

ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた 構成材料の物理・化学的変質に関する研究 (委託研究)

—令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Pilot Study on Thermal, Physico-chemical, and Mechanical Behavior
of Concrete to Understand the Failure Behavior
of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Reactor Pressure Vessel Pedestals
(Contract Research)

– FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project –

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター
東海国立大学機構

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Tokai National Higher Education and Research System

JAEA-Review

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。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
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（<https://www.jaea.go.jp>）
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 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
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
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
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 Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の
物理・化学的変質に関する研究
(委託研究)

—令和 5 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 福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター

東海国立大学機構

(2025 年 6 月 17 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 5 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 (1F) 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、令和 5 年度に採択された研究課題のうち、「ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究」の令和 5 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、1F1 号機原子炉格納容器 (PCV) の内部調査で観測されたペデスタル鉄筋コンクリート部材において、鉄筋を残したままコンクリートだけ崩落するという、1 号機固有の損傷状態に着目し、発生メカニズムを調査・検証を実施した。

コンクリート固有の要因の調査・検証では、(1) 高温による短期の溶解メカニズムの調査として、高温時の溶融実験でのデータ取得方法を検討し、溶解現象の有無を判断する解析フレームワークの構築及び剛体バネモデル解析において、加熱による体積変化を組み込む数値解析手法の構築を実施した。また、(2) 温度履歴による長期の溶解メカニズムとして、実際のペデスタル部の温度・注水履歴の整理を実施し、実験時のコンクリートの曝露条件の決定及び材料選定や膨張量の測定手法の確立を行った。さらに、高温加熱後の水分供給による膨張現象の既往知見を整理した。

次に、特殊な外部環境要因の調査・検証では、(1) 燃料デブリの伝熱解析によるコンクリート熱条件の評価として、事故時の 1 号機 PCV コンクリートの熱条件を評価するための伝熱予備解析を実施した。また、(2) コンクリート破損に関わる特殊な外部環境要因に対する要素挙動試験と総合試験として、コンクリート材の水蒸気雰囲気での高温保持小規模試験の予備試験と金属デブリとコンクリートの反応挙動に関する反応予備試験を実施した。さらに、ウラン酸化物の酸素量に着眼した試験に供するウラン含有亜酸化物を作製した。

本研究では、これらの調査・検証により 1F1 号機固有のコンクリート損傷の発生メカニズムに関わる総合的な知見を蓄積した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東海国立大学機構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

Pilot Study on Thermal, Physico-chemical, and Mechanical Behavior of Concrete to Understand the Failure Behavior of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Reactor Pressure Vessel Pedestals
(Contract Research)

— FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

Tokai National Higher Education and Research System

(Received June 17, 2025)

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 FY2023.

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 FY2023, this report summarizes the research results of the “Pilot study on thermal, physico-chemical, and mechanical behavior of concrete to understand the failure behavior of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station reactor pressure vessel pedestals” conducted in FY2023.

The present study aims to examine the mechanism of the collapse of only concrete with rebar remaining in the pedestal in the containment vessel (PCV) of 1F.

In verifying concrete-specific factors, (1) to clarify the short-term dissolution mechanism by high temperature, we investigated data acquisition methods in melting experiments, established an analytical framework for determining dissolution, and developed a numerical analysis method for volume change by heating. Additionally, (2) to clarify long-term dissolution mechanism by temperature history, we organized the temperature and water injection history, determined concrete exposure conditions during experiments, and established a method for selecting materials and measuring expansion. Furthermore, we summarized existing knowledge of the expansion phenomenon caused by water supply after high temperature heating.

In the verification of special external environmental factors, (1) to evaluate thermal conditions of PCV concrete during an accident, a preliminary heat transfer analysis of fuel debris was conducted. In addition, (2) as elemental behavior tests and comprehensive tests, a preliminary high temperature storage test on concrete materials in a water vapor atmosphere and a preliminary reaction test on the reaction behavior of metal debris and concrete were conducted. Furthermore, uranium-containing suboxides were prepared.

This study provided comprehensive insight into the mechanism of concrete failure in 1F Unit 1.

Keywords: Nuclear Power Station, Concrete, High Temperature Heating, Thermal History

This work was performed by Tokai National Higher Education and Research System 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
5. 令和 3 年度 採択課題	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
7. 令和 5 年度 採択課題	14
付録 成果報告書	17

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018	2
3. Accepted Proposal in FY2019	5
4. Accepted Proposal in FY2020	8
5. Accepted Proposal in FY2021	10
6. Accepted Proposal in FY2022	12
7. Accepted Proposal in FY2023	14
Appendix Result Report	17

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。

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）

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バイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壤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	山崎 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	齊藤 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	渡邊 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 肇	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 2 課題、日露 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
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (～R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1～)	産業技術総合研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立 G E ニュークリア・エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (～R3. 3. 31) 岡山大学 (R3. 4. 1～)

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (～R2. 3. 31) 竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塙原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

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）
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英）

令和 2 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 (～R4. 7. 31) 村上 健太 (R4. 8. 1～)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー 加速器研究 機構
$\alpha / \beta / \gamma$ 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	渡邊 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
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畠 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

5. 令和 3 年度 採択課題

令和 3 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

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

課題数：12 課題

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

令和 3 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太朗	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学 研究機構

課題名	研究代表者	所属機関
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (～R4. 1. 31) 三輪 修一郎 (R4. 2. 1～)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	淺間 一	東京大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

6. 令和4年度 採択課題

令和4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4年3月1日～令和4年5月6日（課題解決型）

令和4年4月7日～令和4年6月16日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8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）

令和4年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学 (～R5.3.31) 理化学研究所 (R5.4.1～)
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッセンジ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学
無線UWBとカメラ画像分析を組合せたリアルタイム3D位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

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
耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発	渡邊 実	岡山大学
マイクロ・ナノテクノロジーを利用したアルファ微粒子の溶解・凝集分散に及ぼすナノ界面現象の探求	塚原 剛彦	東京工業大学

7. 令和 5 年度 採択課題

令和 5 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 5 年 3 月 1 日～令和 5 年 4 月 14 日（課題解決型）

令和 5 年 4 月 12 日～令和 5 年 6 月 15 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

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）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和 5 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特微量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学

課題名	研究代表者	所属機関
高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

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
革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化への挑戦と LIBS による検証	牟田 浩明	大阪大学
燃料デブリ除去に向けた様々な特性をもつメタカオリインベースのジオポリマーの設計と特性評価	Yogarajah Elakneswaran	北海道大学

本報告書は、以下の課題の令和5年度分の研究成果について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
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	東海国立大学機構 (名古屋大学)

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 5 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

ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に
向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究

(契約番号 R05I105)

成果報告書

令和 6 年 3 月

国立大学法人東海国立大学機構

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、国立大学法人東海国立大学機構が実施した「ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究」の令和5年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	vii
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 実施体制	2-2
2.3 令和 5 年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-3
3. 令和 5 年度の実施内容及び成果	3-1
3.1 コンクリート固有の要因	3-1
3.1.1 高温による短期の溶解メカニズム（再委託先：東京大学、東北大学）	3-1
3.1.2 温度履歴による長期の溶解メカニズム	3-15
3.2 特殊な外部環境要因	3-21
3.2.1 燃料デブリの伝熱解析によるコンクリート熱条件の評価（連携先：原子力機構）	3-21
3.2.2 コンクリート破損に関わる特殊な外部環境要因に対する要素挙動試験と総合試験 (連携先：原子力機構)	3-27
3.3 総合評価	3-43
3.4 研究推進	3-43
4. 結言	4-1
4.1 まとめ・今後の検討課題	4-1
4.2 令和 6 年度以降の研究計画	4-3
参考文献	5-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人東海国立大学機構	准教授	五十嵐 豪
	准教授	三浦 泰人
	助教	Aili Abudushalamu

再委託先

国立大学法人東京大学	教授	丸山 一平
国立大学法人東北大学	准教授	宮本 慎太郎

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	グループリーダー	永江 勇二
	研究職	佐藤 拓未
	研究員	Li Xin
	主査	須藤 彩子

表一覧

表 3-1	主な水和物の分解温度と一般的な骨材鉱物の溶融温度	3-1
表 3-2	骨材の鉱物組成	3-3
表 3-3	超音波試験から算出した、剛性率、ポアソン比・ヤング率	3-5
表 3-4	流体の物性値：水、水蒸気	3-23
表 3-5	固体の物性値：デブリ、コンクリート、炭素鋼	3-24
表 3-6	本解析の初期条件	3-24
表 3-7	U-Zr-O アーク溶解組成及び重量	3-29
表 3-8	U-Zr-O 生成相及び平均組成	3-32
表 3-9	試験条件	3-38
表 3-10	情報交換	3-43
表 3-11	全体会合	3-43

図一覧

図 2-1	全体計画図	2-1
図 2-2	実施体制図	2-2
図 3-1	加熱実験中計測された質量変化とヒートフロー	3-2
図 3-2	加熱実験前後サンプル外観の比較	3-2
図 3-3	加熱中の膨張度の変化	3-4
図 3-4	加熱中の線膨張係数の変化	3-4
図 3-5	加熱中の X 線回折パターンの変化	3-6
図 3-6	500 °Cにおける CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 三成分系の状態図	3-7
図 3-7	1,000 °Cにおける CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 三成分系の状態図	3-8
図 3-8	1,500 °Cにおける CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 三成分系の状態図	3-8
図 3-9	ひび割れ進展解析のための参照試験片と境界条件	3-10
図 3-10	モルタルと HCP の熱変形の数値モデル	3-11
図 3-11	高温下におけるコンクリートの力学的挙動	3-12
図 3-12	高温下での過渡的な熱ひずみとひび割れの進展	3-13
図 3-13	加熱、乾燥、一軸圧縮試験における参照試験片のメッシュと境界条件	3-13
図 3-14	高温下でのひび割れ進展が圧縮挙動に与える影響	3-14
図 3-15	高温注水履歴	3-17
図 3-16	Case1-1000 °Cの浸漬後の試験体の様子	3-18
図 3-17	Case1-600 °Cの浸漬後の試験体の様子	3-18
図 3-18	Case2-1000 °Cの浸漬後の試験体の様子	3-19
図 3-19	Case2-600 °Cの浸漬後の試験体の様子	3-20
図 3-20	1号機 RPV、D/W、S/C の圧力履歴データ	3-21
図 3-21	解析ジオメトリー、ペーツ、領域と境界条件	3-22
図 3-22	温度分布変化	3-25
図 3-23	ペデスタル内気相温度履歴	3-25
図 3-24	デブリとコンクリートの温度等高線図	3-26
図 3-25	デブリからコンクリート・水蒸気への熱伝達率	3-26
図 3-26	U-Zr-0 状態図 (2,400 K)	3-28
図 3-27	アーク溶解炉外観写真及び ZrO ₂ -UO ₂ -ZrH ₂ 加熱前成形体の外観写真	3-29
図 3-28	アーク溶解後 U-Zr-0 外観写真 (ナンバー1~4)	3-29
図 3-29	U-Zr-0 断面金相写真及び元素分析領域	3-30
図 3-30	UZr0_1 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)	3-30
図 3-31	UZr0_2 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)	3-31
図 3-32	UZr0_3 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)	3-31
図 3-33	U-Zr-0 試料断面の X 線回折プロファイル	3-32
図 3-34	コンクリート・金属 Zr 反応試験 試料外観写真 (加熱前、加熱後及び切断後)	3-33
図 3-35	コンクリート・金属 Zr 反応試験 (1,500 K) 断面金相写真及び面分析領域	3-33
図 3-36	コンクリート・金属 Zr 反応試験 (1,500 K) 界面マッピング画像	3-34
図 3-37	コンクリート・金属 Zr 反応試験 (1,600 K) 断面金相写真及び元素分析領域	3-34
図 3-38	領域 concrete_1 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)	3-35
図 3-39	領域 concrete_2 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)	3-35
図 3-40	領域 concrete_3 及び concrete_4 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)	3-36
図 3-41	領域 concrete_5 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)	3-36
図 3-42	領域 concrete_6 の 2 次電子像及びマッピング画像	3-37
図 3-43	領域 concrete_7 の 2 次電子像 (金属 Zr)	3-37

図 3-44 金属 Zr/コンクリート反応試験 (1,600 K) 反応層イメージ図	3-37
図 3-45 試験体系模式図 (左) 及び MEISAN 試験装置 (右)	3-39
図 3-46 Zr-SUS304 の固/液相線図	3-39
図 3-47 Ar 雰囲気試験後の試験体外観	3-40
図 3-48 水蒸気雰囲気試験後の試験体外観	3-40
図 3-49 コンクリート単体試料断面の観察結果 (左) 光学顕微鏡 (右) BES 像	3-41
図 3-50 Ar 雰囲気、Zr リッチ金属デブリ反応試験試料の断面観察結果 (右上) 光学顕微鏡、(左上、左下、右下) BSE 像	3-42

略語一覧

CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (廃炉環境国際共同研究センター)
原子力機構	: Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
IRID	: International Research Institute for Nuclear Decommissioning (技術研究組合国際廃炉研究開発機構)
東京電力	: 東京電力ホールディングス株式会社
1F	: 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
名古屋大学	: 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学
東京大学	: 国立大学法人東京大学
東北大学	: 国立大学法人東北大学
OPC	: Ordinary Portland Cement (普通ポルトランドセメント)
FA	: Fly Ash (フライアッシュ)
FAC	: Fly Ash Cement (フライアッシュセメント)
C-A-S-H	: $x \text{CaO} - y \text{Al}_2\text{O}_3 - y' \text{SiO}_2 - z \text{H}_2\text{O}$ (アルミノケイ酸カルシウム水和物)
C-S-H	: $x \text{CaO} - y \text{SiO}_2 - z \text{H}_2\text{O}$ (ケイ酸カルシウム水和物)
RBSM	: Rigid-Body Spring Network Model (剛体バネモデル)
TNM	: Truss-Network Model (トラスネットワークモデル)
M	: mol/L
LOI	: Loss on Ignition (強熱減量)
PCV	: Primary Containment Vessel (原子炉格納容器)

概略

● 研究の背景及び解決すべき課題

東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所（以下、「1F」と略す。）1号機の原子炉格納容器（以下、「PCV」と略す。）の内部調査により、ペデスタル鉄筋コンクリート部材の鉄筋を残したままコンクリートだけが崩落した状態が観測されている。以下に、内部調査で観察されたコンクリート破損状態の特徴を列記すると、PCV 床/構造部上に、塊状・溶岩状の堆積物、ペデスタル開口部付近に、テーブル状の堆積物、それより下部ではコンクリートが消失し、内部の鉄筋やインナースカートが露出、PCV 底部の堆積物が上下の層を形成、上層：コンクリート表面に堆積物が存在、内部：コンクリート材が失われ鉄筋が残存、空洞状下層：堆積物が存在といった様相がみられる。

コンクリート破損については、高温の溶融炉心によりコンクリートが加熱され熱分解し溶融侵食される現象（溶融炉心-コンクリート相互作用：MCCI）が知られているが、1号機で観測された破損状態はそれとは一致しない様相を示している。このようなコンクリートのみが崩落するという破損挙動を理解することが、コンクリート構造物の健全性に資することができると言える。現状では、現場から得られる情報は限定的であり、文献調査によりコンクリート破損挙動シナリオの仮説を立てつつ、鉄筋コンクリートの受けたとみられる高温水蒸気や冷却過程での衝撃的な力によるスパール破壊、コンクリートに含まれるセメントや骨材の膨張、あるいは鉄筋の腐食膨張によるコンクリート基材のみの破壊などにおける要素挙動データを取得することで工学的にアプローチを進め、その結果や更新される公開の現場情報を考慮しつつ、コンクリートやモルタル、鉄筋を含む模擬部材による総合試験により、仮説の検証を実施することが求められる。

● 本研究の目的

本業務では、福島第一原子力発電所1号機PCVの内部調査により観測されたペデスタル鉄筋コンクリート部材の鉄筋を残したままコンクリートだけが崩落した状態が生じたメカニズムに関する検討を行うことを目的とする。

モルタルまたはコンクリートの溶融実験や鉄筋を含む模擬部材による要素挙動試験や、このようなコンクリート破壊様相を生じるかどうか小型模擬部材実験を行う。並行して、コンクリートの溶融侵食以外の現象による崩落の可能性について検討するために、ペデスタル部の鉄筋コンクリート部材が受けたと推定される領域の高温水蒸気-冷却履歴から推定される破壊メカニズムに基づいた要素挙動試験を行う。得られた文献調査や実験結果に基づき、高温水蒸気-冷却履歴やペデスタル部のコンクリート破壊メカニズムについて仮説を導き、検証を進める。

(1) コンクリート固有の要因

- ① 高温による短期の溶解メカニズム
- ② 温度履歴による長期の溶解メカニズム

(2) 特殊な外部環境要因

- ① 燃料デブリの伝熱解析によるコンクリート熱条件の評価
- ② コンクリート破損に関わる特殊な外部環境要因に対する要素挙動試験と総合試験

● 令和5年度の実施内容及び成果

(1) コンクリート固有の要因

① 高温による短期の溶解メカニズム

高経年化を模擬したセメントペースト及びコンクリート用骨材試験体の作製と高温時の溶融実験の条件設定についての予備実験を行い、加熱後の寸法変化、剛性変化、鉱物組成についてデータの取得方法を検討した。

熱力学的平衡計算を用いて溶液の組成を変化させた解析を行うとともに、セメント水和物の焼成実験を並行して行い、溶解現象の有無を判断するための解析フレームワークを構築した。

また、剛体バネモデル解析において加熱による体積変化を組み込む数値解析手法を構築した。

高温熱重量示差走査熱量測定による溶融挙動の取得や、寸法変化については、熱機械分析装置、剛性変化については、超音波伝搬速度測定装置、鉱物組成については、粉末X線回折を用いてそれぞれ予備実験を実施した。

セメント水和物の焼成実験を実施した。また、熱力学的相平衡計算により高温下におけるCaO-SiO₂-Al₂O₃の状態図を作成した。

その結果、C-S-HやAFm相などのセメント水和物のさまざまな温度における変態挙動を捉えることができた。熱力学的相平衡計算では、セメント組成範囲における状態変化の妥当性を確認することができた。また、3成分だけでなく鉄も含む組成を検討する必要性も明らかになった。

モルタル、岩石の温度に対する膨張量を入力条件とした加熱によるコンクリートの体積変化モデルを構築した。

② 温度履歴による長期の溶解メカニズム

実際のペデスタル部の温度履歴と注水履歴を整理し、実験に用いるコンクリートの曝露条件（高温履歴、浸漬条件）を決定するとともに、材料の選定や膨張量を測定する手法を確立した。また、高温加熱後の水分供給による膨張現象に関する既往知見について整理した。想定されるペデスタルコンクリートが受けた履歴として、高温加熱（600 °C、1,000 °C）⇒冷却⇒水中浸漬及び高温加熱⇒水中浸漬の実験条件を構築し、セメントペーストとモルタルを用いて水中浸漬後のコンクリートの膨張挙動を観察した。その結果、高温加熱⇒冷却⇒水中浸漬ケースではライム膨張が、高温加熱⇒水中浸漬では1,000 °Cの条件で、水中で爆裂が発生することを確認した。

(2) 特殊な外部環境要因

① 燃料デブリの伝熱解析によるコンクリート熱条件の評価

公開されている事故シナリオ等を参照して、事故時の1号機PCVコンクリートの熱条件を評価するために、伝熱予備解析を実施した。

燃料デブリとコンクリート接触によるコンクリートの熱条件にかかる予備解析を実施するために必要となる物性値を整備するとともに、解析初期条件を設定した。予備解析の結果、コンクリートの温度分布を解析できることを確認した。

② コンクリート破損に関わる特殊な外部環境要因に対する要素挙動試験と総合試験

水蒸気や温度がコンクリート材の変質挙動に及ぼす影響について、コンクリート材の水蒸気雰囲気での高温保持小規模試験の予備試験を実施した。また、ウラン酸化物や金属デブリとコンクリートの反応挙動については、金属デブリのみに着目した反応予備試験を実施した。さらに、ウラン酸化物の酸素量に着眼した試験に供するウラン含有亜酸化物を作製した。

試験温度 1,100 °Cで、水蒸気または不活性ガス雰囲気でのコンクリート単体での変質挙動の予備試験及び金属デブリとコンクリートとの反応挙動の予備試験では、顕著なコンクリートの変質はみられなかった。また、試験に供するウラン含有の亜酸化物を作製することができた。

(3) 総合評価

上記成果を反映して、コンクリート破損メカニズムに関わる総合的な検討・評価を行った。また、令和 5 年度第 1 回英知事業ワークショップ、令和 5 年度 1F 事故進展基盤研究に関する分科会に参加し、廃炉環境国際共同研究センター（以下、「CLADS」と略す。）を介した情報交換を実施した。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための全体会合をハイブリッドで計 2 回開催した。

所期の全体計画は概ね順調に進んだ。

1. はじめに

本業務では、1F 1号機 PCV の内部調査により観測されたペデスタル鉄筋コンクリート部材の鉄筋を残したままコンクリートだけが崩落した状態が生じたメカニズムに関する検討を行うことを目的とする。

モルタルまたはコンクリートの溶融実験や鉄筋を含む模擬部材による要素挙動試験や、このようなコンクリート破壊様相を生じるかどうか小型模擬部材実験を行った。並行して、コンクリートの溶融侵食以外の現象による崩落の可能性について検討するために、ペデスタル部の鉄筋コンクリート部材が受けたと推定される領域の高温水蒸気-冷却履歴から推定される破壊メカニズムに基づいた要素挙動試験を行った。得られた文献調査や実験結果に基づき、高温水蒸気-冷却履歴やペデスタル部のコンクリート破壊メカニズムについて仮説を導き、検証を進めた。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本研究の全体計画図を図 2-1 に示す。

