

JAEA-Review 2022-054 DOI:10.11484/jaea-review-2022-054

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3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)
-FY2021 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

February 2023

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。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 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. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, 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, 2023

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3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

(2022年10月24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3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(以下、「1F」と略す。) 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、令和元年度に採択された「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」の令和元年度から令和3年度の研究成果に ついて取りまとめたものである。本課題は令和3年度が最終年度となるため3年度分の成果を取 りまとめた。

IFの廃炉のためには炉内状況把握の更新が必要である。特に、1F2・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した。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1F2・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た。その結果、2・3 号機の原子炉圧力容器(RPV)からの先 行流出物に多量のウランが含有されていた可能性が低いことを示す知見が得られた。3 号機につ いては、二酸化ウラン(UO₂)主体の後続移行デブリがペデスタル中間架台構造物群を大規模に溶 かすことはなく堆積したと考えられることを示した。また、堆積分布の不確かさがデブリの臨界 性に及ぼす影響は限定的で、全体としては深い未臨界状態にあると考えられることを示した。

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

JAEA-Review 2022-054

Estimation of the In-depth Debris Status of Fukushima Unit-2 and Unit-3 with Multi-physics Modeling (Contract Research)

- FY2021 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 24, 2022)

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 FY2021.

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. (hereafter referred to "1F"). 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" conducted from FY2019 to FY2021. Since the final year of this proposal was FY2021, the results for three fiscal years were summarized.

Continuous update on understanding of the damaged 1F reactors is important for safe and efficient decommissioning of the reactors. This study aimed to estimate the in-depth debris status of the damaged 1F 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 acquisition in the three-year project from FY2019. As the results, a new insight has been gained, indicating that the preceding release from the reactor pressure vessel (RPV) is unlikely to contain large amount of UO₂ for both Unit-2 and Unit-3. Then, for Unit-3, the following UO₂ rich release from the RPV relocated to the pedestal region without significantly melting the pedestal structures. Any changes to the assumed distribution of the relocated debris may not have significant influences on the estimated criticality of the debris, and overall, the debris in Unit-3 pedestal region is expected to be well below criticality.

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	2
3.	令和元年度 採択課題	5
4.	令和2年度 採択課題	3
5.	令和3年度 採択課題 10	C
付約	録 成果報告書	3

Contents

1.	Outline c	of Nuclear	Energy	Science	& Tech	nology	and	Human	Resource	Developmen	t Proj	ect
		•••••							•••••			. 1
2.	Accepted	Proposal	in FY20	18								. 2
3.	Accepted	Proposal	in FY20	19	• • • • • • •							. 5
4.	Accepted	Proposal	in FY20	20	• • • • • • •							. 8
5.	Accepted	Proposal	in FY20	21								. 10

Appendix Result Report	Appendix Resul	t Report				13
------------------------	----------------	----------	--	--	--	----

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、「東京電力ホ 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式会社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

平成30年度採択課題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評価	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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題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

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
ー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 (~R2.3.31) 大曲 新矢 (R2.4.1~)	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 (~R3.6.30) 塚原 剛彦 (R3.7.1~)	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 (~R3.3.31) 岡山大学 (R3.4.1~)

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

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 (~R2.3.31) 竹下 健二 (R2.4.1~)	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

JAEA-Review 2022-054

4. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2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: 令和2年3月17日~令和2年5月14日(課題解決型) 令和2年5月13日~令和2年7月15日(国際協力型)

課題数:10課題

課題解決型廃炉研究プログラム	8 課題	(若手研究2課題、	一般研究6詞	果題)
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題	(日英共同研究)		

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2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れ の調査	楊 会龍 (~R4.7.31) 村上 健太 (~R4.8.1)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の 分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド 中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー 加速器研究 機構
α / β / γ 線ラジオリシス影響下における格納 容器系統内広域防食の実現:ナノバブルを用いた 新規防食技術の開発	渡邉 豊	東北大学
β、γ、X線同時解析による迅速・高感度放射性核 種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析 センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄 筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高 度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

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
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技 術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン 技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・ 航空技術 研究所

5. 令和3年度 採択課題

令和3年度は、2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: 令和3年3月16日~令和3年5月17日(課題解決型) 令和3年4月13日~令和3年7月1日(国際協力型 日英共同研究) 令和3年7月12日~令和3年8月18日(国際協力型 日露共同研究)

課題数:12課題

課題解決型廃炉研究プログラム	8 課題	
国際協力型廃炉研究プログラム	2課題(日英)、2課題(日露)	

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・日露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) 会議及びステアリ ングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和3年度 採択課題一覧

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
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を 活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性 評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブ リの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明 と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性デー ターベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び 安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの 性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分 析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学

課題名	研究代表者	所属機関
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発 研究	人見 啓太朗	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニ タリング手法の開発	安原 亮	自然科学 研究機構
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハ イブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構 築・安全評価	中瀬 正彦	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
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性 エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (~R4.1.31) 三輪 修一郎 (R4.2.1~)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレー タのナビゲーションおよび制御	淺間 一	東京大学

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
福島第一発電所 2、3 号機の事故進展シナリオに基 づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状 況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業 大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の 高度化	小原 徹	東京工業 大学

本報告書は、以下の課題の令和元年度から令和3年度の研究成果について取りまとめたものである。本課題は令和3年度が最終年度となるため3年度分の成果を取りまとめた。

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

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3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 R03I024)

成果報告書

令和4年3月

学校法人早稻田大学

JAEA-Review 2022-054

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」の令和元年度から令和3年度の 研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略x			Х
1.	はじめ	۲۵۲۵	1
2.	業務計	画	3
2	.1 全体	s計画と実施体制	3
	2.1.1	全体計画	3
	2.1.2	実施体制	7
2	.2 各実	雲施項目の計画	8
	2.2.1	MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析	8
	2.2.2	模擬デブリ流下実験	8
	2.2.3	実機デブリ流下履歴の同定(連携先: JAEA)	9
	2.2.4	浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)	9
	2.2.5	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	10
	2.2.6	3号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価	11
3.	業務の	実施内容及び成果	12
3	.1 MPS	法による溶融物挙動解析手法の改良と解析	12
	3.1.1	令和元年度の実施内容及び成果(概要)	12
	3.1.2	令和2年度の実施内容及び成果(概要)	15
	3.1.3	令和3年度の実施内容及び成果	17
	3.1.4	まとめ	27
3	.2 模撛	モデブリ流下実験	28
	3.2.1	令和元年度の実施内容及び成果(概要)	28
	3.2.2	令和2年度の実施内容及び成果(概要)	30
	3.2.3	令和3年度の実施内容及び成果	31
	3.2.4	まとめ	45
3	.3 実機	&デブリ流下履歴の同定(連携先:JAEA)	47
	3.3.1	令和元年度の実施内容及び成果(概要)	47
	3.3.2	令和2年度の実施内容及び成果(概要)	50
	3.3.3	令和3年度の実施内容及び成果	52
	3.3.4	まとめ	65
3	.4 浮边	差による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)	67
	3.4.1	令和元年度の実施内容及び成果(概要)	67
	3.4.2	令和2年度の実施内容及び成果(概要)	69
	3.4.3	令和3年度の実施内容及び成果	70
	3.4.4	まとめ	78
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	79
	3.5.1	令和元年度の実施内容及び成果(概要)	79
	3.5.2	令和2年度の実施内容及び成果(概要)	81

		3.5.3	令和3年度の実施内容及び成果8	33
		3.5.4	まとめ9	97
	3.	6 3 号	-機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価	99
		3.6.1	令和元年度の実施内容及び成果(概要)	99
		3.6.2	令和2年度の実施内容及び成果(概要)9	<i>)</i> 9
		3.6.3	令和3年度の実施内容及び成果1	101
		3.6.4	まとめ1	06
	3.	7 研究	帘推進	106
4.		結言		107
	4.	1 令利	口3年度のまとめ1	07
	4.	2 1F2	・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状の当初理解からの深化と今後の	
		課題	夏(3 年間のまとめ) 1	108
		4.2.1	3年間のまとめ1	108
		4.2.2	今後の課題1	109
5.		Append	ix(研究成果を実証等につなげる示唆) 1	111
	5.	1 研究	究成果を 1F2 号機の実証につなげる示唆 1	11
	5.	2 研究	究成果を 1F3 号機の実証につなげる示唆 1	12
	5.	3 研究	究成果を 1F1 号機の実証につなげる示唆 1	13

執筆者リスト

事業代表者	学校法人早稲田大学	准教授	山路 哲史
		教授	古谷 正裕
		次席研究員	LI Xin
		次席研究員	深井 尋史
委託先	国立大学法人大阪大学	准教授	大石 佑治
連携先	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	再雇用職員	佐藤 一憲

表一覧

表 2.1-1	年度別全体計画
表 3.1-1	改良 MPS 法による模擬デブリ流下実験の解析条件 23
表 3.2-1	重力分離実験の条件
表 3.2-2	崩壊熱模擬実験の条件
表 3.2-3	クエンチ実験の条件 34
表 3.2-4	凝固した金属堆積物の密度測定結果 42
表 3.2-5	4 種類の異なる堆積物の配置に対する CHF 測定値 43
表 3.5-1	デブリ冷却期及び冷却不足期の解析に用いた物性一覧89
表 3.5-2	VULCANO VF-U1 実験の解析に用いた物性一覧 93
表 3.5-3	1F3 号機ペデスタル燃料デブリの局所性状の推定の解析に用いた物性一覧 97
表 3.6-1	1F3 号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価に用いる解析条件の感度解析結果 102

义	一覧
---	----

図 2.1-1	実施内容の全体概要(計画時)	6
図 2.1-2	実施内容の全体概要(実施中に得た知見を反映)	6
図 2.1−3	実施体制図	7
図 3.1-1	MPS 法の新計算アルゴリズム(令和元年度)	13
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	14
図 3.1-3	層流水の凝固による平板流路閉塞実験の MPS 法解析結果例	14
図 3.1-4	MPS 法の新計算アルゴリズム(令和2年度)	16
図 3.1-5	模擬デブリ堆積分布の解析結果例(溶融塩初期温度:433 K)	16
図 3.1-6	MPS 法解析に用いたエンタルピーと温度の関係	21
図 3.1-7	MPS 法解析に用いた熱容量と温度の関係	21
図 3.1-8	エンタルピー誤差の比較	22
図 3.1-9	模擬デブリ流下実験の MPS 法解析体系	23
図 3.1-10	模擬デブリ流下実験の結果と解析結果の比較	25
図 3.1-11	模擬デブリ流下実験の結果と解析結果の比較(400秒)	26
図 3.1-12	表面熱伝達率が底部パラフィン層の溶融質量に及ぼす影響	26
図 3.2-1	模擬デブリ流下実験装置の概要(正面図)	29
図 3.2-2	アブレーション後模型表面形状計測結果の例	29
図 3.2-3	模擬デブリ流下実験装置の概要(先行固化物を含む)	30
図 3.2-4	円柱7本柱造形物への溶融物流下の様子の例	31
図 3.2-5	重力分離実験の概要	32
図 3.2-6	崩壊熱模擬実験の概要	33
図 3.2-7	模擬堆積デブリの構成	34
図 3.2-8	クエンチ実験設備の概要	35
図 3.2-9	飽和プール沸騰試験設備の概要	36
図 3.2-10	重力分離実験の観察結果(0 s、2 s、5 s)	38
図 3.2-11	重力分離実験の観察結果(10 s、60 s、150 s)	39
⊠ 3.2-12	重力分離試験の観察結果(300 s、600 s)	40
⊠ 3.2-13	崩壊熱を模擬した実験の観察結果 No.1	41
⊠ 3.2-14	クエンチ実験で凝固した金属の写真	42
図 3.2-15	伝熱面上の4種類の異なる堆積物配置の写真	44
図 3.2-16	4 種類の異なる堆積物配置による沸騰曲線	44
図 3.2-17	4 種類の異なる堆積物による沸騰熱伝達率	45
図 3.3-1	1F2 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	48
図 3.3-2	1F3 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	49
図 3.3-3	3 つの RPV バウンダリ破損モードの推定	50
図 3.3-4	1F3 号機におけるデブリ流下履歴の予測	51
図 3.3-5	1F2 号機の炉心エネルギー変化に関わる従来評価	53
図 3.3-6	最新知見を反映した 1F2 号機炉心エネルギー変化の最確評価	54
図 3.3-7	圧力、ライブカメラ映像等に基づくデブリ移行と蒸気発生についての推定	55

図 3.3-8	1F2 号機原子炉ウェル (PCV トップフランジ連結部)の写真	57
🗵 3. 3-9	PCV トップフランジからの高温ガス放出タイミングの候補	58
図 3.3-10	内部調査結果に基づく 1F2・3 号機ペデスタル流出物の概略的分類	59
図 3.3-11	令和3年度までの最新知見を踏まえた1F3号機炉心エネルギー変化の最確評価.	61
図 3.3-12	1F3 号機デブリ再冠水フェーズ初期における温度データと冷却材の経路推定	63
図 3.3-13	1F3 号機デブリ再冠水フェーズ全体における温度データ	64
図 3.4-1	減衰運動する Al ₂ O ₃ 液滴の直径の時間変化	67
図 3.4-2	溶融 Fe _{0.84} B _{0.16} の密度と粘性	68
図 3.4-3	1573 K で熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング	69
図 3.4-4	反応挙動評価実験の概要	71
図 3.4-5	作製した(SUS)0.98(B4C)0.02インゴットの写真と DTA 測定結果	71
図 3.4-6	4 wt% Gd 添加 UO ₂ ペレットの外観写真、SEM/EDX 分析結果、XRD 測定結果	71
図 3.4-7	熱処理した試料断面の SEM/EDX 分析結果	72
図 3.4-8	1773 K で熱処理した試料断面の SEM/EDX 分析結果	72
図 3.4-9	ADL を用いたクエンチ実験の概要	73
図 3.4-10	放電プラズマ焼結法によって焼結したバルク試料と切断した試料	74
図 3.4-11	(SUS304L) _{0.98} (B ₄ C) _{0.02} +5 vol% ZrO ₂ の焼結後バルク試料の SEM/EDX 観察結果	74
図 3.4-12	(SUS) _{0.98} (B ₄ C) _{0.02} +5 vol% ZrO ₂ のガス浮遊溶融時の様子	74
図 3.4-13	クエンチした(SUS304L) _{0.98} (B ₄ C) _{0.02} +5 vo1% ZrO ₂ の外観と SEM/EDX 分析結果	75
図 3.4-14	ADL を用いた密度評価方法の概要	76
図 3.4-15	液滴試料の冷却曲線	76
図 3.4-16	ADL を用いて測定した Pt の密度	77
図 3.4-17	ADL を用いて測定した(SUS) _{0.98} (B ₄ C) _{0.02} の密度	77
図 3.5-1	MPS 法の新計算アルゴリズム(令和2年度)	80
図 3.5-2	並列計算機構成	80
図 3.5-3	1F3 号機ペデスタルデブリ移行解析の解析体系	82
図 3.5-4	デブリ流下・堆積挙動解析結果のまとめと考察(デブリ移行期)	82
図 3.5-5	デブリ表面熱流束と表面温度の関係	84
図 3.5-6	デブリ移行期の挙動解析結果(追加ケース1:高温)	85
図 3.5-7	デブリ移行期終了時のデブリ分布(追加ケース1:高温)	86
図 3.5-8	デブリ移行期終了時のデブリ分布(追加ケース2:低温)	86
図 3.5-9	デブリ移行期終了時のデブリ分布と温度分布(解析結果マップ)	86
図 3.5-10	デブリ冷却期のデブリ分布と温度分布(熱平衡到達時)	90
図 3.5-11	デブリ冷却不足期のデブリ分布と温度分布の推移(ケース1断面図)	91
図 3.5-12	デブリ冷却不足期のデブリ分布と温度分布の推移(ケース 2 及びケース 3 断面	回)
		91
図 3.5-13	冷却不足期の崩壊熱と除熱量の時間推移	92
⊠ 3.5-14	VULCANO VF-U1 実験の体系図と解析体系	94
図 3.5-15	解析に用いた加熱履歴	94
図 3.5-16	VULCANO VF-U1 実験の改良 MPS 法による解析結果	95
図 3.5-17	1F3 号機局所デブリ性状の推定解析結果の例	97

図 3.6-1	均質燃料デブリ無限増倍率の評価結果 (5.2 GWd/t) 100
図 3.6-2	燃料デブリ臨界性の感度解析体系(中間作業架台上・粒子状デブリ)100
図 3.6-3	1F3 号機ペデスタル燃料デブリ臨界性の解析体系 102
図 3.6-4	1F3 号機ペデスタル燃料デブリ臨界性評価結果(一様広がり分布) 103
図 3.6-5	1F3 号機ペデスタル燃料デブリ臨界性評価結果(中央集中堆積分布) 105
図 3.6-6	1F3 号機ペデスタル燃料デブリ臨界性評価結果(非一様・中央集中堆積分布)105
図 4.2-1	本事業提案時(令和元年度)のペデスタル燃料デブリ深さ方向性状の理解110
⊠ 4.2-2	本事業完了時(令和3年度)のペデスタル燃料デブリ深さ方向性状の理解110
図 5.1-1	研究成果を 1F2 号機の実証につなげる示唆及び課題112

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(制御棒案内管駆動機構)
CRGT	:Control Rod Guide Tube(制御棒ガイド管)
D/W	:Drywell (ドライウェル)
EDX	:Energy Dispersive X-ray Spectroscopy(エネルギー分散型 X 線分析装置)
EMPS	:分散メモリ並列 MPS 陽解法ソルバーフレームワーク
GOTHIC	: Generation of Thermal-Hydraulic Information for Containments コード 米国 Numerical Applications Inc.により開発された汎用熱流動解析コード
JAEA	:Japan Atomic Energy Agency(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
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)
MELCOR	:米国サンディア国立研究所が開発している米国原子力規制委員会(NRC)の総合シ ビアアクシデント(過酷事故)解析コード
MPI	: Message Passing Interface (メッセージ パッシング インターフェース) 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1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1つ)
OpenMP	: Open Multi-Processing 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)
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)
PIP	:制御棒位置指示プローブ
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)
- SCDAPSIM :米国 NRC のスポンサーシップで開発・維持され、その後は米国 Innovative Systems Software 社により開発されている総合シビアアクシデント解析コード
- SEM : Scanning Electron Microscope (走査型電子顕微鏡)
- SUS : Stainless Steel (ステンレス鋼)
- 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

東京電力ホールディング株式会社福島第一原子力発電所(以下、「1F」と略す。)の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。1F3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。1F2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(以下、「RPV」と略す。)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、1F2・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 1F3 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 1F2 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、二酸化ウラン (UO₂) を含む高温融体物性実験を連成した、Multi-Physics モデリングによる炉外 (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、1F2・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 目的とした。

本研究の実施内容

(1) MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析

(i) 令和元年度の実施内容

1F2・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、令和元年度は 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。

(ii) 令和2年度の実施内容

令和元年度に開発した MPS 法の新解析アルゴリズムを学校法人早稲田大学(以下、「早稲田大学」 と略す。)の MPS 法解析コードに実装して、従来に比べて計算コストを低減した新クラストモデル を開発した。クラスト形成に伴う計算コスト増大を緩和するため、計算粒子の固相率、速度、近 傍粒子の関係等を活用し、一定の条件を満たしたクラスト粒子については粘性計算等をスキップ した。実施項目(2)の模擬デブリ流下実験に対応し、改良した新クラストモデルを実装した解析を 実施し、改良 MPS 解析手法の妥当性を確認した。

早稲田大学の MPS 法解析コードに実装した新クラストモデルでは、固相率が 1.0 に達し、且つ 速度が閾値(例:10⁻⁵ m/s)を下回った粒子について外力(重力)、外力による粒子の速度・位置 補正、近傍粒子との粘性相互作用、近傍粒子との圧力及び粘性相互作用に基づく粒子の座標補正 をスキップするようにした。実施項目(2)の模擬デブリ流下実験に対応した解析を実施し、実験で 得られた模擬デブリの堆積分布等を再現し、改良 MPS 解析手法の妥当性を確認した。

(iii) 令和3年度の実施内容

令和2年度に開発したデブリ移行期解析用の MPS 法を改良した。解析体系中の流体粒子数(または他の適切な状態変数)等に応じて実機スケールのデブリ冷却過程の評価に要する計算コストを低減できるように不要な計算のスキップまたは計算時間幅を大きくできるようにするための判定パラメータ等を明らかにした。そして、改良 MPS 法を用いて成層化解析の妥当性を確認した。 実施項目(2)の模擬デブリ流下実験に対応し、デブリの流下・成層化パターンの実験データと解析結果を比較し、改良 MPS 法による解析の妥当性を確認した。

計算コストを低減するために適切な判定パラメータを検討し、粒子の温度をパラメータとして 判定すれば計算時間幅を大きくしても、計算精度を損なわないことを明らかにした。また、実施 項目(2)の模擬デブリ流下実験で得られた凝固物の成層化パターンを再現し、改良 MPS 法を用いた 成層化解析の妥当性を確認した。

(2) 模擬デブリ流下実験

(i) 令和元年度の実施内容

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、令和元年度の実験系は、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溶融浸食(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。 (ii) 令和2年度の実施内容

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、先行デブリが固化した上に、組成の異なるデブリが流下して分散する挙動を対象とした実験を行い、MPS 法の妥当性確認データを得た。模擬ペデスタルに先行デブリが固化した形状を三次元造形した。粘性や熱伝導率が異なる流体を模擬デブリとして流下し、先行デブリに後続デブリが層状に堆積する挙動を可視化し、深さ方向の分布を定量化して MPS 法の妥当性確認データを得た。

先行デブリが固化した列柱に溶融塩を流下させる模擬デブリ流下実験を行い、流下しながら固 化する状態を可視化すると共に、温度分布を計測し、MPS 法の妥当性確認データを得た。また三次 元造形したペデスタルに溶融鉛ビスマスが流下する実験を行い、ペデスタルが浸水した場合には ペデスタルへの浸食が制限されること、溶融鉛ビスマスの過熱度が小さいときには浸食量がさら に限定され、MPS 法による 1F3 号機の解析ではペデスタル床まで移行した溶融物は急冷されると 仮定することの妥当性を確認した。

(iii) 令和3年度の実施内容

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、令和2年度に実施し た先行デブリが固化した上に、組成の異なるデブリが流下して分散する挙動を対象とした実験を 改良した。具体的には、先行デブリが凝固した後に、後続デブリが先行デブリを溶融させ、共に 凝固する挙動を三次元可視化し、深さ方向の相分布を定量化して MPS 法の妥当性確認データを得 た。

固化した先行デブリを模擬したパラフィンに、後続デブリを模擬した共晶組成鉛ビスマス (PbBi) が流下して分散する挙動を光学カメラで三次元可視化し、改良 MPS 法の妥当性確認に必要な固体 パラフィン、溶融パラフィン、再度凝固したパラフィン、溶融 PbBi、凝固した PbBi の深さ分布デ ータを得た。

(3) 実機デブリ流下履歴の同定(連携先: JAEA)

(i) 令和元年度の実施内容

1F2・3 号機 RPV から原子炉格納容器(以下、「PCV」と略す。)ペデスタルへのデブリ移行履歴の 推定を目標として、令和元年度は RPV からペデスタルに至る領域の構造情報、1F2・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、1F2・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、1F2 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、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。1F2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。

(ii) 令和2年度の実施内容

令和元年度に得た燃料デブリエンタルピーに係る評価結果に基づき、1F2・3 号機における炉心 物質流下挙動(流動性、流下時間、流下経路等)の評価を進めた。1F2 号機については、溶融金属 対流伝熱による RPV 側部破損の可能性を考慮し、その後の RPV 破損拡大・後続破損、及び破損後 の制御棒案内管駆動機構(以下、「CRD」と略す。)やその支持構造領域におけるデブリ流下挙動に 係る支配要因(複数)に着目した評価を進め、1F2号機における現実的なデブリ流下履歴を概略評 価した。1F3号機については、1F2号機との燃料エンタルピーの差に着目してデブリ流下挙動に係 る支配要因を推定した。

1F2 号機については、RPV 下部プレナムにおける溶融金属対流伝熱特性や溶融金属の CRD 構造流下 特性等の支配因子に着目し、RPV 側部と CRD 貫通部を通じた溶融金属流出フェーズに続き、金属 リッチな燃料デブリが RPV 底部付近から流出したと評価した。1F3 号機については、1F2 号機に比 ベペデスタル移行物質のエネルギーが高いと考えられることに着目し、圧力履歴の分析を行った。 この結果、溶融金属や金属リッチ燃料デブリの可能性に加え、酸化物リッチな燃料デブリが流出 しており、流出時とその後の熱条件は液相水との接触による蒸気発生に支配されると推定した。

(iii) 令和3年度の実施内容

令和2年度までに得た燃料デブリエンタルピーに係る評価結果に基づき、1F2・3号機における 炉心物質流下挙動(流動性、流下時間、流下経路など)の評価を行った。2号機については、令和 2年度の評価を基本として、最新知見を考慮して見直しを行った。3号機については、令和2年度 に早稲田大学が実施した模擬デブリ流下実験と、これを踏まえて早稲田大学と国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」と略す。)が連携して実施した MPS 法を適用したデブリ・ 構造材相互作用解析の結果に基づき、高粘性デブリに着目した流出挙動と構造材との相互作用を 評価した。これらにより、1F2・3号機における実機デブリ流下履歴の評価結果をまとめた。

2 号機については燃料デブリエンタルピーに係る最新知見を考慮して見直し、炉心物質のペデ スタル移行開始時の温度は 1500 K 程度であったとの評価を得た。1F3 号機については、1500 K よ りも高い温度で酸化物主体の高粘性デブリが流下したが、ペデスタル構造物群の溶融は限定的で あったと評価した。これらにより、1F2 号機では先行流出物のようなものから生コンクリート程度 の粘性を有する炉心物質が 2 時間前後でペデスタルに流下し、1F3 号機ではこれらに加えて、そ の後の高粘性の燃料デブリのようなものの流下も含めて 7 時間前後で炉心物質がペデスタルへと 流下したものと推定した。

(4) 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

(i) 令和元年度の実施内容

1F2・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、金属ボライドー(U0₂-Zr0₂-Zr)の高温相状態及び液相の粘性の評価を目標として、令和元年度は国立大学法人大阪大学(以下、「大阪大学」と略す。)に設置されている酸化物試料用のガス浮遊法(以下、「ADL」と略す。)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。Al₂0₃ 試料の液滴振動を従来よりも高い時間 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_{0.84}B_{0.16} の融体密度と粘性を測定した。

(ii) 令和2年度の実施内容

ボライドと高温燃料が反応して生成する液相についての知見を得るため、Fe-B 共晶組成の合金 と燃料(U02、Zr02、Zr等)を坩堝に入れて電気炉で熱処理した。Fe-B 共晶合金は1470 K 程度で 溶融するため、1470 K 程度以上の温度で熱処理することで Fe-B 融体と固体燃料を反応させた。 熱処理後の試料断面を、走査型電子顕微鏡及びエネルギー分散型 X 線分析装置(以下、「SEM/EDX」 と略す。)等によって観察することで、どのような液相が生成し得るかを評価した。また、ボライ ドと燃料(U02、Zr02、Zr等)が反応して生成する融体の物性を明らかにすることを目指し、ADL を 用いてボライドや燃料を含む高温融体の粘性等の物性を評価した。

Fe-B 系において最も低い共晶温度となる Fe_{0.84}B_{0.16}の組成のインゴットを作製し、U02ペレット と Fe_{0.84}B_{0.16}インゴットを Ar フロー雰囲気下で 1573 K と 1673 K で 10 時間熱処理した。熱処理後 の試料の断面を SEM/EDX によって観察した結果、U は Fe-B 相中には確認できなかった。これは還 元雰囲気において Fe-B 溶融相には U はほとんど溶けださないことを示唆している。また、ボライ ドを含む高温融体として Fe_{0.84}B_{0.16}の 1673 K 程度における粘性を、大阪大学において ADL をベー スに独自に開発した手法である液滴落下反跳法を用いて評価した。

(iii) 令和3年度の実施内容

液相の相状態を把握することを狙い、溶融した金属ボライドー燃料(U02、Zr02、Zr等)試料を 急冷凝固させた。ADLによって浮遊させた試料をレーザーによって加熱し、液滴とした。液滴を金 属板上や水中に落下させることにより、急冷凝固させた。その後、凝固した試料の断面を SEM/EDX によって観察し、組織及び元素分布を調べた。その結果より、液相の相状態を評価した。また、 ボライド-燃料高温相状態についての知見等を反映させつつ炉心溶融物に関する物性を、ADLを用 いて評価した。

ステンレス鋼(以下、「SUS」と略す。)、B₄C、ZrO₂からなるペレットを焼結によって作製し、ADL によって浮遊溶融させ、金属板上や水中に落下させて急冷凝固させた。さらに、SUS と B₄C 共晶合 金と UO₂ペレットを電気炉中で加熱して共晶合金を溶融させ、炉冷により凝固させた。凝固体の断 面を SEM/EDX により評価することにより、UO₂中の U は 1770 K 程度の共晶組成の SUS-B₄C 溶融合 金中には、ほとんど溶出しないことを明らかにした。この知見を元に、共晶組成の SUS-B₄C 溶融合 金に着目し、ADL を用いて溶融相の密度を評価した。

(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

(i) 令和元年度の実施内容

1F2・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、 令和元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 MPS 陽解法ソルバーフレームワーク用ライブラリ(以下、「EMPS ライブラリ」と 略す。)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。
(ii) 令和2年度の実施内容

1F3 号機ペデスタル堆積物分布を検討するための解析体系を構築した。溶融物の流下境界には、 凝固粒子タイプに対応した境界条件を与えた。実機デブリ流下履歴に対応するために、実機で想 定される溶融物、凝固物、ペデスタル床コンクリートの物性モデルを組み込んだ。このようにし て構築した解析体系を令和元年度に整備した領域分割法で大規模並列計算用に領域分割した。

