

令和元年6月6日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06960

研究課題名（和文）燃料デブリの堆積挙動に関する実験データベースの構築及び解析コードの検証

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

研究代表者

守田 幸路（MORITA, Koji）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：40311849

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：ナトリウム冷却型高速炉の炉心損傷事故では、炉心から流出した燃料等の炉心物質が燃料デブリとなって原子炉支持構造物上や下部プレナム内に堆積しデブリベッドを形成する。このデブリベッドの冷却特性及び臨界特性はその形状に依存することから、燃料デブリの堆積及びベッド形成挙動が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。本研究では、燃料デブリベッドの堆積及びベッド形成挙動について、解析コード検証用の実験データベースを構築するとともに、個別要素法と結合した多流体モデルの検証を実施し、実機安全解析手法として整備した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子炉の炉心損傷事故の崩壊熱除去過程における熱流動現象を解明し、その解析評価手法を整備することは、アクシデントマネジメントとしての燃料デブリの長期安定冷却方策に技術的な知見を与えるだけでなく、炉心損傷事故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、安全設計（コアキャッチャー設計）の合理化による経済性の向上に大きく貢献することになる。他方、安全規制の観点からは、炉心損傷事故時に炉心内で生じる多相流現象に対する数値計算手法の高度化を図ることは、安全評価の信頼度を向上させ、公衆の安心感の醸成に寄与することになる。

研究成果の概要（英文）：In the core disruptive accident (CDA) of sodium-cooled fast reactors (SFRs), core materials such as fuel discharged settle to form debris beds on the core-support structure and/or in the lower plenum. Characteristics of coolability and recriticality of the debris beds depend on bed shape, and hence debris sedimentation and bed formation behaviors are critical as dominant factors in the long-term decay heat removal phase after CDA of SFRs. In the present study, an experimental database on debris sedimentation and bed formation behaviors was developed to validate numerical simulation codes. Validation of a multi-fluid model coupled with the distinct element method was also performed to develop an analytical tool for reactor safety assessment.

研究分野：原子力工学

キーワード：高速炉 炉心損傷事故 燃料デブリベッド デブリ堆積 数値解析 個別要素法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ナトリウム冷却型高速炉（SFR）の実用化研究では、炉心損傷事故（CDA）時に燃料を炉心外に流出させ再臨界を回避する過酷事故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。以上のような背景から、研究代表者らは、崩壊熱除去過程における燃料デブリの堆積及びベッド形成挙動に着目した基礎的な実験研究を進め、粒子ベッドの堆積過程や形成されたベッド形状に関する基本特性を明らかにしてきた。これまで実施したデブリ再配置挙動模擬試験（デブリ堆積挙動実験）では、冷却材と燃料デブリの模擬物質として水と固体粒子を用い、燃料デブリベッドの堆積及びベッド形成挙動に関する実験データベースの整備を進めてきた。この実験では、水プール中に固体粒子をジェット状に落下させ、プール底部に堆積させることで炉内構造物上に形成されるデブリベッドを模擬した。しかしながら、模擬デブリに均質の固体粒子を用いており、粒径分布を持つ実際の燃料・ステンレス鋼混合デブリの特性を十分に反映したものではなかった。

また、研究代表者らは、デブリの再配置挙動を評価するための解析手法について、多流体モデルを基本とする安全解析コードに、固体デブリ間の相互作用及びその運動を直接的に扱う解析手法（個別要素法（DEM）等）を導入した新たな固気液混相熱流動解析コードの開発を進めている。しかしながら、開発コードの実機条件への適用性向上を図るには、実機条件を視野に入れた広範な実験条件を網羅した実験データベースによるコード検証研究が必要となる。

