

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 2022

2022 年 10 月 11 日

原子力損害賠償・廃炉等支援機構

目次

1. はじめに	5
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	9
3. 福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術戦略	26
3.1 燃料デブリ取り出し	26
3.2 廃棄物対策	70
3.3 汚染水・処理水対策	79
3.4 使用済燃料プールからの燃料取り出し	91
4. 廃炉の推進に向けた分析戦略	97
5. 研究開発への取組	106
6. 技術戦略を支える取組	113
6.1 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	113
6.2 国際連携の強化	128
6.3 地域共生	133
略語・用語集	138
添付資料	142

図表目次

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	6
図 2	廃炉等積立金制度を踏まえた技術戦略プランの位置付け	6
図 3	福島第一原子力発電所が有するリスクの低減	14
図 4	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	15
図 5	主要なリスク源のリスク低減プロセスとその進捗（2022 年 3 月時点）	18
図 6	安全を基軸とした ALARP（イメージ）	23
図 7	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	29
図 8	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）	30
図 9	燃料デブリ取り出しから一時保管までのイメージ（段階的な取り出し規模の拡大）	30
図 10	X-6 ペネ開放作業時の閉じ込め障壁概略図	35
図 11	試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）の閉じ込め障壁概略図	36
図 12	試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）の作業ステップ	36
図 13	エンクロージャとマニピュレータ	39
図 14	各作業フェーズのイメージ（プロセスの分割）	41
図 15	2021 年度 工法の検討フロー（概要）	42
図 16	気中工法の一例	42
図 17	参考：従来の冠水工法	43
図 18	冠水工法の一例	43
図 19	2022 年度以降 工法検討の進め方のイメージ	44
図 20	負圧管理による閉じ込め機能（気相部）の構築例	49
図 21	閉じ込め機能（液相部）の構築例	52
図 22	廃炉・汚染水・処理水対策事業における液相系システム（粒子捕集・除去）の検討例	65
図 23	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）	69
図 24	NDA における廃棄物ヒエラルキーの概念と福島第一原子力発電所における対応策	73
図 25	固体廃棄物の安全な処理・処分方法を合理的に選定するための手法	77
図 26	廃棄物対策に係る主な技術課題と今後の計画（工程表）	78
図 27	汚染水対策の概要	79
図 28	汚染水抑制対策の進捗と汚染水発生量の推移	80
図 29	サブドレンと建屋の水位低下	81
図 30	建屋滞留水の水処理設備の系統と全 α 測定結果	86
図 31	ゼオライト土嚢の回収手順 ⁷⁴	88
図 32	汚染水対策・処理水対策・自然災害対策に係る主な技術課題と今後の計画（工程表）	90
図 33	1 号機オペフロ崩落ガレキの状況	92
図 34	1 号機 プール内燃料取り出し工法	92
図 35	2 号機 プール内燃料取り出し工法	93

図 36	使用済燃料の保管状況（2022 年 5 月時点）	94
図 37	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）	96
図 38	分析・調査結果の反映先とその関係	98
図 39	燃料デブリ分析戦略の三要素	99
図 40	燃料デブリ取り出しと新設分析棟の工事・運用スケジュール	100
図 41	各分析施設の特徴と役割分担	101
図 42	燃料デブリ取り出し後のハンドリング工程における非破壊計測の一例.....	105
図 43	廃炉研究開発の研究範囲と実施機関	107
図 44	福島第一原子力発電所の廃炉に係る研究開発実施体制の概略	107
図 45	標準的なリスクマネジメント・ワークフロー	115
図 46	燃料デブリ取り出しの設計フロー（イメージ）	120
図 47	対面及びオンラインを活用した海外専門家との意見交換の様子.....	130
図 48	原子炉建屋内構造図	141
図 49	原子炉圧力容器（RPV）内構造図.....	141
表 1	福島第一原子力発電所の主要なリスク源	13
表 2	固体廃棄物の保管・管理状況	72
表 3	ALPS 処理水の海洋放出に向けた主な取組	82
表 4	東京電力-JAEA 間の人材交流及び東京電力への NFD からの人材の受け入れの状況	102
表 5	分析施設内で実施するサンプル分析と分析施設外で実施する	104
表 6	「Making」と「Buying」の違い.....	121
表 7	今後のプロジェクトマネジメント（To Be）	122

1. はじめに

東京電力ホールディングス㈱福島第一原子力発電所（以下「福島第一原子力発電所」という。）の長期にわたる廃炉に係る取組は、政府が策定する「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。）に基づいて進められてきた。

2022 年 3 月には福島県沖を震源とする震度 6 弱の地震があったが、放射性物質の環境への漏えいはなく、プラント運営への大きな影響は出ていない。また、東京電力ホールディングス㈱（以下「東京電力」という。）は、2020 年度から継続している新型コロナウイルス感染症に対する感染予防対策を徹底することにより、要員不足に起因する安全確保への影響を回避してきているが、世界的な行動制限や半導体不足等の影響は避けられず、これらを最小限に抑えるための取組が行われている。こうした中、福島第一原子力発電所の廃炉は、2 号機での燃料デブリの試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）の実施に向け、準備を進めているところである。この試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）は中長期ロードマップで示す第 2 期の最終段階であり、今後の燃料デブリ取り出し作業の基本的な現場構成の形となることから、より慎重で丁寧な準備を必要とする局面となる。第 3－①期へ移行後は、より本格的な燃料デブリ取り出しに向けた準備、全号機からのプール内燃料取り出し完了に向けた取組等が進められることとなる。

原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下「NDF」という。）は 2014 年以降、廃炉の実施に必要な研究開発、助言、指導等を行う組織として福島第一原子力発電所の廃炉に係る取組を支援している。「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「技術戦略プラン」という。）は、この支援の一環として、中長期ロードマップに確固とした技術的根拠を与え、その円滑かつ着実な実行や改訂の検討及び原子力規制委員会の「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」（以下「リスク低減目標マップ」という。）の目標達成に資すること、並びに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。）に根拠を与えることを目的として、2015 年以降毎年取りまとめているものである。（添付資料 1）

1.1 福島第一原子力発電所の廃炉に向けた体制・制度

福島第一原子力発電所の廃炉に直接的に関係する機関である、政府、NDF、東京電力、研究開発を担う技術研究組合国際廃炉研究開発機構（以下「IRID」という。）及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）等の研究開発機関との役割分担は図 1 に示す。

このような役割分担の下、東京電力は、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、プロジェクト管理体制の構築・強化に取り組んできており、管理手法の充実や高度化を図り、実効性を高めている段階である。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、NDF による廃炉等積立金管理業務が実施されている。この業務の中で 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を行うこととなり、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。技術戦略プランを踏まえて作成した取戻し計画作成方針により、廃炉等積立金の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、廃炉等積立金の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）。

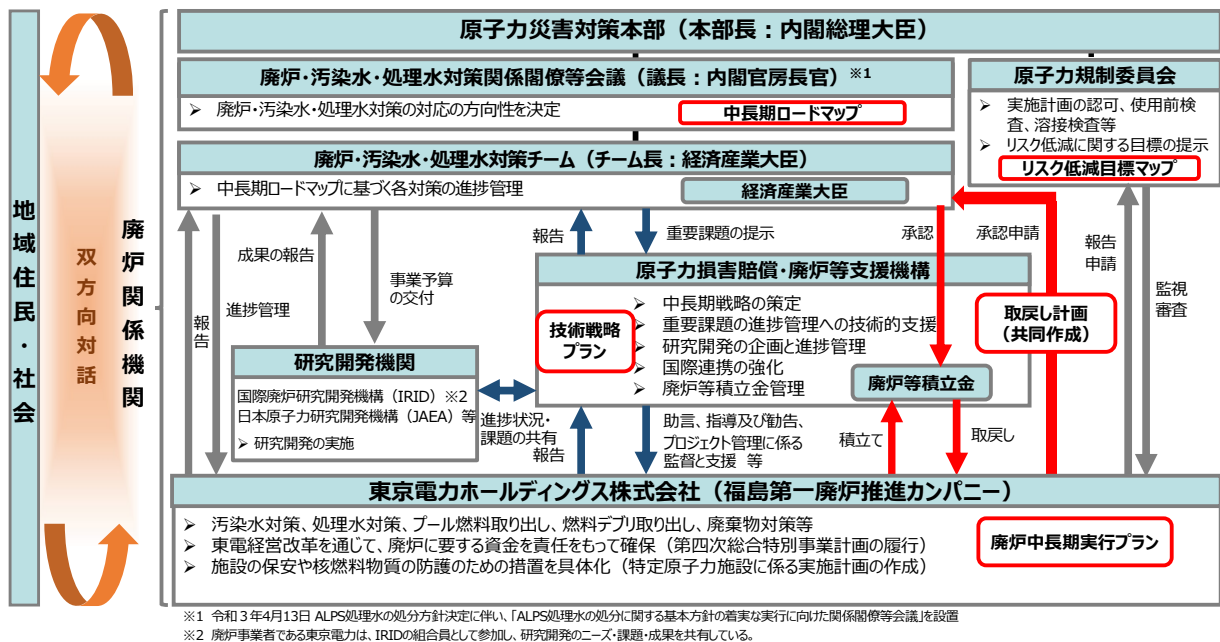


図1 福島第一原子力発電所の廃炉に係る関係機関等の役割分担

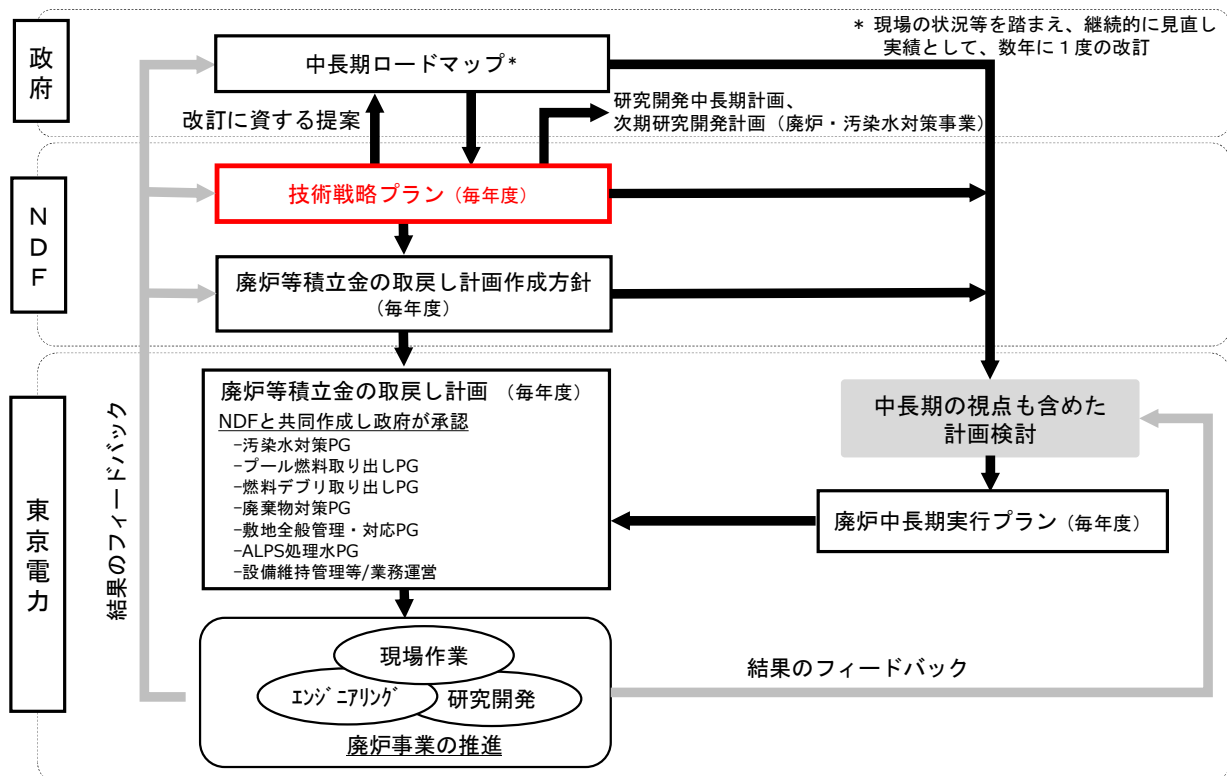


図2 廃炉等積立金制度を踏まえた技術戦略プランの位置付け

1.2 技術戦略プラン 2022 について

技術戦略プラン 2022 は、6 つの章から構成されており、2 号機の試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）に向けた取組状況、取り出し規模の更なる拡大に向けた工法の検討状況、ALPS 処理水の海洋放出に向けた取組状況、廃炉の推進に向けた分析戦略等を特徴的に記載している。2 章以降の構成を以下に示す。

- ・ 2 章では、リスクの低減及び安全確保の考え方としての基本方針を示すとともに、リスクの低減及び安全確保の考え方を記載している。リスク低減の考え方としては、戦略を遂行するに当たっての当面の目標並びに、主要なリスク源のリスク低減プロセスとその進捗を記載している。安全確保の考え方としては、安全視点とオペレータ視点を取り込んだ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等を記載している。
- ・ 3 章では、主要 4 分野（燃料デブリ取り出し、廃棄物対策、汚染水・処理水対策、プール内燃料取り出し）について、分野別目標を定め、これに向けた現在の進捗状況、目標を達成する上での主要な課題とそれを実現する技術戦略をそれぞれ記載している。
 - 3.1 節（燃料デブリ取り出し）では、1 号機の原子炉格納容器（以下「PCV」という。）内部調査の実施状況とともに 2 号機の試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）の実施に向けた準備状況を記載している。また、その後の段階的な取り出し規模の拡大に向けた検討状況並びに、取り出し規模の更なる拡大に向けた工法策定の進め方等についても記載している。
 - 3.2 節（廃棄物対策）では、2021 年度に示した処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通しを踏まえ進めている、固体廃棄物の特徴に応じた廃棄物ストリーム構築に向けた検討状況等を記載している。
 - 3.3 節（汚染水・処理水対策）では、今後の建屋滞留水処理及び燃料デブリ取り出し等の廃炉工程を見据えた課題に係る検討状況を記載するとともに、2021 年の政府の基本方針で 2 年程度後を目途に放出することが示された ALPS 処理水の海洋放出について、その進捗、課題等を記載している。
 - 3.4 節（プール内燃料取り出し）では、1～6 号機燃料取り出し完了に向け進めている 1,2 号機の取組について進捗、課題等を記載するとともに、プール内燃料の長期的な健全性の評価等の将来の処理・保管方法の決定に向けた取組の方向性を記載している。
- ・ 4 章では、分析の意義及び体制について、廃棄物や燃料デブリの取扱いに要する分析施設や機能の構築・整備、人材育成を含む体制構築の重要性とともに、燃料デブリ取り出しのサンプルを破壊せずに核燃料の量を評価する手法の利用等を記載している。
- ・ 5 章（研究開発への取組）では、3 章及び 4 章において示した個別の研究開発を、研究開発全体として、また中長期を見据えた記載とし、政府、事業者及び関連する研究機関に期待される取組等を記載している。

- ・ 6 章（技術戦略を支える取組）では、プロジェクト管理の一層の強化、廃炉の事業者として有すべき能力の向上、国際連携の強化、地域共生の意義と現状及び主な課題と戦略をそれぞれ記載している。
 - 6.1 節（プロジェクト管理）では、プロジェクトの難易度が増す中、オーナーズ・エンジニアリング能力（プロジェクトマネジメント力及び安全とオペレータ視点を基盤とする技術力）を高めるための取組等を記載している。
 - 6.2 節（国際連携）では、福島第一原子力発電所の廃炉で得られた知見や教訓を国際社会に還元するなど、国際社会に開かれた互惠的な形で廃炉を進めるための取組等を記載している。
 - 6.3 節（地域共生）では、東京電力が進めている、廃炉関連産業の浜通りへの集積に向けた新会社設立等の、「復興と廃炉の両立に向けた福島の皆さまへのお約束」の実現に向けた取組等を記載している。

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

2.1 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廃炉の基本方針＞

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

福島第一原子力発電所は、原子力規制委員会が「特定原子力施設への指定に際し東京電力株式会社福島第一原子力発電所に対して求める措置を講ずべき事項」において要求している安全上必要な措置を講じており、一定の安定状態で維持管理されている。

しかしながら、福島第一原子力発電所には、事故により損傷を受けた建物の中に燃料デブリ及び使用済燃料が残されていること、プラントの状態が十分に把握されていない箇所があること、放射性物質を含む汚染水が発生していること、従来にないような放射性廃棄物が多量に発生していること等から、大きなリスクが存在している。このリスクの存在に対して何ら対策を取らない場合、施設の経年劣化等によって更にリスクが増加する可能性もあるため、このリスクを可及的速やかに低減させることが強く求められる。

このため、福島第一原子力発電所の廃炉は、リスク低減のための特段の対策を講ずることを通じて、「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。一般的に、事故を起こした施設のリスクを低減させるには、①損傷した施設の閉じ込め機能を改善すること、②閉じ込められている放射性物質の性状や形態をより安定な状態に持ち込むこと、③異常の発生や進展を抑制・緩和できるように設備等の監視や制御性を高めること等の措置が有効であり、また、それらを総合的に実現するためには、④損傷した施設や不十分な閉じ込め状態から放射性物質を回収して、より健全な保管状態に移行させることが有効である。

事故以降、作業員被ばくや事故を防ぐべく周到な準備をした上で、このような様々なリスクを低減させる対策を講じてきた（添付資料 2）。

2.1.1 第 3 - ①期に向けて取り組むべきリスク管理

第 3 - ①期においても中長期ロードマップにおけるマイルストーンに従い複数のリスク低減のための工程を並行して進めることになる。

- ・ 1～6 号機の使用済燃料プールからの燃料取り出しの完了を目指す。
- ・ 燃料デブリの試験的取り出しに着手し段階的に取り出し規模の拡大を進める。
- ・ 汚染水発生量を最小限にとどめ安定的に維持する。
- ・ 廃棄物対策としてガレキ等の一時保管を解消する。

燃料デブリ取り出しについては、より本格的な廃炉作業となる取り出し規模の更なる拡大に向けた工法の準備を進めることになる。現在は冷温停止状態の宣言から約 11 年が経過し PCV 内の温度や圧力は安定的な状態にあるが、燃料デブリの取り出しが始まると PCV 内の状態は変動することになる。取り出しの進捗に従って燃料デブリに起因するリスクは低減するが、従前小さい

と認識していたリスクが相対的に大きくなったり、未知であったリスクが新たに顕在化するおそれは否定できない。取り出し規模の更なる拡大に向けてリスク対応を実効的なものとしていくためにこれらの、リスク変動が一番生じやすい PCV 内の状態把握能力を向上させるべきである。そのため、現在の PCV 内の監視パラメータの監視目的や設置数、現場施工の困難さを踏まえつつ、監視対象の種類や数の拡充に向けた検討を進めていくべきである。例えば、取り出し規模の更なる拡大においては取り出し作業に伴い PCV 内のダスト濃度が上昇することが予想されるが、先行する試験的取り出しや段階的取り出し規模の拡大の段階で PCV 内のダスト濃度を測定できるようにしておき、取り出し作業の場所や規模等とダスト濃度の相関を把握できれば、取り出し作業に伴う不確かさを低減でき適切な安全裕度を維持しつつ作業効率を高めることができる。

また、PCV 内の状態をより多角的に把握できるようになると、取り出し規模の更なる拡大のために検討している設備類の要・不要の判断材料を提供でき、リソースの最適化に寄与することも期待できる。

さらに、工法に関わる設備類の設計・製造・設置を進めることに加え、操作員・保守要員の確保・教育や管理体制の整備、取り出した燃料デブリに対する合理的な分析体制を構築していくことも重要である。

2.1.1.1 リスク低減

2.1.1.1.1 PCV からの放射性物質の移行抑制に向けた更なる対策

・ 気体状・ダスト状の放射性物質

移行しやすい気体状・ダスト状の放射性物質の PCV からの移行を減らすことで、燃料デブリ取り出しに向けて閉じ込め能力をより向上させる。具体的には、PCV 圧力の均圧化（微負圧化）と、2.1.1 で示した PCV 内のダスト濃度の監視機能を充実させ、PCV 外へのダスト移行量の低減効果を把握できるようにする。

・ 液体状の放射性物質

気体状・ダスト状の放射性物質に次いで移行しやすい液体状の放射性物質の移行抑制を更に確実なものとする。具体的には、現在東京電力にて進められているサプレッションチェンバ（以下「S/C」という。）保有水や他の系統保有水の抜き取りを加速し、PCV 水量の最小化を進める。

上記を進めるに当たっては、その可否の見極めや課題の所在、困難さを判断するために、原子炉注水停止試験や窒素供給量の低減試験等、現在の設備構成で可能な試験を、2.3.2 で述べる「先行的な実施と得られる情報の後段での活用」の考え方に則って積極的に実施すべきである。

2.1.1.1.2 燃料デブリを収める原子炉圧力容器（RPV）・原子炉格納容器（PCV）・原子炉建屋の健全性に対する長期的なリスクへの備え

原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）や PCV は事故の影響を直接受けており、RPV 底部は熔融燃料により、PCV は過熱・過圧により一部が損傷していることが判明している。

また、PCV 底部では、炉心溶融物との接触による影響や溶融物の熱による影響も発生したと想定される。このため、金属材の腐食による強度低下や閉じ込め性能の劣化、影響を受けたコンクリート構造材の強度の低下等のおそれに対して、RPV や PCV の閉じ込め性能や原子炉建屋を含めた強度に関わる長期的な健全性を維持するための慎重な対応が必要である。

このためには、特に PCV 内部の損傷状況の確認を鋭意進めるとともに、地震や経年劣化といった今後生じ得る長期的なリスクを想定した上で、PCV 内部に関する最新情報に基づいた健全性評価を進める必要がある。損傷状態に関する情報が限られる中で、この評価には不確かさが常に伴うが、不確かさを低減するための評価用データの更新や最新の炉内情報の反映等を鋭意努める必要がある。具体的取組を 3.1.2.6.1.5 に示す。

2.1.1.2 取り出し規模の更なる拡大に向けて必要となる事項

取り出し規模の更なる拡大の段階において、安全かつ確実な燃料デブリ取り出し作業を行うために以下の事項が必要となる。

- ・ 試験的取り出しを確実に実施し知見を得て、その後の段階的取り出し規模の拡大に活用するとともに、それを取り出し規模の更なる拡大に活かす。
- ・ 工法に関わる設備類の設計・製作・設置を進める。
- ・ 操作員の確保・教育や管理体制を整備し、必要な訓練を完了させる。
- ・ 取り出し準備作業等においては高線量の原子炉建屋での作業が必要となることから、現場の環境改善を進めるとともに、作業が長期にわたるため作業員の被ばく管理と長期的な作業員の確保ができることを確認する。
- ・ ハード整備の事前準備として、排気筒、廃棄物処理建屋の解体・撤去等の周辺環境整備を完了させておく。
- ・ 取り出した燃料デブリに対して、合理的な分析ができるように分析計画、分析施設及び分析体制を関係機関で協議、整備しておく。
- ・ 以上の作業に支障が出ないように、廃棄物保管の整備を推進する。

以上の、具体的な取組については 3 章及び 4 章に記載する。

2.2 放射性物質に起因するリスク低減の考え方

2.2.1 リスクの定量的把握

「リスク」という用語は分野や場面ごとに様々な用法で用いられているが、一般的にその適切な管理を検討する場合、リスクとは何らかの事象によってもたらされる負の影響の期待値として理解される。すなわち、個々の対象（リスク源）が有するリスクの大きさ（リスクレベル）は、対象において発生し得る事象の「影響度」とその「起こりやすさ」の積で示される。

技術戦略プランでは、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。SED で表すリスクレベルは以下の計算式で与えられる。

SED で表すリスクレベル = 「潜在的影響度」×「管理重要度」

ここでの「潜在的影響度」とは、事象の影響度（リスク源の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）の指標であり、リスク源に含まれる放射性物質の量（放射性物質が有する毒性）であるインベントリと、リスク源の形態やリスク顕在化までの余裕時間に依存する係数の積で定義される。また、「管理重要度」とは、事象の起こりやすさの指標であり、施設の健全性等やリスク源の梱包・監視状態等に依存する係数で定義される（添付資料 3）。

福島第一原子力発電所の主要なリスク源をまとめると表 1 となり、これらのリスク源の総和としての福島第一原子力発電所のリスクは図 3 に示すとおりである。また、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 4 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但し速に処理した場合に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但し廃炉工程において適切に対処すべきもの（除染装置スラッジ等の固体廃棄物）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。図 4 では、上記の①を桃色、②を黄色及び③等を緑色で示し、このうち「十分に安定管理されている領域」（水色の領域）にあるリスク源については、水色で表している。

なお、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。技術戦略プラン 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、雨水等の外部事象を考慮した調査・検討を進めている。調査・検討によりリスク源の情報が明らかになり、主要なリスク源と同様に優先順位を付けて対処すべきと判断されたものについては今後リスクレベルを評価していく（添付資料 4）。

また、廃炉作業中の長期的な時間経過に従い、これまで想定できていない事象も発生しており、想定外のリスクを抽出していく取組が重要になる。このようなリスクの抽出は容易ではないが、想定外の事象が発生した際にその事象を分析し、これまで想定できていなかった要因を明らかにしていくことはリスク抽出の糸口となる。

2021 年 3 月 25 日に報告されたガレキ等の一時保管エリアにおける全 β 汚染物の漏えい事象¹では、内容物が把握されていない容器（コンテナ）からの放射性物質の漏えいが確認された。これまで、ガレキなど固体状の内容物は、容器破損により直ちに放射性物質を環境に移行させることはない想定していたが、その後の分析によりコンテナ内面の腐食が漏えいの要因と推定された

¹ 東京電力ホールディングス株式会社、「物揚場排水路 事故事象報告及び瓦礫類の保管管理について」、特定原子力施設監視・評価検討会（第 90 回）資料 4、2021 年 4 月 19 日

²。本事象を踏まえるとリスク源の所在と放射能に加えて物理化学的状態とその経年変化の把握がリスク抽出に重要となる。また、2021年2月13日に発生した福島県沖を震源とする地震³では、1号機と3号機でのPCVの水位低下や構内のタンクでタンク設置時に評価した滑動量を超える滑動が確認された。2022年3月16日に発生した福島県沖を震源とする地震においても1号機と3号機でのPCVの水位低下や一時保管エリアのコンテナの転倒が確認された⁴。現在の状態が十分に把握できていないPCV等については、内部調査とともに、事故発生時の状況の理解による損傷状態の把握及び監視や評価による経年変化の推定がリスク抽出に役立つ。自然災害等の外部事象については、既存設備や新規設備の設計条件を超える事象に対する影響と対応策の要否を予め十分に評価する必要がある。

上記の事例はいずれも重大な結果に至っていないが、根本原因分析等の手法を用いて事象を丁寧に分析し、これまでに想定できていないリスクを抽出し、重大な結果の発生防止に役立てることが重要である。そのためには、東京電力において、上述のような想定外の事象から学び取る取組が必要である。

表1 福島第一原子力発電所の主要なリスク源

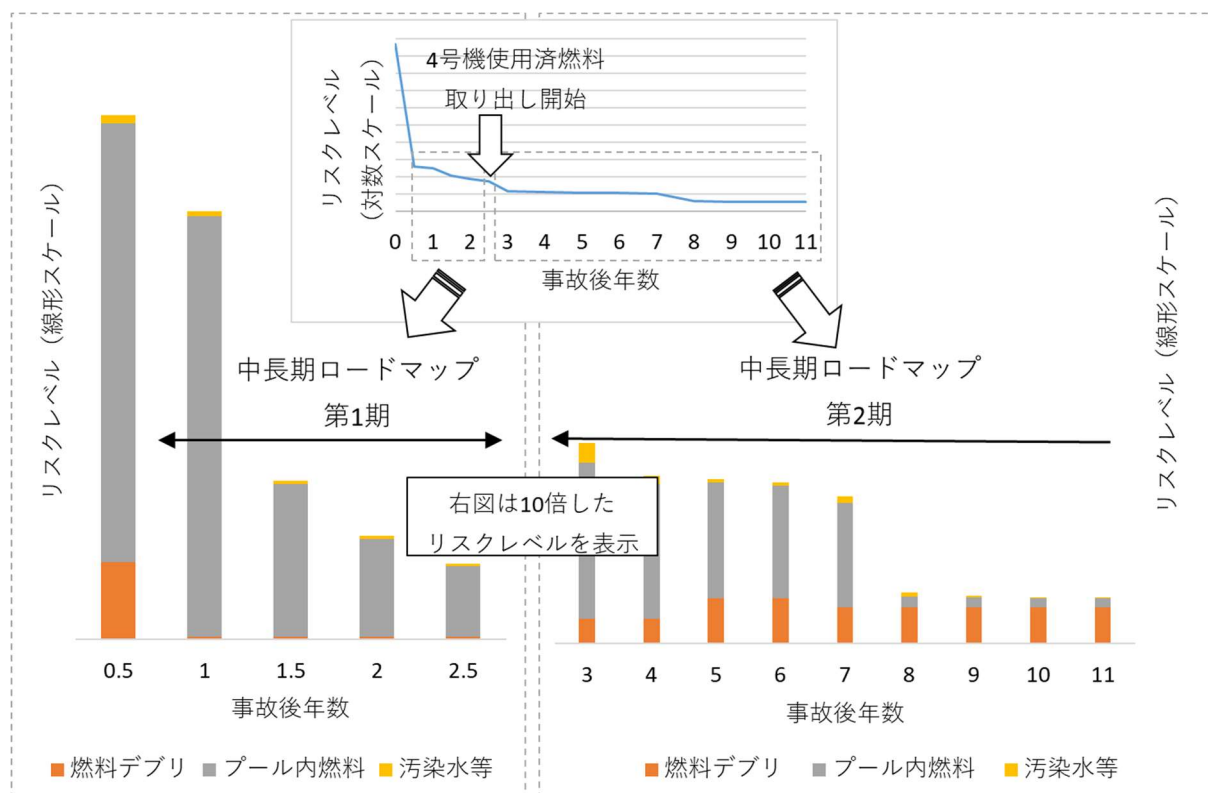
燃料デブリ		1～3号機の原子炉圧力容器（RPV）/原子炉格納容器（PCV）内の燃料デブリ
使用済燃料	プール内燃料	1～2号機の使用済燃料プール内に保管されている燃料集合体
	共用プール内燃料	共用プール内に保管されている燃料集合体
	乾式キャスク内燃料	乾式キャスク内に保管されている燃料集合体
汚染水等	建屋内滞留水	1～3号機原子炉建屋、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋内に滞留する汚染水、1～3号機建屋底部の α 核種含有スラッジ
	ゼオライト土嚢	プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋地下階に設置された土嚢内のゼオライト等
	溶接型タンク内貯留水	溶接型タンク内に保管されているストロンチウム処理水、ALPS処理水等（ALPS処理水及び処理途上水）
	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の残水及び α 核種含有スラッジ
水処理 二次廃棄物	吸着塔類	セシウム吸着装置等の各種の汚染水処理設備から発生した使用済吸着塔等
	ALPS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、廃吸着材
	ALPSスラリー（移替対象HIC）	β 線照射の影響を受けたHICのうち、積算吸収線量が基準値5,000kGy（落下に対する構造健全性が確認できている積算吸収線量）を超えた又は超える時期が近いと評価され、2023年度末までにHIC移替えが計画されているALPS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更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

² 東京電力ホールディングス株式会社、「1F規則第18条第10号判断について（物揚場排水路PSFモニタ放射能高警報発生事象）」、廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議（第90回）資料3-6、2021年5月27日

³ 東京電力ホールディングス株式会社、「福島第一原子力発電所2月13日地震に対する設備の追加点検及び耐震評価について」、特定原子力施設監視・評価検討会（第90回）資料5-1-3、2021年4月19日

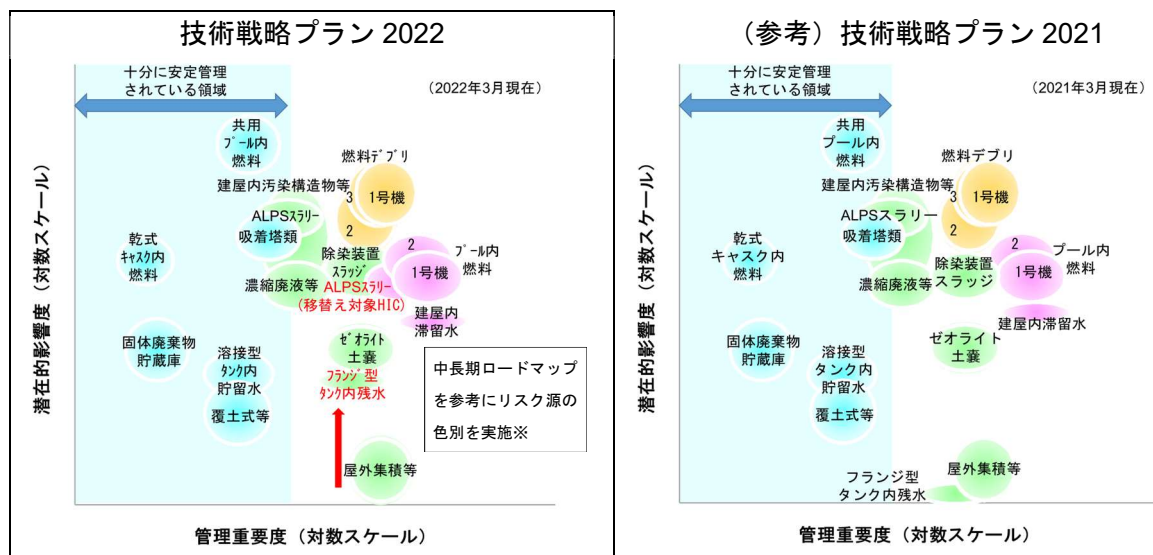
⁴ 東京電力ホールディングス株式会社、「3月16日地震発生後の福島第一原子力発電所の状況について」、特定原子力施設監視・評価検討会（第99回）資料1-1、2022年4月18日

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 (シールドプラグ・非常用ガス処理系配管等) 及び事故以前の運転時の放射化物



- ※1 事故直後は燃料デブリによるリスクレベルが高かったが、事故後 1 年にかけて燃料デブリ中の放射性物質の減衰により潜在的影響度が大きく減少したため、リスクレベルが大きく低下している。
- ※2 事故後 8 年の評価において、使用済燃料プールの冷却停止後の水温上昇がこれまでの想定よりも緩やかであるとの知見を取り入れた結果、リスクが顕在化するまでの時間的余裕が増すことから、プール内燃料のリスクはそれ以前の評価よりも低くなっている。

図 3 福島第一原子力発電所が有するリスクの低減



※「相対的にリスクが高く優先順位が高いもの」を桃色、「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」を黄色、「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」等を緑色で示し、このうち「十分に安定管理されている領域」にあるリスク源を水色で示す。

また、朱記は技術戦略プラン 2021（2021 年 3 月時点評価）からの変化が顕著なリスク源を表す。矢印の元はフランジ型タンク内残水の技術戦略プラン 2021 の位置を示しており、処理作業に先立つ放射能濃度の分析結果を反映したことにより上方へ移動している。ALPS スラリー（移替え対象 HIC）は今回新たに ALPS スラリーから分離し、プール内燃料等と同様に桃色で表示している。

図 4 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

2.2.2 リスク低減戦略

2.2.2.1 リスク低減戦略における当面の目標と進捗

リスク低減対策としては、「潜在的影響度」を低減させる方法と、「管理重要度」を低減させる方法がある。「潜在的影響度」を低減させる例としては、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がある。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等がある。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、「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」

（2.1 節参照）を基本方針とする福島第一原子力発電所の廃炉は、まずはリスク源をより健全な施設においてより安定的に管理することで管理重要度を下げる取組であり、図 4 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ものである。

本目標に対する技術戦略プラン 2021 からの作業進捗として、フランジ型タンク底部の残水（濃縮塩水）の処理の進捗、ALPS スラリーが保管されている高性能容器（以下「HIC」という。）の一部について β 線照射の影響を踏まえ移替えが必要となったことなどを図 4 に反映している。

フランジ型タンク内残水については、各タンクエリアのタンク解体時の底部残水を受け入れたタンクにおいて α 核種を含むスラッジの沈降が確認されており⁵、現在、残水の回収作業が実施されている⁶。上澄み水のプロセス主建屋への移送が実施されており技術戦略プラン 2021 の評価時よりも水位は低下している。スラッジを含む残水が残っているタンクは 1 基のみであり、フィルタ通水によるスラッジ分の回収を実施中である。処理作業に先立つ放射能濃度分析（2021 年 7 月 21 日及び 2021 年 8 月 5 日に 2 基のタンクから採取された残水の分析）により確認された高濃度のストロンチウムと全 α 核種濃度を反映した評価では、高濃度のストロンチウムの影響が大きく、これにより潜在的影響度が技術戦略プラン 2021 よりも上昇したが、分析により得られた知見の反映であり、リスクそのものが増加したことを表している訳ではない。本事例に限らずリスク源の情報には不確かさがあり、限られた情報に基づく推定や断片的な採取データに基づく評価を実施した場合には、リスクを過小評価又は過大評価する可能性がある。

ALPS スラリーについては、 β 線照射の影響を受けた HIC のうち、積算吸収線量が基準値 5,000kGy（落下に対する構造健全性が確認できている積算吸収線量）^{7,8}を超えた又は超える時期が近いと評価され、2023 年度末までに HIC 移替えが計画されているもの⁹を図 4 に桃色で表示した。時間経過とともに積算吸収線量が基準値に近づく HIC の基数は徐々に増えていくため、移替え作業を着実に実施し、積算吸収線量の基準値を超えないように管理していくことが重要である。そのためには、2023 年度末までの移替え作業を計画的に実行することにより、積算吸収線量の基準値を超えた HIC にスラリーを保管している状態を解消し、その後は積算吸収線量の基準値を超える前に計画的に移替え作業を実施していく必要がある。また、長期健全性を有する容器での保管へ早期に移行することが時間経過に伴う劣化に対する本質的なリスク低減につながる。東京電力はスラリーの安定化処理に向けた設計の中で長期健全性を有する容器の設計を検討しているが¹⁰、これを遅滞なく進めていく必要がある。このように、廃炉作業が長期化していく中で、施設・設備の劣化を考慮したリスク源のモニタリング及び管理を行うこと、リスク源を早期に安定管理されている状態に持ち込むことが重要な取組となる。

なお、福島第一原子力発電所全体のリスク低減戦略を検討するに当たり、上述の SED はある時間断面での放射性物質に起因するリスクを定量的に示したものであり、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。

⁵ 東京電力ホールディングス株式会社、「E エリアタンク（フランジ型タンク）の残水から検出されたアルファ核種の対応方針について」、廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第 94 回）資料 3-1、2021 年 9 月 30 日

⁶ 東京電力ホールディングス株式会社、「E エリアタンクの解体に向けた今後の方針」、廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第 100 回）資料 3-1、2022 年 3 月 31 日

⁷ 東京電力ホールディングス株式会社、「スラリー安定化処理に向けた設計について」、特定原子力施設監視・評価検討会（第 88 回）資料 1-2-1、2021 年 2 月 22 日

⁸ β 線を 5,000kGy 照射した HIC ポリエチレン試験片の材料試験結果から許容ひずみを設定し、落下解析により得られた最大ひずみが許容ひずみ未満であることが確認されている。

⁹ 東京電力ホールディングス株式会社、「HIC スラリー移替え作業の状況について」、特定原子力施設監視・評価検討会（第 98 回）資料 3-6、2022 年 3 月 14 日

¹⁰ 東京電力ホールディングス株式会社、「スラリー安定化処理に向けた設計について」、特定原子力施設監視・評価検討会（第 92 回）資料 2-2、2021 年 7 月 12 日

外部事象に対するリスクに関わる対応については、廃炉中長期実行プラン 2021,2022 に示されたとおり^{11,12}、東京電力が津波対策、大規模な降雨、建屋健全性評価等の自然災害に関わる検討を進めている。引き続き、東京電力において、自然災害等の外部事象に対する系統や施設の健全性を把握するとともに、そのリスクの程度を踏まえた対応を整備する必要がある。

2.2.2.2 主要なリスク源のリスク低減プロセスとその進捗

主要なリスク源について、当面の目標である「十分に安定管理されている領域」に持ち込むまでのプロセス及びそのプロセスに沿った廃炉作業の進捗を図 5 に示す。図 5 (a)は、これまでの廃炉作業及び今後の計画の概要をフロー化し、俯瞰的に廃炉作業全体の流れを示すとともに、図 4 の色別を用いて各リスク源のリスクレベルを表すことにより、リスクの低減の流れを提示している。このフローを基に、燃料デブリ、使用済燃料及び事故時に放出された Cs-137 について展開することにより、事故時に比べ、どのようにリスク源が移行したのかを可視化することが可能である。技術戦略プラン 2021 からの変更として、フランジ型タンク内残水の処理プロセス（フィルタ通水によるスラッジ回収）を示し、 β 線照射の影響を踏まえて一部の ALPS スラリーの移替えが計画されていることから ALPS スラリーを緑色と桃色の 2 色で表示している。図 5 (b)には、使用済燃料について、作業進捗が分かりやすい燃料集合体体数を指標として、図 5 (c)には、Cs-137 について、様々な形態で存在するリスク源に共通する放射能推定値（Bq）を指標として、「十分に安定管理されている領域」への移行状況を、各々円グラフにより表現し、廃炉作業の進捗状況を提示している。図 5 (b)は技術戦略プラン 2021 からの進捗はない。図 5 (c)には、2021 年度中の建屋内滞留水の減少、吸着塔類の増加、固体廃棄物貯蔵庫等での保管量の増加、減衰分の増加による Cs-137 の増減を反映し、そのうち、割合の大きい減衰分の増加を明灰色で示している。また、 β 線照射の影響を踏まえて移替え対象 HIC に保管されている ALPS スラリーを桃色の領域に移行させている。

¹¹ 東京電力ホールディングス株式会社、「廃炉中長期実行プラン 2021」、2021 年 3 月 25 日

¹² 東京電力ホールディングス株式会社、「廃炉中長期実行プラン 2022」、2022 年 3 月 31 日

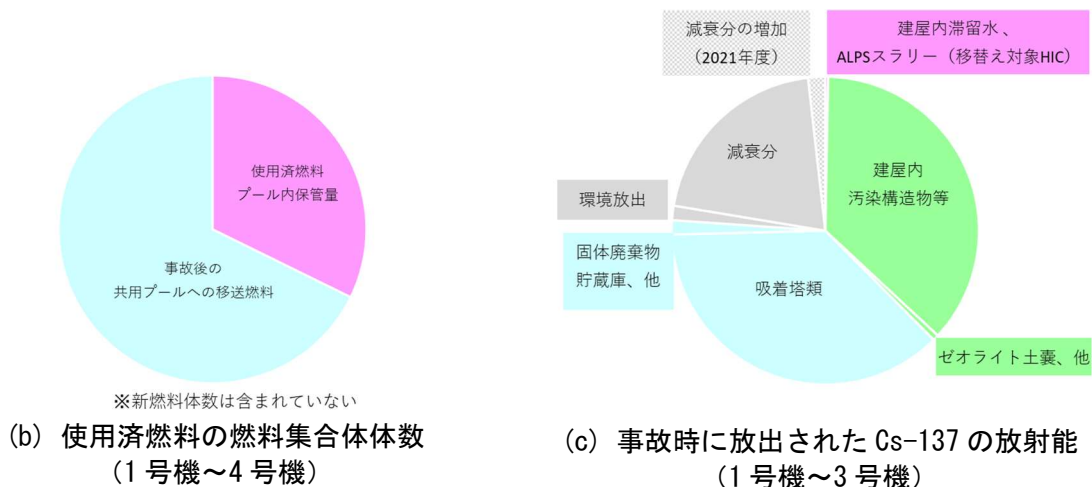
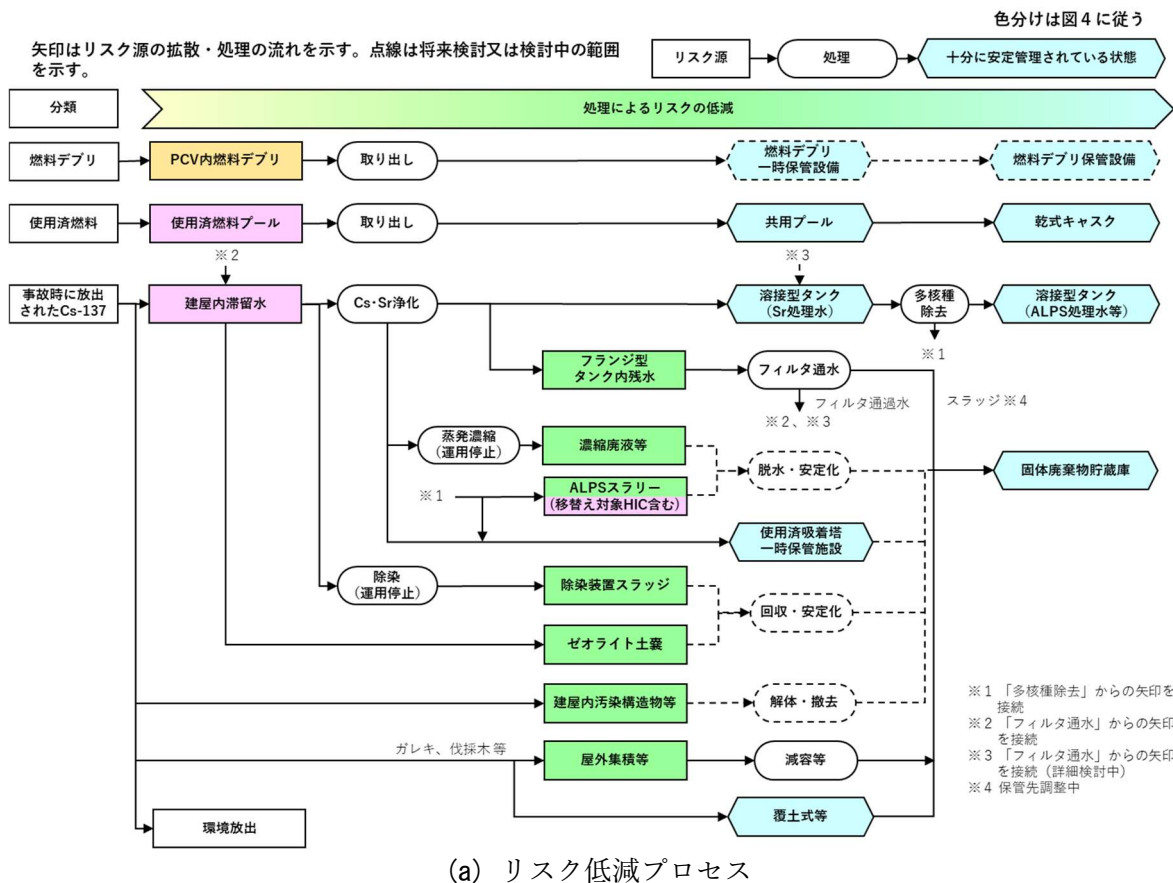


図5 主要なリスク源のリスク低減プロセスとその進捗 (2022年3月時点)

(図5(c)の減衰分は、事故後から2022年3月末までのCs-137放射性崩壊を考慮した)

2.2.2.3 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、PCV内への調査機器の投入、建屋内の線量測定や映像撮影等により、1～3号機PCV内部の様子を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ている。この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が、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廃炉作業を進める必要がある。

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
(検討例：放射性物質の閉じ込め（環境への影響）、作業員の被ばく、リスク低減効果)
- 確実 信頼性が高く、柔軟性のある技術
(検討例：要求事項への適合性、効果、不確かさに対する柔軟性)
- 合理的 リソース（ヒト、モノ、カネ、スペース等）の有効活用
(検討例：廃棄物発生量の抑制、コスト、効率性、作業エリア・敷地の確保)
- 迅速 時間軸の意識
(検討例：燃料デブリ取り出しへの早期着手、燃料デブリ取り出しにかかる期間)
- 現場指向 徹底的な三現（現場、現物、現実）主義
(検討例：作業性（環境、アクセス性、操作性）、保守性（メンテナンス、トラブル対応）)

5 つの基本的考え方を実際の現場に適用した場合、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上で廃炉作業を進めることが重要である（5 つの基本的考え方の「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、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。

2.3 廃炉作業を進める上での安全確保の考え方

2.3.1 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で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。

- ・ 多量の放射性物質（内部被ばくに大きな影響をもつ α 核種を含む）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、また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 つの基本的考え方を踏まえ、以下の点に特に留意した検討をする必要がある。

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、その不確かさを小さくするための現場アクセスや計装装置の設置も制約されている状況において、非定型、非密封の多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、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踏ま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（ALARP¹³）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の特殊な状況にあり、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、実際の現場から得られた情報を適確にエンジニアリングに反映していくことが不可欠である。燃料デブリ取り出しのような、過去に例のないエンジニアリングを確実に実施していくためには、実際に現場（運転操作、保全、放射線管理、計装、分析等）において作業を担う現場を熟知した人や組織（オペレータ）の目線や感覚を大切に、現場を直視した着眼点や判断等（オペレータ視点）を尊重していくことが重要である。また、長期にわたる廃炉を推進するに当たり、オペレータの目線や感覚の維持・強化を図る必要があり、東京電力自らがオペレータ視点を継承していくべきである。そのため、東京電力は外部の専門家や難作業の経験者、現場一線を離れた経験者等の「オペレータ視点」を有する技術者を招聘し指導・教育を仰ぐなど、廃炉作業全体において現場を常に意識した取組を実施していく必要がある。

廃炉作業の実際の検討に当たっては、廃炉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「安全視点」、「オペレータ視点」を反映することが基本である。具体的には、「安全視点」及び「オペレータ視点」を考慮した要求事項を定め、要求事項を満足すべき作業に対し、改めて 2 つの視点も考慮し、具体的な安全対策を

¹³ 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。

選択する。このように、廃炉作業の検討の各段階において「安全視点」、「オペレータ視点」に十分に留意する必要がある。

なお、不確かさが大きな廃炉作業では、要求事項を予め明確に定めることが困難な場面が多い。その場合でも、後述する「先行的な実施と得られる情報の後段での活用」や「イタレーション型¹⁴のエンジニアリング」、具体的に選択した安全対策の効用の確認と改善によって、柔軟かつ迅速に廃炉作業を進める必要がある。

本節では、まず、事業者による「安全ファースト」の浸透を求める。次に、福島第一原子力発電所の特徴に対して、オペレータ視点も包含した安全評価による安全確保策の重要性を述べるとともに、安全確保過程の中において多段階に取り込むべきオペレータ視点固有の重要性を述べる。最後に、ALARP 判断の必要性について言及する。

2.3.1.1 安全視点を第一とする考え「安全ファースト」の浸透

工法・装置についても、安全上の視点が十分に反映されていなければ、その使用は基本的に許容されない。したがって、工法・装置が現場で使用されるまでの過程（プロジェクト）に携わるもの全てが、安全視点を第一とする考え（安全ファースト）をもって業務に当たることが重要である。なお、「安全ファースト」の考えをプロジェクトへ具体的に適用すると、「プロジェクトの検討を行う際に、工法・装置の使用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上で、技術的な確実性、合理性、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、工法・装置とそれに伴う安全対策を決定する」ということになる。

東京電力では、福島第一原子力発電所の事故後、原子力リーダー間の対話、原子力リーダーから一般社員に向けてのメッセージの発信など、リーダー自らが率先して原子力安全に関する意識向上に向けた一層の取組を実施してきている。しかしながら、現場も含むプロジェクトに携わるもの全てに「安全ファースト」をあまねく浸透させるためには、組織トップの姿勢（原子力安全が特別なものであり、特別な意識を向ける必要があることを訴求し続ける姿勢）が重要である。

2.3.1.2 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

廃炉作業によるリスク低減に向け、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は、適切な対策を実施して安全を確保することが最も重要との「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、廃炉の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上で、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。福島第一原子力発電所の廃炉作業は、前例がなく、かつ不確かさが大きいことについて述べてきたが、十分に検討された安全評価を安全対策に関する判断の基本とすることで、安全対策に関する判断が大きく振れることなく（寡少又は過剰なりソース投入を行うことなく）、必要かつ十分に合理的に実行可能な安全対策が実現できる（安全評価を基本とした判断最適化）。なお、合理的に実行可能な安全対策については、2.3.1.3で述べるオペレータ視点を取り込んだ上で安全評価を行うことが特に福島第一原子力発電所の安全評価において重要である。

¹⁴ 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

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）が挙げられる。既に顕在化している高い放射線影響、更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、遅滞なく廃炉作業を進展させることが廃炉全体の安全確保に大きな意味を持つことになる。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ている通常炉の安全確保と異なった視点を持つ点に留意する必要がある。安全が確保されていることが前提であるが、特に、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については、全体バランスとの関係を踏まえて合理的に判断することが求められる（廃炉対応における適時性確保）。

2.3.1.3 「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り、「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における安全対策の実現性を判断するに当たっては、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とは異なる特殊な環境にて行われる未経験の取組であることを踏まえる必要がある。

また、安全確保に当たって通常炉と異なる以下のような観点からも「オペレータ視点」が重要性をもつことになる。

- ・ 運転操作を含めた運用による設計の補完：

大きな不確かさゆえに、全ての状況に設計のみで対応することには限界がある。このため、操作者による対応や現場運用で設計を補い、運用とトータルで安全を高めることが有効である。例えば、現在の福島第一原子力発電所において臨界安全に資する情報（燃料デブリの組成や未臨界度等）は、現場の計測環境の困難等のため把握できたとしても大きな不確かさがある。このような環境下でも臨界に関する安全を確保しつつ、一定の作業規模で燃料デブリの取り出しを進める必要がある。そのためには、作業ステップごとに変化する臨界の兆候を計測値の有意な変動として、燃料デブリ取り出しの操作者が認識できなければならない。仮に、ノイズと識別可能な計測値の有意な変動を生じさせる程度の大きさの切削等を未臨界度が比較的小さい状態で行う場合であっても、設計と実測値を踏まえた運用によって未臨界の維持や臨界兆候を把握することで対応が可能となる。つまり、前述のとおり、大きな不確かさのある環境においては運用による対応を可能とするよう検知技術の開発が一層重要となる。

- ・ 監視、分析等による情報の設計での活用：

大きな不確かさへの対応として、監視、分析等といった現場での運用において得られる情報を安全対策の設計に活用していくことが重要である。なお、活用に際しては監視、分析等から得られる情報を計算評価等と連携させ、総合的な利用を図る視点が重要である。

- ・ 異常時の対応：

異常状態への進展防止に万全を図ることが基本ではあるが、万一の異常発生時の備えとして、異常時の進展は緩やかで対応の時間的余裕が大きいという特徴を考慮した現場対応が有効である¹⁵。

2.3.1.4 安全を基軸とした ALARP 判断

安全には、このレベルを達成しなければ当該の工法、装置は使用できないという安全の基準に係る最低限のレベルがある。この最低限のレベルを満足した上のレベルには選択の幅があり、その幅の中で、達成される安全レベルとプロジェクトのコスト、期間（特に福島第一原子力発電所では長期間を要す重厚な安全対策を伴う工法、装置が必ずしも安全上プラスにならないことに留意）等とのトレードオフ、一種の ALARP に基づき、採用する工法、装置が決定される。また、このような工法、装置が現場において実現可能かという問題もある。

したがって、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）」していくという図 6 のようなサイクルを回しながら、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。この図に示されるように、安全視点とオペレータ視点はそれぞれが独立なものでなく、安全視点をベースにプロジェクトが行った ALARP 判断は、オペレータ視点をベースとした実現性のチェックを経て、工法、装置の決定に至る。安全視点が実際に現場に反映されるためにはオペレータ視点が不可欠であり、一方、オペレータ視点が活かされるためには安全視点をベースにした判断が必要である。

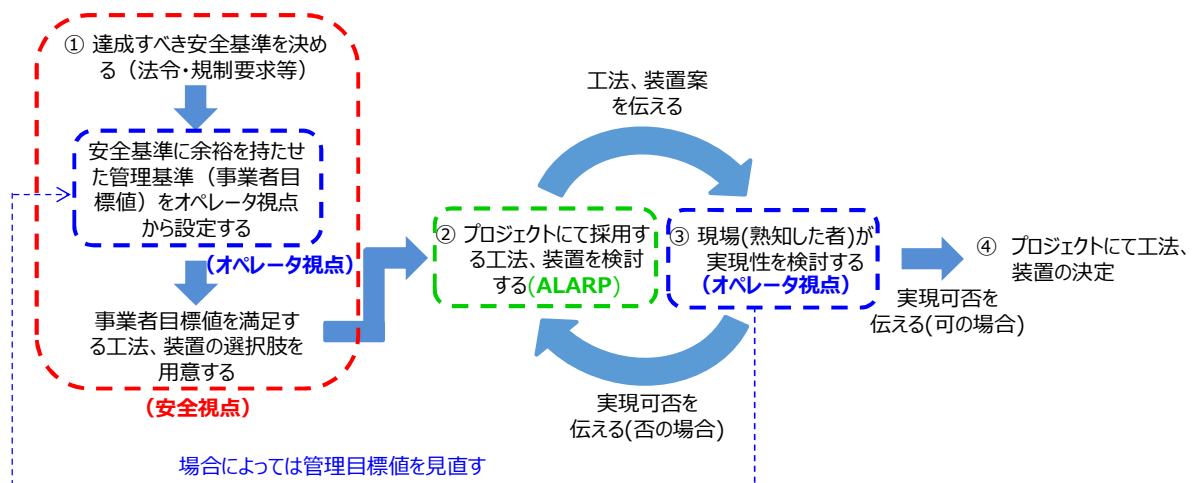


図 6 安全を基軸とした ALARP (イメージ)

2.3.2 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とから、燃料デブリ取り出し等の大掛かりな作業について、既存の知見のみに基づいて作業全体を設計しようとする、極めて大きな安全余裕や幅広い技術選択肢の想定が必要となる。このため、対応期間

¹⁵ 福島第一原子力発電所は事故後長時間が経過しており、放射性物質放散の駆動力となる内在エネルギー（崩壊熱）が小さい。そのため、一般的に、異常の進展は緩やかで、対応の時間的余裕が大きいという特徴がある。

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、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かさの縮小は早急に行うことが求められる。このため、作業をいくつかの段階に分けた上で、実際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¹⁶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¹⁷によって安全を確保した上で作業を進め、作業や試験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積極的に導入していくべきである¹⁸。

東京電力ではこの取組方式に近い事例として、原子炉注水停止試験を 2019 年度以降進めている。この試験は、燃料デブリ取り出しの工法選定の柔軟性を維持する観点も含め、将来の注水停止の可否判断に資することを目的の一つとしたものである。注水停止に伴う様々なリスク（燃料デブリや RPV 底部温度の上昇、PCV 外へのダスト飛散量の増加、注水再開時の再臨界発生）を把握し、一定のリスクをとりつつも段階的に試験時間を長くしていく方法により、注水停止の可否に関する知見を積み上げている。今後は注水停止時のリスク把握や知見積み上げに留まらず、燃料デブリ取り出し時における注水設備設計に資する根拠、すなわち注水に必要なポンプの台数や適切な注水量、注水箇所の相違による燃料デブリの冷却状況の変化等の情報を獲得すること等も視野に入れた取組にまで広げていくべきである。

なお、この原子炉注水停止試験の結果を、1 号機においては PCV 水位の低下と PCV 圧力の低下の関連の解明につなげることができている。試験実施以前に行われた現場調査により判明していた配管損傷の情報から、水位が当該の損傷箇所到達した時点で PCV 圧力の低下が起きる可能性があるかと推測していたが、実際に、この推測どおりの事象が確認され、「PCV 水位の低下により損傷箇所が露出した結果、PCV 圧力が低下した」とする推定原因の確証の度合いを更に高めることとなった。

この例は、試験目的と直接には関連しないが、現場調査によって得られた情報を組み合わせて検討することで不確かさの低減につながる効用を得たものである。

今後は、安全確保のための逐次型の取組の中で、現場作業によって得られる情報も十分に取込み、知見として積み上げていくことを方針として明確にすることが望ましい。例えば、燃料デブリ取り出し時における水素リスクの把握も同様である。窒素供給量を試験的に低減させる試験によって水素リスクを把握し、必要な窒素供給量や排気設備の信頼性などの安全確保上の要件を決定することができる可能性がある。

¹⁶ 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。

¹⁷ 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。

¹⁸ 福島第一原子力発電所の廃炉等の実施に関する方針等を取りまとめた廃炉等実施計画書（2021 年 3 月 17 日、東京電力 HD）において述べられている。https://www.tepco.co.jp/press/release/2021/1585525_8711.html

これらの逐次型の取組方式の過程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り、将来的には廃炉全体がもつ大きな不確かさを徐々に小さくすることができる。これにより、廃炉を着実に進展させることができ、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。

2.3.3 作業に伴う一時的なリスクレベルの増加への対応の考え方

廃炉作業は、中長期的な観点から速やかなリスク低減を目指すものであるが、作業に伴って一時的にリスクレベルが変化することや、作業員の被ばく量が増加する可能性について慎重に考慮する必要がある。廃炉作業は、リスクを有しつつも一定の安定状態にある現状に対して何らかの操作を加えることであり、操作の加え方によっては、そのリスクが顕在化するおそれがあるためである。例えば、燃料デブリを取り出すために原子炉内部にアクセスすることは、現状維持されている閉じ込め状態に影響を与えることになり、また、取り出し作業での特殊な操作や保守の実施は、作業従事者の被ばくを増加させることに繋がる。

