.077E-05
	²³⁸ Pu *	4.041E-06	4.070E-06	4.105E-06
	²³⁹ Pu *	1.141E-04	1.143E-04	1.142E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.183E-05	5.190E-05	5.190E-05
	²⁴¹ Pu *	2.898E-05	2.879E-05	2.875E-05
	²⁴² Pu *	1.209E-05	1.209E-05	1.208E-05
	²⁴¹ Am *	1.436E-06	1.621E-06	1.681E-06
	²⁴³ Am	2.231E-06	2.230E-06	2.230E-06
	⁹⁵ Mo	4.578E-05	4.678E-05	4.678E-05
	⁹⁹ Tc	5.137E-05	5.141E-05	5.141E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05
	¹⁰³ Rh	2.534E-05	2.573E-05	2.572E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.655E-06	4.659E-06	4.658E-06
	¹³³ Cs	5.349E-05	5.361E-05	5.364E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.943E-06	5.116E-06	5.222E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.607E-08	6.480E-08	6.457E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.093E-05	1.095E-05	1.093E-05
	¹⁵¹ Sm	4.006E-07	4.007E-07	4.005E-07
	¹⁵² Sm	5.084E-06	5.091E-06	5.092E-06
	¹⁴³ Nd	3.374E-05	3.388E-05	3.388E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.201E-06	4.207E-06	4.208E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.530E-09	3.143E-09	3.162E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.22 各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度(5) (BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		パターン3-1	パターン3-2	パターン3-3	パターン3-4
各サイクル での比出力 (MW/t)	運転I	20	20	20	26
	運転II	20	20	26	20
	運転III	20	26	20	20
	運転IV	26	20	20	20
無限増倍率	NRC9核種	1.2127	1.2121	1.2117	1.2116
	JAERI27核種	1.1019	1.1011	1.1007	1.1007
原子個数密度 (×10 ²⁴ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.421E-06	4.426E-06	4.427E-06	4.428E-06
	²³⁵ U *	2.005E-04	2.006E-04	2.006E-04	2.006E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.073E-05	1.077E-05	1.077E-05	1.077E-05
	²³⁸ Pu *	4.045E-06	4.074E-06	4.110E-06	4.148E-06
	²³⁹ Pu *	1.141E-04	1.142E-04	1.142E-04	1.141E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.181E-05	5.186E-05	5.189E-05	5.189E-05
	²⁴¹ Pu *	2.896E-05	2.878E-05	2.873E-05	2.872E-05
	²⁴² Pu *	1.208E-05	1.208E-05	1.207E-05	1.207E-05
	²⁴¹ Am *	1.436E-06	1.621E-06	1.680E-06	1.696E-06
	²⁴³ Am	2.230E-06	2.229E-06	2.230E-06	2.228E-06
	⁹⁵ Mo	4.576E-05	4.677E-05	4.677E-05	4.677E-05
	⁹⁹ Tc	5.134E-05	5.137E-05	5.137E-05	5.137E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05
	¹⁰³ Rh	2.531E-05	2.571E-05	2.569E-05	2.568E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.653E-06	4.657E-06	4.656E-06	4.655E-06
	¹³³ Cs	5.378E-05	5.390E-05	5.393E-05	5.395E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.987E-06	5.160E-06	5.267E-06	5.351E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.600E-08	6.475E-08	6.452E-08	6.442E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.090E-05	1.092E-05	1.091E-05	1.087E-05
	¹⁵¹ Sm	4.001E-07	4.004E-07	3.999E-07	3.993E-07
	¹⁵² Sm	5.080E-06	5.087E-06	5.088E-06	5.085E-06
	¹⁴³ Nd	3.372E-05	3.387E-05	3.387E-05	3.386E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.199E-06	4.205E-06	4.206E-06	4.206E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.529E-09	3.143E-09	3.161E-09	3.171E-09

*のついたものはNRC9核種

Table 6.23 パターン1の各々のパターンの無限増倍率の変化率(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

	NRC9 核種		JAERI27 核種	
	無限増倍率	無限増倍率の変化率 % $\Delta k/k$	無限増倍率	無限増倍率の変化率 % $\Delta k/k$
パターン 1-1	1.21356	-0.011	1.10281	-0.011
パターン 1-2	1.21343	-0.030	1.10269	-0.009
パターン 1-3	1.21307	-0.051	1.10259	-0.030
パターン 1-4	1.21245		1.10226	

Table 6.24 パターン2の無限増倍率の順とその運転パターン(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

パターン	無限増倍率		比出力			
	NRC9 核種	JAERI27 核種	1サイクル	2サイクル	3サイクル	4サイクル
2-1	1.2133	1.1024	低	低	高	高
2-2	1.2129	1.1021	低	高	低	高
2-4	1.2128	1.1021	高	低	低	高
2-3	1.2123	1.1013	低	高	高	低
2-5	1.2122	1.1012	高	低	高	低
2-6	1.2118	1.1009	高	高	低	低

Table 6.25 パターン 2 の各々の運転パターンの無限増倍率の変化率
(BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

	NRC9 核種		JAERI27 核種	
	無限増倍率	無限増倍率の変化率 %△	無限増倍率	無限増倍率の変化率 %△
パターン 2-1	1.21327	-0.028	1.10242	-0.026
パターン 2-2	1.21293	-0.009	1.10213	-0.007
パターン 2-4	1.21282	-0.040	1.10205	-0.067
パターン 2-3	1.21234	-0.011	1.10131	-0.009
パターン 2-5	1.21221	-0.031	1.10121	-0.031
パターン 2-6	1.21184		1.10087	

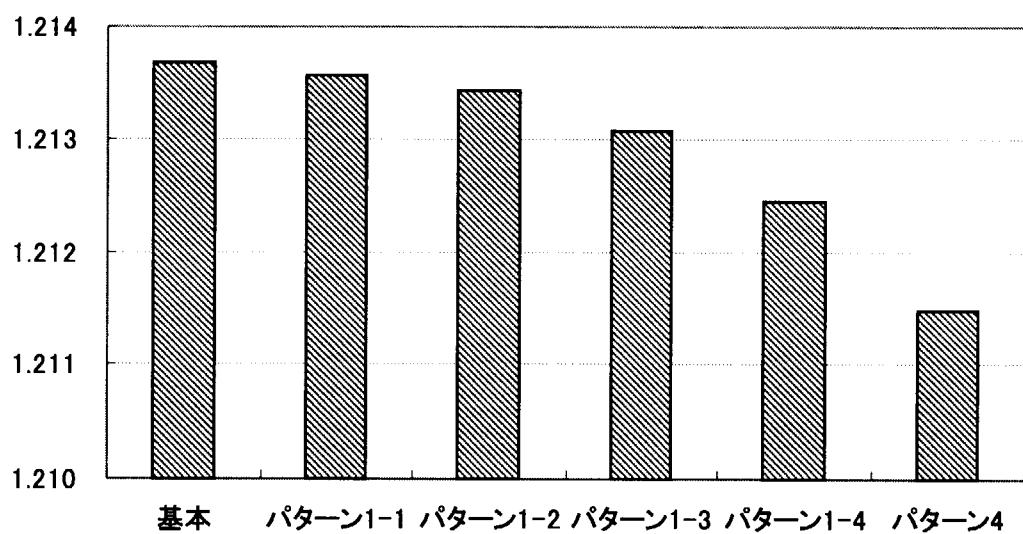


Fig. 6.14 パターン 1 の各々の運転パターンと NRC9 核種で評価した無限増倍率 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

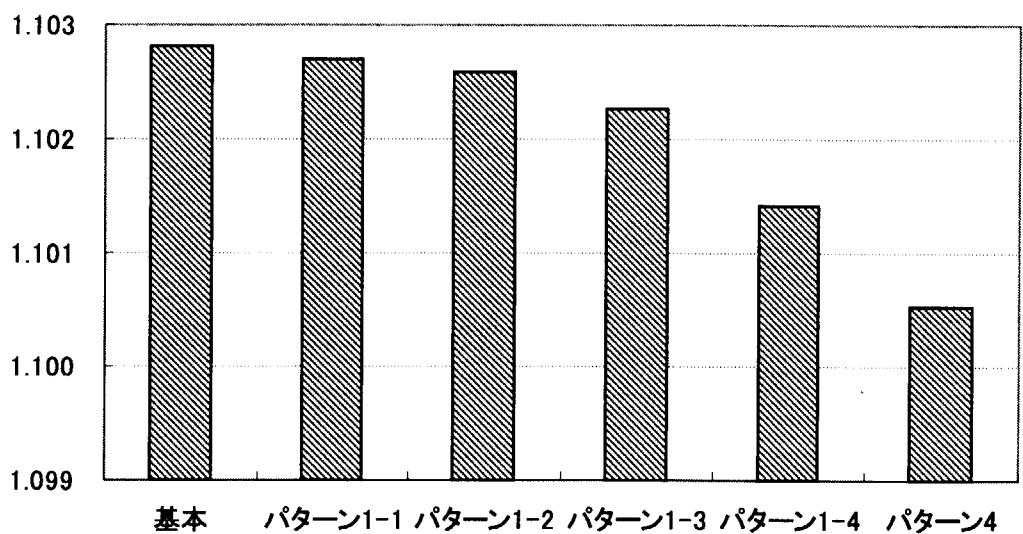


Fig. 6.15 パターン 1 の各々の運転パターンと JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

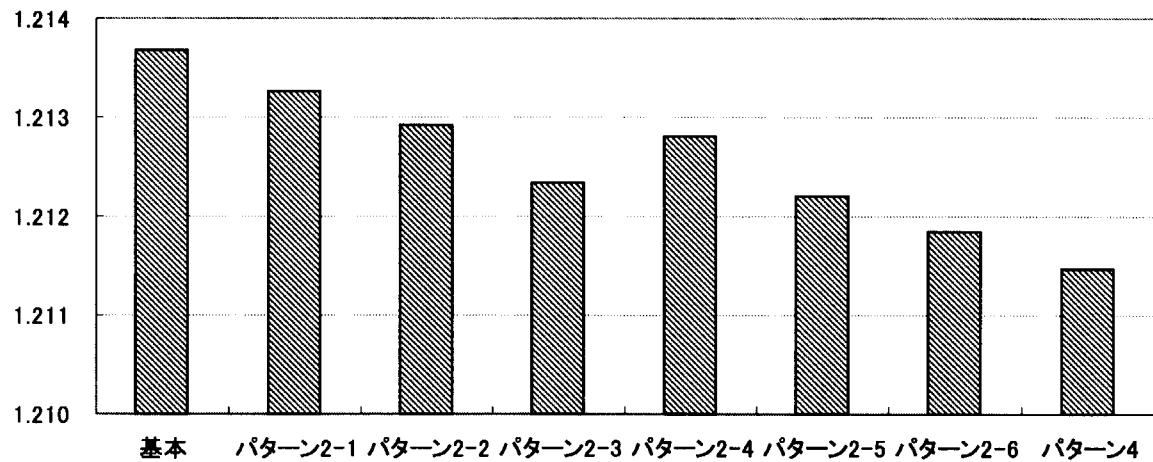


Fig. 6.16 パターン 2 の各々の運転パターンと NRC9 核種で評価した無限増倍率 (BWR, 40GWd/t, 0 年冷却, 300K)

