

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)

—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—

Quantitative Evaluation of Long-term State Changes of Contaminated Reinforced Concrete
Considering the Actual Environments for Rational Disposal
(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
東京大学

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

January 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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 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 (<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 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

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)

—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

東京大学

(2021年10月12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2年度に採択された「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」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。

本研究の目的は、原子炉建屋内の鉄筋コンクリート部材における汚染濃度分布定量予測データベース構築である。令和2年度は、3.1節でメソスケールのひび割れ挙動を評価するためのデータ取得を目的に、試験体の作製および治具の開発等の測定準備、評価手法の確認、予備試験を実施した。また、剛体バネモデルを用いて、水和過程から極厚部材の応力・ひび割れを追随できる数値解析手法の枠組みを開発した。3.2節では、コンクリート部材における長期的な核種の浸透挙動評価を行うためのデータ取得および境界条件、ひび割れ試験体作製方法の検討を行った。3.3節では、事故後の物質濃度相当の条件でCsとSrがひび割れたコンクリートに浸透する状況をイメージングプレートにより可視化する準備を行った。また、 α 核種のコンクリートへの浸透挙動を調べるため、汚染水とコンクリートの接触に関する情報調査、長期浸漬の予察試験を実施した。

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、東京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

Quantitative Evaluation of Long-term State Changes of Contaminated Reinforced Concrete
Considering the Actual Environments for Rational Disposal
(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

The University of Tokyo

(Received October 12, 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, 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 FY2020, this report summarizes the research results of the “Quantitative evaluation of long-term state changes of contaminated reinforced concrete considering the actual environments for rational disposal” conducted in FY2020.

The present study aims to construct a database for quantitative prediction of contaminated reinforced concrete inside the reactor building. In FY2020, in chapter 3.1, in order to obtain the data for the evaluation of mesoscale cracking behavior, the equipment for the making and the measurement of the test specimens were prepared, the evaluation method was confirmed, and preliminary experiments were carried out. And, for the prediction of cracking on the surface of thick concrete wall, the rigid-body spring network model associated with heat and moisture transport truss-network models is developed. In chapter 3.2, in order to evaluate the long-term permeation behavior of nuclides in actual concrete members, the data was obtained and boundary conditions was considered for numerical analysis, and a method for producing a cracked specimen was considered. In chapter 3.3, the visualization procedure of Cs and Sr penetrations from the realistic material concentration levels happened after the accident in cracked concrete by using imaging plate was developed. And, in order to investigate the penetration behavior of alpha-ray emitting nuclides into concrete, the information on contact of contaminated water with concrete was surveyed, and preliminary test for long-term immersion was performed.

Keywords: Reinforced Concrete, Radionuclide, Carbonation, Drying, Crack, Penetration, Sorption, Simulation

This work was performed by the University of Tokyo 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	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
Appendix Result Report	11

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	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 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
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 (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DESTAL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 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	浅間 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 (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

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
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

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

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

(契約番号 R02I142)

成果報告書

令和 3 年 3 月

国立大学法人東京大学

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、国立大学法人東京大学が実施した「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」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	1-1
2. 業務計画	2. 1-1
2.1 全体計画	2. 1-1
2.2 実施体制図	2. 2-1
2.3 令和2年度の成果の目標および業務の実施方法	2. 3-1
2.3.1 核種の長期挙動シミュレーションに向けた部材のひび割れ幅・深さと 密度を含む状態設定の検討	2. 3-1
2.3.2 コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析の手法検討	2. 3-1
2.3.3 実際の核種の種類・濃度を考慮した収着/浸透挙動評価	2. 3-2
2.3.4 研究推進	2. 3-2
3. 令和2年度の実施内容および成果	3. 1-1
3.1 核種の長期挙動シミュレーションに向けた部材のひび割れ幅・深さと 密度を含む状態設定の検討	3. 1-1
3.1.1 メソスケールひび割れ解析に必要な各種物性値の取得	3. 1-1
3.1.2 メソスケールひび割れ解析の実施とひび割れ量の評価	3. 1-9
3.2 コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析の手法検討	3. 2-1
3.2.1 モデルによる核種浸透シミュレーション	3. 2-1
3.2.2 ダメージを受けたコンクリートの核種移行評価	3. 2-24
3.3 実際の核種の種類・濃度を考慮した収着/浸透挙動評価	3. 3-1
3.3.1 低濃度領域での ¹³⁷ Csと ⁹⁰ Srの競合浸透の評価	3. 3-1
3.3.2 α核種のコンクリート部材への収着挙動評価	3. 3-18
3.4 研究推進	3. 4-1
4. 結言	4. 1-1
4.1 まとめ・今後の検討課題	4. 1-1
4.2 令和3年度以降の研究計画	4. 2-1
参考文献	5. 1-1

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人東京大学	教授	丸山 一平
	特任講師	五十嵐 豪

再委託先

国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学	准教授	日比野 陽
国立大学法人北海道大学	准教授	東條 安匡
国立研究開発法人国立環境研究所	主任研究員	山田 一夫
太平洋セメント株式会社	チームリーダー	細川 佳史
株式会社太平洋コンサルタント	部長	芳賀 和子
	グループリーダー	渋谷 和俊
		洞 秀幸
		小林 佑太朗
		富田 さゆり

連携機関

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	ディビジョン長	駒 義和
	課長	柴田 淳広
		栗飯原 はるか

表一覧

表 3.1-1	小型試験体の作製に用いたモルタルの調合 (g/2 L)	3.1-1
表 3.1-2	練り混ぜ直後のフレッシュモルタルの性状	3.1-1
表 3.1-3	材料の詳細	3.1-11
表 3.1-4	コンクリートの物性値	3.1-11
表 3.1-5	温度ひび割れの状況	3.1-12
表 3.2-1	C-A-S-H の合成方法に関する文献調査結果	3.2-2
表 3.2-2	C-A-S-H 合成に使用した原料および合成条件	3.2-3
表 3.2-3	XRD 測定条件	3.2-3
表 3.2-4	TG-DTA 測定条件	3.2-3
表 3.2-5	試料の組成分析方法	3.2-4
表 3.2-6	原料の鉱物定性結果	3.2-5
表 3.2-7	試料の鉱物定性結果	3.2-5
表 3.2-8	原料のアルミン酸ナトリウム、アルミン酸カリウム三水和物の組成分析結果	3.2-8
表 3.2-9	原料の化学組成算出結果	3.2-8
表 3.2-10	平衡液の化学組成分析結果	3.2-8
表 3.2-11	試料の ig. loss 分析結果および化学組成算出結果	3.2-8
表 3.2-12	収着試験水準	3.2-9
表 3.2-13	収着試験に使用した試薬および収着試験条件	3.2-9
表 3.2-14	C1、Cs 分析方法	3.2-10
表 3.2-15	収着試験前後の鉱物定性結果	3.2-11
表 3.2-16	収着試験後の液相分析結果 (1)	3.2-13
表 3.2-17	収着試験後の液相分析結果 (2)	3.2-14
表 3.2-18	Cs 分配比算出結果	3.2-15
表 3.2-19	事故後の建屋コンクリートの汚染状態の検討と解析対象の設定	3.2-17
表 3.2-20	前研究で設定したコンクリートの初期状態の概要	3.2-19
表 3.2-21	前研究で設定した境界条件	3.2-20
表 3.2-22	検索条件	3.2-24
表 3.2-23	ひび割れの作製方法とひび割れ開口幅	3.2-31
表 3.2-24	使用材料	3.2-35
表 3.2-25	分析項目と対象試料	3.2-36
表 3.2-26	OPC および FA の化学組成分析結果	3.2-37
表 3.2-27	リートベルト法によるセメント鉱物組成の定量分析結果	3.2-38
表 3.2-28	リートベルト法による FA 鉱物組成の定量分析結果	3.2-38
表 3.2-29	骨材の物理特性の測定結果	3.2-38
表 3.2-30	現場コンクリート調査	3.2-39
表 3.2-31	コンクリートの計画調査	3.2-39
表 3.2-32	コンクリートのフレッシュ性状の測定結果	3.2-39
表 3.2-33	モルタルの調合およびフレッシュ性状の測定結果	3.2-39
表 3.3-1	試料の調合	3.3-2

表 3.3-2	長期浸漬の実験水準.....	3.3-3
表 3.3-3	汚染水の浸水深さ(平成 23 年 5 月 31 日 7:00 時点).....	3.3-19
表 3.3-4	現時点における滞留水の接触期間.....	3.3-19
表 3.4-1	令和 2 年度の全体会合の開催実績.....	3.4-1

図一覧

図 2. 1-1	全体計画図.....	2. 1-1
図 2. 1-2	研究の全体像.....	2. 1-2
図 2. 2-1	本研究の実施体制図.....	2. 2-1
図 3. 1-1	フレッシュ試験の様子.....	3. 1-1
図 3. 1-2	圧縮試験外観.....	3. 1-2
図 3. 1-3	圧縮強度の経時変化.....	3. 1-2
図 3. 1-4	超音波伝搬速度測定器の外観.....	3. 1-3
図 3. 1-5	超音波伝搬波形の一例.....	3. 1-3
図 3. 1-6	超音波伝搬速度の経時変化.....	3. 1-3
図 3. 1-7	動ポアソン比の経時変化.....	3. 1-4
図 3. 1-8	動ヤング率の経時変化.....	3. 1-4
図 3. 1-9	密度試験外観.....	3. 1-5
図 3. 1-10	密度試験結果.....	3. 1-5
図 3. 1-11	長さ変化試験外観.....	3. 1-6
図 3. 1-12	加熱試験中の長さ変化の結果.....	3. 1-6
図 3. 1-13	浸漬試験の長さ変化の結果.....	3. 1-7
図 3. 1-14	加熱試験中の画像相関法分析結果.....	3. 1-8
図 3. 1-15	水中浸漬試験中の画像相関法分析結果.....	3. 1-8
図 3. 1-16	RBSM の概要.....	3. 1-9
図 3. 1-17	TNM の概要.....	3. 1-10
図 3. 1-18	壁部材およびベース部材の詳細.....	3. 1-11
図 3. 1-19	温度（左）および温度応力（右）の履歴.....	3. 1-12
図 3. 1-20	RBSM に用いたメッシュ.....	3. 1-13
図 3. 1-21	構造解析と伝熱解析の境界条件.....	3. 1-13
図 3. 1-22	コンクリート材料の構成モデル.....	3. 1-14
図 3. 1-23	応力-ひずみ関係上のヒステリシスの関係.....	3. 1-15
図 3. 1-24	鉄筋と付着要素の概要（左）と付着要素の構成則（右）.....	3. 1-15
図 3. 1-25	時間依存型構成モデル（TDM）.....	3. 1-16
図 3. 1-26	RBSM におけるクリープひずみの考え方の概念図.....	3. 1-17
図 3. 1-27	数値解析フロー.....	3. 1-18
図 3. 1-28	温度履歴の解析結果.....	3. 1-18
図 3. 1-29	水和による物性値の変化.....	3. 1-19
図 3. 1-30	マスコン部材中の応力履歴.....	3. 1-20
図 3. 1-31	変形、応力分布、および、ひび割れ.....	3. 1-22
図 3. 1-32	内壁を抽出した 1/2 モデル.....	3. 1-23
図 3. 1-33	解析によって得られた内部の含水率分布（相対含水率として表記）.....	3. 1-24
図 3. 1-34	解析で得られたひび割れの様子.....	3. 1-24
図 3. 2-1	原料の水酸化カルシウムの XRD チャート.....	3. 2-5
図 3. 2-2	原料の非晶質シリカの XRD チャート.....	3. 2-5

図 3.2-3	原料のアルミン酸ナトリウムの XRD チャート	3.2-6
図 3.2-4	原料のアルミン酸カリウム三水和物の XRD チャート	3.2-6
図 3.2-5	試料の XRD チャート	3.2-6
図 3.2-6	試料の TG-DTA チャート (1)	3.2-7
図 3.2-7	試料の TG-DTA チャート (2)	3.2-7
図 3.2-8	CASH0.8(Na) の Cs 収着試験前後の XRD チャート	3.2-11
図 3.2-9	CASH1.0(Na) の Cs 収着試験前後の XRD チャート	3.2-12
図 3.2-10	CASH1.0(Na) の Cs+0.1M Na、K 収着試験前後の XRD チャート	3.2-12
図 3.2-11	CASH1.2(Na) の Cs 収着試験前後の XRD チャート	3.2-12
図 3.2-12	C-A-S-H と C-S-H の Cs 分配比の比較	3.2-16
図 3.2-13	建屋の履歴と現状を考慮した汚染状態に関する模式図	3.2-17
図 3.2-14	前研究で実施した解析フロー	3.2-20
図 3.2-15	炭酸化による空隙構造の変化 (イメージ図)	3.2-22
図 3.2-16	実現象と現モデルの深さ方向の炭酸化カルシウム量の比較 (イメージ図)	3.2-22
図 3.2-17	ひび割れ導入予察試験の実施状況	3.2-33
図 3.2-18	画像撮影箇所の模式図	3.2-33
図 3.2-19	ひび割れ導入後の試験体外観と CT 画像 (試験体 A)	3.2-34
図 3.2-20	ひび割れ導入後の試験体外観と CT 画像 (試験体 B)	3.2-34
図 3.2-21	練混ぜ作業および試験体成形の状況	3.2-40
図 3.3-1	浸漬試料からの薄片の切出しと IP 測定フロー	3.3-4
図 3.3-2	長期浸漬試料のオートラジオグラフィ	3.3-4
図 3.3-3	健全飽水試料の浸漬溶液の線量率測定 (Cs 溶液)	3.3-5
図 3.3-4	健全飽水試料の浸漬面の線量率測定 (Cs)	3.3-5
図 3.3-5	健全飽水試料の Cs 浸透プロファイル	3.3-6
図 3.3-6	炭酸化飽水試料の Cs 浸漬溶液の線量率測定	3.3-7
図 3.3-7	炭酸化飽水試料の Cs 浸漬面の線量率測定	3.3-7
図 3.3-8	炭酸化飽水試料の Cs 浸透プロファイル	3.3-8
図 3.3-9	炭酸化乾燥試料の Cs、Sr 浸透プロファイル	3.3-9
図 3.3-10	4×6×6 cm コンクリート試料の切断状況	3.3-10
図 3.3-11	実構造物 (RC 橋の橋桁) からのコアサンプル	3.3-11
図 3.3-12	CsCl 溶液への浸漬試験時の浸漬液の線量率変化	3.3-12
図 3.3-13	実構造物コンクリートコア試料 (4×6 cm) 浸漬表面の Cs 吸着状況	3.3-13
図 3.3-14	実構造物コンクリートコア試料 (変質していない内部の試料) への Cs 浸透状況	3.3-14
図 3.3-15	SrCl ₂ 溶液への浸漬試験時の浸漬液の線量率変化	3.3-14
図 3.3-16	Sr 溶液浸漬後の実構造物コンクリートコア試料 (4×6 cm) 表面の Sr 吸着状況	3.3-15
図 3.3-17	実構造物コンクリートコア試料 (変質していない内部の試料) への Sr 浸透状況	3.3-16
図 3.3-18	混合酸化物 (MOX) の溶解	3.3-21
図 3.3-19	試験片浸漬の様子	3.3-21

略語一覧

東京大学	: 国立大学法人東京大学
名古屋大学	: 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学
北海道大学	: 国立大学法人北海道大学
東北大学	: 国立大学法人東北大学
国立環境研究所	: 国立研究開発法人国立環境研究所
太平洋セメント	: 太平洋セメント株式会社
太平洋コンサルタント	: 株式会社太平洋コンサルタント
JAEA	: Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (廃炉環境国際共同研究センター)
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
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	: $wCaO-xAl_2O_3-ySiO_2-zH_2O$ (アルミノケイ酸カルシウム水和物)
C-S-H	: $xCaO-ySiO_2-zH_2O$ (ケイ酸カルシウム水和物)
RBSM	: Rigid-Body Spring Network Model (剛体ばねモデル)
TNM	: Truss-Network Model (トラスネットワークモデル)
RI	: Radioactive Isotope (放射性同位元素)
IP	: Imaging Plate (イメージングプレート)
M	: mol/L
ig. loss	: ignition loss (強熱減量)

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。）の事故に伴い汚染した建屋コンクリートは、将来的に解体され、放射性廃棄物となる可能性がある。事故の影響を受けた1号機～4号機のコンクリート廃棄物量は、原子炉建屋、タービン建屋を合わせて約80万tonとも推計され、大量の発生が見込まれるコンクリート廃棄物の処理・処分方法を検討するうえで、建屋内の汚染状況の推定は極めて重要である。

事故後の建屋内には複数の放射性核種（Cs、Sr、 α 核種等）が存在し、またコンクリートの部材によって放射性核種との接触状態が異なるため、放射性核種の分布や浸透状況も異なると想定される。例えば、地震によって構造的な影響を受けたコンクリート部材では、表層からの浸透の他、ひび割れに沿った侵入による部材内部の汚染や鉄筋の変質が懸念される。一方で、建屋内部の核種や水分の浸透を抑制するための被覆材が施されていない部材では、コンクリート表面の中性化（炭酸化）の影響で、汚染水と接すると汚染水からCs/Srは表層の炭酸化部位に吸着され、濃集する。すなわち、高濃度の汚染箇所は部材全体のごく表層のみで、部材によっては内部まで放射性核種が浸透していない可能性もある。

建屋内除染、建屋の解体作業および廃棄物処理処分の計画を策定する際、実際の鉄筋コンクリート部材の状態から部材別・汚染濃度別に分類し、物量を定量的に予測できれば、合理的に除染・処理・処分を進めることができ、最終的な廃棄物発生量を抑制できる可能性がある。

●解決すべき課題

実際の鉄筋コンクリート部材と放射性核種との接触状態を考慮したうえで、放射性核種の長期的な浸透挙動を解明することにより、現実的なコンクリート部材の汚染状況の推定情報が提示される。しかしながら、核種の浸透挙動シミュレーションにおける技術的課題として、以下が挙げられる。

- ・実際のコンクリート部材で想定される状態（ひび割れの幅、炭酸化深さ、密度等）の設定
- ・経年劣化に伴う変質が生じた、およびダメージを受けた（ひび割れが生じた）コンクリート部材における、放射性核種の移行挙動の評価とモデル化
- ・実際の放射性核種の種類・濃度（境界条件）を考慮した収着/浸透挙動評価（低濃度領域での ^{137}Cs と ^{90}Sr の競合浸透、 α 核種とコンクリートの相互作用、Ca溶脱）

●本研究の目的

令和2年度～令和4年度の期間に実施する英知事業「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」（以下、「本研究」と略す。）では、廃炉作業の設計、すなわち建屋内除染、建屋の解体作業および廃棄物処理処分の計画を策定する際に必要となる、汚染状況の推定情報に基づいた原子炉建屋内の各鉄筋コンクリート部材における汚染濃度分布定量予測データベース構築を目的に、以下の検討内容について取り組む。

- ① 放射性核種の長期挙動シミュレーションに向けたひび割れ幅・深さと密度を含むコンクリート部材の状態設定（理論的なアプローチによる状態設定）
- ② 部材の状態を考慮した放射性核種の浸透挙動解析手法の開発（浸透実験に基づく数値解析モデル化）
- ③ 実際の放射性核種の種類・濃度を考慮した収着/浸透挙動評価

④ 処理・処分を見据えたコンクリート廃棄物の状態検討（高濃度汚染の位置、深さ等）

なお、本研究では核燃料デブリなどにより通常運転条件を超えた温度の影響を受けた部位は対象としない。これは、通常条件にあるコンクリートでの検討をまず確実に先行し、さらに複雑な解析を要すると想定される部位を検討することが妥当であると考えられるからである。

●本研究の実施内容および成果（令和2年度）

(1) 核種の長期挙動シミュレーションに向けた部材のひび割れ幅・深さと密度を含む状態設定の検討

① メソスケールひび割れ解析に必要な各種物性値の取得

メソスケールひび割れ解析が必要となる各種物性値を取得するための試験体の作製および測定に必要な備品類を準備するとともに、力学特性の物性評価手法について確認した。また、長さ変化に対応する治具も開発し、予備実験を実施した。

② メソスケールひび割れ解析の実施とひび割れ量の評価（再委託先：名古屋大学）

建設時の温度応力と供用時の乾燥を考慮したひび割れ評価手法として、剛体ばねモデル（以下、「RBSM」と略す。）を用いて、水和過程から極厚部材の応力・ひび割れを追従できる数値解析手法を開発した。圧縮応力発生時の物性変化に関する構成則について改良の余地があり、水和熱によるひび割れ、水分移動と乾燥収縮応力の評価も含め、令和3年度も継続して取り組む。

(2) コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析の手法検討（再委託先：太平洋セメント、太平洋コンサルタント）

① モデルによる核種浸透シミュレーション

実際の1F建屋コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動を解析するため、平成29年度～令和元年度に実施された英知事業「放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究」（以下、「前研究」と略す。）で作成したC-S-HによるCs、Sr収着モデルをC-A-S-HによるCs、Sr収着モデル作成に必要な試験方法を検討および実施した。C-A-S-HによるCs収着試験の結果より、C-A-S-H中のAlおよび環境中の高濃度のアルカリ（Na、K）がCsの収着反応に影響を及ぼす可能性が再確認された。

② ダメージを受けたコンクリートの核種移行評価

ひび割れ部を考慮した物質移行の評価に資するデータ取得と、ひび割れを含むコンクリートの物質移行のモデル化を目的とし、ひび割れ部のモデル化に向けた課題を整理するとともに、既往研究の事例を参考にひび割れ導入の予察試験を実施し、概ね目標とする幅でひび割れを導入できる見通しを得た。また、令和3年度以降の試験に供する試験体を作製した。

(3) 実際の核種の種類・濃度を考慮した収着/浸透挙動評価

① 低濃度領域での ^{137}Cs と ^{90}Sr の競合浸透の評価（再委託先：国立環境研究所、北海道大学）

前研究において実施したラジオアイソトープを用いた汚染水濃度レベルでの浸透実験とイメージングプレート（以下、「IP」と略す。）によるオートラジオグラフィを用いた浸透解析を北海道大学で実施できるよう実験環境を整備し、名古屋大学で開始した浸漬試験の長期材齢のデータを得た。また、令和3年度以降に予定されるひび割れたコンクリート試験体

への Cs と Sr の浸透を解析する準備として、より大きな試験体の加工手順を設定し、浸漬試験を実施した。

② α 核種のコンクリート部材への収着挙動評価（連携先：JAEA）

α 核種が汚染水と接触したコンクリート部材（床・壁面）に浸透する挙動を、実験的に調べるための長期浸漬試験を開始した。浸漬条件を検討するため、予めコンクリートと汚染水の接触条件に関する情報を整理した。また、浸漬試験に用いる Pu および Am を含む浸漬液を調製するとともに、予察試験として、セメントペーストおよびエポキシ樹脂の浸漬を開始した。2 か月の浸漬を継続した後、長期浸漬に係る詳細な条件を決定する予定である。

(4) 研究推進

本研究を推進するにあたり、研究代表者の下で各研究項目間の連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画の策定、全体の結果のとりまとめ等を協議するための全体会合をオンラインで計3回開催した。また、令和2年度第1回英知事業ワークショップ、英知事業の廃棄物関連課題に係る情報交換会に参加し、廃炉環境国際共同研究センター（以下、「CLADS」と略す。）を介したニーズ側との情報交換を実施した他、研究課題間の情報交換として、北海道大学小崎完教授との会合も開催した。所期の全体計画は概ね順調に進んだ。

1. はじめに

1Fの事故に伴い汚染した建屋コンクリートは、将来的に解体され、放射性廃棄物となる。事故の影響を受けた1号機～4号機のコンクリート廃棄物量は、原子炉建屋、タービン建屋を合わせて約80万tonとも推計され[1]、大量の発生が見込まれるコンクリート廃棄物の処理・処分方法を検討するうえで、建屋内の汚染状況の推定は極めて重要である。

事故後の建屋内には複数の放射性核種(Cs、Sr、 α 核種等)が存在し、またコンクリートの部材によって放射性核種との接触状態が異なるため、放射性核種の分布や浸透状況も異なると想定される。例えば、地震によって構造的な影響を受けたコンクリート部材では、表層からの浸透の他、ひび割れに沿った侵入による部材内部の汚染や鉄筋の変質が懸念される。一方で、建屋内部の核種や水分の浸透を抑制するための被覆材が施されていない部材では、コンクリート表面の中性化(炭酸化)の影響で、汚染水と接すると汚染水からCs/Srは表層の炭酸化部位に吸着され、濃集する。すなわち、高濃度の汚染箇所は部材全体のごく表層のみで、部材によっては内部まで放射性核種が浸透していない可能性もある。建屋内除染、建屋の解体作業および廃棄物処理処分の計画を策定する際、実際の部材状態を考慮した放射性核種の浸透挙動シミュレーションによる汚染状況の推定結果より、部材別・汚染濃度別(例えば、表層1cmが高濃度汚染領域、鉄筋までのかぶりコンクリートがひび割れ影響を受けた中程度汚染領域、それ以上の深の大多数の限定汚染コンクリートなど)に分類し、それらの物量を定量的に予測できれば、合理的に除染・処理・処分を進めることができ、最終的な廃棄物発生量を抑制できる可能性がある。

本研究では、廃炉作業の設計、すなわち建屋内除染、建屋の解体作業および廃棄物処理処分の計画を策定する際に必要となる、汚染状況の推定情報に基づいた原子炉建屋内の各鉄筋コンクリート部材における汚染濃度分布定量予測データベース構築を目的とする。

なお、本研究では核燃料デブリなどにより通常運転条件を超えた温度の影響を受けた部位は対象としない。これは、通常条件にあるコンクリートでの検討をまず確実にを行い、さらに複雑な解析を要すると想定される部位は通常部位の解析結果をもとにさらに検討することが妥当であると考えからである。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本研究の全体計画図を図 2.1-1 に示す。

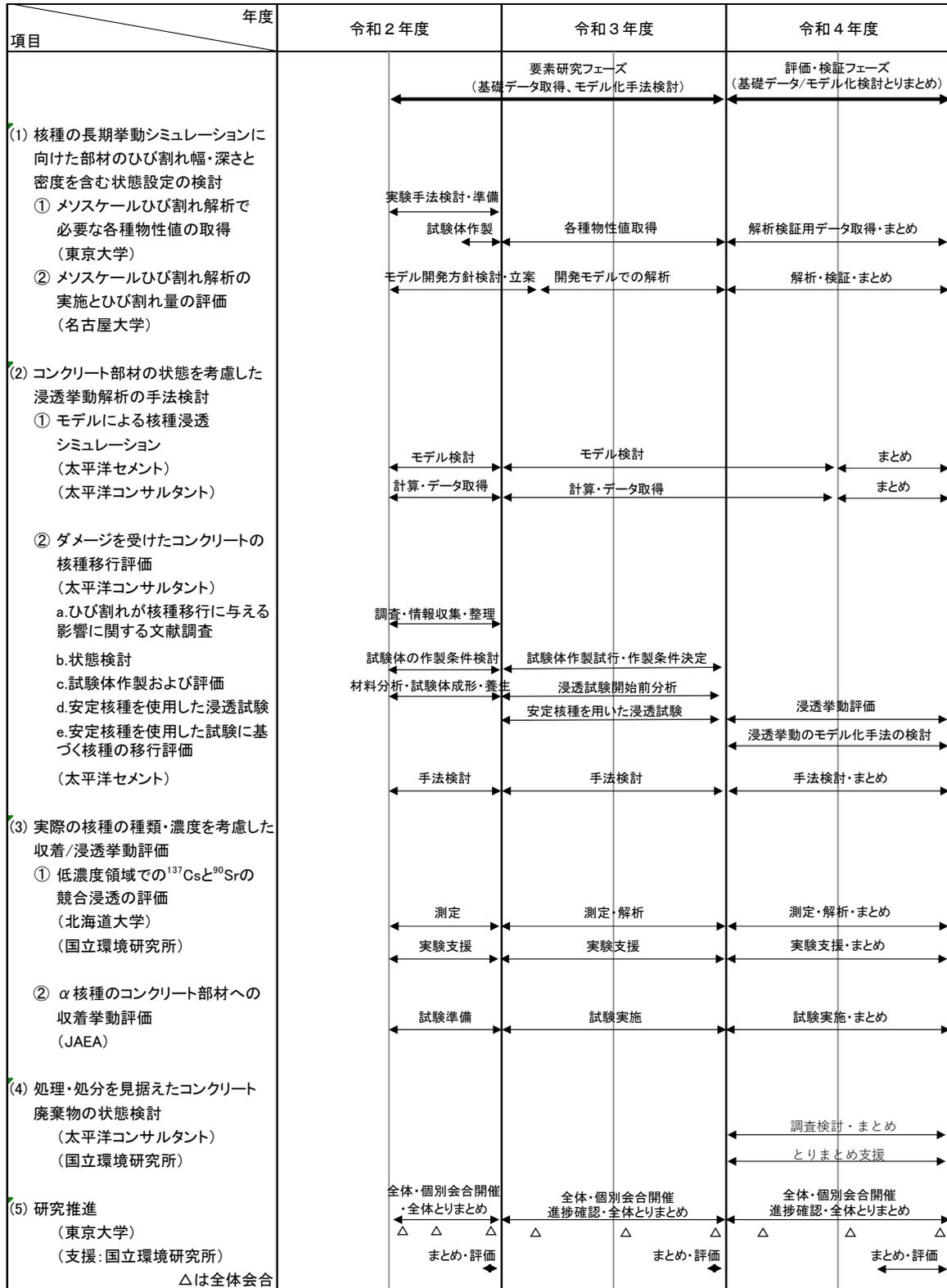


図 2.1-1 全体計画図

「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の長期状態変化の定量評価」（以下、「本研究」と略す。）の全体像を図 2.1-2 に示す。本研究は、平成 29 年度～令和元年度に実施された英知事業「放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究」（以下、「前研究」と略す。）[2]で得た、セメント系材料における核種の浸透・収着挙動に関する基礎的な知見と、本研究より着手する実際のコンクリート部材の状態を考慮した放射性核種の長期的な浸透挙動の解明により、汚染状況を推定し、汚染鉄筋コンクリートの物量を部材別、汚染濃度別に定量的に予測することを目指す。令和 4 年度までの本研究では、核種浸透挙動の評価方法および予測手法の構築を目指す。

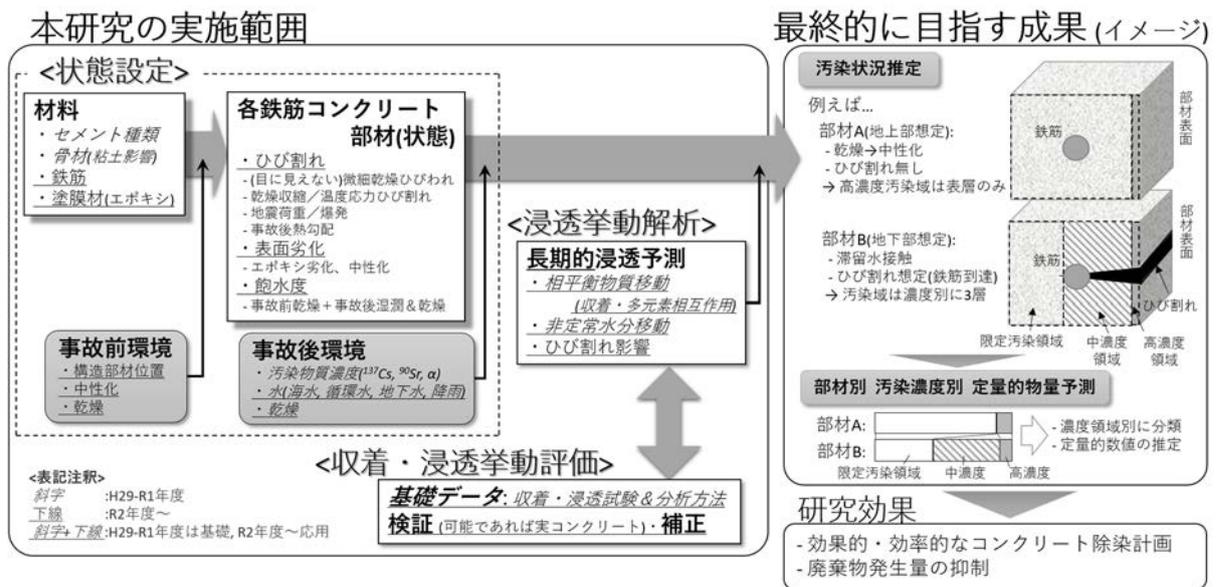


図 2.1-2 研究の全体像

2.2 実施体制図

本研究の実施体制図を図 2.2-1 に示す。

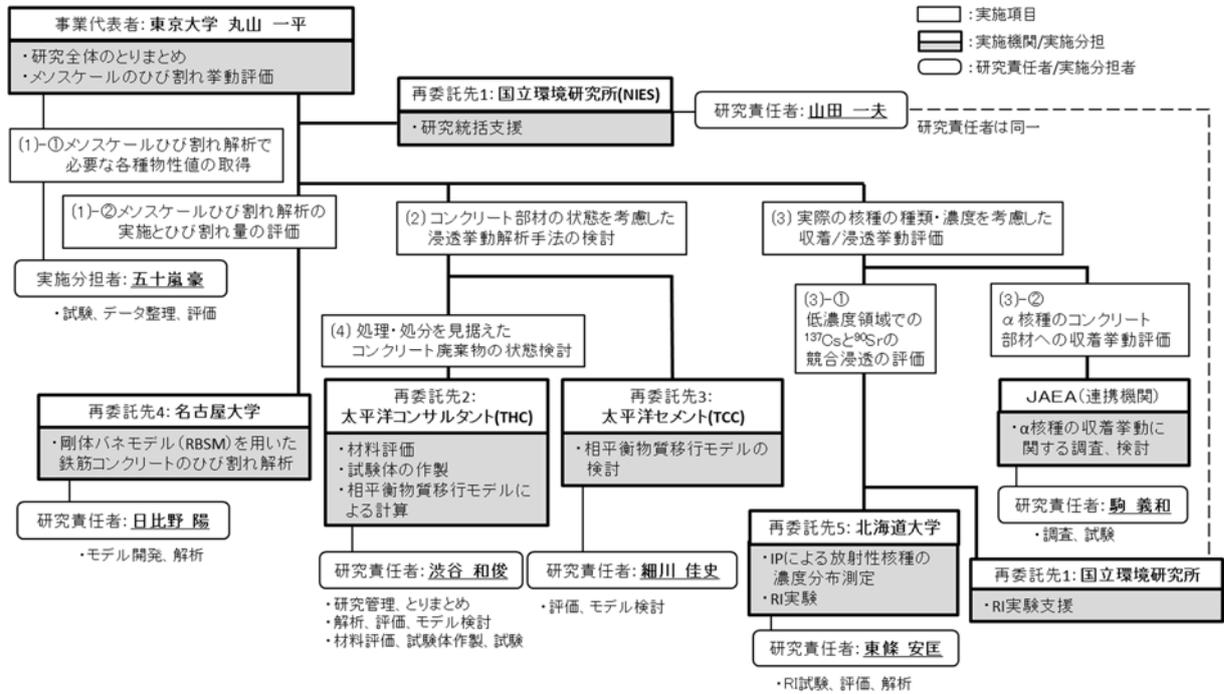


図 2.2-1 本研究の実施体制図

2.3 令和2年度の成果の目標および業務の実施方法

2.3.1 核種の長期挙動シミュレーションに向けた部材のひび割れ幅・深さと密度を含む状態設定の検討

① メソスケールひび割れ解析に必要な各種物性値の取得

東京大学は、メソスケールのひび割れ挙動を評価するための構成則に資するデータと検証用となるデータの取得を目的に、乾燥、再吸水によって生じる力学特性（強度、ヤング率）の変化ならびに体積変化を取得可能な試験体の作製、乾燥、再吸収、外部拘束等を模擬するための治具の作製、試験体の弾性係数の変化を測定可能な治具の作製を行い、実験手法の確立に向け予備試験を実施した。また、令和3年度に向けた試験体の作製を行った。

② メソスケールひび割れ解析の実施とひび割れ量の評価

（再委託先：名古屋大学）

名古屋大学は、RBSMを用い、建設時の温度応力と供用時の乾燥を考慮したひび割れ評価手法について、温度・水・応力および材齢変化を考慮できるプログラムの開発方針を立案し、開発を進める。

RBSMについては、セメントの水和を考慮した強度・ヤング率の変化を考慮できる構成則を開発した。建設時の水和熱による応力の分布ののち、乾燥にともなって生じる乾燥収縮応力を評価し、40年程度で1.5mの壁部材にどのような応力が生じうるかを確認するとともに表層部のひび割れがどのように生じうるかについて考察した。

2.3.2 コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析の手法検討

（再委託先：太平洋コンサルタント、太平洋セメント）

① モデルによる核種浸透シミュレーション

太平洋セメントおよび太平洋コンサルタントは、実際のコンクリート部材における長期的な核種の浸透挙動評価を目的として、前研究において構築した浸透挙動予測モデル（相平衡・物質移行計算モデル）を使用し、材料、配合、炭酸化状態および物質移行係数が異なる条件における C_s 、 S_r の浸透深さを計算するための検討を行った。また、1F建屋コンクリートに対する核種浸透シミュレーションを適切に行うための、部材内部の初期条件、部材外部の境界条件および浸透挙動のモデル化手法について調査し、検討した。

② ダメージを受けたコンクリートの核種移行評価

太平洋コンサルタントは、ひび割れ部を考慮した物質移行の評価に資するデータ取得と、ひび割れを含むコンクリートの物質移行のモデル化を目的に、以下の内容を実施した。

1) ひび割れが核種移行に与える影響に関する文献調査

ひび割れが生じたコンクリートにおける、物質移行に関する既往の研究事例を調査し、試験体の作製方法を含めた、モデル化に必要なデータ取得のための試験およびモデル化の現状に関する情報を収集し、整理した。

2) 状態検討

1)の文献調査の調査結果を踏まえた、実構造物におけるひび割れ部を模擬した試験体の作製条件について検討した。

3) 試験体作製および評価

令和3年度以降に開始する、浸透試験に供する試験体の作製準備として、現場コンクリートの履歴調査で得た情報に基づき、試験体作製に使用する資材を調達し、材料（セメント、骨材）の分析（物理試験、組成分析）を行った。また、コンクリート調合を決

定し、コンクリート試験体を成形した。

太平洋セメントは、ひび割れを有するコンクリート部材の核種移行評価の手法検討において、太平洋コンサルタントによる調査/検討結果に基づく実施計画の策定に参画し、状態設定の妥当性と方向性について検討した。

2.3.3 実際の核種の種類・濃度を考慮した収着/浸透挙動評価

① 低濃度領域での ^{137}Cs と ^{90}Sr の競合浸透の評価

(再委託先：国立環境研究所、北海道大学)

北海道大学は、ひび割れたコンクリートに事故後の物質濃度に近い Cs と Sr が浸透する状況を、IP により可視化する準備として、IP による ^{137}Cs と ^{90}Sr の定量分析の基礎技術の確認を行った。評価対象は、 ^{137}Cs と ^{90}Sr を収着する状態となったコンクリートの浸漬試料で、浸漬期間が数か月以上のものを対象とし、短期間での浸漬状況と比較検討した。

国立環境研究所は、北海道大学で行う浸透試験と IP を用いた定量評価に関し、北海道大学において実験実施を支援した。また、令和 3 年度以降に予定されるひび割れたコンクリート試験体への Cs と Sr の浸透を解析する準備として、より大きな試験体の加工手順を設定し、浸漬試験を実施した。

② α 核種のコンクリート部材への収着挙動評価

(連携先：JAEA)

JAEA は、 α 核種が長期間の浸漬においてコンクリート部材内部へ浸透する可能性を評価するための準備として、長期浸透用のセメント試験体および Pu 等の α 核種を含む溶液を作製し、浸漬試験を開始した。なお、長期間の α 核種浸漬試験では、セメント試験体を Pu 等の α 核種を含む溶液に 1 年以上浸漬することとした。

2.3.4 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打合せや会議等を開催した。

3. 令和2年度の実施内容および成果

3.1 核種の長期挙動シミュレーションに向けた部材のひび割れ幅・深さと密度を含む状態設定の検討

3.1.1 メソスケールひび割れ解析に必要な各種物性値の取得

(1) 小型試験体を用いた各種物性値の取得方法の検討

① 小型試験体の作製方法の検討

特注の型枠を用いて、モルタル小型試験体の作製方法の検討を行った。圧縮強度測定用の試験体作製には10連の20 mm×20 mm×20 mmの樹脂製型枠、長さ変化測定用の試験体作製には10連の厚さ3 mm×幅13 mm×長さ300 mmの樹脂と鋼を用いた型枠、X線ラジオグラフィ測定用の試験体作製には40 mm×40 mm×200 mmの樹脂製型枠を用いた。試験体作製に用いたモルタルの調合を表3.1-1に、フレッシュモルタルの性状を表3.1-2に示す。フレッシュ試験の様子を図3.1-1に示す。材料には、上水、市販普通ポルトランドセメント（以下、「OPC」と略す。）、SO₃量調整のための試薬二水石膏、石灰石砕砂を用いた。練り混ぜには、ホバートミキサーを用いて、セメント、二水石膏、細骨材を空練りしたのち、水を加え3分間練り混ぜ、掻き落とし、2分間練り混ぜた。30分おきに練り返しを行い、5.5時間後にブリーディングが収まるのを目視で確認してから、上記の型枠にフレッシュモルタルを上面に十分な余盛があるように打ち込んだ。30分後に余盛をそぎ取り、ラップフィルムで覆い、封緘養生を行った。20 mm×20 mm×20 mm試験体は、打ち込みから1日後に型枠から取り出し、密閉した袋に濡れウエスとともに入れ、封緘養生を行った。厚さ3 mm×幅13 mm×長さ300 mm試験体およびその小片については4日後に脱型し、水中養生を行った。長さ変化測定用の試験体作製については、型枠から取り出し、長さ100 mmとなるように成型してから、水中養生を行った。

表 3.1-1 小型試験体の作製に用いたモルタルの調合 (g/2 L)

水セメント比	水	セメント	砂
0.55	568	1032	2468

表 3.1-2 練り混ぜ直後のフレッシュモルタルの性状

練りあがり温度	モルタルフロー	空気量
18 °C	27.6 cm	5.46 %



図 3.1-1 フレッシュ試験の様子

② 圧縮試験

圧縮試験は、①で説明した小型試験体を用いて行った。圧縮試験外観を図 3.1-2 に示す。圧縮治具には、4×4×16 cm 角柱試験体用の圧縮試験用治具にスペーサを取り付けたものを使用した。試験には、アムスラー式万能試験機を用いて、荷重計が急激に低下するまで載荷を行い、最大荷重を測定した。試験体は、①で示した封緘養生を行っていた小型試験体を材齢 1、4、7、15 日で試験を実施した。圧縮強度と材齢の関係を図 3.1-3 に示す。既往の研究で報告されている同程度の水セメント比のモルタルの強度および材齢の経過における大小関係に齟齬がないことから正しく測定できると判断した。



