

COBRA-EN のクロスフローモデルの検討

Evaluation of Cross Flow Models in COBRA-EN

西田 浩二 (Koji Nishida)^{*1} 櫻井 征太郎 (Seitaro Sakurai)^{*1} 高浪 祐明 (Hiroaki Takanami)^{*1}

要約 サブチャンネル解析コード COBRA-EN のクロスフローモデルを、圧力 7 MPa における 3×3 集合体、圧力 16 MPa における 4×4 集合体のコーナー、サイド、インナーサブチャンネルの質量速度、クオリティの測定値を用いて検討した。計算値は 7 MPa におけるコーナーサブチャンネルの質量速度の測定値を過小評価、クオリティの測定値を過大評価した。また計算値は 16 MPa におけるコーナーサブチャンネルの質量速度を若干過小評価するが、サイド、インナーの質量速度、クオリティの計算値は測定値と比較的良く一致した。ボイドドリフトが流動様式に依存すると考え、ボイドドリフト係数をボイド率の関数としたボイドドリフトモデルを COBRA-EN に実装した。ボイドドリフトモデルの実装により、7 MPa におけるコーナーサブチャンネルの質量速度、クオリティの計算値が測定値に近づいた。16 MPa におけるコーナー、サイド、インナーサブチャンネルの質量速度、クオリティの計算値は実装前と大きく差はなく、コーナーサブチャンネルの質量速度を若干過小評価するが、計算値と測定値は比較的良く一致することを確認した。

キーワード 燃料集合体、サブチャンネル解析、クロスフロー、質量速度、クオリティ、ボイドドリフト

Abstract The cross flow model of the subchannel analysis code COBRA-EN was evaluated using measured mass velocities and qualities of the corner, side, and center subchannels of a 3 × 3 assembly at 7 MPa and a 4 × 4 assembly at 16 MPa. The computed values underestimated for the mass velocity and overestimated for the quality of the corner subchannel at 7 MPa. The computed values slightly underestimated for the mass velocity of the corner subchannel at 16 MPa, but the computed qualities were relatively consistent with the measured values. Considering that the void drift depends on the flow pattern, the void drift coefficient as a function of void fraction was incorporated into COBRA-EN. With the implementation of the void drift model, the computed mass velocities and qualities at the corner, side, and center at 7 MPa showed better estimation of the measured values, and the computed mass velocities and qualities at the corner, side, and center at 16 MPa did not differ significantly from those before implementation and agreed relatively well.

Keywords fuel bundle, subchannel analysis, cross flow, mass velocity, quality, void drift

1. はじめに

過渡、事故時の炉心の熱水力挙動、燃料被覆管温度を評価することは、炉心の健全性を判断する上で必要である。それらの評価には、燃料集合体を最小単位とする RELAP5⁽¹⁾、TRAC⁽²⁾等のシステム解析コードが一般的に用いられている。また、燃料集合体の熱流動挙動をサブチャンネル（燃料棒等で囲まれた小流路）単位で評価する COBRA-EN⁽³⁾、COBRAG⁽⁴⁾等のサブチャンネル解析コードがあり、システム解析コードとサブチャンネル解析コードを連携させて炉心の熱水力挙動、燃料被覆管温度を詳細に評価する解析手法の開発も進められている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

PWR の熱水力設計の検討項目の一つに Critical Heat Flux (CHF) があり、CHF の評価にはサブチャンネル解析コードと CHF 相関式が用いられている。CHF 相関式は、想定さ

れる燃料集合体の熱水力条件を包含する試験データに基づいて作成される。

INSS では、過渡、事故解析コード RELAP5 への適用を前提に、サブチャンネル解析コード COBRA-EN の整備を進めている。これまでに COBRA-EN と EPRI の CHF 相関式をコロンビア大学の CHF 試験⁽⁷⁾に適用し、高い予測精度があることを確認している⁽⁸⁾。

コロンビア大学の CHF 試験は PWR を対象に 12.7～16.1 MPa の高圧条件で実施されているが、事故時には 1 次系圧力が 2 次系圧力近くまで低下する場合もあることから、低圧条件も含めて COBRA-EN の適用性を確認することが望まれる。