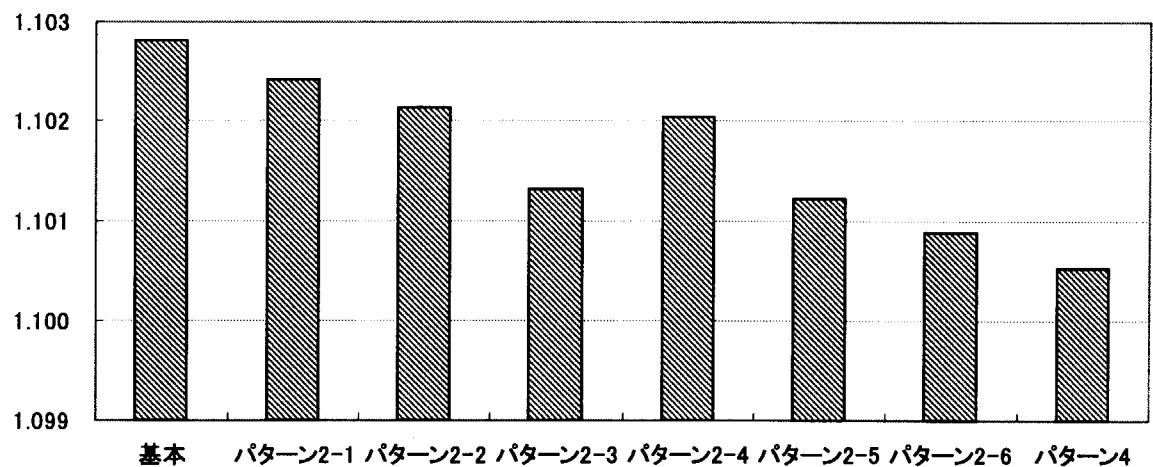


Fig. 6.17 パターン 2 の各々の運転パターンと JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (BWR, 40GWd/t, 0 年冷却, 300K)

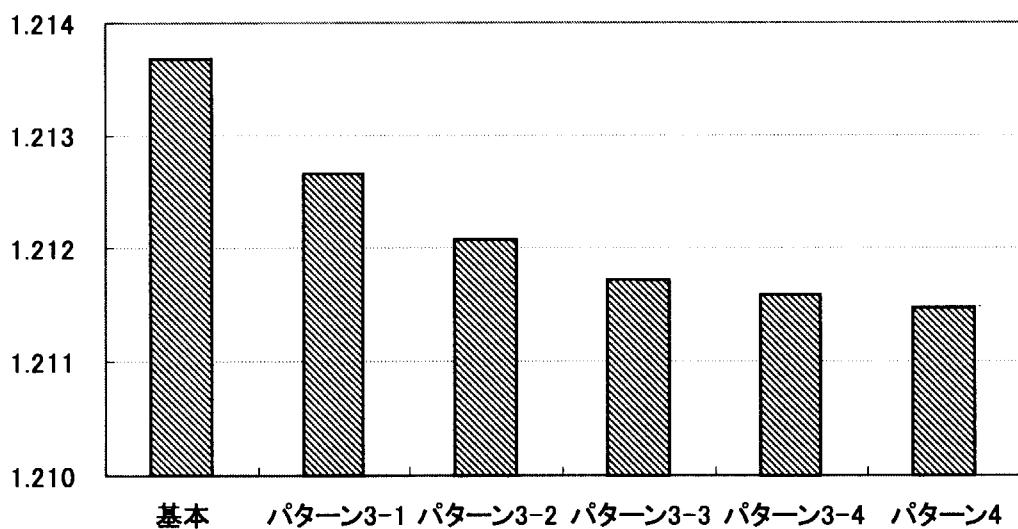


Fig. 6.18 パターン 3 の各々の運転パターンと NRC9 核種で評価した無限増倍率 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

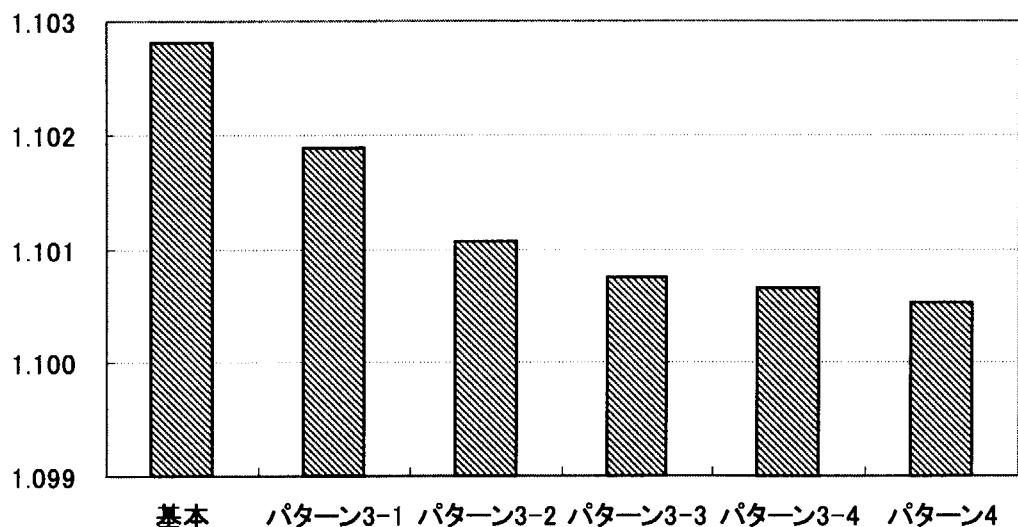


Fig. 6.19 パターン 3 の各々の運転パターンと JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

ここまで 1 サイクルの日数は比出力に応じて変えるとした場合を検討してきたが、以下では 1 サイクルの日数を固定した場合について検討する。

1 サイクルの時間を 417 日に固定して、比出力のみ種々のパターンで変えた場合の使用済燃料の組成と無限増倍率を **Table.6.26**, **Table.6.27** に、この無限増倍率をグラフにしたもの NRC9 核種で評価したものを **Fig.6.20** に、JAERI27 核種で評価したものを **Fig.6.21** に示す。**Fig.6.20**, **Fig.6.21** より、評価に用いる核種が NRC9 核種、JAERI27 核種にかかわらず運転サイクル III での比出力を 45MW/t としたパターン 1 が最も無限増倍率が高く、その次にパターン 2 が高くなっている。パターン 1 は運転サイクル II の比出力を 40MW/t とし、パターン 2 は運転サイクル I の比出力を 40MW/t としたものである。つまり後ろのサイクルを高い比出力で運転したパターン 1 の方が無限増倍率が高くなっている。以下、パターン 3~6 についても同様に運転サイクル III を高い比出力としたパターンのほうが無限増倍率が高くなっている。

Fig.6.22 に運転パターンが変化した場合の無限増倍率の差への各核種の寄与率を示す。**Fig.6.22** は比出力がすべて一定とした場合の核種組成のうち、任意の 1 核種の原子個数密度を無限増倍率が最大になるパターン（比出力が後ろのサイクルで高くなるパターン）の時の原子個数密度に変えて SRAC95 を用いて無限増倍率を算出し、以下の式を用いて寄与率を算出したものである。例として ^{234}U の場合を示す。

$$^{234}\text{U} \text{ の反応度への寄与率} = \frac{k_{U234} - k_{40-40-40\text{MWd/t}}}{k_{35-40-45\text{MWd/t}} - k_{40-40-40\text{MWd/t}}}$$

k_{U234} : ^{234}U の原子個数密度のみを各サイクルの比出力を 35, 40, 45MWd/t として燃焼させた場合の値にし、その他の核種は比出力を 40MW/t 一定とした場合の原子個数密度とした無限増倍率

$k_{40-40-40\text{MWd/t}}$: 比出力を 40MWd/t で一定として燃焼させた組成の無限増倍率

$k_{35-40-45\text{MWd/t}}$: 各サイクルの比出力を 35, 40, 45MWd/t として燃焼させた組成の無限増倍率

また **Fig.6.22** には、無限増倍率が最小となるパターン（各サイクルの比出力が 45, 40, 35MWd/t）と比出力を 40MWd/t で一定とした場合の無限増倍率の差への各核種の寄与率も表示している。**Fig.6.22** より、 ^{241}Pu , ^{241}Am の寄与が最も大きいことがわかる。

この理由は以下のように考えられる。まず、比出力と運転サイクル I が終わった段階での ^{241}Pu の生成量の関係を **Fig.6.23** に示す。この図より比出力を高くすると ^{241}Pu は多く生成されることがわかる。使用済燃料の組成中の ^{241}Pu のうち、運転サイクル I で生成した ^{241}Pu の方が運転サイクル II や運転サイクル III で生成した ^{241}Pu より長い時間が経過しており、運転サイクル I で生成したものの方が崩壊して減少する割合が多い。つまり、初めのサイクルで比出力が高いと、そのとき生成された多量の ^{241}Pu は、その後のサイクルの間に崩壊し、中性子吸収核種である ^{241}Am に変わる。これが使用済燃料の無限増倍率が低くなる原因であると考えられる。この観点よりパターン 1 とパターン 6 について各運転期間と各検査期間の終了時点での ^{241}Pu の量とその変化量を、**Table.6.28** に示す。パターン 1 とパターン 6 で、単純に検査期間中の ^{241}Pu の崩壊量を比べて

も、運転サイクルIで高い比出力としたパターン6の方が多く崩壊する。最終的に運転サイクルIIIの終了時点での²⁴¹Puの量はパターン6の方が少ない。

1サイクルの時間を固定して比出力のみを変えた場合、使用済燃料の無限増倍率が最も高くなるケース（パターン1）と最も低くなるケース（パターン6）で、その変化率はNRC9核種で評価した場合は約0.10%Δk/k、JAERI27核種の場合は約0.14%Δk/kとなる。また、アウト・イン方式で燃料の取り替えが行われた場合、運転サイクルIでは炉心外周部、運転サイクルIIでは中間部、運転サイクルIIIでは炉心中央部へと順次、比出力の高い場所へ移動することになり、サイクルごとに比出力が高くなるパターン1のケースと同じような運転履歴になると考えられるので注意が必要である。**Table.6.26**, **Table.6.27** や **Fig.6.20**, **Fig.6.21**より、全サイクルで比出力を一定とする基本ケースの場合よりパターン1の場合の方が使用済燃料の無限増倍率は高いことがわかる。しかし、その変化率はNRC9核種の場合で約0.04%Δk/k、JAERI27核種の場合で約0.06%Δk/kと小さく、全サイクルで比出力が一定であると仮定して燃焼計算を行っても使用済燃料の無限増倍率への影響は無視しうると考えられる。

Table 6.26 1 サイクルの時間を固定した場合の各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度 (1)(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

