

沸騰水型原子炉の改良炉心

Improved Nuclear Core Design for Boiling Water Reactor

日立製作所では沸騰水型原子炉の炉心設計や運転実績の分析をもとに、プラント利用率のいっそうの向上、運転融通性の増大を目標として、炉心改良の検討を進めてきた。

その結果、炉心軸方向(高さ方向)の出力分布の改善を意図して、新たに「上・下濃縮度2領域燃料」を採用した改良炉心を開発した。本改良炉心は、燃料自体が常に安定で平坦な出力分布を実現する機能をもっているため、炉心の熱的余裕が増大するとともに、制御棒をほとんど使わずに運転ができ、運転期間の長期化にも適している。更に、定期検査時の燃料シャッフリングも不要のため、定期検査期間の短縮が期待されている。これら改良設計の採用により、BWR炉心の信頼性がより向上するとともに、運転の融通性が増し、またプラント利用率のいっそうの向上を図ることができた。

山下淳一* Jun'ichi Yamashita
西村 章* Akira Nishimura
竹田練三** Renzô Takeda
栗原国寿*** Kunitoshi Kurihara
横見迪郎* Michio Yokomi

1 緒 言

BWR(沸騰水型原子炉)の炉心燃料は、これまで種々の改良開発の成果や、燃料健全性を維持するための運転制限条件の適用により、その信頼性は向上している。

一方、近年BWRの運転経験を積み重ねるにつれて、更に炉心設計を改良して、運転がいっそう行ないやすく、利用率を向上した炉心の開発が要望されてきた。特に、上記の燃料健全性を維持するための運転制限からの拘束を極力少なくして、運転の融通性を増大するとともに、15箇月サイクル運転など、プラント利用率の向上を図る長期化運転に適した炉心が要望されている。

このような要望に答えるため、日立製作所ではBWR炉心の基本的特徴である炉心内ボイド分布と、これに伴う軸方向(高さ方向)の出力分布特性の改善について検討を行ってきた。その結果、新たに「濃縮度上・下2領域燃料」を採用して、出力ピーキングを低減し、プラント利用率を向上させるとともに、炉心運用法を単純化した改良炉心を開発した。

以下、改良炉心の基本概念とその効果について紹介する。

2 改良炉心の基本概念

2.1 上・下濃縮度2領域燃料の採用

BWRの特徴として、炉心内で直接蒸気が発生するので、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が変化する性質をもっている。このボイド分布に従い、炉心下部と上部で中性子の減速効果に違いが生じて、減速効果の大きい炉心下部では、炉心上部に比べて中性子の増倍率が高くなっている。

したがって、このままでは出力分布は炉心下方に大きくひずみ、出力ピークを生ずることになる。この軸方向出力ピークをいかに低減するかということは、単に炉心の熱的余裕を増大するだけでなく、後述するように運転の容易さを増し、プラント利用率を向上させる上で重要な課題である。

従来、このボイド分布により生ずる軸方向の出力分布のひずみを打ち消すために、炉心下部から挿入する浅い制御棒と、これを補う部分長の可燃性中性子吸収材(Burnable Poison)を

装荷した燃料を使用している。日立製作所では、これら従来炉心の運転実績などを詳細に検討した結果、新たに「上・下濃縮度2領域燃料」を導入することにより、軸方向出力分布制御法の根本的改良を行なうことに成功した^{1),2)} すなわち、改良炉心では燃料を上・下2領域に分け、下部のウラン濃縮度を上部よりも若干小さくして、ボイドによる上・下の増倍率の差をほぼ打ち消し合って、上・下の増倍率がバランスする

