

上下2領域初装荷炉心の運転実績

BWR Operating Experience with Axially Two-zoned Initial Core

我が国の沸騰水型原子力発電所の運転経験は14年に達し、この経験と実績をベースに燃料の熱的余裕の増大、プラント利用率の向上を目標として炉心改良の検討を進めた。日立製作所独自の自主技術を発展させた上下2領域燃料が開発され、また、燃料健全性の観点から、グレーノーズ制御棒が開発された。

上下2領域燃料は、東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機の初装荷燃料として全炉心に装荷され、軸方向出力分布平坦化、最大線出力密度低減など、設計どおりの性能を示している。

今後のBWR炉心燃料の標準型設計として同機と同じ設計思想に基づいた炉心が採用されていく計画であり、同機の運転実績はこれらの最初の実証として重要な意義をもっている。

下重孝則* *Takanori Shimoshige*

山下淳一* *Jun'ichi Yamashita*

斉藤荘蔵* *Shōzō Saitō*

1 緒言

沸騰水型原子力発電所の運転経験は、日立製作所が主契約メーカーとして納入した中国電力株式会社島根原子力発電所1号機（以下、島根1号機と略す。）、東京電力株式会社福島第一原子力発電所4号機（以下、福島4号機と略す。）、同社福島第二原子力発電所2号機（以下、福島第二・2号機と略す。）をはじめ、我が国全体で14年にも達し良好な運転実績を得ている。

これらの経験と実績に基づき、炉心内の出力分布の平坦化などにより、燃料健全性を維持するための運転制限(PCIOMRと称する出力上昇時の燃料に対する一種のならし運転)からの拘束を極力少なくして運転の融通性を増大させ、また、プラント利用率の向上を図るとともに、長期化運転(12箇月サイクル運転が15箇月サイクル運転になるなど)にも適した炉心設計の検討を積み重ね、上下2領域燃料・グレーノーズ制御棒を用いる改良炉心を開発した。

本稿では、改良炉心の基本概念と、これら改良設計を採用した福島第二・2号機についてその運転実績を述べる。

2 上下2領域炉心

2.1 上下2領域炉心の特徴

BWR(沸騰水型原子炉)の特徴として、炉心内で直接蒸気が発生するため、炉心の下部でボイド(蒸気泡)が少なく上部で多いという性質がある。このボイド分布により軸方向の中性子減速効果に差が生じて出力分布は炉心下方に膨らみ、出力ピークを生ずる傾向となる。したがって、炉心燃料の熱的余裕を増大させる上で、炉心上下の反応度を適切に制御し、出力分布を平坦化することが設計上重要となる。従来設計では、この軸方向出力分布の下部出力ピークを抑えるため、炉心下部から浅く挿入する制御棒を用いていた。制御棒の挿入は大きな反応度抑制効果をもっており、炉心下部の燃焼が炉心上部に比べて遅れることになり、サイクル末期で制御棒を引き抜こうとすると、炉心下部の出力ピークが大きくなる。

改良設計では、燃料のウラン濃縮度を上・下2領域に分け、上部のウラン濃縮度を下部のそれよりも高くすることを設計ベースとし、ガドリニア(可燃性中性子吸収材)濃度も上部の

