

サブチャンネル解析コードによる BWR 限界出力試験の解析*
(スぺーサモデルに含まれる未知定数の決定)光 武 徹*¹, 師 岡 慎 一*¹
山 本 泰*¹, 木 村 次 郎*²Critical Power Experimental Analysis Using Subchannel Analysis Code
(Unknown Parameter Estimation in Spacer Model)Toru MITSUTAKE, Shin-ichi MOROOKA,
Yasushi YAMAMOTO and Jiro KIMURA

In order to predict the critical power of a BWR rod bundle by calculation, we have developed a fuel rod spacer effect model for quantitative estimation of the spacer effect on film flow on a fuel rod surface. Unknown parameters introduced in the spacer effect model are determined, based on critical power test data conducted at the Toshiba 4×4 bundle test loop. In this parameter estimation procedure, a boiling transition (BT) rod position effect is included, using critical power test data in which BT is expected to occur at different rod positions. The spacer model developed in the present program has been implemented in the film flow model subchannel analysis code CRIP version 2, and the calculated critical power is compared with the 4×4 bundle test data. The results of measurement and analysis show good agreement.

Key Words: BWR, Dryout, Subchannel Analysis, Spacer Effect Model

1. 緒 言

流動沸騰系の伝熱過程は蒸気クオリティが増加すると共に、核沸騰域、強制対流蒸発域、ポストドライアウト域の3つに区分される⁽¹⁾。特に、ポストドライアウト域における伝熱は壁面の乾いた噴霧流熱伝達となり、熱伝達率が低下するため、ドライアウト点（ポストドライアウト開始点）は種々の伝熱機器設計の限界点と位置づけられている。沸騰水型原子炉（BWR=Boiling Water Nuclear Reactor）燃料設計においても、上述の熱伝達が低下する熱出力は限界出力と呼ばれ、設計限界となっている。本研究では、この限界出力を精度良く予測するための予測手法の開発を行なっている^{(2)、(3)}。

ロッド間隔を保持する燃料スぺーサは限界出力に及ぼす影響の大きいことが実験的に確認されているので、限界出力を精度良く予測するためには、スぺーサの影響（スぺーサ効果モデル）をどのように評価するかが重要

なポイントである。しかしながら、現状ではスぺーサ効果を解析的に予測することはできない^{(2)、(3)}。

スぺーサ効果モデル開発に関する従来研究には、水-空気条件のロッド表面液膜厚さデータに基づいてスぺーサ前後の液膜厚さ変化をモデル化する研究⁽⁴⁾や実規模バンドルの限界出力データに基づいてスぺーサピッチ（軸方向間隔）の及ぼす限界出力変化を評価する研究⁽⁵⁾などがある。しかし、著者の知る範囲ではドライアウトが発生するロッド位置によりスぺーサ効果が異なることを考慮した研究は行なわれていない。

そこで、本研究では、ドライアウトが発生するロッド位置が変化した場合の限界出力への影響を測定し、得られた限界出力試験データと解析結果との比較によりスぺーサ効果モデルの開発を行なった。

2. スペーサ効果モデル

本研究で用いているスぺーサ効果モデルについて図1を用いて説明する。本モデルでは、スぺーサの上流および下流側のロッド表面の液膜流への影響を考慮している⁽⁶⁾。

* 原稿受付 平成5年3月22日。

*¹ 正員、(株)東芝 原子力技術研究所(〒235 横浜市磯子区新杉田町8)。*² (株)東芝 原子炉設計部(〒235 横浜市磯子区新杉田町8)。

スパーサ上流側では、スパーサ部材により流路面積が減少するため、蒸気流が加速し、気液界面での相対速度が増加する結果、液膜からの液滴発生が増加すると考えられる(図1の①効果)。ここでは、このような液滴発生量の増大または液膜流量の減少量 $E_{sp}^{①}$ を、全動圧 $\Delta P_{2\phi}$ に対する蒸気流の動圧 ΔP_v の比、液膜流量 W_{LF} 及び、ロッド表面からスパーサ部材までの距離 Si に比例するとして次式のようにモデル化した⁽⁷⁾。

$$E_{sp}^{①} = \eta_{SL} Si W_{LF} (\Delta P_v / \Delta P_{2\phi}) \quad (1)$$

スパーサ下流側への影響として、本モデルではスパーサ部材への液滴衝突による液滴沈着増加量 $D_{sp}^{②}$ (図1の②)、ミキシングによる液滴沈着増加量 $D_{sp}^{③}$ (図1の③)および液滴発生増加量 $E_{sp}^{④}$ (図1の④)を考慮した。

