U.D.C. 621.039.524.44:〔621.039.536＋621.039.54〕.001.7

BWR(沸騰水型原子炉)炉心・燃料に関する展望

Perspective on BWR Core and Fuel

山下淳一* *Jun'ichi Yamashita*
西村　章* *Akira Nishimura*
斉藤荘蔵* *Shôzô Saitô*
丸　　彰* *Akira Maru*

BWR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。最近ではこれに加えて，原子力発電の経済性向上の観点から運転サイクルの長期化や燃料の高燃焼度化の要望が高まってきている。

本稿は，経済性向上の観点での炉心・燃料の改良方策と，このための技術的課題を展望したものである。長期サイクル運転と燃料の高燃焼度利用との組合せにより経済性向上が期待できるが，燃料の高燃焼度化は燃料再処理など，核燃料サイクル全体の中で調和のとれた開発が必要である。このため，早期に核燃料サイクルと高燃焼度化などに関する方針決定がなされることが要望されるが，一方では燃料の基礎データ蓄積には長期間を要することから，必要な技術開発を着実に推進する必要がある。

日立製作所では，高燃焼度化の方向に備えて燃料材料の研究開発を行なっており，現在までの成果の一部を併せて紹介する。

1　緒　　言

我が国の軽水炉発電は，これまでの改良，開発により信頼性が飛躍的に向上し，70%近いプラント設備利用率を達成するに至っている。このため，次の段階としてより運転しやすく，より経済的な軽水炉への要求が高まってきている。炉心燃料の分野では，これらの要求を満たすものとして，上下ウラン2領域燃料を用いたBWR(沸騰水型原子炉)改良炉心が既に実用化され成果を挙げているが，現在開発中のものとしては，高性能燃料，高燃焼度燃料，更にこれらを用いてよりいっそうの長期サイクル運転や省ウランを可能にする経済性向上炉心などがある。

バリア被覆管や中空ペレットを用いたBWR用高性能燃料は，昭和52年ごろからBWRを採用する電力会社の支援の下に，日立製作所及び他のBWRメーカーと共同で開発に着手したが，国の開発プログラムとしても採り上げられ，現在着着と開発が進められている。

一方，ウラン資源の節約，使用済み燃料発生量の減少及び燃料経済性の向上を目的とした高燃焼度燃料や経済性向上炉心の開発も進められている。

バリア燃料などの開発については，これまで種々の機会に紹介されている[1]ので，ここでは主としてBWR高燃焼度燃料及び経済性向上炉心を中心として，諸外国の動向を含め以下に展望する。

2　高燃焼度燃料と経済性向上炉心

2.1　長期サイクル運転

軽水炉では従来，定期検査期間を含め1年を周期とした運転が行なわれており，実運転期間は9箇月程度であった。BWRでは昭和57年ごろから12箇月運転が行なわれ始め，現在では多数のプラントで実施されつつあり，5%程度のプラント設備利用率の向上が期待されている。米国では更に18箇月程度の長期の運転が実施されており，フランスでも長期サイクル運転を指向している。

運転期間の長期化の発電費への影響は，次のようになる。

(1)　プラントの設備利用率が向上し，発電費の内の固定費を低減できる。

(2)　燃料の濃縮度を一定とした場合，発電費の内の燃料費は運転期間を長期化すると上昇する。これは運転期間長期化により取出し燃焼度が下がり，単位発電量当たりの取替体数が増加するためである。これに対し濃縮度を高くして取出し燃焼度を上げれば，取替体数を減少できるので燃料費を低減できる。

以上の関係の試算例を**図1**に示す。同図に示すように固定費と燃料費の和である発電費は，ある運転期間まで低下し極小点を過ぎると上昇する。一定の運転期間に着目すれば，濃縮度を上げ高燃焼度化するほうが発電費を安くできる。

更に，燃料取替割合(全数取替を1.0とする。)と運転期間との関係例を**図2**に示す。同図に示すように，高燃焼度化することにより燃料取替割合を減らすことができる。この減少効果は運転期間が長いほど大きい。

燃料取替割合を減らすことにより，燃料費の低減だけでなく**図3**に示すように使用済み燃料を減少させることができる。これにより，ウラン資源が節約できるとともに燃料取替に要する時間を短くでき，定期検査短縮にもつながる。これらの効果は同じ程度の高燃焼度化でも運転期間が長いほど大きくなり，長期サイクル化に伴って高燃焼度化の要求はいっそう高まると予想される。

2.2　高燃焼度化の方法

燃料を高燃焼度化する方法として従来から一般的なのが燃料の濃縮度を上げる方法であるが，最近では濃縮度を上げずに高燃焼度化する方法も各種研究されている。例えば，炉心の周辺部あるいは上下端へ天然ウランあるいは低反応度燃料を装荷する方法，炉心冷却材流量をはじめ低流量で運転し，その後高流量に移行して，蓄積したプルトニウムを燃焼させるスペクトルシフト運転などである。

現在，高燃焼度化の研究は，当面の目標として，取出し燃料平均で3万8,000MWd/t程度の燃焼度を想定しており，前

* 日立製作所日立工場

記の濃縮度を高くする方法と，それ以外の方法とを併用することによって燃料費を現在よりも約25％低減することを目標としている。このためには，高燃焼度燃料の照射挙動についての研究が重要であり，性能実証のための基本データを着実に蓄積してゆくことが必要である。

