

国際標準からみた廃棄物管理

- 廃棄物検討分科会中間報告 -



2020年7月

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会  
一般社団法人 日本原子力学会



## 公開にあたって

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会は、福島第一発電所の事故の反省を踏まえて、原子力分野の専門家集団として何が出来るかを考え、同発電所の廃炉等に積極的に貢献するために日本原子力学会に設置されました。このたび、当委員会廃棄物検討分科会でまとめた「国際標準からみた廃棄物管理」を公表し、関係する多くの皆様にご覧頂くことは意義があると考え、「公表にあたって」を付し、本報告書の位置づけをご理解頂きたいと思っております。

事故を起こした原子力施設や広範な汚染のある原子力施設の廃炉を進めるには、最終的な状態(以下、エンドステートといいます)をあらかじめ設定することが国際的にも重要とされています。このようなエンドステートの設定は、廃炉に係る複雑かつ多様な課題を如何に解決するのかということ、また、福島復興の将来像をどう考えるのかということと綿密に関係しており、ステークホルダー間で話し合うことが必要となります。

そこで、本報告書では、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組みを進めることの必要性を示すと共に、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ました。本報告書を中間報告とさせて頂くのは、本報告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、地元の方々を始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たものです。

当分科会は、政府や東京電力等に所属しない日本原子力学会の専門家から構成されており、この中間報告を示すことにより、地元の皆様や政府関係者等の間で廃炉や放射性廃棄物に関する議論を深化させるきっかけとなればと考えております。

以上

2020年7月

日本原子力学会 福島第一原子力発電所廃炉検討委員会

委員長 宮野 廣

同 廃棄物検討分科会

主査 柳原 敏

## 概要

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の廃炉に係る中長期ロードマップでは、2021 年から残存燃料及び燃料デブリの取り出しを予定している。これは 1F 施設を解体撤去し、放射能汚染したサイトを修復して、放射線管理から解放後、サイトの新たな利用を目指すゴール（最終的な状態、以下「エンドステート」という）に向けた第一歩である。但し、発生する大量の放射性廃棄物を着実に処理・処分することが必須の要件となる。また、エンドステート及びエンドステートに至る過程には様々な選択肢（シナリオ）がある。そこで、国際機関における廃炉・サイト修復（「環境修復」ともいう）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・保管状況の調査を進めるとともに、今後発生すると予想される放射性廃棄物量の推定結果などに基づき、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及びその放射性廃棄物管理シナリオへの影響を検討した。

本検討では、廃炉・サイト修復に係る活動を大きく 4 期に分類するとともに、放射性廃棄物の行先としては、概括的に「処分場に処分」、「サイトで貯蔵」、「放射性廃棄物をできるだけ発生させない（除染・解体領域を限定して原子力施設の管理を継続）」の 3 つを基本とした。また、「放射性廃棄物をできるだけ発生させない」については、どこまで解体するのか（「建屋解体まで(地下構造物残存)」、「全て解体撤去」など）、どこまで除染するのか（「サイトの除染・修復の程度」）など、様々な選択肢があり得る。そこで、これらの選択肢を考慮した上で、代表的な 4 つのシナリオを設定して放射性廃棄物の発生量を半定量的に試算し、また、シナリオの特性を分析した。なお、本検討で示すシナリオは、燃料デブリ取り出しが終了したことを前提に構成した。燃料デブリが計画通り取り出せない場合には、計画の変更が必要になるため、作業の継続を中断して対策を検討することになる。例えば、施設を安全貯蔵する等の処置が採られた場合には、本検討で示すシナリオの選択肢は限定されることになる。

他方、1F サイトのエンドステートやエンドステート達成のタイミングによって廃炉・サイト修復の工程や発生する放射性廃棄物量が異なる。そこで、本検討では、廃棄物管理に係る対策の観点から、廃炉・サイト修復のシナリオ検討に向けた情報を提供することを目的とする。1F サイトを規制解除し、再利用できるようにするためには、放射性廃棄物の処理・処分が重要な要件となるからである。また、1F サイトの利用方法、放射性廃棄物の行先などに係る議論にはステークホルダーの関与が必須であり、このためには原子力の専門家集団が検討した多くの情報を提供することが重要と考える。

さらに、上述したエンドステートを設定する上で、将来の 1F サイトの利用、その周辺で活動する様々な立場の人々を含めた議論が重要と考える。この議論は、廃炉・サイト修復や完了後のサイト利用に関して、技術、経済、社会、環境など多角的な検討が必要であるため、

将来を見据え、できるだけ早い段階から時間をかけて進めることが重要である。1 F の廃炉・サイト修復の活動は長期にわたることが予想されることから、1 F サイトを元の状態に戻す（又は有効に利用する）ためには世代を超えた取り組みが必要である。世代間の公平性も十分に考慮し、今の世代が実施出来ること、次の世代に託すことを明らかにして、今の世代で実施すべきことは十分な計画検討の下、エンドステートに向けて早期に取り組むことが重要である。

## 目次

1. はじめに .....	1
2. 廃止措置・サイト修復・廃棄物管理に係る対策 .....	6
2.1 廃止措置の定義 .....	6
2.2 廃止措置の基本方針 .....	6
2.3 放射性廃棄物の分類と処分方策 .....	8
2.4 廃止措置で発生する放射性廃棄物の量と廃棄体 .....	10
2.5 サイト修復 .....	12
2.6 エンドステート .....	12
2.7 1Fにおける課題 .....	13
3. 事故炉の廃棄物管理に係る対策 .....	15
3.1 エンドステートに至るタイムライン .....	15
3.2 領域区分 .....	15
3.3 事故に起因する放射性廃棄物の特徴 .....	16
3.4 1F 廃炉の廃棄物特性 .....	18
3.5 エンドステートに向けた取り組み .....	20
4. 放射性廃棄物の取り扱いに係る様々なシナリオの検討 .....	21
4.1 前提条件 .....	21
4.2 シナリオの検討 .....	23
4.3 シナリオの特徴 .....	25
5. 廃棄物管理に係る対策の検討課題 .....	29
6. 提言 .....	31
7. おわりに .....	33
参考文献 .....	34
付録1 1Fにおける廃棄物管理に係る対策の現状 .....	36
付録2 サイト修復と環境管理の事例 .....	38
廃棄物検討分科会メンバーリスト .....	42



## 1. はじめに

### 背景

2011年3月に発生した巨大地震・津波（東日本大震災）に起因する東京電力福島第一原子力発電所（1F）の事故により、環境に放射性核種が放出される深刻な事態に至り、同時に1Fサイトに存在する多くの機器、設備、建屋の他、植栽、土壌などが放射性核種により汚染した。事故後には、水素爆発で散乱した瓦礫や破損片の片づけ及び作業環境の改善を目的とした活動から瓦礫、伐採木、汚染水、汚染土壌など、様々な形態を有する放射性廃棄物が発生した。これらの放射性廃棄物は、現在、固体廃棄物貯蔵庫や一時保管施設で保管されている。また、事故対応及びその後の活動で作業者が着用した作業衣などの焼却処理を始めとする減容化などを目的とした廃棄物の処理が進められている<sup>1)</sup>。他方、「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（中長期ロードマップ）」<sup>2)</sup>によると2021年を目途に残存燃料及び燃料デブリ（コリウム〔溶融燃料とコンクリート構造物が反応したもの〕を含む）の取り出しが開始される計画となっている。これらの活動からは、原子炉格納容器（PCV）の中に設置されていた高度に放射能汚染した設備・機器の解体物、残存燃料及び燃料デブリなど様々な形状、材質、放射性核種、化学形態を持つ放射性廃棄物が発生する。残存燃料及び燃料デブリの取り出しの後に（または並行して）実施される施設の除染・解体などの廃炉作業、汚染した敷地の除染・修復など（サイト修復）からはさらに大量の放射性廃棄物が発生することが予想される。

上述した中長期ロードマップでは、「福島第一原子力発電所の廃止措置等を、放射性物質によるリスクから、人と環境を守るための継続的なリスク低減活動と位置づけ」ており、事故が発生した2011年から30-40年を要して廃炉を終了するとしている。中長期ロードマップにおける工程・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おり、廃炉を終了した際のサイトの姿（「エンドステート」という）については明らかにされていない。1Fサイト全体の環境を含めた除染・修復を完了し、事故に起因する汚染がサイト内に存在しない状態に戻すためには多くの作業が必要であり、長期間を要する可能性がある。また、2021年に開始される残存燃料及び燃料デブリの取り出しで発生する放射性廃棄物の処理・保管のほか、トリチウムを含む汚染水の処理、これまでに発生した放射性廃棄物を保管する施設の整備、施設の除染・解体で発生する解体廃棄物の安定化・減容処理、サイト修復で発生する放射性廃棄物の管理、さらに、全ての廃棄物（放射性廃棄物を含む）の処分など、廃炉・サイト修復の終了までを視野に入れた長期的視点を持つ廃棄物管理に係る対策の基本的な考え方の検討が必要になる。

一方、放射能汚染した原子力施設及び原子力サイトの除染・解体・修復は、米国、英国、フランス、ドイツ、ロシアなど、原子力利用を進めてきた国々が有する共通した課題である<sup>3)-5)</sup>ことから、IAEAやOECD/NEAなどの国際機関では、原子力開発や平和利用を目的とした施設における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）及び原子力サ



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<sup>4)-9)</sup>。これらの報告書には、事故を伴わない通常炉の廃止措置に加えて、事故炉におけるサイトの除染・修復活動に向けた有用な知見が示されており、その中の幾つかは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。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」、「(作業をするだけして、最後に残った廃棄物をどうするのか考えるのではなく)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、長期のスチュワードシップ<sup>注1</sup>を環境修復活動として考慮することもあり得ること」などの指摘は注目に値する。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ことも指摘されている<sup>7)</sup>。1Fの廃炉・サイト修復の計画を検討する際には、各国での対応の事例に基づき、IAEA、OECD/NEAなどで討議・整理された様々な知見・教訓を踏まえることが重要と思われる。

1F サイト全体の環境を含めた除染・修復を完了し、事故に起因する汚染がサイト内に存在しない状態に戻すためには多くの作業が必要であり、長期間を要する可能性がある。また、2021年に開始される残存燃料及び燃料デブリの取り出し、トリチウムを含む汚染水の処理、施設の除染・解体、サイト修復などの作業からは放射性廃棄物の発生が見込まれる。1Fの事故対応、残存燃料・燃料デブリ取り出し、廃炉、サイト修復の取り組みにおいては、これまでに発生した放射性廃棄物も含め、安定化・減容処理、放射性廃棄物保管施設の整備、さらに全ての廃棄物(放射性廃棄物を含む)の処分など、廃炉・サイト修復の終了までを視野に入れた長期的視点を持つ廃棄物管理に係る対策の基本的な考え方の検討が重要であることは言を俟たない。このため、これまでに公開された中長期ロードマップには、2017年度内に廃棄物の処理・処分に係る基本的な考え方を取りまとめるとともに、「2021年度頃を目途として固体廃棄物の処理・処分における安全性の見通しを確認し、必要な制度の検討を行い、処分の実施の見通しを得るなど、長期的観点から検討する」ことが明記され、原子力損害賠償・廃炉等支援機構が公開する「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 2019」には廃棄物対策に係る取り組みの考え方が示されている<sup>10)</sup>。これに対応して、2019年12月に公開された中長期ロードマップでは、「当面10年

---

注1 スチュワードシップとは「(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。

間程度に発生する固体廃棄物の物量予測を行い、固体廃棄物の発生抑制と減容を図った上で、一時保管エリアにおける保管や、遮へい・飛散抑制機能を備えた施設の計画的な導入、継続的なモニタリングによる適正な保管を前提とした保管管理計画を策定しており、今後の廃炉作業の進捗状況や計画等により変動するものであることから一年に一度発生量予測を見直し、必要に応じて更新を行う。」などが記載されている。ただ、燃料デブリの取り扱いを含め廃棄物管理に係る対策の具体的な内容は、放射性廃棄物の特性データ等がまだ取得されていないことから、今後の検討とされている。

残存燃料及び燃料デブリ取り出しの開始で始まる第 3 期の活動では、燃料デブリ取出しに伴い発生する放射能レベルが高く  $\alpha$  核種を含む燃料デブリ、コリウム、機器の解体片などの放射性廃棄物、また、廃炉に伴い発生する Cs-137 を中心とした高濃度に汚染した大量の機器・構造物の解体廃棄物が発生し、廃炉と並行または引き続いて実施されるサイト修復（除染・汚染土壌の撤去）では、土壌など放射能レベルは比較的低いものの大量の放射性廃棄物が発生することが予想される。世界各国の経験及びわが国における廃棄物管理に係る対策の経緯では、放射性廃棄物の最終的な行先を決め、処分が可能になるまでに長期間を要することが通例である状況を鑑みると、1F では、まだ十分に放射性廃棄物の特性データ等が取得されていないものの、サイト修復が終了するまで、或いは、中長期ロードマップで示す廃炉終了時（「中間エンドステート」という）までを想定した廃棄物管理に係る対策の検討を複数のエンドステートの比較を含めて早急に開始することが必要と思われる。