スパーサ部材に衝突した液滴は一部分が跳ね返り液膜に沈着すると考えられる。スパーサ部材への液滴衝突量は、蒸気流中の液滴分布を一様と仮定すると、スパーサ部材の流路面積に占める割合 $Asp / Ax-s$ と液滴質量流束 G_B との積として求めることができる。この衝突量のうち液膜に沈着する割合を η_{imp} とすると、スパーサ部材への液滴衝突による液滴沈着増加量 $D_{sp}^{②}$ は次式のようにモデル化することができる(図1の②)。

$$D_{sp}^{②} = \eta_{imp} Asp / Ax-s G_B \quad (2)$$

次に、スパーサ下流では蒸気流の乱れが増大するため、スパーサが無い場合に比較して液滴沈着および液滴発生量は増加する。ここではスパーサがない場合の液滴沈着率および発生率をそれぞれ D_B 、 E_B 、スパーサの存在による増加率をそれぞれ η_D 、 η_E としてスパーサによる流れのミキシング促進による液滴沈着増加量 $D_{sp}^{③}$ 、

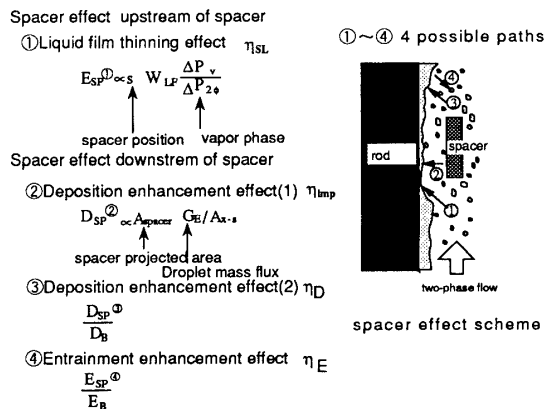


図1 スパーサ効果モデル

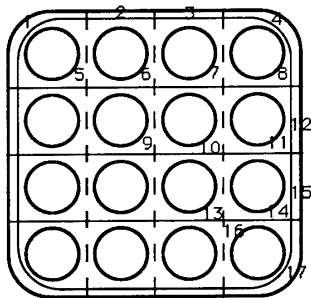


図2 4x4バンドルのサブチャンネル分割

液滴発生増加量 $E_{sp}^{④}$ を、次式のようにモデル化した。

$$D_{sp}^{③} = \eta_D D_B \quad (3)$$

$$E_{sp}^{④} = \eta_E E_B \quad (4)$$

スパーサ下流では上述した効果がスパーサからの距離に従って指数関数的に減少することが知られているが、今回の解析ではスパーサの下流側の1ノードの範囲でだけ、スパーサの影響を考慮しており、それ以外のノードではスパーサが無い場合の値を用いている。スパーサがない場合の値 D_B 、 E_B はHarwell 研(英国)の相関式⁽⁸⁾を用いている。

以上、本研究で用いているスパーサモデルについて説明したが、式(1)~(4)に含まれる定数 η_{SL} 、 η_{imp} 、 η_D 、 η_E は解析的に求められないので、現状では限界出力の測定データに合うように決めている。

3. 解析方法

前章に示したスパーサ効果モデルをサブチャンネル解析コードCRIP version2⁽²⁾に組み込んで限界出力の予測を行なった。本解析コードは、環状噴霧流様式の二相流状態を現象論的にモデル化し、蒸気・液滴・液膜からなる3流体モデルを用いている。ドライアウトの評価は液膜流量が減少するように熱出力を増加させていき、解析で求められた液膜流量=0で判定している。従って、限界熱流束(CHF)などの経験的な相関式を必要としない点に特徴がある。3流体(蒸気・液滴・液膜)の流速、体積分率、エンタルピーは質量保存式、エネルギー保存式、運動量保存式を解いて求めている。横方向の輸送については、圧力分布がなくなるように蒸気流量を配分し、液滴は蒸気に随伴して運ばれると仮定する簡単化を行なっている。