MPS 法の新クラストモデルを実装した 1F3 号機ペデスタル領域の三次元解析体系を構築し、解 析条件に応じて解析体系を 4 領域以上に分割したメモリ分散並列計算とメモリ共有並列計算を併 用した並列計算を実施した。実機で想定される溶融物の初期温度、初期粘性、蒸気自然対流冷却 の効果を考慮した解析を実施し、溶融物が中間作業架台構造物群を大規模に溶融崩落させずに堆 積する条件を示した。

(iii) 令和3年度の実施内容

令和2年度に作成した1F3号機ペデスタル堆積物分布を検討するための解析モデルを改良した。 先行流出物の溶融・凝固モデルを追加し、実施項目(1)のMPS法の改良を反映した大規模並列計算 機実験により、1F3号機ペデスタルへの後続溶融物移行期から冷却期を経て冷却不足期までの先 行流出物と後続溶融物の堆積挙動を解析した。実施項目(3)で示した実機デブリ流下履歴及び実施 項目(4)で得られた高温融体物性を考慮し、1F3号機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布を示 した。

1F3 号機ペデスタル床上の先行流出物に溶融・凝固モデルを追加し、実施項目(3)で示した実機 デブリ流下履歴を考慮すれば、1F3 号機ペデスタルに移行した後続溶融物は、移行期、冷却期、冷 却不足期を通してペデスタル構造物群や先行流出物を大規模に溶融させることなく堆積したと考 えられることを示した。但し、ペデスタルコンクリート側壁近傍で局所的に高温になった場所が あった場合には、実施項目(4)で得られた高温融体物性を考慮すれば、側壁近傍に金属相が多く分 布している可能性が高いことを示した。

(6)3号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価

(i) 令和元年度の実施内容

本実施項目は、令和元年度は実施せず、当初の計画通り令和2年度から3年度までの2年間実施した。

(ii) 令和2年度の実施内容

燃料集合体中の燃料棒配列が 8 列 8 行の沸騰水型軽水炉用燃料(8×8BWR 燃料)の運転中の炉 内燃料組成変化を概略考慮するために、汎用核計算コード SRAC2006 の衝突確率法に基づく詳細エ ネルギー群無限体系のセル燃焼計算を実施した。得られた均質化マクロ断面積を中性子拡散近似 法に基づくペデスタルを模擬した解析体系に配置し、ペデスタル燃料デブリの臨界性を評価する ための解析システムを構築した。成層化堆積した燃料デブリを模擬した試解析体系を構築し、原 子力規制庁事業等も参考に適当な燃料燃焼度を仮置きした試解析を実施して、臨界性を評価した。

無限体系のセル燃焼計算の結果、燃料組成の評価結果は原子力規制庁事業による推定結果と概 ね一致した。また、中性子拡散近似法に基づくペデスタル燃料デブリの臨界性評価体系の試解析 により得られた中性子実効増倍率は、同様の条件で参照解とした中性子輸送計算に基づく解析結 果と概ね一致した。 (iii) 令和3年度の実施内容

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(実施項目(5))から得られた燃料デブリ成層化パターンを令和2年度までに整備した臨界性評価解析体系に反映し、最も考え得るパターンとそれ以外に可能性として考えられるパターンの臨界性(中性子実行増倍率)を評価した。

実施項目(5)で得られた燃料デブリ成層化パターンのうち、比較的に低温(2000 K)で連続的に 後続溶融物が移行した場合の燃料デブリ分布を基本パターンとし、その中性子実効増倍率は、制 御棒や可燃性毒物の存在を無視すると約1.03と評価されるが、可燃性毒物が均一にデブリ中に存 在する場合は0.81と評価されることを示した。また、それ以外のパターンの中性子実効増倍率は、 可燃性毒物を無視すると約1.01~1.05と評価され、可燃性毒物が均一にデブリ中に存在する場合 は約0.80~0.83と評価されることを示した。

(7) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター(以下、「CLADS」と略 す。)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の研究代表者間等でメールやオンライン会議システ ム等を活用して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。主要な打 合せ実施日は以下の通り。

令和元年度: 令和元年10月29日、11月26日、令和2年1月29日

- 令和 2 年度: 令和 2 年 6 月 18 日、7 月 11 日、7 月 14 日、8 月 24 日、11 月 17 日、令和 3 年 2 月 17 日
- 令和3年度: 令和3年5月10日、7月28日、9月3日、10月11日、11月19日

令和2年度までの成果報告書:

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, JAEA-Review 2020-035, https://doi.org/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); 令和2年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, JAEA-Review 2021-034, https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-034

1. はじめに

IF の廃炉のための NDF 戦略プラン 2018[50]では IF からの初号機の燃料デブリ取り出し開始を 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 1F2・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。1F3 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。1F2 号機ペデスタルのデブリ深部に大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、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、1F2・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:平成 28~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 による研究「炉 内性状把握の精度向上に向けた基盤研究」(平成 30~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。「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」(原子力規制庁事業:平成 26~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 1F3 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 1F2 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、二酸化ウラン(UO₂) を含む高温融体物性実験を連成した、Multi-Physics モデリングによる炉外(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 ZrO₂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、1F2・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 目的とした。令和元年度から令和3年度までの3カ年計画で以下を実施した。

- 1. MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析
- 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: JAEA)
- 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(但し、令和2~3年度の2年間)
- 7. 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 全体計画と実施体制
- 2.1.1 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、1F2・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、本研究は令和元年度~令和3年度の3年間に以下を実施する計画とし た。

- (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: JAEA)
- (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(但し、令和 2~3 年度の2年間)
- (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る実施項目(1)、(2)、(5)、(6) は早 稲田大学で実施する計画とした(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 JAEA の並列計算機も活用することを想定した)。実機デブリ流下履歴の同定(実 施項目(3))は JAEA で実施する計画とした。浮遊法による高温融体物性評価(実施項目(4))は大 阪大学で実施する計画とした。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計画 とした。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。また、業務実施中 に得た新たな知見(1F3 号機事故進展の理解の深化及びペデスタル構造物群とデブリの相互作用 の理解等)を反映して精緻化した全体概要を図 2.1-2 に示す。当初の計画は従来のコア・コンク リート反応(以下、「MCCI」と略す。)実験の理解に基づいていたが、本業務により得られた知見 を反映し、ペデスタル構造物群と燃料デブリの相互作用に着目して、実施計画を精緻化した。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

1F2・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複数の方向から可視化し、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: JAEA)

1F2・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、1F2・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、1F2 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。1F3 号機に ついては、1F2 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 1F2 号機との差に 着目してその流出挙動に係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、1F3 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)

1F2・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、金属ボライドー(U0₂-Zr0₂-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U0₂、Zr0₂、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ADL 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 SEM/EDX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 ADL 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

1F3 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、1F3 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(令和2~3年度の2年間)

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、1F3 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 列 8 行の沸騰水型軽水炉 用燃料(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率を評価する。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率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 項目	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 <u> 妥当性確認</u> →	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 ◆ → → まとめ・証価	▲ 各実施項目間の連携 まとめ・評価	◆ 各実施項目間の連携 まとめ・評価

表 2.1-1 年度別全体計画



図 2.1-1 実施内容の全体概要(計画時)



図 2.1-2 実施内容の全体概要(実施中に得た知見を反映)

2.1.2 実施体制

本研究の実施体制を図 2.1-3 に示す。課題全体の取りまとめ、MPS 法の改良・解析とデブリ臨界 性評価、模擬デブリ流下実験は早稲田大学が行う。浮遊法による高温融体物性評価は大阪大学に 再委託する。実機デブリ流下履歴の同定は連携先(JAEA)が実施する。



図 2.1-3 実施体制図

2.2 各実施項目の計画

- 2.2.1 MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析
- (1) 令和元年度の計画

1F2・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、令和元年度 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) 令和2年度の計画

令和元年度に開発した MPS 法の新解析アルゴリズムを早稲田大学の MPS 法解析コードに実装し て、従来に比べて計算コストを低減した新クラストモデルを開発する。クラスト形成に伴う計算 コスト増大を緩和するため、計算粒子の固相率、速度、近傍粒子の関係等を活用し、一定の条件 を満たしたクラスト粒子については粘性計算等をスキップする。実施項目(2)の模擬デブリ流下実 験に対応し、改良した新クラストモデルを実装した解析を実施し、改良 MPS 解析手法の妥当性を 確認する。

(3) 令和3年度の計画

令和2年度に開発したデブリ移行期解析用の MPS 法を改良する。解析体系中の流体粒子数(または他の適切な状態変数)等に応じて実機スケールのデブリ冷却過程の評価に要する計算コストを低減できるように不要な計算のスキップまたは計算時間幅を大きくできるようにするための判定パラメータ等を明らかにする。そして、改良 MPS 法を用いて成層化解析の妥当性を確認する。 実施項目(2)の模擬デブリ流下実験に対応し、デブリの流下・成層化パターンの実験データと解析結果を比較し、改良 MPS 法による解析の妥当性を確認する。

2.2.2 模擬デブリ流下実験

(1) 令和元年度の計画

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、令和元年度の実験系は、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。

(2) 令和2年度の計画

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、先行デブリが固化した上に、組成の異なるデブリが流下して分散する挙動を対象とした実験を行い、MPS 法の妥当性確認データを得る。模擬ペデスタルに先行デブリが固化した形状を三次元造形する。粘性や熱伝導率が異なる流体を模擬デブリとして流下し、先行デブリに後続デブリが層状に堆積する挙動を可視化し、深さ方向の分布を定量化して MPS 法の妥当性確認データを得る。

(3) 令和3年度の計画

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、令和2年度に実施した先行デブリが固化した上に、組成の異なるデブリが流下して分散する挙動を対象とした実験を 改良する。具体的には、先行デブリが凝固した後に、後続デブリが先行デブリを溶融させ、共に 固凝する挙動を三次元可視化し、深さ方向の相分布を定量化して MPS 法の妥当性確認データを得 る。

2.2.3 実機デブリ流下履歴の同定(連携先: JAEA)

(1) 令和元年度の計画

1F2・3 号機 RPV から PCV ペデスタルへのデブリ移行履歴の推定を目標として、令和元年度は RPV からペデスタルに至る領域の構造情報、1F2・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、1F2・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、 1F2 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。

(2) 令和2年度の計画

令和元年度に得た燃料デブリエンタルピーに係る評価結果に基づき、1F2・3 号機における炉心物質流下挙動(流動性、流下時間、流下経路等)の評価を進める。1F2 号機については、溶融金属対流伝熱による RPV 側部破損の可能性を考慮し、その後の RPV 破損拡大・後続破損、及び破損後の CRD やその支持構造領域におけるデブリ流下挙動に係る支配要因(複数)に着目した評価を進め、1F2 号機における現実的なデブリ流下履歴を概略評価する。1F3 号機については、1F2 号機との燃料エンタルピーの差に着目してデブリ流下挙動に係る支配要因を推定する。

(3) 令和3年度の計画

令和2年度までに得た燃料デブリエンタルピーに係る評価結果に基づき、1F2・3号機における 炉心物質流下挙動(流動性、流下時間、流下経路など)の評価を行う。1F2号機については、令和 2年度の評価を基本として、最新知見を考慮して見直す。1F3号機については、令和2年度に早稲 田大学が実施した模擬デブリ流下実験と、これを踏まえて早稲田大学とJAEAが連携して実施した MPS法を適用したデブリ・構造材相互作用解析の結果に基づき、高粘性デブリに着目した流出挙動 と構造材との相互作用を評価する。これらにより、1F2・3号機における実機デブリ流下履歴の評 価結果をまとめる。

2.2.4 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

(1) 令和元年度の計画

1F2・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、金属ボライドー(U0₂-Zr0₂-Zr)の高温相状態及び液相の粘性の評価を目標として、令和元年度は大阪大学に設置されている 酸化物試料用の ADL 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 るなどして、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。 (2) 令和2年度の計画

ボライドと高温燃料が反応して生成する液相についての知見を得るため、Fe-B 共晶組成の合金 と燃料(U0₂、Zr0₂、Zr等)を坩堝に入れて電気炉で熱処理する。Fe-B 共晶合金は1470 K 程度で 溶融するため、1470 K 程度以上の温度で熱処理することで Fe-B 融体と固体燃料を反応させる。 熱処理後の試料断面を SEM/EDX 等によって観察することで、どのような液相が生成し得るかを評 価する。また、ボライドと燃料(U0₂、Zr0₂、Zr等)が反応して生成する融体の物性を明らかにす ることを目指し、ADL を用いてボライドや燃料を含む高温融体の粘性等の物性を評価する。

(3) 令和3年度の計画

液相の相状態を把握することを狙い、溶融した金属ボライドー燃料(U02、Zr02、Zr等)試料を 急冷凝固させる。ADLによって浮遊させた試料をレーザーによって加熱し、液滴とする。液滴を金 属板上や水中に落下させることにより、急冷凝固させる。その後、凝固した試料の断面を SEM/EDX によって観察し、組織及び元素分布を調べる。その結果より、液相の相状態を評価する。また、 ボライド-燃料高温相状態についての知見等を反映させつつ炉心溶融物に関する物性を、ADLを用 いて評価する。

2.2.5 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

(1) 令和元年度の計画

1F2・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、 令和元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。

(2) 令和2年度の計画

1F3 号機ペデスタル堆積物分布を検討するための解析体系を構築する。溶融物の流下境界には、 凝固粒子タイプに対応した境界条件を与える。実機デブリ流下履歴に対応するために、実機で想 定される溶融物、凝固物、ペデスタル床コンクリートの物性モデルを組み込む。このようにして 構築した解析体系を令和元年度に整備した領域分割法で大規模並列計算用に領域分割する。

(3) 令和3年度の計画

令和2年度に作成した1F3号機ペデスタル堆積物分布を検討するための解析モデルを改良する。 先行流出物の溶融・凝固モデルを追加し、実施項目(1)のMPS法の改良を反映した大規模並列計算 機実験により、1F3号機ペデスタルへの後続溶融物移行期から冷却期を経て冷却不足期までの先 行流出物と後続溶融物の堆積挙動を解析する。実施項目(3)で示した実機デブリ流下履歴及び実施 項目(4)で得られた高温融体物性を考慮し、1F3号機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布を示 す。

- 2.2.6 3号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価
- (1) 令和元年度の計画

本実施項目は、令和元年度は実施せず、令和2年度から3年度までの2年間実施する。

(2) 令和2年度の計画

8×8BWR 燃料の運転中の炉内燃料組成変化を概略考慮するために、汎用核計算コード SRAC2006 の衝突確率法に基づく詳細エネルギー群無限体系のセル燃焼計算を実施する。得られた均質化マ クロ断面積を中性子拡散近似法に基づくペデスタルを模擬した解析体系に配置し、ペデスタル燃 料デブリの臨界性を評価するための解析システムを構築する。成層化堆積した燃料デブリを模擬 した試解析体系を構築し、原子力規制庁事業等も参考に適当な燃料燃焼度を仮置きした試解析を 実施して、臨界性を評価する。

(3) 令和3年度の計画

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(実施項目(5))から得られた燃料デブリ成層化パターンを令和2年度までに整備した臨界性評価解析体系に反映し、最も考え得るパターンとそれ以外に可能性として考えられるパターンの臨界性(中性子実行増倍率)を評価する。

- 3. 業務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
 - 3.1.1 令和元年度の実施内容及び成果(概要)

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]である。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 ことを示した。

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(固相率)を導入した。さらに、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、図 3.1-1 に示すように、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。

改良 MPS 法の妥当性を確認するために、層流水の凝固による平板流路閉塞実験(図 3.1-2)を対 象にしたベンチマーク試解析を実施した。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。

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。

レイノルズ数(Re)700の層流水のケースについて異なる無次元壁温度(壁温度とバルク流体温度の比に-1を乗じた無次元数)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3.1-3に示す。同解析例では粒子径が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。インテル®Xeon®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。



図 3.1-1 MPS 法の新計算アルゴリズム(令和元年度)



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 法解析結果例

3.1.2 令和2年度の実施内容及び成果(概要)

令和元年度に開発した MPS 法の改良アルゴリズムでは、粒子の状態変数の1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。しかし、このようなアルゴリズムは、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。)に適用するのは不適切である。

そこで、令和2年度は、図3.1-4に示すような、汎用性と数値計算精度/安定性を向上した新たな改良アルゴリズムを検討し、MPS法の解析コードに実装した。改良アルゴリズム(令和2年度)では、粒子の固相率だけでなく速度も判定条件に加えた。固相率が0.5以上に達して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した。標準的な解析では10⁻⁵ m/s以下で粒子は実効的に運動を止めていると考え、凝固判定した。このとき、計算コストの大きな一部の計算項目(重力等の外力項の計算、外力による粒子の仮移動、粘性計算、圧力と粘性に基づく最終的な粒子の移動計算)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、計算コストの低減を両立した。

さらに、改良アルゴリズム(令和2年度)を用いた新クラストモデルをMPS法の解析コードに 実装した。新クラストモデルでは、固相率が閾値以下の場合は従来と同様に固相率の上昇に応じ て粘性が指数関数的に増大するモデルを用いた。従来は、固相率が閾値(例:0.5)に達したら、 その粒子の座標を固定していた。改良 MPS法では、その時点では座標は固定せず、粘性をさらに 大きくし、実質的に凝固した固体としてその運動(流れ)を解く。このとき、固体粒子の粘性は 極めて大きいため、壁や構造物等の停止した粒子の近傍では大きな速度の拡散力が働き、固体粒 子の速度は急速に低下する。そして、速度が十分に低下したら、クラストとして壁や構造物に付 着したと判断し、その座標を固定し、不要な計算はスキップする。一方、周囲に壁や構造物がな い場合は、バルク流体粒子の運動に運ばれる。このとき、令和元年度に開発したアルゴリズムに 比べ、令和2年度のアルゴリズムでは固体粒子についても圧力計算やParticle Shiftingを行う ことで、非圧縮性を保ちやすく、粒子の乱れを低減して数値的に安定した解を流動が複雑な場合 (特に自由界面の大きな変化を伴う場合)にも得ることができた。

改良アルゴリズム(令和2年度)を用いて、令和2年度に実施した模擬デブリ流下実験(実施 項目(2))を解析し、その妥当性を確認した。先行デブリ(金属)が複雑な構造物群に流下・凝固 した後に、酸化溶融物が低流量で流下しながら、先行凝固物群との伝熱により、凝固する様子を 解析し、実験結果と比較してその妥当性を確認した。実験は複数の異なるケースで実施され、MPS 法の妥当性確認には、系統的な実験データとの比較が望ましいため、初期の溶融塩温度が433 K、 473 K、513 K の3ケースについて実験結果と解析結果を比較した。図3.1-5に示す解析結果例の ように、実験結果が良く再現され、デブリ堆積高さは実験による測定値に対して概ね±10%の範囲 内におさまり、妥当な解析結果が得られたことを確認した。



図 3.1-4 MPS 法の新計算アルゴリズム (令和2年度)



図 3.1-5 模擬デブリ堆積分布の解析結果例(溶融塩初期温度:433 K)

3.1.3 令和3年度の実施内容及び成果

令和3年度は、令和2年度に開発したデブリ移行期解析用の MPS 法を改良した。解析体系中の 流体粒子数(または他の適切な状態変数)等に応じて実機スケールのデブリ冷却過程の評価に要 する計算コストを低減できるように、不要な計算のスキップまたは計算時間幅を大きくできるよ うにするための判定パラメータ等を明らかにした。そして、改良 MPS 法を用いて成層化解析の妥 当性を確認した。実施項目(2)の模擬デブリ流下実験に対応し、デブリの流下・成層化パターンの 実験データと解析結果を比較し、改良 MPS 法による解析の妥当性を確認した。

3.1.3.1 デブリ移行期解析用の MPS 法の改良

MPS 法の支配方程式は、以下(3.1-1)式、(3.1-2)式、(3.1-3)式に示す非圧縮性流体の質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則である[7][8]。

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{3.1-1}$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \frac{1}{\rho}\nabla .\left(\mu\nabla\mathbf{u}\right) + \mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}_{\mathbf{s}}}{\rho}$$
(3. 1-2)

$$\rho C_P \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + Q \tag{3.1-3}$$

ここで、 ρ は密度[kg/m^3]、**u**は速度ベクトル[m/s]、Pは圧力[Pa]、 μ は動粘性係数[m^2/s]、**g** は重力[m/s^2]、Tは温度[K]、kは熱伝導率[$W/(m \cdot K)$]、Qは発熱密度[J/m^3]、 C_P は比熱[J/kg/K] を表す。但し、Qは崩壊熱による発熱のみならず、除熱も勘案した正味の単位体積当たりの発熱 量を表す。

これらの支配方程式は粒子間相互作用モデルで離散化される。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 を導入した粒子間相互作用 モデル[9]を用いた。これにより、粒子配列が乱れても十分な離散化精度が得られるようにした。 また、MPS 法は非圧縮性流体の解析手法であり、(3.1-2)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。Corrective Matrix 及び Particle Shifting の詳細は令和 元年度の報告と重複するため割愛する。

除熱量の考慮については、令和2年度までは燃料デブリ及び構造物表面からの気相自然対流 による除熱のみを考慮していたが、令和3年度は輻射放熱も考慮した。気相自然対流伝熱と輻 射放熱は温度依存性が異なり、令和3年度に実施した1F3号機ペデスタル燃料デブリの冷却不 足期の温度評価結果を理解・考察するために重要であるため、以下に記載する。

空気自然体流による除熱量は一般的な Newton の冷却法則を用いた。表面粒子iからの熱流束 q_iは以下の(3.1-4)式により評価した。

$$q_i = hA_i(T_i - T_\infty) \tag{3.1-4}$$

ここで、hは表面熱伝達率[$W/(m^2 \cdot K)$]、 T_i は表面粒子iの温度[K]、 T_∞ は雰囲気温度[K]である。 表面粒子iの表面積 A_i は、以下の(3.1-5)式により評価した。

$$A_i = l_0^2 \tag{3.1-5}$$

ここで、 l_0 は粒子径[m]を表す。このとき、全表面積は個々の表面粒子の表面積を足し合わせ、以下の(3.1-6)式により評価した。

$$A_{surface} = \sum_{i=0}^{N_s} l_0^2 \tag{3.1-6}$$

ここで、N_sは表面粒子の総数を表す。

同様に、輻射放熱量は一般的な Stefan-Boltzmann の法則を用いて、(3.1-7)式により評価した。

$$q_i = \varepsilon \sigma A_i (T_i^4 - T_\infty^4) \tag{3.1-7}$$

ここで、 ε は輻射率、 σ は Stefan-Boltzmann 定数5.67 × 10⁻⁸[$W/(m^2 \cdot K^4)$]であり、表面粒子iの表面積 A_i は気相自然対流による冷却と同様に(3.1-5)式により評価した。

これらの空気自然体流及び輻射による燃料デブリや構造物の冷却を考慮する際には、対象とな る物体が溶融していなければその流動を解く必要はないので、必ずしも小さな計算時間幅を用い る必要はない。対象物が固体であれば計算時間幅を大きくし、溶融後に流動を解くために計算時 間幅を小さくすれば計算コストを大幅に低減できる。すなわち、粒子の温度をパラメータに固相 線温度に対する大小関係で判定すれば、計算時間幅を合理化し、固相線温度以下の領域での計算 コストを大幅に低減できる。

しかし、従来のように温度場計算の結果からエンタルピーを求める方法では、温度が固相線温 度をまたぐ計算ステップで本来は考慮すべき潜熱が考慮できず、その結果、当該計算ステップに おけるエンタルピー上昇量を過大評価してしまうことになる。本研究で対象としている燃料デブ リや構造物は固相線温度と液相線温度の差が小さく、狭い温度範囲で固液相変化が生じる(狭い 温度範囲に大きなエンタルピー変化が生じる。)。そのため、大きな計算時間幅を用いて固体が昇 温する過程を温度場で計算すると、当該タイムステップにおけるこのようなエンタルピー上昇量 の過大評価が無視できないほどに大きくなってしまう。そこで令和3年度のデブリ冷却不足期の 解析に用いる MPS 法のアルゴリズムを変更し、エンタルピー場計算から温度を計算するようにし た。固相線温度と液相線温度の温度差は小さくてもこの間のエンタルピー変化は大きいので、こ のようにすれば、当該計算ステップの計算時間幅を小さくすればデブリや構造物の昇温・溶融過程 のエンタルピー及び温度を高精度に低コストで計算できる。

具体的には以下のような課題に取り組んだ。(3.1-3)式に示したエネルギー保存則は通常、以下に示す(3.1-8)式のように温度場計算により離散化する。

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \frac{1}{\rho C_P} \langle k \nabla^2 T \rangle_i^n + \Delta t \frac{Q}{\rho C_P}$$
(3.1-8)

ここで、nは計算タイムステップを表し、(n+1)番目のタイムステップの粒子iの温度はその 1 つ前のタイムステップの温度を元に、エネルギー保存則を解いて陽的に求める。 Δt は計算時間幅 である。このとき、溶融や凝固に伴う状態変化は温度の関数として固相率 $\gamma(T)$ を用いて以下に示 す(3.1-9)式のように表す。

$$\gamma(T) = \begin{cases} 1, & T \le T_s \\ \frac{T_l - T}{T_l - T_s}, & T_s < T < T_l \\ 0, & T \ge T_l \end{cases}$$
(3.1-9)

ここで、*T_l*及び*T_s*はそれぞれ液相線温度[*K*]及び固相線温度[*K*]を表す。このとき、MPS 法の解析 に用いる計算点(粒子)の便宜上の体積は一定のため、以降の定式化では体積の記述を省略する と、エンタルピーは温度の関数として以下に示す(3.1-10)式で求まる。

$$H(T) = \rho C_P (T - T_0) + H_0 \tag{3.1-10}$$

ここで、 T_0 及び H_0 はそれぞれ任意の基準温度及び基準エンタルピーであり、本研究に用いた MPS 法解析コード内ではそれぞれ0 K 及び0 J としている。従って、MPS 法解析に用いたエンタルピー(H) と温度(T)の関係は図 3.1-6 で表される。 H_l 及び H_s はそれぞれ液相線温度におけるエンタルピー及び固相線温度におけるエンタルピーを表し、これらのエンタルピーの差には溶融/凝固の潜熱が含まれる。

固相線温度一液相線温度間の相変化領域の粒子の状態を表すために、MPS 法では潜熱を液固線 温度一液相線温度間に均一に割り当てて近似している。これは、固相線温度一液相線温度間にお ける仮想的な比熱 ($C_{P-virtual}$)を以下に示す (3.1-11)式で与えることに相当する。すなわち、 図 3.1-6 に示したエンタルピーと温度の関係図においては、固相線温度以下及び液相線温度以上 では勾配が熱容量 (ρC_P)で与えられ、固相線温度一液相線温度間では仮想的な熱容量 ($\rho C_{P-virtual}$) で与えられることを意味する。

$$\rho C_{P-virtual} = \frac{H_l - H_s}{T_l - T_s} \tag{3. 1-11}$$

すなわち、温度に対して(仮想的)熱容量は図 3.1-7 のように与えられる。ここで、(3.1-8) 式に示したように離散化して、n番目の計算タイムステップの温度Tⁿを元に次のタイムステップ の温度Tⁿ⁺¹を求める際に、温度が固相線温度以下からそれ以上に上昇すると、粒子の(仮想的) 熱容量は不連続に増大する。このとき、計算幅が大きいと、仮想的熱容量を当該計算タイムステ ップで過小評価することになり、温度の計算結果Tⁿ⁺¹に及ぼす影響が相対的に大きくなる。

そこで、このような離散化誤差が温度の計算結果に及ぼす影響を低減するため、温度計算を離 散化してからエンタルピーを求めるのではなく、以下の(3.1-12)式及び(3.1-13)式に示すよ うに離散化したエンタルピー計算の結果から温度を求めるように MPS 法のアルゴリズムを変更し た。このように離散化すれば、エンタルピー計算は仮想的熱容量の過大/過小評価の影響を受け ないため、固液相変化領域の温度計算精度が計算時間幅の増大により著しく低下することを防ぐ ことができる。

$$H_i^{n+1} = H_i^n + \langle k \nabla^2 T \rangle_i^n + \Delta t Q$$
(3.1-12)

$$T_{i}^{n+1} = \begin{cases} T_{s} + \frac{H_{l}^{n+1} - H_{s}}{\rho C_{P}}, H_{i}^{n+1} < H_{s} \\ T_{s} + \frac{T_{l} - T_{s}}{H_{l} - H_{s}} (H_{i}^{n+1} - H_{s}), H_{s} \le H_{i}^{n+1} \le H_{l} \\ T_{l} + \frac{H_{i}^{n+1} - H_{l}}{\rho C_{P}}, H_{i}^{n+1} > H_{l} \end{cases}$$
(3.1-13)

以上のように、従来の温度場計算の離散化後にエンタルピーを求める手法と、本研究において 燃料デブリの冷却不足期の解析に用いるエンタルピー計算を直接離散化した場合(改良 MPS 法) のエンタルピーの誤差を図 3.1-8 に示す。改良 MPS 法は大きな計算時間幅を用いても固液相変化 領域の計算誤差が十分に小さくできることが確認できた。このことはすなわち、粒子の温度をパ ラメータに固相線温度に対する大小関係で判定すれば、固相線温度以下の領域における計算コス トを大幅に低減できることを示している。



