

JAEA-Review 2021-034 DOI:10.11484/jaea-review-2021-034

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)

ー令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー Estimation of the In-depth Debris Status of Fukushima Unit-2 and Unit-3 with Multi-physics Modeling (Contract Research) -FY2020 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

December 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートはクリエイティブ・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, 2021

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

(委託研究)

-令和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-

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

(2021年9月14日受理)

日本原子力研究開発機構(JAEA)廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)では、令和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(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」という)の 廃炉等をはじ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2年度の研究成果について取りまと めたものである。

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、1F 2・3 号機ペデスタル燃料デ ブリの深さ方向の分布・性状の把握が課題である。本研究では、固液の移行及び界面の機構論的 な追跡が可能な MPS 法、模擬溶融デブリ流下実験、高温融体物性データを整備する。これらの Multi-Physics モデリングにより、令和元年度から 3 カ年計画で 1F 2・3 号機ペデスタル燃料デ ブリ深さ方向の性状を同定することを目的としている。

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

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

i

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

(Contract Research)

- FY2020 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 September 14, 2021)

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 FY2020.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2019, this report summarizes the research results of the "Estimation of the in-depth debris status of Fukushima Unit-2 and Unit-3 with multi-physics modeling" conducted in FY2020.

Continuous update on understanding of the damaged 1F reactors is important for safe and efficient decommissioning of the reactors. This study aims 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.

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	8
付	録 成果報告書	11

Contents

1.	Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	
2.	Accepted Proposal in FY2018 2	ŗ
3.	Accepted Proposal in FY20195	•
4.	Accepted Proposal in FY2020	
App	pendix Result Report	

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 ^(令和元年度まで) 大曲 新矢	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するア ルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安 全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (^{令和2年度 まで)} 岡山大学

国際協力型廃炉研究プログラム(日露共同研究)

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

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 ^(平成 30 年度まで) 竹下 健二	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 2021-034

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課題	į)
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	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

本報告書は、以下の課題の令和2年度の研究成果を取りまとめたものである。

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2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 R02I042)

成果報告書

令和3年3月 学校法人早稻田大学

JAEA-Review 2021-034

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2年度の研究成果を取りま とめたものです。

目次

概略	viii
1. はじめに	1
2. 業務計画	3
2.1 全体計画と実施体制	3
2.1.1 全体計画	3
2.1.2 実施体制	6
2.2 令和 2 年度の成果の目標及び業務の実施方法	6
3 令和 2 年度の実施内容及び成果	8
3.1 MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析	
311 改良計算アルゴリズムの MPS 法解析コードへの実装	9
312 新クラストモデル	11
$3.1.3 \pm b$	
3.2 模擬デブリ流下実験の解析	
3.2.1 解析対象と条件	
3.2.2 解析結果	
3.2.3 まとめ	
3.3 模擬デブリ流下実験	
3.3.1 実験装置	
3.3.2 ペデスタル浸食の冷却効果	
3.3.3 円柱 7 本柱造形物への溶融物流下	23
3.3.4 まとめ	24
3.4 実機デブリ流下履歴の同定(連携先:JAEA)	
3.4.1 1F2 号機におけるデブリ流下履歴の概略評価	
3.4.2 1F3 号機におけるデブリ流下挙動に係る支配要因の評価	
3.4.3 まとめ	
3.5 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)	40
3.5.1 Fe-B 共晶合金(Fe _{0.84} B _{0.16})と燃料(UO ₂)との反応挙動評価実験	40
3.5.2 Fe-B 共晶合金の溶融挙動評価	42
3.5.3 Fe-B 共晶合金の粘性評価	43
3.5.4 Fe-B 共晶合金の比熱評価	46
3.5.5 Fe-B 共晶合金の凝固熱評価	48
3.5.6 まとめ	
3.6 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	50
3.6.1 1F3 号機ペデスタル解析体系の構築	50
3.6.2 1F3 号機事故進展における MPS 法の解析範囲とデブリ移行履歴	51
3.6.3 解析の着眼点と解析シナリオ	55
3.6.4 短期連続移行シナリオ	56

3.6.5	間欠移行シナリオ	64
3.6.6	まとめと考察	69
3.7 1F3	3 号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価	71
3.7.1	炉内燃料組成変化の概略評価	71
3.7.2	中性子増倍率(臨界性)の評価	74
3.7.3	モンテカルロ法を用いた燃料デブリ臨界性の感度解析	76
3.7.4	まとめ	
3.8 研究	究推進	79
4. 結言		80
参考文献		

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 X	in
		次席研究員	深井	尋史
再委託先	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 3.2-1	模擬デブリ流下実験の解析に用いた熱物性値14
表 3.3-1	模擬デブリ流下実験に用いた模擬物質の物性19
表 3.6-1	MPS 法による模擬デブリ堆積挙動解析に用いた物性
表 3.6-2	デブリ流下・堆積挙動解析結果のまとめと考察
表 3.7-1	8×8BWR 燃料の仕様及び燃料組成解析条件

図一覧

図 2.1-1	実施内容の全体概要	5
図 2.1-2	実施体制図	6
図 3.1-1	MPS 法の新計算アルゴリズム	10
図 3.1-2	MPS 法のポテンシャルモデルに基づく表面張力モデル	11
図 3.1-3	新クラストモデル	12
図 3.2-1	MPS 法の解析対象とした模擬デブリ流下実験の体系	13
図 3.2-2	模擬デブリ流下・堆積挙動の概要(溶融塩初期温度:160 ℃)	15
図 3.2-3	模擬デブリ流下・堆積挙動の概要(溶融塩初期温度:200℃)	15
図 3.2-4	模擬デブリ流下・堆積挙動の概要(溶融塩初期温度:240℃)	16
図 3.2-5	模擬デブリ堆積分布(溶融塩初期温度:160℃)	16
図 3.2-6	模擬デブリ堆積分布(溶融塩初期温度:200℃)	17
図 3.2-7	模擬デブリ堆積分布(溶融塩初期温度:240℃)	17
図 3.2-8	デブリ堆積高さの比較	18
図 3.3-1	模擬デブリ流下実験装置の概要(正面図)	20
図 3.3-2	模擬デブリ流下実験装置の概要(先行固化物を含む)	20
図 3.3-3	模擬ペデスタル浸食の可視画像	22
図 3.3-4	円柱7本柱造形物への溶融物流下の様子(初期温度:160℃)	24
図 3.4-1	1F2 号機 CRD 下部の映像の例	26
図 3.4-2	1F2 号機における RPV 底部付近の映像	27
図 3.4-3	RPV 及び CRD の全体構造とミュオン測定データの関係	27
図 3.4-4	PIP ケーブル等が欠損している部分の水平方向位置の特定(1F2 号機)	28
図 3.4-5	1F2 号機の内部調査結果における堆積物やグレーチング欠損部の高さ方向の特徴	29
¥ 3 1-6		20
⊠ 3.∓-0	3 JOB RPV パワンタリ 破損モートの推足	30
⊠ 3.4-7	BPV バウンダリ破損モード I に係る研究	30
図 3.4-7 図 3.4-8	RPV バウンダリ破損モード0 推定	30 31 31
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-8 ⊠ 3.4-9	 RPV バウンダリ破損モード0 推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード II に関連する研究の状況 1F2 号機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 	30 31 31 33
図 3.4-7 図 3.4-7 図 3.4-8 図 3.4-9 図 3.4-10	 S 500 RPV バウンダリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード II に関連する研究の状況 1F2 号機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 1F3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 	30 31 31 33 34
 ☑ 3.4-7 ☑ 3.4-8 ☑ 3.4-9 ☑ 3.4-10 ☑ 3.4-11 	 S 500 RPV バウンダリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード II に関連する研究の状況 1F2 号機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 1F3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 1F2・3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 	30 31 31 33 34 35
 ☑ 3.4-7 ☑ 3.4-8 ☑ 3.4-9 ☑ 3.4-10 ☑ 3.4-11 ☑ 3.4-12 	 S 500 RPV バウンダリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード II に関連する研究の状況 1F2 号機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 1F3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 1F2・3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 1F3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 	30 31 31 33 34 35 36
 ☑ 3.4-7 ☑ 3.4-7 ☑ 3.4-8 ☑ 3.4-9 ☑ 3.4-10 ☑ 3.4-11 ☑ 3.4-12 ☑ 3.4-13 	 3 500 RPV バウンダリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード II に関連する研究の状況 1F2 号機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 1F3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 1F2・3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 1F3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 デブリのペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測 	30 31 31 33 34 35 36 37
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-8 ⊠ 3.4-9 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-11 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-14	 S 500 RPV バウンダリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード II に関連する研究の状況 1F2 号機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 1F3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 1F2・3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 1F3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 デブリのペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測 1F3 号機におけるペデスタル移行デブリ冷却に係る長期挙動分析 	30 31 31 33 34 35 36 37 38
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-8 ⊠ 3.4-9 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-14 ⊠ 3.5-1	 S 500 RPV バウンダリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード II に関連する研究の状況 IF2 号機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 IF3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 IF3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 IF3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 デブリのペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測 IF3 号機におけるペデスタル移行デブリ冷却に係る長期挙動分析 熱処理した試料 	30 31 31 33 34 35 36 37 38 40
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-8 ⊠ 3.4-9 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-11 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-14 ⊠ 3.5-1 ⊠ 3.5-2	 S つの KPV ハウンタウ 破損モードの推定 RPV バウンダリ 破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ 破損モード I に関連する研究の状況 IF2 号機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 IF3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 IF2・3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 IF3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 デブリのペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測 IF3 号機におけるペデスタル移行デブリ冷却に係る長期挙動分析 割処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング 	30 31 31 33 34 35 36 37 38 40 41
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-14 ⊠ 3.5-1 ⊠ 3.5-2 ⊠ 3.5-3	 S つの KPV パウンダリ破損モードの推定 RPV パウンダリ破損モード I に係る研究 RPV パウンダリ破損モード I に関連する研究の状況 IF2 号機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 IF3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 IF3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 IF3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 IF3 号機におけるペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測 IF3 号機におけるペデスタル移行デブリ冷却に係る長期挙動分析 熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング 1400 ℃で熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング 	30 31 31 33 34 35 36 37 38 40 41 41
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-8 ⊠ 3.4-9 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.5-1 ⊠ 3.5-3 ⊠ 3.5-4	 S つの KPV パウンダリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード I に関連する研究の状況 1F2 号機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 1F3 号機正力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 1F3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 1F3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 デブリのペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測 1F3 号機におけるペデスタル移行デブリ冷却に係る長期挙動分析 割処理した試料 1300 ℃で熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング 1400 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果 	30 31 33 33 34 35 36 37 38 40 41 41
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-8 ⊠ 3.4-9 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-14 ⊠ 3.5-1 ⊠ 3.5-2 ⊠ 3.5-3 ⊠ 3.5-4 ⊠ 3.5-5	 3 つの KPV パウンダリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード II に関連する研究の状況 1F2 号機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 1F3 号機正力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 1F2・3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 1F3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 デブリのペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測 1F3 号機におけるペデスタル移行デブリ冷却に係る長期挙動分析 1500 ℃で熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング 1300 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果 1400 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果 	30 31 33 34 35 36 37 38 40 41 41 41 42
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-8 ⊠ 3.4-9 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-14 ⊠ 3.5-1 ⊠ 3.5-2 ⊠ 3.5-3 ⊠ 3.5-5 ⊠ 3.5-6	 3 つの KPV パウンタリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード I に関連する研究の状況. IF2 号機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 IF3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 IF2・3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 IF3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 デブリのペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測 IF3 号機におけるペデスタル移行デブリ冷却に係る長期挙動分析 熟処理した試料 I300 ℃で熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング I400 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果 I400 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果 Fe-B 共晶合金の溶融挙動評価実験装置の概要 	30 31 31 33 34 33 34 35 36 37 38 40 41 41 41 42 42
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-14 ⊠ 3.5-1 ⊠ 3.5-2 ⊠ 3.5-3 ⊠ 3.5-5 ⊠ 3.5-5 ⊠ 3.5-6 ⊠ 3.5-7	 3 つの RFV パウンタリ破損モード I に係る研究	30 31 33 34 35 36 37 38 40 41 41 41 42 42 42 43
⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-7 ⊠ 3.4-8 ⊠ 3.4-9 ⊠ 3.4-10 ⊠ 3.4-12 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-13 ⊠ 3.4-14 ⊠ 3.5-1 ⊠ 3.5-2 ⊠ 3.5-3 ⊠ 3.5-5 ⊠ 3.5-6 ⊠ 3.5-7 ⊠ 3.5-8	 3 つの KPV パウンタリ破損モードの推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード I に関連する研究の状況 IF2 号機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 IF3 号機正力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 IF2・3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 IF3 号機におけるデブリ流下履歴の予測 デブリのペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測 IF3 号機におけるペデスタル移行デブリ冷却に係る長期挙動分析 熱処理した試料 I300 ℃で熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング I300 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果 I400 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果 I400 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果 I本晶合金の溶融挙動評価実験装置の概要 試料外観 加熱時の試料の様子 	30 31 31 33 34 33 34 35 36 36 37 38 40 41 41 41 42 43 43
 □ 3.4-7 □ 3.4-7 □ 3.4-8 □ 3.4-9 □ 3.4-10 □ 3.4-11 □ 3.4-12 □ 3.4-13 □ 3.4-13 □ 3.4-14 □ 3.5-1 □ 3.5-2 □ 3.5-3 □ 3.5-3 □ 3.5-3 □ 3.5-5 □ 3.5-6 □ 3.5-7 □ 3.5-8 □ 3.5-9 	 S つの KPV パウンダリ破損モード I に係る研究. RPV バウンダリ破損モード I に係る研究. RPV バウンダリ破損モード I に関連する研究の状況	30 31 33 34 35 36 37 38 40 41 41 41 42 42 43 43 44
 □ 3.4-7 □ 3.4-7 □ 3.4-8 □ 3.4-10 □ 3.4-11 □ 3.4-12 □ 3.4-13 □ 3.4-13 □ 3.4-14 □ 3.5-1 □ 3.5-2 □ 3.5-3 □ 3.5-3 □ 3.5-5 □ 3.5-6 □ 3.5-7 □ 3.5-8 □ 3.5-10 	 3 つの RPV ハウンタリ破損モード O 推定 RPV バウンダリ破損モード I に係る研究 RPV バウンダリ破損モード I に関連する研究の状況 IF2 号機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 IF3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価 IF3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理 IF3 号機におけるデブリ流下履歴の予測	30 31 31 33 34 33 36 36 36 37 38 40 41 41 41 42 43 44 43 44