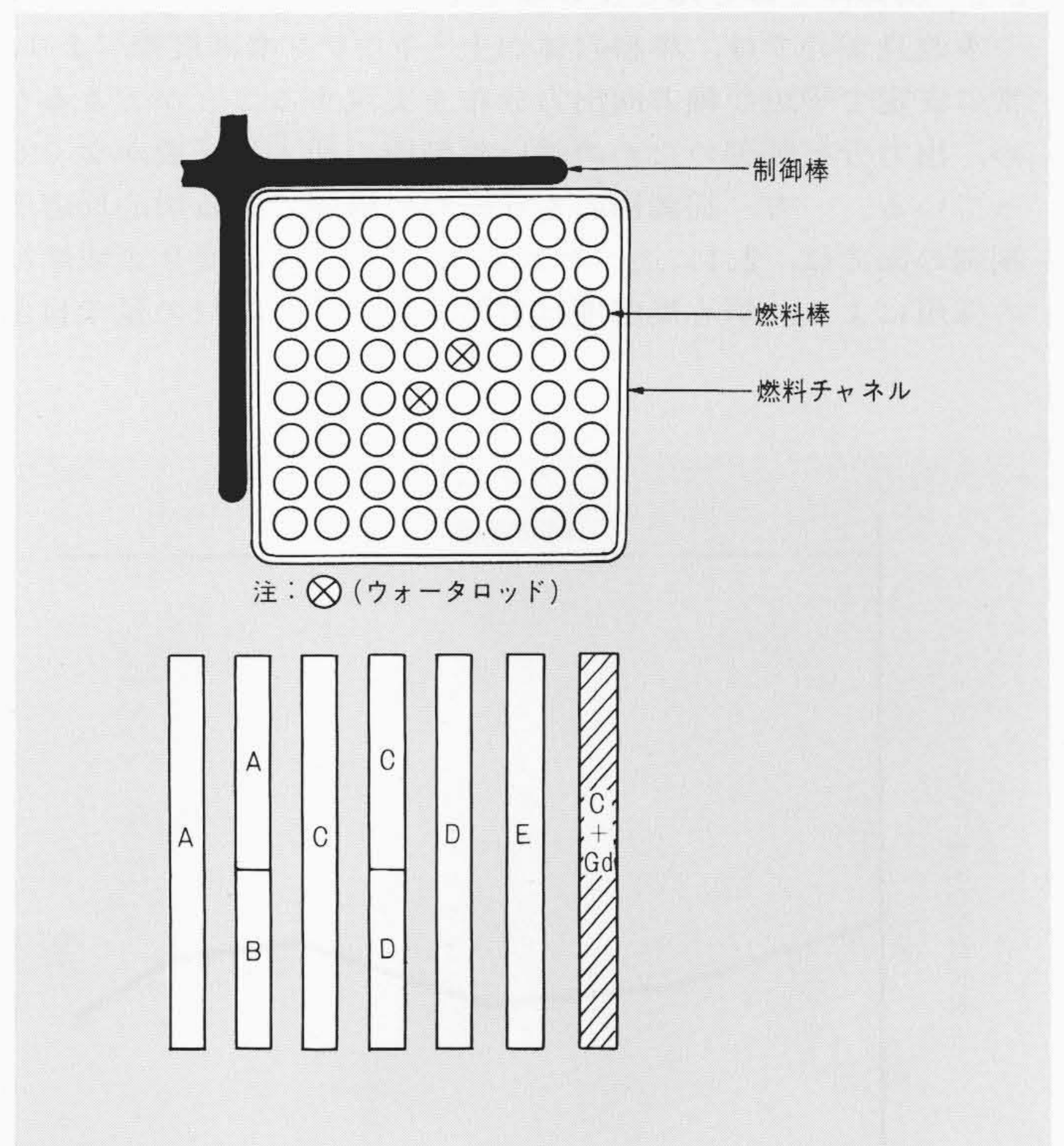


図1 燃料棒内濃縮度ガドリニア分布 燃料集合体内には、上・下2領域に濃縮度分布した燃料棒が採用されている。燃料棒内のアルファベット記号A～Eはウラン濃縮度を、Gdはガドリニアを表わす。

* 日立製作所電力事業本部 ** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 *** 日立製作所エネルギー研究所

方法を採用した。図1に「上・下濃縮度2領域燃料」の設計例を示す。

本改良炉心は、次に述べるような優れた特長をもっている。

(1) 設計信頼性の向上

ウラン濃縮度は特性が安定していて、これまでに十分実績があり、設計の信頼性は確立されている。改良炉心は、このように信頼性の高いウラン濃縮度差により、上・下増倍率差を制御する方法を採用しているため、設計の信頼性は十分高くなっている。

(2) 出力分布及び反応度変化の最適化

本改良炉心は、軸方向出力分布の制御に対して、出力分布を安定して平坦化し、炉心全体の反応度制御とは独立に選べる上・下ウラン濃縮度差方式を用いているため、軸方向出力分布の最適化が容易にできる。また、可燃性中性子吸収材は、軸方向出力分布の平坦化と切り離して、炉心反応度の制御に使用することができるようになった。

以上述べたように、改良炉心は上・下濃縮度2領域燃料の採用により、軸方向出力分布の平坦化と炉心反応度制御の機能とが分離され、それぞれを最適化することが可能になった。

(3) 出力分布平坦化の持続性

上・下濃縮度2領域燃料の効果は、燃焼するにつれて引き抜かれる制御棒や、燃焼とともに効果が小さくなる可燃性中性子吸収材と異なり、燃焼が進んでも上・下反応度差が持続する特性をもっている。このため、改良炉心は全運転期間を通じて常に安定で、平坦な出力分布で運転することができる。

図2、3に、上・下濃縮度2領域燃料を採用した炉心特性として、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出力比を示す。

