BWR 高燃焼 度炉 心燃料の 開発と 適用 **Development and Application of High Burnup BWR Core and Fuel**

日立製作所は、原子力発電の信頼性向上と経済性向上のニーズにこたえるべ く、炉心燃料の開発を進めてきた。近年特に、燃料サイクル費の低減などによ る経済性向上のニーズが大きくなっているが、このニーズにこたえるため、原 子力の研究開始当初から蓄積してきたBWR炉心燃料設計技術、燃料製造技術お よびそれらの評価技術を駆使し、使用実績を確認しながら段階的に高経済性炉 心燃料の開発,実用化を進めている。こうした種々の自主技術を用いた取り出 し燃焼度33 GWd/tを達成する高経済性ステップ I 燃料は昭和62年から実用装荷 を始め,経済性向上に役立っている。取り出し燃焼度約39 GWd/tに対応したス テップⅡ燃料は平成3年から実用化する予定であり、さらに取り出し燃焼度を 45 GWd/tと増加し、いっそうの経済性向上を目指したステップⅢ燃料について は先行使用、実用化の準備を進めている。

西村 章*	Akira Nishimura
安田哲郎*	Tetsurô Yasuda
別所泰典**	Yasunori Bessho
内川貞夫***	Sadao Uchikawa
毎原 肇*	Hajime Umehara
女 英夫**	Hideo Maki

緒 1

わが国で商業用軽水炉が運転を開始して以来,約20年が経 過した。この間,設計改良,品質管理など多方面にわたって 不断の努力を払った結果, 高い信頼性が確保できるようにな り、最近では国内BWR燃料の漏れはほとんどなくなっている。 一般に,原子力発電コストに占める燃料費の割合は,建設 費の償却以降,比較的大きくなる。そのため,軽水炉の設備 利用率の向上とともに燃料費、燃料サイクル費の低減、すな わち発電コスト低減、経済性向上の要求が近年しだいに大き くなっている。

高経済性炉心燃料は基本的に省ウラン技術と高燃焼度化技 術を組み合わせて、こうした経済性向上のニーズにこたえよ うとしたものである。このため日立製作所は図1に示すよう に高経済性炉心燃料の開発を進めてきた。

同図に示した高経済性炉心ステップ I 燃料*1)は取り出し平 均燃焼度33 GWd/tに対応するものであり、またステップⅡ燃 料*2)は、約39 GWd/tに、ステップⅢ燃料は45 GWd/tに対応 するものである。これらの燃料による燃料サイクル費につい ては,取り出し平均燃焼度29 GWd/t,ウラン濃縮度3.0 wt% の基準とする炉心燃料に比べ、それぞれ10%、20%、30%の

低減(以下,基準は同じ。)を目指している。

現在,これらの高経済性炉心燃料は運転経験などの実績を 踏まえながら、段階的、かつ計画的に実用化を図っている。 ここでは、こうした高経済性炉心燃料の開発状況、および 適用状況について説明する。

高経済性炉心燃料の開発と適用実績 2

高経済性炉心燃料は、上下2領域炉心燃料概念による日立 製作所独自の改良炉心燃料など,これまで数多く行ってきた 燃料信頼性向上策1)を基本に、さらに燃料経済性の向上を図る ものである。

高経済性炉心燃料で新たに取り入れたものは、ペレット被 覆管相互作用〔以下, PCI (Pellet Clad Interaction)と言う。〕 特性改善のために内面へジルコニウムを内張りし、熱処理に よって高い耐食性を確保した被覆管のほか,省ウラン技術と して熱中性子を有効に活用する濃縮度分布、改良ウォータロ ッド、新しい燃料格子などである。

高経済性炉心ステップ I 燃料は,昭和62年に実用装荷を始 めた。このステップI燃料を装荷した炉心は順調に運転を続 けており、燃料集合体平均燃焼度約24 GWd/tまでの実績を積 んでいる。

高経済性炉心ステップⅡ燃料は,平成元年,東京電力株式 会社福島第二原子力発電所2号機(以下,福島第二・2号機

47

※1) 新型8×8ジルコニウムライナ燃料と称している。 **※** 2) 高燃焼度8×8燃料と称している。

* 日立製作所 日立工場 ** 日立製作所 日立工場 工学博士 *** 日立製作所 エネルギー研究所 工学博士



注:略語説明など HICOF (Hitachi Core and Fuel Thermohydraulic Test Loop:日立燃料熱限界特性試験装置) BWR (Boiling Water Reactor: 沸騰水型原子炉) LUA (Lead Use Assembly: 先行使用燃料)

