特集 沸騰水型原子力発電技術

次世代BWR炉心技術の開発

Development of Next Generation BWR Core Technology

次世代BWR炉心では、ウラン資源節約と燃料サイクル費低減に加えて、プル トニウム利用、使用済み燃料発生量低減などの新たな軽水炉への課題にも柔軟 に対応できることが求められてくる。日立製作所では、この要求にこたえる次 世代のBWR(沸騰水型原子炉)の炉心構想として、大型燃料炉心格子BWRとプ ルトニウム増倍型BWRの二つの炉心概念を開発した。前者はウランを燃料とし た高燃焼度型炉心に加えて、燃料にプルトニウムを利用して燃焼による燃料減 損を小さくした高転換型炉心にも転用できるBWRである。一方、後者は軽水炉 で転換比を1に近づけるため開発された炉心概念で、これまでの軽水炉に比べ て天然ウラン利用率を大幅に向上することができる。

山下 厚一*	Jun'ichi Yamashita
内川貞夫**	Sadao Uchikawa
横溝 修***	Osamu Yokomizo
持田貴顕*	Takaaki Mochida
片山光夫****	Mitsuo Katayama

軽水炉需要の増加に伴いウラン需要も将来増加すると予想 される。しかし,長期的なエネルギー安定供給確保の観点か らは,ウラン資源に過度に依存することは,わが国にとって 好ましいものではなく,今後はウラン資源節約(省ウラン化) とウラン以外の燃料資源(プルトニムなど)の有効利用が軽水 炉炉心開発にとって重要となってくる。また,使用済み燃料 発生量の低減,高い信頼性,運転制御性の向上および高経済 性も同時に求められる。

このような軽水炉炉心への多様なニーズを踏まえると、次 世代BWR炉心は、ウラン燃料については高燃焼度化によって 省ウランと使用済み燃料発生量低減を同時に達成するととも に、MOX(ウラン・プルトニウム混合酸化物)燃料の利用など、 燃料の多様化にも柔軟に応じられる軽水炉が求められる。

ここでは、こうした次世代の軽水炉炉心概念として、大型 燃料炉心格子BWRとプルトニウム増倍型BWR炉心の技術開 発について述べる。

2 大型燃料炉心格子BWR

2.1 大型燃料炉心格子BWRの設計思想

大型燃料炉心格子BWR炉心の概念設計は,

(1) ABWR(改良型沸騰水型原子炉)を含めた従来のBWRプ ラントシステムに適用され,これまでに高い信頼性と実績が 確立されている技術を用いることを基本とする。 上げるために、MOX燃料を装荷した高転換型BWR炉心のどちらにも対応可能とする。

(3) 高燃焼型炉心では, BWR炉心内のボイド(蒸気泡)を利用 して, スペクトルシフト運転の効果を活用することにより, いっそうの省ウラン化と高燃焼度化を図り燃料の経済性を高 める。また, 全制御棒の引抜き状態で出力運転を可能とし, 高い運転制御性を持つとともに使用済み制御棒の発生量を低 減する。

(4) 高転換型炉心では,燃料棒配列の稠(ちゅう)密化とフォ ロア(水排除部)付き制御棒を用いた水排除により中性子減速 効果を小さくし,高速中性子によるウランからプルトニウム への転換反応を促進する。

ことを基本とした。

2.2 大型燃料炉心格子BWRの基本概念

大型燃料炉心格子BWR炉心には,新型格子配列を採用する。この新型格子配列を適用した炉心と,従来格子から成る 炉心の比較を図1に示す。新型炉心格子配列が持つ特徴を以 下に述べる。

2.2.1 新型格子

新型格子配列の特徴は、広翼型制御棒と大型燃料集合体から成ることである。新型格子では燃料集合体の一辺の長さを 従来燃料集合体の約√2倍、燃料集合体断面積は約2倍とし、十字型制御棒の制御棒ピッチ幅は従来炉心のものと同じ

