

炉心燃料技術と原子燃料サイクルへの対応

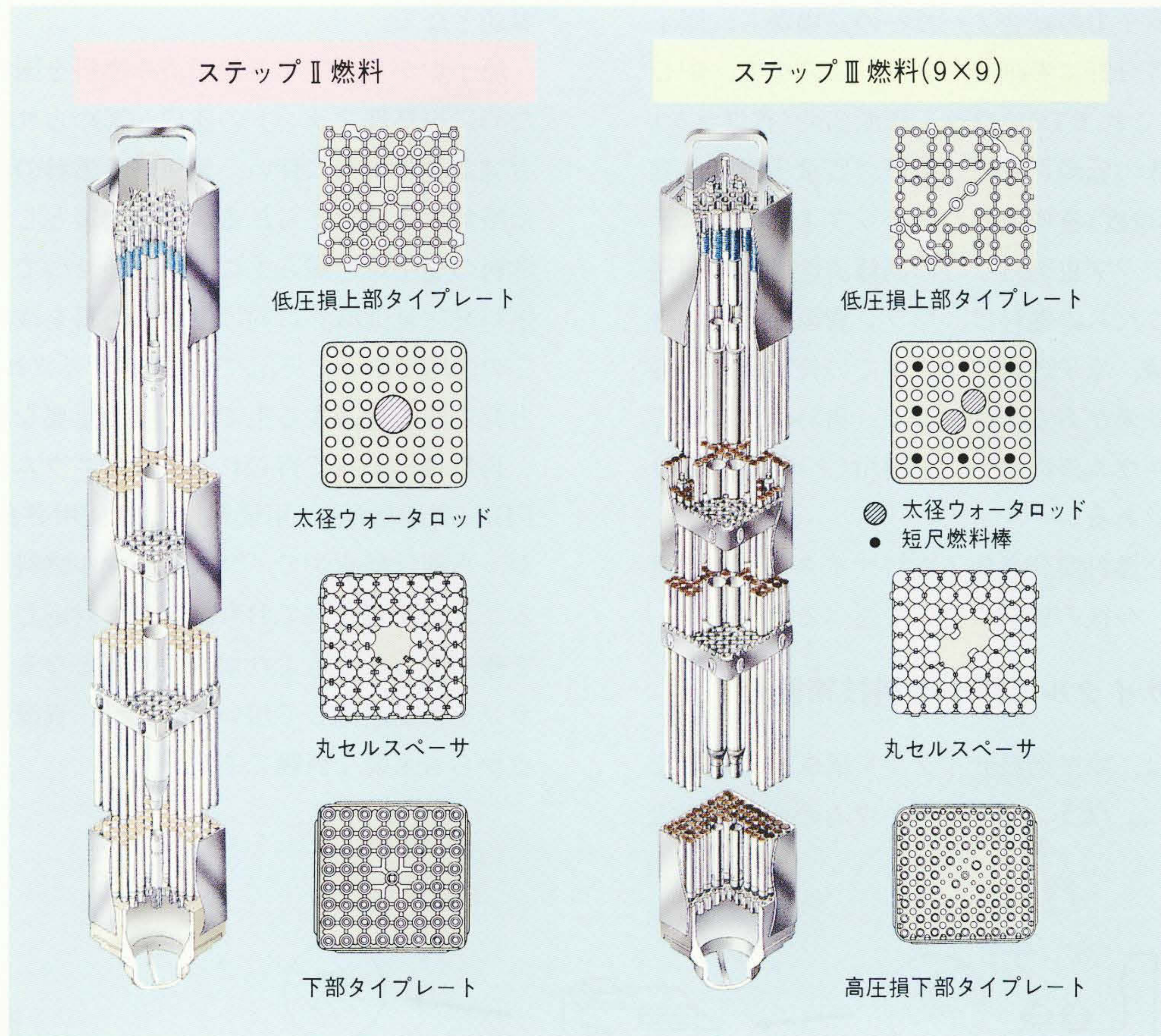
Nuclear Core and Fuel Development Technology and Its Application to Nuclear Fuel Cycle

下重孝則* *Takanori Shimoshige*

丸 彰* *Akira Maru*

内川貞夫** *Sadao Uchikawa*

持田貴顕* *Takaaki Mochida*



BWR(沸騰水型原子炉)用新型燃料 ステップⅡ燃料, ステップⅢ燃料は, ウランの有効利用と高燃焼度化を図るために, 構成部品に改良を施した燃料である。

近年, BWR(沸騰水型原子炉)用の炉心燃料の分野では, ウラン資源節約, 廃棄物量低減, 燃料サイクル費低減などが求められてきている。日立製作所はこれにこたえるため, 燃料質量あたりの発生エネルギーである燃焼度を高くした高燃焼度燃料を開発し, その第一段階としてステップⅠ燃料として実用化してきたが, これに続くステップⅡ燃料もこのほど実用段階に入り, ステップⅢ燃料についても開発

を完了した。

ステップⅡ燃料やステップⅢ燃料は, 燃料棒配列や燃料棒間隔を維持するスペーサなどの構造を燃焼度に合わせて設計し, 熱的余裕を確保しながら, ウラン資源節約, 燃料サイクル費低減などの要請に対応している。また, 再処理によって生み出されるプルトニウムを, ウランの代わりに軽水炉で燃料として使う原子燃料サイクルにも適した設計となっている。

* 日立製作所 日立工場 ** 日立製作所 エネルギー研究所 工学博士

3 省ウラン技術と高経済性炉心

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り、低い濃縮度でより高い燃焼度を得るための技術である。

日立製作所は、急速な負荷変動にも耐えられる高耐食ジルコニウムライナ被覆管が新たに開発されたことを受けて、新たに省ウラン技術と高燃焼度化技術を用いた高経済性炉心の開発に着手してきた。