図 3.1-6 MPS 法解析に用いたエンタルピーと温度の関係



図 3.1-7 MPS 法解析に用いた熱容量と温度の関係



図 3.1-8 エンタルピー誤差の比較

3.1.3.2 改良 MPS 法による成層化解析の妥当性確認

固液相変化領域における解析精度を損なわずに計算コストの低減を可能にした、令和3年度の 改良 MPS 法の妥当性を、実施項目(2)の模擬デブリ流下実験に対応した解析(固液相変化を伴う成 層化解析)を実施することで確認した。模擬デブリ流下実験では、先行デブリが凝固した後に、 後続デブリが先行デブリを溶融させ、共に凝固する挙動を三次元可視化し、深さ方向の相分布を 定量化して MPS 法の妥当性確認データが得られた。これらのデータと改良 MPS 法の解析結果を比 較し、改良 MPS 法による解析の妥当性を確認した。

(1) 解析体系と条件

3.2.3項にまとめた模擬デブリ流下実験(実施項目(2))に対応した MPS 法解析の体系を構築し、 解析条件を定めた。実験では、初期に外径 45 mm のガラス管の底部に 36 g のパラフィンワックス が充填され、上方から溶融 PbBi (473 K) が流下した。そこで、図 3.1-9 に示すような改良 MPS 法 による解析の三次元解析体系を構築した。粒子径は 1.0 mm とした。なお、粒子径と粒子の配列に 伴う離散化誤差に伴い、解析におけるガラス管の外径は 46 mm となっており、実験に用いられた ガラス管の外径に比べ 1.0 mm 大きいが、解析結果に及ぼす影響は無視できると考えられる。

気相自然対流及び輻射放熱は全ての自由表面粒子(ガラス管の外表面と PbBi 層の上面)について考慮した。また、解析に用いた PbBi、パラフィンワックス、Pyrex 耐熱ガラスの物性一覧を表3.1-1 にまとめる。

Properties	PbBi[10]	パラフィンワックス [11][12]	Pyrex 耐熱ガラス [13]
固相の密度 (kg/m ³)	10504.9	927	2230
液相の密度(kg/m ³)	10504.9	783	2230
液相の粘度(Pa·s)	0.0028	0.006	-
固相の熱伝導率(W/m/K)	9.86	0.2	1.1
液相の熱伝導率(W/m/K)	9.86	0.2	-
固相の比熱 (J/kg/K)	147.65	2000	714
液相の比熱 (J/kg/K)	147.65	2000	-
固相線温度(K)	398	341	-
液相線温度(K)	398.7	341.7	-
潜熱(kJ/kg)	38.6	210.0	-
凝固固相率閾値	0.5	0.5	-
凝固速度閾値(m/s)	1×10^{-4}	1×10^{-4}	_
輻射率	0.5	0.5	0.5
気相自然対流熱伝達率(W/m²/K)	100.0	100. 0	100.0

表 3.1-1 改良 MPS 法による模擬デブリ流下実験の解析条件



(2) 解析結果

時系列に実験結果と解析結果の様子及び温度の計算結果を図 3.1-10 に示す。実験では高温の PbBi が流下したことでパラフィンワックスが溶融し、PbBi に比べて密度が低い溶融パラフィンは PbBi 層の上方に成層化した。このような溶融と成層化は改良 MPS 法の解析結果でも良く再現され ている。このようにして成層化した上層の溶融パラフィン層は実験及び解析の両者で約 80 秒頃ま で成長し、その後はほぼ一定に推移した。実験では約 40 秒以降、一部の液相のパラフィンが上方 に移動できず、固相のパラフィンとその上方の PbBi 層の間に閉じ込められていることが伺える。 このような現象は解析結果からも確認できる。解析結果から、このような液相のパラフィンの閉 じ込めは、その上方の PbBi が凝固する過程で生じていることが分かる。約 40 秒以降、PbBi 層は 固相のパラフィンと接している部分や耐熱ガラス壁と接している境界周囲から凝固していること が分かる。これらの凝固進展は PbBi の温度が液相線温度(398 K)を下回る頃から解析結果に表 れている。その後、解析では、一部の液相パラフィンは閉じ込められたまま、その上方の PbBi 層 は外周近傍から中央部に向かって凝固が進展した。解析では、約 270 秒以降は PbBi 層が完全に凝 固し、その温度はパラフィンの固相線温度(341 K)を下回ったことから、パラフィン層の溶融浸 食(アブレーション)は終息した。このように、解析結果は定性的に実験結果を良く再現した。

底部パラフィン層のアブレーションが終息した 400 秒における実験結果と解析結果により示さ れた上部のパラフィン層の厚さを比較すると、解析結果(正面)は実験結果と同程度に見えるが、 解析結果(中央断面)は厚みが大きいように見える(図 3.1-11)。すなわち、解析結果では上部の パラフィン層はガラス管周辺部から中央部に向かって凸に分布している。なお、この時点では上 部パラフィン層は図 3.1-11 に示した温度分布からも分かるように冷えて凝固している。このよう な上部パラフィン層の凝固分布は、ガラス管外周部に与えた気相自然対流による除熱の影響で周 辺部がやや先行して凝固し、中央部に向かって上部パラフィン層が凝固した過程で、凝固したパ ラフィン粒子間に若干の空隙が生じたためにもたらされたと考えられる。そこで、底部パラフィ ン層のアブレーションが終息した時点における上部パラフィン層の質量を実験結果、解析結果そ れぞれから算出し、両者を比較した。実験結果より、上部パラフィン層の厚さは約7 mm であるこ とが分かる。ガラス管の外径は 45 mm であるが、ガラス管の肉厚を考慮すると、その内径は約 40.2 mm である。これらから、上部パラフィン層の体積を求め、その密度(783.0 kg/m³)を乗じれば、 上部パラフィン層の質量は

783.0 kg/m³ × 3.14159 × $(\frac{\frac{40.2}{1000.0}}{2})^2$ × $\frac{7}{1000.0}$ m = 0.00696 kg ≈ 7.0 g (実験)

と推定できる。一方、解析結果からは、上部パラフィン層の粒子数が 9349 個であることが確認で きる。従って、粒子1個の体積及び密度を乗じれば

783.0 $kg/m^3 \times 9349 \times (0.001)^3 \approx 7.3 g$ (解析)

と評価でき、実験結果から推定された上部パラフィン層の質量と概ね良く一致していたことが確認できた。

以上のように改良 MPS 法による成層化解析の妥当性が確認できたが、これらの解析では暫定的 にガラス管の外表面や上部パラフィン層の外表面の自由表面粒子に一定の気相対流伝熱に伴う熱 伝達率(100 W/m²/K)を仮定している。そこで、表面熱伝達率が成層化パターンに及ぼす影響を感 度解析により評価した。その結果、図 3.1-12 に示すように、PbBi が流下した直後の底部パラフィ ン層の溶融質量にはほとんど影響しないものの、時間が経つにつれて次第に、表面熱伝達率の影 響が表れた。表面熱伝達率を小さくするほど底部パラフィン層の最終的な溶融質量は大きくなった。これは、表面からの除熱量が低下し、より長時間高温の PbBi により、底部パラフィン層が溶融したためと考えられる。表面熱伝達率を 10 W/m²/K としたケースでは、最終的な溶融パラフィン質量が表面熱伝達率を 10 W/m²/K としたケースの約 1.4 倍となった。以上より、成層化解析により、最終的な凝固物の分布を予測する際にはその冷却過程における表面からの除熱量が重要であることが示された。



図 3.1-10 模擬デブリ流下実験の結果と解析結果の比較



図 3.1-11 模擬デブリ流下実験の結果と解析結果の比較(400秒)



図 3.1-12 表面熱伝達率が底部パラフィン層の溶融質量に及ぼす影響

3.1.4 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 を可能とするために、MPS 法の解析アルゴリズムを改良した。

令和元年度は、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。これらにより、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。改良アルゴリズムの妥当性を確認するために、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。

令和2年度は、令和元年度に開発した MPS 法の新解析アルゴリズムを早稲田大学の MPS 法解析 コードに実装して、従来に比べて計算コストを低減した新クラストモデルを開発した。クラスト 形成に伴う計算コスト増大を緩和するため、計算粒子の固相率、速度、近傍粒子の関係等を活用 し、一定の条件を満たしたクラスト粒子については粘性計算等をスキップした。具体的には、固 相率が1.0に達し、且つ速度が閾値(例:10⁻⁵ m/s)を下回った粒子について外力(重力)、外力 による粒子の速度・位置補正、近傍粒子との粘性相互作用、近傍粒子との圧力及び粘性相互作用 に基づく粒子の座標補正をスキップするようにした。令和2年度の模擬デブリ流下実験(実施項 目(2))に対応し、このように改良した新クラストモデルを実装した解析を実施した。その結果、 実験で得られた模擬デブリの堆積分布等を再現し、改良 MPS 解析手法の妥当性を確認できた。

令和3年度は、令和2年度に開発したデブリ移行期解析用のMPS法を改良した。解析体系中の 流体粒子数(または他の適切な状態変数)等に応じて実機スケールのデブリ冷却過程の評価に要 する計算コストを低減できるように不要な計算のスキップまたは計算時間幅を大きくできるよう にするための判定パラメータ等を検討し、粒子の温度をパラメータとして判定すれば計算時間幅 を大きくしても、計算精度を損なわないことを明らかにした。そして、改良MPS法を用いて成層 化解析の妥当性を確認した。令和3年度の模擬デブリ流下実験(実施項目(2))に対応し、実験で 得られた凝固物の成層化パターンを再現し、改良MPS法による解析の妥当性を確認した。 3.2 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した。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した。

- 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
- 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複数の方向から可視化し、定量 化する計測系

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(堆積デブリの厚さ方向のデータ)を得た。

3.2.1 令和元年度の実施内容及び成果(概要)

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、模擬デブリ流下実験の体系を構築し、実 験を実施した。令和元年度の実験系は、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。

図 3.2-1 に、令和元年度に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。 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 と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。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、滴下材料を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。形状は 1F2・3 号機のペデスタル形状を模擬し、寸法を 1/100 に縮小して用いた。

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。これらにより、令和2年度以降に実施 した 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

一例として、アブレーション後のペデスタル模型表面形状の計測結果を図 3.2-2 に示す。ここで、図中の x に続く数字は計測位置(単位:mm)を示している。



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 アブレーション後模型表面形状計測結果の例

29 - 61 - 3.2.2 令和2年度の実施内容及び成果(概要)

令和2年度は、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、先行 デブリが固化した上に、組成の異なるデブリが流下して分散する挙動を対象とした実験を行い、 MPS 法の妥当性確認データを取得した。また、模擬ペデスタルに先行デブリが固化した形状を三次 元造形し、粘性や熱伝導率が異なる模擬デブリを流下し、先行デブリに後続デブリが層状に堆積 する挙動を可視化し、深さ方向の分布を定量化して MPS 法の妥当性確認データを得た。

先ず、図 3.2-3 に示すように、予めサンプ孔に物性の異なる模擬先行固化物(シリコーン油、 パラフィン)を充填し、それらと物性の異なる後続デブリ(PbBi、Sn)を流下させた。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、滴下材料を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。

次に、先行デブリが堆積したペデスタル構造物群の一部を想定したアルミニウム製の円柱7本 柱造形物に後続の模擬溶融炉心が流下した場合のデブリ堆積挙動を実験した。アルミニウム円柱 は中央に直径4 mmで高さ10 mmを1本、その周囲に60度間隔で直径2 mmで高さ6 mmを6本配 置した。図3.2-4に7本鋳造構造物への溶融塩流下実験結果の例(流下させた模擬デブリの初期 温度が433 Kの場合)を示す。左側列は正面からの可視化像、中央列は側面からの可視化像、右 側列はサーモグラフィにより計測した温度分布を示す。右上の図はサーモグラフィの色と温度の 対応を示している。左側には流下開始からの時間を示している。中央の太い円柱に滴下された溶 融塩は衝突位置から上方に積み上がっていくが、衝突後の溶融塩の一部が側方に流出した。70秒 においても、溶融塩は一部側方に流出したが、中央円柱の上に積み上がり、高さを増し続けた。 このように MPS 法解析結果の妥当性確認に必要な模擬デブリの流下と堆積挙動の時系列像が温度 分布と共に得られた。



図 3.2-3 模擬デブリ流下実験装置の概要(先行固化物を含む)

JAEA-Review 2022-054



図 3.2-4 円柱 7本柱造形物への溶融物流下の様子の例

3.2.3 令和3年度の実施内容及び成果

令和3年度は、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、令和 2年度に実施した先行デブリが固化した上に、組成の異なる後続デブリが先行デブリを溶融させ、 共に分散・凝固する挙動を可視化できるように実験装置を改良した。固化した先行デブリを模擬 したパラフィンに、後続デブリを模擬した共晶組成鉛ビスマス(PbBi)が流下して分散する挙動 を光学カメラで三次元可視化し、改良 MPS 法の妥当性確認に必要な固体パラフィン、溶融パラフ ィン、再度凝固したパラフィン、溶融 PbBi、凝固した PbBi の深さ分布データを得た。

さらに、当初の計画にはなかったが、ペデスタル床上のプール水で急冷された先行流出物の特性を確認した実験(クエンチ実験)を行い、その先行流出物の崩壊熱が堆積する金属凝固物により、どの程度冷却が阻害されるかを確認する実験(飽和プール沸騰実験)を行うことで、本研究で実施された MPS 法による解析や評価に用いた条件等の妥当性を補強するデータを得た。

3.2.3.1 実験装置の改良と構築

(1) 重力分離実験装置の改良

図 3.2-5 に重力分離実験の概要を示す。令和2年度までに構築した模擬デブリ流下実験装置(図 3.2-3)の試験部を改良し、試験管内の流体に上から高温の流体を注入し、分離、凝固する様子を可視化できるようにした。模擬デブリの溶融移動をビデオカメラで可視化し、温度の変化をサー モグラフィで計測した。試験管下部の試験材にはパラフィンと溶融塩を用いた。上方から注入す る流体は溶融塩とPbBiを用いた。表 3.2-1 に示す条件で実験を行った。

No.	注入側			試験管側		室温
	温度(°C)	流体	質量(g)	流体	質量(g)	(°C)
1	160	鉛ビスマス	402.1	溶融塩	84.4	
2	160	溶融塩	78.8	パラフィン	31.0	
3	180	溶融塩	80.4	パラフィン	37.0	10
4	180	鉛ビスマス	397.7	パラフィン	35.8	
5	200	溶融塩	76.4	パラフィン	37.4	

表 3.2-1 重力分離実験の条件



図 3.2-5 重力分離実験の概要

(2) 崩壊熱模擬実験

実機燃料デブリ堆積分布予測に資するために、崩壊熱模擬実験を実施した。図 3.2-6 に崩壊熱 模擬実験の概要を、図 3.2-7 に模擬堆積デブリの構成を示す。崩壊熱模擬実験は、パラフィンで 模擬したペデスタルにマイクロ波吸収材の CMC (carbon micro coil) を分散させたシリコーン油 で満たし、パラフィン容器と共にマイクロ波で加熱する実験である。ペデスタルをパラフィンで 模擬し、崩壊熱を発する溶融燃料をシリコーンオイルで模擬した。カーボンマイクロコイルを添 加することで、ウラン酸化物の崩壊熱を模擬した。シリコーンオイルがパラフィンを溶融させ、 共に凝固する挙動をカメラで撮影した。

表 3.2-2 に崩壊熱模擬実験の条件を示す。シリコーン油重量と加熱出力をパラメータに、実験 を実施した。

No.	シリコーン油 質量(g)	CMC (%)	加熱出力 (W)	加熱時間 (min)	<mark>冷却時間</mark> (min)	ペデスタル配置
1	8.02	0.3	250	30		中央
2	5.78		350		10	中央
3	6.0		350			15mm奥に入れ左に移動
4	4.04 ピット部分のみ注入		250			中央
5	8.07		450			左に90 °C旋回

表 3.2-2 崩壊熱模擬実験の条件



図 3.2-6 崩壊熱模擬実験の概要



図 3.2-7 模擬堆積デブリの構成

(3) クエンチ実験

当初の計画にはなかったが、実機燃料デブリ堆積分布予測に資するために、ペデスタル床上の プール水で急冷された先行流出物の特性を確認した実験(クエンチ実験)を行った。図 3.2-8 に クエンチ実験設備の概要、表 3.2-3 にクエンチ実験の条件を示す。クエンチ実験は、金属を坩堝 の中で誘導加熱により表 3.2-3 に示す溶融温度まで加熱し、溶融金属を坩堝の底にあるノズル(内 径 2 mm)から放出した。このとき、圧力容器内は溶融金属の酸化を抑制するためにアルゴンに置 換しておいた。放出された溶融金属は、図 3.2-8 に示すように、液滴列を形成し、鉛直パイプ内 の水に浸漬した。鉛直パイプの内径は 50 mm であり、沈殿物が垂直上方に(一次元的に)積み上 がるようにした。水位は垂直パイプの底面から 400 mm とした。溶融金属の放出高さは、ノズル出 口から垂直パイプ底面までの距離 1200 mm とした。水は脱イオン水を使用し、初期温度は 293 K とした。溶融金属は、軽水炉の構造材や被覆材を模擬するため SUS304 及び 20 wt% Zr-SUS304 を 選定した。実験では、250 g の金属を坩堝に入れ、凝固物の形態に及ぼす過熱度の影響を調べるた め、溶融温度を 1723 K 及び 2023 K とし、SUS304 及びジルコニアのそれぞれの金属で実験を行っ た。

項目	内容	
溶融組成	SUS304 及び 20 wt% Zr-SUS304	
溶融温度	1723 K及び2023 K	

表 3.2-3 クエンチ実験の条件


図 3.2-8 クエンチ実験設備の概要

(4) 飽和プール沸騰実験

当初の計画にはなかったが、クエンチ実験の結果を元に、さらに実機燃料デブリ堆積分布予測 に資するために、飽和プール沸騰実験を行った。図 3.2-9 に飽和プール沸騰実験設備の概要を示 す。飽和プール沸騰実験では、一辺 300 mm の矩形容器内に水位 200 mm の水を底面中心の直径 40 mm の加熱円筒表面で沸騰させた。円柱は銅製で、下方から加熱するためヒータロッド8本を埋め 込んだ。伝熱面上にクエンチ実験で得た凝固物等の障害物を設置し、沸騰伝熱や限界熱流束に与 える影響を検討した。最上部の熱電対は伝熱面から5 mm 鉛直下方にしており、さらに 10 mm 間隔 で合計 5 対の熱電対を挿入した。表面温度と表面熱流束は5 点の温度から最小二乗法により算出 した。

前述の凝固物を伝熱面上に保持するため、有孔 SUS 管を伝熱面上に同心円状に配置した。有孔 SUS 管の内径は 50 mm、厚さは 1.5 mm、高さは 100 mm である。比較検討のため、凝固物の代わり に SUS304 球を使用した。球の直径は 10 mm である。水は脱イオン水を使用した。熱流束 300 kW/m²、 水プール温度が飽和温度に達したところで、プログラムされた DC 電源で、発熱量を直線的に増加 させた。限界熱流束(CHF)条件は、表面温度の急上昇として判断した。

JAEA-Review 2022-054



3.2.3.2 実験結果(1) 重力分離実験

表 3.2-1 に示した条件で重力分離実験を行った。試験管に入れた流体に対して、密度が大きい 高温流体を注入し、状態と温度の変化をカメラとサーモグラフィ撮影により可視化した。可視化 した結果を実験番号 No. 1~5 について、図 3. 2-10、図 3. 2-11、図 3. 2-12 に示す。No. 1 は溶融塩 に 433 K の鉛ビスマス (PbBi) を注入したものである。鉛ビスマスが溶融塩の上に堆積し、接触 部の溶融塩は溶けていない。10 s から 150 s で温度が 373 K に到達した。300 s 以降は緩やかに 温度が低下した。No.2はパラフィンに 433 K の溶融塩を注入したものである。溶融塩はパラフィ ン上に注入されたあと冷却されて凝固した。接触部分ではパラフィンが溶融し、5 s では溶けた パラフィンが溶融塩の上に流れ出て、時間経過とともに凝固していたのが分かる。温度は60 s か ら 150 s で 383 K ほどになり、その後低下した。No.3 はパラフィンに 453 K の溶融塩を注入した ものである。溶融塩がパラフィンの上に注入されたあと10sほどで凝固したように見えるが、60 sから150 sで上方から溶融塩が溶け出していたのが分かる。No.2と同様に接触部分のパラフィ ンが溶融し、溶けたパラフィンが溶融塩の上に流れ出た。温度は 60 s から 150 s で 403 K ほどに なり、その後低下した。No.4はパラフィンに 453 K の鉛ビスマスを注入したものである。鉛ビス マスがパラフィンの上に堆積したが、接触部分からかなりのパラフィンが溶融し、No.2、No.3よ り量の多い溶けたパラフィンが鉛ビスマスの上に流れ出し時間経過とともに凝固していたのが分 かる。温度は 60 s で 383 K ほどになり、その後低下した。No.5 はパラフィンに 473 K の溶融塩 を注入したものである。溶融塩は注入後上方とパラフィンとの接触部から凝固し始めているが、

60 sから150 sにかけて上方の溶融塩が溶けていたのが分かる。また、パラフィンとの接触部分では溶融塩がパラフィンのほうに入り込んでいたのが分かる。また、No. 2、No. 3、No. 4 と同様に、溶けたパラフィンの一部が溶融塩の上に流れ出し、時間経過ともに凝固した。温度は60 s で 383 K ほどになり、その後低下した。

・注入温度の違いによる比較

No.2 (注入温度 433 K)、No.3 (注入温度 453 K)、No.5 (注入温度 473 K)の注入側流体が溶融 塩、試験管側流体がパラフィンの場合では、No.2 は注入後の溶融塩は 10 s ほどで凝固してきた が、No.3 は 150 s、No.5 は 300 s まで溶融塩が溶けていたのが分かる。温度は No.3 が高温(60 s から 150 s で約 403 K)を維持しており、次に No.2、No.5 となっている。300 s 以降も No.3 の 維持温度が高かった。600 s では No.2、No.3 が 353 K ほどに維持していたのに対し、No.5 は 323 K ほどに早く冷却した。

・注入流体の違いによる比較

No.3 (注入流体:溶融塩)、No.4 (注入流体:鉛ビスマス)を注入温度453 K でパラフィン上に 注入した場合では、注入後鉛ビスマスの方が溶けたパラフィンが上方に多く流れ出ていたのが分 かる。温度は、No.3 が 60 s から 150 s で約 403 K を維持していたのに対し、No.4 は 60 s で 383 K から温度は低下していた。

・注入温度 433 K で注入側流体、試験管側流体が異なる場合の比較

No.1 (注入側流体:鉛ビスマス、試験管側流体:溶融塩)、No.2 (注入側流体:溶融塩、試験管 側流体:パラフィン)で注入温度433 Kの場合では、No.1 は鉛ビスマスの注入に対して溶融塩は 溶けなかったが、No.2 では溶融塩の注入に対してパラフィンは一部溶けて溶融塩の上方に流出し た。温度は、No.1 が 10 s から 600 s まで 373 K 前後を維持していたが、No.2 は 60 s から 150 s で 383 K 前後を維持した後、600 s で 353 K ほどまで低下した。

以上のことから、重力分離実験により、注入温度、注入側流体、試験側流体の違いにより、流体の分離、凝固、温度変化の特性を確認することができ、改良 MPS 法解析の妥当性確認データを 取得することができた。



図 3.2-10 重力分離実験の観察結果(0 s、2 s、5 s)



図 3.2-11 重力分離実験の観察結果(10 s、60 s、150 s)



図 3.2-12 重力分離試験の観察結果(300 s、600 s)

(2) 崩壊熱模擬実験

表 3.2-2 に示した条件で、堆積デブリに対して崩壊熱を模擬した実験を行った。崩壊熱を模擬 するためにマイクロ波照射炉により 250 W、350 W、450 Wの加熱出力で実験を行った。先行固化 物を模擬したパラフィンを、後続デブリを模擬したシリコーン油が溶融させる挙動をビデオカメ ラ撮影により可視化した(図 3.2-13)。

・シリコーン油質量の違いによる比較

No.1 (シリコーン油質量 8.02 g)、No.4 (シリコーン油質量 4.04 g)、加熱出力 250 W の場合を 比較すると、シリコーン油の質量は約 2 倍違うが、ペデスタル (パラフィン)の左側ピット部分 が溶融しており、溶融の大きさも同程度であり、シリコーン油の質量の違いはパラフィンの溶融 挙動に大きな差をもたらさなかったことが分かった。 ・ペデスタル配置の違いによる比較

No.2 (中央)、No.3 (15 mm 奥に入れて左へ移動)、シリコーン油質量(No.1:5.78 g、No.2:6.0 g)、加熱出力 350 W の場合を比較すると、No.2 は左側ピットに加え、その左側のペデスタルの壁 も溶融していたのに対し、No.3 はペデスタルの壁は溶融せず、左側ピットに加え右側ピットも若 干溶融していたのが分かる。ペデスタルの配置を変えた(マイクロ波の照射位置を変えた)こと でペデスタルの溶融の仕方が変わったのが分かった。

・加熱出力の違いによる比較

No.1 (加熱出力 250 W)、No.5 (加熱出力 450 W)、シリコーン油質量(No.1:8.02 g、No.5:8.07 g)、ペデスタル配置(中央、但し No.5 は左に 90°回転)の場合を比較すると、No.1 は左側ピット部分が溶融していたのに対し、No.5 は両方のピットを含めペデスタル床面のかなりの部分が溶融していたのが分かる。また、No.5 は 90°左回転させたことによりマイクロ波が均一に当てられたといえる。加熱出力を変えたことで、ペデスタルの溶融する大きさが変わったのが分かった。

以上のことから、加熱出力(崩壊熱)の違いや、シリコーン油質量、ペデスタル配置の違いに より、ペデスタル溶融の特性を確認することができ、実機燃料デブリ堆積分布予測に資する知見 が得られた。



図 3.2-13 崩壊熱を模擬した実験の観察結果 No.1

(3) クエンチ実験

表 3. 2-3 に示した 2 つの温度水準と 2 種類の材料について、プール水で急冷凝固した金属の形態を把握した。図 3. 2-14 にクエンチ実験により急冷凝固した金属を回収し、乾燥後に透明な立方体の箱の中に入れた写真を示す。立方体の箱の内側寸法は 56 mmW×56 mmL×57 mmH である。図 3. 2-14 の(a)~(d) は質量 230 g の凝固金属を示している。(e) は等価体積の着色液体を示し、凝固金属の見掛け密度が低いことを示している。急冷した金属の質量(230 g)を SUS304 の密度(7930 kg/m³)で割り、等価容量 2. 9×10⁻⁵ m³を算出した。

図 3.2-14(a)は 1723 Kの SUS304 を急冷凝固させたもので、茶色を呈している。形状はフレー ク状で、その大きさは約 10 mm であった。見かけの体積は、(e)に示した液体の 3 倍以上の大きさ となった。(b)は、(a)よりも 300 K 高い 2023 K の SUS304 堆積物を凝固させたものである。(a)に 比べ色が濃くなり、サイズは少し小さくなった。これは、金属の過熱度が高いほど急冷時に溶融 金属が破砕されやすかったためと考えられる。(c)は、1723 K の 20 wt% Zr-SUS304 を急冷凝固し た堆積物である。Zr を 20 wt%添加した結果、色が金属色になり、Zr を添加しなかったケースに比 べ、見かけの体積が大きくなった。大きさは 10 mm より少し大きい程度であった。(d)は、(c)より 300 K 高い 2023 K から急冷凝固した 20 wt% Zr-SUS304 堆積物である。(c)に比べ色が濃くなり、 大きさは少し小さくなった。

表 3.2-4 は、凝固した金属堆積物の密度を測定した結果である。材料密度は、株式会社エー・ アンド・デイの電子秤と密度測定キット AD-1653 を用い、アルキメデスの原理に基づいて測定し た。見かけ密度は、見かけ体積を材料重量で割った値である。4 種類の金属凝固体の材料密度は 7.26×10³~7.65×10³ kg/m³であり、組成から計算した密度よりわずかに小さかった。このことか ら、固化した金属には気孔が存在し、その表面はある程度酸化されていたことが推測される(但 し、それほど顕著ではない。)。金属堆積物の見かけ密度は 1.16×10³~2.35×10³ kg/m³であり、 金属密度の 3.1~6.3 倍と小さかった。このように、水溜まりにおける溶融金属の急冷とそれに伴 うプール水の沸騰は、凝固した金属の見かけの密度を著しく低下させることが分かった。

以上のことから、先行固化物が金属である場合には、急冷凝固により低密度のフレーク状になり、1F2 号機のペデスタル床上や、1F3 号機堆積物の深部に分布している可能性が示唆された。

	実験 No. 1	実験 No. 2	実験 No. 3	実験 No.4
金属の仕様	SUS304		20 wt% Zr-SUS304	
溶融物温度(K)	1723	2023	1723	2023
材料密度(10 ³ kg/m ³)	7.65	7.38	7.29	7.26
見かけ密度(10 ³ kg/m ³)	2.15	2.35	1.16	1.20
見かけ密度/材料密度(%)	28	32	16	17

表 3.2-4 凝固した金属堆積物の密度測定結果



溶融組成 SUS304:(a)及び(b) 20wt%Zr-SUS304:(c)及び(d) 溶融物温度 1723 K:(a)及び(c) 2023K:(b)及び(d) ※(e):着色液体2.9×10⁻⁵ m³(等価堆積)

図 3.2-14 クエンチ実験で凝固した金属の写真

(4) 飽和プール沸騰実験

伝熱面上の堆積物が飽和プール沸騰伝熱に与える影響を実験により解明した。図 3.2-15 は、伝 熱面上の有孔 SUS 管内に設置した写真である。図 3.2-15(a)は直径 40 mm のパイプと堆積物がな い(銅の)表面である。図 3.2-15(b)は堆積物のない有孔 SUS 管で、内径は 50 mm、高さは 100 mm である。図 3.2-15(c)は、有孔 SUS 管の中にある SUS304 の球体を示しており、その直径は 10 mm である(以下、一部の図表中では「SUS304 球体」と標記する。)。図 3.2-15(d)は、有孔 SUS 管内 で凝固した 20 wt% Zr-SUS304 破片(図 3.2-14(c)で示したフレーク状凝固物)を示す(以下、一 部の図表中では「デブリ」と標記する。)。