105

電気されている技術を用いることを基本とする。 (2) 炉心構造は、高燃焼型BWR炉心とプルトニウム利用率を である。また、燃料集合体を大型化したことにより、従来型

* 日立製作所 日立工場 ** 日立製作所 エネルギー研究所 工学博士 *** 日立製作所 エネルギー研究所 **** 日立製作所 原子力事業部



図 | 新型格子配列 広翼制御棒を45度回転して配置し,正方形断面形状の燃料集合体の一辺の長さを従来の √2 倍,断面積は2倍とした格子配列である。

BWR格子の水ギャップ部面積の約4が,大型燃料集合体の沸 騰水部として取り込まれ,残りは広翼制御棒の翼部分のスペ ースとなるため,炉心設計の自由度を大きくすることができる。

軽水炉のおのおのの特徴の関係を図2に示す。

2.3 原子炉構造

原子炉構造の基本概念を図3に示す。

2.2.2 大型燃料集合体

大型燃料集合体の採用により、従来型BWR炉心と比較して 以下に述べるような利点がある。

(1) 大型燃料集合体の採用とともに,水ロッドまたはスペク トルシフト ロッドを用いて,減速材を燃料集合体内へ適切 に配置し,この減速材の総量を制御することによって,炉心 内の中性子スペクトル分布制御幅を大きくし,燃料格子の最 適化を図ることができる。これにより,中性子利用率が増加 し,反応度利得が増加するため,従来に比べていっそうの省 ウラン化が達成できる。また,水対燃料体積比を減ずること が容易となり,高転換炉として運用する場合に転換率を高く することができる。

(2) 従来炉心の水ギャップ部に,燃料棒を配置できるため, 炉心内燃料棒長さの合計を増加することができる。このため, 従来と同じ炉心熱出力を得る場合,燃料棒単位長さ当たりの 熱発生を小さくすることができ,熱的余裕は大きくなる。

(3) 定期検査期間中に新しく装荷,およびシャッフリングする燃料集合体の総数が減るため,燃料交換に要する時間を短縮し,プラント稼動率を向上できる。

2.2.3 広翼制御棒

106

高燃焼,高転換を達成するためには,燃料に含まれている 核分裂性物質の濃度を増加する必要があるため,低温時の反 応度は増加し,炉停止余裕が減少する。広翼制御棒は,従来 型に比べてより大きな中性子吸収表面積を持つため,中性子 吸収量を増加して高い炉停止能力を得ることが可能となる。 つまり広翼制御棒は,原子炉停止の信頼性と安全性に寄与する。 大型燃料格子BWR炉心の基本概念と,上に述べた次世代型 原子炉圧力容器は従来型BWRからの設計変更は必要なく, 圧力容器内に装荷される燃料集合体と制御棒の大型化に伴う 制御棒案内管,炉心支持板,上部格子板の変更が必要となる。 従来炉のインターナル ポンプ システムや汽水分離器など, その他の部分は現行と同じ設計を適用できる。本炉心を高転 換炉として使用するときは,燃料有効長を従来型BWRよりも 短くする必要がある。しかし,後述するように制御棒はフォ ロア付きとなり,従来と同じ長さとなる。このため,燃料チャネルボックスを制御棒の支持とガイド用として従来どおり の長さとする。これにより,チャネルボックスは従来型BWR と同様に上部格子板によって支持させることができ,特別な 設計変更は不要である。



〔従来技術の活用〕

注:略語説明 H/U比(水対ウラン比), * (高転換炉の場合)

図2 大型燃料格子BWRの炉心概念と技術展開 大型正方燃料体 と広翼十字制御棒を特徴とした新型炉心格子を採用して,大幅なスペク トルシフト炉心を達成する。



は上昇管と下降管の静水頭差と釣り合い,ガンマ発熱によっ て生じる蒸気がSSR内に充満する。流量が増加すると,上昇 管内の水位が上昇し,平均ボイド率が減少する。さらに,SSR 内水位が上昇管の上端を越えるまで上昇すると,水は下降管 を流れ静水頭差は減少するため,SSRを通過する流量割合は 増加し,SSR内は水で満たされることになる。