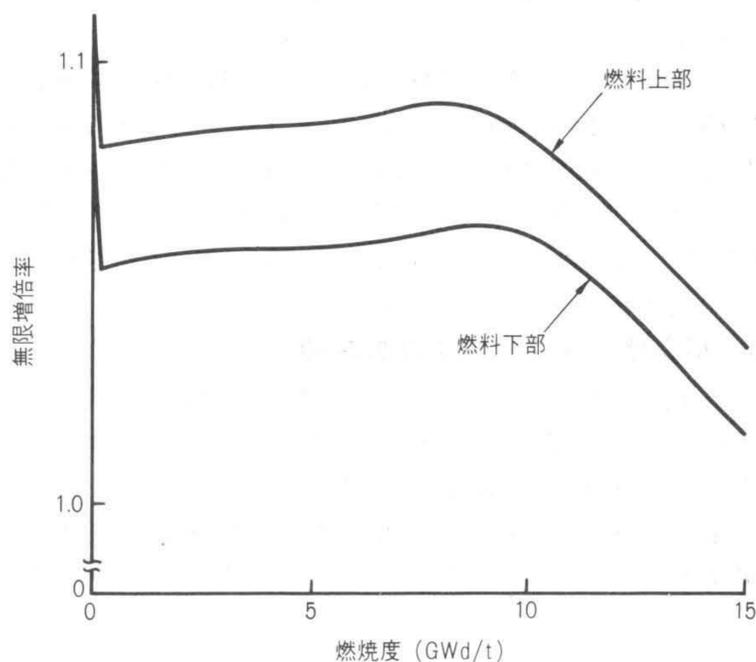


図1 上下2領域燃料の無限増倍率 燃料上部、燃料下部の反応度差が燃焼を通じてほぼ一定している。

濃度を下部のそれよりも低くして、ボイドによる上・下の反応度差をほぼ打ち消して上・下の反応度をバランスさせ、燃料自体で出力分布が平坦になるように設計したものである。また、ウラン濃縮度2領域による効果は、燃焼が進んでも安定に持続する特徴をもっている。図1は、燃料上部及び燃料下部それぞれでの燃焼に伴う無限増倍率の変化を示したものである。

以上の特徴から、上下2領域炉心は下記の効果をもっている。

- (1) 軸方向出力分布が十分平坦化される。その結果、当然のことながら最大線出力密度に対する熱的余裕も増大する。
- (2) サイクル末期に出力分布調整のための制御棒を残す必要がないので、燃料を有効に燃焼させることが可能である。
- (3) 濃縮度分布を出力分布制御のベースとしているため、炉心設計、運転計画の精度が高くなる。
- (4) 燃焼を通じ出力分布の平坦化が維持される。
- (5) 浅い制御棒を必要としないので、制御棒計画が単純になり運転が容易となる。

* 日立製作所日立工場

2.2 上下2領域炉心の運転実績

2.2.1 上下2領域燃料の装荷実績

日立製作所がこれまでに納入した燃料は、7×7燃料が1,085体、8×8燃料(上下2領域燃料を含む。)が2,060体の合計3,145体であり、7×7燃料1,085体は既に全数取り出されている。図2に、炉内滞在燃料体数及び燃料タイプ別内訳の年度別推移を示す。上下2領域燃料は、昭和55年春、まず島根1号機に取替燃料の一部として8体が装荷され、その後、福島4号機に取替燃料として140体、168体と順次装荷され、昭和58年春、福島第二・2号機に初装荷燃料として全炉心に764体が装荷された。現在、炉内滞在燃料はすべて8×8燃料であり、そのうち上下2領域燃料は1,124体と全体の約65%に達している。

2.2.2 上下2領域燃料の先行実績

燃料のウラン濃縮度分布を軸方向に2領域としたWNS^{*}燃料¹⁾が、以下のように実炉に装荷され、燃料単体特性の確認及び取替炉心の特性改良が実証されてきた。

- (1) 島根1号機に、取替燃料の一部としてWNS燃料が8体装荷され(昭和55年5月)、燃料単体特性として軸方向出力分布の平坦化効果が確認された²⁾。
- (2) 福島4号機(電気出力784MW)では、WNS燃料が第2回取替燃料として140体装荷され、第3サイクル(昭和56年12月から開始)の運転実績から、深挿入制御棒だけの運転、制御棒パターンの単純化、軸方向出力分布の平坦化が実証され、WNS燃料が取替燃料として炉心内に部分的に装荷されても炉心特性が改善できることが実証された。

