

JAEA-Review 2020-035 DOI:10.11484/jaea-review-2020-035

# Multi-Physics モデリングによる 福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ 深さ方向の性状同定 (委託研究)

 一令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー
Estimation of the In-depth Debris Status of Fukushima Unit-2 and Unit-3 with Multi-Physics Modeling (Contract Research)
-FY2019 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project-

> 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター 早稲田大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development Waseda University

KEVIEN

January 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2021

# Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ 深さ方向の性状同定

## (委託研究)

#### -令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-

# 日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター

#### 早稲田大学

#### (2020年10月14日受理)

日本原子力研究開発機構 (JAEA) 廃炉環境国際共同研究センター (CLADS) では、令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 (以下、「本事業」という)を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等を始めとした原 子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前 の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進する ことを目的としている。平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行 することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成 をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、研究課題のうち、「Multi-Physics モデリングによる福島2・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定」の令和元年度の研究成果について取りまとめたものである。

福島廃炉のためには炉内状況把握の更新が必要である。特に、福島2・3号機ペデスタル燃料デ ブリの深さ方向の分布・性状の把握が課題である。本研究では、固液の移行及び界面の機構論的 な追跡が可能な MPS 法、模擬溶融デブリ流下実験、高温融体物性データを整備する。これらの Multi-Physicsモデリングにより、令和元年度から3カ年計画で福島2・3号機ペデスタル燃料デ ブリ深さ方向の性状を同定することを目的としている。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、早稲田大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター:〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

i

# Estimation of the In-depth Debris Status of Fukushima Unit-2 and Unit-3 with Multi-Physics Modeling

(Contract Research)

- FY2019 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project -

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development Japan Atomic Energy Agency Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Waseda University

(Received October 14, 2020)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to "the Project") in FY2019.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields. The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2019, this report summarizes the research results of the "Estimation of the In-Depth Debris Status of Fukushima Unit-2 and Unit-3 with Multi-Physics Modeling".

Continuous update on understanding of the damaged Fukushima reactors is important for safe and efficient decommissioning of the reactors. This study aims to estimate the in-depth debris status of the damaged Fukushima Unit-2 and Unit-3 through multi-physics modeling, which comprises of MPS method, simulated molten debris relocation experiment and high-temperature melt property data acquision in the three-year project from FY2019.

Keywords: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Unit-2, Unit-3, Multi-physics Modeling, MPS Method, Levitation Method

This work was performed by Waseda University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

# 目次

1.	英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2.	平成 30 年度 採択課題(継続分)	2
3.	令和元年度 採択課題	5
付銀	录 成果報告書	9

## Contents

1.	Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project 1
2.	Accepted Proposal in FY2018 ~Continued~2
3.	Accepted Proposal in FY20195
Ap	pendix Result Report9

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン(平 成26年6月文部科学省)」等を踏まえ、平成27年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材 育成推進事業」(以下、「本事業」という。)を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃 炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、 機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課 題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という。)では、平成27年に廃炉国際共同研 究センター(以下、「CLADS」という。現:廃炉環境国際共同研究センター)を組織し、「東京電 カホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等 を踏まえ、東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所廃炉(以下、「1F廃炉」とい う。)に係る研究開発を進めている。

また、平成 29 年 4 月に CLADS の中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを 踏まえ、今後は CLADS を中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基 礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指 すことが期待されている。

このため、本事業では平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEA に移行 することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成 をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤 型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、 ④研究人材育成型廃炉研究プログラム(令和元年度より新設)に再編した。

- 1 -

# 2. 平成 30 年度 採択課題(継続分)

平成30年度採択課題(継続分)については以下のとおりである。

課題数:19課題

共通基盤型原子力研究プログラム 11 課題

(若手研究6課題、一般研究5課題)

課題解決型廃炉研究プログラム 6課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2課題

(日英共同研究)

### 平成 30 年度 採択課題一覧

### 共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための 半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマ ップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性 微粒子回収法の高度化	山﨑 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部 被ばくの横断的生体影響	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変 異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低い ストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

# 共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオラ イト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開 発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同 定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

# 課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤 研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環 境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技 術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イ メージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邉 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブ リセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究機構

# 国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク 低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

JAEA-Review 2020-035

## 3. 令和元年度 採択課題

令和元年度は、4 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。 公募の概要は以下のとおりである。

・ 公募期間:平成31年4月24日~令和元年6月7日
令和元年5月30日~令和元年7月18日 ※日露共同研究のみ

· 課題数:19課題

 共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題 (若手研究 2 課題、一般研究 5 課題)
課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題 国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題 (日英共同研究 2 課題、日露共同研究 2 課題)
研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審 査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。その後、PD (プログラムディレクター)・PO(プログラムオフィサー)会議での審議を経て、採択課題を決定 した。

## 令和元年度 採択課題一覧

### 共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海 水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボッ トの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

# 共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋 内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ス トレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オン ラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな 評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁	産業技術総合 研究所

# 課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデス タル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技 術を用いた分別方法の研究開発	渡邉 大輔	日立 GE ニュークリア・ エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物 の安定固化技術の開発	竹下 健二	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによ る圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアル カリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で 効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学

## 国際協力型廃炉研究プログラム(日露共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関 する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾大学

# 研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のため の遠隔技術に関する研究人材育成	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合したデ ブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブ リ劣化機構の解明	大貫 敏彦	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

本報告書は、採択課題のうち、課題解決型廃炉研究プログラム「Multi-Physics モデリング による福島2・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定」の令和元年度の研究成果 について記したものである。

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

# 付録

# 成果報告書

This is a blank page.

# 令和元年度

# 日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

# Multi-Physics モデリングによる福島2・3 号 機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定 (契約番号 311130)

# 成果報告書

# 令和2年3月

# 学校法人早稲田大学

JAEA-Review 2020-035

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の 「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」によ る委託業務として、学校法人早稲田大学が実施した「Multi-Physicsモデリングによる福島2・3号機ペデスタル燃料デ ブリ深さ方向の性状同定」の令和元年度の研究成果を取り まとめたものです。

概	[略	ζ ι		vi
1.	15	tじめに		1
2.	業	逐新計画	l	3
	2.	1.	全体計画	3
	2.	2.	令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法	6
3.	숚	ì和元年	度の実施内容及び成果	8
	3.	1.	MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析	8
		3.1.1.	計算アルゴリズムの改良	8
		3. 1. 2.	試解析条件と結果	11
		3. 1. 3.	まとめ	17
	3.	2.	模擬デブリ流下実験	18
		3. 2. 1.	実験装置	18
		3. 2. 2.	流下重量速度の確認	20
		3. 2. 3.	実験パラメータ	21
		3. 2. 4.	計測項目	25
		3. 2. 5.	実験条件	26
		3. 2. 6.	実験結果	27
		3. 2. 7.	まとめ	47
	3.	3.	実機デブリ流下履歴の同定(連携先:原子カ機構)	48
		3.3.1.	既存情報・最新知見のレビュー	48
		3. 3. 2.	2・3 号機における事故進展と炉心物質流出挙動の概要推定	57
		3. 3. 3.	まとめ	61
	3.	4.	浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)	62
		3.4.1.	ガス浮遊装置の改良	62
		3. 4. 2.	静電浮遊法を用いた融体 Fe <sub>0.84</sub> Bo.16の物性測定	66
		3.4.3.	まとめ	67
	3.	5.	MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験	68
		3. 5. 1.	MPS 法解析コードの並列化と並列計算機システムの構築	68
		3. 5. 2.	並列化 MPS 法解析コードによる試解析	72
		3. 5. 3.	まとめ	76
	3.	6.	研究推進	77
4.	絎	請	······	78
参	老	;文献		80

# 表一覧

表	2.1-1 :	年度別全体計画5
表	3.1-1 :	層流水の凝固による平板流路閉塞実験の条件12
表	3.1-2 :	層流水の凝固による平板流路閉塞実験の MPS 法による解析条件12
表	3.2-1 :	模擬デブリ流下実験の実験パラメータ21
表	3.2-2 :	模擬デブリ流下実験に用いたパラフィンの物性値22
表	3.2-3	模擬デブリ流下実験に用いたシリコーン樹脂 5K の物性値23
表	3.2-4 :	模擬デブリ流下実験に用いたシリコーン樹脂 200 の物性値24
表	3.2-5	模擬デブリ流下実験に用いた溶融塩の物性値25
表	3.2-6	模擬デブリ流下実験の計測項目26
表	3.2-7	模擬デブリ流下実験の実験条件表27
表	3.4-1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 及びZr、Fe、Bの共振周波数(直径2mmの球の場合)64
表	3.5-1 :	MPI 及び OpenMP による MPS 法解析コード並列化の効率評価用試解析用物性と条件
表	3.5-2	並列計算機システム緒元71
表	3.5-3	VULCANO-VEU7 実験の解析条件

図一盟	覧
-----	---

义	3.3-3:3号機ペデスタル領域調査時の映像に基づく 3D イメージ51
义	3.3-4:福島第一原子力発電所の1~3号機のPCV内外から取得したサンプルの部位51
义	3. 3-5 : 1~3 号機 PCV 内外から取得したサンプルの分析結果に基づく U 含有粒子の分類
义	3.3-6:1~3 号機の PCV 内から取得したサンプルの分析結果例
义	3.3-7:事故時プラントデータとデブリのペデスタル移行時間帯(推定)の関係53
义	3.3-8:2号機の圧力データが得られていない時間帯の環境放射線と白煙観測時刻の関係
义	3.3-9:2・3号機の事故進展解析結果に基づく炉心の冷却材ボイド化後のエネルギー推移
义	3.3-10:2号機における事故進展シナリオ推定とペデスタルへのデブリ流出挙動概略予測
义	3.3-11:2 号機 RPV 下部の TIP 案内管や PIP ケーブル等が確認できない部分 59
义	3.3-12:3号機事故進展の推定とペデスタルへのデブリ流出挙動概略予測 60
义	3.4-1:ガス浮遊法による粘性評価の概略図62
义	3.4-2:大阪大学に設置してあるガス浮遊装置の概略図62
义	3.4-3: 減衰振動する液滴の模式図と減衰振動のデータの例63
义	3.4-4:ガス浮遊装置の外観写真64
义	3.4-5: 減衰運動する Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 液滴の直径の時間変化65
义	3.4-6 : 2,000 fps 及び 4,000 fps で取得した Al <sub>2</sub> 0 <sub>3</sub> 液滴の減衰振動の周波数スペクトル
义	3.4-7:静電浮遊装置の概略図と外観66
义	3.4-8:溶融 Fe <sub>0.84</sub> B <sub>0.16</sub> の密度と粘性67
义	3.5-1 : MPI 及び OpenMP による並列化 68
义	3.5-2 : MPI 及び OpenMP による MPS 法解析コード並列化の効率評価用試解析体系(二次元)
义	3.5-3:並列化した MPS 法解析コードの並列化効率の測定結果
义	3.5-4:並列計算機構成72
义	3.5-5:並列計算機システムの外観72
义	3.5-6:解析結果の様子と動的領域分割(水柱のダム崩壊)73
义	3.5-7 : VULCANO VE-U7 解析体系
义	3.5-8 : VULCANO VE-U7 溶融物の粘性モデル74
汊	3.5-9:解析結果の様子と動的領域分割75
义	3.5-10:従来結果と並列化解析結果の比較(流動先端距離)

#### 略語一覧

- ADL: Aerodynamic Levitation (ガス浮遊法:ガス流の圧力と容器の圧力差を利用して一定の 位置に浮遊させる方法)
- ADS: Automatic Depressurization System (原子炉自動減圧系)
- BWR:Boiling Water Reactor(沸騰水型原子炉:軽水を原子炉冷却材及び中性子減速材とし、 この軽水を炉心で沸騰させて蒸気を発生させ直接タービン発電機に導き電気を得る発電 用原子炉)
- CAMS: Containment Atmospheric Monitoring System (格納容器雰囲気モニタ)
- CAD: Computer-aided design (キャド:コンピュータを用いて設計をすること、あるいはコン ピュータによる設計支援ツールのこと)
- CRD: Control Rod Drive mechanism (制御棒駆動機構)
- CRGT: Control Rod Guide Tube (制御棒ガイド管)
- D/W:Drywell (ドライウェル)
- OpenMP: Open Multi-Processing の略。並列計算機環境において共有メモリ・マルチスレッド 型の並列アプリケーションソフトウェア開発をサポートするために標準化された Application Programming Interface (アプリケーションプログラミングインターフェー ス)
- MCCI: Molten Corium Concrete Interaction (コア・コンクリート反応:原子炉過酷事故時に 格納容器床に放出される溶融炉心と床コンクリートの相互作用やそれに伴うコンクリー トの熱分解や浸食)
- MPI: Message Passing Interface (メッセージ パッシング インターフェース)の略。複数の CPUが情報をバイト列からなるメッセージとして送受信することで協調動作を行えるよう にする並列計算のための標準化された規格の一つ
- MPS: Moving Particle Semi-implicit Method (MPS 法: 粒子法の一種であり非圧縮性流れの解 析手法の一つ)
- PCV: Primary Containment Vessel (原子炉格納容器:原子炉とその冷却系設備等を収容する 建造物)
- RPV: Reactor Pressure Vessel (原子炉圧力容器:原子炉の炉心部を収納する鋼製容器)
- SA: Severe Accident(原子炉過酷事故:原子力発電所等の原子炉施設において、設計時に考慮した範囲を超える異常な事態が発生し、想定していた手段では適切に炉心を冷却・制御できない状態になり、炉心溶融や原子炉格納容器の破損に至る事象)
- S/C: Suppression Chamber (圧力抑制室)
- TIP: Traversing In-core Prove(移動式炉心内計装)

#### 概略

#### 研究の背景

福島第一原子力発電所廃炉時の燃料デブリ取り出しシステム・機器の設計、臨界管理、作業時 の安全性向上、不測の事態への対応力向上、作業に伴い得られる新たな知見の作業工程への適切 なフィードバック等のためには炉内状況推定精度の向上が必要である。3 号機ペデスタル燃料デ ブリの深さ方向の分布や性状を把握できれば、工法・機器の設計や、臨界管理を飛躍的に合理化 できる。2 号機ペデスタルのデブリ深部に多量のウランが存在する可能性を合理的に排除できれ ば、臨界管理が不要になる。これらのペデスタル燃料デブリ性状を把握できれば、原子炉圧力容 器(RPV)残存燃料デブリの性状や RPV 破損状況、RPV からペデスタルへのデブリの移行経路の同 定に資することができ、炉内状況推定精度を向上できる。従って、2・3 号機ペデスタル燃料デブ リの深さ方向の分布・性状の把握が喫緊の課題である。

特に、これまでのプラントデータ、事故進展解析、内部調査、試料分析等と整合する3号機ペ デスタル燃料デブリの深さ方向の分布(成層化パターン)を同定し、考え得る燃料デブリ成層化 パターンがデブリ内部浸水時の臨界性(有限体系の中性子実効増倍率)に及ぼす影響を明らかに することが課題である。同様に、これまでのプラントデータ、事故進展解析、内部調査、試料分 析等と整合する2号機 RPV からペデスタルへのデブリ移行履歴を推定し、ペデスタル燃料デブリ の性状を同定し、大量のウランが含有されている可能性の合理的な排除の可否を明らかにするこ とが課題である。

一方で、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」では、ラグランジュ 法に基づき流体を離散化し、固液相変化を伴う溶融物挙動の解析に優れる粒子法の一種である Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法の改良と解析、模擬デブリ流下実験、UO<sub>2</sub>含む高温融体 物性実験を連成した、Multi-physics モデリングによる Ex-Vessel 溶融物挙動理解の深化が図ら れた。その結果、実機事故時の複雑な溶融物挙動解析に適用できる基盤技術が整備された。

#### 本研究の目的

本研究では、以上の背景を踏まえ、固液の移行及び界面の機構論的な追跡が可能な MPS 法、模擬デブリ流下実験、実機溶融デブリ流下履歴の同定、高温融体物性データ整備から構成する Multi-Physics モデリングにより、福島2・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状を同定することを目的とする。

#### 本研究の実施内容(本年度)

#### (1) MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析

福島2・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状を同定するには、デブリ堆積問題の解析に 伴う MPS 法の計算コストを大幅に低減し、実用的な燃料デブリ堆積分布解析手法を確立する必要 がある。そのような解析を可能とする解析アルゴリズムを開発することを目標として、本年度は MPS 法の計算コスト増大の主要因である圧力・粘性計算負荷を低減するために、解析に新たな粒 子タイプ(凝固粒子タイプ)を導入した。また、凝固粒子タイプによる判定を活用し、凝固した 粒子は圧力・粘性計算をスキップできるように、計算アルゴリズム中に粒子タイプによる新たな 判定基準を導入した。 MPS 法の解析アルゴリズムを改良し、各計算タイムステップにおいて粒子の固相率等を判定条件に用いて、凝固粒子タイプと判定された粒子はそれ以降の計算をスキップできるようにした。 平板間流路を流れる層流水の凝固実験を対象にしたベンチマーク試解析で圧力分布等を出力し、 粒子タイプによる計算スキップとそれに伴う解析時間の短縮を確認した。

#### (2) 模擬デブリ流下実験

改良 MPS 法の妥当性確認と実機燃料デブリ堆積分布予測に資するために粘性等の異なる複数種 類の溶融物を異なる履歴で流下させた場合の、模擬デブリ流下・成層化データを取得可能な実験 系を構築することを目標として、本年度の実験系は、粘性流体の流出流量比を時系列制御可能な 熱流動制御系、デブリ流下状態を複数方向から可視化可能な計測系から構成した。また、初期に 流出したデブリによりペデスタルコンクリートが浸食される現象を模擬した実験を行い、MPS 法 の妥当性確認用データが得られることを確認した。

異なる浸漬状態(液位及び粘性)のペデスタルへの溶融デブリ流下を模擬し、模擬デブリの粘 性、温度、流下流量・位置を変化させて得られる模擬ペデスタルのアブレーションや溶融デブリ の混合流動状態及びその凝固物の三次元形状を対比した。その結果、初期の模擬ペデスタルに液 が浸漬している場合に顕著に浸食が抑制される結果が得られた。

#### (3) 実機デブリ流下履歴の同定(連携先:原子力機構)

福島2・3号機原子炉圧力容器(RPV)から原子炉格納容器(PCV)ペデスタルへのデブリ移行 履歴の推定を目標として、本年度はRPVからペデスタルに至る領域の構造情報、福島2・3号機に 対する内部調査結果、PCV内外から採取された試料の分析結果、事故時プラントデータ分析結果、 及び燃料デブリエンタルピーに係わる最新の評価結果を精査し、福島2・3号機における炉心物質 流出挙動の概要を把握した。その上で、2号機における比較的早期段階での炉心物質の流出経路 の候補とその支配要因を推定した。

内部調査、試料分析、プラントデータ分析、既存・新規の解析(MELCOR、SCDAPSIM、GOTHIC)等の結果を精査し、福島2号機と3号機では炉心溶融の程度が異なることが、溶融炉心物質の一時的な冷却後の RPV 破損及び炉心物質の流出に影響したという概要を把握した。2号機の炉心物質流出経路の候補は RPV 側部から底部に至る広い範囲と見込まれ、その支配因子にはデブリ領域に含まれる溶融金属の伝熱等が含まれると推定した。

