

炉心内相間摩擦に係る RELAP5 モデルの不確かさの定量化^{*1}

Uncertainty Quantification of the RELAP5 Interfacial Friction Model in the Rod Bundle Geometry

木下 郁男 (Ikuo Kinoshita) ^{*2} 鳥毛 俊秀 (Toshihide Torige) ^{*2}
山田 実 (Minoru Yamada) ^{*3}

要約 小破断LOCA時高圧注入系不作為事象におけるアクシデントマネジメント策の蒸気発生器2次側強制減圧操作の解析に統計的安全評価手法の適用を進めている。解析コードにはRELAP5/MOD3.2を用いる。炉心内における気液相間摩擦は事故時の炉心水位や燃料棒の冷却性能に影響し、被覆管表面最高温度の評価に影響する重要現象である。RELAP5/MOD3.2コードでは炉心内相間摩擦は気泡流・スラグ流に対してドリフトフラックスモデルに基づくEPRI相関式で与えられる。本研究では、オークリッジ国立研究所(ORNL)の熱流動試験装置(THTF)を用いて行われたボイド率分布測定試験を対象に試験解析を行い、RELAP5コードの炉心内相間摩擦モデルの不確かさを定量化した。モデルの不確かさパラメータは相間摩擦係数に乗ずる乗数により定義した。試験解析を行いボイド率の計算結果が試験結果のボイド率と一致するように乗数を求めた。こうして得られた乗数の分布がモデルの不確かさ分布を表す。得られた分布の平均値、標準偏差、最小値、および最大値は、それぞれ0.88, 0.55, 0.13, および3.0であった。

キーワード 統計的安全評価手法, 小破断LOCA, RELAP5/MOD3, 炉心内相間摩擦, ORNL/THTF

Abstract An application of the Best Estimate Plus Uncertainty (BEPU) method is made to an analysis of the "Intentional depressurization of steam generator secondary side" which is an accident management procedure in a small-break loss-of-coolant accident with high pressure injection system failure. RELAP5/MOD3.2 is used as the system analysis code. Interfacial friction in the core affects the two-phase mixture level and the distribution of the dispersed gas phase. This phenomenon is very important in terms of the influence its uncertainty has on the peak cladding temperature. The RELAP5/MOD3.2 code uses drift-velocity to describe the interfacial friction coefficients in vertical dispersed flow, and the EPRI drift-flux correlation is used for the rod bundle geometry. In the present study, the RELAP5 model uncertainty was quantified regarding the interfacial friction coefficients in the rod bundle geometry by conducting numerical analyses of the void profile tests in the Thermal Hydraulic Test Facility (THTF) of the Oak Ridge National Laboratory (ORNL). The model uncertainty parameter was defined as a multiplier for the interfacial friction coefficient. Numerical analyses were performed by adjusting the multiplier so that the predicted void fractions agreed with the experimental measured data. The resultant distribution of the multipliers represented the model uncertainty. The mean, standard deviation, minimum and maximum values of this uncertainty distribution were 0.88, 0.55, 0.13 and 3.0, respectively.

Keywords Best Estimate Plus Uncertainty (BEPU), small break LOCA, RELAP5/MOD3, Interfacial friction in rod bundle, ORNL/THTF

1. 諸言

加圧水型原子炉の小破断冷却材喪失事故 (LOCA)

時には1次系が高圧の状態では冷却材が喪失していくため蓄圧注入系の注水が遅く、高圧注入系の作動に失敗すると炉心損傷に至る可能性がある。このため、

*1 ASME "Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science," Vol.2, No.2 (2016) 021003-021003-8 (doi:10.1115/1.4031377)より転載

*2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*3 MHIニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株)

アクシデントマネジメント策として蒸気発生器を利用した2次側強制減圧の操作が行われる。これまでに、本アクシデントマネジメント策の有効性評価のため、ROSA/LSTFでの総合システム試験やその試験解析が行われているが^{(1)~(4)}、評価に用いる解析手法の妥当性検証は未だ不十分である。

著者らの一連の研究では、本アクシデントマネジメント策「蒸気発生器二次側強制減圧操作」の解析に統計的安全評価手法⁽⁵⁾の適用を進めている。解析コードにはRELAP5/MOD3.2⁽⁶⁾を使用する。本手法の適用により、最適評価結果に対する不確かさが定量的に評価され、過度の保守性を合理的に排した信頼性の高い評価結果を得ることができる。

統計的安全評価手法では、着目する事象に対し、まず重要度ランク表 (PIRT) を作成して安全評価パラメータに及ぼす影響の大きい重要現象を抽出し、次いで、抽出した重要現象に対応する解析モデルや入力データの不確かさを定量化したうえで、これらの不確かさが安全評価パラメータの解析結果に及ぼす影響を評価する。これまでに、事故時の被覆管表面最高温度 (PCT) を評価パラメータとして、事故事象を詳細に分析しPIRTを作成するとともに、抽出された重要現象に対応するRELAP5/MOD3.2コードの解析モデルを特定した⁽⁷⁾。このうち、炉心内相間摩擦は、事故時の炉心内二相水位やボイド率分布に影響しPCTの評価に影響するため重要現象として抽出されている。

本研究では、オークリッジ国立研究所 (ORNL) の熱流動試験装置 (THTF)⁽⁸⁾ を用いて行われた露出バンドル熱伝達試験および二相水位膨張試験⁽⁹⁾ を対象に試験解析を行い、RELAP5/MOD3.2コードの炉心内相間摩擦モデルの不確かさを定量化した。

