

# 燃料デブリベッドの運動特性に関する基礎的研究

-平成19年度研究報告-(共同研究)

Fundamental Study on Dynamic Behaviors of Fuel Debris Bed - Research Report in 2007 -(Joint Research)

> 守田 幸路 福田 研二 松元 達也 飛田 吉春 鈴木 徹 山野 秀将

Koji MORITA, Kenji FUKUDA, Tatsuya MATSUMOTO, Yoshiharu TOBITA Tohru SUZUKI and Hidemasa YAMANO

> 次世代原子力システム研究開発部門 FBRシステムユニット

FBR System Engineering Unit Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

May 2009

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

燃料デブリベッドの運動特性に関する基礎的研究

## 一平成19年度研究報告-

## (共同研究)

#### 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門 FBR システムユニット

守田 幸路\*、福田 研二\*、松元 達也\*、飛田 吉春、鈴木 徹、山野 秀将+

#### (2009年3月4日受理)

液体金属冷却型高速炉の事故後熱除去過程の評価では、崩壊熱を持つデブリベッドの冷却性を適 切に評価することが重要となる。デブリベッドの冷却特性は、一般にデブリベッド内での冷却材 の対流・沸騰およびデブリベッドの運動挙動に大きく依存する。そこで、本研究では、デブリベ ッドの運動特性を把握するため、模擬物資を用いた試験により、冷却材の沸騰によって駆動され るセルフレベリング特性に関する基礎的な研究を実施した。本試験では、デブリベッド内でのボ イド分布を模擬するため水の減圧沸騰を採用するともに、燃料デブリの模擬物質としてアルミナ 粒子を用いデブリベッドを構成した。さらに、セルフレベリングが生じる条件に関して簡易モデ ルを提案し、試験結果と比較するとともに、実機条件への外挿性について考察した。また、安全 解析コードで用いられている多相流モデルの妥当性を検証するため、デブリベッドの運動挙動に も関連する固液2相流の試験解析を行った。本検証研究では、固体粒子を伴う液柱のスロッシン グ挙動に関する試験解析を実施し、安全解析コードの基本的な妥当性を確認した。

本研究は日本原子力研究開発機構と九州大学との共同研究に基づいて実施したものである。 大洗研究開発センター(駐在):〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002 \* 国立大学法人 九州大学 大学院工学研究院 エネルギー量子工学部門

+ 設計統括ユニット

## Fundamental Study on Dynamic Behaviors of Fuel Debris Bed —Research Report in 2007— (Joint Research)

Koji MORITA<sup>\*</sup>, Kenji FUKUDA<sup>\*</sup>, Tatsuya MATSUMOTO<sup>\*</sup>, Yoshiharu TOBITA, Tohru SUZUKI and Hidemasa YAMANO<sup>+</sup>

FBR System Engineering Unit Advanced Nuclear System Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 4, 2009)

It is important to make a reasonable evaluation of coolability of debris bed with decay heat source in assessing post accident heat removal of a liquid metal cooled fast reactor. In general, the coolability of fuel debris depends on coolant convection, boiling and debris bed movement. In the present study, to understand fundamental characteristics of debris movement, self-leveling behavior caused by the coolant boiling was investigated experimentally using simulant materials. The present experiments employed depressurization boiling of water to simulate void distribution in a debris bed, which consists of solid particles of alumina. A rough estimation model of self-leveling occurrence was proposed and compared with the experimental results. Its extrapolation to reactor accident conditions was also discussed. In addition, solid-liquid flow experiments, which are relevant to debris bed movement behaviors, were analyzed to verify the validity of multiphase flow models employed in a safety analysis code. In the present verification study, basic validity of the code was demonstrated by analyzing experiments of water-column sloshing with solid particles.

Keywords: Fast Reactor, Post Accident Heat Removal, Debris Bed, Self Leveling, Safety Analysis Code

This work has been performed in JAEA as a joint research with Kyushu University.

<sup>\*</sup> Kyushu University

<sup>+</sup> FBR Cycle System Design Synthesis Unit

## 目次

1	序詞	淪
	1.1	研究の目的と概要
	1.2	類似研究の現状
	1.3	期待される効果
2	デス	ブリベッド運動特性試験
	2.1	試験装置及び方法
	2.2	試験で観察された過渡変化の概要
	2.3	減圧沸騰の定量化
	2.4	セルフレベリング挙動
	2.5	セルフレベリング条件の検討
	2.5.	1 簡易評価モデル
	2.5.	<ol> <li>         第 1 第 5 第 6 第 5 第 6 第 5 第 6 第 5 第 6 第 5 第 6 1 第 5 1 第 5 1 第 5 1 第 5 1 第 5 1 第 5 1 第 5 1 第 5 1 第 5 1 1 1 1</li></ol>
3	安全	全解析コードによる試験解析
	3.1	目的25
	3.2	試験の概要
	3.3	試験解析
	3.3.	1 <i>r-θ-z</i> 体系を用いた参照試験 [SA-D1-3 ケース] の解析
	3.3.	2 <i>r-θ-z</i> 体系を用いた固液流試験 [SE-D1P-1 ケース] の解析
	3.3.	3 x-y-z 体系を用いた参照試験 [SA-D1-3 ケース] 験の解析
	3.3.	4 <i>x-y-z</i> 体系を用いた非対称スロッシング [SB-D1A-2 ケース] 試験の解析
	3.4	まとめ
4	結言	<b>言</b> 48
謝	† 辞·	
参	考文南	武
訂	]号表·	

## Contents

1	Intro	oduction	1
	1.1	Objective and outline of the present study	1
	1.2	Review of the past studies	2
	1.3	Expected effect of the present study	3
2	Exp	eriments of debris bed movement	4
	2.1	Experimental apparatus and procedure	4
	2.2	Overview of transient behavior observed in the experiments	5
	2.3	Evaluation of depressurization boiling	6
	2.4	Self-leveling behavior	7
	2.5	Consideration of self-leveling conditions	8
	2.5.	1 Simple evaluation model	8
	2.5.	2 Results and discussion	9
3	Veri	fication of safety analysis code	.25
	3.1	Objective	.25
	3.2	Overview of the test problems	.25
	3.3	Test analyses	.26
	3.3.	1 Reference test (SA-D1-3 case) analysis with the $r$ - $\theta$ - $z$ geometry	.26
	3.3.	2 Solid-liquid flow test (SA-D1P-1 case) analysis with the $r$ - $\theta$ - $z$ geometry	.27
	3.3.	Reference test (SA-D1-3 case) analysis with the <i>x-y-z</i> geometry	.28
	3.3.	Nonsymmetrical sloshing test (SB-D1A-2 case) analysis with the $x-y-z$ geometry	. 29
	3.4	Summary	. 29
4	Con	cluding remarks	.48
A	cknowl	edgement	. 49
Re	eferenc	es	. 50
N	omencl	ature	. 51

表	1:アルミナ粒子の物性	. 11
表	2:アルミナ粒子の充填率	. 11
表	3: 蒸気流量及び換算発熱密度の評価結果	. 11
表	4: 単相流れ中の球形粒子に対する抗力係数の相関式	.12
表	5: 簡易評価に用いる物性値及びデブリベッド条件	.12
义	1:試験装置概略図	.13
义	2:試験装置外観写真	.13
义	3:水槽内に設置した熱電対の位置関係	.14
义	4: 固体粒子層における傾斜角の定義と固体粒子層の初期配置	.14
义	5:アルミナ粒子の形状	.14
义	6:各種温度の時間変化(非球形粒子)	.15
义	7:各種圧力及び蒸気流量の時間変化(非球形粒子)	.15
义	8: 固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(非球形粒子)	.16
义	9:各種温度の時間変化(球形粒子:0.5 mm)	.17
义	10:各種圧力及び蒸気流量の時間変化(球形粒子:0.5 mm)	.17
义	11: 固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(球形粒子: 0.5 mm)	.18
义	12:各種温度の時間変化(球形粒子:6mm)	. 19
义	13:各種圧力及び蒸気流量の時間変化(球形粒子:6mm)	. 19
义	14: 固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(球形粒子:6mm)	.20
义	15:各種温度の時間変化(球形粒子:2mm)	.21
义	16: 固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(球形粒子:2mm)	.22
义	17: 粒子層上部の傾斜角の時間的変化	.23
义	18:平衡ベッド高さのボイド率による変化(水/アルミナ粒子)	.23
义	19:平衡ベッド高さの発熱密度による変化(ナトリウム/UO2粒子)	.24
表	6:スロッシング試験条件概要	.31
表	7:スロッシング試験条件	.32
表	8:スロッシング試験結果	.32
表	9:解析結果 (r-θ-z 体系)	.33
表	10: 固液二相流におけるパラメトリック解析結果 (r-θ-z 体系)	.33
表	11:軸対称スロッシング試験の解析結果(x-y-z 体系)	.34
表	12:非対称スロッシング試験の解析結果(x-y-z 体系)	.34
义	20:スロッシング試験体系概要	.35
义	21: SA-D1-3 試験(参照試験)で観察されたスロッシング挙動 [1/2]	.36
义	22: SA-D1-3 試験(参照試験)で観察されたスロッシング挙動 [2/2]	.37
义	23: SE-D1P-1 試験(固液2相流)で観察されたスロッシング挙動	.38
义	24:SB-D1A-2 試験(非対称スロッシング)で観察されたスロッシング挙動	. 39
义	25: r-θ-z 座標系を用いた SA-D1-3 試験(参照試験)解析体系	.40
义	26: SA-D1-3 試験(参照試験)解析で得られたスロッシング挙動	.41

义	] 27 : <i>r-θ-z</i> 座標系を用いた SE-D1P-1 試験(固液2相流)解析体系	42
义	3 28 : SE-D1P-1 試験(固液 2 相流)解析で得られたスロッシング挙動	43
义	] 29 : <i>x-y-z</i> 座標系を用いた SA-D1-3 試験(参照試験)解析体系	44
义	30: SA-D1-3 試験(参照試験)解析で得られたスロッシング挙動	45
义	31 : <i>x-y-z</i> 座標系を用いた SB-D1A-2 試験(非対称スロッシング)解析体系	46
义	] 32:SB-D1A-2 試験(非対称スロッシング試験)解析で得られたスロッシング挙動	47

