

山本 有紀  
Y. Yamamoto山本 徹  
T. Yamamoto吉田 博之  
H. Yoshida

炉心燃料の信頼性を十分確保しつつ燃料費や使用済燃料発生量を減らすために、沸騰水型原子炉(BWR)燃料の高燃焼度化を進めてきた。その第三段階であり平均燃焼度45 GW·d/tを達成する高燃焼度ステップIII燃料として、2本の太径ウォーターロッド、部分長燃料棒、丸セルスペーサー、低圧力損失上部タイプレート、高圧力損失下部タイプレート、高反応度型濃縮度ガドリニア分布設計などを特長とする9×9燃料を開発した。先行使用燃料の照射を1996年から開始する予定である。高燃焼度燃料の実用化に合わせて、初装荷燃料の燃焼度を増加するために濃縮度多種類初装荷炉心を開発し、4プラントに実用化してきた。

ここでは、使用済燃料を再処理して得られるプルトニウムと回収ウランをBWR燃料に利用する技術開発や、炉心運転管理を支援しプラントの稼働率を向上させる技術開発の実用化についても述べる。

We have developed a high-burn-up step-3 fuel which is designed to achieve a performance of 45 GW·d/t in the reload core and to reduce fuel costs and the amount of discharged bundles. This fuel is 9×9 lattice fuel with two large water rods, partial-length fuel rods, ferrule spacers, a low-pressure-drop upper tie-plate, a high-pressure-drop lower tie-plate, and optimized enrichment and gadolinia distribution for high reactivity. The lead use fuel assemblies are scheduled to be loaded and irradiated in 1996. We have also developed multi-enrichment initial cores with high-burn-up step-1 and step-2 fuel and commercialized them in four boiling water reactors (BWRs).

This paper describes advanced core management technology and the development of recycling fuels such as MOX fuel and reprocessed uranium fuel.

## まえがき

当社は、BWRの炉心燃料について、プラント計画段階の基本設計から詳細設計、初装荷燃料製造納入、起動試験、商用運転開始後の取替炉心燃料の設計、取替燃料の製造納入および各運転サイクルの炉心燃料の運転管理支援まで、一貫した総合技術を提供している。現在、13基のBWRプラントに燃料を納入しており、燃料納入体数は約23,000体となっている。

当社は、新規および既設プラントに適用する新しい炉心燃料を開発し、これを実用化してきている。以下に当社が注力している燃料・炉心技術について概要を説明する。

## 2 高燃焼度燃料

### 2.1 高燃焼度ステップI・II燃料の実績

燃料の高燃焼度化とは、燃料集合体当たり取り出す熱量を大きくすることを意味する。これにより、プラントの各サイクル当たりの取り替える燃料体数を減らすことができるので、プラントの燃料費を減らすことができ、同時に使用済燃料の

発生量を減らすことができる。

当社は、BWR燃料の高燃焼度化を、炉心燃料の信頼性を十分確保しながら行うため、段階的に進めることを計画し順次実用化してきた。表1に高燃焼度化の各ステップを示す。これらの高燃焼度化燃料に共通する特長はジルコニウムライナ燃料被覆管を使用し、燃料の信頼性を高めるとともに従来燃料に必要であった燃料のならし運転を不要にしていることである。ステップI燃料は1987年から実用化しており、約7,100体を納入した。ステップII燃料は1991年から実用化しており、現在までに約4,600体を納入した。当社が燃料を納

表1. 高燃焼度燃料の概要

Outline of high-burn-up fuel

高燃焼度燃料	平均燃焼度 平均濃縮度	使用済燃料 低減目標	燃料経済性 向上目標	実用化
ステップI	33 GW·d/t 3.0 wt%	10%	10%	1987年
ステップII	39.5 GW·d/t 3.4 wt%	25%	20%	1991年
ステップIII	45 GW·d/t 3.7 wt%	33%	30%	1999年 (予定)

