

# 中国電力株式会社島根原子力発電所原子炉炉心 運転実績と炉心管理システム

## Operating Experience of Shimane Nuclear Power Station, Chugoku Electric Power Co., Inc. and Core Management Engineering Systems

中国電力株式会社島根原子力発電所は、本格的な原子力発電所の国産第1号機として昭和49年3月29日営業運転を開始した。運転開始後は運転計画に基づき順調な稼働を続け、昭和50年2月16日第1回の定期検査に入った。49年度発電所利用率は75.6%と好稼働率をみせ、運転開始後1年半以上を経た現在まで燃料は健全性を保持して運転している。この間、本発電所の運転に適用した燃料の熱的負担を軽減する運転法及び原子炉の運転に必要な制御棒計画をはじめとする炉心管理技術情報を作成する炉心管理システムの概要について記述する。

仁木可也*	Yoshiya Niki
平沼博志**	Hiroshi Hiranuma
小沢通裕***	Michihiro Ozawa
元田 浩****	Hiroshi Motoda
河原 暉*****	Akira Kawahara

### 1 緒 言

中国電力株式会社島根原子力発電所第1号機は、我が国における本格的な原子力発電所の国産第1号機として、昭和45年2月11日本工事に着手し、昭和49年3月29日に営業運転を開始した。同発電所は、不測の事故停止もなく運転計画に従って順調な運転を続けている。

図1に運転状況を、表1に運転実績を示す。図1中の連続運転中の出力変化は、制御棒シーケンス交換及び制御棒パターン調整を示すものである。発電所は高稼働率を維持し、燃料集合体の最高燃焼度は、約9,780MWd/tに達している。第1回の定期検査時の燃料体検査や運転時の各種測点データから燃料は健全性を保持して運転されている。

これらの運転実績は、原子炉の設計・製造・据付技術はもとより、炉心管理技術に基づく慎重且つ計画的な運転に負うところが大きい。本発電所の建設及び運転に当たっては、燃料の健全性を確保するために基礎研究の成果を結集した。また、長年にわたる自主開発で培われてきた核熱水力設計技術を駆使したプログラムシステムを中心とした炉心管理技術を適用することにより、燃料の熱的負担を軽減するきめ細かな

運転を可能とした。

本稿は、本発電所の好調な運転の基礎となっている種々の技術のうち、炉心性能に密接な関連のある燃料の健全性、運転法及びこの運転に不可欠な炉心管理技術の概要について説明する。

### 2 原子炉及び燃料仕様

本原子力発電所は、沸騰水型原子炉(以下、BWRと略す)である。表2に原子炉及び燃料仕様を、図2に燃料集合体と制御棒の配置状況を示す。炉心は、燃料集合体400体と制御棒97本とから成る。

燃料集合体は、二酸化ウラン焼結ペレットをジルカロイ-2被覆管に装填した燃料棒49本を7×7の正方格子状に配列した長さ約4mの自立形燃料である。制御棒は、燃料集合体とほぼ同じ長さをもつ十字形の中性子吸収材にボロンを用いたものであり、原子炉の底部から挿入され上下に可動する。原子炉において、炉心内を循環する純度の高い水は、燃料から発生する熱を除去する冷却材と、核分裂の際に発生する高速

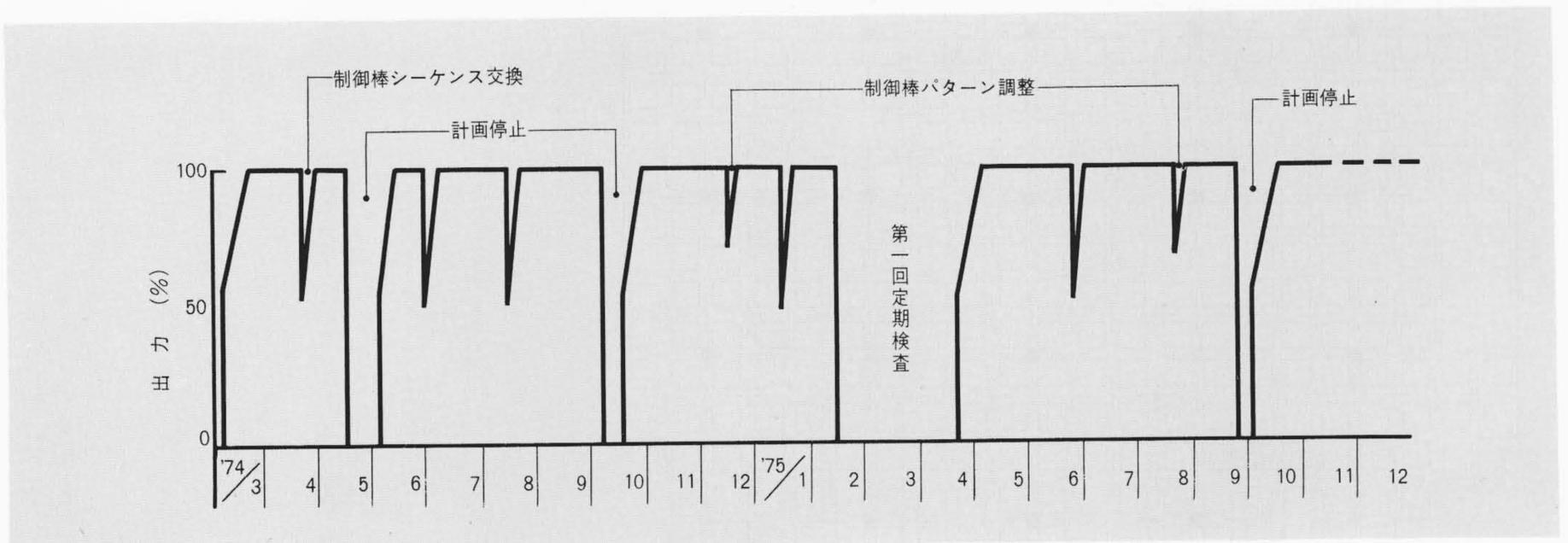


図1 運転状況 昭和49年3月の営業運転開始時から最近までの運転状況を示す。

\* 中国電力株式会社原子力部 次長    \*\* 日立製作所電力事業本部 工学博士    \*\*\* 日立製作所電力事業本部 工学博士    \*\*\*\* 日立製作所原子力研究所 工学博士    \*\*\*\*\* 日立製作所日立工場