サブチャンネル解析では、サブチャンネル毎の流量、エンタルピーを隣接するサブチャンネルとのクロスフローを考慮して評価する。COBRA-EN のサブチャンネル間の

* 1 (株) 原子力安全システム研究所 技術システム研究所

クロスフローの計算では、隣接するサブチャンネル間の圧力差による差圧移動と速度変動による乱流混合がモデル化されている。7 MPa では、隣接サブチャンネル間の時間平均の差圧が無くても、流れが平衡状態に近づく様にボイドドリフト⁹⁾によるクロスフローが生じることが示されている。

本研究では低圧 7 MPa から運転圧力相当の 16 MPa に適用できる COBRA-EN のクロスフローモデルの構築を目標としている。本報では COBRA-EN のクロスフローモデルにボイドドリフトモデルを実装し、7 MPa、16 MPa における集合体のサブチャンネル質量速度、クオリティの測定値を用いてクロスフローモデルについて検討する。

2. クロスフロー試験

2.1 試験の概要

本研究では、COBRA-EN のクロスフローモデルを圧力 7 MPa で実施された Lahey ら⁽¹⁰⁾の 3×3 集合体の試験データ、圧力 16 MPa で実施された Herkenrath ら⁽¹¹⁾の 4×4 集合体の試験データを用いて検討する。検討に用いたデータ範囲を表 1 に示す。本研究では、ボイドドリフトについて検討することから、集合体出口でのクオリティが 0 より大きいデータを用いた。

Lahey ら⁽¹⁰⁾の 3×3 集合体を図 1 に示す。内幅 58.8 mm のチャンネル内に外径 14.48 mm のヒータロッドを 3×3 に正方配列した。発熱長は 1.8 m であり、その下方の非加熱長は 1.2 m であった。ヒータロッドの相対出力は均一であり、軸方向の出力分布も同様であった。ヒータロッドの間隙は細いピンによって維持した。これにより燃料スペーサでの強制混合を出来るだけ排除したクロスフロー試験データを得た。試験では、集合体出口のサブチャンネル①、②、③を薄板で仕切り、各サブチャンネルの流量は熱交換器で蒸気を凝縮させた後に流量計で計測し、クオリティは熱交換器での熱交換量を測定して算出した。

Herkenrath ら⁽¹¹⁾の 4×4 集合体を図 2 に示す。内幅 59.5 mm のチャンネル内に外径 10.75 mm のヒータロッドを 4×4 に正方配列した。発熱長は実機相当の 3.66 m であり、スペーサが軸方向に 0.5 m の間隔で 8 段設けられた。試験では燃料スペーサによる強制混合が含まれたクロスフロー試験データを得た。ヒータロッドの相対出力は均一であり、軸方向の出力分布も同様であった。集合体出口のサブチャンネル①～⑤を薄板で仕切り、Lahey らの試験と同様な方法でサブチャンネルの流量、クオリティを測定した。

表 1 データ範囲

	3×3	4×4
Pressure [MPa]	7	16
Mass velocity [kg/(m ² s)]	720-1460	2180-3250
Exit quality [-]	0.03-0.32	0.05-0.20