### 2. 研究の目的

SFR の CDA の影響緩和対策として、損傷した炉心を原子炉容器内で保持・冷却する、所謂、IVR（In-vessel Retention）を成立させる設計方を講じることが、放射性物質の格納機能を確保する上で有効かつ合理的な考え方として提案されている。しかしながら、炉心領域から流出した燃料が放出する崩壊熱の長期の除熱性についての知見は、IVR の成立性を設計で担保するには十分ではない。特に、流出した燃料の冷却性及び核的な臨界性はデブリとなって堆積したベッドの形状に大きく依存するため、その特性とこれを支配する基本機構を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、SFR における CDA の炉心物質再配置過程で重要となる燃料デブリの堆積及びベッド形成挙動について、異なる特性を有する混合粒子を模擬デブリとして用いた実験を行い、解析コード検証用の実験データベースとしてベッド形状特性を予測する新しい工学的相関式を提案するとともに、固体デブリ間の相互作用及びその運動解析に DEM を用いた固気液混相熱流動解析コードの適用性について実験解析によって検証を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) デブリ堆積挙動実験

本実験では、炉心物質デブリを模した固体粒子を円筒ノズルを通じて円筒水プール中に落下させ、プール底部に堆積させることで、実験パラメータに依存して変化する粒子ベッドの特性を観察・測定する。これにより、解析コードの検証性に優れた実験データを取得する。

#### (2) 実験データベースの構築

研究代表者らは、これまでの実験で測定された粒子ベッドの高さを次元解析によって関連する実験式を検討してきた。ここでは、新たに取得する粒子の落下速度、非均質性（混合粒子）の影響を含む広範な条件下で取得する実験データを含めた実験相関式として整備する。

#### (3) 固気液混相熱流動解析コードの検証

研究代表者らが日本原子力研究開発機構及び独・カールスルーエ工科大学と共同で開発を進めてきたデブリベッドの堆積挙動を評価するための固気液混相熱流動解析コードについて、混合粒子を用いた実験の結果を含む広範なデータに対して解析コードの妥当性を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) デブリ堆積挙動実験

実験装置の概略を図 1 に示す。実験装置は、アクリル製円筒容器（内径  $D_c$  375 mm；高さ 1,020 mm）、その外側のアクリル製矩形容器、及び円筒容器上部の粒子落下装置により構成される。本実験では、アルミナ： $Al_2O_3$ （球形、非球形）、ジルコニア： $ZrO_2$ （球形）、ステンレス鋼：SS（球形、非球形）の固体粒子を用いた。特性（直径あるいは密度）の異なる混合粒子（嵩体積  $V_p$  5 L）を、粒子落下装置に充填し、プラグを引き抜くことで、粒子流出ノズル（内径  $d_n$  20～40 mm；長さ 70～105 mm；ノズル下端高さ 473～720 mm）から水で満たした円筒水槽（初期水位 825 mm）内に粒子を自由落下させた。用いた固体粒子の密度、体積等価直径及び球形度の範囲は、それぞれ、 $\rho_p = 3,720 \sim 8,050 \text{ kg/m}^3$ 、 $d_p = 0.5 \sim 6.0 \text{ mm}$  及び  $\phi = 0.39 \sim 1.0$ 、ベッドの空隙率の範囲は、 $\varepsilon = 32 \sim 51\%$  である。粒子の落下・堆積挙動は、矩形容器に水を満たすことで歪みを少なくして円筒容器内部を可視化し、ビデオカメラにより記録した。模擬デブリの堆積挙動特性は、図 2 に示すように中央位置での粒子ベッド円錐部の高さ分布  $H_{m,x}$ （ $H_m$ ：中央部高さ）及び粒子ベッド中央部での全体高さ  $H_b$ （ $= H_m + H_e$ ； $H_e$ ：粒子ベッド基部高さ）を用いて評価した。