この第一段階であるステップⅠ燃料は、東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機の第3回取替燃料として1987年に炉心に装荷され、他プラントでも、これ以後の燃料はステップⅠ燃料に順次置き換えられてきた。

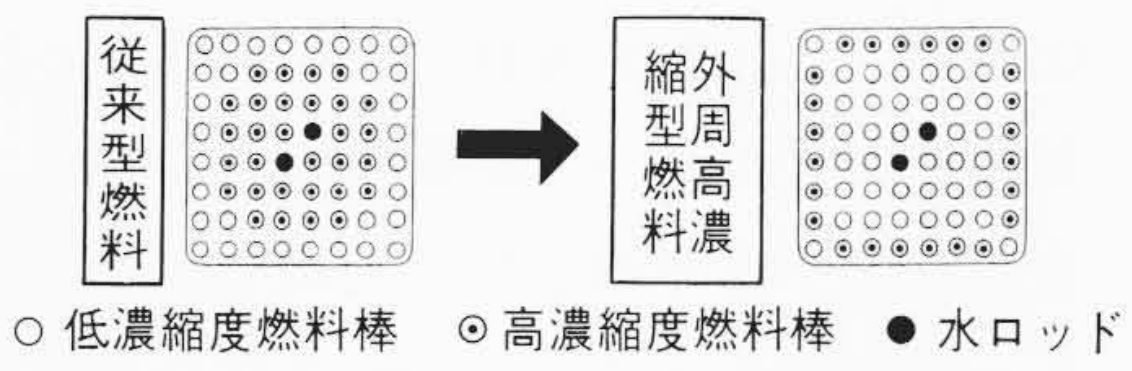
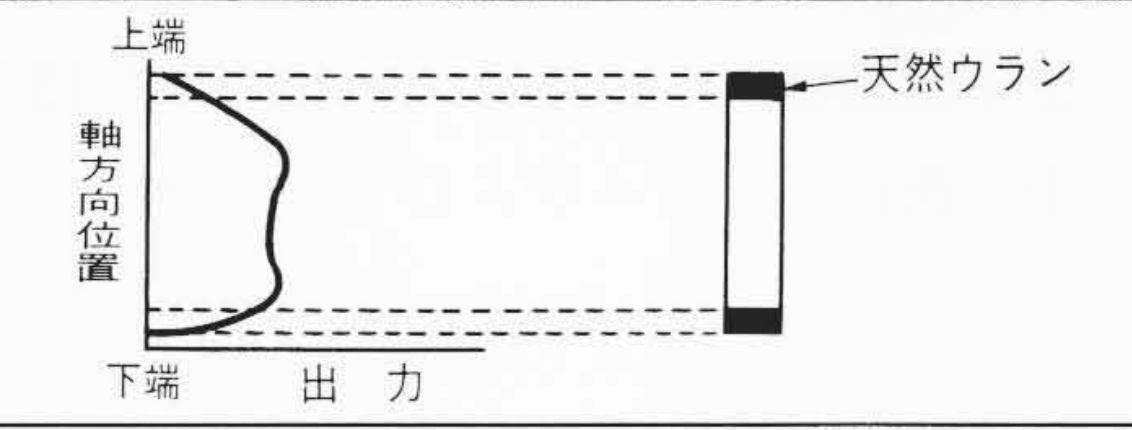
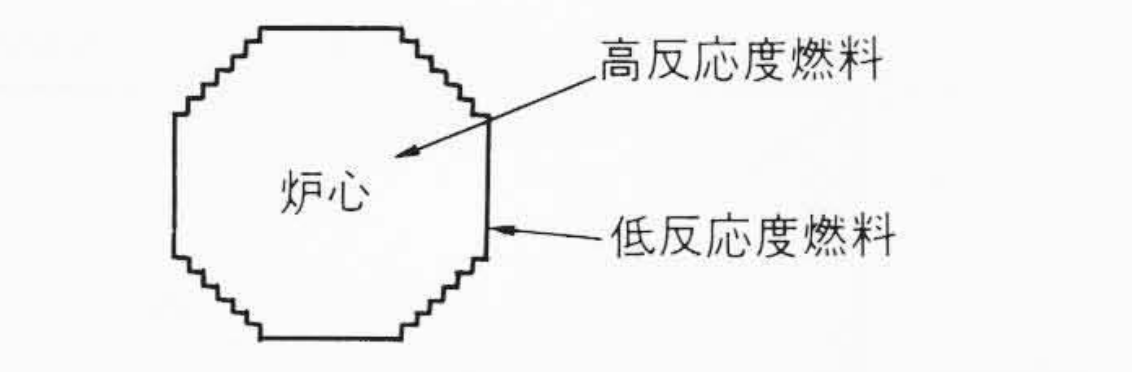
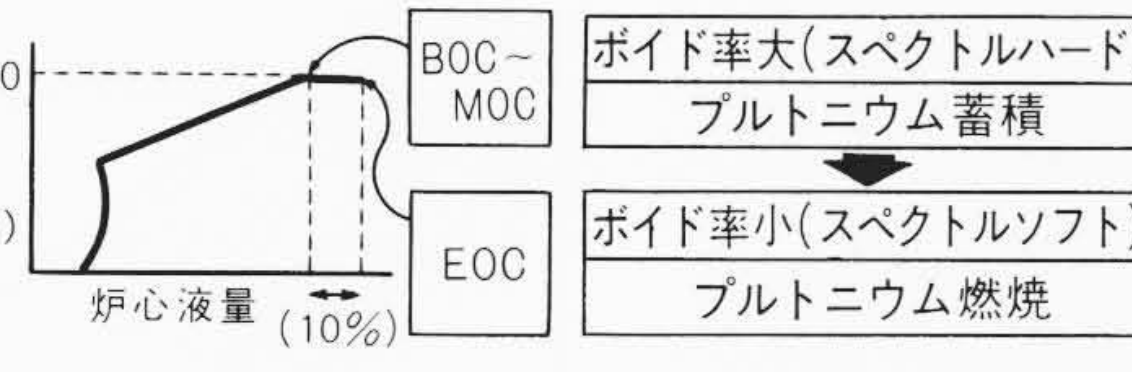
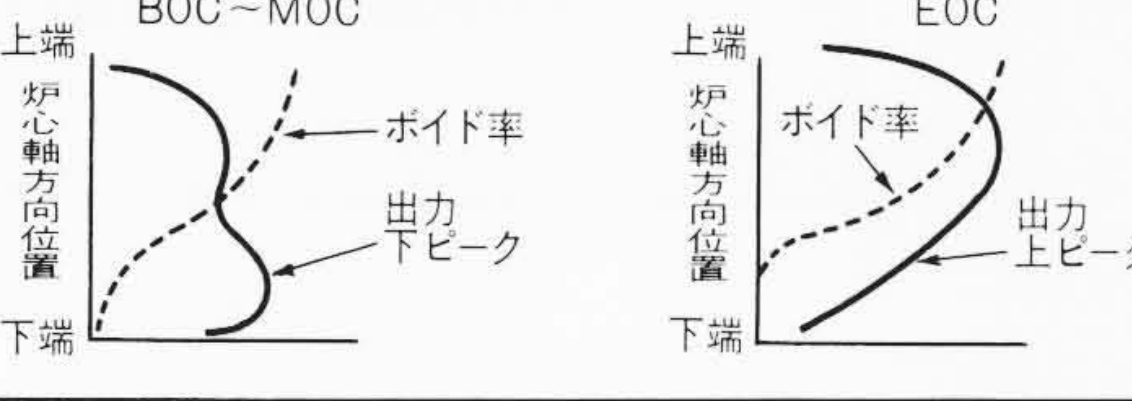
第二段階であるステップⅡ燃料も、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所5号機の第2回取替燃料として炉