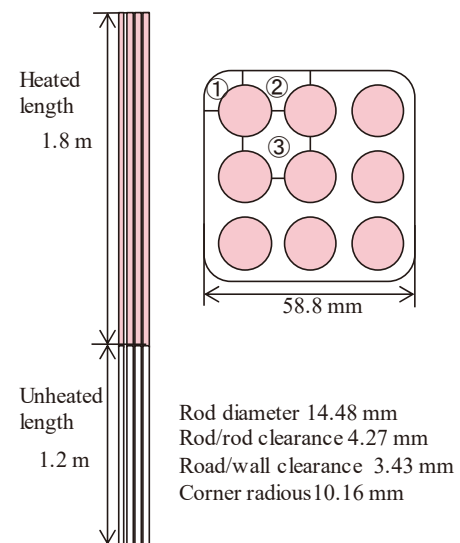


図 1 7 MPa における 3×3 集合体⁽¹⁰⁾

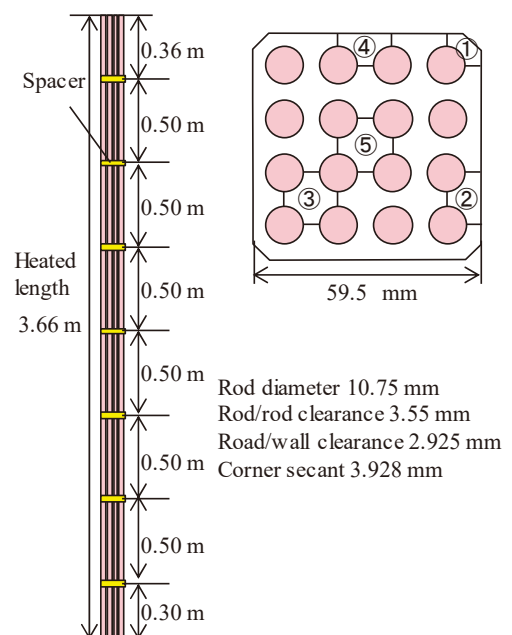


図 2 16 MPa における 4×4 集合体⁽¹¹⁾

2.2 試験データの特徴

圧力 7 MPa における 3×3 集合体、圧力 16 MPa における 4×4 集合体で測定された集合体出口のサブチャンネルの質量速度、クオリティの特徴について述べる。

圧力 7 MPa における 3×3 集合体出口のサブチャンネル①, ②, ③ (以後、コーナー、サイド、インナーと称す) の質量速度を集合体平均の質量速度に対して図 3 に示す。コーナー、サイドの質量速度は集合体平均より小さくなる傾向があり、逆に、インナーの質量速度は集合体平均より若干ではあるが大きくなる傾向がある。

3×3 集合体出口のクオリティの測定値を集合体平均の出口クオリティに対して図 4 に示す。コーナー、サイドのクオリティは集合体平均より小さくなる傾向があり、逆に、インナーは集合体平均より若干大きくなる傾向がある。

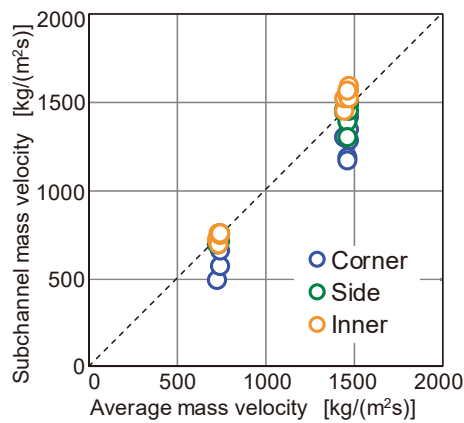


図 3 サブチャンネルの質量速度 (7 MPa)⁽¹⁰⁾

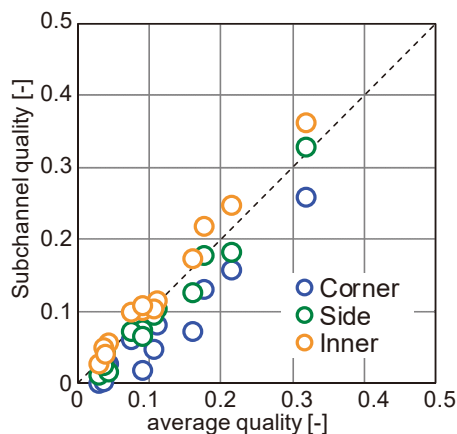


図 4 サブチャンネルのクオリティ (7 MPa)⁽¹⁰⁾

圧力 16 MPa における 4×4 集合体出口でのサブチャンネルの質量速度、クオリティはサブチャンネル①～⑤で測

定された。圧力 7 MPa での 3×3 集合体の測定結果と比較するために、代表的なサブチャンネル①, ②, ③ (以後、コーナー、サイド、インナーと称す) の質量速度、クオリティを集合体平均に対して図 5 に示す。