このような廃炉作業による一時的なリスクレベルの高まりや被ばく増加の可能性については、それらを防止・抑制する措置を講ずることが重要であり、特に作業員の放射線安全は ALARA の考え方（被ばくを合理的に実行できる限り低くすること）に沿って確保するなど、周到な準備を施した上で作業を行うことで作業中のリスクレベルの増加を可能な限り抑えなければならない。

なお、廃炉作業の実施が過度に遅れることは現存する大きなリスクが長期間存在し続けることを意味し、建屋や設備の劣化に伴うリスクが徐々に増加していく可能性も有するため、廃炉作業を速やかに実施するという基本姿勢は堅持されねばならない。このため、廃炉作業のための作業工法の選定、装置や安全系の設計製作、作業計画の立案等においては、廃炉作業中のリスク増加の抑制を要件として、準備や作業にかかる時間、コスト、作業員被ばくの制限等の種々の制約条件をも考慮に入れた上で、早期の実施を実現するための慎重で総合的な判断を行うこととなる（添付資料 5）。

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、東京電力等は、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、幅広い方々によって分かりやすいリスクの継続的な監視の仕組みを整え、社会に発信していくことが重要である。NDF では、技術戦略プランを通して継続的にリスクの状況を提示することに加え、2.2.2.2 に示した廃炉作業の進捗に伴うリスク低減状況を提示する検討を進めている。東京電力においても、サイト全体のリスクを把握する仕組みを整備するとともに、リスク低減の状況について東京電力自ら社会への発信を意識した対応が求められる。

3. 福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術戦略

3.1 燃料デブリ取り出し

3.1.1 目標と進捗

（目標）

- (1) 周至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) 2号機の試験的取り出しについては、2021年内に着手としていたものの、新型コロナウイルス感染拡大の影響、2022年2月より櫛葉遠隔技術開発センターにおいて実施しているモックアップ試験や2号機現場の準備工事の状況等を踏まえ、取り出し作業の安全性と確実性を高めるために工程を見直し、2023年度後半目途に着手とする。また、段階的な取り出し規模の拡大等の一連の作業を進め、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（燃料デブリ取り出しの対象については添付資料6参照）。
- (3) 取り出し規模の更なる拡大については、2号機の燃料デブリ取り出し、内部調査、研究開発、現場環境整備等を見極めつつ、収納・移送・保管方法を含め、その方法の検討を進める。

（進捗）

各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を図7に示す。

また、各号機の取組状況の進捗について以下に示す。

① 1号機

各種計測センサを搭載できる潜水機能付ボート型アクセス調査装置（以下「水中ROV」という。）を用いたPCV内部調査を進めている。水中ROVはX-2ペネトレーション（以下、X-2ペネという。）からPCV内へ投入され、ペDESTAL外の地下階にアクセスするものである。このアクセスルート構築のため、X-2ペネへの隔離弁の設置、外扉・内扉の穿孔、PCV内干渉物の撤去及びガイドパイプ設置等の工事が2021年10月に完了している。その後、調査開始前に水中ROV線量計ノイズとカメラモニタ画面表示の不具合が発生したが、原因調査結果を踏まえた再発防止対策を講じた上で、2022年2月に調査が開始された。これまでに、目視調査、堆積物厚さ測定等を順次実施しており、目視調査ではペDESTALの作業員アクセス口の周辺外側及び内側に既設構造物か燃料デブリかの特定はできていないものの塊状の堆積物が確認されている。また、作業員アクセス口付近に鉄筋が確認され、ペDESTALのコンクリートの一部が無くなっていることが確認されている。本件に関して「廃炉・汚染水対策事業」にて、IRIDが2016年度にペDESTALの一部が損傷した状態における耐震性評価を実施しており、支持機能を大きく損なわないことを確認している。また、東京電力は今後内部調査により知見の拡充、評価を実施していくことを前提として、現時点の情報等を基に、ペDESTALの損傷に伴うプラントへの影響について考察している¹⁹。それによれば、ペDESTAL外面の確認状況を踏まえ、東京電力はペDESTALの損傷により想定される支持すべき構造物の移動、衝突や落下については、大規模な損壊等に至る

¹⁹ 第100回特定原子力施設監視・評価検討会「資料3：1号機 原子炉格納容器内部調査の状況について（技術研究組合 国際廃炉研究開発機構、東京電力ホールディングス株式会社）」

可能性は低いと想定しており、また、仮にペDESTALの支持機能が低下し、RPV等が傾斜、沈下した場合の安全上の影響として、燃料デブリの冷却、ダスト飛散、臨界の影響について考察した結果、周辺の公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えることはないと考えられている。NDFとしても今後内部調査により知見の拡充、評価が必要と考えており、東京電力が実施する内部調査の結果及びそれを踏まえたプラントへの影響評価について、評価内容の妥当性を確認していく。

今後、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、堆積物のサンプリング・分析、ペDESTAL内部の構造物状況等の調査を計画している。

なお、将来的な対応として、S/Cの耐震性の向上を図るための水位の低下を計画している。現在、既設配管を用いた取水やS/C内包水の水质把握等の水位を下げていくための準備として、原子炉建屋1階北側の調査を行い、現場環境整備に向けた取組を進めている。

② 2号機

2019年の中長期ロードマップにおいて、燃料デブリ取り出しの初号機は2号機とすることが定められ、その際に2021年内の試験的取り出し着手としていたものの、新型コロナウイルス感染症の影響により工程が遅れ、工程遅延を1年程度に留めることを目標に進めていた。

その後、アーム型のアクセス装置（以下「ロボットアーム」という。）については、2021年6月に英国での製作、確認試験を完了させた後、日本国内に持ち込み、7月より国内工場（神戸）において、また、2022年2月よりJAEA 櫛葉遠隔技術開発センターにおいて、性能確認試験、モックアップ試験及び訓練を実施している。これらの試験を踏まえ新たに必要となった制御ソフトの改修・検証、一部装置の改良等に取り組んでいる。さらに、信頼性向上のため、ワンスルー試験の拡充を計画している。

また、現場での準備工事として、2021年11月よりX-6ペネハッチ開放に向けた隔離部屋設置作業に着手しており、その中で発生した隔離部屋の箱型ゴム部損傷／ガイドローラ曲がり（地震対応）等について、対策として、箱型ゴムから金属板への交換、X-6ペネハッチ把手の切断、ガイドローラの構造変更等を計画している。今後、工場モックアップ試験により作業成立性を確認していくが、その検証結果や対策後の隔離部屋の据え付け状態に問題が確認された場合に備え、隔離部屋の再製作についても検討している。今後も、X-6ペネハッチ開放／X-6ペネ内の堆積物除去作業等を控えており、安全かつ慎重に作業を進める必要がある（詳細は3.1.2.2項を参照）。

上述のように、ロボットアームにおけるモックアップ試験等を踏まえた対応状況や、現場の準備工事における対策等が整理されたことも踏まえ、作業の安全性と確実性を高めるため、従前の新型コロナウイルス感染症の影響による1年程度の遅れに加え、更に1年から1年半程度の準備期間を追加し、試験的取り出しの着手は2023年度後半目途に工程変更することとしている。

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（内部調査及び燃料デブリ採取）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。この計画では、ロボットアームとエンクロージャ等について、性能に係わる要求事項や設計・据付時の要求事項を明確化し検討を進めている。取り出した燃料デブリは、エンクロージャ内で燃料デブリ取り出し容器及び構内輸送容器に収納した後、受入／

払出セルまで構内移送され、一時保管セルに保管する。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、一時保管セルを設計中である（図 8、図 9）。

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、東京電力の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しながら進めている。

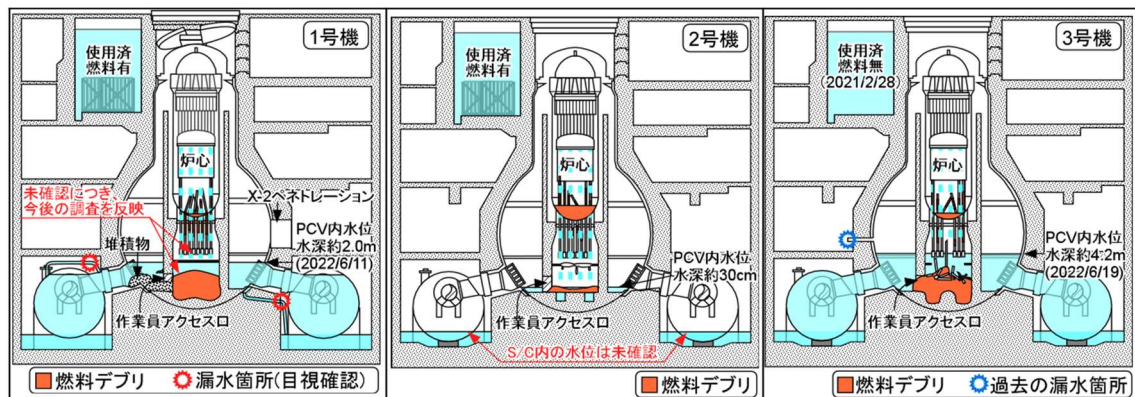
③ 3号機

3号機については、PCV内の水位が高いため、PCV内部調査やS/Cの耐震性向上を行うことを念頭に、2段階でPCV水位を低下させる計画である。ステップ1の水位低下は、S/Cに接続する既設配管を活用して自吸式ポンプによって排水し、水位を原子炉建屋1階床面以下に低下させる計画で進めていた。ところが、2022年3月16日に発生した地震以降、PCV水位は緩やかに低下していることが確認された。また、6月に以前より計画していた原子炉注水停止試験を開始したところ、PCV水位はPCV新設温度計／水位計下端を下回ったと判断されたことから、水位計測を維持するため注水を再開している。その後、7月には注水量を調整しPCV水位が概ね安定したことを確認している²⁰。以上の状況から、ステップ1の水位低下の計画については、今後、プラントパラメータを引き続き監視していくとともに、現在よりも低い位置での計器設置やPCV水位低下に向けた注水量低減・停止等を検討していくこととしている²¹。なお、ステップ2の水位低下は、将来的にガイドパイプをS/Cに接続し、S/C内部に設置する水中ポンプでS/C底部まで水位低下させる計画としている。

次に、取り出し規模の更なる拡大について、概念検討の中で工法検討を進めたが、俎上に上がった各工法については、難度の高い課題・リスクが数多く抽出されている。2022年度以降はこれらの課題・リスクの対応策に対して成立性の観点から検討を進めている。（詳細は、3.1.2.4項を参照）

²⁰ 東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニー、2022年7月19日、「福島第一原子力発電所3号機原子炉注水停止試験の終了について」

²¹ 第103回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議「資料3-5：3号機原子炉注水停止試験」



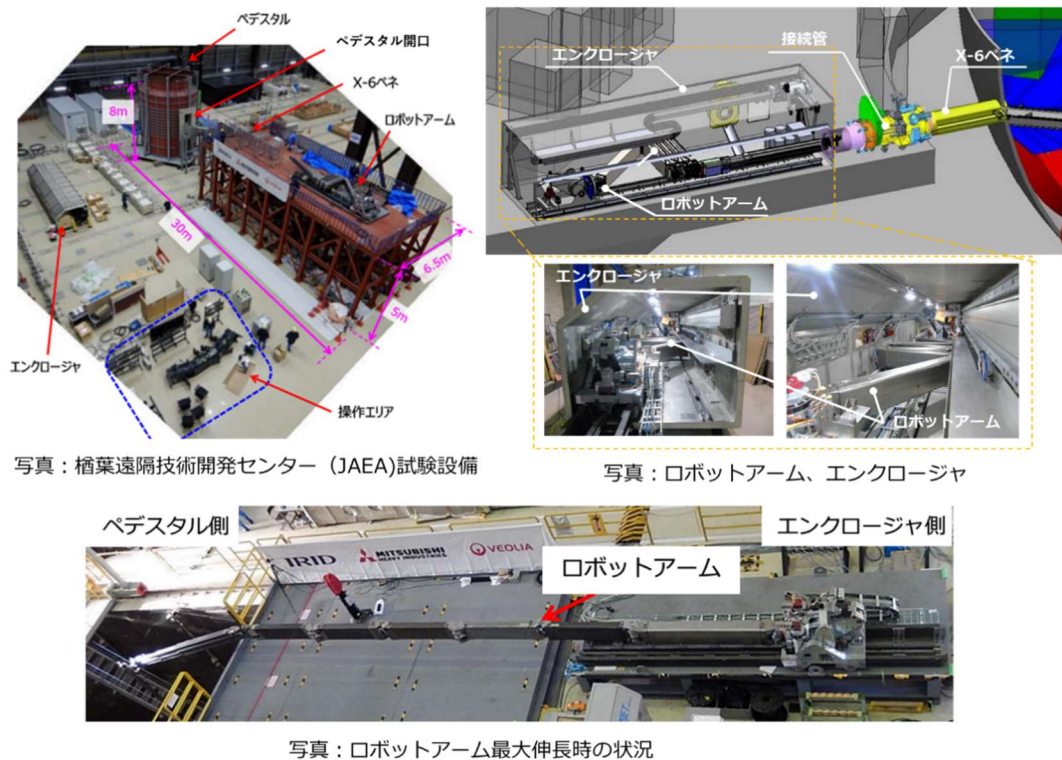
	1号機	2号機	3号機
炉心部	・炉心部にはほぼ燃料デブリなし	・炉心部にはほぼ燃料デブリなし (外周部に切り株状燃料の残存の可能性あり)	・炉心部にはほぼ燃料デブリなし
RPV底部	・RPV底部に少量の燃料デブリが存在 ・CRDハウジング内部及び外表面などに少量の燃料デブリが存在	・RPV底部に多くの燃料デブリが存在 ・CRDハウジング内部及び外表面などに少量の燃料デブリが存在	・RPV底部に一部の燃料デブリが存在 ・CRDハウジング内部及び外表面などに少量の燃料デブリが存在
PCV底部 (ペデスタル内側)	・ペデスタル内側床面に大部分の燃料デブリが存在	・ペデスタル内側床面に一定量の燃料デブリが存在	・ペ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 (ペデスタル外側)	・作業員アクセス口を通してペデスタル外側に燃料デブリが広がった可能性あり(堆積物を確認)	・作業員アクセス口を通してペデスタル外側に燃料デブリが広がった可能性は小さい	・作業員アクセス口を通してペデスタル外側に燃料デブリが広がった可能性あり
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(145mSv/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。
	・鉄筋の露出は作業員アクセス口周辺で確認		
燃料デブリへのアクセスルートに関する情報※2	・グレーチング上側から、ペデスタル外側のドライエール底部へのアクセス可能 ・X-6ベネからペ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レール上やペデスタル開口部付近には大きな障害物なし ・ペデスタル開口部からペ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	・ペデスタル開口部からペ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	・作業員アクセス口において、内部の鉄筋、インナースカートが露出し、RCW系配管が欠損 ・ペデスタル外側の作業員アクセス口周辺で厚さ約1mの堆積物を確認(但し、堆積物内部の状態(空洞の存在等)については評価できていない) ・グレーチング上側のペデスタル外側壁面に大きな損傷なし	・ペ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 ・ペデスタル内側壁面及びペ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	・ペ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 ・ペデスタル内側壁面に大きな損傷なし

※ 1 東京電力提供資料

※ 2 横アクセスによる燃料デブリ取り出しのための有力なアクセスルートと考えられる、X-6ベネからペデスタル内側へ至るルートに、落下物等による支障がないかを判断するための情報として、これまでの内部調査で確認された内容を記載。
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ベネの周りが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。
なお、1号機の内部調査は、調査装置の投入を考慮しX-2ベネからアクセスを行う。

(第 81 回特定原子力施設監視・評価検討会「資料 4-1：建屋滞留水処理の進捗状況について」等に基づき作成)

図 7 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



（東京電力、IRID 資料を基に NDF にて作成）

図 8 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）

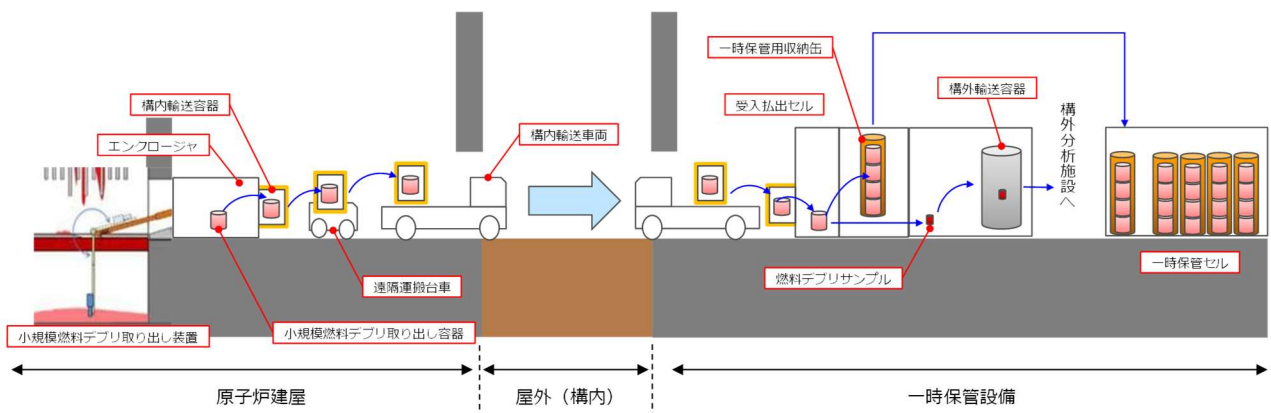


図 9 燃料デブリ取り出しから一時保管までのイメージ（段階的な取り出し規模の拡大）

3.1.2 主要な課題とそれを実現する技術戦略

PCV 内の状況把握等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り、燃料デブリ取り出しに向けた検討や研究開発の成果も的確に反映していくことが重要である。

2号機における試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）は初めての燃料デブリ取り出しであり、この作業を通して得られる貴重な情報、経験等を後続の取り出し作業に活かしていくためにも着実に準備を進める必要がある。その後、2号機の取り出しで得られた知見等も踏ま

え、段階的な取り出し規模の拡大を行う。また、3号機を対象として取り出し規模の更なる拡大の概念検討を進める。なお、東京電力は、取り出し規模の更なる拡大に向けたシステム・設備の基本設計及び研究開発を行う東双みらいテクノロジー株式会社（以下「新エンジ会社」という。）を設立した²²。今後は、東京電力の強力なリーダーシップの下で、東京電力本体、新エンジ会社、メーカ、研究機関等の関係機関との適切な役割分担のうえ連携し廃炉に取り組む必要がある。また、この取組を通じて新エンジ会社を中心に培われる技術を、後述する安全とオペレータ視点を基盤とする技術力の東京電力自身の向上に有効に繋げていくことが重要となる。

各号機は、それぞれ状況が異なることから、この項では、まず、3.1.2.1 節で各号機の燃料デブリ取り出し戦略について述べ、次に、3.1.2.2 節で試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）、3.1.2.3 節で段階的な取り出し規模の拡大、3.1.2.4 節で取り出し規模の更なる拡大についての戦略を記載する。その後、3.1.2.5 節で事故分析活動の継続、3.1.2.6 節で技術要件の技術課題と今後の計画について記載する。

3.1.2.1 各号機の燃料デブリ取り出し戦略

(1) 1号機

- ・ 取り出し規模の更なる拡大に向け、研究開発とその成果を現場適用するためのエンジニアリングを進め、2号機の試験的取り出しを通じて得られる知見の活用として、例えば、既設構造物の状況や堆積物の分布状況、ガンマ線分布や中性子カウント数分布、装置類の出し入れに伴う閉じ込めへの影響程度、取り出し作業で採取する燃料デブリの情報などを装置設計や取り出し手順、安全評価等に反映する必要がある。また、先行する3号機における工法検討結果等も踏まえ、取り出し方法を検討する必要がある。
- ・ 現在実施されている PCV 内部調査では、ペDESTAL 外の既設構造物の状態や堆積物の広がり状況等の確認を実施しており、今後、作業員アクセス口からのペDESTAL 内の調査も予定されている。一方、これまでのミュオンを用いた調査・解析等により、炉心部にはほぼ燃料デブリはなしと評価されているが、直接的な調査ではないため、今後の検討において直接的な映像調査が必要になる。このための技術開発は進められており、今後の工法の検討に当たっては、必要に応じて、これらの調査で得られた情報を反映していく必要がある。
- ・ 2,3号機と比較してプラント出力が小さいが故に RPV や PCV のサイズが小さく、プラント設備の配置も異なっている。また、今後の調査で明らかになると期待されるが、RPV 内及びペDESTAL 内外の堆積物分布は 2,3号機と異なると考えられている。そのため、これらの差異を考慮して工法の検討を進めていく必要がある。

(2) 2号機

- ・ 現在、試験的取り出しの準備が進められており、その後、段階的な取り出し規模の拡大を実施していく計画である。ただし、横アクセス工法にて実施するこれらの取り出しでは、全ての燃

²² 東京電力ホールディングス株式会社、「福島第一原子力発電所における燃料デブリ取り出しに向けた「東双みらいテクノロジー株式会社」の設立について」、2022 年 10 月 3 日

料デブリを取り出す計画ではないため、取り出し規模の更なる拡大に向けた工法の検討が必要である。

- ・ 段階的な取り出し規模の拡大に向け、研究開発とその成果を現場適用するためのエンジニアリングを進め、試験的取り出しを通じて得られる知見等を踏まえ、燃料デブリ取り出し設備・安全システム（閉じ込め、燃料デブリ冷却、臨界管理等）・燃料デブリー時保管設備・取り出し設備のメンテナンス設備の設計・製作・設置を進める必要がある。
- ・ 取り出し規模の更なる拡大に向けては、2号機の取り出しを通じて得られる知見、先行する3号機における工法検討結果等も踏まえ、取り出し方法を検討する必要がある。
- ・ これまでに実施された PCV 内部（ペDESTAL内）の調査及びミュオンを用いた調査・解析等では、RPV 底部に多くの燃料デブリが存在すると考えられており、また炉心部にも燃料が一部存在している可能性が指摘されており、工法検討時に考慮が必要である。さらに、PCV 底部に落下した燃料デブリはペDESTAL外へ広がった可能性は低いとされているが、RPV 内部とペDESTAL外の調査は未実施であるため、今後の検討において直接的な映像調査が必要になる。

(3) 3号機

- ・ 後述の 3.1.2.4 に記載のとおり、他の号機に先行して取り出し規模の更なる拡大に向けた工法の検討が進められており、2022 年度からはより深く検討する工法の課題・リスクに対して、現場適用性、技術成立性の検討を進める必要がある。
- ・ これまでに PCV 内部（ペDESTAL内）の調査が実施され、CRD ハウジングサポートの一部脱落、変形している状況や、ペDESTAL内下部には、炉内構造物と推定されるものを含む複数の構造物が落下している状況が確認されており、また、燃料デブリと推定される堆積物も確認されている。さらに、ミュオン調査・解析等から2号機よりも多くの燃料デブリがペDESTAL内に落下し、作業員アクセス口からペDESTAL外へ広がった可能性が推定されている。選択する工法の確実性を高めるためにも、ペDESTAL外の堆積物分布状況を把握するための調査の計画を検討する他、ペDESTAL内の追加調査や RPV 内の調査を検討し、これらの調査結果を工法の検討や設計に反映していく必要がある。
- ・ 工法の検討に当たっては、原子炉建屋の損傷状況を考慮した閉じ込め設備を検討する必要がある。

(4) 各号機に共通の戦略

- ・ 現在実施している1号機 PCV 内部調査においてペDESTALの一部に損傷が確認されているが、過去の研究開発において、損傷範囲を仮定した耐震評価では支持機能を大きく損なわないことを確認している。今後、内部調査等により知見を拡充させていくとともに、高温の堆積物（燃料デブリ）がペDESTAL外へ流出したことから推察される事故時の事象に対する考察を行っていく必要がある。これらの知見や考察を踏まえ、ペDESTAL内外の堆積物の取り出し方

法、S/C への堆積物の流入可能性等を検討するとともに、内部調査で得られた知見を他号機も含めて燃料デブリ取り出し工法へ反映していく必要がある。

- ・各号機ともこれまで得られている PCV 内部の情報は限定的であり、直接的な映像情報が得られていないエリアも多いため、各号機の PCV 内部調査や RPV 内部調査等の更なる調査の検討を進め、RPV 底部の損傷状況、ペDESTAL 外の堆積物の有無や分布状況など、更に多くの情報を早期に集めることが必要である。これらの情報を早期に把握することで、今後進める燃料デブリ取り出し戦略の方向性を確認することができ、後戻りの少ないエンジニアリングになる。
- ・これまで実施してきた廃炉の現場作業において経験してきたいくつもの現場トラブルについて、原因分析・究明を実施した上で、組織、体制等も含めた改善を行い、再発防止策を次の作業に反映することを検討すべきである。また、今後実施していく燃料デブリ取り出しにおいては、これらの経験を基に、想定されるリスクを排除できる工法を策定するか、排除できないリスクについては、そのリスクが発生した際の対応策をあらかじめ準備しておく必要がある。
- ・燃料デブリ取り出しは、準備作業も含めて高線量環境下という厳しい現場環境での作業となる。様々な状況下で遠隔装置を使用することになるが、現場の線量低減や既設構造物の撤去準備、使用機器の準備・段取作業においては、作業員による現場作業も少なからずあると考ええる。また、遠隔装置の保全や故障時の復旧も考慮する必要がある。このような取り出しの準備から取り出しに至る全体工事シーケンスを考慮した工法検討が必要であり、現場状況が全て特定できなくても取り出しが成立する工法、地震等の外部事象に影響されにくい工法（ロバストな工法）の選択が必要である。
- ・各号機とも残存量の違いはあるものの RPV 内には燃料デブリが存在していると想定されることから、気中工法においては、RPV 内部へのアクセスが限定的と想定される横アクセスのみでは対応に限界があり、上アクセスも必要となる。そのため、改めて上アクセス工法の開発及びエンジニアリングを加速して実施し、その上で上アクセスと横アクセスの組み合わせでの燃料デブリ取り出し工法の検討が必須と考えられ、その観点で工法や作業手順、オペレーティングフロア（以下「オペフロ」という。）に設置する遮へい設備やセル構造の検討、燃料デブリや廃棄物搬出の動線や汚染管理区分等の検討を進める。

3.1.2.2 試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）の開発状況と今後の見通し

2 号機における試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）では、X-6 ペネのフランジを開放し、従来より大きな開口を利用し、これを通じてロボットアームを出し入れし、PCV 内の燃料デブリを外へ取り出すことを行う。この作業では、従来の閉じ込め障壁の位置が X-6 ペネの閉止フランジ部であったものから、X-6 ペネ開放作業時に設置する隔離部屋（ロボット搬入部屋等から構成）（図 10）や新たに設置するエンクロージャ（ロボットアーム等を内包）（図 11）に拡張することになる。これは、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あり、新たな段階に入る取組である。

上記のように試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）は新たな段階に入る取組であり、以下に示す一連の作業を段階的に進めていく必要がある（図 12 参照）。また、PCV 内部状況の不確かさ故に、実際の現場の状況次第では、追加作業や作業のやり直し等が発生し、計画した作業どおりに行かないことも十分考えられることを念頭に置いた上で、安全かつ慎重に作業を進める必要がある。さらに、一つ一つの作業は初めての作業であり、これらの作業を通して得られる貴重な情報、経験等を後続の取り出し作業に活かしていくことが非常に重要となる。加えて、トラブル時の対応やその体制についても事前に検討しておくことで速やかに対処できるようにしておくことも重要である。

(1) 事前準備（実施済み）

① 原子炉建屋 X-6 ペネ廻りの環境改善

② X-53 ペネ孔径拡大

(2) 隔離部屋（ステージ内隔離部屋、ハッチ隔離部屋、ロボット搬入部屋）設置（実施中）

(3) ハッチ開放装置による X-6 ペネハッチ開放

(4) 堆積物除去装置による X-6 ペネ内堆積物除去

(5) ロボットアーム設置（ロボット搬入部屋撤去、X-6 ペネ接続構造設置、延長管設置、アーム・エンクロージャ設置）

(6) ロボットアーム進入（X-6 ペネ～CRD 開口～ペDESTAL内）、周囲の状況確認、障害物撤去（アブレッシブウォータージェット）

(7) ロボットアームによる内部調査及び燃料デブリ採取

① PCV 入口からペDESTAL外における内部調査

② ペDESTAL内部（グレーチング上、PCV 底部等）における内部調査

③ ペDESTAL内部からのサンプル採取（グレーチング上、PCV 底部等からの採取を検討中）

(8) 燃料デブリ回収装置から輸送用容器へ収納・線量計測

(9) グローブボックス受入・計量

(10) 容器の取出し・輸送容器へ収納・搬出

(11) 構外輸送及び構外分析（燃料デブリの性状分析）

また、試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）の準備状況については、中長期ロードマップ第 2 期末までに必要な装置の製作・設置、現場準備、取り出した燃料デブリを移送するためのグローブボックス設備までの設置が完了し、取り出しに必要な、各種機器装置のオペレータ、現場リーダーを含めた作業員が確保され、各種検証試験、モックアップ試験、訓練、取り出し体制が確立される見込みである。

新たに開発したロボットアームの検証試験は、英国工場内での検証試験に引き続き、神戸（三菱重工神戸造船所）にて 2021 年 7 月より 2022 年 1 月まで実施した。2 月からは、櫛葉遠隔技術開発センター（JAEA）の X-6 ペネから先の PCV 全体のモックアップ設備を使用して、実機模擬環境における検証試験（モックアップ試験）を開始している。

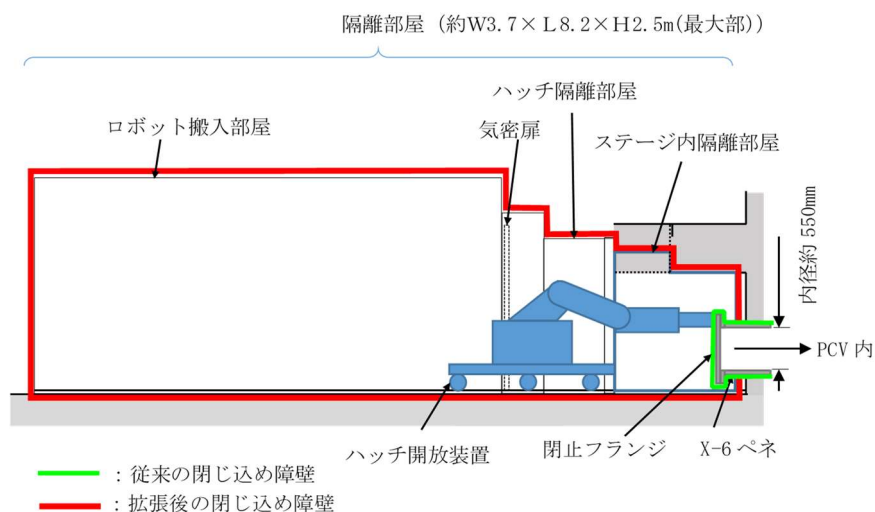
不確かな現場への適用に向けて、様々な状態での機能を検証すること、及び万一の際に装置を確実に救出できることが重要である。そのため、必要な準備を整えること、現場を模擬したモックアップ試験等を行うことにより、時間をかけてでも要求機能を満足していることを確実に確認

すること、新たに抽出されたリスクを確実に潰していくことが必要である。必要な場合には、それを繰り返し行っていくことも求められる。例えば、櫛葉遠隔技術開発センターでのモックアップ試験では、これまでの試験結果を踏まえ新たに必要となった制御ソフトの改修・検証、一部装置の改良等に取り組んでいる。また、信頼性を向上させるため、ワンスルー試験の拡充を計画している。さらに、モックアップ試験では、現場の厳しい環境を模擬することに加え、模擬していない部分を明らかにし、実機適用時の必要な方策を十分に準備することが必要である。

一方、現場のアクセスルート構築作業においては、ステージ内隔離部屋設置場所の床面の凹凸対応、ステージ内・ハッチ隔離部屋の気密漏えい対策等により隔離部屋設置が遅れており、今後、ロボット隔離部屋の設置まで完了した後に、引き続き X-6 ペネのハッチ開放、X-6 ペネ内堆積物除去作業、X-6 ペネ接続構造・エンクロージャ（ロボットアーム等を内蔵）の設置作業を行うことでアクセスルートの構築を図る計画である。

隔離部屋の設置作業においては、新たに設置したステージ内隔離部屋からの気密漏えい試験で漏えいが確認（ゴム製の閉じ込め障壁部分）された。この事象から高線量環境下で PCV 外側に既設構造物と取り合った閉じ込め障壁を拡張することは、非常に難しい作業であることが再認識された。また、高線量環境下では重装備の作業員を短時間で交代させ作業を実施する必要があるため、常に品質と安全を確保し作業を実施しなければならないことが再確認された。また、今後ロボットアーム設置のような PCV 外側に既設構造物と取り合った設備を設置し、閉じ込め障壁を拡張する作業等においても、高線量環境下での非常に難しい作業であることから、今回の事象を踏まえた周到な準備が必要である。上記、並びに閉じ込め障壁が不完全であり不確かさを有することや今後も地震発生が予想されること等、福島第一原子力発電所固有の特徴に十分留意し、今後の作業に当たっては、改めて作業内容の確認や作業訓練等を実施し、作業の安全性と確実性を高めるべきである。なお、段階的な規模の拡大以降の燃料デブリ取り出し工法の検討においても、上記の特徴や今回得られた知見、経験等を反映していく必要がある。

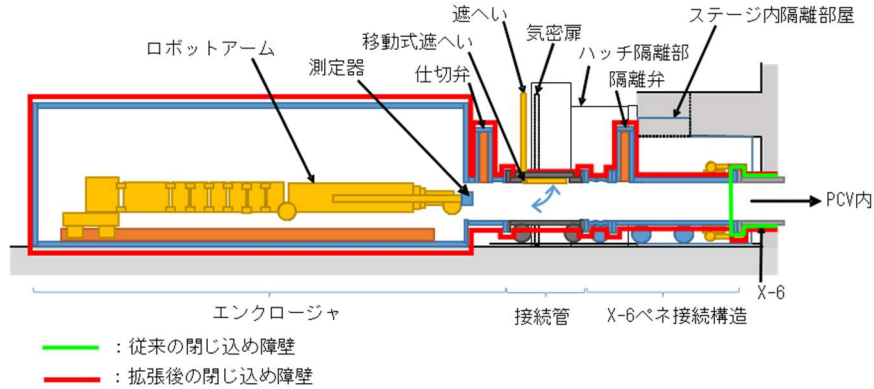
上記の事象も踏まえ、装置類を現場へ投入する場合には、十分な性能確認、運転検証を行ってから投入すべきである。



（東京電力資料を NDF にて加工）

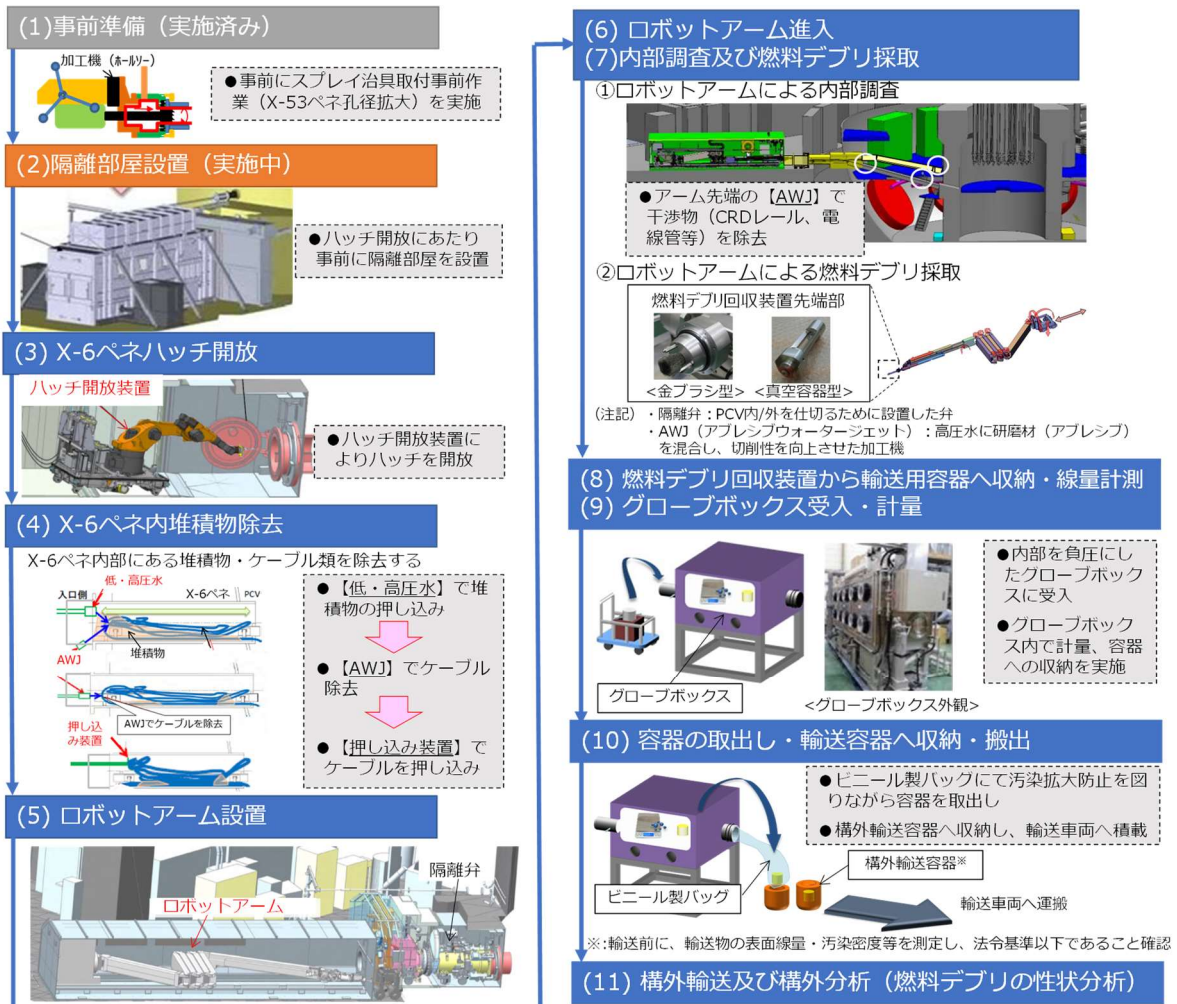
図 10 X-6 ペネ開放作業時の閉じ込め障壁概略図

エンクロージャ〜接続管〜X-6ベネ接続構造：（約W3.6×L11.8×H2.1m（最大部））



（東京電力資料を NDF にて加工）

図 11 試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）の閉じ込め障壁概略図



（東京電力資料を NDF にて加工）

図 12 試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）の作業ステップ

以下に主な技術課題と対応策や留意点について述べる。

- ・ X-6 ペネ内堆積物除去等に伴うダスト拡散抑制対策

1号機 PCV 内部調査アクセスルート構築におけるアブレッシブウォータージェット（以下「AWJ」という。）によるダスト拡散事象を踏まえ、X-6 ペネ内堆積物除去作業に伴うダスト拡散を抑制するために、低圧水洗浄装置による堆積物除去、スプレイカーテンによる拡散抑制等の対策を準備した。また、ダスト拡散抑制対策を考慮した作業手順（試射によるダスト挙動事前把握、切断作業の細分化等）として、ダスト濃度をモニタリングしながら、徐々に作業を拡大していく等、安全対策が十分考慮されていることを確認している。安全確保を第一としつつも、作業の制約となり工程が大幅に延伸しないような適正なダスト濃度の作業管理値を設定するように東京電力と協議していく。

- ・ 新型コロナウイルス感染症の影響再拡大リスクへの留意点

櫓葉遠隔技術開発センターでの性能確認試験については、英国技術者のサポートが不可欠であり、英国技術者の確保及び情報共有や意思疎通を円滑に行いつつ、不具合が発生した際の英国側のバックアップ体制を維持し、進める必要がある。

また、国内での新型コロナウイルス感染症の影響再拡大のリスクに備え、可能な準備を行っていくことが重要である。NDF としてもこれらの対応等について確認をしていく。

- ・ プロジェクト管理の留意点

海外企業を含めた受注者やその外注先の工程の進捗管理に注意を払い、プロジェクトを進めていくことが重要である。東京電力においては、プロジェクト管理の取組の中で、遅れのリスクを事前評価し、リスク発生の防止策や代替案を立案する取組がより一層必要である。NDF としても、受注者やその外注先の会議体へ参加し、きめの細かい状況の確認を行い、リスクの事前評価をサポートする。

- ・ 試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）可能範囲の制約と段階的な取り出し規模の拡大への反映

PCV 内部調査では、ロボットアームを用いて、ペDESTAL内側の既設構造物の状況や堆積物の分布（3D データ）、底部及びプラットフォーム上のガンマ線分布、中性子カウント数分布を可能な限り広い範囲で取得する計画である。しかしながら、設計当初の計画に比べペDESTAL内の構造物やプラットフォームの残置量が多く、ロボットアームが炉底部へアクセスできる範囲が制約され、ペDESTAL底部の中性子計測や試験的取り出しの可能な範囲は限定的となる。

櫓葉遠隔技術開発センターでのアーム・ツールの組合せ試験結果も反映し、中性子センサ、3D スキャナー、ガンマセンサ等で取得するデータの範囲、種類、そのデータに基づく炉内状況の評価方法（燃料デブリの分布等）を計画して、事前に準備している。

ペDESTAL底部の燃料デブリの取り出しができなかった場合も想定し、プラットフォーム上の堆積物は底部同様に燃料デブリの可能性が高いため、取り出しの対象として計画をしている。制限された範囲での調査や試験的取り出しとなる中で、次の段階的な取り出し規模の拡大に向け必要な情報は何かを事前に十分に検討した上で、確実に作業を進める必要がある。

- ・ 次ステップ（段階的な取り出し規模の拡大）に向けた人材育成、技術継承

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かさ及び難しさがある。そのため、こうした作業を進める際には、東京電力や関係者において、必要に応じて外部からの招聘も含め現場経験豊富な人材を活用し、現場の目線や感覚の浸透を図る人材育成を行っていくとともに、そこで培った技術の継承を行っていく取組が必要である。

3.1.2.3 段階的な取り出し規模の拡大の開発状況と今後の見通し

段階的な取り出し規模の拡大に適用する取り出し用の装置は、試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）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。

取り出し範囲については、実績を積みながら、ステップ・バイ・ステップで範囲を拡大していく計画で、把持・吸引できる燃料デブリから取り出しを開始し、切削を伴う燃料デブリ取り出しに拡大していく。併せて、プラットフォームの梁切断の可否や切断範囲を検討していく計画である。また、内部にロボットアーム等を内蔵するエンクロージャについては、PCV と X-6 ペネの接続構造を介して接続され、閉じ込め機能を担保している。燃料デブリをエンクロージャ内に持ち込むため、遮へい、水素対策や汚染拡大防止の対策、燃料デブリをエンクロージャ外へ持ち出すための方法、バウンダリや動的機器の機能維持の確認及び遠隔メンテナンス方法の検討が必要である。

NDF としても引き続き、研究開発及び東京電力のエンジニアリングの両面から、技術開発の状況や現場への適用準備の状況を適時把握して、現場適用性や安全性確保の観点から確認していく。

以下に主な技術課題と対応策について述べる。

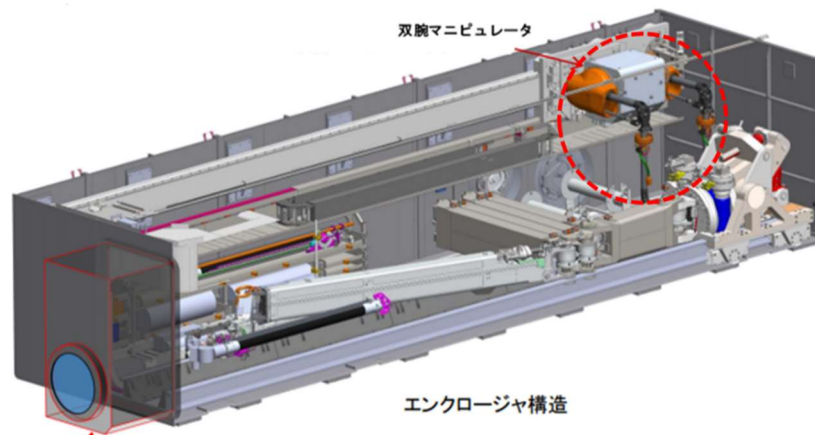
- ・ 燃料デブリを持ち込むエンクロージャの閉じ込め性の確保

取り出し作業は、PCV 内から取り出した燃料デブリをエンクロージャへ持ち込み、ユニット缶に収納し、構内移送のためエンクロージャ外へ搬出するという作業を繰り返し行うことになる。このため、エンクロージャ内が徐々に汚染するため、閉じ込め性の確保が重要である。

こうした作業は、ロボットアームの出し入れに合わせて、エンクロージャ内の圧力をコントロールしながら実施する。このため、エンクロージャの耐久性を含めた気密性能や動作の信頼性を確認するため、事前のモックアップ試験、装置設置後の試験、その後の異常監視が重要である。

- ・ マニピュレータの信頼性確保（図 13）

エンクロージャ内に設置されるマニピュレータは、エンクロージャ内で様々な作業・保守を行う重要な役割を担っており、信頼性の確保が重要である。そのため、事前に様々な作業・保守に対する十分な訓練を行い、作業の再現性を確保することや運転員の養成を行っていく必要がある。



(IRID 資料を NDF にて加工)

図 13 エンクロージャとマニピュレータ

・ 供用期間中の装置類保守の確保と対応策

段階的な取り出し規模の拡大においては、定期的な保守に加えて、万一故障した場合の修理あるいは交換を行う必要がある。エンクロージャが設置される 2 号機の原子炉建屋内は線量が高く、その場での保守は困難であるため、建屋外にメンテナンス建屋を設け、そこまで装置類あるいはエンクロージャごと移送し、その中で、除染、解体、補修あるいは交換等を実施することを計画している。

また、様々な作業を行うマニピュレータは、供用期間中に補修あるいは交換の可能性があり、これをメンテナンス建屋に搬出入する装置の開発を継続中である。

このように修理等を含む装置類の保守性の確保とその対応が極めて重要であるため、東京電力の検討及び準備状況を確認していく。また、こうした供用期間中の装置類保守によって得られる経験を取り出し規模の更なる拡大にも活かしていくことが重要であるため、故障履歴や対応結果を含めたメンテナンス記録を確実に残す仕組みを構築する必要がある。

・ 一時保管設備の詳細設計・製作・据付工事での留意点

一時保管設備は、基本設計、詳細設計を複数の企業が分担している。また、据付に際しては既存設備との干渉などを事前に解消しておくことや、他の工事との輻輳を避ける等の工程上の調整も必要である。据付工事においても建築工事とセル等の機器の据付がほぼ同時期に実施される可能性もある。このように設計、据付時に取り合いが多く、工程管理や懸案事項の解決等に東京電力によるプロジェクト管理が期待されてくる。この一時保管設備の設計、製作、据付等の工事管理は規模が小さいながらも多数の企業が関わることから、仕様調整・取り合い調整を行い、工程をキープしながら工事を進めていく必要がある。この工事での経験や知見は今後の取り出し規模の更なる拡大における作業のプロジェクト管理、工事管理の参考になると考える。様々なトラブルも発生する可能性もあるだろうが、その解決方策等含めて記録を残しながら、この経験を後続作業に活かすことが重要である。

受入/払出セル、一時保管セル内作業ではマニピュレータや遠隔装置を使用する計画である。設計段階においてこれらの装置を用いた作業内容を十分に確認し、潜んでいるリスクの抽出を行ってその対策の検討を行い実行していくことが重要である。また、先行する PCV 内部調査や試験的取り出しにおける遠隔装置に関する知見や経験を参考にして、設計の検証やモックアップ

プ/訓練を行っていくことが重要である。

3.1.2.4 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、「燃料デブリ取り出しは廃炉事業の重要なプロセスでありその確実な実施は廃炉事業の成否を左右する」ということを踏まえて、総合的な見地（技術的な成立性のみならず事業継続性も見据えて）から工法の検討を行うとともに、東京電力が責任を持って取り組んでいく必要がある。そのため、本節では工法策定の進め方について詳述する。

今なお不確かさが存在する福島第一原子力発電所では、PCV 内部状況の不確かさが検討の障害となっており、前提条件を設定して検討を進めざるを得ない状況がある。今後、技術的成立性を判断する上では、臨界管理、ダストの閉じ込め、遮へい、熱除去等、工法・システムに対する要求事項（境界条件）及び制約条件（敷地利用面積、既設設備との取合い等）を明確にして検討していくことが重要である。（参考に、これまでの技術戦略プランにおける工法検討の変遷を添付資料 7 に示す。）

東京電力は、取り出し規模の更なる拡大についての概念検討を、3号機を先行して実施中であり、燃料デブリ取り出しシナリオを検討するとともに工法の検討を進めている。この中で、2021 年度末までに工法を検討してきたが、俎上に上がった各工法については、難度の高い課題・リスクが数多く抽出されたことから、2022 年度以降は、これらの課題・リスクの対応策に対する現場適用性、技術成立性の確認を行っていく。これらを確認した結果、予め定めた判断基準を満足できない場合等も考えられるため、その他の工法の検討も考慮しておく必要がある。

以下に取り出しシナリオ・工法を検討する上での留意点について述べる。

・ 取り出しシナリオの策定

工法検討においては、5 つの視点(安全、確実、合理的、迅速、現場指向)に基づき、目標とする安全レベルを満足することはもちろんのこととして、コスト、工程といった属性（評価項目）も判断指標とする必要がある。検討の初期段階において、これらの評価項目を、多属性効用分析手法²³（以下「MADA 評価」という。）などを活用してできるだけ定量化する必要があり、判断指標と判断基準を明確にすることが最も重要である。これらの設定に当たっては、判断基準を満たしているかどうかを客観的に判断するための材料（例えば、被ばく評価、構造評価等）を予め明らかにしておく必要がある。また、工法検討の結果については、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。

PCV 内の状況把握が限定的な中、号機ごとに複数の燃料デブリ取り出しシナリオを検討し、スタートからゴールまでの複数の道筋を明らかにすることは重要である。燃料デブリ取り出しシナリオの検討においては、将来実施される PCV や RPV の内部調査や技術検討により得られる成果を予め複数想定した上で、それらを活用する前提条件の基に検討を行うものである。

²³ 意思決定を行う際にひとつの属性（評価項目）だけではなく複数の属性（評価項目）に着目し優劣を判断する手法。この手法を工法策定プロセスに当てはめ「 $\sum$ （各属性（評価項目）の評価） $\times$ （各属性（評価項目）の重み=重要度）」の得点が高い工法を残す。今回、工法の検討で活用したが、今後も複数の工法オプション（例えば、アクセス装置等）の絞り込みの際には本手法の評価も有効であると考える。

こうした複数の道筋を検討した上で、道筋の中のある時点における工法の有力候補絞り込みを行い、その後得られる情報等に応じ、以降の道筋を更に絞り込んでいく取組が重要である。

・ 要求事項の明確化

取り出し規模の更なる拡大については、2号機の燃料デブリ取り出し（試験的取り出し、段階的な取り出し規模の拡大）、PCV 内部調査、RPV 内部調査、研究開発、現場環境整備等で得られた知見を踏まえ、収納・移送・保管方法を含め、その工法の検討を進める。その際、2号機の燃料デブリ取り出しに比べ、作業、装置及び施設が大規模化し、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。また、現場の線量が高いこと、PCV 内の状況把握が限定的であること、作業範囲が大規模化する可能性もあることを踏まえ、作業・装置に求める要求事項（閉じ込め、臨界、操作性、メンテナンス性、スループット等）をより明確に設定して進めることが重要であり、要求事項の相互の関係にも留意する必要がある。

以下に東京電力による工法の検討状況、NDF の考えについて述べる。

・ 工法検討の具体的な手順、方法

2021 年度に実施した内容を以下に示す。工法を検討するに当たって、作業プロセスを取り出しプロセスと移送・保管プロセスの大きく 2 つに分け、さらに、取り出しプロセスは準備作業と PCV 内作業、移送・保管プロセスは PCV 外作業と移送・保管作業の合計 4 つの主要な作業フェーズⅠ～Ⅳに分類した（図 14 参照）。作業フェーズごとに工法の検討を行うため、各作業フェーズで考えられる工法をあらゆる可能性を排除せず幅広く網羅的に抽出（ロングリストの設定）した上で、合理性の低い工法を排除した（ショートリストへの整理）。次に、ショートリスト各々に対し、MADA 評価によりスコアリングを実施した。また、狙上に上がった工法に対し、廃炉・汚染水・処理水対策事業の開発成果や東京電力のエンジニアリング成果や国内外の技術知見を取り入れ、基本仕様、条件等を仮設定した上で工法を検討し、課題・リスクを抽出、整理した（図 15 参照）。東京電力の工法検討と並行して、NDF は独立して工法検討を進め、東京電力と NDF はお互いの検討結果の考え方を確認し、意見交換等を行っている。

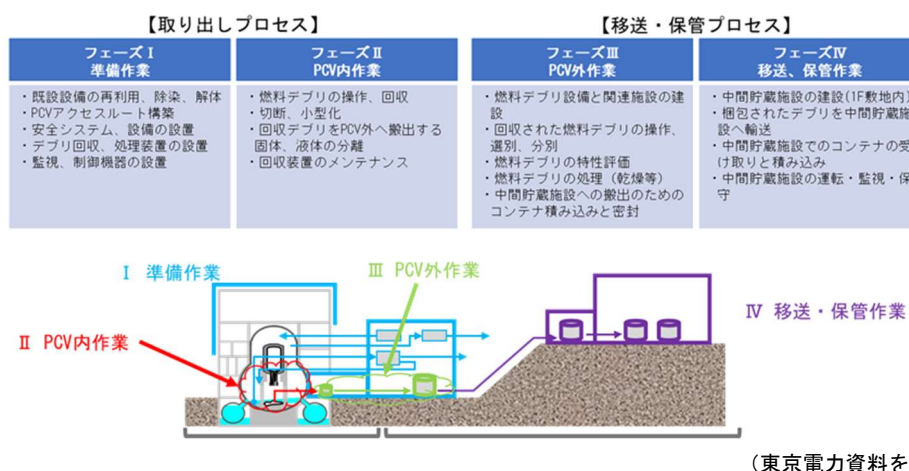


図 14 各作業フェーズのイメージ（プロセスの分割）

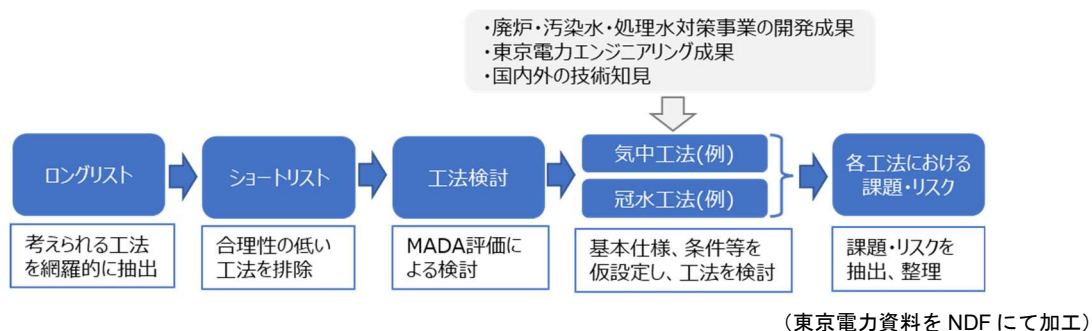


図 15 2021 年度 工法の検討フロー（概要）

・ 工法の検討状況

【取り出しプロセス（準備作業、PCV 内作業）】

取り出しプロセスは、作業環境、アクセス方向、一次バウンダリ等により工法が分類され、気中工法及び冠水工法が俎上に上がってきている。今回の気中工法は、従来から考えられてきた上アクセス工法と横アクセス工法を単独ではなく組合せした形の工法としている（今回の気中工法のイメージ図は図 16 参照）。

一方、今回の冠水工法については、以下に示すように従来からの冠水の考え方と相違している。従来の冠水工法（PCV に水を張る工法：PCV 冠水工法）は放射線の遮へい効果等に利点があるものの、PCV 上部止水の技術的難度と作業時の被ばく量を踏まえると、実現性が低いと判断されていた（従来の冠水工法（PCV 冠水工法）のイメージ図は図 17 参照）。このため、2017 年及び 2019 年の中長期ロードマップにおける取り出し方針では、気中工法に軸足を置いて進めることとし、冠水工法については研究開発の進展状況を踏まえ、将来改めて検討の対象とすることとしていた。今回の冠水工法は、上述の PCV 冠水工法と相違し、新たな発想により、バウンダリとして船殻構造体²⁴と呼ばれる新規構造物で原子炉建屋全体を囲い、原子炉建屋を冠水させる方式の工法である（今回の冠水工法（船殻工法）のイメージ図は図 18 参照）。

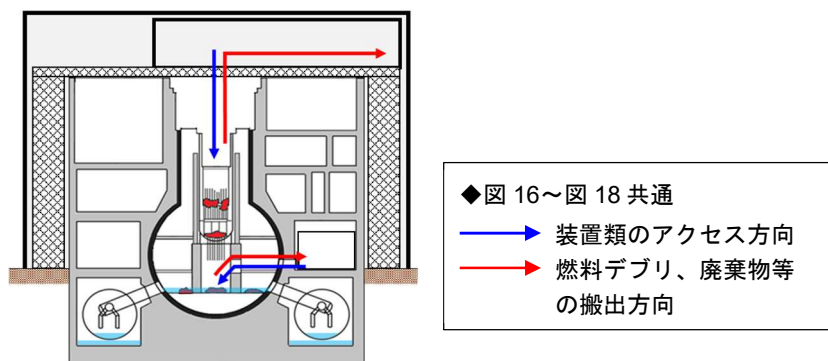


図 16 気中工法の一例
 （上アクセスと横アクセスの組合せのイメージ図）

²⁴ 船殻構造体：船殻構造とは、板（面）で受けた力を防撓材（撓みを押さえる骨組み）が支える構造のことで、船舶・飛行機で用いられている。

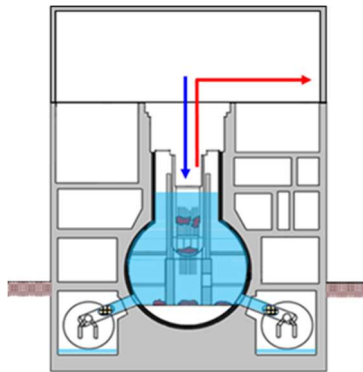


図 17 参考：従来の冠水工法
(PCV 冠水工法のイメージ図)

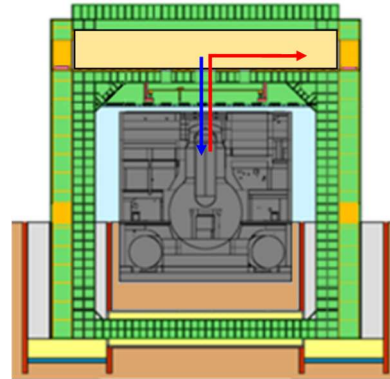


図 18 冠水工法の一例
(船殻工法のイメージ図)

その後、これらの気中工法、冠水工法（船殻工法）について、工法検討を進めてきたが、各工法ともに原子力では実績のない工法であり、難度の高い課題・リスクが数多く抽出された。なお、各工法の共通の課題の例として、原子炉建屋内の準備工事では高線量下の非常に厳しい環境での作業となり、作業員の被ばくを考慮した工事成立性を確認する必要がある。また、閉じ込め障壁や安全システム構築のため、周辺の建屋／設備の撤去及び大型の新規構造物の設置等が必要となり、工事物量やこれに伴う廃棄物量は膨大となる。さらに、燃料デブリ取り出し時は、燃料デブリ切削等の加工に伴い発生する放射性物質を確実に閉じ込める機能が求められ、加えて、万が一臨界が起きたとしても作業員、環境に影響が出ないように早期検知し、未臨界状態に移行できる設備、運用が必要となる。これらの課題の解決に向けて、各工法単独で検討するのではなく、前提条件や要求事項などの共通的な検討条件を整理し、また、内部調査や研究開発などで得られた成果を共有、活用していくことが重要である。

2022 年度以降は各工法の成成立性の検討を進めていくが、課題・リスクの対応策が複数考えられるため、成成立性がある程度確認できた後は設計を進めつつ段階的に選択肢の絞り込みを行っていく。また、ホールドポイントを設け、現場適用性、技術成成立性等の評価やコスト・工程といった事業継続性を含めた評価を行い、判断基準を満足しなかった場合は下記の①又は②を検討する必要がある。なお、前述のとおり、その他の工法の検討も考慮しておく必要がある（図 19 参照）。