ケース名		パターン1	パターン2	パターン3
各サイクル での比出力 (MW/t)	運転 I	35	40	35
	運転 II	40	35	45
	運転 III	45	45	40
無限増倍率	NRC9 核種	1.1974	1.1972	1.1971
	JAERI27 核種	1.0598	1.0597	1.0593
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.949E-06	3.950E-06	3.953E-06
	²³⁵ U *	1.608E-04	1.607E-04	1.609E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.490E-05	1.490E-05	1.494E-05
	²³⁸ Pu *	6.389E-06	6.429E-06	6.427E-06
	²³⁹ Pu *	1.320E-04	1.320E-04	1.322E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.204E-05	6.205E-05	6.208E-05
	²⁴¹ Pu *	3.913E-05	3.911E-05	3.907E-05
	²⁴² Pu *	1.913E-05	1.912E-05	1.912E-05
	²⁴¹ Am *	1.170E-06	1.187E-06	1.283E-06
	²⁴³ Am	4.374E-06	4.372E-06	4.374E-06
	⁹⁵ Mo	5.318E-05	5.319E-05	5.402E-05
	⁹⁹ Tc	6.239E-05	6.238E-05	6.241E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	2.984E-05	2.982E-05	3.016E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.293E-06	6.291E-06	6.295E-06
	¹³³ Cs	6.301E-05	6.301E-05	6.308E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.737E-06	3.823E-06	3.859E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.289E-08	8.270E-08	8.213E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.457E-05	1.453E-05	1.457E-05
	¹⁵¹ Sm	5.042E-07	5.034E-07	5.046E-07
	¹⁵² Sm	5.926E-06	5.922E-06	5.931E-06
	¹⁴³ Nd	3.895E-05	3.894E-05	3.907E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.508E-05	3.508E-05	3.508E-05
	¹⁵³ Eu	5.533E-06	5.532E-06	5.541E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.423E-09	2.438E-09	2.685E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.27 1 サイクルの時間を固定した場合の各運転パターンでの無限増倍率と原子個数密度 (2)(PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

ケース名		パターン4	パターン5	パターン6	基本
各サイクル での比出力 (MW/t)	サイクル1	45	40	45	40
	サイクル2	35	45	40	40
	サイクル3	40	35	35	40
無限増倍率	NRC9 核種	1.1968	1.1963	1.1962	1.1969
	JAERI27 核種	1.0591	1.0584	1.0583	1.0592
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.955E-06	3.958E-06	3.960E-06	3.954E-06
	²³⁵ U *	1.609E-04	1.609E-04	1.609E-04	1.608E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.494E-05	1.497E-05	1.498E-05	1.494E-05
	²³⁸ Pu *	6.514E-06	6.500E-06	6.546E-06	6.473E-06
	²³⁹ Pu *	1.321E-04	1.322E-04	1.321E-04	1.321E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.208E-05	6.218E-05	6.217E-05	6.203E-05
	²⁴¹ Pu *	3.904E-05	3.889E-05	3.888E-05	3.903E-05
	²⁴² Pu *	1.911E-05	1.911E-05	1.911E-05	1.912E-05
	²⁴¹ Am *	1.326E-06	1.431E-06	1.457E-06	1.302E-06
	²⁴³ Am	4.372E-06	4.372E-06	4.372E-06	4.376E-06
	⁹⁵ Mo	5.403E-05	5.486E-05	5.487E-05	5.402E-05
	⁹⁹ Tc	6.241E-05	6.245E-05	6.244E-05	6.238E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.010E-05	3.046E-05	3.043E-05	3.012E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.293E-06	6.297E-06	6.297E-06	6.294E-06
	¹³³ Cs	6.308E-05	6.316E-05	6.316E-05	6.308E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.030E-06	4.068E-06	4.154E-06	3.945E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.179E-08	8.102E-08	8.086E-08	8.193E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.449E-05	1.454E-05	1.450E-05	1.453E-05
	¹⁵¹ Sm	5.032E-07	5.039E-07	5.032E-07	5.037E-07
	¹⁵² Sm	5.925E-06	5.936E-06	5.933E-06	5.927E-06
	¹⁴³ Nd	3.906E-05	3.918E-05	3.917E-05	3.906E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.508E-05	3.508E-05	3.508E-05	3.508E-05
	¹⁵³ Eu	5.540E-06	5.547E-06	5.547E-06	5.540E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.719E-09	3.023E-09	3.042E-09	2.700E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.28 各サイクルでの ^{241}Pu の量の比較

	パターン1			パターン6		
	^{241}Pu の量 (g/tU)	変化量 (g/tU)	比出力 (MW/t)	^{241}Pu の量 (g/tU)	変化量 (g/tU)	比出力 (MW/t)
運転I終了時	370.9	-2.9	35.0	581.4	-4.6	45.0
検査I終了時	367.9	+827.1		576.8	+793.2	
運転II終了時	1195.1	-9.4	40.0	1370.1	-10.8	40.0
検査II終了時	1185.7	+625.3		1359.3	+440.3	
運転III終了時	1811.0		45.0	1799.5		35.0

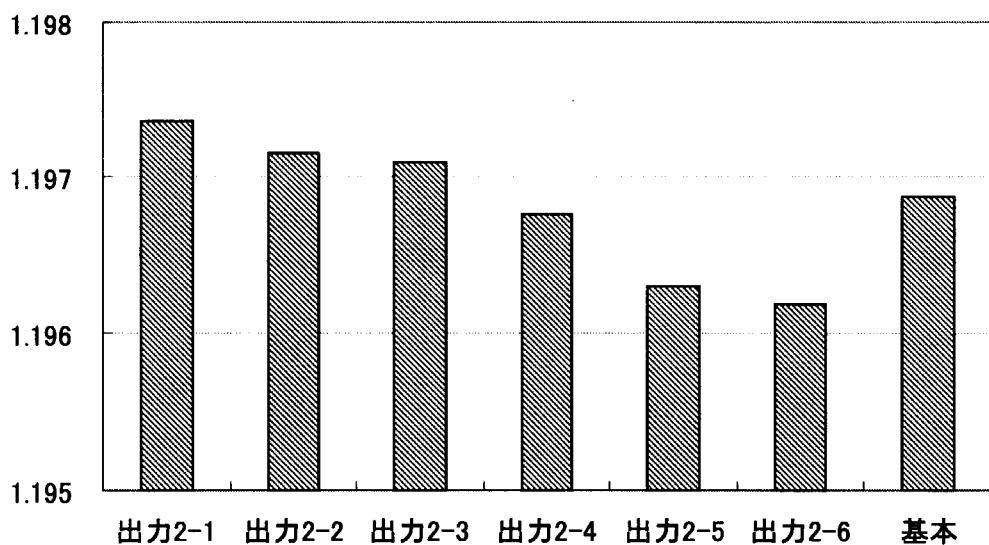


Fig. 6.20 1 サイクルの時間固定の場合の各運転パターンの NRC9 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

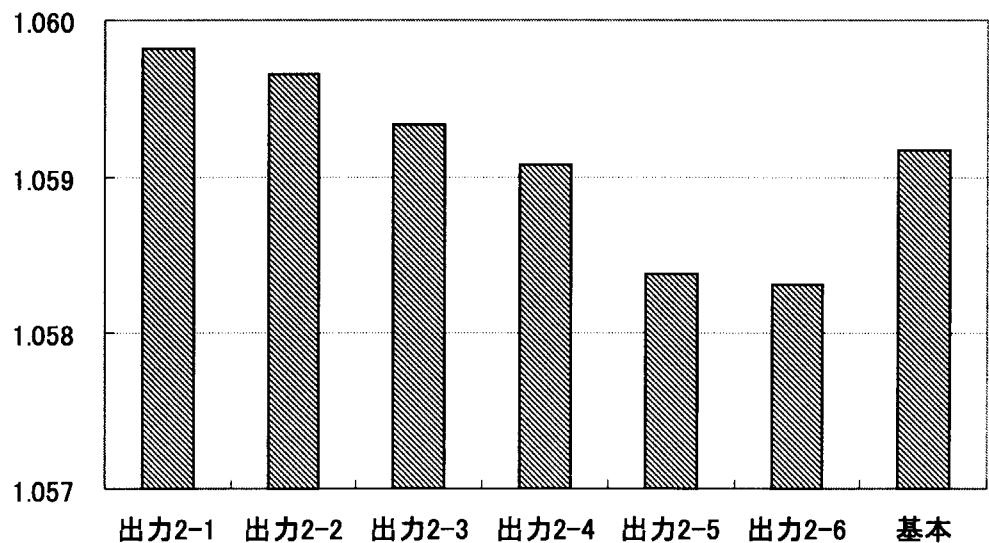


Fig. 6.21 1 サイクルの時間固定の場合の各運転パターンの JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

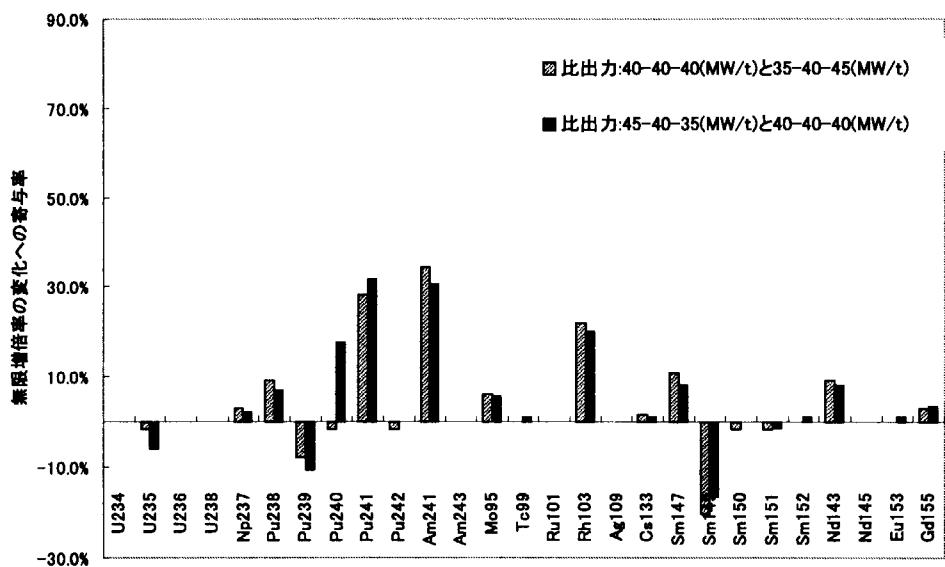
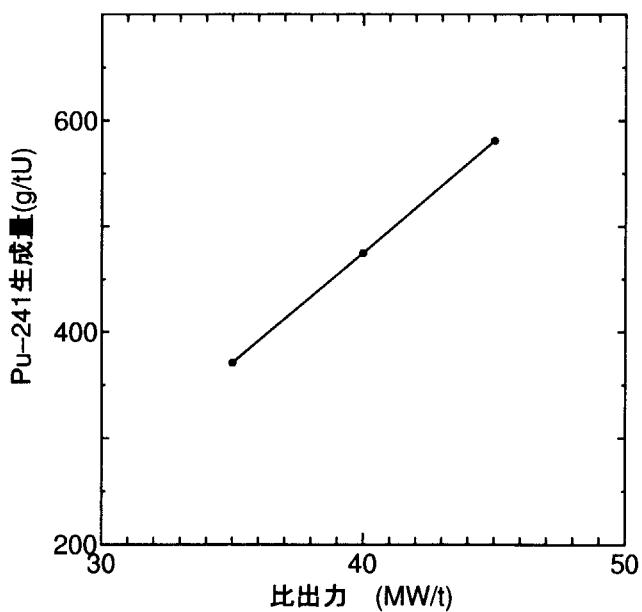


Fig. 6.22 運転パターンを変えたときの無限増倍率の差への各核種の寄与率

Fig. 6.23 運転期間を一定の場合の比出力と運転 I の末期の ^{241}Pu の生成量の関係

6.3 定期検査の時間が使用済燃料の反応度に及ぼす影響

6.3.1 計算手順

定期検査の時間が使用済燃料の反応度に及ぼす影響を調べるために、定期検査の日数を変化させた場合の燃焼計算を SWAT を用いて行う。ただし、定期検査の時間以外の条件は 3 章で示した条件に固定した。得られた組成のうち NRC 9 核種または JAERI27 核種を選び、SRAC95 を用いてこれまでと同様に燃料ピンの無限配列で無限増倍率を算出する。