コーナー、サイド、インナーの質量速度は集合体平均の質量速度に近く、圧力 7 MPa の時に見られたサブチャンネル間での大きな差はない。

4×4 集合体出口のコーナー、サイド、インナーのクオリティを集合体平均の出口のクオリティに対して図 6 に示す。圧力 16 MPa ではコーナー、サイド、インナーのクオリティは集合体平均のクオリティに近く、圧力 7 MPa の時に見られたサブチャンネル間での大きな差はない。

以上の試験結果をまとめると、圧力 7 MPa と 16 MPa で以下の様な差があった。7 MPa の 3×3 集合体出口ではコーナーの質量速度、クオリティ共に集合体平均より小さくなった。一方、16 MPa の 4×4 集合体出口では、コーナー、サイド、インナーで質量速度、クオリティに大きな差がなかった。

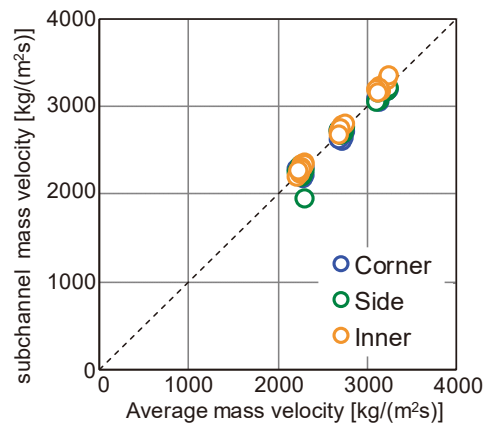


図 5 サブチャンネルの質量速度 (16 MPa)⁽¹¹⁾

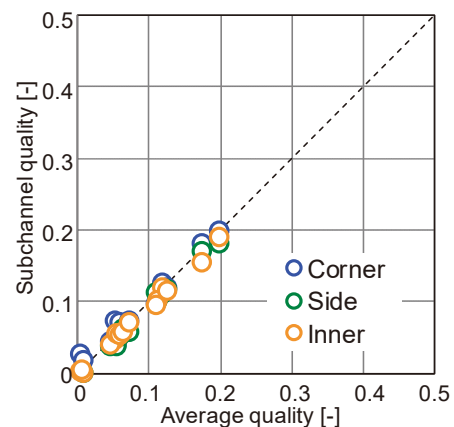


図 6 サブチャンネルのクオリティ (16 MPa)⁽¹¹⁾

3. クロスフローモデルの検討

3.1 計算方法と計算結果

COBRA-EN での質量速度、クオリティの計算は、集合体横断面の対称性を考慮して図 7 に示す集合体の 1/8 部分について実施した。3×3 集合体は 3 サブチャンネル、4×4 集合体は 6 サブチャンネルとした。軸方向は 3×3 集合体では発熱長 1.8 m を 24 分割、非加熱長 1.2 m を 16 分割とした。4×4 集合体では発熱長 3.66 m を 32 分割とした。4×4 集合体の計算では、9 個の燃料スペーサの強制混合も COBRA-EN に組み込まれているモデルで考慮した。

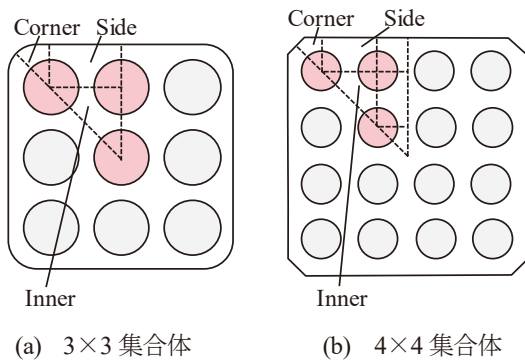


図 7 サブチャンネル分割

7 MPa における 3×3 集合体出口のコーナー、サイド、インナーの質量速度、クオリティの測定値⁽¹⁰⁾と計算値の比較を図 8, 9 に示す。集合体出口のコーナーの質量速度の計算値は測定値を過小評価する傾向があり、クオリティの計算値は測定値を過大評価した。

