

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420909

研究課題名(和文) 燃料デブリベッド運動挙動に関する実験データベース整備及び解析コード検証

研究課題名(英文) Development of experimental database and validation of analysis code for dynamic behavior of fuel debris bed

研究代表者

守田 幸路 (MORITA, Koji)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40311849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

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ベッドのセルフ・レベリング挙動に着目し、模擬デブリの特性、冷却材の沸騰挙動等について実機条件の模擬性を向上した実験によって知見を得るとともに、解析コードの適用性を検証するための実験データベースを整備した。さらに、実験結果に基づき格子-粒子法連成計算による数値シミュレーション手法の妥当性について検討した。

研究成果の概要(英文)：The present study focuses on self-leveling behavior of fuel debris bed, which is critical as a dominant factor in the long-term decay heat removal phase after core disruptive accident of fast reactors. A series of experiments, which improve simulated accident conditions such as debris properties, coolant boiling behaviors and so on, was performed to acquire experimental knowledge on self-leveling characteristics. An experimental database was also developed for validation of physical models used in computational tools. Validation of a numerical simulation code based on the particle-grid hybrid method was examined based on the present experimental results.

研究分野：原子炉工学

キーワード：高速炉 炉心損傷事故 燃料デブリベッド セルフ・レベリング 数値解析 個別要素法

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第4世代原子炉「GEN-IV」では、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挙げられている。また2011年3月に発生した福島第一原子力発電所の事故後、我が国において原子力を基幹電源の一つとして位置付けるためには、原子炉の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が必要不可欠である。

これに関連して、ナトリウム冷却型高速炉(SFR)の実用化研究では、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、長期の崩壊熱除去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重要な課題となっている。また、福島第一原子力発電所1～3号機では、溶融した核燃料と炉内構造物が再度固化した状態(燃料デブリ)となって原子炉圧力容器内外に存在すると考えられており、燃料デブリ取り出しまでの期間、未臨界状態を継続し、安定的に崩壊熱を冷却する必要がある。

原子炉のCDAにおいて冷却材の沸騰によって駆動される燃料デブリベッドの運動挙動は、その冷却特性及び臨界特性がベッド厚さに依存することから、事故後長期の崩壊熱除去過程を支配する要因として重要である。このため、報告者らは、崩壊熱除去過程における燃料デブリの運動挙動に着目した実験的研究を進め、崩壊熱による冷却材沸騰によって堆積デブリが平坦化する「燃料デブリベッドのセルフ・レベリング挙動」について、その発生条件や過渡挙動の基本特性を明らかにしてきた。しかしながら、実機条件下でのベッド運動挙動を予測し、解析コードの妥当性を検証するための実験データベースは十分には整備されていない。

2. 研究の目的

これまで報告者らは、冷却材に水、燃料デブリに数mm程度までの大きさの固体球形粒子(アルミナ、ジルコニア、ステンレス鋼等)を模擬物質として用いた燃料デブリ運動挙動実験を実施してきた。この実験では、崩壊熱による冷却材沸騰を(1)減圧沸騰、(2)ベッド下部からの加熱沸騰、(3)ベッド下部からの気相貫流によって模擬し、燃料デブリベッドのセルフ・レベリング挙動に対する実験技術を確立してきた。しかしながら、模擬デブリの特性(粒子形状、粒径、粒径分布等)、冷却材の沸騰強度等が広範な実機条件を網羅していないことから、実機条件下での燃料デブリベッドの運動挙動に関する知見は十分ではない。

一方で報告者らは、デブリベッドの運動挙動を評価するための解析手法について、日本原子力研究開発機構と共同で多流体モデルを基本とする高速炉安全解析コードSIMMERの適用性を検討してきた。また、固体デブリ間の相互作用を直接的に扱う解析手法である個別要素法(DEM)をSIMMERコードに導入した新たな固気液混相熱流動解析コード(以下、SIMMER-DEMコード)の開発を進めている。しかしながら、SIMMER-DEMコードの実機条件への適用性向上を図るには、実機条件の模擬性に優れた実験データベースに基づいた検証研究が必要となる。

