

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560828

研究課題名（和文） 燃料デブリの運動挙動に関するメソスケール解析手法の開発

研究課題名（英文） Development of Mesoscale Analysis Method for Fuel Debris Movement Behavior

研究代表者

守田 幸路（MORITA KOJI）

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40311849

研究成果の概要（和文）：高速炉における過酷事故（炉心損傷事故）において、事故後の長期の崩壊熱除去過程を支配する要因として重要な燃料デブリの運動挙動に着目し、その流体力学的な基本特性を評価するための数値シミュレーションコードを粒子法に基づくメソスケール解析手法として開発した。さらに、固体粒子ベッドにおける固気液三相流挙動を模擬した小規模な実験を実施し、実験結果に基づいて開発手法の基本的妥当性を検証した。

研究成果の概要（英文）：The present study focuses on dynamic behavior of fuel debris bed, which is critical as a dominant factor in the long-term decay heat removal process after core disruptive accident of fast reactors. A particle-based simulation code was developed as a mesoscale analysis method to evaluate fundamental characteristics of fluid-dynamic behavior in fuel debris beds. A small-scale experiment was also performed simulating solid-gas-liquid three-phase flows in a solid particle bed, and then the developed method was verified based on experimental results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、原子力学

キーワード：高速炉、炉心損傷事故、燃料デブリ、数値解析、粒子法

1. 研究開始当初の背景

2000年に米国エネルギー省により提唱された高速炉をはじめとする第4世代原子炉「GEN-IV」においては、炉心損傷頻度の飛躍的低減や敷地外の緊急時対応の必要性排除による高い安全性／信頼性の達成が、2030年までに実用化を目指す原子炉概念における開発目標の一つにあげられている。このように、高速炉におけるシビアアクシデント（過酷事故）の影響が一般公衆に対して十分に許容できる範囲にあることを示し、社会的に受容性の高い安全論理を構築することは、来る

べき高速炉の実用化時代において必要不可欠である。

これに関連して、我が国で検討されてきたナトリウム冷却型高速炉（SFR）の実用化研究開発では、過酷事故時に燃料を炉心外に流出させ再臨界を回避する炉心損傷事故（CDA）対策が提案されている。一方で、燃料流出後、長期の事故後崩壊熱除去（PAHR）過程については十分な知見が得られていないため、炉容器内事象終息（IVR）に至る事象推移を明らかにし、SFRの設計成立性を担保することが急務の課題となっている。

このような背景をもとに、報告者らは、これまで、低エネルギー損傷炉心プールでの燃料デブリの流動性に着目した実験的・解析的研究、PAHR 過程における燃料デブリの熱流動特性に着目した実験的研究を進めてきた。特に、燃料デブリの崩壊熱による冷却材の沸騰で駆動される「燃料デブリベッドのセルフレベリング挙動」は、崩壊熱除去特性がベッドの厚さに依存することから極めて重要であるにもかかわらず、その発生条件や過渡的な挙動に対する解析的評価手法が確立されていない。

2. 研究の目的

これまで報告者らが実施した燃料デブリの運動挙動に関連する研究から、その基本的特性は、比較的高濃度で固体粒子（燃料デブリ）を含む固気液多相流の流動様式や固体粒子間の相互作用が大きく影響することが明らかとなっている。しかしながら、これらは、0.1~数 mm 程度（メゾスケール）の固体粒子からなる固液混合層の流体力学的な特性に支配されることから、CDA 評価用の安全解析コードで用いられる多流体モデル（マクロモデル）の要素モデルを整備するために必要な知見は十分には得られていない。

一方で、ラグランジェ座標に基づく流体解析手法の一つである粒子法は、計算格子を用いないグリッドレス手法であるためメゾスケール現象や自由界面流れへの適用性に優れ、流動様式マップ等を用いない汎用的な多相流解析手法として近年注目されている。このため、本研究では、高速炉 CDA における PAHR 過程の事象推移を支配する要因として重要である「燃料デブリベッドのセルフレベリング挙動」に着目し、その基本特性を評価するための数値解析コードを粒子法に基づくメゾスケール解析手法として開発する。

3. 研究の方法

本研究では、「燃料デブリベッドのセルフレベリング挙動」における固気液三相流挙動の基本特性を評価するための流体解析コードを開発し、基礎的な実験に基づく検証解析により、開発した解析手法の基本的な妥当性を検証する。

