

BWR新型炉心燃料の適用と開発

Application and Development of Improved BWR Core and Fuel Technology

日立製作所は、これまで燃料の信頼性向上策を施すとともに、日立改良炉心の適用により負荷率(運転中の利用率のこと)の向上を図ってきた。その後、原子力発電の経済性向上のニーズにこたえるため、高経済性炉心燃料の開発を今後とも改良を積み重ねるべき課題として取り上げ、長期的に開発を推進している。高経済性炉心燃料の開発は、取出し平均燃焼度を段階的に高めることによって、燃料サイクル費を低減させることを目的とし、BWR運転期間を現状の約12箇月から将来15箇月、更には18箇月に長期化させるのに対応できるものである。このため、省ウラン技術の開発、高燃焼度化に対応した燃料集合体構造及び材料の開発などを行い、使用実績を確認しながら段階的に高経済性炉心燃料の適用及び開発を進めている。

山下淳一* Jun'ichi Yamashita
斉藤莊蔵* Shôzô Saitô
小沢通裕* Michihiro Ozawa
梅原 肇* Hajime Umehara
牧 英夫** Hideo Maki

1 緒 言

原子力の開発に着手した当初から炉心燃料技術は原子力の中核技術であると考え、精力的にその基礎技術開発に努めてきた。昭和40年代には、燃料漏れが発生したが、炉心燃料の技術を徹底的に見直し改良することによって、国内での燃料漏れは極めて少ないものにすることができた。昭和50年代には日立改良炉心と呼ばれる独自の炉心を開発し、燃料の信頼性を更に向上させるとともに、負荷率を99.3%まで向上させる実績を得ることができた。

近年になり原子力発電量が増加するに従って、信頼性の高い高経済性炉心燃料が要望されるようになった。電力会社の支援を得て昭和52年に開発に着手し、このほど集合体平均濃縮度は従来燃料と同じままで、燃焼度を約10%増加させることができる高経済性炉心燃料を製品化することができた。BWR(沸騰水型原子炉)炉心燃料の経済性向上を今後とも改良を積み重ねるべき課題として取り上げ、現在、長期的に開発を推進している。ここでは、これまでの炉心燃料開発の経緯を振り返って紹介するとともに、高経済性炉心燃料の開発及び適用の現状について紹介する。

2 炉心燃料開発の経緯

図1に、これまでの炉心燃料開発の流れと今後の展開の概要を示す。本章では、このうち燃料信頼性の向上と負荷率の向上について述べる。

2.1 燃料信頼性向上

国内では昭和45年以降、商用炉燃料が多量に使用され始めるに伴い、低い確率ながら燃料に漏れが生じた。その燃料漏れの主な要因は、「局部水素化」と、「ペレットと被覆管の相互作用」〔以下、PCI(Pellet Clad Interaction)と呼ぶ。〕であ

り、これに対して昭和50年代初期までに対策を施して問題を解決した。漏れの最大の原因であった「局部水素化」に対しては、燃料製造時での燃料棒内水分管理の強化などにより完全に防止することができた。また、PCIに対しては、ならし運転法の適用¹⁾、8×8型燃料の採用による最大線出力密度の低減などの対策を施した。

その結果、国内での燃料漏れは極めて少ないものとすることができた。最近では国内でのBWR燃料の漏れはほとんどなく、諸外国での漏れ率に比べて $\frac{1}{10}$ 以下となっている。図2に日立製作所がこれまで納入し使用されてきたBWR燃料の使用実績を、表1に各燃料型式の主要仕様を示す。

2.2 負荷率向上

ならし運転法の適用によって燃料の健全性を大幅に向上させることができたが、このならし運転法は出力上昇率に対する制限などを設けていたため、起動に時間がかかり負荷率の損失という問題が生じた。これに対して、負荷率を大幅に向上できる上下2領域炉心及び少数制御セル炉心を開発した。

上下2領域燃料は、燃料を上下2領域に分け上部のウラン濃縮度を下部に比べ高くしたものであり、その反応度差を用いて軸方向ボイド分布に起因する反応度差を補償することによって、従来用いていた浅挿入制御棒を必要とせずに炉心の上下方向(軸方向)の出力分布を平坦にするものである。上下2領域燃料を装荷したWNS炉心^{*1)}は、出力分布が平坦になり熱的余裕が増大することによって、燃料健全性の向上及びならし運転法の制約緩和による負荷率の向上を図ることが

※1) No shallow rods, No shuffling of fuelの二つのNSの意である。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立工場 工学博士

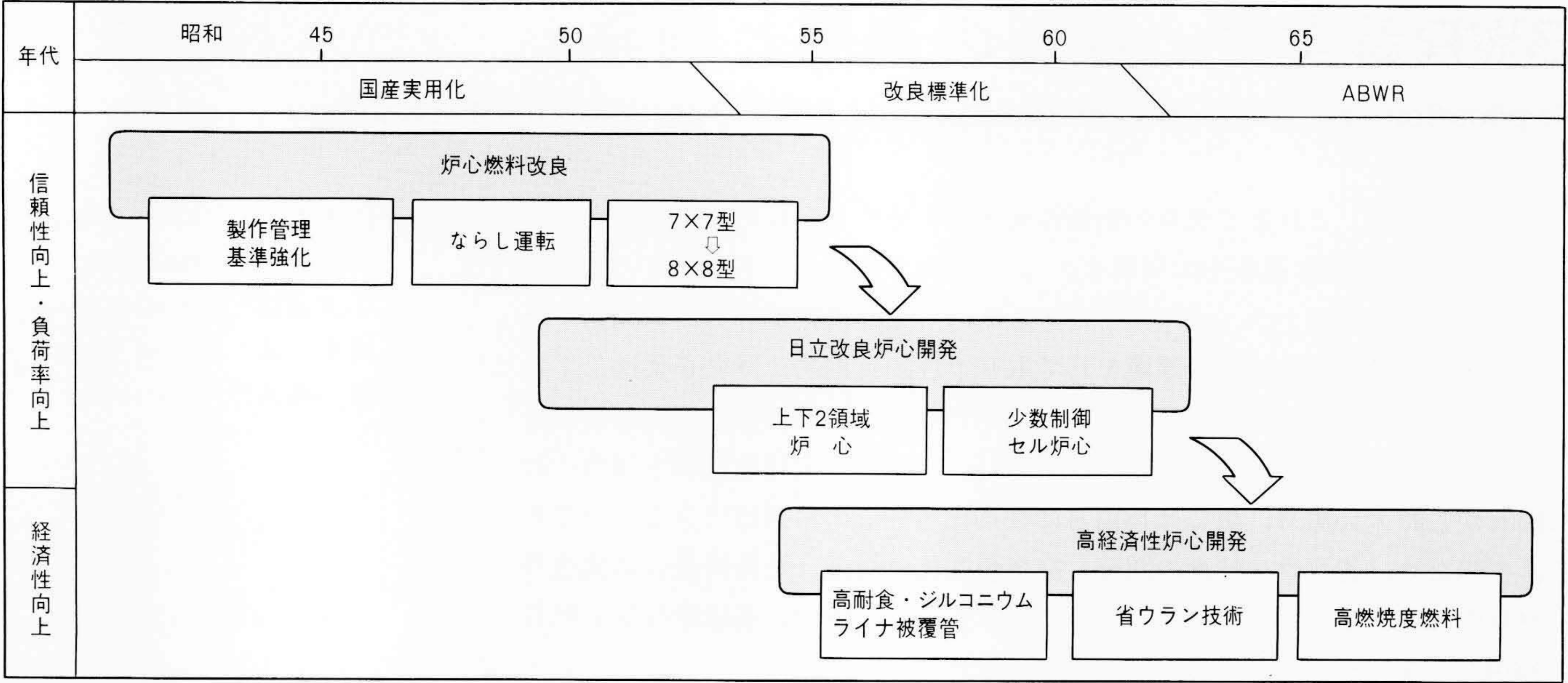
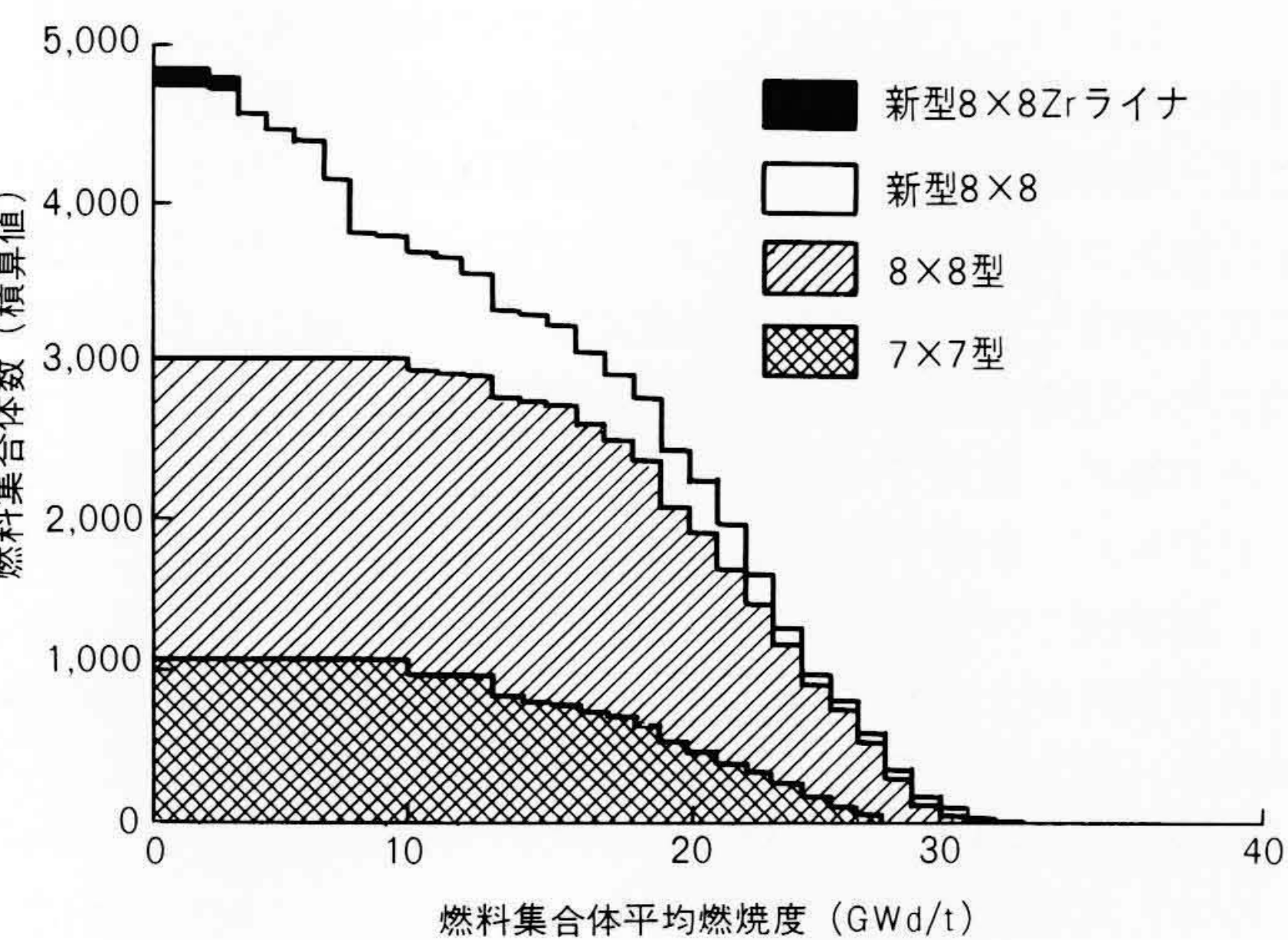


