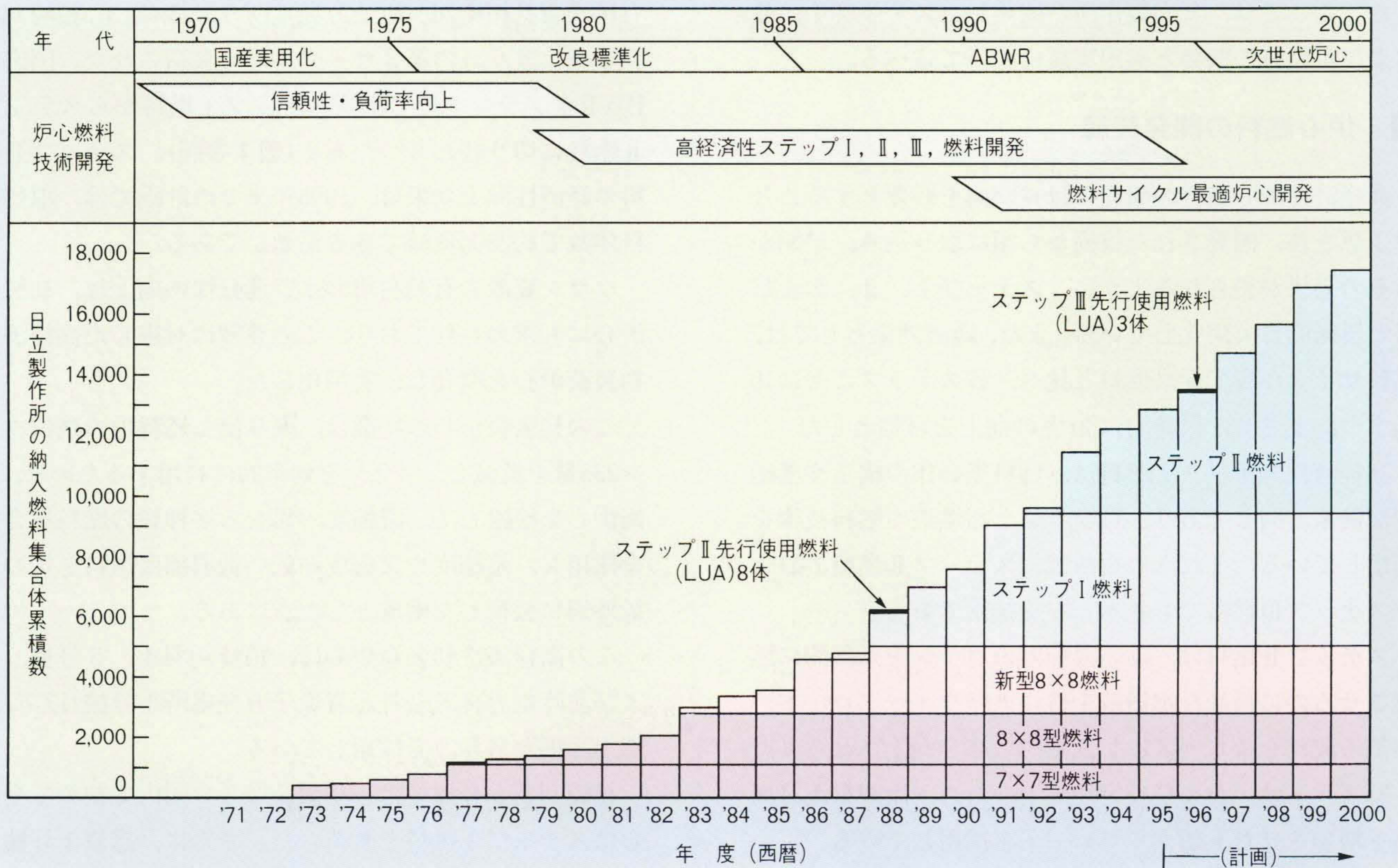


BWR炉心燃料の開発と適用実績

Development and Application of BWR Core and Fuel

別所泰典* Yasunori Bessho 小熊正臣* Masaomi Oguma
 梅原 肇** Hajime Umehara 青山肇男*** Motoo Aoyama