(1) 解析コード開発

デブリベッド運動を支配する固気液三相流挙動に適用可能な解析コードを粒子法の一つである有限体積粒子（FVP）法を基本とするラグランジェ流体解析コードとして開発する。また、燃料デブリ間の相互作用モデルには、固体粒子集合体の解析手法として広く用いられている DEM（個別要素法）を採用する。

(2) 検証実験

液相中の模擬デブリ層内における単一気泡の運動挙動を可視化する実験を実施する。これにより、セルフレベリング挙動を支配する固気液三相流の流動挙動について、開発コードの検証データを取得する。

(3) 検証解析

検証実験を対象とした解析を実施し、燃料デブリベッドのセルフレベリング特性を支配するメゾスケールでの固気液三相流の流動挙動について、開発した解析コードを検証するとともに、固気液三相流のモデル化手法について検討する。

4. 研究成果

(1) 解析コード開発

以下に示す非圧縮性流体の連続の式及びナビエ・ストークスの式を流体力学の支配方程式とする固気液三相流解析コードを開発した。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla(\mu \cdot \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}_{other} \quad (2)$$

ここで、 p ：圧力、 t ：時間、 \mathbf{u} ：速度、 ρ ：密度、 m ：粘性である。体積力 \mathbf{f}_{other} には重力、表面張力が含まれる。さらに、固体粒子には、以下の回転及び並進の運動方程式を考慮した。

$$m \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{F}_{col} + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_g \quad (3)$$

$$I \frac{D\boldsymbol{\omega}}{Dt} = \mathbf{T}_{col} \quad (4)$$

ここで、 m ：質量、 \mathbf{F}_{col} ：固体粒子間の接触力、 \mathbf{F}_f ：固体粒子-流体間抗力、 \mathbf{F}_g ：重力、 I ：慣性モーメント、 $\boldsymbol{\omega}$ ：角速度、 \mathbf{T}_{col} ：粒子間接触によるトルクである。

式(1)及び(2)はFVP法に基づいて離散化し、時間積分アルゴリズムにはMAC法を用いた。また、固体粒子間の相互作用モデルにDEMを用いて式(3)及び(4)を解く場合、一般に、時間ステップ幅は流体力学計算のそれより小さくなる。従って本研究では、多段時間ステップ法を用いて流体力学計算とDEM計算を結合した。また、開発した固気液三相流解析コードによる流体力学計算の基本的な妥当性は、別途実施した実験解析により検証した。

(2) 検証実験

図1に本研究で実施した気泡上昇挙動実験体系の概要を示す。実験では、液相にシリコンオイル、模擬デブリ層に球形ガラス粒子層を用い、アクリル製矩形容器（高 200 mm

×幅 150 mm×奥 45 mm) 内を高さ 140 mm まで固液混合層で満たし、容器底部から 40 mm の高さに直径 20 mm のゴム風船を置く。この風船をニードルで破裂させることで充填した空気を単一気泡として固液混合層中に放出し、その運動挙動を可視化した。用いたガラス粒子の直径は 0.85-1.0 mm、固液混合層中の固体粒子の充填率は 49%である。また、固液混合層上の液相への気泡離脱挙動についても合わせて実験を実施した。

本実験では、高速度カメラで撮影した可視化画像から固液混合層中を上昇する単一気泡の形状変化及び気泡上昇速度を検証データとして取得した。

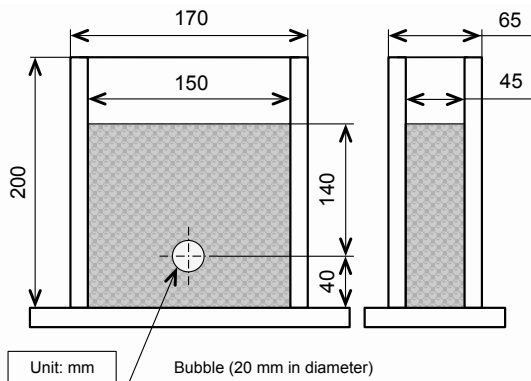


図1 気泡上昇挙動体系の概要

(3) 検証解析

固体粒子を含まない液相中での気泡運動挙動に対する開発コードの妥当性を確認した上で、固液混合層中の固体粒子による相互作用に関わるモデル化の効果を比較した。さらに、固液混合層から液相への気泡離脱挙動についても実験と解析結果を比較した。これらにより、燃料デブリベッドのセルフレベルリング特性を支配するメソスケールでの固気液三相流に対する開発コードの基本的な妥当性を検証した。

