



福島第一原子力発電所廃炉に関する課題と今後の新たな視点



鈴木 俊一
Suzuki Shunichi

1. はじめに

地震にともなう津波により福島第一原子力発電所（以後1F）事故が発生して10年近くが経過した。数々の課題を抱えながらも、廃炉に向けた取組みが一步一步着実に進められている。

一方、1F廃炉の最大の課題は、海外の専門家から「Unknown Unknowns」と指摘されているように、大きな不確実性を内在している点にある。このような環境にあって、最も重要なことは、事故により発生した放射性物質に起因するリスクを継続的かつ速やかに下げることであり、具体的には放射性物質の飛散等外部環境への影響を可能な限り低くすること、並びに作業員の被ばくを極力抑制することである。

上記はすべての工程において必須の課題となるが、廃炉工程そのものが長期にわたることから、個別リスクではなく、全体を俯瞰してトータルリスクを管理することが極めて重要である。

2. 廃炉完遂のための基本シナリオ

1F廃炉戦略の中核機関である原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下、NDF：Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation）は、環境への放出等放射性物質によるリスクの低減、並びに被ばく低減等の労働安全の確保に加えて、信頼性が高く柔軟性のある技術の活用、

合理的リソース（ヒト、モノ、カネ、スペース等）の有効活用、時間軸を意識した迅速性（燃料デブリ取出しへの早期着手、燃料デブリ取出しにかかる期間等）、徹底的な三現（現場、現物、現実）主義に基づく現場指向（作業性、保守性）を廃炉作業における重要な基本原則と位置付けている¹⁾。

ここで廃炉工程を検討するにあたり、基本シナリオとしては、以下の視点が重要である。

〈全体〉

- ①汚染水処理、燃料取出し・保管、燃料デブリ取出し・保管、建屋・構造物解体、廃棄物処理・処分において、長期にわたる安全性（a. 外部への放射性物質飛散防止、b. 作業員被ばく低減等安全性確保）を最優先で実施する。
- ②廃炉工程で内在するリスクを抽出の後、深層防護を含めて安全ロジックを検討し、その結果を導入されるシステムに反映する。
- ③腐食をはじめとする建屋・構造物の経年劣化等時間軸を意識した対策を考える。また事故時の損傷及び経年劣化を考慮し、対策は安全ロジックを遵守の上、迅速に実施する。
- ④1F特有の多種・多量の廃棄物を極力合理的かつ安全に処理・処分する。
- ⑤工法・技術に関して社会的な認知を確保する。
- ⑥廃炉技術・分析技術等に関する人材育成を着実にかつ継続的に実施する。

〈設備側の課題〉

- ①米国 TMI と異なり高線量下での作業が多く、調査並びに作業において高度な遠隔技術が必要となる。このため、モックアップ設備の活用等による事前の検証が重要である。
- ②将来どのような環境になるか、線量が下がればどこにアクセス可能か、検討することは必要であるが、すべてのエリアに対して完璧な評価を行うことは困難であり、重要なエリア・部位を重点的に評価することが重要。また、アクセス困難な場合でも、当該部類似環境のアクセス可能な別の場所で測定する等の工夫にも意義がある。
- ③原子炉スカート、ペDESTAL基礎部等、アクセスが困難な部位がある。この場合、保守的評価による破損の防止に加えて、破損した場合の全体への影響評価、可能であれば破損しても不安定に拡大せずに影響を緩和できるマネジメントを含む対応が望ましく、安全シナリオとのリンクが重要である。
- ④環境が変化した場合、例えば多重化による閉じ込め空間の新設によりバウンダリが変更された場合等、変化に応じて対策を柔軟に変更する必要がある。
- ⑤同一構造物・機器であっても時間と共に評価重要度は変わる。例えば、使用済み燃料プールでは燃料を取り出してしまえばリスクは低くなり、号機によって5年、10年スケールで重要度を見直す必要がある。同様に原子炉格納容器（以下、PCV: Primary Containment Vessel）も内部の燃料デブリをあらあら取り出せばリスクは小さくなる。このためマイルストーンに応じて優先順位を考える必要がある。
- ⑥燃料デブリ冷却方法も10年後は変わる可能性が高く、また線量低減によりアクセス領域も変わることから、適用可能となる対策は異なる可能性がある。

〈汚染水 / 廃棄物の課題〉

- ①長期にわたる安全性を最優先で確保するため、安定化した状態（核種が移動しない状態）を早くつくることが重要である。
- ②1F 廃棄物は通常廃炉と異なり NR（非放射性廃棄物）がほとんどなく、作業性向上、被ばく低減、手間・コスト低減のためには多種・多量の廃棄物を極力合理的かつ安全に処理・処分する方策を考