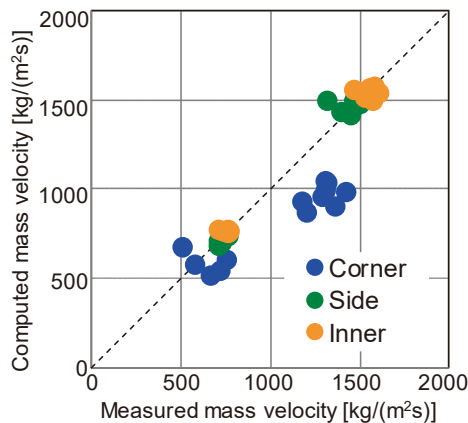


図 8 質量速度の測定値⁽¹⁰⁾と計算値の比較 (7 MPa)

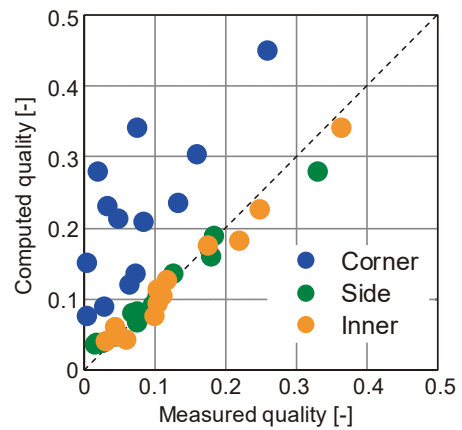


図 9 クオリティの測定値⁽¹⁰⁾と計算値の比較 (7 MPa)

16 MPa における 4×4 集合体出口のコーナー、サイド、インナーの質量速度、クオリティの測定値⁽¹¹⁾と計算値の比較を図 10, 11 に示す。コーナーの質量速度の計算値は測定値を若干過小評価するが、サイド、インナーの質量速度、クオリティの計算値と測定値は比較的良く一致した。

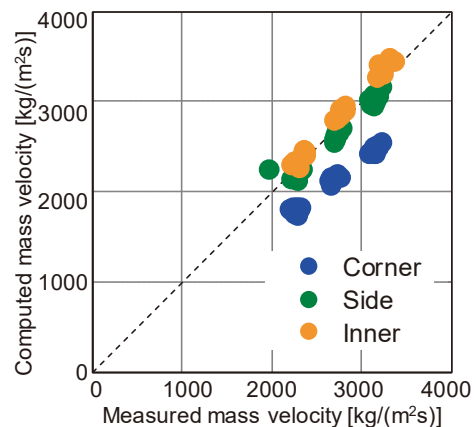


図 10 質量速度の測定値⁽¹¹⁾と計算値の比較 (16 MPa)

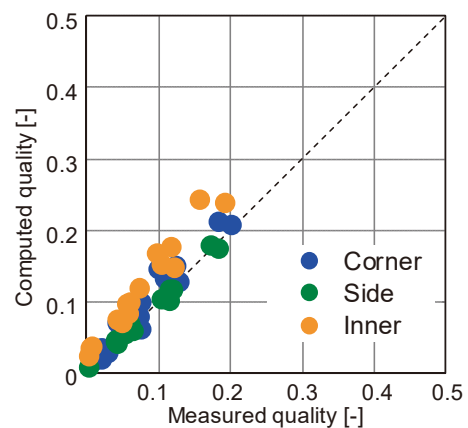


図 11 クオリティの測定値⁽¹¹⁾と計算値の比較 (16 MPa)

以上、COBRA-EN で 7 MPa における 3×3 集合体、16 MPa における 4×4 集合体のサブチャンネル解析を実施した結果、以下のことがわかった。

