

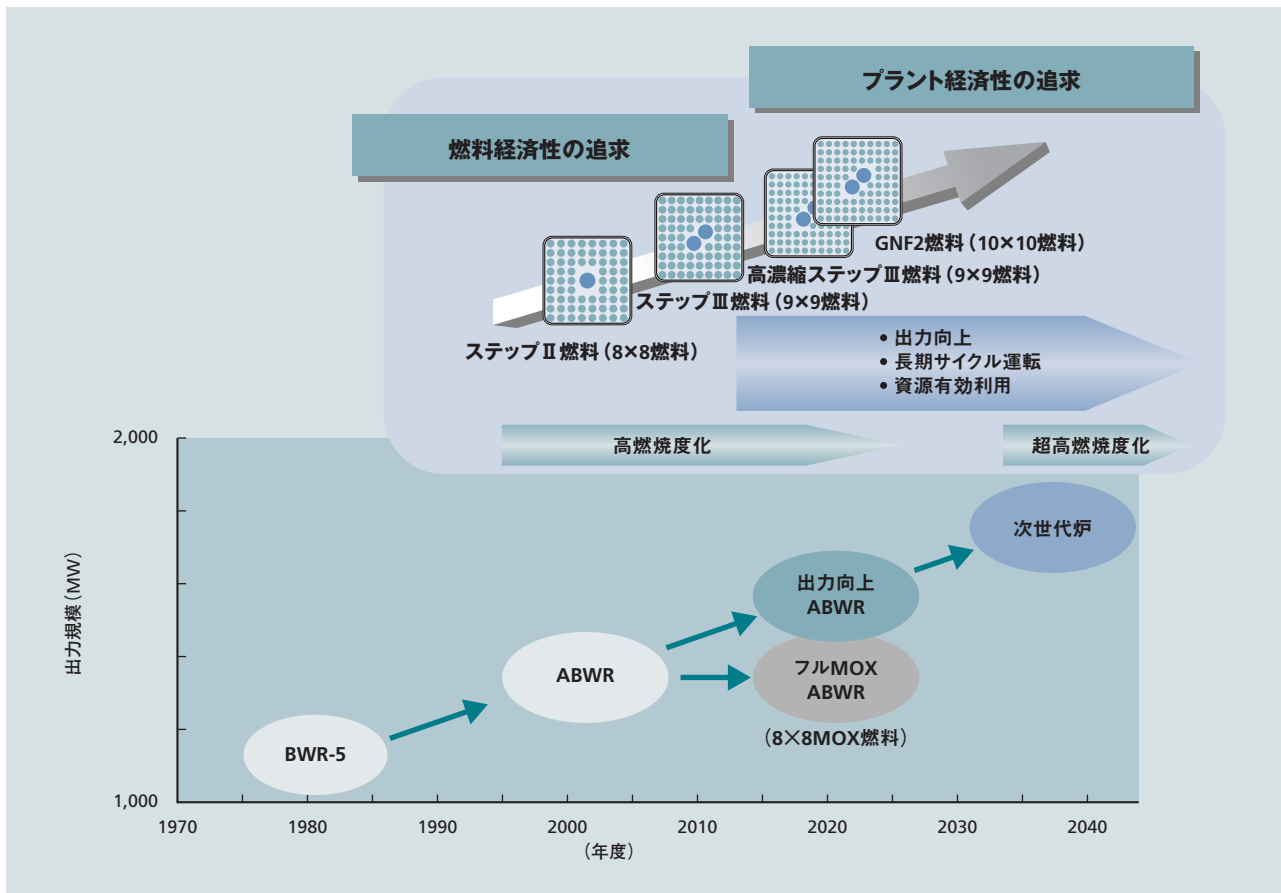
高経済性プラントの実現に向けた BWR炉心・燃料の高度化への取り組み

BWR Core and Fuel Development for Highly-economical Power Generation

曾根田 秀夫 Hideo Soneda

岩田 豊 Yutaka Iwata

戎家 三津雄 Mitsuo Ebisuya



注:略語説明 BWR(Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉), ABWR(Advanced BWR:改良型沸騰水型原子炉), MOX(Mixed Oxide:混合酸化物)