2.2 制御棒をほとんど使わなくても運転できる炉心

本改良炉心では、燃料自体が上・下ウラン濃縮度差により、常に安定で平坦な軸方向出力分布を実現することができるため、出力分布制御のための浅い制御棒の挿入は必要がなくなっている。一方、制御棒のもう一つの機能である炉心反応度制御の面では、2.1に述べたように、上・下濃縮度2領域燃料の採用により、炉心反応度は可燃性中性子吸収材の量で自由

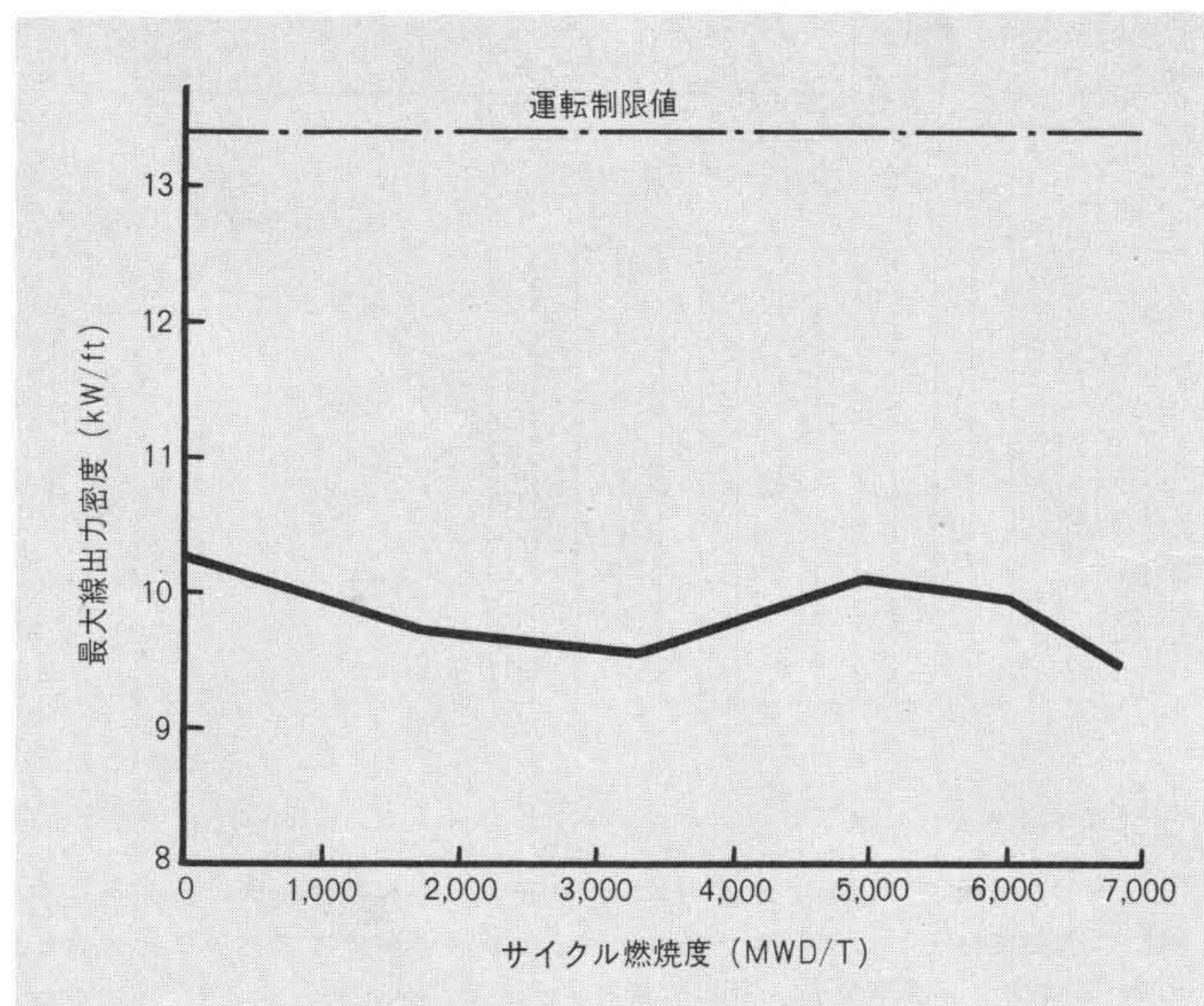


図2 最大線出力密度の燃焼に伴う変化(平衡サイクル) 燃焼に伴う燃料棒の最大線出力密度の変化を示す。運転制限値に対し、十分余裕をもっている。

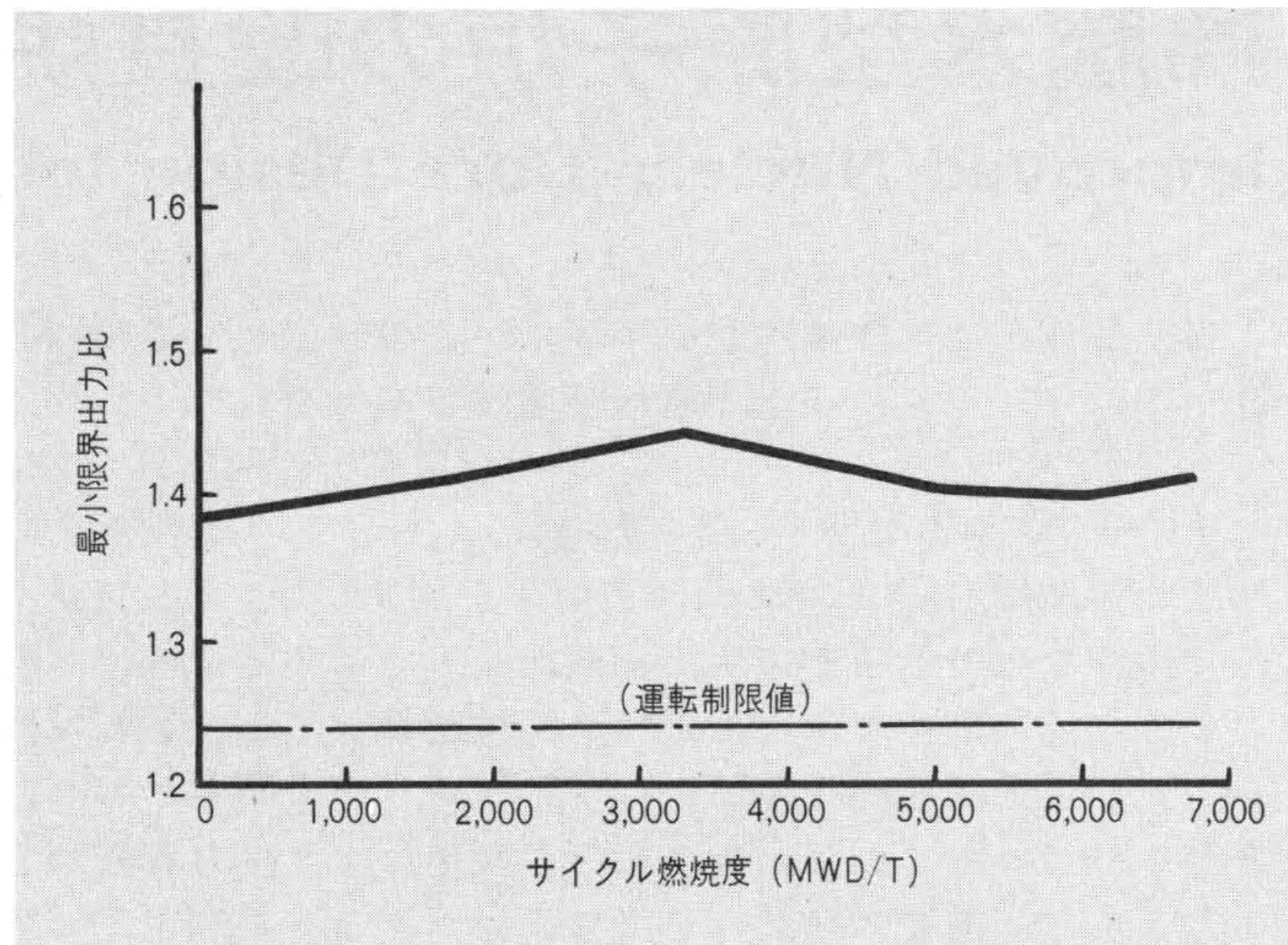


図3 最小限界出力比の燃焼に伴う変化(平衡サイクル) 燃焼に伴う最小限界出力比の変化を示す。運転制限値に対し、十分余裕をもっていることが分かる。

に制御できるため、この面からも制御棒をほとんど必要としなくなっている。すなわち、改良炉心は軸方向出力分布制御と炉心反応度制御の両方の面から制御棒をほとんど必要としないため、可燃性吸収材の適切な混合により炉心反応度を常に小さくして、運転中ほとんど制御棒を使わなくても済むように設計することが可能である。

更に、次に述べるようなコントロールセルの概念を組み合わせると、炉心性能はいっそう向上する。すなわち、制御棒周辺の4体の燃料を反応度の低い燃料としたコントロールセルを、炉心中央部に少数個配置しておき、運転中はコントロールセル内の制御棒だけを挿入することにより、制御棒パターンの交換を不要とすることができる。これは、制御棒周辺の燃料はもともと反応度を低くしてあるので、サイクル末期で制御棒を引き抜いても大きな出力ピークを生じないためである。図4に運転中の制御棒パターン例を示す。