- ①工法は変更せず、課題・リスク対応策を再検討
- ②その他の工法について、課題・リスクの抽出からやり直し

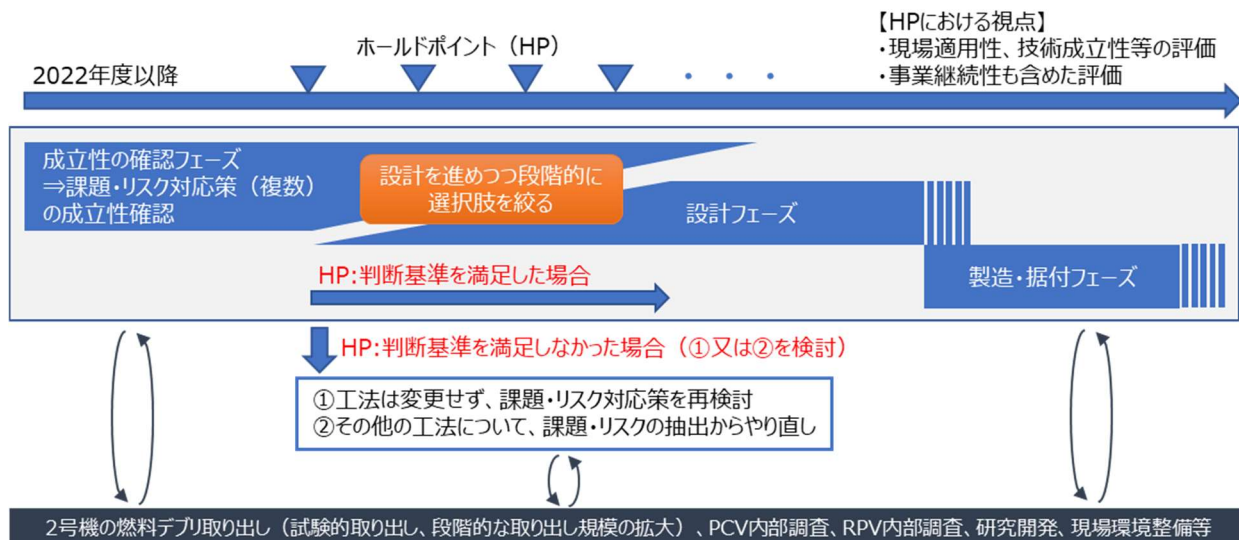


図 19 2022 年度以降 工法検討の進め方のイメージ

【移送・保管プロセス（PCV 外作業、移送・保管作業）】

移送・保管プロセスは、燃料デブリ処理、燃料デブリ／廃棄物分別、容器、水素対策、保管遮へい等により工法が分類されるが、各選択肢には成立性の観点で大きな差がないと評価された。

2022 年度以降は、取り出しプロセスの検討を優先し、その中で移送プロセスとの接続性の観点での検討を進めている。

・ 2022 年度以降の取組に向けて

上述のように、2022 年度以降は、課題・リスクの対応策に対し現場適用性、技術成立性の確認等を計画的に進める必要がある。このため、早期に本検討のエンジニアリング計画を立案し、アウトプットの内容確認やレビュー等のプロジェクト管理を確実に進める必要がある。これを進めるためには、東京電力の要員を十分に確保し、強固な東京電力プロジェクト体制の下で検討を進める必要がある。また、検討する項目が多々あるため、工法の成立性に大きく影響する課題を優先し、各分野（安全／被ばく線量、構造（耐震）、工法、システム、臨界、廃棄物等）の担当者とホールドポイントで確認、共有しながら進める必要がある。そのため、東京電力／NDF の検討体制を明確にし、より一層の強化が必要である。さらに、工法の検討においては総合的な見地として技術的な成立性のみならずコストや工程といった事業継続性も見据えるべきである。

なお、取り出し規模の更なる拡大に向けた各技術分野の課題については、3.1.2.6 で述べる。

3.1.2.5 事故分析（事故時の発生事象・進展過程等の明確化）活動の継続

燃料デブリ取り出しに向けたこれまでの内部調査により採取された堆積物サンプルの分析が進められている²⁵。このような調査・分析により得られる情報は燃料デブリ取り出し工法や保管管理等に直接的に反映される。さらに、事故履歴に関する情報と照らし合わせて、検討及び考察することで現象理解が進み、事故原因の究明及び廃炉へ貢献するとともに、間接的には原子力に関する安全性の向上にも資することになる。

サンプル分析の結果と事故進展の模擬試験、既往の科学的知見を照らし合わせて、事故時に発生した過熱、溶融、化学反応、水素爆発等の個々の事象、それらが経時的に進展していく過程、非常用冷却・減圧機器の作動状況、ケーブル等からの可燃性ガス発生量を推定・確認する活動を東京電力と JAEA が協力して実施している^{26,27,28}。さらに、東京電力が各号機のオペフロ^{29,30,31}、非常用ガス処理系^{32,33}（以下「SGTS」という。）等の調査を独自に行っている。

事故の継続的な調査・分析を所掌³⁴する原子力規制庁においては、「東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会」を設置して事故分析に係る検討を進めるとともに、状況に応じて東京電力と協働して、2号機のオペフロ、3号機原子炉建屋の内部、SGTS フィルタトレイン等の調査を実施し、それらの結果を中間報告³⁵として取りまとめている。これらの調査により、原子力規制庁は、2号機及び3号機のオペフロに設置しているシールドプラグの1層目と2層目の間に大量のCsが存在していると評価し、2号機のシールドプラグに穿孔した穴内での線量測定³⁶、及びシールドプラグの変形の有無を確認するための形状測定³⁷も新たに実施した。

また、施設解体等の廃炉作業によって事故分析に必要な情報が影響を受ける。その一方では事故分析のための取組が廃炉作業に干渉する等のケースも考えられることから、原子力規制庁は

²⁵ 第84回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議「資料3-3：1～3号機格納容器内部調査関連サンプル等の分析結果」

²⁶ 平成30年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発)2020年度実施分成果、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)、(2021)

²⁷ 第29回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料1-1：BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析結果」

²⁸ 第29回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料1-2：ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験結果」

²⁹ 第69回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議「資料3-2：1号機 原子炉建屋 SFP 内干渉物調査及びウェルプラグ調査について」

³⁰ 第88回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議「資料3-3：第24回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議「資料3-2：2号機原子炉建屋オペフロ調査の速報について」

³¹ 第24回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議「資料3-2：3号機原子炉建屋オペフロにおけるγ線スペクトル測定結果について」

³² 第84回特定原子力施設監視・評価検討会「資料4-3：1/2号機 SGTS 配管撤去に向けた調査結果について」

³³ 第30回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料2：福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去について」

³⁴ 原子力規制委員会設置法第4条第1項第11号に「原子炉の運転等に起因する事故の原因及び原子力事故により発生した被害の原因を究明するための調査に関すること」と所掌事務が定められている。

³⁵ 第19回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料4：東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ」

³⁶ 第27回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料2-1 別添1：2号機シールドプラグでの新たな穴内部での測定」

³⁷ 第28回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料2-1-3：2号機シールドプラグの変形」

「福島第一原子力発電所廃炉・事故調査に係る連絡・調整会議」^{38,39}を設置し、資源エネルギー庁、東京電力、NDF等の間で事故分析と廃炉に関する連絡・調整を行っている。廃炉作業と事故調査を両立させる例として、1号機及び2号機SGTS配管の一部撤去⁴⁰においては、放射線量率やガンマカメラによる測定、切断後に分析用の配管サンプルを採取することを東京電力が計画している。切断時の放射性ダスト放出への対策として、2021年9月から発泡ウレタンの注入作業を開始し⁴¹、ウレタン注入部をカメラ及びレーザーポインタで確認しながら切断するように改善を図っている⁴²。廃炉作業と事故調査が周辺住民や環境へ影響を及ぼさないように注意が払われている。

国内での事故調査活動に加え、事故進展、燃料デブリ分析に関する国際的な議論の場として、経済協力開発機構／原子力機関（以下「OECD/NEA」という。）のプロジェクトが2012年から実施されている。BSAF、BSAF-2に続く、PreADES及びARC-Fを統合したFACEプロジェクトが2022年7月から開始されている。12か国23機関が参加しており、詳細については4章で記述する。

東京電力においても炉心・PCVの状態の推定と未解明問題に関する検討⁴³を行いながら、現場調査を計画的に実施していく予定である。事故から約11年が経過し、核分裂生成物（以下「FP」という。）の減衰や現場の環境改善等によって線量が低下し、原子炉建屋へのアクセス性が向上したとはいえ、未だに線量の高い場所は多く存在する。少ない被ばく量で事故時に放出されたFPの所在を明らかにするためにも、このように各機関と連携し、合理的な範囲で事故時の発生事象、進展過程、機器の作動状況を明らかにする活動を継続することが重要である。また、今後の調査等により事故についての新たな事実が明らかになった時には、事故進展解析評価を行うなどの知見を深め反映していくことも重要である。

なお、シールドプラグはオペフロに設置されているため、原子炉建屋1階からアクセスを行う試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）及び段階的な取り出し規模の拡大については、その影響を直接的に受けることはないが、取り出し規模の更なる拡大においては、オペフロからのアクセス（上取り出し）が必要となる可能性も考慮した上で、シールドプラグの線量が高いことを十分に認識し、除染や遮へい、閉じ込め等の対策に留意した取り出し工法の検討を進める取組が重要である。

³⁸ 第27回原子力規制委員会「資料2：東京電力福島第一原子力発電所事故に係る継続的な調査・分析について」

³⁹ 第7回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料2：東京電力福島第一原子力発電所事故に係る継続的な調査・分析について」

⁴⁰ 第21回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料5-1：福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去について」

⁴¹ 第95回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料3-3：1号機及び2号機非常用ガス処理系配管の一部撤去の進捗状況について」

⁴² 東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニー、2022年6月9日、「福島第一原子力発電所1号機及び2号機非常用ガス処理系配管一部撤去作業再開について」

⁴³ 東京電力ホールディングス株式会社「福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第5回進捗報告」

3.1.2.6 技術要件の技術課題と今後の計画

以下、項目の現状と課題について記載する。（以下は気中工法に対して記載しているものである。冠水工法（船殻工法）については、3.1.2.4項で工法の一つとして俎上に上がった状況であるが、2022年度以降に実施する課題・リスクに対する成立性の確認を進める中で、残された課題の整理や今後の技術開発の計画を策定していくものとする。）

3.1.2.6.1 燃料デブリ取り出しにおける安全確保に係る技術課題

一般に、原子力施設における安全確保を考える際には、その施設が有する潜在的な危険が顕在化する事故のシナリオを想定し、それらのシナリオが安全の基準に収まることを評価して、安全対策が妥当であることを確認するという一連の流れで検討が実施される。通常の原子力発電所では、このような安全評価の一連の流れが国の規則・ガイド等によって定型化・標準化されている。これに対して、福島第一原子力発電所の廃炉作業に関しては、定型化・標準化された規則・ガイド等がないため、福島第一原子力発電所の安全上の特徴を踏まえた上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。

事故炉である福島第一原子力発電所の廃炉作業は、通常炉と異なる特殊な環境で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。

- ・ 多量の放射性物質（内部被ばくに大きな影響をもつ α 核種を含む）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、また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

NDFでは、このような特徴を踏まえ、下記を基本とした安全確保の考え方の整理を進めている。

・ 安全評価を基本とした判断最適化：

技術的な確実性、合理性、迅速性等を総合的に考慮して判断するに際し、安全の評価を十分に活用することによって、安全対策についての判断が大きく振れること（寡少又は過剰なリソース投入）を防止すること。

・ 廃炉対応における適時性確保：

事故の発生防止と影響抑制に留意すると同時に、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を懸念し、廃炉を長期化させないよう時間軸を意識した対応を行うこと。

・ 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：

大きな不確かさゆえに、全ての状況に設計だけで対応することには限界がある。このため、監視、分析等による情報を含め、運用段階で取得した情報を設計に活かしていくこととはじ

め、操作者による対応や現場運用で設計を補い、運用とトータルで安全を高めること。万一の異常発生時の備えにおいても、異常の進展は緩やかで対応の時間的余裕が大きいという特徴を考慮した現場対応を検討すること。

また、こうした安全確保の考え方の整理とともに、次の3.1.2.6.1.1から3.1.2.6.1.6までに示すとおり、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ところである。

3.1.2.6.1.1 閉じ込め機能の課題（気相部）

通常の原子力発電所においては、PCVは静的閉じ込めとし、原子炉建屋はその内部を外部の大気に対して負圧に維持することによって放射性物質の漏えいを防いでいる（負圧管理による動的閉じ込め）。一方、現在の福島第一原子力発電所においては、原子炉建屋・PCV等が水素爆発により一部損傷し、閉じ込め機能が低下しているため、燃料デブリ取り出し時には、負圧管理による動的閉じ込め機能の構築が検討されている。また、現状では水の放射線分解で定常的に発生する水素による水素爆発の防止や酸素による構造材の腐食防止（不活性化）の観点から、PCV内に窒素を注入して窒素雰囲気中に維持している。なお、原子炉建屋内からの排気はフィルタによる放射性物質の除去と放射能測定を行うPCVガス管理設備によって放射性物質の放出抑制が図られている⁴⁴。

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。1号機でのPCV内部調査における干渉物撤去のために用いたAWJにより、ダスト濃度が上昇する経験をしており、今後、同様の作業に対しても水平展開を行い、ダスト濃度を確認しながらステップ・バイ・ステップで作業を慎重に進めることが必要である。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。したがって、PCV内からの α ダストの拡散を極力抑制するとともに、作業員及び公衆への線量影響を許容値内に収めるための気相部の閉じ込め機能の構築が必要である。

このため、燃料デブリ取り出し規模拡大の段階ごとに α 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。東京電力のエンジニアリングでは、廃炉・汚染水・処理水対策事業の成果を踏まえ、原子炉建屋内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内の圧力低下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。

⁴⁴ 東京電力、1～4号機原子炉建屋からの追加的放出量の評価結果(2020年6月)、廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第80回)資料3-6、2020年5月28日。
https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2020/d200528_11-j.pdf

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の構築及びその必要性についても東京電力のエンジニアリングにて検討を進めている。

閉じ込め機能維持のための系統設備等を構築する際の課題については、3.1.2.6.2.3 項で概要を述べる。

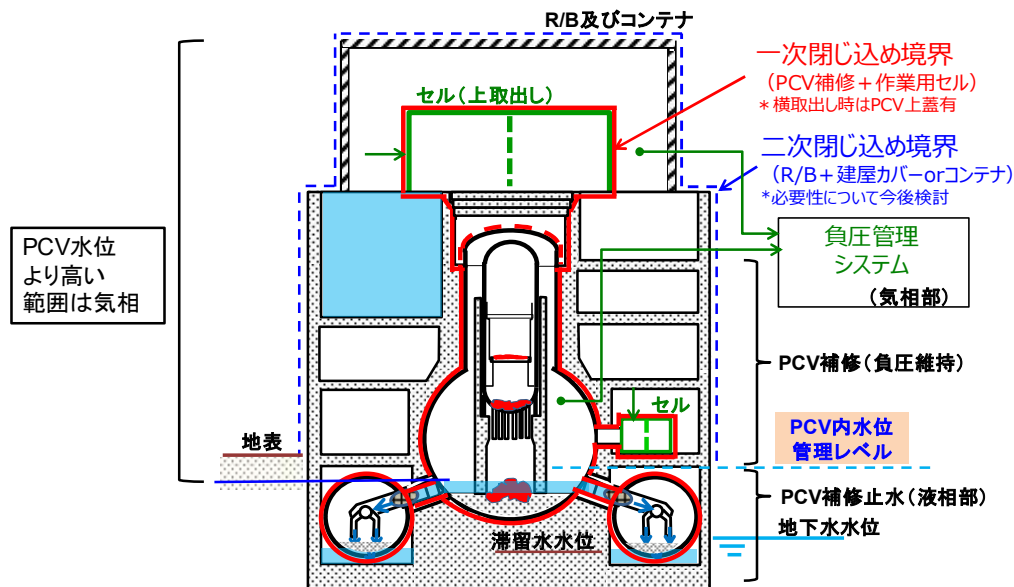


図20 負圧管理による閉じ込め機能（気相部）の構築例

この閉じ込め機能（気相部）の構築に当たり、取り出し規模の更なる拡大に向けて当面取り組むべき技術課題は次のとおりである。

(1) α ダストの飛散率の把握等

上述のとおり、燃料デブリ取り出し作業に向けて、 α ダストの飛散影響を把握し、 α ダストの気相部への移行を可能な限り抑制する対策を講じる必要がある。

α ダストの飛散影響を把握するためには、試験的取り出しや段階的な取り出し規模の拡大において飛散に関するデータを測定し、安全評価手法の実証・確認を計画していくことが必要である。また、これらの実証データが得られていない状況において燃料デブリ取り出し工法・システムに係る技術検討や研究開発を進めるためには、 α ダスト飛散に係る一般的なおおよその挙動を把握しておくことが必要であり、さらに、 α ダストの飛散率を把握するために、いくつかの加工方法における飛散データを取得する試験が計画され、現状は、複数の工法間の差異を分析する試験が実施されており、現場環境条件への適用性を高める試験も予定されている。

α ダストの気相部への移行を抑制するためには、燃料デブリを水没させ、その加工は可能な限り水中で行うことが望ましい。ただし、PCV内水位の設定は、次項に述べる液相部の閉じ込め機能の構築等の他の技術要件との調整事項となることから、全ての加工を水中でできるとは限らず、水没していない燃料デブリに対しては、水を掛け流すことによる α ダストの気相部への移行抑制が検討されている。

(2) PCV内負圧管理の実現性の見極め

A. 現場条件を踏まえた負圧管理の技術的成立性

PCV 内を負圧に維持するためには、PCV 損傷状況に応じた排気能力が必要となる。現時点においては、損傷箇所の特定には至っていないものの、実機における窒素供給量と PCV 圧力変動のデータを基に排気能力を設定している。この際、内部の温度上昇や排風機の停止等の異常事象による PCV 内部の圧力上昇への備えとして、余裕を持った差圧の設定が必要となる。また、これらを達成するためには、必要に応じて PCV の補修が検討されることとなるが、高線量下での作業となるため遠隔作業ないし作業員の被ばくが伴う等の困難が想定される。

このように、現場条件を踏まえた PCV 内の負圧維持の技術的成立性を、試験的取り出しや段階的な取り出し規模の拡大時に得られた情報も踏まえて見極める必要がある。

B. 負圧管理時の PCV 内への空気流入による影響

負圧管理を行う場合、PCV 内に空気が流入することとなるため、PCV 内部で水の放射線分解により発生する水素量に関する情報収集や流入する空気（酸素）の影響による火災・水素爆発の可能性について評価を行い、必要に応じて、窒素ガス供給量増加による不活性化の維持等の防護策を検討していくこととなる。

C. 二次閉じ込め機能の必要性検討

図 20 に例示したように、燃料デブリ取り出しに当たっては、負圧管理された PCV に連結する形で作業用のセルを新たに設置し、燃料デブリを取り出して取り出し容器を輸送容器に格納するまでの作業はこのセル内部において行うことを想定している。PCV 及びこの作業用セルが、 α ダストの外部への流出（アウトリーク）を防止する一次閉じ込め機能を構築することとなる。

これに加え、負圧管理による一次閉じ込め機能が喪失し、閉じ込め境界から放射性物質が漏えいした場合に備え、既存の原子炉建屋に建屋カバー又はコンテナを設置し、原子炉建屋を微負圧に管理して放射性物質を回収処理する二次閉じ込め機能の必要性検討が進められている。ただし、原子炉建屋は保有する体積が大きく、また事故による影響から気密性が低下していることも考えられるため、負圧を維持する場合には大規模な排風機が必要となると考えられる。そのため、今後得られるダスト飛散の傾向把握等の結果を踏まえながら、二次閉じ込め機能として必要な機能の見極めと研究開発を進めていく必要がある。

D. PCV の閉じ込め機能の劣化抑制

燃料デブリ取り出し期間中にわたって PCV 内を負圧に維持するためには、PCV による閉じ込め機能の劣化を考慮し、地震や経年変化に対する備えが必要となる。これについては、3.1.2.6.1.5 項で概要を述べる。

(3) 排気管理の検討

負圧管理に伴う排気の管理においては、燃料デブリ由来の核燃料物質等を含むおそれのある気体中の放射性物質について、放出濃度及び放出量を測定管理することにより、施設周辺の公衆に対する線量基準以下に維持されていることを確認する必要がある。また、燃料デブリ由来の α 核種を評価対象に加え、燃料デブリ取扱作業中において定常的に監視測定を行い通常の変

動幅を予め評価しておくことにより、漏えい等の異常事象を早期に発見して適切な影響緩和策を講ずることができるようにし、作業員及び環境への影響を防ぐべきである。

なお、ダストの効率的な回収等の除染設備構築のための設計要求として、燃料デブリの機械的性状や化学的組成の情報が必要であり、今後、燃料デブリの分析による情報の確度向上が課題である。

上記のとおり、閉じ込め機能（気相部）の構築に関しては、東京電力のエンジニアリングにて PCV 内負圧管理の実現性の見極め、これと並行して二次的な閉じ込め機能の必要性についての検討及び二次的な閉じ込め機能構築についての検討が進められている。今後、廃炉・汚染水・処理水対策事業の成果や試験的取り出しや段階的な取り出し規模の拡大時に得られた情報も取り込み、東京電力は、閉じ込め機能の構築に必要となる設備仕様の具体化をエンジニアリングにて実施していく。（3 号機原子炉建屋の密閉性を高めるための建屋側面及び上部へのカバー設置に関する取組状況については、3.1.2.6.2.3 を参照のこと。）

3.1.2.6.1.2 閉じ込め機能の課題（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漏えい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（図 21）。

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る。廃炉・汚染水対策事業にて研究開発⁴⁵が進められた。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は、廃炉・汚染水対策事業による研究開発⁴⁶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、廃炉・汚染水対策事業の研究開発にて得られた成果（燃料デブリ性状の情報等）を踏まえつつ、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を目的とした設備の追設、

⁴⁵ IRID, 平成 30 年度補正 廃炉・汚染水対策事業費補助金「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し技術の更なる拡大に向けた技術の開発」2019 年度実施分成果, 2020 年 8 月.

<https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2020/09/2019008kibonosaranarukakudai.pdf>

⁴⁶ IRID, 平成 29 年度補正 廃炉・汚染水対策事業費補助金「原子炉格納容器内水循環システム構築技術の開発（実規模試験）」2019 年度実施分最終報告, 2020 年 8 月.

<https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2020/09/2019006mizujyunkan.pdf>

IRID, 平成 29 年度補正 廃炉・汚染水対策事業費補助金 原子炉格納容器内水循環システム構築技術の開発（実規模試験）2019 年度実施分最終報告, 2020 年 8 月.

<https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2020/09/2019007mizujyunkanjitukibo.pdf>

設置等について、廃炉・汚染水対策事業の成果⁴⁷を踏まえ、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。燃料デブリ取り出しの作業中の液相への影響について、 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。

閉じ込め機能維持のための系統設備等を構築する際の課題については、3.1.2.6.2.3 項で概要を述べる。

この閉じ込め機能（液相部）の構築に当たり、取り出し規模の更なる拡大に向けて当面取り組むべき技術課題は次のとおりである。

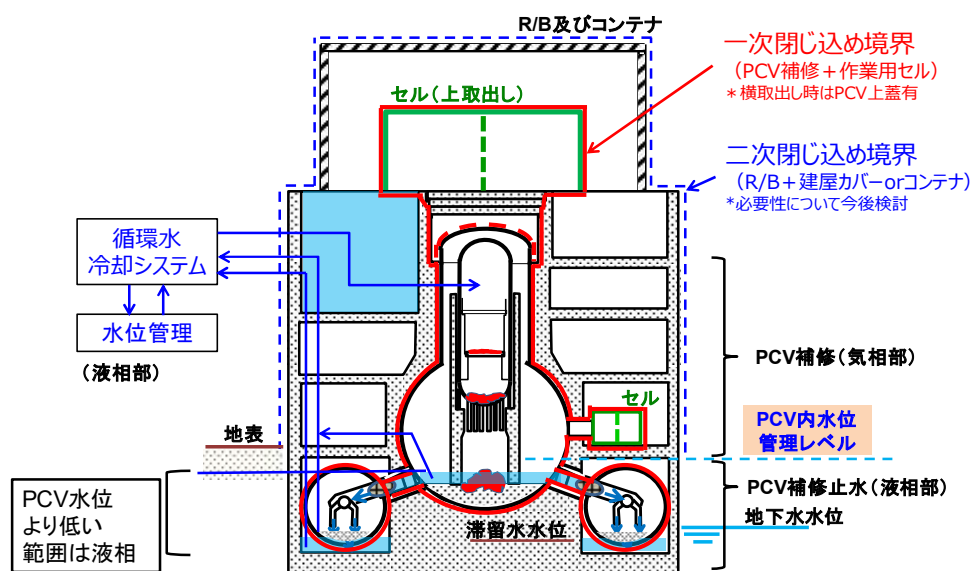


図 21 閉じ込め機能（液相部）の構築例

(1) 燃料デブリ取り出しによる冷却水中の放射能濃度上昇の抑制

冷却水中の放射能濃度を把握する取組として、段階的な取り出し規模の拡大時における廃液への影響把握を計画していくことが必要である。

PCV内の冷却水の放射能濃度の上昇を抑制する観点では、切削等の加工によって発生する切削粉をPCV循環冷却系で回収することによる拡散抑制が検討されており、段階的な取り出し規模の拡大の段階で、水循環システムによるモニタリング結果を踏まえ、PCV循環冷却系に必要な改造等の検討に適宜、反映していくことが望ましい。

(2) PCV内の水位の設定

S/C脚部の耐震裕度が低いことから、S/C内の水位を低くする方が望しく、水位低下に向けた検討を進めている。この際、各号機におけるPCVの損傷状況や地下水への冷却水の流出防止（原子炉建屋内水位を地下水水位より低く維持）等の観点も考慮し、PCV内の水位を適切に設定して管理するとともに、燃料デブリの冷却やダスト飛散抑制の観点から安全が確保されることを確認しておくことが求められる。

⁴⁷ IRID, 平成 28 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化 平成 30 年度最終報告, 令和元年 7 月。
http://irid.or.jp/_pdf/20180000_13.pdf

上記のとおり、閉じ込め機能（液相部）の構築に関しては、廃炉・汚染水・処理水対策事業の成果（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等）を基に、PCV 循環冷却系の構築について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。今後は、試験的取り出しや段階的な取り出し規模の拡大時に得られるモニタリング結果等を基に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、PCV 循環冷却系に必要な改造等についての検討が実施される。

3.1.2.6.1.3 冷却機能の課題

燃料デブリは放射性物質の崩壊による熱を発生している。例えば、事故後 11 年以上を経過した 2 号機では事故時の 1000 分の 1 以下まで低下したとはいえ、最大数十 kW⁴⁸の発熱があると推定されている。このため、冷却を継続しないと、発生した熱を周囲の物質が徐々に吸収し、以下の事象が生じることが懸念される。

- ・ 燃料デブリ中の酸化ウランの温度上昇により酸化が進み(O/U 比が増加)、体積が膨張し、ひび割れが発生して粉体化が進行する。
- ・ コンクリート構造物中の水分も熱によって逸散、乾燥し、ひび割れが発生してコンクリートの強度が低下する。
- ・ PCV 内が乾燥し、放射性ダストが飛散、浮遊しやすくなる。
- ・ 一旦乾燥状態になった後に注水を行うと、燃料デブリに接触した水が蒸気となって PCV の内圧を上昇させ、損傷部から放射性ダストを伴って漏えいする。

上記 4 点や燃料デブリの過度な温度上昇を抑制するため、現状、原子炉注水による循環冷却を行うことにより、100℃未満（冷温停止状態）を維持している。2019 年度には、冷却設備の運転・保守管理や緊急時対応手順等の適正化を図ることを目的として、原子炉注水の一時的な停止を実施した。この注水停止試験結果を踏まえて、2020 年度以降は今後の廃炉に向けて各号機の状態を踏まえた目的に応じた試験を計画・実施していくこととしている。この方針に基づいて、2021 年度には、2 号機と 3 号機で段階的に注水量を低下させる試験（2 号機：2022 年 1 月～3 月、3 号機：2021 年 11 月～2022 年 1 月）により、これまでの 3.0m³/h から 1.7m³/h まで低下させた。なお、3 号機については 2022 年 3 月 16 日に発生した地震後に水位低下が継続したため、2022 年 6 月下旬からは、注水量を 2.1～2.2m³/h に増やしている。このように、プラントの注水量は、今後の状況に応じて変更する可能性があるが、PCV 水位低下状況等を踏まえ、注水量の更なる低減等の今後の注水の在り方について検討が進められている。

今後、燃料デブリ取り出し作業において燃料デブリ周辺にアクセスする際には、燃料デブリ取り出し装置等が長期間にわたり健全に機能を維持できる温度以下とする必要がある。

さらに、将来的に燃料デブリ取り出しが進行し、残存する燃料デブリ量の低減に伴い崩壊熱量が低減した場合を想定し、冷却水の注入の必要性についても今から検討を進めておくべきである。上述の注水停止試験はこうした冷却設備の規模（流量や多重性等）の見極めも目的に加え更に促進すべきである。

⁴⁸ 西原健司ら,"福島第一原子力発電所の燃料組成評価",日本原子力研究開発機構,JAEA-DATA/Code 2012-018(2012).

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、機器の回収等の異常発生時の対応策や手順等を検討しておく必要がある。

PCV 内の温度監視も燃料デブリ周囲の機器や水の温度で評価しており、燃料デブリの温度を直接測定していない。冷却水の低減に備え、燃料デブリの温度を測定するか、あるいは直接測定が困難な場合は現在の評価に用いている機器や水の温度から推定する技術を検討しておく必要があり、廃炉・汚染水・処理水対策事業による研究開発にて検討が進められている。

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等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について、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、判断基準等を東京電力のエンジニアリングで計画し、準備しておく必要がある。

3.1.2.6.1.4 臨界管理の課題

現在は、実施計画に基づく未臨界状態の監視により、臨界の兆候は見られていないことが確認されている。また、燃料集合体の溶融によって、炉心溶融の過程で炉内構造物等の不純物の混入があったと想定され、事故進展により炉心部の外の広範囲に燃料デブリが分散した状態にあると推定される。このため、福島第一原子力発電所の燃料デブリは工学的に臨界が起こる可能性は低いと考えられる。炉心溶融の過程で燃料要素より先に制御棒が溶け落ちる、偶発的に粉碎された燃料デブリが水と最適混合することなどを想定しても、その可能性は小さい。

このように臨界が起こる可能性は低いと考えられるものの、燃料デブリ取り出しは、燃料デブリの形状等を変化させる作業である。燃料デブリの形状や作業条件を踏まえた臨界管理を計画し、万が一の臨界を想定しても、速やかな検知及び停止による確実な管理方法の確立が重要である。

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把持、吸引から加工量を制限しながら取り出すことで管理される。また、取り出し規模を拡大し切削を行う段階においては、中性子測定、作業前の未臨界度測定や中性子吸収材の投入準備等の措置が講じられる。このように、設計による対応と運転員による監視と作業の一旦停止・再開までの判断を組み合わせた、確実な臨界管理（臨界監視）を行うことが必要である。

なお、取り出した燃料デブリは、未臨界状態が維持可能な容器に収納し、適切に保管される。また、取り出し規模の更なる拡大時の循環水系システムの構成及び設備仕様については、東京電力のエンジニアリングにより概念設計が進められている。各機器の設計は、早い段階で臨界評価を行い、後段での手戻りを避けるため、臨界防止対策が機器の仕様に大きな影響を与えるものは事前に抽出されている。

この臨界管理に当たり、当面取り組むべき技術課題は次のとおりである。

(1) 臨界評価手法の整備

内部調査等や燃料デブリ取り出し時の各段階で得られる情報から、燃料デブリの臨界性に関して、臨界の起こりにくさや影響度を評価する手法の整備が進められてきた。それらの評価を行うため、臨界評価に対し影響の大きいパラメータに関する情報が内部調査や取り出し作業を進める過程で入手できるように計画される。また、情報は、都度最新化され、先行する作業時の現場情報を後段の安全評価に反映することで適切に見直していく必要がある。

(2) 取り出し箇所周辺の局所的な中性子測定

既存の中性子検出器としては、用途に応じた多様な種類が存在（核分裂電離箱、B-10 比例計数管、半導体検出器等）しており、これらの特徴を踏まえ、各段階に応じた中性子検出器を選定する検討が進められてきた。臨界監視のための中性子検出器の要求仕様は、①作業期間に応じた寿命（集積線量（Gy））が維持できること、②装置に搭載できること、③必要な検出効率（時間、精度）の確保できること等が挙げられる。今後、内部調査で得られる PCV 内線量率についての情報や号機ごとの装置開発に合わせて、最適な検出器が選定される。

なお、小型の中性子検出器は、未臨界度測定その他、単体検出器として局所的な中性子測定の連続監視にも用いる。燃料デブリ取り出し時の連続監視の実用化に向け、中性子検出器の仕様及び臨界近接監視技術の開発は、廃炉・汚染水・処理水対策事業において検討が進められてきた。2021 年度には、中性子検出器の現場環境への適用性があることが試験により確認されている⁴⁹。今後は、中性子束の変動を検知した場合の作業の一旦停止や再開、中性子吸収材であるホウ素の注入判断基準の策定などの具体的な運用を検討していく必要がある。

なお、取り出し作業の場所以外（PCV 底部ペDESTAL外、配管、水系フィルタ、廃液受槽、燃料デブリ切削粉が蓄積している箇所等）での臨界の可能性については、PCV ガス管理設備による臨界検知の対応が求められる。

(3) 未臨界度測定の成立性の見極め

未臨界度測定を行う場合、(2)の要求仕様に加えて、短時間の中性子のゆらぎを捉えるため、高い時間分解能と高感度の中性子検出器が必要である。主に高ガンマ線環境下（1,000Gy/h を想定）における鉛遮へいの必要性から、装置への搭載性（サイズ・重量・電磁ノイズ対策等）と運用法（測定時期・測定時間、設置場所等）が課題である。今後、燃料デブリ取り出し工法・システム側からの制約条件（サイズ・重量、測定・加工時間のバランス等）を踏まえた最適化や複数の検出器の組み合わせが検討される。

また、様々な組成・性状の混在が予想される燃料デブリへの適用性を判断するため、試験計画の策定と実証によって適用範囲を含む技術的成立性を確認する必要がある。

(4) 中性子吸収材の成立性の見極め

規模拡大の各段階で得られる情報により、燃料デブリの臨界性が高いことが否定できない場合は、通常の燃料デブリ取り出し時に中性子吸収材（五ホウ酸ナトリウム）を適用することに

⁴⁹ IRID、廃炉・汚染水対策事業費補助金「安全システムの開発（液体系・気体系システム、臨界管理技術）」2021 年度実施分成果(2)臨界管理技術、2022 年 8 月 <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/09/2021011anzensystem.pdf>

についても東京電力のエンジニアリングにより検討されている。漏えい時の環境影響や構造材であるコンクリートとの共存性が評価されている⁵⁰。

PCV 循環冷却系への影響やホウ素濃度維持のための作業（分別・回収、再利用、処理時の設備影響・廃棄物影響等）も検討されている。なお、五ホウ酸ナトリウム注入を行う場合、「(2) 取り出し箇所周辺の局所的な中性子測定」にて述べた臨界近接監視技術を合わせて現場への適用性を確認する必要がある。

また、臨界が発生し、緊急五ホウ酸ナトリウム注入がなされた場合の未臨界維持及び復旧方法も検討していく必要がある。

さらに、臨界に対する余裕が小さい場合の確実な未臨界維持のため、非溶解性中性子吸収材の開発も進められている。非溶解性中性子吸収材は、PCV 循環冷却系への影響を局所的であるなどの利点がある。これまでに、基礎物性や耐放射線性能試験等が行われた候補材（B₄C 金属焼結材・B/Gd 入ガラス・Gd₂O₃ 粒子、水ガラス/Gd₂O₃ 造粒粉材）について、加工作業に応じた散布方法や効果も確認されている。2021 年度以降は、燃料デブリ取り出し作業条件に適した現場運用方法の具体化のための技術開発が進められている。

なお、非溶解性中性子吸収材の導入に当たっては、PCV 腐食への影響や環境放出時の環境影響等の課題の見極めが必要となる。

(5) PCV ガス管理設備による臨界検知

燃料デブリの取り出し箇所周辺の臨界近接及び臨界検知と、取り出し箇所以外における燃料デブリの落下・粉状デブリの集積等による臨界を検知するため、PCV ガス管理設備の検出器の高感度化が図られる。既に測定している Xe-135 に加え、反応度変化への追従性の良い Kr-87/88 の測定によって臨界検知の早期化を図ることも検討されている。

3.1.2.6.1.5 PCV・建屋等の構造健全性における課題

PCV、RPV ペDESTAL 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・設備と建屋（既設の機器・設備と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地震と津波を始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 内部調査や燃料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。主な要求機能を以下に例示する。

○既設の機器・設備と建屋に関して（改造部を含む。必要に応じて経年影響も考慮）

⁵⁰ IRID, 平成 29 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化（臨界管理方法の確立に関する技術開発）最終報告, 2019 年 7 月. http://irid.or.jp/_pdf/20180000_04.pdf

- ・ PCV、RPV 及び原子炉建屋等の閉じ込め機能の劣化を抑制し、放射性物質の大量放出を抑制・防止する（閉じ込め機能の維持）。
- ・ 原子炉建屋等が、既設の主要機器に加えて、燃料デブリ取り出しのために原子炉建屋等に新たに設置される機器・設備を安全に支持する（支持機能の維持）。

○燃料デブリ取り出しのために新設する機器・設備と建屋に関して（既設の機器・設備への接続部を含む）

- ・ 設計要求に応じた機能を有し、放射性物質の大量放出を抑制・防止する（閉じ込め機能の確保）。
- ・ 燃料デブリ取り出しのために設置される機器・設備を安全に支持する。（支持機能の確保）。
- ・ 新設する建屋等が所要の安全な作業環境を提供する（遮へい性能の確保等）。

東京電力では、既設の構内の設備・機器と建屋に対し、劣化進展を考慮した長期保守管理計画を 2020 年度に策定し、運用を開始している。今後の調査等により事故についての新たな事実が明らかになった時には、事故進展解析等の評価を行って特に損傷等の事故影響を明らかにするとともに、劣化進展を考慮の上で廃炉期間にわたる機能の確保を図ることが必要である。また、既設の機器・設備と建屋に関し、2021 年 2 月 13 日及び 2022 年 3 月 16 日に発生した福島県沖を震源とする地震^{51,52}では、1,3 号機の PCV の水位低下が確認された。いずれの地震でも冷却機能は維持されたが、両地震も踏まえ、中長期を見据えた上記の機能を有する機器・設備と建屋を保全管理するために、事故影響、経年劣化、並びに今後の廃炉期間中に想定される外部事象（地震、津波等）に対する影響評価を進めておく必要がある。これらの影響に関し従来の評価では限定的であったことに鑑み、高線量下での遠隔操作等が困難な課題となる調査計画の立案及び推進に、既往の技術や評価結果を最大限活用する他、状況把握のための要素技術の開発が必要である。その際には、安全性を優先しつつ、原子力分野だけでなく、広く他分野の最新知見と実績の積極的な導入を図ることが有用である。

上記の影響評価に基づいて、今後想定される地震や経年劣化によるリスクへの備えをできることから実施していくことが重要である。以下に地震リスクと経年劣化リスクへの備えについて述べる。

(1) 地震リスクへの備え

今後想定される地震によるリスクへの備えとして、耐震評価によって裕度を見極めた上で、対策を具体化することが重要であるが、その際には現場の不確かさと作業の難易度、作業員被ばくを十分に考慮しなければならない。

耐震評価のためには、事故による影響や経年劣化による減肉等を実状に合わせて考慮し、検討条件として設定する必要がある。しかし、高線量環境下にあるため、把握できる情報は限定

⁵¹ 福島県沖を震源とする地震。宮城県と福島県で最大震度6強を観測した。福島第一では、6号機原子炉建屋の地下2階（基礎盤上）に設置した地震計で最大加速度235galの揺れが記録された。これは、原子力規制委員会の決定した新耐震設計方針適用前の基準地震動Ss（600gal）に対する建屋の地震応答解析結果の約半分程度の応答レベルに相当する。

⁵² 福島県沖を震源とする地震。宮城県と福島県で最大震度6強を観測した。福島第一原子力発電所では、6号機原子炉建屋の地下2階（基礎盤上）に設置した地震計で最大加速度221galの揺れが記録された。

的であり、検討条件の多くを推定に基づいて保守的に設定することにより、対策の難易度を高める可能性がある。したがって、不確かさが高いが故に過度に保守的な条件設定になることを考慮し、事故時の影響のほか、経年劣化の実状を精度良く把握することに努めることが重要である。例えば、計測できるところは限定的ではあるが、配管等の腐食進展速度の計測結果を、モデル分析を踏まえて測定出来ない場所の推定に生かすなど、そのフィードバックの範囲や仕方について、不確かさを低減するべく工夫していく必要がある。

そのほか、地震リスクへの備えの一つとして地震時に発生する応力を低減させる方法がある。この例としては、事故の影響によって水位が通常運転時よりも高い 1,3 号機の S/C の水抜きを計画中である。このうち、3 号機では、S/C の水抜きに先立って必要となる PCV 本体からの水抜きに着手している。

1～3 号機の原子炉建屋については、事故後の損傷状態を考慮した耐震評価により一定の安全性を確認している。しかし、上記の主要な設備と同様、燃料デブリ取り出し期間中の長期にわたって、今後、耐震安全性を確認していく必要がある。

そのためには、高線量下のため、実施困難な状況にあるとはいえ、継続的な調査を行い、損傷状態や劣化・腐食状況の把握に努めなければならない。

東京電力では以下の取組を進めているが、継続的な調査により知見の蓄積を図り、建屋の状態に関する情報として集約することが重要である。

- ・ ロボットやドローン等を活用した無人化・省人化技術の適用
- ・ 詳細評価が可能な 4 号機を活用したコア採取による詳細調査
- ・ 地震計の整備と観測記録の活用

耐震評価上考慮している部材に対して、上記の調査等により、構造性能の低下、大地震による損傷の追加等の新たな事実や知見が明らかになった場合には、建屋の状態に関する情報を更新し、耐震評価に適宜反映することが重要である。

(2) 経年劣化リスクへの備え

RPV や PCV 等の経年劣化としては腐食による減肉が想定されるため、経年的には構造強度が低下していく傾向にある。このための備えとしては、構造物そのものへの対策と、構造物が置かれている環境への対策が考えられる。前者としては、一般的にはコーティング等があるが、人が容易に近づけないことを考えると難易度が極めて高い。このため、後者の環境への取組を優先して検討する。現状の取組として、原子炉注水に対しては、タンク内での窒素バブリングやヒドラジン注入により、溶存酸素濃度の低減を図る対策を講じており、気相部に関しては PCV 内部に窒素を封入する対策を講じている。

一方で PCV は損傷しており、経年劣化も進展していくことも考えると、特に PCV 内部の酸素濃度が低い状態を適切に継続的に維持していく取組が重要である。

また、既設及び新設の機器・設備と建屋に関しては、燃料デブリ取り出し時の荷重条件（新設される機器・設備の配置、大きさ、重量、PCV/生体遮へい壁への開口の新設等）が今後の設計進捗に応じて具体化される。機器・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。

なお、新設する機器・設備と建屋の具体的な設計では、耐震クラスの設定とそれに基づいて耐震評価を行うことが重要となる。一方、事故で損傷した建屋や主要機器等については、未だに高線量の環境下で補修や補強も容易でない状況にある。このため、設計に用いる地震動やクライテリアは、原子力規制委員会の決定した新耐震設計方針^{53,54}に従って、リスク評価の観点も含めて適切に設定する。その際、今後の燃料デブリ取り出しをはじめとする個々の廃炉作業に必要な設備の設計方針に関し、安全確保最優先であることは当然として、適用する地震動や解釈などについて、審査の独立性を担保しつつ、申請前に東京電力が原子力規制庁と意見交換のできる枠組みを構築し、運用することが重要と考える。

そのほか、既設設備の評価において、耐震性に直接影響がない部材や耐震評価上、無視している部材についても、事故影響で破損した部位などが崩落した場合には、構造上及び放射線安全上の支障が生じなくても社会的に大きな影響を与える可能性がある。それを避けるため、日々のモニタリングにより劣化の進行がないか注視するとともに、人身安全、設備安全の観点からの管理を徹底する必要がある。

○原子力規制委員会の決定した新耐震設計方針について（参考）

原子力規制委員会では、「平成23年度東北地方太平洋沖地震の地震動はSs600を上回り、令和3年2月13日の地震動がSd300を上回るものであったことに鑑みれば、今後の1Fの耐震設計に用いる地震動は、このような地震動が実際に観測されたこと等を考慮したものが必要と考える」⁵³としたうえで、『・・当面の間、検討用地震動（Ss900）を基本とした「1Fの耐震設計における地震動とその適用の考え方」を再整理することが適当・・』⁵³とし、従来の検討用地震動⁵⁵を基本とする体系（Ss900体系）を適用することを了承した。また、従来の耐震クラス（Sクラス、Bクラス、Cクラス）に加え、Bクラスより高い耐震クラスとして新たにB+を導入⁵³した。

以上から、新規に設置する設備等については、以下の耐震方針⁵³が適用される。

- ・ 検討用地震動（Ss900）を福島第一原子力発電所における新たな基準地震動（Ss900）として設定する。
- ・ 1/2 Ss（最大加速度450gal（Ss900の1/2）。以下「Sd450」という。）を新たな弾性設計用地震動（Sd）として適用する

そのうえで、福島第一原子力発電所の状況を勘案して以下を求めている。

- ・ 地震力の算定に際しては水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせる。
- ・ B+クラスには、Bクラスに適用する地震動に加えて、Sd450に対して安全機能が維持されること。

⁵³ 原子力規制庁 「令和3年2月13日の地震を踏まえた東京電力福島第一原子力発電所の耐震設計における地震動とその適用の考え方」、原子力規制委員会（第19回）資料3、2021.7.7。

⁵⁴ 原子力規制庁 「令和3年2月13日の地震を踏まえた東京電力福島第一原子力発電所の耐震設計における地震動とその適用の考え方(2回目)」、原子力規制委員会（第30回）資料2、2021.9.8。

⁵⁵ 東京電力HD 「東京電力福島第一原子力発電所の外部事象に対する防護の検討について」、特定原子力施設監視・評価検討会（第27回）資料2、2014.10.3

- ・既に設置している設備については、原則として上記と同様の考えを適用する。ただし、該当する耐震クラスに対応した耐震性を評価した上で追加の対応が必要とされる設備のうち、廃炉作業への影響や対応の実施による被ばくリスク等を勘案し合理的な範囲内で補強等の対応ができないものについては、耐震性の不足に起因するリスクを早期に低減するための対策を個別に検討する。

福島第一原子力発電所の耐震設計における耐震クラス分類と地震動の適用の考え方については、「1Fの施設・設備の耐震評価については、①耐震クラス分類（S、B+、B、C）、②廃炉活動への影響、上位クラスへの波及的影響、供用期間、設計の進捗状況、内包する液体の放射エネルギー等を考慮して適用する地震動を設定するとともに、必要に応じて対策を判断する。」⁵⁴としている。耐震クラス分類と施設等の特徴に応じた地震動の設定及び必要な対策を判断する流れは別添⁵⁴で定めている。

3.1.2.6.1.6 作業時の被ばく低減等における課題

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・アクセスルートで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。試験的取り出しの準備として、現場の線量低減作業が行われており、2号機原子炉建屋1階西側の通路、北西部のX-6ペネ周囲の線量を、概ね5mSv/h以下（平均2～3mSv/h程度）に低減させている。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等の作業時の被ばく低減が課題であり、東京電力のエンジニアリングを支援するために廃炉・汚染水・処理水対策事業による研究開発を進めている。

燃料デブリ取り出し関連作業の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 核種を含む核燃料物質等を取り扱うことになる。このため、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。

具体的には、作業環境や作業形態に基づいた放射線防護を適切に実施し、作業者の過度な被ばくを防止することが肝要である。外部被ばく防護に関しては、作業エリアの対象線源と線量率から被ばく線量を評価し、「時間、距離、遮へい」の三原則に則り、合理的に達成可能な被ばく低減対策を実施する必要がある。

その際、次のような考え方を念頭に置いて、除染、遮へい、遠隔技術等の被ばく低減方策の適切な組み合わせを目指すべきである。

- ・ 遠隔技術の活用と除染の組み合わせによる被ばく低減を優先的に検討し、その後「時間、距離、遮へい」による作業時被ばく管理を計画すること
- ・ PCV内やトラス室内のように極めて放射線量が高いエリアは、遠隔技術により人がアクセスすることなく作業を実施すること
- ・ 上記のエリアを除く原子炉建屋内については、作業全体に係る積算線量を低く抑えることができるように除染、遮へい、不用物の撤去、遠隔技術、作業時間短縮等の最適な組み合わせを検討すること
- ・ 遠隔技術を活用する場合であっても、その設備を設置する作業、メンテナンス作業、トラブル時対応作業等が付随して必要であることを考慮して評価・検討を行うこと

- ・ 除染の作業についても、遠隔技術を用いるか人手で実施するかは、その対象箇所の線量率、汚染形態、作業スペース、利用頻度、遠隔技術の適用性・開発動向、工程、コスト等を評価して判断すること
- ・ ニーズが不明確な箇所や全体の線量低減といったベターメント指向の検討は控え、作業ニーズが明確な箇所の検討を優先して行うこと

また、内部被ばく防護に関しては、放射性ダストの飛散抑制、汚染拡大防止等の設備上の措置を講じた上で、作業エリアの対象核種と空气中濃度及び表面密度から適切な防護措置を選定し、内部被ばくに繋がる吸入摂取や身体汚染の防止に努めるべきである。内部取り込み事象の発生時は、体外計測法（肺モニタ）やバイオアッセイ法により預託実効線量を適切に評価する必要がある。このため、事前に被ばく評価において重要な α 核種を選定し、空气中濃度の管理、防護装備の着用基準、機器校正管理へ反映しておくことが重要である。また、作業環境や入退域の作業員身体における表面密度の管理は、区域区分を超えた汚染拡大を早期に発見し、遊離性汚染から再浮遊したダストによる内部取り込みを未然に防止するために重要である。これらを踏まえ、2021 年度から内部取り込み防護と取り込み時の線量評価のための廃炉・汚染水・処理水対策事業による研究開発に着手している。

長期にわたる廃止措置の被ばく低減においては、現場作業の実績、教訓等の知見を蓄積し、ノウハウを伝承することが重要である。取り出し規模の更なる拡大に向けて、試験的取り出しにおける α 核種の取扱技術等の情報を共有し、迅速に次の作業計画へフィードバック可能なようにする必要がある。2021 年 5 月から、試験的取り出しに向けて、 α 核種の取扱作業における身体汚染や内部被ばくリスクが懸念されることから、ノウハウを有する JAEA からの指導が開始されている。

特に、燃料デブリ取り出し作業では、原子炉建屋内の作業環境を十分確保した上で、X-6 ペネ等から PCV 内にアクセスすべきである。原子炉建屋内における作業員の被ばく低減のためには、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して線量低減の計画を立てることが重要である。作業エリア・アクセスルート目標線量率は、作業の成立性を十分に検証し、法令で定められた作業員の被ばく線量限度（50mSv/年及び 100mSv/5 年）に対する裕度も考慮して設定する。高線量区域の線量低減計画は、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して作業を達成するための管理的対策を行うことが重要である。これらを踏まえ、廃炉・汚染水・処理水対策事業による研究開発として、安全・効率的な作業計画の策定に向けて、環境調査データを用いた放射線源の特定、デジタル技術によって可視化する環境・線源分布のデジタル化技術の開発を 2021 年度から着手し、要求機能を踏まえた開発を進めている。また、高線量下における環境改善・干渉物撤去のための遠隔技術の開発では、2020 年度から、撤去対象物を選定して、要求機能を踏まえた要素技術を抽出し、技術調査、要素試験の結果から東京電力で実施するエンジニアリングに向けて、遠隔装置の仕様を検討している。

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、全体としての被ばく管理を適切に行うこと、及び人的資源である作業員の確保を長期的視点で進めることが必要である。作業計画、被ばく管理を効率化できるデータベースの

整備を行い、福島第一原子力発電所全体の種々の情報を統合的に管理、運転するシステムの構築へとステップ・バイ・ステップで進めていくように支援を行う。

3.1.2.6.2 燃料デブリ取り出し工法に係る技術課題

3.1.2.6.2.1 アクセスルートの確保における課題

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等には、3.1.2.6.1.1 項で述べた気相部の閉じ込め機能の観点から 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。

中長期ロードマップでは、初号機を 2 号機として試験的取り出しに着手し、段階的な取り出し規模の拡大に向けて進めていくことが示されており、東京電力は、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の検討を進めている。

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・処理水対策事業における研究開発の成果を踏まえ、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（横取り出し工法）の検討が進められている。横取り出し工法においては、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り、軽量化セルと固定レールによる方式やアクセストンネル方式等による技術開発を進めている。

また、横アクセスに加え、上アクセスを含むアクセスルート構築（上取り出し工法）について、スループット向上を目的に、取り出し準備の工程が短縮できる干渉物撤去技術や搬送方法の検討を行っている。干渉する構造物を一体又は大型に切断して取り出し、閉じ込め、遮へいを確保して搬送する方法等について、その実現性を廃炉・汚染水・処理水対策事業で 2020 年度から検討している。東京電力によるエンジニアリングにおいては、3 号機を対象としてペDESTAL内外へのアクセスがしやすい横取り出しと RPV 内へのアクセスがしやすい上取り出しを組み合わせることが必要となることを想定した工法の全体的なプロセスの検討が行われている。なお、東京電力が行ったオペフロ線量等の測定結果に対する評価として、原子力規制庁が 2,3 号機のシールドプラグ下面に大量の Cs の存在可能性を指摘したことについて、2021 年後半に行われたシールドプラグ下部の原子炉ウェル内の状況及び線量調査、掘削孔の線量調査などの追加調査結果を踏まえて、上取り出し工法のアクセスルート構築の検討が必要である。

今後、上記の課題も踏まえ、取り出し規模拡大の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る。特に、1 号機の X-2 ペネの内側扉の切削時には、作業開始前に想定していた以上の PCV 内のダスト濃度上昇が生じたこと、また、干渉物調査用のカメラチャンバー取り付け時に PCV 内の圧力低下が発生したことがあり、ダスト飛散対策だけでなく、このような予想外の状況に直面した際の対策に時間を要することも考慮した検討や計画が必要である。

なお、燃料デブリ取り出しの方針では、号機ごとに燃料デブリが存在すると考えられる部位に応じた最適な取り出し工法を組み合わせることとされており、今後の規模拡大に向けた研究開発を進めていくことが重要である。

3.1.2.6.2.2 機器・装置の開発における課題

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の各フェーズにおいて、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。また、これらのフェーズで開発する機器・装置については、燃料デブリが主に存在すると考えられる RPV 内部及び PCV 底部の現場状況に柔軟に対応するために、耐放射線性、防じん性、防水性、温度範囲、遠隔点検・保守性、遠隔操作性、視野確保、耐震性、衝突回避や異常時自動停止等の保護機構、高い信頼性と適切な冗長性、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等を考慮した仕様を設定する必要がある。

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・処理水対策事業の研究開発として進めてきている。2 号機の試験的取り出しに適用するロボットアーム等について 2021 年から進めてきたメーカ工場での試験、訓練を終了し、2022 年からは櫓葉遠隔技術開発センターでの試験、訓練を進めているところである。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て 2021 年から教育・訓練の準備を進めている。ロボットアーム等の遠隔装置は、現場に設置する前に想定する PCV の内部環境を模擬したモックアップを活用し、性能検証、操作訓練を十分に行うことが不可欠であり、そのためのモックアップ設備の検討が行われている。

取り出し規模の更なる拡大用の機器・装置については、アクセス用設備の設置工法、干渉する PCV 内機器等の解体・撤去技術等に関する横取り出し工法の開発、大型機器の切断、搬送方法及び汚染拡大防止等に関する上取り出し工法の開発が進められている。また、取り出し規模の更なる拡大の段階は長期間に及ぶことから、取り出し作業を安全、効率的かつ継続的に行うために、多種類の遠隔の機器・装置に対する合理的な保守技術の開発及び作業進展による PCV 内の環境変化を連続的に監視するシステムの開発等の福島第一原子力発電所廃止措置の統合的な支援技術の開発に取り組むことも重要であり 2021 年度から進めている。東京電力は取り出し規模の更なる拡大のための工法策定に向けた概念検討を実施中であり、2021 年度は工法の検討を実施し、各工法の課題・リスクの抽出を実施している。2022 年度以降はこれらの課題・リスクに対して成立性の観点から検討を進めている。今後の機器・装置の開発は工法の検討状況を踏まえて計画、実施していく必要がある。

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徐々に得られる情報に基づいて柔軟に後段の作業を進めていき、新たな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・装置についてはシステムとして組み合わせた上で、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、モックアップ試験を重ねて検証を行う必要がある。このモックアップ試験は、不確定要素を多分に含む過酷環境条件下に対して、遠隔装置の適用性や遠隔システム全体の運用・保守性の検証を行うため、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 及び東京電力は、関係機関と協力し、遠隔モックアップ試験計画の進め方と試験計画レビューの仕組み、整備するモックアップ施設の範囲、必要となる時期、運

用管理等について検討を進めてきたが、2021 年度からは東京電力が主体的に検討、具体化を進めている。

3.1.2.6.2.3 系統設備・エリアの課題

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、その結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等がある。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、廃炉・汚染水・処理水対策事業による研究開発を基に前提条件（設備設計条件）を仮設定し、系統設計や配置検討等が東京電力のエンジニアリングによって進められている。

気相系システムに関して、2021 年度には PCV の気密性低下も視野に入れた負圧管理のための前提条件や付帯設備の概念の整理が進められた。液相系システムに関する廃炉・汚染水・処理水対策事業による研究開発の検討例を図 22 に示す⁵⁶。本事業においては、溶解性 α 核種の除去技術や水処理に伴う二次廃棄物の処理技術について開発が進められている。

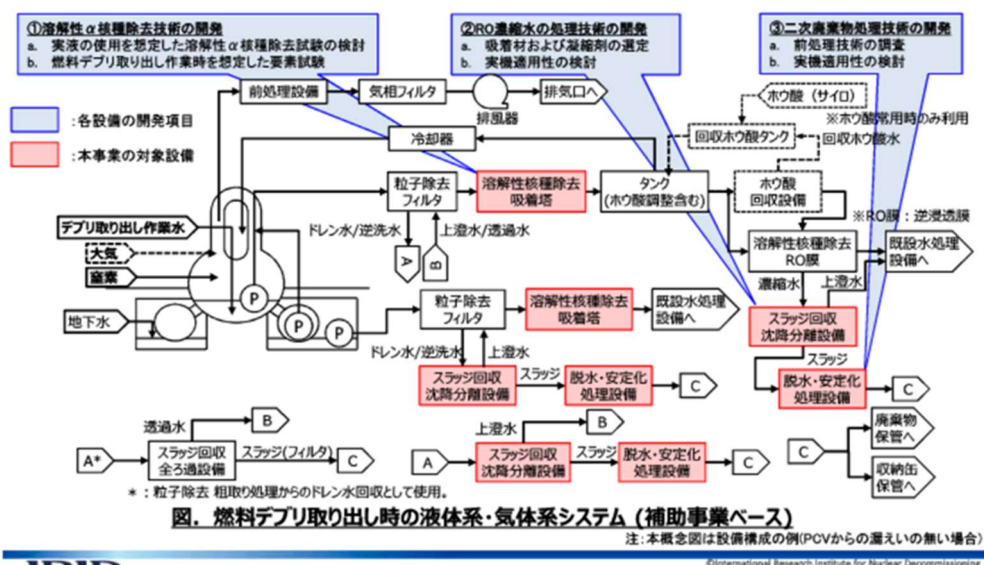
東京電力のエンジニアリングにおいては、廃炉・汚染水・処理水対策事業の成果を参照しつつ設備構成の基本計画を立案し、原子炉建屋内の環境（装置設置スペース確保の容易性や当該エリアの線量等）を条件とした設備配置の実現性（原子炉建屋内に配置、あるいは配置制約がある場合は一部の装置のみ原子炉建屋内に配置等）のケーススタディが行われている。その検討結果を基に、安全システムとしての成立性に関わる検討が実施される。このように、安全システムの構築においては、設備の配置設計との調整や、状況によって装置仕様の見直しを行うといった検討を繰り返しながら設計の質を高めていくという、地道な取組が求められる。

⁵⁶ IRID、廃炉・汚染水対策事業費補助金「安全システムの開発（液体系・気体系システム、臨界管理技術）」2021年度実施分成果、2022年8月。 <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/09/2021011anzensystem.pdf>

2. 補助事業の概要

補助事業にて検討中の液体系・気体系システムの系統構成図を示す。

今期補助事業では、溶解性核種除去設備およびスラッジの脱水・安定化処理設備の開発を実施する。



（出典：IRID）

図 22 廃炉・汚染水・処理水対策事業における液相系システム（粒子捕集・除去）の検討例

これまでに、3号機原子炉建屋の密閉性を高めるため、建屋の側面及び上部にカバーを構築することについての検討が進められている。本検討においては、カバーの構築に必要なスペースの確保に加え周辺環境等も考慮されているが、現状は原子炉建屋上層階の線量が高いため遠隔でのカバー構築が検討されている。カバー構築において精度良い施工を実現するには、実機の条件を模擬した検証を十分に実施しておくことが必要であるが、密閉性の向上にも限度があると推定される。したがって、構造や施工性の検討と並行して原子炉建屋周辺の環境改善を図り、要所の作業を作業員によって実施することで密閉性を高めるような俯瞰的な取組を進めることが必要である。

3.1.2.6.3 燃料デブリの安定保管に係る技術課題

3.1.2.6.3.1 燃料デブリの取扱い（収納・移送・保管）における課題

段階的な取り出し規模の拡大の開始までに、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、2021年度までに以下の検討が進められてきた^{57,58}。