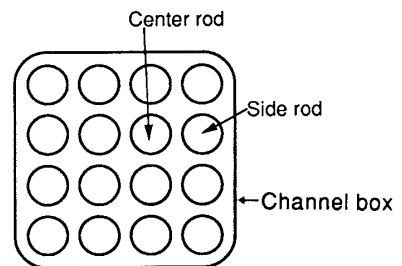
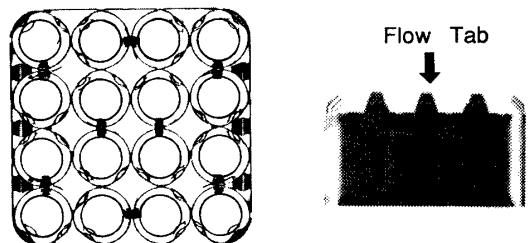


図3 4x4 BWR模擬バンドル



(a) 流れ方向から見た図 (b) 側面から見た図

図4 丸セル型スパーサ

サブチャンネル配列は、図2に示すロッド中心サブチャンネル分割で、サブチャンネル数は合計17ヶで、図中の数字はサブチャンネル番号を示している。

4. 未知定数 η_D の決定

上述したように、本研究で使用しているスパーサモデルには、計算では求められない未知定数が含まれているため、現状では限界出力の測定データに合うように決めている。本章では、未知定数を決定する方法について説明する。

用いる限界出力試験データは、図3に示すBWR燃料棒と同じ形状の模擬燃料棒を4行4列の正方格子に配列した試験体（以下4x4バンドル）により測定したものである。スパーサとしては図4に示す丸セル型スパーサを用いた。軸方向出力分布形はコサインである。径方向出力分布形は、センタロッドにロッド出力のピークのある分布とサイドロッドにロッド出力のピークのある分布の2種類である。ドライアウトが発生するロッド位置（以下ドライアウトロッド）は、センタロッドにピークのある出力分布ではサブチャンネル⑨⑩⑬（図2中の番号）に含まれるセンタロッド、サイドロッドにピークのある出力分布ではサイドロッドサブチャンネル⑥（図2中の番号）に含まれるサイドロッドである。試験条件は、BWR運転条件を模擬した圧力7MPa、質量流束300-1600kg/m²sである。

図5はスパーサモデルを含まない計算結果と限界出力測定値との比較を示す。図中、プロット○、□および破線はそれぞれ測定値および計算値を示す。センタロッドピーク試験体の限界出力測定値（以下センタロッド測定値）と計算値は若干測定値のほうが大きいがほぼ等しく、本解析ではセンタロッドでの限界出力に対するスパーサ効果は小さいことを示している。一方、サイドロッドピーク試験体の限界出力測定値（以下サイドロッド測定値）は計算値より大きく、スパーサの存在により限界出力が増加している。この増大は主としてスパーサ下流部でのミキシング（乱れ）増大により、断面内の二相流分布が均一化するためと考えられる。この効果を促進するものとしてスパーサ外周に取付けられたフロータブ（図4(b)参照）の影響が大きいと考えられる。また、サイドロッドピークでは、低流量範囲 $G < 1120 \text{ kg/m}^2\text{s}$ で測定値と計算値の差が大きいことから、低流量範囲でスパーサ効果を考慮することが必要と考えられる。解析に用いたスパーサモデルではスパーサによるミキシング効果である二相流分布の均一化を直接考慮していないが、均一化をもたらす横方向流れにより主流中の液滴が運ばれ、ロッド表面に沈着する過程を考慮している（図1の③の効果）。即ち、ミキシングによる液滴沈着増加率 η_D を定めることにより、この効果を表すことができると考えられる。