図1 炉心燃料改良開発の経緯 炉心燃料の改良及び開発は、これまで信頼性の向上に重点がおかれてきたが、最近ではこれに加えて経済性の向上に焦点を当てて開発を推進している。



注：昭和62年12月現在
図2 日立製作所製商用BWR燃料の積算使用実績 これまでの実績では、少数体ではあるが37 GWd/tまで良好な性能が示されている。

できた。
少数制御セル炉心は、上下2領域燃料装荷により出力分布を燃料自身で平坦にできる特性を十分活用し、運転時の制御棒パターン交換回数の低減を図ったものである。少数制御セル炉心では、特定の少数の制御棒挿入位置の周りに、燃焼の進んだ低反応度燃料4体を集めた制御セルを設け、そのセルだけ制御棒操作を行うものである。このように、少数制御セル炉心では、制御棒パターン交換回数の低減により負荷率を向上するとともに、運転用制御棒本数の低減により運転の単純化及び使用済み制御棒発生量を従来炉心の50%に減少できる効果がある。

3 経済性向上及び運転高度化のための展開

軽水炉による発電量が増加するに従い、燃料サイクル費の低減や設備利用率の向上による固定費の低減を図ることによって、経済性を向上することが期待されている。また、給電

表1 燃料仕様比較表 燃料仕様の変遷を示す。

燃料の型式 項 目	7×7型	7×7改良型	8×8型	新型8×8	新型8×8Zrライナ (ステップI燃料)
ペレット長さ対直径比	1.8	1.0	1.0	1.0	1.0
燃料棒外径(mm)	14.5	14.3	12.5	12.3	12.3
被覆管材料	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2 ジルコニウム内ばり
燃料棒の本数*	49	49	63	62	62
ウオータロッドの本数*	0	0	1	2	2
水分ゲッタの有無	なし	あり	あり	あり	あり
最大線出力密度(kW/m)	57.4	60.7	44.0	44.0	44.0

注：* 燃料集合体当たりの本数を示す。

運用の柔軟性を向上するため、ならし運転を不要にする炉心燃料が要望されている。このため、よりいっそうの経済性向上と運転の高度化に向けて炉心燃料の開発を進めている。

設備利用率を向上させるため、現状の運転月数である約12箇月を将来は15箇月、18箇月と長くすることが期待されている。このニーズにこたえとともに燃料サイクル費を低減すべく、省ウラン技術及び高燃焼度化技術の開発を行い、使用実績を確認しながらステップⅠ、ステップⅡ及びステップⅢと段階的に高経済性炉心燃料の実用化を図るべく開発、及び製品化を進めている。ステップⅠ炉心燃料は取出し平均燃焼度が33 GWd/tで12箇月運転を経済的に達成するものである。ステップⅡ炉心燃料は38 GWd/tで15箇月運転に、ステップⅢ炉心燃料は45 GWd/tで18箇月運転に対応するものである。図3に高経済性炉心燃料の実用化スケジュールと、それらの導入による燃料サイクル費の低減効果を示す。運転月数を長くすると燃料サイクル費の低減が若干少なくなる傾向にあるが、設備利用率向上の効果により総合的には効率よく発電費を低減することができると考えられる。一方、ならし運転を撤廃し、給電運用の柔軟性を向上させるとともに高燃焼度化を達成するため、燃料集合体を構成する材料を開発するとともに、構造設計を改良する開発を併せて進めている。

高経済性炉心燃料の設計では、これまでの設計改良と同様に、燃料基本寸法を保持することによって、常に最新の改良・開発技術がABWR(改良型沸騰水型原子炉)炉心など新プラントはもとより、既設プラントにも共通して適用できるようにしている。

3.1 高経済性ステップⅠ炉心燃料の適用

開発の目標である高経済性炉心は、先に述べた日立改良炉心の優れた運転性を活用し、新たに省ウラン技術と高燃焼度化技術とを用いて燃料サイクル費の低減を図る炉心燃料を実現するものである。このほど実用化を開始した高経済性ステップⅠ燃料は、省ウラン技術を適用することによって従来燃

料と構造も濃縮度も同じままで、燃焼度を高くすることができると、燃料サイクル費を約10%低減できる。また、ここ10年来開発努力を傾注してきたPCI対策と、冷却水に対するジルコイ合金の高耐食化技術を、ステップⅠ燃料の被覆管に同時に適用し、高耐食ジルコニウムライナ被覆管として製品化している。

ステップⅠ燃料は、東京電力株式会社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。)の第3回取替燃料として装荷され、昭和62年9月から照射が開始された。それ以降の取替燃料はステップⅠ燃料に順次切り替える予定である。

(1) 省ウラン技術の適用

省ウラン技術とは、炉心に装荷されたウランを効率的に燃焼させることによって、濃縮度の増加量をできるだけ少なくして高い燃焼度を得るための技術である²⁾。表2に高経済性炉心燃料に適用した省ウラン技術の概要を示す。出力ピーキングの活用は、熱中性子が多くウランの核分裂が起こりやすい炉内の適切な位置に、濃縮度が高く燃えやすい燃料を配置する技術である。これによって炉内で若干出力密度が高くなる部分が生じるが、燃料の健全性については、ジルコニウムライナ被覆管を用いて飛躍的に向上させることができるため、この方法を適用することが可能になった。スペクトルシフト運転は、BWR炉心ではボイドが発生するという特徴を生かしたもので、炉内のボイド発生量(ボイド率)を制御してサイクル前半でボイド率を大きくし、プルトニウムの蓄積を促進し、サイクル末期でボイド率を小さくし、蓄積したプルトニウムの燃焼を促進してサイクル末期の反応度を高める技術である。

(2) 高耐食ジルコニウムライナ被覆管

高耐食ジルコニウムライナ被覆管の開発経緯については、これまで種々の機会に紹介されている²⁾ので、ここでは主として実用化に際し確立した製造・QC(Quality Control)技術について述べる。

ジルコニウムライナ被覆管の品質を保証する上で、内面のジルコニウムライナ層の厚さが、被覆管の全長・全断面にわたって、規定した範囲であることを確認する検査方法の確立が必要であった。被覆管製造会社と協力して、渦電流法によるジルコニウムライナ厚さの非破壊検査法を量産被覆管に適用した。本方法の検証に際しては、様々なライナ厚さを持ったジルコニウムライナ被覆管を数多く渦電流法で測定し、その測定位置を切断し金相によりライナ厚を測定し、相互を比較することで測定精度を確認した。結果は実用に供するのに十分な精度が得られた。この検査技術の実用化によって、ジルコニウムライナ被覆管の耐PCI性能上重要な仕様であるライナ厚さを、確実に保証できるようになった。

燃料被覆管の外表面は冷却水によって酸化し、ノジュール〔小りゅう(瘤)〕状の酸化物が成長することが知られている。高燃焼度化により燃料の炉内滞在年数が長くなるため、酸化膜の成長をできる限り小さく抑えることが必要と考え、素管の段階で溶体化処理を行い、それ以降の工程では温度を極力低く抑えることで、耐食性の改善を図った高耐食被覆管を開発して実用化した。製造方法の開発と並行して、高耐食化熱処理が確実に行われ耐食性が改善されていることを確認する