図 3.1-2 圧縮試験外観

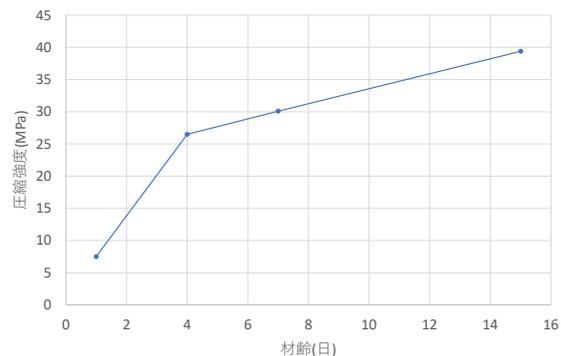


図 3.1-3 圧縮強度の経時変化

③ 超音波伝搬速度試験

超音波伝搬速度試験は、①で説明した長さ変化測定用に作製した薄肉試験体の小片を用いて材齢 7、15 日で実施した。超音波伝搬速度測定器の外観を図 3.1-4 に示し、超音波伝搬波形の一例を図 3.1-5 に示す。測定には、オリンパス株式会社製超音波伝搬速度測定器、縦波、横波のトランスデューサーを用いて、反射法により縦波、横波それぞれの伝搬速度を測定し、弾性理論により動ポアソン比と動ヤング率を算出した。伝搬速度、動ポアソン比、動ヤング率の経時変化をそれぞれ図 3.1-6、図 3.1-7、図 3.1-8 に示す。既往の研究で報告されている同程度の水セメント比のモルタルの値および材齢の経過における大小関係に齟齬がないことから正しく測定できると判断した。



図 3.1-4 超音波伝搬速度測定器の外観



図 3.1-5 超音波伝搬波形の一例

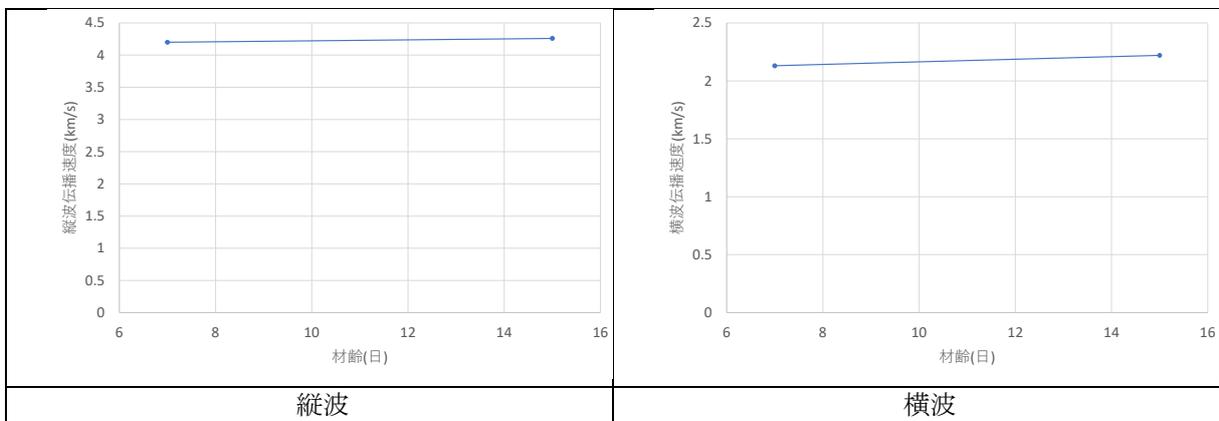


図 3.1-6 超音波伝播速度の経時変化

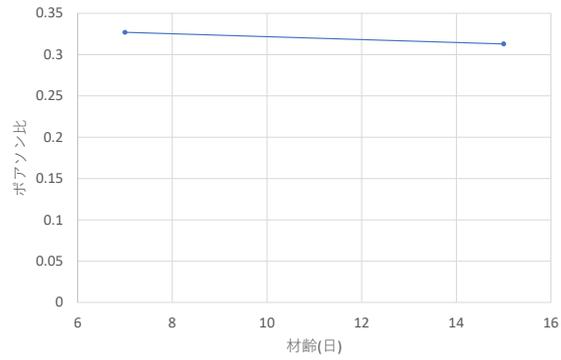


図 3.1-7 動ポアソン比の経時変化

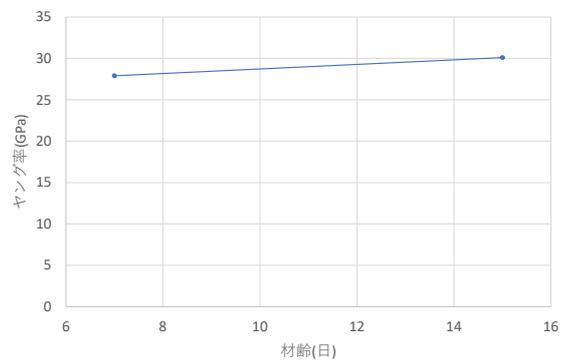


図 3.1-8 動ヤング率の経時変化

④ 密度試験

密度は、分析天秤を用いて、アルキメデス法による測定を行った。密度試験外観を図 3.1-9 に示す。試験体は、長さ変化測定用に作製した薄肉試験体の小片を用いた。水中養生した薄肉試験体の小片を材齢 4、7、15 日にて表面の水分を拭き取り気中質量および水中質量を測定した。測定された質量からアルキメデス法により求めたい見かけの密度を算出した。見かけの密度の経時変化を図 3.1-10 に示す。調合から得られる密度、各材齢間の見かけの密度および大小関係に齟齬がないことから正しく測定できると判断した。



図 3.1-9 密度試験外観

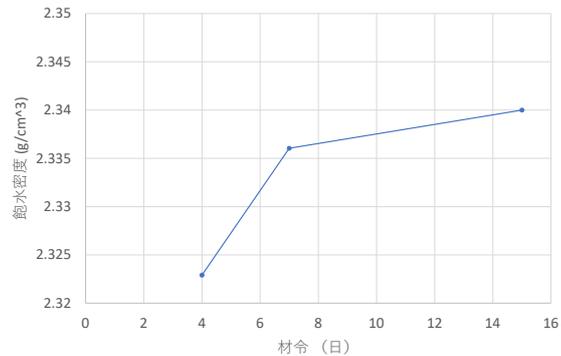


図 3.1-10 密度試験結果

⑤ 長さ変化試験

長さ変化試験は、①で説明した厚さ 3 mm×幅 13 mm×長さ 100 mm の薄肉試験体を用いて行った。飽水状態からの加熱および乾燥状態からの水中浸漬における長さ変化試験外観を図 3.1-11 に示す。両試験の長さ変化は、測定直前の基長をマイクロメータで測定し、測定中の長さ変化を接触式デジタルセンサ（株式会社キーエンス GT2-P12K、分解能 0.1 μm、横向き設置時測定力 0.95 N）により取得した。加熱試験中の全ひずみと温度の関係を図 3.1-12 に示す。加熱は、ペルチェ温度コントローラセット（株式会社ビックス VTH1.8K-70S）2 基を用いて、25 °C を始点として、65 °C まで 1 °C/min. で昇温、65 °C を 20 分間保持、25 °C まで 1 °C/min. で降温、25 °C を終点とした。試験に供した試験体は、飽水状態であり、加熱試験中の蒸発を簡易に抑制するためにアルミ箔で覆った。全ひずみと温度の関係から得られた線膨張係数は、昇温時 6.1 (10⁻⁶/°C)、降温時 6.7 (10⁻⁶/°C) であった。これは、一般的な値よりも若干小さいが、65 °C 保持期間において収縮挙動がみられるように、加熱試験中の乾燥収縮ひずみ成分が全ひずみに含まれているためと考えられる。次に、水中浸漬試験中のひずみの経時変化を図 3.1-13 に示す。試験に供した試験体は、100 °C に設定した定温乾燥機内で 10 時間乾燥された状態で乾燥後の長さを基

長としたとき、飽水時から乾燥時との間のひずみは、 796×10^{-6} であった。図に示されるように、厚さ 3 mm の試験体では、水分と接してから 2~3 分以内に 350×10^{-6} の急激な膨潤を示した後、なだらかな膨潤を示した。測定は、150 分間まで実施したが最終膨潤量は、乾燥時の長さを基長として、 510×10^{-6} であった。経時変化をみると、計測終了時点では、膨潤が収まっていないことから、飽水時とのひずみとの範囲内であることと齟齬がないことから初期の急激な膨潤挙動から正しく測定できると判断した。

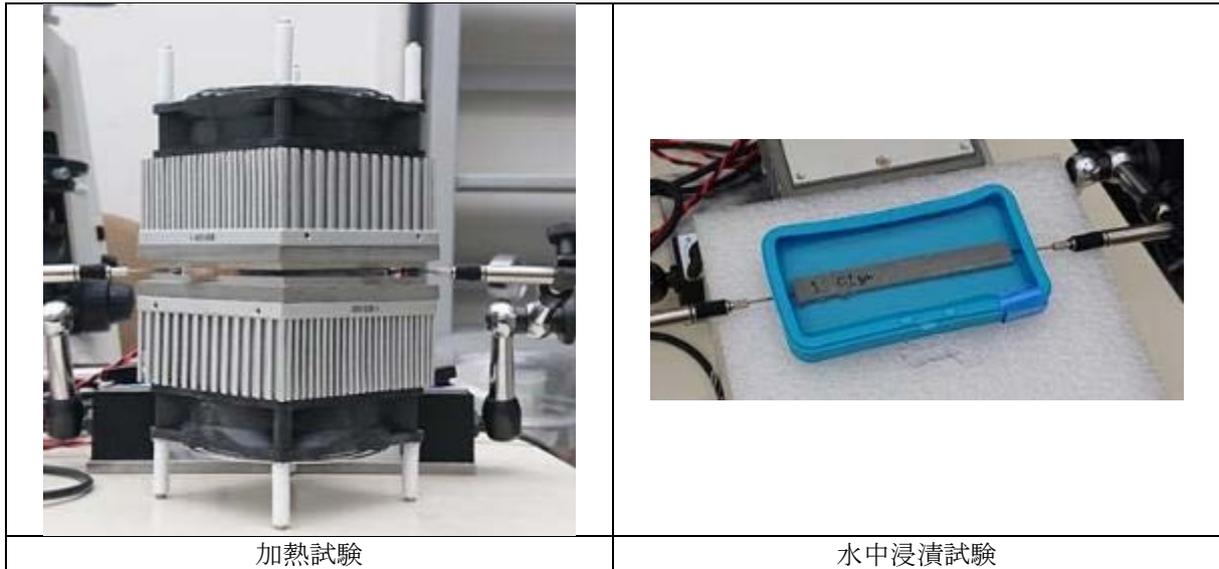


図 3.1-11 長さ変化試験外観

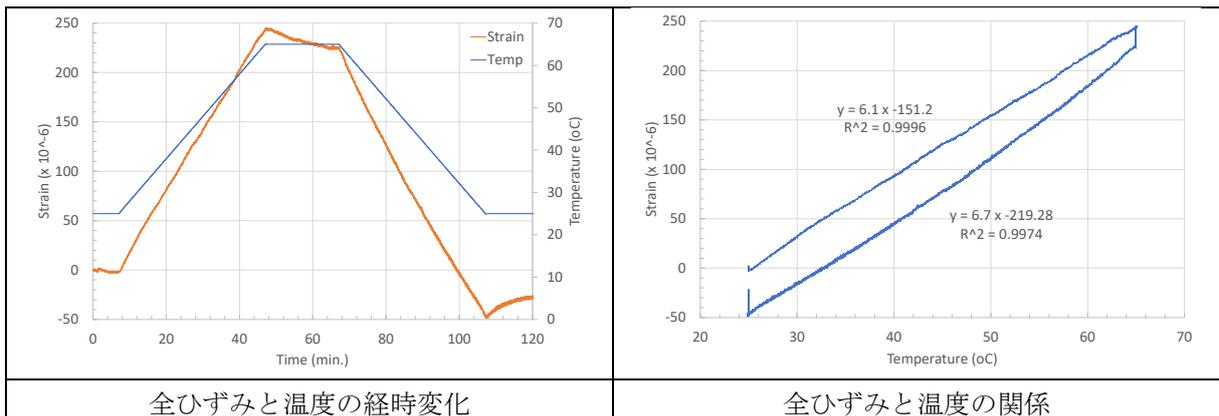


図 3.1-12 加熱試験中の長さ変化の結果

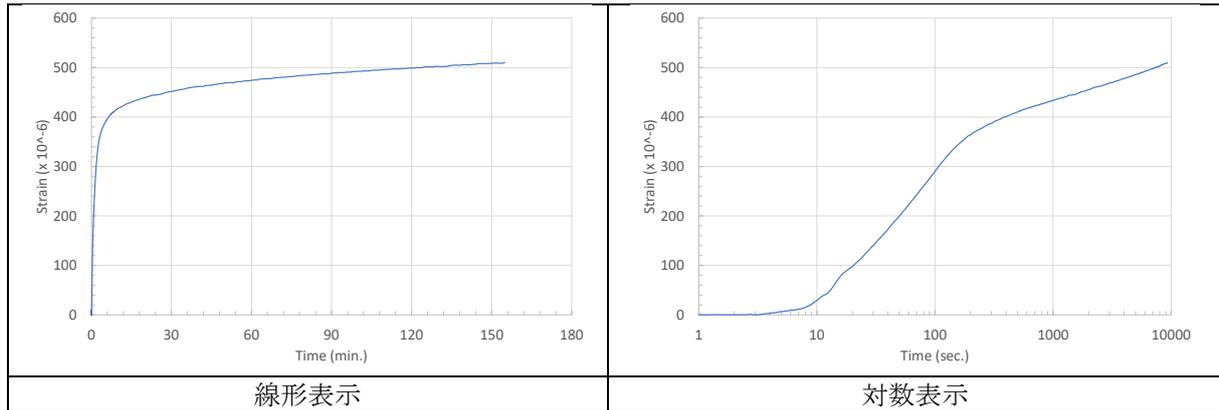


図 3.1-13 浸漬試験の長さ変化の結果

(2) 画像相関法

微細一巨視ひび割れをもつコンクリート内部への水分浸透または乾燥に伴うひずみ分布を観察するために画像相関法による画像分析を行った。画像相関法とは、例えば、加熱や水分浸漬の前後における基準画像との比較により、変形、ひずみ分布を取得する手法である。このとき、撮影対象表面におけるテクスチャによってとらえられる解析分解能が変化するため、白と黒のスプレーなどを吹き付けることによりドットのランダムパターンを作製するのが一般的な観察手法である。画像撮影には、10×10×40 cm のコンクリートプリズムから、10 mm 程度に切り出した 10×10×1 cm 程度のコンクリート板を用いた。板状試験体は、回転研磨板を用いて、両面の切断バリを 100 メッシュの研磨粉により湿式研磨で取り除き、観察面を 400 および 800 メッシュの研磨粉で湿式研磨を行った。画像相関法における観察面のランダムパターンは、つやなしの白色および黒色の水性スプレーで作製した。画像の取得および画像相関法分析には、USB カメラ (FLIR Systems Inc.、Grasshopper3、モデル GS3-U3-51S5M-C、画素数 5.0 MP、フレームレート 75 FPS、イメージセンサー Sony、IMX250、Mono)、レンズ (computer 社、1.1 型サイズカメラ用 12 メガピクセルレンズ、モデル V3528-MPY、f=35 mm、F2.8)、LED リングライト、画像相関法ソフトウェア (Correlated Solutions 社、VIC-2D) を用いた。加熱試験は、ホットプレート上で 100 °C に加熱中および放冷中の試験片に対してインターバル撮影を行った。試験に供した試験体は、飽水状態であった。画像相関法による画像分析を行い得られた最大主ひずみ分布の結果を図 3.1-14 に示す。図に示されるように、加熱中は、断面全体が膨張するとともに、 0.002×10^{-6} を超える大きな変形が網目状に発生していることが確認できる。放冷後は、断面全体の変形はほぼ元に戻っているが、加熱中にみられた 0.002×10^{-6} を超える大きな変形が一部残存していることが確認できる。これは、加熱中に生じたひび割れに由来するものと考えられる。水中浸漬試験は、水槽中に置かれた試験片に対して、注水開始からインターバル撮影を行った。試験に供した試験体は、100 °C で乾燥した試験片を曲げ変形によって割裂し、観察面の裏側をアルミ粘着テープで拘束したものである。加えて、一面からの水分浸透を観察するために、試験片の 3 側面はアルミ粘着テープで簡易に覆った。画像相関法による画像分析を行い得られた最大主ひずみ分布の結果を図 3.1-15 に示す。水分浸透面は、紙面左側である。図に示されるように、接水とともに巨視ひび割れが変形していく様子が確認できる。これは、ひび割れ界面のコンクリートマトリクスが吸水と同時に膨潤していることに由来すると

考えられる。その後、ひび割れ界面および試験体左側面から垂直方向に向かってコンクリートマトリクスの変形が網目状に進行している様子が確認できる。これは、加熱試験で見られたように試験片中に生じた微細ひび割れを伝って浸透した水分によって膨潤していることに由来すると考えられる。加熱試験および水中浸漬試験の結果から、試験体断面の全体的な変形および局所的な変形が経時的に進行していることを観察できたため、正しく計測できると判断した。

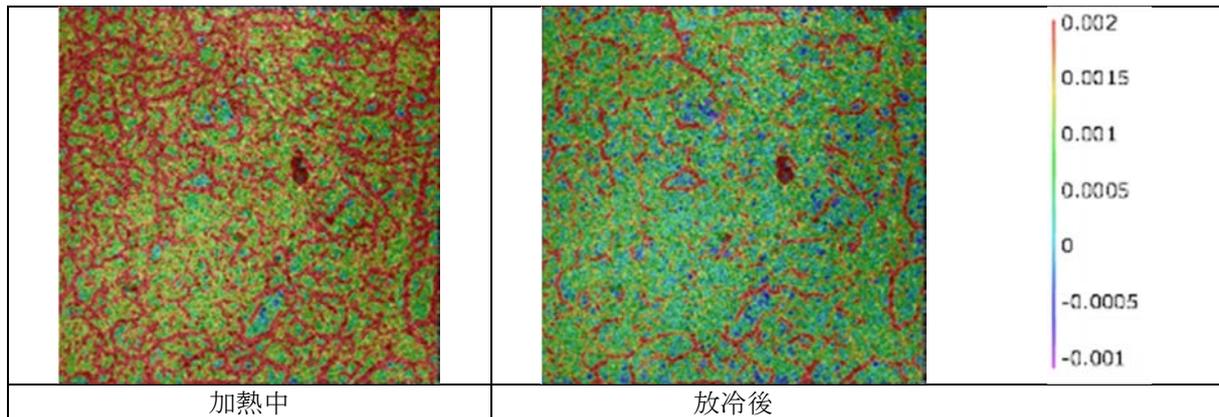


図 3.1-14 加熱試験中の画像相関法分析結果
(10 cm×10 cm 断面の主ひずみ分布、単位無次元)

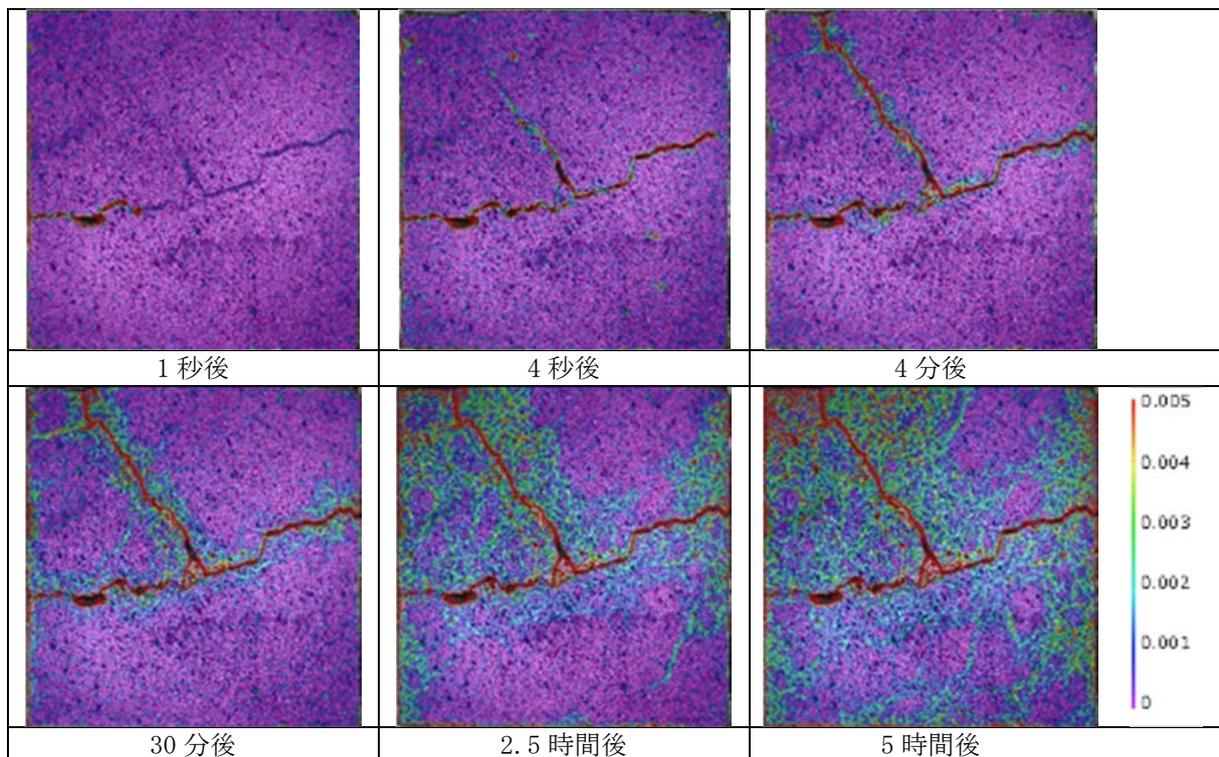


図 3.1-15 水中浸漬試験中の画像相関法分析結果
(10 cm×10 cm 断面の主ひずみ分布、単位無次元)

3.1.2 メソスケールひび割れ解析の実施とひび割れ量の評価

(再委託先：名古屋大学)

(1) 提案する計算方法の紹介

本研究プロジェクトで提案する手法は、コンクリートのひび割れ進展を評価するために、多くの適用例のある RBSM を用いる。この手法と熱や水分などの物質移動を表現するトラスネットワークモデル（以下、「TNM」と略す。）は RBSM と併用することを目的として提案されており、本研究プロジェクトの応用性が高いものと判断した。事例とともに詳細は①「RBSM」および②「TNM」に示す。

今回、沸騰水型の内壁として一般的な 1.5 m 厚さの部材を対象として、ひび割れおよび内部の応力を評価することによって物質移動に影響を及ぼすコンクリートの状態を推定し、その浸透深さ予測に貢献することを想定している。1.5 m 厚さの部材においては、初期にセメントの水和発熱とそれに伴う物性変化が変形の拘束条件下で生じるために、温度上昇と下降のプロセスだけで部材内部に引張の、部材表面に圧縮の応力が生じる。これに乾燥の影響が重畳するため、コンクリートの状態推定においてはセメントの水和からスタートする必要があるため、令和 2 年度は初期の挙動を主たる評価対象として検討を進めた。

① RBSM

RBSM は、当初、Kawai[3]によって開発された。RBSM は離散的なモデルであり、離散的な数値解析を操作することで、コンクリートのような連続体材料のひび割れを直接取り扱うことができる。RBSM では、Bolander と Saito[4]によって提案されたボロノイ図に基づいて、コンクリートを剛体粒子の集合体に分割し、ひび割れが発生する可能性のある方向へのメッシュの偏りを減らすことができる。ボロノイ要素の境界面では、図 3.1-16 に示すように、積分点上にゼロサイズのスプリングセット（1つの正常ばねと 2つの接線ばね）が生成し解析する。ばねの挙動は、コンクリート材料の力学的挙動を表す。

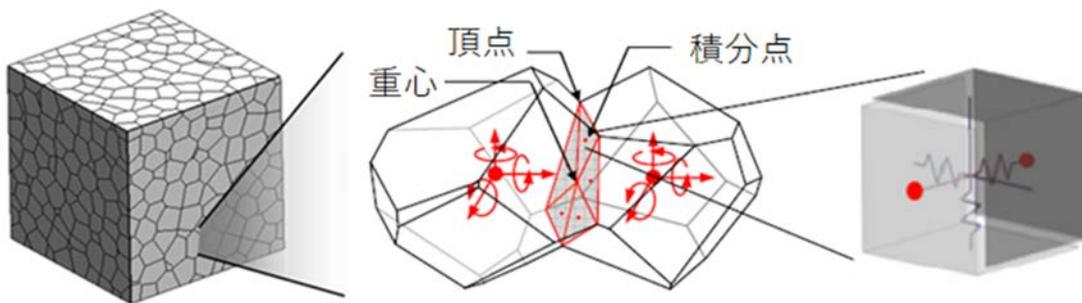


図 3.1-16 RBSM の概要

② TNM

TNM は、Bolander ら[4]が質量移動現象を再現するために RBSM とともに開発したものである。TNM は、図 3.1-17 に示すように、ボロノイ要素内の母点間を結合するように生成し、コンクリート材料内の物質移動問題のために線形の導管のネットワークの集合体として物質移動を解く。各導管内では一次元の差分法として物質移動を評価する。TNM では、ボロノイ核と境界面の間接点の間に生成されるトラス要素を内部トラス要素（青線）とする。これはバルクコンクリート中の物質輸送を表現するために用いられる。

また、中間点と境界面の頂点の間に生成されるトラス要素は、境界トラス要素（緑線）として、ひび割れを介した質量輸送を表現するために使用する。令和 2 年度はひび割れ部の物質移動は考慮せず、内部トラス要素のみでの解析を実施した。

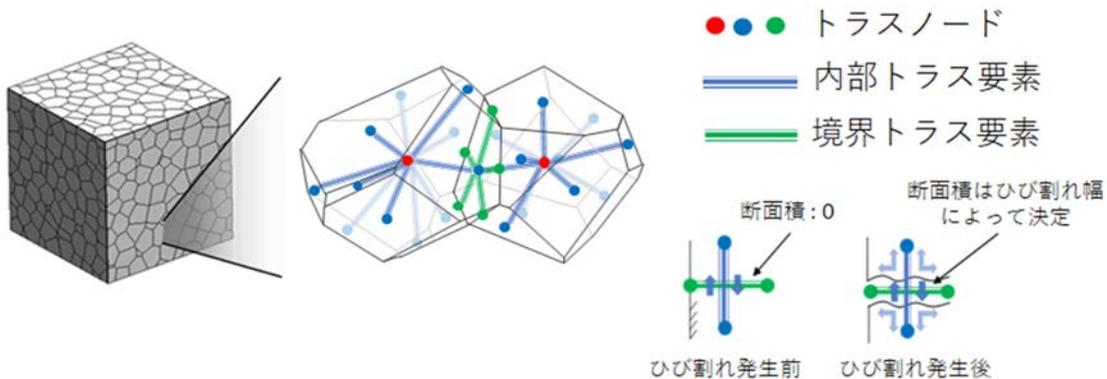


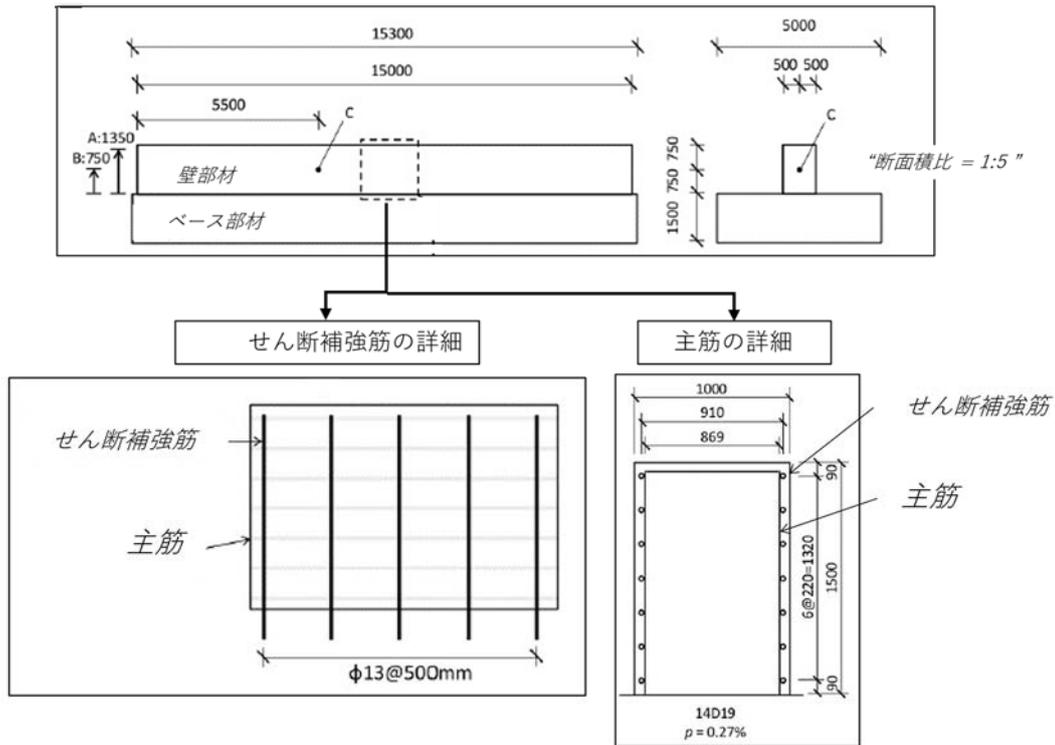
図 3.1-17 TNM の概要

(2) 鉄筋コンクリート壁の温度ひび割れ試験 (JCI guideline 2008)

① 参考実験

マッシュなコンクリートにおけるセメントの水和熱に起因するひび割れは、鉄筋コンクリート構造物の構造性能や耐久性を低下させる重要な要因であり、本研究プロジェクトにおいては放射性物質の内部浸透を容易にするということから問題になる。マッシュな鉄筋コンクリート構造物の施工において、温度ひび割れ問題は避けたい問題であり、たとえひび割れが入らないとしても、乾燥収縮ひび割れにつながる可能性もあることから初期応力として考慮する必要がある。そのため、本検討では、初期のマスコングクリートの初期応力やひび割れ発生が可能な構成則の検討を行った。これは、最終的に沸騰水型原子力建物の内壁で一般的な 1.5 m 厚さの壁のひび割れ問題を RBSM で解くことを目的とするからである。日本コンクリート工学会から発行されているマスコングクリートのひび割れ制御指針 2008[5]には、指針の設計用値の決定や設計方法の検証用の実験が掲載されている。本検討では、そのなかの 1 つを参考とすることにした。

ここでは、計算結果を検証するために、指針に掲載されている実験に焦点を当てた。図 3.1-18 に供試体の詳細（壁部材やベース部材の形状、鉄筋の配置）を示す。また、材料の詳細（コンクリートの調合や鉄筋の物性）を表 3.1-3 に示した。実験条件として、新たに施工した壁部材を対象として、十分養生された壁部材をその上に施工する既存のベース部材がこの壁部材の変形を拘束する。壁部材の養生条件は、壁構造体の側面は材齢 2 日程度まで合板で覆われ、その後、大気に開放さる。上面は養生マットで継続的に覆われていた。ベース部材は地中に埋設され、上面は地面と同じ高さになっている。そのため、熱的には地盤との移動が可能となっており、部材の変形は底面の摩擦および周囲の地盤に拘束を受ける。十分硬化したコンクリートの機械的性質については、表 3.1-4 に記載した。本実験では、壁部材に打ち込んだ同一バッチのコンクリートについてシリンダー試験体を別途取得し、機械的物性を継続的に取得して水和過程における物性変化についての定量的なデータが取得されている。実験で得られた物性値の変化は、後述するように計算結果に反映させた。



※図中には部材中心部に観測点であるc点を示した。

図 3.1-18 壁部材およびベース部材の詳細

表 3.1-3 材料の詳細

コンクリートの調合 (unit: kg/m ³)	セメント (OPC*)	水	細骨材	粗骨材	混和材	化学混和 (セメント %)
	380	160	717	1079	---	0.7
鉄筋	主筋			せん断補強筋		
	D19 (ρ = 0.27 %)			D13 (spacing = 500 mm)		

*普通ポルトランドセメント

表 3.1-4 コンクリートの物性値

	壁部材	ベース部材	
Young's modulus, E	22,500	41,200	MPa
Tensile strength, f _t	2.372	2.500	MPa
Compressive strength, f _c	25.58	34.6	MPa

② 対象実験の成果

実験の結果として、図 3.1-19 に温度および温度応力（これは鉄筋にひずみゲージを貼り、断面に生じている応力を、平面保持過程を仮定して算出している。）の履歴結果を示す。温度履歴から、壁部材のコンクリートがセメントの水和により発熱し、施工後 1 日目で

ーク温度として約 70 °Cに至っていることが確認できる。応力の履歴を見ると、温度膨張が拘束された壁部材は、材齢 1 日において 1 MPa 程度の圧縮応力が生じており、その後、温度低下とヤング率の増大にともない引張応力が生じ、最終的にひび割れに至っている。施工後 5 日目に引っ張り応力が急激に低下しているのは、厚いコンクリート壁に温度ひび割れが発生していることを示している。ひび割れの伝播を目視で確認した結果を表 3.1-5 に示す。厚い壁のコンクリートには 4 つの主な垂直ひび割れが発生しており、最大のひび割れ幅は A 点と B 点でそれぞれ 0.53 mm と 0.41 mm であった。

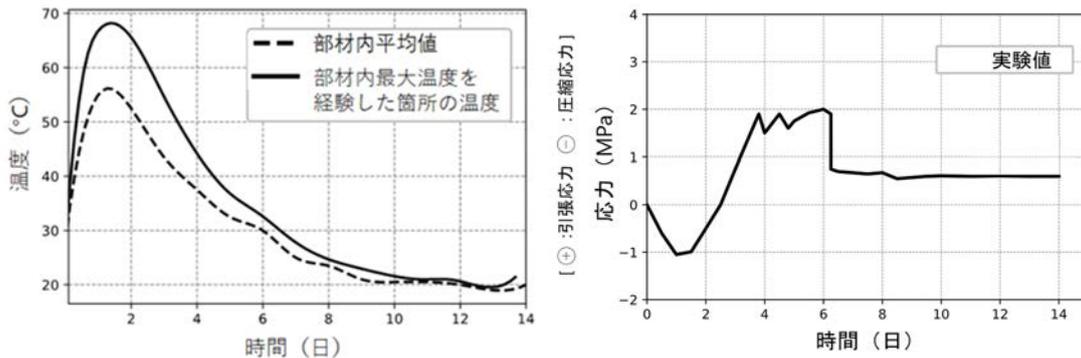


図 3.1-19 温度（左）および温度応力（右）の履歴

表 3.1-5 温度ひび割れの状況

ひび割れ本数	ひび割れ間隔 (m)	時間	ひび割れ開始時間 (時間)、ひび割れ幅 (mm)			
		場所	W1	W2	W3	W4
4	3.8, 3.8, 2.4, 2.8, 2.2	ひび割れ	192	167	264	192
		E	0.18	0.53	0.20	---
		C	0.20	0.41	0.15	0.09

(3) RBSM による解析

RBSM により参考実験の模擬を試みた。最初に水和発熱を考慮した熱伝導解析を実施し、次に温度応力を解いた。個別の流れや考え方について以下に示す。

① 鉄筋コンクリートの解析モデル

1) 対象となる試験片のメッシュと境界条件

厚いコンクリート壁の挙動を再現するために、図 3.1-20 に示すように、実際の試験体の形状を考慮し、1/2 モデルを構築した。コンクリート要素は、要素サイズ 150 mm のボロノイ要素でメッシュ化し、総要素数は 6302 である。縦方向と横方向の鉄筋は梁要素でモデル化し、ボロノイ要素と梁要素は付着要素で接合した。表 3.1-3 で示した鉄筋比と間隔に従って配置した。

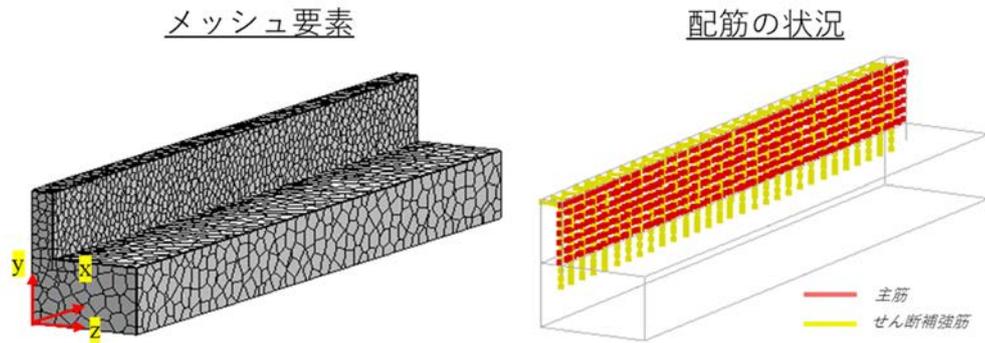


図 3.1-20 RBSM に用いたメッシュ

境界条件の計算については、図 3.1-21 に示すように、伝熱解析と構造解析の境界条件を実験の条件に沿って設定した。

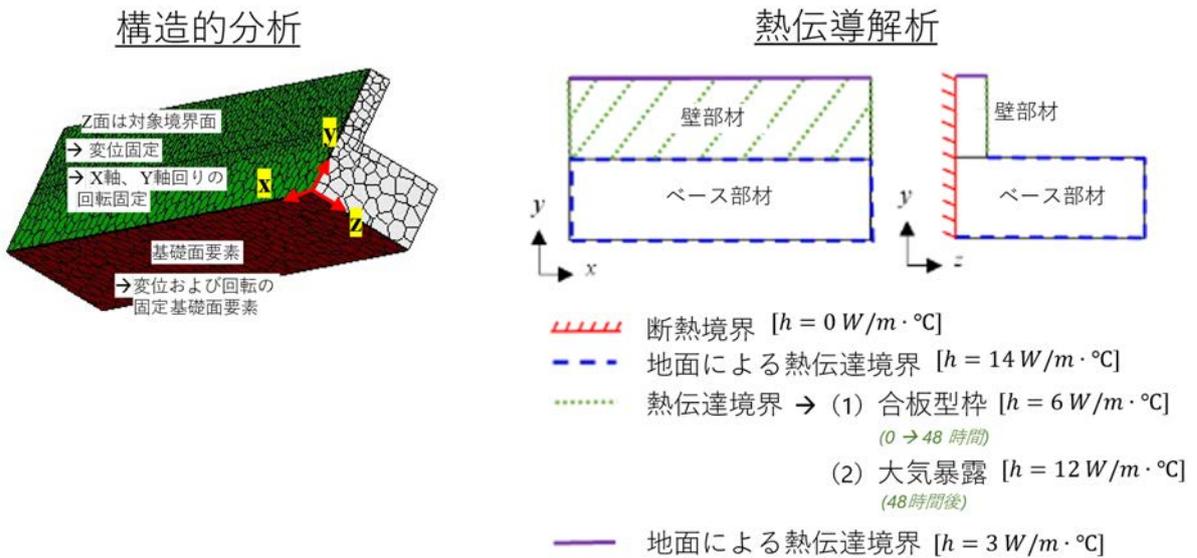


図 3.1-21 構造解析と伝熱解析の境界条件

2) TNM における熱伝導解析

熱伝導解析では、TNM を用いて熱移動を考慮するために、各導管に対して 1 次元有限要素法 (1D-FEM) を導入している。ここでは、コンクリート内部の温度変化を表現するために、伝熱過程のみを考慮している。熱伝導解析の支配方程式はフーリエの法則に基づき、連続式と境界条件は以下の式(3.1-1)および式(3.1-2)に基づく。

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_c(T) \tag{3.1-1}$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial n} + h_c(T_s + T_\infty) = 0 \tag{3.1-2}$$

ここで、 T は温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 t は時間 (s)、 ρ はコンクリートの密度 (g/mm^3)、 $c(T)$ はコンクリートの比熱 ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)、 $\lambda(T)$ は熱伝導率 ($\text{W}/\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C}$)、 $Q_c(T)$ はコンクリート内部の発熱量 (W/m^3)、 n は乾燥面の法線ベクトル、 h_c は熱対流の係数 ($\text{W}/\text{mm}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)、 T_s 、 T_{∞} はそれぞれ露出面と大気温度である。

今回の計算では、JCI 指針 2008 [5]と同様の方法で求めたコンクリートの断熱温度上昇の特性をもとに、水和による発熱を計算した。

3) RBSM による構造解析

a) コンクリート材料の構成モデル

RBSM では、コンクリート材料の特性を表現するために、図 3.1-22 に示すように、引張、圧縮、せん断、および Mohr-Coulomb の構成モデルを採用している。コンクリートの引張挙動は、1/4 モデルに基づき、引張強度までの線形弾性体とそれに続くバイリニアな軟化枝としてモデル化されている。コンクリートの圧縮挙動は、山本らによって開発された S 字型曲線でモデル化されている [6]。コンクリートのせん断挙動は、せん断強度まではせん断弾性率の傾きを持つ弾性領域でモデル化され、その後、想定される軟化挙動が続く。せん断ばねの破壊は、Mohr-Coulomb によってモデル化される。RBSM の適用に関しては、構成モデルで使用される数値パラメータは、材料のマクロ的な挙動を直接採用するものではない。山本ら [6]の研究に基づいて物性値と要素寸法を考慮して修正する必要がある。

