

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 2020

概要版

2020 年 10 月 6 日

原子力損害賠償・廃炉等支援機構

目 次

1	はじめに.....	2
1)	福島第一原子力発電所の廃炉に向けた体制・制度.....	2
2)	戦略プランについて	3
2	福島第一原子力発電所の廃炉のリスク低減及び安全確保の考え方.....	4
1)	福島第一原子力発電所廃炉の基本方針	4
2)	放射性物質に起因するリスク低減の考え方	4
3)	廃炉作業を進める上での安全確保の考え方	7
3	福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術戦略	10
1)	燃料デブリ取り出し	10
2)	廃棄物対策	22
3)	汚染水対策	26
4)	使用済燃料プールからの燃料取り出し	28
5)	廃炉の円滑な推進に向けた分析結果の活用	30
4	研究開発への取組	31
5	技術戦略を支える取組	33
1)	プロジェクト管理の一層の強化、廃炉の事業執行者として有すべき能力の向上	33
2)	国際連携の強化.....	34
3)	地域共生.....	35

1 はじめに

福島第一原子力発電所の事故からまもなく 10 年を迎えることになり、これまでの短期的な対応から、中長期的な対応を見据えた廃炉作業へのフェーズの転換が図られている。この間、事故直後に緊急を要した汚染水対策の一定程度の安定化や 4 号機の使用済燃料プールからの燃料取り出し（以下「プール内燃料取り出し」という。）完了及び 3 号機のプール内燃料取り出し開始などの具体的な進展がみられるとともに、発電所内の放射線量の大幅な低減が実現されてきた。

今後は、廃炉作業の本丸である燃料デブリ取り出しに向けた具体的な対策を進めていく必要がある。2019 年 12 月に改訂された政府の「東京電力ホールディングス㈱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」（以下「中長期ロードマップ」という。）においては、燃料デブリ取り出しは、2021 年内に 2 号機から開始されることが明記された。また、東京電力ホールディングス㈱（以下「東京電力」という。）はこれを実現するための今後の廃炉全体の主要な作業プロセスとして、2020 年 3 月に「廃炉中長期実行プラン 2020」（以下「廃炉中長期実行プラン」という。）を公表した。これにより、事業者である東京電力は複雑かつ長期にわたる作業見通しの具体化や、地元や社会に対する廃炉事業の透明化を図り、主体的に廃炉に取り組む姿勢を明らかにした。

「東京電力ホールディングス㈱福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン」（以下「戦略プラン」という。）では、中長期ロードマップにおいて示された新たなマイルストーンを踏まえ、東京電力が着実に廃炉作業を実施するために、福島第一原子力発電所の取組全体を俯瞰した中長期視点での技術戦略を提示する。戦略プラン 2020 では、廃炉中長期実行プランが策定されたこと、規模の更なる拡大に向けた燃料デブリ取り出し方法の検討に必要な要求事項の抽出、廃炉作業における安全確保の考え方の明確化、研究開発の重要性の高まりを受けた管理体制の強化などを特徴的に記載している。

1) 福島第一原子力発電所の廃炉に向けた体制・制度

廃炉作業の中長期を見据え、各課題への対応を計画的に実施し廃炉作業を着実に進めていくため、東京電力は 2020 年 4 月から廃炉作業の管理体制を強化し、プロジェクト型組織への転換を行った。また、資金面においては、当面の廃炉作業を確実なものとしていくため、2017 年 10 月から原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下「NDF」という。）による廃炉等積立金管理業務が実施されている。当該管理業務は、毎年度、①NDF が定め、経済産業大臣が認可した廃炉の適正かつ着実な実施に要する金額を東京電力が NDF に積み立て、②NDF と東京電力が共同で作成し経済産業大臣が承認した「廃炉等積立金の取戻しに関する計画」（以下「取戻し計画」という。）に基づいて、東京電力が廃炉等積立金を取り戻し、廃炉を実施していくものである（図 1）。

この業務の下では、NDF は、①廃炉に係る資金についての適切な管理、②適切な廃炉の実施体制の管理、③廃炉等積立金制度に基づく着実な作業管理等に当たることとなり、東京電力による廃炉の実施の管理・監督を行う主体として、役割や責任が課せられている。NDF は戦略プランを踏まえて作成した「廃炉等積立金の取戻しに関する計画の作成方針」（以下「取戻し計画作成方針」という。）により、取戻し計画に盛り込むべき作業目標及び主要作業を東京電力に対して提示し、取戻し計画を東京電力と共同で作成する過程で東京電力の取組内容について地域共生も見据えたプロジェクト遂行の観点から妥当性の評価を行っている（図 2）。

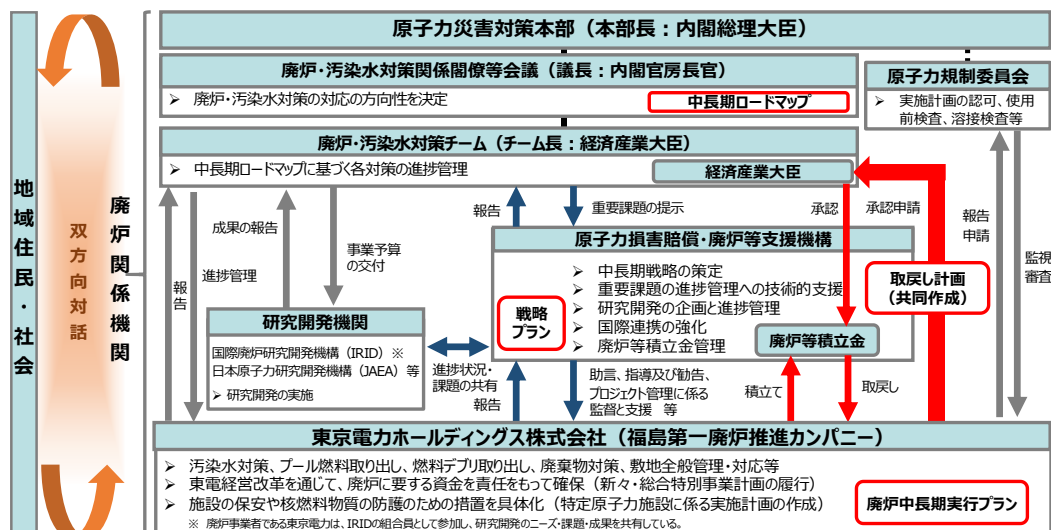


図1 福島第一原子力発電所の廃炉に係る関係機関等の役割分担

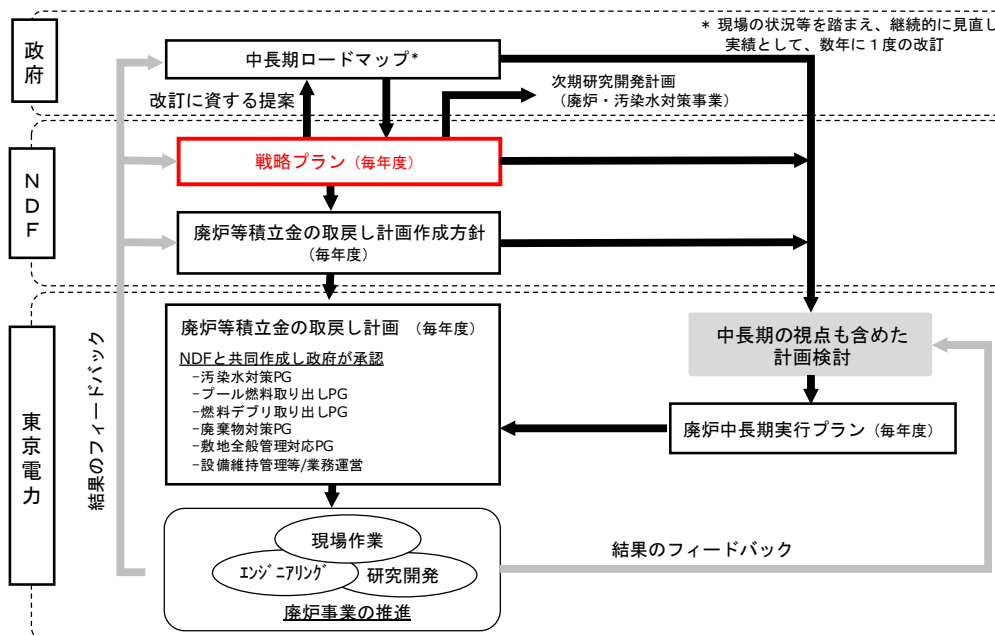


図2 廃炉等積立金制度を踏まえた戦略プランの位置付け

2) 戦略プランについて

NDFでは、中長期ロードマップに確固とした技術的根拠を与え、その円滑・着実な実行や改訂の検討及び原子力規制庁の「東京電力福島第一原子力発電所の中期的リスクの低減目標マップ」の目標達成に資すること、並びに取戻し計画作成方針に根拠を与えることを目的として、戦略プランを2015年以降毎年取りまとめている。また、戦略プランは、廃炉中長期実行プランの毎年の改訂に技術的な観点から影響を与えることになる。

戦略プラン2020では、昨年末の中長期ロードマップの改訂を受け、新たな目標工程に沿って事業者が廃炉作業を着実に実施するために、福島第一原子力発電所の取組全体を俯瞰した中長期視点での技術戦略を提示する。特に、難易度が高い作業である燃料デブリ取り出しが至近に迫っており、この実現のためにも、政府、NDF、東京電力、研究機関等の役割は一層大きくなっており、本書ではこれらの観点も意識した記載としている。

次章から各分野の具体的な技術戦略について述べる。

2 福島第一原子力発電所の廃炉のリスク低減及び安全確保の考え方

1) 福島第一原子力発電所廃炉の基本方針

福島第一原子力発電所の廃炉においては「事故により発生した通常の原子力発電所にはない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を基本方針とする。

2) 放射性物質に起因するリスク低減の考え方

i. リスクの定量的把握

戦略プランでは、放射性物質に起因するリスクの大きさ（リスクレベル）を表現するため、英国原子力廃止措置機関（以下「NDA」という。）が開発した Safety and Environmental Detriment（以下「SED」という。）をベースとした手法を用いる。本手法において、リスクレベルは、放射性物質が人体に取り込まれた場合の内部被ばくの影響度を示す指標である「潜在的影響度」と事象の起こりやすさを示す指標である「管理重要度」の積によって表される。

ii. リスク源の特定と評価

福島第一原子力発電所の主なリスク源をまとめると表 1 となり、これらの各リスク源が有するリスクレベルの現時点の状況を「潜在的影響度」と「管理重要度」を軸として表現すると図 3 となる。

中長期ロードマップでは、これらリスク源への対処に関して①相対的にリスクが高く優先順位が高いもの（建屋内滞留水やプール内燃料）、②直ちにリスクとして発現するとは考えにくいが拙速に対処した場合にかえってリスクを増加させ得るもの（燃料デブリ）、③将来的にもリスクが大きくなるとは考えにくいが廃炉工程において適切に対処すべきもの（除染装置スラッジなどの固体廃棄物）の 3 つの基本分類を用いており、優先順位を付けて最適な対策を実施している。

表 1 福島第一原子力発電所の主要なリスク源

燃料デブリ		1～3 号機の原子炉圧力容器（RPV）/原子炉格納容器（PCV）内の燃料デブリ
使用済燃料	プール内燃料	1～3 号機の使用済燃料プール内に保管されている燃料集合体
	共用プール内燃料	共用プール内に保管されている燃料集合体
	乾式キャスク内燃料	乾式キャスク内に保管されている燃料集合体
汚染水等	建屋内滞留水	1～4 号機建屋、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋内に滞留する汚染水、1～3 号機建屋底部の α 核種含有スラッジ
	ゼオライト土嚢	プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋地下階に設置されたゼオライト入り土嚢
	溶接型タンク内貯留水	溶接型タンク内に保管されているストロンチウム処理水、処理済水
	フランジ型タンク内残水	フランジ型タンク底部に残っている濃縮塩水、処理済水の残水
水処理 二次廃棄物	吸着塔類	セシウム吸着装置、第二セシウム吸着装置、第三セシウム吸着装置、高性能多核種除去設備、モバイル型ストロンチウム除去装置、第二モバイル型ストロンチウム除去装置、モバイル式処理装置の使用済吸着材等
	HIC スラリー	多核種除去設備、増設多核種除去設備で発生した、高性能容器 HIC に保管されているスラリー
	除染装置スラッジ	除染装置の運転に伴って発生した凝集沈殿物

	濃縮廃液等	濃縮塩水を蒸発濃縮装置でさらに濃縮減容した濃縮廃液及び濃縮廃液から収集した炭酸塩スラリー
ガレキ等	固体廃棄物貯蔵庫	固体廃棄物貯蔵庫内に収納されているガレキ類（30 mSv/h 超）
	覆土式等	覆土式一時保管施設、容器収納にて保管されているガレキ類（1～30 mSv/h）、一時保管槽にて保管されている伐採木
	屋外集積等	屋外シート養生にて保管されているガレキ類（0.1～1 mSv/h）、屋外集積にて保管されているガレキ類（0.1 mSv/h 未満）、屋外集積にて保管されている伐採木
建屋内汚染構造物等		原子炉建屋、PCV/RPV 内で、事故により飛散した放射性物質により汚染された構造物・配管・機器等及び事故以前の運転時の放射化物

福島第一原子力発電所の主要なリスク源は表 1 のとおりであるが、廃炉作業全体を長期的に見据えた場合には事故前から存在する廃棄物や、潜在的影響度が必ずしも高くはないが、十分に安定管理されていないものが存在する。戦略プラン 2019 からは、これらについても提示しているところであり、特にこれまで明示的に検討の対象としていなかったリスク源を収納する設備については、地震、津波、雨水などの外部事象を考慮した調査・検討を進めている。



図 3 福島第一原子力発電所の主要なリスク源が有するリスクレベルの例

iii. リスク低減戦略

(1) リスク低減戦略における当面の目標

リスク低減対策としては、「潜在的影響度」を低減する方法と、「管理重要度」を低減する方法がある。「潜在的影響度」を低減させる例は、放射性崩壊に伴うインベントリや崩壊熱の低下、液体や気体を移動しにくい形態に変化させること等である。汚染水を処理して二次廃棄物にすることは形態変化の例である。

「管理重要度」を低減させる例としては、プール内燃料の共用プールへの移動、屋外に保管しているガレキ等を貯蔵庫に収納することなどがある。様々なリスク低減対策のうち、一般に