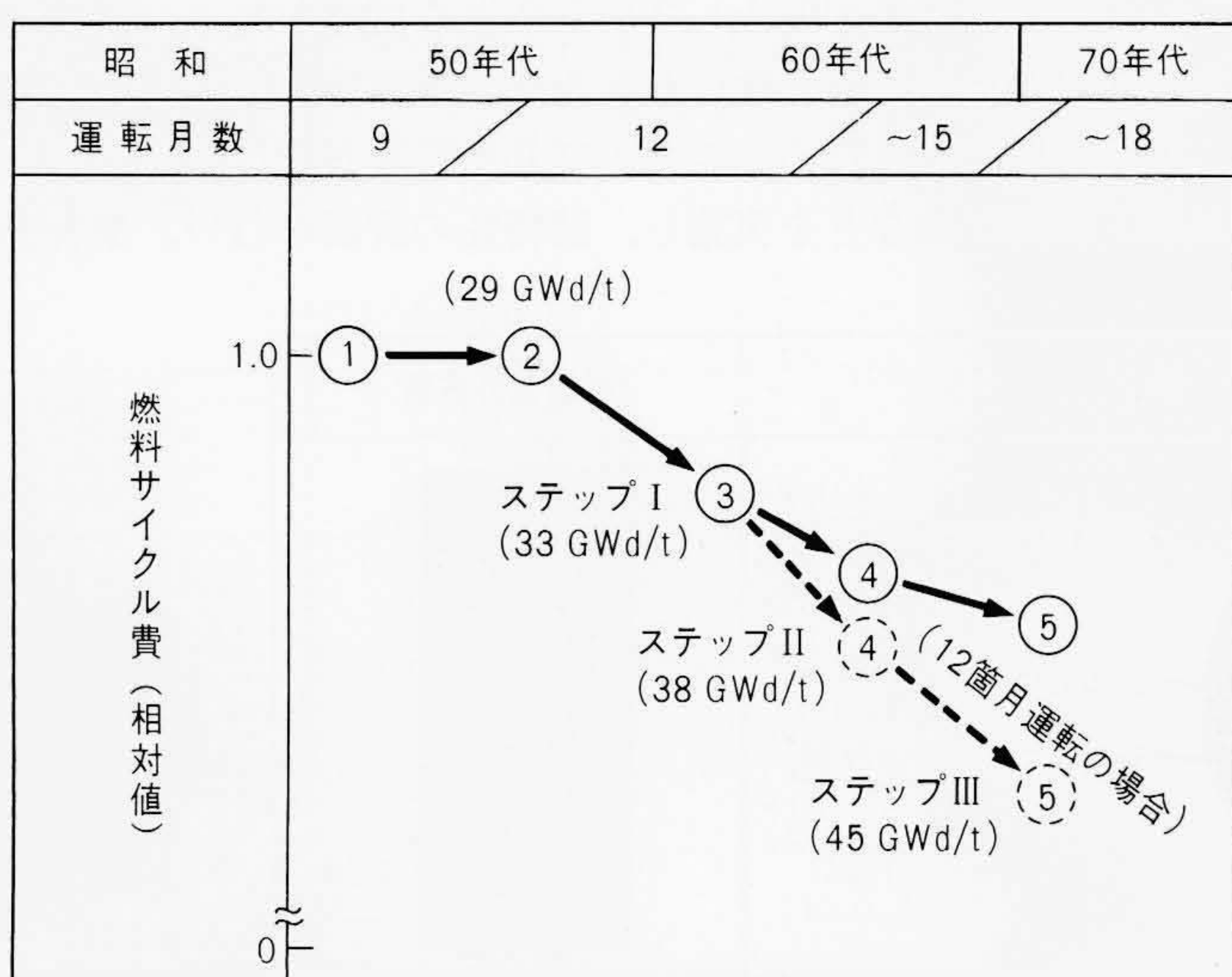
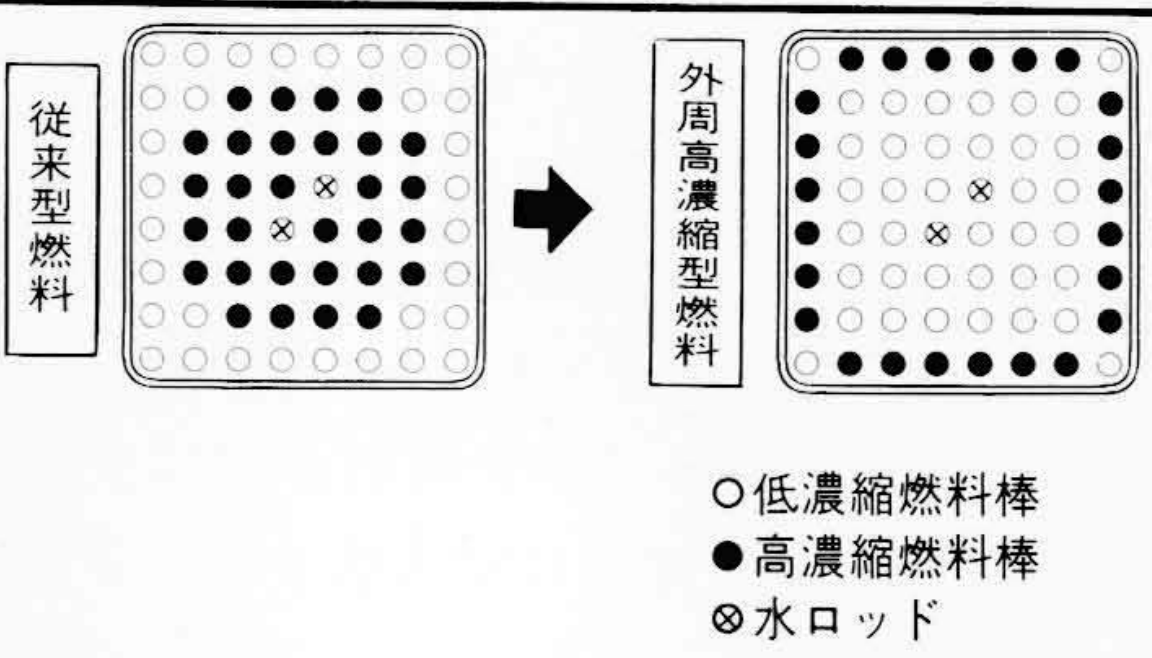
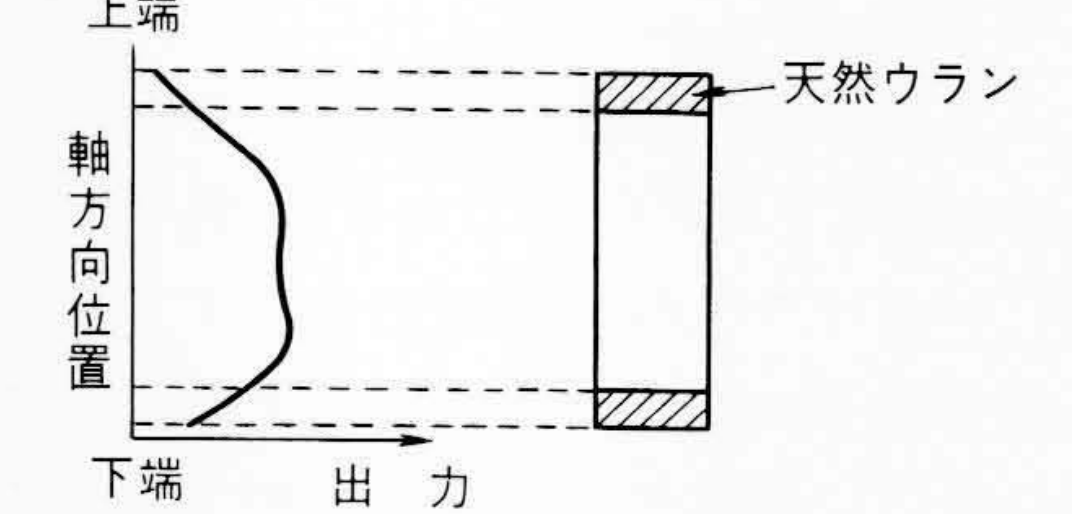
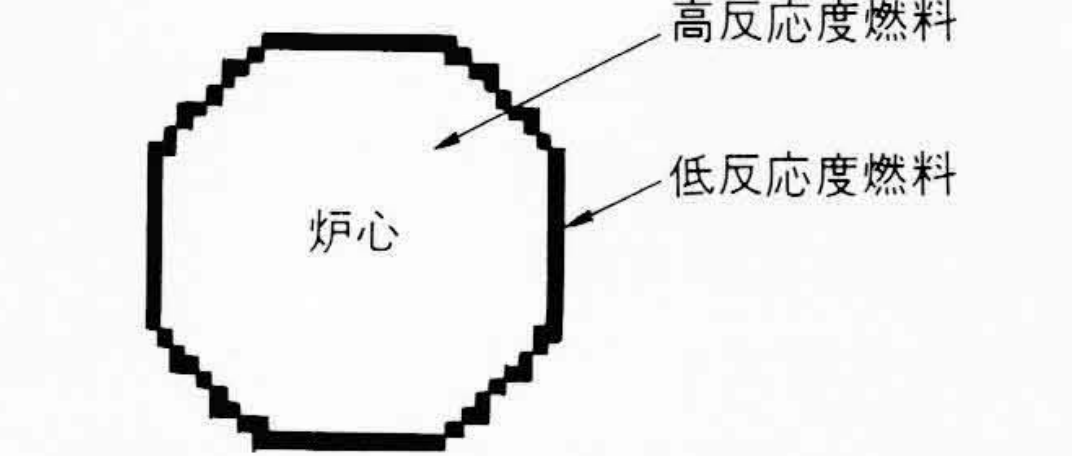
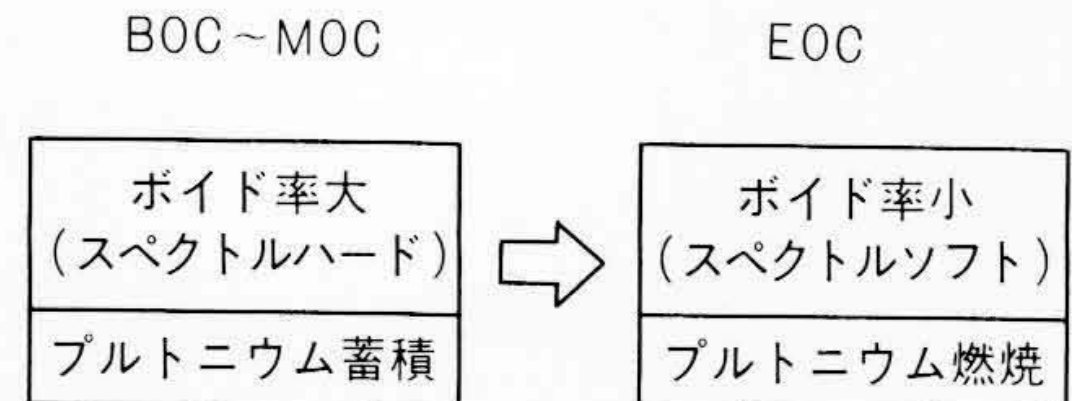
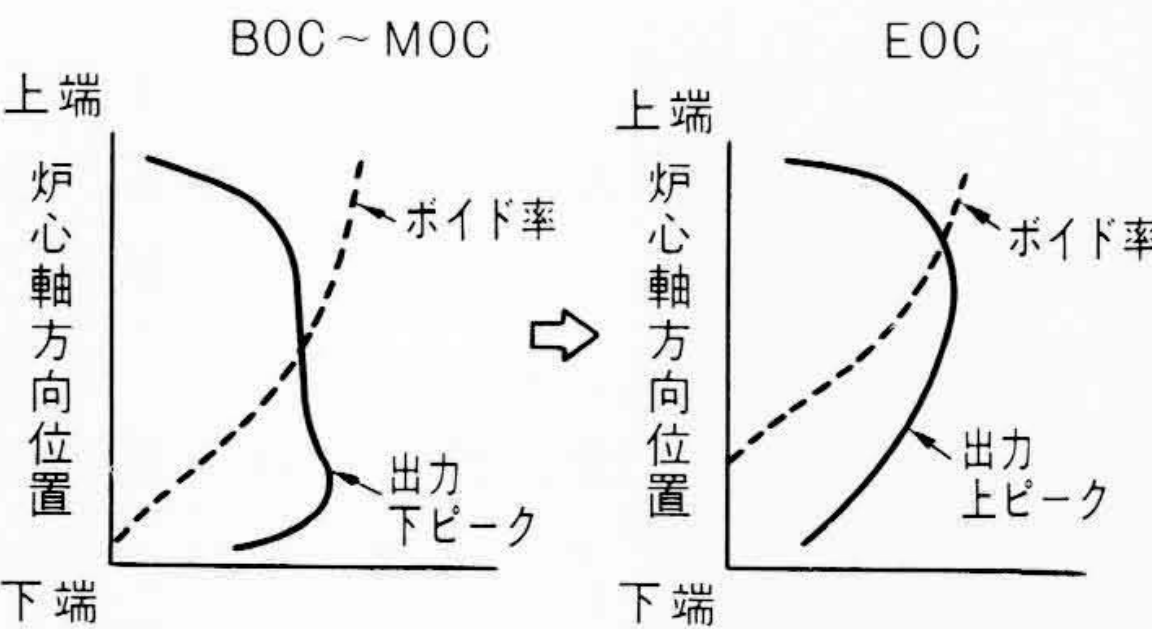


図3 経済性向上及び運転高度化のための展開 段階的に高燃焼度化を進めることで運転月数の長期化にも対応でき、燃料サイクル費が低減する。

表2 省ウラン技術 高経済性ステップⅠ炉心燃料に適用する省ウラン技術を示す。

内 容		説 明
1. 出力ピーキング活用	(1) 外周高濃縮度分布 	熱中性子束の高い集合体内外部に、高濃縮燃料棒を配置し、反応度を高める。
	(2) 天然ウランブランケット 	ウラン利用率の小さい上下端に、天然ウランを配置する。
	(3) 最適装荷パターン 	周辺低出力部に低反応度燃料(低濃縮又は燃焼の進んだもの)を配置し、反応度を高める。
2. スペクトルシフト	(1) 流量制御運転 	流量変更により、ボイド率を増減させプルトニウムの蓄積(BOC, MOC)燃焼(EOC)を図り、反応度を高める。
	(2) 軸方向出力分布制御 	軸方向出力分布制御により、ボイド率を増減させ、プルトニウムの蓄積(BOC, MOC)燃焼(EOC)を図り、反応度を高める。