7 MPa における 3×3 集合体では、COBRA-EN の計算値はコーナーの質量速度の測定値を過小評価し、クオリティの測定値を過大評価することがわかった。コーナーの蒸気がボイドドリフトの効果により、サイド、インナーに移動したためと考えられる。16 MPa における 4×4 集合体では、計算ではコーナーの質量速度の測定値を若干過小評価するが、サイド、インナーの質量速度、クオリティの計算値と測定値は比較的良く一致した。

3.2 ボイドドリフトモデルの実装

COBRA-EN のクロスフローモデルでは、サブチャンネル i, j 間のクロスフロー流量 W'_{ij} を差圧移動による流量 W'_{cf} と乱流混合による流量 W'_{mix} による(1)式で計算している。

$$W'_{ij} = W'_{cf} + W'_{mix} \quad (1)$$

本研究では差圧移動、乱流混合からなるクロスフローモデルにボイドドリフトを実装する。差圧移動による流量 W'_{cf} 、乱流混合による流量 W'_{mix} 、ボイドドリフトによる流量 W'_{vd} によるクロスフロー流量 W'_{ij} を、サブチャンネル解析コード MATRA の Yoo ら⁽¹²⁾のクロスフローモデルと同じく、(2)式で計算する。

$$W'_{cf} + W'_{mix} + W'_{vd} = W'_{cf} + W'_{mix} [(\alpha_j - \alpha_i) - C_{vd}(G_j - G_i) \alpha_{ave}/G_{ave}] \quad (2)$$

ここで α はボイド率、 G は軸方向の質量速度、 C_{vd} はボイドドリフト係数であり、添え字 i, j はサブチャンネルの値、 ave は隣接するサブチャンネル i, j の平均値である。

Yoo らは 7 MPa におけるボイドドリフト係数 C_{vd} をスラグ流で 1.5、環状噴霧流で 5 とし、スラグ流から環状噴霧流の遷移条件に Wallis 式⁽¹³⁾を用いた。また、16 MPa のボイドドリフト係数 C_{vd} は流動様式が気泡流であるとして 0 とした。佐藤ら⁽¹⁴⁾の大気圧条件の水-空気でのボイドドリフトに関する試験では、気泡流からボイドドリフト現象が見られ、スラグ流領域で顕著になるとの報告がある。本研究では、圧力 7 MPa から 16 MPa までのボイドドリフトによるクロスフローが流動様式に依存すると考え、Yoo らの検討を参考に、ボイドドリフト係数 C_{vd} を表 2 に示すボイド率の関数とした。

表 2 ボイドドリフト係数の値

Region of void fraction	C_{vd}
$0 < \alpha \leq 0.3$	5α
$0.3 < \alpha \leq 0.75$	1.5
$0.75 < \alpha < 1.0$	5

上記のボイドドリフトモデルを実装した COBRA-EN で 7 MPa における 3×3 集合体のコーナー、サイド、インナーの質量速度、クオリティの測定値と計算値を比較した結果を図 12、図 13 に示す。コーナーの質量速度 1200~1500 kg/(m²s) の計算値は測定値に近づいた。また、コーナーのクオリティの計算値は図 9 に示した実装前よりも小さくなり、測定値に近づいた。

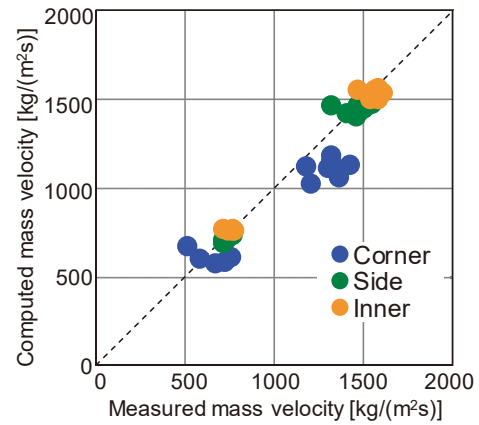


図 12 ボイドドリフトモデル実装後の質量速度の測定値⁽¹⁰⁾と計算値の比較 (7 MPa)

