

沸騰水型原子炉の炉心設計の改良

Improvement of Nuclear Core Design for Boiling Water Reactor

沸騰水型原子炉の運転経験の蓄積とともに、従来以上の運転の融通性の増大と、プラント設備利用率の向上を目標とした炉心設計の改良が要望されている。これに応ずるため、日立製作所で実施した炉心軸方向出力分布平坦化法の改良設計と、これに伴う改善効果について述べる。

すなわち、第1サイクル炉心では上下方向の濃縮度に差をつけた2領域燃料を採用し、平衡サイクル炉心では燃焼による自己平坦化を実現するような改良設計によって、従来炉心に比べて軸方向の出力ピーキングを約10%低減することを可能とした。これによって、炉の利用率と設計余裕を増大したばかりでなく、従来、軸方向出力分布平坦化のために浅く挿入していた制御棒操作を不用として炉心運用を単純化し、また、燃料交換時に炉内燃料のシャッフリング(Shuffling)を不要とする炉心運用も可能となり、定期点検期間の短縮を期待することもできる。

内川貞夫* Uchikawa Sadao

竹田練三* Takeda Renzô

山下淳一** Yamashita Jun'ichi

1 緒 言

沸騰水型原子炉(以下、BWRと略す)は、原子炉で発生した蒸気が直接タービンに供給される、いわゆる直接サイクルであり、蒸気発生器が不要で、炉心流量による出力制御ができるなど、多くの特徴をもつ原子炉である。

近年、発電炉としての運転経験の蓄積とともに、各電力会社を中心に、燃料の健全性を維持するために適用されている運転制限条件からの拘束を極力少なくして、運転の融通性の増大、プラントの設備利用率の向上などを目標とした、BWR炉心改良が要望されている。

日立製作所では、このような要望に対処するため、炉心内にボイド分布が存在し、炉心下方部に熱出力のピーキングが生ずるというBWR炉心の基本的な特徴、及びこれから派生する特性を検討し、新たな設計思想を導入して、出力ピーキングの低減、プラント設備利用率の向上及び炉心運用法の単純化に重点をおいた改良型炉心(WNS炉心と名づける^{*1)})を開発した。

本稿は、改良型炉心設計について、その基本的考え方を中心に紹介する。

2 改良型炉心の基本構想

BWRは、炉心内で直接蒸気が発生し、炉心の下部でボイドが少なく上部で多いという、軸方向にボイド分布をもっているため、そのままでは出力分布が歪んで炉心下方に大きな出力ピークを生ずる。この軸方向出力ピーキングをどう低減するかがBWR炉心設計の要点の一つとなっている。

出力分布に対する炉心の特性は、初装荷時の新燃料ばかりから成る第一サイクルと、運転が進み、軸方向に燃焼度分布をもった燃料が装荷されている平衡炉心では、それぞれ様相が異なっている。

改良型炉心では、軸方向のピーキングの低減対策として、第1サイクル炉心の「軸方向濃縮度2領域燃料の採用」、平衡サイクル炉心の「燃焼による出力分布の自己平坦化」という二つの組合せによって、従来型の炉心よりもいっそう効果的に行なうことを目的とした。

2.1 第1サイクル炉心の軸方向出力分布平坦化

炉心にボイドが発生すると、減速材の密度が低くなり、この部分の中性子無限増倍率が低下する。BWRでは炉心上部は下部よりボイド量が多いので炉心上部増倍率は下部に比べ数パーセント低くなっており、このため、出力分布が下方に大きい歪を生ずることになる。この歪を打ち消すため従来の炉心設計では、燃料棒下部に可燃性中性子吸収材(Burnable Poison)を添加し、制御棒を炉心下方より浅く挿入して、