#### (4) 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

福島 2・3 号機では、金属ボライドが燃料と反応した可能性があるため、金属ボライド-(U0<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Zr)の高温相状態及び液相の粘性の評価を目標として、本年度は大阪大学に設置されている 酸化物試料用のガス浮遊法の装置の構成を変更した。従来よりも高性能なハイスピードカメラを 設置する等して、金属系試料でも粘性を測定できるように改良した。また、静電浮遊法装置を用 いて、Fe-B系高温融体の物性(粘性と密度)を測定した。

従来のハイスピードカメラ(フレームレート 2000 fps)よりも高速に記録できるカメラ(フレ ームレート 4000 fps)を大阪大学の装置に設置した。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 試料の液滴振動を従来よりも高い時 分解能で観察し、共振周波数が高い金属系試料(Fe-B等)の粘性を測定できる見通しを得た。また、 静電浮遊法で温度 1600 K における Fe<sub>0.84</sub>Bo.16 の融体密度と粘性を測定した。

#### (5) MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験

福島2・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状を同定するには、MPS法解析コードによる 大規模並列解析が必要である。そのような解析を可能とする MPS法コードの並列化を目標として、 本年度は流体の自由界面追跡が可能な試解析体系を複数の解析領域に分割し、領域間の境界部の 情報の受け渡し量が最小化されるように動的に領域分割を制御した。また、各解析領域の計算負 荷が平準化するように解析領域を制御した。さらに、これらの領域を並列計算機の各計算ノード に割り振り、水柱のダム崩壊ベンチマーク解析等の簡易な例を対象に並列計算の試解析を実施し、 動作確認を行った。

分散メモリ並列 EMPS ライブラリを活用し、早稲田大学の MPS 法解析コードを並列化した。水柱のダム崩壊ベンチマーク問題を対象に、解析体系を複数の領域に分割し、動的に領域分割ができることを確認した。

#### (6)研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉国際共同研究センター(CLADS)等との連携を密に して、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。早稲田 大学、大阪大学、CLADSの研究代表者間でメールや電話等で密に連絡を取り合いながら研究を進 めた。適時打ち合わせを実施した(令和元年10月29日、11月26日、令和2年1月29日)。

#### 1. はじめに

福島第一原子力発電所廃炉のための NDF 戦略プラン 2018 では初号機の燃料デブリ取り出し開 始を 2021 (令和 3) 年度中としており、これらの燃料デブリ取り出しシステム・機器の設計、臨 界管理、作業時の安全性向上、不測の事態への対応力向上、作業に伴い得られる新たな知見の作業 工程への適切なフィードバック等のためには炉内状況推定精度の向上が必要である。これまでに 2・3 号機の内部調査が進んでいるが、ペデスタル燃料デブリの性状が不明である。3 号機ペデス タル燃料デブリの深さ方向の分布や性状を把握できれば、工法・機器の設計や、臨界管理を飛躍 的に合理化できる。2 号機ペデスタルのデブリ深部に多量のウランが存在する可能性を合理的に 排除できれば、臨界管理が不要になる。これらのペデスタル燃料デブリ性状を把握できれば、原 子炉圧力容器 (RPV) 残存燃料デブリの性状や RPV 破損状況、RPV からペデスタルへのデブリの移 行経路の同定に資することができ、炉内状況推定精度を向上できる。従って、2・3 号機ペデスタ ル燃料デブリの深さ方向の分布・性状の把握が喫緊の課題である。

上記課題に関連する既往・既存研究等には以下がある:廃炉・汚染水対策事業費補助金事業の 総合的な炉内状況把握の高度化(IRID炉内状況把握 PJ:2011(平成 23)~2017(平成 29)年度) [1]では炉内状況推定図が作成されたが解析による推定精度の向上が課題とされた。JAEA/CLADS研究「炉内性状把握の精度向上に向けた基盤研究」(2018(平成 28)~2020(令和 2)年度)は RPV 内外のデブリ等特性把握を目的としている点で本提案と共通要素を含むが、JAEA/CLADS研究は主 に RPV 内部における事象推移に焦点をあてたものであるのに対し、本研究は RPV 外における事象 推移に焦点をあてたものであり、互いに相補的な関係にある。福島第一原子力発電所燃料デブリ の臨界評価手法の整備(原子力規制庁事業:2014(平成 26)~2021(令和 3)年度) [2]では、 ミクロな燃料デブリの組成の不確かさを考慮した詳細な臨界性解析(無限体系の中性子無限増倍 率の評価)手法が開発されているが、マクロな燃料デブリの分布(成層化パターン)が臨界性(有 限体系の中性子実行増倍率)に及ぼす影響は検討されていない。今後、プラント内部調査や限ら れたサンプリング試料の分析からデブリ表層の性状は把握できるが、深部の性状同定は困難であ る。

以上から、これまでのプラントデータ、事故進展解析、内部調査、試料分析等と整合する3号 機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布(成層化パターン)を同定し、考え得る燃料デブリ成 層化パターンがデブリ内部浸水時の臨界性(有限体系の中性子実効増倍率)に及ぼす影響を明ら かにすることが課題である。同様に、これまでのプラントデータ、事故進展解析、内部調査、試 料分析等と整合する2号機 RPV からペデスタルへのデブリ移行履歴を推定し、ペデスタル燃料デ ブリの性状を同定し、大量のウランが含有されている可能性の合理的な排除の可否を明らかにす ることが課題である。

一方で、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」では、ラグランジュ 法に基づき流体を離散化し、固液相変化を伴う溶融物挙動の解析に優れる粒子法の一種である Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法の改良と解析、模擬デブリ流下実験、UO<sub>2</sub>含む高温融体 物性実験を連成した、Multi-physics モデリングによる Ex-Vessel 溶融物挙動理解の深化が図ら れた。その結果、溶融物が流動する過程で凝固した際に生じるクラストと溶融物の複雑な相互作 用を解析可能な MPS 法及び ZrO<sub>2</sub>等の高温融体の粘性等の物性を系統的に取得可能な技術が確立し た。これらにより、実機事故時の複雑な溶融物挙動解析に適用できる基盤技術が整備された [3]。 本研究では、以上の背景を踏まえ、固液の移行及び界面の機構論的な追跡が可能な MPS 法、模 擬デブリ流下実験、実機溶融デブリ流下履歴の同定、高温融体物性データ整備から構成する Multi-Physics モデリングにより、福島2・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状を同定すること を目的とする。3 カ年計画の1年目である本年度は以下を実施した:

- 1. MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析による計算コスト低減策の検討
- 2. 模擬デブリ流下実験系の整備と模擬ペデスタル床浸食実験
- 実機デブリ流下履歴の同定のための福島2・3号機における炉心物質流出挙動の概要把握(連携先:原子力機構)
- 4. 浮遊法による高温融体物性評価のための実験装置の構成変更(再委託先:大阪大学)
- 5. MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験のための MPS 法解析コードの並列 化
- 6. 研究代表者及び参加機関との連携による研究推進

#### 2. 業務計画

#### 2.1. 全体計画

本研究の目的は、固液の移行・相変化及び界面の機構論的な追跡が可能な MPS 法、模擬デブリ 流下実験、実機溶融デブリ流下履歴の同定、高温融体物性データ整備から構成する Multi-Physics モデリングにより、福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状を同定することである。 この目的を達成するために、本研究は3年間で以下を実施する計画である:

- (1) MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析
- (2) 模擬デブリ流下実験
- (3) 実機デブリ流下履歴の同定(連携先:原子力機構)
- (4) 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)
- (5) MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験
- (6)3号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価(2年目以降)

(7) 研究推進

これらのうち、MPS 法の改良と解析及びその妥当性確認に係わる実施項目(1)、(2)、(5)、(6)は 早稲田大学で実施する(但し、MPS 法による大規模並列計算機実験には必要性と期待される効果 に応じて原子力機構の並列計算機も活用する)。実機デブリ流下履歴の同定(実施項目(3))は原 子力機構で実施する。浮遊法による高温融体物性評価(実施項目(4))は大阪大学で実施する。全 体の研究推進(実施項目(7))は早稲田大学が取りまとめる。これらの全体計画を表 2.1-1にまと め、全体概要を図 2.1-1に示す。以下にそれらの概要を示す。

#### (1) MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析

福島2・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状を同定するには、デブリ堆積問題の解析に 伴う MPS 法の解析コストを低減し、実用的な燃料デブリ堆積分布解析手法を確立する必要がある。 そのような解析を可能とする解析アルゴリズムを開発することを目標として、粒子の固相率等の 状態変数が一定の条件を満たした粒子について一部の負荷の大きな計算をスキップできるように 新たな粒子タイプ(凝固粒子タイプ)を導入する。また、凝固粒子タイプによる判定を活用し、 凝固した粒子は圧力や粘性計算等をスキップできるように、計算アルゴリズム中に粒子タイプに よる新たな判定基準を導入する。計算のスキップが解析精度に及ぼす影響も勘案し、実用的な計 算アルゴリズムを開発し、早稲田大学の MPS 法解析コードに実装し、ベンチマーク解析を実施す る。

#### (2) 模擬デブリ流下実験

改良 MPS 法の妥当性確認と実機燃料デブリ堆積分布予測に資するために粘性等の異なる複数種 類の溶融物を異なる履歴で流下させた場合の、模擬デブリ流下・成層化データを取得する。MPS 法 での改良効果の定量化及び妥当性確認に資するため、境界条件を正確に制御し、流下物が堆積し、 成層化した状態を把握するために以下の実験系を独自に設計製作する:

流下させる複数の粘性流体の流出流量比を正確に時系列制御したディスペンサから流下させる熱流動制御系を設計製作する。

- MPS 法解析の界面変動と対比するためにデブリ流下状態を 3 方向から可視化し、定量化する 計測系を設計製作する。
- 堆積デブリを厚さ方向に分析する。

上記設備を設計製作し、境界条件を正確に制御した実験により、MPS 法に最適な妥当性確認デ ータを得る。

#### (3) 実機デブリ流下履歴の同定(連携先:原子力機構)

福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状を同定するにはどのような履歴でどのよう なデブリが RPV からペデスタルに移行したのかを推定する必要がある。そこで、RPV からペデス タルに至る領域の構造情報、2・3 号機に対する内部調査結果、PCV 内外から採取された試料の分 析結果、事故時プラントデータ分析結果、事故進展解析結果等を元に、2 号機における炉心物質の 流出経路の候補とその支配要因を推定する。推定された支配要因に着目し、個々の支配要因に適 した形で MPS 法を適用し、現実的な流出履歴(組成、温度、経路等)を評価する。3 号機について は、2 号機の炉心物質流出挙動評価結果を元に、燃料エンタルピーの 2 号機との差に着目してそ の流出挙動に係わる支配要因を評価する。評価された支配要因について、必要に応じ MPS 法を適 用し、3 号機の現実的な流出履歴を評価する。

#### (4) 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

福島 2・3 号機では、金属ボライドが燃料と反応した可能性があるため、金属ボライド-(U0<sub>2</sub>-Zr0<sub>2</sub>-Zr)の高温相状態を評価する。さらに、生成し得る液相の粘性を評価する。そのために、金属 ボライドとU0<sub>2</sub>、Zr0<sub>2</sub>、Zr 等を電気炉中で反応させ、その反応層を観察する。また、上記試料をガ ス浮遊法で浮遊溶融させてから金属基板上に落下させ、急冷凝固させてその組織を観察する。観 察には走査型電子顕微鏡及びエネルギー分散型 X 線分析装置を用いる。これにより、金属ボライ ドが燃料と反応した時に生成し得る液相を評価する。また、生成し得ると予想される液相の物性 を測定する。ボライドを含む溶融物は反応性が高いため、浮遊法を用いて物性(粘性)を測定す る。浮遊させた微小な試料片をレーザー加熱によって溶融させ、振動させる。その振動の減衰か ら液滴振動法によって粘性を得る。浮遊法としては酸化物も浮遊できるガス浮遊法を主として用 いるが、金属の浮遊に適した静電浮遊法も併用する。

#### (5) MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験

3 号機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布・性状を明らかにするために、早稲田大学の MPS 法解析コードを並列化する。解析体系を複数の解析領域に分割し、領域間の境界部の情報の受け 渡し量が最小化されるように動的に領域分割を制御する。また、各解析領域の計算負荷が平準化 するように解析領域を制御する。これらを実施項目(1)で開発する改良 MPS 法解析コードに実装し て、並列化する。実施項目(3)から得られる実機デブリ移行履歴を考慮し、3 号機ペデスタル燃料 デブリ堆積分布と整合するデブリ流下履歴及び成層化パターンを同定する。

#### (6)3号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価(2年目以降)

MPS 法による MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験(実施内容(5))と連成 し、3号機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布(非均質性)に対応した燃料デブリの成層化パ ターンが、デブリ取り出し時に起こりうるデブリの内部浸水時の臨界性(有限体系の中性子実効 増倍率)に及ぼす影響を明らかにする。SRAC2006 等によるセル燃焼計算により、8×8BWR 燃料の ウラン燃料ペレットや、ウラン燃料ペレットと被覆管構造材の均質化マクロ断面積を作成する。 代表燃焼度における燃料の均質化マクロ断面積と、構造材、水等の断面積を解析体系に配置し、 三次元体系の中性子実効増倍係数を評価する。異なる成層化パターンに対応した断面積配置の解 析を実施し、成層化パターンが中性子実効増倍係数に与える影響を評価する。

#### (7)研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

年度	令和元年度	令和2年度	令和3年度
(1) MPS法による溶融物挙動解析手法 の改良と解析	新アルゴリズム検討	新クラストモデル開発と 妥当性確認	成層化解析の妥当性確認
(2) 模擬デブリ流下実験	溶融浸食実験	固化デブリと流下デブリの 混合・分散実験	溶融デブリ同士の混合・分散実験
(3)実機デブリ流下履歴の同定 (連携先:原子力機構)	プラントデータ分析	デブリ流下解析	実機デブリ流下履歴の同定
(4) 浮遊法による高温融体物性評価 (再委託先:大阪大学)	浮遊法装置の改良	高温融体浮遊実験	高温融体物性・相状態評価 ▶◀
(5)MPS法による模擬デブリ堆積挙動 の大規模並列計算機実験	簡易体系での並列化	並列化と解析体系の構築	大規模計算機実験
(6)3号機ペデスタル成層化デブリ臨 界性評価	•	試解析体系構築と試解析	臨界性評価
(7)研究推進	各実施項目間の連携	◆名実施項目間の連携	各実施項目間の連携
	まとめ・評価	まとめ・評	は、まとめ・評価

#### 表 2.1-1:年度別全体計画

#### JAEA-Review 2020-035



図 2.1-1:実施内容の全体概要

#### 2.2. 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法

## (1) MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析

デブリ堆積問題の解析に伴う MPS 法の計算コストを低減し、実用的な燃料デブリ堆積分布解析 を可能とする解析アルゴリズムを開発することを目標として、MPS 法の計算コスト増大の主要因 である圧力・粘性計算負荷を低減するために、解析に新たな粒子タイプ(凝固粒子タイプ)を導 入する。また、凝固粒子タイプによる判定を活用し、凝固した粒子は圧力・粘性計算をスキップ できるように、計算アルゴリズム中に粒子タイプによる新たな判定基準を導入する。

#### (2) 模擬デブリ流下実験

改良 MPS 法の妥当性確認と実機燃料デブリ堆積分布予測に資するために粘性等の異なる複数種 類の溶融物を異なる履歴で流下させた場合の、模擬デブリ流下・成層化データを取得可能な実験 系を構築することを目標として、実験系は、粘性流体の流出流量比を時系列制御可能な熱流動制 御系、デブリ流下状態を複数方向から可視化可能な計測系から構成する。また、初期に流出した デブリによりペデスタルコンクリートが浸食される現象を模擬した実験を行い、MPS 法の妥当性 確認用データが得られることを確認する。

#### (3) 実機デブリ流下履歴の同定(連携先:原子力機構)

福島 2・3 号機 原子炉圧力容器(RPV)から原子炉格納容器(PCV)ペデスタルへのデブリ移行 履歴の推定を目標として、RPVからペデスタルに至る領域の構造情報、福島 2・3 号機に対する内 部調査結果、PCV 内外から採取された試料の分析結果、事故時プラントデータ分析結果、及び燃料 デブリエンタルピーに係わる最新の評価結果を精査し、福島 2・3 号機における炉心物質流出挙動 の概要を把握する。その上で、2 号機における比較的早期段階での炉心物質の流出経路の候補と その支配要因を推定する。

#### (4) 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

福島 2・3 号機では、金属ボライドが燃料と反応した可能性があるため、金属ボライド-(U0<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Zr)の高温相状態及び液相の粘性の評価を目標として、大阪大学に設置されている酸化物試 料用のガス浮遊法の装置の構成を変更する。従来よりも高性能なハイスピードカメラを設置する 等して、金属系試料でも粘性を測定できるように改良する。また、静電浮遊法装置を用いて、Fe-B 系高温融体の物性(粘性と密度)を測定する。

#### (5) MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験

MPS 法解析コードの並列化を目標として、流体の自由界面追跡が可能な試解析体系を複数の解 析領域に分割し、領域間の境界部の情報の受け渡し量が最小化されるように動的に領域分割を制 御する。また、各解析領域の計算負荷が平準化するように解析領域を制御する。さらに、これら の領域を並列計算機の各計算ノードに割り振り、水柱のダム崩壊ベンチマーク解析等の簡易な例 を対象に並列計算の試解析を実施し、動作確認を行う。

#### (6) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進める。また、 研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

#### 3. 令和元年度の実施内容及び成果

#### 3.1. MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析

空間を計算メッシュで離散化するオイラー法により固液界面を正確に追跡するには、事前に界 面の進行経路を予測し、適切な計算メッシュ分割を準備する必要がある。また、空間に固定され たメッシュで界面を追跡するため、複数の界面が複雑に形成されるような解析には適さない。そ のため、実機燃料デブリの成層化パターン同定のために、ペデスタルのような RPV 外の広い自由 空間に放出された溶融物の流動と凝固に伴う複雑な界面挙動を追跡する解析には適さない。

一方、空間ではなく固液をラグランジュ的に計算点(粒子)で離散化する MPS 法は以下の特徴 からこのような RPV 外溶融物挙動解析に適していることが示されている [3]。

- 界面を明示的に解く必要がないため、数値拡散を伴わずに容易に複雑な界面変化を追跡できる
- 移流項がないため、クラストやクラスト形成過程(凝固過程)の溶融物の流動・移行を、数 値拡散を伴わずに容易に追跡できる
- 計算メッシュが不要なため、複雑な体系の解析が容易

従来の MPS 法を実機燃料デブリの成層化パターン同定等に活用するには、他の解析手法と同様 に計算コストの低減が課題であった。オイラー法に基づく解析では、一般的に高精度を要する界 面近傍のみ高解像度にし(計算メッシュを細かくし)、それ以外の空間は低解像度(粗い計算メッ シュ)で解析することで計算コストを低減する。しかし、このようなオイラー的な手法は、事前 にどこに界面が形成されるのかを予測できていないと適用できない。