2.3 長期サイクル運転・高燃焼度化に関する周辺環境

(1) 我が国の状況

運転期間に関しては，現在の電気事業法の規定に基づいて12箇月運転が実施されている。また，高燃焼度化に対しては，以下の考慮が必要である。

(a) 燃料成型加工工場

現在のＢＷＲ燃料成型加工工場の取扱い可能最高濃縮度は4 wt％である。高燃焼度化のため更に高い濃縮度の燃料が取り扱えるようにするためには，設備の改善・配置変更などの配慮が必要である。

(b) 再処理施設など

現在の再処理施設，使用済み燃料輸送や燃料貯蔵設備などにも燃焼度の制約がある。今後の第二再処理施設の建設，その他技術開発に際しては，高燃焼度化傾向を踏まえ，核燃料サイクル全体として調和のとれた展開が望まれる。

(2) 諸外国の状況

従来考えられてきた燃料サイクルは，軽水炉，再処理，高速炉によりU-235はもちろん，U-238がもつ潜在的なエネルギー源をも最大限に活用しようというものであった。しかし，米国は核拡散防止の観点から再処理及び高速炉を凍結・延期する方針を打ち出した。日本をはじめ，英国，フランス，西ドイツは資源問題から再処理，高速炉の路線が必要との方針を維持しているが，その後，西ドイツ及びスウェーデンなどは経済情勢の変化や燃料サイクルの経済性の観点から再処理，

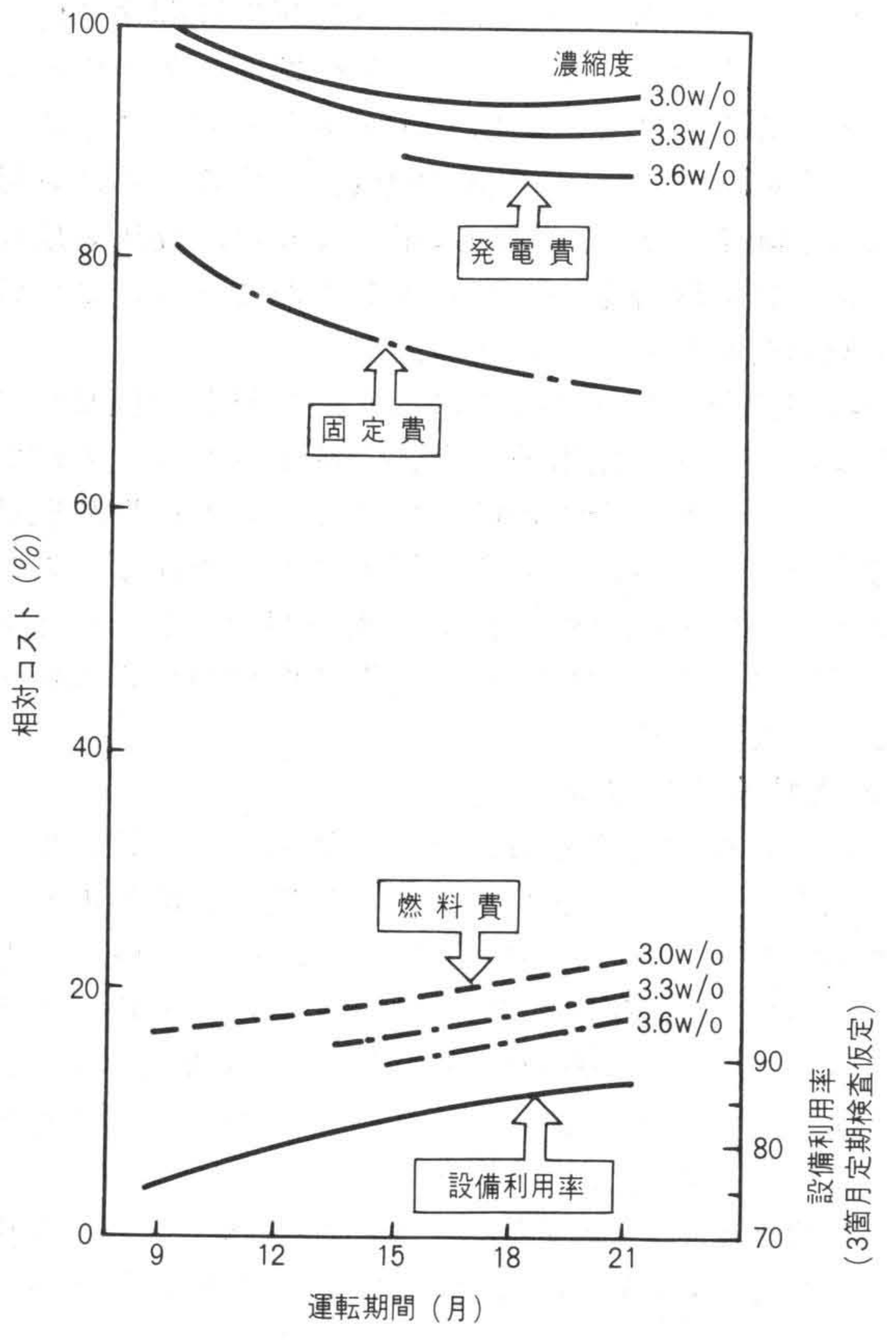


図1 発電費と運転期間の関係(試算例) 運転期間が長期化すると固定費は安くなるが，燃料費は高くなる。両者の和である発電費には極小点が存在する。ある運転期間に着目すると，濃縮度を上げるほうが発電費は下がる。

