

JAERI-Research
98-047



高燃焼度フルMOX-BWR炉心の核特性の検討

1998年8月

白川利久・大久保努・落合政昭

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

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

高燃焼度フルMOX-BWR炉心の核特性の検討

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

白川 利久・大久保 努・落合 政昭

(1998年7月23日受理)

運転サイクル3年程度、燃料交換頻度4バッチそして燃焼度100GWd/t以上を目指した全MOX高燃焼度BWR炉心の核的検討を行った。ベース炉心は、135万kWe級US版ABWRに9X9型燃料集合体を装荷して構成した。可燃性毒物ガドリニア(Gd_2O_3)の濃度を調整するとともに水棒の有無や被覆管直径変更により水対燃料体積比を変えて検討した。水棒を9本持った比較的高減速の燃料集合体、水棒無しの燃料集合体、そして水棒無しでかつ太直径燃料棒の比較的低減速の燃料集合体の3ケースについて、2次元XY燃料集合体セル計算を原研で開発した汎用核計算コードシステムSRAC95で実施した。3ケースとも上記目標が達成可能と考えられる。最後の比較的低減速の燃料集合体は、プルトニウムの使用量は多くなるものの、長期間燃焼により総発熱量は多くなる。加工費、使用済み燃料貯蔵費の観点からは有利と思われる。最後のケースについては、3次元XYZ炉心燃焼計算を同コードシステムで実施した。線出力密度が低く、全制御棒引き抜き運転が可能と思われる結果が得られた。

Study on Nuclear Physics of High Burn-up Full MOX-BWR Core

Toshihisa SHIRAKAWA, Tsutomu OKUBO and Masa-aki OCHIAI

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

(Received July 23, 1998)

In this report, neutronics study of full Mixed-oxide (MOX) high burn-up BWR core is presented. Our design goals are about 3-year cycle length, four-batch refueling scheme and more than 100GWd/t fuel discharge burn-up. Base core configuration is 1,350MWe US version of ABWR with 9×9 type fuel assembly. Investigation of the reactor core has been carried out by arranging Gd_2O_3 contents in fuel rods and changing water to fuel volume ratio (V_m/V_f) through the number of water rods or adjustment of fuel clad diameter. JAERI's general purpose neutronics code system SRAC95 was used for two dimensional XY fuel assembly cell neutronics calculations. Calculated cases are for a comparatively high moderated fuel assembly with 9 water rods, a fuel assembly without water rods and a comparatively low moderated fuel assembly without water rods and with larger fuel clad diameter. All these 3 cases seem to achieve our design goals mentioned above. For the last case, three dimensional core burn-up calculation was performed by this code system. This case seems to attain a low linear power density and the operation with all control rod out.

Keywords: BWR, High Burn-up, MOX, Long Cycle Length, Neutronics Study

目 次

1. 序 論	1
2. 燃料棒単ピンセルの核特性の検討	2
2.1 MOX燃料の核特性の一般的特徴	2
2.2 高燃焼度燃料での課題	2
2.3 本検討の主要仕様	2
2.4 検討結果	3
3. 燃料集合体セルの核特性の検討	14
3.1 プルトニウム富化度分布一様セルの核特性の検討	14
3.2 プルトニウム富化度分布付きセルの核特性の検討	15
3.3 まとめ	17
4. 炉心核特性の検討	30
5. BWR 設計用コードシステムによる核特性の検討	36
6. 結 論	45
参考文献	46

Contents

1. Introduction	1
2. Single Fuel Rod Cell Neutronics Study	2
2.1 General Neutronic Characteristics for MOX Fuel	2
2.2 Issues for High Burn-up Fuel	2
2.3 Major Core Specifications in this Study	2
2.4 Results and Investigation	3
3. Fuel Assembly Cell Neutronics Study	14
3.1 Fuel Assembly Cell Neutronics Study with Uniform Pu Content	14
3.2 Fuel Assembly Cell Neutronics Study with Various Pu Contents	15
3.3 Summary	17
4. Core Neutronics Study	30
5. Neutronics Calculation Results by BWR Design Code System	36
6. Conclusions	45
References	46

1. 序論

軽水炉が当面する課題の1つとして、高レベル廃棄物発生量の削減を目指した高燃焼度化が重要であり、中期的課題としては、軽水炉技術の利用・応用によるウラン資源の有効利用が重要である。

加えて、軽水炉による発電量が増加するにつれ、経済性を向上させる要求が高まってきた。固定費の低減に直結し発電コストにダイレクトに比例する設備利用率向上への要望は特に高い。設備利用率の向上には、1運転サイクル当たりの日数を長期化することが効果的である。ただし、従来と同じ燃料を使用したのでは燃料交換バッチ数（現行 BWR では約4）を下げざるを得ないため、取り出し燃焼度が下がって燃料サイクルコストが上がることから、これを避けるためにも燃料の高燃焼度化が必要になってくる。

本検討では、135万 kWe 級 A BWR の 9X9 型燃料集合体炉心をベースとして、劣化ウランを用いた軽水炉の使用済燃料から取り出したプルトニウム組成の MOX 燃料を採用し、ガドリニア (Gd_2O_3) の採用、水対燃料体積比の調整により、「運転サイクル期間3年程度、燃料交換頻度4バッチ、取出平均燃焼度 100GWd/t 以上」の長期運転サイクル・高燃焼度炉心の概念を構築した。

現行の高燃焼度対応炉心及び関連する研究は、熱中性子利用率の向上と共鳴中性子吸収の減少とによりプルトニウムを効率よく燃焼させるとともに、過度に負になるボイド係数を緩和するために減速材である水を多くした高減速化が一般的であった⁽¹⁾。しかし、本検討では、プルトニウムは十分にあり、それを有効に利用するとの観点から検討した。すなわち、プルトニウムを効率良く燃焼させることには重点を置かず、燃料を長期間燃焼させてそこからの総発熱量を多くする方向で検討した。このため、水を多くするよりも燃料を多くする方向でも検討した。

2. 燃料棒単ピンセルの核特性の検討

MOX燃料炉心の主な核特性を把握するために、燃料棒1本とその回りを減速材の水が取り囲んでいる単ピンセルが無限に配列されている無限格子形状での核特性を、汎用核設計コードシステムSRAC 95⁽²⁾の中のSRAC計算コードにより検討した。中性子漏洩は幾何学的バックリングで考慮した。

2.1 MOX燃料の核特性の一般的特徴

MOX燃料は、初めから新燃料にPuが含まれているだけで通常のウラン(U)燃料と大きな違いはないが、PuとUとの注目すべき違いは、

- ①PuはUに比べて熱中性子吸収断面積が大きい。したがって、中性子エネルギースペクトルが硬くなり熱中性子割合が少なくなる。
- ②Puの中性子再成率 η はUに比べて、中性子エネルギーが高くなるほど大きくなる。
- ③PuはUに比べて遅発中性子割合が小さい。

この結果、①②より、MOX燃料の無限増倍率 k_{∞} はU燃料と比べると燃焼度に対して緩やかに減少する。このことは、取り替え炉心において、運転期間が長くなっても燃焼度依存出力ミスマッチが小さくなることを意味する。また、新燃料の k_{∞} を低く抑えることができるため、余剰反応度も小さくなる。一方、可燃性毒物や制御棒の効果は低下するため、炉停止余裕はこれ等の兼ね合いで決まる。

③より、動的ポイド係数の低下が懸念される。しかし、通常のU燃料でも燃焼末期ではPuによる出力分担率がかなり大きいためこれと比べてみるとたいした問題にはならない。

2.2 高燃焼度燃料での課題

高燃焼度化の技術的対策として一般的に次のような手段がある。

- ①燃料棒1本当たりの熱負荷を小さくして長期利用に耐えられるようにする。そのために、チャンネルボックス内の燃料棒本数を8x8から9x9に増やす。
- ②核分裂性物質の装荷量を増加させる。更に、これによる吸収断面積の増加に伴う熱中性子不足を補うため、水棒を太くしたり本数を増やし、減速材を増加させて k_{∞} の増大を図る。
- ③核分裂性物質の増加による新燃料の初期余剰反応度を抑制するために可燃性毒物入り燃料棒本数を増やしかつ濃度を高める。

本検討でも上記手段を取り入れた燃料集合体を対象とした。

2.3 本検討の主要仕様

ベース炉心は135万kW e級US版ABWR^{(3),(4)}とした。プラントの基本仕様ならびに

燃料の基本仕様を表 2.1 に示す。炉心形状、燃料集合体を図 2.1 に示す。劣化ウラン中の ^{235}U の割合は 0.2%とし、プルトニウムの組成は、軽水炉の使用済燃料から取り出したものの値⁽⁶⁾を用いた。

なお、本検討でも上記 2.2 に挙げた一般的手段をとった。すなわち、

- ①燃料格子：9 x 9型とする。これは、燃料1本当たりの熱負荷を低減させるためである。
- ②水棒：減速材の量を多くするために、中心9本の燃料棒を9本の水棒に置き換えた。水棒間の水は周辺に発熱がないためボイドは発生せず、その分更に水はふえる。スペーサ加工の単純さや、大量生産燃料被覆管の流用によるコスト低減が期待できる。（ここに、補助制御棒を設置できる可能性もある）
- ③可燃性毒物(Gd_2O_3)：全燃料棒に均一に装荷する。現行BWRでは数本の燃料棒に Gd_2O_3 を混在させている。これによりサイクル初期の余剰反応度を大幅に低減させることが出来る。核分裂性物質を大量に装荷して超長期運転サイクル、超高燃焼度への道が開ける可能性がある。燃料集合体製造面から見ると、現在被覆管上部端栓形状を変えて Gd_2O_3 入り燃料棒と Gd_2O_3 の入っていない燃料棒とを目視検査が可能ないように区別しているが、その必要がなくすむため製造工程が単純になる。その他、 Gd_2O_3 が混在されていない燃料棒の集合体内局所ピーキング (LPF) は大きな値になるが、それを抑制できる。また、燃料集合体に装荷する PuO_2 富化度種類を減らせる可能性がある。

2.4 検討結果

計算コード：SRAC

計算モデル：燃料棒1本の周りを水が取り巻く1次元円筒モデルの格子燃焼計算。燃料棒被覆管直径は実燃料と同じにし、セル境界は水対燃料体積比が実燃料集合体と同じになるようにした。水素の数密度は、ボイドの蒸気密度を考慮して水の質量が保存される実効密度から算出した。keff に対する中性子の炉心からの漏れは、幾何学的バックリングにより考慮した。

運転条件：18ヶ月運転（燃料集合体セルの検討では3年とした）。4バッチ交換。

このようにして、 PuO_2 富化度をパラメータとした keff の計算をした。出力は keff に比例するとして、制御棒1本の周りの燃料集合体4体の出力を計算した。表 2.2 に結果を要約した。ただし、サイクル初期の新燃料の keff は、4燃料集合体の平均 keff が 1.0 になるように調整した。すなわち、 Gd_2O_3 で調整しうるものと仮定した。

この表から次のことが判った。

- ① 約 7 w/o 程度の PuO_2 富化度であれば4バッチ燃料交換で18ヶ月運転が可能である。
- ② 燃料棒平均線出力密度 q' は表 2.1 に示す様に 168.6W/cm であって、LPF~1.2、原子炉半径方向ピーキング (RPF) ~1.2、原子炉軸方向ピーキング (ZPF) ~1.2 を仮定すると、 PuO_2 富化度が 7 w/o の場合には燃焼度ミスマッチによるバンドルピーキング (BPF) が表 2.2 に示す様に 1.072 であるから、実炉心での最大線出力密度は、312W/cm と

なり熱的余裕は十分あると考えられる。

Gd₂O₃濃度を1 w/oとして燃焼計算を実施した結果を図 2.2 に示す。Gd₂O₃ を装荷しても PuO₂ 富化度が6 w/o から10 w/o の範囲では富化度が高いほど keff の燃焼度に対する減少割合は小さくなる。また、PuO₂ 富化度が7 w/o の場合の燃焼初期0.0GWd/tでの keff は図 2.2 に示す様に十分低く、原子炉停止が可能である。

つぎに、PuO₂ 富化度をNa冷却FBRで使われている20 w/oにした場合にどうなるか超高燃焼度炉心について検討した。表 2.3 に、燃料交換4バッチで53ヶ月運転を想定した計算結果を示した。BPFは1.098でそれほど高くはない。取り出し燃焼度は162.7GWd/tとなる。

Gd₂O₃濃度を2 w/oにした場合の結果を図 2.3 に示す。0.0GWd/tでの keff は0.98、1 サイクル燃焼した40.7GWd/tでは1.09、2 サイクル燃焼した81.3GWd/tでは1.03、3 サイクル燃焼した122GWd/tでは0.96であり、制御棒周りの4燃料集合体平均では1.02程度となるから制御棒で十分制御可能と考えられる。

以上のことから、

- ①全燃料棒にGd₂O₃を装荷する方式は初期原子炉停止余裕を大きく確保出来、運転サイクル期間を長くするための有力な方策と考えられる。
- ②実際の燃料集合体の場合では、水ギャップまたは水棒に面した燃料棒の出力は高くなるためLPFはこの位置に生じるが、その燃料棒のGd₂O₃の濃度を高めるか、Sm₂O₃のような共鳴領域でも中性子吸収の高い可燃性毒物を装荷するか、PuO₂ 富化度を低くすることにより、LPFを低くすることが可能と考えられる。(水ギャップを狭くして高転換炉を目指す場合には、水ギャップによるLPFの増大は考慮する必要はなくなる。)

BWRの炉心挙動はボイドにより大きな影響を受けるため、keffのボイド挙動を検討した。図 2.4 は水棒9本、PuO₂ 富化度7w/o、0.0GWd/tでの keff 対ボイドの計算結果である。Gd₂O₃が0.5w/o装荷されている場合には、サイクル初期でのボイド反応度は正になっている。BWRの一般的設計では、1制御棒の回りは、Gd₂O₃が十分装荷されている未燃焼の1燃料集合体と、燃焼が進んでGd₂O₃が焼損してボイド反応度が負の3燃料集合体で構成されており、平均ではボイド反応度は負になるように設計している。更に、サイクル初期でGd₂O₃が十分装荷されている燃料集合体の keff は1.0を大きく下回っているため出力は低く、ボイド発生量も少ない。これらの理由から、新燃料のボイド反応度が正であることは問題とはならない。

次に、水棒について検討を試みた。水棒の使用は、ボイド反応度が過度に負にならないようにするためと、燃料集合体中心部での熱中性子不足を補うためである。しかし、一方では、これは無駄な空間ともいえる。そこで、水棒の代わりに燃料棒を装荷した場合を検討した。図 2.5 に示すように、ボイド反応度はGd₂O₃無しでは負であるが、添加されてい

れば濃度の違いや PuO_2 富化度に関わらず正である。

水棒の有無が k_{eff} にどのような影響があるか調べた。ただし、水棒無しの場合の PuO_2 富化度は総 PuO_2 がほぼ同じになるように低くした。結果を図 2.6 に示す。なお、同じ $\text{MW} \cdot \text{d}$ を得るのには、燃料集合体出力密度が同じならば、水棒無しの方が燃焼反応度は小さくて済み BPF は小さくなる。また、燃料棒 1 本当たりの出力は 72/81 に低下するため、安全裕度は大きくなる。

水棒無しとした場合にポイド反応度が負で絶対値が過度に大きくなるのを抑制する対策の 1 つとして、燃料棒被覆管の直径を太くして冷却材流路面積を狭くした検討を行った。燃料棒間隔は 0.138cm とした。これにより冷却材流速を高めたことになる。冷却材流路面積が狭くなったため減速材の変動量が少なくなることからポイド反応度変化も小さくなると考えられる。図 2.7 に計算結果を示す。

以上のことから、高燃焼度炉心への対応手段として、減速材を減らす方法も可能性が有ることが判った。特に、プルトニウム資源が十分にある場合には有効であると考えられ、更に検討を加えることとした。

表2.1 炉心・燃料基本仕様^{(3), (4)}

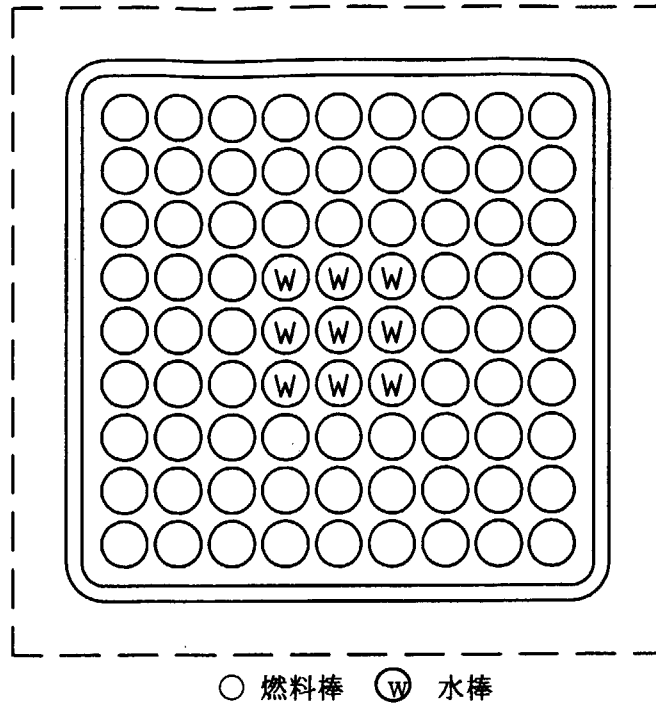
熱出力(MW)	3926
冷却材全流量(t/h)	52000
原子炉圧力(MPa)	7.2
蒸気温度(°C)	287
炉心有効高さ(m)	3.71
炉心等価直径(m)	5.16
炉心等価体積(m ³)	77.5826
燃料集合体数	872
燃料棒本数	72
水棒本数	9
制御棒本数	205
出力密度(kw/l)	50.6
燃料集合体線出力密度(MWt/cm)	0.012136
燃料棒線出力密度(MWt/cm)	0.0001686
燃料棒被覆管外直径(cm)	1.12
被覆管厚さ(cm)	0.07
ペレット直径(cm)	0.96
ペレットと被覆管とのギャップ(cm)	0.01
燃料単位セル1辺長さ(cm)	15.49
チャンネルボックス1辺長さ(cm)	13.9
チャンネルボックス厚さ(cm)	0.25
水ギャップ半分幅(cm)	0.79
ペレット密度(g/cm ³)	10.45