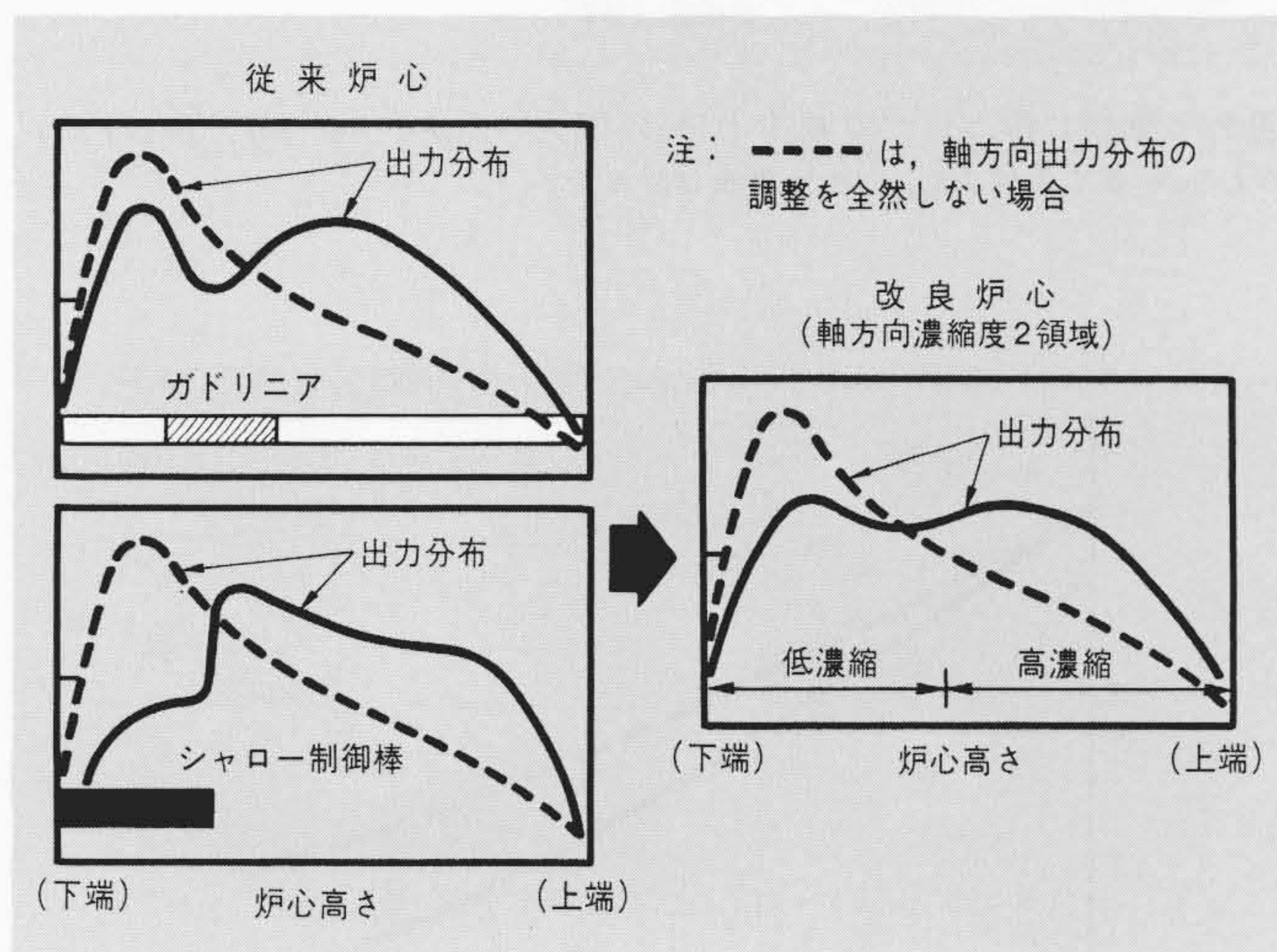


図1 軸方向出力分布平坦化法 従来炉心では、炉心下部に強い中性子吸収体(部分長ガドリニア、シャロー制御棒)を配置する方法により出力分布平坦化を図っている。改良型炉心では、「軸方向濃縮度2領域」を採用し、常に安定した平坦な出力分布が維持される。

* 1) 改良型炉心(WNS炉心)

改良型炉心の特長であるNo Shuffling and No Shallow Control Rodsの二つのN、Sの文字をとって名称とした。

出力分布を平坦化する方法をとっている(図1)。
これに対し改良炉心では、ボイドによる増倍率の低下を補うため、炉心上部の平均濃縮度を下部より多少高くして上下の増倍率をバランスさせ、出力分布を平坦化する方法を新たに採用し、制御棒と可燃性中性子吸収材は、主に燃焼による増倍率変化の調整に使用するようにした。

2.2 平衡サイクル炉心の軸方向出力分布平坦化法

BWRでは、減速材中のボイドによる中性子エネルギー、スペクトルの硬化により、図2に示すように、炉心上部では下部に比べてプルトニウムの生成量が多い。このため、軸方向に一樣な燃料を用いた場合でも図3のように、燃焼が進むに従って炉心上部の核分裂性物質が下部に比べ相対的に多くなり、自然に炉心上部の増倍率が下部よりも高くなる。BWRの燃料交換は、1年ごとに炉心の約25%の燃料を順次新燃料と取り替える方式を用いているので、平衡サイクル炉心の平均燃焼度はサイクル初めでもかなり進んでいる。そこで先の原理により、軸方向に一樣な取替燃料を使用しても、炉心上部と下部とでは実効的な濃縮度に差が生ずる。表1に、平衡サイクル初期についての炉心上下の実効的濃縮度の差の一例

表1 平衡炉心サイクル初期での炉心上部～下部間の濃縮度差
平衡炉心では、軸方向濃縮度1領域燃料を装荷しても、燃焼効果により炉心平均として実効的に上下に濃縮度差のついた燃料を装荷した炉心となる。

炉心滞在年数	燃 焼 度	実 効 濃 縮 度* (w/o)		
		上 部	下 部	上・下差
0 年	0 GWd/sh	2.77	2.77	0
1	7	2.39	2.26	0.13
2	14	2.04	1.80	0.24
3	21	1.72	1.37	0.35
平 均	10.5	2.23	2.05	0.18

注：* $(U^{235} + Pu^{239} + Pu^{241}) / \text{新燃料中のU}$

を示す。
このような状態の原子炉では、炉心上部と下部での実効的な濃縮度差からくる増倍率の違いは、ボイド率の差により生ずる増倍率の差を相殺し、結果として炉心の上下で差の少ない出力分布が実現される。
このように、燃焼の進んだ平衡サイクルの炉心では、第1サイクルと異なり燃料に上下の濃縮度をつけなくても、軸方向の出力分布は自然に平坦化され、第1サイクル炉心と同様な特性を示す。これを「燃焼による出力分布の自己平坦化」と呼ぶ。

なお、従来炉心の平衡サイクルでは、改良炉心と同様な取替燃料を用いているにもかかわらず、出力分布を平坦化するために、制御棒を浅く挿入することが必要である。この相違が生ずる理由は、従来炉心では第1サイクルで浅く挿入した制御棒を使用するため、この制御棒の周辺の燃料は燃焼が進まず、燃焼による自己平坦化が阻害され、次のサイクルでも制御棒による出力分布平坦化が必要となり、更に、この影響が次のサイクルに引き継がれて平衡サイクルまで影響が及ぶことによる。