このため本研究では、原子炉のCDAにおいて長期の崩壊熱除去過程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」について、模擬デブリの特性、冷却材の沸騰強度等について実機条件の模擬性を向上した実験によって知見を得る。これにより、解析コードの適用性を検証するための実験データベースを整備するとともに、実験結果に基づきSIMMER-DEMコードの実機評価への適用性について検証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 燃料デブリ運動挙動実験

本研究で実施した燃料デブリ運動挙動実験では、崩壊熱による冷却材沸騰の模擬に、報告者らが開発したベッド下部からの気相貫流を用いた実験方法を用いる。図1に実験装置の概要を示す。本実験方法では、デブリ運動挙動に影響を与え得る不確定な因子(プール内対流、ベッド内気相分布、気相流量変化)を極力排除し、実機条件を網羅する気相流量においてセルフ・レベリング特性が測定可能である。これにより、非球形粒子、微細粒子及び特性の異なる混合粒子等の実機模擬性を向上した実験条件下での固体粒子ベッドのセルフ・レベリング挙動について解析コードの検証性に優れた高精度の実験データを取得する。

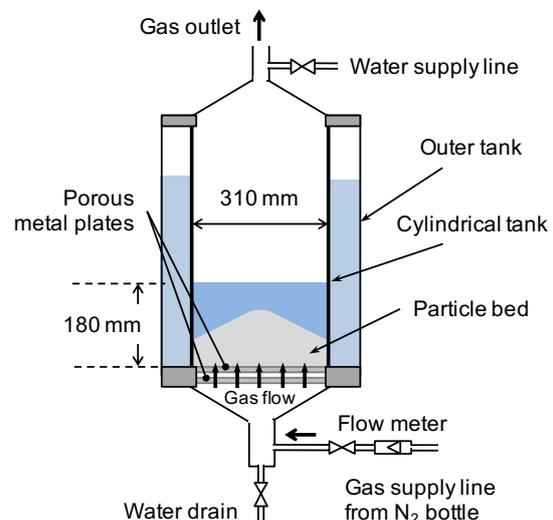


図1 燃料デブリ運動挙動実験装置の概要

(2) 実験データベースの整備

燃料デブリ運動挙動実験で得られたデータに基づいてセルフ・レベリングの発達を予測する実験相関式のモデル化手法について次元解析の手法を用いて検討し、実験結果を反映したデータベースとして整備する。

(3) 混相流動解析コードの検証

SIMMER-DEM コードについて、本研究で実施する燃料デブリ運動挙動実験を対象とした検証解析を実施する。これにより、セルフ・レベリング挙動に対する本コードの基本的な適用性について検討する。

4. 研究成果

(1) 燃料デブリ運動挙動実験

本実験では、燃料デブリを模擬した固体粒子（嵩体積 7 L）を頂部が円錐形状になるように円筒水槽（内径  $D = 310$  mm；初期水位 180 mm）内に堆積させ、水槽底部の多孔質板を通じて窒素ガスを吹き込み固体粒子ベッドが平坦化する挙動を観察した。固体粒子には、体積相当直径  $d_p = 0.51 \sim 6.1$  mm のアルミナ ( $Al_2O_3$ )、ジルコニア ( $ZrO_2$ )、亜鉛 (Zn)、ステンレス鋼 (SS)、銅 (Cu) の球形及び非球形粒子（球形度  $\phi = 0.39 \sim 1.0$ ）を用い、窒素ガス流量  $Q_g$  を実験パラメータとした。図 2 に実験で観察された非球形の  $Al_2O_3$  粒子 ( $d_p = 2.0$  mm； $\phi = 0.43$ ) 及び SS 粒子 ( $d_p = 2.2$  mm； $\phi = 0.75$ ) ベッドのセルフ・レベリング過程の例を示す。