日立製作所の炉心燃料の開発実績

日立製作所は、信頼性安全性確保を基本に経済性向上、使用済燃料体数低減、プルトニウムおよび回収ウランの有効利用など燃料サイクル全体としての最適化要求にも的確に対応できるように炉心燃料の開発を進めていく。

BWR(沸騰水型原子炉)用の炉心燃料の分野では、燃料の信頼性向上、プラントの負荷率向上とともに、近年では、ウラン資源節約、廃棄物量低減、燃料サイクル費低減、および長期サイクル運転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当たりの発生エネルギーである燃焼度を高くした高経済性燃料を開発し、その第一段階としてステップⅠ燃料を実用化した。これに続くステップⅡ燃料も、国内のほとんどのBWRに導入されている。さらに、ステップⅢ燃料についても開発を完了し、先行使用燃

料装荷に向けて準備を進めている。

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、長期運転サイクルにも対応できる設計としている。

さらに、再処理によって回収されるプルトニウムおよび回収ウランの利用については、新原子力長期計画の「余剰のプルトニウムは持たない」という方針に従い、技術開発を進めている。

* 日立製作所 日立工場 工学博士 ** 日立製作所 日立工場 *** 日立製作所 電力・電機開発本部 工学博士

1 はじめに

炉心燃料の開発は、燃料の信頼性向上、プラントの負荷率向上とともに、いっそうの燃料経済性(燃料サイクル費低減)が要望されるようになった。日立製作所は、これにこたえるため高経済性炉心燃料の開発に取り組んできた。ここでは、日立製作所が開発したステップⅠ、ⅡおよびⅢ燃料の概要と適用実績について述べる。

2 炉心燃料の開発経緯

高経済性炉心燃料の開発には長期間を必要とすることが予想され、開発された技術から順に取り込み、早期からその効果が得られるように、ステップⅠ、Ⅱ、およびⅢと段階的に実用化している。また、経済効果としては、燃料サイクル費で従来燃料と比べ、各ステップごとに10%ずつ向上させ、最終的に30%の向上を目標とした。

高経済性ステップⅠ燃料は、燃料集合体の構造や濃縮度が従来と同じであり、省ウランと高燃焼度燃料技術を適用している。これらの技術は、ステップⅡ燃料、およびステップⅢ燃料でも基本となる技術である。

ステップⅡ燃料は、高い濃縮度のウランを効果的に燃焼させるのに最適な水領域を持つ太径ウォータロッド、蒸気の流れをスムーズにし、熱的余裕を向上させる丸セル型スペーサ、および安定性向上のため、冷却材流路面積を増加させた上部タイプレートを採用している。

ステップⅢ燃料は、燃料棒を9×9型に配列して、2本の太径ウォータロッド、丸セル型スペーサを採用した構造を基本とし、これに部分長燃料棒、高圧損型下部タイプレート、超低圧損型上部タイプレートなどの改良を加えている。

3 ステップⅠ、Ⅱ燃料初装荷炉心の適用

高経済性燃料の第一段階であるステップⅠ燃料では、燃料経済性向上の実績として取替燃料体数が約13%低減でき、所期の目標をほぼ達成している。

ステップⅡ燃料は、取替燃料として平成4年に東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所5号機(以下、柏崎刈羽5号機と言う。)の第3サイクルから装荷された。国内のBWR全プラントでも漸次ステップⅠ燃料からステップⅡ燃料に切り替わりつつある(図1参照)。ステップⅡ燃料の経済性向上効果は、1996年までの計画では、取替燃料体数で約28%低減できる見通しである。

