

BWR(沸騰水型原子炉)高経済性炉心燃料の開発

BWR Core with High Burn-up and High Uranium Utilization

日立製作所ではBWR原子力発電プラントの利用率を向上し、運転性をいっそう向上するために上下2領域燃料を特徴とする改良炉心の開発を行ない、実機プラントに適用してきた。その結果、改良炉心は炉心の熱的余裕を大幅に増大するとともに運転中負荷率は99%以上を達成し、その優れた性能を実証することができた。日立製作所ではこれら改良炉心の成果をベースに、更に燃料経済性の向上を目的として「高経済性炉心」の開発に取り組んでいる。BWRでは、これら最新の技術をABWRはもとより新設、既設いずれのプラントにも適用できるように開発設計を行なっている。本稿は、日立改良炉心の運転実績を紹介するとともに、現在開発を進めている「高経済性炉心」について紹介する。

山下淳一* Jun'ichi Yamashita

斉藤莊蔵* Shôzô Saitô

1 緒言

BWR(沸騰水型原子炉)の炉心燃料は、導入期では燃料健全性の確保を目的に種々の改善が行なわれ、PCIOMR(燃料ならし運転)の適用によりその信頼性が確立した。次に燃料健全性を確保しながら、PCIOMR運転下でのプラント利用率向上を図り、運転を単純化することを目的に炉心改良が行なわれた。この段階で日立製作所は、上下濃縮度2領域燃料を導入し、更にこれを発展させたTMS炉心^{※1)}を開発し、実機プラントに適用してその優れた性能を実証することができた。現在、BWR炉心燃料は、燃料の経済性向上を主要課題とする開発段階に入っている。本稿は、上下2領域炉心やTMS炉心の運転実績を示すとともに、現在開発を進めている高経済性炉心燃料の現状について紹介する。

2 日立改良炉心とその運転実績

BWRでは炉心内で蒸気が発生するため、この蒸気泡(ボイド)の軸方向分布によって軸方向出力分布は、炉心下方が出力大になるようにひずむ傾向をもっている。従来はこの軸方向出力分布を制御するため、炉心下部から浅く挿入する制御棒を用い、その交換調整を多く行なってきた。このように浅く挿入する制御棒を用いると、一時的に出力分布の平坦化を図れても燃焼期間を通じ平坦化し、熱的余裕を大きく保つことは困難である。一方現行の燃料では、その健全性確保のためPCIOMRが必要であるが、熱的余裕の小さい炉心ではこのPCIOMRの制約を大きく受け、プラントの利用率が低下することになる。日立製作所では、このようなPCIOMRによるプラントの利用率低下を改善し、経済性を高めるためBWR炉心出力分布制御方法について抜本的な検討を行ない、新たに燃料上下の反応度差による軸方向出力分布平坦化技術を開発したり。すなわち、燃料を上下2領域に分け、上部のウラン濃縮度を高く下部のウラン濃縮度を低くする新しい方法を導入し、ガドリニア濃度は上部で低く下部で高くし、燃焼期間を通じ燃料自身により自然に軸方向出力分布の平坦化を図る

ものである。このような技術の採用により、運転中の軸方向出力分布は燃焼期間を通じ常に平坦になり、燃料の最大線出力密度が大幅に低減する。また、制御棒は炉心余剰反応度の制御に必要な少数の深い制御棒だけとなり、この制御棒を炉心内に設けた反応度の低い燃料4体から成るセル(コントロールセル)中で運転することによって制御棒パターン交換が不要となる。このような炉心をTMS炉心と呼んでいる。これら改良炉心は東京電力株式会社福島第一原子力発電所4号機(以下、福島第一・4号機と呼ぶ。)の取替燃料として、また福島第二原子力発電所2号機(以下、福島第二・2号機と呼ぶ。)では初装荷燃料から適用され下記のような優れた成果を挙げている。

- (1) 燃料の熱的余裕が従来よりも20%以上増大し、燃料信頼性が向上した。
- (2) PCIOMRの制約が軽減され、99%以上の高い負荷率を達成して経済性が向上した。
- (3) 運転は単純で操作が容易になった。

以下にこれら日立改良炉心の運転実績について詳述する。

2.1 福島第二・2号機運転実績

福島第二・2号機では、初装荷燃料として上下2領域燃料が初めて全炉心に適用された。本初装荷燃料の燃料集合体内濃縮度、ガドリニア分布を図1に示す。福島第二・2号機は昭和59年2月に営業運転に入ってから、第1サイクルの運転を終了し現在第2サイクルの運転を順調に続けている。図2に同機の最大線出力密度の運転実績を示す。同図に示すように、最大線出力密度は燃焼期間を通じ常に低く保たれており、同型先行機に比べて20%以上低減していることが分かる。このように最大線出力密度が大幅に低くなったのは、本プラントで採用した上下2領域燃料により、燃料自身によって常に上下反応度差が保たれ軸方向出力分布が平坦になっているからである。福島第二・2号機では、このように運転中の最大線出力密度が低減することによってPCIOMRの制約が大幅に軽減され、プラント負荷率は99%という高い値を達成し、経済性向上に寄与することができた。また、運転中の制御棒は深く挿入したものだけとなり運転の操作が容易になった。

※1) TMSとは、Minimum Shim, Minimum Shuffling, Minimum Swapの三つの頭文字のMSを取って名づけたものである。

* 日立製作所日立工場

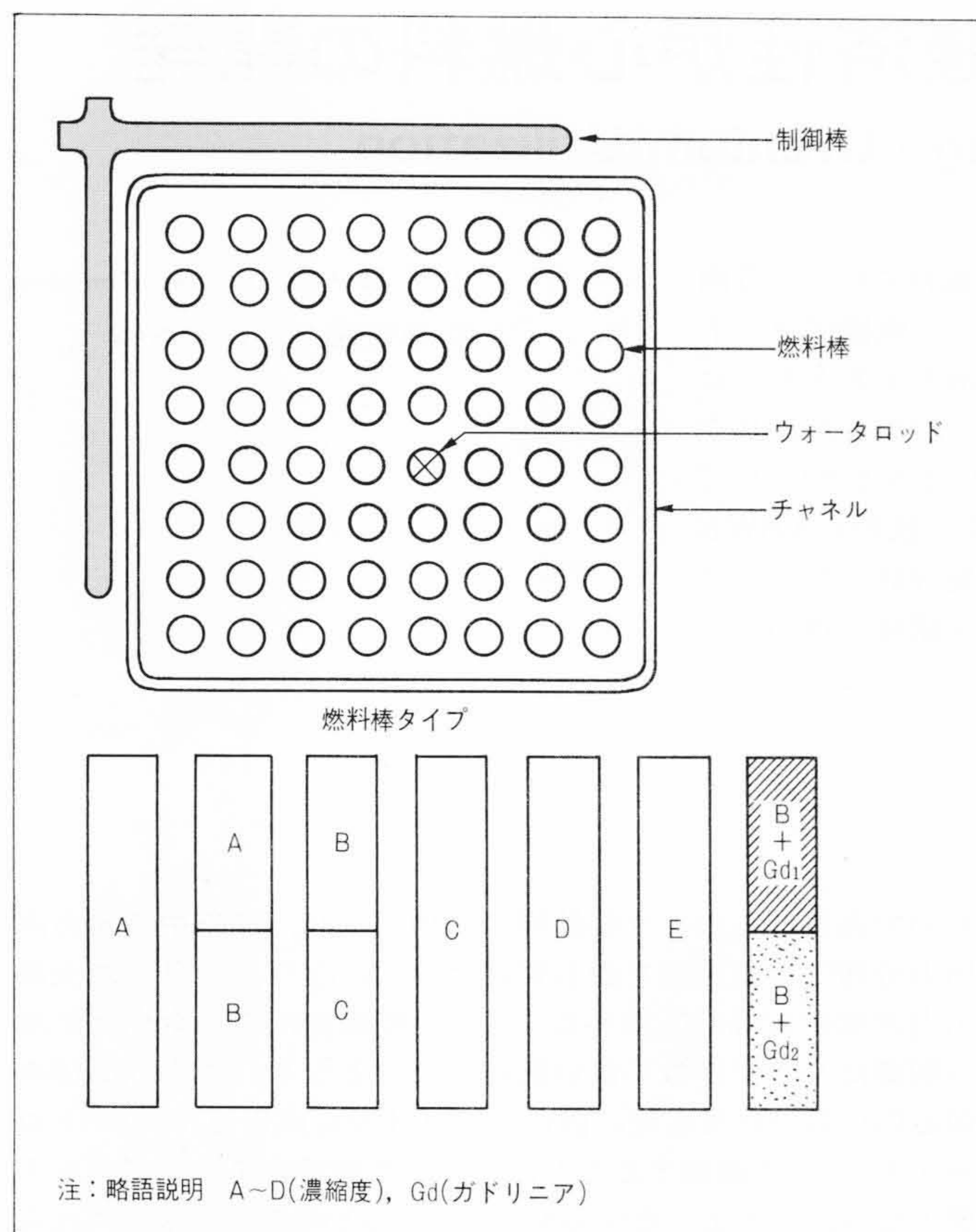


図1 燃料棒内濃縮度ガドリニア分布 燃料集合体内には、上・下2領域に濃縮度分布及びガドリニア濃度分布した燃料棒が採用されている。燃料棒内のアルファベット記号A~Eはウラン濃縮度を、Gdはガドリニアを表わす。