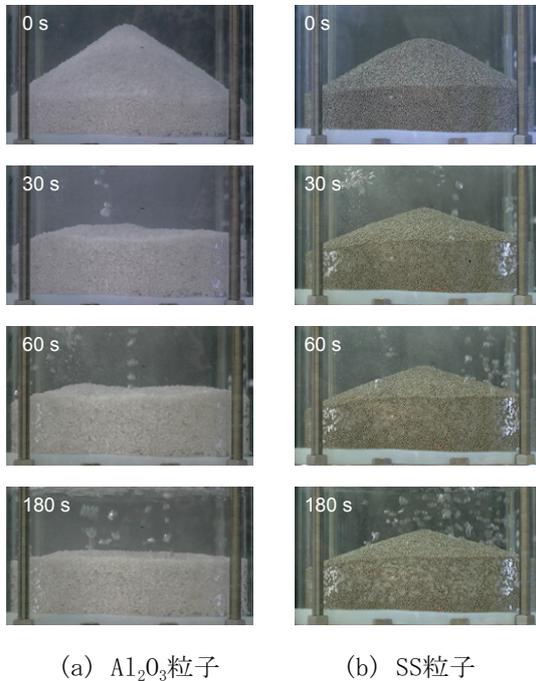


図 2 非球形粒子のレベリング過程 ( $Q_g \sim 100$  L/min)

(2) 実験データベースの整備

本研究では、可視化画像から測定された固体粒子ベッドの円錐部高さ（図 3）の時間変

化  $H_m(t)$  をモデル・パラメータとなるレベリング特性時間  $\tau$  及び円錐部の平衡高さ  $H_{eq}$  を用いて次式でモデル化することを提案した。

$$\frac{H_m(t) - H_{eq}}{H_0 - H_{eq}} = \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 $H_0$  は初期の円錐部高さである。また、各実験結果から求めた  $\tau$  及び  $H_{eq}$  は、次元解析によって、気相速度、粒子表面積、粒子直径、ベッド空隙率及び下記で定義される気相レイノルズ数  $Re$ 、気相アルキメデス数  $Ar$  を独立変数とする無次元実験式に相関した。

$$Re = \frac{\rho_g u_g d_p}{\mu_g} \quad (2)$$

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_l) g d_p^3}{\mu_g^2} \quad (3)$$

ここで、 $\rho_g$  は気体密度、 $u_g$  は気相速度、 $\mu_g$  は気体粘性係数、 $\rho_p$  は粒子密度、 $\rho_l$  は液体密度、 $g$  は重力加速度である。

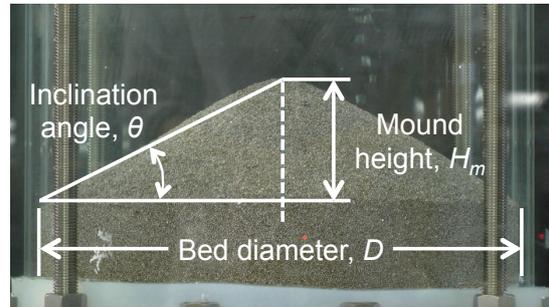


図 3 ベッド円錐部高さの定義

図 4 に式 (1) による  $H_m/D$  の予測値と測定値の比較を示す。本モデル式によって 33 ケースで測定された 300 データの 91% が 20% 以内の精度で予測できている。図 5 に固体粒子ベッドの円錐部高さの時間変化の例を示す。式 (1) が広範な気相流量に対して非球形 SS 粒子 ( $d_p = 2.2$  mm； $\phi = 0.62$ ) ベッドのレベリングの発達を適切に予測できることが分かる。