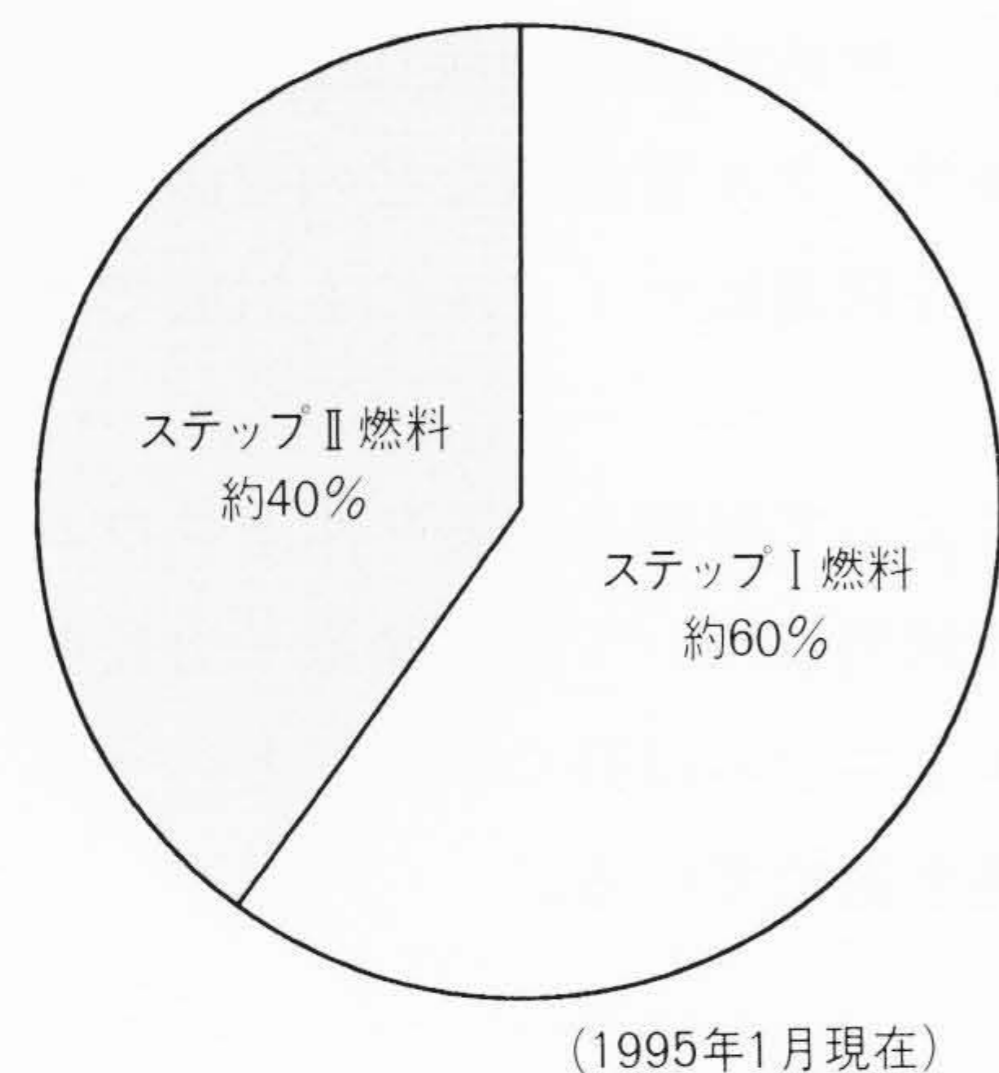
ウラン資源の有効利用および運転性の向上は、初装荷炉心にも求められており、この要望に対応した高経済性初装荷炉心を開発し、実用化した。

この初装荷炉心の特徴は、取り出し燃料中の残留ウラン235量を低減し、ウランを効率的に利用するために、平衡炉心を模擬して、濃縮度の異なる多種類の燃料集合体を採用し、濃縮度や反応度が低い低濃縮度燃料を炉心の最外周に装荷した構成とした点にある。

この高経済性初装荷炉心は、柏崎刈羽4、5号機、および北陸電力株式会社志賀原子力発電所1号機(以下、志賀1号機と言う。)で採用している。

柏崎刈羽5号機では、初装荷として国内で初めて全炉心にステップⅠ燃料を装荷した。さらに、志賀1号機でも、全炉心にステップⅠ燃料を装荷した。柏崎刈羽4号機では、全炉心にステップⅡ燃料を装荷した(図2参照)。