図 3.5-12	横方向の振動の減衰	.46
図 3.5-13	Fe-B 共晶合金の比熱評価法	.47
図 3.5-14	Fe _{0.84} B _{0.16} の液相のモル比熱	.47
図 3.5-15	凝固熱評価方法の概要	.48
図 3.5-16	Fe _{0.84} B _{0.16} の冷却曲線	.48
図 3.6-1	1F3 号機ペデスタル調査結果から構築された復元図を元にした構造物の状況推定	. 50
図 3.6-2	1F3 号機ペデスタルデブリ移行解析の解析体系	.51
図 3.6-3	1F3 号機プラント圧力 (RPV、D/W、S/C) 推移と主要なイベントの推定	. 52
図 3.6-4	短期連続移行シナリオと間欠移行シナリオそれぞれの移行・冷却フェーズの概略	. 53
図 3.6-5	強い/弱い冷却ケースの熱伝達率境界条件	. 54
図 3.6-6	燃料デブリ移行・堆積挙動の移行フェーズ	.56
図 3.6-7	燃料デブリ移行・堆積挙動解析の並列計算領域分割	.57
図 3.6-8	燃料デブリ移行・堆積時デブリ温度分布	. 57
図 3.6-9	燃料デブリ移行・堆積時構造物温度分布	. 57
図 3.6-10	燃料デブリ移行・堆積時デブリ固相率分布	. 58
図 3.6-11	冷却フェーズの燃料デブリ移行・堆積時デブリ温度分布	.58
図 3.6-12	冷却フェーズの燃料デブリ移行・堆積時構造物温度分布	. 59
図 3.6-13	燃料デブリ移行・堆積時平均温度推移	.60
図 3.6-14	燃料デブリ移行期最終デブリ分布	.61
図 3.6-15	構造物の溶融量の分布と推移	.61
図 3.6-16	構造物の溶融割合と分布(短期連続移行シナリオ、高温・強い冷却ケース)	. 62
図 3.6-17	低温ケースの燃料デブリ移行・堆積挙動移動フェーズ	. 62
図 3.6-18	低温ケースの燃料デブリ移行・堆積時平均温度推移	.63
図 3.6-19	低温ケースの燃料デブリ移行期最終デブリ分布	. 63
図 3.6-20	分割サイクルで解析した燃料デブリ移行・堆積時デブリ温度分布	. 64
図 3.6-21	分割サイクルで解析した燃料デブリ移行・堆積時構造物温度分布	.65
図 3.6-22	ペデスタル構造物群の大規模溶融損壊時の様子(間欠サイクル長 500 秒)	.65
図 3.6-23	燃料デブリ移行期最終デブリ分布(間欠サイクル長 500 秒・低温・強い冷却ケース)
		.66
図 3.6-24	燃料デブリ移行期最終デブリ分布(250秒サイクル)	.67
図 3.6-25	燃料デブリ移行期最終デブリ分布(125秒サイクル)	.68
図 3.6-26	ペデスタル構造物群の大規模溶融損壊時の様子(間欠サイクル長 125 秒)	. 69
図 3.7-1	評価対象の 8×8BWR 燃料集合体の構成	.72
図 3.7-2	セル燃焼計算体系	.73
図 3.7-3	原子個数密度の燃焼推移(²³⁵ U)	.73
図 3.7-4	原子個数密度の燃焼推移(²³⁹ Pu)	.74
図 3.7-5	均質燃料デブリ無限増倍率の解析体系	.74
図 3.7-6	均質燃料デブリ無限増倍率の評価結果(5.2 GWd/t)	.75
図 3.7-7	マクロ断面積作成用燃焼計算体系	.76
図 3.7-8	マクロ断面積作成用燃焼計算体系	.76
図 3.7-9	燃料デブリ臨界性の感度解析体系(均質・塊状デブリ)	.77
図 3.7-10	燃料デブリ臨界性の感度解析体系(非均質・塊状デブリ)	.77
図 3.7-11	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)	.78

	略語一覧		
ADL	: Aerodynamic Levitation (ガス浮遊法:ガス流の圧力と容器の圧力差を利用して一定の 位置に浮遊させる方法)		
ADS	: Automatic Depressurization System (原子炉自動減圧系)		
BWR	: Boiling Water Reactor (沸騰水型原子炉:軽水を原子炉冷却材及び中性子減速材とし、 この軽水を炉心で沸騰させて蒸気を発生させ直接タービン発電機に導き電気を得る 発電用原子炉)		
CAMS	: Containment Atmospheric Monitoring System(格納容器雰囲気モニタ)		
CAD	: Computer-aided design (キャド:コンピュータを用いて設計をすること、あるいはコ ンピュータによる設計支援ツールのこと)		
CRD	: Control Rod Drive mechanism(制御棒駆動機構)		
CRGT	: Control Rod Guide Tube(制御棒ガイド管)		
D/W	: Drywell (ドライウェル)		
EDX	: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy(エネルギー分散型 X 線分析装置)		
JAEA	: Japan Atomic Energy Agency(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)		
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))		
MCCI	: Molten Corium Concrete Interaction (コア・コンクリート反応:原子炉過酷事故時に格納容器床に放出される溶融炉心と床コンクリートの相互作用やそれに伴うコンクリートの熱分解や浸食)		
MPI	: Message Passing Interface (メッセージ パッシング インターフェース: 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 法	: Moving Particle Semi-implicit Method(粒子法の一種であり非圧縮性流れの解析手法の1つ)		
PCV	: Primary Containment Vessel (原子炉格納容器:原子炉とその冷却系設備等を収容する 建造物)		
RPV	: Reactor Pressure Vessel(原子炉圧力容器:原子炉の炉心部を収納する鋼製容器)		
SA	: Severe Accident(原子炉過酷事故:原子力発電所等の原子炉施設において、設計時 に考慮した範囲を超える異常な事態が発生し、想定していた手段では適切に炉心を 冷却・制御できない状態になり、炉心溶融や原子炉格納容器の破損に至る事象)		
SEM/EDX	: Scanning Electron Microscope (走査型電子顕微鏡及びエネルギー分散型 X 線分析装置)		
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ス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。3 号機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布や性状を把 握できれば、工法・機器の設計や、臨界管理を飛躍的に合理化できる。2 号機ペデスタルのデブリ 深部に多量のウランが存在する可能性を合理的に排除できれば、臨界管理が不要になる。これら のペデスタル燃料デブリ性状を把握できれば、原子炉圧力容器(RPV)残存燃料デブリの性状や RPV 破損状況、RPV からペデスタルへのデブリの移行経路の同定に資することができ、炉内状況 推定精度を向上できる。従って、2・3 号機ペデスタル燃料デブリの深さ方向の分布・性状の把握 が喫緊の課題である。

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

一方で、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」では、ラグランジ ユ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、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 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する。

本研究の実施内容(令和2年度)

(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 2 年度 は前年度(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。

(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、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。

(3) 実機デブリ流下履歴の同定(連携先: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。))

1F2・3 号機から原子炉格納容器(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 の制御棒駆動機構(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 機に比べ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。

(4) 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:国立大学法人大阪大学(以下、「大阪大学」と略す。))

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(UO₂、ZrO₂、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1200℃程度で 溶融するため、1200℃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(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した。また、ボライドと燃料(UO₂、 ZrO₂、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、ガス浮遊法を用いて 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、UO₂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 1300 ℃と 1400 ℃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 は殆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 1400 ℃程度における粘性を、大阪大学においてガス浮遊法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。

(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

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2年度は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。

(6) 1F3 号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価

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。

(7) 研究推進

研究代表者の下で上記(1)から(6)を実施する担当者間の連携ならびにそれぞれの担当者と廃炉 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電話等で密に連絡を取り合いながら研究を進めた。適時打ち合わせ を実施した(令和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)。 1. はじめに

IF の廃炉のための NDF 戦略プラン 2018 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 IF2・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。 IF3 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。 IF2 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 23~平成 29 年度)[1]では炉内状況推定図が作成されたが解析による推定精度の向上が課題 とされた。

JAEA/CLADS 研究「炉内性状把握の精度向上に向けた基盤研究」(平成 30~令和 2 年度)では 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。

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。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 MPS 法の改良と解析、模擬デブリ流下実験、UO2含む高温融体物性実験を連成した、Multi-Physics モデリングによる Ex-Vessel 溶融物挙動理解の深化が図られた。その結果、溶融物が流動する過程 で凝固した際に生じるクラストと溶融物の複雑な相互作用を解析可能な MPS 法及び 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する。3 カ年計画の2年目である令和2年度は以下を実施した。

- 1. MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析による計算コスト低減策の検討
- 2. 模擬デブリ流下実験系の整備と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た 実験
- 3. 実機デブリ流下履歴の同定のための 1F2・3 号機における炉心物質流出挙動の概要評価(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. 1F3 号機ペデスタル成層化デブリ臨界性試評価
- 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3年間で以下を実施する計画である。

- (1) MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析
- (2) 模擬デブリ流下実験
- (3) 実機デブリ流下履歴の同定(連携先: 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(2年目以降)
- (7) 研究推進

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

(1) MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析

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3方向から可視化し、定量化する計測系を設計製作する。
- 堆積デブリを厚さ方向に分析する。

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

(3) 実機デブリ流下履歴の同定(連携先: 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(UO₂-ZrO₂-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UO₂、ZrO₂、Zr等を電気炉中で反応させ、その反応層を観察する。また、上記試料をガス浮遊法で浮遊溶融させてから金属基板上に落下させ、急冷凝固させてその組織を観察する。 観察には走査型電子顕微鏡及びエネルギー分散型 X 線分析装置を用いる。これにより、金属ボライドが燃料と反応した時に生成し得る液相を評価する。また、生成し得ると予想される液相の物性を測定する。ボライドを含む溶融物は反応性が高いため、浮遊法を用いて物性(粘性)を測定する。浮遊させた微小な試料片をレーザー加熱によって溶融させ、振動させる。その振動の減衰から液滴振動法によって粘性を得る。浮遊法としては酸化物も浮遊できるガス浮遊法を主として用いるが、金属の浮遊に適した静電浮遊法も併用する。

(5) MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験

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(2 年目以降)

MPS 法による MPS 法による模擬デブリ堆積挙動の大規模並列計算機実験(実施内容(5))と 連成し、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 ×8BWR 燃料のウラン燃料ペレットや、ウラン燃料ペレットと被覆管構造材の均質化マクロ断 面積を作成する。代表燃焼度における燃料の均質化マクロ断面積と、構造材、水等の断面積を 解析体系に配置し、三次元体系の中性子実効増倍係数を評価する。異なる成層化パターンに対 応した断面積配置の解析を実施し、成層化パターンが中性子実効増倍係数に与える影響を評価 する。

(7) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

年度	令和元年度	令和2年度	令和3年度
(1) MPS法による溶融物挙動解析手法 の改良と解析	新アルゴリズム検討	新クラストモデル開発と 妥当性確認	成層化解析の妥当性確認
(2) 模擬デブリ流下実験	溶融浸食実験	固化デブリと流下デブリの 混合・分散実験	溶融デブリ同士の混合・分散実験
(3) 実機デブリ流下履歴の同定 (連携先:JAEA)	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	◆ 各実施項目間の連携	各実施項目間の連携
	まとめ・評価	まとめ・評価	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

2.1.2 実施体制

本研究の実施体制を図 2.1-2 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 2.1-2 実施体制図

2.2 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法

(1) MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析

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。

(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、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) 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。

(4) 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

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(UO₂、ZrO₂、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 1200 ℃ 程度で溶融するため、1200 ℃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(UO₂、ZrO₂、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、ガス浮遊法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。

(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。

(6) 1F3 号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価

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、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。

(7) 研究推進

研究代表者の下で上記(1)から(6)を実施する担当者間の連携ならびにそれぞれの担当者と CLADS 等との連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや 会議等を開催する。

- 3. 令和2年度の実施内容及び成果
- 3.1 MPS 法による溶融物挙動解析手法の改良と解析

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

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

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

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

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

そこで令和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。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。 3.1.1 改良計算アルゴリズムの MPS 法解析コードへの実装

MPS 法の支配方程式は、(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]。

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \mathbf{.} \, \mathbf{u} = 0 \tag{3-1-1}$$

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

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = k \nabla^2 T + Q \tag{3-1-3}$$

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。

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。

固液相変化を伴う流体の温度は一般にエンタルピーを用いて(3-1-4)式で表される。

$$T = \begin{cases} T_{s} + \frac{h - h_{s}}{\rho c_{ps}} & (h < h_{s0}) \\ T_{s} & (h_{s0} \le h \le h_{l}) \\ T_{s} + \frac{h - h_{l}}{\rho c_{pl}} & (h_{l} < h) \end{cases}$$
(3-1-4)

ここで、 T_s 及び h_s は固相線温度[K]及びそれに対応するエンタルピー[k]/kg]、 T_l 及び h_l は液相 線温度[K]及びそれに対応するエンタルピー[k]/kg]、 c_{ps} 及び c_{pl} は固相及び液相の比熱 [J/kg·K] である。また、一般に固相線温度と液相線温度の間にある流体の固液混合状態は固相率(γ :固 相の体積割合)で表される。固相率のエンタルピー(または温度)依存性は物質により異なり、 様々な溶融炉心物質の固相率のエンタルピー依存性を正確に予測することは困難なため、本研 究では(3-1-5)式で示すように、固相線と液相線の間の固相率はエンタルピーに対して線形に変 化すると仮定した。

$$\gamma(T) = \begin{cases} 1, & h(T) < h_s \\ \frac{h_l - h(T)}{h_l - h_s}, & h_s \le h(T) \le h_l \\ 0, & h_l < h(T) \end{cases}$$
(3-1-5)

以上の離散化手法及び固液相変化モデルを用いて、令和元年度は図 3.1-1(a)に示すようなア ルゴリズムを用いた。令和元年度に開発した新アルゴリズム1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 3.1-1(b)に示すような、汎用性と数値計算精度/安定性を向上した 新アルゴリズム2を検討し、MPS法の解析コードに実装した。新アルゴリズム2では、粒子の 固相率だけでなく速度も判定条件に加えた。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。



(a) 新アルゴリズム1 (令和元年度) (b) 新アルゴリズム2 (令和2年度) 図 3.1-1 MPS 法の新計算アルゴリズム

10 - 34 - なお、令和2年度は、新たに実施した模擬デブリ流下実験(第3.3節)を解析するために、ポ テンシャルカに基づく表面張力F_s[N/m]のモデル[10][11]を実装した。表面張力は(3-1-6)式に示 す粒子間ポテンシャルエネルギーの勾配で表される。

$$\boldsymbol{F}_{s}(\boldsymbol{r}) = -\nabla P(\mathbf{r}) \tag{3-1-6}$$

ここでポテンシャルエネルギーP(r)は(3-1-7)式で与えられる。

$$P(r) = \begin{cases} \frac{C_f}{3} \left(r - \frac{3}{2} r_{min} + \frac{1}{2} r_e \right) (r - r_e)^2 & (0 \le r < r_e) \\ 0 & (r_e \le r) \end{cases}$$
(3-1-7)

ここで*r_{min}*は粒子間の最小距離を表す。すなわち、図 3.1-2 に示すように粒子間ポテンシャル エネルギーが最小になるように平衡点に向かって表面張力が働く。



図 3.1-2 MPS 法のポテンシャルモデルに基づく表面張力モデル

このとき、係数 C_f は液体粒子同士の場合は(3-1-8)式のように表面張力係数 σ を用いて求める。

$$C_{f} = \frac{2 \sigma r_{min}^{2}}{\sum_{r_{ij} < r_{e}} \frac{1}{3} \left(r_{ij} - \frac{3}{2} r_{min} + \frac{1}{2} r_{e} \right) \left(r_{ij} - r_{e} \right)^{2}}$$
(3-1-8)

また、液体粒子と固体粒子の場合には、(3-1-9)式のように接触角θを用いて求める。

$$C_{fs} = \frac{c_f}{2} (1 + \cos\theta) \tag{3-1-9}$$

3.1.2 新クラストモデル

3.1.1 項に示した新アルゴリズム 2 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、図 3.1-3 に示すように、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る。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 年度に開発した新アルゴリズム1に比べ、新アルゴリズム2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る。



図 3.1-3 新クラストモデル

3.1.3 まとめ

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。実施項目(2)模擬デブ リ流下実験に対応し、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、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。 3.2 模擬デブリ流下実験の解析

3.2.1 解析対象と条件

令和2年度に改良した MPS 法の新アルゴリズム2を早稲田大学の MPS 法解析コードに実装 し、令和2年度に実施した模擬デブリ流下実験を解析し、解析コードの妥当性を確認した。

(1) 解析対象と体系

MPS 法の解析対象とした模擬デブリ流下実験の体系の概略を図 3.2-1 に示す。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。構造物群・先行デブリはアルミニウム製の円柱状の支柱を7本配置し、実験では中央の支柱の中心部にノズル径 2.0 mm を用いて溶融塩が滴下された。中央の支柱は直径が4.0 mm、高さが10.0 mm であった。周囲の6本の支柱はいずれも直径が2.0 mm、高さが6.0 mm であり、中央の支柱から60°間隔で均等に円周上に配置されていた。解析では、これらを粒子径0.5 mmの粒子(総粒子数約35000)で模擬した。



図 3.2-1 MPS 法の解析対象とした模擬デブリ流下実験の体系

実験は複数の異なるケースで実施された。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 160 ℃、200 ℃、240 ℃の 3 ケースについて実験結果と解析結果を比較した。なお、実験に用いられた溶融塩の融点は 142.0 ℃であるため、溶融塩