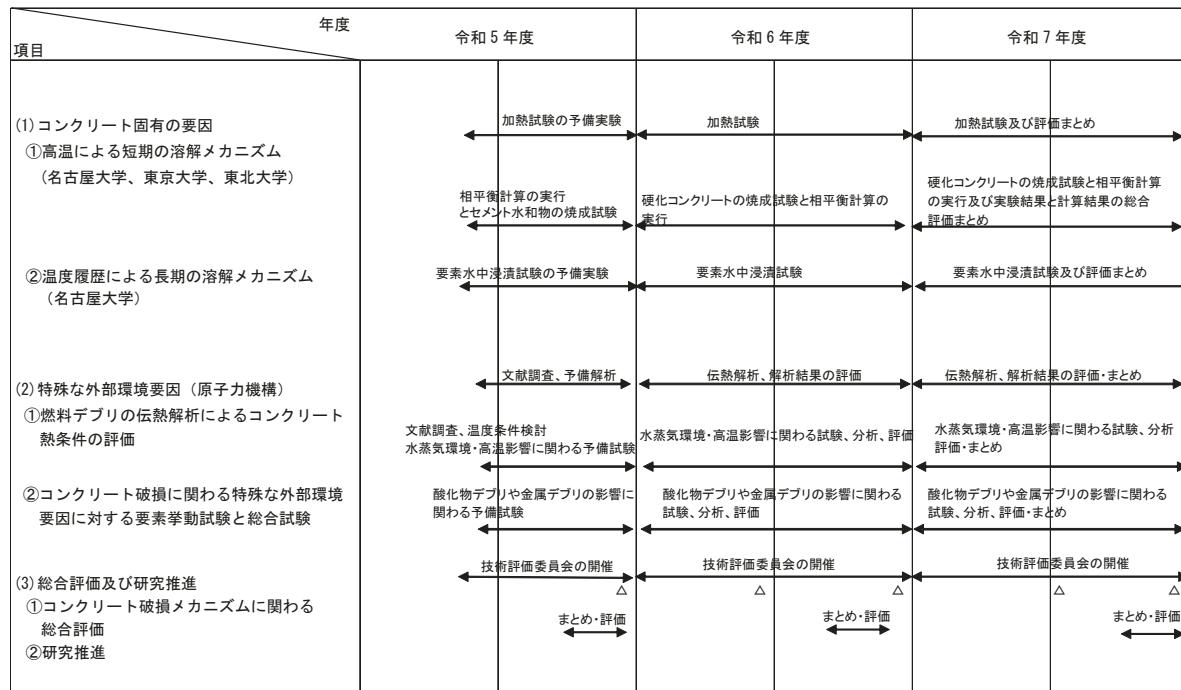


図 2-1 全体計画図

2.2 実施体制

実施体制を図 2-2 に示す。

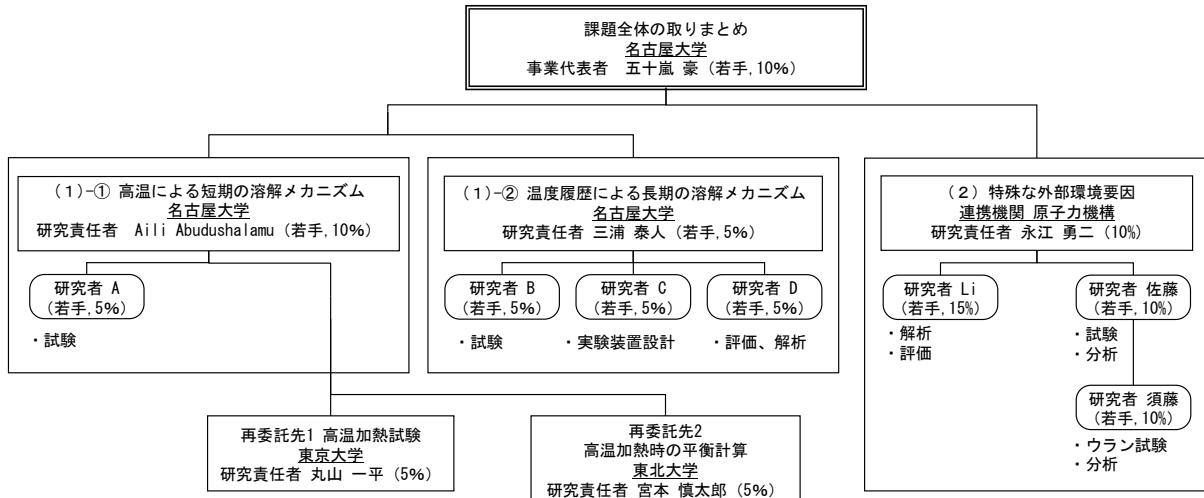


図 2-2 実施体制図

2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法

(1) コンクリート固有の要因

① 高温による短期の溶解メカニズム（再委託先：東京大学、東北大学）

国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学（以下、「名古屋大学」と略す。）、国立大学法人東京大学（以下、「東京大学」と略す。）は高経年化を模擬したセメントペースト及びコンクリート用骨材試験体の作製と高温時の溶融実験の条件設定についての予備実験を行い、加熱後の寸法変化、剛性変化、鉱物組成についてデータの取得方法を検討した。

国立大学法人東北大学（以下、「東北大学」と略す。）は熱力学的平衡計算を用いて溶液の組成を変化させた解析を行うとともに、セメント水和物の焼成実験を並行して行い、溶解現象の有無を判断するための解析フレームワークを構築した。

また、東京大学は剛体バネモデル解析において加熱による体積変化を組み込む数値解析手法を構築した。

② 温度履歴による長期の溶解メカニズム

実際のペデスタル部の温度履歴と注水履歴を整理し、実験に用いるコンクリートの曝露条件（高温履歴、浸漬条件）を決定するとともに、材料の選定や膨張量を測定する手法を確立した。また、高温加熱後の水分供給による膨張現象に関する既往知見について整理した。

(2) 特殊な外部環境要因

① 燃料デブリの伝熱解析によるコンクリート熱条件の評価

（連携先：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と略す。）

公開されている事故シナリオ等を参照して、事故時の1号機PCVコンクリートの熱条件を評価するために、伝熱予備解析を実施した。

② コンクリート破損に関わる特殊な外部環境要因に対する要素挙動試験と総合試験

（連携先：原子力機構）

水蒸気や温度がコンクリート材の変質挙動に及ぼす影響について、コンクリート材の水蒸気雰囲気での高温保持小規模試験の予備試験を実施した。また、ウラン酸化物や金属デブリとコンクリートの反応挙動については、金属デブリのみに着目した反応予備試験を実施した。さらに、ウラン酸化物の酸素量に着眼した試験に供するウラン含有亜酸化物を作製した。

(3) 総合評価

上記成果を反映して、コンクリート破損メカニズムに関わる総合的な検討・評価を行う。

なお、検討・評価に資するため、技術評価委員会を開催した。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびにCLADS等との連携を密にして、研究を進める。

また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

3. 令和5年度の実施内容及び成果

3.1 コンクリート固有の要因

3.1.1 高温による短期の溶解メカニズム（再委託先：東京大学、東北大学）

(1) 加熱前後の物性取得方法の検討

1) 热重量-示差走査熱分析

コンクリートなどセメント系材料において、高温下での挙動は多くの先行研究が知られるが、特に800 °Cまでの報告がよくみられる。この範囲内の温度では、セメント水和物が水分を損失し、炭酸塩が分解し二酸化炭素を排出する。主な水和物ケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) とほとんどの骨材鉱物は安定であるため、コンクリートは強度を一部保つことができる。しかし、1,500 °Cまでの高温領域では、ケイ酸カルシウム水和物が分解する上、骨材である造岩鉱物も他相に変化し、溶融してしまい、コンクリートの強度が完全に失われ、元の形状を保持できなくなることさえある。

このような極端な高温にさらされたコンクリートの挙動を理解するためには、表 3-1 にまとめられたセメント水和物の分解温度や骨材鉱物の融点を把握する必要がある [1][2]。

表 3-1 主な水和物の分解温度と一般的な骨材鉱物の溶融温度

	Portlandite	C-S-H	Quartz	Albite	Orthoclase	Microcline	Muscovite
分解温度 (°C) [1]	580	850	—	—	—	—	—
溶融温度 (°C) [2]	—	—	1,650	1,100	1,170	1,170	1,350

上記の温度は単相に対するものであるが、混相が加熱された場合は、溶融過程において異なる物の間に相互作用が発生し、複雑な現象が生じる。例えば、Gardien et al. は黒雲母-斜長石-石英混相の加熱を行い、走査型電子顕微鏡を用いて鉱物の分布を観察した[3]。報告では、石英の一部が純石英の融点よりかなり低い 900 °C未満の温度で溶融し、それと同時に、黒雲母と斜長石の界面で柘榴石が形成されたことを確認している。コンクリートは、多相を含むセメントペーストや岩石からなる複合材料であるため、高温にさらされると、上記のような複雑な現象が起こることが予想される。令和5年度は、単純な系であるセメントペーストから検討を実施した。

試験体には、普通ポルトランドセメントを上水と練り混ぜ、水セメント比 0.55 のセメントペーストを作製した。試験体は、セメントが十分に水和するまで 200 日以上 20 °C恒温で封緘養生を行った。次に、セメントペーストを粉碎し、90 µm 以下の粉末試料を準備し、熱重量-示差走査熱量分析を実施した。加熱は、100 mL/min の窒素を流しながら、30 °C/min の速度で室温から 1,500 °Cまで実施した。結果を図 3-1 に示す。ヒートフローカーブには、四つのピークが確認された。低温側の二つのピークは約 100 °Cと約 500 °C付近であり、それぞれ質量も減少していることから吸着水やカルシウムサルフォアルミネート系水和物の結合水の一部分解と Portlandite の熱分解と解釈できる。高温側の二つのピークは約 1,200 °Cと約 1,400 °C付近であったが、SO₂の蒸発によるものか、溶融によるものか今後検証を進める。

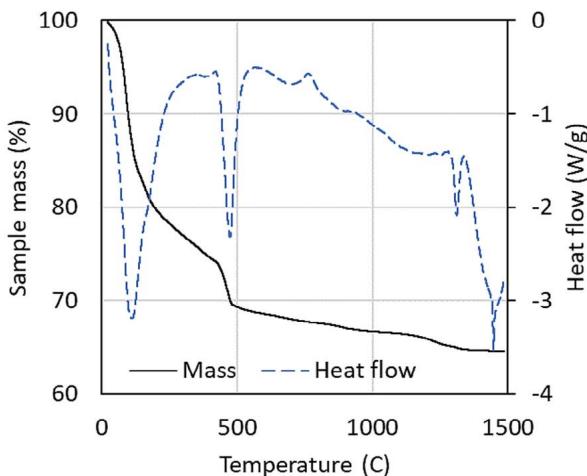


図 3-1 加熱実験中計測された質量変化とヒートフロー

高温加熱後の外観観察を実施した。加熱前後の容器中の試料を図 3-2 に示す。1,500 °C の加熱後には試料が均質にガラス状になっていることが確認された。1,400 °Cまでの加熱では、黒く変色し溶融したようなテクスチャとともにセメントベーストの粉末のままのテクスチャが混在している様子が確認された。今後は、モルタル粉碎物やコンクリート粉碎物で同様の実験をすすめる。



図 3-2 加熱実験前後サンプル外観の比較

2) 加熱中の寸法変化の測定

加熱中の寸法変化の測定手法について検討するために、2 種類の岩種の粗骨材を対象に、熱膨張計を用いた高温加熱中の長さ変化の測定を実施した。

試験体には、メタチャート（以下、骨材 A）と砂岩（以下、骨材 B）を用いた。それぞれの鉱物組成（質量%）を表 3-2 に示す[4][5]。それぞれの原石から湿式コアドリルで仕上がり直径約 11 mm のコアビットで採取し、熱機械分析測定用に長さ約 20 mm に成形したものを用いた。

表 3-2 骨材の鉱物組成

鉱物名	骨材 A	骨材 B
Quartz	91.87	46.87
Albite	0.77	23.46
Anorthite	2.29	7.17
Anorthoclase	0.61	—
Orthoclase	0.50	—
Microcline	3.02	4.61
Biotite	0.44	—
Chlorite	0.50	3.58
Sericite	—	10.00
Illite	—	4.31
Total	100.00	100.00

試験体の熱膨張測定は、DIL 402 Expidis Classic (NETZSCH Japan 社製) を用いて実施した。測定開始温度を 100 °C、最高温度を 1,000 °C、昇温速度を 5 °C/min に設定して、N₂ガスフロードで熱し、熱膨張測定を行った。1,000 °C保持時間は 15 min とした。加熱の際、ロッドやエンドプレートも膨張するため、長さ 25 mm、直径 6 mm の標準資料 (Al₂O₃) を用いた測定を行い、ロッド及びエンドプレートの膨張ひずみの補正を行った。次に、2 種類の骨材の試験体を熱膨張測定機にかけ、1,000 °Cまで昇温し、膨張させ、それぞれの膨張度（元の長さに対する伸び）、線膨張係数を得て、比較した。

図 3-3 に 100 °Cから 1,000 °Cまで昇温した際の各種岩石の膨張度変化を示す。骨材 A をみると最初は緩やかに上昇し、その後急激に変化していったが、570 °C以上ではほとんど変化がなかった。骨材 B も 600 °C付近までは骨材 A と似た挙動を示したが、600 °C付近から再び緩やかな膨張になり、800 °Cから再び急激に膨張していき、831 °Cで骨材 B の膨張度が骨材 A の膨張度を超える結果となった。

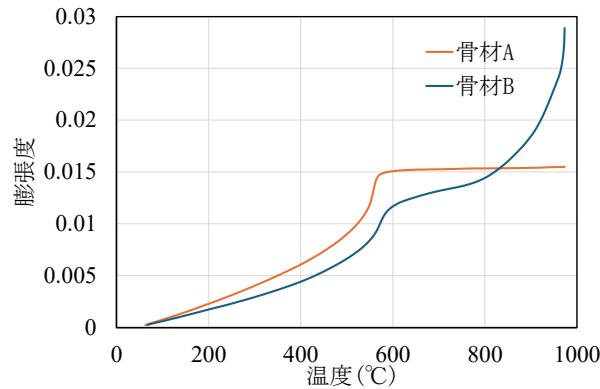


図 3-3 加熱中の膨張度の変化

図 3-4 に 100 °C から 1,000 °C まで昇温した際の各種岩石の線膨張係数の変化を示す。骨材 A の線膨張係数について、100 °C から 500 °C までの間は、10~40 $\mu(1/K)$ とほぼ一定であったが、そこから急激に上昇し、557.8 °C で 228.010 $\mu(1/K)$ となった。ピーク後、値は急激に減少し、600 °C 以上では、0~5 $\mu(1/K)$ とほぼ一定になった。また、骨材 B の線膨張係数について、100 °C から 500 °C までの間は、10~30 $\mu(1/K)$ とほぼ一定であったが、そこから急激に上昇し、571 °C で 105.189 $\mu(1/K)$ となった。ピーク後、値は急激に減少し、620 °C から 790 °C までの間は 10~20 $\mu(1/K)$ とほぼ一定になった。しかし、骨材 B は 800 °C 以上でも線膨張係数が上昇し、962 °C で 135.786 $\mu(1/K)$ であった。どちらの骨材も温度上昇とともに膨張しているが、特に、550 °C~600 °C 程度で膨張が大きいのは、骨材に含まれている石英が 575 °C で α 型から β 型に転移する際に急激に膨張するためである[6]。そのため、石英を多く含む骨材 A の方が骨材 B よりも線膨張係数のピークが大きくなったと考えられる。Bažant et al. の岩石の熱特性に関する報告と比較すると[7]、20 °C~100 °C、100 °C~300 °C の範囲での平均線膨張係数は、骨材 B の方が石灰岩や花崗岩よりも大きいが、500 °C~700 °C では、石灰岩や花崗岩の方が大きいことが確認できた。一方、骨材 A の平均線膨張係数については、100 °C~300 °C までは、約 15 $\mu(1/K)$ 、300 °C~500 °C では、約 25 $\mu(1/K)$ 、500 °C~550 °C では、約 58 $\mu(1/K)$ 、550 °C~570 °C では約 150 $\mu(1/K)$ となり、他の岩石よりも大きいことが確認できた。

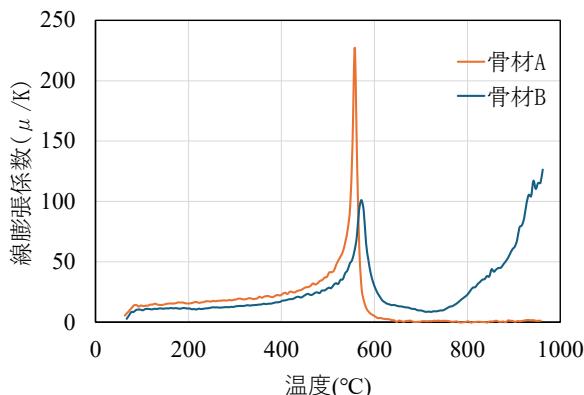


図 3-4 加熱中の線膨張係数の変化

3) 加熱前後の剛性変化の測定

普通ポルトランドセメントを水と混合し、セメント比 0.50 のセメントペーストを作製し、20 °C 封緘で 3 ヶ月間の養生を行ったセメント硬化体を供試体として用いた。セメント硬化体の寸法は、20×20×40 mm である。供試体は、前処理乾燥として、105 °C の定温乾燥機で 2 日間乾燥を行った。その後、電気炉で加熱を行った。電気炉の加熱プログラムは、昇温速度 8.2 °C/min で 1,000 °C まで昇温後、1,000 °C を一時間保持し、降温速度 2.7 °C/min で室温まで徐冷した。徐冷後、試験体温度が室温に戻ったことを確認し、超音波試験を行った。超音波伝搬速度の測定には、超音波厚さ計 (EVIDENT 社製、38DL PLUS モデル) を用いた。伝播速度は、試験体の短辺方向 (約 20 mm) で測定した。別途、飽水状態の試験体のアルキメデス密度、前処理乾燥後と 1,000 °C 加熱後の質量減少を測定し、ヤング率を算出した。超音波パルス法において、剛性率、ポアソン比・ヤング率は以下の式で表される。

$$G = \rho V_s^2$$

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_S^2}{2(V_L^2 - V_S^2)}$$

$$E = 2(1 + \nu)G$$

ここで、 E ：ヤング率 [N/m²]、 G ：剛性率 [N/m²]、 ν ：ポアソン比 [-]、 ρ ：供試体密度 [kg/m³]、 V_L ：縦波音速 [m/s]、 V_S ：横波音速 [m/s]、 L ：試験体厚さ [m] である。

表 3-3 に本実験の結果から算出したヤング率を示す。供試体を 1,000 °C に加熱した本実験では、4.44 GPa までヤング率は低下しており、加藤らの結果[8]よりヤング率は大きいが、概ねヤング率を評価できていることが確認された。

表 3-3 超音波試験から算出した、剛性率、ポアソン比・ヤング率

	供試体密度 [g/cm ³]	剛性率 [GPa]	ポアソン比 [-]	ヤング率 [GPa]
加熱前	1,058	4.70	0.22	11.44
加熱後	763	1.85	0.20	4.44

4) 加熱前後の鉱物組成の取得

X 線回折装置 Smart Lab (Rigaku) を用いて水和したセメントペーストを室温から 300 °C まで加熱し、鉱物組成の変化の様子、特にカルシウムアルミネート系水和物変化の様子について、in-situ 測定を実施した。

測定に用いた試料は、普通ポルトランドセメント及びフライアッシュを用い、水粉体比 0.50、フライアッシュ置換率 20% として 7 日間養生を行ったセメント硬化体である。試料は、材齢 7 日で水和停止処理を施し、乳鉢と篩を用いて粒径 90 μm 以下に分級してから測定に用いた。

In-situ 測定について、装置専用の高温加熱炉を用い、はじめに加熱炉内で試料を室温 (30 °C) の環境下で X 線回折法による測定を行った。測定後、加熱炉内を 100 °C まで 10 °C/min で昇温し、100 °C に達してから 15 分間温度を保持したのち、再度測定を実施した。100 °C での測定以降は、100 °C ごとに 200 °C、300 °C まで昇温して測定を行った。昇温速度、温度保持時間は同様である。

測定条件は、X線源 Cu-K α 、管電圧 40 kV、管電流 45 mA、ステップ幅 0.02°、スキャナースピード 0.5°/min、2θ=5-70°である。

図 3-5 に試料の各温度での X 線回折パターンを示す。カルシウムアルミネート系水和物のピークは主に 10°付近に集中しているため、その範囲について取り上げて示す。

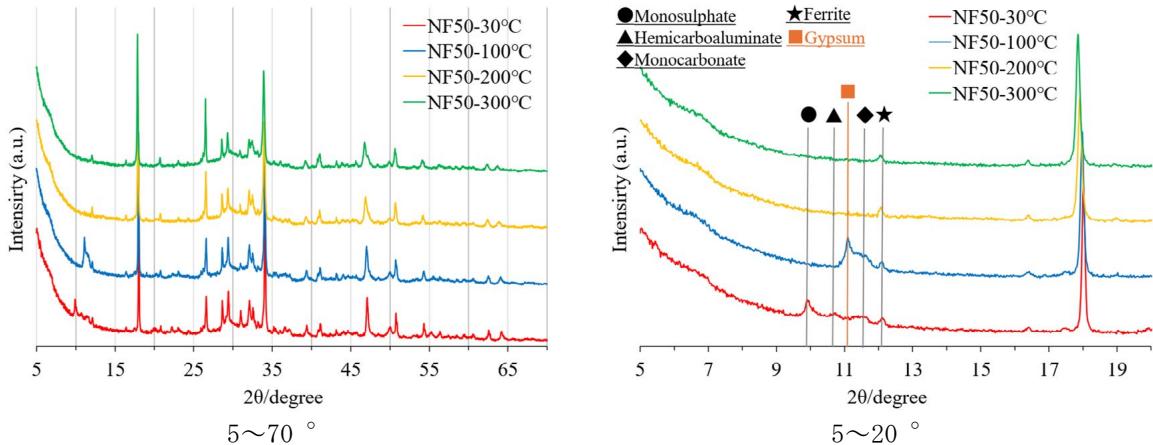


図 3-5 加熱中の X 線回折パターンの変化

まず、加熱前の室温環境での回折パターン（赤線）について、低角側から 10°付近に Monosulphate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、10.5°付近に Hemicarboaluminate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0.5\text{CaCO}_3(0.5\text{H}_2\text{O}) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、11.5°付近に Monocarbonate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、12°付近 Ferrite ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) のピークが確認された。

次に、100 °C 加熱後の回折パターン（青線）について、100 °Cまで加熱されると Monosulphate と Hemicarbonate のピークが消滅した。また、それにともなって Monocarbonate のピークと重なるように、11~12°にハローが出現し、11°にも鋭い Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) のピークが出現した。

Gypsum のピークの出現について、アルミネート系水和物の中で硫酸イオンを含む Monosulphate の分解によって生じたものと考えられる。Gypsum へ分解する Monosulphate は、熱重量分析において 100 °C 以下では二つ、150~200 °C の間には一つの熱分解ピークをもつ[9]。11~12°に出現したハローについて、Monosulphate 及び Hemicarboaluminate の分解によって生じた生成物に由来すると考えられる。この生成物は、一部硫酸イオンや炭酸イオンを含み、Gypsum や Monocarbonate に近い構造をもっており、それゆえ Gypsum や Monocarbonate と同じピーク位置にハローが出現したと考えられる。この時、Monocarbonate は 150 °C 程度の加熱で分解するため、100 °C の加熱では未だ分解していないと考えられる。

続いて、200 °C 加熱後の回折パターン（黄線）について、200 °Cまで加熱されると 10~11°付近に存在するカルシウムアルミネート系水和物と Gypsum のピークは消失し、Ferrite のピークのみとなった。Gypsum は 150 °C 付近において熱分解を起こすため、200 °C の加熱により、Hemihydrite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) を経由して、Anhydrite (CaSO_4) に分解したと考えられる[10]。Monocarbonate も 200 °C の加熱で分解するため[9]、カルシウムアルミネート系水和物は全て分解したと考えられる。よって、300 °C 加熱後の回折パターン（緑線）においても、Gypsum とカルシウムアルミネート系水和物のピークは確認されていなかった。

(2) 高温の作用を受けたセメント組織の相組成変化に関する数値計算的アプローチ

令和5年度は熱力学的相平衡計算によって最大1,500 °Cまで加熱されたセメント組織の相組成変化を数値計算によって予測した。高温におけるセメント組織の熱力学的相平衡計算については近年においても積極的に熱力学データベースの整備が進められており[11]、未だ発展が求められる分野である。その中でも本研究では、熱力学的相平衡計算には特に高温条件での熱力学データベースが充実しているFactSageを使用した。