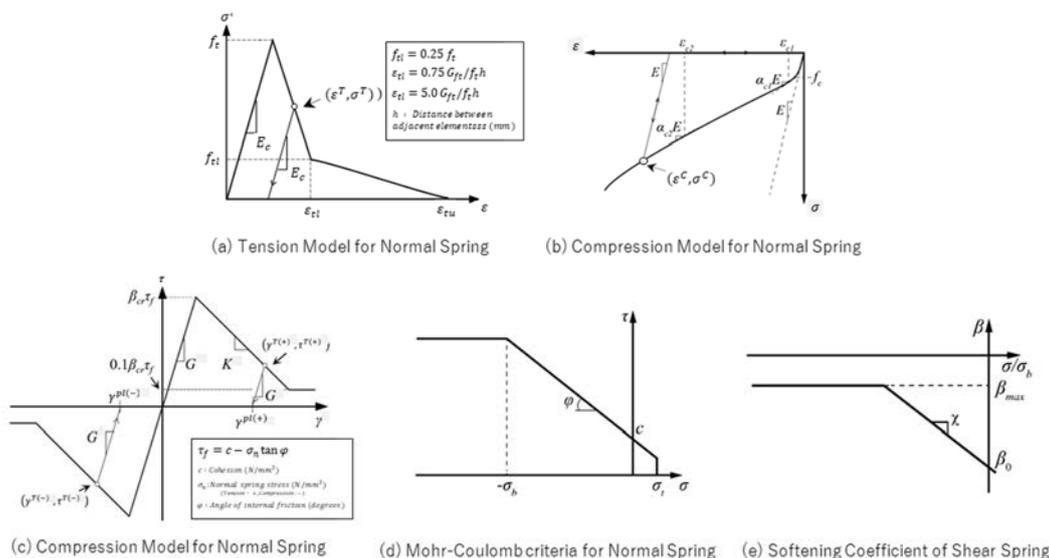
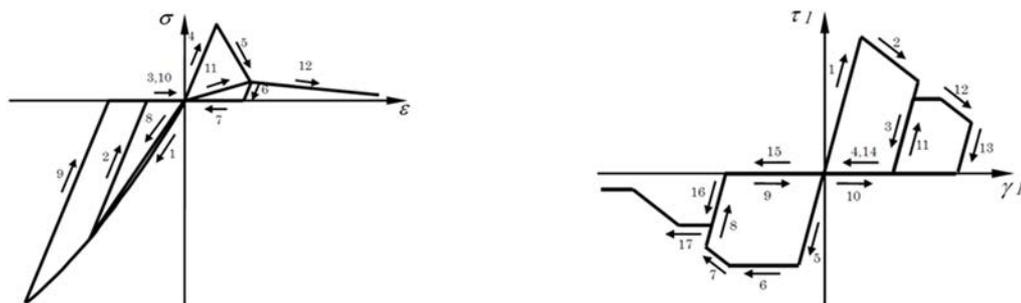


図 3.1-22 コンクリート材料の構成モデル
(山本ら [6]、Sasano ら [7]、許諾を得て転載)

さらに塑性化後のヒステリシス挙動については、山本ら、篠野らの研究に基づいてモデル化した。この様子は図 3.1-23 に示す。



(a) Hysteresis Stress-Strain Relationship for Normal Spring (b) Hysteresis Stress-Strain Relationship for Shear Spring

図 3.1-23 応力-ひずみ関係上のヒステリシスの関係
垂直ばね (左)、せん断ばね (右) (Sasano ら [7]、許諾を得て転載)

b) 鉄筋と付着

鉄筋のモデル化は、Saito らの検討に従った [8]。長さゼロのリンク要素をボロノイ要素と線要素の間に付着要素として設定した。鉄筋の降伏後までの範囲でのモデル化は、島らの研究に従った [9]。他の方向について弾性的にふるまうと仮定した。付着要素については、菅らの研究に従いモデル化した [10]。鉄筋とボロノイ要素の関係、ならびに付着の応力-スリップ関係については図 3.1-24 に示した。

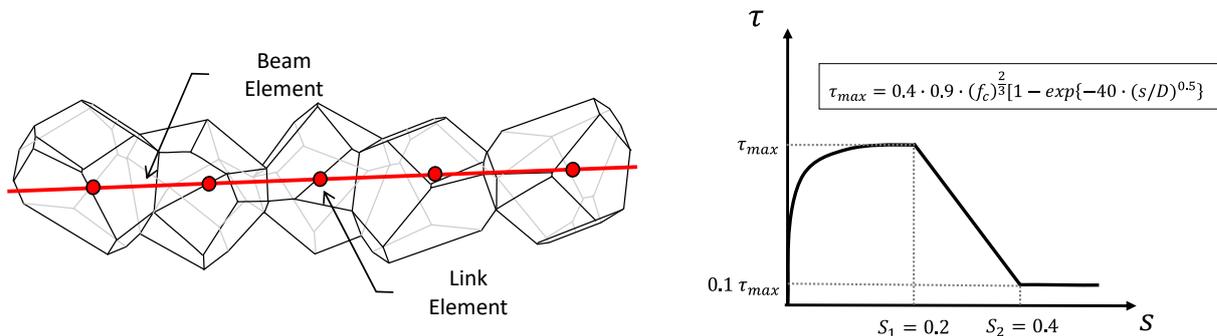


図 3.1-24 鉄筋と付着要素の概要 (左) と付着要素の構成則 (右)
(山本ら [6]、許諾を得て転載)

c) 時間依存型微細ひび割れ構成モデル

本解析では、Jang ら [11] の既往の手法に基づいて物理的性質の発現を計算した。圧縮強度と破壊エネルギーの発現は、有効材齢の概念 (JCI ガイドライン 2008 [5]) に準拠して決定した。温度履歴を考慮して有効材齢を計算後、有効材齢の関数として物性変化を表現した。引張強さ、ヤング率、せん断剛性の発現は、圧縮強度の関数として表現した。

d) 時間依存型構成モデル

RBSM において、応力-変位条件下での物性変化を適切に評価する目的で時間依存型構成モデル (time dependent model、以下「TDM」と略す。) を導入した。

このモデルは、図 3.1-25 に示すように、丸山ら[12]が開発した時間依存型微細ひび割れモデルを基に開発したものである。TDM は、乾燥収縮による損傷を導入するために、Sasano ら[13]によって RBSM に実装された。TDM は、乾燥過程での物性変化や微細ひび割れの発生に伴う合理的なコンクリートの変形、応力伝達、ひび割れ挙動を再現することができた。TDM モでは、ひび割れなどの塑性変形が生じた場合に応力がゼロとなるひずみを毎時刻再計算し、あらたな構成則に切り替える形でコンクリート部材中の物性発現を表現できる。

提案した計算方法では、硬化過程による物性変化の影響をより適切に表現するために、原点移動の概念をさらに拡張した。また、微細ひび割れによる塑性化による塑性ひずみとヤング率の変化だけでなく、本構成則では物性値の変化自体も考慮することができる。

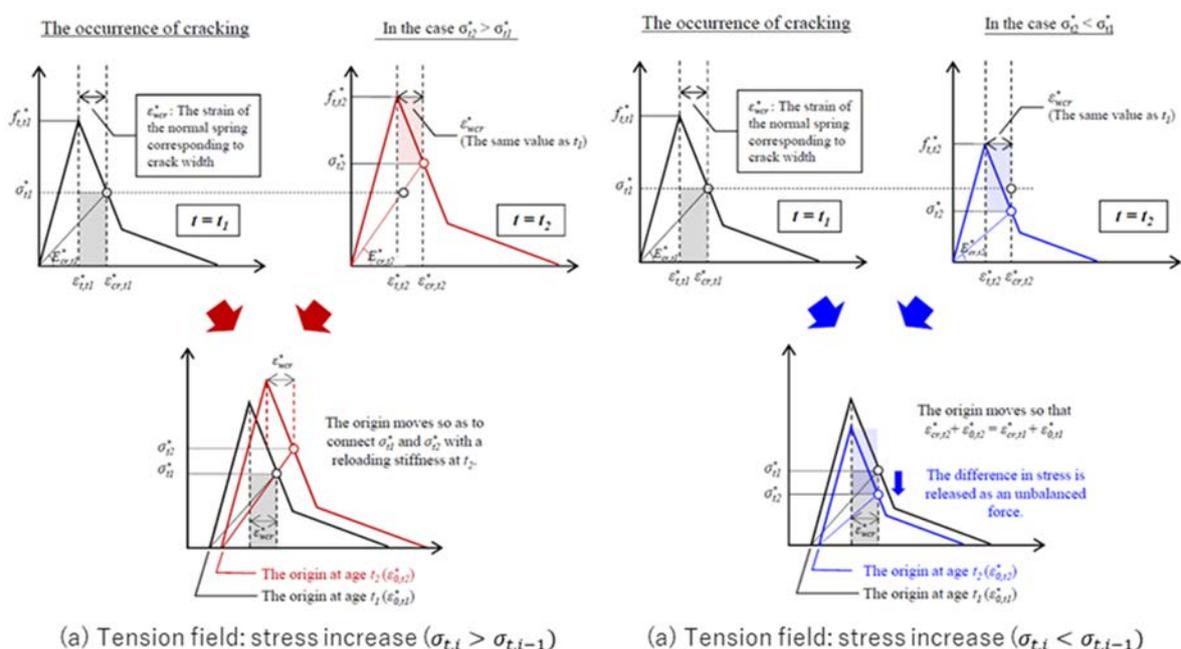


図 3.1-25 時間依存型構成モデル (TDM)
(Sasano ら[13]、許諾を得て転載)

e) 若材齢におけるコンクリートのクリープ挙動

若材齢時のコンクリートのクリープ挙動を考慮するため、日本建築学会 (AIJ) のマスコンクリートにおけるひび割れ制御指針に記載のモデルを導入して RBSM のクリープ挙動を評価することとした。AIJ モデル[14]では、クリープ係数の最終値ならびにクリープの速度係数は、材齢 28 日におけるヤング率と対象材齢であるヤング率の比に依存する。

RBSM への適用については、重ね合わせ則が成り立つものとして、増分応力とクリープ係数によってクリープひずみを算出し、初期ひずみ問題として算出した。図 3.1-26 に重ね合わせ則の模式図を示すが、これは Bolander ら[4]の計算結果と同様である。クリープ挙動は、クリープ荷重下での熱膨張による応力低下を表現するために、初期ひずみ問題として取り扱った。

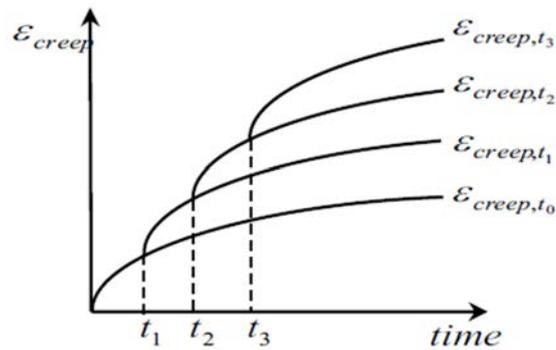


図 3.1-26 RBSM におけるクリープひずみの考え方の概念図
(杉本ら[15]、許諾を得て転載)

② 解析の流れ

数値解析の流れについて図 3.1-27 に示す。最初に熱伝導問題を TNM によって解く。このとき、セメントの水和発熱は断熱温度上昇曲線として取り扱い、コンクリート内部の熱伝導とコンクリート表面における熱伝達問題を解く。型枠や暴露の状況は熱伝達係数を変化させることで考慮する。次に、各ボロノイ点における温度履歴に基づき、有効材齢を算出し物性値を取得する。温度変化と線膨張係数によって熱による体積膨張ひずみも算出する。これらをもとに力の釣り合いを解く。時間依存する物性値は TDM によって評価する。このとき、過去の応力履歴からクリープ関数を用いてクリープひずみを算出する。過去の応力履歴と応力载荷時から現在までの時間を用い、すべての応力履歴に対応するクリープひずみを算出して重ね合わせ則に基づき算出する。今回の解析では、初期応力へのひび割れ問題への影響を確認する目的で、材齢 15 日までの範囲で解析を行った。今回の解析では、360 ステップに分解し、各ステップは 1 時間とした。

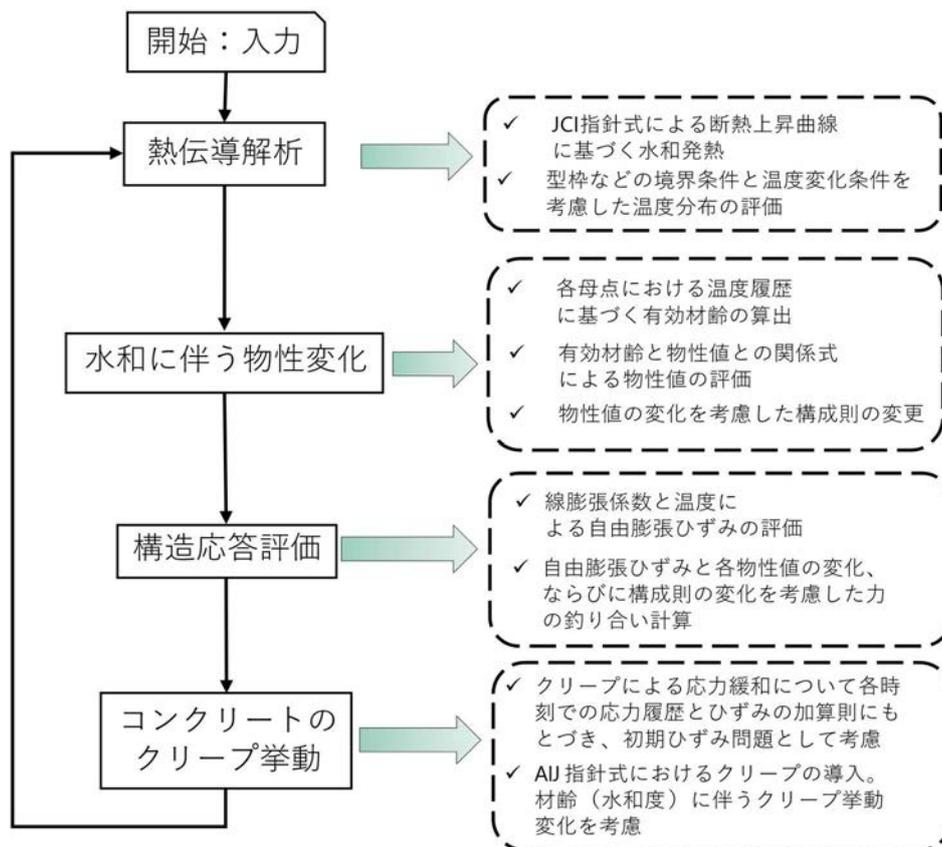


図 3.1-27 数値解析フロー

③ 解析結果

1) 温度履歴

温度履歴の結果について、図 3.1-28 に示す。ここに示されるように実験値と解析値は良い対応を示した。

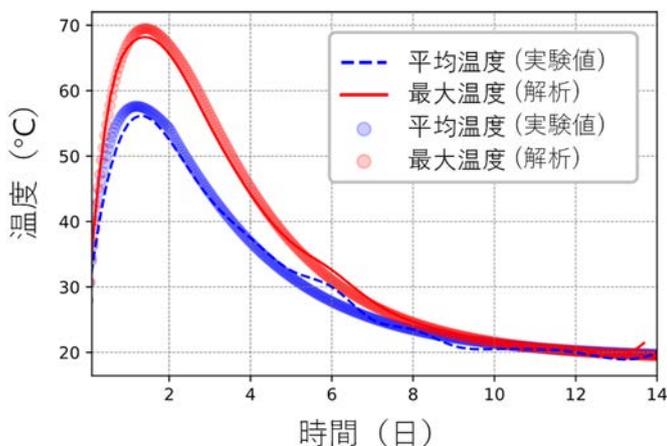


図 3.1-28 温度履歴の解析結果

2) 物性変化

ここでは、有効材齢に対して物性値の発現と実験値との確認を行う。図 3.1-29 においては、圧縮強度、引張強度、粘着係数（せん断強度のパラメータ）、ヤング率、破壊エネルギーについて示した。また、ヤング率については初期のヤング率は適合しているが本解析ではその後のヤング率は高めに評価している。これは実験でのヤング率が乾燥によって低下している可能性もあるため、今回はこのような設定で解析を行った。今後、これらの影響評価は追加で実施する。全般的に実験値に対して概ね適切な値を用いて解析していることが分かる。

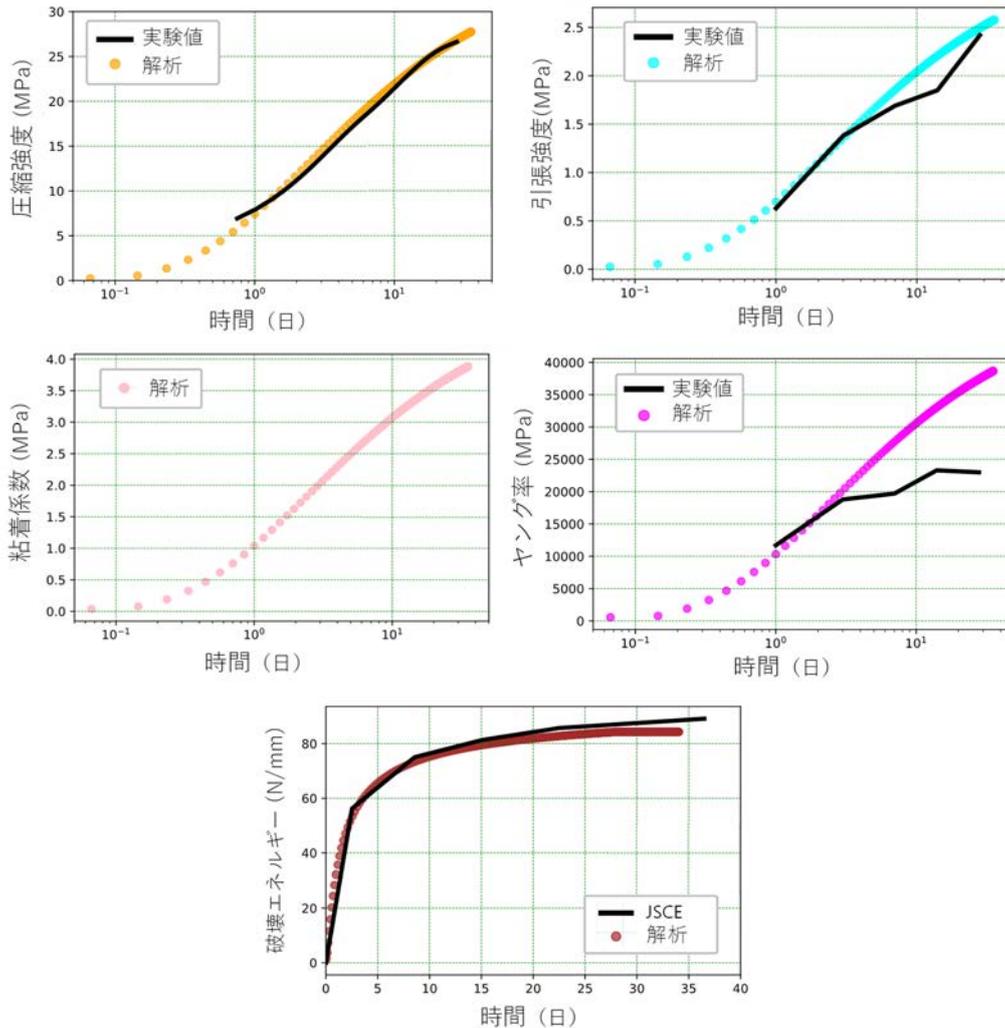


図 3.1-29 水和による物性値の変化

3) 応力変化

温度履歴に伴う温度ひずみが拘束され、そのときの物性値が変化するために最終的に温度がもとに戻ったとしても応力が蓄えられる。この様子を確認するために部材の水平方向の応力と抽出して確認を行った。抽出点は、図 3.1-18 における点 c である。図 3.1-30 に結果を示す。温度上昇による最大点では、圧縮応力として 1 MPa 程度が蓄えられ、この傾向は概ね再現された。圧縮が蓄えられるタイミングおよび応力が適合している。そ

その後、引張強度が加算されていく様子、その後、ひび割れが入る様子も概ね確認された。今回、c点における応力は最大で1.37 MPaにとどまっております、実験で計算された2.0 MPaを下回った。これは、ひび割れ箇所がずれると、ひび割れによって生じる応力緩和挙動がひび割れ中心からの距離に依存して生じることから、やむを得ず生じることであると考えられ、計算上は適切に現象を再現していると考えられる。とくにひび割れによって応力が低下しているタイミングが概ね再現されていることから、裏付けられる。

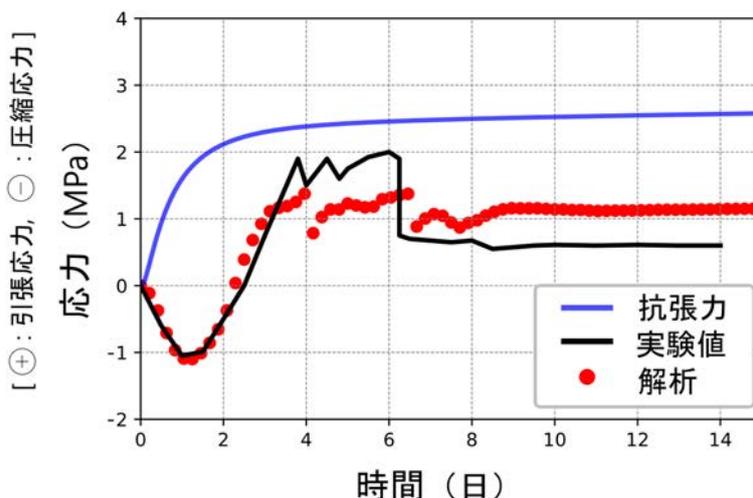


図 3.1-30 マスコン部材中の応力履歴

4) ひび割れ

応力の履歴以外にも、変形、応力分布、ひび割れの伝播などの構造応答を調べた。これらの応答の解析結果を図 3.1-31 に示す。図 3.1-31 に示すように、変形と亀裂の伝播は 3 次元的に可視化されており、応力分布は対称境界付近の z 平面上の断面から抽出した。温度上昇時 (1.0 日) と下降時 (4.0 日以降) の膨張と収縮が明確に観察され、解析による変形は妥当であると考えられる。

これは、温度がベース部材を介して伝達されるため、コンクリート壁の上部にはセメントの水和発熱による温度上昇が一定期間継続して起きるが、ベース部材である下部には温度が蓄積されないことと、ベース部材の剛性に対する壁部材の剛性の比が小さいためである。

また、水平方向の応力分布についても、変形による圧縮・引張応力がよく再現されている。

ひび割れの進展についても、提案した計算方法により、膨張時と収縮時におけるひび割れの発生を確認することができた。膨張状態では、ベース構造にいくつかの分散した多くのひび割れが発生した。解析上はこのひび割れは壁部材の温度低下後に閉じる。この挙動を裏付ける実験データは存在しない。しかし、これらのクラックは、壁部材のコンクリート要素の膨張に抵抗して発生するものであるため必然性がある。温度低下時には、壁部材に引張応力が生じ、ほぼ引張強度に達する 3 日前後にひび割れが発生した。4 日目には数本のひび割れが壁部材に発生した。応力分布とひび割れ伝播の図か

ら、ひび割れの局所化、すなわち実部材では可視化されるひび割れを確認することができた。実験の 8 日目では、壁部材に局所的なひび割れが目視で確認されている。数値解析では、多数のひび割れが生じており、局所化がうまく表現されておらず、この点は令和 3 年度に改良の必要があると考えられる。要素の詳細化などを検討していく。

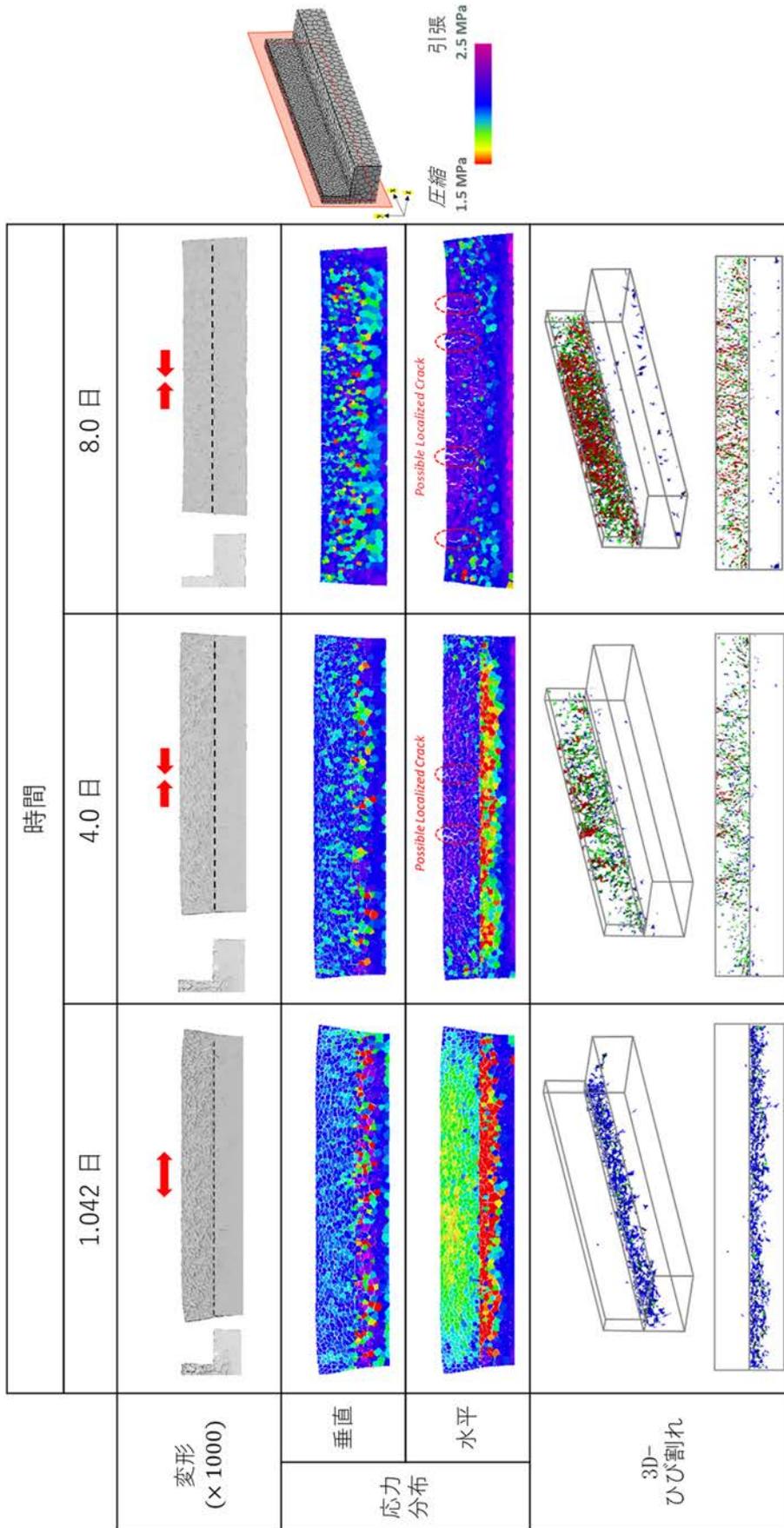


図 3.1-31 変形、応力分布、および、ひび割れ

④ 追加の数値解析

ここでは、同一のRBSMを用いて、1.5 m厚さの内壁を想定した40年間の乾燥によるひび割れを評価するための計算を追加で実施した。現状では、初期応力を経たまま乾燥の影響を連成するには至っていない。原子力発電所の一般内壁を想定し、1.5 m厚さの壁の一部を抽出し、 $300 \times 300 \times 750 \text{ mm}^3$ の対称性を考慮したモデルを作成した。図3.1-32に示されるように対称面においては水分伝達をなしとして、壁両面から乾燥が生じることを考慮して、モデルの1面からのみ1次元的に水分が逸散する状況をモデル化した。この解析では、モルタル要素と骨材要素に分けて、骨材とモルタルに異なる乾燥収縮ひずみ（骨材は 50μ 、モルタルは 1100μ （ $20 \text{ }^\circ\text{C}$ において））と仮定して解析を行った。解析の手法は、Sasanoらの解析方法に準じた[16]。

解析によって得られた相対含水率の分布を図3.1-33に示す。この含水率の分布は既往の中部電力株式会社浜岡原子力発電所で確認された水分分布よりも若干分布の勾配が急になっている[17]。そのため、水分移動についてはさらに検討が必要である。相対含水率に応じてひずみを与え、ひび割れを可視化した結果が図3.1-34である。ここで示されるように材齢10年くらいまでは表層部にひび割れが多く生じる結果になっているが、20年以降は深部にも生じているが、いずれも骨材周囲に入ることによって分散効果が生じているため、1つのひび割れはせいぜい $100 \mu\text{m}$ にも達しない結果となっている。乾燥収縮が大きい場合の結果については令和3年度以降に検討を行う。

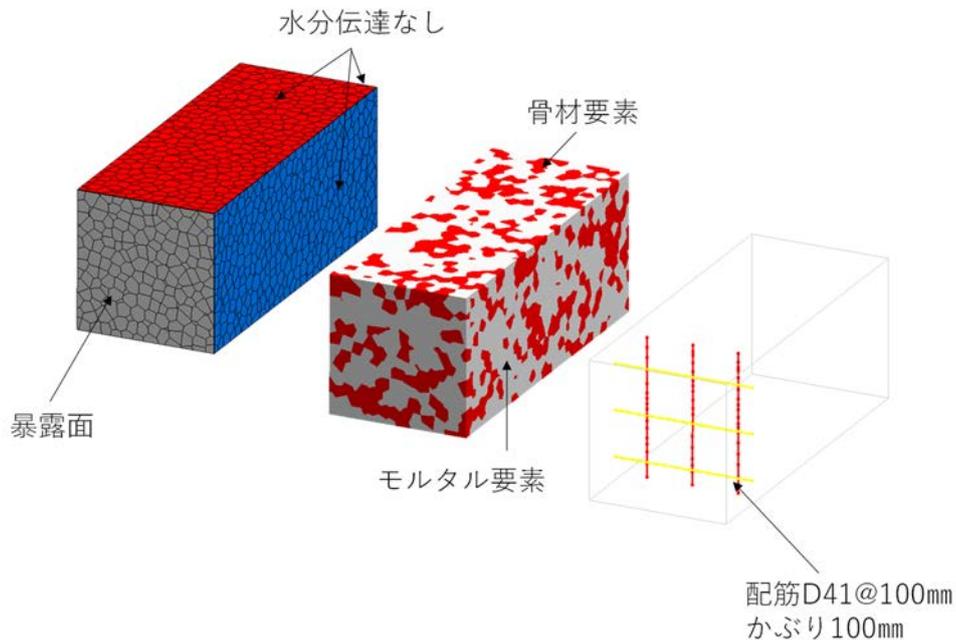


図 3.1-32 内壁を抽出した 1/2 モデル
 (想定部材厚さは 1500 mm として、対称性を考慮して長さ 750 mm の試験体とした。
 コンクリート部材を無限遠の壁から切り出すことを想定して
 領域は $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ を解析対象とした。)

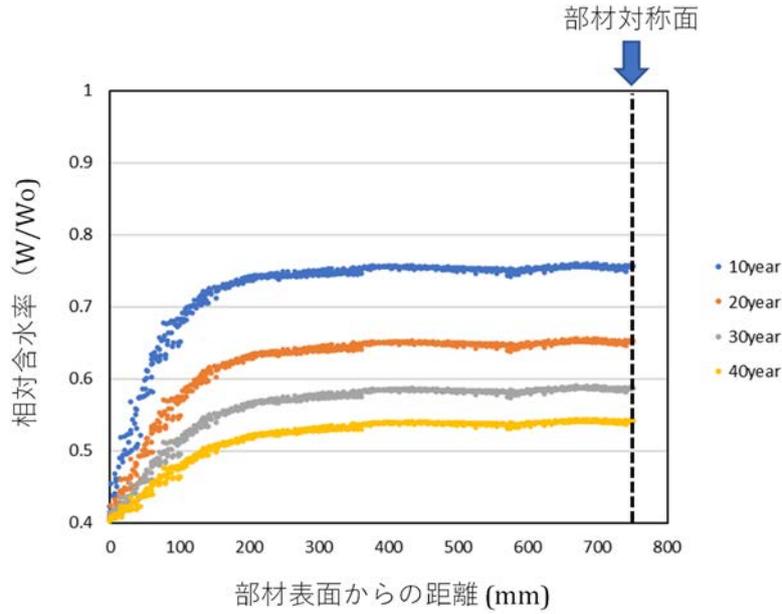


図 3.1-33 解析によって得られた内部の含水率分布 (相対含水率として表記)

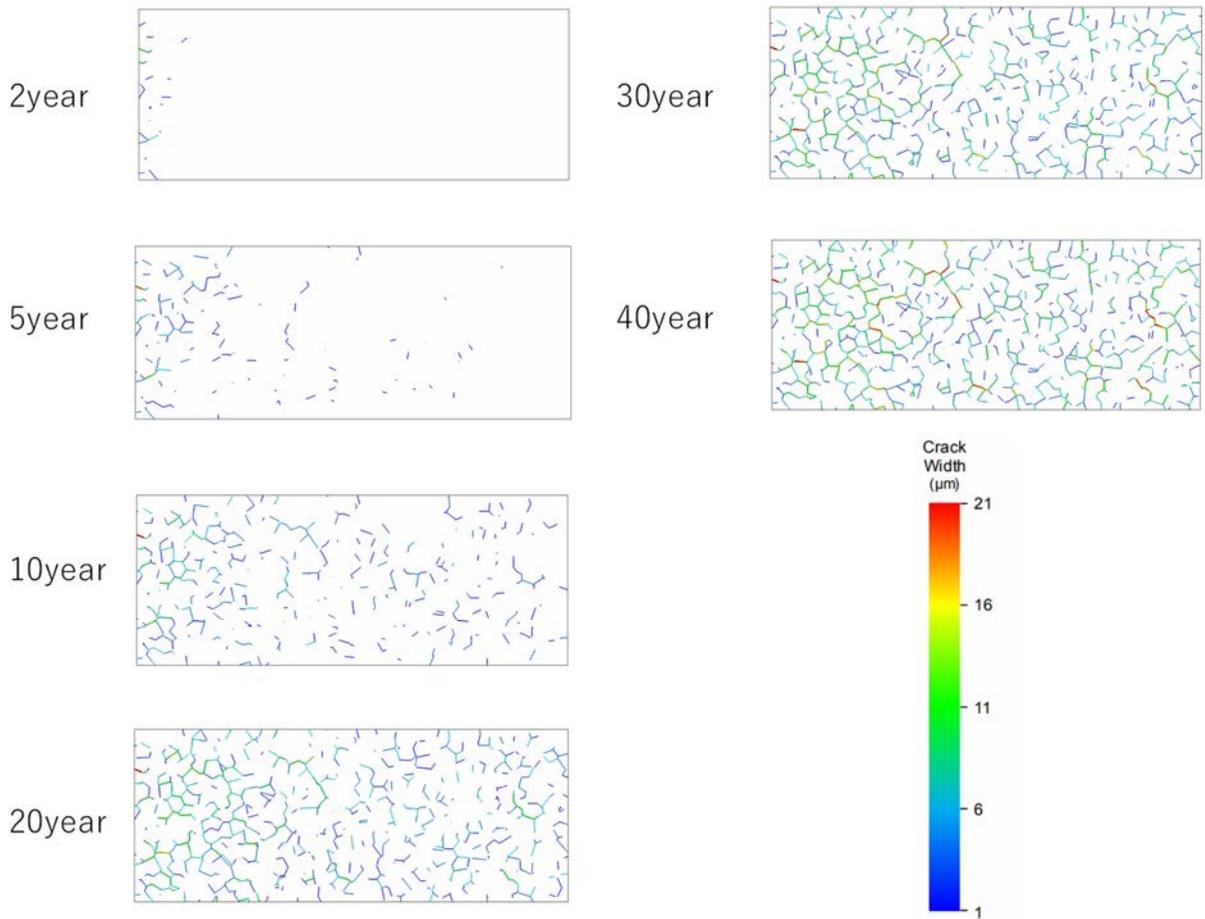


図 3.1-34 解析で得られたひび割れの様子

(4) 考察ならびにまとめ

本検討では、原子力発電所特有の部材厚の大きい鉄筋コンクリート部材において、まずは高経年によって生ずるひび割れの問題を考慮する目的で、RBSMに用いる構成則を整理し、初期の水和発熱の問題、ならびに長期の乾燥によるひび割れの問題について解析を行った。初期の水和発熱の問題では、初期の水和発熱に起因してひび割れが生じうるほどの応力が発生しうることを確認した。実際の原子力発電所では、中庸熱セメントを用いたり、フライアッシュを用いたりすることでこのひび割れ抑制対策を行っている。しかしながら、この初期応力はその後の乾燥収縮ひび割れを誘引する可能性がある。初期応力は中央部で引張、表層部で圧縮の状態になる。そのため、乾燥収縮のひび割れに対しては初期の温度応力は抑制の方向に働くが、一方で、乾燥がこの圧縮域を超えて内部まで進んでいくと、全域が引張応力の状態になり、容易に貫通ひび割れを生じる。これは、物質浸透性の観点からは大きな問題になる。例えば北陸電力における雨水流入で確認された床部材のひび割れは、施工の問題の可能性もあるがこれらの複合要因によるひび割れによる影響の場合もある[18]。そのため、令和3年度においては、これらの重畳したケースの検討を行い、これらの仮説について明らかにし、さらに解析の正確度を向上させたいうで、高経年のひび割れ状態を模擬する境界条件と部材条件を考慮したうで、水を吸収するモデルの検討を行う。

3.2 コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析の手法検討

(再委託先：太平洋コンサルタント、太平洋セメント)

本節では、実際の 1F 建屋コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析の手法を検討した。本検討の結果については、3.2.1 モデルによる核種浸透シミュレーション、3.2.2 ダメージを受けたコンクリートの核種移行評価の順で示す。

3.2.1 モデルによる核種浸透シミュレーション

本項では、実際のコンクリート部材における長期的な核種の浸透挙動評価として、前研究で構築した浸透挙動予測モデル（相平衡・物質移行計算モデル）[2]を使用し、材料、配合、炭酸化状態および物質移行係数が異なる条件における Cs、Sr の浸透深さを計算する手法を検討した。

また、1F 建屋コンクリートに対する核種浸透解析を適切に行うため、部材内部の初期条件、部材外部の境界条件および浸透挙動のモデル化手法について調査し、検討した。

(1) セメントペーストの主要水和物による Cs、Sr 収着モデルの検討

我々は前研究においてセメントペースト中の主要な水和物であり、Cs、Sr の収着に大きく影響する C-S-H への Cs、Sr 収着試験結果を基に C-S-H の Cs、Sr 収着モデルを作成し、相平衡物質移行計算モデルに実装して、1F 建屋を想定したコンクリートへの Cs、Sr の浸透挙動を予測した。その結果、コンクリートの経年変化である炭酸化や溶脱による C-S-H の Ca/Si モル比（以下、「C/S 比」と略す。）変化に応じた Cs、Sr の収着を反映させた Cs、Sr の浸透を計算することができた。しかし、実際のセメントペースト中において C-S-H の構造の一部の SiO₄ 四面体が AlO₄ 四面体に置換した C-A-S-H として存在していること [19][20][21][22][23][24][25]、セメント間隙液中に多量に存在する Na、K の影響があること [26][27][28][29][30][31] をモデルに反映する必要があると考えた。

令和 2 年度は、Na、K 共存影響を考慮した C-A-S-H による Cs、Sr 収着モデル作成を目指し、合成 C-A-S-H に対する Cs、Sr の収着試験を行った。

① C-A-S-H の合成

1) 合成方法

C-A-S-H に関する研究は、多くの研究者によって行われており、表 3.2-1 に C-A-S-H の合成方法について文献調査した結果を示す。合成方法には、水酸化カルシウムや非晶質シリカ等を水中に入れて反応させるサスペンション法と、ケイ酸ナトリウム溶液に硝酸カルシウム溶液を滴下する共沈法があり、前者は容易に多量の試料が作製できるが、C-A-S-H 以外の鉱物相が生成しやすい、後者は均質な合成物を作製できるが、サスペンション法と比較して一度に合成できる量が少ない、といった特徴がある。本研究では、収着試験に多量の試料を要することと、実際の部材でも他の鉱物相が存在していることを考慮し、サスペンション法を採用した。

合成方法は、Al、Na 源としてアルミン酸ナトリウムを使用した Andersen ら [19] の方法を参考にした。本研究では、炭酸化や Ca 溶脱といった経年変化により C/S 比が低下することを考慮して、C/S 比が 0.8、1.0、1.2 になるよう試薬を混合して合成した。Al/Si モル比（以下、「A/S 比」と略す。）は、0.15 とし、Na(K)/Al モル比（以下、「N(K)/A 比」と略

す。)は、使用した試薬組成とした。試料名は、CASHの後に設定したC/S比と共存させたアルカリの元素を記載して、CASH0.8(Na)、CASH1.0(Na)、CASH1.0(K)、CASH1.2(Na)とした。C-A-S-H合成に使用した原料の情報および合成条件を表3.2-2に示す。

合成終了時に固液分離して得られたろ液(以下、CASH0.8(Na)/1.0(Na)/1.0(K)/1.2(Na)平衡液と略す。)は、収着試験に使用するため、Arガス雰囲気下のグローブボックス内で保管した。

表 3.2-1 C-A-S-Hの合成方法に関する文献調査結果

No.	文献	合成方法	C-A-S-H組成
①	Hongら (2002) [32]	Ca(OH) ₂ (炭酸化カルシウムを脱炭酸化処理した後、水和)、非晶質シリカ (Aerozil300)、非晶質アルミナゲルを液固比 20、1年間 20 °Cで攪拌。	C/S比 : 0.66~1.50
			A/S比 : 0.05
②	芳賀ら (2016) [33]	Ca(OH) ₂ 、非晶質シリカ、γ-Al ₂ O ₃ をイオン交換水に液固比 20、合成温度は 70 °Cで7日間養生後、ろ過して 10日間真空乾燥。	C/S比 : 0.8~1.2
			A/S比 : 0.08
③	Sevelstedら (2015) [34]	Ca(OH) ₂ 、非晶質シリカゲル、A100Hを液固比 45、3週間室温で攪拌。	C/S比 : 0.66~1.50
			A/S比 : 0.05
④	Pardalら (2009) [35]	所定量のC3A水溶液に、合成C-S-Hを添加して 23 °Cで1日攪拌。 ※⑥は室温で、液固比 1000で1日浸漬。 ※⑦は 23 °Cで1週間攪拌。	C/S比 : 0.66~1.42
			A/S比 : 0.13~0.34 (一部 Etringite)
⑤	Pardalら (2012) [22]		C/S比 : 0.7、0.95
			A/S比 : 0.12~0.34 (他相あり)
⑥	湊ら (2015) [36]		C/S比 : 0.8、1.0
		A/S比 : 0.04、0.01	
⑦	Haasら (2015) [24]	C/S比 : 0.8	
		A/S比 : 0.1~0.2	
⑧	小林ら (2017) [37]	焼成 CaO、SiO ₂ 、焼成 CaAl ₂ O ₃ を液固比 45、2回/週混ぜながら、80 °Cで5週間養生。	C/S比 : 0.8~1.4
			A/S比 : 0.04~0.21
⑨	Hôpitalら (2016) [31]	CaO、SiO ₂ 、CaAl ₂ O ₃ を液固比 45で養生。	C/S比 : 0.6~1.4
			A/S比 : 0.05
⑩	Andersenら (2006) [19]	Ca(OH) ₂ 、SiO ₂ 、NaAlO ₂ を液固比 50、室温で3週間攪拌。	C/S比 : 0.66~1.25
			A/S比 : 0.05
⑪	Sun (2006) [20]	Ca(NO ₃) ₂ ・4H ₂ O溶液、Na ₂ SiO ₃ ・9H ₂ OとAl(NO ₃) ₃ ・9H ₂ O混合溶液を1、4週間、4ヶ月間、90または105 rpmで回転させて反応。pH>12になるようNaOH添加。	C/S比 : 0.86~1.4
			A/S比 : 0.09~0.4
⑫	Liら (2019) [38]	Ca(NO ₃) ₂ ・4H ₂ O溶液、Na ₂ SiO ₃ ・5H ₂ O(pH>13になるようNaOH添加)、Al(NO ₃) ₃ ・9H ₂ Oを室温で1日攪拌。	C/S比 : 1.2
			A/S比 : 0.018~0.14