の初期過熱度はそれぞれ 18 ℃、58 ℃、98 ℃に相当する。構造物群・先行デブリの初期温度は いずれも室温(約 24.5 ℃)であった。

(2) 解析に用いた物性等

解析に用いた模擬デブリ(溶融塩)と模擬構造物群・先行デブリ(アルミニウム)の熱物性 値を表 3.2-1 にまとめる。ここで、溶融塩の固液相変化領域での混合物の粘性には溶融物の粘 性評価に広く用いられている Ramacciotti の相関式(3-1-10)[12]を用いた。

$$\mu(T) = \mu_l e^{(2.5\gamma(T)C)}$$
(3-1-10)

ここで、 μ_l は液体の動粘性係数[Pa·s]、 $\gamma(T)$ は温度T[K]での固相率を表す。定数Cは一般に 4.0 ~8.0 の値を取る。溶融塩の場合、潜熱や固相線-液相線温度差が小さいため定数Cは解析結果に 大きく影響しないと考えられるが、本研究では暫定的に 4.0 とした。溶融塩の融点は 142.0 $^{\circ}$ であるが、解析では固液相変化領域を考慮するために、固相線温度を 142.0 $^{\circ}$ とし、液相線温 度を 142.5 $^{\circ}$ とした。さらに、固相率が一定の閾値を超えた場合には、実効的に固体としてモ デル化するため、固相率が 0.50 を超えた粒子の動粘性係数を Ramacciotti の相関式により求まる 値の 10⁵ 倍した。

表 3.2-1 模擬デブリ流下実験の解析に用いた熱物性値

物性	模擬デブリ(溶融塩)	構造物群・先行デブリ
		(アルミニウム)
密度 (kg/m ³)	1960 (*1)	2700
比熱(J/kg·K)	1500	900
潜熱(J/kg)	8.4e10 ⁴	
熱伝導率(W/m·K)	0.6	237
動粘性係数(Pa·s)(160 ℃)	0.012	
融点(℃)	142.0	
表面張力(N/m)	0.12	

*1:160 ℃での値

3.2.2 解析結果

(1) 模擬デブリ流下・堆積挙動の概要

溶融塩の初期温度が160℃、200℃、240℃の3ケースについて、解析結果の概要を実験結果の 様子と比べてそれぞれ図3.2-2、図3.2-3、図3.2-4に示す。いずれの実験ケースでも、滴下され た溶融塩は中央の支柱から周囲の支柱に広がりながら流下するが、体系の中心から片側に分布が 集中した。これは、溶融塩が必ずしも中央の支柱の中心部に正確に滴下されているわけではなく、 わずかに中心部からずれており、次第に中央の支柱に堆積する溶融/凝固塩の分布が非対称にな ることで生じたものと考えられる。そこで、MPS法の解析では、溶融塩の滴下位置を中央の支柱 の中心部から0.25 mm 片側にずらした。これは解析の解像度(粒子径は0.50 mm)に対してその 半分に相当する小さなずれである。その結果、いずれのケースについても、実験で観察された特 徴を解析結果は良く再現し、実験と同様に片側に溶融塩が流下する様子を再現できた。

また、図 3.2-2、図 3.2-3、図 3.2-4 の結果の概要を比較すると、溶融塩の初期温度(初期過熱 度)が増大するほど、中央の支柱の直上に堆積する凝固塩の高さは低くなり、溶融塩が周囲の支 柱に流れやすくなっていることが分かる。これは溶融塩初期温度の上昇に伴い、より多くの溶融 塩が低い粘性のまま流下したためと考えられる。



図 3.2-2 模擬デブリ流下・堆積挙動の概要(溶融塩初期温度:160 ℃)





(2) 模擬デブリ堆積分布

溶融塩の初期温度が160℃、200℃、240℃の3ケースについて、解析により得られた模擬デブ リ(凝固塩)の堆積分布を実験後の様子と比べてそれぞれ図 3.2-5、図 3.2-6、図 3.2-7 に示す。 いずれのケースについても解析により得られた全体的なデブリの分布は実験結果を良く再現して いる。溶融塩の初期温度が高くなるほど、中央の支柱上に堆積する高さは低下し、周囲の支柱に 流下する傾向が増した。これは、初期温度(過熱度)の上昇に伴い、溶融物の粘性が低下して流 れやすくなったためと考えられる。

模擬ペデスタル床から模擬デブリ頂上部までの高さを比較した結果を図 3.2-8 に示す。解析結果は実験結果の概ね 10%以内におさまっており、妥当な解析結果が得られていることが確認できた。



図 3.2-5 模擬デブリ堆積分布(溶融塩初期温度:160℃)

JAEA-Review 2021-034







3.2.3 まとめ

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。実施項目(2)の模擬デ ブリ流下実験に対応し、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、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。

3.3 模擬デブリ流下実験

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。

3.3.1 実験装置

実験に使用するペデスタル模型は耐熱樹脂で三次元造形した。令和元年度はパラフィンで造 形し、ペデスタルの溶融浸食を観察したが、令和2年度は先行固化物の溶融浸食挙動を把握す ることから耐熱樹脂とした。ペデスタル形状は令和元年度と同様に1F2・3号機の形状を模擬 し、寸法を1/100に縮小して用いた。図3.3-1に、令和元年度構築した模擬デブリ流下実験の実 験装置の概要(正面図)を示す。令和2年度は図3.3-2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。これらの模擬物質の物性を表 3.3-1 にまとめる。滴下材料を加熱 及び流下させるため、坩堝を使用した。坩堝はカーボン製で周囲にラバーヒーターを巻き、そ の上に断熱材を巻き付けた。坩堝の底面には内径 2 mm のノズル孔から流下させる構造とした。 実機ではプラットフォームや中間架台等から構成されるペデスタル構造物群中を流下した溶融 物がペデスタル床に以降したと考えられることを踏まえ、坩堝の設置は、ノズル先端がペデス タル模型床面から 20 mm の高さ(実機では 2.0 m に相当する高さ)になるように定めた。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。

パラメータ	水 25 ℃	シリコー ン 25 ℃	パラフィン 25 ℃	溶融塩 200 ℃	РbВi 127 °С	Sn 233 ℃
密度(kg/m ³)	997	969	927	$1960^{\ (*1)}$	10574	6957
熱伝導率 (W/mK)	0.608	0.15	-	0.60	0.0109	0.033
比熱(J/mK)	4182	1510	-	1500 (200∼ 600 °C)	146	240
動粘性係数 (mm²/s)	0.893	200	6.4 (100 °C)	3.94	0.320	0.283
表面張力(N/m)	0.0720	0.0209	-	-	_	0.566
融点(℃)	0		68~70	142	124	232

表 3.3-1 模擬デブリ流下実験に用いた模擬物質の物性

*1:160℃での値



図 3.3-1 模擬デブリ流下実験装置の概要(正面図)



図 3.3-2 模擬デブリ流下実験装置の概要(先行固化物を含む)

3.3.2 ペデスタル浸食の冷却効果

先行固化物の後に流下する模擬デブリには、粘性や熱伝導率の影響を把握するために、共晶 組成の鉛ビスマス(44.5 wt% Pb-Bi)と錫(Sn)を用いた(PbBiとSnの物性値は表 3.3-1 を参 照)。溶融物落下時には浸水している可能性があったことから、ペデスタル内にはサンプ孔を含 めペデスタル床上2 mm まで水を注入した。1/100 スケールであることから、実機では 200 mm の浸水高さを模擬している。物性値の影響を把握するため、水の他にシリコーン油を用いた。 用いたシリコーン油は Momentive Performance Materials 社製 Element14 PDMS 200-J[13]である (水とシリコーン油の物性値は表 3.3-1 を参照)。

ペデスタル内の2箇所の矩形ピット内には組成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。先行固化物として融点68~70℃のパラフィンを矩形ピット2箇所 に注入し、固化させた。パラフィンは、富士フイルム和光純薬社製(製造コード:162-13265) である(パラフィンの物性値は表 3.3-1を参照)。固化したパラフィンの形状は両方とも、幅と 奥行き共に13 mm で、高さは10 mm である。

図 3.3-3 に代表的な実験における可視画像と凝固物写真を示す。一連の写真は最上部が模擬 溶融炉心注入直後(0s)で、その後1秒毎で10秒までの可視画像である。その下に、模擬溶融 炉心の凝固物を実験後に取り出し、ピット内での凝固形状を観察するために上下転置させて撮 影した写真を示す。

図 3.3-3(a)はベースケースとして PbBi を 160 ℃で流下させ、ピット内には固体も液体もない 場合である。溶融物は障害無くピット内に侵入し、凝固物はピット内の形状通り凝固している。 図 3.3-3(b)は PbBi を 200 ℃で流下させ、ピット内には水が存在する場合である。溶融 PbBi は 水と接触することで急速に冷却されることから異形となり凝固する。図 3.3-3(b)では温度を 40 K 高く 200 ℃で流下させているが、ピット内の形状も異形で、ペデスタル床面にも完全に広が っていない。これに対し、図 3.3-3(c)では PbBi を 160 ℃で流下させ、ピット内にはシリコーン 油が存在する場合ある。溶融 PbBi は粘性が高いシリコーン油とゆっくりと入れ替わり、下方に 沈降した。

図 3.3-3(d)は PbBi を 132 ℃で流下させ、ピット内には先行固化物としてパラフィンがある場合である。パラフィンはピット内に存在することから、模擬溶融炉心はペデスタル床上を容易に広がるが、過熱度が 8 K と小さいことからパラフィンの溶融は限定的である。図 3.3-3(e)は PbBi を 240 ℃で流下させた場合である。過熱度は 116 K と大幅に増大していることから、パラフィンの溶融量は増大しているが、模擬溶融炉心は底部には到達していない。すなわち凝固物は粘性が高いシリコーン油や、沸騰冷却となる水よりも溶融炉心のピット底部への浸食を抑制していることが分かる。下方の固体を溶融させながら浸食することの困難さとして理解できる。図 3.3-3(f)はこれまでに PbBi を用いた模擬溶融炉心を Sn に変更し、240 ℃で流下させた場合である。高温で流下させているが過熱度は図 3.3-3(d)と同様に 8 K と PbBi の場合と同じため、ピット底部への浸食は抑制されている。よって、溶融物が高温でパラフィンと接触することより、 模擬溶融炉心の過熱度が低下して粘性が増大して流動性が低下することが浸食抑制の主要因となることが判明した。

以上のようにデブリ移行期には低過熱度で後続デブリがペデスタル構造物群中を流下した場 合、ペデスタル床上で先行固化物を溶融させて深さ方向の成層化分布が大きく変化することは 考え難く、先行固化物の上に後続デブリが堆積すると、流動性が低下し、そのまま流下順に堆 積する可能性が高いことが確認できた。これらのことから、MPS法による1F3号機ペデスタル への移行期の燃料デブリ挙動解析では、先行デブリの一部が固化したペデスタル構造物群への 後続の燃料デブリの流下・堆積挙動が重要であると考えられる。



図 3.3-3 模擬ペデスタル浸食の可視画像

3.3.3 円柱7本柱造形物への溶融物流下

本項では、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4mmで高さ10.0mmを1本、その周囲に60度間隔で直径2mmで高さ 6.0mmを6本配置した。これらの配置はMPS法による解析対象として図 3.2-1に示されたも のと同一である。

模擬溶融物には綜研テクニックス株式会社製溶融塩 NeoSK-SALT を用いた。表 3.3-1 に溶融 塩の物性値を示す。流下ノズル内径は 2.0 mm で、初期温度 160 ℃、200 ℃、240 ℃の溶融塩を 5 s 毎に 1 滴ずつ断続的に滴下した。総滴下量は 1.2 g である。

図 3.3-4 に 7 本鋳造構造物への溶融塩流下実験結果を示す。例として、流下させた模擬デブ リの初期温度が 160 ℃の場合について示す。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ている。70秒においても、溶融塩は一部側方に流出するが、中央円 柱の上に積み上がり、高さを増し続けている。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 3.3-4 円柱7本柱造形物への溶融物流下の様子(初期温度:160℃)

3.3.4 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、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。 3.4 実機デブリ流下履歴の同定(連携先: JAEA)

令和2年度は、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。以下にその主要な点についてま とめる。

3.4.1 1F2 号機におけるデブリ流下履歴の概略評価

(1) 1F2 号機内部調査結果の検討

1F2 号機内部調査の結果[14]から、ペデスタル領域の広い範囲で雨が降り注ぐように冷却水が 滴り落ちている状況が確認できる。ペデスタルのコンクリート壁の近くには燃料集合体の上部 タイプレートと見られるものが落下していたが、この落下物が健全な CRD の隙間から落下した とは考え難いことから、CRD 群の外側の、RPV 側部近傍の破損孔から落下したものと考えられ る。これらのことは、RPV 側部を含む多数の部位で RPV バウンダリが破損している可能性を示 している。

一方で CRD 下部の多くの構造は、確認できている範囲では残留している(図 3.4-1 参照)。 しかし、図 3.4-2 に示されるように、RPV 底部付近には堆積物で制御棒位置指示プローブ(PIP) ケーブルや局部出力領域モニタ(LPRM)ケーブルが見えず、CRD 下端の一部が欠損している 箇所がある。これらのことは、RPV バウンダリの多くの部位で破損があったとしても、個々の 破損部は CRD 下部構造を大規模に損壊させるほどの大きな破損孔を形成するほどではなかっ たが、部分的には CRD 規模の破損孔が形成されている可能性が高いことを示している。



写真の出典:東京電力ホールディングス https://photo.tepco.co.jp/ext_lib/180426_01/180426_03.jpg 図 3.4-1 1F2 号機 CRD 下部の映像の例



写真の出典:東京電力ホールディングス https://photo.tepco.co.jp/ext_lib/180426_01/180426_05.jpg

図 3.4-2 1F2 号機における RPV 底部付近の映像

そこで先ず、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 PIP ケーブル等の欠損部の位置に着目した。PIP ケーブル等の欠損部と RPV 全体の縦断面構 造及びミュオン測定結果[15]の位置関係を図 3.4-3 に示す。ミュオン測定結果から予想される RPV 下部ヘッド残留デブリの全体像から見ると PIP ケーブル等の欠損部は RPV 中心部分に比 較的近いと見ることができる。さらに詳しく PIP ケーブル等欠損部の位置に着目すると、図 3.4-4 に示すように、当該部は RPV の中央部から CRD ピッチ 2 つ分、すなわち約 60 cm 北側に 位置していることが分かる。



図 3.4-3 RPV 及び CRD の全体構造とミュオン測定データの関係

JAEA-Review 2021-034



図 3.4-4 PIP ケーブル等が欠損している部分の水平方向位置の特定(1F2 号機)

次に、PIP ケーブル等の欠損部の位置に着目し、作業用プラットフォーム(ペデスタル床上約 3.2 m)、中間架台(ペデスタル床上約 2 m)及びペデスタル床付近のグレーチングの崩落や堆積 物等の状況を確認した。これらを図 3.4-5 に比較して示す。PIP ケーブル等欠損部の真下にあた る部位を図 3.4-5 では黄色い四角で表示している。作業ステージと中間架台では PIP ケーブル 等欠損部位の真下のグレーチングが崩落しているが、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。また中間架台の西側部分(図 3.4-5 の中央の図)のグレーチン グが崩落しているのに対して、その真上のプラットフォームのグレーチングは健全で残ってい る。なお、図 3.4-4 の左下の写真から、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が確認できる。このことは、RPV から放出され た炉心物質は流下時にある程度の粘性を有し、水のような低粘性の液状のものではなかったこ とをうかがわせる。



図 3.4-5 1F2 号機の内部調査結果における堆積物やグレーチング欠損部の高さ方向の特徴

(2) 考えられる 3 つの RPV バウンダリ破損モード

以上の状況を総合し、図 3.4-6 に示す 3 つの RPV バウンダリ破損モードを想定した。破損モ ード I は下部プレナム堆積デブリが固相の粒子状酸化物からなり、その隙間を溶融金属が満た す状況になり、溶融金属の対流伝熱で RPV 側部に高い伝熱をもたらす結果として生じる早期の 破損モードである。1F2 号機では炉心部での燃料溶融が比較的少なかったと考えられ[16]、下部 プレナム移行後も冷却効果が大きかったと考えられる[17]ことから、燃料の多くが粒子状で RPV 底部に残っていた可能性が考えられる。