える必要がある。

- ③すべての工程で汚染水・廃棄物は発生するため、全体を俯瞰して総量を減らす方策、例えば汚染水対策、廃棄物処理・処分と燃料デブリ取出し手法との連携を考える必要がある。
- ④燃料デブリ取出しを含む解体作業に伴い、 α 廃棄物が分散すると管理が困難となる。取出し作業時から極力分散しない工夫、あるいは廃棄物ストリームと代表サンプリングから決定する廃棄物分類により、仮に分散しても将来の廃棄物処分に困難が生じないコンセプトが必要である。
- ⑤低レベル廃棄物は検出限界値以下も含め大量に広く分散しており、簡便な測定で対応可能なシナリオの設定が必要である。

3. 現状の取組み状況と課題^{2,3)}

東京電力HDは2031年までの目標を設定してロードマップ実現の具体的な作業プロセスを示す「廃炉中長期実行プラン 2020」を2020年3月に公表した。現在作業員数は4,000人以下と事故当時の7,000人から大きく減少している。また、マスク不要のエリアの増加と共に被ばく線量も大きく減少しており、労働環境改善は着実に進んでいると言える。

前節では廃炉の長期的な視点に立った課題を列挙したが、以下では汚染水対策、燃料・燃料デブリ取出し及び廃棄物の現状と課題について述べる。

3.1 汚染水対策

汚染水対策の3つの基本方針は、①汚染源を「取り除く」②汚染源に水を「近づけない」③汚染源を「漏らさない」であり、2025年以内に汚染水発生量を100m³/日以下に抑制すると共に、2022年度～2024年度には原子炉建屋滞留水を2020年末の半分程度に低減することが目標とされている。現在崩壊熱は事故時の1,000分の1以下で高々数十KW程度であるが、崩壊熱による温度上昇を防止するための注水は燃料デブリや汚染構造物と触れることにより汚染水となる。ここで重要なことは建屋に地下水及び雨水が流入して余剰水となることであり、注水に必要なとされない余剰水は、多核種除去設備においてTを除く62核種が除去され、最終的にはタンクに保管されている。すなわち、地下水・雨水等の流入

がある限りタンクは増設することとなるため、この対策としては地下水及び雨水の建屋への流入を極力抑制した上で、タンクを増設し続けるか、あるいはタンクに蓄積したTを何らかの手段で基準以下に処理して系外放出するかのいずれかになる。一方、将来を考えると、燃料デブリ取出し工法とのリンクにより燃料デブリ自体の冷却方法を考えることも重要である。現在の注水による水冷方式から、例えば水冷管を使った水冷方式やより空冷に近い方式に変えることにより、冷却水そのものが燃料デブリに接触しなくなるため、余剰水量は変わらないものの、汚染水全体の汚染度が減り、Cs、Sr吸着塔への負荷が減ると共に、タンクに貯蔵されるトリチウム量は大幅に減少する。ただし、注水しない場合には、PCV内面の乾燥による放射性物質の飛散防止には注意を払う必要がある。汚染水や廃棄物ほどの廃炉工程においても発生する課題であり、全体工程を俯瞰して最適条件を探ることが重要である。

3.2 燃料取出し

震災時4号機では、すべての燃料が炉心シュラウド交換工事に伴い原子炉から取り出されて原子炉建屋内にある使用済み燃料プールに保管されていたが、事故後すべての燃料はプールから取り出され、現在原子炉建屋外の共用プール等に安定に保管されている。一方、1号機、2号機、3号機では炉心溶融を伴う大規模な損傷を生じたため、使用済燃料プールからの燃料取出しの準備作業が鋭意進められている。

使用済み燃料プールから燃料を取り出すためには、外部に放射性物質が飛散しないためのカバーの設置、プールへのアクセスを可能とするための最上階オペレーションフロアの線量低減、水素爆発によりプール内へ落下した燃料交換機やコンクリート瓦礫等干渉物の撤去が事前に必要である。3号機では既に瓦礫が撤去されており、1、2号機では瓦礫撤去の準備が行われている。目標達成のためには、プール内での3次元的な障害物の位置把握や重量物の吊り上げ時における重心把握等が必要となるため、高度な位置認識技術と遠隔操作技術の開発並びにモックアップ等による緻密な検証及び訓練が実施されている。

3.3 燃料デブリ取出し工法⁴⁾

1F廃止措置で最大の課題である燃料デブリ取出

しは2021年からの開始に向けて工法の検討が進められている。取出し案として冠水工法と気中工法が主に検討されているが、前者ではPCVの止水、後者では放射性核種を含む粉塵の飛散防止等の技術的成立性が課題となっている。

NDFは詳細検討の結果、数百か所にのぼる配管・ケーブル・ハッチ等のPCV貫通部を完全に補修して止水することは作業被ばく線量の観点から困難と判断し、現在は気中一横アクセスと気中一上アクセスが主要な工法として選択されている。