入しているプラントの炉心は、これらの高燃焼度燃料に置き替わっている。また、当社の納入する燃料は現在すべてステップII燃料である。

## 2.2 高燃焼度ステップIII燃料の実用化に向けて

現在実用化に向けて開発を進めているステップIII燃料では、集合体取出平均燃焼度  $45 \text{ GW} \cdot \text{d/t}$  (最大  $55 \text{ GW} \cdot \text{d/t}$ ) を達成することを目指している。高燃焼度化に伴う炉心・燃料特性への影響を緩和し、十分な信頼性を確保しつつより経済的にこの目標燃焼度を達成するため、これまでの  $8 \times 8$  格子燃料に換えて  $9 \times 9$  格子燃料を採用する。

### 2.2.1 設計の特長

ステップIII燃料の断面の模式図を図1に、燃料の外観を図2に示す。この燃料の特長を以下に示す。

- (1)  $9 \times 9$  燃料は燃料棒本数が増加するため燃料棒当たりの出力が減り、燃料健全性の余裕が大きくなる。一方、燃料棒の表面積が増加するため中性子経済が悪くなること、また燃料集合体での冷却材の流れが悪くなるなどの影響がある。これらの特徴を考慮し燃料棒直径、およびウォーターロッドなどの格子形状を最適化する。
- (2) 燃料棒7本分を占有する2本の太径ウォーターロッドを

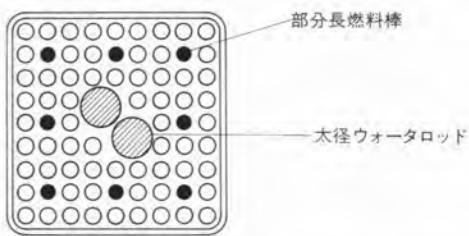


図1. 高燃焼度ステップIII燃料の断面　太径ウォーターロッド、部分長燃料棒、丸セルスペーサなどを特長とする  $9 \times 9$  格子燃料。

Concept of high-burn-up step-3 fuel



図2. 高燃焼度ステップIII燃料　取出平均燃焼度  $45 \text{ GW} \cdot \text{d/t}$  を達成し燃料費と使用済燃料発生量を減らす。

High-burn-up step-3 fuel

採用し集合体の水対燃料比を最適化する。

- (3) 通常燃料の約  $2/3$  の長さの8本の部分長燃料棒を配置し、集合体の上部で冷却材が流れやすくする。また、燃料上部での冷却材が増えるので炉停止余裕が増加する。
- (4)  $9 \times 9$  格子用の丸セル型スペーサを採用し、燃料集合体の除熱の効率を表す燃料限界出力比の余裕を向上させる。
- (5) 燃料の上部タイプレートは、部分長燃料棒に相当する位置の部材を除いてステップII燃料よりも流路面積を大きくし冷却材を流れやすくする。
- (6) 燃料下部のタイプレートは逆に流路面積を小さくして高圧損失化し炉心の熱水力安定性を改善するとともに、燃料破損の原因となる異物が集合体内に入りにくくする。これらの燃料の構造設計を採用したことにより、高燃焼度化した炉心燃料でも燃料の線出力密度、限界出力比、炉心・チャネル安定性、炉停止余裕などの運転制限値に対する余裕を十分確保することができる。

燃料棒に詰める濃縮ウランと可燃性毒物のガドリニアの分布については、ジルコニウムライナ燃料の特性を生かし、より少ない濃縮度の増加で目標燃焼度を達成するよう濃縮度とガドリニア分布を最適化している。

### 2.2.2 先行使用燃料

ステップIII燃料を本格利用する前に、電力会社の協力を得て少数体の先行使用を行うことになっている。今年中に先行使用燃料の製造を完了し、来年から実炉にて照射を開始する予定である。

### 2.3 初装荷燃料の取出燃焼度の向上

当社は、新規プラントの初装荷燃料の高燃焼度化の開発に積極的に取り組んできている。高燃焼度ステップI燃料の実用化に合わせて、濃縮度多種類初装荷炉心 (MEC: Multi-Enrichment initial Core) を開発し実用化した。この炉心は取替炉心の平衡サイクルを模擬して、初装荷炉心を低、中、高の濃縮度の異なる集合体により構成する。低濃縮度燃料は平衡サイクルで2サイクル以上燃焼し反応度がもっとも減少した燃料を、中濃縮度燃料は1サイクル燃焼した燃料を、高濃縮度燃料は新燃料を模擬し、もっとも低い濃縮度の燃料から順番に取り出すことにより、初装荷燃料の燃焼効率が向上する。