心に装荷され、1992年11月には照射が開始される。さらに、第三段階のステップⅢ燃料についても開発を完了し、実用化への準備を進めている。

高経済性炉心では、図2に示した次の省ウラン技術を採用している。

- (1) 出力ピーキングの活用
- (2) スペクトルシフト運転
- (3) 水対ウラン比の最適化

これらの省ウラン技術を次章で述べる高燃焼度燃料とともに採用した高経済性炉心では、低い濃縮度で高い燃焼度を達成でき、図3に示すように、燃料サイクル費もこれまでの燃料炉心に比べて、それぞれステップⅠ燃料で約10%、ステップⅡ燃料で約20%、ステップⅢ燃料で約30%低減できる。

内 容		説 明	ステップ		
			I	II	III
(1) 出力ピーキングの活用	(a) 外周高濃縮度分布 	熱中性子束の高い集合体内外周部に高濃縮燃料棒を配置し、反応度を高める。	○	○	○
	(b) 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。	○	○	○
	(c) 最適装荷パターン 	周辺低出力部に低反応度燃料（低濃縮また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	(a) 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。	○	○	○
	(b) 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。	○	○	○
(3) 水対ウラン比の最適化	 従来燃料断面 8×8 改良燃料断面 8×8 改良燃料断面 9×9	水対ウラン比を最適化し、反応度を高める。	—	○	○

注：略語説明など
BOC [Beginning of Cycle(運転サイクル初期)]
MOC [Middle of Cycle(運転サイクル中期)]
EOC [End of Cycle(運転サイクル末期)]
○ (利用技術)

図2 省ウラン技術 ステップⅠ燃料、ステップⅡ燃料およびステップⅢ燃料には、出力ピーキングの活用、スペクトルシフト、水対ウラン比の最適化などの省ウラン技術が採用されている。