工学的に実現しやすいものは、この「管理重要度」の低減である。したがって、図3の「十分に安定管理されている領域」（水色の領域）に持ち込むことを当面の目標とする。なお、SEDは放射性物質に起因するリスクの現状を定量的に示したものであり、これはリスク源の対策の優先順位を判断する際に有効な手法である。図3について、昨年からの変更としてゼオライト土嚢を追加¹しており、これは事故後の汚染水対策の一環として設置されたもので、建屋内滞留水処理の過程で2019年12月に高線量状態で存在することが判明したものである（3章3）参照）。

(2) リスク低減における基本的考え方

福島第一原子力発電所の廃炉は、大きな不確かさを内在した事業である。現在までに、事故進展過程のシミュレーション、ミュオン測定による燃料デブリ位置の推定、原子炉格納容器（以下「PCV」という。）内への調査機器の投入、建屋内の線量測定や映像撮影などにより、1～3号機PCV内部の様子はある程度推定できるようになってきているが、未だ大きな不確かさが存在し、不確かさを解消するためには多くのリソース、特に膨大な時間を要することになる。速やかなリスク低減を目指すためには、ある程度の不確かさが存在していても、安全の確保を最優先に、これまでの経験・知見、実験や解析によるシミュレーション等を活用し方向性を見定めた上で、柔軟かつ迅速に総合的な判断を行う必要がある。

このような総合的な判断を行う上での視点として、NDFでは次に示す5つの基本的考え方を整理している。

（5つの基本的考え方）

安全	放射性物質によるリスクの低減並びに労働安全の確保
確実	信頼性が高く、柔軟性のある技術
合理的	リソース（ヒト、モノ、カネ、スペース等）の有効活用
迅速	時間軸の意識
現場指向	徹底的な三現（現場、現物、現実）主義

5つの基本的考え方を実際の現場にあてはめた場合、作業に伴う放射線から人と環境を防護することを目的とした安全確保に最も力点を置き、人と環境に与える放射線影響評価を徹底して行い、適切な放射線防護対策を講じたうえで廃炉作業を進めることが重要である（「安全」）。

福島第一原子力発電所の廃炉においては、事故により損傷を受けた設備等の劣化が進行して公衆リスクレベルは時間とともに上昇することから、現場の状況に照らし可及的速やかに（「迅速」）、このリスクを合理的に達成できる限り低く管理しつつ（「合理的」）、確実（「確実」）で、現場の厳しい条件に対し実際に実行できる方法により（「現場指向」）廃炉を進めることが、中長期的な安全確保につながる。

このような基本的考え方に基づく判断結果については、判断結果が広く社会から受容されるよう、丁寧な情報発信を行う等の努力をしていくことが重要である。

¹ 戦略プラン2019では、ゼオライト土嚢を主要なリスク源を除いた放射性物質を含むリスク源として抽出していたが、戦略プラン2020では主要なリスク源に追加

3) 廃炉作業を進める上での安全確保の考え方

i. 福島第一原子力発電所の特徴を踏まえた安全確保の基本方針

事故炉である福島第一原子力発電所の廃炉は、通常炉と異なる特殊な環境のなか行われる未経験の取組であることから、その安全確保に当たって以下の安全上の特徴（特殊性）を十分認識する必要がある。

- ・ 大量の放射性物質（内部被ばくに大きな影響をもつα核種を含め）が通常にない様々な形態（非定型）で非密封状態にあること
- ・ 原子炉建屋、PCV といった放射性物質を閉じ込める障壁が完全でないこと
- ・ これらの放射性物質や閉じ込め障壁の状況等に大きな不確かさがあること
- ・ 現場の放射線レベルが高い等の制約から現場へのアクセスや現場情報を得るための計装装置の設置が困難であること
- ・ 現状の放射線レベルが高く、さらには閉じ込め障壁等の更なる劣化が懸念されることから廃炉を長期化させない、時間軸を意識した対応が必要なこと

そのため、廃炉事業執行者である東京電力は、廃炉作業を進めるに当たって、5つの基本的考え方から作業を検討するなかで、以下の点に特に留意が必要である。

第一に、「安全」に関して、放射性物質や閉じ込め障壁の状況等に大きな不確かさがあり、かつ、その不確かさを低減するための現場アクセスや計装装置設置も制約されている状況で、非定型、非密封の大量の放射性物質を不完全な閉じ込め状態で扱うことになる。このため、幅広い可能性（ケース）を想定して、それらについて確実に安全確保が可能であることの確認を、全ての検討の起点とすることが必要である。同時に、「安全」に関して、作業期間全体にわたるリスク低減を考えて作業期間を長期化させないことが重要であり、そのために過剰な安全対策を避け、最適な安全対策を講じること（ALARP²）が必要である。「安全」に関するこのような視点（安全視点）を廃炉作業の検討に反映することが重要である。

第二に、「現場指向」に関して、

- ・ 現場環境が、高い放射線レベル等、特殊な状況にあり、安全対策を施工、実施する際の現場実現性に留意が必要であること
- ・ 大きな不確かさのために設計単独での対応に限界があること

等から、実際の現場の情報を適確にエンジニアリングに反映することが不可欠であり、そのために実際に現場（運転操作、保全、放射線管理、計装、分析等）で作業を担う現場を熟知した人・組織（オペレータ）の目線、感覚を大切にし、現場を直視した着眼や判断等（オペレータ視点）が重要である。

プロジェクトにおける廃炉作業の実際の検討に当たっては、事業執行者である東京電力がその作業に対する「要求事項」を予め明確に定め、その実現に向けた具体的な安全対策の検討を行う。その際には、福島第一原子力発電所の廃炉の特徴（特殊性）に対応するために、「安全視点」、「オペレータ視点」を反映することが基本である。

² As Low As Reasonably Practicable の略。放射線影響を合理的に実行できる限り低くしなければならないというもの。

(1) 安全評価を基本とした判断最適化と廃炉対応における適時性確保

リスク低減に向けた廃炉作業を進める上で、燃料デブリ取り出しなど技術的に難易度が高く、大きな不確かさを有し、かつ多量の放射性物質を取り扱う作業において、適切な安全対策を施し安全を確保することが最も重要であり、「安全視点」をもって廃炉作業を進める必要がある。具体的には、廃炉各作業の安全対策を検討する際には、安全の評価を尽くし、必要な安全が確保されていることを確認したうえで、5つの基本的な考え方に基づいた判断を行うことが基本となる。

また、福島第一原子力発電所の廃炉に固有な「安全視点」として、遅滞ない廃炉作業進捗の重要性（時間軸を意識した対応の重要性）があげられる。既に顕在化している高い放射線影響、さらには閉じ込め障壁等の更なる劣化の可能性を考慮すると、中長期的な視点で見た場合には、遅滞ない廃炉作業の進展が廃炉全体の安全確保に大きく貢献する。そのため、ヒト、モノ、カネ等のリソースに一定の裕度を持ち、放射線影響が低く安定した通常炉の安全確保とは異なり、特に、安全が確保されていることを前提として、時間軸を意識した遅滞ない廃炉作業の進展とリソース投入を、全体バランスとの関係を踏まえ、合理的に判断することが求められる。

(2) 「オペレータ視点」を取り込んだ安全確保

安全対策が真に実効的であるためには現場で実際に操作や作業等を実行する立場からのニーズを満足している必要がある。このために「オペレータ視点」（現場を熟知し現場で操作や作業等を実行する立場からの着眼や判断等）が重要である。そのような観点に加え、福島第一原子力発電所の廃炉では、事故影響を受けた施設であること、高い放射線レベルなど通常炉に見られない特殊な環境のなか行われる未経験の取組であることから、安全対策の実現性を判断するに当たっては現場での実現性について、高い放射線レベルなどの特殊な状況、環境等、現場の状況を踏まえて判断する必要がある。

また、安全確保に当たって、運転操作を含めた運用による設計の補完、監視・分析等による情報の設計での活用等が重要性をもつ。

ii. 先行的な実施と得られる情報の後段での活用

事故炉である福島第一原子力発電所の現場状況には大きな不確かさが存在する。このようななか燃料デブリ取り出し等の大掛かりな作業について、作業全体を設計しようとすると、極めて大きな安全余裕や、幅広い技術選択枝の想定が必要となる。このため、対応期間の長大化や手戻りのリスクが避けられず、その結果、廃炉全体の遅れ、廃炉費用の高騰、作業員被ばくの増加等を招き、全体プロジェクトの成立性や予見性を低下させる可能性が大きくなる。

一方で、現状既に放射線レベルが高い環境下にあること、閉じ込め障壁等の更なる劣化、今後の大きな自然事象（地震や津波等）の発生の可能性等を考慮すると、リスク状態の改善と不確実性の縮小を出来るだけ急ぐことが求められる。このため、作業を幾つかの段階に分けた上で、実地的な安全の確保を保証できる「最初の段階の作業」に取り組み、そこで得られた情報を次の段階に展開するという「逐次型の取組」が重要となる。この取組方式³では、各段階の作業において、炉内部の状態監視、操作の制限、機動的な対応等⁴によって安全を確保した上で作業を進め、作業

³ セラフィールドの廃止施設等、英国でも用いられており、リード・アンド・ラーン（Lead & Learn）と呼ばれている。

⁴ 例としては、臨界防止の観点から、実現可能な範囲での核計装を設置する、デブリ加工量を制限する、放射性ダスト濃度の管理値を定めて作業を規制する、などの措置を講ずること等。

によって得られた情報を次段階の作業の設計に活用することで、次段階の作業の不確かさを低減し、安全確保の信頼性向上と設計の合理化を図ることができる。

東京電力は、このような取組方式を実際のエンジニアリングやプロジェクト管理にすみやかに導入していく必要がある。この取組方式の中で得られる上手くいった経験や上手くいかなかった経験を実績として積み上げていくことが重要である。それにより、廃炉を着実に進展させることにつながり、中長期的なリスク低減の観点から福島第一原子力発電所の廃炉における安全確保に資することになる。

本章で述べた福島第一原子力発電所の廃炉のリスク低減及び安全確保の考え方は、関係者のみならず地域の皆様からの幅広い理解を得ながら進める必要がある。このため、地域の皆様、政府（経済産業省、原子力規制委員会）、NDF、東京電力などは、それぞれの立場を踏まえ、安全確保の考え方に基づくリスク低減を目指し、連携していくことが必要である。その際に、廃炉作業によってサイト全体のリスク低減がどのように継続的に進んでいるか等について、幅広い方々にとって分かりやすいリスクの継続監視の仕組みを整えることが重要である。NDF と東京電力では、このような仕組みについても検討しているところであり、東京電力において将来的にこのような仕組みを導入していくことが重要である。

3 福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術戦略

1) 燃料デブリ取り出し

i. 目標と進捗

(目標)

- (1) 安全対策をはじめ周到な準備をした上で、燃料デブリを安全に回収し、これを十分に管理された安定保管の状態に持ち込む。
- (2) 燃料デブリ取り出しの初号機である 2 号機で試験的取り出しに 2021 年内に着手し、段階的な取り出し規模の拡大など一連の作業を迅速に開始することで、その後の取り出し規模の更なる拡大に向けて必要な情報・経験を得る。
- (3) 取り出し規模の更なる拡大については、初号機の燃料デブリ取り出し、内部調査、研究開発（廃炉・汚染水対策事業、東京電力自主事業）、現場環境整備等に関する進捗を見極めつつ、収納・移送・保管方法を含め、その方法の検討を進める。

(進捗)

中長期ロードマップにおいては、燃料デブリ取り出しの初号機は2号機とし、2021年内に試験的取り出しに着手し、その後、段階的な取り出し規模の拡大に向けた作業を進めるとしている。試験的取り出しについては、PCV内部に通じる既存の開口部から取り出し装置を投入し行う。東京電力は廃炉中長期実行プランにおいて2031年までの作業工程を示し、これに従い取組を進めている。

①1号機

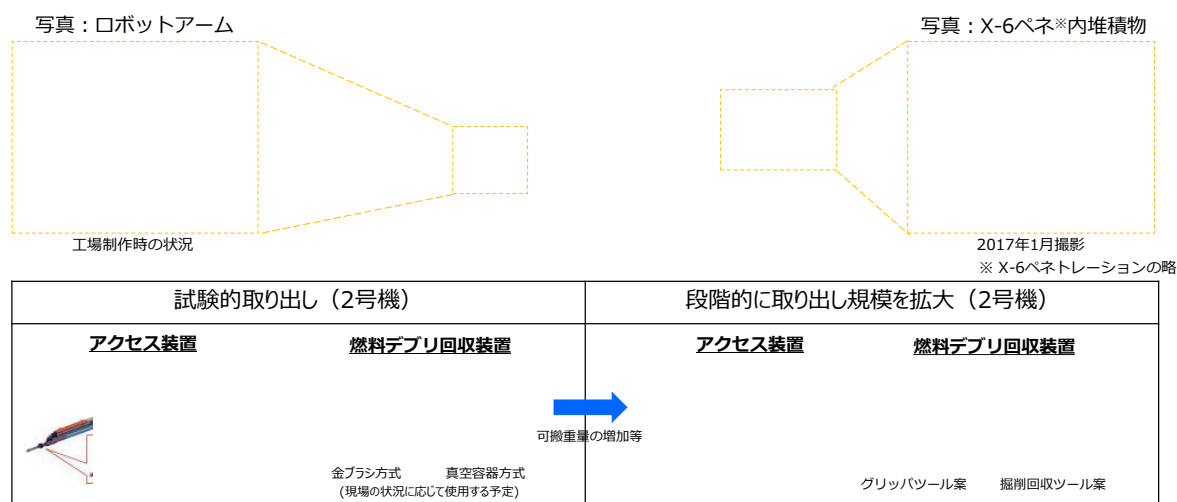
2020 年度下期から、潜水機能付ボート型アクセス調査装置（水中 ROV）を PCV 内に投入し、ペDESTAL外底部に広く存在している堆積物の分布状況や堆積物内部の燃料デブリの有無や状況、ペDESTAL内部の構造物状況を調査し、PCV 内部の更なる詳細な情報を把握する計画である。この調査開始に向け、X-2 ペネトレーション（以下「X-2 ペネ」という。）内扉の開孔作業時のダスト濃度変化を踏まえ、ダスト拡散抑制対策及びダスト濃度監視を行いながら、PCV 内の干渉物の除去等を進めている。

②2号機

2021 年内の試験的取り出し及び PCV 内部調査開始に向け、アーム型のアクセス装置（ロボットアーム）を製作中であり（図 4）、ダスト拡散抑制対策について検討中である。