一方、RPV を貫通する形で設置されている多数の CRD はスタブチューブと呼ばれる RPV/CRD 接合のための構造を有しており、Ni 等を含むいくつかの異材とこれらの溶接部が含 まれる。このような部分は RPV の厚肉部分よりも先行的に溶融しやすいと考えられ、CRD 貫 通部を通じた溶融金属の流出が考えられる。このような溶融金属による多くの CRD 貫通部の破 損を破損モードIIとする。プラント内部調査等で確認されている RPV の多くの部位から雨のよ うに降り注ぐ冷却水は、このようなモードによる破損部から流下している可能性がある。

さらに、PIP ケーブル等の欠損部位からの流出物については、生コン程度の粘性を持ち、各高 さ部分でのグレーチングを水平方向に広がりつつ、下段へと落下していった可能性が考えられ る。水平方向への広がりは、流下物がグレーチングを構成するスティール融点を大きく超える 温度条件にはない場合に考えられる。そして、CRD 下端部での流出状況を考えると、やや大き な破損孔が RPV の底部付近で形成されている可能性があり、これを破損モードIIIとした。この 破損モードについては、前述の破損モードIIの一部が発展する形で生じている可能性がある。



図 3.4-6 3 つの RPV バウンダリ破損モードの推定

(3) 3 つの破損モードに係る研究の状況と得られている知見

本研究では、前述のように 3 つの破損モードの可能性を摘出したが、これらの各破損モード に係る研究の状況と得られている知見について以下に整理する。

破損モード I に関しては JAEA から早稲田大学への委託研究「RPV 下部構造破損・炉内物質 流出挙動の MPS 法による予測」として金属溶融と溶融金属の対流挙動に係る MPS 法による解 析評価[18]が行われている(図 3.4-7 参照)。この結果、対流の程度に不確かさが大きいものの、 溶融金属の対流によって、1F2 号機で観測された圧力データ等から推定される事故進展シナリ オ、タイミング及び本研究で推定する破損部位と整合する破損が予測されることが示されてい る。一方、JAEA がカールスルーエ工科大学に委託して実施している LIVE 実験では、固体粒子 と溶融金属をそれぞれ、粒径 2.5~2.8 mm のアルミナと 50 mol%KNO3-50 mol%NaNo3(融点 222 ℃)で模擬した 5 分の 1 体系実験が実施されている。この実験結果については分析が進め られているが、対流伝熱によって RPV 側壁過熱が顕著になることが報告されている。



破損モードⅡに関しては実機における RPV/CRD 接合部の材料・構造的な特徴を模擬した実験が JAEA の独自研究(本研究外)として実施されている(図 3.4-8 参照)。この実験はシリーズ実験として進行中であるが、CRD 貫通部分の溶融が RPV 壁本体よりも先行的に生じる傾向が把握されている。これにより、破損モードⅡが実際の 1F2 号機でも生じ得ることが示されつつある。



図 3.4-8 RPV バウンダリ破損モードIIに関連する研究の状況

破損モードIIIについては、JAEA が早稲田大学に委託して実施した MPS 法を活用した解析研究「RPV 下部構造破損・炉内物質流出挙動の MPS 法による予測」[18]が参考になる結果を提示した。この解析では CRD 貫通部分から溶融金属が流出し、RPV 内に粒子状の酸化物燃料が残留する状況を模擬されたが、燃料デブリの体積に対する表面積の割合が小さい RPV 底部付近バウンダリへの伝熱よりも大きいことが示された。このような燃料デブリのマクロな形状効果は RPV 底部付近の加熱を促進し得ると考えられ、破損モードIIIの可能性を支持する情報として特筆される。

以上のように破損モード I ~IIIに係る実験や解析研究は進行中であり、それぞれの破損モードの可能性を支持するような知見が得られつつあること確認した。

(4) 1F2 号機におけるデブリ流下履歴について

前述の(1)~(3)の情報や知見を踏まえ、現時点で推定される 1F2 号機のデブリ流下履歴について推定した。

図 3.4-9 に 1F2 号機の事故進展に係る推定を示す。1F2 号機では第2 RPV 圧力ピークと呼ば れる時間帯(平成 23 年 3 月 14 日 22:50~23:40)に炉心インベントリの半分程度の燃料が RPV 下部プレナムに落下したものと推定される [17]。1F2 号機ではその後も炉心燃料の崩落が継続 していたものと考えられ、15日02:00過ぎ頃に見られた RPV 圧力上昇は、大規模な炉心燃料 の下部プレナムへの崩落が生じたことを示唆している。ミュオン測定では RPV 底部から深さ約 1.5 m の領域に濃い影が映し出されている (図 3.4-3 参照)。仮にこの濃い影が燃料デブリを表 している場合、これは炉心インベントリの 100 %相当の燃料をポロシティ約 40 %で RPV 底部 を満たした条件に相当する。即ち、大部分の炉心燃料が粒子状の形状で下部プレナムに落下し、 RPV 内に堆積した状況が考えられる。なお、RPV 下部プレナムに燃料デブリが落下した時点で は CRD は健全であったと考えられるが、15 日 04:00 頃に下部プレナム内のデブリを覆う液相 水の喪失(ドライアウト)が生じたと考えられ、その後のデブリ昇温過程で CRD の一部は溶融 し、燃料デブリはそのスペースに入り込んでいた可能性が考えられる。そして、デブリの上部 付近が RPV 壁と接する領域は RPV を下方から支えるスカートと呼ばれる構造の内側部分に近 く、溶融金属プールが対流伝熱を生じた場合に高温が予想されるのはこの付近である。この部 分は CRD の存在する領域の外側にあり、ペデスタルに落下していた燃料集合体上部タイプレー トはこの部分の下方に位置している。



図 3.4-9 1F2 号機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

図 3.4-9 に示されるように、15 日 07:00 前後には RPV 下部プレナムには溶融金属プールが形 成されていたものと考えられ、炉心物質のペデスタル移行の観点からの最初の RPV バウンダリ 破損はこの頃に破損モードIの形で生じた可能性が高い。ただし、この破損によってペデスタル 方向へと流下する溶融金属はRPV 側部の破損部位の高さより高い部分に限られ、これより低い 部分の溶融金属は RPV 内にとどまっていたと考えられる。そして RPV バウンダリは初期破損 位置から RPV 底部にかけて、各位置が 1200~1300 ℃に昇温した時点で CRD 貫通部等から溶融 金属が流下していったものと考えられる。このような広範な領域からの溶融金属の流下が生じ ていた可能性が高いが、内部調査の結果ではこれに対応した流出物の痕跡を特定することがで きていない。これは、当該溶融金属が低粘性で固化し難かった場合には理解できる。このよう に、1F2 号機で予想される溶融金属の流下状況については漠然とした推定はできるものの、客 観的な根拠が不足している。従って、サンプル採取や試料分析等によって根拠を補強してゆく ことが喫緊の課題である。なお、3.4節に示す Feをベースとして Bを含有する物質の物性実験 の結果では、当該物質が低融点であるばかりでなく、融点直上で粘性が小さいこと(3.5.3 項参 照)、凝固熱(Bを含まないFeに比べて)が大きくなる(3.5.4項参照)等、固化し難い特徴を 有することが示されており、1F2 号機の内部調査の状況を理解する上で重要な材料科学的な知 見になっている。

一方、これまでの 1F2 号機における下部ヘッドでのデブリ挙動評価[19]に基づくと、RPV 底 部付近から流下した物質は単なる溶融金属ではなく、燃料の成分が相当含まれる「金属リッチ な燃料デブリ」が破損モードIIIの結果として流下している可能性がある(ただし、サンプル分 析等による裏付けが得られておらず、喫緊の課題である)。当該物質はその堆積状況(図 3.4-4) から生コン程度の中粘性の物質と推定されるが、その流下時間は比較的短く、またペデスタル 移行期の終盤に生じていたものと推定される。1F2 号機からの白煙の放出は 15 日 08:00 前後か ら確認されているが、ライブカメラの映像を分析した結果では 15 日 11:00 頃に顕著に増加して いた。崩壊熱を伴う「金属リッチな燃料デブリ」は、15 日 11:00 頃の顕著な白煙発生の時期に 比較的短時間でペデスタルに流下していた可能性がある。溶融金属に続いて金属リッチな燃料 デブリが流出することで、RPV内に残留していた粒子状の酸化物デブリとその隙間に、液相あ るいは気相の冷却材が浸入し易くなり、15日12:00~13:00頃の蒸気発生を経て15:00頃までに は再冠水されていたものと推定される。

3.4.2 1F3 号機におけるデブリ流下挙動に係る支配要因の評価

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。以下にその推定結果をまとめる。

(1) 下部プレナム移行デブリの伝熱に係る評価

JAEA の既往研究では 1F3 号機において観測された各部の圧力データをもとに、GOTHIC コ ードを用いて RPV 内での蒸気と水素の発生履歴が評価されている[20]。図 3.4-10 はこれにより 得た炉心エネルギー増加(炉心が空焚き状態になる前のエネルギーに対する増加)を図示した ものである。崩壊熱の想定に依存するが、デブリの下部プレナム移行後9時間程度に亘り PCV 圧力変化は緩慢であり、デブリ冷却は比較的安定であったと考えられる。このことは崩壊熱と デブリ冷却が平衡状態にあったことを示唆し、図 3.4-10 におけるエネルギー変化が小さくなる 条件が現実的と考えられる。このことから、下部プレナムに落下したデブリは冷却材温度程度 まで冷却されていた可能性が高いと推定した。



図 3.4-10 1F3 号機圧力データに基づくデブリ伝熱挙動の評価

(2) 1F3 号機におけるペデスタル移行物質の特徴

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(3.4.1 項)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。図 3.4-11 はこの結果を示したものである。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「先行溶融物」のようなものが、比較的早い段階で落下していた可能性が整理された。 また、1F2 号機の「生コン」のような中粘性でスティール融点以下と考えられる物質をここでは 「デブリのようなものその1」と呼ぶ。1F3 号機ではこのような形跡を直接に確認することはで きていないが、1F2 号機同様に落下している可能性は否定できない。一方、1F3 号機ではペデス タル移行物質の一部や RPV 下方の CRD に付着した高粘性と見られるものがあり、ここでは「デ ブリのようなものその2」と呼ぶ。この「デブリのようなものその2」は 1F2 号機では確認され ていない。

このような「先行溶融物」は前述の破損モード I や II (3.4.1(2)参照)によって RPV 内から流 出し、RPV バウンダリやその下方の各種構造材等と反応しつつ、ペデスタルに至っている可能 性がある。一方、デブリのようなものその1と同その2については破損モードIII(3.4.1(2)参照) に対応している可能性が高い。

2号機	「先行流出物」 のようなもの	「デブリ」 のような もの その1	『「デブリ」のよう なものその2』は見 られない			
3号機	「先行流出物」のよう なもの(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』 は不在?	「デブリ」のようなもの その2			
粘性	低	中(生コンのイメージ)	高			
温度	スティール融点	スティール融点以上				
スティール融点以下の流出物における Bの寄与とその物性への影響の可能性			<mark>3号機特有の高粘性</mark> デブリの可能性			
2号機では主に、流動性の高い金属リッチなデブリ流出の可能性						

オリジナル写真出典:東京電力ホールディングス

(3) 1F3 号機におけるデブリ流下履歴の評価

図 3.4-12 は 1F2・3 号機の燃料エンタルピーの差及び上述のペデスタル移行物質の整理結果 も踏まえて検討した、デブリ流下履歴の予測結果である。14 日 03:00 頃から水位計の指示値が 変化しているが、この頃までに水位計の配管(A 系、B 系のそれぞれにレファレンスレグ配管、 リアクターレグ配管の2 つが存在)中の液相水は PCV 境界付近まで沸騰していた(ボイド化し ていた)ものと考えられ、水位計指示値の変化は炉心下部につながるリアクターレグ配管に溶 融金属が侵入して閉塞ができ、配管内の圧力がリファレンスレグ配管の圧力から大きくずれて いるためと考えられる。このことはこの時点までに炉心下部領域に溶融金属の一部が移行して いたことを示唆している。その後、14 日 05:30 頃までは PCV 圧力は緩慢に上昇しているが、 05:30 頃から 06:45 頃にかけて PCV 圧力が急激に上昇している。このことから、「デブリのよう なものその 2」は主に 14 日 05:30~06:45 頃の約 75 分間にペデスタルに移行し(但し、06:45 頃 以降もある程度継続していた可能性はある)、その温度は「先行流出物」よりも高温であったと

図 3.4-11 1F2・3 号機の内部調査結果に基づくペデスタル移行物質の整理

推定した。また、「デブリのようなものその2」は粘性が大きく、CRD 領域やプラットフォーム 等の構造を大規模に変形させて移動したと考えられる。なお、落下した制御棒ガイド管(CRGT) の一部には溶融したような痕跡が見られるものの、プラットフォーム等の構造材には溶融の痕 跡は殆ど見られず、デブリから構造材への伝熱が緩慢であったことを示唆している。これは当 該物質が酸化物を主体としたものであると理解しやすい。



図 3.4-12 1F3 号機におけるデブリ流下履歴の予測

(4) 1F3 号機におけるペデスタル移行デブリ伝熱挙動の評価

図 3.4-13 は 1F3 号機における燃料デブリのペデスタル移行から約 10 日間の圧力履歴とデー タ分析に基づくペデスタル移行デブリ伝熱挙動の予測[21]である。PCV 圧力変化から 1F3 号機 の「デブリのようなものその 2」がペデスタルに移行したのは主に 14 日 05:30 頃から 06:45 頃 にかけてであると推定したが、この段階ではペデスタル及び D/W 床上には液相水が存在し、ペ デスタル移行デブリとの接触で蒸気が発生し、ペデスタル移行デブリは床上の液相水(この時 点で深さは 40 cm 以下)のみでなく、ペデスタルで発生した蒸気によって冷却されていた可能 性がある。なお、この間、消防ポンプによる RPV への代替注水が継続されており、RPV 底部等 から蒸気あるいは液相水がペデスタル移行デブリの上方から下降していた可能性も否定できな い。何れにせよ、ペデスタルに移行していたデブリは蒸気によって冷却されていた可能性が高 いことは PCV 圧力の急上昇から推定でき、流下デブリの粘性を高める方向に作用していたもの と考えられる。

なお、14日11:00頃には一度ペデスタルデブリからの蒸気発生が低下して PCV 圧力が低下したのと考えられ、ペデスタルあるいは D/W の床上に存在していた液相水が枯渇したことが考

えられる。しかし、D/W 圧力低下は S/C との圧力差をもたらし、直ぐに S/C 水がベント管内を 通って D/W に吸い上げられ、ペデスタル移行デブリは短時間で再び液相水に接触することにな ったものと考えられる。このようなサイクルが少なくとも2回繰り返され、16日頃までの2日 間はデブリが蒸気に冷却された状態、または冠水した状態であったと考えられる。



図 3.4-13 デブリのペデスタル移行後長期に亘るデブリ伝熱挙動の予測

16日以降は代替注水流量が減少しており、図 3.4-14 に示すように、水素爆発のあった 14日 の午後以降ライブカメラによって観測されていた 1F3 号機からの白煙は、16日以降観測されな くなっている。代替注水は 20日頃から増加したが、これによってペデスタル移行デブリは液相 水に冷却されるようになり、その後は低温状態に保たれたものと考えられる。このように 16日 以降、数日間は注水がデブリに届かずに、デブリがドライな状態にあったと考えられるが、い わゆるコア・コンクリート反応(以下、「MCCI」と略す。)は、一般的には最も懸念されるデブ リのペデスタル移行後早期段階では蒸気冷却によって緩和されていたと考えられ、1F3 号機で は MCCI が顕著でなかった可能性を示している。



オリジナル写真出典:東京電力HD

3.4.3 まとめ

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、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。