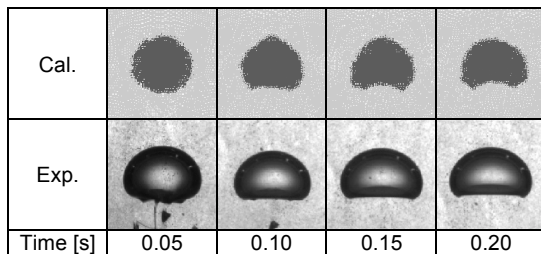


図2 液相中での気泡形状の変化

① 液相中での気泡上昇挙動解析

図2に液相中での気泡上昇開始から 0.05, 0.10, 0.20 sにおける気泡形状を示す。実験

で観察された気泡形状は、初期の球形から dimpled ellipsoidal-cap に徐々に変化しており、計算においてもこの傾向は良く再現されている。図3に測定された気泡上昇速度を計算結果と比較する。計算では矩形容器壁が気泡に与える影響が考慮されていないため終端速度がやや過大評価されるものの、本結果は、液相中での単一気泡運動に対する解析コードの妥当性を示している。

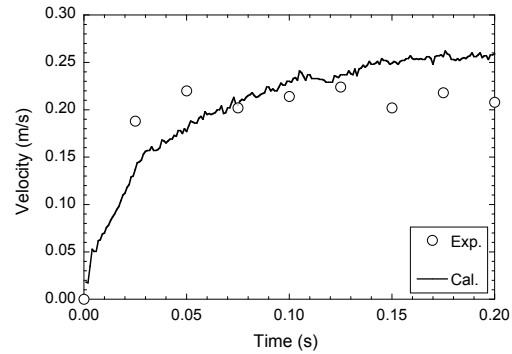


図3 液相中での気泡上昇速度

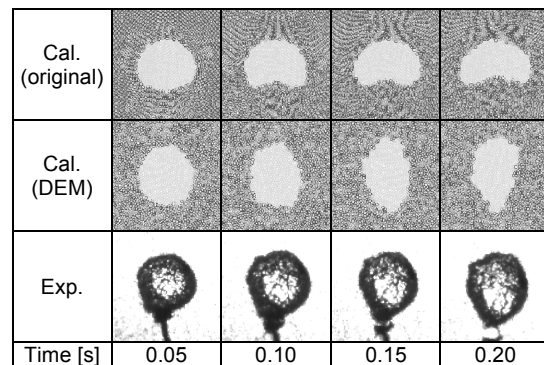


図4 固液混合層中での気泡形状の変化 (固体粒子間の相互作用を考慮した計算との比較)

② 固液混合層中での気泡上昇挙動解析 (固体粒子間の相互作用の影響)

図4及び図5に、それぞれ、液相中での気泡形状変化及び気泡上昇速度について固体粒子間の相互作用を考慮しない計算 (original) と DEMにより考慮した計算 (DEM) を比較する。図4が示すように original の計算は観察された気泡形状変化を再現できない。一方、DEMを用いた計算では気泡形状は縦長に変化し、dimpled ellipsoidal-cap に近づいている。図5に示す気泡上昇速度は、originalの計算では過大評価されDEMを用いた計算では大きく減少するものの、依然として測定値との差は大きい。

DEMを用いた計算は、固体粒子間の相互作用が気泡形状や上昇速度に代表される気泡運動挙動に影響を与えることを示唆してい

る。しかしながら、気泡上昇速度の再現性は低く、固気液三相流解析における固体粒子と流体間の相互作用のモデル化手法に着目した検討を行った。

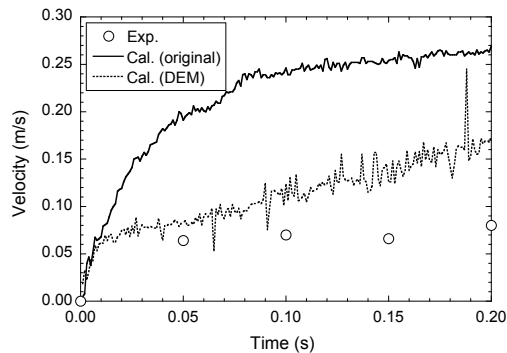


図5 固液混合層中での気泡上昇速度 (固体粒子間の相互作用を考慮した計算との比較)