## List of Tables and Figures

Table 1: Physical properties of alumina particles.	11
Table 2: Packing fraction of alumina particles in the bed.	11
Table 3: Evaluation of steam flow rate and equivalent power density.	11
Table 4: Correlations of drag coefficient for a spherical particle in single-phase flow.	12
Table 5: Physical properties and debris bed conditions used in simple evaluations	12
Fig. 1: Schematic view of the experimental apparatus.	13
Fig. 2: External view of the experimental apparatus.	13
Fig. 3: Positions of thermocouples in the water bath	14
Fig. 4: Definition of inclination angle and initial configuration of particle bed	14
Fig. 5: Shapes of alumina particles	14
Fig. 6: Transients of various temperatures (non-sphere particles)	15
Fig. 7: Transients of various pressures and steam flow rate (non-sphere particles).	15
Fig. 8: Transients of particle-bed movement and boiling behavior in the case of non-sphere particles	16
Fig. 9: Transients of various temperatures (spherical particles with 0.5 mm D).	17
Fig. 10: Transients of various pressures and steam flow rate (spherical particles with 0.5 mm D)	17
Fig. 11: Transients of particle-bed movement and boiling behavior (spherical particles with 0.5 mm D)	18
Fig. 12: Transients of various temperatures (spherical particles with 6 mm D).	19
Fig. 13: Transients of various pressures and steam flow rate (spherical particles with 6 mm D)	19
Fig. 14: Transients of particle-bed movement and boiling behavior (spherical particles with 6 mm D)	20
Fig. 15: Transients of various temperatures (spherical particles with 2 mm D)	21
Fig. 16: Transients of particle-bed movement and boiling behavior (spherical particles with 2 mm D)	22
Fig. 17: Transients of inclination angle for particle bed	23
Fig. 18: Equilibrium bed height as a function of void fraction for water/alumina particles	23
Fig. 19: Equilibrium bed height as a function of power density for sodium/UO <sub>2</sub> particles	24
Table 6: Summary of sloshing test conditions.	31
Table 7: Sloshing test conditions	32
Table 8: Sloshing test results.	32
Table 9: Calculation results (r- $\theta$ -z geometry).	33
Table 10: Parametric calculation results in solid-liquid flow ( <i>r-θ-z</i> geometry)	33
Table 11: Calculation Results in symmetric sloshing test (x-y-z geometry).	34
Table 12: Calculation Results in asymmetric sloshing test (x-y-z geometry).	34
Fig. 20: Overview of the sloshing test geometry.	35
Fig. 21: Sloshing behavior observed in the SA-D1-3 test (Ref. test) [1/2]	36
Fig. 22: Sloshing behavior observed in the SA-D1-3 test (Ref. test) [2/2]	37
Fig. 23: Sloshing behavior observed in the SE-D1P-1 test (solid-liquid flow).	38
Fig. 24: Sloshing behavior observed in the SB-D1A-2 test (asymmetric sloshing).	39
Fig. 25: Analytical geometry with the $r-\theta$ -z coordinate for the SA-D1-3 test (Ref. test).	40
Fig. 26: Sloshing behavior obtained in the SA-D1-3 test calculation (Ref. test)	41
Fig. 27: Analytical geometry with the <i>r</i> -θ-z coordinate for the SE-D1P-1 test (solid-liquid flow)	42

Fig. 28: Sloshing behavior obtained in the SE-D1P-1 test calculation (solid-liquid flow).	43
Fig. 29: Analytical geometry with the x-y-z coordinates for the SA-D1-3 test (Ref. test)	44
Fig. 30: Sloshing behavior obtained in the SA-D1-3 test calculation (Ref. test)	45
Fig. 31: Analytical geometry with the <i>x-y-z</i> coordinates for the SB-D1A-2 test (asymmetric sloshing).	46
Fig. 32: Sloshing behavior obtained in the SB-D1A-2 test calculation (asymmetric sloshing)	47

### 1 序論

#### 1.1 研究の目的と概要

世界規模で研究開発が急加速しているナトリウム冷却炉の設計概念では、現在、再臨界排除方 策による炉心損傷事故(CDA)対策を施すことが提案されている。しかしながら、その対策は事 故直後の比較的短時間の事象を対象としたものである。また、ナトリウムを冷却材とし高い出力 密度を有する高速炉では、CDA時の対流・沸騰・輻射などの熱伝達機構が軽水炉と異なり、特に、 事故後長期の崩壊熱除去過程についての十分な知見は得られていない。このため、長期における CDA炉内終息の事象推移を明らかにし、ナトリウム冷却炉設計の成立性を担保することが急務の 課題となっている。また、このような事故後の崩壊熱除去過程を解明することは、CDA事象推移 の不確かさを低減するばかりでなく、現在の設計で考慮されているコアキャッチャーの削減とそ れに伴う原子炉容器高さの縮小に繋がり、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、CDA時に炉心内で生じる多相・多成分の流動・伝熱・相変化の複合現象に 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。

本研究では、再臨界排除方策が実現した場合に、事故後崩壊熱除去において重要となる燃料デ ブリベッドの熱流動シミュレーション手法を整備することを目的とする。そのため、粒子系多相 流の運動特性を実験的に解明するとともに、多相多成分解析コードへ適用可能な構成方程式を開 発し、実用的な安全解析手法として整備する。

本研究では、事故後崩壊熱除去において重要となる燃料デブリベッドの運動特性、特に、セル フレベリング挙動に着目し、デブリベッドを模した固体粒子層の冷却材沸騰条件下での過渡的な 運動挙動を実験的に解明する。これらの知見を基に、多流体モデルを基本とする安全解析コード による試験解析を通じて、実機解析における燃料デブリベッドの熱流動シミュレーション技術の 開発に反映する。具体的には、以下の課題を実施する。

1) デブリベッド運動特性試験(冷却材沸騰模擬試験)

炉心物質の分散過程において炉内の各部にデブリベッド状態で再配置された炉心物質は、崩壊 熱によって発熱し続けることから、その原子炉容器内での長期的な冷却・保持性を評価すること が重要となる。デブリベッドの冷却特性は、一般に、デブリベッド内での冷却材の対流・沸騰・ ドライアウトおよびデブリベッドの運動挙動などに大きく依存する。

このため、本研究では、特に、デブリベッド内での冷却材の自然対流・沸騰によるデブリベッ ドの流体力学的な運動挙動、特に、セルフレベリング挙動に着目したデブリベッド運動特性試験 (冷却材沸騰模擬試験)を実施する。この試験では、デブリベッドを模した固体粒子層(アルミ ナ粒子)を水プール内に配置し、系に接続した真空タンクへの圧力開放により系の圧力を減圧し、 固体粒子表面からの減圧沸騰によって駆動される固体粒子層の運動を実現する。また、粒子層の 形状変化等の過渡応答挙動の可視化画像を記録し、固体粒子層の空間分布の時間変化に関する定 量データを得る。 2) 安全解析コードによる試験解析

デブリベッド運動特性試験によるデブリベッド運動挙動解析の知見をもとに、安全解析コード による試験解析を実施し、安全解析コードで用いる多相流解析モデルの妥当性について検証する。 また、実機安全解析の観点から、安全解析コードに適切なモデル化手法を検討・提案し、実機解 析における燃料デブリベッドの熱流動シミュレーション技術の開発に反映する。

#### 1.2 類似研究の現状

炉心物質の分散過程において炉内の各部にデブリベッド状態で再配置された炉心物質は、崩壊 熱によって発熱し続けることから、その原子炉容器内での長期的な冷却・保持性を評価すること が重要となる。デブリベッドの冷却特性は、デブリの形態(粒子径・空隙率)、ベッドの形状(ベ ット厚み、堆積状態)や冷却モード条件等に大きく依存する。また、その冷却限界を定量化する には、デブリベッド粒子間での熱伝達、デブリベッド内での冷却材の対流・沸騰・ドライアウト、 周囲冷却材プールへの熱移行、デブリベッドの再配置等を多次元的に解析する必要がある。

このため、1970年代から1985年にかけて、デブリベッドの冷却機構および冷却限界の定量化 に重点を置いて、デブリベッドの熱伝達機構を把握するための実験室規模の炉外試験が行われた。 その炉外試験の多くは、本研究と同様に、模擬物質(例えば、冷却材として水、アセトン、メタ ノール、フレオン等、また、デブリとして鉄、鉛、銅、砂等)を使用したものである。また、冷 却材にナトリウムを用いた試験<sup>1)</sup>もあるが、加熱にはナトリウムを直接加熱する方法を採用して いる。また、1977~1985年にかけて、実機条件への外挿性の観点から重要な知見が得られた燃料 -ナトリウム系でのデブリベッド冷却炉内試験が米国サンディア国立研究所で実施されている。こ れらの実験的な研究成果を基に、デブリベッドの冷却性やドライアウト挙動を予測する解析モデ ルが Lipinski<sup>2</sup>によって確立された。

一方で、実機条件におけるデブリベッドの熱流力挙動評価には、デブリベッド内での冷却材の 対流・沸騰に駆動されたデブリベッド形状のセルフレベリングや蒸気チャンネル形成などの過渡 的な運動挙動を考慮した多次元解析が必要となる。しかしながら、燃料デブリの崩壊熱による冷 却材の沸騰現象を実験的に模擬することが困難であるため、従来の試験結果から、実機条件下で のデブリベッドの運動特性を解明し、安全解析コードで用いる汎用的な物理モデルを開発するま でには至っていない。

また、FBR の安全解析に用いられる多成分多相流の数値シミュレーション手法は、多流体モデ ルを採用することで汎用性の高い数値シミュレーションを実現し、本研究で対象とするような固 体粒子等の固相成分が混在した多相流の解析を可能とする。この多流体モデルが基本する物理モ デルは、一般に、多成分多相流の巨視的な素過程を工学的相関式により記述するモデルである。 このため、本研究で対象とする燃料デブリベッドのように、メゾスケールでの粒子サイズ・形状 等が流体力学的な特性として重要となる多相流現象への適用性については、これまで十分な知見 が得られていない。

以上のように、本研究では、燃料デブリの崩壊熱による冷却材の沸騰現象を冷却材の減圧沸騰 により実験的に模擬し、従来の炉外試験では得られていないデブリベッドの運動特性に関する新 しい実験的知見を提供する。

#### 1.3 期待される効果

CDA の安全解析に用いられる多成分多相流解析手法は、損傷炉心における多成分多相流の伝 熱・流動・相変化を構成する素現象を記述する機構論的な要素物理モデルを有機的に統合するこ とで高度化されている。このため、伝熱・流動・相変化の複合現象に対する本手法の妥当性を確 認するためには、要素物理モデルの汎用性と一般性を検証するための基礎的な試験データが必要 不可欠である。本研究で対象とする事故後崩壊熱除去において重要となる燃料デブリベッドの冷 却材沸騰条件下での運動挙動についても、実験的に現象を模擬することが難しいことから、実機 安全解析コードで用いる機構論的な物理モデルを構築するのに必要な知見は極めて少ない。この ため、本研究によって燃料デブリの運動特性を明らかにし、実機解析における燃料デブリベッド の熱流動シミュレーション技術の開発に反映することで、炉心安全評価における損傷炉心の多成 分多相流解析に対する信頼度が向上することが期待される。また、過去の崩壊熱除去過程に関す る研究では実験手法として減圧沸騰を用いた実験はなく、本研究は学術的にも価値は高い。