- ・ 収納缶の基本仕様、すなわち取扱性を考慮した全長や作業効率と未臨界維持を考慮した内径、材質、蓋構造等の策定と、試験による収納缶の構造健全性の実証

⁵⁷ IRID, 令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発（燃料デブリの乾燥技術））」 2021年度中間報告, 2022年8月
<https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/20220825syunoukansou.pdf>

⁵⁸ IRID, 令和2年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発（粉状・スラリー・スラッジ状の燃料デブリ対応））」 2021年度最終報告, 2022年8月
<https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2022/08/20220825syunousurajji.pdf>

- ・ 収納缶に格納した燃料デブリからの現実的かつ合理的な水素発生予測法の検討とその予測法を用いた収納缶の蓋に設置される水素ガス放出用のベント機構の検討と移送容器内の水素ガスの蓄積を考慮した安全な移送条件の設定
- ・ ユニット缶内に格納された燃料デブリに対して適用可能で効率的な乾燥技術の開発及びその技術を用いた乾燥システムの検討

さらに、東京電力において、これらの検討結果を参考にして、段階的な取り出し規模の拡大に必要な燃料デブリの収納・移送・保管に必要な機器・設備（一時保管用収納缶、受入れ/払い出しセル、一時保管セル等）を、関連する他のプロジェクトと協調しながら具体化する活動が継続されている。また、取り出し規模の更なる拡大に向けて敷地全体の利用計画を踏まえて保管場所を検討し、そこまでの具体的な移送ルートや保管技術/形式の検討も進められてきている。この検討は粒状、塊状の燃料デブリを対象としてきた。燃料デブリの加工に伴って発生する粉状の燃料デブリはガス管理システムや、冷却水循環システムにおいて粉状、スラリー・スラッジ状態で回収することが検討されている。そのため、この検討の進捗に合わせて粉状、スラッジ・スラリー状の燃料デブリを安全、確実、合理的に保管するための方法、必要となる機器や設備の検討に着手しており、着実に進めていく必要がある。

現在、燃料デブリの性状に関する情報、知見が限定的であることから、燃料デブリの性状を保守的に想定して機器・設備を設計することになる。取り出し規模の更なる拡大時の燃料デブリの収納・移送・保管のための設備、施設の設計では試験的取り出しや段階的に規模を拡大した取り出しにおいて収集・蓄積される水素発生量や燃料デブリ性状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いに関する知見や経験を活用して合理化を進めることが重要である。

燃料デブリが収納されたユニット缶や収納缶の取扱いや操作は遠隔装置を用いて安全かつ確実に継続して実施されていく必要がある。そのため、詳細設計の初期の段階で実際に使用する又は類似の遠隔装置でユニット缶や収納缶の取扱いや、分析用の燃料デブリ試料の分取等の想定される作業のモックアップを行う。また、モックアップを通じ、これらの遠隔装置や燃料デブリの収納・移送・保管に必要な機器・装置の仕様/サイズやそれらの配置、燃料デブリの動線等を確定していくというアプローチは設計の後戻りの抑制の観点から有用と考えられる。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、保障措置の要求を満たすための設備（監視装置など）に対しても配慮を行っていく必要がある。

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。

3.1.2.6.3.2 燃料デブリ取り出し作業時における仕分けの課題

燃料デブリ取り出しの作業においては、溶融した炉心燃料が金属類と混合・固化した燃料デブリや、溶融した炉心燃料がPCV底面のコンクリートと混ざり合って生成された化合物（MCCI生成物）の他に溶融燃料が部分的に付着した干渉物や構造物等もPCV内から取り出される。さらに、燃料デブリの加工に伴って発生する粉状の燃料デブリも回収される。これらのうち、微量な溶融燃料が付着・混合しているものも全て燃料デブリとして保管すると燃料デブリ保管施設及び必要となる敷地規模も大型化する等の廃炉を進める上での阻害要因となる可能性がある。

燃料デブリはその特徴から未臨界状態を維持した取扱いや保管のために特別の配慮や設備・システム等が必要と判断されることから、核物質の量や含有濃度の測定結果に基づいて燃料デブリと放射性廃棄物を区分して別個の保管状態に持ち込む（仕分け）することを目指すのが望ましい。これへの対策として以下の検討が実施された⁵⁹。

- ・ PCV 内から取り出される物質（燃料デブリや構造物等）を燃料デブリと放射性廃棄物に仕分ける作業に関し、取り出しから保管までの作業プロセスのどのステップで実施することができるかについての検討（仕分けのシナリオの検討）
- ・ PCV 内から取り出される物質内に対して核物質の量やその含有濃度を非破壊で測定ないしは推定できる可能性のある技術・装置の調査（計測技術の候補の調査）

これらの検討から、PCVから取り出される物質に対して核物質の量やその含有濃度を計測ないしは推定することは制御棒成分（中性子吸収材）を含む種々の物質が不均一に混合している等により現時点で難度が高く、新たな技術開発が必要とされた。

計測技術・装置の開発においてはその計測誤差の把握が重要である。計測誤差に影響を与える因子としては、燃料デブリの性状、ユニット缶や収納缶への収納状態等の計測装置自体に依存する誤差以外のものが少なからず存在する。しかし、これら因子の影響の程度は燃料デブリの性状に関する知見が不足している現時点において極めて不確実である。そのため、模擬燃料デブリ等を用いた実際の計測を繰り返すことによる計測データの蓄積や実際の計測装置の開発と並行して、計算機上での多くの数値実験によって蓄積される計測誤差への影響因子の特定と影響の強さ等の知見を実際の計測装置の開発に反映していくことは研究開発のコスト及び期間短縮上有利と考えられる。つまり、性状や収納状況等の異なる種々の条件の燃料デブリが計測誤差に与える影響を把握することや、計測誤差を低減するための計測技術・装置の変更・改良等（例えば、遮へい材の仕様やその設置場所等）も計算機上の数値実験で検討することが可能である。2021年度の廃炉・汚染水・処理水対策事業において数値実験を主体とした検討で一定の成果を得た。2022年度以降は、上述の数値実験を主体とした解析的なアプローチによる計測装置の開発の他に、現在使用可能な計測装置による模擬燃料デブリやスリーマイルアイランド原子力発電所2号炉（以下「TMI-2」という。）の燃料デブリ等の実計測を並行して実施して、計測装置の開発を継続、加速することが重要である。

試験的取り出しや段階的に規模を拡大した取り出しにおいて、限定的ではあるがサンプル分析により実燃料デブリの性状に関する知見が得られる可能性がある。この知見が得られれば非破壊計測装置の計測結果が大きな誤差を含むことがないかチェックすることも可能である。

このような方法による燃料デブリと放射性廃棄物の保管状態を区分（仕分け）するために必要な計測技術・装置の開発を継続してその実機適用性及び実効性を高めていくことが重要である。

3.1.2.6.3.3 保障措置方策の課題

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、計量管理や保障

⁵⁹ IRID, 平成30年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」2019年度実施分成果 2020年8月。
<https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2020/09/2019008kibonosaranarukakudai.pdf>

措置に係わる既存技術を広範囲に調査することで東京電力の技術支援に備えるとともに、エンジニアリング的視点も踏まえながら、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ことをプロジェクト進捗状況から確認していく。

3.1.2.7 主な技術課題のまとめ

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 23 のとおりである。

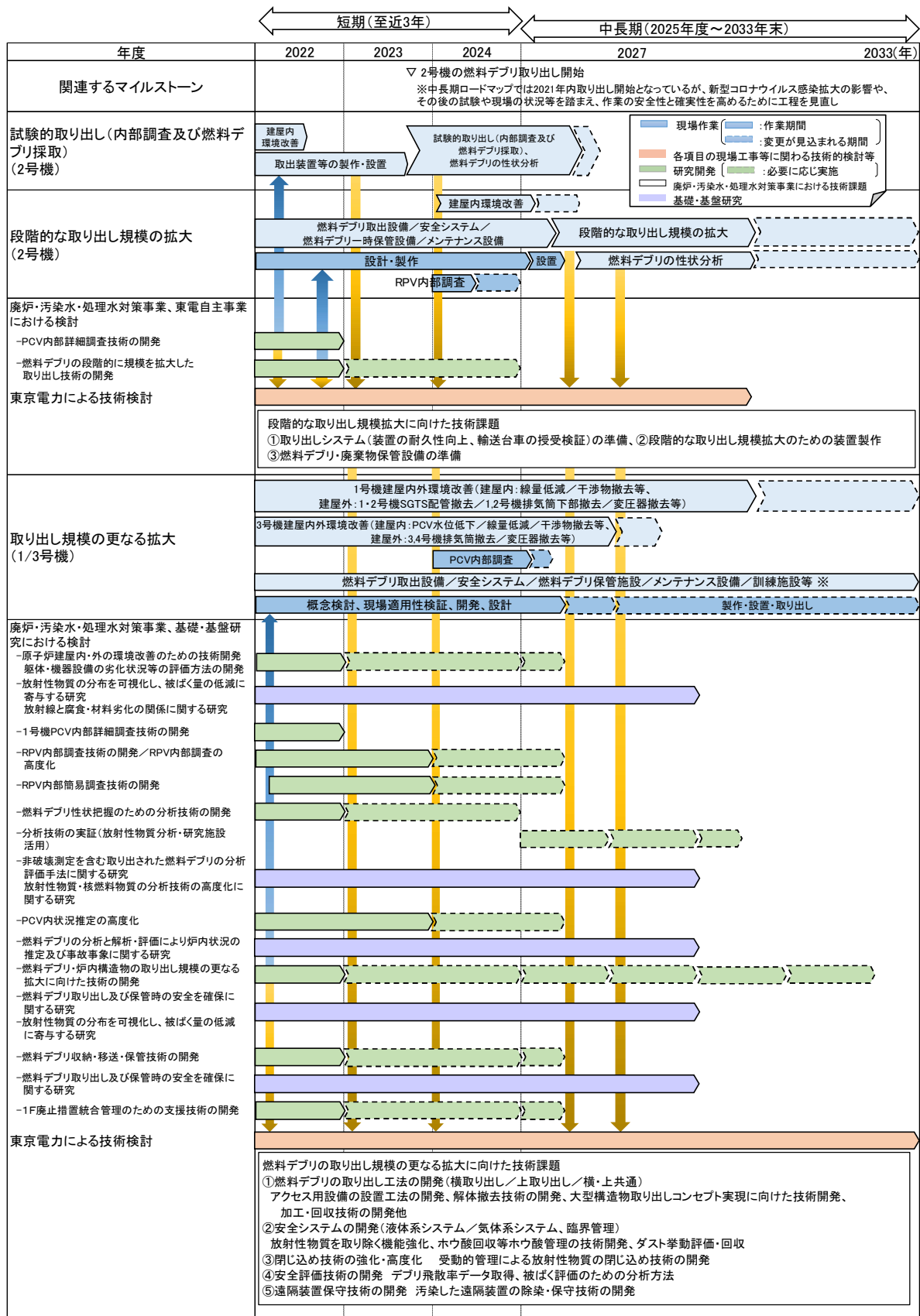


図 23 燃料デブリ取り出しに係る主な技術課題と今後の計画(工程表)

3.2 廃棄物対策

3.2.1 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、モニタリングを始め、適正な保管管理計画の策定・更新とその遂行を進める。
- (2) 2021 年度に示した処理・処分方策とその安全性に関する技術的見通し（以下「技術的見通し」という。）を踏まえ、固体廃棄物の特徴に応じた廃棄物ストリームの構築に向けて、性状把握を進めつつ、処理・処分方策の選択肢の創出とその比較・評価を行い、固体廃棄物の具体的管理について全体として適切な対処方策の提示に向けた検討を進める。

<「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)

廃棄物対策は、発生から保管・管理、処理等を経て処分に至るまでの各段階でリスクを低減しつつ、最終的な処分の実施の見通しを得る必要がある長期にわたる取組である。放射性廃棄物管理に関する用語について、IAEA の用語集における定義を添付資料 8 に、国内外の放射性廃棄物の分類と処分について添付資料 9 に示す。

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、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基づく取組を進めている。東京電力には発生する固体廃棄物の安全かつ合理的な保管・管理を徹底することが求められている。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 を中心に関係機関が各々の役割に基づき取組を進めており、性状把握のための分析能力の向上、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）の構築に向けた開発の成果を踏まえ、2021 年度に、技術的見通しを示した。中長期ロードマップでは、第 3 期には、固体廃棄物の性状分析等を進め、廃棄体の仕様や製造方法を確定するとされているため、固体廃棄物の具体的管理について全体としての適切な対処方策の提示に向けた検討に着手した。

なお、これまでは固体廃棄物に関する廃炉・汚染水・処理水対策事業は、IRID が中心に担ってきたが、2023 年夏頃に現在の継続期限を迎えることに備え、2022 年度開始事業より、JAEA を中心とした体制となっている。

3.2.1.1 福島第一原子力発電所における保管・管理の現状

固体廃棄物の現在の保管・管理状況は表 2 の通りである。これら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の設置等の方針を示している。

この計画に基づき、水処理二次廃棄物及び再使用・リサイクル対象を除く全ての固体廃棄物の屋外での一時保管を 2028 年度内までに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（添付資料 10）。

技術的見通しにおいて、廃棄物ヒエラルキーの考え方（廃棄物対策として取るべき方策は、①廃棄物発生抑制、②廃棄物量最小化、③再使用、④リサイクル、⑤処分、の優先順位とする。①の方策から優先的に可能な限り取り組み、⑤の処分は最後の手段とする考え方（図 24））を実践している諸外国の例を示したが、東京電力でもこの考え方に対応する取組が実行されている。

再使用・リサイクル対象のうち、コンクリートガラについては破砕し、表面線量率がバックグラウンド相当と確認した上で、路盤材としてリサイクルを実施している。また、金属については、リサイクルに供するための除染方法として溶融除染等の検討が行われている。廃炉・汚染水・処理水対策事業においても、この実現に必要な研究開発として、溶融・除染時の核種分配挙動の解明と溶融処理後の検認手法に係る検討に着手した。

水処理二次廃棄物についても、内包する放射エネルギーの大きい吸着塔を優先的に建屋内保管に移行する計画としており、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、含水率が高く流動性のある多核種除去設備等で発生した ALPS スラリー及び除染装置スラッジについては、より安全に保管・管理を行うため、前者については安定化（脱水）処理

(2024 年度の処理設備設置予定) を行い、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回収し、脱水処理、容器収納して高台の保管施設へ移送(2023 年度回収着手予定) することとしている。

これらの固体廃棄物は一部を除いて今後も継続的に発生するとともに、燃料デブリ取り出しに伴って今後は新たな固体廃棄物が発生する。

表 2 固体廃棄物の保管・管理状況

(a) ガレキ類・伐採木・使用済保護衣等の管理状況 (2022.7.31 時点)

分類	保管量 (m ³) / 保管容量 (m ³) (割合)
屋外集積 (表面線量率 ≤ 0.1 mSv/h)	237,500 / 266,300 (89%)
シート養生 (表面線量率 0.1~1 mSv/h)	47,700 / 50,700 (94%)
覆土式一時保管施設、容器 (表面線量率 1~30 mSv/h)	16,800 / 17,900 (94%)
容器* (固体廃棄物貯蔵庫内)	28,000/ 39,600 (71%)
合計	330,000 / 374,500 (88%)

伐採木

分類	保管量 (m ³) / 保管容量 (m ³) (割合)
屋外集積 (幹・根・枝・葉)	92,000 / 134,000 (69%)
一時保管槽 (枝・葉)	37,300 / 41,600 (90%)
合計	129,300 / 175,600 (74%)

使用済保護衣等

分類	保管量 (m ³) / 保管容量 (m ³) (割合)
屋外集積	30,400/ 52,500 (58%)

*水処理二次廃棄物 (小型フィルタ等) を含む

なお保管量は端数処理で 100m³未満を四捨五入しているため、合計と内訳が整合しない場合がある。

(b) 仮設集積の管理状況 (2022.7.31 時点)

分類	保管量 (m ³) / 保管容量 (m ³) (割合)
仮設集積	47,900/ 62,600 (77%)

(c)水処理二次廃棄物の管理状況（2022.8.4 時点）

吸着塔類

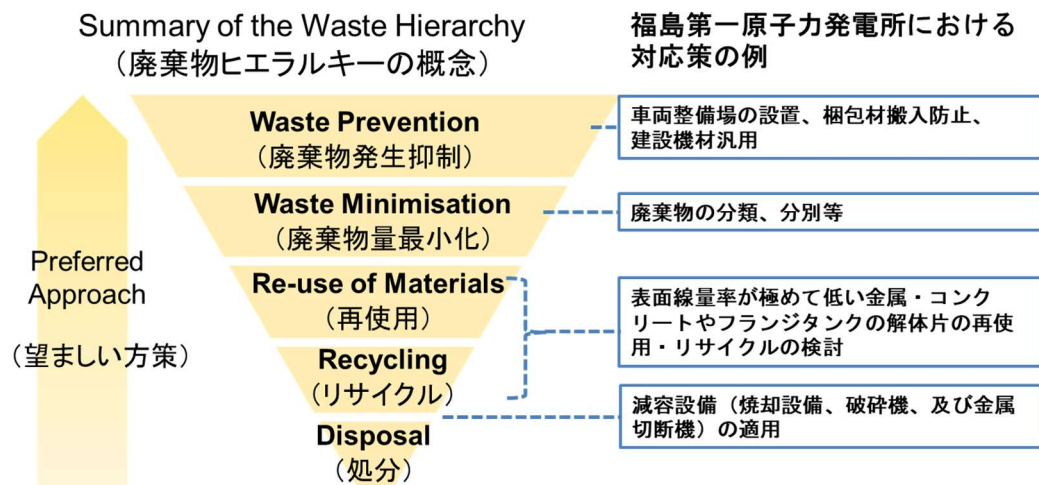
保管場所				保管量		保管量/保管容量 (割合)	
使用済吸着塔保管施設	セシウム吸着装置使用済ベッセル			779	本	5,402 / 6,372 (85%)	
	第二セシウム吸着装置使用済ベッセル			254	本		
	第三セシウム吸着装置使用済ベッセル			13	本		
	多核種除去設備等保管容器		既設	1,986	基		
			増設	2,041	基		
	高性能多核種除去設備使用済ベッセル		高性能	91	本		
	多核種除去設備処理カラム		既設	17	塔		
	モバイル式処理装置等使用済ベッセル及びフィルタ類			221	本		

廃スラッジ

保管場所	保管量 (m ³) /保管容量 (m ³) (割合)
廃スラッジ貯蔵施設	442 / 700 (63%)

濃縮廃液

保管方法	保管量 (m ³) /保管容量 (m ³) (割合)
濃縮廃液タンク	9,380 / 10,300 (91%)



出典: Strategy Effective from April 2011 (print friendly version), NDA を加工

図 24 NDA における廃棄物ヒエラルキーの概念と福島第一原子力発電所における対応策

3.2.1.2 処理・処分方策の検討

性状把握について、対象とする固体廃棄物とその優先度、分析の定量目標等を定める中長期的な分析戦略を策定するための方法論確立に向けた検討を行っている。これまでに確立したデータを簡易・迅速に取得するための分析手法については、その成果を放射性物質分析・研究施設第 1 棟（2022 年 6 月竣工）において、標準的な分析法として利用するための取組に着手した。また、

高線量廃棄物の分析データの取得に向け、セシウム吸着塔の吸着材を採取する技術の現場実証に取り組んでいる。

保管・管理については、高線量廃棄物保管時の水素発生対策として重要なベントフィルタの機能を維持するため、フィルタの劣化（閉塞・破損）に影響を与える要因（水素脆化、放射線劣化等）とその確認方法について検討・整理した。また、水素発生以外の懸念事象に関し、国内外の事例を基に、保管中の課題とその対策に関する検討を行った。

処理技術については、技術的見通しで高温処理技術の ALPS スラリー等への実機適用の見通しを確認したところであるが、さらに処理時の Cs 揮発抑制のための詳細な検討を行った。低温処理技術については、実規模試験による実機適用の見通しの確認を行ったとともに、更なる固化可能性検査手法や固化体の変質に関する課題の検討に取り組んでいる。また、低温処理技術の適用範囲の拡大等、技術オプションの拡大に資するため、熱分解処理等の中間処理技術について、有機物の無害化、反応性・腐食性物質の不活性化等への適用性の確認に着手した。

処分技術については、処分概念に求められるニーズへの対応策構築のため、廃棄物ストリームの検討が進んでいる廃棄物について、必要な情報・知識の調査を行っている。また、固体廃棄物処分に関して重要なシナリオ抽出のために、処分施設における重要事象進展のストーリーボード⁶⁰の構築を開始した。

3.2.2 主要な課題とそれを実現する技術戦略

第3期には、固体廃棄物の性状把握等を進め、廃棄体の仕様や製造方法を確定するとされているため、性状把握、処理・処分の各分野の連携の下、必要な研究開発課題を確認しつつ、固体廃棄物の具体的管理について全体としての適切な対処方策の提示に向けた検討を進める。具体的には、まず処理技術に関する未対応の課題や中間処理に関する検討及び処分オプション案の検討により、処理・処分方策の選択肢の創出を行い、その上で、明らかになりつつある性状データ等を用いて選択肢の比較・評価を行い、固体廃棄物の特徴に適した廃棄物ストリームの構築等の検討を進める。

これらを円滑に進めるために、関係者は、引き続き高いレベルでの技術・人材を備えた研究開発体制による取組の継続に向け、廃棄物分野の人材育成・技術力向上に不断に努めるとともに、廃棄物分野内での連携強化、成果の相互活用などによるリソースの効率的な活用に取り組むことが不可欠である。また、廃棄物管理の各段階で必要な要素技術及びそれを支える周辺技術等のサプライチェーンの維持・強化を可能とする環境の整備についても検討する必要がある。

3.2.2.1 性状把握

分析データを蓄積しながら、固体廃棄物のインベントリ評価について不断の改善を行い、処理・処分を含む固体廃棄物対策への反映を継続していく必要がある。その際には、ガレキ類等の低線量廃棄物、水処理二次廃棄物や燃料デブリ取り出しに伴い発生する廃棄物等の高線量廃棄物について、それぞれの特徴に応じた取組を進める必要がある。

低線量廃棄物については、分析作業自体の困難性は高くないものの、物量が膨大であることから全数測定の実施には膨大な時間を要し、前述の物量低減とともに効率的な分析・分析計画法が

⁶⁰ 処分システム全体のふるまいを俯瞰し、時間・空間スケールに関する整合性を確認できるようにする絵コンテ

必要となる。そのためには必要な精度を効率的に担保するアプローチが重要となり、その実現に向けて簡易・迅速化により効率的な分析を進めるとともに、DQO プロセス⁶¹と統計論的方法を組み合わせた効率的な分析計画法の確立を目指すことが必要である。

高線量廃棄物については、試料採取や分析自体が困難であり、取得される分析データの数が限定されることから、移行モデルに基づく統計論的インベントリ推定が重要なものとなる。現在実施中のセシウム吸着塔からの試料採取・分析に向けた取組を継続するなど、DQO プロセスと統計論的方法を組み合わせた分析計画法による効率的な実試料のデータ取得に取り組むとともに、移行モデルの精度向上を目指すために採取すべきデータの優先度を検討することが必要である。

性状把握については、試料採取が容易なものを分析する段階から、廃棄物対策において重要な試料を採取・分析する段階になってきている。今後は対象とする固体廃棄物とその優先度、分析の目的と定量目標等を定める中長期的な分析戦略を策定し、それに基づいて分析・評価を進めることが重要となる。DQO プロセスと統計論的方法を利用した分析計画法による年度の分析計画策定、データ取得・分析、取得したデータの処理・処分方策検討への反映とその効果の評価、評価結果に基づく次期中長期分析計画の策定のフローを確立するため、その試行実績を蓄積し、妥当性を確認することが有用である。

分析施設については、JAEA 茨城地区の分析施設等の既存の分析施設に加え、放射性物質分析・研究施設が 6 月に竣工、また東京電力による新たな分析施設の設置が計画されており、様々な固体廃棄物の性状把握を並行して実施することが可能となる。対象とする固体廃棄物によって求められる分析の対象核種や分析項目、精度、分析試料数等が異なるため、施設の特徴や分析の目的に応じた適切な役割分担に基づく体制の構築が必要である。

3.2.2.2 保管・管理

固体廃棄物の保管・管理については、放射能濃度や性状等、リスクに応じて適切に行う。また、保管・管理状況のモニタリングやサーベイランスにより必要な情報を得つつ、性状把握に資する多様な情報という観点からも、測定項目・測定時期等を見直していくことが重要である。

中長期ロードマップで、水処理二次廃棄物及び再使用・リサイクル対象を除く全ての固体廃棄物の屋外一時保管を 2028 年度内までに解消するとされていることから、その達成のため、伐採木や使用済保護衣等の焼却、金属・コンクリートの切断・破砕など減容等を進め、建屋内保管への集約を着実に進める必要がある。

ALPS スラリー安定化処理設備の設置時期の遅れにより、安定化処理までに積算吸収線量の上限值（5,000kGy）を超え、移替えが必要となる HIC の基数が増加している。静置時の健全性に直ちに影響があるものではないものの、移替えまで適切に管理するとともに、安定化処理設備の早期の設置及び当面の移替えを安全に完了することが必要である。

燃料デブリ取り出しに伴って発生する廃棄物等の高線量廃棄物について、2021 年度までの研究開発の成果によって燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大を想定した課題と対策は明確にしたところであり、今後は燃料デブリ取り出し工法の検討に応じた見直しが必要である。なお、そ

⁶¹ 米国環境保護庁により開発された、意思決定のために分析試料のサンプリングを計画する方法。

れ以前に行われる燃料デブリ取り出し作業（試験的取り出し、段階的な取り出し規模の拡大）において発生が想定される固体廃棄物の保管・管理についても確実に対策を講じる必要がある。

敷地内には事故前から保管されている固体廃棄物も存在し、燃料デブリ取り出し作業終了後には大量の解体廃棄物の発生も予測されことから、固体廃棄物の保管容量を増大する対応のみでは何れ限界となるため、固体廃棄物発生量を可能な限り低減する取組を進めることとする。

物量低減は、今後の廃炉作業の進展に応じた固体廃棄物の保管容量を確保し、その管理を安全かつ合理的に進める上で、極めて重要な対策であり、まずはこれまで実行している対策を着実に継続することが必要である。固体廃棄物は今後も発生し続けることから、より物量を低減するために他国の先進事例を参考に、更なる可能性の検討を継続していくことが重要であり、期待される効果と実現可能性を考慮して、具体化していくことが望ましい。

表面線量率が極めて低い金属の再使用・リサイクルの実現のため、金属のリサイクルに向けた除染方法として溶融除染（溶融スラグ除染法）について検討が進められている。溶融スラグ除染法による金属リサイクルは、既に欧米諸国で多くの実績があり、有望な候補技術と考えられることから、欧米諸国と福島第一原子力発電所で条件が異なる部分（対象核種等）に着目し、その適用性の評価に取り組むことが重要である。

コンクリートガラについては、表面線量率がバックグラウンド相当と確認された部分は既に路盤材としてリサイクルされているが、廃炉作業の進捗に応じ継続的に発生することから、今後の発生量とリサイクル量のバランスを適切に評価し、追加の対策が必要となる場合は、リードタイムを考慮した対応を検討しておく必要がある。

3.2.2.3 処理・処分

全ての廃棄物ストリームを束ねた全体像の最適化・合理化に向けた方策の具体化のため、廃棄物ストリームごとの処理・処分方策の最適化・合理化の試行例を積み重ね、廃棄物ストリームごとの最適化の知見を幅広く得る。そのため、図 25 の一連の検討に必要となる処理技術、処分技術の研究開発に継続して取り組む必要がある。

処理技術に関しては、これまで研究開発を進めてきた低温・高温処理技術について、未対応となっている課題に取り組む必要がある。これまでに低温・高温処理技術の適用について検討されていない廃棄物ストリームについて、必要に応じて評価を行うとともに、作製される固化体の処分後の地下水への浸出性能等の評価を行う。低温処理技術については、固化可能性検査手法や固化体の変質に関する検討を行う。高温処理技術については、固化処理プロセスだけでなく供給系や排気系を含めた処理システム全体としての成立性が課題であり、処理の開始時期に応じた適切な時期に検討を行う必要がある。

処分技術に関しては、処分概念の信頼性を高めるために、固体廃棄物の特徴を踏まえ、処分施設の長期変遷挙動の検討に基づき処分概念の成立性を評価し、処分概念の検討に反映することが必要である。また、成立性の示された処分概念に適切に廃棄物を割り当てるためには、廃棄物の特性、処分施設やその周辺の環境条件の変化等を、適切に線量評価のシナリオやパラメータに反映した上で試行を繰り返すことにより、これらのシナリオやパラメータの線量への感度構造に関する知識を拡充する。この知識を活用し、安全で合理的な処分オプション案を提示することが重要である。さらに、この処分オプションを反映した廃棄物ストリームの対象を広げ、福島第一原

子力発電所の固体廃棄物全体を俯瞰した処分オプション群の検討を行い、性状把握に必要な精度や廃棄物性能の目標の提示等の処分以外の分野と連携して、固体廃棄物の具体的管理について全体としての適切な対処方策検討に寄与する。

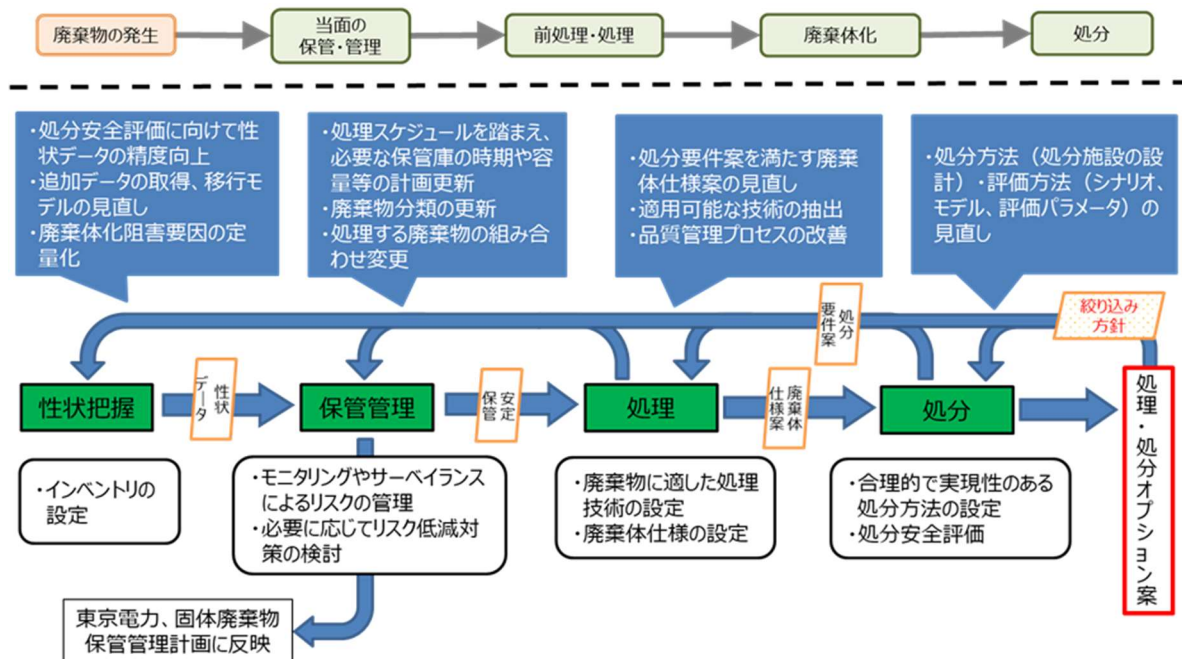


図 25 固体廃棄物の安全な処理・処分方法を合理的に選定するための手法

3.2.2.4 主な技術課題のまとめ

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 26 のとおりである。

中長期ロードマップにおいて、第 3 期には、固体廃棄物の性状分析等を進め、廃棄体の仕様や製造方法を確定するとされているため、第 3-①期では、固体廃棄物の具体的管理に関する全体としての適切な対処方策の提示に向けた検討を進める。具体的には、分析データの蓄積と統計論的方法の適用により評価された性状データを反映した現実的インベントリ設定を基に、安全確保を前提とした廃棄物ストリームごとの処理・処分方策の最適化・合理化の試行例を積み重ね、廃棄物ストリームごとの最適化の知見を幅広く得るとともに、全ての廃棄物ストリームを束ねた全体像の最適化・合理化に向けた方策の具体化に向けた検討を進め、その考え方を明らかにする。

これらの検討の際には、最新知見を反映すること及び利用可能な最良の技術 (Best Available Techniques) の概念を適用することにより、利用実績や経済的実現性をも考慮して、最適な方策を柔軟に検討することが重要である。検討が進み、廃棄物の全体像に対する処理・処分方策を固めていくに当たっては、地元・社会と問題意識を共通理解にするなど、最適化に向けた検討の過程を共有することが重要である。

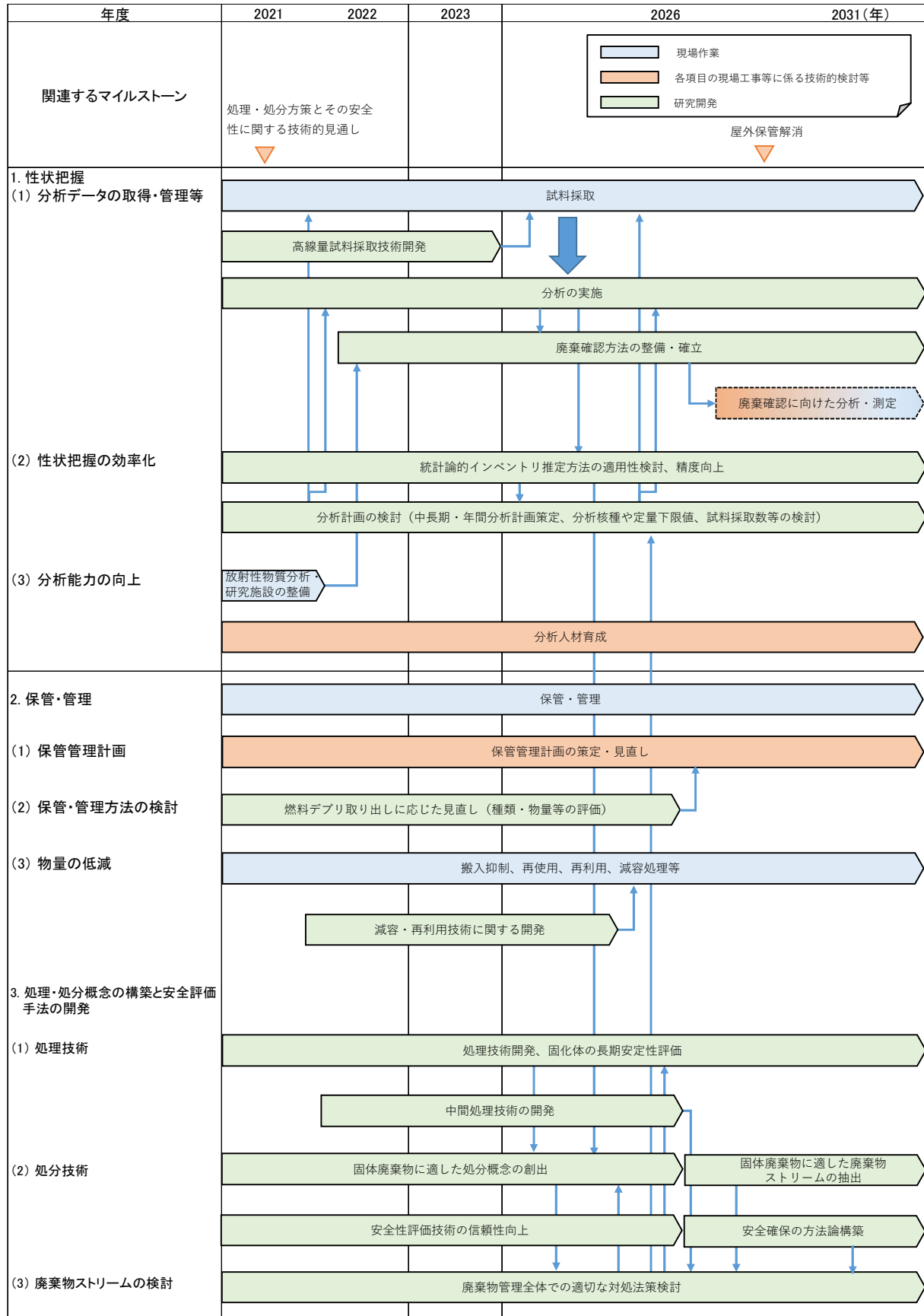


図 26 廃棄物対策に係る主な技術課題と今後の計画（工程表）

3.3 汚染水・処理水対策

3.3.1 目標と進捗

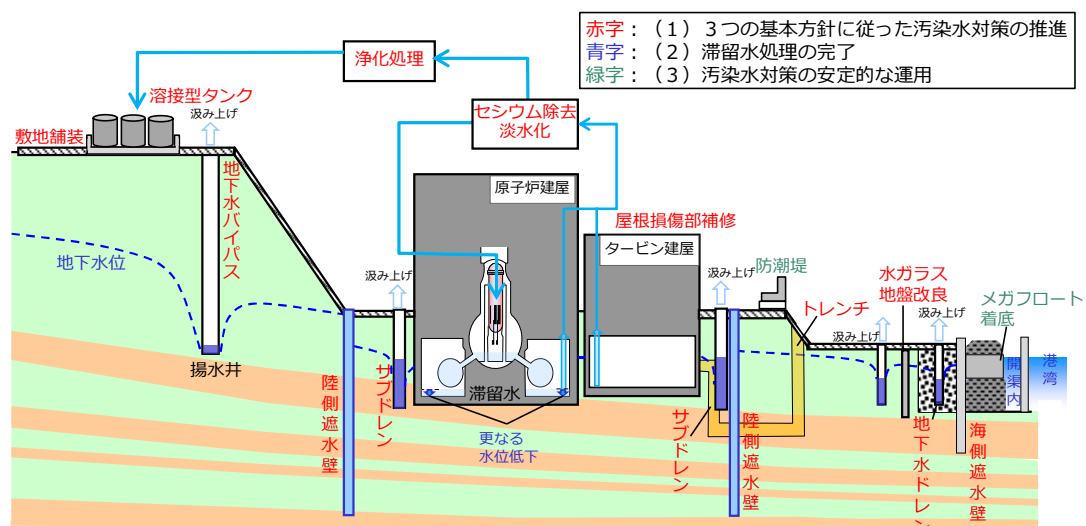
(目標)

- (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。また、汚染水対策の安定的な運用に向け、津波対策や豪雨対策等の大規模自然災害リスクに備えた対策を計画的に実施する。
- (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。
- (3) 現在タンク保管中の ALPS 処理水について、「ALPS 処理水の処分に関する基本方針」（2021 年 4 月）から 2 年程度後の放出に向けた対応を進める。

(進捗)

汚染水対策の概要を図 27 に示す。燃料デブリに接触した冷却水と建屋に流入した地下水・雨水が混合した汚染水である建屋滞留水は、放射性物質に起因するリスクの低減対策という観点では、相当量の放射性物質（インベントリ）が溶存した液体であることから潜在的影響度が高く、本来あるべき保管状態にないことから管理重要度も高い状態にある（2.2 節参照）。この建屋滞留水の処理は、循環注水を行っている 1～3 号機原子炉建屋、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いて 2020 年に完了し、保有水量は大幅に低減したものの、未だ潜在的影響度は高いレベルにある。

現在、汚染水・処理水対策として、以下の 4 つの取組が進められている。

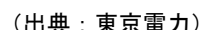


(出典：東京電力)

図 27 汚染水対策の概要⁶²

⁶² 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第 100 回），資料 2，廃炉・汚染水・処理水対策の概要，2022 年 3 月 31 日

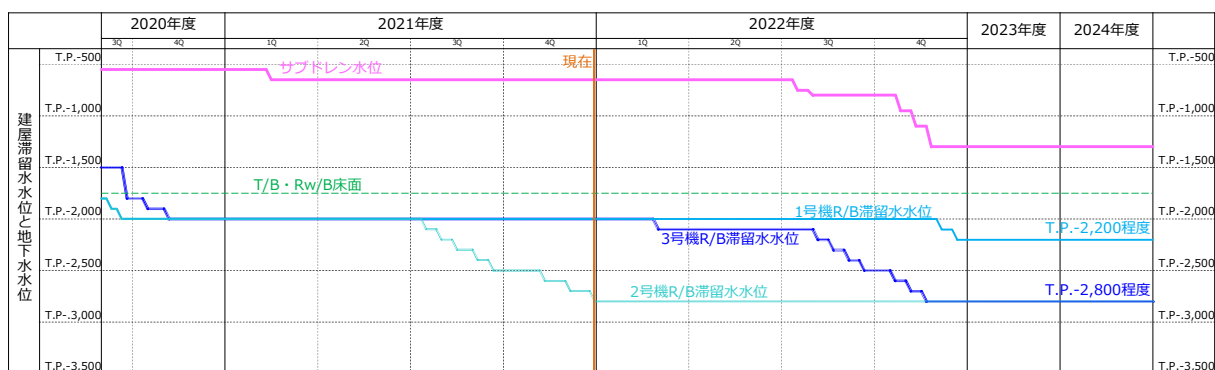
陸側遮水壁、サブドレン等の重層的な汚染水対策により、原子炉建屋周辺の地下水位を低位に安定的に管理するとともに、建屋屋根の損傷部の補修や構内のフェーシング等により、降雨時の汚染水発生量の増加も抑制傾向となり、汚染水発生量は、対策前の約 490m³/日（2015 年度）から約 130m³/日（2021 年度）まで低減した。2025 年内には 100m³/日以下に抑制することに向け、他の廃炉作業等との干渉を調整しながら、屋根の補修やフェーシング範囲の拡大を進めている。図 28 には、汚染水抑制対策の進捗と汚染水発生量の推移を示す⁶³。



(2) 滞留水の処理完了に向けた取組

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き、建屋滞留水の処理が2020年に完了した。また、2022～24年度に原子炉建屋滞留水を2020年末の半分程度に低減させることを目指しており、2号機原子炉建屋では、PCVの圧力やダスト濃度などのパラメータを監視しながら慎重に水位を低下し、2022年3月に目標水位であるT.P.-2,800へ先行到達させた⁶⁴（図29）。

⁶⁴ 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議（第 100 回），資料 3，建屋滞留水処理等の進捗状況について，2022 年 3 月 31 日



(出典：東京電力)

図 29 サブドレンと建屋の水位低下⁶⁴

今後、原子炉建屋滞留水量の半減に向け、引き続き、サブドレン水位を低下させながら、建屋内水位を低下させる計画であるが、これに伴って原子炉建屋底部に存在する α 核種を含むスラッジ（以下「 α スラッジ」という。）対策の課題の重要度が増している。 α スラッジについては、粒径分布や化学組成が分析され、適切な孔径のフィルタにより大部分を除去できる見通しが得られつつある。また、プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋の滞留水処理完了に向け、最下階に存在する高線量のゼオライト土嚢についても、線量率調査や回収に向けた工法検討が進められている。滞留水処理が完了し、床面露出をさせた建屋については、床面に存在するスラッジ等の回収方法の検討が進められている。

(3) 汚染水対策の安定的な運用に向けた取組

津波対策として、2020年9月に千島海溝津波防潮堤、2022年1月に建屋開口部の閉止対策が完了し、その後は日本海溝津波防潮堤の設置、陸側遮水壁の保全強化、サブドレン等の集水機能設備類の護岸側から高台への移転、除染装置スラッジの高台への移送などを進めている。豪雨対策としては、1～4号機周辺における浸水リスクの解消を目指すD排水路の設置や既存排水路の排水機能強化等が進められている。

また、陸側遮水壁等の重層的な対策の重要性は変わっていないものの、ブラインの漏えいなど設備の損傷等が発生していることも踏まえ、今後、監視を強化し、予備・代替品の調達・手配の整備や、早期に復旧対策に取り組む体制の構築が重要である。さらに、2021年2月13日、2022年3月16日に発生した地震では処理水を貯蔵するタンクにおいて、漏えいは生じていないものの、滑動が生じた。（それぞれ53基、160基）。また、一部の連結管においてメーカ推奨値⁶⁵を超過する変位が確認されたが、連結弁を全閉しているため万が一破断してもタンク滞留水の漏えいには至らない状態となっている。

(4) ALPS 処理水の海洋放出に向けた取組

2021年4月13日、政府は「復興と廃炉の両立」を大原則として、6年以上に及ぶ専門家会議^{66,67}での総合的な議論を経て、安全性を確保し、風評対策を徹底することを前提にALPS処理水

⁶⁵ 変位が生じて安全に使用できる目安値であり、この値に対して設計値は約2～4倍の裕度有

⁶⁶ トリチウム水タスクフォース報告書、2016年6月3日

⁶⁷ 多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会報告書、2020年2月10日

の海洋放出を福島第一原子力発電所において実施するという基本方針を公表した。また、東京電力に対し、今後、2年程度後にALPS処理水の海洋放出を開始することを目途に、具体的な放出設備の設置等の準備を進めることを求めた⁶⁸。

この方針を受け、東京電力は、2021年4月16日、法令に基づく規制基準等の遵守と更なる取組による安全の確保、風評影響を最大限抑制するための取組、風評影響が生じた場合の賠償、将来に向けた課題についての考え方を示す⁶⁹とともに、関係者への説明や実施計画の認可取得に向け取組を開始した。

表3に基本方針公表以後のALPS処理水の海洋放出に向けた主な取組を示す。政府は「ALPS処理水の処分に係る基本方針の着実な実行に向けた関係閣僚等会議」の第2回会議において当面の対策を、第3回会議では具体的な行動計画を取りまとめ公表している。また、2021年には海域環境の監視測定タスクフォース、ALPS処理水に係る海域モニタリング専門家会議が設置され、海域モニタリングの強化に向けた取組が実施されている。2021年7月には、国際原子力機関（以下「IAEA」という。）と付託事項に関する署名を行いALPS処理水の放出に向けた支援を要請している。

表3 ALPS処理水の海洋放出に向けた主な取組

スケジュール	2021年度	2022年度	2023年度上期
政府	▼「ALPS処理水の処分に係る基本方針」の公表 ALPS処理水の処分に係る基本方針の着実な実行に向けた関係閣僚等会議 ▼第1回 ▼第2回 ▼第3回 ▼海域環境の監視測定タスクフォース設置 ▼ALPS処理水に係る海域モニタリング専門家会議設置 ▼IAEAとの付託事項(TOR)署名 ▼JAEAが放出前のALPS処理水の第三者分析を実施 ▼海域モニタリング開始		
東京電力	▼「政府基本方針を受けた当社の対応」を公表 ▼「安全確保のための設備の検討状況について」を公表 ▼「ALPS処理水の海洋放出に係る放射線影響評価報告書（設計段階）の公表」 ▼「ALPS処理水希釈放出設備及び関連施設設置に関する特定原子力施設に係る実施計画変更認可申請」の提出	設備設置等工事 使用前検査	▼春頃を目途に海洋放出を開始
原子力規制委員会	▼第1回審査会合 ▼第2回審査会合 審査会合（第3回～第15回）	バブコメ ▼認可	
IAEA	▼日本政府とのTOR署名	▼ALPS処理水の取扱いに係る安全性レビュー ↳ ▼レビュー結果報告書の公表 ▼ALPS処理水の規制に関するレビュー ↳ ▼レビュー結果報告書の公表	

⁶⁸ 廃炉・汚染水・処理水対策関係閣僚等会議（第5回）、資料1、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所における多核種除去設備等処理水の処分に係る基本方針（案）、2021年4月13日

⁶⁹ 東京電力：別紙1 多核種除去設備等処理水の処分に係る政府の基本方針を踏まえた当社の対応について、プレスリリース、2021年4月16日

一方、東京電力は2021年8月に安全確保のための設備の検討状況を公表するとともに、2021年11月には「ALPS 処理水の海洋放出に係る放射線影響評価報告書（設計段階）」において、ALPS 処理水の海洋放出による人及び環境への影響は極めて小さいとの評価結果を公表した。また、2021年12月には「ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設設置に関する特定原子力施設に係る実施計画変更認可申請」を原子力規制委員会に提出し、海洋放出設備とその運用方法、海洋放出時の安全性等に関する審査を受け、2022年7月に認可を得ている。

また、IAEA は政府との付託事項に基づき、2022年2月にはALPS 処理水の取扱いに係る安全性レビュー、2022年3月にはALPS 処理水の規制に関するレビューを実施しており、それぞれ2022年4月、2022年6月にレビュー結果報告書を公表した。

原子力施設から発生する液体廃棄物を、法令に基づき、人と環境への放射線影響を十分に低く抑え海洋へ管理放出することは、国際的にも認められ国内外で広く採用されている方法である。一方で、ALPS 処理水の海洋放出に関し、風評影響を懸念する声が出ていることも事実であり、これらの懸念を払拭するための理解が深まるよう努力を続ける必要がある。そのため、東京電力を中心に、安全な海洋放出を行う上で基本となる①海洋放出の運用計画、②海洋放出水中のトリチウムなどの放射性物質が人体に及ぼす影響、③運用状況の確認方法をご理解いただけるよう分かりやすく丁寧な説明を繰り返し行うこと、関係機関とも連携の上、IAEA 等の信頼できる第三者によりこれらの確認を行い正確な情報を発信することなど、より高い透明性が求められる。

東京電力が準備中の海洋放出システムは、実施計画どおりに確実に運用されれば人や環境への影響に支障はなく、したがって、「計画どおり」に「確実に」運用することが重要な課題である。以下に技術戦略プラン2021において示した東京電力が準備すべき各項目についての進捗をまとめる。

- ・ 運用段階における、設備運転、ALPS 処理水の分析、処理水・希釈水の流量管理、海域モニタリング、メンテナンス、トラブル発生時の対応方策等一連の運用計画を立案の上、リスクを最小限に抑え、かつ社会に不安を与えない設備計画の立案
⇒ 東京電力の設備計画、運用計画は原子力規制委員会の認可を7月に取得。ただし、海洋放出前の測定・評価の対象核種についてはALPS 処理水中に有意に存在し得る核種を改めて検証した上で選定を行う。NDFは分析対象核種の選定方法や核種濃度の評価方法等に関する技術的な助言・支援を実施。
- ・ 具体的な放出計画に基づく、人や環境への放射線影響評価と評価結果の公表
⇒ 東京電力が2022年4月にIAEAや国際専門家によるレビュー、原子力規制委員会との議論等を踏まえて改訂した放射線影響評価書を原子力規制委員会に提出。今後、評価の対象核種の選定結果を踏まえ、放射線環境影響について確認を行う。
- ・ IAEAの専門家等による安全性の確認
⇒ IAEAは2022年2月にALPS 処理水の取扱いに係る安全性レビューを実施し、安全性については、国際安全基準に照らして、放出設備の設計において予防措置が的確に講じら

れていることや、人への放射線の影響は規制当局が定める水準より大幅に小さくなることなどを確認し、報告書として公表⁷⁰。次回のレビューミッションは2022年11月を予定しており、ALPS処理水の放出開始前に、最終的な結論及び所見が含まれる包括的な報告書を発行する予定。

また、2022年3月に原子力規制委員会へのレビューを行い、原子力規制委員会が独立した規制機関として機能しており、適切な規制の枠組みを整備し、安全性を評価する責任を果たしていると公表⁷¹。

さらに、IAEAは第三者分析として、IAEAの研究所と第三国の研究機関によるALPS処理水に関する分析を実施する予定。なお、東京電力は自社での分析に加え、ISO/IEC17025⁷²の認定証などを持つ外部機関にも分析を委託する計画である。政府においても日本原子力研究開発機構（JAEA）が放出前における第三者分析を行う方針としており、これらの分析結果は国内外に透明性高く発信される。

- ・ 海域モニタリングの強化計画の策定と放出前の海域でのモニタリング
⇒ 2022年3月30日に開催された政府のモニタリング調整会議において、国（環境省、原子力規制委員会等）、東京電力、福島県が実施する海域環境のモニタリングの強化・拡充計画が示され、2022年4月よりモニタリングが開始された。東京電力は、国や地方公共団体等との連携の下、主体的にモニタリングを実施している。
- ・ 分析に係る協力会社を含めた関係者の教育・訓練
⇒ 東京電力は分析に係る教育・訓練の計画を公開の審査会合にて原子力規制委員会に説明。分析に関わる力量管理方法、教育・訓練などが審査された。
- ・ 社会目線に立ち不安を与えない国内外への正確かつ誰でも理解し得る情報発信方策の整備、準備状況のタイムリーな発信
⇒ 東京電力は、福島県浜通り13市町村を始めとした福島県内にお住まいの方々を対象にした「福島第一原子力発電所視察・座談会」の継続的な開催や、地元紙の新聞広告を通して、廃炉やALPS処理水に関する情報提供を実施している。また、外国政府関係者等による視察を実施するとともに、東京電力「処理水ポータルサイト」では日本語だけでなく英語、中国語、韓国語でALPS処理水の海洋放出に関する最新情報が提供されている。
- ・ 2021年4月に公表された政府の基本方針に掲げられた風評対策の確実な実施
⇒ 政府は2021年12月に開催された「第3回ALPS処理水の処分に関する基本方針の着実な実行に向けた関係閣僚等会議」において行動計画を公表（2022年8月改定）。東京電力は行動計画に基づき、原子力規制委員会による審査やIAEAのレビュー、廃炉安全確保協定に基づく自治体の安全確認等を通じて風評影響の最大限の抑制に向けた取組を進

⁷⁰ IAEA review of safety related aspects of handling ALPS-treated water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Report 1: Review mission to TEPCO and METI (February 2022)、2022年4月29日

⁷¹ IAEA review of safety related aspects of handling ALPS-treated water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Report 2: Review mission to NRA (March 2022)、2022年6月16日

⁷² 国際標準化機構によって策定された、試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項の国際標準規格

めている。NDFは諸外国の関係機関との会合や国際会議等を通じて、正確かつ受け手の関心に応じた情報発信や理解促進を進めている。

3.3.2 主要な課題とそれを実現する技術戦略

3.3.2.1 今後の建屋滞留水処理における課題

今後の建屋滞留水処理の主要な課題としては以下の3点が挙げられる。

(1) α 核種の拡大防止

原子炉建屋のトーラス室底部には、燃料デブリ由来の α 核種が微粒子状（ α スラッジ）とイオン状で存在する滞留水が存在しており、比較的高い全 α 濃度が検出されている⁷³。 α 核種は吸入摂取した場合の実効線量係数が顕著に高いため、 α 核種が建屋滞留水や水処理設備に拡がった場合には特別な管理や対策が必要となる。こうした状況を避けるためには、 α 核種の拡がりをできるだけ限られた範囲に抑える必要がある。

2021年度の調査では、 α 核種の拡がりについて以下の2点が判明した⁷³。

- ・3号機の主蒸気隔離弁室で採取した溜まり水においてこれまでで最も高い全 α 濃度を検出
- ・EエリアのD1・D2タンクの底部スラッジで比較的高濃度の全 α 濃度を検出

3号機主蒸気隔離弁室で採取された溜まり水の全 α 濃度は、これまで最も濃度が高かった3号機の原子炉建屋底部から採取された滞留水の約3倍（ $1.7 \times 10^6 \text{Bq/L}$ ）となっている。この溜まり水は、PCVと接続している主蒸気配管の伸縮継手部の破損部から主蒸気隔離弁室にPCV内の水の一部が直接流れ込んだものと推定される⁷⁴。また、この溜まり水はフィルタ処理することで全 α 濃度が約1/1000に低下することが分かり、 α 核種の大部分が微粒子として存在していることが示されている⁷³。

EエリアのD1・D2タンクは、RO濃縮塩水を貯蔵していたフランジ型タンクの解体に伴い発生したタンク底部の残水を集めた水を貯蔵しており、タンク底部のスラッジ混じりの水の全 α 濃度を測定した結果、建屋滞留水と同程度の全 α 濃度（ $5.3 \times 10^3 \text{Bq/L}$ ）を検出したものである⁷⁵。この底部スラッジはタンクの天板マンホールから水中ポンプを投入して回収される予定である。

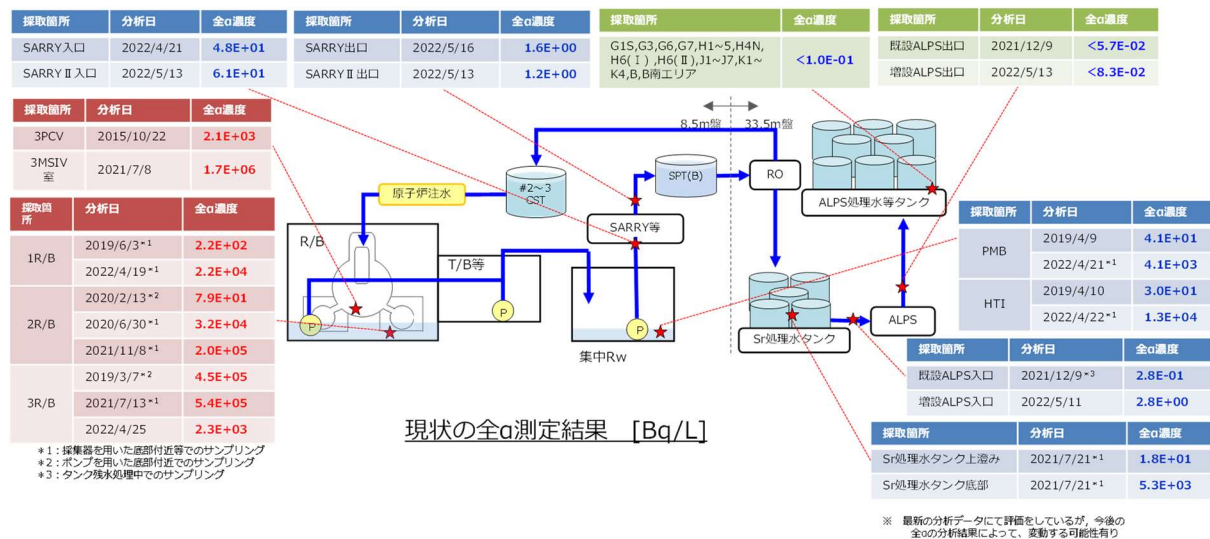
以上のように、3号機原子炉建屋内での α 汚染の状況やタンク底部の残水処理に伴う α スラッジの存在が明らかになりつつある。特に α 汚染は主に微粒子（スラッジ成分）を介して拡大することに注意する必要がある。現状では、セシウム吸着装置（SARRY/SARRY II）入口では10Bq/Lオーダーの全 α 濃度が維持されており下流側への汚染拡大は抑えられているが、今後原子炉建屋の滞留水水位をより低下させていくに当たり建屋底部のスラッジの混入が多くなり、水

⁷³ 汚染水処理対策委員会（第24回）、参考資料1、「これまでの福島第一原子力発電所の汚染水処理対策の状況参考資料集」、2022年6月15日

⁷⁴ 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議 第91回、汚染水対策、資料3-1-8 3号機原子炉建屋1階床面穿孔について、2021年6月24日

⁷⁵ 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議 第94回、汚染水対策、資料3-1-9 Eエリアタンク（フランジ型タンク）の残水から検出された α 核種の対応方針、2021年9月30日

処理設備入口での全 α 濃度が上昇する可能性がある。こうした懸念に対し、東京電力はセシウム吸着装置の後段にフィルタ設備を設置する対策を検討している⁷⁶。



(出典：東京電力)

図 30 建屋滞留水の水処理設備の系統と全 α 測定結果⁷³

(2) 汚染水発生量を抑制する更なる地下水位低下

原子炉建屋トラス室底部には高濃度の建屋滞留水が存在しており、滞留水を処理する際に急激な濃度変化が生じると後段の処理設備に支障を及ぼすことから、建屋滞留水の水位については建屋ごとに2週間で10cm程度を目安として慎重に低下させる予定である。

床面露出を達成した建屋では床サンプ内で水位管理を行っているが、台風等の大雨時には一時的にサンプから溢水するおそれがあり、溢れた水については、現状の扱いでは燃料デブリ由来の高濃度汚染水である「建屋滞留水」としてサブドレンとの水位差確保(800mm以上)が必要となる。このため、大雨時におけるLCO(運転上の制限)逸脱のリスクに備え、サブドレンの水位を予め高めておく運用が行われており、その結果、建屋流入量を増加させる原因となっている。こうした建屋の床面は原子炉建屋内の滞留水水位よりも高い位置にあるため大雨時に床サンプに流入する水は雨水や地下水由来であり、水位が上昇した場合においても原子炉建屋内の滞留水の漏えいリスクが増すものではないため、今後、床面露出が達成された建屋の水位管理方法を見直していく必要がある。

(3) プロセス主建屋と高温焼却炉建屋の滞留水処理

現在、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋の地下階には建屋滞留水が貯留されているが、東京電力は2024年度から建屋の床面露出に向けた水位低下を行うことを目標としている。これを実現するためには、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋の地下階に設置された高線量のゼオライト土嚢

⁷⁶ α 核種除去の観点からはフィルタ設備はセシウム吸着装置の前段に設置すべきであるが、その場合フィルタが粒子状の放射性セシウムを捕捉してしまい、フィルタ設備が高線量となり交換作業が困難となる。このため、フィルタ設備はセシウム吸着装置の後段に設置される。