③ 固液混合層中での気泡上昇挙動解析 (実効粘性の影響)

比較的高い割合で固体粒子を含む固液混合流体は、固液間の流体力学的な相互作用によって見かけ上その粘性が実効的に大きくなる。この効果が気泡運動挙動に与える影響を考慮するため、式(2)の粘性係数を固液混合流体の実効粘性を与える次の Frankel-Acrivos の理論式で置き換えた。

$$\frac{\mu^*}{\mu} = \frac{9}{8} \frac{(\alpha/\alpha_{\max})^{1/3}}{1 - (\alpha/\alpha_{\max})^{1/3}} \quad (5)$$

ここで、 α : 固体粒子の体積率、 α_{\max} : 固体粒子の最大充填率、 μ^* : 固液混合流体の実効粘性である。本実験解析の条件では、 $\mu^*/\mu = 12.3$ となる。

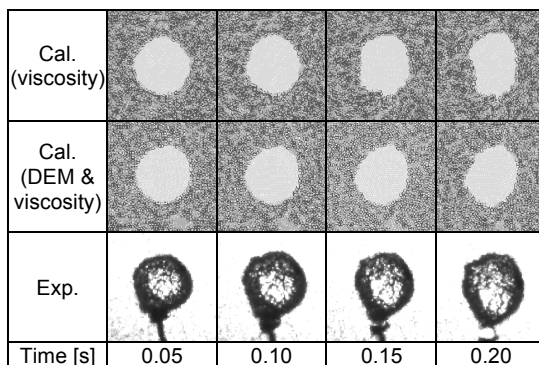


図6 固液混合層中での気泡形状の変化 (実効粘性を考慮した計算との比較)

図6及び図7に、それぞれ、液相中での気泡形状変化及び気泡上昇速度について実効粘性を考慮した計算 (viscosity) と DEM を用いて固体粒子間の相互作用も合わせて考

慮した計算 (DEM & viscosity) を比較する。これらの計算では気泡形状は縦長に変化しているものの、大きな実効粘性によって初期の気泡形状からの変化は小さい。また、2つの計算結果に顕著な違いは見られない。図7は、DEM に加えて実効粘性を用いた計算が気泡上昇速度に与える固体粒子の影響を過大評価するものの、実効粘性を考慮することで気泡上昇速度がより適切に再現されることを示している。これらの結果は、実効粘性により代表される固液間の相互作用が気泡運動挙動に大きく影響していることを示している。

一方で、本解析で用いた式(2)は、実効粘性を固体粒子の体積率のみの関数として与えるものであり、粒子径等への依存性については考慮されていない。今後、適用範囲等について検討する必要がある。

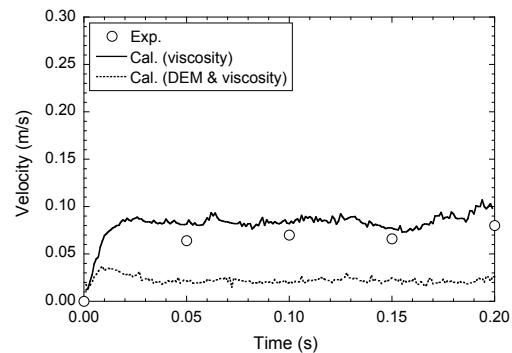


図7 固液混合層中での気泡上昇速度 (実効粘性を考慮した計算との比較)

④ 固液混合層中での気泡上昇挙動解析 (固体粒子-流体間相互作用の影響)

固体粒子-流体間相互作用が気泡運動挙動に与える影響を考慮するため、式(2)中の外力項に次式で表される相互作用項を導入した。

$$\mathbf{f}_f = \frac{\beta}{1 - \varepsilon} (\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_f) \quad (6)$$