+分な安全確保対策が実施されている我が国の原子炉施設においては、現実に CDA が起こる とは工学的には考えられない程度までに安全性が高められていると言える。しかしながら、CDA 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、社会的受容性の高い安全論 理を構築することは、来るべき FBR の実用化時代において必要不可欠であると考えられる。この ため本研究のように、FBR の CDA における熱流動現象を明らかにし、これを精度良く解析する ための機構論的な解析モデルを開発することは、原子炉の安全評価技術を確立する上で重要な役 割を果たすと考えられる。

一方で、安全解析で用いる多成分多相流解析手法に採用されている要素物理モデルは、CDA 時の主要現象のみならず、一般的な多成分多相流を汎用的に記述できるように設計されている。このため、本研究による成果は、原子炉の安全解析だけでなく、一般的な多成分多相流の数値シミュレーション技術の観点から、工学的にも応用範囲の広い成果が得られることが期待される。

## 2 デブリベッド運動特性試験

#### 2.1 試験装置及び方法

本研究で実施したデブリベッド運動特性試験で用いた試験装置の概略図を図 1 に、試験装置の 外観写真を図 2 を示す。主要な試験部は内径 256 mm、高さ 605 mmのガラス製円筒管と上部の フランジと下部のガラス平板で形成された水槽である。ガラス製円筒管は二重管になっており、 試験部の外側を真空にすることで断熱性能を高めることができるようになっている。上部のフラ ンジには圧力計(共和電業社製 PHF-S-2MPSA4)が取り付けられ、水槽上部の気相圧力を測定す る。水槽内部の温度測定には、計5本の K 型熱電対を用いており、固体粒子層上下部の水温測定 に2本、固体粒子層上の水プール温度測定に2本、水プール上の気相温度測定に1本配置してい る。水槽内に設置した熱電対位置を図 3 に示す。

水槽上部のフランジには真空タンクにつながる配管が接続されており、真空タンクの前には流 量制御用のバルブが取り付けられている。配管には蒸気流量を計測するための2本の圧力計(共 和電業社製 PHF-S-2MPSA2)がオリフィスを挟んで取り付けられ、圧力計の下流側に設置された K型熱電対により流体温度を測定する。真空タンクは総容量200リットルで、試験開始前に真空 ポンプ(日立製 ROTARY OIL VACUUM PUMP)を用いて数 kPa 程度の低圧状態にし、試験開始 後は真空ポンプを切り離した。また、真空タンク内には、圧力計(共和電業社製 PHF-S-2MPSA4) および K 型熱電対が設置されている。

K型熱電対と圧力計のデータはデータロガー(グラフテック社製 GL500A)により PC に記録 した。この際、圧力計の信号はアンプ(ミネベア社製動ひずみ測定器 DSA-605C,DSA-601B)を用 いて増幅している。試験中はデジタルビデオカメラにより水槽内の過渡的な挙動を動画(AVI フ ァイル)として PC に記録した。この AVI ファイルを静止画像(bmp ファイル)に変換し、図 4 に示す固体粒子層の傾斜角(後述)の測定に用いた。また、沸騰開始直後の映像も高速度 CCD カメラ(ディテクト製 HAS-200R)を用いて撮影した。この高速度カメラで撮影した画像は一時 的に HIGH SPEED VIDEO SYSTEM (RYOKOSHA 製 HASTURTLE)に記録し、それを PC 上でキ ャプチャーすることにより、ビデオカメラと同様、静止画像として保存した。

試験開始前には、試験部の水槽内を水で満たし、固体粒子を充填しない状態で投げ込みヒーターにより試験部内が 100℃になるまで加熱した。これは加熱により水槽内を脱気することで水中に溶存した気体からの沸騰核を減らし、試験中に固体粒子層以外からの沸騰を抑止することを目的として行った。また、固体粒子は、水槽内に投入する前に、ウォーターバス (アズワン製 EW100)を用いて加熱し、90℃前後に保った。

その後、投げ込みヒーターを取り外し、フランジを配置した後、漏斗を用いて所定の量の固体 粒子を水槽内に充填した。この時、上部の固体粒子層が円錐状に傾斜を有する状態で配置した。 同時に、真空ポンプにより真空タンク内を数 kPa 程度まで減圧し、ポンプと真空タンクを切り離 した。その後、水槽内の水温約 80℃、水位 405 mm、大気圧を初期条件とし、バルブを開いて減 圧沸騰を開始した。固体粒子層内から最初の気泡を目視で確認できた時点を計測開始点とし、そ の後数分間の挙動を観測した。

本研究で実施したデブリベッド運動特性試験では、燃料デブリの模擬物質としてアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 粒子(表 1 に物性を示す)を用い、大きさの異なる球形粒子(直径 0.5, 2, 6 mm)及び 非球形粒子(直径 0.84~1 mmの粒子が 80%)を試験パラメータとした。図 5 に試験で用いたア ルミナ粒子の形状を、表 2 に試験で測定したアルミナ粒子の充填率を示す。また、それぞれの試 験では、固体粒子層に嵩体積(空隙を含む)で7 リットルの固体粒子を用いた。図 4 に示すよう に、水槽内に充填した初期の固体粒子層は、上部の円錐状粒子層(高さ約 5 cm)を含め約 18 cm で、全体を平坦化した高さは約 16 cm である。

先に述べたように、本研究では、デジタルビデオカメラによる映像から固体粒子層の傾斜角の時間的変化を測定した。固体粒子層の上部は、必ずしも円錐形状のまま形状を変化させる訳ではないので、ここでは、図4に示すように、固体粒子層の上部中心の高さ(H<sub>m</sub>)を基準に、傾斜角を tan-1(H<sub>m</sub>/R)として定義した(ここで、R は固体粒子層の半径)。

#### 2.2 試験で観察された過渡変化の概要

非球形粒子を用いた試験ケースを例に、水槽内での減圧沸騰とそれに伴う固体粒子層の運動挙 動について説明する。本試験で減圧沸騰は、何れのケースでも、時間と共に変化する3つの典型 的な挙動(第 I-III 期)を示している。固体粒子層内の水温、固体粒子層上の水プール温度、水 プール上の気相温度及び水槽上部の気相圧力から換算した飽和温度の時間変化を図6に示す(沸 騰開始直後には、水槽上部に空気が残存しているため、気相圧力から換算した飽和温度は、必ず しも正しい飽和温度を示していないことに注意する)。沸騰開始から約70sまでの間(第 I 期) では、水温の変化は大きくなく、この時点では、熱容量の大きい固体粒子から蒸発潜熱が奪われ ることで沸騰が起こっているものと考えられる。後に示す固体粒子層の運動挙動を撮影したビデ オカメラによる映像から、非球形粒子を用いたケースでは、この第 I 期で減圧沸騰によって駆動 されたセルフレベリングはほぼ完了する。また、約70sの時点で気相温度の勾配も大きくなり、 気相圧力から換算した飽和温度も同様の変化を示している(この時点で、水槽上部は、ほぼ飽和 蒸気のみで満たされていると考えられる)。水槽上部の気相圧力、配管の上下流での圧力、真空タ ンク内圧力及びこれらの圧力差から換算した蒸気流量の時間変化を図7に示す。蒸気流量につい ては、この後で述べる減圧沸騰の第 II 期終了(約200 s)まで 0.3 g/s 程度の値を示しているが、 ここで用いた圧力計の測定精度を超えており、有意な値ではないと判断した。

第Ⅰ期の後の減圧沸騰は、非球形粒子を用いたケースでは、約200 s でピークに達するまで比較的穏やかに継続する(第Ⅱ期)(約200 s で沸騰がピークに達することは、図7に示した圧力差から換算した蒸気流量から確認できる)。この減圧沸騰の第Ⅱ期は、ビデオカメラによる映像から、第Ⅰ期と比べると粒子層の全体から発泡が生じ気泡量が増え、固体粒子層内で成長した気泡が気液界面から離脱し、第Ⅰ期に比べて激しい沸騰が観察された。この第Ⅱ期では、固体粒子層内での水温、水プール温度及び飽和温度の何れも低下しており、固体粒子層の温度がある程度下がりきったため、減圧沸騰に必要な潜熱が水から奪われることで全体の温度が下がり始めるものと考えられる。また、セルフレベリングが生じる試験ケースでは、気相温度と水温に近づき沸騰がピークを迎えた時点ではセルフレベリングは終了しており、本研究では、主として第Ⅰ〜Ⅱ期で生じるセルフレベリング現象に着目する。ここでは、沸騰が激しくなり始めピークを迎える減圧沸騰を第Ⅲ期と呼ぶ。第Ⅲ期では、水温はほぼ飽和温度に達しており、バルク的な沸騰が固体粒

子層からだけでなく、固体粒子層上の水プールでも生じる。

図 8 に非球形粒子を用いたケースでの固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(ビデオカメ ラによる映像)を示す。このケースでは、比較的緩慢に固体粒子層が運動し、後述するように、 固体粒子層上部の円錐層の時の傾斜角がゆっくりと減少していく様子が観察された。24 s の映像 からは、固体粒子層頂上部付近で粒子層が崩れている事が確認できる。これは、固体粒子層内で 発生した気泡が主として頂上部付近から離脱していることに起因している。また、減圧沸騰の第 I 期では、固体粒子層から離脱した気泡は、固体粒子層上の水プールで急速に凝縮する様子が観 察された。また、継続する減圧沸騰によって固体粒子層のセルフレベリングが進むと共に、固体 粒子層から気泡が離脱する経路(蒸気チャンネル)も増え、第 I 期終了時点(約 70 s)で、セル フレベリングはほぼ終了した。この時点では固体粒子層のほぼ全域から発泡する様子が観察され た。

球形粒子(直径 0.5 mm)を用いたケースについて、固体粒子層内の水温、固体粒子層上の水プ ール温度、水プール上の気相温度及び水槽上部の気相圧力から換算した飽和温度の時間変化を図 9 に、水槽上部の気相圧力、配管の上下流での圧力、真空タンク内圧力及びこれらの圧力差から 換算した蒸気流量の時間変化を図 10 に示す。このケースでは、先の非球形粒子に比べて初期の 気相温度が高いため、約130 s で沸騰がピークに達する第 III 期に移行する。図 11 に固体粒子層 の運動及び沸騰挙動の時間変化(ビデオカメラによる映像)を示す。非球形粒子のケースと比べ ると、固体粒子層内で発生する気泡は比較的大きく、発泡量も少ない傾向が認められた。また、 固体粒子層は、第 I 期が終了する約 50 s で完全に平坦化した。