2.2 福島第一・4号機運転実績

福島第一・4号機では、上下2領域燃料が取替燃料として昭和56年装荷の第2回取替燃料から適用された。福島第一・4号機では、この燃料を採用するとともに、炉心内の燃料装荷パターンに少数のコントロールセルを採用しTMS炉心とした。図3に本炉心の概念を示す。福島第一・4号機では本炉心を採用することにより図4に示すように制御棒パターン交換がなく、極めて単純な運転ができるようになった。これに

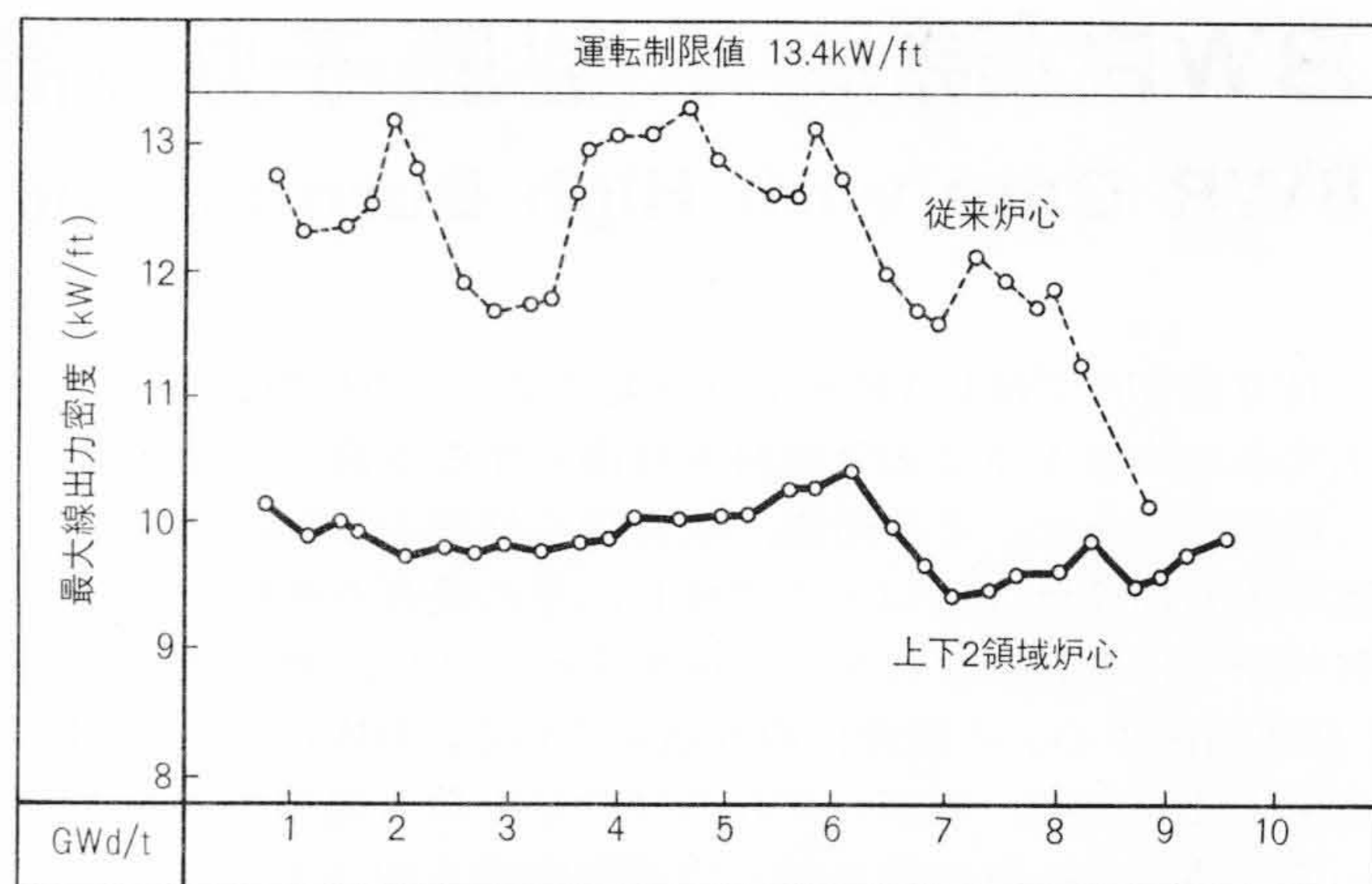


図2 上下2領域炉心と従来炉心の最大線出力密度実績例の比較 上下2領域炉心を採用した福島第二・2号機では、燃焼を通じ軸方向出力分布が平坦化されており、従来炉心に比べ20%以上熱的余裕が増大した。

伴いプラントの負荷率は、99%以上の高い値を達成した。これらの運転実績により、日立改良炉心の基本となる上下2領域燃料の有効性が実証されるとともに、これを発展させたTMS炉心の優れた性能を証明することができた。

日立改良炉心燃料は上記福島第二・2号機及び福島第一・4号機の運転実績によりほぼ完成したと言える。したがって、BWR炉心燃料のこれからの開発は、これらの成果を踏まえながら燃料の経済性をいっそう向上させる段階に入ってきたと考えている。

3 高経済性炉心燃料

3.1 高経済性炉心の考え方

燃料の経済性を高めるためには、(1)高燃焼度化を図ることと、(2)省ウラン化を図ることが考えられる。燃料の高燃焼度化により再処理費などのダウンストリーム費を低減するとともに、省ウラン化によりウラン費・濃縮費のアップストリーム費を低減するものであるが、経済性をいっそう高めるには両者をより効率的に行なうことが肝要である²⁾。燃料を高燃焼度化するにはウラン濃縮度を高くする方法があるが、単にウラン濃縮度を高めるだけでは、ウラン費や濃縮費が増大するのでその効果が低下する。高経済性炉心ではこのような観点