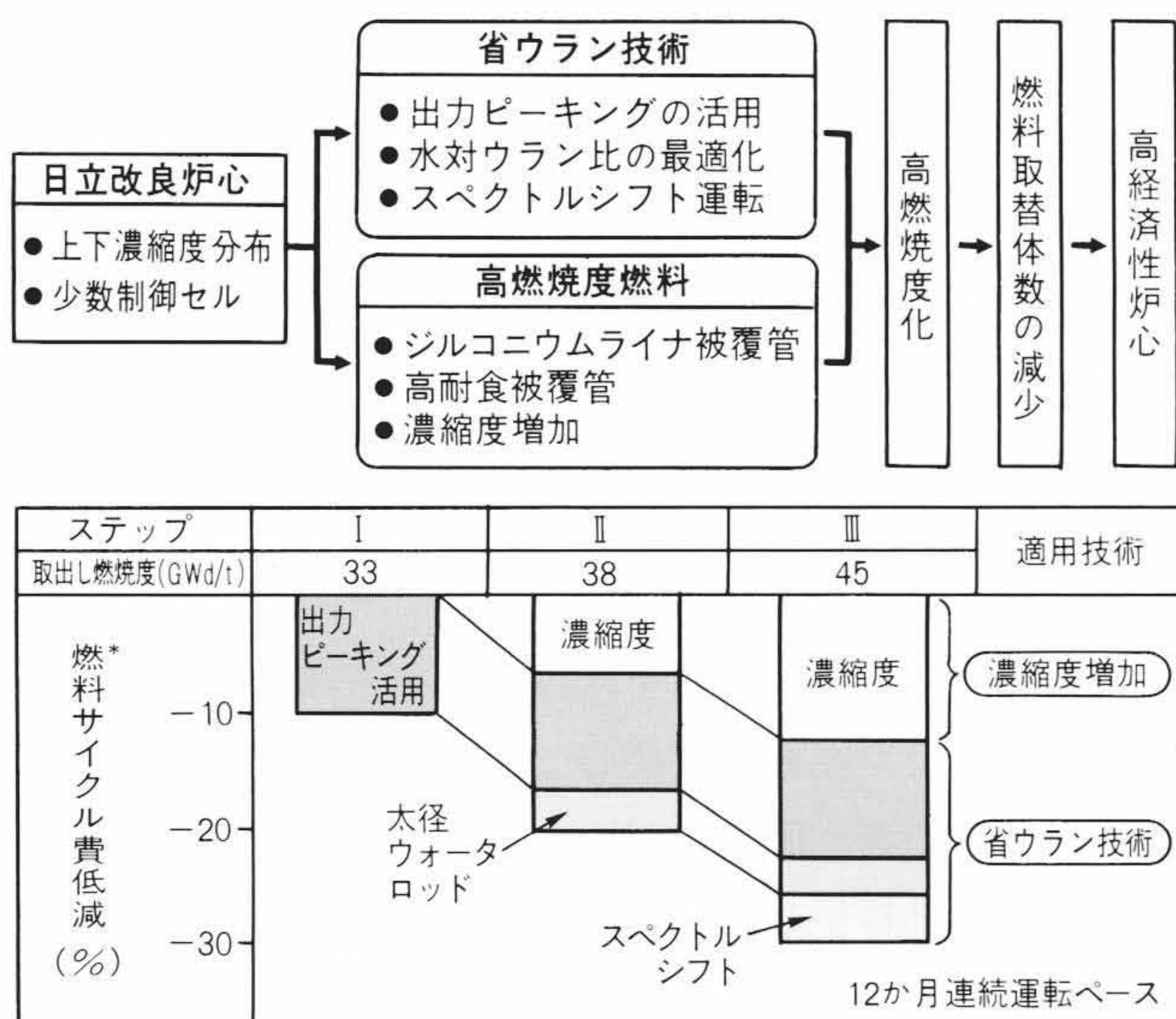


図3 高経済性炉心と燃料サイクル費低減 省ウラン技術と高燃焼度燃料を採用した高経済性炉心は、ステップⅠ燃料で約10%、ステップⅡ燃料で約20%、ステップⅢ燃料で約30%の燃料サイクル費の低減効果がある。

4 燃料の高燃焼度化と技術開発

4.1 高燃焼度燃料の特徴とその効果

燃料を高燃焼度化することにより、サイクルごとの燃料取替体数を減らすことができる。その結果、新燃料加工体数を低減できるほか、使用済み燃料発生量を減らす効果がある。

しかし、燃焼度を高くするためには、ウラン濃縮度を上げる必要がある。これに伴ってバンドル出力差の増加、中性子減速不足に起因するボイド反応度係数絶対値の増加などの炉心特性が変化するので、これに適切に対処する必要がある。

この対策としてステップⅡ燃料は、燃料棒6本分に相当する内部水面積を持つ太径ウォータロッドによってボイド反応度係数絶対値を低減したほか、円筒セルをつなぎ合わせた構造によって高い限界出力特性を持つ丸セル型スペーサを採用して、燃料熱特性を向上した。また、上部タイプレートの低圧損化によって安定性を向上している(本文1ページの図参照)。

さらに、高耐食性ジルコニウムライナ被覆管により、健全性が向上したことを活用して、前章で述べた省ウラン技術を取り込んだ。ヘリウム加圧量は5気圧に上昇し、ギャップ熱伝達係数を向上させ、また、ペレット密度を上げて熱伝導を向上している。これらの設計は、燃料温度の上昇、高燃焼度化に伴う核分裂生成物ガスの放出率、

および燃料内圧の上昇を抑えるのに有効である。

一方、取出し燃焼度45 GWd/tを目標としたステップⅢ燃料では、バンドル出力差の増大に対処するために燃料棒配列を9×9とし、線出力密度の低減を図っている。また、短尺燃料棒とボス径、ウェブ厚を最適化した上部タイプレートを採用して、二相部の圧力損失を減らし、さらに单相部の圧力損失を増加するために、高圧損型下部タイプレートを併用して安定性を向上する設計とした。また、燃料集合体のウラン質量を減らすことなく水対ウラン比を最適にするため、2本の太径ウォータロッドを採用している(本文1ページの図参照)。