表2.2 高燃焼度炉心の富化度パラメータサーベイ(燃料棒9本を水棒、18ヶ月運転)

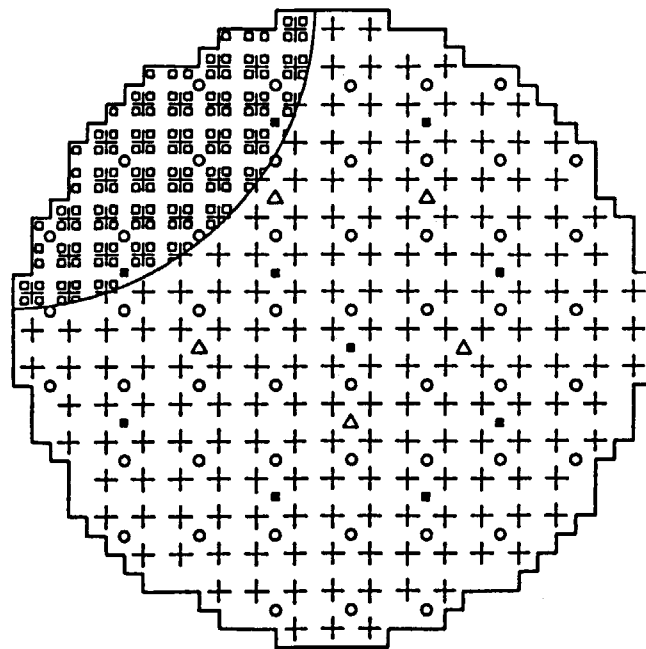
	サイクル初期		サイクル末期	
PuO ₂ 富化度 10.0w/o	新燃料 0.0GWd/t keff=0.83 P0=0.83	1サイクル燃焼 13.9GWd/t keff=1.095 P0=1.095	1サイクル燃焼 13.9GWd/t keff=1.095 P0=1.054	2サイクル燃焼 27.8GWd/t keff=1.057 P0=1.018
	3サイクル燃焼 41.7GWd/t keff=1.020 P0=1.020	2サイクル燃焼 27.8GWd/t keff=1.057 P0=1.057	4サイクル燃焼 55.5GWd/t keff=0.983 P0=0.946	3サイクル燃焼 41.7GWd/t keff=1.020 P0=0.982
	平均keff=1.0(新燃料のkeff調整) 平均燃焼度=20.83GWd/t		平均keff=1.039 平均燃焼度=34.72GWd/t	
PuO ₂ 富化度 7.0w/o	新燃料 0.0GWd/t keff=0.94 P0=0.94	1サイクル燃焼 13.9GWd/t keff=1.069 P0=1.069	1サイクル燃焼 13.9GWd/t keff=1.069 P0=1.072	2サイクル燃焼 27.8GWd/t keff=1.021 P0=1.024
	3サイクル燃焼 41.7GWd/t keff=0.973 P0=0.973	2サイクル燃焼 27.8GWd/t keff=1.021 P0=1.021	4サイクル燃焼 55.5GWd/t keff=0.925 P0=0.928	3サイクル燃焼 41.7GWd/t keff=0.973 P0=0.978
	平均keff=1.0(新燃料のkeff調整) 平均燃焼度=20.83GWd/t		平均keff=0.997 平均燃焼度=34.72GWd/t	
PuO ₂ 富化度 6.0w/o	新燃料 0.0GWd/t keff=0.99 P0=0.99	1サイクル燃焼 13.9GWd/t keff=1.057 P0=1.057	1サイクル燃焼 13.9GWd/t keff=1.057 P0=1.083	2サイクル燃焼 27.8GWd/t keff=1.003 P0=1.028
	3サイクル燃焼 41.7GWd/t keff=0.949 P0=0.949	2サイクル燃焼 27.8GWd/t keff=1.003 P0=1.003	4サイクル燃焼 55.5GWd/t keff=0.895 P0=0.917	3サイクル燃焼 41.7GWd/t keff=0.949 P0=0.972
	平均keff=1.0(新燃料のkeff調整) 平均燃焼度=20.83GWd/t		平均keff=0.976 平均燃焼度=34.72GWd/t	

表2.3 超高燃焼度炉心の出力挙動(燃料棒9本を水棒、53ヶ月運転)

		サイクル初期		サイクル末期	
PuO ₂ 富化度 20.0w/o	新燃料	0.0GWd/t	1サイクル燃焼 40.7GWd/t	1サイクル燃焼	2サイクル燃焼
		keff=0.9	keff=1.099	40.7GWd/t	81.3GWd/t
		P0=0.9	P0=1.099	keff=1.099	keff=1.033
				P0=1.098	P0=1.033
	3サイクル燃焼	2サイクル燃焼	4サイクル燃焼	3サイクル燃焼	
	122.0GWd/t	81.3GWd/t	162.7GWd/t	122.0GWd/t	
	keff=0.968	keff=1.033	keff=0.903	keff=0.968	
	P0=0.968	P0=1.033	P0=0.902	P0=0.967	
	平均keff=1.0(新燃料のkeff調整)			平均keff=1.0008	
	平均燃焼度=61.0GWd/t			平均燃焼度=101.7GWd/t	



燃料集合体



炉心形状⁽⁶⁾

□ 燃料集合体、 + 制御棒、 ○ 出力領域検出器、 ■ 起動領域検出器、 △ 中性子源

図 2.1 ベース炉心の燃料集合体および炉心形状

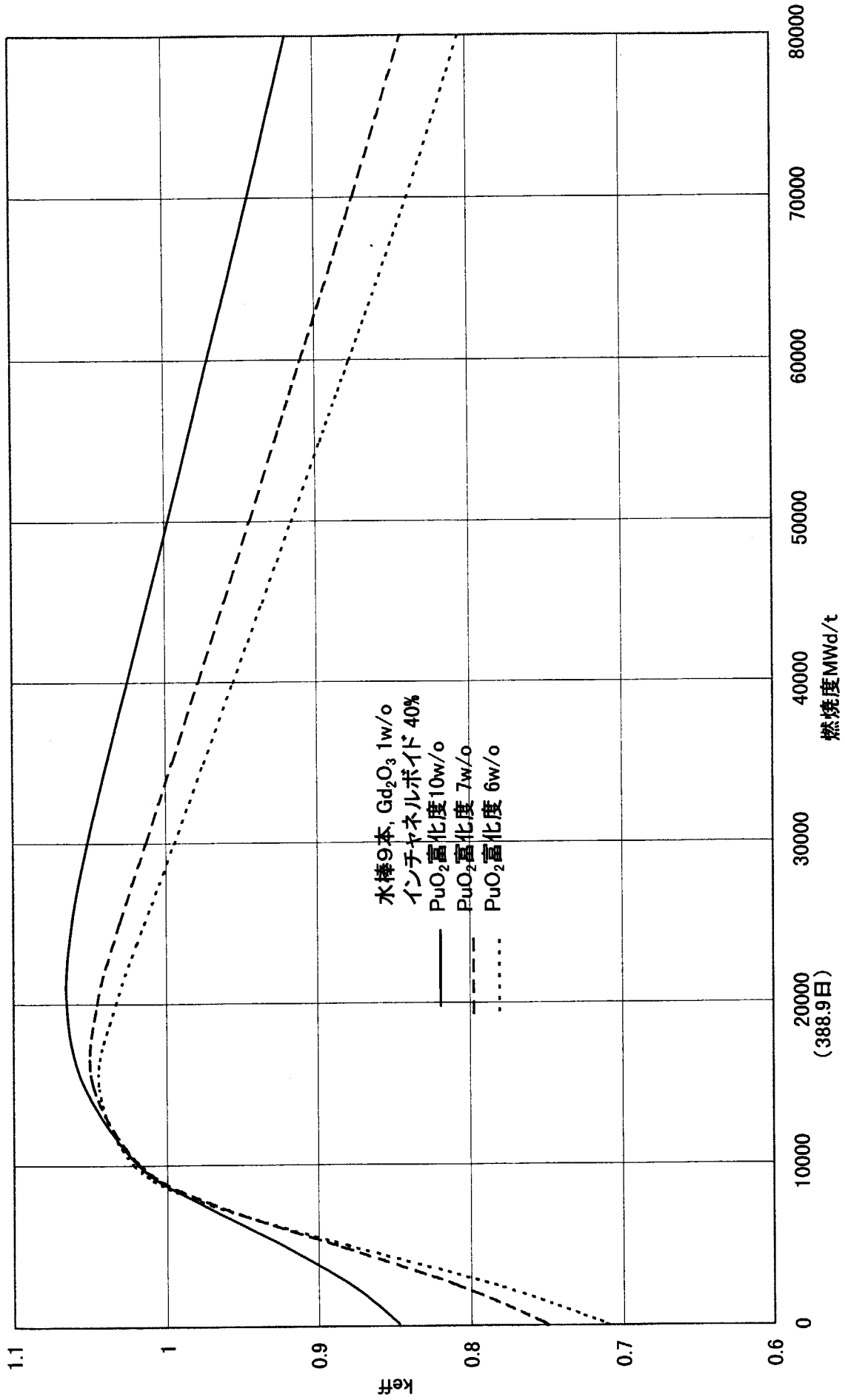


図 2.2 keffの燃焼度変化

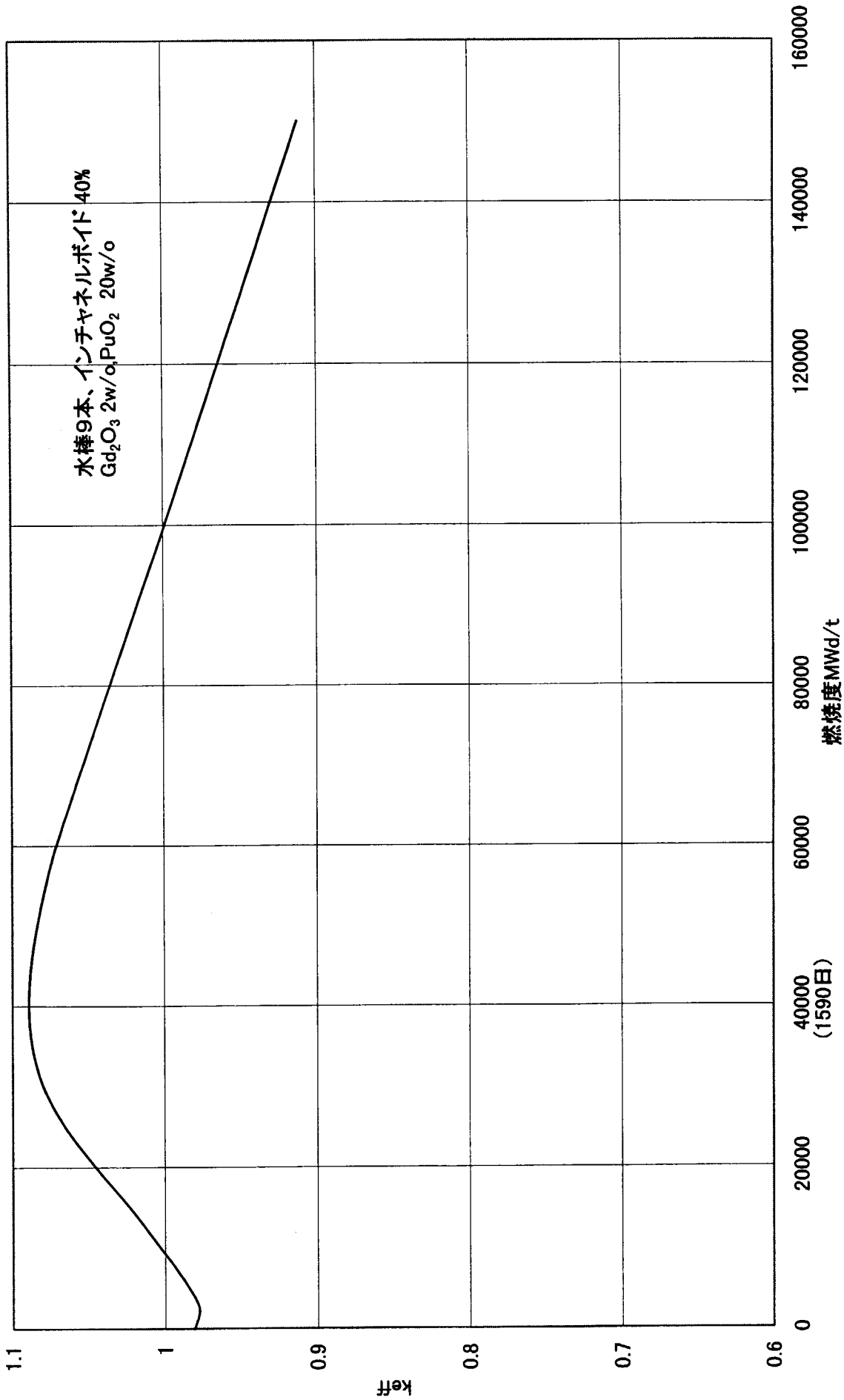


図 2.3 keffの燃焼度変化(超高燃焼度炉心)

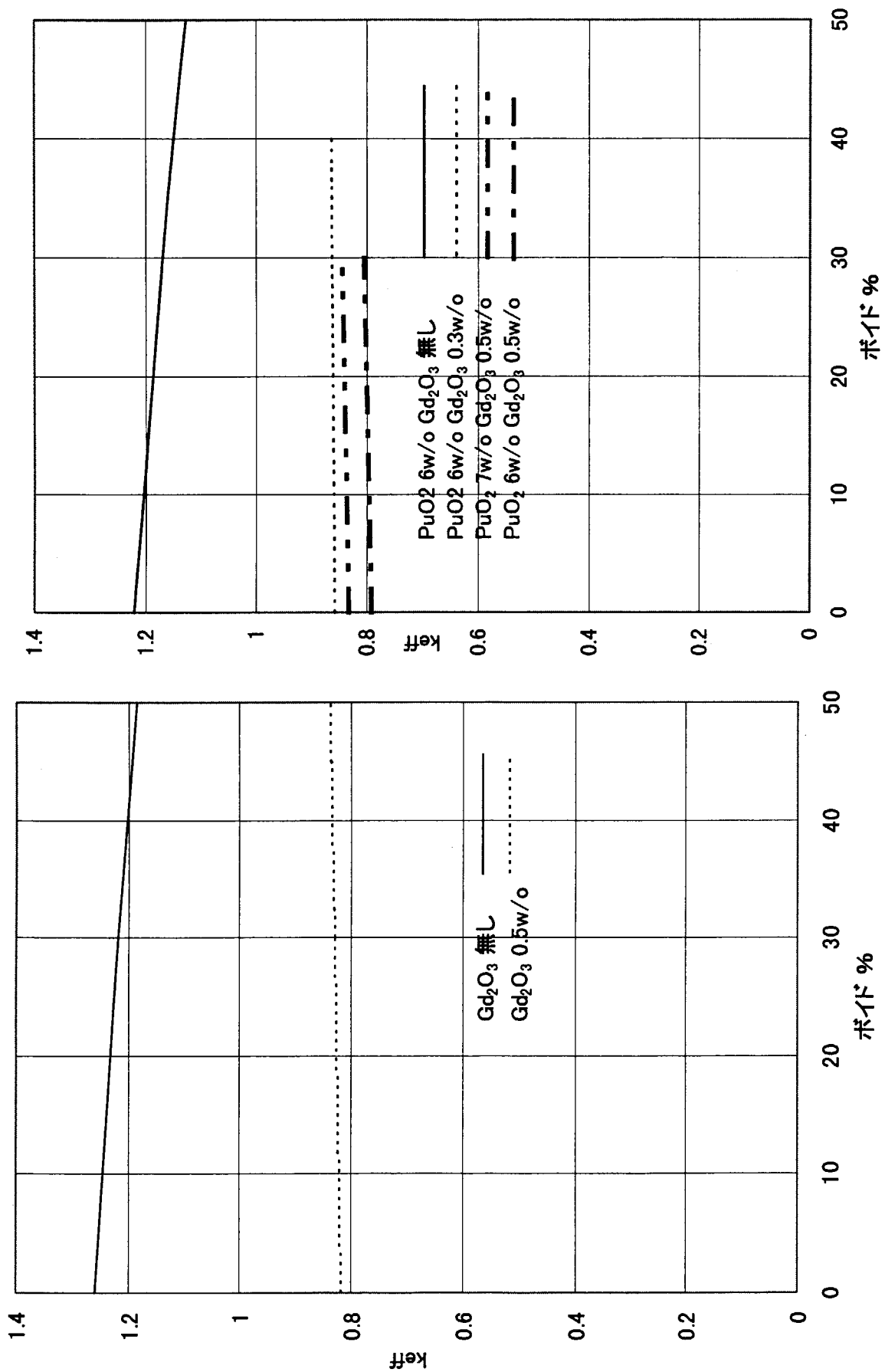


図 2.4 ボイド挙動 (水棒 9 本、 PuO_2 7w/o、0.0GWd/t)

図 2.5 ボイド挙動 (水棒無し、0.0GWd/t)

