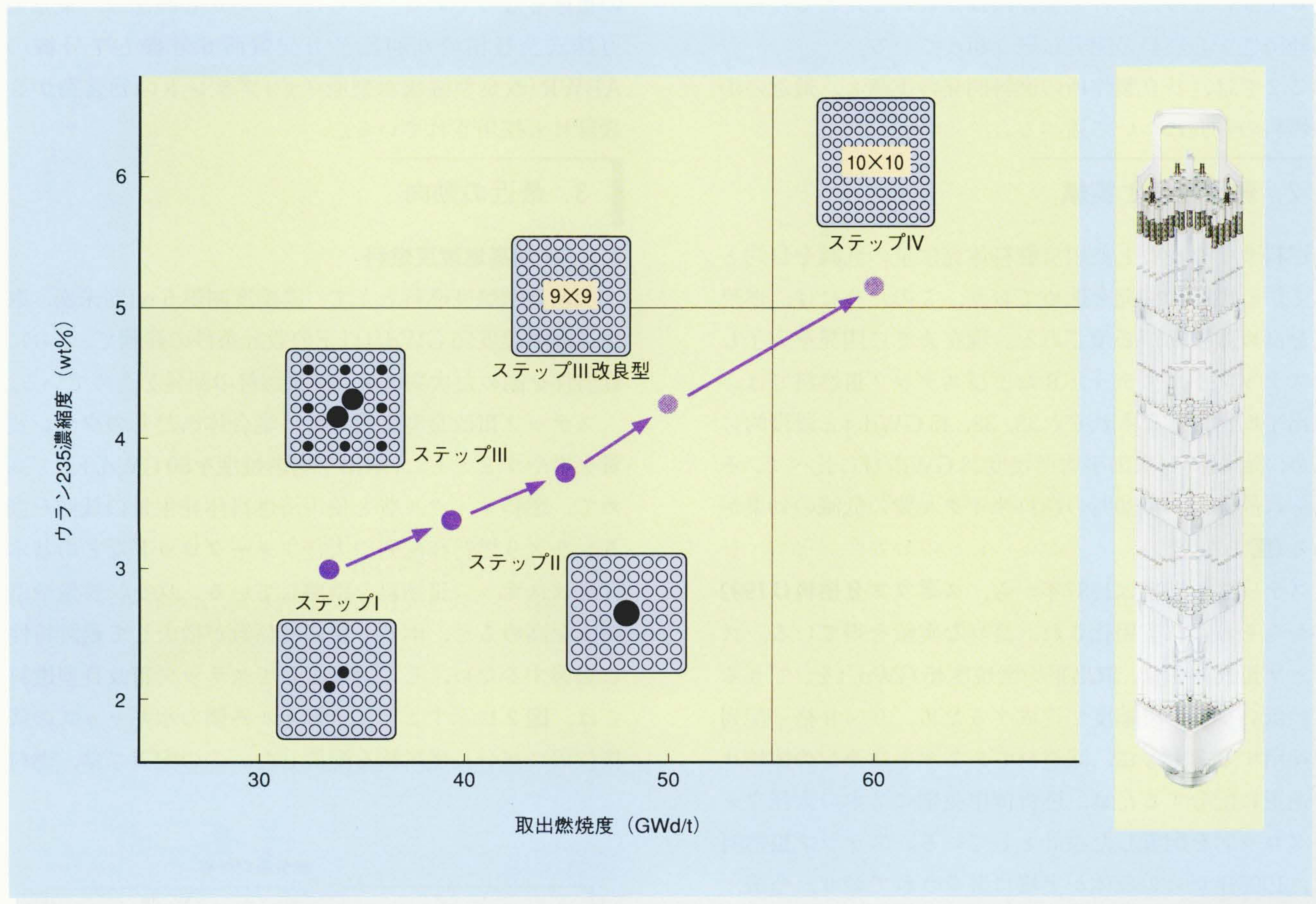


炉心燃料の開発動向

Developmental Activities of BWR Core and Fuel

伊東賢一 Ken'ichi Itô 青山肇男 Motoo Aoyama
配川勝正 Katsumasa Haikawa 久保利雄 Toshio Kubo



BWR(沸騰水型原子炉)用燃料の開発目標

次期取替燃料は、ステップⅢ燃料と同じ9×9格子を用いて取出平均燃焼度を50 GWd/tまで高めた改良型である。ステップⅣ燃料では10×10格子を用い、現行のウラン235濃縮度と燃料集合体最高燃焼度の上限を超えた将来のニーズに対応する。

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、プラント負荷率向上とともに、燃料サイクル費の低減、ウラン資源節約など燃料の経済性向上のための技術開発を進めてきた。日立製作所は、燃料の経済性向上のために燃料単位質量当たりの発生エネルギー(燃焼度)を高くした高経済性炉心燃料を開発し、ステップⅠ、ステップⅡ燃料を順次実用化してきた。これに続くステップⅢ燃料についても開発を完了し、現在、少数体が実機に装荷されており、今後、本格的に利用される計画である。

ステップⅢ燃料では、9×9格子配列を採用するとと

もに、減速材である水とウランの体積比を適正に配分するために太径ウォータロッドを配置するなど、高燃焼度化に適した集合体設計を行っている。

ステップⅢ改良型燃料は、現行のステップⅢ燃料の9×9配列、太径ウォータロッド、部分長燃料長などの基本設計を踏襲し、さらなる高燃焼度化を目指した次期取替燃料である。