への対策と、地下階への貯留に代わる滞留水一時貯留タンクの設置が必須となる⁷⁷。プロセス主建屋、高温焼却炉建屋ともに地下階には、事故後まもなく設置されたゼオライト土嚢が高線量状態で存在しており土嚢の表面最大線量は約 4,400mSv/h と極めて高線量であること、また活性炭の土嚢も存在することが分かっている。これらの地下階を床面露出した場合、水遮へいがなくなること、地上階の開口部についても線量が大幅に上昇することが予想されている。

図 31 には現在検討されているゼオライト土嚢の回収手順を示す。まず作業を効率化するためゼオライト土嚢を水没させた環境で可能な限り集積作業を行い、次に集積されたゼオライト等を回収ロボット（ROV+ポンプ）で地上階に移送し、建屋内で脱塩、脱水を行い、金属製の保管容器に封入し、一時保管施設に移送する計画となっている⁷⁷。最初のステップである集積作業は 2023 年度に、次のステップである容器封入作業は 2023～2024 年度に実施される予定である。本作業においてゼオライトは粒子状で吸引回収される予定であり、今後計画される原子炉建屋の床面に堆積する高線量スラッジの回収作業などにも適用できる可能性があり、今後の廃炉作業の進展において非常に重要な知見となる。

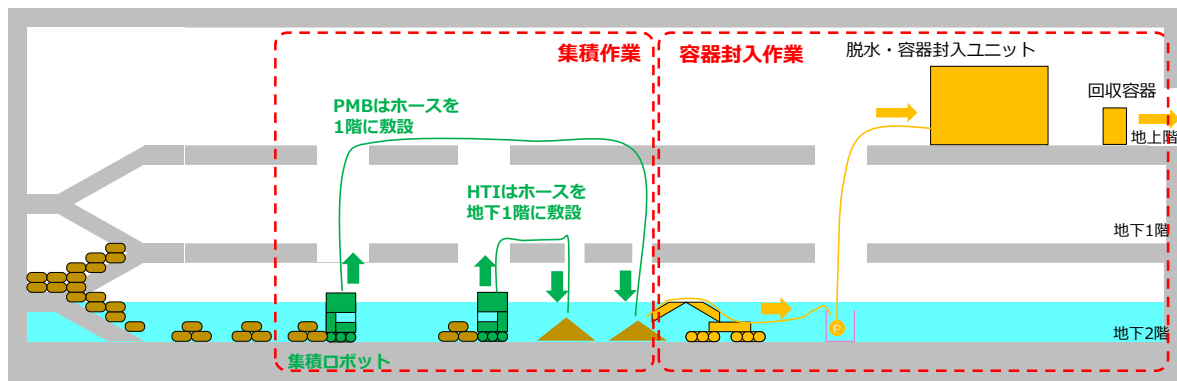
一方、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋の地下階はこれまで数万 m³ 相当の建屋滞留水の貯槽となっており、ここで 1～4 号機の各建屋から移送された化学的性状や放射能の異なる滞留水が混合し、平均化された水質となってセシウム吸着装置で処理されてきた経緯がある。このため、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋がこれまで担ってきた以下の機能を引き継ぐ滞留水一時貯留タンクの検討が進められている⁷⁸。

- ・ 建屋滞留水の受入
- ・ セシウム吸着装置(KURION,SARRY,SARRY II)を安定稼働させるための滞留水バッファ
- ・ 各建屋滞留水の濃度平均化
- ・ スラッジ類の沈砂

これらの滞留水一時貯留タンクはプロセス主建屋の 4 階に設置される予定であり、タンク設置後のプロセス主建屋地下階は大雨時等の流入量が増大する時にのみ使用されることとなる。滞留水一時貯留タンクは上述の機能を引き継ぐため、水を受入れスラッジ類を沈砂する一時受入槽と、水の濃度を均質化する一時貯留槽の 2 種類のタンクの組み合わせで構成される予定であるが、一時受入槽の容量は約 10～20m³、一時貯留槽の容量は約 20m³を想定しており、これまでのプロセス主建屋地下階（最大容量：約 16,000m³）、高温焼却炉建屋地下階（最大容量：約 5,000m³）に比べて大幅に小さくなっており、今後、小容量でも機能の維持がなされるよう運用面での検討が必要である。滞留水一時貯留タンクの設置工事は 2023～2024 年度に実施され、2024 年度から運用される予定となっている。

⁷⁷ 汚染水処理対策委員会（第 24 回），資料 2，「今後の福島第一原子力発電所の汚染水処理対策の課題と対応」，2022 年 6 月 15 日

⁷⁸ 汚染水処理対策委員会（第 24 回），参考資料 2，「今後の福島第一原子力発電所の汚染水処理対策の課題と対応 参考資料集」，2022 年 6 月 15 日



(出典：東京電力)

図 31 ゼオライト土嚢の回収手順⁷⁷

3.3.2.2 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等の廃炉工程を見据えた汚染水対策の主要な課題としては以下の 2 点が挙げられる。

(1) 燃料デブリ取り出しに向けた水処理設備の検討

燃料デブリ取り出しに向けた水処理設備の検討においては、既存の建屋滞留水の処理設備（SARRY、ALPS 等）とどのように機能分担して適正な構成にしていくかの全体像の検討が重要である。同時に、既存の水処理設備のリプレイスを計画的に進めることも求められる。こうした検討を行うためには、燃料デブリ取り出し時の水処理設備への要求仕様や基本設計をできるだけ早い段階で実施していく必要がある。

燃料デブリ取り出し時には切削等の加工により多量の微粒子を含む汚染水が発生し、燃料デブリに含まれる α 核種も微粒子やイオン、コロイドなど様々な形態で存在する可能性がある。こうした汚染水の水質は切削等の加工の方法に依存するため、燃料デブリ取り出し工法が確定していない状況では水質の想定が難しく、燃料デブリ取り出し時の水処理システムは幅広い水質、様々な α 核種の形態に対応するために複雑な設備構成にせざるを得ないとの課題が生じている。

しかし一方、これまでの建屋滞留水の分析では全 α 濃度はフィルタのろ過処理により濃度が約 1/100～1/1,000 に低下する結果が得られており、大部分の α 核種は単純なる過処理によって除去できる可能性があることが分かりつつある。薬剤等を使用しない単純な切削等の加工では化学的な水質の変化は小さいため、これらの分析結果と同様に大部分の α 核種は微粒子として発生し、溶解性の α 核種濃度は低く抑えられる可能性がある。そのため、現在、サンプリングしている各所での α 核種の形態、粒径などを確認し、燃料デブリ取り出し規模の更なる拡大での設備設計に反映していくことが重要である。

今後、切削等の加工方法の確立に向けては、室内試験等を行い水質の化学的変化にどのような影響を及ぼすかの検討を進めるべきであり、これにより現実的な汚染水の水質条件の設定が可能となり、水処理システムの合理化、信頼性向上につながる。

(2) 汚染水対策設備の中長期的対応

汚染水対策の効果を中長期にわたって維持するため、陸側遮水壁やサブドレン設備、既存の水処理設備（SARRY、ALPS 等）など、各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。そのためには、経年変化に伴う設備機能の低下、交通荷重による金属疲労や自然災害で生じる配管の損傷など様々なリスクを想定し、監視・早期復旧対策の体制強化や安定運用に向けた予備・代替品の調達手配等を整え、計画的に維持管理・設備更新を進めることが重要である。

また、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、建屋全体の地下水流入に対する抜本的な止水を直ちに実施することは困難であり、中長期的な課題として、建屋流入量の更なる低減のため、今後の廃炉作業と調整を図り、現状の施策との比較等をしていくことにより、最も適切な対策について、幅広く総合的に検討していく必要がある。東京電力は、1～4号機周辺のフェーシングによる雨水流入対策に加え、局所的な止水対策として、3号機を対象に建屋貫通部（配管等）と建屋間ギャップ端部への止水対策（充填や地盤改良等）を検討している。施工試験や現場試験などで課題の明確化やその対策の検討を進めながら、将来における抜本的な止水対策の検討に向け、一連の止水対策の現場適用を通じて得られる知見を蓄積していくことが重要となる。

一方、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。現在進められている燃料デブリ取り出し規模の更なる拡大の工法選定と併せ、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各設備のより適切な維持・管理についても検討を進める必要がある。また、廃炉工程を見据えた汚染水対策として、燃料デブリ取り出し作業との干渉性を考慮する必要がある。現在、燃料デブリ取り出しに向けては、3.1で例示した気中工法、冠水工法等の検討が進められている。いずれの工法においても現場適用性や技術成立性の確認と合わせて、建屋内から外部への汚染水流出を防止し、建屋外から建屋内への地下水流入を抑制する対策検討を進める必要がある。今後、燃料デブリ取り出し工法とともに、これらの中長期的な汚染水対策について検討を進める必要がある。

3.3.2.3 ALPS 処理水の海洋放出に向けた今後の取組

東京電力は ALPS 処理水の海洋放出に関する設備及びその運用方法、海洋放出時の安全性について 2022 年 7 月に原子力規制委員会から認可を得るとともに、ALPS 処理水の取扱いに係る安全性について IAEA レビューを受け、国際安全基準に照らして、放出設備の設計において予防措置が的確に講じられており、人への放射線の影響は規制当局が定める水準より大幅に小さいことなどが示された。

今後、東京電力は、立案した計画を「確実に」運用することが重要な課題であり、各種計画（設備、運用、情報発信等）の確実な実施、チェック＆レビューや必要な計画の見直し・拡充、並びにその透明性の確保が求められる。認可を受けた実施計画に基づいた設備を構築するとともに、その運用に向けた教育・訓練等の準備を確実に実施していくことが必要である。

- ・ 計画した設備の確実な構築と、その確実な運用（設備運転、ALPS 処理水の分析、処理水・希釈水の流量管理、海域モニタリング、メンテナンス、トラブル発生時の対応方策等）
- ・ 分析対象核種の選定結果を踏まえた人や環境への放射線影響の再評価と評価結果の公表
- ・ 策定した海域モニタリング計画に基づく、放出前、放出中、放出後のモニタリング
- ・ 以下の継続実施

- IAEA の専門家等による安全性の確認
- 設備操作、分析等に係る協力会社を含めた関係者の教育・訓練
- 社会目線に立ち不安を与えない国内外への正確かつ誰でも理解し得る情報発信方策の整備、準備状況のタイムリーな発信
- 2021 年 4 月に公表された政府の基本方針に掲げられた風評対策の確実な実施

さらに、東京電力は、処理水放出後の敷地活用の迅速かつ確実な実施に向け、タンク内処理水のトリチウムの濃度や減衰を考慮しつつ、敷地利用計画に応じた放出計画を策定するとともに、状況に応じて計画を適切に見直していくことが必要である。

NDF は、東京電力が進める設備の構築や運用開始の準備などに対し技術的・専門的な支援を行うとともに、諸外国の関係機関との会合、国際会議等を通じて、正確かつ受け手の関心に応じた情報発信や理解促進を進めていく。さらに、東京電力により、風評影響を最大限抑制する対策が確実に実施されていること、万が一風評被害が発生した場合には適切かつ十分な賠償により対応していることを確認していく。

3.3.2.4 主な技術課題のまとめ

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 32 のとおりである。なお、燃料デブリ取り出しにおける水処理システムに係る今後の計画は図 23 に示したとおりである。

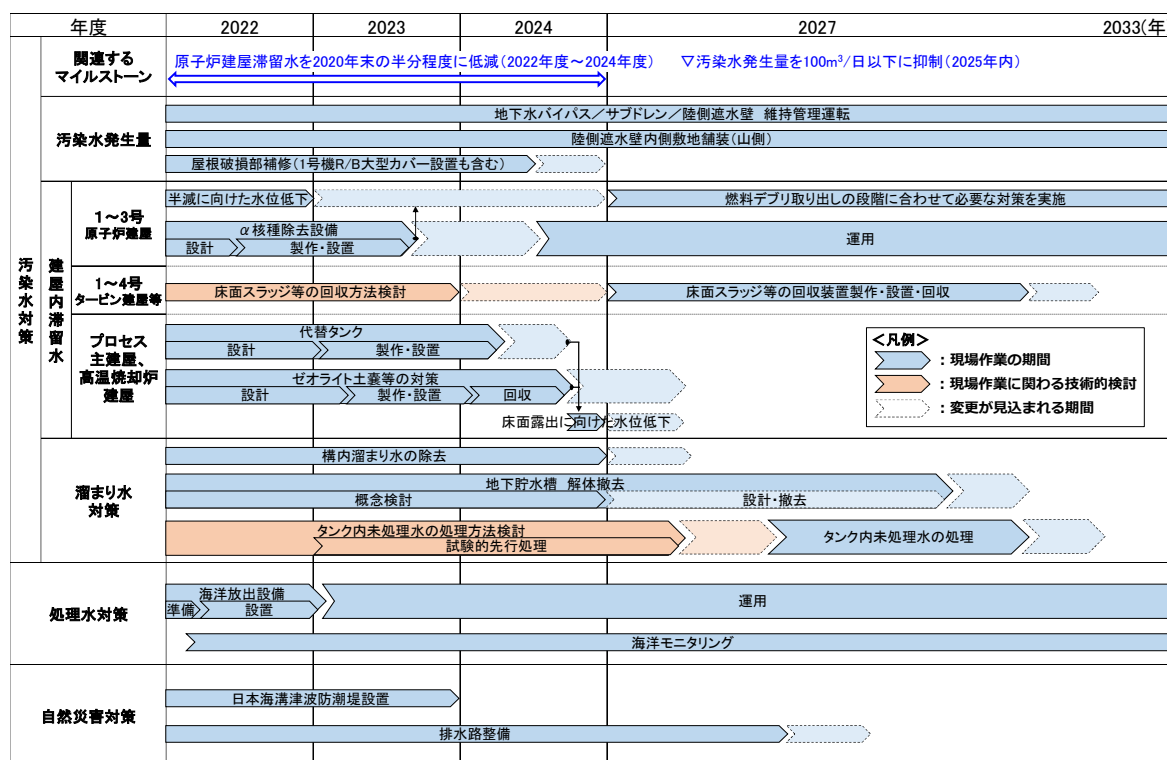


図 32 汚染水対策・処理水対策・自然災害対策に係る主な技術課題と今後の計画（工程表）

3.4 使用済燃料プールからの燃料取り出し

3.4.1 目標と進捗

(目標)

- (1) 中長期ロードマップの第 3-①期において、1～6 号機の全てで使用済燃料プールからの燃料取り出しの完了を目指す。
- (2) 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始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) 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後に共用プール等へ移送して適切に保管することにより、安定管理状態とする。なお、共用プールの容量確保に向け、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。
- (4) 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、オペフロ上に屋根板、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図 33 のとおり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 2019 年 12 月に行われた。本工法のイメージを図 34 に示す。

大型カバー設置やその後のガレキ撤去作業の準備として、プール内の燃料へ影響を及ぼさないようにするための天井クレーンや燃料取扱機への支保の設置、使用済燃料プール養生等、ガレキ落下防止・緩和対策を 2020 年 11 月に完了、干渉する既存の建屋カバー（残置部）の撤去を 2021 年 6 月に完了した。その後、原子炉建屋周辺の整備を進めているが、SGTS 配管の撤去作業（遠隔操作による高線量配管の撤去）の遅延により準備工事に遅れが生じた。原子力規制委員会が示した新耐震設計方針の適用等を巡る審査の状況も踏まえて、東京電力は「廃炉中長期実行プラン 2022」において、「（準備工事の遅れに伴う）工事干渉等による 1 号大型カバー設置工程の見直し」を行うとしており、2023 年度頃の設置完了を目標に、工程表での設置期間を 2024 年度中頃までとしている。なお、中長期ロードマップのマイルストーンである 1 号機燃料取り出しは予定どおり 2027～28 年度に開始見込みである。今後、大型カバー設置に係る実施計画の認可を取得し、本体の設置作業を開始する予定である。



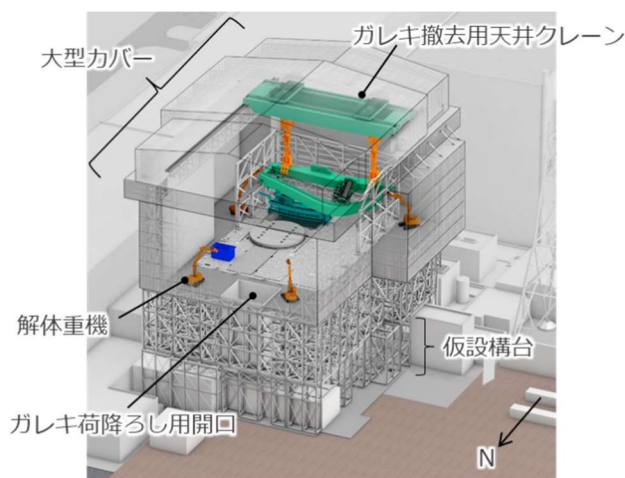
崩落屋根下の既存設備の状況（イメージ図）



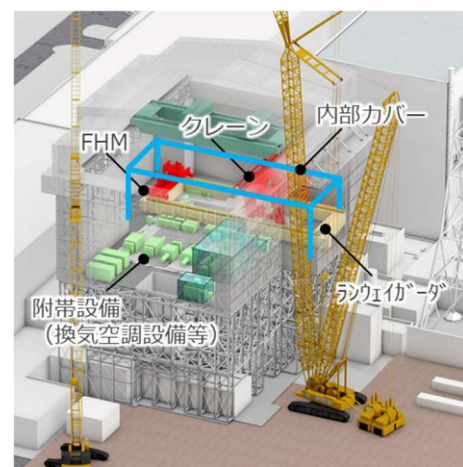
南側崩落屋根の状況

（東京電力資料をNDFにて加工）

図 33 1号機オペフロ崩落ガレキの状況



ガレキ撤去時（イメージ図）



燃料取り出し時（イメージ図）

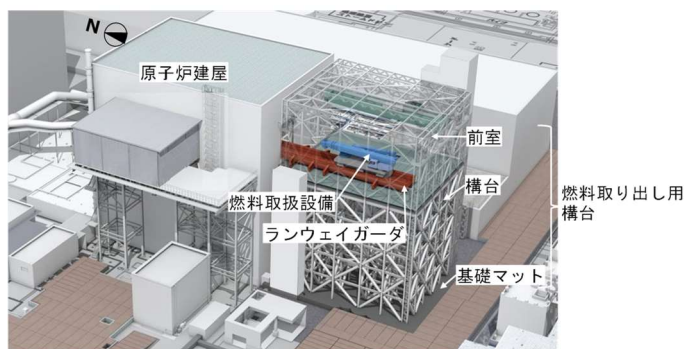
（東京電力資料をNDFにて加工）

図 34 1号機 プール内燃料取り出し工法

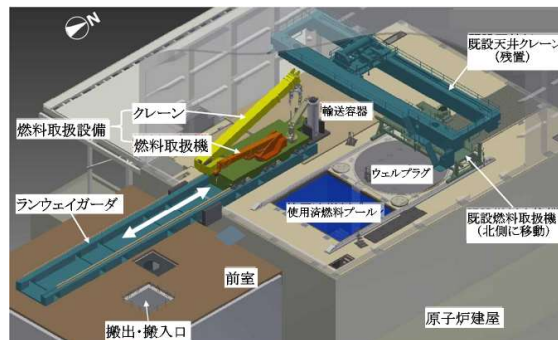
2号機は、1号機と同様にダスト飛散リスクの更なる低減の観点から、オペフロ上部を解体せず、原子炉建屋南側に設置する燃料取り出し用構台からアクセスする工法が採用されている。本工法のイメージを図35に示す。

東京電力は、2020年12月に申請した燃料取扱設備等の実施計画の変更について、新耐震設計方針の適用等を巡る審査の状況と準備工事の進捗を踏まえて、燃料取り出し用構台等と燃料取扱設備に分割して2022年3月に補正申請を行った。このうち燃料取り出し用構台等については、2022年4月に認可を取得している。地盤改良を2022年4月に完了し、5月に燃料取り出し用構台基礎マットの設置工事を開始した。

また、オペフロ内では、2021年に実施したオペフロ内、ウェルプラグ上の線量調査結果を基に除染、ウェル上部等への遮へい体設置を行い、2022年5月に再度線量低減効果を確認した。引き続き燃料取り出しに向け既設の取扱設備の移動、更なる除染・遮へい等の準備作業を進めている。



燃料取り出し工法（イメージ図）



燃料取扱設備（イメージ図）

（東京電力資料をNDFにて加工）

図 35 2号機 プール内燃料取り出し工法

5,6号機は、1,2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方針で進めており、まず、6号機については、使用済燃料プールから共用プールへの移送を2022年8月に開始した。

共用プール及び乾式キャスク仮保管設備の空き容量の状況は、図36のとおりである。5,6号機を含むプール内燃料を全て取り出して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。このため、東京電力は、乾式キャスク仮保管設備の増設や計画的な新燃料の所外搬出に取り組んでいる。新燃料の所外搬出については、6号機の搬出を2022年度以降に開始する計画としており、4号機の新燃料については洗浄作業を2022年3月に完了した。これらの取組を進め、2031年以内に全ての号機の燃料取り出しを完了する計画である。なお、2022年3月16日の福島県沖の地震により、共用プール建屋1階のキャスク搬出入エリア天井クレーンの走行に支障が生じたため、2022年3月に予定していた共用プールから乾式キャスク仮保管設備への移送開始は、クレーン復旧後の2022年8月となった。

3号機は、2021年2月に全ての燃料の取り出しが完了しているが、使用済燃料プール内には、そのほかにも制御棒、チャンネルボックス、フィルタ等の高線量機器が保管されている。これらについては、冷却は不要だが、遮へいが必要であり、プール水が漏えいした場合にプール内の線源が露出する等のリスクが残っている。このため、今後はリスク低減の観点から、プール内燃料に続いてこれらの高線量機器の取り出しを進める必要がある。その際に、燃料取り出しやガレキ撤去に用いた装置等を活用することが効率的であるため、保管先の確保（3号機については既設サイトバンカを予定）等の取り出しに向けた準備が整い次第、速やかに進めるべきである。その後は、プールの水抜きを行うことによってプールの水を管理対象から除外することができる。ただし、事前にプールの水抜き後のプールからの線量やダスト飛散を評価し、安全性を確認しておく必要がある。これらにより、オペフロの活用自由度が増す等の後段の燃料デブリ取り出し作業の円滑な実施につなげられる。

3号機と同様に、1,2及び4号機についても、使用済燃料プールに高線量機器が保管されており、プール内燃料の取り出しを優先（4号機は取り出し済み）し、これらの取り出し及びプールの水抜きを計画的に進めるべきである。燃料取扱設備の設計においては、プール内燃料だけでなく、高線量機器の取り出し計画や工程を十分考慮する必要がある。

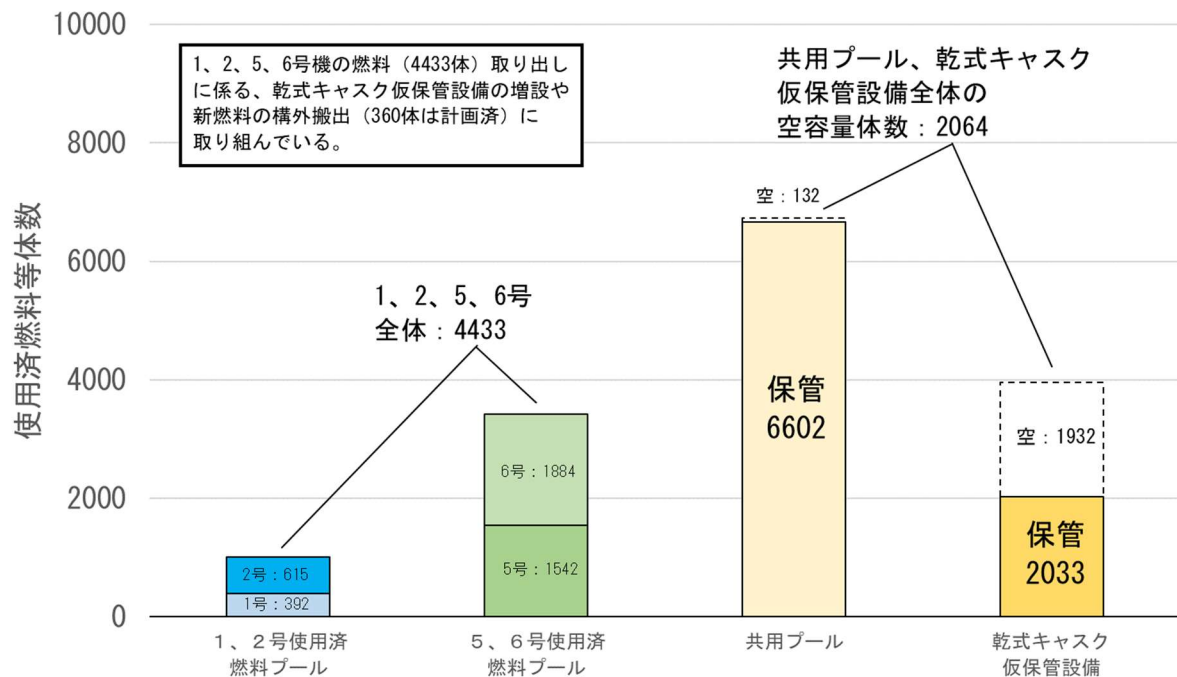


図 36 使用済燃料の保管状況（2022 年 5 月時点）

3.4.2 主要な課題とそれを実現する技術戦略

3.4.2.1 プール内燃料取り出し

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。プロジェクトを進めるに際しては、作業に伴う安全性を評価し、必要十分な安全の確保を確認した上で、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) 1号機について

1号機は、今後、大型カバーの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、落下防止の支保は設置されているものの、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、安全評価を行うことが前提であり、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作業員被ばく等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等の観点を踏まえ、総合的に検討していくことが重要である⁷⁹。東京電力は天井クレーンの撤去方法については案を作成しているが、現時点では屋根スラブ下部の状況に関する情報が限られているため、スラブを除去後の詳細調査により再確認する必要がある。再確認結果によってはクレーン解体工程が遅延するリスクがある。この

⁷⁹ NDF、「福島第一 1 号機燃料取り出し工法（プラン）の選定に関する評価」、廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第 73 回）資料 3-2、2019.12.19

ため、調査や確認等の必要作業を抽出した上で作業手順等を立案し、調査が可能となった段階で速やかに天井クレーン等の調査を行い、リスクケースを含め安全評価、ガレキ撤去計画に反映することが重要である。

1～3号機のウェルプラグの汚染状態については、福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会にて、その汚染の高さから、「安全面及び廃炉作業面において非常に重要な意味を持つ」と指摘されている⁸⁰。このうち、1号機のウェルプラグについては、2,3号機の数十PBqに比べ2桁程度低い汚染であることが上記検討会にて評価されているものの、事故時の爆発の影響でずれが生じ、不安定な状態になっている。このため、東京電力では地震時のPCVへの落下による影響の検討を進めている。今後、ウェルプラグへの対応方法は、検討結果を踏まえ、プール内燃料取り出しや後段作業である燃料デブリ取り出しへの影響を考慮し、安全評価を尽くした上で、総合的に判断することが必要である。

なお、1号機のプール内に事故前より保管されている被覆管の破損した燃料67体についても、2031年の燃料取り出し完了に向けて、海外の知見も活かした取扱計画の具体化を進めているところである。特に、事故後の状況の確認、取扱方法の検討とその開発、取扱いに係るリスク検討等を確実に実施する必要がある。

(2) 2号機について

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、プール内燃料取り出しを行う。新たな設備であることから、①裕度を持たせた適切な設計・製作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等が重要である⁸¹。

燃料取扱設備を設置するためには、構台上への前室の設置、原子炉建屋オペフロ南側への開口の設置等の準備作業を着実に実施する必要がある。また、プール内燃料取り出しは遠隔操作による無人作業を基本とするが、一部設備の設置時とトラブルへの対応時には有人作業も想定していること、前述の検討会におけるウェルプラグの高い汚染の指摘⁸⁰も踏まえ、可能な限りオペフロの線量を低減し環境を整備することが重要である。そのため、東京電力は既設の燃料取扱機の移動等の完了後の除染、遮へい体設置を2023年度に計画している。現計画では、除染後にオペフロ南側の開口設置作業を実施するため、除染後の作業エリアが再度汚染し、工程遅延が生じるリスクがある。そのため、開口設置時のダスト飛散対策を徹底することが重要である。

3.4.2.2 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海水やガレキの影響評価を行い、これらの影響は少ないと見通されているものの、今後、取り出した燃料の状況を踏

⁸⁰ 原子力規制委員会、「意見募集の結果等を踏まえた中間取りまとめ（案）の修正案について」、東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会（第19回会合）、資料3（P.81～83）、令和3年3月5日

⁸¹ NDF、「福島第一2号機燃料取り出し工法（プラン）の選定に関する評価」、廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第71回）資料3-2、2019.10.31

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。

なお、2031 年内までに全ての号機のプール内燃料を共用プールへ移送する計画であるが、津波リスクも考慮すると、高台への移送が望ましく、東京電力では燃料の高台での保管に向けた検討を進めている。高台での保管に当たっては、空気の自然対流（換気）による冷却であり、設備、維持管理を簡素化できる乾式保管が望ましいが、被覆管の破損した燃料等の取扱いも含め、海外知見も参考に検討を進めるべきである。また、本保管設備は、安全視点、オペレータ視点の観点から、準備していく必要がある。

3.4.2.3 主な技術課題のまとめ

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 37 のとおりである。

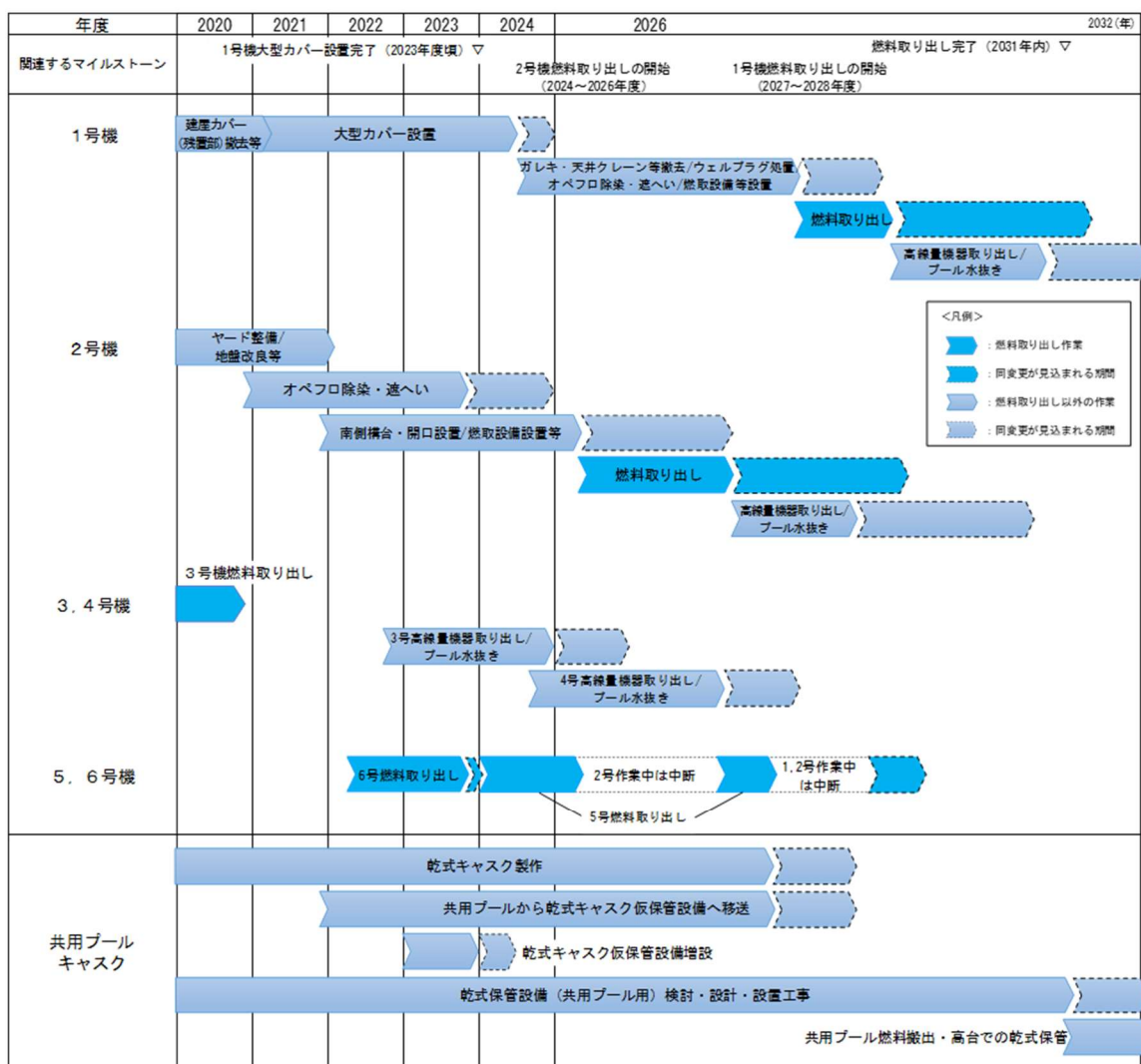


図 37 プール内燃料取り出しに関する主な技術課題と今後の計画（工程表）

4. 廃炉の推進に向けた分析戦略

4.1 燃料デブリ等の不確かさと分析の重要性

福島第一原子力発電所の事故では、世界初の沸騰水型原子炉の炉心溶融事故であるとともに、事故時の停電により温度を始めとする多くのプラントパラメータの記録が存在しない。さらに、安全機器の作動状況が不明瞭であることや事故収束のために海水注入が行われたこと等が影響して、炉内状況、燃料デブリの状態、FP の放出経路等に多くの不確かさが含まれたままである。燃料デブリの生成過程に不確かさが存在し、人為的な管理下でもないために、燃料デブリは、化学組成、ミクロ組織、密度等の各種物性値において不均質性を有するものと考えられる。

U 含有率が不明な場合において、事故前の燃料集合体中の U 含有率である 97～98%を用いて臨界管理や構外輸送の安全評価、安全対策を保守的に検討することが想定される。シビアアクシデントコードの計算結果や PCV 内部調査の映像から、周囲の構造材と溶融・混合して U 含有率は低下している可能性が高いが、評価に用いる値がないことから安全対策に過度の裕度を含ませることになる。このような不確かさの幅を低減できれば、燃料デブリの取扱いや安全評価及び安全対策の中に過度な裕度を含める必要がなくなり、廃炉の迅速性、合理性の向上が可能となる。固体廃棄物の分析結果は事故によって発生した多種、多様な廃棄物の処理・処分方策の検討にとって重要な基礎情報である。燃料デブリの分析結果は、取り出し工法、保管・管理、処理の必要性、事故原因の究明、原子力に関する安全性向上等の多くの反映先があり、図 38 に示すように、その関係は福島第一原子力発電所の廃炉の進捗とともに変化していくことになる。分析結果は廃炉を円滑に進めるための上記検討における不確かさの幅を小さくするための重要な判断材料の 1 つであることを正しく認識することが重要である。分析結果を廃止措置の各工程で反映する東京電力が中心となり、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。

ウクライナのチョルノービリ原子力発電所の燃料デブリは、経年変化により粉体化し、放射性のダスト発生源となることが報告されている^{82,83}。それに対し、TMI-2 の燃料デブリは、事故後 40 年以上経過しても顕著な経年変化を生じていない。燃料デブリが経年変化を生じる原因については、明確に判明しておらず、福島第一原子力発電所の燃料デブリが経年変化を生じるか否かも不明である。そのため、廃炉・汚染水・処理水対策事業及び英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業において、それぞれ、燃料デブリの経年変化及び安定性評価に関する研究が実

⁸² National Report of Ukraine, Ministry of Ukraine of Emergencies, “Twenty-five Years after Chernobyl Accident: Safety for the Future” (2011)

⁸³ B. Burakov, V.G. Khlopin Radium Institute, 第 2 回福島第一廃炉国際フォーラム資料, (2017)

施されている^{84,85,86,87}。経年変化の発生は、燃料デブリの化学的安定性に依存していると考えられ、化学的安定性が低い場合には時間の経過とともに徐々に燃料デブリの化学形が変化し、体積変化、き裂の発生及び水への溶出等が生じると想定される。このため、取り出し後の工程において、粉体化や水への溶出による汚染の拡大、内部・外部被ばくリスクの増加等への対策がより重要となることも想定される。サンプル分析の結果と上述の研究により得られる知見とを照合し、経年変化の発生の有無、あるいは発生の程度を確認することが必要である。それらを積み重ねて燃料デブリ性状の不確かさを低減しながら、今後の取り出し工法及び保管・管理の適切な方策の検討へフィードバックすることが重要である。他にも、従来のサンプル分析に加え、他の計測手法による燃料デブリ性状の不確かさの低減についての検討が廃炉・汚染水・処理水対策事業において2020年度から開始されている。

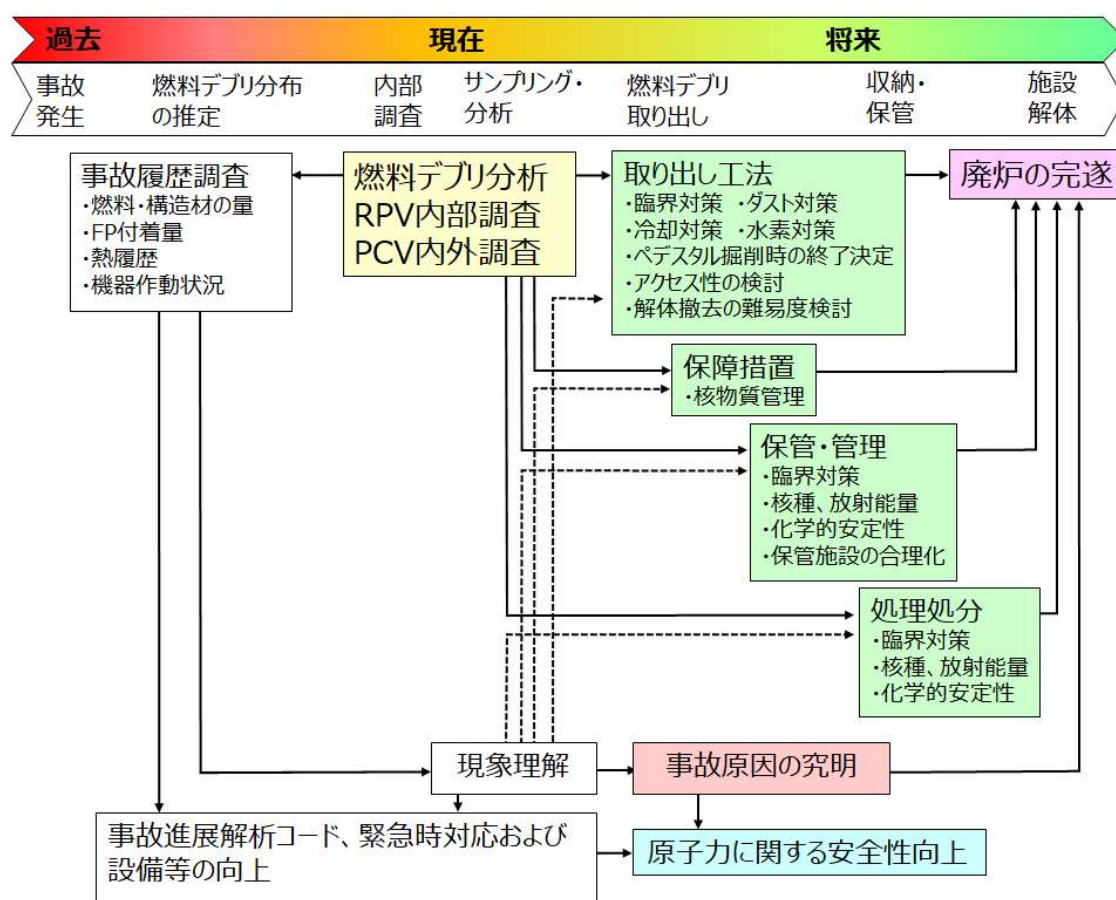


図 38 分析・調査結果の反映先とその関係

⁸⁴ TENEX and ROSATOM, “Development of Analysis and Estimation Technology for Characterization of Fuel Debris (Development of Estimation Technology of Aging Properties of Fuel Debris)”, Final report for FY 2019 and 2020 (2021)

⁸⁵ 東芝エネルギーシステムズ株式会社、廃炉・汚染水対策事業補助金“燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発(燃料デブリの経年変化特性の推定技術の開発)”, 2020年度最終報告(2021)(最新版が公開後、差替予定)

⁸⁶ 桐島陽, “合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究”, 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の令和3年度成果報告会資料, (2022)

⁸⁷ 東北大学多元物質科学研究所、日本原子力研究開発機構、京都大学、2022年6月13日、“固溶体化が燃料デブリの「その後、」を決める ～核燃料デブリの安全な保管や処理・処分に関わる新たな化学的知見～”

4.2 分析戦略の三要素

東京電力が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、固体廃棄物や燃料デブリの取扱い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。良好な分析結果を取得するためには、図 39 に示すように、①分析の手法・体制、②分析結果の品質及び③サンプルのサイズ・量を適正に保つことが有効である。

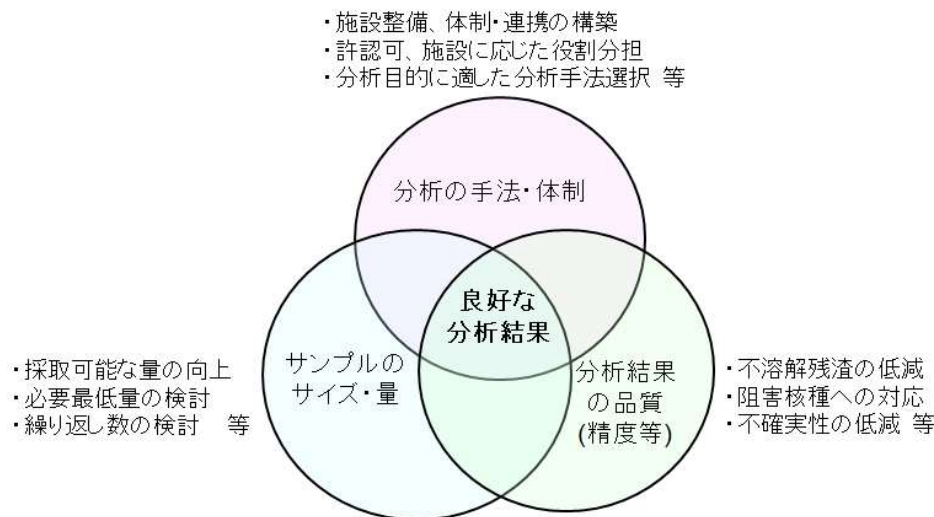


図 39 燃料デブリ分析戦略の三要素

4.3 分析体制構築の現状と戦略

福島第一原子力発電所の廃炉に必須な施設として、政府の補正予算（2012 年度）⁸⁸により JAEA が放射性物質分析・研究施設の整備を福島第一原子力発電所の隣接地に進めている⁸⁹。これらの運用開始時には福島第一原子力発電所の管理対象区域として順次設定するため、構外輸送にならない利点がある。これを活かして基礎的な物性を迅速に把握し、安全評価、作業手順等へ反映させることが有効である。このうち第 1 棟では固体廃棄物の分析及び ALPS 処理水の第三者分析⁹⁰、第 2 棟では燃料デブリの分析を行うことを目的としている。施設管理棟は 2018 年に運用を開始し、第 1 棟は 2022 年 6 月に竣工^{91,92}、10 月に特定原子力施設の一部として管理区域等を設定し放射性物質を用いた分析作業を開始した⁹³。第 2 棟は実施計画変更認可申請審査及び事業者選定プロセス中である。東京電力も現行のルーチン分析の他、燃料デブリや固体廃棄物の分析といった将来の分析ニーズを踏まえた分析施設(総合分析施設)の建設を検討している。

⁸⁸ 第 24 回特定原子力施設監視・評価検討会「資料 3-1：廃炉関係の研究開発拠点施設の整備について」

⁸⁹ 第 52 回廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議「資料 3-4：大熊分析・研究センター施設管理棟の開所」

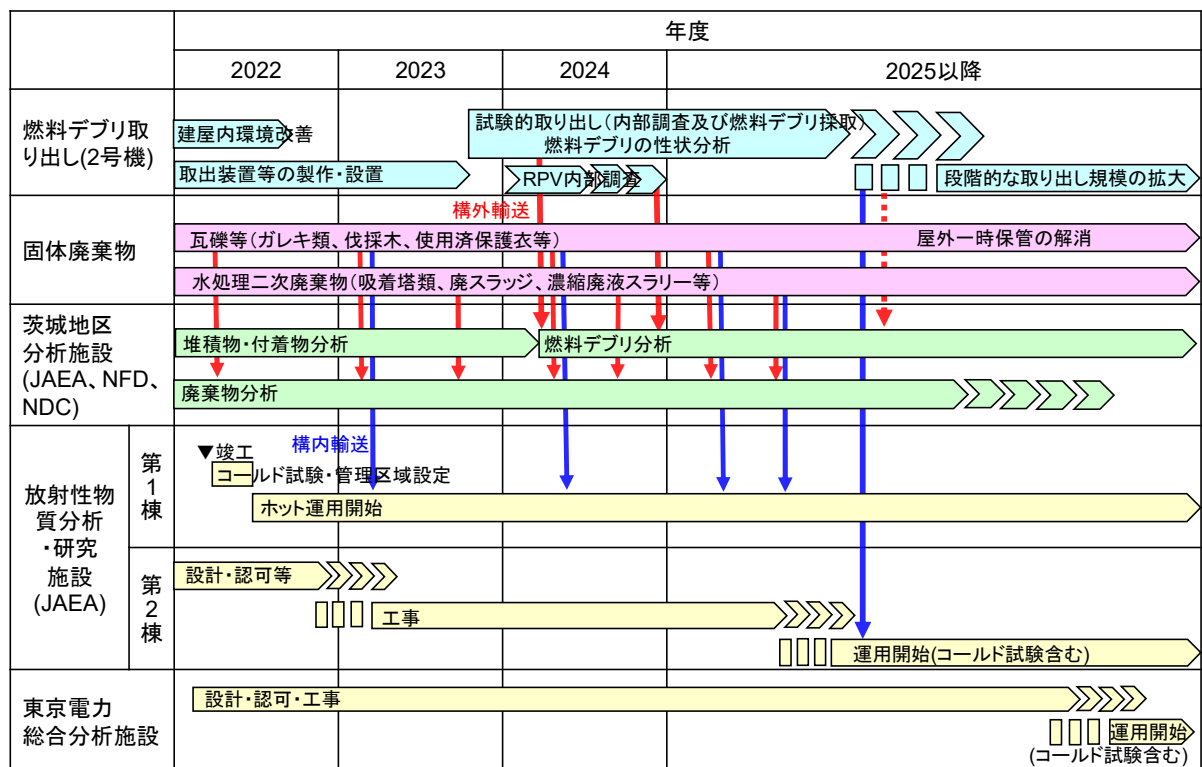
⁹⁰ 第 100 回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料 4：放射性物質分析・研究施設第 1 棟の整備状況について」

⁹¹ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、2022 年 6 月 24 日「放射性物質分析・研究施設第 1 棟(大熊分析・研究センター)の竣工と今後の予定について」

⁹² 第 103 回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料 4-1:放射性物質分析・研究施設第 1 棟(大熊分析・研究センター)の竣工と今後の予定について」

⁹³ 第 106 回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料：放射性物質分析・研究施設第 1 棟の分析作業開始について」

図 40 に示すように、第 2 棟と総合分析施設は、燃料デブリの試験的取り出し以降の運用開始予定のため、それまでは茨城地区の分析施設での分析を行うことになる。第 2 棟の運用開始後もサンプルの前処理に特別な技術が必要、あるいは分析や試験に長時間が必要な場合については、(i)研究者、技術者が多くおり、(ii)特殊な分析装置の種類も多く、(iii)閉じ込め・遮へい機能を有するホットセルの数・用途の選択肢が多い茨城地区で行い、福島第一原子力発電所の敷地内・隣接地では迅速性を優先する分析を行うことが効率が良い。固体廃棄物の分析についても、燃料デブリの試験的取り出しの進捗に伴い、微細な燃料デブリや FP を捕獲したフィルタ等、これまで経験していない固体廃棄物が発生することが予想される。このような経験が乏しく、かつ、高線量の固体廃棄物については、上記の燃料デブリと同様の理由により茨城地区で分析することが望ましく、第 1 棟の運用開始後もしばらくの間は茨城地区での固体廃棄物分析を継続することが必要である。これらを踏まえ、福島第一原子力発電所の敷地内・隣接地の分析施設と茨城地区の分析施設では、使用許可の対象核種や構外輸送の有無等が異なることから、図 41 に示すように特徴に応じた役割分担とし、燃料デブリ及び固体廃棄物の分析データの拡充を図ることが有効である。ただし、茨城地区の分析施設はいずれも運用開始後 30 年以上経過しているため、今後も使用を継続する施設への老朽化対策等に関して検討する必要がある。



※ ↓ ↓ については、サンプルの輸送先を示すものであり、輸送回数とは対応していない。

※ ↓ (破線矢印)については、他施設の運用状況により、変更となる可能性がある。

図 40 燃料デブリ取り出しと新設分析棟の工事・運用スケジュール

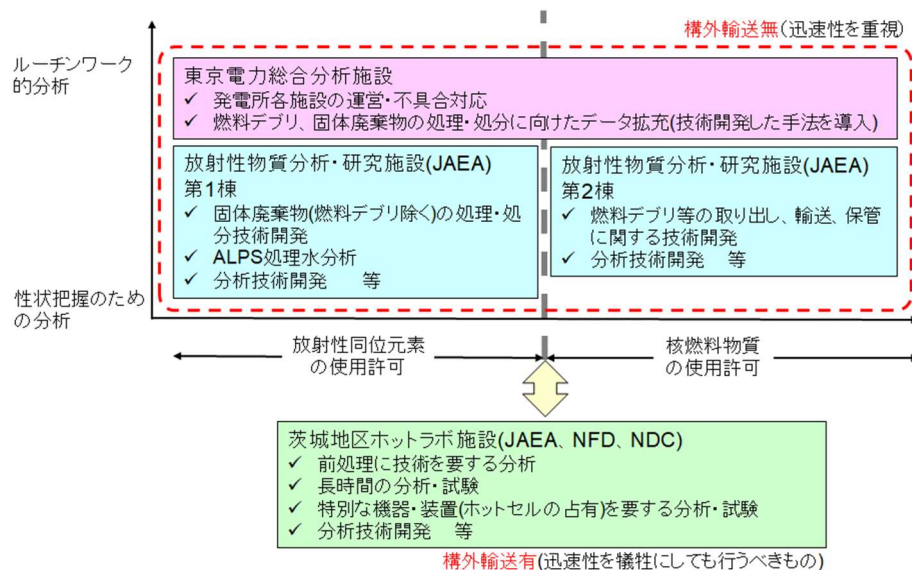


図 41 各分析施設の特徴と役割分担

茨城地区の分析施設はもとより、福島第一原子力発電所の隣接地に運用を開始する放射性物質分析・研究施設では安定的な施設稼働を継続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、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に計画することが重要である。通常の原子力発電所においては、燃料は燃料被覆管の中に密封されており、福島第一原子力発電所においても事故前は非密封状態の α 核種を直接取り扱うことはなかった。事故により生じた燃料デブリは、非密封状態の燃料、FPを含んでおり、分析の際には、内部・外部被ばくや汚染拡大のリスクを伴うことになる。このため、一般的な化学分析や電子機器分析の知見に加え、被ばく防護、原子力・放射線の関係法令、燃料・材料の化学反応性、放射性同位元素の物理・化学・生物学的特性、各種放射線の特性と測定手法等の多岐にわたる知見が必要となる。

これらの知見は、時間をかけて身に付くものであるが、東京電力にとっては経験の少ない分野での人材育成を可能な限り短時間で行わねばならない。 α 核種の取扱いや燃料の分析技術に関して十分な知識と経験をもつ JAEA 及び民間企業の協力^{94,95}を得ながら、東京電力が分析技術者の育成に効率的に取り組むことが重要である。東京電力-JAEA 間での人材交流及び東京電力への日本核燃料開発株式会社（以下「NFD」という。）から人材の受け入れが継続的に実施されている。その状況を表 4 に示す。東京電力と日本原燃株式会社の間においても、 α 核種の取扱いや分析等についての技術協力の協定書が 2022 年 1 月に締結されている⁹⁴。

⁹⁴ 東京電力ホールディングス(株)、日本原燃(株)、2022 年 1 月 27 日、「「福島第一原子力発電所の廃止措置に関する技術協力についての協定書」の締結について」

⁹⁵ 東京電力ホールディングス(株)、日本核燃料開発(株)、2022 年 8 月 1 日、「「福島第一原子力発電所デブリ分析業務等の協力に関する覚書」の締結について」

表 4 東京電力-JAEA 間の人材交流及び東京電力への NFD からの人材の受け入れの状況

		年度			
		2018	2019	2020	2021
東京電力→JAEA	出向・派遣・外来研究員	1	1	3	3
	移籍・再雇用	0	0	0	1
JAEA→東京電力	出向・派遣・クロスアポイントメント	0	3	11	4
	移籍・再雇用	0	0	1	0
NFD→東京電力	出向・派遣	0	0	1	0
	移籍・再雇用	1	1	0	1

4.4 サンプル分析結果の品質向上と非破壊計測の利用

4.4.1 分析結果の品質向上

燃料デブリは難測定核種、妨害元素、不溶解性物質等を含み、サンプルの均一溶解、同重体の選別等の前処理や測定時の課題があることから、分析により微量成分までの全ての元素、同位体の同定・定量を精密に行うことは困難と考えられる。誤差要因の影響を考慮してサンプルの分析結果に対して懐疑的な視点を持つことも重要である。これまでに、モニタリングデータ、サンプル分析、PCV 内部・現場調査、SA コードによる解析、過去の知見、実験の結果等が蓄積されている。サンプルの分析結果の検証の意味も兼ねて、解析、調査、試験結果等の既存知見と照らし合わせて議論、検討し、矛盾のない性状評価を導出することが分析結果の信頼性を向上させ、分析結果の品質向上へつながることになる。

分析精度向上のために、JAEA、NFD、MHI 原子力研究開発株式会社（以下「NDC」という。）、東北大学が協力して共通試料を用いて化学分析や構造解析を 2020 年度から実施している⁹⁶。今後の燃料デブリデータの拡充のため、茨城地区の事業所間において、最新の技術による TMI-2 デブリの分析も検討している。

サンプルの分析結果と溶融進展の模擬試験、既往の科学的知見を照らし合わせて、事故時の挙動や事故原因を推定する活動については、既に、東京電力と JAEA が協力して実施している⁹⁷。さらに、国際的な議論の場として、OECD/NEA のプロジェクトとして実施してきた、BSAF、BSAF-2、PreADES 及び ARC-F が終了し、2022 年 7 月からは FACE プロジェクトが開始されている。FACE プロジェクトは、(i) FP の移行挙動や水素爆発等を含む事故進展に係わる詳細な検討、(ii) 原子炉建屋等から採取された U 含有粒子の特性評価及び廃止措置に向けた燃料デブリ分析技術の構築、(iii) データ、情報の収集及び共有をスコープとしている。12 か国から 23 機関が参加し、我が国からは、原子力規制庁、資源エネルギー庁、JAEA、一般財団法人電力中央研究所、一般財団法人エネルギー工学総合研究所及び NDF の 6 機関が参加している。

予め分析結果の活用方法を見越した分析範囲や項目等を立案できる人材（分析評価者）は希少であり、これを増やすことに取り組むことも重要である。分析評価者としては、(i) 分析結果から事故事象を論理的かつ的確に理解し、(ii) 評価結果を廃炉工程上必要な箇所(取り出し工法、保障

⁹⁶ 「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリの分析精度の向上及び熱挙動の推定のための技術開発)」に係る補助事業 2020 年度最終報告 2021 年 8 月 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構(2021)

⁹⁷ 平成 30 年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発) 2020 年度実施分成果、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)、(2021)

措置、保管・管理、処理処分)へ適切に反映させるとともに、(iii) 次のサンプル採取において適切な指示を出す能力が求められる。しかしながら、個人でこれら全ての能力に対応することは困難である。そのため、国内の燃料デブリ、廃止措置に関する知見を有する機関から研究者、技術者を選抜し、分析評価チーム(One Team)を東京電力が主導して構成することが望ましい。

4.4.2 燃料デブリのサンプル分析

現在のサンプル分析は、スミアサンプル等を茨城地区の分析施設へ輸送後、電子顕微鏡を用いた分析を中心に行っている。微小、少量のサンプルでは、密度や硬さ等の測定不可能な項目があるため、今後、燃料デブリ取り出し工程の進捗に伴い、サンプルのサイズ、量ともに増加させる必要がある。ホットセル内の分析工程ではマニピュレータを用いての分析であり、1つの施設では、0.5～1 サンプル/月程度の分析となる上、各々のホットセルでは取り扱える核種ごとに使用量が決まっていることから大量に分析することは困難である。このため、取り出し・保管量と分析量の間に大きな離が生じてしまう。

燃料デブリは不均質性を持つために採取された部位に応じて分析値に幅がある上、十分な量を分析できる状況ではなく、評価における不確かさに幅が生じることになる。分析品質の向上やサンプル量の改善に制限がある中で、良好な分析結果を増やすためには、従来のホットラボでのサンプル分析での数量の増加に注力するだけでなく、他の分析・計測の手法の多様化・拡充を行い、各項目の短所、長所を把握した上で、分析結果の用途に応じて相互に補完することを検討し、総合的な評価をすることが有効である。用途によっては、単独の項目を計測することしかできない手法を検討することも価値がある。

4.4.3 サンプル分析と非破壊計測の利用

サンプル分析の結果を補完する分析・計測の手法の1つとして、サンプルから放出、散乱、又は透過した放射線、量子等を利用して、サンプルを破壊せずに核燃料の量等を評価する手法（以下「非破壊計測」という。）がある。表5に分析施設内で実施するサンプル分析と分析施設外で実施する非破壊計測の項目やサンプル量等を相対的に比較したものを示す。サンプル分析では多くの分析項目を行えるが、分析に要する時間は長く、1回の分析量も少量である。一方、非破壊計測では計測項目が少ないものの、サンプル分析よりも計測時間は短く、1回の計測につき多くの量が計測でき、汚染拡大防止のために密封容器に対象物を収納しての計測も可能である。

表 5 分析施設内で実施するサンプル分析と分析施設外で実施する
非破壊計測における主要諸元の相対比較

	分析施設内で実施する* サンプル分析	分析施設外で実施する** 非破壊計測
分析・計測時間	長(△)	短(○)
分析・計測項目	多(◎)	少(△)
1回の分析・計測量	少(△)	多(◎)
廃液の発生	有(△)	無(○)
分析・計測時の閉じ込め性	非密封	非密封、密封どちらも可
ダスト対策	必要	必要
放射線の遮へい施設	必要	必要

◎：優 ○：良 △：可

*: 燃料デブリのサンプルを取り扱うのに適したホットラボ等の分析専用の施設内での実施。
**: 燃料デブリを取り出して保管・管理するまでの工程で利用する施設であり、分析専用ではない施設での実施。

分析施設内でのサンプル分析に加え、特定の項目、例えば、核燃料の定量に絞った非破壊計測を燃料デブリの収納容器に対して実施できれば、分析数の少なさを補うとともに、燃料デブリ中の核燃料の量を迅速に把握(最小臨界質量未満を確認)することができ、未臨界状態を維持したまま、次の工程へと移行することが可能となる。このとき、サンプルの分析数、サンプル採取時の座標情報等のサンプルに関する情報量を増やしてデータの信頼性を向上させながら、可能な限り燃料デブリのもつ性状の不確かさの幅を小さく抑えることが望ましい。燃料デブリ性状把握の精度を向上し、取り出し後の保管・管理をより安全に実施するために、燃料デブリを取り出してから保管・管理するまでの工程で利用する施設において、非破壊計測の具体的適用方法の検討をすべきである。

非破壊計測を適用する場合の一例として、図 42 に燃料デブリ取り出しから保管・管理の間のハンドリング工程での利用を示す。図中の非破壊計測①、②及び③において、非破壊計測を実施することを検討している。取り出された燃料デブリに対して非破壊計測②により核燃料量を定量する。得られた核燃料量、例えば U 量に応じて、U 量が多い燃料デブリは細径収納缶、U 量が少ない場合は太径収納缶へ収納する。このとき、細径収納缶は形状管理、太径収納缶は質量管理(非破壊計測②で得られた核燃料量の合計)とすれば、未臨界状態を維持可能となる。非破壊計測②で得られた核燃料量を積算すれば、収納缶ごとの核燃料量を算定できるが、非破壊計測②では 1 回の計測に用いる燃料デブリの量が少なく、検出される信号が少ないことが予想される。このため、密封後に非破壊測定③を行い、輸送・保管用に核燃料の値を最終的に計測することが望ましい。これら非破壊計測②及び③では、燃料デブリ中に制御棒成分である中性子吸収材(B₄C)が含まれているため、アクティブ中性子法では正しく計測できない可能性がある。中性子を用いる手法では不得手な部分を補うために他の手法を検討する必要がある。

一方、上部炉内構造物の表面には事故時に放出された U 含有粒子、Cs-137 が付着していることが予想される。上部炉内構造物を切断し、必要性及び実現性を考慮して表面を除染後に非破壊計測①により、U 含有粒子、Cs-137 の付着がないことを確認できれば、固体廃棄物の保管・管理レベルの負担を下げることも可能となる。このため、非破壊計測①では、高感度、高精度に計測可能な技術が必要となる。