以上述べたように、改良炉心では運転中に挿入する制御棒本数を極力少なくすることができるとともに、コントロールセルとの組合せにより、制御棒パターン交換を不要とすることができ、炉心性能は次に述べるようにいっそう向上する。

- (1) 運転中に挿入する制御棒本数が少なく、それをほとんど動かす必要がないため、運転が非常に簡単となる。
- (2) 制御棒パターンの交換や調整に伴うプラント利用率の損失がほとんどない。
- (3) 制御棒の中性子照射量が減少し、使用済み廃棄物量が低減する。

2.3 長期化運転に最適な炉心

原子炉の運転期間を長期化し、プラント稼動時間を上げることは、プラント設備の利用率を高くする上で極めて有効な手段である。近年、このようなプラント運転期間の長期化の傾向がでてきたことは、ごく自然なことと言える。図5に、12箇月運転の従来型炉心と15箇月運転の改良型炉心の例について、運転履歴をモデル化して示した。原子炉の運転を長期化するに当たっては、炉心出力分布特性や炉停止余裕など反応度特性が影響を受けるので、これを十分検討する必要がある。まず、炉心長期化運転に際し、炉心特性上重要な項目の一つは、長期間にわたり安定した出力分布で運転でき、運転計画の変動に対しても十分対処できるよう、出力分布が平坦