2.2.3 福島第二・2号機の運転実績

上下2領域燃料が福島第二・2号機の初装荷燃料として全炉心に初めて装荷された。装荷した燃料の燃料集合体内濃縮度・ガドリニア分布を図3に示す。

福島第二・2号機は、昭和59年2月営業運転を開始し、現在、第1サイクル運転中であるが、これまでの運転実績で実

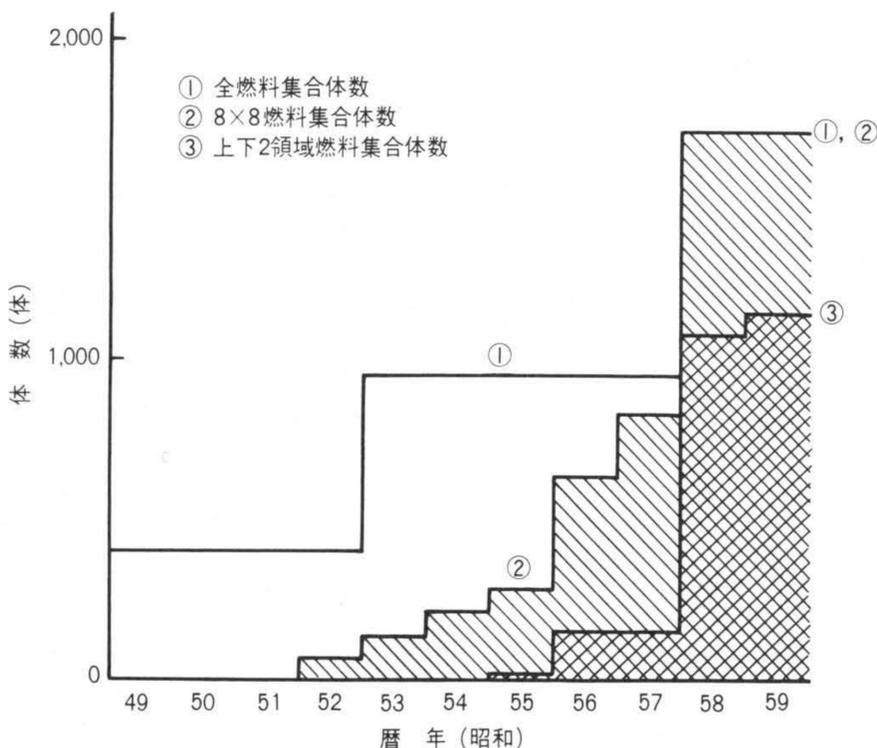


図2 炉内滞在燃料の推移 現在では、装荷されている燃料はすべて8×8燃料であり、そのうち上下2領域燃料は全体の約65%を占めている。

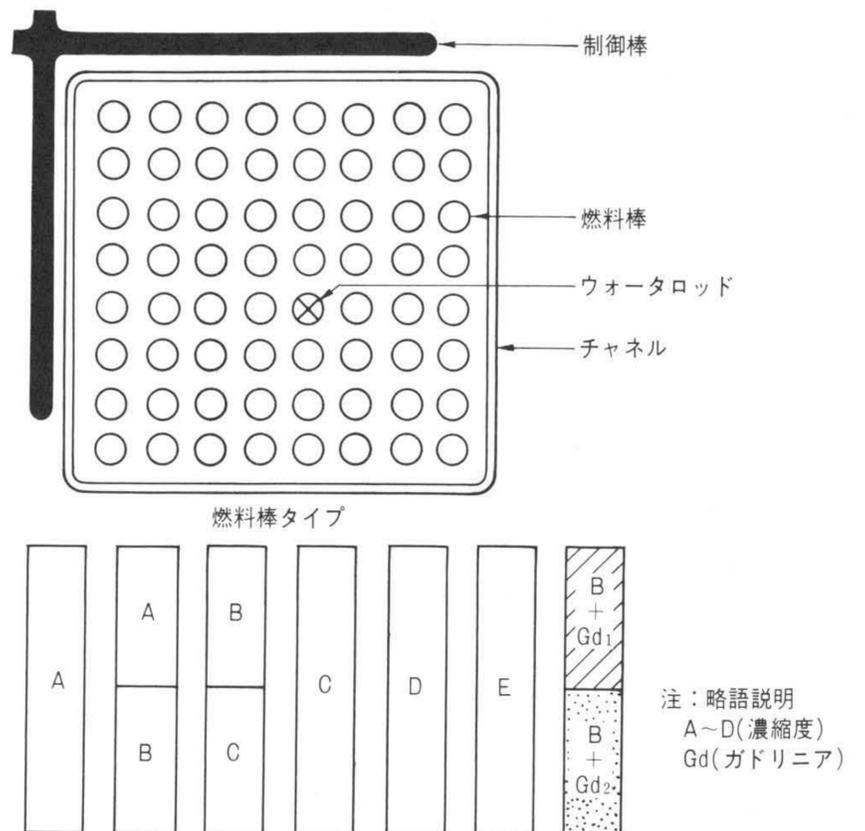


図3 燃料棒内濃縮度ガドリニア分布 燃料集合体内には、上・下2領域に濃縮度分布及びガドリニア分布した燃料棒が採用されている。燃料棒内のアルファベット記号A~Eはウラン濃縮度を、Gdはガドリニアを表わす。