本研究では熱力学的相平衡計算により CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三成分系の状態図を計算した。まずは図 3-6 に 500 °C での CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三成分系の状態図を示す。図 3-6 より三成分の含有比率によって安定する状態が大きく異なることがわかる。この中でも普通ポルトランドセメントの CaO-SiO₂-Al₂O₃ 比率に該当するものは Lime と γ -C₂S、C₃A (赤枠) で安定することがわかる。この計算の整合性について Miyamoto et al. の既報[12]の実験データと比較・検証する。なお、既報では 500 °C のデータは存在していなかったため、最も加熱温度が近い 600 °C の場合と比較した。

まず、実験データを確認すると、計算結果で生成すると予測された鉱物のうち Lime 以外の鉱物は生成していないことがわかる。このように計算結果と実験結果の間に乖離が生じた理由については以下が考えられる。

まず、FactSage に実装されている熱力学データベースは酸化物に特化したものであるため、常温において生成する水和物のデータが拡充されていない点が挙げられる。ここで、C-S-H は 500 °C の加熱では完全に分解しない可能性も考えられ、また、AFm 相なども結晶構造は保持できなくなる可能性はあるが、完全に分解し切らない可能性も考えられる。このような理由からセメント組織を形成する水和物の熱力学データを本データベースに実装することで、令和5年度行った計算結果の問題を解決できる可能性が考えられる。

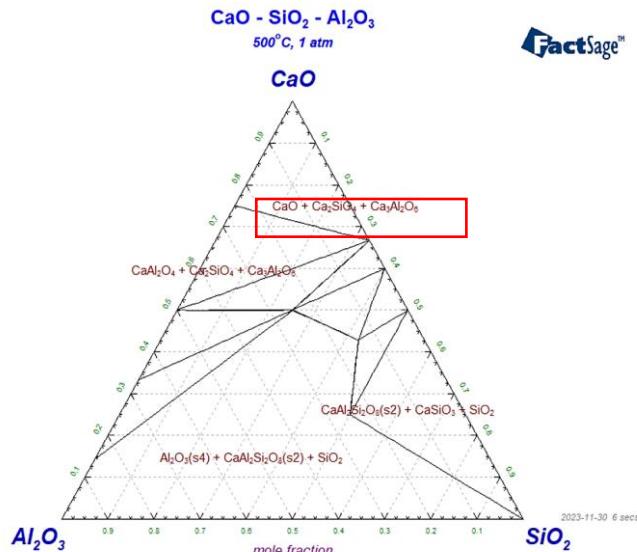
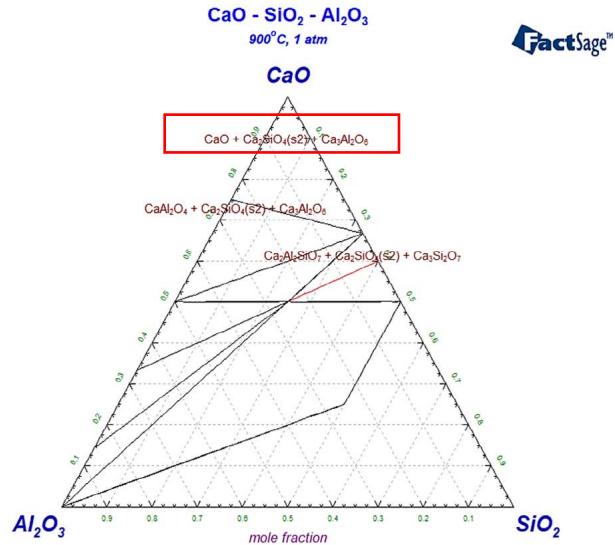
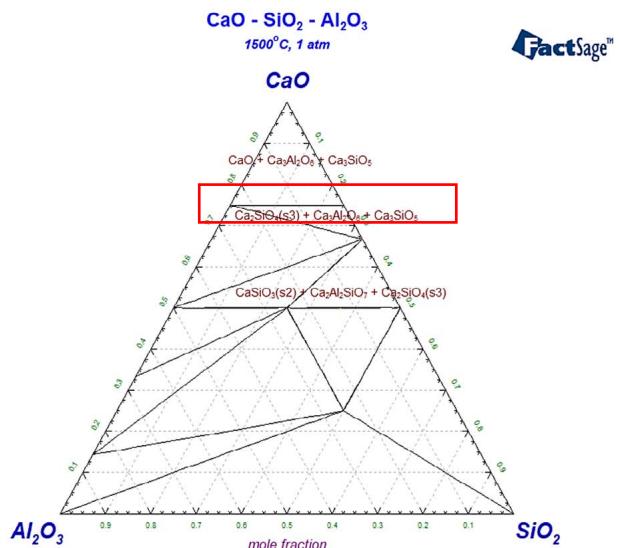


図 3-6 500 °C における CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三成分系の状態図

次に、図 3-7 に 1,000 °C での CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三成分系の状態図を示す。図 3-7 より、普通ポルトランドセメントの CaO-SiO₂-Al₂O₃ 比率に該当するものは Lime と α -C₂S、C₃A で安定することがわかった。この計算結果と既報の実験データ[11]を比較する。その結果、実験データでは C₃A の生成については触れられていないが、実験においても Lime と C₂S が生成していることがわかった。ただし、C₂S は計算結果、実験結果とも生成しているものの結晶格子の形 (α 相、 β 相) が異なっている点についても検証を続ける必要があると考えられる。

図 3-7 1,000 °Cにおける CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三成分系の状態図

最後に、図 3-8 に 1,500 °Cでの CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三成分系の状態図を示す。図 3-8 より、普通ポルトランドセメントの CaO-SiO₂-Al₂O₃ 比率に該当するものは C₃S と C₂S、C₃A で安定することがわかった。この計算結果と既報の実験データ[11]を比較する。既報の実験データでは 1,500 °Cでセメントペーストが加熱された場合には Gehlenite のみが確認されている。すなわち、実験結果と計算結果で大きな乖離が生じているといえる。この点については、サンプルの均一性が影響している可能性が考えられた。詳細には計算結果は均一系の計算になっているが、実験では化学組成の分布が不均一な状態で加熱されているため、局所的に析出相が異なる可能性が考えられた。例えば、図 3-8 に着目すると、CaO-SiO₂-Al₂O₃ の比率によっては Gehlenite (Ca₂Al₂SiO₇) が安定して生成する場合もあることから、実験ではサンプルの不均一性によって Gehlenite が生成した可能性が考えられた。

図 3-8 1,500 °Cにおける CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三成分系の状態図

また、計算結果の妥当性については、実際の普通ポルトランドのセメントについては、 C_3S と C_2S 、 C_3A 、 C_4AF で安定している。つまり、均一で計算する熱力学的相平衡計算については、概ね実際に析出する相を予測できていると判断できる。ただし、本計算は $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ の三成分系であるため、今後は相組成に影響を及ぼす Fe なども計算に含めることでさらなる妥当性を検証していく必要があることがわかった。

以上を踏まえると、今後の課題としては熱力学データベースへのセメント水和物の実装、サンプルの均一性の問題、計算を実行する際の化学組成の種類の適切な選定、などに着目する必要がある。また、現時点では $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 三成分系の検討に留まったが、令和 5 年度の検討範囲においては本計算手法はある程度の妥当性は得られるものと判断した。

(3) メソスケールひび割れ解析の実施とひび割れ量の評価

令和5年度は、高温下でのコンクリート挙動に関する調査に重点を置いた。高温下で発生するさまざまな現象の中でも、高温下におけるコンクリートの時間依存性ひび割れ挙動は、コンクリート構造物の構造性能のみならず耐久性にも影響を及ぼすため、最も重要な挙動である。そこで、高温下におけるコンクリートのひび割れ進展解析を行った。その後、一軸圧縮試験を行い、コンクリートの構造性能への影響を明らかにした。

① 高温下におけるコンクリートのひび割れ進展解析

乾燥収縮ひび割れのようなコンクリート中のひび割れは、主にコンクリート構成要素間の変形量の違いによって引き起こされる。高温下では、コンクリート構成要素ごとに異なる変形が起こり、その変形量の違いがセメントペースト中のひび割れの発生を誘発する。したがって、高温下でのひび割れ進展過程を調べるために、コンクリート構成要素の過渡的な（平衡に達するまでの）熱変形を合理的に再現する必要がある。

骨材は連続的に膨張するが、硬化セメントペースト (HCP) は 200 °Cまで膨張し、その後温度の上昇とともに収縮することが、さまざまな研究によって明らかにされている [13] [14] [15] [16] [17] [18]。高温（300 °C以上）は骨材の酸化、 $\alpha \rightarrow \beta$ 転移、鉱物の分解などの性質変化を引き起こすため、骨材の熱的性質は温度、特に熱膨張率に大きく依存する [18]。高温下での非単調変形が報告されているため、HCPに対する温度の影響はより複雑である。初期段階（過渡加熱 200 °Cまで）では、HCP 中の分子運動と細孔構造中の毛管張力の低下により HCP は熱膨張する。その後、蒸発可能水が失われることによるコンクリートの収縮によって熱膨張は止まる。高温加熱状態では、HCP の相転移により熱収縮が起こる。これは水和物や鉱物の分解にともない、化学結合水が失われることを指す。

前述のメカニズムに関して提案する数値解析手法は、さらに各コンクリートの構成要素の変形を再現できるように開発された。次に、過渡加熱過程における変形量の違いからひび割れ進展過程を調査した。

1) 基準試験片と境界条件

図 3-9 は、ひび割れ進展解析に用いたコンクリートスラブと円柱供試体の三相モデルである。コンクリートスラブは、前年度に使用された参考試験片と同様の最大骨材寸法と骨材比率でメッシュ加工された。加熱・乾燥過程において、全ての表面は大気にさらされ、供試体は自由変形した。

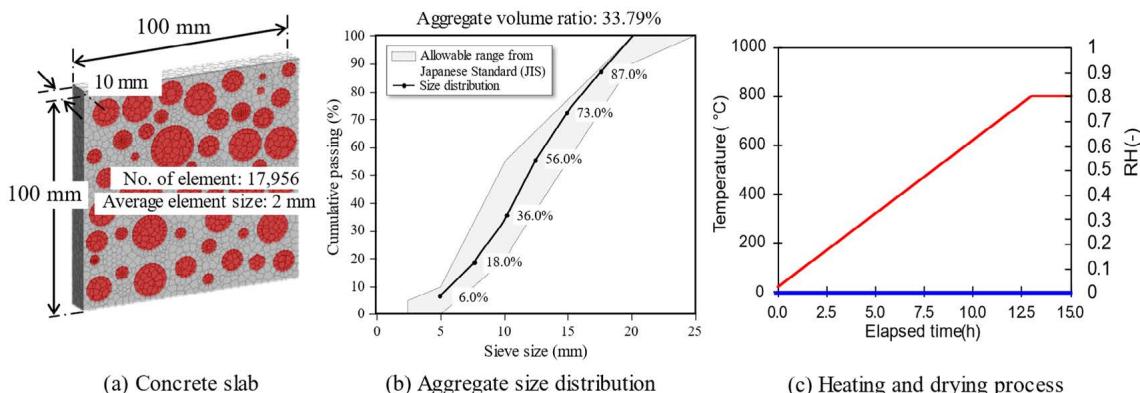


図 3-9 ひび割れ進展解析のための参考試験片と境界条件

2) 数値解析の実装

(a) コンクリート構成要素の熱変形のモデリング

ひび割れ進展過程を再現するために、先行研究[18]の実験データにしたがって、骨材とHCPの熱変形を導入した。骨材相については、石灰岩の実験データに当てはめた経験式に基づき、骨材バネの熱膨張率を下式で表した。

$$\alpha_{agg,T} = 6 \times 10^{-5} \cdot T^2 + 1.59 \times 10^{-2} \cdot T + 2.34 \quad (3-1)$$

where $\alpha_{agg,T}$ is the thermal expansion coefficient of aggregate (μ/C), T is temperature of aggregate ($^{\circ}\text{C}$).

ここで、 $\alpha_{agg,T}$ は骨材の熱膨張率(μ/C)、Tは骨材の温度($^{\circ}\text{C}$)である。

HCP相については、1) 穏やかな温度での初期熱膨張、2) 蒸発可能水の損失による乾燥収縮、3) 化学結合水の損失に関する熱収縮を考慮して熱変形をモデル化した。熱膨張率($\alpha_{mor,T}$)は、図3-10(a)に示すようにJanota et al. [19]の実験的研究に基づいて導入した。飽和度に基づいて、さまざまな前処理養生でのモルタルの熱膨張微分を導入した。モルタルの乾燥収縮については、実験から得られた経験式を用いて乾燥収縮ひずみを導入した[20]。

HCPの熱収縮について、熱収縮率は化学結合水の損失量に依存しているはずである。しかし、その関係を明らかにする実験データはない。そこで本研究では、フィッティングに基づいて経験式を提案した。熱収縮は熱膨張が停止し始める105 $^{\circ}\text{C}$ から起こると仮定し、図3-10(b)に示すようにHCPの熱膨張を微分して熱収縮率を求めた。その後逆算し、過渡的な熱ひずみが合理的に再現できることを検証した(図3-10(c))。

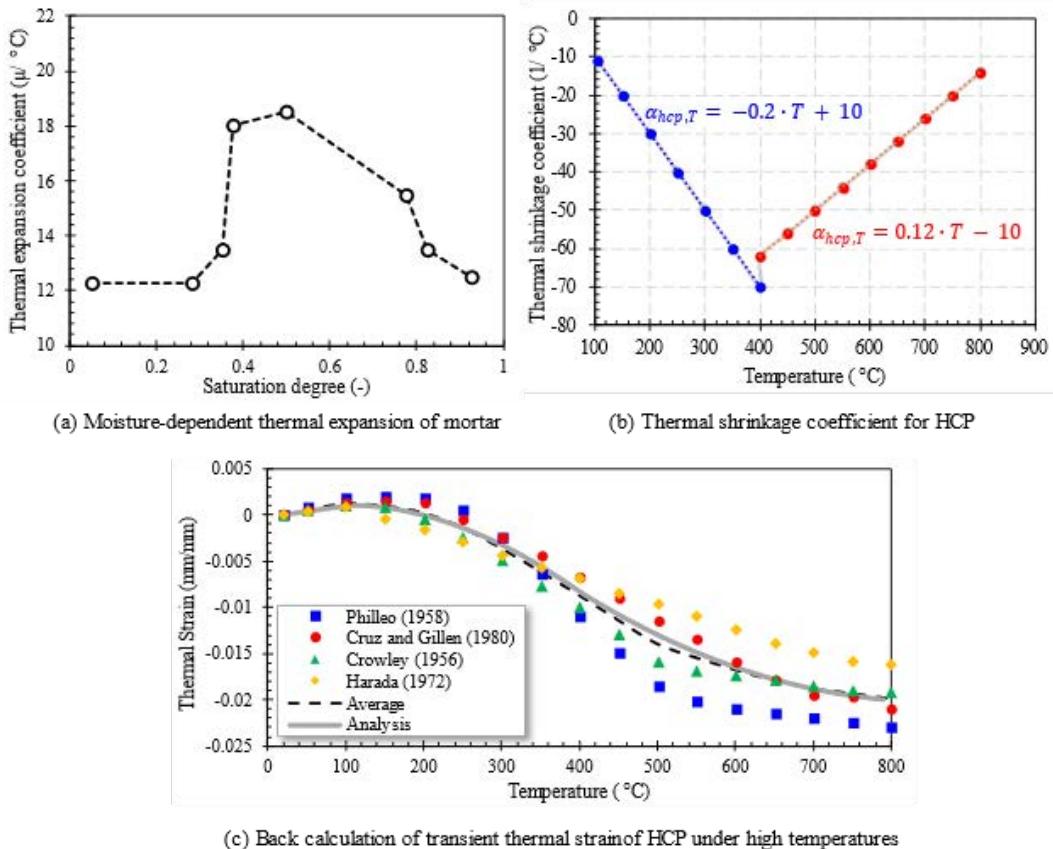


図 3-10 モルタルと HCP の熱変形の数値モデル

(b) ひび割れ進展解析のための数値フロー

各ステップでは、コンクリート内の温湿度分布を決定するために、過去に開発された数値モデルに基づいて熱と水分の輸送シミュレーションが行われた。熱の輸送はフィックの法則に支配され、水分の輸送は、動的な微細構造変化モデルを導入したダルシー法によって支配された。

温度と水分の分布に基づいて、過渡加熱時のコンクリート構成要素ごとの変形を計算した。モルタルと骨材の総変形量を求め、各相のバネの初期ひずみとして導入した。また、モルタルの機械的性質の変化に対する乾燥の影響については、同様に導入した[8]。飽和度の関数であるモルタルの機械的性質の残存比はバネのパラメータに導入した。乾燥過程で発生する損傷履歴を考慮するため、時間依存微細ひび割れモデルを導入した。

各ステップの最後に、ニュートン・ラフソン法に基づいて繰り返し構造解析が行われた。反復計算は、内部応力の和がゼロに近づくまで続けられる。

3) 数値解析結果

図 3-11 は、高温下におけるコンクリートの力学的挙動を明らかにした数値解析結果である。加熱・乾燥の過程で骨材とモルタルが異なる変形量を生じ、内部拘束応力が蓄積される。この応力が引張強度を超えるとひび割れが発生し始め、全体に進展する。

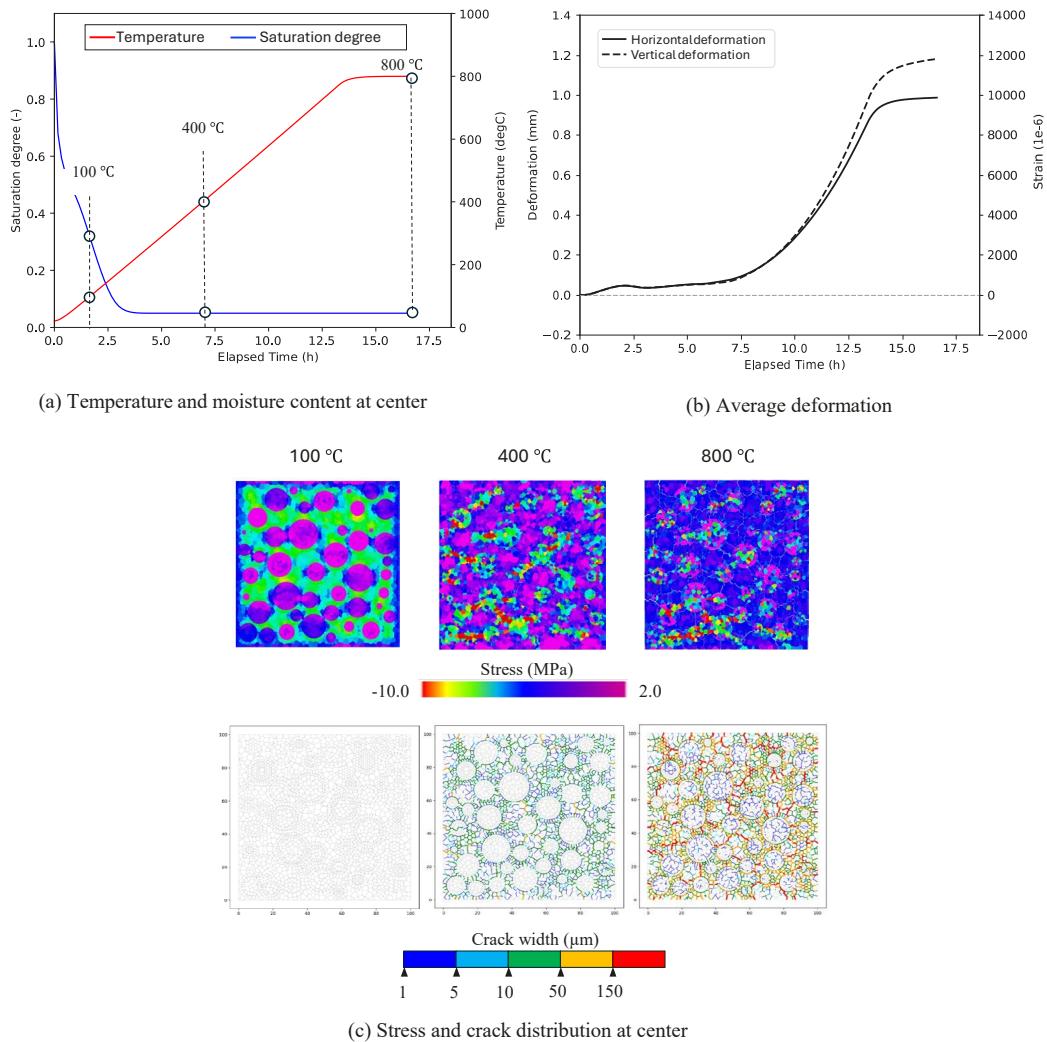


図 3-11 高温下におけるコンクリートの力学的挙動

20～100 °Cでは、モルタル相は圧縮応力を受け、骨材は引張応力を受けた。その後、200 °Cから400 °Cにかけては逆の応力分布が観察され、ひび割れが生じた。まず、ひび割れは乾燥収縮ひび割れと同じように骨材表面に直交して発生する。その後、骨材・モルタルの変形量の差の増大にともない、ひび割れが骨材表面の周辺に進展する。400 °C以上では、ひび割れはセメントペースト中に全体的に進展し、その後は高温下でひび割れ幅が拡大し続ける。600～800 °Cでは、骨材に引張応力が蓄積し、モルタルと同様にいくつかのひび割れが骨材中に発生した。

高温下でのひび割れ進展は、図 3-12 に示すように、コンクリート構成要素の過渡的な熱ひずみに依存する。200 °Cまでは HCP の全熱ひずみは骨材と有意な差がないため、初期段階での顕著なひび割れ進展はみられなかった。200 °Cを超えると界面ひずみの増大にともなって、ひび割れが急速に進展する。800 °Cでは、最大ひび割れ幅は約 0.494 mm、平均ひび割れ幅は約 0.039 mm である。

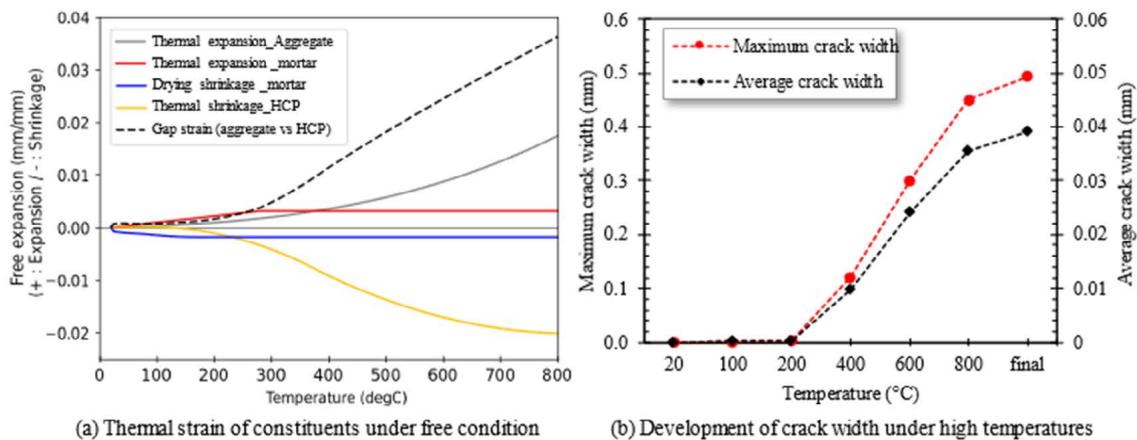


図 3-12 高温下での過渡的な熱ひずみとひび割れの進展

② 高温下におけるひび割れコンクリートの一軸圧縮試験

ここでは、一軸圧縮荷重を負荷した際の高温下でのひび割れ進展の影響を調べた。数値計算の詳細については、次のセクションで明らかにする。

1) 基準試験体と境界条件

図 3-13 は、コンクリートスラブと同様の最大骨材寸法と骨材比率でメッシュ化した円柱供試体の三相モデルを示している。加熱・乾燥過程において、全ての表面は大気にさらされ、試料は自由変形した。一軸圧縮試験は変位制御法により実施した。試験体底面を固定し、試験体上面に垂直変位を与えた。