#### 1F 廃炉に係る活動の経緯

1F 事故以降、日本原子力学会では事故原因の究明、事故処理に向けての提言、住民への情報提供・対話など、緊急に必要な活動を実施してきた。また、2012 年 6 月には、専門分野ごとに設置された部会などで実施された福島事故関連の活動を統合化するため、「東京電力福島第一原子力発電所事故における調査委員会」を設置し、専門家集団としての知識や経験を生かした活動が進められた。この結果は報告書として取りまとめられ、中長期ロードマップの改訂などに役立てられている<sup>11)</sup>。

上述した委員会とともに設置された「福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分」特別専門委員会においては、1F 事故対応からサイト修復までに発生する大量の廃棄物に対して長期的視点に立った検討が必要であることを明記した上で、廃棄物管理に係る対策の当面の研究開発課題を具体的に提案した<sup>12)</sup>。

一方、上述した委員会による報告書の公開後、事故の経過や施設状況の調査の進展に伴い、廃炉に係るリスク評価及び施設の健全性評価など更なる検討が必要との認識のもと、2014 年には「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」が発足した。本委員会には、リスク評価分科会、事故課題フォロー分科会、事故進展に関する未解明事項フォロー分科会、ロボット分科会、建屋の構造性能検討分科会などが設けられ、総合的な事故の分析および今後の取り組みに係る検討が進められている。また、廃棄物管理に係る課題をより詳細に検討するため、2016 年 4 月に「廃棄物検討分科会」が設置された。これまでの作業で発生した放射性廃棄

物の適切な処理及び保管、放射性廃棄物の減容、液体廃棄物の処理など、廃棄物管理に係る課題が山積していることを背景にしたものである。

廃棄物検討分科会では、1F 廃炉が安全で効率的に進められるよう廃棄物管理に係る対策に関して適切な提言を行うことを目的とし、原子力に係る専門家集団として学術的な立場から様々な検討を実施してきた。本分科会の活動は、1F 廃炉で発生する放射性廃棄物の処理・処分に係る取り組みを対象とし、放射性廃棄物の発生およびその管理シナリオの検討、放射性廃棄物管理、国の政策との整合性や経済性などに関するものである。

#### 廃棄物検討分科会の活動概要

放射性廃棄物の処理・保管・処分を含む管理は、2021 年以降に本格化する残存燃料および燃料デブリの取り出し、施設の除染・解体、サイト修復（除染を含む）など、1F を放射能汚染の拡散を防止するための管理状態から解放し、新たな跡地の利用を可能にするまでの全ての取り組みと密接に関係する。1F 跡地の再利用を展開するためには、放射能汚染した設備・機器、建屋・構造物を解体・撤去した上で土壌・地下水を除染し、それらの作業から発生する大量の放射性廃棄物を処理・処分することが必要である。或いは放射性廃棄物をサイトに保管する場合でもその容量を極力少なくし、保管エリアを限定するための対策が必要になる。

本分科会の当面の目的は、1F 廃炉・サイト修復における最終着地点であるエンドステートまでの作業・工程を俯瞰して、廃棄物管理に係る対策の観点から、今後の取り組みの基本的な考え方、方策、道筋の可能性を幾つか示し、その特性を明らかにすることである。廃炉・サイト修復のエンドステートに至る過程には様々な選択肢があり、それらの選択肢に対し廃棄物管理の観点からの特徴を明らかにすることは、社会的合意に基づく廃炉・サイト修復の進め方・ゴールに関する意思決定への第一歩であると考えられる。そこで、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・保管状況の整理、今後発生すると予想される放射性廃棄物の推定などを基本にして、エンドステートを視野に入れた廃炉・サイト修復の方針及び廃棄物管理シナリオへの影響を検討した。

「廃棄物管理シナリオ」とは、放射性廃棄物を最終的に処分するまでの道筋を示すものであり、管理の形態には様々な選択肢が考えられる。また、1F の廃炉（施設の除染・解体）、サイト修復の進め方を含め、作業を終了するまでに行われる作業内容や除染の程度などにより発生する放射性廃棄物の特性および量が異なり、廃棄物管理シナリオの検討に影響を与える。このため、放射性廃棄物の最終的な行先を見据えた上で、施設の除染・解体およびサイト修復に係る活動を大きく分類し、発生する放射性廃棄物（固体廃棄物に限定）の管理シナリオを検討した。ここで、放射性廃棄物の行先としては、概括的に「処分場に処分」、「サイトで貯蔵」、「廃棄物をできるだけ発生させない（除染・解体領域を限定して原子力施設の管理を継続）」の3つを基本的な選択肢とした。また、エンドステートに至るまでの取

り組みや汚染状況を考慮し、サイトを幾つかの領域に区分することにより廃棄物管理に係る検討を行った。区分した領域ごとに発生する放射性廃棄物の特性が異なることが予想されるため、サイト全体としての放射性廃棄物の行先は「1F サイト外」、「1F サイト内で貯蔵」に分類できる。また、発生する放射性廃棄物については、クリアランス、限定再利用、減容（溶融等）を進めて、その容量を少なくするための様々な処理、貯蔵方法などが考えられ、これらを含む幾つかの選択肢を検討した。さらに、「廃棄物をできるだけ発生させない」選択肢についても、これまでの海外の取り組みを踏まえると、どこまで解体するのか（「建屋解体まで（地下構造物残存）」、「全て解体撤去」など）、どこまで除染するのか（「サイトの除染・修復の程度」）など、様々な選択肢があり得る。本分科会では、放射性廃棄物の特性（発生時期、量、汚染の程度）に対応した幾つかの選択肢を示して廃棄物管理シナリオを検討した。なお、1F の廃炉・サイト修復及び廃棄物管理に係る対策の策定では、サイトを如何に有効に利用できるようになるかの視点が重要になる。

上述したように、「廃棄物管理シナリオ」の選択肢は「廃炉シナリオ」と密接に関連する。「廃棄物管理シナリオ」の評価には、放射線リスク評価（一般公衆、1F 作業員）、社会的（ステークホルダ）受容性評価（具体的方法は今後の課題）、経済性、環境影響などが考えられるが、これらについても分科会の課題として今後検討を進める予定である。

本報告は、「1F 廃炉で発生する廃棄物をどうするか」（どうするのが良いのか）に関する検討の第一ステップとして、1F 施設及びサイトについて現段階で入手可能なデータに基づき、幾つかの「廃棄物管理シナリオ」を評価し、まとめたものである。廃棄物管理シナリオの検討には、より正確な放射能インベントリや物量の評価、汚染領域の推定が不可欠である。本検討は、今後、調査・分析などの進展に伴い、廃棄物管理シナリオ検討に必要な1F 施設及びサイトの特性に関する情報が拡充された際には、再度の見直しが必要となる。

なお、本報告書では、通常原子力発電所には「廃止措置」という言葉を当て、1F のような事故炉には「廃炉」という言葉を当てることにした。通常炉の廃止措置、少なくとも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及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 の1-3号機では、残存燃料及び燃料デブリが炉心及びその周辺に分布しており、汚染も広範囲に広がっているため、通常炉の手順に従った作業とはならない。また、1F は特定原子力施設に指定され、通常炉と同様の手順を取ることが必須の要件とはなっていない。このように、残存燃料及び燃料デブリを取り扱うこと、作業は事前に認可された実施計画に沿って実施される点が通常炉との大きな違いである。これらを考慮して1F 施設の除染・解体を通常炉の廃止措置と区分して「廃炉」と記述する。

## 2. 廃止措置・サイト修復・廃棄物管理に係る対策

### 2.1 廃止措置の定義

国際原子力機関 (IAEA) では廃止措置を次のように定義している<sup>13),14)</sup>。すなわち、「廃止措置とは原子力施設の一部又は全部をそこに課せられている規制から除外するための行政的、技術的な活動である (処分施設は除外、処分施設は閉鎖であり廃止措置とは定義されない)。この廃止措置の活動には、放射性物質、廃棄物、機器・構造物の除染、解体、撤去が含まれ、放射線リスクの低減を実現するために適用されるものであり、安全確保に必要な事前の計画や評価に基づいて実施される。」

一方、わが国における原子力施設の廃止措置の規制に関して検討された報告書では、「廃止措置とは、許可・指定をうけた事業または原子炉に係る主たる活動が終了した後、原子炉等規制法の規制を終了するまでの間に行う核燃料物質の譲渡、核燃料物質による汚染の除去、核燃料物質または核燃料物質によって汚染された物の廃棄等の一連の措置と捉えることとする。」と記述され<sup>15)</sup>、IAEA と同様に、原子炉等に係る主たる活動が終了した後に行われる規制解除のための解体、除染及び放射性廃棄物の廃棄などに係る作業と定義されている。さらに、原子炉等規制法の下 (実用炉規則第 119 条など) における廃止措置の終了条件は以下の通りである。

- ・核燃料物質の譲渡
- ・施設や敷地の放射能の除去
- ・放射性廃棄物の廃棄
- ・放射線管理記録の引渡し<sup>注2</sup>

ここで、「施設や敷地の放射能の除去」とは、施設や敷地の規制が解除された後、公衆がそれらを利用する際に有意な放射線被ばくを生じないように、施設や敷地の除染を実施することを意味している。例えば、IAEA では年間 10-300  $\mu$  Sv の範囲で適切な基準を設けることを推奨している<sup>16)</sup>。

### 2.2 廃止措置の基本方針

原子炉施設の廃止措置の実施には様々な選択肢がある。すなわち、廃止措置の方式は、原子炉施設の特性、施設の立地条件、施設所有者 (事業主) の考え方等により千差万別である。IAEA の報告書では、廃止措置の考え方 (基本方針) をより単純にするために、以下に示すように、即時解体 (Immediate Dismantling)、遅延解体 (Deferred Dismantling)、原位置処分<sup>注3</sup> (Entombment) に分類している<sup>13)</sup>。

即時解体 : 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

注2 (公財) 放射線影響協会への引き渡し

注3 Entombment の本来の英訳は「埋葬」であるが、ここではより理解しやすく「原位置処分」とする。

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。

遅延解体：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。

原位置処分（長期保管）：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。

廃止措置計画の検討では、廃止措置が終了するまでの時間軸を考慮することが重要である。上述した IAEA の分類は時間軸をパラメータにして、原子炉の運転停止後のなるべく早い時期に廃止措置作業に取り掛り早期に廃止措置を終了する「即時解体」、本格的な廃止措置作業に取り掛る時期を遅らせる「遅延解体」、かなりの長期間に亘り廃止措置の終了を遅らせる「原位置処分」の基本方針とみることが出来る。図 2.2-1 は上述した廃止措置の基本方針を時系列で示したものである。

何れの基本方針においても、施設の最終の姿（エンドステート）を明らかにした上で準備に取り掛かることになる。廃止措置を進めるに当たっては、施設の実態（残存放射能、汚染状況など）を十分に調べて計画を立案することが重要である。除染や解体が終了した後に、最終的な放射能測定を行い、許容レベル以上の放射能汚染が存在しないことを確認することにより廃止措置が終了する。

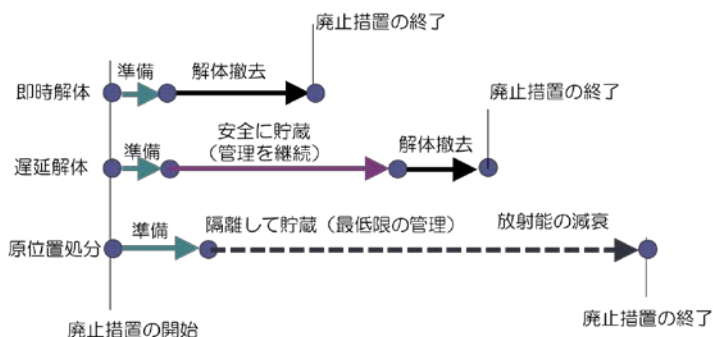


図 2.2-1 時系列で示す廃止措置の基本方針

### 2.3 放射性廃棄物の分類と処分方策

わが国では原子力発電を含む核燃料サイクル及び原子力に係る研究活動などから発生する放射性廃棄物はその特性に応じた処分形態の分類がなされている。即ち、放射性廃棄物はその放射能レベルの高低に応じて「高レベル放射性廃棄物」と「低レベル放射性廃棄物」に区分されている。高レベル放射性廃棄物は、原子力発電所で使用された使用済燃料の再処理の過程で作られるガラス固化体であり、これらは地下の深い部分（300m以深）に地層処分される。原子炉施設の廃止措置で発生する放射性廃棄物は全て低レベル放射性廃棄物に分類される。このうち、比較的放射能レベルが高い廃棄物は70m以深の地下に処分（中深度処分）される。また、放射能レベルが低い廃棄物は浅地中処分（コンクリートピット処分又はトレンチ処分）される。これらを区分するため埋設濃度上限値が定められており、例えば、トレンチ処分ではCo-60で $10^{10}$ Bq/トン、コンクリートピット処分ではCo-60で $10^{15}$ Bq/トンである。原子力利用で発生する低レベル放射性廃棄物の分類とその処分方法は以下の通りである（図2.3-1参照）。