当社は、この炉心をさらに発展させた改良型濃縮度多種類初装荷炉心 (IMEC: Improved Multi-Enrichment initial Core) を開発した。上述の MEC は、平衡サイクル炉心では最外周に燃焼の進んだ低反応度の燃料を配置していることを模擬して、もっとも低い濃縮度の燃料を配置している。これに対して IMEC では最高濃縮度燃料を炉心最外周を含む炉心外周に多く装荷する。この効果を以下に示す。

- (1) 低濃縮度燃料を炉心中央部に配置するので第一サイクルでの燃焼が進み、この燃料の取出燃焼度が増加する。
- (2) 高濃縮度燃料を第三サイクル以降に取り出すが、第一サイクルで最外周に配置するので燃焼が進まず反応度を

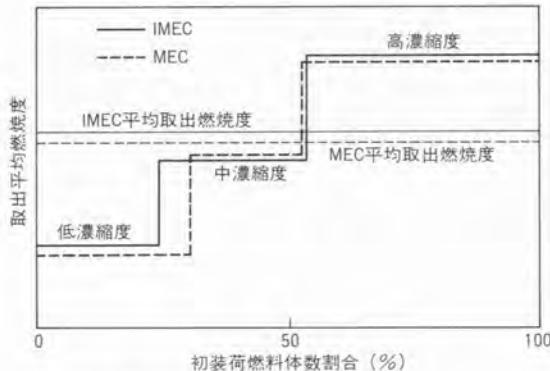


図3. IMECとMECの初装荷燃料取出燃焼度の比較 IMECでは高濃縮度燃料を炉心外周に多く装荷することにより初装荷燃料の取出燃焼度を増加する。

Comparison of discharge exposure of initial fuel between IMEC and MEC with same core average enrichment

第二サイクル以降に持ち越すので、第二、第三サイクルでの燃焼が進むことから、最終的に取り出すときの燃焼度が増加する。図3に平均濃縮度が同じMECとIMECの取出燃焼度の比較例を示す。IMECではMECより初装荷燃料の燃焼度が約5%高く、燃料費が5%低い。

(3) 第一サイクルで反応度の高い高濃縮度燃料を最外周に配置するので初装荷炉心の半径方向の出力分布が平坦化し、燃料棒線出力密度や限界出力比などの運転制限値の余裕が増加し運転がしやすい。また、初装荷炉心の濃縮度を上げやすい。

当社は、前記のMECを2基、IMECを2基のプラントで実用化しており、表2に実用化したプラントの炉心燃料の概要を示す。図4に825MWe級プラントに適用したIMEC炉心の燃料の配置設計例を示す。このプラントの燃料は初装荷・取替燃料ともに高燃焼度ステップII燃料であり、初装荷・取替燃料ともに従来燃料で濃縮度一様の初装荷炉心設計に比べ約50%初装荷燃料の燃焼度が増加する。

表2. 高燃焼度燃料を採用した濃縮度多種類初装荷炉心  
Multi-enrichment initial cores with high-burn-up fuel

プラント出力(MWe)	燃料タイプ	燃料濃縮度(wt%)	炉心配置	実用化(年)
1,100	ステップI	1.3/2.4/3.0	MEC	1990
1,137	ステップI	1.2/2.0/3.0	IMEC	1993
1,100	ステップII	1.2/2.3/3.4	MEC	1993
825	ステップII	1.2/2.2/3.5	IMEC	1995

### 3 リサイクル燃料

BWRで例えば30GW·d/tまで燃焼し取り出した燃料にはU235が0.8wt%残っており、核分裂性プルトニウム(プルトニウム同位体のうち熱中性子により核分裂を生ずるPu239と