注：略語説明 BOC(サイクル初期)
MOC(サイクル中期)
EOC(サイクル末期)

ための試験方法として、炉外でもノジュールを再現することができ、データの再現性を向上させるための工夫を施した炉外加速腐食試験方法を開発し、材料の耐酸化特性を判定する方法として実用化した。高耐食ジルコニウムライナ被覆管の素管及び最終製品段階での試験片を用いて、炉外加速腐食試験を行った。得られた試験片の外観を図4に示す。外表面は均一な黒色酸化膜でおおわれており、白色状のノジュールは発生していない。改良した製造工程を適用して得られる高耐食被覆管は、均質でかつ高い耐酸化特性を示すようになる。

3.2 高経済性ステップⅡ炉心燃料の開発及び先行使用

ステップⅡ炉心燃料は、ステップⅠで適用した省ウラン技術及び高耐食ジルコニウムライナ被覆管を基本に、高燃焼度化するために太径ウオータロッド、新型スペーサなどの燃料集合体構造部材の設計改良のほか、種々の改良を施したものである。濃縮度を従来よりも増加させ、取出し平均燃焼度を38 GWd/tとし、燃料サイクル費をステップⅠ炉心燃料に比べて更に低減させることができる。

(1) ステップⅡ燃料の概要

図5にステップⅡ炉心燃料設計の特徴を、ステップⅠ炉心燃料と比較して示す。燃料棒は、照射中の燃料温度及び燃料棒内圧の上昇を抑制するために、初期ヘリウム加圧量の増加、ペレット密度の増加などの改良を施した。燃料集合体の構造は、1本の太径のウオータロッドを集合体中央に配し、その周りに60本の燃料棒を8行8列(8×8)に配して構成したものである。ウオータロッドの形状は、高燃焼度化のための濃縮度上昇に見合ってチャンネル内の水対燃料体積比を増加させるため、太径のウオータロッドとしたものである。スペーサには、限界出力特性などを向上する目的で新型のスペーサを採用している。上部タイプレートには、圧損を低減させるために、流路面積を増加する工夫を取り込んだ設計改良を施した。

スペーサや上部タイプレートの設計改良に対しては、実規模の模擬燃料集合体を用いた装置で熱・流動試験を行い、限界出力特性が向上していることを、また上部タイプレートについては圧損特性が向上していることを確認した。一方、形状の変更がその他の特性に与える影響を事前に確認しておくことが重要であるため、ステップⅡ燃料を対象に部材の機械試験、流動試験などを実施し、諸特性の評価を行い、集合体

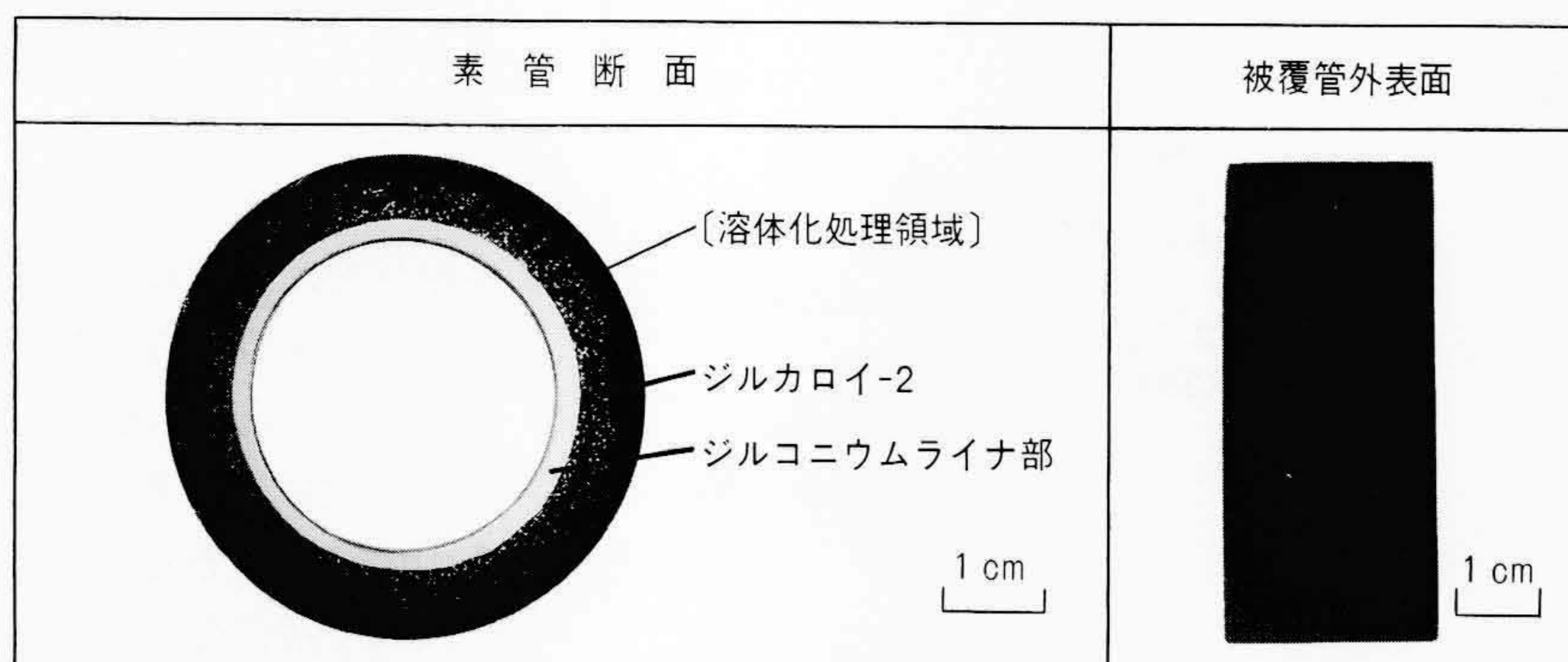


図4 高耐食被覆管の炉外加速腐食試験結果 内面のジルコニウムライナ層を保護するため、溶体化処理は素管(中間製品)の外表面層に適用する。腐食試験後の素管断面は外表面近傍の領域でノジュールが発生しておらず良好な外観を示している。

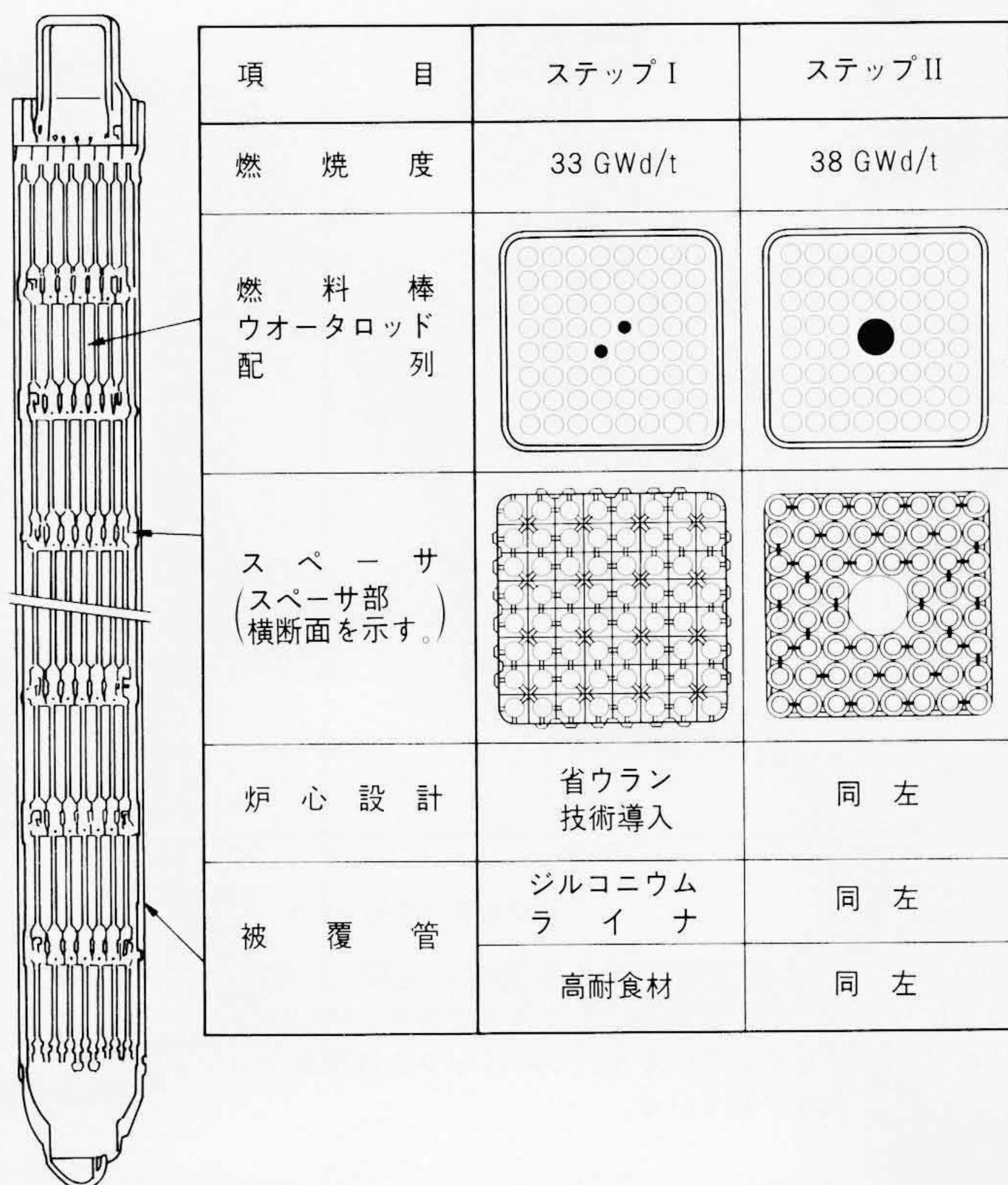


図5 高経済性BWR燃料設計の特徴 高経済性ステップII炉心燃料の特徴をステップIと比較して示す。

特性に問題のないことを確認した。

(2) ステップII燃料の先行使用

ステップII仕様の高燃焼度確証用燃料集合体8体を製作し、昭和63年度後半に福島第二・2号機に装荷し、ステップII燃料の実用化に先駆けて燃料集合体燃焼度50 GWd/tまで燃焼させる予定である。財団法人原子力工学試験センターによる「高燃焼度燃料確証試験」では、高燃焼度確証用燃料集合体を燃焼初期から1サイクルごとに1体ずつ原子炉から取り出し、日本核燃料開発株式会社で照射後試験を行い、燃料のふるまいを詳細に確証する計画である。また、高燃焼度での燃料の出力急昇性能を確認するため、高燃焼度確証用燃料集