6.3.2 計算ケース

原子炉は運転サイクルの間に定期検査が行われる。一般にこの検査の時間は約二ヶ月程度であるが、装置の取替や詳細な点検などにより原子炉の停止時間が長くなる場合がある。ここでは検査時間の変化が、使用済燃料の無限増倍率に及ぼす影響を調べる。

Table.6.29 に日本の PWR の定期検査の時間の頻度分布と最長検査時間・最短検査時間・平均検査時間を示す^{19) 20) 21) 22)}。**Table.6.29** は美浜・高浜・大飯原子力発電所の原子炉を除く日本のすべての PWR (12 基) の 94 回の定期検査のデータである。**Table.6.29** より、PWR の定期検査の時間は 56 日から 189 日、平均すると 94.4 日で、ほとんどの検査が 60 日から 120 日程度であることがわかる。

Table.6.30 に日本の BWR の定期検査の時間の頻度分布と最長検査時間・最短検査時間・平均検査時間を示す^{20) 23) 24) 25) 26)}。**Table.6.30** は浜岡原子力発電所の原子炉を除く日本のすべての BWR (26 基) の 131 回の定期検査のデータである。**Table.6.30** より、BWR の定期検査の時間は 36 日から 423 日、平均すると 111.9 日で、ほとんどの検査が 40 日から 140 日程度であることがわかる。検査の日数が 300 日を超えているのは、シュラウドの取替などにより検査が長くなつたためである。

本節では PWR の検査時間を **Table.6.31** に示すように、2 回の検査時間を同じとし、0 日から 500 日の間で変えて 17 ケースの燃焼計算を行った。また、実際には検査 I と検査 II とで定期検査の時間が違う場合も考えられるので、特殊なケースとして検査 I を 730 日 (2 年) とし検査 II を 60 日とする場合と、検査 I を 60 日とし検査 II を 730 日とする場合についても計算を行った。また、BWR の場合も 3 回の検査期間について同様な考え方により **Table.6.32** に示すように、全 20 ケースの燃焼計算を行った。

Table 6.29 日本のPWRの定期検査の時間の頻度分布

定期検査の時間(日)	頻度(回)
0~39	0
40~59	6
60~79	25
80~99	33
100~119	19
120~139	3
140~159	4
160~179	2
180~199	2
200以上	0
最長検査時間	189日
最短検査時間	56日
平均検査時間	94.4日

Table 6.30 日本のBWRの定期検査の時間の頻度分布

定期点検の時間(日)	頻度(回)
0~39	2
40~59	20
60~79	11
80~99	33
100~119	26
120~139	13
140~159	9
160~179	4
180~199	7
200~299	3
300~399	1
400以上	2
最長点検時間	423日
最短点検時間	36日
平均点検時間	111.90日

Table 6.31 各計算ケースでの検査の時間 (PWR)

ケース No.	定期検査の時間 (日)	
	検査 I	検査 II
1	0	0
2	20	20
3	40	40
4	60	60
5	80	80
6	100	100
7	120	120
8	140	140
9	160	160
10	180	180
11	200	200
12	250	250
13	300	300
14	350	350
15	400	400
16	450	450
17	500	500
18	730	60
19	60	730

Table 6.32 各計算ケースでの検査の時間 (BWR)

ケース No.	定期検査の時間 (日)		
	検査 I	検査 II	検査 III
1	0	0	0
2	20	20	20
3	40	40	40
4	60	60	60
5	80	80	80
6	100	100	100
7	120	120	120
8	140	140	140
9	160	160	160
10	180	180	180
11	200	200	200
12	250	250	250
13	300	300	300
14	350	350	350
15	400	400	400
16	450	450	450
17	500	500	500
18	730	60	60
19	60	730	60
20	60	60	730

6.3.3 結果

PWR の定期検査の時間を 0 日から 500 日まで変えて燃焼させた時の、核種組成と無限増倍率を Table.6.33 から Table.6.37 に、また無限増倍率をグラフにプロットしたものを NRC9 核種で評価したものについては Fig.6.24 に、JAERI27 核種で評価したものについては Fig.6.25 に示す。Fig.6.24, Fig.6.25 より、定期検査の時間が長くなると、無限増倍率は低くなっていることがわかる。次にこの理由について考える。まず、どの核種が無限増倍率の変化に寄与しているかを調べるために、各核種の無限増倍率の変化への寄与率を Fig.6.26 に示す。Fig.6.26 は定期検査の時間が 300 日の場合の核種組成のうち、ある 1 核種の原子個数密度を定期検査の時間が 0 日の場合での値に変えて SRAC95 で無限増倍率を算出し、以下の式を用いて寄与率を算出したものである。 $(^{234}\text{U}$ の場合)

$$^{234}\text{U} \text{ の反応度への寄与率} = \frac{k_{\text{U}234} - k_{300 \text{ 日}}}{k_{0 \text{ 日}} - k_{300 \text{ 日}}}$$

$k_{\text{U}234}$: ^{234}U の原子個数密度のみを定期検査時間を 0 日として燃焼させた場合の値に置換し、その他の核種の原子個数密度は定期検査時間 300 日として燃焼させた場合の値としたときの無限増倍率

$k_{300 \text{ 日}}$:定期検査の時間を 300 日として燃焼させた組成での無限増倍率

$k_{0 \text{ 日}}$:定期検査の時間を 0 日として燃焼させた組成での無限増倍率

Fig.6.26 より、定期点検の時間が短いと使用済燃料の無限増倍率が高くなるのは、 ^{235}U , ^{238}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am , ^{147}Sm の影響が大きいことがわかる。これらの核種の生成量が変わる理由は以下のように考えられる。定期点検の時間が短いと、 ^{238}Np (半減期 2.1 日で ^{238}Pu になる), ^{241}Pu (半減期 14.4 年で ^{241}Am になる), ^{147}Pm (半減期 2.6 年で ^{147}Sm になる) が定期点検中に崩壊する量が少なくなり、中性子吸収核種である ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{147}Sm の生成量が少なくなる。また定期点検の時間が短いと ^{241}Pu の崩壊量が減るので相対的に ^{241}Pu が多くなり、 ^{241}Pu が核分裂する量が多くなる。出力は一定であるとしているので ^{241}Pu が核分裂する量が多くなった分 ^{235}U の核分裂する量が少なくなり、 ^{235}U が多く残る。このため使用済燃料の無限増倍率が高くなる。

定期検査の時間が一日変わった場合の使用済燃料の無限増倍率の変化は NRC9 核種による評価の場合、 $5.66 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/\text{day}$, JAERI27 核種によると、 $4.40 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/\text{day}$ である。定期検査の時間を 60 日とする場合の無限増倍率と、0 日とする場合の無限増倍率の変化率は NRC9 核種の場合で約 $0.04 \% \Delta k/k$, JAERI27 核種の場合で約 $0.03 \% \Delta k/k$ と非常に小さい。以上の結果から、妥当な安全余裕を含む安全評価法として定期検査の時間は 0 日であると仮定して計算する方がよい。

次に、特殊なケースとしてどちらかの検査時間の長さを一般的な 60 日とし、他方の検査時間を 730 日（2 年）とした場合の核種組成と無限増倍率を Table.6.38 に示す。NRC9 核種の場合も JAERI27 核種の場合も検査 II の期間を 2 年とした場合の方が無限増倍率が低くなっている。以下ではこの理由について考える。まず、どの核種が無限増倍率の変化に寄与しているかを調べるた

めに、各核種の無限増倍率の変化への寄与率を Fig.6.27 に示す。Fig.6.27 は検査 II の時間が 730 日の場合の核種組成のうち、ある 1 核種の原子個数密度を検査 I の時間が 730 日の場合の値に変えて SRAC95 で無限増倍率を算出し、以下の式を用いて寄与率を算出したものである。(^{234}U の場合)

$$\text{ ^{234}U の反応度への寄与率} = \frac{k_{\text{U}234} - k_{\text{検査 II が 730 日}}}{k_{\text{検査 I が 730 日}} - k_{\text{検査 II が 730 日}}}$$

$k_{\text{U}234}$: ^{234}U の原子個数密度のみを検査 I が 730 日として燃焼させた場合の値に置換し、その他の核種の原子個数密度は検査 II が 730 日として燃焼させた場合の値としたときの無限増倍率

$k_{\text{検査 II が 730 日}}$:検査 II の時間を 730 日として燃焼させた組成での無限増倍率

$k_{\text{検査 I が 730 日}}$:検査 I の時間を 730 日として燃焼させた組成での無限増倍率

Fig.6.27 より ^{238}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am , ^{147}Sm の影響が大きいことがわかる。検査 II の時間が長いほど ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{147}Sm の生成量が多く、 ^{241}Pu の生成量は少なくなっている。これらの核種の生成量が変わる理由は以下のように考えることができる。各検査期間の初めと終わりの ^{241}Pu の量を Table6.39 に示す。Table6.39 より検査 I の開始時点での ^{241}Pu は 475g、検査 II の開始時点ではケース 18 とケース 19 で差があるがおよそ 1280g 程度である。 ^{241}Pu の半減期は 14.4 年であるので 730 日の間に約 9.2% が、60 日の間に約 0.8% が崩壊する。つまり検査 I が

- 730 日なら

$$475\text{g} \times 0.092 = 43.7\text{g}$$

- 60 日なら

$$475\text{g} \times 0.008 = 3.8\text{g}$$

崩壊する。検査 II が

- 730 日なら

$$1280\text{g} \times 0.092 = 117.8\text{g}$$

- 60 日なら

$$1280\text{g} \times 0.008 = 10.2\text{g}$$

崩壊する。よって検査 I を 730 日としたケース 18 の場合、 ^{241}Pu が 2 回の定期検査の間に崩壊する量の合計は

$$43.7\text{g} + 10.2\text{g} = 53.9\text{g}$$

であるのに対し、検査IIを730日としたケース19の場合、 ^{241}Pu が2回の定期検査の間に崩壊する量の合計は

$$3.8\text{g} + 117.8\text{g} = 121.6\text{g}$$

となり、検査IIを730日とした場合の方が ^{241}Pu が多く崩壊し、 ^{241}Am が多く生成したと考えられる。なお、実際にはTable6.39からもわかるように、運転中の生成や崩壊などにより ^{241}Pu の崩壊量は最終的には67.7gでなく88gである。これと同様に、検査IIを730日とした場合の方が ^{238}Np 、 ^{147}Pm が多く崩壊し ^{238}Pu 、 ^{147}Sm が多く生成すると考えられる。