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。即ち、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。これらの燃料デブ リは何れも、下部プレナムに液相冷却材がある場合は冷却され、低温を保っていた可能性が高 い。しかし下部プレナムの液相水が枯渇(ドライアウト)すると何れも除熱が低下し、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1200 ℃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される。この段階で RPV-CRD ハ ウジング構造システム領域を抜けてペデスタルに落下したのは溶融金属が主体の「先行流出物」 であったと推定される。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号機に共通と推定される(破損モードIとⅡ)。

その後、IF2 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(破損モードIII)。IF2 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。IF3 号機では「デブリのようなものその1」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、IF3 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 14 日 05:30 頃から 07:00 頃にかけてペデスタル領 域へと落下したものと推定される。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。

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。 3.5 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

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 と EDX によって観察し た。また、ボライドと燃料(UO₂、ZrO₂、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、ガス浮遊法を用いて Fe-B 共晶溶融物の粘性を評価した。

3.5.1 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

Fe (株式会社ニラコ、Grains、4N) と B (フルウチ化学株式会社、Chunk、3N)を出発物質と して、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 て作製した。また、UO₂粉末を焼結温度 1600 °C、焼結温度 12 h、昇降温 100 °C/h、Ar 雰囲気の 条件で焼結し、ペレットを作製した。

作製した UO₂ペレットと Fe_{0.84}B_{0.16}インゴットを BN 坩堝に入れ、Ar フロー雰囲気下で 1300 ℃ と 1400 ℃で 10 時間熱処理した。これらの温度は Fe_{0.84}B_{0.16}の共晶温度である 1177 ℃以上の温度であるため、熱処理中は Fe-B 共晶溶融物中に UO₂ が沈んだ状態となっていることが予想される。熱処理後の試料を切断し、断面を SEM/EDX によって分析した。

図 3.5-1 に、熱処理後に坩堝から取り出した試料外観と断面の写真を示す。試料下部に見える黒色の塊が UO₂ であり、狙い通り熱処理中は Fe-B 共晶溶融物中に UO₂ が沈んでいたと考えられる。



図 3.5-1 熱処理した試料

(a) 1300 ℃外観、(b) 1300 ℃断面、(c) 1400 ℃外観、(d) 1400 ℃断面

断面の UO₂ とマトリックス境界部分を SEM/EDX で観察した結果を図 3.5-2 と図 3.5-3 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。1300 ℃で熱処理した試料 と 1400 ℃で熱処理した試料の双方において 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を図 3.5-4 と図 3.5-5 に示す。線分析の結果からも、U と Fe の分布の境界は明瞭であることが分かる。すなわち、元素マッピングと線分析のいずれにお いても 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 UO₂ から Fe-B 溶融 相には U は殆ど溶けださないことを示唆している。



図 3.5-2 1300 ℃で熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング



図 3.5-3 1400 ℃で熱処理した試料断面の SEM 画像及び元素マッピング



図 3.5-4 1300 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果



図 3.5-5 1400 ℃で熱処理した試料断面の線分析結果

3.5.2 Fe-B 共晶合金の溶融挙動評価

Fe-B 共晶合金の流動挙動評価のため、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。図 3.5-6 に示すように縦に設置した管状炉内にサファイア板を設置し、Fe-B 共晶合金を サファイア板の上に置いて Ar 雰囲気下で昇温速度 150 ℃/h、最高温度 1200 ℃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。試料温度は試料付近に設置した熱電対で測定し、撮影は 30 秒間隔で行った。


実験には、Fe_{0.84}B_{0.16}インゴットを切断して得られた試料片を用いた。図 3.5-7 に実験前と実 験後の試料外観を示す。実験後の試料形状から、試料が実験中に溶融したことが分かる。また、 図 3.5-8 にカメラで撮影した 1198.9 ℃と 1200.4 ℃ (30 秒間隔)の時の試料の様子を示す。撮影 した画像から、試料は 1200 ℃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る。 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(1177 ℃)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。





図 3.5-7 試料外観 (a) 実験前、(b) 実験後



図 3.5-8 加熱時の試料の様子 (a) 1198.9 ℃、(b) 1200.4 ℃

3.5.3 Fe-B 共晶合金の粘性評価

浮遊法を用いた粘性評価の手法として、液滴振動法が一般的に用いられている。これは、液 滴に外力を与えて共振周波数で液滴を振動させ、振動の減衰挙動から減衰振動係数 τ を得て粘 性を評価する手法である。減衰振動係数 τ から、(3-5-1)式で表される Rayleigh の式より粘性 η を計算できる。

$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{5\tau} \tag{3-5-1}$$

ここで、 pは試料の密度、roは試料の半径である。

ガス浮遊法では、スピーカーを用いて液滴を振動させる手法が知られている。しかし、スピ ーカーを用いて共振振動を励起するためには共振周波数を探すのに数分間ほど必要であるため、

容易に酸化する金属試料の測定は困難である。そこで本研究では、ガス浮遊法をベースに大阪 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。液滴衝突反跳法の概略図を図 3.5-9 に示す。ガス浮遊法によって溶融させた液滴試料を落下させ、基板と衝突させる。衝突した試 料は反跳するが、その際に振動する。この振動の減衰をハイスピードカメラによって観察する ことで、粘性を評価するという手法である。短時間で測定が完了するため、酸化の影響を抑え ることが可能である。



図 3.5-9 液滴衝突反跳法の原理の模式図

紫外光をバックライトとして用い、ハイスピードカメラによって試料の影を録画することで 試料の減衰の情報を得る。試料の輪郭に対して楕円フィッティングを行い、試料の縦径及び横 径の長さを記録し、長さ変化の時間依存性をプロットすることで減衰振動の図が得られる。こ の減衰振動について、(3-5-2)式で表される関数でフィッティングすることで減衰振動係数 *c* を 求めることが出来る。

$$r = Aexp\left(-\frac{t}{\tau}\right)sin\{2\pi\nu_R(t-t_0)\} + r_{av}$$
(3-5-2)

ここで、rは試料の縦径または横径、tは時間、Aは初期の振幅、 v_R は共振周波数、 t_0 は振動の位相ずれ、 r_{av} は平均の試料径である。

図 3.5-10 に、Fe_{0.84}B_{0.16} 液滴が落下して反跳する様子を示す。このようにして得られた画像から評価した縦径と横径の時間変化と、(3.5-2)式でフィッティングした結果を図 3.5-11 及び図 3.5-12 に示す。縦方向は明確に振動が減衰しているのに対し、横方向の振動は明確な減衰が見られない。これは試料が僅かに回転しているためであると考えられる。試料が回転したとしても粘性の上限は縦方向の振動減衰から評価可能であり、その値は 45 ±4 mPa·s であった。また、放射温度計によって評価した試料温度は 1410 ℃であった。

以上、ボライドを含む高温融体として Fe_{0.84}B_{0.16}の 1400 ℃程度における粘性を大阪大学にお いてガス浮遊法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結果、 Fe_{0.84}B_{0.16}の粘性は 1683 K において 45±4 mPa·s 以下であることが明らかとなった。



図 3.5-10 Fe0.84B0.16 液滴の反跳の様子





3.5.4 Fe-B 共晶合金の比熱評価

比熱は溶融物の凝固挙動に影響を与える重要な物性であるものの、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。近年になって大阪大学グループではガス浮 遊させた液滴の比熱を評価する手法を開発したため、本研究ではこの手法を用いて Fe-B 共晶合 金の液相の比熱を評価した。図 3.5-13 の(a)に比熱評価に用いたガス浮遊ノズルを、(b)に断面の 概略図を示す。ガス浮遊する液滴からは、(3-5-3)式で表すように放射と浮遊ガスへの伝熱によ って熱が失われる。

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_{radiation} + \Delta Q_{forced\ convection}}{Cp} = \frac{S\varepsilon\sigma T^4 + Sh(T_{sample} - T_{gas})}{Cp}$$
(3-5-3)

ここで T は温度、t は時間、 $Q_{radiation} \ge Q_{forced convection}$ はそれぞれ放射と伝熱によって逃げる熱量、 Cp は定圧比熱、S は液滴の表面積、 ε は放射率、 σ はシュテファンボルツマン定数、 T_{sample} は試料温度、 T_{gas} はガス温度である。h は熱伝達率であり、ガスの種類(主に熱伝導率)によって変化する。(3-5-3)式の左辺は試料温度が時間によってどのように変化するか、すなわち冷却曲線を示している。この式の中で未知のパラメータは Cp と ε の2 つである。h はガスの種類で変化するので、浮遊用のガスを2 種類使用し、異なる冷却曲線を2 つ得ることができれば、未知のパラメータである Cp と ε を求めることができる。

*Cp*を求めるためには熱伝達率*h*を評価する必要がある。本研究では、ガス浮遊する液滴を図 3.5-13 の(c)のようにガス中を終端速度で落下する液滴と近似する。落下する液滴からの熱伝達 率*h_{R-M}*は、Ranz-Marshall equation により(3-5-4)式を用いて評価できる。ここで、*L*は試料の直径、 *k*はガスの熱伝導率、*Re*はレイノルズ数、*Pr*はプランドル数である。レイノルズ数*Re*は流体の 密度 ρ_f と粘性係数 μ_f 、相対速度*u*を用いて*Re* = $\rho_f uL/\mu_f$ で表せる。相対速度*u*として、(3-5-5)式 で表される終端速度*u_t*を用いる。近似によるずれを補正するための装置係数*A*を導入し、*h_{R-M}* を用いてガス浮遊した液滴から失われる熱を(3-5-6)式のように表す。装置定数は $\epsilon \geq C_p$ 既知の Ni のデータをもとに装置定数を決定した。Au、Cu、Pd、Pt、Fe の比熱の本手法による測定値と文 献値の誤差は概ね±10%以内である。

$$h_{R-M} = \frac{k}{L} (2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3})$$
(3-5-4)

$$u_t = \left\{ \frac{4}{3 \times 0.44} \frac{(\rho_s - \rho_f)g}{\rho_f} \right\}^{\frac{1}{2}} (500 < Re < 105)$$
(3-5-5)

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{S\varepsilon\sigma T^4 + A\cdot Sh_{R-M}(T_{sample} - T_{gas})}{Cp}$$
(3-5-6)



(a) ノズル外観、(b) 試料の概略図、(c) 終端速度で落下する液滴の概略図

本手法により、 $Fe_{0.84}B_{0.16}$ の液相の比熱を評価した。用いた浮遊ガスは Ar と Kr の 2 種類であ る。その結果を同手法による Fe の測定結果及び B の文献値[22]と併せて図 3.5-14 に示す。モル 比熱としては、 $Fe_{0.84}B_{0.16}$ の方が Fe よりも小さい値となった。Fe と B のモル比熱を直線で結ん だ線と比較すると、 $Fe_{0.84}B_{0.16}$ のモル比熱はこの直線よりも僅かに低い値となっている。これは 過剰比熱が負であることを示している。しかし、ここで用いた B の比熱は液相の B の比熱を 1448 K まで外挿したものであり、液相 B の比熱の精度のみならず外挿による不確実性があるた めに過剰比熱についての詳細な議論は難しいと考えられる。



3.5.5 Fe-B 共晶合金の凝固熱評価

比熱を評価する手法を応用すれば、凝固熱の評価も可能である。図 3.5-15 に示す通り、凝固 熱は過冷却領域とプラトー領域において液滴から失われた熱に相当する。過冷却領域とプラト ー領域において液滴から失われる熱を、比熱評価と同様の手法で評価すれば凝固熱が得られる。 本手法で評価した Feの凝固熱は 12.7±0.5 kJ/mol であり、文献値は 13.81 kJ/mol(CRC handbook) であるためやや過小評価するが、概ね一致する。そこで Fe0.84B0.16 について本手法での凝固熱の 評価を試みた。



図 3.5-15 凝固熱評価方法の概要

ガス浮遊させた Fe0.84B0.16 の組成の液滴試料について、図 3.5-16 に示すような冷却曲線を得た。この図より、過冷却領域とプラトー領域が確認できる。この領域における熱を評価し、凝固熱を算出した。3 回測定を繰り返し平均値と標準誤差を評価したところ、Fe0.84B0.16 の凝固熱は 14.0±0.5 kJ/mol となった。同手法で評価した Fe の凝固熱は Fe の凝固熱は 12.7±0.5 kJ/mol であることから、Fe に B が混合することによりモル当たりの凝固熱が上昇するという結果が得られた。



図 3.5-16 Fe_{0.84}B_{0.16}の冷却曲線

3.5.6 まとめ

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(UO2、ZrO2、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1200℃程度で溶融するため、1200℃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 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

得るかを評価した。また、ボライドと燃料 (UO₂、ZrO₂、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、ガス浮遊法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、UO₂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 1300 ℃と 1400 ℃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 は殆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 1400 ℃程度における粘性を、大阪大学においてガス浮遊法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。

3.6 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

本節では、1F3 号機ペデスタル堆積物分布を検討するために構築した解析体系と、推定される 実機デブリ流下履歴(第1.1節)を踏まえて実施した解析結果についてまとめる。先ず、1F3 号機 プラント内部調査や事故時プラントデータ等を踏まえ、解析に用いる体系及びデブリ移行履歴を 検討した。これらを用いて実施した解析結果を示す。

3.6.1 1F3 号機ペデスタル解析体系の構築

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ホールディング ス株式会社(以下、「東京電力」と略す。)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[23]を参考に解析体系を構築した。1F3 号機ペデスタル調査結果か ら構築された復元図を元にした構造物の状況推定を図 3.6-1 に示す。図中に指示した、CRD 交 換用レールは、公開されている情報からの理解として示した。また、中間作業架台フレームの 可能性及び CRD 交換機が埋もれている可能性は本研究で独自に推定したものである。これらの 理解及び推定は東京電力によるプラント内部調査報告[24]を元にしている。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による原子炉格納容器内部調査[25] を元に推定した。



東京電力ホールディングスによる復元図(https://photo.tepco.co.jp/date/2018/201804-j/180426-02j.html) を元にした推定(本研究)

図 3.6-1 1F3 号機ペデスタル調査結果から構築された復元図を元にした構造物の状況推定

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 3.6-2 に示す。 本研究では次項に示すように、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、図 3.6-1 中に見られる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。



図 3.6-2 1F3 号機ペデスタルデブリ移行解析の解析体系

3.6.2 1F3 号機事故進展における MPS 法の解析範囲とデブリ移行履歴(1) 解析対象範囲

先行研究によるプラントデータ分析によれば、1F3 号機の RPV 圧力、D/W 圧力、S/C 圧力の 推移等から RPV からペデスタルへの燃料デブリの移行は約 7 時間にわたって起こったと推定 されている[26]。図 3.6-3 に示すように、1F3 号機は自動減圧系が作動し、RPV 圧力が急減した 以降、RPV、D/W、S/C の圧力は主要なガスの流動に伴う圧力損失による差を除けば概ね同程度 の圧力で推移している。この間の事故進展は次のように推定されている[26]。3 月 13 日の昼過 ぎの圧力ピークは炉心部から RPV 下部プレナム水への主要な炉心物質の移行に伴う蒸気発生 がもたらしたものと考えられている。また、その後に RPV、D/W、S/C の圧力がいずれもほぼ 一定に保たれた後に減少に転じたのは、その頃に RPV 内の液相水がほぼ沸騰や蒸発で失われた ことを示していると考えられている。その後、3 月 14 日の午前 0 時頃からの緩やかな圧力上昇 は、RPV が破損し、炉心物質が RPV から流出してペデスタル床の水中に移行したことで発生し た蒸気によるものと考えられている。その後、圧力上昇は約 7 時間継続するが、最後の約 75 分 間で圧力上昇率が増大していることが分かる。本研究では、第 1.1 節でも示したように、この約 75 分間(約 4500 秒間)に崩壊熱による発熱を伴う主要な酸化物燃料等の RPV からペデスタル への移行があったものと推定した。