球形粒子(直径 6 mm)を用いたケースについて、固体粒子層内の水温、固体粒子層上の水プ ール温度、水プール上の気相温度及び水槽上部の気相圧力から換算した飽和温度の時間変化を図 12 に、水槽上部の気相圧力、配管の上下流での圧力、真空タンク内圧力及びこれらの圧力差から 換算した蒸気流量の時間変化を図 13 に示す。このケースでは、約 70 s で沸騰がピークに達する 第 III 期に移行する。図 14 に固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(ビデオカメラによる映 像)を示す。沸騰開始直後から発生する気泡はかなり大きく、固体粒子層のセルフレベリングは 減圧沸騰の第 III 期になってから生じるが、固体粒子層の完全な平坦化には至っていない。

球形粒子(直径 2 mm)を用いたケースについて、固体粒子層内の水温、固体粒子層上の水プ ール温度、水プール上の気相温度及び水槽上部の気相圧力から換算した飽和温度の時間変化を図 15 に示す。このケースでは、圧力計測系が不調であったため、ここで示した飽和温度は参考値と する。水槽上部の気相温度から、約90 s で沸騰がピークに達する第 III 期に移行したものと思わ れる。図 16 に固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(ビデオカメラによる映像)を示す。 第 I~II 期の継続時間が短かったため、第 II 期末期に固体粒子層上部の円錐固体層に傾斜角が残 っているが、その後、沸騰のピークを経て固体粒子層は完全には平坦化した。

#### 2.3 減圧沸騰の定量化

本研究で実施したデブリベッド運動特性試験では、セルフレベリングに対する減圧沸騰の影響 を定量化し、実機条件と対比するために、沸騰の大きさを定量的に求めておく必要がある。この ため、本来は、水槽と真空タンクをつなぐ配管内での差圧から蒸気流量を測定する予定であった。 しかしながら、本試験では、当初の予想よりも比較的穏やかな沸騰(先に述べた第 I-II 期の減圧 沸騰)でセレフレベリングが駆動されたことから、配管内では大きな圧力差が生じず、結果とし て、圧力計の測定精度の問題から、減圧沸騰の第 I-II 期では有意な圧力差を測定できなかった。 このため、ここでは、試験で測定された水温変化が減圧沸騰によって奪われた潜熱によるもので あると仮定し、その損失熱量を見積もった。すなわち

(損失熱量)=(水槽上部の平均水温変化)×(水槽上部の水の質量)×(水の比熱容量)

+ (固体粒子層内の平均水温変化)

× [(固体粒子層内の水の質量) × (水の比熱容量)

+ (固体粒子層内の固体粒子の質量)×(固体粒子の比熱容量)] (1)

ここでは、固体粒子層内の固体粒子の温度変化が、固体粒子層内の平均水温変化に等しいと仮定した。

本試験での評価結果を表 3 に示す。この表で発熱密度に換算した値は、実機条件との比較のた め、固体粒子の単位体積、単位時間当たりの損失熱量として計算したものである。また、蒸気質 量速度・体積速度は、損失熱量が全て水の沸騰に使われたものとして計算した。実機条件での崩 壊熱による燃料デブリからの発熱密度は、炉停止直後で約 20 W/cc (JSFR-1500) 〜30 W/cc (もん じゅ)程度である。デブリには体積で半分程度スティールが混在することを仮定すると、本試験 での第 IーII 期の減圧沸騰は、実機条件 (JSFR-1500) に比べ発熱密度換算(4 つの試験ケースの 平均 0.26 W/cc) で約 1/50 程度の大きさということになる。一方、冷却材の物性値(蒸発潜熱、 蒸気比体積)が違うことから、同じ発熱密度であっても沸騰による蒸気体積速度が異なることが 考えられる。しかしながら、蒸気密度×蒸発潜熱(単位体積の蒸気発生に必要な蒸発熱)は、水 とナトリウムでほぼ同じであり(表 5 参照)、その影響は大きくないものと考えられる。また、 固体粒子密度は本試験で用いたアルミナが燃料の約 1/3 であることから、その分セルフレベリン グは生じやすいことになる。この固体粒子密度の影響を 3.1 節で議論するセルフレベリング条件 に対する簡易モデル式(6)で考慮すると、本試験での沸騰条件(第 IーII 期の減圧沸騰)は、沸騰 がセルフレベリングを駆動する観点からは、大まかに実機条件の約 1/30 程度と考えられる。

#### 2.4 セルフレベリング挙動

デジタルビデオカメラにより動画として記録された固体粒子層の過渡的な運動挙動から図 4 に示す定義に基づいて固体粒子層上部の円錐状粒子層の傾斜角の時間変化を測定した。本研究で 実施したデブリベッド運動特性試験で観察された粒子層上部の傾斜角の時間変化を図 17 に示す。 本試験では、粒子層上部に円錐状に堆積させた粒子層の初期の傾斜角は、粒子径が小さいほど、 また、非球形粒子の方が大きいことに注意する。本試験条件では、セルフレベリング挙動に関し て以下の様な結果が得られた。

球形粒子(直径 0.5 mm)の場合には、固体粒子層上部の円錐状粒子層が完全に平坦化したが、直径 2 mmの場合には、0.5 mmの場合に比べて沸騰が激しいにもかかわらず、同じ時間では堆積層が完全には平坦化しなかった。また、直径 6 mmの場合には、更に激しい沸騰にもかかわらず、第 I-II 期の減圧沸騰では、円錐状粒子層の形状は殆ど変化しなかった。

 非球形粒子(粒子直径 0.84~1 mm)の場合、セレフレベリングが生じた球形粒子の場合(直径 0.5,2 mm)に比べて、平坦化終了までにより長い時間を要した。また、第 I~II 期の減圧 沸騰の時間が比較的長かったにも関わらず、固体粒子層上部の円錐状粒子層は完全には平坦 化しなかった。

本試験では、必ずしも同一の沸騰強度(蒸発速度から求めた発熱密度換算値)でセルフレベリ ング挙動を観察していないが、本結果から、大きい粒子ほど、また、非球形粒子の方がセルフレ ベリングが生じにくく、また、その発達も遅くなる傾向があることが推察される。また、デブリ の性状によって沸騰によって発生する気泡の大きさ、頻度も異なっており、沸騰の大きさでなく、 気泡のダイナミックスもセルフレベリング挙動に影響することが伺える。

#### 2.5 セルフレベリング条件の検討

本研究で実施したデブリベッド運動特性試験で観察された模擬デブリのセルフレベリング条 件への支配因子を同定し、実機条件への外挿性を考察するために、簡易評価モデルを用いた検討 を行った。ここでは、1 つの球形固体粒子が周りを流れる流体から受ける力のバランス式を考え ることで、セルフレベリング条件に与える支配因子(粒子径、ボイド率、発熱密度等)の影響に ついて検討し、試験と実機条件の違いについて考察した。

#### 2.5.1 簡易評価モデル

高さ*H*、水平方向断面積*A*、空隙率 εのデブリベッドを考える。単位時間・体積当たりの崩壊 熱を*q*とすると、デブリベッドからの崩壊熱による単位時間当たりの発熱量は

$$Q = AH(1 - \varepsilon)q$$

(2)

となる。ここで、全ての崩壊熱は、サブクール度 $\Delta T$ の冷却材を沸点まで加熱し、飽和状態の冷却材の蒸発に使われると仮定すると、デブリベッド内での冷却材の体積蒸発速度 $G_g$ は、以下の式を満たす。

$$Q = G_g \rho_g c_p \Delta T + G_g \rho_g h_{\rm lg} \tag{3}$$

すなわち

$$G_g = \frac{Q}{\rho_g(c_p \Delta T + h_{\rm lg})} \tag{4}$$

ここで、 $\rho_g$ 、 $c_p$ 及び $h_{lg}$ は、それぞれ、冷却材の飽和蒸気密度、液体比熱容量及び蒸発潜熱である。デブリベッド上端での平均流路断面積を $a = A \varepsilon^{2/3}$ 、流路での実効的なボイド率を $\alpha_g$ と仮定すると、デブリベッド上端での冷却材蒸気の流速 $V_g$ は、次式から計算できる。

$$V_g = \frac{G_g}{\alpha_g a_g} = \frac{H(1-\varepsilon)q}{\rho_g (c_p \Delta T + h_{\rm lg}) \alpha_g \varepsilon^{2/3}}$$
(5)

次に、デブリ粒子に働く力のバランス式から、セルフレベリングが生じる蒸気流速を評価する。 デブリ粒子が周囲を流れる冷却材の気液二相流により受ける抗力と重力のバランスを考える。こ のとき、気液二相流の平均流速をV<sub>ee</sub>とすると、次式が成り立つ。

$$C_{d} \cdot \pi \left(\frac{d}{2}\right)^{2} \cdot \frac{1}{2} \rho_{m} (V_{eq})^{2} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^{3} \cdot (\rho_{p} - \rho_{m})g$$
(6)

ここで、dはデブリ粒子直径、 $C_d$ は気液二相流中でのデブリ粒子に対する抗力係数、 $\rho_m$ は気液 二相流の平均密度 (= $\alpha_s \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l$ )、gは重力加速度である。すなわち

$$V_{eq} = \left[\frac{4}{3}\left(\frac{\rho_p}{\rho_m} - 1\right)\frac{gd}{C_d}\right]^{1/2} \tag{7}$$

従って、デブリベッド上端で冷却材の気・液相の流れに滑りがないと仮定すると、 $V_g > V_{eq}$ を満た せば、平均高さHまでセルフレベリングが生じ得ることになる。

一方、式(7)を計算するには気液二相流中でのデブリ粒子に対する抗力係数を知る必要があるが、 ここでは簡単化のため、次式で定義する気液二相流に対するレイノルズ数 Re を用いて、表 4 に 示す単相流れ中の球形粒子に対する相関式<sup>3)</sup>から抗力係数を求めた。

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho_m V_{eq} d}{\mu_m} \tag{8}$$