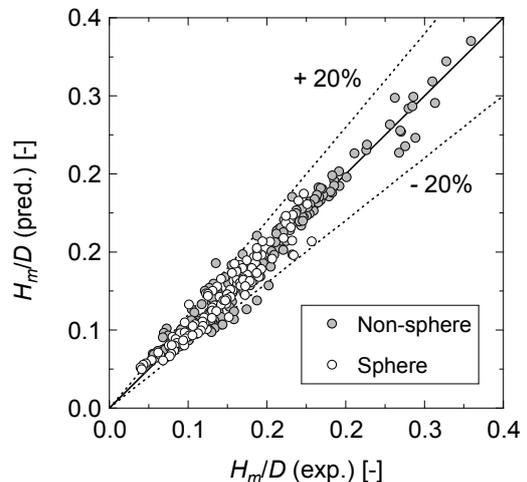


図 4 ベッド高さの実験値と予測値の比較

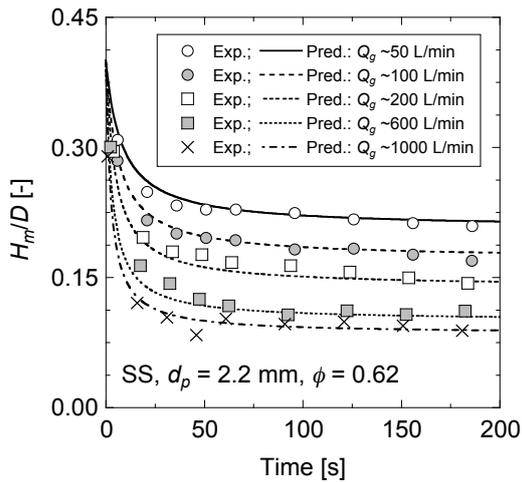


図5 ガス流量のベッド高さ変化への影響 (非球形 SS 粒子;  $d_p = 2.2 \text{ mm}$ ;  $\phi = 0.62$ )

実機の事故条件では、燃料デブリには SS の微粒化粒子も含まれる。また、デブリ粒子は一般に非球形であり、平均径数百  $\mu\text{m}$  の粒径分布を持っている。このため、本実験では、密度、粒径あるいは球形度の異なる 2 種類の固体粒子の混合ベッドを用いて、その基本的なレベリング特性について実験データを取得した。図 6 に球形 SS・ $\text{Al}_2\text{O}_3$  混合粒子ベッド ( $d_p \sim 2 \text{ mm}$ ;  $Q_g = 100 \text{ L/min}$ ) のレベリング開始前と完了後の側面及び上面から撮影した写真を示す。ここで、SS 粒子及び  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子は、それぞれ、黒及び白色に写っており、上面からの写真において赤丸で囲った部分が粒子ベッド部分である。この写真の比較から分かるように、レベリング完了後は、低密度の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子がベッド外周部に多く分布しており、レベリングの過程で密度の違いによる分離が生じていることが確認できる。

【側面】



【上面】



レベリング開始前 | レベリング完了後

図6 球形 SS・ $\text{Al}_2\text{O}_3$  混合粒子ベッドのレベリングの例

粒径の異なる球形 SS 混合粒子ベッド、球形 SS・ $\text{Al}_2\text{O}_3$  混合粒子ベッド及び球形・非球形 SS 混合粒子ベッドにおける円錐部高さ  $H_m/D$  の時間変化の例をそれぞれ図 7、8 及び 9 に示

す。ここでは、混合粒子ベッドの高さを、それを構成する粒子のみを用いた均質粒子の結果と比較している。先に述べたようにレベリングの過程で特性の異なる粒子のベッド内分布に偏りが生じるため、ベッド高さにおいても一方の均質粒子の結果に偏る傾向が認められる。

このため本研究では、式(1)に用いる  $\tau$  及び  $H_{eq}$  の無次元実験式に、粒径差及び密度差の影響を代表する項を加え、混合粒子ベッドに対する実験結果を相関することを試みた。その結果、図 7、8 及び 9 に示すように、式(1)が混合粒子のセルフ・レベリングによるベッド高さ変化を概ね予測できることが分かった。

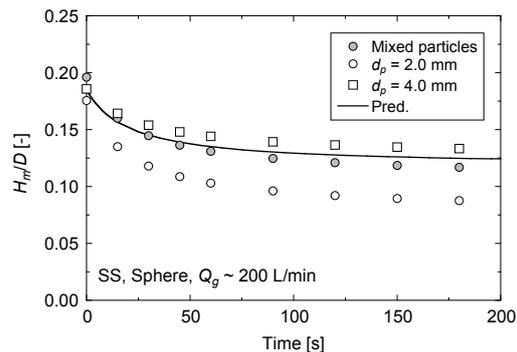


図7 粒径の異なる球形 SS 混合粒子ベッドのレベリング ( $d_p \sim 2.0, 4.0 \text{ mm}$ ;  $Q_g \sim 200 \text{ L/min}$ )