4.2 燃料構造材料の開発

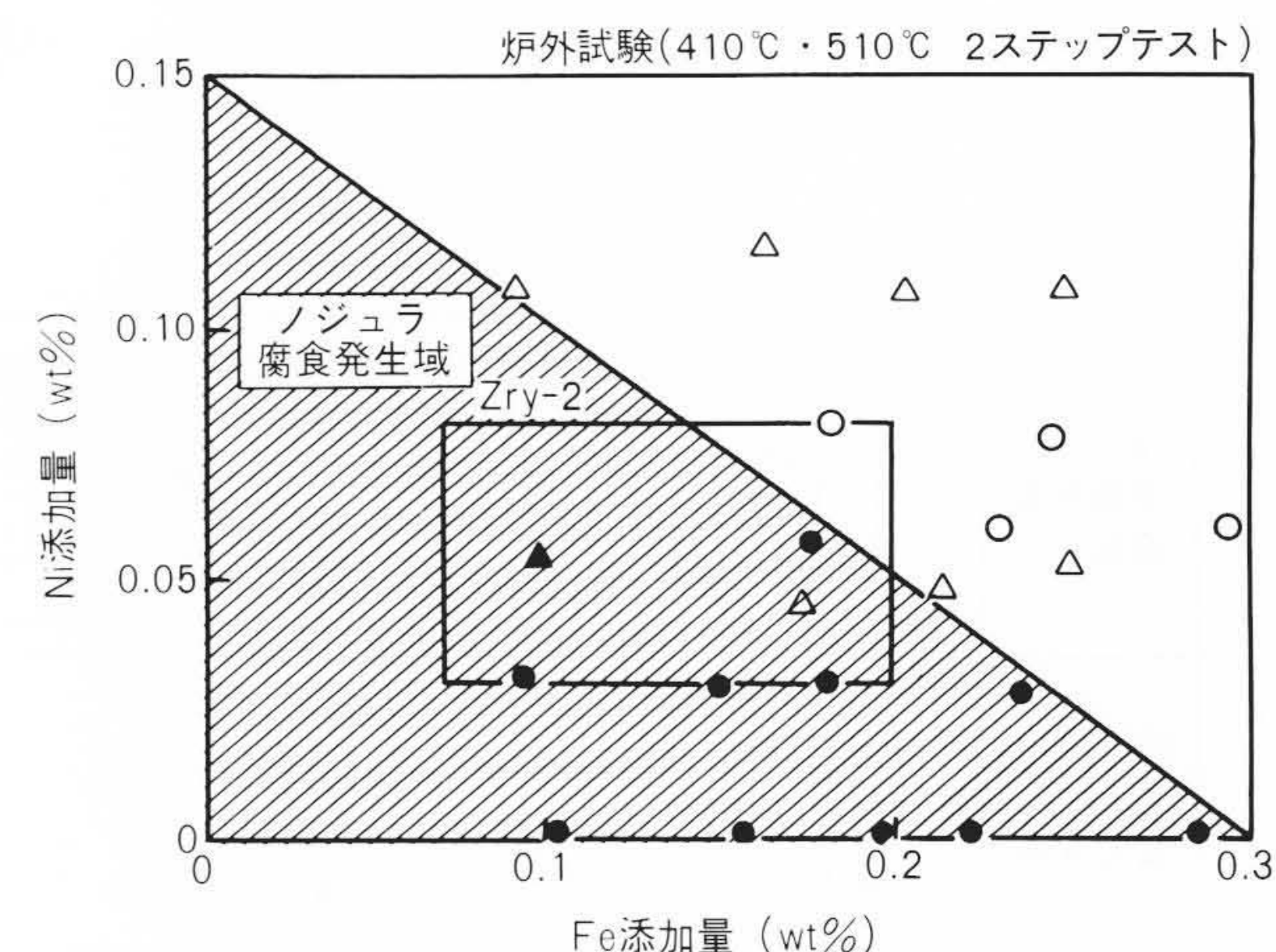
燃料の高燃焼度化は、材料には厳しい使用環境を要求することになるので、高燃焼度化を進めるには炉内条件を考慮した材料の選定や開発が必要となる。

取出し燃焼度45 GWd/tのステップⅢ燃料は現行材料で対応が可能である。将来、燃焼度がさらに伸張することとも考慮して、

- (1) 使用時間長期化による材料の腐食
- (2) FP(核分裂生成物)生成量増加による燃料棒内圧上昇やPCI(ペレット-被覆管相互作用)

などに対する余裕を増した新しい材料開発が行われている。日立製作所では、1980年代から改良ジルコニウム合金や改良 UO_2 ペレットの開発に取り組んでいる。

- (1) 改良ジルコニウム合金の開発



注：Zry-2 (ジルカロイ-2合金)

△：Zr-Sn-Fe-Ni

○：Zr-Sn-Fe-Ni-Cr

図4 Zryのノジュラ腐食感受性に及ぼすNi, Fe添加量の影響 図中の斜線部はノジュラ腐食発生域を、四角で囲った領域は現用Zryの規格範囲を示す。Ni, Fe高添加量域に高耐食域が存在する。

ジルコニウム合金(以下、Zryと略す。)の水腐食は、表面酸化膜中の欠陥を介した酸素イオンと電子拡散によって生じる。日立製作所は被覆管のノジュラ腐食が電子拡散律則であると判定し、電子拡散抑制効果のある低原子価金属、Fe、Niを添加した高Fe/Ni-Zryを開発した¹⁾。炉外腐食実験で得られたFe、Ni添加量とノジュラ腐食との関係を図4に示す。Fe、Niの添加濃度増加が腐食防止に有効であることがわかる。日立製作所が開発した改良Zryは、水素吸収や強度、製造性でも好ましい特性を持つことを炉外実験で確認している。現在これら改良Zryは、電力会社との共同研究のもとに海外の実験炉や商用炉で腐食実験に供されている。

(2) 改良ペレットの開発

FPによる内圧上昇とPCIに対しては、図5で示すようにペレットの微細組織改良で対応するアプローチをとっている。すなわち、結晶粒径を粗大化した大粒径ペレットは、ガス原子の粒内拡散距離を長大にしてガス放出を抑制するものであり、また軟質化ペレットは粒界や結晶粒を軟質化させることによってペレットの塑性を増加し、PCI発生時の被覆管応力を軽減するものである²⁾。これらの改良ペレットは、日本核燃料開発株式会社(以下、NFDと言う。)で試作、評価が行われている。また、海外実験炉での照射試験や一部供試燃料棒の照射後試験がNFDで進行中である。

5 BWRにおけるプルトニウムと回収ウランの利用

プルサーマルは、その特性の確認や燃料の加工、取扱い経験の蓄積の観点から、少数体規模および実用規模での実証を経て本格利用へと進めることが適当とされ、これに沿った計画が進められてきた。また、1991年8月の核燃料リサイクル専門部会報告でも、再処理で発生したプルトニウムは、当面は軽水炉でも使用することとし、1990年代の半ばから段階的にその規模を増大していくとの方針が示されている。