2. RELAP5/MOD3の 炉心内相間摩擦モデル

RELAP5/MOD3.2コードでは、流路を複数の体積要素 (ボリューム) とそれらの間の接続部 (ジャンクション) の組み合わせで表す。相間摩擦はジャンクションで計算され、流路の形状や流動様式毎に適用する相関式が異なる。一方、相間摩擦の算出、流動様式の判定に用いるパラメータはボリュームの値に基づいて算出される。これまでに実施した実機4ループプラントを対象とした解析では、炉心の二

相水位以下の流動様式は気泡流またはスラグ流が支配的になっている⁽⁷⁾。

RELAP5/MOD3.2コードでは、鉛直管の気泡流・スラグ流に対して、相間摩擦をドリフトフラックスモデルに基づく方法により算出する⁽⁶⁾。相間摩擦力 F_i は次式で計算される。

$$F_i = C_i \langle v_r \rangle \langle v_r \rangle \quad (1)$$

$$C_i = \frac{\langle \alpha_g \rangle \langle \alpha_f \rangle^3 (\rho_f - \rho_g) g}{\langle \langle V_{gj} \rangle \rangle \langle \langle V_{gj} \rangle \rangle} \quad (2)$$

$$\langle v_r \rangle = \left(\frac{1 - C_0 \langle \alpha_g \rangle}{\langle \alpha_f \rangle} \right) \langle \langle v_g \rangle \rangle - C_0 \langle \langle v_f \rangle \rangle \quad (3)$$

ここで、記号 $\langle \rangle$ および $\langle \langle \rangle \rangle$ はそれぞれ流路断面平均およびボイド率加重平均を表す。 C_i は相間摩擦係数であり、 v_r は相間の相対速度である。 α_g および α_f はそれぞれ気相および液相の体積率、 ρ_g および ρ_f はそれぞれ気相および液相の密度、 g は重力加速度、 V_{gj} は気相のドリフト速度である。また、 C_0 は分布パラメータ、 v_g および v_f はそれぞれ気相および液相の速度である。

分布パラメータ C_0 およびドリフト速度 V_{gj} はともに流路の形状や流動状態に依存して計算される。ロッドバンドルに対しては、EPRIのドリフトフラックス相関式^{(10),(11)}が用いられる⁽⁶⁾。EPRI相関式は、ロッドバンドルにおける広範な条件に適用できるように開発された。本式は多くの経験式を組み合わせた相関式であり、ドリフトフラックス理論に基づく次式とともに用いることによって比較的精度よくボイド率が計算できることが分かっている⁽¹¹⁾。

$$\langle \langle v_g \rangle \rangle = \frac{\langle j_g \rangle}{\langle \alpha_g \rangle} = C_0 \langle j_g + j_f \rangle + \langle \langle V_{gj} \rangle \rangle \quad (4)$$

ここで、 j_g および j_f はそれぞれ気相および液相の体積流束である。しかしながら、EPRI相関式の分布パラメータ C_0 およびドリフト速度 V_{gj} を式(1)~(3)の形で用いた場合の精度は、別に検証が必要である。

本研究では、ボイド率分布に係る個別効果試験の試験解析を行うことによりRELAP5の相間摩擦モデルの不確かさを定量化する。モデルの不確かさパラメータは、式(1)の相間摩擦係数 C_i に対する乗数 C_M として定義する。RELAP5コードによる試験

解析を行い、ボイド率の解析結果が試験データと一致するような乗数 C_M を決定する。この結果から得られた乗数の分布が相間摩擦モデルの不確かさを表す。

3. ORNL/THTF 加熱管群試験の概要

RELAP5/MOD3.2コードの炉心内相間摩擦モデルの不確かさ定量化には、ORNL/THTFで実施された高圧低流量条件での露出バンドル熱伝達試験および二相水位膨張試験⁽⁹⁾を用いた。本試験は、高圧低出力条件におけるバンドル露出時の熱伝達係数とボイド率分布データの取得を目的に実施された。

3.1 試験装置

THTFの全体図を図1に示す。THTFは高圧熱流動ループであり、小破断LOCA時と同様の熱流動状態を模擬できるように設計されている。図の試験部において、ボイド率分布データが差圧測定により取得された。試験部における差圧計の設置位置を図2に示す。バンドル領域は底部と頂部の一部を除いて軸方向に9つの差圧計測区間に分割されており、各区間の平均ボイド率が取得された。各差圧計測区間におけるボイド率評価代表位置は各差圧計測区間の中間点であるが、沸騰開始点を含む計測区間については二相領域(沸騰開始点から計測区間上端)の中間点である。

試験部の断面図を図3に示す。試験部はバンドル領域、シュラウドボックス、シュラウドプレナムアニュラス、およびテスト部バレルからなる。シュラウドプレナムアニュラスはもともとダウンカムとし