表 3.2-2 C-A-S-H 合成に使用した原料および合成条件

原料	水酸化カルシウム	関東化学株式会社、特級
	非晶質シリカ	日本アエロジル株式会社、AEROZIL®200
	アルミン酸ナトリウム	関東化学株式会社、鹿 1 級
	アルミン酸カリウム三水和物	関東化学株式会社、鹿 1 級
	水	イオン交換水
合成条件	液固比	約 30
	合成温度、期間	50 °C、約 3 週間
	合成方法	(1) 大気中で予め所定量の粉末状原料を計量し、ポリプロピレン製容器へ封入し、Ar ガス雰囲気下のグローブボックス内で水とアルミナボールを加えて密閉後、50 °C の恒温槽に保管、営業日毎に 1 回ハンドシェイクを実施 (2) 一部試料を分取し、固液分離、乾燥後、粉末 X 線回折(以下、「XRD」と略す。)測定により原料のピークの有無を確認 (3) 原料のピークが無いことを確認後、全量を Ar ガス雰囲気下のグローブボックス内で 0.45 μm の PTFE 製フィルターを用いて固液分離 (4) 10 日以上真空乾燥後、アルミナ乳鉢を用いて解砕

2) 分析方法

合成した試料に対して、XRD 分析、熱重量示差熱分析 (TG-DTA) を実施し、合成時の液相組成から固相の組成を求めた。

a) XRD 分析

表 3.2-3 に示す測定条件により、原料および合成した試料の鉱物定性を行った。

表 3.2-3 XRD 測定条件

装置	XRD 装置 : Malvern Panalytical Ltd 製、X'Pert PRO MPD
条件	ターゲット : Cu 電流・電圧 : 45 kV・40 mA 走査範囲 : 5~65° ステップサイズ : 0.03° /step スキャンスピード : 0.08° /秒

b) TG-DTA

合成した試料の室温~1000 °C の重量減少率を求めるとともに、430 °C 付近で生じる Ca(OH)₂ の脱水反応および 650 °C 付近で生じる CaCO₃ の脱炭酸反応が起因した重量変化から、Ca(OH)₂ と CaCO₃ の含有量を算出した。測定条件を表 3.2-4 に示す。

表 3.2-4 TG-DTA 測定条件

装置	示差熱-重量分析装置 : 株式会社リガク製、Thermo plus EV02
条件	昇温速度 : 10 °C/min 測定温度範囲 : 室温~1000 °C 測定雰囲気 : N ₂ ガス (300 ml/min) リファレンス : α-Al ₂ O ₃

c) 組成分析

固相組成は、合成に使用した原料の化学組成より平衡液の組成を差し引いて求めた。原料の組成は、試薬の計量値から算出した。アルミン酸ナトリウム、アルミン酸カリウム・三水和物は、試薬を分析して、Al、Na もしくは K 組成を求めた。液相は、pH および Ca、Si、Al、Na もしくは K 濃度を分析した。表 3.2-5 に分析方法を示す。

表 3.2-5 試料の組成分析方法

測定項目		装置、分析方法
液相	pH	<ul style="list-style-type: none"> • pH メータ：株式会社堀場製作所製 D-53 • pH 電極：株式会社堀場製作所製 ガラス電極、比較電極、温度補償電極一体型 6367-10D • 標準液 <ul style="list-style-type: none"> pH 7 : pH 測定用 中性リン酸塩 pH 標準液 (pH 6.86 at 25 °C) pH 9 : pH 測定用 ホウ酸塩 pH 標準液 (pH 9.18 at 25 °C) pH12.5 : 水酸化カルシウム飽和溶液 (pH 12.45 at 25 °C)
	Ca、Si、Al	エスアイアイ・ナノテクノロジーズ株式会社製 ICP 発光分光分析装置 SPECTRO BLUE EOP <ul style="list-style-type: none"> ✓ Ca : JIS K 0102 50.3 ICP 発光分光分析法 ✓ Si : ICP 発光分光分析法 ✓ Al : JIS K 0102 58.4 ICP 発光分光分析法
	Na、K	バリアン・テクノロジーズ・ジャパン・リミテッド製 バリアン原子吸光分光光度計 SpectrAA <ul style="list-style-type: none"> ✓ Na : JIS K 0102 48.2 フレーム原子吸光法 ✓ K : JIS K 0102 49.2 フレーム原子吸光法
固相	強熱減量 (ig. loss)	試料を大気雰囲気下で、950 °C で恒量になるまで強熱した時の減量

3) 分析結果

a) XRD 分析結果

原料および合成した試料の鉱物定性結果を表 3.2-6 および表 3.2-7 に、XRD チャートを図 3.2-1～図 3.2-5 に示す。試料の XRD チャートには、原料のピークは確認できなかった。全ての試料において、C-S-H に対応するピークおよび Katoite が確認できた。C-S-H は非晶質でブロードなピークを示しており、C-S-H 中に Al や Na が含まれていたとしても XRD のピークからは判断することが難しい。Katoite は、セメントの水和生成物であるアルミン酸カルシウム水和物が結晶化したものとして報告されており [39]、1F でも生成している可能性がある。CASH0.8(Na)、CASH1.0(Na)、CASH1.0(K) の試料では、Stratlingite のピークが確認できた。Stratlingite は、フライアッシュセメントのような Al が多く含まれるセメントの水和物として知られており [40]、1F でもフライアッシュセメントが使用されている部分では生成している可能性がある。また、CASH1.0(Na) および CASH1.0(K) の試料では、Tobermorite-11A のピークが確認できた。特に CASH1.0(K) では、明確なピークが確認できた。Tobermorite は、C-S-H が結晶化して生成するものであり、温度の上昇する環境で生成することが知られている。Tobermorite の C/S 比は 0.83 であり、組成が近い条件で生成しやすい。CASH1.0 の試料は、他の鉱物の生成や Al が Si と置換した影響で、組成が近くなり、Tobermorite が生成したと考えた。

表 3.2-6 原料の鉱物定性結果

鉱物名	化学式	水酸化カルシウム	非晶質シリカ	アルミン酸ナトリウム	アルミン酸カリウム三水和物
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	○			
NAH1.25	$\text{Na}(\text{AlO}_2) \cdot 1.25\text{H}_2\text{O}$			○	
KAH	$\text{K}_2(\text{Al}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$				○
KAH3	$\text{K}_2(\text{Al}_2\text{O}_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$				○

○：ピークが確認できた鉱物

表 3.2-7 試料の鉱物定性結果

鉱物名	化学式	CASH0.8 (Na)	CASH1.0 (Na)	CASH1.0 (K)	CASH1.2 (Na)
C-S-H	$x\text{CaO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$	○	○	○	○
Katoite	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	○	○	○	○
Stratlingite	$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 7.25\text{H}_2\text{O}$	○	○	○	
Tobermorite-11A	$5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$		○	○	

○：ピークが確認できた鉱物

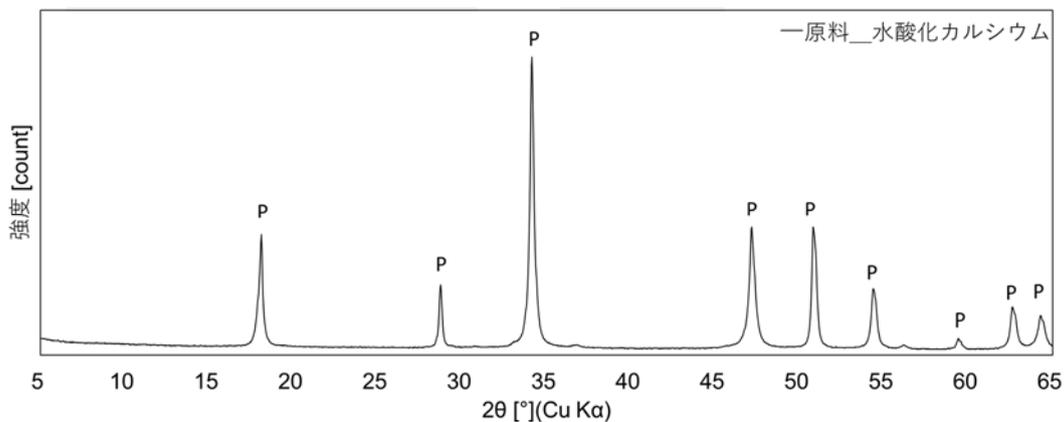


図 3.2-1 原料の水酸化カルシウムの XRD チャート
(略号：鉱物名【ICSD コード番号】 / P: Portlandite【01-078-0315】)

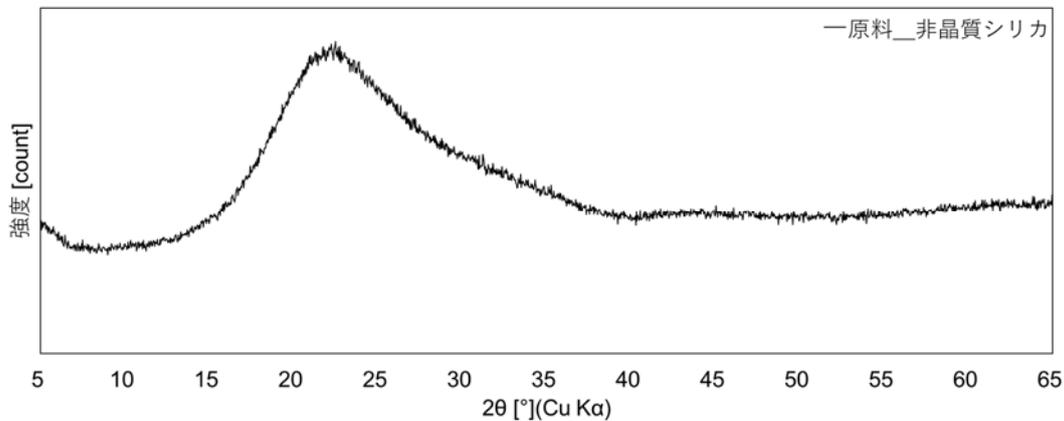


図 3.2-2 原料の非晶質シリカの XRD チャート

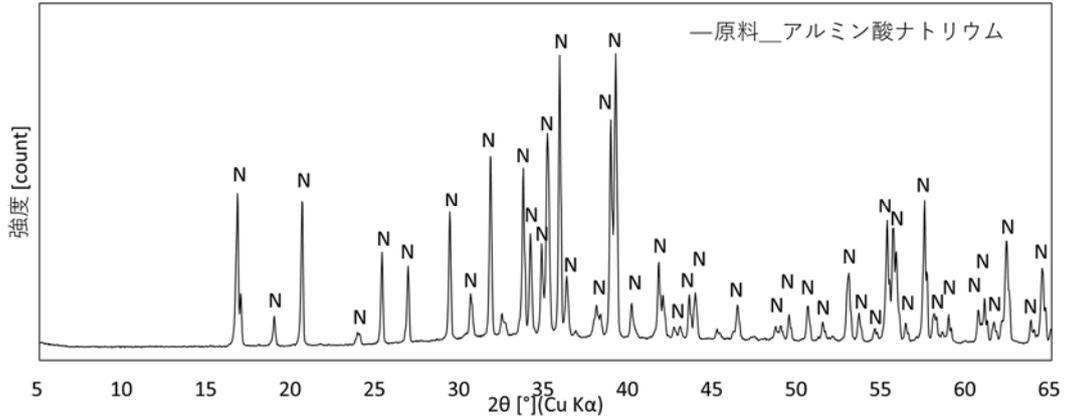


図 3.2-3 原料のアルミン酸ナトリウムの XRD チャート
 (略号：鉱物名【ICSD コード番号】/N : NAH1.25【98-007-9403】)

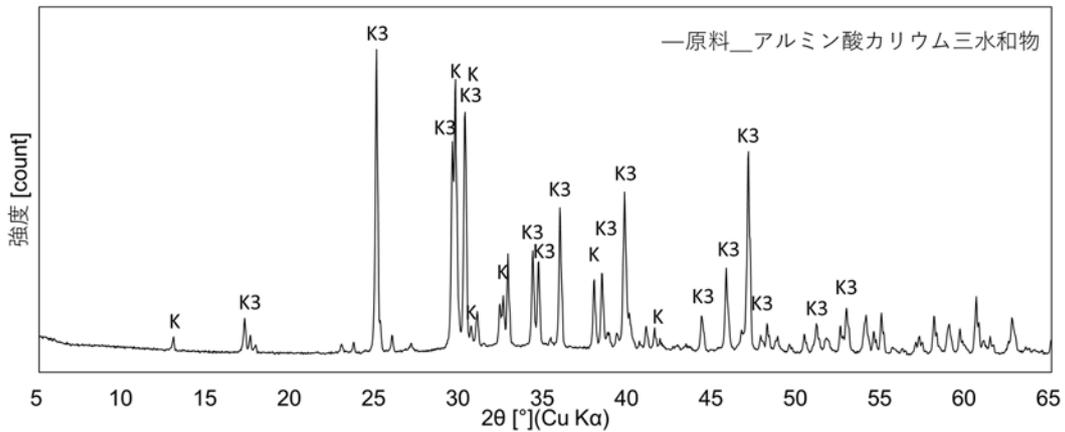


図 3.2-4 原料のアルミン酸カリウム三水和物の XRD チャート
 (略号：鉱物名【ICSD コード番号】/K : KAH【00-040-0703】、K3 : KAH3【00-019-0927】)

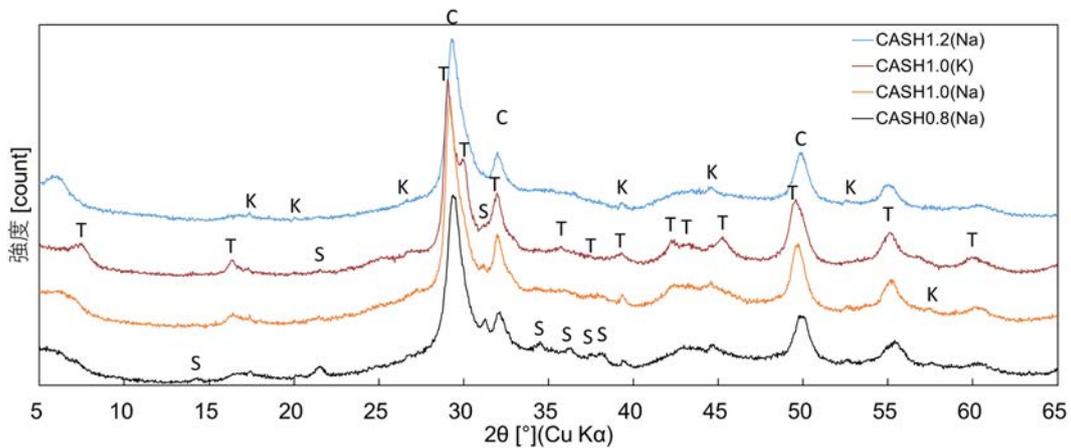


図 3.2-5 試料の XRD チャート
 (略号：鉱物名【ICSD コード番号】/T : Tobermorite-11A【00-019-1364】、
 S : Stratlingite【00-046-1348】、K : Katoite【01-084-1354】、
 C : C-S-H【00-033-0306】)

b) TG-DTA 結果

合成した試料の TG-DTA チャートを図 3.2-6 と図 3.2-7 に示す。全ての試料において、430 °C 付近で生じる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水反応および 650 °C 付近で生じる CaCO_3 の脱炭酸反応に起因する重量変化は確認されなかった。このことから、試料には原料の水酸化カルシウムが残存しておらず、炭酸化による炭酸化カルシウムが生成していなかった。

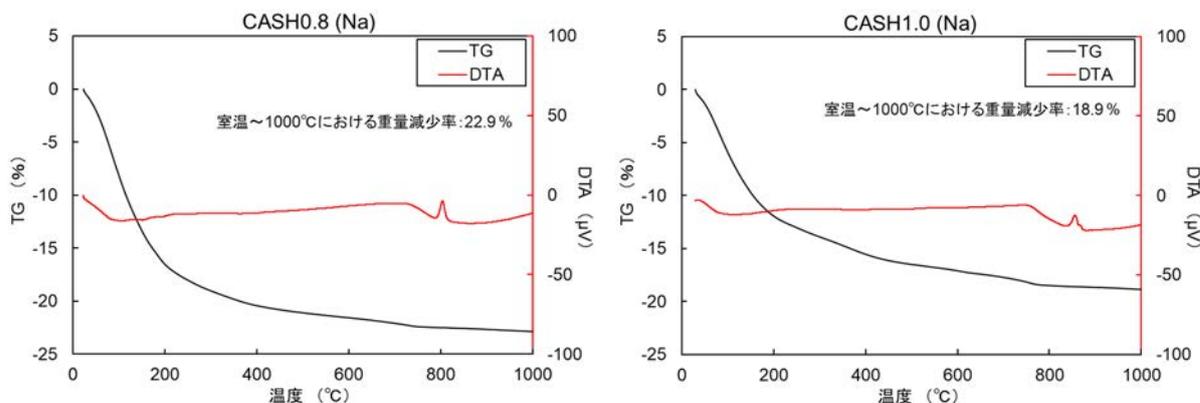


図 3.2-6 試料の TG-DTA チャート(1)
CASH0.8(Na) (左)、CASH1.0(Na) (右)

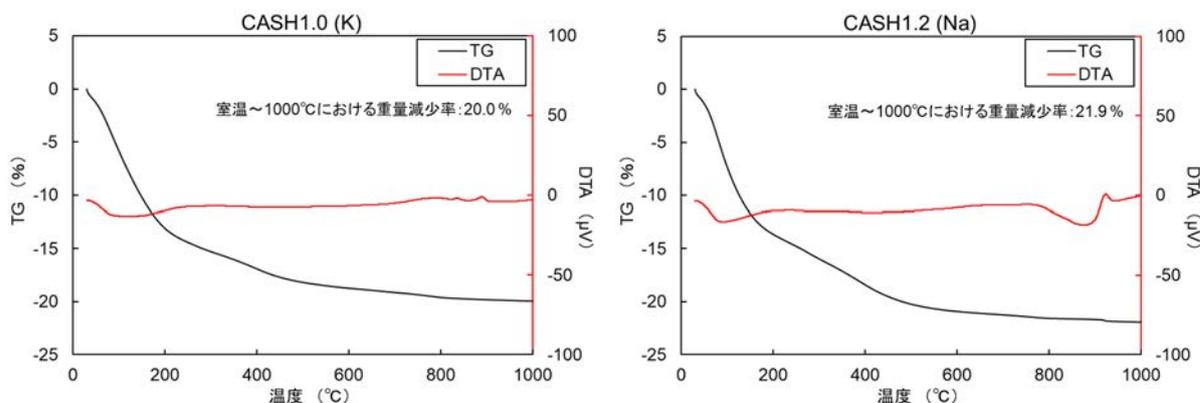


図 3.2-7 試料の TG-DTA チャート(2)
CASH1.0(K) (左)、CASH1.2(Na) (右)

c) 組成分析結果

原料のアルミン酸ナトリウムおよびアルミン酸カリウム三水和物の Al、Na、K 組成分析結果を表 3.2-8 に示す。この試薬の分析結果を基に算出した試料合成時の原料の組成を表 3.2-9 に示す。

試料合成時の平衡液の液相分析結果を表 3.2-10 に示す。Ca、Na 濃度については、原料の C/S 比が増加するにつれて、平衡液中の濃度が増加していた。Si、Al 濃度は、原料の C/S 比が増加するにつれて減少していた。CASH1.0(Na) および CASH1.0(K) 平衡液の分析結果を比較すると、CASH1.0(Na) の方が Ca 濃度は低く、Si、Al 濃度は高かった。Na および K 濃度は同程度であった。

試料の ig. loss 分析結果および原料の化学組成および平衡液の液相分析結果を基に算出した化学組成を表 3.2-11 に示す。試料の C/S 比および A/S 比は、原料の組成と概ね一緒であった。つまり、合成原料の Ca、Si、Al はほぼすべてが固相となったと考えられる。一方、試料の N/A 比および K/A 比は、原料に比べて低くなっていた。これは、Na、K が固相に取り込まれず、液相に残存していることを示す。また、C/S 比が増加するほど、N/A 比および K/A 比が低下する傾向にあった。つまり、固相中の Ca 濃度が高いとアルカリ濃度が低下するということである。これらは、C-A-S-H に対する Na、K の収着試験を行い、C-A-S-H の C/S 比が低いほど、Na、K の収着量が増加することを示した文献[31][33]と同様の傾向を示している。ただし、ここで示した固相組成は Katoite 等の他の鉱物相を含む組成になっており、純粋な C-A-S-H の組成ではない。

表 3.2-8 原料のアルミン酸ナトリウム、アルミン酸カリウム三水和物の組成分析結果

試料名	組成 (mass%)			モル比	
	Al	Na	K	N/A	K/A
アルミン酸ナトリウム	20	25	/	1.5	/
アルミン酸カリウム三水和物	17	/	36	/	1.5

表 3.2-9 原料の化学組成算出結果

試料名	組成 (mass%) ※					モル比			
	Ca	Si	Al	Na	K	C/S	A/S	N/A	K/A
CASH0.8(Na)	46	40	6.0	7.4	/	0.80	0.15	1.5	/
CASH1.0(Na)	52	36	5.3	6.7	/	1.0	0.15	1.5	/
CASH1.0(K)	50	35	4.9	/	10	1.0	0.15	/	1.5
CASH1.2(Na)	56	33	4.8	6.0	/	1.2	0.15	1.5	/

※Ca、Si、Al、Na、K の合計が 100 mass%になるようノーマライズした結果

表 3.2-10 平衡液の化学組成分析結果

試料名	pH	液相組成 (M)				
		Ca	Si	Al	Na	K
CASH0.8(Na) 平衡液	12.4	3.5×10^{-5}	2.7×10^{-3}	3.0×10^{-4}	2.0×10^{-2}	/
CASH1.0(Na) 平衡液	12.6	2.4×10^{-4}	2.9×10^{-4}	2.7×10^{-4}	3.3×10^{-2}	/
CASH1.0(K) 平衡液	12.6	2.7×10^{-4}	2.2×10^{-4}	2.1×10^{-4}	/	3.3×10^{-2}
CASH1.2(Na) 平衡液	12.7	5.2×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.9×10^{-4}	3.5×10^{-2}	/

表 3.2-11 試料の ig. loss 分析結果および化学組成算出結果

試料名	ig. loss (%)	組成 (mass%) ※					モル比			
		Ca	Si	Al	Na	K	C/S	A/S	N/A	K/A
CASH0.8(Na)	22	48	41	6.1	4.7	/	0.81	0.15	0.91	/
CASH1.0(Na)	49	54	38	5.6	2.2	/	1.0	0.15	0.48	/
CASH1.0(K)	19	53	37	5.3	/	4.2	1.0	0.15	/	0.55
CASH1.2(Na)	21	59	35	5.1	1.3	/	1.2	0.15	0.29	/

※Ca、Si、Al、Na、K の合計が 100 mass%になるようノーマライズした結果

② C-A-S-H の Cs、Sr 収着試験

1) 収着試験方法

本研究では、①で合成した試料を用いて、表 3.2-12 に示す水準で Cs、Sr 収着試験を実施することとした。令和 2 年度は、CASH0.8(Na)、CASH1.0(Na)、CASH1.2(Na)の初期 Cs 濃度が 1.0×10^{-1} M および 1.0×10^{-3} M の収着試験を実施した。他の水準については、令和 3 年度に実施する予定である。

収着試験に用いる液相は、固相の溶出を防ぐため、試料合成時の平衡液に試薬の塩化セシウムを添加して所定の濃度になるよう調製した。収着試験に使用した試薬および試験条件を表 3.2-13 に示す。

試験は、N 数 2 で実施し、固相を入れないブランク試料も分析した。

表 3.2-12 収着試験水準

固相名	対象元素	ベース液相	初期液相濃度 (M)		
			1.0×10^{-5}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-1}
CASH0.8(Na)	Cs	CASH0.8(Na)	○	●	●
	Sr	平衡液	○	○	○
CASH1.0(Na)	Cs	CASH1.0(Na) 平衡液	○	●	●
	Sr		○	○	○
	Cs/Sr=1		○	○	○
	Cs	CASH1.0(Na)	○	●	●
	Sr	平衡液	○	○	○
	Cs/Sr=1	+0.1M Na、K	○	○	○
CASH1.0(K)	Cs	CASH1.0(K) 平衡液	○	○	○
CASH1.2(Na)	Cs	CASH1.2(Na)	○	●	●
	Sr	平衡液	○	○	○

●：令和 2 年度実施、○：令和 3 年度実施予定

表 3.2-13 収着試験に使用した試薬および収着試験条件

試薬	塩化セシウム	関東化学株式会社、特級
試験条件	液固比	10 (液相 50 g / 固相 5 g)
	収着試験温度、期間	約 20 °C、1 週間
	試験方法	<u>Ar ガス雰囲気下のグローブボックス内</u> ①各ベース液相に所定の濃度になるよう試薬を添加し、収着液相を調製 ②固相と収着液相を計量し、ポリプロピレン製の容器に入れて密閉し、毎営業日 1 回ハンドシェイク ③1 週間後、0.45 μm の PTFE 製フィルターで固液分離 <u>Ar ガス雰囲気下のグローブボックス外</u> 固相を 3 日間真空乾燥

2) 分析方法

収着試験後の固相に対して XRD 分析、液相に対して pH および化学組成 (Ca、Si、Al、Na、Cl、Cs) 分析を実施した。

a) 固相の XRD 分析方法

固液分離後、真空乾燥処理を行った固相に対して、XRD 分析により鉱物定性を行った。XRD 測定条件は、表 3.2-3 に示したものと同様である。

b) 液相分析方法

固液分離後の液相に対して、pH および化学組成 (Ca、Si、Al、Na、Cl、Cs) を分析した。pH および Ca、Si、Al、Na の分析方法は、表 3.2-5 に示したものと同様である。Cl、Cs の分析方法は、表 3.2-14 に示す。Cs については、ブランク試料と収着後の液相濃度を比較して減少分を固相に収着した量とし、分配比 (Rd) を算出した。Rd の算出には、式 (3.2-1) を用いた。

$$Rd(L/kg) = \frac{(\text{収着後濃度 (M)} - \text{ブランク濃度 (M)})}{\text{収着後濃度 (M)}} \times \frac{\text{液相量 (L)}}{\text{固相量 (kg)}} \quad \text{式 (3.2-1)}$$

表 3.2-14 Cl、Cs 分析方法

対象元素	装置、分析方法
Cl	サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社製 イオンクロマトグラフ分析装置 DIONEX INTEGRION HPIC IonPac AS22 ✓ JIS K 0102 35.3 イオンクロマトグラフ法
Cs	アジレント・テクノロジー株式会社製 Agilent 7900 ICP-MS ✓ ICP 発光分光分析法

3) 分析結果

a) 固相の XRD 分析結果

収着試験後の固相の鉱物定性結果の一覧を表 3.2-15 に、XRD チャートを図 3.2-8～図 3.2-11 に示す。定性された鉱物は収着前後で概ね変わらなかった。ただし、CASH1.2(Na)の 10^{-1} M Cs 収着試料では、Friedel's salt (β - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (以下、「 β -C4AC1H10」と略す。)) および $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (以下、「C4AC1H10」と略す。)) の生成が確認できた。CASH1.2(Na)の水準のみが Friedel's salt を生成した要因としては、C/S 比が高いためと考える。実際の構造物でも海水との接触により Friedel's salt が生成することが知られており [41]、1F においても海水と接触したコンクリートにおいて、Friedel's salt が生成している可能性もあることから、本試験は実現象に近い条件となっていると考えている。

表 3.2-15 収着試験前後の鉱物定性結果

試料		鉱物名					
		C-S-H	Katoite	Stratlingite	Tobermorite -11A	β - C4AC1H10	C4AC1H 10
CASH0.8 (Na)	収着試験前	○	○	○			
	10 ⁻¹ M Cs 収着後	○	○	○			
	10 ⁻³ M Cs 収着後	○	○	○			
CASH1.0 (Na)	収着試験前	○	○	○	○		
	10 ⁻¹ M Cs 収着後	○	○	○	○		
	10 ⁻³ M Cs 収着後	○	○	○	○		
CASH1.0 (Na) +10 ⁻¹ M Na、K	収着試験前	○	○	○	○		
	10 ⁻¹ M Cs 収着後	○	○	○	○		
	10 ⁻³ M Cs 収着後	○	○	○	○		
CASH1.2 (Na)	収着試験前	○	○				
	10 ⁻¹ M Cs 収着後	○	○			○	○
	10 ⁻³ M Cs 収着後	○	○				

○：ピークが確認できた鉱物

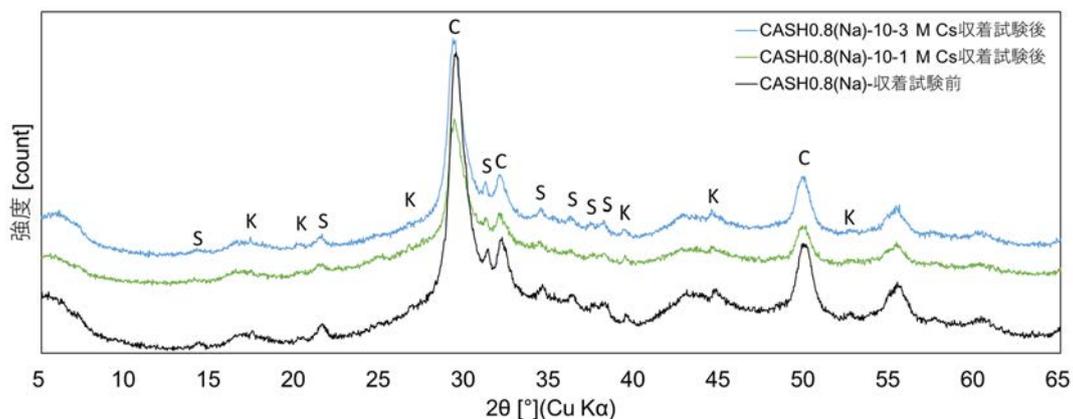


図 3.2-8 CASH0.8(Na)のCs 収着試験前後のXRD チャート
 (略号：鉱物名【ICSDコード番号】/S：Stratlingite【00-046-1348】、
 K：Katoite【01-084-1354】、C：C-S-H【00-033-0306】)

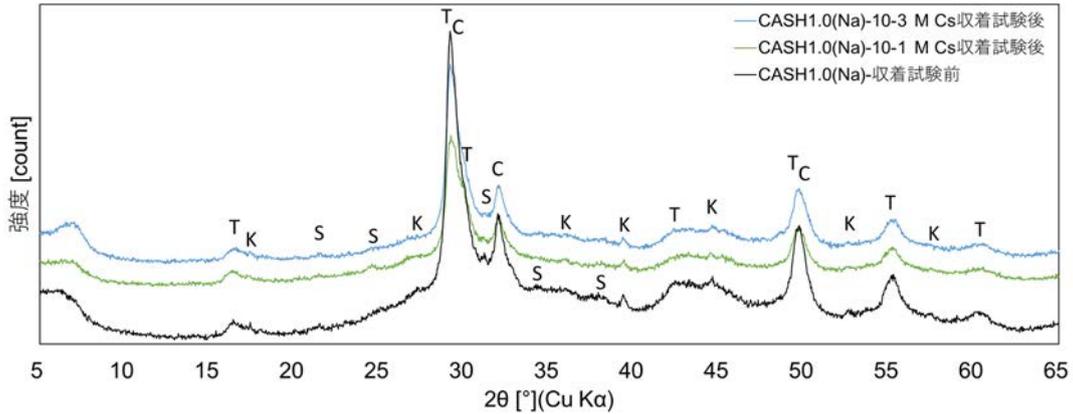


図 3.2-9 CASH1.0(Na)のCs 吸着試験前後のXRD チャート

(略号：鉱物名【ICSDコード番号】/T:Tobermorite-11A【00-019-1364】、K:Katoite【01-084-1354】、S:Stratlingite【00-046-1348】、C:C-S-H【00-033-0306】)

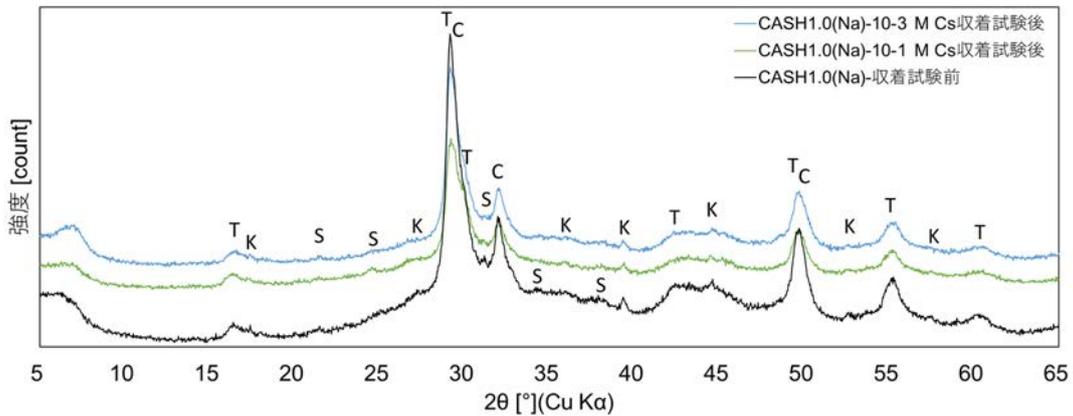


図 3.2-10 CASH1.0(Na)のCs+0.1M Na、K 吸着試験前後のXRD チャート

(略号：鉱物名【ICSDコード番号】/T:Tobermorite-11A【00-019-1364】、K:Katoite【01-084-1354】、S:Stratlingite【00-046-1348】、C:C-S-H【00-033-0306】)

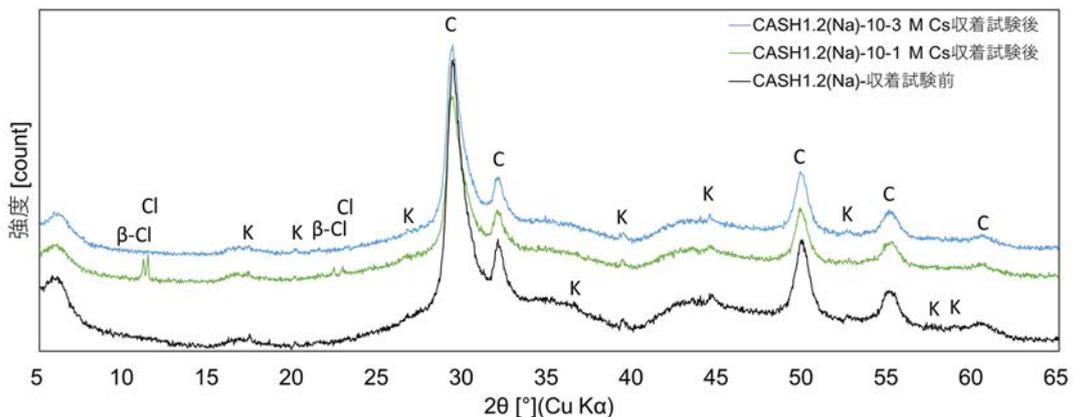


図 3.2-11 CASH1.2(Na)のCs 吸着試験前後のXRD チャート

(略号：鉱物名【ICSDコード番号】/β-Cl:β-C4AC1H10【00-031-0245】、Cl:C4AC1H10【00-042-0558】、K:Katoite【01-084-1354】、C:C-S-H【00-033-0306】)

b) 液相分析結果

収着試験後の液相分析結果を表 3.2-16、表 3.2-17 に示す。収着試験後、Ca や Na は液相中の濃度が増加する傾向にあり、Cs は濃度が減少する傾向にある。このことから、Cs が Ca や Na と交換して、固相中に取り込まれていることが推定できる。また、Ca、Si、Al の液相中の濃度変化は、C-A-S-H の構造の変化と連動している可能性が高い。

表 3.2-16 収着試験後の液相分析結果(1)

試料名 固相名-初期液 相濃度 -Blank/N 数	液相分析結果						
	pH	元素濃度 (M)					
		Ca	Si	Al	Na	Cl	Cs
CASH0.8(Na)- 10 ⁻¹ M Cs-B	12.3	3.5×10 ⁻⁵	2.7×10 ⁻³	3.0×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻²	1.2×10 ⁻¹	9.8×10 ⁻²
CASH0.8(Na)- 10 ⁻¹ M Cs-1	12.3	2.7×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴	7.4×10 ⁻²	1.2×10 ⁻¹	4.9×10 ⁻²
CASH0.8(Na)- 10 ⁻¹ M Cs-2	12.3	2.7×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴	7.4×10 ⁻²	1.2×10 ⁻¹	4.7×10 ⁻²
CASH0.8(Na)- 10 ⁻³ M Cs-B	12.3	3.5×10 ⁻⁵	2.7×10 ⁻³	3.0×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻²	1.1×10 ⁻³	9.0×10 ⁻⁴
CASH0.8(Na)- 10 ⁻³ M Cs-1	12.5	5.2×10 ⁻⁵	3.1×10 ⁻³	2.4×10 ⁻⁴	3.4×10 ⁻²	1.1×10 ⁻³	5.6×10 ⁻⁵
CASH0.8(Na)- 10 ⁻³ M Cs-2	12.5	5.2×10 ⁻⁵	3.1×10 ⁻³	2.4×10 ⁻⁴	3.3×10 ⁻²	1.1×10 ⁻³	5.5×10 ⁻⁵
CASH1.0(Na)- 10 ⁻¹ M Cs-B	12.4	2.4×10 ⁻⁴	3.0×10 ⁻⁴	2.9×10 ⁻⁴	3.2×10 ⁻²	1.2×10 ⁻¹	9.8×10 ⁻²
CASH1.0(Na)- 10 ⁻¹ M Cs-1	12.6	7.0×10 ⁻⁴	1.6×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻⁴	5.7×10 ⁻²	1.2×10 ⁻¹	7.5×10 ⁻²
CASH1.0(Na)- 10 ⁻¹ M Cs-2	12.6	7.0×10 ⁻⁴	1.6×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻⁴	5.7×10 ⁻²	1.1×10 ⁻¹	7.5×10 ⁻²
CASH1.0(Na)- 10 ⁻³ M Cs-B	12.6	2.4×10 ⁻⁴	2.9×10 ⁻⁴	2.9×10 ⁻⁴	3.2×10 ⁻²	1.1×10 ⁻³	9.8×10 ⁻⁴
CASH1.0(Na)- 10 ⁻³ M Cs-1	12.7	2.3×10 ⁻⁴	2.8×10 ⁻⁴	3.1×10 ⁻⁴	4.3×10 ⁻²	1.1×10 ⁻³	6.1×10 ⁻⁵
CASH1.0(Na)- 10 ⁻³ M Cs-2	12.7	2.3×10 ⁻⁴	2.8×10 ⁻⁴	3.1×10 ⁻⁴	4.2×10 ⁻²	1.1×10 ⁻³	6.4×10 ⁻⁵

赤セル：収着試験後、ブランクより値が上がったもの

青セル：収着試験後、ブランクより値が下がったもの

表 3.2-17 収着試験後の液相分析結果(2)

試料名 固相名-初期液 相濃度 -Blank/N数	液相分析結果							
	pH	元素濃度 (M)						
		Ca	Si	Al	Na	K	Cl	Cs
CASH1.0(Na)- 10 ⁻¹ M Cs +10 ⁻¹ M Na、 K-B	12.5	2.3×10 ⁻⁴	2.8×10 ⁻⁴	2.8×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹	9.8×10 ⁻²
CASH1.0(Na)- 10 ⁻¹ M Cs +10 ⁻¹ M Na、 K-1	12.5	1.9×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴	1.6×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻¹	8.4×10 ⁻²	3.1×10 ⁻¹	7.5×10 ⁻²
CASH1.0(Na)- 10 ⁻¹ M Cs +10 ⁻¹ M Na、 K-2	12.4	1.9×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴	1.6×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻¹	8.4×10 ⁻²	3.1×10 ⁻¹	8.3×10 ⁻²
CASH1.0(Na)- 10 ⁻³ M Cs +10 ⁻¹ M Na、 K-B	12.5	2.3×10 ⁻⁴	2.7×10 ⁻⁴	2.8×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹	2.1×10 ⁻¹	9.8×10 ⁻⁴
CASH1.0(Na)- 10 ⁻³ M Cs +10 ⁻¹ M Na、 K-1	12.5	1.4×10 ⁻³	1.1×10 ⁻⁴	1.7×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻¹	7.7×10 ⁻²	2.1×10 ⁻¹	4.5×10 ⁻⁴
CASH1.0(Na)- 10 ⁻³ M Cs +10 ⁻¹ M Na、 K-2	12.5	1.4×10 ⁻³	2.1×10 ⁻⁴	1.9×10 ⁻⁴	1.4×10 ⁻¹	7.7×10 ⁻²	2.1×10 ⁻¹	4.4×10 ⁻⁴
CASH1.2(Na)- 10 ⁻¹ M Cs-B	12.6	5.5×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻⁴	3.3×10 ⁻²		1.2×10 ⁻¹	9.8×10 ⁻²
CASH1.2(Na)- 10 ⁻¹ M Cs-1	12.8	1.6×10 ⁻³	7.1×10 ⁻⁵	2.3×10 ⁻⁴	7.0×10 ⁻²		1.2×10 ⁻¹	8.3×10 ⁻²
CASH1.2(Na)- 10 ⁻¹ M Cs-2	12.8	1.6×10 ⁻³	7.5×10 ⁻⁵	2.3×10 ⁻⁴	7.0×10 ⁻²		1.2×10 ⁻¹	8.3×10 ⁻²
CASH1.2(Na)- 10 ⁻³ M Cs-B	12.6	5.5×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻⁴	3.4×10 ⁻²		1.1×10 ⁻³	9.8×10 ⁻⁴
CASH1.2(Na)- 10 ⁻³ M Cs-1	12.8	9.2×10 ⁻⁴	8.5×10 ⁻⁵	2.9×10 ⁻⁴	6.1×10 ⁻²		1.1×10 ⁻³	5.6×10 ⁻⁴
CASH1.2(Na)- 10 ⁻³ M Cs-2	12.9	9.2×10 ⁻⁴	8.5×10 ⁻⁵	2.9×10 ⁻⁴	6.1×10 ⁻²		1.1×10 ⁻³	5.7×10 ⁻⁴