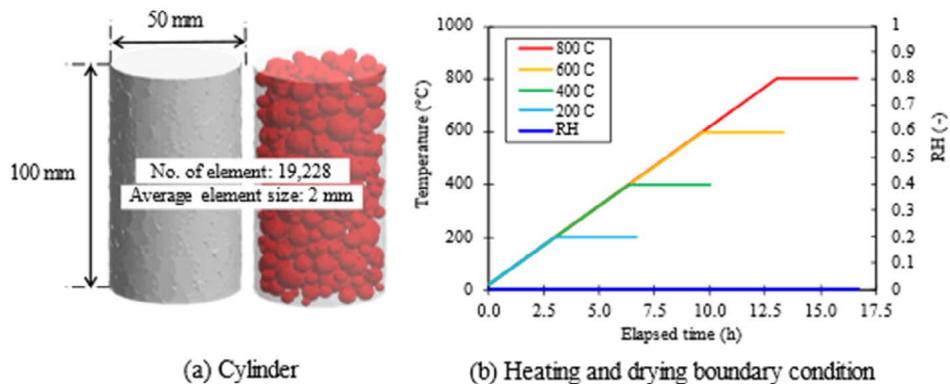


図 3-13 加熱、乾燥、一軸圧縮試験における参考試験片のメッシュと境界条件

2) 解析の数値的実装

この数値計算は、前節で説明したのと同様の計算フローに基づいて行われた。ただし、一軸圧縮試験では、内部応力の和が外力に近づいた時点での構造解析の反復計算を終了した。

3) 数値解析結果

図 3-14 に、高温下でのひび割れ進展が機械的性質に及ぼす影響を示す。応力とひずみの関係から、コンクリートの剛性（ヤング率）と強度は、高温下でのひび割れ進展過程で著しく低下する。加熱過程でのひび割れの存在は、乾燥の影響で観察されたものと同様に、応力伝達経路を悪化させ、圧縮応力下でのひび割れ進展を促進させる [20]。ひび割れが全体の剛性を低下させるため、ピーク荷重時の変位は高温時に著しく増大する。

前述の挙動は、Youssef [21] によって報告された高温下でのコンクリートの応力とひずみの関係と一致していた。しかしながら、本研究の解析結果は、ひび割れ進展の影響のみを示している。将来的には、コンクリート構成要素の熱的・機械的性質に及ぼす温度の影響を考慮する必要がある。その目的は、微細ひび割れ、動的な空隙構造変化、材料の分解、その他の現象によって引き起こされる損傷を導入することである。

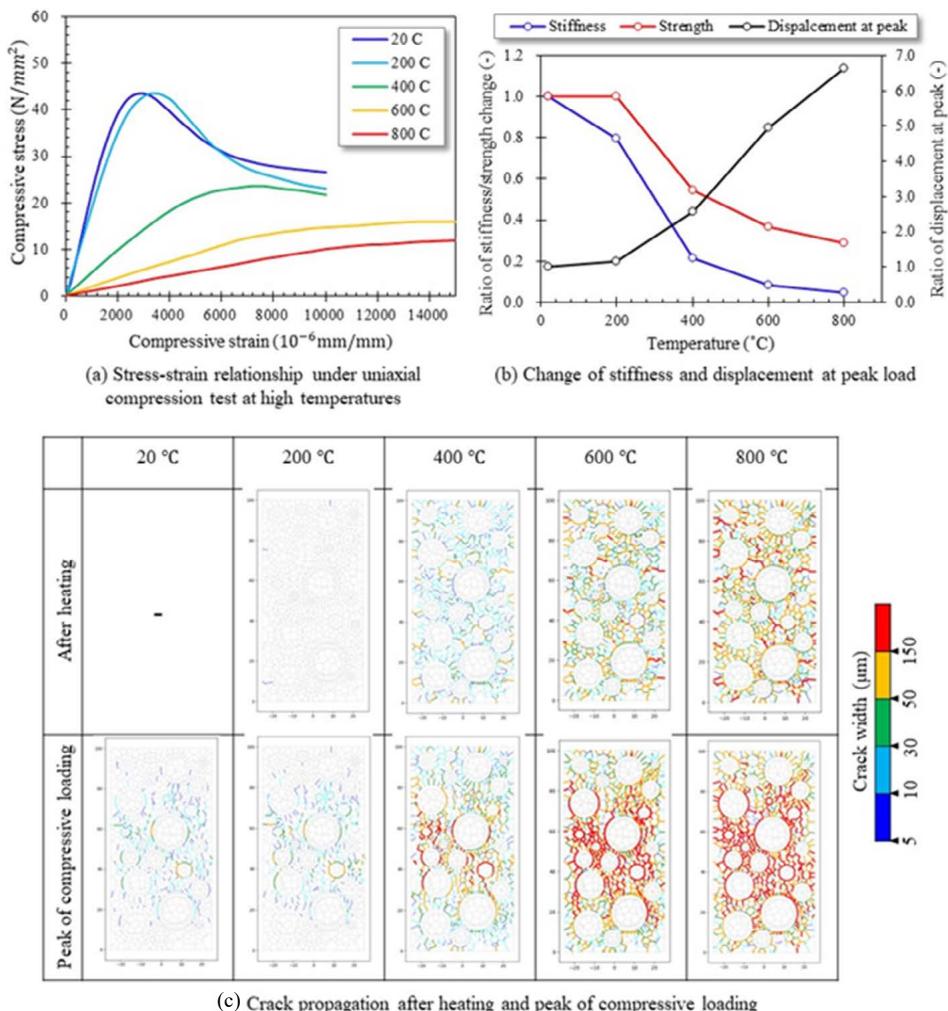


図 3-14 高温下でのひび割れ進展が圧縮挙動に与える影響

3.1.2 溫度履歴による長期の溶解メカニズム

① 高温注水履歴による膨張現象に関する既往知見

ペデスタルコンクリートに作用した履歴として、燃料デブリからの輻射熱による高温と水の投入による冷却を複数回繰り返された可能性が示唆されている。しかしながら、水とペデスタルコンクリートの接触の有無、水が接触したとしたときのペデスタルコンクリートの温度変化など、実際にペデスタルコンクリートに作用した履歴は理解されていないことが多い。そこで、高温注水履歴を受けたコンクリートの挙動について既往の知見を調査した。その結果を以下に整理した。

コンクリート材料が高温履歴を経験すると、その温度によって固相の変質が生じるとともに力学特性が大幅に低下することが知られている[22][23][24]。セメント材料は105 °Cまでの加熱で自由水が蒸発し、300 °Cまでの加熱で水和物の結合水がリリースされる。さらに、400 °C～500 °Cではポルトランダイトの脱水により CaO が生じ、600～700 °C程度ではカルサイトの脱炭酸反応により CaO が生じる[25]。さらに、主要水和物である C-S-H の脱水や熱膨張/収縮が生じて微細ひび割れが発生することによって、顕著な強度の低下を引き起こすとされている[26]。

高温履歴を受けたセメント材料に水の供給があると特徴的な現象が生じることが知られている。一つは再水和による強度回復である。これは、高温加熱時に脱水や分解したセメント水和物の再水和が生じることに起因する[27][28][29]。また、ポルトランダイトの脱水やカルサイトの脱炭酸反応により生成される CaO の再水和で生じるポルトランダイトによって、過度な膨張が生じることが実験的に確認されている。Mendes et al. [30] は、この CaO の水和によるライム膨張で 44%もの膨張を引き起こすことを報告した。

上述した現象は、ある高温履歴を経験したコンクリートに生じる定常状態の static な現象である。これに対して、限定的な条件下において生じる dynamic な現象として爆裂現象が知られている。これは、昇温プロセスにおいてコンクリート表面が動的にはじけ飛ぶ現象である。爆裂現象には、コンクリート中の空隙水の存在と急激な加熱履歴 (RABT 曲線など[23]) が必要であるとされており、水蒸気圧説[31]と熱応力説[32]の二つのメカニズムが提唱されている。水蒸気圧説は、外部からの加熱によってコンクリート表層部の空隙水は外部へと蒸発するが、それよりも深い領域において空隙水が蒸発すると外部へと蒸発できない水蒸気によって水蒸気圧が蓄積することで、表層部のコンクリートを弾き飛ばす爆裂現象が生じるというものである[23][31][33][34]。一方、熱応力説は、外部からの加熱によって表層部と内部とで急激な温度勾配が生じ、熱膨張する表層部を内部が拘束することで内部拘束状態となり、表層近傍の領域に圧縮応力が蓄積することで爆裂が生じるというものである[31][35][36]。

このように、高温履歴を受けたセメント材料は固相の変質や力学特性の低下を引き起こすだけでなく、ライム膨張や爆裂といった顕著な膨張や動的な破壊が生じる。ライム膨張や爆裂は、冷却後の水の供給や昇温過程におけるセメント材料中の空隙水や水和物中の結合水の蒸発によって生じる現象である。一方で、高温加熱を引き起こす重大なインシデントでは、防災的観点から対象が高温中に温度を下げるために水が供給される。火災時の消火活動の放水などがこれに当たる。同様の条件を模擬した実験がいくつか報告されており、高温加熱した試験体を直ちに水に浸漬させて急冷させることで急激な温度変化をコンクリートに与えている。この急激な温度変化による影響は Thermal shock と呼ばれている。この Thermal shock は、断面内に急激な温度勾配によって熱応力が発生することを指していると考えられる。Peng et al. [37] は 800 °Cまでのコンクリート

ブロックの加熱を行い、その後水に浸漬させて急冷することで thermal shock を与えた後の圧縮強度を評価している。Yaragal et al. [38] も同様の実験を行っている。Bingöl et al. [39] は 700 °C までの高温加熱して急冷させたコンクリートによる実験を行っており、700 °C で急冷する場合にライム膨張によるマクロなひび割れの発生を確認している。Bi et al. [40] は 600 °C までの高温加熱して急冷させたコンクリートに動的荷重を作用させる実験を行っている。いずれも Thermal shock かライム膨張による力学特性に及ぼす影響は甚大であることを確認している。

ペデスタルコンクリートに作用した高温注水履歴として、短期的には高温状態のまま急冷される履歴が考えられるが、既往の知見では 800 °C までの実験結果が報告されており、それ以上の温度のときの挙動はわかっていない。また、高温加熱→冷却→水分供給の履歴の場合には、非常に膨張量の大きいライム膨張が生じると報告されているが、その発生条件は明確ではない。

② 異なる高温注水履歴による実験条件の検討

本研究では、長期的なコンクリートの溶解現象に着目して、ペデスタルコンクリート下部のコンクリートが鉄筋を残して消失した現象のメカニズムを解明することを目的とする。令和 5 年度では、前述した既往の知見を踏まえて、ペデスタルコンクリートに作用したと考えられる温度履歴と注水履歴から、ペデスタルコンクリート下部が消失する可能性のある高温注水履歴の実験条件を推定するとともに実験方法の確立に重点を置いた。本研究では、初期段階の検討として、要素試験体レベルでセメント材料が溶解（膨張により水中に飛散）するような現象が生じる実験条件を模索することとした。なお、要素試験体レベルであることから、試験体内部の温度分布は一様であり、試験体の全面から水が浸透する実験条件となる。

異なる細骨材とセメントの比 (S/C) のモルタルの要素試験体を用いて、2 パターンの高温注水履歴を検討した。Case1 では、高温加熱後に気中冷却により緩やかに室温まで降温した後に水中に浸漬するケースであり、高温加熱→冷却→水中浸漬の実験条件である。Case2 では、高温加熱した直後に水中浸漬による急冷を行ったケースであり、高温加熱→水中浸漬の実験条件である。高温履歴として、セメント固相の変質が生じる温度域を対象とすることとし、高温加熱時の最高温度を 600、1,000 °C とした。600 °C では全てのポルトランダイトの分解と一部の炭酸カルシウムの分解が生じる温度域であり、1,000 °C ではポルトランダイトと炭酸カルシウムの分解が完了する温度域である [25]。これらの高温加熱では、ポルトランダイトと炭酸カルシウムの分解によって CaO が生成されることから、水中浸漬時には水と CaO の反応によるライム膨張が発生することが想定される。Case1 と Case2 の高温注水履歴において、水中浸漬時のモルタル試験体の温度の違いによる膨張挙動の変化を評価可能な実験条件を検討した。

本実験で用いた試験体は、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比が 50%、S/C が 0.0、1.0、2.0 のモルタル試験体を作製した。なお、S/C=0.0 はセメントペーストである。試験体の寸法は 40×40×80 mm である。養生は水中にて 14 日間行った。なお、高温加熱時に試験体中の水の蒸発による爆裂を生じさせないため、高温加熱試験の前に 105 °C で 24 時間保管することで内部の水分を蒸発させた。

高温履歴は、電気炉を用いて 600、1,000 °C の高温履歴を試験体に与えた。最高温度の保持時間は 1 時間、昇温勾配は 13 °C/min である、なお、爆裂試験で用いられる RABT 曲線 [24] の昇温温度は 240 °C/min であることから、本実験の昇温勾配は十分爆裂現象が生

じない条件である。Case1 では、最高温度到達から 1 時間保持した後に気中冷却をして、室温になった時点で試験体全体が水に浸かるように浸漬させた（図 3-15(a)）。Case2 では、最高温度到達から 1 時間保持した後に電気炉から試験体を取り出して、高温の試験体を水中に浸漬させた（図 3-15(b)）。試験体が高温であるため、水中に金網カゴを設置し、その上に試験体を置くことで浸漬させた。

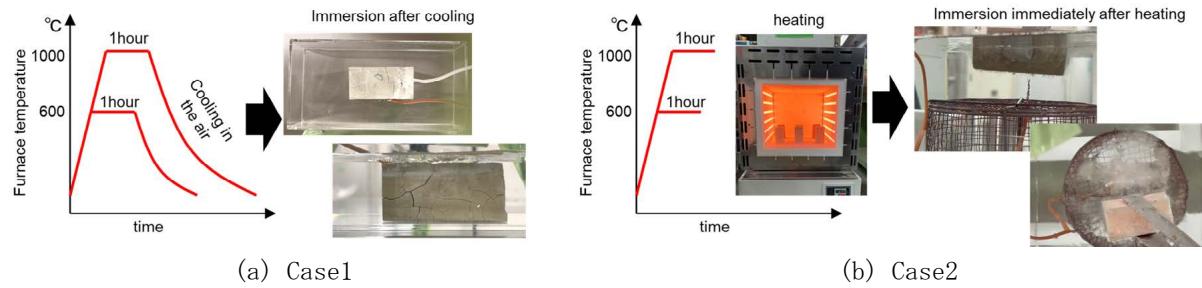


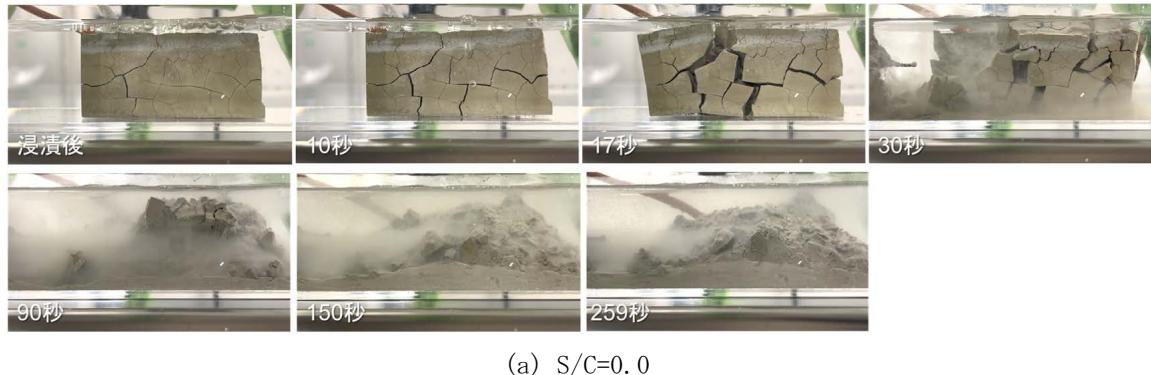
図 3-15 高温注水履歴

③ 高温注水履歴における膨張プロセス

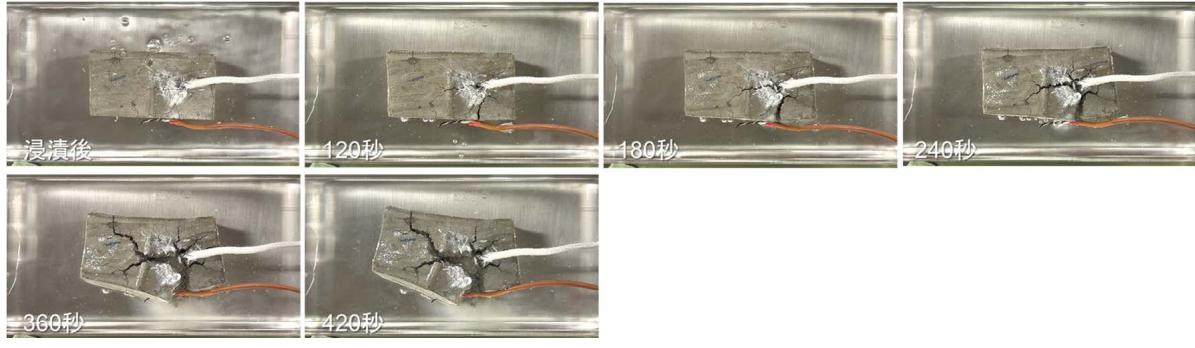
Case1 と Case2 の高温注水履歴における膨張プロセスを示し、それぞれの膨張現象について考察する。

1) Case1 「高温⇒冷却⇒水中浸漬」の膨張挙動

Case1 の 1,000 °C の膨張のプロセスを図 3-16 に示す。セメントペースト (S/C=0.0) では、浸漬 10 秒後から高温加熱により浸漬前に生じていたひび割れが拡大し、浸漬 17 秒ではひび割れ幅が非常に大きくなり、試験体の形状を維持できずに浸漬前に生じたひび割れで細分化された。それ以降、この破片がさらに膨張することで最終的にペースト状になることが確認された。S/C=1.0 のモルタルでは、セメントペーストと比較して膨張量は小さく、試験体を分断する大きなひび割れが発生するにとどまった。S/C =2.0 のモルタルでは浸漬前に発生していたひび割れから大きな変化は観察できなかった。Case1 の 600 °C の各 S/C の浸漬後の試験体の様子を図 3-17 に示す。1,000 °C と比較して膨張量は小さいものの、細骨材量が多いほど膨張が小さくなる挙動は同じであった。



(a) S/C=0.0



(b) S/C=1.0



(c) S/C=2.0

図 3-16 Case1-1000 °Cの浸漬後の試験体の様子

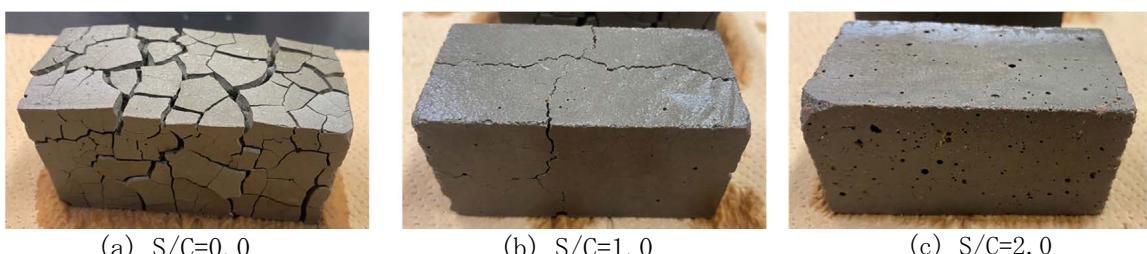


図 3-17 Case1-600 °Cの浸漬後の試験体の様子

2) Case2「高温⇒水中浸漬」の膨張挙動

Case2 の 1,000 °Cの膨張のプロセスを図 3-18 に示す。セメントペースト (S/C=0.0) では、浸漬 6 秒後において試験体上部表面の一部が破裂音をともなって爆裂する様子が観察され、それ以降連続的な爆裂によって破片が水中に飛散する様子が確認された。浸漬 13 秒では試験体の角部がかけ落ちるとともに、セメントペースト粒子が水中に飛散する様子が確認できる。浸漬 22 秒では、飛散するセメントペースト粒子の量が著しく多くなった。さらに、内部では赤く発光する様子が確認できることから、試験体内部はいまだ高温状態が継続していることが推察できる。それ以降は、セメントペースト粒子の飛散に加えて、セメントペーストの欠片が金網カゴに堆積する様子が確認で

きることから、試験体は爆裂現象によって細かい破片に細分化されていると見受けられる。浸漬期間が増加するにともなって、破片が細粒化して堆積した。S/C が増加するほど爆裂が発生するタイミングが若干遅くなるものの、爆裂が連続的に発生し、最終的に細粒化した状態で堆積した。