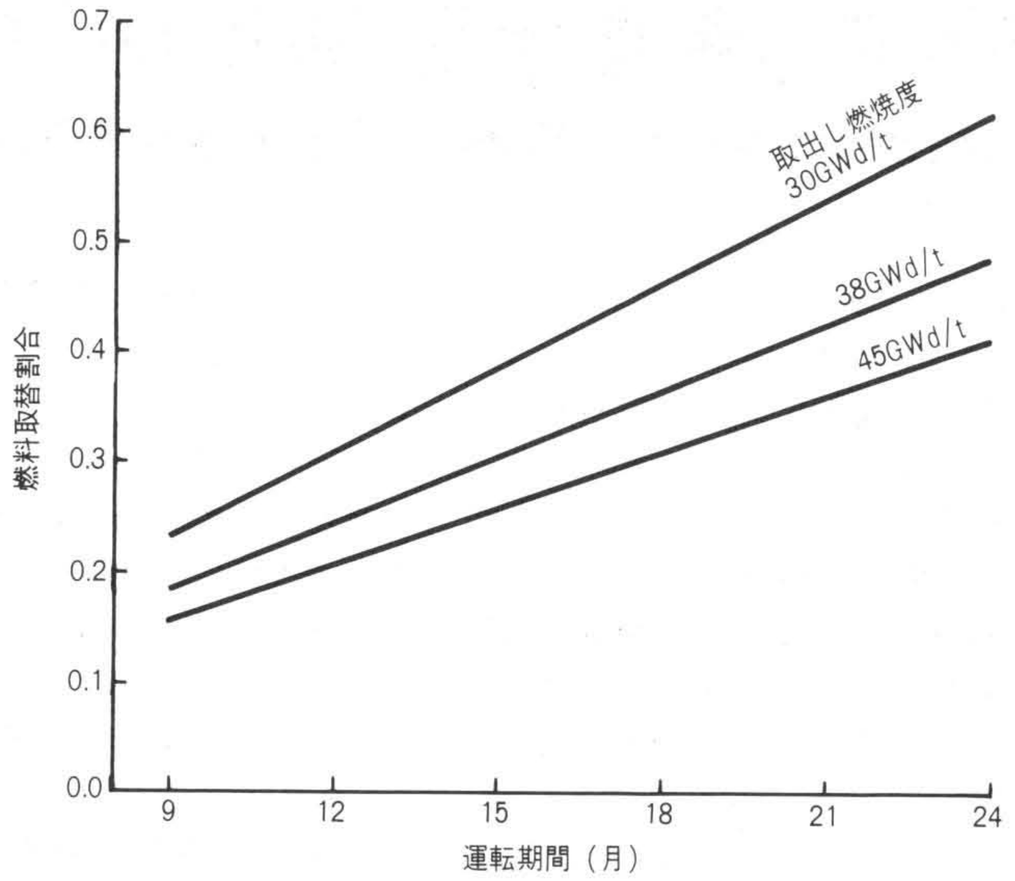


図2 燃料取替割合と運転期間の関係例 取出し燃焼度が一定の場合，取替割合は運転期間が長くなるほど増大する。取出し燃焼度を増やせば取替割合を小さくできる。

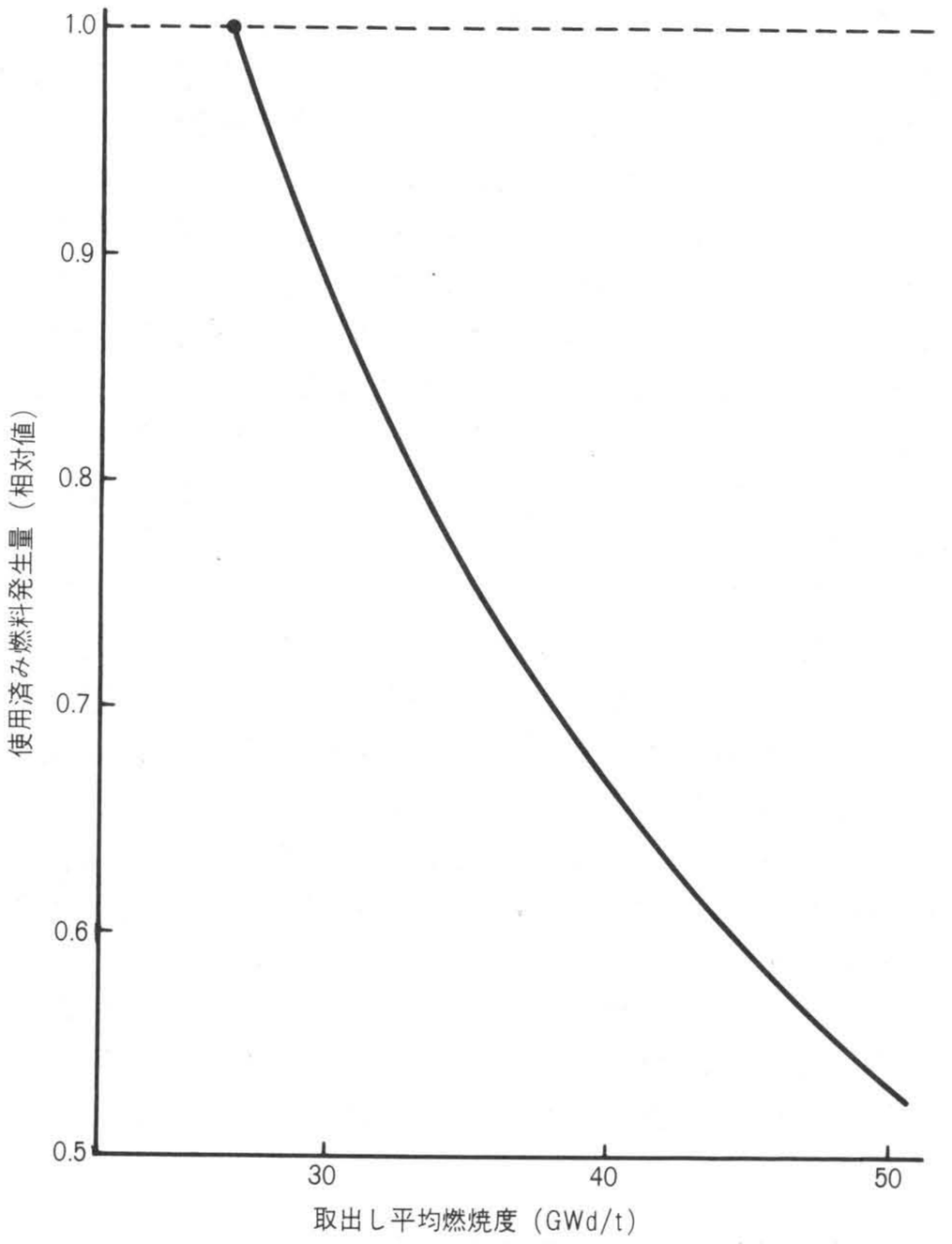


図3 使用済み燃料発生量と取出し平均燃焼度 取出し平均燃焼度を増やすことにより，使用済み燃料発生量を減らすことができる。

高速炉の路線に加えて使用済み燃料の長期貯蔵を取り入れた考え方に変化しつつある。また最近になって，フランスも長半減期核種への配慮から長期貯蔵を併用することを考え始めている。

米国の場合，運転期間に関する法規制が緩やかなこと，また昭和58年1月に制定された核廃棄物政策法(Nuclear Waste Policy Act)により，使用済み燃料の永久貯蔵が具体化するなど，長期サイクル及び高燃焼度化のニーズが強い。この傾向は米国だけにとどまらず，しだいに世界的傾向になりつつあり我が国でも検討が開始されつつある。

3　高燃焼度化に伴う燃料の技術的課題

3.1　BWR燃料の概要と使用実績

ＢＷＲ燃料は**図4**に示すように，62本の燃料棒と2本の水管(ウォータロッドと呼ぶ。)を8×8に配列したものである。それぞれの燃料棒はスペーサで保持され，上下端のタイプレートで支持されている。また，燃料集合体はジルカロイ-4製のチャネルボックスで囲われ，チャネルボックスは冷却水路の形成及び制御棒のガイドの役割を果たしている。