ステップⅣ燃料は次期ステップⅢ燃料の次の燃料として、10×10燃料棒配列によって大幅な高燃焼度が可能な将来型の取替燃料として開発を進めている。

1. はじめに

わが国の原子力利用は商業用原子力発電を始めてから30年近くが過ぎ、軽水炉による発電が定着する中で、炉心燃料の信頼性向上、プラントの負荷率向上とともに、いっそうの燃料経済性(燃料サイクル費の低減)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いる。

ここでは、日立製作所の燃料開発の実績と、最近の炉心燃料の動向について述べる。

2. 開発経緯と実績

燃料サイクル費と使用済燃料体発生量の低減を目的として炉心燃料の開発を進めており、このためには、燃焼度を高める技術が必須である。現在までに開発を完了したステップⅠ、ステップⅡおよびステップⅢ燃料では、取出平均燃焼度をそれぞれ33, 38, 45 GWd/tと段階的に高め、従来燃料(取出平均燃焼度28 GWd/t)に比べて、それぞれ約10, 20, 30%の燃料サイクル費の低減の効果がある(図1参照)。

ステップⅠ燃料は1987年から、ステップⅡ燃料は1992年からそれぞれ実用化され、良好な実績を得ている。ステップⅢ燃料では、取出平均燃焼度45 GWd/tを、できるだけ低いウラン濃縮度で達成するため、9×9格子配列を採用するとともに、減速材である水とウランの体積比を適正に配分するため、燃料体中央部に2本の太径ウォータロッドを配置した設計としている。ステップⅢ燃料は、1996年から少数体が実機に装荷されており、今後、本格的に利用される計画である。