段階的な取り出し規模の拡大に向けた計画も進めており、取り出し装置は、試験的取り出し及び PCV 内部調査装置の仕様を踏襲しつつ、可搬重量の増加やアクセス性を向上するなどの改良を行う計画である。取り出した燃料デブリは受入／払出セルまで構内移送され、一時保管設備に保管する。また、分析のために受入／払出セルで燃料デブリを一部分取し、分析施設に移送する計画である。現在、取り出し装置、受入／払出セル、一時保管設備を設計中である。

初号機の燃料デブリ取り出しというこれまで未経験の取組に対し、NDF は東京電力におけるエンジニアリングの進捗に応じて、装置の現場適用性の確認や安全システムの改造内容に関する検討結果等を安全、確実、合理的、迅速、現場指向の視点で確認することを検討している。



（東京電力資料をNDFにて加工）

図4 燃料デブリ取り出し設備のイメージ（試験的取り出し及び段階的な取り出し規模の拡大）

③3号機

3号機については、PCV内の水位が高いため、サプレッションチェンバ（以下「S/C」という。）の耐震性向上やPCV内部調査を行うことを念頭に、段階的にPCV水位を低下する計画である。S/C内包水は放射能濃度が高い可能性があり、S/Cの水質に応じた対応が必要となる。このため、PCV取水設備の設計や工事及び水処理計画を行うにあたり、S/C内包水を採取し、水質を把握する作業を開始している。

ii. 主要な課題とそれを実現する技術戦略

PCV内の状況把握や燃料デブリ取り出しに必要な研究開発が未だ限定的であることから、現時点での燃料デブリ取り出しに係る設計や現場作業計画は、今後得られる知見を基に不断の見直しが必要である。なお、燃料デブリ取り出しに向けた検討や研究開発を進めており、その成果も的確に反映していくことが重要である。

(1) 試験的取り出し及びPCV内部調査、段階的な取り出し規模の拡大

試験的取り出しについては、PCV内の状況把握が限定的であり、ロボットアームの開発や堆積物、干渉物の除去に不確実性及び難しさがある。そのため、現場を模擬したモックアップ試験を行うことがオペレータ視点からも重要であり、十分に安全性や現場適用性を確認し、着実に進めていく必要がある。

また、東京電力は強化したプロジェクト管理体制の下、これまでの経験等から得られた①～③の留意点を踏まえ、エンジニアリングを主導的に推進していくことが重要である。

NDFは、東京電力が進めるエンジニアリングのスケジュールに基づいて、アクセス装置の現場適用性、安全システム改造に関する検討結果、乾式保管の安全評価等の確認ポイントを予め設定し、安全、確実、合理的、迅速、現場指向の視点で研究開発成果、エンジニアリング成果等の確認を行っていく。なお、2号機において、2021年内の試験的取り出し及び同一のロボットアームを使ったPCV内部調査の開始に向け検討を進めているが、安全が最重要であるということを再度認識し、工程については安全の確保を確認したうえで検討を進めることが重要である。さらに、今般の世界的な新型コロナウイルスの蔓延に伴う技術者や技能者等の出勤制限等により、

従来に比較して計画的な作業が難しい状況が想定されることから、より一層、慎重かつ細心の注意を払い、安全の確保を行う必要がある。

試験的取り出し及び PCV 内部調査は、規模は小さいながらも、PCV に新たな開口を設けて、PCV 外側に閉じ込め障壁を拡張するという今後の取り出し作業の基本的な現場構成の形で実施するものであり、新たな段階に入る取組である。閉じ込め障壁機能の維持に係る作業であり、特に安全に十分に配慮した検討を行う必要があり、その実施に向け、より慎重、丁寧に準備と検証や訓練を行う必要がある。

また、干渉物撤去や試験的取り出し及び PCV 内部調査については、実際に得られた PCV 内の干渉物や内部状況により、干渉物撤去や試験的取り出し及び PCV 内部調査の順序や方法は、その時の確認結果により変更となる可能性もあることから、これら作業については一体の作業として検討を行っていく必要がある。

① 初期段階から安全を強く意識したプロジェクトの推進

1号機の PCV 内部調査に向けた X-2 ペネ内扉の開孔作業時、作業監視用のダストモニタが管理値に達したため十分に時間をかけてダスト拡散抑制対策やダスト濃度監視を行った。PCV 内の状況が分からない中、慎重に作業を進めダスト拡散性に対する新たな知見も得ながら作業を実施したものである。計画の初期段階において、安全の観点からこれまで以上にダスト拡散抑制に対する検討を行うことにより、計画的に作業を遂行することが可能になる。この経験を次に活かし、プロジェクトを手戻りなく円滑に進めるために、検討の初期段階からこれまで以上に安全評価を行い、現場適用性を考慮した要求事項を明確化していくことが重要である。

② 現場適用性を考慮した品質要求の明確化

これまでの研究開発及び東京電力によるエンジニアリングの経験も踏まえ、今後、段階的な取り出し規模の拡大や、取り出し規模の更なる拡大に向けて装置開発が進められる。燃料デブリの取り出し量に応じて装置の規模も大掛かりなものとなり、さらに、長期にわたり安定した信頼性の確保も必要となる。従って、現場適用性を予め考慮し、機能要求等の仕様を明確化した上で装置開発を進めることが重要である。特に燃料デブリ取り出し装置の品質管理は重要な要素であり、東京電力自らが品質の確保を行うとの前提に立ち、状況に即した品質レベルや品質に係る基本的な要求事項を事前に整理し、装置開発に展開することが重要である。

また、燃料デブリ取り出しの検討や工事において、今後、海外の知見や経験も結集した取組が増えていくことが考えられる。これまで海外企業等と進めてきた研究開発等において、品質管理以外の工程管理、情報管理等の面でいくつかの課題を経験してきた。海外の知見や経験を活用する上では、受注者やその外注先に対しても、より細やかな工程管理等を行っていく必要がある。

③ 燃料デブリ取り出し作業時の情報の取得とその活用

東京電力は、段階的な取り出し規模の拡大や取り出し規模の更なる拡大に向けて、取得すべきデータの選定及びデータを取得するための設備の検討に着手している。この検討は取扱装置の可搬重量等のさまざまな制約を克服していく困難を伴うものである。

現場は不確かな状況ではあるが、燃料デブリ取り出し作業時の計装モニタリング、目視観察等といった状態監視によるデータ取得やシミュレーションによる評価、安全システム、各種装置の設計条件となるパラメータの取得が重要であり、これらのデータと別途実施する分析結果を連携させ、取り出し方法の検討や安全評価に活用していく取組が必要である。

加えて、燃料デブリ取り出しによって発生する固体廃棄物の保管・管理方法等の検討も必要である。試験的取り出し、段階的な取り出し規模の拡大等において、当面の保管・管理に不可欠なデータ取得に加え、処理・処分方法の検討に資する視点から、様々な試料の採取やデータの拡充を図り、分析・評価を重ねていくことが重要であり、計画的に進めながら、必要性に応じて柔軟に分析を進めていくことが必要である。

デブリ取り出し作業、また、取り出しにより発生する廃棄物の取扱において一番重要なことは、厳格な作業安全管理の下、作業を進めることである。

(2) 取り出し規模の更なる拡大

取り出し規模の更なる拡大においては、作業、装置、施設の大規模化が進むこと等により、福島第一原子力発電所全体を見据えた取り出し方法の検討が一層重要となる。事業執行者である東京電力が廃炉事業として非常に重要な判断を行う段階になるため、安全確保を最優先とした上で、コスト、期間、総被ばく線量などの視点も含めた基本方針を設定し、責任をもって取り組んでいく必要がある。研究開発や内部調査等から得られる新たな成果及び情報を取り出し方法の検討に反映し、取り出し方法の検討について柔軟な取組を進めることが必要である。また、先行的な実施と得られる情報の後段での活用を考えに基づき、現場運用から得られる情報を次の設計に反映していくなど、設計と現場運用による安全の確保が重要となることに加え、長期間に及ぶ廃炉事業の影響など社会的側面にも留意が必要である。

① 取り出し方法検討の流れ

取り出し規模の更なる拡大については、初号機の燃料デブリ取り出し、PCV 内部調査、研究開発、現場環境整備等に関する進捗を見極め、収納・移送・保管方法を含め、その方法の検討を進める。その際、初号機（2号機）の燃料デブリ取り出しに比べ、作業、装置、施設が大規模化し、工事範囲が広域化することから、他工事も含めて福島第一原子力発電所全体を見据えた検討が一層重要となる。さらに作業内容が多岐にわたり、より広範な技術分野の検討を進めていく必要があるため、引き続き、世界の英知を結集し、取り出し方法の検討を進めることが重要である。また、現場の線量が高いことや、PCV 内の状況把握が限定的な中、作業範囲が大規模化することから、作業・装置に求める要求事項をより明確に設定した上で、体系的な取り出し方法の検討を進めることが重要である。取り出し方法の検討の流れ（概念図）を図5に示す。

情報の充足状況や現場の状況を踏まえると、3号機の方がデブリ取り出しに早く着手し、早く情報を取得することが可能となる。ある号機を代表号機とすることで、取り出し方法の検討等エンジニアリングを進展させることが可能となり、技術的な要点や更に検討を深めていくべき項目等を早期に得ることができる。これらの成果を他号機に活用することは、1~3号機の燃料デブリ全体のリスク低減につながる。以上のことから3号機を先行検討号機とすることは適切であると評価している。このように3号機で先行的な取組を進め、他号機の状況や検討結果の再確認を行い、その結果によっては検討号機の見直しを行う対応も重要である。初号機（2号機）の燃料デブリ取り出しが途上であっても、他号機での取り出し準備が整えば、2号機の実績を踏まえ他号機での取り出しを開始するなど、廃炉作業全体の最適化の観点から、燃料デブリの取り出しの進め方は柔軟に検討すべきである。

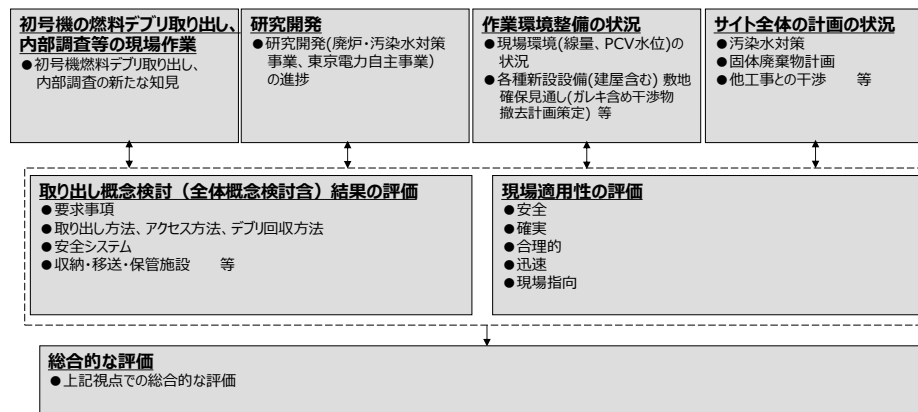


図5 取り出し方法検討の流れ(概念図)

② 取り出し方法の重要な要求事項(境界条件)の考え方

東京電力による取り出し方法の検討は、現状においては研究開発を踏まえ、要求事項に対して前提条件を仮に設定して検討を進めている。

今後、体系的な取り出し方法の検討を進める上では、研究開発の初期に設定した前提条件のうち、取り出し方法の決定に関わる重要な要求事項(境界条件)について、その時点までに得られた情報及び分析結果に基づき再検討し、要求事項をより明確に設定し、必要に応じて見直しをすることが求められる。また、研究開発段階での工法概念の是非も考慮し、現実的な工法について設計上の試作、モックアップによる性能検証、設計改良、安全対策上の機能付加、付帯する準備工事や周辺設備の設計などのエンジニアリングを相当の規模で行うことが求められる。

本項の冒頭で記載した視点を含めた基本方針の下、要求事項をより明確にして、取り出し方法の検討を進める際には、東京電力が事業執行者として、重要な要求事項(境界条件)を明確にすることが必要である。重要な要求事項(境界条件)については、何を重要なものとし、どのような性能を求めるかについて、安全視点、オペレータ視点から設定する必要がある。

③ 取り出し方法検討における柔軟な取組

取り出し方法の検討は、東京電力により研究開発を踏まえて進められている。今後、前述の重要な要求事項(境界条件)の設定を行った上で、1号機のPCV内部調査に向けたX-2ペネ内扉の開孔作業時のダスト拡散の事例や、今後得られる研究開発の成果、2号機の試験的取り出し及びPCV内部調査や段階的取り出し規模の拡大によって得られる情報等に基づき実施される現場適用性に係る評価に応じて、方法の見直しを含め、状況に応じて柔軟な取組を進めることが必要である。

検討に際して、検討によって得られた成果に加え、新たに得られる情報等を取り込み、安全視点、オペレータ視点から前提条件の設定の適切性を検証することや、それによる取り出し方法の見直しを行うといった反復、繰り返し型の取組が必要である。

④ 設計と現場運用による安全の確保

福島第一原子力発電所の廃炉は未経験の取組であるため、現場の運用(運転、保全、放射線管理、計装、分析、工事等)を担う人たちの目線、感覚が通常炉以上に重要である。これらに加え、分析といった現場運用によって得られる情報を、試験的取り出し、段階的な取り出しの規模の拡大等を行いながら取得し、次の設計に反映し安全を確保していくことが必要である。

1～3号機について、事故時に取得したプラントパラメータ等の実測値、事故進展解析、PCV内部調査等による情報、試験等で得られた知見に基づいた燃料デブリの分布、燃料デブリへのアクセスルート及び周囲の構造物の状況に関する総合的な分析・評価結果を図6に示す。分布の違いはあるが、原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）内部及びPCV底部の両方に燃料デブリが存在すると分析しており、各号機の燃料デブリ取り出しに向けて、内部調査、研究開発を継続的に実施し、RPV内、PCV内を把握する必要がある。

廃炉中長期実行プランは、試験的取り出しや段階的な取り出し規模の拡大、取り出し規模の更なる拡大における作業工程を示しており、今後の内部調査等を通じて得られる知見を踏まえ不断の見直しが行われる。作業工程については、着実な実施に向け、より具体的な実施内容へブレークダウンすることが重要である。