日立製作所がこれまで納入し使用されてきた商用ＢＷＲ燃料の使用実績を**図5**に示す。これまでの使用経験では燃焼度の増加に起因する性能上の問題は生じておらず，現在のＢＷＲ燃料が構造・材質の面で余裕のある設計となっていることが分かる。

3.2　燃料棒及び燃料集合体

燃料のふるまいのなかで，高燃焼度化時に着目する必要のあるものとしては，(1)ジルカロイ被覆管の腐食，(2)PCI(Pellet-Clad Interaction：ペレット-被覆管相互作用)，(3)核分裂生成ガス放出，(4)燃料棒の照射伸びなど，が考えられる。以下，これらの項目についての現状について述べる。

(1)　ジルカロイ被覆管の腐食

ジルカロイ被覆管には，炉水中での長期間使用中に表面に腐食が起こる。腐食の程度，形態は使用温度，炉水の水質条件に依存すると考えられているが，これまでの経験では，腐食が燃料の寿命の制限因子とはなっていない。日立製作所では，腐食の実態をよりよく把握するために，各種データの蓄積を行なうとともに，高燃焼度化時での信頼性確保のため材料の改良を行なっている。

今回新たに開発した方法は，被覆管の製造工程中の素管と呼ばれる段階で材料に特殊な熱処理を加え，その後最終製品まで加工と焼なましを特定の条件で行なうものである。この方法によって耐食性が優れ，かつ被覆管として必要な他の諸性質は現用品と同等の試作品が得られている。炉外での加速腐食試験の結果を**図6**に示す。現用品に比べて試作品は腐食量が少なく，また製品の間の腐食量のばらつきが少ない。