現在、廃炉・汚染水・処理水対策事業において、燃料デブリを計測対象とした非破壊計測に関する技術開発が実施されている。これまで燃料デブリに対して、非破壊計測を行った前例がなく、燃料デブリには、阻害要因も含まれることから、数種類ある非破壊計測手法の実力、適用可能性、組合せの可否等を確認する必要がある。図 42 は一例の提示であり、今後の研究開発、検討の結果に応じて変更となる可能性がある。ただし、燃料デブリの試験的取り出し、燃料デブリの性状把握、段階的な取り出し規模の拡大が連続的に継続することを考慮すると、非破壊計測②と③の計測手法の開発の優先度が高いことになる。

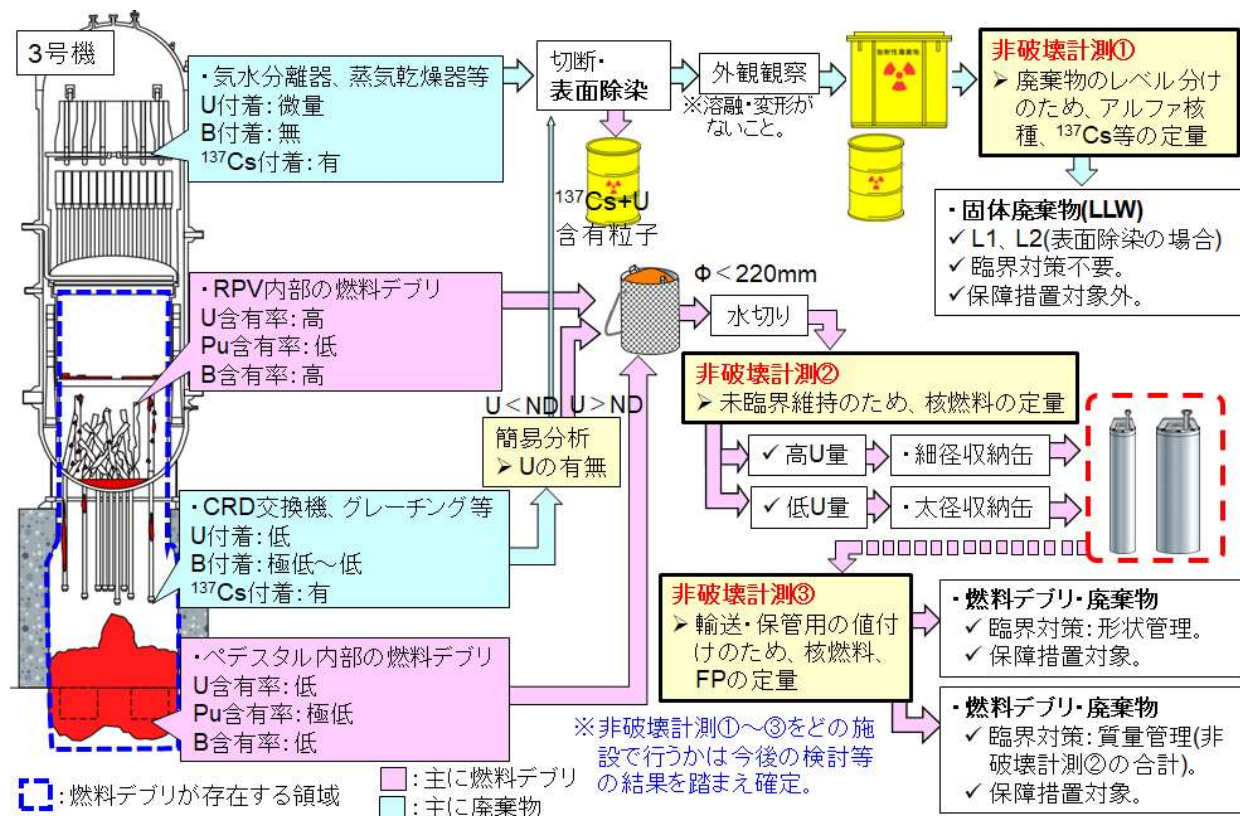


図 42 燃料デブリ取り出し後のハンドリング工程における非破壊計測の一例

5. 研究開発への取組

5.1 研究開発の意義と現状

福島第一原子力発電所の廃炉を安全、確実、合理的、迅速及び現場指向の視点で推進していくためには、研究開発が必要となる困難な技術課題が多数存在する。燃料デブリの試験的取り出しが開始されようとしている現在、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向け、現場での適用を見据えた研究開発を加速する必要がある。

これら技術課題を解決するため、国内外の大学や JAEA 等の研究機関による基礎・基盤研究及び応用研究、IRID、メーカ、東京電力による実用化研究、現場実証等が産学官の海外企業を含む多様な機関により実施されている（図 43）。

政府は、廃炉に向けた応用研究、実用化研究のうち技術的難易度の高い課題の課題解決を目指すため「廃炉・汚染水・処理水対策事業」により、国内外の大学、研究機関等の基礎的・基盤的研究及び人材育成の取組を推進するため「英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業（以下「英知事業」という。）」により各機関が行う研究開発を支援している。

東京電力においては、現場適用に直結した技術開発に取り組むとともに、技術開発の企画・管理機能の体制強化として 2021 年 8 月に廃炉技術開発センターを設置し廃炉中長期実行プランに紐づいた研究・技術開発課題の抽出と解決策の検討、技術開発の進捗管理と開発計画への反映等を行っている。

NDFにおいては、研究開発中長期計画や次期研究開発計画の企画検討及び英知事業の支援を行うとともに、関係機関の代表者や大学等の有識者をメンバーとする「廃炉研究開発連携会議」を設置し、研究開発のニーズとシーズの情報共有、廃炉作業のニーズを踏まえた研究開発の調整、研究開発・人材育成に係る協力促進等の諸課題について検討している。また、廃炉・汚染水・処理水対策事業と英知事業の連携強化が廃炉研究開発連携会議等を通じて進められている。

2022 年度から JAEA は第 4 期中長期目標・計画に沿って取組を実施していく計画であるが、福島第一原子力発電所の廃炉に係る研究開発においても JAEA の知見や経験等を活用し燃料デブリの性状把握、廃棄物対策の研究開発や分析に関する取組等において主要な役割を果たしていくことが期待される。これら研究開発実施体制を図 44 に示す。

なお、2023 年 4 月に政府により設立される予定の「福島国際研究教育機構」において実施する研究開発分野は①ロボット、②農林水産業、③エネルギー、④放射線科学・創薬医療、放射線の産業利用、⑤原子力災害に関するデータや知見の集積・発信とされており、廃炉に関する研究開発の連携も期待される。そのため、今後、NDF は、福島国際研究教育機構の研究開発に関連したアウトリーチ活動を視野に入れつつ、研究開発の推進に関する基本計画⁹⁸も踏まえた連携を検討していく⁹⁹。

⁹⁸ 新産業創出等研究開発基本計画（令和 4 年 8 月 26 日 内閣総理大臣決定）

⁹⁹ 福島国際研究教育機構の基本構想（令和 4 年 3 月 29 日 復興推進会議決定）

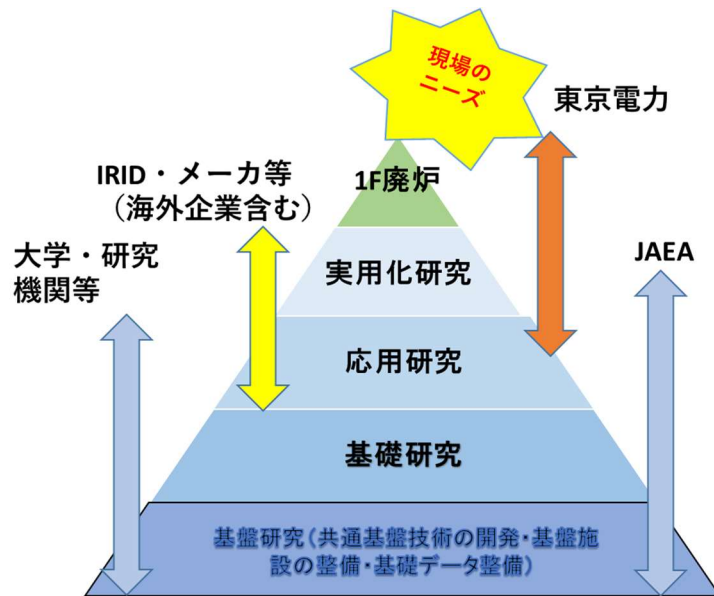
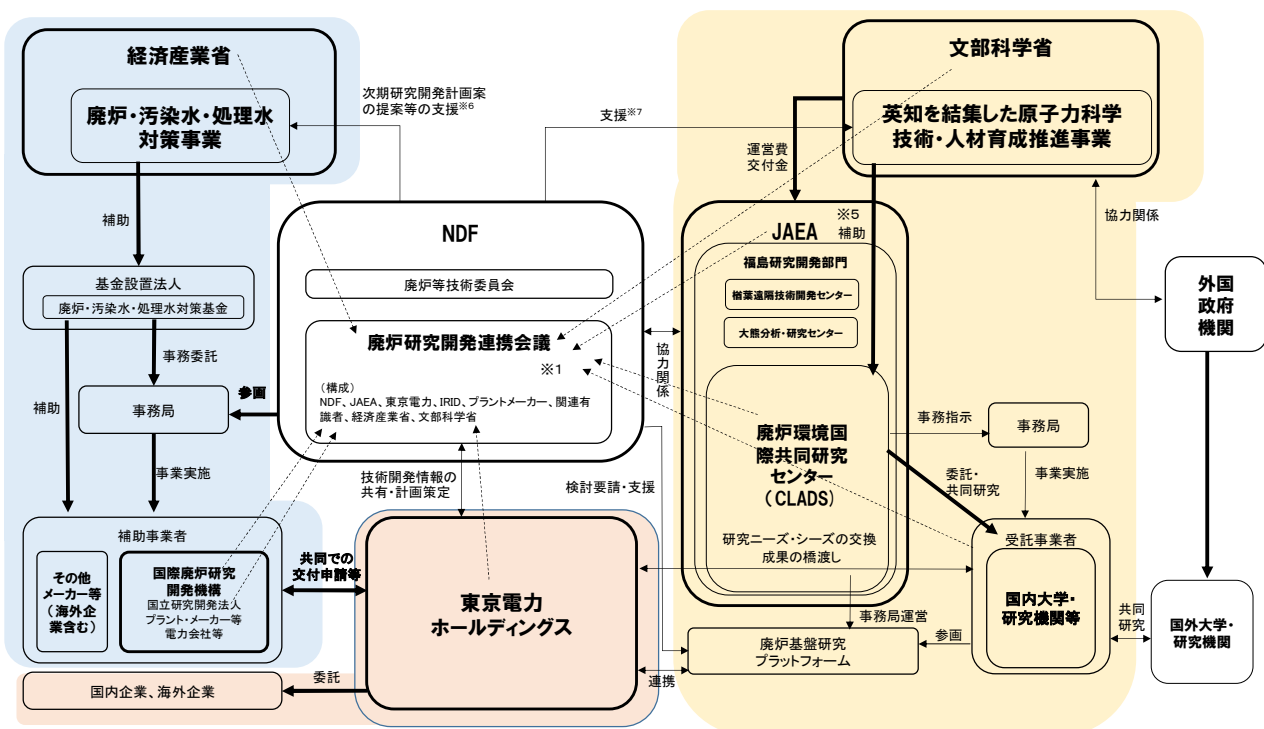


図 43 廃炉研究開発の研究範囲と実施機関



- ※1 廃炉研究開発連携会議は、廃炉・汚染水対策チーム会合決定によりNDFに設置。
 ※2 太い実線矢印は研究費・運営費等の支出(施設費除く)、細い実線矢印は協力関係等、点線矢印は廃炉研究開発連携会議への参加を示す。
 ※3 JAEA等、一部機関は複数個所に存在している。
 ※4 各機関はそれぞれMOU等に基づき外国機関との協力関係を有する。
 ※5 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の補助金は、JAEAに交付されるが、わかりやすさのためCLADSに交付されるものと表現した。
 ※6 廃炉・汚染水・処理水対策事業は、中長期ロードマップや戦略プランにおける方針、研究開発の進捗状況を踏まえ、NDFがその次期研究開発計画の案を策定し、経済産業省が確定する。
 ※7 NDFは、英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業のステアリングコミッティに構成員として参加する。

図 44 福島第一原子力発電所の廃炉に係る研究開発実施体制の概略

5.2 主な課題と戦略

5.2.1 研究開発中長期計画

NDF 及び東京電力は、2020 年度に廃炉の今後約 10 年程度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し、その後毎年度更新している。東京電力の廃炉中長期実行プランの改訂、燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大に向けての概念検討、現在実施されている研究開発の進展等を踏まえ研究開発中長期計画を更新する。主な改訂としては、廃炉の主要工程の最新化、基礎・基盤研究の取り込み等である。更新した研究開発中長期計画を添付資料 11 に示す。研究開発中長期計画の検討に当たっては、東京電力、文部科学省、経済産業省、NDF の参加する研究開発企画会議等を通じて、求められる成果、必要とされる時期、実施体制等の検討を行っている。引き続き、PCV 内部調査等の進展、燃料デブリの分析により明らかになった情報、研究開発の進展等を踏まえ、継続的に更新・拡充を図っていく。

また、2022 年 2 月の第 10 回廃炉研究開発連携会議での議論を踏まえ、英知事業と廃炉・汚染水・処理水対策事業の連携を図るため、10 年を超える長期の課題を含めた技術課題の分析共有を東京電力、廃炉環境国際共同研究センター（以下「JAEA/CLADS」という。）及び NDF の三者で行い、俯瞰的かつ網羅的な課題の整理を開始した。その成果を参考として研究開発中長期計画、基礎・基盤研究の全体マップに反映していく計画である。

5.2.2 廃炉・汚染水・処理水対策事業への取組

5.2.2.1 廃炉・汚染水・処理水対策事業

経済産業省は、廃炉に向けた技術的難易度の高い課題の課題解決を目指すため廃炉・汚染水・処理水対策事業によって支援を行っている。

廃炉・汚染水・処理水対策事業は、図 44 に示すように基金設置法人、事務局を介して研究開発を実施する事業者を選定し、必要な補助を行っている。これまでの廃炉・汚染水・処理水対策事業においては、PCV 内の調査による炉内状況把握の進展などの廃炉作業を進める上で大きな成果が得られている。これまで実施されてきた廃炉・汚染水・処理水対策事業の実施概要を添付資料 12 に示す。

また、廃炉・汚染水・処理水対策事業においては、2020 年度より、各事業の企画立案及び進捗管理の機能を強化するため NDF が廃炉・汚染水・処理水対策事業事務局に参画するとともに、現場適用性の観点からの要求事項を研究開発に反映させるため、東京電力が研究実施主体と共同での交付申請を行い事業のプロジェクト管理に責任を持つ体制としている。

この機能強化により、事務局が研究開発の進捗状況を確実にフォローできるようになり、円滑な事業遂行と目的とする成果の達成が図られている。また、現場適用性の観点からの東京電力二一ズの事業への反映や東京電力のエンジニアリングスケジュールにおける事業の位置付けの明確化が図られている。

5.2.2.2 次期研究開発計画

NDFは、廃炉・汚染水・処理水対策事業を支援するため、毎年度、研究開発中長期計画を踏まえ、直近2年間で行うべき研究開発として次期研究開発計画を策定している。次期研究開発計画は、燃料デブリ取り出し及び固体廃棄物の処理・処分等に係る課題解決を目的としている。

次期研究開発計画は、研究開発企画会議において関係者間で調整検討の上、NDFの委員会である燃料デブリ取り出し専門委員会、廃棄物対策専門委員会での審議を経た後、廃炉等技術委員会で審議しNDF提案として取りまとめている。この計画は、経済産業省から廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合／事務局会議に報告され、これに沿って廃炉・汚染水・処理水対策事業が実施されている。

次期研究開発計画の検討においては、これまでの研究開発成果を評価し、更に達成度を向上すべき課題や新たに出てきた課題を抽出するとともに、研究開発中長期計画を見据えた新たな課題を抽出して技術課題を整理している。また、課題の抽出に当たっては網羅的に課題を抽出するとともに、各課題が廃炉の実施主体である東京電力のニーズに沿ったものであることを確認し、研究開発成果が東京電力のエンジニアリングに活用されるものを目指すことが重要である。

2022年度は、次期研究開発計画の策定に当たり新たな取組として、福島第一原子力発電所の廃炉に向けて解決すべき技術的課題を広く募集する情報提供依頼（RFI：Request for Information）を行った¹⁰⁰。これは、次期研究開発計画の検討に資するため、研究開発テーマ、研究開発の内容（解決すべき技術的な課題と実施内容）、研究開発の規模、想定される共同研究開発先、研究開発分野などについて公募により情報提供を求めるものである。

5.2.2.3 廃炉・汚染水・処理水対策事業に係る今後の研究開発実施体制

事故後の原子炉内の状況が不明な時期から約11年間、廃止措置に関する研究開発の母体としてIRIDが果たしてきた役割は大きなものがある。特に、PCV内部調査において炉内状況把握に実績を上げるとともに、燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発、燃料デブリ取り出し装置及び収納容器の開発、固体廃棄物の処理・処分技術の開発等において成果を上げてきている。

他方、原子炉内の状況が次第に明らかになり、また、東京電力におけるエンジニアリングの進展によりニーズが明らかになってきており、技術研究組合による共同の取組から東京電力のエンジニアリングに基づく開発を進める段階になってきている。これらの環境変化を踏まえるとともに、2023年夏頃にIRIDの現在の継続期限を迎えることに備え、研究開発体制について検討を進めているところである。

廃炉・汚染水・処理水対策事業において幅広い視点から研究開発課題を検討すること及び現場適用性の観点から事業の評価を行い研究開発内容に反映していくことは引き続き重要であるため、NDFは東京電力等と協力して研究開発の企画提案や事業品質確保の取組に係る機能をより一層強化して再構築する計画である。

¹⁰⁰ 第102回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「廃炉・汚染水・処理水対策事業に関する情報提供依頼（RFI）の開始について」

研究開発の企画提案として、福島第一原子力発電所の廃炉に向けて解決すべき技術的課題を広く募集する情報提供依頼（RFI）を今年度から実施した。今後、その実施結果を踏まえ制度の改善を図っていく計画である。

また、事業品質確保の取組として、全ての廃炉・汚染水・処理水対策事業を対象としたレビュー制度を構築する計画である。その目的は、事業の現場適用性の確保、研究開発の品質向上であり、制度の具体的内容については今後検討を進める。

一方、廃炉・汚染水・処理水対策事業において継承が必要な事業において、支障が出ないように円滑に事業を実施する場合には以下の課題があり、関係機関で議論を進めている。

- ・事業を引き継ぐ場合の実施者
- ・研究開発を継続するために必要なハード（設備、機器等の有形資産）及びソフト（成果、技術情報等の無形資産）の適切な継承
- ・補助事業で蓄積されてきたノウハウの保持及び活用方法

なお、これまで廃炉・汚染水・処理水対策事業により開発してきた成果については、福島第一原子力発電所の廃炉は国家的・社会的課題であることから、廃炉の研究開発に参画する機関が得られた知見等の研究開発成果を効果的に活用できるアクセスしやすい体制を構築することが重要である。そのため、成果の情報開示とナレッジシェアの観点からアーカイブ化を推進することが望ましい。その場合、アーカイブ化の資料集約・共有ルールの整備、アーカイブ化構築・運営体制の整備及び使用する管理ツールの整備が課題である。

また、東京電力は、基礎基盤研究から実用化研究に至る全ての研究開発に対してそれぞれの意義、役割を十分認識した上で各研究開発に適切に関与しつつ、廃炉技術開発センターによる技術開発マネジメントの下、自主技術開発も含めた廃炉研究により一層積極的に取り組んでいく必要がある。その際、2022年10月に設立した新エンジ会社との連携を図っていく必要がある。

5.2.3 廃炉現場と大学・研究機関における連携の促進

5.2.3.1 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業

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共有しておくことが重要である。長期にわたる福島第一原子力発電所の廃炉を推進するに当たっては、中長期的な観点から、原理の理解や理論に基づいた理工学的検討も重要である。

このような背景の下、文部科学省においては英知事業として、大学・研究機関等を対象とし、原子力分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、国内外の英知を結集し、福島第一原子力発電所の廃炉等の課題解決に資する基礎的・基盤的研究及び人材育成の取組を推進してきている。英知事業の実施は、JAEA/CLADS と大学等との連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制とするため JAEA/CLADS が担っている。

また、NDF では廃炉研究開発連携会議での議論に基づき、「研究連携タスクフォース」を設置¹⁰¹し、課題の調査、ニーズ側の問題意識などを踏まえ、基礎・基盤分野を中心に優先的に取り組む 6 つの重要研究開発課題を抽出した。これら重要研究開発課題は、英知事業や廃炉・汚染水・処理水対策事業において研究開発が実施され成果が得られてきている。引き続き、基礎基盤研究における重要な研究開発課題の一つとして位置付けるため JAEA/CLADS が作成した「基礎・基盤研究の全体マップ」に含めまとめられている。

英知事業の公募に当たっては、汚染水対策から廃棄物の処理・処分まで含めた廃炉全体を俯瞰し、求められる研究開発のニーズとシーズを整理した「基礎・基盤研究の全体マップ」を活用している。

2022 年度の英知事業では、福島第一原子力発電所の廃炉を着実に進展させるためのニーズに基づいた研究開発の推進により課題解決を目指す「課題解決型廃炉研究プログラム」及び福島第一原子力発電所の廃炉の加速に資することを目的として、日英の様々な分野の研究を融合・連携し幅広い知見を集めて研究開発を推進する「国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）」の 2 公募が実施されている。なお、過去に採択された英知事業の選定課題を添付資料 13 に示す。

また、2021 年度から廃炉ニーズと研究シーズのマッチングのため東京電力や廃炉に携わる企業参加のワークショップ開催等の取組が進められるとともに、2022 年度からは廃炉現場への成果の活用や成果を最大化するためのリサーチ・サポーター（RS）の導入が計画されている。

廃炉現場の課題解決に資する基礎・基盤研究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り、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英知事業により得られた優れた成果の橋渡しを進めていくことが重要である。

5.2.3.2 廃炉・汚染水・処理水対策事業と英知事業の連携及び東京電力における産学連携の取組

ニーズとシーズのマッチングの深化及び基礎基盤研究から応用実用化研究までの廃炉研究開発の整合のとれた実施のため、廃炉・汚染水・処理水対策事業と英知事業の連携を図ることが重要である。そのため、それぞれの事業の成果等の情報交換、情報共有を積極的に図るとともに、廃炉研究開発連携会議の活用、廃炉研究開発連携会議において共有された今後の方向性や課題共有の取組について、NDF や関係機関が連携して取り組んでいくべきである。

また、東京電力においても、基礎基盤研究分野を中心に、原子力分野だけでなく、大学が持つ幅広い研究リソースから廃炉に役立つニーズに合った技術シーズを発掘するため大学（東京大学、東京工業大学、東北大学、福島大学）との産学連携の取組を行っている。

政府、JAEA/CLADS、NDF、東京電力等の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、更に連携を強化していく必要がある。

5.2.3.3 基礎研究拠点・研究開発基盤の構築

長期にわたる福島第一原子力発電所の廃炉を技術面においてより着実なものとしていくためには、基盤技術や基礎データの整備、研究拠点や研究施設・設備の構築、人材の育成等の研究開発

¹⁰¹ 2016 年に NDF に設置し、計 6 回開催。NDF、大学・研究機関の有識者、東京電力で構成。福島第一原子力発電所の廃炉を推進する上で戦略的かつ優先的に原理の解明等に取り組むべき 6 つの重要研究開発課題を抽出し、研究連携タスクフォース中間報告（平成 28 年 11 月 30 日）を取り纏めた。

基盤の整備や技術知識の蓄積が必要不可欠である。福島第一原子力発電所の廃炉の研究開発は、最先端の科学技術の実践の場でもあり、こうした蓄積がイノベーションの源泉となっていくことが期待される。

JAEA/CLADS の廃炉環境国際共同研究センター（福島県富岡町）では、国内外の大学、研究機関、産業界等がネットワークを形成し研究開発と人材育成を一体的に推進し、英知事業における「研究人材育成型廃炉研究プログラム」の創設や研究・人材育成拠点（連携ラボ）を形成した上での組織間をクロスアポイントメント制度で結ぶ研究開発・人材育成事業の開始など、JAEA/CLADS の拠点機能の強化を図っている。

また、ハードウェアとしての研究開発基盤の構築も重要である。2016 年 4 月に福島県楢葉町で本格運用を開始した JAEA の楢葉遠隔技術開発センターは、遠隔操作機器・装置の開発・実証のためのモックアップ試験が行える施設である。特に人間がアクセスできない過酷環境への機器投入に先立って、実スケールでのモックアップ試験を行うことは、性能検証のみならず訓練や操作手順の確立のために必要不可欠である。2022 年においては、燃料デブリの試験的取り出し（内部調査及び燃料デブリ採取）に向けたロボットアームのモックアップ試験を行っている。

さらに、福島県大熊町においては、4.3 のとおり JAEA 大熊分析・研究センター(放射性物質分析・研究施設)の建設が進んでおり、低線量・中線量の固体廃棄物の分析及び ALPS 処理水の第三者分析を行う放射性物質分析・研究施設第 1 棟が 2022 年 6 月に竣工、10 月に管理区域設定し運用が開始されている。燃料デブリ等の高線量試料を分析する第 2 棟については詳細設計が進められている。

このように、福島県内に、廃炉事業に関連する研究施設が立地してきており、廃炉研究開発の世界的な拠点が形成され、中長期を見通した研究開発基盤が構築されつつある。

6. 技術戦略を支える取組

6.1 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

6.1.1 プロジェクト管理の意義と現状

東京電力は、廃炉作業の中長期を見据えたプロジェクト全体を調整・整合させながら円滑に進めていくためには、これに関係する組織が達成目標に向かって協働していく管理体制を構築し、その総合力を高めていくことが必要である。

廃炉プロジェクトの各作業分野における個々の作業においては、一般に概念検討→研究開発→基本設計→詳細設計→製作→現地据え付け工事→検査→運用、といったプロセスを経て進められることとなる。また、その間に必要に応じて、原子力規制委員会による審査や各種検査も加わることになる。こうした一連のプロセスを漏れなく、また遅滞なく実施していくに当たっては、長期計画において定める大きな作業の流れを適切な規模の管理単位である個別プロジェクトとして設定することが有効である。その上で、プロジェクト間の相互関係並びに時系列的な関係を最適化し、またプロジェクトに内在するリスクを適切に管理できるように、高度化されたプロジェクト管理体制の下で全体整合をとりながら進めていくことが重要である。この観点から東京電力はこれまでプロジェクト管理体制の構築・強化に取り組んできており、2020年4月に組織を改編し、約2年間の運用を通じてプロジェクト型の組織運営は定着しつつある。

今後、燃料デブリ取り出し等の難易度の高いプロジェクトが本格化すること、EPC¹⁰²マネジメントを東京電力が主導する方針であることから、プロジェクトマネジメント力の更なる強化が求められる。

また、中長期ロードマップの第3期に入り廃炉作業が本格化するにつれ、対応すべきプロジェクトも多様化しプロジェクト間のインターフェース管理が一段と複雑化し、プロジェクトの難易度も更に上がっていくものと予想される。このため、プロジェクトマネジメントに係る東京電力の業務量は今以上に増加するものと思われる。業務の優先順位付けやピークシフト等を行い、業務負荷の平準化を図りつつ、それでも対処できない場合は要員を増加するなど、長期的な要員確保をする上で東京電力経営層のリーダーシップが一段と重要となる。

2022年度までの主な取組例としては、組織改編によるプロジェクトマネージャーの権限強化、工程管理ソフト（P6）を活用した工程管理、リスクモニタリングシステムの構築・運用（リスク管理表を用いリスクを数値化。発生頻度と影響度の2軸でリスクをマッピングし経営層を含めた会議体でリスクの推移を定期的にモニタリング）、廃止措置プロジェクトの知見及び経験を持つ海外企業とパートナーシップ契約に基づくプロジェクトマネジメント強化、安全・品質レベル向上、先を見据えた計画（廃炉中長期実行プラン）の作成等がある。主な取組内容を以下に示す。

① 組織改編によるプロジェクトマネージャーの権限強化、安全・品質レベル向上

¹⁰² E : Engineering（設計）、P : Procurement（調達）、C : Construction（建設）

2020年4月に福島第一廃炉推進カンパニーを組織改編してプログラム¹⁰³/プロジェクト体制を構築するとともに最高責任者（CDO）直下に廃炉安全・品質室を設置した。これに伴い「プロジェクトマネージャーの専任化」や「予算執行権限の付与」等のプロジェクトマネージャー権限を強化し、運用面でも経営層をはじめとした関係者が毎月各プログラム、プロジェクトの進捗状況、課題、リスク等について情報共有する仕組みを構築する等、廃炉プロジェクトの業務推進力向上を図った。また、廃炉安全・品質室を設置したことにより、燃料デブリ取り出し等の不確かさ及び技術的難易度の極めて高い取組が本格化していく中での、廃炉作業における安全の確保や業務品質のレベル維持・向上を図っている。

一方でプロジェクト型業務が成熟したレベルに達するには課題も多く、例えば、廃炉中長期実行プランに基づき目標設定を適切に行い、各部署における業務の意義を明確にすること等により、メンバーのモチベーションが損なわれないようにコントロールすることが必要であったり、廃炉安全・品質室の業務では、各主管グループの行うエンジニアリングに参画する仕組みの確立、安全を専門とするメンバーを育成するなど、様々な取組が必要である。

② リスクマネジメント強化

“リスク”とは既に起こった事象ではなく、今後起こるかもしれない「不確実な事象」をいう。「不確実な事象」にはマイナスの影響（脅威：Threat）を及ぼすものとプラスの影響を及ぼすもの（機会：Opportunity）がある。福島第一原子力発電所の廃炉における“不確かさ（Uncertainty）¹⁰⁴”の多くはプロジェクトに対しマイナスの影響（脅威）を与える“原因”となる。他方、既に起こってしまった、若しくは確かに起こる（確率 100%）事象は“Issue（課題・問題）”となる。

リスクマネジメントはリソースを使い、潜在的な根本原因を処理し重大な結果となることを軽減させることにある。これに対し Issue マネジメントは的確なリソースを使い、起きてしまった課題や問題を処理し解決することである。リスクは処理を誤ると Issue となる。したがって、リスク処理を的確に行うことが Issue を減らすことにつながる。

リスクマネジメントが上手く作用すれば“問題となるようなことは何も起こらない”。しかし失敗して何かが起こると、“問題視され、説明責任が求められる”。このため、プロジェクトマネージャーの仕事の多くはコストやスケジュール、そしてパフォーマンスに影響を与える原因を排除・改善・軽減することに費やされる。すなわち、リスクマネジメントはプロジェクトマネジメントにとって中心的な活動となる。

リスクマネジメントは、不確実な事象が顕在化する前に把握し、プロジェクトにマイナスの影響を与える事象が発生しないよう「未然に対処する」、あるいは発生した場合でも「その影響を最小限にとどめる」ように対処する活動である（リスクマネジメントの標準的なワークフローを図 45 に示す）。

¹⁰³ プログラムはプロジェクトの上位に位置し、全体使命を実現するために複数のプロジェクトが有機的に結合された事業である。

¹⁰⁴ プロジェクトにマイナスの影響を与える不確かさとして、例えば次のものが挙げられる。現場情報を 100% 取得できないことによる設計インプット条件の不確かさ、難易度の高い技術開発に伴う不確かさ、過去に経験したことのない作業が多いためコスト・スケジュールを推計することの不確かさ等。

東京電力は、リスクマネジメントの重要性を十分に認識しており、リスクマネジメントを更に強化するため、2021 度から図 45 のワークフローに沿った体系的な取組を開始している。

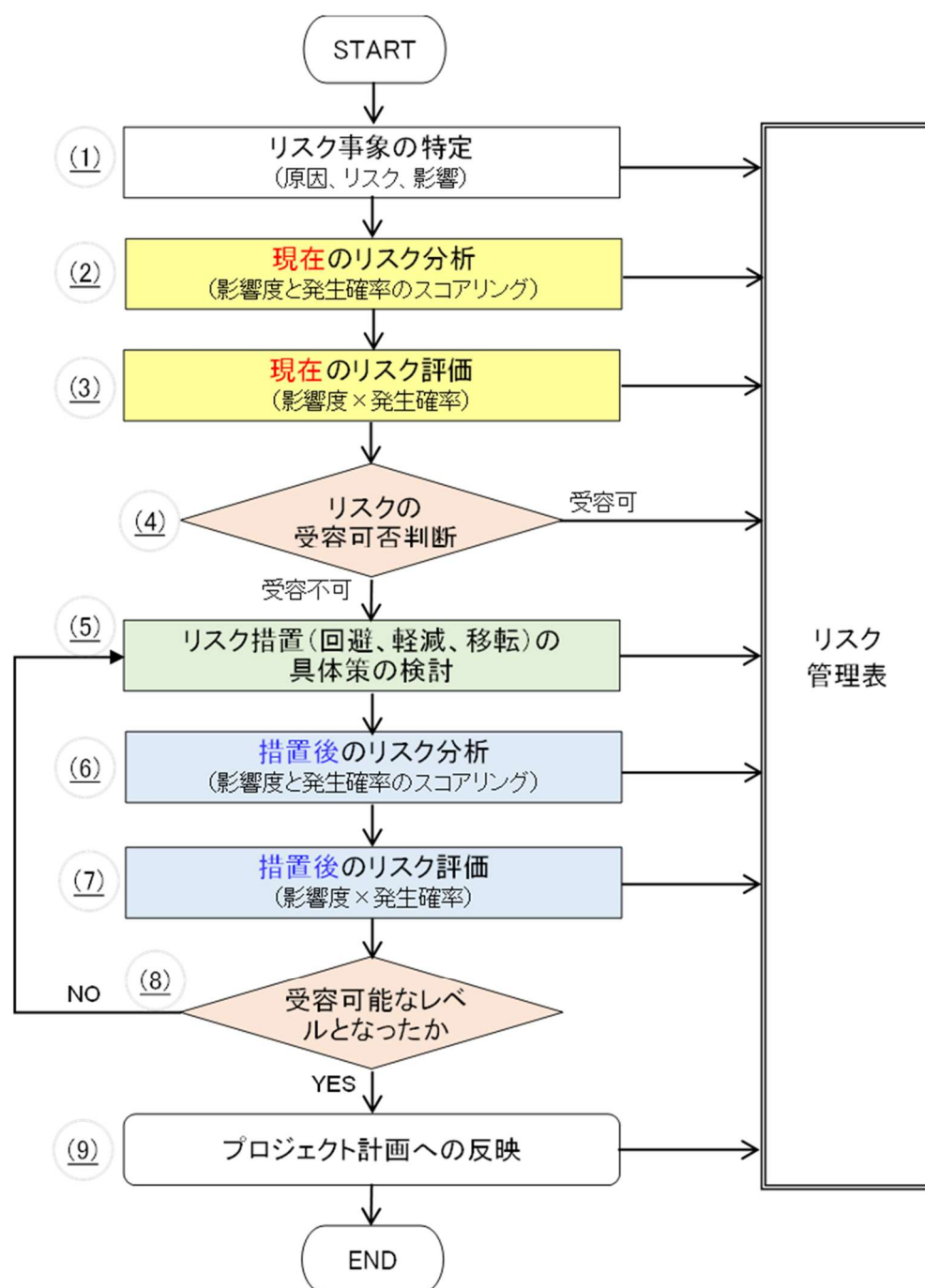


図 45 標準的なリスクマネジメント・ワークフロー

③ 先を見据えた計画（廃炉中長期実行プラン）の作成

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¹⁰⁵に基づく要求や、廃炉・汚染水・処理水対策関係閣僚等会議において決定された中長期

¹⁰⁵ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律

ロードマップ並びに原子力規制委員会が作成したリスク低減目標マップの目標工程（マイルストーン）を道標として廃炉事業を実施してきたが、中長期ロードマップ並びにリスク低減目標マップのマイルストーンを達成するための具体的な作業計画を示すことを目的として廃炉中長期実行プランを作成、2020 年 3 月に公表した。これ以降、作業進捗を踏まえて毎年更新し、2022 年 3 月には廃炉中長期実行プラン 2022 を公表した。

廃炉中長期実行プランは東京電力が責任事業として主体的に廃炉に取り組む姿勢の証である。複雑かつ長期にわたる廃炉事業に一定の透明性を与えており、地元や社会の皆さまとの効果的なコミュニケーションツールとなるよう、透明性、内容に適切性を維持、改善することが、重要である。

なお、廃炉中長期実行プランでは至近約 10 か年の作業計画を主な対策ごとに示しており、同プランの至近 3 か年の計画を基に廃炉等積立金の取戻し計画を作成している。

④ 研究開発中長期計画の作成

福島第一原子力発電所における廃炉事業は、「先々を見越して戦略的に進めていく段階」に入ってきていると同時に、所在や性状が不明である燃料デブリの取り出しなど「未踏の領域に計画的に取り組む局面」に直面している。このため、研究開発との連携の重要性が高まっており、2020 年度から NDF と共同で研究開発中長期計画を作成している。その後、東京電力は技術開発課題の検討や実施計画を推進するための研究開発の企画・管理機能の強化を目的として、2021 年 8 月に廃炉技術開発センターを設立した。

当センターは、各 PG と連携し開発に取り組んでいくために廃炉中長期実行プランに紐づいた技術開発課題を抽出するとともに、重要な課題については、研究開発中長期計画に反映させるというミッションを開始している。本ミッションは、中長期ロードマップの目標工程の実現に向けた重要なミッションであり、リソースの早期充実に図り、中長期的な研究開発の立案を行っていく必要がある。

特に、燃料デブリ取り出しの研究開発については、本年 10 月に設立した新エンジ会社と連携を密にとった一体的推進が必須となるため、当センターの体制を一層充実する必要がある。また、当センターは、単に企画立案に留まることなく、各 PG の研究開発の進捗状況を常にモニタリングした上で、研究開発の有効性を定期的に評価し、評価結果を各 PG に適切にフィードバックしていくことも、今後の重要な役割となる。

⑤ 予算計画の強化

毎年度、廃炉に必要なプログラム/プロジェクト作業、プログラム外の作業（維持管理やユーティリティ設備）及び運営費の予算計画を策定しており、廃炉中長期実行プランを踏まえた件名の計上、早期設計確定、予算月報差異理由書の作成・分析等の取組により、予算精度の向上に取り組んできた。こうした取組により、仕事の進め方の問題（検討不足、調整不足、確認不足等）が原因となった予実差は減少傾向にある。一方で、以下の課題については継続的な取組が必要である。

福島第一廃炉推進カンパニーでは毎年数百件の工事契約を締結している。計画策定の段階では工事契約の完了時期（以下「検収時期」という。）を年度末（3 月）にならないように設定しているものの、その後のエンジニアリングが計画どおりに進まず、契約段階では検収時期を 3

月に設定せざるを得なくなった結果、実際の工事で生じた工程変動を年度内で吸収するバッファがなくなり、検収を翌年度に持ち越す事案が少なからず発生している。

今後は計画の段階で適切な工程を検討し、検収時期を年度末に対し一定の余裕を確保した設定にするとともに、年間を通じてできるだけ平準化した検収計画を立てることでリソースの分散化を図っていくことが肝要と考える。

⑥ プロジェクトを横断した課題への対応

東京電力では常にリスク、課題等を抽出、共有しており、それぞれ各プロジェクトが対応しているが、個々のプログラム/プロジェクトに収まらない課題に対しては部門横断的な体制を構築して対応している。以下に一例を示す。

- ・福島第一原子力発電所の廃炉作業では α 核種の環境への拡散防止や作業員の内部被ばく防止が今後の課題として抽出され、これに対応するプログラム/プロジェクト横断型のワーキングチームを立ち上げて課題の検討を深めている。
- ・1,2号機原子炉建屋西側周辺では複数プロジェクトの工事が輻輳しており、これに対応するプログラム/プロジェクト横断型のワーキングチームを立ち上げて課題の検討を深めている。
- ・2021年10月に耐震設計・評価を統括する耐震担当を設置し、耐震設計のバラツキや手戻りによる遅延を発生させないように、組織横断的に調整を実施している。

6.1.2 今後強化すべき主な課題と戦略

6.1.1 に示したとおり、廃炉事業の安全・確実な遂行に向けて様々な方策を実施しているところであり、それぞれ継続的に運用の高度化や改善を図ることが必要であるが、今後強化していくべき重要な項目について以下に示す。

6.1.2.1 安全とオペレータ視点、「安全ファースト」の浸透

柏崎刈羽原子力発電所（以下「柏崎刈羽」という。）における核物質防護上の不適合を受け、2021年4月、東京電力は原子力規制委員会から特定核燃料物質の移動を禁止する命令を受けた。これにより東京電力の原子力規制検査の対応区分は第4区分（「各監視領域における活動目的は満足しているが、事業者が行う安全活動に長期間にわたる又は重大な劣化がある状態」となり、今後は原子力規制委員会の監視下で多くの検査が実施されることになる。

福島第一原子力発電所は事業形態として柏崎刈羽の発電所運営とは異なる上に、管理体制においてもプロジェクト管理を本格的に運用しており、その点でも柏崎刈羽と異なるが、他方で2021年2月、福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋に試験的に設置した地震計の故障情報が組織内で共有されず、かつ長期間修理・復旧がなされなかったという不適合が起きている。作業上の安全や被ばく等の問題がなかったにしろ、一連の事象について社外からも厳しい指摘を受けており、福島第一原子力発電所では事象の背後にある組織的な課題は何なのかを把握すべく、経営層自らが所員全員との対話活動を行っているところである。

安全を組織文化として定着させるためには、心構えを問うだけでは不十分であり、社員一人一人が安全を体系的に学ぶ教材と機会が必要である。

また、東京電力が信頼を取り戻すべく、特に環境への影響、人身災害、放射線拡散等に至るような不適合を未然に防止する対策を継続的に推進するとともに、地域目線を反映した情報発信や設備形成を行うことが重要である。事故後 11 年が経過し設備の老朽化も進んでいることから経年劣化対策として、長期保全計画のプロセスの改善、ヒューマンエラー（HE）防止、労働災害防止活動を各部署の体制や業務内容に応じた現場目線での要因分析、対策を試みている。

労働災害、ヒューマンエラー、設備不具合が頻発すると地域・社会からの信頼を失う。特に労働災害については、福島第一原子力発電所で働く多くの作業員は地元の方であることから、労働災害が続くと、構内で働く労働者の方だけではなくそのご家族にも不安を与えてしまうことになる。「安全な職場」を確保することは東京電力としての責務である。東京電力としてのオペレータ視点に一層磨きをかけ、労働災害ゼロ、HE ゼロ、設備不具合ゼロの「3ゼロ」職場を目指す。

最終的に安全を実現するのは、「福島第一原子力発電所の現場」全般（運転、保全、放射線管理、計装、分析等）を扱う人、組織（オペレータ）である。福島第一原子力発電所では「ALARA 会議¹⁰⁶」や「安全事前評価会議¹⁰⁷」等の場において被ばく低減及び人身安全対策の有効性・十分性を確認しているが、こういった場に現場を熟知しているオペレータ（東京電力社員だけではなく工事を請け負う協力企業の社員も含む）が参加し、様々なオペレータが持つ「現場目線」（経験値）から安全を総合的にチェックできるような業務プロセスとなっていることが重要である。すなわち「作業上の安全確保のための手順やルールや注意点等について、現場からの経験知や関係情報等を体系化・マニュアル化し、現場作業を管理運営の責任を持つ担当者や作業者がそれらを熟知して作業に当たる」という業務プロセスをゲートプロセスの中に組み込む等、仕組みとして定着させることが重要である。

6.1.2.2 オーナーズ・エンジニアリング能力

原子力発電所の建設のように技術が成熟し要求性能が明確かつ規模が大きなプロジェクトにおいては、通常、ウォーターフォール型のエンジニアリング¹⁰⁸が行われる。こういったウォーターフォール型のエンジニアリングでは、プロジェクトのできるだけ上流側において、発注者（東京電力）の要求事項をサプライチェーンとなる受注候補者（メーカ、ゼネコン等）に明確に伝えることが、プロジェクトを円滑に進める上で有効である。

しかしながら、燃料デブリ取り出しは、未経験の取組であるため、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、「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」に加えて、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

¹⁰⁶ 作業員の被ばく低減を目的とし、放射線源の除去、遮へいの設置等の工学的対策（物理的対策）の有効性・十分性を審議する会議体。

¹⁰⁷ 労働災害発生防止を目的とし、リスクマネジメント手法（リスク特定→リスク分析→リスク評価）を用い人身安全対策の有効性・十分性を審議する会議体。

¹⁰⁸ 概念検討→基本設計→詳細設計という具合に設計の精度を段階的に高めていく手法。上流から下流に向かって一方向に進むため予算・工程・リソース（人員）をコントロールし易いというメリットはあるが、次のフェーズに進んでしまうと後戻りができないというデメリットもある（水が上から下に落ちる滝に例えてウォーターフォール型と呼ばれている）。

エンジニアリングをある程度イタレーション型¹⁰⁹に行っていく必要がある。その上では、同様にイタレーション型のエンジニアリングを実施している他産業の取組事例を参考にしつつ進めることが有効である。また、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なものとはならないため¹¹⁰、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、事業執行者である東京電力がオーナー¹¹¹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。

ここでオーナーズ・エンジニアリング能力とは、事業者である“東京電力自身“が「サイトオーナー」及び「ライセンスホルダー」として求められる能力で、具体的にはプロジェクトマネジメント力、及び安全とオペレータ視点を基盤とする技術力の双方の要素から成る能力のことである。

特に適用技術、環境、対象物等全てが未知数である燃料デブリ取り出し作業は、原子力発電所の設計・建設のように完成されたプロダクトを性能保証した上で納める仕事ではない。したがって、最後は事業執行者である東京電力が事業リスクや技術的なリスクを負う形でないと、要求性能の限界がなくなるおそれがある。事業リスクや技術リスクを事業執行者が負うということは、プロジェクトマネジメント力に加え、事業執行者自らが機能設定や工学的設計の信頼性についても見極めるという技術力が求められるということでもある。また、ここで重要なことは「安全とオペレータ視点」をエンジニアリングのできるだけ上流から組み込むことにある（図46）。

オーナーズ・エンジニアリング能力向上に向けた取組の例としては、燃料デブリ取り出し工法選定の評価において、品質（燃料デブリ取り出し状態、安全性等）、プロジェクト（コスト、時間等）、技術成立性の視点で評価を行うことや、あるいは従来であれば一社に一括発注していたような案件を複数社に分割発注し、東京電力が工事全体を統括管理するといった取組が挙げられる。また、こうした取組や後述する手の内化の推進など、諸々の現場経験を蓄積・フィードバックすることもオーナーズ・エンジニアリング能力向上を図る上で重要である。

¹⁰⁹ 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

¹¹⁰ 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（フルターンキー契約）で事業執行者に納品していた。

¹¹¹ 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。（廃炉の事業執行者）

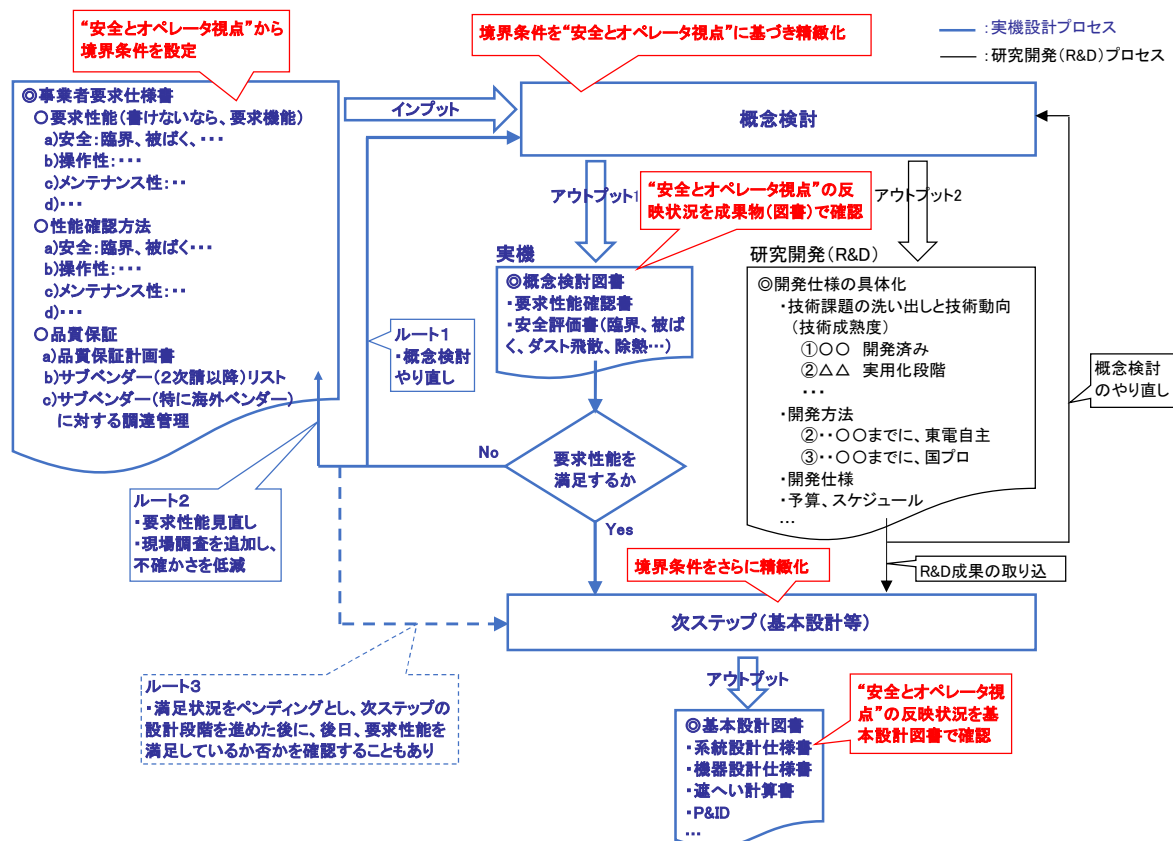


図 46 燃料デブリ取り出しの設計フロー (イメージ)

6.1.2.2.1 プロジェクトマネジメント力

福島第一原子力発電所の廃炉は、変化する現場状況にあって長年に渡って確実に廃止措置作業を実施しなくてはならず、特に燃料デブリ取り出しのようにリスクの大きいプロジェクト作業に対しては、従来型の契約では対処が困難となるため、発注者、受注者双方が協調し、契約上のリスクを分担し、合意した達成目標を目指すような新たな概念による契約方式を準備する必要がある。また、調達の在り方も、発注者から受注者といった一方通行のモノ買い (Buying) ではなく、開発から製造そして運用保守までも考慮して「モノを作り上げてゆく」 (Making) ことで“最終成果を取得する (Acquisition)” という発想が双方にとって必要となる (表 6)。

このような Making 型プロジェクトに対応するためには、仕様を具体化する技術力を向上させることに加えて、“成果の取得”を主眼としたプロジェクトマネジメント力が必要である。

東京電力と NDF は、従来の Buying 型プロジェクトマネジメントだけでは燃料デブリ取り出しのような不確かさの大きなプロジェクトを的確にコントロールしていくことは困難であるとの共通認識の下、現在のプロジェクトマネジメントを更に発展させるべく、先行事例の一つである米

国連邦政府が採用している取得マネジメント^{112,113}をベンチマークとし、2017 年度から外部専門家の協力を得てその手法を積極的に学習し、現在、福島第一原子力発電所の廃炉事業に合う形にカスタマイズしているところである。

今後、パイロットプロジェクトで試行し、その有効性と適用範囲を見極めた上で、順次他のプロジェクトに展開していく計画である（表 7）。

表 6 「Making」と「Buying」の違い

	Making	Buying
目的	プロジェクトの最終成果の獲得 (Acquisition)	仕様に適合した製品（モノ）を購入
受注者の呼び方、役割	Contractor（請負契約者）、プロジェクトの最終成果を獲得するための Partner	Vender（ベンダー）、仕様に適合した機器の供給
受注者の決め方	提案内容と実現性で選定	価格で選定
契約方法	リスク配分に沿った契約	確定価格契約
コスト見積り方法	データに基づいたコスト推計（アナロジー：類推、積算、パラメトリック：感度解析など）	見積書/価格表など
マネジメントの考え方	“Do the Right Things”（正しい事をする） ※ 正しい目的、正しい目標、正しい手段が何かを常に考えながら事に当たる	“Do Things Right”（事を正しく行う） ※ ルールどおりに、手順どおりに事に当たる

¹¹² 取得マネジメントとは、1990 年代に米国連邦政府の予算編成プロセスにおいて採用され（法制化）継続的に改善されてきたプロジェクトマネジメント手法。信頼あるデータに基づいた科学的・体系的なマネジメント手法を用い成果（製品、構造物、成果品）の取得（Acquisition）を目的としている。WBS（Work Breakdown Structure）の Work を作業ではなく獲得する成果（製品、構造物、成果品）要素に分解する点が、従来と大きく異なる。また、この分解した要素ごとのコストを、計画工程に基づいて積み上げ、プロジェクト進捗状況を可視化することで、計画と実際のギャップを適切に把握しリスクを早期に把握、対策することが可能となる。

¹¹³ 取得マネジメントでは、「取得：Acquisition」と「調達：Procurement」を次のように定義し厳密に使い分けている。「取得」とはある目的・目標を実現するために獲得しようとする特定の装備品などの成果（物）を開発から製造、そして運用保守までライフサイクルを通じてその価値・能力の獲得を“取得”と呼ぶ。一方、この取得の流れの中で、開発や製造といった各段階において外部組織に契約ベースで委託することがあるが、この契約単位で特定の要素を獲得することを「調達」と呼ぶ。すなわち、「取得」は複数の「調達（契約ベースでの成果物）」により成り立っている。

表7 今後のプロジェクトマネジメント (To Be)

現在のプロジェクトマネジメント		→	今後のプロジェクトマネジメント (To Be)
目的と“成功”の定義	☐ 目的は定めても “成功” (達成評価基準) を事前に明確にしていない		☐ プロジェクト立ち上げ時に、目的だけでなく 達成評価基準を定義
特徴 (WBS※1の構成)	☐ “Work”を実施する 作業要素 に分解		☐ “Work”を獲得する 成果 (製品、構造物、成果品) 要素 に分解
コントロールパラメータ	コスト	☐ 予算段階：積算ができない段階では類似工事からの類推、 ベンダーから見積り ☐ 実行段階：内訳レベルでの 実績コストは収集していない	☐ 予算段階：積算ができない段階では 信頼できるデータに基づいたコスト推計 ☐ 実行段階：WBS単位で 実績コストを収集
	スケジュール	☐ 計画段階： Best Effort 工程 ☐ 実行段階： マイルストーンに対する進捗度合いを主観的に評価	☐ 計画段階： リスクを織り込んだ工程 ☐ 実行段階： 客観的科学的手法 を用い成果の取得状況を 定量的に 把握 (EVM※2等)
	テクニカルパフォーマンス	☐ 達成されることが前提 (性能保証は受注者役務として保証されているため、コントロールの対象外)	☐ テクニカルパフォーマンスもWBSレベルでコントロールできるように テクニカルパフォーマンスのベースラインを設定し コントロール
契約	☐ 固定 価格契約		☐ リスク (種類、大きさ等) に応じた 契約

※1：Work Breakdown Structure
 ※2：Earned Value Management

6.1.2.2.2 安全とオペレータ視点を基盤とする技術力

かつて原子力発電所の建設では、建設経験が豊富な企業に一括発注することでオンタイム、オンバジェット、オンパフォーマンスを達成してきた。しかし、福島第一原子力発電所のようなメルトダウンしたプラントの廃炉を経験した企業はない。特に燃料デブリ取り出しは極めて技術的難易度が高く1社が持つ技術だけやりとげることは困難である。各社が持つオンリーワン/ナンバーワン技術を結集しひとつのシステムとして作り上げる必要があり、そのためには個々の技術の良し悪しを判断する工学的判断能力（“眼力”）を備えた上でシステムとして統合し所定の性能を発揮させるという、従来以上の技術力が東京電力に求められる。現在取り組んでいる手の内化により、個別技術の工学的判断能力に磨きをかけ、システムとして統合する能力を高め、技術リスクの低減を目指す。

「手の内化」とは、計画・設計や保全・運転において東京電力自らが行える力を付けることであり、これによりムリ・ムダの低減、生産性向上等を深化させ、設計品質、調達品質等、並びに東京電力社員の業務品質の向上を図ることを目指している。これらの品質の向上は、結果的に安全性の向上にも寄与する。手の内化は広い範囲で様々な課題に対して有効であるが、より多くの効果を得るために今後予想される課題を意識しながら進めることが望ましい。以下に今後の課題例を記載する。

・ 運転・保全ノウハウの内部集積化による運転品質・設備品質の向上

運転業務、設備の保全業務については今後新たな設備の設置による運転業務の拡大、設備の経年劣化による保全費用の増加が予想される。保全費用を抑制しつつも信頼性を低下させないためには、今以上に“賢い”保全（Smart Maintenance）のやり方を考案する必要がある。例え

ば、長期間使用する新設設備については、運転状態をオンラインモニタリングするためのセンサ類（振動、熱、音響等）を予め組み込んでおいて、蓄積された大量の保全データをコンピュータ処理して予知保全（Prediction Maintenance）につなげることや、既存設備で得られた保全データについても活用するなど、保全ナレッジマネジメントをシステム化・高度化することで保全ノウハウの内部集積が容易となる。なお、保全対象機器をデータベース化したシステムの運用を開始するが、今後保全に関する情報を拡張し、運用の改善を図りながら定着化することが重要である。

また、燃料デブリ取り出しのように高濃度の放射性物質（かつ核燃料物質）を長期に取り扱う業務については、ライセンスホルダーである東京電力社員自らがを行い、事業者自ら放射線安全を確保しつつ、運転ノウハウの内部集積化に努めていくべきである。

・工学的判断力の強化

燃料デブリ取り出しのように大きな不確かさが内在する作業、これまで未経験の作業に対しては、東京電力自らが工学的判断を行う必要があり、そのためには自らが設計、施工、保全、運転の内容を確実に把握しなければならない。したがって、設計を例に挙げれば、今の段階から自ら系統設計を行い、機器の要求仕様を決定することに取り組みながら力量向上を図るべきである。

・現場力の強化

福島第一原子力発電所は事故前と現場の状況が大きく変化し、「2.3.1 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」で述べたように、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中で多量の放射性物質が非定型・非密封状態で存在している状態にあるうえ、天候・地震等の自然事象や機器・建物等の経年劣化により常に状態が変化し得る環境にあり、放射性物質や閉じ込め障壁の状況等に不確かさを含んでいる。また、高線量及び機器・建物等の損傷により人・設備のアクセス性に制約があり、現場情報を完全に把握することが困難な状況にある。

現在は、燃料デブリ、汚染水等の放射性物質を安定な状態にコントロールできているが、福島第一原子力発電所の廃炉は過去の建設、運転、保守等において経験したことがない作業が連続する現場であるため、東京電力は、予測困難な事態が発生し得るということを常に念頭に置きつつ現場に目を向け、現場の変化を一早く察知し、現場目線で物事を考える力（“現場力”）が特に重要となる。

具体的には、設計段階においては、取得する設備の機能・性能を熟知した上で、現場の使用条件（作動環境、干渉物の有無等）において所定の機能がライフサイクル（据付～試験～運転～保守）にわたって発揮できるよう要求仕様を作り込む力、現場作業段階においては、最新の現場状況を把握し、作業に潜むリスク（人身災害、手順ミス等）を契約者とともに抽出し、適切なリスク措置を施し、現場における安全と品質を確保する力、加えて、非常事態が起こった際に、仮に協力企業の支援がなくても、東京電力社員自らがトラブルシューティングできる力を高めていく必要がある。

6.1.2.3 人材の確保・育成

6.1.2.3.1 廃炉事業を円滑に遂行していくための人材の確保・育成

福島第一原子力発電所の廃炉事業は、経験のない業務であることに加え、燃料デブリ取り出し計画の進捗に伴う業務の拡大等を見据え、今後も計画的に人材の確保・育成を進めていく必要がある。具体的には、廃炉中長期実行プラン並びにその後の事業の展開も見据えた中長期の業務見通しに基づき、必要な能力・資質と要員数を含む人材配置計画を立案すること、それを達成するための方策をまとめた組織としての育成計画を立案すること、併せて要員のモチベーション向上策を展開することが望まれる。このうち特に人材育成は時間を要するため、非効率な業務を削減する、限られた人材を有効活用するなどの取組も併せて必要である。こうした認識の下、東京電力は以下の取組を進めることが望まれる。

(1) ミス・エラー発生防止と社会との双方向コミュニケーションの改善

柏崎刈羽での核物質防護上の不適合、あるいは福島第一原子力発電所での試験的に設置した地震計の故障情報が共有されていなかった事象等、社会目線で見ても信頼を失うような現場におけるミスやエラー、並びにその報告が遅かったり、分かりやすい報告をしていなかったりなどの事案をなくすため、東京電力ではミス・エラー発生防止と社会との双方向コミュニケーションの改善する体制を整備し取組を進めている。引き続き取組を進めることに加え、協力企業も含めた風通しのよい職場作りを更に進める必要がある。風通しのよい職場づくりに向けては、例えば、「心理的安全性¹¹⁴」の確保に向けて、経営層からの継続的な情報発信と、同時に時間を要するがグループマネージャー等ミドルマネジメント層をしっかりと教育・訓練することが有効である。