			
炉心部	・炉心部にはほぼ燃料デブリなし	・炉心部にはほぼ燃料デブリなし (外周部に切り株状燃料の残存の可能性あり)	・炉心部にはほぼ燃料デブリなし
RPV底部	・RPV底部に少量の燃料デブリが存在 ・CRDハウジング内部及び外表面などに少量の燃料デブリが存在	・RPV底部に多くの燃料デブリが存在 ・CRDハウジング内部及び外表面などに少量の燃料デブリが存在	・RPV底部に一部の燃料デブリが存在 ・CRDハウジング内部及び外表面などに少量の燃料デブリが存在
PCV底部 (A°デ・スタル内側)	・ベデスタル内側床面に大部分の燃料デブリが存在	・ベデスタル内側床面に一定量の燃料デブリが存在	・ベデスタル内側床面に2号機と比較して多くの燃料デブリが存在
PCV底部 (A°デ・スタル外側)	・作業用出入口を通してベデスタル外側に燃料デブリが拡がった可能性あり	・作業用出入口を通してベデスタル外側に燃料デブリが拡がった可能性は小さい	・作業用出入口を通してベデスタル外側に燃料デブリが拡がった可能性があり
作業現場の線量※	・R/B 1 階X-6ベネトレーション周りの線量が高い(630mSv/h)。	・R/B 1 階の線量は全体的に約5mSv/hまで低減している。	・R/B 1 階の線量は数～数十mSv/h以上であり、線量が高い。
燃料デブリへのアクセスに関する情報※2	・グレーチング上側から、ベデスタル外側のドライウェル底部へのアクセス可能 ・X-6ベネからベデスタル内につながるCRDレール周辺の状態は確認できず	・CRDレール上やベデスタル開口部付近には大きな障害物なし ・ベデスタル開口部からベデスタル内側底部へのアクセスが可能であることを確認	・ベデスタル開口部からベデスタル内側底部へのアクセスが可能であることを確認
周囲の構造物の状況に関する情報	・グレーチング上側のベデスタル外側壁面に大きな損傷なし	・ベデスタル内底部に燃料集合体の一部が落下していたが、調査した範囲では、CRDハウジングサポートには大きな損傷はなし ・ベデスタル内側壁面及びベデスタル内の既設構造物(CRD交換機等)には大きな損傷なし	・ベデスタル内において複数の構造物の損傷や落下物(一部は炉内構造物と推定可能)、CRDハウジングサポートの一部脱落、変形を確認 ・ベデスタル内側壁面に大きな損傷なし

PCV内の燃料デブリ取り出しのアクセスルートについては、機器ハッチ等からのアクセスルートを廃炉・汚染水対策事業で検討中。
1号機のX-6ベネの周りは高線量率であるため、作業環境整備が困難な場合は、機器ハッチをアクセスルートとする可能性がある。
また、1号機の内部調査は、調査装置の投入と作庫内X-2ベネからアクセスを行う。

図 6 1～3 号機の燃料デブリ分布の推定、アクセスルート及び周囲の構造物の状況

(4) 技術要件の技術課題と今後の計画

a. 燃料デブリ取り出しにおける安全確保に係る技術課題

燃料デブリの取り出しに関しては、燃料デブリや閉じ込め障壁の状況に大きな不確かさ（非密封、非定型）があり、そのなかで大量の燃料デブリを不完全な閉じ込め状態で扱う等の安全上の特徴がある。これらの特徴を踏まえたうえで安全確保の考え方を整理し、関係者で共有することが必要である。

現在、NDF では、①安全評価を基本とした判断最適化、②廃炉対応における適時性確保、③運転操作、監視、分析、異常時等の現場運用による設計の補完、を基本とした安全確保の考え方の整理を進めている。また、こうした安全確保の考え方の整理とともに、燃料デブリ取り出しにおける安全確保に係る技術要件を定めて、重点的に検討を進めている。

① 閉じ込め機能の構築（気相部）

試験的取り出しや段階的な取り出し規模の拡大における、把持、吸引といった燃料デブリの取り出しでは、既存の安全システムでの対応が可能な見通しである。その後の燃料デブリ切削等の作業においては、PCV 内の機器や構造物に付着している Cs 等の再飛散や、放射性物質を含んだ水分のエアロゾル化、仮に臨界が発生した場合の短寿命のよう素や希ガス発生等を考慮した気相系の閉じ込め機能の構築が必要である。

また、Cs 等の再飛散以外にも α 核種を含む飛散微粒子（ α ダスト）が発生し、PCV 気相部の放射能濃度が上昇することが懸念される。このため、燃料デブリ取り出し規模拡大の段階ごとにダスト飛散の傾向把握等を行い、次段階において構築される閉じ込め機能の妥当性を検証しつつ、取り出し規模の拡大を図っていくことが合理的である。東京電力によるエンジニアリングでは、廃炉・汚染水対策事業の成果を踏まえて原子炉建屋内外のダストのモニタリング設備の拡充や、既設設備を用いた PCV 内の均圧化ないし負圧化検討等が進められている。今後、作業に伴う α ダスト飛散等の状態変化のモニタリング結果を基に周囲への影響を評価し、徐々に燃料デブリ取り出しの規模を拡大していく。その過程において、周囲への影響が増加する可能性も想定し、二次的な閉じ込め機能として必要な機能の見極めとその構築についても検討している。

② 閉じ込め機能の構築（液相部）

発生する α ダストの飛散率を軽減し気相部への移行を抑制するため、燃料デブリ取り出しに当たっては、燃料デブリに水を掛けながら切削等の作業を行うことが想定される。把持、吸引といった燃料デブリの取り出しにおいては、既存の安全システムでの対応が可能な見通しであるが、その後の燃料デブリの加工や干渉物撤去等の作業に当たっては、大量の α 粒子が冷却水（液相部）に混入することとなる。この α 粒子を含む冷却水が環境へ影響することを防ぐために、冷却水の循環・浄化系の確立と汚染拡大防止対策を考慮した液相部閉じ込め機能の構築が必要である。

このため、燃料デブリから循環冷却水中へ溶出すると考えられる溶解性核種の除去技術、循環冷却水系のフィルタに捕集された固形物の処理技術について検討していく必要があり、廃炉・汚染水対策事業にて研究開発が進められている。これと並行して、 α 粒子を含む冷却水の拡散防止の観点で利点となる、PCV から取水し原子炉へ注水冷却する PCV 循環冷却系の構築について、廃炉・汚染水対策事業による研究開発にて検討が進められた。

燃料デブリ取り出し規模拡大の各段階において、合理的な液相部閉じ込め機能を構築するためには、段階ごとに冷却水中の放射能濃度の監視等を行い、次段階において構築される閉じ込め機能の妥当性を検証しつつ進めることが合理的である。閉じ込め機能（気相部）と同様に、作業に

よる液相への影響の確認・調査の観点から、循環水系のモニタリングや既設の水処理設備での入口放射性物質濃度の低減を目的とした設備の追設、設置等について、廃炉・汚染水対策事業の成果を基に、東京電力のエンジニアリングにて検討が進められている。 α 核種を含めた廃液の状況変化のモニタリング結果を基に、徐々に燃料デブリ取り出しの規模を拡大していく。なお、原子炉建屋内水位を地下水水位より低く維持し、地下水への冷却水の流出を防止することやPCV内水位を適切に管理することが求められ、この点も考慮して安全システムは構築される。

③ 冷却機能の維持

燃料デブリは崩壊熱を発生しており、例えば、2号機では最大69kWの発熱があると推定されている。現状、原子炉注水による循環冷却を行うことで、100℃未満（冷温停止状態）を維持している。

この冷却機能の維持に当たり、当面取り組むべき技術課題として、各作業が実施可能なPCV内部温度目標の設定や各作業中の冷却機能への異常発生を想定した対応策等がある。基本的な対応策は早期の復旧や機動的対応等により冷却を継続することであるものの、異常発生時の時間余裕等を基にPCV内部状態の変化を評価し、機器の回収等、異常発生時の対応策・手順等を検討しておく必要がある。

また、燃料デブリ取り出し作業時には、ダストの飛散抑制の観点から、水をかけながら燃料デブリを切削するなどの加工を行うことも考えられ、PCV内部の水位管理や発生する汚染水管理にも留意が必要である。

これらのことから、燃料デブリ取り出し等の作業が既設の循環水冷却・浄化システムとその冷却機能にどのような影響を与えるか、状態を監視しながら慎重に進められるよう、監視パラメータ、判断基準等をエンジニアリングで計画し、準備しておく必要がある。

なお、将来的に燃料デブリ量の低減に伴って崩壊熱量が低減した場合を想定し、冷却水の注入による冷却が不要となる可能性についても留意しておくべきである。

④ 臨界管理

福島第一原子力発電所の推測される燃料デブリの存在状態より、工学的に見て臨界が起こる可能性は低いと考えられるが、取り出し規模を拡大していくにあたり、燃料デブリの形状等を変化させる可能性があることを考慮しなければならない。燃料デブリ取り出しの作業計画を検討するにあたり、確実に臨界の発生を防止し、万が一の臨界を想定した場合にも速やかな検知・停止が行われるよう適切な管理方法を確立する必要がある。

取り出し初期においては、燃料デブリの形状を大きく変化させない方法や加工量制限しながら取り出しを行う。取り出し規模を拡大していく段階では、中性子吸収材の投入準備や作業前の未臨界度測定や燃料デブリ周辺の中性子信号の変動量を確認することによる監視などの方策を組み合わせ、取り出し量の増加に応じた臨界管理を実施するための技術開発が進められている。

⑤ PCV・建屋の構造健全性の確保

PCV、RPVペデスタル等の主要機器と原子炉建屋に関して、事故後、東京電力の検討や廃炉・汚染水対策事業において、構造健全性等の評価が進められた。その結果、主要機器と原子炉建屋等が一定の耐震裕度を有していることが確認されている。

今後は、既設の主要機器と原子炉建屋等、及び、燃料デブリ取り出しのために今後新設する機器と設備（以下「設備」という。）と建屋（既設設備・建屋の改造部を含む）が、要求機能を満足し、比較的長期にわたる燃料デブリ取り出しにおいて、①作業を安全に実施できること、②地震

と津波をはじめとする外部事象に対して所要の安全性を確保できることが必要である。また、③長期的な保守管理を前提としつつ、④今後の PCV 内部調査やデブリ分析結果等で得られる新たな知見を燃料デブリ取り出し設備の設計や工法の検討にフィードバックすることが重要である。

また、今後の設計の進捗により、燃料デブリ取り出し時の荷重条件（新設される設備の配置、大きさ、重量、PCV/生体遮蔽壁への開口の新設等）が具体化される。設備と建屋の構造健全性の確保に向け、サイトの状況を反映しつつ、それらの最新の設計情報に基づいて、着実に検討を進めることが求められる。

⑥ 作業時の被ばく低減等

中長期ロードマップ、東京電力の廃炉中長期実行プランに沿い、作業エリア・アクセスルートの作業環境の改善として、原子炉建屋内の干渉物撤去、線量低減が進められている。今後、燃料デブリ取り出し関連作業として、高線量の設備等の撤去などが計画されており、作業時の被ばく低減が課題である。

主な作業エリアは原子炉建屋内等の高線量区域である上、内部被ばくの際の線量寄与が大きい燃料デブリ由来の α 放射性核種を含む核燃料物質等を取り扱うことになるため、被ばく低減には、より一層の外部被ばく管理及び内部被ばく管理が重要となる。

特に、原子炉建屋内の作業員の被ばく低減については、作業対象範囲の周囲の寄与も含めて線量分布、汚染状況について十分な調査を行い、線源位置、強度を可能な限り特定するとともに、法令で定められた作業員の被ばく線量限度に対する裕度も考慮して目標線量率を設定した線量低減計画を立てることが重要である。高線量区域では、線量限度に従う作業時間と作業達成に必要な作業時間について、可能な限り総被ばく線量を抑制するよう計画することが重要である。

今後、一連の作業プロセスの中での α 放射性核種に対し、空气中及び水処理系への拡散にも備えた閉じ込めや漏洩検知ができる管理方法、設備が必要になる。取り出し規模の更なる拡大に向けて、情報を共有し、迅速に次の作業計画へフィードバック可能なデータベース等を整備し、また、作業員の被ばくが個人に偏ることがなく、作業員全体の被ばくも低減できる長期的な作業計画を作成し、被ばく管理を適切に行っていく必要がある。

b. 燃料デブリ取り出し工法に係る技術課題

① アクセスルートの確保

燃料デブリ取り出しに係る機器・装置の搬入、設置、搬出、燃料デブリや廃棄物の移送のためには、アクセスルートの干渉物が撤去されるとともにこれらの作業が可能な程度に原子炉建屋内の線量が低減されていること、すなわち、アクセスルートが構築されていることが必要である。燃料デブリへのアクセスルートを構築するために PCV 等に新たな開口を設ける場合などには、PCV 及び RPV からの放射性物質の放出抑制、既存の構造物の健全性維持に対しても留意が必要である。

試験的取り出し、段階的な取り出し規模の拡大に向け、東京電力において、2 号機 X-6 ペネ等からのアクセスルート構築の具体的なエンジニアリング検討が進められている。

一方、取り出し規模の更なる拡大に向けては、これまでの廃炉・汚染水対策事業における研究開発成果を踏まえ、PCV 側面開口部から燃料デブリに到達するまでのアクセスルート構築の検討が進められている。アクセスルート構築には新設の重量構造物と PCV 側面開口部の接続部構造の閉じ込め、遮へいや地震変位への対応が課題である。また、オペフロからの上アクセス工法について、干渉する構造物を一体または大型で取り出し、閉じ込め、遮へいを確保して搬送する方法等によるスループットの向上の検討が進められている。

今後、上記の課題も踏まえ、各段階で得られたデータから、次段階において構築されるべきアクセスルートを具体化していく必要があり、規模拡大にむけた研究開発を進めていくことが重要である。

② 機器・装置の開発

燃料デブリを取り出すための機器・装置は、安全・確実・効率を重点において開発する必要がある。これらの機器・装置は、現場状況に柔軟に対応するために、耐放射線性、保守性、遠隔操作性、高い信頼性、トラブル発生時に以降の作業を妨げない救援機構、燃料デブリ取り出しの効率性などを考慮する必要がある。

試験的取り出し、段階的な取り出し規模の拡大用の装置は、廃炉・汚染水対策事業の研究開発として進めてきている。段階的な取り出し規模の拡大以降については、その開発成果を東京電力が引き継いで実現をしていくことが必要である。東京電力は2号機に適用するロボットアーム等のエンジニアリングを進めるとともに、それら遠隔装置を使用した燃料デブリ取り出しの運転に向けた教育・訓練の準備を進めている。

取り出し規模の更なる拡大用の機器・装置については、効率向上のための工法、燃料デブリの様々な状態に応じた取り出し・取扱システム、燃料デブリの加工で発生するダストの集塵システム等の開発が進められている。

開発の進め方としては、先行する調査、取り出し作業によって得られる情報を踏まえ、新たに発生した重要課題に対しては開発を継続していくことが必要である。開発された機器・装置については、実際に現場において安全確実に性能が発揮できることを確認するためにモックアップ試験による検証を重ねる必要がある。モックアップ試験は、不確定要素を多分に含む過酷な現場環境を模擬した施設で実施する必要がある。そのためNDFと東京電力は、遠隔モックアップ試験計画の進め方等について検討を進めている。