表1 運転実績概要 発電時間, 積算電力量, 燃焼度, 負荷率及び発電所利用率を昭和49年度, 50年度に分けて示す。

項目	単位	昭和49年度	昭和50年度
		S49.4.1~S50.3.31	S50.4.1~S50.9.30
発電時間	h	6,941	3,765
積算電力量	kWh	3.048×10 <sup>9</sup>	1.674×10 <sup>9</sup>
年度増分炉心平均燃焼度	MWd/t	4,750	2,635
年度末炉心平均燃焼度	MWd/t	5,608	7,358
燃料集合体最高燃焼度	MWd/t	6,876	9,776
負荷率*	%	95.5	96.6
発電所利用率**	%	75.6	82.8

注: \* 負荷率 =  $\frac{\text{総発電量}}{\text{運転時間} \times \text{定格出力}} \times 100 (\%)$

\*\* 発電所利用率 =  $\frac{\text{総発電量}}{\text{期間} \times \text{定格出力}} \times 100 (\%)$

中性子を減速する減速材の役目をもつ。原子炉出力は, 制御棒操作と再循環ポンプによる炉心流量の増減により制御される。

### 3 燃料の健全性と運転法

BWR燃料は, 既に20年を超える世界的な規模の研究開発と使用実績とをもち完全に実用化されている。しかし, この間低い確率ではあるが被覆管の破損が報告されている。この主な原因として,

- (1) 被覆管内面からの局所的な水素化
- (2) 燃料ペレットと被覆管の機械的相互作用

表2 原子炉の炉心及び燃料の仕様 原子炉の炉心及び燃料の基本仕様を示す。電気出力460MWe, 燃料集合体400体のBWRプラントである。

項目	仕様
電気出力	460MWe
熱出力	1,380MWth
原子炉圧力	71.7kg/cm <sup>2</sup> ・a
炉心流量	21,770 t/h
炉心等価直径	3,440mm
炉心有効高さ	3,660mm
格子間ピッチ	152mm
燃料集合体数	400体
被覆管肉厚	0.9mm
被覆管外径	14.5mm
ペレット直径	12.4mm
ウラン装荷重量	78.2TU
制御棒本数	97本
ポイズンカーテン枚数	172枚
最大線出力密度	17.5kW/ft
最小限界熱流束比	1.9