図 3.2-16 は、4 種類の沈殿物の配置を変えた場合の沸騰曲線である。過熱度は、系圧力(0.10 MPa)を基準とした飽和温度に対する表面温度との差である。図 3.2-16 中の凡例は、図 3.2-15 に 示し4 種類の異なる堆積物の配置を示している。図中の矢印は、表面温度が速やかに上昇した CHF 条件を示す。各沸騰曲線は図中の直線上にある。4 つの沸騰曲線は、堆積物の配置に関係なく、全 て同じ曲線に収まった。有孔 SUS 管や沈殿物はいずれも、飽和プール沸騰熱伝達を著しく劣化さ せなかった。これは十分発達した核沸騰の特徴として一般的である。

表 3.2-5 は、測定した CHF をまとめたものである。CHF の値は、堆積物の配置によって異なった。有孔 SUS 管や堆積物のない表面での CHF は 1.13 MW/m²であった。この値は、一般に得られて いる上向きプール沸騰の CHF 値(例えば, Zuber の CHF 相関式等)と一致する。有孔 SUS 管の CHF は 1.10 MW/m²であり、有孔 SUS 管なしの表面の CHF よりわずかに低かった (97%)が、大きな低下 ではない。

一方で、デブリ状の堆積物の CHF は、堆積物のない裸面の約 2/3 まで減少した。SUS304 球の CHF は 1.13 MW/m²であり、これは裸面の CHF の 66%である。20 wt% Zr-SUS304 破片の CHF は 0.77 MW/m² であり、裸面の 68%の CHF である。これらの熱流東レベル以上では、堆積物が伝熱面からの沸騰気 泡の離脱を妨害し、伝熱面を覆って膜沸騰に移行していた。

図 3.2-17 は、4 種類の堆積物の配置を変えた場合の沸騰熱伝達率を示している。沸騰熱伝達率 は、表面熱流束を過熱度で割ったものである。図 3.2-17 中の凡例は、図 3.2-15 に示したような 4 種類の堆積物の配置を表している。それぞれの沸騰熱伝達曲線は、ある偏差幅に収まり、同様の 沸騰曲線となっている。有孔 SUS 管の熱伝達率は、堆積物のない表面の場合よりも若干低くなっ た。これは、有孔 SUS 管が伝熱面への流量をある程度減少させたためと考えられる。一方、堆積 物(SUS304 球体とデブリ)の熱伝達率は、堆積物のない表面の熱伝達率よりもわずかに高くなっ た。これは、流路面積が減少したにもかかわらず、伝熱面上の堆積物が表面積を増加させたため と思われる。これらの効果は、熱伝達率の差は小さいが、CHF 点に向かって一貫している。

以上から、実機において、堆積物が急冷凝固によるフレーク状であれば、CHF が 2/3 に低下する ものの注水により崩壊熱を十分冷却可能であることが示唆された。

ケース	堆積物の ない表面	有孔 ステンレス管	SUS304 球体	デブリ
有孔ステンレス管	なし	あり	あり	あり
障害物ベッド	なし	なし	SUS304 球体	固化した 20wt% Zr - SUS304 の破片
CHF (MW/m ²)	1.13	1.10	0.75	0.77
正規化した CHF (%)	100	97	66	68

表 3.2-5 4 種類の異なる堆積物の配置に対する CHF 測定値



(a)

(c)

- (d)
- (a): 堆積物のない銅の表面 (b): 有孔ステンレス管 (c):球体で満たされた有孔ステンレス管(SUS304球体) (d):破片で満たされた有孔ステンレス管(デブリ)





図 3.2-16 4 種類の異なる堆積物配置による沸騰曲線



図 3.2-17 4 種類の異なる堆積物による沸騰熱伝達率

3.2.4 まとめ

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ことを 目標に模擬デブリ流下実験体系を構築し、実験を実施した。

令和元年度は、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構成 する実験系を構築した。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。

令和2年度は先行デブリが固化した上に、組成の異なるデブリが流下して分散する挙動を対象 とした実験を行い、MPS法の妥当性確認データを得た。模擬ペデスタルに先行デブリが固化した形 状を三次元造形した。先行デブリが固化した列柱に溶融塩を流下させる模擬デブリ流下実験を行 い、流下しながら固化する状態を可視化すると共に、温度分布を計測し、MPS法の妥当性確認デー タを得た。また三次元造形したペデスタルに溶融鉛ビスマスが流下する実験を行い、ペデスタル が浸水した場合にはペデスタルへの浸食が制限されること、溶融鉛ビスマスの過熱度が小さいと きには浸食量がさらに限定され、MPS法による1F3号機の解析ではペデスタル床まで移行した溶 融物は急冷されると仮定することの妥当性を確認した。

令和3年度は改良 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、令和2 年度に実施した先行デブリが固化した上に、組成の異なるデブリが流下して分散する挙動を対象 とした実験を改良した。具体的には、固化した先行デブリを模擬したパラフィンに、後続デブリ を模擬した共晶組成鉛ビスマス (PbBi)が流下して分散する挙動を光学カメラで三次元可視化し、 改良 MPS 法の妥当性確認に必要な固体パラフィン、溶融パラフィン、再度凝固したパラフィン、 溶融 PbBi、凝固した PbBi の深さ分布データを得た。さらに、当初の計画にはなかったが、ペデス タル床上のプール水で急冷された先行流出物の特性を確認した実験(クエンチ実験)を行い、そ の先行流出物が残留熱によって内部加熱された燃料デブリの冷却性及びその限界熱流束にどのよ うに影響を及ぼすかを確認する実験(飽和プール沸騰実験)を行うことで、本研究で実施された MPS 法による解析や評価に用いた条件等の妥当性を補強するデータを取得し、実機デブリ性状推 定に資する知見を得た。 3.3 実機デブリ流下履歴の同定(連携先: JAEA)

3.3.1 令和元年度の実施内容及び成果(概要)

令和元年度は、実機デブリ流下履歴を同定するために、(1)有用な既存情報・最新知見のレビュー結果をまとめ、(2)それらの理解から推定される 1F2・3 号機における炉心物質流出挙動の概要 を把握した。

(1-1) RPV からペデスタルに至る領域の構造情報の把握

1F2・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。また、CRD ハウジング領域を通過したデブリはペデスタルへと落下するが、この領域には 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 SUS 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ことを把握した。

(1-2) 1F2・3 号機に対する内部調査結果に基づく推定

1F2 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 るが、炉心燃料物質の移行経路はペデスタルの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した。

1F3 号機では炉心燃料物質の相当な割合がペデスタルに移行し、デブリ流出の末期には、主に RPV 中央部付近から 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制御 棒ガイド管(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 に落下したと推定した。また、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 が存在するものと推定した。

(1-3) PCV 内外から採取された試料の分析結果に基づく推定

1F1~3 号機の全号機の試料に共通して認められた粒子の特徴から、1F2・3 号機を含む全ての号 機で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と推定した。一方、1F3 号機の PCV 内(滞留水中の浮遊物や構造物への付着物)から得られた試料のウラン(U)含有割合が1F1・2 号 機のそれらに比べて顕著に高いことは、プラントデータの分析からの推定(ペデスタル燃料デブ リに圧力抑制室(S/C)の水が繰り返し注がれて急冷されていた。)と整合するものであることを 確認した。これらの分析も含め、1F3 号機ペデスタル燃料デブリは繰り返し急冷されていたと推定 した。

(1-4) 事故時プラントデータ分析結果に基づく推定

1F2 号機については、従来のプラント圧力データを元にした推定に加え、プラント圧力データが 得られていない期間中に現場で撮影された写真、ライブカメラ映像、放射線レベル等を総合的に 評価した。その結果、1F2 号機炉心物質のペデスタルへの移行は主に平成 23 年 3 月 15 日 8:30 頃 から 11:00 頃までの 2.5 時間に生じていたと推定した。

1F3 号機については、従来のプラント圧力データを元にした推定内容をさらに詳細に検討し、 RPV からペデスタルへの主要な炉心物質移行は約7時間継続しており、その間はペデスタルにあ る程度の冷却水が存在し、燃料デブリが急冷されていたと推定した。 (1-5) 燃料デブリエンタルピーに係わる最新の評価結果

1F2・3 号機それぞれに対する既存の事故進展解析コードによる燃料デブリエンタルピーの評価 結果について、本研究の実施に特に重要な点を整理した。すなわち、1F2・3 号機いずれについて も、RPV 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、その後、燃料デブリの崩壊熱により冷却材が沸騰蒸発により喪失し、やがて RPV 下部 ヘッドの破損と炉心物質のペデスタルへの移行をもたらしたと考えられ、そのような理解に必要 な情報を整理した。

(1-6) RPV 破損メカニズムに係る LIVE 実験の情報収集

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 ール実験」(LIVE 実験)[14]実施者らとの情報・意見交換を行い、1F2 号機の RPV 破損メカニズム 推定に活用できる実験データの存在を確認した。さらに、従来の実験に比べて 1F2 号機条件に近 い新たな実験の実施の技術的な可能性を確認した。

(2-1) 1F2 号機事故進展と炉心物質流出挙動の概要推定

図 3.3-1 に示すように 1F2 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 を得た。このように、1F2 号機のペデスタルへの主要な炉心物質の流出は 3 月 15 日 8:30 頃から 11:00 頃までの約 2.5 時間であったと推定された。また、この間にデブリは酸化物の溶融する高 温 (2500 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 SUS 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と推定し た。



図 3.3-1 1F2 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 オリジナル圧力データ出典:東京電力 HD[18]

(2-2) 1F2 号機における炉心物質の流出経路と支配因子について

1F2 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た。また、その支配因子として、燃料デブリの形状(粒子あるい はブロック)、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。

(2-3) 1F3 号機事故進展と炉心物質流出挙動の概要推定

図 3.3-2 に示すように、1F3 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 測を得た。このように、1F3 号機のペデスタルへの主要な炉心物質の流出は 3 月 14 日午前 0:00 頃 ~7:00 頃までの約 7 時間であったと推定された。また、この間にペデスタル領域には液相水が存 在していたと考えられ、この間に燃料デブリが流出していた場合、固相または粘性の大きな固液 混相状態であった可能性が高いと推定した。



図 3.3-2 1F3 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 オリジナル圧力データ出典:東京電力HD[18]

(2-4) 1F3 号機における炉心物質の流出経路と支配因子について

1F3 号機では炉心燃料物質の相当な割合がペデスタルに移行し、デブリ流出の末期には、主に RPV 中央部付近から 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し た。また、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推定した。1F3 号機では初期の溶融金属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、これらのデブリが 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支配因子となっている可能性がある。

3.3.2 令和2年度の実施内容及び成果(概要)

令和2年度は、令和元年度に得た燃料デブリエンタルピーに係る評価結果に基づき、1F2・3号 機における炉心物質流下挙動(流動性、流下時間、流下経路等)の評価を進めた。

(1) 1F2 号機におけるデブリ流下履歴と RPV バウンダリ破損モードの推定

1F2 号機内部調査の結果から、比較的に RPV バウンダリの破損の程度が大きい場所の影響を受けたと考えられる制御棒位置指示プローブ(以下、「PIP」と略す。)ケーブル等の欠損部直下及びその周辺部ではグレーチングが失われているものの、ペデスタル床の堆積は必ずしもこの位置で顕著なものとはなっていないことや、残留しているプラットフォームのフレーム部分やその周辺には堆積物が厚みをもって付着している様子等に着目し、図 3.3-3 に示すような 3 つの RPV バウンダリ破損モードを推定した。



図 3.3-3 3 つの RPV バウンダリ破損モードの推定

(2) 1F2 号機におけるデブリ流下履歴の評価

上述した RPV バウンダリ破損モードの推定結果も新たに考慮し、令和元年度に得た 1F2 号機に おけるデブリ流下履歴の推定を更新した。すなわち、令和元年度は「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という推定に留まっていたが、RPV バウン ダリ破損モードの推定結果を踏まえ、RPV 側部と CRD 貫通部を通じた溶融金属流出フェーズに続き、金属リッチな燃料デブリが RPV 底部付近から流出したと評価した。1F2 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。

(3) 1F3 号機におけるデブリ流下履歴及びペデスタル移行デブリ伝熱挙動の評価

1F2・3 号機の内部調査の結果に基づき、1F2 号機におけるデブリ流下履歴の概略評価も踏まえ、 これらの号機におけるペデスタル移行物質の特徴について整理した。1F2・3 号機に共通に、粘性 が小さくスティール融点以下と考えられる炉心物質が RPV 破損モード I 及び II によって先行流出 したと評価した。その後、1F3 号機では RPV 内に残留する酸化物主体と考えられる燃料デブリの 冷却性が 1F2 号機の場合よりも低く、冷却性が回復しなかったと推定した。その結果、1F3 号機で は RPV 破損モードIIIに伴い、燃料デブリの相当割合が、粘性が生コンクリート程度以上に高い状 態で 3 月 14 日 5:30 頃から 7:00 頃にかけてペデスタル領域へと落下したものと推定した。この際 のペデスタル移行デブリはペデスタル床上に存在した液相冷却材との接触等により蒸気を発生し、 蒸気による冷却効果が作用し、粘性の大きな状態で CRD 支持構造群やプラットフォーム等の構造 を大規模に変形させつつペデスタルに移行していたものと推定した。このようにして得た 1F3 号 機のデブリ流下履歴の予測を図 3.3-4 に示す。



図 3.3-4 1F3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 オリジナル圧力、水位データ出典:東京電力 HD[51]

3.3.3 令和3年度の実施内容及び成果

令和2年度までに得た燃料デブリエンタルピーに係る評価結果に基づき、1F2・3号機における 炉心物質流下挙動(流動性、流下時間、流下経路など。)の評価を行った。1F2号機については、 令和2年度の評価を基本として、最新知見を考慮して見直した。1F3号機については、令和2年 度に早稲田大学が実施した模擬デブリ流下実験と、これを踏まえて早稲田大学とJAEAが連携して 実施した MPS 法を適用したデブリ・構造材相互作用解析の結果に基づき、高粘性デブリに着目し た流出挙動と構造材との相互作用を評価した。これらにより、1F2・3号機における実機デブリ流 下履歴の評価結果をまとめた。

3.3.3.1 1F2 号機における炉心物質流下履歴の同定

1F2 号機における炉心物質のペデスタルへの流下履歴については、燃料デブリの温度条件に係る最新知見を踏まえるとともに、最新の内部調査結果との整合性を踏まえて令和2年度までの評価結果を見直した。

(1) 炉心エンタルピーに係る最新知見を踏まえた見直し

事故進展を考える上では炉心物質の温度、あるいは溶融潜熱も考慮したエンタルピー変化の分 析が重要になる。一方で、多様な既存解析結果の分析においては、情報を取得しやすい「炉心エ ネルギー変化」(炉心領域の燃料とチャネルボックスや制御棒を含む構造材の全熱エネルギーの変 化)を使用して評価を進めてきた経緯がある。以下においては、これまでの「炉心エネルギー変 化」を基盤としつつ、最新の解析評価に基づいて炉心物質の温度についても推定した。

図 3.3-5 は 1F2 号機の炉心エネルギー変化に関わる従来評価[15]の結果である。その後、1F2 号 機に関する SCDAPSIM 及び MELCOR による評価[16][17]がそれぞれ新たに実施されている。これら の解析においては、第二圧力ピーク終了時(スクラム後約 81 時間に相当する 3 月 15 日の 0 時頃) までに RPV 下部プレナムに落下したデブリは下部プレナムの冷却材によって急冷(クエンチ)さ れ、RPV 内の液相冷却材温度近くまで低下すると予測されている。また、これらの研究では、第三 圧力ピーク(スクラム後約 81~82 時間に相当する 3 月 15 日の 0~1:00 頃)は原子炉注水系に代 わる外部からの代替注水の継続によって除熱が維持される条件下での主蒸気逃がし安全弁(SRV) の閉と開によって説明できるとの共通の結論を得ている。

これらの解析評価の結果を参考に見直した炉心エネルギー変化の最確評価を炉心物質の平均温度の予測と共に図 3.3-6 に示す。スクラムから約 80 h後(3月14日の22:40頃)の炉心支持板等の崩落を伴う大規模な炉心物質の RPV 下部プレナムへの移行(炉心物質のスランピング)開始の後、炉心エネルギーは従来の予測に比べ低く推移したと推定を見直した。すなわち、下部プレナム移行デブリは短期間に冷却され、炉心エネルギーは炉内水位が炉心発熱部上端を下回ったとき(炉心ボイド化開始時)の条件程度まで低下すると推定した。その後は継続した代替注水によって下部プレナム内液相水が残留した状況でデブリは低温を維持したと推定した。スクラムから約85.5 h後(3月15日4:00頃)からは、図3.3-6の圧力スケールでは確認できないものの、低圧領域を拡大表示すると RPV 圧力低下が観測されており、この間に下部プレナムでの蒸気発生が低下していたことを示している。蒸気発生量の低下はデブリ冷却性の低下に対応していると理解でき、その後にデブリが昇温したと推定した。

デブリのペデスタル移行時間については後述するが(3.3.3.1(2)参照)、3 月 15 日の 8:30~11:00(スクラム後 89.5 h~92 h)との従来評価の見積もりが妥当との結論を得た。ペデスタル移行開始時の下部プレナムデブリの平均温度は図 3.3-6 に示したエネルギー変化から 1500 K 程度

と見積もられるが、ペデスタル移行終了時の残留デブリ温度には不確かさが大きい。すなわち、 金属主体の溶融物が RPV バウンダリの一部を溶融浸食し、流出する過程で残留デブリから溶融物 への熱移行がどれだけ生じるのか、及び残留デブリを蒸気がどの程度冷却するのかに依存する。 この残留デブリ冷却効果が大きければ残留デブリ温度は 1500 K を大きく上回らず、逆に冷却効果 が小さければ 2000 K 程度まで上昇し得る。



図 3.3-5 1F2 号機の炉心エネルギー変化に関わる従来評価 オリジナル圧力データ出典:東京電力 HD[18]



図 3.3-6 最新知見を反映した 1F2 号機炉心エネルギー変化の最確評価 オリジナル圧力データ出典:東京電力 HD[18]

(2) デブリのペデスタル移行時間に係る見直し

図 3.3-7 に圧力を始め、現場情報や 1F ライブカメラ映像等からの 1F2 号機デブリ移行と蒸気発 生の推移を推定した結果を示す。現場写真によると 3 月 15 日 8:58 の時点で 1F2 号機ブローアウ トパネルから白煙が放出されているのが確認できる。この白煙は蒸気が凝縮したものと考えられ、 プラント内部で顕著な蒸気の発生があり、何らかの形でデブリが冷却されていたことを示す。1F ライブカメラによる 3 月 15 日 9:00 の映像では 1F3 号機からの白煙は確認できるものの、1F2 号 機からの白煙のようなものは明確ではない。一方、3 月 15 日 10:00 と 11:00 のライブカメラ映像 では 1F2 号機ブローアウトパネル付近からと考えられる白煙が見られており、RPV バウンダリが 破損してペデスタルに移行したデブリがペデスタル床上に存在する液相水と接触して蒸気が発生 しているものと推定される。この時期、1F サイトの放射線量は極めて高いレベルを示しており、 主に 1F2 号機から放出された放射性物質によるものと思われる。事故後の現場調査においては 1F2 号機原子炉ウェルプラグ部が顕著な汚染を受けていることが確認されているが、この汚染は 1F サ イトの放射線量の継時変化と同時刻の 1F2 号機の圧力データの関係等から、主にデブリのペデス タル移行時にペデスタル領域で発生した高温の蒸気によって、ペデスタルやドライウェル(以下、

「D/W」と略す。)に存在していた放射性物質が PCV トップフランジから放出されることで生じた ものと推定される。この間、PCV 圧力は測定されていないが、PCV トップフランジからの気相漏洩 を生じさせる程度の圧力レベル(0.40~0.75 MPa)にあったものと推定される。

3月15日の11:25の時点でのD/W 圧力データは0.155 MPa まで低下しているが、これはペデス タルでの蒸気発生量が低下した結果と考えられ、このときペデスタルにおける液相水が失われて ペデスタル移行デブリのドライアウトが生じていた可能性がある。図3.3-7 には RPV と D/W の差 圧(ΔP=P_{RPV}-P_{D/W})も示している。ここで、P_{RPV}は RPV 圧(A系)の測定値を表しているが、同測 定値については、圧力計の基準面器以下の液相水の一部が失われており[19]、現実の圧力よりも 小さな値を示していたと推定される。このため、指示値の差圧はマイナスになっているが、現実 には RPV 圧力の方が D/W 圧力よりも高かった(指示値の差圧はプラスであった。)と推定される。 そして、この差圧は3月15日の11:25~13:00の間上昇しており、RPV内での蒸気発生量の増加 を示している。このような蒸気発生量の増加は、炉心エンタルピーに係る最新知見を踏まえた見 直し(3.3.3.1(1))にも示したように、金属を主体とした溶融物がペデスタルへと流出したこと で、下部ヘッド残留デブリ(酸化物燃料主体と推定)の冷却性が増加したためにもたらされた可 能性がある。また PCV 圧力低下により、代替注水された流量のうち、炉内に到達した流量(実効 的な代替注水流量)が増加し、下部ヘッド残留デブリが冷却された再冠水の過程で蒸気の発生量 が増加した可能性もある。これらの複合的な要因により、蒸気発生量が増加したと推定される。 この間、ライブカメラには1F2号機からと思われる白煙は見られていないが、RPV内発生蒸気の うち、SRVを通じて S/C に流れ、そこで凝縮する割合が大きかった可能性がある。

3月15日15:00と16:00のライブカメラ映像では、再度1F2号機からと思われる白煙が見られ るが、これはドライアウト以降昇温していたペデスタル移行デブリが再冠水する過程で発生した 蒸気であった可能性がある。但し、ドライアウトから再冠水までの時間は4時間程度と短く、デ ブリ温度がペデスタル移行時よりも高くなっていた可能性は低い。

以上の見直しの結果として、炉心物質のペデスタルへの流下は主に8:30頃から11:00頃までの約2時間半の間に生じていたとの従来評価が妥当であるとの認識を得た。



図 3.3-7 圧力、ライブカメラ映像等に基づくデブリ移行と蒸気発生についての推定 オリジナル圧力データ出典:東京電力 HD[18] オリジナル写真出典:東京電力 HD[20]

(3) 内部調査結果からの最新知見の検討

1F2 号機の内部調査における新たな情報としては、原子炉ウェル部にカメラや測定器具を導入 して実施した調査[21]がある。図 3.3-8 に新たに取得(東京電力ホールディングス株式会社(以 下、「東京電力 HD」と略す。)プレスリリース令和3年6月)された1F2号機の原子炉ウェル部の 調査結果の一部を示す。

PCV トップフランジ連結部の外面や締め付けボルトは黒っぽく変色しており、PCV 上部とそこか ら漏出したガスやエアロゾルが、ある程度高温化していたことがうかがわれる。1F2 号機における PCV トップフランジからの高温ガス漏出のタイミングとしては以下の3つが候補に考えられる(図 3.3-9参照)。

候補1:第二圧力ピーク終了時

候補2:デブリのペデスタル移行時

候補3:ペデスタル移行デブリの再冠水時

このうち、候補1については RPV で発生した蒸気が主に S/C に流れていた状況と考えられる。 すなわち、第二圧力ピーク中は SRV が部分開状態であったところ、SRV 開度が増加し[16]、S/C へ のガス流が増加してから D/W 圧力が PCV トップフランジからの漏洩が顕著になるレベル (~0.75 MPa) に到達したと推定される。この時の D/W 圧力上昇は、RPV 内で発生した H₂等の非凝縮性ガス が S/C 経由で D/W に流れ込むことで生じていた可能性が高い。このように、第二圧力ピーク終了 時に RPV 内発生蒸気は主に S/C に流れて凝縮していたものと考えられ、PCV トップフランジから の漏洩ガスはあまり高温にはなっていなかったと推定される。

これに対し、候補2と候補3ではペデスタルでデブリと冷却材が接触して発生した高温の蒸気 がPCVトップフランジから漏出していた可能性がある。この時の発生蒸気温度については、予想 されるデブリ温度が高い候補2の方が候補3に比べ高温であったものと推定される。ペデスタル 移行デブリの温度は前述(3.3.3.1(1)参照)のように候補2の方が候補3よりも高かったと考え られる。また、図3.3-7から分かるように、環境への放射性物質の放出は候補2において顕著で、 候補3においてあまり大きくなかったと考えられる。環境への放射性物質の放出は PCV 内の高温 化によって生じていると考えると、候補2と候補3の環境放出の顕著な差は理解しやすい。なお、 2号機の内部調査では、ペデスタルコンクリートの内側領域よりもペデスタルコンクリート外側 領域の線量が高いことが確認されているが、ペデスタル流出デブリの熱によってペデスタル内の Cs などの揮発性の放射性物質が排除されているものと考えると現状が良く理解できる。

このように、1F2 号機におけるペデスタル流出デブリは冷却材と接触して高温の蒸気を発生させていたと考えられ、その結果としてデブリは顕著な冷却を受けていたものと考えられる。1F2 号機の内部調査結果では、後述するようにグレーチングの脱落したプラットフォームのフレーム上に「燃料デブリのようなものその1」(図 3.3-10 参照)が厚く付着しており、デブリ移行の過程で強い冷却を受けていたと考えると説明しやすい。



図 3.3-8 1F2 号機原子炉ウェル (PCV トップフランジ連結部)の写真 出典:東京電力 HD[21]



図 3.3-9 PCV トップフランジからの高温ガス放出タイミングの候補 オリジナル圧力データ出典:東京電力 HD[18]

(4) 1F2 号機デブリの酸化に係る検討

1F2 号機では、炉心が空焚き状態になって炉心昇温が開始してから炉心物質がスランピングす るまでの時間が 1F3 号機に比べて短く、スランピング時点での炉心物質の熱エネルギーが低い [22]。この結果、1F2 号機ではスランピング開始時における未溶融炉心燃料の割合が大きく、この ことが、1F2 号機において 1F3 号機に比べてスランピングにより長い時間を要した要因になった と推定した。すなわち、観測された圧力データから、1F3 号機では主に 3 月 13 日の 12:00 頃から 数分間で炉心物質のスランピングが起きたと推定したのに対して、1F2 号機では 3 月 14 日の 22:40 頃から数十分間でスランピングしたものと推定できるが、前述の熱エネルギー評価結果は、その ような推定と整合することが確認できた。なお、1F2 号機における 3 月 14 日の 22:40 頃から数十 分間の RPV 圧と PCV 圧の継続的な上昇には、継続した顕著な蒸気発生が必要であることから、こ の間スランピングが継続していたものと推定した。スランピングの間、下部プレナムでは蒸気発 生が顕著となるが、これによって炉心部の残留炉心物質の酸化が促進されると考えられる。この ことから、スランピングに要する時間が長い 1F2 号機では、下部プレナムに移行した炉心物質が 1F3 号機よりも顕著に酸化されていた可能性が高い。下部プレナム移行デブリの酸化度が大きい と、デブリ昇温時の溶融金属の生成量が少なくなることや溶融金属組成が異なることが考えられ、 これが 3.3.3.1(1)に示した残留デブリ冷却性の差につながった可能性がある。

(5) 1F2 号機の炉心物質流下履歴に関わるまとめ

令和3年度に得られた最新知見を踏まえて、令和2年度までに推定した1F2号機の炉心物質流 下履歴を見直した。その結果、従来の推定は最新の解析評価や内部調査結果と整合しており、妥 当であるとの結論を得た。さらに、炉心物質の流下期間や温度の推定範囲を新たに絞り込んだ。 すなわち、1F2号機では3月15日の8:30頃から11:00頃までに、図3.3-10に示す「『先行流出 物』のようなもの」や「『燃料デブリ』のようなものその1」が流下したものと推定した。流下物 の初期温度については、前者は1500 K程度、後者は1500~2000 Kの範囲であったものと推定し たが、流下の途中で冷却され、ペデスタル・プラットフォーム部に到達した段階ではいずれもス ティール融点(約1700 K)程度以下になっていたものと考えられる。 また、下部プレナム移行デブリの酸化度は 1F3 号機よりも大きかった可能性が高く、「『先行流 出物』のようなもの」や「『燃料デブリ』のようなものその 1」の組成や生成量は 1F3 号機と異な る可能性がある。

	「先行流出物」 のようなもの	「燃料デブリ」の ようなものその1	「燃料デブリ」の ようなものその2	
2 号 機	低粘性:構造 物表面に薄く 拡がりながら 流出した痕跡	中粘性: 横方向に 拡がりな がら流出	「燃料デブリ」の ようなものその2 は見られない	
3 号 機	同上(水没の影 響で茶褐色の 盛り上がり)	「デブリ」のよう なものその1は存 在?(未確認)	<u>高粘性</u> :構造物 への付着、堆積物の凹凸	
粘性	低 中(生コンのイメージ)		高	
温度	度 スティール融点程度以下		スティール融点以上	

図 3.3-10 内部調査結果に基づく 1F2・3 号機ペデスタル流出物の概略的分類 オリジナル写真出典:東京電力 HD[22][24]

3.3.3.2 1F3 号機における炉心物質流下履歴の同定

1F3 号機における炉心物質のペデスタルへの流下履歴については、高粘性デブリの RPV からの 流下挙動とプラットフォーム等の構造材との相互作用、及び流下デブリの冷却に係る最新知見を 踏まえて見直した。

(1) 高粘性デブリの RPV からの流下挙動と構造材との相互作用に係る検討

令和2年度に早稲田大学が実施した模擬デブリ流下実験と、これを踏まえて早稲田大学と JAEA が連携して実施した MPS 法を適用したデブリ・構造材相互作用解析の結果に基づき、高粘性デブリに着目した流出挙動と構造材との相互作用を評価した。