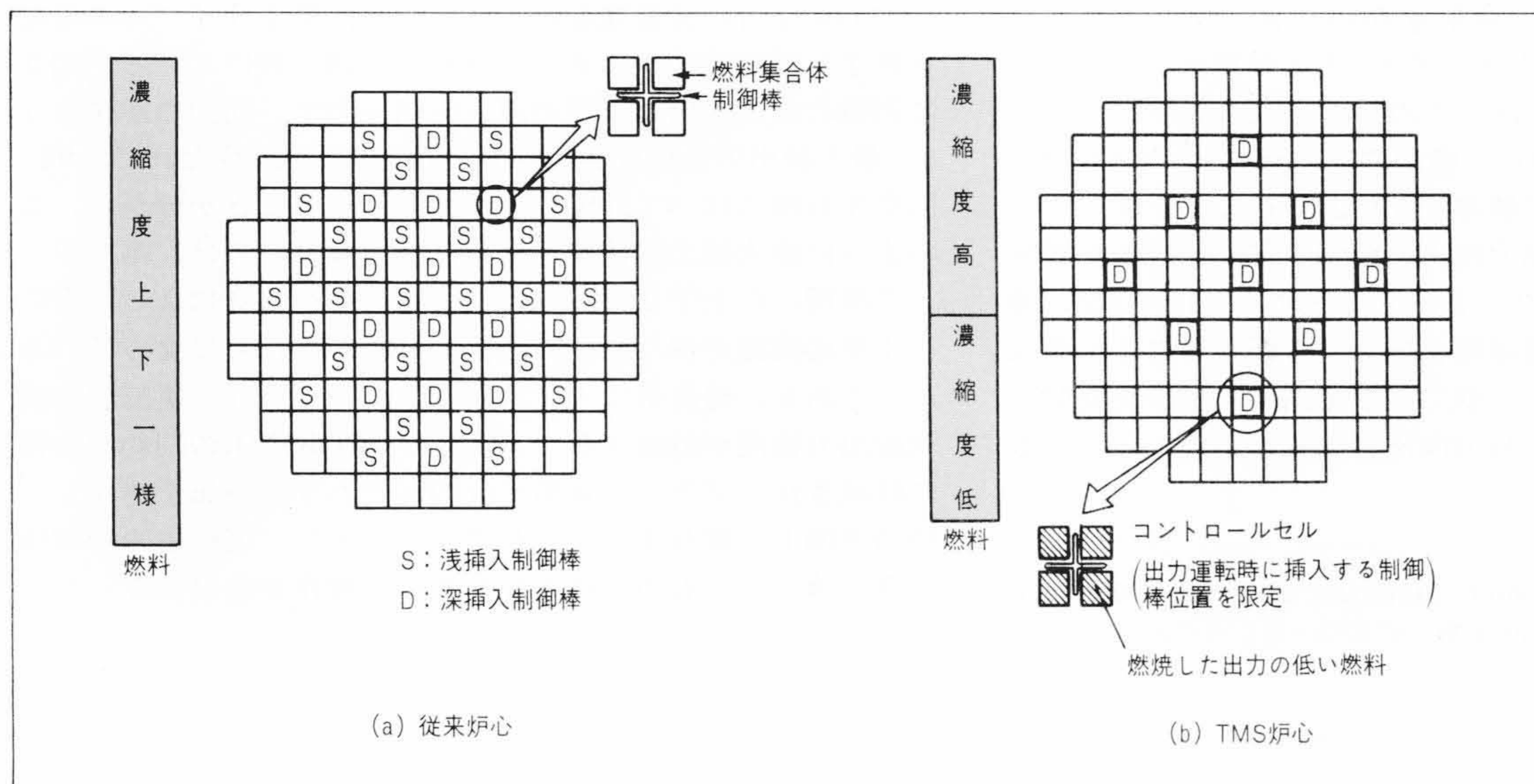
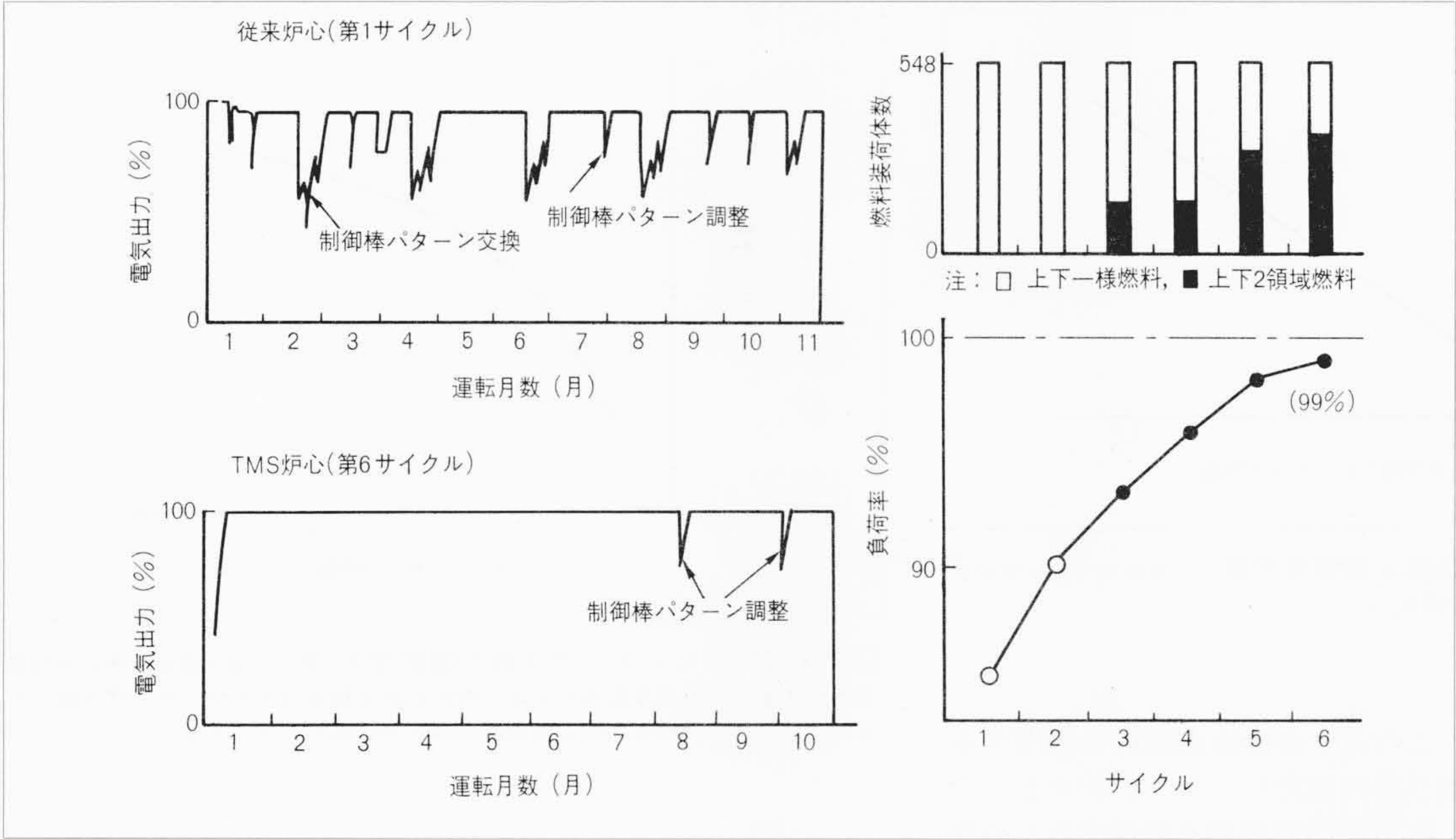


図3 TMS炉心の概念

TMS炉心は上・下2領域燃料をベースに、少数個のコントロールセルを配置したことを特徴とする。



から、ウラン濃縮度を増加せずに高燃焼度化を図る省ウラン技術の活用を積極的に採用する考え方をとった。

ところで日立製作所では、前記改良炉心の開発と同時にPCIOMRの制約を取り除く燃料として、ジルコニウムライナ燃料(純ジルコニウムを被覆管に内張りした燃料)の開発を進めてきた。本ジルコニウムライナ燃料は種々の実証試験によりその有効性が証明され、実用化の段階に入っている。したがって、高経済性炉心ではジルコニウムライナ燃料採用を前提とすることができる。ジルコニウムライナ燃料ではPCIOMRの制約がなくなるので、先に述べた改良炉心による熱的余裕の増大は利用率向上の点からは必要のないことになる。逆に改良炉心によって得られた熱的余裕を、燃料経済性向上に活用する新しい手段としてみなすことができる。日立製作所ではこのような観点から、出力ピーキングと燃料経済性について詳細な検討を行ってきた。その結果、軸方向出力ピーキングはこれをできるだけ平坦化し、この余裕により局所及び半径方向の出力ピーキングを増大するのが反応度利得上最

も効果的であることが分かった。これはBWRでは軸方向にボイド分布があるために、軸方向の出力ピーキングを大きくすると炉心平均のボイド率が増え、ボイドの負のフィードバックが働き、反応度利得が得られないのに対し、局所及び半径方向の出力ピーキングを増大しても、ボイド率の径方向分布は変わっても炉心平均のボイド率はほとんど変わらないためである。

したがって、高経済性炉心ではジルコニウムライナ燃料採用を前提とし、軸方向上下濃縮度差付き燃料(以下、上下濃縮度分布という。)を採用し、これによって得られる出力ピーキングの余裕を局所や半径方向のピーキングに振り向けて、積極的に反応度利得に活用するものとした。また高経済性炉心ではジルコニウムライナ燃料の採用により、炉心流量制御を後述するスペクトルシフト運転として反応度利得に使えるようになり、これを省ウラン技術として活用することとした。

図5に高経済性炉心の考え方を示す。

- 日立製作所では、本高経済性炉心を次のようなステップで開発し、実用化を進めている。
- (1) ステップⅠ 燃料
 - 現行燃料に比べ燃料サイクル費を10%以上向上する。昭和63年実用化を図るため既にその設計を完了し、官庁許認可変更を申請中である。
 - (2) ステップⅡ 燃料
 - 現行燃料に比べ燃料サイクル費を20%以上向上する。昭和63年先行使用燃料を装荷し、昭和66年実用化を図るべく計画 中である。

3.2 BWR省ウラン化技術

本節では、高経済性炉心で採用する省ウラン化技術について説明する。

(1) 外周高濃縮度分布

BWRの燃料集合体はチャンネルボックスにより内・外の冷却材流量がしきられ、チャンネル内はボイドが発生するがチャンネル外はボイドが発生しないように流量の配分が行なわれている。このため、熱中性子束はチャンネル内で低くチャンネル外で高くなり、これを利用してチャンネルボックス近くに高い濃縮度を配置し、チャンネルボックスの内側になるほど低い濃縮度を配置すると、熱中性子を効率的に利用し反応度利得を高め