福島第二・2号機(東京電力株式会社 福島第二原子力発電所2号機)

高経済性炉心燃料の実用化計画 高経済性炉心燃料の実用化は、ステップⅠ、Ⅱ、Ⅲ燃料と段階的、かつ計画 \mathbb{X} | 的に進め、それぞれ10%、20%、30%の燃料サイクルコスト低減を目指している。

と言う。)で8体の先行使用を開始し、平成2年3月に照射第 1サイクルを終了している。この燃料集合体が健全であるこ とは照射後の原子炉サイトでの外観検査などによって確認し ている。

また,新しく9×9燃料格子を採用した高経済性炉心ステ ップⅢ燃料については開発を完了し,先行使用,実用化の準 備を進めている。

2.1 高経済性炉心ステップ I 燃料

48

高経済性炉心ステップ I 燃料は、ウラン平均濃縮度、燃料 構造や寸法などの仕様は従来燃料と同一とし、ジルコニウム ライナ燃料をベースに種々の省ウラン技術を取り入れて、従 来燃料の取り出し平均燃焼度29 GWd/tから取り出し平均燃焼 度33 GWd/tと高燃焼度化を図り、12か月連続運転で燃料サイ クル費10%低減を目標として、昭和60年までに開発を完了 した。

入っている。2サイクル目では全炉心の52%がステップ I 燃 料で構成され、3サイクル目では全炉心の79%がステップI 燃料で構成されている。この結果,従来燃料を用いた場合に 比べ、約10%の交換燃料体数の低減が実現できている(図3)。 これは燃料平均濃縮度が従来燃料と同一であるので、ほぼ同 程度の約10%の燃料サイクル費低減に対応している。

また,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。)では, 図4に示すように国内で 初めて全炉心にステップ I 燃料を装荷した2),3)。この炉心では, 上記ステップI燃料の効果のほかに, 平衡炉心を模擬した初 装荷多種類濃縮度(図5)の効果が加わっている。そのため、 取り出し燃焼度は約20%増加すると予想されている。

従来,初装荷炉心では,燃料取り出し時期が約3回にわた るのにもかかわらず単一種類濃縮度燃料を用いていたので, 取り出し燃料中の残留²³⁵Uが多く,平衡炉心に比べて濃縮度当

高経済性炉心ステップ I 燃料は、これまでに、図2に示す	たりの取り出し燃焼度が低かった。これを解消するために柏
ように燃料集合体平均燃焼度約24 GWd/tまでの実績を積んで	崎刈羽5号機では核燃料の濃縮度を平衡炉心での取り替え新
いる。	燃料,1サイクル燃焼燃料,2サイクル燃焼燃料にそれぞれ
福島第二・2号機では, ステップ I 燃料が実用装荷されて	対応づけることにより, 初装荷炉心燃料の濃縮度当たりの取
すでに2サイクル目の運転が終了し、3サイクル目の運転に	り出し燃焼度を平衡炉心と同等にした。



図 2 日立製作所製商用BWR燃料の積算使用実績 ステップ I 燃料は,福島第二・2号機をかわきりに約2,300体装荷され,燃料集合体平均燃焼度約24 GWd/tまでの実績を積んでいる。



300



図3 高経済性炉心ステップ I 燃料による取り替え燃料体数低減効果 ステップ I 燃料を用いた場合には,従来燃料に比べて約10%の交換燃 料数の低減が可能となる。 図4 柏崎刈羽5号機初装荷炉心の特徴 柏崎刈羽5号機では, 国内で最初に全炉心でステップI燃料が装荷された。

燃料取り出し時期に応じた濃縮度設定



/* xx /	

図5 取り出し燃焼度増大の原理 同型先行機の初装荷炉心では, 単一濃縮度を用いているために,第3回取り出し燃料の燃焼度が低い。 これに対し柏崎刈羽5号機では,取り出し時期に応じた濃縮度設定によ り第3回取り出し燃料の燃焼度が大きくとれ,初装荷燃料全数平均の燃 焼度が増大する。