合体に組み込まれたセグメント燃料を用いて、出力急昇試験を行うことを計画している。図6に本確証試験のスケジュールを示す。

高燃焼度領域での燃料の照射挙動を把握するためには、従来から行われている被覆管外面腐食量や核分裂生成ガス放出量の測定に加えて、ペレット、被覆管及び主要構造部材の燃焼の進行に伴う状態の変化を、より詳細に調べる必要がある。このため本確証試験では、最新の技術を用いて照射後試験技術の高度化を図り、精度の高いデータを得る計画である。図7に高燃焼度で予想される二酸化ウラン燃料ペレット内の微視的な変化とその特性への影響を示す。燃焼の進行に伴って、U-235などの核分裂によってペレット内には核分裂生成物〔以下、FP(Fission Product)と呼ぶ。〕が蓄積される。FPは、気体として存在するキセノン、クリプトンなどの気体状FP、及びその他のセシウム、ヨウ素などの固体状FPに大別される。固体状FPは、ペレット内に固溶しペレットの熱伝導度に影響を与え、また種々の化学形態で析出することにより体積膨脹を起こし、スエリング(燃料ペレットの膨れ)の原因となる。気体状FPがペレット内にとどまれば、気泡として生成・成長することによって、同様にスエリングの原因となる。核分裂に伴い余剰となる遊離酸素の増加により、ペレットのO/M比(酸素対金属原子数比)が変化する。気体状FPの気泡生成・成長及びペレットから燃料棒内空間への放出挙動は、拡散律速現象であるため、O/M比の影響により変化するものと考えられる。図8に気体状FPの放出機構を模式的に示す。このような気泡の生成・成長など微視的な変化を詳細に観察するため、高分解能走査形電子顕微鏡など最新の分析・計測機器を導入し、高燃焼度での燃料のふるまいをより詳細に調べることにしている。

なお、試験の進展に伴って、燃料集合体燃焼度50 GWd/t以上のデータを得ることについても必要に応じて検討することになっている。

(3) 新設計計算コード“PRIME”の適用

これまでBWR燃料の機械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、保守的な設計基準との組合せにより、全体として設計計算の保守性が確

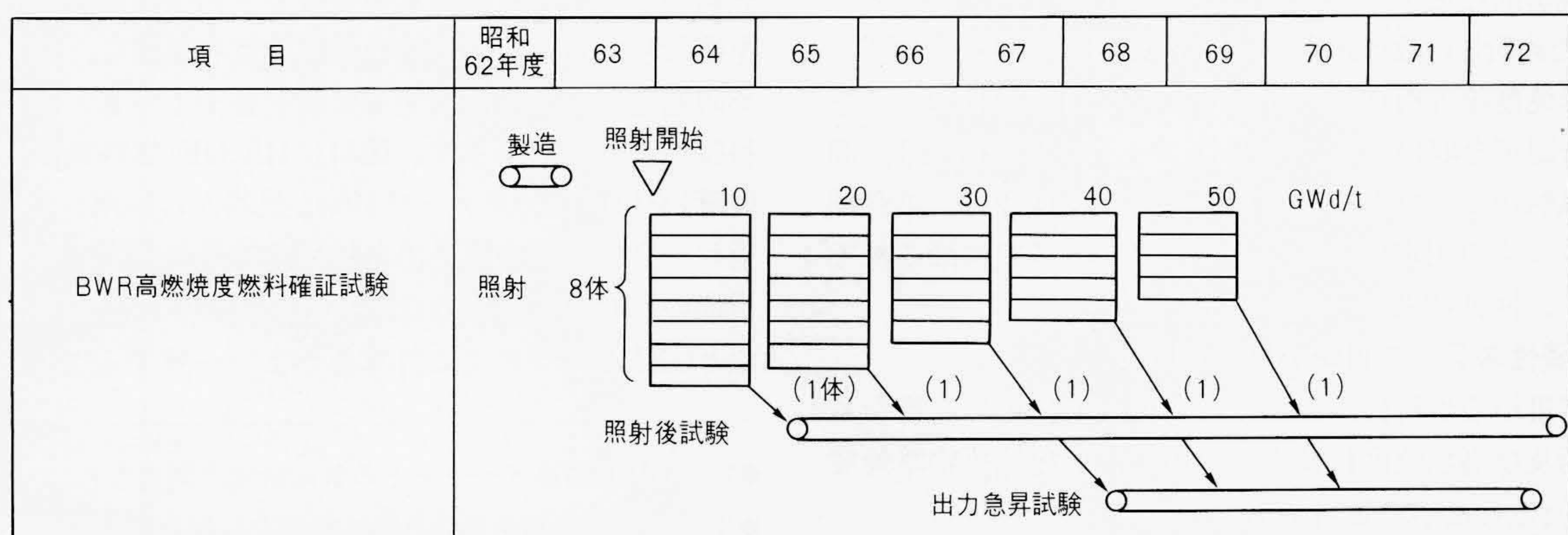
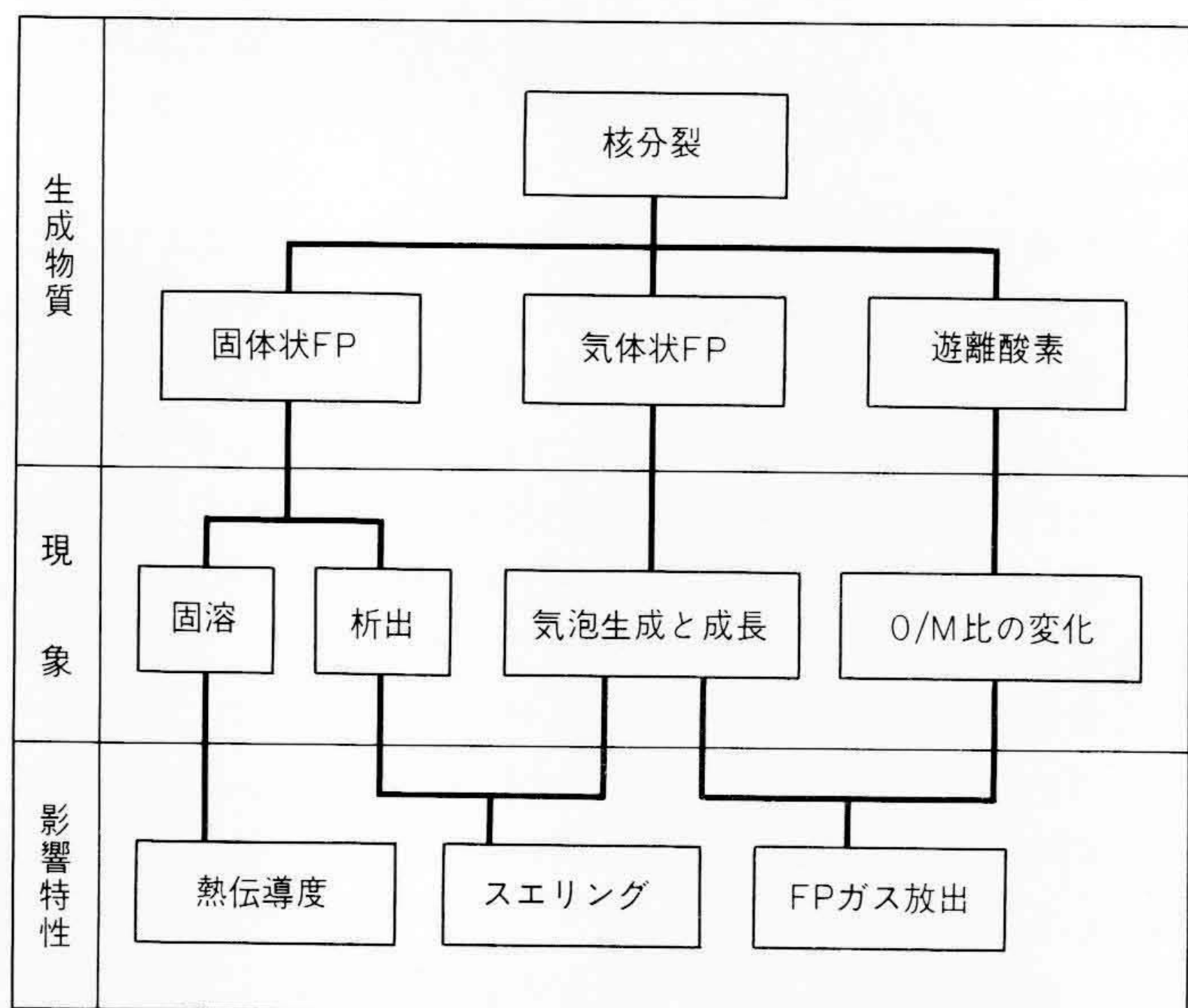


図6 高燃焼度燃料確証試験スケジュール 燃焼初期からの特性変化を追跡できるように、またウオータロッドなど新規部材の健全性を早期に確認できるように、1サイクル目から各10 GWd/tごとに照射後試験を行う。



注：略語説明など

FP(Fission Product)

O/M比[酸素対金属(ウランなど)原子数比を言う。これが燃料ペレット内の拡散現象を律速する。]

図7 燃料ペレット内の微視的な燃焼変化と特性への影響 燃料ペレットの燃焼度の進行に伴う微視的な変化を最新の計測技術を使って精度よく測定することにより、高燃焼度での燃料挙動を把握する。