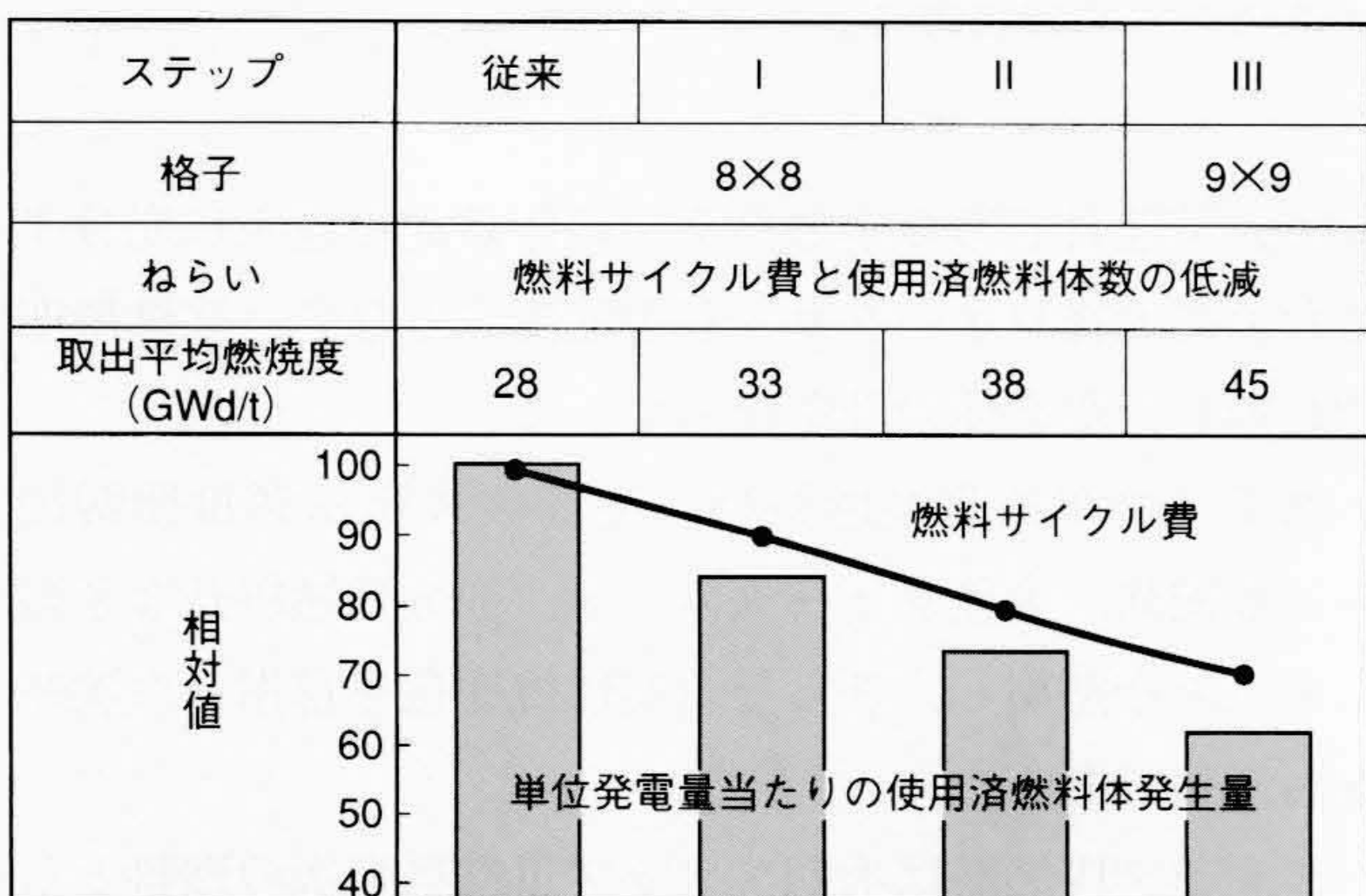


図1 高経済性炉心燃料の開発

ステップⅠ、ステップⅡ、およびステップⅢ燃料では、段階的な高燃焼度化によって燃料サイクル費と使用済燃料体発生量の低減を実現してきた。

初装荷炉心では、ウラン濃縮度が異なる多種類の燃料体を用いて平衡炉心を模擬し、取出燃焼度を高めた炉心概念を開発した。この高経済性初装荷炉心は、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所5号機をはじめ、同発電所4号機、北陸電力株式会社志賀原子力発電所1号機などに採用され、BWR(沸騰水型原子炉)初装荷炉心設計の標準となっている。さらに、この炉心概念は、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所6号機と7号機のABWR(改良型沸騰水型原子炉)プラントの初装荷炉心設計にも採用されている。

3. 最近の動向

3.1 次期高燃焼度燃料

次期高燃焼度燃料として、濃縮度制限5wt%未満、取出最高燃焼度55 GWd/t以下の設計条件の範囲で、さらに経済性を高めた次期ステップⅢ燃料の開発を進めている。

ステップⅢ改良型燃料では、集合体当たりのウラン質量を増やすとともに、取出平均燃焼度を50 GWd/tまで高めて、燃料サイクル費と使用済燃料体発生量の低減を図る。9×9燃料棒配列や太径ウォータロッドなどの基本仕様はステップⅢ燃料を踏襲している。ウラン質量や濃縮度を高めると、ボイド反応度係数が増大して過渡特性に影響するため、その対策としてステップⅢ改良型燃料では、図2に示すようにチャンネル外側の水ギャップの隣接位置に部分長燃料棒を配置した。この配置では、燃料

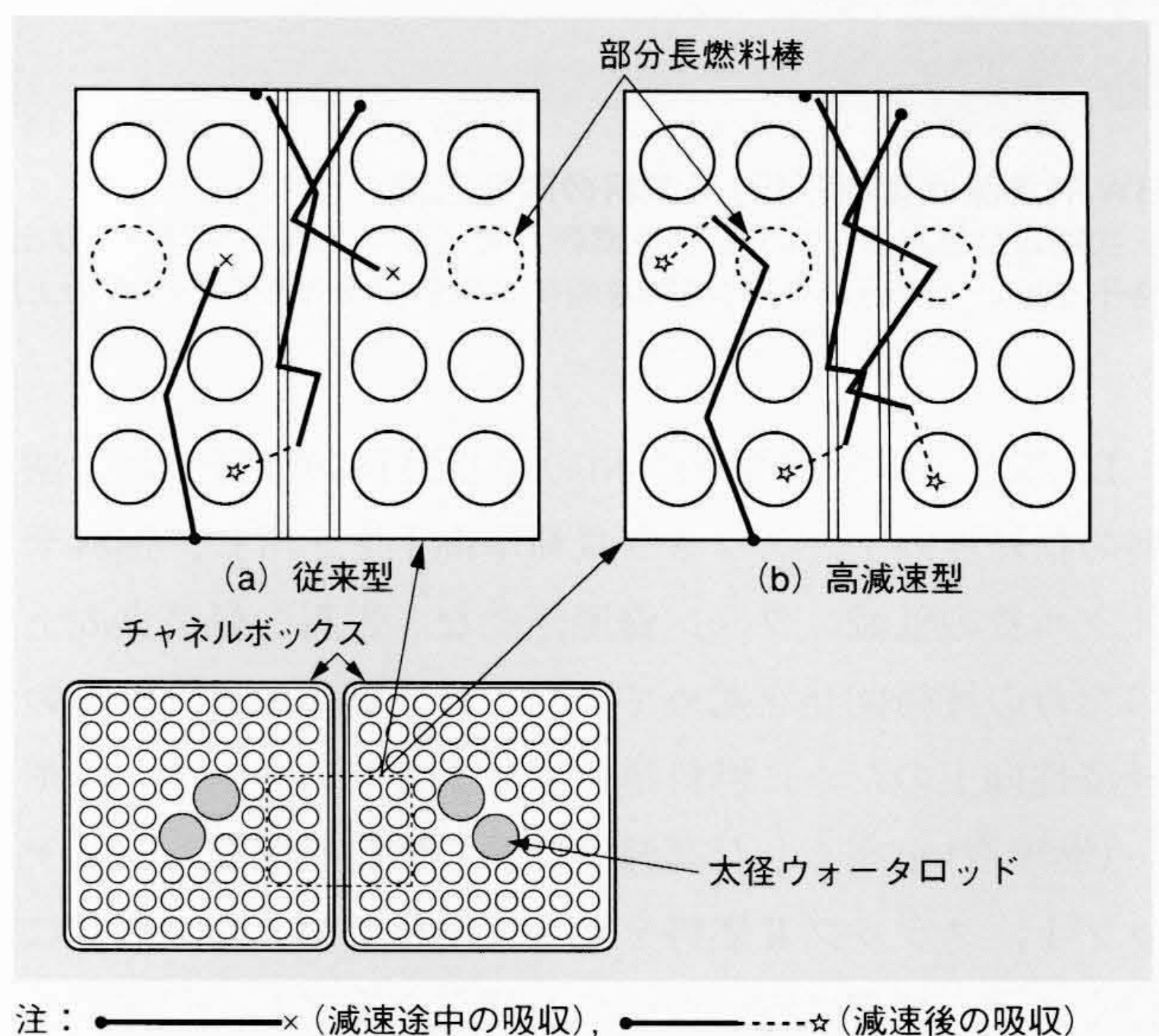


図2 部分長燃料棒配置による中性子減速の促進

部分長燃料棒を、チャンネルボックスを挟んでギャップ水に隣接させることにより、核分裂で発生した高速中性子を効率よく減速させ、減速途中に吸収される中性子の割合を低減する。