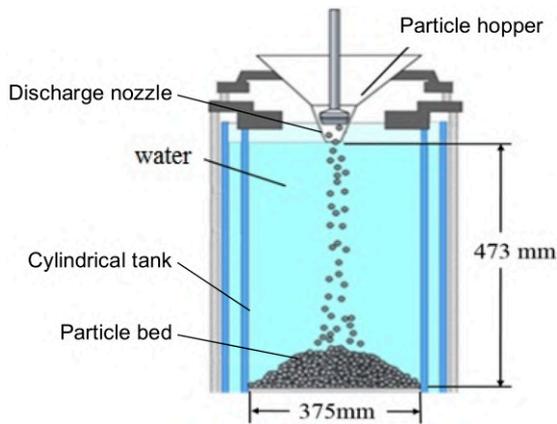
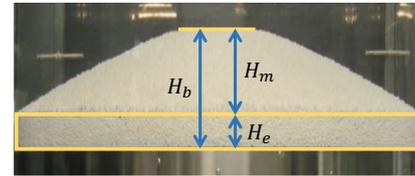
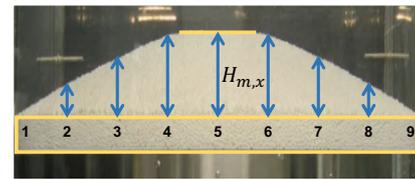


図1 実験装置概略



ベッド高さの定義



ベッド形状（高さ分布）の計測点

図2 ベッド高さと形状の測定

### (2) 実験データベースの構築

次元解析に基づいて均質及び混合粒子のベッド形成挙動特性として固体粒子ベッドの高さを予測する新しい工学的相関式を提案した。

$$\ln\left(\frac{H_b}{d_n}\right) = 12.0 + 1.36\ln\left(\frac{d_p}{d_n}\right) + 3.76\ln\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_p}\right) + 0.589\ln\left(\frac{(1-\varepsilon)V_p}{d_n^3}\right) - 0.661\ln\left(\frac{\rho_p v_i d_n}{\mu_f}\right) - 1.60\ln\left(\frac{D_c}{d_n}\right) - 0.545\ln\left(\frac{v_t}{v_i}\right) + 0.490\ln\left(\frac{A_p}{d_n^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\rho$ は固液密度差、 $v_i$ は落下粒子の平均初速度、 $\mu_f$ は液体粘性、 $v_t$ は単一粒子の終端速度、 $A_p$ は粒子表面積である。

図4に式(1)による $H_b/d_n$ の予測値と測定値の比較を示す。本相関式は、混合粒子特性の効果を適切に代表しており、決定係数 0.97、実験値からの最大偏差 19.8%であり、標準偏差 6.80%で実験データを予測することが示された。

