

福島第一原子力発電所廃炉で発生する廃棄物のマネージメント

渡邊直子*1

福島第一原子力発電所（1F）廃炉検討委員会では廃棄物検討分科会の中間報告として「国際標準からみた廃棄物管理」を取り纏めた。1Fの廃炉・サイト修復で発生する廃棄物の取扱いは長期にわたることが予想されることから、本報告書ではエンドステートを念頭に、廃炉（除染・解体）やサイト修復等の各活動の一步先の達成目標である中間エンドステートを定めて着実にステップを踏むことが重要であると指摘している。また、エンドステートについての議論を深めることを目的として、エンドステートまでの複数の道筋を「シナリオ」として設定し、それぞれのシナリオの特性および課題を示した。本稿では、この中間報告の概要を紹介する。

Keywords: 放射性廃棄物, エンドステート, 廃炉, サイト修復, スチュワードシップ, シナリオ分析

A subcommittee organized under the Investigation Committee on the Nuclear Accident at the Fukushima Dai-ichi NPP (1F) published an interim report “Waste management from international perspectives”. Because it will be a long-lasting process to manage waste from decommissioning and site remediation of 1F, it is important to define interim end states for major activities of decommissioning (de-contamination and dismantling) and site remediation, and to steadily make progress toward them, with an eye to the final end state. In addition, multiple “scenarios” to attain the final end state were hypothesized, and advantages and disadvantages of each scenario were identified in order to further the discussion on the final end state. This article presents a summary of the interim report.

Keywords: Radioactive waste, End state, Decommissioning, Site remediation, Stewardship, Scenario analysis

1 はじめに

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会では廃棄物検討分科会の中間報告として「国際標準からみた廃棄物管理」を取り纏めた[1]。この報告書は日本原子力学会のHPからダウンロードでき、公表されてから1年以上が経っていることから、多くの方が既に目にされていることと思うが、ここではその概要を、放射性廃棄物の取扱いに係る複数のシナリオの検討を中心に説明する。なお、本報告書は中間報告であり、福島第一原子力発電所（1F）の廃棄物に関する検討の経過を報告する形になっている。廃棄物検討分科会は、報告書を公表することで様々なステークホルダーからのフィードバックを得て、また、汚染状況や物量に関する情報の拡充や廃炉作業の進捗に伴う状況の変化を反映させて、今後も検討を続けていく予定である。

2 中間報告の内容

2.1 概要

本報告書では、国際機関における廃炉・サイト修復に係る検討内容の調査、わが国の放射性廃棄物管理に係る現状の整理、これまでに発生した放射性廃棄物の物量、性状、処理・保管状況の調査、および1Fのエンドステートを視野に入れた廃炉とサイト修復の方針およびその放射性廃棄物管理シナリオへの影響の検討を行った。廃炉やサイト修復に関しては、TMI-2（スリー・マイル・アイランド原子力発電所2号炉）やChNPP-4（チェルノブイリ原子力発電所4号機）をはじめとした数々の事例があり、それぞれの現場での経験に基づいた教訓がIAEAやOECD/NEAなどの国際機関の報告書にまとめられている[2-7]。それらの中から

1Fの廃炉・サイト修復において参考となる教訓としては、例えば、

- 1) 事故直後から施設の修復が終了するまでのタイムライン（Fig.1）において、施設の除染・解体のほか、サイトの除染・修復までを含めた様々な活動が必要であること
- 2) 事故後の取り組みでは、エンドステートを見据えた上で、そこに至るまでの道筋と計画を十分に検討することが重要であること
- 3) 十分な情報がなく、エンドステートが明確に定義できない段階では、複数のエンドステートの選択肢を設定し、それぞれの利点・難点を検討することが有用であること
- 4) 放射性廃棄物管理計画を廃炉、サイト修復の作業計画と統合して検討すること
- 5) サイト修復とは汚染からの被ばくを低減することを意味し、必ずしも、完全な除染やサイトを事故以前の状態に戻すことではないこと。また、長期スチュワードシップを環境修復活動として考慮することもあり得ること
- 6) 放射性廃棄物の処分を含む廃炉・サイト修復の取り組みは、周辺住民を含む様々なステークホルダーとのコミュニケーションおよび社会の合意なくしては解決が困難であることなどが挙げられる。