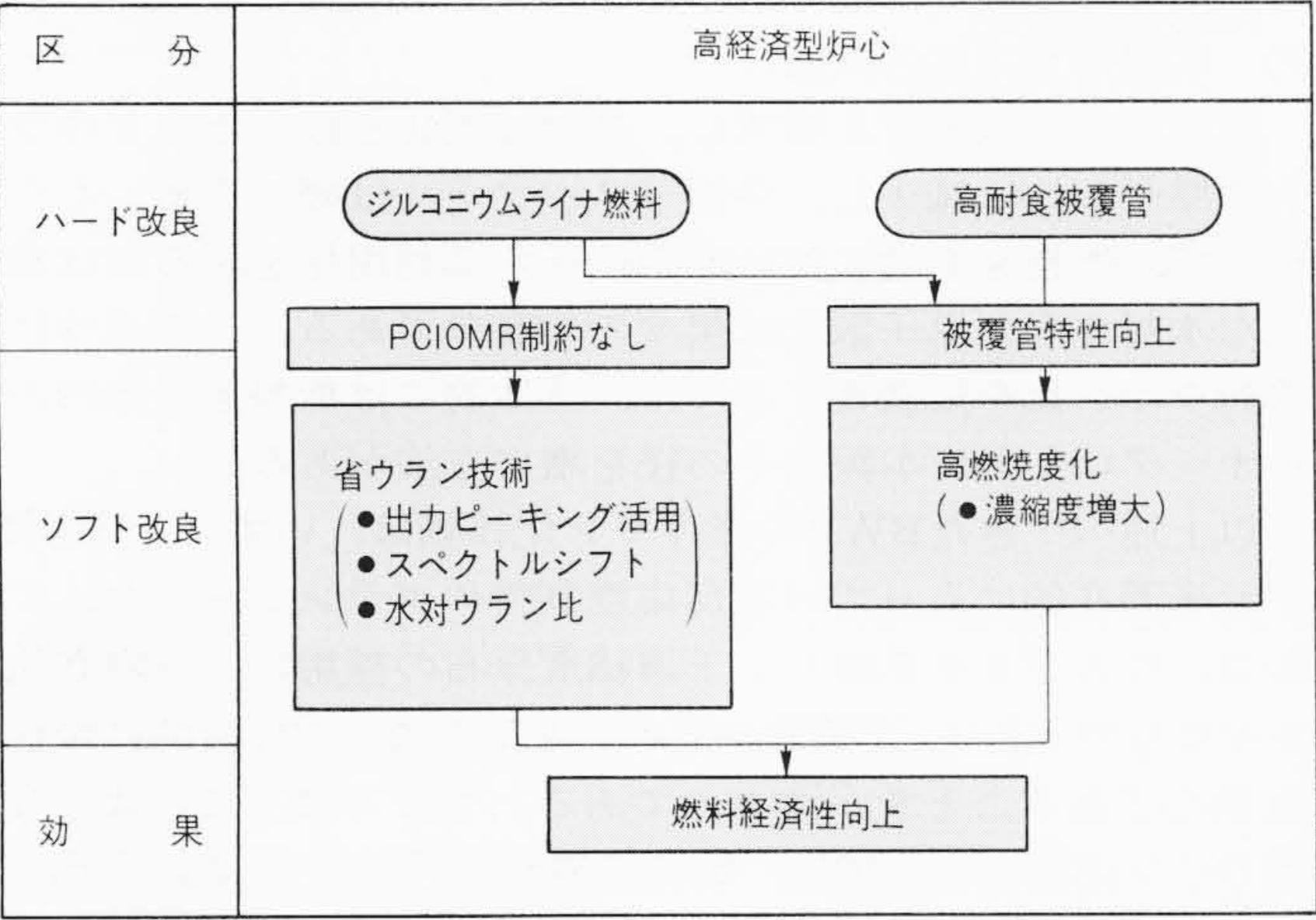


図5 高経済性炉心の考え方 高経済性炉心では、ジルコニウムライナ燃料を採用し、出力ピーキング活用やスペクトルシフト運転による省ウラン化を図るとともに、高燃焼度化を行なって燃料経済性を向上させる。

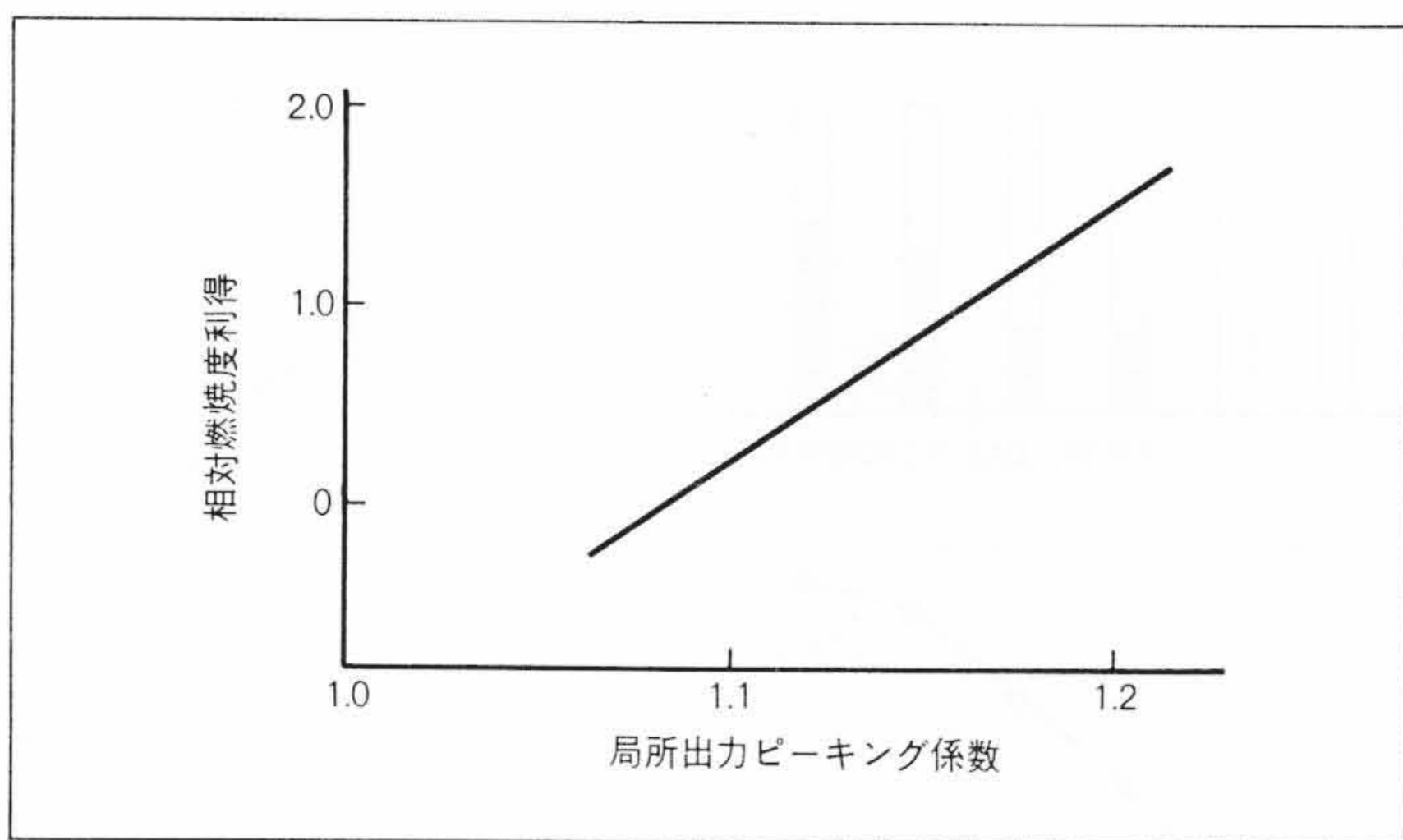


図6 局所出力ピーキング係数と燃焼度利得 局所出力ピーキング係数を増大すると、燃焼度利得がある。

ることができる。ただし、このような濃縮度配置を採用すると、燃料棒の発熱分布が偏り局所出力ピーキングが大きくなる。従来は熱的余裕を増しPCIOMRの制約を軽減するため外周低濃縮度型の配列を採用していた。高経済性炉心ではジルコニウムライナ燃料を採用し、また上下濃縮度分布により出力ピーキングは低減しているため、局所出力ピーキングを上げて反応度向上を図ることができるようになった。図6に局所出力ピーキング係数と燃焼度利得の関係を示す。

(2) 燃料装荷パターン最適化

炉心外周部のように出力の低い領域に反応度の低い燃料を配置し、逆に炉心中心部の出力の高い領域に反応度の高い燃料を配置することによって炉心反応度を高め、燃料経済性を高めることは一般によく知られていることである。ただし、このような燃料配置をすると、出力ピーキングが大きくなり熱的余裕は少なくなる。高経済性炉心ではジルコニウムライナ燃料と上下濃縮度分布の採用により、半径方向の出力ピーキングを高くしても運転上問題になることはなく、むしろ軸方向出力ピーキングが平坦になって生じた余裕を、半径方向のピーキングに振り向けて反応度利得を図ることができる。

図7に径方向出力ピーキング係数と燃焼度利得の関係を示す。

(3) 上下端天然ウランブランケット

燃料上下端部のように出力の低い位置に天然ウランのように反応度の低い燃料を配置し、その分燃料中央部の濃縮度を高くすることは前記の燃料装荷パターンの場合と同じ理由により反応度利得となり、燃料経済性は向上する。なお、天然ウランを上下端部に採用するとその部分のガドリニアを取り除くことができ、反応度利得に寄与することができる。

(4) 炉心流量スペクトルシフト運転

BWRでは炉心流量と制御棒挿入量の組合せにより定格出力状態で炉心内のボイド率を変えることができる。炉心流量を少なくし炉心内のボイド率を高くすると、中性子減速効果は下がりウラン238からプルトニウムへの転換が促進され、逆に炉心流量を増すと、中性子減速効果が上がりプルトニウムの燃焼が促進される。このような中性子スペクトルの変化を炉心流量で制御して燃料の反応度利得を高める方法を、流量制御によるスペクトルシフト運転と呼ぶ。図8に流量制御スペクトルシフト運転の概念を示す。