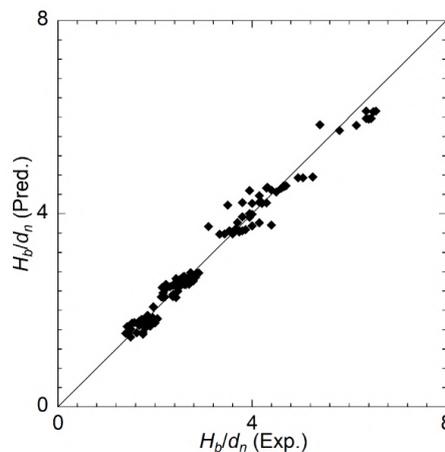


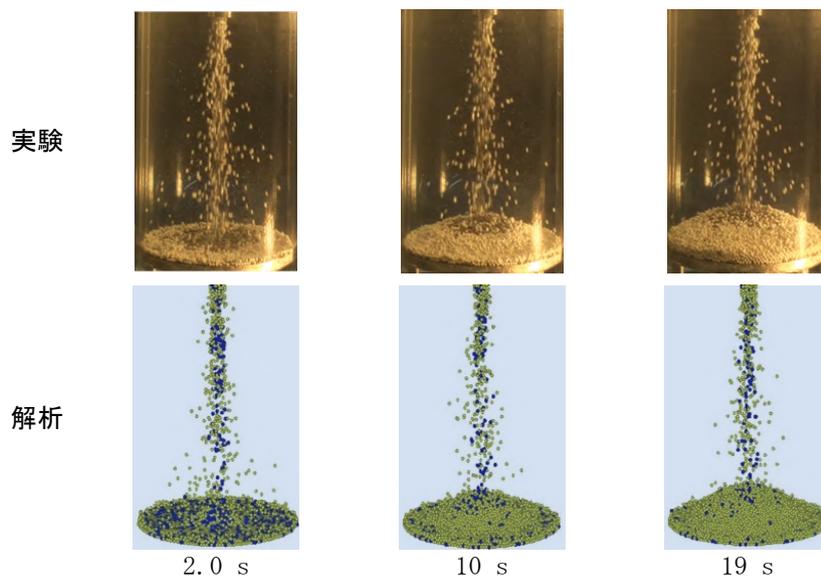
図3 ベッド高さの実験値と相関式による予測値の比較

### (3) 固気液混相熱流動解析コードの検証

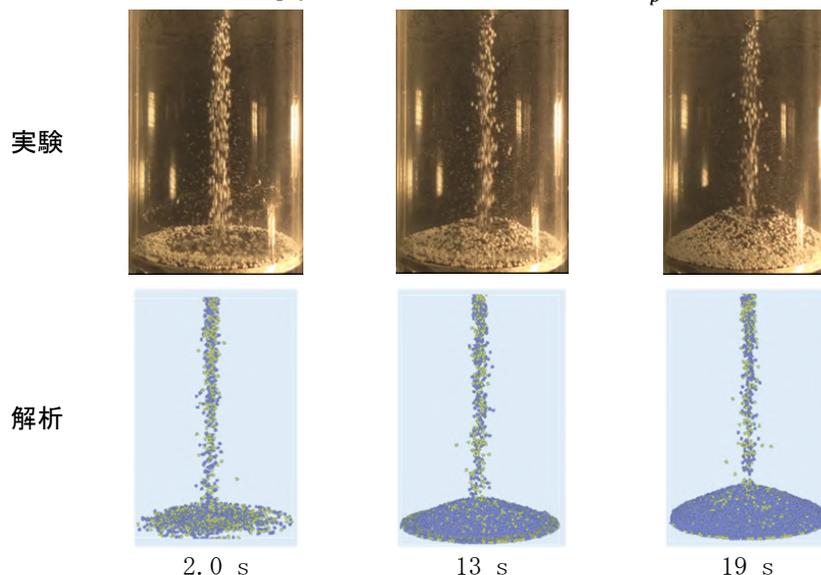
DEMを多流体モデルと結合した三次元数値シミュレーション法について、粒子堆積実験の解析により、その妥当性を検証した。本解析では、ノズルからの粒子の放出、水プール中での粒子の沈降、プール底部でのベッドの形成に至る一連の過程をシミュレーションした。ここでは、同じ粒子径 ( $d_p = 6$  mm) の  $Al_2O_3$  及び SS 粒子を同じ体積で混合した Case M1 及び粒子径の異なる  $Al_2O_3$  粒子 ( $d_p = 4$  mm 及び 6 mm) を同じ体積で混合した Case M2 について、測定された水プール中を落下して堆積する混合粒子のベッド形成挙動とシミュレーション結果の比較を示す。

図4に水プール中での混合粒子の落下及び堆積挙動の実験とシミュレーション結果の比較として、Case M1 は、粒子の放出後から 2.0 s, 10 s, 19 s, Case M2 は、2.0 s, 13 s, 19 s でのスナップショットを示す。図から分かるように、Case M1 では、粒子ジェットの主流は、主に重い SS 粒子で形成され、軽い  $Al_2O_3$  粒子は水プール中を落下する間に大きく分散している。同様の挙動が Case M2 でも見られ、直径 6 mm の大きな粒子が水プール中で分散し、小さい粒子