体上部で減速材領域が集中して中性子の減速が促進できるので、ボイド係数が減少する。これにより、ステップⅢ燃料と同等の過渡特性が確保できる。

3.2 初装荷炉心の高燃焼度化

ステップⅢ燃料初装荷炉心では、濃縮度を上昇させるために、炉心を構成する燃料タイプを2種類(低濃縮度燃料と高濃縮度燃料)とし、おのこの燃料集合体の平均濃縮度を従来よりも高めた設計としている。特に高濃縮度燃料については、取替燃料よりも高い濃縮度としたことが特徴で、従来の初装荷炉心と比べて大幅な経済性の向上を実現した。

従来の設計との比較を表1に示す。平均濃縮度を従来(東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所7号機の初装荷炉心)と比べて約0.9 wt%増加させており、初装荷燃料の取出平均燃焼度は41 GWd/tとなる。これにより、燃料サイクル費は約20%低減できる(図3参照)。

3.3 MOX炉心燃料

1970年代から、国内電力各社と協力して段階的にMOX(混合酸化物)炉心燃料の研究開発を進めてきた。

表1 初装荷炉心の比較

日立製作所はこれまで、初装荷炉心にステップⅠとステップⅡ燃料を用いて燃料経済性を向上させてきた。今回は、ステップⅢ燃料を用いていっそうの経済性向上を図っている。

項目	燃料	ステップⅠ燃料 (柏崎刈羽5号機)	ステップⅡ燃料 (柏崎刈羽7号機)	ステップⅢ燃料
初装荷炉心平均濃縮度 (wt%)		2.2	2.6	3.5
平均取出燃焼度 (GWd/t)		23	27	41
燃料サイクル費 (相対値)		110	100	80

注：略語説明 柏崎刈羽(東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所)