図1 次期燃料のイメージ

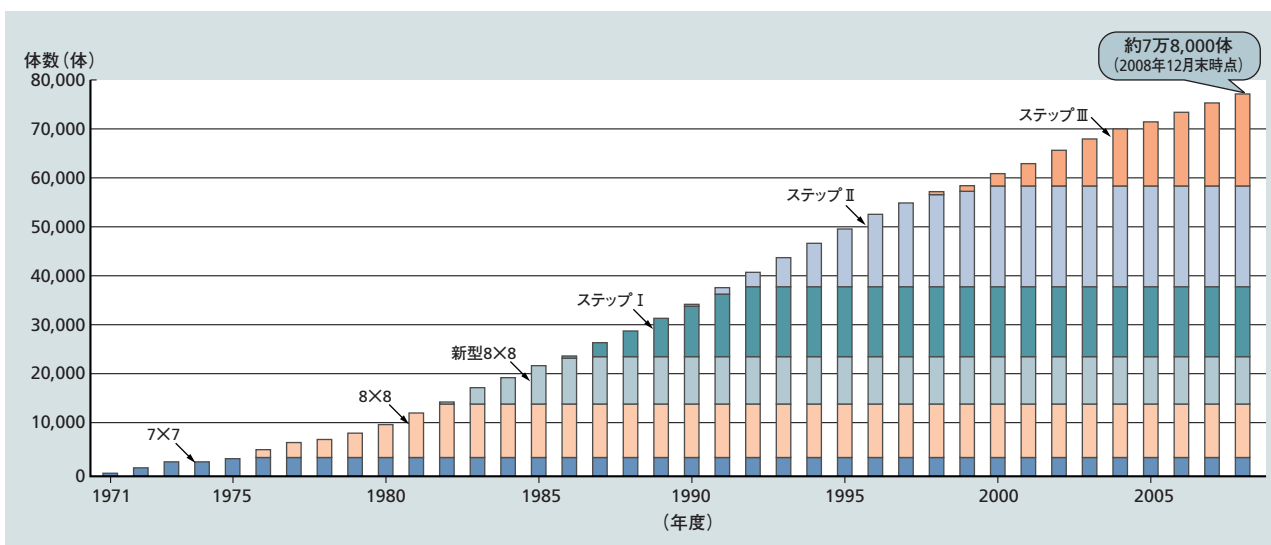
炉心・燃料は、燃料の信頼性向上、燃料経済性の追求をめざして開発されてきた。今後は長期サイクル運転、出力向上により、プラント経済性の追求を図っていく。現行のステップⅢ燃料の平均濃縮度を増加した高濃縮ステップⅢ燃料(9×9燃料)、さらには熱的余裕に優れ、出力向上と長期サイクルの両立に好適なGNF2燃料(10×10燃料)の国内導入をめざしている。

日立は、株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパンとともに、高経済性炉心・燃料ステップⅠ、Ⅱ、Ⅲ燃料を開発・導入し、燃料の信頼性向上と高性能化を図りながら段階的に高燃焼度化を推進してきた。また、省資源の観点からプルトニウムの有効活用が重要と考え、フルMOX-ABWR(全炉心混合酸化物燃料装荷可能な改良型沸騰水型原子炉)炉心の開発も行ってきた。

今後は、長期サイクル運転、出力向上によるプラント経済性の向上、さらにはいっそうの省資源を図るべく、これらに好適な炉心・燃料の導入と開発への取り組みを進めていく。

1. はじめに

日立は、原子力の開発に着手した当初から炉心・燃料技術は原子力の中核技術であると考え、精力的にその基礎技術開発に努めてきた。近年、原子力発電量の増加に従って、信頼性の高い高経済性炉心・燃料が要望され、燃焼度をそれぞれ約10%ずつ増加させた高経済性ステップⅠ、Ⅱ、Ⅲ燃料を製品化してきた。これに引き続き、現在はBWR(Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉)プラントの経済性向上として長期サイクル運転、大出力化、およびウラン資源の有効利用にかかわる取り組みについても改良を積み重ねるべき課題として取り上げ、長期的な開発を推進している(図1参照)。



注:略語説明 GNF-J(株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン)

図2 BWR燃料バンドルの累積製造体数(GNF-Jによる)

