

東京電力福島第一原子力発電所における
事故の分析に係る検討会 第32回会合
資料1-2

東京電力福島第一原子力発電所 1号機PCV内部調査により確認された コンクリートに関する事象の検討

大阪大学 大学院工学研究科
東京電力福島第一原子力発電所事故調査チーム
「1F-2050」



大阪大学工学部/大学院工学研究科
School/Graduate School of Engineering,
Osaka University

大阪大学 大学院工学研究科
附属フューチャーイノベーションセンター
インキュベーション部門 社会課題解決型グループ
<http://www.cfi.eng.osaka-u.ac.jp/arena/incubation/1F-2050/>

「1F(福島第一原子力発電所)-2050」

グループ長 村田 勲

副グループ長 牟田浩明、佐藤文信、北田孝典



大阪大学工学研究科

マテリアル科学

鈴木賢紀准教授

生産科学

大畑充教授

コンクリート専門家
(人選調整中)

環境エネルギー工学
(エネルギー量子工学)

村田勲教授、牟田浩明教授、
佐藤文信教授、北田孝典教授、
藤井俊行教授、大石佑治准教授
秋山庸子准教授、帆足英二准教授



CFi

山田知穂招聘教授



大阪大学
放射線科学基盤機構
Institute for Radiation Sciences

吉村崇教授



福井工業大学

Fukui University of Technology

西嶋茂宏工学部長

| | |
|-------|-------|
| グループ員 | : 14名 |
| 学内 | : 13名 |
| 工 | : 12名 |
| 工以外 | : 1名 |
| 学外 | : 1名 |



原子力規制委員会

Nuclear Regulation Authority

1F-2050

グループ組織図
(調整中)

1号機PCV内部調査に関する確認点と考え方

確認点

- ・ ペDESTAL開口部で確認されたコンクリート部の破損のメカニズム
- ・ ペDESTAL外側のPCV底部に確認されたテーブル状堆積物の生成メカニズム



考え方

- ・ 確認点に関して特徴的な要素を抽出
- ・ コンクリートの破損要因と堆積物生成要因を列挙し、特徴的な要素を満たす条件について検討、可能性を評価
- ・ 可能性の高い要因からシナリオを想定し、評価すべき項目を挙げる

特徴的な要素

1. ペDESTAL開口部付近の破損

- 1-a コンクリートが破損
- 1-b 鉄筋の熱的損傷なし

2. テーブル状堆積物

- 2-a 多孔質な物質
- 2-b 下部は空洞
- 2-c 空洞内の配管等への熱的損傷なし
- 2-d 多層になっている箇所がある

2-e 堆積物の高さに傾斜あり

1号機PCV内部調査に関する確認点と考え方

1. コンクリート破損要因

| No. | 要因 | 詳細 | 1-b 鉄筋の熱的損傷なし | その他の課題 | 可能性 |
|-----|------------------|---|-----------------------------------|--------------------------------------|-----|
| 1-1 | 炉心溶融物との反応 (MCCI) | 炉心溶融物とコンクリートが接触反応し、混合溶融物を形成 | △ 共晶反応により低温の流動物が生成 | | A |
| 1-2 | 水への溶解 (水熱反応) | コンクリート成分 (特に SiO_2) が高温高压の水へ溶解して水含有ガラスを形成 | ○ 水熱反応は200°C程度でも起きる | △ 水の存在が不可欠 | A |
| 1-3 | 応力による機械的破損 | 応力がペDESTAL開口部付近に集中し、コンクリートのみが破損 | △ 鉄筋は大きく変形しないがコンクリートは破損する程度の応力 | △ 生じ得る応力の検討、コンクリートの劣化の可能性の検討の必要あり | B |
| 1-3 | コンクリートのみの溶解 | 輻射によりコンクリート温度が上昇、溶融 | △ 鉄筋への影響が生じる温度より低温でコンクリートが溶融 | × 局所的な破損を説明できない | C |
| 1-4 | 蒸発 | コンクリート成分 (主としてSi) の蒸発 | △ 鉄筋への影響が生じない温度・雰囲気 | × 局所的な破損を説明できない | C |
| 1-5 | 劣化 | 比較的低温でコンクリートが劣化、その後冠水、水へのコンクリート成分の一部溶解・崩落 | ○ 鉄筋への熱的影響が生じる温度より低温でコンクリートが劣化 | × 局所的な破損の説明が困難 | C |
| 1-6 | 熱衝撃 | コンクリートが炉心溶融物により急速加熱、または冠水により急冷されて崩落 | ○ 鉄筋はコンクリートよりも熱衝撃への耐性は高いと考えられる | × コンクリートが破損しているのは表面だけではない点の説明が困難 | C |