ここで、 ε : ボイド率、 \mathbf{u}_f : 流体の速度、 \mathbf{u}_s : 固体粒子の速度、 β : 固体粒子-流体間の運動量交換係数である。式(3)中でこの相互作用項は、固体粒子の体積 V_s を用いて

$$\mathbf{F}_f = -\mathbf{f}_f V_s \quad (7)$$

で与えられる。本研究では、 β に固体粒子系流体解析でしばしば用いられる Gidaspow の抗力係数相関式を用いた。

図8及び図9に、それぞれ、液相中での気泡形状変化及び気泡上昇速度について固体粒子-流体間相互作用を考慮した計算 (SL drag) と DEM を用いて固体粒子間の相互作用も合わせて考慮した計算 (DEM & SL drag) の結果を比較する。図から分かるように固体

粒子-流体間相互作用のみを考慮した場合、気泡形状の変化は図8に示した original の計算に近く、気泡上昇速度も過大評価されており、測定値との差は大きい。一方で、固体粒子間の相互作用も合わせて考慮した計算は、気泡形状がやや歪んでいるものの、気泡上昇速度は良く再現されている。これらの計算から、固体粒子間だけでなく固体粒子-流体間の相互作用が気泡運動挙動を適切に再現する上で重要であることが明らかとなった。

一方で、本研究で用いた固体粒子-流体間の相互作用を与える抗力係数相関式は、本来、マクロスケールでの平均量として圧力損失を与えるものであり、本解析が対象とするメゾスケール現象への適用性については、今後、検討の必要がある。

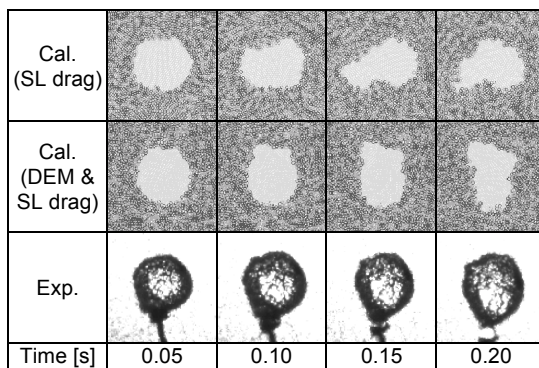


図8 固液混合層中での気泡形状の変化 (固体粒子-流体間の相互作用を考慮した計算との比較)

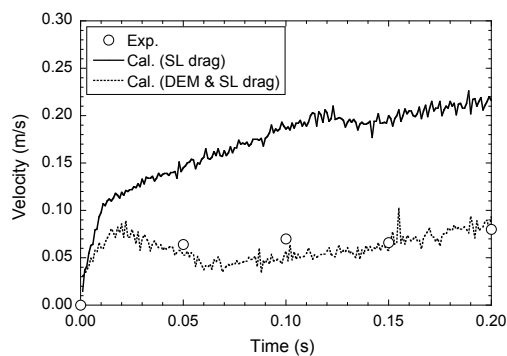


図9 固液混合層中での気泡上昇速度 (固体粒子-流体間の相互作用を考慮した計算との比較)

⑤ 固液混合層からの気泡離脱挙動解析

燃料デブリベッドのセルフレベリングを構成する基本挙動の一つである固液混合層中から液相への気泡離脱挙動について開発コードを用いた解析を行った。図10に実験で観察された気泡離脱時の気泡形状の変化と実効粘性を考慮した計算 (viscosity) と

固体粒子間の相互作用に加え固体粒子-流体間の相互作用を考慮した計算 (DEM & SL drag) の結果を示す。この比較から分かるように、本解析で採用した固体粒子の影響を代表する物理モデルを用いることで液相中への気泡離脱挙動についても定性的に再現することが示された。

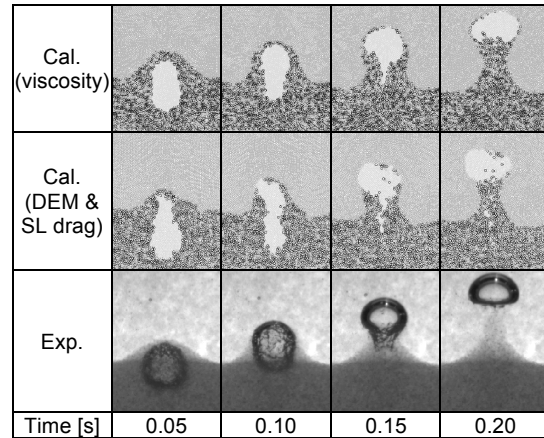


図10 固液混合層からの気泡離脱挙動 (固体粒子効果を考慮した計算との比較)