③ 系統設備・エリアの構築

安全機能の確保を前提として、過度な設備仕様とならないよう配慮しつつ系統設備等の構築について検討、その成果に基づいて設備を追設する等の必要な処置を講じ、適正に運用していくことが求められる。検討においては、設備の敷設、運転・保守管理に加え、作業員被ばく低減のための遮へい体等も考慮し、十分なエリアが確保され、必要とされる環境条件を満たす必要がある。

この系統設備には、気相部の閉じ込め機能の構築で要求される負圧管理システム、液相部の閉じ込め機能や冷却機能の維持で要求される循環水冷却・浄化システム、臨界管理で要求される臨界管理システムなどがある。また、燃料デブリ取り出しに当たって必須であるPCV内部状況の監視のための計測システム（圧力、温度、水位、放射線等）の具体化は重要な課題であり、これらを統合した安全システムの構築に向けて、東京電力によるエンジニアリングにて検討が進められている。

また、燃料デブリ取り出し装置・関連機器や系統設備を設置するエリアの構築については、各システム設置に必要なスペースの算出が進められており、原子炉建屋内の高線量エリアの取扱や他作業との干渉も考慮し、既存建屋以外への設置も含めて検討が進められている。

c. 燃料デブリの安定保管に係る技術課題

① 燃料デブリの取扱（収納・移送・保管）

燃料デブリ取り出し開始までに、未臨界維持、閉じ込め機能、水素発生対策、冷却等の安全機能を備え、取り出した燃料デブリの収納から移送、保管までの一連のシステムを構築する必要がある。そのため、以下の検討が進められている。

- ・ 収納缶の基本仕様（全長や内径等）の策定と、収納缶の構造検証試験の計画とその実施
- ・ 燃料デブリからの現実的な水素ガス発生予測法の検討とその結果を用いた収納缶の排気構造の仕様の検討及び安全な移送条件の検討
- ・ 燃料デブリに適用可能な乾燥技術の開発と、その技術を用いた乾燥システムの検討

今後、これらの検討結果に基づいて、1日あたりの燃料デブリ取り出し量や収納缶への充填率を考慮した燃料デブリの収納から保管までのシステムおよび機器/設備を関連する他のプロジェクトと協調して具体化していく必要がある。また、燃料デブリの収納から保管までの設備・システムの具体化に際して、保障措置に対する要求への対応も含める必要がある。

段階的に規模を拡大した取り出しにおいて収集・蓄積できる水素発生量等の各種計測データや、構内移送容器の受け入れから一時保管までの作業における燃料デブリの取扱に関する知見や経験を、更に規模を拡大した取り出し時の燃料デブリを安全・確実・合理的に収納・移送・保管するための設備、施設の設計に反映することが重要である。

なお、中長期ロードマップにおいては、取り出した燃料デブリの処理・処分については燃料デブリ取り出し開始後の第3期に決定することとされている。

② 燃料デブリ取り出し作業時における仕分けについて

燃料デブリ取り出し作業、その準備及び後片付け等の各作業段階において燃料デブリのほかに核燃料物質が付着・融合した干渉物や構造物等が取り出される。このため、燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け基準、必要な計測技術の開発等を行っていくことが重要である。

しかしながら、燃料デブリの取り出しに先立って仕分けに必要なPCV内の燃料デブリ及び構造物などの分布やそれらの性状に関する情報を蓄積・整理・分析することは現実的に困難である。そのため、核燃料物質の量やその含有濃度の測定結果に基づいて燃料デブリを仕分けすることを目指すことが望ましいと考えられる。これに応える第1歩として、仕分けを保管までのどの作業プロセスで実施するか（シナリオの検討）と、核物質の量または含有量を測定できる可能性のある技術の調査が実施された。これらの検討では、PCVから取り出される物質の核燃料物質質量または濃度を計測・推定することは現時点で難度が高いとされた。

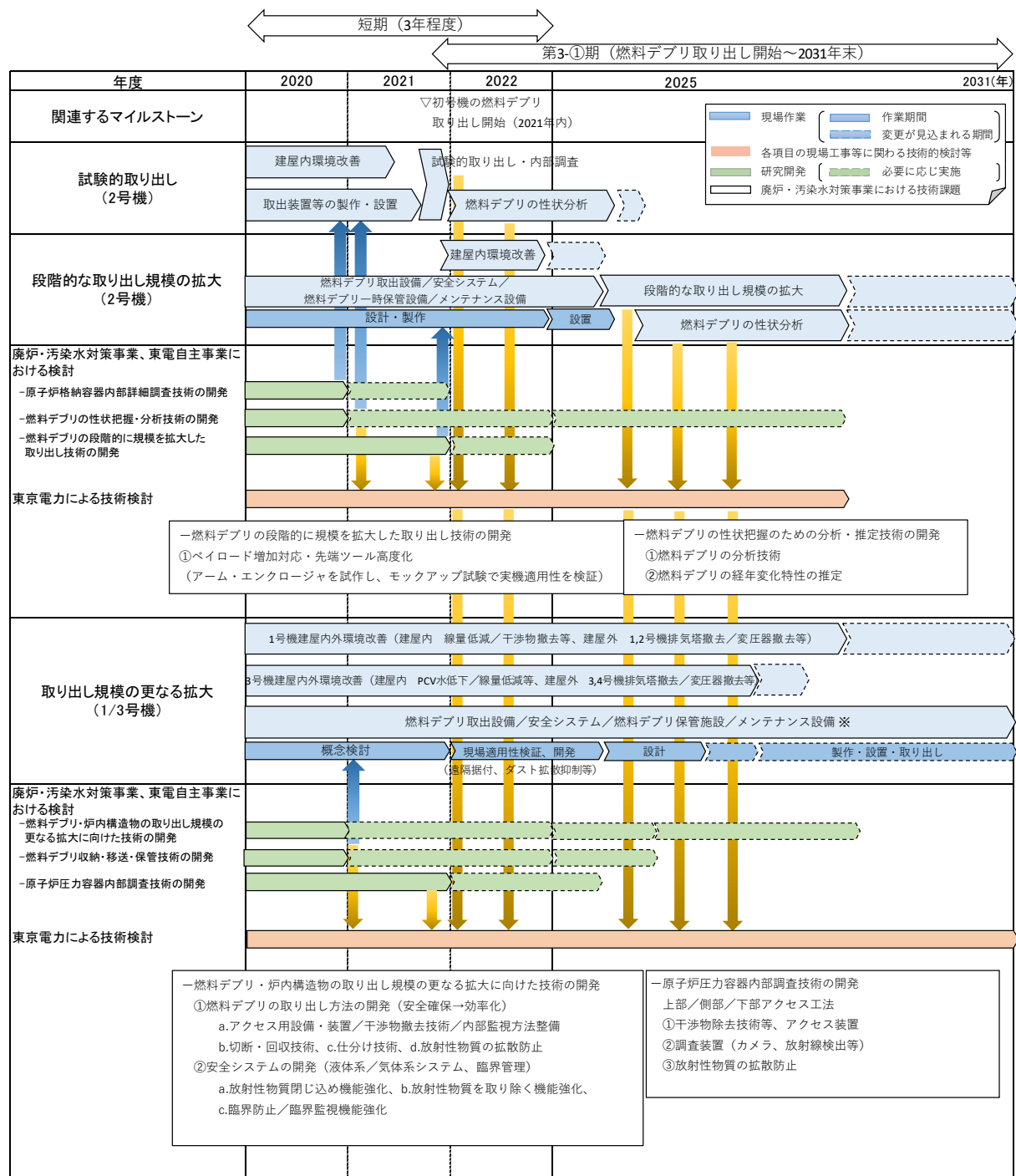
しかしながら、更に規模を拡大した取り出し時において、燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け基準と計測技術・装置を開発しておくことは、燃料デブリとして保管すべき物量の低減を可能にする等、合理的で安全な廃炉事業の実現に貢献できると判断される。このため、引き続き、燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けの基準とそれに必要な計測技術・装置の開発を継続することが望ましい。更に、今後の内部調査、試験的取り出し、段階的な取り出し規模の拡大等で得られる各種試料の分析等の知見や情報を用いて仕分けの方法、技術の実機適用性および実効性を高めていく作業を継続していくことが重要である。

③ 保障措置方策検討

取り出した燃料デブリに対する計量管理や保障措置は前例のないことであり、その検討や現場への適用に際して東京電力が技術的課題に直面する可能性があるため、NDFはエンジニアリング

的視点も踏まえながら、この技術的課題の解決に向けた検討について支援を行っていくとともに、保障措置の適用に係る設備対応が廃炉工程に影響を与えないよう、プロジェクト進捗状況を東京電力と情報共有する。

本節に述べた主な技術課題と今後の計画を整理すると、図7のとおりである。



※ 3号機を先行して検討を進め、1号機に展開することを想定

図7 燃料デブリ取り出しに係る主な技術課題と今後の計画（工程表）

2) 廃棄物対策

i. 目標と進捗

(目標)

- (1) 当面 10 年間程度に発生する固体廃棄物の物量予測を定期的に見直ししながら、発生抑制と減容、モニタリングをはじめ、適正な保管管理計画の策定・更新とその遂行を進める。
- (2) 性状把握から処理・処分に至るまで一体となった対策の専門的検討を進め、2021 年度頃までを目処に、固体廃棄物の処理・処分方策とその安全性に関する技術的な見通しを示す。

<「固体廃棄物についての基本的考え方」のポイント>

① 閉じ込めと隔離の徹底

人が有意な被ばくを受けないように、放射性物質と人の接近を防ぐための閉じ込めと隔離を徹底

② 固体廃棄物量の低減

廃炉作業に伴って発生する固体廃棄物について、可能な範囲で物量を低減

③ 性状把握の推進

固体廃棄物の処理・処分の検討を進めていくための、分析試料数の増加に対応した適切な性状把握

④ 保管・管理の徹底

発生した固体廃棄物について、その性状を踏まえた安全かつ合理的な保管・管理
福島第一原子力発電所の敷地内で確実に保管・管理できるよう、保管容量の確保

⑤ 処分を念頭に置いた先行的処理方法の選定手法の構築

処分の技術的要件が決定される前に、安定化・固定化するための処理（先行的処理）の選定手法を構築し、先行的処理方法を選定

⑥ 固体廃棄物の管理全体を俯瞰した効率的な研究開発の推進

性状把握、処理・処分の研究開発の各分野が連携し、固体廃棄物の管理全体を俯瞰した上で、必要な研究開発課題を確認

⑦ 継続的な運用体制の構築

固体廃棄物の管理全体を安全かつ着実に継続していくため、関連する施設の整備や人材の育成を含めた継続的な運用体制の構築

⑧ 作業員の被ばく低減対策等

関連する法令に基づいた被ばく管理、健康管理、安全管理を徹底

(進捗)

福島第一原子力発電所の廃炉に伴い発生する固体廃棄物は、多種多様な性状を有する廃棄物が大量に存在することから、性状把握のための分析能力の向上に加えて、柔軟で合理的な廃棄物ストリーム（性状把握から処理・処分に至るまで一体となった対策の流れ）を開発している。具体的には、中長期ロードマップで取りまとめられた固体廃棄物についての基本的考え方に沿って、関係機関が各々の役割に基づき取組を進めており、固体廃棄物の性状把握から処理・処分に至るまで一体となった対策の専門的検討は、NDF を中心に進めている。

(1) 保管・管理

固体廃棄物の適切な保管・管理を行うため、東京電力は保管管理計画を公表し、今後 10 年程度の固体廃棄物の発生量の予測とそれに伴い必要となる廃棄物関連施設等の設置等の方針を示している。

この計画に基づき、2028 年度内までに、水処理二次廃棄物及び再利用・再使用対象を除くすべての固体廃棄物の屋外での保管を解消するとしており、それに必要な設備の整備を進めている。廃棄物の発生量低減の観点から、敷地のバックグラウンド相当のコンクリート瓦礫については、路盤材として再利用が行われており、表面線量率が極めて低い金属・コンクリートやフランジタンクの解体タンク片等は、固体廃棄物貯蔵庫外の一時保管を当面継続しながら、再利用・再使用について検討されている。

水処理二次廃棄物についても、建屋内への保管に移行する方針としており、吸着塔類の保管施設として、大型廃棄物保管庫の建設が進められている。また、高い流動性から保管・管理におけるリスクが比較的高い、多核種除去設備等で発生したスラリー及び除染装置スラッジについては、前者については安定化（脱水）処理（2022 年度の運用開始）、後者については、現在の保管場所である建屋内地下貯槽から、高台への移送（2023 年度完了予定）を行うこととしている。

燃料デブリ取り出しに伴って発生する廃棄物に関しては、廃炉・汚染水対策事業により、種類・物量を評価するとともに、保管方法、収納方法及び容器の仕様について水素ガス発生対策も含めて検討が進められている。

(2) 処理・処分方策の検討

固体廃棄物の処理処分方策に関しては、中長期ロードマップにおいて、2021 年度頃までを目処に、処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通しを示すこととされている。固体廃棄物は取組の進捗に伴い全体像が明らかとなるため、2021 年度頃は引き続き必要な性状に関する情報を蓄積する段階にある。これを念頭に、技術的見通しのための具体的目標を整理すると、次のとおりとなる。

- 福島第一原子力発電所で発生する固体廃棄物の性状と物量及びそれらに適用可能な処理技術を踏まえた安全かつ合理的な処分概念を構築し、諸外国の例を踏まえつつ処分概念の特徴を反映した安全評価手法を整備すること
- 性状把握のための分析・評価手法が明確になっていること
- 水処理二次廃棄物等いくつかの重要な廃棄物ストリームに対して処分を念頭に置いた安定化、固定化のための実機導入が期待される処理技術が明確になっていること
- 上記をベースに、処分の技術的要件が決定される前に、安定化・固定化するための処理（先行的処理）の方法を合理的に選定する方法を構築すること
- 固体廃棄物のうち、処分を念頭に置いた処理技術が明確となっていないものについては、2021 年度頃までに開発した一連の手法を用いて処理・処分方策を設定できる見通しがあること
- 固体廃棄物の廃棄体化前までの保管・管理に係る課題と対策が明確になっていること

これらの達成を目指し、廃炉・汚染水対策事業により、工学規模試験装置等を用いた各種処理方法（高温・低温処理）の適用性の確認、廃棄物の性状と適用可能な処理技術を踏まえた処分概念の構築とその安全評価手法の整備を行っている。