具体的には、NDF戦略プラン2020では、①試験的取出し、②段階的な取出し規模の拡大、③更なる拡大とステップを踏んで進める必要性が示されており、現在は将来を見据えて試験的に進める状況にある。

2017～2018年には、1F3号機及び2号機においてPCV内部調査が行われ、燃料ハンドルや制御棒がPCV底部において観察された^{3,4)}。この結果は共に事故時に原子炉圧力容器（以下、RPV:Reactor Pressure Vessel）底部に制御棒のRPV貫通孔よりも大きな開口部が生じたことを示しており、燃料デブリ取出し時にはRPV底部をより安定な状況にして作業安全を高める必要があることを示唆している。

ここで現状の1FのPCV内の状況を図1に示す。

また燃料デブリのみならず、Csをはじめとする多数の放射性物質の場所、分布、濃度が現状不明確であるため、ホットスポット等高線量領域の特定の不確かさによる作業リスク、取出し時の放射性物質

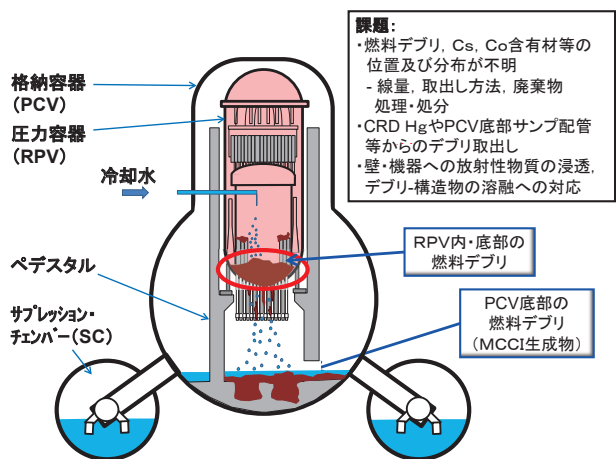


図1 PCV内の状況（推定）

の飛散防止、更には取出し後の廃棄物の処分時区分けをどのようにすべきか等の大きな課題がある。

ここで取出し工程における安全要求としては、①閉じ込めバウンダリ機能、②負圧管理機能、③支持機能、④冷却機能、⑤臨界防止機能（未臨界維持）、⑥放射線遮蔽機能、⑦水素爆発・火災防止機能を確保することが重要である。

また、放射性物質の追加生成を抑制することは重要であり、燃料デブリや構造物の切削等により発生する微粉末は、冷却水への混入や気中への拡散が想定される。レーザーやプラズマを使った切断手法は狭隘部へのアクセス等有効な手法ではあるが、一方、入熱により約0.2~0.4 μm という微小寸法のエアロゾルが発生するため、仮に水中で発生しても容易に気中へ移動する等放射性物質の閉じ込めには慎重な対応が必要となる。このため、極力機械的な切断の導入が望まれているが、効果的な水スプレーの利用や放射性物質の安定固定化等新たな閉じ込め技術が開発されれば、閉じ込め機能を確保する工法選択肢は大幅に改善されると思われる。

前者については、より少ない水量で切断時に発生するエアロゾル粒子の飛散を抑制可能な効果的な水スプレーシステムを構築することが必要である。エアロゾル粒子の特性の不確実性や粒子除去の困難さを考慮すると、エアロゾル粒子を凝集させ、慣性衝突メカニズムの効果を増加させて粒子寸法を大きくすることにより、水滴により効率的に除去する新たな手法も有効な手段であると判断される。

4. 全体を俯瞰する

長期にわたる廃炉の課題を整理するためには、先ずは廃炉工程全体を俯瞰した場合にエンドステート（最終状態）とは何かを考慮する必要がある。特に1Fのように長期にわたる場合、段階的なエンドステートである中間エンドステート（Interim End State）を設定することが重要である。いずれの場合においても、安定化した状態を合理的・効果的につくることが重要であり、この場合、「安定化」の定義は、核種を閉じ込めて移動させないことである。

長期にわたる廃止措置の過程において何が起こりうるかを現時点において完全に予測することは困難である。ただし、将来何が起こりそうかリスクを合

めて俯瞰し、仮説を立てた上であらかじめ何らかの備えをすることは可能であろう。この場合、影響度合いが大きいと思われる不確実な事象を徹底的に洗い出し、モニタリングすることによって仮説を検証することが重要となる。

本質的な問題を解決するための有効な手法として、仮説指向計画法（Discovery-Driven Planning）があげられる⁶⁾。まず目標を明確にした上で、何を行えばその目標が達成できるかを考え、可能性のある仮説をたてる。次にどのようにしたら、その仮説が正しいと判断できるか、検証できる計画をたてる。最後に計画を次々と実行に移す。これを繰り返すことにより不確実性のある事象の対応を含めた複数の案が浮かび上がると共に、真に重要な本筋（幹）はどこにあるのかがより明確になるという概念である。