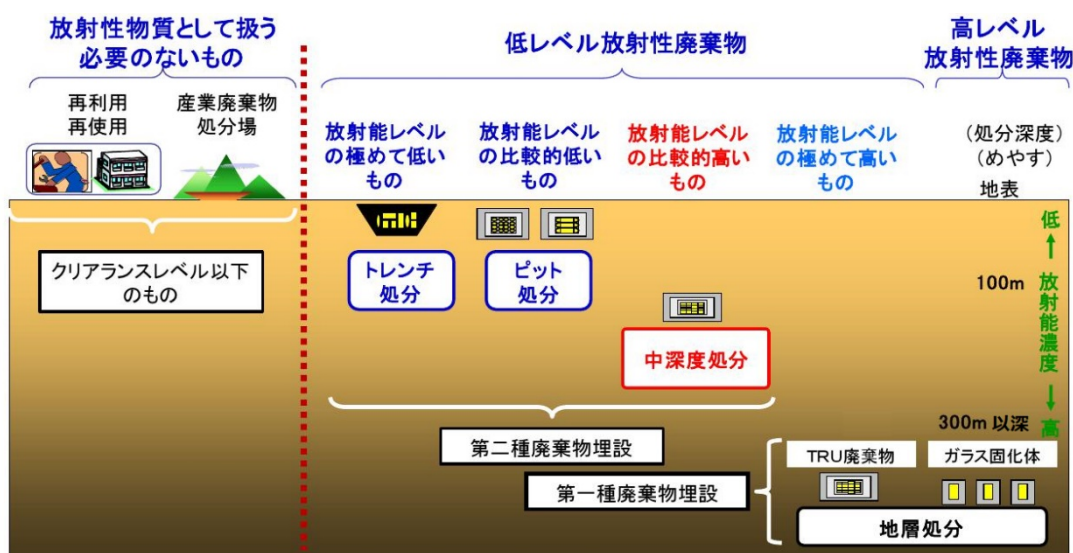


図 2.3-1 放射性廃棄物の処分形態（地層処分は第一種廃棄物埋設、中深度処分、コンクリートピット処分およびトレンチ処分は第二種廃棄物埋設に区分される。）

#### 放射能レベルが比較的高い廃棄物（中深度処分）

炉心近傍の炉内構造物や制御棒などが中性子の照射を受けて放射化したものなどが対象である。地下70m以深の空洞（トンネル又はサイロ）に搬送して定置され、処分坑道は最終的に埋め戻される。

#### 放射能レベルが比較的低い廃棄物（コンクリートピット処分）

原子力発電所の運転や廃止措置で発生する放射能濃度の低い廃棄物が対象である。浅地

中のコンクリートピット（コンクリート構造物で囲われた区画）内に処分され、コンクリートピットは埋め戻される。

#### 放射能レベルが極めて低い廃棄物（トレンチ処分）

放射能濃度が極めて低く、コンクリートピットのような区画内への埋設を必要としない放射性廃棄物が対象である。例えば、土地を掘削した溝（トレンチ）に定置され埋設される。掘削溝は埋め戻される。なお、埋め戻された掘削溝は人工構造物と定義され、周辺土壌と区別される場合がある。

以上は原子力発電所の運転や廃止措置で発生する放射性廃棄物（発電所廃棄物）を対象に処分形態に係る分類を示したものであるが、放射性廃棄物の発生源で区分すると、この他、核燃料サイクルの様々な活動で発生する放射性廃棄物として、ウラン廃棄物、超ウラン核種を含む放射性廃棄物（TRU 廃棄物）が分類されている（表 2.3-1）。TRU 廃棄物は再処理施設や燃料加工施設の運転から発生するものであり、燃料棒の部品、廃液を処理した固体、フィルターなどである。このうち放射能レベルの高いものは地層処分されるが、上述した高レベル放射性廃棄物の処分場に隣接する場所を処分場にする（併置処分）も一つの選択肢となる。また、ウラン廃棄物はウラン濃縮施設や燃料加工施設から発生するものであり、ウラン核種で汚染した各種部材が相当する。比較的放射能レベルの高いものは中深度処分の対象となるが、その他はピット処分又はトレンチ処分の対象である。

他方、医療機関や研究機関（研究炉を含む）などから発生する放射性廃棄物（RI 廃棄物、研究所等廃棄物）があり、これらは原子力発電所の運転・廃止措置で発生する放射性廃棄物と同様に、放射能濃度に応じて上述した処分方法が採られることになる。

なお、わが国には青森県に六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターがあり、日本原燃が放射性廃棄物（低レベル）の埋設事業を進めている。但し、現在は原子力発電所の運転で発生した放射性廃棄物（放射能レベルが比較的低い廃棄物）を処分の対象としている。茨城県東海村には JPDR<sup>注4</sup>の廃止措置で発生した放射能レベルが極めて低い廃棄物の処分施設（トレンチ処分）が存在する（処分場は閉鎖）。また、現在、廃止措置が進められている東海発電所の機器・構造物の解体で発生する放射能レベルが極めて低い廃棄物は同サイト（東海村）にトレンチ処分することが計画されている。

---

注4 わが国で初めて旧日本原子力研究所（東海村）に建設された試験用原子力発電所（Japan Power Demonstration Reactor）。原子炉特性、燃料特性などの研究及び運転員の訓練などに供された（電気出力は 1.25MW）。また、わが国で初めて廃止措置（1986-1996）が行われ、施設は解体撤去され跡地は更地になっている。



表 2.3-1 発生源に基づく放射性廃棄物の分類

発生源	廃棄物の名称	備考
再処理施設 MOX燃料加工施設	ガラス固化体	実施主体はNUMO
	TRU（超ウラン）廃棄物	
原子炉施設	運転・解体廃棄物	実施主体は日本原燃 六ヶ所低レベル放射性廃棄物 埋設センターで処分が可能
ウラン濃縮施設 燃料加工施設	ウラン廃棄物	実施主体はJAEA 処分の詳細は今後の課題
研究施設	研究所等廃棄物	実施主体はJAEA
RI使用施設	RI廃棄物	

## 2.4 廃止措置で発生する放射性廃棄物の量と廃棄体

通常炉の廃止措置作業では、運転・保守と比較して大量の放射性廃棄物及び放射性廃棄物に分類する必要のないもの（廃棄物或いは有価物）が発生する。この量は施設の規模によって異なるため、原子力発電所の規模と種類を考慮した上で、放射性廃棄物の処分形態に対応した分類ごとに発生する解体物の重量が試算されている<sup>17)</sup>。例えば、110万kW級の大型原子力発電所の廃止措置では約50万トンの解体物が発生する。また、小規模の原子力発電所では14万~20万トンの解体物が発生する（表2.4-1）。

表 2.4-1 通常炉の廃止措置で発生する機器・構造物の量

	BWR			PWR			GCR
	小規模	中規模	大規模	小規模	中規模	大規模	
L1	50	70	80	120	190	200	1,540
L2	760	830	850	710	1,230	1,720	8,950
L3	5,530	6,750	11,810	1,850	2,570	4,040	12,300
CL	9,710	9,750	28,490	3,970	8,080	11,660	41,100
NR	130,620	220,430	495,420	187,150	215,750	477,300	128,700
合計	146,670	237,830	536,650	193,810	227,820	494,920	192,400

L1：放射能レベルが比較的高い廃棄物  
CL：クリアランス物

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



NR：「放射性物質として扱う必要がないもの」及び「放射廃棄物でない廃棄物」

これらの放射性廃棄物を処分するためには、処分の安全を確保することが重要であり、技術基準に適合する廃棄体を製作することが求められる。特に「放射能レベルが比較的高い廃棄物」、「放射能レベルが比較的低い廃棄物」の処分においては廃棄物を容器に封入して安定化することが必要になる。これまでに実施されている「放射能レベルが比較的低い廃棄物」の処分では、セメント固化などにより「均質・均一固化体」や「充填固化体」が製作されて

六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターに搬出されている（表 2.4-2）。また、「放射能レベルが極めて低い廃棄物」の処分では必ずしも放射性廃棄物を容器に封入する必要はないが、処分場への運搬中に放射性廃棄物が散逸しないよう運搬容器に詰めて運ぶことや埋設時に飛散を防止する等の対策が必要になる。

運転を終了した原子炉施設の廃止措置で発生する解体物の多くは放射性廃棄物として扱わなくても良いものであり、放射性廃棄物の割合は少ない。このため、履歴や放射能測定により「放射性廃棄物」と「放射性物質として扱う必要がないもの」及び「放射廃棄物でない廃棄物」を区分する制度が作られており、区分の判断には「クリアランス検認」又は「放射性廃棄物でない廃棄物を特定するための履歴調査」が必要になる。

表 2.4-2 廃棄体の例

	均一・均質固化体	充填固化体
概要		
内容物	濃縮廃液、使用済樹脂、焼却灰など	金属類、プラスチック、保温材、フィルター類など
固形化方法	セメント、アスファルト、プラスチックを用いてドラム缶に均質・均一に練り混ぜて固形化	切断・圧縮・溶融処理などを行い、ドラム缶に収納後モルタルで固形化

クリアランス検認では、定められた測定単位に対して核種ごとの放射能濃度を測定（または推計）して、核種ごとのクリアランスレベルに対する放射能濃度の比の合計が1以下であることが条件となる。「放射性物質として扱う必要がないもの」については、運転の履歴やその構造から中性子による放射化の量が無視できるレベルであることを確認する必要がある。また、「放射性廃棄物でない廃棄物」については、汚染がないか、物理的に汚染部分の分離がなされていることを確認することが必要になる。このような、検認及び履歴などの調査により、多くの解体物は放射性廃棄物として取り扱わなくても良く、放射性廃棄物処分場で処分する必要がなくなる。

これらの結果、通常炉の場合、放射性廃棄物は発生する解体物に対して数パーセント以下になると予想される。

## 2.5 サイト修復

OECD/NEA の報告<sup>4)</sup>では、原子力サイトの土地などに放射能汚染がある場合、その除染などの活動は「サイト修復（「環境修復」ともいう）」として廃止措置とは区別した検討がなされている。廃止措置は対象となる施設に課されている規制を解除するための活動であるのに対して、サイト修復は土壌、地下水などを対象とし、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にするための取り組みである。

一方、原子力発電所のサイトには原子炉建屋やタービン建屋など原子力発電に直接関与するものの他、放射性廃棄物の保管施設、事務管理施設、港湾施設など、目的に応じて様々な機能を持つ施設が存在する。廃止措置・サイト修復が終了した後にサイトを有効利用するためには、これらの領域区分を生かして将来計画を立案する必要がある。図 2.5-1 はサイトの領域を区分する例である。

原子力施設の廃止措置・サイト修復に係る活動では必ず放射性廃棄物が発生するため、放射性廃棄物の処理・処分を適切に実施することが、廃止措置・サイト修復を完了させる上で必須の要件である。特に、事故や放射性物質の不適切な管理でサイト（敷地）やそこに存在する施設の一部（又は全部）が放射能汚染したケースでは、これらの汚染を除去する過程で多様な形態を持つ放射性廃棄物が発生する。放射性廃棄物の発生量を如何にして低減するのか、また、発生する放射性廃棄物をどのように処理・処分するのかについての検討は、廃止措置・サイト修復を完了し、サイトを有効利用するための必須の要件である。

放射性廃棄物管理施設	港湾、送電施設などの 付属施設
一時的な放射性廃棄物 保管領域	原子炉施設（原子炉建 屋、タービン建屋）
事務管理施設	
道路・緑地帯	

図 2.5-1 原子力サイトの領域区分の考え方

## 2.6 エンドステート

前述したように、通常炉の廃止措置と事故炉の廃炉の取り組みは大きく異なるが、通常

炉の廃止措置はプラントライフサイクルの一環として計画された活動の一部であるのに対して、事故で停止した施設の廃炉は計画外の活動と捉えることが出来る。エンドステートとは、各国の法規制や各サイトの状況、環境に応じて事前に規定される基準であり、残存放射能レベルとそれに対応する土地利用の選択肢（土地利用に制限が必要な場合にはその内容の詳細）、廃棄物の最終的な行き先に関する情報について記載されている必要がある<sup>9)</sup>。通常炉でも事故炉でも、廃止措置（廃炉）およびサイト修復は、放射能レベルを低減し、エンドステートとして予め規定した基準を満たした時に完了する<sup>14)</sup>。

エンドステートの達成に向けた活動は、サイトに存在する各種施設の除染・解体、土地、植栽、道路などのサイト内の汚染エリアの除染に係る活動で構成される<sup>3),14)</sup>。サイト全体が汚染しているケースでは、汚染した土壌の撤去、汚染地下水の浄化などの作業から大量の放射性廃棄物が発生することも予想される。

一方、米国 DOE における環境管理プログラム（付録 2 参照）では、放射性廃棄物の発生量を考慮に入れて、エンドステートの在り方が検討されている<sup>18)</sup>。サイト修復後の土地を無効束解放するためには大量の放射性廃棄物が発生するが、制限付きの限定的な利用にすればこの発生量が少なくなる場合がある（図 2.6-1）。放射性廃棄物の処分と土地利用に係る利点・難点を勘案したバランスのよい目標設定が重要であり、このためには放射性廃棄物管理とサイトの跡地利用形態の双方を考慮したエンドステートの検討が有効である。