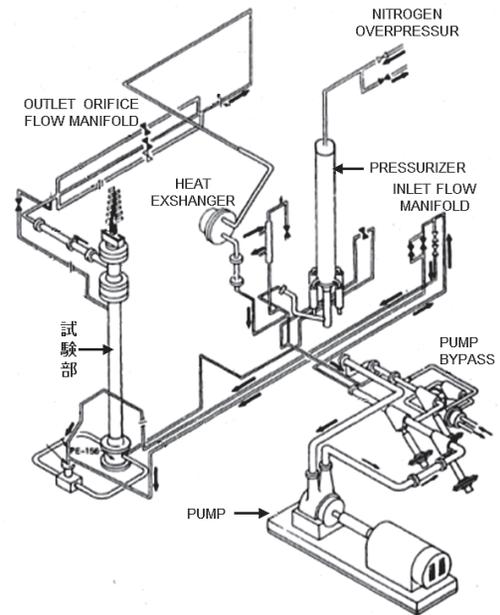


図1 ORNL/THTF 試験装置⁽⁹⁾

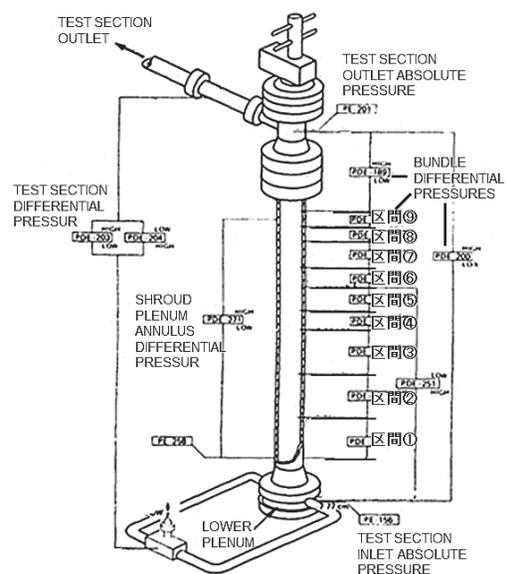


図2 試験部の差圧計設置位置⁽⁹⁾

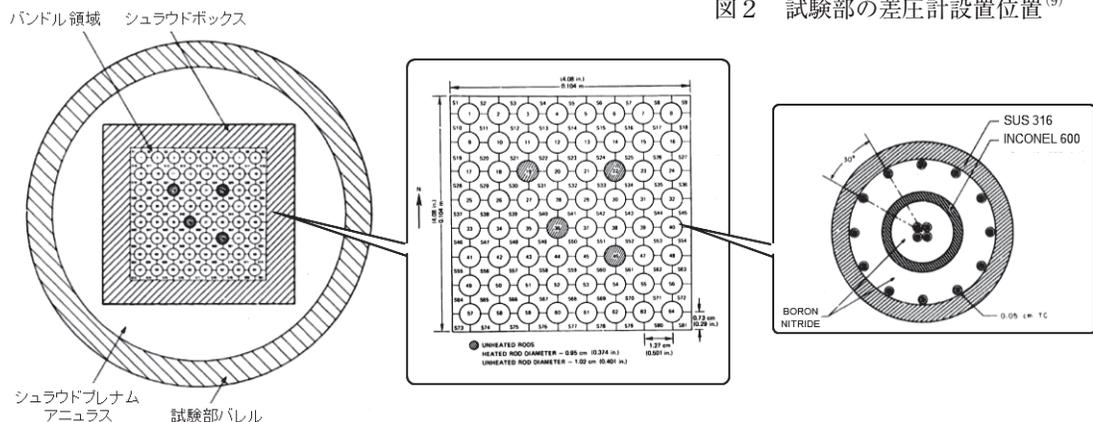


図3 ORNL/THTF 試験装置試験部断面図⁽⁹⁾

て用いていた領域であり、今回対象とする試験時には隔離されている。ただし、シュラウドプレナムアニュラスは空ではなく液相が存在するためシュラウドボックスからの熱損失が生じる。バンドル領域は60本の加熱棒と4本の非加熱棒からなり、軸方向出力分布はフラットである。模擬燃料棒の加熱長は3.66m、外径0.95cm、ピッチ1.02cmであり、代表的なPWR17×17燃料集合体と同じである。模擬燃料棒は窒化ホウ素に囲まれたヒーターとその外側のステンレス鋼シースから構成されている。

3.2 試験条件

主要な試験条件を表1に示す。試験パラメータは圧力と模擬燃料棒出力である。全部で12ケースの試験が実施された。模擬燃料棒出力による蒸散量と釣り合う量のサブクール水をバンドル領域底部から注入することにより、バンドル領域の保有水量を一定に保った準定常状態を達成して計測を行っている。

炉心内相間摩擦の不確かさの定量化を実施するにあたり、表1に示す12試験のうち、試験条件（圧力、燃料棒線出力）が実機の小破断LOCA時高圧注入系不動作事象の条件と近い試験を定量化の対象試験として選定した。Test 3.09.10IとTest 3.09.10Lについては、燃料棒線出力が実機条件範囲(<500kW/m)より大きすぎるため定量化の対象外とした。

表1 試験条件

		圧力 (MPa)	線出力 (kW/m)
試験条件	Test 3.09.10I	4.50	2.22
	Test 3.09.10J	4.20	1.07
	Test 3.09.10K	4.01	0.32
	Test 3.09.10L	7.52	2.17
	Test 3.09.10M	6.96	1.02
	Test 3.09.10N	7.08	0.47
	Test 3.09.10AA	4.04	1.27
	Test 3.09.10BB	3.86	0.64
	Test 3.09.10CC	3.59	0.33
	Test 3.09.10DD	8.09	1.29
	Test 3.09.10EE	7.71	0.64
	Test 3.09.10FF	7.53	0.32
実機条件		2 - 8	< 0.55

(注) 網掛けの試験は試験解析の対象から除外する。

4. RELAP5/MOD3による試験解析

4.1 解析方法

(a) ノード分割

試験解析のノード分割を図4に示す。バンドル領域 (PIPE3) は加熱長さのみを模擬し、差圧計測区間で分割してボイド率評価代表位置がボリューム中心位置にくるようにした。沸騰開始点を含む計測区間のボイド率評価代表位置は二相領域 (沸騰開始点から計測区間上端) の中間点であるため、沸騰開始点を含む計測区間については、さらに沸騰開始点で分割した。