本報告書では、教訓3)に示されているように、エンドステートまでの複数の道筋を「シナリオ」として設定し、それぞれのシナリオで発生が予想される廃棄物量を半定量的に評価した。この目的は、優れたシナリオを選ぶことではなく、幅広い様々な選択肢を示した上で、それぞれのシナ

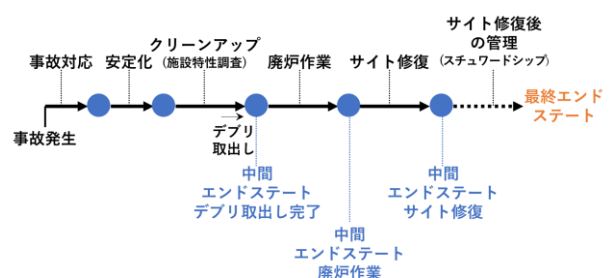


Fig.1 Timeline of activities after an accident

Management of waste generated from decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station by Naoko Watanabe (n.watanabe@eng.hokudai.ac.jp)

*1 北海道大学工学研究院

Faculty of Engineering, Hokkaido University

〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第37回バックエンド夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

リオの特性および課題を明らかにすることで、エンドステートについての議論を深めることである。

2.2 廃炉・サイト修復・放射性廃棄物の管理

1Fの廃炉にはFig.2に示すように、廃炉、サイト修復およびそれらの活動から発生する放射性廃棄物の処理・処分という3つの要素がある。教訓4)では、廃炉およびサイト修復の計画に、活動によって発生する放射性廃棄物の管理を考慮に含めることの重要性を指摘している。廃炉およびサイト修復の活動を実行し、その結果として発生する廃棄物を事後にどのように管理するか検討するのではなく、計画段階からFig.2の3つの要素を統合することで、廃棄物の性状やリスクに応じた処理・処分、可能な解体物を対象とした再使用・再利用や減量化、既に存在する廃棄物管理施設の利用や新たに必要ルートの整備などを、より効率的に実施することが期待できる。

本報告書では、原子力施設を対象とし、施設に課されている規制を解除するために実施する除染・解体作業などの活動を「廃炉」とし、サイトの土壌、地下水などの環境に対して除染・修復を行い、放射線管理上の措置が不要な状態にするための取り組みを「サイト修復」とした。1Fの廃炉作業が、事故を経験していない通常炉の廃止措置とは異なることは既に指摘されており、本報告書では1Fにおける活動については「廃止措置」ではなく「廃炉」と呼び、混同することがないように区別した。

サイト修復については、例えば、OECD/NEAの報告書[7]によれば、汚染土壌を除去するような除染に加えて、立ち入りの制限などの物理的、行政的な措置によって汚染からの被ばくリスクを低減・緩和するような措置も含まれる。また、汚染の除去活動のようなアクティブな環境修復活動に加えて、除染活動後の環境評価によって残留物による健康、環境への影響からの長期にわたる保護が必要な場合には、サイト管理、モニタリング、保守、情報管理などの技術的、社会的な対応策を継続する「長期ステewardシップ」もサイト修復策に含まれる。特に、土壌や地下水が汚染した場合には、除染が難しく、また大量の廃棄物が発生する。OECD/NEAの報告書[7]では、「持続可能な」サイト修復として、サイトの物理的な状態のみでなく、社会的、経済的、環境への影響を評価することや、サイト修復により発生する廃棄物をサイト外の処分施設に処分する場合には、サイトと処分施設の影響の両方を最適化する必要性も