図 3.6-3 1F3 号機プラント圧力 (RPV、D/W、S/C) 推移と主要なイベントの推定

図 3.6-3 に示した約 75 分間に RPV からペデスタルに移行した燃料デブリの総量と崩壊熱量 は次のように概算した。先ず、炉心部の燃料インベントリから推定される燃料デブリの総量及 びその平均密度は、先行研究の事故進展解析に用いられている情報[27]を参考に、195144 kg及 び 8930 kg/m³と推定した。ここで、金属デブリと酸化物デブリの体積比を先行研究の情報から 0.534:0.466 と仮定した。この場合、仮に燃料デブリの全量が炉心部から半径 2.7 m のペデスタ ルに移行したと仮定すると、燃料デブリの高さは約 0.95 m と推定できるが、プラント内部調査 では堆積物の最も高いところはペデスタル床から約 3 m の高さにあり、明らかに現実と異なる。 燃料デブリ移行期にはペデスタル床に約 0.4 m の水位があったと推定されており(第 1.1 節参 照)、金属溶融物は水中に落下すると、空孔率の高い粒子状デブリを形成することがあることは 知られているが、それだけでは 1F3 号機のペデスタルの現状を説明するのは困難であり、中間 作業架台を含む構造物群(移行、ペデスタル構造物群)に相当量の燃料デブリが堆積している と考えられる。

MPS 法による解析は実機 1/10 スケールで実施するため、燃料デブリ総量及びその崩壊熱は 195.14 kg 及び 8 kW になる。本研究では、その 80 %がペデスタルに移行し、残り 20 %は RPV 内部や、RPV から RPV 下部の CRD 構造物群に分布しているものと仮定した。また、ペデスタ ルに移行した燃料デブリのうち、図 3.6-3 に示した主要な燃料デブリ移行期間(約 75 分間)に 移行した燃料デブリは全以降燃料デブリの 70 %と仮定した。すなわち、燃料デブリ総量の 80 % ×70 % = 56 %の移行挙動を MPS 法による解析の対象とした。解析対象の燃料デブリは 109.28 kg (崩壊熱密度は 0.3661 MW/m³)。

(2) 解析に用いる燃料デブリ移行履歴

本研究では図 3.6-3 に示した主要な移行期(4500 秒間)について、以下の2通りの燃料デブリ移行履歴を検討した。

- 短期連続移行シナリオ:解析対象の燃料デブリの全量が短期間に連続的に RPV からペデ スタルに移行する大規模な燃料デブリ移行。
- ② 間欠移行シナリオ:解析対象の燃料デブリの全量が間欠的に RPV からペデスタルに移行 する小規模な燃料デブリ移行の繰り返しによる移行。

さらに、上記の移行シナリオ①、②それぞれについて移行フェーズと冷却フェーズに分けて計算効率の向上を図った。すなわち、燃料デブリの移行挙動に着目すれば、RPV から流下した燃

料デブリは(その後、CRD 構造物群等を流下し)、ペデスタル構造物群に到達すると、構造物と の伝熱及びペデスタル雰囲気中の蒸気との伝熱により冷却され、短時間で流動は停止すると考 えられる(移行フェーズ)。その後、後続の燃料デブリの移行に伴う伝熱や、自らの崩壊熱と冷 却の不均衡に伴う温度上昇があれば、再び流動することが考えられるが、それまでの間は静止 状態にあると考えられる(冷却フェーズ)。これらのフェーズのうち、移行フェーズでは溶融物 の流動を解く必要があるため、十分に小さい計算時間幅(例:10⁴s)を用いる必要がある。し かし、冷却フェーズでは流動を解く必要はなく、粒子の座標は固定して伝熱のみを解けば良い と考えられる。その場合、伝熱に伴う温度変化の時間スケールは流動の時間スケールに比べ遥 かに大きい(例えば1000 倍程度に大きな計算時間幅を用いても十分な温度計算ができる)。

以上のような考え方に基づき、本研究では短期連続移行シナリオ、間欠移行シナリオそれぞ れについて、移行フェーズ時間を移行フェーズと冷却フェーズを合わせた時間の1%として解 析した。それぞれのシナリオと移行フェーズ及び冷却フェーズの関係を図3.6-4 に示す。いず れのシナリオにおいても解析時間は4500秒間(75分間)である。短期連続移行シナリオでは、 全解析時間の1%に相当する最初の45秒間に燃料デブリが移行し、それ以降は冷却フェーズで あったと仮定した。一方、間欠移行シナリオは、間欠サイクルの長さを500秒、250秒、125秒 の3パターンについて検討した。各間欠サイクルでは、デブリ移行時間は間欠サイクル長の1% とした。間欠サイクルが短くなるほど、一度に移行する燃料デブリの量は少なくなるため、実 効的に燃料デブリは冷やされやすくなる。これらの異なるシナリオについて、解析を行った。

短期連続移行シナリオ



図 3.6-4 短期連続移行シナリオと間欠移行シナリオそれぞれの移行・冷却フェーズの概略

(3) 解析条件と解析ケース

実機デブリ流下履歴の同定(第1.1節)で示されているように、主要な燃料デブリの RPV からペデスタルへの移行期にはペデスタルに約0.4 mの水位があったと推定されており、先行移行物(主に金属)やその後の後続移行物(主に酸化物)がペデスタル床に移行することでペデスタルには多量の蒸気が供給され続け、その蒸気の自然対流により、RPV からペデスタルに移行する燃料デブリは冷却されながら流下したものと推定される。そこで、本研究の MPS 法の解析では、(3-6-1)式に示すようにニュートンの冷却則により燃料デブリの蒸気の自然対流による冷却を評価した。

$$q = hA_i(T_i - T_{\infty}) \tag{3-6-1}$$

ここで、hは熱伝達率、 T_i は粒子iの温度、 T_∞ は雰囲気温度、 A_i は粒子iの表面積であり、(3-6-2) 式で与えられる。

$$A_i = (1 - \frac{n_i}{n_0}) \cdot 6l_0^2 \tag{3-6-2}$$

ここで、 n_i は粒子iの粒子数密度、 n_0 は初期粒子数密度、 l_0 は粒子径を表す。

本研究では蒸気による自然対流冷却は蒸気の供給状況等により異なることを踏まえ、熱伝達率には 100 W/(m²·K)及び 10 W/(m²·K)の 2 通り(強い冷却ケース及び弱い冷却ケース)を想定した感度解析を実施した。尚、強い冷却ケースに用いた 100 W/(m²·K)は、水平平滑板の上面に接する層流(Nu 数~10、Ra 数 10⁶~10⁸)による冷却時の熱伝達率に相当し弱い冷却ケースに用いた 10 W/(m²·K)は典型的な自然対流による熱伝達率に相当する[28]。また、ペデスタル床上 0.4 m は主要な燃料デブリ移行期には高さ約 0.4 m ほど浸水していたという理解に基づき、水没する燃料デブリの急冷を模擬するために、高さ 0.4 m 以下に蒸気自然対流冷却に用いた熱伝達率の 10 倍の熱伝達率を適用した。

強い冷却ケース及び弱い冷却ケースそれぞれについて用いた熱伝達率の境界条件を図 3.6-5 に示す。強い冷却ケース及び弱い冷却ケースそれぞれについて、燃料デブリの移行フェーズと 冷却フェーズを考え、以下のようにそれぞれ自然対流冷却モデルの適用範囲を変更した。

- 移行フェーズ:燃料デブリの移行途中に強い冷却により、不自然に CRD 交換機上に燃料デブリが堆積することがないようにするため、自然対流冷却の適用範囲を中間作業架台レベル(0.215 m)以下にした。尚、本フェーズは解析時間の1%に限られた短い時間であり、燃料デブリ全体の熱バランスに与える影響は小さいと考えられる。
- 冷却フェーズ:CRD交換機上端以下の全ての自由表面粒子に自然対流蒸気冷却を適用した。



図 3.6-5 強い/弱い冷却ケースの熱伝達率境界条件

以上の境界条件で実機燃料デブリの流下・堆積挙動を解析するため、燃料デブリには模擬炉 心溶融物質の広がり挙動の実験(FARO L26S)に用いられた模擬炉心物質の物性[29]を用いた。 構造物にはステンレス鋼の物性を用いた。解析に用いた物性一覧を表 3.6-1 にまとめる。ここ で、燃料デブリの熱伝導率、固相線温度、液相線温度、液体の動粘性係数は本研究で独自に定 めた。これらのうち、固相線温度、液相線温度、液体の動粘性係数については高温ケースと低 温ケースの2通りの組み合わせを考えた。高温ケースは、初期温度が 2500 K の比較的に流動性 の高い固液混合状態の燃料デブリが流下するケースを想定しており、液体の動粘性係数は低く 設定した。一方、低温ケースは、初期温度が 2000 K の比較的に流動性の低い固液混合状態の燃 料デブリが流下するケースを想定しており、比較的に高い液体動粘性係数を設定した。

表 3.6-1 MPS 法による模擬デブリ堆積挙動解析に用いた物性

物性	燃料デブリ(コリウム)	構造物
	[30]	(ステンレス鋼)
固体・液体の密度(kg/m ³)	8930	7800
固体/液体の比熱(J/kg/K)	364.08/481.31	500/436.7
潜熱(kJ/kg)	249.975	244.6
崩壊熱密度(W/m³)	0.391×10^{6}	0
固体・液体の熱伝導率(W/m/K)	<u>4.0</u>	25.0
固相線—液相線温度(K)	以下の2ケース	$1495 - 1505 \swarrow 0.005$
/液体の動粘性係数(Pa·s)		
高温ケース(初期デブリ温度 2500 K)	<u>2495 - 2505 / 0.005</u>	
低温ケース(初期デブリ温度 2000 K)	<u>1995 - 2005 / 0.5</u>	

<u>太字下線部</u>:本研究で独自に定めた物性

3.6.3 解析の着眼点と解析シナリオ

第1.1 節にも示したように、これまでの1F3 号機の事故時プラントデータ分析結果、ペデス タル構造物の理解、プラント内部調査の結果等から、1F3 号機ペデスタルの最大で高さ約3mに 達する堆積物はペデスタル構造物群が完全に損壊することなく部分的に残存して、燃料デブリ のペデスタル床への移行を妨げた結果もたらされたものと推定できる。このことは、第1.1 節 に示した高温融体物性評価により得られた材料科学的な知見からも裏付けることができた(Fe-B系は共晶温度の直上で流動性が高く、冷えにくい性質もあり、RPV 破損後は先行してペデス タル床の最深部まで流下した可能性が高い。このとき、U は Fe-B 溶融相にはほとんど溶け出さ ず、RPV 内にしばらく留まり、デブリ移行期の終盤にペデスタルに移行したと考えられる)。そ こで、第3.1 節に示したように MPS 法を改良し、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、その妥当性を第3.3 節に示した模擬デブリ流下実験の解析により示した(第 1.1 節)。本節では、これらの理解に基づき、改良 MPS 法を用いて1F3 号機ペデスタルへの燃料 デブリの移行・堆積挙動をメモリ共有型と分散型の並列計算を組み合わせた大規模並列計算に より解析した結果を示す。

解析の着眼点は主に以下とした。

- (a) 1F3 号機の中間作業架台等のペデスタル構造物群は燃料デブリの移行時に受ける熱負荷に 耐えて溶融せずに残存するか?
- (b) 1F3 号機の中間作業架台等のペデスタル構造物群が溶融せずに残存した場合、その上部に堆 積する燃料デブリの堆積分布は実機内部調査結果から伺える様子図 3.6-1 と整合するか?

これらに着目し、主要な燃料デブリの移行期(推定約75分間:図3.6-3)に、全燃料デブリの56%がペデスタルに移行したと仮定(炉心インベントリの80%がペデスタルに移行したと仮定(炉心インベントリの80%がペデスタルに移行したと 仮定し、そのうちの70%が主要な移行期のものだったと仮定)した。この75分間の間、燃料 デブリが短期連続的に移行したシナリオと間欠的に移行したシナリオについて感度解析を実施 した。このとき、一部のケースについては高温ケース(初期燃料デブリ温度が2500K)と低温 ケース(初期燃料デブリ温度が2000K)、強い冷却ケース(自然対流蒸気の熱伝達率:100W/m²/K)、 弱い冷却ケース(自然対流蒸気の熱伝達率:10W/m²/K)を検討した。以下に主要な解析結果と それらを元にした考察を示す。

3.6.4 短期連続移行シナリオ

(1) 高温ケース

高温ケース(初期燃料デブリ温度2500 K、液体の動粘性係数0.005 Pa·s) 且つ強い冷却ケース(自然対流蒸気熱伝達率100 W/m²/K)、の燃料デブリ移行・堆積挙動の移行フェーズの解析結果を先ず、移行フェーズについて図3.6-6 に示す。ここでは、代表的な様子として(a)燃料デブリがペデスタル構造物群上を広がる様子、(b)燃料デブリがペデスタル構造物群全体を覆う様子、(c)燃料デブリがケーブルトレイ近傍にまで流下した時点の様子、(d)燃料デブリ移行の完了時の様子を示した。構造物はほとんど溶け落ちず残存しており、燃料デブリを支えている様子が示された。また、この解析に用いたメモリ分散による計算領域の分割の様子を図3.6-7 に示す。メモリ分散による領域分割は、各領域に占める粒子の数が概ね均等になるように動的に変動している。

このときの燃料デブリ温度分布、構造物温度分布、燃料デブリ固相率分布の進展の様子をそれぞれ図 3.6-8、図 3.6-9、図 3.6-10 に示す。燃料デブリは初期温度(2500 K)で流下し、移行フェーズの 45 秒間はほとんど初期温度で体系全体に広がる様子が示された(図 3.6-8)。この間、中間作業架台等のペデスタル構造物群は燃料デブリの流下点近傍等で一部高温になったものの、全体的に溶融するほどの温度には達していない(図 3.6-9)。一方、半凝固状態で流下した燃料デブリの固相率は流下過程で固相率が上昇し、移行フェーズ終了時にはほとんどが固相率 0.5 を上回り、流動性がほぼ失われて凝固している様子が示された。



JAEA-Review 2021-034





図 3.6-10 燃料デブリ移行・堆積時デブリ固相率分布 (短期連続移行シナリオ、高温・強い冷却ケース、移行フェーズ)

次に、同ケースについて、その後の冷却フェーズにおける燃料デブリ温度分布及び構造物温 度分布の時間進展をそれぞれ図 3.6-11 及び図 3.6-12 に示す。燃料デブリは流下開始後 500 秒 頃までに急速に温度が低下している様子が示された(図 3.6-11)。また、この間、構造物温度は 約 170 秒頃に最も高くなるが、構造物全体に大きな溶融をもたらす前に温度は低下に転じ、燃 料デブリの堆積分布は移行フェーズ最終状態から変化せずそのままの分布が維持されることが 示された。





t = 1000 st = 1500 st = 2500 st = 4500 s図 3.6-11冷却フェーズの燃料デブリ移行・堆積時デブリ温度分布
(短期連続移行シナリオ、高温・強い冷却ケース)

JAEA-Review 2021-034



 t = 1500 s
 t = 2500 s
 t = 4500 s

 図 3.6-12
 冷却フェーズの燃料デブリ移行・堆積時構造物温度分布 (短期連続移行シナリオ、高温・強い冷却ケース)

本解析ケースで得られた燃料デブリと構造物の平均温度の時間進展(移行フェーズ~冷却フ ェーズ)を図 3.6-13 に示す。半凝固状態で流下した燃料デブリは移行フェーズ終了後、しばら くするとほぼ全量が凝固し、それ以降は急速に温度が低下している。一方、構造物の平均温度 は燃料デブリの凝固が完了する頃(約 174 秒)まで温度上昇が続いた後は、緩やかに温度低下 に転じている。構造物の平均温度は最高で 825 K であり、平均温度はステンレス鋼の融点(1500 K)に対して大きな余裕があり、構造物全体が大規模に溶融するような状況にはならなかったこ とが示された。このように、短期連続移行シナリオ、高温(初期燃料デブリ温度 2500 K、液体 の動粘性係数 0.005 Pa·s)、強い冷却ケース(熱伝達率 100 W/m²/K)、移行フェーズ)では、半 凝固状態で流下した燃料デブリは移行期中に体系全体に広がり、その一部はペデスタル床まで 流下しながらほぼ全量が凝固し、構造物全体が溶融するほどの高温になる前に、自然対流蒸気 伝熱により冷却され、事象は終息する結果が得られた。



図 3.6-13 燃料デブリ移行・堆積時平均温度推移 (短期連続移行シナリオ、高温・強い冷却ケース、移行フェーズ〜冷却フェーズ)