平衡炉心を模擬した高経済性初装荷炉心は、ウラン資源の有効利用、運転性の向上、および負荷率損失の低減を図るうえで優れた特長を持っており、上記プラント以



プラント	年	'93	'94	'95	'96
島根1号機		□	□	□	□
福島第一・4号機		□	□	□	□
福島第二・2号機		□	□	□	□
福島第二・4号機		□	□	□	□
島根2号機		□	□	□	□
柏崎刈羽5号機		□	□	□	□
志賀1号機		□	□	□	□
柏崎刈羽4号機			□	□	□

注：略語説明ほか

- ステップⅠ燃料
- ステップⅡ燃料

- 島根1,2号機(中国電力株式会社島根原子力発電所1,2号機)
- 福島第一・4号機(東京電力株式会社福島第一原子力発電所4号機)
- 福島第二・2,4号機(東京電力株式会社福島第二原子力発電所2,4号機)
- 志賀1号機(北陸電力株式会社志賀原子力発電所1号機)
- 柏崎刈羽4号機(東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所4号機)

図1 ステップⅠ、Ⅱ燃料の装荷実績と計画

国内のBWR全プラントでは、高経済性ステップⅠ燃料から漸次ステップⅡ燃料に切り替わりつつある。

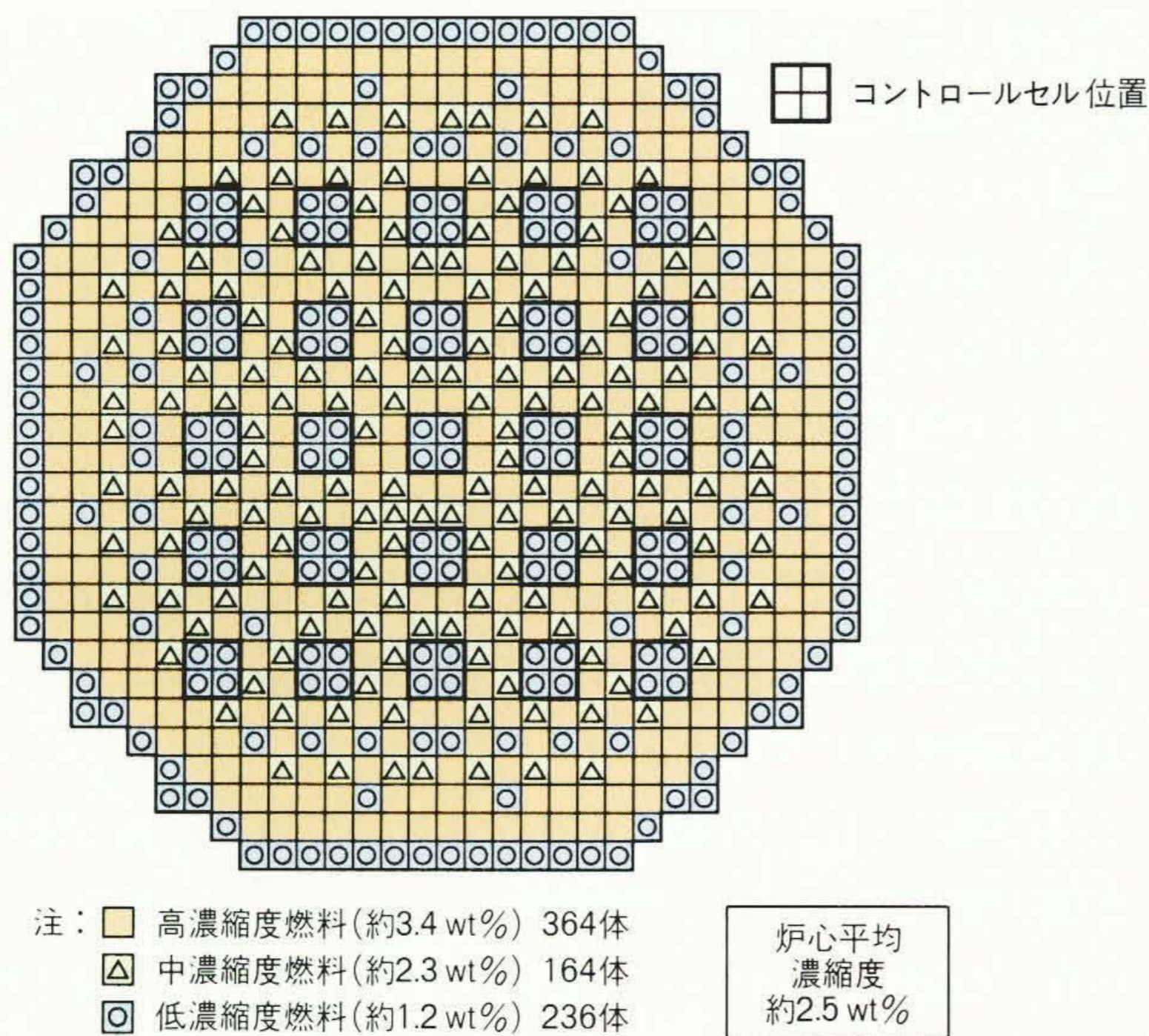


