

廃炉プロセス「燃料デブリ取り出し」

検討対象「取り出し工法・システム」

課題「燃料デブリ取り出し装置・機器の開発」

ニーズ

1. デブリのアクセス、加工（切削・破砕等）、回収及び集塵に必要なツールを開発したい

燃料デブリ取り出し：【中期】

望ましい状態とその理由

- 工法選定にあたっては、5つの視点（安全、確実、合理的、迅速、現場指向）に基づきながら、コストや工程も判断指標とする必要がある。そのために、評価項目をなるべく定量化するとともに、総合的な観点から判断指標を設定することが求められる。
- 工法選定にあたり、取り出しシナリオの策定と要求事項の明確化が求められる。シナリオの策定では、将来実施される内部調査や技術検討により得られる成果を予め複数想定した上で、これらを活用する前提条件の基に検討する。要求事項の明確化では、要求事項の相互関係にも留意しながら、福島第一原子力発電所全体を見据えた検討が重要となる。
- 燃料デブリを安全・確実・効率的に取り出すために、耐放射線性、耐腐食性、遠隔点検・保守性、高い信頼性、高精度、トラブル事象を可能な限り想定したうえでトラブル発生時に以降の作業を妨げない救援機構等の仕様を満たし、現場状況に柔軟に対応可能なデブリ取り出し機器・装置の開発が望まれる。
- 燃料デブリを安全・確実・効率的に取り出すために、デブリの位置に応じたアクセスシステム、デブリの状態に応じた回収システム、燃料デブリの切削・集塵システムの開発が望まれる。
- 燃料デブリを安全・確実・効率的に取り出すために、水中、気中で発生する粉塵や微粒子、ヒューム等の挙動を把握し、汚染拡大や放射性物質の拡散を防止できることが望まれる。
- デブリの加工にはカメラによる映像の鮮明さを保つことが不可欠であり、滞留水の濁度を低く保つ必要がある。そのために腐食等の問題を生じさせずに、微生物繁殖を抑制することが望まれる。
- 燃料デブリ取り出しに際しては、燃料デブリ以外の炉内構造物等も切断し、収納し、炉外に搬送する必要がある、それらの技術・システムを整備することが望まれる。
- 燃料デブリ以外の炉内構造物等の切断・収納・搬送においては、燃料デブリに比べて大型（大重量）の物を取り扱うため、それに応じた切断能力・把持能力・収納能力（容器）・搬出能力が求められる。

理想に対する現状

- 2号機について、櫛葉遠隔技術開発センターにてロボットアームのモックアップ試験、訓練が実施された後、2024年9月から試験的取り出しが開始された。2024年9月にはX-6ペネからペデスタル内部までのアクセスに成功、2024年11月および2025年4月にデブリサンプルの回収に成功している。
- 取り出し規模の更なる拡大のための工法選定に向けた概念検討を実施しており、各工法の課題・リスクを抽出している。また、構造物・燃料デブリの加工工法としてディスクカッタ、吸引、チゼル、コアボーリングが検討されている。
- 燃料デブリの回収システムを開発するために、燃料デブリの性状（金属屑、切株燃料、粉、塊、小石、クラスト燃料デブリの割合など）及び量を具体的に設定する必要がある。また、粒燃料デブリの吸引回収工法を具体化する必要がある（配管の閉塞対策、効率的に吸引できるストレーナ形状、ポンプの保守手法、フィルタのつまりの検知及び保守、スループット量算出など）。
- 燃料デブリの切削・加工システム、集塵・飛散抑制システム、PCV内ダスト挙動予測手法の開発が進められている。これらの結果を踏まえ、最適な加工工法、集塵手法、機器の設計及び設置方法を選択する必要がある。
- 取り出し用アームの遠隔保守や燃料デブリの収納を行う場所となる燃料デブリ取り出し用エンクロージャの設計が進められている。ダブルドアシステム試作機の製作が完了しており、エンクロージャへ組み込み、X-6ペネ接続構造との組合せ試験を実施してシステムとして検証する計画となっている。
- 燃料デブリ収納容器を搬送するための遠隔輸送台車の設計が進められている。試作機の製作が完了し、工場内検証試験において収納容器の移送作業やメンテナンスの実現性が確認されている。今後はエンクロージャとの組合せ検証試験を行う必要がある。
- 段階的な取り出し規模の拡大の段階では、試験的取り出し装置の検証で判明した改善点等も踏まえて装置を改良していく方針であり、エンクロージャの閉じ込め性・マニピュレータの信頼性・供用期間中の装置類保守の確保が課題として挙げられている。

