

廃炉プロセス「燃料デブリ取り出し」

検討対象「構造健全性」

課題「PCV・建屋の構造健全性確保」

ニーズ

1. 構造物の健全性を検査・モニタリングしたい

燃料デブリ取り出し：【中期】

望ましい状態とその理由

- 燃料デブリサンプリングや燃料デブリ取り出しを安全に行うために、PCV や RPV 等の重要な機器・設備の支持機能を維持するためには、維持すべき機能（例えば、支持機能や閉じ込め機能等）を有する構造物の健全性を検査・モニタリングすることが望まれる。
- 検査・モニタリングに際しては、検査装置のアクセス性、設置性、評価手法の開発が望まれる。また、高放射線環境下でアクセスできない場合には、代替となる検査・モニタリング手法及び保守・保全技術が望まれる。
- 金属材の腐食による強度低下や閉じ込め性能の劣化、影響を受けたコンクリート構造材の強度の低下等のおそれに対して、RPV や PCV の閉じ込め性能や原子炉建屋を含めた強度に関わる長期的な健全性を維持するための慎重な対応が必要である。
- このためには、特に PCV 内部の損傷状況の確認を鋭意進めるとともに、地震や経年劣化といった今後生じ得る長期的なリスクを想定した上で、PCV 内部に関する最新情報に基づいた健全性評価を進める必要がある。損傷状態に関する情報が限られる中で、この評価には不確かさが常に伴うが、不確かさを低減するための評価用データの更新や最新の炉内情報の反映等に鋭意努める必要がある。

理想に対する現状

- 2021 年 2 月 13 日に発生した福島県沖を震源とする地震により、1,3 号機において PCV 水位の低下が確認されている。この水位低下は、これまで確認されている PCV 損傷箇所の状況変化や新たな損傷箇所の発生に伴い、PCV 内部からの漏えい量の増加によって発生した可能性があるとして想定される。プラントの状態変化を把握するための監視系の強化や、中長期を見据えた設備と建屋を保安全管理するための影響評価、状況を把握するために必要な技術開発が求められる。
- サプレッションチェンバ(以下 S/C)脚部は滞留水によって水没しているため、腐食減肉が進行すると想定される。そのため、廃炉・汚染水・処理水対策事業で腐食減肉を抑制するために、実機環境を踏まえた電気防食方法が検討されている。

- 2023 年に実施された 1 号機 PCV 内調査でペデスタル部のコンクリートが消失していることが分かった。この結果を受けて、①ペデスタルの支持機能には期待できないという前提の下、RPV が沈下し PCV に主蒸気管相当の開口部が生じる場合も含めて、敷地境界におけるダスト飛散の影響を評価すること、②評価結果にかかわらず取り得る対策を検討すること、③支持機能が失われて RPV が沈下した場合の RPV 及び PCV がどのような状態に至るか構造上の影響に関する評価を行うこととなった。
- 支持機能が失われた場合の評価については、地震動を想定した強度評価の結果、大規模な損壊には至らないと評価されている。
- 2024 年 2 月には無線小型ドローンによる PCV 内部（気中部）調査が実施された。調査によって得られた情報は以下の通り。① ペデスタル外壁に大きな損傷はなかった。また、CRD 交換用開口部外側には落下物があるものの、既存構造物はおおむね形を保っており、CRD 交換用レール周辺には目立った障害物がないことを確認した。② 脱落した CRD ハウジング（複数の CRD 関連機器を含む）がペデスタルの CRD 交換用開口部の一部を塞いでおり、その上部には塊状の物体（つらら状になっている部位もある）が付着している様子が確認され、上方より移行してきたものと推定された。③ ペデスタル内壁面には著しい損傷は確認されず、ケーブルの中継箱等の既設設備や既設 T I P（移動式炉心内計装）開口部も確認された。