図2 柏崎刈羽4号機燃料装荷パターン
 柏崎刈羽4号機では平衡サイクル炉心を模擬した、濃縮度が異なる多種類のステップⅡ燃料で炉心を構成した。

降のBWRでの初装荷炉心設計の基本となっている。

4 ステップⅢ炉心燃料の実用化状況

高経済性炉心燃料の第三段階であるステップⅢ燃料は、取り出し燃焼度を約45 GWd/tとし、燃料サイクル費を従来燃料に比べ約30%低減することを目標に開発したものである。

ステップⅢ燃料は、日立製作所提案の基本概念を基本に、さらに部分長燃料棒の改良などを加え、設計仕様を確立した。

現在、日本ニュークリア・フュエル株式会社ではステップⅢ燃料の量産に先行して、少数体装荷用燃料の製造準備を行っており、ステップⅢ燃料に対応した燃料製造基礎技術の確立を図り、これをベースに量産対応の技術開発を進めている。

5 燃料の高燃焼度化技術開発

燃料の高燃焼度化に伴う核熱水力特性・機械特性への影響と対応技術を図3に示す。燃料の高燃焼度化技術開発の主な課題は、ステップⅢ燃料の取り出し燃焼度45 GWd/tを超える将来の高燃焼度化に備えた高燃焼度化用ペレット、被覆管材料などの研究である。電力会社と協力し、照射後試験施設を持つ日本核燃料開発株式会社で高燃焼度領域での燃料挙動を詳細に把握することと合わせ、開発材の評価を行っている。