本解析ケースで得られた燃料デブリ移行期の終了時のデブリ分布を図 3.6-14 に示す。本ケースでは、燃料デブリの約 62%が中間作業架台レベル以下に流下し、約 38%は中間作業架台レベル以上に留まった。中間作業架台レベル以下に流下し、ケーブルトレイ近傍に到達した燃料デブリは全流下デブリ(全炉心インベントリの 56%相当)の約9%であった。一方、全流下デブリの約 53%は中間作業架台レベルとケーブルトレイの間に分布した。

この間の構造物の溶融は限定的であった。図 3.6-15 に構造物の溶融質量の時間進展を中間作 業架台レベル以上、ケーブルトレイ以下、それらの合計、及び解析体系中の全構造物の合計に ついて示す。構造物は燃料デブリの凝固が完了する約 173 秒頃まで溶融するが、それ以降は溶 融せず、溶融量の全量も約 6 kg と少ない(但し、本解析は実機 1/10 スケールである)。また、 溶融した構造物のほとんどは中間作業架台レベル以上またはケーブルトレイ以下に分布してい ることが示された。最終的に溶融した構造物は、図 3.6-16 に示すように全体の約 12%と限定的 であった。また、溶融した構造物のうち約 75%は中間作業架台レベル以上、約 22%はケーブル トレイ以下に分布していた。



図 3.6-14 燃料デブリ移行期最終デブリ分布 (短期連続移行シナリオ、高温・強い冷却ケース)







図 3.6-16 構造物の溶融割合と分布(短期連続移行シナリオ、高温・強い冷却ケース)

(2) 低温ケース

前述の高温ケースと同様な条件で、低温ケース(初期燃料デブリ温度2000K、液体の動粘性 係数0.5 Pa·s) 且つ強い冷却ケース(自然対流蒸気熱伝達率100W/m²/K)、の燃料デブリ移行・ 堆積挙動の移行フェーズの解析を実施した。移行フェーズの様子を図3.6-17に示す。高温ケー スの解析結果と同様に、代表的な様子として(a)燃料デブリがペデスタル構造物群上を広がる様 子、(b)燃料デブリがペデスタル構造物群全体を覆う様子、(c)燃料デブリがケーブルトレイ近傍 にまで流下した時点の様子、(d)燃料デブリ移行の完了時の様子を示した。高温ケース(図3.6-6) に比べ、初期燃料デブリの粘性が高いため流下点近傍を中心に堆積分布が高くなる傾向が示さ れた。



図 3.6-17 低温ケースの燃料デブリ移行・堆積挙動移動フェーズ (短期連続移行シナリオ、低温・強い冷却ケース)

本解析ケースで得られた燃料デブリと構造物の平均温度の時間進展(移行フェーズ~冷却フェーズ)を図 3.6-18 に示す。燃料デブリの初期温度が低いため、構造物の温度も高くならず、 ペデスタル構造物群のうち、溶融したのは全体のわずか 0.4%であった。

本解析ケースで得られた燃料デブリ移行期の終了時のデブリ分布を図 3.6-19 に示す。本ケースでは、燃料デブリの約 62%が中間作業架台レベル以下に流下し、約 43%は中間作業架台レベル以上に留まった。中間作業架台レベル以下に流下し、ケーブルトレイ近傍に到達した燃料デブリは全流下デブリ(全炉心インベントリの 56%相当)の約 10%であった。一方、全流下デブリの約 47%は中間作業架台レベルとケーブルトレイの間に分布した。これらの全体的な分布は

前述の高温ケースと同様であった。一方で、低温ケース(図 3.6-19)は高温ケース(図 3.6-14) に比べて燃料デブリの初期粘性が高いため、流下点近傍の堆積が高くなり、堆積分布も全体的 に滑らかになる傾向が示された。



図 3.6-18 低温ケースの燃料デブリ移行・堆積時平均温度推移 (短期連続移行シナリオ、低温・強い冷却ケース、移行フェーズ〜冷却フェーズ)



図 3.6-19 低温ケースの燃料デブリ移行期最終デブリ分布 (短期連続移行シナリオ、低温・強い冷却ケース)

(3) 短期連続移行シナリオのまとめと考察

本解析シナリオでは、一度の移行フェーズに炉心インベントリの56%に相当する燃料デブリ が流下し、その半分以上が中間作業架台レベル以下に短時間で移行するため、燃料デブリから ペデスタル構造物群への伝熱が限定的となり、構造物群が大規模に溶融せずに残存し、その上 部に堆積した燃料デブリを支えることができたのではないかと考えられる。このような燃料デ ブリ分布は定性的にプラント内部調査から構築された 1F3 号機ペデスタルの現在の状況(図 3.6-1)とも一致しているように見える。このとき、高温ケースに比べ、低温ケースの方が燃料 デブリの初期粘性が高いため、堆積物分布が滑らかになる結果が示された。今後、1F3 号機内部 調査でペデスタル領域の堆積物分布の状況がさらに詳しく分かれば、デブリ流下時の性状推定 により、現在のデブリ深さ方向の性状の理解が深まると考えられる。

一方、RPV から酸化物燃料の放出が限定的であったと考えられる 1F2 号機ではペデスタルの プラットフォームのグレーチングの脱落等が確認されている。1F2 号機に比べ、1F3 号機は RPV からの酸化物燃料の放出量は大規模であったと考えられることから、仮にペデスタル構造物群 が大規模な溶融損壊を免れたとしても、熱的な負荷と機械的な荷重により、ペデスタル構造物 群が大規模に崩落している可能性も考えられる。仮にその場合は、本解析ケースの結果は、1F3 号機の内部調査結果とは整合しないことになる。

3.6.5 間欠移行シナリオ

(1) サイクル長 500 秒

燃料デブリ移行期(4500秒間)を500秒×9サイクルに分割した間欠移行シナリオの解析で は、初期燃料デブリ温度が高いケース(初期燃料デブリ温度2500K、液体の動粘性係数0.005 Pa·s)では、冷却の強さ(100W/m²/Kまたは10W/m²/K)に関わらず、早期にペデスタル構造 物群は大規模に溶融し、燃料デブリを支えることは困難であることが示された。例として、高 温ケース(初期燃料デブリ温度2500K、液体の動粘性係数0.005 Pa·s)且つ強い冷却ケース(自 然対流蒸気熱伝達率100W/m²/K)の1サイクル目の解析により得られた燃料デブリ温度分布及 び構造物温度分布の進展をそれぞれ図3.6-20及び図3.6-21に示す。本解析ケースの移行フェ ーズ(最初の5秒間)は第3.6.4項に示した短期連続移行シナリオの移行フェーズの最初の5秒 間と同じ解析である。その後、短期連続移行シナリオでは、デブリのペデスタル体系への流入 が継続し、デブリの流下が継続して計算されたのに対し、本解析ケースでは、5秒間の移行フェ ーズの終了と同時に全ての粒子の座標は固定され、その後の5~500秒間は伝熱のみが計算され た。その結果、短期連続移行シナリオではペデスタル構造物群上のデブリは十分に広がり、表 面積が大きいため、構造物が大規模に溶融するほどの高温になる前に、デブリが蒸気自然対流 冷却で冷えた。一方、本解析ケースでは、デブリが十分に広がらなかったため、デブリの表面 積が小さく、蒸気自然対流冷却でデブリが冷える前に構造物が大規模に溶融したと考えられる。



図 3.6-20 分割サイクルで解析した燃料デブリ移行・堆積時デブリ温度分布 (500 秒サイクル、高温・強い冷却ケース、1 サイクル目)



図 3.6-21 分割サイクルで解析した燃料デブリ移行・堆積時構造物温度分布 (500 秒サイクル、高温・強い冷却ケース、1 サイクル目)

以上のような特徴の結果、高温ケースではペデスタル構造物群は燃料デブリ移行期中に大規 模に溶融した。例として、高温(2500 K)で強い冷却(100 W/m²/K)であったケースと低温(2000 K)で弱い冷却(10 W/m²/K)であったケースそれぞれにおいてペデスタル構造物群が大規模に 溶融した直前の燃料デブリの堆積分布(side view)と大規模に溶融した直後のペデスタル構造 物群の様子(top view)を図 3.6-22 に示す。両ケースではペデスタル構造物群の損壊タイミング が異なり、ペデスタル体系に流下した燃料デブリの総量が異なるが、燃料デブリが低温で粘性 が高い場合、燃料デブリがペデスタル構造物群上に高く堆積し、表面からの蒸気自然対流冷却 では燃料デブリが効果的に冷却されず、やがてペデスタル構造物群が大規模に溶融崩落した。



一方、初期燃料デブリ温度が低いケース(初期燃料デブリ温度 2000 K、液体の動粘性係数 0.5 Pa·s) で且つ、強い冷却(100 W/m²/K)のケースでは、ペデスタル構造物群は大規模に溶融し ない結果が得られた。燃料デブリ移行期の終了時(4500 秒)における最終デブリ分布とそのと きのデブリ温度分布を図 3.6-23 に示す。初期燃料デブリ粘性が高いため、堆積分布は短期連続 移行シナリオの低温ケース(図 3.6-17)と同様な滑らかな分布になった。



サイクル長 500 秒 低温(2000 K, 0.5 Pa·s)・強い冷却(100 W/m²/K)ケース

(2) サイクル長 250 秒

燃料デブリ移行期(4500秒間)を250秒×18サイクルに分割した間欠移行シナリオの解析では、燃料デブリの初期温度(2500K、2000K)に関わらず、蒸気自然対流冷却が強い(100W/m²/K) 場合に、ペデスタル構造物群が燃料デブリ移行期の全期間(4500秒間)大規模に溶融損壊する ことはなかった(蒸気自然対流冷却が弱い(10W/m²/K)場合にはペデスタル構造物群は大規模 に溶融した)。これは、サイクル長が短くなると、一度の移行フェーズにペデスタル体系に流入 する燃料デブリの量が低下し、冷却フェーズ中に燃料デブリが効果的に冷えたためと考えられ る。

これらのケースについて最終的な燃料デブリ及び温度の分布を図 3.6-24 に示す。高温ケース (2500 K、0.005 Pa·s) は燃料デブリの粘性が低いため、短期連続移行シナリオ(第3.6.4 項) の解析結果と同様に、燃料デブリはペデスタル構造物群側面を伝って、ペデスタル床のケーブ ルトレイ付近にまで流下した。但し、短期連続移行シナリオでは一度に流下した燃料デブリを 250 秒間隔で18回に分けて流下させているため、相対的にペデスタル構造物群上に残る燃料デ ブリの割合が多くなった。一方、低温ケース(2000 K、0.5 Pa·s) は燃料デブリの粘性が高いた め、流下させた燃料デブリのほぼ全量がペデスタル構造物群上に堆積し、ペデスタル床には到 達しなかった。いずれのケースも燃料デブリの頂上部の高さは約0.38 m(実機の約3.8 mに相 当)と高く、実機プラント内部調査(堆積物の高さは2~3 m)からみられる様子(図3.6-1)と やや異なるように見える。但し、実機ではペデスタル構造物群が大規模な溶融損壊は免れたと しても機械的な荷重等で崩落している可能性があり、本解析ではそのような機械的な構造物の 崩落は考慮できていない。そのため、これらの結果を直ちに、プラント内部調査と整合してい ないとして考えられる可能性から排除することはできない。

図 3.6-23 燃料デブリ移行期最終デブリ分布 (間欠サイクル長 500 秒・低温・強い冷却ケース)



(3) サイクル長 125 秒

燃料デブリ移行期(4500秒間)を125秒×36サイクルに分割した間欠移行シナリオの解析では、上述のケースに比べ、一度の移行フェーズにペデスタル体系に流入する燃料デブリの量がさらに低下し、冷却フェーズ中の燃料デブリの冷却が促進されるため、より広いシナリオでペデスタル構造物群の大規模な溶融損壊が回避される結果となった。高温・強い冷却ケース、低温・強い冷却ケース、低温・強い冷却ケース、低温・弱い冷却ケースの燃料デブリ移行期最終デブリ分布を図3.6-25に示す。いずれのケースもほとんどの燃料デブリが中間作業架台上に堆積した。低温ケースでは、ペデスタル外周部の燃料デブリ堆積分布はほぼ一様になり、中間作業架台以下には全く流下しなかった。



図 3.6-25 燃料デブリ移行期最終デブリ分布(125秒サイクル)

一方、高温・弱い冷却ケース(初期燃料デブリ温度 2500 K、液体の動粘性係数 0.005 Pa·s、 蒸気自然対流熱伝達率 10 W/m²/K)では、間欠サイクル長が 500 秒のシナリオや 250 秒のシナ リオに比べてペデスタル構造物群の昇温速度は遅かったものの、最終的には図 3.6-26 に示すよ うに大規模な溶融損壊に至る結果となった。



図 3.6-26 ペデスタル構造物群の大規模溶融損壊時の様子(間欠サイクル長 125 秒)

3.6.6 まとめと考察

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。

表 3.6-2 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。本研究では、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。

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		r			
弱い冷却 10 W/m²/K	んど んど 流 で 読 に に に に た 続 発 生 の 説 明 が 困 難 。 建 発 生 の 説 明 が 。 朝 新 男 新 の の 、 通 新 の の の あ 、 の 。 一 、 一 、 の の 、 。 連 、 予 、 の の 、 一 、 の の 、 の 、 の 、 の の 、 の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の の 、 の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の 、 の 、 の の 、 の 、 の の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の の の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の の 、 の の の の の の の の の の の の の	未評価				
温度スケー	-ル(K) 425	5.1	2000 黒枠:	ペデスタル構造	5物群が大規模(こ溶融・指壊したケース

表 3.6-2 デブリ流下・堆積挙動解析結果のまとめと考察

3.7 1F3 号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価

事故後に 1F1 号機から 3 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年度~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 1F1 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(第 1.1節)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 とを目標としている。

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。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、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(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。

3.7.1 炉内燃料組成変化の概略評価

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[30]を実施した。核 データライブラリには JENDL-4.0[31]を用いた。評価対象とした 8×8BWR 燃料集合体の仕様及 び燃料組成変化を評価するために用いた解析条件を表 3.7-1 にまとめる。

燃料棒線出力密度 [kW/m]	17.1	
燃料棒ピッチ [mm]	16.30	
燃料棒外径 [mm]	12.3	
被覆管/被覆管肉厚 [mm]	ジルカロイ/0.86	
ペレット-被覆管直径ギャップ幅 [mm]	0.20	
ペレット外径 [mm]	10.40	
ペレット理論密度 [g/cm³]/理論密度比 [%TD]	10.96/97.0	
²³⁵ U 濃縮度 [wt%]	3.0 または 5.0	
水ロッド構造材/水ロッド外径・内径 [mm]	ジルカロイ/32.0・30.0	
水ロッド減速材温度 [K]/減速材密度 [g/cm³]	489/0.849	
燃料集合体間幅 [mm]/ギャップ幅 [mm]	152.4/8.46	
チャンネルボックス構造材/肉厚 [mm]	ジルカロイ/2.54	
冷却材温度 [K]/密度 [g/cm³]/ボイド率 [%]	524/0.800/40.0	

表 3.7-1 8×8BWR 燃料の仕様及び燃料組成解析条件

燃料集合体の構成を図 3.7-1 に示す。外径 12.3 mm の燃料棒が燃料棒間間隔(ピッチ) 16.3 mm で 8×8 格子に配列され、その周囲には密度 0.800 g/cm³の冷却水がボイド率 40.0%(すなわち、実行水密度は 0.32 g/cm³) で流れている。燃料集合体の中央部には中性子減速のための水ロッド(ジルカロイ製、外径 32.0 mm、内径 30.0 mm) が配置されており、その内部は 0.849 g/cm³の減速材(水)で満たされている。燃料集合体は 1 辺が 152.4 mm のチャンネルボックス(ジルカロイ製)に囲まれ、隣り合う燃料集合体間のギャップ 8.46 mm 中には冷却材(密度 0.849 g/cm³) が存在する。