例えば、炉心流量70%のときに圧力差が0.01 MPaとなるよう下部タイプレートを設計したならば、炉心流量が110%のときには0.025 MPaの圧力差であり、ボイド率は66%から14%に変化することを確認している。

図5は、このSSRを適用した原子炉炉心の断面を示す。

燃料集合体を大型化しSSR数を増やすことは、炉心流量制 御に伴うチャネル内ボイドの総量と、SSR内水位の変化によ る炉心内減速材の総量を大幅に変えることになるので、スペ クトルシフト効果がいっそう効くようになる。すなわち、運 転サイクルの前半は、SSR内水位を下げ、炉心上部の減速材 を少なくするので主に炉心下部領域の燃料が燃焼し、上部領 域ではプルトニウムの転換が図られる。サイクル後半では、 SSR水位を上げて炉心上部の減速材を多くして、サイクル前

図3 原子炉構造 大型燃料格子では,現行BWRの炉心構造から, 炉心上部格子板,燃料集合体,炉心支持板,制御棒案内管および制御棒 を変更しており,圧力容器などは同一である。

2.4 高燃焼型BWR炉心

2.4.1 改良型スペクトルシフトBWR炉心概念

スペクトルシフト効果を高めるためには、減速材密度変化 幅を大きくとることが望ましい。炉心内減速材密度を変化さ せるには、(1)水排除棒などの機械的な手段を用いる方法と、 (2)冷却水流量などのプロセス量を制御する方法がある。前者 は炉心内に新たな可動部を必要とするため、圧力容器に貫通 部などが増え、構造が複雑となる。後者は、燃料集合体のボ イド率(蒸気体積率)が蒸気の発生量に対して飽和する特性が あるため、減速材密度変化幅をあまり大きくとれない。

そこで、本燃料集合体には、中性子減速材密度を変化させ るSSR(スペクトル シフト ロッド)を持たせた。SSRは図4 に示すように、水と蒸気の上昇管と下降管から成り、上昇管 内部の水位が流量によって変化する特性を持つ水ロッドで、 機械的可動部なしに水対ウラン比を大幅に変えることができ る。上昇管の下端部は燃料棒を支持する下部タイプレートの 下側に開口され、下降管は上側に開口される。SSRの出入口 の間には、下部タイプレートを通過する流量のおよそ二 乗に比例する差圧が生じ、SSR内に水を流す駆動力として働く。 冷却水流量が小さいときは、この駆動力も小さく、圧力差 半で転換された炉心上部のプルトニウムを燃焼させ,反応度 を増加する。

また、このような炉心内ボイド変化による大幅なスペクト ルシフト効果の活用により、出力の制御は単に流量制御だけ の単純な運転が可能で、制御棒操作は不要である。



注:略語説明

 ΔP (下部タイプレート差圧), W(流量), K(下部タイプレート定数) ρ (水密度), A(流路面積), g(重力定数), H(水位)

図4 平衡状態のスペクトル シフト ロッド内水位 スペクトル シフト ロッド内の水の質量p・g・Hが下部タイプレート差圧 ΔPと釣り合うので,水位Hは流量Wの二乗に比例して変化する。

107

1072 日立評論 VOL. 72 No. 10(1990-10)



ン濃縮度を下げることで平たん化できる。

(3) 反応度係数

原子炉の反応度係数は炉心内平均の水対ウラン比に大きく 依存する。本炉心では、炉心上部での水対ウラン比が小さく、 下部では大きい。炉心全体平均の水対ウラン比が従来型BWR の水対ウラン比と同程度であるため、反応度係数は従来型 BWRとほぼ同じ値にすることができる。また、出力係数は十 分負で大きな値を持ち、過渡時の自己制御性効果として有効 に機能する。