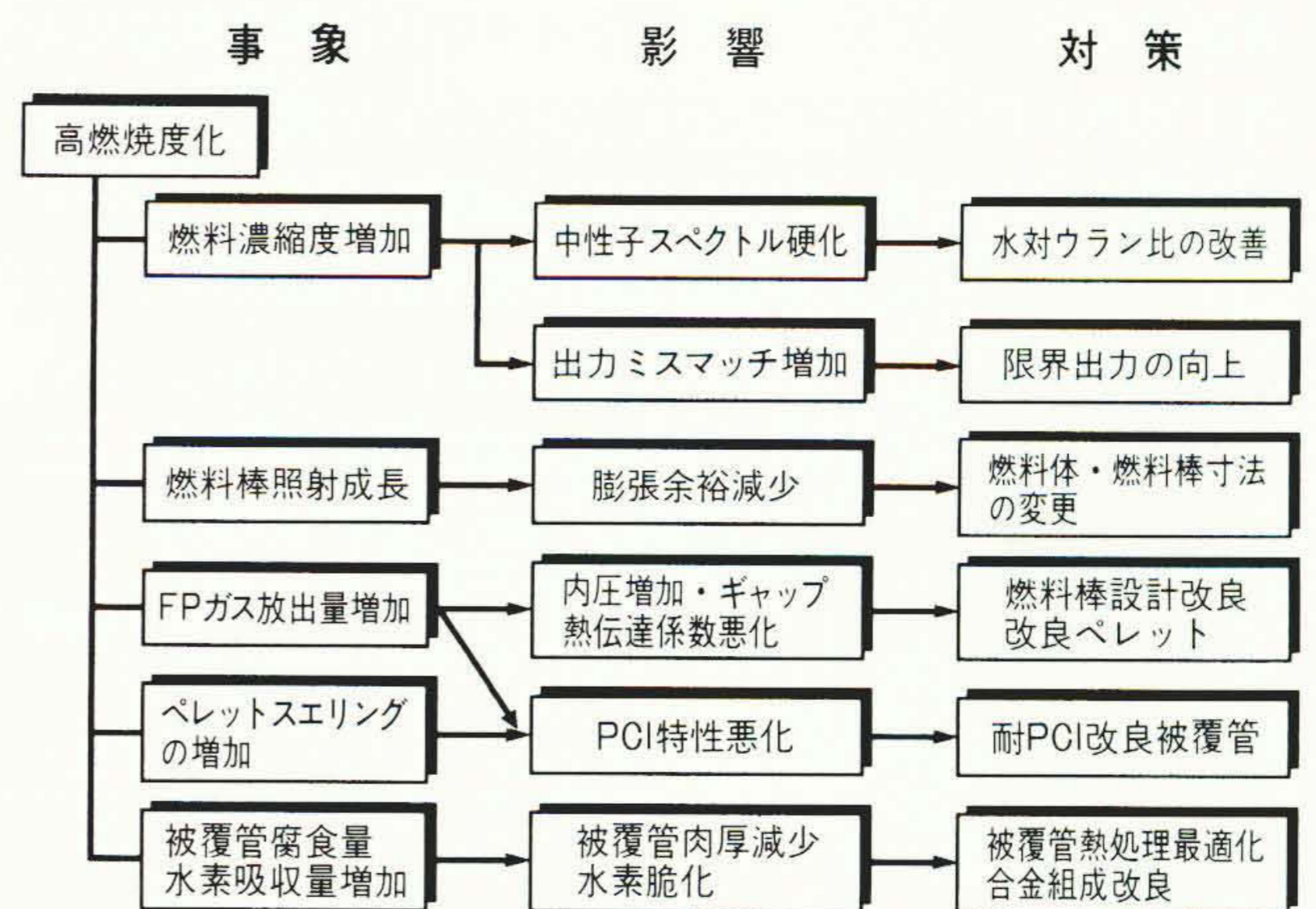
高燃焼度燃料用改良ペレットでは、FPガス放出や気泡

スエリングの抑制、PCIの軽減などを目的とし、ペレットの微細組織改良の検討を進めている。改良ペレットの一例として無添加大粒径、およびアルミナシリケート添加大粒径ペレットの照射試験結果を図4に示す。これにより、ペレットの大粒径化による高燃焼度領域でのFPガス放出率の低減効果を確認している。また、高燃焼度下でのペレット挙動に関しては、熱伝導率の低下等のペレットの物性変化、およびペレットの外縁部に形成される結晶の細粒化、かつ多孔質化したリム組織の形成機構・特性などについて検討・評価を進めている。

被覆管材料の開発では、耐食性向上を目的として、被覆管の高耐食化熱処理(素管での $\alpha+\beta$ 焼入れ処理)の採用、合金成分の調整(Fe, Ni濃度を仕様値内で調整)などの改良を重ね、従来型被覆管に見られたノジュラ腐食を低減してきた。また、これまでの多くの炉外試験、および照射試験の知見によれば、ジルカロイ-2素地中の合金元素Fe, Niの濃度を高めることによって耐食性がさらに向上すると考えられる。そのため、現在、改良ジルコニウム合金の実用化に向けて、海外の実験炉や商用炉で腐食試験を実施中である。

6 MOX燃料

軽水炉でのMOX(プルトニウムとウランの混合酸化物)燃料では、再処理施設の規模、高速炉の実用化の進捗(ちよく)状況を踏まえ、適切な規模で経済的に利用していく必要がある。日立製作所としても軽水炉でのMOX燃料本格利用のために開発を進めている。