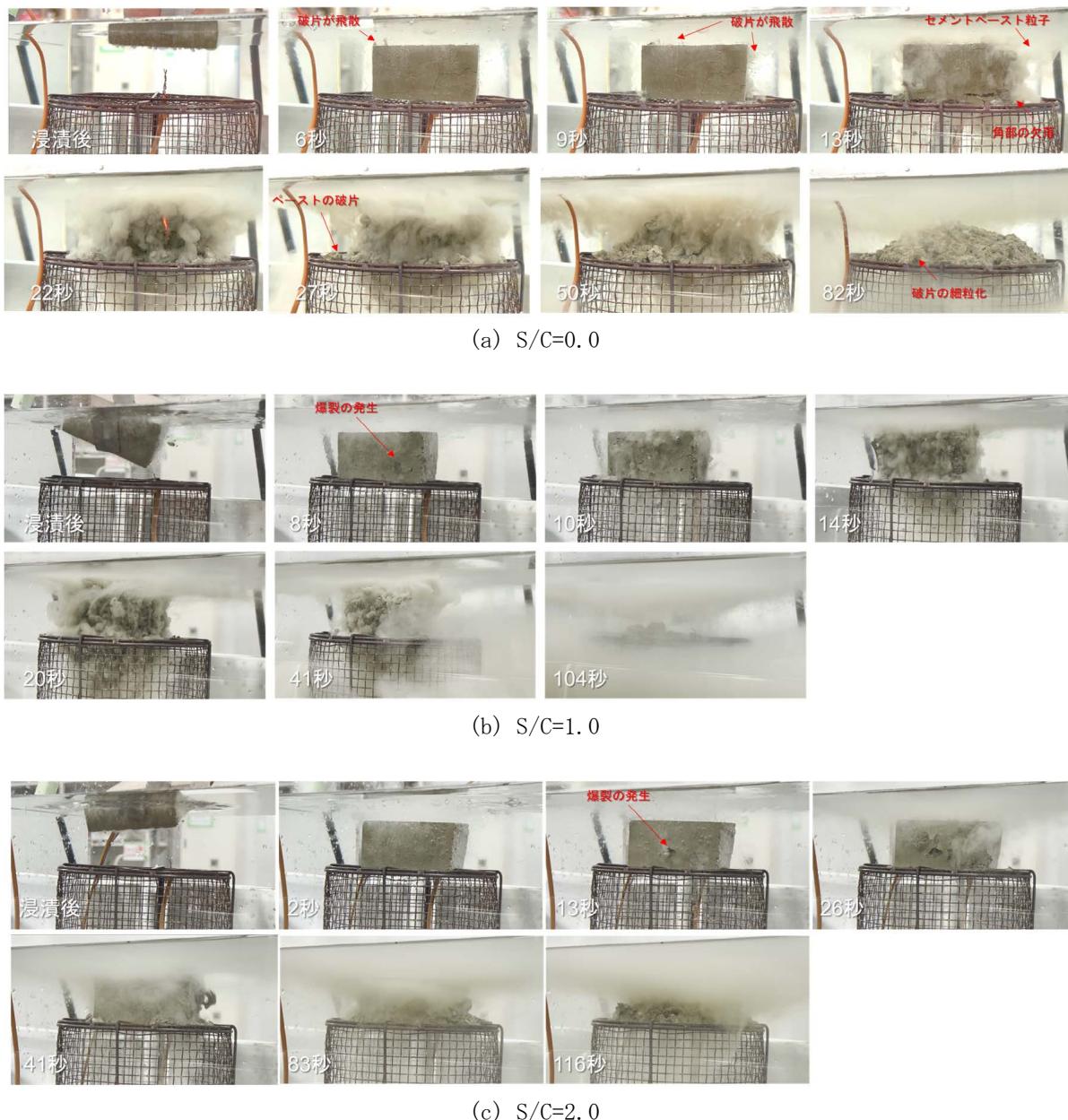


図 3-18 Case2-1000 °Cの浸漬後の試験体の様子

Case2 の 600 °C のケースでは、図 3-19 に示すが、1,000 °C の時と異なり爆裂現象は観察されなかった。セメントペーストでは全体的に非常に微細なひび割れが発生するとともに、幅の大きいひび割れが試験体長手方向の側面に 2 本生じた。このひび割れは内部から膨張して生じたというよりは、表層部と内部の温度差が非常に大きい場合に内部拘束によって生じる収縮ひび割れによるものと推察される。モルタルでは、細骨材量が多くなるにつれてひび割れは減少した。S/C=2.0 では、微細なひび割れの発生も観察されず、大きな変化はみられなかった。

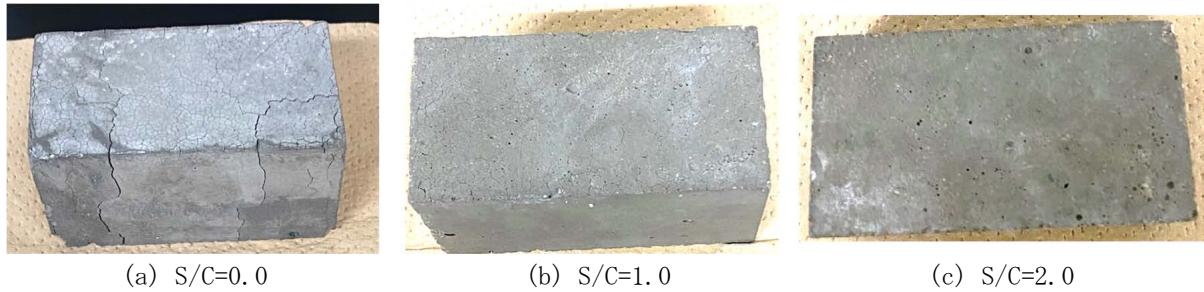


図 3-19 Case2-600 °Cの浸漬後の試験体の様子

④ 膨張メカニズムの検討

Case1 と Case2 の高温注水履歴において、水中浸漬時の試験体温度によって明らかに膨張挙動が異なることを確認した。Case1 では、S/C が小さいほど、また、最高温度が高いほど膨張が顕著になり、元の試験体形状を維持できないほどの膨張が生じることが観察された。S/C が小さいほどセメントペースト量が多くなることから、高温加熱によって生じる CaO の量は多くなる。このことから Case1 では、ライム膨張による膨張が生じたと判断した。なお、最高温度が 1,000 °C の方が膨張が著しいことは、全ての炭酸カルシウムの分解による CaO の増分は小さいと予想されるため、C-S-H の分解によって膨張に抵抗する固相強度が低下[41]したことに起因すると考えられる。

一方、Case2-1000 °C では、Case1 で観察されたライム膨張とは異なり、爆裂をともなう動的な破壊現象が生じた。さらに、それが連続的に内部に進行して、S/C によらず全てのケースで試験体がペースト状に堆積することとなった。Case2 の高温注水履歴は、これまでのコンクリート分野において想定していない履歴であり、水中において連続的に爆裂現象が生じることを本実験により、はじめて観察することができた。この破壊現象のメカニズムは、外部水が高温の試験体に侵入して固相から液相へと熱が伝達することで内部の液水が気化することで水蒸気圧が蓄積し、この水蒸気圧がセメント硬化体強度を上回ることで急激な破壊が生じたと推察される。

今後の展開として、Case1 のライム膨張では、ライム膨張の定量的な膨張挙動や発生要因の整理は現時点ではなされていない。また、水の侵入経路となるひび割れや空隙が膨張挙動に及ぼす影響、試験体内部の温度分布の評価、CaO が高温履歴後に生成しないフライアッシュなどのポゾラン反応が多く生じる系との比較などは有益な情報となると考えられる。フライアッシュ添加は、ライム膨張を大幅に抑制できる可能性がある。Case2 の水中連続爆裂では、爆裂発生条件が明らかになっておらず、温度履歴や使用材料などの基本的な情報を整理する必要がある。また、高温直後の水中浸漬時の試験体内部の温度分布の評価や CaO が生じない系での比較などの実験データの蓄積が必要である。

3.2 特殊な外部環境要因

3.2.1 燃料デブリの伝熱解析によるコンクリート熱条件の評価（連携先：原子力機構）

(1) 本研究の概要

本研究の目的は、事故時における1F1号機のペデスタル領域に存在するコンクリートが受けた熱の影響を評価することである。1号機では、燃料デブリがペデスタルへと落下、堆積し、コンクリートが損傷したと考えられている。燃料デブリの崩壊熱による温度上昇や海水注入による冷却といった事故時の炉内環境下におけるコンクリートへの熱影響を評価する。1号機の事故シナリオ、圧力や温度などのプラントデータを考慮して、ペデスタル鉄筋コンクリート周辺の熱的境界条件に関わる感度解析を実施し、コンクリートの温度分布といった熱的破損に関わる知見を得ることを目的とする。

(2) 解析条件

公開情報である事故シナリオから解析条件を設定した。1号機の事故シナリオ[42][43]についてRPV、D/W、S/C圧力のプラントデータ[42][44]を図3-20に示す。各所の圧力や水位変化の解析から事故進展事象が推定されており、RPVが破損し、燃料デブリがペデスタルやPCVに流出したのは、平成23年3月12日の6:00以降と推定されている。その後、燃料デブリは連続的な海水注水[45]により冷却されていったと考えられている。令和5年度は、予備解析として燃料デブリPCV流出後にPCV圧力が徐々に低下するフェーズである平成23年3月13日18:00頃を解析対象とした。

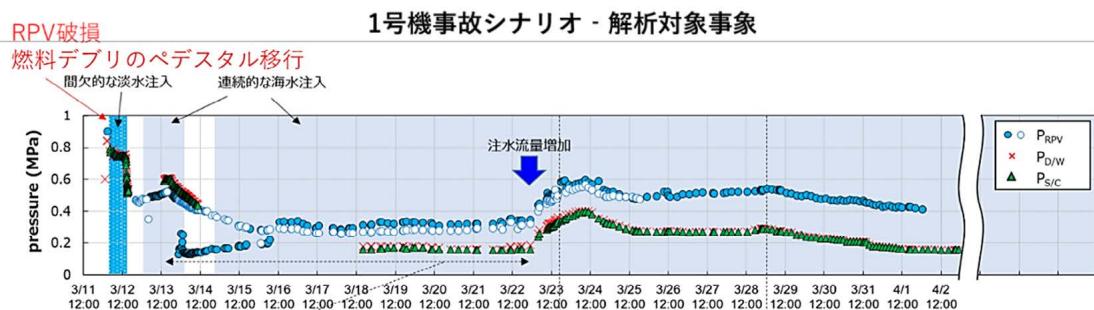


図 3-20 1号機 RPV、D/W、S/C の圧力履歴データ[42]

本解析では、熱流体解析ソフトウェアのSTAR-CCM+を使用した。1号機のプラント情報に基づき、解析モデルを構築し、PCV境界条件を設定した。解析モデルを図3-21に示す。計算コストを節約のため、2次元モデルを用いた。また、S/CやD/Wに接続するためのベント配管は、計算負荷を軽減するために省略し、必要に応じてS/Cの影響を簡略化した手法で模擬している。また、PCV内の構造物は省略し、D/W壁は断熱状態としている。冷却水注水としてRPV底部に大開口部破損（直径1m相当）を想定し、RPV内に底部から12m上方に注水口を設置した。また、D/Wの右下には、1号機の真空ブレーカーラインからの漏洩を模擬した「漏洩ポート」が設置されている。この予備解析用のパイプ状漏洩構造は、直径0.15m、長さ5mであり、実際の真空破壊ラインの漏洩部より断面積、長さとも大きいが、計算の安定性を考慮した基本条件として設定している。燃料デブリは直径5m、高さ1mのブロックで表現し、ペデスタル床や側壁のコンクリートに直接接触させる。

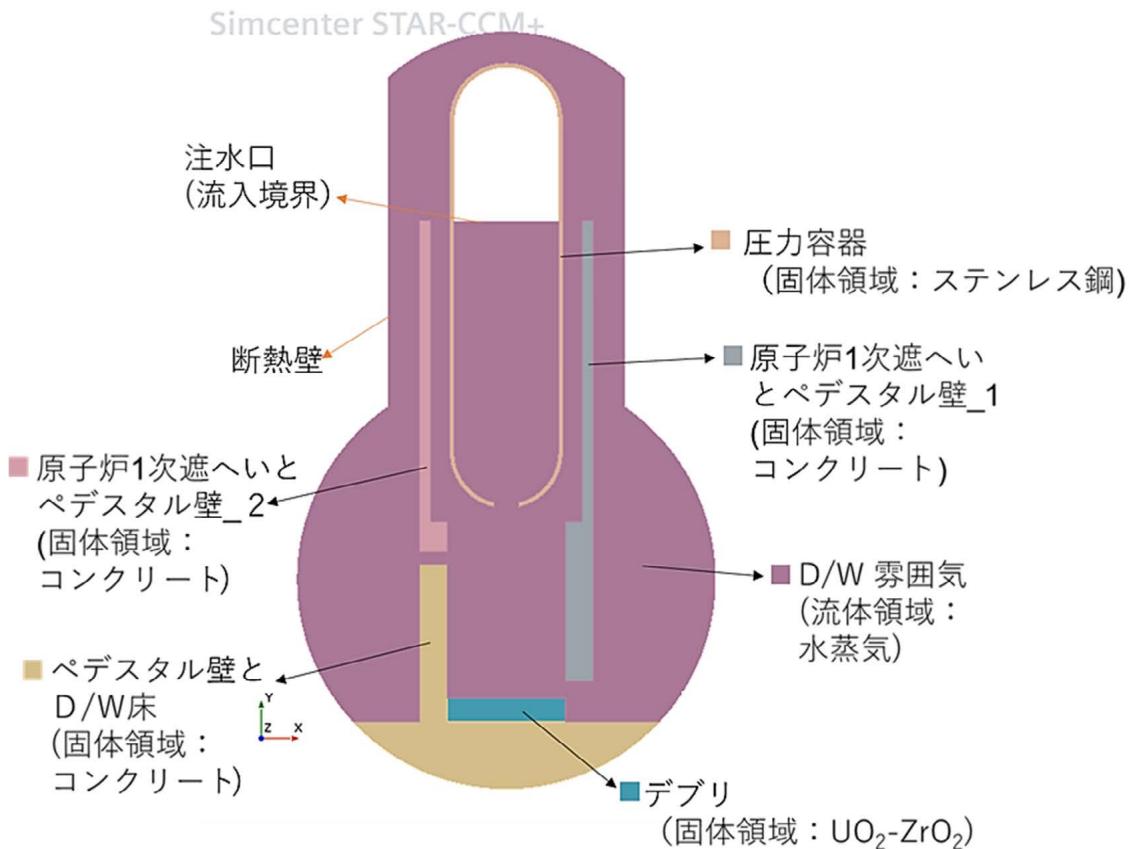


図 3-21 解析ジオメトリー、パート、領域と境界条件

本解析では、水の蒸発と凝縮を含めた燃料デブリと冷却材の伝熱・流動を模擬するためには、以下の物理モデルを使用した。

○ 流体モデル：混合混相流 (MMP) による Spalding の蒸発／凝縮モデル

<気相>

・多成分気体

水蒸気 (1成分のみ定義)：密度一定

・物性値：一定値 (0.155 MPa、666 Kにおける過熱水蒸気の物性値を参照した。)

<液相>

・多成分液体

水 (1成分のみ定義)：密度一定

・物性値：一定値 (0.155 MPa、283 Kにおける過冷水の物性値を参照した。)

<混相>

・物性値：密度、粘性率、熱伝導率：温度依存

・Spalding 蒸発・凝縮

(計算条件)

飽和圧力：Antoine 式

飽和温度：反復法 (飽和圧力の定義から自動的に飽和温度を計算する。)

伝熱制限モード：有効 (蒸気が飽和するとき、液の表面の蒸気のモル分率は、液の表面温度における飽和圧力と周囲の気体の圧力の比で求められる。)

- ・重力（密度差による対流を考慮可能）
- ・乱流モデル：SST (Menter) $k-\omega$ モデル、All $y+$ 壁面近傍の取り扱い
- ・分離型流れ、分離型混相温度
- ・Adaptive 時間ステップ
- 固体モデル
 - ・分離型固体エネルギー
 - ・密度一定
- 解析の種類：陰解法非定常解析
 - ・時間離散化：2 次精度
 - ・時間ステップ[°]： $10^{-3} \sim 10^{-4}$ s

本解析を利用した物性値は表 3-4 と表 3-5 に示す。なお、現在の岩屑-コンクリート相互作用モデルでは、岩屑とコンクリートの相変化は考慮されていないため、固体の融解熱は考慮されていない。このため、相変化領域での温度履歴評価に若干の誤差が生じる可能性がある。

表 3-4 流体の物性値：水、水蒸気[46]

物性値	水 (0.605 MPa、432 K における飽和水の物性値)	水蒸気 (0.605 MPa、432 K における飽和水蒸気の物性値)
生成熱 (J/kg)	671,275.0	2,755,990.0
密度 (kg/m ³)	908.278	3.19368
熱伝導率 (W/m/K)	0.620271	—
粘性係数 (Pas)	1.71213×10^{-4}	2.41517×10^{-5}
比熱 (J/kg/K)	4,195.2	2,069.1
標準状態温度 (K)	298.15	298.15
飽和圧力	Atoine 式	—
飽和温度	反復法	—
臨界圧(Pa)	2.2055e7	—
臨界温度 (K)	3,000 K (default: 647.3 K)	—

表 3-5 固体の物性値：デブリ、コンクリート、炭素鋼

物性値	デブリ	コンクリート	炭素鋼 (UNSG101000)
密度 (kg/m ³)	8,000.0	2240.0	7,832.0
熱伝導率 (W/m/K)	10.0	2.0	63.2
比熱 (J/kg/K)	502.0	750.0	434.0

本解析の初期条件は表 3-6 に示した。初期圧力は平成 23 年 3 月 13 日 18:00 の 0.605 MPa とした。D/W の雰囲気温度は平成 23 年 3 月 20 日まで入手できなかつたため、3 月 20 日の測定値である 666 K とした。代替海水注入速度は、冷却水の一部が原子炉に到達したと仮定し、3 kg/s から 1/10 にスケーリングした[45]。

表 3-6 本解析の初期条件

初期条件	数値
D/W 初期圧力 [MPa]	0.605
初期温度 [K]	D/W ガス、構造材: 666
	圧力容器: 283
	デブリ: 2,000
初期注水流量 [kg/s]	0.3
初期注水温度 [K]	283
デブリ崩壊熱 [MW]	5.0
D/W 気相組成	100% 水蒸気

(3) 解析結果

600 秒間の原子炉内温度分布の計算結果を図 3-22 に示す。注水後直後は RPV 内に低温の蒸気が観察される。60 秒後、RPV と D/W は再び過熱蒸気で満たされ、蒸気はデブリからの崩壊電力によって連続的に加熱される。低温のサブクール蒸気は注水口近傍にのみ存在し、D/W の残りの部分は過熱蒸気で満たされていることがわかる。これは、過熱蒸気流がデブリ、特に内部を効果的に冷却できないことを示している。ペデスタル領域の代表的な蒸気相温度として、ペデスタル中央に設置した温度プローブの各瞬間の最高温度を図 3-23 に示す。不安定な蒸気対流のため、110 秒、230 秒、550 秒付近に温度スパイクが発生しているが、ペデスタル内の蒸気温度は 666 K から 850 K 付近まで上昇している。

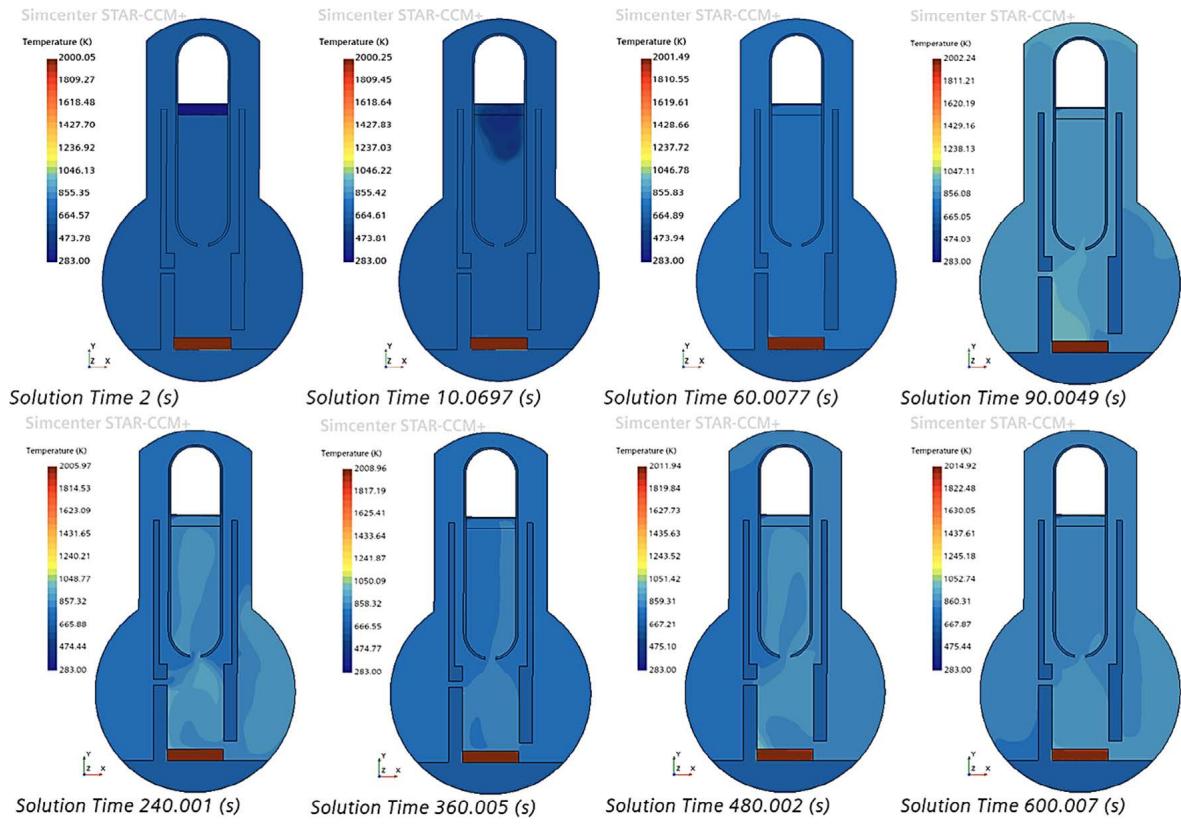


図 3-22 温度分布変化

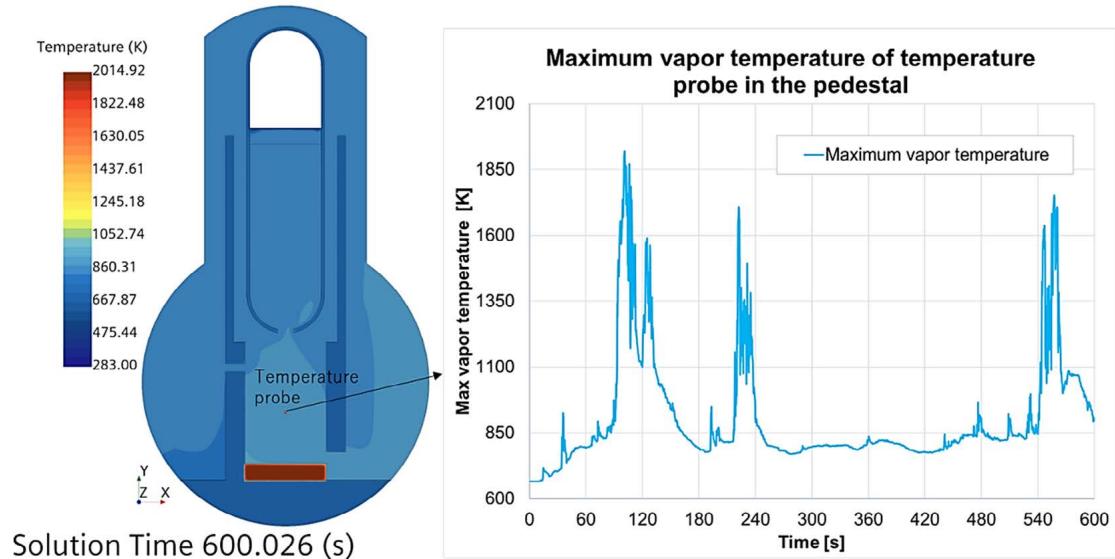


図 3-23 ペデスタル内気相温度履歴

図 3-24 に 600 秒時点でのペデスタル底部のデブリ-コンクリートの温度分布を示す。底部コンクリート温度は、おおよそ 0.8 cm までが 1,673 K、2.4 cm までが 1,473 K に加熱されていることがわかる。コンクリート融点が約 1,500 K であることを考慮すると、この解析結果からは約 1 cm のコンクリートが溶融する可能性がある。コンクリート深さ 5.4 cm 程度までは強度低下する温度 (1,073 K) [47] まで加熱されている。コンクリートは熱伝導率が低いため、熱影響部が小さい結果となっている。