MPS 法を適用した解析(3.1節参照)から、ペデスタル移行デブリは高温になるほど一般構造用 圧延鋼材(SS)等が大規模に溶融する温度に達する前に、輻射熱伝達によってデブリ表面が効果 的に冷却されること、構造材への伝熱は抑制されて構造材の溶融が起き難いこと、3月16日以降 の数日間にわたるデブリ冷却不足期においてもデブリに内包された構造材の溶融は起き難いこと が示された。これらの解析結果から、プラント内部調査から得られているペデスタル内部のデブ リや構造材の状況が、デブリのペデスタル移行終了時の状況を基本的に代表しているとの認識を 得た。また、後述(3.3.3.2(2))のように、ペデスタル移行デブリから冷却材への強い伝熱が3月 15日の6:00~7:00頃に生じていたと考えられることから、この時間帯に高粘性デブリがプラッ トフォームなどの構造材を大きく変形させながらペデスタルへと流下したものと推定した。 以上のように、MPS 法を適用した解析結果は、1F3 号機におけるデブリ流下挙動に係る令和2年 度のプラント内部調査結果等に基づいた予測を、現象の理解に基づいて裏付けたものであり、本 研究でこれまでに実施した評価の妥当性を補強するものである。

(2) ペデスタル流下デブリの冷却に係る最新知見

令和2年度までの検討ではPCV 圧力の上昇が大きいことをもって、「『燃料デブリ』のようなものその2」が3月15日の6:00~7:00頃に生じていたと推定していた。この点については、その後の検討[25]により、D/WとS/Cの圧力変化の相関等からS/C蒸気圧の上昇が主に3月15日の6:00~7:00の時間帯に生じていたと推定した。すなわち、D/WとS/Cの圧力の関係からS/Cカバーガス領域の蒸気圧が予測でき、この蒸気圧が3月15日の6:00~7:00頃に上昇していた可能性が高いことを示した。これにより、図3.3-10に示した「『先行流出物』のようなもの」、「『燃料デブリ』のようなものその2」が3月15日の0:00~7:00頃の約7時間の間にペデスタルに移行し、「『燃料デブリ』のようなものその2」は最後の約1時間(3.1節におけるMPS法による解析で想定された75分に対応)に生じているとの理解が妥当であるとの認識を得た。

(3) 炉心エンタルピーに係る最新知見を踏まえた見直し

3.3.3.1(1)に示した 1F2 号機に対する最新知見を踏まえて、1F3 号機の炉心エネルギー変化の 評価を見直した。図 3.3-11 はこの見直しによって得た炉心エネルギー変化の最確評価を炉心物質 平均温度の概略予測と共に示したものである。

1F3 号機ではスクラム後約 45 h (3 月 13 日の 12:00 頃)の時点で炉心物質の主要なスランピン グが生じていたと考えられるが、RPV や D/W の圧力履歴などから下部プレナム移行デブリは短時 間にクエンチされ、液相冷却材温度近くまで冷却されたものと推定した。その後は代替注水の継 続によって約 53.5 h (3 月 13 日の 20:40 頃) までデブリは冷却されていたものと考えられる。こ の時点以降は D/W 圧力が低下しており、RPV 内での蒸気発生量は減少してデブリの冷却性は低下 していたものと考えられる。この結果、約57h(3月14日の0:00頃)にデブリ平均温度は1500 K 程度に達し、RPV バウンダリの破損と溶融金属の RPV 外への流出が開始したものと考えられる。 その後の RPV 内残留デブリ温度については、3.3.3.1(1)に示したように流出物や蒸気による残留 デブリからの除熱の大小に依存すると考えられる。この除熱が小さい場合でも約 64 h (3 月 14 日 の 7:00 頃) におけるデブリ平均温度は 2500 K には達しないと推定される。また、3 月 14 日の 3:00頃には PCV 圧力上昇がやや顕著になっているが、この時間帯にかなりの炉心物質の流出が生 じたものと考えられる。このような流出物質には 1F2 号機で見られた「『燃料デブリ』のようなも のその1」が含まれる可能性があるが、いずれにせよ、流動性の高い物質が流出した結果として、 下部ヘッド内には主に固体の酸化物デブリが残留していたものと推定され、残留デブリ冷却はあ まりなかった可能性がある。3月14日の3:00頃までの残留デブリ冷却が顕著であり、その後除 熱が失われた場合には、3 月 14 日 7:00 頃の残留デブリ平均温度は 2000 K 程度と推定される。な お、残留デブリの冷却が顕著であった場合でも、RPV バウンダリとその下部に位置している CRD や その支持構造が顕著な損傷を生じていることから、3月14日の7:00頃のデブリ温度は1F2号機 の 1500 K 程度を有意に上回る温度であったと推定される。本評価ではスティール融点(約 1700 K)を参考にして、1F3号機のペデスタル移行時のデブリ平均温度の下限を1700Kと推定した。

以上の分析結果から、1F2 号機同様、「『先行流下物』のようなもの」の初期温度は 1500 K 程度 と推定され、「『燃料デブリ』のようなものその 2」の初期温度は 1700 K~2500 K と推定した。ま た、デブリ冷却に係る 3.3.3.2(2)の知見と 3.1 節の MPS 法を適用した解析からの知見を踏まえる と、「『燃料デブリ』のようなものその 2」は RPV バウンダリを抜けてペデスタル領域に至る過程で 顕著な冷却を受け、初期温度から大幅に温度が低下していた可能性がある。



図 3.3-11 令和3年度までの最新知見を踏まえた1F3号機炉心エネルギー変化の最確評価 オリジナル圧力データ出典:東京電力HD[18]

(4) RPV 内残留デブリの量に係る検討

1F3 号機では3月16日以降、数日間、注水流量の低下で除熱不足の状態にあった[26]と推定し ているが、3 月 20 日以降の注水流量の増加でデブリの再冠水が生じていたと考えられる。このデ ブリ再冠水時の温度データの詳細分析[26]を行った。図 3.3-12 は観測された温度データと推定さ れる冷却材の流動経路を示すものである。なお、図中の数字①~⑩は熱電対(TC)の番号(TC① ~TC®)を表している。このデブリ再冠水フェーズにおける熱電対の応答は、その特徴から3つ のグループに分類される。グループ1の熱電対は3月20日の0:00以降3月20日の18:00過ぎま で単調な温度低下を示し、一部では液相冷却材の進入が生じていたと考えられる。このグループ の熱電対の領域を結ぶ冷却材の流動経路は2つあり、1つは給水配管(TC①が代表)から RPV 内 (TC②が代表) に入り、破損した RPV 底部を抜けてペデスタルに至る経路である。この経路を通 ってペデスタルに抜けた冷却材はペデスタルのデブリに加熱されて、主に D/W の北東方向に放出 され、グループ2の熱電対(TC③、TC⑦)によってとらえられている。グループ1の熱電対を結 ぶもう1つの経路は RPV から主蒸気配管を通じて D/W 東側付近の SRV (TC⑧が代表) から D/W に 漏洩していたと考えられる経路であり、この経路を通じて D/W 南東部(TC④と TC⑨が代表)を冷 却しながら PCV トップフランジに向かっていたと考えられる。一方、グループ3に属する熱電対 は PCV 上部の西側(TC⑩)と南側(TC⑤)に位置するものであり、これらは再冠水の初期にグル ープ2と同様に温度上昇が生じていたが、3月20日の18:00頃以降は一転して温度低下を生じて いた。この変化は、デブリ再冠水の進む過程で、何らかの理由により、PCV トップフランジの北東 部により顕著な漏洩経路ができ、そこへと流れ込む蒸気流によって冷却されていたことによる可 能性がある。

図 3.3-13 は原子炉建屋で火災発生時(オイル類の燃焼と考えられる。)の温度計測中断を含め たデブリ再冠水フェーズ全体の熱電対応答を示すものである。多くの熱電対が破損して負の温度 (セ氏温度)を示しているが、グループ1のいくつかは現実的と考えられる温度を示している。 このことは、ペデスタルデブリに直接的に加熱されない冷却材の流動経路にあるグループ1の熱 電対(TC④、TC⑥、TC⑨)のみが健全性を維持したと理解することができる。

以上のように、デブリ再冠水フェーズの初期段階では比較的低温の冷却材流動経路がペデスタ ルを除く部分に形成されており、この経路には RPV 内部も含まれていたと考えられる。すなわち、 RPV 内残留デブリはこのようなデブリ冠水フェーズの初期には、その熱的影響が殆ど熱電対デー タに見てとれない。このことから、デブリ再冠水フェーズにおいては、少なくとも高温のデブリ が RPV 内に残留していたことは考えられない。これに対して、温度測定の中断の間に発生した火 災は、ペデスタルの高温化したデブリが再冠水する過程で高温の蒸気が発生したことによるもの と考えられる。このように、ペデスタルデブリの冷却までには数日間にわたり高温の蒸気が発生 していたと考えられ、RPV 内への低温冷却材が容易に浸入していたと考えられる状況(3月20日 18:00 までのグループ1の熱電対指示値の単調減少)とは対照的である。

以上の温度応答の分析に基づくと、RPV 内残留デブリの量はあまり大きくはないと考えられる。



図 3.3-12 1F3 号機デブリ再冠水フェーズ初期における温度データと冷却材の経路推定 オリジナル圧力・温度出典:東京電力 HD[18][52]



図 3.3-13 1F3 号機デブリ再冠水フェーズ全体における温度データ オリジナル圧力・温度出典:東京電力 HD[18][52]

(5) 1F3 号機の炉心物質流下履歴に関わるまとめ

令和3年度に得た最新知見を踏まえて、令和2年度までの1F3号機の炉心物質流下履歴の推定 について見直しを行った。その結果、令和2年度までの推定は最新の解析評価や内部調査結果と 整合しており、妥当であるとの結論を得た。さらに、炉心物質の流下期間や推定温度の範囲を新 たに絞り込んだ。すなわち、1F3号機では3月14日の0:00頃から7:00頃までに、図3.3-10に 示した「『先行流出物』のようなもの」や「『燃料デブリ』のようなものその2」が流下したものと 推定された。流下物の初期温度については、前者は1500 K 程度、後者は1700~2500 K の範囲に あったものと推定されるが、流下の途中で冷却され、プラットフォームのフレームなどの構造材 は大規模に溶融することはなかったものの、デブリの荷重によって大規模な変形が生じていたも のと考えられる。また、PRV 下部ヘッド底部やその下の CRD 群やその支持構造部にある程度の燃 料デブリが残留している可能性が高いが、その量はあまり多くないと考えられる。

3.3.4 まとめ

1F2・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、1F2・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、1F2 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した。推定された支配要因に着目し、現実的な流出履歴 (組成、温度、経路等)を評価した。1F3 号機については、1F2 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 1F2 号機との差に着目してその流出挙動に係る支配要因を評価した。 以上の 1F2・3 号機デブリ流下挙動に関して得られた知見を本プロジェクト関係者間で共有し、解 析条件や実験条件の選定に反映した。

令和元年度は、RPV からペデスタルに至る領域の構造情報、1F2・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、1F2・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、1F2 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。

令和2年度は、1F2・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 1F 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、1F2・3 号機共に下部プレナムに落下した炉心燃料は一度、冷却材温度程度まで冷 却されたとの推定結果を得た。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落下までの時間が長い 1F3 号機(1F2 号機の約 2 時間に対して 1F3 号機では約6.5時間)でより大きく、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 た可能性があることが分かった。すなわち、1F2 号機では未溶融のペレット状の燃料等の細かな粒 子状の燃料デブリを主体としていた可能性があり、1F3 号機では溶融後に固化し、クラックによっ て分割されたブロック状の(内部に金属を含む。)燃料デブリを多く含む可能性があることが分か った。これらの燃料デブリはいずれも、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ことが分かった。しかし下部プレナムの液相水が枯渇(ドライアウト) するといずれも除熱が低下し、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 程度でデブリ温度は1500 K 程度まで上昇し、その後1時間程度の比較的短時間に炉心物質の一部 が RPV から流出できる程度に破損し、炉心物質のペデスタルに向けた移行が開始したと推定した。 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落下したのは溶融金属が 主体の「先行流出物」であったと推定した。このような初期の溶融金属を主体とする炉心物質の ペデスタル移行までの事象進展は1F2・3号機に共通と推定した(破損モードIとⅡ)。

その後、1F2 号機では若干のデブリ昇温があって、燃料成分をある程度含む「金属リッチ燃料デ ブリ」の流出が RPV 底部付近で生じた可能性があることが分かった(破損モードIII)。1F2 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。1F3 号機では「デブリのようなもの」の形跡は直接確認されていないが、そのような流出物が 存在していて、ペデスタル堆積デブリ中に埋もれている可能性がある。しかし、1F3 号機では RPV 内に残留する酸化物主体と考えられる燃料デブリの冷却性が 1F2 号機の場合よりも低く、冷却性 が回復せず、燃料デブリの相当割合が平成 23 年 3 月 14 日 5:30 頃から 7:00 頃にかけてペデスタ ル領域へと落下したものと推定した。この際のペデスタル移行デブリはペデスタル床上に存在し た液相冷却材との接触等により蒸気を発生し、蒸気による冷却効果が作用し、粘性の大きな状態 で CRD 支持構造群やプラットフォーム等の構造を大規模に変形させつつペデスタルに移行してい たものと考えられる。

令和3年度は、令和2年度までに得た燃料デブリエンタルピーに係る評価結果等に基づき、1F2・ 3号機における炉心物質流下挙動(流動性、流下時間、流下経路など)の評価を見直した。1F2号 機については燃料デブリエンタルピーに係る最新知見を考慮して見直し、炉心物質のペデスタル 移行開始時の温度は1500K程度であったとの評価を得た。1F3号機については、1500Kよりも高 い温度で酸化物主体の高粘性デブリが流下したが、ペデスタル構造物群の溶融は限定的であった と評価した。これらにより、1F2号機では先行流出物のようなものから生コンクリート程度の粘性 を有する炉心物質が2時間前後でペデスタルに流下し、1F3号機ではこれらに加えて、その後の 高粘性の燃料デブリのようなものの流下も含めて7時間前後で炉心物質がペデスタルへと流下し たものと推定した。これらの情報を本事業内の実験やMPS法を用いた解析の条件検討に反映した。 3.4 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

3.4.1 令和元年度の実施内容及び成果(概要)

金属ボライドー(U0₂-Zr0₂-Zr)の高温相状態及び液相の粘性の評価を目標として、令和元年度 は大阪大学に設置されている酸化物試料用の ADL 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、従来よりも高性能なハイスピードカメラを設置した。

本研究の実施以前に大阪大学に設置されていた酸化物試料用の ADL の装置に用いていたハイス ピードカメラは、株式会社ディテクト製の HAS-D72M であり、2,000 fps (1,280×1,024 pixel) のフレームレートであった。金属系の炉心物質 (Zr、Fe、B) は従来の酸化物試料 (Al₂O₃)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 Al₂O₃の約 1.6 倍に達すると評価 した。そこで、ハイスピードカメラをフレームレートが十分に大きい(従来比 2 倍の)株式会社 ナックイメージテクノロジー製の MEMRECAM HX-7S に交換した。これにより、図 3.4-1 に示す減衰 運動する Al₂O₃ 液滴の直径の時間変化からも分かるように、従来の 2000 fps の倍である 4000 fps (1,280×720 pixel) での撮影が可能となった。

また、ADL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 評価した。先ず、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 株式会社、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Fe0.84B0.16となるよ うに溶融混合しインゴットを得た。次に、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。試料の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。溶融 Fe0.84B0.16の密度は、測定した1,450~1,650 Kの温度範囲 において図3.4-2(a)に示すように一般的な溶融物の密度の温度依存性と同じ挙動を示すことを確 認した。また、粘性は図3.4-2(b)に示すように約1600 Kの温度において測定に成功した。



図 3.4-1 減衰運動する Al₂O₃液滴の直径の時間変化 (a)2,000 fps (b)4,000 fps



図 3.4-2 溶融 Fe_{0.84}B_{0.16}の密度と粘性 (a)密度 (b)粘性(文献値 Fe [27]、B [28])

3.4.2 令和2年度の実施内容及び成果(概要)

(1) Fe-B 共晶合金(Fe_{0.84}B_{0.16})と燃料(UO₂)との反応挙動評価実験と溶融挙動評価

ボライドと高温燃料が反応して生成する液相についての知見を得るため、Fe-B 共晶組成の合金 と燃料である UO₂を坩堝に入れて共晶温度以上の温度で熱処理し、SEM/EDX によって観察した。Fe-B 系において最も低い共晶温度となる Fe_{0.84}B_{0.16}の組成のインゴットをアーク溶解にて作製し、UO₂ 粉末を焼結温度 1873 K、焼結温度 12 時間、昇降温 100 K/h、Ar 雰囲気の条件で焼結し、ペレット を作製した。その後、作製した UO₂ペレットと Fe_{0.84}B_{0.16}インゴットを BN 製坩堝に入れ、Ar フロ ー雰囲気下で 1573 K と 1673 K で 10 時間熱処理した。熱処理後の試料を切断し、断面を SEM/EDX によって観察した結果を、1573 K で熱処理したケースを例に図 3.4-3 に示す。図の右下に見える のが UO₂、それ以外の領域は Fe-B 相である。U と Fe の分布の境界は明瞭であり、U が Fe-B 相へ溶 けだしているような箇所は観察できなかった。さらに、図中に赤線で示した方向に対して U と Fe の組成の線分析を行った結果からも、U と Fe の分布の境界は明瞭であることが分かった。これは、 還元雰囲気において UO₂から Fe-B 溶融相には U は殆ど溶けださなかったことを示唆している。

次に、Fe-B 共晶合金のインゴットを加熱して溶融挙動を観察した。Fe-B 共晶合金を Ar 雰囲気 下で昇温速度 150 K/h、最高温度 1473 K の条件で加熱した。電気炉の下部からバックライトとし て紫外光を照射し、上部に設置したカメラで試料の様子を観察した。撮影した画像から、試料は 1473 K において 30 秒以内という短時間で球状に変化したことが分かった。また、肉眼ではおよ そ 3 秒で形状が変化したことを確認した。このことから、Fe-B 共晶合金は共晶温度(1450 K)の 直上で低い粘性(高い流動性)を有することが予想されることが分かった。



図 3.4-3 1573 K で熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング

(2) Fe-B 共晶合金の粘性・比熱・凝固熱評価

Fe-B 共晶合金の粘性、比熱、凝固熱を評価した。金属試料の粘性は、測定に時間がかかるとその間に金属試料が酸化してしまうため、短時間で測定するために、ADL をベースに大阪大学が独自に開発した手法である液滴衝突反跳法を用いた。基板に落下して反跳した試料の振動振幅をハイスピードカメラによってとらえ、その減衰振動係数を求めて、粘性を評価した。その結果、1683 K の粘性は45±4 mPa·s 以下であった。この結果は、静電浮遊法で評価した粘性(約 1600 K において 10 mPa·s 程度)と矛盾しないものとなった。

ガス浮遊させた液体の比熱を評価する手法はこれまで知られていなかったが、近年になって大阪大学の研究グループにより開発された手法を用いて Fe-B 共晶合金の液相の比熱を評価した。浮遊用のガスを2種類 (Ar と Kr)使用し、浮遊させた液体が冷却する過程において異なる冷却曲線を2つ得ることで、比熱を算出した。その結果、モル比熱としては、Fe_{0.84}B_{0.16}の方が Fe よりも小さいことが明らかになった。

3.4.3 令和3年度の実施内容及び成果

 3.4.3.1 SUS-B₄C 共晶溶融物と燃料(U0₂+Gd₂O₃)が接触した際に生成し得る液相の評価 SUS と B₄C は(SUS)_{0.98}(B₄C)_{0.02}の組成において 1500 K 程度で共晶反応により液相が生じるこ とが知られている。そこで、共晶組成の SUS-B₄C 液相と燃料ペレットが接触した際に U や Gd が 液相へ移行するかを評価することを目的に、電気炉と ADL を用いた実験を行った。

(1) 電気炉を用いた実験

電気炉を用いた実験は以下のように実施した。SUS304L(株式会社高純度化学研究所、Powder) とB₄C(株式会社高純度化学研究所、Powder、99% up)を出発物質として、SUS-B₄C系において最 も低い共晶温度となる、(SUS304L)_{0.98}(B₄C)_{0.02}の組成のインゴットをアーク溶解にて作製した。得 られたインゴットの一部を切断し、Arフロー下において示差熱分析(DTA)測定を行うことにより 溶融温度を評価した。また、燃料ペレットとして4 wt% Gd 添加 UO₂ペレットを用意した。4 %H₂-Arフロー雰囲気下で1023 K において10時間熱処理を行って還元し、X 線回折法(XRD)測定によ り相状態を評価し、SEM/EDX 観察によって元素分布を評価した。その後、図 3.4-4 に示すように (SUS)_{0.98}(B₄C)_{0.02} 共晶合金インゴットと UO₂ペレットを BN 製坩堝に入れて電気炉中で加熱し共晶 合金を溶融させ、炉冷により凝固させた。このとき、雰囲気は Ar フロー、温度は1573 K と 1773 K、時間は10時間保持とした。1573 K は共晶温度よりやや高い温度、1773 K は鉄の融点である 1813 K よりもやや低い温度として選定した。炉冷後に凝固体の断面を SEM/EDX により観察し、U と Gd の挙動を評価した。

図 3.4-5 に、作製した(SUS)_{0.98}(B₄C)_{0.02}インゴットの写真と DTA 曲線を示す。1500 K 付近で溶融によるピークが見られることが分かる。DTA 曲線から得られた溶融温度は 1509 K であり、文献値と良く一致する結果が得られた。

図 3.4-6(a)に、4 wt% Gd 添加 UO₂ペレットの外観写真と SEM/EDX 分析結果を示す。U と Gd は均一に分散していることが分かる。EDX によって Gd 組成を評価したところ 3.6±0.4 wt%であり、妥当な結果が得られた。図 3.4-6(b)には XRD 測定結果を示す。不純物に起因するピークは見られなかった。ピーク位置から計算した格子定数から理論密度を算出し、実密度を測定することで相対密度を評価したところ、94%であった。

図 3.4-7 に、1573 K と 1773 K で熱処理した (SUS) $_{0.98}$ (B₄C) $_{0.02}$ +4 wt% Gd 添加 UO₂ペレットの外 観写真と断面の SEM/EDX 分析結果を示す。いずれの温度においても目視では UO₂ペレット金属部 との境界における反応は確認できなかった。SEM 観察結果より、酸化物相と金属相の境界は明瞭で あることが分かる。反応層の形成は確認できなかった。EDX による U と Fe のマッピング結果から は、U と Fe が共存している領域は確認できなかった。以上により、UO₂中の U は 1573 K と 1773 K のいずれの温度においても共晶組成の SUS-B₄C 溶融合金中にはほとんど溶出しないことが明らか となった。

図 3.4-8 に、1773 K で熱処理した試料断面の SEM 観察画像と EDX によって得られた X 線のスペクトルを示す。金属相と酸化物相のスペクトルを比較すると、Gd に起因するピークは酸化物相にのみ見られ、金属相には見られないことが分かる。このことから、Gd は 1773 K においても SUS-B₄C 相への顕著な移行は生じないことが明らかとなった。


図 3.4-4 反応挙動評価実験の概要



図 3.4-5 作製した (SUS) 0.98 (B₄C) 0.02 インゴットの写真と DTA 測定結果



図 3.4-6 4 wt% Gd 添加 UO₂ペレットの外観写真、SEM/EDX 分析結果、XRD 測定結果 (a) 外観写真と SEM/EDX 分析結果 (b) XRD 測定結果



図 3.4-7 熱処理した試料断面の SEM/EDX 分析結果

(b) 熱処理温度:1773 K

(a) 熱処理温度:1573 K



図 3.4-8 1773 K で熱処理した試料断面の SEM/EDX 分析結果

(2) ADL を用いた実験

電気炉を用いた試験温度(最高1773 K)以上の温度でのSUS-B4C 共晶溶融物と燃料との反応挙動を評価するために、浮遊法の一種であるADL を用いた。ADL では直径 2 mm 程度の試料をノズル下部から噴出させたガスにより浮遊させる。レーザー加熱で試料を加熱することにより試料を溶融できる。本実験ではガスとして Ar を、レーザーとして出力100 Wのファイバーレーザー(波長976 nm)を用い、1分間程度浮遊溶融させた。試料温度は放射温度計により測定した。本実験では溶融相の相状態に関する知見を得ることを目的としているため、に示すようにノズルを分割する

ことで液滴を水中または金属板状に落下させ、急冷凝固させるクエンチ実験(図 3.4-9)を実施した。その後、試料の断面を SEM/EDX により分析した。

試料は、SUS304L(株式会社高純度化学研究所、Powder)、B₄C(株式会社高純度化学研究所、Powder、 99% up)、ZrO₂(フルウチ化学株式会社、Powder、99.99%)を出発物質として、SUS304LとB₄Cにつ いては SUS-B₄C 系において最も低い共晶温度となる(SUS304L)_{0.98}(B₄C)_{0.02}の組成となるように、 ZrO₂は5 vo1%となるように秤量した。ZrO₂はUO₂の模擬として用いた。粉末を乳鉢で15分間混合 し、放電プラズマ焼結法によって焼結して図 3.4-10(a)に示すようなSUS304L、B₄C、ZrO₂からなる ペレットを作製した。SEM/EDX分析によってZrO₂が均一に分布していることを確かめた後に、こ のバルク試料を図 3.4-10(b)に示すように切断し、ガス浮遊実験に供した。

図 3.4-11 に、焼結体したバルク試料の SEM 画像と EDX による元素マッピングの結果を示す。ガ ス浮遊実験に用いる試料サイズの 1 mm 程度のオーダーでは、Zr は均一に分布しており、ガス浮 遊実験に問題なく用いることができることを確認した。

図 3. 4-12 に、(SUS304L)_{0.98}(B₄C)_{0.02}+5 vol% ZrO₂のガス浮遊溶融時の様子を示す。溶融した球状の液滴の周囲に突起が生じていることが分かる。突起部の SEM/EDX 観察結果を図中に示しているが、この突起は主に Zr からなることが分かった。溶融した金属相と主に ZrO₂ からなる酸化物相が分離したと考えられる。

図 3.4-13 に、ADL によって浮遊溶融させた後に水中及び金属面上に落下させて急冷凝固させた 凝固体の外観と断面の SEM/EDX 観察結果を示す。落下直前の温度を放射温度計によって評価した ところ、水中クエンチでは約 2600 K と 2000 K、金属面クエンチでは約 1900 K であった。いずれ の場合でも突起部はクエンチ後に脱落してしまったために、残った金属相のみを分析した。クエ ンチ方法及び落下時温度による明確な影響は見られず、いずれの場合でも金属相中に僅かに Zr が 存在していることが確認できた。Zr の割合を (Zr+Fe) に対して計算したところ、0.4~0.6 at% 程度であった。これは、1900 K 以上の高温では ZrO₂が一部還元し、金属相へ移行したことを示し ている。UO₂でも同様の挙動を示すかについては今後検討する必要があると考えられる。



図 3.4-9 ADL を用いたクエンチ実験の概要



図 3.4-10 放電プラズマ焼結法によって焼結したバルク試料と切断した試料 (a) 焼結したバルク試料 (b) 切断した試料



図 3.4-11 (SUS304L)_{0.98}(B₄C)_{0.02}+5 vol% ZrO₂の焼結後バルク試料の SEM/EDX 観察結果



図 3.4-12 (SUS)_{0.98}(B₄C)_{0.02}+5 vol% ZrO₂のガス浮遊溶融時の様子



図 3.4-13 クエンチした (SUS304L) 0.98 (B4C) 0.02+5 vol% ZrO2の外観と SEM/EDX 分析結果

3.4.3.2 ステンレス-B₄C 共晶溶融物の密度評価

SUS-B₄C 共晶溶融物と燃料 (UO₂+Gd₂O₃)が接触した際に生成し得る液相の評価結果 (3.4.3.1) から、SUS-B₄C 共晶溶融物が燃料ペレットと 1773 K で接触しても U や Gd の金属溶融相への顕著な 移行は生じないことが明らかとなった。この知見を元に、溶融相として共晶組成の SUS-B₄C 溶融 合金に着目し、その密度を評価することを目的に ADL を用いて溶融相の密度を評価した。

試料については、SUS304L(株式会社高純度化学研究所、Powder)と B₄C(株式会社高純度化学研究所、Powder、99% up)を出発物質として、(SUS304L)_{0.98}(B₄C)_{0.02}の組成のインゴットをアーク 溶解にて作製した。図 3.4-14 に、ADLを用いた密度評価方法の概要を示す。4 % H₂-Ar ガスを用 いて試料を浮遊させ、出力100 Wのレーザー(波長 976 nm)を用いて加熱溶融させ液滴とする。 試料温度は放射温度計により測定した。ノズルを分割して液滴を落下させ、液滴の形状をハイス ピードカメラにより撮影した。得られた画像より液滴の輪郭を抽出し、楕円フィッティングによ り液滴の体積を評価した。試料の重さを測定し、密度を得た。

図 3.4-15(a)に、加熱レーザーをオフにした際の液滴試料の冷却曲線を示す。レーザーを切ると 液滴は冷却し凝固するが、凝固の際に冷却曲線に変化がみられる。その温度が、試料が溶融する 温度となるように放射率を補正することで温度校正を行った。試料が溶融する温度としては、本 研究で DTA によって評価した温度(1509 K)の値を用いた。