注：略語説明
 FP (Fission Product), PCI (Pellet Clad Interaction)

図3 燃料の高燃焼度化の影響と対策
 日立製作所は、将来のいっそうの燃料高燃焼度化に向けて技術開発を進めている。

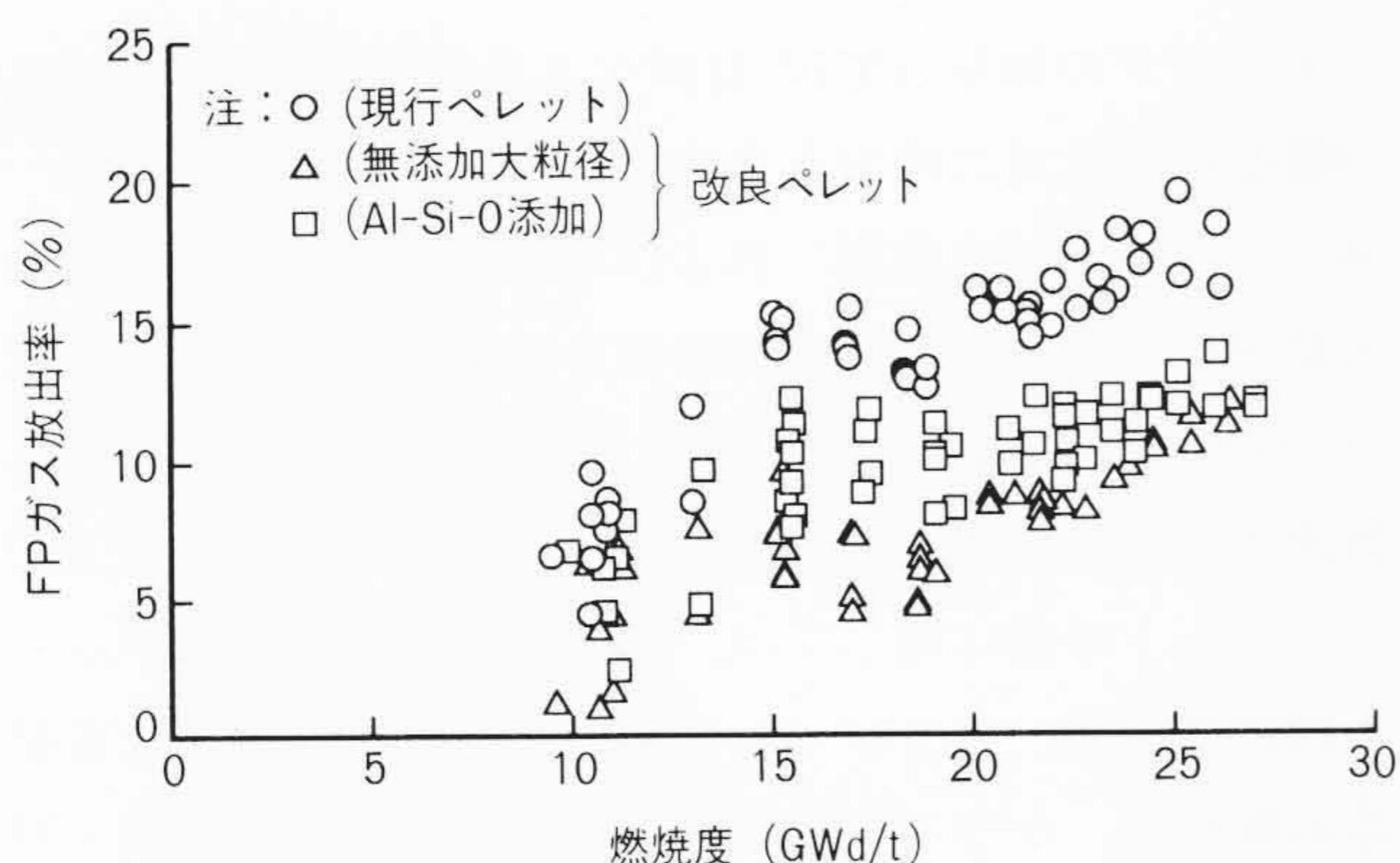


図4 組織改良ペレットによるFPガス放出率低減効果
組織改良ペレットでは、高燃焼度でFPガス放出率が低減できる。

既設炉でのプルサーマル利用計画では、炉心の $\frac{1}{3}$ 程度のMOX装荷を目安に炉心設計を検討してきた。現在、実用化段階に入ったABWR(改良型BWR)は、既設のBWRに比べて水対燃料体積比が大きく、炉停止余裕や熱的余裕の点で、MOX燃料装荷量を多くできる可能性がある。そこで日立製作所は、炉心にMOX燃料集合体を全数装荷した全MOX炉心の成立性を検討してきた。全MOX炉心では、1基当たり約1tのプルトニウムを毎年利用するので、前述の国内再処理工場から発生するプルトニウムのうち、軽水炉での需要分、年間約3tは約3基の全MOX炉心ABWRで賄うことができる。これは、MOX燃料の集中装荷によって国内でのプルサーマル利用軽水炉の基数を十数基から3基に減らすことができることを意味しており、MOX燃料利用炉の少数特定化の点で有利である。

MOX燃料の特性把握や設計コードの検証のため、燃料照射試験を含む種々の研究開発を行っている。燃料照射試験の例としては、日本原子力発電株式会社敦賀発電所1号機の炉に2体のMOX燃料集合体を装荷し、3サイクル照射した後、詳細な照射後試験を行った例¹⁾がある。また、製法の異なるMOX燃料棒を UO_2 燃料棒とともにオランダのBWRで最高約50 GWd/tまで照射した後、一部の燃料棒についてベルギーの実験炉BR-2で出力急昇試験と照射後試験を実施した例²⁾などもある。

2000年過ぎに予定されている日本原燃株式会社六ヶ所