2008年12月末時点の累計で約7万8,000体の製造実績がある。

ここでは、これまでの炉心・燃料開発の経緯とともに、今後の高経済性プラントの実現に向けた炉心・燃料に関する取り組みについて述べる。

2. 炉心・燃料開発の経緯

2.1 燃料の信頼性向上と高性能化

国内では1970年以降、商用炉燃料が多量に使用され始めたのに従い、低い確率ながら燃料破損が生じた。破損の最大の原因であった「局部水素化」に対しては、燃料製造時の燃料棒内水分管理の強化などにより、完全に防止することができた。また、PCI(Pellet Clad Interaction:ペレットと被覆管の相互作用)に対しては、ならし運転法の適用や8×8燃料の採用による最大線出力密度の低減などの対策が施された。その結果、国内での燃料破損はさきわめて少ないものとすることができた。株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン(以下、GNF-Jと記す。)のBWR燃料バンドルの累積製造体数を図2に示す。これまでに約7万8,000体の製造実績があり、8×8燃料以降、約480万本の燃料棒について、製造欠陥による燃料破損0を達成している。

2.2 燃料経済性の向上

これまで省ウラン技術および高燃焼度化技術の開発を行い、使用実績を確認しながらステップI、II、IIIと段階的に高経済性炉心・燃料を開発して製品化を進めてきた。高経済性炉心・燃料の実用化時期と、燃料サイクル費および使用済燃料発生量の低減効果を図3に示す。

高経済性ステップI燃料は、出力ピーキングの活用や流量スペクトルシフト運転などの省ウラン技術を適用することによって、従来燃料と構造も濃縮度も同じままで燃焼度を高くして、

燃料サイクル費を約10%低減した。また、PCI対策と冷却水に対するジルコニウム合金の高耐食化技術をステップI燃料の被覆管に同時に適用した。

高経済性ステップII燃料は、燃料棒は8行8列(8×8)に60本を配している。ウォータロッドは、高燃焼度化のための濃縮度上昇に見合ってチャンネル内の水対燃料体積比を増加させるため、太径1本とした。また、燃料棒は、照射中の燃料温度および燃料棒内圧の上昇を抑制するために、初期ヘ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。

高経済性ステップIII燃料は、濃縮度増加とともにさらに高度な省ウラン技術および高燃焼度化技術を適用し、取出平均燃焼度を45 GWd/tとしている。

ステップIII燃料は、燃料棒を9行9列(9×9)に配して74本に

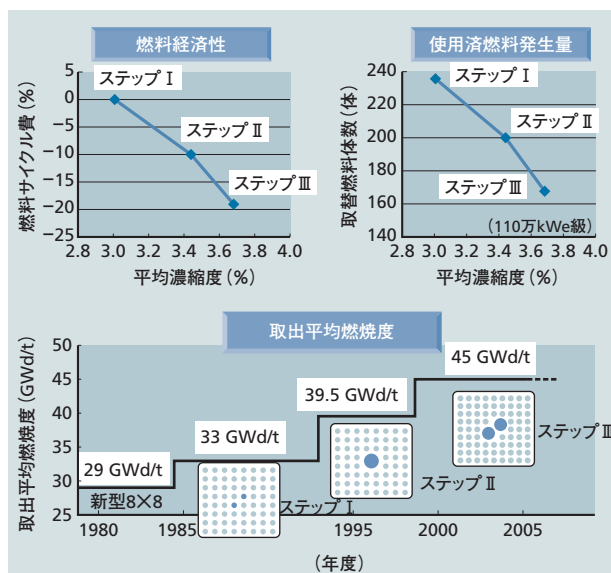


図3 段階的燃焼度の向上による燃料経済性の向上

段階的に燃焼度を向上させ、燃料サイクル費を低減する。

増加させ、平均線出力密度を低下させている。このうち8本の燃料棒は、圧力損失低減の観点から標準燃料棒の約 $\frac{2}{3}$ の長さの部分長燃料棒とし、下部タイプレートに固定している。燃料棒内の初期ヘリウム加圧量は、高燃焼度化に対応してステップII燃料よりさらに高めた。