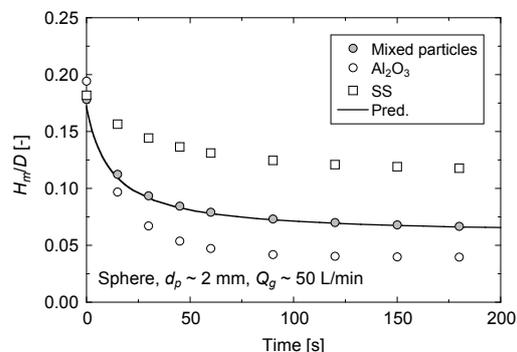


図8 球形 SS・ $\text{Al}_2\text{O}_3$  混合粒子ベッドのレベリング ( $d_p \sim 2 \text{ mm}$ ;  $Q_g \sim 50 \text{ L/min}$ )

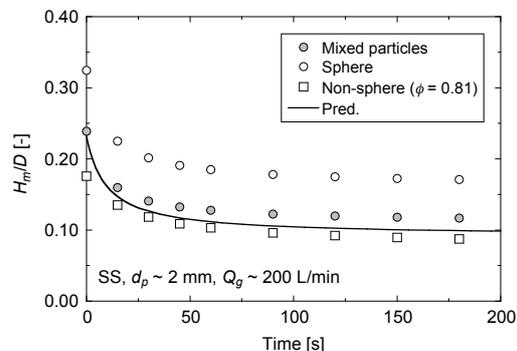
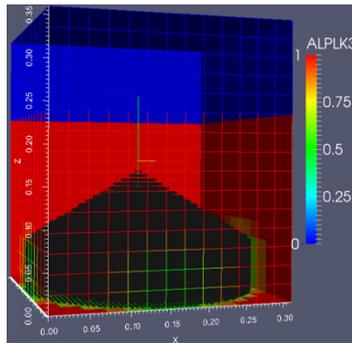


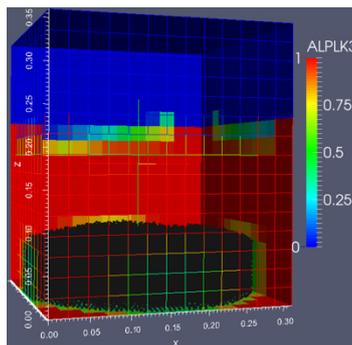
図9 球形・非球形 SS 混合粒子ベッドのレベリング ( $d_p \sim 2 \text{ mm}$ ;  $Q_g \sim 200 \text{ L/min}$ )

### (3) 混相流動解析コードの検証

本研究では、SIMMER-DEM コードを用いて、燃料デブリ運動挙動実験の条件を模擬した3次元解析を行った。図10に直径約6 mmの球形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子のベッドを対象とした解析について、初期状態及びガス吹き込み開始後26秒時点でのベッド形状を黒色の粒子で示す。ここで、ALPLK3は円筒水槽内の水の体積率の分布、 $x$ 軸及び $z$ 軸は長さ[m]を示している。本解析では、流体計算に  $13 \times 13 \times 15$  個の格子、DEM計算では模擬デブリに43,400個の粒子を用いた。



(a) 初期条件 (0 秒)



(b) ガス吹き込み開始後26秒

図10 球形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子ベッド形状の変化 ( $d_p = 6.1 \text{ mm}$ ;  $Q_g = 104 \text{ L/min}$ )