が挙げられる。

#### 3.1 局部水素化防止対策

被覆管の局部水素化は, 燃料製造時二酸化ウラン焼結ペレットの表面などに微量の水分が吸着し, この水分と被覆管のジルカロイとの間に生ずる化学的現象である。

これによって生じたジルカロイの水素化物はもろい物質であり, ジルカロイより密度が小さいため, 体積膨張を起こし

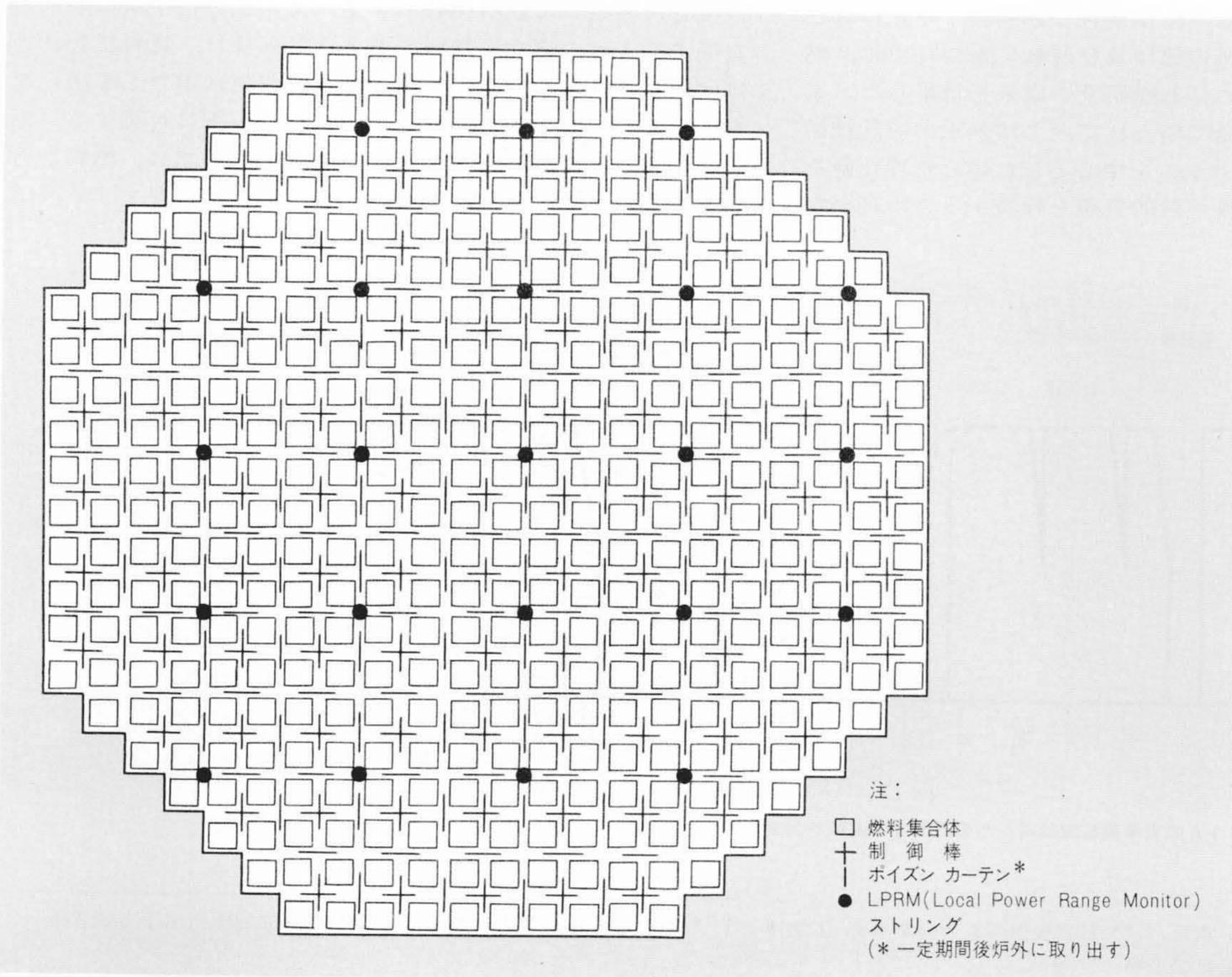


図2 原子炉炉心配置 燃料集合体, 制御棒, ポイズンカーテン及びLPRMストリングの配置を示す原子炉炉心の平面図である。

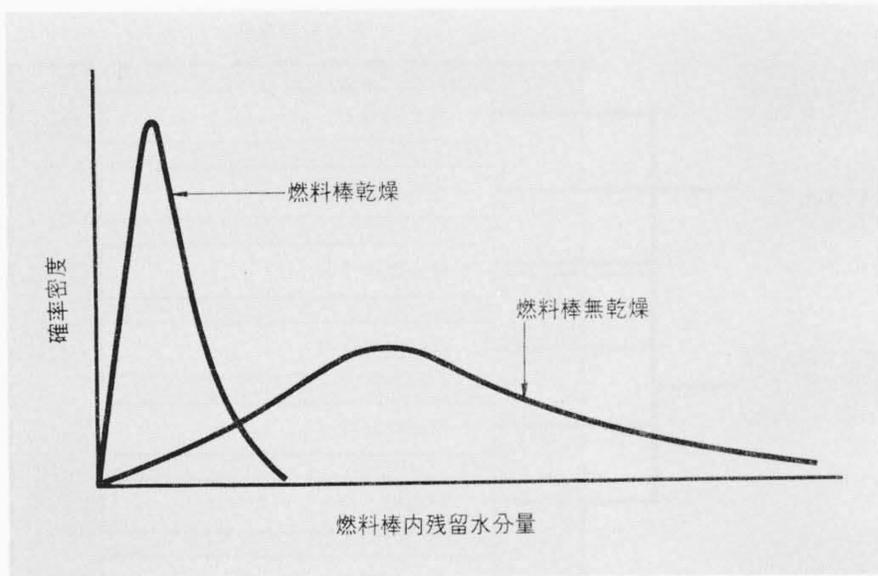


図3 燃料棒内残留水分量の推定頻度分布 燃料の乾燥工程のあるものと、ないものの燃料棒内残留水分量の対比を示す。

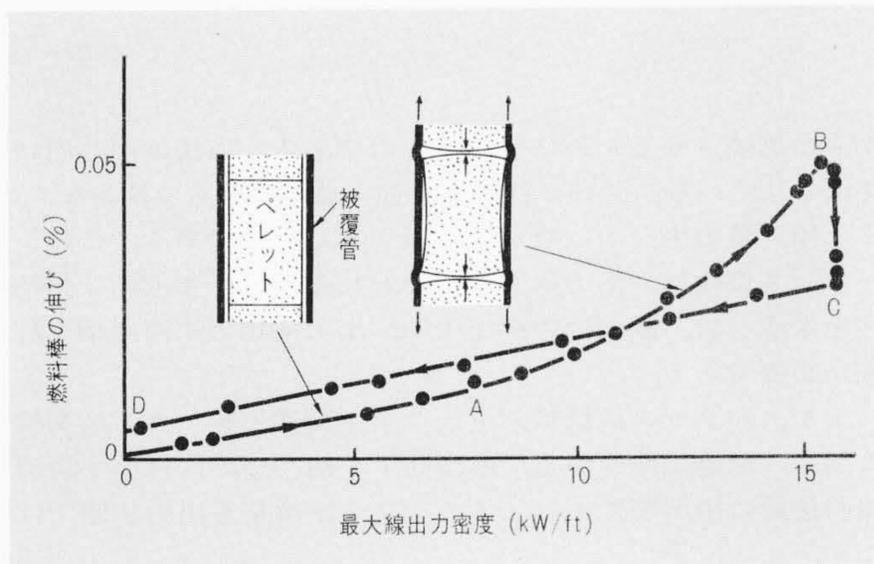


図4 燃料棒の伸びの挙動 ノルウェー国ハルデン炉における燃料棒の照射試験結果の一例を示す。

て被覆管の局部が破損することがある。この発生機構と対策の研究結果から、燃料成形加工時に燃料棒内に残留する水分許容値を決め、残存水分を除去するために燃料棒の真空乾燥工程を導入した。真空乾燥工程の導入による残留水分を図3に示す。この工程の導入により、ジルカロイの水素化物発生の可能性は、ほとんどなくなり、燃料の性能が更に向上した。

### 3.2 燃料ペレットと被覆管との機械的相互作用防止対策

二酸化ウラン焼結ペレットの膨張によって被覆管が内側から押し広げられることに伴って生ずる現象を機械的相互作用と総称している。被覆管に過大なひずみを与えられると被覆管の破損にも至るので、この機械的相互作用に関する研究が進められてきた。図4は、本発電所の燃料と同一仕様の燃料をノルウェー国ハルデン炉において照射した試験結果の一例である。同図中、0→A→Bは、最大線出力密度上昇期間であり、B→Cは最大線出力密度を一定に保持した期間、C→Dは最大線出力密度下降期間である。燃料の最大線出力密度をAまで上昇させると、燃料ペレットと被覆管の機械的相互作用が始まり、Bに至るまで最大線出力密度の増加に伴って燃料棒の伸び割合は大きくなる。B→Cでは最大線出力密度は一定に保持されているが、燃料棒の伸びが縮小する「緩和」が起こる。更に、最大線出力密度を下げると、燃料棒の伸びはC→Dのように減少し、わずかに塑性伸びが残る。図5は、図4の現象を時間的変化でみた燃料棒の伸び緩和現象を示す。最