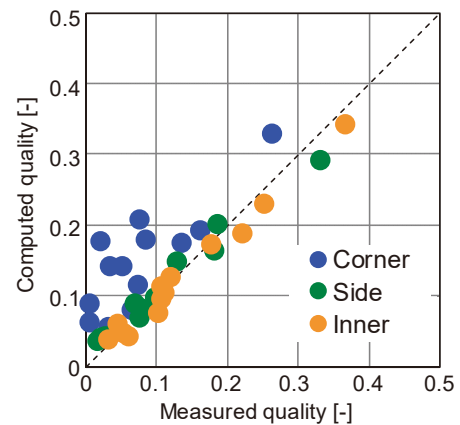


図 13 ボイドドリフトモデル実装後のクオリティの測定値⁽¹⁰⁾と計算値の比較 (7 MPa)

ボイドドリフトモデルを実装した COBRA-EN で 16 MPa における 4×4 集合体のコーナー、サイド、インナーの質量速度、クオリティの測定値と計算値を比較した結果を図 14、図 15 に示す。16 MPa における 4×4 集合体出口のサブチャンネルの質量速度、クオリティの計算値は実装前と大きな差はなく、コーナーの質量速度を若干過小評価するが、計算値と測定値は比較的良好一致を示した。

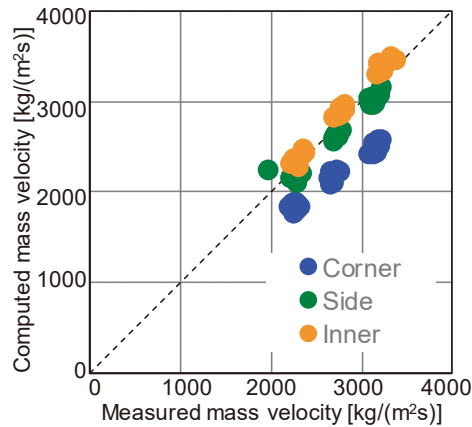


図 14 ボイドドリフトモデル実装後の質量速度の測定値⁽¹⁾と計算値の比較 (16 MPa)

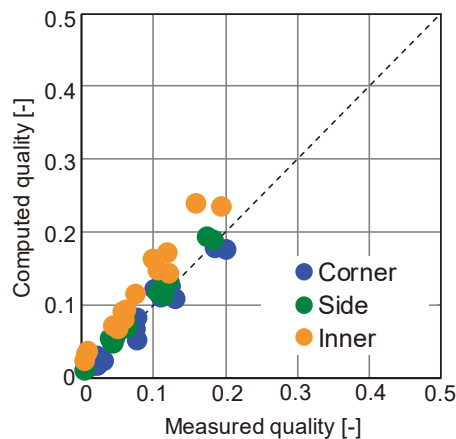


図 15 ボイドドリフトモデル実装後のクオリティの測定値⁽¹⁾と計算値の比較 (16 MPa)

4. おわりに

本報ではサブチャンネル解析コード COBRA-EN のクロスフローモデルにボイドドリフトモデルを実装し、圧力 7 MPa における 3×3 集合体、圧力 16 MPa における 4×4 集

合体のサブチャンネル質量速度、クオリティを用いてクロスフローモデルについて検討した。以下に、結論を示す。

- (1) ボイドドリフトを実装する前の COBRA-EN の計算値は 7 MPa における 3×3 集合体出口のコーナーサブチャンネルの質量速度を過小評価、クオリティを過大評価した。16 MPa における 4×4 集合体出口のコーナーサブチャンネルの質量速度の計算値は測定値を若干過小評価するが、サイド、インナーサブチャンネルの質量速度、クオリティの計算値と測定値は比較的良好一致した。
- (2) 圧力 7 MPa から 16 MPa までのボイドドリフトが流動様式に依存すると考え、ボイドドリフト係数をボイド率の関数としたボイドドリフトモデルを COBRA-EN に実装した。ボイドドリフトモデルを実装することで、7 MPa における 3×3 集合体出口のコーナーの質量速度、クオリティの計算値が、実装前よりも測定値に近づいた。16 MPa における 4×4 集合体出口のコーナーサブチャンネルの質量速度の計算値は測定値を若干過小評価するが、サイド、インナーサブチャンネルの質量速度、クオリティの計算値は実装前と大きな差はなく、測定値と計算値は比較的良好一致した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、元 INSS の佐野直樹氏には多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

