

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」現地状況及び活動報告
Review Committee on Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPS

(4) 学会廃炉委における廃棄物の取り組みと今後について

(4) Some initiatives for the waste in the AESJ Review Committee on Decommissioning
of the Fukushima Daiichi NPS*新堀 雄一¹¹東北大学

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（主査：柳原 敏先生）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⁾。本報告書（以下、同様に呼称）は日本原子力学会のHPからダウンロードでき、既に多くの方の目に触れている。ここでは、本報告書の位置付けや内容の概要を説明するとともに、それらを基盤として今後の方向性について、廃棄物の処分に携わるものの一人としての私見を述べる。後者については、福島第一原子力発電所(1F)におい発生する廃棄物に関連する学会における取り組む視点について、1Fの廃棄物について更に議論を深めることに繋がる一つの叩き台となればと考える。

2. 本報告書の位置付け¹⁾

エンドステートとはその名の通り最終的な状態を指す。本報告書では、1Fのエンドステートに着目し、事故後9年が過ぎ、いよいよ燃料デブリ取出し作業が開始されようとしている同発電所の廃炉の課題として、あらかじめエンドステートの概念を関係者で共有した上で、廃棄物管理に係る対策などの取り組みを進めることの必要性やエンドステートに至る過程の代表的な選択肢を、現在まで得られている情報を基に海外の知見等を踏まえてまとめている。ここで留意すべきは、本報告書はあくまでも中間報告であり、本報告書の内容を今後どのように福島第一の廃炉に活かしていくかを、地元の方々をはじめ様々なステークホルダーから多様な観点のご意見を伺った上で更なる検討を深めると共に、廃炉作業の進捗に伴う追加情報を得て改訂していくことが必要と考えていることにある。

3. 本報告書の内容¹⁾

3.1 「廃止措置」、「廃炉」および「環境修復」の基本的な考え方

図1に事故発生から最終状態に至るまでの主要なタイムラインを示す。本検討では、1Fのように事故で停止した施設の場合、「廃止措置」ではなく「廃炉」と記述している。すなわち、原子炉施設（原子炉建屋、タービン建屋など）および関連する施設（廃棄物処理建屋、汚染水管理エリア、地下水管理施設など）、管理棟、港湾施設を対象とした除染・解体作業を「廃炉」とし、原子力サイトの土壌・地下水など環境に対する除染・修復をサイト修復として取り扱う。商用原子力発電所の廃止措置では、燃料を炉心から全て取り出した後からの作業を「廃止措置」として定義し、立案される計画は認可の対象になる。また、通常炉の廃止措置計画の申請では、廃止措置終了までの期間および必要となる費用を記載することが求められている。一方、1Fは1-3号機において、残存燃料および燃料デブリが炉心やその周辺に分布しており、汚染も広範囲に拡がっているため、通常炉の手順に従ったものではない。1Fは既に特定原子力施設に指定されており、本報告書では、1F施設の除染・解体を通常炉の廃止措置と区分して「廃炉」と呼称し、IAEA^{3),4)}の廃止措置に係る基本的な考え方に基づき、「廃炉を施設に課される規制から除外するための行政的、技術的な活動」とし、また、OECD/NEA⁵⁾に従って「サイト修復を周辺の施設以外の土壌や地下水等について、放射能汚染の除去によりサイトを放射線管理上の措置が不要とすること」と改めて定義している。なお、通常炉と事故炉に関する廃止措置（廃炉）の違いについては学会事故調報告書⁶⁾にも整理されている。

