

## 新型炉部会セッション

## 原子カイノベーションを支える最新の新型炉開発の状況

Latest trends of advanced reactor development supporting nuclear innovation

## (6) 国内燃料サイクル柔軟性拡大へ寄与する軽水冷却高速炉

(6) Light Water Cooled Fast Reactor Enhancing Flexibility of Fuel Cycle in Japan

\*日野 哲士<sup>1</sup>

日立GEニュークリア・エナジー

## 1. はじめに

沸騰水型原子炉（BWR）の炉心燃料の設計自由度を活用し、プルトニウム利用の促進、プルサーマルによる使用済 MOX 燃料の削減、高速炉サイクルへの移行時の負担軽減を図った軽水冷却高速炉の開発を進めており、その開発状況について報告する。

## 2. 背景と目的

日立は BWR プラントメーカーとして、冷却水（中性子減速材）が沸騰する BWR の特徴を活かした軽水冷却高速炉 RBWR（Resource-renewable BWR）の開発を進めてきた[1][2][3]。図 1 に RBWR の概要を示す。冷却水の沸騰および稠密燃料により水素対燃料の原子数比を減少させ、通常の軽水炉よりも中性子エネルギー分布を高エネルギー側にシフトする。図 2 に RBWR の導入ビジョンを示す。最終的には六角格子 RBWR により、超ウラン元素（TRU）の多重リサイクルを行う高速炉サイクルの実現をめざすが、既設炉にバックフィットし、現状の再処理および MOX 燃料製造技術の利用を前提とする四角格子 RBWR の開発も進めてきた。後述するように、まずはプルトニウム利用の促進により再処理工場の稼働率を向上し、使用済燃料貯蔵の逼迫問題を解決、原子力発電の維持に寄与することで、2050 年カーボンニュートラルに貢献すべく、本開発では四角格子 RBWR に注力する。

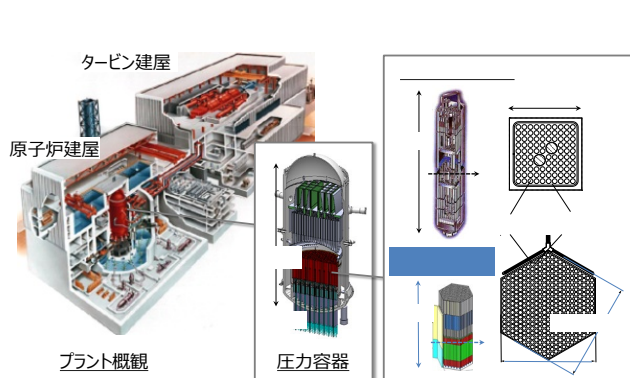


図 1 RBWR の概要

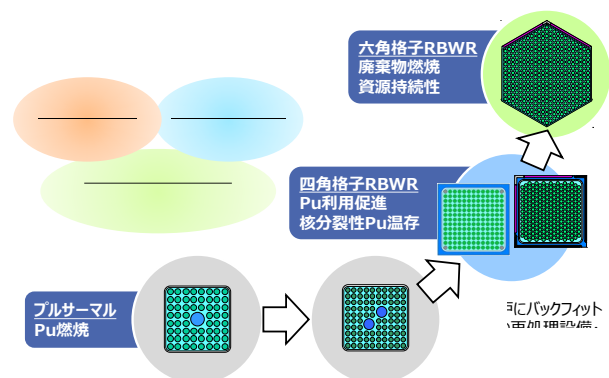


図 2 RBWR の導入ビジョン

## 3. 四角格子 RBWR の概要とねらい

図 3 に四角格子 RBWR で用いる燃料集合体の概要を示す。四角格子 RBWR は、既設 BWR で取替容易なコンポーネントの交換および追加のみで実現をめざしたコンセプトである。図 3 の短尺燃料は、燃料棒を

\*Tetsushi Hino<sup>1</sup>

Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

三角格子配列し、チャンネルボックス間の水ギャップに水排除板を設置、また制御棒にフォロアをつけることで、水を可能な限り排除し中性子エネルギーを高めることを重視している[4]。長尺燃料は、制御棒は既存のものを用い、水排除板の追加設置も不要として、燃料集合体の交換のみで実現することを前提とした[5]。

図 4 に四角格子 RBWR のねらいを示す。四角格子 RBWR は、短尺および長尺燃料のいずれも、燃料集合体当りのプルトニウム装荷量を増やすことで、プルトニウム利用量を現行 BWR プルサーマルの約 2 倍にできる見通しである。核不拡散の観点から、日本はプルトニウムを利用する分のみ再処理する方針であるが、燃料集合体当りのプルトニウム利用量を増やすことで、プルトニウムを利用できるプラントが限られる場合でも、再処理量を増やし、使用済燃料貯蔵量をより多く削減することができる。また、燃料集合体当りのプルトニウム装荷量が増えることで、同じ量のプルトニウムを利用した場合に発生する使用済 MOX 燃料の体数も現行 BWR プルサーマルよりも削減できる。