1号機PCV内部調査に関する確認点と考え方

2. 堆積物生成要因

| No. | 要因 | 詳細 | 2-c 空洞内の配管等への熱的損傷なし | 2-d 多層になっている箇所がある | その他の課題 | 可能性 |
|-----|----------------------|---|------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----|
| 2-1 | 液体への気泡の導入、凝固 (MCCI) | コンクリートと炉心溶融物が反応溶融し、混合溶融物を形成。コンクリートからの蒸気が溶融物中に気泡を形成、その後に凝固 | △ 共晶反応により低温の溶融物が形成 | × 多層になることの説明が困難 | | B |
| 2-2 | 水含有ガラスからの水の脱離 (水熱反応) | 高温高圧の水により生じた水含有ガラスの内部の水の脱離により多孔質なガラスが生成 | ○ 水熱反応は200°C程度でも起きる | ○ 反応が複数回発生 | △ 水の存在が不可欠 △ 堆積物の高さの傾斜の説明が困難 | B |
| 2-3 | 粉体の凝集 (反応) | 粒子が水面に堆積後、粒子中のセメント成分により隣接する粒子が接合 | ○ セメント凝固反応は低温で進行 | ○ 反応が複数回発生 | × セメント成分を含む粒子の生成メカニズムが不明 | C |
| 2-4 | 粉体の凝集 (焼結) | 粒子が水面に堆積後、高温で隣接する粒子が接合 | △ 低温で焼結が進行する組成 | ○ 反応が複数回発生 | × 粒子の生成メカニズム及び焼結温度を保持するメカニズムが不明 | D |
| 2-5 | 液体中から気泡が生成、凝固 | 炉心溶融物が減圧もしくは凝固する際に溶解度の差により溶解していた蒸気が気泡を形成 | △ 共晶反応により低温の溶融物が形成 | × 多層になることの説明が困難 | × 下部が空洞になるメカニズムが不明 | D |

1号機PCV内部調査に関する確認点と考え方

シナリオ

1. MCCI (従来の理解)

- 炉心溶融物とコンクリートが反応しコンクリートを浸食
- MCCI生成物の形成

2. コンクリートの水への溶解

- コンクリート成分 (特に SiO_2) が高温高圧の水へ溶解
- 水温上昇により発泡しながら凝固
- 下記はボロシリケートガラスの水熱反応 (200°C, 1.6MPa) によって形成された水含有ガラスと、水含有ガラスを加熱することで形成される多孔質ガラス (水含有ガラスの軟化とガラス内部水の脱離が同時に起こることに起因)

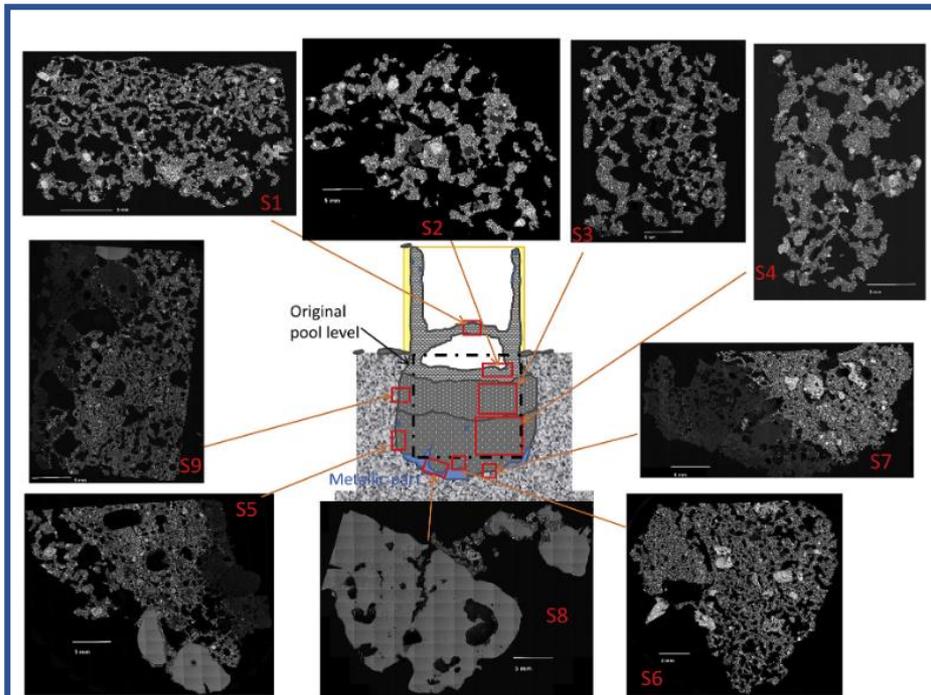
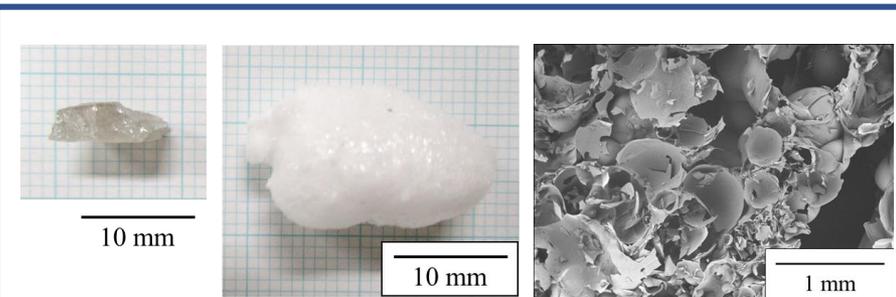