が粒子ジェット的主流を形成している。これらのシミュレーションは、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子の分散を実験よりも過小評価する傾向があるが、水プール中での落下及び堆積挙動は、概ね適切に再現されている。図5に粒子堆積後の側面から見た混合粒子ベッドの高さの径方向分布を示す。計算結果は実験結果と概ね一致しているが、粒子の落下・堆積挙動の違いによってベッド高さの分布に差が現れている。

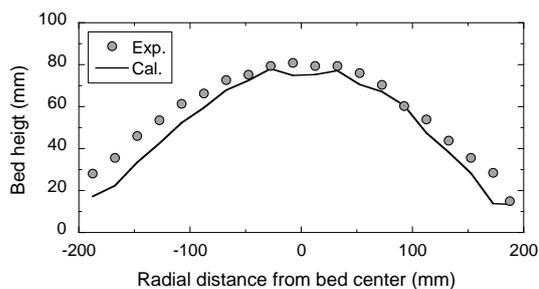


(a) Case M1:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (緑) 及び SS (青) 混合粒子 ( $d_p = 6 \text{ mm}$ )

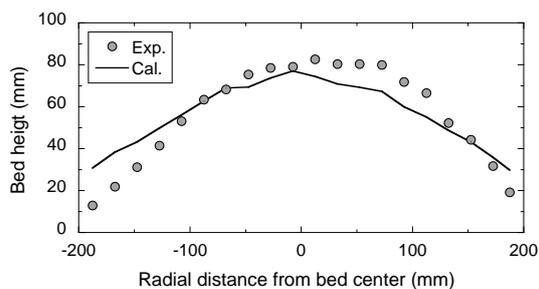


(b) Case M2:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  混合粒子 ( $d_p = 4 \text{ mm}$  (黄);  $6 \text{ mm}$  (青))

図4 混合粒子の落下及び堆積挙動

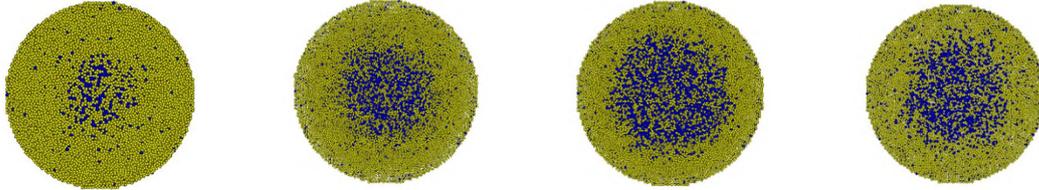
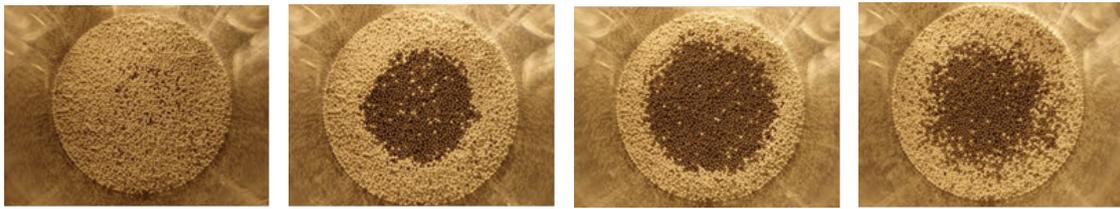
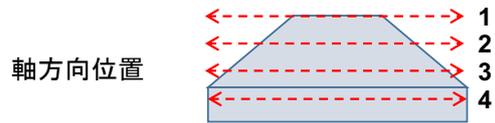


(a) Case M1:  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及び SS 混合粒子 ( $d_p = 6 \text{ mm}$ )