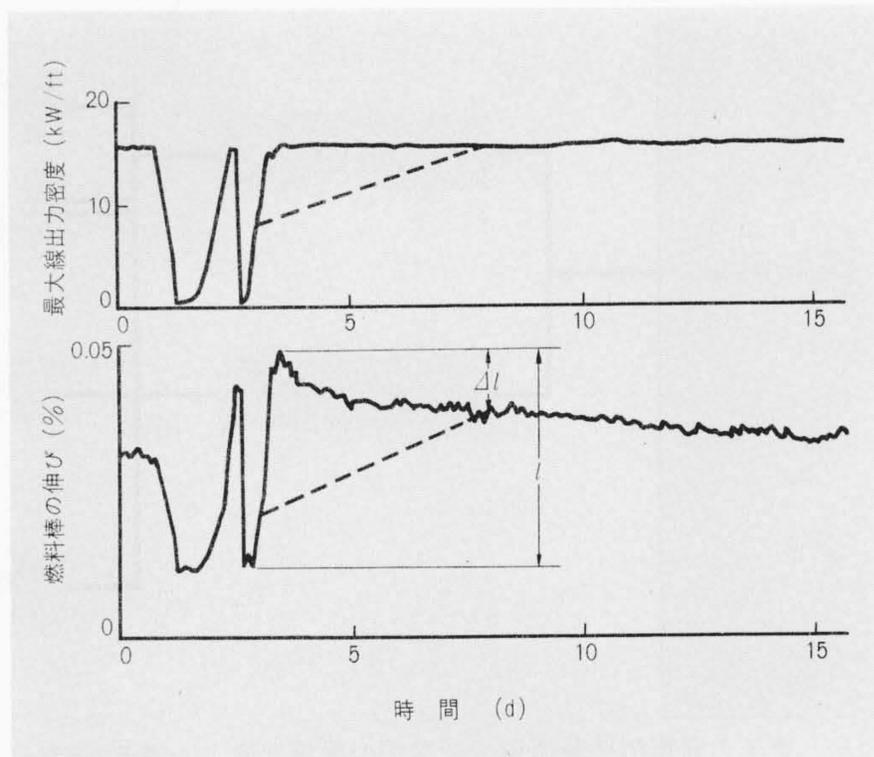


図5 燃料棒の伸び緩和現象 図4の結果を最大線出力密度の時間的変化に対応させ、燃料棒の伸び緩和現象として示す。

大線出力密度を上昇させると、燃料棒の伸びは増加するが、最大線出力密度を一定に保持すると、燃料棒の伸びは減少する。最大線出力密度を点線のようにゆっくり上昇させると、上昇中に伸びの緩和が起こるので燃料棒の伸びは点線のように小さくなる。これらの研究の成果は、燃料棒の伸びを軽減すること、すなわち燃料ペレットと被覆管の機械的相互作用を少なくするためには、次のことが有効であることを示している。

- (1) 最大線出力密度を小さくすること。
- (2) 最大線出力密度の上昇率を小さくすること。

## 4 炉心管理技術

燃料製造技術に加えて、燃料の健全性を確保する運転を実現するためには、詳細な運転管理上の情報と計画が必要である。原子炉の運転に必要な情報及び計画を作成する技術は、炉心管理技術(Core Management Engineering)と呼ばれているが、以下この炉心管理技術について説明する。

図6に原子力発電所の運用に必要な炉心管理技術の体系を示す。炉心管理技術の範囲についてまだ明確な定義はされていないが、同図中の点線の部分が該当するものと考えられる。

### 4.1 制御棒計画

炉心管理技術の中でも、最も重要な項目の一つである制御棒計画の典型的な分類を、図7に示す。

制御棒計画は、燃料の設計許容値の範囲内で達成燃焼度ができるだけ高くするという考え方に立脚し、燃料の燃焼に伴う特性の変化を考慮に入れて、実際の運転に適用するための制御棒引抜量などを決める技術の総称である。

長期計画は、燃料サイクル期間の燃焼に伴う炉心反応度変化の予測結果を基にして、運転計画の大綱を決定する。

中期計画は、長期計画で決められた運転計画に沿って、シーケンス交換、パターン調整を行なうための制御棒引抜量などを具体的に決定する。これの検討の際には、運転実績などをきめ細かく反映させ、必要な場合は、運転計画について若干の変更を行なう。中期計画の対象とする期間は、1～3ヶ月である。