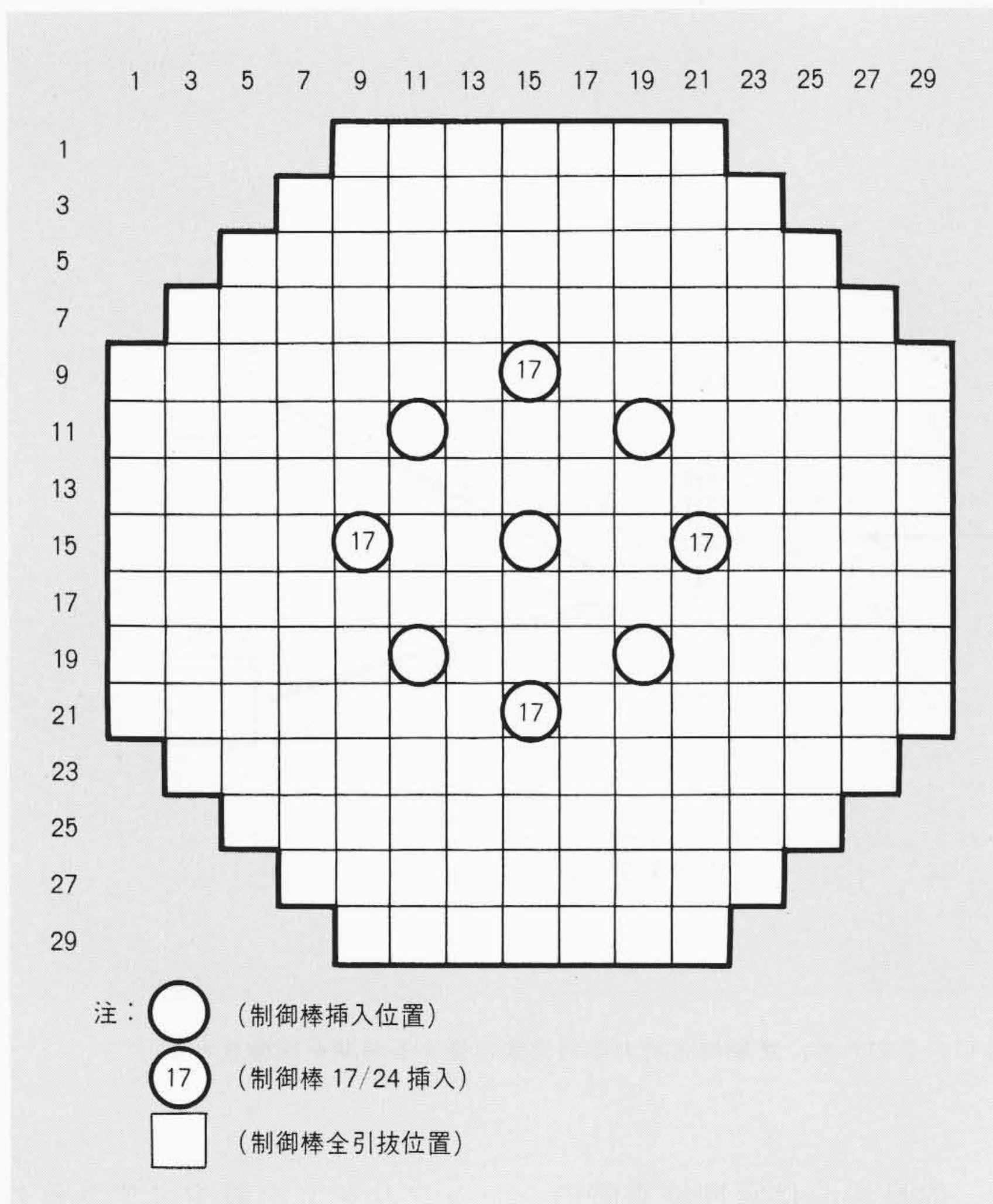


図4 制御棒パターン 改良炉心では出力運転中にはごく少数の深く挿入した制御棒だけを使い運転される。コントロールセルを採用すると、更に制御棒は、出力運転中一定の位置に挿入されたままで運転することができる。

化されていることである。また、燃料の交換本数や平均濃縮度が増えるので、炉停止余裕が十分確保されている必要がある。

これらの点から、本改良炉心の運転長期化に伴う適応性を考察してみる。改良炉心は、前述したように燃料自体に付加した上・下反応度差により平坦な出力分布を実現する。上・下濃縮度差の効果は、燃焼が進んでも消えることなく一定の反応度差をもち続けるため、運転期間が長期化してもほとんど影響されることがなく、出力分布は常に平坦に保たれる。更に、炉停止余裕の点からは、2.2で述べたように、炉心の反応度を十分低く抑えても運転上全く問題がないので、炉停止余裕を十分大きくすることができる。以上述べたように、改良炉心は炉心出力分布及び炉停止余裕の点に優れており、運転長期化に対し最も適した炉心であるといえる。

2.4 燃料シャッフリングの少ない炉心

従来、半径方向の出力分布平坦化を目的として、定期検査時に行なわれてきた燃料シャッフリングを、改良炉心では最少に済ませることができるとも一つの特長である。すなわち、改良炉心では、炉心内のコントロールセルなどの一部分を除き、炉心内に一度装荷された燃料は、その燃料が取り出されるまで(3～6年)同一の場所に滞在させる。定期検査時には、炉心内の燃料の $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ が取り出され、同数の新しい燃料が炉心に装荷されるが、この場合、新燃料は取り出された燃料の場所に装荷される。図6に装荷法の例を示す。このような燃料装荷法を採用することにより、従来炉心では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ていたのに比べ、改良炉心では燃料シャッフリングが不要になった分だけ定期検査時の燃料交換時間が短縮される。これにより、