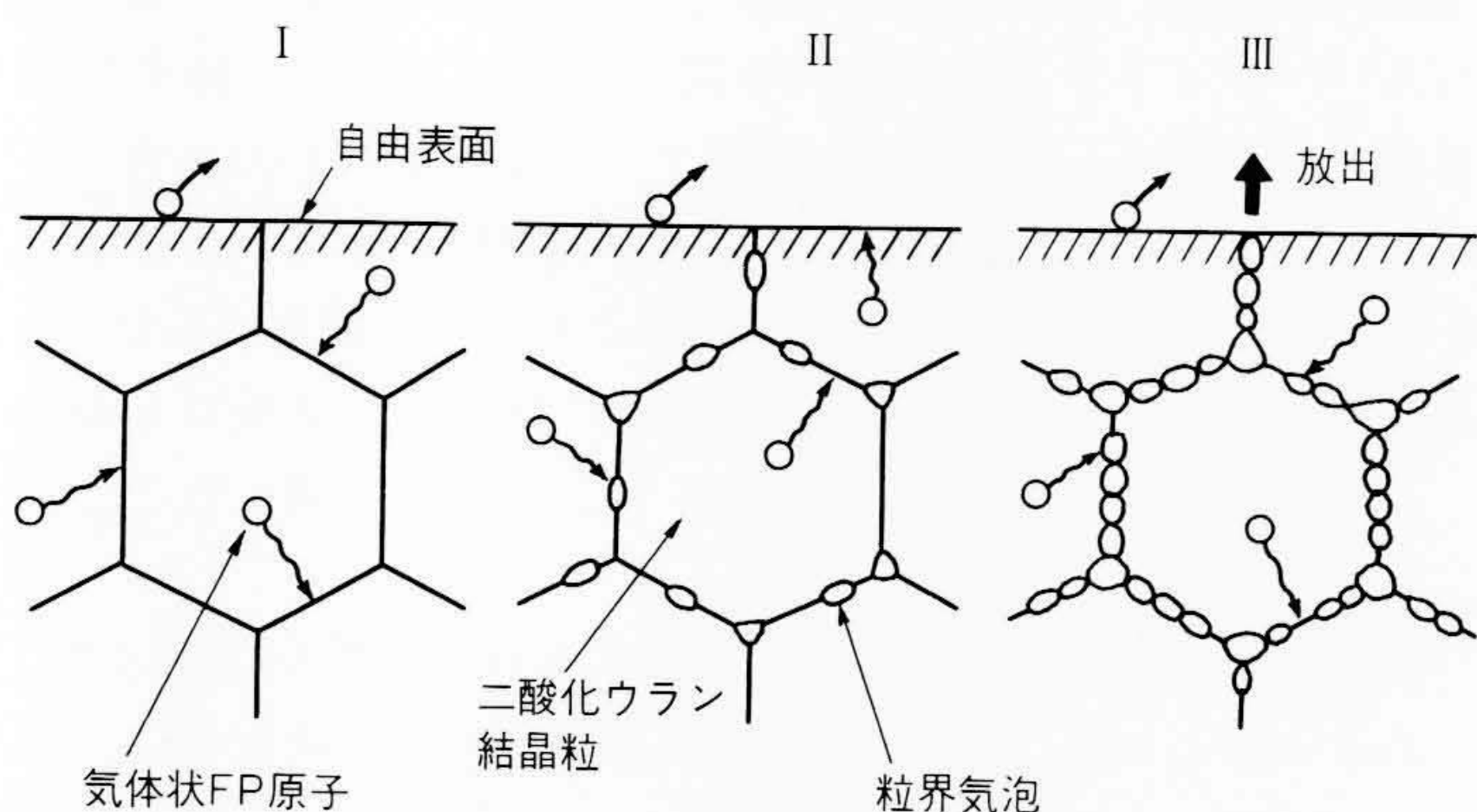


図8 FPガスの放出機構 核分裂によって発生したキセノンなどの気体状FP原子は、気泡生成と成長により粒界気泡となり、それらが連結した後、燃料ペレット表面やペレットクラックなどの自由表面から放出される。

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り、このため新しい設計計算コード“PRIME”を開発した^{※2)}。前述の高燃焼度確証用燃料の許認可に初めてPRIMEコードを適用し、許認可を取得した。PRIMEコードの予測精度は、商用炉及び試験炉での燃料中心温度、燃料棒外径変化、燃料棒内圧など数多くの測定値に基づくデータベースで検証されている。図9に検証結果の一例を示す。

3.3 高経済性ステップⅢ炉心燃料の開発

ステップⅢ炉心燃料は、濃縮度増加とともに更に高度な省ウラン技術及び高燃焼度化技術を適用し、取出し平均燃焼度を45 GWd/tとした炉心燃料である。

日立製作所ではこの新しい炉心燃料の開発のために、核、熱、流動、構造強度、材料など広範囲にわたる知識をひとつ

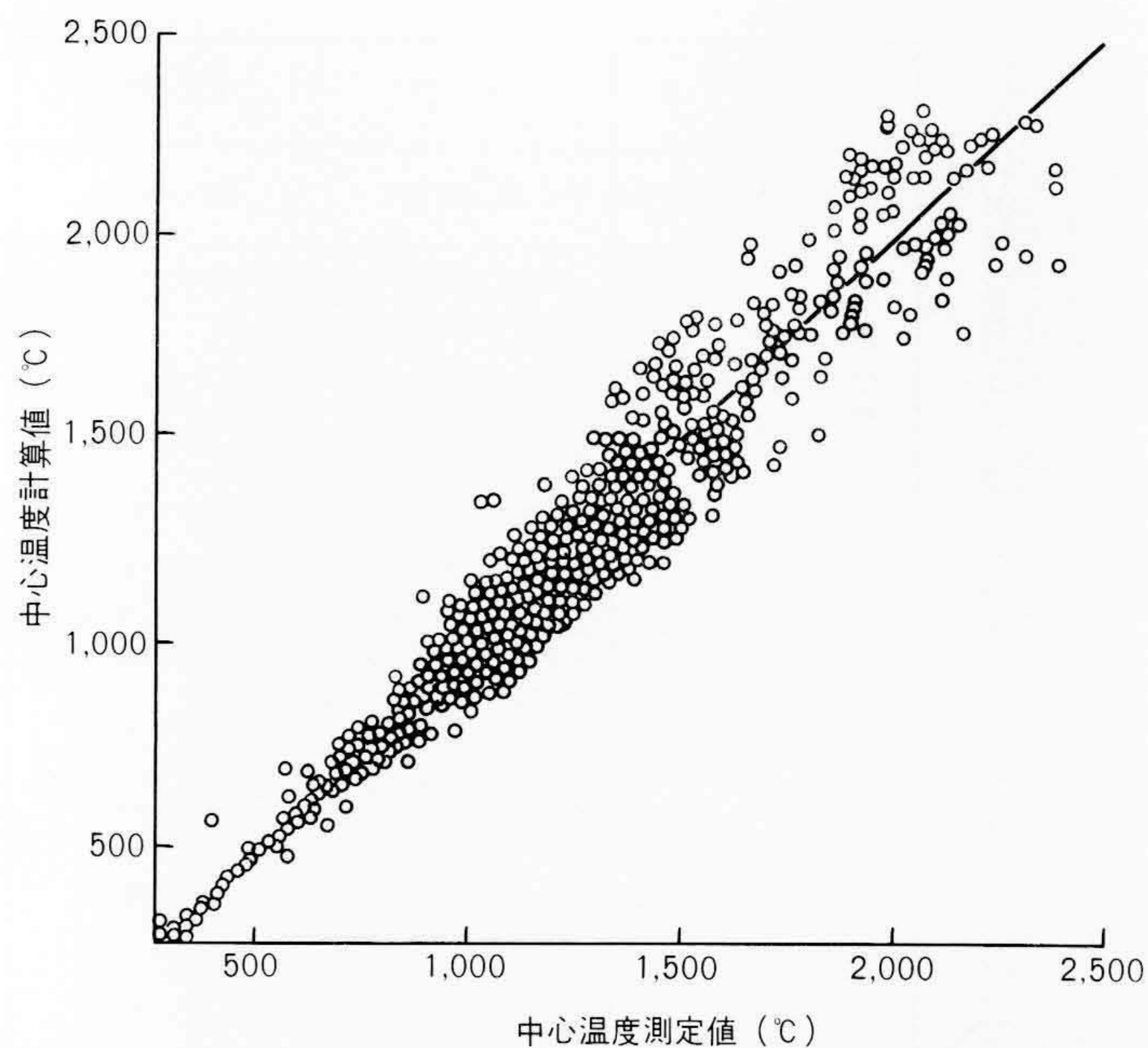


図9 燃料中心温度測定値と計算値の比較 燃料中心温度測定値は、試験炉での熱電対測定によるものである。PRIMEの予測結果は、若干のばらつきを示しているが、このばらつきは設計でコードの予測不確かさとして考慮されている。

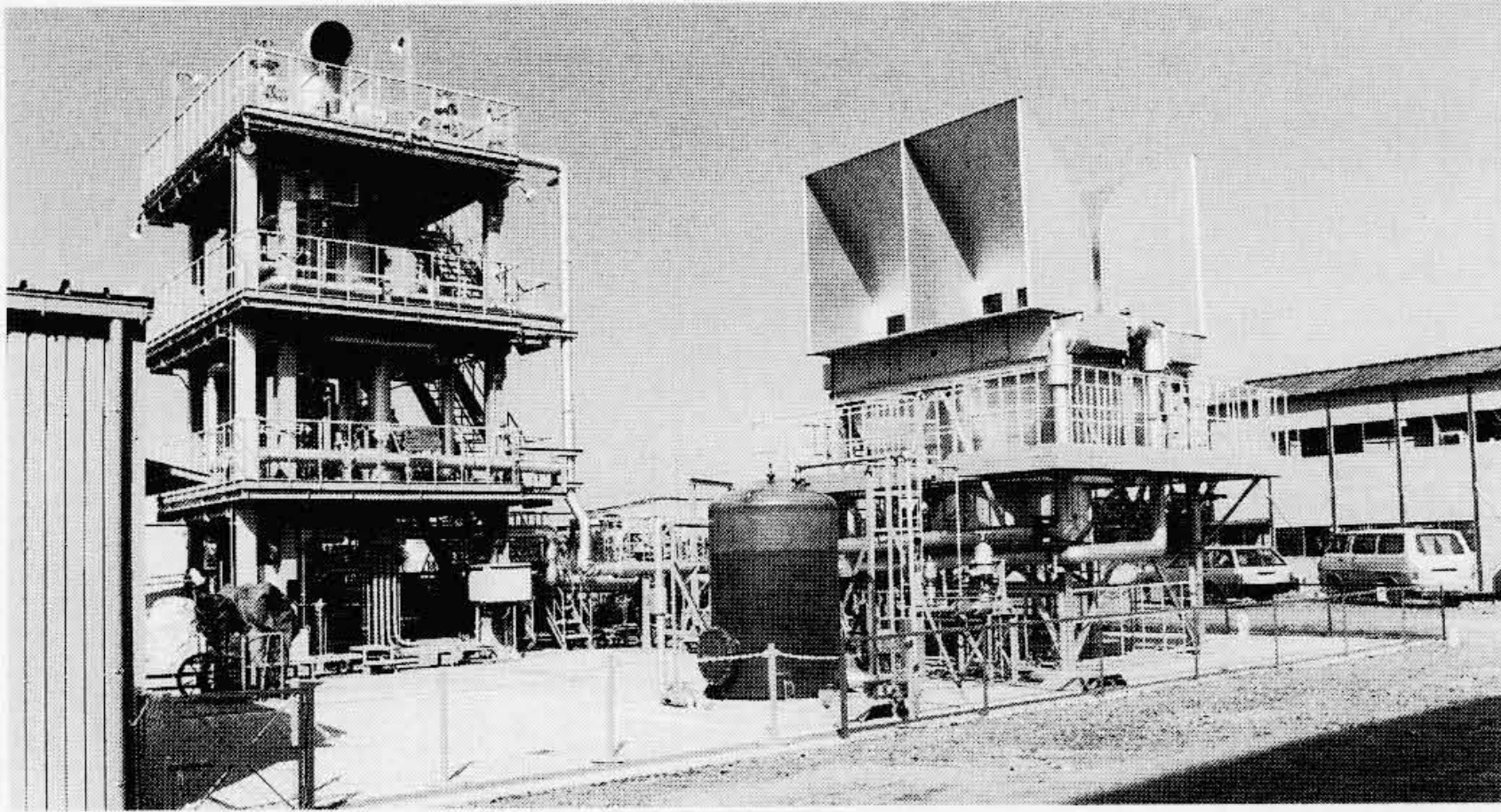
の炉心燃料設計に集約し、従来の炉心燃料と同等の高い信頼性を確保しながら燃料サイクル費の達成目標を満足させるべく設計を進めてきた。このほど基本設計が完成し、現在その熱流動特性、流動振動特性、構造強度特性、安全特性などの性能評価や実証を進めており、十分満足した結果が得られつつある。