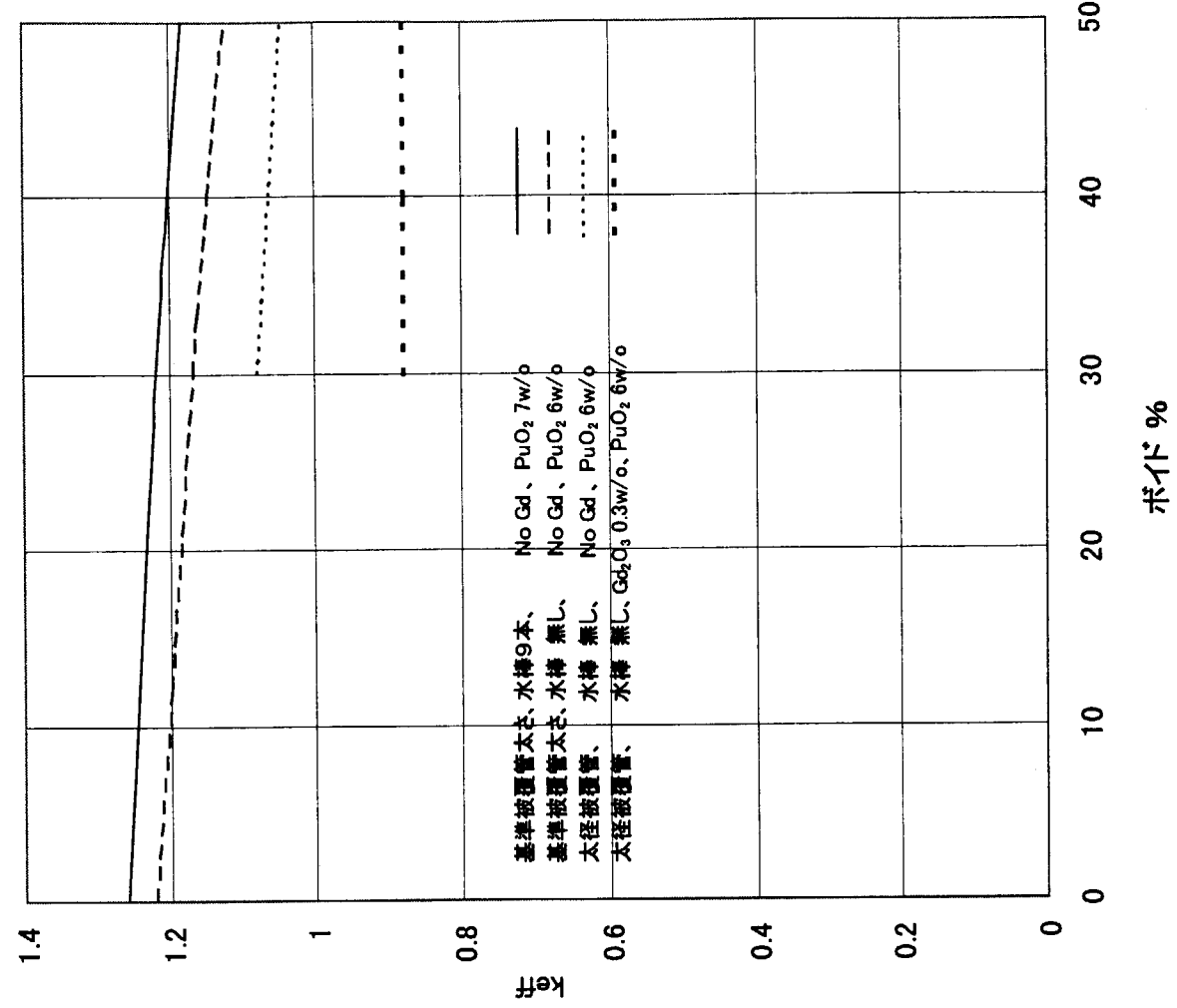


図 2.6 ボイド挙動 (水棒有無の効果、0.0GWd/t)

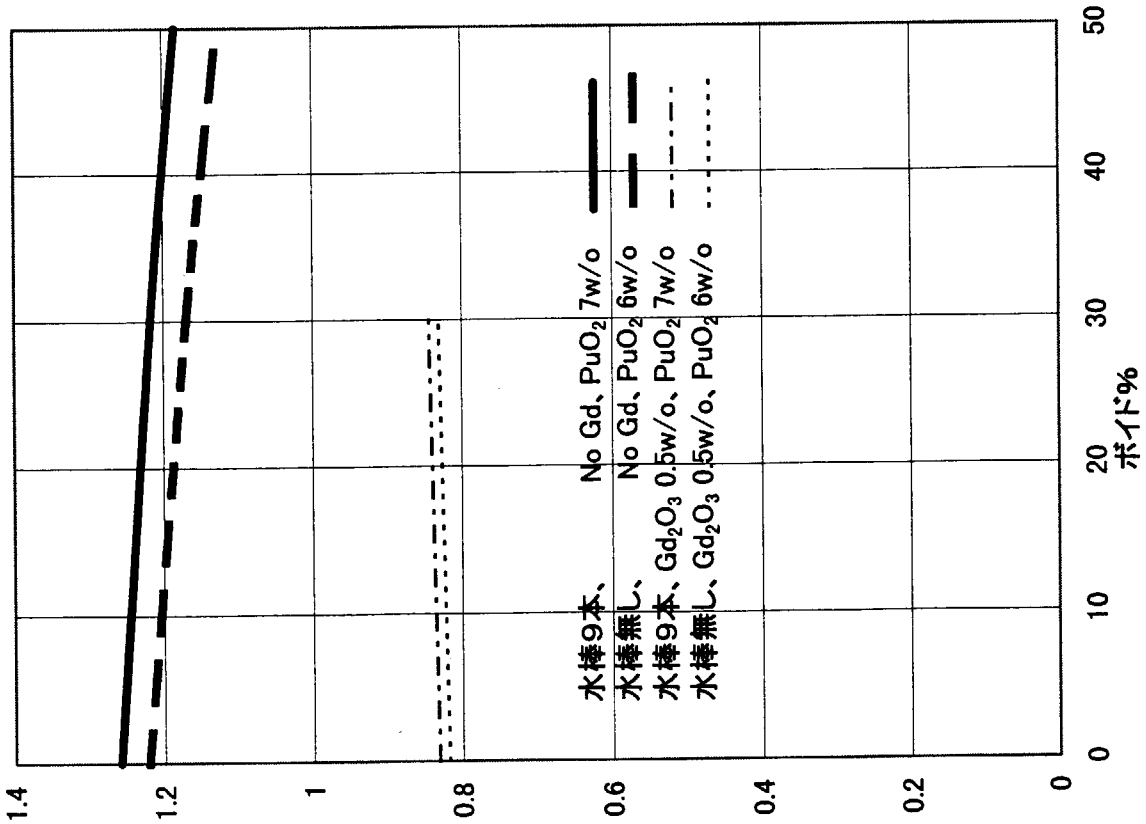


図 2.7 ボイド挙動 (被覆管太さ効果、0.0GWd/t)

3. 燃料集合体セルの核特性の検討

燃料集合体のチャンネルボックスの内側は、燃料棒が9行X9列の正方格子に配列されている。燃料棒は水の2相流で冷却されている。一方、チャンネルボックスの外側は単相の水が流れている。したがって、単ピンセルでモデル化した計算では核特性を把握するには十分ではない。そこで、SRAC 95の中のASMBURNコードで2次元XY形状の燃焼計算を実施した。

検討実施に当たって、燃料棒配列、チャンネルボックス形状寸法、出力密度（熱出力、装荷体数、高さ、炉心等価直径）、（1燃料集合体当たりの）炉心流量、炉心圧力は、表2.1に示す様にUS版ABWRとほぼ同一とした。

炉心性能は水対燃料体積比により大きく変わるので、水対燃料体積比を変えて、高減速炉心用燃料集合体、中減速炉心用燃料集合体、低減速炉心用燃料集合体の計3ケースの核特性を検討した。表3.1に仕様を示す。高減速炉心用燃料集合体の燃料棒直径は表2.1の仕様と同一であって中心の9本は水棒である。中減速炉心用燃料集合体の燃料棒直径は前ケースと同一で水棒は無しとした。低減速炉心用燃料集合体の燃料棒直径は前ケースよりも太くして水棒も無しとした。

3.1 プルトニウム富化度分布一様セルの核特性の検討

本節では、全燃料棒のプルトニウム富化度とガドリニア濃度は同一とした場合の検討を行った。ここでは、水ギャップの影響を適切に考慮した。

3.1.1 核定数の作成

図3.1の上段に示されている燃料集合体セルの燃焼計算核定数を、中段に示す計算モデルでASMBURNによって作成した。ASMBURNの均質化燃料格子燃焼計算核定数は同図の下段に示す計算モデルでSRACによって作成した。

コーナー位置の燃料棒1は半円分が水ギャップと接しているため、中性子スペクトルはかなり熱化している。水ギャップの影響を考慮するために同図下段に示すモデルで水ギャップに接している均質化燃料格子の燃焼計算核定数を作成した。MOX燃料棒の被覆管に40%ポイドの水が接している。その外側を水ギャップを模擬した0%ポイド、厚さdの水層で覆っている。dは水ギャップLの半分L/2とした。コーナー位置の均質化燃料格子1の核定数はMOX、被覆管そして40%ポイドの水を均質化したものである。0%ポイドの水ギャップの水は含めない。コーナー位置の隣の燃料棒2の核定数は、1と同様にして作成した。ただし、dはL/4とした。コーナー位置の隣の隣の燃料棒3の核定数も、同様にして作成した。ただし、dはL/8とした。3に隣接した燃料棒4と中央部の水棒の回りの燃料棒4は、燃料棒3と同じ核定数で代替した。

その他の燃料集合体中央部に位置する燃料棒セルの核定数は、燃料棒とその外側に 40%ポイドの水が接しているとした S R A C コードの「同心円分割による正方格子モデル」で格子燃焼計算を実施して作成した。

水ギャップの水、水棒とチャンネルボックスの各核定数は、S R A C コードの「円筒モデル」を使って作成した。チャンネルボックス内の組成は、MOX、被覆管そして 40%ポイドの水の体積比とした。その外側は実厚さのチャンネルボックスとした。更にその外側は、水ギャップの半分の厚さ $L/2$ の 0%ポイドの水とした。

3.1.2 計算結果及び検討

図 3.2 に燃料棒直径 1.12 cm、水棒 9 本の場合の PuO_2 富化度分布および Gd_2O_3 濃度分布（最上段）並びに計算で得られた出力分布（中段および下段）を示す。

出力分布において、水棒 W に隣接している燃料棒の出力を太字の斜体で示したものは、計算時間節約のため出力計算領域を 1 領域と設定したため同一の数値になっている。また、4 個所のコーナー部の出力が、本来対称であるにも関わらず同一の数値になっていないのは、制御棒側の水ギャップのメッシュの切り方を制御棒が入ることを前提として細かくし、一方、反対側の水ギャップは滑らかなので計算時間を節約するためにメッシュの切り方を粗くしたためである。しかし、図に示されている様に、このメッシュの切り方による影響は微少であり、以下の議論において問題とならない程度である。

図 3.2 の中段に示した燃焼度 $E=0GWd/t$ での出力分布を見ると、コーナー部燃料の出力は約 1.49 と飛びぬけて高くなっている。水ギャップの影響を最も強く受けている。 Gd_2O_3 濃度は 0.8 w/o と比較的薄いので熱中性子を十分吸収しきれず PuO_2 との核分裂が最も多くなるためである。出力ピークを下げるために Gd_2O_3 濃度を濃くすると、 k_{∞} が小さくなりすぎて炉心が臨界に達しなかったり、運転サイクル末期に Gd_2O_3 が燃え残って反応度ロスになる恐れが生じる。特に、中心部に位置する燃料で燃え残る。

図 3.2 の下段に示した $E=10GWd/t$ でのコーナー部燃料の出力は約 1.65 と更に高くなる。これは、コーナー部の初期出力が高く、 Gd_2O_3 が早く消耗するためである。一方、水ギャップにも水棒にも隣接していない燃料棒の出力は低く 0.7 程度である。これは、水ギャップから離れているため熱中性子不足により Gd_2O_3 の消耗が少なく、燃焼が進んでも熱中性子を吸収する能力を残して PuO_2 の核分裂が抑制されるからである。

上記のことから、出力分布を平坦化するために PuO_2 富化度と Gd_2O_3 濃度に分布をつける必要のあることが明らかになった。

3.2 プルトニウム富化度分布付きセルの核特性の検討

図 3.3 に、 PuO_2 富化度と Gd_2O_3 濃度に分布をつけた燃料集合体セルに対する結果を示す。分布の付け方は、出力分布が出来るだけ平坦で、かつ 4 バッチ燃料交換で 100GWd/t

達成が可能な k_{∞} になるようにトライアンドエラーで決定した。燃焼度 $E=0\text{GWd/t}$ でのピーク出力は 1.14 で水ギャップに面したコーナーから 3 番目の燃料棒である。コーナー部の燃料棒は、 PuO_2 富化度を 7 w/o と極端に低くし Gd_2O_3 濃度は 5 w/o と濃くしたことにより出力ピークは生じていない。 $E=30\text{GWd/t}$ になると出力ピークは約 1.22 となり位置はコーナーの次の燃料棒に移っている。

図 3.4 は、図 3.3 に示す場合から水棒を無くしてその代わりに実燃料とした中減速炉心用燃料集合体のケースである。中心部の燃料棒には Gd_2O_3 を添加しなかった。中心部から水棒がなくなったため中心部の中性子スペクトルは硬くなっており、 Gd_2O_3 を添加してもその効果が低いためである。また、燃料集合体中心部の出力が低くなり過ぎることにより、相対的に水ギャップに隣接した燃料棒に大きな出力ピークが生じるのを抑制するためである。中心部の燃料棒の PuO_2 富化度は、前のケースの 14 w/o から 19 w/o に高めている。水棒がなくなったことによる熱中性子不足から出力が低下するのを、核分裂性物質の増加により補っている。その他の位置の燃料棒の富化度も調整しているが、燃料集合体平均の富化度は 2.3% 上昇している。しかし、燃焼度が同じであれば実燃料が多いほど燃焼日数は増加するためメリットがあると考えられる。

図 3.5 は、燃焼日数を更に増やすために図 3.4 での構成を基本として燃料棒直径だけを 0.7mm 太くした低減速炉心用燃料集合体のケースである。冷却材流路が減少して燃料集合体中心部の熱中性子が減少するから、中心部の出力低下を補うためにその PuO_2 富化度を更に 1% 増加させた。したがって、前ケースで水ギャップ側に生じていた出力ピーク 1.294 は、本ケースでもほぼ同じ 1.286 になっている。

図 3.6 は、参考のために、 PuO_2 富化度分布は図 3.5 の場合と同じで燃料棒直径を更に太くした場合である。減速材が極端に減少するため中性子再成率 η が増加して燃料集合体中心部の燃料棒出力は増加に転じる。その結果、水ギャップ側に生じていた出力ピーク 1.286 は 2% 程下がって 1.254 になっている。ボイド係数が正になることと除熱効果減少に大きな問題が生じなければ望ましい燃料集合体である。高転換炉の観点から、今後検討する価値のあるケースであろう。

図 3.3~3.5 に示した 3 ケースの燃料集合体の k_{∞} の燃焼度挙動を図 3.7 にまとめた。 PuO_2 富化度分布及び Gd_2O_3 濃度分布を適切に決定して目標とする炉心を達成したため、ほぼ同じような挙動を示している。3 ケース共、初期 k_{∞} は原子炉停止余裕の観点から取り出し燃焼度での値とほぼ同じにしている。水棒無しの場合、 Gd_2O_3 が燃え尽きて k_{∞} がピークになるのは 25GWd/t 付近である。取り出し平均 100GWd/t で 4 バッチ交換の場合の運転サイクル期間 25GWd/t の時点と合うように Gd_2O_3 濃度分布を調節した。水棒が 9 本のケースではピークは 20GWd/t に出ている。 Gd_2O_3 濃度が薄めであったために早く燃え尽きたためである。

次に、BWRにとって重要なボイド係数について検討した。図 3.8 は履歴ボイド率が 40% で瞬時ボイド率を 70%にした場合の反応度変化である。燃焼初期において、ボイドが多く

なった時に k_{∞} が大きくなるのは、おおよそ、次の理由だと考えられる。燃焼初期では、 Gd_2O_3 が十分あるため、熱中性子の寄与は少なく共鳴・高速中性子の反応が主たるものになる。そこで、富化度が低く ^{238}U が多い場合は、ボイドが多くなればその共鳴吸収により k_{∞} は小さくなるが、本検討のように富化度が高い場合には、ボイドが多くなれば中性子スペクトルがはるかに硬くなり、 η が大きい高速中性子の寄与が大きくなって k_{∞} が大きくなる。従来の LWR 燃料の濃縮度は低いため、ボイドが多くなれば共鳴吸収により k_{∞} は小さくなる。本検討の様に高燃焼度を目標とした燃料集合体の場合には、Pu の富化度が高く ^{239}Pu の量が多いため、ボイドが増えて中性子スペクトルが硬くなれば、 η が大きい高速中性子の寄与が大きくなって k_{∞} が大きくなる。

一方、燃焼が進むと、 Gd_2O_3 は焼損しているため熱中性子の寄与が大きくなる。それと同時に核分裂性物質の量も少なくなっているから、ボイドが増えると ^{238}U による共鳴吸収の増加と、熱中性子減少による熱領域の核分裂反応の低下とにより k_{∞} は小さくなってボイド係数は負になる。

尚、図には、被覆管直径 d が 1.359 と極端に太く Pu の量が多いケースも参考として示す。

3.3 まとめ

100GWd/t 時での上記の燃料集合体からの取得熱量等の比較一覧を表 3.2 に示す。減速材が少ない比較的減速の燃料集合体は、Pu の使用量は多くなるものの、長期間燃焼により総発熱量は多くなる。Pu が余っている場合には、加工費や使用済み燃料貯蔵費の観点からは有利な方向である。

表中、ピン直径 1.359cm の例が最も燃料の量が多いが、燃焼の全過程でボイド係数が正であるため除外し、ピン直径 1.19cm の例がこの中では最も有利であると考えられる。このことからこの燃料集合体セルの形状を、更に炉心計算を行って検討を進めるケースとして選定し、図 3.9 に分かり易く示した。