(4) まとめ

本研究では、燃料デブリの運動挙動における固気液混相流の基本的な流動特性を評価するための数値シミュレーションコードを粒子法に基づくメゾスケール解析手法として開発した。また、燃料デブリである固体粒子による混相流動への影響に対して開発コードの妥当性を検証するデータを取得するため、固液混合層中での気泡上昇挙動実験を合わせて実施した。

開発した固気液混相流解析コードを用いた実験解析から、固液混合流体の実効粘性あるいは固体粒子間・固体粒子-流体間の相互作用を考慮することが本実験条件下での固気液三相流動を再現する上で重要であることが示された。今後、開発コードを用いて燃料デブリベッドのセルフレベリング挙動の基本特性を評価するには、本研究で採用した固体粒子の影響を代表する物理モデルの妥当性について、広範な実験データを基にその適用範囲を検証する必要がある。

本研究では、解析手法として用いた粒子法は、格子法と比べてメゾスケールの挙動評価に優れている一方で、固体粒子による相互作用等、混相流効果を記述する構成方程式が十分には整備されていない。本研究では、燃料デブリベッドのセルフレベリング挙動における流動特性をメゾスケールで評価するための数値解析手法を整備し、その基本的な妥当性を実験的な検証を通じて示すことができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Y. ARAMAKI, T. SUZUKI, I. MIYA, L. GUO, K. MORITA, Numerical Simulation of Single Bubble Moving in Stagnant Solid-Liquid Mixture Pool Using Finite Volume Particle Method, Proc. of 2013 21th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE21), 査読有, ICONE21-16688, July 2013, CD-ROM.
- ② L. GUO, S. ZHANG, K. MORITA, K. FUKUDA, Fundamental Validation of the Finite Volume Particle Method for 3D Sloshing Dynamics, Int. J. Numerical Methods in Fluids, 査読有, 68(1), 1-17, 2012, 10.1002/flid.2490.
- ③ T. SUZUKI, L. GUO, R. S. MAHMUDAH, K. MORITA, Numerical Simulation of Effective Viscosity in Solid-Fluid Mixture Flows Using Finite Volume Particle Method, Proc. of 19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-19), 査読有, ICONE19-43981, August 2011, CD-ROM.
- ④ R. S. MAHMUDAH, M. KUMABE, T. SUZUKI, L. GUO, K. MORITA, 3D Simulation of Solid-Melt Mixture Flow with Melt Solidification Using a Finite Volume Particle Method, J. Nuclear Science and Technology, 査読有, 48(10), 1300-1312, 2011, 10.1080/18811248.2011.9711820.
- ⑤ R. S. MAHMUDAH, M. KUMABE, T. SUZUKI, L. GUO, K. MORITA, Particle-Based Simulations of Molten Metal Flows with Solidification, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 査読有, 71(1), 17-29, 2011, <http://kenkyo.eng.kyushu-u.ac.jp/memoirs-eng/top.php>
- ⑥ R. S. MAHMUDAH, M. KUMABE, W. TORII, I. MIYA, T. TAKEDA, T. SUZUKI, L. GUO, K. MORITA, 3D Simulation of Solid-Melt Mixture Flow with Phase Change Using Finite Volume Particle Method, Proc. of 7th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS7), 査読有, N7P0006, November 2010, CD-ROM.

[学会発表] (計 4 件)

- ① 荒牧優希他, 有限体積粒子法を用いた固気液混相流解析のモデル化手法に関する研究, 日本原子力学会「2013年春の

年会」, 2013年3月26日, 近畿大学

- ② 宮 一郎他, 粒子法を用いた固気液混相流解析における固相相互作用モデルの検討, 日本原子力学会九州支部第31回研究発表講演会, 2012年12月1日, 九州大学
- ③ 荒牧優希他, 粒子法を用いた固気液混相流解析手法の実験的検証, 日本原子力学会「2012年春の年会」(学生ポスターセッション), 2012年3月20日, 福井大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

守田 幸路 (MORITA KOJI)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 40311849

(2) 連携研究者

松元 達也 (MATSUMOTO TATSUYA)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 90325514