ウォータロッドは、平均濃縮度の増加に対応して燃料棒7本分の領域に相当する2本で置換した。また、部分長燃料棒の採用などによる圧力損失低減の余裕分を下部タイプレート圧力損失に振り向け、ステップII燃料よりも単相圧損を増加させるとともに、燃料集合体の全圧力損失をステップII燃料と同等にして安定性の向上を図っている。

現在、国内で新たに使われるウラン燃料はすべてステップIII燃料であり、順調に使用実績を増やしている。

3. プラント経済性の向上への取り組み

これまで、燃料サイクル費の低減を段階的な高燃焼度化によって進めてきたが、現在の濃縮制限下では達成可能な取出平均燃焼度はほぼ上限となっている。今後は、プラント全体の総合的な経済性の向上、および資源の有効活用に好適な炉心・燃料を開発していくべきであると考え、GNF-Jとともに、長期運転サイクルによるプラント稼働率の向上、出力向上による大容量化に適した炉心・燃料の実現に取り組んでいる。

3.1 長期サイクル運転への対応

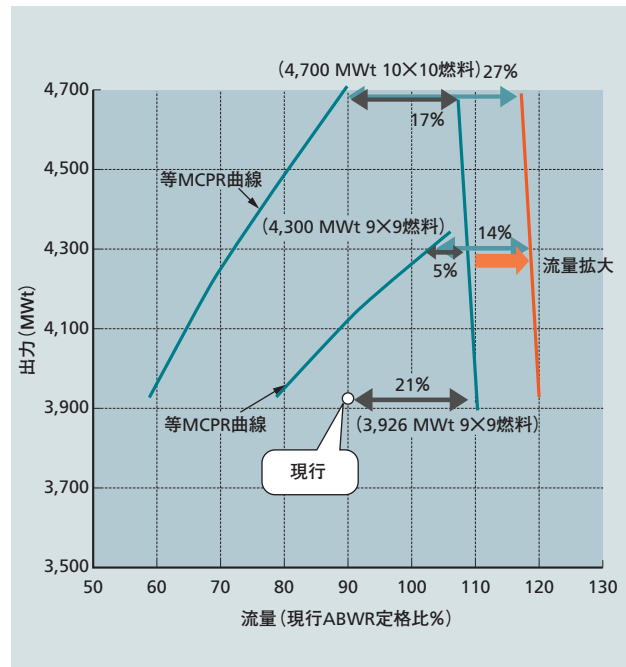
稼働率の向上による発電費の改善といったプラントを総合的に見た経済性追求の観点から、長期サイクル運転の検討が進められている。現在、軽水炉用燃料として使用可能な濃縮度には5重量%（以下、wt%と記す。）という制約がある。濃縮度上限付近の設計では、1サイクルの運転期間を長期化することは取出平均燃焼度を減少させることとなり、燃料サイクル費は増加する。しかし、長期サイクル運転による稼働率の向上が寄与する発電費の改善効果がこれに勝ると考えられるため、長期サイクル運転に適した燃料の設計を進めている。

具体的には、使用実績の豊富な現行のステップIII燃料の構造仕様をそのまま活用し、平均濃縮度をステップIII燃料より増加させた高濃縮ステップIII燃料を、2010年代前半の19か月運転、さらには24か月運転に適用すべく詳細設計を進めている。

さらに、長期サイクル運転に適した燃料として、後述するGNF2燃料（10×10燃料）の国内への早期導入を図るべく準備を進めている。

3.2 出力向上炉心への対応

長期サイクル運転とともに、発電量を増大してプラント経済性を向上する方法として出力向上が挙げられる。既設炉の場



注:略語説明 MCPR (Minimum Critical Power Ratio:最小限界出力比)