証された上下2領域炉心の特長を、同型先行機の実績と比較して示す。

(1) 軸方向出力分布の平坦化

制御棒パターン及び炉心平均軸方向出力分布の実績の一例を図4に示す。同図に示すように、上下2領域炉心では、浅挿入制御棒を用いることなく軸方向出力分布が十分平坦化され、出力ピークが約20%改善されている。図5は、TIP(可動型炉内中性子検出器)の測定による炉心の半径方向の代表的な位置での軸方向出力分布を示す。同図から、炉内のどの位置でも出力分布が平坦化されていることが分かる。

(2) 燃料の熱的余裕の増大

最大線出力密度及び最小限界出力比について図6に示す。前述した軸方向出力分布平坦化により、同図に示すように同型先行機に比べ最大線出力密度は、約20%以上改善された。最小限界出力比は、ほぼ同程度であることが分かる。

軸方向出力分布平坦化によって最大線出力密度が大幅に改善されたことにより、PCIOMR下での制御棒パターン調整のための出力低下幅が少なく済み、プラント利用率の向上に寄与する。また、上下2領域炉心ではガドリニア設計を適切にしたことにより、サイクル期間を通じて余剰反応度が平坦化され、制御棒パターン調整の回数が低減され、プラント利用率の向上に寄与する。図7に、第1サイクルの出力負荷曲線を同型先行機と比較して示す。前述した効果により、約2%プラント利用率の向上が期待される。

(3) 運転性の向上

BWRはPCIOMRを遵守して運転されている。福島第二・2号機は、上下2領域燃料の採用により、前述したように大幅に最大線出力密度が改善され、約10kW/ftで運転されている。燃料燃焼初期に最大線出力密度が約10kW/ftであることは、PCIOMR適用のしきい線出力密度(燃焼初期)よりも低いことから、PCIOMRの拘束を受けなくて済み、この期間の運転はより単純となり運転性が向上した。

(4) 制御棒パターンの単純化

制御棒パターンの実績例は先の図4に示したとおりである。

※) 本燃料を用いた改良炉心の特徴であるNo Shuffling(燃料交換時に新燃料以外の燃料移動不要) and No Shallow(浅い制御棒不要)の二つのNSから日立製作所で名付けた。