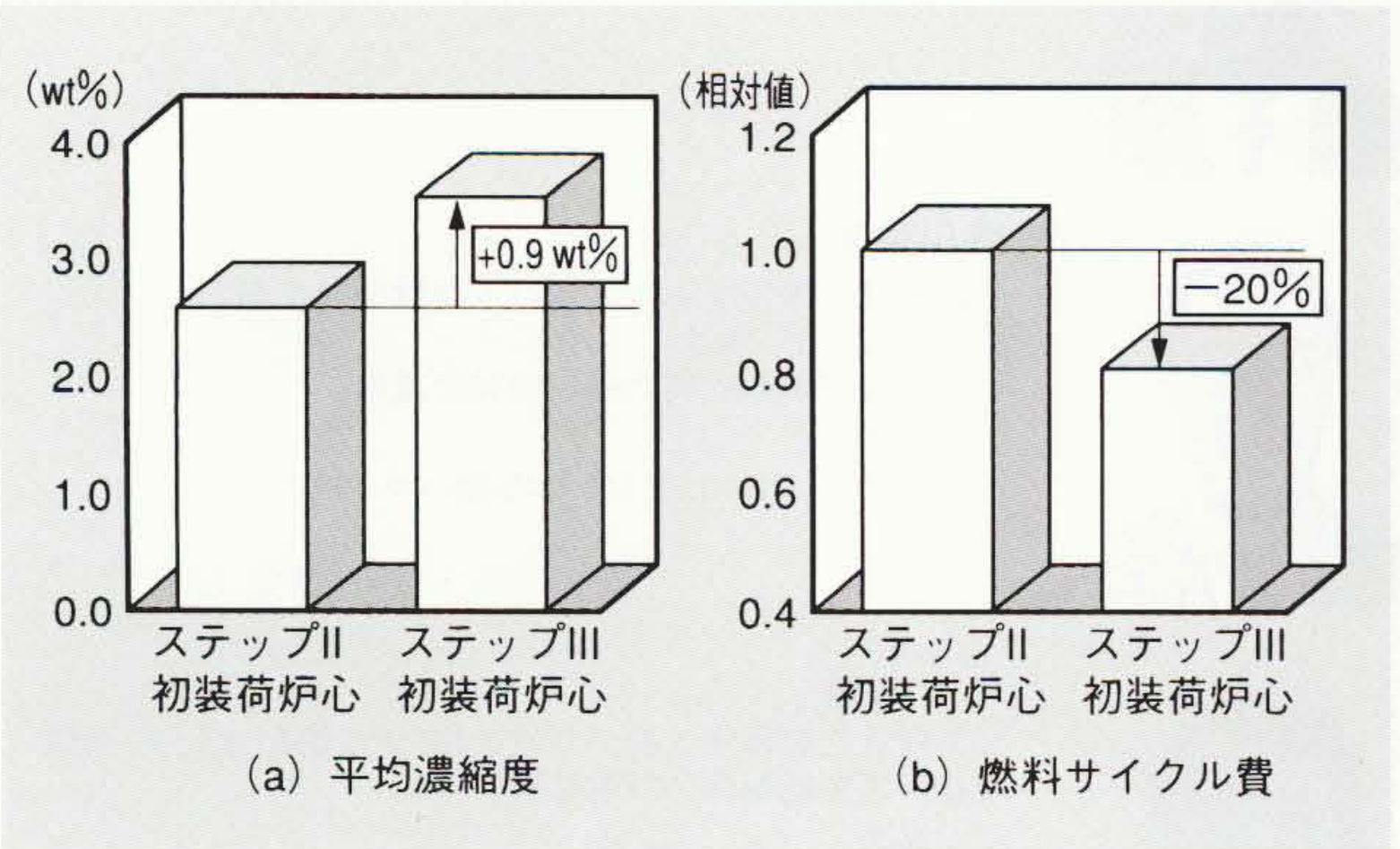


図3 初装荷炉心の燃料経済性の比較

初装荷炉心の平均濃縮度を約0.9 wt%上昇させることで、燃料サイクル費を約20%低減させている。

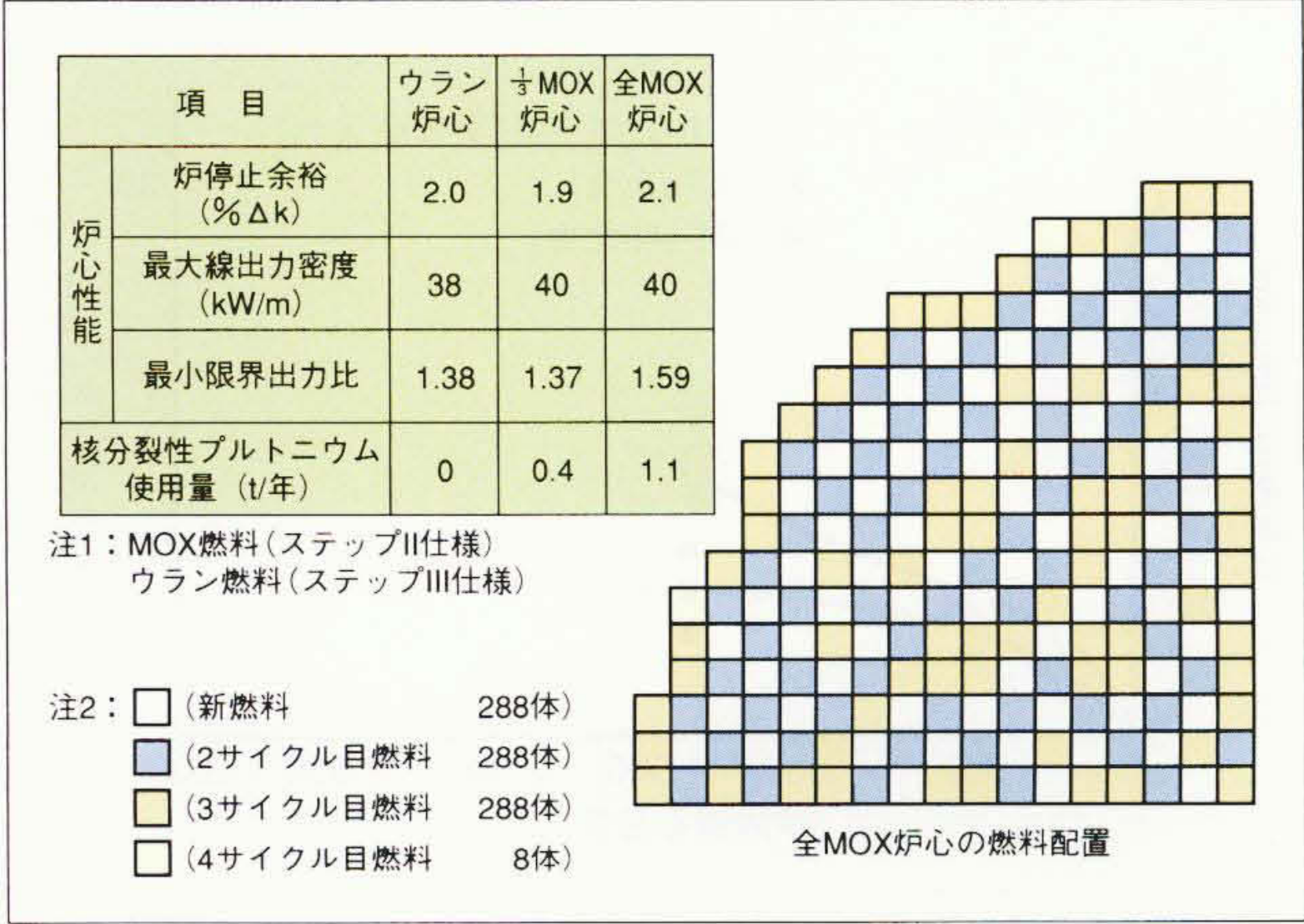


図4 MOX炉心の燃料配置と炉心特性
全ウラン炉心から全MOX炉心まで柔軟に対応できる。

これまでに少数体実証試験の照射を終えている。今後、実用規模の導入が開始され、幾つかの既設炉で炉心の1/3までのMOX燃料装荷が計画されている。さらに、プルトニウム利用の観点から全MOX-ABWRが計画されており、日立製作所は、基本設計の一環として全MOX炉心燃料の設計を進めている。