図4 ABWR出力向上炉心の成立性見直し

ステップIII燃料（9×9燃料）は、最大流量の拡大によって流量制御幅を確保できる。GNF2燃料（10×10燃料）は、流量制御幅を確保できる。

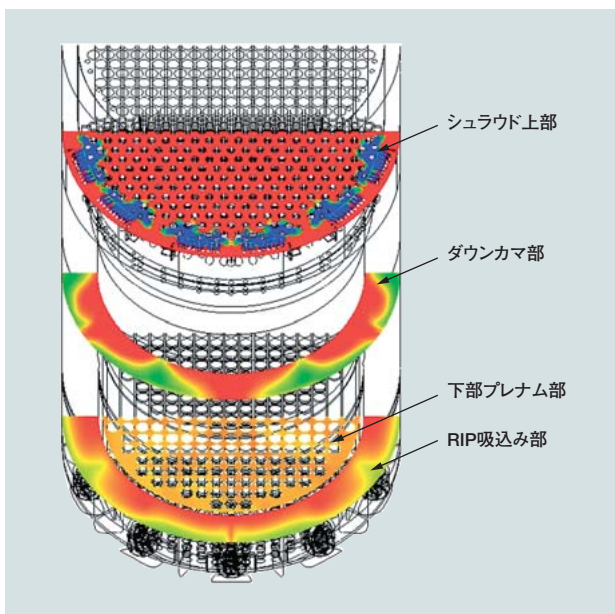
合、既存設備の運転余裕を活用した出力向上とともに、タービン・発電機のリプレースを行い、20%程度まで大幅に出力を向上させることが海外で行われている。国内でも今後、既設炉において段階的な出力向上の推進が検討されている。

出力向上では炉心の出力密度が増大することから、炉心・燃料の熱的余裕（最大線出力密度および最小限界出力比）の確保が課題となる。

10%の出力向上には、ステップIII燃料および高濃縮ステップIII燃料を適用することが可能である。この場合、最小限界出力比の余裕を現行出力炉心と同等に保持するとともに、炉心の運転性の観点から流量制御幅を可能な限り確保するためには、定格出力運転時の炉心流量範囲を高流量側にシフトした原子炉システム設計との組み合わせが好適である（図4参照）。

後述するフルMOX-ABWRは、開発を完了した定格出力時の最大炉心流量120%を実現する再循環ポンプシステムを適用している。これを出力向上ABWRに適用することで、流量制御幅の回復を図ることが可能である。また、ABWR以前のジェットポンプを採用しているプラント向けには、最大炉心流量の増大を期待でき、容易に取り替え改造が可能な高効率ジェットポンプの開発を進めている。最大線出力密度に関しては、炉心の出力分布を平坦（たん）化する設計の工夫を図ることで10%の出力向上に対応可能な見直しを得ている。

一方、20%の出力向上には、後述するGNF2燃料を適用することが可能である。この際、GNF2燃料の熱的余裕の改善効果を振り向けることにより、最大炉心流量を高流量側に



注:略語説明 RIP(Reactor Internal Pump:原子炉内蔵型再循環ポンプ)

図5 ABWR流動評価(温度分布例)

ダウンカムから下部プレナム部での流量の混合状況を三次元流動解析によって確認している。



図6 低圧損型セパレータの概念図(流線および出口との差圧)

ABWR実機条件を模擬した[水-蒸気(圧力:7.2 MPa, 流量:41.5 kg/s, クオリティ:14.5%)]イメージを示す。気水分離性能を確保しつつ、圧力損失を低減するために、旋回羽根の位置を変更している。

拡大することなく現行ABWRと同じ流量制御幅の確保ができる見通しである。

また、出力向上に対応した炉内流動評価手法やドライヤ、セパレータなどの原子炉構成機器の開発を進めている。

流動評価については、出力向上に伴う炉心流量拡大や給水増加の影響評価などに三次元流動解析モデルを開発し、流動解析を積極的に活用している(図5参照)。

ドライヤでは、ドライヤ音響・流動振動評価について、音響解析と実験による評価を行っている。これにより、米国で生じたドライヤ損傷事例の発生メカニズムを実験と解析によって解明するとともに、出力向上時の予測評価手法を開発中である。

また、出力向上に伴い蒸気流量が増加しても十分な気水分離性能と圧力損失の低減を両立する低圧損セパレータの開発を、実験と流動解析手法を組み合わせを進めている(図6参照)。

3.3 資源(プルトニウム,トリウム)の有効利用

ABWR炉心はそれまでの炉心に比べて燃料集合体間の水ギャップ幅を拡大し、水対燃料比を大きくして、熱中性子の割合を高めた。これにより、ボイド反応度係数の絶対値の低減や炉停止余裕の増大などの特徴を持たせている(図7参照)。