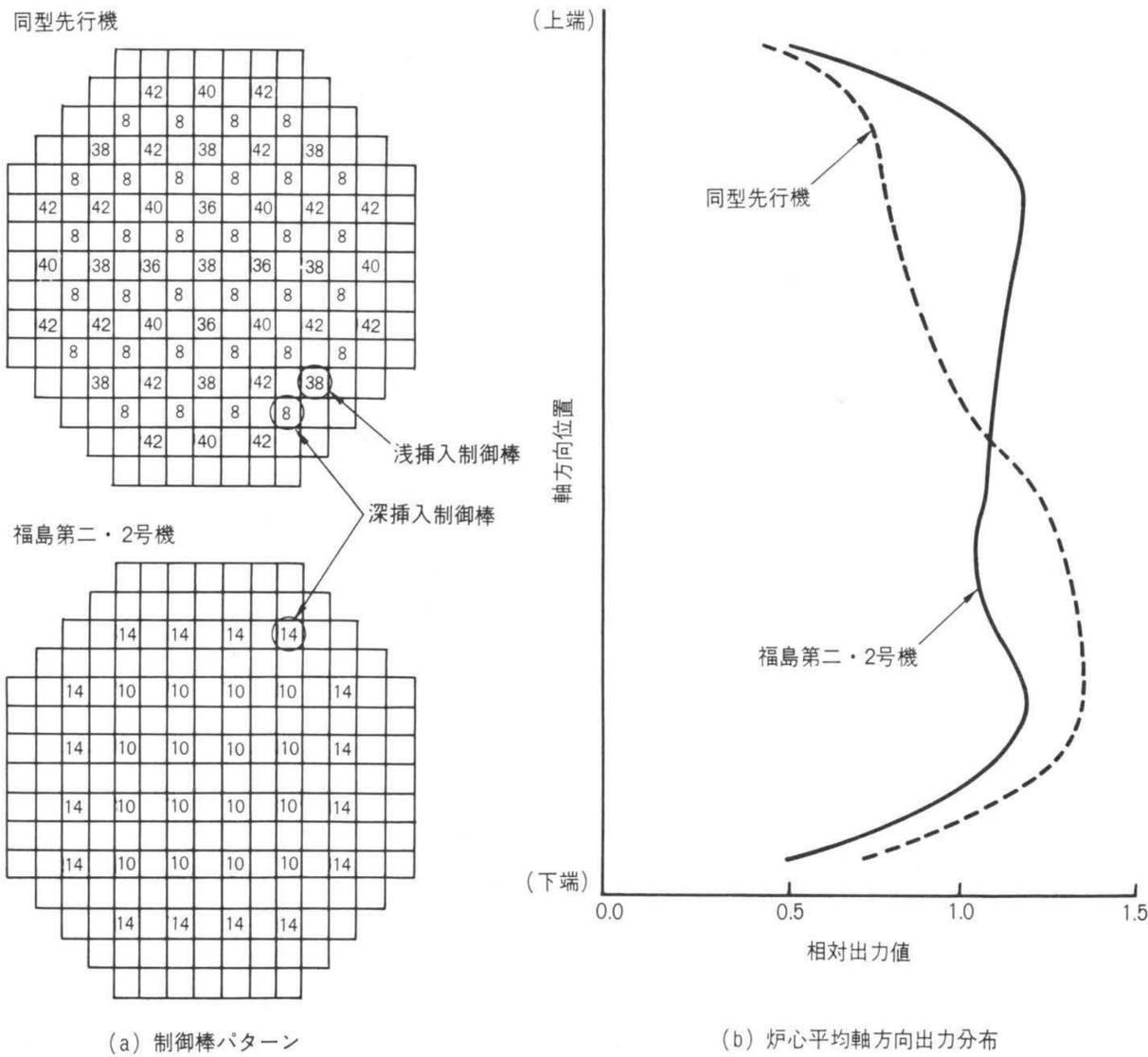


図4 軸方向出力分布と制御棒パターンの実績 福島第二・2号機の軸方向出力分布は、先行機に比べて十分平坦化されている。制御棒を示す数字は引抜きノッチ数を、48及び空白は全引抜きを意味する。

同図から、福島第二・2号機では、同型先行機と比較して、浅挿入制御棒が不要となり深挿入制御棒だけであり、したがって、制御棒本数も従来の約半数となっている。このように使用制御棒本数が少なくなったことにより、制御棒取替本数の低減が期待できることから、制御棒取替に要する定期検査期間を短縮するとともに、固体廃棄物量の低減をも図れる。

2.3 取替燃料

福島第二・2号機の取替燃料は、初装荷燃料の設計思想と同じ上下2領域燃料を採用する。これにより、取替炉心でも初装荷炉心と同様、(1)軸方向出力分布の平坦化、(2)燃料の熱的余裕の増大、(3)制御棒パターンの単純化(深挿入制御棒だけの運転など)が図れる。