上記に述べたシーケンス交換は、炉心内の燃料を、全体に

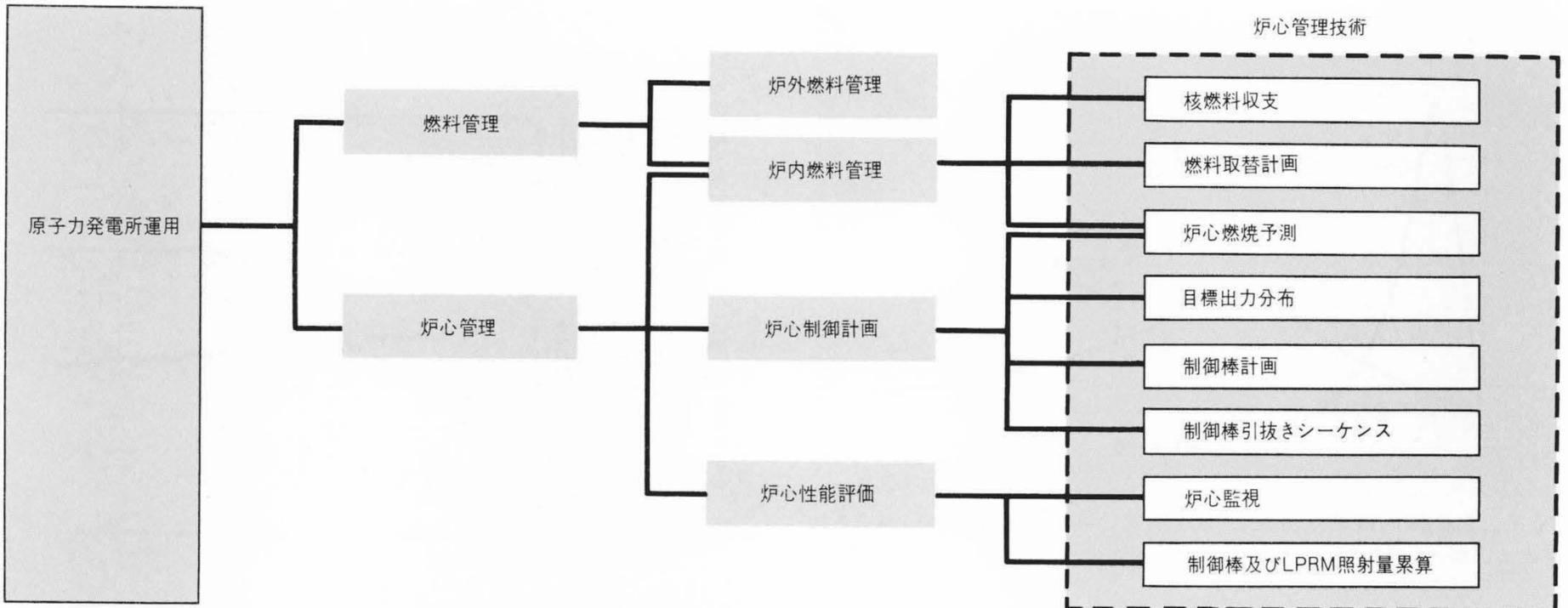


図6 原子力発電所の運用に必要な炉心管理技術系を示す。

原子力発電所の運用に必要な炉心管理技術の体系を示す。

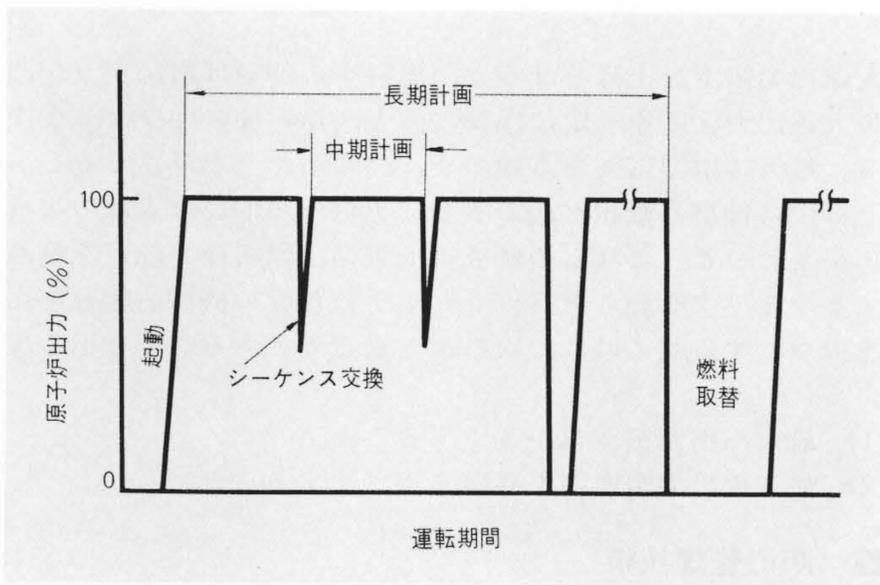


図7 制御棒計画の分類 制御棒計画は、長期、中期、起動及びシーケンス交換の四つの計画に分類される。

均一に燃焼させるために行なうものである。方法は炉心内に挿入されている制御棒の状態を、挿入量の多いものは少なく、また挿入量の少なかったものは多くするものである。このシーケンス交換は、出力状態で行なわれるので、キセノン動特性を考慮した、制御棒の操作手順、出力変化方法の詳細な計画が必要である。

また、パターン調整は、シーケンス交換とシーケンス交換の間で、燃焼に伴う炉心反応度低下を補うために行なう制御棒引抜き量の微調整である。このパターン調整も出力状態で行なう。

起動については、原子炉停止状態から、定格出力とするため、冷温時の制御棒ノッチ値や部分出力時におけるキセノン量を考慮に入れた出力分布及び定格出力時の出力分布を十分検討して制御棒引抜き手順を決める。