ABWRでは、燃料集合体の寸法は既設炉と同一で、チャンネルボックス外部の非沸騰水領域を拡大し、水対燃料体積比を増加させている。この仕様は、中性子吸収が大きいMOX燃料にも優れた特性を示すものである。ABWRでは、MOX燃料の装荷割合にかかわらず十分な熱的余裕と炉停止性能が得られ、MOX燃料装荷に対して高い融通性を持つことを確認している(図4参照)。

4. 大幅高燃焼度燃料

4.1 改良ジルコニウム合金

大幅高燃焼度化に際しては、炉内滞在期間が長期化するため、被覆管やスペーサなどのジルカロイ部材の腐食と水素吸収量が増加する。また、将来の10×10型燃料の設計を考慮すると、圧損低減などのために部材肉厚を薄くするニーズが大きくなると考える。

耐食性を高めるためには、ジルカロイ-2の規格組成範囲を越えて、FeやNiを増量した高Fe合金と高FeNi合金を改良合金として提案し、国内電力会社と協力して照射試験を実施してその性能を評価している。海外商用炉照射の結果を図5に示す¹⁾。現行ジルカロイ-2(素管焼入れ管)と比較して、改良合金は、高燃焼度域での耐食性に優れていることがわかる。

ハルデン炉腐食ループで水質をパラメータとして改良

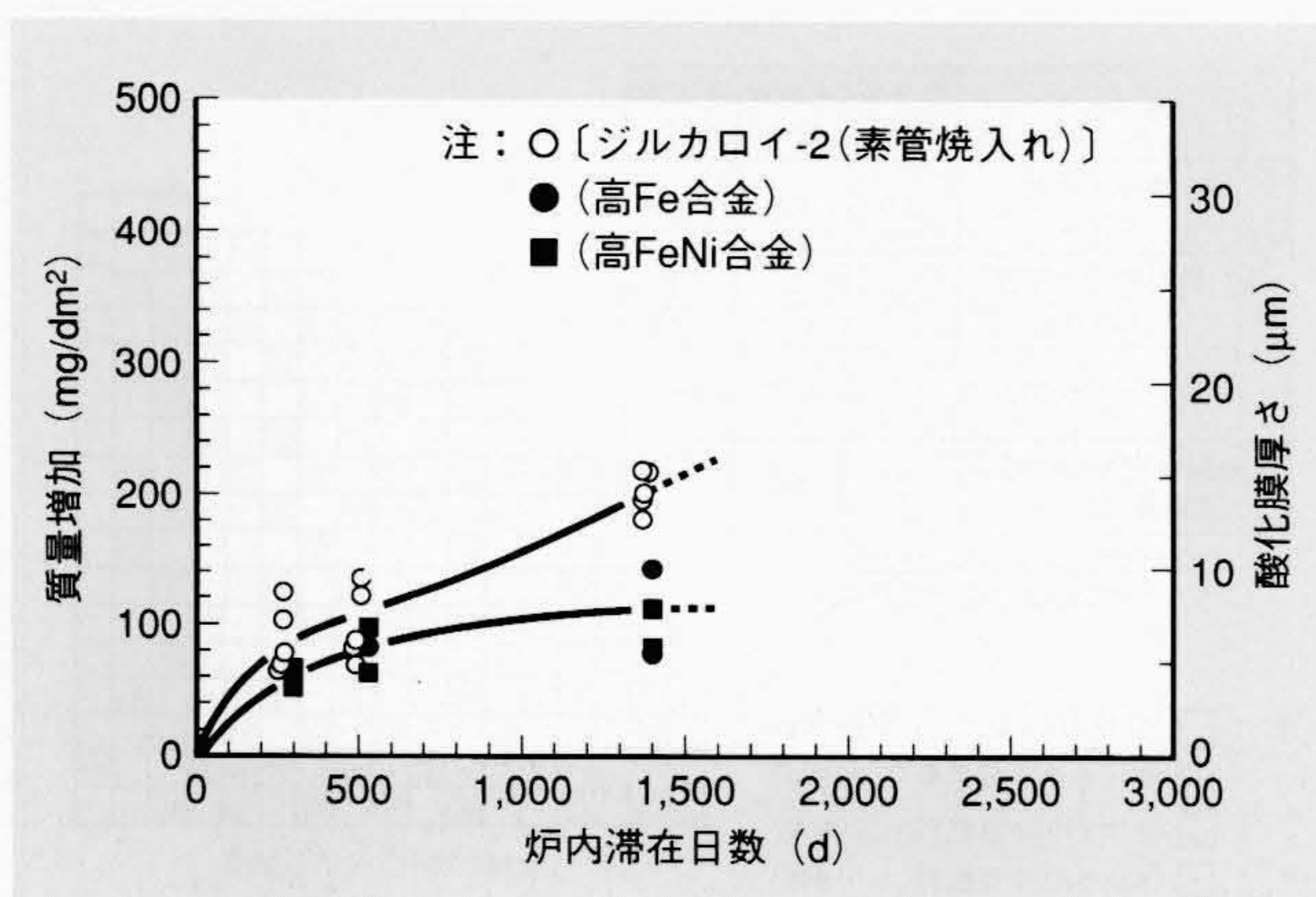


図5 改良合金とジルカロイ-2との耐食性の比較(海外商用炉内材料照射試験)