新型炉心燃料の開発は、広範囲な技術分野の開発を必要とするため、各分野の力を結集して開発を推進している。また、日本核燃料開発株式会社及び日本ニュークリア・フュエル株式会社とも一体となって、研究開発、設計、製造及び性能実証を行い、その結果をまた研究開発や設計に反映させる一貫した体制で進めている。

新型炉心燃料の開発及び実機への適用を精度よくかつ効率的に行うには、実機により近い条件で諸特性の性能評価や実証を行うことが必要である。このため、日立製作所では、燃料熱限界特性試験装置、BWR模擬大型実証試験装置、実規模燃料集合体二相流流動試験装置などの大型燃料特性試験施設を建設し、新型炉心燃料の基本特性を検証し、設計を行うための基礎データを蓄積する体制を整えている。図10に大型燃料特性試験施設を示す。図11にHICOF(燃料熱限界特性試験装置)を用いた、ステップⅠ炉心燃料から採用している出力外周ピーク型燃料の限界出力試験の結果を示す。燃料集合体外周部の相対出力を高めた燃料設計について、限界出力の実験値とGEXL式^{※3)}による計算値がよく一致することが確かめら

※2) BWR関連メーカーとの共同研究で開発した。

※3) 実規模燃料を用いた炉外実験をもとに、沸騰が核沸騰から遷移する限界出力を、沸騰長さの関数で整理した沸騰遷移関係式である。

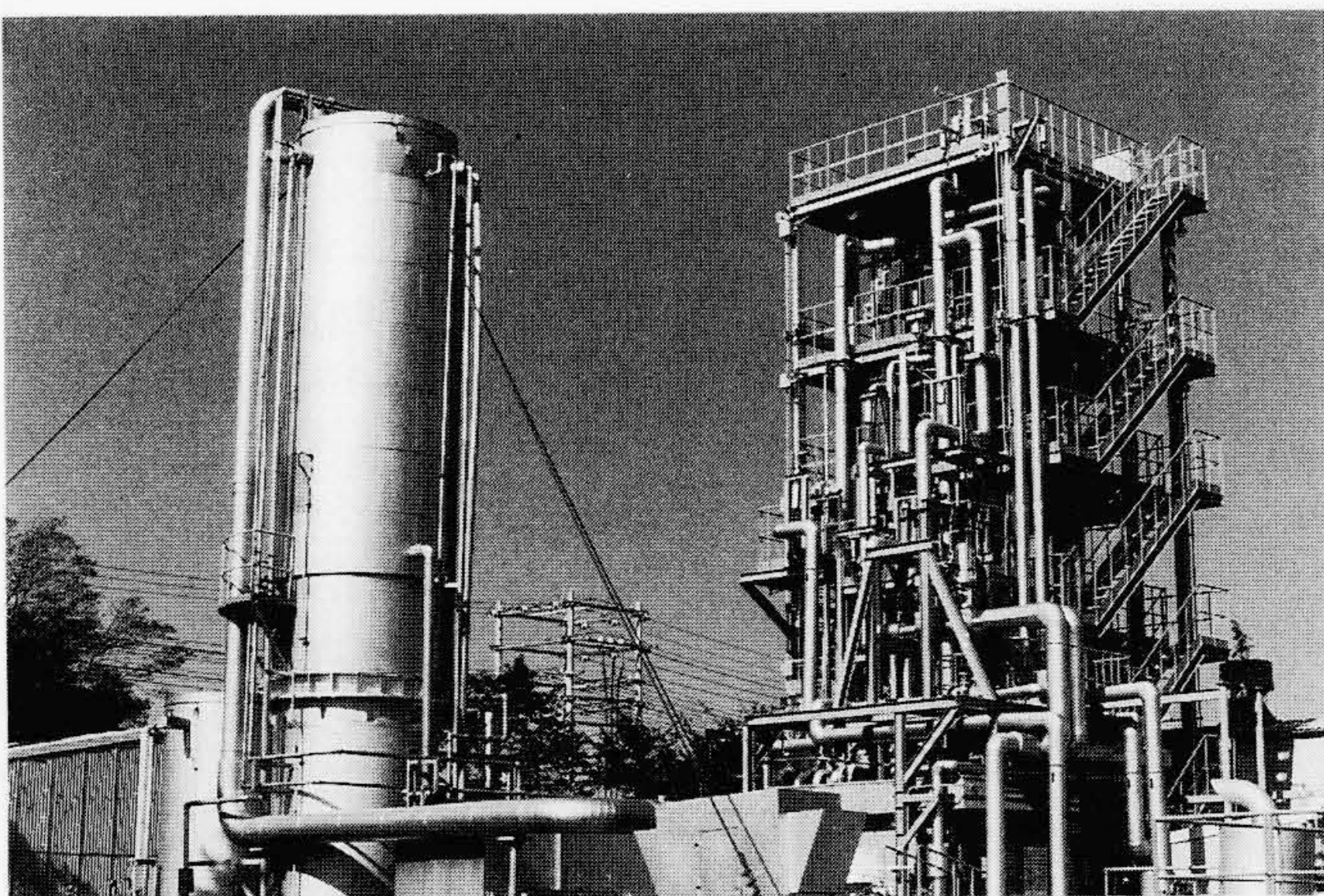


(a) 燃料熱限界特性試験装置(HICOF)

[Hitachi Core and Fuel Thermohydraulic Test Loop]

〔目的〕

- ・実規模燃料集合体の熱限界特性、圧損特性などの評価

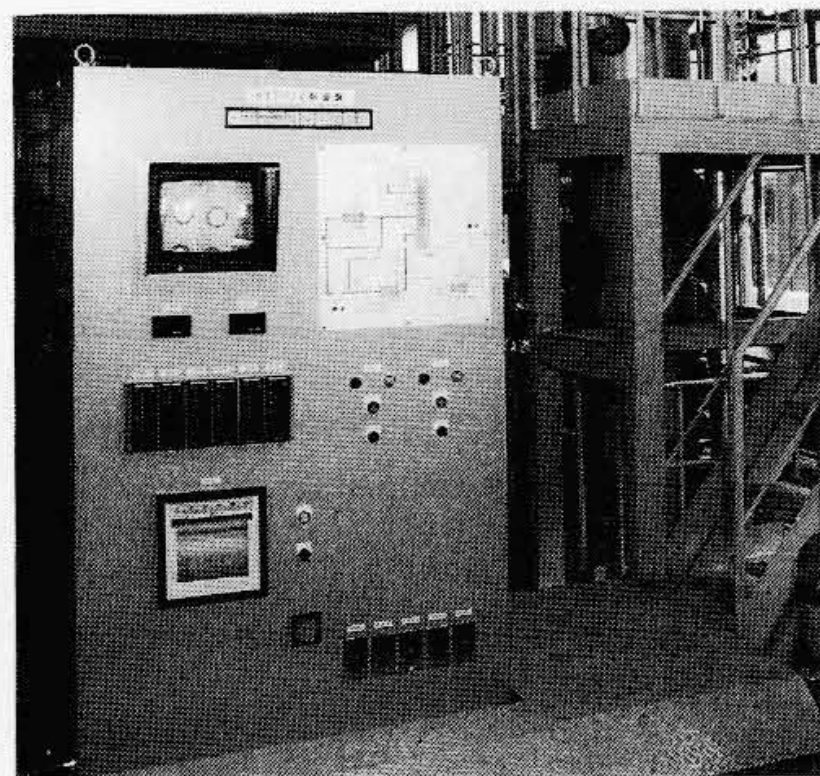
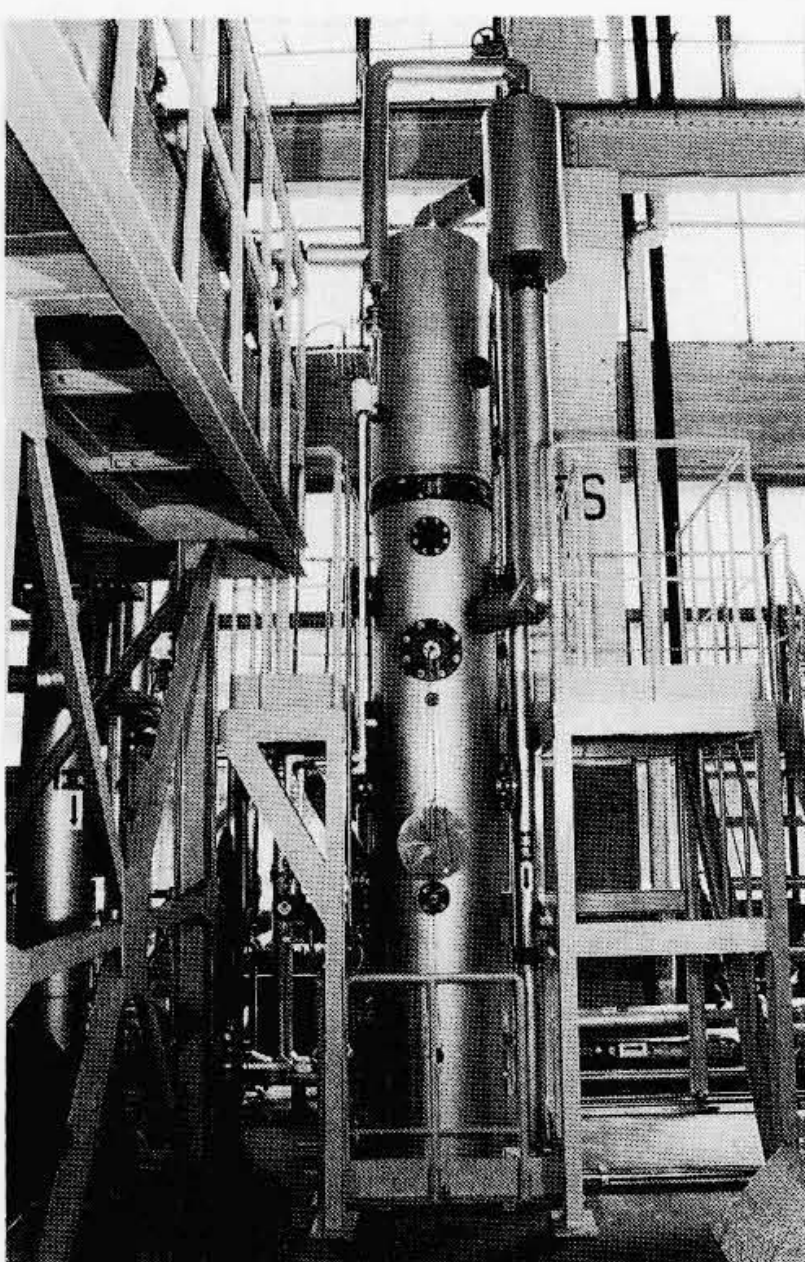


(b) BWR模擬大型実証試験装置(TBL)

[Two Bundle Loop]

〔目的〕

- ・実規模燃料集合体の熱限界特性の実証
- ・2実規模燃料集合体冷却材喪失事故特性の評価



(c) 実規模燃料集合体二相流流動試験装置(HITFIV)

[Hitachi Two Phase Flow Induced Vibration Test Loop]