Fig. 1. Location and BSE micrographs of the nine samples analyzed for the VF-U1 tests.

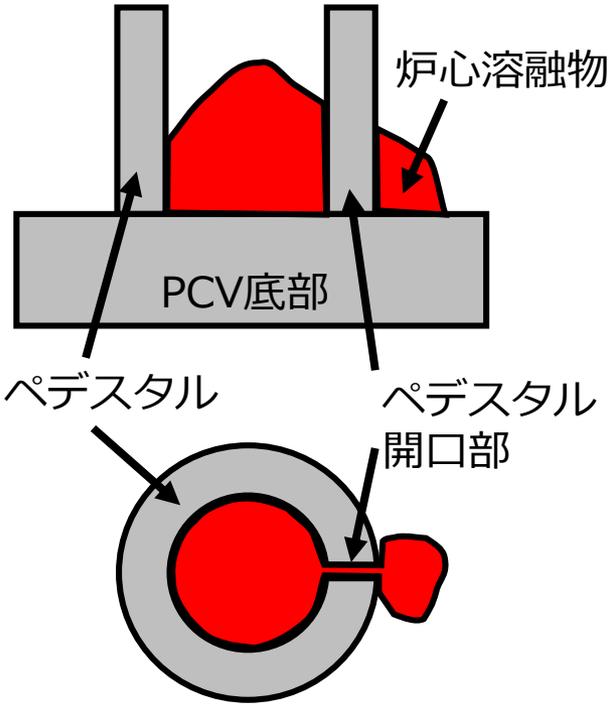
出典 : L. Brissonneau et al., "Material characterization of the VULCANO corium concrete interaction test with concrete representative of Fukushima Daiichi Nuclear Plants", J. Nucl. Mater. 528 (2020) 151860.



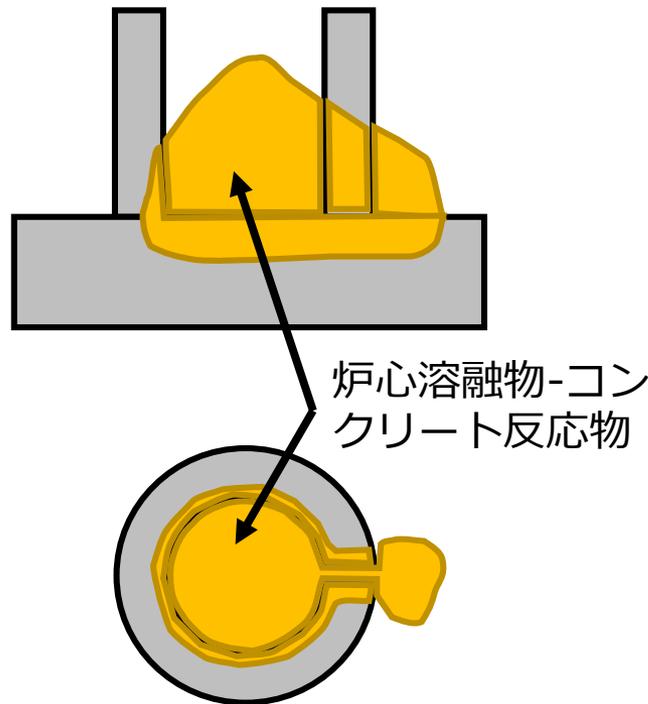
出典 : M. Suzuki et al., "Hydroxyl-Group Identification Using O K-Edge XAFS in Porous Glass Fabricated by Hydrothermal Reaction and Low-Temperature Foaming", Molecules 24, 3488 (2019).