熱構造材は、模擬燃料棒とバンドル領域を囲んでいるシュラウドボックスを模擬した。試験ではシュラウドボックスからの熱損失があるため、解析でも熱損失を模擬した。

(b) 境界条件と初期条件

バンドル領域入口境界は、バンドル領域底部に時間依存ジャンクション (TJ2) を接続し、その

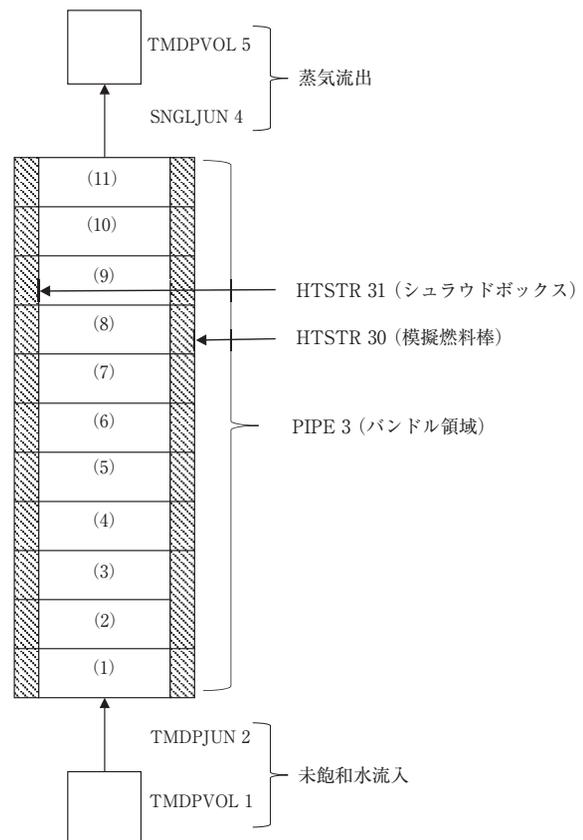


図4 試験解析ノードニング

上流に時間依存ボリューム (TV1) を接続して未飽和補給水を注入した。その注入流量は試験のバンドル領域入口流量と出口流量の中央値とし、未飽和水の温度は試験と同じとした。バンドル領域出口境界は、通常ジャンクション (SJ4) を接続して発生蒸気が流出する自由流出境界とし、その下流に時間依存ボリューム (TV5) を接続して圧力境界条件を設定した。時間依存ボリュームの境界圧力は試験のバンドル領域出口圧力と同じとした。

(c) 不確かさの定量化方法

RELAP5コードではボイド率はボリュームで計算され、相間摩擦はジャンクションで計算される。相間摩擦モデルの不確かさの定量化にあたり、ジャンクション毎に、式(1)における相間摩擦係数 C_i に乗数 C_M を乗じることができるようコード修正を行った。本コードを用いて試験解析を行い、バンドル領域の各ボリュームにおいて、その中心位置に対応するボイド率の試験データとボイド率の解析結果が測定誤差の範囲で一致するように、その下流側ジャンクションの相間摩擦係数 C_i に乗数 C_M を乗じた。この結果得られた乗数 C_M の分布が相間摩擦モデルの不確かさを表す。

計算時間1000秒の解析を行い、準定常状態が達した1000秒時点での軸方向ボイド率分布を試験結果と比較した。

4.2 解析結果

ボイド率の軸方向分布の解析結果を図5から図14に示す。白丸点は乗数 C_M を乗じる前の解析結果、黒丸点は乗数 C_M を乗じた後の解析結果である。

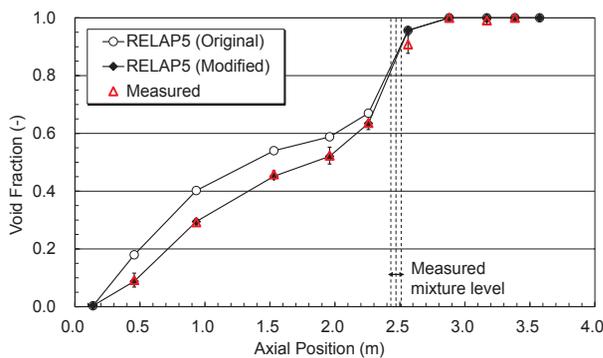


図5 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10J)

これらの図に示すように、ボイド率分布の解析結果が急上昇して1の近傍となる軸方向位置は、試験の二相水位とよく一致しており、解析が妥当であることが分かる。オリジナルのRELAP5コードによるボイド率の解析結果は試験データをほぼ妥当に予測したが、全体的に試験データよりも過大評価している。

(a) 不確かさの定量化に用いるデータ

二相水位以下の領域のデータが不確かさ定量化の対象である。以下の (b) で示すケースを除いて、乗数 C_M を乗じた解析結果のボイド率は試験データと測定誤差の範囲で一致した。これらを不確かさの定量化に用いる。不確かさの定量化に用いるデータの数は55である。

(b) 不確かさの定量化から除外するデータ

以下の3ケースは不確かさの定量化から除外した。

第1に、Test 3.09.10K (図6) において、約2.0mの位置のボイド率が試験データと一致していないが、これは解析ではこの位置での流動様式が噴霧流になっており、相間摩擦係数に乗数を乗じてボイド率を調整することができないためである。解析と同じく、シュラウドボックスからの熱損失を軸方向に一樣と仮定した条件でヒートバランスを手計算すると、二相水位は約2.086mであり、ボリューム中心が約2.0mのボリューム (下端: 1.8288m, 上端: 2.0892m) の流動様式が噴霧流であることは不合理ではない。これは、Test 3.09.10Mの約2.6m位置、Test 3.09.10AAの約3.4m位置、Test 3.09.10BBの約3.2m位置、Test 3.09.10DDの約3.2m位置、Test 3.09.10EEの約3.4m位置、Test 3.09.10FFの約3.2m位置に

