技術報告

285. 高性能 BWR 燃料集合体の開発
サイクロンスペースサの熱水力性能師岡 慎一*, 白川 健悦*, 山本 泰*,
矢野 隆*, 木村 次郎**, 光武 徹**Development of High Performance BWR Fuel Bundle
Thermal-hydraulic Performance of CYCLONE Spacer*By Shinichi MOROOKA, Kenetsu SHIRAKAWA,
Yasushi YAMAMOTO, Takashi YANO,
Jiro KIMURA and Tohru MITSUTAKE

The purpose of this study is to develop a new BWR fuel with high critical power and low pressure drop performance. In this report, the spacer which has a significant effect on thermal hydraulic performance, has been improved and the performance has been measured. The improved high performance spacer is a ferrule type spacer with twisted tape and improved flow tab. This spacer is called CYCLONE spacer.

The test bundle consists of electrically heated rods in a 4×4 array configuration. The axial power shape is cosine. Two test assemblies with different radial power distribution have been used. One test assembly has the maximum power rods at the center of the test assembly and the other has the maximum power rods near the channel wall.

The results show that the critical power performance of the bundle with CYCLONE spacers is 10 to 22% higher than that of the current bundle with ferrule spacers at BWR rated flow rate, while the pressure drop is about 3% higher at BWR rated conditions (quality 15%).

KEYWORDS : *boiling transition, spacers, BWR type reactors, critical power, fuel bundles, pressure drop, swirl flow, droplet deposition, performance*

I. ま え が き

原子力発電所の安全性にとって不可欠な燃料の熱的健全性を維持するために、沸騰水型原子炉(BWR)においては、従来よりMCPR(Minimum Critical Power Ratio)基準, すなわち“運転員の単一誤動作あるいは機器の単一故障によって引き起こされる運転時の異常な過渡変化中に炉心監視の不確定性を考慮してもなお、全炉心内の燃料棒のうち99.9%以上が沸騰遷移(BT: Boiling Transition)を経験しない安全限界MCPRの値を下回らない”よう運転最大出力を定めている⁽¹⁾。

このように、沸騰遷移が発生する出力(限界出力)は、原子炉運転出力に関連する重要な設計因子であり、多くの研究者が長年にわたり限界出力を増大する方法の開発を試みている。

従来より旋回流により限界出力を増大する研究が広く行われており、多くの研究者が⁽²⁾ 振り板を管に挿入することによりCHF(Critical Heat Flux)を増大する結果を報告している。一方、多数の燃料棒を正方格子に配列しているBWR燃料集合体は、流れによって生ずる燃料棒の振動の

抑制および燃料棒間隔を保持するために複数個の支持格子(スペースサ)が設置されている。スペースサは上記の役割のほかに、限界出力などの熱水力性能に大きな効果を与える。

BWR燃料メーカでは、ステップⅠ、Ⅱ、Ⅲ燃料と段階を踏んで高燃焼度化を進めてきており、燃料集合体の除熱の効率を向上させるため、スペースサの改良を実施してきた。ステップⅠ燃料では、板を格子状に組んだグリッドスペースサ(以下、グリッド)を用いていたが、ステップⅡ、Ⅲ燃料では、金属セルを格子状に配列した丸セルスペースサ(以下、丸セル)⁽³⁾を開発して、限界出力を約15%増大した。また、Kraemerら⁽⁴⁾はmixing vaneをグリッド・スペースサに取り付けたスペースサ(ULTRAスペースサ)を開発し、約20%の限界出力の増大を報告している。

本研究の目的は、従来燃料より高い限界出力および良好な圧力損失性能を持ったBWR燃料を開発することである。本報では、熱水力性能に強く影響するスペースサ形状を改良し、性能を測定した。

II. 試験装置および試験体

Fig. 1 に試験装置の系統図を示す。試験装置 BEST (BWR Experimental loop for Stability and Transient test)において、冷却水は循環ポンプ①にて循環され、試験部入口流量は空気作動弁②により、また試験部入口温度

* ㈱東芝 原子力技術研究所 (Toshiba Corp.)

** ㈱東芝 炉心設計部 (Toshiba Corp.)

(1996年 2月2日 受理)

Fig. 1 A flow chart for BEST loop

は直接通電型予熱器③によりそれぞれ制御した。図中、テスト部は2系統あるが、本試験ではバンドル④のみを使用した。水は試験部を上方に流れるに従い、加熱されて二相流となり、試験部上端より出た後、気水分離器⑥に入る。このうち、分離された蒸気の方は冷却系の蒸気ドラム⑦に導かれ、スプレー水によって凝縮し、一部は気水分離された水と合体して循環ポンプ①に戻り、同様なサイクルを繰り返す。ループ全体の圧力は蒸気ドラム内のスプレー流量を変えて制御するが、微調整は加圧器⑧により行った。試験には、Fig. 2に示すようなBWR燃料棒と同じ寸法(外径12.3 mm, 発熱長3,708 mm)の間接発熱ヒータロッドを4×4の正方格子に配置した管群バンドルを用いた。ヒータ

ロッドは、被覆管材質をインコネルとした間接発熱方式である。発熱長、ヒータロッド外径、スぺーサの数および軸方向位置はBWR燃料棒と同じとした。ロッド間隔は等間隔に設置した7個のスぺーサにより保持した。軸方向出力分布は、Fig. 3に示すように、コサインである。径方向出力分布(バンドル断面内での各ロッドの出力分布)が異なる2種類の試験バンドルを使用した。Fig. 2に示すように、ひとつはバンドル中央部に高出力ロッドを、他方はチャンネルボックスの2つの面に面した位置に高出力ロッドを配置したものである。また、ヒータロッド表面の温度は外径0.5 mmのクロメルアルメル(CA)熱電対をヒータロッド表面に埋め込んで測定した。

圧力および差圧計測はダイヤフラム式の変換器で、試験部入口流量はタービン流量計により、また入口流体温度は熱電対を用いて測定した。試験体出力は、電圧および電流より計算で求めた。各測定値の精度(ランダム誤差)を下記に示す。

Fig. 2 Radial power distribution for the test bundle

Fig. 3 Axial power distribution for the test bundle

測定値	精度
圧力, 差圧	±1%
流量	±1%
出力	±1.5%
入口温度	±1.5℃

III. 試験方法および試験条件

限界出力試験では、圧力、入口流体温度および流量を所定の試験条件に設定し、試験部の流動状態が安定した後、定常状態を維持しながらロッド出力を徐々に増大させ、核沸騰から沸騰遷移に至らせ、この時の投入電気出力を限界出力として測定した。

圧力損失測定試験では、圧力、入口流体温度、出口コエリティおよび流量を所定の試験条件に設定し、試験部の流動

状態が安定した後、圧力損失を測定した。試験条件を以下に示す。

限界出力試験

圧力 7.2MPa

流量 $284 \sim 1,400 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

入口サブクール 50 kJ/kg

圧力損失測定試験

圧力 7.2MPa

流量 $833, 1,400 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

クォリティ $0 \sim 0.25$

入口サブクール 50 kJ/kg

ちなみに、実機高出力バンドルの定格運転状態は、圧力 7.2MPa、流量 $1,400 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 、入口サブクール 50 kJ/kg 、クォリティ 0.25 である。

IV. スペーサ改良

Fig. 4 に示すように、BWR 燃料で限界出力が発生する位置(以下、沸騰遷移発生点あるいは BT ポイント)における流動様式は環状噴霧流であり、燃料は表面に形成されている薄い液膜により冷却されている。BT は、液膜が局所的に消滅(ドライアウト)することにより生じる。したがって、限界出力を増大させるためには燃料棒表面の液膜流量を増大させることが必要である。Fig. 4 よりわかるように、チャンネル壁面の液膜および蒸気流中の液滴は燃料棒の冷却に利用されていない。したがって、スペーサ形状をこの利用されていない冷却材を効率的にロッド冷却に利用するように改良することにより、限界出力を増大できると考えられる。燃料集合体の中央に位置するサブチャンネル

Fig. 4 Flow pattern in BWR flow channel

Fig. 5 Flow tab for the ferrule spacer

では、旋回流が蒸気流中の液滴をロッドに付着される有効な方法である。現在の BWR 燃料に使用されている丸セル・スペーサには、チャンネルボックスに面した最外周ロッドの冷却性能を向上させるために Fig. 5 に示すようなフロートタブを設置している。

フロートタブ等の形状をいろいろ変えて BWR 運転状態での限界出力試験を実施するためには費用と時間がかかる。そこで、限界出力試験に先立って水-空気試験により、フロートタブそして振り板の形状の選択を行った。水-空気試験部の断面形状は限界出力試験部と同じ寸法の 4×4 ロッドバンドルで、スペーサ下流の燃料棒表面の液膜流の質量流量を suction method⁽⁵⁾ により測定した。水-空気試験結果より BWR 条件下での限界出力そのものを外挿することは現段階では難しいが、スペーサ形状を変化させた場合の限界出力性能の定性的な優劣の評価には利用できる。

Fig. 6 には、スペーサの改良部分を示す。改良したスペーサは、Fig. 6(a) に示すように、従来の丸セルスペーサに振り板を取り付け、そして Fig. 6(b) に示すように、フロートタブをバンド①と燃料棒②との間に形成された流路③のほぼ全面を覆うように大型化したものであり、サイクロン・スペーサと名付けた⁽⁶⁾。Fig. 7 に従来スペーサとサイクロン・スペーサの液膜流量の比較を示す。サイクロン・スペーサのスペーサ下流の液膜流量は従来スペーサよりも大きくなっている。これは、振り板によりスペーサ下流に発生する旋回流および大型化されたフロートタブによりチャンネル側からロッド方向への空気流の増大の相乗効果により、空気流中の液滴のロッド表面への付着量が促進されたためと考えられる。

一方、このような状況下では、スペーサ下流で液膜表面からの液滴飛散量が増大することが考えられるが、液膜流量の測定結果を見る限りでは、付着量の増大の方が大きいようである。Fig. 7 より、液膜流量の増大率はサイドロッドよりセンタロッドの方が大きく、この試験結果によればセンタロッドの限界出力の方がより増大すると予測される。このように改良を行ったサイクロン・スペーサを使用した場合、圧力損失の増大が懸念される。このサイクロン・スペーサはスペーサ下流の液膜を増大する。Fig. 3 に示すように、7 個のスペーサが等間隔で設置されており、BT が発生する位置は、下から数えて 7 あるいは 6 番目のスペーサ直前であり、7 番目のスペーサの下流では BT が発生しない。したがって、7 番目のスペーサをサイクロン・スペーサにする必要はない。限界出力性能を高めるという点では、7 番目以外のスペーサをすべてサイクロンにするのがよいが、圧力損失を低減するために、Fig. 3 に示すように、7 個のスペーサのうち、7, 6 番目のスペーサ直前の液膜流量に強く影響すると考えられる 4, 5, 6 番目のスペーサのみをサイクロン・スペーサとし、他のスペーサを従来の丸セルスペーサとした。

Fig. 6 CYCLONE spacer

Fig. 7 Comparison of mass flow liquid film on the rod between the ferrule spacer and CYCLONE spacer under air-water conditions

V. 結果および検討

Fig. 8 に丸セル・スペーサを使用した燃料(以下, 従来燃料)と, Fig. 3 に示すように, サイクロン・スペーサと丸セルを組み合わせて使用した燃料(以下, 改良燃料)の限界出力測定値の比較を示す。図中, プロット○, ●は, それぞれセンターピークおよびサイドピーク・バンドルのデータを示す。横軸は質量速度を, 縦軸は従来燃料と改良燃料の限界出力の比を示す。この図より, BWR 運転状態(1,400 kg/m²・s)での改良燃料の限界出力性能は従来燃料に比較してサイドピークでは約10%, センターピークでは約22%増大していることがわかる。低質量速度において限界出力の増大割合は小さく, 流量が増大するに従い, 増大割合は増加する。この増大割合は約800 kg/m²・sの流量で最大となり, その後流量の増加とともに減少する。低質量速度にお