また、それらの検討に必要な固体廃棄物の性状を効率的に把握するため、分析手法の簡易・迅速化、低線量の廃棄物試料を分析する放射性物質分析・研究施設第 1 棟の整備を中心とした分析

能力の向上、解析的インベントリ推定手法の精度向上を進めている。ガレキ類、汚染水、水処理二次廃棄物などの試料採取・分析が実施され、各分析対象の核種組成の相関が徐々に明らかになりつつある。

ii. 主要な課題とそれを実現する技術戦略

(1) 性状把握の推進及び分析体制・技術力の強化

性状把握を着実に推進するため、ハードウェアとしての施設の整備に加え、分析人材の育成及び分析技術力の継承・強化などが重要な課題である。当面は、放射性物質分析・研究施設の整備、分析方法の簡易・迅速化等の成果の反映を進めていくとともに、分析人材の育成を計画的に進めていくことが重要である。

(2) 保管・管理

高線量廃棄物の安全な保管管理では、水素発生対策が課題となることから、ベント付き容器や乾燥技術に関する概念の検討が進められている。また、保管が長期化した場合、保管容器の健全性評価が課題となることから、その評価手法及び腐食等の発生に関する対策の検討を進める。

(3) 処理・処分概念の構築と安全評価手法の開発

先行的処理方法としての候補技術を選定するため、合理的で実現可能性のある処理技術の抽出及び、これに対応した処分時の安全評価手法の開発を進める。

処理技術の抽出については、固化成立性の確認の他、供給系や排気系を含めた処理システム全体としての技術的成立性の確認を行う必要がある。また、処分時の安全評価手法を構築するため、必要な項目・情報を収集・整理する。

また、処分方策については、福島第一原子力発電所の廃棄物の物量が多く、多様な性状を有し、不確実性が大きいという特徴を考慮し、海外の事例を参考にさまざまな可能性を検討する。

(4) 廃棄物ヒエラルキーの考え方に基づく更なる方策の検討

英国や米国では廃棄物ヒエラルキーの概念（①発生量抑制、②廃棄物量最小化、③再使用、④リサイクル、⑤処分の順に望ましい方策）に基づき多くの施策が実施されている（図8）。福島第一原子力発電所でもこの概念に基づく対策が実践されつつある。合理的な廃棄物管理を進める上で、他国の先進事例を基に更なる可能性を検討する。

これらの取組の成果に基づく処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通しについては、研究開発及び東京電力によるエンジニアリングの成果等を踏まえ、2021年度頃までを目処に示すこととする。

本節に述べた技術課題と今後の計画を整理すると、図9のとおりである。

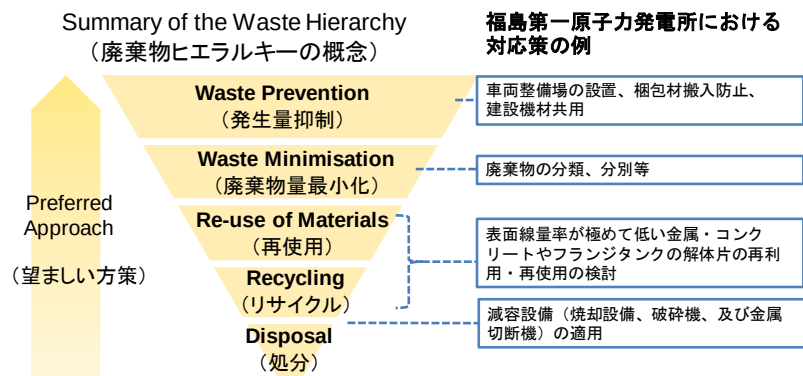


図 8 NDA における廃棄物ヒエラルキーの概念⁵と福島第一原子力発電所における対応策

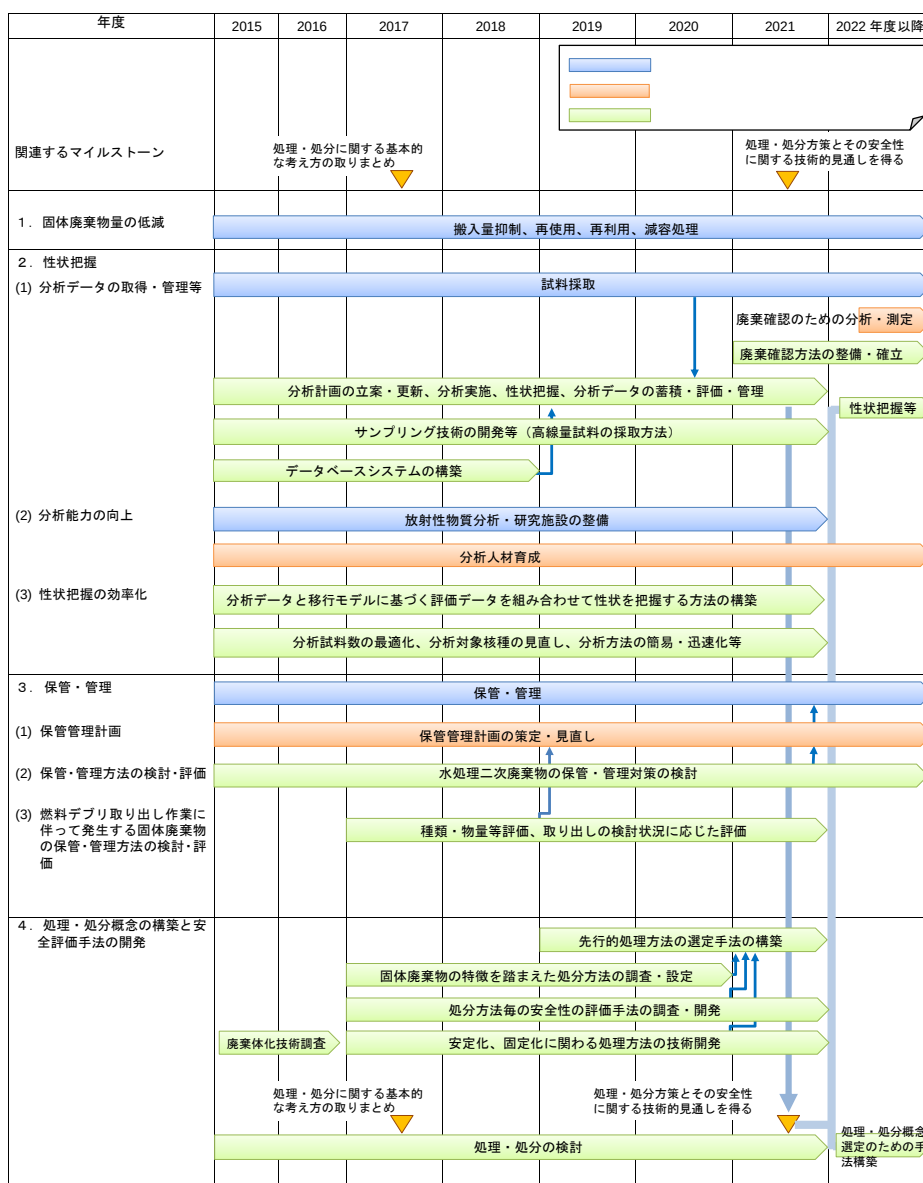


図 9 廃棄物対策に係る主な技術課題と今後の計画（工程表）

⁵ NDA, Nuclear Decommissioning Authority Strategy Effective from April 2016 (2016), p.60, Figure 7. Summary of the Waste Hierarchy. を加工したもの。

3) 汚染水対策

i. 目標と進捗

(目標)

- (1) 汚染水問題に関する3つの基本方針（汚染源を「取り除く」、汚染源に水を「近づけない」、汚染水を「漏らさない」）の下、構築された水位管理システム運用を継続しつつ、2025年以内に汚染水発生量を100m³/日以下に抑制するとともに、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。
- (2) 今後本格化する燃料デブリ取り出し等の廃炉工程との関係を整理するとともに、中長期を見据えた汚染水対策の在り方についての検討を進める。

(進捗)

循環注水を行っている1～3号機原子炉建屋及び浄化処理のため汚染水を一時的に貯水しているプロセス主建屋及び高温焼却炉建屋を除く、建屋内滞留水の処理を2020年以内に完了させるため、3つの基本方針に基づき、より安定的な運用に向けた取組が進められている。

汚染源を「取り除く」については、高濃度の汚染水を浄化する第三セシウム吸着装置(SARRY2)が2019年7月から本格運用を開始し、既設の2基(KURION、SARRY)と合わせて3基体制での安定的な浄化処理が可能となっている。

汚染源を水に「近づけない」については、陸側遮水壁、サブドレン等の重層的な汚染水対策により、原子炉建屋周辺の地下水位が低位で安定的に管理されるとともに、周辺の敷地舗装や屋根破損部の補修により、降雨時の汚染水発生量の増加も抑制傾向となっている。これらの対策により、汚染水発生量は、対策前の約540m³/日(2014年5月)から約180m³/日(2019年度)まで低減しており、2020年以内には汚染水発生量を150m³/日程度に、2025年以内には100m³/日以下に抑制することを目指している。

汚染水を「漏らさない」については、多核種除去設備等で浄化した水は2019年度からは全て溶接型タンクで保管されており、タンクからの漏洩リスクは低減している。フランジ型タンクの底部に残った多核種除去設備の残水は処理が完了し(2020年7月)、現在は濃縮塩水の残水約500m³(2020年8月末時点)のみが貯蔵されている。また、海側遮水壁の保守、地下水・港湾のモニタリングにより、汚染拡大防止に向けた取組と監視が行われている。

以上の取組により、1～3号機原子炉建屋、プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋を除く建屋滞留水の処理は2020年以内に完了する計画であり、汚染水対策は、事故直後の緊急的対策を要する状況から比べると一定の安定的な状態に移行していると考えられる。

また、多核種除去設備、いわゆるALPS等で浄化処理した水の取扱いについては、技術的な観点に加え、風評など社会的な影響も含めた総合的な検討が国の小委員会で行われ、2020年2月に報告書が公表された。現在、当該報告書を踏まえ、政府としてALPS処理水の取扱い方針を決定するため、地元自治体や農林水産業者を始めとした幅広い関係者の御意見を伺う場を2020年4月から開催するなど、広く国民から御意見を聴く機会を設けている。

ii. 主要な課題とそれを実現する技術戦略

(1) 今後の建屋内滞留水処理における課題

2019年3月以降の調査により、2、3号機原子炉建屋のトーラス室底部では比較的高い全 α が検出されており、2022年度～2024年度に原子炉建屋の滞留水を2020年末の半分程度に低減させていく際には、 α 核種の拡大防止は重要な課題となる。対策としては、各建屋・水処理設備の α 核

種濃度の監視、性状分析を強化するとともに、 α 核種を含むスラッジ状沈殿物の除去方策の確立に向けた研究開発が必要である。

また、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋においては、震災後に地下階に設置されたゼオライト土嚢が高線量状態で存在することが2019年12月に判明した。土嚢表面の最大線量率は、プロセス主建屋では約3000mSv/h、高温焼却炉建屋では約4000mSv/hと高いため、今後これらの建屋の滞留水処理を完了させるためには、線量緩和対策が重要な課題となる。現在、ゼオライト等を吸引回収し容器等で保管する遠隔回収方法と、ゼオライト等を地下階で集積し容器等で仮保管する遠隔集積方法が検討されているが、作業時に受ける被ばく線量や、長期的な安全性、工期などから総合的に評価し、適切な方法を選定していく必要がある。

(2) 燃料デブリ取り出し等の廃炉工程を見据えた汚染水対策の課題

燃料デブリ取り出しにおいて、試験的取り出し、段階的な取り出し規模の拡大、取り出し規模の更なる拡大で得られる様々な情報、経験、実績を踏まえ、汚染水処理のシステム全体の検討を行うことが重要な課題となる。燃料デブリの切削・加工等に伴い、 α 粒子を含む燃料デブリ由来物質が水処理設備に混入する可能性が否定できないため、水処理設備のモニタリングの強化や、 α 粒子捕集設備の設置、臨界監視などの対策をとる必要がある。

取り出し規模の更なる拡大においては、水処理設備の処理容量の拡大や、持続的な安定運転を実現するためのシステム構築が課題となる。ここでは、 α 粒子やその他放射性物質の除去方式だけでなく、設置場所を考慮した設備の小型化、高線量下での運転保守、既設の浄化設備の利用方法などを検討しておくことが必要である。

また、汚染水対策の効果を長期にわたって維持するため、設備の定期的な点検、更新を確実に行うことが必要である。さらに、津波、豪雨など大規模自然災害リスクについては、2020年4月に内閣府より公表された「日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデルの検討について（概要報告）」を受け、津波影響の再評価を行い、新たに日本海溝津波防潮堤を2023年度までに設置する計画である。今後、その再評価結果等を踏まえレジリエンス（強靱性）に配慮した対策を実施していく必要がある。

現在の汚染水対策は一定の安定的な状態に移行しつつあるが、燃料デブリ取り出し完了までには長期の期間が必要となる。中長期を見据え、現在の汚染水対策を改めて俯瞰し、より安定的な汚染水対策の在り方やより適切な維持・管理についても検討を進めることが重要である。

本節に述べた技術課題と今後の計画を整理すると、図7及び図10のとおりである。

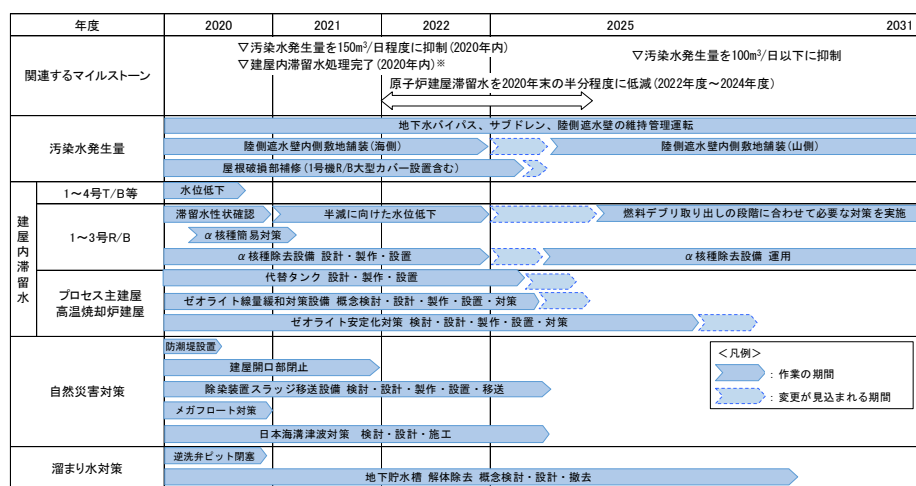


図 10 汚染水対策に係る主な技術課題と今後の計画（工程表）

4) 使用済燃料プールからの燃料取り出し

i. 目標と進捗

(目標)