このようなABWR炉心の特徴を生かし、全炉心にプルトニウムを活用したMOX(Mixed Oxide:混合酸化物)燃料を適用したフルMOX-ABWRが実現可能である。フルMOX-ABWR炉心は、現在のABWRと同一の基本仕様とし、MOX燃料装荷の炉心特性を従来のウラン炉心特性と大幅に変えないようにしたものである。

フルMOX-ABWRの初号機として電源開発株式会社大間原子力発電所が現在建設中であり、日立はGNF-Jとともに炉周りの詳細設計を進めている。初装荷炉心のMOX燃料集合体の装荷割合は0(全ウラン炉心)から約 $\frac{1}{3}$ までの範囲を想定しており、段階的にフルMOX炉心へ移行することとしている。MOX燃料集合体の基本構造は、使用実績のあるステップII燃料形状と同一である。MOX燃料の主要仕様を表1に示す。

さらに、最近ではプルトニウムだけでなくトリウム資源の有効利用の動きも見られるため、フルMOX-ABWRの技術を利用した、トリウム利用炉心の開発にも取り組んでいる。

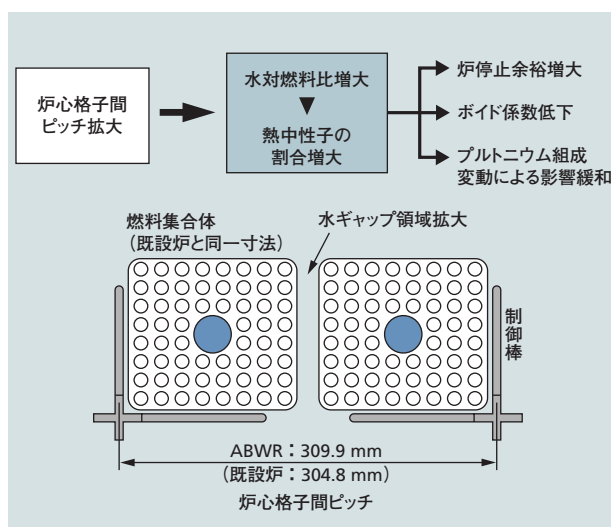


図7 ABWR炉心・燃料の特徴

水対燃料比が大きいABWRの特徴を生かし、フルMOX炉心を適用している。

表1 ウラン燃料とMOX燃料の主要仕様

ウラン燃料(ステップⅢ燃料)とMOX燃料(ステップⅡ燃料)の主要仕様を示す。

	ウラン燃料	MOX燃料
燃料型式	ステップⅢ	ステップⅡ
配列	9×9	8×8
ウラン濃縮度 (wt%)	約3.8	約1.2
プルトニウム富化度 (wt%)	—	約4.3*
最高燃焼度 (MWd/t)	55,000	40,000
燃料棒本数	74(部分長8本)	60
ペレット直径 (mm)	約9.6	約10.4
ペレット材	UO ₂ UO ₂ -Gd ₂ O ₃	UO ₂ UO ₂ -PuO ₂ (MOX) UO ₂ -Gd ₂ O ₃

* 初期の核分裂性プルトニウム割合:約67%

注:略語説明 wt%(重量%)

3.4 GNF2燃料の国内導入への取り組み

出力向上への対応策として、熱的余裕に優れたGNF2燃料の国内への導入準備を進めている。GNF2燃料は、燃料棒配列を10行10列(10×10)として燃料棒本数を92本に増加させており、ステップⅢ燃料に対し平均線出力密度を約20%低下させている。また、改良型スペーサを軸方向8か所に配置するなどの改良により、燃料棒本数が増加することによる伝熱面積の増加と相まって、ステップⅢ燃料に対して限界出力が大幅に向上している(図8参照)。この熱的余裕の改善効果を振り向けることにより、GNF2燃料は20%出力向上、24か月運転に適用可能である。