49

1014 日立評論 VOL. 72 No. 10(1990-10)

このように高経済性炉心ステップ I 燃料が装荷されたプラントでは、順調に運転されている。

2.2 高経済性炉心ステップⅡ燃料

高経済性炉心ステップ II 燃料は,取り出し平均燃焼度約39 GWd/tを開発目標としている。このため,ステップ I 燃料で 適用した省ウラン技術および高耐食ジルコニウムライナ被覆 管を基本とし,高燃焼度化するための設計改良を新たに採用 して,経済性の向上を図った。

すなわち、構造上では、現行燃料ウォータロッド約6本に 相当する水領域を持つ太径ウォータロッドを採用し、高燃焼 度化のための濃縮度上昇にもかかわらず、核特性をこれまで の炉心と同等にし、経済性を向上させた。スペーサとしては、 熱水力特性を向上させるため、丸セル型スペーサを採用した。 このスペーサは、燃料棒を取り巻く円筒型のセルをつなぎ合 わせた構造とし、また、スペーサ側面には、フロータブを付 け、限界出力の向上を図っている。高経済性炉心では炉心流 量スペクトルシフト運転などに伴い、熱限界特性の余裕確保 が重要であり、この点を考慮してステップ II 燃料ではこうし た丸セル型スペーサの採用により、大幅な限界出力特性向上



をねらった。

燃料棒の設計としては、燃料温度および内圧の上昇を抑制 するために、初期へリウム加圧量やペレット密度の増加など の改良を施した。すなわち、燃焼とともにペレットから放出 される気体状の核分裂生成ガス〔以下、FPガス(Fission Products)と言う。〕は、ペレットと被覆管とのギャップの熱伝達係 数を低下させ、燃料温度を上昇させ、これはさらにFPガスの

50



図6 高経済性炉心ステップⅡ先行使用燃料(LUA)の運転実績 福島第二・2号機の第5サイクルから、ステップⅡ先行使用燃料が装 荷されている。





図7 高経済性炉心ステップⅡ先行使用燃料(LUA)装荷炉心での最小限界出力比 ステップⅡ燃料では 丸セル型スペーサが使用され,最小限界出力比はステップⅠ燃料と比べ約15%向上する。

BWR高燃焼度炉心燃料の開発と適用 1015



図8 高燃焼度燃料確証試験スケジュール 燃焼初期からの特性変化を追跡できるように、またウォータロッドなど新規部材の健全性を早期に 確認できるように、Iサイクル目から各10 GWd/tごとに照射後試験を行う。

放出を増し、内圧を上昇させる。このようなFPガス混合によるギャップ熱伝達係数の低下を防ぐために初期へリウム加圧

に見通しを得ること,および高燃焼度確証用燃料の設計改良 効果を明らかにして,燃料ふるまいに関するデータベースを

量を増加させた。また、ペレット密度を上げることによりペレットの熱伝導度が向上し、燃料温度を下げることができるので、ペレット密度を従来より増加させる設計とした。これらの改良により高経済性炉心ステップII燃料では、燃焼度が増加するものの、使用中の燃料温度や使用末期の燃料棒内圧は従来の燃料設計より改善できた。

この高経済性炉心ステップ II 燃料の先行使用燃料集合体〔以 下, LUA(Lead Use Assembly)と言う。〕8体は, 財団法人 原子力工学試験センターによる「高燃焼度等燃料確証試験」 の一環として、平成元年1月から福島第二・2号機で照射が 開始され(図6), 燃料集合体燃焼度50 GWd/tまで燃焼させる 予定である。照射第1サイクルの運転実績として,最小限界 出力比は, 丸セル型スペーサの採用により, 図7に示すよう にステップⅠ燃料に比べ約15%と大幅に向上し、ステップⅡ 燃料の熱的余裕改善効果が実績として得られている。本確証 試験ではLUAを高燃焼度確証用燃料集合体として燃焼初期か ら1サイクルごとに1体ずつ原子炉から取り出し、日本核燃 料開発株式会社(以下,NFDと言う。)で照射後試験を行い, 燃料のふるまいを詳細に確証する計画である。確証試験のス ケジュールを図8に示す。照射第1サイクルは平成2年3月 に終了し,終了時に原子炉サイトで外観検査などを行い,燃 料集合体が健全であることを確認した。高燃焼度確証用燃料 集合体8体中1体の照射第1サイクルを終えた燃料集合体は 本年末以降,NFDで詳細な照射後試験に供される予定であり, 残り7体は継続して照射している。 高燃焼度確証用燃料の照射後試験に先立ち、比較的高燃焼 度まで使用した従来燃料の健全性に対する裕度について早期