- (1) 周辺地域で住民の帰還と復興が徐々に進む中、放射性物質の飛散防止をはじめとしたリスク評価・安全確保を確実に行之、1号機は2027～2028年度、2号機は2024～2026年度にプール内燃料取り出しを開始する。3号機については、2020年度内にプール内燃料の取り出しを完了する。
- (2) 事故の影響を受けた1～4号機の燃料については、使用済燃料プールから取り出したのち共用プール等に移送し適切に保管することにより、安定管理状態とする。なお共用プール容量確保に向け、共用プールに保管されている燃料を乾式キャスク仮保管設備へ移送・保管する。
- (3) 取り出した燃料の長期的な健全性の評価及び処理に向けた検討を行い、将来の処理・保管方法を決定する。

(進捗)

東京電力は、中長期ロードマップ及び廃炉中長期実行プランに示された新たな作業計画に基づき取組を進めている。

1号機は、水素爆発により、オペレーティングフロア（以下「オペフロ」という。）上に屋根板、建屋上部を構成していた鉄骨等の建築材及び天井クレーン等がガレキとして崩落している。住民の帰還が進む中、ダスト飛散リスクの更なる低減の観点から、1号機のプール内燃料取り出しについては、オペフロ全体を大型カバーで覆い、カバー内においてガレキ撤去やプール内燃料取り出しを行う工法への変更が行われた。現在、大型カバー設置に向けた準備を進めるとともに、オペフロのガレキ撤去作業等を継続している。2号機は、1号機と同様にダスト飛散リスクの更なる低減の観点から、オペフロ上部を解体せず、原子炉建屋南側からアクセスする工法が採用され、現在、準備を進めている。また、1/2号機周辺環境整備の一環として行われていた1/2号機共用排気筒の解体は、地元企業が元請として取り組み、2020年5月に作業を終了した。

3号機は、2020年度内の取り出し完了に向け、安全最優先に取り出し作業を進めている。2020年8月現在、315体の取り出しが行われ、共用プールへの移送を継続している。

5、6号機は、当面、当該号機の使用済燃料プールにおいて適切に保管した後、1～3号機の作業に影響を与えない範囲で燃料取り出し作業を実施することとしている。なお、5、6号機を含むプール内燃料を全て取り出し共用プールに保管するためには、共用プールの空き容量を確保する必要があり、共用プール内燃料の一部を乾式キャスク仮保管設備へ移送する必要がある。この実現のために、東京電力は乾式キャスク仮保管設備の増設計画や新燃料の所外搬出計画に取り組んでいる。

これらの取組を進め、2031年内に全ての号機の燃料取り出しを完了する計画である。

ii. 主要な課題とそれを実現する技術戦略

1、2号機については、決定された工法の実現に向けて、着実に作業を進めることが必要である。

(1) プール内燃料の取り出し

プロジェクトを進めるに際しては、作業に伴う安全性の評価を尽くし、必要十分な安全の確保を確認したうえで、技術的な確実性、合理性、作業工程に関わる迅速性、現場適用性、プロジェクト上のリスク等を総合的に考慮して、課題への対応を行うことが基本である。

1号機は、今後、大型カバーの設計・設置やオペフロ上部のガレキ等の残置物の撤去が進められることになる。オペフロ上部には、天井クレーンが不安定な状態で存在しており、燃料交換機への崩落、及びそれに伴うこれらの使用済燃料プールへの落下を防止するため、安全かつ確実に天井クレーンを撤去することが主要な課題の一つである。そのため、現在進めている天井クレーンの撤去方法の検討に当たっては、安全評価を尽くすことが前提であり、①リスク項目を抽出し得る具体的な作業手順及び作業計画の作成、②そこから想定されるリスクシナリオとその対策、③作業員被ばくなどのオペレータ視点に立った考慮事項の抽出、④合理性や他の作業への影響などの観点を踏まえ、総合的に検討していくことが重要である。なお、事故前より保管されている被覆管の破損した燃料について、具体的な取扱計画の検討を進めていく必要がある。

2号機は、オペフロ南側の開口から、これまで国内原子力施設では経験のないブーム型クレーン式の燃料取扱設備を用いて、プール内燃料の取り出しを行う。新たな設備であることから、①適切な裕度を持たせた設計スケジュールの設定、②現場状況と操作方法を十分に模擬したモックアップ試験の実施及びその結果の設計・製作への確実なフィードバック、③遠隔操作により取り出しを行うことから事前に設備の操作・機能性の十分な習熟などが重要である。

3号機は、2020年度下期からハンドルの変形が確認されたプール内燃料の取り出しが予定されている。燃料ラックから安全に吊り上げて輸送容器に確実に収納するための準備や品質保証の体制整備及び予備品の確保等の対応を確実に行っていくとともに、4号機の経験も含め、得られた知見を蓄積し、今後の1、2号機の燃料取り出しに活かしていくことが必要である。

(2) 将来の処理・保管方法の決定

プール内燃料の将来の処理・保管方法は、事故時に受けた海水やガレキの影響を考慮した上で決定することが必要である。これまで、4号機から取り出した燃料について評価を行い、海水やガレキの影響は少ないと見通されているものの、今後取り出す燃料の状況を踏まえ、長期的な健全性の評価及び処理に向けた検討を進め、将来の処理・保管方法を決定する必要がある。

本節に述べた技術課題と今後の計画を整理すると、図11のとおりである。

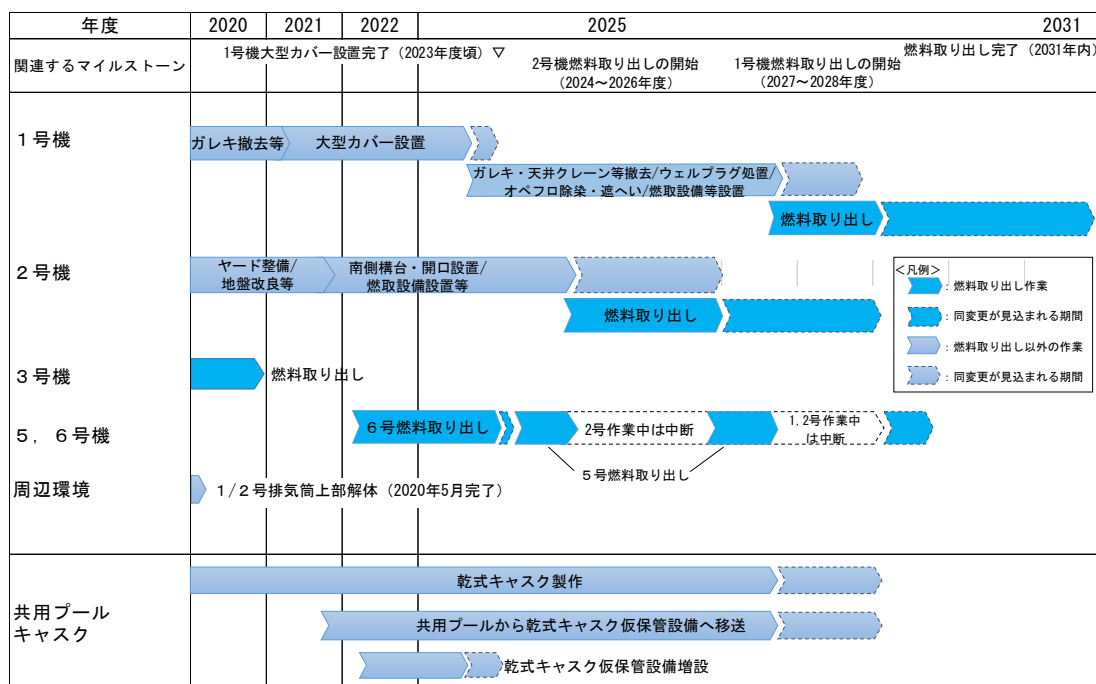


図11 プール内燃料取り出しに関する主な技術課題と今後の計画（工程表）

5) 廃炉の円滑な推進に向けた分析結果の活用

i. 分析の意義と現状

福島第一原子力発電所の廃炉作業を安全かつ着実に進捗させるためには、廃棄物や燃料デブリの取扱に要する分析施設や機能を構築・整備する必要がある。また、分析結果を各廃炉作業に効率的に活用していくための体制構築も重要である。

現在、東京電力は、5/6号機ラボ、化学分析棟及び環境管理棟の3箇所の施設を活用して、施設運営や廃炉作業の進捗に必要な分析を行うとともに、今後の廃棄物の処理・処分や燃料デブリ取り出しに係わるルーチン分析を円滑に行うために必要な分析施設の設置を計画している。

放射性物質分析・研究施設（施設管理棟、第1棟、第2棟）は、福島第一原子力発電所の廃炉に必須な分析施設として政府の補正予算により JAEA によって整備が進められており、得られた分析結果は、廃炉の円滑な推進、廃止措置に向けた放射性物質の確実な処理・処分方策とその安全性に関する技術的基盤の確立等に寄与することが求められる。

ii. 主な課題と戦略

分析結果は廃炉を円滑に進めるための様々な検討における不確実性の幅を小さくするための「重要な一駒」であることを正しく認識し、分析結果を効率的に収集・評価できる分析体制、分析施設や機能を構築・整備する必要がある。特に、取り出し工法の検討においては、安全確保を確認しつつ過剰な安全設計を緩和するために分析データが重要な役割を果たすことから、廃炉プロジェクトの上位に分析を位置付けることが極めて重要である。

現在、分析実施を計画している施設の役割分担は、廃炉の進捗に沿って求められる分析の中身、質、量等が変化していくことを考慮した上で各施設の特徴を踏まえて適切に最適化されるべきである。この際、分析需要が上振れするリスクを考慮して、施設の拡張性や運用の柔軟性を考慮しておくことが必要である。

さらに、上記の施設群を安定的に稼働するために必要な人的資源は不足しており、分析技術者の確保と維持の検討が必要である。この際には、上記最適化で必要とされる種々の分析業務に対して分析技術者に期待される資質をあらかじめ考慮し、求められる役割が適切に達成されるよう計画することが必要である。

廃炉の迅速化の観点から、放射性物質分析・研究施設等の構外輸送が不要な施設の運用においては「即時性」や「即応性」を求めることが重要である。特に未知な試料を対象とする燃料デブリ取り出し作業においては非常に困難な分析作業が想定されるが、遅滞ない分析によって廃炉作業に遅れを生じさせないという視点が重要であり、分析結果が、計装モニタリング・目視観察・その場計測・計算評価（シミュレーション）が与える内部状況の推測結果をベンチマークする機能があることにも着目するなど、分析結果と現場情報の総合的な利用を図り、合理的な分析計画を追求することが重要である。

廃炉事業の展開（工法・装置エンジニアリング、安全評価・安全設計、廃炉オペレーション）に沿って、求められる分析の中身、質、量等が変化していくことを考慮し、これに対応する組織や施設の役割分担を適切に設置して総合的な評価に基づく判断をしていくためには、東京電力自らが分析に関わる活動全体を管理・主導する積極的な体制を作っていくべきである。このような観点から、東京電力においては外部の専門家の協力も得て、廃炉作業に係る分析の全体戦略や分析計画の検討に早期に着手することが必要である。

2) 主な課題と戦略

i. 廃炉・汚染水対策事業における研究開発管理体制の強化

東京電力は、これまで至近の廃炉作業に係る研究開発に注力していたが、現在では廃炉中長期実行プランを公表するなど、研究開発においても、中長期的な計画に基づいた戦略的な取組に移行してきている。この状況を踏まえると、廃炉・汚染水対策事業は、東京電力によるニーズや現場適用を見据えた研究開発をより強化する必要がある。このため、今後の廃炉・汚染水対策事業に対する NDF と東京電力の関与を一層高めていくこととした。

具体的には、廃炉・汚染水対策事業において、プロジェクトの企画立案及び進捗管理の両方の機能を強化すべきという課題認識の下、NDF が廃炉・汚染水対策事業の事務局に参画する体制に移行するとともに、東京電力の現場適用者としての関与を明確化する体制とした。東京電力が研究実施主体と共同での交付申請を行うことで、現場適用性の観点からの要求を反映させるとともに、進捗管理を東京電力が自らのプロジェクト管理と連携して行っていく。

なお、東京電力はこのような仕組みを構築しつつ、併せて自らが行う研究開発の比重を高めていく努力が求められている。NDF は、東京電力と情報交換や意見交換によるコミュニケーション強化を行いつつ、ともに現場のニーズや適用性を考慮した案件を企画するとともに、研究開発の目的や成果の達成目標時期に合致した開発となるよう、研究開発の進捗状況を管理していく。

ii. 今後約 10 年間を見通した研究開発中長期計画の作成

中長期ロードマップで今後約 10 年間の方向性及びそれを支援する研究開発の推進が示されたが、これに対して、廃炉中長期実行プランも踏まえ、NDF と東京電力は燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大の達成に向け必要な研究開発の抽出とその実施を適切に管理するため、研究開発の今後約 10 年間の研究開発の全体を俯瞰した研究開発中長期計画を作成することとした。この研究開発中長期計画においては、燃料デブリ取り出しにおける各段階で現在想定される研究開発項目及び内容を東京電力の廃炉中長期実行プランと紐づけた形で明らかにしている。また、毎年度作成する次期研究開発計画は、この研究開発中長期計画に基づき策定し、各研究開発が廃炉工程のどこにどのように位置づけられるかを明確にする。研究開発中長期計画は、PCV 内部調査等の進展や燃料デブリの分析により明らかになった情報、研究開発の進展、東京電力の廃炉中長期実行プランの改訂等を踏まえ継続的に更新・拡充を図っていく。

iii. 廃炉現場と大学・研究機関におけるニーズとシーズのマッチング

基礎・基盤研究を担う大学・研究機関には、将来、理工学的知見を要する技術課題が発生したときに即応できる人材、知識・基盤を維持・育成していくことが期待され、大学・研究機関においても、廃炉現場が有する課題認識を強く共有しておくことが重要である。