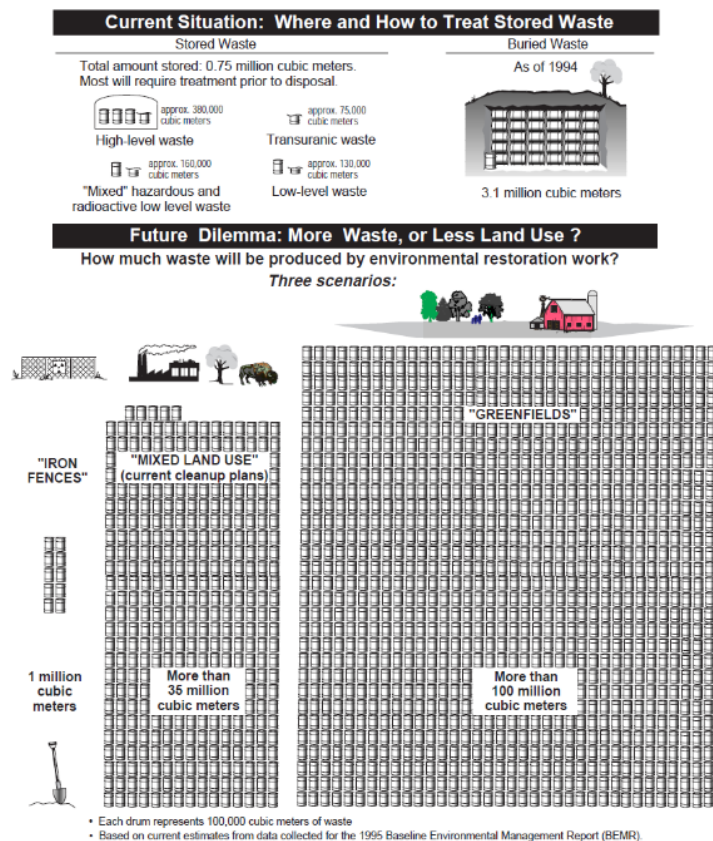
また、通常炉の遅延解体（安全貯蔵の後に解体）の期間が長期にわたる場合や、サイト修復に長期間を要する場合には、これらの活動を着実に進める上で中間エンドステートを幾つか定め、活動を計画的に組み立てることが求められる。特に、事故炉については長期的な展望の下にこれらの活動を計画し、発生する放射性廃棄物の量及び行先を考慮した上で中間エンドステートやエンドステートを設定すること、また、状況の変化や獲得される情報・データなどに応じて改訂していくことが必要と思われる。

## 2.7 1F における課題

1F サイトの状況は通常炉と異なり、施設の内外が放射性核種で汚染している可能性が大きいため、「放射性物質として扱う必要がないもの」の特定は通常炉に比べてかなり困難になることが考えられる。このため、1F（特定原子力施設）に特化した「放射性廃棄物」と「放射性物質として扱う必要がないもの」の区分の考え方の整備が必要になる。また、わが国では、使用済み燃料は有価物であり放射性廃棄物として定義されないため、燃料デブリは放射性廃棄物ではないとされ、固体廃棄物から除外されている。しかし、燃料デブリや燃料デブリの付着した機材については、現実的に考えて有価物となる可能性は極めて小さいと考えられることから、計量管理されていることを前提に、本検討では放射性廃棄物に区分することとしたが、今後、燃料デブリおよびその付着を考慮した放射性廃棄物の定義について議論を深めることが重要である。さらに、燃料デブリ取り出しでは、取り出された解体片は原子炉の機器や構造物と一体になっていることが考えられるため、取り出された燃料デブ

りの分別、保管管理、記録の作成などに係る検討も必要である。

なお、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」と記載するため、原子炉施設（原子炉建屋、タービン建屋など）及び関連する施設（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。



注：米国環境管理プログラムにおいて放射性廃棄物の取り扱いに係る選択肢の概略を説明した図<sup>18)</sup>

図 2.6-1 放射性廃棄物の取り扱いに係る選択肢

### 3. 事故炉の廃棄物管理に係る対策

#### 3.1 エンドステートに至るタイムライン

事故で運転を停止した施設の廃炉は異なる性質の幾つかの作業から構成され、事故発生からサイト修復のエンドステートに至る取り組みに関して図 3.1-1 のようなタイムラインが示されている<sup>9)</sup>。即ち、事故対応、安定化活動、クリーンアップ、廃炉作業（除染・解体）、サイト修復などであり、各段階の作業では発生する放射性廃棄物の特性が異なる。ここで、事故対応とは、放射性物質の環境への漏洩防止及び原子炉の冷却を可能にするための活動などである。安定化活動とは、事故で発生したレベルの高い放射能汚染の除去、放射性物質の環境への放出抑制などで、引き続き実施される取り組みを容易にするための活動である。クリーンアップとは、敷地の放射能汚染を除去し、放射性物質の環境への放出が制御できる状態にする活動であり、その後に廃炉作業（除染・解体）が始められる。但し、残存燃料及び燃料デブリの取り出し、熔融燃料とコンクリート構造物が反応したコリウムの取り出し、核燃料物質で汚染した機器の解体・撤去の際には、クリーンアップと廃炉作業が並行して実施されることもある。最終段階ではサイト修復が実施される。エンドステートとして解体撤去の範囲(全て～一部)、跡地利用の制限の有無など広範囲の設定が可能であり、その想定如何により、一連の工程における作業の必要性の要否や作業の特性が大きく異なる可能性があることに留意することが大切である。このため、廃炉（除染・解体）における達成目標とサイト修復における達成目標を明確に設定することが重要になる。なお、ここでは各活動の達成目標を「中間エンドステート」という。

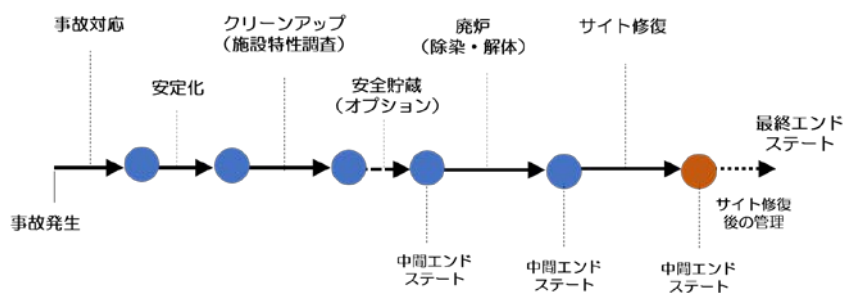


図 3.1-1 事故発生から最終状態に至るまでの主要なタイムライン

#### 3.2 領域区分

原子力サイトは一般に広大な敷地を有しており、原子炉建屋、緑地帯、事務建屋など様々な役割を有する施設や土地が存在する。事故で停止した原子炉施設では、施設の内部が放射性汚染していることは勿論であるが、作業者の被ばく管理を前提にした原子炉施設（原子炉

建屋、タービン建屋（BWR の場合）、放射性廃棄物管理建屋）以外の施設・設備、例えば、事務建屋、港湾施設、電力供給施設、道路、緑地帯などが放射性核種で汚染している可能性がある。また、廃炉作業では、領域ごとに実施される作業内容や土地利用の方法・目的によって除染の程度が異なることも考えられる。このため、サイトの領域を区分した上で、領域ごとの汚染特性（核種、放射能濃度、量など）や、廃炉・サイト修復の活動内容、及び発生する放射性廃棄物の取り扱いを検討することが必要になる。

1F サイトには様々な施設が存在するが、図 3.2-1 は施設の役割に応じて、廃炉対象の領域とサイト修復対象の領域に区分したものである。廃炉（除染・解体）の対象となる領域は、原子炉建屋、タービン建屋、廃棄物処理建屋、汚染水の保管エリア、地下水管理施設、管理棟である。また、サイト修復の対象領域は、冷却水が浸透したエリア、事故で放出された放射性核種で汚染したエリア（緑地帯、道路など）である。

### 3.3 事故に起因する放射性廃棄物の特徴

廃炉及びサイト修復のエンドステートを想定した取り組みの計画検討においては、発生する放射性廃棄物の特性を考慮してその処理・処分までを対象範囲とすることになる。エンドステートに至るまでの期間を、「事故対応・安定化活動」、「残存燃料と燃料デブリの取り出し・除染・解体（クリーンアップから廃炉作業）」、「サイト修復」に分類すると、おおよそ以下のような特性を持つ放射性廃棄物が発生することが予想される。

#### 事故対応・安定化活動

瓦礫等（瓦礫類、伐採木、使用済保護衣等）、水処理二次廃棄物（吸着塔類、廃スラッジ、濃縮廃液スラリー）、冷却水処理で除去できなかったトリチウムで汚染された廃液

#### 除染・解体(クリーンアップから廃炉作業)

- ① 残存燃料と燃料デブリ：残存燃料及び燃料デブリ、コンクリート構造物と熔融燃料が反応したコリウム
- ② 主要施設：核燃料物質で汚染した機器、Cs-137 などで汚染した機器・構造物の解体片
- ③ その他の施設：原子炉建屋及びタービン建屋以外の施設の構造物等の解体片

#### サイト修復

敷地の汚染土壌など比較的放射能濃度は低いが大量の放射性廃棄物

なお、残存燃料及び燃料デブリの取り出し及び廃炉（除染・解体）に係る活動では核燃料に加えて TRU 核種で汚染された解体片などの放射性廃棄物が発生する。また、これらに加えて、事故以前に発生した放射性廃棄物が施設に保管されているため、これらを含めた放射性廃棄物の処理・処分が必要になる。但し、残存燃料及び燃料デブリ、放射能レベルの高い解体片が混在する放射性廃棄物の処理・処分が実施された例はこれまでにない。これらを分



別することは必要なのか、混在したまま処分が可能なのかなどの検討及びその処分方策と処分施設の整備が必要になる。

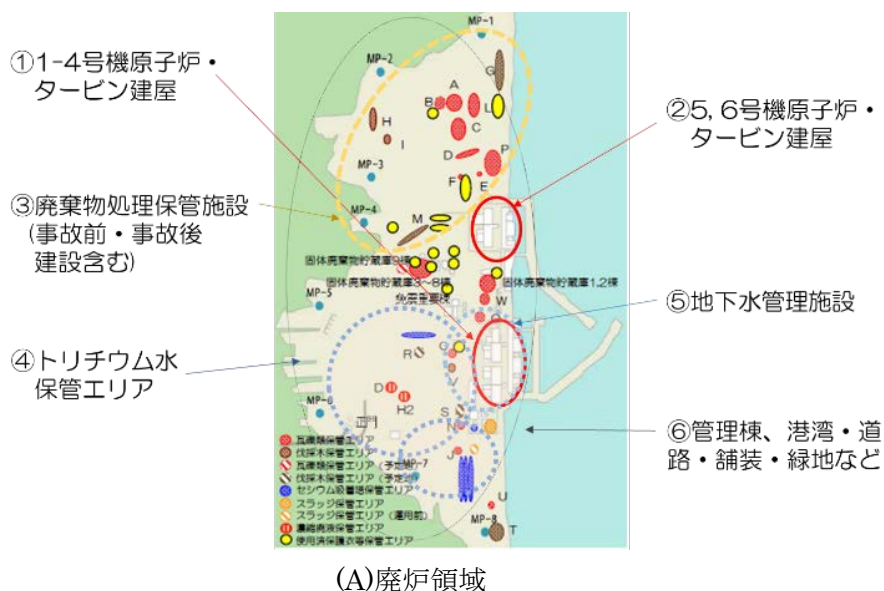


図 3.2-1 1F サイトの領域区分



### 3.4 1F 廃炉の廃棄物特性

これまでに実施された 1F の廃炉に係る活動では多くの放射性廃棄物が発生している（付録 1）。これらは、事故対応、安定化作業、クリーンアップに係る作業から発生したものであり、瓦礫、伐採木、作業衣、水処理二次廃棄物、トリチウム水の貯蔵タンクなどを挙げる事が出来る。残存燃料及び燃料デブリの取り出し（廃炉作業）で発生する放射性廃棄物には、溶融した核燃料（燃料デブリ）、PCV 底部のコンクリート構造物と溶融した核燃料が反応したコリウム、炉内構造物、原子炉压力容器、原子炉格納容器ドライウエルの構成機器などが予想される。これらは、核燃料や核分裂生成物による汚染に加えて、運転中に放射化している。例えば、炉心部を構成する機器・構造物の放射能濃度（110 万 kW 級 BWR が 30 年間運転した後）は表 3.4-1 に示す通りである<sup>19)</sup>。1-3 号機ではこれらの炉心部機器に加えて残存燃料及び燃料デブリが存在する。炉心部機器は核燃料と反応して一体化しているもの、一部の核燃料が付着しているものが予想される。燃料デブリ及びコリウムのように核燃料物質を含む放射性廃棄物は、放射能レベルが高く  $\alpha$  線を放出する核種を含むため、作業員の放射線防護の観点から吸入摂取についても留意して作業を実施することが必要になる。また、核燃料物質を含む放射性廃棄物の保管には再臨界の防止措置も必要である。一方、核燃料物質管理の観点からは取り出された核燃料の量をできるだけ精度良く把握することが求められる。

一方、PCV 内に存在する機器や構造物の表面は、溶融した核燃料が付着していなくても、核燃料が溶融した時に放出された揮発性の放射性核種（例えば Cs-137）によって高度に汚染していることが予想されるため、これらは上述した、燃料デブリなどの核燃料を含む放射性廃棄物と同様に作業員の放射線防護に十分留意して取り扱うことも必要と考えられる。PCV の外側に位置している機器・構造物も事故時に核燃料が溶融したために揮発性の放射性核種で高度に汚染している可能性がある。但し、汚染の程度は場所により異なる可能性があり、汚染状況の調査により、除染・解体の作業で発生する放射性廃棄物の分類が必要な場合も想定される。また、建屋構造物の物量は設備・機器に比較してかなり大量になるため、コンクリート廃棄物の処理方法及びその管理方法に関して十分な検討が必要となる。

原子炉建屋及びタービン建屋の外側の土地（土壌）や構造物も事故時に原子炉から放出された放射性核種によって汚染されている。汚染の対象となる核種は主に Cs-137 であると予想されるが、様々な場所から試料を採取して測定することにより、汚染源の核種同定が必要になる。また、サイト全体に亘って汚染しているため、放射能レベルは比較的低いものの、その汚染を取り除く作業（除染作業）が行われると、大量の放射性廃棄物が発生することになる。その量は、今後の試料採取による測定などによって推定されることになるが、文献では解体等と合わせて総計 780 万トン以上と見積もられている（表 3.4-2）<sup>20)</sup>。

表 3.4-1 炉心部の構成機器・構造物の放射化放射能濃度  
(通常炉 110 万 kW BWR が 30 年運転した例)

機器	数量	重量 (トン)	機器毎の放射能 (Bq)	放射能濃度 (Bq/g)
炉心シュラウド	1	29.63	2.33E+17	7.87E+09
ジェットポンプ集合体	10	6.03	7.40E+13	1.23E+08
原子炉容器クラッド	1	3.38	1.69E+13	5.01E+06
原子炉容器壁	1	119.91	6.29E+13	5.25E+05
生体遮蔽内壁	1	16.31	3.81E+12	2.34E+05
生体遮蔽コンクリート	1	168.73	1.28E+11	7.61E+02
生体遮蔽外壁	1	49.17	1.99E+12	4.06E+04
シュラウド上部板	1	6.63	3.20E+14	4.82E+07
気水分離機	1	2.97	3.52E+13	1.18E+07
燃料ガイド上部	1	2.45	1.11E+15	4.55E+08
オリフィス燃料支持	193	5.48	1.34E+11	4.73E+06
炉心支持板	1	20.06	2.41E+13	1.20E+06
炉内計装線	55	0.11	7.36E+12	3.59E+09
制御棒	185	2.75	3.56E+13	2.39E+09
制御棒案内管	185	3.46	1.89E+10	1.01E+06

※事故による汚染がない場合

表 3.4-2 1F 廃炉・サイト修復で発生する放射性廃棄物の試算例<sup>20)</sup>

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

### 3.5 エンドステートに向けた取り組み

廃炉作業では残存燃料及び燃料デブリの取り出しと施設の除染・解体が行われ、原子炉建屋、タービン建屋、発生する放射性廃棄物の保管施設などの領域が対象になる。また、サイト修復では港湾施設、緑地帯、道路、事務管理施設などの除染が対象になるが、この場合、汚染除去の程度を決める必要がある。除染作業や放射性廃棄物の運搬、処分施設の整備などに伴う全般的な環境負荷を考慮すると放射性廃棄物の発生量を極力低減する方策も重要であり、放射性核種で僅かに汚染している土壌などは、安全性を十分に評価した上で除去せずにそのまま管理することも選択肢としてあり得る。このような作業を前提として、施設やサイトの汚染状況、解体・撤去・除染の技術的可能性、コストなどを勘案してサイト利用計画を作成し、廃炉の方式、領域区分、放射性廃棄物対策を統合化したシナリオの構築（タイムラインを含む）が必須の課題となる。

中長期ロードマップの第3期計画では廃炉・サイト修復が進められると考えられることから、核種、材質、放射能などの特性の異なる放射性廃棄物が大量に発生することが予想される。また、放射性廃棄物のサイト外への搬出が困難である場合、長期にわたるサイト内での管理が必要になる。どこまで除染して作業を終了するのか、放射性廃棄物をどうするのかは今後の課題として残されている。上述した中長期ロードマップでは、「廃止措置計画は、30～40年後の廃止措置終了を目標に、燃料デブリ取り出し等の廃炉作業や研究開発等の進捗状況を踏まえ、東京電力が第3期に策定する。」とされている。エンドステートの姿によっては発生する放射性廃棄物の量が異なり、それに応じて廃棄物対策も異なることになるため、エンドステートや中間エンドステートを定めて、廃炉作業に取り組むことが求められる（図3.5-1）。なお、この検討において重要なことは1Fサイトをどのように活用するかとの視点と考えられる。廃炉・サイト修復では発生する放射性廃棄物の行先、放射性廃棄物の発生量の抑制、サイトの有効利用を視野に入れたエンドステート及びタイムラインの検討が重要である。

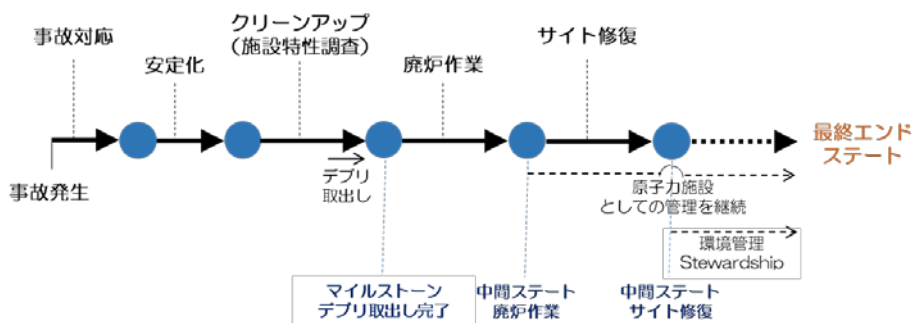


図 3.5-1 長期のサイト管理を考慮したタイムライン

#### 4. 放射性廃棄物の取り扱いに係る様々なシナリオの検討

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事が予想されるが、最終的なサイトの利用形態を考慮した上で発生する放射性物質の行先を検討することが重要であることは世界各国の様々な試みから学ぶべき課題である。本章では、1Fのエンドステートを見据えた廃炉・サイト修復に係るシナリオの検討と、予想される放射性廃棄物発生量の半定量的な検討を行う。この検討は、将来、1Fの廃炉・サイト修復に係る最適なシナリオの決定を行うための情報を提供することにある。1Fサイトの利用方法、放射性廃棄物の行先などに係るステークホルダーを含めた議論は必須の課題であり、そのためには原子力の専門家集団が検討した多くの情報を提供することが重要と考えるためである。なお、本項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、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が、これらは今後の課題である。

##### 4.1 前提条件

###### 1) シナリオの範囲

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放射性廃棄物の取り扱いとした。中長期ロードマップの第3期計画では燃料デブリ取り出しの程度に関しては明確にされていないため、本検討では計画された取り出し量の全ての核燃料物質が取り出されるものと仮定した場合を基本とした。なお、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については、初期条件として考慮する必要があることから付加的な検討を加えた。シナリオ構築ではエンドステートにおける「機器・構造物及び汚染土壌などの撤去の範囲」、また、「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。シナリオ構築の基本的な考え方と検討対象範囲の時間軸を各々表4.1-1、図4.1-1に示す。このよう条件の下では、エンドステートは以下の2ケースとなる。

- ① 1Fサイト内の機器・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
- ② 1Fサイト内の機器・構造物及び汚染土壌・地下水等の汚染の一部が管理・監視の可能な状況で残存する状態

また、エンドステートに至るまでの主要な工程は以下を想定した。

- ① 原子炉施設に存在する機器・構造物の解体撤去（廃炉）
- ② サイト内の汚染した土壌、構造物などの撤去（サイト修復）
- ③ サイト修復が終了しサイトの利用が可能になるまでの猶予期間

ここで、廃炉方式としては通常炉の廃止措置で適用される以下を考慮した。

- ① 即時解体
- ② 遅延解体（安全貯蔵の後に解体撤去）

## 2) 時間軸

燃料デブリの取り出しが終了した後の取り組み（廃炉・サイト修復）を対象とし、この期間における時間軸を以下のように想定した。

- フェーズ0：残存燃料及び燃料デブリ取り出しが終了するまで（作業が中断する場合も考慮）
- 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）

表 4.1-1 シナリオ構築の基本的な考え方

初期条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 予め設定した量の残存燃料及び燃料デブリが取り出せた場合：後続する機器・構造物の解体には核燃料物質（残された量）の存在が影響しないとする。</li> <li>② 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：フェーズ0におけるゴールの設定が達成できないため、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た。</li> </ul>
エンドステートの状態	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 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</li> <li>② 機器・構造物及び汚染土壌・地下水等の汚染の一部を管理・監視する状態</li> </ul>
エンドステートまでの工程	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 廃炉作業：原子炉施設に存在する機器・構造物の解体撤去（フェーズ1、2） <ul style="list-style-type: none"> <li>1) 即時解体</li> <li>2) 遅延解体（安全貯蔵の後に解体撤去）</li> </ul> </li> <li>② サイト修復：サイト内の汚染した土壌、構造物などの撤去（フェーズ3）</li> <li>③ サイト修復が終了しサイトの利用が可能になるまでの猶予期間（フェーズ4）</li> </ul>

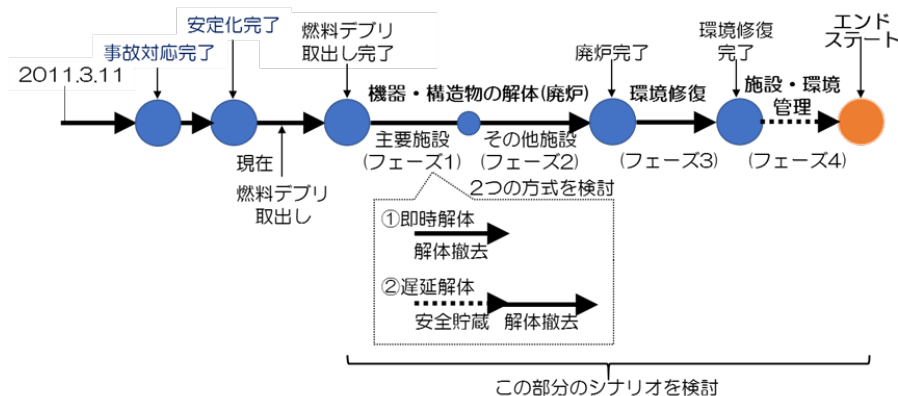


図 4.1-1 検討対象範囲と時間軸

### 3) 対象領域

第 3.2 章で述べたように、1F には様々な施設が存在するため、廃炉・サイト修復の対象施設を次のように分類した。

- ・廃炉（フェーズ 1）：主要施設（1-6 号機原子炉建屋・タービン建屋、図 3.2-1(A) の①、②)
- ・廃炉（フェーズ 2）：その他の施設（図 3.2-1(A)の②～⑥)
- ・サイト修復（フェーズ 3）：地下部を含むサイト全域（図 3.2-1(B)の a)～c)

### 4.2 シナリオの検討

本検討では上述したタイムライン及び領域区分に対し、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た。これらの各々の放射性廃棄物の発生特性及びサイトの利用可能性を分析し、シナリオ検討における最初のステップとして、廃棄物管理に係る対策の大枠を把握することを目的とした。4つのシナリオの概要は以下に示す通りである。

#### シナリオ 1：即時・全撤去

- ・ エンドステート：1F サイト内の機器・構造物及び汚染土壌・地下水等の汚染が全て取り除かれ、全量の放射性廃棄物が搬出された状態
- ・ 廃炉方式：即時解体
- ・ 最終状態（サイト利用）：制限なしサイト解放
- ・ 作業対象範囲
  - 廃炉： ① 主要施設：機器、建屋、地下構造物を全て解体撤去  
② その他施設：機器、建屋、地下構造物を全て解体撤去
  - サイト修復：サイト内全域の汚染物(土壌、地下水、底泥等)を処理・撤去
- ・ 廃棄物管理：発生する放射性廃棄物の全量をサイト外に搬出。対象となる放射性廃棄物は、解体機器、解体建屋(地上部、地下構造物)、汚染土壌、地下水処理二次廃棄物、既に保管されている固体廃棄物、中間処理済廃棄物（焼却灰等）、使用済みトリチウム水タンク、汚染水処理二次廃棄物など

#### シナリオ 2：即時・部分撤去

- ・ エンドステート：1F サイト内の機器・構造物及び汚染土壌・地下水等の汚染の一部が管理・監視の可能な状況で残存する状態。放射性廃棄物は、廃棄物保管施設を設置し、処分施設に搬出まで保管
- ・ 廃炉方式：即時解体
- ・ 最終状態（サイト利用）：制限付き解放。サイトを管理区域と解放区域に区分。管理区域には、廃棄物保管施設を含む

- ・ 作業対象範囲
  - 廃炉： ① 主要施設：機器、建屋の地上部を解体撤去。地下構造物は管理を継続
  - ② その他施設：機器、建屋を解体撤去
  - サイト修復：サイト全域の汚染物(土壌、地下水、底泥等)の一部を処理・撤去。残存物は管理・監視を継続（スチュワードシップ）
- ・ 廃棄物管理：発生する放射性廃棄物は処分施設に搬出できるまでサイト内の保管エリアに保管。対象廃棄物は解体機器、解体建屋(地上部構造物)、部分的な除染から発生する廃棄物(汚染土壌、地下水処理二次廃棄物など)、既に保管されている固体廃棄物、中間処理済廃棄物（焼却灰等）、使用済みトリチウム水タンク、汚染水処理二次廃棄物など

#### シナリオ 3：安全貯蔵・全撤去

- ・ エンドステート：1F サイト内の機器・構造物及び汚染土壌・地下水等の汚染が全て取り除かれ、全量の廃棄物が搬出された状態
- ・ 廃炉方式：遅延解体（安全貯蔵）
- ・ 最終状態（サイト利用）：制限なし解放。但し、安全貯蔵の後に処分が可能になる時点。
- ・ 作業対象範囲
  - 廃炉： ① 主要施設：安全貯蔵の後に機器、建屋、地下構造物を全て解体撤去
  - ② その他施設：機器、建屋、地下構造物を全て解体撤去
  - サイト修復：サイト内全域の汚染物（土壌、地下水、底泥等）を処理・撤去
- ・ 廃棄物管理：発生する放射性廃棄物の全量を必要に応じてサイト内の保管エリアに保管。処分施設が確保された時点で搬出。対象となる放射性廃棄物は解体機器、解体建屋（地上部、地下構造物）、汚染土壌、地下水処理二次廃棄物、既に保管されている固体廃棄物、中間処理済廃棄物（焼却灰等）、使用済みトリチウム水タンク、汚染水処理二次廃棄物など

#### シナリオ 4：部分撤去・安全貯蔵

- ・ エンドステート：1F サイト内の機器・構造物及び汚染土壌・地下水等の汚染の一部が管理・監視の状況で残存。廃棄物保管施設を設置し放射性廃棄物を処分施設に搬出まで保管
- ・ 廃炉方式：遅延解体（安全貯蔵）
- ・ 最終状態（サイト利用）：制限付サイト解放。サイトを管理区域(廃棄物保管施設を含む)と解放区域に区分。安全貯蔵準備終了後、廃炉作業終了後、環境修復作業終了後など、段階的な解放区域の拡大もあり得る。
- ・ 作業対象範囲：
  - 廃炉： ① 主要施設：機器、建屋の地上部を解体撤去。地下構造物は残存。

## ② その他施設：機器、建屋を解体撤去

- サイト修復：サイト内の汚染物（土壌、地下水、底泥等）の一部を処理・撤去。残存物は管理・監視を継続（スチュワードシップ）
- ・ 廃棄物管理：放射性廃棄物の全量をサイト外に搬出。対象となる放射性廃棄物は解体機器、解体建屋（地上部構造物）、部分的な除染から発生する廃棄物（汚染土壌、地下水処理二次廃棄物など）、既に保管されている固体廃棄物、中間処理済廃棄物（焼却灰等）、使用済みトリチウム水タンク、汚染水処理二次廃棄物など

### 4.3 シナリオの特徴

上述した条件により発生する放射性廃棄物量の概略を時間軸（フェーズ）に沿って整理した（図 4.3-1、図 4.3-2、図 4.3-3）。タイムライン（図 4.3-1）には、即時解体の場合に廃炉が終了する段階の時間軸として A を、即時解体の場合にサイト修復が終了する段階及び安全貯蔵の場合に廃炉が終了する段階として B を、施設・環境の管理が終了する段階として C を設定した。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。

シナリオ 1~4 におけるフェーズ毎の放射性廃棄物発生量の概略は図 4.3-2 に示すようになる。本図は現時点において放射性廃棄物とみなせる物量を計算した結果である。いずれのシナリオにおいても、その発生量は「その他の施設」の解体撤去によるものが最も多い。原子炉建屋、タービン建屋の地下部分及び汚染を管理・監視の状態に残存させる場合（シナリオ 2、4）では、主要施設の解体工事から発生する物量を約半分に、また、サイト修復で発生する物量を減少できる。なお、放射性廃棄物は時間の経過とともに放射能が減衰するため、一部の放射性廃棄物は下のレベル区分に移行し、また、放射性廃棄物として取り扱う必要がなくなるものも出現する可能性があるが、含まれる核種の量や時間軸が明らかではないため、放射能の減衰は考慮していない。ただし、主要核種が  $^{137}\text{Cs}$  であると想定すると、図 4.3-3 に示すように、フェーズ 1 の開始時に比較して放射能濃度は A の段階で約 2 分の 1、B の段階で 10 分の 1、C の段階で 1000 分の 1 程度になることが予想される。また、その他施設の廃炉・サイト修復から発生する放射性廃棄物のレベル区分を L3（放射能レベルが極めて低い廃棄物）とし、その濃度に対する放射性廃棄物の重量分布が一様（100Bq/g から 0.1Bq/g まで一様に分布）であると仮定すると、シナリオ 3、4 におけるフェーズ 2、3、4 の放射性廃棄物はゼロになる。但し、安全貯蔵における長期間の施設維持に係る技術的および社会的な観点からの検討が別途必要になる。

各シナリオを実施した場合の特徴を以下に示す。

#### ① シナリオ 1：即時・全撤去

汚染した機器・構造物及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（約780万トン）、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、処分が実現できないとサイト解放が不可能になる。

#### ② シナリオ2：即時・部分撤去

機器・構造物の一部（地下構造物）及び土壌等の汚染を管理・監視の状態に残すため、廃炉・サイト修復を早期に終了できる。また、地上部のみ解体であり、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・監視が必要となったりする可能性がある。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、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・建屋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、サイト解放は一部に限られる。

#### 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くため、廃炉作業に取り組む時期は遅くなるが、この間に施設解体の技術的な準備が可能になり、また、放射能の減衰により安全貯蔵後の作業が容易になる。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れるため、サイトの有効利用が可能になるまでに長期間を要する。サイトには原子炉建屋、タービン建屋、放射性廃棄物保管施設以外にも多くの施設（その他施設）が存在し、これらを解体するとかなりの放射性廃棄物が発生する。その他施設の汚染の程度は低いいため、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。放射性廃棄物は全てサイト外に搬出するが、廃炉・サイト修復の終了（フェーズ3の終了）まで待てば、その他の施設の廃炉及びサイト修復で発生する放射性廃棄物の量は限定的になることが予想される。

#### ④ シナリオ4：安全貯蔵・部分撤去

施設を安全貯蔵の状態に置くため、廃炉作業に取り組む時期は遅くなる。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・監視が行われる（スチュワードシップ）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。サイトには地下構造物及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、サイト解放は限定される。

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。サイトには原子炉建屋、タービン建屋、放射性廃棄物保管施設以外にも多くの施設（その他施設）が存在し、これらを解体するとかかなりの放射性廃棄物が発生する。その他施設の汚染の程度は低いいため、解体した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。なお、シナリオ3と同様に、廃炉・サイト修復の終了（フェーズ3の終了）まで待てば、その他の施設の廃炉・サイト修復で発生する放射性廃棄物は限定的になることが予想される。

上述したように、廃炉・サイト修復の作業計画を作成するためには、解体技術などの具体的な取り組み内容の検討の前段階として、作業範囲、エンドステートなど様々な要素を勘案する必要がある。特に、サイトをどのように有効利用するのか、また、サイト利用が可能な状態をどの時期までに実現するのかをサイト周辺の環境を考慮した上で検討することが重要と思われる。検討に必要な視点を以下に挙げる。

- ・ 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
- ・ 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）

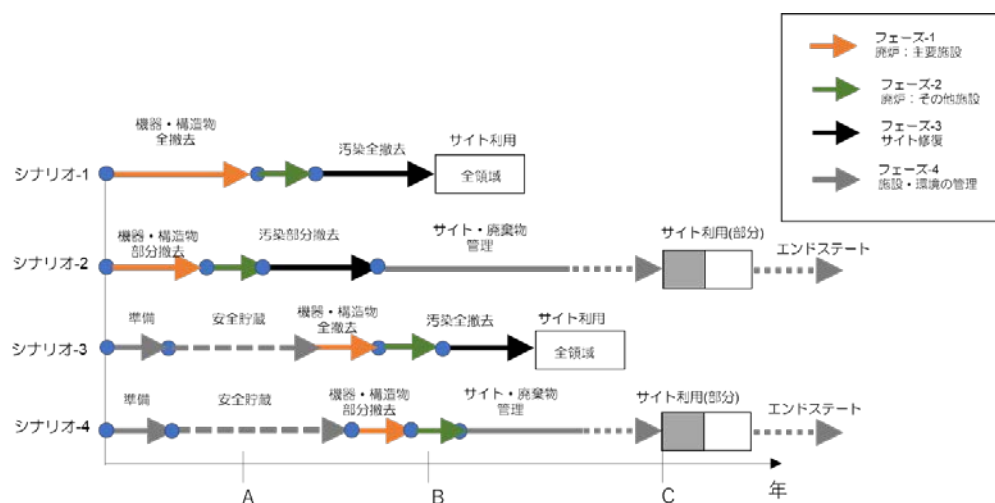


図 4.3-1 シナリオのタイムライン

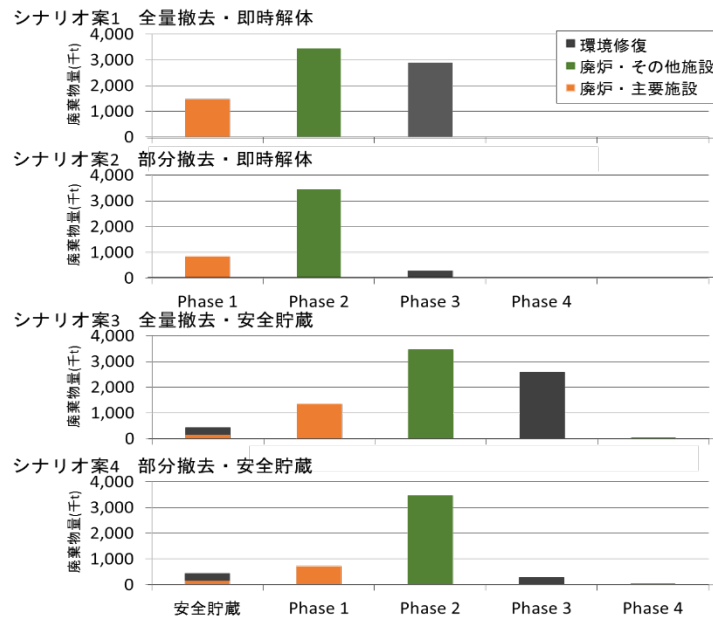


図 4.3-2 現時点における放射性廃棄物量<sup>20)</sup>に係るシナリオ毎の物量の評価結果  
(含まれる核種の量や時間軸が明らかではないため、放射能の減衰は考慮していない。)

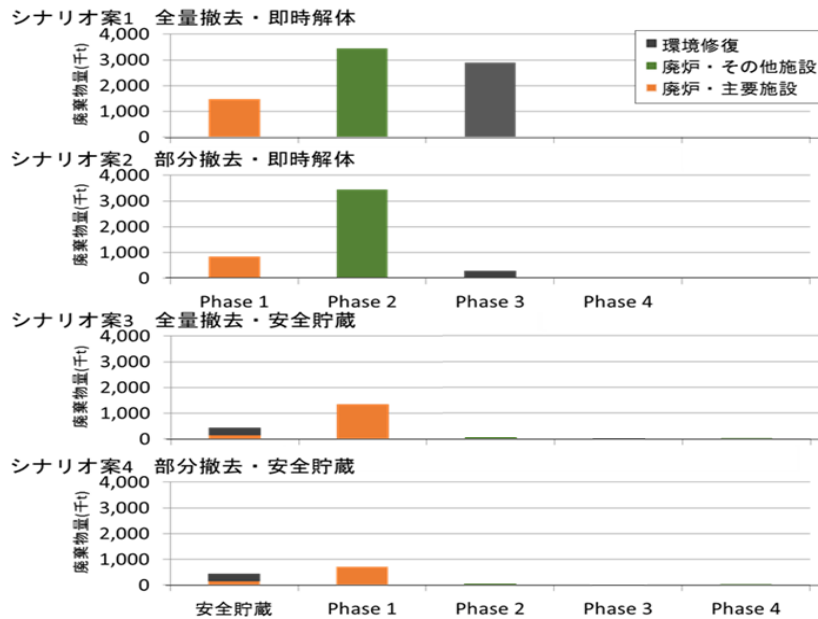


図 4.3-3 放射能の減衰を仮定した放射性廃棄物の発生量の予測  
(図 4.3-2 に放射能の減衰を考慮した廃炉・サイト修復の終了時点での評価。主要核種は <sup>137</sup>Cs であるとし、また、時間軸は前述の「時間軸の考え方の目安の一例」を想定している。)

## 5. 廃棄物管理に係る対策の検討課題

1Fの廃炉・サイト修復では、放射性廃棄物の取り扱いがエンドステート達成に重要な役割を負うことは言を俟たない。本章では、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。

### 放射性廃棄物処分制度の検討

わが国では通常炉の運転及び廃止措置で発生する放射性廃棄物については、第2.3章で述べたように、対象となる放射性廃棄物の特性に応じて3種類の処分形態に分類されている。これらは放射性廃棄物の特性を十分に調査した上で制度化されたものであるが、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、現行制度に準じた処分の可能性に関しては未知の部分が多い。1Fで発生する放射性廃棄物を対象にした新制度構築の可否について十分な検討・討議が必要になる。特に、事故対応の過程で瓦礫などが分別・特性評価のないまま管理されていることが考えられる。従来の制度では、有害物質は廃棄体から除去することが求められるが、瓦礫の中には除去すべき有害物質が含まれる可能性がある。このような放射性廃棄物に関しては再度の分別、或いは、安全性を評価した上で処分することも想定される。

わが国では通常炉や研究施設などの運転・保守及び廃止措置から発生する放射性廃棄物に係る処分制度は概ね整備されているものの、処分の実施は限られている。実効性のある制度でなければ意味がないことを考えると、実行可能な1F放射性廃棄物の処分制度をどのように整備するかは今後の重要な課題である。また、その検討には発生する放射性廃棄物の特性把握が必須であり、データ収集(施設及びサイトの汚染状況の調査)を進める必要がある。このことは、エンドステートを念頭に、中間エンドステートを定め、着実にステップを踏むことに大きく寄与する。

### 放射性廃棄物発生量の低減

放射性廃棄物の保管または処分する場合でも、環境負荷の低減の観点から、出来る限り放射性廃棄物の発生量を少なくすることが求められる。放射性廃棄物の分類、圧縮、熔融、焼却などの方法は通常炉の廃棄物管理においても実施されているが、これらの技術を1Fの廃炉・サイト修復に適用することが重要である。さらに、クリアランス制度を適用することにより、放射性廃棄物として取り扱うものの量を低減できる。しかし、クリアランス検認には、検認対象とする核種の選定、スケールリングファクターを含む検認の方法、スケールリングファクター作成のためのデータ収集と分析など、今から取り掛かるべき多くの課題が存在する。また、クリアランス制度の本来の目的はクリアランスされたものを原子力サイト以外において社会の様々な活動に利用することであるが、1Fサイト近隣での利用を前提とした限定再利用に係る制度の実現も視野に入れた検討が有効と思われる。即ち、1Fサイトでの資材・製品の使用は限定されることから、クリアランスレベルよりも高い濃度を有する放射性物質についても作業員の被ばく線量を抑えて活用できる可能性がある。図4-3-2に示す「そ

の他施設」は汚染レベルが低いことが予想されるが、解体撤去すると廃棄物量は膨大となる。安全性を評価した上で 1F サイトでの限定再利用を実現することにより、放射性廃棄物発生量をかなり低減することが可能になる。

一方、サイト修復で発生した放射性廃棄物は、放射能濃度は低いものの大量になることが予想される。米国 DOE の環境管理プログラムでは、放射能レベルの低い物質に係る対策の例が報告されている。放射性廃棄物として認定されたものは放射性廃棄物の処分場に処分することになるが、放射能レベルが低く、かつ、最終的な行先が決まらない場合には、これらの放射能レベルの低い物質を、公衆の侵入の禁止、環境への漏洩の防止などの制度化によりそのままの状態管理する方法（スチュワードシップ）である（付録 2 参照）。安全性の確保は大前提であり、また、サイトの利用は限定されるが、放射性廃棄物量の低減に寄与する。

### 総合的廃棄物対策の実施

わが国では、令和 2 年 1 月現在、26 基の原子力発電所で廃止措置工事が実施されるかその準備が進められているが、廃止措置工事から発生する放射性廃棄物を処分するための処分場は決められておらず、また、処分に向けた廃棄物の受入れ基準も決まっていない。1F のみならず、廃棄物管理に係る対策はわが国における原子力利用の緊急な課題であるが、これまでの原子力利用においては後送りされる傾向がある。1F（特定原子力施設）を対象とする放射性廃棄物の処理・処分に係る制度の検討も後送りはできないものである。主要な課題を以下に列挙するが、これらは英国 NDA（原子力廃止措置機関）における階層化された廃棄物管理に係る対策の概念<sup>21)</sup>（図 5-1）とも整合するものである。

- ・ 有害物質の分別と処分方策の検討
- ・ クリアランス制度の適用
- ・ サイト内での限定再利用の実施
- ・ 処分体系の再検討
- ・ スチュワードシップ等の検討

これらの取り組みを進める上で、1F 施設及びサイトの汚染状態の調査は必須である。また、1F サイトから環境に漏洩する放射性核種の調査・分析など施設及びサイト環境の汚染に起因する公衆・作業員の安全性の評価を進めることも重要と考えられる。さらに、サイト修復は常に安全性とコストとのバランスであることも留意すべきであり、廃棄物管理に係る対策に必要となるコストの分析が重要と思われる。作業員や公衆の安全確保は最も優先する課題であるが、コスト（経済性）を考慮した実現可能な方法を選択することが有効と考えられる。



図 5-1 英国 NDA における廃棄物対策に係る階層構造の概念

## 6. 提言

前章までの検討に基づき 1F の廃炉・サイト修復を安全で効率的に進める上で重要と考えられる課題を提言として以下にまとめた。

### 廃炉の定義

中長期ロードマップ<sup>注 5</sup>では、現在進められている様々な活動に対して「廃止措置」、「廃炉」という用語が用いられており、「ステップ 2 終了から 20 年～30 年で廃炉を終了することを目標」としているが、廃炉終了の姿は今後の課題とされており、どのような姿を目指すのかの議論が早い段階から必要である。例えば、1F の廃炉を第 2 章で示した通常炉の廃止措置と同等のものと捉えると、ステップ 2 終了から 20 年～30 年で通常炉の廃止措置終了条件を満たすことは現実的に困難であると考えられる。中長期ロードマップに示された廃炉は、通常炉と同様であるのか、それに至る中間状態なのかの説明が必要である。

### エンドステートに係る議論の必要性

中長期ロードマップで示す「ステップ 2 終了から 20 年～30 年の期間」に 1F サイトを事故前の状態に戻すことが困難であるとするれば、如何なる姿を目標とするかの議論が必要になる。海外における原子力サイトの環境修復活動では、原子力サイト全体を完全に解放した

注5 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, 2019年12月27日

例は稀であるが、米国 DOE の環境管理プログラムにおいて原子力サイトの一部を解放してビジネスセンターや公園に利用されている例がある（付録2参照）。1F サイトにおいても、原子炉施設領域、事務施設領域、放射性廃棄物管理施設領域など、領域を区分して部分的にサイトを解放することや、30～40年後の各々の状態（中間エンドステート）を如何にするかについての議論が、国内の制度の見直しを含めて必要になる。エンドステートには、原子力施設としての利用、一般の人のサイトへの立ち入りを限定した利用（制限付き解放）、誰でもが自由に利用できる土地（施設）として解放（無効束解放）など、様々な選択肢が考えられる。

#### ステークホルダーによる討議機会の整備

1F サイトを元の状態に戻す（又は有効に利用する）ためには世代を超えた取り組みが必要である。エンドステートを決定する上で、将来の施設や土地の有効利用、その周辺で活動する様々な立場の人々を含めた議論が重要となる。米国 DOE の環境管理プログラムでは、地域住民との協議を経て廃炉・サイト修復の内容やエンドステートを決定する方法が採られ、活動の完了に至ったことが報告されている。我が国においても、通常行われる「国や事業者が考え方を示してから地域住民の了解を得る」という取り組み方法について、海外の事例を参考に改善策を考慮することも必要と思われる。1F サイトおよびその周辺の土地利用は40年以上の長い期間を経て実現できるものと考えれば、今から、討論の機会を作り議論を進めることが重要である。

#### 放射性廃棄物の低減に係る取り組みの早期実施

これまでの原子力開発や原子力事業の展開の結果、多くの放射性廃棄物が発生したが、その処理・処分は後送りされてきた。廃炉・サイト修復が本格化すると大量の放射性廃棄物が発生することが予想される。廃炉の終了までにどのくらいの放射性廃棄物量が発生するかの具体的な分析・予測が重要であり、放射能インベントリーを含む物量の評価を進めるとともに、放射性廃棄物の発生量の抑制、減容に係る検討を引き続き実施することが求められる。また、作業計画の策定でも放射性廃棄物低減を意識した検討を継続的に進める必要がある。即ち、廃棄物ヒエラルキーの概念（図5-1）に示すように、作業計画の策定段階から発生量抑制、廃棄物量最小化、再利用・再使用に係る検討を継続し、それらの実現に向けて進めることが重要となる。「発生量の抑制」および「再利用・再使用」の検討内容について改めて整理すると以下のようなになる。

**発生量抑制**：クリアランス、スチュワードシップなど放射性廃棄物を低減することを前提にした、廃炉・サイト修復の計画及び制度の検討

**再利用・再使用**：クリアランスレベルよりも多少放射能濃度の高いものであっても、作業員の安全性を評価した上で1F サイト内での限定再利用の検討

## 放射性廃棄物処分に係る制度の見直し

原子力発電所の運転で発生した放射性廃棄物の処分体系の整備はほぼ完了しているが、1Fの廃炉・サイト修復で発生する放射性廃棄物の処分が現行制度のまま実施できるのかについては未知の部分が多い。1Fの放射性廃棄物に特化した処分制度が必要なのか、或いは現行制度に準じた処分の実施が可能なのかの検討が必要である。即ち、1Fの廃炉・サイト修復を完了して同サイトを有効に活用するためにはこれからの活動で発生する放射性廃棄物の取り扱いに係る制度面での検討を推進することが重要と考えられる。第2.7章で示したように、燃料デブリの取り扱いに関しては未知の部分が多い。燃料デブリを放射性廃棄物として処分するのか、核燃料物質として管理するのかなどを含め、燃料デブリの定義に係る検討も必要である。

## 7. おわりに

本報告書では、事故後9年が経過し、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1F廃炉・サイト修復の課題として、予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組みを進めることの必要性を示すとともに、エンドステートに至る過程の代表的な選択肢を、今ある情報をベースに海外の知見等を踏まえてまとめた。1Fの廃炉・サイト修復で発生する放射性廃棄物の取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中間エンドステートを定め、着実にステップを踏むことが重要となる。

一方、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り、このためには原子力の専門家が技術的な立場において様々な角度から分析し、その結果、即ち、1F廃棄物の安全で合理的な管理に向けた見解を社会に丁寧に説明すること、また、提言として発信することが重要と考える。本報告書の公開後も、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組みを注意深く観察・分析・評価し、本報告書で議論した内容をさらに深めることが必要であり、このような活動を継続することは原子力の平和利用に関わる技術者集団としての責務と思われる。



## 参考文献

- 1) 原子力規制庁 特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会（第7回）資料，平成30年7月，原子力規制委員会
- 2) 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
- 3) Environmental Management Consolidated Business Center, Strategic Plan 2016-2020, December 2015
- 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) IAEA, Management of Long-Term Radiological Liabilities: Stewardship Challenges, Technical Report Series No. 450, 2006
- 7) IAEA, Lessons Learned from Environmental Remediation Programmes, Nuclear Energy Series No. NW-T-3.6, 2014
- 8) OECD/NEA, Management of Radioactive Waste After a Nuclear Power Plant Accident, NEA No. 7305, 2016
- 9) 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
- 10) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構，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 2019, 2019年9月9日
- 11) 日本原子力学会，福島第一原子力発電所事故その全貌と明日に向けた提言：学会事故調 最終報告書，丸善出版，ISBN-10: 4621087436, 2014年3月
- 12) 日本原子力学会，福島第一事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分，平成25年度報告書，平成26年3月
- 13) IAEA, Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors, Safety Guide, Safety Standard Series No. WS-G-2.1, 1999
- 14) IAEA, Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material, Safety Requirement, No.WS-R-5, 2006
- 15) 原子力安全・保安院 廃止措置安全小委員会，原子力施設の廃止措置規制のあり方について，平成16年12月
- 16) IAEA, Release of Sites from Regulatory Control on Termination of Practices, IAEA Safety Standards Series No.WS-G-5.1, 2006
- 17) 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，平成21年11月

- 18) The U.S. Department of Energy Office of Environmental Management, Closing the Circle on the Splitting of the Atom, DOE/EM-0266, ISBN: 0-16-048448-0, 1996
- 19) H. D. Oak, et al., Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boiling Water Reactor Power Station, NUREG/CR-0672, 1980
- 20) H. Kawamura, et al., Decommissioning and Environmental remediation Scenario development for Fukushima Daiichi, Proceedings of TopSafe 2017, 12-16, February 2017, IAEA
- 21) Nuclear Decommissioning Authority, Strategy - Effective from April 2016, ISBN(Print) 9781474130431, ISBN(Web) 9781474130448, March 2016

## 付録1 1Fにおける廃棄物管理に係る対策の現状

### これまでに発生した放射性廃棄物の特性<sup>注6</sup>

1F事故に伴い、放射性核種で汚染された廃棄物や伐採木、瓦礫及びその対応に伴う二次廃棄物（水処理二次廃棄物など）が多量に発生した。発生した放射性廃棄物は液体廃棄物と固体廃棄物に大別できる。このうち、液体廃棄物（汚染水）はサイトに設置されたタンクに貯蔵されており2020年3月時点で約119万 $\text{m}^3$ になり、敷地内には1005基のタンクが建設されている。このうち、多核種除去設備等処理水の貯蔵タンクは874基、ストロンチウム処理水の貯蔵タンクは105基と報告されている。タンク貯留水中のトリチウム濃度は、建屋への地下水流入に伴う希釈により徐々に低減しているため、貯蔵時期によって異なり、貯蔵時点における濃度は30万～420万 $\text{Bq/l}$ 程度（2011.9～2016.3）であった。2019年10月31日の時点におけるトリチウムの全放射能と平均の放射能濃度は各々856兆ベクレル、37万ベクレル/lと報告されている。