解決すべき課題

- 段階的な取り出し規模の拡大に向け、研究開発成果を現場適用するためのエンジニアリングを進め、試験的取り出しを通じて得られる知見等を踏まえながら、燃料デブリ取り出し装置・安全システム・燃料デブリ一時保管設備・取り出し設備のメンテナンス設備の設計・製作・設置を進める必要がある。
- 開発された機器・装置はシステムとして組み合わせた上で、実際に現場で安全かつ確実に性能が発揮できることを確認するために、モックアップ試験を重ねて検証する必要がある。
- 燃料デブリ取り出しにおける加工速度が不足しているため、加工速度向上の可能性検討や、超音波加工に適した応用手法の検討が必要である。
- 現場情報およびその不確かさ、それを解決しようとする取組などに関する知見を集約し、想定外の状況や不測の事態が発生した場合に対応するための基本データベースを構築する必要がある。

る。また、そのような集合知を開示することで、関連する検討課題において廃炉進捗を俯瞰的に捉え、廃炉工程全体の適正化や、研究を効率的に推進することが求められる。

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
- 令和 3 年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金」「燃料デブリの取り出し工法の開発」2021 年度実施分成果、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)、2022 年 9 月
 - https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/2022007_deburitoridashi.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業費補助金「燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発」令和 3 年度実施分報告（報告資料）、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構、2022 年 8 月
 - https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/2022006_dandori.pdf

（参考）関連する研究課題

実施されている研究課題

- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し基盤技術の高度化（燃料デブリの拡散防止に係る技術開発）」
 - http://irid.or.jp/_pdf/20180000_14.pdf
 - http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2018/06/20170000_09.pdf?v=2
 - https://dccc-program.jp/files/20190711_ONET.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技術の開発（燃料デブリのダスト集塵システムの技術開発）」
 - <https://dccc-program.jp/files/20220114ONET.pdf>
- 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」
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発」
 - <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/10/2023003dandori202310F.pdf>
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの取り出し工法の開発」
 - <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/06/2022008toridasikouhou202306F-.pdf>
- 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」
- 廃炉・汚染水対策事業「安全システム（核燃料物質・難分析元素等の分析の迅速化・効率化技術の開発）」
 - https://dccc-program.jp/project/project-2_24-1
- 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（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）」
 - https://dccc-program.jp/project/project-1_24-1
- R7 年度英知「燃料デブリ輸送のためのマルチフィジックスシミュレーションモデル」
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ取り出し工法の開発（気中上取り出し工法における大型搬送装置等のオペフロ上部設備の開発）」

- https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20251030_r05-result-4th_DecomTech.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「安全システム（液体処理システム）」
 - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20250916_r05-result-4th_DecomTech.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ取り出し工法の開発（気中上取り出し工法における充填安定化技術、加工時落下対策技術の開発）」
 - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20251008_r05-result-4th_DecomTech.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの取り出し工法の開発（C R Dハウジング切断、撤去技術の開発）」
 - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20231027_ONET.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの取り出し工法の開発（大型構造物取り出し及び搬送時における汚染拡大防止隔離技術の開発）」
 - <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/06/2022009kakurigijyutu202306.pdf>