このほかの特徴として、GNF2燃料は燃料棒92本のうち14本が部分長燃料棒であり、長さも2種類として圧力損失の低

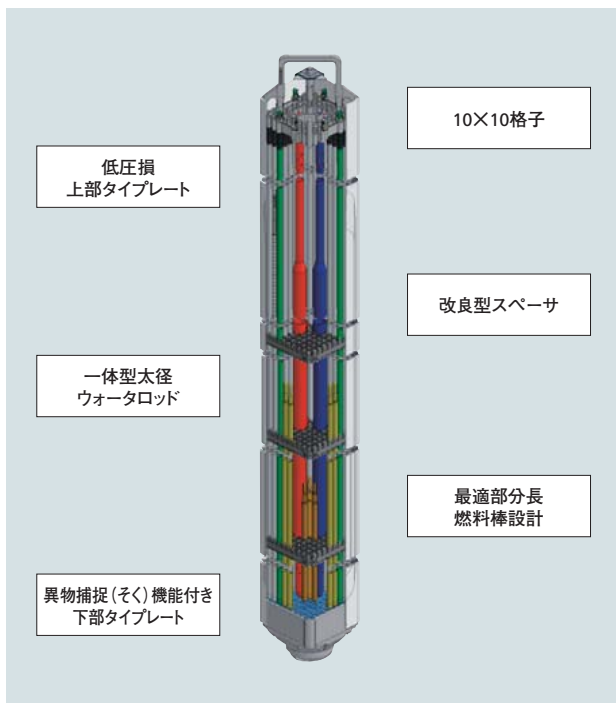


図8 GNF2燃料(10×10燃料)の特徴

9×9燃料に比べて大幅な熱的余裕の改善が可能である。

減を図っている。ウォータロッド2本は、高燃焼度化に対応して燃料棒8本分の領域を置換する。また、上部タイプレートは低圧損型の構造とし、下部タイプレートは異物捕捉(そく)機能を強化した構造としている。

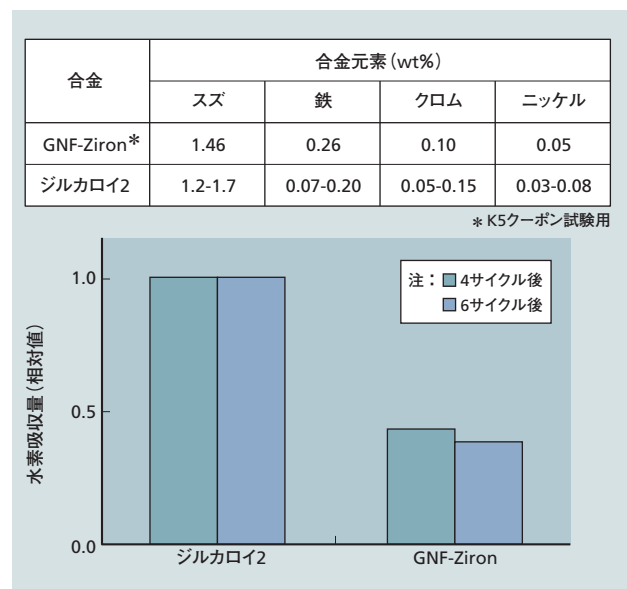
GNF2燃料は、米国において先行使用燃料が装荷されて健全性が確認された後、2008年から取替燃料として使用されている。日立はGNF-Jに協力して、今後の長期サイクル運転・出力向上のニーズに対応できるように、2010年代前半の国内の許認可申請をめざして、GNF2燃料に対応した最新の設計コードや技術書(トピカルレポート)の導入準備を進めている。

4. 将来に向けた開発への取り組み

次世代BWRの炉心・燃料は、超高燃焼度化により、使用済燃料発生量を削減して環境負荷を低減するとともに、長期サイクル運転・省ウラン技術の適用による資源の有効利用へのニーズがますます高まると考えられる。

超高燃焼度の炉心・燃料の実現にあたっては、現行の燃料集合体最高燃焼度55 GWd/tを超える高燃焼度化に適した燃料被覆管材料の確保が必要である。

日立は、GNF-Jとともに、超高燃焼度領域でも低水素吸収特性を有し、耐食性にも優れた新被覆管材料の開発に取り組んでいる。日立は、高燃焼度時の燃料の耐食性を確保するために、いち早くジルコニウム合金の成分組成の適正化に着目し、鉄の濃度を高めた高耐食低水素吸収材の開発に着手してきた。この材料は、現行のジルカロイ2に比べて耐食性、低水素吸収特性に有効であることが確認されている(図9参照)。この合金は、現在GNF-JにおいてGNF-Zironとして製品化され、国内における今後の燃料の被覆材として適用する計