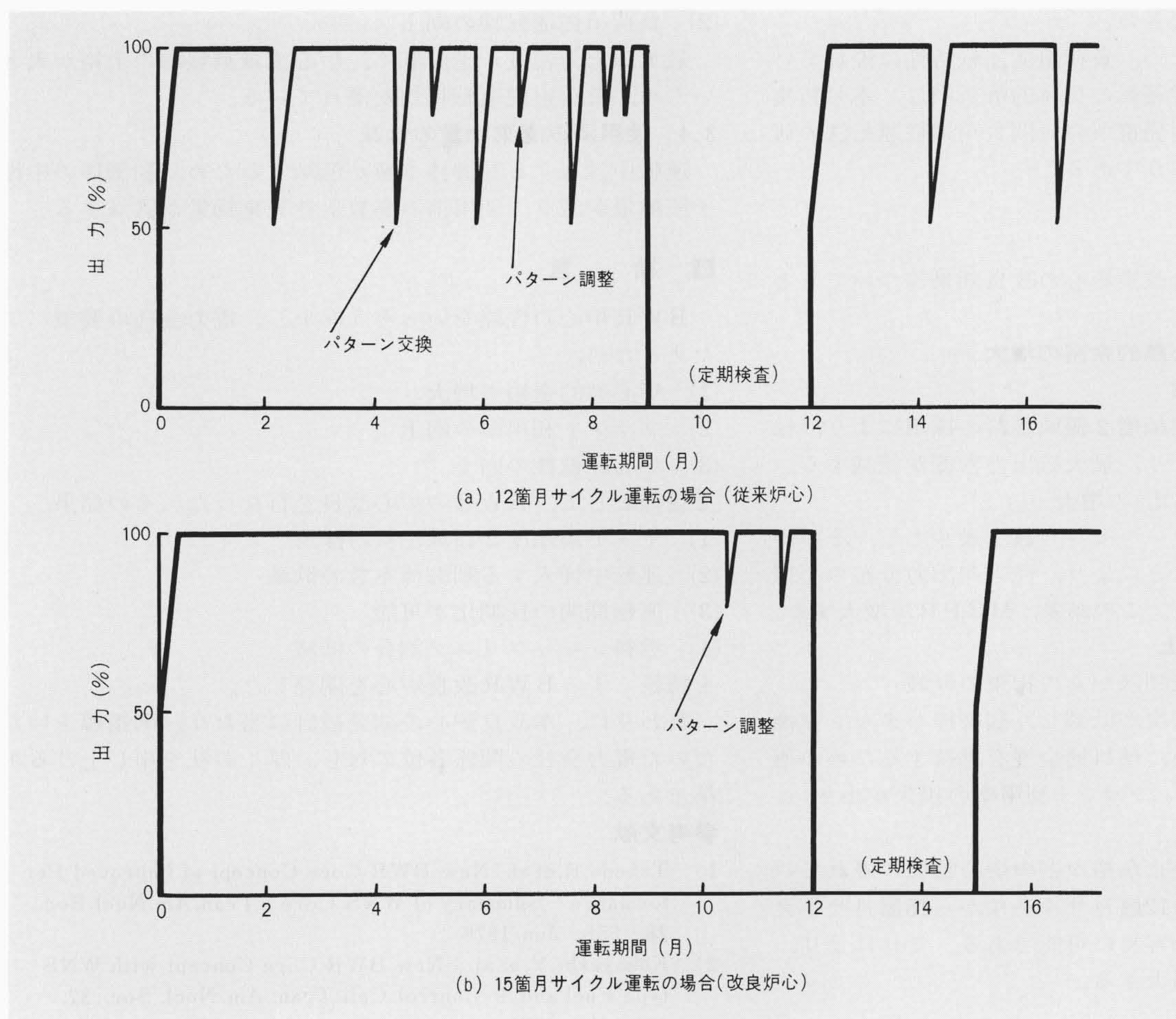


図5 出力運転履歴の比較 定期検査期間を3箇月とした場合の12箇月サイクル運転と、15箇月サイクル運転の出力履歴例を示す。このような運転長期化により、プラント利用率は約5%増大する。