上記のスパーサモデルなしの計算値との比較検討より、ミキシングによる液滴沈着増加割合 $D_{sp}^{\textcircled{D}}$ （増加率 η_D ）を調整することにより、センタロッド測定値と計算値を一致するようにした。 η_D は一定値を仮定した。その結果を図6に示す。図より、測定値と計算値は低流量範囲で良く一致するが、高流量条件では測定値に比較して計算値が大きくなっている。この原因として次の2点が考えられる。

- (1) ミキシングによる液滴沈着増加率 η_D が流量に対して一定ではない
- (2) ミキシングによる液滴沈着増加率 $D_{sp}^{\textcircled{D}}$ 以外のスパーサ効果がある

上記(1)のミキシング効果は高流量側でより強くなると考えられるので、ミキシングの流量依存性を考慮すると限界出力は増加する方向であり、高流量側のズレを拡大する方向になる。一方、高流量ではスパーサ上流での液膜の薄肉化効果（図1の①の効果）が低流量に比較してより顕著になると考えられるので、ここでは高流量側での両者の差を、液滴発生増加率 $E_{sp}^{\textcircled{D}}$ （増加率 η_{SL} ）を調整することにより、測定値と計算値を一致するようにした。図7に、測定値と計算値との比較を示すが、5%以内で両者は一致するようになった。

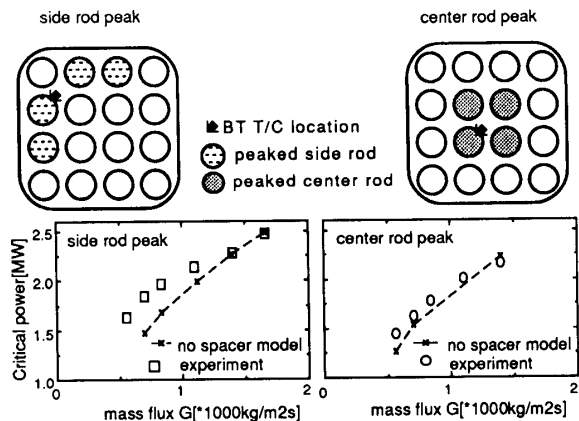


図5 スパーサモデルなしの解析と測定との比較

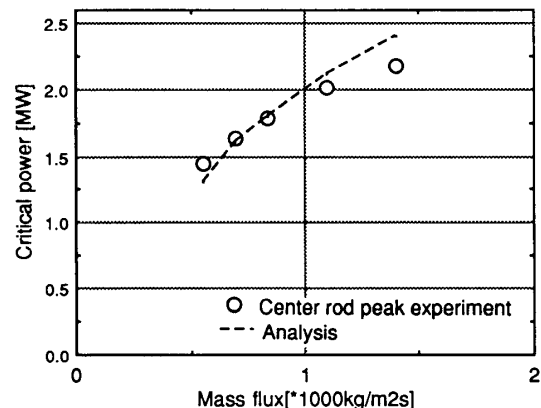


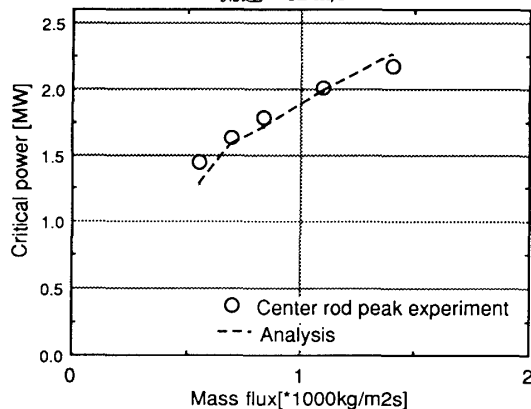
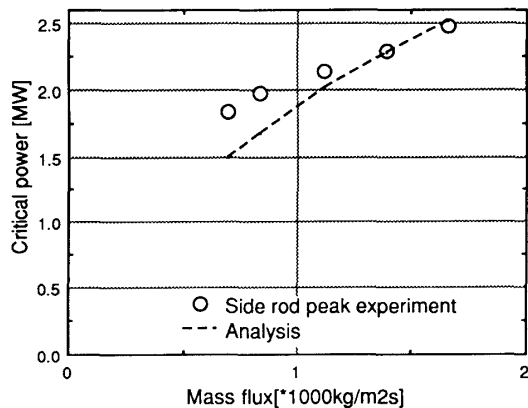
図6 限界出力試験データとの比較
センタロッドピーク