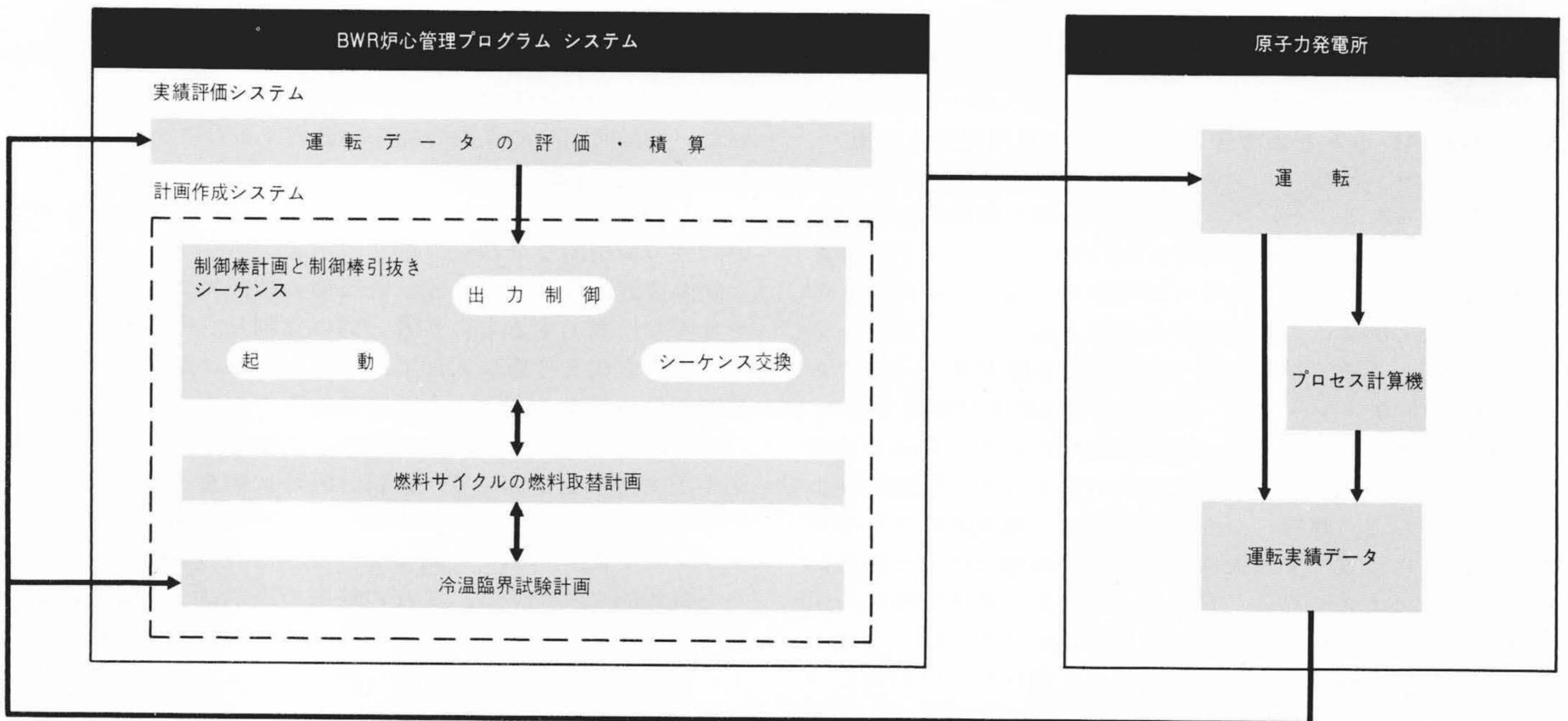


図8 炉心管理システムの概要 原子炉の運転に必要な炉心管理システムとデータの流れを示す。

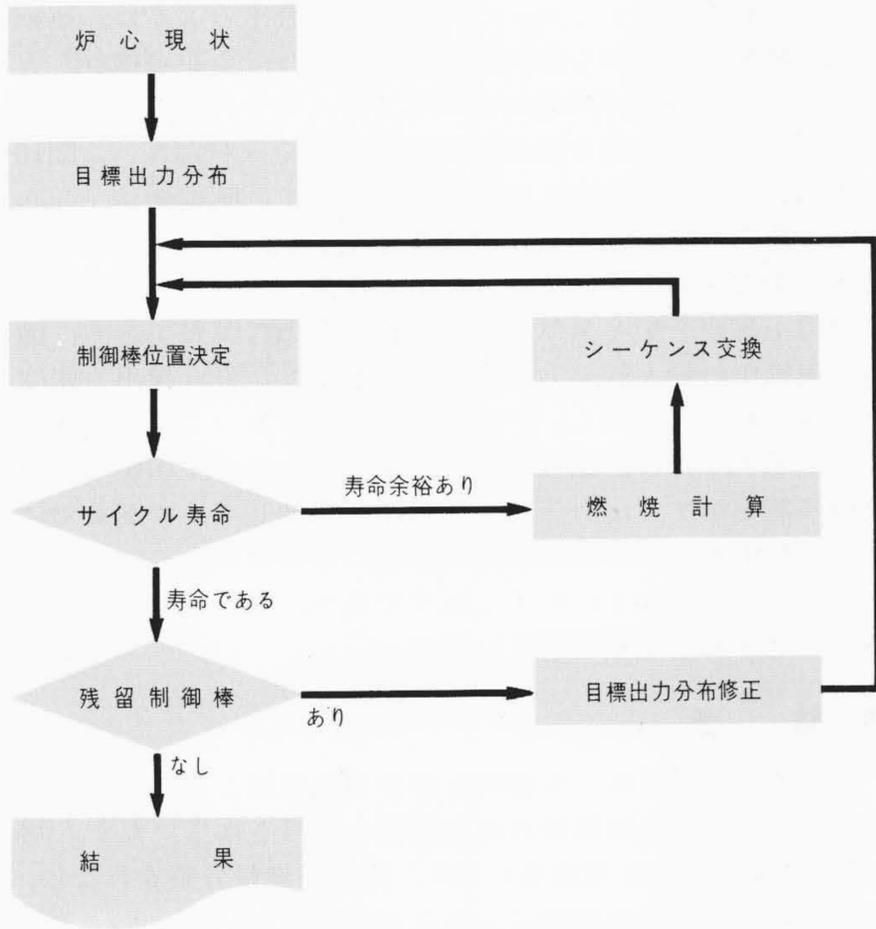


図9 制御棒計画作成プログラム流れ図 制御棒計画作成プログラムの最適制御棒位置決定計算流れを示す。

### 4.2 炉心管理プログラム システム

原子力発電所の運用に必要な炉心管理技術計画作成する炉心管理プログラム システムを図8に示す。本システムは、実績評価プログラム システムと計画作成プログラム システムとから成る。

実績評価プログラム システムは、燃料の種類、配置、核定数などの基本データ、燃焼度、同位元素組成などの運転データが累積されており、運転実績が評価記録され、過去の運転状況が再現できる。

計画作成プログラム システムは、制御棒計画作成プログラム、燃料サイクルの燃料取替計画作成プログラム及び冷温臨界試験計画作成プログラムから成る。計画作成システムは、実績評価システムが評価記録しているデータから炉心管理に必要な計画作成する。

制御棒計画作成プログラムは、計算精度と即応性が要求されるもので、二つの最適化アルゴリズムをもたせたコードであり、線出力密度及び達成燃焼度について制御棒の長期計画、中期計画を自動的に作成する。図9に出力制御用制御棒計画作成プログラム流れ図を示す。

起動計画及びシーケンス交換計画作成プログラムは、キセノン動特性解析を含むコードであり、一定の線出力密度以下で制御棒の引抜きを完了し、以降は炉心流量によって出力を上昇させるものである。

燃料取替計画作成プログラムは、燃料の取出し、炉内移動及び装荷計画作成する。本プログラムは、燃料取替計画として作業手順も同時に作成できる。また、単一燃料サイクルだけでなく十数サイクルの燃料取替計画も作成でき、燃料の長期的収支計画に利用できる。

冷温臨界試験計画作成プログラムは、冷温状態の原子炉の試験計画作成する。

このBWR炉心管理プログラム システムで作成された計画は、更に運転操作面から検討し、原子炉プラントに適用され

る。原子力発電所は、定められた計画に基づき運転され、各種の計測機器で監視制御される。またオンライン プロセス計算機により運転実績が管理される。原子炉の運転実績データはBWR炉心管理プログラム システムにフィードバックされ、計画の適切な修正が行なわれる。

### 4.3 炉心管理システムの適用と運転

電力系統運用計画から原子力発電所の年間運転計画が決められる。この年間計画をもとに燃料取替計画作成し、燃料の炉内配置を決める。計画した運転が可能かどうかを制御棒長期計画を作成し検討する。この長期計画作成後又は同時に具体的な中期計画を作成する。更に起動計画、シーケンス交換計画を加えて制御棒計画が決定される。制御棒計画作成には、電力会社とメーカー間で詳細な検討が繰り返される。

本発電所は 3.2の燃料ペレットと被覆管との機械的相互作用防止対策で述べた燃料の挙動を考慮して、

- (1) 出力分布を平坦にし、最大線出力密度を小さくすること。
- (2) 制御棒引抜きを低出力で行ない、高出力時の出力調整は、炉心流量の増減により行ない、最大線出力密度の上昇率を小さくすること。