固体廃棄物は、種類や表面線量率に応じた保管・管理が継続されている。瓦礫等の保管量は2019年3月現在約46万 $\text{m}^3$ に達している。これらは、廃炉・サイト修復などの進捗とともに増加することが予想され、当面の10年で発生すると予想されるものを加えると、以下のような量が推定されている。

- 瓦礫類（可燃物・伐採木・使用済保護衣：約30万 $\text{m}^3$
- 瓦礫類（金属・コンクリート；
  - 0.005-1.00 $\text{mSv/h}$ ）：約17万 $\text{m}^3$
  - 1 $\text{mSv/h}$ 以上：約8万 $\text{m}^3$
  - 0.005 $\text{mSv/h}$ 未満：約18万 $\text{m}^3$
  - 汚染土：約4万 $\text{m}^3$

これら廃棄物の保管地区はサイト全体に亘り、保管施設が点在する状況にある（図1-1）。東京電力が示す廃棄物の保管管理計画では、当面10年程度に発生する固体廃棄物の物量予測に基づいて、固体廃棄物の保管・管理量低減を目指し、焼却処理など可能な限り減容を行った上で、建屋内保管へと集約する計画が示されている（図1-2）。

### 放射性廃棄物の処理・管理

上述した放射性廃棄物は通常炉の運転・保守及び廃止措置で発生するものとは異なる特性を有するものが多く含まれている。例えば、伐採木や瓦礫には塩分が含まれる可能性があり、伐採木は有機物であるためそのまま処分することは出来ない。また、水処理二次廃棄物には、流動性が高いもの、水素発生を促すような放射能濃度の高いものが多く含まれている。今後の廃炉・サイト修復に係る作業の進展に伴ってさらに多種多様な廃棄物も発生する。こ

注6 東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の固体廃棄物の保管管理計画 2019年6月版

のように1F 廃棄物の処理・処分は、その性状や存在核種とその濃度等に応じた対策を立てる必要があるとともに、放射性廃棄物の長期保管に対する安全確保に係る対策も必要になる。



図 1-1 廃棄物の保管エリア

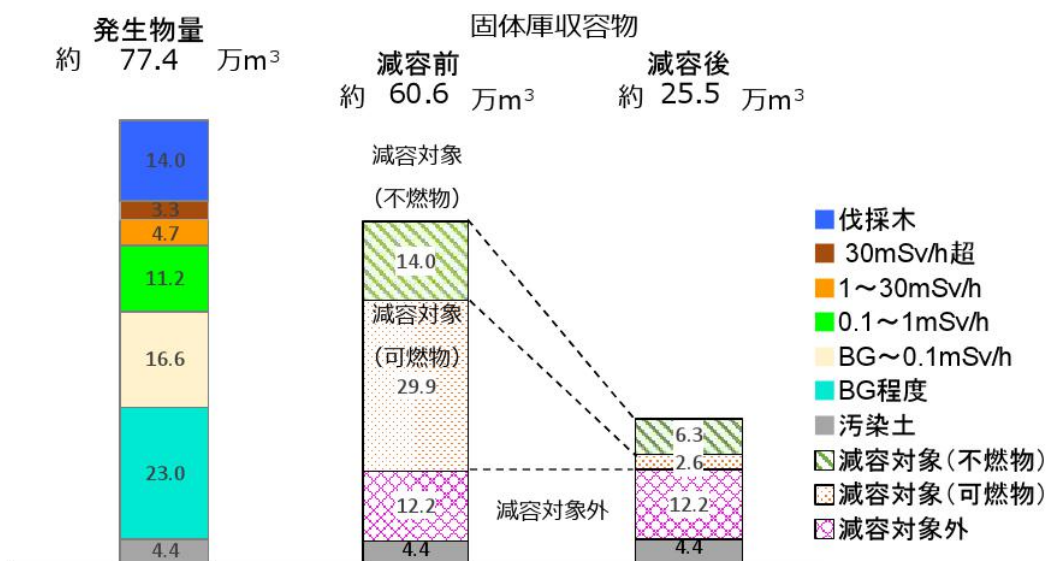


図 1-2 固体廃棄物発生量の予測 (当面 10 年程度)

## 付録2 サイト修復と環境管理の事例

### EM 計画

第二次世界大戦中に米国で進められた原爆開発計画（マンハッタン計画）及びその後の東西冷戦時代の原爆の開発・製造では、放射性廃棄物、土壌汚染、地下水汚染、余剰残存原子力施設など原子力における負の遺産が多く残された。米国では 1980 年代にこれらの負の遺産を原因とした環境問題が顕著になったことに起因し、米国エネルギー省（DOE）は負の遺産の処置を目的として 1989 年に環境修復及び廃棄物管理局を設置した。これは核兵器の製造や原子力利用に係る研究開発で汚染した環境の除染・浄化（クリーンアップ）、余剰施設の廃止措置、放射性廃棄物の適切な措置等を積極的に進めることを目的にした組織である。米国 DOE の環境管理計画（EM 計画）における総予算は 2000-3500 M\$ と見積もられ、作業についての革新的な実施方法がなければさらに上昇するとも考えられている。2020 年の要求予算は 6,500M\$ でこれは DOE 予算要求の約 20% に当たる。EM 計画の対象となる原子力サイトは全米に分布しており、その各々において環境修復計画が作られて作業が進行している。

EM 計画の対象となる主要原子力サイトは核兵器製造や軍事関係の研究開発を進めた場所であり、このうち、ロッキーフラッツ、ファーナルド、コロンバスでは環境修復の主要作業が終了している。また、アイダホ国立研究所（INL）、オークリッジ国立研究所（ORNL）、ハンフォード、サバンナリバーでは現在も環境修復、施設の廃止措置、放射性廃棄物の処理などの取り組みが進行中である。

一方、EM 計画は必ずしも軍事関係の施設に限ったものではなく、バッテル・コロンバス、アルゴンヌ国立研究所（ANL-EAST 及び ANL-WEST）ブルックヘブン国立研究所、ウエストバレー再処理施設、 SHIPPING ポート原子力発電所、スタンフォード加速器施設、プリンストンプラズマ物理研究所など、民生用施設の廃止措置や研究サイトの除染・浄化の作業が含まれる。さらに、放射性廃棄物の処理、廃止措置、除染・浄化などの活動に必要な様々な技術の開発も行われている<sup>注7</sup>。

以下にロッキーフラッツ、ファーナルド、サバンナリバーの例を示す。

---

注7 米国エネルギー省のホームページ（<https://www.energy.gov/em/office-environmental-management>）には EM 計画の現状、歴史など多くの情報が公開されている。

## ロッキーフラッツ環境技術サイト

ロッキーフラッツ環境技術サイトはコロラド州デンバーの北西約 10 マイルに位置し、ロッキー山脈の麓に 11 平方マイルの敷地を有している。本サイトは核兵器製造の目的で 1951 年に設立されたものである。1991 年の運転停止時には大量のプルトニウム（プルトニウム複合物を含む）、有害廃棄物、放射性廃棄物などが幾つかの施設に残存し、また、敷地の土地が放射能汚染していた。1991 年から 2005 年の間にサイトの全施設の除染・解体、廃棄物の撤去、サイト修復が行われ、サイトの一部を放射性廃棄物処分場、管理地区（スチュワードシップ）、野生保護区にして環境修復活動を終了した。

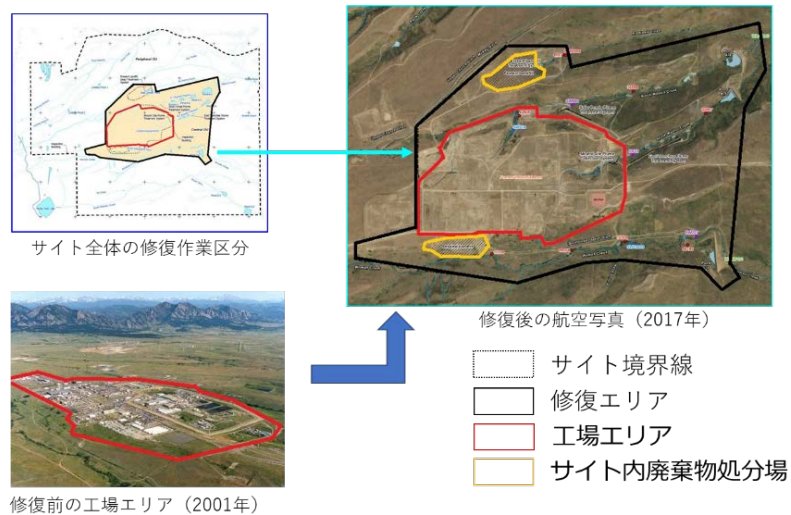


図 2-1 ロッキフラッツ環境技術サイトの修復概要

## ファーナルド

ファーナルドサイトはオハイオ州の南西部でシンシナチ市から北西に 17 マイルの場所に位置している。ファーナルドサイトでは 1950 年代にウラン金属の生産が開始され、ウラン鉱石からウラン金属への転換、核兵器級のプルトニウム及びトリチウムの製造、核爆弾ターゲット材の製造などが行われた。施設の運転中に、放射性廃液が漏洩して地下水に汚染が広がり、近隣の農家において白血病が発生するなどの問題で訴訟問題を起こしている。本格的な環境修復活動は 1991 年から始められ 2006 年に終了した。サイトの一部にビジターセンターが開設されているが大部分の地域（約 4.3km<sup>2</sup>）は長期管理が続けられている。

- サイト周辺住民の訴訟（1984年）
- 補償金・健康診断の獲得
- 環境修復に係る地域諮問委員会（FCAB）
- 環境修復作業に係る勧告
- 将来展望と長期監視
- 多目的教育センターの設置



- 森林回復エリア
- プレーリー回復エリア
- サイト内廃棄物処分場

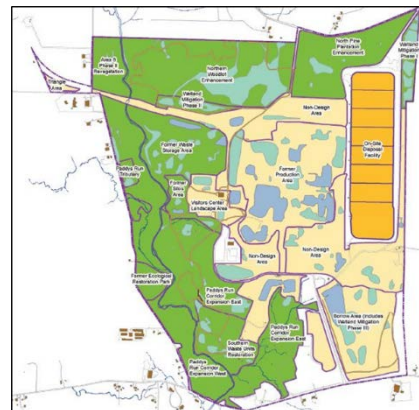
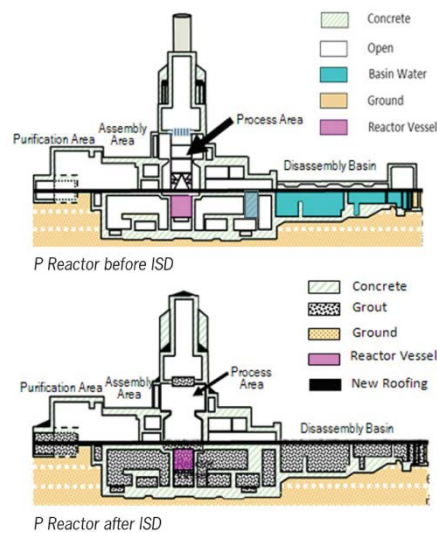


図 2-2 ファーナルドのサイト修復の概要



### サバンナリバー国立研究所

サバンナリバー国立研究所はサウスカロライナ州の西部に位置している。トリチウムやプルトニウムを生産することを目的に 1950 年に設立された。1953 年にはプルトニウム生産などの軍事目的のために 5 基の原子炉が建設された。米国 DOE の環境管理プログラムでは原子力施設と構造物を対象に非活性化、除染、解体などの活動が行われた。この取り組みは、施設の除染、ホットセルの撤去、原子炉の原位置処分などが含まれる。現在もサイト修復作業が続けられているが、新たな分野での研究開発の活動も進められている。なお、P 炉及び R 炉は原位置に埋設された施設である。



P and R reactors  
 原位置処分費用：2施設で  
 \$7,000万ドル  
 (解体撤去・運搬(処分を含まず)  
 の場合、1施設で\$2.5億ドルと  
 見積。)  
 13,700tの廃棄物の発生を回避



SRS P-Reactor Area Closure Project

図 2-3 サバンナリバーP 炉と R 炉の廃炉の概要



廃棄物検討分科会メンバーリスト

(2020年7月現在)

主査	柳原 敏	福井大学	
副主査	新堀 雄一	東北大学	
	川崎 大介	福井大学	
	岸本 克己	日本原子力研究開発機構	
	渡辺 直子	北海道大学	
	渡辺 将久	日本原子力研究開発機構	
	浅沼 徳子	東海大学	
	浅野 隆	日立GEニュークリア・エナジー	
	安部 浩	日本原子力学会	
	出光 一哉	九州大学	
	大井 貴夫	日本原子力研究開発機構	
	金子 昌章	日本核燃料開発株式会社	
	紺谷 修	鹿島建設	
	鈴木 俊一	東京大学	
	前田 一人	三菱重工業	
	宮本 泰明	日本原子力研究開発機構	
	山下 雄生	東芝エネルギーシステムズ	
	山内 豊明	日本原子力発電	(2020年6月まで)
	蛭沢重信	原子力安全研究協会	(2018年4月まで)
	中澤 俊之	三菱マテリアル	(2020年3月まで)
オブザーバー	早瀬 佑一	エネルギー・環境研究会	
オブザーバー	山内 豊明	日本原子力発電	
オブザーバー	加藤 和之	原子力損害賠償・廃炉等支援機構	(2019年3月まで)