現在これらの結果を踏まえて，実機への適用を評価，検討中である。

(2)　PCI

燃料が急激な出力上昇を受けた場合，PCI損傷が生じることが知られている。

この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。このタイプの損傷は，現在のＢＷＲではPCIOMR(ならし運転法)を適用することにより解決されている[2]。更に，このPCIOMRを不要とし自由な出力変化を可能とする高性能燃料を開発しており，高性能燃料は高燃焼度下の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

高燃焼度での核分裂生成ガスの放出は，燃料棒の内圧，ペレットと被覆管の間のギャップ熱伝達に影響するので，燃料棒の設計上重要な評価項目である。特に，高燃焼度ではデータにかなりのばらつきが見られる。当面核分裂生成ガスの放出が寿命を制限するとは考えられないが，将来，より高い燃焼度を目指す場合も考慮し，ばらつきの原因究明あるいは対策を検討しておくことが望ましい。

日立製作所ではBNWL(バッテルノースウエスト研究所)主催の高燃焼度時効果プログラム，RISO国立研究所主催の過渡時FP放出プログラムなどの国際プロジェクトに参加するな

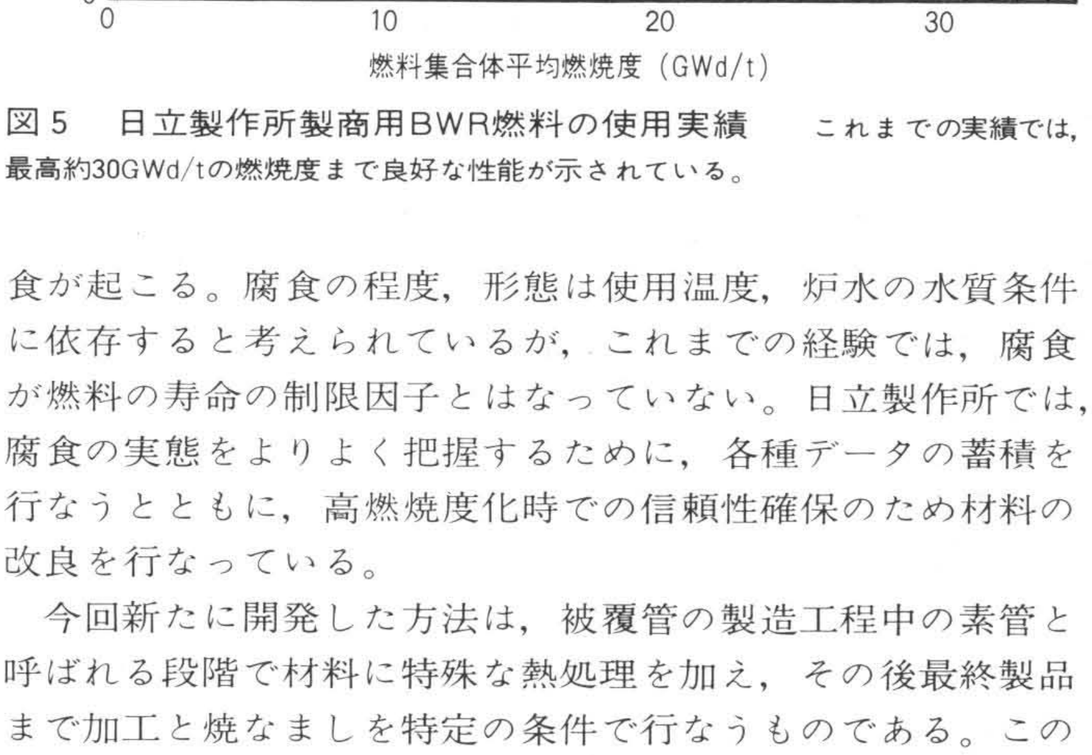
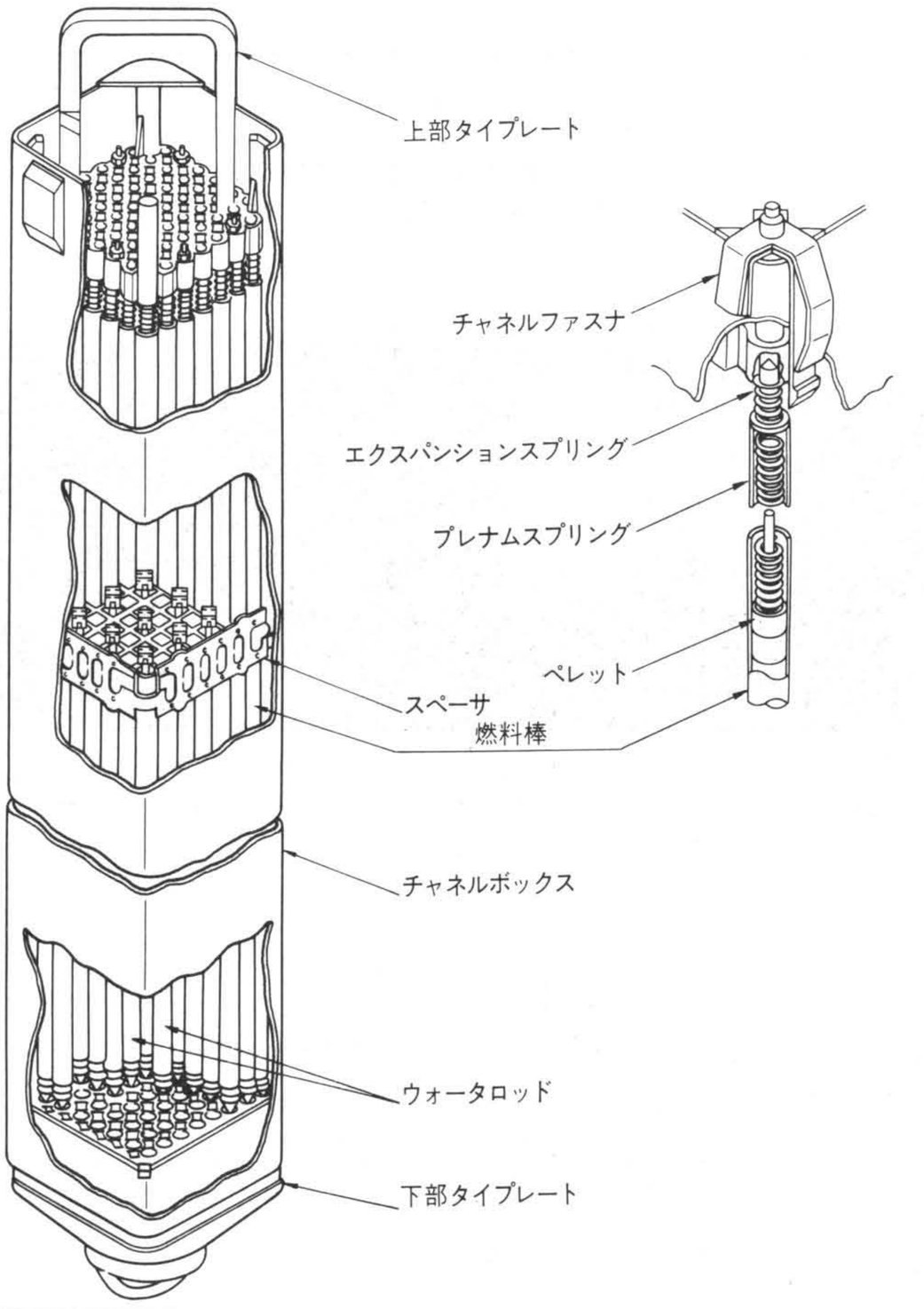