改良合金は高照射域での耐食性が優れている。

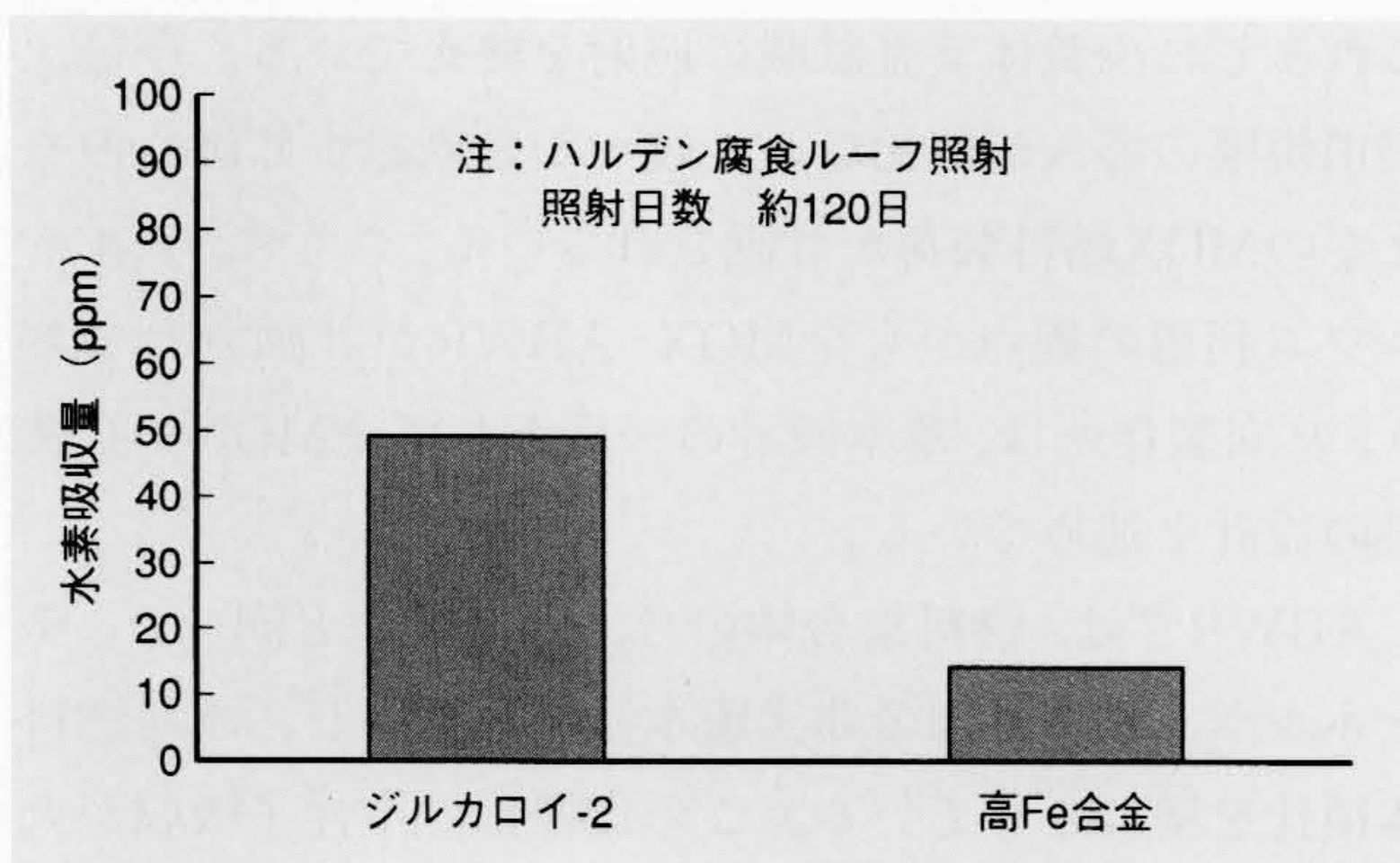


図6 改良合金とジルカロイ-2の水素注入水質条件下の水素吸収量の比較

高Fe合金は水素吸収が少なく、スペーサ用材料として有望である。

合金の特性を評価した結果を図6に示す¹⁾。高Fe合金は、水素注入水質条件下でも水素吸収が少なく、スペーサ用材料として有望と考える。

4.2 改良ペレット

FP(核分裂生成物)ガス放出やPCI(Pellet Clad Interaction)の抑制などを目的として、アルミナシリケート添加大粒径ペレットを大幅な高燃焼度用改良ペレットとして提案し、国内電力各社と協力してハルデン炉照射試験を実施している。ハルデン炉照射試験でのアルミナシリケート添加大粒径ペレットのFPガス放出率を、現行ペレットのそれと比較して図7に示す²⁾。前者のFPガス放出率は、後者のそれと比較して約30%減少している。