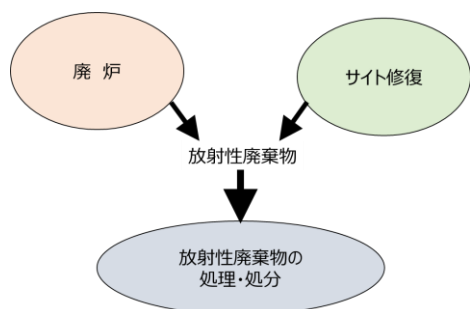


Fig.2 Integration of radioactive waste management with decommissioning and site remediation planning

指摘している。

3 1F 廃炉・サイト修復シナリオ

IAEAなど[8]では、廃止措置の考え方(基本方針)をFig.3に示すように、即時解体(Immediate Dismantling)、遅延解体(Deferred Dismantling)、原位置処分(Entombment)に分類している。即時解体は、放射能汚染物質を含んでいる器材、構造物、設備を撤去するか、または、規制当局が示す無拘束の許容レベルか制限付き許容レベルまで除染することを基本方針とする。この方針では、運転停止後に速やかに廃止措置作業が開始され、全ての放射性廃棄物が保管施設か処分施設へ移送され、廃止措置は迅速に完遂する。遅延解体は、安全貯蔵、安全保管、安全隔離などとも呼ばれ、放射能汚染を含む施設の一部を撤去するか安全に貯蔵・維持できる状態にして管理し、その後規制当局が示す無拘束解放に係る許容レベルか、制限付き使用に係る許容レベルまで、除染または解体撤去することを基本方針とする。この方針では放射性廃棄物の扱いは即時解体と同様である。原位置処分は、放射性核種で汚染した物質を、放射能レベル、核種の化学形態および周辺環境等を考慮して適切な安全機能を施した上で原位置に処分すること、または、構造的に長寿命材料の中に格納するなどして、規制当局が示す施設の無拘束解放に係る許容レベルか、制限付き使用に係る許容レベルまで放射能の減衰を待つことを基本方針とする。本報告書におけるシナリオは、これらの基本方針に基づいて設定した。

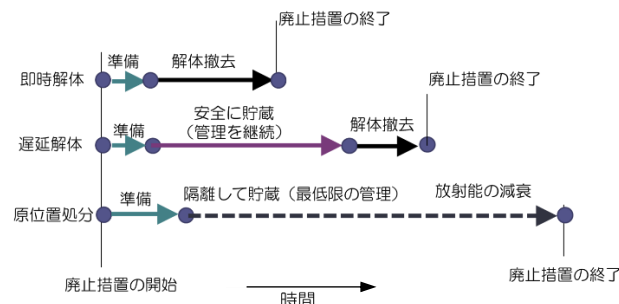


Fig.3 Typical decommissioning strategies

3.1 シナリオ設定の視点と条件

シナリオを検討する際に必要な視点として、Table 1に示す項目について議論した。また、本検討の対象範囲は、燃料デブリ取り出し後からエンドステートに到達するまでの

Table 1 Principles for discussing 1F decommissioning scenarios

- ・サイトの有効利用(一部/全部, 制限/無制限)が可能か
- ・安全性(作業員および公衆)は確保されるのか
- ・合理性(経済性)は確保されるのか
- ・放射性廃棄物の安全な管理は可能か
- ・放射性廃棄物の行先を決められるのか
- ・サイトの利用計画が社会的に受容されるか
- ・エンドステートまでの概略工程が社会的受容性を有するか(地域間および世代間等の公平性, 意思決定プロセスの透明性)

放射性廃棄物の取り扱いとした。予め設定した量の残存燃料および燃料デブリが取り出せない場合には、遅延解体として別の取り組みを検討するなど、初期条件として考慮する必要がある。

シナリオを設定する際には、エンドステートにおける「機器・構造物および汚染土壌などの撤去の範囲」、および、「機器・構造物の解体からエンドステートに至るまでの期間」を変数とした。中間エンドステート（廃炉、サイト修復の作業が終了する段階）は以下の2ケースとなる。