(4) 運転特性

本炉心は、18か月以上の長期間連続運転が可能であり、取 出し燃焼度も55~70 GWd/tの高燃焼度とすることができる。 また、燃料集合体の交換パターンの最小化を図れば、燃料集 合体の大型化と相まって定期検査期間の短縮に寄与する。

2.5 高転換型BWR炉心

2.5.1 高転換型BWR炉心の基本概念

高転換型BWR燃料には、減損ウラン、または天然ウランに プルトニウムを富加したMOX燃料を使用する。BWRで転換 比を高くし、プルトニウム生成量を増やすには、水対燃料比



注:略語説明 SSR (スペクトル シフト ロッド)

図5 高燃焼型BWR炉心でのスペクトル シフト ロッド配置 燃料集合体は数体のスペクトル シフト ロッドを配置する。スペクト ルシフト ロッドは,機械的可動部を持たず,炉心流量の増減に伴い内 部水位が昇降し,減速材密度は大幅に変化する。

2.4.2 高燃焼型BWR炉心特性

(1) 反応度制御特性

高燃焼型BWR炉心では,従来,制御棒操作で行っていた燃 焼に伴う反応度変化の制御を,インターナルポンプ回転速度 変更に伴う炉心流量変化と,SSR水位変化によって行う。す なわち,出力運転中は制御棒全引抜きとし,制御棒は炉停止 (スクラム)機能だけに使用する。本炉心では,広翼制御棒を 大型格子に適用して,制御棒の反応度制御能力を高めている。 このため,ガドリニアによる反応度制御容量が軽減し,ガド リニアの装荷量を低減できる。

(2) 出力分布特性

108

炉心内出力分布は,燃料配置およびウラン濃縮度,ガドリ

を小さくする必要がある。これは,燃料集合体内に燃料棒を 稠密に配置し,燃料に対する減速材の量を小さくすることで 達成される。また,同じ転換比を実現する場合,BWRは炉心 内の蒸気ボイドによって水密度を簡単に低減できるので,加 圧水型原子炉に比べて燃料棒間隔を大きくできる。これは燃 料の冷却だけでなく製造上にも有利である。

2.5.2 高転換型BWR炉心設計の特徴

本炉心は,従来型炉心への適用を考えて,正方断面を持つ 燃料集合体と十字型制御棒を用い,原子炉構造の改造が最小 限で済むようにする。燃料棒配列は,水対燃料比を小さくす るために図6に示す稠密三角格子配列を採用する。また,燃 料集合体の大型化によって燃料集合体間の水ギャップ部面積 を減少させる。これらの方法により,単位面積当たりの燃料 棒本数を従来型BWRの約2倍に増やすことができる。したが って,炉心等価直径が同じ場合,燃料棒有効長を約半分にす れば,燃料棒の単位長さ当たりの熱出力を従来炉心と同じに できる。この場合,燃料有効長を短くすることで炉心圧力損 失も小さくできる。

水対燃料比は稠密格子燃料棒配列に加え,制御棒の吸収材 の先端にジルコニウム製のフォロア部を付けたフォロア付き 制御棒を採用することで,さらに小さくできる。すなわち, 炉停止時にはフォロア付き制御棒の吸収材部分を炉心に挿入

ニア分布によって制御することができる。原則として出力運するが、運転時にはフォロア部だけを挿入して水ギャップ部転中は制御棒全引抜きとするが、これらの設計手段によってから水を排除し、これにより水対燃料比を減少させ、転換比出力分布を十分に制御できる。軸方向出力分布の制御は、従を増加させることができる。また、必要ならばサイクル末期 来炉心同様、軸方向濃縮度とガドリニア分布で行う。燃料集合体内コーナ部の燃料棒のウラ反応度利得を得ることもできる。