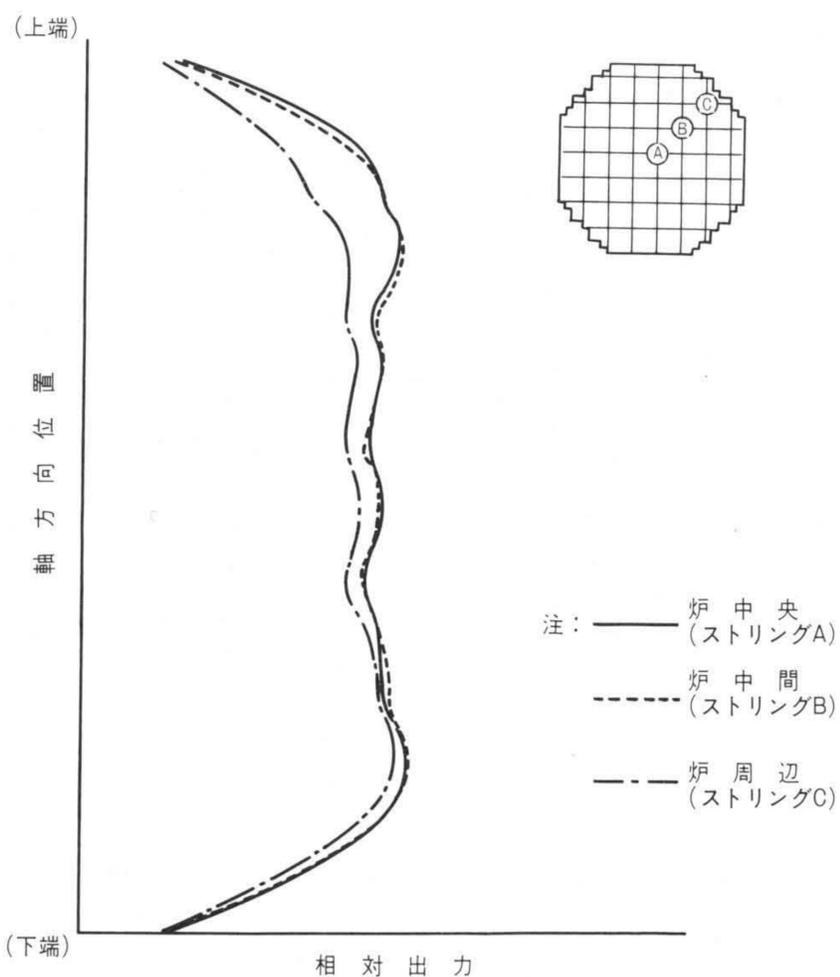


図5 半径方向位置での軸方向出力分布測定値 半径方向のどの位置でも、軸方向出力分布は十分平坦化されている。

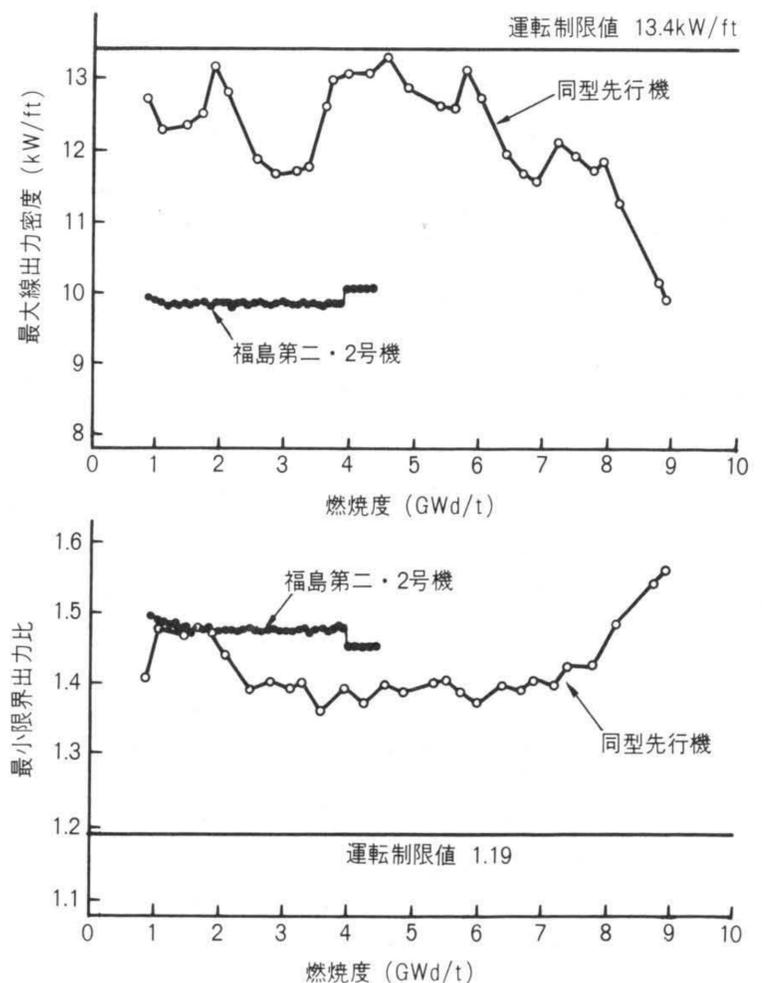


図6 最大線出力密度と最小限界出力比 福島第二・2号機では、最大線出力密度が上下2領域燃料の効果により20%以上改善されている。

3 グレーノーズ制御棒

3.1 グレーノーズ制御棒の考え方

従来制御棒は、制御棒の大きな反応度効果のため制御棒部分とその先端の制御棒なしの部分とで大きく出力分布が変化していた。

これに対し、グレーノーズ制御棒は、 B_4C (ボロンカーバイド) を主な中性子吸収物質とする制御棒の先端に、吸収能力が B_4C よりも小さい部材 (不銹鋼) を設け、これにより制御