1) 1F サイト内の機器・構造物および汚染土壌・地下水等の汚染が全て取り除かれた状態

2) 1F サイト内の機器・構造物および汚染土壌・地下水等の汚染の一部が管理・監視の可能な状態で残存する状態

さらに、1F の廃炉、サイト修復の対象領域は、

1) 主要施設（1-4 号機および 5,6 号機の原子炉建屋・タービン建屋）

2) その他の施設（廃棄物処理保管施設、汚染水処理関連施設、管理棟など）

3) 事故による環境汚染（土壌、地下水、底泥など）とした。

廃炉およびサイト修復の対象となる物量については明確な数値は現状では不明だが、Kawamura らによる推計例[9]によると、Table 2 に示すように総量で約 780 万トンとなっている。領域ごとには、おおまかには、1)主要施設から発生するもの 150 万トン、2)その他の施設 350 万トン、3)サイト修復 290 万トンである。通常炉の廃止措置では、原子炉施設からの廃棄物の大部分が放射性廃棄物でない廃棄物やクリアランス対象物となるが、1F の場合には低レベル放射性廃棄物と分類される廃棄物が大量に発生することが予測される。また、廃棄物量としては、2)その他の施設、3)サイト修復から発する物量が全量の約 8 割を占める。この廃棄物の大部分は事故により汚染した建屋構造物や土壌であり、比較的放射能濃度が低く、量が多いことが特色である。その他の施設を解体するとかなりの量の放射性廃棄物が発生するが、汚染の程度は低いため、解体物をサイト内で利用するなどの方策（クリアランスを含む）を採ることにより放射性廃棄物の発生を低減できる可能性がある。また、サイト修復については、スチュワードシップなどの方法により、原位置で管理を継続することで、搬出しなければならない廃棄物量の低減となる。廃炉・サイト修復に際しては、放射性廃棄物を適正に管理しつつ、これらの物量をどのように合理的に減量するかが重要となる。

燃料デブリの取出し終了後の期間における時間軸は以下のように想定した。

フェーズ 1: 廃炉作業のうち主要施設（原子炉建屋・タービン建屋）の解体が終了するまで

フェーズ 2: 残存する他の構造物の解体が終了するまで

フェーズ 3: 汚染土壌・地下水の除去・処理等サイト修復が終了するまで

フェーズ 4: サイト利用に必要な準備が終了するまで（廃棄物の管理などを含む）

上記のような検討に基づき、本報告書で設定したシナリオを Fig.4 に示す。時間軸としては、即時解体の場合に廃炉

が終了する段階を A、即時解体の場合にサイト修復が終了する段階および安全貯蔵の場合に廃炉が終了する段階として B、施設・環境の管理が終了する段階として C を設定した。なお、このシナリオは放射性廃棄物の管理の視点からの検討を主目的としている。シナリオそのものについては、今後、放射性廃棄物の管理に加えて、各作業プロセスでの作業員・公衆の安全性、コスト、環境影響、実行可能性などの総合的な評価が必要である。

Table 2 An example of the estimated amount of radioactive waste arising from 1F decommissioning and site remediation [9]

分類	1-6号機	他の施設	水処理施設	廃棄物処理/貯蔵施設	サイト修復	合計
燃料デブリ	644	0	0	0	0	644
HLW	2,042	0	0	0	83	2,125
TRU	0	0	16	0	830	846
L1	100,135	104,543	310	1,050	76,030	282,068
L2	429,462	329,364	38,174	200	1,424,600	2,221,800
L3	95,130	2,825,634	151,320	26,325	1,375,000	5,329,588
合計	1,483,592	3,259,541	189,820	27,575	2,876,543	7,837,071