図11及び12に直径約6 mmの球形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  及び  $\text{ZrO}_2$  粒子ベッドの高さ  $H_m/D$  の変化について、実験結果、式(1)による予測値及びSIMMER-DEMコードによる解析結果との比較を示す。何のケースでも解析は、初期のレベリングの発達を過大評価している。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子ベッドの場合、解析では、レベリングを開始してから25秒の間にレベリングは徐々に穏やかになり、ベッド高さは実験で得られた平衡高さ  $H_{eq}/D$  に近づいている。また、 $\text{ZrO}_2$  粒子ベッドにおいても、初期に急速にベッドが崩壊した後は、実験で観察された平衡高さと比較しうるベッド高さが再現されている。

実験では図2に示すように、初期の粒子ベッド形状は、頂部がやや丸みを帯びた形状となっているが、本解析では完全な円錐形状を初期条件としているため、ベッド頂部は比較

的に早期に崩壊しやすい。また、球形粒子ベッド内部の空隙率は40%程度と比較的小さく、本解析では流体-粒子間の抗力係数をErgun式に基づいて計算している。しかしながら、ベッド表面近傍の固体粒子については流体-粒子間の抗力が過大評価される可能性があり、これも初期のレベリングの発達を過大評価する要因になっているものと考えられる。特に、ガス流量の大きな  $\text{ZrO}_2$  粒子ベッドのケースで、この傾向が顕著に現れたものと思われる。

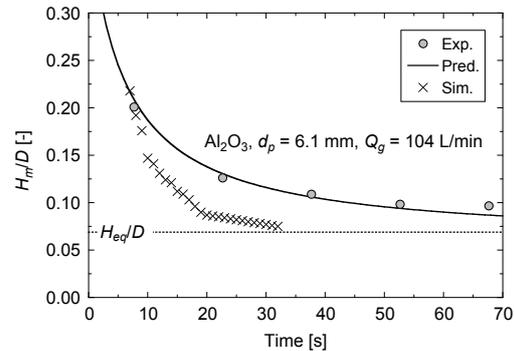


図11 球形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子ベッドの高さ変化 ( $d_p = 6.1 \text{ mm}$ ;  $Q_g = 104 \text{ L/min}$ )

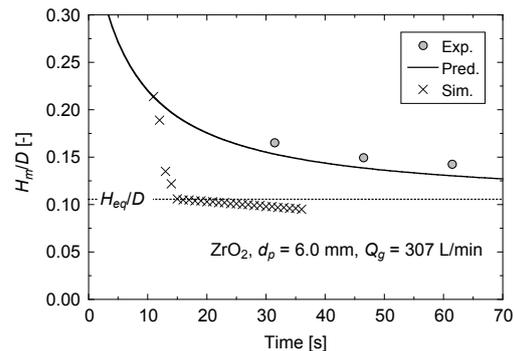


図12 球形  $\text{ZrO}_2$  粒子ベッドの高さ変化 ( $d_p = 6.0 \text{ mm}$ ;  $Q_g = 307 \text{ L/min}$ )

### (4) まとめ

本研究では、原子炉のCDAにおいて事故後長期の崩壊熱除去過程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・レベリング挙動に関する実験的研究を実施した。その結果、実機条件の模擬性を向上した実験によって広範な条件における実験的知見を得た。また、セルフ・レベリングによるベッド高さの時間変化に関する経験モデルを開発することで、実験データベースとして整備した。

さらに、燃料デブリ運動挙動実験の結果を用いて、セルフ・レベリング挙動に対する固気液混相熱流動解析コードの妥当性について検討した。本コードは、多流体モデルにDEMを導入したもので、燃料とスチールの固化粒子及び液体ナトリウムとその蒸気が混在し流動化する相変化を伴った多相多成分の熱流動現象を解析できる。今後も本研究で実施した燃料デブリ運動挙動実験で得られたデータベ