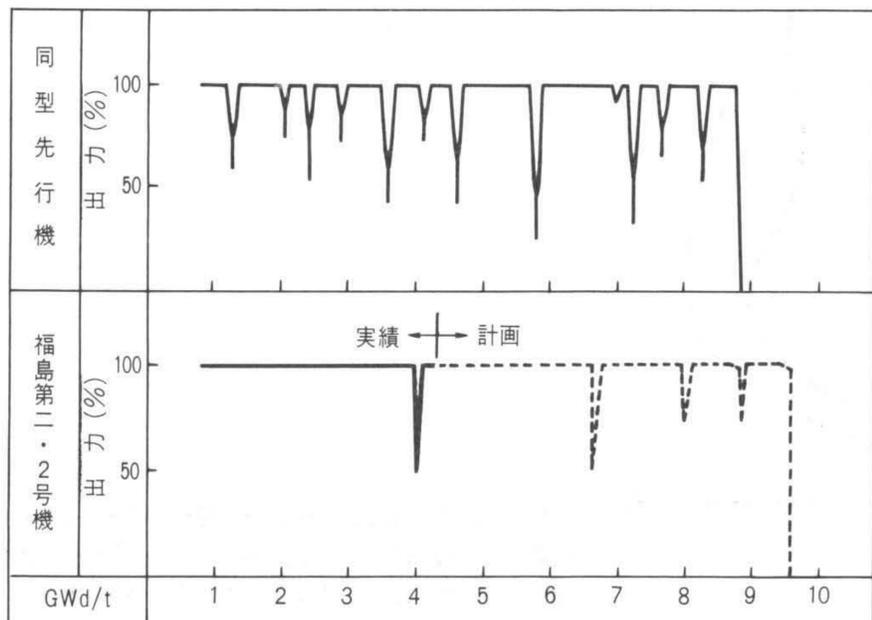


図7 出力負荷曲線 福島第二・2号機では、先行機に比べて制御棒パターン・調整回数が大幅に低減する。

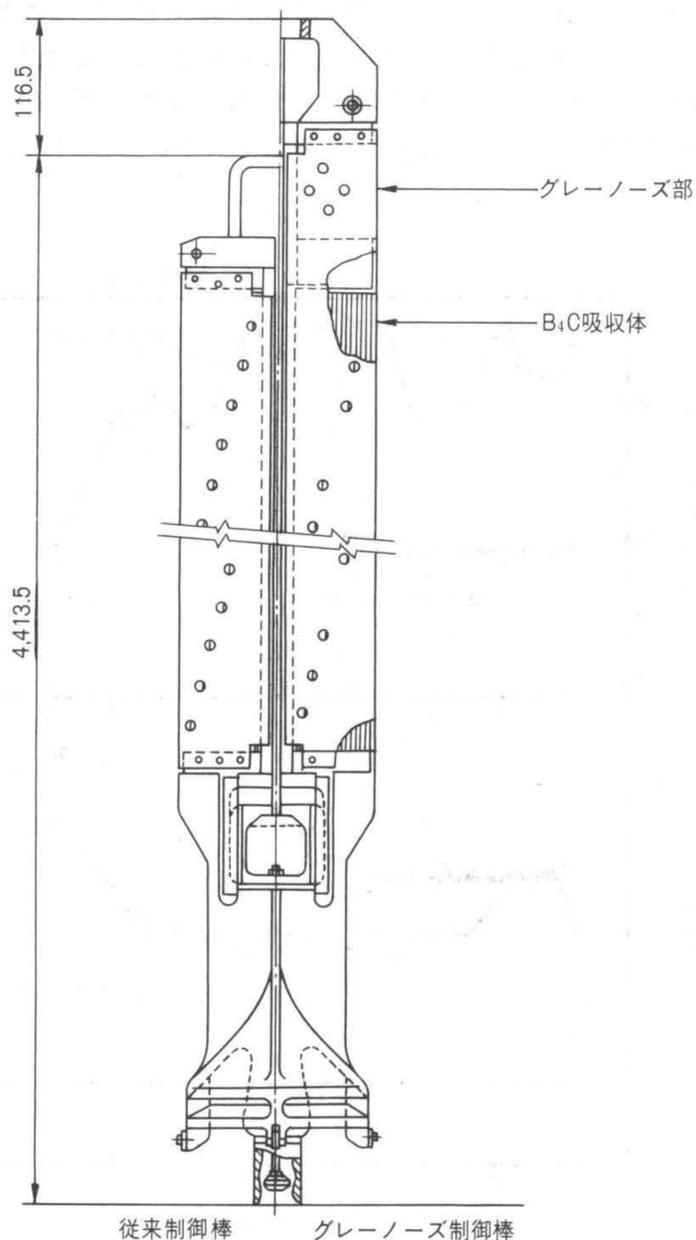


図8 従来制御棒とグレーノーズ制御棒の比較 グレーノーズ制御棒は、従来制御棒の先端に吸収能力が B_4C よりも小さい部材を設けたものである。

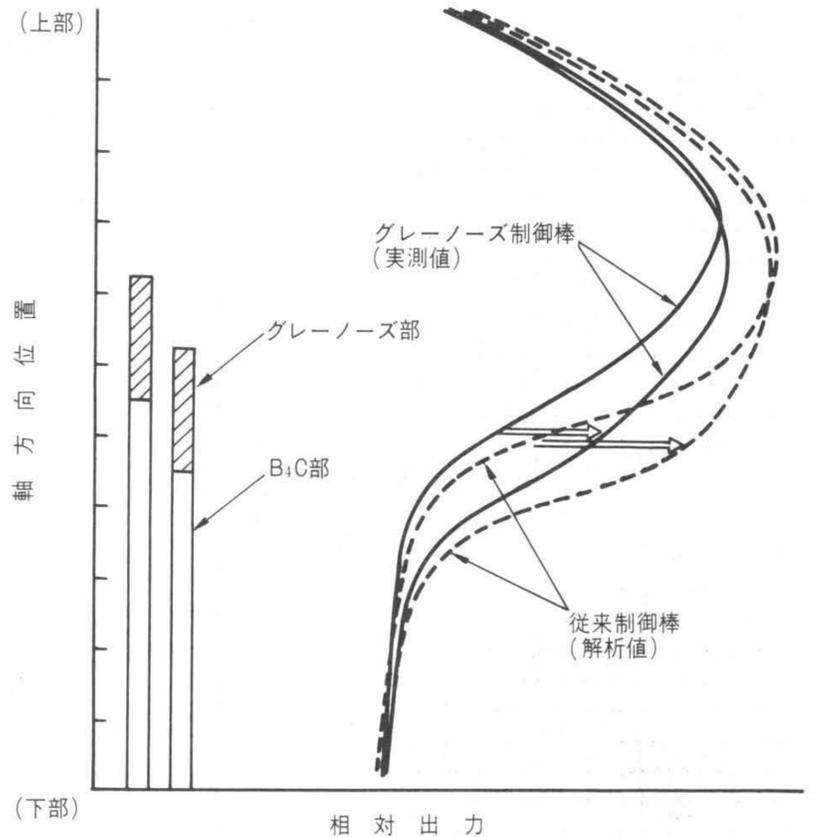


図9 グレーノーズ制御棒の効果 グレーノーズ制御棒による出力上昇幅は、従来より約30%低減される。

棒としての吸収能力を B_4C 、不銹鋼、制御棒なしと段階的に変わることとし、制御棒先端部付近の出力分布変化を緩やかにするものである。

3.2 グレーノーズ制御棒の実績

福島第二・2号機に採用されているグレーノーズ制御棒の構造を、従来型制御棒と比較して図8に示す。

グレーノーズ制御棒は、制御棒引抜きに伴って生ずる線出力密度変化を低減することが特長であり、制御棒操作に伴う出力分布測定値を図9に示す。同図には、出力分布の解析値を従来制御棒の場合とともに示してある。同図から、グレーノーズ制御棒の引抜きでは従来制御棒の場合に比べて、線出力密度の変化幅が低減していることが分かる。

4 結 言

原子力発電所のプラント利用率向上、運転性向上、燃料の熱的余裕増大を目的として上下2領域燃料、及びグレーノーズ制御棒を開発した。これらを採用した福島第二・2号機の運転実績から改良炉心は設計どおりの特性をもっていることが実証された。

今後のBWR炉心燃料の標準型設計として、福島第二・2号機と同じ設計思想に基づいた炉心が採用されてゆく計画であり、福島第二・2号機はこれらの最初の実証として重要な意義をもっている。

最後に、本開発設計及び運転に当たり、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上げる。

参考文献

- 1) R. Takeda, et al. : New BWR Core Concept of Improved Performance-Summary of WNS Core, Trans. Am. Nucl. Soc. 28, 558 (1978)
- 2) O. Sugimoto, et al. : BWR Operating Experience at Shimane-1 with WNS Type Initial Fuel, Trans. Am. Nucl. Soc. 39, 912 (1981)
- 3) A. Aoki, et al. : BWR Operating Experience at Axially Two-Zoned Fuel Core, Trans. Am. Nucl. Soc. 45, 743 (1983)