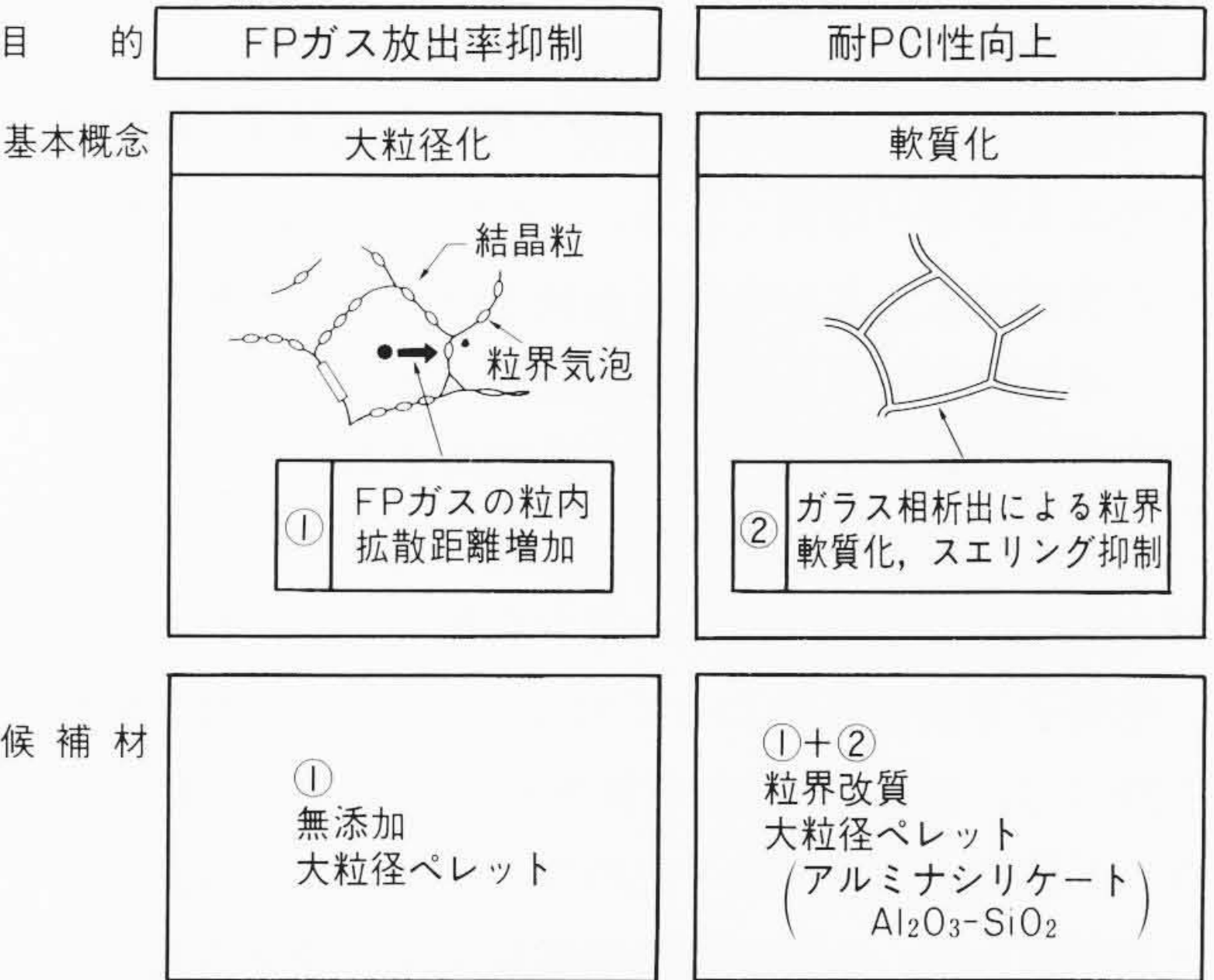
さらに、回収ウランについても、1994年から中規模での炉心装荷を実施する計画が進められている。

5.1 少数体規模実証計画とその成果

国内BWRでのプルサーマルは、少数体規模実証計画として、2体のウラン-プルトニウム混合酸化物燃料(Mixed Oxide：以下、MOX燃料と言う。)を、1986年度から1989年度にかけて日本原子力発電株式会社敦賀原子力発電所1号炉(以下、敦賀1号炉と言う。)で照射した実