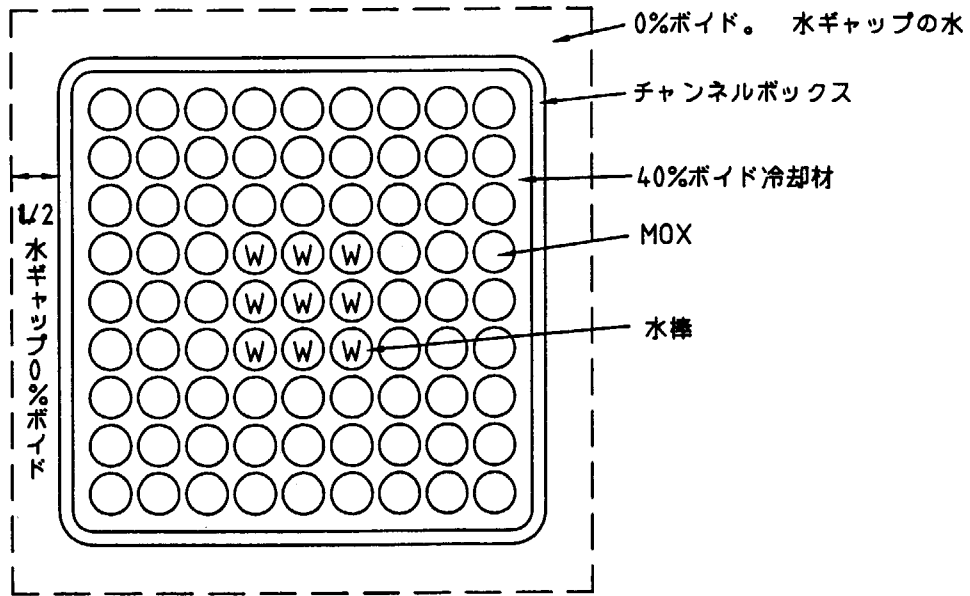
図 3.10 に履歴ボイド率が 0%、40%、70%での k_{∞} を示した。従来の BWR 燃料集合体セルの k_{∞} はボイド依存性がかなり大きく、その炉心はボイドの少ない炉心下部に大きな出力ピークが生じる傾向を持っている。それに比べて、本検討の低減速の燃料集合体セルの k_{∞} はボイド依存性がかなり小さいため、その炉心の出力ピークは小さくなると想定され、高さ方向の出力平坦化が図れると考えられる。

表3.1 フルMOX BWR 炉心・燃料基本仕様

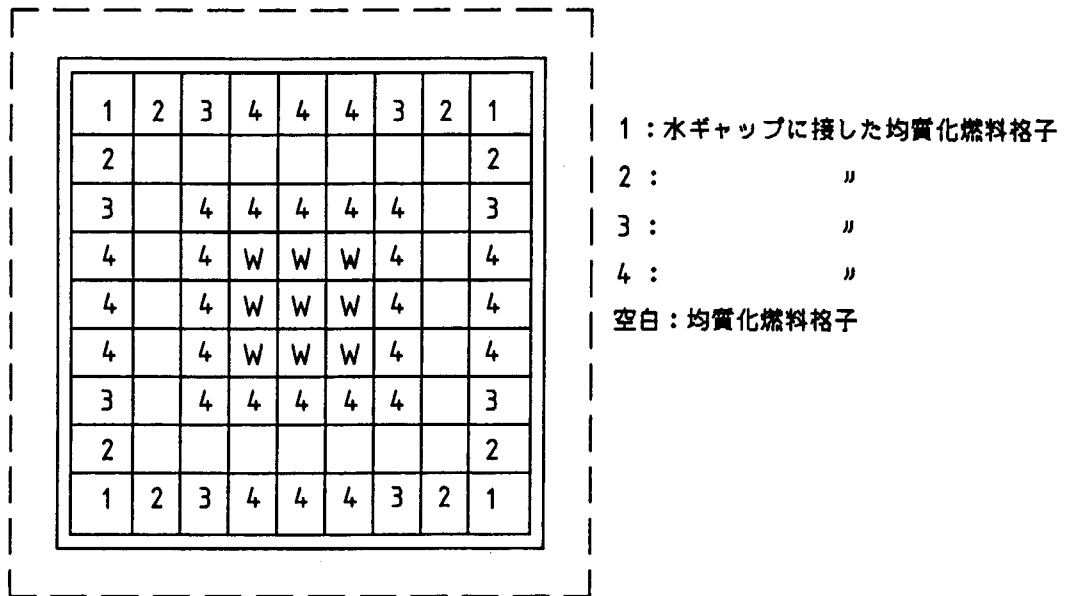
	高減速	中減速	低減速
熱出力(MW)	3926	同左	同左
冷却材全流量(t/h)	52000	同左	同左
原子炉圧力(Mpa)	7.2	同左	同左
蒸気温度(°C)	287	同左	同左
炉心有効高さ(m)	3.71	同左	同左
炉心等価直径(m)	5.16	同左	同左
炉心等価体積(m ³)	77.5826	同左	同左
燃料集合体数	872	同左	同左
燃料棒本数	72	81	81
水棒本数	9	0	0
制御棒本数	205	同左	同左
出力密度(kw/l)	50.6	同左	同左
燃料集合体線出力密度(MW _t /cm)	0.012136	同左	同左
燃料棒線出力密度(MW _t /cm)	0.0001686	0.0001686x72/81	同左
燃料棒被覆管外直径(cm)	1.12	同左	1.19
被覆管厚さ(cm)	0.07	同左	同左
ペレット直径(cm)	0.96	同左	1.03
ペレットと被覆管とのギャップ(cm)	0.01	同左	同左
燃料単位セル1辺長さ(cm)	15.48	同左	同左
チャンネルボックス1辺長さ(cm)	13.9	同左	同左
チャンネルボックス厚さ(cm)	0.25	同左	同左
水ギャップ半分幅(cm)	0.79	同左	同左
ペレット密度(g/cm ³)	10.45	同左	同左

表3.2 燃料集合体の減速特性による100GWd/tでの状態

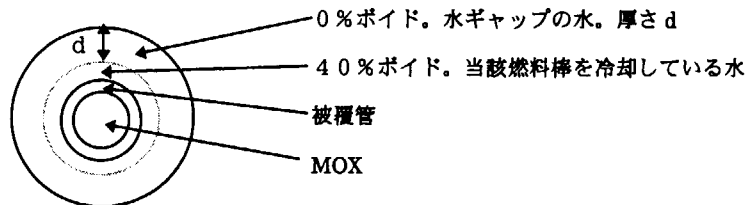
減速特性	燃料棒本数	被覆管直径(cm)	100GWd/tでの 日数比	100GWd/tでの 取得熱量比	平均重金属密 度比	平均核分裂性物 質比
高減速	72(水棒9本)	1.12	1(4018d)	1(49MWd)	1(1.96g/cm ³)	1(0.18g/cm ³)
中減速	81	1.12	1.13	1.13	1.13	1.3
低減速	81	1.19	1.3	1.3	1.3	1.56
超低減速	81	1.395	1.76	1.76	1.76	2.12



燃料集合体セル断面図



ASMBURNによる燃料集合体セル燃焼計算モデル



SRACによるASMBURN均質化燃料格子 1~4 燃焼計算モデル

図 3.1 燃料集合体セル計算モデル

									PuO ₂ 富化度/ Gd ₂ O ₃ 濃度
			W	W	W				
			W	W	W				
			W	W	W				

								1.494	
							0.802	1.147	
						0.879	0.769	1.078	
			W	W	W	1.073	0.785	1.058	
			W	W	W	1.157	0.796	1.054	E=0GWd/t
			W	W	W	1.073	0.785	1.057	
		1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	0.769	1.077	
	0.802	0.769	0.785	0.796	0.785	0.771	0.802	1.147	
1.492	1.148	1.078	1.058	1.054	1.058	1.079	1.147	1.493	

								1.649	
							0.723	1.215	
						0.851	0.684	1.108	
			W	W	W	1.104	0.701	1.077	
			W	W	W	1.211	0.713	1.077	
			W	W	W	1.104	0.701	1.077	E=10GWd/t
		1.046	1.046	1.046	1.046	1.046	0.684	1.108	
	0.723	0.683	0.701	0.712	0.701	0.685	0.723	1.214	
1.649	1.216	1.109	1.077	1.071	1.078	1.111	1.214	1.646	

図3.2 PuO₂富化度分布とGd₂O₃濃度分布が一様の場合の出力分布
(燃料棒直径1.12cm、水棒9本)

G3	G2						G2	G3	PuO ₂ 富化度/ Gd ₂ O ₃ 濃度
G2								G2	
									空白=14/0.8
			W	W	W				G2=12/0.8
			W	W	W				G3=7/5
			W	W	W				
G2								G2	
G3	G2						G2	G3	

									0.739
								0.851	1.111
						0.93	0.815		1.114
			W	W	W	1.136	0.831		1.118
			W	W	W	1.225	0.842		1.114
			W	W	W	1.136	0.831		1.118
		1.087	1.087	1.087	1.087	1.087	0.814		1.139
	0.851	0.814	0.831	0.842	0.831	0.815	0.851		1.109
0.739	1.111	1.141	1.118	1.114	1.119	1.142	1.109		0.739

E=0GWd/t

									0.981
								0.878	1.219
						0.861	0.787		1.158
			W	W	W	1.055	0.798		1.103
			W	W	W	1.135	0.812		1.091
			W	W	W	1.055	0.798		1.103
		1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	0.788		1.158
	0.878	0.786	0.797	0.811	0.797	0.789	0.878		1.218
0.978	1.221	1.161	1.103	1.091	1.104	1.161	1.218		0.979

E=30GWd/t

図3.3 PuO₂富化度分布、Gd₂O₃濃度分布及び出力分布
(燃料棒直径1.12cm、水棒9本)

G4	G3	G2	G1	G1	G1	G2	G3	G4	PuO ₂ 富化度/ Gd ₂ O ₃ 濃度 空白=19/- G1=12/1 G2=11/1 G3=11/6 G4=7/8
G3	G1						G1	G3	
G2								G2	
G1								G1	
G1								G1	
G1								G1	
G2								G2	
G3	G1						G1	G3	
G4	G3	G2	G1	G1	G1	G2	G3	G4	

								0.697	
								0.841	0.822
						1.038	1.138	1.026	
					0.997	0.997	1.112	1.061	
				0.981	0.981	0.981	1.105	1.054	E=0GWd/t
			0.982	0.982	0.982	0.982	1.112	1.061	
		1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.137	1.026	
	0.841	1.135	1.112	1.105	1.112	1.138	0.841	0.822	
0.697	0.823	1.026	1.061	1.054	1.061	1.027	0.822	0.697	

								1.088	
								0.944	1.293
						0.875	1.031	1.131	
					0.812	0.812	0.964	1.123	
				0.788	0.788	0.788	0.964	1.123	
			0.793	0.793	0.793	0.793	0.964	1.122	E=30GWd/t
		0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	1.031	1.129	
	0.943	1.026	0.964	0.949	0.965	1.031	0.943	1.291	
1.085	1.294	1.131	1.123	1.103	1.124	1.132	1.291	1.086	

図3.4 PuO₂富化度分布、Gd₂O₃濃度分布及び出力分布
(燃料棒直径1.12cm、水棒無し)

G4	G3	G2	G1	G1	G1	G2	G3	G4	PuO ₂ 富化度/ Gd ₂ O ₃ 濃度 空白=20/- G1=12/1 G2=11/1 G3=11/6 G4=7/8
G3	G1						G1	G3	
G2								G2	
G1								G1	
G1								G1	
G1								G1	
G2								G2	
G3	G1						G1	G3	
G4	G3	G2	G1	G1	G1	G2	G3	G4	

								0.733	E=0GWd/t
							0.842	0.853	
						1.021	1.114	1.045	
					<i>0.983</i>	<i>0.983</i>	1.091	1.082	
				<i>0.967</i>	<i>0.967</i>	<i>0.967</i>	1.085	1.075	
			<i>0.969</i>	<i>0.969</i>	<i>0.969</i>	<i>0.969</i>	1.091	1.081	
		<i>1.001</i>	<i>1.001</i>	<i>1.001</i>	<i>1.001</i>	<i>1.001</i>	1.113	1.0444	
	0.842	1.112	1.091	1.085	1.091	1.114	0.842	0.853	
0.732	0.854	1.045	1.081	1.075	1.082	1.046	0.853	0.733	

								1.113	E=30GWd/t
							0.927	1.285	
						0.867	1.011	1.147	
					<i>0.811</i>	<i>0.811</i>	0.952	1.141	
				<i>0.788</i>	<i>0.788</i>	<i>0.788</i>	0.939	1.122	
			<i>0.793</i>	<i>0.793</i>	<i>0.793</i>	<i>0.793</i>	0.952	1.141	
		<i>0.836</i>	<i>0.836</i>	<i>0.836</i>	<i>0.836</i>	<i>0.836</i>	1.009	1.146	
	0.827	1.007	0.852	0.939	0.953	1.011	0.927	1.283	
1.111	1.286	1.148	1.141	1.122	1.142	1.149	1.283	1.111	

図3.5 PuO₂富化度分布、Gd₂O₃濃度分布及び出力分布
(燃料棒直径1.19cm、水棒無し)

G4	G3	G2	G1	G1	G1	G2	G3	G4	PuO ₂ 富化度/ Gd ₂ O ₃ 濃度 空白=20/- G1=12/1 G2=11/1 G3=11/6 G4=7/8
G3	G1						G1	G3	
G2								G2	
G1								G1	
G1								G1	
G1								G1	
G2								G2	
G3	G1						G1	G3	
G4	G3	G2	G1	G1	G1	G2	G3	G4	

								0.814	E=0GWd/t
							0.838	0.921	
						0.985	1.062	1.084	
					0.955	0.955	1.045	1.124	
				0.941	0.941	0.941	1.041	1.118	
			0.944	0.944	0.944	0.944	1.045	1.124	
		0.969	0.969	0.969	0.969	0.969	1.062	1.083	
	0.838	1.061	1.045	1.041	1.045	1.062	0.838	0.921	
0.814	0.921	1.084	1.124	1.117	1.125	1.085	0.919	0.814	

								1.179	E=30GWd/t
							0.879	1.253	
						0.855	0.966	1.181	
					0.815	0.815	0.927	1.181	
				0.799	0.799	0.799	0.918	1.162	
			0.802	0.802	0.802	0.802	0.927	1.181	
		0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.966	1.179	
	0.879	0.964	0.927	0.918	0.927	0.967	0.879	1.252	
1.177	1.254	1.181	1.181	1.162	1.181	1.182	1.252	1.177	

図3.6 PuO₂富化度分布、Gd₂O₃濃度分布及び出力分布
(燃料棒直径1.359cm、水棒無し)

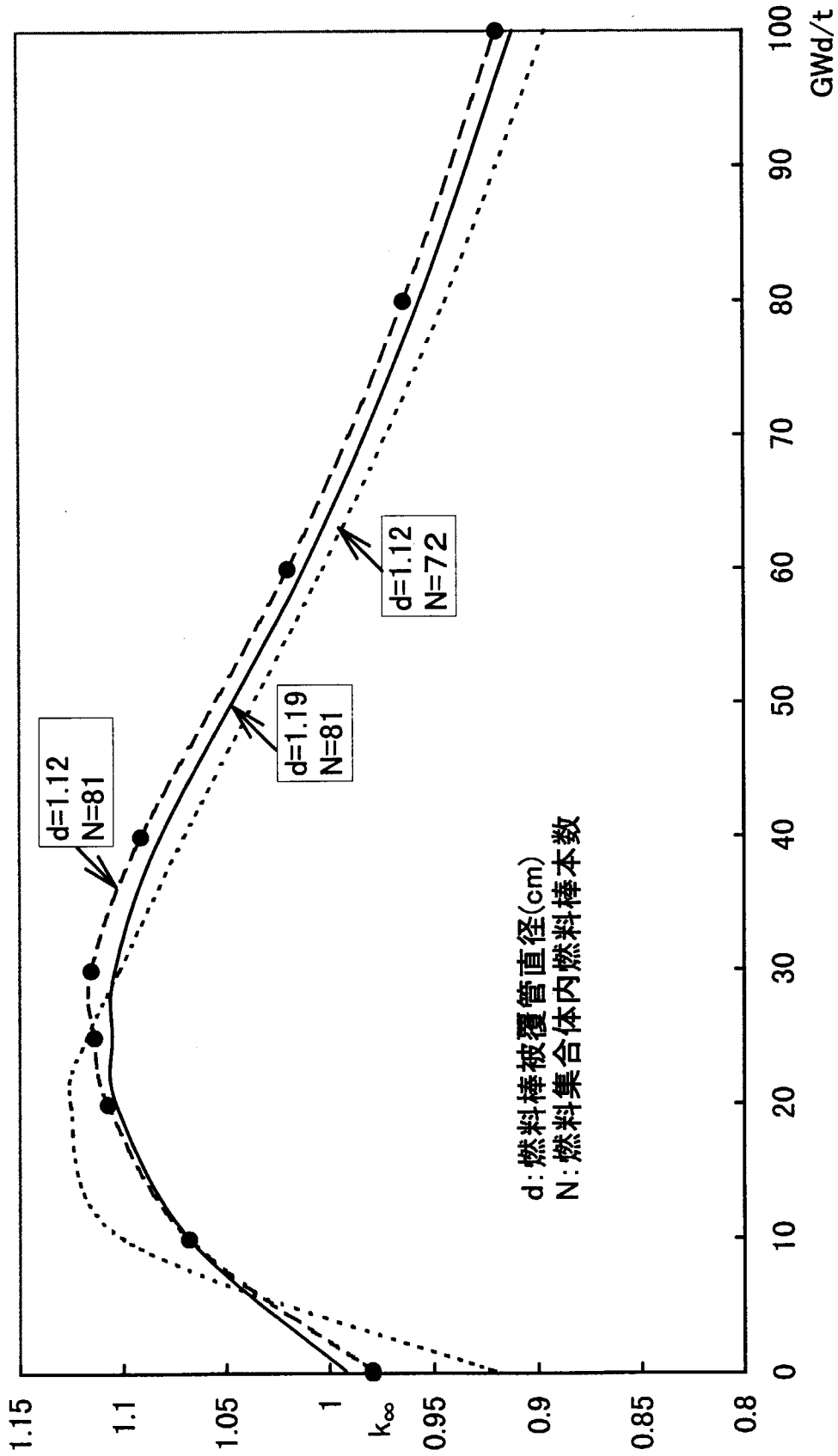


図3.7 燃料集合体セル無限増倍係数 k_{∞} (履歴ポイド率40%)