ラグランジュ法に基づく MPS 法でも、マルチ解像度の解析手法がいくつか提案されている:波 の打ち込み問題の解析で打ち込む流動先端近傍のみ粒子を小さくする手法 [4];物体が衝突する 波面近傍の流体粒子のみ小さくする手法 [5];主要な流れの方向に長い楕円型の粒子を用いる手 法 [6]。しかし、これらは本質的にオイラー的な手法を取り入れている(高解像度の計算が必要 な空間座標や方向が解析の事前に分かっている必要がある)ため、自由界面や固液界面がどこに 形成されるのかを事前に予測できない本研究に適用することは困難である。一方で、MPS 法の計 算アルゴリズムに着目すると、必ずしも完全に凝固したクラスト粒子について、他の流体粒子と 同様に全ての計算(例えば粘性計算)を行わなくとも、解析結果への優位な影響はないと考えら れる。そこで、本研究では、MPS 法の計算アルゴリズム・凝固(クラスト)モデルの改良と試解析 により、一定の条件を満たした粒子について一部の計算をスキップして計算コストを低減できる ことを示す。

#### 3.1.1. 計算アルゴリズムの改良

MPS 法の支配方程式は、以下に示す質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則である[7] [8]:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{3-1-1}$$

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \upsilon\nabla^2 \boldsymbol{u} + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{f}$$
(3-1-2)

$$\frac{\partial h}{\partial t} = k\nabla^2 T + Q \tag{3-1-3}$$

ここで $\rho$ は密度 $[kg/m^3]$ 、uは速度ベクトル[m/s]、Pは圧力[Pa]、vは動粘性係数 $[m^2/s]$ 、gは重力  $[m/s^2]$ (その他、外力が存在する場合には外力項)、hはエンタルピー [kJ/kg]、kは熱伝導率 $[W/m \cdot K]$ 、Tは温度[K]、Qは発熱密度 $[J/m^3]$ を表す。

これらの支配方程式(支配方程式中に含まれる微分演算子)は一般に粒子間相互作用モデルで 離散化される(四則演算に置き換えられる)。本研究では従来の粒子間相互作用モデル[7]に、数 値解析精度の向上のための Corrective Matrix を導入した以下の粒子間相互作用モデル[9]を用 いる:

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{(P_j - P_i)}{\|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i\|} \left( \mathbf{C}_i \frac{\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i}{\|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i\|} \right) w(\|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i\|) \right\}$$
(3-1-4)

$$\langle \nabla \cdot \boldsymbol{u} \rangle_{i} = \frac{d}{n^{0}} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{(\boldsymbol{u}_{j} - \boldsymbol{u}_{i})}{\|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}\|} \left( \mathbf{C}_{i} \frac{\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}}{\|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}\|} \right) w(\|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}\|) \right\}$$
(3-1-5)

$$\langle \nabla^2 \boldsymbol{\phi} \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left\{ (\boldsymbol{\phi}_j - \boldsymbol{\phi}_i) \left( \frac{2}{\lambda} - \frac{\mathbf{L}_i \mathbf{C}_i (\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i)}{\|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i\|^2} \right) w(\|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i\|) \right\}$$
(3-1-6)

ここで、dは次元数、 $n^0$ は初期粒子数密度、 $\phi$ は任意のスカラー変数、rは位置ベクトル[m]、 $\lambda$ は 修正係数である。Corrective Matrix $C_i$ 及び $L_i$ は次式で与えられる:

$$\mathbf{C}_{i}^{-1} = \frac{d}{n^{0}} \begin{pmatrix} \sum_{j \neq i} \frac{x_{ij}^{2}}{r_{ij}^{2}} w_{ij} & \sum_{j \neq i} \frac{x_{ij} y_{ij}}{r_{ij}^{2}} w_{ij} \\ \sum_{j \neq i} \frac{y_{ij} x_{ij}}{r_{ij}^{2}} w_{ij} & \sum_{j \neq i} \frac{y_{ij}^{2}}{r_{ij}^{2}} w_{ij} \end{pmatrix}$$
(3-1-7)

$$\mathbf{L}_{i} = \left(\frac{2d}{n^{0}\lambda} \sum_{j \neq i} x_{ij} w_{ij} \quad \frac{2d}{n^{0}\lambda} \sum_{j \neq i} y_{ij} w_{ij}\right)$$
(3-1-8)

ここで、 $x_{ij} = x_j - x_i$ 、 $y_{ij} = y_j - y_i$ 、 $r_{ij}^2 = x_{ij}^2 + y_{ij}^2$ 、 $w_{ij} = w(||r_j - r_i||)$ である。これらのモデルは 粒子間距離に応じて、近接する粒子間の相互作用が強く、距離が離れるほど相互作用が弱くなる ように、以下の重み関数を用いる:

$$w(r) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r_e}{r}\right)^2 & (0 \le r \le r_e) \\ 0 & (r_e \le r) \end{cases}$$
(3-1-9)

MPS 法は非圧縮性流体の解析手法であり、(3-1-4)式に示した圧力項により、粒子は粒子数密度 が高い領域から低い領域に流れ、解析体系中の粒子数密度分布はほぼ初期値で一定に保たれる。 このことにより、上記の粒子間相互作用モデルの数値的な精度が一定程度保たれるようになって いる[7]。しかし、複雑な解析に MPS 法を用いる場合は、高い数値計算精度が求められる。

そこで、本研究では、解析体系中の粒子の分布及び粒子数密度を均一に保つための Particle Shifting 手法を導入した早稲田大学の MPS 法を用いる。同手法では、上述の圧力項による補正に 加え、以下のように粒子の速度は変更せずに、粒子数密度の高い領域から粒子数密度の低い領域 に粒子の位置座標を補正する [10] [11]:

$$\delta \boldsymbol{r}_{i} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}_{i}}{n^{0}} \sum_{j \neq i} \frac{l_{0}}{\|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}\|} \left( \boldsymbol{C}_{i} \frac{\boldsymbol{r}_{i} - \boldsymbol{r}_{j}}{\|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}\|} \right) w(\|\boldsymbol{r}_{j} - \boldsymbol{r}_{i}\|)$$
(3-1-10)

ここで、 $\delta r_i$ は粒子位置の補正ベクトル[m]、 $l_0$ は粒子径[m]、 $\Delta r_i$ は予め定める粒子間距離の下限値  $al_0$ (本研究ではa = 0.9)に対して粒子ij間距離の最低値( $r_{i,min}$ )から定める補正量であり、以下 のように与える:

$$\Delta r_{i} = \begin{cases} al_{0} - r_{i,min} & (r_{i,min} < al_{0}) \\ 0 & (r_{i,min} \ge al_{0}) \end{cases}$$
(3-1-11)

以上の一連の解析を各計算タイムステップで全ての粒子について行うのが従来のアルゴリズム である。図 3.1-1(a)に、本研究で本年度に検討した新アルゴリズム1を示す。従来の計算と同様 に、近傍粒子探索、熱計算、粒子の状態変数の更新を行った後に、新たに粒子の凝固判定を導入 した。新アルゴリズム1では、粒子の状態変数の一つである固相率が任意に定める閾値を超えた 場合に凝固判定し、それ以降の全ての計算をスキップし、座標を固定することで計算コストを低 減した。このようにして、ラグランジュ的に粒子の状態(固相率)に応じて、任意の計算項目を スキップできるように計算アルゴリズムを改良し、その動作確認(計算時間の短縮の確認)を行 うことを本年度の目標とした。



(a) 新アルゴリズム1 (本年度) (b) 新アルゴリズム1 (次年度)

図 3.1-1: MPS 法の新計算アルゴリズム

但し、本年度に構築したアルゴリズム1は、一定の条件(ある程度、簡単な流れの中で、壁近 傍で溶融物が凝固するような単純なケース)に対して適用できるが、複雑な解析(例えば、流れ の中で溶融物が凝固してクラストを形成し、そのクラストが流れに乗って輸送されるようなケー
ス)には適用が困難であることが予想される。そこで、次年度以降に、図 3.1-1(b)に示すような、 汎用性と数値計算精度/安定性を向上したアルゴリズムを検討し、MPS 法の解析コードに実装す る。新アルゴリズム 2 では、粒子の固相率だけでなく速度も判定条件に加える。凝固判定された 粒子の座標は固定せず、状況に応じて流体と一緒に流れることができるようにする。このとき、 計算コストの大きな一部の計算項目(例えば粘性計算)をスキップすることで、計算の汎用性の 向上、精度/安定性の向上と、計算コスト低減の両立を目指す。

#### 3.1.2. 試解析条件と結果

本年度に改良した MPS 法の新アルゴリズム1を早稲田大学の MPS 法解析コードに実装し、試解 析を実施した。

#### (1) 解析対象

平板間流路中を流れる層流水の凝固による、流路の部分閉塞の実験 [12]を対象に新アルゴリズム1を実装した MPS 法解析コードを用いた試解析を実施した。実験の試験部体系を図3.1-2 に示す。実験では、水がアクリル平板(断熱領域)を流れ、層流水が十分に安定した後に、下流側の冷却銅板区間で冷却され、冷却壁近傍から氷の層が発達し、やがて熱平衡状態に到達して、一定の氷の層が形成された。異なる流量、温度条件に対する氷の層の分布データが得られている。

MPS 法による解析の体系を図 3.1-3 に示す。解析は二次元で実施し、垂直アクリル板(実験で は断熱材により断熱されている)は無視した。粒子径は0.4 mm とした。解析では入口境界部に流 入境界粒子を設置することで、層流水の流入境界を与えることができるため、試験部上流側のア クリル平板区間は解析対象から除外し、冷却銅板の試験部のみを解析対象とした。また、実験で は冷却銅板の試験部の上流から下流に向かって約 300 mm の範囲で氷の層は十分に発達してそれ よりも下流側では氷の層の分布に有意な変化は認められなかった。そこで、解析では計算コスト 低減のために、冷却銅板の試験部の上流側から下流に向かって 300 mm までの区間を解析対象とし た。



図 3.1-2: 層流水の凝固による平板流路閉塞実験の試験部体系



図 3.1-3: 層流水の凝固による平板流路閉塞実験の MPS 法解析体系

実施されたケースAからケースFまでの6つの実験条件を表 3.1-1にまとめる。ここで、異なる流水流量 $\bar{u}_{mo}$ の条件は実験では、以下の関係式から得られるRe数で整理し、報告されている[12]。

$$\operatorname{Re} = \frac{4\bar{u}_{mo}H}{\nu} \tag{3-1-12}$$

ここで、Hは流路チャンネルの幅の 1/2 (=10 mm) である。同様に、異なる冷却条件は銅板の温度 ( $T_W$ )及び流入水のバルク温度 ( $T_0$ )から、次式で与えられる無次元壁温度で整理して報告され ている [12]:

$$\theta_W = \frac{-T_W}{T_0} \tag{3-1-13}$$

一方、MPS 法の解析では、流入粒子のRe数や、無次元壁温度を直接には定義できないため、上記の関係式から流入流水速度、温度、冷却板温度をそれぞれ求め、表 3.1-2 にまとめた条件で解析した。

実験ケース	А	В	С	D	Е	F
Re数[-]		70	00		1200	2300
無次元壁温度 $\theta_W$ [-]	2.5	1.1	0.6	0.4	1.	1
表 3.1-2:層流水の	の凝固によ	る平板流路	閉塞実験の	MPS 法によ	る解析条件	i:
解析ケース	А	В	С	D	E	F
流入水速度 $\bar{u}_{mo}$ [m/s]		0.0	2625		0.045	0.08625
流入水温度 T <sub>0</sub> [℃]	2.0	4.0	4.0	6.0	4	. 0
冷却板温度 <i>T<sub>W</sub></i> [℃]	-5.0	-4.4	-2.4	-2.4	-2	1.4

表 3.1-1: 層流水の凝固による平板流路閉塞実験の条件

### (2) 層流水の凝固に伴う物性(粘性)変化の扱い

本研究では、図 3.1-4(a)及び次式に示すように、水の固相線温度と液相線温度は等しく0 ℃ あると仮定し、固液相変化領域中では温度一定(0 ℃)でエンタルピーの変化に応じて固相率が 線形に変化すると仮定した。

$$T = \begin{cases} T_s + \frac{h - h_{s0}}{\rho C_{ps}} & (h < h_{s0}) \\ T_s & (h_{s0} \le h \le h_{s1}) \\ T_s + \frac{h - h_{s1}}{\rho C_{pl}} & (h_{s1} < h) \end{cases}$$
(3-1-14)

ここで、 $T_s$ は固相線温度 [K]、 $C_{ps}$ は固体(氷)の比熱[ $J/kg \cdot K$ ]、 $C_{pl}$ は液体(水)の比熱[ $J/kg \cdot K$ ]、  $h_{s0}$ は固相線温度に対応するエンタルピー[kJ/kg]、 $h_{s1}$ は液相線温度に対応する比熱[kJ/kg]であり、 すなわち両者の差が潜熱に相当する。

固相率は一般にレオロジーや流体力学の分野で用いられている概念であり、MPS 法では各粒子 がそれぞれ温度、エンタルピーと同様に固相率を状態変数として持ち、その粒子に占める固体の 体積割合を表す。すなわち、次式で表すように、固相率は 1.0 (完全に固体) から 0 (完全に液体) の間の値を取る:



図 3.1-4: 固液相変化に伴うエンタルピーと温度変化の関係図

一般に、固相率の上昇に伴って固液混合物の粘性は指数関数的に上昇することが知られており、 様々な実験から相関式が提案されている。本研究では、MPS 法のアルゴリズム改良の妥当性確認 の対象に層流水の凝固実験を選択したが、一般的な水は固相線温度と液相線温度はほぼ等しく、 固液相変化領域の粘性を詳細に考慮することはそれほど重要ではない。そこで、本研究では暫定 的に、溶融炉心物質(コリウム)の固液相変化領域における粘性の相関式として提案されている Ramacciottiの式 [13]を用いた。

$$\mu = \mu_{lig} exp[2.5 \cdot \gamma \cdot CR] \tag{3-1-16}$$

ここで、 $\mu$ は固液混合物の動粘性係数[ $Pa \cdot s$ ]、 $\mu_{liq}$ は液体の動粘性係数 [ $Pa \cdot s$ ]、CRは感度係数で あり、一般には 4.0 から 8.0 の間の値を取るが[13]、本研究では暫定的に 7.0 とした。但し、固 相率が 0.5 を上回ると、上記の式で算出される動粘性係数をさらに 10 倍し、水が凝固する(氷 る)過程で急激に流れにくくなることをモデル化した。

一方で、実験では層流水が発達し、冷却銅板の試験部で冷却板近傍から氷の層が発達し始めて から、熱平衡に達して氷の層の分布が定常になるまでに相当程度の時間を要しており、その過程 を MPS 法で全て解析して熱平衡になるのを待つと計算時間が膨大になってしまう。そこで、本研 究では、水の潜熱を本来の3.35×10<sup>5</sup>[J/kg]から低減して、熱平衡状態に達するまでの時間を短縮 することを検討した。但し、潜熱をゼロとしてしまうと、図 3.1-4(b)に示すように、液体状態の 水が、ある瞬間突然、凝固するため、後述するように計算精度や安定性が悪化する可能性がある ため、実用的な計算精度と計算時間を得るために妥当な範囲で潜熱を低減し、熱平衡状態に達す る時間を短縮することを検討した。

#### (3) 解析結果

先ず、表 3.1-2 に示した解析ケース B について、必要な数値計算精度・安定性の目安となる解 析結果を得るため、新アルゴリズム1 による計算スキップ判定を行わずに得られた解析結果を、 一般的な MPS 法のアルゴリズムを用いて、凝固判定された粒子の座標を固定した場合に得られる 結果と比べた。図 3.1-5 に示すように、一般的な MPS 法を用いた場合、凝固した氷粒子の配置が 乱れ、粒子間距離や粒子数密度が一定に保たれていない。このような乱れは MPS 法の数値計算精 度悪化要因であり、解析が複雑になるほど解析結果に及ぼす影響が大きくなると考えられる。一 方、本研究では、Corrective Matrix 及び Particle Shifting を導入し、固相率が 0.5 を超えた 流体粒子の粘性は Ramacciotti の相関式 (3-1-16 式) により得られる粘性の 10 倍にして、固相 率が 1.0 に達した粒子の座標を固定した。その結果、凝固した氷粒子の配列は規則正しく、粒子 間距離、粒子数密度がほぼ一定に保たれており、今後、複雑な解析を行った場合にも、高い計算 精度が期待できることが分かる。尚、いずれの解析でも、熱平衡状態に達するまでに要する時間 を短縮するために、水の潜熱は通常の 10%である3.35 × 10<sup>4</sup>[]/kg]とした。



▶ 氷粒子 ● 水粒子 流入境界から150-160 mmの範囲を拡大表示

図 3.1-5:層流水の凝固による平板流路閉塞実験の MPS 法解析結果(計算スキップ無し)

次に、図 3.1-1(a)に示したように、一定の条件を満たした粒子(固相率が1.0に達した粒子) について、計算をスキップするアルゴリズムが有効に作用していることを確認するために、計算 をスキップしなかった場合とスキップした場合の結果を比較した。その結果、両者の解析結果に 有意な差は見られなかった。このとき、図 3.1-6に示すように凝固粒子について圧力計算等をス キップしたため、圧力計算をスキップした粒子については圧力値がゼロになっていることが確か められる。このとき、Xenon プロセッサ E5-2650v2、8CPU コア(16 スレッド)で解析した場合の 計算時間は凝固粒子の計算をスキップしなかった場合(従来手法)約14日間であったが、計算ス キップした場合(本研究手法)では約4日間に短縮された。

凝固粒子の圧力計算をスキップしなかった場合



図 3.1-6: 層流水の凝固による平板流路閉塞実験の MPS 法解析結果(圧力分布)

尚、解析に用いる水の潜熱は小さくするほど熱平衡状態に達するまでに要する計算時間を短縮 できるが、図 3.1-4 に示したように、相変化範囲を狭くし過ぎると、水粒子が急激に凝固するこ とで粒子の配置が乱れ、MPS 法の数値計算精度が悪化する可能性がある。解析に用いる潜熱を通 常の 100 %、10 %、1 %、0 %とした時の結果を図 3.1-7 に示す。潜熱を 10 %程度まで低減しても、 解析結果に有意な差は見られないが、1 %以下にすると、凝固した氷粒子の配列の乱れが顕著にな ることが分かる。そこで、以降では水の潜熱を通常の 10 %とした結果を示す。



図 3.1-7: 層流水の凝固による平板流路閉塞実験の MPS 法解析結果(潜熱の影響)