廃炉現場の課題解決に資する基礎・基盤研究については、文部科学省及び JAEA/CLADS の英知事業を中心に優れた研究成果が得られているものもあり、その成果を廃炉現場に直接反映していくことは重要な課題である。これを実現するため、JAEA/CLADS の基礎・基盤研究の全体マップを活用しつつ、廃炉現場からのニーズと大学・研究機関のシーズのマッチングや得られた優れた成果の橋渡しを行うことが不可欠である。このような状況の下、2019 年度から東京電力において、大学の有する廃炉に関する技術シーズを発掘すべく、英知事業の成果も踏まえた新たな大学との共同研究が開始されるなど、政府（文部科学省、経済産業省）、JAEA/CLADS、NDF、東京電力など関係機関はニーズとシーズのマッチング及び成果の橋渡しの強化に向けて、さらに連携を強化していく必要がある。

5 技術戦略を支える取組

1) プロジェクト管理の一層の強化、廃炉の事業執行者として有すべき能力の向上

i. プロジェクト管理の意義と現状

(1) 廃炉中長期実行プランの策定

東京電力は、福島第一原子力発電所の事故以降、原子力災害対策特別措置法及び原子炉等規制法⁶に基づく要求や、廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議において決定された中長期ロードマップの目標工程に従い、廃炉事業を実施してきた。今回、事故後 10 年を迎えるにあたり、東京電力はこうした目標工程をどのように達成するのかを示した廃炉中長期実行プランを作成・公表することで、複雑かつ長期にわたる作業見通しを具体化するとともに、地元や社会に対する廃炉事業の透明化を図り、主体的に廃炉に取り組む姿勢を明らかにした。

福島第一原子力発電所の廃炉作業は不確実性が大きい事業であるものの、廃炉中長期実行プランを踏まえることで、研究開発、人材、調達についても中長期を見据えた計画を作成できるため、廃炉中長期実行プラン作成の意義は大きい。今後この廃炉中長期実行プランを効果的に役立てるためにも、新知見や現場状況などを踏まえて不断の見直しを行っていくことが重要である。

(2) プロジェクト管理の一層の強化

東京電力は、2020 年 4 月に福島第一廃炉推進カンパニーを組織改編することにより、プロジェクト管理型へ廃炉事業の転換を行った。しかし、東京電力はプロジェクト管理型組織として出発点に立ったところであり、プロジェクト管理体制の運用が課題である。

燃料デブリ取り出し等の複雑かつ重層的な大規模の廃炉事業を長期にわたり安全かつ着実に遂行するためには、エンジニアリング及び研究開発を一体的に管理するとともに、プロジェクトリスクを管理する機能の向上を加速させていくなどプロジェクト管理体制の一層の強化を行いながら、的確かつ効率的な運用を行う必要がある。

ii. 主な課題と戦略

(1) プロジェクト活動における「安全とオペレータ視点」の充実

工法や設備などの設計検討（エンジニアリング）のような取組を進める際に、特に技術的難易度の高い課題に対しては、工法や設備などを物理的に実現させることに重きをおく傾向がある。しかしながら、取組の成果を実際に現場で実現するためには、物理的な実現に加え、

- ・ 核燃料物質等という危険物を扱う⁷事業執行者としての「安全視点」
- ・ 福島第一原子力発電所廃炉の現場を熟知したオペレータ⁸が持つ「オペレータ視点」

が、当該の工法、設備に十分に反映されていることが不可欠である。

そのためには、工法、設備を現場で実現するまでのプロジェクト活動において、これらの視点が十分に反映される必要がある。十分な反映がなされなければ、結果として現場に適さない工法、設備等の成果がもたらされ、安全かつ安定的な廃炉を妨げてしまう。

⁶ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律

⁷ 燃料デブリは現在一定の安全状態にあるが、燃料デブリ取り出し作業はこの安定状態に対して積極的に外乱を与える行為となる。すなわち、燃料デブリ取り出し作業においては、 α 放射性物質を非密封状態で取り扱うことになること、また一時的に臨界リスクが高まる可能性があることから、その作業に当たってはこれまで以上に入念な作業管理（臨界管理、被ばく管理、運転管理、監視強化等）を必要とする。

⁸ オペレータとは現場（運転、保全、放射線管理、計装、分析等）を扱う人・組織の総称。

こうした事態に陥らないよう「安全視点」及び「オペレータ視点」をプロジェクト活動の上流で取り入れるための業務プロセスを早期に確立する必要がある。

(2) オーナーズ・エンジニアリング能力の向上

燃料デブリ取り出しのように得られた情報が限られ（不確かさが大きい）、かつ、過去に前例のない高難度の作業に対しては、従来型のエンジニアリングの進め方⁹が当てはまるとは限らない。廃炉の事業執行者である東京電力からの目標設定・要求仕様がエンジニアリング着手時点では必ずしも明確にならず、性能要求設定や工法・装置の物理的な実現性や性能保証の程度も、試行錯誤的なものにならざるを得ない。したがって、事業執行者の性能要求とサプライチェーンの機能設定及びエンジニアリングをある程度イタレーション¹⁰型に行っていく必要がある。

イタレーション型のエンジニアリングは、事業執行者とサプライチェーンとの契約も従来のものとはならないため¹¹、東京電力は事業執行者として「エンジニアリング上の判断を行い、その結果に対して責任を持つこと」が強く求められる。そのためには、プロジェクト管理能力に加え、サプライチェーン全体を最適化するために事業執行者として有すべき能力、具体的には、工学的判断をする能力、事業リスクを評価する能力、発注仕様を具体化する能力等の事業執行者である東京電力がオーナー¹²として主体的に行うエンジニアリング能力（オーナーズ・エンジニアリング能力）を向上させていく必要がある。

その上で、工法、装置を決める判断には、「安全の基準をはっきりさせ（安全視点）」、「現場での実現性等について指摘する（オペレータ視点）」、それを「プロジェクトで検討、議論（プロジェクトマネジメント）」していくという安全を基軸とした ALARP¹³に基づき、最終的に採用する工法、装置を決めていくことが大切である。

(3) 人材の育成・確保

長期にわたる廃炉事業を円滑に遂行していくための基盤として、人材の育成が不可欠である。東京電力は、廃炉中長期実行プランに照らして、将来必要となる技術者の職種（設計、運転、保全、化学分析、安全評価、放射線管理等）や人数及び必要となる時期を想定して、それらを中長期人材育成計画としてまとめ、人材の育成と要員の確保を計画的に進めていくことが重要となる。さらに、将来の研究者・技術者などの育成・確保等が不可欠であり、原子力に関わる産学官全体として着実に進めることが重要である。そのため、今後も初等中等教育段階の児童・生徒、大学・高専をはじめとした高等教育段階の学生、若手研究者・技術者など次世代を担う人材確保のための施策を引き続き推進・強化していくことが必要である。

2) 国際連携の強化

i. 国際連携の意義と現状

近年、原子力利用の黎明期に建設された原子炉や核燃料サイクル関連施設が運転寿命を迎え、各国ではこれらの施設の廃止措置が本格化している。また、過酷事故を起こした原子炉では、長年にわたって安定化作業、安全対策等が講じられてきている。さらに、海外にある過去の核関連

⁹ 事業執行者である東京電力が提示した要求仕様に基づいてサプライチェーンがエンジニアリングを進める。

¹⁰ ある結果を基に次の結果を求め、これを繰り返すことによって次第にエンジニアリングの完成度を高めていくやり方

¹¹ これまでの原子力発電所の建設ではサプライチェーンが完成されたプロダクトを性能保証した上で事業執行者に納品していた。（フルターンキー契約）

¹² ここでいうオーナーには発災責任者、特定原子力施設認可者、設備所有者の3つの立場がある。東京電力はこの3つの立場から廃炉事業を執行している。

¹³ 放射線影響を合理的に達成可能な範囲で低くしなければならないというもの。

施設（レガシーサイト）においては、多種多様な放射性物質の管理に大きな不確かさが存在しその廃止措置及び環境修復の取組は長期にわたることが見込まれている。各国は、「unknown unknowns」（何がわからないかがわからない）とも言われる技術的な困難や、長期にわたるプロジェクト運営、多額の資金の確保といった課題に直面しながらも、それらを乗り越えるための挑戦を続けている。

難度の高い工学的課題を扱う福島第一原子力発電所の廃炉を着実に進めるためには、リスク低減戦略として、先行する廃止措置活動等の事例から教訓を学び、廃炉に活かしていくことが重要である。また、廃炉に対する国際社会の継続的な理解・関心や協力関係を維持・発展させていくため、国際社会への情報発信や国際共同活動への参画等を通して、福島第一原子力発電所の事故及び廃炉で得られた知見等を国際社会に積極的かつ戦略的に還元し、国際社会に開かれた互恵的な廃炉を進めることが重要である。

国際連携においては、各国の事情に即した二国間協力を進めるとともに、IAEA、経済協力開発機構／原子力機関（以下「OECD/NEA」という。）などを通じた多国間協力の枠組みを活用することが重要である。これらの国際機関は、廃止措置に関する国際基準の策定等といった重要な役割を有している。我が国の廃炉の経験を基に国際基準の策定等に参画していくことは、福島第一原子力発電所の廃炉を国際的に開かれた形で進めるために重要であり、各国にも我が国の経験が共有されることにより国際社会に対する責任の一端を果たすことも期待される。そのような観点から NDF は、これらを踏まえ IAEA 総会のサイドイベントへの参加や OECD/NEA 運営委員会等の主要な国際会議での登壇等の機会を通じて、廃炉に関する情報発信に取り組んでいる。

ii. 主な課題と戦略

福島第一原子力発電所の廃炉のために世界の英知を結集するという観点からは、事故から間もなく 10 年を迎える現在において、同じ情報であっても受け手の関心等が事故当時から変化している部分もあり、これに留意した情報発信が重要となる。具体的には、専門家向けに詳細で正確な情報を発信するだけでなく、非専門家向けへの分かりやすい情報を発信することや、事故の経緯に係る受け手の理解度を考慮した適切な工夫を加えるなどの配慮が必要である。

また、福島第一原子力発電所のエンジニアリングが本格化する中、世界の優れた技術や人材の最新状況を把握し、これらを有効に活用することが重要である。そのため、民間の状況まで含めた世界の最新情報を把握するとともに、これら民間企業との継続的なコミュニケーションに取り組み、廃炉作業の進捗について情報を共有しながら、必要な時に必要な技術にアクセスできる環境を形成していくことが必要である。

3) 地域共生

i. 地域共生の意義と現状

周辺地域において住民帰還や復興が徐々に進む中、廃炉を安全かつ着実に進めるためには、地域からの信頼が必要不可欠である。そのため、地域の皆様の不安や疑問に真摯に耳を傾け、正確な情報を分かりやすく速やかにお届けするといった双方向のコミュニケーションを通じて、地域の皆様が廃炉事業について御理解・御安心いただけるよう取り組んでいくことが重要である。加えて、長期にわたる廃炉を貫徹するためには地元企業を中心とした企業の皆様に継続的に御協力いただくことが不可欠であると同時に、地元企業の皆様に廃炉事業に参画いただくことは、この地で廃炉関連産業が活性化し、雇用や技術が生まれ、他の地域や産業への成果の拡がりにつながることから、東京電力が福島の復興に貢献するための重要な柱でもある。

このような「復興と廃炉の両立」の大原則の下、東京電力は、浜通り地域への廃炉関連産業集積を重点分野に掲げる「福島イノベーション・コースト構想」の実現に向けた取組とも連携しつつ、地域と共生しながら廃炉を貫徹することとしている。

昨年度、東京電力は、福島イノベーション・コースト構想推進機構の協力を得ながら、地元企業を対象にした廃炉事業のマッチングイベントを開催した。また、2020年3月末には、廃炉事業への地元企業の参画や域外企業の誘致、人材育成に向けた地元企業の支援や大学等との連携などの取組をまとめた「復興と廃炉の両立に向けた福島の皆さまへのお約束」（以下「お約束」という。）を策定し、地域の一員として全力で廃炉事業に取り組む決意を改めて示した。

東京電力は「お約束」の取組を実現するため、福島イノベーション・コースト構想推進機構、福島相双復興推進機構と連携し、廃炉事業への参画に希望・興味を持つ地元企業向けの共同相談窓口を設置したほか、元請け企業と地元企業との商談会の開催などに向け準備を進めているところである。また、地元企業が参画しやすくなるよう、廃炉事業の中長期的な見通しと想定される発注案件の内容・時期・規模を可能な限り細分化し、それぞれの発注案件ごとに必要な機材・技術等を具体的に示す「廃炉中長期発注見通し」を2020年9月に作成し、元請け企業や地元の自治体・商工団体に説明を行っているところである。

ii. 主な課題と戦略

廃炉に関する不適切な情報の発信による誤解や懸念、風評の発生は、地域のみならず社会全体の廃炉事業に対する評価・信頼を失墜させ、廃炉の遅れにつながる。このため、東京電力は、福島第一原子力発電所の視察や廃炉資料館（富岡町）のほか、情報誌やWEBサイト、動画など多様なツールを活用し、廃炉の現状・取組状況を分かりやすく速やかに伝えていく必要がある。

また、政府、NDF、東京電力は適切な連携の下、情報の提供をより一層丁寧に行い、地域との信頼構築に努めることが求められる。このため、地域の皆様と直接対話する機会を積極的に設けるとともに、NDFが開催する福島第一廃炉国際フォーラム等の催事を通して参加者の皆様からの不安や疑問に真摯に耳を傾けるなど、対話による双方向のコミュニケーションを図り、正確な情報を分かりやすく速やかにお届けしていく必要がある。

東京電力は、「お約束」が形だけで終わることなく、実効性が担保されなければならない。そのため地域共生の専門部署が中心となり、廃炉事業の進捗に応じて「廃炉中長期発注見通し」の内容を随時更新・追加していくとともに、地元の自治体・商工団体を通じて丁寧な説明を継続的に行っていく、併せて専用の共同相談窓口や地元企業を対象とした商談会等を通じ、地域との積極的なマッチングを図っていく。また、東京電力自ら地元企業の技術力向上に向けたサポートや域外取引企業の域内誘致に努めるほか、元請け企業に対しても、技術指導を含めた地元企業の参画を促進し、一定の成果があった場合にはインセンティブを付与するといった仕組みを整えるなど、廃炉事業を通じた地元経済の基盤づくりと地元企業・人材の育成を図っていく。さらに、廃炉に関する研究開発はもとより、域外企業の進出や地元企業への技術指導などが進んでくると、域外から来訪・滞在する技術者や研究者の増加が見込まれることから、そうした外部人材が地域社会に溶け込み、その一員として活躍することができるよう、必要な環境整備や支援を図っていくことが求められる。

これらの地域共生の業務を遂行するには、各部署間の緊密な連携が求められるため、必要に応じて体制の強化にも取り組むことが求められる。さらに、福島県をはじめとする地元自治体、福島イノベーション・コースト構想推進機構、福島相双復興推進機構等との連携・協働を継続・強化していく必要がある。