**Table 6.33 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度 (1) (PWR,50GWd/t,0 年
冷却,300K)**

ケース No.		1	2	3	4
点検時間 I(日)		0	20	40	60
点検時間 II(日)		0	20	40	60
無限増倍率	NRC9 核種	1.1974	1.1971	1.1970	1.1969
	JAERI27 核種	1.0595	1.0593	1.0592	1.0592
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.951E-06	3.952E-06	3.953E-06	3.954E-06
	²³⁵ U *	1.610E-04	1.609E-04	1.608E-04	1.608E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.494E-05	1.494E-05	1.494E-05	1.494E-05
	²³⁸ Pu *	6.391E-06	6.416E-06	6.445E-06	6.473E-06
	²³⁹ Pu *	1.322E-04	1.321E-04	1.321E-04	1.321E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.203E-05	6.202E-05	6.203E-05	6.203E-05
	²⁴¹ Pu *	3.909E-05	3.905E-05	3.904E-05	3.903E-05
	²⁴² Pu *	1.914E-05	1.913E-05	1.913E-05	1.912E-05
	²⁴¹ Am *	1.243E-06	1.262E-06	1.282E-06	1.302E-06
	²⁴³ Am	4.379E-06	4.377E-06	4.376E-06	4.376E-06
	⁹⁵ Mo	5.402E-05	5.402E-05	5.402E-05	5.402E-05
	⁹⁹ Tc	6.239E-05	6.239E-05	6.238E-05	6.238E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.021E-05	3.017E-05	3.014E-05	3.012E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.298E-06	6.296E-06	6.295E-06	6.294E-06
	¹³³ Cs	6.308E-05	6.308E-05	6.308E-05	6.308E-05
	¹⁴⁷ Sm	3.676E-06	3.768E-06	3.857E-06	3.945E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.246E-08	8.225E-08	8.210E-08	8.193E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.464E-05	1.460E-05	1.456E-05	1.453E-05
	¹⁵¹ Sm	5.058E-07	5.048E-07	5.042E-07	5.037E-07
	¹⁵² Sm	5.937E-06	5.934E-06	5.931E-06	5.927E-06
	¹⁴³ Nd	3.908E-05	3.907E-05	3.906E-05	3.906E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.507E-05	3.508E-05	3.508E-05	3.508E-05
	¹⁵³ Eu	5.544E-06	5.542E-06	5.541E-06	5.540E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.662E-09	2.674E-09	2.686E-09	2.700E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.34 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度(2)(PWR,50GWd/t,0年
冷却,300K)

ケース名		5	6	7	8
点検時間 I(日)		80	100	120	140
点検時間 II(日)		80	100	120	140
無限増倍率	NRC9 核種	1.1968	1.1967	1.1966	1.1965
	JAERI27 核種	1.0591	1.0590	1.0589	1.0588
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.954E-06	3.955E-06	3.956E-06	3.957E-06
	²³⁵ U *	1.608E-04	1.608E-04	1.608E-04	1.607E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.494E-05	1.494E-05	1.495E-05	1.495E-05
	²³⁸ Pu *	6.501E-06	6.529E-06	6.557E-06	6.585E-06
	²³⁹ Pu *	1.321E-04	1.321E-04	1.321E-04	1.321E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.203E-05	6.204E-05	6.204E-05	6.204E-05
	²⁴¹ Pu *	3.902E-05	3.900E-05	3.899E-05	3.898E-05
	²⁴² Pu *	1.911E-05	1.911E-05	1.910E-05	1.910E-05
	²⁴¹ Am *	1.322E-06	1.342E-06	1.362E-06	1.382E-06
	²⁴³ Am	4.376E-06	4.376E-06	4.376E-06	4.376E-06
	⁹⁵ Mo	5.402E-05	5.402E-05	5.402E-05	5.401E-05
	⁹⁹ Tc	6.238E-05	6.238E-05	6.238E-05	6.237E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05	5.897E-05
	¹⁰³ Rh	3.010E-05	3.009E-05	3.008E-05	3.008E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.292E-06	6.291E-06	6.290E-06	6.289E-06
	¹³³ Cs	6.310E-05	6.310E-05	6.310E-05	6.309E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.031E-06	4.115E-06	4.198E-06	4.279E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.178E-08	8.163E-08	8.148E-08	8.135E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.450E-05	1.447E-05	1.444E-05	1.442E-05
	¹⁵¹ Sm	5.032E-07	5.027E-07	5.023E-07	5.019E-07
	¹⁵² Sm	5.925E-06	5.922E-06	5.919E-06	5.917E-06
	¹⁴³ Nd	3.906E-05	3.905E-05	3.905E-05	3.906E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.508E-05	3.508E-05	3.508E-05	3.508E-05
	¹⁵³ Eu	5.539E-06	5.538E-06	5.537E-06	5.536E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.714E-09	2.727E-09	2.741E-09	2.753E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.35 各検査時間での無限倍率と原子個数密度(3) (PWR,50GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		9	10	11
点検時間 I(日)		160	180	200
点検時間 II(日)		160	180	200
無限倍率	NRC9 核種	1.1963	1.1962	1.1961
	JAERI27 核種	1.0588	1.0587	1.0586
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.957E-06	3.958E-06	3.959E-06
	²³⁵ U *	1.607E-04	1.607E-04	1.607E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.495E-05	1.495E-05	1.495E-05
	²³⁸ Pu *	6.612E-06	6.639E-06	6.667E-06
	²³⁹ Pu *	1.321E-04	1.321E-04	1.321E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.205E-05	6.205E-05	6.205E-05
	²⁴¹ Pu *	3.897E-05	3.896E-05	3.894E-05
	²⁴² Pu *	1.909E-05	1.909E-05	1.908E-05
	²⁴¹ Am *	1.402E-06	1.422E-06	1.442E-06
	²⁴³ Am	4.375E-06	4.375E-06	4.375E-06
	⁹⁵ Mo	5.401E-05	5.401E-05	5.401E-05
	⁹⁹ Tc	6.237E-05	6.237E-05	6.237E-05
	¹⁰¹ Ru	5.897E-05	5.896E-05	5.896E-05
	¹⁰³ Rh	3.007E-05	3.007E-05	3.006E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.288E-06	6.287E-06	6.286E-06
	¹³³ Cs	6.309E-05	6.309E-05	6.310E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.359E-06	4.436E-06	4.513E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.119E-08	8.107E-08	8.092E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.440E-05	1.437E-05	1.435E-05
	¹⁵¹ Sm	5.015E-07	5.011E-07	5.007E-07
	¹⁵² Sm	5.915E-06	5.912E-06	5.910E-06
	¹⁴³ Nd	3.906E-05	3.906E-05	3.906E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.509E-05	3.509E-05	3.509E-05
	¹⁵³ Eu	5.536E-06	5.535E-06	5.534E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.767E-09	2.780E-09	2.794E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.36 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度(4) (PWR,50GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		12	13	14
点検時間 I(日)		250	300	350
点検時間 II(日)		250	300	350
無限増倍率	NRC9 核種	1.1959	1.1956	1.1953
	JAERI27 核種	1.0584	1.0582	1.0580
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.961E-06	3.963E-06	3.965E-06
	²³⁵ U *	1.606E-04	1.606E-04	1.605E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.496E-05	1.496E-05	1.497E-05
	²³⁸ Pu *	6.735E-06	6.802E-06	6.870E-06
	²³⁹ Pu *	1.321E-04	1.320E-04	1.320E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.206E-05	6.207E-05	6.207E-05
	²⁴¹ Pu *	3.891E-05	3.888E-05	3.886E-05
	²⁴² Pu *	1.907E-05	1.905E-05	1.904E-05
	²⁴¹ Am *	1.491E-06	1.539E-06	1.588E-06
	²⁴³ Am	4.375E-06	4.374E-06	4.374E-06
	⁹⁵ Mo	5.401E-05	5.401E-05	5.401E-05
	⁹⁹ Tc	6.236E-05	6.236E-05	6.235E-05
	¹⁰¹ Ru	5.896E-05	5.896E-05	5.896E-05
	¹⁰³ Rh	3.006E-05	3.005E-05	3.005E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.283E-06	6.280E-06	6.278E-06
	¹³³ Cs	6.309E-05	6.308E-05	6.308E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.697E-06	4.873E-06	5.041E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.059E-08	8.028E-08	7.998E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.430E-05	1.424E-05	1.420E-05
	¹⁵¹ Sm	4.998E-07	4.989E-07	4.981E-07
	¹⁵² Sm	5.905E-06	5.900E-06	5.895E-06
	¹⁴³ Nd	3.905E-05	3.905E-05	3.904E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.509E-05	3.509E-05	3.509E-05
	¹⁵³ Eu	5.532E-06	5.530E-06	5.529E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.825E-09	2.858E-09	2.890E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.37 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度(5) (PWR,50GWd/t,0年冷却,300K)

ケース名		15	16	17
点検時間 I(日)		400	450	500
点検時間 II(日)		400	450	500
無限増倍率	NRC9 核種	1.1951	1.1948	1.1946
	JAERI27 核種	1.0577	1.0575	1.0573
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.967E-06	3.969E-06	3.972E-06
	²³⁵ U *	1.605E-04	1.604E-04	1.604E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.497E-05	1.497E-05	1.498E-05
	²³⁸ Pu *	6.936E-06	7.002E-06	7.067E-06
	²³⁹ Pu *	1.320E-04	1.320E-04	1.320E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.208E-05	6.209E-05	6.210E-05
	²⁴¹ Pu *	3.883E-05	3.880E-05	3.877E-05
	²⁴² Pu *	1.902E-05	1.901E-05	1.900E-05
	²⁴¹ Am *	1.636E-06	1.683E-06	1.730E-06
	²⁴³ Am	4.374E-06	4.373E-06	4.373E-06
	⁹⁵ Mo	5.401E-05	5.401E-05	5.401E-05
	⁹⁹ Tc	6.235E-05	6.235E-05	6.234E-05
	¹⁰¹ Ru	5.896E-05	5.895E-05	5.895E-05
	¹⁰³ Rh	3.005E-05	3.004E-05	3.004E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.275E-06	6.273E-06	6.270E-06
	¹³³ Cs	6.307E-05	6.307E-05	6.303E-05
	¹⁴⁷ Sm	5.200E-06	5.352E-06	5.497E-06
	¹⁴⁹ Sm	7.969E-08	7.942E-08	7.916E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.415E-05	1.410E-05	1.406E-05
	¹⁵¹ Sm	4.973E-07	4.966E-07	4.958E-07
	¹⁵² Sm	5.891E-06	5.886E-06	5.882E-06
	¹⁴³ Nd	3.904E-05	3.903E-05	3.903E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.509E-05	3.509E-05	3.509E-05
	¹⁵³ Eu	5.528E-06	5.526E-06	5.525E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.922E-09	2.954E-09	2.985E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.38 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度 (6) (PWR,50GWd/t,0 年
冷却,300K)

ケース名		18	19
検査 I(日)		730	60
検査 II(日)		60	730
無限増倍率	NRC9 核種	1.1963	1.1940
	JAERI27 核種	1.0588	1.0568
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	3.955E-06	3.977E-06
	²³⁵ U *	1.606E-04	1.603E-04
	²³⁶ U	1.174E-04	1.174E-04
	²³⁸ U *	2.019E-02	2.019E-02
	²³⁷ Np	1.496E-05	1.498E-05
	²³⁸ Pu *	6.777E-06	7.059E-06
	²³⁹ Pu *	1.321E-04	1.320E-04
	²⁴⁰ Pu *	6.206E-05	6.211E-05
	²⁴¹ Pu *	3.900E-05	3.867E-05
	²⁴² Pu *	1.908E-05	1.897E-05
	²⁴¹ Am *	1.366E-06	1.882E-06
	²⁴³ Am	4.367E-06	4.380E-06
	⁹⁵ Mo	5.399E-05	5.405E-05
	⁹⁹ Tc	6.236E-05	6.234E-05
	¹⁰¹ Ru	5.896E-05	5.895E-05
	¹⁰³ Rh	3.009E-05	3.005E-05
	¹⁰⁹ Ag	6.284E-06	6.268E-06
	¹³³ Cs	6.305E-05	6.303E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.681E-06	5.521E-06
	¹⁴⁹ Sm	8.102E-08	7.869E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.421E-05	1.417E-05
	¹⁵¹ Sm	4.987E-07	4.972E-07
	¹⁵² Sm	5.893E-06	5.896E-06
	¹⁴³ Nd	3.905E-05	3.902E-05
	¹⁴⁵ Nd	3.509E-05	3.508E-05
	¹⁵³ Eu	5.525E-06	5.533E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.779E-09	3.044E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.39 各検査期間での ^{241}Pu の生成量