解決すべき課題

- プラントの状態変化を把握するための監視系の強化や、中長期を見据えた設備と建屋を保全管理するための影響評価、状況を把握するために必要な技術開発が求められる。
- コンクリートは環境に応じて常に変化していることから、変形をつねに画像解析で評価することや、加速度計を設置して小地震の応答、あるいは特異な変形挙動についてモニタリングするとともに、建物剛性などを振動特性から評価することが必要となる。また、亀裂や腐食のみならず、変形や破壊のモニタリングを継続的に実施することが、許容される変形量等の把握の観点から望まれる。
- 高線量環境のため、構造物に接近できない、あるいは遠隔技術を用いても十分に構造健全性を検査することができない構造物に対して、構造物の状態や環境を推定する方法（例えば統計的解析手法や各種試験等の方法の考案・開発）が必要となる。

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

- 廃炉・汚染水対策事業「圧力容器／格納容器の耐震性・影響評価手法の開発（大規模地震時における安全シナリオの構築、安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発、安全シナリオの高度化）」
 - http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2017/06/20160000_11.pdf
- R2 年度英知「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」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2023-031.pdf>
- R3 年度英知「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-004.pdf>
- 廃炉・汚染水・処理水対策事業「原子炉建屋内の環境改善のための技術開発（サプレッションチェンバ脚部の電気防食による腐食抑制技術の開発）」
 - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20230705_IRID.pdf
- 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※」

検討されている研究課題

- 特になし

2. 構造物の長期的な健全性を評価したい

燃料デブリ取り出し：【中期】

望ましい状態とその理由

- PCV や RPV 等の重要な機器・設備の維持すべき機能（例えば、支持機能や閉じ込め機能等）を維持するための対応策を講じるために、事故の影響及び経年劣化を踏まえた構造物の耐震性及び損傷発生時の影響を把握することが望まれる。その際、実機調査を通じて得られる構造物の状況・状態を用いて解析により事故進展を解明して、構造物の健全性評価を行うことが望まれる。
- デブリ取り出しにあたり放射性物質の閉じ込め機能を有するバウンダリとなる構造物・配管の健全性の維持を行うために、高放射線環境下、海水や地下水由来の微生物影響環境下、負圧管理により酸素を含む大気が PCV 内に流入する環境下、また、廃炉作業の過程で腐食が刻々と進行する中での構造物の腐食等の劣化現象を把握することが望まれる。腐食劣化に関しては、閉じ込め機能の確保のために取られる手法により、PCV 内の酸素濃度の変化が起きると大幅な違いが生じるため、連携した対応が望まれる。
- 気相、液相の流動の中で 1 F 環境特有の劣化（例えば、腐食やき裂等）の有無を確認できることが望ましい。
- 構造物の長期健全性を評価するためには、検査手法・評価手法の組み合わせとともに高精度でのアウトプットが創出されることが望ましい。

理想に対する現状

- 大気中での使用を想定し、閉じ込めバウンダリとなっている原子炉格納容器（PCV）は耐食性の低い炭素鋼が使用されているが、事故後の 1F では、高放射線、室温、懸濁物・堆積物が存在する特殊な環境となっており、同環境での腐食現象に関する知見が不足している。燃料デブリの冷却のために PCV 内に注水が行われており、炭素鋼が水に浸漬している状態となっている。また、水の放射線分解により過酸化水素水や各種のラジカル種などの酸化性化学種が発生することが知られている。
- 燃料デブリ取り出し時に PCV 内を負圧に維持する場合は大気の流れにより酸素濃度が上昇して、RPV・PCV 等の構造材及び必要な配管等の腐食が進行することが懸念されるものの、これまでの検討から 40 年間分の鋼材の腐食による減肉を考慮しても基準地震動に対する耐震裕度を確保できる見通しが得られている。
- 一方、更なる腐食抑制対策のため、廃炉・汚染水対策事業において、長期の廃炉作業期間にわたり RPV・PCV 等の構造材及び必要な配管等の腐食の進行を防ぎ、現状を維持するための腐食抑制策の実機適用性について検討している。
- PCV・RPV 及び配管等については、放射線環境や海水投入の影響を考慮した鋼材の腐食抑制剤の有効性の試験も実施されており、全体腐食・局部腐食に対しても有効な腐食抑制剤の候補も抽出されている。また、鋼材表面の腐食状況の可視化や腐食原因の推定のための手法が検討されている。
- また、滞留水によって水没している S/C 脚部の腐食減肉を抑制するために、廃炉・汚染水対策事業において実機環境を踏まえた電気防食方法が検討されている。
- 2022 年から 2023 年に実施された 1 号機の PCV 内調査によって、ペデスタルのコンクリートの一部がなくなっていることが確認されている。