最後に、本研究で改良したアルゴリズムを用いた解析の定量的な妥当性を確認するために、 Re=700((3-1-12)式)の層流水のケースについて異なる無次元壁温度の実験ケース(A、B、C、D)の解析結果から得られた氷の厚さの分布を実験の測定データと比較して図 3.1-8 に示す。粒子径が0.4 mmであることから、計算値と測定値の差は概ね粒子1~2 個分程度以下であり、高い精度で実験データを再現していることが分かる。但し、通常の数値流体力学計算と同様に、流体の流れが層流から乱流に近づくにつれて、解析で解像する必要のある流れの渦のスケールは小さくなるため、図 3.1-9 に示すようにRe数の増大に伴って、計算精度は悪化(氷の厚さを過小評価)する傾向にあることも確かめられた。



図 3.1-8: 層流水の凝固による平板流路閉塞実験の MPS 法解析結果



図 3.1-9: 層流水の凝固による平板流路閉塞実験の MPS 法解析結果

(Re 数が氷の厚さ分布に及ぼす影響)

16 - 36 - 尚、早稲田大学では JAEA/CLADS 研究(2018(平成 30)~2020(令和 2)年度)において、以下 のような計算タイムステップの効率化手法を開発した:

- 剛体(固体デブリ)の移動が完了するのに十分な時間、通常のタイムステップΔt<sub>f</sub>を用いて伝熱、剛体の移行、流体の流れを解く
- ② 全ての粒子を空間に座標固定し、陰的に伝熱を解き、計算タイムステップを大きくする
- ③ 解析体系中の流体粒子の数がある閾値を超えたら、剛体の再配置を計算するために、計算タイ ムステップを通常のタイムステップに戻し、①に戻る

今後、本研究でも解析体系中のデブリ性状が剛体で近似できる場合があれば、このような手法 と本研究の手法を組み合わせ、さらに計算コストの削減と効率の向上を図ることが可能と考えら れる。

#### 3.1.3. まとめ

デブリ堆積問題の解析に伴う MPS 法の計算コストを低減し、実用的な燃料デブリ堆積分布解析 を可能とする解析アルゴリズムを開発することを目標として、MPS 法の計算コスト増大の主要因 である圧力・粘性計算負荷を低減するために、解析に新たな粒子タイプ(凝固粒子タイプ)を導 入した。また、凝固粒子タイプによる判定を活用し、凝固した粒子は圧力・粘性計算をスキップ できるように、計算アルゴリズム中に粒子タイプによる新たな判定基準を導入した。

MPS 法の解析アルゴリズムを改良し、各計算タイムステップにおいて粒子の固相率等を判定条件に用いて、凝固粒子タイプと判定された粒子はそれ以降の計算をスキップできるようにした。 平板間流路を流れる層流水の凝固実験を対象にしたベンチマーク試解析で圧力分布等を出力し、 粒子タイプによる計算スキップとそれに伴う解析時間の短縮を確認した。

### 3.2. 模擬デブリ流下実験

模擬デブリ流下実験は、MPS 法の妥当性確認と実機燃料デブリ堆積分布予測に資するために模擬デブリ流下・成層化データを取得可能な実験系を構築することを目標としている。本年度の実験系は、粘性流体の流出流量比を時系列制御可能な熱流動制御系、デブリ流下状態を複数方向から可視化可能な計測系から構成した。また、初期に流出したデブリによりペデスタルコンクリートが浸食される現象を模擬した実験を行った。

#### 3.2.1. 実験装置

図 3.2-1 に、本年度構築した模擬デブリ流下実験の実験装置の概要(正面図)を示す。図 3.2-2 は実験装置の上面図を、図 3.2-3 は実験装置における滴下材料の流下方法を示す。滴下材料を加 熱及び流下させるため、坩堝を使用した。坩堝はカーボン製で周囲にラバーヒーターを巻き、そ の上に断熱材を巻き付けた。坩堝の底面には内径 2 mmのノズル孔から流下させる構造とした。図 3.2-4 にカーボン製坩堝の寸法図を示す。坩堝の設置は、ノズル先端がペデスタル模型床面に対 し衝突せず流量制御しやすい高さで設定した。また、坩堝及びノズル内部には熱電対を取り付け、 坩堝内部の滴下材料の温度を初期温度、ノズルを通過する際の滴下材料の温度を流下温度として 計測できるようにした。実験は、ノズルに栓をした状態で坩堝に模擬デブリを入れて加熱し、滴 下材料が所定の温度に維持した。溶融物の出湯と停止は、ディスペンサとコントローラーにより 電子制御した。実験に使用するペデスタル模型はパラフィン材で三次元造形した。ペデスタル形 状は東京電力福島第一原子力発電所2号機と3号機の形状を模擬し、寸法を1/100に縮小して用 いた。



図 3.2-1:模擬デブリ流下実験装置の概要(正面図)



図 3.2-2:模擬デブリ流下実験装置の概要(上面図)



図 3.2-3:模擬デブリ流下実験装置の概要(滴下材料の流下方法)

JAEA-Review 2020-035



カーボン製坩堝の寸法図

図 3.2-4: 模擬デブリ流下実験用カーボン製坩堝の寸法図

#### 3.2.2. 流下重量速度の確認

坩堝から流下させる溶融物の流量を実験によらず同一にするため、予備実験を通じてノズル内 径及び吐出圧を調整し、確認した。図 3.2-5 に一例として、滴下材料として溶融塩、初期温度が 160 ℃及び200 ℃、着色剤の有無についての流下重量の時系列を示す。全ての実験条件に関して、 3.4~4.1 g/s の流下重量速度範囲に制御しながら流下できることを確認した。



図 3.2-5:模擬デブリ流下実験装置の流下重量速度の確認結果

#### 3.2.3. 実験パラメータ

表 3.2-1 に本年度実施する実験パラメータを示す。滴下材料は物性値が広範な温度範囲におい て既知である溶融塩、鉛ビスマス、シリコーン5 K及びシリコーン200の4ケースとし、ペデス タル模型の床の浸食を伴う流下挙動の可視化データを取得することとした。ベースケースとして 用いる溶融塩は、コンクリートを模擬するパラフィンより密度が大きいことから硝酸系の溶融塩 NeoSK-SALTを選定した。その他にさらに密度が大きい鉛ビスマス(共晶組成)と、密度が小さい シリコーンを選定した。シリコーンに続く記号5 K及び200 は動粘性係数がそれぞれ5,000 mm<sup>2</sup>/s 及び200 mm<sup>2</sup>/s であることを示している。

パラメータ		員数	内容		
ペデスタル	大きさ	1	1/100 モデル		
模型	材質	1	パラフィン:融点 68~70 ℃		
		1	富士フイルム和光純薬社製(製造コード:162-13265)		
流下場所		4	4 点		
滴下材料			溶融塩(NeoSK-SALT 比重:1.72(500 ℃)、融点 142 ℃		
(着色剤)			⇒着色剤:LION スタンプインキ 0.4%配合		
			シリコーン5K(Element_14_PDMS_5K-J 比重:0.975(25℃)、		
		3	動粘性係数 5,000 mm²/s)		
			シリコーン 200 (Element_14_PDMS_200-J 比重:0.969 (25 ℃) 、		
			動粘性係数 200 mm <sup>2</sup> /s)		
			⇒着色剤:Silc Pig(Blue&Black)0.2 %配合		
ノズル径		2	内径 2 mm、3 mm		
吐出圧		F	1 kPa 4 kPa 5 kPa 7 kPa 8 kPa		
		Э	(下記流量範囲内に制御するため、条件別に調整)		
流量	量  1  3.5~4.1 g/s の範囲で制御		3.5~4.1 g/s の範囲で制御		
初期温度 2 160 ℃、200 ℃		160 ℃、200 ℃			
落下高さ		1	22 mm		
床条件			床下 0.1 m にシリコーン 5 K または 200 を任意の量設定		

表 3.2-1:模擬デブリ流下実験の実験パラメータ

滴下位置は図 3.2-6 に示す4点とした。ノズルは、内径2 mm、及び3 mm のいずれかを使用す ることとし、先端を金属製にすることで膨張を抑制し流量が変化しないようにした。流量は重量 速度範囲 3.4~4.1 g/s で制御した。滴下材料の初期温度は、流下開始時の温度を初期温度とし 160 ℃、200 ℃の2水準とし、異なる温度によるパラフィン材のアブレーションへの影響を確認 できるようにした。シリコーン樹脂の落下高さについては、ノズルの先端がペデスタル模型床面 に触れないように、床面からノズル先端の高さを22 mm とした。ここで床面とは滴下材料が衝突 するペデスタル床面を意味している。表 3.2-2 に使用したパラフィンの物性値を示す。富士フイ ルム和光純薬社製パラフィンで製造番号 162-13265 を用いた。また使用したシリコーン樹脂及び 溶融塩の物性値を表 3.2-3 から表 3.2-5 に示す。溶融塩は、NeoSK-SALT、シリコーン樹脂は Momentive 社製 Element 14 PDMS を用いた。また、流下材料の流動の可視化するために着色剤を 用いた。溶融塩の着色剤は LION スタンプインキ (0.4 %配合)、シリコーン樹脂の着色剤は Slic Pig Blue & Black (0.2%配合)を使用した。

パラフィン		富士フイルム和光純薬社製(製造コード 162-13265)			
種類		155P (JIS K 2235)			
融点		68~70 °C			
油分		0.2 mass%			
<i>会</i> 1.7 庄	25 °C	15			
針入度	35 ℃	20			
粘度(100℃	C)	6.4 mm <sup>2</sup> /s			
色相		セーボルト +30			
应由	25 °C	$0.927 \text{ g/cm}^3$			
省皮	90 °C	0.783 g/cm <sup>3</sup>			
引火点		262 °C			
平均分子量 (ガスクロ法)		472			

表 3.2-2: 模擬デブリ流下実験に用いたパラフィンの物性値

表 3.2-3: 模擬デブリ流下実験に用いたシリコーン樹脂5Kの物性値 (5Kは25℃において動粘性係数が5000 mm<sup>2</sup>/sであることを意味している)

シリコーン樹脂		Momentive 社製 Element14* PDMS 5K-J				
外観		無色透明				
比重 (25 ℃)		0. 975				
粘性係数(25	°C)	$5000 \text{ mm}^2/\text{s}$				
揮発分(150°	C, 24 h)	0.3 %				
粘度温度係数		0. 6				
屈折率		1.404				
引火点		330 °C				
流動点		-40 ℃以下				
表面張力		21.3 mN/m				
熱伝導率		$1.6 \times 10^{-1}$ W/(m·K)				
	25 °C	1.51 J/(g·K)				
计教	40 °C	1.51 J/(g·K)				
	100 °C	1.55 J/(g·K)				
	200 °C	1.63 J/(g·K)				
体膨張率		$0.94 \times 10^{-3} 1/K$				
体積抵抗率		1×10 <sup>14</sup> Ω·cm 以上				
絶縁破壊電圧 (2.5 mm 当たり)		35 kv 以上				
比誘電率 (50 Hz)		2.75				
誘電正接 (50 Hz)		1×10 <sup>-4</sup> 以下				

表 3.2-4: 模擬デブリ流下実験に用いたシリコーン樹脂 200 の物性値 (200 は 25℃において動粘性係数が 200 mm<sup>2</sup>/s であることを意味している)

シリコーン樹脂		Momentive 社製 Element14* PDMS 200-J				
外観		無色透明				
比重 (25 ℃)		0.969				
動粘性係数(2	25 °C)	200 mm <sup>2</sup> /s				
揮発分(150°	C, 24 h)	0.3 %				
粘度温度係数		0. 6				
屈折率		1. 403				
引火点		330				
流動点		-50 ℃以下				
表面張力		20.9 mN/m				
熱伝導率		$1.6 \times 10^{-1}$ W/(m·K)				
	25 °C	1.51 J/(g·K)				
と教	40 °C	1.51 J/(g·K)				
山杰	100 °C	1.55 J/(g·K)				
	200 °C	1.68 J/(g·K)				
体膨張率		$0.96 \times 10^{-3} 1/K$				
体積抵抗率		$1 \times 10^{14}$ Ω·cm 以上				
絶縁破壊電圧		35 ky 1/ -				
(2.5 mm 当たり)						
比誘電率 (50 Hz)		2.74				
誘電正接(50	Hz)	1×10 <sup>-4</sup> 以下				

溶融塩		綜研テクニックス社製(製品名 : NeoSK-SALT)			
凝固点		142 °C			
比重 (500 ℃)		1.72			
粘度 200 ℃		7.6 mPa•s			
	400 °C	1.8 mPa•s			
	600 °C	1.0 mPa•s			
融解熱		84 kJ/kg			
熱伝導率(200~600 ℃平均)		0.60 W/mK			
比熱(200~600 ℃平均)		1.5 kJ/kgK			

表 3.2-5: 模擬デブリ流下実験に用いた溶融塩の物性値



図 3.2-6:模擬デブリ流下実験の流下位置の概要図 (CO:中央部 N1:北側① N2:北側② E1:東側①)

## 3.2.4. 計測項目

表 3.2-6 に本年度実施する計測項目を示す。計測項目は、ビデオカメラによる滴下材料の流動 の可視化、サーモグラフィーによる滴下材料温度の可視化、及び台はかりによる重量時系列とな る。流動を可視化するビデオカメラは3台使用する。1台(Cam1)は、ドレンサンプピットの並び が垂直方向になるように配置し、反対側に2台目(Cam3)を設置して流下した滴下材料が床面上 とドレンサンプピット部を流れる際に起きるアブレーションを観察できるようにした。Cam1、Cam3 の可視化に対して真横から観察できるように、3台目(Cam2)のビデオカメラはドレンサンプピッ トの並びに対して一直線上に設置した。流出する温度を可視化するサーモグラフィーは、ペデス タル模型のスリット側から Cam2、Cam3 に対して斜めに設置し流下した滴下材料の温度を観察でき るようにした。台はかり1、2、3は、それぞれ受け皿となる容器を分けてドレンサンプピット1、 2及びスリット部から流下した滴下材料の流下重量を時系列で計測できるようにした。

表	3.2-6	:	模擬デ	ブ	IJ	流下	「実験の	)計測項目
---	-------	---	-----	---	----	----	------	-------

計測機器		計測項目			
Cam1		流動の可視化			
ビデオカメラ	Cam2	流動の可視化			
	Cam3	流動の可視化			
サーモグラフィー		流動するシリコーン樹脂、溶融塩、PbBi の温度の可視化			
1    台はかり  2					
		滴下時の重量時系列の計測			
	3				
レーザー変位計		パラフィン模型、溶融塩模型、PbBi 模型の変化量			

### 3.2.5. 実験条件

実験条件は、実験パラメータを元に表 3.2-7 に示す 12 ケースとした。滴下場所の影響につい て4ケース、事前液張の影響について5ケース、滴下材料の影響について3ケースを中心に滴下 材料の初期温度の影響も含めて実験した。事前液張は、サンプピットが水没している場合の影響 を把握するために、水に見立ててシリコーン油を流下実験前に注入した場合を示している。溶融 塩を用いているため、水に代替してシリコーン油を用いた。溶融塩の融点は 142 ℃であるので、 初期温度が 160 ℃と 200 ℃の場合には過熱度は 18 K と 58 K である。

No.	滴下 材料	滴下 位置	ノズル内 径(mm)	初期温 度(℃)	吐出圧 (kPa)	流下後の 回収量(g)	床条件
1	溶融塩	CO	2	160	4	23.4	
2	溶融塩	N1	2	160	4	25.3	床下 0.1 m シリコーン 200, 4.0 g
3	溶融塩	N1	2	160	4	27.1	床下 0.1 m シリコーン 5 K, 4.7 g
4	溶融塩	N1	2	200	4	22. 3	床下 0.1 m シリコーン 5 K, 5.0 g
5	溶融塩	E1	2	160	4	25.2	
6	溶融塩	N1	2	160	4	28.8	
7	溶融塩	N2	2	160	4	31.0	
8	溶融塩	N1	2	160	5	25.7	床上 0.1 m シリコーン 5 K, 8.9 g
9	シリコーン 5 K	N1	3	200	7	10.4	
10	シリコーン 5 K	N1	3	160	8	10.7	
11	シリコーン 200	N1	2	160	5	9.5	
12	PbBi	N1	2	160	1	127.2	

表 3.2-7: 模擬デブリ流下実験の実験条件表

# 3.2.6. 実験結果

表 3.2-7の実験条件表に基づいて模擬デブリ流下実験を行った。各実験条件で以下に着目して、 次年度以降に実施する MPS 法の解析結果の妥当性確認に必要なデータが得られることを確認した:

- 実験中の溶融物(滴下材料)の流動及びその温度分布
- 実験後に凝固した滴下材料の形状及び分布
- 実験後のペデスタル模型表面形状

#### (1) 滴下場所の影響

実機事故時には炉心物質がペデスタル領域中の異なる場所に移行した可能性が考えられるため、 滴下場所が溶融物の流動や分布に及ぼす影響を観察した。

- 中央部(C0)から滴下した場合は、図 3.2-7に示す実験条件 No.1の様子から分かるように、
  四方向に対称性を保ちながら左右のサンプピットに流入し、サンプピット内が滴下材で充填
  された後も、対称性を維持してペデスタル面に一様に拡がった。
- 北側(N1)から滴下した場合は、図 3.2-8 に示す実験条件 No.2の様子から分かるように、滴 下直後に関しては中央部(C0)の場合と同様に四方向に対称性を保ちながら左右のサンプピ ットに流入したものの、充填された後は南側のペデスタル面から北側に拡がる流れが生じた。
- 東側(E1)から滴下した場合は、図 3.2-9 に示す実験条件 No.5 の様子から分かるように、滴 下位置に近い東側のサンプピット内に優先的に流入し、満たされた後に西側のサンプピット へ流入し、最終的に北側のペデスタル面から南側に拡がる流れが生じた。
- 北側(N2)から滴下した場合は、図 3.2-10 に示す実験条件 No.7 の様子から分かるように、 滴下直後に関しては中央部(C0)の場合と同様に四方向に対称性を保ちながら左右のサンプ ピットに流入し、N1 と相対的に充填後は北側のペデスタル面から南側に拡がる流れが生じた。
- 固化後の模擬デブリに関しては、図 3.2-11 に示すように、C0 の場合は西側に、E1 の場合は 南側に、N1 の場合は東側に先行して流下し、N2 の場合において、最も同心円状に対称に流下 が進展したと考えられる。

#### (2) 事前床下 0.1 m シリコーン浸液張りの影響

実機事故時には炉心物質がペデスタルに移行した際にペデスタル領域に一定程度の水が存在し た可能性が考えられる。そこで、滴下材に比べ温度及び密度が低いシリコーン樹脂を事前に浸液 張りし、それが溶融物の流動や凝固時の分布に及ぼす影響を観察した。