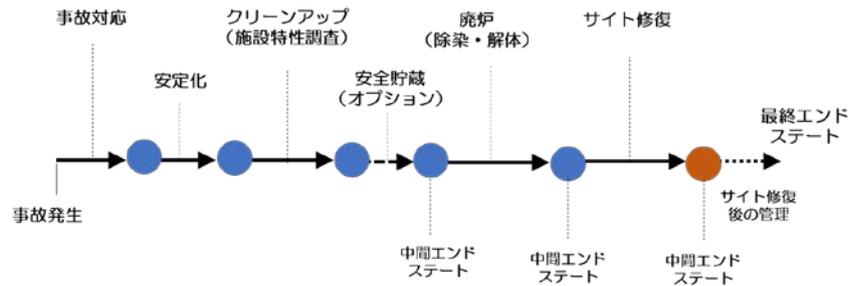


図1 事故発生から最終状態に至るまでの主要なタイムライン¹⁾

これまでも、関連する様々な議論において「廃止措置」、「廃炉」および「サイト修復」のキーワードが使われ、使い分けがなされている。このことは今後も、新たな言葉の定義が是認されるまでは、同様となることから、特にこれらのキーワードを明確に使い分ける必要がある。本報告書では、1Fの廃炉およびサイト修復も目指す状態（施設の規制解除および放射線管理上の措置を不要とすること）が、原則的に通常炉と同様にあることを述べている。

3.2 廃炉および環境修復のプロセス

廃炉のプロセスは、通常炉の廃止措置からもいくつかの選択肢がある。IAEA²⁾では、即時解体、遅延解体、原位置処分（Entombment）に分類している。即時解体とは、放射能汚染物質を含んでいる器材、構造物、設備の部分を撤去するか、又は、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。この場合、廃止措置作業は運転停止後に速やかに開始される。この基本方針は廃止措置の迅速な完遂を意味し、全ての放射性廃棄物を保管施設か処分施設へ移送することを含んでいる。また、遅延解体とは、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処理するか安全に貯蔵・維持できる状態にして管理し、その後に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又は解体撤去することを基本方針とする。ここでは放射性廃棄物の扱いは即時解体と同様である。他方、原位置処分と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、又は、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。これらの考え方を基盤とすれば、「廃炉」の過程についても、複数の選択肢が存在する。

事故炉の環境修復は、通常炉とは大きく異なる過程の一つである。IAEA や OECD/NEA などの国際機関では、事故及び環境汚染を対象にして、原子力施設の廃止措置（廃炉）および原子力サイトの除染・修復などに係る過去の経験や現状のレビューを行い、その結果を幾つかの報告書にまとめている^{5), 7)-10)}。1Fにおける施設の除染・解体及びサイトの除染・修復を実施する上で有益と考えられる事項としては、例えば、「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」、「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」、「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」、「放射性廃棄物管理計画を廃炉、環境修復の作業計画と統合して検討すること」、「環境修復とは汚染からの被ばくを低減することであり、完全な除染や、サイトをバックグラウンド状態に戻すことでは必ずしもなく、長期のステeward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」などである。ここでステewardシップとは、「(アクティブな) 環境修復、環境評価の終了後、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とられる技術的、社会的な対応策（サイト管理、モニタリング、保守、情報管理など）」と定義されている。さらに「放射性廃棄物の処分など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的合意なくして解決が困難である」⁸⁾ことも有益な事項の一つとして取り上げている。

3.3 廃棄物量

図2に通常炉での廃棄物の区分と目安となる量を示す¹⁾。ここでは一例として、沸騰水型軽水炉(BWR)の110万kW級1基分を想定している。区分は放射性廃棄物と非放射性廃棄物との分類、およびそれぞれの取る扱いによって分類がなされている。ここで重要なことは、放射性廃棄物に区分される物量は合計の廃棄物量(非放射性廃棄物を含む)に比較して、制限されることである。他方、表1に示すように、1Fの廃棄物は、現状では、L3相当以上の放射性廃棄物が多量に存在する。したがって、廃炉および環境修復のプロセスの検討では、これらの物量を如何に合理的に低減するかが重要な視点となる。

| 区分 | 量 (ton) | |
|----|---------|--------------------------|
| L1 | 80 | 放射性廃棄物 中深度処分相当の放射性廃棄物 |
| L2 | 850 | ビット処分相当 // |
| L3 | 11,810 | トレンチ処分相当 // |
| CL | 28,490 | クリアランス対象物 |
| NR | 495,420 | 放射性廃棄物でない廃棄物 |
| 合計 | 536,650 | 非放射性廃棄物 |