3 改良型炉心の特長

基本構想がそのまま大きな特長となっているが、ここではプラント設備利用率向上、炉心運用法の単純化の点から、改良型炉心の特長について述べる。

3.1 基本的な特長

改良炉心の出力分布の平坦化法は、制御棒の挿入法のように局所的に強い吸収材を用いるのではなく、濃縮度差により炉心内一樣に上下の増倍率を調整する単純な方法に基づいているので、炉心の特性も単純になり次のような特長をもっている。

- (1) 軸方向の出力分布が、従来炉心より更に平坦になり、出力ピーキングが約10%低減する。
- (2) 燃料が燃焼しても、濃縮度差による上下の増倍率バランスはほぼ一定に保たれ、常に安定した平坦な出力分布が維持される。したがって、炉心及び制御棒の運用が簡単になる。
- (3) 従来炉心では、炉心下部より制御棒を浅く挿入することによって、軸方向出力分布を平坦化しているが、改良炉心では、これを必要としないので制御棒の運用が極めて簡単になる(図4)。特に、サイクル末期で出力分布平坦化のために制御棒を挿入しておく必要がないので、燃料の燃焼度が増加する。
- (4) 核設計のベースとして、データの信頼度の高い濃縮度により出力分布を平坦化しているので、十分な経験をつんだ信