(2) 業務の効率化やリソース有効活用への取組

プロジェクト化を進めつつある現在は、業務の進め方の改善とリソースの配分の最適化や強化を、継続的に探究していく良い機会である。従前の業務の進め方に捉われることなく、常に業務を見つめ直し、業務の効率化とリソースの有効活用を進めていくことが重要である。既に、カイゼン活動などを通じた取組が進められているが、今後もさらに、これらの取組を推し進めることが望まれる。また、前述のように東京電力では成果の取得を主眼としたプロジェクトマネジメントを目指しており、これを通じてコストやスケジュール等の業務品質がより向上することになる。さらに、この取組により、業務の時間計画性を向上させるとともにメンバーの成果確認も可能となり、効率的な業務運営に資することが期待される。

(3) 人材の確保と育成

廃炉事業では、新たな設備・施設の設置が継続し、かつ設置された設備等を安全・確実に運用するため業務量が増加することは否めない。限られた人材で増加する業務に対応するためには、中長期を見据えた人材配置計画・育成計画を整備し、それに向けて要員数の拡充・再配置を図るとともに、人材育成を時間を掛けてでも計画的かつ着実に進めること、それを柔軟かつ円滑に遂行する体制を整備することが必要である。今後、燃料デブリ取り出しに向けた工法選

¹¹⁴ 心理的安全性：他のメンバーが自身の発言を拒絶したり罰したりしないと確信できる状態。この状態にあれば、安心して発言することが可能となる。

定や新たな設備・施設の設計など、これまでよりも技術的に難易度の高い目標に向け一段高いレベルでの工学技術、専門技術が求められることから、中長期人材配置計画では、将来必要となる職種（プロジェクト管理、設計、運転、保全、化学、分析、安全評価、放射線管理等）ごとの加え、より高度な専門知識（アクチニド化学、分析評価、耐震、環境影響等々）を有する人材も含めて、技術分野ごとの必要人員数及び必要となる時期を想定することが望まれる。

人材の確保に関しては、上述の業務効率化により人材余力を絞り出すことに加え、長期にわたって地元とともに進める廃炉事業を見据え、地元の高校や高等専門学校、大学からの採用、あるいは各地に進学した地元出身者の採用など、地元を意識した仕組みを導入することも有効である。また、作業進捗に伴い変化する必要な業務量と求められる技術に対し、人材配置や業務所掌見直しを柔軟かつ円滑に進めることで、より効率的な人材活用が可能となる。

さらに、人材育成に関し、分析要員の育成、確保は急務であり、東京電力は JAEA 等、分析の専門分野を有する組織での OJT¹¹⁵による育成を開始している。現在は、分析作業を管理する分析管理者の育成を優先しているが、今後は、状況に応じた適用分析技術を判断でき、分析計画を策定できる分析技術者（マネジメント層）の育成にも力を注ぐ必要がある。加えて、各廃炉作業の工程を理解し、各廃炉作業に必要な分析は何か、分析結果をどう活用するかを見越して分析範囲や項目を立案できる分析評価者の育成も望まれる。

《人材育成案の例：1F の特殊環境下での廃炉推進に向けた技術リーダーの育成》

「2.3.1 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」で述べた福島第一原子力発電所での特殊条件下において、廃炉事業を安全、着実に進める上で、プログラムマネージャー級の技術リーダー層が備えるべき能力は多岐にわたるが、核燃料物質の取扱いやそれに対する要求事項を総合的に理解し進展させること等についての基礎的知識と技術的経験が必要である。こういった知識、経験を積んだリーダーを育成する上で、如何にその能力を身に付けさせるか（育成）、各人が能力を有していることを如何に確認するか（確認）、能力取得に向け如何に各人の意識を向上させるか（モチベーション）が課題である。この課題解決のためには、前述のように、人材育成計画を整備し、それを計画的かつ着実に進めることが必要であり、その実施体制の例を以下に述べる。

a) 育成計画の作成

技術リーダーに求める能力項目ごとに、①目標とする、必要な知識、求める技術レベル等、②手段となる、取得に必要な OJT 内容、研修項目等、③取得できたか否かを判断する能力基準を定めた組織としての人材育成計画を整備する。それをもとに、上司であるグループマネージャーは、育成対象者に対し、キャリアパスとしての将来像を描いたうえで、個人の育成計画を作成する。

b) 育成と能力確認

¹¹⁵ On the Job Training（オンザジョブトレーニング）の略で、実際の仕事を通じて指導し、知識、技術などを身に付けさせる教育方法

人材育成の基本は OJT にあり、対象者の能力を超える、あるいは能力範囲外の業務を付与し、実行させることにより、対象者は、新しい能力を身に付けられる。必要により選任した指導員の指導に基づき、対象者は、与えられた業務の手順、実施スケジュールを作成し、それを遂行する。スケジュールには、必要に応じて基礎的な技術の習得を含め、これは既実施の「廃炉コア技術講座」等を活用する。取得できたか否かを判断する能力基準の設定、並びにその判断は難しく、当該能力について最も習熟した者を 1 名定め、その判断に委ねることが有効である。求める能力レベルと公的資格（例えば、核燃料取扱主任者）が合致していれば、資格取得を能力確認手段とすることも考えられる。

c) モチベーション向上

廃炉自体が多岐にわたる人類の英知を集めて立ち向かうナショナルチャレンジであり、その為に獲得すべき能力、発揮すべき個性は多様であることから、様々な方向に社員を導くためのモチベーション付与施策は、それ自体が多様なものとなる。その全てに共通して重要なことは、個々の社員の努力の先にある未来を体現する、優れた社員の活躍が見える化されることにある。東京電力は組織として、そのようなロールモデルたり得る社員を育て、重用する文化をより強力に育むことが重要である。

6.1.2.3.2 将来の福島第一原子力発電所の廃炉を担う次世代の育成

長期にわたる福島第一原子力発電所の廃炉を継続的に実施し、それに必要な研究開発活動を行うためには、将来の研究者・技術者の育成・確保及び確実な技術の継承が不可欠であり、産学官全体として、高等・中等教育段階の各階層に応じた取組を着実に進めることが重要である。

第一義的には、東京電力が福島第一原子力発電所の廃炉を計画的かつ持続可能な事業として確立し、その下で所員や協力企業を含めた人材育成及び人材獲得の活動が自発・継続的に進むことが前提である。福島第一原子力発電所の廃炉に携わる人材は、原子力を専門とする人材に加え、原子力分野以外の科学や技術を備えた人材も必要とされ、様々な技術的バックグラウンドを持った人材の確保・育成が求められている。

そのため、東京電力及び協力企業の社内内部における直接の人材育成や人材登用を強力に進めることの重要性に加え、大学・大学院・高等専門学校・高校などから卒業し、科学や技術に関する専門性を備えた優秀な人材がこれら企業に継続的に供給されることが最も重要である。これを安定的に実現するためには、高等・中等教育機関において、専門的な知識に加え周辺知識を学習・獲得する場の形成、関連するシステム及び制度が教員を含め全体として機能するように維持されることが必要である。

大学・大学院、専門学校などの高等教育段階の学生に対しては、原子力産業に関する理解促進活動を産業界と高等教育機関が連携して継続的に実施していくことが重要である。近年、原子力に係る学部・学科の改組等により、高等教育機関における原子力分野の人材育成の機能が脆弱化しつつあるとの指摘もある中、我が国全体として原子力分野の人材育成機能を維持・充実していくことに注視しなければならない。特に、福島第一原子力発電所の廃炉が世界にも例のない極めて高度な技術的挑戦であるという魅力を発信し、若手研究者・技術者が廃炉を含む原子力分野で活躍するための多様なキャリアパスを構築し、その職業観を具体的に示し、実感させることが必

要である。次世代人材の育成のためには、これら高等教育機関から若手研究者・技術者が安定して輩出されることが何よりも根本的に重要である。

特に、文部科学省及び JAEA/CLADS の英知事業により、学生及び若手研究者に廃炉を重要な研究分野として捉えさせ、廃炉研究に携わる仕組みを導入した。人材育成の観点からは、若手の研究者や教員が廃炉に関わる講義カリキュラムを作成・実施する支援等を行ってきた。英知事業発足から 5 年以上を経て研究・人材育成の両面から大きな成果を創出している。英知事業の一環として実施している学生を対象とした研究発表の場である「次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス (NDEC)」や、高専生を対象とした廃炉創造ロボコンでは、学生による研究成果が発表され、福島第一原子力発電所の廃炉に携わる研究者・技術者等との意見交換や、優秀者の表彰が継続的に行われている。また、英知事業には若手研究者の措置について、これまで実施している 39 歳以下の若手研究者を代表者とするプログラムに加え、2021 年度からは若手研究者が研究開発プロジェクト内の相応の研究責任を担うことを応募要件とするプログラムも新たに開始されている。併せて 2021 年 4 月より英知事業に従事する若手研究者については、自発的な研究活動等を促進するため、研究代表者の了解の下、事業に従事するエフォートの 20% を上限とする研究活動を認めるなどの措置が講じられている（専従義務緩和）。

これら英知事業の仕組み・実施内容は、高等教育機関に属する研究者及び学生に対して一定の成果を上げており、卒業生が廃炉関連事業に従事するなどの人材の活性化も出てきている。今後は、この事業の仕組みにおいて、東京電力の廃炉現場と高等教育機関の活動の視点が一層一致することを目指し、事業を実施していくことが重要である。

高等学校、中学校の中等教育段階の生徒に対しては、廃炉を含む原子力分野に携わる魅力を紹介し、廃炉に特化した技術的な関心を寄せる取組や福島第一原子力発電所の廃炉や復興、広くは理系の進路等について理解を広げる取組が大切である。中等教育段階は、社会に参画・貢献する準備段階として、自らの個性・適性を伸ばしつつ、社会で活躍する研究者・技術者、理科教員などから影響を受け、主体的な選択と進路の決定を行える段階である。この観点から、NDF においては、福島県をはじめとした女子中高生を対象に女性研究者・技術者との交流を通じて理学・工学への関心、特に廃炉等への興味・関心を高める取組として、OECD/NEA と連携した「国際メンタリングワークショップ Joshikai in Fukushima」を開催し、女性の理解促進及び開発検討への参画意欲の向上を図っている。2020 年には、新型コロナウイルス感染症が世界的に流行している状況においても、オンラインシステムを活用することで、「国際メンタリングワークショップ Virtual Joshikai in Fukushima 2020」を開催しており、2021 年も引き続きオンラインシステムを活用して開催したところである。また、高校生等を対象に、福島復興について考えることを目的とした「学生セッション」を福島第一廃炉国際フォーラム（以下「国際フォーラム」という。）と併せて開催しており、2022 年は 2021 年に引き続き、双葉地域の統計データから導かれる将来予測と廃炉の状況や計画、浜通り全体の人的資源や自然資源等の情報を基に、2050 年の双葉地域の未来像を検討するワークショップを実施している。この取組を通して、福島第一原子力発電所の廃炉と復興の両立に向けた取組を考える機会を高校生等に提供することで、廃炉が地域の復興において重要な課題であることを認識してもらい、廃炉と復興に向けた取組への興味・関心及び貢献意欲の醸成を図っており、一定の成果を上げている。

このような福島第一原子力発電所の廃炉に係る技術人材の育成については、基礎研究や関連研究等の幅広い分野に拡大していくことも必要であり、日本の基礎技術基盤全体を底上げするという方向性の中で、原子力レガシーへの対応や原子力安全への取組が広く定着していくことが期待される。

今後も次世代を担う人材確保・育成のための取組を関係機関がそれぞれの役割・階層に応じ、引き続き推進・強化していくことが求められる。

6.1.2.3.3 廃炉及び廃炉に関わる放射線安全等に関する基礎的知識の普及と国民理解の促進

多くの国民や地元住民が、福島第一原子力発電所の事故・廃炉、災害対応、放射線安全、食品安全等について基礎的な知識を身に付けることは、廃炉及びそれに関係する放射線安全等に関して正確な情報に基づく議論が行われ、国民理解が促進されるための基礎であることから、今後の日本全体のレジリエンス（強靱性）の観点からも重要である。加えて、直接的には次世代の原子力分野を担う人材育成を目指すものではないが、原子力分野に限らず科学全般を志す人材の裾野を間接的に広げる側面もある。特に、原子力分野に関しては、原子力や廃炉に関する知識・体験を得るとともに、地域・社会における関係において、様々な機会を通じた子供の発達段階に応じた学びが必要である。その際には、教員や親等の周囲の大人の知識・体験を通じて子供が興味・関心を持つことが重要であることから、初等教育機関に従事する者も含めた幅広い者に対して原子力や廃炉に関する科学的根拠に基づく知識を一層普及していくことが重要である。これに関連して、政府では、「ALPS 処理水の処分にに関する基本方針の着実な実行に向けた行動計画」（2021年12月28日策定、2022年8月30日改訂）を踏まえ、出前授業の継続・拡大、放射線副読本の活用促進等が進められている。また、NDFにおいても、上述のような地元の学生を対象にした廃炉と復興について考えるワークショップを開催している。

6.2 国際連携の強化

6.2.1 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としては、英国のウィンズケール原子炉1号炉（Windscale Pile-1）、米国のスリーマイルアイランド原子力発電所2号炉（TMI-2）、ウクライナのチョルノービリ原子力発電所4号機（ChNPP-4）があり、これらの施設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や世界最高水準の技術や人材を活用すること、すなわち世界の英知の結集と活用が重要である。

加えて、福島第一原子力発電所の廃炉は、原子力分野だけに限らない様々な分野の知見を組み合わせながら未踏の工学的課題を解決していくプロセスであり、福島第一原子力発電所の廃炉がイノベーション創出の有力な場になり得るものと解釈できる。世界から多様な知や経験を福島に集約することは、第一義的には福島第一原子力発電所の廃炉そのものを着実に進めるための重要な取組であるが、廃炉プロセスを通じて生み出されるイノベーションを地元産業の復興につなげ、長期にわたる廃炉を進めるに当たって不可欠な地域との共生関係を構築していくという観点からも重要な取組である。

また、世界の英知を結集するためには、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・発展させていくことが重要である。そのため、廃炉の進捗等の正確な情報を国際社会に発信し、国際社会からの信頼を得るとともに、福島第一原子力発電所の事故及び廃炉に向けた取組の中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するなど、国際社会に開かれた互恵的な形で廃炉を進めることが重要となる。

具体的には、各国の事情に即した二国間協力を進めるとともに、IAEA や OECD/NEA 等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担っている。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って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、我が国では、政府間の枠組みとして、各国との情報共有を行う年次対話の開催や会議体の設置を行ってきた。また、国内関係機関それぞれが、海外関係機関との協力協定や取り決めを結び、また国際会議の場で情報発信を行っている。NDF においては、IAEA 主催の国際会議や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み、国際社会からの信頼を確保すること及び互恵的な廃炉を進めることで、国際社会の継続的な理解・関心や協力関係の維持・発展を図っている（添付資料 14）。

また、上記の国際連携を行っていく上で、新型コロナウイルス感染症の世界的流行の影響で、IAEA、OECD/NEA 等の多くの会議やイベントがオンラインで開催されてきた。NDF においても、例年、招聘した海外有識者と実施していた意見交換や諸外国の廃止措置関係機関との年次会合をオンライン開催するなど、オンラインシステム等を積極的に活用して、継続的な情報交換の機会を確保し、世界の英知の結集、国際社会の継続的な理解・関心の維持・強化、及び国際社会との協力関係の維持・発展に取り組んできた。一方で、IAEA、OECD/NEA をはじめとした海外の関係機関においては、以前のように対面での会議等が開催され、現地で参加・登壇したりする機会も増えてきているところである。NDFにおいても、新型コロナウイルス感染者数は増減を繰り返しつつある中で、会議等開催に当たっては、こうした海外機関の動き及び国内外における新型コロナウイルス感染症の流行状況を考慮しつつ、対面開催、オンライン開催、対面とオンラインを組み合わせた開催を検討し、実施しているところである（図 47）。

このように、今後も、これまでの経験を活かして、諸外国とのコミュニケーションの機会の更なる拡大等を図っていくことが大切である。



図 47 対面及びオンラインを活用した海外専門家との意見交換の様子
(2022 年 6 月開催)

6.2.2 主な課題と戦略

6.2.2.1 世界の英知の結集と還元

福島第一原子力発電所の廃炉は長期にわたると見込まれ、難度が高い工学的課題を有するために、この解決に向けて、世界最高水準の技術や人材の活用に加え、先行事例であるレガシーサイトの廃止措置で得られた経験や知見を取り入れつつ進めることが重要である。

レガシーサイトの廃止措置は、先行モデルとして技術面や運営面等において参考になる点が多い。技術面では、レガシーサイトを有する各国は原子炉等の運転・保守とは異なる専門的知識や考え方、新技術等の必要性といった課題に対応するため、公的な廃止措置関係機関が中心となってこれを推進している。また、運営面では、制度・政策、戦略策定と事業計画・運営、安全確保、地域コミュニケーション等にも、公的な廃止措置関係機関が中心となって取り組んでいる。そのため、我が国では、政府間の枠組みの下、国内及び海外の組織間での協力協定や取り決めを結び、定期的な情報交換を引き続き実施し、技術面・運営面での世界の英知を集め、学ぶことが重要である。

NDF としては、英国 NDA、フランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）、米国エネルギー省（DOE）等の各国で中心的な役割を担う公的な廃止措置関係機関との長期的なパートナーシップを引き続き維持し、情報交換を通じて世界のレガシーサイトでの廃止措置で得られた教訓等の英知の結集に取り組み、我が国の廃止措置に活かしていく必要がある。

また、我が国としても、廃炉を進めるに当たって国際社会の支援を受けており、IAEA による DAROD プロジェクトや OECD/NEA による共同プロジェクト等における、国際社会への廃炉に関する課題等の情報発信や国際共同活動への参画等を通じ、海外の政府機関や有識者から様々な支援を受けてきたところである。

事故から約 11 年が経ち、国際社会に対してこれまで蓄積した知見や教訓の還元にも取り組み、互恵的関係をより深めることが重要となってきた。これまでも、上述の国際共同活動や国際会議等の場で福島第一原子力発電所の状況や得られた知見の発信等を進めてきており、引き続き、これらの活動を推進していく必要がある。加えて、我が国として、原子力先進国以外の国々に対しても、国際機関とも連携し、福島第一原子力発電所の事故及び廃炉に向けた取組、実績等について、積極的に情報発信を行うことが望まれる。

なお、新型コロナウイルス感染症の世界的流行により諸外国との行き来が困難となったことは、このような互惠的関係を継続・強化する上で障害となっているが、新型コロナウイルス感染症の世界的流行に限らず、未曾有の事態により諸外国の関係機関や有識者、国際機関との関係が希薄になることがないよう、オンラインシステム等を活用することで、コミュニケーションの機会を確保し、関係の維持・発展に取り組むことが重要である。

NDFでは、国際フォーラムを通して、廃炉の現状や課題について、世界へ向けて情報発信するとともに、世界各国の廃止措置の教訓や技術といった英知を集めてきた。引き続き、諸外国からの直接の参加が困難な状況下でも、オンラインシステムを活用することで国際フォーラムを世界の英知の結集と還元の一つの有効な機会とすることが重要である。一方で、新型コロナウイルス感染症流行の状況や感染拡大防止策の在り方の変化の可能性を踏まえ、積極的に対面によるコミュニケーションの機会を確保することも視野に入れ、効果的な手法を用いて英知の結集と還元に取り組んでいく。

現在、福島第一原子力発電所では、廃炉を着実に進めるために、国内外を問わず、多数の企業と廃止措置事業者との契約の下で実施されており、その世界市場は大きな広がりを見せている。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。そのような中、東京電力は海外の民間企業との技術交流を活発に行っている。例えば、2号機の燃料デブリ試験的取り出しのためのロボットアームは英国企業によって開発され、現在日本国内にて訓練が行われている。引き続き、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。

6.2.2.2 廃炉に対する国際社会の理解・関心や協力関係の維持・発展

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ためには、国際社会の理解・関心や協力関係の維持・発展が重要となる。これまで、オンラインシステムを活用し、交流機会の維持を行ってきたが、国際社会の対面での活動が回復しつつあることを踏まえ、オンラインでの交流だけでなく、対面での交流を回復させていくことを視野に入れて、各国関係機関や国際機関との協力関係の維持・発展を図ることが重要である。

また、政府を始めとした国内関係機関が、廃炉に関する情報の透明性を確保するとともに、正確な情報発信を継続することが、国際社会の理解の維持・強化や信頼関係の構築のために、重要となる。

情報発信に関しては、事故から約11年が経過し、情報の受け手の関心等が事故当時から変化しているほか、理解のベースとなる知識や情報量に国ごとに開きがある部分もある¹¹⁶。このため、専門家だけでなく非専門家にも分かりやすい情報を発信すること、動画やイラストを効果的に用いる等受け手の理解度を考慮しつつ説明に工夫を加えること、日本語や英語以外の言語でも情報を発信すること等の配慮が必要である。また、廃炉に関する現状や問題点について、情報の

¹¹⁶ 2021年6月廃炉等技術委員会における指摘

<https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/committee/pdf/summary/20210618dscsum.pdf>

受け手の関心や理解度に留意した情報発信を行い、正確に見える化することにより情報の受け手の理解を深めることは、結果として、信頼関係の構築につながるため重要である。

このように、国際共同活動への参画に当たっては、我が国にとっての最優先課題である廃炉の着実な実施を前提としつつ、国際社会の利益も確保されるような形で取り組まれることが必要であるところ、廃炉を進める中で得られた知見等の国際社会への還元方法としても、継続的な正確な情報の発信は重要である。なお、成果の還元の側面からは、例えば、事故や廃炉そのものだけでなく他の課題への応用といった側面にも関心が拡がりつつあるといった国際社会の変化に応えることで、その関心の水準の維持に努めることも重要になっている。

さらに、昨今のウクライナ問題を受けた世界のエネルギー情勢の変化に対応して、各国においてエネルギー政策の見直しが行われている。このような中においても、関係国の最新の状況を的確に把握しつつ、福島第一原子力発電所の廃炉に向けて、各国との協力関係を円滑に維持していく必要がある。

NDF としても、様々な機会を通じて、正確かつ情報の受け手の関心に応じた情報発信及び情報収集並びに廃炉を進める中で得られた知見等の国際社会への還元を行っていくことが重要である。

《情報の透明性の確保と情報発信の重要性を示した事例と課題》

～ALPS 処理水の海洋放出～

情報の透明性確保と情報発信の重要性を示した事例として、ALPS 処理水の海洋放出に関する方針発表後の各国等からの反応が挙げられる。

2021 年 4 月に日本政府は、安全性を確保し、風評対策を徹底することを前提に、ALPS 処理水を海洋放出する方針を公表した。

この発表を受け、我が国の廃炉の状況を理解し、これまで発信された情報に基づき、我が国の取組の透明性を評価している海外政府、関係機関及び国際機関からは、引き続き透明性を確保することを期待した上で、我が国の決定を支持するコメントが発表された。加えて、IAEA がレビューミッションの派遣や環境モニタリングの支援など、第三者的立場から ALPS 処理水の海洋放出に向けて積極的に協力することを表明した。これらは海洋放出に対する国際的な理解を得る後押しとなっており、情報の透明性の確保、正確な情報発信、並びに国際社会との協力関係の構築の重要性が改めて認識されたものである。

一方で、一部の国からは環境への影響を懸念するコメントや処分に当たっての透明性について疑義を呈するコメントが発表されている。2020 年 4 月の IAEA によるフォローアップレビューミッション¹¹⁷において、選択された処分方針の実施のためには、全てのステークホルダー及び一般公衆に必要な情報を積極的かつタイムリーに提供するためのコミュニケーション計画が重要である、と指摘されているが、引き続き、ALPS 処理水の安全性について、国際

¹¹⁷ The follow-up review mission (April 2, 2020)

https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/iaea_review.html

社会からの理解を得るため、情報の透明性を確保し、IAEAに全面的に協力するとともに、丁寧な情報発信を継続していく必要がある。

今後のALPS処理水の海洋放出を含め、廃炉の着実な実施に当たっては、引き続き継続して、これらの国からの理解と協力を得ることが重要であり、東京電力が情報の透明性を確保することを前提として、政府をはじめとする国内関係機関が、国際会議・国際共同活動の場やウェブサイトにおいて、正確な情報の発信や情報の受け手の側の関心や情報量を踏まえた分かりやすい情報発信を行う必要がある。

6.3 地域共生

6.3.1 地域共生の意義と現状

6.3.1.1 基本的な考え方

福島第一原子力発電所の廃炉における大原則は、「復興と廃炉の両立」である。避難指示が解除された地域において、住民の帰還や事業活動の再開はもとより、域外からの移住・定住や新たな投資の促進など、復興への歩みが徐々に進んでいる中にあっては、より一層の周辺環境へのリスク低減や安全確保を最優先としつつ、地域からの信頼を獲得するため、コミュニケーションを強化するとともに地域との共生を進めていくことが必要である。廃炉に対する不安感や不信感によって、復興の動きに悪影響が及ぶ、すなわち廃炉が復興の妨げになることは決してあってはならない。

そのため、一方的な情報発信ではなく、地域住民の不安や疑問に真摯に耳を傾け、それらを取り除くための正確な情報を分かりやすく速やかに伝える、といった双方向のコミュニケーションを通じて、地域住民が廃炉について理解を深め、安心していただくことが重要である。また、非常に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継続的な御協力が不可欠である。それと同時に、地元企業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るのみならず、他の地域や産業への成果の広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。このことを踏まえ、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、廃炉を通じて地域の雇用創出、人材育成、産業・経済基盤の創造等に貢献し、「復興と廃炉の両立」の実現を目指すこととしている。

6.3.1.2 現状における具体的な取組

(1) コミュニケーションの取組

政府においては、「廃炉・汚染水・処理水対策福島評議会」など主催する会議体における地元関係機関等との意見交換、廃炉の現状をまとめた動画やWebサイト、パンフレット等による情報発信、地域住民や関係自治体を対象とした説明会・座談会の開催等を行っている。

NDFにおいては、廃炉に関する地域住民をはじめとした参加者と関係機関等との率直な意見交換及び国内外の専門家との廃炉に関する最新の知見や技術的成果・課題の共有を目的に国際フォーラムを開催しているほか、政府や地元自治体主催の会議等での廃炉に関する進捗の説明等に努めている。なお、国際フォーラムでの意見交換を促進するため、国際フォーラム開催前

に高校生・高専生を含む地元の方々と対話を行う「ヒアリング活動」を例年実施しており、「生の声」を収集、整理及び編集し、冊子にまとめて、「ぼいすふろむふくしま」として国際フォーラムにおいて配布している。

東京電力においては、政府や福島県主催の会議体における地域代表者等への説明・対話の取組のほか、報道機関向けの定例の会見やレクチャー、自社の Web サイト、パンフレット等を活用した情報発信を継続的に行っている。また、ありのままの廃炉の現状を見ていただくとともに、率直な意見を交わすことが共通理解の形成において非常に有効であることから、福島第一原子力発電所の視察受け入れを積極的に行っている（視察者数：2019 年度 18,238 人、2020 年度 4,322 人、2021 年度 6,138 人）。一方、新型コロナウイルス感染症の影響で直接の視察に一定の制限を設けていることや直接視察を行えない方もいることから、東京電力の Web サイトで 2018 年から福島第一原子力発電所の廃炉現場を巡るバーチャルツアーを公開しており、こうした疑似体験プログラムを活用した積極的な情報発信も重要である。

加えて、原子力発電所事故の経過と廃炉の進捗を学べる場として富岡町に設置している「東京電力廃炉資料館」では、2022 年 4 月末時点の来場者数が約 80,000 人となっており、2020 年度からは、福島県が双葉町に開所した「東日本大震災・原子力災害伝承館」との連携を図っている。

(2) 廃炉を通じた地域の産業・経済基盤の創造に向けた取組

東京電力は、2020 年 3 月末に策定した「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。）に基づき、廃炉産業集積に向けた取組を大きく「①地元企業の参画拡大」「②地元企業のステップアップサポート」「③地元での新規産業創出」の 3 つに整理し、段階的に着手している。また、これらの地域共生の取組を着実に進めるため、東京電力は組織改編を随時実施しており、2020 年 4 月に福島第一廃炉推進カンパニー内に地域パートナーシップ推進グループを、10 月には福島第一原子力発電所内に地域との共生に取り組む専門部署を設置したほか、社長直轄として浜通り廃炉産業プロジェクト室を設置し、それぞれ役割分担の下、社内外の調整や地元での現場対応、中長期的な方向性の検討などを行っている。

①及び②の取組については、福島イノベーション・コースト構想推進機構及び福島相双復興推進機構と連携し、廃炉事業への参画希望や興味・関心を持つ地元企業と地元企業への発注を検討している元請企業とのマッチングを支援するための共同相談窓口の設置・運用や、元請企業と地元企業とのマッチング商談会の開催、地元企業への個別訪問、地元企業を対象とした福島第一原子力発電所の視察ツアーなどに取り組んでいるほか、人材育成に関する元請企業・地元企業双方へのニーズ調査、複数の大学との共同研究等に着手している。また、2020 年 9 月に作成した「廃炉中長期発注見通し」の内容を、廃炉作業の進捗に合わせて適宜更新するとともに、新型コロナウイルス感染症の流行状況に十分留意しながら、元請企業はもとより、地元の商工団体や地元企業に対する説明会を順次実施している。

また、③の取組については、地元で「開発・設計」から「製造」、「運用」、「保管」、「リサイクル」という一貫した廃炉事業の実施体制を構築するため、これまで海外を含めた福島県外へ発注していた比較的難度・重要性の高い技術や製品について、浜通り地域で完結できるよう、2020 年代に複数の新たな施設を設置・運用を予定している。特に「開発・設計」及び「製造」

については、パートナー企業と共同事業体を設立し、地元企業との緊密な連携を図ることで、地域の雇用創出、人材育成、産業・経済基盤の創造等を目指しており（2022年4月27日公表）、2022年10月に燃料デブリ取り出しに向けた共同事業体として新エンジ会社を設立している（2022年10月3日公表）。

6.3.2 主な課題と戦略

6.3.2.1 コミュニケーションに関する課題と戦略

廃炉に関する不適切な情報発信による誤解や懸念、風評の発生は、廃炉に対する地域はもとより社会全体の評価・信頼を失墜させ、廃炉の遅れのみならず福島復興への妨げにつながる。このため、東京電力は、引き続き様々な手段を講じて廃炉の現状を分かりやすく速やかに発信していく必要がある。この点、新型コロナウイルス感染症の影響が当面続くことが想定される中で、バーチャルツアーのような疑似体験プログラムやオンライン会議システムといったツールを積極的に活用するとともに、写真・動画コンテンツの一層の充実を図るなど、非対面・非接触でも可能なコミュニケーションを強化していくことも重要である。また、政府、NDF 及び東京電力が適切な連携の下、情報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、座談会の開催や地域の会議体・行事への参加など、機会を捉えて地域住民との直接対話や関係機関等との連携を積極的に図るとともに、国際フォーラム等のイベントを通じて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丁寧に伝えていく必要がある。加えて、これらの機会を捉えて地域や東京電力、政府、NDF、関係機関などが、様々な状況変化の中で、ともに知見を深めていくことが重要である。

特に、ALPS 処理水の処分方針に関しては、依然として反対の意見もあり、地元自治体や関係団体から正確な情報発信や理解醸成、万全の風評対策などの措置を強く求められていることから、政府においては、「ALPS 処理水の処分に関する基本方針の着実な実行に向けた行動計画」（2021年12月28日策定、2022年8月30日改訂）に基づき、科学的根拠に基づく安全性の発信をすることにより風評を生じさせない対策や、漁業者の設備投資や販路拡大に対する支援、基金や賠償等のセーフティネットの充実を行うことで風評に打ち勝つための対策を実施している。

東京電力においては「多核種除去設備等処理水の処分に関する政府の基本方針を踏まえた当社の対応について」（2021年4月16日公表）に基づき「処理水ポータルサイト」による情報発信や関係機関による安全確認等を通じた風評影響の抑制に向けた取組を実施しており、引き続き、地元等の理解醸成に最大限取り組み、信頼関係を築くことが重要である。

6.3.2.2 廃炉を通じた地域の産業・経済基盤の創出に関する課題と戦略

6.3.1.2(2)で述べたように、東京電力は、「お約束」の実現に向けた様々な取組を進めているが、これらはすぐに目に見える成果が出るものではなく、一定の期間を要する。「③地元での新規産業創出」の取組である2020年代の複数の新たな施設を設置・運用、及びパートナー企業と共同企業の設立（2022年4月27日公表）については、比較的大規模な投資であり浜通り地

域への大きな経済効果が見込まれることから、着実に取組の推進・強化を行っていく必要がある。

一方、特に高機能製品の製造については高度な技術を要することから、地元企業の技術力の向上を図るなど、地元企業の積極的な参画に繋げられるかが課題となる。

よって、当面は「①地元企業の参画拡大」「②地元企業のステップアップサポート」といった現状の取組もしっかりと継続・強化していくとともに、新たな廃炉関連施設の立地場所や規模、建設・運用までのスケジュール、雇用・協業・発注における地元との関わりなど諸々の検討状況について、地元の自治体、商工団体及び関係機関に丁寧に説明し、理解・協力を得ながら取組を進めていくことが重要である。

また、元請企業の理解の下、地元企業が受注しやすくなるような発注・契約方法を具体的に検討し、まずは試行的に実施することも必要である。2020 年度、地元企業を対象に行ったヒアリングの結果、地元企業は必ずしも元請となることを希望しておらず、まずは下請けとして参入して技術や経験を得ることを望む傾向にあるといったことが明らかとなった。こうした地元企業の意向やニーズを適切に把握した上で、地元企業へのアプローチのみならず、既存の元請企業に対しても、例えば技術指導を含めた地元企業への発注を促進し、地元企業の受注や人材育成に関し一定の成果があった場合には、複数年契約や優先発注のような契約上のインセンティブを元請企業に付与するといった仕組みを構築するなど、両者にメリットが生じるような手法を取り入れることで、地元企業の受注促進に寄与するものと考えられる。特に、今後の廃炉作業を念頭に入れながら、具体的な調達の内容や地元企業の特徴を関係機関と分析した上で、地元企業が継続した一定規模の発注を見通すことができる取組を検討するなど、今後長期にわたる廃炉作業を地元・福島とともに進めていくという姿勢を示していくことが重要である。

併せて、人材育成の取組に関しては、2018 年に発足し、これまで放射線防護教育、低圧電気取扱等の特定事項に関する特別教育等を実施してきている福島原子力企業協議会の福島廃炉技術者研修センターを活用し、今後は並行して地元企業向けに特化した研修に係る具体的な検討・準備を加速させることが求められる。こうした様々な取組を状況の変化に適宜対応しながら着実に進め、廃炉事業を通じた地元産業・経済の基盤づくりと地元企業・人材の育成を図っていくことが重要である。

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今後進んでくると、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体制の構築を図っていくことが求められる。特に環境整備については、単身はもとより家族ぐるみで安心して生活できるよう、日常生活や教育などの機能を幅広く考慮する必要がある。この点、福島県が住民の帰還促進に加え、広域的な移住・定住を促進することで避難地域の復興を加速化させるため、主に県外から 12 市町村への移住・定住を支援する「ふくしま 12 市町村移住支援センター」を開設し、全国の移住に関心を持つ層への情報発信や 12 市町村への移住希望者に対する各種支援などを行っている。こうした地元の取組との連携・協力の可能性を検討していくことも重要である。

これらの地域共生の取組を着実に進めるには、東京電力社内における組織体制の強化及び各部署間の緊密な連携が不可欠である。6.3.1.2(2)で触れたとおり、東京電力が組織改編により地

域共生の専門部署を順次設置し、廃炉を通じた地元の産業振興に向けた取組が少しずつではあるが前に進んでおり、地元からも一定の評価を得つつある。この流れを絶やさず着実に進めつつ、更なる地元の産業振興に向け、必要に応じて社内の取組を更に強化していくことが重要である。

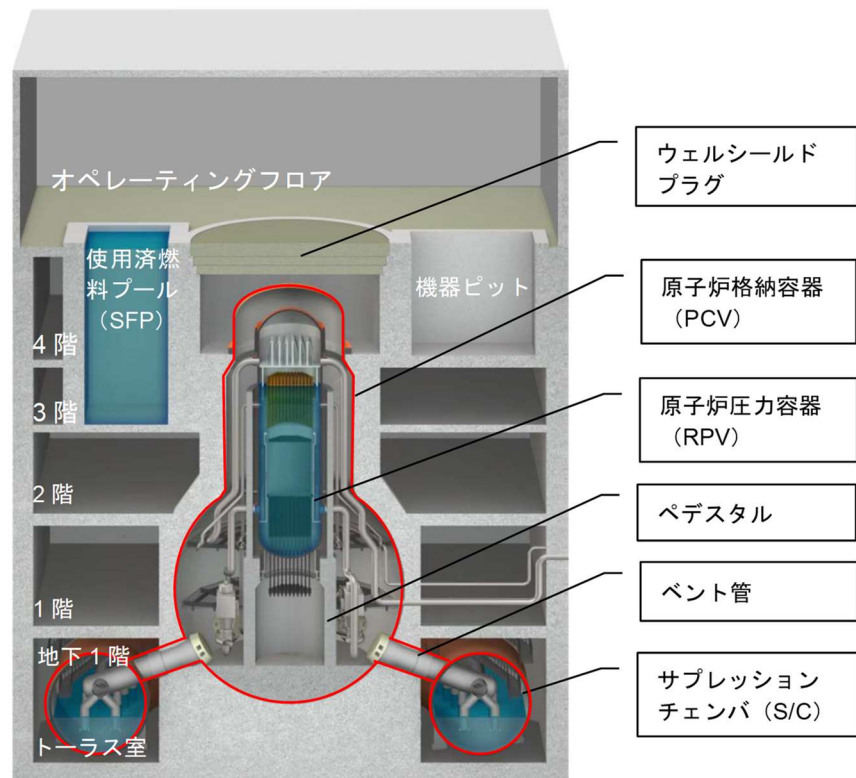
さらに、福島県を始めとする地元自治体、共同相談窓口の運用やマッチング商談会の共催などを行っている福島イノベーション・コースト構想推進機構、福島相双復興推進機構を始めとする地元関係機関との連携・協働をより一層強化していく必要がある。NDF は、東京電力の地域共生に関する取組を適切に支援するとともに、地元自治体、関係機関等との連携・協働の強化に努めていく。

略語・用語集

略 語	正 式 名 称
ALARP	As Low As Reasonably Practicable：危険/効用基準あるいはコストを含めて、リスク低減策の実現性を考慮しながらも、最小限のリスクまで低減すべきという考え方
ALARA	As Low As Reasonably Achievable：全ての被ばくは社会的、経済的要因を考慮に入れながら合理的に実行可能な限り低く抑えるべきである、という被ばく管理の基本精神
AWJ	Abrasive Water Jet（アブレッシブウォータージェット）
DOE	United States Department of Energy：米国エネルギー省
FP	Fission Products：核分裂生成物
HIC	High Integrity Container：高性能容器
IAEA	International Atomic Energy Agency：国際原子力機関
IRID	International Research Institute for Nuclear Decommissioning：国際廃炉研究開発機構
JAEA	Japan Atomic Energy Agency：日本原子力研究開発機構
JAEA/CLADS	JAEA Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science：日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター
MADA 評価	多属性効用分析手法
NDA	Nuclear Decommissioning Authority：英国原子力廃止措置機関
NDC	MHI 原子力研究開発株式会社
NDF	Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation：原子力損害賠償・廃炉等支援機構
NFD	Nippon Nuclear Fuel Development Co.,Ltd：日本核燃料開発株式会社
OECD/NEA	OECD Nuclear Energy Agency：経済協力開発機構/原子力機関
PCV	Primary Containment Vessel：原子炉格納容器
RPV	Reactor Pressure Vessel：原子炉圧力容器
S/C	Suppression Chamber：サプレッションチェンバ
SED	Safety and Environmental Detriment：英国原子力廃止措置機関が開発したリスクレベルを表現する手法
SGTS	Standby Gas Treatment System：非常用ガス処理系
TMI-2	Three Mile Island Nuclear Power Plant Unit 2：米国スリーマイルアイランド原子力発電所 2 号機
X-2 ペネ	PCV 貫通部 X-2 ペネトレーション
X-6 ペネ	PCV 貫通部 X-6 ペネトレーション
英知事業	英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業
オペフロ	オペレーティングフロア

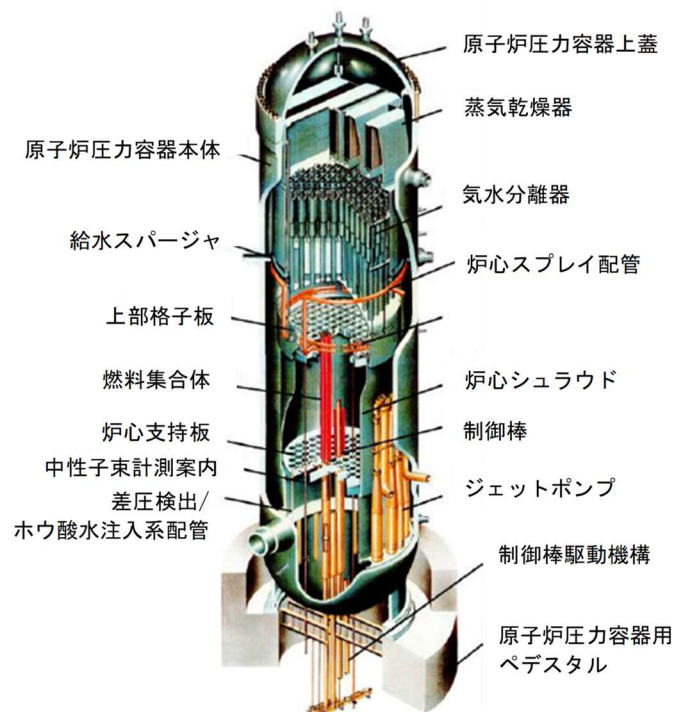
略 語	正 式 名 称
お約束	復興と廃炉の両立に向けた福島の方々へのお約束
柏崎刈羽	柏崎刈羽原子力発電所
技術戦略プラン	東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン
技術的見通し	固体廃棄物の処理・処分方策とその安全性に関する技術的な見通し
国際フォーラム	福島第一廃炉国際フォーラム
水中 ROV	水中遊泳式遠隔調査装置 (Remotely Operated Vehicle)
中長期ロードマップ	東京電力ホールディングス (株) 福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ
東京電力	東京電力ホールディングス(株)
非破壊計測	サンプルから放出、散乱、又は透過した放射線、量子等を利用して、サンプルを破壊せずに核燃料の量等を評価する手法
福島第一原子力発電所	東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所
ミュオン測定 (ミュオンによる燃料デブリ検知技術)	宇宙や大気から降り注ぐミュー粒子 (ミュオン) が物質を通り抜ける際に、密度の違いにより粒子の数や軌跡が変化する特性を利用して燃料の位置や形状を把握する技術
リスク低減目標マップ	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

用 語	説 明
インベントリ	リスク源に含まれる放射性物質の量（放射能、放射性物質の濃度または放射性物質が有する毒性）
ウェルプラグ（シールドプラグ）	原子炉格納容器の上部にある遮へい用のコンクリート製上蓋（運転中は原子炉建屋最上階の床面となっている。）
エンジニアリング	技術要素を現場に適用するための設計等の作業
キャスク	使用済燃料の輸送や貯蔵に用いられる専用の容器
サブドレン	建屋近傍の井戸
除染装置スラッジ	汚染水を処理するため 2011 年 6 月～9 月にかけて運転していた除染装置 (AREVA)により発生した高濃度の放射性物質を含むスラッジ
スプレイカーテン	ダストを封じ込めて、沈降を促すための散水
スラッジ	泥状物質、汚泥
スラリー	液体中に鉱物や汚泥等が混ざった液状の懸濁物
ゼオライト	セシウム等の放射性物質を回収するために用いる吸着材
船殻構造	船舶・飛行機で用いられている板（面）で受けた力を防撓材（撓みを押さえる骨組み）が支える構造
トーラス室	非常用炉心冷却系の水源として用いる水を擁する大きなドーナツ状の圧力抑制室を収納する部屋
燃料デブリ	原子炉冷却材の喪失等により核燃料が炉内構造物の一部と熔融した後に再度固化した状態
バイオアッセイ法	被ばく量の推定ため、排泄物など人体からの試料を分析することにより、体内に摂取された放射性核種の種類と量を評価する方法
フェーシング	発電所構内の地表面をアスファルト等で覆うこと
プラットフォーム	ペDESTAL内側で原子炉圧力容器の下に設置された作業用の足場
フランジ型タンク	ボルト締めによる組み立て式のタンク
ペDESTAL	原子炉本体を支える基礎
マニピュレータ	燃料デブリ取り出しのサポートを行うロボットアーム
モックアップ	実物とほぼ同様に似せて作られた模型
五ホウ酸ナトリウム	溶解性の中性子吸収剤材（ホウ酸水）



(IRID 提供)

図 48 原子炉建屋内構造図



(IRID 提供)

図 49 原子炉圧力容器 (RPV) 内構造図

添付資料

目次

添付資料 1 中長期ロードマップの改訂とこれまで公表した技術戦略プランについて	143
添付資料 2 これまでに実施した主なリスク低減対策と今後の計画	145
添付資料 3 SED 指標の概要	150
添付資料 4 主要なリスク源として明示的に取り扱っていないリスク源	155
添付資料 5 リスクの時間変化	157
添付資料 6 燃料デブリ取り出しの対象となる燃料デブリについて	158
添付資料 7 これまでの技術戦略プランにおける工法検討の変遷	160
添付資料 8 放射性廃棄物管理に関する用語	165
添付資料 9 放射性廃棄物処分について	166
添付資料 10 福島第一原子力発電所の固体廃棄物の保管管理計画の全体イメージ	169
添付資料 11 研究開発中長期計画	171
添付資料 12 廃炉・汚染水対策事業における研究開発のこれまでの取組	173
添付資料 13 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業（英知事業） 選定課題	176
添付資料 14 国際連携の強化に係る主な活動実績	180

添付資料1 中長期ロードマップの改訂とこれまで公表した技術戦略プランについて

【中長期ロードマップ 初版（2011年12月21日）】 - 事故発生後に政府及び東京電力でとりまとめた「東京電力福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋 当面のロードマップ」におけるステップ2が完了したことに伴い、確実に安定状態を維持するための取組、使用済燃料プールからの燃料取り出しや燃料デブリの取り出し等の中長期に亘って進めるべき必要な措置を、東京電力、資源エネルギー庁、原子力安全・保安院の3者にてとりまとめ、政府・東京電力中長期対策会議で決定 - 中長期の取組の実施に向けた基本原則の提示や、廃止措置終了までの期間を使用済燃料取り出し開始までの期間（第1期）、第1期終了後から燃料デブリ取り出し開始までの期間（第2期）、第2期終了後から廃止措置終了までの期間（第3期）に区分した上で時期的目標を設定
【中長期ロードマップ 改訂第1版（2012年7月30日）】 ステップ2以降に東京電力が策定した「中期的な信頼性向上のために優先的に取り組むべき事項についての具体的な計画」の反映や、作業の進捗状況に応じた目標の明確化
【中長期ロードマップ 改訂第2版（2013年6月27日）】 使用済燃料プールからの燃料取り出し、燃料デブリ取り出しについて号機毎の状況を踏まえたスケジュールの検討（複数プランの提示）及びこれを踏まえた研究開発計画の見直し
【技術戦略プラン2015（2015年4月30日）】 - 福島第一原子力発電所の廃炉を適正かつ着実に実施する観点から、中長期ロードマップにしっかりとした技術的根拠を与えるために初版となる技術戦略プランを公表（NDFは2014年8月18日に既存の原子力損害賠償支援機構を改組する形で発足） - 福島第一原子力発電所の廃炉を「過酷事故により顕在化した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」と位置付け、リスク低減のための5つの基本的考え方（安全、確実、合理的、迅速、現場指向）を提示 - 燃料デブリ取り出し分野について、冠水一上アクセス工法・気中一上アクセス工法・気中一横アクセス工法を重点的に検討する工法と位置付け、実現可能性のあるシナリオを検討 - 廃棄物対策分野について、処分の安全確保や処理のあり方の基本的考え方を踏まえ、中長期的観点から保管・管理等の方針を検討
【中長期ロードマップ 改訂第3版（2015年6月12日）】 - リスク低減を重視し、長期的にリスクが確実に下がるように取組の優先順位付けを実施 - 燃料デブリ取り出し方針の決定（2年後を目処）、建屋内滞留水中の放射性物質の量を半減（2018年度）等、数年間の目標の具体化
【技術戦略プラン2016（2016年7月13日）】 技術戦略プラン2015公表からの廃炉の進捗状況を踏まえつつ、中長期ロードマップで規定された2017年夏頃の「号機ごとの燃料デブリ取り出し方針の決定」、2017年度の「放射性廃棄物の処理・処分に関する基本的な考え方」とりまとめ等の目標工程に向けて、技術戦略プラン2015の考え方や取組の方向性に従って具体的な考え方や方法を展開
【技術戦略プラン2017（2017年8月31日）】 - 燃料デブリ取り出しの重点3工法について実現性評価等を行い、燃料デブリ取り出し方針の決定に向けた提言と予備エンジニアリング等方針決定以降の取組を戦略的提案として提言 - 固体廃棄物の処理・処分に関する基本的考え方の取りまとめに向けた提言
【中長期ロードマップ 改訂第4版（2017年9月26日）】 - NDFの技術提言を踏まえ、燃料デブリ取り出し方針と当面の取組を決定 - 固体廃棄物の処理・処分に関する基本的考え方の取りまとめ

・ 個別作業を具体化するにあたり、「廃炉作業全体の最適化」の視点
【技術戦略プラン 2018（2018 年 10 月 2 日）】 ・ 汚染水対策及び使用済燃料プールからの燃料取り出し等も含めた構成とし、福島第一原子力発電所廃炉の取組全体を俯瞰した中長期的視点での方向性を提示
【技術戦略プラン 2019（2019 年 9 月 9 日）】 ・ 初号機の燃料デブリ取り出し方法を確定するための戦略的提案を提示するとともに、廃棄物対策等も含め、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方向性を提示
【中長期ロードマップ 改訂第 5 版（2019 年 12 月 27 日）】 ・ 燃料デブリを取り出す初号機と、その取り出し方法を確定 ・ 1、2 号機のプール内燃料の取り出しに係る工法を変更 ・ 1 日あたりの汚染水発生量について、2020 年以内に 150m³まで低減させる目標は堅持。加えて、2025 年以内に 100m³まで低減させる新たな目標を設定
【技術戦略プラン 2020（2020 年 10 月 6 日）】 ・ 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等を特徴的に記載
【技術戦略プラン 2021（2021 年 10 月 29 日）】 ・ 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提示するとともに、新型コロナウイルス感染症の影響を最小限にするための試験的取り出しに向けた課題、取り出し規模の更なる拡大の工法選定に向けた論点整理、ALPS 処理水に係る取組等を記載

添付資料2 これまでに実施した主なリスク低減対策と今後の計画

福島第一原子力発電所が有するリスクレベルの時間的変化を SED で評価すると、図 A2-1 のとおりである。同図中の上部に示したグラフの縦軸は常用対数スケールのリスクレベルであり、横軸は事故後年数を示している。

事故後 0 年時点では、冷却機能が失われたプール内燃料や溶融した核燃料によりリスクレベルは高い状態にあったが、燃料プールの冷却機能回復、炉心スプレイ系注水による燃料デブリの冷却、窒素注入などの安全対策が行われ（2011 年）、放射性物質の減衰によるインベントリ及び崩壊熱の減少も寄与し、事故後 0.5 年にかけて潜在的影響度・管理重要度ともに大きく低下してリスクレベルが低下している。

事故後 0.5 年から 2.5 年までについては同図中の左下部の縦軸を線形スケールにしたグラフにおいて、リスクレベルを主なリスク源（燃料デブリ、プール内燃料、汚染水等）ごとの内訳とともに示しており、更に事故後 3 年以降のリスクレベルについては同図中の右下部に線形スケールの縦軸を 10 倍に拡大したグラフとして示している。いずれからも、継続的なリスク低減が図られていることが確認できる。

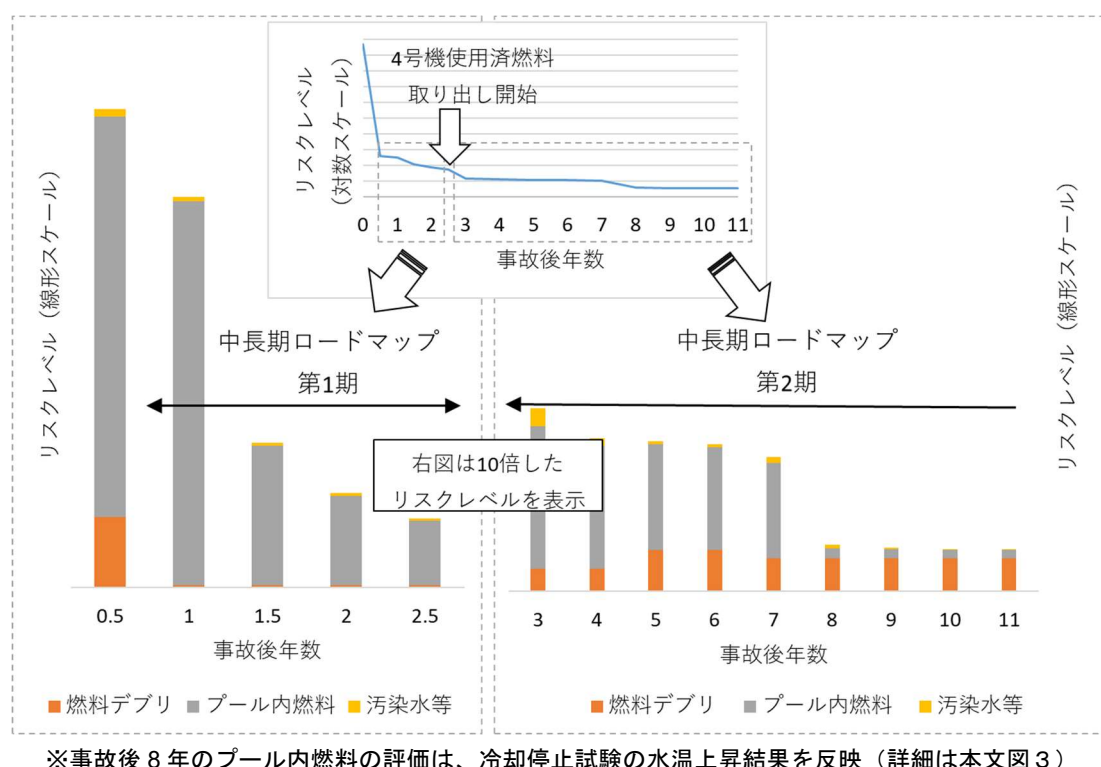


図 A2-1 福島第一原子力発電所が有するリスクの低減

この事故後 0.5 年以降のリスクレベルの変化を、更に詳細なリスク源ごとに示すと図 A2-2 のとおりである。同図におけるリスク源は、対数スケールで表示することによって、線形スケールの図 A2-1 では小さすぎて表示されなかったリスク源についても表示されている。なお、十分に安定管理がなされている共用プール内燃料と乾式キャスク内燃料は省略した。また、図 A2-2 に

示す「建屋内滞留水＋ゼオライト土嚢」は事故後 0～8 年の間は建屋内滞留水の情報に基づいて評価したが、事故後 9 年後からは、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の情報が明らかになってきたためこれを評価に取り入れた。

主なリスク源の中でも、燃料デブリ、プール内燃料、建屋内滞留水及びゼオライト入り土嚢、水処理二次廃棄物は、比較的风险レベルが高い。近年は、建屋内滞留水の処理が進み、「建屋内滞留水＋ゼオライト土嚢」のリスクレベルは低下傾向にあるものの、高線量状態で存在するゼオライト土嚢は今後の廃炉作業において支障を及ぼす可能性があるため留意が必要である。水処理二次廃棄物については、ALPS スラリーが保管されている一部の HIC について β 線照射の影響を踏まえ移替えが必要になったことにより、リスクレベルが技術戦略プラン 2021 の評価（事故後 10 年）よりも高くなっている。また、タンク内貯留水（フランジ型タンク及び溶接型タンク）は、2021 年中にフランジ型タンクの濃縮塩水残水から検出された高濃度ストロンチウムの放射能濃度を反映したことによりリスクレベルは事故後 10 年よりも高くなっている。しかしながら、フランジ型タンク貯留水の処理自体は進行していたことから、実際のリスクレベルは図 A2- 2 に示したレベル（実線：タンク内貯留水）よりも高い位置（破線：タンク内貯留水（推定））で推移していたと考えられる。

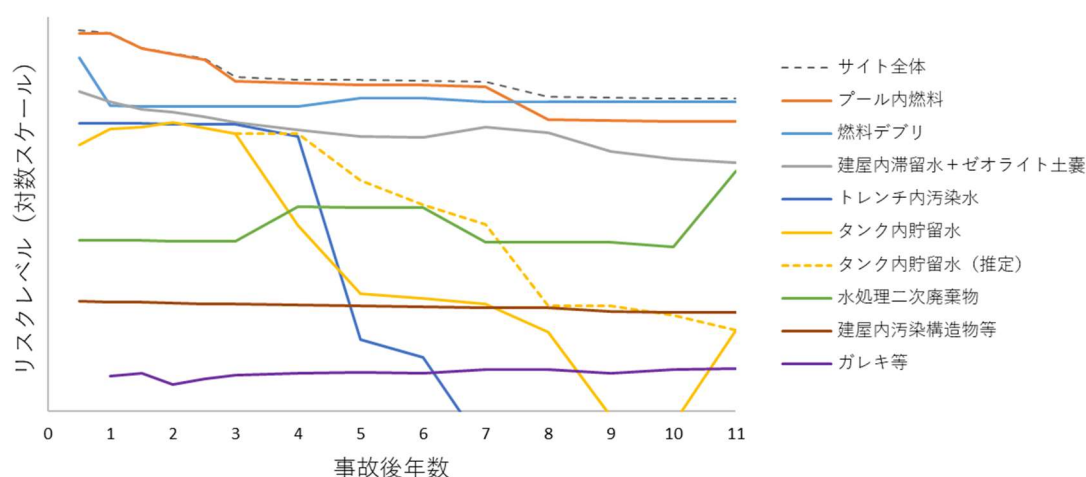


図 A2-2 主なリスク源ごとのリスクレベルの推移

(1) プール内燃料

事故後 1 年頃から、4 号機について、燃料取り出し準備としてガレキ撤去や燃料取り出し用カバー設置等が行われ、プール内燃料のガレキ等による損傷リスクや損傷時における拡散抑制機能が強化されたこと、また、事故後 2.5 年から燃料の取り出しが行われ管理重要度の低い共用プールに移送したことにより、リスクレベルが低減した（2014 年完了）¹¹⁸。

1 号機の建屋カバー（2011 年設置）の拡散抑制機能により、管理重要度の低減によるリスクレベルの低減効果があったが、プール内燃料取り出し準備のために建屋カバーが取り外された

¹¹⁸ 廃炉プロジェクト 廃炉作業の状況 4 号機燃料取り出し作業（ウェブサイト）東京電力ホールディングス株式会社

ことにより（2015 年）、現在ではこの効果はなくなっている¹¹⁹。今後、ガレキ撤去時のダスト飛散抑制のため、2023 年度頃を目途に大型カバーを設置し、2027 年度～2028 年度にプール内燃料の取り出しを開始する計画である¹²⁰。

2 号機については、原子炉建屋の南側に燃料取り出し用構台を設置し、2024 年度～2026 年度にプール内燃料の取り出しを開始する計画である¹²⁰。

3 号機については、プール内燃料取り出し準備としてガレキ撤去等を実施した後に、2018 年に燃料取り出し用カバーが設置され、2019 年 4 月からプール内燃料取り出しを開始した。その後、2021 年 2 月に共用プールへの移送が完了した¹²¹。

なお、プール内燃料の冷却が停止した場合、崩壊熱によりプール水温度の上昇及びプール水位の低下が考えられる。事故後 8 年目以降においては、使用済燃料プールの冷却停止後の水温上昇がこれまでの想定よりも緩やかであるとの知見を取り入れた結果、水位低下等のリスクが顕在化するまでの時間的余裕が増すことから、プール内燃料のリスクレベルはこれまでの評価よりも低くなっている。

(2) 燃料デブリ

燃料デブリは事故直後、熔融状態にあり、また、放射性物質の放出リスクが顕在化したため、リスクレベルの高い状態にあったが、放射性物質の減衰に加え、冷却機能の回復・強化により潜在的影響度・管理重要度が低減し、リスクレベルが低減した。

なお、(1)に記載のとおり、1 号機の建屋カバーの拡散抑制機能により、燃料デブリの飛散に伴うリスクが低減し、管理重要度の低減によるリスクレベルの低減効果があったが、現在ではこの効果はなくなっている。

(3) 建屋内滞留水＋ゼオライト土嚢

建屋内滞留水は、燃料デブリの冷却及び地下水の建屋内への侵入等によって発生するが、セシウム吸着装置（KURION）及び第二セシウム吸着装置（SARRY）の運転開始、サブドレン・陸側遮水壁の効果、復水器中の水抜き、第三セシウム吸着装置（SARRY II）の運転開始などにより、リスクレベルは低減している。この建屋内滞留水の処理は、プール内燃料取り出しに次いで、これまでサイト全体のリスクレベル低減に大きく寄与している。

(4) トレンチ内汚染水

2～4 号機の海水配管トレンチには事故直後から高濃度の汚染水が滞留していたが、トレンチ内を閉塞してその処理を完了している（2015 年完了）¹²²。2～4 号機に比べて低濃度である 1 号機の海水配管トレンチは、溜まり水の浄化について検討中である¹²³。

¹¹⁹ 特定原子力施設監視・評価検討会（第 57 回）資料 7「福島第一原子力発電所 1 号機 進捗状況およびオペレーティングフロア北側のがれき撤去について」東京電力ホールディングス株式会社

¹²⁰ 廃炉中長期実行プラン（2022 年 3 月 31 日）東京電力ホールディングス株式会社

¹²¹ 廃炉プロジェクト 廃炉作業の状況 3 号機使用済燃料プールからの燃料取り出し（ウェブサイト）東京電力ホールディングス株式会社

¹²² 廃炉プロジェクト 廃炉作業の状況 海水配管トレンチ内の汚染水除去（ウェブサイト）東京電力ホールディングス株式会社

¹²³ 第 98 回特定原子力施設監視・評価検討会 参考資料 1「福島第一原子力発電所 中期的リスクの低減目標マップ（2021 年 3 月版）を踏まえた検討指示事項に対する工程表」東京電力ホールディングス株式会社

(5) タンク内貯留水

タンク内貯留水には浄化処理の段階により放射性物質濃度が異なる複数種類の貯留水が存在する。まず、建屋内滞留水の KURION、SARRY 及び SARRY II による浄化処理で発生するストロンチウム処理水は溶接型タンク内貯留水として保管されている。その後、多核種除去設備（ALPS）等により、更にリスクレベルが低減され、ALPS 処理水等（ALPS 処理水及び処理途上水）として溶接型タンクに保管されている。事故直後の短期間のみ稼働した蒸発濃縮装置から発生した濃縮廃液等は、放射性物質濃度の高い沈殿状のスラリー（濃縮廃液スラリー）が分離され、残った液体（濃縮廃液）については、溶接型タンクに移送することにより、漏えいリスクの低減及びリスクレベルの低減を図っている。

ALPS が稼働する前に KURION による処理で発生した濃縮塩水は、ALPS 及び高性能多核種除去設備（高性能 ALPS）の稼働により、2015 年に処理が完了している¹²⁴。

これらのタンク内貯留水は、堰のかさ上げと二重化（既設タンクは 2014 年に完了）、フランジ型タンクから溶接型タンクへの移送、フランジ型タンク底部に残水として存在していたストロンチウム処理水の処理（2019 年）及び ALPS 処理水等の処理（2020 年）により、リスクレベルの低減が図られている。なお、濃縮塩水のフランジ型タンク底部の残水については、タンク解体に向けて回収作業を実施中であり、フィルタ通水によりスラッジ分を除去した残水はプロセス主建屋へと移送される計画となっている。

(6) 水処理二次廃棄物

汚染水の処理により、多くの放射性物質が水処理二次廃棄物に移行する。除染装置スラッジ、KURION 及び SARRY 稼働（2011 年）、SARRY II 稼働（2019 年）による廃吸着塔、ALPS の稼働（2013 年）による ALPS スラリー、高性能 ALPS の稼働（2014 年）による廃吸着塔、海水配管トレンチを処理したモバイル式処理装置による廃吸着塔などが発生している。リスクレベルは、移替え対象 HIC に保管されている ALPS スラリーの影響により技術戦略プラン 2021 よりも高くなっており、水処理二次廃棄物の中でも支配的な要因となっている。積算吸収線量の基準値を超えた又は超える時期が近いと評価された HIC は 2023 年度中の移替えが計画されている。時間経過とともに積算吸収線量が基準値に近づく HIC は徐々に増えていくが、移替え作業を計画的に実施し、積算吸収線量の基準値を超えないように管理できるようにすることでリスクレベルの低減につながる。それ以外のリスク源としては、除染装置スラッジの寄与が大きいですが、除染装置スラッジは現在では新たに発生しておらず、水処理二次廃棄物全体のリスクレベルは増加傾向にはない。今後は、津波対策としてプロセス主建屋内（T.P. 8.5m 盤）に保管されている除染装置スラッジを抜き出し（2023 年度計画）、保管容器に入れ、高台エリア（T.P. 33.5m 盤）に移送する計画である¹²⁵。

濃縮廃液から分離された濃縮廃液スラリーは、基礎がない地表に置かれ堰もない溶接型横置きタンクに収納されていたが、鉄筋コンクリートの基礎と堰が設置される安全対策がなされリスクレベルが低減した。

¹²⁴ 廃炉プロジェクト 廃炉作業の状況 汚染水の浄化処理（ウェブサイト）東京電力ホールディングス株式会社

¹²⁵ 福島県原子力発電所の廃炉に関する安全監視協議会（2021 年 3 月 8 日）資料 5-1

(7) 建屋内汚染構造物等

原子炉建屋、PCV 又は 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（シールドプラグ・非常用ガス処理系配管等）からなる建屋内汚染構造物等は、現時点においてそのリスクレベルに大きな変化はない。

(8) ガレキ等

固体廃棄物のうちガレキ等は、固体廃棄物貯蔵庫、一時保管施設、屋外集積など様々な状態で保管されており、それぞれで管理重要度が異なり、屋外シート養生や屋外集積のリスクレベルが最も高い。これまでも、覆土式一時保管施設受入開始（2012 年）、伐採木一時保管槽受入開始（2013 年）、固体廃棄物貯蔵庫増設（2018 年）などにより、より管理状態のよい施設が増強されてきた。また、仮設保管設備のガレキ等については、より管理状態の良い固体廃棄物貯蔵庫への移送を実施した（2020 年）。増設固体廃棄物焼却設備の運用開始（2022 年 5 月）により、屋外保管の可燃性ガレキ類等について焼却減容を図った上で固体廃棄物貯蔵庫へ移送することが可能となった。今後は固体廃棄物保管管理計画に従って、減容処理設備、固体廃棄物貯蔵庫の更なる増設などにより、2028 年度までに屋外一時保管を解消する計画である¹²⁶。

¹²⁶ 福島第一原子力発電所の固体廃棄物の保管管理計画（2022 年 7 月版）東京電力ホールディングス株式会社

添付資料3 SED 指標の概要

サイト全体に存在する様々な特徴を有するリスク源について、リスク低減対策を実施すべき優先度を決定する上で重要な要素として、NDA が開発した SED 指標¹²⁷を参考にして分析を実施した。福島第一原子力発電所への適用に当たっては、福島第一原子力発電所固有の特徴を反映しやすいように一部変更した（次頁以降参照）。以下に、SED 指標の概要と、福島第一原子力発電所への適用に当たって変更した部分について述べる。

SED 指標は下式で表される。第一式は廃棄物等を対象として広くに用いられるもの、第二式は汚染土壌の評価に用いられるものである。各々の式において、第一項をリスク源が持つ潜在的影響度、第二項を管理重要度と呼ぶ。

$$SED = (RHP + CHP) \times (FD \times WUD)^4$$

または

$$SED = (RHP + CHP) \times (SSR \times BER \times CU)^4$$

以下、各指標について説明する。CHP は化学物質の潜在的影響度であるが、ここでは使用しないので、説明は省略する。

(1) 潜在的影響度

Radiological Hazard Potential (RHP) は、放射性物質の潜在的影響度を表す指標であり、放射性物質が全量放出された際に公衆に及ぼす影響を下式で表したものである。

$$RHP = Inventory \times \frac{Form Factor}{Control Factor}$$

Inventory は、下式のように、リスク源の放射能 Radioactivity と潜在的比毒性 Specific Toxic Potential (STP) で表され、実効線量に相当する¹²⁸。STP は、1TBq の放射性物質を水で希釈し、その一定量を 1 年間摂取した際の被ばく量が 1mSv となるような水の希釈量であり、線量係数に相当する。SED 指標では保守的に、経口摂取と呼吸のうち大きい線量係数を用いている。

$$Inventory(m^3) = Radioactivity(TBq) \times STP(m^3/TBq)$$

Form Factor (FF) は、気体、液体、固体等の性状の相違によって、実際にどれだけの放射性物質が放出されるかを表す指標であり、表 A3-1 に与えられている。気体や液体は、閉じ込め機能を完全に喪失すると 100%放出、粉末は測定データに基づいて 10%放出としている。固体には明確な根拠はなく、放出されにくいことを表すために十分小さい数値として設定したものである。

表 A3-1 では、NDA が使用している定義に、特に燃料デブリに対して想定されるいくつかの形態を追加した。#4 と #5 はスコア自体、新たに設定したものである。

¹²⁷ NDA Prioritization – Calculation of Safety and Environmental Detriment score, EPGR02 Rev.6, April 2011.