充実することを目的に、8×8型燃料集合体2体を対象に NFDホットラボ試験施設で照射後試験を実施した。これらの 燃料は、中国電力株式会社島根原子力発電所1号機で、原子 炉運転5サイクルの間に通常の燃料として燃焼され、集合体 平均30 GWd/tの燃焼度に達したものである。照射後試験では、





51

日立評論 VOL. 72 No. 10(1990-10) 1016

従来行われてきた被覆管外面腐食量やFPガス放出量などの測 定はもちろんのこと、さらに高燃焼度での燃料の照射挙動を より詳細に調べるために、測定技術の高度化を図った高分解 能透過型電子顕微鏡など新たに導入した装置類を用いた。

透過型電子顕微鏡によって照射済みのジルカロイ-2 製被覆 管の金属組織中の析出物を観察した例を図9に示す。ジルカ ロイ-2には合金元素であるFeとCrまたはNiから成る微小な 析出物が存在するが,照射前後の材料を観察した結果,照射 によってFeなどの合金元素が析出物から金属マトリックスに 移動し再固溶する現象がみられた。一方、照射後のジルカロ イ-2被覆管材を照射前の材料とともに炉外加速腐食試験に供 して耐食性を調べたところ、照射によって耐食性が改善して いることが確かめられた。上記の照射による合金元素の再固 溶現象と炉外加速腐食試験の結果は、ジルカロイ-2の耐食性 はFeなど合金元素が金属マトリックス中に多く固溶するほど 良好になるという知見と一致しており、ジルカロイ-2の耐食 性に関する知見を拡充することができた。これら照射後試験 の結果,当該燃料集合体の健全性に対する裕度が確認され, 同時に今後の高燃焼度確証用燃料の照射後試験に対する対比



高経済性ステップⅢ燃料の最適化 ステップⅢ燃料では,燃 ×10 料経済性のほか、安定性、圧力損失の制限(斜線部は制限領域)の面から も最適化されている。

増やし燃料棒1本当たりの熱負荷線出力密度を減らし、燃料

データが整備された。これらの成果を今後の照射後試験に反 映する予定である。

日本ニュークリア・フュエル株式会社(以下, JNFと言う。) では、上記LUA製造に向けて確立した燃料製造基礎技術をベ ースに,量産対応の技術開発を終了し,ステップⅡ燃料量産 に向けて万全の準備をしている。丸セル型スペーサについて は、円筒(丸)セル、スプリングなど高い精度が要求される部 品を自動プレス設備で均質かつ連続的に製造する技術を開発 するとともに,新設計への対応および溶接部品質の安定化の ため、新たにスペーサ組立溶接装置を開発、導入している。 また、燃料棒溶接部の検査工程では、端栓形状の設計改良と 合わせて自動検査装置を開発,導入し,溶接部検査の信頼性 を向上している。これらの製造検査技術に加え、燃料ペレッ ト自動外観検査装置,燃料集合体ソフト組立装置などの高度 の製造設備が先行して順調な稼動を続けており、JNFでは信 頼性の高い燃料製造検査体制が確立している。

国内でのステップⅡ燃料実規模装荷のための設置変更許可 は、柏崎刈羽サイトについて平成元年7月に申請され、平成 2年7月に許可された。今後,設計認可,工事認可,成型加 工と続き、平成4年には柏崎刈羽第5号機などに、ステップ Ⅱ燃料が取り替え燃料として装荷され、以降の取り替え燃料 および初装荷燃料として順々に装荷される予定である。