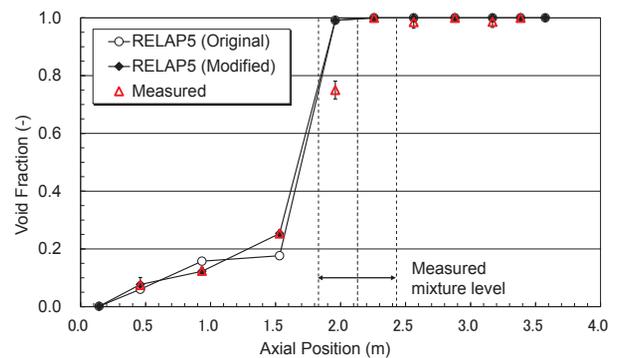


図6 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10K)

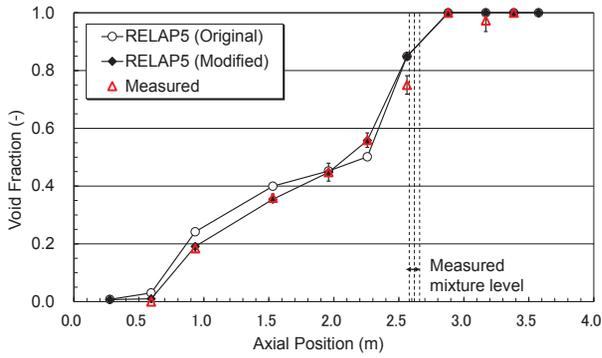


図7 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10M)

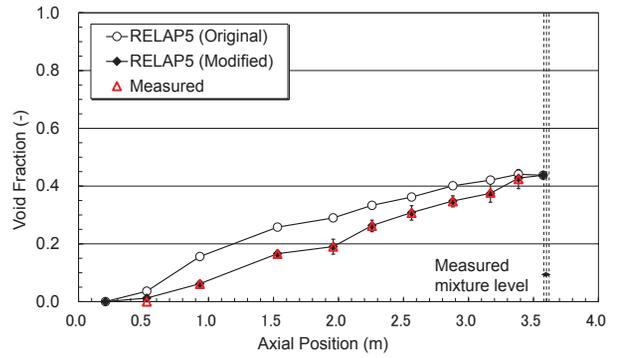


図11 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10CC)

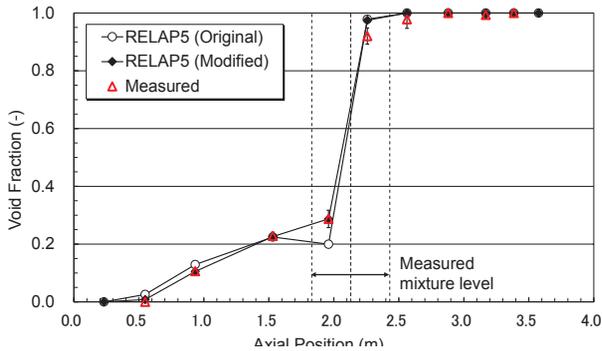


図8 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10N)

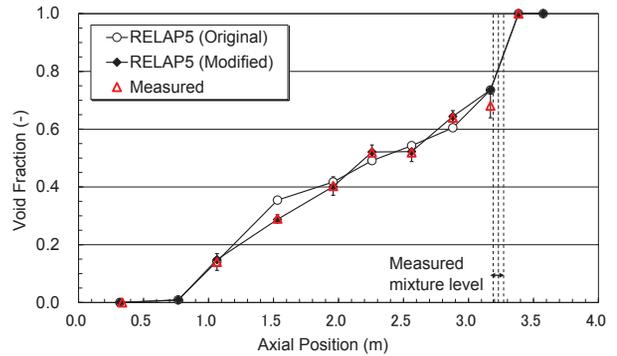


図12 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10DD)

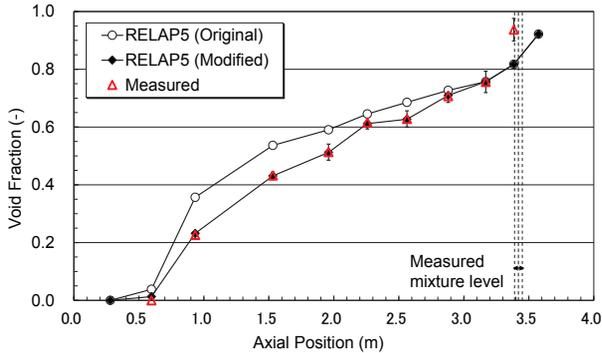


図9 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10AA)

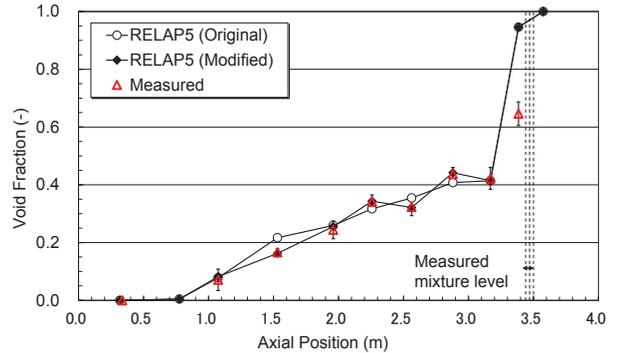


図13 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10EE)

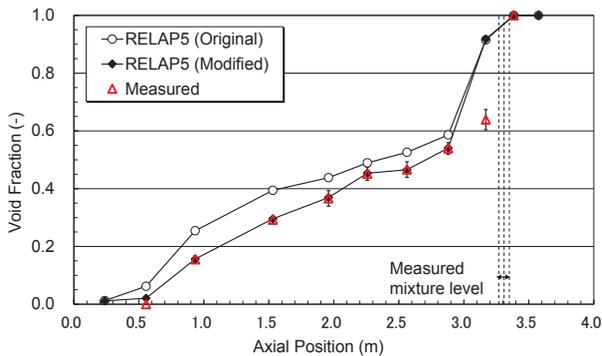


図10 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10BB)