図2 通常炉の廃止措置で発生する機器・構造物の量^{1,11)}

表1 1F 廃炉・サイト修復で発生する放射性廃棄物の試算例^{1,12)}

| 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 | 951,309 | 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 |

HLW: 高レベル放射性廃棄物相当 TRU: TRU廃棄物相当
L1: 放射能レベルが比較的高い廃棄物 L2: 放射能レベルが比較的低い廃棄物 L3: 放射能レベルが極めて低い廃棄物

3.4 シナリオの検討

本報告書では、前述の多量の廃棄物量を念頭に、基本的に4つのフェーズを設定している。その概要を図3に示す。フェーズ1では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は残存する他の構造物の解体が終了するまで、フェーズ3は汚染土壌・地下水の除去・処理等サイト修復が終了するまで、そして、フェーズ4は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)を指す。ここでは、フェーズ1の起点を、燃料デブリ取出し完了としているが、予め設定した量の残存燃料及び燃料デブリが取り出せない場合は、一旦作業を中断して別の取り組みを検討する(遅延解体)必要があるものとして考慮する。他方、エンドステートは、機器・構造物及び汚染土壌・地下水等の汚染が全て取り除かれた状態を基本とするものの、それらの一部を管理・監視する状態をも考慮する。本報告書では上述したタイムラインおよび領域区分に対し、2つのエンドステート(制限なし解放、制限付き解放)と2つの廃炉方式(即時解体、遅延解体)を組み合わせた4つのシナリオを設定している。図4にその概要を示す。時間軸の考え方の目安の一例として、Aには中長期ロードマップの目標工程として挙げられている30年程度、Bには100年程度、Cには低レベル放射性廃棄物処分施設の管理期間と同様の300年程度が考えられる。

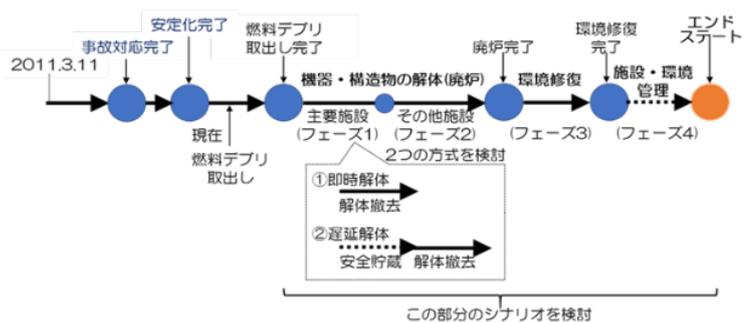


図3 検討対象範囲と時間軸¹⁾

本報告書は、これらいくつかのシナリオの検討を通して、放射性廃棄物の減衰による放射性廃棄物量のみではなく、複眼的に比較検討が必要となることを指摘している。たとえば、サイトの有効利用(一部/全部、制限/無制限)が可能か、安全性(作業員及び公衆)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受

容性を有するか、そして、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（地域間及び世代間等の公平性、意思決定プロセスの透明性）などが、シナリオの検討には重要となることに言及している。

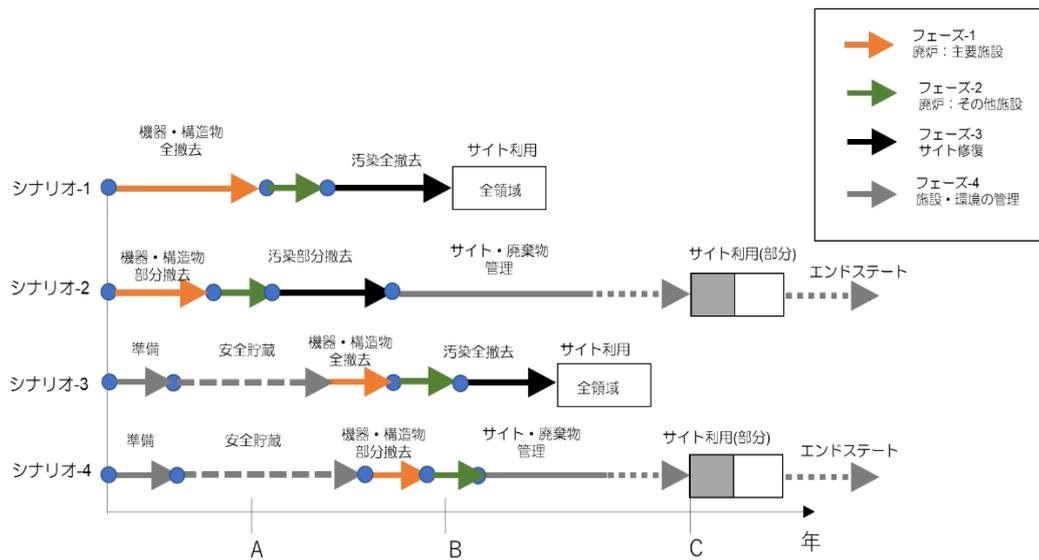


図4 検討した4つのシナリオの概要¹⁾

4. 今後の方向性(私見)

放射性廃棄物の最終的な処分までを考えれば、1Fサイトおよびその周辺のみではなく、廃棄物を処分するサイトのことも考慮する必要がある。その意味では、特定のサイトのエンドステートも、搬出する先の廃棄物の処分サイトを含めて俯瞰すれば、事故修復の一つの中間的なステートということになるかもしれない。そのような背景を理解しつつも、特定のサイト、すなわち1Fサイトのステート(状態)を、関係者(ステークホルダー)で共有し、そこに向けて進捗を管理し、また課題を抽出するとともに、その解決に向けた技術や関連する規制の整備、また、何より大切な社会的側面での議論を深めることは重要と考える。

東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ¹³⁾における工程・作業内容は、策定時の知見や号機ごとの状況の分析に基づいて策定され、現場の状況、廃炉・汚染水対策の進捗、研究開発成果等を踏まえて見直すこととされている。現状では、燃料デブリの取り出しが予定されており、燃料デブリの炉内での分布や性状に関する詳細な情報の蓄積が、達成目標やその選択肢の議論には必要となる。また、これまで得られたデータを踏まえ、燃料物質の計量管理方策や事故進展挙動評価に加え、遠隔操作技術、分析技術、処理・処分技術の構築に関する継続的な検討が重要となっている。これらの現状を考慮すれば、本報告書に示されている関連の海外事例、さらにその選択の背景についても整理しつつ、放射性廃棄物や今後取り出すデブリの合理的な安定保管を念頭に置く中間エンドステートの議論を深める段階にある。

他方、放射性廃棄物の物量の低減について、現在、1Fでは、焼却などによる減容が図られている一方、クリアランス制度(放射性廃棄物として扱わなくてよい 廃棄物のサイト内外の再利用、クリアランスレベル以下の廃棄物と放射性廃棄物の合理的な分別手法と規制の整備を含む)の検討が重要になる。再利用では、通常炉で既に検討される処分容器の一部としての利用に加え、バリア機能(低透水性や低拡散性)を持つ資材への大規模な利用も)廃棄物の中で考えていく必要がある。これらの検討は廃炉および環境修復の過程にも大きく影響する。

さらに、これらの過程(廃炉および環境修復)に定義上含まれない放射性廃棄物の処分についても前述のように議論を要する。放射性廃棄物の減容は、処分事業に大きく関係してくる。そこでは、1Fに関連する放射性廃棄物の定義やその 処分事業の実施主体とその体制に関する議論も必要となる。現状では、今後のデブリ取出しを経て、それらの分布状態や性状が段階的に明らかになること、また、1Fの状況をこれらのデータをも加えて把握し、データを蓄積、整理していくことが期待される段階にあることを認識しつつも、放射性廃棄物の処分についての議論を進める上では、燃料デブリの取出しを本格的に進めていく前に、デブリを

含んだ放射性廃棄物の定義について踏み込んだ議論も開始する時期に来ていると考える。現状では、デブリは放射性廃棄物として定義されていない。しかし、処分の議論ではデブリの位置づけが大きな要素になる。放射性廃棄物の処分は、インベントリの同定およびその化学形態の特定が基本にあり、濃度上限値のみでは処分は進まない。そもそも濃度上限値は、代表的な処分システムを想定し、その性能評価結果を基に、多様な処分サイトにも対応できるように、一桁程度大きく設定されている。また、ヨウ素やテクネチウムのように、陰イオンは、地下を構成する土壌（主にケイ酸塩鉱物からなる）の表面が、通常の地下水の環境では負に帯電していることから、固相との相互作用を期待することができない。これまでもいわゆる TRU 廃棄物の中の ^{129}I は、地層処分相当の廃棄物に区分され、単に、 α 核種濃度および $\beta \cdot \gamma$ 核種濃度との関係における放射性廃棄物の処分形態の分類とは異なる処分形態が必要となる。さらに、管理型の処分システムでは比較的長期にわたる期間の管理が必要となり、サイトが開放され処分システムが閉鎖されるまでを考慮する。現場での状況を把握しつつ、廃炉を進めている現状において、1F から得られる新たなデータに加えて、その他の放射性廃棄物の処分事業の状況を把握し、1F に関連する放射性廃棄物の処分に必要なことは何かをステークホルダー間で共有していくことは、廃炉および環境修復を進める上でも、大切なことと考えている。

5. おわりに

本報告書の重要なメッセージの一つは、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は、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サイト内においても中間エンドステート（廃炉（除染・解体）やサイト修復等の各活動の達成目標）を定め、着実にステップを踏むことが重要となることを指摘している点にある。前述において、放射性廃棄物の処分サイトのエンドステートにも言及したが、本報告書では、燃料デブリ取出し作業が開始されようとする 1F サイトにおいても、その状況によって、廃棄物を安定に管理し、段階的に目標とすべきステート（状態）を議論していくことの重要性にも併せて言及している。

学会における廃棄物分会では、クリアランス制度、廃棄物の再利用、放射性廃棄物の定義、処分までに至る間の安定な保管とその処分に及ぼす影響の把握、さらには、処分サイトを含む 1F の事故修復の段階的な進捗について、ステークホルダーとの意見を進め、処分サイトを含むより広義のエンドステートについての議論も重要な時期に来ていると考える。

謝辞：本講演を勧めて頂いた福島第一原子力発電所廃炉検討委員長 宮野先生および同委員会廃棄物検討分会主査 柳原先生に深甚なる謝意を表すとともに、本報告書に携わった委員会、分科会メンバーおよび事務局をはじめとする関係の皆様へ厚く御礼申し上げます。

引用文献：

- 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-国際基準からみた廃棄物管理- (2020).
- 2) IAEA, Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors, Safety Guide, Safety Standard Series No. WS-G-2.1 (1999).
- 3) IAEA, Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material, Safety Requirement, No. WS-R-5 (2006).
- 4) OECD/NEA, Strategic Considerations for the Sustainable Remediation of nuclear Installations, OECD NEA No. 7290 (2016).
- 5) IAEA, Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents, Safety Guide No. WS-G-3.1 (2007).
- 6) 日本原子力学会東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会：その全貌と明日に向けた提言（最終報告書），丸善（2013）.
- 7) IAEA, Management of Long-Term Radiological Liabilities: Stewardship Challenges, Technical Report Series No. 450 (2006).
- 8) IAEA, Lessons Learned from Environmental Remediation Programmes, Nuclear Energy Series No. NW-T-3.6 (2014).
- 9) OECD/NEA, Management of Radioactive Waste After a Nuclear Power Plant Accident, NEA No. 7305 (2016).
- 10) 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).
- 11) 原子力安全基盤機構，平成 20 年度廃止措置に関する調査報告書；廃止措置ハンドブック（2009）.
- 12) H. Kawamura, et al., Decommissioning and Environmental remediation Scenario development for Fukushima Daiichi, Proceedings of TopSafe 2017, 12-16, Feb., IAEA (2017).
- 13) 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議，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止措置等に向けた中長期ロードマップ，令和元年 12 月 27 日（2019）.

*Yuichi Niibori¹

¹Tohoku University