さらに、四角格子 RBWR は、プルトニウム利用量を増やしつつも、将来的に高速炉で使用済 MOX 燃料を再利用することを考慮し、使用済 MOX 燃料中の核分裂性プルトニウムの割合を現行プルサーマルよりも高く維持する。プルサーマル後の使用済 MOX 燃料は、長期保管され  $^{241}\text{Pu}$  の崩壊が進むと、高速炉で再利用する際に、核分裂性プルトニウムの割合が比較的多い使用済ウラン燃料からの回収プルトニウムと混合するなど、核分裂性プルトニウムの割合を高める必要がある[6]。四角格子 RBWR は、燃料稠密化による高速中性子スペクトルを利用し、長期保管後も、核分裂性プルトニウムの割合を単独で高速炉で再利用可能なレベルに維持することで、高速炉サイクル移行に必要とされる使用済燃料の保管量や再処理量の削減を図るねらいである。

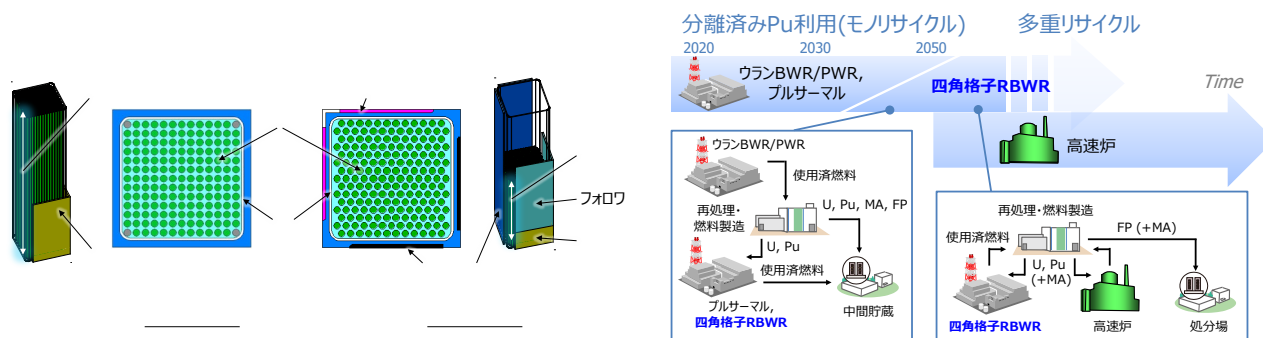


図 3 四角格子 RBWR の概要

図 4 四角格子 RBWR のねらい

#### 4. 開発項目

表 1 に RBWR の格子タイプ毎の技術成熟度レベル (TRL) および市場性について評価した結果を示す。四角格子は既設炉へのバックフィットが可能であり、早期の実用化が可能である。特に長尺燃料タイプは、短尺燃料タイプよりも開発要素が少なく、現行プルサーマルからの使用済 MOX 燃料体数削減効果も大きいことから、国内燃料サイクルの短中期課題と考えるプルトニウム利用促進へ大きく寄与できると考えている。

図 5 に四角格子長尺燃料の中性子エネルギースペクトルを現行 BWR および六角格子 RBWR と比較して示す。四角格子長尺燃料の特に集合体中央付近では、六角格子 RBWR と同様に熱中性子ピークがほとんどないスペクトルとなる。この特徴により、四角格子長尺燃料は、現行 BWR と同様にチャンネルボックス間の水ギャップを有しながらも、現行プルサーマルよりも使用済 MOX 燃料中の核分裂性プルトニウムの割合が高くなるが、これまでの BWR の中性子スペクトルと異なることから核特性解析手法の妥当性確認が必要となる。また、図 6 に熱水力パラメータを現行 BWR および既存の稠密燃料試験条件と比較して示す。四角格子長尺燃料は現行燃料と稠密燃料試験の間の領域となるが、特に、チャンネルコーナーがボイド率分布に及ぼす影響に対する、熱水力解析手法の妥当性も同様に確認する必要がある。

表 2 に四角格子 RBWR の現状設計例でのプルトニウム含有率と燃焼度を示す。プルトニウム含有率は現行再処理および MOX 燃料製造技術の範囲内ではあるが、既存の照射実績を超えるため、炉外材料試験デー

タや照射試験データを蓄積していく必要がある。

表 1 RBWR の TRL および市場性の評価結果

格子タイプ	TRL	評価結果
四角格子 (長尺)	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>主な開発要素は、炉心解析妥当性評価、燃料ペレットおよび被覆材の炉外材料・照射試験データ蓄積に限定される</li> <li>短中期課題であるプルトニウム利用促進への効果大</li> <li>再処理、MOX 燃料技術進展に伴い、高速炉サイクル実現までのマイナーアクチニド (MA) 蓄積量削減などへの寄与も期待できる</li> </ul>
四角格子 (短尺)	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>長尺タイプよりも高転換比が得られるが、長尺タイプの開発要素に加え、フォロー付き制御棒および水排除板など炉内構造の開発が必要</li> </ul>
六角格子	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>狭隘な集合体・炉内構造、高プルトニウム・MA 含有ペレット、従来実績を大きく超える燃焼度に適用する被覆管の開発が必要</li> <li>TRU 燃焼炉としての市場性の可能性があるが、Na 冷却高速炉の実用化状況、社会状況に依存</li> </ul>

