

廃炉プロセス 「燃料デブリ取り出し」

検討対象 「炉内状況把握」

課題 「FP の状況把握」

ニーズ

1. FP の性状を把握したい

燃料デブリ取り出し：【中期】

望ましい状態とその理由

- 燃料デブリ取り出しのための除染、燃料デブリ取り出し作業時の被ばくリスクを低減するためには、事故時に燃料から放出されて炉内に残留していると推定される FP の化学挙動や基礎的物性、存在形態（遊離性・浸透性等）、FP 核種の蒸気圧変化・雰囲気依存性等の情報が得られることが望ましい。
- 新たな事故の防止や周辺環境保全のためには、事故により放出された核種のうちガンマ線を放出しない（あるいは放出しにくい）難測定核種による影響を把握することが望ましい。
- FP の化学的性状は空気や水に触れている最表面からの深度依存性を把握することが望ましい。

理想に対する現状

- 1号機に関して、数 10~数 100 ミクロンのセシウム粒子がオペフロに散在していると考えられている。水和性のセシウム化合物は水酸化セシウムの形でコンクリート表面から内部に浸透した可能性がある。不溶性セシウム粒子が炉心加熱の初期段階に、酸化ケイ素と水酸化セシウムとの気相中凝固反応によって生成するが、生成量は 2号機と比較して少ないと考えられている。
- 2号機に関して、水和性のセシウム化合物は水酸化セシウムの形でコンクリート表面から内部に浸透した可能性がある。粒子径数 μm 程度の不溶性セシウム粒子が 2号機由来として環境中で確認されている。不溶性セシウム粒子が炉心加熱の初期に、酸化ケイ素と水酸化セシウムとの気相中凝固反応によって生成。生成量は限定的で 10 kg のオーダーと推定されており、不溶性セシウム粒子の一部は、格納容器内、原子炉建屋内に残存している可能性がある。
- 3号機に関して、水和性のセシウム化合物は水酸化セシウムの形でコンクリート表面から内部に浸透した可能性がある。不溶性セシウム粒子が炉心加熱の初期段階に、酸化ケイ素と水酸化セシウムとの気相中凝固反応によって生成するが、生成量は 2号機と比較して少ないと考えられている。

解決すべき課題

- 想定される主なセシウム¹³⁷の化学形態と特徴を踏まえ、PCV 内部に留まっている FP の性状・量を把握することが今後の課題である。例えば遊離性の FP は、これまでに行われてきた注水により建屋内滞留水に流れている可能性が高いと考えられることから、コンクリート表面から内部に浸透している FP や不溶性 FP の炉内での現在の状態と、今後の取り出し期間中の性状推定が今後の課題となる。
- 燃料デブリ取り出し等の作業のためには除染等を行い、作業環境を改善する必要があるが、そのためには、特にインベントリが大きい部分（例えば 1 号機 RCW 系（原子炉補機冷却系）など）を見るのが重要となる。放射エネルギーを推定できる技術があると有益である。たとえインベントリ把握とまでいかずとも、核種組成比の把握ができるだけでも有益である。
- 評価手法を用いない場合、実インベントリと比べて保守的に扱う必要があると考えられる。そのため、特に、解析と実測をセットとしたアプローチが求められる（理想形は全てを実測できることであるが、現実的ではなく困難であるため、解析との適切な組み合わせが求められる）。

参考文献

- 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炉のための技術戦略プラン 2025、原子力損害賠償・廃炉等支援機構、2025 年 10 月 30 日
 - https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20251030_SP2025FT.pdf

(参考) 関連する研究課題

実施されている研究課題

- H30 年度英知「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」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2023-021.pdf>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=cp35v5YvhAk>
- R1 年度英知「放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣機構解明」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2024-026.pdf>
 - https://www.youtube.com/watch?v=ISu0i62H_U4
- 廃炉・汚染水対策事業「総合的な炉内状況把握の高度化（炉内状況の総合的な分析・評価、総合的な分析・評価に資する燃料デブリの挙動や核分裂生成物の挙動及び特性の推定・評価）」
 - http://irid.or.jp/_pdf/20170000_01.pdf
 - http://irid.or.jp/_pdf/20160000_01.pdf
- R3 年度英知「福島第一発電所 2,3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-012.pdf>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=S00acsd4K6M>
- R3 年度英知「世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-013.pdf>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=Ocq0dWRtA9Q>
- R4 年度英知「革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用」

- <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2024-016.pdf>
- <https://www.youtube.com/watch?v=yG-BgiSXJ4k>
- R7 年度英知「臨界近接監視への適用を見据えた TIBr 半導体検出器を用いた FP ガスモニタの高感度化」

検討されている研究課題

- 特になし

2. FP の分布状況を把握したい

燃料デブリ取り出し：【中期】

望ましい状態とその理由

- 燃料デブリ取り出しを安全に行うためには、FP の炉内分布の推定に加え、炉内において特に高い放射線量の領域（ホットスポット）が形成される位置を予測・検知しておくことが望ましい。
- 効率的な除染の実施、廃棄物管理の観点から、事故時の汚染拡散メカニズムや核種移行シミュレーション等を実施することにより建屋内の FP 分布状況を把握することが望ましい。
- 実機による調査により、解析による推定結果を補正し、実験等によりその再現性が確認できること、実際の環境の調査で得られている FP の情報との整合性を確認することで、事故原因の解明や炉内状況の推定ができることが望ましい。