ここで、 $\mu_m$ は気液二相流の粘性係数であり、気・液相の粘性係数 $\mu_g$ 及び $\mu_l$ を用いて次式で近似する。

$$\frac{1}{\mu_m} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l} \tag{9}$$

xはクオリティであり、冷却材の気・液相の流れに滑りがない場合

$$x = \frac{\alpha_g \rho_g}{\rho_m} \tag{10}$$

で与えられる。尚、以上のモデルを用いた簡易評価には、表 5 に示す物性値及びデブリベッド条件を用いた。

#### 2.5.2 簡易評価の結果と考察

本研究で実施したデブリベッド運動特性試験の条件(水-アルミナ粒子)に対して簡易評価モデルを用いて得られて結果を図 18 に示す。ここで、縦軸はVg = Veq でのデブリベッドの高さ H(セルフレベリングが起こる最低の高さ)、横軸はデブリベッド表面での実効ボイド率であり、ベッド内流路に対する気相体積率を表す。図 17 に示したように、本試験では、粒子層上部の円錐状粒子層は、デブリ粒子直径 6 mm の場合を除いてセルフレベリングが生じたこと、また、円錐状粒子層が完全に平坦化した場合のデブリベッドの高さは、約20~25 cm 程度である。従って、本試

験結果を説明するには、簡易評価モデルに従う限り、セルフレベリングが生じるデブリベッド表 面は、ベッド内流路の実効ボイド率は比較的小さい必要があり、少なくとも、気相のみでは試験 で観察されたセルフレベリングを駆動できないことになる。

図 19 に実機条件(ナトリウム-UO<sub>2</sub>;本評価では UO<sub>2</sub>と MOX の物性値に大きな差はない)に 対して簡易評価モデルを用いて得られて結果を示す。ここでは、デブリベッド表面での実効ボイ ド率を 0.3 及び 0.7、デブリ粒子直径 3 mm 及び 0.4 mm (燃料冷却材相互作用でフラグメントした デブリの典型的な大きさ)の場合について、 $V_g = V_{eq}$ でのデブリベッドの高さ H (セルフレベリ ングが起こる最低の高さ)と発熱密度の関係を示した。また、実機条件では、冷却材のサブクー ル度を 350℃と仮定した。実機の崩壊熱は炉停止直後で約 20 W/cc (JSFR-1500) ~30 W/cc (もん じゅ)程度であることから、スティールが体積で半分程度混在するデブリの場合、ベッド内流路 の実効ボイド率を 0.3 と仮定すれば、デブリ粒子直径 3 mm であっても、5 cm 程度まではセレフ レベリングによってデブリベッドが平坦化することになる。本研究で実施したデブリベッド運動 特性試験の条件との最大の違いは、冷却材の沸騰速度(発熱密度)であり、実機条件では実効的 な発熱密度が 10~20 倍程度大きいため (2.3 節参照)、簡易評価モデルに従う限り、非常に激し いセルフレベリングが起こることが予想される。

本研究で実施したデブリベッド運動特性試験で観察されたデブリベッドでの冷却材の沸騰挙 動およびそれに駆動されたセレフレベリング挙動は、本簡易評価モデルと整合するものではない。 セレフレベリングはデブリベッド内で発生する蒸気泡の運動によって駆動されており、例えば、 沸騰強度だけでなく、デブリベッドの性状にも依存したデブリベッド内での気泡の成長・発達挙 動がセレフレベリングに影響を与えるものと考えられる。従って、今後、デブリベッド内での固 気液混相流のダイナミックスに関する知見なども反映し、より適切なモデル化を導入して行く必 要がある。

表 1: アルミナ粒子の物性

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.6
熱伝導率(W/m・K)	37
比熱容量 (kJ/kg・K)	0.8
温度拡散係数(cm <sup>2</sup> /s)	0.12

表 2:アルミナ粒子の充填率

試験ケース     (%)       球形粒子     58       (直径 0.5 mm)     58       球形粒子     58       (直径 2 mm)     58       球形粒子     62       (直径 6 mm)     62       非球形粒子     52			
球形粒子     58       (直径 0.5 mm)     58       球形粒子     58       (直径 2 mm)     58       球形粒子     62       (直径 6 mm)     62       非球形粒子     52	試験ケース	(%)	
(直径 0.5 mm)     58       球形粒子     58       (直径 2 mm)     58       球形粒子     62       (直径 6 mm)     62       非球形粒子     52	球形粒子	59	
球形粒子     58       (直径 2 mm)     58       球形粒子     62       (直径 6 mm)     62       非球形粒子     52	(直径 0.5 mm)	38	
(直径 2 mm)     58       球形粒子     62       (直径 6 mm)     52	球形粒子	59	
球形粒子     62       (直径 6 mm)     52	(直径 2 mm)	38	
(直径 6 mm)     62       非球形粒子     52	球形粒子	63	
非球形粒子 (直径 0.84) = 1 mm) 52	(直径 6 mm)	62	
(直径 0.84 - 1 mm) 32	非球形粒子	52	
(但1至 0.84~1 11111)	(直径 0.84~1 mm)	52	

## 表 3: 蒸気流量及び換算発熱密度の評価結果

お た フ	沸騰時間 [s]	損失熱量	発熱密度	蒸気質量	蒸気体積
武殿クース	(第 Ⅰ〜Ⅱ 期)	[kJ]	換算 [W/cc]	速度 [g/s]	速度 [cc/s]
球形粒子	124	05	0.17	0.21	1.070
(直径 0.5 mm)	134	95	0.17	0.31	1,070
球形粒子	01	112	0.20	0.52	1.020
(直径 2 mm)	91	112	0.29	0.55	1,930
球形粒子	(0)	106	0.27	0.67	2 270
(直径 6 mm)	69	106	0.37	0.07	2,370
非球形粒子	202	170	0.21	0.28	1 240
(直径 0.84~1 mm)	203	1/9	0.21	0.38	1,340

Author(s)	Range	Relationship for CD	Range of deviation in CD (%)
Rumpf	Re < 10	$2 + 24/C_D$	-3 to -5
Lanmuir and Blodgett	$10 \le \text{Re} < 100$	$\frac{24}{\text{Re}}(1+0.197\text{Re}^{0.63}+2.6\times10^{-4}\text{Re}^{1.38})$	+6 to +1
Schiller and Nauman	$100 \le \text{Re} < 800$	$\frac{24}{\text{Re}}(1+0.15\text{Re}^{0.687})$	+5 to -4
Lapple	$800 \le \text{Re} < 1000$	$\frac{24}{\text{Re}}(1+0.125\text{Re}^{0.72})$	+5 to -8
Kurten et al.	$1000 \le \text{Re} < 4000$	$0.28 + \frac{6}{\mathrm{Re}^{1/2}} + \frac{21}{\mathrm{Re}}$	+7 to -6
Abraham	$4000 \le \text{Re} < 6000$	$0.2924(1+9.06 \mathrm{Re}^{-1/2})^2$	+9 to -6
Clift and Gauvin	$6000 \le \text{Re} < 3 \times 10^5$	$\frac{24}{\text{Re}}(1+0.15\text{Re}^{0.687})$	+6 to -4

## 表 4: 単相流れ中の球形粒子に対する抗力係数の相関式

表 5: 簡易評価に用いる物性値及びデブリベッド条件

		試験(水-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	実機(Na-UO <sub>2</sub> )
$h_{lg}$	: 冷却材の蒸発潜熱 [J/kg]	2.26×10 <sup>6</sup>	$4.26 \times 10^{6}$
Н	: デブリベッドの平均高さ [m]	0.155	
q	: 燃料デブリベッドの発熱密度 [W/cm³]	0.17 ~ 0.37	$20 \sim 30$
ε	: デブリベッドの空隙率	0.5	0.5
$\rho_g$	: 冷却材の飽和蒸気密度 [kg/m³]	0.293	0.157
$\rho_l$	: 冷却材の飽和液体密度 [kg/m³]	0.972×10 <sup>3</sup>	$0.753 \times 10^{3}$
$\rho_p$	: 粒子(デブリ)の密度 [kg/m³]	$3.6 \times 10^{3}$	$10.97 \times 10^{3}$
$\mu_g$	: 冷却材蒸気の粘性係数 [Pa s]	12.1×10 <sup>-6</sup>	17.6×10 <sup>-6</sup>
$\mu_l$	:冷却材液体の粘性係数 [Pas]	0.282×10 <sup>-3</sup>	$0.157 \times 10^{-3}$
c <sub>p</sub>	: 冷却材液体の比熱容量 [J/(kg K)]	4.20×10 <sup>3</sup>	$1.28 \times 10^{3}$



### 図 1:試験装置概略図



## 図 2:試験装置外観写真







図 4: 固体粒子層における傾斜角の定義と固体粒子層の初期配置



図 5: アルミナ粒子の形状







図 7:各種圧力及び蒸気流量の時間変化(非球形粒子)



初期状態



24 s 後







72 s 後









192 s 後

図 8: 固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(非球形粒子)



図 10:各種圧力及び蒸気流量の時間変化(球形粒子:0.5 mm)



初期状態











72 s 後



96 s 後







168 s 後



120 s 後

192 s 後

図 11: 固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(球形粒子:0.5 mm)



図 13:各種圧力及び蒸気流量の時間変化(球形粒子:6mm)



初期状態



24 s 後



48 s 後



72 s 後



96 s 後



144 s 後



168 s 後



192 s 後

図 14: 固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(球形粒子:6mm)

#### - 20 -







初期状態



24 秒後



48 秒後



72 秒後



96 秒後



120 秒後



144 秒後

168 秒後





図 16: 固体粒子層の運動及び沸騰挙動の時間変化(球形粒子:2mm)







図 18:平衡ベッド高さのボイド率による変化(水/アルミナ粒子)



図 19: 平衡ベッド高さの発熱密度による変化(ナトリウム/UO2粒子)

## 3 安全解析コードによる試験解析

#### 3.1 目的

事故後の崩壊熱除去過程において重要となるデブリベッドの流動特性に着目したデブリベッド 運動特性試験(前章)と並行して、安全解析コードで用いられている多相多成分モデルの検証の ため試験解析を行う計画となっている。試験の進捗に合わせて、平成19年度は基礎的な実験を対 象とすることとした。

本共同研究で行う試験は、沸騰を伴いながら固体粒子層で模擬するデブリベッドの運動挙動を 調べることとしており、学術的に十分な研究がなされていない相変化を伴う固気液3相流である。 安全解析コードの本試験への適用に当たっては、まず気液2相流、固液2相流および相変化を伴 わない固気液3相流に対して、本コードの基本検証を行うことが必要である。気液2相流につい ては、これまで相変化を伴う気泡群に対してモデルの検証を行った。<sup>4)</sup>相変化を伴わない固気液 3相流については、圧力駆動による粒子層の運動挙動を調べ、モデルチューニングにより本コー ドの基本的な妥当性を確認した。<sup>5)</sup>一方で、固液2相流については、これまでモデルの検証を十 分に実施してきたとは言い難い。そこで、デブリベッドの運動挙動を調べる上で重要な固液2相 流に対して安全解析コードの基本検証を行うこととした。