センタロッドピーク測定値に基づいて決定した未知定数の値を用いた計算値とサイドロッド測定値との比較を図8に示す。図より、質量流束 $G > 1100$ [kg/m²s]の高流量範囲では解析値と測定値は5%以内で一致している。このことから、高流量範囲のサイドロッド位置でのスぺーサ効果はセンタロッド位置と同じと考えてよいことがわかる。一方、質量流束 $G < 830$ [kg/m²s]の低流量範囲では解析値は測定値より約15-20%小さいことから、この範囲ではサイドロッド位置に特有のスぺーサ効果を考慮する必要があると思われる。

スぺーサの外枠がサイドロッドセルの外周部にあり、また外枠には図4(b)に示すようなフロータブが設けられており、これがサイドロッド位置特有のスぺーサ効果をもたらすと考えられる。図9に汎用流れ解析コードPHOENICS⁽⁹⁾を用いて表1の条件で解析したスぺーサ前後の蒸気流の流れ状況を示す。

表1. 解析条件

解析コード	PHOENICS
モデル	蒸気単相流 層流モデル
メッシュ数	38*38*22 (境界適合メッシュ) スぺーサ形状考慮
解析体系	41mm*41mm*240mm
流体条件	圧力 7 MPa 流速 12 m/s

図7 限界出力試験データとの比較
センタロッドピーク図8 限界出力試験データとの比較
サイドロッドピーク

スぺーサ上端の流れ解析結果によると、フロータブの効果でチャンネルボックスからバンドル内部への速度成分が増大していることがわかる。この流れにより、チャンネルボックス内壁面上を流れる液膜の剥離（液滴の発生）・チャンネルボックス近辺の液滴の横方向輸送とロッド表面（とくにサイドロッド）への液滴沈着が増大することが考えられる。そこで、ミキシングによる液滴沈着増加量 D_{sp} ^③（増加率 η_D ）を調整することにより、低流量での測定値と計算値とを一致するようにした。

以上の決定した未知定数の値を表2に示す。

表2 スぺーサ効果モデル未知定数の数値

a. 高流量条件 ($G \geq 1390$ kg/m²s)

気相偏流による液膜薄肉化 $\eta_{SL} = 3.0$

ミキシングによる液滴沈着促進 $\eta_D = 0.4$

なお、ミキシングによる沈着促進に関する定数 η_E 、 η_D は両者を分けることなく、 η_D に集約して評価している。

b. 低流量条件 ($G < 1390$ kg/m²s)

(センタサブチャンネルは a. と同じ)

(サイドロッド側サブチャンネル = ⑥⑦⑪⑫)

気相偏流による液膜薄肉化 $\eta_{SL} = 3.0$

ミキシングによる液滴沈着促進

$$\eta_D = 32.83 \times 10^{-1.913 \frac{G}{G_0}}$$

ただし、 $G_0 = 1390$ kg/m²s

5. 測定値と計算値との比較検討

図10には、スぺーサモデルにより計算したロッド表面液膜流量の軸方向分布結果を示す。この場合、未知定数の値としては表2を用いた。図より、スぺーサ下流部で液膜流量が増加し、加熱終端から第1スぺーサ直上流部で液膜が消失（ドライアウト）していることがわかる。これはスぺーサ効果を考慮しているためで、実験においても第1スぺーサ直上流部でドライアウトが発生している。

図11(a)はサイドロッド限界出力測定値と計算値との比較を示す。図中、実線、破線はスぺーサモデルがある場合とない場合の計算結果を示す。図より、計算では、スぺーサモデルあり／なしの計算値は高流量条件で互い