シナリオ1. MCCI (従来の理解)

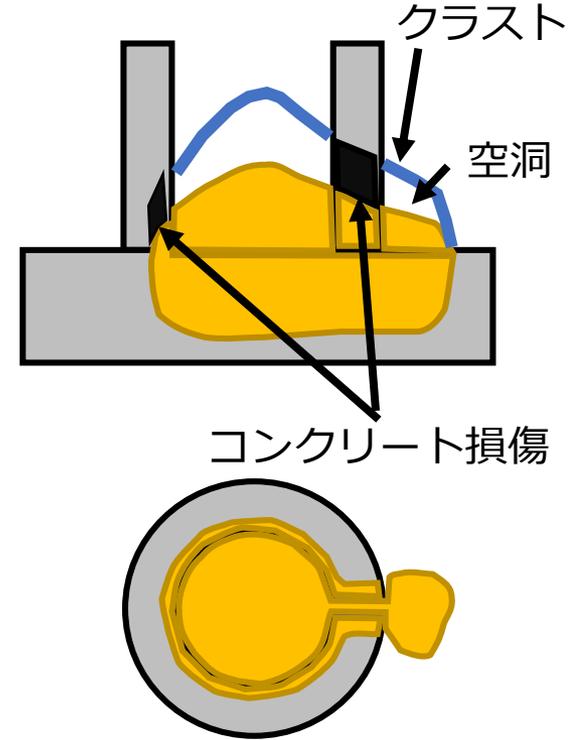
- 炉心溶融物の落下
- 拡がり



- 炉心溶融物-コンクリート反応物の生成
- コンクリートの浸食



- クラストの形成
- 浸食の進行



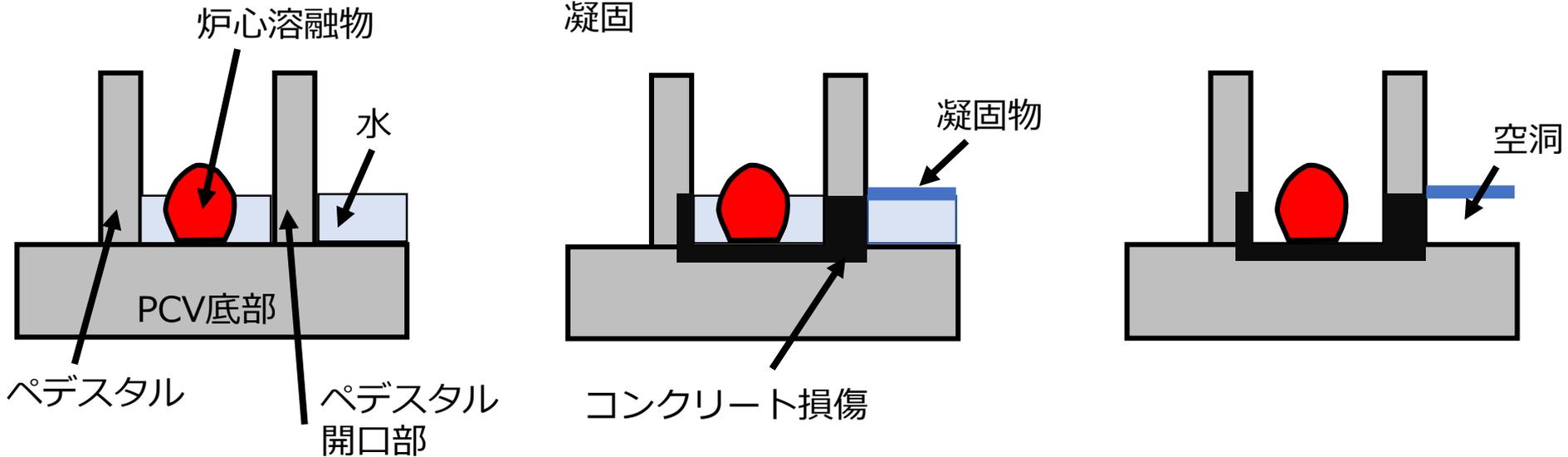
- 課題
- ❑ ペDESTアル開口部は炉心溶融物-コンクリート反応により破損
⇒鉄筋へ熱的損傷を与えない温度条件の解明
 - ❑ テーブル状堆積物の下部はコンクリートを破損する程度の高温になるはず
⇒配管等への熱的損傷が見られないこととの整合性
 - ❑ テーブル状堆積物高さ程度まで炉心溶融物が到達したことになるが、炉心溶融物の量として妥当なのか

シナリオ2. コンクリートの水への溶解

- 初期に水が存在
- 落下した炉心溶融物により、**局所的に水温・圧力上昇**
- 水へBが移行？

- コンクリート成分の高圧水への溶解によりコンクリート損傷
- コンクリート成分と多量の水から成る高粘度な液相が形成
- 水温上昇、また**局所圧力の開放により**、水の蒸発が進み、溶解したコンクリート成分が発泡しながら凝固