検討されている研究課題

- 特になし

2. 耐放射線材料（電子回路含む）を開発したい

燃料デブリ取り出し：【中期】

望ましい状態とその理由

- 燃料デブリを取り出す際の機器・装置に与える放射線の影響を軽減するために、実際の現場に適用可能な耐放射線性を有する材料（電子回路等含む）が望まれる（P C V・R P V内の線量当量率は数 Sv/h～数百 Sv/h オーダー、原子炉建屋内の線量当量率は数 mSv/h～数十 mSv/h オーダー）。
- 高い汚染状況に晒された場合においても速やかに除染を実施できる加工技術や表面処理技術等の開発が望まれる。

理想に対する現状

- アクセス装置の運用及びメンテナンスにおいて、カメラの耐放射線性は 100 k Gy、アクセス装置の耐放射線性は 1MGy 程度あることが望ましい。なお、一部のカメラは耐放射線性 100kGy を達成している。
- 燃料デブリ取り出し装置を内包する作業セル内の除染方法と手段は取り出し工法ごとに異なり、未定であるため、今後具体的な手法について検討する必要がある。
- 2024 年 9 月に実施された試験的取り出しで発生したカメラ映像が途絶えるという事業について、東京電力は「カメラの半導体素子に放射線が通過し、電離作用により発生した多量の電荷の影響が考えられる」と考察している。

解決すべき課題

- 高線量下での長時間作業にあたっては、大量の交換部品が必要となり、結果的に大量の廃棄物が発生する。先進技術開発に限らず、既存技術の適用も視野に入れながら、廃棄物発生を考慮した材料が求められる。
- 除染性を向上させるために、作業セル等への異物混入防止策が必要である。

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
- 第 130 回 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議、資料 3-3 燃料デブリ取り出し準備「2 号機_燃料デブリ試験的取り出し作業状況」、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構・東京電力ホールディングス株式会社、2024 年 9 月 26 日
 - <https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2024/09/09/3-3-2.pdf>

(参考) 関連する研究課題

実施されている研究課題

- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し基盤技術の高度化」
 - http://irid.or.jp/_pdf/20180000_14.pdf
 - http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2018/06/20170000_09.pdf?v=2
 - https://dccc-program.jp/files/20190711_ONET.pdf
 - https://dccc-program.jp/files/20190716_HAMAMATSU.pdf
- 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-2020-027.pdf>
- 課題解決型廃炉研究プログラム・一般「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」
- 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」
- R6 年度英知「高放射線耐性を有する無線データ伝送用チップセットの要素開発(ベースバンド回路開発)」
- R6 年度英知「高放射線耐性を有する無線データ伝送用チップセットの要素開発(高周波アナログ回路開発)」
- 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」
- 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」
- 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」
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ取り出し工法の開発（気中上取り出し工法における大型搬送装置等のオペフロ上部設備の開発）」
 - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20251030_r05-result-4th-DecomTech.pdf

- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ取り出し工法の開発（気中上取り出し工法における大型搬送装置等のオペフロ上部設備の開発）」
 - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20251030_r05-result-4th_DecomTech.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリ取り出し工法の開発（気中上取り出し工法における充填安定化技術、加工時落下対策技術の開発）」
 - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20251008_r05-result-4th_DecomTech.pdf
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの取り出し工法の開発（大型構造物取り出し及び搬送時における汚染拡大防止隔離技術の開発）」
 - <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/06/2022009kakurigijyutu202306.pdf>
- 廃炉・汚染水対策事業「燃料デブリの取り出し工法の開発」
 - <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/06/2022008toridasikouhou202306F-.pdf>

検討されている研究課題

- 課題リスト「耐放射線性材料」
- 課題リスト「耐放射線電子回路等の開発」

関連する課題

- デブリ-101「燃料デブリの状況把握」
- デブリ-102「PCV・RPV 内部の構造物の状況把握」
- デブリ-105「炉内状況の知見集約」
- デブリ-106「建屋内の汚染状況の把握」
- デブリ-211「PCV・建屋の構造健全性確保」
- デブリ-301「PCV 内燃料デブリ取り出し」
- デブリ-302「RPV 内燃料デブリ取り出し」
- 共-1「遠隔技術」