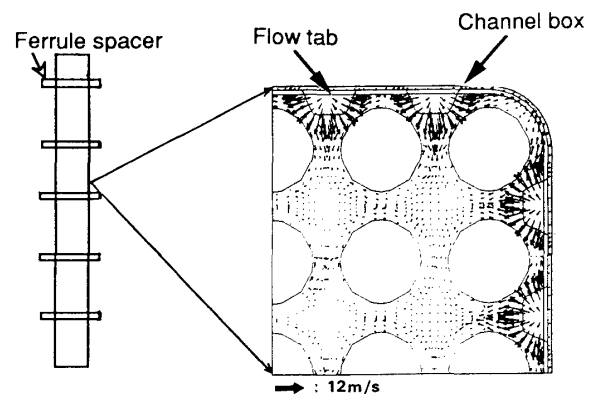


図9 スぺーサ上端部の蒸気流速分布

にはほぼ等しいが、低流量条件でスパーサモデルありの限界出力が大きくなり、測定値との一致も良好である。図11(b)はドライアウトロッドがサイドロッドとセンタロッドの場合の計算値(スパーサモデルを考慮)を比較したものである。サイドロッドピークの計算値は、センタロッドピークに比べて低流量側で大きく、高流量側で両者は漸近している。この結果は図5の実験の傾向と一致している。本報告のスパーサモデルは、チャンネルボックス側の液膜が剥離し、サイドロッドへ液滴沈着が増加する効果を考慮しているため、実験と一致する傾向が得られたと考えられる。

図12に限界出力試験の測定値とスパーサモデルを考慮した場合の計算値との比較結果を示す。図中のスパーサモデルを考慮した場合及び、スパーサモデルを考慮しない場合の統計評価結果を表3に示す。

表3 限界出力測定値Eと解析値Cの比較

	スパーサモデル なし	あり
(C-E)/E 平均値	-5.9%	-1.8%
(C-E)/E 標準偏差	7.5%	4.1%

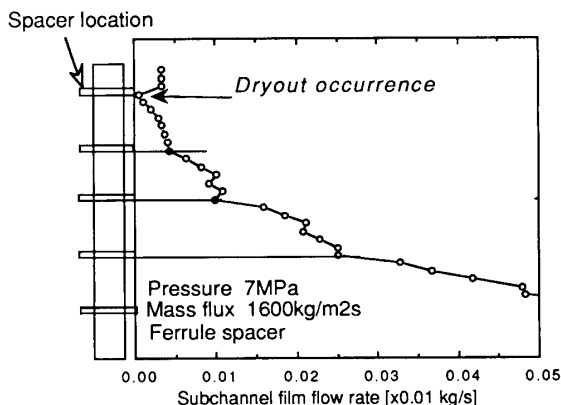


図10 ドライアウト条件の軸方向液膜分布

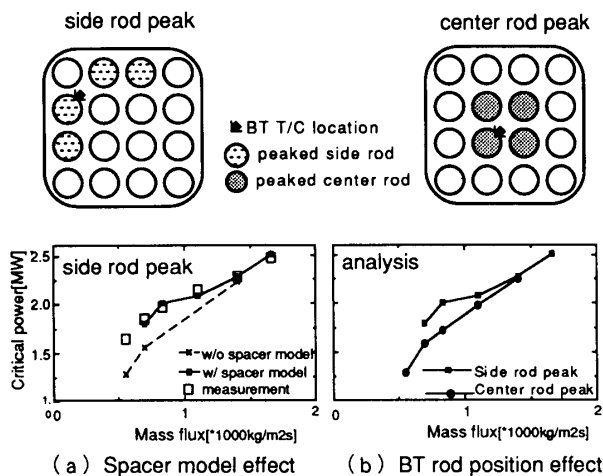


図11 解析結果と測定結果との比較

表より、スパーサモデルを考慮しない解析値はバイアス誤差が大きく、測定値を過小評価したが本スパーサモデルを用いることによりバイアス誤差が減少し、標準偏差は4.1%と小さくなった。上記データにはドライアウト位置の異なる試験が含まれているが、本スパーサモデルによりドライアウトロッド位置の違いによる限界出力の違いを良く評価できていることがわかる。