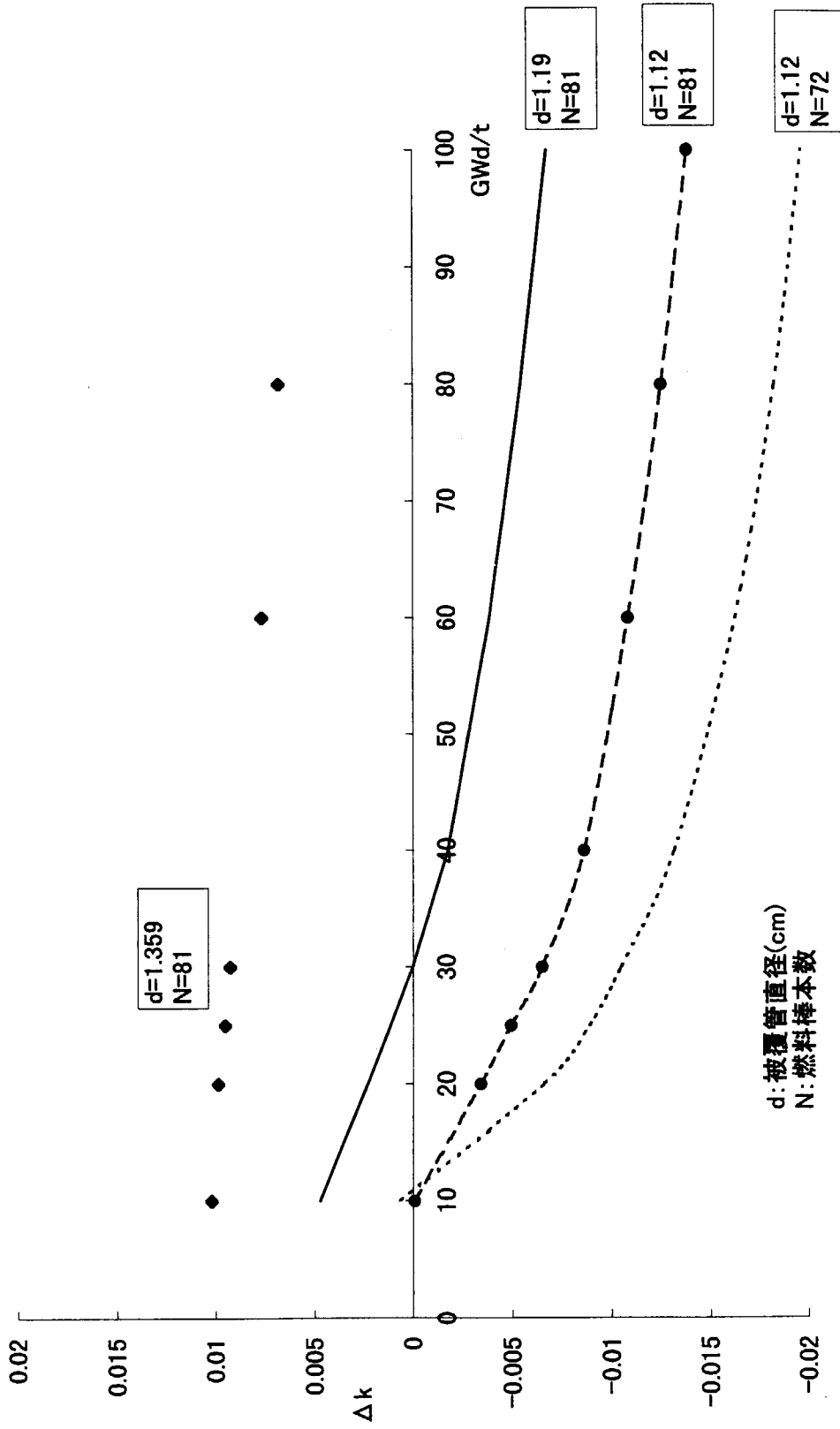
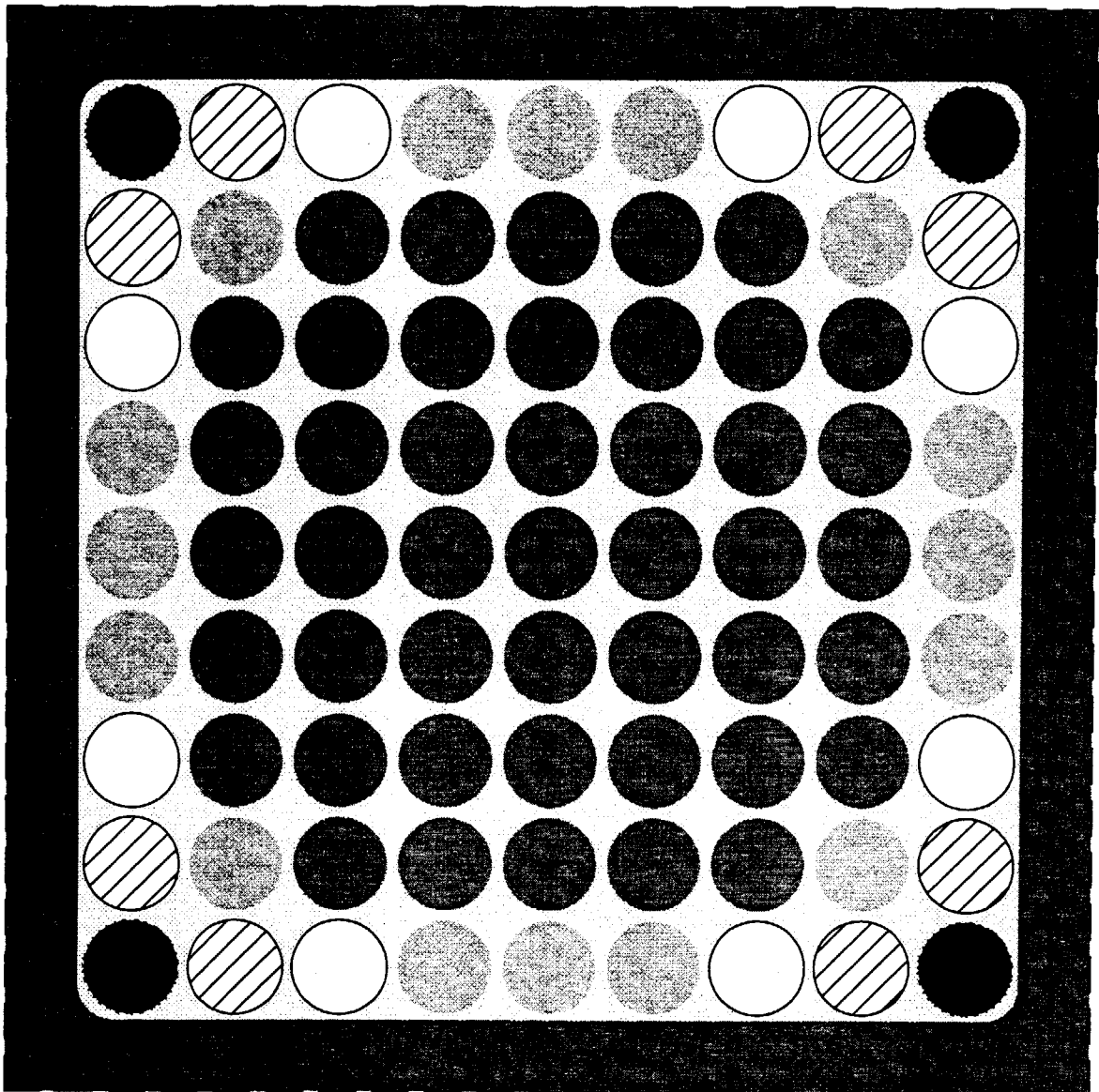


図3.8 履歴ポイド率40%から瞬時ポイド率70%になった場合の反応度変化




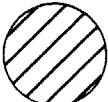
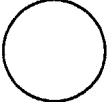


- 
 PuO_2 7w/o. Gd_2O_3 8w/o
- 
 PuO_2 11w/o. Gd_2O_3 6w/o
- 
 PuO_2 11w/o. Gd_2O_3 1w/o
- 
 PuO_2 12w/o. Gd_2O_3 1w/o
- 
 PuO_2 20w/o.

図 3.9 3次元炉心燃焼計算用燃料集合体 PuO_2 富化度分布及び Gd_2O_3 濃度分布

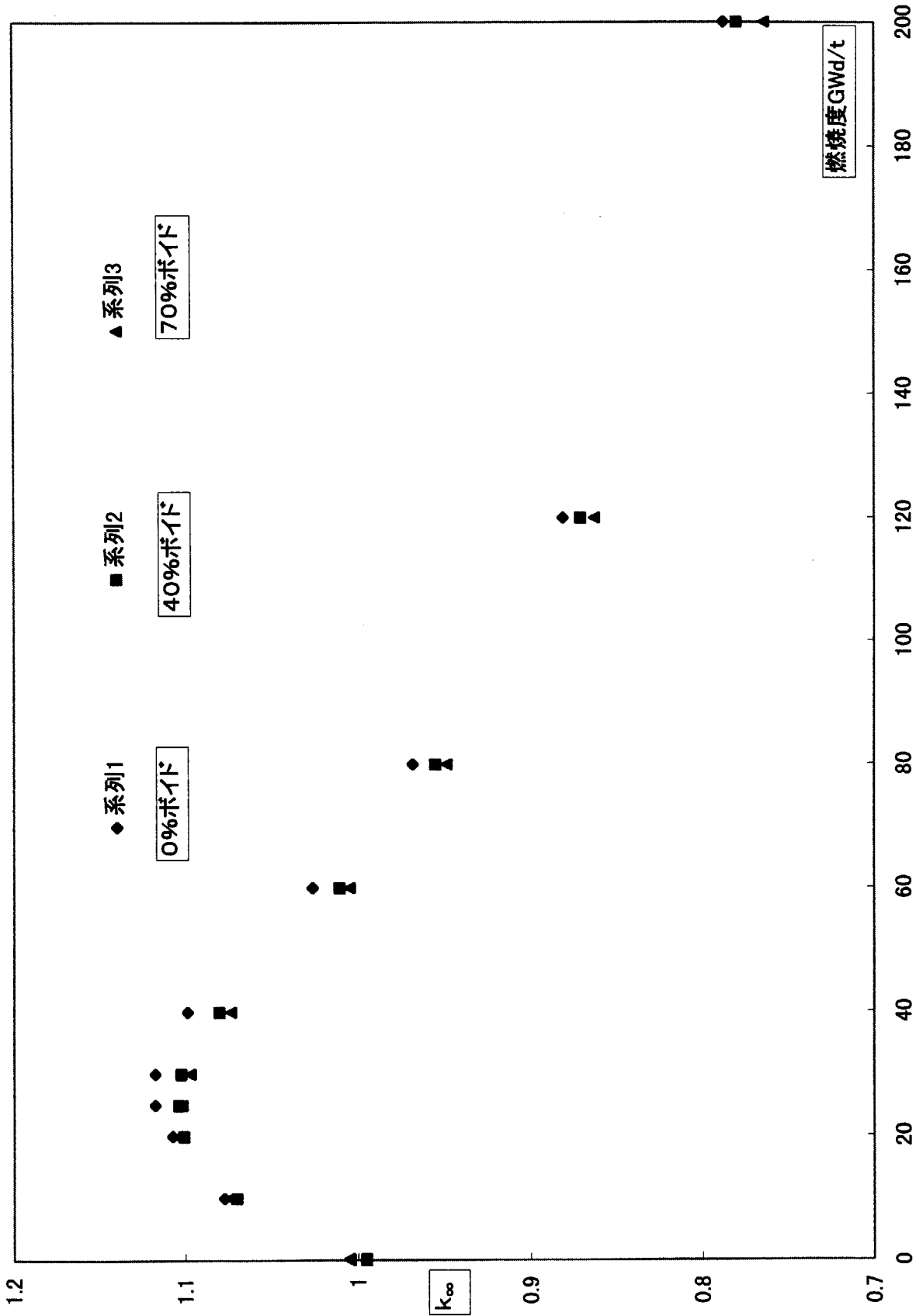


図3.10 燃料集合体反応度 k_{∞} の履歴ボイド率(被覆管直径1.19cm、水棒無し)

4. 炉心核特性の検討

燃料集合体セルの核定数が決まったので、3次元XYZ形状で主要な炉心核特性を検討した。図4.1にSRACシリーズによる計算手順の概要を示す。平衡炉心での燃料集合体装荷パターンは図4.2に示すようないわゆる「ノーシャッフル装荷パターン」とした。すなわち、取り出した燃料集合体の位置に新燃料を装荷する。こうすると、1制御棒の周りの4体の燃料集合体はサイクルの異なる4種で構成されることになり、全炉心で見ると平均化されているので出力ピーキングが低く、炉停止余裕も大きい。なお、高さ方向ボイド分布は、核熱カップリング計算コードであれば自動的に決定されるが、本検討では3次元拡散燃焼コードCOREBNで計算可能なように高さ方向ボイド分布を炉心下部1/6を0%、炉心中央2/3を40%、炉心上部1/6を70%に固定した。なお、炉心上方の物質は、下方の物質と同じ0%ボイドの水としている。これは、高さ方向出力分布がボイド分布によりどの程度変わるかを看しておくために敢えて上下同じ物質としたからである。したがって、上部中性子漏洩が小さ目であるから余剰反応度は若干大き目になると思われる。

図4.3は全制御棒引き抜き運転での反応度推移である。最大 k_{eff} は約1.01であるので、ガドリニア濃度を濃くするか、流量を減少させてボイドを増加させることにより中性子漏洩を増加させるか、制御棒を5本程度挿入（定格運転中BWRの制御棒1本の反応度は約0.002）するかで対応出来ると考えられる。燃焼末期において反応度低下が比較的ゆるやかであるので5%程度の出力低減により燃焼期間を延長出来る利点がある。

図4.4は最大線出力密度の推移である。400W/cm近辺で推移している。BWRの8X8燃料集合体の最大線出力密度上限44kW/m(440W/cm)の約1割減である。しかし、ガドリニアの高さ方向濃度分布や ^{235}U 濃縮度分布により出力平坦化をしている従来のBWRでの値33kW/mに比べると高い。もっとも、核熱カップリングによりボイド分布を実機に即して平滑に増加させれば400W/cm以下になるものと考えられる。図4.5は最大線出力密度が現れる燃料集合体の高さ方向出力分布である。平衡初期では1サイクル燃焼した燃料集合体にピークがでている。初装荷燃料にはガドリニアが十分含まれているから k_{eff} は低くピークが生じない。平衡中期以降は新燃料集合体にピークがでている。高さ方向中央部では、上下端に比べて出力が高いため、燃焼が早く進みガドリニアの焼損が早く、新燃料集合体にピークがでる。

燃料棒81本の集合体の平均線出力密度は149.8W/cmであり、局所出力ピーキング1.3（燃焼中一定と仮定）、バンドル出力ピーキング1.5（半径出力ピーキングと燃焼度ミスマッチ込み）、高さ方向出力ピーキング1.35の結果、最大線出力密度は約400W/cmになった。