		ケース No.	18	19
^{241}Pu の生成量 (g/tU)	検査の時間 (日)	検査 I	730	60
		検査 II	60	730
	検査 I	開始	4.750E+02	4.750E+02
		終了	4.315E+02	4.713E+02
	検査 II	開始	1.277E+03	1.285E+03
		終了	1.266E+03	1.167E+03
	運転 III	終了	1.805E+03	1.790E+03

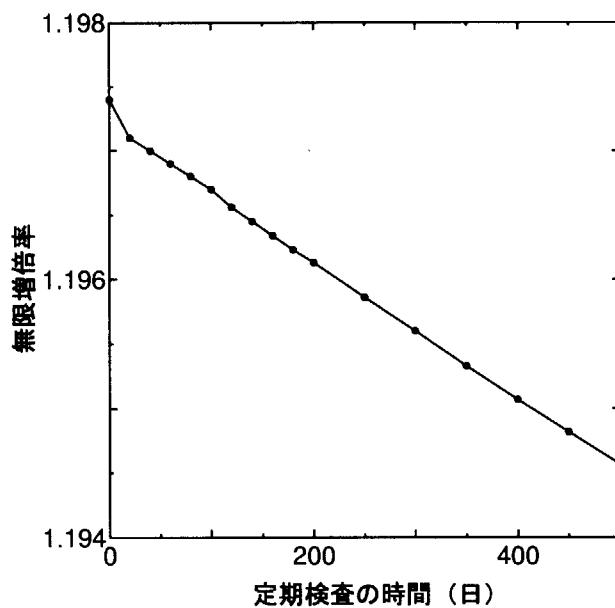


Fig. 6.24 定期検査の時間と NRC9 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

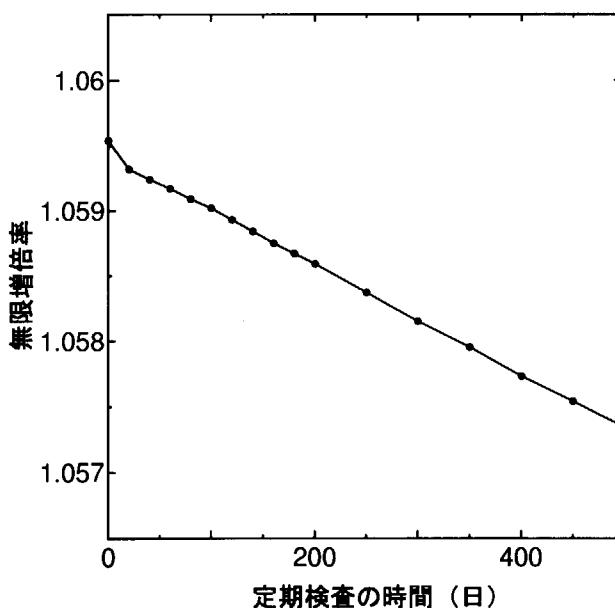


Fig. 6.25 定期検査の時間と JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (PWR,50GWd/t,0 年冷却,300K)

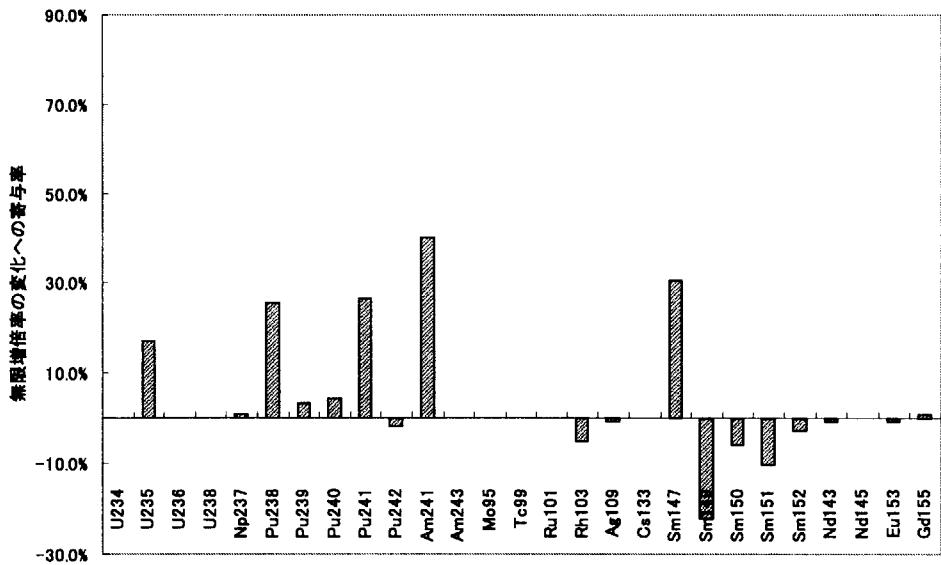


Fig. 6.26 定期検査の時間を 0 日として燃焼させた時の組成での無限増倍率と、
300 日とした場合の無限増倍率の差への各核種の寄与率

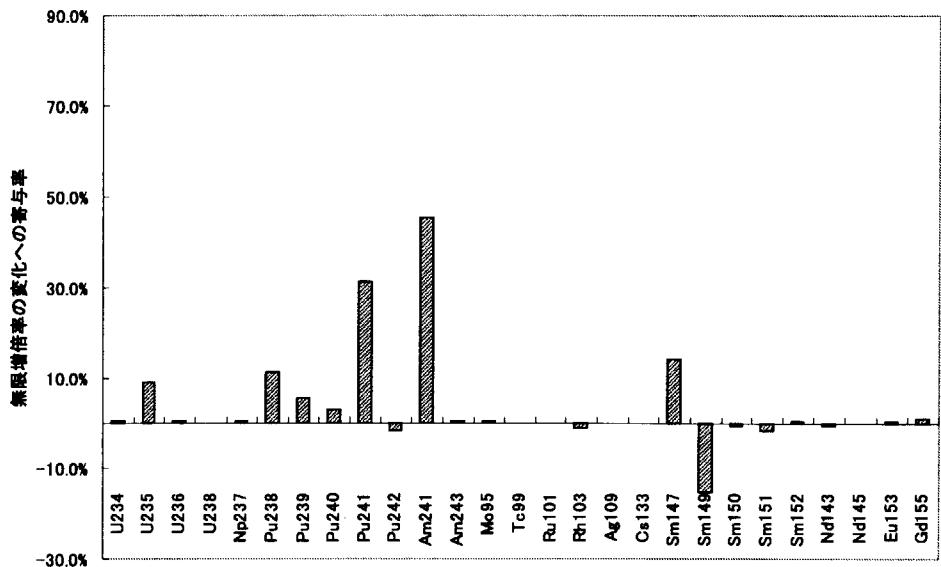


Fig. 6.27 検査 I の時間を 730 日として燃焼させた時の組成での無限増倍率と、
検査 II の時間を 730 日とした場合の無限増倍率の差への各核種の寄与率

BWR の定期検査の時間を 0 日から 500 日まで変えていったときの、核種組成と無限増倍率を Table.6.40 から Table.6.45 に、また無限増倍率をグラフにプロットしたものを NRC9 核種で評価したものについては Fig.6.28 に、JAERI27 核種で評価したものについては Fig.6.29 に示す。Fig.6.28, Fig.6.29 より、定期検査の時間が長くなると、無限増倍率は低くなっていることがわかる。これは PWR の場合の無限増倍率の傾向と全く同じであるので、その原因についても PWR の場合と同様であると考えられる。

定期検査の時間が一日変わった場合の使用済燃料の無限増倍率の変化は NRC9 核種で評価した場合で $7.50 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/day$ 、JAERI27 核種の場合で $6.28 \times 10^{-4} \% \Delta k/k/day$ である。定期検査の時間を 60 日と仮定した場合の無限増倍率と 0 日とする場合の無限増倍率の変化率は、NRC9 核種の場合で約 $0.05 \% \Delta k/k$ 、JAERI27 核種の場合で約 $0.04 \% \Delta k/k$ と非常に小さい。以上の結果から、BWR についても PWR と同様に定期検査の時間は 0 日であると仮定して計算する方がより安全側な評価となる。

特殊なケースとして 3 つの検査期間のうちの 1 つの検査時間を 730 日（2 年）とし残りを 60 日とした場合の核種組成と無限増倍率を Table.6.45 に示す。無限増倍率は NRC9 核種の場合も JAERI27 核種の場合も、より後ろの検査の期間を 730 日とした場合の方が無限増倍率が低くなっている。これも PWR の場合と同様な理由で解釈できると考えられる。

**Table 6.40 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度(1) (BWR,40GWd/t,0年
冷却,300K)**

ケース No.		1	2	3	4
検査時間 I(日)		0	20	40	60
検査時間 II(日)		0	20	40	60
検査時間 III(日)		0	20	40	60
無限増倍率	NRC9 核種	1.2141	1.2140	1.2138	1.2137
	JAERI27 核種	1.1031	1.1030	1.1029	1.1028
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.414E-06	4.415E-06	4.416E-06	4.416E-06
	²³⁵ U *	2.010E-04	2.009E-04	2.009E-04	2.009E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.073E-05	1.073E-05	1.073E-05	1.073E-05
	²³⁸ Pu *	3.844E-06	3.872E-06	3.898E-06	3.925E-06
	²³⁹ Pu *	1.143E-04	1.143E-04	1.143E-04	1.143E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.185E-05	5.185E-05	5.186E-05	5.187E-05
	²⁴¹ Pu *	2.913E-05	2.911E-05	2.909E-05	2.907E-05
	²⁴² Pu *	1.214E-05	1.213E-05	1.212E-05	1.211E-05
	²⁴¹ Am *	1.250E-06	1.281E-06	1.313E-06	1.344E-06
	²⁴³ Am	2.235E-06	2.235E-06	2.234E-06	2.234E-06
	⁹⁵ Mo	4.578E-05	4.579E-05	4.579E-05	4.580E-05
	⁹⁹ Tc	5.145E-05	5.145E-05	5.145E-05	5.145E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05
	¹⁰³ Rh	2.549E-05	2.546E-05	2.544E-05	2.542E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.665E-06	4.664E-06	4.662E-06	4.661E-06
	¹³³ Cs	5.285E-05	5.285E-05	5.284E-05	5.284E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.201E-06	4.320E-06	4.436E-06	4.548E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.728E-08	6.709E-08	6.691E-08	6.673E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.117E-05	1.114E-05	1.111E-05	1.108E-05
	¹⁵¹ Sm	4.048E-07	4.043E-07	4.038E-07	4.033E-07
	¹⁵² Sm	5.105E-06	5.102E-06	5.099E-06	5.096E-06
	¹⁴³ Nd	3.379E-05	3.378E-05	3.378E-05	3.377E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.935E-05	2.935E-05	2.935E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.206E-06	4.206E-06	4.205E-06	4.204E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.457E-09	2.469E-09	2.481E-09	2.491E-09