Fig. 8 Comparison of critical power between CYCLONE spacer and ferrule spacer
Pressure : 7.2 MPa, Subcooling : 50 kJ/kg

けるドライアウト・クオリティは大きく, サブチャンネルにおける液滴量は小さい。したがって, 燃料棒へ付着する液滴量の増加量は低流量では小さく, これが限界出力向上割合が小さい理由と考えられる。増大割合が流量とともに増加していくのは, BTが発生するクオリティが小さくなり, 蒸気中の液滴量が増えるためと考えられる。増大割合が約800 kg/m²・sで最大となり, その後, 流量の増加とともに減少する理由は明確ではないが, 流量の増加に伴い, 液膜からの液滴飛散量も増大し, 液滴の付着量と飛散量の増大がバランスしたのが約800 kg/m²・sで, 流量増加による液滴の付着量増大よりも液膜表面からの液滴飛散量の増

Pressure : 7.2 MPa, Subcooling : 50 kJ/kg

Fig. 9 Comparison of pressure drop between CYCLONE spacer and ferrule spacer

加の方が大きくなるため、流量の増加とともに限界出力増加割合が減少したと考えられる。サイドピークの方がセンタピークに比較して限界出力増大率は小さい。この傾向は前述した水-空気の試験結果 (Fig. 7) の傾向と一致している。

Fig. 9 に、従来燃料と改良燃料の発熱部の全圧力損失の比較を示す。黒く塗り潰したプロット (●, ▲) が従来燃料の結果を示す。定格流量 ($1,400 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) では、クオリティが15~25%の範囲で、約3~5%圧力損失が増大するが、クオリティが10%以下および低流量 ($833 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) で圧損はほぼ同等である。このように圧力損失の増加も小さく、良好な圧力損失性能を有している。

VI. 結 論

次の結論が得られた。

- (1) 従来の丸セルスペースに振り板を取り付け、そしてフロータブを大型化したサイクロン・スペースを試作した。7個のスペースのうち、下から数えて4, 5,

6番目のスペースのみをサイクロン・スペースとし、他のスペースを従来の丸セルスペースとした改良燃料の限界出力性能は、丸セルスペースのみを使用した従来燃料に比較して、定格流量において、約10~22%増大し、一方、圧力損失特性において、定格流量 ($1,400 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) では、クオリティが15~25%の範囲で、約3~5%圧力損失が増大するが、クオリティが10%以下および低流量 ($833 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) で圧損はほぼ同等である。このように従来燃料に比較して圧力損失の増加も小さく、良好な圧力損失性能を有している。

- (2) 空気-水を用いたロッド表面液膜流量測定試験は、限界出力性能を改良するためのスペース形状を選択する有効な手段である。

強度などについて検討し、実機燃料に適用していくつもりである。

本研究で使用したロッド表面液膜流量測定方法は、東京電力(株)、東北電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、中国電力(株)、日本原子力発電(株)、(株)日立製作所、(株)東芝の共同研究により開発したものである。

— 参 考 文 献 —

- (1) 東芝：沸騰水型原子力発電所GETABの概要，TLR-009改定3，(1994)。
- (2) 例えば、稲坂富士夫，他：ねじりテープ挿入管のサブクール沸騰限界熱流束，第27回日本伝熱シンポジウム講演論文集，499 (1990)。
- (3) 山本有紀，他：BWR燃料・炉心技術，東芝レビュー，50 (1)，815 (1995)。
- (4) Kraemer, W., et al.: The ULTRAFLOW spacer—an advanced feature of ATRIUM fuel assemblies for boiling water reactors, *Nucl. Eng. Des.*, 154, 17 (1995)。
- (5) 矢野 隆，他：原子力学会「1995秋の大会」予稿集，E18。
- (6) 師岡慎一，他：燃料スペースおよび燃料集合体，特願平6-265676。