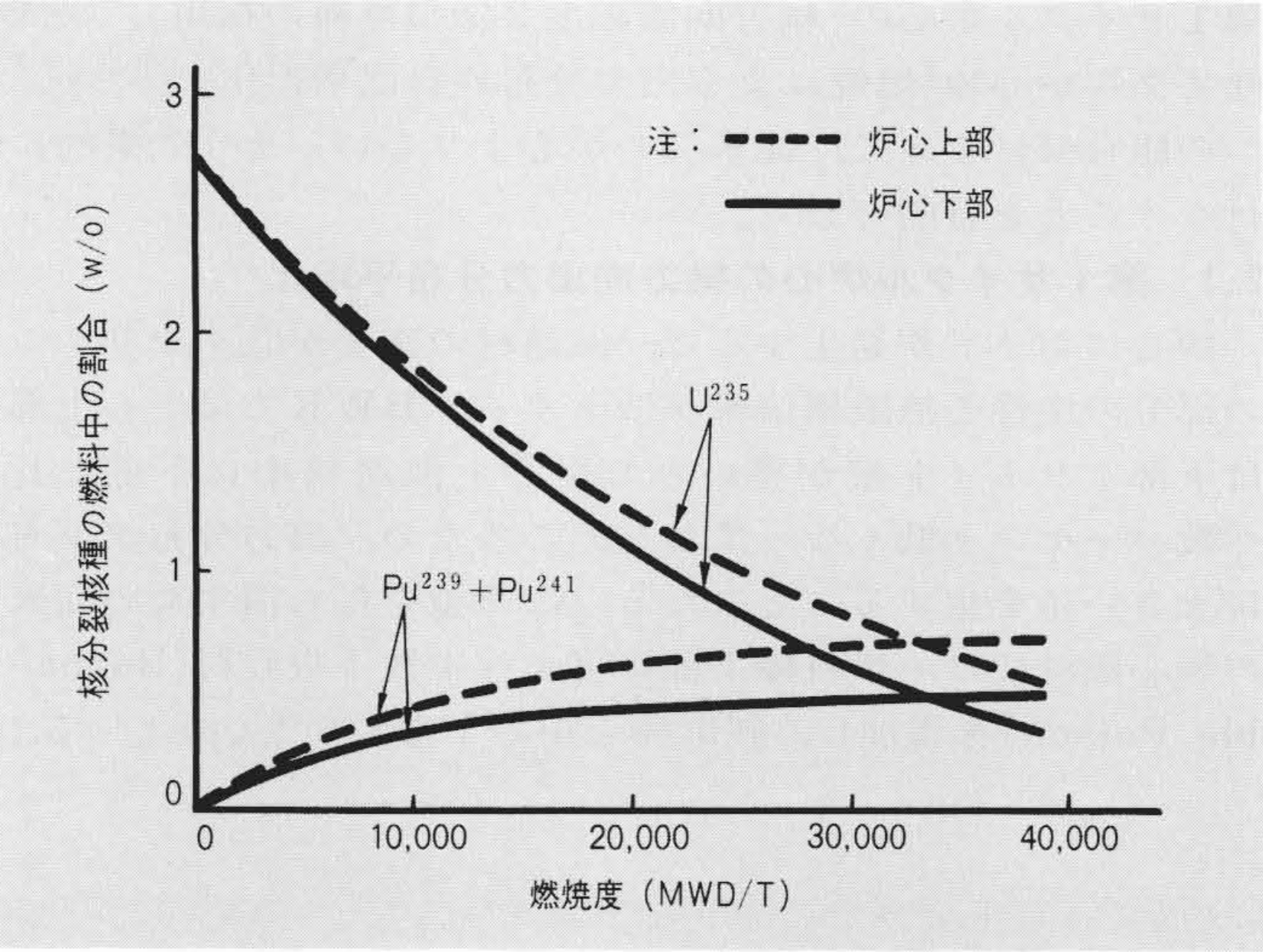


図2 燃焼に伴うU²³⁵の減少とPuの増大 炉心上部では、炉心下部よりもPuが多く生成され、Uの消費量は少ない。

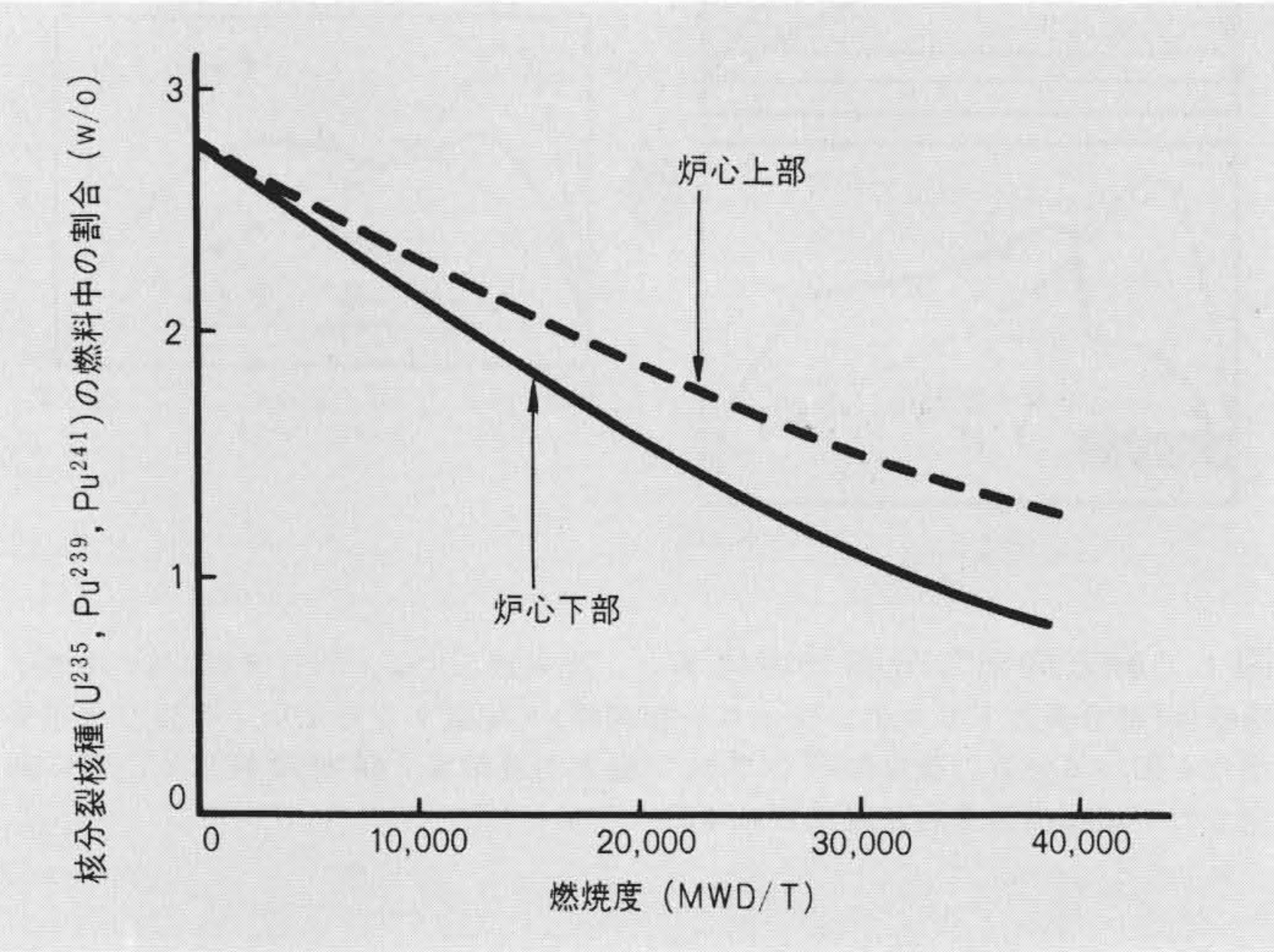


図3 核分裂核種(U²³⁵, Pu²³⁹, Pu²⁴¹)の燃焼に伴う変化 燃焼が進むと、炉心上部で炉心下部よりも核分裂核種が相対的に多くなる。

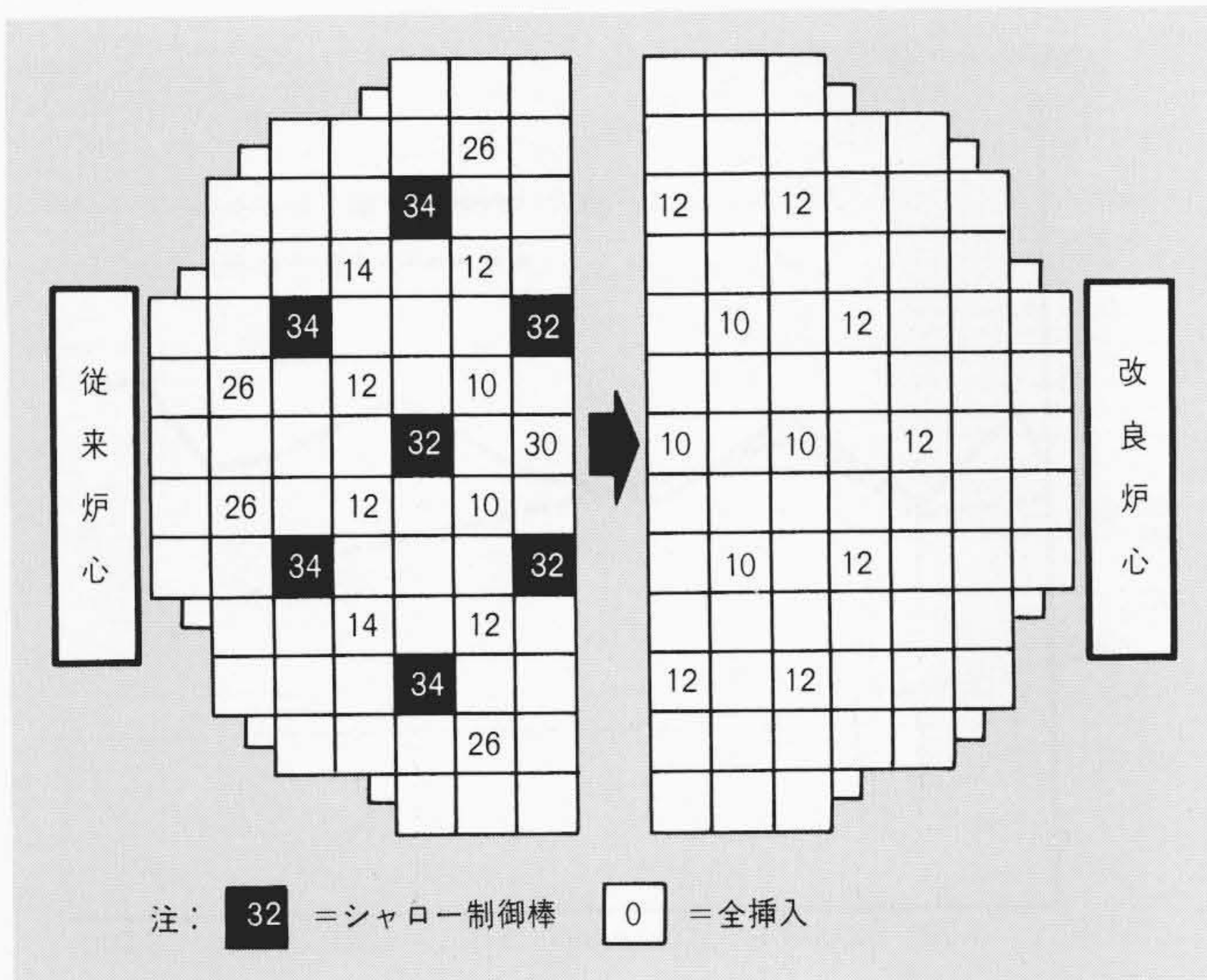


図4 制御棒パターン 改良型炉心では、浅く挿入した制御棒(シャロー制御棒)が不要となり、制御棒の運用が簡単化されるとともに、燃料燃焼度が增加する。

頼のおける設計が可能である。

(5) 上下濃縮度差という単純な原理で、出力分布を十分平坦化できるので、初装荷燃料及び取替燃料とも、それぞれ1種類の簡単な燃料要素を使用すればよい。

3.2 移行サイクルの特長

第1サイクルから平衡サイクルに至るまでの炉心を、移行サイクル炉心と呼ぶが、移行サイクルでは、原則として平衡

サイクル炉心と同じ軸方向に一樣な従来型の取替燃料を用いる。