(5) 軸方向出力分布制御によるスペクトルシフト運転

前述の流量スペクトルシフト運転で用いた炉心内のボイド率を変化させて、反応度利得を図る別の方法として炉心軸方向出力分布変化法がある。これは運転サイクルの前半では軸

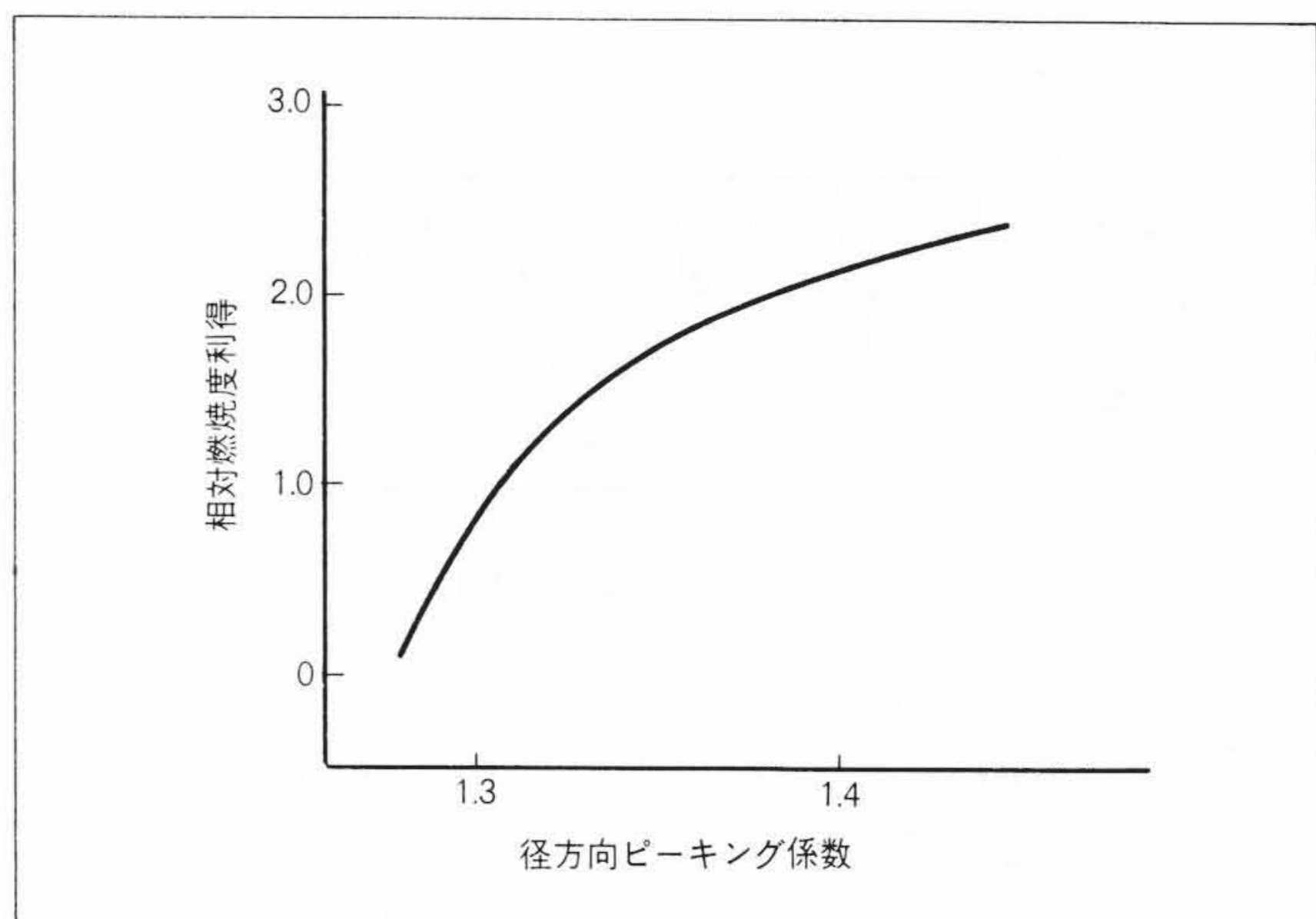


図7 径方向ピーキング係数と燃焼度利得 径方向ピーキング係数を増大すると、燃焼度利得がある。ただしある程度以上のピーキング係数になると、ピーキング増大の割に燃焼度利得への効果が小さくなる。

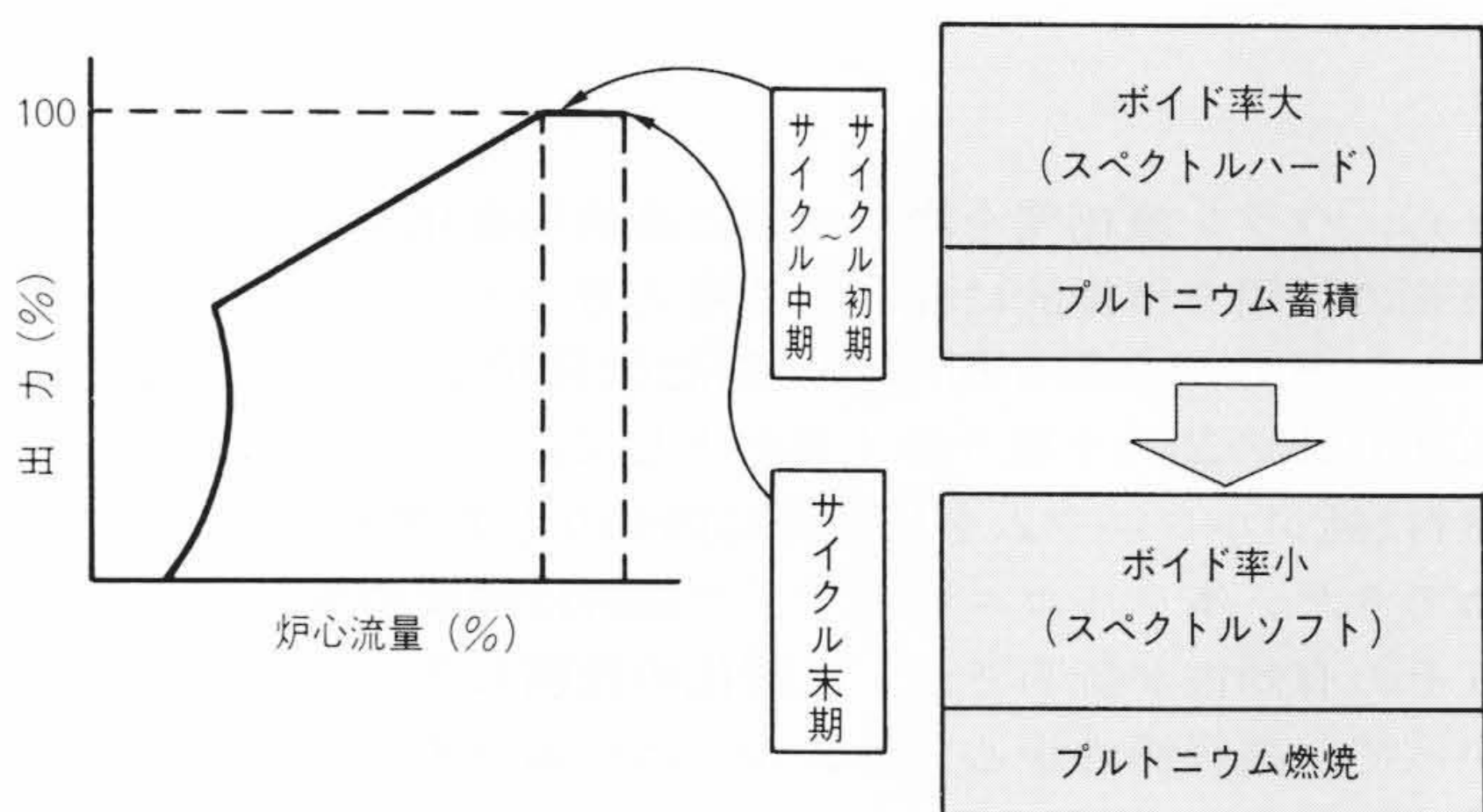


図8 流量制御スペクトルシフト運転 BWRは、炉心流量の制御により炉心内ボイド率を変化させ、中性子スペクトルを変えプルトニウム蓄積→燃焼を行なって反応度利得を高めることができる。

方向出力分布を下方ひずみにしてボイド発生点を下部にして炉内ボイド率を高くし、運転サイクル後半では逆に軸方向出力分布を上方ふくらみにして炉内ボイド率を低くするものである。このように、運転中の軸方向出力分布を制御して、中性子スペクトルをシフトさせて反応度利得を図る方法を、軸方向出力分布制御によるスペクトルシフト運転と呼ぶ。

(6) 水対ウラン比の最適化

燃料ウラン濃縮度を増大し、高燃焼度化を図ると水とウランの原子数比は減少し、中性子スペクトルは硬くなる。したがって、燃料を有効に使い熱中性子の高利用化を図るには最適な水対ウラン原子数比に戻すのが有効である。このように水対ウラン比を最適化するには、具体的には燃料集合体内のウオータロッドの本数やその径を増す方法がある。

以上述べてきたBWRの省ウラン化技術は、いずれもBWRが元来潜在的にもっている反応度利得のポテンシャルを、ジルコニウムライナ燃料と上下濃縮度分布の採用により顕在化させたものであり、BWRが極めて柔軟性に富み経済的に優れた炉心であることを示すものである。ちなみに、このような省ウラン化技術を採用し、燃料経済性を従来より10%(取出し燃焼度にして約3,000MWd/t)向上を図ったのが高経済性ステップI燃料である。図9に本ステップI燃料の出力ピーキングと取出し燃焼度増加の関係を示す。