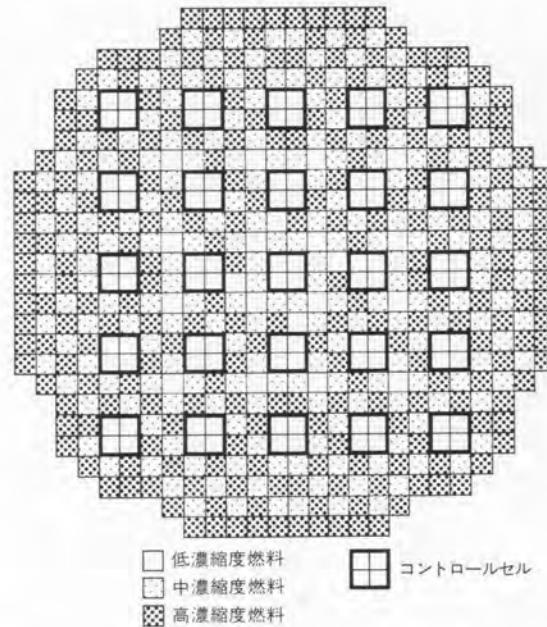


図4. 825MWe BWRの改良型濃縮度多種類初装荷炉心 濃縮度の異なる3種類の燃料で初装荷炉心を構成することにより、初装荷燃料の燃焼度を向上する。

Improved multi-enrichment initial core design for 825 MWe BWR

Pu241)が0.5wt%生成されている。これらをBWRで有効に使用することはウラン資源の節約上重要である。当社はこれらのリサイクル燃料の開発にも積極的に取り組んでいる。

#### 3.1 MOX燃料

MOX(Mixed OXide fuel)燃料はプルトニウムとウランの混合酸化物燃料であるが、2体を1986年から1989年にかけて電力会社の協力を得て国内プラントで照射する実証試験を完了し、MOX燃料の炉心設計、運転中のデータ評価および取り出し後の照射試験を通じて、MOX燃料の核特性や照射挙動がウラン燃料と同等であることを確認した。

現在、欧州に再処理を委託した燃料から得られるプルトニウムを利用したMOX燃料を、国内のBWRで炉心の1/4から1/3装荷する本格利用に向けた準備を進めている。図5に1,100MWe級BWR炉心に1/3まで装荷するMOX燃料の設



図5. 1,100MWe級BWRプラント用MOX燃料設計例 ガドリニア入り燃料棒以外をMOX燃料棒として集合体当たりのプルトニウム量を多くする。

MOX fuel design for 1,100 MWe BWR plant

計例を示す。この設計では、炉心に同時に装荷する通常のウラン燃料との共存性を図るために前述の高燃焼度ステップII燃料と同一の燃料構造設計としている。また、ガドリニア入り燃料棒以外は MOX 燃料棒とし、燃料集合体当たりのプルトニウム装荷量を多くし、MOX 燃料の加工および輸送体数を減らすことや MOX 燃料棒中のプルトニウムの重量率(富化度)の種類を少なくするくふうにより、より経済的な設計としている。これを装荷した炉心では MOX 燃料として核分裂性プルトニウムを約 1.5t 装荷し、有効に燃焼できる。また、燃料・炉心解析により通常のウラン燃料炉心と同等の余裕をもつ運転が可能であることを確認している。

これらの燃料・炉心の技術に加え、当社は電力会社からの委託研究などにより、欧州での MOX 燃料の加工、輸送、国内への受け入れ、発電所での取扱いおよび検査など、MOX 燃料の全分野にわたり技術を蓄積している。

### 3.2 回収ウラン燃料

回収ウランの利用では、これを再濃縮し通常ウラン燃料と同等の反応度特性をもたせた燃料を開発し、電力会社の協力を得て少数体実証試験用として 784 MWe プラント用に 4 体納入し、1987 年から 1991 年まで炉心に装荷し順調に運転した。また中規模での利用としてさらに 1,100 MWe プラント用に 24 体を納入し 1994 年から照射を開始した。回収ウランには微量ではあるが U232 が含まれ燃料の放射線量が通常ウラン燃料より高いこと、U236 が含まれ中性子経済が悪くなるなどの特徴があるが、上述の納入経験を通して燃料の加工、輸送、燃料設計など総合的な技術を蓄積した。この経験を生かして今後の回収ウランの本格利用として、東海再処理工場や海外に委託した再処理から生ずる回収ウランの利用について電力会社とともに取り組んでいる。