このようにしても、前半のサイクルでは、上下に濃縮度差をつけた初装荷燃料が炉心に多く残っており、後半のサイクルでは、初装荷燃料は減るが燃料の燃焼が進むので、この効果によって、第1サイクル及び平衡サイクルと同様に軸方向出力分布は自然に平坦化される。このように、移行サイクルに従来型の軸方向一樣な取替燃料を使用しても、軸方向出力分布が従来炉心より平坦化され、制御棒運用計画も簡単化されるのは本改良炉心の特長の一つである。

3.3 プラント設備利用率変更の影響

プラント設備利用率が変更された場合も、次のサイクルの初めには、燃焼に必要な反応度が通常のコイルと同じになるように燃料取替体数を調整する。これにより、炉心平均燃焼度、したがって炉心上下の実効的濃縮度差も通常サイクルとほぼ同一になり、軸方向出力分布はほとんど影響を受けることがなく、平坦化が保たれることも本改良炉心の特長である。

3.4 燃料シャッフリングを必要としない炉心

従来、半径方向の出力分布の平坦化を目的として、定期点検時に行なわれてきた燃料シャッフリングを廃止することも本炉心では可能である。

この場合、図5に示すように炉心内の任意の隣りあった4本の燃料集合体に注目すると、炉心滞在年数が1年から4年までの4種類の燃料から成っており、4年間炉心に滞在した燃料は炉から取り出され、その位置に新燃料が装荷される。新燃料は4年間同一位置に滞在する。同図中の数字は、ある時点での燃料の炉心滞在年数を示している。一方、従来炉心