理想に対する現状

- 1 号機に関しては、オペフロで水素爆発が発生したことから、事故時に放出された FP は主に格納容器⇒格納容器トップヘッドフランジ⇒原子炉ウェル⇒シールドプラグ⇒オペフロに至る経路で放出されたものと想定されており、この経路上に FP が偏在していると推定されている。また、事故後に圧力容器から D/W への直接漏えいに起因して D/W 圧力が高圧になっていたと考えられることから、D/W も同様に大量の FP 付着ありと推定されている。また、建屋壁や S/C 壁、もしくは S/C 内滞留水が高汚染と推定されている。
- 2 号機に関して、事故進展においては圧力容器から D/W への気体の漏えいが起こり、FP は D/W 側に直接移行しやすい状況にあったことが推定されている。2 号機のオペフロではシールドプラグ位置で高線量を確認。加えて、事故時の写真からブローアウトパネルから大量の蒸気が放出される様子が確認されている。したがって、FP は圧力容器⇒格納容器⇒格納容器トップヘッドフランジ⇒原子炉ウェル⇒シールドプラグ⇒オペフロに至る経路を通り放出されたものと推定されており、FP 移行経路上に FP が偏在しているものと推定されている。
- 3 号機に関して、事故時に放出された FP は圧力容器⇒格納容器⇒格納容器トップヘッドフランジ⇒原子炉ウェル⇒シールドプラグ⇒オペフロに至る経路を通り放出されたものと推定されており、FP 移行経路上に FP が偏在しているものと推定されている。
- 例えば 2 号機においては、PCV 内部調査において CRD レール付近に局所的な高線量を確認されている。

- 1～3号機廃炉作業(オペフロ除染)及び事故調査の過程において、各号機のシールドプラグ下部(2, 3号機)に多量のセシウム137が存在することが確認された。これは格納容器内部に残っていると推測される放射性物質の量に比肩するオーダーであり、今後の廃炉作業及び事故分析(主にFP放出経路等)において注視すべきポイントである。

解決すべき課題

- FPが特定位置に集中する事象が確認されており、メカニズムを解明することが今後の課題となる。
- 水が循環している状況下ではセシウムなど水溶性の核種の移行が問題になると考えられる。
- 解析のみによって事故時の状況を追跡することでFPの分布を推定することは困難であるため、特に、現在の状態からバックフィットすることで新しい知見を得たい。例えば1号機RCW系の線量が高いため水を抜くことを検討しているが、この部分のFPを調べた上で、他の系でも同じ結果が出るのかといった評価ができるとう良い。
- 評価手法を用いない場合、実インベントリと比べて保守的に扱う必要があると考えられる。そのため、特に、解析と実測をセットとしたアプローチが求められる(理想形は全てを実測できることであるが、現実的ではなく困難であるため、解析との適切な組み合わせが求められる)。

参考文献

- 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炉のための技術戦略プラン 2025、原子力損害賠償・廃炉等支援機構、2025年10月30日
 - https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20251030_SP2025FT.pdf

(参考) 関連する研究課題

実施されている研究課題

- R1 年度英知「放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣機構解明」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2024-026.pdf>
 - https://www.youtube.com/watch?v=ISu0i62H_U4
- 廃炉・汚染水対策事業「総合的な炉内状況把握の高度化(炉内状況の総合的な分析・評価、総合的な分析・評価に資する燃料デブリの挙動や核分裂生成物の挙動及び特性の推定・評価)」
 - http://irid.or.jp/_pdf/20170000_01.pdf
 - http://irid.or.jp/_pdf/20160000_01.pdf
- H28 年度英知「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」
 - https://www.kenkyu.jp/nuclear/result/h29/document/H29eichi_houkokukai_shiryo_poster_28.pdf
- R1 年度英知「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」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2022-028.pdf>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=bCVnJqAi-yo>

- R3 年度英知「福島第一発電所 2,3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-012.pdf>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=S00acsd4K6M>
- R3 年度英知「連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-011.pdf>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=Z5GpqjZRsjE>
- R3 年度英知「アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-019.pdf>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=zDkGcjCKmhl>
- R4 年度英知「高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2024-023.pdf>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=1CicRLuRyfM>
- R4 年度英知「3次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-020.pdf>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=xAMnXFKBbto>
- R5 年度英知「PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発」
- R5 年度英知「高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発」
 - <https://www.youtube.com/watch?v=tHm9RoEKdAk>
- R6 年度英知「デブリ取り出しの安全性確保を目的とした中性子源等のイメージング手法の研究」
 - <https://www.youtube.com/watch?v=YCVU4VwsstA>
- R7 年度英知「群知能を用いた多リンク型ロボットによる多視点環境情報計測及び試料採取技術に関する研究」
- R7 年度英知「超高線量率場における放射線環境情報取得を目指した無線線量計開発」

検討されている研究課題

- 特になし

関連する課題

- デブリ-104「PCV・RPV 内部の線量の把握」
- デブリ-105「炉内状況の知見集約」
- デブリ-201「燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け」
- デブリ-202「遮へい・除染対策」
- デブリ-203「建屋内エリアの作業員被ばく管理」
- デブリ-205「閉じ込め機能の構築」
- 共-1「遠隔技術」
- 共-4「耐放射線性」