6. 結論

本研究結果は下記のように要約できる。

1. スパーサの及ぼすロッド表面液膜流への影響として次の4点を考慮した。
 - ①気相偏流による液膜薄肉化効果、②スパーサ材への液滴衝突による液滴沈着増加、③ミキシングによる液滴沈着増加、④ミキシングによる液滴発生増加。
2. スパーサの及ぼす限界出力への影響は下記のようにドライアウトが発生するロッド位置により異なる。
 - (1) センタロッドピーク径方向出力分布では影響は小さい
 - (2) サイドロッドピーク径方向出力分布では低流量側で限界出力は増加する
3. 実験結果に基づいてスパーサ効果モデルを作成した。本モデルの特徴は、ロッド位置により異なるスパーサ効果を組み込んだことである。

この結果より、サイドロッド及びセンタロッドで生ずるドライアウト発生条件である限界出力をスパーサ効果モデルを導入した本解析コードで良く予測できることがわかった。

なお、現在のスパーサモデルは解析では評価できない未知定数があるため、測定値に一致するように未知定数の値を決定している。今後は、二相流詳細コード⁽¹⁰⁾、⁽¹¹⁾または簡単な試験(たとえば水-空気二相流試験⁽¹²⁾)により未知定数を決定する方法を開発していく必要があると思われる。

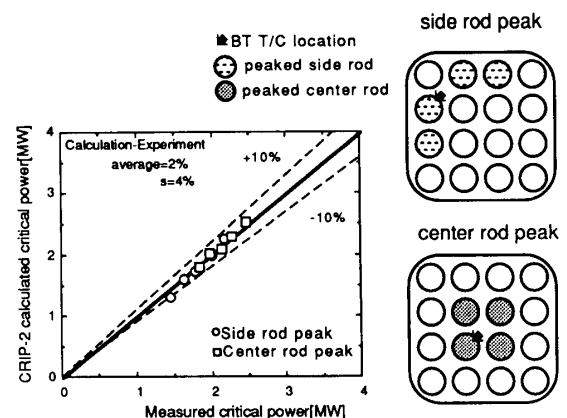


図12 サブチャンネル解析コードCRIP version2.0 4x4バンドル限界出力測定値との比較

文 献

- (1) 伝熱工学資料、日本機械学会1986
- (2) 光武、師岡、石塚、吉村、燃料スぺーサ限界出力試験の解析、日本原子力学会「1992春の年会」
- (3) 山本、光武、師岡、木村、サブチャンネル解析コードによるBWR限界出力試験の解析、日本原子力学会「1992秋の大会」
- (4) Nishida,K., et al., Spacer Effect on Liquid Film Flow and Critical Power in BWR Fuel Bundle, The 1st JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering, Nov. 4-7, 1991
- (5) T.Sakai, and S.Sugawara, Application of Three-Fluid Code FIDAS to Dryout Prediction for Rod Bundles, Proceeding of the International Conference on Multiphase Flows '91-Tsukuba, Sept. 24-27, 1991
- (6) Mitsutake,T., et al., Subchannel analysis of a critical power test, using simulated BWR 8x8 fuel assembly, Nucl. Engng. and Des. 122(1990)235
- (7) 寺坂、平田、障害物周辺の二相流動解析、第21回日本伝熱シンポジウム (1984)
- (8) Hewitt, G. F., Annular Flow Phenomena, 混相流サテライトセミナー大阪、平成3年9月
- (9) Spalding,D.B., A General-Purpose Computer Program for Multidimensional One- and Two-Phase Flows, Math. Comp. Simulation, 23(1981)
- (10) Kanazawa,T., Nishida,K., Yokomizo,O., Kawabe,K., Analysis on deposition characteristics of coolant droplets in fuel assembly, J. Nucl. Sci. Technol., 29(1992) 175
- (11) 山本、光武、師岡、木村、サブチャンネル解析コードにおけるスぺーサ効果モデルの評価手法、日本原子力学会「1993春の年会」
- (12) 星出、新留、師岡、石塚、空気-水二相流管群内の液膜挙動に関する研究、第29回日本伝熱シンポジウム、1992