解決すべき課題

- PCV 内部の損傷状況の確認を鋭意進め必要な情報を得るとともに、地震や経年劣化等の今後生じるハザードを想定し PCV や原子炉建屋の健全性評価を進める必要がある。なお、損傷状態調査等から得られる健全性評価に必要な情報は限定的であることから、不確かさを低減するためにも継続的に調査・データ収集を行い評価用データの更新等に努める必要がある。
- 既設循環水冷却・浄化システムへの防錆剤の影響を緩和する上では、浄化の前段階で防錆剤濃度を低減する必要が示されている。今後、PCV 循環冷却系の検討において、腐食抑制策と他の要求機能が満足される対応策を総合的に検討していく必要がある。
- 特に、S/C 脚部の腐食可能性は課題であり、どの様にモニタリング可能かが課題である。検査は難しいため、評価技術との組み合わせが求められる。
- 長期に亘るコンクリートの劣化については、更なる検討が必要と考えられる。検査が可能な部分は問題ないと考えられるが、例えば、RPV のペデスタル基礎部分等はモニタリングが困難であるため、評価技術との組み合わせが必須となる。

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,原子力損賠賠償・廃炉等支援機構, 2025,2025 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

- H29 年度英知「放射線環境下での腐食データベースの構築」
- R1 年度英知「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」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2020-047.pdf>
- 廃炉・汚染水対策事業「圧力容器／格納容器の耐震性・影響評価手法の開発（大規模地震時における安全シナリオの構築、安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発、安全シナリオの高度化）」
 - http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2017/06/20160000_11.pdf
- R2 年度英知「 $\alpha/\beta/\gamma$ 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」
- R5 年度英知「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2025-004.pdf>
- 廃炉・汚染水・処理水対策事業「原子炉建屋内の環境改善のための技術開発（サプレッションチェンバ脚部の電気防食による腐食抑制技術の開発）」
 - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20230705_IRID.pdf
- 「ペDESTAL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>

検討されている研究課題

- 特になし

3. 構造健全性を維持するための対策を確立したい

燃料デブリ取り出し：【中期】

望ましい状態とその理由

- 検査技術及び評価技術で健全性を評価した結果、経年劣化や冷却材の漏えい、動的機器の故障などが発生、顕在化した場合、あるいは既設構造物に新設構造物を追設する必要性が生じた場合、構造健全性を維持するための技術が準備されていることが望まれる。

理想に対する現状

- 検査技術及び評価技術による健全性評価について、過去には耐震性の評価手法の検討などがされている。

解決すべき課題

- 検査技術及び評価技術による健全性評価手法を確立するとともに、健全性に影響を与える要因を想定したうえで健全性を維持するための技術を検討する必要がある。

参考文献

（参考）関連する研究課題

実施されている研究課題

- R4 年度英知「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」
 - <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2023-031.pdf>
- R2 年度英知「 $\alpha/\beta/\gamma$ 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」
- 廃炉・汚染水・処理水対策事業「原子炉建屋内の環境改善のための技術開発（サプレッションチェンバ脚部の電気防食による腐食抑制技術の開発）」
 - https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20230705_IRID.pdf

検討されている研究課題

- 特になし

関連する課題

- デブリ-102「PCV・RPV 内部の構造物の状況把握」
- デブリ-208「安定状態維持のための燃料の状況把握」
- 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-217「燃料デブリへのアクセスルートの構築」
- デブリ-218「燃料デブリ取り出し装置・機器の開発」
- デブリ-303「安全機能の継続的な維持・確保」