注:略語説明 Zry(Zircaloy:ジルコニウム合金の一種)

図9 GNF-Ziron(高Fe改良Zry)

高燃焼度時の水素吸収量がジルカロイ2の約半分改善する³⁾。

画である。また、これまでの知見を活用し、さらなる高性能の新合金の開発をめざしている。

省ウラン技術としては、燃料のウォータロッドの代わりとなるSSR(Spectrum Shift Rod)の開発を進めている。SSRは、上昇管と下降管を有し、燃料下部タイプレート上下間の差圧のバランスを利用して上昇管内に水位を形成することができる。この水位は、再循環ポンプの回転速度御による炉心流量の変更のみで変えられる。サイクル前半では炉心流量を下げることでSSR内水位を下げ、燃料上部の中性子スペクトルを硬くしてプルトニウムの蓄積を促進する。サイクル末期は炉心流量を上げることで、SSR内水位を上昇させて中性子スペクトルを柔らかくし、サイクル前半で蓄積したプルトニウムを燃焼させる(図10参照)。

日立は、GNF-Jとともに、電力共同研究や国の開発プロジェクトへの提案を含め、SSRの実用化に向けた開発を進めていく。

5. おわりに

ここでは、これまでの炉心・燃料開発の経緯とともに、今後の高経済性プラントの実現に向けた炉心・燃料に関する取り組みについて述べた。

今後も、BWRプラントの安全性と経済性向上に寄与すべく、炉心・燃料技術の開発を強力に推進し、ニーズに応じていく考えである。

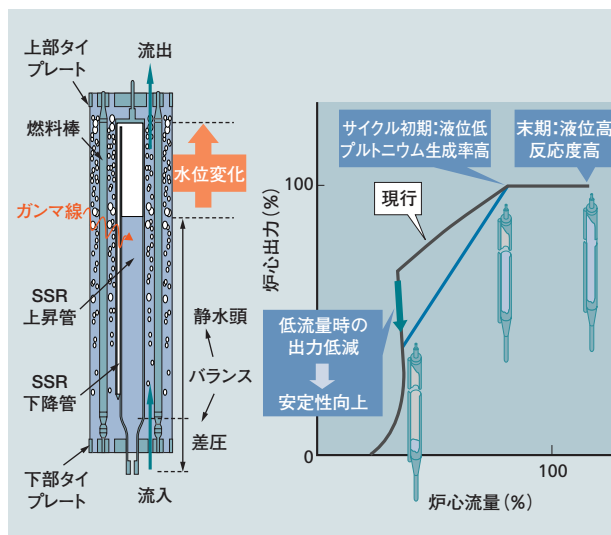
執筆者紹介



曾根田 秀夫
1988年日立製作所入社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力計画部 所属
現在，原子炉システム設計，次世代炉の研究開発に従事
日本原子力学会会員，日本機械学会会員



岩田 豊
1978年日立エンジニアリング株式会社入社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力計画部 所属
現在，新プラントの炉心設備設計，原子炉の炉心解析手法の研究開発に従事
日本原子力学会会員



注:略語説明 SSR(Spectrum Shift Rod)

図10 スペクトルシフトロッドの原理

SSRは下部タイプレート上下間差圧とバランスする静水頭位置に液面を形成する。液面高さは炉心流量の変更のみで変更可能である。これにより、スペクトルシフト効果を増大できる。

参考文献

- 1) 山下，外:BWR新型炉心燃料の適用と開発，日立評論，70，4，403～409(1988.4)
- 2) 西村，外:BWR高燃焼度炉心燃料の開発と適用，日立評論，72，10，1011～1018(1990.10)
- 3) S. Ishimoto, et al.:Improved Zr Alloys for High Burnup BWR Fuel, Proceedings of Top Fuel 2006, Salamanca, Spain(2006)



戎家 三津雄
1978年株式会社東芝入社，株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン エンジニアリングサービスセンター 所属
現在，BWR炉心・燃料全般の技術開発に従事
日本原子力学会会員