燃料実効体積比は、現在よりも蒸気体積率を高くしたBWRで 実現可能である。

3.2 プルトニウム増倍型BWRの概念設計

現行BWRと同程度の出力密度で、電気出力900 MWの炉心 概念例を表1に示す。

本設計側では、燃料棒クリアランスを1.3mm、炉心平均ボ イド率を50%以上とした稠密六角格子を採用することにより、 水対燃料実効体積比0.3以下を達成している。

3.2.1 燃料集合体の概念設計

燃料集合体は六角形状の断面を持ち,燃料棒151本,制御 棒シンブル管18本、スペーサ、チャネルボックスおよび上下 部タイプレートから成る。燃料集合体3体の横断面図を図7 に示す。燃料被覆管およびチャネルボックス材には、ステン レス材(SUS材)を使用する。これは、中性子スペクトルが硬 いプルトニウム増倍型BWRでは、SUS材の中性子吸収割合が ジルカロイよりも小さくなるためである。SUS材はジルカロ イよりも強度が高いため、燃料被覆管、チャネルボックスを 薄肉化できる。

集合体構造上の主な特徴は、丸セルタイプスペーサと薄肉

図6 大型燃料格子BWRの燃料集合体と制御棒 高燃焼型BWRで はウラン燃料とSSRを用いた燃料集合体を、高転換型BWRではMOX燃料を 三角稠密配列した燃料集合体とフォロア付き制御棒を用いる。

以上のように、従来型BWR炉の最小限の改造で単位面積当 たり約2倍の燃料密度を持つ稠密格子を実現し、高転換BWR 炉とすることが可能である。そして、フォロア部を持つ制御 棒と組み合わせることで、取出し燃焼度は45 GWd/t、転換比 は約0.85を得ることができる。

チャネルボックスの使用により, 燃料集合体間隔を小さくし ている二点である。丸セルタイプのスペーサは、隣接セルと の接触部分を重ね合わせることにより、投影面積を減少させ 圧力損失を低減することができる。また、チャネルボックス ギャップに流れる漏れ流量を調整することで、チャネルボッ クス内外圧力差を減少させ、チャネルボックスの変形を抑制 することができる。

3.2.2 炉内構造物の概念設計

プルトニウム増倍型BWRでは、燃料集合体3体に1体の駆 動機構を持つクラスタ型制御棒を使用し、炉心下部から挿入

プルトニウム増倍型BWRの炉心仕様 プルトニウム増倍型 表丨 BWRは,現行のBWRに比べて炉心有効長,炉心外径ともに小さな炉心で, 水対燃料体積比は0.50である。

109

	項目	仕 様
3 プルトニウム増倍型BWR	電気出力	900 MW
	原子炉圧力	7.2 MPa
3.1 プルトニウム増倍型BWRの基本概念	冷却材流量	2.25(10 ⁴ t/h)
天然ウラン利用率大幅向上による長期エネルギー安定確保	炉心有効長	2.00 m
ち生用オスカめには プルトーウノ 単位ド オカわナ 恒广に	炉 心 外 径	4.7 m
を天境りるためには、 ノルドーワム増信比、 りょわらがいに	燃料集合体数	601体
装荷される燃料に含まれる核分裂性プルトニウム量と、炉心	集合体 体当たり燃料棒本数	151本
から取り出される使用済み燃料に含まれる核分裂性プルトニ	燃料棒外径	II.8 mm
	燃料棒クリアランス	I.3 mm
ワム量の比を1.0近傍にする必要がある。	水対燃料体積比	0.50
1.0前後のプルトニウム増倍比を実現するためには ²³⁸ Uなど	比 出 力	17.5 kW/kg
の宮連枝分型の活田が不可欠で、これは水対燃料実効休積	出 力 密 度	85.1 kW/1
· 同还很万衣· / 百万/ 「「八 C, C4UG, 小/ MAT 天 / 开有	平均線出力密度	14.9 kW/m
比を0.3以下にすることに対応している。熱除去と機械強度の	出口クォリティ	27%
要求から燃料棒間隔を1mm以上とした場合、このような水対	炉心平均ボイド率	51%