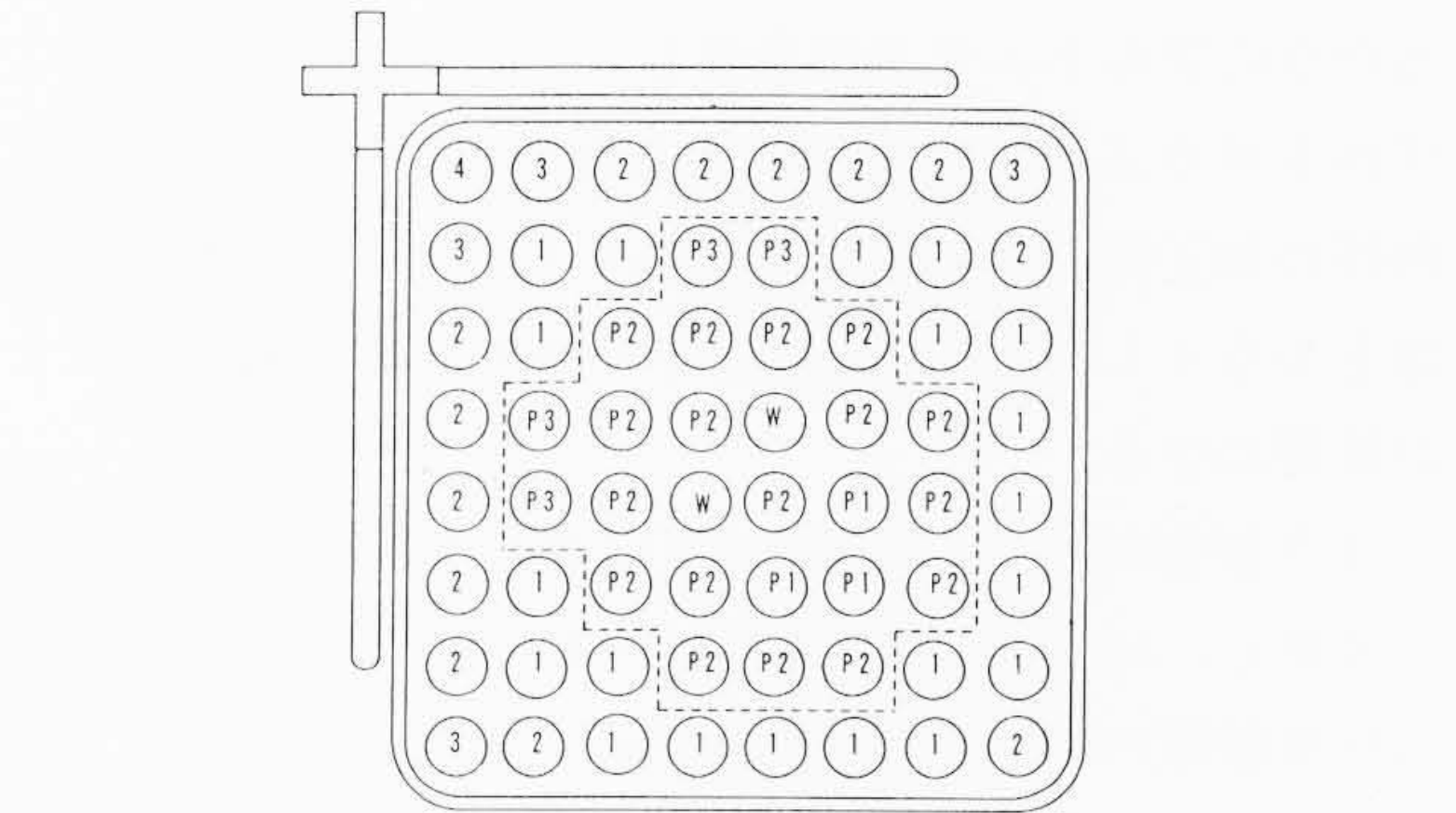
績がある³⁾。この燃料は、図6に示すように、燃料棒62本中、中央部の24本の燃料棒をMOX燃料棒とした、いわゆるアイランド型MOX燃料である。

日立製作所は、このMOX燃料の核設計、炉心設計、許可解析、運転中のデータ採取、評価およびその後の照射後試験に携わってきた。そして、運転中の出力分布、熱的余裕の評価を実施して、MOX燃料の核熱特性が、ウ



注：略語説明 FPガス(核分裂生成物ガス)、PCI(ペレット被覆管相互作用)

図5 改良ペレットの概念とねらい アルミナシリケート添加ペレットは、粒界を軟質化した大粒径ペレットであり、FPガス放出抑制と耐PCI性向上の両効果をねらっている。



注：略語説明など
 (W) (ウォーターロッド), □ 内 (MOX燃料棒, ただし(W)を除く。)

UO ₂ 燃 料 棒		MOX 燃 料 棒	
①	高濃縮度燃料棒	(P1)	高富化度燃料棒
②	中間高濃縮度燃料棒	(P2)	中富化度燃料棒
③	中間低濃縮度燃料棒	(P3)	低富化度燃料棒
④	低濃縮度燃料棒	—	

図6 敦賀1号炉MOX燃料設計 中央部の燃料棒はMOX燃料棒、周辺部の燃料棒はウラン(UO₂)燃料棒とした燃料で、アイランド型MOX燃料と呼ばれている。

ラン燃料とほぼ同等であることを確認している。さらに、各サイクル終了後には、水中テレビジョンカメラによって燃料体の外観を検査し、燃料棒溶接部、膨張スプリングなどの部品には異常のないことを、また、燃料寸法検査により、MOX燃料棒の伸びが、ウラン燃料の通常の範囲であることをそれぞれ確認している。