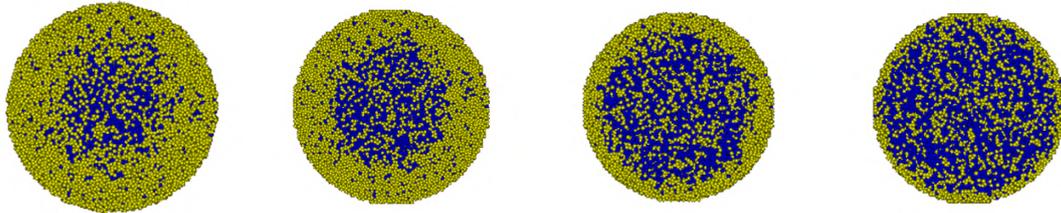
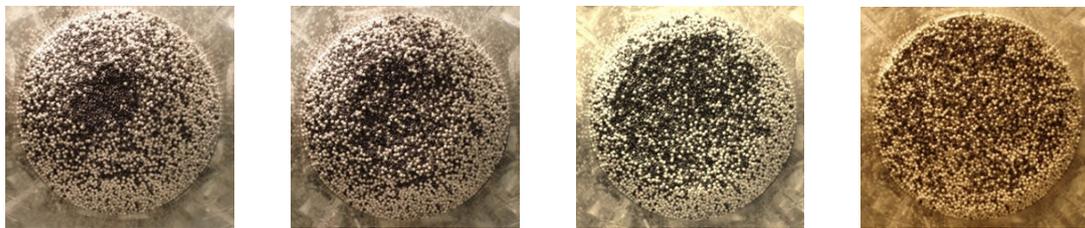


(b) Case M2:  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  混合粒子 ( $d_p = 4 \text{ mm}$  及び  $6 \text{ mm}$ )

図5 粒子堆積後の側面から見た混合粒子ベッドの高さの径方向分布

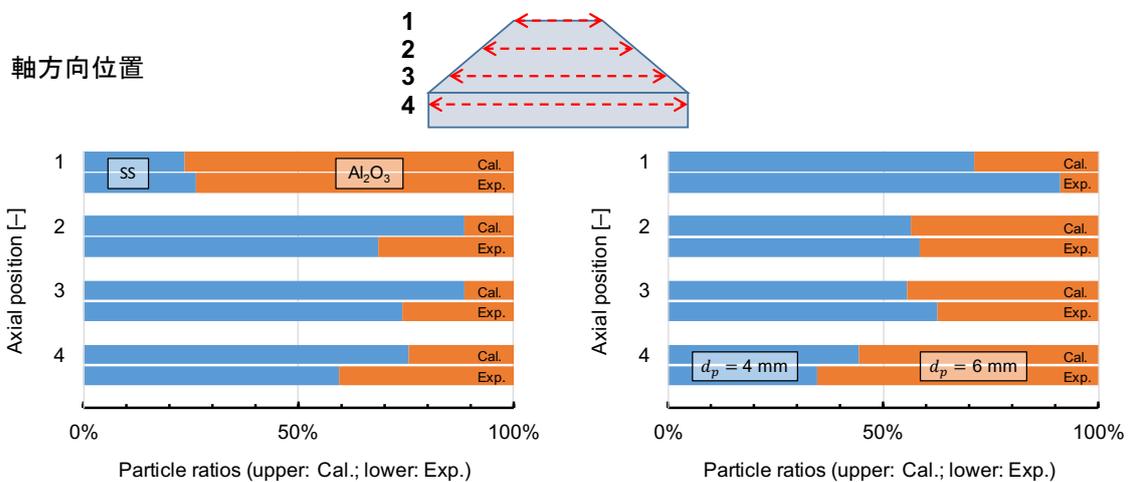


Position 1                      Position 2                      Position 3                      Position 4  
 (a) Case M1:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (緑) 及び SS (青) 混合粒子 ( $d_p = 6 \text{ mm}$ ) 上段 : 実験 ; 下段 : 解析