1074 日立評論 VOL. 72 No. 10(1990-10)



図7 燃料集合体横断面図 プルトニウム増倍型BWRでは、六角形 状の燃料集合体にクラスタ型制御棒を下部から挿入する。



図 8 プルトニウム増倍型BWRの炉心配置図 六角形状の燃料集合 体601体をはちの巣状に配置し、炉心を構成する。

する。クラスタ型制御棒の断面を燃料集合体とともに図7に

0.3以下を実現している。平均取出し燃焼度45 GWd/tとした

示す。制御棒には,引き抜き時の水対燃料実効体積比を減少 させるためフォロア部を設けた。また,炉心シュラウド最上 部には,燃料集合体の上部タイプレートを上方から抑える上 部炉心板を設けた。この上部炉心板により,圧損増加による 燃料集合体の浮き上がりを防止する。また,汽水分離器,蒸 気乾燥器などは,現行BWRと同構造のものを使用可能とした。

3.3 プトニウム増倍型BWR炉心特性評価

プルトニウム増倍型BWRの炉心特性を表2に示す。炉心は、 図8に示すように六角形状の燃料集合体をはちの巣状に配置 して構成される。平均取出し燃焼度は45 GWd/t,連続運転期 間は12か月である。

プルトニウム増倍型BWRでは,現行BWRに比べ炉心下部 からボイドが発生する。その結果,炉心出口のボイド率は約 75%,炉心平均ボイド率は51%になり,水対燃料実効体積比

表 2 プルトニウム増倍型BWRの炉心特性 プルトニウム富化度6.5 %で取出し燃焼度は45 GWd/tとなり、プルトニウム増倍比は、1.02となる。

項目	特性
取出し燃焼度	45 GWd/t
連続運転期間	12か月
核分裂性プルトニウム富化度*(W/O)	6.5
核分裂性プルトニウム装荷量	10.0t
プルトニウム増倍比**	1.02
最大線出力密度	27 kW/m
最小限界出力比	>1.3
注:* 天然ウランに富化	
** プルトニウム増倍比= <u>取出し時の核</u> 炉の装荷時の材	分裂性プルトニウムの量 亥分裂性プルトニウムの量

110

ときの所要核分裂性プルトニウム富化度は6.5%である。また、 プルトニウム増倍比は核分裂性プルトニウム発生量と消減量 がほぼ同じ1.0となることを確認した。

4 結 言

次世代BWR炉心として、大型燃料格子BWR炉心とプルト ニウム増倍型BWR炉心を提案した。大型燃料格子BWR炉心 は、現行BWR炉心構成からの変更を最小限にとどめたうえで、 スペクトル シフト ロッド採用し、省ウラン化と使用済み燃 料の発生低減を目標とした高燃焼度炉と稠密MOX燃料を採用 し、転換率向上によるウラン資源節約と燃料資源多様化を目 標とした高転換炉のいずれにも転用でき、今後の原子燃料サ イクル環境の変化にも柔軟に対応できる次世代BWRである。

また,これを一歩進めて,天然ウラン利用率のよりいっそうの向上を目的とし,六角格子燃料集合体とクラスタ型制御 棒を採用するなど,炉心格子構成を大幅に変更したプルトニウム増倍炉の概念設計も進めている。

今後とも国や電力会社の指導と支援を得ながら,技術的実 証,設計改善を図り,開発を進めていく考えである。

参考文献

- 山下,外:高転換型沸騰水炉概念の開発,日立評論,70,4, 429~432(昭63-4)
- R. Takeda, et al. A Conceptual Core Design of Plutonium Generation Boiling Water Reactor, Proc. of the 1988 International Reactor Physics Conf. Vol.III, 119(1988)