5. おわりに

ここでは、経済性の向上を目指して日立製作所が進めているBWR炉心燃料の開発状況について述べた。

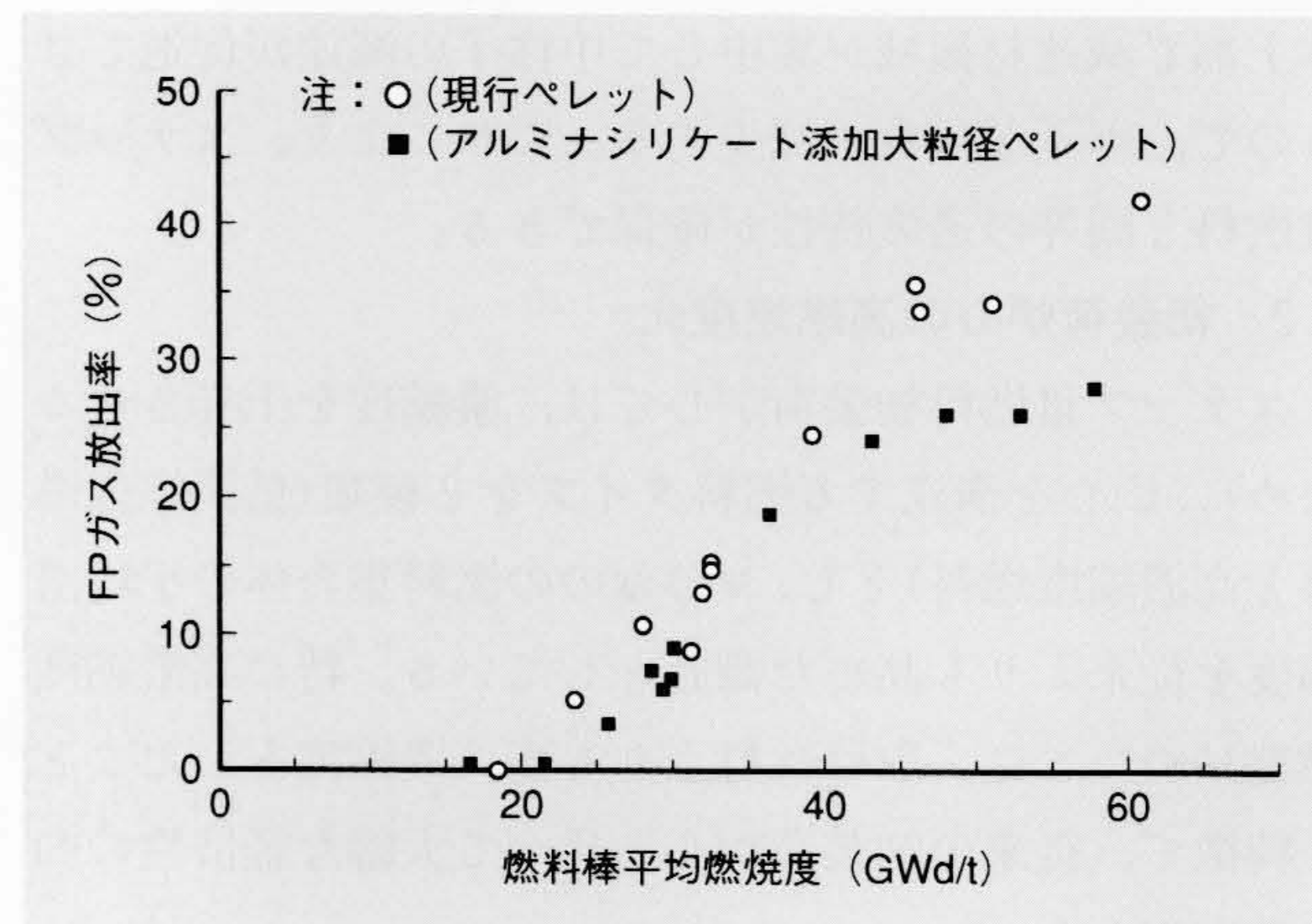


図7 FPガス放出率の燃焼度依存性とハルデン照射試験結果
大粒径化によってFPガス放出率が約30%低減する。

現在までに開発を完了したステップⅢ燃料では、従来燃料と比較して約30%のサイクル費低減を達成した。

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ために、研究開発を推進していく考えである。

参考文献

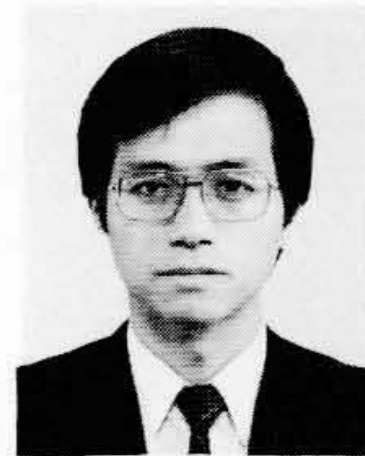
- 1) Y. Etoh, et al.: International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, Portland, Oregon, USA, March 2-6, 1997
- 2) M. Hirai, et al.: ibid.

執筆者紹介



伊東賢一

1973年日立製作所入社、日立工場 炉心燃料センタ 所属
現在、燃料機械設計および材料開発に従事
工学博士
E-mail: kenichi-itou@cm.hitachi.hitachi.co.jp



配川勝正

1984年日立製作所入社、日立工場 炉心燃料センタ 所属
現在、次期炉心燃料の開発に従事
E-mail: haikawa@cm.hitachi.hitachi.co.jp



青山肇男

1979年日立製作所入社、電力・電機開発本部
原子力第一部 所属
現在、次期炉心燃料の研究開発に従事
工学博士
E-mail: maoyama@erl.hitachi.co.jp



久保利雄

1974年日立製作所入社、日立工場 炉心燃料センタ 所属
現在、次期燃料用の材料開発に従事
工学博士
E-mail: t-kubo@cm.hitachi.hitachi.co.jp