*のついたものは NRC9 核種

**Table 6.41 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度(2) (BWR,40GWd/t,0年
冷却,300K)**

ケース No.		5	6	7	8
冷却時間 I(日)		80	100	120	140
冷却時間 II(日)		80	100	120	140
冷却時間 III(日)		80	100	120	140
無限増倍率	NRC9 核種	1.2135	1.2134	1.2132	1.2131
	JAERI27 核種	1.1027	1.1025	1.1024	1.1023
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.417E-06	4.418E-06	4.419E-06	4.419E-06
	²³⁵ U *	2.009E-04	2.008E-04	2.008E-04	2.008E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.073E-05	1.074E-05	1.074E-05	1.074E-05
	²³⁸ Pu *	3.951E-06	3.977E-06	4.003E-06	4.029E-06
	²³⁹ Pu *	1.143E-04	1.143E-04	1.143E-04	1.143E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.187E-05	5.187E-05	5.187E-05	5.188E-05
	²⁴¹ Pu *	2.905E-05	2.903E-05	2.901E-05	2.899E-05
	²⁴² Pu *	1.211E-05	1.210E-05	1.210E-05	1.209E-05
	²⁴¹ Am *	1.375E-06	1.406E-06	1.437E-06	1.468E-06
	²⁴³ Am	2.234E-06	2.234E-06	2.234E-06	2.234E-06
	⁹⁵ Mo	4.580E-05	4.580E-05	4.580E-05	4.580E-05
	⁹⁹ Tc	5.145E-05	5.144E-05	5.144E-05	5.144E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05
	¹⁰³ Rh	2.541E-05	2.541E-05	2.540E-05	2.540E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.660E-06	4.659E-06	4.658E-06	4.657E-06
	¹³³ Cs	5.287E-05	5.286E-05	5.286E-05	5.286E-05
	¹⁴⁷ Sm	4.658E-06	4.764E-06	4.868E-06	4.970E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.655E-08	6.637E-08	6.621E-08	6.604E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.105E-05	1.103E-05	1.100E-05	1.098E-05
	¹⁵¹ Sm	4.028E-07	4.024E-07	4.020E-07	4.016E-07
	¹⁵² Sm	5.094E-06	5.092E-06	5.090E-06	5.088E-06
	¹⁴³ Nd	3.377E-05	3.377E-05	3.377E-05	3.378E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.204E-06	4.203E-06	4.203E-06	4.202E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.503E-09	2.515E-09	2.525E-09	2.537E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.42 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度(3) (BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

ケース No.		9	10	11
冷却時間 I(日)		160	180	200
冷却時間 II(日)		160	180	200
冷却時間 III(日)		160	180	200
無限増倍率	NRC9 核種	1.2129	1.2127	1.2126
	JAERI27 核種	1.1021	1.1020	1.1019
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.420E-06	4.421E-06	4.422E-06
	²³⁵ U *	2.007E-04	2.007E-04	2.007E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.074E-05	1.074E-05	1.075E-05
	²³⁸ Pu *	4.054E-06	4.080E-06	4.106E-06
	²³⁹ Pu *	1.143E-04	1.143E-04	1.143E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.188E-05	5.188E-05	5.189E-05
	²⁴¹ Pu *	2.896E-05	2.894E-05	2.893E-05
	²⁴² Pu *	1.208E-05	1.208E-05	1.207E-05
	²⁴¹ Am *	1.499E-06	1.530E-06	1.560E-06
	²⁴³ Am	2.234E-06	2.233E-06	2.234E-06
	⁹⁵ Mo	4.581E-05	4.581E-05	4.581E-05
	⁹⁹ Tc	5.144E-05	5.144E-05	5.144E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.739E-05	4.739E-05
	¹⁰³ Rh	2.539E-05	2.539E-05	2.539E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.656E-06	4.655E-06	4.654E-06
	¹³³ Cs	5.286E-05	5.286E-05	5.286E-05
	¹⁴⁷ Sm	5.068E-06	5.164E-06	5.258E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.589E-08	6.575E-08	6.561E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.096E-05	1.094E-05	1.092E-05
	¹⁵¹ Sm	4.013E-07	4.011E-07	4.008E-07
	¹⁵² Sm	5.086E-06	5.084E-06	5.083E-06
	¹⁴³ Nd	3.378E-05	3.378E-05	3.378E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.202E-06	4.201E-06	4.201E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.548E-09	2.559E-09	2.571E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.43 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度(4) (BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

ケース No.		12	13	14
冷却時間 I(日)		250	300	350
冷却時間 II(日)		250	300	350
冷却時間 III(日)		250	300	350
無限増倍率	NRC9 核種	1.2122	1.2118	1.2115
	JAERI27 核種	1.1016	1.1013	1.1010
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.424E-06	4.426E-06	4.428E-06
	²³⁵ U *	2.006E-04	2.006E-04	2.005E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.075E-05	1.075E-05	1.076E-05
	²³⁸ Pu *	4.169E-06	4.231E-06	4.293E-06
	²³⁹ Pu *	1.143E-04	1.143E-04	1.143E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.189E-05	5.191E-05	5.192E-05
	²⁴¹ Pu *	2.888E-05	2.883E-05	2.878E-05
	²⁴² Pu *	1.205E-05	1.204E-05	1.202E-05
	²⁴¹ Am *	1.636E-06	1.711E-06	1.785E-06
	²⁴³ Am	2.233E-06	2.233E-06	2.233E-06
	⁹⁵ Mo	4.581E-05	4.581E-05	4.581E-05
	⁹⁹ Tc	5.143E-05	5.143E-05	5.142E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.738E-05	4.738E-05
	¹⁰³ Rh	2.538E-05	2.538E-05	2.537E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.651E-06	4.649E-06	4.646E-06
	¹³³ Cs	5.286E-05	5.285E-05	5.285E-05
	¹⁴⁷ Sm	5.482E-06	5.692E-06	5.889E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.523E-08	6.489E-08	6.457E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.088E-05	1.084E-05	1.080E-05
	¹⁵¹ Sm	4.001E-07	3.993E-07	3.986E-07
	¹⁵² Sm	5.078E-06	5.075E-06	5.070E-06
	¹⁴³ Nd	3.377E-05	3.377E-05	3.376E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.200E-06	4.199E-06	4.199E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.598E-09	2.625E-09	2.652E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.44 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度(5) (BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

ケース No.		15	16	17
冷却時間 I(日)		400	450	500
冷却時間 II(日)		400	450	500
冷却時間 III(日)		400	450	500
無限増倍率	NRC9 核種	1.2111	1.2108	1.2104
	JAERI27 核種	1.1006	1.1003	1.1000
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.431E-06	4.433E-06	4.436E-06
	²³⁵ U *	2.005E-04	2.004E-04	2.003E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.076E-05	1.077E-05	1.077E-05
	²³⁸ Pu *	4.354E-06	4.415E-06	4.474E-06
	²³⁹ Pu *	1.143E-04	1.143E-04	1.142E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.193E-05	5.194E-05	5.194E-05
	²⁴¹ Pu *	2.873E-05	2.869E-05	2.864E-05
	²⁴² Pu *	1.201E-05	1.199E-05	1.198E-05
	²⁴¹ Am *	1.859E-06	1.931E-06	2.004E-06
	²⁴³ Am	2.233E-06	2.233E-06	2.233E-06
	⁹⁵ Mo	4.581E-05	4.581E-05	4.581E-05
	⁹⁹ Tc	5.142E-05	5.142E-05	5.141E-05
	¹⁰¹ Ru	4.738E-05	4.738E-05	4.738E-05
	¹⁰³ Rh	2.537E-05	2.537E-05	2.537E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.644E-06	4.642E-06	4.640E-06
	¹³³ Cs	5.284E-05	5.284E-05	5.280E-05
	¹⁴⁷ Sm	6.074E-06	6.248E-06	6.413E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.429E-08	6.400E-08	6.375E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.076E-05	1.073E-05	1.070E-05
	¹⁵¹ Sm	3.980E-07	3.973E-07	3.968E-07
	¹⁵² Sm	5.067E-06	5.063E-06	5.060E-06
	¹⁴³ Nd	3.376E-05	3.376E-05	3.375E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.198E-06	4.197E-06	4.196E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.679E-09	2.704E-09	2.731E-09

*のついたものは NRC9 核種

Table 6.45 各検査時間での無限増倍率と原子個数密度(6)(BWR,40GWd/t,0年冷却,300K)

ケース No.		18	19	20
検査時間 I(日)		730	60	60
検査時間 II(日)		60	730	60
検査時間 III(日)		60	60	730
無限増倍率	NRC9 核種	1.2134	1.2124	1.2102
	JAERI27 核種	1.1026	1.1018	1.0998
原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)	²³⁴ U *	4.416E-06	4.421E-06	4.437E-06
	²³⁵ U *	2.008E-04	2.006E-04	2.005E-04
	²³⁶ U	1.059E-04	1.059E-04	1.059E-04
	²³⁸ U *	2.045E-02	2.045E-02	2.045E-02
	²³⁷ Np	1.074E-05	1.076E-05	1.076E-05
	²³⁸ Pu *	4.034E-06	4.283E-06	4.279E-06
	²³⁹ Pu *	1.143E-04	1.143E-04	1.142E-04
	²⁴⁰ Pu *	5.187E-05	5.190E-05	5.193E-05
	²⁴¹ Pu *	2.906E-05	2.897E-05	2.853E-05
	²⁴² Pu *	1.210E-05	1.205E-05	1.199E-05
	²⁴¹ Am *	1.371E-06	1.547E-06	2.113E-06
	²⁴³ Am	2.231E-06	2.229E-06	2.240E-06
	⁹⁵ Mo	4.578E-05	4.579E-05	4.584E-05
	⁹⁹ Tc	5.144E-05	5.143E-05	5.142E-05
	¹⁰¹ Ru	4.739E-05	4.738E-05	4.738E-05
	¹⁰³ Rh	2.541E-05	2.540E-05	2.539E-05
	¹⁰⁹ Ag	4.657E-06	4.649E-06	4.644E-06
	¹³³ Cs	5.283E-05	5.282E-05	5.281E-05
	¹⁴⁷ Sm	5.002E-06	5.477E-06	6.118E-06
	¹⁴⁹ Sm	6.626E-08	6.542E-08	6.371E-08
	¹⁵⁰ Sm	1.092E-05	1.085E-05	1.088E-05
	¹⁵¹ Sm	4.009E-07	3.997E-07	3.993E-07
	¹⁵² Sm	5.079E-06	5.075E-06	5.080E-06
	¹⁴³ Nd	3.377E-05	3.376E-05	3.375E-05
	¹⁴⁵ Nd	2.936E-05	2.936E-05	2.936E-05
	¹⁵³ Eu	4.198E-06	4.199E-06	4.204E-06
	¹⁵⁵ Gd	2.516E-09	2.600E-09	2.716E-09

*のついたものは NRC9 核種

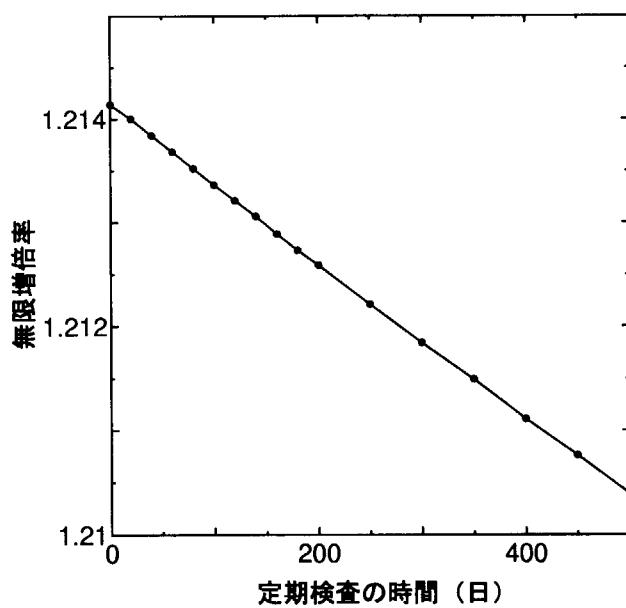


Fig. 6.28 定期検査の時間と NRC9 核種で評価した無限増倍率 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