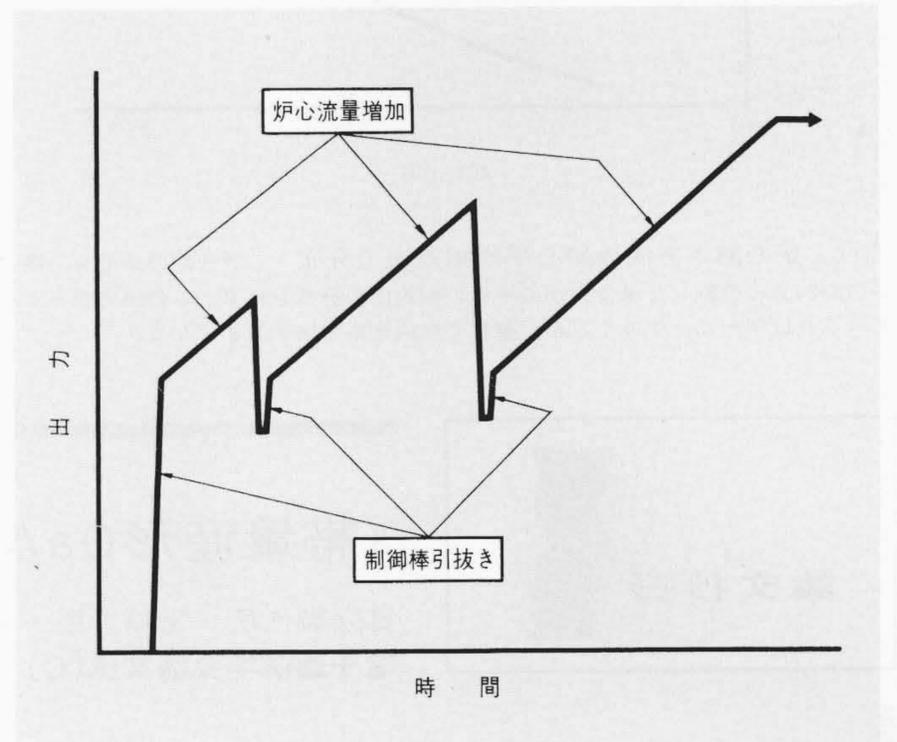


図10 燃料装荷後の冷温からの出力起動の例 低出力で制御棒を引き抜き、高出力では炉心流量を増加して、燃料の熱的負担を軽減する出力起動の例を示す。

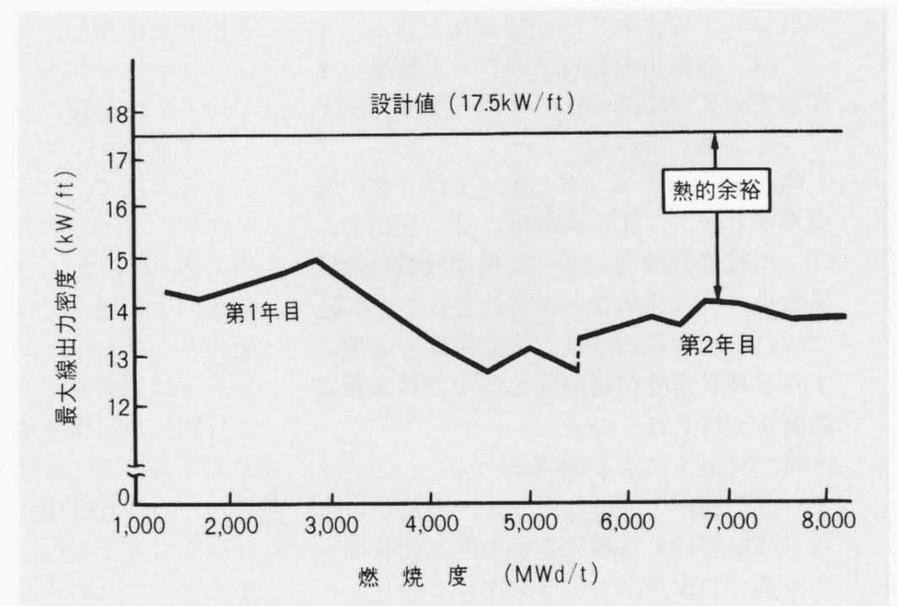


図11 最大線出力密度の推移 運転開始第1年目及び第2年目の最大線出力密度の推移と、設計値に対する熱的余裕を示す。

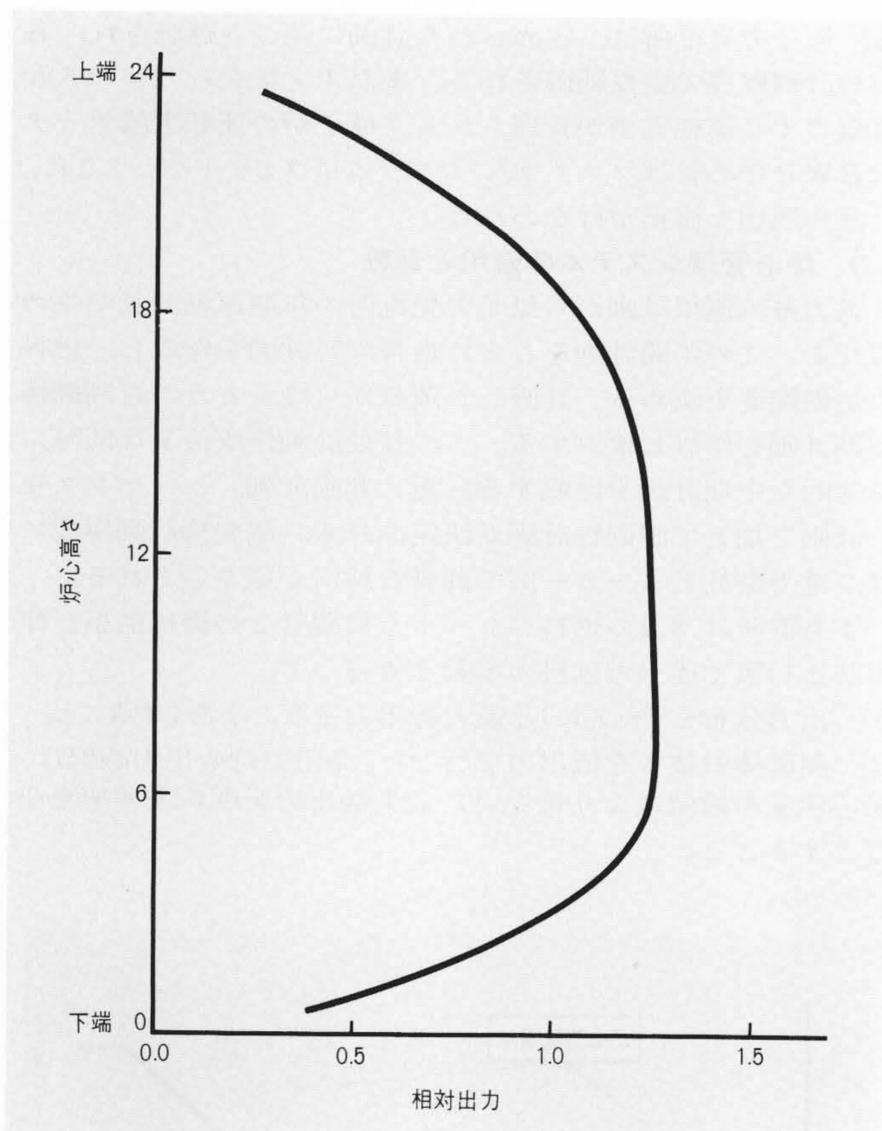


図12 炉心高さ方向の炉心平均相対出力分布 原子炉の炉心を、高さ方向24点に分割した場合の炉心平均の相対出力分布を示す。この出力分布をできるだけ平坦化することが、運転の熱的余裕を増すことになる。

を運転の目標指針とした。この目的に適合するように、運転状況に即応した詳細な制御棒計画を作成し、上記の指針を実施した。また計画の実施に当たっては、原子力発電所における慎重、且つ弾力的な運転技術に負うところが大きい。図10に燃料装荷後の冷温からの起動の例を示す。制御棒は、できるだけ出力の低いところで引抜きを完了し、以後、炉心流量により出力を上昇させる。これにより高出力領域で、燃料棒の出力上昇率を炉心全体に均一に且つ自由に調整できる。図11に運転中の最大線出力密度の推移を示す。最大線出力密度をできるだけ低く抑え、十分な熱的余裕をもつことができたことを示す。また、図12に炉心高さ方向の炉心平均相対出力分布の例を示す。出力分布を運転期間を通して、できるだけ平坦化することが熱的余裕を増すことになる。

運転結果は、表1に示すとおりであり、燃料の健全性を維持し、高稼働率運転を達成した。

### 5 結 言

本原子力発電所は、本格的な原子力発電所として国産第1号機であり、運転開始後の運転管理が注目されていたが、昭和50年2月第1回定期検査に入り、第1回燃料取替を行ない、順調に第2年度目の運転に入ることができた。

炉心管理技術については、電力会社とメーカーの密接な連絡のもとに炉心管理システムを適用して、計画どおりの炉心管理を実施することができた。運転面では、燃料棒の熱的負担を軽減する運転法を確立し、詳細な解析予測をベースに運転を行なった。この間に得られた技術と経験は、BWRの今後の炉心管理技術の向上に大きく貢献するものと考えられる。

終わりに、関係各位に対し心から謝意を表わす次第である。



## X帯量産形GaAsインパット ダイオード

日立製作所 宮崎 勝・右高正俊

電子通信学会論文誌(C) 58-C, 633 (昭50-10)