図5　日立製作所製商用BWR燃料の使用実績　これまでの実績では，最高約30GWd/tの燃焼度まで良好な性能が示されている。



項　目	主要諸元	項　目	主要諸元
燃料棒外径	12.3mm	ペレット外径	10.3mm
被覆管肉厚	0.86mm	燃料棒本数	62本
燃料有効長さ	3.66～3.71m	スペーサ個数	7個

図4　BWR新型8×8燃料集合体の構造　燃料集合体は，62本の燃料棒と2本のウォータロッドから構成される燃料バンドルと，それを囲むチャネルボックスから成る。

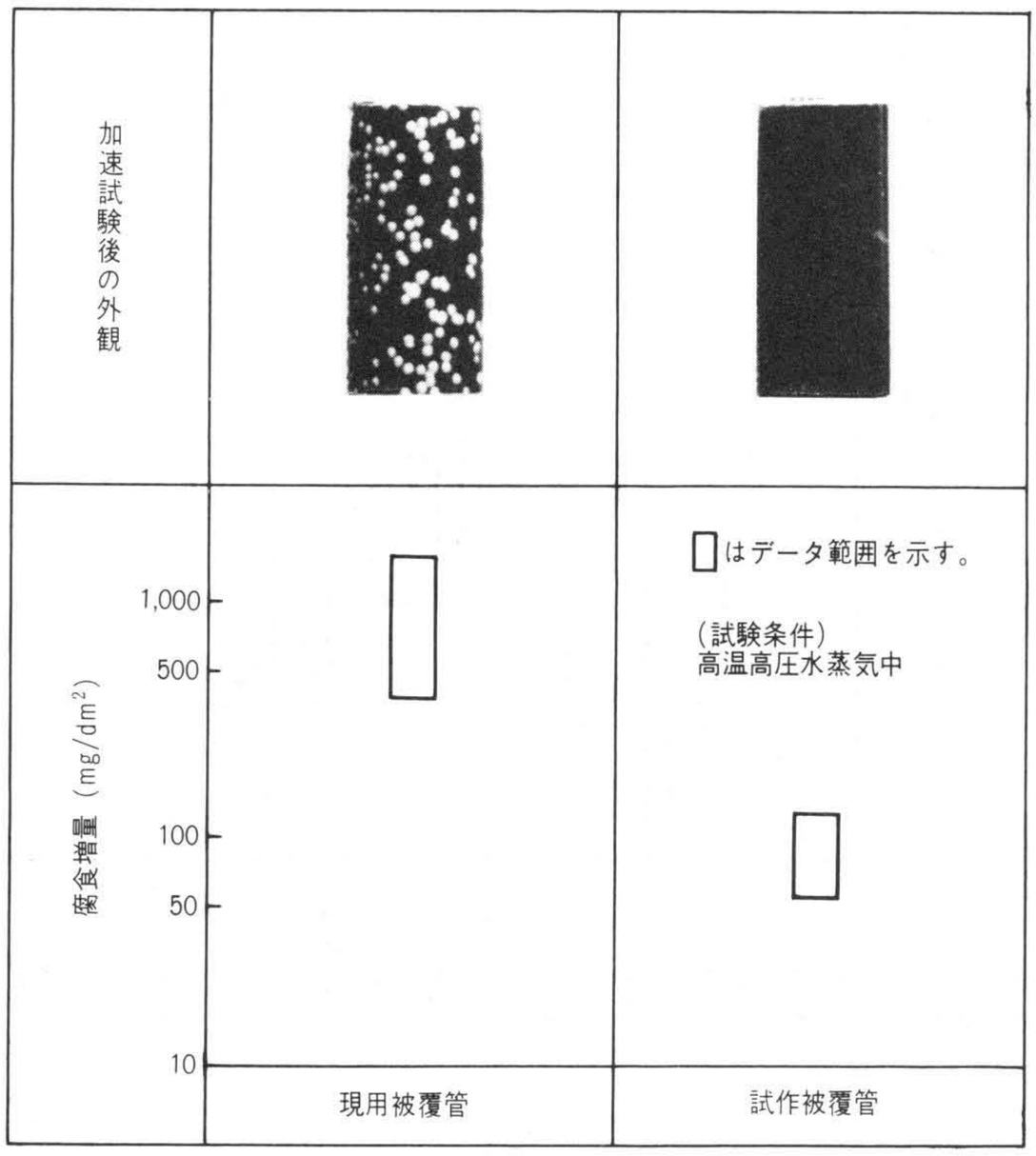


図6 高耐食性ジルカロイ被覆管の炉外加速腐食試験結果 特殊熱処理を施した被覆管は，現用品に比較して腐食量が大幅に減少している。

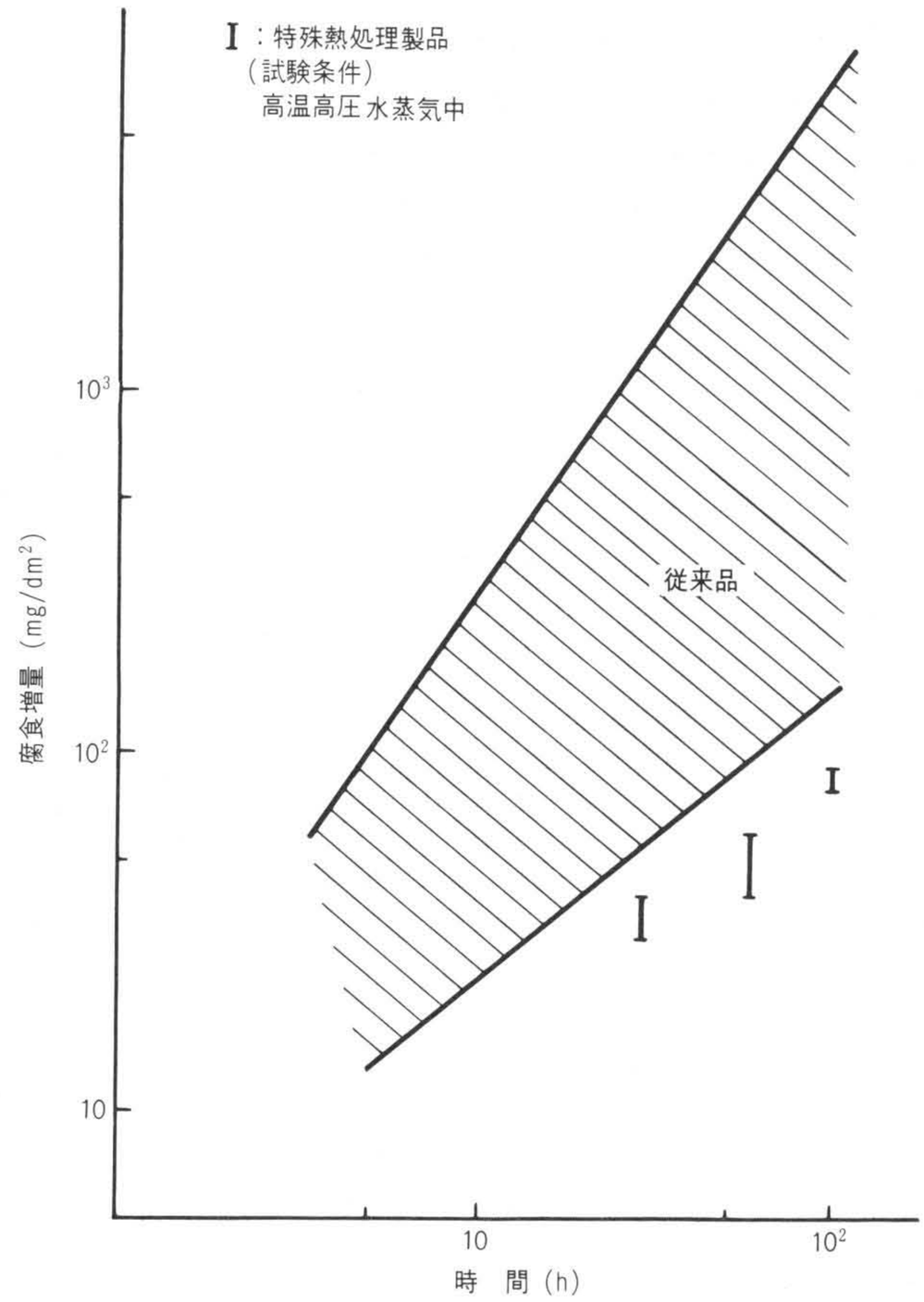


図7 チャネルボックスの炉外加速腐食試験結果 特殊熱処理を施したチャネルボックスは，炉外試験で従来品の約$\frac{1}{5}$の腐食量である。

どして，データの蓄積を図っている。

(4) 燃料棒の照射伸びなど

高燃焼度化時の他の考慮因子としては，燃料棒の照射伸びやスペーサの燃料棒保持ばねの緩みなど燃料集合体の構造寸法の安定性にかかわるものがある。これらについては，集合体の設計上の配慮によって対応できるものと考えているが，今後ともデータの蓄積，評価を行なってゆく。

3.3 チャネルボックス

チャネルボックスの使用実績が多くなるに従い，その表面腐食に差があることが明らかとなっている。腐食の程度は現行の使用範囲で問題となるものではないが，燃焼度の増加や使用済みチャネルボックス廃棄物量の削減を目的とした2バンドルライフ使用(燃料とともに使用済みとするのではなく，再び新燃料に装着して再使用する。)