- 更に水が蒸発、凝固物の下部に空洞が生成



- 特徴
- コンクリート成分が水へ溶解して破損した場合、温度はせいぜい200℃程度
⇒鉄筋や配管への熱的影響なし
 - 発泡により多孔質低密度な凝固物が形成⇒テーブル状堆積物形成
- 課題
- コンクリート成分が水へ溶解する条件(水温、圧力、Bやアルカリ成分の影響)の
25
解明

2つのシナリオのまとめ

| | MCCI（従来の理解） | コンクリートの水への溶解 |
|---------------|--|---|
| 1-a コンクリートが破損 | 炉心溶融物とコンクリートとの反応 評価項目：反応溶融物の流動挙動（粘性が高く流れて行かない可能性の検討） | 高温・高圧の水へコンクリート成分が溶解 評価項目：水の温度、圧力、成分（Bやアルカリ）とコンクリート成分溶解との関係 |
| 1-b 鉄筋の熱的損傷なし | 鉄筋へ熱的損傷を与えない程度の温度で炉心溶融物とコンクリートとの反応が進行 評価項目：炉心溶融物とコンクリートとの反応と温度との関係、鉄筋の損傷と温度との関係 | コンクリート成分の水への溶解は低温で進行するため、鉄筋への熱的損傷は生じない |

2つのシナリオのまとめ

| | MCCI（従来の理解） | コンクリートの水への溶解 |
|---------------------|---|---|
| 2-a 多孔質な物質 | 炉心溶融物とコンクリートとの反応物の上部に形成されるクラスト | 水へ溶解したコンクリート成分が水温上昇、また局所圧力の開放により発泡しながら凝固 評価項目：模擬実験 |
| 2-b 下部は空洞 | 表面にクラスト形成後に炉心溶融物とコンクリートとの反応物が床を侵食し、空洞形成 | 発泡した凝固物が水面に浮上、水が蒸発して空洞形成 評価項目：模擬実験 |
| 2-c 空洞内の配管等への熱的損傷なし | 炉心溶融物の温度が低い 評価項目：炉心溶融物とコンクリートとの反応と温度との関係 | コンクリート成分の水への溶解は低温で進行するため、配管等への熱的損傷は生じない |
| 2-d 多層になっている箇所がある | 評価項目：メカニズムが現状では不明 | 反応が複数回発生 |
| 2-e 堆積物の高さに傾斜あり | 評価項目：溶融物の粘性が高い場合に傾斜が形成されるか | 評価項目：高温・高圧の水へコンクリート成分が溶解して生成する水含有ガラスの粘性が高く、傾斜を形成する可能性 |
| その他の検討項目 | テーブル状堆積物の高さまで炉心溶融物が到達したことになるが、物量的にあり得るのか | 水（水面）が（局所的にでも）存在し得たのか |

予備的検討の実施

MCCIシナリオに関し、1-aと1-bの評価項目の予備的な検討を実施

| | MCCI（従来の理解） | 実施した予備検討の項目 |
|---------------|--|--|
| 1-a コンクリートが破損 | 炉心溶融物とコンクリートとの反応 評価項目：反応溶融物の流動挙動（粘性が高く流れて行かない可能性の検討） | コンクリートの溶融挙動評価 • コンクリートの種類が溶融挙動に与える影響の確認 • 新田川産粗骨材の組成分析 • 新田川産粗骨材を用いて作製したコンクリートの加熱溶融試験 |
| 1-b 鉄筋の熱的損傷なし | 鉄筋へ熱的損傷を与えない程度の温度で炉心溶融物とコンクリートとの反応が進行 評価項目：炉心溶融物とコンクリートとの反応と温度との関係、鉄筋の損傷と温度との関係 | 鉄筋入りコンクリートの加熱時挙動評価 • 鉄筋の加熱試験 • コンクリートの加熱試験との比較 |

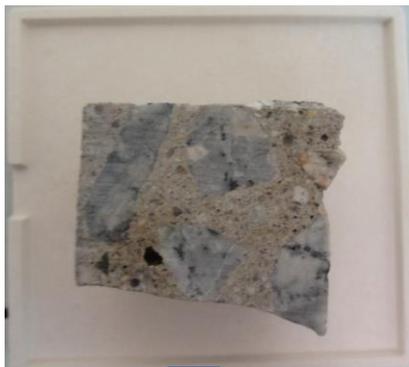
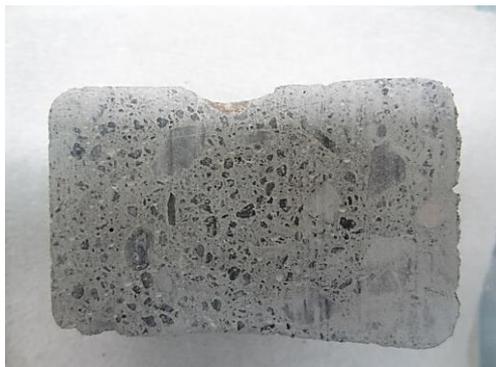
コンクリートの種類が溶融挙動に与える影響