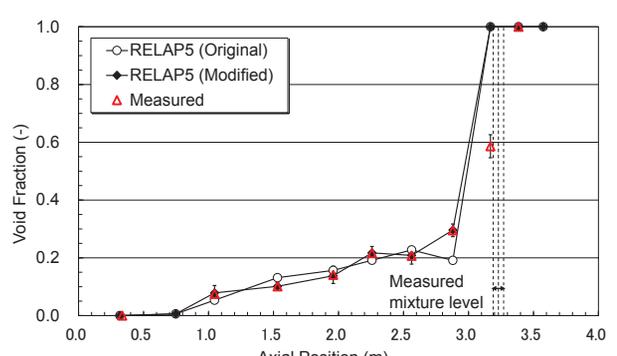


図14 ボイド率測定値と解析値の比較 (Test 3.09.10FF)

についても同様である。

第2に、Test 3.09.10M (図7)において、実験では約0.59mの位置のボイド率が0.0であるのに対して解析ではわずかにボイドが存在しているが、実験での沸騰開始点は0.55mであり、ボイドが存在することは妥当であると考えられる。これは、Test 3.09.10Nの約0.55m位置、Test 3.09.10AAの約0.60m位置、Test 3.09.10BBの約0.55m位置、Test 3.09.10CCの約0.52m位置についても同様である。

最後に、Test 3.09.10DD, Test 3.09.10EE, およびTest 3.09.10FFの約0.34m位置のデータは沸騰開始点よりも前のデータであるため、定量化対象から除外した。

4.3 不確かさの定量化

乗数 C_M を乗じる前のボイド率の解析結果とボイド率の試験結果の相関を図15に示す。解析結果のボイド率は試験データと概ねよく一致しているが、全体として解析結果のほうがやや大きい。これはRELAP5コードの相間摩擦係数がやや過大評価となっていることを示す。

相間摩擦係数の乗数 C_M すなわちRELAP5コードの相間摩擦モデルの不確かさの定量化の結果を、ボイド率の測定結果および解析結果とともに表2に示す。また、相間摩擦係数の乗数 C_M をボイド率の測定結果で整理して図16に示す。低ボイド率ほど C_M

が大きく、相間摩擦係数の誤差が大きいことが分かる。これは、RELAP5/MOD3.2コードで用いられているERPI相関式が、もともとチャーン・タービュレント流に対するドリフト速度式を基礎にしているため、沸騰流の低ボイド率領域では精度が悪化するためと考えられる。

相間摩擦係数乗数の度数分布図を図17に示す。これがRELAP5コードの炉心内相間摩擦モデルの不確かさを表す。分布の統計値は、データ数55、最小値0.13、最大値3.0、平均値0.88、標準偏差0.55である。炉心内相間摩擦を大きくすると炉心内のボイド率が高くなり、炉心保有水が減少するため、炉