- シリコーン 200 の液張の場合、図 3.2-8 に示す実験条件 No.2 の様子から分かるように、東 側のサンプピットのシリコーン樹脂と溶融塩がペデスタル面の高さで衝突し、その反発力で 反対側の西側のサンプピットのペデスタル面の高さ双方の流体が再衝突を起こし、その後は 溶融塩が北側にシリコーン樹脂が南側に相分離するものの、時間と共に南側から北側に回り 込む流れと共に混合された。
- シリコーン 200 に比べ粘度が高いシリコーン5 kの液張の場合は、図 3.2-12 に示す実験条件 No.3の様子から分かるように、東側のシリコーン樹脂と溶融塩が最初に衝突し、その直後 に西側で同様の衝突が生じた後、ペデスタル面の高さで南側から拡がり北側に流入する流れ を確認した。また、シリコーン 200 に比べて粘度が高いため、溶融塩とシリコーン樹脂の混 合は一連の混合過程の終盤で生じた。
- 床上にシリコーン5kを液張した場合は、図 3.2-13に示す実験条件No.8の様子から分かる ように、溶融塩の流入と共に左右のサンプピットの位置上へ最初に流入し、その後に北側と 南側にそれぞれ拡がっていく流れとなった。
- 固化後の模擬デブリに関しては、図 3.2-14 に示すように、シリコーン5 Kの液張の場合、 床上と床下の条件の違いにより、結果に顕著な差異は生じなかった。一方液張材の粘度の影

響の方が結果に顕著に現れ、シリコーン5Kよりも粘度の小さいシリコーン200の場合は、 滴下材料との混合が促進されるため、サンプピットへの充填やペデスタル面への流動は複雑 になり、結果的に南北方向に非対称かつサンプピットへの固化形状も相対的に異なるものと なった。

### (3) 滴下材料の影響

実機事故時には密度や粘性の異なる多様な炉心物質がペデスタルに移行したと考えられる。そ こで、滴下材に密度や粘性の異なる溶融塩、シリコーン樹脂、鉛ビスマスを用い、それらが溶融 物の流動や凝固時の分布に及ぼす影響を観察した。

- 滴下材に溶融塩を用いた場合は、先述した(1)の北側(N1)(図 3.2-8 に示した実験条件 No.2) の通りである。
- 滴下材にシリコーン 200 を用いた場合は、図 3.2-15 に示す実験条件 No.11 の様子から分かるように、2 か所のサンプピット及び北側のペデスタル面へ一様に流れていき、最終的に南側のペデスタル面に拡がった。
- 滴下材に鉛ビスマスを用いた場合は、図 3.2-16 に示す実験条件 No.12 の様子から分かるように、西側のサンプピットが東側のサンプピットに先行しながら充填され、双方のサンプピットが充填された後は四方向一様にペデスタル面全体に拡がった。
- 固化後の模擬デブリに関しては、図 3.2-17 に示すように、滴下材料に起因した顕著な差異 は見られなかった。

#### (4) 初期温度の影響

実機事故時には初期温度の異なる多様な炉心物質がペデスタルに移行したと考えられる。そこ で、滴下材の初期温度を変更し、それが溶融物の流動や凝固時の分布に及ぼす影響を観察した。

- ① 溶融塩、床下 0.1 m シリコーン 5 k 浸液
- 滴下材の初期温度が 160 ℃の場合は、(2)の 2 項目(図 3.2-12 に示した実験条件 No.3)の 通りである。
- 滴下材の初期温度が200 ℃の場合は、前記条件と比べて滴下材料の温度が高温であるが故に、
  図 3.2-18 に示す実験条件 No.4 の様子から分かるように、床下のシリコーン樹脂への熱伝導によりシリコーンの粘性が下がるため、溶融塩が左右のサンプピット内に充填されるシリコーン上に流入した後に、南北方向に溶融塩が、東西方向に床下のシリコーンが広がる流れが 生じた。
- 固化後の模擬デブリに関しては、図 3.2-19 に示すように、初期温度が高い程、液張させたシリコーンと高温で混合し、ペデスタル面上に固化することが確認された。逆に初期温度が低い場合は、サンプピット内に優先的に充填される傾向となった。

② シリコーン 5K

滴下材の初期温度が160 ℃の場合(実験条件No.10)と200 ℃の場合(実験条件No.9)の場合の実験の様子をそれぞれ図 3.2-20 及び図 3.2-21 に示す。温度差による粘性の違いによ

り流入及び充填速度は異なるものの、双方の条件共に、左右のサンプピットに一様に充填さ れ、その後にペデスタル面一様に拡がる流れが生じた。

● 固化後の模擬デブリに関しては、図 3.2-22 に示すように、初期温度が高い条件では、ペデス タル面やサンプピットへの浸食が相対的に進行したと考えられる。

これらの実験によるペデスタル模型床アブレーション後の表面形状は、レーザー変位計を用いて計測して確認した。一例として、実験条件 No. 12 における計測結果を図 3.2-23 に示す。図中の x に続く数字は計測位置を示している。



図 3.2-7:流動観察結果/No.1 (滴下材料:溶融塩 流下位置:C0 初期温度:160 ℃)



図 3.2-8:流動観察結果/No.2 (滴下材料:溶融塩 流下位置:N1 初期温度:160 ℃、床条件:床下 0.1 m, シリコーン 200, 4.0 g)



図 3.2-9:流動観察結果/No.5 (滴下材料:溶融塩 流下位置:E1 初期温度:160 ℃)



図 3.2-10:流動観察結果/No.7 (滴下材料:溶融塩 流下位置:N2 初期温度:160 ℃)

JAEA-Review 2020-035



図 3.2-11: 固化後の模擬デブリ/滴下場所の影響(滴下材料:溶融塩 初期温度:160 ℃)



図 3.2-12:流動観察結果/No.3 (滴下材料:溶融塩 流下位置:N1 初期温度:160 ℃、床条件:床下0.1 m, シリコーン5 K, 4.7 g)



図 3.2-13:流動観察結果/No.8 (滴下材料:溶融塩 流下位置:N1 初期温度:160 ℃、床条件:床上0.1 m, シリコーン5 K, 8.9 g)



図 3.2-14: 固化後の模擬デブリ/液張の影響 (滴下材料:溶融塩 流下位置:N1 初期温度:160 ℃)



図 3.2-15:流動観察結果/No.11 (滴下材料:シリコーン200 流下位置:N1 初期温度:160 ℃)



図 3.2-16:流動観察結果/No.12 (滴下材料:PbBi 流下位置:N1 初期温度:160 ℃)



図 3.2-17: 固化後の模擬デブリ/滴下材料の影響 (流下位置:N1 初期温度:160 ℃)



図 3.2-18:流動観察結果/No.4 (滴下材料:溶融塩 流下位置:N1 初期温度:200 ℃、 床条件:床下0.1 m, シリコーン5 K, 5.0 g)



図 3.2-19: 固化後の模擬デブリ/溶融物温度の影響(液浸条件) (滴下材料:溶融塩 流下位置:N1 床条件:床下 0.1 m, シリコーン 5 K)



図 3.2-20:流動観察結果/No.10 (滴下材料:シリコーン5K 流下位置:N1 初期温度:160 ℃)



図 3.2-21:流動観察結果/No.9 (滴下材料:シリコーン油5K 流下位置:N1 初期温度:200 ℃)



図 3.2-22: 固化後の模擬デブリ/溶融物温度の影響 (滴下材料:シリコーン5K 流下位置:N1)



図 3.2-23:アブレーション後模型表面形状計測結果/No.12
## 3.2.7. まとめ

粘性等の異なる複数種類の溶融物を異なる履歴で流下させた場合の、模擬デブリ流下・成層化 データを取得可能な実験系を構築することを目標として、本年度の実験系は、粘性流体の流出流 量比を時系列制御可能な熱流動制御系、デブリ流下状態を複数方向から可視化可能な計測系から 構成した。また、初期に流出したデブリによりペデスタルコンクリートが浸食される現象を模擬 した実験を行い、MPS 法の妥当性確認用データが得られることを確認した。

異なる浸漬状態(液位及び粘性)のペデスタルへの溶融デブリ流下を模擬し、模擬デブリの粘 性、温度、流下流量・位置を変化させて得られる模擬ペデスタルのアブレーションや溶融デブリ の混合流動状態及びその凝固物の三次元形状を対比した。その結果、初期の模擬ペデスタルに液 が浸漬している場合に顕著に浸食が抑制される結果が得られた。

#### 3.3. 実機デブリ流下履歴の同定(連携先:原子力機構)

本節では、実機デブリ流下履歴を同定するために有用な既存情報・最新知見のレビュー結果を まとめ、それらの理解から推定される2・3号機における炉心物質流出挙動の概要をまとめる。

#### 3.3.1. 既存情報・最新知見のレビュー

## (1) RPV からペデスタルに至る領域の構造情報の把握

BWR の特長として原子炉圧力容器(RPV)の下部プレナムから下方に林立する CRD (Control Rod Drive mechanism) ハウジングがある(図 3.3-1参照)。これらの CRD ハウジングはその下端で支持金具に支えられ、この支持金具を載せたサポートバー(黄色)がビーム(赤)から降ろされた ハンガーロッド(青)で支えられている。ビームは梯子を横にして立てたような形状で、7体が ペデスタルコンクリートを横切る形で東西方向に架けられている。このように BWR の RPV バウン ダリは、ペデスタルへのデブリ流出挙動評価の観点からは RPV 単独ではなく、CRD ハウジングと その支持構造群を含むシステム構成の考慮が必要である。すなわち、RPV 破損は直ちにペデスタ ルへのデブリ流出にはつながらないことを踏まえた評価が重要である。特に3号機では、後述の ように、固体主体の燃料デブリが数時間かけて下部プレナムに移行した可能性が高く、RPV と CRD ハウジング等支持構造のシステムとしての段階的な損傷の進展を考える必要がある。また、RPV の 直下には積層アルミ薄板からなる保温層が設置されており、溶融金属等が RPV から流下するよう な状況では、溶融物の径方向の流れや、融点の低いアルミ(融点約800℃)が溶融物に溶け込む ことで溶融物の融点が著しく降下する可能性に留意する必要がある。



図 3.3-1:福島第一原子力発電所2・3号機のRPV下部の構造概要

CRD ハウジング領域を通過したデブリはペデスタル(ここでは原子炉圧力容器ペデスタルコン クリートの内側領域を指す)へと落下するが、この領域には図 3.3-2 に示すように、制御棒交換 のための作業用プラットフォーム等がある。これらの構造はステンレス製のフレームとそれには め込まれたグレーチングからなり、上下 2 層構造になっている。グレーチングの損傷の分布とペ デスタル落下物の分布の対応が流出物の流動性等を推定する手がかりとなる。



図 3.3-2:福島第一原子力発電所2・3号機のペデスタル内部の構造概要

以上のように、2・3 号機の RPV からペデスタルに至るデブリ流出経路の構造について調査し、 CRD ハウジングとその支持構造群を RPV と合わせた RPV バウンダリシステムとしてとらえること の重要性を把握した。

#### (2) 福島2・3号機に対する内部調査結果に基づく推定

2号機ではミュオンを活用した観測の結果、RPV下部に高密度の物質が存在していると評価された[14]。ロボットカメラを活用したペデスタル領域の調査の結果、作業用プラットフォームのグレーチングに広範に堆積物が付着しているものの、プラットフォームのフレームや一部のグレーチングは残留しており、グレーチング脱落部の下等で堆積物の高さがやや高いものの、その他の領域では堆積物の高さは概ね40-70 cm程度以下であることが確認された[15]。また、グレーチング脱落部の直下近傍のペデスタル領域堆積物の上に燃料集合体(あるいは燃料を含まない「ダミー燃料」)の上部タイプレートと思われる構造物が確認された。

これらの情報を踏まえ、これまでの研究では2号機ではかなりの燃料が RPV 下部に残留し、ペ デスタルに移行した炉心物質の量は限られることが推定されている。また、炉心燃料の移行経路 はグレーチング脱落部が主体であり、移行経路上の構造物の融点程度以下の温度で移行したと推 定されている。また、内部調査結果に基づくと、2号機では CRD ハウジングの多くが当初の配置 を保ち残留していると思われ、これらの CRD ハウジングの間を上部タイプレートと思われる大き な構造物が落下したものとは考え難い。一方、CRD ハウジングの最外周部とペデスタルコンクリ ート壁内面の間には数十 cm 程度の比較的に大きな隙間があるため、仮に RPV の側部が破損している場合にはこの領域から上部タイプレートと思われる構造物が落下した可能性がある。

3 号機ではミュオンを活用した観測の結果、RPV 下部に2 号機で観測されたような高密度物質の 存在は確認されなかった [16]。ロボットカメラを活用したペデスタル領域の調査の結果、作業用 プラットフォームのグレーチングは広範囲に脱落しており、ペデスタル領域の堆積物の高さは 2 m程度以上であり、中央付近に小山状の盛り上がりが見られ、その上部と CRD ハウジングが林立 する領域の間に CRGT (Control Rod Guide Tube) と見られる構造が残っていることが確認された が、多数の CRGT のペデスタルへの落下や、2 号機と同様な上部タイプレートと思われる構造の落 下も確認された [16] [17]。

これらの情報を踏まえ、従来の研究では3号機では炉心燃料の相当な割合がペデスタルに移行 したと推定されている。また、デブリ流出の末期には、RPV下部プレナムに堆積していた燃料デブ リがその上部に位置していた CRGT と共にペデスタルへと移行し、上部タイプレートと思われる構 造物もその際に落下したと推定されている。

図 3.3-3 は内部調査時の撮影映像を元に RPV 下部の CRD ハウジング下部を 3D データ化したも のであるが、CRD ハウジング群を支える役割を担う 7 つのサポートビームの中央ビームの下が空 洞化しているように見える。それにもかかわらず、CRD ハウジングは多数残留しているように見 受けられる。これらのことは RPV-CRD ハウジング構造システムの領域内に残留する炉心物質が結 果的に CRD ハウジングを支えていることを示唆しており、流出した粘性の大きな炉心物質と同質 のものが RPV-CRD ハウジング構造システム領域に残留している可能性がある。また、中央の空洞 化領域は、粘性の大きな炉心物質の流出パスを形成していた可能性を示唆する。ペデスタル堆積 デブリが全体に約 2 m の高さを持ち、中央で小山状に盛り上がっていることは、このデブリ落下 の終了時のデブリが高粘性であったことを示しており、他の内部調査結果の理解とも整合する。

尚、高さ2mの堆積物はペデスタル内だけでも約45m<sup>3</sup>の体積に相当する。これに対し、全燃料インベントリ(約107t)が仮にポロシティー40%のデブリを形成した場合の体積は約18m<sup>3</sup>に過ぎない。これらのことから、3号機ペデスタルの堆積物中には多くの炉心外構造物(RPV下部やCRDハウジング等の一部、及びグレーチングやそのフレーム、CRD交換機などの構造材)やかなりの空隙が存在するものと思われる。

以上のように2号機と3号機ではペデスタルに移行した炉心物質の質と量に大きな差があるものと推定されている。その差は、事故進展に伴う炉心物質の熱状態等(温度、溶融割合、流動性等)の差に起因している可能性がある。

JAEA-Review 2020-035



図 3.3-3:3 号機ペデスタル領域調査時の映像に基づく 3D イメージ

## (3) PCV 内外から採取された試料の分析結果に基づく推定

JAEA では他の機関と協力し、IRID 補助金事業として、福島第一原子力発電所(1F)の PCV(原子 炉格納容器)内外で取得したサンプルの分析を進めている[18][19][20][21][22]。図 3.3-4 に主なサンプル取得部位を示す [22]。これらの部位から、1~3 号機の各 PCV 内部調査時に使用 したロボットの表面の付着物スミアサンプル等を取得しており、詳細な分析がなされている。



この図は、経済産業省/平成28年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金事業 (燃料デブリ性状把握・分析技術開発)により得られたものです。

図 3.3-4:福島第一原子力発電所の1~3号機のPCV内外から取得したサンプルの部位[22]

図 3.3-5 はこれらのサンプル分析結果に基づきウラン(U)含有粒子を分類したものである [22]。 U 含有粒子は以下の2種類に分類されている:

- タイプ I 粒子:溶融燃料落下時に飛沫として発生したと考えられる(溶融燃料起源の)粒子 等であり、冷却時に Zr リッチ相と U リッチ相に分離している。1~3 号機全てでこのような 粒子が含まれたサンプルが取得されている。
- タイプ II 粒子:ウラン蒸発成分の一次凝集により生成したと考えられるナノ粒子と、それらの二次凝集による成長により生成したと考えられるミクロン粒子等の微小な球状の U 含有粒子であり、2 号機のオペレーション・フロアから取得したサンプル等に含まれている。



図 3.3-5:1~3 号機 PCV 内外から取得したサンプルの分析結果に基づく U 含有粒子の分類 [22]

透過型電子顕微鏡 (TEM) による分析の結果に基づき整理されたタイプ I 粒子の特長を図 3.3-6 にまとめる。ここでは  $(U, Zr) 0_2 (U リッチ相) 主体のもの、U リッチ相に Zr リッチ相((Zr, U) 0_2)$ が含まれるもの、及びUリッチ相にα-Zr(0)が含まれるもの、の3種類に分類して示している。 全号機の PCV 内サンプルから溶融燃料起源の粒子(タイプ I 粒子)が認められた。また、全号機 に共通にみられる α-Zr(0)は、Zrを含む炉心物質が高温化した状態から急冷されたことを示して おり、1~3 号機いずれにおいても、燃料デブリと冷却材が接触すること等による急冷があった可 能性を示している。また、1~3 号機から採取されたサンプルに含まれるタイプ I 粒子の粗密や組 成等は多様であり、特に3号機では一部性状の異なるU含有粒子も含まれることなどが分かって いる。尚、サンプル全体の特長の観点では ICP-MS による元素ごとの比率の情報が得られている。 個々の U 含有粒子に対する TEM 分析結果とサンプル全体の元素比の情報を併せて活用することが 重要であるが、3 号機の PCV 内サンプルに占める U 含有割合が 1・2 号機 PCV 内サンプルに比べて 顕著に高いことが確認されている。このことは、3 号機の PCV 内サンプル(滞留水中の浮遊物や 構造物への付着物)に含まれるU含有物質が燃料デブリから発生した状況が1・2号機のそれと異 なっていた可能性を示している。例えば、後述のように、3号機のペデスタル燃料デブリはS/C(サ プレッション・チャンバー)の水が繰り返し注がれて急冷されていた可能性があり、その過程で U含有粒子を多量に発生させていた可能性がある。

以上のように試料分析が進むにつれて、断片的ながら燃料デブリの性状やその形成過程に係わる情報が得られつつある。

- 全号機のPCV内サンプルから溶融燃料起源の粒子が認められた。(タイプI粒子)
- 3号機の一部粒子には、性状が異なるものがある。



図 3.3-6:1~3 号機の PCV 内から取得したサンプルの分析結果例

## (4) 事故時プラントデータ分析結果に基づく推定

図 3.3-7 に 2・3 号機の事故時プラントデータとデブリのペデスタル移行時間帯(推定)の関係 [23]を示す。以下においては 2、3 号機におけるデブリのペデスタル移行に着目した分析結果 を示す。



図 3.3-7:事故時プラントデータとデブリのペデスタル移行時間帯(推定)の関係

2 号機についての従来研究からは炉心物質のペデスタル移行が 2011 (平成 23) 年 3 月 15 日の 朝以降に生じたとの漠然とした理解は得られていたが、同日午前 7:20~11:25 までの間、圧力な どのデータが取得されていない時間帯があり、ペデスタル移行時間の評価が困難であった。これ に対して最新の研究では、3 月 15 日早朝からの僅かな圧力変化や、現場で撮影された写真、ライ ブカメラ映像、サイトにおける放射線レベルなどを総合的に評価し、ペデスタルへの移行時間の 推定がなされている。