図 3.4-15(b)に、ノズルを分割して液滴を落下させた際の放射温度計で測定した温度を示す。液 滴を落下させると放射温度計の測定範囲から試料位置が外れてしまうために試料温度が測定でき なくなる。そこで、試料落下時には試料はガス浮遊時と同様に冷却すると仮定した。ガス浮遊時 は、試料はガス流によって強制冷却されるが、落下時はガスの流速は相対的に小さくなるために 試料落下時の冷却速度はガス浮遊時に対して下がると考えられる。すなわち、この方法で評価で きる試料温度は下限の値である。一方で上限は落下時の温度である。そこで、本研究では上記方 法で見積もった温度の上限と下限を温度の不確実性として測定結果にエラーバーで示した。なお、 体積の評価は落下開始時点から10~20 ms後程度に行ったため、温度の不確実性としては10~20 K程度となった。

先ず、密度の文献値の豊富な Pt を用いて本手法で密度を測定し、文献値と比較することで本手 法による密度評価結果の妥当性及び測定精度を評価した。図 3.4-16 に本手法による Pt の密度の 測定結果を文献値と併せて示す。本手法で測定した結果は±1%程度のばらつきがあるものの、浮 遊法で測定された文献値[29][30][31][32]とよく一致していることが分かる。これにより、本手 法による密度評価は可能でありその精度は 1%程度であることが示された。

本手法を用いて(SUS304L)_{0.98}(B₄C)_{0.02}の密度を測定した結果を図 3.4-17 に示す。SUS304L の密 度の文献値[33]と比較することで、SUS304L に対して(SUS304L)_{0.98}(B₄C)_{0.02}の密度は 1%程度低いも のの大きな変化はないことが明らかとなった。



図 3.4-14 ADL を用いた密度評価方法の概要



図 3.4-15 液滴試料の冷却曲線 (a) 加熱レーザーをオフにしたとき (b) 液滴を落下させたとき



図 3.4-17 ADL を用いて測定した(SUS) 0.98 (B₄C) 0.02 の密度

3.4.4 まとめ

1F2・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、金属ボライドー(U02-Zr02-Zr)の高温相状態を評価し、生成し得る液相の粘性等を評価することを目標とした。そのために、 金属ボライドとU02、Zr02、Zr等を電気炉中で反応させ、その反応層を観察した。また、上記試料 を ADL 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した。

令和元年度は、金属ボライドー(U0₂-ZrO₂-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 ADL 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。A1₂O₃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、 A1₂O₃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、ADL よりも実績が豊富な静電浮遊法を用いて、Fe0.84B0.16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。

令和2年度は、ボライドと高温燃料が反応して生成する液相についての知見を得るため、Fe-B 共晶組成の合金と燃料(U0₂、Zr0₂、Zr等)を坩堝に入れて電気炉で熱処理した。Fe-B 共晶合金は 1473 K 程度で溶融するため、1473 K 程度以上の温度で熱処理することで Fe-B 融体と固体燃料を 反応させた。Fe-B 系において最も低い共晶温度となる Fe_{0.84}B_{0.16}の組成のインゴットを作製し、 U0₂ペレットと Fe_{0.84}B_{0.16}インゴットを Ar フロー雰囲気下で1573 K と 1673 K で 10 時間熱処理し た。熱処理後の試料の断面を SEM/EDX によって観察した結果、U は Fe-B 相中には確認できなかっ た。これは還元雰囲気において Fe-B 溶融相には U はほとんど溶けださないことを示唆している。 また、ボライドを含む高温融体として Fe_{0.84}B_{0.16}の 1673 K 程度における粘性を、大阪大学におい て ADL をベースに独自に開発した手法である液滴落下反跳法を用いて評価した。

令和3年度は、液相の相状態を把握することを狙い、SUS、B₄C、ZrO₂からなるペレットを焼結に よって作製し、ADLによって浮遊させた試料をレーザーによって加熱し、液滴とした。液滴を金属 板上や水中に落下させることにより、急冷凝固させた。さらに、SUS と B₄C 共晶合金と UO₂ペレッ トを電気炉中で加熱して共晶合金を溶融させ、炉冷により凝固させた。凝固体の断面を SEM/EDX により評価することにより、UO₂中の U は 1770 K 程度の共晶組成の SUS-B₄C 溶融合金中には、ほ とんど溶出しないことを明らかにした。この知見を元に、共晶組成の SUS-B₄C 溶融合金に着目し、 ADL を用いて溶融相の密度を評価した。 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 令和元年度の実施内容及び成果(概要)

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、1 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、MPS 法に基づく解析コードの並列化を行った。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 1 つである Message Passing Interface (以下、「MPI」と略す。)を用いて各領域間の通信を行った。このと き、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。このような並列化制御の効率を 評価した結果、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 が分かった。

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 3.5-2 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10 gigabit の高速イ ーサネット(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 構成とした。管理ノード及び各計算ノードは、CPUにインテル®Xeon® Gold 6238(2.1 GHz 22コ ア)を2セット搭載し、8 GB 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10 G 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。

これらの解析コードと並列計算機システムを用いて、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 VE-U7 実験の試解析を実施した。溶 融物の粘性は Ramacciotti の相関式[34]により評価した。但し、固相率が一定値(凝固固相率 0.8) を超えた場合には、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。このような試解析を実施した結果、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ることを確認できた。また、従来の 0penMP のみを用いた解析により得ら 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 の時間変化を比較し、実質的に従来の解析結果と同じ結果が得られていることを確認した。



図 3.5-1 MPS 法の新計算アルゴリズム(令和2年度)



図 3.5-2 並列計算機構成

3.5.2 令和2年度の実施内容及び成果(概要)

1F3 号機ペデスタル堆積物分布を検討するための解析体系を構築した。1F3 号機ペデスタルの状況に係る情報は限られており、本研究では東京電力HDがインターネット上に公開しているペデスタル内部調査結果を元にした復元動画[35]等を参考に解析体系を構築した。このとき、東京電力HDによるプラント内部調査報告[36]等を元に本研究独自に1F3 号機ペデスタルの堆積物中にはペデスタル構造物群を構成する中間作業架台フレームやCRD 交換機が埋もれている可能性を検討した。また、中間作業架台の高さ位置及び内径、ケーブルトレイの位置等は東京電力HDによるPCV内部調査[37]を元に推定した。

これらの情報を元に構築した実機の 1/10 スケールの MPS 法の解析体系を図 3.5-3 に示す。1F3 号機の RPV からペデスタルへのデブリ移行期は約7時間に及ぶものの、主要な酸化物デブリの移 行はその7時間のうち、最後の約75分間に集中していたものと推定した。その時点では、プラン ト内部調査結果を参考に、中間作業架台構造の一部(フレーム構造)は本来の位置から脱落して いたものと仮定した。一方、ペデスタル構造物の中では比較的に頑健であると考えられる CRD 交 換機はペデスタル中央部デブリの凸部に埋もれていると考え、概ね本来の位置に直立した状態で あったと仮定した。また、その時点では RPV 破損後に初期に流出したと考えられる金属デブリは ペデスタル床に堆積していたものと仮定した。このような体系に対して、RPV のほぼ中央部に位置 する場所から酸化物デブリが流下したと仮定した。

溶融物の流下境界には、凝固粒子タイプに対応した境界条件を与えた。実機デブリ流下履歴に 対応するために、実機で想定される溶融物、凝固物、ペデスタル床コンクリートの物性モデルを 組み込んだ。このようにして構築した解析体系を令和元年度に整備した領域分割法で大規模並列 計算用に領域分割した。MPS 法の新クラストモデルを実装した 1F3 号機ペデスタル領域の三次元 解析体系を構築し、解析条件に応じて解析体系を 4 領域以上に分割したメモリ分散並列計算とメ モリ共有並列計算を併用した並列計算を実施した。実機で想定される溶融物の初期温度、初期粘 性、蒸気自然対流冷却の効果を考慮した解析を実施し、溶融物がペデスタル構造物群を大規模に 溶融崩落させずに堆積する条件を示した。

図 3.5-4 に解析結果をまとめる。表中には燃料デブリ移行期の最終デブリ堆積分布を示した。 また、表中の黒枠部はペデスタル構造物群が大規模に溶融損壊したケースを表し、構造物群の top view を示した。実機では燃料デブリ移行期中はペデスタル床に最大約 40 cm の水があり、約 75 分 間にわたり連続的に燃料デブリが移行してくることで連続的に蒸気が発生し、後続の燃料デブリ をある程度冷却していた可能性が考えられる。但し、それ以外にも注水の一部が燃料デブリに直 接到達して蒸気を発生させていた可能性も考えられる。本解析では、蒸気による冷却は、自由表 面粒子が一定の熱伝達率で除熱されるように境界条件を与えることで模擬した。また、75 分間の 連続的な移行を現実的な計算コストで模擬するために、燃料デブリ移行期を複数サイクルの「移 行フェーズ」と「冷却フェーズ」の繰り返しで模擬し、その合計が 75 分間になるようにして解析 した。サイクル長を短くすることで一度の移行フェーズに流下する燃料デブリ量を低減したが、 サイクル長が短くなるほど連続移行シナリオに近づくと考えることができる。

このようにして実施した一連の解析結果から、一度にペデスタル領域に移行する燃料デブリの 量が少なく、蒸気自然対流冷却が強いほどペデスタル構造物群上に燃料デブリが堆積しやすくな る傾向が明らかになった。このとき、燃料デブリの初期温度が低いほど、ペデスタル構造物群が 熱的に健全な状態を保ちやすくなるが、燃料デブリの粘性が増加するため、ペデスタル構造物群 を通過してペデスタル床にたどり着く燃料デブリ量は減少する。しかし、燃料デブリがペデスタ ル床に到達できなければ、後続の燃料デブリを冷却する蒸気の発生量は低下する。これらのこと を踏まえると、燃料デブリがある程度高い流動性(低い粘性)で流下し、その一部はペデスタル 構造物群を通過してペデスタル床に到達し、残りはペデスタル構造物群上で冷却されて凝固堆積 したようなシナリオが考えられる。このような条件を想定した解析から得られた燃料デブリの堆 積分布は、1F3号機内部調査の結果に比べると全体的に平坦で高いように見える。しかし、本研究 の解析ではペデスタル構造物群に加わる荷重による損壊は考慮できていない。CRD 交換機のよう な比較的に頑強な構造体の周囲を除き、ペデスタル構造物群が燃料デブリの荷重で本来の位置か ら下方に沈降して現在の内部調査で確認されているような堆積分布がもたらされている可能性も 考えられる。



図 3.5-3 1F3 号機ペデスタルデブリ移行解析の解析体系

デブリ移行シナリオ		短期連続移行	長期・間欠移行			長期連続移行 (実機・推定)
ー度の流下量 (サイクル長)		特大(-)	大(500秒)	中(250秒)	小(125秒)	極小
強い冷却 100 W/m²/K	流下温度・ 高(2500 K) 粘性・低 (0.005 Pa·s)			ture (K)		ペデスタル構造物群が中 央を除いて荷重で沈降?
	流下温度・ 低(2000 K) 粘性・高 (0.5 Pa·s) →中間架台 以下にほと		re the second			
弱い冷却 10 W/m²/K	んど んどい。 連 気 発 生 の 説 明 が 困 難。	未評価			e Change	

温度スケール(K) 425.1 2000 **黒枠**:ペデスタル構造物群が大規模に溶融・損壊したケース 図 3.5-4 デブリ流下・堆積挙動解析結果のまとめと考察(デブリ移行期)

3.5.3 令和3年度の実施内容及び成果

令和3年度は、令和2年度に作成した1F3号機ペデスタル堆積物分布を検討するための解析モ デルを改良した。先行流出物の溶融・凝固モデルを追加し、令和3年度のMPS法の改良(実施項 目(1))を反映した大規模並列計算機実験により、1F3号機ペデスタルへの後続溶融物移行期から 冷却期を経て冷却不足期までの先行流出物と後続溶融物の堆積挙動を解析した。令和3年度に実 施/取得した実機デブリ流下履歴の同定(実施項目(3))及び高温融体物性(実施項目(4))を考 慮し、1F3号機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布を示した。

3.5.3.1 デブリ移行期の解析

(1) 解析条件の検討

令和2年度に実施した1F3号機ペデスタルへの燃料デブリ移行期の解析では、ペデスタル構造 物群がデブリ移行期に大規模に溶融しない可能性を保守的に評価するために、デブリや構造物群 からの除熱は気相自然対流に伴う伝熱のみを考慮した。しかし、実際にはかなりの熱が輻射放熱 によりペデスタルのデブリや構造物群から除熱されていた可能性がある。そこで、令和3年度は 3.1.3項に示したように、MPS法解析コードを改良し、Stefan-Boltzmannの法則を用いて輻射放 熱による除熱(3.1-7)式を新たに考慮できるようにした。例として、バックグラウンド温度(T_∞) (すなわち、輻射放熱する先の受熱構造体の表面温度)が425 Kで、輻射率(ε)が0.50の場合

発熱体(デブリ)の温度に対して、その表面からの気相自然対流及び輻射放熱による熱流束は図 3.5-5に示すような温度依存性を示す。輻射放熱は気相自然対流に比べ温度に対する感度が高く、 表面温度が約 1200 K 以上になると、輻射放熱による熱流束(輻射率 ε =0.5、バックグラウンド温 度 T_{∞} =425 K)は気相自然対流による熱流束(h=100 $W/m^2/K$)を超える。しかし、1200 K は 高温であるものの、燃料デブリが溶融するような温度ではなく、主要な構造物群の融点(約 1500 K)に比べてもずっと低い。

そのため、1F3 号機ペデスタル燃料デブリの冷却期、冷却不足期における構造物群の熱的な健全 性や燃料デブリの堆積分布を包括的に考慮するには、令和2年度の評価において構造物群の大規 模な溶融の可能性があるとした、「弱い冷却(10 W/m²/K)」ケースについても、輻射放熱による 追加の除熱を考慮した追加評価が必要であることが分かった。すなわち、令和2年度までの評価 結果に比べ、輻射放熱の影響を追加考慮するとペデスタル構造物群が熱的に健全と評価できる条 件範囲が広がることが予想される。また、ペデスタル構造物群を通過してペデスタル床に到達す る燃料デブリの割合が低下することが予想される。そこで、令和3年度はデブリ移行期について 以下の2ケースを追加評価した。

- 追加ケース1(高温ケース):デブリ初期温度2500 K、移行サイクル500秒、気相自然対流による熱伝達率10 W/m²/K、輻射率0.50、バックグラウンド温度425 K。本ケースはペデスタル構造物群に対する熱負荷が最も大きくなる(デブリ初期温度が高く、気相自然対流伝熱が弱い)ケースとして選定した。本ケースは、輻射放熱を考慮しなかった令和2年度の評価では、構造物群が大規模に溶融する結果となった。また、デブリ初期温度が高いため、相対的に輻射放熱の影響が大きくなることが予想される。
- 追加ケース2:デブリ初期温度2000 K、移行サイクル500秒、気相自然対流による熱伝達率 10 W/m²/K、輻射率0.50、バックグラウンド温度425 K。本ケースはデブリ初期温度が低く、相対的に輻射放熱の影響が小さくなることが予想される。

なお、仮にバックグラウンド温度を973 K に高めるとデブリ温度が比較的に低温(1000 K)以下では輻射放熱量が著しく低下するが、温度の上昇に伴って熱流束は増大し、SUS 等の主要な構造物の融点(1500 K)近傍ではバックグラウンド温度が輻射放熱量に及ぼす影響は小さいことが分かる。また、気相自然対流に伴う熱流束に対して輻射放熱による熱流束の方が大きくなることが分かる。



(2) 解析結果

追加ケース1(高温ケース)のデブリ移行期の解析結果を図3.5-6に示す。燃料デブリ及び構造 物群は共に急速に冷却されており、輻射放熱の寄与が大きいことが分かる。ペデスタル構造物群 の一部は一時的に(105秒)に最高で1495 Kまで温度上昇した後、緩やかに1000 K程度まで温 度低下した。デブリ移行のサイクル末期になる頃には(移行サイクル 500秒)ほとんどの燃料デ ブリの温度は1500 K以下となり、構造物群の温度は900 K以下となった。これらの結果、輻射放 熱を考慮しなかった令和2年度の評価結果とは異なり、構造物群が大規模に溶融することはなか った。

追加ケース1(高温ケース)のデブリ移行期終了時のデブリ分布を図3.5-7に示す。輻射放熱の 寄与を考慮しなかった令和2年度の評価では、一度に流下させるデブリ量を多くした、デブリ移 行サイクル長500秒のケースでは、ペデスタル構造物群が大規模に溶融し、一度に流下させるデ ブリ量を減らしたサイクル長250秒、125秒のケースでは最終的にデブリがペデスタル構造物群 により支えられる結果となった。それらの結果に比べ、輻射放熱の寄与を考慮して、一度に流下 させるデブリ量を多くしたデブリ移行サイクル長500秒の本ケースでは、最終的なデブリ堆積分 布がペデスタル構造物群上を水平方向に広がって分布する傾向が見られた。一方、強い輻射冷却 の影響により、ペデスタル構造物群を通過して、ペデスタル床にまで到達する燃料デブリは無く、 途中で完全に凝固した。

追加ケース2(低温ケース)は、追加ケース1(高温ケース)に比べ、ペデスタル構造物群への 熱的な負荷は小さく、構造物群が大規模に溶融しないことは明らかなため、デブリ移行挙動とそ れに伴う構造物群の温度変化は省略する。デブリ移行期終了時のデブリ分布を図 3.5-8 に示す。 輻射放熱の寄与を考慮しなかった令和 2 年度の評価でも、ペデスタル構造物群は大規模に溶融せ ず、デブリ移行期終了時にペデスタル構造物群上にデブリが堆積分布したが、その結果に比べ、 本解析ケースの結果では、ペデスタル構造物群上に残存し、ペデスタル床に移行しなかったデブ リの割合が大きくなった。

これらの追加ケースに加え、追加ケース3(高温・連続移行ケース:デブリ初期温度2500 K、 デブリ連続移行、気相自然対流による熱伝達率10 W/m²/K、輻射率0.50、バックグラウンド温 度425 K)としたケースも加え、令和2年度に得たデブリ移行期の解析結果マップを更新した。更 新したデブリ移行期の解析結果マップを図3.5-9に示す。令和2年度までの評価では輻射放熱を 考慮していなかったため、ペデスタル構造物群は最も熱負荷が大きくなるケースでは大規模に溶 融する可能性があるとする解析結果が得られていた。令和3年度に新たに輻射放熱も追加考慮し た結果、これらの熱負荷の大きなケースであってもペデスタル構造物群は大規模に溶融すること はないことを示す解析結果が得られた。また、その後のデブリ冷却期及び冷却不足期の解析のた めにペデスタル床へのデブリ移行量(大、中、小)で分類して、代表3ケースを選定した。



図 3.5-6 デブリ移行期の挙動解析結果(追加ケース1:高温) (デブリ初期温度 2500 K、初期粘性 5×10⁻³ Pa·s、移行サイクル 500 秒、 気相自然対流熱伝達率 10 W/m²/K、1/10 スケール)

JAEA-Review 2022-054







図 3.5-8 デブリ移行期終了時のデブリ分布(追加ケース2:低温) (デブリ初期温度 2000 K、初期粘性 5×10⁻¹ Pa·s、移行サイクル 500 秒、 気相自然対流熱伝達率 10 W/m²/K、1/10 スケール)

デブリ移行き	レナリオ	短期連続移 行	長期·間欠移	行		長期連続移行 (実機・推定)	
ー度の流下 (サイクル長	量 ·)	特大(-)	大(500秒)	中(250秒)	小(125秒)	極小	
強U \冷却 100W/m²/K	流下温度・ 高(2500K) 粘性・低 (0.005 Pa-s) でのの5 Pa-s) での5 Pa-s) 250 での5 Pa-s) 250 (0.005 Pa-s) 250 流下温度・ 低(2000K) 粘性・高(0.5 Pa-s) Pa-s)					ペデスタル床 への移行デブ リ量(大、中、 小)の代表3 ケースを選定	いずれのケースも この間/後にペデ スタル構造物群は 荷重で崩壊したと 推定される。
引しい冷却 10W/m²/K	425:1 2000 流下温度· 高(2500K) 粘性·低 (0.005 Pa-s) Temperature 425:1 2000		reture (K)		Ż		
	流ト温度・ 低(2000K) 粘性・高(0.5 Pa-s) Temperature 425.1		adure (N)	輻射熱る →全ケー は溶融し	を追加考慮 −スで構造物 しない見込み	群	

図 3.5-9 デブリ移行期終了時のデブリ分布と温度分布(解析結果マップ)

(3) 解析条件が解析結果に及ぼす影響の考察

1F3 号機デブリ移行期の挙動とペデスタル構造物群について令和3 年度は輻射放熱の寄与を追加考慮し、その結果、ペデスタル構造物群は最も熱的な負荷が大きいケースにおいても大規模に溶融せず、令和2 年度までの評価結果に比べて、相対的にペデスタル床まで移行せず、ペデスタル構造物群上に堆積分布するデブリの割合が大きくなることが示された。これらの評価結果は特に輻射放熱に係る以下の2 つの条件の影響を強く受けると考えられる。すなわち、輻射率と、バックグラウンド温度(輻射放熱する先の受熱構造体の表面温度)の影響が強いと考えられる。

輻射率については、表面を磨いていない SUS の輻射率は 0.3~0.4 程度であるが、873 K以上の 温度で酸化すると 0.5~0.7 程度に上昇することが知られている[38]。また、燃料デブリの輻射率 についての公開文献は見当たらないが、UO₂の輻射率は約 0.8 であり、ZrO₂の輻射率は 2000 K以 上では約 0.7 に達することが知られている[39][40][41]。これらを勘案すれば、本研究の評価で 仮定した輻射率(0.5) は現実的な値であると考えられる。

バックグラウンド温度は令和3年度の MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析(3.1.3 項)に示した(3.1-7)式に示されるように輻射放熱量に強く影響する。一方、1F3 号機ペデスタ ルへの主要な燃料デブリ移行期にはペデスタル床には最大約40 cmの水深があったものと推定さ れている[25]。従って、デブリ移行期のペデスタル雰囲気は飽和蒸気で満たされていたと推定さ れる。圧力 0.4 MPa における飽和蒸気温度は約 425 K であり、ペデスタル下部の構造物等の温度 は概ねこの程度の温度であったと推定し、バックグラウンド温度を 425 K と仮定することは妥当 と考えられる。但し、CRD ハウジング等のペデスタル上部の構造物温度はそれ以上の高温になって いた可能性があり、1F3 号機の内部調査結果等も参考にして、どの程度の温度にまで達していた可 能性があるのかを推定する必要がある。東京電力 HD によるプラント内部調査の報告内容[36]か ら、PCV ペデスタル内壁コンクリート表面からエポキシ系塗料が剥がれ落ちているものの、塗料の 一部は残存している様子が確認できる。一般的にはエポキシ系塗料は673 K以上の温度で急速に 熱分解し、773 K~873 K 程度の温度で完全に熱分解することが知られている[42][43]。また、高 温加熱時のコンクリートの脱水は 673 K~973 K で進むことが知られている[44]。これらの知見を 勘案すれば、1F3 号機ペデスタル内部の内壁や構造物温度は、デブリ移行期に限らず全ての事故進 展過程を通して概ね 873 K~973 K 程度以下の温度であった(あるいはそのような温度を長期間超 えることはなかった。)と推定できる。そのような比較的に低温状態にペデスタル内部が維持され ていたということは、ペデスタル内部で発生していた熱は、最終的には気相による熱輸送でペデ スタル外 (S/C等) に輸送されていたと推定される。また、図 3.5-5 にも示したように、バックグ ラウンド温度が高くなったとしても、SUS等の主要な構造物が大規模に溶融するような温度(1500 K)に達するまでにはバックグラウンド温度が輻射放熱量に及ぼす影響は小さくなり、気相自然対 流に伴う除熱量を上回る。

以上のように、輻射率は現実的な値を仮定し、バックグラウンド温度には不確かさがあるもの の、プラント内部調査等からその上限の目安が得られている。バックグラウンド温度の上限(目 安)を仮定したとしても、デブリ等の温度が、ペデスタル構造物群が大規模に溶融するような温 度(1500 K)に達するまでにバックグラウンド温度が輻射放熱量に及ぼす影響は小さくなり、気 相自然対流による除熱量を輻射放熱による除熱量が上回る。これらのことから、デブリ移行期の 解析結果(3.5.3.1(2))に不確かさはあるものの、ペデスタル構造物群が大規模に溶融するよう なことは考え難く、主要な燃料デブリはペデスタル構造物群上に堆積したと考えられる。但し、 これらの解析では荷重に伴うペデスタル構造物群の崩壊は考慮できていない。デブリ移行期にペ デスタル構造物群は熱的には健全であったものの、機械的な荷重で崩壊したと考えれば、プラン ト内部調査の結果確認されている高さ 2~3 m のペデスタル堆積物を説明・理解することができる。

3.5.3.2 デブリ冷却期及び冷却不足期の解析

(1) デブリ冷却期及び冷却不足期の解析条件

デブリ移行期の解析結果(3.5.3.1(3))にまとめたデブリ移行期終了時のデブリ分布(解析結 果マップ)(図3.5-9)に示したように、1F3号機ペデスタル床に移行したデブリ量(大、中、小) により、代表的な3ケース(ケース1、ケース2、ケース3)について冷却期及びその後の冷却不 足期を解析した。これらの期間の解析に用いた主要な物性一覧を表3.5-1にまとめる。ケース1 及びケース3はデブリ移行期の高温ケースに対応しており、液相の粘度は低く(0.005 Pa·s)、固 相線/液相線温度が高い(2495 K/2505 K)。一方、ケース2はデブリ移行期の低温ケースに対応 しており、液相の粘度は比較的に高く(0.5 Pa·s)、固相線/液相線温度が低い(1995 K/2000 K)。

本研究において実施したプラントデータ分析等から、1F3 号機ペデスタルは平成 23 年 3 月 14 日の朝から 15 日の夜まで液相水に失われ、燃料デブリは強く冷却されていたと推定される[45]。 そこで、デブリ冷却期においてはそのような燃料デブリの蒸気による強い冷却状態(推定)を踏 まえてデブリ表面からの除熱評価には比較的に大きな熱伝達率(100 W/m²/K)を仮定した。一方、 デブリ冷却不足期にはペデスタルから液相水が失われ、ペデスタルの燃料デブリや構造物群は弱 い気相自然対流で冷却されていたと考えられる。そこで、冷却不足期はこれらの表面における熱 伝達率は 10 W/m²/K とした。なお、冷却期及び冷却不足期の雰囲気温度及びバックグラウンド温 度は解析条件が解析結果に及ぼす影響の考察(3.5.3.1(3))で整理した内容も踏まえ、全てのケ ース及び期間について保守的に高く設定し、973 K とした。

物性	構造物 (SUS)	燃料デブリ (移行期の初期温度 2500 K) ケース1及びケース3	燃料デブリ (移行期の初期温度 2000 K) ケース2
固相の密度 (kg/m ³)	7800	8930	8930
液相の密度(kg/m ³)	7800	8930	8930
液相の粘度 (Pa·s)	0.005	0.005	0.5
固相の熱伝導率(W/m/K)	24.5	4.0	4.0
液相の熱伝導率(W/m/K)	33.0	4.0	4.0
固相の比熱 (J/kg/K)	420.0	481.31	481.31
液相の比熱 (J/kg/K)	465.0	481.31	481.31
固相線温度(K)	1495	2495	1995
液相線温度(K)	1505	2505	2000
潜熱(kJ/kg)	232.5	250.0	250.0
凝固固相率の閾値	0.5	0.5	0.5
輻射率	0.5	0.5	0.5
気相自然循環による熱流束 (W/m ² /K)	10.0	10.0	10.0
崩壊熱(W/m ³)	0.0	3. 661×10^5	3.661×10^5

表 3.5-1 デブリ冷却期及び冷却不足期の解析に用いた物性一覧

(2) デブリ冷却期の解析結果

ペデスタル床へのデブリ移行量大、中、小の3ケースをそれぞれケース1、ケース2、ケース3 として冷却期において崩壊熱と除熱量がバランスした熱平衡に達した状態のデブリ分布及び温度 分布を図3.5-10に示す。これらの解析結果から分かるように、いずれのケースにおいても熱平衡 到達時には構造物群の温度は飽和蒸気温度(圧力0.4 MPaで温度425 K)程度にまで冷やされて いる。一方、いずれのケースにおいても燃料デブリ深部に比較的に温度が高い(周囲の温度に比 べて約170~270 K 高い)ホットスポットが存在する。これらの解析結果を初期条件として、以降 に示すデブリ冷却不足期の解析を実施した。



図 3.5-10 デブリ冷却期のデブリ分布と温度分布(熱平衡到達時)

(3) デブリ冷却不足期の解析結果

ペデスタル床へのデブリ移行量大、中、小の3ケースをそれぞれケース1、ケース2、ケース3として、ケース1の冷却不足期におけるデブリ分布及び温度分布の推移を図3.5-11に示す。解析結果は冷却不足期の初期状態(すなわち、冷却期の最終状態)(Time=0 s)から熱平衡に達するまでの変遷を示した。冷却不足期においてはデブリ表面等の熱伝達率は低い(10 W/m²/K)ため、時間進展と共に、デブリ中の高温部の場所がデブリ深部から表面に移動した。その後、デブリ温度が雰囲気及びバックグラウンド温度(973 K)を超えると、輻射放熱による表面からの熱流束が増大し、高温部は再びデブリの深部に移動した。最終的には約6~7時間程度で熱平衡状態に達し、温度分布は一定になった。ケース1ではペデスタル構造物群の中間架台よりも下の位置まで移行したデブリが比較的に高温になった。同様にケース2及びケース3の冷却不足期におけるデブリ分布及び温度分布の推移を図3.5-12に示す。ケース2及びケース3ではペデスタル構造物群の中間架台により支えられ、その上に堆積したデブリが比較的に高温になった。