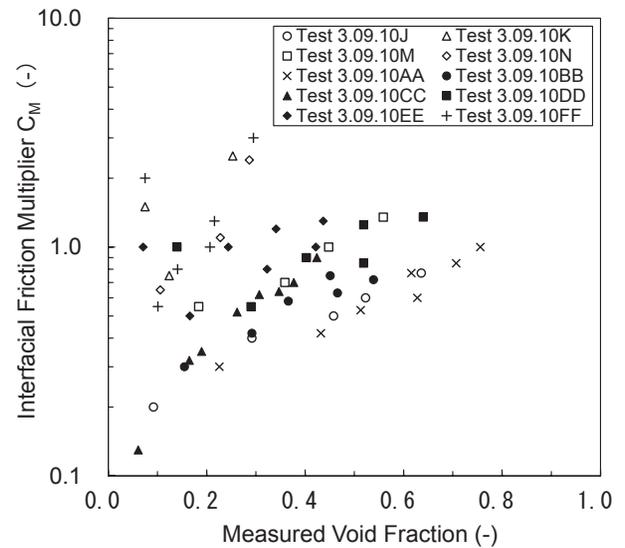


図16 相間摩擦係数乗数 C_M

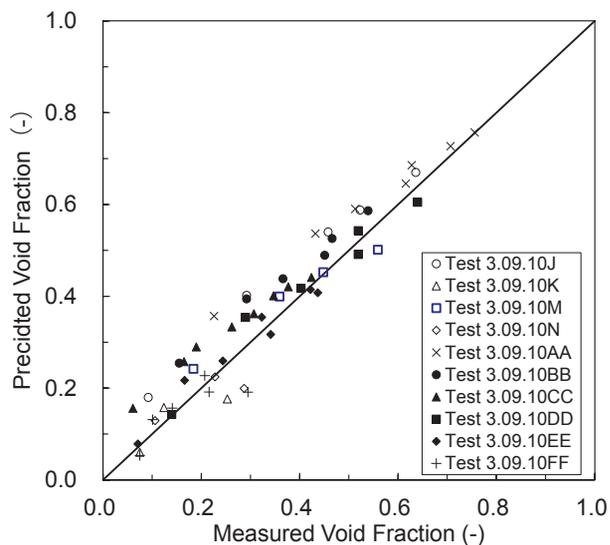


図15 ボイド率測定値と解析値の比較

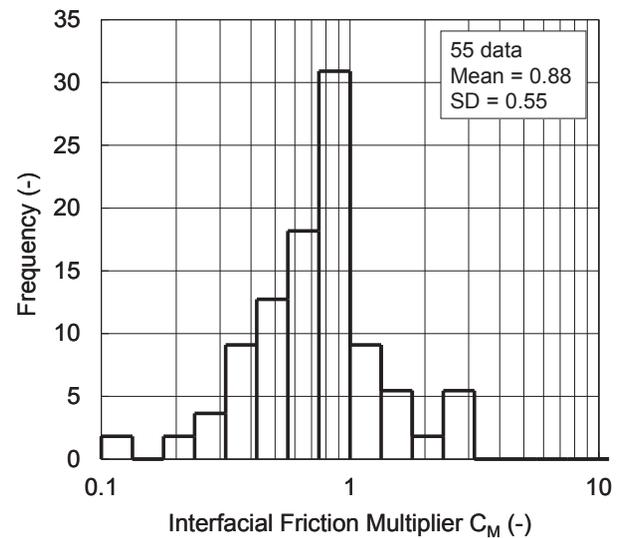


図17 相間摩擦係数乗数 C_M の分布

表2 RELAP5/MOD3.2コードの炉心内相間摩擦モデルの不確かさ

試験ケース	試験結果 ⁽⁹⁾		RELAP5			
	測定位置 (m)	ボイド率 (-)	測定位置 (m)	C_M 乗算前 ボイド率 (-)	C_M 乗算後 ボイド率 (-)	相間摩擦係数 乗数 C_M (-)
Test3.09.10J	0.45626	0.092	0.45626	0.180	0.088	0.20
	0.93345	0.292	0.93345	0.402	0.295	0.40
	1.53035	0.458	1.53035	0.540	0.451	0.50
	1.95898	0.523	1.95898	0.588	0.521	0.60
	2.25743	0.636	2.25743	0.670	0.634	0.77
	2.56222	0.908	2.56222	0.956	0.957	-
	2.87972	1.000	2.87972	1.000	1.000	-
	3.16865	0.991	3.16865	1.000	1.000	-
	3.38455	1.000	3.38455	1.000	1.000	-
Test 3.09.10K	0.45938	0.075	0.45938	0.060	0.077	1.50
	0.93345	0.124	0.93345	0.157	0.122	0.75
	1.53035	0.253	1.53035	0.176	0.253	2.50
	1.95897	0.750	1.95897	0.991	0.992	-
	2.25742	1.000	2.25742	1.000	1.000	-
	2.56222	0.985	2.56222	1.000	1.000	-
	2.87972	1.000	2.87972	1.000	1.000	-
	3.16865	0.986	3.16865	1.000	1.000	-
	3.38455	1.000	3.38455	1.000	1.000	-
Test 3.09.10M	0.59435	0.000	0.59435	0.030	0.010	0.10
	0.93345	0.184	0.93345	0.242	0.191	0.55
	1.53035	0.359	1.53035	0.399	0.354	0.70
	1.95897	0.448	1.95900	0.452	0.447	1.00
	2.25742	0.559	2.25745	0.501	0.558	1.35
	2.56222	0.750	2.56225	0.849	0.849	-
	2.87972	1.000	2.87975	1.000	1.000	-
	3.16865	0.973	3.16865	1.000	1.000	-
	3.38455	1.000	3.38455	1.000	1.000	-
Test 3.09.10N	0.54842	0.000	0.54842	0.026	0.008	0.10
	0.93345	0.106	0.93345	0.129	0.105	0.65
	1.53035	0.228	1.53035	0.224	0.226	1.10
	1.95897	0.287	1.95900	0.199	0.287	2.40
	2.25742	0.920	2.25745	0.979	0.975	-
	2.56222	0.978	2.56225	1.000	1.000	-
	2.87972	1.000	2.87975	1.000	1.000	-
	3.16865	0.993	3.16865	1.000	1.000	-
	3.38455	1.000	3.38455	1.000	1.000	-
Test 3.09.10AA	0.59726	0.000	0.59726	0.038	0.013	0.10
	0.93345	0.226	0.93345	0.357	0.232	0.30
	1.53035	0.432	1.53035	0.536	0.431	0.42
	1.95898	0.513	1.95900	0.590	0.512	0.53
	2.25743	0.616	2.25745	0.645	0.612	0.77
	2.56223	0.628	2.56225	0.686	0.627	0.60
	2.87973	0.707	2.87975	0.727	0.709	0.85
	3.16865	0.756	3.16865	0.757	0.757	1.00
	3.38455	0.937	3.38455	0.817	0.817	-

(注) 網掛けのデータは不確かさ評価の対象から除外する。

表2 RELAP5/MOD3.2 コードの炉心内相間摩擦モデルの不確かさ (続き)