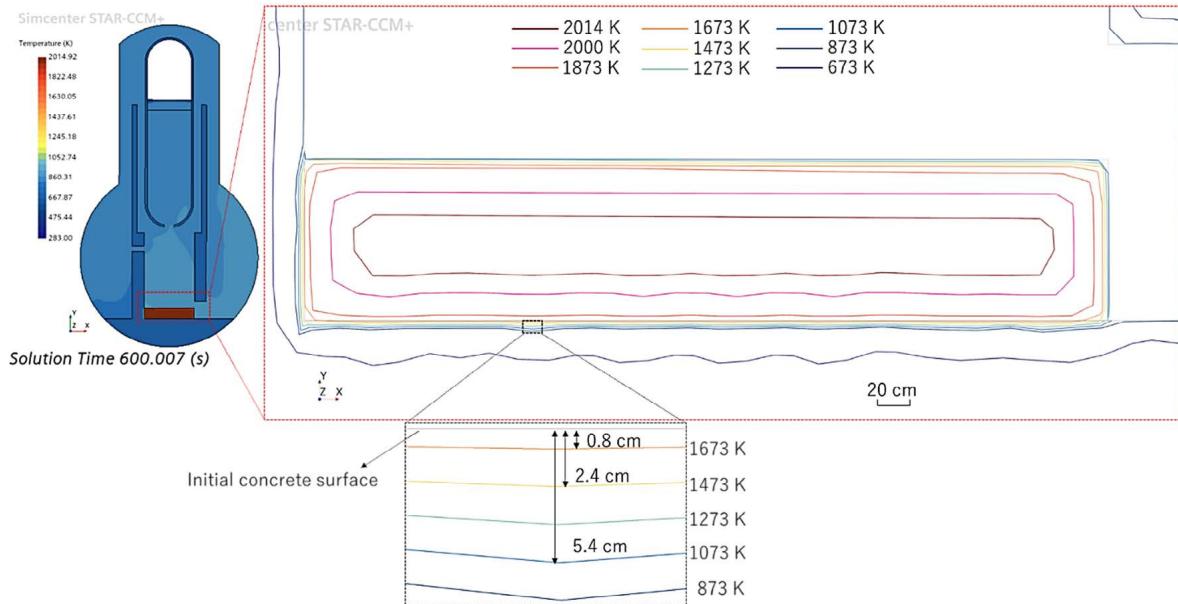


図 3-24 デブリとコンクリートの温度等高線図

図 3-25 に燃料デブリから水蒸気及びコンクリートへの熱流束を示す。デブリからコンクリートへの伝熱挙動は比較的安定しているが、デブリから水蒸気へは水蒸気温度の影響を受け時間によって上下している。燃料デブリからの伝熱挙動は水蒸気冷却の影響が大きいことがわかり、これを考慮する必要がある。

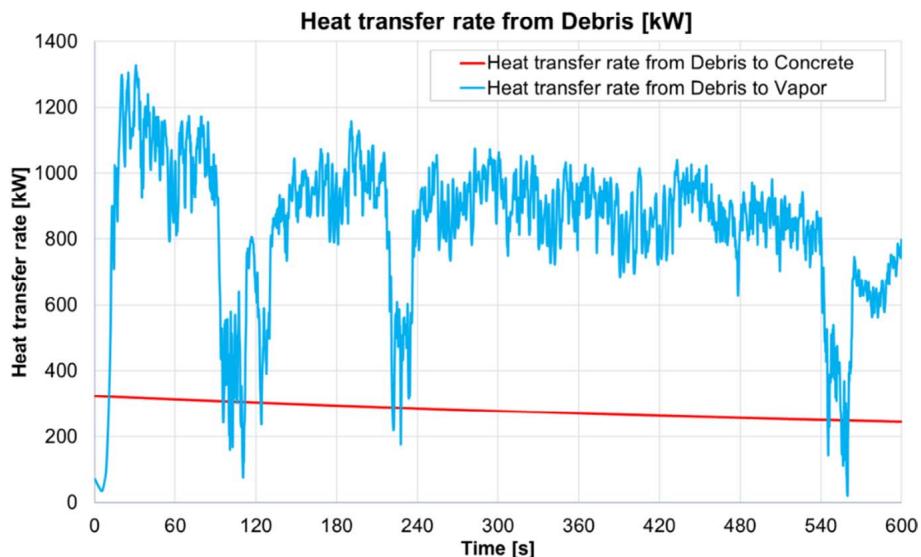


図 3-25 デブリからコンクリート・水蒸気への熱伝達率

(4) 解析結果

STAR-CCM+を用いて、1号機のD/Wにおけるデブリ、コンクリート、蒸気の多相交互作用の予備解析を実施し、ペデスタル領域のコンクリート温度分布を解析可能であることを確認した。本予備解析の結果では、燃料デブリからコンクリートへの伝熱はおよそ 250～300 kW 程度となり、水蒸気冷却の影響を考慮する必要がある。令和6年度以降は、令和5年度の計算で考慮していなかったコンクリート溶融潜熱を解析に組込むなど、より詳細な解析を実施する予定である。

3.2.2 コンクリート破損に関わる特殊な外部環境要因に対する要素挙動試験と総合試験 (連携先: 原子力機構)

(1) 本研究の概要

1F1号機ペデスタル部のコンクリートの破損状況について、1F事故特有の環境要因についての影響を評価する。1F事故では、燃料デブリ（酸化物+金属）がコンクリートと反応したと考えられている。また、冷却水の注水により水蒸気が発生しており、コンクリートは高温水蒸気雰囲気下にさらされていたと考えられる。これらの要因がコンクリート破損に与える影響を評価するために、ウラン酸化物とコンクリートの高温反応試験及び金属デブリとコンクリートの水蒸気雰囲気下での高温反応試験を実施する。

(2) ウラン酸化物とコンクリートとの反応試験

燃料デブリとコンクリートとの反応試験を実施し、コンクリート破損挙動を観察した。令和5年度は、令和6年度の試験に向けてウラン酸化物を含む模擬燃料デブリとして酸素50 at%以下のU-Zr-O試料をアーク溶解により作製した。また、予備試験としてコンクリートと金属Zrの高温反応試験を実施した。作製したU-Zr-O試料及び反応試験試料の断面観察・元素分析により生成相を明らかにしたうえでそれぞれの反応状況を評価した。

① U-Zr-O試料の作製

1) U-Zr-O試料組成の決定

令和6年度のウラン酸化物-コンクリートの反応試験に向けて、U-Zr-O試料を作製した。1号機の事故シナリオ[42]では、燃料デブリがRPVからペデスタル領域へと流出しているが、その際の温度は2,400 K程度であるとSA解析結果[48]から予測されている。また、燃料デブリは完全に酸化されておらず、U-Zr-O系では比較的低温での液相を形成する可能性がある。熱力学計算ソフトThermo-calcとTAF-IDデータベース[49]より計算した2,400 KにおけるU-Zr-O状態図を図3-26に示す。この温度においてもU-Zr-Oの液相が存在していることがわかる。U-Zr-O試料組成は、2,400 Kの状態図において、燃料デブリ構成成分のUO₂-ZrO₂-Zr内の液相であり、酸化物が最大限溶解した液相として、0濃度が最大地点の0.07 at% U、0.49 at% Zr、0.44 at% Oを試料組成に設定した。

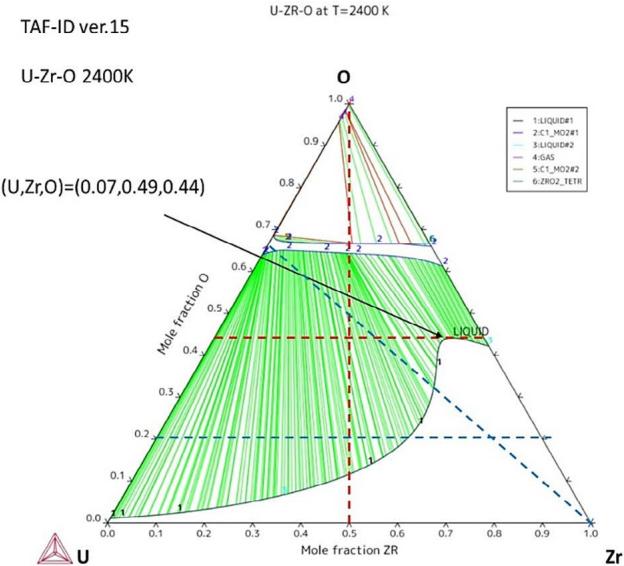


図 3-26 U-Zr-O 状態図 (2, 400 K)

2) 試料調整方法

出発材料として ZrO_2 、 UO_2 、 ZrH_2 を供試した。 UO_2 は Ar-20%H₂ 混合気流中約 900 °C 以上で定比組成に還元処理した UO_2 を使用した。金属 Zr 粉末は発火の恐れがあるため、 ZrH_2 粉末を供試した。 ZrH_2 粉末は、旧日本原子力研究所が分析用標準試料として作製・頒布していた金属 Zr チップ (JAERI-Z21、99. 9%) を Ar-20%H₂ 混合気流中約 500 °C で加熱して水素化したものである。 ZrH_2 は加熱試験中金属 Zr と水素ガスに分解することが予測される。 ZrO_2 、 UO_2 、 ZrH_2 は合計 1 g、表 3-7 に示す混合組成となるよう秤量し、乳鉢中で混合した後、タンクステンカーバイド製のダイス (内径 10.3 mm) を用いて約 100 MPa の圧力でペレット状に成型した。成形体は 4 個作製した。なお、原料の準備、保管、秤量、混合、成型の一連の作業は、酸化あるいは水分吸着の影響を避けるため、高純度 Ar 霧囲気のグローブボックス中で行った。アーク溶解炉外観写真、加熱前成形体の外観写真を図 3-27 に示す。成形体をアーク溶解炉の水冷銅ハース (試料台) 上に置き、試料室を真空引きした後 Ar ガスを導入し、アーク溶解を行った。まず、試料台中央に設置した Ti 金属ボタンにアークを飛ばし、溶融させることで酸素濃度を下げ、その後成形体にアークを飛ばし溶融を行った。試料は放冷固化した後、上下反転を行い、再度溶融、放冷固化を行い試料全体がなるべく均質化するようにした。この手順で成形体 4 個の溶融固化を行った。固化後の試料のうちの一つを分析用に用いた。試料をアクリル樹脂に包埋した後に精密切断機で鉛直方向に切断し、断面を研磨紙及びダイヤモンドペーストで鏡面研磨した。光学顕微鏡及び SEM による組織観察、EDS による元素分析、X 線回折測定による生成相の同定を行った。2 次電子像には、多数の点分析によって評価した各相の平均的な元素組成 (at%) を示した。また、広い範囲 ($\sim 1 \text{ mm}^2$) での面分析を行い、平均組成を算出した。

表 3-7 U-Zr-0 アーク溶解組成及び重量

目標組成		UO ₂	ZrO ₂	Zr
	at%	12.5	26.79	60.71
	wt%	27.63	27.02	45.35
供試材料		UO ₂	ZrO ₂	ZrH ₂
	重量(g)	0.28	0.27	0.45

図 3-27 アーク溶解炉外観写真及び ZrO₂-UO₂-ZrH₂ 加熱前成形体の外観写真

3) 試料調製及び分析結果

加熱後の外観写真（ナンバー1～4）を図 3-28 に示す。固化後は、直径～7 mm 程度のボタン状の金属が得られた。光学顕微鏡による U-Zr-0 断面観察写真を図 3-29 に示す。金相写真から全体的に均一で溶け残り等は起こっていないことがわかる。上部のクラックは溶融状態からの急冷の際に発生したと考えられる。



図 3-28 アーク溶解後 U-Zr-0 外観写真（ナンバー1～4）

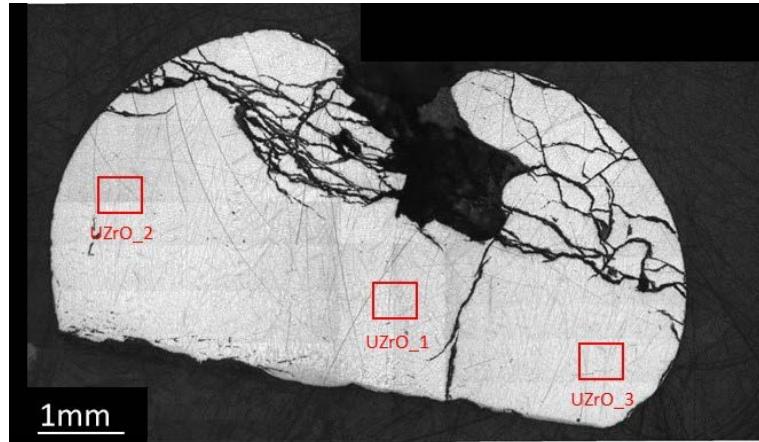


図 3-29 U-Zr-O 断面金相写真及び元素分析領域

領域 UZrO_1 の 2 次電子像及び元素分析結果を図 3-30 に示す。(1)U を~13 at%程度含む明るい U リッチ相と、(2)U を~2 at%程度含む暗いマトリクス Zr リッチ相が観測された。暗い相は Zr/O 比が 63/37 であり、高温でできた α -Zr(0) であることが考えられる。ただし、EDS の酸素濃度の定量性は低い。広い範囲 ($\sim 1 \text{ mm}^2$) で行った面分析の結果、UZrO_1 は 51.0 at% O, 43.2 at% Zr, 5.8 at% U であり、初期組成 (44 at% O, 49 at% Zr, 7 at% U) と比較して若干 U 濃度が低い。

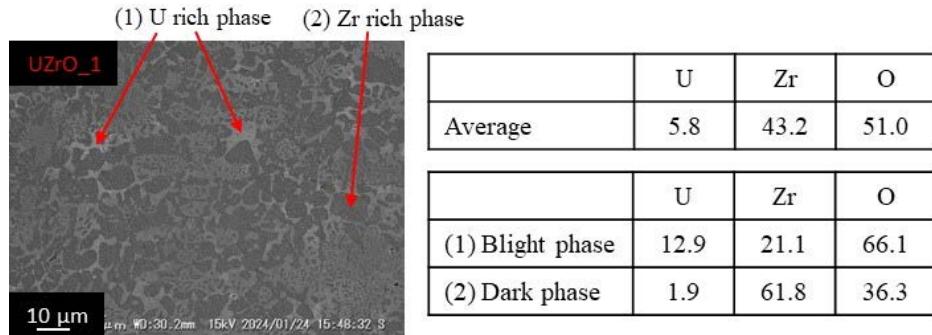
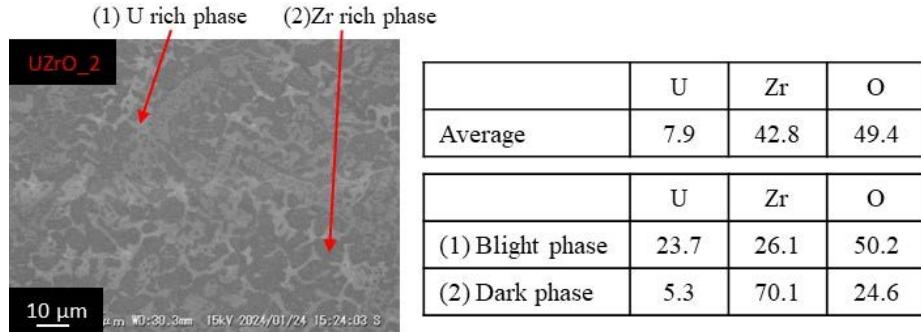
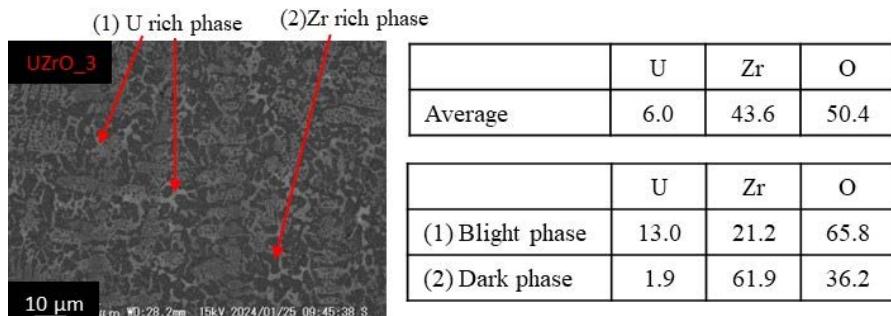


図 3-30 UZrO_1 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)

領域 UZrO_2 の 2 次電子像及び元素分析結果を図 3-31 に示す。(1)U を~24 at%程度含む明るい U リッチ相と、(2)U を~5 at%程度含む暗いマトリクス Zr リッチ相が観測された。暗い相は Zr/O 比が 74/26 であり、高温でできた α -Zr(0) であることが考えられる。広い範囲 ($\sim 1 \text{ mm}^2$) で行った面分析の結果、UZrO_2 は 49.4 at% O, 42.8 at% Zr, 7.9 at% U であり、初期組成 (44 at% O, 49 at% Zr, 7 at% U) に近い値を示している。

図 3-31 UZrO₂ の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)

領域 UZrO₃ の 2 次電子像及び元素分析結果を図 3-32 に示す。(1)U を～13 at%程度含む明るい U リッチ相と、(2)U を～2 at%程度含む暗いマトリクス Zr リッチ相が観測された。暗い相は Zr/O 比が 63/37 であり、高温でできた α -Zr(0) であることが考えられる。広い範囲 (～1 mm²) で行った面分析の結果、UZrO₃ は 50.4 at% O、43.6 at% Zr、6.0 at% U であり、初期組成 (44 at% O、49 at% Zr、7 at% U) に近い値を示している。

図 3-32 UZrO₃ の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)

ZrO_{1, 2, 3} の面分析結果の平均は 50.2 at% O、43.2 at% Zr、6.6 at% U であり、Zr/U 比は 86.7/13.3 である。一方で、初期組成の Zr/U 比は 87.5/12.5 であり、EDS の酸素の定量性を考慮するとおおよそ一致しているといえる。

U-Zr-O 断面の X 線回折プロファイル及び同定できた相を図 3-33 に示す。ZrO_{0.333} とピークが一致しており、SEM/EDX で検出された α -Zr(0) であることが予測される。SEM/EDX で検出された U リッチ相は回折ピークが検出されず、同定できなかった。面心立方 UO₂ のピークは観測されなかったことから、U リッチ相は二酸化物ではないことが考えられる。

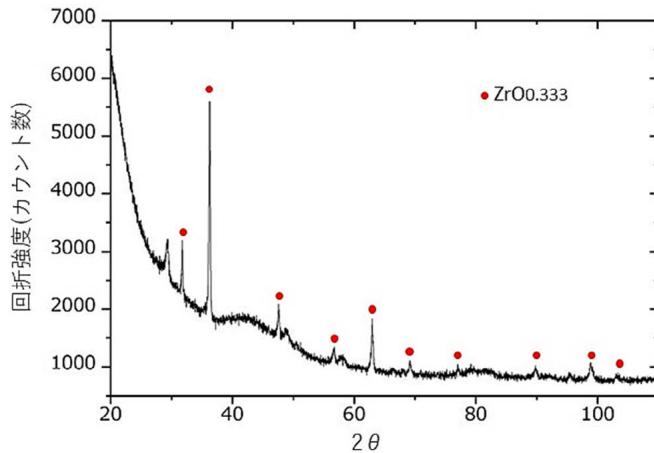


図 3-33 U-Zr-O 試料断面の X 線回折プロファイル

SEM/EDX 及び X 線回折プロファイルから予測される U-Zr-O の生成相及び面分析から得られた平均組成を表 3-8 にまとめた。

表 3-8 U-Zr-O 生成相及び平均組成

面分析から得られた平均組成	50.2 at% O、43.2 at% Zr、6.6 at% U (Zr/U 比 86.7/13.3)
生成相	α -Zr (0) U リッヂ酸化物

② 燃料デブリ - コンクリート高温反応予備試験

1) 実験方法

ウラン酸化物を使用したコンクリート反応試験は、令和 6 年度を予定しているため、令和 5 年度は、予備試験として金属 Zr とコンクリートの高温反応試験を実施した。

コンクリート片約 1 g 及び Zr ロッド約 1 g を径 14 mm の Al_2O_3 るつぼに装荷し、加熱試験に供試した。コンクリートは過去の英知事業[50]で作製した 1F 模擬コンクリートを、金属 Zr ロッド（ニラコ社製、 $\phi 6.3 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 99.2%）は市販品を用いた。反応試験は、ケラマックス炉 (NEW KERAMAX FURNACE QR-1850V) で行った。Ar ガス 0.2 L/min 気流中で昇温速度 10 K/min で昇温し、最高温度でコンクリート融点付近である 1,500 K、1,600 K で 1 時間保持した後、降温速度 10 K/min で降温した。

自然冷却した試料はエポキシ樹脂に包埋した後に精密切断機で鉛直方向に切断し、断面を研磨紙及びダイヤモンドペーストで鏡面研磨した。光学顕微鏡及び SEM による組織観察、EDS による元素分析を行った。2 次電子像には、多数の点分析によって評価した各相の平均的な元素組成 (at%) を示した。加熱前、加熱後及び切断後の外観写真を図 3-34 に示す。



図 3-34 コンクリート・金属 Zr 反応試験 試料外観写真
(加熱前、加熱後及び切断後)

2) 試験結果

1,500 K 保持試料の断面全体 (光学顕微鏡) を図 3-35 に示す。金属 Zr、コンクリート片とともに加熱前の形状を保っており、溶融は確認できない。SEM によるコンクリート-Zr 界面のマッピング画像を図 3-36 に示す。コンクリート/金属 Zr 界面での元素の移動は確認されず、1,500 K では反応は起こらなかったことがわかる。

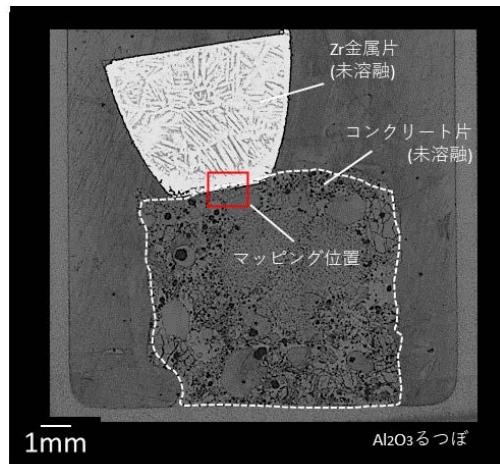


図 3-35 コンクリート・金属 Zr 反応試験 (1,500 K) 断面金相写真及び面分析領域

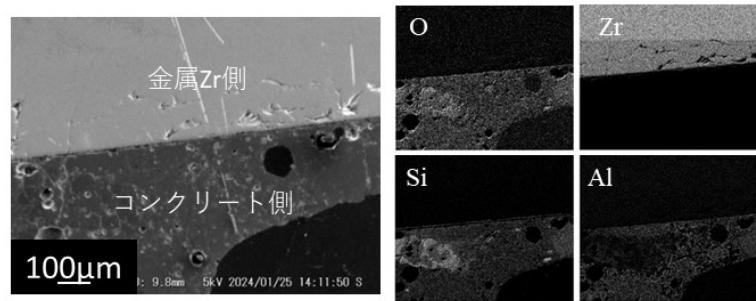


図 3-36 コンクリート・金属 Zr 反応試験 (1,500 K) 界面マッピング画像

1,600 K 保持試料の断面全体像（光学顕微鏡）及び元素分析領域を図 3-37 に示す。金属 Zr は加熱前の形状を保っているが、コンクリート中のセメント部が溶融している様子が確認できる。一方で、コンクリート中の骨材は溶け残っている。溶融セメント部がるっぽ下部に溜まり、未溶融骨材の上に未溶融金属 Zr が乗っていることが確認できる。