ガン ダイオードやインパット ダイオードなどの半導体発振素子は、マイクロ波帯以上の超高周波領域の発振器、増幅器に盛んに実用化されている。これらの用途の増大につれて、半導体発振素子は量産によって低コスト化することが望まれている。ここでは、発振出力数百ミリワット程度の量産形式のX帯GaAsインパット ダイオードについて述べている。

GaAsインパット ダイオードは、他の発振素子と比べ、(1) 高効率、(2) 高出力、(3) 比較的低雑音、(4) 発振周波数の温度係数小、又は正值などの特長をもっている。このため、特に周波数温度安定度を必要とするSHF帯受信局発振器などに大量の需要が期待されている。

新プロセスによるGaAsインパット ダイオードの製作工程では、ウェーハ結晶による一括処理により組立工程の簡素化を図っている。つまり、エッチングによるウェーハバッチ処理で面積のそろったメサダイ

オードを得るため、あらかじめ、エピタキシャル層側から大きめの面積をもつメサ形を作ってGaAsの厚さをそろえている。また、組立てを容易にするため、メサダイオードの全面に耐熱特性の優れたポリイミド系樹脂を塗布し、オーミック電極上の樹脂にスルーホールをあけて上部電極を形成している。この後ウェーハからペレットに分割して測定マウントに組み立てる。

この方法で、ウェーハバッチ処理によるメサダイオードの面積ばらつきは±20%以内であった。また、微小接合面積のメサダイオードの組立ては従来、極めて作業性の悪いものであったが、この方法でメサダイオードの周辺をポリイミド系樹脂で補強して外囲気から保護する構造としたため、ペレットの組立ては従来法と比べ著しく改善された。これは硬化したポリイミド系樹脂は組立てによる加圧に対して塑性変形がほとんどないため、通常の荷重による熱圧着が可能となったことによる。これによって

従来、マイクロ波帯の半導体素子では不向きであった組立ての自動化が可能になり、著しく生産性が向上できる見通しがある。

ポリイミド系樹脂による静特性は、樹脂を用いない従来のダイオードと比べ、(1) 逆方向電流に差異がない、(2) 静電容量の増加は大略10%程度であるなどが分かった。また、X帯での量産形ダイオードの発振効率は~13%、発振出力は~310mWが得られ、樹脂を用いない従来法のものと同程度であった。これらの結果、樹脂による特性低下はほとんどないことが分かった。ダイオードの熱抵抗は $3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ の接合面積で約60°C/Wであり、最大発振効率時の接合温度は約180°Cであった。また、GaAsインパットダイオードの発振周波数温度係数は、発振効率、出力を低減させることなく+100~200kHz/°Cの正值をコントロールよく得ることができ、この条件での接合温度は80~120°Cであり、十分長寿命が期待できることが分かった。