固液2相流は産業界に多く存在しており、その試験データベースも豊富ではあるが、高速炉の 実機安全評価上で重要な溶融炉心プールのスロッシング(揺動)挙動を対象とした固液2相流の 基礎試験が本研究では最適であると判断した。このスロッシング試験は本共同研究のための固液 2相流に対する解析コードの基本検証になる。また、実機のエネルギー発生評価において重要な 反応度挿入率を決める溶融炉心プールの集中速度など過渡的なスロッシング挙動に対するコード 検証に資することにもなる。特に、非対称スロッシング挙動試験は最近開発された3次元解析コ ード SIMMER-IV に対するコード検証に適している。過去の実機安全評価では2次元解析コード であったため、炉心内の中心軸以外で圧力駆動(例えば、燃料冷却材相互作用)が起きた場合に 中心軸への集中を余儀なくされていたが、この非対称スロッシング試験によって、その中心軸集 中は非現実的であることが示された。ここでは、実機安全評価上重要な非対称スロッシング挙動 についてもコード検証の対象とした。

#### 3.2 試験の概要

ここで対象とするスロッシング試験は 1990 年代に独国 FZK で実施されたものである。<sup>6</sup> 試験 は、直径 44cm の透明な円筒形の試験体の中に配置した高さ 5~20cm、直径 11~19cm のシリンダ ーに 22℃の水を給水し、そのシリンダーを試験開始とともに~3m/s の速度で瞬時に上に引き抜く ことにより水柱が崩壊しスロッシングが起きる挙動をハイスピードカメラに収める。試験は大き く分けて、下記の 5 つに分類される。

- 1) 試験体中心に液柱を配置し中心軸に対して対称なスロッシング挙動を確認する SA シリーズ
- 2) 試験体中心からずれた位置に液柱を配置し非対称のスロッシング挙動を確認する SB シリーズ

- 3) 試験体中心に液柱を配置し試験体底面に高さ 2~3cm の固定されたリングを配置しリングに 阻害されたスロッシング挙動を確認する SC シリーズ
- 4) 試験体中心に液柱を配置しプール内に最大で12本の固定されたロッドを配置しロッドに阻害 されたスロッシング挙動を確認するSDシリーズ
- 5) 試験体中心に液柱を配置し試験体底面の内周部または外周部に可動性のあるアクリル製の粒 子を配置し粒子を巻き込みながらのスロッシング挙動を確認する SE シリーズ

それぞれのシリーズをさらにプール底面の初期状態で分類し、プール底面を 1~10cm の水で 満たしたものを Water step、満たしていないものを Dam break と呼ぶ。試験では各シリーズに対し て初期液柱高さ 5~20cm、直径 11~19cm を変えることにより複数の試験が行われた。各試験シ リーズの試験体系概要図を図 20、試験条件の概略を表 6 に示す。

本研究では、固液2相流に着目しているため、SA シリーズ Dam break 試験 [SA-D1-3 ケース] を基準として、SE シリーズ Dam break 試験 [SE-D1P-1 ケース] を解析対象に選定した。SE-D1P-1 試験は、試験体外周部の底にアクリル製の粒子を配置し、水が粒子を巻き込みながらスロッシン グを起こす挙動が確認できた。SA-D1-3 試験は、SE-D1P-1 試験との試験条件の違いが粒子の有無 だけであり、容易に比較できる。また、SA-D1-3 試験と比較できる非対称スロッシング試験は SB シリーズ Dam break 試験 [SB-D1A-2 ケース] であり、これを解析対象とした。

本試験より得られた結果は、ハイスピードカメラに収められたスロッシング挙動、及び、ハイ スピードカメラの映像から抽出した、スロッシング外周部でのピーク高さ、中心部でのピーク高 さ、及び、それらのスロッシング開始からの時刻である。図 21~図 24 に各シリーズの代表的な スロッシング挙動のハイスピードカメラの映像、表 7 に試験条件、表 8 にスロッシング時刻、ピ ーク高さ等の試験結果を示す。中心軸に対称な試験ケースのハイスピードカメラの映像より、試 験では非常に精度良く対称性が取れていることがわかる。一方、非対称スロッシング試験は液面 揺動が複雑となりスロッシングピークを求めることは困難で、スロッシング高さは容器左右での 高さを計測することとした。

試験では、初期に液柱を入れている容器を瞬時に引き抜く際に外乱が与えられ、スロッシング 挙動に影響を与える可能性がある。つまり、液柱の外縁部分のみ上昇し、液柱の下降流を妨害す る恐れがある。液柱容器引き抜き時に導入されるエネルギーと液柱のポテンシャルエネルギーを 比較することによって、それによる誤差は約3%(不確かさを考慮すると8%)と見積もられた。 カメラによる観察によって、水中の大部は影響を受けておらず、液中の外縁部の薄い層のみ上昇 流が見られた。多くのケースで、スロッシングピーク高さは横方向に歪み正確にピークを求める ことができなかったため、そのようなケースは排除して試験結果は整理されてある。解析する際 は、試験の測定にはいくつかの誤差が含まれることに留意が必要である。

#### 3.3 試験解析

3.3.1 r- θ-z 体系を用いた参照試験 [SA-D1-3 ケース] の解析

(a) 解析体系及び条件

本解析では、2次元コード SIMMER-III は使用せず、周方向1メッシュとすれば SIMMER-III と同等の解析機能を有する3次元 SIMMER-IV コードを用いた。解析体系は、図 25 に示すよう に、径方向メッシュ数44、軸方向メッシュ数100、周方向メッシュ数32 の3次元 r- θ-z 体系であ るが、周方向1メッシュとして2次元解析も行った。このメッシュ分割により径方向メッシュサ イズは 5mm となる。試験では、液面底部でかなり浅い形状となって広がっていくことを踏まえ て数値拡散を低減する必要がある。そのため、液柱部分の軸方向メッシュサイズは2.5mm とした。 この試験ケースではスロッシングピーク高さが40cm であることから、カバーガス領域は30cm 高 さを設けて解析領域としては50cm を考慮した。ただし、このメッシュ分割ではメッシュサイズ が2cm となり、測定誤差が数 cm であることを考慮するとスロッシングピーク高さを同定するに は不十分である可能性があることに注意が必要である。なお、周方向角度はおよそ11度となる。 試験結果との比較のため、本解析では液体体積率の1%をより大きなメッシュ部分を液体部分と 定義してスロッシングピーク高さを同定した。試験では正確な定義がなされていないため、本解 析では液滴部分が含まれることになる。したがって、本解析におけるピーク高さを試験と比較す る際には、解析結果は多少誤差範囲が広がることに留意が必要である。

本解析では標準的な解析モデル(デフォルト)を用いた。本解析のようなセル間をまたがり大 規模な流動挙動となる場合には運動量拡散項の影響が大きいと考えられる。そこで、運動量拡散 項をパラメータとして解析を実施した。

#### (b) 解析結果

試験結果と比較するため、解析結果を表9にまとめた。まず、周方向1メッシュを2次元解析 では、試験結果と比較しスロッシングによる中心への集中が過大評価され中心部でのスロッシン グピーク高さが大幅に高い。一方、径方向32メッシュを用いた3次元解析では、試験結果とよく 一致している。また、2次元解析と3次元解析で得られたスロッシング挙動を液体体積率で図示 したものを図26に示す。2次元解析では、運動量の周方向へ分散することなく、スロッシング の運動量が完全な状態で中心に戻ってくるため、過大評価したと言える。3次元解析では、数値 拡散により微妙な周方向運動が発生しており、その分中心へ戻るための運動量が減じられたこと が試験結果を再現できた理由と言える。このように、実機における燃料プールのスロッシング挙 動を評価する上では3次元解析により燃料集中を緩和できる効果があることが示された。

運動量拡散項の有無を比較してみると、多少スロッシング高さが緩和されるが、固体粒子を含 まない本試験では、さほど影響がないことが示された。

#### 3.3.2 r-θ-z体系を用いた固液流試験 [SE-D1P-1 ケース]の解析

#### (a) 解析体系及び条件

解析体系を図 27 に示す。前項と同じ体系で異なる部分は、水と同程度の密度を有する粒子を タンクの外側に設置したことである。粒子ベッドは、高さ 1cm、内半径 15cm、外半径 22.2cm と し、試験と同じ条件とした。また、粒子径は 1.52mm で試験と一致させた。粒子体積率は 0.6 を 設定した。

#### (b) 解析結果

本ケースでも、3次元解析結果と周方向1メッシュの2次元解析結果を比較した(表 9)。上記の参照試験解析と同様に、次元の影響は大きく、3次元解析は試験結果をよく再現している。スロッシング挙動を図28に示す。

固体粒子を含まない前ケースに比べて、固体粒子を含む本ケースでは、水が固体粒子の上を飛 び越えた後に固体粒子を巻き込みながら壁側の水の上昇および中心へ移動していることが分かる。 3次元解析では有意に中心における水のピーク高さが減じられた。また、固液二相流の本ケース では、運動量拡散項の影響は大きく、運動量拡散項を使用しない場合は明らかに中心への集中が 生じている。運動量拡散項は粒子体積率の増加に応じて流体粘性を増加させるモデルとなってお り、これが有意に働き中心への集中が阻害されたと考えられる。実機評価においては、最近の研 究の進展によって崩壊炉心は比較的低エネルギーで事象推移することを想定しており、燃料プー ルは多量の粒子を含んだものと考えられる。本解析結果は実機評価においては運動量拡散項を取 り入れることが合理的であることを示している。

SIMMER コードの中には、セル内の運動量交換関数を計算するのに液体中の燃料粒子の増大に 応じて運動量交換を増加させる粒子粘性モデルを有している。そこで、粒子粘性モデルを使用せ ずに解析した結果を比較した(表 10)。その結果、運動量拡散項に比して粒子粘性モデルの影響 が大きいことが示された。本試験解析では、粒子を設定するのにセル内に最大充填率に相当する 体積率で用いたため、壁を設定すると液体は全く動かなくなる。そのため、本試験解析では壁の 設定を行わなかった。したがって、粒子粘性モデルは流体-壁間運動量交換には用いられず、流 体-流体間運動量交換に使用されたことになる。本試験では、固体粒子の比重は水と同程度でほ ぼ一緒に動いているため有意に作用しないと予想していたが、固液二相流状態はスロッシングに よる水の集中に影響を与えることが分かった。実機評価においては、固体粒子を含む崩壊炉心の 運動挙動に粒子粘性モデルは重要なモデルであることが認識された。