赤セル：収着試験後、ブランクより値が上がったもの

青セル：収着試験後、ブランクより値が下がったもの

c) 分配比

表 3.2-16、表 3.2-17 の液相分析結果から求めた C-A-S-H の Cs 分配比を表 3.2-18 に示す。Haga らの C-S-H の Cs 分配比[42]と C/S 比ごとに比較したグラフを図 3.2-12 に示す。図 3.2-12 より、本研究で実施した C-A-S-H の収着試験結果は Haga らが実施した C-S-H の収着試験結果と比較して、全体的に分配比が大きい傾向にあった。具体的には、Haga らの C/S 比 1.2 の C-S-H の 1.0×10^{-3} M Cs 溶液による収着試験の場合、Cs の分配比が 1.1 L/kg であったのに対し、本研究で実施した C/S 比 1.2 の C-A-S-H の 1.0×10^{-3} M Cs 溶液による収着試験場合、Cs の分配比は 7.2 L/kg であった。また、C/S 比 1.0 の C-A-S-H において、収着液相に Na、K を 10^{-1} M 添加した試料は、添加しない試料に比べて Cs の分配比が 1/10 程度に小さくなっていた。

これらのことから、同じ C/S 比で比べると C-S-H に Al が入ることで Cs の収着量が增大し、Na が過剰な環境では Na の収着が優先され、Cs の収着量が小さくなる考えた。

表 3.2-18 Cs 分配比算出結果

固相名	液相		分配比 (L/kg)		
	ベース	初期 Cs 濃度 (M)	Cs		
			N1	N2	平均
CASH0.8 (Na)	CASH0.8 (Na) 平衡液	1.0×10^{-1}	10	11	11
		1.0×10^{-3}	150	150	150
CASH1.0 (Na)	CASH1.0 (Na) 平衡液	1.0×10^{-1}	3.0	3.0	3.0
		1.0×10^{-3}	150	140	150
	CASH1.0 (Na) 平衡液 +0.1 M Na、K	1.0×10^{-1}	3.0	1.8	2.4
		1.0×10^{-3}	12	12	12
CASH1.2 (Na)	CASH1.2 (Na) 平衡液	1.0×10^{-1}	1.8	1.8	1.8
		1.0×10^{-3}	7.3	7.1	7.2

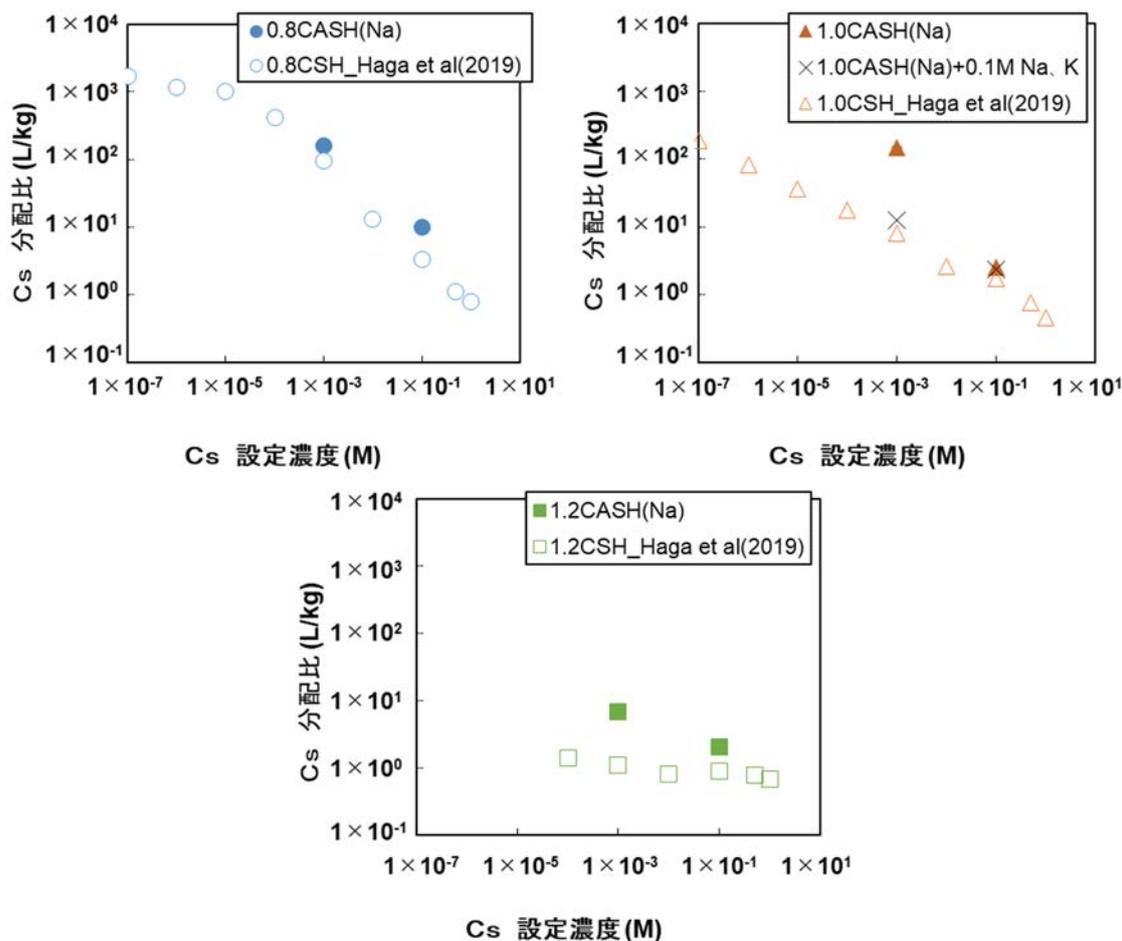


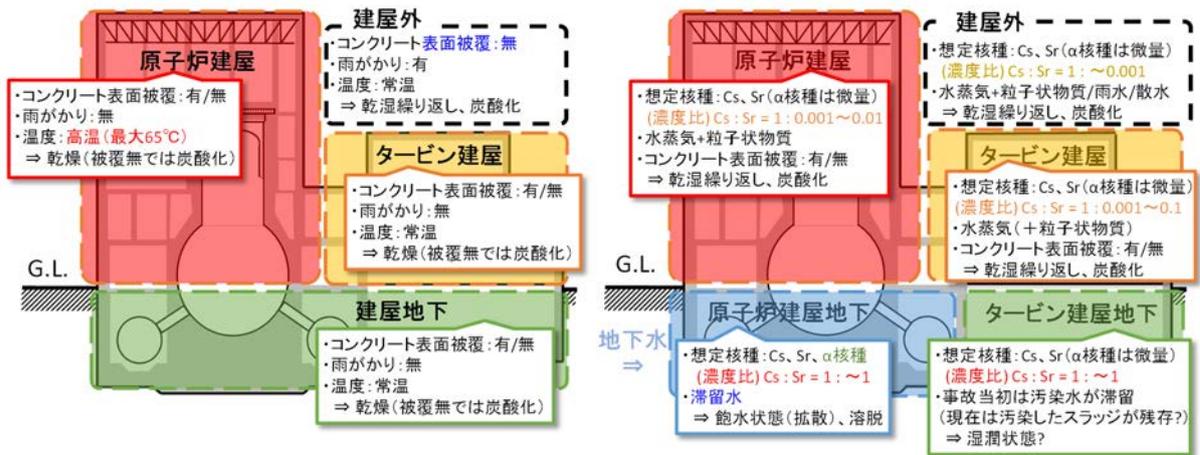
図 3.2-12 C-A-S-H と C-S-H の Cs 分配比の比較
(C-S-H の Cs 分配比[42])

(2) 境界条件およびモデル化手法の検討

(2) では、1F 建屋コンクリートに対する核種浸透解析を適切に行うために、部材内部の初期条件、滞留水や部材外部の境界条件を調査、整理し、浸透挙動のモデル化手法について検討した。前研究で整理した建屋の履歴と現状を考慮した汚染状態に関する模式図を図 3.2-13 に示す[2]。事故前の建屋コンクリートの環境条件と事故後の建屋コンクリートの汚染状況を熱、中性化、塩分浸透を中心に類推した模式図である[43][44][45][46][47]。

事故前の建屋コンクリートの環境温度は、原子炉格納建屋は最大 65 °C程度となる可能性があるが、他の部分は常温である可能性が高い。事故前の建屋コンクリートの表面は乾燥もしくは乾湿繰り返し状態であり、表面が樹脂で被膜されていない部分は炭酸化が起きていると考えられる。部位別に事故後の建屋コンクリートの汚染状態を検討した結果を表 3.2-19 に示す。本研究では、高濃度の汚染水が長く滞留したことにより、Ca が溶脱し、Cs、Sr の浸透が比較的進んでいると推定される「汚染水と接触した被膜のない建屋内コンクリート」、具体的には 1F 1号機タービン建屋地下のコンクリートに対する Cs、Sr の浸透を解析することとした。

解析に必要な境界条件および課題等を①部材条件、②環境条件、③モデル化手法の検討の順に記載した。



(a) 事故前の建屋コンクリートの環境条件 (b) 事故後の建屋コンクリートの汚染状況

図 3.2-13 建屋の履歴と現状を考慮した汚染状態に関する模式図

表 3.2-19 事故後の建屋コンクリートの汚染状態の検討と解析対象の設定

部位	汚染状態に関する検討	解析対象
原子炉建屋コンクリート (地上、地下)	<ul style="list-style-type: none"> 事故時に数百～数千℃の高温状態にさらされ、燃料デブリとコンクリートの高温反応 (MCCI) も生じており、通常のコンクリートとは異なる性質を持つ可能性が高い。 すでに、池内ら[48]や北海道大学[1]等によって、実験および解析的に研究されている。 	×
建屋外コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> 炭酸化部分にのみ Cs, Sr が浸透している可能性が高い[49]。 表面数 mm を削れば、除染できる可能性が高い。 	×
汚染水と接触していない 建屋内コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> Cs, Sr は移流でコンクリート内部に浸透するため、汚染水と接触していない場合、Cs, Sr は表面のみに汚染し、浸透深さは小さい可能性が高い。 表面数 mm を削れば、除染できる可能性が高い。 	×
汚染水と接触した 建屋内コンクリート (被膜あり)	<ul style="list-style-type: none"> 表面被膜のみ汚染されており、コンクリート側には浸透していない可能性が高い[50]。 表面数 mm を削れば、除染できる可能性が高い。 	×
汚染水と接触した 建屋内コンクリート (被膜なし)	<ul style="list-style-type: none"> 長期間滞留水と接しており、Ca が溶脱し、Cs, Sr の表面吸着が進む一方で、浸透が大きくなる可能性もある。 コンクリートの状態 (健全、乾燥、炭酸化、ひび割れ) によっては、Cs, Sr の浸透が大きい可能性がある。 外部の環境 (乾燥、飽水) 状態が、Cs, Sr の浸透に影響を及ぼしている可能性がある。 	○

① 部材条件

前研究での現場建屋コンクリートの調査結果より、1F 1号機タービン建屋地下コンクリートは、OPCを用いた調合である。3.3.2項における建屋内の浸水深さの調査結果でも後述するが、地下階の床と壁面（下部）には、コンクリート部材への核種の浸透を抑制するための塗装（表面被覆材）が施されているが、塗装が施されている範囲は、通常人が通常立ち入るもしくは接触するエリアであり、例えば高所には塗装はなかったとされている。すなわち、地震前の1F 1号機タービン建屋地下コンクリートでは、表面被覆材が施されていない箇所において、経年変化による炭酸化や乾燥、さらに乾燥収縮等に伴うひび割れが生じていたと考えられる。ひび割れはCs、Srの浸透に及ぼす影響が大きいと考えられ、本研究では、前研究のコンクリートの初期条件では考慮されていなかったひび割れの影響を反映させることを目標とする。

ここで、原子力発電所建屋におけるひび割れの維持補修に関する情報を整理する。1F 1号機のひび割れ状況を直接的に示す資料ではないが、東北電力株式会社女川原子力発電所2号炉原子炉建屋の乾燥収縮ひび割れ調査結果によれば[51]、平均ひび割れ幅はフロアによって大きな差はなく0.05～0.07 mmの範囲であり、ひび割れが検出された程度を表すひび割れ密度（＝クロス数 /m、クロス数：任意の基準線において交差したひび割れの数）は、4.0～4.8の範囲であったと報告されている。また同調査資料では、乾燥収縮ひび割れを踏まえた止水性を確保するための保守管理として、ひび割れ幅0.2 mm以上となったひび割れは、すべて補修を実施する、とある。

本研究では、ひび割れ幅・深さと密度を含む状態設定の検討として、メソスケールひび割れ解析（3.1節）を実施するが、浸透シミュレーションの検討と並行して進めることとなるため、浸透挙動評価のモデル化の検討においては、まずは上述の調査結果を踏まえたひび割れ状況を想定する。なお、ひび割れが浸透挙動に及ぼす影響については、3.2.2項「ダメージを受けたコンクリートの核種移行評価」で検討する。

その他の初期条件については、前研究で設定した条件を踏襲する。前研究で設定したコンクリートの初期状態の概要を表3.2-20に示す。なお、解析対象としたコンクリートに関する情報を新たに入手できた場合には、適宜条件を見直す。また、コンクリートの経年変化による乾燥および炭酸化に関しては、前研究でこれらの事象のモデル化が課題として明らかとなったことから、本研究では段階的に取り組む。概要は③「モデル化手法の検討」で述べる。

表 3.2-20 前研究で設定したコンクリートの初期状態の概要

項目	設定
配合	1F 1号機の OPC 配合が不明であったため、同じ OPC を使用した BWR であり、同時期に施工された中部電力株式会社浜岡原子力発電所の地下一般躯体コンクリートの調合
セメントの組成	SO ₃ 量を調整した OPC の組成
セメントの反応率	浜岡原子力発電所コンクリートの調査報告より得られた値
生成鉱物	可能性があるものを設定
炭酸化深さ	30 mm と設定
炭酸カルシウム量	表面から炭酸化深さまで一定量の CO ₂ が侵入し、侵入した範囲で炭酸塩鉱物が生成すると仮定 →本研究では検討課題として見直す計画
コンクリート中の含水状態	飽水 →本研究では検討課題として、乾燥状態の考慮も検討
骨材の陽イオン交換容量	骨材への吸着は主に細骨材中の粘土鉱物に吸着するとし、細骨材の分析値とコンクリート中の細骨材量に応じて設定（粗骨材への吸着は考慮せず）
温度	25 °C

② 環境条件

前研究では、初期状態を地震が起きる前のコンクリートとし、津波による海水の侵入、水素爆発による高濃度の汚染水の侵入、核種除去設備の稼働による低濃度の汚染水の滞留、滞留水除去の完了までを解析した。また、汚染水がコンクリートと接触している期間および汚染水濃度を東京電力や JAEA が公開している分析値[52][53]および JAEA の物質移行モデルによる推定値[54]を基に境界条件として設定した。前研究で設定した解析フローを図 3.2-14 に、境界条件を表 3.2-21 に示す[2]。

本研究では、解析フローおよび境界条件は前研究で設定したものとし、コンクリートの初期条件にひび割れの影響を加え解析を実施する。将来的には、滞留水除去後のコンクリートの状態を考慮し、核種の移行を解析する必要があるが、本研究ではまず、Cs、Sr の浸透に及ぼす影響が大きいと考えられるひび割れの影響を初期状態へ反映させることを目標として定めた。

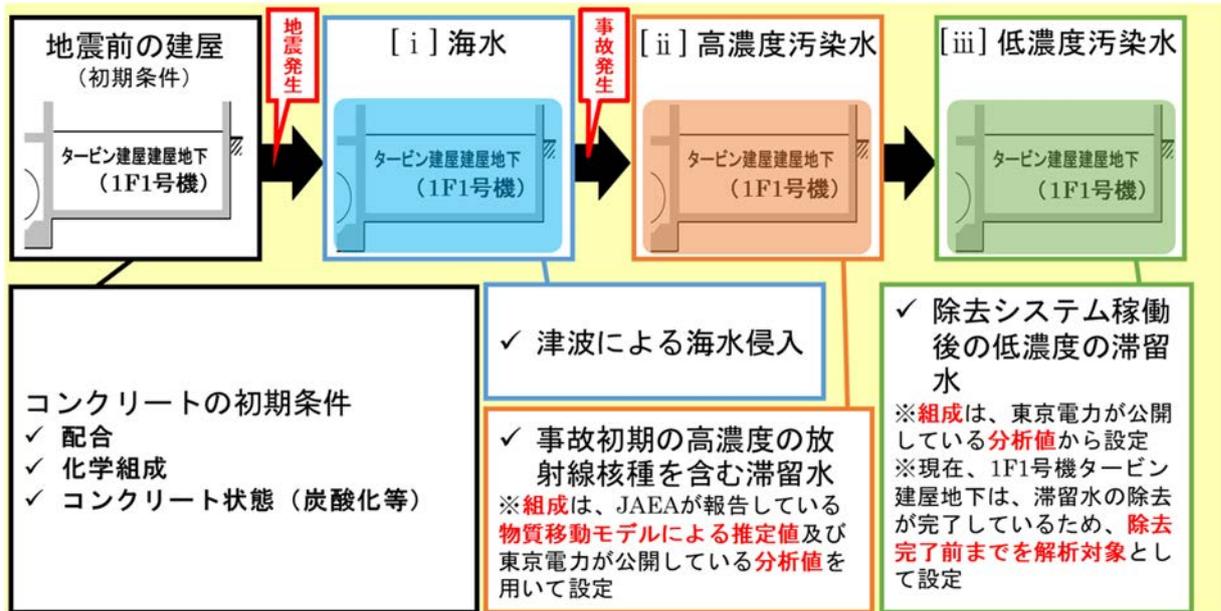


図 3.2-14 前研究で実施した解析フロー

表 3.2-21 前研究で設定した境界条件

境界条件名	解析対象期間								
	年月日*	平成 23 年 3 月 11 日起点の経過日数							
[i] 海水	平成 23 年 3 月 11 日								
[ii] 汚染水 (高濃度)	平成 23 年 3 月 12 日	1							
[iii]-1 汚染水 (除去設備等の運用により濃度減少)	平成 24 年 2 月 1 日	326							
[iii]-2 汚染水 (濃度減少継続中の中間時点)	平成 24 年 12 月 1 日	629							
[iii]-3 汚染水 (放射性核種以外は地下水組成となる時点)	平成 27 年 1 月 1 日	1389							
[iv] 汚染水 (すべての元素が低濃度で一定となる時点)	平成 29 年 3 月 1 日～平成 29 年 3 月 24 日	2178～2201							
境界条件名	元素濃度 (M)								
	Na	Mg	S	Cl	K	Ca	Sr	Cs	C
[i]	4.7×10^{-1}	5.3×10^{-2}	2.8×10^{-2}	5.5×10^{-1}	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	8.9×10^{-5}	2.3×10^{-9}	2.2×10^{-3}
[ii]	3.5×10^{-1}	3.9×10^{-2}	7.0×10^{-3}	4.2×10^{-1}	7.9×10^{-3}	7.7×10^{-3}	7.2×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.7×10^{-3}
[iii]-1	4.2×10^{-2}	4.9×10^{-3}	3.1×10^{-3}	4.8×10^{-2}	9.0×10^{-4}	1.8×10^{-3}	8.4×10^{-6}	1.8×10^{-5}	2.0×10^{-4}
[iii]-2	8.3×10^{-3}	9.9×10^{-4}	1.1×10^{-3}	9.9×10^{-3}	1.8×10^{-4}	1.1×10^{-3}	1.8×10^{-6}	4.6×10^{-7}	4.1×10^{-5}
[iii]-3	6.5×10^{-3}	7.8×10^{-4}	1.0×10^{-3}	7.6×10^{-3}	1.4×10^{-4}	1.1×10^{-3}	1.3×10^{-6}	7.9×10^{-8}	3.1×10^{-5}
[iv]	6.5×10^{-3}	7.8×10^{-4}	1.1×10^{-3}	7.6×10^{-3}	1.4×10^{-4}	1.1×10^{-3}	1.2×10^{-6}	1.3×10^{-7}	3.1×10^{-5}

※Cs、Sr 濃度については、1号機タービン建屋の分析値の日付[53]を基に設定している。

③ モデル化手法の検討

前研究では、1F の建屋コンクリートに対する Cs、Sr の浸透を評価するため、Hosokawa らが開発した多元素移動計算（物質移動モデル）と相平衡計算（熱力学相平衡モデル）を連成させた移行予測モデル[55]により予測計算を行った。本研究では、様々な実現象を考慮できるようにモデルを改良し、より現実に近い 1F 建屋コンクリートの Cs、Sr の浸透状態を評価することを目指す。令和 2 年度は、前研究で明らかとなったモデルの課題を整理した。本研究においてすべての課題を解決することは難しいため、優先順位を定めて実施することとした。

a) C-A-S-H の構造および C-A-S-H への Cs、Sr 収着挙動の反映

3.2.1(1)にて述べた通り、より実現象に近づけるためには、前研究で作成した C-S-H への Cs、Sr 収着モデルを C-A-S-H への Cs、Sr 収着モデルに改良する必要がある。

b) 炭酸化

炭酸化に関する課題は大きく分けて以下の 3 つが考えられる。

1 つ目の課題は、C-A-S-H の炭酸化により生じる、アルミナシリカゲル[34]への Cs、Sr の収着である。アルミナシリカゲルは、 ^{29}Si MAS-NMR により、 Q^3 、 Q^4 構造を持つことが報告されており[42]、この構造は Cs、Sr を収着する可能性がある。また、 ^{27}Al MAS-NMR によって、このアルミナシリカゲル中の Al は 4 配位であることが示されており[41]、Al が Si と同形置換することによって生じる電荷の補償として、Cs、Sr が取り込まれる可能性がある。アルミナシリカゲルは、OPC の炭酸化によっても生成することが報告されていることから[42]、1F 建屋コンクリートにおいても炭酸化部分ではアルミナシリカゲルが生成しているものと推測される。

2 つ目の課題は、炭酸化による空隙構造の変化である。空隙構造の変化については、炭酸化によって、細孔径の大きな空隙が増加するという報告と[56]、二酸化炭素との反応によって生じる体積の増加により、空隙率が減少する[57]といった報告がある。前者では、健全なセメント硬化体では、C-A-S-H の微細結晶が組み合わさることで微細な空隙構造になり、空隙の連結性が低く、屈曲度は高くなっているが、炭酸化により C-A-S-H が分解すると、空隙の連結性が高まり、屈曲度が低下するため、元素の移動が容易になると考えられる[42]。しかし、後者では、炭酸カルシウムの生成により空隙率が減少するため、元素の通り道が少なくなり、移動が困難になると考えられる。これらのイメージ図を図 3.2-15 に示す。現在のモデルでは、炭酸化カルシウムの生成による空隙率の低下のみを反映している。屈曲度の減少についても検討する必要がある。

3 つ目の課題は、炭酸化によって生成する炭酸カルシウム量の深さ方向の変化である。図 3.2-16 に示すように、現在のモデルでは設定した炭酸化深さまで一定量の炭酸カルシウムが生成する設定になっているが、実際には二酸化炭素はコンクリートに拡散によって浸透していくため、大気と接触している表面の炭酸カルシウム量が多く、深さ方向に進行するにつれて炭酸カルシウム量は徐々に減少していく[58]。場所による炭酸カルシウム量の変化もモデルに反映していく必要がある。

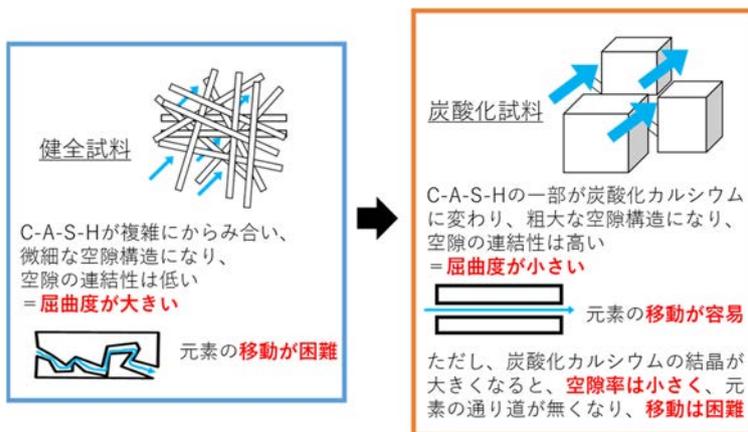


図 3.2-15 炭酸化による空隙構造の変化 (イメージ図)

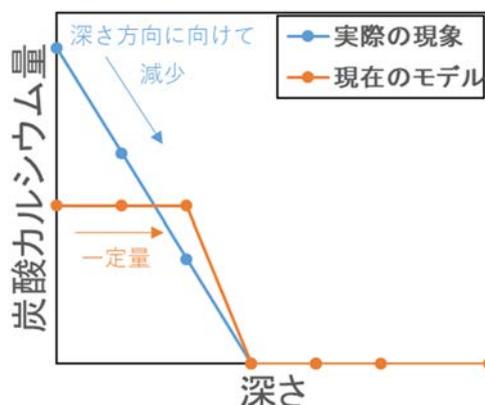


図 3.2-16 実現象と現モデルの深さ方向の炭酸化カルシウム量の比較 (イメージ図)

c) 乾燥

地震前の 1F 建屋内部のコンクリートは、水との接触はなく乾燥状態であったと推測される。地震後、水と接触した飽水状態におけるコンクリート中の元素の移動は、相平衡計算および拡散、移流を考慮すればよいが、乾燥状態においては、これらに加えて吸水過程を考慮する必要がある[59]。前研究では、初期条件を飽水状態と仮定して計算を実施したが、本研究では乾燥による影響を考慮する必要がある。

d) ひび割れ

前研究では、ひび割れの無いコンクリートを対象として、浸透計算を実施した。しかし、1F のオフサイトの実環境中のコンクリートでは、コンクリートのひび割れに沿って Cs が浸透していたことが報告されている[60]。また、ひび割れへの浸透では、イオンの濃縮等、通常の拡散とは異なる現象が起きているという報告もある[61]。したがって、1F 建屋の汚染状況を推定するには、ひび割れの影響を浸透予測に反映する必要がある。

e) 鉄筋

ひび割れが鉄筋まで進行していた場合は、ひび割れに沿って核種が浸透した後、鉄筋に沿って核種が浸透していくと報告されている[62][63]。1F 建屋の汚染状況を推定するためには、鉄筋とひび割れの位置関係を考慮する必要がある。

f) 計算結果と実験結果との比較

前研究では、浸透挙動に影響を及ぼす因子を特定するため、セメントペーストおよびモルタルを用いてデータを取得し、その結果を反映させた解析をコンクリートに適用した。炭酸化や骨材による収着の影響については確認できたが、浸透深さについては比較が困難であった。本研究では、コンクリートを用いて実験を行い、計算結果との比較、モデルの妥当性を確認する。また、東京電力および JAEA が実施している 1F コンクリートの分析結果をヒアリングが可能であれば実行し、より現実に近い 1F 建屋コンクリートの浸透予測ができるようモデルを改良していくことが好ましいと考える。

(3) まとめ

令和 2 年度は、実際の 1F 建屋コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析の手法を検討した。具体的には、前研究で作成した C-S-H による Cs、Sr 収着モデルを C-A-S-H による Cs、Sr 収着モデルに改良するための試験方法を検討および実施した。また、1F 建屋コンクリートの部位別汚染状況の推定、解析に必要な 1F 建屋コンクリートの初期条件の整理、境界条件の設定、前研究で使用したモデルの課題の整理を実施した。

C-A-S-H による Cs 収着試験の結果より、C-A-S-H 中の Al および環境中の高濃度のアルカリ (Na、K) が Cs の収着反応に影響を及ぼす可能性が再確認された。令和 3 年度は、令和 2 年度に実施できなかった収着試験の実施と C-A-S-H による Cs、Sr 収着モデルの検討を行う予定である。また、²⁹Si-NMR や ²⁷Al-NMR を用いて、C-A-S-H の構造について検討する予定である。

1F 建屋コンクリートの汚染状況を部位別に整理した結果、本研究では「汚染水と接触した被膜のない建屋内コンクリート」、具体的には 1F 1 号機タービン建屋地下のコンクリートに対する Cs、Sr の浸透を解析することとした。部材条件については、前研究で設定した条件に、前研究で考慮されていなかった乾燥やひび割れの影響を新たに反映することを検討する。解析する際の環境条件は、前研究で設定した滞留水の濃度変化を使用することとした。モデルの改良については、令和 2 年度に整理した課題について、本研究で全ての課題を解決することは難しいため、令和 3 年度以降に優先順位を定めて実施していく。

3.2.2 ダメージを受けたコンクリートの核種移行評価

ひび割れ部を考慮した物質移行の評価に資するデータ取得と、ひび割れを含むコンクリートの物質移行のモデル化を目的に、令和2年度は以下の項目を実施した。

- ・ひび割れが核種移行に与える影響に関する文献調査
- ・状態検討
- ・試験体作製および評価

(1) ひび割れが核種移行に与える影響に関する文献調査

(1)では、ひび割れが生じたコンクリートにおける、物質移行に関する既往の研究事例を調査し、試験体の作製方法を含めた、モデル化に必要なデータ取得のための試験およびモデル化の現状に関する情報を収集し、課題を整理した。

文献の検索には、J-GLOBAL および Google Scholar を利用し、それぞれ表 3.2-22 に示す条件で一次検索を行った (Google Scholar では日本語検索と英語検索に分けて実施)。次いで、適合度順で各上位 100 件から、タイトル、要約で関連すると思われる文献を抽出し、文献を収集した。

表 3.2-22 検索条件

データベース		キーワード	件数*
J-GLOBAL		(コンクリート OR CONCRETE) AND (ひび割れ OR クラック OR 亀裂 OR CRACK) AND (拡散 OR 浸透 OR DIFFUSION OR PENETRATION) AND (評価 OR シミュレーション OR モデル OR EVALUATION OR SIMULATION OR MODEL)	801
Google Scholar	日本語	コンクリート AND (ひび割れ OR クラック OR 亀裂) AND (拡散 OR 浸透) AND (評価 OR シミュレーション OR モデル)	1480
	英語	CONCRETE AND CRACK* AND (DIFFUS* OR PENETRAT*) AND (EVALUAT* OR SIMULAT* OR MODEL*)	17300

※平成 23 年以降に絞った条件での件数

収集した文献より得られた内容を、①拡散に及ぼすひび割れ影響の評価とモデル化、②ひび割れ試験体の拡散性状の評価方法、③ひび割れ試験体の作製方法、に分けて、以下に記す。

① 拡散に及ぼすひび割れ影響の評価とモデル化

ひび割れを有するコンクリート部材の物質移行特性に関するシミュレーションは、コンクリート構造物の耐用年数を予測することを目的に、国内外で多数研究が行われている (例えば、[63][64][65][66][67][68][69][70])。その多くが、塩化物イオンの浸透に対するシミュレーションであり、Cs、Sr を対象とした事例はほとんどない。そこで①では主に、ひび割れが生じた場合の塩化物イオンの浸透に対する設計上の考え方、ひび割れ部への塩化物イオンの浸透シミュレーションに関する既往の研究事例について整理する。

ひび割れのモデル化に関する考え方は、ひび割れが物質の浸透に及ぼす影響を平均的に考慮したモデル（分散型）と、ひび割れ中の物質の移動を考慮したモデル（離散型）、の2つに大別される。

前者の分散型の例としては、公益社団法人土木学会（以下、「JSCE」と略す。）のコンクリート標準示方書[設計編]がある。JSCEでは、コンクリート構造物の設計耐用年数を算定するために、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査として、鋼材位置における塩化物イオン濃度と、鋼材腐食発生限界濃度とを対比することを要求しており、その中で、塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d を算定する式(3.2-2)が記されている[71]。この式は、コンクリート表面から内部にある鋼材に至るコンクリート中の塩化物イオンの移動を一次元線形の拡散現象とみなし、ひび割れの影響を考慮する場合の設計拡散係数を、健全なコンクリートの拡散係数 D_c と、ひび割れ中の拡散係数 D_{cr} × ひび割れ開口面の面積割合の和で求められる、と考えている。なお式(3.2-2)は、平成19年制定のJSCEに記された式で、最新版（平成29年制定）では若干式の見直しが行われているが、基本的な考え方は同じである。

$$D_d = \gamma_c D_c + \left(\frac{w}{l}\right) \left(\frac{w}{w_a}\right)^2 D_{cr} \quad \text{式(3.2-2)}$$

γ_c : コンクリートの材料係数。一般に 1.0 としてよい。ただし、上面の部位に関しては 1.3 とするのがよい。なお、構造物中のコンクリートと標準養生供試体の間で品質に差が生じない場合は、すべての部位において 1.0 としてよい。

D_c : コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

D_{cr} : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)。

曲げひび割れを許す場合にのみ考慮する。一般に、 $200 \text{ cm}^2/\text{年}$ としてよい。

w : ひび割れ幅 (mm)

w_a : 許容ひび割れ幅 (mm)、鉄筋のかぶり厚から設定される定数。

l : ひび割れ間隔 (mm)

JSCEの式に基づき、ひび割れを持つ様々な部材への塩分浸透特性評価を検討した事例として、齊藤らの報告がある[72][73]。JSCEは貫通ひび割れにのみ対応しているが、齊藤らは貫通していないひび割れへの適用を目的に、薄いシートを未硬化のセメントに差し込み、様々な深さの模擬ひび割れの入ったモルタル試験体を作製し、電気泳動試験によりひび割れ深さが塩化物イオンの拡散に与える影響を実験的に検討した。その結果、ひび割れ深さと拡散係数は正の相関を示す線形関係が得られ、ひび割れ深さが分かれば、非貫通ひび割れにも適用可能と考えられる、としている。

後者の離散型の例としては、塚原ら[74]やTakewakaら[75]の報告がある。塚原らはコンクリートのひび割れ部を開放面と同様に取扱い、ひび割れ深さ毎のひび割れ中の塩化物イオン濃度、ひび割れ部の塩化物イオン量および塩化物イオン量に対する質量保存則を考慮することにより、コンクリート中における濃度拡散と疑似吸着をマクロ的に表現した塩化物イオン移動評価モデルを構築している。また、Takewakaらは、拡散セル試験の結果を参考に、初期ひび割れの影響を拡散係数の違いとして表現し、初期の表面ひび割れ幅に応じたひび割れ内の拡散係数を設定している。

ここで、ひび割れを有するコンクリート内の物質移行シミュレーションに関する研究の多くは、ひび割れ形状を簡素化するために矩形として考慮され、先に挙げた2つの離散型の研究事例でも、ひび割れを線要素として模擬し、拡散係数を設定している。しかしながら、実際のひび割れは複雑な形状であり、幅も一様ではない。そこで、よりリアルなひび割れに対する浸透挙動を評価するため、X線CT画像をベースに構成した実際のひび割れ形状を用いたり、あるいはRBSMを用いて力学解析を行い、圧縮または引張荷重によって誘発されるひび割れの分布と幅をシミュレートしたりすることで、コンクリートのひび割れにおける塩化物イオンの移動をシミュレーションした事例もある。

例えばLuら[76]は、3次元X線CTによる微細構造に基づき、COMSOLモデルを用いて塩化物の浸透過程をシミュレーションしている。またWangら[65]は、RBSMとTNMに基づいて、コンクリートの塩化物イオンの拡散をシミュレーションしている。コンクリートを骨材粒子、モルタル、界面遷移領域(ITZ)の三相材料としてシミュレートし、TNMを用いて、ひび割れたコンクリート中の塩化物イオンの移動プロセスをシミュレーションした。なお、ひび割れ幅に対するひび割れ内の塩化物イオンの拡散係数は、Katoら[64]の実験結果にフィッティングすることで定式化した、としている。

このように、実物をトレースしたひび割れの形状や、載荷荷重に応じたひび割れの分布が考慮されるなど、ひび割れのモデル化に関する研究は進展しているが、例えば、水和や炭酸化などの化学反応により、ひび割れ部では表面状態の変化が生じ、ひび割れ形状が変化する。これらの事象は、ひび割れ部の拡散に大きく影響することは認知されているが、どのように影響するか統一的な見解は示されておらず、モデル化研究における課題となっている。

② ひび割れ試験体の拡散性状の評価方法

ひび割れを有するコンクリートの物質移行挙動を解析で評価するためには、ひび割れを含む試験体全体あるいはひび割れ中の拡散係数を実験的に求めることが必要となる。ここでは、ひび割れ試験体の拡散性状の評価方法について、既往の報告事例を述べる。

ひび割れを導入した試験体の拡散性状を評価する方法としては、主に、電気泳動試験、拡散セル試験、浸漬試験が挙げられる。

電気泳動試験には、NT-BUILD 492の規格[77]をベースとした方法と、JSCE規準「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(JSCE-G 571)」[78]のような方法がある。NT-BUILD 492は非定常の電気泳動試験で、試験後試料の断面の拡散フロントの深さ平均から拡散係数を算出することができる。数時間程度で試験でき、この試験規格で得られる拡散係数は、見かけの拡散係数とは区別して非定常拡散係数(D_{nssm})などと呼ばれる。一方、JSCE-G 571は、定常状態の電気泳動試験であり、電気泳動試験セルの溶液濃度を測定し、定常状態の濃度変化から実効拡散係数 D_e を算出できる。定常状態の電気泳動試験としては、例えばDjerbiらの報告がある[79]。

拡散セル試験は、電気泳動試験と同様の試験セルを使うが、電氣的ではなく、溶液の濃度勾配を駆動力とする試験で、例えば塚原ら[74]やIsmailら[80]の報告がある。塚原らは、ひび割れコンクリートで150日拡散試験を行い、ひび割れを通過したイオン量とひび割れからセメント内に拡散したイオン量を測定して拡散を評価している。Ismailらはひび割れモルタルで14日拡散試験を行い、8mm程度まで拡散した濃度プロファイルを使い、ひび割れの自己修復の評価などを行っている。

浸漬試験は、Mori ら[81]、大塚ら[82]、久徳ら[83]、齊藤ら[73]、Darma ら[84]などの報告がある。大塚らは、蒸気養生ひび割れコンクリート試料を1年浸漬し、拡散フロントから拡散係数を推定している。久徳は半年、齊藤は3ヶ月行っている。Darma らは、ひび割れモルタルをCs溶液に一面暴露した状態で24時間固定し、X線CTを用いてひび割れ内の浸透・拡散を評価した。初期状態と浸漬時間ごとのCT値を測定し、差し引くことでひび割れ内の気泡、水、Cs溶液等の分布を解析し、評価している。

拡散性状の評価方法にはそれぞれ得失があり、目的に応じた評価手法を選定する必要がある。以下、ひび割れ中の拡散係数(D_{cr})と、ひび割れの入ったコンクリートの拡散係数(D_{eq})の評価事例を記す。

1) ひび割れ中の拡散係数(D_{cr})の算出

①の1)で述べたJSCEと同様、ひび割れを有するコンクリート部材を、ひび割れ部と健全部の2相からなると考え、ひび割れ幅に応じたひび割れ中の拡散係数(D_{cr})を算出した事例がいくつか報告されている。

塚原ら[74]は、割裂ひび割れ試験体およびひび割れを模した鋼製スリット試験体を用いて拡散セル試験を行い、拡散セルの一方にNaCl 3.0%溶液、もう一方に蒸留水(H₂O)を入れ、40℃環境で拡散試験を行い、以下の式(3.2-3)[85]によりひび割れ中の塩化物イオンの拡散係数を求めている。

$$J = \frac{V_{H_2O}}{A} \frac{dC_{H_2O}}{dt} = \frac{D}{L} (C_{NaCl} - C_{H_2O}) \quad \text{式(3.2-3)}$$

- J : H₂Oセルへのイオン流速
- A : 試験体断面積
- L : 試験体長さ
- V_{H₂O} : H₂Oセル内の溶液体積
- C_{NaCl}、C_{H₂O} : 試験体表面部のイオン濃度

塚原らの報告では、ひび割れ幅が大きくなるにつれて、ひび割れ中の塩化物イオン拡散係数は大きくなり、ある程度のひび割れ幅(スリット試験体の結果では0.075 mm)以上では拡散係数は収束すると考えられる、としている。

Kato らも同様に、割裂ひび割れ試験体およびひび割れを模した鋼製スリット試験体を用いて拡散試験を行い、ひび割れ部の拡散挙動の評価を行っている[64]。試験結果から、ひび割れ幅0.075 mmあたりに変曲点があり、0.075 mmまではひび割れ幅が大きくなるほどD_{cr}も大きくなるが、0.075 mm以降は値がほぼ収束したとしている。

なおWang らは、Kato らの報告より20℃の鋼製スリットの試験結果を用いてカーブフィッティングを行い、ひび割れ幅W_{cr}とひび割れの拡散係数D_{cr}の関係を表す以下の式(3.2-4)を得ている[65]。

$$\log D_{cr} = -2.277 [1 + 1.311e^{-20.6w_{cr}}] \quad \text{式(3.2-4)}$$

Djerbi らは、貫通ひび割れ試料の塩化物イオンの電気泳動試験から、ひび割れコンクリートの拡散係数 D 、ひび割れ部の拡散係数 D_{cr} を算出している[79]。電気泳動で定常状態となった時の流束 J から、各ひび割れ試料の $D_e (=D)$ を算出し、また、ひび割れ部および健全部のそれぞれの面積を A_{cr} および A_c 、流束を J_{cr} および J_c と置き、以下の式と Nernst-Planck の式(3.2-5)から D_{cr} を算出している。

$$(A_c + A_{cr})J_t = A_c J_c + A_{cr} J_{cr} \quad \text{式(3.2-5)}$$

Djerbi らによれば、ひび割れを有する試験体の拡散係数 D は、ひび割れ幅が大きくなるにつれて増加し、ひび割れ幅が 80 μm 未満の場合、ひび割れたコンクリートの拡散係数は健全なコンクリートの拡散係数に比べて緩やかに増加したが、80 μm 以上の場合は急激に増加した、としている。また、ひび割れ中の塩化物イオンの拡散係数は、30 μm から 80 μm まではひび割れ幅の増加に伴って直線的に増加し、ひび割れ幅が約 80 μm 以上になるとほぼ一定になる、としている。

上記の結果から Djerbi らは、ひび割れ幅 w と D_{cr} の関係から、ひび割れ幅 30 μm と 80 μm を閾値とした 2 つの D_{cr} の式(式(3.2-6)、式(3.2-7))を示している。Djerbi らが報告した実験結果や提案式は、その後のひび割れ内、またはひび割れを有するコンクリート内の塩化物イオンの拡散シミュレーションの研究に度々採用されている(例えば、[67][68])。

$$D_{cr} (\text{m}^2/\text{s}) = 2 \times 10^{-11} w - 4 \times 10^{-10} \quad (30 \mu\text{m} \leq w \leq 80 \mu\text{m}) \quad \text{式(3.2-6)}$$

$$D_{cr} (\text{m}^2/\text{s}) \approx 14 \times 10^{-10} \quad (w \geq 80 \mu\text{m}) \quad \text{式(3.2-7)}$$

2) ひび割れの入ったコンクリートの拡散係数 (D_{eq}) の評価

Gerald らは、コンクリートの拡散特性に与えるひび割れの影響を調査するため、凍結融解作用によるひび割れ試験体を用いた電気泳動試験を行い、ひび割れの拡散特性を評価した。ダメージレベルが拡散係数 D_{eq} に及ぼす影響は、ひび割れコンクリート全体の拡散係数 D_{eq} 、健全コンクリート部の拡散係数 D_c と、ひび割れ幅 w とひび割れ間隔 l によって定義したひび割れ間隔係数 ($f=l/w$) で整理している[86]。

Darma らは、X線CTを使い、Csを使ったひび割れ方向の拡散係数 D_{eq} の算出の他、ひび割れの屈曲度 τ 、ひび割れの収斂度 δ 、ひび割れの垂直方向の拡散係数を算出し、ひび割れ幅 w とそれぞれの関係を考察している[84]。

Wang らは、複雑なひび割れを含むコンクリート中の塩化物イオンの拡散について、拡散特性に影響を与えると考えられるひび割れの密度、長さ、方向、屈曲度、ひび割れ幅といった幾何学パラメータを定量化することを考えた。様々なひび割れ試料を作製するため、様々な圧縮応力を加えたひび割れ円盤試験体を作製し、電気泳動試験を実施している[87]。

何れの報告も、ダメージレベル(ひび割れ幅、ひび割れ長さ、ひび割れ内部の形状等)が異なる試験体の見掛けの拡散係数 D_{eq} を測定し、健全なコンクリートの拡散係数と対比し、ダメージレベルに応じて設定した係数を整理する、という考え方である。

③ ひび割れ試験体の作製方法

ひび割れたコンクリートの物質移行特性を調べるには、コンクリート試験体にひび割れを導入させる必要がある。コンクリートへのひび割れの導入方法としては、主に 2 つの方法があり、1 つは、試験体成形時に予めシートやプレート等を埋め込む、あるいは成形後にカッター等でスリットを入れることで人工的にひび割れを模擬する方法である。もう 1 つは、コンクリート試験体に荷重をかけ、ひび割れを発生させる方法である。ひび割れ導入方法にもそれぞれ得失があり、目的に応じた評価手法を選定する必要がある。以下、導入方法の概要を記す。

1) 人工的にひび割れを模擬する方法

人工的にひび割れを模擬する方法の事例としては、例えば、齊藤ら[72]、S. Mu ら[88]や Cheng ら[70]の報告があり、硬化前のコンクリートに銅などでできた薄いシートを差し込むことで、貫通していない自由なサイズのひび割れを好きな位置に複数作製することも可能である。これらの報告によれば、作製されるひび割れ幅は 0.1 mm 以上となっている。

この方法の特長は、平行壁で幅と深さを正確に制御できる点であり、ひび割れたコンクリートの物質移行特性に対する、ひび割れ幅とひび割れ深さの影響を評価するのに適している。しかしながら、ひび割れ内部の表面状態等で実現象との乖離があり、ひび割れの屈曲度、連結性、表面の粗さが物質移行特性に及ぼす影響は評価できない。

2) 荷重によりひび割れを発生させる方法

コンクリート試験体に荷重をかけて、ひび割れを発生させる方法の特長は、現実的なひび割れを生成できる点である。広く使われている方法としては、割裂引張方式、曲げ載荷方式などがある。以下に概要を記す。

割裂引張は円柱状の試験体に対し、試験体中央を通るほぼまっすぐな 1 本の貫通ひび割れを導入することができる方法で、海外の報告では Brazilian Splitting Test と呼ばれ、国内では、例えば、塚原ら[74]、藤井ら[89]や久徳ら[83]の報告がある。この方法では、線形可変変位トランスデューサ (LVDT) 等で測定しながら載荷することで、ひび割れの幅をある程度制御することはできるが、除荷時に変形することに気を付けなければならない。試料が完全に離れることを防止するため試料の周りを塩ビパイプ (藤井ら[89]) や熱収縮チューブ (Darma ら[84]) などによって保護している場合や、割裂後に樹脂で固定する方法 (塚原ら[74]) などがある。割裂引張試験は円柱試験体の場合が多いが、角柱試験体にノッチを設け、割裂引張ひび割れを導入した事例もある (岩波ら[90])。

曲げ載荷方式は、角柱試験体に対して 3 点または 4 点曲げを与え、ひび割れを導入する方法であり、例えば Kato らが行っている[64]。この方法は、貫通していないひび割れ、単一のひび割れも複数のひび割れも導入でき、荷重下でひび割れたコンクリートの物質移行特性の評価にも適用できる。鉄筋が入り比較的大きな試験体が対象になるため、より実規模に近い条件を想定した試験を行える一方で、ひび割れの状態を確認する際、例えば X 線 CT では試験体寸法が収まらない等、ハンドリングにおいて制約を受けるケースもある。

荷重によりひび割れを発生させるその他の方法としては、ドーナツ型の試験体に中央部から膨張応力を加えることで、ドーナツ型の試験体部に引張ひび割れを生じさせる方法がある。ドーナツ型の膨張応力を使った方法は、海外で Deformation-controlled tensile tests として Ismail らによって報告されており[80]、割裂引張方式で発生するひび割れと類似している。

3) その他の方法

これまで述べた内容は、制御された環境下で導入したひび割れであるのに対し、事例はあまり多くないが、乾燥収縮や凍結融解作用で生じるような、ランダムなひび割れ（分散ひび割れ）を導入する方法も報告されている。例えば、Wang らは、立方体試験体に対して様々な応力の単軸圧縮を行い、応力方向、応力と垂直方向に円柱をくり抜いて作製している[87]。また、大塚らは蒸気養生を施した試験体を乾燥させて[82]、Jacobsen らは凍結融解試験を行って[91]、ランダムなひび割れを生じさせたコンクリート試験体を作製し、塩化物イオンの浸透を評価する試験を行っている。大塚はランダムひび割れの分布やその成長過程を X 線造影法と wet-SEM によって詳細に評価している。

また、ひび割れ内の物質移動を評価する際、コンクリートの持つ性質が物質の移動現象を複雑にするため、コンクリート以外の物質を用いたひび割れ試験もいくつか存在する。例えば、コンクリートは多孔質体のため、溶媒やイオンがひび割れ内だけでなく、ひび割れからコンクリート内部にも拡散するため、塚原らは、金属スリット試験体を用いた検討を行っている[74]。齊藤らは、ひび割れからの拡散方向を制御するため、一方をアクリル板でせき止めた試験を行っている[73]。Ismail らは、セメントが時間とともに水と反応し、ひび割れを自己修復してしまうことを考慮してレンガでもひび割れ試験を行っている[80]。

各報告で物質移動に関する評価試験のために作製されたひび割れ試験体の作製方法と、報告されているひび割れ開口幅を表 3.2-23 に示す。

表 3.2-23 ひび割れの作製方法とひび割れ開口幅

ひび割れ作製方法	筆頭著者	報告年度	試験体サイズ (mm)	ひび割れ開口幅 (mm)
シート貫入	齊藤	2011	40×40×40	0.1、0.2、0.4
	S. Mu	2013	Φ100×50	0.3～0.5
	Cheng	2017	Φ100×50	0.1
割裂引張方式	塚原	2003	Φ100×30	0.025～0.38
	岩波	2006	55×25×60	0.15、0.20、0.25
	Djerbi	2008	Φ110×50	0.03～0.25
	S. Y. Jang	2011	Φ100×50	0.015～0.2
	久徳	2013	Φ100×100	0.05、0.10、0.15、0.20
	Darma	2013	Φ20×40	0.051、0.127、0.152
曲げ載荷方式	塚原	2000	100×100×400	0.07～0.2
	塚原	2003	120×70×380	0.090、0.070、0.10、0.088
Deformation-controlled tensile tests	Ismail	2008	ドーナツ型 Φ150×50	0.006～0.325
凍結融解	H. L. Wang	2016	200×200×200	～約0.5
乾燥収縮	大塚	1998	400×100×100	0.002～0.12
その他	塚原	2003	金属 Φ100×30	0.025、0.05、0.075、0.1、0.2
	齊藤	2014	アクリル 100×100×80	0.1、0.2、0.4、0.8
	Ismail	2004	レンガ Φ150×50	0.021、0.034、0.053、0.06、0.128

(2) 状態検討

(2)では、(1)の文献調査の調査結果を踏まえ、ひび割れ影響を考慮した物質移行モデル化の方向性、実構造物におけるひび割れ部を模擬した試験体の作製条件について検討した。

① ひび割れ影響を考慮した物質移行モデル化の方向性

(1)の文献調査で述べた通り、ひび割れが生じたコンクリートの物質移行特性の評価の多くは、健全な状態の拡散性状に対し、ダメージレベルに応じた拡散係数を設定され、ひび割れ幅や深さに応じた拡散係数の変化を定式化したモデルがいくつか提案されている。定性的にはひび割れ幅の増大に伴い拡散係数は大きくなり、ある一定のひび割れ幅を超えると拡散係数は収束することが、既往報告から明らかにはなっているが、拡散係数の変曲点となるひび割れ幅については、統一的な見解は示されていない。これは、既往の研究報告によってひび割れの形状や試験体の特性（使用材料、配合、水分量、乾燥状態、炭酸化等）の違いに起因すると考えられる。また、既往研究の多くが塩化物イオンの移動を評価対象としており、Cs および Sr に関する知見はほとんどない。すなわち、実コンクリート調査に近い条件で、ひび割れを有する試験体の Cs および Sr の拡散性状に関するデータを取得する必要がある。

ひび割れ影響を考慮した物質移行モデル化の順序としては、分散型もしくは離散型の何れのモデルにせよ、まずは1F建屋コンクリートを模擬した使用材料および調合で、ひび割れ幅や深さを変えた試験体を作製し、比較対象となる健全状態の試験体とともに、CsおよびSrの拡散試験を実施する。そのうえで、既往報告で定式化されたひび割れ幅や深さに応じた拡散係数の式と同様の評価ができるかを検討する。

なお、ひび割れ内部の炭酸化等、経年変化の影響については、今後の検討課題とする。

② ひび割れの状態設定に関する検討

3.2.1項(2)「境界条件およびモデル化手法の検討」でも述べた通り、本研究ではひび割れ幅・深さと密度を含む状態設定の検討として、メソスケールひび割れ解析(3.1節)を実施するが、浸透シミュレーションの検討と並行して進めることになるため、浸透挙動評価のモデル化の検討においては、まずは既往の原子力発電所建屋におけるひび割れの調査結果を踏まえて想定する。

先でも引用した、東北電力株式会社女川原子力発電所2号炉原子炉建屋の乾燥収縮ひび割れ調査結果によれば[51]、平均ひび割れ幅はフロアによって大きな差はなく0.05~0.07 mmの範囲であり、ひび割れ幅0.2 mm以上となったひび割れは、すべて補修を実施する、とあることから、主に0.05~0.2 mmの範囲のひび割れ幅に対する拡散性状のデータを取得する。また、ひび割れが検出された程度を表すひび割れ密度(=クロス数/m、クロス数:任意の基準線において交差したひび割れの数)は、4.0~4.8の範囲であったと報告されているが、これは1 mの直線上において、200~250 mm間隔でひび割れがあったと考えられることから、本研究ではまず、1本のひび割れを模擬した試験体で評価する。

試験体作製で重要になるのが、ひび割れ導入の制御方法と、導入後のひび割れ形状の確認方法である。既往研究では多くの方法が示されているが、同様に実施できるかは事前の確認が必要である。そこで令和2年度は、予察として、試験体へのひび割れ導入と、X線CTによる導入後のひび割れ状態の観察を試みている。詳細は③「ひび割れ導入に関する予察試験」で述べる。

③ ひび割れ導入に関する予察試験

ひび割れを導入した試験体を用いた拡散試験の実施を想定し、予察として、試験体へのひび割れ導入と、X線CTによる導入後のひび割れ状態の観察を試みた。ひび割れ導入方法は、比較的簡便にできそうな塩ビパイプを用いる藤井(2012)ら[89]の方法を参考にした。

内径5 cmの塩ビパイプ内にW/C=0.5のモルタルを充填し、モルタルが硬化した後に高さ約5 cmに切断し、耐圧試験機を用いて、コンクリートの割裂引張強度試験の要領で割裂した(図3.2-17(a))。

導入できたひび割れについては、クラックスケールによって開口幅を測定するとともに、試験体内部をひび割れの状態を観察するためX線CT画像を撮影した。マイクロX線CTの撮影には株式会社島津製作所のinspeXio SMX-225CTを使用した(図3.2-17(b))。なお、CT画像の解像度は、0.047 mm/voxelである。



(a) 割裂引張によるひび割れ導入状況



(b) X線CT装置の外観

図 3.2-17 ひび割れ導入予察試験の実施状況

画像撮影箇所の模式図を図 3.2-18 に、ひび割れ導入後の試験体外観と CT 画像を図 3.2-19 および図 3.2-20 に示す。耐圧試験機で $\phi 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 供試体にゆっくり荷重をかけ、ひび割れが入った瞬間に圧縮を止めると開口幅 0.05 mm 程度のひび割れが導入でき、その後も圧縮を続けることで開口幅 0.5 mm 程度まで拡張することができた。ただし、ひび割れ導入の過程で供試体が崩壊する場合もあった。同じ要領で作製しても個体差が出る可能性が高いことから、供試体の強度、拘束治具（塩ビパイプ）の剛性、載荷荷重、などを鑑みて、令和 3 年度は載荷方法、条件を検討する。

また、今回実施した予察試験では、画像の撮影のみで解析は行っていないが、ひび割れを CT 画像で確認することができた。撮影された画像を見ると、ひび割れ A は綺麗な 1 本のひび割れが作製できていた。ひび割れ幅を大きくしようと加圧したひび割れ B では、裏面のひび割れが 1 本に繋がっておらず、内部はひび割れに分岐していることが確認できた。クラックスケールで測ったひび割れ開口幅は 0.05 mm であり、CT 画像の解像度と同程度 (0.047 mm) だったため、CT では観察できないごく微細なひび割れが存在する可能性も考えられる。

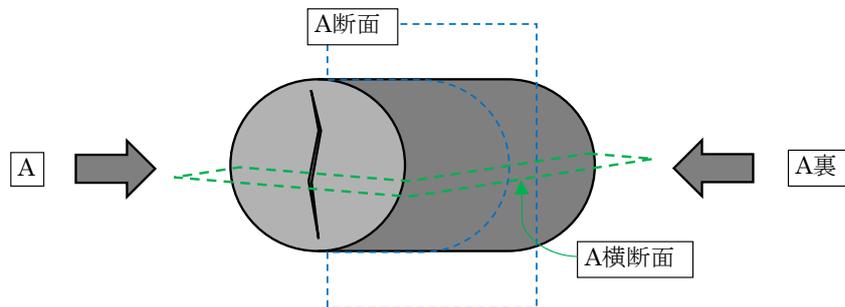


図 3.2-18 画像撮影箇所の模式図

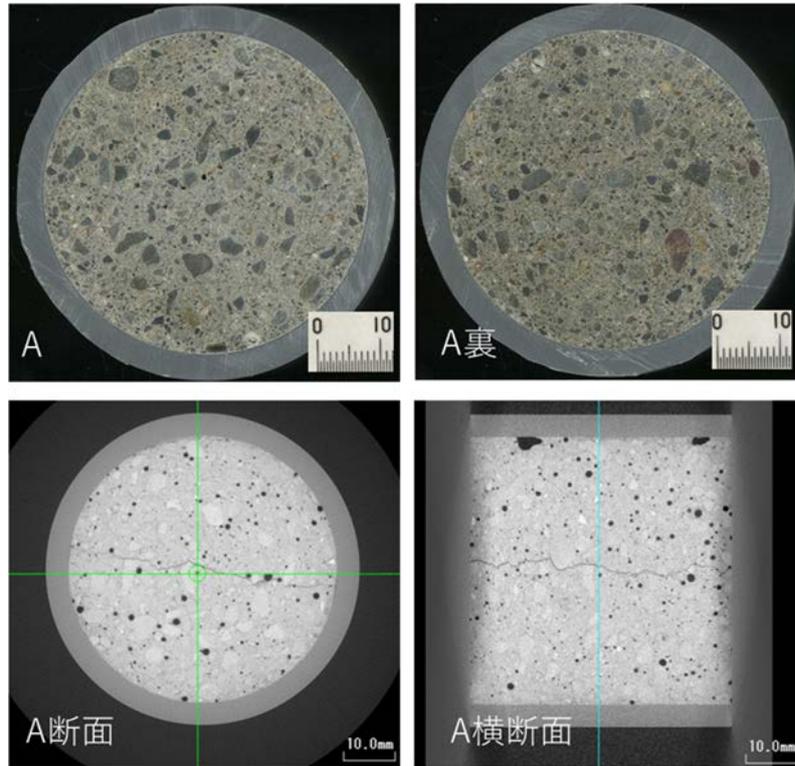


図 3.2-19 ひび割れ導入後の試験体外観と CT 画像（試験体 A）

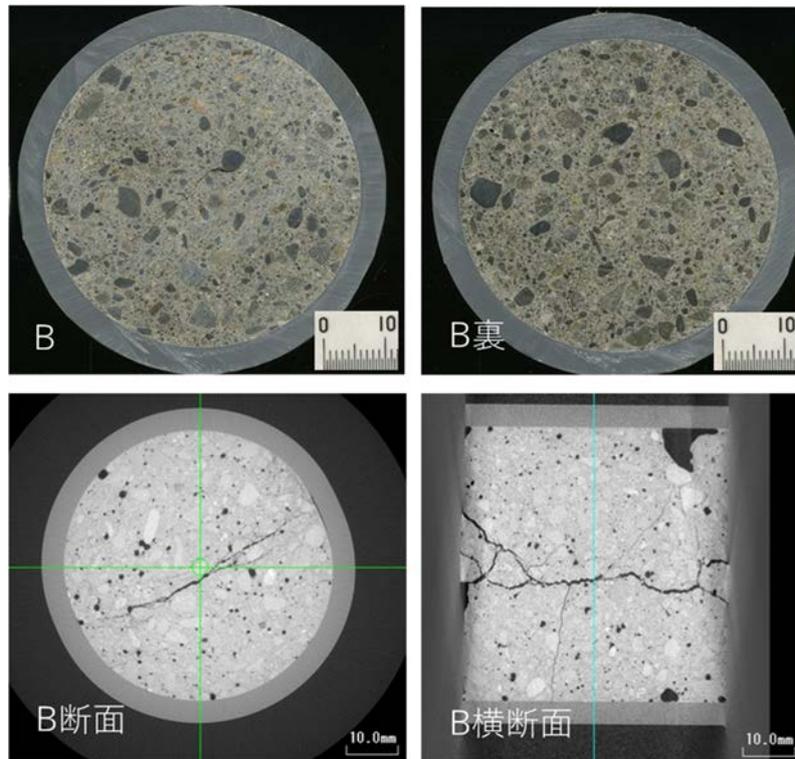


図 3.2-20 ひび割れ導入後の試験体外観と CT 画像（試験体 B）

ひび割れ幅の制御について、今回はリアルタイムの計測は行わなかったが、例えば文献 [84] [79] で示されているように、変位計を装着しながら割裂引張試験を行うことで、ある

程度のコントロールは可能と考えられる。また、今回載荷時の試験体の拘束に用いた塩ビパイプは弾力を有するため、除荷した瞬間に割裂した試料が元の状態に戻ろうとし、ひび割れが閉塞する。このため、令和3年度は、拘束治具を含めた試験体の作製条件を改めて検討する。

(3) 試験体作製および評価

令和3年度以降に開始する、浸透試験に供する試験体の作製準備として、前研究での現場コンクリートの履歴調査で得た情報に基づき、試験体作製に使用する資材を調達し、材料（セメント、骨材）の分析（物理試験、組成分析）を行った。また、コンクリート調合を決定し、コンクリート試験体を成形した。

① 使用材料の分析

1) 使用材料および分析項目

使用材料を表 3.2-24 に、3.2.2 項で実施した分析項目と対象試料を表 3.2-25 に示す。前研究での現場コンクリートに関する調査の結果、現場コンクリートには OPC と FAC の両者が用いられていたが、当時現場に納入していたであろうセメント工場が閉鎖している等の理由で、OPC および FA については、現時点で入手できる銘柄とした。細骨材および粗骨材は、前研究でも採取した、現場コンクリートに使用されていたと考えられる阿武隈川産の川砂利、川砂とした。なお、粗骨材については、浸透試験用の試料調製で支障が生じた場合の備えとして、粗骨材最大寸法 20 mm (SG-2005 と表記) と 13 mm (SG-1305 と表記) の 2 種類を準備した。また、細骨材に関しては、前研究と同様に水洗により 150 μm 以下の微粒分を取り除いた石灰石砕砂も、比較用として入手した。

表 3.2-24 使用材料

材料名	記号	種類	メーカー/採取地
練混ぜ水	W	上水道水	—
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント (密度:3.16 g/cm ³ 、比表面積:3070 cm ² /g)	太平洋セメント株式会社
フライアッシュ	FA	JIS II 種品 (密度:2.30 g/cm ³ 、比表面積:4900 cm ² /g)	株式会社 ジェイペック
細骨材	LS	石灰石砕砂 (洗浄により 150 μm 以下を除く)	奥多摩工業株式会社
	SS	現場細骨材	宮城県阿武隈川
粗骨材	SG	現場粗骨材 (粗骨材最大寸法:20 mm/13 mm の 2 種類)	宮城県阿武隈川
混和剤 (空気連行剤)	AE	JIS A 6204 「コンクリート用化学混和剤」 AE 剤 (I 種)、主成分は天然樹脂酸塩	山宗化学株式会社

表 3.2-25 分析項目と対象試料

分析項目		対象試料				
		SG	SS	LS	OPC	FA
組成 分析	粉末 X 線回折 (XRD)	—	—	—	○※1	○※1
	蛍光 X 線分析 (XRF)	—	—	—	○	○
物理 特性	密度	○	○	○	—※2	—※2
	吸水率	○	○	○	—	—
	粒度分布 (粗粒率)	○	○	○	—	—
	実積率	○	—	—	—	—

※1 リートベルト法による鉱物の定量を実施

※2 メーカー試験成績表の密度の値を使用

2) 分析方法

a) OPC および FA の化学組成 (XRF)

XRF による化学組成分析は、以下の条件で実施した。

- ・ 試料調製：OPC は調整を行わず、そのままの状態ですべて試験に供した。
FA はディスク型ミルにて微粉砕を行い試験に供した。
- ・ 強熱減量：OPC は JIS R 5204 「セメントの蛍光 X 線分析方法」に準拠。
FA は 950 °C 強熱における減量値 (ig. loss)。
- ・ 成分分析：OPC については JIS R 5204 「セメントの蛍光 X 線分析方法」に準拠。
FA については粘土類検量線を用いて蛍光 X 線分析を行った。

装置：株式会社リガク製 蛍光 X 線分析装置 ZSX PrimusIV

b) OPC および FA の鉱物定量 (XRD)

OPC および FA について、特性を把握しておくため、基礎データとしてリートベルト法により鉱物組成の定量分析を行った。

OPC は、そのまま測定に供した。FA は、内部標準として α -Al₂O₃ を内割りで 10 mass% 添加し、十分に均一になるようメノウ乳鉢で混合して測定試料とした。測定装置は、XRD 装置 D8-Advance (Bruker AXS 社製) を用い、以下の条件で測定した。

【使用装置および測定条件】

使用装置	: XRD 装置 D8-Advance (Bruker AXS 社製)
管球条件	: 35 kV-350 mA
ターゲット	: Cu
測定範囲	: OPC は 10~65°、FA は 5~65°
ステップ幅	: 0.023° /step
測定時間	: 0.13 秒/step

リートベルト解析は、星野らの手法[92]に準拠した。解析ソフトは TOPAS (Bruker AXS 社製) を用い、以下の定量対象鉱物について定量分析を行った。FA の測定試料には α -Al₂O₃ を混合していることから、各鉱物量は式(3.2-8)より、非晶質量は式(3.2-9)より算出した。

$$H'_x = H_x \times \frac{10}{\alpha - Al_2O_3} \times \frac{100}{90} \quad \text{式(3.2-8)}$$

$$\text{非晶質} = 100 \times (\alpha - Al_2O_3 - 10) \div \left(\alpha - Al_2O_3 \times \frac{90}{100} \right) \quad \text{式(3.2-9)}$$

- H' x : FA 中の鉍物量 (mass%)
- Hx : リートベルト解析で定量した値 (mass%)
- $\alpha - Al_2O_3$: リートベルト解析で定量した $\alpha - Al_2O_3$ の値 (mass%)
- 10 : $\alpha - Al_2O_3$ 混合量 (mass%)
- 90 : 測定試料中の FA 量 (mass%)

【定量対象鉍物】

- OPC : エーライト (C₃S)、ビーライト (C₂S)、アルミネート (C₃A)
 フェライト (C₄AF)、ペリクレーズ (f. MgO)、フリーライム (f. CaO)
 二水石膏 (Gypsum)、半水石膏 (Bassanite)、カルサイト (Calcite)
- FA : 石英 (Quartz)、ムライト (Mullite)、マグネタイト (Magnetite)
 非晶質相 (Glass)、 $\alpha - Al_2O_3$ (内部標準)

c) 骨材の物理特性

コンクリートの調合を設定するうえで必要な物性値として、JIS A 5308 のレディーミクストコンクリート用骨材で定められる粒度分布を満足するよう調整した細骨材および粗骨材について、密度および吸水率を測定した。測定方法は、JIS A 1109「細骨材の密度及び吸水率試験方法」および JIS A 1110「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」に、粒度分布の測定は JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」に準拠した。また、粗骨材については、JIS A 1104「骨材の単位容積質量及び実積率試験方法」に準じて、実積率を測定した。

3) 分析結果

a) OPC および FA の組成分析

OPC および FA の化学組成分析結果を表 3.2-26 に、リートベルト法による鉍物組成の定量分析結果を表 3.2-27 および表 3.2-28 に示す。なお、表 3.2-27 で示した鉍物のうち、セメントの主要成分である C₃S、C₂S、C₃A、および C₄AF 以外の鉍物の定量値の信頼性は低く、参考として記載した。

表 3.2-26 OPC および FA の化学組成分析結果

試料名	ig. loss※	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	合計
OPC	2.26	20.71	5.31	3.08	64.20	0.89	1.94	0.31	0.34	0.32	0.48	0.08	99.92
FA	2.12	63.50	21.86	4.12	3.06	1.10	0.26	0.53	1.05	1.14	0.66	0.03	99.43

※950℃強熱における減量値

(単位: mass%)

表 3.2-27 リートベルト法によるセメント鉱物組成の定量分析結果

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	f. MgO	f. CaO	Gypsum	Bassanite	Calcite
53.5	20.8	9.2	10.3	0.09	0.00	0.18	2.1	4.0

(単位：mass%)

表 3.2-28 リートベルト法によるFA 鉱物組成の定量分析結果

Quartz	Mullite	Magnetite	Glass
17.92	18.66	0.88	62.53

(単位：mass%)

b) 骨材の物理特性

骨材の物理特性の測定結果を表 3.2-29 に示す。

表 3.2-29 骨材の物理特性の測定結果

試料名	表記 記号	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (F. M.)	実積率 (%)
現場粗骨材	SG-2005	2.54	2.45	3.65	6.37	64.9
	SG-1305	2.54	2.45	3.65	5.84	65.1
現場細骨材	SS	2.56	2.49	2.66	2.93	-
石灰石砕砂	LS	2.66	2.63	1.20	2.99	-

② コンクリート試験体の成形

1) コンクリート調合

設定したコンクリートの計画調合を表 3.2-31 に、フレッシュ性状の測定結果を表 3.2-32 に示す。

コンクリートの調合は、1F 工事報告の文献[93]に記された現場コンクリートの調合（表 3.2-30）を参考に設定し、水粉体比（W/P）を 0.55、目標空気量を 4.5±1.5 %とした。空気量の調整には、1F 工事報告の文献と同じ銘柄の AE 剤を用いた。コンクリートの練混ぜには強制パン型ミキサ（公称容量 50 L）を用い、1 バッチの混練量は 30 Lとした。

なお本試験では、表 3.2-31 の調合で粗骨材なしとしたモルタル試料も作製した。モルタルの調合およびフレッシュ性状の測定結果を表 3.2-33 に示す。

コンクリート調合では目標空気量を 4.5±1.5 %としていたことから、コンクリート調合からモルタル調合に換算した空気量（7 %）の±1.0 %となるように、同じ銘柄の AE 剤を用いて空気量を調整した。モルタルの混練方法は JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠し、ホバート式ミキサで練混ぜた（1 バッチの混練量は 2 L）。

表 3.2-30 現場コンクリート調合[93]

適用部位	水 セメント比 (W/C)	単位数 (kg/m ³)				AE 剤 添加量 ^{※2}
		水(W)	セメント ^{※1} (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	
一般構造用	0.55	182	330	790	1000	99 ml

※1 セメント種類はフライアッシュセメント (FAC)

※2 AE (空気連行) 剤として、ヴィンソル (山宗化学株式会社製) を使用
コンクリートの目標空気量は 4.5±1.5 %

表 3.2-31 コンクリートの計画調合

調合名	水 粉体比 (W/P)	細骨材 率 (s/a)	単位数(kg/m ³)						AE 剤 添加率 (P×%)
			水 (W)	粉体(P)		SS	SG-2005	SG-1305	
				OPC	FA				
G. max20 mm	0.55	45.5 %	182	281	49	772	894	—	0.65
G. max13 mm							—	917	0.50

AE 剤は 100 倍希釈し、練混ぜ水(W)の一部として使用

SS : 現場細骨材、SG-2005:粒度が 20~5 mm の現場粗骨材

SG-1305 : 粒度が 13~5 mm の現場粗骨材

表 3.2-32 コンクリートのフレッシュ性状の測定結果

調合名	測定結果		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	練り上がり 温度(°C)
G. max20 mm	16.0	4.8	23.6
G. max13 mm	11.0	5.0	23.4

表 3.2-33 モルタルの調合およびフレッシュ性状の測定結果

調合名	水粉 体比 (W/P)	砂粉 体比 (S/P)	FA 置換率 (%)	2 L 練りの計量値 (g)						フレッシュ性状	
				水 (W)	P		S		AE 剤 添加量 [※]	空気量 (%)	単位容積 質量 (kg/L)
					OPC	FA	LS	SS			
OPC-LS	0.55	2.48	0	568	1034	—	2566	—	54	7.0	2.08
FAC-LS		2.44	15		880	154	—	2518	120	6.0	2.06
FAC-S1		2.34			880	154	—	2424	80	6.2	2.00

※AE 剤はヴィンソル (山宗化学株式会社製) を 100 倍に希釈して使用

AE 剤量は目標空気量 7.0±1.0 %となるよう添加 (AE 剤の計量値は 100 倍液の量で表記)

LS : 石灰石砕砂、SS : 現場細骨材

2) 成型試験体

練混ぜ作業および試験体成形の状況を図 3.2-21 に示す。令和 2 年度は、試験体の成形および初期養生までを行い、ひび割れの導入等の操作は、令和 3 年度に実施する。



(a) コンクリートの練混ぜ状況



(b) モルタルの練混ぜ状況



(c) コンクリートのフレッシュ性状状況



(d) モルタル混練後の空気量測定状況



(e) コンクリートの型枠への打設状況



(f) モルタルの成型容器への打設後状況



(g) コンクリートの打設後状況

図 3.2-21 練混ぜ作業および試験体成形の状況

(4) まとめ

3.2.2項では、ひび割れ部を考慮した物質移行の評価に資するデータ取得と、ひび割れを含むコンクリートの物質移行のモデル化を目的に、ひび割れが生じたコンクリートにおける、物質移行に関する既往の研究事例を調査し、モデル化に必要なデータ取得のための試験およびモデル化の現状に関する情報を収集、整理し、試験体の作製条件等について検討した。

また、既往研究の操作方法を参考に、ひび割れ導入の予察試験を行い、導入後の試験片について表面観察と X 線 CT でひび割れ状態を確認し、概ね目標とするひび割れ幅 (0.05～0.5 mm) を導入できる見通しを得た。

さらに、試験体作製に使用する材料の分析を行うとともに、コンクリートの調合を選定し、試験体を成形した。令和 2 年度は、試験体の成形および初期養生までを行い、ひび割れの導入等の操作は、令和 3 年度に実施する。

3.3 実際の核種の種類・濃度を考慮した収着/浸透挙動評価

3.3.1 低濃度領域での¹³⁷Csと⁹⁰Srの競合浸透の評価

(再委託先：国立環境研究所、北海道大学)

(1) はじめに

前研究において、CsとSrの溶液へのモルタルの浸透実験を行い、元素浸透の状況を、IPを用いたオートラジオグラフィにより検討した。この検討は、東北大学および名古屋大学の施設を用い、国立環境研究所の支援の下に実施した。本研究では、北海道大学の施設を用い、ひび割れたコンクリートへのCsとSrの浸透をオートラジオグラフィにより可視化する。このためには、2つの課題がある。1つは異なる施設での浸透実験とオートラジオグラフィの準備であり、もう1つはより大きなコンクリート試料の加工ノウハウの獲得である。

まず北海道大学の施設でこれまで開発してきた放射性同位元素（以下、「RI」と略す。）を用いたオートラジオグラフィを実施する準備である。前研究では試料加工の難しさからモルタルを用いた試料を用い、種々の材料特性、すなわちセメント種類、骨材中の粘土、浸漬溶液の濃度、CsとSrの競合、中性化とCa溶脱の変質、乾燥吸水の格影響因子について検討してきた。そこで、北海道大学は、ひび割れたコンクリートに事故後の物質濃度に近いCsとSrが浸透する状況を、IPにより可視化する準備として、IPによる¹³⁷Csと⁹⁰Srの定量分析の基礎技術の確認を行った。評価対象は、¹³⁷Csと⁹⁰Srを収着する状態となったコンクリートの浸漬試料で、浸漬期間が数か月以上のものを対象とし、短期間での浸漬状況と比較検討した。検討に当たっては、国立環境研究所は、北海道大学で行う浸透試験とIPを用いた定量評価に関し、北海道大学において実験実施を支援した。

上記の検討では、試料寸法2×5×5 cmのモルタルを用いた。しかし、本研究は「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」であり、実機環境を考慮した鉄筋コンクリートとは、ひび割れを有するコンクリートへの事故後における濃度領域でのCsとSrの浸透を評価する必要がある。そこで、国立環境研究所は、令和3年度以降測定する（実施場所は北海道大学と一部国立環境研究所）、ひび割れ部材へのCsとSrの浸透に関する実験実施に必要な関連情報を提供することとした。

モルタルとコンクリートの違いは、粗骨材の有無である。モルタルは粒径5 mm以下の細骨材とセメントペーストからなるが、コンクリートはモルタルに粒径5 mmを超える粗骨材（通常の建設物では最大粒径20 mm）を含むため、試料の均一性を考慮すると、モルタルよりも大きな試料を用いる必要がある。粗骨材寸法を20 mmとすると、厚さ2 cmの試料を作製すると、1つの粗骨材が試料を貫通する場合も生じ、適切なイオン浸透評価ができない。少なくとも4 cm程度の厚さが必要である。一方で、RI実験では、可能な限り少量のRIとすることが望ましく、かつRIの飛散による実験室汚染を抑制しなければならない。したがって、非RIのコンクリート実験のような数十 cmの試料を、冷却水を用いたコンクリートカッターで加工するような操作は現実的ではなく、モルタルの加工に用いた小型精密切断機でコンクリートを切断する手順の設定が求められる。このため、北海道大学において国立環境研究所とともに、この検証を行った。

(2) CsとSrのモルタルへの長期浸透評価によるオートラジオグラフィ技術の整備

① 試料

長期浸漬に用いた試料は前研究で用いたものであり、浸漬材齢28日と56日で試料を加工した残りを同一の溶液に継続して浸漬したものである。表3.3-1に前研究で用いた試料

の調合[2]を示す。LSは洗浄により微粉を除いた石灰石砕砂であり、S1は1Fに使用されたものと考えられる川砂である。セメント種類はOPCを用いた。変質状態としては、炭酸化を考慮し、フェノールフタレイン溶液噴霧による中性化深さは、OPC-LSでは5 mm、OPC-S1では3 mmであった。飽水試料は水没状態で16時間減圧吸水させた。乾燥試料は105℃で恒量になるまで乾燥した。

表 3.3-1 試料の調合

調合名	水粉体比	骨材粉体比	4 L 練りの計量値 (g)				
			水	OPC	LS	S1	AE 剤
OPC-LS	0.55	2.39	1136	2064	4936	—	53.3
OPC-S1					—	4936	16.0

② RI 浸透試験

RI 浸漬実験の条件を表 3.3-2 に示す。濃度レベルとして 5 桁にわたる 3 水準、 10^{-1} M (100 mM)、 10^{-3} M (1 mM)、 10^{-5} M (10 μ M) とした。 10^{-5} M が事故直後の現実的な汚染水中の濃度に相当する。Cs と Sr は令和元年度の検討から共存効果がないと考えられるため、それぞれの浸透をより明確に理解するため、独立の溶液とした。以下に、前研究の報告書[2]から浸漬試験を開始した時点での情報を転載する。

RI としては、公益社団法人日本アイソトープ協会から入手した 1.002 MBq の ^{137}Cs を含有する 0.05 mg/L の CsCl 溶液 5 mL、および 0.964 MBq の ^{90}Sr を含有する 0.05 mg/L の SrCl_2 と 0.05 mg/L の YCl_3 混合溶液 5 mL を使用した。この溶液を希釈し、それぞれ 2500 Bq/mL として浸漬溶液とした。ただし、OPC-LS-20-1y 炭酸化+乾燥（以下、モルタル試料は養生条件を省略して表記する）の水準⑩については、500 Bq/mL とした。全体の濃度は、安定同位体の試薬 CsCl、 SrCl_2 を用い、浸漬液の濃度を調整した。

浸漬液の量は、100 mM および 1 mM の水準では 10 mL、10 μ M の水準では 100 mL とした。ただし、OPC-LS 炭酸化+乾燥の水準⑩の CsCl 溶液については 500 mL、同⑪の SrCl_2 溶液については 600 mL とした。

炭酸化後の試料は、試料表面が疎水化し、水に浸漬した条件では吸水が起きなかったため、RI 試験前に減圧下で 40 分および 16 時間の吸水処理を行った。

溶液はアルミ箔をラミネートしたプラスチック袋（アルミバッグ）に入れ、試料を浸漬試験に供した。IP 試験は、特定の浸漬期間において試料を切断し測定するため、試験中の浸透状況は評価できない。しかし、RI の特性上、浸漬期間中においても溶液と試料表面の放射線量率計測で、RI の移行状況が推定できる。そこで、種々の浸漬期間において、アルミバッグの側面と試料表面の線量率を GM 管サーベイメータ（以下、「GM 管」と略す。）と NaI シンチレーションサーベイメータ（以下、「NaI シンチレータ」と略す。）により計測した。

浸漬期間は、本研究では、健全飽水試料では 406 日、炭酸化飽水試料では 349 日、乾燥炭酸化試料では 255 日とした。所定の浸漬期間経過後に、試料表面を鉄粉入りエポキシ樹脂で被覆したのち、厚さ 1.6 mm の薄片を切り出した。薄片中の水分量が IP 測定に影響するため、40℃において 1 時間減圧乾燥を行ったのちに IP 暴露した。

使用した IP は GE ヘルスケア・ジャパン株式会社製 BAS-IP MS である。データの読出しは、GE ヘルスケア・ジャパン株式会社製 Typhoon FLA7000 である。一連の流れを図 3.3-1

に示す[2]。Typhoon FLA から読み出したデータは、GE ヘルスケア・ジャパン株式会社の Image Quant TL8.2 を用いて PSL 値として読みだした。濃度プロファイルは、試料の深さ方向 20 mm 全面を対象に、深さ方向の 200 メッシュの分割を行うことで、1 次元プロファイルを得た。

GM 管は主に物質内での減衰が大きい β 線を検出するため表面近傍における β 線放射核種の存在を評価し、NaI シンチレータは主に物質透過性が高い γ 線を検出するため試料全体の γ 線放射核種の存在を評価する。よって両者の測定値を比較することで、浸透深さの推定が可能である。溶液側の線量率では、NaI シンチレータでは、Cs の総量の指標を得ることができ、GM 管では Cs の濃度の指標を得ることができる。溶液では、溶液量が一定である場合、Cs 総量と Cs 濃度は直線関係があり、NaI シンチレータと GM 管の測定は一致する。モルタル試料の測定では、NaI シンチレータでは Cs 浸透総量、GM 管では Cs の表面濃度の指標と異なる情報を得ることができる。

これらの計測では、検出器と試料の距離と相対的位置関係の影響を受ける。モルタル試料の測定面は平面であるため比較的測定再現性が高いが、アルミバッグ底面は凹凸があり、測定再現性に乏しい。本来は、液体をバッグから採取し、別途再現性を確保できる容器に移してから測定することが好ましいが、溶液量が少ないため、この操作ができず、浸漬液の放射能測定には誤差が含まれる。

IP による計測は、浸漬試験終了後のある時点での結果であり、そこに至る核種の浸透挙動は分からない。そこで、その時点に至るまでの核種の表面収着と浸透の概要を、GM 管と NaI シンチレータによる計測から補助的に推定した。また、RI を用いた浸漬試験の制約から、液相量を十分に確保できず、浸漬試験中に液相側の拡散種の濃度低下、および試料の出し入れによる少量の浸漬溶液の損失が起きることが予想され、この評価にも GM 管および NaI シンチレータによる濃度計測は有効である。

IP へは、別途作製した 1 MBq/kg の ^{137}Cs 、もしくは 0.33 MBq/kg の ^{90}Sr を含有するセメントペーストを同時に暴露し、評価対象試料の計数値を ^{137}Cs 濃度換算した。IP 試験では、RI は安定同位体に比べ圧倒的に低濃度であり、物質濃度としては考慮する必要はない。RI は浸透位置を評価するために使用している。試験条件としては、Cs 濃度を制御しており、その結果としては Cs 濃度プロファイルとなる。ここで、浸漬溶液では RI である ^{137}Cs と安定同位体である ^{133}Cs の関係が分かっているので、IP 測定による ^{137}Cs 濃度の測定結果を、 ^{133}Cs 濃度に換算することができるため、結果の最終的表記は Cs 濃度とした。

表 3.3-2 長期浸漬の実験水準[2]

セメント 種類	骨材 種類	変質状態	浸漬液濃度設定 (表中の()は対象とする移動核種)					
			10^{-1} M (100 mM)		10^{-3} M (1 mM)		10^{-5} M (10 μM)	
OPC	LS	健全(飽水)	⑩(Cs)	-	⑪(Cs)	-	⑫(Cs)	-
		炭酸化(飽水)	⑬(Cs)	-	⑭(Cs)	-	⑮(Cs)	-
		炭酸化+乾燥	-	-	-	-	⑯(Cs)	⑰(Sr)
	S1	健全(飽水)	⑱(Cs)	-	-	-	-	-
		炭酸化(飽水)	⑲(Cs)	-	-	-	-	-

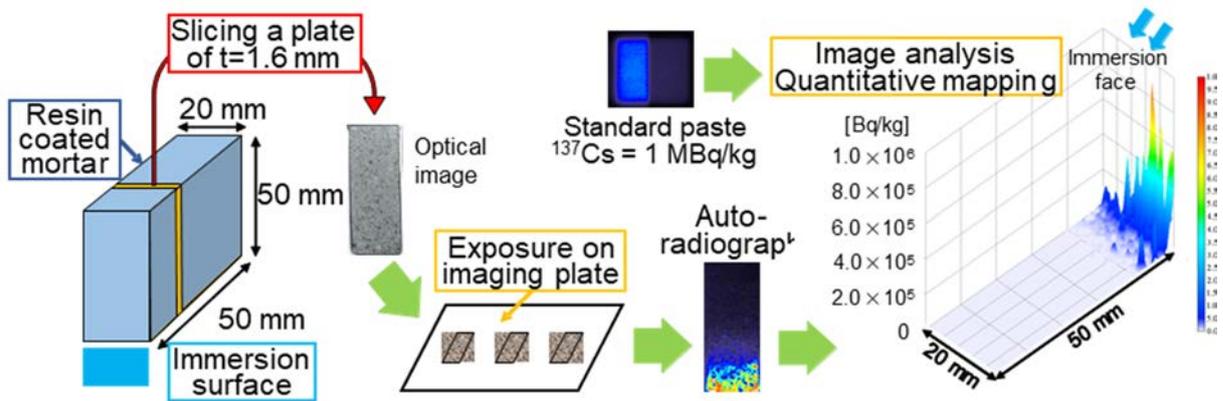


図 3.3-1 浸漬試料からの薄片の切出しと IP 測定の流れ[2]

③ 結果と考察

1) オートラジオグラフィ

図 3.3-2 に長期浸漬試料のオートラジオグラフィの結果を示す。乾燥炭酸化 LS 試料を Sr 溶液に浸漬した試料は、⁹⁰Sr の表面濃縮が著しく、同時に IP 上に暴露すると他の試料の測定結果に影響を及ぼしたため、別途測定し、同じ図に追加表示した。

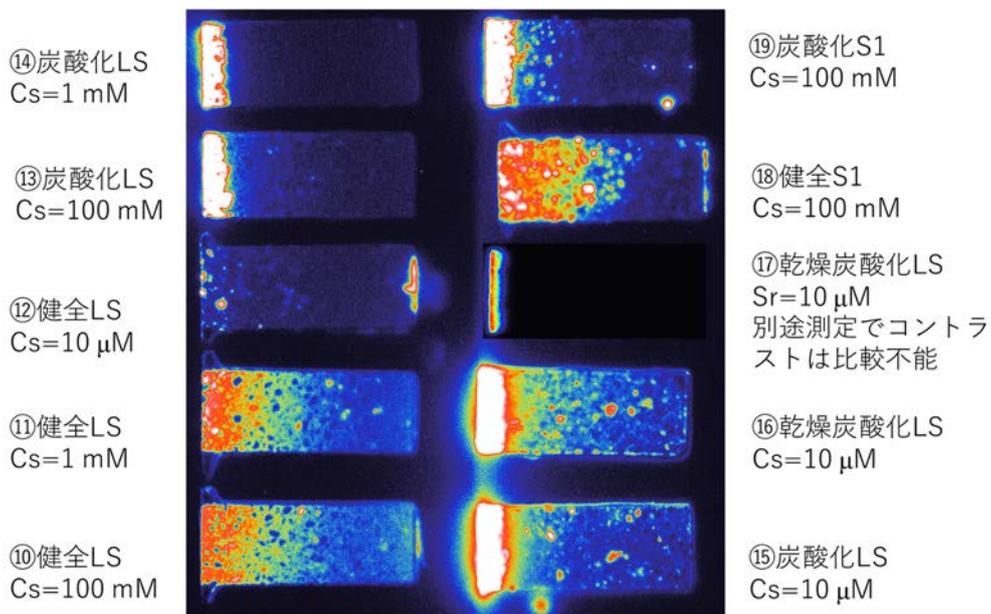


図 3.3-2 長期浸漬試料のオートラジオグラフィ
試料寸法：2×5 cm、左が浸透表面

2) 健全飽水試料

図 3.3-3 に健全飽水試料の Cs 浸漬溶液の線量率に関する測定結果を示す。ばらつきは大きいものの、10 μM の水準では期間を通じ一定であったが、他の 100 mM と 1 mM の水準では濃度低下が認められた。これらの傾向は、NaI シンチレータによる γ 線計測でも、GM 管による β 線測定でも同様であった。

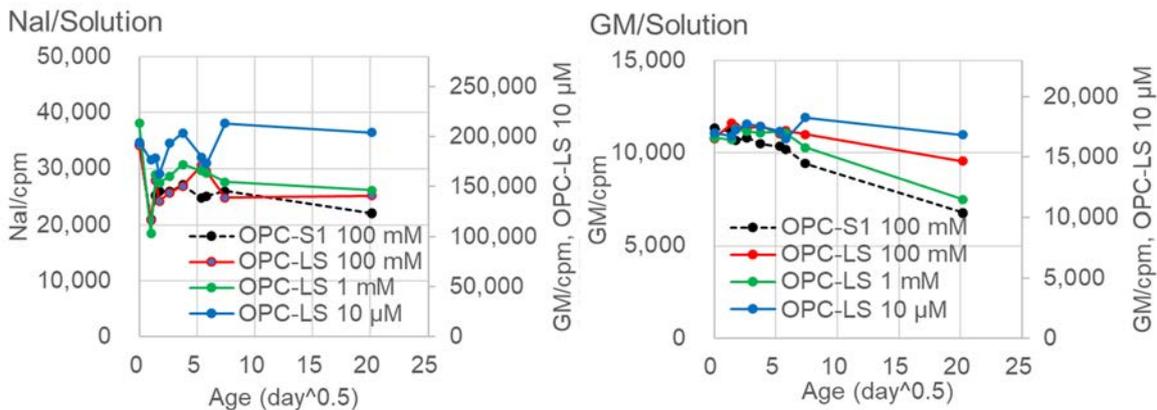


図 3.3-3 健全飽水試料の浸漬溶液の線量率測定 (Cs 溶液)
 NaI シンチレータによる γ 線測定 (^{137}Cs の量の指標) (左)
 GM 管による β 線測定 (^{137}Cs の濃度の指標) (右)

図 3.3-4 に健全飽水試料を Cs 溶液に浸漬した際の、表面線量率の経時変化を示す。56 日材齢までは、NaI シンチレータによる γ 線強度は材齢の平方根に比例しており、Cs 浸透が拡散であることを示唆する。406 日材齢では、拡散則から外れて増加速度が低下した。特に、10 μM の水準では β 線強度が低下しており、Cs の試料からの溶脱が起きていると考えられる。GM 管による β 線測定の結果は材齢 1 日までに急激な増加を示し、10 μM を除き、その後は徐々に増加した。10 μM の長期材齢では、 γ 線と同じく、強度が低下した。

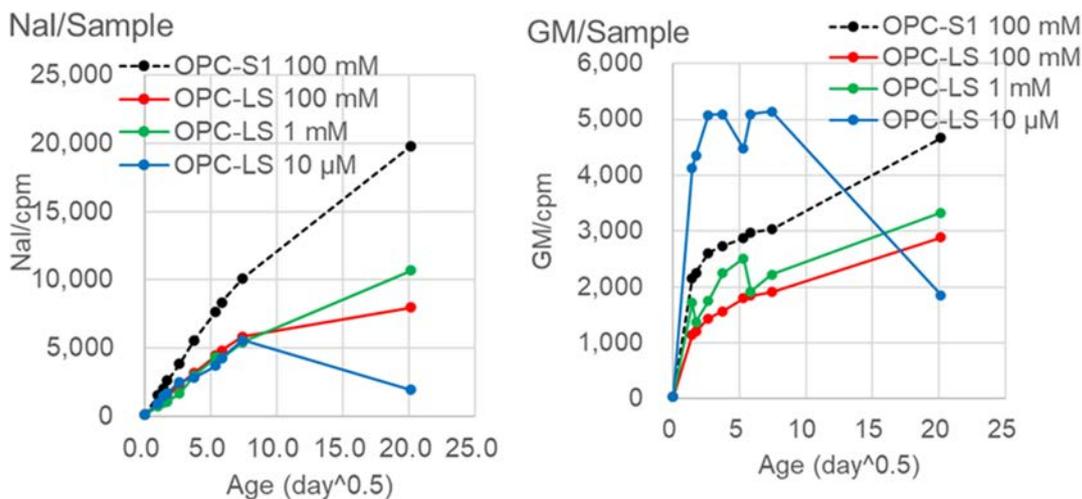


図 3.3-4 健全飽水試料の浸漬面の線量率測定 (Cs)

図 3.3-5 に Cs 浸透プロファイルを、56 日材齢と合わせて表示する。56 日材齢では、15 ~ 20 mm まで Cs が浸透した濃度勾配をもつプロファイルが得られたが、406 日では濃度勾配は緩やかになり、Cs が試料深部に到達したことが分かる。表面濃度は材齢の経過とともに増加したが、10 μM の水準のみでは表面部分の濃度が低下し、全体に勾配が小さいプロファイルとなった。この原因を推定すると、セメント中には 1~10 ppm 程度の Cs が含有されており、空隙水中の濃度に換算すると 100 μM 程度になる。初期はすでに含有されていた

3.3-5

^{133}Cs との同位体交換による ^{137}Cs の浸透プロファイルが得られたと推定されるが、長期間が経過し、浸漬液と試料中の Cs が相互拡散により平衡状態となり、試料中の ^{137}Cs の濃度は全体的に低下した可能性を考慮することができる。

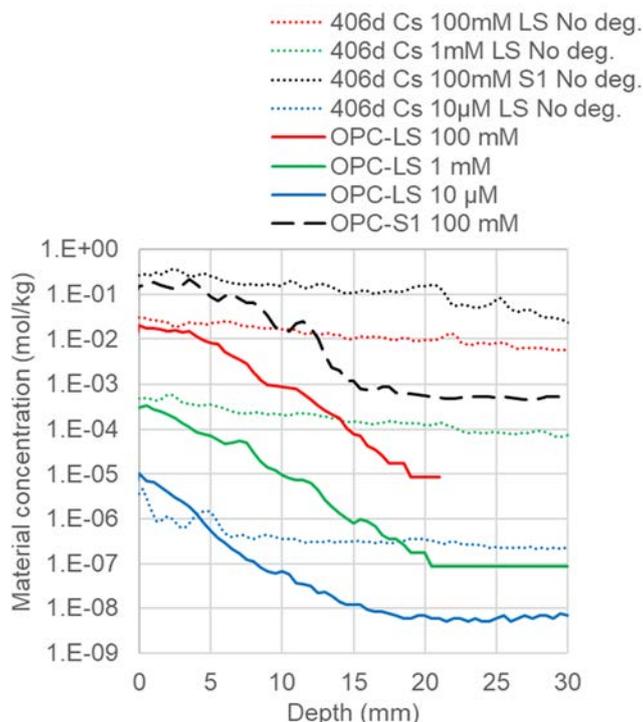


図 3.3-5 健全飽水試料の Cs 浸透プロファイル

実線：材齢 56 日

点線：材齢 406 日

3) 炭酸化飽水試料

図 3.3-6 に炭酸化飽水試料の浸漬溶液の線量率測定結果を示す。前記の健全飽水の場合とは異なり、早期のうちから急激に線量率は低下し、Cs が試験体に吸着されたものと推定される。特に 1 mM の水準は 28 日以降、ほぼ一定となった。その他の水準では、349 日まで継続的に濃度は低下した。

図 3.3-7 に炭酸化飽水試料の浸漬面の線量率測定結果を示す。NaI シンチレータによる γ 線計測では、浸漬溶液の線量率変化と対応して、1 mM の水準は早期で飽和に達し、100 mM の水準では経時的な増加が認められた。時間の平方根に比例的であり、浸透は拡散律速と考えられる。10 μM は線量率が高すぎて計測限界を超えた数値であり、初期値以外は Cs 浸透を表していない。

GM 管による測定では、100 mM については、初期材齢で表面濃度は 1 日浸漬で急増し、その後の増加は緩やかになった。なお、1 mM と 10 μM の水準は線量率が高すぎて測定範囲外となり Cs 濃度を示していない。

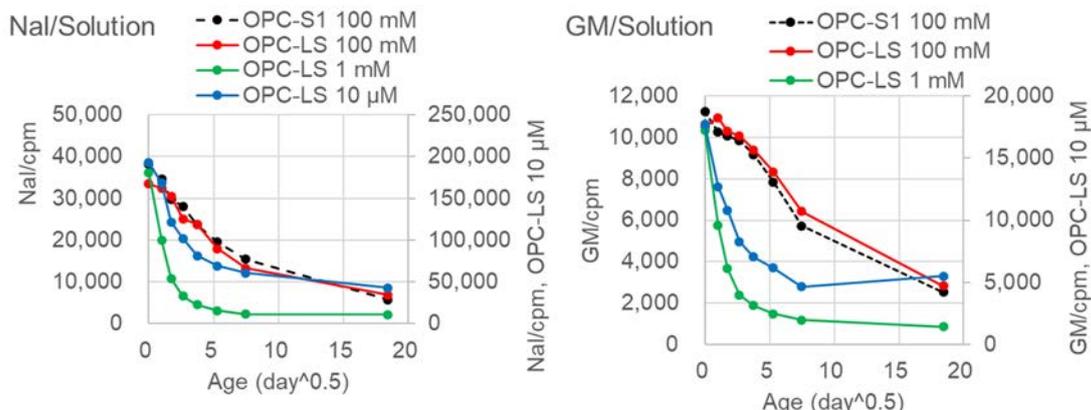


図 3.3-6 炭酸化飽水試料のCs浸漬溶液の線量率測定

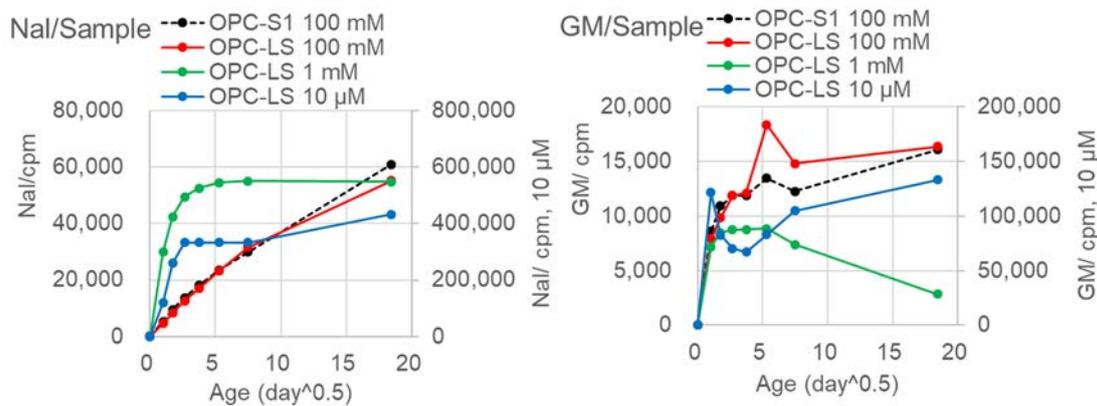


図 3.3-7 炭酸化飽水試料のCs浸漬面の線量率測定

図 3.3-8 に、炭酸化飽水試料の浸透プロファイルを示す。炭酸化領域 5 mm 程度において、56 日材齢と同じく 349 日材齢でも、深部よりも 1~2 桁高濃度となった。349 日材齢では深部については全体的に Cs 濃度が高くなっており、表層で高濃縮は起きているものの、深部での濃度も 1~2 桁高くなっており、深部までの浸透が炭酸化試料においても起きていると考えられる。ただし、これは健全なセメントペースト、骨材ともに、Cs 吸着能が低い場合の結果である。Cs 吸着能がある S1 (現場骨材である川砂) では、微粉を除去した LS (石灰石) よりも約 1 桁高濃度であり、深部への浸透は限定的である結果となった。吸着物質の存在は深部への浸透へ影響している可能性があり、実部材で使用された骨材 (粗骨材を含めて) を用いた検討が望ましい。

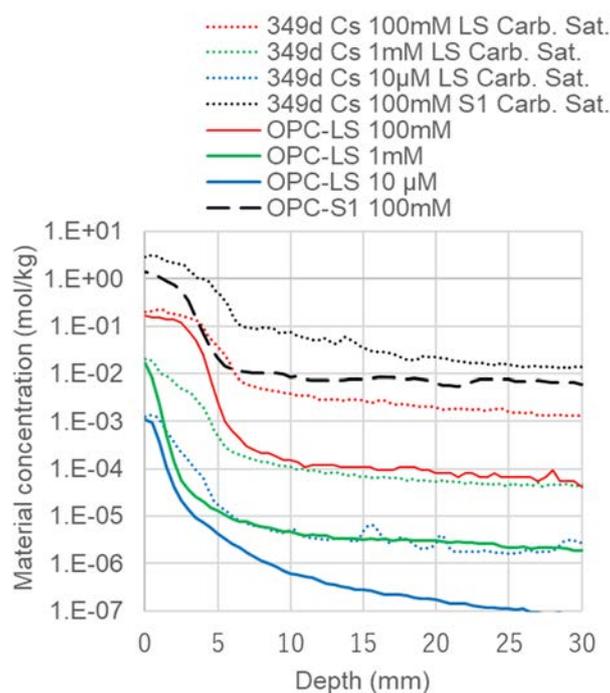


図 3.3-8 炭酸化飽水試料の Cs 浸透プロファイル
実線は短期材齢(56 日)

4) 炭酸化乾燥試料

セメントが炭酸化することで、極めて高い Cs 吸着能が現れることが分かったが、この吸着現象と乾燥試料への水の移流との競合を調べるため、前研究[2]において促進中性化した試料を乾燥させ、そこに Cs と Sr の溶液を吸水浸透させた。炭酸化試料を 105 °C で恒量になるまで乾燥したところ、試料表面が疎水化し、浸漬では吸水しなかったため、浸漬状態で、試料と浸透液を入れたアルミバッグごと、ロータリーポンプによりいったん減圧し、その後、圧力開放し溶液を浸透させた。前研究では短時間の 40 分と 16 時間での減圧吸水の結果を示したが、令和 2 年度は常圧で浸漬を継続し、浸透状況を調べた。

図 3.3-9 に炭酸化乾燥試料への Cs と Sr の浸透プロファイルを示す。浸透開始後、40 分、16 時間、255 日時点でのプロファイルを示す。Cs を見ると、表面濃度は 1 桁高くなり、炭酸化深さの 5 mm にかけて、急激な濃度減少が起きるのは短期材齢と同様である。ただし短期材齢では、バックグラウンドレベルと考えられる位置まで 2~3 桁程度の濃度低下が認められたが、255 日材齢では濃度低下は 2 桁であり、深部まで Cs が到達した可能性がある。

Sr については 255 日材齢においても表面濃度は数割増加したのみであり、浸透プロファイル自体も短期材齢と近いものであり、炭酸化フロント以深ではバックグラウンドと考えられるレベルで一定となった。すなわち、Sr の浸透は炭酸化領域にとどまり、255 日においても限定的であると考えられる。

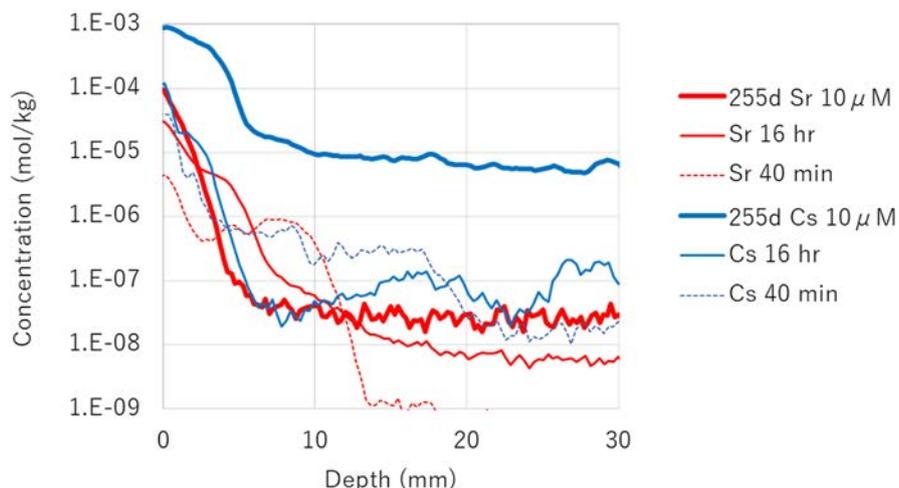


図 3.3-9 炭酸化乾燥試料の Cs、Sr 浸透プロファイル

(3) コンクリート試料加工手順の開発

① 概要

国立環境研究所は、北海道大学で行う浸透試験と IP を用いた定量評価に関し、北海道大学において実験実施を支援し、令和 3 年度以降測定する、ひび割れ部材への Cs と Sr の浸透に関する実験実施に必要な関連情報を提供し、実際にコンクリートへの元素浸透プロファイルを測定するための試料切断手順の検討、ならびにコンクリートへの Cs と Sr の浸透実験および浸透評価を行った。

② コンクリートブロック加工方法の設定

最終的にひび割れ部材への ^{137}Cs と ^{90}Sr の浸透に用いる試料は、コンクリートである。よって、これまで IP 測定の対象としてきたモルタル試料と比較し、以下に示すようにより大きくなり、IP 測定に供するための加工が困難になると予想された。

モルタル試料 : 2×5×5 cm

コンクリート試料 : 4×6×6 cm

RI を浸透させていないコンクリートブロックを準備し、精密切断機で浸透面を切断により得る作業を行った。試料が大型になると、均一な分析面を得るための加工に特別な配慮が必要であった。モルタル試料に使用してきた装置が小型試料の精密加工用であり、6 cm 角断面の試料を加工するように設計されていない。そこでまず、6 cm 角試料の保持治具を作製した。さらにブレードの大きさには制約があるため、一度で 6 cm を切ることができず試料を 180 ° 回転させ、両側から切断する必要がある。

この精密切断機は、切断ブレードに負荷される荷重を、カウンターバランスにより過度にならないようにする構造となっている。既存のカウンターバランスにより試料切断を試みたところ、試料にブレードが斜めに入り、180 ° 回転させて切断すると、中央部分に切断の段差が数 mm 発生し、平面を得ることができず、IP に切断面を密着させることが難し

かった。ブレードの回転速度を遅くしても解決しなかった。これはカウンターバランスが軽すぎて、ブレードに過度の荷重が作用し、切断中にブレードが湾曲して試料に侵入していったためである。

そこで、図 3.3-10 に示すように、試料と同寸法のコンクリート試料をカウンターバランスとして使い、ブレードにかかる荷重を制御したところ、ある程度良好な切断面を得ることができた。ただし、加工時間は、1 断面を得るために 2 日を要する。この条件で、モルタル試料で得られていた 1.6 mm 厚さの薄片が採取できるかどうかはさらに検討が必要である。



図 3.3-10 4×6×6 cm コンクリート試料の切断状況

③ コンクリートブロックの短期浸漬試験

令和 3 年度以降、ひび割れたコンクリートへの低濃度領域での Cs と Sr の浸透を IP により評価する予定であり、コンクリートの切断手順については前記のように実施可能な見通しを得たので、実構造物から採取したコンクリートコアから分析可能な寸法の直方体を加工し、浸漬試験を試みた。

1) 試料

コア採取した構造物は、昭和 29 年竣工の RC 橋であり、湾岸部から 200 m 程度の河川に存在していたものを、撤去時に一部を切断し国立大学法人九州大学に移設されたものである。コア採取は九州大学工学部佐川康貴准教授らの協力を得て実施した。採取したコア寸法は $\phi 100 \times$ 約 250 mm である。コア採取の状況を図 3.3-11 に示す。フェノールフタレインの散布により中性化領域を測定したところ、約 40 mm であった。コンクリートの中性化は、大気中の二酸化炭素によるもののほか、河川水や雨水や海水による Ca の溶脱、工場など酸性溶液の影響などでも起き得る。この実構造物の場合は、橋梁であるので二酸化炭素と雨水の影響、すなわち炭酸化と Ca 溶脱が同時に作用し、変質しているものと考えられる。

浸漬したコンクリート試料は、炭酸化している表層を含む 4×6 cm 表面で、深さ 6 cm の表層部分の試料、および同寸法で中性化の影響がない深さ 100 mm の以深の深部の 4×6×6 cm の試料である。なお、構造物表層はコンクリートの仕上げ面であり、粗骨材は露出せず、モルタルとなっている。



図 3.3-11 実構造物 (RC 橋の橋桁) からのコアサンプル

(左) コア抜き状況

(中央) 採取コア (直径 10 cm) ヘフェノールフタレインを散布した状況 (左が表面)

(右) フェノールフタレインを散布したコアの側面展開写真

(左が表面で、4 cm 程度の非発色部分が中性化領域)

2) 浸漬試験

10 μM の CsCl ならびに SrCl_2 溶液を浸漬液とした。それぞれ、 ^{137}Cs と ^{90}Sr により 198 Bq/mL、275 Bq/mL の標識を行った。浸漬試験は 10 L のポリエチレン製広口瓶内で実施し、浸漬液の量は 2.5 L とした。表層部分と深部の試験体は、同じ広口瓶に浸漬した。これは、変質試料において急速にイオン吸着が進むため、異なる広口瓶に浸漬すると外部のイオン濃度に差が出ることを避けることを考えたためである。

測定は、試料表面と溶液の線量率測定としたが、試料表面には想定以上に Cs と Sr の吸着が発生し、NaI シンチレータおよび GM 管の測定範囲を超え、評価できなかった。溶液はろ紙を敷いた直径 2 cm のプラスチックシャーレに 2 mL の溶液をサンプリングし、20 分間計数し、バックグランドを除去したのちに評価した。

コンクリート試料は、浸漬後、試料表面の 1/3 (1.3×6 cm) に鉄粉入りエポキシ樹脂を塗装し、2/3 (2.6×6 cm) は追加の浸漬を行うために養生テープで被覆し、切断した。IP 測定は、この切断表面にて行った。

3) Cs 溶液への浸漬結果

コンクリート試料を CsCl 溶液に浸漬した際の浸漬溶液の線量率変化を図 3.3-12 に示す。NaI シンチレータによる γ 線と GM 管による β 線の係数値は一致し、材齢とともに線量率は低下し、溶液中の Cs 濃度が徐々に低下したことが分かる。現象は初期により急速に進み、16 日までに半減したが、その後 68 日では初期の 40 %であり、減少幅は小さくなった。

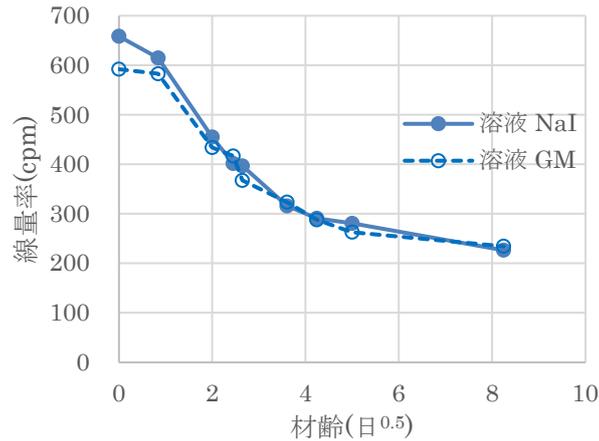


図 3.3-12 CsCl 溶液への浸漬試験時の浸漬液の線量率変化

図 3.3-13(a)に、浸漬材齢 25 日におけるコンクリート表面の IP 像(高濃度のため 30 分のみの暴露)、図 3.3-13(b)に深部コンクリートの切断面の写真、図 3.3-13(c)に図 3.3-13(a)中の線に対応した PSL 値のラインプロファイルを示す。図 3.3-13(a)右に示す構造物コンクリートの表面は、モルタル仕上げになっており骨材そのものは見えない。このモルタル部分には多量の Cs が吸着した。1 MBq/kg に調整したセメントペーストとの比較からコンクリート表面の ¹³⁷Cs 濃度は 73 MBq/kg となった。これを Cs 濃度換算すると 3.7 mM/kg である。10 μM の溶液から炭酸化および溶脱したコンクリート表面には、分配比 740 で Cs が吸着したことになる。前研究での炭酸化飽水試料での分配比は 400 であったので、溶脱の効果により分配比は増加したものと推定される。

図 3.3-13(a)左は変質影響がない深部のコンクリート切断面への Cs 吸着を示す IP 像である。赤い部分は安山岩と考えられる粗骨材であり、斑晶部分に Cs の濃縮が認められ、セメントペースト部分の濃度は比較的低い。これは図 3.3-16(c)左のラインプロファイルからも分かる。中央の骨材における Cs 濃度は 1.8 mM/kg であり、表面部分よりは低濃度ではあるが、斑晶部分の斜長石が変質して生成した粘土鉱物に選択的に Cs が吸着された可能性がある。セメントペースト部分の Cs 濃度は 50 μM/kg、分配比は 10 であり、前研究の石灰石モルタルの 1 よりも大きな値となった。これは、セメントペースト部分にも骨材由来の粘土成分が実コア試料には含有されていることが原因である可能性がある。

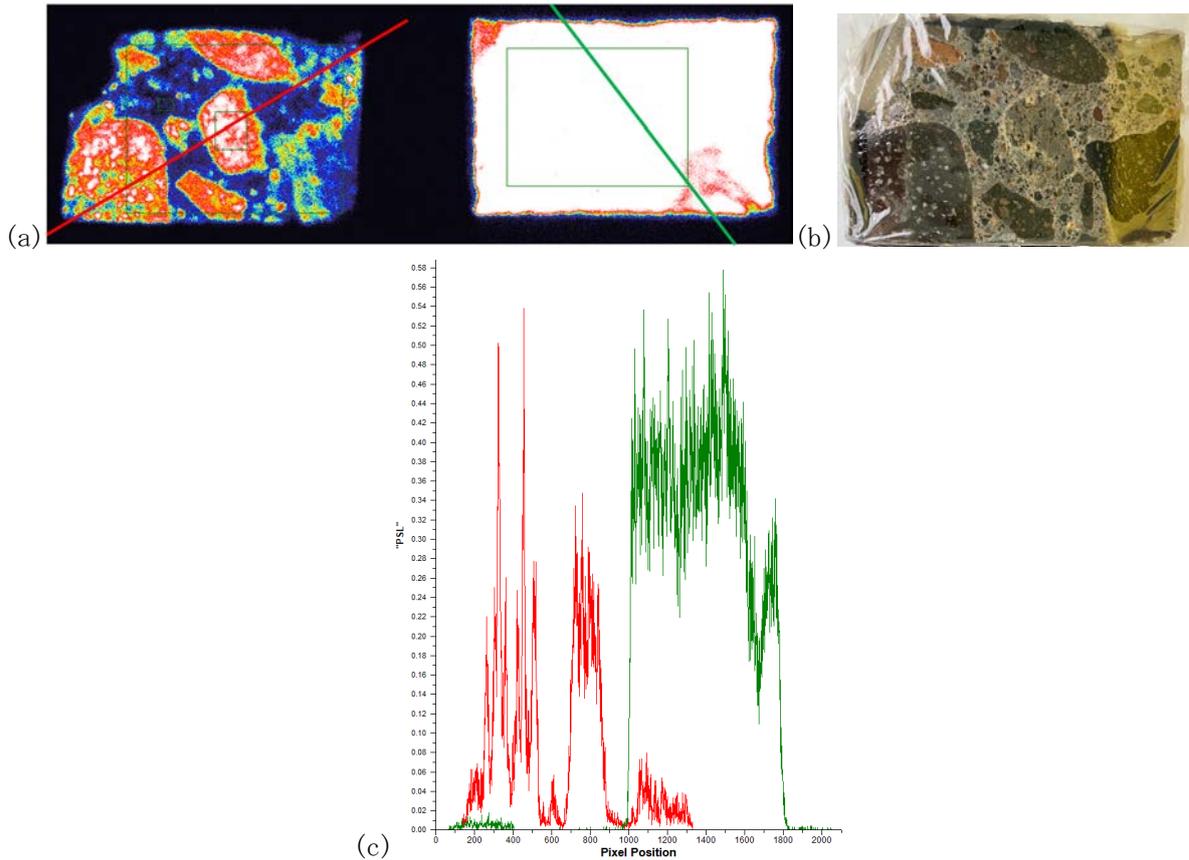


図 3.3-13 実構造物コンクリートコア試料 (4×6 cm) 浸漬表面の Cs 吸着状況
 (a) IP 像 (左) 深部コンクリートの切断面、(右) 炭酸化した部材表面
 (b) 深部コンクリートの浸透面の写真
 (c) PSL 値のラインプロファイル ((a)の線的位置に対応し、赤線は変質のない
 深部コンクリート表面、右側の緑線はコンクリートコア表層、左下部の緑線は
 別途作製した ^{137}Cs 1 MBq/kg のセメントペースト)

図 3.3-14 に変質していない深部コンクリートを 10 μM -CsCl 溶液に 25 日間浸漬した場合の、浸透状況を示す。図 3.3-14(a)の IP 像では、強度が強い点が骨材に相当し、弱い点がペーストに相当する。Cs は表層のみに存在しているようである。図 3.3-14(b)にペースト部分の PSL 値のラインプロファイルを示す。図 3.3-14(c)には前研究で測定した飽水炭酸化石灰石モルタルを同濃度の溶液に 56 日間浸漬した場合を示す。炭酸化領域の物質移動は健全部分よりも相当に早く、Cs は容易に炭酸化フロントまで、石灰石砕砂の部分 avoiding ペースト部分を内部まで浸透することが分かっている[42]。しかし、このような状況は本検討では観察されなかった。図 3.3-14(b)の PSL 値のラインプロファイルは一見浸透プロファイルのように見えるが、表面の ^{137}Cs 濃度が高すぎて、高濃度部分からハローとなって表れていることから、高濃縮した部分からの γ 線の影響を受けている可能性もあり、Cs が浸透したのかどうか確実なことは言えない。なお、浸漬液中の Cs は残存しており、全量が吸着されたわけではない。本検討で用いたコンクリートは、炭酸化および Ca 溶脱したペースト部分と同等の吸着能を骨材が有しており、これら、Cs 吸着能が高い物質が Cs 浸透を抑制した可能性もある。令和 3 年度により長期材齢での測定など追加検討が望ましい。

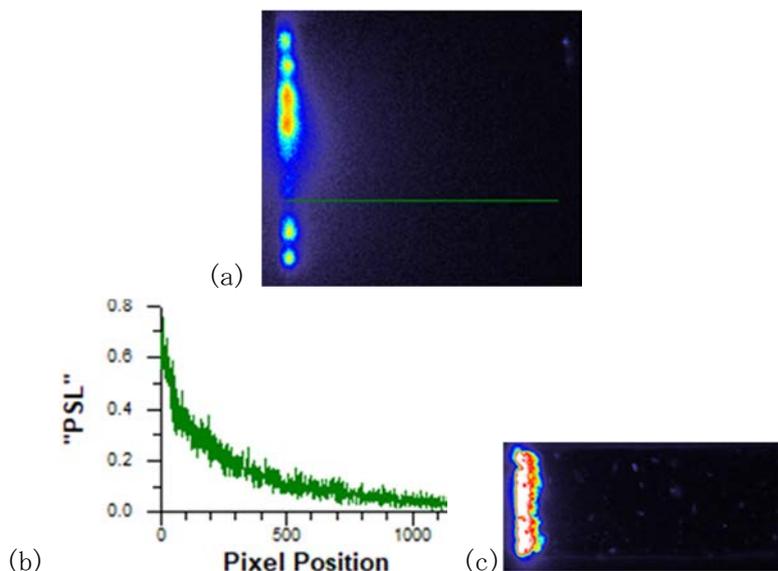


図 3.3-14 実構造物コンクリートコア試料（変質していない内部の試料）への Cs 浸透状況（左側が浸漬面）

- (a) ペースト部分の浸透プロファイル
- (b) 6×6 cm 断面の IP 像
- (c) 前研究での飽水炭酸石灰石モルタル（2×5 cm 断面）の 10 μM-CsCl 溶液への 56 日浸漬後の Cs 分布

4) Sr 溶液への浸漬結果

コンクリートを SrCl₂ 溶液に浸漬した際の浸漬液の線量率変化を図 3.3-15 に示す。浸漬材齢 16 日程度までは濃度が低下したが、その後はほぼ一定の濃度となった。これは Sr 浸透が単純な拡散ではないことを示唆する。

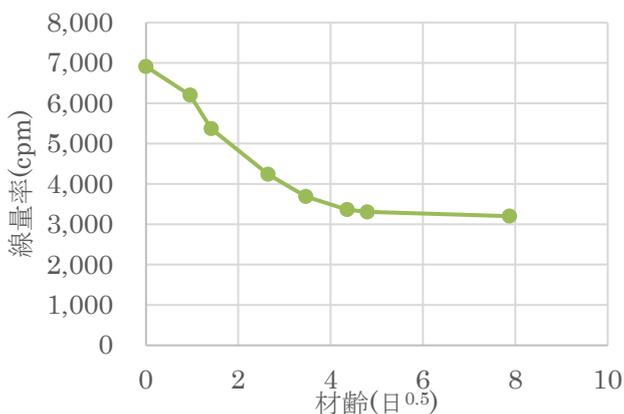


図 3.3-15 SrCl₂ 溶液への浸漬試験時の浸漬液の線量率変化

図 3.3-16(a)に、浸漬材齢 23 日におけるコンクリート表面の IP 像(高強度のため 30 分のみ暴露)、図 3.3-16(b)に深部コンクリートの切断面の写真、図 3.3-16(c)に PSL 値のラインプロファイルを示す。構造物コンクリートの表面のセメントペースト部分には、Cs と同じく多量の Sr が吸着した。⁹⁰Sr を 0.33 MBq/kg に調整したセメントペーストを標準試料として換算すると、IP による分析値ではコンクリート表面では ⁹⁰Sr の濃度は 61 MBq/kg と

なった。これを Sr 濃度換算すると 11 mM/kg である。10 μM の溶液から炭酸化および溶脱したコンクリート表面には、分配比 220 で Sr が吸着したことになる。なお、前研究では Sr の分配比は評価しておらず比較できない。

図 3.3-16(a)右は変質影響がない深部のコンクリート切断面へ吸着した Sr の分布である。図 3.3-16(b)の浸漬面の写真と比較すると、Sr が高濃度となっている白い部分は骨材というよりも、骨材とセメントペーストの境界部分と考えられる。これらの部分にはいわゆる遷移帯が形成されており、水酸化カルシウムが優先的に生成し、平均的セメントペーストよりはポーラスになっている。この部位で Ca と Sr がイオン交換することで固定されていると推定できる。骨材内部で Sr 濃度が高い場所は、炭酸カルシウム（方解石）が存在している可能性がある。図 3.3-16(c)の左側に示す深部のコンクリート切断面の PSL 値のラインプロファイルを見ると、Cs と異なり Sr 分布はセメントペースト部分での濃度は骨材よりも著しく低いわけではない。切断面全体での Sr 濃度は 58 mM/kg であり、セメントペースト部分の Sr 濃度は 34 mM/kg であり（分配比は 34）、Sr はセメントペーストに固定されやすいことが分かる。

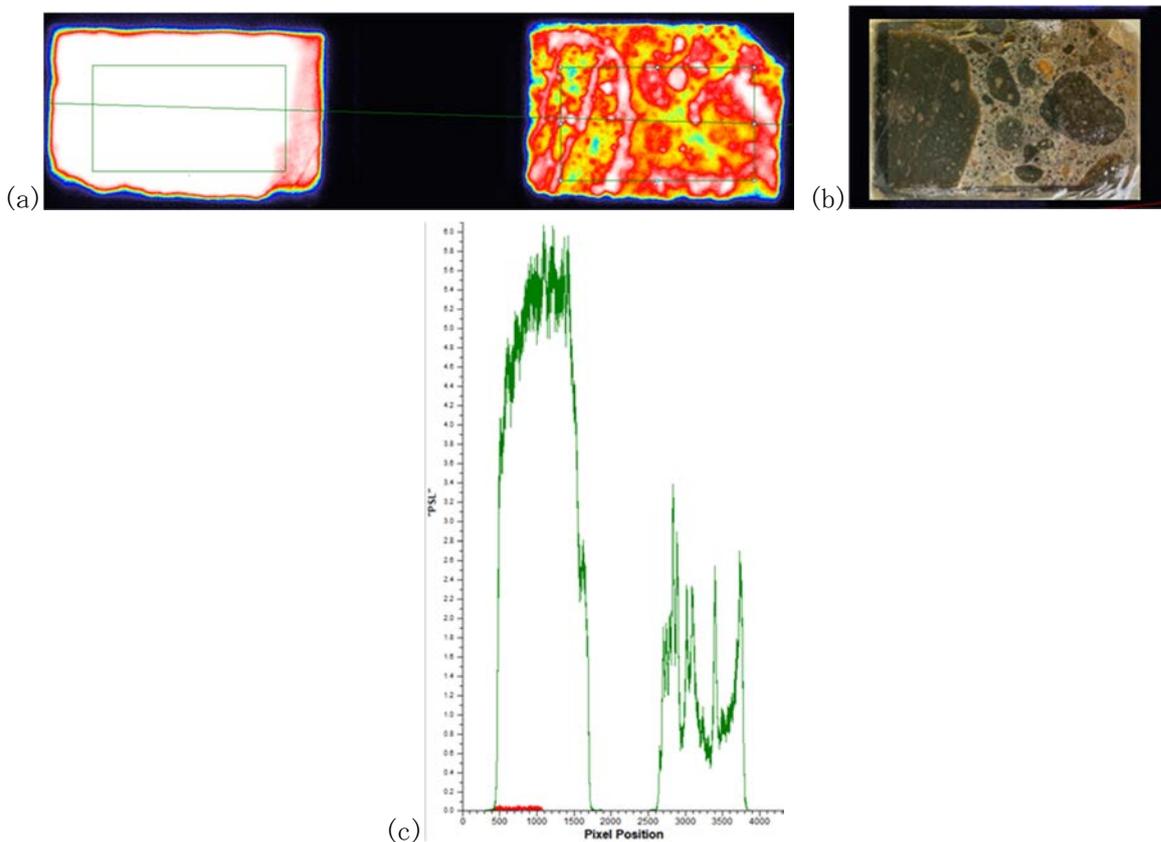


図 3.3-16 Sr 溶液浸漬後の実構造物コンクリートコア試料（4×6 cm）表面の Sr 吸着状況
 (a) IP 像（左）炭酸化した部材表面、（右）深部コンクリートの切断面
 (b) (a)右に対応するコンクリート断面の写真
 (c) (a)中の緑線のラインプロファイル（赤線は ^{90}Sr 0.33 MBq/kg のセメントペースト）

変質していない内部試料を 10 μM - SrCl_2 溶液に 23 日間浸漬した場合の、浸透状況として、図 3.3-17 (a) に IP 像を、図 3.3-17 (b) に PSL 値のラインプロファイルを示す。Sr は表層