といった長期間使用の場合については，更に耐食性を向上させておくことが望ましい。このようなニーズに対応して，日立製作所では耐食性を向上させた特殊熱処理チャネルボックスの開発に着手し，基礎研究，炉外特性評価を実施して昭和56年には製造技術を確立した。特殊熱処理品の炉外加速腐食試験の結果を**図7**に示す。特殊熱処理品の腐食増量は従来品に比較して約$\frac{1}{5}$に低下している。**図8**に日立製作所製チャネルボックスの外観を示す。

特殊熱処理を施した製品は既に国内の3プラントに納入されており，いずれも良好な性能を示している。

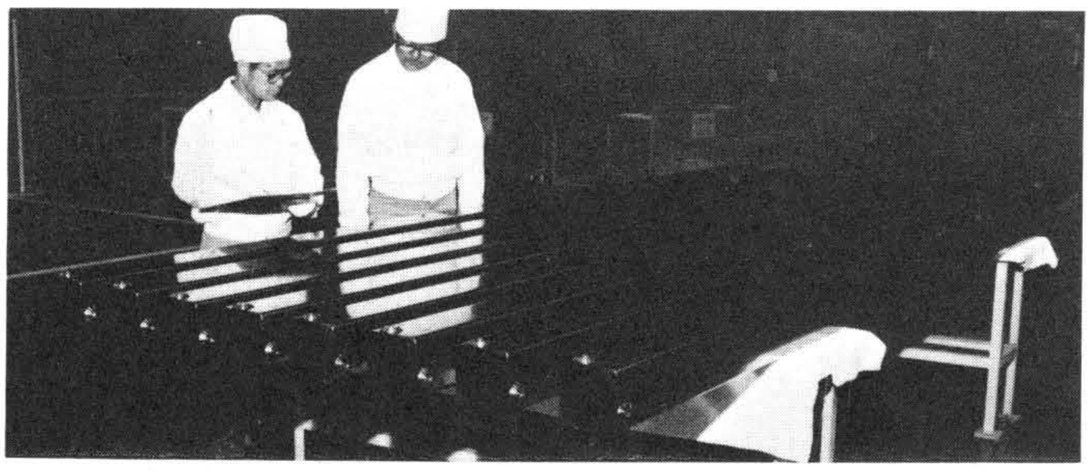


図8 燃料チャネルボックスの外観 既に国内3プラントに日立製作所製特殊熱処理チャネルボックスを供給しており，良好な性能を示している。

4 結 言

原子力発電の経済性向上の観点で，運転サイクルの長期化との組合せによる燃料の高燃焼度化の経済的メリットと燃料の性能にかかわる技術的側面について展望した。結論として次のようにまとめられる。

(1) 長期サイクル運転と高燃焼度燃料の組合せにより，軽水炉の経済性向上が期待される。

(2) 我が国での核燃料サイクルの方式と高燃焼度化などに関する調和のとれた方針決定が早期になされることが望まれる。

(3) 高燃焼度燃料の性能実証には長期間を要するので，将来に備えた技術開発を着実に推進する必要がある。

日立製作所では既に高性能燃料の開発，高耐食性被覆管及びチャネルボックスの開発などを進めてきており，今後ともよりいっそうの技術開発に努める考えである。

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) 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）