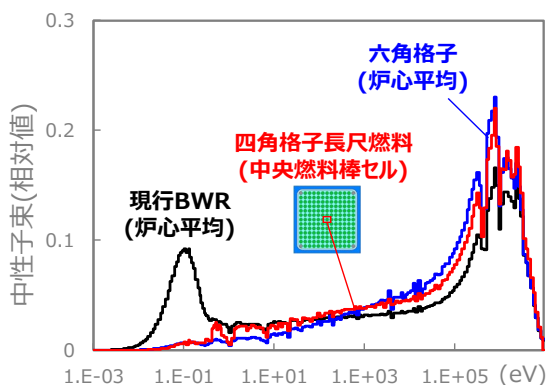


図 5 中性子エネルギースペクトル

	現行燃料	四角格子	稠密燃料試験*
燃料棒配列	正方	正方	三角
燃料棒外径 (mm)	10~12	8.0	12.3, 13.0 6.4, 7.1
燃料棒間ギャップ (mm)	2.5~4	2.0	1.0, 1.3 1.5~2.3
水力等価直径 (mm)	10~14	6.1	2.4~4.4 4.2~6.5

\* W. LIU, et al., J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 44, pp. 558-571 (2007)  
M. KURETA, et al., JAEA-Data/Code 2006-007 (2006)  
B.W. LETOURNEAU, et al., WAPD-TM-1013 (1975)

図 6 熱水力パラメータ

表 2 プルトニウム含有率と燃焼度

	四角格子長尺燃料 設計例	従来知見範囲 (実績など)
集合体平均 プルトニウム含有率 (wt%)	~13	<ul style="list-style-type: none"> <li>臨界試験は核分裂性プルトニウム富化度 16wt%までのデータあり</li> <li>照射試験はプルトニウム含有率 14.3wt%までのデータあり</li> </ul>
ペレット最高 プルトニウム含有率 (wt%)	18	
バンドル平均 MA 含有率 (wt%)	_*	
取出平均燃焼度 (GWd/t)	55	<ul style="list-style-type: none"> <li>ノード最高燃焼度 80GWd/t までの照射データあり</li> </ul>
ノード最高燃焼度 (GWd/t)	~90	

\*  $^{241}\text{Pu}$  の崩壊で生成される  $^{241}\text{Am}$  除く

## 5. まとめ

日立は燃料サイクルの短期から長期のさまざまな課題に対応するため、BWR をベースとした軽水冷却高速

炉 RBWR のバリエーションを検討してきた。開発要素が相対的に少なく、プルトニウム利用の促進、プルサーマルによる使用済 MOX 燃料の削減、高速炉サイクルへの移行時の負担軽減により、国内燃料サイクルの柔軟性拡大に寄与できると考え、四角格子長尺燃料を用いた RBWR の開発に注力して進める。

### 謝辞

本報告は、経済産業省からの補助事業である「令和 2 年度 社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」の一環として実施した成果を含む。

### 参考文献

- [1] R. Takeda, M. Aoyama, Y. Bessho, S. Uchikawa and Y. Ishii, “A Conceptual Core Design of Plutonium Generation Boiling Water Reactor,” Proc. of the 1988 International Reactor Physics Conference, Vol. 3, pp. 119 (1988)
- [2] R. Takeda, M. Aoyama, M. Moriwaki, S. Uchikawa, O. Yokomizo and K. Ochiai, “General Features of Resource-Renewable BWR (RBWR) and Scenario of Long-term Energy Supply,” Proc. of International Conference on Evaluation of Emerging, Nuclear Fuel Cycle Systems, Vol. 1, pp. 938 (1995)
- [3] R. Takeda, J. Miwa and K. Moriya, “BWRS for long-term energy supply and for fissioning almost all transuranium, Proc. of GLOBAL 2007, p. 1725 (2007)
- [4] 三輪他,” 軽水冷却高速炉の開発(3) Pu 利用に適用する四角格子炉心の核・熱水力特性長寿命超ウラン元素を燃焼可能な軽水炉 RBWR の開発”、日本原子力学会 2020 年秋の大会 1I07 (2020)
- [5] 三輪他,” 軽水冷却高速炉の開発(6) 現行炉心からの移行性を高めた Pu 利用向け四角格子炉心概念”、日本原子力学会 2021 年春の年会 3B09 (2021)
- [6] 高増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ II 技術検討書 -(1)原子炉プラントシステム- (2006)