これらの結果から分かるように、雰囲気温度及びバックグラウンド温度を保守的に高く(973 K) 設定しても、デブリや構造物の温度が高くなると輻射放熱による除熱の寄与が大きくなり、6~7 時間程度で熱平衡に達した。冷却不足期の全ての解析ケースにおいて熱平衡到達時にはデブリ深 部で最も高温になるものの、ピーク温度は約1200 K以下であり、ペデスタル構造物群を大規模に 溶融させるほどの温度には達しなかった。冷却不足期のデブリ崩壊熱と除熱量(輻射放熱及び気 相自然対流伝熱)の時間推移を図3.5-13 に示す。デブリ(及び構造物)の温度が雰囲気及びバッ クグラウンド温度を超えると除熱量が増大するが、輻射放熱の方が気相自然対流伝熱量に比べ急 速に増大し、熱平衡到達時には約10倍に達しており、主要な除熱は輻射によるものであることが 分かる。一方、各解析ケース間の除熱量の差は小さく、熱平衡到達時にはデブリ分布の違いは除 熱量にほとんど影響していないことが分かる。



図 3.5-11 デブリ冷却不足期のデブリ分布と温度分布の推移(ケース1断面図)



図 3.5-12 デブリ冷却不足期のデブリ分布と温度分布の推移(ケース2及びケース3断面図)



図 3.5-13 冷却不足期の崩壊熱と除熱量の時間推移

3.5.3.3 VULCANO VF-U1 実験の解析を元にした 1F3 号機ペデスタル燃料デブリの局所性状の推定 本研究で実施した、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結果、1F3 号機 の RPV からペデスタルに移行する燃料デブリの初期温度や粘性、及びペデスタル雰囲気温度やバ ックグラウンド温度には不確かさがあるものの、これまでのプラント内部調査の結果等も勘案し て合理的に推定される範囲においては、ペデスタル構造物群がデブリの移行期から冷却不足期に 至るまでの間に大規模に溶融することは考え難いことが示された。また、ペデスタルに移行した 燃料デブリの多くは中間架台等のペデスタル構造物群に支えられ、ペデスタル床に大量の燃料デ ブリが高温で以降し、大規模な MCCI を生じさせた可能性が低いことも示された。以上が 1F3 号機 ペデスタル燃料デブリの全体像として理解できた。

一方で、一部の高温の燃料デブリがペデスタル床に移行し、局所的に MCCI を伴った可能性は否 定できない。そこで、本研究の当初の計画にはなかったが、新たにそのような局所的な MCCI がも たらす 1F3 号機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の性状推定に資するために、1F に用いられてい たものと同様な玄武岩系コンクリート及び酸化物燃料(UO₂)と構造物(SUS)を模擬炉心物質に用 いた MCCI 実験である、VULCANO VF-U1 実験[46]を改良 MPS 法により解析した。VULCANO VF-U1 実 験は、1F 条件で MCCI が生じた場合のコンクリートのアブレーション挙動を把握するために実施 されたが、実験後に残留したデブリには酸化物相中に金属相が分布し、特にコンクリート側壁近 傍に沿うように金属相が分布していたことが報告されている[46]。そこで、そのようなデブリ分 布がもたらされたメカニズムを改良 MPS 法により理解することができれば、同様なメカニズムで 実機 1F3 号機等でも金属リッチなデブリがコンクリート側壁に沿うように分布している可能性を 検討することができる。

(1) 解析体系と条件

VULCANO VF-U1 実験の実験体系の模式図(断面図)と改良 MPS 法の解析体系を図 3.5-14 に示す。 実験では、玄武岩コンクリートに円筒形状のキャビティ空間が設けられ、そこに模擬炉心物質と して UO_2 を含む酸化物の粉末 (UO_2 、CaO、 ZrO_2 、Zrの混合粉末) と SUS 製の金属球が充填、配置された。キャビティの内径は 250 mm で、高さ 150 mm まで模擬炉心物質が充填され、誘導加熱により 46.4 kg の模擬溶融炉心物質が生成された。このような体系を模擬するために、改良 MPS 法の二次元解析体系を粒子径 2 mm で構築した。解析に用いた酸化物相、金属相、コンクリート壁(固体)、溶融コンクリート(液体)の物性を表 3.5-2 にまとめる。これらの値には文献値[47][48]を用いたが、液体コンクリートの粘度及び比熱は公開文献中に見当たらなかったため、暫定的に酸化物燃料の液相物性と同じとした。また、酸化物、金属、コンクリートいずれについても、固相線温度一液相線温度間の固液相変化領域における粘性(μ) は固相率(γ)の関数として以下に示す(3.5-1)式で求めた。

 $\mu = \mu_{lig} exp(2.5C_{\gamma}\gamma), \quad (\gamma < \gamma_T) \tag{3.5-1}$

ここで、 μ_{liq} は液相の粘性、 C_{γ} は経験的に 4~8 の範囲で用いられる係数(本解析では暫定的に 7.58 とした。)、 γ_T は凝固固相率の閾値(本解析では暫定的に 0.55 とした。)である。

実験では、誘導加熱により、先ず金属球が加熱され、金属球からの熱伝導によりその周囲の酸 化物も加熱された。誘導加熱開始から約 3900 秒後には金属球に埋め込まれた熱電対の測定値が急 上昇しており、およそこの頃に金属球が溶融したと推定されている。そこで、本解析では、この タイミングを初期条件として解析を実施した。解析に用いた加熱履歴を図 3.5-15 に示す。金属球 の溶融開始時を起点に、実験で投入された正味の加熱出力の履歴を解析に用いた。加熱履歴は大 きく4期に分けることができる。第1期目は余熱期であり、金属球の溶融に伴い、溶融金属から 周囲の酸化物への伝熱量が増し、実験では金属球溶融開始時(推定)から約 600 秒後に酸化物も 完全に溶融したように見えたと報告されている。その後、高・加熱期(220 kW)、低・加熱期(38 kW)、冷却期(0 kW)を考慮した。

物性	酸化物	金属	コン	クリート
			固体	液体
密度(kg/m ³)	6312	6461	2400	2400
液相の粘度(Pa·s)	1.94×10^{-2}	4.75 $\times 10^{-3}$	-	1. $94 \times 10^{-2(*1)}$
熱伝導率(W/m/K)	1.5	25	1.5	1.5
比熱(J/kg/K)	498	600	950	498 (*1)
固相線温度(K)	2127	1673	1350	-
液相線温度(K)	2673	1723	1650	-
潜熱(kJ/kg)	367	280	518	_

表 3.5-2 VULCANO VF-U1 実験の解析に用いた物性一覧

(*1) 暫定的に酸化物燃料の液相物性と同じとした。



図 3.5-14 VULCANO VF-U1 実験の体系図と解析体系



図 3.5-15 解析に用いた加熱履歴

(2) 解析結果とメカニズムの考察

VULCANO VF-U1 実験の高・加熱期以降の解析結果から把握した主要な成層化パターンを図 3.5-16 に示す。高・加熱期(0~150 s)では、溶融物は高温・低粘性であるが、金属相の密度(6461 kg/m³)は酸化物相の密度(6312 kg/m³)に比べわずか(約1.02)に大きいため、両者の密度差によって金属相は底部に沈降した。一方、コンクリートのアブレーションに伴って生じた溶融コンクリートの密度(2400 kg/m³)は、溶融酸化物の密度や、溶融金属の密度に比べ半分程度に小さいため、コンクリート壁と溶融物の界面でコンクリートが溶融すると周囲の溶融物との密度差によって上昇する。このような上昇流によって粘性が低い溶融酸化物相と溶融金属相の界面が乱れ、変動している様子が分かる。

低・加熱期ではコンクリート壁のアブレーションは継続するものの、溶融酸化物相と金属相の 温度は低下し始め、融点が高い酸化物相(液相線温度:2673 K、固相線温度:2127 K)が、相対 的に融点が低い金属相(液相線温度:1723 K、固相線温度:1673 K)に先行して凝固した。この とき、熱伝導率が高い金属相に接している周囲の酸化物相が先行して凝固し始める様子が示され た。その結果、溶融金属相が流動できる領域は狭まった。その間も、融点が低いコンクリート壁 (液相線温度:1650 K、固相線温度:1350 K)のアブレーションは継続した。その結果、生じた 密度の低い溶融コンクリートは溶融物中を密度差によって上昇した。これらの結果、酸化物相と コンクリート壁の間に沿うように金属相が流動する(密度の低い溶融コンクリートの流れによっ て上方に牽引される。)様子が示された。特に、熱伝導率の高い金属相が集中していたキャビティ 底部でコンクリート浸食が顕著に進んだ。これらの結果、酸化物相をコンクリート側壁近傍に取 り残すようにして主にキャビティ底部のコンクリートのアブレーションにより、溶融物が全体的

冷却期では、コンクリートのアブレーションもほぼ終息し、酸化物相のみならず、金属相も凝 固を開始した。そして、そのままの分布を維持した状態で事象は終息した。

以上の解析結果から、VULCANO VF-U1実験において、MCCI後に金属相がコンクリート側壁に沿 うように分布していた主要なメカニズムを示すことができた。すなわち、先ず、高・加熱期にお いて酸化物相に対してわずかに密度が高い金属相の沈降による密度成層化が生じた。次に、コン クリート壁の溶融に伴って生じた密度の小さい溶融コンクリートによる上昇流が生じた。この上 昇流は特に、コンクリート側壁で強く生じた。同時に、熱伝導率の高い金属相に接していた酸化 物相が先行的に冷えて凝固したことで、金属相の流動できる領域が狭まった。これらが相まった 結果、金属相はコンクリート側壁に沿うように上方に牽引された。そのような状態を経て、冷却 期では金属相も凝固し、結果的に、コンクリート側壁に沿うように金属相が分布した。これらの メカニズムは実験体系の大きさの影響を受ける大域的な伝熱流動ではなく、酸化物相、金属相、 コンクリートの物性(密度差と融点の差)に支配されたメカニズムであることが理解できる。す なわち、1F3号機ペデスタルにおいて、局所的に VULCANO VF-U1実験と同様に高温に達した場所 があれば、実験と同様な現象により、金属リッチなデブリがコンクリート側壁に沿うように分布 している可能性を示している。



(a) 高・加熱期(0-150 s)

に沈降する様子が見られた。

(b) 低・加熱期(150-900 s)

(c)冷却期(900s-)

図 3.5-16 VULCANO VF-U1 実験の改良 MPS 法による解析結果

(3) 1F3 号機ペデスタル燃料デブリの局所性状の推定

上述のように、VULCANO VF-U1 実験後の特徴的な金属相の分布をもたらしたメカニズムを改良 MPS 法の解析により示すことができた。但し、VULCANO VF-U1 実験では金属相に SUS が用いられた が、1F3 号機の先行流出物は、本研究の実機デブリ流下履歴の同定(3.3節)でも示されているよ うに Fe-B 共晶物の可能性が高い。一方、本研究の浮遊法による高温融体物性評価(3.4節)にお いては、Fe-B 共晶物の密度等、上記メカニズムを支配する重要な物性が新たに得られている。そ こで、VULCANO VF-U1 実験の解析に用いた金属相の物性を、本研究の浮遊法による高温融体物性 評価(3.4節)により更新して、上述のメカニズムによるデブリ分布が起こり得るかどうかを検討 した。

表3.5-3に3号機ペデスタル燃料デブリの局所性状の推定の解析に用いた物性一覧をまとめる。 これらのうち、<u>下線</u>で示した物性値は、本研究の高温融体物性評価(3.4節)により得られた物性 値を元に定めたものである。金属相の密度は VULCANO VF-U1 実験では 6461 kg/m³であったが、Fe-B は 7000 kg/m³である。このため、金属相と酸化物相の密度の比は約 1.02 から約 1.11 に増大し た。

解析結果から把握した主要な成層化パターンを図 3.5-17 に示す。高・加熱期では、VULCANO VF-U1 実験に比べ金属相と酸化物相の密度比が(約1.11)大きいため、両者の密度差によって金属相 はより顕著に底部に沈降した。低・加熱期では金属相の密度がやや高いため、金属相と酸化物相 の界面の乱れは VULCANO VF-U1 実験の解析結果に比べて小さかったが、同実験の解析結果と同様 に、酸化物相とコンクリート壁の間に沿うように金属相が流動する(密度の低い溶融コンクリー トの流れによって上方に牽引される。)様子が示された。また、同実験の解析結果と同様に、熱伝 導率の高い金属相が集中していたキャビティ底部でコンクリート浸食が顕著に進んだ。これらの 結果、酸化物相をコンクリート側壁近傍に取り残すようにして主にキャビティ底部のコンクリー トのアブレーションにより、溶融物が全体的に沈降する様子が見られた。冷却期では、コンクリ ートのアブレーションもほぼ終息し、酸化物相のみならず、金属相も凝固を開始した。そして、 そのままの分布を維持した状態で事象は終息した。

以上の解析結果は、金属相と酸化物相の界面の乱れの程度は異なったものの、VULCANO VF-U1 実験の解析結果が示したものと同様なメカニズムによって、MCCI 後に金属相がコンクリート側壁に沿うように分布する様子を示している。すなわち、金属相と酸化物相の密度比が 1.02~1.11 程度の範囲であり、1F3 号機ペデスタルにおいて、局所的に VULCANO VF-U1 実験と同様に高温に達した場所があれば、実験と同様な現象により、金属リッチなデブリがコンクリート側壁に沿うように分布していると推定される。

物性	酸化物	金属	コンクリート	
			固体	液体
密度(kg/m ³)	6312	7000	2400	2400
液相の粘度(Pa·s)	1.94×10^{-2}	4.50×10^{-2}	-	1.94×10^{-2}
熱伝導率(W/m/K)	1.5	25	1.5	1.5
比熱 (J/kg/K)	498	<u>775</u>	950	498
固相線温度(K)	2127	1400 (*1)	1350	-
液相線温度(K)	2673	<u>1450</u>	1650	-
潜熱(kJ/kg)	367	285	518	-

表 3.5-3 1F3 号機ペデスタル燃料デブリの局所性状の推定の解析に用いた物性一覧

<u>下線</u>:本事業の高温融体物性評価(3.4節、再委託先:大阪大学)により得られた Fe-B 共晶物の物性値。

*1:但し、暫定値。

◎:酸化物相 ●:金属相 ●:溶融コンクリート ● :固体コンクリート



期(0-150 s) (b) 低・加熱期(150-900 s) (c) 斧 図 3.5-17 1F3 号機局所デブリ性状の推定解析結果の例

3.5.4 まとめ

令和元年度は、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て、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。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、このようにして構築した並列計算シス テムの動作確認のため、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 VE-U7 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。

令和2年度は、1F3号機ペデスタル堆積物分布を検討するため、MPS法の新クラストモデルを実 装した1F3号機ペデスタル領域の三次元解析体系を構築し、解析条件に応じて解析体系を4領域 以上に分割したメモリ分散並列計算とメモリ共有並列計算を併用した並列計算を実施した。溶融 物の流下境界には、凝固粒子タイプに対応した境界条件を与えた。実機で想定される溶融物の初 期温度、初期粘性、蒸気自然対流冷却の効果を考慮した解析を実施し、溶融物がペデスタル構造 物群を大規模に溶融崩落させずに堆積する条件を示した。

令和3年度は、令和2年度に作成した1F3号機ペデスタル堆積物分布を検討するための解析モ デルを改良した。先行流出物の溶融・凝固モデルを追加し、令和3年度に実施したMPS法の改良 (実施項目(1))を反映した大規模並列計算機実験により、1F3号機ペデスタルへの後続溶融物移 行期から冷却期を経て冷却不足期までの、先行流出物と後続溶融物の堆積挙動を解析した。1F3号 機ペデスタル床上の先行流出物に溶融・凝固モデルを追加し、令和3年度に示した実機デブリ流 下履歴(実施項目(3))を考慮すれば、1F3号機ペデスタルに移行した後続溶融物は、移行期、冷 却期、冷却不足期を通してペデスタル構造物群や先行流出物を大規模に溶融させることなく堆積 したと考えられることを示した。さらに、当初の計画にはなかったが、1F条件で実施された VULCAN0 VF-U1実験を改良MPS法で解析し、その結果得られた知見から、ペデスタルコンクリー ト側壁近傍で局所的に高温になった場所があった場合には、令和3年度に取得した高温融体物性 (実施項目(4))を考慮すれば、側壁近傍に金属相が多く分布している可能性が高いことを示した。 3.6 3号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価

3.6.1 令和元年度の実施内容及び成果(概要)

本実施項目は、令和元年度は実施せず、当初の計画通り令和2年度から3年度までの2年間実施した。

3.6.2 令和2年度の実施内容及び成果(概要)

事故後に 1F1 号機から 1F3 号機の燃料デブリはいずれも未臨界に保たれていることは明らかで あるが、今後の燃料デブリ取り出し工程において、燃料デブリ中のクラックの進展に伴う燃料デ ブリ内部への新たな水の侵入や燃料デブリ堆積分布の変化、あるいは燃料デブリの性状の変化等 によって、その未臨界度が減少する可能性がある。1F燃料デブリの臨界評価手法の整備(原子力) 規制庁事業 : 平成 26~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(手法開発のために当面は1号機を対象として試解析等が行われている。)。1F3号 機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布のうち、最も考え得るパターンとそれ以外に可能性と して考えられるパターン及びそれらのパターンの変化が燃料デブリの臨界性(中性子実効増倍率) に及ぼす影響を評価することができれば、デブリ取り出し時の臨界管理の合理化が期待でき、過 剰なホウ酸水の使用や、それによりもたらされる構造物の長期健全性確保への新たな課題を低減 できる。そこで本研究では、MPS 法による模擬燃料デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験と連成 し、1F3 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堆積パ ターンが、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を目標とし た。

そこで令和2年度は、8×8BWR燃料の運転中の炉内燃料組成変化を概略考慮するために、汎用 核計算コード SRAC2006の衝突確率法に基づく詳細エネルギー群無限体系のセル燃焼計算を実施 した。無限体系のセル燃焼計算の結果、燃料組成の評価結果は原子力規制庁事業による推定結果 と概ね一致した。得られた均質化マクロ断面積を中性子拡散近似法に基づくペデスタルを模擬し た解析体系に配置し、ペデスタル燃料デブリの臨界性を評価するための解析システムを構築した。 また、成層化堆積した燃料デブリを模擬した試解析体系を構築し、原子力規制庁事業等も参考に 適当な燃料燃焼度を仮置きした試解析を実施して、中性子実効増倍率を評価した。さらに、当初 の計画よりも高精度に複雑な体系の臨界性を評価するために、モンテカルロ法に基づく連続エネ ルギー汎用中性子輸送計算コード MVP3を用いて、同様な試解析体系の中性子実効増倍率を評価し た。中性子拡散近似法に基づくペデスタル燃料デブリの臨界性評価体系の試解析により得られた 中性子実効増倍率を、同様の条件で参照解とした中性子輸送計算に基づく解析結果と比較して、 図 3.6-1に示す。両者は概ね一致した。

また、令和3年度に評価予定の1F3号機ペデスタル中間作業架台を含む体系の燃料デブリの臨 界性評価の参考のために、図3.6-2に示すように、粒子状のUO₂が板状SUSの上に堆積した場合 の臨界性を評価した。このとき、粒子状デブリの空孔は水で満たされていると仮定し、空孔率の 変化によって粒子状燃料デブリの減速材(水)対燃料体積比(V_m/V_f)が0.75~2.00に変化した場 合の中性子実効増倍率を評価した。なお、原子力規制庁事業[2]では、V_m/V_fがおよそ2.0で最適減 速になる(中性子無限増倍率が最大となる。)と評価されている。解析の結果、V_m/V_fが0.75~2.0 に変化すると中性子実効増倍率は0.96~1.03に変化した。最適減速近傍では臨界を超過する結果 になったが、この解析では燃料デブリにジルカロイやSUS等の構造材は含まず、制御棒の中性子 吸収材 (B₄C) 等も含まれていないため、実際には 1F3 号機ペデスタルの燃料デブリは深い未臨界 状態にあると考えられることが分かった。なお、 V_m/V_f が 0.75 の場合について SUS 層の厚さを 5.2 cm~57.2 cm に増加させた (質量に換算して約 80 t 増加させた)場合、中性子実効増倍率は 0.96 ~0.98 に微増し、SUS による中性子反射効果が図 3.6-2 に示すような燃料デブリの臨界性に及ぼ す影響は限定的であることが確認された。



図 3.6-1 均質燃料デブリ無限増倍率の評価結果(5.2 GWd/t)



図 3.6-2 燃料デブリ臨界性の感度解析体系(中間作業架台上・粒子状デブリ)

3.6.3 令和3年度の実施内容及び成果

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(実施項目(5))から得られた燃料デブリ成層化パターンを、令和2年度までに整備した臨界性評価解析体系に反映し、最も考え得るパターンとそれ以外に可能性として考えられるパターンの臨界性(中性子実行増倍率)を評価した。

3.6.3.1 1F3 号機ペデスタル燃料デブリ臨界性評価の解析体系と条件

解析に用いる燃料デブリ組成は令和2年度までの評価と同様に、原子力規制庁による事業[2]で示されている燃焼度 25.8 GWd/t の燃料組成を用いた。このとき、臨界性を保守的に評価するために、炉内の制御棒に含まれる中性子吸収材 (B₄C) は燃料デブリ中に含まれないと仮定した。一方、燃料ペレット中に含まれる可燃性毒物 (Gd₂O₃) は、一般的には溶融炉心と共に燃料デブリに含まれると考えられるが、その影響感度を評価するために、仮想的に Gd₂O₃を排除したケースと、均一に燃料デブリ中に分散していると仮定したケースについて評価した。燃料被覆管やチャンネルボックス等の炉心構造材に用いられるジルカロイや、その他の炉心構造材に用いられる SUS 等は、炉心メルトダウンやその後の事故進展の過程で、燃料と分離して先行して RPV からペデスタルに移行した可能性も考えられるため、保守的にこれらは燃料デブリに含まれないと仮定した。このようにして仮定した燃料デブリ組成について、粒子状デブリの空孔の不確かさが臨界性に及ぼす影響を保守的に考慮するため、空孔は液相水で満たされ、中性子が最適減速となる(臨界性が最大となる。)減速材 (水)対燃料体積比 (V_m/V_f=2.00)を用いた。なお、令和2年度の予備的な解析体系(図 3.6-2)を用いて実施した感度解析の結果、これらの解析パラメータが燃料デブリの臨界性に及ぼす影響(中性子実効増倍率の変化量:dk)は以下に示す表 3.6-1 のようにまとめることができた。

これらの感度解析結果と、本研究で実施した実機デブリ流下履歴の同定(3.3節)及び 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結果(3.5節)を踏まえ、炉心燃料インベント リの 80%(約87 t)がペデスタルに移行したと仮定し、図 3.6-3に示す体系を用いて臨界性を評 価した。ペデスタル領域は円筒形状のコンクリートに覆われた空間とした。ペデスタル床のサン プ孔には上蓋があり、主要なデブリの移行期にはある程度(最大 40 cm)の床上水位があったこと から、この上蓋がそれ以下への大量の燃料デブリの移行を妨げていたものと考え、サンプ孔は解 析体系からは除外した。ペデスタル構造物の中では比較的に頑健であると考えられる CRD 交換機

(SUS)は、ペデスタル中央部に直立した状態で残存しているものと仮定した。中間架台(SUS) は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結果(3.5節)を踏まえ、熱的には 大規模に溶融せず残存していると考えられるが、燃料デブリの加重により、本来の位置から下方 に移動、または崩壊している可能性が考えられる。そこで、中間架台の高さ位置(H_p)は中間架台 上に堆積する燃料デブリ分布のパターンに応じて、燃料デブリの最頂部の高さ位置がプラント内 部調査結果(~3 m)と概ね整合するように調整することとした。実機デブリ流下履歴の同定結果 (3.3節)から、RPV破損時のFe-Bを含む先行流出物がペデスタル最深部に堆積しているものと 推定されるが、その後に移行したと考えられるジルカロイ等の物量も多いことと、臨界性評価の 観点からは、熱中性子吸収断面積が小さいジルカロイで先行流出物を代表させた方が保守的と考 えられるため、ペデスタル床上0.2 mはジルカロイ層とした。解析には、令和2年度と同様に、 体系の中性子輸送を考慮したモンテカルロ法に基づく解析コードである MVP3 コードを用い、核デ ータライブラリには JENDL-4.0[49]を用いた。

パラメータ	中性子実効増倍率の 最大変化量(dk%)	燃料デブリ臨界性に及ぼす影 響感度(相対的な評価)
燃料ペレット中に含まれる可燃性 毒物(¹⁵⁷ Gd)	- 22	大
燃料デブリの減速材対燃料体積比 (燃料デブリの空孔率)	+7	中
SUS 等の構造体による中性子反射 効果	+2	小

表 3.6-1 1F3 号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価に用いる解析条件の感度解析結果



3.6.3.2 1F3 号機ペデスタル燃料デブリ臨界性評価の解析結果

(1) 一様広がり分布の場合

先ず、燃料デブリがペデスタルに一様に広がって分布(一様広がり分布)した場合の、各燃料 デブリ分布パターンに対応した中性子実効増倍率(k_{eff})の計算結果を図3.6-4に示す。このとき、 燃料デブリ以外の空間は液相水で満たされていると仮定した。また、k_{eff}は、燃料デブリ組成に原 子力規制庁事業[2]で示されている、燃焼度25.8 GWd/tの燃料組成(¹⁵⁷Gd 有)を用いた場合の評 価値と、保守的に(仮想的に)可燃性毒物の¹⁵⁷Gdを排除した場合(¹⁵⁷Gd 無)の評価値を示した。 なお、制御棒等に含まれる中性子吸収体(B₄C)は保守的に燃料デブリ中には含まれないものと仮定している。

図 3.6-4(a)は、中間架台外周部のペデスタル床上に一様に燃料デブリが堆積し、さらに中間架 台より上の高さではペデスタル全域に燃料デブリが広がった場合(ケース(a))のデブリ分布と k_{eff} を示している。¹⁵⁷Gd 有では k_{eff}=0.81 であり、深い未臨界状態を示している。¹⁵⁷Gd 無では k_{eff}= 1.04 であり、わずかに臨界超過状態を示しているが、前述のとおり、これは仮想的な評価であり、 実際には深い未臨界状態であると考えられる。

図 3.6-4(b)は、ケース(a)に対して、中間架台が 0.3 m 降下した場合(ケース(b))のデブリ分 布と k_{eff} を示している。中間架台の降下は、燃料デブリ等による加重で中間架台構造物群が部分 的に崩落したような場合を想定して定めた。その結果 k_{eff} はケース(a)とほぼ同じ(あるいは微増) であり、このようなデブリ分布の変化は臨界性にほとんど影響しないことが分かった。

図 3.6-4(c) 及び図 3.6-4(d) は、それぞれケース(a) 及びケース(b) に対して、ペデスタル外周部 に堆積していた燃料デブリを中間架台上に一様に再配置したケース(それぞれケース(c) 及びケース(d)) を示している。いずれも k_{eff} はデブリ再配置の前に比べ微増しているがその変化量は小さかった。

以上のように一様広がり分布の場合、燃料デブリは全体として深い未臨界状態にあり、デブリ 分布の違いがその臨界性に及ぼす影響は小さいことが分かった。但し、これらのケースでは、燃 料デブリの頂上部の高さはペデスタル床から2.15 m~2.65 m であり、3.2 m 程度とされているプ ラント内部調査結果と整合しない。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 結果(3.5節)が示すように、燃料デブリの広がり方は一様ではないと考えられる。



図 3.6-4 1F3 号機ペデスタル燃料デブリ臨界性評価結果 (一様広がり分布)

(2) 中央部に多く堆積している場合

プラント内部調査結果や、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結果(3.5 節)を踏まえ、ペデスタル中央部に多く燃料デブリが堆積している場合(中央集中堆積分布)に ついて臨界性を評価した。検討した異なる燃料デブリ分布とそれぞれの k_{eff}の計算結果を図 3.6-5 に示す。いずれのケースも、燃料デブリの頂上部の高さは 1F3 号機のプラント内部調査から推 定された 3.2 m となるようにした。

図3.6-5(a)は、中間架台が概ね本来の高さ位置にそのまま保持された場合に、中央部付近でデ ブリ高さが3.2mとなるようにデブリを分布させた場合(ケース(a))である。これは、MPS法に よる模擬デブリ堆積挙動解析の結果としてまとめた解析結果マップ(図3.5-9)のケース1を念 頭に定めた分布である。臨界性の解析の結果、¹⁵⁷Gd 有では k_{eff}=0.81 であり、深い未臨界状態を 示している。¹⁵⁷Gd 無では k_{eff}=1.03 であり、わずかに臨界超過状態を示しているが、前述のとお り、これは仮想的な評価であり、実際には深い未臨界状態であると考えられる。また、これらの k_{eff}の値は一様広がり分布のケース(a)とほぼ同じ値であり、実効的に中間架台以上の燃料デブリ ではなく、中間架台以下に流下した燃料デブリの臨界性がペデスタル領域の臨界性を支配してい ると理解できる。

図3.6-5(b)は、ケース(a)に対して、中間架台が0.8 m 降下した場合(ケース(b))のデブリ分 布とk_{eff}を示している。これは、MPS法による模擬デブリ堆積挙動解析の結果としてまとめた解析 結果マップ(図3.5-9)のケース2を念頭に定めた分布である。臨界性の解析の結果 k_{eff} はケース(a)に比べわずかに(約2%)増大した。ペデスタル中央部に堆積している燃料デブリ分布の形状からは、中央部の中性子漏洩率は低いと考えられ、その領域の臨界性が体系全体の臨界性の微増を もたらしたものと理解できる。