2.3 高経済性炉心ステップⅢ燃料

52

の高燃焼度化に対応しやすくした。

また,熱水力特性を改善する対策として,高圧損型の下部 タイプレート,低圧損型の上部タイプレート,改良型丸セル 型スペーサ,水対燃料体積比を調整する太径ウォータロッド などの構造を採用した。特に、図10に示すように、ウォータ ロッド太さは,安定性,圧力損失特性,および燃料経済性の 面から最適となるようにした。また、ステップⅢ燃料ではそ のほか、熱的余裕度などの熱水力特性についても現行燃料以 上に改善した。

このように、高経済性炉心ステップⅢ燃料では、ステップ I, Ⅱ燃料とは構造的にも変更されるため, 種々の解析コー ドによるパラメータサーベイはもちろんのこと、部材を試作 し, 試作品による種々の試験を行い, その特性を多角的に検 討した。例えば, 圧損を大幅に低減させることを設計上要求 される上部タイプレートは、圧損低減のために部材の肉厚な どを減らし、さらに構造的にも変更が余儀なくされる。これ に対し、図11に示すように、有限要素モデルにより、想定さ れる使用条件下での強度解析を行い,最適な構造を決め,そ れに基づき実機相当の上部タイプレートを試作し,強度試験 によって解析結果の妥当性を確認した。このように大幅な構 造変更がある場合には、各部材やその一部を取り出した要素 について解析および試験を行い、設計の妥当性を確認しなが ら, 設計を完成させるという考え方に基づき, 圧力損失試験, 機械強度試験,耐震試験,材料試験を含む要素開発試験など を行い, 各要素の特性を詳細に評価した。これらの結果から, ほぼ目標の圧力損失を得,安定性上良好なことを,また強度, 耐震,材料の特性面で信頼性が高いことを確認した。

高経済性炉心ステップⅢ燃料は、取り出し平均燃焼度45 GWd/tに対応でき、ステップⅡ燃料に比べ、燃料サイクル費 をさらに低減させたものである。

このステップⅢ燃料では、9×9格子として燃料棒本数を

53



図11 上部タイプレート構造強度解析 上部タイプレートの取り扱い時の応力分布を有限要素法で解析し, 圧力損 失低減のための構造変更や部材薄肉化の強度上の影響を評価した。従来の上部タイプレートと同等の強度を持ち、大幅に 圧力損失が低減する構造となることを確認した。



ステップⅢ燃料集合体 下部タイプレート

図12 ステップⅢ燃料集合体の概要 8×8から9×9へと格子構造を変えても炉心 チャネル安定性が保たれるよう、高圧損型下部タイプレート、超低圧損型上部タイプレ ートなどを採用するとともに,太径ウォータロッドを組み込み水対ウラン比の改善を図っ ている。また、ステップⅡ燃料と同様、限界出力特性を大幅に改善した丸セル型スペーサ を採用している。

1018 日立評論 VOL. 72 No. 10(1990-10)

さらに、燃料熱限界特性試験装置HICOF(Hitachi Core and Fuel Thermohydraulic Test Loop)を用いて、実炉条件 での限界出力試験、圧力損失試験などの実証試験を行い、限 界出力はステップIと比べ17%向上し、圧力損失はほぼステ ップ1、II並みとなることも確認した。さらに、照射特性の 試験、燃料製造の品質向上のための試験なども実施し、燃料 体特性を総合的に確認した。

このようにして確立した高経済性炉心ステップⅢ燃料(図12) は、今後、先行使用燃料装荷によって炉外確証試験を実施し、 取り替え燃料としての実用化を予定している。

3 結 言

日立製作所は、燃料サイクル費の低減などによる経済性向 上のニーズにこたえるため、原子力の研究開始当初から、蓄 積してきたBWR炉心燃料設計、燃料製造およびそれらの評価 技術を駆使し,高経済性炉心燃料の開発を進めてきた。また, 開発では十分な検討と試験を行うとともに,商用炉での少数 体先行使用実証試験を重視してきた。

これらの背景のもとに,種々の自主技術を反映した高経済 性ステップI燃料は昭和62年から実用装荷に入り,順調な運 転を続け,経済性向上に役立っている。高経済性ステップII 燃料は平成3年から実用化する予定であり,また高経済性ス テップII燃料については開発を完了し,先行使用,実用化の 準備を進めている。

参考文献

 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)
武藤,外:日本原子力学会1990年年会,D16,D17(1990-4)
同上