照射後の燃料体は現在解体され、燃料ペレット照射挙動に関する基礎データを得るための照射後試験を実施中である。

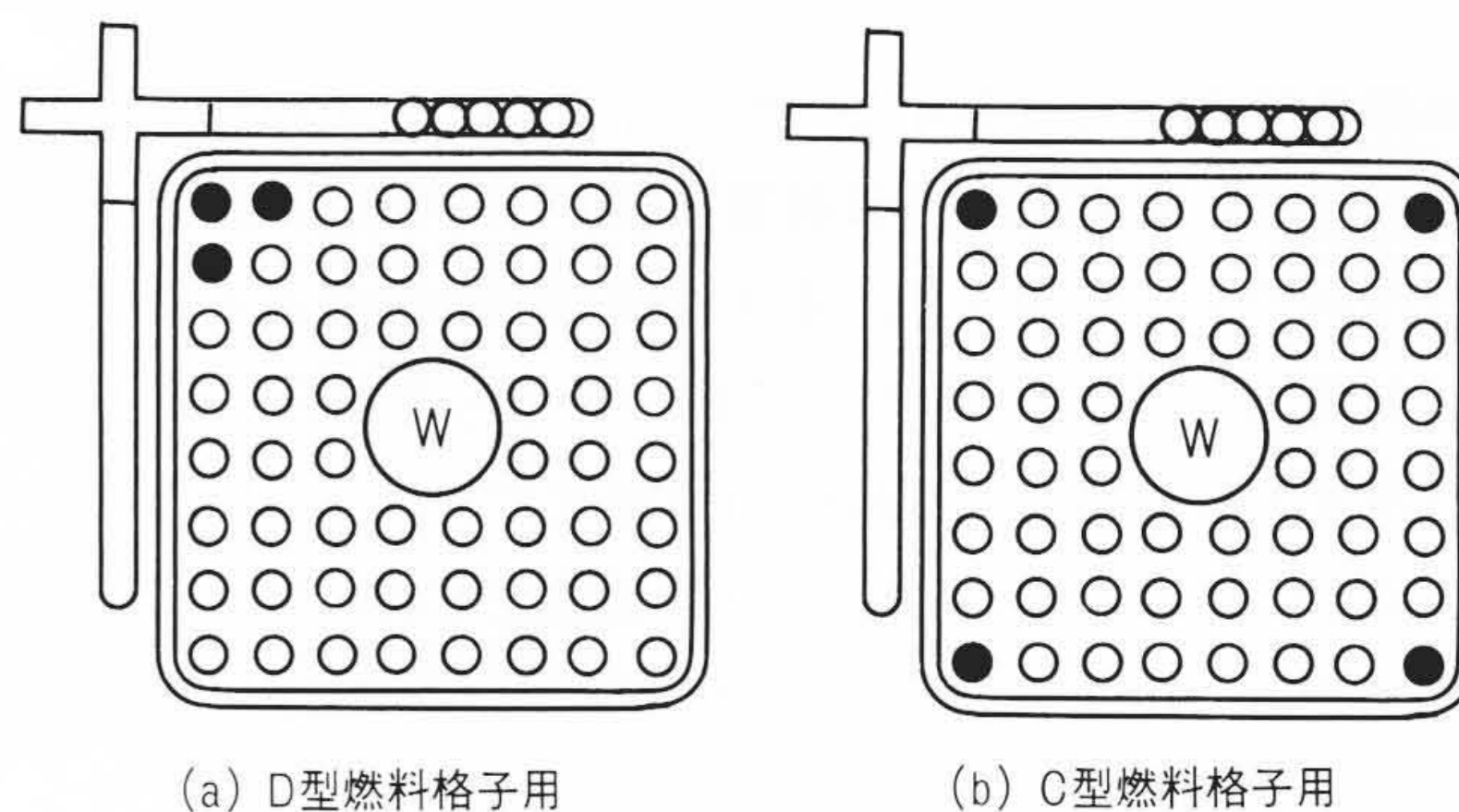
5.2 本格利用に向けてのMOX燃料炉心設計

一般にMOX燃料は、熱中性子吸収が大きく、中性子の平均エネルギーは高くなる。このため、プルトニウム240が共鳴領域に大きな吸収断面積を持つことと相まってボイド率変化に対する反応度変化が大きくなり、ボイド反応度係数の絶対値は大きくなる傾向である。

ボイド反応度係数の絶対値の増加は、炉心圧力上昇を伴う過渡事象で熱的余裕の減少を招く。そのため、ウラン燃料と互換性を持たせてMOX燃料を本格的に使用するには、MOX燃料が取替燃料として使用されるのでウラン燃料と同等の核・熱特性を持つように設計することが望ましい。この点で、高燃焼度用に開発されたステップⅡ燃料、ステップⅢ燃料は、ウォータロッドの直径を太くしたことによって中性子減速を改善している。この燃料にMOXを適用した場合には、ボイド反応度係数の絶対値を低減できる効果がある。

また、MOX燃料の富化度分布設計にあたっては、1体当たりのプルトニウム装荷量を多くして、少数の燃料でプルトニウムを集中利用できる燃料設計とした。MOX燃料の加工体数、輸送体数を減らすとともに、富化度種類を少なくして、MOX加工時の加工工数を減らすことが重要になる。

日立製作所は、このためMOX燃料をアイランド型から変更し、MOX燃料棒数の多い全MOX型にした上で、富化度種類の増加を抑えるために、燃料棒出力が大きくなる部分の少数の燃料棒をウラン燃料棒としたMOX燃



注：○ (MOX燃料棒), ● (ウラン燃料棒)

図7 コーナ燃料棒をウラン燃料棒とした全MOX型燃料

コーナ部燃料棒の一部をウラン燃料棒とすることにより、MOX燃料棒数を大幅に減らすことなく、MOX燃料棒種類を減らすことができる。

料設計を考案してきた。

図7に例示するように、燃料コーナー部の燃料棒を濃縮ウラン棒とすることにより、D型燃料格子では富化度種類を6種類から4種類に、C型燃料格子では4種類から3種類にそれぞれ減らすことができる。

本格利用に向けてのMOX燃料炉心設計は、前述した敦賀1号炉での実績などを踏まえて、今後、詳細設計を実施することになるが、ステップⅡ燃料、ステップⅢ燃料の特性を活用して、プルサーマルに適する燃料炉心設計とする予定である。

6 おわりに

日立製作所が開発したステップⅡ燃料、ステップⅢ燃料は、高燃焼度技術と省ウラン技術を取り入れた高経済性燃料であり、原子燃料サイクルで課題となる省ウラン化、使用済み燃料発生量低減、燃料サイクル費低減、および軽水炉でのプルトニウム利用などの分野で効果がある。

また、よりいっそうの高燃焼度化に向けての研究開発も進めており、今後とも原子燃料サイクルの課題に柔軟に対応できる炉心燃料技術を提供していきたい。

参考文献

- 1) 稲垣, 外: BWR用燃料被覆管の耐食性に及ぼすジルカロイ合金組成の影響, 日本原子力学会誌, 32巻, 7号, 728(1990)
- 2) 伊東, 外: Advanced UO₂ Pellets with Controlled Mi-

crostructure, 原子先端技術シンポジウム(1992)

- 3) 目黒, 外: 敦賀発電所一号機におけるBWR-MOX燃料照射実績(I)・(II), 日本原子力学会, 1990年秋の大会D38, D39(1990)