## 4 炉心運転管理支援技術

当社は、電力会社の炉心運転管理を支援する技術サービスの分野で 1974 年以来経験を重ね、現在まで 13 プラント合計 109 サイクルの支援経験をもち、電力会社の良好な運転実績を支えている。この技術サービスは、①発電所運転計画に基づく取替炉心の燃料最適配置設計、②オンラインプロセス計算機の炉心性能計算用の定数作成と装荷、③原子炉起動、出力運転中の炉心反応度や出力調整のための制御棒運用計画、④運転実績評価、⑤燃料手配長期計画、燃料チャネル管理と制御棒取替計画などである。当社は、この支援サービスの中で特にプラントの稼働率を向上させるために、運転中の稼働率損失を減らすことや運転期間の長期化を含む柔軟な運転計画への対応の努力をしてきた。

当社が燃料を納入するプラントの炉心は、ステップ I, II 燃料により構成されている。これにより電力会社では燃料のならし運転が必要な燃料棒線出力密度しきい値の運用を従来

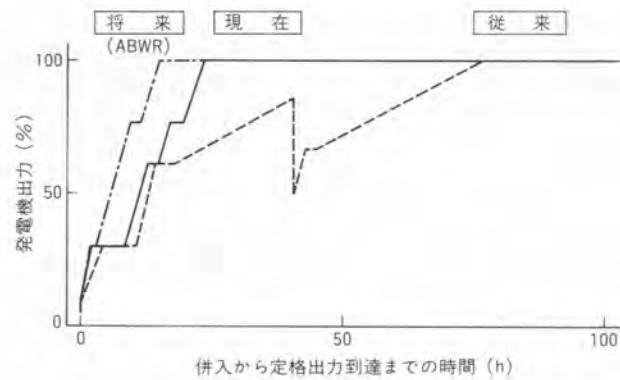


図 6. 起動時間の短縮 燃料のならし運転が必要な燃料棒出力のしきい値を上げることにより起動時間を短縮する。  
BWR quick start-up

の 26 kW/m から徐々にしきい値を廃止する方向に変更しつつある。当社はこの方針にそって、運転中の稼働率損失を最少化する炉心運転技術を開発してきた。その一つは原子炉の初起動の時間の短縮であり、図 6 に起動からの時間と出力の推移の例を示している。BQS (BWR Quick Start) と呼ぶ 24 時間程度での起動の実績を現在までに 7 回経験している。また、炉心の反応度変化を補償する制御棒挿入量の調整を従来炉心では出力を下げて行っていたが、最近では負荷損失を伴わない手法を導入しつつある。これらの運用により、高燃焼度ステップII燃料を初装荷燃料として採用したプラントの起動試験後の第一サイクルで、99.8% の運転中稼働率を達成した。

## 5 あとがき

以上、高燃焼度燃料、リサイクル燃料および炉心運転管理支援技術について述べた。当社は、今後もさらなる高燃焼度化、運転余裕の大きい炉心、高出力密度炉心など時代のニーズにこたえる燃料・炉心の技術開発や、これを支える高精度の評価解析技術の開発を積極的に進めていく。

山本 有紀 Yuki Yamamoto

1971 年入社。BWR 原子力発電プラントの炉心燃料開発設計に従事。現在、原子力事業部原子炉設計部部長。  
Nuclear Energy Div.

山本 徹 Toru Yamamoto, D.Eng.

1979 年入社。BWR 原子力発電プラントの炉心燃料開発設計に従事。現在、原子力事業部原子炉設計部部長附、工博。  
Nuclear Energy Div.

吉田 博之 Hiroyuki Yoshida

1975 年入社。BWR 原子力発電プラントの炉心燃料開発設計に従事。現在、原子力事業部原子炉設計部課長。  
Nuclear Energy Div.