図 3.7-1 評価対象の 8×8BWR 燃料集合体の構成

このような燃料集合体中の燃料組成の燃焼変化を概略評価するために、図 3.7-2 に示すよう な体系でセル燃焼計算を行った。ジルカロイ被覆管(肉厚 0.86 mm)が内包する燃料ペレットの 密度(97 %TD)は、ペレット-被覆管間直径ギャップ幅(0.20 mm)を考慮して、ギャップ幅相 当の体積がペレットで満たされたと仮定してその分、ペレット密度を低減(スミア)した。ま た、炉内には異なる濃縮度の燃料が存在することを考慮するために²³⁵U濃縮度は2ケース(3.0 wt%及び 5.0 wt%)について評価した。燃料棒周囲の冷却材には、燃料集合体の構成を考慮し、 燃料棒1本当たりの冷却材を配置した。このとき、水ロッド中の減速材、及び燃料集合体外側 の冷却材の水の寄与も考慮した。燃焼時の線出力密度は炉心の平均的な出力密度(17.1 kW/m)を想定した。セル燃焼計算の境界条件には完全反射境界を用いた。



水ロッド+集合体間ギャップ水: 1.3 mm

図 3.7-2 セル燃焼計算体系

一方、原子力規制庁事業[2]では、代表的な燃料燃焼度に対する実機燃料組成の推定結果が示 されている。そこで、本研究では以上のような手法と条件により得られる燃焼計算結果と原子 力規制庁事業により示された燃料組成を用いた燃焼計算結果を比較し、解析の妥当性を確認し た。主要な核分裂性核種である²³⁵U及び²³⁹Puの燃焼に伴う原子個数密度の推移をそれぞれ図 3.7-3及び図 3.7-4にそれぞれ示す。いずれも原子力規制庁による評価結果は本研究による評価 結果(²³⁵U濃縮度 3~5%)の範囲内であり、本研究で用いる燃焼計算による燃料組成評価の妥 当性を確認できた。



図 3.7-3 原子個数密度の燃焼推移 (²³⁵U)



3.7.2 中性子増倍率(臨界性)の評価

本項では、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(解析体系)と、 試解析結果についてまとめる。

先ず、第 3.7.1 項で確認した SRAC2006 の衝突確率法による燃料セル計算から得られる中性 子の無限増倍率を、参照解として汎用中性子輸送計算コード(MVP3)による解析結果から得ら れる無限増倍率と比較した。例として、原子力規制庁事業[2]で示されている燃料燃焼度 5.2 GWd/t の燃料組成を用いて、図 3.7-5 に示すような一次元均質燃料デブリ体系で中性子無限増 倍率を評価した結果を示す。減速材領域の幅をパラメータに、衝突確率法(SRAC2006)、中性 子輸送計算(MVP3)それぞれを用いて感度解析した結果を原子力規制庁事業により示されてい る結果と比較して図 3.7-6 に示す。いずれのケースも中性子無限増倍率が最大値(最適減速)と なるときの減速材厚さは良く一致しており、そのときの中性子無限増倍率のピーク値も良く一 致している。これらから、均質燃料デブリ系の中性子無限増倍率は妥当に評価できることが確 認できた。







次に、中性子拡散近似法により、ペデスタルを模擬した解析体系で有限体系の中性子漏洩と 非均質性を考慮した臨界性を評価した。このとき、実機燃料デブリは一様ではなく、燃料(UO₂)、 構造材(ジルカロイ、ステンレス鋼)、水等が非均質にコンクリート製の床・壁のペデスタル体 系に堆積していることを考慮するために、図 3.7-7 に示す体系で、それぞれのマクロ断面積を 作成した(燃料組成には原子力規制庁事業[2]で示されている燃焼度 25.8 GWd/t の組成を用い た)。なお、本研究では保守的に制御棒や燃料中に含まれる中性子吸収材(B₄C や Gd₂O₃)は考 慮しないこととした。燃料及び水、ジルカロイ、ステンレス鋼それぞれのマクロ断面積は図 3.7-7(a)に示すような一次元板状体系で、これらの構成物質が非均質に堆積している状態に対応 する中性子スペクトルを考慮した燃焼計算により作成した。また、体系外周部のコンクリート 床やコンクリート壁のマクロ断面積の作成には、図 3.7-7(b)に示すような一次元セル体系を用 いた。このとき、体系中のデブリは均質化し、コンクリート床・壁周辺部の中性子スペクトル を近似した。いずれの解析でも中性子エネルギー群は 107 群(熱:45 群、高速:62 群)から 16 群(熱:8 群、高速:8 群)に縮約した。

このようにして得られたマクロ断面積を図 3.7-8 に示す体系に配置し、16 群(熱:8 群、高 速:8 群)の中性子拡散近似法により、体系からの中性子の漏洩も考慮した中性子実効増倍率を 評価した。その結果、中性子実効増倍率は 0.537 と評価された。一方、中性子の拡散近似をせ ず、厳密に図 3.7-8 に示した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(MVP3 コード)の結果、中性子実効増倍率は 0.579 となった。これらの結果から、解析手法の違いによ る中性子実効増倍率の差は、燃料と水の体積割合等の燃料デブリ性状が中性子無限増倍率に及 ぼす影響(図 3.7-6)に比べて十分に小さいことが確認できた。但し、中性子拡散近似法を用い る場合に比べて中性子輸送計算の方がより複雑な燃料デブリ堆積分布を容易に評価できるため、 以降の評価には MVP3 コードを用いることとした。





図 3.7-8 マクロ断面積作成用燃焼計算体系

3.7.3 モンテカルロ法を用いた燃料デブリ臨界性の感度解析

3.7.2 項に示した 1F3 号機ペデスタル領域に成層化堆積した燃料デブリを模擬した解析体系と 同様な体系について、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 を用いて燃料デブリ臨界性の感度解析を実施した。燃料組成には原子力規制庁事業[2]で 示されている燃焼度 25.8 GWd/t の組成を用いた。

図 3.7-9 に厚さ 20 cm のコンクリート壁に囲まれたペデスタル領域に炉心部を構成する燃料 (UO₂)、ジルカロイ、ステンレス鋼が均質に混合した燃料デブリが堆積した場合の臨界性評価 体系を示す。燃料デブリの総量は炉心インベントリの 80%を仮定した。燃料デブリの空孔率ゼ ロと仮定し(燃料デブリ中への水の浸水はないと仮定し)、上部に水位 0~200 cm の水がある場 合について体系からの中性子の漏洩も考慮した中性子実効増倍率を評価した。その結果、水位 の増加(0 cm~100 cm)に応じて中性子実効増倍率は約 0.47~0.50 まで増大し、それ以上の水 位の増加は中性子実効増倍率に有意な変化をもたらさなかった。燃料デブリ上部の水位が臨界 性に及ぼす影響は限定的(約6%)であることが示された。

JAEA-Review 2021-034

250 cm	
水	0~200 cm
燃料,ジルカロイ,ステンレ (主にUO ₂)	ス 78.4 cm
コンクリート 厚さ 20 c	cm

図 3.7-9 燃料デブリ臨界性の感度解析体系(均質・塊状デブリ)

次に、燃料デブリが燃料(UO₂)、ジルカロイ、ステンレス鋼の層に完全に成層化した図 3.7-10 に示す体系について燃料デブリの臨界性を評価した。燃料デブリ上の水の水位は 100 cm とし た。密度は UO₂ が最も高く(約 11.0 g/cm³)、次いでステンレス鋼(約 7.8 g/cm³)、ジルカロイ (約 6.6 g/cm³)の順に密度が低い。一方、実機デブリ流下履歴(第 1.1 節)を踏まえると、初期 に金属溶融物が RPV から流出してペデスタルに堆積・凝固した後に UO₂ が堆積したと考えら れる。これらも踏まえ、本研究では図 3.7-10 に示すように下からステンレス鋼層、ジルカロイ 層、燃料層が空孔率ゼロで堆積して塊状の燃料デブリ層が堆積した場合について燃料デブリの 臨界性を評価した。その結果、中性子実効増倍率は約 0.58 であった。また、燃料デブリは UO₂ とジルカロイが均質に混合したものとし、ステンレス鋼のみが成層化分離した場合の中性子実 効増倍率は約 0.51 であった。従って、均質燃料デブリ、ステンレス鋼のみが分離・成層化した 燃料デブリ、UO₂、ジルカロイ、ステンレス鋼が全て分離・成層化した燃料デブリの中性子実効 増倍率はそれぞれ約 0.50、0.51、0.58 となり、炉心燃料物質から構造材が完全に分離・成層化す ることによる反応度の増加は約 16%となり、塊状デブリの上の水位が臨界性に及ぼす影響に比 べて影響が大きいことが確認できた。



図 3.7-10 燃料デブリ臨界性の感度解析体系(非均質・塊状デブリ)

最後に、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3.7-11に示すように粒子状のUO2が板状ステンレス鋼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(Vm/Vf)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、規制庁事業[2]ではVm/Vf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。解析の結果がVm/Vf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ステンレス鋼等の構造材は 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。なお、 V_m/V_f が 0.75 の場合についてステ ンレス層の厚さを 5.2 cm \sim 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 \sim 0.98 に微増し、ステンレス鋼による中性子反射効果が図 3.7-11 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 3.7-11 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)

3.7.4 まとめ

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規制庁事業による推定結果と概ね-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。
3.8 研究推進

研究代表者の下で各実施項目の担当者間の連携ならびにそれぞれの担当者と CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。 早稲田大学、大阪大学、CLADS の研究代表者間でメールや電話等で密に連絡を取り合いながら研究を進めた。また、適時打ち合わせを実施した(令和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)。

4. 結言

固液の移行及び界面の機構論的な追跡が可能な MPS 法、模擬デブリ流下実験、実機溶融デブリ 流下履歴の同定、高温融体物性データ整備から構成する Multi-Physics モデリングにより、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 2 年目である 令和 2 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。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 法の妥当性を確認 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、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。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時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。

(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。2 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。

(4) 浮遊法による高温融体物性評価(再委託先:大阪大学)

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 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、 $UO_2 ペレットと Fe_{0.84}B_{0.16}$ インゴットを Ar フロー雰囲気下で 1300 ℃と 1400 ℃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 は殆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 1400 ℃程度における粘性を、大阪大学においてガス浮遊法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。

(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。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損壊させずに堆積する条件を示した。

(6) 1F3 号機ペデスタル成層化デブリ臨界性評価

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 により、8×8BWR 燃料の運転中の炉内燃料組成変化を概略考慮し、燃料組成の評価結果は規制庁 事業による推定結果と概ね一致することを確認した。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することを確認した。

(7) 研究代表者及び参加機関との連携による研究推進

研究代表者の下で上記(1)から(6)を実施する担当者間の連携ならびにそれぞれの担当者と CLADS等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会 議等を開催した。早稲田大学、大阪大学、CLADSの研究代表者間でメールや電話等で密に連絡を 取り合いながら研究を進めた。また、適時打ち合わせを実施した(令和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)。 参考文献

- [1] 一般財団法人エネルギー総合研究所,平成29年度成果報告「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, 59p., https://irid.or.jp/_pdf/20170000_
 01.pdf (Accessed: 2020年8月7日).
- [2] 国立研究開発法人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」,2018,616 p.
- [3] 学校法人早稲田大学,文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業,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, 83p.
- [4] Chen, X., Sun, Z., Liu, L., Xi, G., Improved MPS Method with Variable-Size Particles, Int. J. Numer. Meth. Fluids., vol. 80, no. 6, 2016, pp. 358-374.
- [5] Tang, Z., Wan, D., Chen, G., Xiao, Q., 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] Shibata, K., Koshizuka, S, Masaie, I., Cost Reduction of Particle Simulations by an Ellipsoidal Particle Model, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering., vol. 307, 2016, pp. 411-450.
- [7] Koshizuka, S., Oka, Y., Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nuclear Science Engineering, vol. 123, no. 3, 1996, pp. 421-434.
- [8] Yamaji, A., and Li, X., Development of MPS Method for Analyzing Melt Spreading Behavior and MCCI in Severe Accidents, Journal of Physics Conference Series 739, 012002, 2016, doi:10.1088/1742-6596/739/1/012002.
- [9] Duan, G., Koshizuka, S., Yamaji, A., Chen, B., Li, X., Tamai, T., 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] Kondo., M., Koshizuka, S., Suzuku, K., Takimoto, M., Surface Tension Model Using Inter-Particle Force in Particle Method, ASME/JSME 5th Joint Fluids Engineering Conference, 2007, pp. 93-98.
- [11] Zhu, Y., Qiu, Z., Xiong, J., Yang, Y., Verification and Validation of MPS Potential Force Interface Tension Model for Stratification Simulation, Annals of Nuclear Energy, vol. 148, no. 1, 2020, 107753p.
- [12] Ramacciotti, M., Journeau, C., Sudreau, F., Cognet, G., Viscosity Models for Corium Melts, Nuclear Engineering and Design, vol. 204, no. 1-3, 2001, pp. 377-389.
- [13] Momentive Performance Materials Inc., Data Sheets, TSF451 series, 2007.
- [14] 東京電力ホールディングス株式会社,燃料デブリ取り出し準備スケジュール(2018/4/26現在), https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/2018/images1/d180426_08-j.pdf (Accessed: 2019 年11月5日).
- [15] 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号機ミュオン測定による炉内燃料デブリ位置把握について,https://photo.tepco.co.jp/library/160728_01/160728_01.pdf,2016年7月28日(Accessed: 2019年11月5日).
- [16] 佐藤一憲他,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.
- [17] Madokoro, H., Sato, I., 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, 11123 p.
- [18] 吉川信治,山路哲史, RPV 下部構造破損・炉内物質流出挙動の MPS 法による予測(委託研究), JAEA-Research 2021-006, 2021, 52p.

- [19] Yamashita, T, et al., Comprehensive Analysis and Evaluation of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2, Nuclear Technology, vol. 206, no. 10, 2020, pp. 1517-1537.
- [20] Sato, I, et al., Evaluation of Core Material Energy Change During the In-Vessel Phase of Fukushima Daiichi Unit 3 Based on Observed Pressure Data Utilizing GOTHIC Code Analysis, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 58, no. 4, 2021, pp. 434-460.
- [21] Sato, I, et al., Estimation of Long-Term Ex-Vessel Debris Cooling by Water in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit-3, ICONE-28 (online), August 4-6, 2021.
- [22] Chase, M. W., Davies, C. A., Downey, J. R., Frurip, D, J. McDonald, R. A., Syverud, A. N., JANAF Thermochemical Tables, 3rd Ed, J. Phys Chem. Ref. Data 14:177, 1985.
- [23] 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://www.tepco.co.jp/en/news/library/archive-e.html?video uuid=j0xqy3zf&catid=61785, 2018 年 4 月 26 日 (Accessed : 2021 年 3 月 13 日).
- [24] 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: 2017年11月30日).
- [25] 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, https://www.nsr.go.jp/data/000194291.pdf, 2017 年 6 月 28 日, (Accessed: 2021 年 3 月 13 日).
- [26] Sato, I., An Interpretation of Fukushima-Daiichi Unit 3 Plant Data Covering the Two-week Accident-Progression Phase Based on Correction for Pressure Data, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 56, no. 5, 2019, pp. 394-411.
- [27] Li, X., Sato, I., Yamaji, A., Sensitivity Analysis of In-Vessel Accident Progression Behavior in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 3, Annals of Nuclear Energy, vol. 133, 2019, pp. 21-34.
- [28] Kitamura, K., Kimura, F., Heat Transfer and Fluid Flow of Natural Convection Adjacent to Upwardfacing Horizontal Plates, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 38, no. 17, 1995, pp. 3149-3159.
- [29] Tromm, W., Foit, J. J., Magallon, W., Dry and Wet Spreading Experiments with Prototypic Material at the FARO Facility and Theoretical Analysis., Proc.of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, November 15-18, 1999 Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6475, 2000.
- [30] Okamura, K., Kugo, T., Kaneko, K., Tsuchihashi, K., SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System, JAEA: Ibaraki, Japan, 2007, pp. 1-313.
- [31] Shibata, K., Iwamoto, O., Nakagawa, T., et al., JENDL-4.0: a New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl. Sci., Technol., vol. 48, no. 1, 2011, pp. 1-30.

This is a blank page.