3種類のコンクリートを1200℃で8時間保持

1. ホームセンターで購入したコンクリート

2. 大阪大学吹田キャンパスA15棟コンクリート

3. 大阪大学自由電子レーザー研究施設コンクリート



1のコンクリート
形状は変化なし

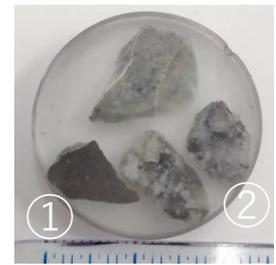
3のコンクリート
溶融して変形



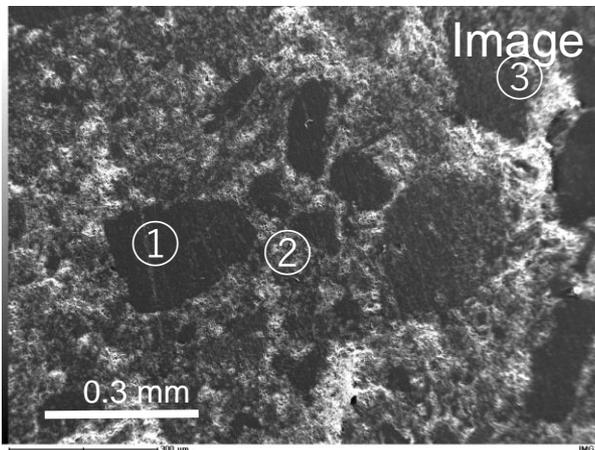
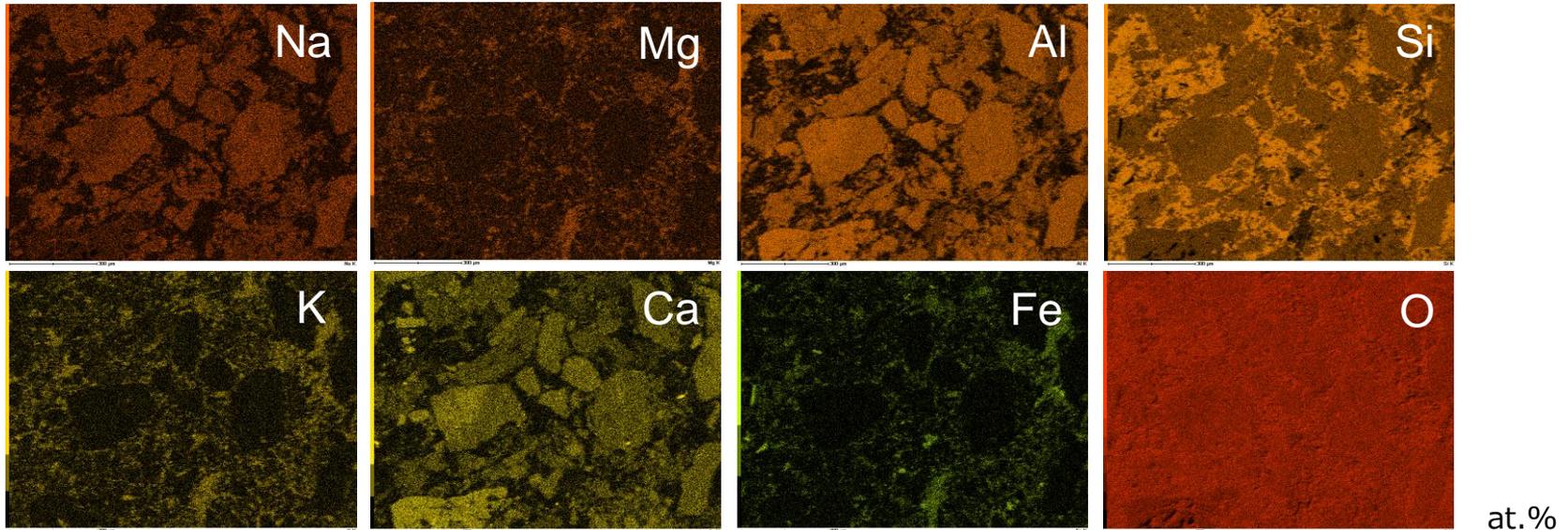
コンクリートの挙動評価試験の際には、1号機に用いられている
コンクリートと同じものを用いる必要がある

新田川産粗骨材の組成分析

1号機で使用された新田川産粗骨材のSEM/EDXによる成分分析 (①黒色)