図3.6-5(c)(d)(e)の3ケースは、中間架台の高さが異なる3ケースについて、中間架台以下に はほとんど燃料デブリが流下しなかった場合の燃料デブリ分布とk_{eff}を示している。これら3ケ ースの臨界性は¹⁵⁷Gd 無では k_{eff}=0.82~0.83 であり、¹⁵⁷Gd 有では k_{eff}=1.04~1.05 であった。い ずれも k_{eff}はデブリが中間架台以下に流下したケースと同程度かそれよりもやや(約1%)大きい 程度であった。なお、以上の5ケースではデブリ頂上部は水面に露出しており、臨界性評価の観 点からは非保守的である可能性が考えられたため、推進を0.5 m増大させた感度解析を実施した。 しかし、その結果、いずれのデブリ分布パターンにおいても、水深を変化させた前と比べ中性子 実効増倍率の変化は1%未満と小さかった。

以上の検討では、燃料デブリは水平方向には一様に分布していたと仮定していた。しかし、実 機では必ずしも燃料デブリが水平方向に一様に分布しているとは限らない。そこで、ケース(a)を 元に、図 3.6-6 に示すように、水平方向に非一様にデブリが分布した場合の臨界性を評価した。 その結果、ケース(a)との k_{eff}の値の差は 1%未満となり、小さかった。

以上の解析結果は、熱中性子の中性子拡散面積は約8.1 cm²と小さいことから理解できる。す なわち、1F3 号機ペデスタルのような大きな空間に燃料デブリが広がった場合、その広がり分布が 異なったとしてもデブリ表面からの中性子漏洩率(形状バックリング)がデブリ全体の臨界性に 及ぼす影響は小さいと考えられる。



図 3.6-5 1F3 号機ペデスタル燃料デブリ臨界性評価結果 (中央集中堆積分布)



図 3.6-6 1F3 号機ペデスタル燃料デブリ臨界性評価結果 (非一様・中央集中堆積分布)
3.6.4 まとめ

本実施項目は、令和元年度は実施せず、当初の計画通り令和2年度から3年度までの2年間実施した。

令和2年度は、8×8BWR 燃料の運転中の炉内燃料組成変化を概略考慮するために、汎用核計算 コード SRAC2006 の衝突確率法に基づく詳細エネルギー群無限体系のセル燃焼計算を実施した。無 限体系のセル燃焼計算の結果、燃料組成の評価結果は原子力規制庁事業による推定結果と概ねー 致した。得られた均質化マクロ断面積を中性子拡散近似法に基づくペデスタルを模擬した解析体 系に配置し、ペデスタル燃料デブリの臨界性を評価するための解析システムを構築した。成層化 堆積した燃料デブリを模擬した試解析体系を構築し、原子力規制庁事業等も参考に適当な燃料燃 焼度を仮置きした試解析を実施して、臨界性を評価した。中性子拡散近似法に基づくペデスタル 燃料デブリの臨界性評価体系の試解析により得られた中性子実効増倍率は、同様の条件で参照解 とした中性子輸送計算に基づく解析結果と概ね一致した。

令和3年度は、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(実施項目(5))から 得られた燃料デブリ成層化パターンを令和2年度までに整備した臨界性評価解析体系に反映し、 最も考え得るパターンとそれ以外に可能性として考えられるパターンの臨界性(中性子実行増倍 率)を評価した。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(実施項目(5))で得 られた燃料デブリ成層化パターンのうち、比較的に低温(2000 K)で連続的に後続溶融物が移行 した場合の燃料デブリ分布を基本パターンとし、その中性子実効増倍率は、制御棒や可燃性毒物 の存在を無視すると約1.03と評価されるが、可燃性毒物が均一にデブリ中に存在する場合は0.81 と評価されることを示した。また、それ以外のパターンの中性子実効増倍率は、可燃性毒物を無 視すると約1.01~1.05と評価され、可燃性毒物が均一にデブリ中に存在する場合は約0.80~0.83 と評価されることを示した。

3.7 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 代表者間等でメールやオンライン会議システム等を活用して、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。主要な打合せ実施日は以下の通り。

令和元年度: 令和元年10月29日、11月26日、令和2年1月29日

令和 2 年度: 令和 2 年 6 月 18 日、7 月 11 日、7 月 14 日、8 月 24 日、11 月 17 日、令和 3 年 2 月 17 日

令和3年度:令和3年5月10日、7月28日、9月3日、10月11日、11月19日

4. 結言

4.1 令和3年度のまとめ

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、1F2・ 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3年目である 令和3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

令和2年度に開発したデブリ移行期解析用の MPS 法を改良した。解析体系中の流体粒子数(または他の適切な状態変数)等に応じて実機スケールのデブリ冷却過程の評価に要する計算コストを低減できるように、不要な計算のスキップまたは計算時間幅を大きくできるようにするための 判定パラメータ(粒子の温度)等を明らかにした。また、実施項目(2)の模擬デブリ流下実験で得られた凝固物の成層化パターンを再現し、改良 MPS 法を用いた成層化解析の妥当性を確認した。

(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、令和2年度に実施し た先行デブリが固化した上に、組成の異なるデブリが流下して分散する挙動を対象とした実験を 改良した。具体的には、固化した先行デブリを模擬したパラフィンに、後続デブリを模擬した共 晶組成鉛ビスマス(PbBi)が流下して分散する挙動を光学カメラで三次元可視化し、改良 MPS 法 の妥当性確認に必要な固体パラフィン、溶融パラフィン、再度凝固したパラフィン、溶融 PbBi、 凝固した PbBi の深さ分布データを得た。

(3) 実機デブリ流下履歴の同定(連携先: JAEA)

1F2・3 号機 RPV から PCV ペデスタルへのデブリ流下履歴の推定を目標として、令和2年度まで に得た燃料デブリエンタルピーに係る評価結果に基づき、1F2・3 号機における炉心物質流下挙動 (流動性、流下時間、流下経路など)の評価を行った。1F2 号機については、令和2年度の評価を 基本として、燃料デブリエンタルピーに係る最新知見を考慮して見直し、炉心物質のペデスタル 移行開始時の温度は1500 K 程度であったとの評価を得た。3 号機については、令和2年度に早稲 田大学が実施した模擬デブリ流下実験と、これを踏まえて早稲田大学と JAEA が連携して実施した MPS 法を適用したデブリ・構造材相互作用解析の結果に基づき、1500 K よりも高い温度で酸化物 主体の高粘性デブリが流下したが、ペデスタル構造物群の溶融は限定的であったと評価した。こ れらにより、1F2 号機では先行流出物のようなものから生コンクリート程度の粘性を有する炉心 物質が 2 時間前後でペデスタルに流下し、1F3 号機ではこれらに加えて、その後の高粘性の燃料 デブリのようなものの流下も含めて 7 時間前後で炉心物質がペデスタルへと流下したものと推定 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)

液相の相状態を把握することを狙い、溶融した金属ボライドー燃料(UO₂、ZrO₂、Zr等) 試料を 急冷凝固させた。ADLによって浮遊させた試料をレーザーによって加熱し、液滴とした。液滴を金 属板上や水中に落下させることにより、急冷凝固させた。その後、凝固した試料の断面を SEM/EDX によって観察し、凝固体の断面を SEM/EDX により評価することにより、UO₂中のUは1770 K 程度 の共晶組成の SUS-B₄C 溶融合金中には、ほとんど溶出しないことを明らかにした。この知見を元 に、共晶組成の SUS-B₄C 溶融合金に着目し、ADL を用いて溶融相の密度を評価した。

(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

令和2年度に作成した、1F3号機ペデスタル堆積物分布を検討するための解析モデルを改良した。先行流出物の溶融・凝固モデルを追加し、実施項目(1)のMPS法の改良を反映した大規模並列計算機実験により、1F3号機ペデスタルへの後続溶融物移行期から冷却期を経て冷却不足期までの先行流出物と後続溶融物の堆積挙動を解析した。これらの解析により、後続溶融物はこれらの期間を通して、ペデスタル構造物群や先行流出物を大規模に溶融させることなく堆積したと考えられることを示した。さらに、当初の計画にはなかったが、1F条件で実施されたVULCAN0 VF-U1実験を改良MPS法で解析し、ペデスタルコンクリート側壁近傍で局所的に高温になった場所があった場合には、実施項目(4)で得られた高温融体物性を考慮すれば、側壁近傍に金属相が多く分布している可能性が高いことを示した。

(6) 1F3 号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価

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(実施項目(5))から得られた燃料デ ブリ成層化パターンを、令和2年度までに整備した臨界性評価解析体系に反映し、最も考え得る パターンとそれ以外に可能性として考えられるパターンの臨界性(中性子実行増倍率)を評価し た。実施項目(5)で得られた燃料デブリ成層化パターンのうち、比較的に低温(2000 K)で連続的 に後続溶融物が移行した場合の燃料デブリ分布を基本パターンとし、その中性子実効増倍率は、 制御棒や可燃性毒物の存在を無視すると約1.03と評価されるが、可燃性毒物が均一にデブリ中に 存在する場合は0.81と評価されることを示した。また、それ以外のパターンの中性子実効増倍率 は、可燃性毒物を無視すると約1.01~1.05と評価され、可燃性毒物が均一にデブリ中に存在する 場合は約0.80~0.83と評価されることを示した。

(7)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、JAEA の研究 代表者間でメール、電話、オンライン会議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3年5月10日、7月28日、9月3日、10月11日、11月19日)。

以上、3カ年計画の3年目である令和3年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

4.2 1F2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状の当初理解からの深化と今後の課題(3年間のまとめ)

4.2.1 3年間のまとめ

本事業提案時(令和元年度)の1F2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状の理解を図 4.2-1 に示す。当初より、酸化物リッチな燃料デブリのペデスタルへの移行は1F2 号機では限定 的で、1F3 号機ではかなりの移行があったものと推定していた。それらの差が、1F2・3 号機ペデ スタル床の燃料デブリ深さ方向の成層化パターンの差をもたらし、1F3 号機ペデスタルでは(1F3 号機の水素爆発をもたらしたほどの水素発生の要因として)顕著なコンクリート浸食を伴うMCCI が生じていたものと考えていた。

本研究完了時(令和3年度)の1F2・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状の理解を図 4.2-2 に示す。当初の計画に基づき、本事業に先行して実施されていた JAEA/CLADS 研究「炉内性 状把握の精度向上に向けた基盤研究」(平成 30~令和2年度)から得られつつあった知見や、「IF 事故進展基盤研究に係る分科会」における専門家の議論を踏まえ、各実施項目(1)~(6)を互いに 連携を取りながら実施した。その結果、RPV 破損時の Fe-B を含む先行流出物は融点直上で粘性が 低く(高い流動性を有し)、U 含有率が低いものであり、ペデスタル移行時にはペデスタルに存在 していた液相水により急冷され、空孔率(ポロシティ)が高い状態で堆積しているものと推定で きた。1F2 号機では後続溶融物の流下が限られると考えられることから、このような先行流出した 堆積物がそのまま残っている可能性がある。1F3 号機では、1F2 号機と同様な炉心物質移行履歴を 経て、その後、酸化物リッチな後続溶融物が半凝固状態でペデスタルに移行したと推定される。 このとき、従来の研究では考えられていなかったペデスタル中間架台等の構造物群と後続溶融物 の相互作用により、従来は推定が困難であった高さ2~3mの堆積物分布を理解できることが分か った。一方で、局所的には金属リッチな燃料デブリがペデスタルコンクリート側壁に沿うように 分布している可能性があることも分かった。これらを踏まえて実施した臨界性評価から、全体と しては 1F3 号機ペデスタルの燃料デブリは深い未臨界状態にあり、デブリ分布の不確かさが臨界 性に及ぼす影響は小さいことも分かった。

4.2.2 今後の課題

今後の課題には、本研究で得た推定精度(信頼性)の向上が挙げられる。本研究で得た推定は、 プラント内部調査結果や事故時プラントデータ、事故進展の理解や基本的な熱バランスの理解等 を元に、解析の条件を定めて推定結果を得ている。これらの解析・評価条件は現在までに得られ ている情報を元に合理的に保守的な範囲で定めたものであるが、それらの評価条件の不確かさを 低減することで、本研究で得た推定結果の信頼性を高めることができる。例えば、1F3 号機ペデス タルへの主要な酸化物リッチな燃料デブリ移行時のペデスタル雰囲気温度やバックグラウンド温 度の想定範囲を精緻な解析で狭めることができれば、本研究で、1F3 号機ペデスタルの構造物群が 熱的には大規模に溶融しなかったとした評価結果の信頼性を高めることができる。また、本研究 で実施した溶融物・構造物の熱的な連成解析に、構造物の構造力学解析を連成すれば、さらに現 在のデブリ性状(深さ方向の分布)についての推定精度を高めることができる。

上記の課題以外にも、今後進むプラント内部調査やサンプリングから得られる新たな知見を炉 内状況把握精度向上に資するための情報の統合、1F2・3 号機について深まった理解の、比較的に 情報が不足している 1F1 号機の炉内状況推定への反映等が挙げられる。比較的に得られている情 報が多い 1F2・3 号機について、本研究では従来の事故進展解析から得られていた理解を修正する ことで、それらの事故進展の理解を深めることができた。同様な理解に基づけば、従来は情報不 足により、予測が困難であった 1F1 号機の事故進展についても信頼性のある事故進展を推定でき るものと期待できる。

なお、今後さらに 1F2・3 号機の事故進展の理解を深め、炉内状況の推定精度を向上するために は、1F2 号機についてはペデスタル等からの燃料デブリのサンプルの新規取得が必要と考えられ る。1F3 号機については相対的にサンプル情報が豊富であり、これらのサンプルと、事故進展の理 解に基づき、適切な実験等を実施することでさらなる炉内状況の把握精度向上が期待できる。



図 4.2-1 本事業提案時(令和元年度)のペデスタル燃料デブリ深さ方向性状の理解



図 4.2-2 本事業完了時(令和3年度)のペデスタル燃料デブリ深さ方向性状の理解

110 - 143 -

5. Appendix (研究成果を実証等につなげる示唆)

本研究により得られた成果を実機からの燃料デブリ取り出し等につなげる示唆について検討した。本検討では、令和4年度中に予定されている1F2号機からの試験的デブリ取り出しや、さらに規模を拡大したデブリ取り出しに資する観点から、効果的なデブリの採取位置、深さ等について検討した。また、3号機については、ペデスタル燃料デブリの成層化パターンの調査や、その他のプラント内部の追加調査に効果的な調査項目や方法を検討した。さらに、将来の1号機からの燃料デブリ取り出しへの展開につながる示唆を検討した。

5.1 研究成果を 1F2 号機の実証につなげる示唆

図 5.1-1 に本研究の成果を 1F2 号機の実証につなげる示唆及び課題をまとめる。1F2 号機については以下の 6 点が挙げられる。

(1) RPV 底部~直下の領域(主要な B₄C の所在)

炉心部の制御棒ブレードに含まれていた中性子吸収材(B₄C)に含まれる B は SUS と共晶溶融するが、そのために必要な B は少量であり、大部分の B₄C は Cr リッチなホウ素化物相等に被膜され、UO₂ と共に RPV 内部(及びその直下の断熱層との間の領域)に残存していると推定される。

(2) CRD ハウジングの映像取得

本研究で推定したデブリ流下履歴やその挙動の妥当性の実証等の観点から、CRD ハウジングの 状態やその映像を得られると良い。

(3) CRD ハウジングや中間架台グレーチング領域の付着物取得

本研究で推定したデブリ流下履歴やその挙動の妥当性の実証等の観点から、CRD ハウジングや 中間架台グレーチング領域の付着物を取得できると良い。

(4) ペデスタル床堆積物のサンプリング(表層)

本研究では2号機ペデスタル床の堆積物の分布について、他のプラント状態やデブリ移行挙動 と整合するように十分に説明できていない。特に、PIPケーブルが見えない部分の真下に位置する 部分でペデスタル床に堆積物があまり高く堆積していないことが説明できていない。この点につ いてさらに検討するために、ペデスタル床の堆積物のサンプリングが実施できると良い。

(5) ペデスタル床堆積物の性状(表層~中層)

ペデスタル床の堆積物の表層~中層にかけて、少量の B と U を含有する金属デブリ層が堆積していると推定される。これらは、RPV 破損後、しばらくしてから金属溶融物として RPV 外に流出し、凝固したものと推定される。少量の B が固溶した金属は硬い体積物層を形成していると推定される。

(6) ペデスタル床堆積物の性状(中層~深部)

ペデスタル床の堆積物の中層~深部にかけて、少量の B を含有する金属デブリ層が堆積していると推定される。これらは、RPV 破損初期に金属溶融物として RPV 外に流出し、凝固したものと推定される。少量の B が固溶した金属は硬い体積物層を形成していると推定される。また、これ以降の深部には U は含有されていないと推定される。



図 5.1-1 研究成果を 1F2 号機の実証につなげる示唆及び課題 オリジナル写真の出典:東京電力 HD[22]

5.2 研究成果を 1F3 号機の実証につなげる示唆

本研究の成果を 1F3 号機の実証につなげる示唆及び課題をまとめる。1F3 号機については以下 の5 点が挙げられる。

(1) CRD ハウジングの映像取得

本研究で推定したデブリ流下履歴やその挙動の妥当性の実証等の観点から、CRD ハウジングの 状態やその映像を得られると良い。特に、CRD ハウジングが欠落しているように見える部分(CRD ハウジングの存在が確認できない部分)は主要な燃料デブリ移行経路であると考えられ、その詳 細な状態を映像から確認できると良い。

(2) CRD ハウジング領域の付着物取得

本研究で推定したデブリ流下履歴やその挙動の妥当性の実証等の観点から、CRD ハウジング領域の付着物を取得できると良い。これまでに取得されている映像からは、RPV 破損初期に流出したと思われる先行流出物のようなものと、それ以降に移行したと思われる燃料デブリと思われるものの2種類が確認されている。これらの一部を取得できると良い。

(3) ペデスタル床堆積物の映像取得

これまでに取得されたペデスタル堆積物の映像は、不完全であり、ペデスタルの一部の領域に ついて映像が得られていない。この未取得の領域の映像が得られると、本研究の実証につながる。

(4) ペデスタル床堆積物の性状(表層サンプリング)

大部分の B 及び UO₂ は共にペデスタル領域に移行して、堆積しているものと推定される。これ らの推定を実証につなげるため、少量で良いので、できるだけペデスタルの広い範囲からサンプ ルを取得できると良い。

(5) ペデスタル床堆積物の性状(中層~深部)

本研究で推定した 1F3 号機ペデスタルデブリ深さ方向の堆積分布を実証につなげるため、超音 波で 3 号機堆積物の性状を調査できると良い。特に大きな空洞の有無等が確認できると良い。ペ デスタル堆積物の上部からのみならず、外周部から超音波を用いることも検討できると良い。

5.3 研究成果を 1F1 号機の実証につなげる示唆

1F1 号機はプラントデータ等からは、RPV 破損後、比較的に短時間でデブリがペデスタルに移行 したことが推定され、本研究で検討した 1F3 号機のデブリ移行挙動と大きく異なると考えられる。 2022 年2 月には 1F1 号機ペデスタル領域の映像が初めて取得されているが、これらの様子からも、 デブリの性状は 1F3 号機のそれとやや異なる可能性が考えられる。例えば、1F3 号機ペデスタル 領域について本研究では構造物群の大規模な溶融はなく、それに伴って大きな空洞が存在する可 能性を指摘したが、1F1 号機についてはそのようなことは考え難い。MCCI によるある程度のコン クリート浸食の可能性も排除できない。また、ペデスタル開口部付近のコンクリートの損傷がど のようにもたらされたのかを解明することや、開口部付近のデブリ堆積物の状況を理解すること が、ペデスタル領域全体のデブリ性状推定に有効と考えられる。

以上の観点から、1F1 号機と1F2・3 号機の共通点及び相違点を整理し、1F2・3 号機について同 定された事故進展を1F1 号機に対して水平展開し、相対的にプラントデータや内部状況調査が不 足していたために精緻化が困難であった、従来の1F1 号機の事故進展の理解を補完・更新・精緻 化することが期待される。その際には、これまでに得られているペデスタルやその開口部の状態 を示す映像等が重要な手がかりになると考えられる。 参考文献

- [1] 一般財団法人エネルギー総合工学研究所,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-1787101,2018年3月.
- [2] 日本原子力研究開発機構,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」,2018年3月,322p.
- [3] 学校法人早稲田大学,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,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, vol. 80, no. 6, 2016, pp. 358-374.
- [5] Z. Tang, D. Wan, G. Chen, Q. Xiao, Numerical Simulation of 3D Violent Free-surface Flows by Multi-resolution MPS Method, J. Ocean Eng. Mar. Energy, vol. 2, 2016, pp. 355-364.
- [6] K. Shibata, S. Koshizuka, I. Masaie, Cost Reduction of Particle Simulations by an Ellipsoidal Particle Model, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., vol. 307, 2016, pp. 411-450.
- [7] S. Koshizuka, Y. Oka, Moving-particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nuclear Science Engineering, vol. 123, no. 3, 1996, pp. 421-434.
- [8] S. Koshizuka, K. Shibata, MPS-SW-MAIN-Ver. 2. 0, P8827-1, 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, vol. 115, no. 10, 2018, pp. 1287-1314.
- [10] V. Sobolev, Database of Thermophysical Properties of Liquid Metal Coolants for GEN-IV, Belgian Nuclear Research Center SCK-CEN Belgium, 2011.
- [11] Science & Engineering Encyclopedia, https://web.archive.org/web/20070608020241/ (Accessed: 2022/3/21).
- [12] 富士フイルム和光純薬株式会社,安全データシートW01W0116-0397 JGHEJP, https://labchem-wako.fujifilm.com/sds/W01W0116-0397 JGHEJP.pdf (Accessed:2022/3/21).
- [13] AGC テクノグラス株式会社,技術資料, IWAKI LAB/SCIENCE PRODUCTS, 2021, https://iwaki.atgc.co.jp/div/rika/pdf/catalog_technical_data_2021-001.pdf (Accessed: 2022/3/21).
- [14] T. Schulenberg, Annual Report 2014 of the Institute for Nuclear and Energy Technologies, Karlsruhe Institute of Technology KIT Scientific Reports 7702, 2014, 74p.
- [15] 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 会予稿集,2018.
- [16] H. Madokoro, I. Sato, Estimation of the Core Degradation and Relocation at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 based on RELAP/SCDAPSIM Analysis, Nuclear Engineering and Design, vol. 376, 2021, pp. 1-15.

- [17] 大迫昇太郎,山路哲史,X.Li,MELCOR-2.2を用いた福島第一原子力発電所2号機の減圧 後7時間の熱状態推定に係る感度解析,日本原子力学会2021年秋の大会予稿集,2J04, 2021.
- [18] The Government-TEPCO Council on Mid-to-Long Term Response for Decommissioning, Information Portal for the Fukushima Daiichi Accident Analysis and Decommissioning Activities,

https://fdada.info/home/accident/measured/am_download/ (Accessed: 2022/3/13) .

- [19] 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1~3号機の炉心・格納容器の 状態の推定と未解明問題に関する検討第5回進捗報告平成29年12月25日, https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_unconfirmed/pdf/2017/ 171225j0102.pdf (Accessed: 2022/3/13).
- [20] 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構内での計測データ 2011 年
 |アーカイブ,https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/data/2011/index-j.html
 (Accessed: 2022/3/13).
- [21] 東京電力ホールディングス,福島第一原子力発電所2号機原子炉ウェル内の様子, https://photo.tepco.co.jp/date/2021/202106-j/210624-01j.html (Accessed: 2022/3/13).
- [22] 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2号機原子炉格納容器内部調査結果について2018年4月26日, https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/2018/images1/d180426_08-j.pdf (Accessed: 2022/3/13).
- [23] 佐藤一憲他, 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:(12)2号機、3号機におけるデブリのペデスタル移行履歴の検討,日本原子力学会 2022 年春の年会予稿集,1E02,2022.
- [24] 東京電力ホールディングス株式会社、3 号機原子炉格納容器内部調査について 2017 年 11 月 30 日、
 https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/2017/images2/d171130_08-j.pdf
 (Accessed: 2022/3/13).
- [25] I. Sato, Analysis of Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant Unit 3 Pressure Data and Obtained Insights on Accident Progression Behavior, Nucl. Eng. Des., vol. 383, 2021, p. 111426.
- [26] I. Sato, A. Yamaji, X. Li, H. Madokoro, Estimation of Long-term Ex-vessel Debris Cooling Behavior in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 3, Mechanical Engineering Journal, vol. 9, no. 2, 2022, p. 21-00436.
- [27] H. Kobatake, J. Brillo, Density and Viscosity of Ternary Cr-Fe-Ni Liquid Alloys, J. Mater. Sci., vol. 48, 2013, pp. 6818-6824.
- [28] J. T. Okada, T. Ishikawa, Yu. Watanabe, Ya. Watanabe, P.-F. Paradis, K. Kimura, Viscosity of Liquid Boron, Phys. Rev. B, vol. 81, 2010, p. 140201.
- [29] G. Gathers, J. Shaner, W. Hodgson, Thermodynamic Characterization of Liquid Metals at High Temperature by Isobaric Expansion Measurements, High Temp. High Press, vol. 11, no. 5, 1979, pp. 529-538.

- [30] R. Hixson, M. Winkler, Thermophysical Properties of Liquid Platinum, International Journal of Thermophysics, vol. 14, no. 3, 1993, pp. 409-416.
- [31] M. Watanabe, M. Adachi, M. Uchikoshi, H. Fukuyama, Densities of Pt-X (X: Fe, Co, Ni, and Cu) Binary Melts and Thermodynamic Correlations, Fluid Phase Equilibria, vol.515, 2020, p.112596.
- [32] T. Ishikawa, P.-F. Paradis, N. Koike, Non-contact Thermophysical Property Measurements of Liquid and Supercooled Platinum, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 45, no. 3A, 2006, pp. 1719-1724.
- [33] J. Delacroix, P. Piluso, N. Chikhi, O. Asserin, D. Borel, A. Brosse, S. Cadiou, Measurements of Liquid AISI 304L Steel Density and Surface Tension, and Influence of Surface-Active Elements at High Temperatures, Steel Research International, vol.93, no. 6, 2022, p. 2100624.
- [34] M. Ramacciotti, C. Journeau, F. Sudreau and G. Cognet, Viscosity Models for Corium Melts, Nuclear Engineering and Design, vol. 204, no. 1-3, 2001, pp. 377-389.
- [35] 東京電力ホールディングス株式会社, 3D Reconstruction Results Based on Unit 3 Primary Containment Vessel Internal Investigation, https://photo.tepco.co.jp/en/date/2018-e/201804-e/180426-02e.html (Accessed: 2022/3/13).
- [36] 東京電力ホールディングス株式会社, Unit 3 Primary Containment Vessel Internal Investigation, https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts_171130_ 03-e.pdf (Accessed: 2022/3/13).
- [37] 東京電力ホールディングス株式会社,原子炉格納容器内部調査について 2017 年 6 月 28 日, https://www.nsr.go.jp/data/000194291.pdf (Accessed: 2022/3/13).
- [38] C. S. Randy, Total Hemispherical Emissivity of Metals Applicable to Radiant Heat Testing, Sandia Report, SAND2018-13271, 2018, 38p, https://doi.org/10.2172/1483461.
- [39] V. Bobkov, L. Fokin, E. Petrov, V. Popov, V. Rumiantsev, A. Savvatimsky, Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data, IAEA, Vienna, 2008, 200p.
- [40] C. Journeau, C. Jegou, G. Cognet, Infrared Thermography for Measuring the Surface Temperature of an Oxidic Melt, Radiative Transfer 1, 1996, pp. 620-626.
- [41] C. Journeau, D. Roulet, E. Porcheron, P. Piluso, C. Chagnot, Fukushima Daiichi Fuel Debris Simulant Materials for the Development of Cutting and Collection Technologies, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 55, no. 9, 2018, pp. 985-995.
- [42] K.-Y. Lee, K.-Y. Kim, I.-R. Hwang, Thermal Decomposition Kinetics of γ-ray Irradiated DGEBA/Jeffamine Epoxy Resin, vol. 12, no. 2, 2008, pp. 277-280.
- [43] H. Wen, X. Zhang, R. Xia, Z. Yang, Y. Wu, Thermal Decomposition Properties of Epoxy Resin in SF6/N2 Mixture, Materials (Basel), vol.12, no.1, 2018, p.75.
- [44] D. Naus, A Compilation of Elevated Temperature Concrete Material Property Data and Information for Use in Assessments of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures, U.S. NRC, NUREG/CR-7031, 2010, 328p.

- [45] I. Sato et al., Estimation of Long-term Ex-vessel Debris Cooling by Water in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit-3, ICONE-28 (online), 2021.
- [46] V. Bouyer, C. Journeau, J. Haquet, P. Piluso, A. Nakayoshi, A. Ikeuchi, T. Washiya, T. Kitagaki, Large Scale Vulcano Molten Core Concrete Interaction Test Considering Fukushima Daiichi Condition, Proc. 9th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR 2019), Prague, 2019.
- [47] J. F. Haquet, A. Boulin, P. Piluso, M. Antoni, S. Semenov, A Local Multiphase Approach for the Modelling of Nuclear Severe Accident Using CFD Methods, Rio de Janeiro, 2019.
- [48] E. R. Copus, D. A. Powers, Interaction between a Superheated Uranium Dioxide Jet and Cold Concrete, Proc. Second OECD (NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, 1992.
- [49] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, et al., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl. Sci. Technol., vol.48, no.1, pp.1-30, 2011, https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711675.
- [50] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構,技術戦略プラン 2018, https://www.dd.ndf.go.jp/strategic-plan/index2018.html (Accessed: 2022/3/13).
- [51] Tokyo Electric Power Company, Water Level and Pressure Data, Available from: https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/f1/pla/2012/images/csv_level_pr_ data_3u-e.csv (Accessed: 2022/3/13).
- [52] Tokyo Electric Power Company, Fukushima Daiichi Unit 3 Temperature Data, Available from: https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/f1/pla/2012/images/csv_temp_ data_3u-e.csv (Accessed: 2022/3/13).