2 号機については図 3.3-8 に示すように、2011 (平成 23) 年 3 月 14 日の午後 6 時頃から RPV 圧 力が低下し、その後に特徴的な 3 度の RPV 圧力ピークが測定されている。これらはそれぞれ第一、 第二、第三圧力ピークと呼ばれている。3.3.1(5)に後述する事故進展解析を用いた研究ではこの 間に炉心燃料の一部が炉心部から RPV 下部プレナムに移行したと推定されている。その後、3 月 15 日午前 2:20 頃に RPV 圧力と PCV 圧力 (D/W 圧力)がそれまでの約 0.725 MPa から 0.750 MPa に 上昇し、D/W の格納容器雰囲気モニタ (CAMS)の指示値が顕著に増加している。これらは、炉心部 に残留していた炉心物質の下部プレナムへの移行の結果と推定されている。

3月15日の午前4時頃から RPV 圧力と PCV 圧力 (D/W 圧力) が緩やかに低下している。その後、 圧力データが取得されていない時間帯があるが、その間にライブカメラ映像や現場で撮影された 写真が湯気のような白煙の発生をとらえている。図 3.3-8 に示すように、同日の午前8:58 時点 での現場写真には2号機ブローアウトパネル付近から放出される白煙が見られ、この頃に発電所 の正門付近の γ線モニタリング値は急激に上昇している。また、同午前10時及び11時頃のライ ブカメラ映像も同様な白煙をとらえており、この白煙も2号機ブローアウトパネル付近から放出 されたものである可能性がある。

以上のように最新のプラントデータ類分析に基づくと、2 号機炉心物質のペデスタルへの移行 は主に3月15日8時半頃から11時頃までの2.5時間に生じていると推定される。



白煙観測時刻の関係

**54** - 74 - 3 号機については炉心物質がペデスタルに移行したと考えられる時間帯にプラントの圧力デー タ等が比較的豊富に得られており、従来研究では3月14日未明から朝にかけて炉心物質がペデス タルに移行したと推定されていた[24]。そして、炉心物質がペデスタルに移行した時点でペデス タルにはS/C-D/W 差圧 によってS/C 水が汲み上げられており、この水は3月14日の午前11時頃 までペデスタルの燃料デブリを冷やしていたものと考えられている。その後、燃料デブリを冷や していた水は枯渇し、蒸気発生が低下することによって D/W 圧力が低下すると、再びS/C 水がペ デスタルのデブリに注がれるというサイクルを何度か繰り返していたと考えられている。ただし、 約7時間に及ぶペデスタルへの炉心物質の移行履歴までは検討されていなかった。

#### (5) 燃料デブリエンタルピーに係わる最新の評価結果

2 号機事故進展の MELCOR コードを用いた解析 [25]や RELAP/SCDAPSIM コードを用いた解析に よると、図 3.3-8 にも示されている RPV 第二圧力ピーク終了時点までに半分程度以上の炉心燃料 は RPV 下部プレナムに移行しており、この時点で下部プレナム移行デブリは冷却材温度程度まで 冷却されている。そして第三圧力ピーク(3月15日午前0時頃~1時頃)は冷却されたデブリか ら下部プレナム水への伝熱で発生する蒸気と SRV の開閉で説明できることが示されている [25]。

これらの知見を元に得られた2・3 号機の炉内水位が炉心有効長上端を下回った以降(本研究で はこのことを便宜的に「炉心の冷却材ボイド化」と呼ぶ)の炉心エネルギー推移の既存評価結果 [26]を図 3.3-9 に示す。2 号機については冷却材ボイド化開始後4.5~5.5 時間(RPV 第二圧力ピ ーク中)に炉心燃料は効果的に冷却され、同約8時間に追加的なデブリの下部プレナム移行と効 果的な冷却が生じたと推定されている。また、ペデスタルへの炉心物質の移行が生じたと考えら れる時間帯でのデブリのエネルギー増加は比較的小さなものと推定されている。一方、3 号機に ついては炉心物質の下部プレナムへの落下の主要なものと定義される「主要なスランピング」ま で及びそれ以降の評価結果の不確かさが大きいと考えられていた。



エネルギー推移

そこで、JAEA/CLADS 研究(2018(平成 30)~2020(令和 2)年度)では「RPV 内で生成する水素と蒸気の履歴」を逆算の対象として、RPV から PCV へのガス流出経路を仮定し、観測された各部

の圧力データ及びその補正値を再現する「水素(不凝縮性ガス)と蒸気(凝縮性ガス)の発生履 歴」を求めることで炉心の冷却材ボイド化後の炉心エネルギー推移を評価検討中である。同研究 では GOTHIC コードを用いて逆算した水素発生履歴 [27]から Zr の酸化を想定して「酸化反応熱の 発生履歴」が求められている。また、蒸気発生履歴から「デブリ冷却履歴」が求められている。 これらの結果、以下の結論が得られている。

- 原子炉自動減圧系(ADS)作動(3月13日午前9時頃)後12時頃までに、燃料デブリは酸化
  発熱を上回る冷却(蒸気発生)を受け、燃料デブリの熱エネルギーはやや減少していた可能
  性が高い。
- 3月13日12時頃から午後2時頃にかけても同様に、燃料デブリの酸化発熱を上回る冷却が あり、燃料デブリは相当に冷却されていた可能性が高い。

以上の GOTHIC 解析からの知見に基づき、前出の MELCOR や RELAP/SCDAPSIM 等の事故進展解析結 果から推定された炉心エネルギーの推移(図 3.3-9)の改訂が検討されている。同検討によれば 2 号機のみならず、3 号機においても下部プレナムに落下した燃料デブリは一度、冷却材温度程度 の低温まで冷却されていたと考えられる。その後、2 号機の RPV 下部プレナムの水が沸騰蒸発に より失われた以降(同研究では便宜的に「下部プレナムのドライアウト以降」と呼ばれている) を対象とした MPS 法を活用した検討では、ドライアウト後 3 時間程度で粒子状酸化物デブリの隙 間を溶融金属が満たして溶融金属プールを形成し、その数十分後に RPV 側壁が溶融破損するとの 予測が示されている。さらにその後に、RPV 下部ヘッドの 2 次破損、3 次破損等を伴いながら、炉 心物質が RPV 下部構造領域を経てペデスタルに到達するにはある程度の時間を要したとの考えか ら、同研究では 2 号機の RPV 下部プレナムのドライアウトからペデスタルへの炉心物質の到達に 要した時間スケールを約 4.5 時間と推定している。

## (6) RPV 破損メカニズムに係る LIVE 試験の情報収集

本研究の一環として、ドイツ・カールスルーエ工科大学(KIT)における「下部プレナム溶融プ ール試験(LIVE 試験) [28]」実施者らとの情報・意見交換を行い、福島2号機のRPV 破損メカニ ズム推定に活用できる試験データの存在を確認した。さらに、従来の試験に比べて2号機条件に 近い新たな試験の実施の技術的な可能性を確認した。

LIVE 試験の目的は、下部プレナムにおける溶融プールの熱的挙動を見ることにある。1:5 スケ ールの PWR 体系の下部ヘッドを模擬した LIVE-3D 試験では、主に硝酸塩(20 mol.%NaN03 - 80 mol.%KN03)を用いて、下部ヘッド外部冷却の効果、熱流束分布、温度分布、クラスト生成に着目 している。異なる溶融塩(50 mol.%NaN03 - 50 mol.%KN03)、水を用いた試験も比較として行われ ている。上部冷却、外部冷却、溶融塩の質量、加熱履歴などをパラメータとして試験が行われて いる。

福島2号機の事故進展において下部ヘッド破損時の燃料デブリの状態は、比較的温度が低く、 主に炉心物質中の金属が溶融し、酸化物は未溶融で、固液混合状態であったと考えられる。LIVE 試験において、このような固液混合状態を模擬した試験はLIVE-L8Cのみの1試験であり、試験で は溶融塩(20 mol.%NaN03 - 80 mol.%KN03)とグラナイト(小石状の花こう岩)を体積比で50% ずつ装荷し、熱出力を段階的に上昇させて試験が行われた。その結果、融点の低い硝酸塩が選択 的に溶融し、デブリベッドの隙間を埋めて下部に移行したことによって、デブリベッド中心部に 空洞が生じた。その後上部デブリベッドは徐々に崩落し、内壁にクラストが生じなかった領域 (図 3.3-11における高さ約 225 mm)において熱流束が最大となった[28]。この領域が熱的に厳 しく、下部ヘッド破損につながる可能性が最も高かったことを示している。本試験は、外部冷却 及び上部断熱条件で行われており、福島 2 号機の事故条件とは異なるが、固液混合状態の溶融プ ール試験は知見が少なく、参考となる点が多いと考えられる。

今後、KIT との共同研究として LIVE-L8C 試験データを入手することができれば、JAEA における 福島2号機 RPV 破損メカニズム推定のための評価モデルの検証に活用できる。さらに、福島2号 機に近い条件での試験を提案・実施できれば、福島各号機事故条件下での RPV 下部ヘッド破損に 資する情報を得ることが可能である。

#### 3.3.2. 2・3 号機における事故進展と炉心物質流出挙動の概要推定

前項までの既存知見・最新知見のレビューに基づくと共に、本研究の中での新たな視点を加え て推定した事故進展と炉心物質のペデスタルへの流出挙動の概要を推定した結果を以下に示す。

#### (1)2号機事故進展と炉心物質流出挙動の概要推定

前項までの検討結果を元に作成した2号機事故進展の推定とペデスタルへの燃料デブリ流出挙 動概略予測を図3.3-10に示す。炉心燃料の半分程度がRPV第二圧力ピーク(3月14日午後10:40 頃~午後11:50頃)までにRPV下部プレナムに落下(「燃料スランピング」と呼ぶ)し、15日午前 2時過ぎの追加的な燃料スランピングの後、15日午前4時頃(燃料デブリの下部プレナム移行開 始後約5時間後)に下部プレナム内の液相水が枯渇したものと推定される。

RPV の液相水喪失後は継続した代替注水によって蒸気によるデブリ冷却があるものの、デブリ 温度は上昇し、15日午前7時頃にはデブリ領域内の金属が溶融して溶融プールを形成したものと 推定される。その後、溶融金属の対流熱伝達により、RPV 側部での初期破損が15日午前7時~8 時頃であったと推定される。この段階ではペデスタルへの炉心物質の流出は少なかったと推定さ れる。その後も破損部より下方の溶融金属はRPV内に残留して対流伝熱を継続し、時間の進行と 共にRPV底部中央方向に向かって破損部位が拡大していた可能性があり、それに伴い15日午前8 時半頃から炉心物質のペデスタルへの移行が顕著となった可能性がある。この間のデブリ昇温は 限られ、溶融金属主体の炉心物質流出であったと推定される。その後、ライブカメラが2号機ブ ローアウトパネル付近からと思われる白煙をとらえた15日午前11時までに、それまでよりも熱 量の大きな燃料デブリのペデスタルへの流出が起きていた可能性がある。

このように、2 号機 RPV の破損は15 日午前7 時頃から生じて一部の溶融物が RPV 外に流れ出て いた可能性があるものの、ペデスタルへの主要な炉心物質の流出は15 日午前8 時半頃から午前 11 時頃までの約2.5 時間であったと推定される。また、この間にデブリは酸化物の溶融する高温 (2,500 K 程度以上)には至っていなかったと推定され、ペデスタル移行物質はジルカロイやス テンレス鋼由来の溶融金属、及び燃料と被覆管の一部が溶融した U-Zr-0 等からなる可能性があ る。



図 3.3-10:2 号機における事故進展シナリオ推定と ペデスタルへのデブリ流出挙動概略予測

#### (2) 2 号機における炉心物質の流出経路と支配因子について

2 号機の内部調査結果ではペデスタルコンクリート壁付近においてグレーチング脱落部が見られ、その下方には集合体上部タイプレートの一部が落下している等、RPV 側部に一定程度大きな破損口が存在することが予想される。このような RPV 側部の破損は、下部プレナムに炉心燃料の 半分以上が堆積したような条件で溶融金属がデブリ領域を対流する場合には、その早期段階で起 こりやすいと考えられる。

一方、事故後 RPV の広い領域から雨のように冷却水が注いでいる状況から、RPV バウンダリ破 損は広い領域に及んでいると思われる。そして RPV 下部の殆どの部分では何らかの溶融物の流下 の痕跡が見られるものの制御棒位置検出器(PIP)ケーブル等が残存しており、RPV の全体に広が る破損部から流下した物質は金属主体の低融点物質だった可能性が高い。

これに対して、図 3.3-11 に示すように RPV 下部の一部(中央から若干外側)には移動式炉心 内計装(TIP)案内管や PIP ケーブル等が付着物で見えない領域があり、その直下のグレーチング が失われていることから、この部分からは他とは質の異なる炉心物質が流下した可能性が高い。 内部調査時の湯気の状況からペデスタル移行物質の一部は有意な発熱を持つことが明らかであり、 溶融金属のみでなく、何らかの形で燃料の一部が流出している可能性が高いが、そのような燃料 を含む炉心物質の流出経路としては RPV 側部よりも RPV 底部に近い、限定的な部位であった可能 性がある。

#### JAEA-Review 2020-035



https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/2018/images1/d180426\_08-j.pdf

図 3.3-11:2 号機 RPV 下部の TIP 案内管や PIP ケーブル等が確認できない部分

以上のように2号機の炉心物質移行経路としては「RPV 側部」と「RPV 下部中央寄り」、及び「RPV の全域」と多様な移行経路であった可能性があるが、RPV 下部プレナムにおける溶融金属の対流 伝熱が重要な役割を果たしたと推定され、その支配因子としては燃料デブリの形状(粒子 or ブロ ック)、燃料デブリ領域に存在する金属の組成、溶融金属対流時の粘性(金属組成に依存)と燃料 デブリの流動抵抗などが挙げられる。

#### (3)3号機事故進展と炉心物質流出挙動の概要推定

前項までの検討結果を元に作成した3号機事故進展の推定とペデスタルへの炉心物質流出挙動 概略予測を図3.3-12に示す。3号機では3月13日早朝に炉心損傷が開始し、同日の午前9時頃 のADS 作動までに酸化物燃料の一部は炉心部に溶融プールを形成していた可能性が高い。ADS 作 動後は3月13日の午前10時頃と12時過ぎに炉心燃料のRPV下部プレナムへのスランピングを 生じていたものと推定されるが、下部プレナムに移行した燃料デブリはその後1~2時間程度の比 較的短時間で冷却材温度程度まで冷却されていたものと推定される。その後3月13日午後8:40 頃までの9時間は下部プレナム残留水と代替注水による水で下部プレナム内デブリは冷却された が、下部プレナム水が枯渇すると(ドライアウトすると)デブリは昇温を開始したものと思われ る。

RPV バウンダリの破損は3月14日0時頃(RPV 下部プレナムのドライアウト後約3時間)まで に生じたと考えられる。同日の午前3時頃に溶融金属の大規模な移動を伴う流出があり、5時か ら7時頃にかけては燃料デブリのような大きな蓄熱あるいは発熱を持つ物質が流出した可能性が 高い。尚、3月14日0時頃~午前7時頃までの比較的に連続的な RPV 及び PCV 圧力上昇が記録さ





図 3.3-12:3 号機事故進展の推定とペデスタルへのデブリ流出挙動概略予測

#### (4) 2・3 号機における事故進展と炉心物質流出挙動の概要推定の今後の課題

以上のように本研究では、2・3 号機における炉心燃料の熱条件の推移に重点をおいた評価と、 内部調査や試料分析の結果等の知見を総合し、炉心物質のペデスタルへの流出挙動について概略 評価した。この結果、2・3 号機共に RPV 下部プレナムに移行した炉心燃料は、一度は冷却材温度 程度まで冷却されたとの見通しを得た。この冷却に至る過程での燃料温度の上昇は、炉心損傷の 開始から炉心燃料の下部プレナムへの移行までに要した時間(2 号機の約 2 時間に対して 3 号機 では約 6.5 時間)に依存し、RPV 下部プレナムで冷却された燃料デブリの形状は異なっていた可 能性がある。即ち、2 号機では未溶融のペレット状の燃料など細かな粒子状の燃料デブリを主体 としていた可能性があり、3 号機では燃料ペレット等が溶融後に固化し、クラックによって分割 された内部に金属を含むブロック状の燃料デブリを多く含む可能性がある。

これらの燃料デブリは何れも、下部プレナムに液相冷却材がある場合は冷却され、低温を保っ ていた可能性が高い。しかし下部プレナムの液相水が枯渇(ドライアウト)すると何れも除熱量 が低下し、デブリは昇温していったと考えられる。ドライアウトから3時間程度で燃料デブリ温 度は金属の共晶点程度まで上昇し、その後比較的短時間に RPV が破損し、炉心物質のペデスタル への移行が開始したと考えられる。この段階で RPV-CRD ハウジング構造システム領域を抜けてペ デスタルに移行するのは溶融金属が主体と推定され、比較的緩慢な移行であったと思われる。以 上のように初期の炉心物質のペデスタル移行までの事象進展は2・3号機に共通と推定される。 その後、2 号機の RPV 下部プレナムの燃料デブリは若干昇温し、燃料成分をある程度含むデブ リの比較的少量の流出が RPV 底部付近で生じた可能性がある。2 号機ではここまでの炉心物質の 流出により、RPV 内残留デブリが冷却可能な状態に推移したと考えられる。

一方、3 号機では初期の溶融金属を主体と推定される炉心物質の RPV 下部プレナムからペデス タルへの流出後も RPV 内残留物質は冷却性を回復せず、燃料の相当割合が数時間をかけてペデス タル領域へと移行したものと推定される。このような RPV 内残留デブリの冷却性回復有無の差は、 残留デブリの特長の違いがもたらした可能性があり、これらが RPV 下部プレナムに移行する前の 炉心部での到達エンタルピーの差がその要因となっている可能性がある。

燃料デブリの RPV からペデスタルへの流下履歴の同定には、総合的な炉内状況把握精度の向上 が必要である。そのためには、常に最新知見を反映しながら、炉内構造、プラント内部調査結果、 サンプリングされた試料分析結果、事故時プラントデータの分析、燃料デブリエンタルピー評価 及び RPV 破損機構に係わる既存情報・最新知見のレビューを積み重ね、それらの最新知見を反映 して本研究により得られたデブリ流下履歴の妥当性及び修正が必要と考えられる。

3.3.3. まとめ

福島 2・3 号機 原子炉圧力容器(RPV)から原子炉格納容器(PCV)ペデスタルへのデブリ移行 履歴の推定を目標として、RPVからペデスタルに至る領域の構造情報、福島 2・3 号機に対する内 部調査結果、PCV 内外から採取された試料の分析結果、事故時プラントデータ分析結果、及び燃料 デブリエンタルピーに係わる最新の評価結果を精査し、福島 2・3 号機における炉心物質流出挙動 の概要を把握した。その上で、2 号機における比較的早期段階での炉心物質の流出経路の候補と その支配要因を推定した。