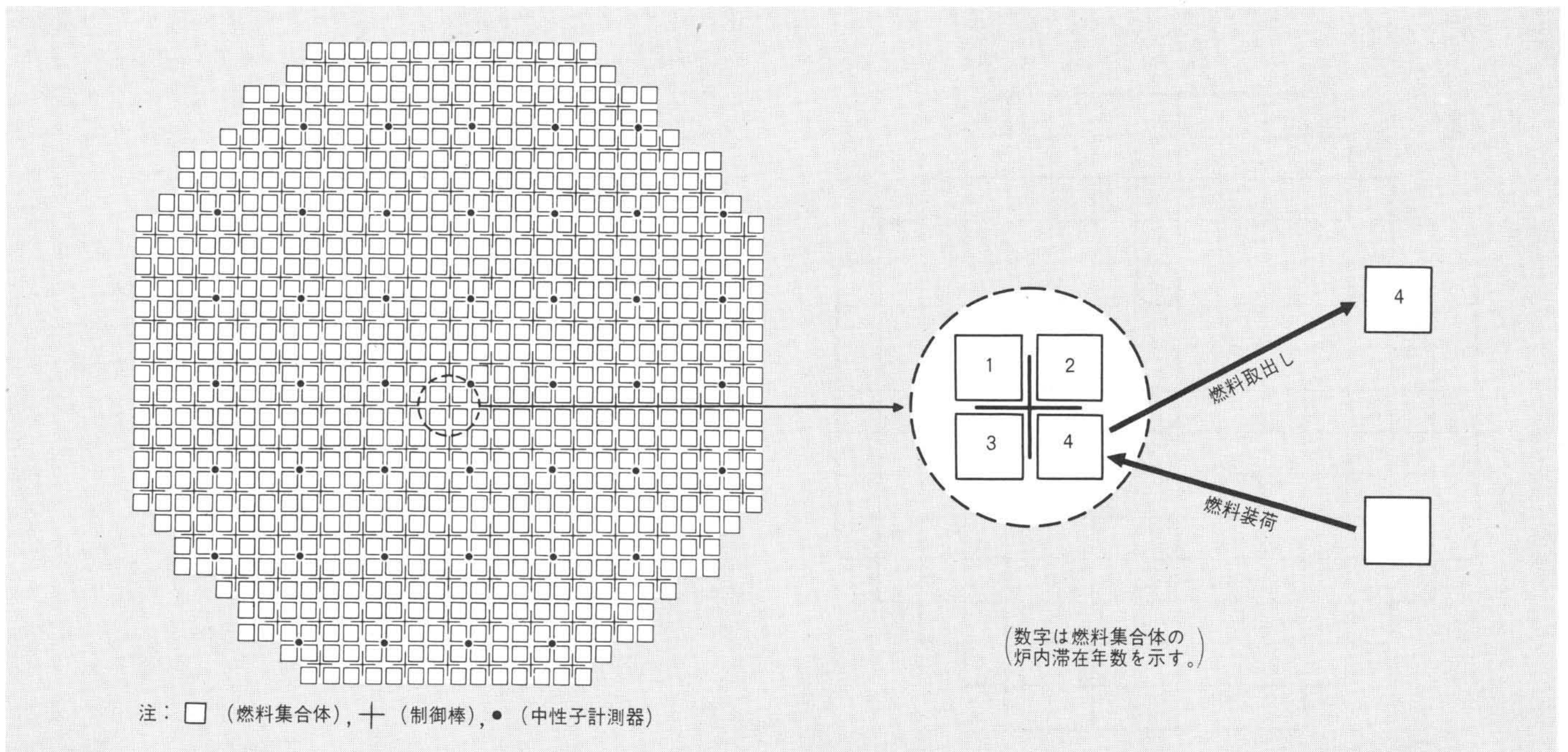


図6 燃料交換方法例 改良炉心では、原則として燃料シャッフリングをしない。このため、定期検査時の燃料交換に要する時間が短縮される。

定期検査期間の短縮とプラント利用率の向上に寄与することができる。

2.5 負荷追従運転に優れた炉心

本改良炉心は、前述したように、

- (1) 最大線出力密度が十分低い。
- (2) 炉心余剰反応度変化が少なく、炉心反応度制御のために使える炉心流量の余裕が大きい。

などの特性をもっているため、負荷追従運転特性に優れている。本改良炉心の負荷追従運転の具体的解析例は、本号特集別論文の「沸騰水型原子力発電所の日間負荷追従運転法の研究」に述べられているとおりである。

3 改良炉心の効果

本章では、以上に述べた改良炉心の改良効果についてまとめて述べる。

3.1 信頼性の向上 — 炉心熱的余裕の増大 —

- (1) 最大線出力密度の低減

改良炉心では、上・下濃縮度2領域燃料の採用により、軸方向の出力分布が平坦になり、最大線出力密度が低減する。

- (2) MCPR(最小限界出力比)の増大

改良炉心では、コントロールセルの数を最少とし、その炉心内の配置を最適にすることにより、径方向出力分布の平坦化に役立てることができる。この結果、MCPRは増大する。

3.2 プラント利用率の向上

- (1) 燃料健全性維持の運転制限からの拘束の軽減

改良炉心は最大線出力密度が低減し、制御棒パターン交換や調整がほとんどないため、燃料健全性を維持するための運転制限からの拘束が少なく、プラント利用率の損失が小さい。

- (2) 運転長期化

改良炉心は出力分布や停止余裕などの炉心特性に優れているため、運転期間を従来の12箇月サイクルから15箇月サイクルなどに長期化することが容易に可能である。これにより、プラント利用率が約5%増大する。

- (3) 定期検査期間の短縮

改良炉心は定期検査時のシャッフリングを最少にできるので、定期検査期間の短縮に寄与する。

3.3 運転性の向上

- (1) 運転の単純化

改良炉心は、制御棒をほとんど使わない運転ができ、制御棒パターンの交換が不要であるので、運転が極めて簡単である。

- (2) 負荷追従運転性の向上

最大線出力密度が十分低く、炉心流量調整幅の余裕が大きいので、負荷追従運転特性が優れている。

3.4 使用済み廃棄物量の低減

運転中挿入する制御棒本数が低減するため、制御棒の中性子照射量が減り、使用済み高放射性廃棄物量が低減する。

4 結 言

BWR炉心の性能をいっそう向上し、電力会社の要望にこたえるため、

- (1) 炉心熱的余裕の増大
- (2) プラント利用率の向上
- (3) 炉心運転性の向上

を目標として、BWRの炉心改良を行なった。その結果、

- (1) 上・下濃縮度2領域燃料の採用
- (2) 運転中挿入する制御棒本数の低減
- (3) 運転期間の長期化が可能
- (4) 燃料シャッフリング割合の低減

を特長とするBWR改良炉心を開発した。

終わりに、本改良炉心の開発設計に当たり、御指導をいただいた電力会社の関係各位に対し、厚くお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Takeda, R, et al.: New BWR Core Concept of Improved Performance—Summary of WNS Core—Tran. Am. Nucl. Soc., 28, 558, Jun. 1978
- 2) Kobayashi, Y, et al.: New BWR Core Concept with WNS-type Fuel and 9 Control Cell Tran. Am. Nucl. Soc., 32, 641, Nov. 1979