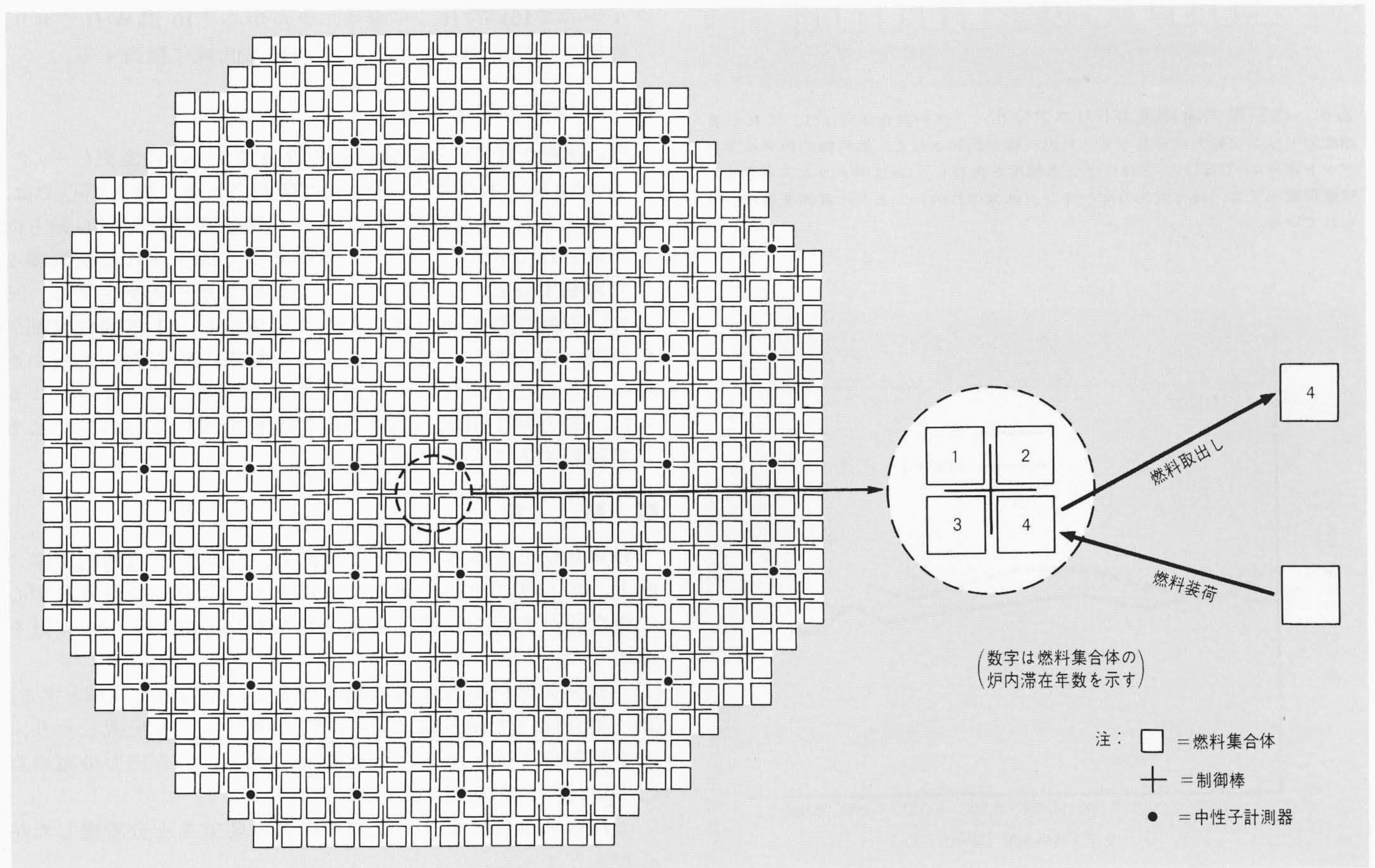


図5 燃料交換方法例 改良型炉心では、原則として燃料シャッフリングをしない。このため、定期点検時の燃料交換に要する時間が短縮される。

では、通常、炉心に装荷される新燃料のほぼ2倍の燃料がシャッフリングされるので、これに比べ燃焼シャッフリングしない炉心では、定期点検時に行なわれる燃料交換時間の短縮が可能となり、定期点検期間の短縮と、これに伴うプラント設備利用率の向上に寄与することが期待される。

4 改良型炉心の設計例

電気出力1,100MWe, 燃料集合体数764, 出力密度50kW/lの改良型炉心の設計例を次に述べる。

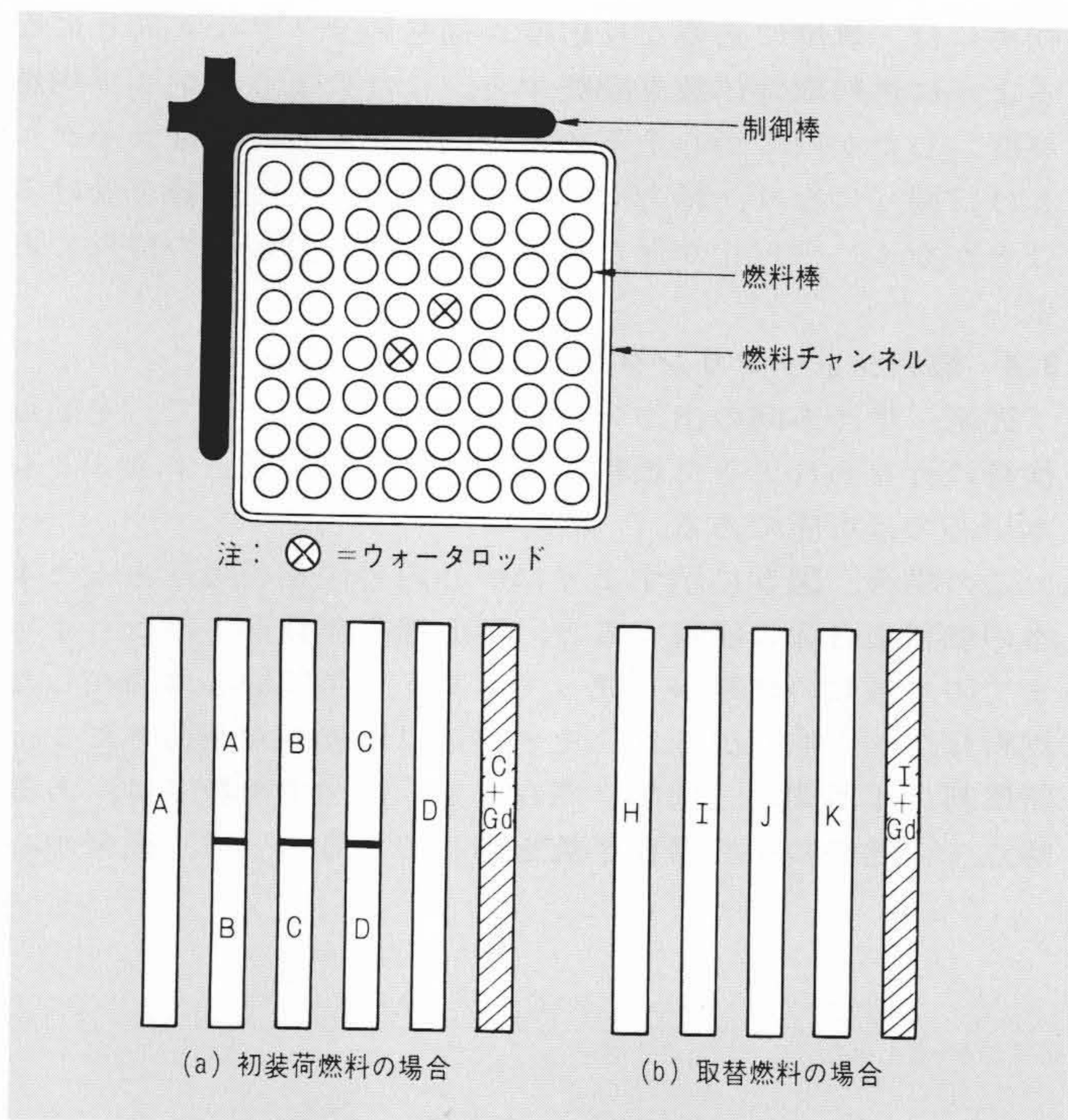


図6 燃料棒内濃縮度ガドリニア分布 燃料集合体内には、これら濃縮度ガドリニア軸方向分布をもった燃料棒が配列される。燃料棒内のアルファベット記号A～D及びH～Kはウラン濃縮度を表わし、Gdはガドリニアを示す。初装荷燃料では、軸方向出力ピーキング低減のために、上下に濃縮度差がつけられている。