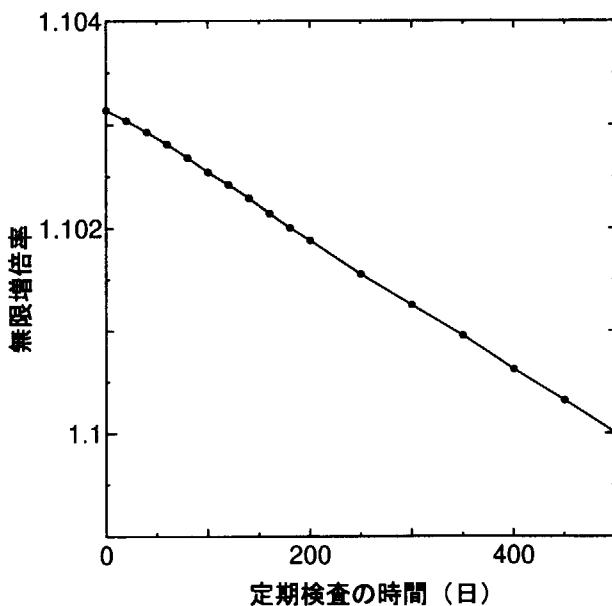


Fig. 6.29 定期検査の時間と JAERI27 核種で評価した無限増倍率 (BWR,40GWd/t,0 年冷却,300K)

7 結論

ホウ素濃度、冷却材温度分布、運転履歴が使用済燃料の反応度に及ぼす影響について調査し以下のようなことがわかった。

1. 燃焼期間中の平均ホウ素濃度が高いほど、使用済燃料の無限増倍率は高くなる。平均ホウ素濃度が1ppm変化した場合の、燃焼度50GWd/t、冷却時間0年の使用済燃料の無限増倍率の変化量はNRC9核種で評価した場合で $2.82 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/\text{ppm}$ 、JAERI27核種で評価した場合で $2.75 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/\text{ppm}$ であった。
2. 現実にはホウ素濃度はサイクル初期から単調に減少するが、ホウ素濃度を平均濃度で一定であると仮定した方が無限増倍率は高くなり、基本パターンとホウ素濃度一定の場合の、燃焼度50GWd/t、冷却時間0年の使用済燃料の無限増倍率の変化率はNRC9核種で評価した場合で約0.18% $\Delta k/k$ 、JAERI27核種で評価した場合で約0.17% $\Delta k/k$ であった。
3. 平均冷却材温度が高くなるほど無限増倍率は高くなり、平均冷却材温度が1K変化したときの、燃焼度50GWd/t、冷却時間0年の使用済燃料の無限増倍率の変化量はNRC9核種で評価した場合で $7.3 \times 10^{-2} \% \Delta k/k/K$ 、JAERI27核種で評価した場合で $7.0 \times 10^{-2} \% \Delta k/k/K$ であった。
4. PWRの冷却材温度分布は、冷却時間が0年の場合では燃焼度が10GWd/t以上の時は平均温度で一定と仮定するより、冷却材温度分布を考慮した方が実効増倍率は高くなるが、冷却材温度分布を考慮することによる実効増倍率の変化率は、燃焼度分布を考慮することによる実効増倍率の変化率と比較して小さく、冷却材温度分布を考慮することは計算コストの増加になるので、あらかじめ実効増倍率バイアス値を求めておき、そのバイアス値を加えることにより冷却材温度分布の効果を取り入れる方がよい。なお、実効増倍率バイアス値は想定される最大の燃焼度での値を採用することにより、保守的に決定することができる。
5. BWRの冷却材温度分布を考慮することによる実効増倍率の変化率は小さく、統計誤差の範囲であると考えられるので、無視しうると考えられる。
6. 比出力は高いほど無限増倍率は高くなるが、これは比出力が変化したことが原因ではなく、1サイクルの燃焼度を保つために1サイクルの時間が変化したことが原因であると考えられる。1サイクルの時間は短くなるほど無限増倍率は高くなり、1サイクルの時間が1日変化した場合の燃焼度50GWd/t(PWR)または40GWd/t(BWR)、冷却時間0年の使用済燃料の無限増倍率の変化は、NRC9核種で評価した場合で $1.4 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/day$ 、JAERI27核種で評価した場合で $1.5 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/day$ となり、これはPWRについてもBWRについても、ほぼ同じであった。

7. 運転パターンについては、全サイクルで比出力は一定であると仮定するより、燃料の取り替えをアウト・イン方式とした場合のように、徐々に比出力が高くなるケースの方が無限増倍率は高くなり、今回の計算条件では、PWR で全サイクルの比出力を 40MW/t 一定とする場合と、各サイクルの比出力を 35・40・45MW/t とする場合の燃焼度 50GWd/t、冷却時間 0 年の使用済燃料の無限増倍率の変化率は NRC9 核種で評価した場合で $0.04\%\Delta k/k$ 、JAERI27 核種で評価した場合で $0.06\%\Delta k/k$ であった。
8. 定期検査の時間は短いほど無限増倍率は高くなり、PWR で定期検査の時間が 1 日変化した場合の燃焼度 50GWd/t、冷却時間 0 年の使用済燃料の無限増倍率の変化は、NRC9 核種で評価した場合で $5.66 \times 10^{-4}\%\Delta k/k/day$ 、JAERI27 核種で評価した場合で $4.40 \times 10^{-4}\%\Delta k/k/day$ であった。BWR については NRC9 核種で評価した場合で $7.50 \times 10^{-4}\%\Delta k/k/day$ 、JAERI27 核種で評価した場合で $6.28 \times 10^{-4}\%\Delta k/k/day$ であった。
9. 2 回の定期検査（PWR の場合。BWR の場合は 3 回）のいずれかで長時間の検査となる場合は、後の検査の時間が短い場合の方が無限増倍率が高くなることがわかった。

以上の結果から、燃焼度クレジットを導入する際に必要となる燃焼計算を行うときに、これらのパラメーターをどのように扱えば安全側の評価となるかを示すことができた。しかし、これらの結果はすべて冷却時間が 0 年の場合についての結論であり、数年間冷却された使用済燃料では、これらの数値や傾向が変化する可能性があり注意が必要である。

謝辞

本解析は日本原子力研究所の夏期実習として、日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部の方々から有益な助言をいただきながら行った。

燃料サイクル安全工学部長の藤根幸雄氏、野村靖室長には夏期実習生として受け入れていただきました。また、奥野浩氏にはいろいろと有益なアドバイスをしていただきました。今井和彦氏にも様々な面でお世話になりました。名古屋大学の山根義宏教授には夏期実習に行く機会を与えていただき、またレポートに関して様々な助言をいただきました。この場を借りて深く感謝の意を述べたいと思います。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁ホームページ. <http://www.enecho.go.jp/dayori/hokoku/gensiryoku/s5.html>.
- 2) 二村嘉明, 中込良広. 燃焼度クレジット概念の輸送への適用. 原子力工業 第40巻 第3号, 1994.
- 3) YOSHITAKA NAITO, MAKOTO TAKANO, MASAYOSHI KUROSAWA, and TAKENORI SUZAKI. *STUDY ON THE CRITICALITY SAFETY EVALUATION METHOD FOR BURNUP CREDIT IN JAERI*. NUCLEAR TECHNOLGY VOL.110, 1995.
- 4) 黒澤正義, 内藤淑孝, 須山賢也, 板原國幸, 鈴木勝男, 濱田紘司. 軽水炉使用済燃料の長期貯蔵が
プルサーマル燃料サイクルに与える影響. 日本原子力学会誌, Vol.40, No.6, 1999.
- 5) M.D.DeHart. *Sensitivity and Parametric Evaluations of Significant Aspects of Burnup Credit for PWR Spent Fuel Packages*. ORNL/TM-12973, 1996.
- 6) J.C.Wagner, M.D.DeHart, and B.L.Broadhead. *Investigation of Burnup Credit Modeling Issues Associated With BWR Fuel*. ORNL/TM-1999/193, 1999.
- 7) 須山賢也, 清住武秀, 望月弘樹. 統合化燃焼計算コードシステム SWAT 改訂版. JAERI-Data/Code 2000-027, 2000.
- 8) 奥村啓介, 金子邦男, 土橋敬一郎. SRAC95 ; 汎用核計算コードシステム. JAERI-Data/Code 96-015, 1996.
- 9) 森貴正, 中川正幸. MVP/GMVP 連続エネルギー法および多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算コード. JAERI-Data/Code 94-007, 1994.
- 10) A.G.Croff. *ORIGEN2 - A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code*. ORNL-5621, 1980.
- 11) 泉文男, 堀上邦彦, 小林健介, 生田目健. 日本における原子力発電プラントに関するデータリスト (PWR 編)(1992 年版). JAERI-M-92-204, 1993.
- 12) DOE/RW-0472 Revision 2. *Topical Report on Actinide-Only Burnup Credit for PWR Spent Nuclear Fuel Packages*. 1998.
- 13) Makoto TAKANO. *OECD/NEA BURNUP CREDIT CRITICALITY BENCHMARK -RESULT OF PHASE-IA-*. JAERI-M 94-003, 1994.
- 14) 奥野浩, 小室雄一, 中島健, 野村靖, 内藤淑孝, 仁科浩二郎, 西堀俊雄, 松本忠邦, 三好慶典, 高井克昭, 板原國幸. 臨界安全ハンドブック改訂準備資料. JAERI-Tech-95-048, 1995.
- 15) Makoto TAKANO and Hiroshi OKUNO. *OECD/NEA BURNUP CREDIT CRITICALITY BENCHMARK -RESULT OF PHASE IIA-*. JAERI-Research-96-003, 1996.

- 16) (編) 中原嘉則, 須山賢也, 須崎武則. 軽水炉使用済燃料の燃焼度クレジットに関する技術開発. JAERI-Tech-2000-071, 2000.
- 17) 泉文男, 中村仁一. 日本における原子力発電プラントに関するデータリスト 1981年版. JAERI-M-82-132, 1982.
- 18) 須山賢也 私信, 2000.
- 19) 北海道電力ホームページ. <http://www.hepco.co.jp/atomic/data/08.html>.
- 20) 日本原子力発電ホームページ. http://www.japc.co.jp/h_data/kensa_t2.htm.
- 21) 四国電力ホームページ. <http://www.yonden.co.jp/denryoku/ikata/ikt03.htm>.
- 22) 九州電力ホームページ. <http://www.kyuden.co.jp/company/kigyo/nuclear/index.html>.
- 23) 東北電力ホームページ. http://www.tohoku-epco.co.jp/electr/genshi/data/4_d.html.
- 24) 北陸電力ホームページ. <http://www.rikuden.co.jp/shika/index.htm>.
- 25) 東京電力ホームページ. <http://www.tepco.co.jp/>.
- 26) 中国電力ホームページ. <http://www.energia.co.jp/energaj/company/atom/atomf.html>.

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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	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、ヘクタ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では液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 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	1	1	100	
3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

燃焼履歴が使用済燃料の反応度に及ぼす影響

（略）