#### 3.3.3 x-y-z 体系を用いた参照試験 [SA-D1-3 ケース] 験の解析

#### (a) 解析体系及び条件

非対称スロッシング挙動を解析するには、3次元 *r*-θ-z 体系では実行できないため、液柱やタンク境界を適切に模擬できないが、デカルト(*x-y-z*)座標系とせざるをえない。ここでは、比較のため、軸対称スロッシング試験 [SA-D1-3 ケース] も解析することとした。また、タンク壁への水の衝突にはメッシュの影響が大きいと考えられるため、粗メッシュケースと詳細メッシュケースに2種類を実施した。軸対称スロッシング試験(参照試験)解析ケースのデカルト座標系を用いたメッシュサイズの異なる2種類の解析体系を図 29 に示す。径方向・周方向共にメッシュ数は 46 であり、軸方向メッシュ数は *r*-θ-z 体系と同じ 100 を用いた。

#### (b) 解析結果

x-y-z 体系を用いた軸対称スロッシング試験解析で得られた液面最高高さを表 11 で試験結果と 比較した。両ケース共にタンク壁での到達高さを過大評価した。図 30 にスロッシング挙動を2 次元表示の縦断面の液体体積率分布および3次元表示の液面位置を示す。縦断面表示では r-θ-z 体系解析とほぼ同様の結果に見えるが、3次元表示ではタンク壁面での水が非一様分布になって いることが分かる。これは、タンク壁に水が到達したとき、ガタガタ形状の壁近接セルで水平方 向に2方向からの運動量が1つのセルに集中することになるため、解析で得られたタンク壁での 到達高さは過大評価したと考えられる。一方、軸中心スロッシング高さは過小評価している。こ れは、中心へ戻るとき、周方向へ運動量が散逸されるため中心への集中が緩和されたと考えられ る。図 30 を見ると、ピーク高さは液面の定義によって変わりうることが分かる。また、そメッ シュケースは数値拡散が大きいため壁面最高高さが詳細メッシュケースより低くなったといえる。 このようなタンク壁における非一様分布は*x-y-z*体系に特有であり、本解析の数値シミュレーショ ン上の限界を示している。また、単相流分野では曲面をデカルト座標系で模擬することは限界が あることが知られており、最近では壁を適切に模擬する境界適合座標系を導入した解析コードの 開発が進められている。

他方、ピーク到達時間を見ると、解析結果は試験とよく一致している。実機解析では反応度挿 入率を決める燃料コンパクション速度が重要であることから、SIMMER-IV コードによるスロッ シング挙動は適切に再現できたと言える。

#### 3.3.4 x-y-z 体系を用いた非対称スロッシング [SB-D1A-2 ケース] 試験の解析

#### (a) 解析体系及び条件

図 31 に示すように、非対称スロッシング試験解析ケースも同様のメッシュを用いているが、 試験では液柱の位置が中心から 8.25mm ずれているが、解析では粗メッシュケースで水平方向メ ッシュサイズが 1cm(詳細メッシュケースでは 5mm)であるため、中心からのズレを 8cm とした。

#### (b) 解析結果

非対象スロッシング試験では、液面が乱れて計測が困難であったことから、左右側壁上での最 高高さを取得した。それを解析結果と比較したものを表 12 に整理した。非対象スロッシング試 験を解析した結果、最初に到達する左側タンク壁での到達高さは過大評価し、少し遅れて到達す る右側へは過小評価した。スロッシング挙動を2次元と3次元で図 32 に表示する。粗メッシュ ケース・詳細メッシュ共に試験の誤差範囲を超えているが、本解析も軸対称スロッシング試験解 析と同じ理由により数値シミュレーション上の限界を含んでいる。

容器壁と中心でのピーク高さ時間は試験とよく一致している。これは実機解析におけるコンパ クション速度の観点から重要である。また、液柱の偏心が少し不足していることも右側到達高さ を過小評価していることの原因の一つと考え、参考のため、タンク中心から 8.5cm ずらしたケー スも実施してみたが、解析結果は変わらなかった(表 12)。さらに、壁の存在を考慮した解析や 液柱を引き抜く際の液柱表面流速を与えた解析を実施してみたが、解析結果に影響を与えないこ とは確認した。

#### 3.4 まとめ

軸対称スロッシング挙動は事故時の全炉心規模プール運動によって駆動される再臨界を評価する際に重要である。そのスロッシング挙動に対して、本解析を通じて SIMMER-IV コードの流体 力学モデルの妥当性を確認した。特に、従来の2次元解析に比べて、3次元解析は周方向エネル ギー散逸のため軸中心へのコンパクションを緩和できることがわかった。これは SIMMER-IV が 合理的な評価を可能とすることを示している。固液流に対しては運動量拡散項及び粒子粘性モデ ルを実機解析で考慮することが合理的であることが示された。デカルト座標系を用いた数値シミ ュレーションは上述の解析上の限界があるものの、試験の誤差範囲を若干上回る程度でスロッシ ングピーク高さを再現することができることを確認した。実機評価における全炉心プールは、本 試験のタンクのような円筒の境界を有しているわけではなく、一部破損や変形を伴った極めて非 均質な境界である。また、局所的な蒸発などによって燃料プールが運動する。また、反応度挿入 率の観点ではコンパクション速度が重要であり、本解析では試験結果とよく一致していることを 確認した。よって、スロッシング挙動に対する SIMMER-IV コードの妥当性を確認した。

Classification of Experiments	Sloshing test Geometry	Obstacles in the flow
SA	Symmetric Dam break	
	Symmetric water step	
SB	Asymmetric Dam break	
SC	Symmetric Dam break	Symmetric rings at the pool
	Symmetric Water step	bottom
SD	Symmetric Dam break	Symmetric rod structure
	Symmetric Water step	Asymmetric rod structure
SE	Symmetric Dam break	Particles in the flow

## 表 6: スロッシング試験条件概要

(出典) Maschek, W., Roth, A., Kirstahler, M., Meyer, L., "Simulation Experiments for Centralized Liquid Sloshing Motions," KfK report, KfK5090 (Dec. 1992).

Experimental		Diameter of	Height of	water (cm)	Type of obsi	acle/disturbance: articles
series signature	Туре	water cylinder(cm)	inner cylinder	outer cylinder	Particle height in central cylinder(cm)	Particle height in outer cylinder(cm)
SA D1-3	Dam	11	20	-	-	-
SE D1P-1	break	11	20	-	-	1

表 7:スロッシング試験条件

Experimental		Diameter of	Height of v	water (cm)	Asymmetry of central water
series	Туре	central water	Inner	Outer	cylinder.
signature		cylinder(cm)	cylinder	cylinder	Off-centeredness (cm)
SB D1A-2	Dam break	11	20	-	8.25

(出典) Maschek, W., Roth, A., Kirstahler, M., Meyer, L., "Simulation Experiments for Centralized Liquid Sloshing Motions," KfK report, KfK5090 (Dec. 1992).

## 表 8:スロッシング試験結果

E	Slos	h at outer container	Slosh at pool	center	
Experimental				Time of first sector	Electron also
series	Arrival time at	I ime of maximai	Maximai	I ime of first peak	First peak
signature	wall (sec)	height (sec)	height (cm)	height (sec)	height (cm)
SA D1-3	0.20±0.02	0.42±0.02	16.0±1.0	0.88±0.04	40.0±5
SE D1P-1	0.28±0.02	0.40±0.02	10.0/8.0±1.0	0.80±0.04	25.0±5.0

Europia entel	Slosh at	left wall	Slosh at right wall		
	Time of maximal	Maximal height	Time of first peak	First peak height	
Series signature	height (sec)	(cm)	height (sec)	(cm)	
SB D1A-2	0.36±0.02	14.0±2.0	0.48±0.02	24.0±2.0	

(出典) Maschek, W., Roth, A., Kirstahler, M., Meyer, L., "Simulation Experiments for Centralized Liquid Sloshing Motions," KfK report, KfK5090 (Dec. 1992).

			(	Conditions				
	Experimental	Slosh a	it outer cor	tainer wall	Slosh at p	bool center		
Calculation	series	Arrival	Time of		Time of		Number of	Momentum
case name	signature	time	maximal	Maximal	first peak	First peak	azimuthal	diffusion term
	J	at wall	height	height (cm)	height	height (cm)	meshes	
		(sec)	(sec)		(sec)			
SA_2D_DIS	SA D1-3	0.20	0.37	18.3	-	>50	1	Yes
SE_2D_DIS	SE D1P-1	0.25	0.44	26.0	-	>50	1	Yes
SA_3D	SA D1-3	0.19	0.4	15.5	0.89	42	32	No
SE_3D	SE D1P-1	0.21	0.36	11.0	0.82	32	32	No
SA_3D_DIS	SA D1-3	0.19	0.39	15.3	0.89	42	32	Yes
SE_3D_DIS	SE D1P-1	0.21	0.36	10.5	0.82	27	32	Yes

表 9:解析結果 (r- θ-z 体系)

## 表 10: 固液二相流におけるパラメトリック解析結果 (r-θ-z 体系)

			Calculation results					Conditions	
Calculation case name	Experimental series signature	Arrival time at wall (sec)	Time of maximal height (sec)	Maximal height at outer wall (cm)	Time of first peak height (sec)	First peak height at pool center (cm)	Momentum diffusion term	Particle viscosity model	
SE_3D	SE D1P-1	0.21	0.36	11.0	0.82	32	No	Yes	
SE_3D_DIS_ NOPV	SE D1P-1	0.21	0.35	10.0	0.83	36	Yes	No	
SE_3D_DIS	SE D1P-1	0.21	0.36	10.5	0.82	27	Yes	Yes	

Symmetric sloshing case	Slosh	at outer conta	iner wall	Slosh at pool center		Calculation
name	Arrival time at wall (sec)	Time of maximal height (sec)	Maximal height (cm)	Time of first peak height (sec)	First peak height (cm)	mesh condition
SA D1-3 (exp.)	0.20±0.02	0.42±0.02	16.0±1.0	0.88±0.04	40.0±5	-
SA_3D_DIS_XYZ_S	0.20	0.4	17.25	0.88	36.0	Coarse mesh
SA_3D_DIS_XYZ	0.20	0.4	18.75	0.88	>50	Fine mesh

## 表 11:軸対称スロッシング試験の解析結果 (x-y-z 体系)

表 12:非対称スロッシング試験の解析結果(x-y-z 体系)

	Condition		Results			
Asymmetric sloshing case name	Position from the center (cm)	Slosh at Time of first peak (sec)	First peak	Slosh at r Time of first peak (sec)	ight wall First peak height (cm)	Calculation mesh condition
SB D1A-2 (exp.)	8.25	0.36±0.02	14.0±2.0	0.48±0.02	24.0±2.0	-
SB_3D_DIS_ASY_XYZ_S	8.00	0.36	16.75	0.46	16.5	Coarse mesh
SB_3D_DIS_ASY_XYZ	8.00	0.36	17.25	0.48	21.0	Fine mesh
SB_3D_DIS_ASY_XYZ_8.5	8.50	0.36	17.25	0.48	21.0	Fine mesh



図 20:スロッシング試験体系概要



(出典) Maschek, W., Roth, A., Kirstahler, M., Meyer, L., "Simulation Experiments for Centralized Liquid Sloshing Motions," KfK report, KfK5090 (Dec. 1992).