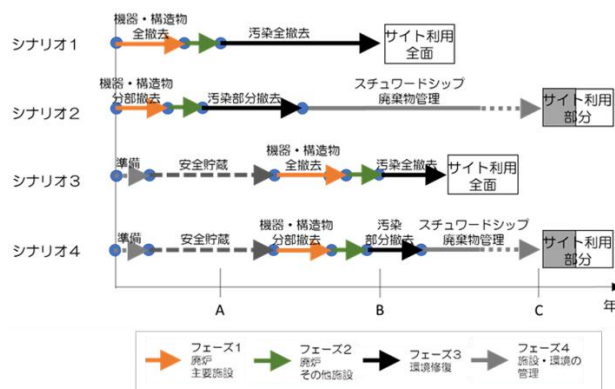


Fig.4 Decommissioning scenarios considered in the interim report

3.2 各シナリオの特徴

各シナリオの特徴は以下の通りである。

1) シナリオ 1: 即時解体・全撤去

汚染した機器・構造物および汚染土壌などを早い時期に全量撤去するため、サイトはクリーンな更地となる。但し、機器・建屋の放射能の減衰はあまり期待できないため、作業が困難となる可能性がある。また、大量の放射性廃棄物が比較的短期間で発生するため、この放射性廃棄物の保管・搬出状況が作業に影響を及ぼす可能性があり、廃棄物の処分が実現できるまでサイトの有効利用が不可能である。

2) シナリオ 2: 即時解体・部分撤去

地上部のみ撤去し、機器・構造物の一部（地下構造物）および土壌等の汚染を管理・監視の状態に残すため、廃炉・サイト修復作業を早期に終了できる。また、サイト修復では安全を確認した上で汚染土壌などを残して一部領域の管理・監視を継続する（スチュワードシップ）ため、放射性廃棄物の発生量を低減できる。ただし、地下構造物や土壌などの汚染が顕著な場合には撤去する物量が増加したり、大規模な汚染拡大防止措置や長期の管理・監視が必要とな

る可能性がある。また、放射性廃棄物は処分施設に搬出可能となるまで保管施設に保管するため、処分施設が確保できない場合には保管が長期に及ぶ可能性がある。なお、シナリオ1と同様に、機器・構造物の放射能の減衰があまり期待できないため、作業が困難となる可能性がある。また、サイトには地下構造物・汚染土壌が残存し、放射性廃棄物の保管施設が設置されるので、サイトの有効利用は一部に限られる。

3) シナリオ3：安全貯蔵・全撤去

施設を安全貯蔵の状態に置いた後に解体、全撤去する。廃炉作業の開始時期は遅くなるが、この間に施設解体の技術的な準備が可能になり、また、貯蔵期間によっては放射能の減衰により作業が容易になる可能性がある。さらに、安全貯蔵期間中には放射性廃棄物の処分施設を確保し、サイト修復を進めることができる。サイト全域の解放が可能であるが、廃炉・サイト修復の終了時期が遅く、サイトの有効利用が可能になるまでに長期間を要する。

4) シナリオ4：安全貯蔵・部分撤去

シナリオ3と同様に、施設を安全貯蔵の状態に置くため、廃炉作業の開始時期は遅くなる。この期間中には、施設解体の技術的な準備、機器・構造物の放射能の減衰による作業の容易化、放射性廃棄物の処分施設の確保、サイト修復の実施が可能である。施設は地上部のみを解体、また、サイト修復では安全を確認した上で一部領域の継続した管理・監視（スチュワードシップ）が行われるため、シナリオ2と同様に地下構造物や土壌などの汚染状況にも依存するが、放射性廃棄物の発生量をかなり低減できる可能性がある。作業の終了後もサイトには地下構造物および汚染土壌などが残存し、また、放射性廃棄物の保管施設が設置されるので、サイトの有効利用は限定される。エンドステート達成までには、安全貯蔵期間に加えて、放射性廃棄物の処分施設の確保、残存施設の放射能の減衰を待つことが必要なことから長期間を有する。

4 廃棄物管理に係る対策の検討課題

廃炉・サイト修復の活動からは様々な形態の放射性廃棄物が発生する。本報告書では、廃棄物管理に係る対策に関して今後検討すべき課題を以下のようにまとめた。

1) 放射性廃棄物処分制度の検討

現行の放射性廃棄物処分の仕組みは、通常炉の廃止措置で発生する廃棄物の特性を調査した上で制度化されたものである。1Fの廃炉・サイト修復で発生する放射性廃棄物の特性調査は今後の課題であり、現状の処分制度が適用できるか検討が必要である。

2) 放射性廃棄物発生量の低減

1Fの廃炉・サイト修復の全工程において、廃棄物減量化や減容化を進め、クリアランス制度や構内などに利用を制限した限定再利用制度、また、サイト修復に関してはスチュワードシップ制度の適用により、放射性廃棄物として取り扱うものの量を低減できる。これらの制度を、「主要施設」の解体物、「その他の施設」の解体物、「サイト修復」で発生する廃棄物それぞれに当てはめることが可能か否かの検

討が必要になる。また、クリアランス制度を適用する場合の検認には、検認対象とする核種の選定、スケーリングファクターを含む検認の方法、スケーリングファクター作成のためのデータ収集と分析、多量の対象物に対して、検認工程の合理化・効率化の検討などの課題がある。また、クリアランスや限定再利用制度の適用で発生する有価物の用途を確保することも必要である。

3) 総合的廃棄物対策の実施

廃炉・サイト修復で発生する多様で多量の廃棄物に係る対策では、その特性に応じて、実現可能性や経済性を考慮した方法を選択することも大切である。適切な処理・保管・処理に加えて、廃棄物の発生抑制、再使用・再利用の促進、減量化・減容化を総合的に実施するとともに、廃棄物管理と廃炉・サイト修復事業を両輪として統合的に対応していくことが重要と思われる。

5 おわりに

1Fの廃炉・サイト修復で発生する放射性廃棄物の取り扱いが世代を超えた長期にわたることが予想され、エンドステートを念頭に、一歩先の中間エンドステートを定めて着実にステップを踏むことが重要である。また、放射性廃棄物の処分を含む廃棄物管理に係る対策には、社会的合意形成が不可欠である。本報告書は幅広い様々な選択肢に対して、それらの利点や課題を示すことで、中間・最終エンドステートを含む廃棄物管理策についての議論を深めることを目的として作成した。廃棄物検討分科会では、今後も、1Fの廃炉・サイト修復に係る進展や放射性廃棄物の管理に係る取り組みの分析・評価を継続していく予定である。

参考文献

- [1] 福島第一原子力発電所廃炉検討委員会廃棄物検討分科会：中間報告—国際標準からみた廃棄物管理—(2020).
- [2] IAEA: Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents, Safety Guide No. WS-G-3.1 (1997).
- [3] IAEA: Management of Long-Term Radiological Liabilities: Stewardship Challenges, Technical Report Series No. 450 (2006).
- [4] IAEA: Lessons Learned from Environmental Remediation Programmes, Nuclear Energy Series No. NW-T-3.6 (2014).
- [5] OECD/NEA: Management of Radioactive Waste After a Nuclear Power Plant Accident, NEA No. 7305 (2016).
- [6] IAEA: Experiences and Lessons Learned Worldwide in the Cleanup and Decommissioning of Nuclear Facilities in the Aftermath of Accidents, Nuclear Energy Series, No. NW-T-2.7 (2014).
- [7] OECD/NEA: Strategic Considerations for the Sustainable Remediation of Nuclear Installations, OECD NEA No. 7290 (2016).
- [8] IAEA: Decommissioning of Nuclear Power plants and

Research Reactors, Safety Guide, Safety Standard Series
No. WS-G-2.1 (1999).

- [9] Kawamura, H. et al.,: Decommissioning and Environmental Remediation Scenario Development for Fukushima Daiichi, Proceedings of TopSafe 2017, 12-16, Feb, IAEA (2017).