〔目的〕

- ・実規模燃料集合体の流動振動特性評価

図10 大型燃料特性試験施設 新型燃料の早期実用化に必要な燃料特性試験施設の一例を示す。

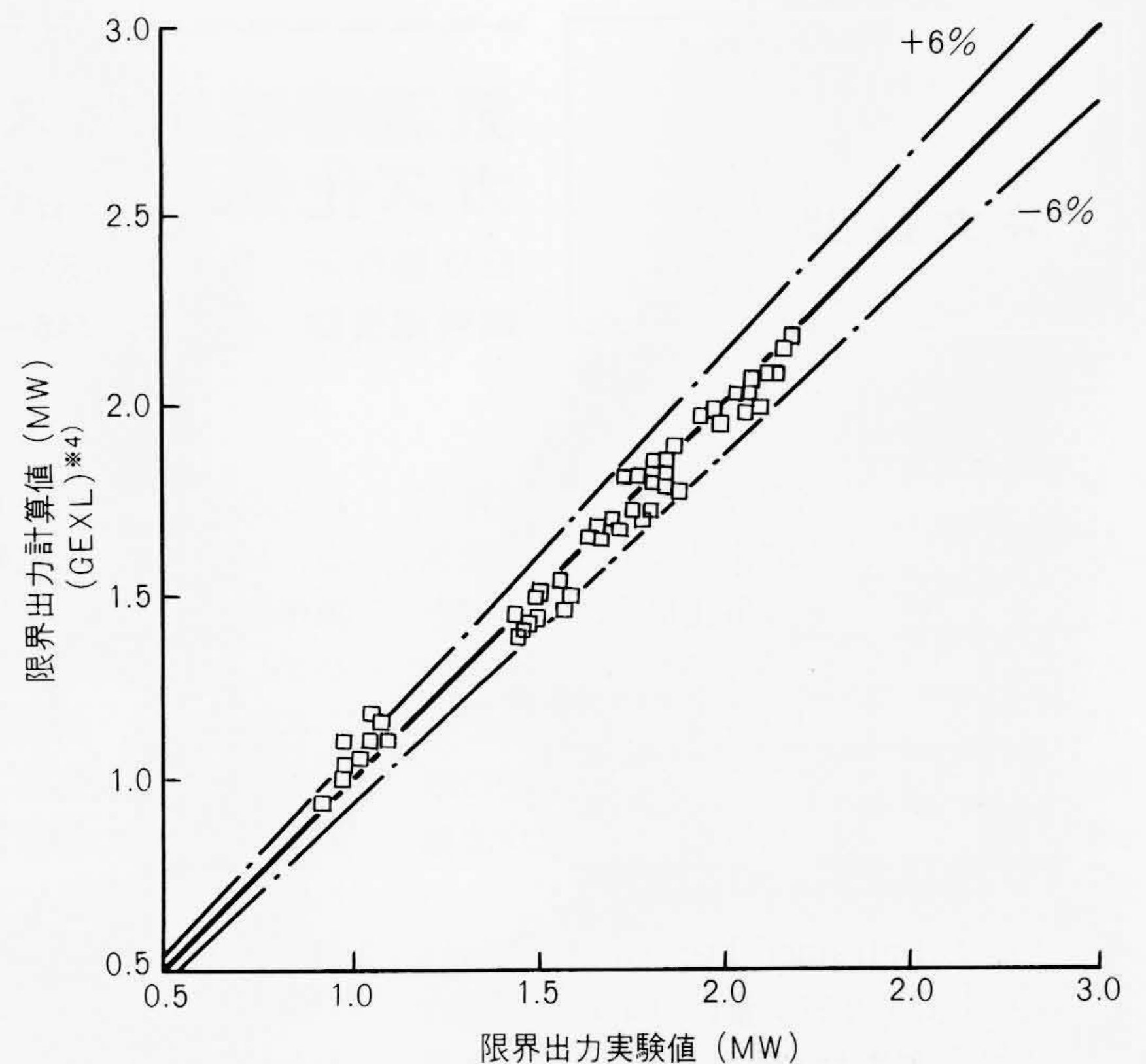


図11 出力外周ピーク型燃料の限界出力実験値と計算値の比較

模擬燃料集合体は、間接発熱型で軸方向コサイン分布を持つ4×4集合体である。

れた。

これらの施設のほかにも、種々の材料や部品の性能確認試験を行うための機械試験装置、材料試験装置などを設置し、新型炉心燃料の評価改良や実機設計への反映が速やかにできるように体制を整えている。

4 結 言

日立製作所は、原子力発電の信頼性と経済性向上のニーズにこたえるべく高経済性炉心燃料の開発に取り組み、技術課題を着実に解決して新製品として適用を図ってきた。高経済性ステップⅠ炉心燃料では、抜本的なPCI対策であるジルコニウムライナ燃料を採用し飛躍的に健全性を高め、ならし運転を不要とするとともに省ウラン技術の適用を図り、新製品として実用化した。ステップⅡ炉心燃料では、本格的な高燃焼度に対処するためウオータロッドなどの主要構造部材に大幅な設計改良を施した。この燃料の高燃焼度での健全性を確証するため、原子力工学試験センターの「高燃焼度燃料確証試験」の一環として実機での先行使用が昭和63年度から開始される。更に、燃料サイクル費の一層の低減を目指したステップⅢ炉心燃料に対しては、基本設計を完成した。今後も高経済性炉心燃料の開発を強力に推進し、ニーズにこたえていく考えである。

参考文献

- 1) 河原, 外: 燃料の健全性確保のためのならし運転法“PCIOMR”の改良, 日立評論, **62**, 9, 641~644(昭55-9)
- 2) 山下, 外: BWR(沸騰水型原子炉)高経済性炉心燃料の開発, 日立評論, **68**, 4, 313~318(昭61-4)

気流層石炭ガス化特性に対する炭種の影響と ガス化効率の評価

日立製作所 小山俊太郎・田中真二・他3名
燃料協会誌 65—9, 746～755 (昭61-9)

石炭の用途拡大法の一つにガス化技術がある。これは石炭を酸素又は空気や水蒸気と反応させ、水素、一酸化炭素、メタンガスなどを発生させるもので、生成したガスは燃料、化学合成用原料、都市ガスなどに幅広く利用できる。代表的なガス化炉の形式には、固定層、流動層、気流層及び溶融層がある。

気流層法(Entrained-bed Gasification)では、他方式より石炭量に対する酸素量の割合(以下、酸素比と称する。)を多くし、高温でガス化するので、(1)高いガス化効率を得られる、(2)炭種に対する適用上の制約が少ない、(3)環境保全性に優れるなどの特徴があるとされ、近年その重要性が見直されている。特に我が国では、多くの石炭を海外に頼らざるを得ないため、炭種対応に優

れるとされるこの方式には大きな魅力がある。しかし、ガス化効率やガス化炉の適正操作条件に対する炭種の影響については、必ずしも十分に明らかにされていない。

本論文では、気流層ガス化特性及びガス化炉内での灰の溶融とスラグ流下特性などに及ぼす炭種の影響を調べるとともに、ガス化効率の評価法について著者らの考え方を示した。

0.5t/dの内熱式ガス化炉により、0.5MPaのもとで、国内、中国、カナダ及び南アフリカのそれぞれ代表的な石炭をガス化した結果、冷ガス効率は酸素比の変化に対して最大値を持ち、この最大冷ガス効率は炭種により異なった。また、同一酸素比では炭種により炭素ガス化率は異なること、溶融スラグをガス化炉から排出するために必要

な最低のガス化炉温度は、灰の流動点にほぼ比例することなどを明らかにした。

気流層法では、各種石炭を高効率でガス化できるとされるが、実験の範囲では炭種によるガス化特性の差異を評価するため、石炭に固有の到達可能な最大冷ガス効率があると考え、その効率を石炭の元素分析値及び灰流動点から推算できるようにした。そして、この理論ガス化効率と実験値との比を性能指数とすることを提案した。性能指数が大きいことは、理想に近いガス化ができていることを表す。性能指数により、同一ガス化炉では各種石炭の気流層ガス化炉への適合性を評価できる。また、同一石炭を用いていけば、各種ガス化方式で、その性能を向上するための指標が得られる。

イオン浸硫窒化処理したFC25鋳鉄の 表面組織と摩擦係数

日立製作所 山口 静・日立粉末冶金株式会社 朝日直達・他2名
熱処理 27—4, 200～206 (昭62-8)

鉄鋼材料の耐摩耗性を改善する表面処理法に、浸硫窒化処理がある。この技術は表面に硬い窒化層と、その最表面部に軟質の硫化鉄被膜を形成させるもので、処理によりしゅう(摺)動部材の凝着摩耗による焼付きを防止するとともに、定常摩耗での摩耗量を少なくできる。従来の浸硫窒化法には塩浴法(NaCN , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)と気体法(H_2S , NH_3)があるが、本研究ではドライプロセスである気体法に着目し、この改良を試みた。

一方、迅速表面処理技術にグロー放電を用いるイオン窒化法があり、広い分野で適用されている。この技術は数トールの N_2 ガス雰囲気中でグロー放電を発生させ、ガスをイオン化して窒化処理するものである。イオン法の特徴は、ガス状物質をイオン化して電界によって処理品表面に捕獲し、その後熱拡散などにより表面改質層を形成することにある。したがって、雰囲気ガス中に硫黄源として H_2S ガスを添加すると浸硫処

理が加えられ、浸硫窒化層が迅速に形成できる。

本論文では、イオン浸硫窒化法による迅速表面改質の基礎検討結果について述べた。処理因子として H_2S ガス分圧は0.02 Torrから0.10 Torr、処理温度は500℃から650℃、時間は1.5時間の範囲で変化させ、基材としてFC25鋳鉄を用い、基材表面に形成される表面層の構造及び摩擦特性を評価した。

H_2S ガスを添加することにより、最表面には硫化物が析出した層が、また内部には窒化物を含む浸硫窒化層が形成された。浸硫窒化層の組織は H_2S ガス分圧により変化する。 H_2S ガス分圧が低い条件で処理すると、外層、中間層及び内層の3層から構成された表面となり、また H_2S ガス分圧が高いと、外層及び内層の2層となる。外層は灰色の析出物が分散し、最表面は多孔質を呈している。中間層はS濃度が高くFe濃度の低い黒

色のち(緻)密な層である。内層はち密な窒化層になっていることが明らかとなった。

処理温度の影響についてみると、外層の組織は温度の上昇とともに微細な黒い析出物が多くなり、また化合物層の厚さは放物線則によって温度の上昇とともに増加している。しかし、厚さの増加の割合は各層で異なり、内層の増加量が顕著で、外層及び中間層はわずかであることが分かった。

表面化合物層をX線回折により同定した結果、 H_2S ガス分圧が0.02 Torrから0.075 Torrで形成された表面化合物層は、 FeS , $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ 及び $\alpha\text{-Fe}$ であり、0.10 Torrの処理では窒化物が消失し、 FeS と $\alpha\text{-Fe}$ だけになることが明らかとなった。

処理層の摩擦係数は0.040から0.064の値が得られ、無処理及び窒化に比較して低く、 H_2S ガスの添加による効果が確かめられた。これにより、ドライプロセスでの浸硫窒化処理の迅速化が図れた。