エンドステートを意識した全体像を俯瞰しておおよそのマップを作成した上で、現在必要な技術と、将来から俯瞰して必要と判断される技術がマッチするかどうかを確認する（図2）。

具体的には、現状と中間エンドステートの両面から事象を俯瞰し（例えば図中でデブリ取出しは閉じ込め（青囲み部）や廃炉最終状態（赤囲み部）から俯瞰）、両者の機能を満足する技術を選択する。現状適切に思える工法も将来の要求機能とのマッチングが成立しない場合には、廃炉を完遂するための成功パスとはならない。特に、将来の廃棄物処理・処分に負荷を与えない燃料デブリ取出し工法を選択することは極めて重要である。

例えば、RPVからの燃料デブリ取出しに関しては、一旦セメント系材料等により安定化してから大規模に大きく取り出すことにより、損傷した部位の補強と共に、切断面の減少により放射性物質の飛散をより抑制することが可能となる。また、原子炉建屋外に設置する中間保管施設に輸送すれば、建屋内と異なる安定した環境下で調査・作業が可能となり、廃棄物の分類、保管、更には処理・処分のための準備を迅速かつ安全に実施しやすくなると考えられる⁵⁾。

以上、1F廃炉の課題を克服するためには、全体工程を俯瞰した後、将来何が起こりうるかを推定すると共に、複数の対策シナリオを考え、必要とされる新たな技術を開発するという“未知への挑戦”が求められている。

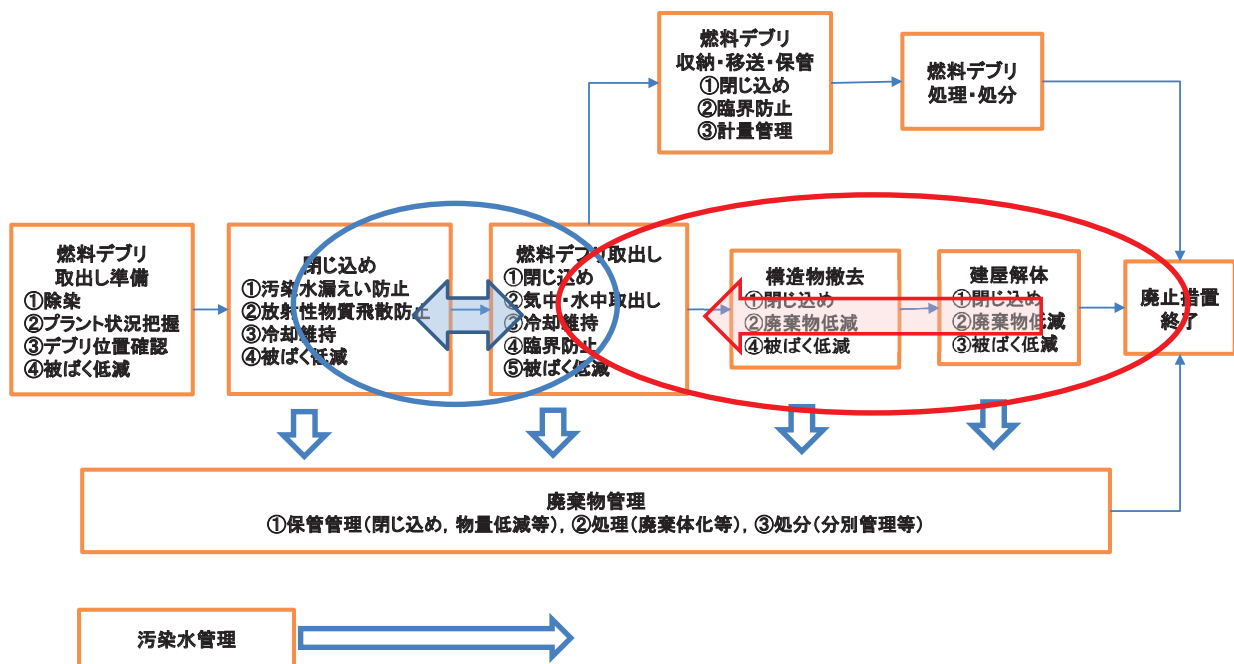


図2 廃炉全体俯瞰図

参考文献

- 1) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構；東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃炉の技術戦略プラン 2015-2020（2015-2020）
- 2) 経済産業省ホームページ；廃止措置に向けた取組
- 3) 東京電力 HD（株）ホームページ
- 4) IRID ホームページ
- 5) 鈴木俊一，“俯瞰的アプローチによる燃料デブリ取り出し代替工法の提案”，日本保全学会，保全学 Vol.17, No.3（2018）
- 6) C.M.Christensen, イノベーションのジレンマ, Harvard business school press
 （東京大学大学院工学系研究科総合研究機構）