のみに存在している。Cs とは異なりハローは認められない。強度プロファイルでも浸透はごく表層部に限定され、深部から ^{90}Sr の信号は検出されなかった。これは炭酸化部分でも同様であった。炭酸化ペーストの 1 M- SrCl_2 溶液への浸漬では、Sr であっても炭酸化フロントまでは容易に浸透した結果が得られている[42]。また、乾燥試料への吸水試験では 10 mm 程度の浸透が認められた (図 3.3-9)。本研究で飽水した変質コアにおいて変質の有無にかかわらず、Sr 浸透がごく表層であった理由は、セメントペーストによる低濃度 Sr の固定による浸透遅延の可能性を考えることができる。

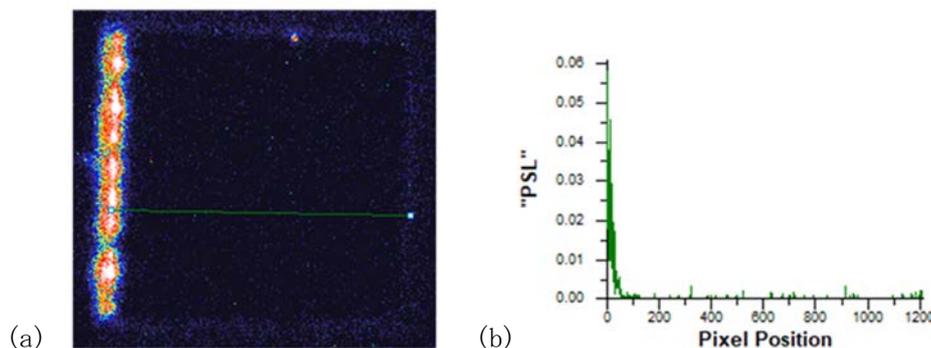


図 3.3-17 実構造物コンクリートコア試料 (変質していない内部の試料) への Sr 浸透状況
 (a) 6×6 cm 断面 (左側が浸漬面)
 (b) (a) 中のミドリ線位置 (ペースト部分) の Sr 浸透プロファイル

(4) まとめ

令和 2 年度は、東北大学および名古屋大学で行ってきたラジオアイソトープを用いた汚染水濃度レベルでの浸透実験と IP によるオートラジオグラフィを用いた浸透解析を北海道大学で実施できるよう実験環境を整備し、名古屋大学で開始した浸漬試験の長期材齢のデータを得た。また、令和 3 年度以降に予定されるひび割れたコンクリート試験体への Cs と Sr の浸透を解析する準備として、より大きな試験体の加工手順を設定し、浸漬試験を実施した。その結果以下の成果を得た。

飽水健全モルタルへの長期浸透は、Cs は試料の深部まで到達し、濃度プロファイルは平坦化した。特に 10 μM の水準では、表面濃度も低下し、試料全体で Cs は再配分したと考えられた。

- ・飽水炭酸化モルタルへの浸透では、炭酸化部分の濃度は高まったが、深部の濃度も高まった。
- ・乾燥炭酸化モルタルへの長期吸水では、Cs では炭酸化部位での全体的な濃度増加と深部への浸透が認められた。Sr については炭酸化部分のみに Sr が再配置される結果となった。
- ・ひび割れたコンクリートの評価で必要となる寸法の 6×6×4 cm の試験体を精密切断機で切断する手順を検討し、カウンターウェートの調整により切断ブレードに作用する荷重を制御することで、IP 測定可能な平滑面を得ることができた。
- ・70 年を経た橋梁の実構造物からコンクリートコアを採取し、変質した試料表面と非変質の内部から試験体を切り出し、それぞれを 2.5 L の 10 μM の CsCl および SrCl_2 溶液にそれぞれ 25 日および 23 日浸漬した後の浸透状況を測定した。
- ・浸漬面の分析では、Cs も Sr も深部の非変質面に比べ表層の変質面に多量に濃縮した。

- ・深部の切断面の分析では、Cs は骨材、特に変質鉱物に濃縮し、セメントペーストへの吸着は比較的少なかった。Sr は骨材というよりも、骨材とセメントペーストの遷移帯と呼ばれる界面に濃縮している一方、セメントペースト部分にも高濃度で存在した。
- ・Cs、Sr とともに、コンクリート内部への浸透は認められなかった。実験室で作製した試料とは異なる挙動であり、粗骨材を含めた Cs 吸着相を含んだ現実的コンクリート試料、かつ浸漬液量を考慮したうえでの低濃度領域での浸漬試験が重要であると改めて考えられた。

(5) 今後の予定

IP を用い、Cs と Sr の浸透を定量評価できる実験環境を整えたが、Cs と Sr が共存する条件での浸透に対し、両者を分離定量する技術の可能性と精度について追加確認する。

ひび割れたコンクリートへの浸透解析を行う準備をさらに進めるため、令和 2 年度に実施した実コンクリートコアの浸漬実験を継続し、より長期での浸透を令和 2 年度に実施した切断面ではなく、薄片を加工し追加測定する。

さらにひび割れ部への浸透挙動評価の基礎検討として、ひび割れを導入したモルタルへの¹³⁷Cs と⁹⁰Sr の浸透を、IP で計測する技術開発を行う。RI 試験では使用できる試料寸法に制約があることから、ひび割れを有する試料準備とその後の浸漬試験、さらに元素移動が測定できる断面の取得方法など測定に必要な技術開発を行う。

これらの開発は、北海道大学および国立環境研究所の施設を用い、国立環境研究所と北海道大学が連携して実施する。

3.3.2 α 核種のコンクリート部材への収着挙動評価 (連携先：JAEA)

汚染水には Cs や Sr とともに Pu や Am 等の α 線を放出する核種が含まれている。 α 核種の濃度は原子炉建屋から下流で減少していることから、 α 核種が水から失われ建屋に滞留している可能性が考えられる。放射性核種により汚染したコンクリートの除染や廃棄物としての処理、処分を検討するうえで α 核種の付着や浸透の挙動が重要である。

汚染水は原子炉建屋等の地下に長期間滞留しておりその影響を実験的に評価するため、Pu および Am を含む浸漬液にセメントおよびエポキシ樹脂の試験片を浸漬する試験を開始した。コンクリートと汚染水の接触条件は収着や浸透の挙動に影響を与えるため、接触条件を検討するために関連する情報を整理した。

(1) 目的

前研究では、OPC および FAC について、その変質状態を考慮して Pu および Am の分配比およびセメントペースト試験片への浸透深さを求めた[2]。Pu の分配比は約 10^5 以上と非常に高く、OPC と FAC には有意な差が見られず、一方で、健全状態に比べ炭酸化状態は分配比が低下することを明らかにした。 α 核種の浸透はセメントの種類や状態での差は見られず、いずれも表層から 1 mm に大半が収着し、2 mm まで浸透している可能性が示唆された。また、課題としては、試験片の浸漬では表層で収着が飽和し、浸透挙動を明らかにするには至っておらず、また、汚染水との接触が長期に渡っておりより長期間を想定した評価が望まれる。

Pu および Am はコンクリートへの分配比が高く、沈殿物を生じるため内部へ浸透しにくい性質である。建屋と汚染水の接触が 10 年程度であることを想定した場合でも Cs や Sr に比べて深く浸透しないことが予想される。これらのことを受けて、本研究では実験的に浸透挙動を求めるため、コンクリートの構成材であるセメントペーストと塗装材であるエポキシ樹脂の試験片を Pu および Am を含む溶液に浸漬し、浸透深さを検討する。浸透深さは時間に依存し、 α 核種の拡散に係る基礎データとなることが期待される。

令和 2 年度は、長期の浸漬を行ううえでの試験条件の決定するための予察試験を実施した。

(2) コンクリートが汚染水と接触した初期条件の検討

放射性核種のコンクリートへの浸透挙動を調べるうえでは、コンクリートが放射性物質を含む汚染水と接触した初期条件を把握する必要がある。事故発生からの海水や汚染水の滞留に係わる情報を整理した。

① 津波に伴う海水の流入

津波は 3 月 11 日 15:36 頃に到達した。その影響により最も早く事故が進展した 1 号機は 3 月 12 日 4:00 に淡水注入を開始し、3 月 12 日 15:36 に水素爆発した[94]。3 月 12 日未明までに 1 号機～4 号機の原子炉建屋とタービン建屋はいずれも地下階が被水した[95][96]。ここで、3 号機原子炉建屋については被水の記載が見られなかったが、同様に浸水したものと考えられる。被水が確認された建屋においても、被水を免れた盤もあることから、浸水の影響は均一ではなかったとみられる。結果として、建屋地下階では、海水が最初にコンクリートと接触し、その後放射性核種を含む汚染水が流入した場合が多いと考えられる。

廃棄物処理建屋については記述が見られなかったが[97][98]、原子炉建屋およびタービン建屋に隣接しており、床レベルがタービン建屋と同じであるため、いずれの廃棄物処理建屋も津波により被水した可能性が高いと考えられる。

② 建屋内の浸水深さ

建屋内の壁面と汚染水の接触を検討する際は床面から水面までの高さ（浸水深さ）の情報が重要である。

平成 23 年 5 月 31 日 7:00 時点の滞留水の水位[97]と建屋床レベルから求めた浸水深さを表 3.3-3 に示す。原子炉建屋で約 6 m、タービン建屋で 2 m 弱、廃棄物処理建屋で 2~4 m 程度それぞれ浸水した。壁面の一部は津波に伴う海水と接触せず放射性核種を含む汚染水と接触したものとみられる。原子炉建屋は床レベルが低いことから浸水が深い。また、6 m の高さは人が通常立ち入る範囲ではない可能性があり、塗装がないことを考慮すべきである。建屋内部の塗装に関する情報が得られればより詳細に接触条件が検討できる。

表 3.3-3 汚染水の浸水深さ（平成 23 年 5 月 31 日 7:00 時点）

ユニット	原子炉建屋(mm)			タービン建屋(mm)			廃棄物処理建屋(mm)		
	床レベル OP	滞留水位 OP	浸水深さ	床レベル OP	滞留水位 OP	浸水深さ	床レベル OP	滞留水位 OP	浸水深さ
1 号機	-1230	4860	6090	3200	4920	1720	1400	3588	2188
2 号機	-2060	3567	5627	4900	3567	1667	-300	3545	3845
3 号機	-2060	3696	5756	1900	3696	1796	-300	3696	3996
4 号機	-2060	3669	5729	1900	3696	1796	-300	3696	3969

③ 汚染水との接触期間

滞留水の水位を管理しながら徐々に低下させる措置が進められている。燃料デブリを冷却するための循環注水が行われている 1 号機~3 号機原子炉建屋以外は、令和 2 年 8 月までに床面の露出に至った[98]。平成 23 年 3 月から床面が露出するまでの汚染水との接触期間を表 3.3-4 にまとめた。接触期間は、1 号機のタービン建屋が最も短く 6 年、それ以外は 8~9.4 年であった。原子炉建屋では、燃料デブリの取り出しが完了次第、注水を停止し汚染水の抜き取りが始められると見込まれる。中長期ロードマップ[99]では、燃料デブリ取り出し開始から廃止措置終了まで 30~40 年度を想定しており、原子炉建屋はこれからも相当の長い接触期間を想定する必要がある。

表 3.3-4 現時点における滞留水の接触期間

ユニット	原子炉建屋		タービン建屋		廃棄物処理建屋	
	床面露出完了時期	接触期間(y)	床面露出完了時期	接触期間(y)	床面露出完了時期	接触期間(y)
1 号機	未	継続中	2017/3	6.0	2019/3	8.0
2 号機	未	継続中	2020/6	9.3	2020/5	9.2
3 号機	未	継続中	2020/6	9.3	2020/7	9.3
4 号機	2020/8	9.4	2020/1	8.8	2020/1	8.8

④ 接触条件の検討

建屋コンクリートと汚染水の接触に関する情報を整理すると下記の通りとなる。

コンクリートと接触した水

- ・ 海水が接触してから放射性物質が流入（大部分）
- ・ 乾燥状態に直接汚染水が接触（一部）

コンクリートの塗装

- ・ 床、並びに壁の低い部分

浸漬期間

- ・ 約 20 年、あるいはそれ以上（1 号機～3 号機原子炉建屋。冷却水の注入を停止し、滞留水の抜き取りが終了するまで）
- ・ 約 10 年（上記以外の建屋）

また、時系列的に以下の状況が想定される。

建屋地下階へ津波に伴う海水が侵入し、乾燥状態のコンクリートと接触した。これによりコンクリートに水分とともに、塩分（Na や Ca などとともに Cs や Sr といった汚染水中の主要な放射性核種の安定核種を含む）が収着した。海水の一般的な組成では Sr 7800 ppb、Cs 0.31 ppb である[100]。この後、放射性核種がコンクリートへ到達した。海水成分と放射性核種が収着において競合する。地下階の床と壁面（下部）は塗装が施されているが、高所はコンクリートに塗装がなく、海水および放射性核種との相互作用が重要となる。汚染水との接触期間は約 10 年と 20 年以上となる場合に分けて考えることができる。

これらの情報を浸漬等の試験において考慮する必要がある。

(3) α 核種のコンクリート部材への浸漬試験

検討したコンクリートと汚染水の接触条件を考慮し、長期の接触を想定した浸漬試験を実施するため、予察の試験を開始した。ここで、 α 核種の収着と浸透の挙動を詳しく調べるため、 α 核種濃度が低い浸漬液を用いる必要があり分析の実現性を確認すること、ブランクであるエポキシへの収着量を調べることを目的とした。

① 浸漬液の調製

汚染水がほぼ中性であり、 α 核種濃度が 10^{-1} Bq/mL 以下であることを模擬するため、添加する Pu 溶液をできるだけ高濃度に調製することとした。Pu と Am を含む U-Pu 混合酸化物（MOX）（Pu 富化度 30 %）のペレット 10 個（18.77 g）を 7 M 硝酸溶液 330 mL で溶解した。溶解は冷却管をとりつけたセパラブルフラスコで行い、ホットスターラーで 95 °C に加熱し 5 時間維持した。溶解時の様子を図 3.3-18 に示した。放冷後ろ過し、Pu 15.6 g/L、Am 1.1 g/L の溶解液を得た。これを水により 1.4×10^4 倍に希釈した。希釈後の液は、 ^{239}Pu 1.6 $\times 10^3$ Bq/mL、 ^{241}Am 9.7 $\times 10^3$ Bq/mL、pH 3.3 であった。これを浸漬液とした。



図 3.3-18 混合酸化物 (MOX) の溶解
昇温開始 15 分後 (左)、5 時間後 (右)

② 試験片の浸漬

セメントペーストおよびエポキシ樹脂の試験片を調製した。健全な OPC および FAC を $10 \times 2.5 \times 50$ mm に切り出し、エポキシ樹脂で被覆した。試験片の寸法は $14 \times 5 \times 50$ mm となった。セメントを含まないエポキシ樹脂も同じ寸法で得た。

OPC、FAC およびエポキシ樹脂 (2 個) の試験片を 100 mL の溶液に浸漬した。浸漬の様子を図 3.3-19 に示した。浸漬は 2 か月間継続する予定であり、その後浸漬液および試験片の α 放射能を分析し、定量的な分析が可能であること、被覆材であるエポキシ樹脂への収着量を評価できることを確認する。



図 3.3-19 試験片浸漬の様子

(4) まとめ

汚染水と接触した床・壁面に浸透する α 核種の挙動を実験的に調べるための浸漬試験を開始した。浸漬条件を検討するため、予めコンクリートと汚染水の接触条件に関する情報を整理した。浸漬試験に用いる Pu および Am を含む浸漬液を調製した。予察試験として、セメントペーストおよびエポキシ樹脂の浸漬を開始した。2 か月の浸漬を継続した後、長期浸漬に係る詳細な条件を決定する予定である。

3.4 研究推進

本研究を推進するにあたり、研究代表者の下で各研究項目間の連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画の策定、全体の結果のとりまとめ等を協議するための全体会合をオンラインで計3回開催した。令和2年度の全体会合の開催実績を表3.4-1に示す。

また、令和2年度第1回英知事業ワークショップ、英知事業の廃棄物関連課題に係る情報交換会に参加し、CLADSを介したニーズ側との情報交換を実施した他、研究課題間の情報交換として、北海道大学小崎完教授との会合も開催した。

所期の全体計画は概ね順調に進んだ。

表 3.4-1 令和2年度の全体会合の開催実績

回数	開催日	議事概要
第1回	令和2年11月9日(月)	<p><キックオフミーティング></p> <ul style="list-style-type: none"> ① 3年間の全体計画の確認 ② 11月5日開催ワークショップの情報共有 ③ 令和2年度の実施計画の確認 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 浸透挙動解析の手法検討(太平洋コンサルタント/太平洋セメント) ➢ RBSM用データ取得/解析手法検討(東京大学/名古屋大学) ➢ α核種試験(JAEA) ➢ ¹³⁷Csと⁹⁰Srの浸透試験(国立環境研究所/北海道大学) ④ 今後のスケジュール確認
第2回	令和3年3月3日(水)	<p><進捗確認および報告書作成に関する打ち合わせ></p> <ul style="list-style-type: none"> ① 各機関からの確認事項 <ul style="list-style-type: none"> ➢ ¹³⁷Csと⁹⁰Srの浸透試験(国立環境研究所/北海道大学) ➢ α核種試験(JAEA) ② 事務的連絡(報告書書式変更等) ③ 今後のスケジュール確認
第3回	令和3年3月9日(火)	<p><進捗確認および報告書作成に関する打ち合わせ></p> <ul style="list-style-type: none"> ① 各機関からの確認事項 <ul style="list-style-type: none"> ➢ RBSM用データ取得/解析手法検討(東京大学/名古屋大学) ➢ 浸透挙動解析の手法検討(太平洋コンサルタント/太平洋セメント) ② 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) 核種の長期挙動シミュレーションに向けた部材のひび割れ幅・深さと密度を含む状態設定の検討

① メソスケールひび割れ解析に必要な各種物性値の取得

メソスケールひび割れ解析で必要となる各種物性値を取得するための試験体の作製および測定に必要となる備品類を準備するとともに、力学特性の物性評価手法について確認した。また、長さ変化に対応する治具も開発し、予備実験を実施した。

② メソスケールひび割れ解析の実施とひび割れ量の評価

建設時の温度応力と供用時の乾燥を考慮したひび割れ評価手法として、RBSMを用いて、水和過程から極厚部材の応力・ひび割れを追跡できる数値解析手法を開発した。圧縮時の構成則について改良の余地があり、水和熱によるひび割れ、水分移動と乾燥収縮応力の評価も含め、令和3年度も継続して取り組む。

(2) コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析の手法検討

① モデルによる核種浸透シミュレーション

実際の1F建屋コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析するため、前研究で作成したC-S-HによるCs、Sr収着モデルをC-A-S-HによるCs、Sr収着モデル作成に必要な試験方法を検討および実施した。C-A-S-HによるCs、Sr収着試験の結果より、C-A-S-H中のAlがCsの収着反応に影響を及ぼす可能性が示唆された。また、高濃度のアルカリが共存する環境では、収着量が減少する可能性が示唆された。

② ダメージを受けたコンクリートの各種移行評価

ひび割れ部を考慮した物質移行の評価に資するデータ取得と、ひび割れを含むコンクリートの物質移行のモデル化を目的ひび割れ部のモデル化に向けた課題を整理するとともに、既往研究の事例を参考にひび割れ導入の予察試験を実施し、概ね目標とする幅でひび割れを導入できる見通しを得た。また、令和3年度以降の試験に供する試験体を作製した。

(3) 実際の核種の種類・濃度を考慮した収着/浸透挙動評価

① 低濃度領域での ^{137}Cs と ^{90}Sr の競合挙動の評価

前研究において実施したラジオアイソトープを用いた汚染水濃度レベルでの浸透実験とIPによるオートラジオグラフィを用いた浸透解析を北海道大学で実施できるよう実験環境を整備し、名古屋大学で開始した浸漬試験の長期材齢のデータを得た。また、令和3年度以降に予定されるひび割れたコンクリート試験体へのCsとSrの浸透を解析する準備として、より大きな試験体の加工手順を設定し、浸漬試験を実施した。

② α 核種のコンクリート部材への収着挙動評価

α 核種が汚染水と接触したコンクリート部材(床・壁面)に浸透する挙動を、実験的に調べるための長期浸漬試験を開始した。浸漬条件を検討するため、予めコンクリートと汚染水の接触条件に関する情報を整理した。また、浸漬試験に用いるPuおよびAmを含む浸漬液を調製するとともに、予察試験として、セメントペーストおよびエポキシ樹脂の浸漬を開始した。2か月の浸漬を継続した後、長期浸漬に係る詳細な条件を決定する予定である。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間の連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画の策定、全体の結果のとりまとめ等を協議するための全体会合をオンラインで計3回開催した。また、令和2年度第1回英知事業ワークショップ、英知事業の廃棄物関連課題に係る情報交換会に参加し、CLADSを介したニーズ側との情報交換を実施した他、研究課題間の情報交換として、北海道大学小崎完教授との会合も開催した。所期の全体計画は概ね順調に進んだ。

4.2 令和3年度以降の研究計画

(1) 核種の長期挙動シミュレーションに向けた部材のひび割れ幅・深さと密度を含む状態設定の検討

① メソスケールひび割れ解析での必要な各種物性値の取得

①では、乾燥、再吸水を模擬する実験を行うため試験体を作製し、試験体の乾燥、再吸水によって生じるマクロメソスケールの変形および水分移動に関するデータを取得する。巨視的な体積変化挙動（レーザー変位計）、ひび割れの開閉（画像相関法による画像分析）に関する実験的評価を行う。また、数値解析の構成則構築に必要な異なる含水状態、温度状態の試験体の物性値を取得する。

② メソスケールひび割れ解析の実施とひび割れ量の評価

②では、令和2年度から開始した、RBSMを用いた建設時の温度応力と供用時の乾燥を考慮したひび割れ評価手法について、温度・水・応力および材齢変化を考慮できるプログラムの開発を継続して進める。

令和2年度までのマスコンクリートに生ずる初期ひび割れの影響の高精度化にくわえ、長期の乾燥によるひび割れに関する数値解析と水分移動について検討する。また、令和4年度に実施する、代表的な部材についての解析に資する予備的検討を行う。

(2) コンクリート部材の状態を考慮した浸透挙動解析の手法検討

① モデルによる核種浸透シミュレーション

実際のコンクリート部材における長期的な核種の浸透挙動評価として、令和2年度から開始した、材料、配合、炭酸化状態および物質移行係数が異なる条件におけるCs、Srの浸透深さ計算に関する検討を継続し、令和元年度までに検討されたコンクリート部材の浸透挙動のモデル化手法により、代表的な初期条件および境界条件における核種の浸透深さを計算する。

② ダメージを受けたコンクリートの各種移行評価

ひび割れ部を考慮した物質移行の評価に資するデータ取得と、ひび割れを含むコンクリートの物質移行のモデル化を目的に、以下の内容を実施する。

a) 状態検討

令和2年度の調査結果（ひび割れが核種移行に与える影響に関する文献調査）を踏まえ、実構造物におけるひび割れ部を模擬した試験体の作製方法を試行し、実構造物におけるひび割れ部を模擬した試験体の作製条件を決定する。

b) 試験体作製および評価

令和2年度に成形したコンクリート試験体について、浸透試験開始前（初期）の分析（力学的特性および組成分析）を行う。

c) 安定核種を使用した浸透試験

令和2年度に成形したコンクリート試験体にひび割れを導入し、安定核種（Cs および Sr）を用いた浸透試験を開始する。

(3) 実際の核種の種類・濃度を考慮した収着/浸透挙動評価

① 低濃度領域での ^{137}Cs と ^{90}Sr の競合浸透の評価

ひび割れ部への浸透挙動評価の基礎検討として、ひび割れを導入したモルタルへの ^{137}Cs と ^{90}Sr の浸透を、IP で計測する技術開発を行う。RI 試験では使用できる試料寸法に制約があることから、ひび割れを有する試料準備とその後の浸漬試験、さらに元素移動が測定できる断面の取得方法など測定に必要な技術開発を行う。

② α 核種のコンクリート部材への収着挙動評価

令和2年度から開始した、セメント試料を用いた長期間の α 核種浸漬試験を継続し、表層における堆積や内部への浸透の様子を明らかにする。また、コンクリートの部材として、セメントの他に、骨材、塗装、鉄筋等を対象に挙げ、それぞれ Pu 等の α 核種を含む溶液に浸漬する。 α 核種の収着量を求め、各部材を比較し、実際の現場コンクリートを想定した際に α 核種が濃縮しやすい場所を評価する。

(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] 北海道大学, 汚染コンクリートの解体およびそこから生じる廃棄物の合理的処理・処分
の検討, 平成 30 年度文部科学省 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 成果報告書, 2019, 111p.
- [2] 名古屋大学, 放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研
究, 平成 31 年度文部科学省 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・人材育成推進事業成果報告書, 2020, 128p.
- [3] Kawai, T., New Discrete Models and Their Application to Seismic Response Analysis
of Structures, Nuclear Engineering and Design, vol. 48, no. 1, 1978, pp. 207-
229.
- [4] J. E. Bolander, S. Saito, Fracture Analyses Using Spring Networks with Random
Geometry, Engineering Fracture Mechanics, vol. 61, Issues 5-6, 1998, pp. 561-
591.
- [5] 日本コンクリート工学会, マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 日本コンクリ
ート工学会, 付録, 2008, pp. 80-97.
- [6] 山本佳士他, 3 次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学
会論文集 E, vol. 64, no. 4, 2008, pp. 612-630.
- [7] Sasano, H., et al., Impact of Drying on Structural Performance of Reinforced
Concrete Shear Walls, J. Adv. Concr. Technol., vol. 16, 2018, pp. 210-232.
- [8] 斉藤成彦他, バネ系モデルを用いた鉄筋コンクリート構造物の破壊挙動の数値解析, 土
木学会論文集, 627 号/V-44, 1999, pp. 289-303.
- [9] 島弘他, マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関
係, 土木学会論文集, vol. 1987, no. 378, 1987, pp. 165-174.
- [10] 菅満宣他, RC はりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響, コンクリート工学年次論文
集, vol. 23, no. 3, 2001, pp. 295-300.
- [11] Jang, I., et al., Numerical Prediction of Crack Width in Massive Concrete Member
Due to Heat of Hydration, JCI-RILEM (CONCRACK5), 2017, pp. 91-100.
- [12] 丸山一平他, RC プリズムにおける自己収縮による微細ひびわれ発生と収縮応力挙動, コ
ンクリート工学年次論文集, vol. 28, no. 1, 2006, pp. 587-592.
- [13] Sasano, H., Impact of Damage in Concrete by Inhomogeneous Volume Change of
Components on the Physical Properties of Concrete and Concrete Structures,
Doctoral Dissertation, Nagoya University, Nagoya, Japan, 2020, 130p.
- [14] 日本建築学会, マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説, 日本建
築学会, 2019 年 11 月, 333p.
- [15] 杉本啓太他, 熱・水分移動および硬化過程を考慮した RBSM による RC 部材のひび割れ進
展挙動解析, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-175, 2016, pp. 349-350.
- [16] Sasano, H., et al., Mechanism of Drying-Induced Change in the Physical Properties
of Concrete: A Mesoscale Simulation Study, Cem. Concr. Res., vol. 143, 106401,
2021, 24p.

- [17] Rymeš, J., et al., Long-Term Material Properties of a Thick Concrete Wall Exposed to Ordinary Environmental Conditions in a Nuclear Reactor Building: The Contribution of Cement Hydrates and Feldspar Interaction, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 17, no. 5, 2019, pp. 195-215.
- [18] 北陸電力, 志賀原子力発電所 2 号機における雨水流入事象に関する原子力規制庁への報告について (中間報告), <http://www.rikuden.co.jp/press/attach/16102805.pdf> (参照: 2021 年 4 月 16 日) .
- [19] Andersen, M. D., et al., A New Aluminium-Hydrate Species in Hydrated Portland Cements Characterized by ^{27}Al and ^{29}Si MAS NMR Spectroscopy, *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 1, 2006, pp. 3-17.
- [20] Sun, G. K., et al., The Role of Al in C-S-H: NMR, XRD, and Compositional Results for Precipitated Samples, *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 1, 2006, pp. 18-29.
- [21] Manzano, H., et al., Aluminum Incorporation to Dreierketten Silicate Chains, *J. Phys. Chem. B*, vol. 113, no. 9, 2009, pp. 2832-2839.
- [22] Pardal, X., et al., ^{27}Al and ^{29}Si Solid-State NMR Characterization of Calcium-Aluminosilicate-Hydrate, *Inorg. Chem.*, vol. 51, no. 3, 2012, pp. 1827-1836.
- [23] Richardson, I. G., Model Structures for C-(A)-S-H (I), *Acta Cryst.*, B70, 2014, pp. 903-923.
- [24] Haas, J., et al., From C-S-H to C-A-S-H: Experimental Study and Thermodynamic Modelling, *Cem. Concr. Res.*, vol. 68, 2015, pp. 124-138.
- [25] Lothenbach, B., et al., Calcium Silicate Hydrates: Solid and Liquid Phase Composition, *Cem. Concr. Res.*, vol. 78, Part A, 2015, pp. 57-70.
- [26] Hong, S.-Y., et al., Alkali Binding in Cement Pastes: Part I. The C-S-H Phase, *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 12, 1999, pp. 1893-1903.
- [27] Hill, J., et al., The Effect of Sodium Chloride on the Dissolution of Calcium Silicate Hydrate Gels, *Waste Manag.*, vol. 26, no. 7, 2006, pp. 758-768.
- [28] Bach, T.T.H., et al., Retention of Alkali Ions by Hydrated Low-pH Cements: Mechanism and Na^+/K^+ Selectivity, *Cem. Concr. Res.*, vol. 51, 2013, pp. 14-21.
- [29] Myers, R. J., et al., A Thermodynamic Model for C-(N-)A-S-H Gel: CNASH_ss. Derivation and Validation, *Cem. Concr. Res.*, vol. 66, 2014, pp. 27-47.
- [30] Kawabata, Y., et al., Evaluation of Alkalinity of Pore Solution Based on the Phase Composition of Cement Hydrates with Supplementary Cementitious Materials and its Relation to Suppressing ASR Expansion, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 13, no. 11, 2015, pp. 538-553.
- [31] L'Hôpital, E., et al., Alkali Uptake in Calcium Alumina Silicate Hydrate (C-A-S-H), *Cem. Concr. Res.*, vol. 85, 2016, pp. 122-136.
- [32] Hong, S.-Y., et al., Alkali Sorption by C-S-H and C-A-S-H Gels: Part II. Role of Alumina, *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 7, 2002, pp. 1101-1111.
- [33] 芳賀和子他, 合成 C-(A-)S-H へのアルカリ金属 (Na) の収着に関する検討, 第 70 回セメント技術大会, 1207, 2016, pp. 58-59.
- [34] Sevelsted, T. F., et al., Carbonation of C-S-H and C-A-S-H Samples Studied by ^{13}C , ^{27}Al and ^{29}Si MAS NMR Spectroscopy, *Cem. Concr. Res.*, vol. 71, 2015, pp. 56-65.

- [35] Pardal, X., et al., Experimental Study of Si-Al Substitution in Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) Prepared under Equilibrium Conditions, *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 8, 2009, pp. 637-643.
- [36] 湊大輔他, C-A-S-H への Cs の収着挙動の評価, セメント・コンクリート論文集, vol. 69, no. 1, 2015, pp. 53-60.
- [37] 小林創他, ^{29}Si MAS-NMR 及び ^{27}Al MAS-NMR を用いた C-A-S-H の構造検討, セメント・コンクリート論文集, vol. 71, no. 1, 2017, pp. 93-100.
- [38] Li, J., et al., Effects of Ca/Si Ratio, Aluminum and Magnesium on the Carbonation Behavior of Calcium Silicate Hydrate, *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 8, 2019, 14p.
- [39] 佐藤正己他, フライアッシュと水酸化カルシウムによるポゾラン反応に及ぼす養生温度の影響, セメント・コンクリート論文集, vol. 70, no. 1, 2016, pp. 69-76.
- [40] 目黒貴史他, フライアッシュのガラス組成とポゾラン反応生成物に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, vol. 72, no. 1, 2019, pp. 129-135.
- [41] 羽淵貴士他, アルカリシリカ反応と海水の複合的な作用によるコンクリートの劣化現象とその評価手法の提案, 土木学会論文集, no. 774, V-65, 2004, pp. 149-161.
- [42] Haga, K., et al., Quantification of Interaction between Alkali Metal Ions and C-(A-)S-H/Cement Paste for a Wide Range of Ion Concentrations, 15th Intern. Cong. Chemi. Cem., 2019.
- [43] 三菱総合研究所, 高経年化技術評価高度化事業(コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究) 成果報告書平成 26 年度, 2015, pp. 4-207-211.
- [44] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所 1 号機高経年化対策について, 2011, https://www.pref.fukushima.lg.jp/download/1/girenH22_9_1.pdf (参照: 2021年3月31日) .
- [45] 後藤哲夫他, 建屋内の遠隔除染技術の開発「基礎データ取得結果(その3) サンプル採取及びオンサイト分析結果, 日本原子力学会 2013 年春の年会, 2013.
- [46] IRID/JAEA, 福島第一原子力発電所の固体廃棄物試料分析(現状までの成果報告), 廃炉・汚染水対策チーム会合第 42 回事務局会議資料, 2017 年 5 月 25 日, <https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/10369289/www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2017/05/3-04-03.pdf> (参照: 2021年3月31日) .
- [47] Koma, Y., Radioactive Contamination of Several Materials Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, *Nucl. Mate. Ener.*, vol. 10, 2017, pp. 35-41.
- [48] 池内宏知, 溶融燃料とコンクリートとの相互作用(MCCI)による生成物の相および硬さ: 大型試験からの知見, 平成 29 年度福島研究開発部門成果報告会, <https://fukushima.jaea.go.jp/report/document/pdf/pdf1802/hokokukai03.pdf> (参照: 2021年3月23日) .
- [49] Yamada K, et al., Field Survey of Radioactive Cesium Contamination in Concrete after the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Accident, *J. Adv. Concr. Tech.*, vol. 17, 2019, pp. 659-672.
- [50] 前田宏治他, 福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた 2-①-1 建屋内遠隔除染技術の開発; JAEA におけるサンプルの詳細分析結果, JAEA-Research 2013-025, 2014, 123p.

- [51] 東北電力, 女川原子力発電所2号炉鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響を踏まえた各条文の要求機能に対する機能維持の方針の整理, <https://www.nsr.go.jp/data/000266212.pdf> (参照: 2021年3月31日) .
- [52] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所における日々の放射性物質の分析結果, https://www.tepco.co.jp/decommission/data/daily_analysis/ (参照: 2021年3月23日) .
- [53] JAEA, 福島第一原子力発電所事故廃棄物に関する分析データ集, <https://frandlib.jaea.go.jp/FRAnDLi/> (参照: 2021年3月23日) .
- [54] Shibata, A., et al., Estimation of the Inventory of the Radioactive Wastes in Fukushima Daiichi NPS with a Radionuclide Transport Model in the Contaminated Water, *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 12, 2016, pp. 1933-1942.
- [55] Hosokawa, Y., et al., Development of a Multi-Species Mass Transport Model for Concrete with Account to Thermodynamic Phase Equilibriums, *Mater. Str.*, vol. 44, no. 9, 2011, pp. 1577-1592.
- [56] 原沢蓉子他, 異なる炭酸化環境が空隙特性および炭酸化生成物に与える影響, *コンクリート工学年次論文集*, vol. 36, no. 1, 2014, pp. 808-813.
- [57] 石田哲也, 微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム, *東京大学学位論文*, 1999, 125p.
- [58] 伊代田岳史他, コンクリート構造物の炭酸化進行における雨掛り等の環境条件の影響とその進行メカニズムの検討, *コンクリート工学論文集*. vol. 28, 2017, pp. 113-122.
- [59] 秋田宏, モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, *土木学会論文集*. vol. 420, 1990, pp. 61-69.
- [60] Yamada, K., et al., Field Survey of Radioactive Cesium Contamination in Concrete After the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Accident, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 17, 2019, pp. 659-672.
- [61] 中村英佑他, 暴露試験によるコンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食に関する検討, *コンクリート工学年次論文集*, vol. 31, no. 1, 2009, pp. 1093-1098.
- [62] Win, P. P., et al., Chloride Ion Ingression Through and Around the Crack in Reinforced Concrete Structures, *コンクリート工学年次論文集*, vol. 25, no. 1, 2003, pp. 869-874.
- [63] Win, P. P., et al., Penetration Profile of Chloride Ion in Cracked Reinforced Concrete, *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 7, 2004, pp. 1073-1079.
- [64] Kato, E., et al., Development of Simulation Model of Chloride Ion Transportation in Cracked Concrete, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 3, no. 1, 2005, pp. 85-94.
- [65] Wang, L., et al., Simulation of Chloride Diffusivity for Cracked Concrete Based on RBMSM and Truss Network Model, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 6, no. 1, 2008, pp. 143-155.
- [66] Ishida, T., et al., Modeling of Chloride Diffusivity Coupled with Non-Linear Binding Capacity in Sound and Cracked Concrete, *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 10, 2009, pp. 913-923.
- [67] Jin, W. L., et al., Chloride Diffusion in the Cracked Concrete, *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures-Assessment, Durability, Monitoring and*

- Retrofitting of Concrete Structures. Korea Concrete Institute, Seoul, 2010, pp. 880-886.
<http://framcos.org/FraMCoS-7/07-05.pdf> (参照：2021年3月1日) .
- [68] Šavija, et al., Lattice Modeling of Chloride Diffusion in Sound and Cracked Concrete, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 42, 2013, pp. 30-40.
- [69] Sahmaran, M., Effect of Flexure Induced Transverse Crack and Self-Healing on Chloride Diffusivity of Reinforced Mortar, *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 22, 2007, pp. 9131-9136.
- [70] Cheng, Y., et al., Experimental and Simulation Study on Diffusion Behavior of Chloride Ion in Cracking Concrete and Reinforcement Corrosion, *Adv. Mater. Sci. Engineering*, vol. 2018, Article ID 8475384.
- [71] 土木学会, 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2017, pp. 156-164.
- [72] 齊藤準平他, コンクリートの塩分浸透特性におよぼすひび割れ深さの影響に関する実験的検討, *コンクリート工学年次論文集*, vol. 33, no. 1, 2011, pp. 815-820.
- [73] 齊藤準平他, ひび割れを有するコンクリートの拡散係数評価式への塩分浸透影響範囲の適用効果, *日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル*, no. 132, 2014, pp. 10-20.
- [74] 塚原絵万他, ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動評価手法の提案, *土木学会論文集*, vol. 2003, no. 732, V-59, 2003, pp. 109-120.
- [75] Takewaka, K., et al, Simulation Model for Deterioration of Concrete Structures due to Chloride Attack, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 2, 2003, pp. 139-146.
- [76] Lu, Y., et al., Modeling of Chloride Transport in Cracked Concrete: A 3-D Image-Based Microstructure Simulation, *COMSOL Conference*, Boston, USA, pp. 1-15, 2012.
- [77] NT-BUILD 492, Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, 1999, 8p.
- [78] 土木学会, 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法, 2018年制定コンクリート標準示方書[規準編], 土木学会規準および関連規準, 2018, JSCE-G 571-2013, pp. 393-399.
- [79] Djerbi, A., et al., Influence of Traversing Crack on Chloride Diffusion into Concrete, *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 6, 2008, pp. 877-883.
- [80] Ismail, M., et al., Effect of Crack Opening on the Local Diffusion of Chloride in Inert Materials, *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, 2008, pp. 1106-1111.
- [81] Mori, D., et al., Applications of Electron Probe Microanalyzer for Measurement of Cl Concentration Profile in Concrete, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 4, no. 3, 2006, pp. 369-383.
- [82] 大塚浩司他, 蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響, *土木学会論文集*, vol. 1998, no. 585, V-38, 1998, pp. 97-111.
- [83] 久徳貢大他, ひび割れを有するモルタルの塩化物イオン浸透特性とひび割れ部における拡散係数の推定, *コンクリート工学年次論文集*, vol. 35, no. 1, 2013, pp. 853-858.
- [84] Darma, I. S., et al., Application of X-Ray CT to Study Diffusivity in Cracked Concrete Through the Observation of Tracer Transport, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 11, no. 10, 2013, pp. 266-281.

- [85] Buenfeld, N. R., et al., Permeability of Concrete in a Marine Environment, *M. Concr. Res.*, vol. 36, no. 127, 1984, pp. 67-80.
https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/8715/1/Nicholas_Robert_Buenfeld-1985-PhD-Thesis.pdf (参照：2021年3月1日)。
- [86] Gérald, B., et al., Influence of Cracking on the Diffusion Properties of Cement Based Materials: Part I: Influence of Continuous Cracks on the Steady-state Regime, *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 1, 2000, pp. 37-43.
- [87] Wang, H. L., et al., Characteristics of Concrete Cracks and Their Influence on Chloride Penetration, *Constr. Build. Mater.*, vol. 107, 2016, pp. 216-225.
- [88] Mu, S., et al., Non-steady State Chloride Diffusion in Concrete with Different Crack Densities, *Mater. Struct.*, vol. 46, 2013, pp. 123-133.
- [89] 藤井隆史他, 微細なひび割れを持つコンクリート試験体の作製方法と試験方法, 土木学会第67回年次学術講演会, V-451, 2012.
- [90] 岩波光保他, ひび割れを含むコンクリート中の塩分移動に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, vol. 28, no. 1, 2006, pp. 917-922.
- [91] Jacobsen, S., et al., Effect of Cracking and Healing on Chloride Transport in OPC Concrete, *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 6, 1996, pp. 869-881.
- [92] 星野清一他, X線回折/リートベルト法によるセメントペーストの水和反応解析, コンクリート工学年次論文集, vol. 28, no. 1, 2006, pp. 41-46.
- [93] 野村顕雄他, 9. 福島原子力発電所第3号機工事報告, コンクリート・ジャーナル, vol. 12, no. 6, 1974, pp. 72-81.
- [94] OECD/NEA, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (BSAF Project), NEA/CSNI/R(2015)18, 2016, 53p.
- [95] 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, 最終報告, 平成24年7月23日, 462p.
- [96] 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, 中間報告, 平成23年12月26日, 519p.
- [97] 東京電力, 福島第一原子力発電所における高濃度の放射性物質を含む水の保管・処理に関する計画について, 平成23年6月2日,
https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110603a.pdf (参照：2021年4月1日)。
- [98] 東京電力ホールディングス, 建屋滞留水処理等の進捗状況について, 特定原子力施設監視・評価検討会(第86回)資料3-1, 2020年12月14日,
<https://www.nsr.go.jp/data/000337146.pdf> (参照：2021年4月1日)。
- [99] 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議, 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, 平成29年9月26日,
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/hairo_osensui/dai3/siryou2.pdf (参照：2021年4月1日)。
- [100] 日本分析化学会編, 分析化学データブック 改訂5版, 丸善出版株式会社, 2004, 230p.

This is a blank page.