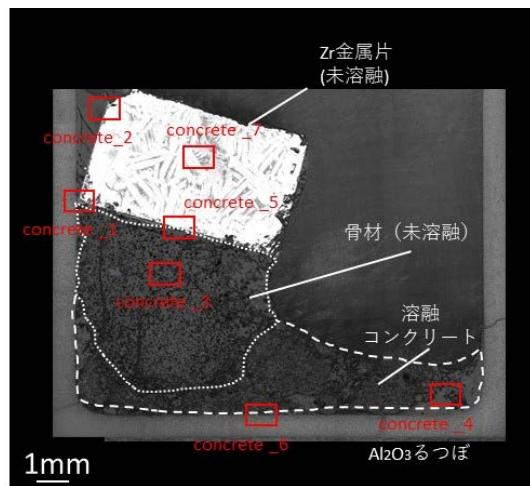


図 3-37 コンクリート・金属 Zr 反応試験 (1,600 K) 断面金相写真及び元素分析領域

領域 concrete_1 の 2 次電子像及び元素分析結果を図 3-38 に示す。この領域は、未溶融金属 Zr と溶融コンクリートの境界を示しており、右上の明るい領域(1)は金属 Zr、左側の暗いマトリクス(4)は溶融コンクリートを示している。光学顕微鏡による断面観察から金属 Zr は溶融していないことが推測されるが、(1)及び(4)の境界では、コンクリート成分と Zr が反応した相が観察された。(1)金属 Zr の粒界では、 $\sim 20 \mu\text{m}$ 程の金属相(2)59Si-36Zr-5Fe が観測され、Si/Zr 比が 62/38 であることから ZrSi₂ 型金属に相当すると考えられる。さらに、金属 Zr 表面から $\sim 10 \mu\text{m}$ 程の Zr とコンクリート成分が反応した酸化物相(3)Zr-Ca-Si-Al-O が排出されている様子が確認できる。

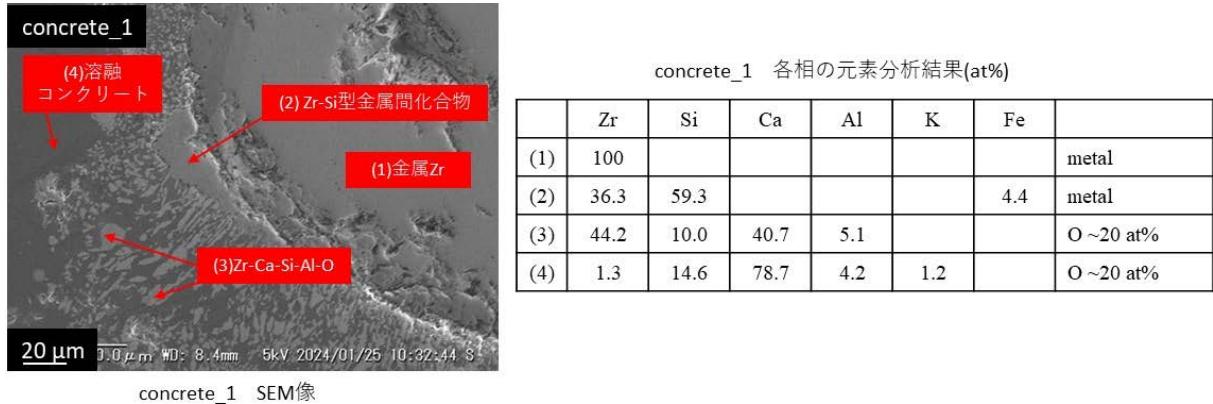


図 3-38 領域 concrete_1 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)

領域 concrete_2 の 2 次電子像及び元素分析結果を図 3-39 に示す。領域 concrete_1 と同様、(1) 金属 Zr と (4) 溶融コンクリートの境界で (2) Zr-Si 型金属が観察されたが、Si/Zr 比が 42/58 であることから、 SiZr_2 もしくは Si_2Zr_3 に相当することが考えられる。さらに、(3) Zr とコンクリート成分の反応層 Zr-Si-Al-O も観測された。

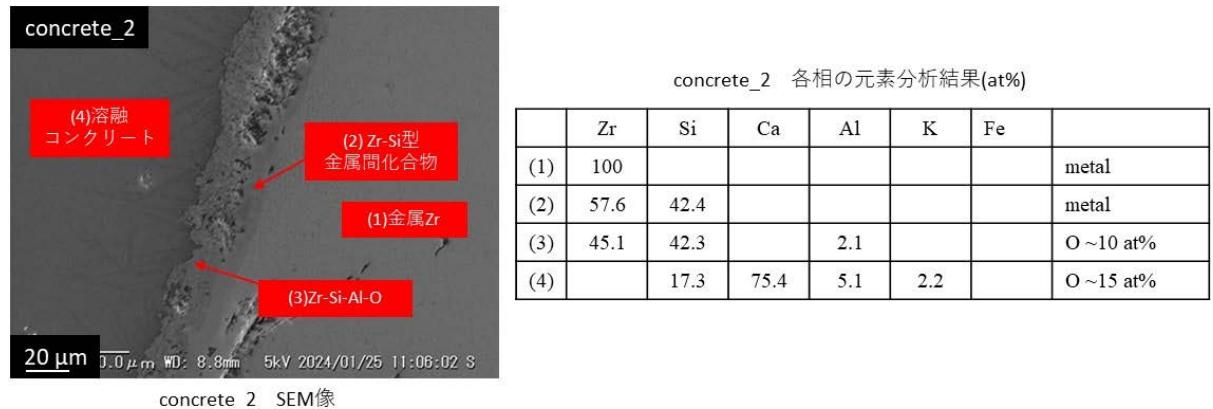


図 3-39 領域 concrete_2 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)

領域 concrete_3 及び 4 の 2 次電子像及び元素分析結果を図 3-40 に示す。領域 concrete_3 は、未溶融の骨材部分を示している。面分析の結果、組成は 62.6 at% Si、16.2 at% K、11.1 at% Ca、8.4 at% Al、1.6 at% Na であり、Si に続き K を多く含むことが明らかとなった。Concrete_4 は溶融コンクリート部を示している。面分析の結果、組成は 45.0 at% Ca、43.9 at% Si、4.7 at% Al、4.2 at% Zr、2.3 at% Na であり、Ca、Si を主成分とすることが明らかとなった。

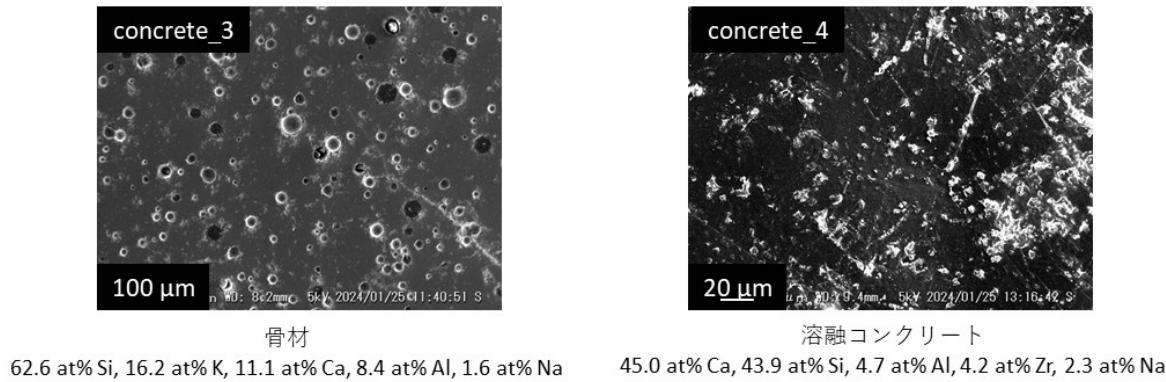


図 3-40 領域 concrete_3 及び concrete_4 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)

領域 concrete_5 の 2 次電子像及び元素分析結果を図 3-41 に示す。領域 concrete_5 は、未溶融骨材と未溶融 Zr が接触している領域を示している。金属 Zr/溶融コンクリート反応面と同様、界面では Si-Zr 型金属が観察された。ただし、骨材と Zr の反応ではなく、セメントが溶融する過程で一部が骨材表面に残り、Zr と反応した可能性も考えられる。

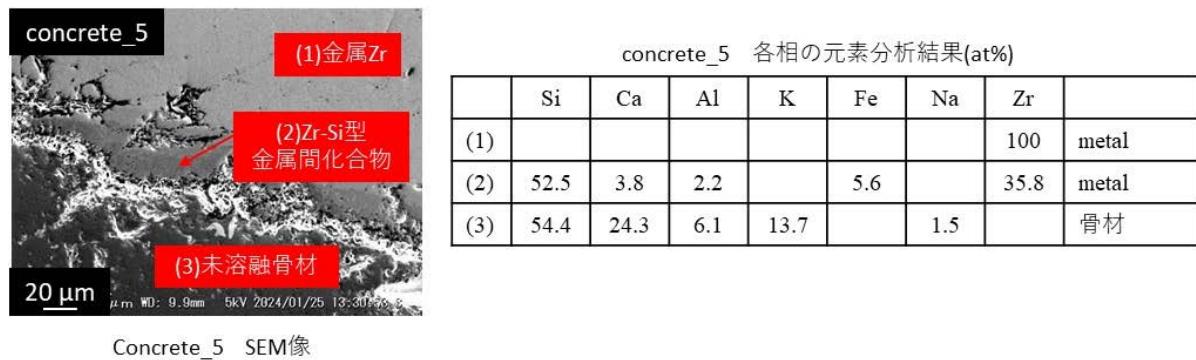


図 3-41 領域 concrete_5 の 2 次電子像及び元素分析結果 (at%)

領域 concrete_6 の 2 次電子像及び元素分析結果を図 3-42 に示す。領域 concrete_6 は、Al₂O₃ るつぼと溶融コンクリートの境界部分を示している。マッピング画像より、下部るつぼからの Al の溶出やコンクリート成分の浸食は認められず、試料とるつぼの反応は起こっていないことがいえる。Ca の濃淡が観察されたが、骨材やセメント中の場所によって Ca 濃度に変化があることが考えられる。

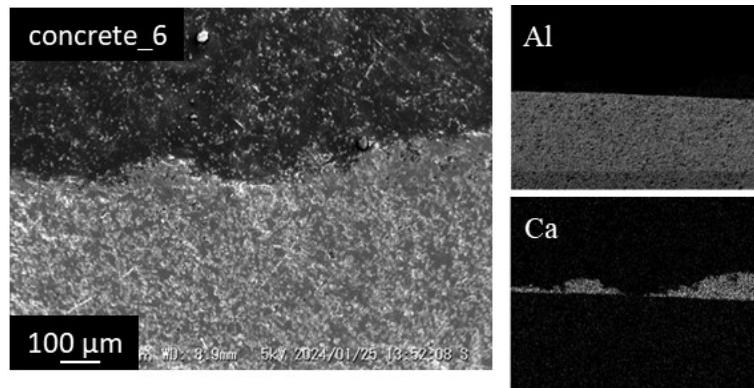


図 3-42 領域 concrete_6 の 2 次電子像及びマッピング画像

領域 concrete_7 の 2 次電子像及び元素分析結果を図 3-43 に示す。領域 concrete_7 は、金属 Zr の中央部分を示している。断面の金相写真から金属 Zr 中に棒状の組織が観察されたが、元素分析の結果金属 Zr 成分以外は観測されず、ボイドの集まりのような組織であることがわかった。

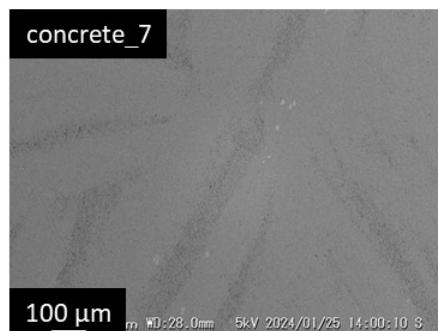


図 3-43 領域 concrete_7 の 2 次電子像（金属 Zr）

図 3-44 に金属 Zr/コンクリート反応試験(1,600 K)の反応層のイメージ図を示す。1,600 K では、溶融したセメントと Zr が反応して Si-Zr の化合物を形成するが、反応は接触面のみで限定的である結果となった。

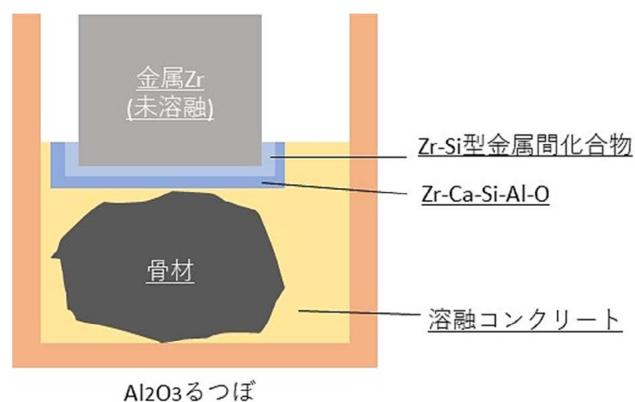


図 3-44 金属 Zr/コンクリート反応試験 (1,600 K) 反応層イメージ図

(3) 金属デブリとコンクリートの水蒸気雰囲気高温反応試験

水蒸気雰囲気下におけるコンクリートの熱変質及び金属デブリとの反応挙動を観察するために反応試験を実施した。令和5年度は予備試験として、コンクリート試料を溶融温度以下の1,100 °Cにおいて水蒸気の有無の条件で反応試験を実施した。また、同時に金属デブリと接触させたコンクリート試料を同条件で反応させその挙動を確認した。

① 試験条件

水蒸気雰囲気及び金属デブリとの反応によるコンクリート損傷挙動を観察するために反応試験を実施した。試験条件を表 3-9 に示す。試験温度はコンクリート融点以下の1,100 °Cとし、Ar 雰囲気及び水蒸気雰囲気で4時間保持した。コンクリート単体及び模擬金属デブリと接触させた試料を水蒸気雰囲気下制御棒崩落試験装置 (MEISAN:Medium-scale Equipment for Investigation of Severe Accidents in Nuclear reactors) にて加熱試験を実施した (図 3-45)。本試験装置は、カーボンヒーター最高1,800 °Cにて加熱部にボイラで発生させた水蒸気を流入することで、水蒸気雰囲気下での高温試験を実施することができる。試験に使用したコンクリートは過去の英知事業[50]で製作した普通ポルトランドセメント及びフライアッシュ及びSi系骨材を使用した1F模擬コンクリートを使用した。模擬金属デブリは、原子炉金属材料であるZrとSUS304の合金とし、状態図上 (TAD-ID データベース[49]を使用し計算、図 3-46) の共晶組成であるZrリッチ/ステンレス鋼リッチ組成にてアーク溶解にて合金ペレットを製作した。これら試料を縦15 mm、横10 mm、高さ10 mmに切断して試験に供試した。試験後の試料は、エポキシ樹脂に包埋した後に精密切断機で鉛直方向に切断し、断面を鏡面研磨後、光学顕微鏡及びSEM-EDSによる組織観察、元素分析を行った。

表 3-9 試験条件

温度 °C	保持時間 h	雰囲気	試料
1,100	4	Ar	コンクリート単体
			+Zrリッチ金属デブリ
			+ステンレス鋼リッチ金属デブリ
	H ₂ O 5 g/min		コンクリート単体
			+Zrリッチ金属デブリ
			+ステンレス鋼リッチ金属デブリ

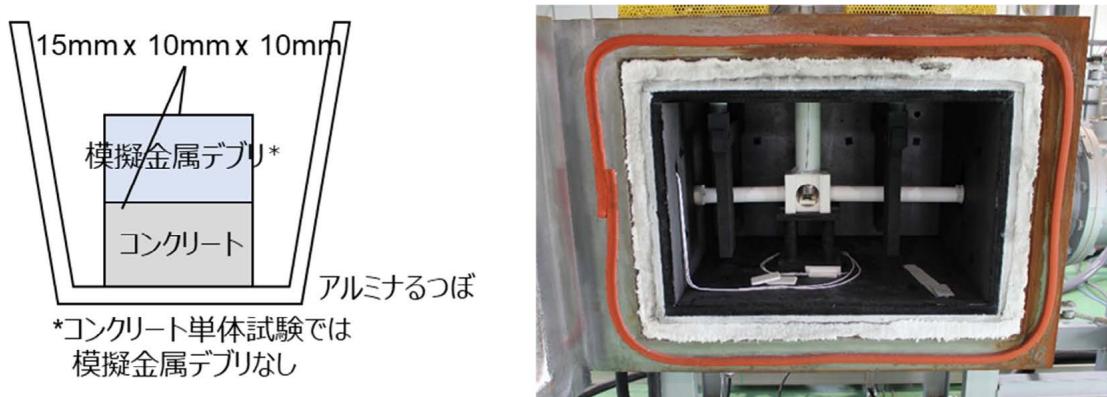


図 3-45 試験体系模式図（左）及び MEISAN 試験装置（右）

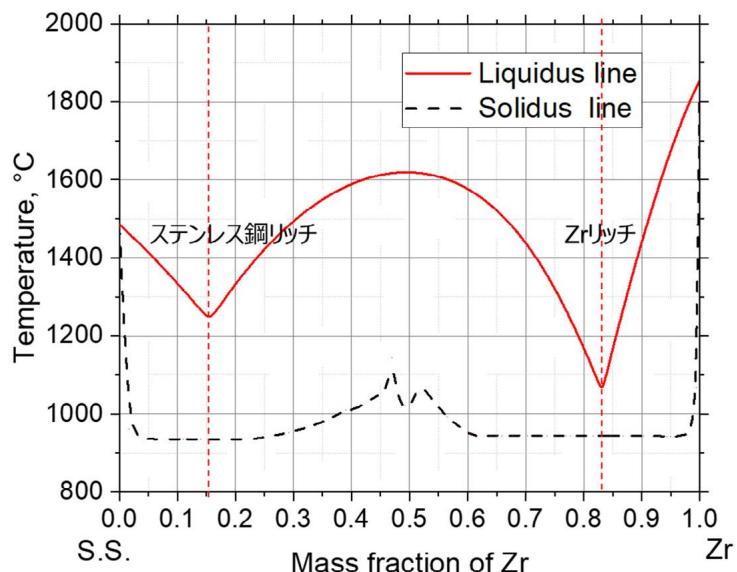


図 3-46 Zr-SUS304 の固/液相線図

② 試験結果

Ar 雰囲気試験後の試験体外観を図 3-47 に示す。コンクリート単体としては、形状には変化がなく 1,100 °C では溶融が開始していないことがわかる。表面上は骨材、セメントともに若干暗く変色している。金属デブリとしては Zr リッチ金属デブリは一部溶融しコンクリートと固着、反応した。一方、ステンレス鋼リッチ金属デブリは、溶融及びコンクリートとの反応は起きなかった。この二つの金属デブリの融点（図 3-46）は、Zr リッチの場合は約 1,100 °C と低温で溶融することに対し、ステンレス鋼リッチでは約 1,300 °C と融点が高くなっている。本試験温度では、Zr リッチ金属デブリが溶融したため、コンクリートと反応したと考えられる。ステンレスリッチ金属デブリのようにコンクリートとの固体どうしでの反応は起きにくいため結果となった。

	コンクリート単体	+ Zrリッチ金属デブリ	+ ステンレス鋼リッチ金属デブリ
試験前			
試験後			

図 3-47 Ar 霧囲気試験後の試験体外観

図 3-48 に水蒸気霧囲気試験後の試料外観を示す。高温水蒸気下においても、コンクリート単体としては形状を維持し、溶融は発生しなかったことがわかる。Ar 霧囲気の場合と同様に表面上は骨材、セメント部が変色している様子がみられる。金属デブリとの反応においては、金属デブリ両組成とともにコンクリートとは反応しない結果となった。Zr リッチ金属デブリ自体も溶融しておらず、水蒸気により表面酸化されることで溶融が進まなかったと考えられる。そのためコンクリートとの反応も抑制されたと考えられる。

	コンクリート単体	+ Zrリッチ金属デブリ	+ ステンレス鋼リッチ金属デブリ
試験前			
試験後			

図 3-48 水蒸気霧囲気試験後の試験体外観

コンクリート単体試料の断面観察及び SEM-EDS 分析結果を図 3-49 に示す。双方の条件とともに、上述した表面変色だけでなくコンクリート内部まで試験後で変色していることがわかる。水蒸気の有無で試料を比べてみると、特にセメント部の色に差異がみられ、Ar 霧囲気試験の試料のほうが暗い色に変色していることがわかる。SEM-EDS 分析結果で

は、双方ともにセメント部は Ca-Si-Al-C から主に構成されていることがわかる。EDS 分析のため、軽元素濃度の分析精度が低いが、水蒸気の有無における成分差はみられなかった。

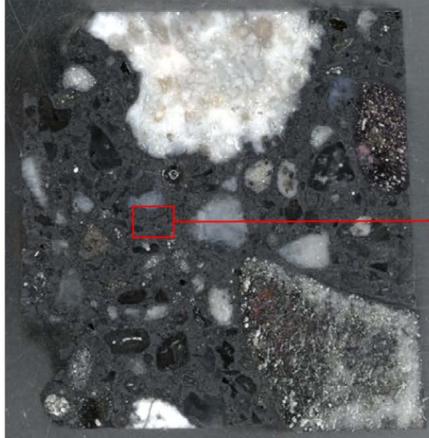
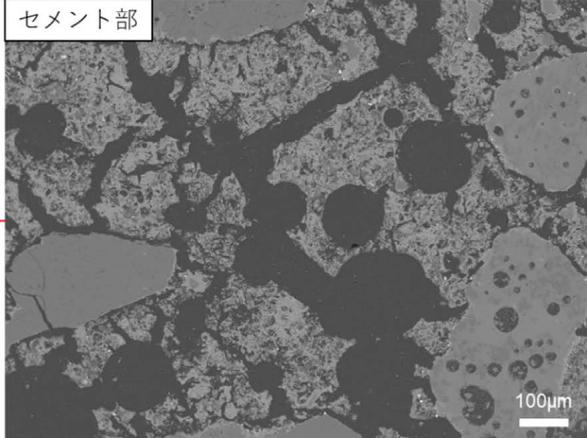
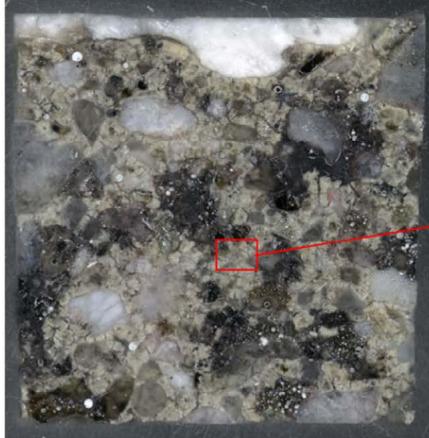
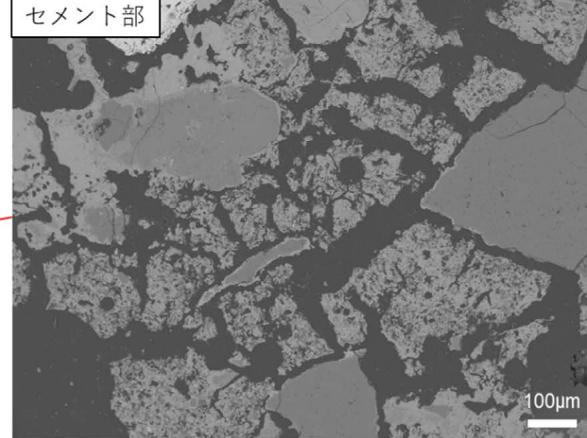
Ar 霧囲気試験後試料																	
水蒸気霧囲気試験後試料																	
測定箇所 霧囲気																	
組成 at%																	
	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Ni	Zr	
セメント	Ar	39.49	39.86	0.04	0.42	2.71	6.20	0.00	0.31	0.08	0.02	10.12	0.08	0.03	0.65	0.02	0.00
セメント	H ₂ O	45.28	35.99	0.04	0.42	2.17	5.46	0.00	0.00	0.15	0.00	9.82	0.10	0.03	0.54	0.01	0.00

図 3-49 コンクリート単体試料断面の観察結果（左）光学顕微鏡（右）BES 像

図 3-50 にコンクリート + Zr リッチ金属デブリの Ar 霧囲気試験後試料の断面観察及び SEM-EDS 分析結果を示す。金属デブリが溶融しコンクリートと固着、内部に侵食していることがわかる。BES 像からは骨材界面で反応し、内部に侵食している様子が観察される。しかし、EDS 分析結果をみてみるとコンクリート成分が金属側に移行しておらず、反応は起きていないと示唆される。骨材表面のクラックに溶融金属が侵入し凝固したのみで、1,100 °C では溶融が進行するような反応は起きないと考えられる。セメント部も骨材部と同様にクラックに金属デブリが侵食していると考えられる。この部分の金属デブリは微量の Si 成分が検出され、わずかにセメントと反応した可能性があるが、主としてはクラックに侵入して反応は限定的だったと考えられる。

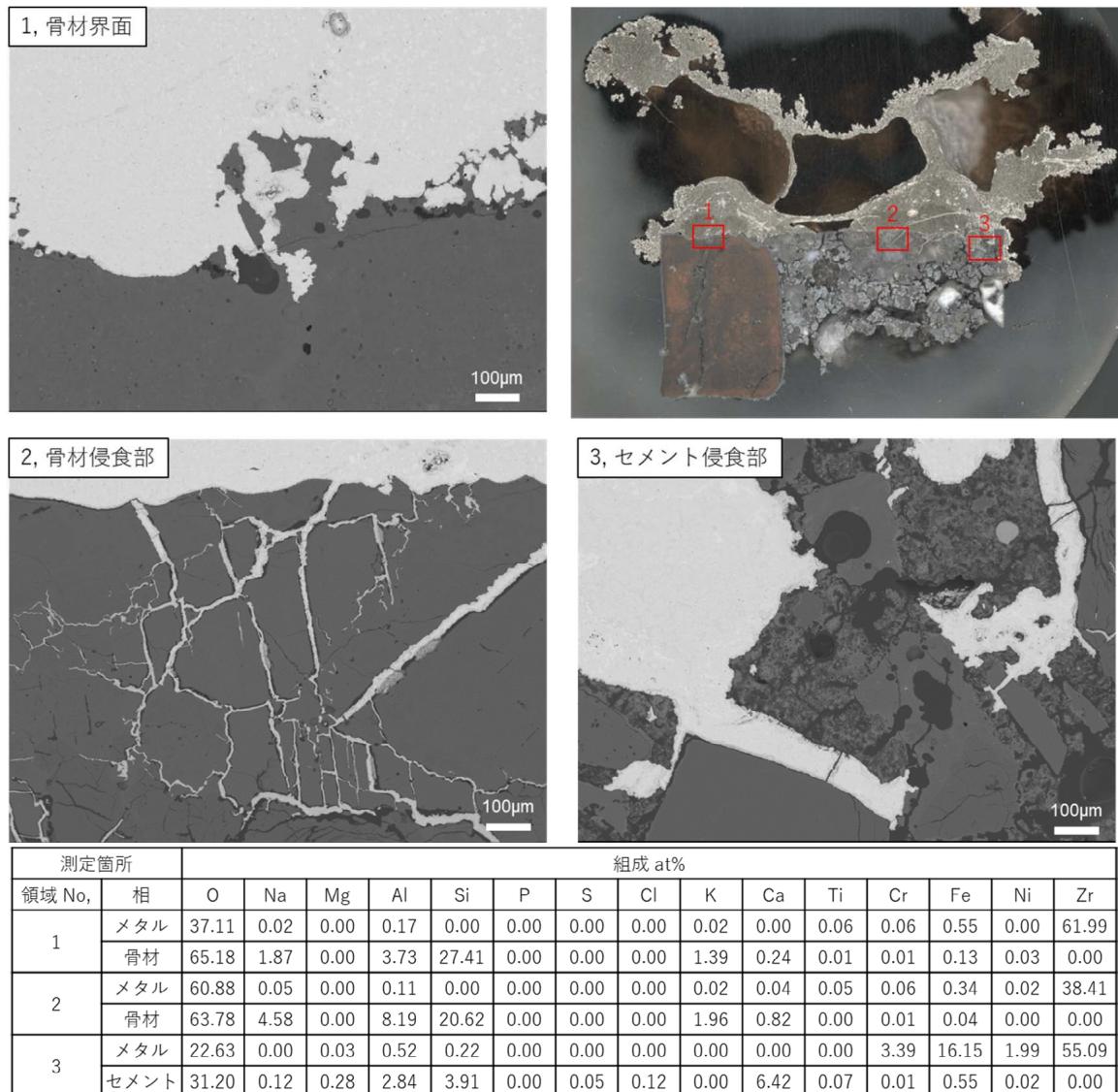


図 3-50 Ar 霧囲気、Zr リッチ金属デブリ反応試験試料の断面観察結果
(右上) 光学顕微鏡、(左上、左下、右下) BSE 像

令和 5 年度試験条件の 1, 100 °C では、水蒸気霧囲気の有無及び金属デブリとの反応により、コンクリート溶融温度の低下といった破損の進展現象は観察されない結果となつた。水蒸気の有無において、セメント部の変色の差異がみられたが成分上の違いはみられなかつた。令和 6 年度は各種条件を変え、コンクリート破損挙動を確認するとともにより詳細な分析が実施していく予定である。

(4) まとめ

コンクリート破損挙動において、燃料デブリとの反応や水蒸気霧囲気下による加熱といった 1F 事故特有の要因の影響について試験を実施した。令和 5 年度は、令和 6 年度に向けた U-Zr-0 試料の調整及び模擬金属デブリとの反応、水蒸気霧囲気下での予備試験を実施した。金属デブリとの反応では、コンクリートと金属デブリが固体どうしでは反応が進まず、どちらかが溶融した場合に接触界面近傍のみで反応する結果となつた。コンクリート溶融温度及び破損挙動の顕著な変化はみられなかつた。水蒸気の有無により、加熱試験後のセメント部の変色は様子が異なる結果となつた。しかし、成分的な差異は観察されなかつた。

3.3 総合評価

上記成果を反映して、コンクリート破損メカニズムに関わる総合的な検討・評価を行った。また、令和5年度第1回英知事業ワークショップ、令和5年度1F事故進展基盤研究に関する分科会に参加し、CLADSを介した情報交換を実施した。令和5年度の情報交換の概要を表3-10に示す。所期の全体計画は概ね順調に進んだ。

表 3-10 情報交換

	開催日	会合名
1	令和5年12月5日(火)	令和5年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業福島リサーチカンファレンス／ワークショップ
2	令和6年1月9日(火)	中間フォロー

3.4 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびにCLADS等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための全体会合をハイブリッドで2回開催した。令和5年度の会合の概要を表3-11に示す。所期の全体計画は概ね順調に進んだ。

表 3-11 全体会合

	開催日	議事概要
1	令和5年8月9日(水)	<p>＜キックオフミーティング＞</p> <ul style="list-style-type: none"> ・3年間の全体計画の確認 ・令和5年度の実施計画の確認 <p>高温による短期の溶解メカニズム</p> <ul style="list-style-type: none"> -加熱前後の物性取得（名古屋大学） -高温環境の熱力学平衡状態（東北大学） -高温環境のメソスケールひび割れ解析（東京大学） <p>温度履歴による長期の溶解メカニズム（名古屋大学）</p> <p>特殊な外部環境要因</p> <ul style="list-style-type: none"> -伝熱解析（原子力機構） -外部環境（原子力機構） <ul style="list-style-type: none"> ・今後のスケジュール確認
2	令和5年12月18日(月)	<p>＜進捗確認及び報告書作成に関する打合せ＞</p> <ul style="list-style-type: none"> ・各機関からの確認事項 ・CLADSの試験装置の見学及び実験打合せ ・中間フォロー提出資料の確認 ・今後のスケジュール確認

4. 結言

4.1 まとめ・今後の検討課題

(1) コンクリート固有の要因

① 高温による短期の溶解メカニズム

高経年化を模擬したセメントペースト及びコンクリート用骨材試験体の作製と高温時の溶融実験の条件設定についての予備実験を行い、加熱後の寸法変化、剛性変化、鉱物組成についてデータの取得方法を検討した。

熱力学的平衡計算を用いて、溶液の組成を変化させた解析を行うとともにセメント水和物の焼成実験を並行して行い、溶解現象の有無を判断するための解析フレームワークを構築した。

また、剛体バネモデル解析において加熱による体積変化を組み込む数値解析手法を構築した。

高温熱重量示差走査熱量測定による溶融挙動の取得や寸法変化については熱機械分析装置を用い、剛性変化については超音波伝搬速度測定装置を用い、鉱物組成については粉末X線回折を用いて、それぞれ予備実験を実施した。

セメント水和物の焼成実験を実施した。また、熱力学的相平衡計算により高温下における $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ の状態図を作成した。

その結果、C-S-HやAFm相などのセメント水和物のさまざまな温度における変態挙動を捉えることができた。熱力学的相平衡計算では、セメント組成範囲における状態変化の妥当性を確認することができた。また、3成分だけでなく鉄も含む組成を検討する必要性も明らかになった。

モルタル、岩石の温度に対する膨張量を入力条件とした、加熱によるコンクリートの体積変化モデルを構築した。

② 温度履歴による長期の溶解メカニズム

実際のペデスタル部の温度履歴と注水履歴を整理し、実験に用いるコンクリートの曝露条件（高温履歴、浸漬条件）を決定するとともに、材料の選定や膨張量を測定する手法を確立した。また、高温加熱後の水分供給による膨張現象に関する既往知見について整理した。想定されるペデスタルコンクリートが受けた履歴として、高温加熱（600 °C、1,000 °C）⇒冷却⇒水中浸漬及び高温加熱⇒水中浸漬の実験条件を構築し、セメントペーストとモルタルを用いて水中浸漬後のコンクリートの膨張挙動を観察した。その結果、高温加熱⇒冷却⇒水中浸漬ケースではライム膨張が発生し、高温加熱⇒水中浸漬では1,000 °Cの条件で水中で爆裂が発生することを確認した。

(2) 特殊な外部環境要因

① 燃料デブリの伝熱解析によるコンクリート熱条件の評価

公開されている事故シナリオ等を参照して、事故時の1号機PCVコンクリートの熱条件を評価するために伝熱予備解析を実施した。

燃料デブリとコンクリート接触による、コンクリートの熱条件にかかる予備解析を実施するために必要となる物性値を整備するとともに解析初期条件を設定した。予備解析の結果、コンクリートの温度分布を解析できることを確認した。

② コンクリート破損に関わる特殊な外部環境要因に対する要素挙動試験と総合試験

水蒸気や温度がコンクリート材の変質挙動に及ぼす影響について、コンクリート材の水蒸気雰囲気での高温保持小規模試験の予備試験を実施した。また、ウラン酸化物や金属デブリとコンクリートの反応挙動については、金属デブリのみに着目した反応予備試験を実施した。さらに、ウラン酸化物の酸素量に着眼した試験に供するウラン含有亜酸化物を作製した。

試験温度 1,100 °C で、水蒸気または不活性ガス雰囲気でのコンクリート単体での変質挙動の予備試験及び金属デブリとコンクリートとの反応挙動の予備試験では、顕著なコンクリートの変質はみられなかった。また、試験に供するウラン含有の亜酸化物を作製することができた。

(3) 総合評価

上記成果を反映して、コンクリート破損メカニズムに関わる総合的な検討・評価を行った。また、令和 5 年度第 1 回英知事業ワークショップ、令和 5 年度 1F 事故進展基盤研究に関する分科会に参加し、CLADS を介した情報交換を実施した。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための全体会合をハイブリッドで計 2 回開催した。

所期の全体計画は概ね順調に進んだ。

4.2 令和 6 年度以降の研究計画

(1) コンクリート固有の要因

① 高温による短期の溶解メカニズム

セメントペースト、コンクリート骨材、両者の混合物（モルタル調合を想定）の高温加熱実験を行い、加熱挙動を取得する。

高温がセメント組織に作用したときのセメント組織の安定性を熱力学的相平衡計算により推定する。計算結果と実際に焼成したセメント組織の結果を比較する。

ひび割れが生じた部材に水が侵入する数値解析手法を構築する。

② 温度履歴による長期の溶解メカニズム

想定されているペデスタル部の温度・注水履歴を模擬した曝露実験を実施し、高温加熱後の経時的な膨張量の測定と水分供給による膨張挙動の観察を実施する。

(2) 特殊な外部環境要因

① 燃料デブリの伝熱解析によるコンクリート熱条件の評価

公開されている事故シナリオ等を参照して、事故時の 1 号機 PCV にデブリが堆積した際の境界条件等の解析パラメータを整備する。1 号機 PCV の伝熱解析を実施し、コンクリートの熱分布を評価する。

② コンクリート破損に関わる特殊な外部環境要因に対する要素挙動試験と総合試験

水蒸気や温度がコンクリート材の変質挙動に及ぼす影響について、コンクリート材の水蒸気雰囲気での高温保持小規模試験を実施し、水蒸気の有無におけるコンクリート崩落挙動を評価する。また、ウラン酸化物を含む亜酸化模擬燃料デブリとコンクリートの高温反応試験を実施し、燃料デブリとの反応によるコンクリート破損挙動を評価する。

(3) 総合評価

上記成果を反映して、コンクリート破損メカニズムに関わる総合的な検討・評価を行う。

(4) 研究推進

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

参考文献

- [1] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials, Crc Press, 2016.
- [2] W.A. Deer, R.A. Howie, J. Zussman, An Introduction to the Rock-Forming Minerals, Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2013.
<https://doi.org/10.1180/DHZ>
- [3] V. Gardien, A.B. Thompson, D. Grujic, P. Ulmer, Experimental melting of biotite + plagioclase + quartz \pm muscovite assemblages and implications for crustal melting, J Geophys Res Solid Earth 100, 1995, pp. 15581-15591.
<https://doi.org/10.1029/95JB00916>
- [4] I. Maruyama, et al., Radiation-induced Alteration of Meta-chert, Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 20, 2022, pp. 760-776.
- [5] I. Maruyama, et al., Radiation-induced Alteration of Sandstone Concrete Aggregate, Journal of Nuclear Materials, vol. 583, 2023.
- [6] 松沢晃一他, 高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊特性に及ぼす粗骨材種類の影響, 日本建築学会構造系論文集, vol. 81, no. 727, 2016, pp. 1383-1390.
- [7] Z.P. Bažant, et al., Concrete at High Temperatures, Material Properties and Mathematical Models, Concrete Design and Construction Series, 1996.
- [8] 加藤優志, 五十嵐豪, 西脇智哉, 1,150 °Cまでの高温履歴を受けたセメント硬化体の力学的性質, コンクリート工学年次論文集, vol. 38, no. 1, 2016, pp. 687-692.
- [9] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials, CRC Press, 2016.
- [10] D.L. Hudson, C.A. Strydom, J.H. Potgoeter, The thermal dehydration of natural gypsum and pure calcium sulphate dihydrate(gypsum), Thermal Acta, vol. 282-283, no. 10, 1996, pp. 483-492.
- [11] W. Abdul, et al., CaO-SiO₂ assessment using 3rd generation CALPHAD models, Cem. Concr. Res., vol. 173, 2023, 107309.
- [12] S. Miyamoto, et al., Fundamental Property of Hardened Cement Paste and Mortar heated up to 1,500 Degree Celcius, International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation: Ikeda & Otsuki Symposium, 2016, pp. 323-328.
- [13] M. Malik, S.K. Bhattacharyya and Sudhirkumar V. Barai. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review. Construction and Building Materials 2021, 270, 121398.
- [14] C.R. Cruz, and M. Gillen. Thermal expansion of Portland cement paste, mortar, and Concrete at high temperature. Fire and Materials 1980, vol. 4, no. 2, pp. 66-70.
- [15] Yu-Fang Fu, Yuk-Lung Wong, Chi-Sun Poon, Chun-An Tang and Peng Lin. Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures. Cement and Concrete Research 2004, 34, pp. 789-797.
- [16] D.X. Xuan and Z.H. Shu, Temperature dependence of thermal induced mesocracks around limestone aggregate in normal concrete, Fire and Materials 2010, 34, pp. 137-146.

- [17] Umang Pulkit and Satadru Das Adhikary, Effect of micro-structural changes on concrete properties at elevated temperature, Current knowledge and outlook, *Structural Concrete* 2020, 23, pp. 1995–2014.
- [18] D. J. Naus, A compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures (NUREG/CR-7031). United States Nuclear Regulatory Commission, 2010.
- [19] M. Janota, O. Istok, Faux, A. David, McDonald, Peter J. Factors influencing the time dependence of porosity relaxation in cement during sorption, Experimental results from spatially resolved NMR. *Cement and Concrete Research* 2019, 120, pp. 256–266.
- [20] H. Sasano and I. Maruyama, Mechanism of drying-induced change in the physical properties of concrete, A mesoscale simulation study, *Cement and Concrete Research* 2021, 143, 106401.
- [21] M.A. Youssef and M. Moftah, General stress-strain relationship for concrete at elevated temperature. *Engineering Structures* 2007, 29, pp. 2618–2634.
- [22] U. Schneider, Concrete at high temperatures – A general review, *Fire Saf. J.* 13, 1988, pp. 55–68. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(88\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0379-7112(88)90033-1)
- [23] G.A. Khoury, Effect of fire on concrete and concrete structures, *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2, 2000, pp. 429–447. <https://doi.org/10.1002/pse.51>
- [24] Q. Ma, R. Guo, Z. Zhao, Z. Lin, K. He, Mechanical properties of concrete at high temperature–A review, *Constr. Build. Mater.* 93, 2015, pp. 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>
- [25] J. Piasta, Z. Sawicz, L. Rudzinski, Changes in the structure of hardened cement paste due to high temperature, *Matériaux Constr.* 17, 1984, pp. 291–296. <https://doi.org/10.1007/bf02479085>
- [26] Y.-F. Fu, Y.-L. Wong, C.-S. Poon, C.-A. Tang, P. Lin, Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures, *Cem. Concr. Res.* 34, 2004, pp. 789–797. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.029>
- [27] C.-S. Poon, S. Azhar, M. Anson, Y.-L. Wong, Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing, *Cem. Concr. Res.* 31, 2001, pp. 1307–1318. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00582-8](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00582-8)
- [28] L. Li, L. Shi, Q. Wang, Y. Liu, J. Dong, H. Zhang, G. Zhang, A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing, *Constr. Build. Mater.* 237, 2020, 117564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117564>
- [29] O. Kontani, S. Ishikawa, T. Nishioka, H. Masaki, N. Tanaka, Y. Goto, S. Ishioka, Properties of Concrete Subjected to Severe Accident Conditions at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *J. Adv. Concr. Technol.* 20, 2022, pp. 152–187. <https://doi.org/10.3151/jact.20.152>
- [30] A. Mendes, J.G. Sanjayan, F. Collins, Long-term progressive deterioration following fire exposure of OPC versus slag blended cement pastes, *Mater. Struct.* 42, 2008, pp. 95–101. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9369-7>
- [31] Y. Anderberg, Spalling Phenomena of HPC and OC, I Proceedings of International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, MD, 1997.

- [32] Bazant, Analysis of pore pressure, thermal stresses and fracture in rapidly heated concrete, Proceedings of International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, MD, 1997.
- [33] P. Kalifa, F.-D. Menneteau, D. Quenard, Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, *Cem. Concr. Res.* 30, 2000, pp. 1915–1927.
[https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00384-7](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00384-7)
- [34] F.L. Monte, R. Felicetti, Heated slabs under biaxial compressive loading, a test set-up for the assessment of concrete sensitivity to spalling, *Mater. Struct.* 50, 2017, 192. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1055-1>
- [35] R. Jansson, L. Boström, Fire spalling in concrete - The moisture effect, part II, *MATEC Web Conf.* 6, 2013, 03003. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20130603003>
- [36] J. Mindegua, H. Carré, P. Pimienta, C.L. Borderie, Experimental discussion on the mechanisms behind the fire spalling of concrete, *Fire Mater.* 39, 2015, pp. 619–635. <https://doi.org/10.1002/fam.2254>
- [37] G.-F. Peng, S.-H. Bian, Z.-Q. Guo, J. Zhao, X.-L. Peng, Y.-C. Jiang, Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures, *Constr. Build. Mater.* 22, 2008, pp. 948–955. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.002>
- [38] S. Yaragal, M. Kittur, K. Narayan, Recurring Studies on Concretes Subjected to Elevated Temperatures and Suddenly Cooled by Water Quenching, *J. Str. Fire Eng.* 6, 2015, pp. 67–76. <https://doi.org/10.1260/2040-2317.6.1.67>
- [39] A.F. Bingöl, R. Güll, Effect of elevated temperatures and cooling regimes on normal strength concrete, *Fire Mater.* 33, 2009, pp. 79–88.
<https://doi.org/10.1002/fam.987>
- [40] J. Bi, P. Liu, F. Gan, Effects of the cooling treatment on the dynamic behavior of ordinary concrete exposed to high temperatures, *Constr. Build. Mater.* 248, 2020, 118688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118688>
- [41] U.S. NRC, A Compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures, NUREG/CR-7031, ORNL/TM-2009/175, 2010.
- [42] debrisWiki, 1号機の事故進展, <https://fdada-plus.info/wiki/index.php?title=1号機の事故進展> (参照: 2024年4月8日) .
- [43] 東京電力ホールディングス株式会社, 福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第6回進捗報告添付資料1-6
1号機の測定データ及び既往の解析結果による事故進展の推定について, 2022,
https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_unconfirmed/
(参照: 2024年4月8日) .
- [44] Information Portal for the Fukushima Daiichi Accident Analysis and Decommissioning Activities, https://fdada.info/en/home2/accident2/measured2/am_download2/
(参照: 2024年4月8日) .

- [45] 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事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果「第6回進捗報告」添付資料1-5 消防車による1号機原子炉注水の注水量に関する検討, 2022,
https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_unconfirmed/
(参照: 2024年4月8日).
- [46] Steam Table Calculator Dry Saturated Steam Line Spirax Sarco,
<https://www.spiraxsarco.com/resources-and-design-tools/steam-tables/dry-saturated-steam-line#article-top> (参照: 2024年4月8日).
- [47] 日本建築学会, 構造材料の耐火性ガイドブック, 丸善出版, 2017, 474p.
- [48] I. Sato et al., MAAP code analysis for the in-vessel phase of Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Unit 1 and comparison of the results among Units 1 to 3, Nucl Eng Des, 422, 2024, 113088.
- [49] C. Guéneau et al., TAF-ID: An international thermodynamic database for nuclear fuels applications, Calphad, vol. 72, 2021, 102212.
- [50] 廃炉環境国際共同研究センター, 東京大学, 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(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, JAEA-Review 2021-047, 2022, pp. 90-96.

This is a blank page.