Position 1                      Position 2                      Position 3                      Position 4  
 (b) Case M2:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  混合粒子 ( $d_p = 4 \text{ mm}$  (黄) ;  $6 \text{ mm}$  (青)) 上段 : 実験 ; 下段 : 解析

図 6 粒子堆積後の 4 つの軸方向位置でのベッド横断面



(a) Case M1:  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及び SS 混合粒子 ( $d_p = 6 \text{ mm}$ )

(b) Case M2:  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  混合粒子 ( $d_p = 4 \text{ mm}$  及び  $6 \text{ mm}$ )

図 7 粒子堆積後の 4 つの軸方向位置のベッド横断面における粒子の分布割合

#### (4) まとめ

本研究では、SFRにおけるCDAの炉心物質再配置過程で重要となる燃料デブリの堆積及びベッド形成挙動について、異なる特性を有する混合粒子を模擬デブリとして用いた実験を実施し、ベッド高さに関する経験モデルを実験データベースとして整備した。さらに、燃料デブリ堆積挙動実験の結果を用いて、燃料デブリの堆積及びベッド形成挙動に対する数値シミュレーション法の妥当性を検証した。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、燃料デブリの堆積及びベッド形成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。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

- ① M. A. R. SHEIKH, E. SON, M. KAMIYAMA, T. MORIOKA, T. MATSUMOTO, K. MORITA, K. MATSUBA, K. KAMIYAMA, T. SUZUKI, Sedimentation Behavior of Mixed Solid Particles, J. Nucl. Sci. Tech., 査読有, Vol. 55, No. 6, 2018, pp. 623-633.

〔学会発表〕(計 4件)

- ① M. A. R. SHEIKH, E. SON, M. KAMIYAMA, T. MORIOKA, T. MATSUMOTO, K. MORITA, K. MATSUBA, K. KAMIYAMA, T. SUZUKI, Experimental Investigation on Characteristics of Mixed Particle Debris in Sedimentation and Bed Formation Behavior, Proc. 11th Int. Topical Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-11), N11P0029, Gyeongju, Korea, Oct. 9-13, 2016.
- ② M. A. R. SHEIKH, E. SON, M. KAMIYAMA, T. MORIOKA, T. MATSUMOTO, K. MORITA, K. MATSUBA, K. KAMIYAMA, T. SUZUKI, Experimental Database for Bed Formation Behaviors of Solid Particles, Proc. 10th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS10), N10P1135, Kyoto, Japan, Nov. 27-30, 2016.
- ③ R. KAWATA, Y. OHARA, M. A. R. SHEIKH, X. LIU, T. MATSUMOTO, K. MORITA, L. GUO, K. KAMIYAMA, T. SUZUKI, Numerical Simulation of Solid-Particle Sedimentation Behavior Using a Multi-Fluid Model Coupled with DEM, Proc. 17th Int. Topical Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-17), 21462, Xi'an, China, Sep. 3-8, 2017.
- ④ ソン エイカク, Md Abdur Rob Sheikh, 松元達也, 劉 維, 守田幸路, 松場賢一, 豊岡淳一, 田上浩孝, 神山健司, 混合固体粒子の堆積挙動に関する実験的研究, 日本原子力学会九州支部第36回研究発表講演会, 2017年12月2日, 九州大学(福岡市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：松元 達也

ローマ字氏名：MATSUMOTO, Tatsuya

所属研究機関名：九州大学

部局名：大学院工学研究院

職名：助教

研究者番号(8桁)：90325514

##### (2) 連携研究者

連携研究者氏名：鈴木 徹

ローマ字氏名：SUZUKI, Tohru

所属研究機関名：日本原子力研究開発機構

部局名：高速炉研究開発部門

職名：主任研究員

研究者番号(8桁)：80446418

##### (3) 研究協力者

研究協力者氏名：郭 連城

ローマ字氏名：GUO, Liancheng

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。