ースを活用して、堆積デブリのセルフ・レベリング挙動を原子炉容器内構造物上の局所スケールで高精度に評価する手法として整備を進める予定である。

燃料デブリベッドの運動挙動を解明し、その解析評価手法を整備することは、原子炉の過酷事故における燃料デブリの長期安定冷却性に関するアクシデントマネジメントの整備に技術的な知見を与えるだけでなく、CDAにおける事象推移の不確かさを低減し、従来の安全評価上の保守性を大幅に低減することで原子炉容器等の設計合理化による経済性の向上に大きく貢献する。また、本研究で整備した実験データベースは、多相流解析のための数値シミュレーション手法の検証データベースとして広く活用されることも期待される。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① K. MORITA, T. MATSUMOTO, S. NISHI, T. NISHIKIDO, S. CHENG, H. TAGAMI, T. SUZUKI, Y. TOBITA, A New Empirical Model for Self-Leveling Behavior of Cylindrical Particle Beds, Journal of Nuclear Science and Technology, 査読有, 53(5), 713-725, 2016, 10.1080/00223131.2015.1126204.
- ② S. CHENG, H. TAGAMI, H. YAMANO, T. SUZUKI, Y. TOBITA, S. TAKETA, S. NISHI, S. NISHIKIDO, B. ZHANG, T. MATSUMOTO, K. MORITA, An Investigation on Debris Bed Self-Leveling Behavior with Non-Spherical Particles, Journal of Nuclear Science and Technology, 査読有, 51(9), 1096-1106, 2014, 10.1080/00223131.2014.910478.
- ③ S. CHENG, H. TAGAMI, H. YAMANO, T. SUZUKI, Y. TOBITA, Y. NAKAMURA, S. TAKETA, S. NISHI, B. ZHANG, T. MATSUMOTO, K. MORITA, Experimental Study and Empirical Model Development for Self-Leveling Behavior of Debris Bed Using Gas-Injection, Mechanical Engineering Journal, 査読有, 1(4), TEP0022, 2014, 10.1299/mej.2014tep0022.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 松岡史也, 錦戸達也, 三浦亮, 松元達也, 守田幸路, デブリベッドのセルフ・レベリングに関する研究: 非球形混合粒子のレベリング特性, 日本原子力学会「2016年春の年会」, 2016年3月26日, 東北大学(仙台市)
- ② 三浦亮, 錦戸達也, 松岡史也, 松元達也, 守田幸路, デブリベッドのセルフ・レベリングに関する研究: 混合粒子のセルフ・レベリング特性, 日本原子力学会九州支部第34回研究発表講演会, 2015年

12月5日, 九州大学(福岡市)

- ③ 錦戸達也, 西津平, 松岡史也, 松元達也, 守田幸路, デブリベッドのセルフ・レベリングに関する研究: 混合粒子のセルフ・レベリング特性, 日本原子力学会「2015年春の年会」, 2015年3月20日, 茨城大学(日立市)
- ④ K. MORITA, T. MATSUMOTO, S. TAKETA, S. NISHI, S. CHENG, T. SUZUKI, Y. TOBITA, Validation of New Empirical Model for Self-Leveling Behavior of Cylindrical Particle Beds Based on Experimental Database, 10th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10), Dec. 14-18, 2014, Okinawa, Japan.
- ⑤ 松岡史也, 西津平, 錦戸達也, 松元達也, 守田幸路, ガス吹き込みによる非球形粒子ベッドのレベリング特性に関する研究, 日本原子力学会九州支部第33回研究発表講演会, 2014年12月13日, 九州大学(福岡市)
- ⑥ 西津平, 錦戸達也, 竹田祥平, 松元達也, 守田幸路, デブリベッドのセルフ・レベリングに関する研究: 非球形粒子ベッドのレベリング特性, 日本原子力学会「2014年秋の大会」, 2014年9月9日, 京都大学(京都市)
- ⑦ 竹田祥平, 西津平, 錦戸達也, 松元達也, 守田幸路, 固体粒子ベッドにおけるセルフレベリング手法の定量的評価に関する研究, 日本原子力学会九州支部第32回研究発表講演会, 2013年12月14日, 九州大学(福岡市)

## 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) 研究分担者

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

### (3) 連携研究者

飛田 吉春 (TOBITA, Yoshiharu)  
日本原子力研究開発機構・次世代原子力システム研究開発部・主任研究員  
研究者番号: 20421555