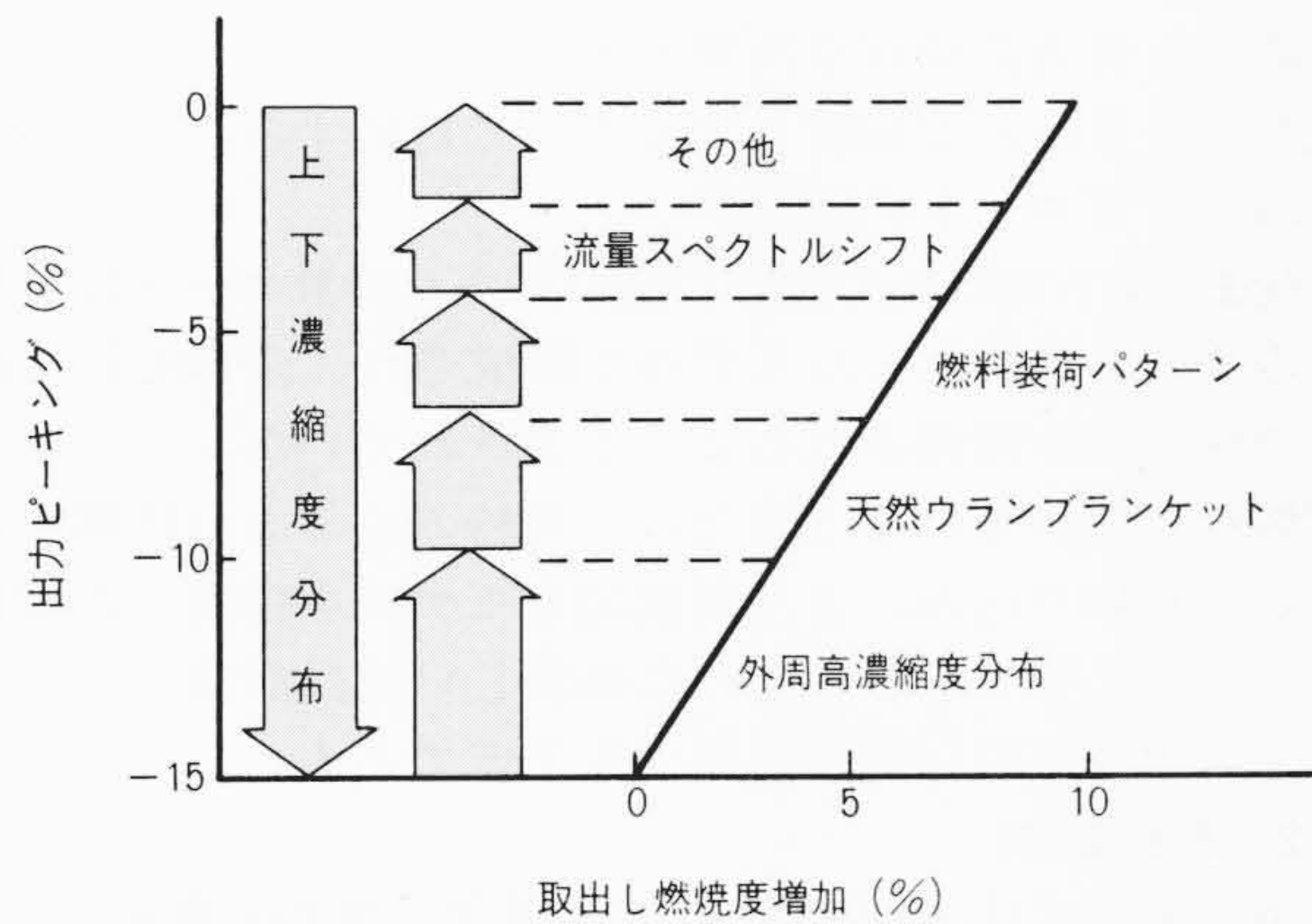


図9 高経済性炉心(ステップI)の燃焼度増加方法 高経済性炉心では、日立製作所が独自に開発した上下濃縮度分布により得られた出力ピーキングの余裕を、経済性向上に役立てている。

3.3 高燃焼度燃料の開発

3.3.1 燃料棒・燃料集合体の設計

高燃焼度時での燃料の機械構造設計上の技術的検討課題と、高燃焼度ステップI、ステップII燃料に適用する予定の改善策を表1に示す。以下に、その開発状況について述べる。

(1) ジルカロイの耐食性改善

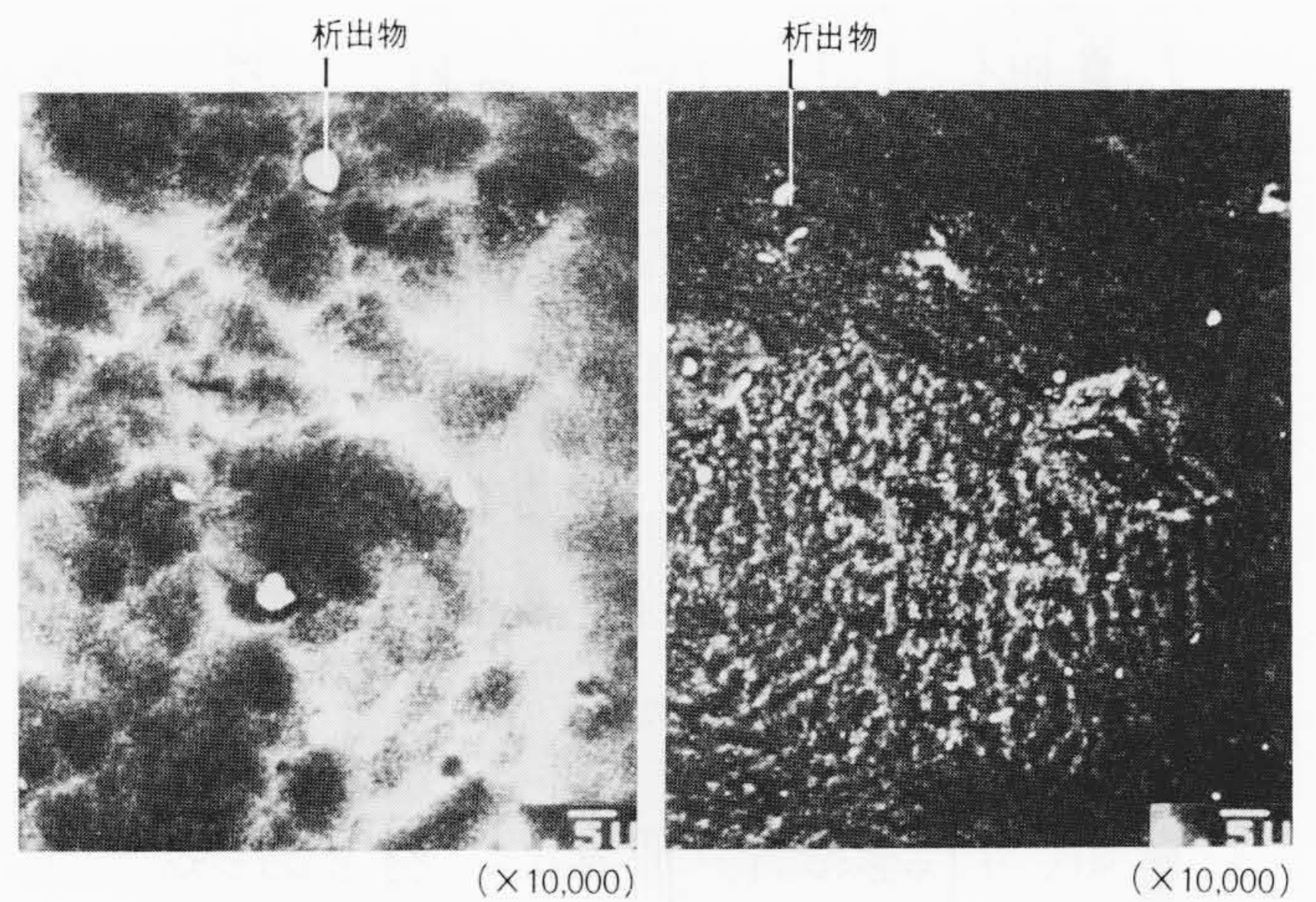
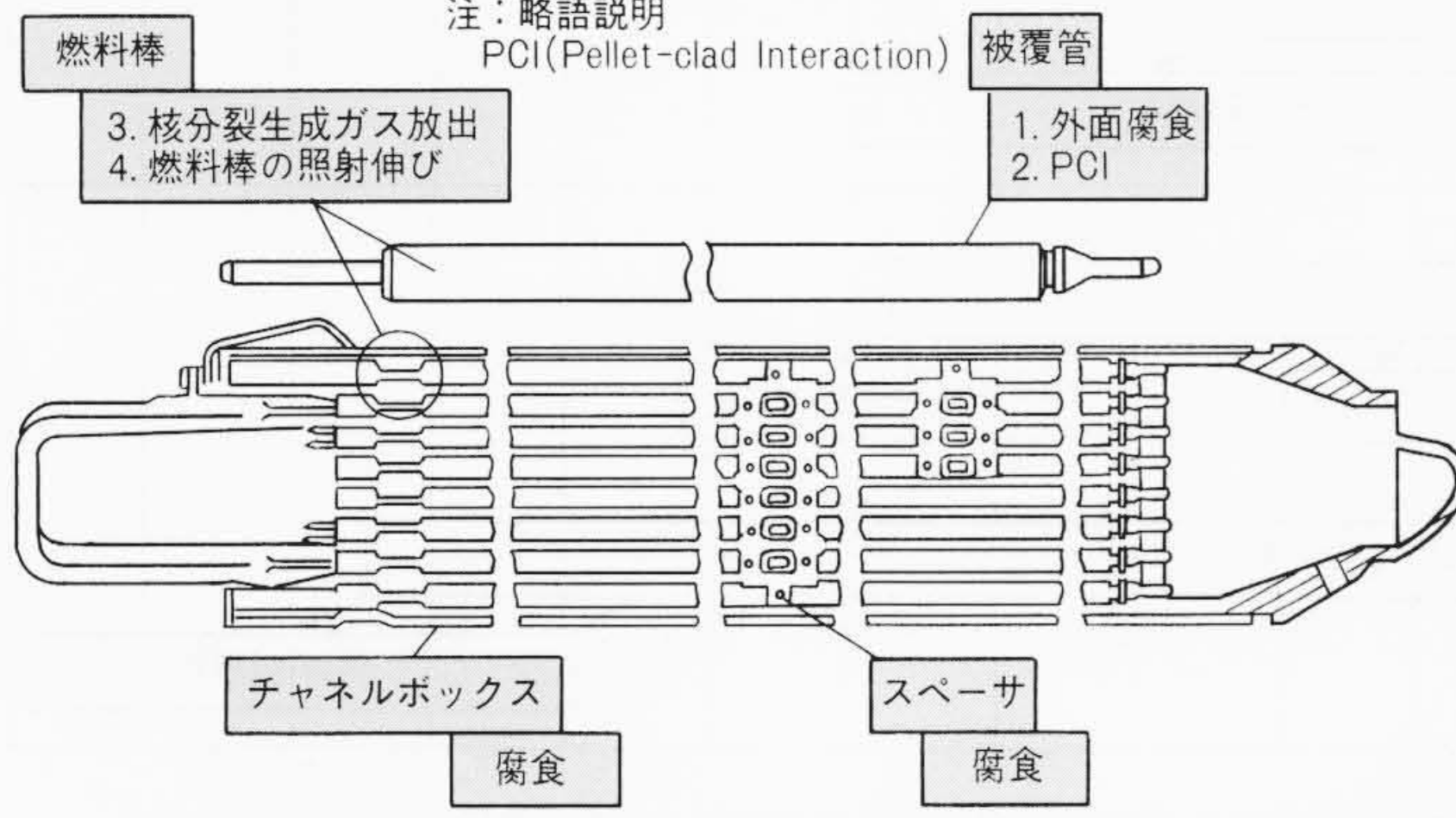
ジルカロイは、高温の炉水との反応で腐食がわずかつつ進行する。これまでの経験では、腐食が燃料の寿命制限因子とはなっていないが、耐食性のばらつきが大きく、高燃焼度のため炉内滞在期間が長期化すると、耐食性の低い材料では、酸化被膜の脱落による水質劣化も予想されるので、耐食性の改善が望まれる。日立製作所では高燃焼度時での燃料の信頼性を確保するため、材料の改良にいち早く着手し、ジルカロイの耐食性を改善するには、製造工程の途中で $(\alpha + \beta)$ 焼入れと呼ばれる特殊熱処理を適切に施すのが有効であることを確認した。