福島県新田川産の粗骨材



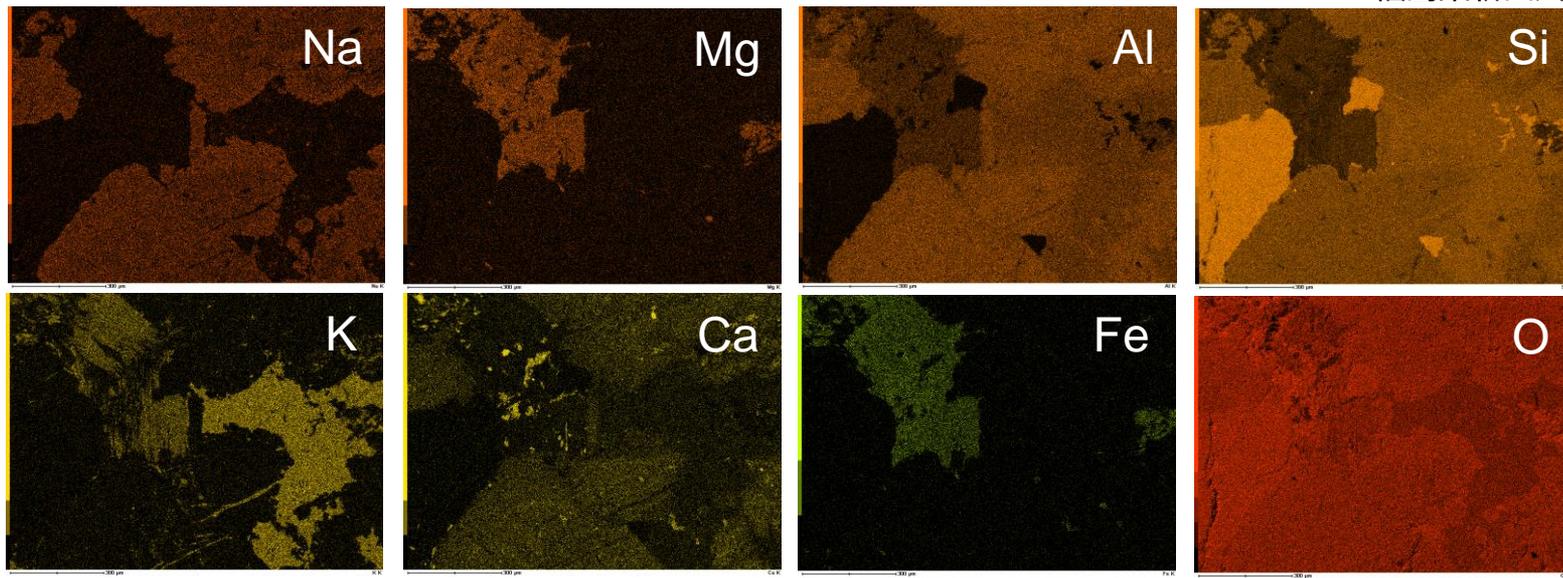
| | ① | ② | ③ |
|----|------|------|------|
| Na | 6.0 | 0.7 | - |
| Mg | - | 1.8 | 16.5 |
| Al | 19.2 | 2.9 | 12.0 |
| Si | 62.1 | 91.0 | 52.0 |
| K | 0.1 | 1.0 | 6.0 |
| Ca | 11.9 | 1.0 | 1.4 |
| Fe | 0.1 | 1.0 | 10.0 |

新田川産粗骨材の組成分析

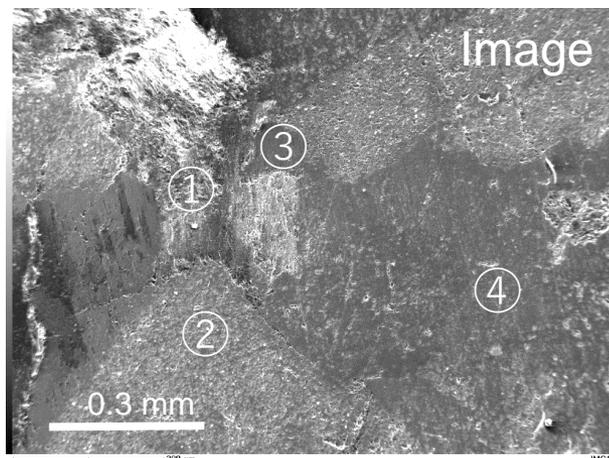
1号機で使用された新田川産粗骨材のSEM/EDXによる成分分析 (②白黒混合)