XYZ炉心計算. COREBN

水ギャップ付き燃料集合体セル
核定数計算. ASMBURN

燃料棒核定数計算. SRAC

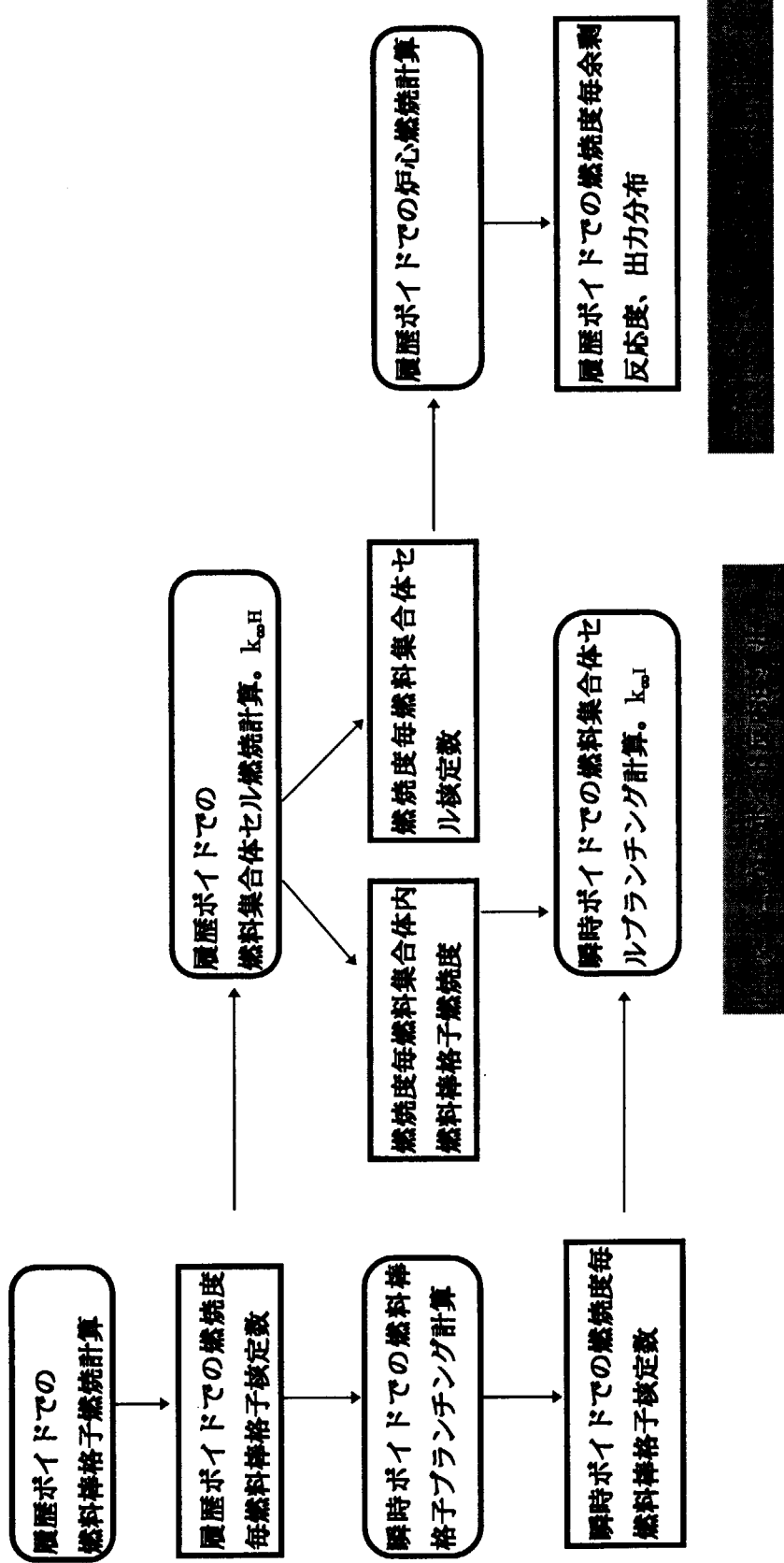
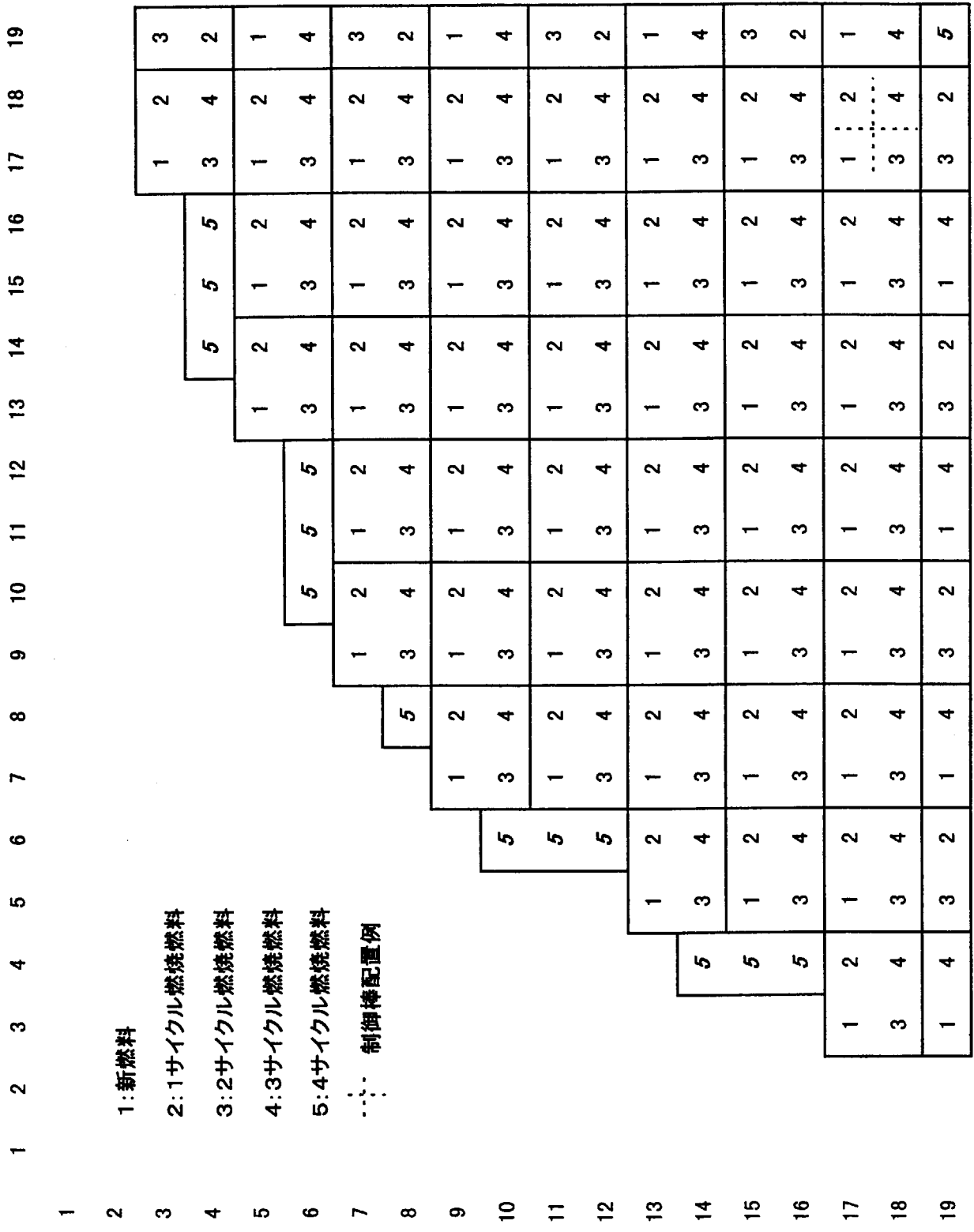


図 4.1 BWR核設計計算手法(SRACシリーズ利用)



中央

図4.2 3次元拡散燃焼計算用燃料装荷パターン(1/4鏡面対象)

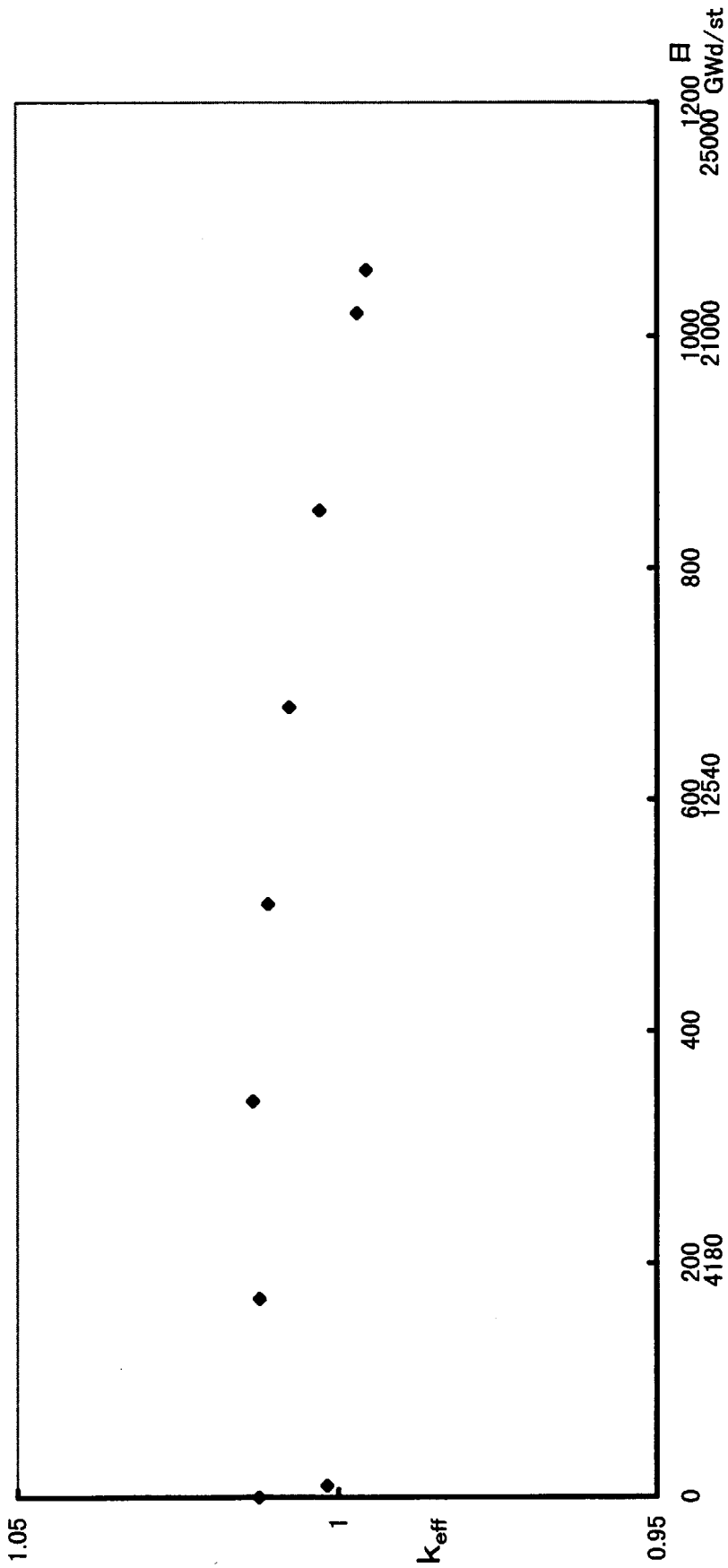


図4.3 平衡サイクル時反応度推移(燃焼度単位の中のstはBWRで通常用いられているショートトン)

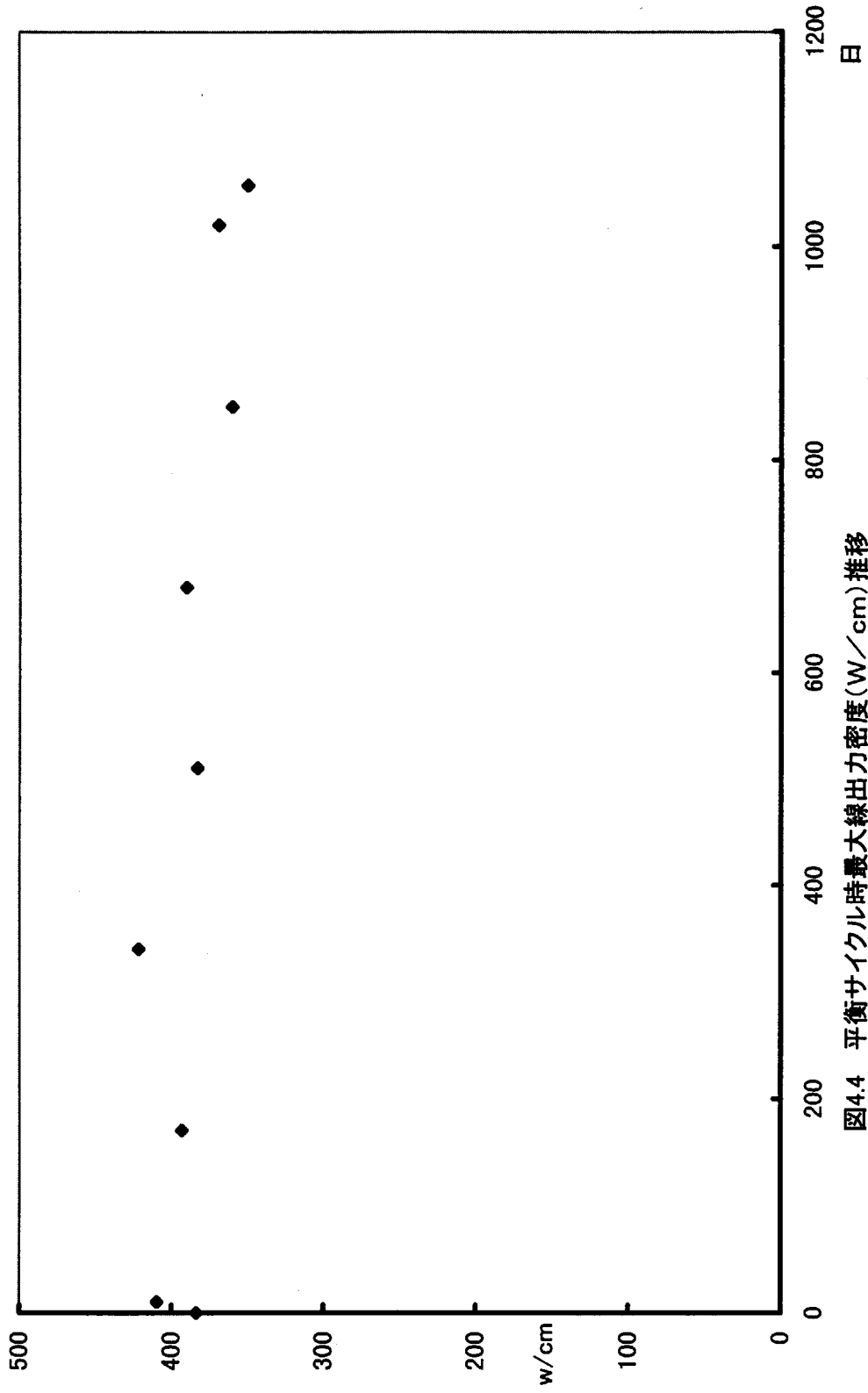


図4.4 平衡サイクル時最大線出力密度(W/cm)推移

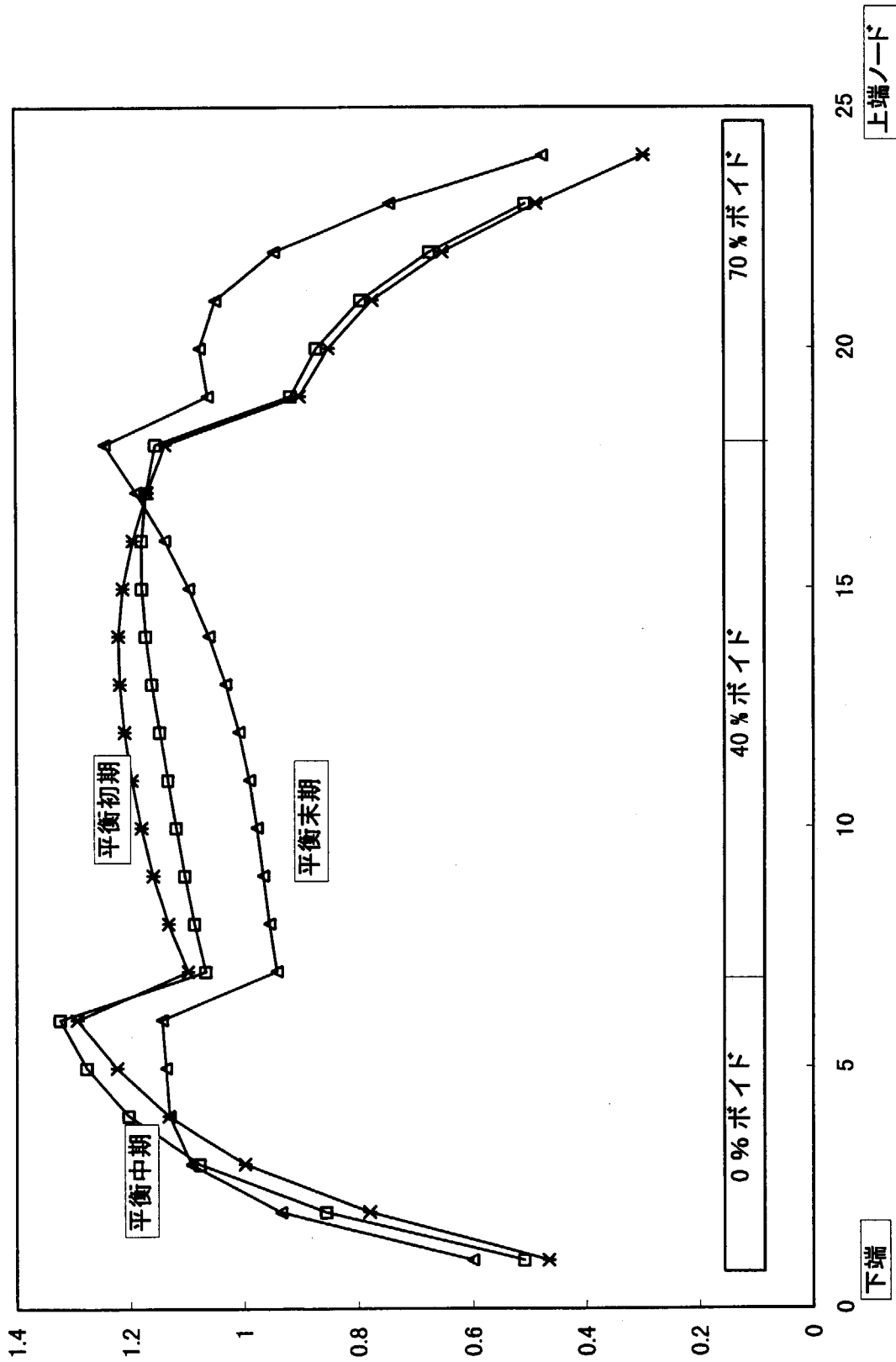


図4.5 平衡サイクル時最大線出力密度が出た燃料の高さ方向出力分布

5. BWR設計用コードシステムによる核特性の検討

参考のために BWR 設計用コードシステムによる比較検討を行った。炉心燃料仕様は S R A Cコード計算で使ったものと同じである。

図 5.1 は燃料集合体セルの無限増倍係数 k_{∞} である。水棒無しの 2 ケース共、 k_{∞} は図 3.7 に示した ASMBURN 計算と同様に 25GWd/t の近傍で最大となっている。水棒有り (9 本) のケースでは、20GWd/t よりも小さい燃焼度で最大となっている。0GWd/t での k_{∞} は ASMBURN 計算と同様に、水棒有りのケースが最も低く約 0.92 で、水棒無しで燃料棒直径の太いケースが最も高く約 1.0 となっている。燃料が取り出される 100GWd/t での k_{∞} は、ASMBURN 計算と同様に 3 ケース共ほとんど差はなく約 0.9 となっている。