表1 高燃焼度燃料の開発 高経済性炉心では、燃料構造仕様上の改善を取り入れながら、段階的に高燃焼度化を図っていく。

No.	検討項目	改善策	ステップI	ステップII
1	ジルカロイの腐食	●特殊熱処理による(被覆管)高耐食化(スぺーサ)	○	○
2	PCI	●ジルコニウムライナ被覆管の採用	○	○
3	核分裂生成ガス放出	●ヘリウム加圧量増加などによるペレット温度の低減	ヘリウム加圧	ヘリウム加圧
4	燃料棒の照射伸び	●構造設計の見直し	○	○
5	設計計算コード	●新設計計算コードの採用	—	○

注：略語説明

PCI(Pellet-clad Interaction)



(a) 従来燃料被覆管例

(b) 高耐食燃料被覆管例
(特殊熱処理素管から製造)

図10 高耐食燃料被覆管の金属組織 高耐食燃料被覆管は、特殊熱処理によって析出物が微細化しており、耐食性が向上している。

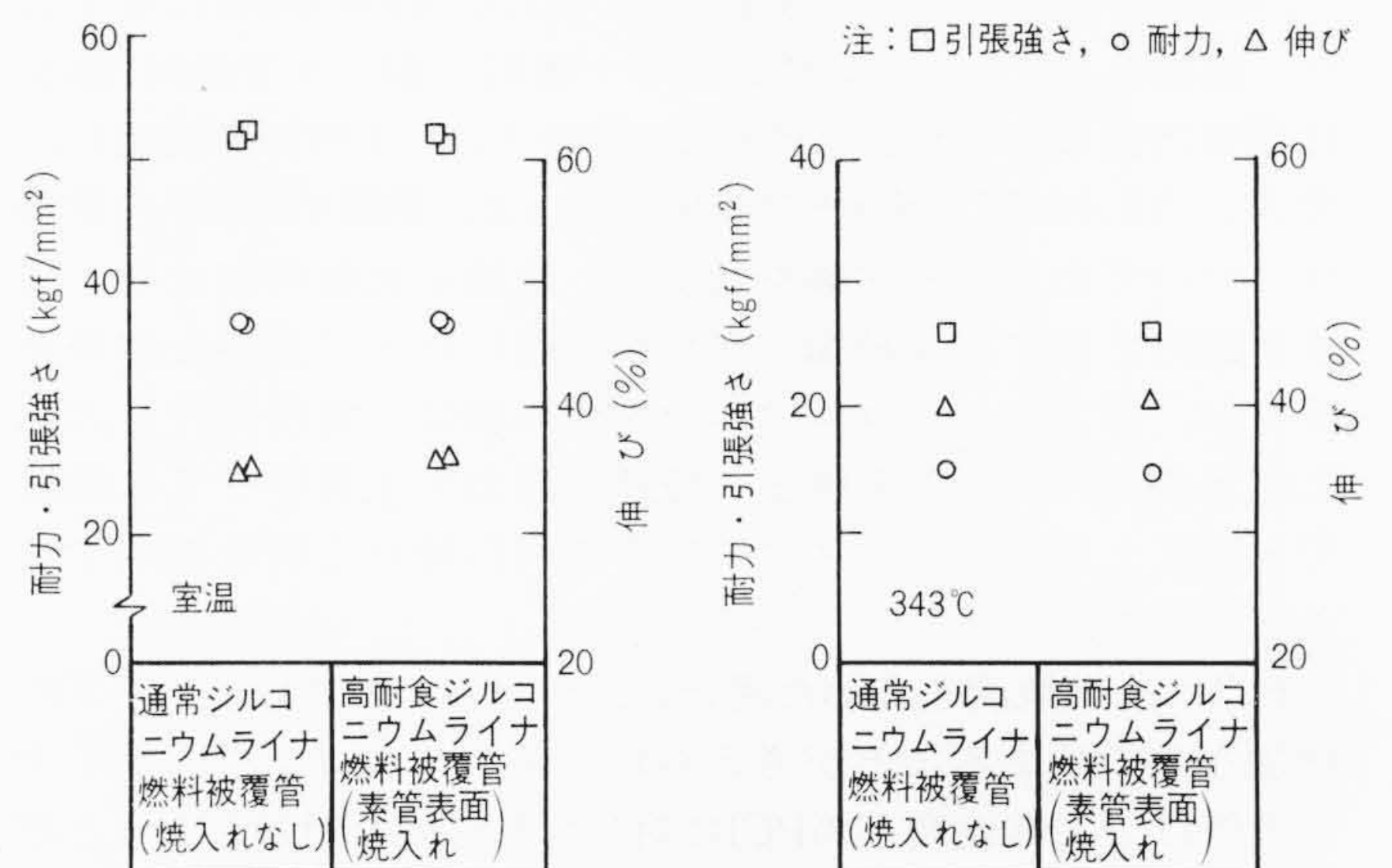


図11 高耐食被覆管の引張特性 高耐食ジルコニウムライナ燃料被覆管の機械的性質は、通常ジルコニウムライナ燃料被覆管と同等である。

燃料被覆管については、製造工程中の素管の段階で特殊熱処理を加え、その後圧延加工と焼鈍を適切な条件で行なうことにより、耐食性を改善する方法を開発した。高耐食燃料被覆管の金属組織を図10に、引張特性を図11に示す。高耐食燃料被覆管はステップI燃料から採用されるが、それに先立ち、福島第二・2号機の第2回取替燃料の一部として、昭和61年から先行使用が開始される。スぺーサ材料についても、ステップII燃料から、この技術を適用する予定である。

燃料チャンネルボックスについては、昭和56年に特殊熱処理品の製造技術を確認した。その技術を適用した製品を国内3プラントに先行使用品として装荷し、定期検査時に表面腐食量を測定し、性能を追跡している。これまでに得られたデータから、特殊熱処理品は、従来品の腐食データのばらつきの下限近くにあり、腐食の進行程度も小さく、良好な特性をもっていることが確認されている。以来、特殊熱処理チャンネルボックスは、初装荷又は取替用として、国内9プラント、国外1プラントに納入されている。