福島県新田川産の粗骨材



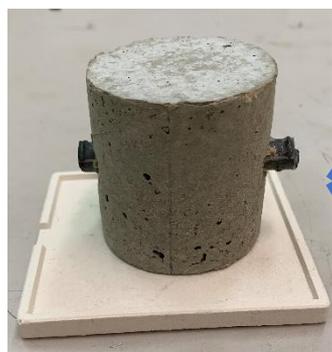
at. %



| | ① | ② | ③ | ④ |
|----|------|------|------|------|
| Na | - | 8.0 | - | 0.9 |
| Mg | 24.0 | - | - | - |
| Al | 11.6 | 17.1 | - | 12.6 |
| Si | 43.9 | 65.7 | 99.4 | 75.6 |
| K | 3.2 | 0.5 | - | 10.5 |
| Ca | 5.7 | 7.9 | 0.1 | - |
| Fe | 10.8 | 0.2 | - | - |

新田川産粗骨材を用いて作製したコンクリートの加熱溶融試験

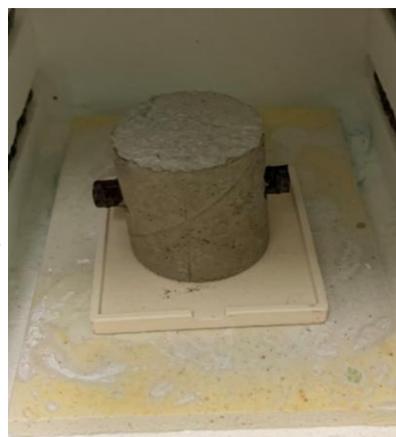
600 °Cと1280 °Cで8時間保持



福島県新田川産の粗骨材を用いて作製した鉄筋入りコンクリート



600 °C



外観上は変化なし



1280 °C



32 - 溶融



鉄筋の加熱試験

鉄筋を600℃と1200℃で8時間保持



鉄筋D10 (600度8時間)
加熱前と比較して変化なし

鉄筋D10 (1200度8時間)
加熱前と比較して変色
錆止めが一部剥離

鉄筋が大きな熱的損傷を受けな~~33~~温度でもコンクリートが溶融する可能性がある

予備的検討のまとめと今後の評価への提案

実施した予備検討

| | MCCI（従来の理解） | 実施した予備検討の結果 |
|---------------|--|---|
| 1-a コンクリートが破損 | 炉心溶融物とコンクリートとの反応 評価項目：反応溶融物の流動挙動（粘性が高く流れて行かない可能性の検討） | コンクリートの溶融挙動評価 • コンクリートの溶融挙動は種類によって異なるため、1号機と同じものを評価に用いる必要がある • 新田川産粗骨材を用いて作製したコンクリートは1280℃で溶融 |
| 1-b 鉄筋の熱的損傷なし | 鉄筋へ熱的損傷を与えない程度の温度で炉心溶融物とコンクリートとの反応が進行 評価項目：炉心溶融物とコンクリートとの反応と温度との関係、鉄筋の損傷と温度との関係 | 鉄筋入りコンクリートの加熱時挙動評価 • 鉄筋は1200℃で錆止めが一部剥離 • 鉄筋が大きな熱的損傷を受けない温度でもコンクリートが溶融する可能性 |

今後の評価への提案

- (1-a MCCI) コンクリートの流動挙動（粘性）評価
- (1-a MCCI) コンクリートと炉心溶融物との反応温度、流動挙動評価
- (1-b MCCI) 鉄筋露出箇所鉄筋表面状態のより詳細な調査
- (1-a, 1-b) コア抜きによる実際のコンクリートの入手
- (1-a, 1-b, 水への溶解) 水への溶解挙動に係る評価の実施
- (1-a 応力による破損) ペDESTAL開口部付近の応力（履歴）の評価

まとめ

1. 大阪大学「1F-2050」

- 大阪大学工学研究科 附属フューチャーイノベーションセンターに、東京電力福島第一原子力発電所（1F）の事故原因調査等を行う研究グループ「1F-2050」を設置

2. 1号機PCV内部調査により確認されたコンクリートに関する事象の検討

- コンクリートの破損要因と堆積物生成要因を列挙し、可能性を評価
- 可能性の高い要因から、「MCCI（従来の理解）」と「コンクリートの水への溶解」の2つのシナリオを提案
- シナリオの妥当性検証のための評価項目をまとめた

3. 予備的検討の実施

- 複数種類のコンクリート加熱試験を実施し、コンクリートの挙動評価のためには1号機に用いられたコンクリートと同じものを用いる必要があることを確認
- 1号機に用いられたと考えられる新田川産粗骨材の成分を分析
- 鉄筋の1200℃8時間加熱試験を実施、錆止めの一部剥離を確認
- 新田川産粗骨材を用いた鉄筋入りコンクリートを作製し加熱試験を実施したところ、1280℃8時間加熱後にコンクリートは外形を保てないほど溶融
- 今後の評価への提案