#### 3.4. 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

金属ボライド-(U0<sub>2</sub>-Zr0<sub>2</sub>-Zr)の高温相状態及び液相の粘性の評価を目標として、本年度は大阪大 学に設置されている酸化物試料用のガス浮遊法の装置の構成を変更する。金属系試料でも粘性を 測定できるように、従来よりも高性能なハイスピードカメラを設置する。また、ガス浮遊法より も実績が豊富な静電浮遊法を用いて、Fe-B系高温融体の物性(粘性と密度)を評価する。

#### 3.4.1. ガス浮遊装置の改良

ガス浮遊法を用いて液滴振動法により粘性を測定する手法は、Langstaff らによって開発され た [29]。図 3.4-1 に概略図を示す。この手法では、直径が 1-2 mm 程度の球状の試料をガス浮遊 法で浮遊溶融させ、スピーカーにより液滴試料を共振周波数で振動させる。この振動は粘性によ って減衰するために、ハイスピードカメラで記録した試料の画像から減衰挙動を評価することで 粘性を導出する。



図 3.4-1:ガス浮遊法による粘性評価の概略図

大阪大学に設置されているガス浮遊装置の概略図を図 3.4-2 に示す。試料を波長 10.6 µm、出 力 100 Wの CO<sub>2</sub> レーザーで加熱溶融し、液滴とする。ファンクションジェネレーターを用いて特 定の波長の正弦波信号を発生させ、それをアンプで増幅したものをスピーカーにより音波とし、 液滴を振動させる。紫外光 (Hamamatsu Photonics 製紫外ランプ Ls9588-02A、370±2 nm バンド パスフィルター)をバックライトとし、ハイスピードカメラ (Ditect 製、HAS-D72M) を用いて液 滴振動を記録する。大阪大学では、この装置を用いて Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の粘性評価に成功している [30]。



図 3.4-2:大阪大学に設置してあるガス浮遊装置の概略図

62 - 82 - 減衰振動する液滴をハイスピードカメラで観察すると、図 3.4-3の上に示すような画像が得ら れる。この振動する液滴の x 軸方向(もしくは y 軸方向)の試料径を時間に対してプロットする と、図 3.4-3の下に示すようなグラフとなる。このようにして得られた減衰振動のデータを、正 弦波関数で表される周期振動項と指数関数で表される減衰運動項の積である関数(3-4-1)でフィッ ティングする。

$$r_{h} = A \exp\left(-\frac{t - t_{1}}{\tau}\right) \sin\{2\pi\nu_{R}(t - t_{0})\} + R_{av}$$
(3-4-1)

ここで、 $r_h$ は試料の水平または鉛直方向の径、tは時間、 $R_a$ 、は平均の試料径である。また、Aは最初に印可した振動強度、 $t_0$ は振動の位相ずれ、 $t_1$ は減衰振動開始時間、 $\tau$ は減衰振動係数、 $\nu_R$ は 共振周波数を表し、これら 5 つの変数はフィッティングにより決定する。フィッティングによっ て得られる減衰振動係数  $\tau$ から粘性は次の式(3-4-2)で得ることができる。

$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{5\tau} \tag{3-4-2}$$

ここで η は粘性、ρは密度、raは試料を真球状とした時の半径である。



図 3.4-3: 減衰振動する液滴の模式図と減衰振動のデータの例

この方法で粘性を精度良く評価するためには、(3-4-1)式でフィッティングできるだけの時間分 解能を有する測定データが必要である。すなわち、共振周波数とハイスピードカメラの記録速度 (フレームレート)の関係が重要となる。共振周波数は物質固有の物性である表面張力と密度、 及び液滴のサイズと関係があり、その関係は(3-4-3)式のように表せる。

$$\gamma = \frac{3}{8}\pi\nu_R^2 M \tag{3-4-3}$$

ここで $\gamma$ は表面張力、 $\nu_R$ は共振周波数、Mは試料質量である。この式から、共振周波数と表面張力には正の相関関係があることが分かる。従って、表面張力の大きな物質の粘性を測定するためには、高いフレームレートの値が必要となる。

表 3.4-1 に、大阪大学において粘性測定に成功した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と、金属ボライド関連物質 (Zr, Fe, B) について表面張力の文献値を元に共振周波数を算出したものを示す。尚、直径 2 mm の球状である と仮定して共振周波数を算出した。Zr, Fe, B は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> よりも表面張力が高いために共振周波数が 高く、特に B の共振周波数は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の約 1.6 倍に達する。すなわち、ハイスピードカメラのフレー ムレートを 2 倍にすれば金属ボライドの粘性評価にも支障がないと考えられる。

	A1 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Zr	Fe	В
共振周波数[Hz]	212	219	232	322

表 3.4-1: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及びZr、Fe、Bの共振周波数(直径2mmの球の場合)

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の粘性測定に成功した際に用いたハイスピードカメラは Ditect 製の HAS-D72M であり、 2,000 fps (1,280×1,024 pixel)のフレームレートである。2 倍のフレームレートを達成するた めに、このカメラを nac Image Technology 製の MEMRECAM HX-7s に交換した。これにより、4,000 fps (1,280×720 pixel) での記録が可能となる。ハイスピードカメラを付け替える前と後の外観 を図 3.4-4 に示す。



図 3.4-4:ガス浮遊装置の外観写真 (a)カメラ交換前 (b)カメラ交換後

カメラの交換による効果を評価するために、A1<sub>2</sub>0<sub>3</sub>を模擬試料として、減衰振動の様子を観察した。A1<sub>2</sub>0<sub>3</sub>粉末(株式会社高純度化学研究所、99.99%)を放電プラズマ焼結法によって焼結し、バルク試料を作成した。この際、焼結は1,300℃、50 MPa、保持時間なし、Ar 雰囲気という条件で 行った。放電プラズマ焼結はAr 雰囲気で行うため試料が僅かに還元される。そこで、焼結したバルク試料は大気雰囲気で1,000℃、12時間という条件で酸化させた。次にバルク試料を粉砕し、小片としてガス浮遊実験に用いた。A1<sub>2</sub>0<sub>3</sub> 試料の減衰振動は Ditect 製の HAS-D72 で 2,000 fps (1,280×1,024 pixel)、nac 製の MEMRECAM HX-7s で 4,000 fps (1,280×720 pixel) でそれぞれ 記録した。図 3.4-5 に 2,000 fps で撮影したデータと 4,000 fps で撮影したデータを示す。4,000 fps で撮影した方が短い時間間隔でデータが得られていることが分かる。それぞれのデータについて、フーリエ変換を用いて周波数分析した結果を図 3.4-6 に示す。4,000 fps で撮影したデータの方が鋭いピークとなっており、より正確な測定ができていることが分かる。以上より、従来(2,000 fps)よりも高速に撮影できるカメラ(4,000 fps)を設置することで、従来のカメラを用いた場合よりも時間分解能が高いデータが得られることを、Al<sub>2</sub>0<sub>3</sub>を模擬試料として用いて実証した。これにより、Al<sub>2</sub>0<sub>3</sub>より共振周波数が高いと思われる金属系試料(Fe-B等)でも粘性が測定できる見通しが得られた。



図 3.4-5:減衰運動する Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>液滴の直径の時間変化 (a)2,000 fps (b)4,000 fps



図 3.4-6:2,000 fps 及び 4,000 fps で取得した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 液滴の減衰振動の 周波数スペクトル

#### 3.4.2. 静電浮遊法を用いた融体 Fe0.84B0.16の物性測定

静電浮遊法 [31]では上下電極間に静電場を生じさせ、僅かに帯電した試料を静電場により浮遊 させる。浮遊した試料はレーザー加熱により液滴とし、静電場を介して液滴を振動させることで 液滴振動法により粘性を導出する。静電浮遊法はガス浮遊法よりも粘性測定における実績が豊富 な手法であるものの、一般的に真空中でしか浮遊させることができないので、酸化物の測定には 不向きである。本研究では金属ボライドのみならず酸化物までを評価の対象としているため、酸 化物にも適用できるガス浮遊法を主として用いるものの、金属ボライドのみであれば静電浮遊法 が適用できる。そこで、金属ボライドの物性に関する知見を得るために静電浮遊法による物性測 定を試みた。

Fe (株式会社高純度化学研究所、Grains 5-15 mm、99.99 %) と B (フルウチ化学、Chunk、99.9 %) を出発物質として、アーク溶解にて共晶組成である Fe<sub>0.84</sub>B<sub>0.16</sub>となるように溶融混合しインゴット を得た。インゴットを静電浮遊に適した試料重量である 20~30 mg になるように切断し、静電浮 遊実験に用いた。本実験で用いた静電浮遊装置の概略図を図 3.4-7 に示す。密度は画像解析によ って得られた体積と静電浮遊後の質量から算出した。粘性は液滴振動法により測定した。



図 3.4-7:静電浮遊装置の概略図と外観

密度については、1,450-1,650 K の温度範囲で測定に成功した。本実験により得られた密度の 温度依存性を図 3.4-8(a)に示す。図中に示した点線は得られたデータを直線フィッティングした ものである。一般に、溶融物の密度は温度に対して線形に変化することが知られている。今回得 られたデータは直線でよく近似できており、溶融 Fe<sub>0.84</sub>B<sub>0.16</sub>の密度は一般的な溶融物の密度の温度 依存性と同じ挙動を示した。

溶融 Fe<sub>0.84</sub>B<sub>0.16</sub>の粘性を図 3.4-8(b)に示す。粘性の測定は極めて困難であり、測定に成功したのは約 1,600 K での 1 点のみである。図 3.4-8(b)の二つの点線は、Fe と B の文献値について、 粘性と温度の関係を表すアンドレードの(3-4-4)式によってそれぞれフィッティングした外挿線である。

$$\eta = A \exp(\frac{E}{BT}) \tag{3-4-4}$$

ここで *A、E*はフィッティングパラメータ、R は気体定数を表している。本実験で求めた Fe<sub>0.84</sub>B<sub>0.16</sub>の粘性の値は二つの曲線の間に位置しており、Fe と B の中間的な粘性であることが示唆される結果となった。以上から、静電浮遊法を用いて溶融 Fe-B 系の密度と粘性を測定することができた。



図 3.4-8:溶融 Fe<sub>0.84</sub>B<sub>0.16</sub>の密度と粘性 (a)密度 (b)粘性(文献値 Fe [32]、B [33])

### 3.4.3. まとめ

金属ボライド-(U0<sub>2</sub>-Zr0<sub>2</sub>-Zr)の高温相状態及び液相の粘性の評価を目標として、大阪大学に設置 されている酸化物試料用のガス浮遊法の装置の構成を変更した。金属系試料でも粘性を測定でき るように、従来のハイスピードカメラ(フレームレート 2,000 fps)より高性能なカメラ(フレー ムレート 4,000 fps)を大阪大学の装置に設置した。A1<sub>2</sub>0<sub>3</sub>を模擬試料として液滴振動の様子を観 察し、従来よりも高い時間分解能でデータが得られることを確かめた。これにより、A1<sub>2</sub>0<sub>3</sub>よりも 共振周波数が高い金属系試料(Fe-B 等)の粘性を測定できる見通しを得た。また、ガス浮遊法より も実績が豊富な静電浮遊法を用いて、Fe<sub>0.84</sub>B<sub>0.16</sub>の 1,600 K における粘性と 1,450-1,650 K におけ る密度を測定した。

#### 3.5. MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験

## 3.5.1. MPS 法解析コードの並列化と並列計算機システムの構築

実機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布・性状の把握のためには、大きな解析体系におけ る長時間を要する溶融デブリの移行及び凝固等を解析する必要があり、一つのメモリを共有する 従来の OpenMP に基づくワークステーション単体のマルチスレッド型の並列計算では実用的な解 析が困難である。そこで本研究では図 3.5-1 に示すように、従来の OpenMP に加え、異なるワー クステーション(異なる計算メモリ)に計算負荷を分配する大規模並列計算を実施するために、 第3.1.1 項に示した改良 MPS 法に基づく解析コードの並列化を行った。



図 3.5-1: MPI 及び OpenMP による並列化

解析体系を複数の領域に分割し、各領域はワークステーションの1つのプロセスにより計算し、 並列計算のために標準化された規格の一つである Message Passing Interface (MPI)を用いて各 領域間の通信を行った。このとき、領域間の通信量を低減するために、領域間の境界の最小化を 図る手法が必要である。本研究では領域間の境界部の情報の受け渡し量を最小化し、各解析領域 の計算負荷が平準化しながら動的に領域分割を制御するために、階層型領域分割法(HDDM) [34] [35]と計算領域をほぼ同一の面積や体積のサブ領域に分割する様々な方法が格納されている ParMetis ライブラリ [36] [37]を用いて計算領域の分割と通信を行う HDDM-EMPS 法 [34]を用い た。 図 3.5-1 に示した各プロセスは分割された一つの計算領域に対応し、中央制御計算機(中央制御ノード)により、それが一つのワークステーション(計算ノード)に割り振られる。各計算ノードでは、OpenMPにより、メモリ共有型の計算サブ領域に分割され、それらは各ワークステーションの CPU コアにより計算される。このような計算領域分割を細かくするほど隣り合う計算領域同士の通信量を低減することができるが、このとき、全体の計算領域に均等に計算負荷を分配することが課題になる。HDDM-EMPS 法では、各計算領域の計算粒子数の数が概ね等しくなるように動的に計算領域が分割され、並列化効率を高める。

このようにして並列化した MPS 法解析コードの並列化効率を概略評価するために、仮想的に RPV に炉心溶融物の溶融プールが形成された時の伝熱流動問題を解析した。解析は図 3.5-2 に示すよ うな二次元体系で実施した。粒子径は6 mm とし、粒子数は 47,373 となった。RPV 下部ヘッド及 び下部プレナム領域を模擬し、比較的に粘性が高い(0.1 Pa·s) 溶融プールが形成し、崩壊熱と溶 融物の自然循環による流れを伴う伝熱流動と、溶融プールの凝固に伴う酸化物クラスト層の形成 及びベッセル壁のアブレーションを伴う固液多相問題を設定した。試解析に用いた各物性及び温 度条件等を表 3.5-1 にまとめる。

物性	RPV 壁	酸化物	溶融プール
密度(固体)(kg/m <sup>3</sup> )	7800	10970	8930
密度(液体) (kg/m <sup>3</sup> )	8930	10970	8930
粘度(液体)(Pa·s)	0.1	0.005	0.1
熱伝導率(固体) (W/m/K)	25.0	4.0	14.947
熱伝導率(液体)(W/m/K)	25.0	4.0	19.486
比熱(固体) (J/kg/K)	500	300	364.08
比熱(液体) (J/kg/K)	436.7	500	481.31
固相線温度(K)	1495	3115	1495
液相線温度(K)	1505	3125	1505
潜熱(kJ/kg)	244.6	270.0	249.975
固着固相率	0.5	0.5	0.5
空気対流熱伝達率(w/m²/K)	0.0	0.0	0.0
崩壞熱密度(w/m <sup>3</sup> )	0.0	0. $7 \times 10^{6}$	0. $326 \times 10^{6}$

表 3.5-1: MPI 及び OpenMP による MPS 法解析コード並列化の効率評価用試解析用物性と条件



図 3.5-2: MPI 及び OpenMP による MPS 法解析コード並列化の効率評価用試解析体系(二次元)

このような条件の解析を、JAEA の並列計算機システム(SGI ICE X、CPU: Intel Xeon E5-2680 v3 12core 2.5 GHz×2 CP、Memory: 64 GB)を用いて実施した。同システムは各計算ノードに 12CPU コアを搭載する。コンパイラには Intel Compiler version 2018 Update 3 (parallel\_studio\_xe\_2018)を用いた。測定結果の指標として、計算ノード数に対する計算タイムステップ当たりに要した計算時間を図 3.5-3 に示す。JAEA の並列計算機システムは各ユーザーが連続して使用できる CPU コア数に制限があるため、計算タイムステップ当たりに要する時間を評価し、短時間で効果を評価した。その結果、並列化に伴う計算ノード数が増えるほど計算ノード間の通信量が増すため、並列化の効率は低下するが、6 ノード(144 スレッド)~12 ノード(288 スレッド)までは並列化による計算時間の低減効果が大きいことが明らかになった。また、ノード数の増加に伴う並列化の効率低下の影響を低減するには、計算ノード当たりの搭載 CPU コア数の大きな高速計算機が必要であることが分かる。



図 3.5-3:並列化した MPS 法解析コードの並列化効率の測定結果

そこで、構築した MPS 法の並列計算コードを用いて大規模な並列計算を実施するために、早稲 田大学に図 3.5-4 に示すような並列計算機を新たに導入した。並列計算機は1台の管理・計算ノ ードと、5 台の計算ノードの合計 6 ノードから構成され、各計算ノード間を 10Gigabit の高速 ethernet スイッチでつなぐことで、高効率の並列計算を実現するシステム構成とし、必要に応じ て計算ノードの拡充も可能な構成となっている。管理ノード及び各計算ノードは、それぞれ 44CPU コアを搭載し、システム全体では 264CPU コアを活用した大規模並列計算が可能な構成になってい る。構築した並列計算機システムの外観を図 3.5-5 に示す。

管理ノード及び各計算ノードは、CPUに Intel Xeon Gold 6238 (2.1GHz 22 コア)を2セット 搭載し、8GB DDR4-2666 REG ECCメモリを搭載し、オペレーティングシステムには安定性に優れ た Cent OS 7.6 を採用し、大容量の並列計算に対応できる構成とした。ネットワークには 10G Ethernet Card を搭載し、高速通信に対応する。コンパイラには高効率の Intel Compiler Cluster Edition をインストールした。これらのシステムを活用した大規模並列計算を制御するために、 並列計算用管理ソフトウェアに Bright Cluster Manger を用いた。これにより、管理ノードで一 括して各計算ノードへの計算負荷配分や通信制御を行えるシステムを構築した。構築したシステ ム緒元を表 3.5-2 にまとめる。

項目	内容	数量
	管理ノード兼計算ノード 44 Core 一式	1
製品型番	HPCT-W216s	
	【ノード辺りの内訳】	
CPU	Intel Xeon Gold 6238 (2.1GHz 22 Corse)	2
メモリ	8 GB DDR4-2666 REG ECC (合計 96 GB)	12
HDD (OS)	1 TB 3.5インチ SATA 6 Gbp/s	1
HDD (DATA)	10 TB 3.5 インチ SATA 6 Gbp/s(管理ノードのみ)	3
RAID	RAID Card (管理ノードのみ)	1
ネットワーク	10 G Ethernet Card	1
0S	CentOS 7.6	1
	計算ノード 220 Core 一式	
製品型番	HPCT-W216s	
	【ノード辺りの内訳】 x5ノード	
CPU	Intel Xeon Gold 6238 (2.1 GHz 22 Corse)	2
メモリ	8 GB DDR4-2666 REG ECC (合計 96 GB)	12
HDD (OS)	1 TB 3.5インチ SATA 6 Gbp/s	1
ネットワーク	10 G Ethernet Card	1
0S	CentOS 7.6	1
スイッチ	10 Gigabit 8 Port ネットワークスイッチ及びケーブル	1
コンパイラ	Intel Compiler Cluster Edition	1
クラスタ	PC クラスタソフトウェア(Bright Cluster Manger)	1