図 5.2 は水棒有りの燃料集合体内出力分布である。コーナー位置(9,1)で 0.81、隣接した位置(9,2)で 1.14 であるのに対して、S R A C計算では図 3.3 に示した様に 0.739、1.109 と低くなっている。出力ピークが出やすいコーナー近傍位置(9,1)や(9,2)の核定数作成に際して、ASMBURN 計算では燃料棒セルの回りに水ギャップの水を十分つけて、敢えて出力ピークを大きく出させようとしたが、ガドリニアによる熱中性子吸収の効果の方が大きくなって出力が下がったものと考えられる。ここの出力の違いは、一番遠い燃料棒位置での出力の違いとなって跳ね返って出ている。燃料棒位置(7,5)の出力が 1.12 であるのに対して、ASMBURN 計算では 1.225 と高くなっている。

図 5.3 は水棒無し燃料集合体内の出力分布である。水棒有りのケースと同様の差が生じている。図 5.4 は水棒無しでかつ燃料棒直径が太い燃料集合体内の出力分布である。前ケースに比べてその差は小さくなっている。減速材が少なくなっているために熱中性子束に対し高速側の中性子束が大きくなり、相対的にガドリニアの影響が小さくなったものと推定される。

図 5.5、図 5.6 及び図 5.7 にボイド反応度の燃焼変化を示す。ASMBURN 計算結果 (図 3.8) とほぼ同じ傾向を示している。燃焼が十分進んだ時点でのボイド反応度 (40%から 70%にボイドを変えたケース) は水棒有りのケースが ASMBURN 計算同様、最も大きく負になっている。

BWR 設計用コードによる 3次元核熱カップリング計算結果を表 5.1 にまとめた。平衡炉心の燃料装荷パターンは「ノーシャッフル方式」で、1/4 回転対称である。なお、燃焼方式は、出力分布と燃焼度分布とが比例する「ヘーリング分布」である (COREBN 計算での燃焼方式は、全制御棒引き抜き状態で単純運転を続けたとした場合である)。ヘーリング計算では、原則として燃焼末期 (燃焼期間中出力分布一定) での状態のみ計算結果を表示する (燃焼途中での結果を得たい時は、燃焼ステップを細かく刻んだヘーリング計算を実施する。制御棒パターンを設定する時の目標出力分布となる)。

バンドル出力ピーキングは COREBN 計算では約 1.5 であったからほぼ同じである。高さ方向出力ピーキングは COREBN 計算では約 1.35 であったが、本計算では 1.1~1.2 とか

なり低い。COREBN 計算でもポイド分布、燃料温度分布を細かく設定すればこの程度の値になると推定される。局所出力ピーキングは、COREBN 計算では 1.3 と固定させたのに対し、本計算では燃焼度依存を考慮している。

本計算における余剰反応度 k_{eff} は全制御棒が引き抜かれている平衡初期で 0.992、ヘーリング計算による平衡末期では 0.966 とかなり低い。原因の一つは、計算時間短縮のため 1/4 回転対称をもたせながら、出力ピーク低減を主目的にしたため燃料取り替えバッチ数が 4.54 となり、燃え過ぎ燃料の体数を多くし過ぎた点である。全炉心で計算すれば燃料取り替えバッチ数が 4 に近くなり、新燃料装荷体数が多くなるため、 k_{eff} は高くなるものと思われる。また、出力ピーク低減を主目的にしたヘーリング計算では半径方向外側及び上下端の燃焼を抑えたものとなる。したがって、中性子漏洩が多い燃焼パターンであるから固有値は小さくなる。全制御棒引き抜き状態で単純運転を続ける方式にすれば k_{eff} は高くなるものと思われる。

COREBN 計算では、1/4 回転対称計算オプションでは中性子束の収束が遅いため、1/4 鏡面对称計算オプションを選び、燃料取り替えバッチ数を 4.27 とした。このため、余剰反応度 k_{eff} は平衡初期で 1.0、平衡末期で 0.98 と大き目である。また、COREBN 計算では、前述の様に炉心上方の物質を下方の物質と同じ 0%ポイドの水としたため上部からの中性子漏洩が小さ目である。更に、核熱カップリングを考慮せずに炉心平均ポイド割合を本計算での約 44%に対して 40%と暫定的に設定したため、燃料集合体セルの k_{∞} からいって当然余剰反応度は高くなる。以上の点を総合すると、S R A C 計算の結果とほぼ同じと見てよいと思われる。

炉心ポイド係数は、炉心出力及び炉心流量は定格のまま、炉心入り口サブクール度を上げて炉心ポイド割合を増加させることにより計算した。小さいながらもポイド係数は負になっている。

表 5.1 BWR 設計用コードシステムによる 3次元核熱カップリング計算結果

項 目	平衡初期 (全制御棒引き抜き)	平衡末期 (ヘーリング計算)
取り替えバッチ数(ノーシャッフル)	4.54	同左
対称性	1 / 4 回転対称	同左
炉心燃焼度 (G W d / s t)	41.1	61.1
k_{eff}	0.992	0.966
炉心平均ポイド (%)	44.1	44.4
最大線出力密度 (W / c m)	344	320
バンドル出力ピーキング	1.7	1.5
高さ方向出力ピーキング	1.2	1.1
局所出力ピーキング	1.13	1.3
ポイド係数 ($\Delta k / k / \% \text{ void}$)	-0.26E-04	-0.33E-04

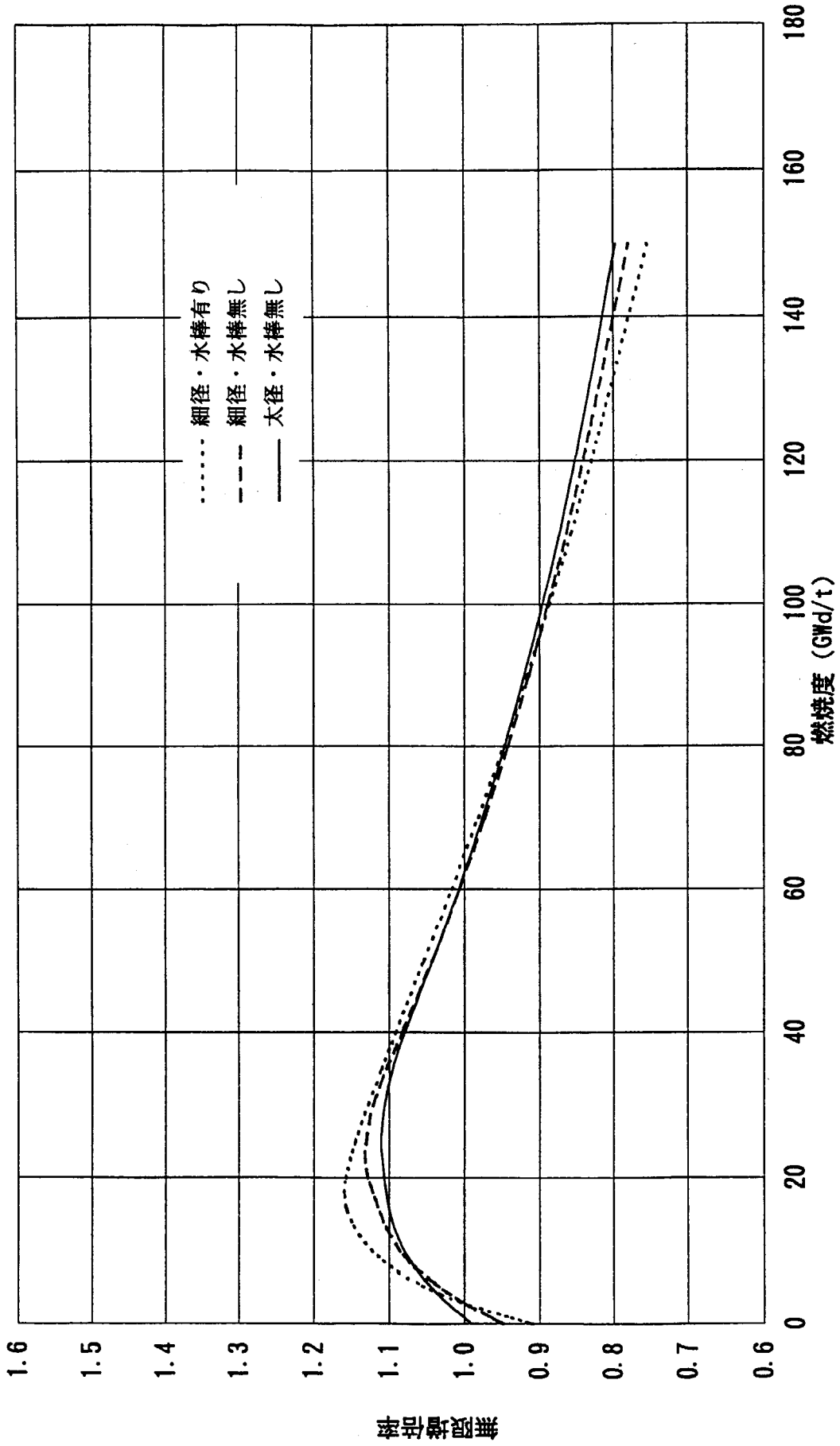


図 5.1 無限増倍率の燃焼変化

燃焼度 = 0.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.81	1.14	<u>1.14</u>	1.12	1.12	1.12	<u>1.14</u>	1.14	0.81
2	1.14	0.90	0.85	0.87	0.88	0.87	0.85	0.90	1.14
3	<u>1.14</u>	0.85	0.85	1.05	1.12	1.05	0.85	0.85	<u>1.14</u>
4	1.12	0.87	1.05	0	0	0	1.05	0.87	1.12
5	1.12	0.88	1.12	0	0	0	1.12	0.88	1.12
6	1.12	0.87	1.05	0	0	0	1.05	0.87	1.12
7	<u>1.14</u>	0.85	0.85	1.05	1.12	1.05	0.85	0.85	<u>1.14</u>
8	1.14	0.90	0.85	0.87	0.88	0.87	0.85	0.90	1.14
9	0.81	1.14	<u>1.14</u>	1.12	1.12	1.12	<u>1.14</u>	1.14	0.81

燃焼度 = 10.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.10	<u>1.25</u>	1.18	1.13	1.12	1.13	1.18	<u>1.25</u>	1.10
2	<u>1.25</u>	0.87	0.77	0.79	0.80	0.79	0.77	0.87	<u>1.25</u>
3	1.18	0.77	0.77	1.01	1.10	1.01	0.77	0.77	1.18
4	1.13	0.79	1.01	0	0	0	1.01	0.79	1.13
5	1.12	0.80	1.10	0	0	0	1.10	0.80	1.12
6	1.13	0.79	1.01	0	0	0	1.01	0.79	1.13
7	1.18	0.77	0.77	1.01	1.10	1.01	0.77	0.77	1.18
8	<u>1.25</u>	0.87	0.77	0.79	0.80	0.79	0.77	0.87	<u>1.25</u>
9	1.10	<u>1.25</u>	1.18	1.13	1.12	1.13	1.18	<u>1.25</u>	1.10

燃焼度 = 25.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.12	<u>1.23</u>	1.16	1.11	1.09	1.11	1.16	<u>1.23</u>	1.12
2	<u>1.23</u>	0.92	0.80	0.81	0.82	0.81	0.80	0.92	<u>1.23</u>
3	1.16	0.80	0.79	0.99	1.08	0.99	0.79	0.80	1.16
4	1.11	0.81	0.99	0	0	0	0.99	0.81	1.11
5	1.09	0.82	1.08	0	0	0	1.08	0.82	1.09
6	1.11	0.81	0.99	0	0	0	0.99	0.81	1.11
7	1.16	0.80	0.79	0.99	1.08	0.99	0.79	0.80	1.16
8	<u>1.23</u>	0.92	0.80	0.81	0.82	0.81	0.80	0.92	<u>1.23</u>
9	1.12	<u>1.23</u>	1.16	1.11	1.09	1.11	1.16	<u>1.23</u>	1.12

燃焼度 = 50.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.89	<u>1.15</u>	1.14	1.10	1.08	1.10	1.14	<u>1.15</u>	0.89
2	<u>1.15</u>	1.00	0.87	0.87	0.88	0.87	0.87	1.00	<u>1.15</u>
3	1.14	0.87	0.84	0.99	1.07	0.99	0.84	0.87	1.14
4	1.10	0.87	0.99	0	0	0	0.99	0.87	1.10
5	1.08	0.88	1.07	0	0	0	1.07	0.88	1.08
6	1.10	0.87	0.99	0	0	0	0.99	0.87	1.10
7	1.14	0.87	0.84	0.99	1.07	0.99	0.84	0.87	1.14
8	<u>1.15</u>	1.00	0.87	0.87	0.88	0.87	0.87	1.00	<u>1.15</u>
9	0.89	<u>1.15</u>	1.14	1.10	1.08	1.10	1.14	<u>1.15</u>	0.89

図 5.2 局所出力分布の燃焼変化 (細径燃料棒・水棒有り、40%ポイド率)

燃烧度 = 0.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.80	0.91	1.08	1.11	1.10	1.11	1.08	0.91	0.80
2	0.91	0.89	<u>1.11</u>	1.07	1.07	1.07	<u>1.11</u>	0.89	0.91
3	1.08	<u>1.11</u>	0.98	0.94	0.94	0.94	0.98	<u>1.11</u>	1.08
4	1.11	1.07	0.94	0.91	0.91	0.91	0.94	1.07	1.11
5	1.10	1.07	0.94	0.91	0.90	0.91	0.94	1.07	1.10
6	1.11	1.07	0.94	0.91	0.91	0.91	0.94	1.07	1.11
7	1.08	<u>1.11</u>	0.98	0.94	0.94	0.94	0.98	<u>1.11</u>	1.08
8	0.91	0.89	<u>1.11</u>	1.07	1.07	1.07	<u>1.11</u>	0.89	0.91
9	0.80	0.91	1.08	1.11	1.10	1.11	1.08	0.91	0.80

燃烧度 = 10.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.12	1.08	1.23	<u>1.23</u>	1.22	<u>1.23</u>	1.23	1.08	1.12
2	1.08	0.91	1.00	0.96	0.95	0.96	1.00	0.91	1.08
3	1.23	1.00	0.86	0.82	0.81	0.82	0.86	1.00	1.23
4	<u>1.23</u>	0.96	0.82	0.78	0.78	0.78	0.82	0.96	<u>1.23</u>
5	1.22	0.95	0.81	0.78	0.77	0.78	0.81	0.95	1.22
6	<u>1.23</u>	0.96	0.82	0.78	0.78	0.78	0.82	0.96	<u>1.23</u>
7	1.23	1.00	0.86	0.82	0.81	0.82	0.86	1.00	1.23
8	1.08	0.91	1.00	0.96	0.95	0.96	1.00	0.91	1.08
9	1.12	1.08	1.23	<u>1.23</u>	1.22	<u>1.23</u>	1.23	1.08	1.12

燃烧度 = 25.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.27	<u>1.30</u>	1.20	1.18	1.16	1.18	1.20	<u>1.30</u>	1.27
2	<u>1.30</u>	0.99	0.99	0.92	0.90	0.92	0.99	0.99	<u>1.30</u>
3	1.20	0.99	0.81	0.77	0.76	0.77	0.81	0.99	1.20
4	1.18	0.92	0.77	0.73	0.73	0.73	0.77	0.92	1.18
5	1.16	0.90	0.76	0.73	0.72	0.73	0.76	0.90	1.16
6	1.18	0.92	0.77	0.73	0.73	0.73	0.77	0.92	1.18
7	1.20	0.99	0.81	0.77	0.76	0.77	0.81	0.99	1.20
8	<u>1.30</u>	0.99	0.99	0.92	0.90	0.92	0.99	0.99	<u>1.30</u>
9	1.27	<u>1.30</u>	1.20	1.18	1.16	1.18	1.20	<u>1.30</u>	1.27

燃烧度 = 50.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.98	<u>1.23</u>	1.15	1.15	1.12	1.15	1.15	<u>1.23</u>	0.98
2	<u>1.23</u>	1.09	1.08	0.97	0.95	0.97	1.08	1.09	<u>1.23</u>
3	1.15	1.08	0.84	0.81	0.79	0.81	0.84	1.08	1.15
4	1.15	0.97	0.81	0.76	0.75	0.76	0.81	0.97	1.15
5	1.12	0.95	0.79	0.75	0.74	0.75	0.79	0.95	1.12
6	1.15	0.97	0.81	0.76	0.75	0.76	0.81	0.97	1.15
7	1.15	1.08	0.84	0.81	0.79	0.81	0.84	1.08	1.15
8	<u>1.23</u>	1.09	1.08	0.97	0.95	0.97	1.08	1.09	<u>1.23</u>
9	0.98	<u>1.23</u>	1.15	1.15	1.12	1.15	1.15	<u>1.23</u>	0.98

図 5.3 局所出力分布の燃烧变化 (細径燃料棒・水棒無し、40%ボイド率)

燃焼度=0.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.77	0.89	1.04	1.07	1.06	1.07	1.04	0.89	0.77
2	0.89	0.88	<u>1.12</u>	1.09	1.08	1.09	<u>1.12</u>	0.88	0.89
3	1.04	<u>1.12</u>	1.01	0.98	0.97	0.98	1.01	<u>1.12</u>	1.04
4	1.07	1.09	0.98	0.95	0.95	0.95	0.98	1.09	1.07
5	1.06	1.08	0.97	0.95	0.94	0.95	0.97	1.08	1.06
6	1.07	1.09	0.98	0.95	0.95	0.95	0.98	1.09	1.07
7	1.04	<u>1.12</u>	1.01	0.98	0.97	0.98	1.01	<u>1.12</u>	1.04
8	0.89	0.88	<u>1.12</u>	1.09	1.08	1.09	<u>1.12</u>	0.88	0.89
9	0.77	0.89	1.04	1.07	1.06	1.07	1.04	0.89	0.77