図 21: SA-D1-3 試験(参照試験) で観察されたスロッシング挙動 [1/2]



(出典) Maschek, W., Roth, A., Kirstahler, M., Meyer, L., "Simulation Experiments for Centralized Liquid Sloshing Motions," KfK report, KfK5090 (Dec. 1992).

図 22: SA-D1-3 試験(参照試験) で観察されたスロッシング挙動 [2/2]



(出典) Maschek, W., Roth, A., Kirstahler, M., Meyer, L., "Simulation Experiments for Centralized Liquid Sloshing Motions," KfK report, KfK5090 (Dec. 1992).

図 23: SE-D1P-1 試験(固液2相流)で観察されたスロッシング挙動



(出典) Maschek, W., Roth, A., Kirstahler, M., Meyer, L., "Simulation Experiments for Centralized Liquid Sloshing Motions," KfK report, KfK5090 (Dec. 1992).

図 24: SB-D1A-2 試験(非対称スロッシング)で観察されたスロッシング挙動





<sup>(</sup>b) 3-D calculation (Case: SA\_3D\_DIS)

図 26: SA-D1-3 試験(参照試験)解析で得られたスロッシング挙動



図 27: r-θ-z 座標系を用いた SE-D1P-1 試験(固液2相流)解析体系



(b) 3-D calculation (Case: SE\_3D\_DIS)図 28: SE-D1P-1 試験(固液2相流)解析で得られたスロッシング挙動



図 29: x-y-z 座標系を用いた SA-D1-3 試験(参照試験)解析体系



図 30: SA-D1-3 試験(参照試験)解析で得られたスロッシング挙動



図 31: x-y-z 座標系を用いた SB-D1A-2 試験(非対称スロッシング)解析体系



図 32:SB-D1A-2 試験(非対称スロッシング試験)解析で得られたスロッシング挙動

### 4 結言

本研究では、事故後崩壊熱除去において重要となる燃料デブリベッドのセルフレベリング挙動 に着目し、その基本的特性を解明するためのデブリベッド運動特性試験(冷却材沸騰模擬試験) を実施した。また、燃料デブリベッドの運動挙動に対して、安全解析コードで用いられている多 相流モデルの妥当性を検証するため、デブリベッドの運動挙動に関連する固液2相流試験の解析 を行った。その結果、以下の結果を得た。

1) デブリベッド運動特性試験では、冷却材沸騰を水の減圧沸騰よって模擬し、デブリベッドを 模したアルミナ粒子層の運動挙動について可視化試験を行った。試験では、固体粒子の大きさ(0.5 ~6 mm) 及び形状(球形粒子、非球形粒子)が固体粒子層のセルフレベリング挙動に与える影響 について系統的に確認し、セルフレベリング発生の有無や、過渡的なセルフレベリングの発達に ついて定量的なデータを取得した。

2) セルフレベリングの発生条件について、単一粒子に働く力のバランスに基づく簡易モデルを 提案した。デブリベッド運動特性試験結果と比較から、冷却材の沸騰による比較的低ボイド率で の二相流がセルフレベリングを駆動していることが予想された。また、本結果を実機条件に外挿 した結果、燃料デブリベッドのセルフレベリングは、崩壊熱によるナトリウム沸騰に駆動される ことで容易に発生し得ることが示唆された。

3) 安全解析コードの検証では、固体粒子を伴う液柱のスロッシング挙動に関する試験解析を実施し、安全解析コードの基本的な妥当性を確認した。

今後は、本研究の結果に基づき、デブリベッド運動特性試験においては、より広範な試験条件 でデータを取得することで、セルフレベリング特性を支配する因子について実験的な解明を進め ていく。また、安全解析コードによる本試験解析を進め、実機解析における燃料デブリベッドの 熱流動シミュレーション技術の開発に反映する。

## 謝 辞

本研究を実施するに当たり、九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻の張 斌氏、原田 哲志氏、平原大輔氏に多大な協力を頂きました。また、SIMMER-IV コードによる解析の実施に 当たっては、(株) NESI 菅谷正昭氏、細野正剛氏にご協力頂をきました。ここに感謝申し上げま す。

## 参考文献

- J.D. Gabor, E.S. Sowa, Jr.L. Baker, J.C. Cassulo : "Studies and Experiments on Heat Removal from Fuel Debris in Sodium," Proc. Fast Reactor Safety Meeting, CONF-74041-P2, pp.823-844 (1974).
- R.J. Lisinski : "A Coolability Model for Postaccident Nuclear Reactor Debris," Nucl. Tech., 65, pp. 53-66 (1984).
- 3) R. Clift, J.R. Grace, M.E. Weber : "Bubbles, Drops, and Particles," Academic Press Inc., New York (1984).
- Suzuki, T., Tobita, Y., Yamano, H., Kondo, Sa., Morita, K., Matsumoto, T., Akasaka, R. Fukuda, K., "Development of Multicomponent Vaporization/Condensation Model for a Reactor Safety Analysis Code SIMMER-III: Extended Verification Using Multi-bubble Condensation Experiment," Nuclear Engineering and Design, Vol. 220, pp. 240-254 (April 2003).
- 5) Liu, P., Yasunaka, S., Matsumoto, T., Morita, K., Fukuda, K, Yamano, H., Tobita, Y., "Dynamic Behavior of a Solid Particle Bed in a Liquid Pool: SIMMER-III Code Verification," Nuclear Engineering and Design, Vol. 237, pp. 524-535 (March 2007).
- Maschek, W., Munz, C.D., Meyer, L., "Investigations of Sloshing Fluid Motions in Pools Related to Recriticalities in Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Core Meltdown Accidents," Nuclear Technology, Vol. 98, pp. 27-43 (April 1992).
- Maschek, W., Roth, A., Kirstahler, M., Meyer, L., "Simulation Experiments for Centralized Liquid Sloshing Motions," KfK report, KfK5090 (Dec. 1992).
- Munz, C.D., Maschek, W., "Comparison of Results of Two-Phase Fluid Dynamics Codes and Sloshing Experiments," KfK report, KfK5091 (Dec. 1992).

## 記号表

:	Interface area per unit volume [1/m]
:	Cross sectional area of bed [m <sup>2</sup> ]
:	Heat capacity [J/kg/K]
:	Specific heat capacity of liquid coolant [J/kg/K]
:	Drag coefficient for a particle in two-phase flow [-]
:	Particle diameter [m]
:	Gravitational acceleration [m/s <sup>2</sup> ]
:	Vaporization rate of coolant from bed [m <sup>3</sup> /s]
:	Specific heat of vaporization for coolant [J/kg]
:	Height of bed [m]
:	Decay heat per unit volume [J/m <sup>3</sup> ]
:	Heat generation rate from bed [W]
:	Reynolds number [-]
:	Average velocity of two-phase flow [m/s]
:	Coolant vapor velocity at the top of the bed [m/s]
:	Quality [-]
:	Void fraction [-]
:	Coolant subcooling [K]
:	Porosity [-]
:	Density of saturated coolant vapor [kg/m <sup>3</sup> ]
:	Density of liquid coolant [kg/m <sup>3</sup> ]
:	Average density of two-phase flow [kg/m <sup>3</sup> ]
:	Density of particles [kg/m <sup>3</sup> ]
:	Viscosity of gas [Pa s]
:	Viscosity of liquid [Pa s]
:	Viscosity of two-phase flow [Pa s]

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位					
甘木旦	SI 基本ì	单位			
本平里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光 度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位	を用いて表されるSI組立単	立の例
組立量	SI 基本単位	
加工业	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s
加 速 度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度,質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比 体 積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	$A/m^2$
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝 度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$
屈折率 (6)	(数字の) 1	1
比透磁率的	(数字の) 1	1

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立単位	
組立量	反折	初旦	他のSI単位による	SI基本単位による
	石柳	記与	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立 体 角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 <sup>(b)</sup>	$m^{2/}m^{2}$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	$\mathbf{S}$	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Η	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m <sup>2</sup> e <sup>-2</sup>
カーマ	× • •	G, J	ong	111 5
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
性線量当量, 個人線量当量		21	3. ng	
<u>酸素活性</u>	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもにマ コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)潮光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (b)セルジカス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (f)を認知してある。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f)数増性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば認った用語でradioactivityでと記される。
 (b)単位かーベルト(レ900270205)についてはCEPD和動告2(C12002)を参照。 (g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

	表4.	単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例
--	-----	--------------------------

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA
表 面 電 荷	ウーロン毎平方メートル	$C/m^2$	m <sup>-2</sup> sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	$C/m^2$	m <sup>-2</sup> sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語								
乗数	接頭語	接頭語 記号 乗数		接頭語	記号			
$10^{24}$	э 9	Y	$10^{-1}$	デシ	d			
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с			
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m			
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ			
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n			
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р			
$10^{6}$	メガ	Μ	$10^{.15}$	フェムト	f			
$10^{3}$	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	アト	a			
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z			
$10^{1}$	デ カ	da	$10^{-24}$	ヨクト	У			

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	•	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg		

\_

\_

#### 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの					
名称	記号	SI 単位で表される数値			
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J			
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg			
統一原子質量単位	u	1u=1 Da			
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m			

#### 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	表8. SIに属さないか、SIと併用されるその他の単位						
	名称			SI 単位で表される数値			
バ	l	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa			
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa			
オン	グストロ	- <i>L</i>	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m			
海		里	Μ	1 M=1852m			
バ	-	ン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})2=10^{-28} \text{m}^2$			
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s			
ネ	-	パ	Np	cI単位しの粉結的な間径は			
ベ		ル	В	対数量の定義に依存。			
デ	ジベ	ル	dB -	)			

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N				
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s				
ストークス	$\mathbf{St}$	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>				
フォト	$^{\rm ph}$	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx				
ガル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$				
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	$1 \text{ Oe} \triangleq (10^3/4\pi) \text{A m}^{-1}$				

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 🌢 」 は対応関係を示すものである。

#### 表10. SIに属さないその他の単位の例

名称				記号	SI 単位で表される数値	
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
V	ン	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
V				L	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\sim$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	工		ιV	5		1フェルミ=1 fm=10-15m
メ	ートル	/系	カラゞ	ット		1メートル系カラット=200 mg=2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク			$\sim$	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています