段階： **Preparation**

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 「**燃料デブリの状況把握**」

ニーズ

1. 燃料デブリの位置情報を把握したい

望ましい状態とその理由

- 燃料デブリ取り出しを安全かつ効率的に行うためには、PCV 内において燃料デブリがどこにどれくらい存在し、またどこに存在していないかを把握できることが望ましい。また、種々の燃料デブリのうち、粉体の燃料デブリや溶解後に沈殿・堆積等した燃料デブリ（二次デブリ）についても把握できることが望ましい。
- 事故進展解析（燃料挙動、RPV 破損位置、破損タイミング、MCCI による P／D 床及び D／W 床の侵食等）を高度化し、内部調査では明らかにできない要素を高い精度で推定できることが望ましい。
- 取り出し開始直後に取り出しでは表面近傍の燃料デブリが対象となることが想定されるため、事故進展解析などと組み合わせることで 3 次元的なデブリ分布を把握することが望ましい。
- 号機ごとに事故進展が異なり、燃料デブリの存在する位置、量や組成が異なることに留意が必要である。
- なお、温度計等、現在も計測を継続している実測値も燃料デブリの存在する位置や量の評価に活用できる可能性がある。

理想に対する現状

【1 号機】

- 圧力容器内部にはほぼなく、ほとんどは格納容器内に溶け落ちていることがわかっている。これまでには、格納容器内部（ペデスタル内・外、1 階グレーチング上、地下 1 階）の調査が実施されている。比較的デブリの状況に関する情報が不足しているのが 1 号機である。
- ２０２２年に実施された PCV 内部調査において、ペデスタル外の調査ポイント全てにおいて、熱中性子束及び Eu-154 が検出され、 それらの数値については、ペデスタル開口部からの距離と堆積物の高さとの相関は確認されなかったことから、燃料デブリから遊離した物質（燃料デブリ由来の物質）が調査範囲に広く存在していると推定されることが分かった。
- 2024 年 3 月より PCV 水位低下作業が実施され、堆積物の一部が気中に露出した可能性がある。

【2 号機】

- 圧力容器底部に多くあるが、格納容器内には少ないことがわかっている。これまでには格納容器内部（主にペデスタル内）の調査が実施されている。比較的情報が充実しているのが 2 号機である。
- 2024 年 11 月および 2025 年 4 月の「試験的取り出し」により燃料デブリサンプルが採取され、分析が開始されている。また、ロボットアームによる内部調査・段階的取り出し規模拡大に向けた準備が進められている。内部調査の着手時期は 2026 年度となる見込みである。

【3 号機】

- 圧力容器内には少ないが、格納容器内にはある程度存在することがわかっている。これまでに格納容器内部（主にペデスタル内）の調査が実施されており、燃料デブリのペデスタル外への流出は否定できないという調査結果である。
- 2024 年度より取り出し工法の検討結果を踏まえた設計が進められており、PCV 内部調査計画（マイクロドローンやファイバースコープの活用等）や PCV 水位低下準備が実施されている。

解決すべき課題

【1 号機】

- 既存の調査内容の精緻化に加え、ペデスタル内部及び圧力容器内部の燃料デブリの位置情報に関する情報の新規取得が今後の課題である。既存の調査内容の精緻化では特に、堆積物の厚さを把握し、PCV 底部に広がり、MCCI により床面へ侵食している可能性がある燃料デブリを含め、堆積物の下に隠れている燃料デブリの存在範囲を確認することが重要となる。

【2 号機】

- 既存の情報の更なる精緻化と、圧力容器内部の燃料デブリの位置情報に関する情報の新規取得が今後の課題である。

【3 号機】

- 未調査部分である圧力容器内に加え、ペデスタル外の燃料デブリの位置情報は引き続き情報の更新が必要となる。

参考文献

- 東京電力ホールディングス㈱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

- H27 年度英知「プラント内線量率分布評価と水中デブリ探査に係る技術開発」
    - https://www.kenkyu.jp/nuclear/result/h28_decommi/pdf/sys_p06.pdf

- H28 年度英知「原子力エレクトロニクス技術を活用した耐放射線半導体イメージセンサの開発」
    - https://www.kenkyu.jp/nuclear/result/h29/document/H29eichi_houkokukai_shiryo_poster22.pdf
- H30 年度英知「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」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2021-042.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=cXqQZiL196E
- R1 年度英知「耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2023-003.pdf
- R1 年度英知「Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2022-054.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=Egs074Yfqr0
- R1 年度英知「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」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2022-060.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=W8FwJgyP5kU
- R1 年度英知「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」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-001.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=dy0HdZtCOrw
- 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）」
    - http://irid.or.jp/_pdf/20170000_01.pdf
    - http://irid.or.jp/_pdf/20160000_01.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「原子炉圧力容器内部調査技術の開発（調査計画・開発計画の立案・更新、上部から炉心にアクセスする装置の開発、炉心部までの調査方式の開発、選定、調査装置全体システムの設計と工法計画）」
    - http://irid.or.jp/_pdf/20180000_08.pdf
    - http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2018/06/20170000_02.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発（1 号機-堆積物 PJ）（調査計画・開発計画の策定、アクセス・調査装置及び調査技術の現場実証）」
    - http://irid.or.jp/_pdf/20180000_10.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発（2 号機-X-6 ペネ）（調査計画・開発計画の策定、アクセス・調査装置及び調査技術の現場実証）」
    - http://irid.or.jp/_pdf/20180000_11.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発（調査計画・開発計画の策定、アクセス・調査装置及び要素技術の開発）」
    - http://irid.or.jp/_pdf/20180000_09.pdf
    - http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2018/06/20170000_13.pdf
- R2 年度英知「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」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2023-022.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=WESD-5TT8o0
- R2 年度英知「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」

    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2024-020.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=QKqFSq2CWk8
- 廃炉・汚染水対策事業「原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発」
    - https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/06/2022005PCVnaibusyousaityousaF202306r5.pdf
    - https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/2021004PCVnaibutyousa.pdf
- H30 年度英知「炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2021-046.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=dt9Ljwha2Ik
- R3 年度英知「燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データーベスの高度化」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-007.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=ZmyNdQXASUI
- R3 年度英知「燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-014.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=_jw3OtL8xzU
- 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
- 廃炉・汚染水・処理水対策事業「原子炉圧力容器内部調査技術の開発（上部アクセス調査工法における加工技術の高度化、下部アクセス調査工法の開発）」
    - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20240918_r05-result-1st_DecomTech.pdf
- 廃炉・汚染水・処理水対策事業「原子炉圧力容器内部調査技術の開発（既存配管を利用しての原子炉圧力容器内部調査の技術開発）」
    - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20241114_r04-result-2nd_ToshibaESS.pdf
    - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20231006_TOSHIBAESS.pdf
- 廃炉・汚染水・処理水対策事業「原子炉圧力容器内部調査技術の開発（上部側面アクセス調査工法の技術開発、下部アクセス調査工法の技術開発）」
- R5 年度英知「ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究」
    - https://www.youtube.com/watch?v=9AbHhUktiMA
- R5 年度英知「動画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング」
    - https://www.youtube.com/watch?v=iq-8mMuapoA
- R6 年度英知「耐放射線性を有するレーザスキャナと AI・画像処理による 3D モデリング法の開発」
- 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」

検討されている研究課題

- 特になし

2. 燃料デブリの性状（各工程での状態予測等含む）を把握したい

望ましい状態とその理由

- 燃料デブリの性状に関する情報は、事故原因の解明や炉内状況の推定を高度化するために活用され、そして燃料デブリの取り出し工法の設計・燃料デブリの取り出し作業、安全な輸送・保管・管理、そして処理・処分の検討に活用されることが望まれる。
- 燃料デブリの性状に関する情報を取得するための方法論としては主に解析、実機における調査、そして実験の 3 つが想定される。
- 燃料デブリの取り出し工法の設計・燃料デブリの取り出し作業に反映するためには、燃料デブリ表面線量、燃料デブリの機械的特性、組織の状態（気孔率等）、MCCI 生成物の特性、加工性、取り出し時のダスト発生挙動、デブリの経年変化挙動に係る情報を把握できていることが望まれる。この際、燃料デブリの位置として、RPV、CRD ハウジング内・間、ペデスタル内、ペデスタル外があるため、それぞれの状態同定ができることが望ましい。
- 燃料デブリの安全な輸送・保管・管理のためには、燃料デブリの組成や鉱物相、特性情報、デブリの経年変化挙動に係る情報を把握できていることが望ましい。経年変化挙動に関しては、経年変化のメカニズムを解明し、将来の変化を予測できる手法の検討により事前策を施せることが望ましい。（例えば、燃料デブリの経年変化予測のための放射線・生物・化学・物理的溶解機構評価）。
- 燃料デブリの処理・処分の検討のためには、燃料デブリの安定性（核種の溶出挙動等）に係る情報を把握できていることが望ましい。
- 各工程における臨界管理の検討のためには、燃料デブリの組成や特性情報、MCCI 生成物の特性に係る情報を把握できることが望ましい。また、燃料デブリ中の Gd 及び B の挙動を把握しておき、体積に関する情報等も含めて総合的に臨界リスクを把握しておくことが望まれる。
- これらについては、号機ごとに事故進展が異なり、燃料デブリの性状、デブリの置かれている環境が大きく異なることに留意が必要である。

理想に対する現状

- これまでは内部調査による目視確認や堆積物等の採取、そして解析による推定、模擬デブリを活用した実験結果を基に燃料デブリの性状を推定してきた。
- 燃料デブリ取り出しの初期段階においては、採取できる燃料デブリは非常に限られていることから、限られた燃料デブリを用いて、位置や深さが異なる燃料デブリの性状を予測することも必要となる。そのための燃料デブリの分析項目・分析フローを設定することも必要となる。
- 2022 年 2 月から実施されている PCV 内部調査において、堆積物のサンプリングも成功しており、分析が実施されている。

- 2024 年 11 月および 2025 年 4 月に実施された 2 号機の「試験的取り出し」により 2 つの燃料デブリサンプルの採取が完了し、構外分析施設へ輸送のうえ分析が開始されている。採取された各サンプルについて、外観観察、元素分布、同位体比、放射線量等の分析結果が得られつつある。
- 2024 年 9 月より 2 号機の燃料デブリ試験的取出しに向けた作業に着手しており、燃料デブリの採取が成功したのちに分析が実施される予定である。

解決すべき課題

- 今後は、実機による更なる調査や、実際の燃料デブリ取り出しにより得られる燃料デブリの分析結果を用いて、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が望まれる。

参考文献

- 東京電力ホールディングス㈱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

- H27 年度英知「漏洩箇所特定とデブリ性状把握のためのロボット搬送超音波インテグレーション」
    - https://www.kenkyu.jp/nuclear/result/h28_decommi/pdf/sys_p07.pdf
- H29 年度英知「可搬型加速器 X 線源・中性子源によるその場燃料デブリ元素分析および地球統計学手法を用いた迅速な燃料デブリ性状分布の推定手法の開発」
- H30 年度英知「レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2022-007.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=ygh8XEM3VZE
- H30 年度英知「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」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2022-009.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=moQHj5irfoA
- R1 年度英知「Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2022-054.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=Egs074Yfqr0
- R1 年度英知「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」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2022-060.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=W8FwJgyP5kU
- 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=lSu0i62H_U4
- R1 年度英知「燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2024-064.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=4FCd_1PTRbo
- 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/20180000_09.pdf
    - http://irid.or.jp/_pdf/20160000_01.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けたサンプリング技術の開発（燃料デブリサンプリング技術の開発計画、サンプリング計画の策定、ＰＣＶ内燃料デブリサンプリングのための装置、システムの開発）」
    - http://irid.or.jp/_pdf/20180000_07.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ性状把握・分析技術の開発（燃料デブリ性状の分析に必要な技術開発等、燃料デブリ微粒子挙動の推定技術の開発）」
    - http://irid.or.jp/_pdf/20180000_07.pdf
    - http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2018/06/20170000_04.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ性状把握・分析技術の開発（燃料デブリの経年変化特性の推定）（海外の事故炉における燃料デブリの特性調査及び燃料デブリ取り出しシステムへの影響調査と、これらを踏まえた研究計画立案、燃料デブリの経年変化及び移行挙動に関するデータ取得）」
    - https://dccc-program.jp/files/20190718_TENEX.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリの経年変化特性の推定技術の開発）（福島第一原子力発電所の燃料デブリにおける総合的な経年変化予測）」
    - https://dccc-program.jp/files/20190718_TENEX.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発」
    - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20251022_r05-result-1st_JAEA_2.pdf
    - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20251022_r05-result-1st_JAEA_3_3.pdf
- R2 年度英知「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」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2024-007.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=ZFwgcAVzPEM
- R2 年度英知「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」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2023-022.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=WESD-5TT8o0
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリの分析精度の向上及び熱挙動の推定のための技術開発）」
    - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20231117_JAEA.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発」
    - https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/06/2022001seijyouhaaku202306F.pdf
    - https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/12/2022001seijyouhaakuPJ.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリの経年変化特性の推定技術の開発）」
    - https://dccc-program.jp/files/20230714TOSHIBAESS.pdf

- R3 年度英知「燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データーベスの高度化」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-007.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=ZmyNdQXASUI
- 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
- R3 年度英知「燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御」
    - https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-014.pdf
    - https://www.youtube.com/watch?v=_jw3OtL8xzU
- 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
- R5 年度英知「革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化への挑戦と LIBS による検証」
    - https://www.youtube.com/watch?v=240_b91ExNI
- R6 年度英知「燃料デブリ取り出しに向けた遠隔ロボット-計測技術の統合のための研究教育人材育成」
    - https://www.youtube.com/watch?v=Eqk2eI6fa1s
- R6 年度英知「燃料デブリ研究と SEEM 学構築を基軸とした研究人材育成」
    - https://www.youtube.com/watch?v=1oRqaPwuND0
- 廃炉・汚染水・処理水対策事業「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発）」

検討されている研究課題

- 特になし

関連する課題

- デブリ-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-207「臨界管理」
- デブリ-210「水素発生挙動の把握」
- デブリ-213「燃料デブリ取り出し方針」
- デブリ-214「デブリ回収戦略の構築」
- デブリ-218「燃料デブリ取り出し装置・機器の開発」
- 共-1「遠隔技術」
- 共-3「測定・分析技術」
- 共-4「耐放射線性」