燃焼度=10.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.01	1.01	1.16	<u>1.17</u>	1.16	<u>1.17</u>	1.16	1.01	1.01
2	1.01	0.89	1.04	1.00	0.99	1.00	1.04	0.89	1.01
3	1.16	1.04	0.91	0.88	0.87	0.88	0.91	1.04	1.16
4	<u>1.17</u>	1.00	0.88	0.85	0.85	0.85	0.88	1.00	<u>1.17</u>
5	1.16	0.99	0.87	0.85	0.84	0.85	0.87	0.99	1.16
6	<u>1.17</u>	1.00	0.88	0.85	0.85	0.85	0.88	1.00	<u>1.17</u>
7	1.16	1.04	0.91	0.88	0.87	0.88	0.91	1.04	1.16
8	1.01	0.89	1.04	1.00	0.99	1.00	1.04	0.89	1.01
9	1.01	1.01	1.16	<u>1.17</u>	1.16	<u>1.17</u>	1.16	1.01	1.01

燃焼度=25.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	<u>1.23</u>	1.18	1.15	1.15	1.13	1.15	1.15	1.18	<u>1.23</u>
2	1.18	0.94	1.00	0.95	0.94	0.95	1.00	0.94	1.18
3	1.15	1.00	0.86	0.83	0.82	0.83	0.86	1.00	1.15
4	1.15	0.95	0.83	0.80	0.79	0.80	0.83	0.95	1.15
5	1.13	0.94	0.82	0.79	0.79	0.79	0.82	0.94	1.13
6	1.15	0.95	0.83	0.80	0.79	0.80	0.83	0.95	1.15
7	1.15	1.00	0.86	0.83	0.82	0.83	0.86	1.00	1.15
8	1.18	0.94	1.00	0.95	0.94	0.95	1.00	0.94	1.18
9	<u>1.23</u>	1.18	1.15	1.15	1.13	1.15	1.15	1.18	<u>1.23</u>

燃焼度=50.0Gwd/t

制御棒側	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.02	<u>1.21</u>	1.12	1.12	1.10	1.12	1.12	<u>1.21</u>	1.02
2	<u>1.21</u>	1.02	1.05	0.97	0.96	0.97	1.05	1.02	<u>1.21</u>
3	1.12	1.05	0.87	0.84	0.83	0.84	0.87	1.05	1.12
4	1.12	0.97	0.84	0.81	0.80	0.81	0.84	0.97	1.12
5	1.10	0.96	0.83	0.80	0.79	0.80	0.83	0.96	1.10
6	1.12	0.97	0.84	0.81	0.80	0.81	0.84	0.97	1.12
7	1.12	1.05	0.87	0.84	0.83	0.84	0.87	1.05	1.12
8	<u>1.21</u>	1.02	1.05	0.97	0.96	0.97	1.05	1.02	<u>1.21</u>
9	1.02	<u>1.21</u>	1.12	1.12	1.10	1.12	1.12	<u>1.21</u>	1.02

図 5.4 局所出力分布の燃焼変化 (太径燃料棒・水棒無し、40%ボイド率)

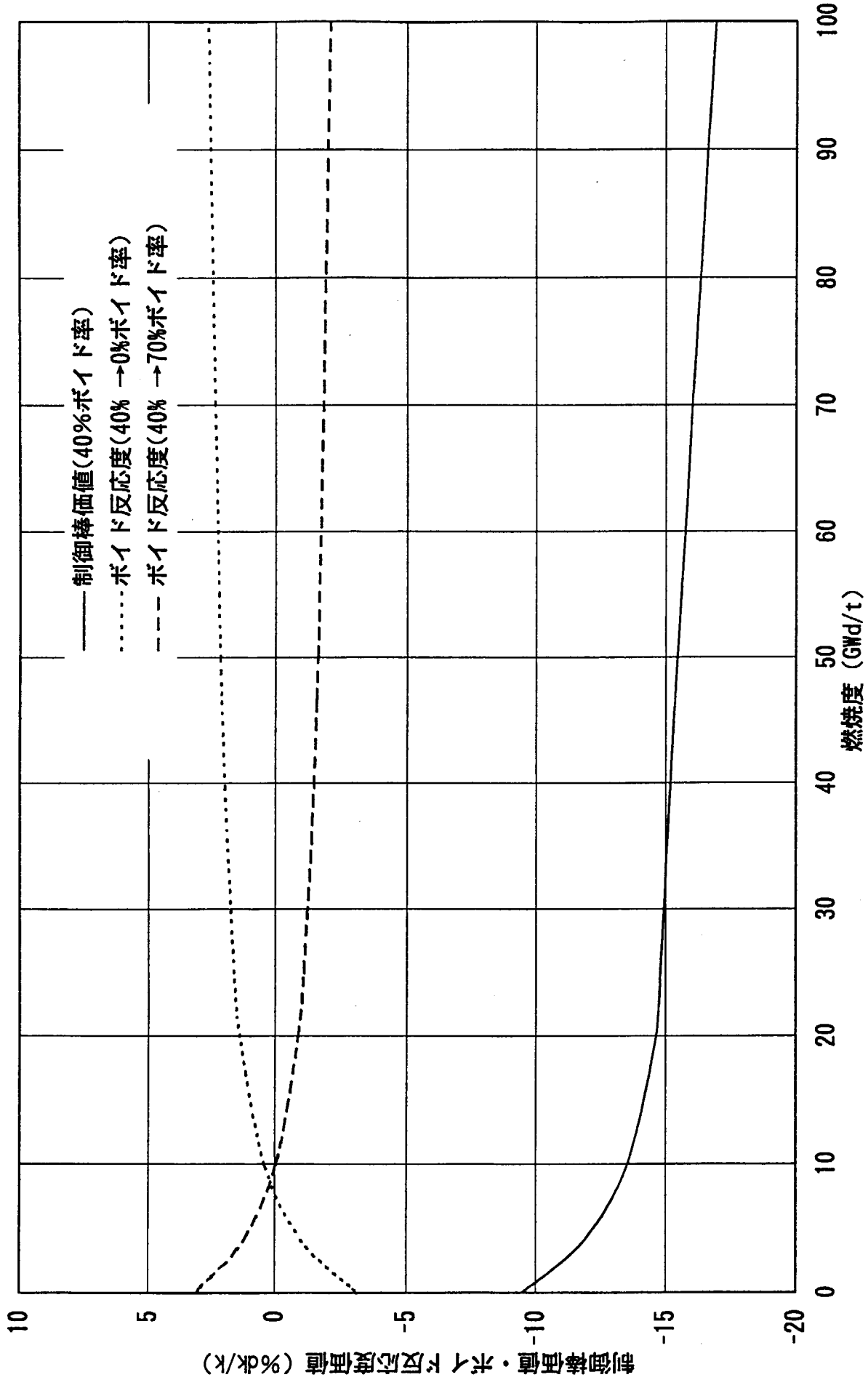


図 5.5 制御棒価値・ボイド反応度係数の燃焼変化 (細径燃料棒、水棒有り)

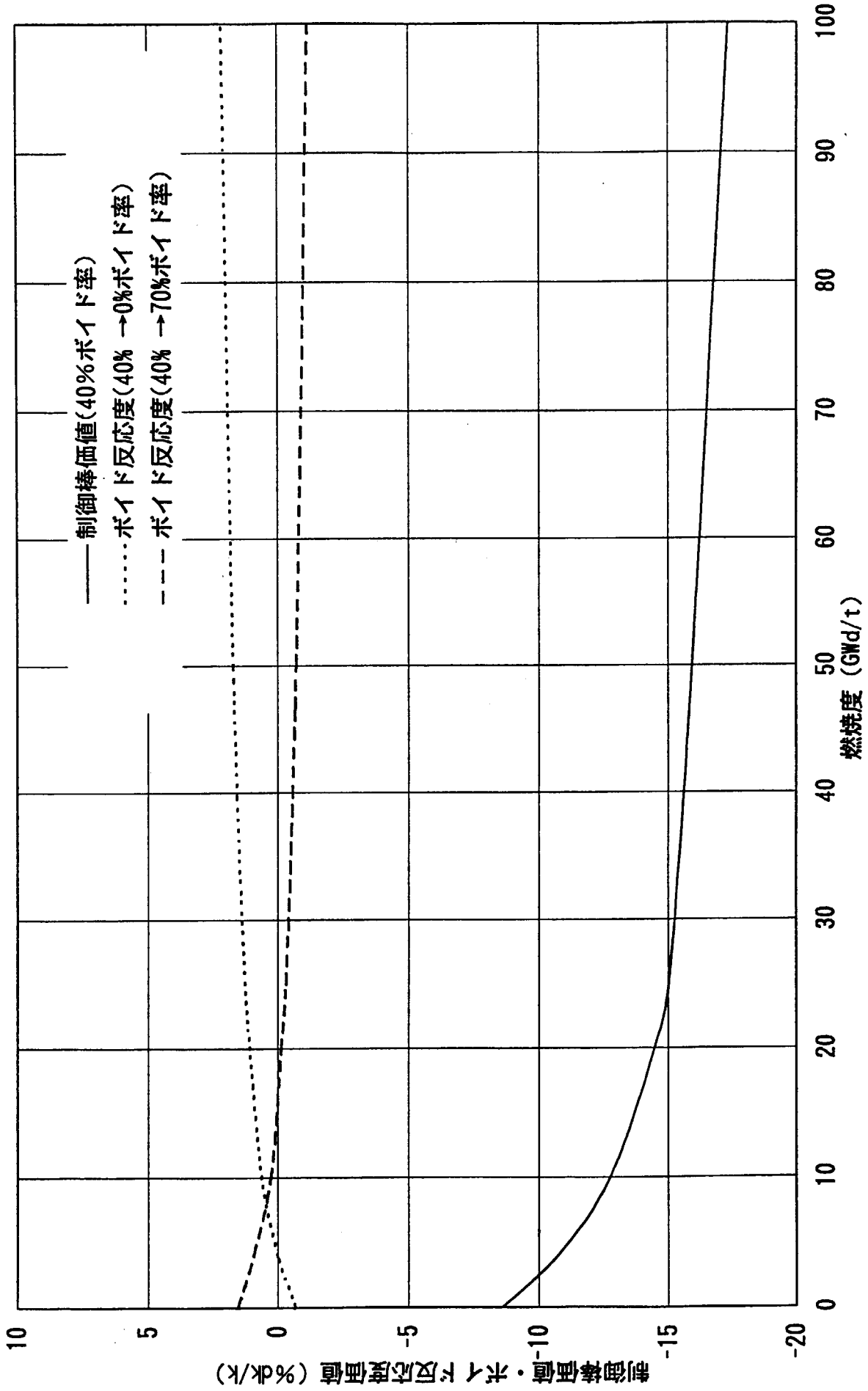


図 5.6 制御棒価値・ボイド反応度価値の燃焼変化 (細径燃料棒、水棒無し)

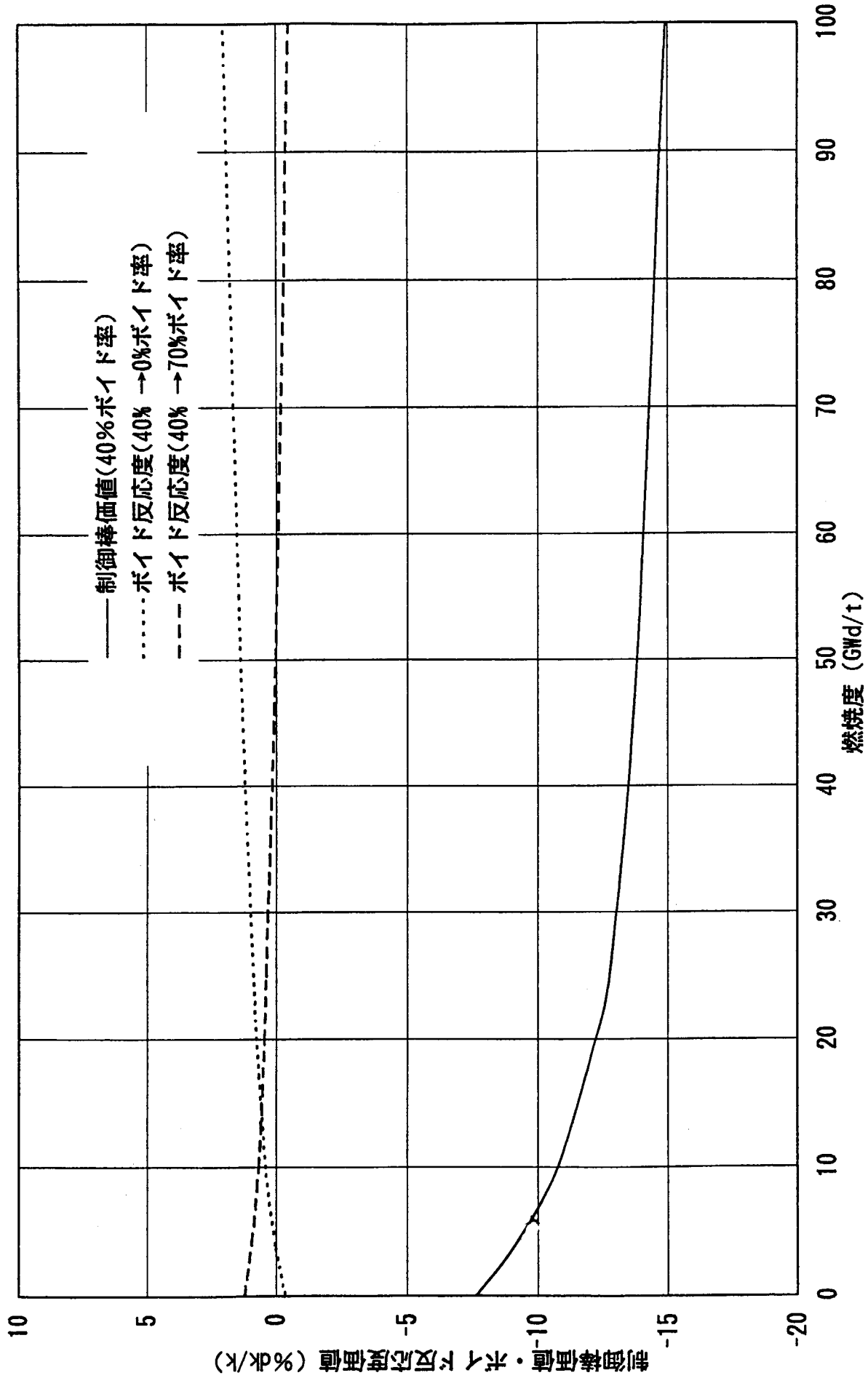


図 5.7 制御棒係数・ボイド反応度係数の燃焼変化(太径燃料棒、水棒無し)

6. 結論

運転サイクル期間3年程度及び取出平均燃焼度100GWd/t以上を目指し、LWR使用済み燃料から取り出した組成のプルトニウムと劣化ウランから成るフルMOX燃料を使用した高燃焼度BWR炉心概念を構築した。

現行の高燃焼度化対応では、熱中性子利用率の向上と共鳴吸収の減少とによってプルトニウムを効率よく燃焼させるとともに、過度に負になるボイド係数を緩和するために、減速材である水を多くした高減速化が一般的である。しかし、本検討では、プルトニウムは十分にありそれを有効に利用するとの観点から検討した。すなわち、プルトニウムを効率よく燃焼させることには重点を置かずに、長期間燃焼させて総発熱量を多くする方向で検討した。このため、水を多くするよりも燃料を多くする方向でも検討した。

水棒を9本持った比較的高減速の燃料集合体、水棒無し燃料集合体、そして水棒無しでかつ太径燃料棒の比較的低減速の燃料集合体の3ケースについて検討した。これら3ケースとも上記の目標を達成可能と考えられる結果が得られた。

水の割合を少なくしたケースでは、ボイド係数は正になる傾向を見せた。また、核分裂性プルトニウムの装荷量が増えるとともに、プルトニウムの生成量が増加してプルトニウムの量が減少しないため、一見効率よく燃焼しない印象を与えるが、運転サイクル期間は期待通り約3年間確保出来る見通しを得た。

本炉心では、「ノーシャッフル燃料取り替え方式」をとったこと、および制御棒全引き抜き運転方式をとるために燃料集合体に可燃性毒物燃料を多量に装荷して運転時余剰反応度を低く抑えた設計にしたことにより、原子炉停止余裕は十分であると推定できる。今後、詳細設計計算による定量的な確認を行う予定である。

参 考 文 献

- (1) 八木誠他：“BWRにおける100%MOX燃料装荷炉心の検討” 日本原子力学会 1996年春の年会 E50.
- (2) 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).
- (3) GE, Hitachi and Toshiba：“ABWR”，IAEA-TECDOC-968, pp.91-118 (1997).
- (4) Ogata K., et al.：“BWR Fuel Performance and Recent R&D Activities in Japan”，Proc. Int. Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, March 1998.
- (5) K. Yamate et al.：“Design of a gadolinia bearing mixed-oxide fuel assembly for pressurized water reactors”，Nuclear Engineering and Design, 170, pp.35～51 (1997).
- (6) 永野護：“フル MOX-BWR について”，第 28 回炉物理夏期セミナーテキスト (1996).

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表2 SIと併用される単位

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

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

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

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	ジーメンズ	S	A/V
磁束	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	
光量	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	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
線量等量	シーベルト	Sv	J/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
バル	bar
ガール	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m
1 b=100fm²=10⁻²⁸m²
1 bar=0.1MPa=10⁵Pa
1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²
1 Ci=3.7×10¹⁰Bq
1 R=2.58×10⁻⁴C/kg
1 rad=1cGy=10⁻²Gy
1 rem=1cSv=10⁻²Sv

(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, 1 eV および 1 u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では流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C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

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ²	145.038
力	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

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))
動粘度 1 m²/s=10⁶St(ストークス)(cm²/s)

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= 4.18605J (計量法) = 4.184J (熱化学) = 4.1855J (15℃) = 4.1868J (国際蒸気表) 仕事率 1 PS(仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499W
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻¹	0.737562	6.24150×10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻¹	7.23301	6.12082×10 ¹⁹	
	3.6×10 ³	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ³	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵	
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹	
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹	
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸	
	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
	1	2.70270×10 ¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	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

高燃焼度フルMOX-BWR炉心の核特性の検討