再処理工場の操業開始にリンクした国内MOX燃料加工工場が本格操業を開始するまでは、海外再処理施設で回収されたプルトニウムを海外施設でMOX燃料に加工した後、わが国に返還輸送し、軽水炉で利用することになっている。このような海外でのMOX燃料加工は2010年ごろまで継続されると予想されている。日立製作所でも海外加工MOX燃料の円滑な導入に向けて電力会社、官庁の指導、支援の下に、MOX燃料加工技術の適合性評価、輸送関連技術開発、サイト検査技術開発など一連の技術開発を進めている。

再処理によって回収されるウランについては、資源の有効利用の観点から、積極的な利用を図ることになっている。わが国の方針に沿ってBWRでは、東海再処理工場回収されたウランの一部を用いた利用計画が進行中であるほか、海外再処理施設回収分を含む本格的回収ウラン利用計画を電力会社の指導の下に立案しつつある。

7 使用済燃料貯蔵技術の開発

わが国の原子力発電所の稼働は順調であり、それに伴って発生する使用済燃料は増加する傾向にある。この原子力発電所から発生する使用済燃料は再処理されるまでの間、適切に貯蔵される必要がある。

現在使用済燃料は、発電所内の燃料プールに安全に貯蔵されているほか、発電所敷地内の号機間共用設備として、独立建屋の燃料プールあるいは乾式キャスクで貯蔵される予定である。

日立製作所は、使用済燃料貯蔵に関し、燃料の高燃焼度化も踏まえ、高密度貯蔵技術や各サイト条件に最適な貯蔵技術の開発を電力会社の協力を得て行っている。

8 おわりに

ここでは、高経済性を目指して日立製作所が開発してきた、BWR用のステップI、IIおよびIII燃料の概要と適用実績について述べた。今後も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計画的に強力に研究開発を進めていく。

参考文献

- 1) 片山, 外: 敦賀発電所1号機照射MOX燃料の照射後試験(1), (2), 日本原子力学会「1992年秋の大会」(1992)
- 2) K. Asahi, et al.: "Irradiation and Post Irradiation Testing Program of BWR MOX Fuel Rods," Proceed-

ings of 1994 International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, West Palm Beach, FL, USA (1994)