(2) PCI対策燃料

PCI(Pellet-clad Interaction：ペレット-被覆管相互作用)損傷を防止し、自由な出力変動運転を可能とすることを目的

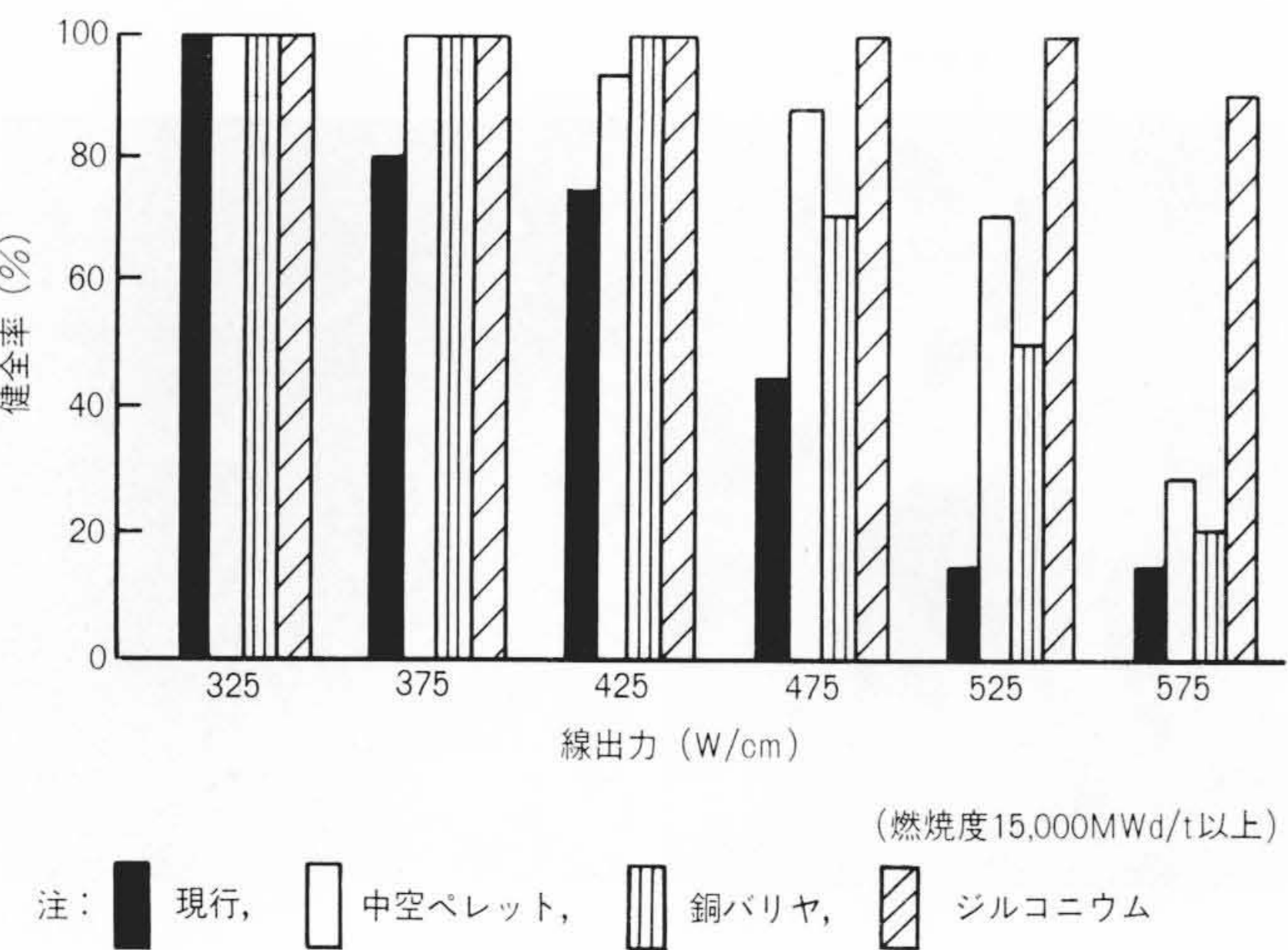


図12 ジルコニウムライナ燃料出力急昇試験結果 3種類とも現行燃料に比べて良好であるが、中でもジルコニウムライナ燃料が優れた耐PCI性能を示す。

に、昭和50年代初期に耐PCI性能に優れた燃料の開発に着手した。候補としてジルコニウムライナ燃料、銅バリア燃料(銅を被覆管内面にめっきした燃料)、中空ペレット燃料を選定し、最大3万9,000MWd/tまで照射したあと、累積約120本の燃料棒について出力急昇試験を行ない、性能を比較検討した。結果を図12に示す。3種類とも現用燃料に比べて良好な結果を得たが、中でもジルコニウムライナ燃料は、実用条件を大幅に超える高い線出力密度まで急速に出力を上昇させても健全であることが分かり、ステップI燃料以降にこれを採用することにした。

PCIは、燃焼度を高めた場合に、ペレットのスウェリングの増加などで強まることが考えられるが、ジルコニウムライナ被覆管は、高燃焼度下のPCIに対しても有効な対策となると考えられている。

(3) 核分裂生成ガス放出の抑制

燃焼度の増加とともに、ペレットからの核分裂生成ガスの放出が増加することが知られている。核分裂生成ガスの放出量を低減するには、ヘリウムの封入圧を高くするなどにより、ペレットの温度を下げるのが有効である。

(4) 燃料棒の照射伸び対策

燃料棒は、燃焼度の増加とともに軸方向の伸びの絶対量とそのばらつきが増加する傾向を示す。BWR燃料集合体は、燃

料棒の軸方向伸び差を膨張スプリングで吸収しており、高燃焼度時でも軸方向伸びを拘束することのないように、十分な膨張しろを見込んだ設計とすることで対処する。

(5) 設計計算コードの改良

これまでBWR燃料の設計に用いてきた計算コードは、燃料のふるまいを単純化したモデルで構成され、全体として設計計算の保守性が確保されるよう工夫されていた。しかし高燃焼度燃料の設計を行なう場合は、燃料のふるまいに関する最新の知見を取り込み、より現実的なモデルを採用した設計計算コードが必要となる。このため新しい設計計算コードを開発し、ステップII以降に適用する予定である。

3.3.2 照射試験

燃料の開発では、実炉照射による確証が極めて重要である。実炉照射試験のスケジュールを図13に示す。PCI対策燃料については、昭和56年度から財団法人原子力工学試験センターによる「高性能燃料確証試験」が進められている。また、高燃焼度燃料については、既に国内商用炉に装荷されている現行燃料を、約4万MWd/tまで燃焼度伸長することによって、高燃焼度時のデータベースの拡充を図るとともに、ステップII燃料の先行使用を昭和63年に開始する予定で準備を進めている。

4 結 言

PCIOMRによる利用率の低下を改善し、運転性をいっそう向上させるため日立製作所が開発を行ってきた上下濃縮度分布の技術は、福島第一・4号機及び福島第二・2号機の優れた運転実績により当初の開発目標を達成し、ほぼ完成した。本技術は更に高経済性炉心にも活用され、ジルコニウムライナ燃料の採用とあいまって、反応度向上策の基本技術として極めて有用であることが分かった。またBWR炉心は柔軟性に富み燃料経済性にも優れた特性をもっていることが判明した。日立製作所はこれらBWR炉心の優れた特性を生かしながら、いっそう燃料経済性の向上した高経済性炉心の開発を強力に推進し、電力会社の要望にこたえていく考えである。

参考文献

1) 山下、外：最近の炉心及び燃料の技術展開、日立評論、64、8、553～558(昭57-8)
2) 山下、外：BWR(沸騰水型原子炉)炉心・燃料に関する展望、日立評論、66、4、319～322(昭59-4)

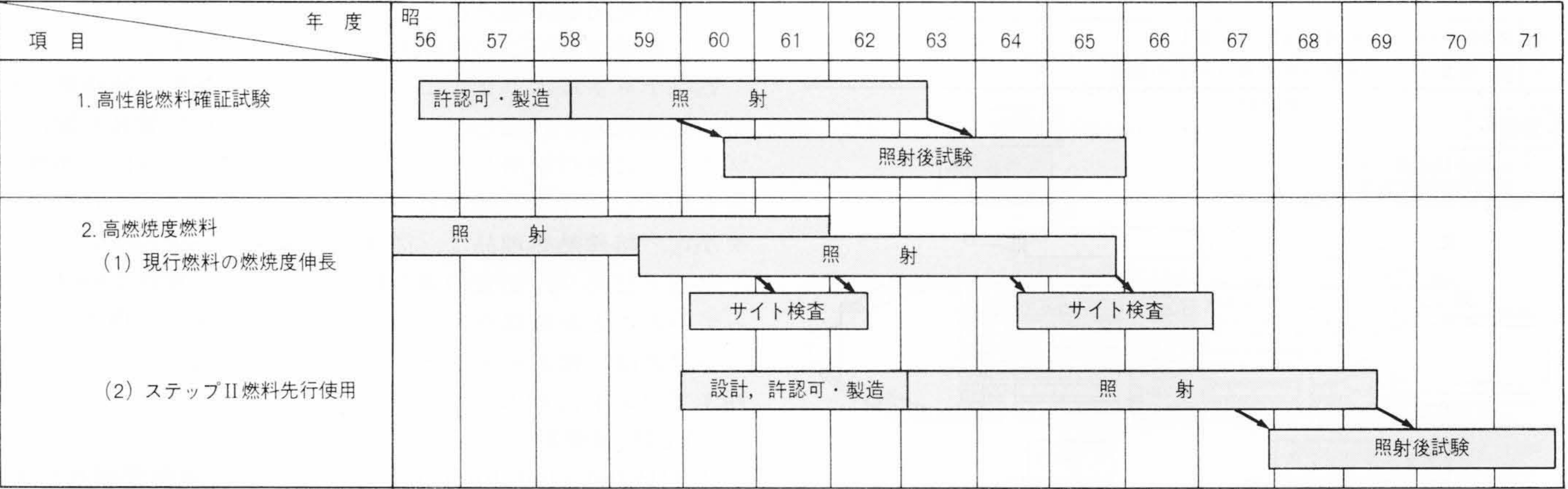


図13 高性能燃料、高燃焼度燃料の照射試験スケジュール 高経済性炉心で採用する高性能燃料、高燃焼度燃料の照射試験スケジュールを示す。