記号

C_{vd}	ボイドドリフト係数 (-)
G	軸方向の質量速度 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
W'	クロスフロー流量 (kg/s)

ギリシャ文字

α	ボイド率(-)
----------	---------

添え字

ave	隣接サブチャンネルの平均値
-------	---------------

<i>cf</i>	差圧移動	(10)	R. T. Lahey, Jr., B. S. Shiralkar, D. W. Radcliffe, Mass Flux and Enthalpy Distribution in a Rod Bundle for Single-and Two-Phase Flow Conditions, J. Heat Transfer 93 197-209, 1971
<i>i</i>	サブチャンネル <i>i</i>		
<i>j</i>	サブチャンネル <i>j</i>		
<i>mix</i>	乱流混合		
<i>vd</i>	ボイドドリフト	(11)	H. Herkenrath, W. Hufschmidt, U. Jung, F. Weckermann, Experimental Investigation of the Enthalpy and Mass Flow Distribution in 16-Rod Clusters with BWR-PWR Geometries and Conditions, ISPRA Rept. EUR 7575 EN, 1981.

引用文献

- (1) The RELAP5-3D Code Development Team, RELAP5-3D Code Manual Volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods, INL-EXT-98-00834-V1, Revision 4.2, Idaho National Laboratory (2012).
- (2) J.A. Borkowski, et al., TRAC-BF1/MOD1: An Advanced Best Estimate Program for BWR Accident Analysis, NUREG/CR-4356, Idaho National Engineering Laboratory (1992).
- (3) D. Basile, M. Beghi, R. Chierici, E. Salina, and E. Brega, COBRA-EN, an Upgraded Version of the COBRA-3C/MIT Code for Thermal Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores Report no. 1010/1, NEA-1614/01 (1999).
- (4) J. G. M. Andersen, R. Harrington, B. Hizoum, COBRAG Subchannel Code - Model Description Report, NEDE-32199P, Revision 1 (2007).
- (5) M. J. Thurgood, J. M. Kelly, et al., COBRA/TRAC – A Thermal-Hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems – Equations and Constitutive Models, NUREG/CR-3046, Vol. 1, United States Nuclear Regulatory Commission (1983).
- (6) D. L. Aumiller, G. W. Swartele, M. J. Meholic, L. J. Lloyd, F. X. Buschman, COBRA-IE: A New Sub-Channel Analysis Code, NURETH-16, 3832- 3845 (2015).
- (7) J. E. Kelly, S. P. Kao, M. S. Kazimi, THERMIT-2: A Two-Fluid Model for Light Water Reactor Subchannel Transient Analysis, MIT Energy Laboratory Electric Utility Program Report No. MIT-EL-81-01 (1981).
- (8) 川崎 郁夫, 吉田 至孝, 佐々木 泰裕, COBRA-EN コード/EPRI 相関式の DNBR 計算信頼性評価, Journal of the Institute of Nuclear Safety System, 2011, Vol.18, 288-293.
- (9) R.T. Lahey Jr., F.J. Moody, The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor (Second ed.) (1993).
- (12) Y. J. Yoo, D. H. Hwang, D. S. Sohn, Development of Subchannel Analysis Code MATRA Applicable to PWRs and ALWRs, Journal of the Korean Nuclear Society Vol. 31, Num. 3 (1999), 314-327.
- (13) G. B. Wallis, Annular Two Phase Flow, Part 1: A Simple Theory, J. Basic Eng., 92, 59 (1970).
- (14) 佐藤泰生, 佐田富道雄, 下釜宏徳, 石井良和, 川原 顕磨呂, 複合流路内気液二相流のボイド・ドリフト現象 (第1報, 実験), 機械学会論文集 (B編) 56 巻 528 号(1980), 183-190.