試験ケース	試験結果 ⁽⁹⁾		RELAP5			
	測定位置 (m)	ボイド率 (-)	測定位置 (m)	C_M 乗算前 ボイド率 (-)	C_M 乗算後 ボイド率 (-)	相間摩擦係数 乗数 C_M (-)
Test 3.09.10BB	0.55497	0.000	0.55497	0.062	0.020	0.10
	0.93345	0.155	0.93345	0.254	0.156	0.30
	1.53035	0.292	1.53035	0.394	0.296	0.42
	1.95898	0.366	1.95900	0.438	0.369	0.58
	2.25743	0.451	2.25745	0.489	0.454	0.75
	2.56222	0.466	2.56225	0.526	0.465	0.63
	2.87972	0.539	2.87975	0.586	0.541	0.72
	3.16865	0.639	3.16865	0.915	0.918	-
	3.38455	1.000	3.38455	1.000	1.000	-
Test 3.09.10CC	0.52483	0.000	0.52483	0.036	0.012	0.10
	0.93345	0.061	0.93345	0.156	0.062	0.13
	1.53035	0.165	1.53035	0.258	0.166	0.32
	1.95898	0.190	1.95900	0.290	0.190	0.35
	2.25742	0.262	2.25745	0.333	0.263	0.52
	2.56222	0.307	2.56225	0.362	0.308	0.62
	2.87972	0.347	2.87975	0.401	0.348	0.64
	3.16865	0.377	3.16865	0.421	0.375	0.70
	3.38455	0.424	3.38455	0.441	0.427	0.90
Test 3.09.10DD	0.33655	0.000	0.31750	0.000	0.000	1.00
	1.06476	0.140	1.06476	0.142	0.148	1.00
	1.53035	0.290	1.53035	0.354	0.288	0.55
	1.95898	0.403	1.95900	0.417	0.401	0.90
	2.25743	0.519	2.25745	0.491	0.521	1.25
	2.56222	0.519	2.56225	0.543	0.522	0.85
	2.87972	0.640	2.87975	0.605	0.644	1.35
	3.16865	0.681	3.16865	0.735	0.736	-
	3.38455	1.000	3.38455	1.000	1.000	-
Test 3.09.10EE	0.33655	0.000	0.31750	0.000	0.000	1.00
	1.07413	0.071	1.07413	0.078	0.082	1.00
	1.53035	0.166	1.53035	0.217	0.163	0.50
	1.95898	0.244	1.95900	0.259	0.255	1.00
	2.25742	0.341	2.25745	0.317	0.343	1.20
	2.56222	0.323	2.56225	0.354	0.321	0.80
	2.87972	0.437	2.87975	0.407	0.442	1.30
	3.16865	0.422	3.16865	0.414	0.414	1.00
	3.38455	0.646	3.38455	0.946	0.946	-
Test 3.09.10FF	0.33655	0.000	0.31750	0.000	0.000	1.00
	1.04601	0.075	1.04601	0.053	0.078	2.00
	1.53035	0.101	1.53035	0.131	0.101	0.55
	1.95897	0.141	1.95900	0.156	0.138	0.80
	2.25742	0.216	2.25745	0.191	0.217	1.30
	2.56222	0.207	2.56225	0.227	0.208	1.00
	2.87972	0.295	2.87975	0.191	0.296	3.00
	3.16865	0.586	3.16865	1.000	1.000	-
	3.38455	1.000	3.38455	1.000	1.000	-

(注) 網掛けのデータは不確かさ評価の対象から除外する。

心露出が早くなり、PCTが上昇すると考えられる。一方、炉心内相間摩擦が大きいと二相水位が高くなるため、PCTは低下する。このため、PCTの観点で相間摩擦係数乗数の最小値側、最大値側のどちらが保守的かは一概には言えない。

5. 結言

小破断LOCA時高圧注入系不作動事象におけるアクシデントマネジメント策「2次側強制冷却による低圧注入」の信頼性を向上するため、本アクシデントマネジメント解析に統計的安全評価手法の適用を進めている。本研究では、ORNLのTHTF装置を用いて行われた露出バンドル熱伝達試験および二相水位膨張試験を対象に試験解析を行い、RELAP5炉心内相間摩擦モデルの不確かさを定量化した。モデルの不確かさパラメータは相間摩擦係数に乗ずる乗数により定義した。試験解析を行いボイド率の計算結果が実験のボイド率と一致するように乗数を求めた。得られた乗数の分布がモデルの不確かさ分布を表す。利用可能なデータ数55について、分布の平均値、標準偏差、最小値、および最大値はそれぞれ0.88, 0.55, 0.13, および3.0であった。

RELAP5コードの炉心内相間摩擦モデルの精度は概ね良いといえるが、低ボイド率領域で予測精度が悪化する。RELAP5コードによる相間摩擦計算の不確かさを低減するためには、低ボイド率領域でのドリフトフラックス相関式の精度向上が必要である。

参考文献

- (1) H. Asaka and Y. Kukita, "Intentional Depressurization of Steam Generator Secondary Side during a PWR Small-Break Loss-of-Coolant Accident," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 32, No. 2, pp.101-110, (1995).
- (2) H. Asaka et al., "Core Liquid Level Responses Due to Secondary-Side Depressurization during PWR Small Break LOCA," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 35, No. 2, pp.113-119, (1998).
- (3) H. Asaka et al., "Secondary-Side Depressurization during PWR Cold-Leg Small Break LOCAs Based on ROSA-V/LSTF Experiments and Analyses," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 35, No. 12, pp.905-915, (1998).
- (4) M. Suzuki et al., "Effects of Secondary Depressurization on Core Cooling in PWR Vessel Bottom Small Break LOCA Experiments with HPI Failure and Gas Inflow", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 43, No. 1, pp.55-64 (2006).
- (5) 日本原子力学会, "統計的安全評価の実施基準: 2008", AESJ-SC-S001:2008, (2009).
- (6) The RELAP5 Code Development Team, "RELAP5/MOD3 Code Manual", NUREG/CR-5535, (1995).
- (7) 山田実, 南雲宏一, 木下郁男, 村瀬道雄, 吉田至孝, 川崎郁夫, "小破断LOCA時高圧注入系不作動事象のPIRT作成および重要現象の感度解析", *INSS JOURNAL*, Vol.18, pp.294-309, (2011).
- (8) Felde, D. K. et al., "Facility Description THTF MOD3 ORNL PWR BDHT Separate-Effects Program", NUREG/CR-2640, Sep. (1982).
- (9) Anklam, T. M. et al., "Experimental Investigations of Uncoverd-Bundle Heat Transfer and Two-Phase Mixture-Level Swell Under High-Pressure Low-Heat-Flux Conditions", NUREG/CR-2456, Mar. (1982).
- (10) Chexal, B. and Lellouche, G., "A Full-Range Drift-Flux Correlation for Vertical Flows (Revision 1) ". , EPRI NP-3989-SR, September, (1986).
- (11) Chexal, B. et al., "The Chexal-Lellouche Void Fraction Correlation for Generalized Applications", NSAC-139, (1991).