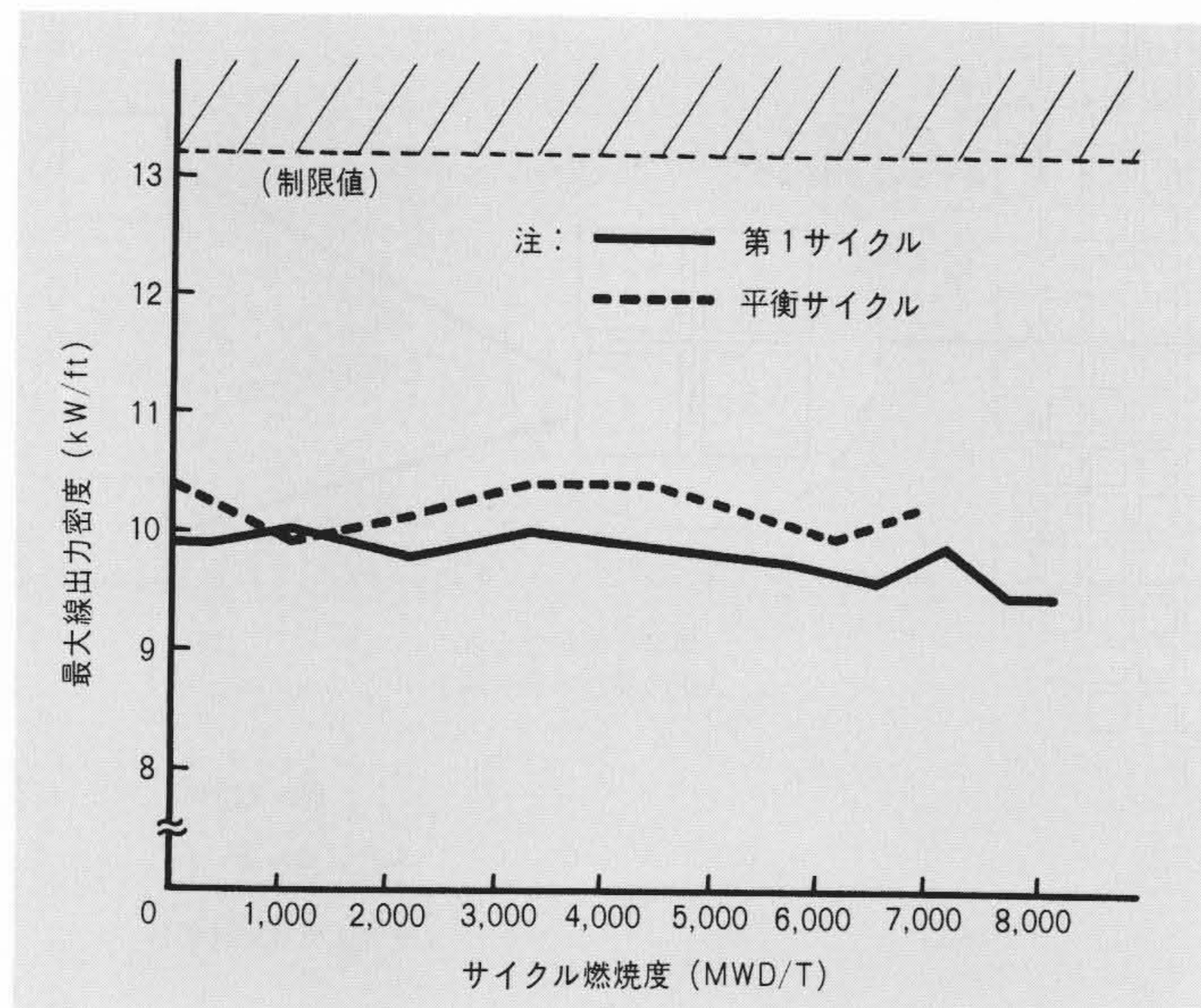


図7 改良炉心の運転特性(1) 燃焼に伴う燃料棒の最大線出力密度の変化を示す。運転制限値に対し、十分余裕をもっている。

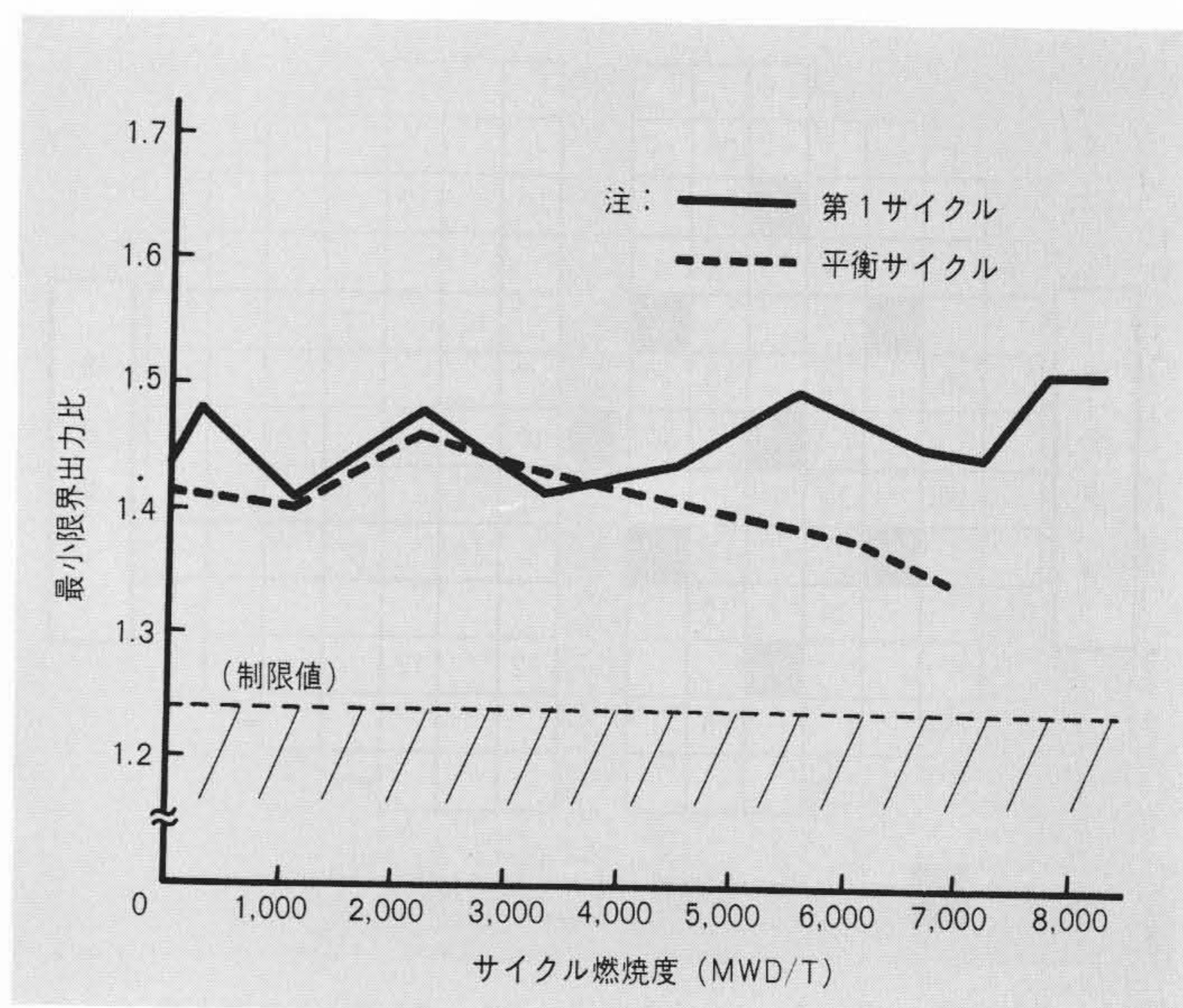


図8 改良炉心の運転特性(2) 燃焼に伴う最小限界出力比の変化を示す。運転制限値に対し、十分余裕をもっていることが分かる。

(1) 燃料集合体設計

図6に、初装荷燃料集合体及び取替燃料集合体の燃料棒内濃縮度、ガドリニア軸方向分布例を示す。初装荷燃料の炉心上部及び下部の平均濃縮度は、それぞれ2.1w/o, 1.9w/oであり、ボイド分布による増倍率の差が相殺されるようになっている。

(2) 炉心特性

制御棒計画を立案して評価した最大線出力密度と最小限界熱出力比を、図7、8に示す。最大線出力密度は、第1サイクル炉心で10kW/ft、平衡サイクル炉心で10.5kW/ftであり、この値は、従来炉心に比較して約10%低減に相当する。

5 バック・フィット

既に運転されている従来炉心の改良型炉心への変更(バック・フィット)は、次の考えに基づいて実現される。従来炉心では、浅く挿入された制御棒の影響により燃焼度分布が炉心軸方向に均質されていないので、そのまま浅く挿入された制御棒なしで運転すると、炉心下方に大きな出力ピークが生ずる。そこで、取替燃料を軸方向濃縮度2領域にし、1年間程度制御棒の浅い挿入なしで運転する。この結果、炉心内の燃料の燃焼による自己平坦化効果を促進させるので、次のサイクルからは、軸方向1領域の通常の実替燃料を用いて改良型炉心として運転することが可能となる。

6 結 言

BWR炉心を基本に戻って検討し、プラント設備利用率の向上、炉心運用法の簡単化に重点をおいた改良型BWR炉心の概念設計を行なった。本設計に当たり、次の二つの方針を採用した。

- (1) 初装荷燃料集合体の濃縮度分布を、軸方向2領域とする。
- (2) 集合体内で軸方向に局所的にガドリニアを配置したり、浅く制御棒を挿入することを避け、燃焼による出力分布の自己平坦化効果を活用する。

これらの改良により、国内の顧客の要望を十分考慮した炉心がまとまった。

最後に、本設計に当たり、種々御指導をいただいた電力会社の関係各位に対し、厚くお礼を申しあげる次第である。