表	3.5-2	:	並列計算機シ	へ	テム緒元
---	-------	---	--------	---	------

<sup>71</sup> 

JAEA-Review 2020-035



図 3.5-4:並列計算機構成



図 3.5-5: 並列計算機システムの外観

## 3.5.2. 並列化 MPS 法解析コードによる試解析

3.5.1 項に示した MPS 法並列解析コードと並列計算機システムを用いて、並列計算の試解析を 実施した。解析対象には、一般的に MPS 法の解析の動作確認に用いられる水柱のダム崩壊ベンチ マーク解析及び過去に早稲田大学の MPS 法解析コードで解析実績のある、VULCANO-VEU7 実験の条 件を選定した。先ず、水柱のダム崩壊ベンチマーク解析の試解析結果の流動の様子と、その間の 計算領域分割の動的な変化の例を図 3.5-6 に示す。溶融物の流動に伴って、計算領域の分割が動 的に制御できている様子が分かる。



図 3.5-6:解析結果の様子と動的領域分割(水柱のダム崩壊)

次に、伝熱及び固液相変化を伴う VULCANO-VEU7 実験の解析結果を示す。同実験は欧州加圧水型 炉(EPR)のコアキャッチャーの設計評価のために仏国の原子力・代替エネルギー庁(CEA)によ り実施された、模擬溶融炉心広がり挙動(spreading)の実験である [38]。解析体系を図 3.5-7 に示す。実験では、流入境界部に EPR コアキャッチャーの犠牲材と混合した溶融炉心を模擬した 溶融物(UO<sub>2</sub>:56 %、ZrO<sub>2</sub>:32 %、FeO:5 %、CaSiO<sub>3</sub>:2 %、SiO<sub>2</sub>:2 %)が約 2,450 K で投入され、 コンクリートチャンネルとセラミックチャンネルの二つのチャンネルに同時に流入した。このう ち、セラミックチャンネルを解析対象とした。溶融物は約1.75 kg/sの流量で14.0 kgがセラミ ックチャンネルに流入した。溶融物の初期温度に対して、液相線温度と固相線温度はそれぞれ 2,623 Kと1,273 Kであり、半凝固状態の溶融物が流入境界プールに投入された。試験部に流入 した溶融物は初期には重力/慣性支配で、その後は粘性支配の比較的に緩やかな流動で流動停止 に至った実験であることが報告されている [38]。これらの解析条件を表 3.5-3 にまとめる。溶 融物の粘性は Ramacciotti の相関式(3-16 式)を元にした。ただし、固相率が一定値(凝固固相 率 0.8) を超えた場合には、図 3.5-8 に示すように同式により評価される動粘性係数をさらに 100 倍し、凝固固相率以上の粒子のクラスト化を模擬した。尚、解析では、溶融物と床の間の接触熱 抵抗は無視しているが、接触熱抵抗が VULCANO-VEU7 の溶融物の spreading 挙動に与える影響は比 較的に小さいことが報告されている[39]。

パラメータ	溶融物	床材(セラミック)
密度(kg/m³)	7,140	5, 300
液体の動粘性係数 (Pa·s)	0.0206	_
固液相変化領域の動粘性係数(Pa·s)	Ramacciotti の相関式(3-16 式) を元にしたモデル図 3.5-8	
熱伝導率(W/m/K)	3.0	4.7
比熱(J/kg/K)	800	575
固相線/液相線温度(K)	1,273/2,623	_
潜熱(kJ/kg)	420	_
流入温度(K)	2, 450	_
流入質量 (kg)	14.0	_
流入質量流束(kg/s)	1.75	_

表 3.5-3: VULCANO-VEU7 実験の解析条件









**74** - 94 - 試解析結果の溶融物流動の様子と、その間の計算領域分割の動的な変化の例を図 3.5-9に示す。 溶融物の流動に伴って、計算領域の分割が動的に制御できている様子が分かる。また、従来の OpenMP のみを用いた解析 [39]により得られた流動先端の時間変化と、さらに MPI により並列化 した本研究の解析により得られた流動先端の時間変化を図 3.5-10 に示す。このとき、本研究の 解析では流動先端が完全に停止した以降はプロットしていない。従来の結果と実質的に同じ結果 が得られていることが分かる。



図 3.5-9:解析結果の様子と動的領域分割



図 3.5-10: 従来結果と並列化解析結果の比較(流動先端距離)

## 3.5.3. まとめ

MPS 法解析コードの並列化を目標として、流体の自由界面追跡が可能な試解析体系を複数の解 析領域に分割し、領域間の境界部の情報の受け渡し量が最小化されるように動的に領域分割を制 御した。また、各解析領域の計算負荷が平準化するように解析領域を制御した。さらに、これら の領域を並列計算機の各計算ノードに割り振り、水柱のダム崩壊ベンチマーク解析等の簡易な例 を対象に並列計算の試解析を実施し、動作確認を行った。

分散メモリ並列 EMPS ライブラリを活用し、早稲田大学の MPS 法解析コードを並列化した。先 ず、伝熱や固液相変化を伴わない、水柱のダム崩壊ベンチマーク問題を対象に、解析体系を複数 の領域に分割し、動的に領域分割ができることを確認した。次に、伝熱及び固液相変化を伴う VULCANO-VEU7 実験の解析を実施し、動的な領域分割の動作確認に加え、従来の解析により得られ た流動先端距離の時間先端と比較し、実質的に同じ結果が得られていることを確認した。

## 3.6. 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。また、 研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。早稲田大学、大阪大学、CLADS の研究 代表者間でメールや電話等で密に連絡を取り合いながら研究を進めた。また、適時打ち合わせを 実施した(令和元年10月29日、11月26日、令和2年1月29日)。

## 4. 結言

固液の移行及び界面の機構論的な追跡が可能な MPS 法、模擬デブリ流下実験、実機溶融デブリ 流下履歴の同定、高温融体物性データ整備から構成する Multi-Physics モデリングにより、福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状を同定することを目的に、3 カ年計画の1年目で ある本年度は以下を実施した:

#### (1) MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析による計算コスト低減策の検討

MPS 法の計算コスト増大の主要因である圧力・粘性計算負荷を低減するために、解析に新たな 粒子タイプ(凝固粒子タイプ)を導入した。また、凝固粒子タイプによる判定を活用し、凝固し た粒子は圧力・粘性計算をスキップできるように計算アルゴリズムを改良した。平板間流路を流 れる層流水の凝固実験を対象にしたベンチマーク試解析で圧力分布等を出力し、粒子タイプによ る計算スキップとそれに伴う解析時間の短縮を確認した。

#### (2) 模擬デブリ流下実験系の整備と模擬ペデスタル床浸食実験

改良 MPS 法の妥当性確認と実機燃料デブリ堆積分布予測に資するために粘性等の異なる複数種 類の溶融物を異なる履歴で流下させた場合の、模擬デブリ流下・成層化データを取得可能な実験 系を構築することを目標として、粘性流体の流出流量比を時系列制御可能な熱流動制御系、デブ リ流下状態を複数方向から可視化可能な計測系から実験系を構成した。また、初期に流出したデ ブリによりペデスタルコンクリートが浸食される現象を模擬した実験を行い、初期の模擬ペデス タル浸漬状態が結果に及ぼす影響が大きいデータが得られた。

# (3) 実機デブリ流下履歴の同定のための福島2・3 号機における炉心物質流出挙動の概要把握(連携先:原子力機構)

福島 2・3 号機 原子炉圧力容器(RPV)から原子炉格納容器(PCV)ペデスタルへのデブリ移行 履歴の推定を目標として、RPVからペデスタルに至る領域の構造情報、福島 2・3 号機に対する内 部調査結果、PCV内外から採取された試料の分析結果、事故時プラントデータ分析結果、及び燃料 デブリエンタルピーに係わる最新の評価結果を精査した。2 号機と 3 号機では炉心溶融の程度が 異なることが、溶融炉心物質の一時的な冷却後の RPV 破損及び炉心物質の流出に影響したという 概要を把握した。2 号機の炉心物質流出経路の候補は RPV 側部から底部に至る広い範囲と見込ま れ、その支配因子にはデブリ領域に含まれる溶融金属の伝熱等が含まれると推定した。

#### (4) 浮遊法による高温融体物性評価のための実験装置の構成変更(再委託先:大阪大学)

金属ボライド-(U0<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Zr)の高温相状態及び液相の粘性の評価を目標として、大阪大学に設置 されている酸化物試料用のガス浮遊法の装置に従来よりも高性能なハイスピードカメラを設置す るなどして、金属系試料でも粘性を測定できるように改良した。共振周波数が高い金属系試料(Fe-B等)の粘性を測定できる見通しを得た。また、静電浮遊法で温度1600 Kにおける Fe<sub>0.84</sub>B<sub>0.16</sub>の融 体密度と粘性を測定した。

## (5) MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験のための MPS 法解析コードの並列 化

分散メモリ並列 EMPS ライブラリを活用し、早稲田大学の MPS 法解析コードを並列化した。先 ず、伝熱や固液相変化を伴わない、水柱のダム崩壊ベンチマーク問題を対象に、解析体系を複数 の領域に分割し、動的に領域分割ができることを確認した。次に、伝熱及び固液相変化を伴う VULCANO-VEU7 実験の解析を実施し、動的な領域分割の動作確認に加え、従来の解析により得られ た流動先端距離の時間先端と比較し、実質的に同じ結果が得られていることを確認した。

## (6) 研究代表者及び参加機関との連携による研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。また、 研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。早稲田大学、大阪大学、CLADS の研究 代表者間でメールや電話等で密に連絡を取り合いながら研究を進めた。また、適時打ち合わせを 実施した(令和元年10月29日、11月26日、令和2年1月29日)。

#### 参考文献

- [1] 平成 27 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」(総合的な炉内状況把握の高度化) IAE-1787101、一般財団法人エネルギー総合研究所、2018 年 3 月.
- [2] 平成28年度原子力規制庁委託成果報告書「東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨 界評価手法の整備」、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、2018年3月.
- [3] 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「Multi-physics モデリングによる Ex-Vessel 溶融物挙動理解の深化」成果報告書、学校法人早稲田大学、2019年3月.
- [4] X. Chen, Z. Sun, L. Liu, G. Xi, Improved MPS method with variable-size particles, Int. J. Numer. Meth. Fluids 2016; 80:358–374, 2016.
- [5] Z. Tang, D. Wan, G. Chen, Q. Xiao, Numerical simulation of 3D violent free-surface flows by multiresolution MPS method, J. Ocean Eng. Mar. Energy 2 (2016) 355–364, 2016.
- [6] K. Shibata, S. Koshizuka, I. Masaie, Cost reduction of particle simulations by an ellipsoidal particle model, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 307 (2016) 411–450, 2016.
- S. Koshizuka, Y. Oka, Moving-Particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science Engineering 123 (1996) 421-434, 1996.
- [8] S. Koshizuka, K. Shibata, MPS-SW-MAIN-Ver.2.0, P 8827-1, 23, February 2006.
- [9] G. Duan, S. Koshizuka, A. Yamaji, B. Chen, X. Li, T. Tamai, An Accurate and Stable Multiphase Moving Particles Semi-implicit Method Based on Corrective Matrix for All Particle Interaction Models, International Journal for Numerical Methods in Engineering 115 (10), (2018) 1287-1314, 2018.
- [10] R. Xu, P. Stansby, D. Laurence, Accuracy and stability in incompressible SPH (ISPH) based on the projection method and a new approach, J. Comput. Phys., 228 (18), (2009) 6703-6725, 2009.
- [11] A. Khayyer, H. Gotoh, Y. Shimizu, Comparative study on accuracy and conservation properties of two particle regularization schemes and proposal of an optimized particle shifting scheme in ISPH context, J. Comput, Phys., 332 (2017) 236-256, 2017.
- [12] Y. Kikuchi, Y. Shigemasa, A. Oe, T. Ogata, Steady-State Freezing of Liquids in Laminar Flow between Two Parallel Plates, Nuclear Science and Technology, 23(11) (1986) 979-991, 1986.
- [13] M. Ramacciotti, C. Journeau, F. Sudreau, G. Cognet, Viscosity models for corium melts, Nuclear Engineering and Design, 204(1-3) (2001) 377-389, 2001.
- [14] 福島第一原子力発電所2号機ミュオン測定による炉内燃料デブリ位置把握について、東京 電力ホールディングス株式会社、https://photo.tepco.co.jp/library/160728\_01/160728\_01.pdf, 2016年7月28日(参照日:2019年11月5日).
- [15] 燃料デブリ取り出し準備(2018年4月26日現在)、東京電力ホールディングス株式会社、 https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/2018/images1/d180426\_08-j.pdf(参照日:2019年11月5日).

- [16] 燃料デブリ取り出し準備(2017年7月27日現在)、東京電力ホールディングス株式会社、 https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/2017/images2/d170727\_08-j.pdf(参照日:2019年11月5日).
- [17] 燃料デブリ取り出し準備(2017年11月30日現在)、東京電力ホールディングス株式会社、 https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/2017/images2/d171130\_08-j.pdf(参照日:2019年11月5日).
- [18] 小山、他、福島第一原子力発電所の原子炉格納容器内等で採取された試料の分析(1) 燃料 デブリの性状把握のための分析について、日本原子力学会 2019 年秋の大会、3E10、2019 年 9月.
- [19] 溝上伸也、他、福島第一原子力発電所の原子炉格納容器内等で採取された試料の分析(2)
  試料分析の実施枠組みとその成果の活用、日本原子力学会 2019 年秋の大会、3E11、2019 年 9月.
- [20] 小山、他、福島第一原子力発電所の原子炉格納容器内等で採取された試料の分析(3) 格納 容器内等で採取された試料の核種分析、日本原子力学会 2019 年秋の大会、3E12、2019 年 9 月.
- [21] 溝上伸也、他、福島第一原子力発電所の原子炉格納容器内等で採取された試料の分析(4) ウラン含有粒子に着目した詳細分析、日本原子力学会 2019 年秋の大会、3E13、2019 年 9 月.
- [22] 溝上暢人、他、福島第一原子力発電所の原子炉格納容器内等で採取された試料の分析(5) ウラン含有微粒子の生成メカニズムの考察、日本原子力学会 2019 年秋の大会、3E14、2019 年9月.
- [23] 佐藤、吉川、炉心物質のペデスタル移行挙動に着目した 1F プラントデータの分析、日本原 子力学会 2019 年秋の大会、3F08、2019 年 9 月.
- [24] I. Sato, An interpretation of Fukushima-Daiichi Unit 3 plant data covering the two-week accidentprogression phase based on correction for pressure data, Journal of Nuclear Science and Technology, 56, 5, 2019.
- [25] K. Wadayama, A. Yamaji, Estimation of thermal status of the fuel debris at the time of core slumping of 1F2 with MELCOR-2.2, International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research, FDR2019, May 25, 2019.
- [26] 佐藤、他、東京電力福島第一原子力発電所炉内状況把握の解析・評価(109)2号機、3号機の炉心物質移行過程における炉心エネルギーの差とその影響、日本原子力学会2018年秋の大会、3I03、2018年9月.
- [27] 荒井雄太、佐藤一憲、吉川信治、福島第一原子力発電所 3 号機における ADS 作動後の圧力 応答に係る GOTHIC 解析、日本原子力学会 2020 年春の年会、1G10、2020 年 3 月.
- [28] T. Schulenberg, Annual Report 2014 of the Institute for Nuclear and Energy Technologies, KIT-SR 7702 (2014).

- [29] D. Langstaff, M. Gunn, G. N. Greaves, A. Marsing , F. Kargl, Aerodynamic levitator furnace for measuring thermophysical properties of refractory liquids, Rev. Sci. Instrum., 84, 124901 (2013).
- [30] T. Kondo, H. Muta, K. Kurosaki, F. Kargl, A. Yamaji, M. Furuya, Y. Ohishi, Density and viscosity of liquid ZrO2 measured by aerodynamic levitation technique, Heliyon, 5, E02049 (2019).
- [31] W.-K. Rhim, S.-K. Chung, D. Barber, K.-F. Man, G. Gutt, A. Rulison, R. E. Spjut, An electrostatic levitator for high-temperature containerless materials processing in 1-g, Review of Scientific Instruments, 64, 10, 2961-2970 (1993).
- [32] H. Kobatake , J. Brillo, Density and viscosity of ternary Cr–Fe–Ni liquid alloys, J. Mater. Sci., 48, 6818-6824 (2013).
- [33] J. T. Okada, T. Ishikawa, Y. Watanabe, P.-F. Paradis , K. Kimura, Viscosity of liquid boron, Phys. Rev. B 81, 140201 (2010).
- [34] K. Murotani, S. Koshizuka, T. Tamai, K. Shibata, N. Mitsume, S. Yoshimura, S. Tanaka, K. Hasegawa, E. Nagai, T. Fujisawa, Development of Hierarchical Domain Decomposition Explicit MPS Method and Application to Large-scale Tsunami Analysis with Floating Objects, J. Adv. Simul. Sci. Eng. 1 (2014) 16-35, 2014, doi:10.15748/jasse.1.16.
- [35] K. Murotani, LexADV\_EMPS Explicit MPS (moving particle simulation) solver framework, 2014.
- [36] K. Lab, ParMETIS Parallel Graph Partitioning and Fill-reducing Matrix Ordering, 2013, (accessed November 22, 2019) http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/metis/parmetis/overview.
- [37] K. Schloegel, G. Karypis , V. Kumar, Parallel multilevel algorithms for multi-constraint graph partitioning, Eur. Conf. Parallel Process, (2000) 296-310, 2000.
- [38] C.Journeau, E. Boccaccio, C. Brayer, G. Cognet, J. Haquet, C. Jégou, P. Piluso, J. Monerris, Ex-vessel corium spreading: results from the VULCANO spreading tests, Nucl. Eng. Des. 223 (2003) 75-102.
- [39] G. Duan, A. Yamaji, S. Koshizuka, A novel multiphase MPS algorithm for modeling crust formation by highly viscous fluid for simulating corium spreading, Nuclear Engineering and design 343 (2019) 218-231, 2019.
\_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
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	位の例				
AI 立 是 SI 組 立 単位	SI 組立単位				
名称	記号				
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>				
体 積 立方メートル	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 <sup>2</sup>				
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>8</sup>				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>				
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 (b) (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 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$
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>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
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	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	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	Н	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 <sup>2</sup>	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, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH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 コヒーレントではない。
 (h)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。
 (a)測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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はとおらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM物告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	[ 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リ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 <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
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> s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	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> s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	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	名称	記号	乗数	名称	記号		
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	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	М	$10^{-15}$	フェムト	f		
$10^3$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а		
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z		
$10^{1}$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	v		

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=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

# 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	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J	
ダル	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=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

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	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	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	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	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>		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T		
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>		
(a) 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 尾	<b>属さないその他の単位の例</b>
	-	名利	5		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
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$