¹²⁸ Instruction for the calculation of the Radiological Hazard Potential, EGPR02-WI01 Rev.3, March 2010.

Control Factor (CF) は、リスク源の特徴として、発熱性、腐食性、可燃性、水素発生等の可能性、空気や水との反応性、臨界性等を考慮したものであり、安定している現状を維持するための安全機能が喪失した場合に、復旧するまでにどの程度の時間余裕があるかを示す指標であり、表 A3-2 に与えられている。CF は NDA の定義どおりである。

(2) 管理重要度－FD, WUD

Facility Descriptor (FD) は、施設の閉じ込め機能が十分かどうかを表す指標である。施設の健全性、閉じ込め機能の多重性、安全対応状況等の要素の組み合わせによってリスク源を序列化する。

Waste Uncertainty Descriptor (WUD) は、リスク源の取り出しが遅れた場合に影響が生じるかどうかを表す指標である。リスク源の劣化や活性度、梱包や監視状態等の組み合わせによってリスク源を序列化する。

これらは、NDA の定義のままでは福島第一原子力発電所に適用することが困難であったため、各々表 A3-3 及び表 A3-4 のように再設定した。

(3) 管理重要度－SSR, BER, CU

汚染土壌の管理重要度評価に用いる SSR, BER, CU は NDA の定義のままであり、各々のスコアを表 A3-5 に示す。

Speed to Significant Risk (SSR) は、敷地境界までの距離や地下水の流れの状況など、公衆が影響を受けるまでの時間に関するもので、対策の緊急度を評価するための指標である。

Benefit of Early Remediation (BER) は、リスク対策を早期に実施することのメリットを評価するための指標である。

Characterisation Uncertainty (CU) は、リスク評価モデルの信頼性または不確実性を評価するための指標である。

表 A3-1 FF の定義とスコア表

#	形態	FF
1	気体、液体、水分の多いスラッジ※及び凝集粒子※	1
2	その他スラッジ	1/10 = 0.1
3	粉及び遊離性汚染物(表面汚染など)※	1/10 = 0.1
4	固着性※または浸透汚染物(表面浸透汚染)※	1/100 = 0.01
5	脆く分解しやすい固体(空隙部の多い MCCI など)※	1/10,000 = 1E-4
6	不連続な固体(ペレットなど、人力で運搬可能な大きさと重さ)	1/100,000 = 1E-5
7	連続した固体	1/1,000,000 = 1E-6

※: 福島第一原子力発電所への適合性を高める目的で、NDA での定義に加えて追加した形態

表 A3-2 CF の定義とスコア

#	リスクが顕在化するまでの時間裕度	CF
1	数時間	1
2	数日	10
3	数週間	100
4	数か月	1,000
5	数年	10,000
6	数十年	100,000

表 A3-3 FD の判断基準とスコア

カテゴリ	判断基準 (福島第一原子力発電所への適合性を高める目的で、NDA での定義を修正)	NDF スコア
1	拡散抑制機能の構成物が存在しない。このため格納機能についての評価ができない。	100
2	事故の影響等により「評価時点 ^{*1} 」において、「安全評価基準 ^{*2} 」を満たさない。 拡散抑止機能の構成物は一重。	91
3	事故の影響等により「評価時点」において、「安全評価基準」を満たさない。 拡散抑制機能の構成物は多重。	74
4	拡散抑制機能の構成物に内包されるリスク源の「作業時点（移動、処理、回収などの作業を行う時点） ^{*3} 」まで、「安全評価基準」を満たさない。 「評価時点」では、「安全評価基準」を満足する拡散抑制機能の構成物が存在する。	52
5	リスク源の「作業時点（移動、処理、回収などの作業を行う時点）」まで、拡散抑制機能の健全性が評価されており、「安全評価基準」を満足する。 「不測の事態 ^{*4} 」の発生頻度が高く、不測の事態が発生した際に、内包されるリスク源の拡散を防止する対策が不十分。 拡散抑制機能の構成物は一重。	29
6	リスク源の「作業時点（移動、処理、回収などの作業を行う時点）」まで、「安全評価基準」を満足する。 「不測の事態」の発生頻度が高く、内包されるリスク源の拡散を防止する対策が不十分。 拡散抑制機能の構成物は多重。	15
7	リスク源の「作業時点（移動、処理、回収などの作業を行う時点）」まで、「安全評価基準」を満足する。 周辺に「安全評価基準」を満足しない施設などがあり、これら隣接施設へ（からの）リスク源の拡散影響 ^{*5} を与える（受ける）可能性が高い。 拡散抑制機能の構成物は一重。	8
8	リスク源の「作業時点（移動、処理、回収などの作業を行う時点）」まで、「安全評価基準」を満足する。 隣接施設へ（からの）リスク源の拡散影響を与える（受ける）可能性が高い。 拡散抑制機能の構成物は多重。	5
9	リスク源の「作業時点（移動、処理、回収などの作業を行う時点）」まで、「安全評価基準」を満足する。 隣接施設へ（からの）リスク源の拡散影響を与える（受ける）可能性が低い。 拡散抑制機能の構成物は一重。	3

10	リスク源の「作業時点（移動、処理、回収などの作業を行う時点）」まで、「安全評価基準」を満足する。 隣接施設へ（からの）リスク源の拡散影響を与える（受ける）可能性が低い。 拡散抑制機能の構成物は多重。	2
*1 SED スコアを検討する「時点」、すなわち評価する「現時点」をいう。 *2 ここでいう「安全評価基準」とは、「措置を講ずべき事項」、あるいは、「設計基準事象の範囲での拡散抑制機能の確保」をいう。 *3 SED スコアを検討する対象であるリスク源を、処分・搬出等のために「回収」する時点をいう。 *4 不測の事態としては外部事象（自然災害等）を想定する。 *5 不測の事態による外的影響や隣接施設における事象（火災等）などによる影響を受けた際に、隣接施設へ（からの）リスク源の拡散の可能性がある。		

表 A3-4 WUD の判断基準とスコア

カテゴリ	判断基準 (福島第一原子力発電所への適合性を高める目的で、NDA での定義を修正)	NDF スコア
1	燃料（核分裂性物質を含有するもの）であり、活性 ^{*1} である。 処理や回収などの作業に必要な情報（存在量、存在箇所、放射能等）が不十分で（確認または推定ができず）、モニタリング等による管理・監視が不可能な状態である。 ハンドリングに適した形状となっていない、或いは、専用容器に収納されていない等の理由で、そのままの形態・状態ではハンドリングできない。	100
2	燃料であり、活性（核分裂性を有する）である。 処理や回収などの作業に必要な情報が不十分で、管理・監視が不可能な状態である。 ハンドリングに適した形状となっている、或いは、専用容器に収納されている等の理由で、そのままの形態・状態でハンドリングできる。	90
3	活性であるが、燃料以外（廃棄物）である。 処理や回収などの作業に必要な情報が不十分。	74
4	燃料であり、活性（核分裂性を有する）である。 処理や回収などの作業に必要な情報が得られており（確認または推定でき）、モニタリング等により管理・監視が可能な状態である。 そのままの形態・状態でハンドリングできない。	50
5	燃料であり、活性（核分裂性を有する）である。 処理や回収などの作業に必要な情報が得られており、管理・監視が可能な状態である。 そのままの形態・状態でハンドリングできる。	30
6	活性であるが、燃料以外（廃棄物）である。 処理や回収などの作業に必要な情報がある。	17
7	不活性 ^{*2} であるが、物理的・幾何学的な不安定性がある。 そのままの形態・状態でハンドリングができない。	9
8	不活性であるが、物理的・幾何学的な不安定性がある。 そのままの形態・状態でハンドリングできる。	5
9	不活性であり、物理的・幾何学的な不安定性が無い、或いは、十分低い。 そのままの形態・状態でハンドリングができない。	3
10	不活性であり、物理的・幾何学的な不安定性が無い、或いは、十分低い。 そのままの形態・状態でハンドリングできる。	2
*1 「活性」とは、CF で定義する反応性を、管理や作業に影響を及ぼす程度に顕著に有するもの。 *2 「不活性」とは、反応性を有さない、或いは、十分低いもの。		

表 A3-5 SSR, BER, CU の定義とスコア

指標	スコア	判断基準	
SSR	25	5 年以内にリスクが顕在化する可能性がある。	
	5	40 年以内にリスクが顕在化する可能性がある。	
	1	40 年以上（リスクが顕在化する可能性はほぼ無い）。	
BER	20	対策の実施により、リスクを 2 桁以上低減可能、または管理が階段状に容易になる。	
	4	対策の実施により、リスクを 1 桁以上低減可能、ただし管理は容易にならない。	
	1	リスク低減効果が非常に小さく、管理も容易にならない。	
CU	20	①+②= 5~6 点	①現状に対する評価 1 点：主要な核種や拡散経路がモニタされている。 2 点：モニタされているが、評価モデルの構築に十分なデータはない。 3 点：モニタされていない。
	4	①+②= 3~4 点	②将来予測に対する評価 1 点：評価モデルの構築に十分なサイト特性が得られている。 2 点：サイトを代表する主要な特性が得られている。
	1	①+②= 2 点	3 点：将来予測に使用可能なモデルが無い。

添付資料4 主要なリスク源として明示的に取り扱っていないリスク源

主要なリスク源は本文表 1 のとおりであるが、福島第一原子力発電所全体の廃炉を見据えると、主要なリスク源では明示的に取り扱っていないリスク源にも着目しておく必要がある。表 A4-1 では、事故前から存在する廃棄物や事故により拡散された低濃度の放射性物質などに着目し、原子力規制委員会の中期的リスクの低減目標マップ¹²⁹も参考にして整理した。

表 A4-1 主要なリスク源として明示的に取り扱っていないリスク源 (1/2)

分野	リスク源	概略
液状の放射性物質	建屋内床面スラッジ	1～4号機のタービン建屋及び廃棄物処理建屋、4号機の原子炉建屋は床面露出状態を維持し、これらの露出後のスラッジは $1.9 \times 10^{13} \text{Bq}^{130}$ 。なお、1～3号機の原子炉建屋、プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋は滞留水処理を継続中。
	地下貯水槽	全地下貯水槽の残水回収は完了 ¹³¹ 。解体・撤去の方針は検討中。
	構内溜まり水	2015年のリスク総点検で抽出し ¹³² 、以降、適宜、放射性物質濃度、水量を確認している状況 ¹³³ 。
使用済燃料	5/6号機プール内燃料	5号機：1,374体、6号機：1,456体 ¹³⁴
	使用済制御棒等	使用済制御棒等：23,547本。シュラウド片等： 193m^3 ¹³⁵ 。主要核種はCo-60。
	プール水	2013年までに2～4号機の塩分除去完了。

¹²⁹ 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（2022年3月版） 原子力規制委員会

¹³⁰ 第87回特定原子力施設監視・評価検討会「資料3-5：建屋滞留水処理等の進捗状況について」

¹³¹ 第44回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料3-6：発電所内のモニタリング状況等について(1～3号機放水路の状況、地下貯水槽の状況について)」

¹³² 福島第一原子力発電所の敷地境界外に影響を与えるリスク総点検～検討結果～(2015年4月28日) 東京電力株式会社

¹³³ 第100回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料1：汚染水等構内溜まり水の状況(2022.3.24時点)」

¹³⁴ 第100回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料3-2：使用済燃料等の保管状況」

¹³⁵ 原子力規制委員会 被規制者との面談資料「福島第一原子力発電所における固体廃棄物について」 2021年6月18日 東京電力ホールディングス株式会社

表 A4-1 主要なリスク源として明示的に取り扱っていないリスク源 (2/2)

分野	リスク源	概略
固形状の放射性物質	建屋周辺のカレキ	水素爆発により建屋上屋に飛散したカレキの撤去が作業・計画 中。物量については未確認。
	震災前廃棄物	ドラム缶相当で 185,816 本保管 ¹³⁶ 。主要核種は Co-60。
外部事象等への対応	建屋への雨水流入水	屋上のカレキ撤去・新規防水。雨樋への浄化材設置。排水管への逆止弁設置。ルーフトレインの改修・閉塞 ¹³⁷ 。T.P.2m、T.P.6m 及び T.P.8.5m 盤のフェーシングを完了 ¹³⁸ 。
	メガフロート	着底・内部充填作業完了 ¹³⁹ 。護岸整備工事及び盛土工事を実施中。
廃炉作業を進める上で重要なもの	オベフロのダスト	放出管理目標値 (1×10^7 Bq/h) 未満。徐々に低下傾向 ¹⁴⁰ 。
	3号機原子炉建屋 3・4階の放射線源	3階では、複数箇所の梁が損傷、最大 45mSv/h を測定。4階では 104mSv/h を確認 ¹⁴¹ 。
	排水路	A 排水路では Cs-137 : ND~23Bq/L へ低下 ¹⁴² 。K 排水路では 2号機原子炉建屋屋上の汚染源除去を実施し、67Bq/L まで低下。その他、浄化材を設置 ¹⁴³ 、弁別型 PSF モニタの運用等の対策を実施 ¹⁴⁴ 。
	排気筒	1/2 号機排気筒：2019 年 8 月より解体作業を実施し、全高 120m のうち、上部 61m を全 23 ブロックに分割して解体。2020 年 5 月 1 日に地上 59m の筒身部に雨水侵入防止用の蓋を設置し解体完了 ¹⁴⁵ 。 3/4 号機排気筒：基部で 3mSv/h を測定 ¹⁴⁶ 。
	汚染土壌	表土分析の結果、採取サンプルの半数以上が放射性物質対処措置法に基づく指定基準 (8,000Bq/kg) を超過 ¹⁴⁷ 。

¹³⁶ 原子力規制委員会 被規制者との面談資料「福島第一原子力発電所使用済燃料共用プール運用補助共用施設排気放射線モニタおよび燃料貯蔵区域換気空調系の復旧状況について」2018 年 9 月 21 日 東京電力ホールディングス株式会社

¹³⁷ 第 78 回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料 3-1: 屋根雨水対策の進捗状況」

¹³⁸ 第 84 回特定原子力施設監視・評価検討会「資料 1-3: 汚染水発生抑制対策の進捗及び検討状況 建屋毎の地下水及び雨水流入量」

¹³⁹ 第 81 回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料 3-1: 1F メガフロートの津波リスク低減完了について」

¹⁴⁰ 福島第一原子力発電所における日々の放射性物質の分析結果(ウェブサイト)東京電力ホールディングス株式会社

¹⁴¹ 第 14 回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料 3: 現地調査の実施状況について」

¹⁴² 第 32 回特定原子力施設監視・評価検討会「資料 2: K 排水路の廃水濃度低減対策状況について」

¹⁴³ 第 63 回特定原子力施設監視・評価検討会「資料 2: 雨水流入抑制対策 (タービン建屋雨水排水 浄化材設置の進捗状況)」

¹⁴⁴ 第 74 回廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議「資料 3-6: K 排水路における PSF モニタの運用開始について」

¹⁴⁵ 「福島第一原子力発電所 1/2 号機排気筒解体作業完了について」(2020 年 5 月 1 日) 東京電力ホールディングス株式会社

¹⁴⁶ 第 19 回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会「資料 4: 東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間とりまとめ(案)」

¹⁴⁷ 福島第一原子力発電所における日々の放射性物質の分析結果(ウェブサイト)東京電力ホールディングス株式会社

添付資料5 リスクの時間変化

英国のリスク管理の考え方の概要を、図 A5-1 に示す。現在のリスクレベルが白色の領域にあるとしても、そのままの状態がいつまでも許容されるわけではなく、許容できない時期が到来する（黄色の領域）。さらに、時間の経過とともに、施設やリスク源の劣化等によりリスクレベルが増加する可能性がある（点線）。一方、リスク低減措置を実施する場合には、リスクレベルが一時的に増加する可能性があるものの、周到な準備と万全の管理によって、受容できない領域（赤色の領域）に入らないようにすることが可能である。このように、受容又は許容できない領域に入ることなく、リスクレベルを十分に下げることを目指すべきである（実線）。

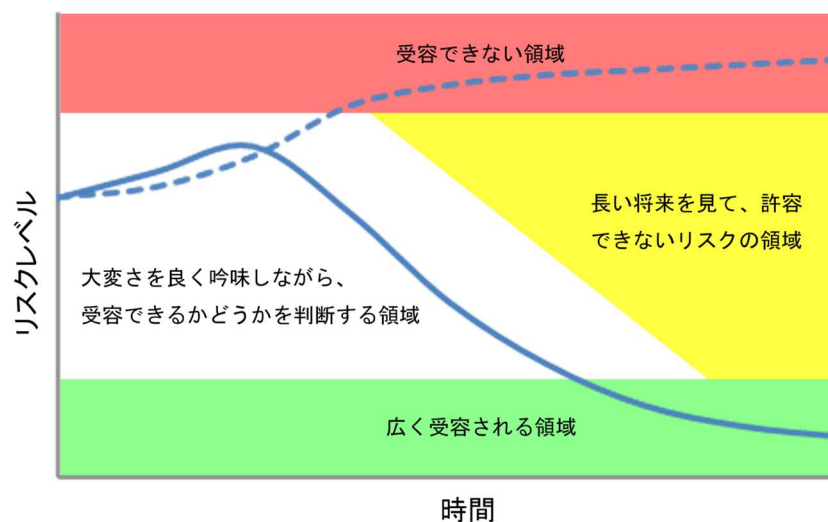


図 A5-1 リスクの時間変化¹⁴⁸

¹⁴⁸ V. Roberts, G. Jonsson and P. Hallington, "Collaborative Working Is Driving Progress in Hazard and Risk Reduction Delivery at Sellafield" 16387, WM2016 Conference, March 6-10, 2016. M. Weightman, "The Regulation of Decommissioning and Associated Waste Management" 第1回福島廃炉国際フォーラム（2016年4月）。

添付資料6 燃料デブリ取り出しの対象となる燃料デブリについて

東京電力（株）福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ（2011 年 12 月 21 日）においては、燃料デブリを「燃料と被覆管等が溶融し再固化したもの」と解説しており、IAEA のレポート^{149,150}の趣旨に従うと、燃料デブリとは「燃料集合体、制御棒、炉内の構造材がともに溶融して固まった燃料」である。

PCV 内の状態を、これまでの内部調査、TMI-2 やチヨルノービリ原子炉といった過去の事故事例、溶融再現試験等の結果から総合的に想定したものを図 A6-1 に示す。ただし、図の損傷状況は特定の号機を示しているものではない。図中に示されるように、詳細にみると、燃料デブリは損傷ペレット、デブリ、クラスト等のように形態に応じて呼称することができる。

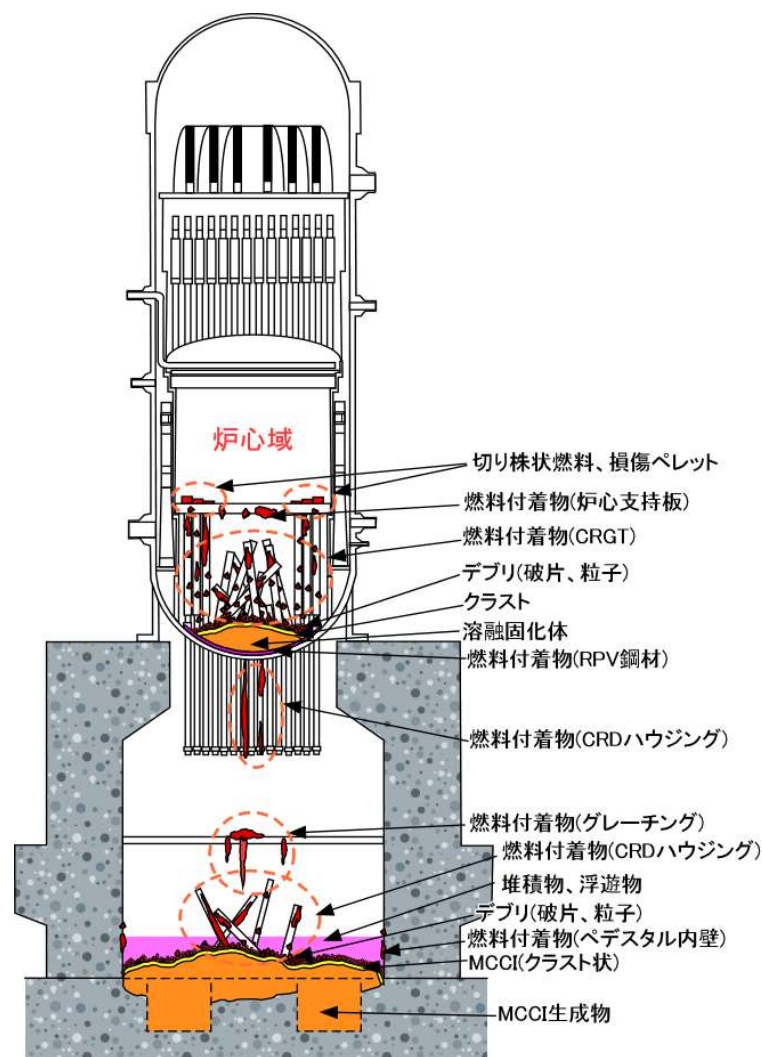


図 A6-1 福島第一原子力発電所で想定される PCV 内の状態

¹⁴⁹ International Atomic Energy Agency Experiences and Lessons Learned Worldwide in the Cleanup and Decommissioning of Nuclear Facilities in the Aftermath of Accidents, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.7, Vienna (2014)

¹⁵⁰ Managing the Unexpected in Decommissioning, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.8, Vienna (2016)

核燃料物質を含むものには臨界性への配慮が必要であるため、今後の取り出し、収納・移送・保管の観点から、PCV内に存在する物質は、核燃料物質を含むものと含まないものに大きく分類することが合理的であると考えられる。核燃料物質を含まないものは、放射性のセシウムやコバルトが含有され、あるいは付着している場合には放射性廃棄物として取り扱うことになる。

以上を踏まえ、燃料デブリ取り出しの対象としての燃料デブリの概念を整理した一例が図 A6-2 である。炉心損傷により生じた物質は、燃料成分の含有量、外観上の形態から様々な呼称があるが、臨界対策の必要性、燃料含有量により分類した。

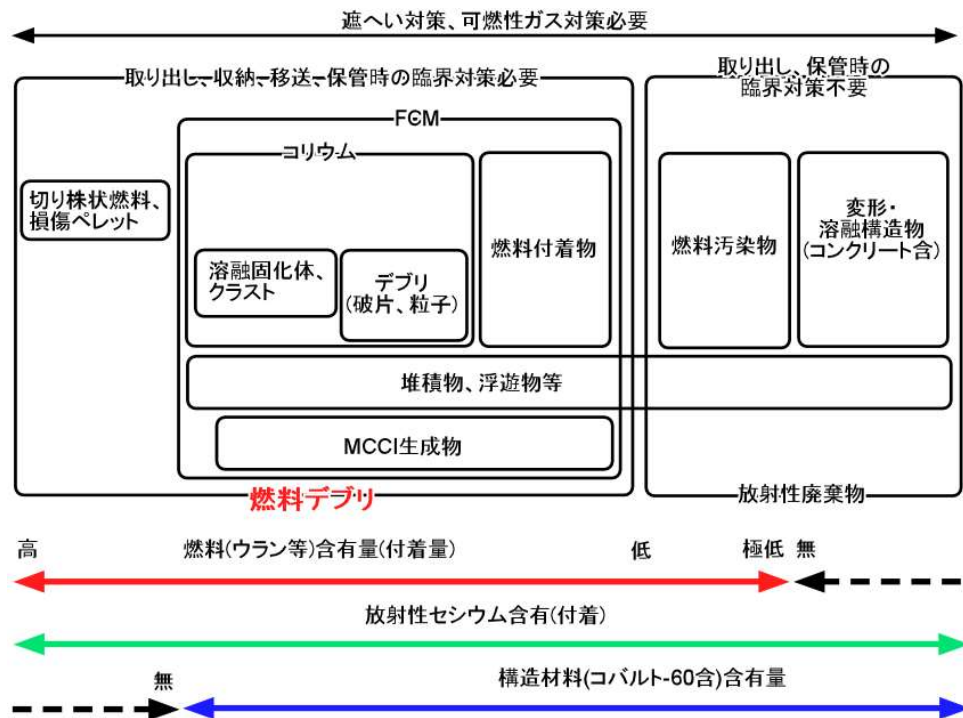


図 A6-2 福島第一原子力発電所事故における燃料デブリ取り出しの対象となる燃料デブリの概念整理の例

【用語解説】

- ・ FCM : Fuel Containing Materials (燃料含有物質)。溶融した燃料成分が構造材を巻き込みながら、固化したものを広義に指す。外観から、lava-like FCM (溶岩状 FCM) と呼称することもある。
- ・ コリウム : corium。主に炉心成分である燃料集合体、制御棒成分が溶融固化したもの。
- ・ クラスト : crust。固い外皮、甲殻のこと。溶融した燃料が固化する際に表面層では冷却速度が大きいため、殻状に硬く固化することがある。
- ・ MCCI 生成物 : Molten Core Concrete Interaction (溶融炉心コンクリート相互作用) により生じたもの。コンクリート成分である、カルシウム、ケイ素等を含む。
- ・ 燃料付着物 : CRD ハウジング、グレーティング等、元来、燃料成分を含まない部材に溶融した燃料が付着、固化したもので、目視で燃料の付着が確認可能なもの。
- ・ 燃料汚染物 : 目視では溶融した燃料の付着が確認できないが α 線検出器等により燃料成分が検知されるもの。付着している燃料成分の粒子の大きさが極めて小さく、かつ微量であるために、電子顕微鏡でなければ、燃料成分の所在が特定できないもの。

添付資料7 これまでの技術戦略プランにおける工法検討の変遷

技術戦略プラン2015及び2016では、PCV内水位レベル（完全冠水、冠水、気中、完全気中）や燃料デブリへのアクセス方向（上アクセス・横アクセス・下アクセス）の組み合わせによる燃料デブリ取り出し工法オプションの検討を行い、重点的な検討を進めるべき3つの工法（①冠水-上アクセス工法、②気中-上アクセス工法、③気中-横アクセス工法）を選定し、その検討を進めてきた。（図1～3参照）

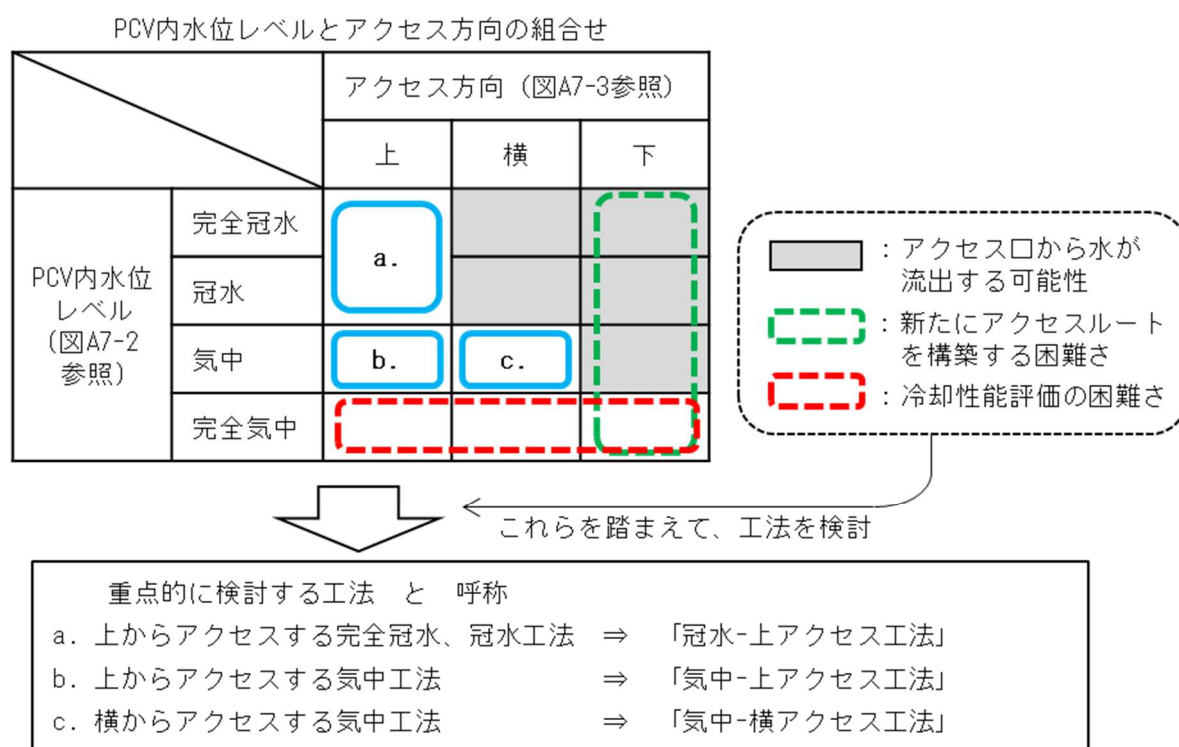
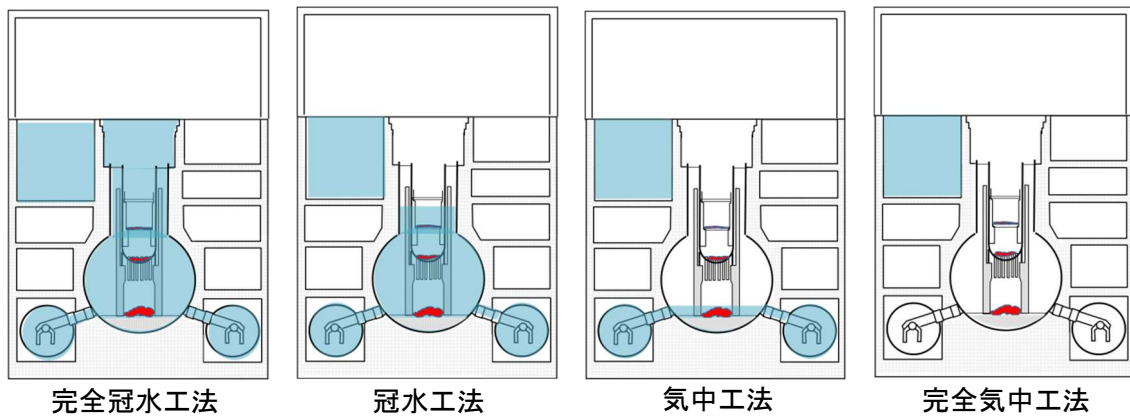


図 A7-1 PCV 水位と燃料デブリへのアクセス方向の組合せによる工法の検討



- 完全冠水工法：原子炉ウェル上部までの水張りを行う工法
- 冠水工法：燃料デブリ分布位置より上部までの水張りを行う工法
 (補足) 現状、燃料デブリは炉心領域より上に分布がないものと想定し、炉心領域上端部以上の水位では、冠水工法と呼ぶ。
- 気中工法：燃料デブリ分布位置最上部より低いレベルまで水張りを行い、気中の燃料デブリには水を掛けながら取り出しを行う工法
 (補足) 現状、炉心領域上端部より下の水位では、気中に露出する燃料デブリが存在すると想定し、気中工法と呼ぶ。
- 完全気中工法：燃料デブリ分布全範囲を気中とし、水冷、散水を全く行わない工法

図 A7-2 PCV 内水位レベルに応じた工法分類

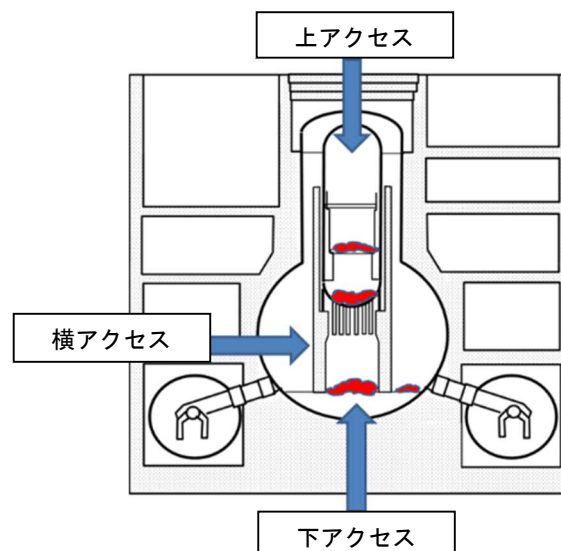


図 A7-3 燃料デブリへのアクセス方向

技術戦略プラン 2017 においては、上記の 3 つの燃料デブリ取り出し工法に関して、燃料デブリの安全な取り出しのために満足すべきものとして 9 つの技術要件（①閉じ込め機能、②冷却機能、③臨界管理、④構造健全性、⑤被ばく低減、⑥労働安全、⑦アクセスルート、⑧機器・装置開発、⑨系統設備・エリア構築）に加え、燃料デブリの安全・安定保管に係る 3 つの技術要件（①収納・移送・保管、②取り出し作業で発生する廃棄物の取扱い、③保障措置）に関してそれぞれ実現可能性評価を行い、5 つの基本的考え方（安全、確実、合理的、迅速、現場指向）による総合評価の上で、燃料デブリ取り出し方針の決定に向けた戦略的提案（燃料デブリ取り出し方針の決定に向けた提言と決定以降の取組）を行った。2017 年 9 月に改訂された中長期ロードマップでは、この戦略的提案の内容を踏まえ、燃料デブリ取り出し方針が次のように決定されている。

燃料デブリ取り出し方針

① ステップ・バイ・ステップのアプローチ

早期のリスク低減を図るため、先行して着手すべき燃料デブリ取り出し工法を設定した上で、取り出しを進めながら徐々に得られる情報に基づいて、柔軟に方向性を調整するステップ・バイ・ステップのアプローチで進める。

燃料デブリ取り出し作業と原子炉格納容器内部及び原子炉圧力容器内部の調査は相互に連携させながら一体的に実施する。燃料デブリ取り出しは、小規模なものから始め、燃料デブリの性状や作業経験などから得られる新たな知見を踏まえ、作業を柔軟に見直しつつ、段階的に取り出し規模を拡大していく。

② 廃炉作業全体の最適化

燃料デブリ取り出しを、準備工事から取り出し工事、搬出・処理・保管及び後片付けまで、現場における他の工事等との調整も含め、全体最適化を目指した総合的な計画として検討を進める。

③ 複数の工法の組み合わせ

単一の工法で全ての燃料デブリを取り出すことを前提とせず、号機毎に、燃料デブリが存在すると考えられる部位に応じた最適な取り出し工法を組み合わせる。

現時点では、アクセス性の観点から、原子炉格納容器底部には横からアクセスする工法、原子炉圧力容器内部には上からアクセスする工法を前提に検討を進めることとする。

④ 気中工法に重点を置いた取組

原子炉格納容器上部止水の技術的難度と想定される作業時の被ばく量を踏まえると、現時点で冠水工法は技術的難度が高いため、より実現性の高い気中工法に軸足を置いて今後の取組を進めることとする。

なお、冠水工法については、放射線の遮へい効果等に利点があること等を考慮し、今後の研究開発の進展状況を踏まえ、将来改めて検討の対象とすることも視野に入れる。

⑤ 原子炉格納容器底部に横からアクセスする燃料デブリ取り出しの先行

各号機においては、分布の違いはあるが、原子炉格納容器底部及び原子炉圧力容器内部の両方に燃料デブリが存在すると分析されている。取り出しに伴うリスクの増加を最小限に留めながら、迅速に燃料デブリのリスクを低減する観点から、以下の項目を考慮し、まず、原子炉格納容器底部にある燃料デブリを横からのアクセスで取り出すことを先行することとする。

○原子炉格納容器底部へのアクセス性が最もよく、原子炉格納容器内部調査を通じて一定の知見が蓄積されていること

○より早期に燃料デブリ取り出しを開始できる可能性のあること

○使用済燃料の取り出し作業と並行し得ること

技術戦略プラン2018及び2019では、初号機とその燃料デブリ取り出し方法の検討を行っている。初号機とその取り出し方法の検討プロセスとしては、これまでの研究開発成果やPCV内部調査結果等を基に、東京電力による予備エンジニアリングにおける燃料デブリ取り出しシステムの概念検討とその号機ごとの現場適用性の評価に基づいたシナリオ（作業工程案）を踏まえ、各号機のシナリオとサイト全体の計画を組み合わせた全体最適化を検討して、初号機の燃料デブリ取り出し方法の確定に向けた提言をまとめている。検討の流れを図1に示す。

上記検討の結果、燃料デブリを取り出した上で、収納・移送した後に安定的に保管するまでの一連の作業を継続して行う「燃料デブリ取り出し方法」としては、取り出しに伴うリスク増加を最小限に留めながら、「迅速」に小規模な取り出しを開始し、取り出し規模を拡大した取り出しや初号機以外での取り出しに向けた情報・経験などを「迅速」に得ることで、1～3号機の燃料デブリ全体のリスクを低減する。具体的には、現場の状態は大きく変えずに、既存の安全システムの活用を基本として、現場適用の目処が立ちつつあるアーム型アクセス装置とそれを格納する気密性を有したエンクロージャ等を用い、把持、吸引といった方法から始めることで、「安全」、「確実」、「迅速」に実施できる可能性があると評価している。なお、把持、吸引だけでなく、小規模な取り出しで燃料デブリの切削等を行う場合は、既存の安全システムの大幅な変更を行わない範囲で行う。

最後に、技術戦略プラン2020及び2021では、燃料デブリ取り出し方法の取組の考え方や方針等が提言されているが、工法自体の検討は従前から新たな進捗は無いため、ここでは技術戦略プランの内容は省略する。

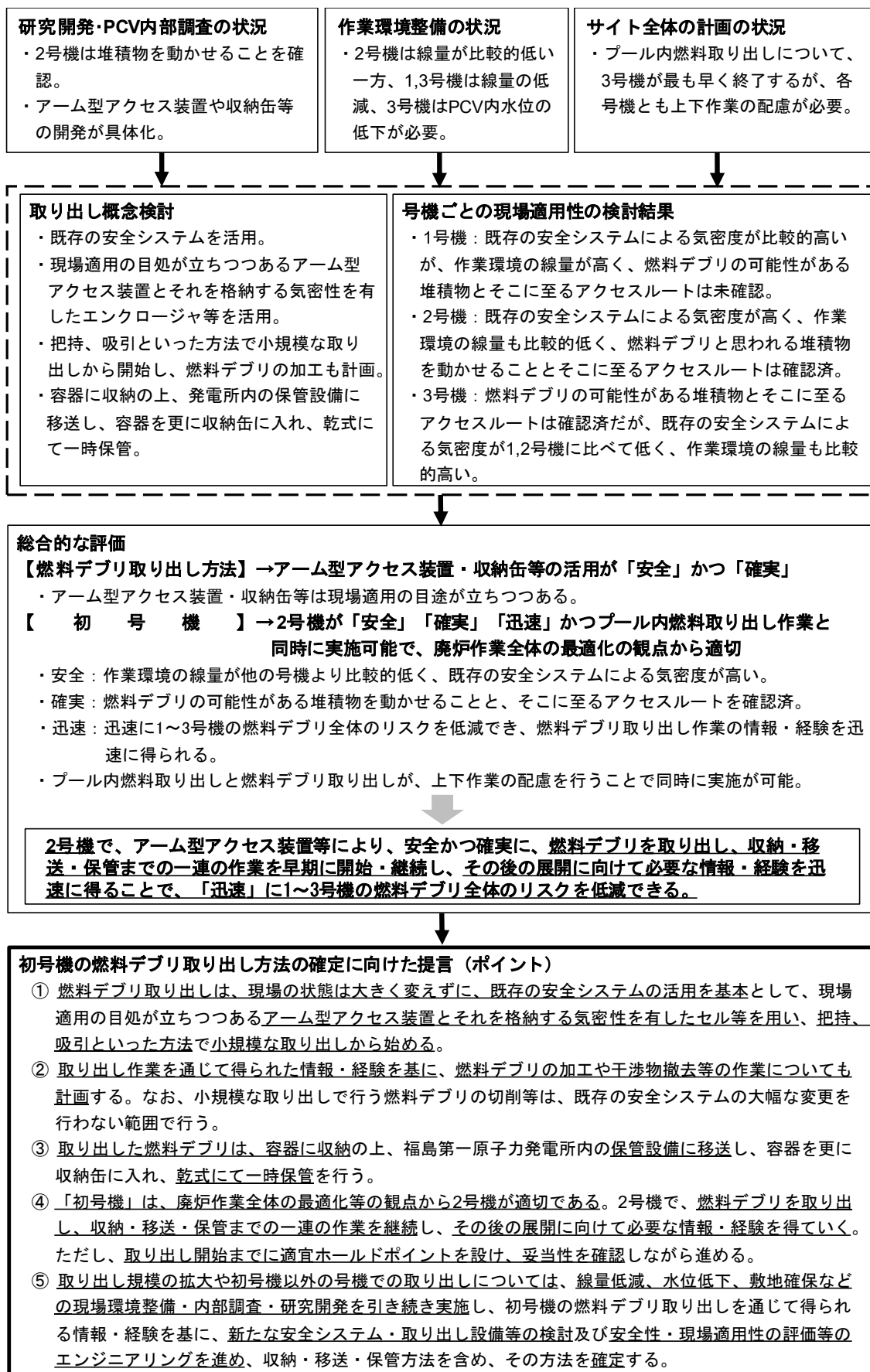


図 A7-4 初号機の燃料デブリ取り出し方法の確定の検討の流れ

添付資料8 放射性廃棄物管理に関する用語

IAEA の安全要件 GSR-Part5¹⁵¹では、処理、貯蔵及び輸送を含む、発生から処分に至るまでの放射性廃棄物の管理におけるあらゆる段階を包含するものとして放射性廃棄物の処分前管理（predisposal）を位置づけている。IAEA の用語集において定義されている放射性廃棄物の管理に関する用語を図 A8-1 に示す。処分前管理の中で、放射性廃棄物の処理（processing）は、前処理（pretreatment）、処理（treatment）及び廃棄体化（conditioning）に分けられる。処理（processing）は選択あるいは予想される処分オプションに適合する廃棄物の形態であるように実施されるとともに、放射性廃棄物はその管理において貯蔵される可能性があり、輸送及び貯蔵のために適した形態であることも必要であるとされている。

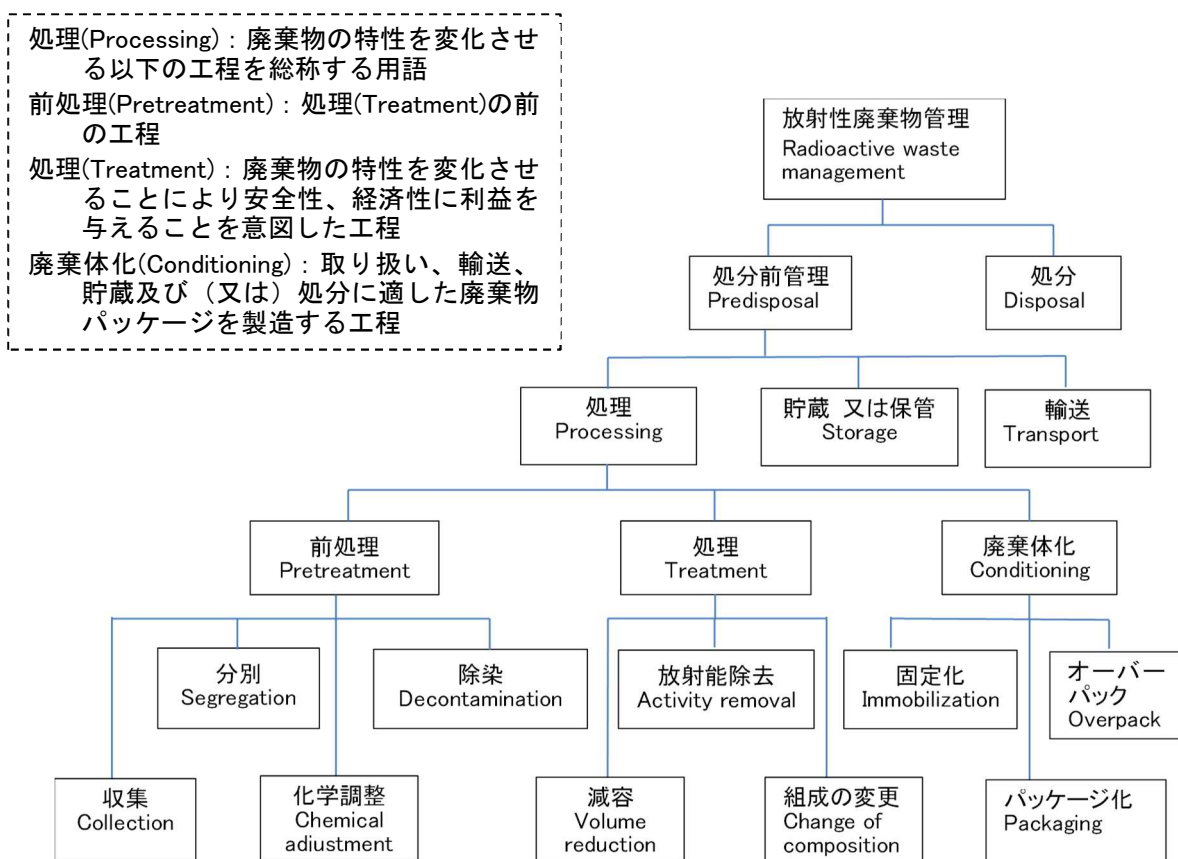


図 A8-1 放射性廃棄物管理に係る用語（IAEA）152とその和訳例
（和訳例については日本原子力学会の資料153, 154を参考にした）

¹⁵¹ IAEA, Predisposal Management of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 5, (2009).
（原子力安全研究協会, IAEA 安全基準 放射性廃棄物の処分前管理 一般安全要件第 5 巻 No. GSR-Part5, 2012 年 7 月）

¹⁵² IAEA, IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2007 Edition, p.216, (2007).

¹⁵³ 日本原子力学会「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, 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 平成 25 年度報告書 ～廃棄物情報の整理と課題解決に向けた考慮事項～, p.7, 2014 年 3 月.

¹⁵⁴ 長尾誠也, 山本正史, 放射性廃棄物概論 施設の運転および廃止措置により発生する放射性廃棄物の対策 第 1 回放射性廃棄物対策の概要, 日本原子力学会誌 56(9), p.593, (2014).

添付資料9 放射性廃棄物処分について^{155,156,157}

1. 国際的な放射性廃棄物の分類

原子力発電所の運転や解体、医療あるいは産業での放射性同位元素の利用などにより、放射性物質で汚染された放射性廃棄物が発生する。放射性廃棄物は、人間の生活環境に影響がないように、廃棄物の放射能レベル、性状、放射性物質の種類などに応じて適切に分類し、厳重に管理し、それに応じて合理的な処理・処分を行う。

IAEA の個別安全要件 SSR-5 “Disposal of Radioactive Waste”(2011)¹⁵⁸では、国際的に合意されている放射性廃棄物の管理に関する好ましい戦略は、放射性廃棄物の発生を最小化した上で、廃棄物を閉じ込め、生活環境から隔離することとしている。必要な隔離と閉じ込めは、廃棄物の危険性の程度と時間に応じて決まり、それに応じた処分オプション（施設の設計、深度）が選定されることとなる。

IAEA の一般安全指針 GSG-1 “Classification of Radioactive Waste”¹⁵⁹では、放射性廃棄物の危険性の程度（放射エネルギー）と持続時間（半減期）に応じた廃棄物分類と処分オプションの関係を図 A9-1 のように示している。また、各分類について表 A9-1 のとおり示している。

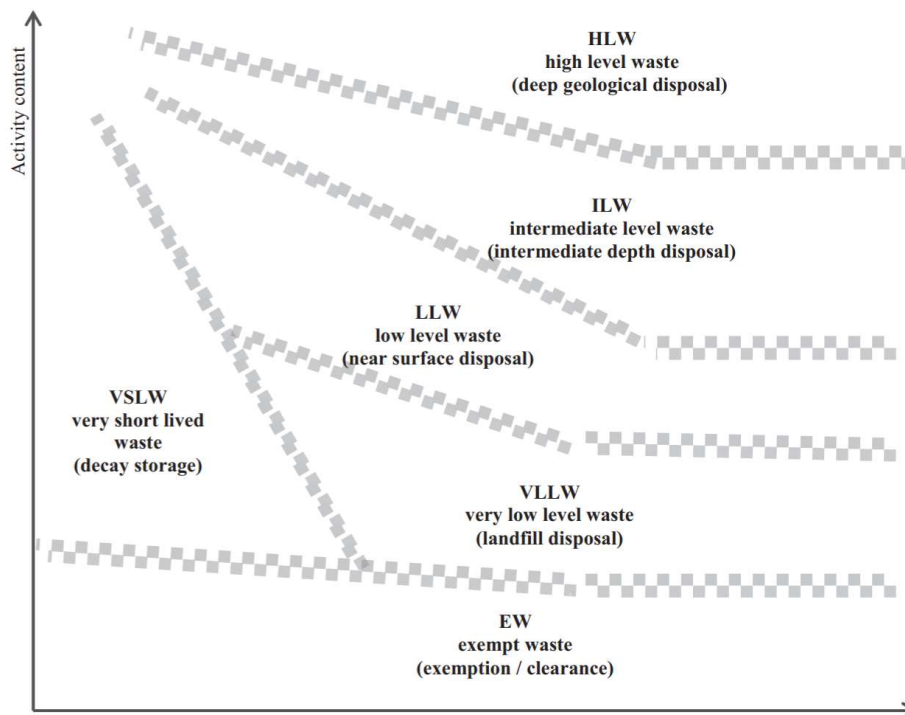


図 A9-1 廃棄物分類の概念図

¹⁵⁵ 朽山修 放射性廃棄物処分の原則と基礎 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター(2016)

¹⁵⁶ https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/

¹⁵⁷ <https://www.fepec.or.jp/nuclear/haikibutsu/index.html>

¹⁵⁸ IAEA SSR-5 “Disposal of Radioactive Waste”(2011)

¹⁵⁹ IAEA GSG-1 “Classification of Radioactive Waste” (2009)

表 A9-1 GSG-1 における放射性廃棄物の分類

分類	分類の説明
規制免除廃棄物(EW)	放射線防護目的での規制管理からのクリアランス、規制除外、免除の基準を満たす廃棄物
極短寿命廃棄物(VSLW)	規制機関によって承認された、数年までの限られた期間にわたって減衰保管され、その後規制管理から除かれる廃棄物。
極低レベル廃棄物(VLLW)、	EW の基準を必ずしも満たしていないが、高度な閉じ込めと隔離を必要としない廃棄物。規制管理が限定される、浅地中の埋立タイプの施設での廃棄に適する。
低レベル廃棄物(LLW)	クリアランスレベルを超えているが、長寿命の放射性核種の量が限られている廃棄物。最長で数百年の期間にわたって強固な隔離と閉じ込めが必要であり、浅地中での工学的施設での処分に適しています。
中レベル廃棄物(ILW)	含有する核種、特に長寿命放射性核種のために、浅地中処分よりも高度な閉じ込めと隔離が必要な廃棄物。ただし除熱への考慮はほとんど必要としない。ILW には浅地中処分では管理できないレベルの長寿命放射性核種（特にアルファ核種）の濃度を含むことがあるため、数十から数百メートルの処分深度が必要となる。
高レベル廃棄物(HLW)	高い放射能濃度レベルで大量の熱の発生を伴う廃棄物、またはそのような廃棄物の処分施設と同等の設計を検討する必要がある大量の長寿命放射性核種を含む廃棄物。通常、地表から数百メートル以深の安定した地層での処分が一般的である。国によっては使用済燃料を HLW としている。

2. 我が国における分類と処分

我が国では、放射性廃棄物は、原子力発電所の運転などにもない発生する放射能レベルの低い「低レベル放射性廃棄物」（GSG-1 の VLLW～ILW に相当）と、原子力発電の運転に伴って発生する使用済燃料を再処理することで生じる放射能レベルの高い廃液をガラス固化体にした「高レベル放射性廃棄物」（GSG-1 の HLW に相当）とに大別している。処分に当たっては、廃棄物の放射能レベル、性状、放射性物質の種類などに応じて適切に分類し、厳重に管理し、それに応じて発生者責任の原則の下、合理的な処理・処分を行うこととしている。

「高レベル放射性廃棄物」は原子力発電の運転に伴って発生する使用済燃料を再処理することで生じる放射能レベルの高い廃液をガラス固化体にしたものである。日本では、法律（特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法））で地下 300 メートルよりも深い地層に処分することが決められている。

「低レベル放射性廃棄物」は「高レベル放射性廃棄物」以外の放射性廃棄物全体のことを呼び、発生場所や放射能レベルによって更に複数の分類に分けられている。

原子力発電の運転に伴い発生する放射性廃棄物の種類や想定されている処分の方法を表 A9-2 に示す。

これらのうち既に処分が開始されているのは、原子力発電所の運転に伴い発生した放射能レベルの比較的低い廃棄物のみで、平成 4 年より、青森県六ヶ所村にある日本原燃(株)六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターでピット処分が行われている。現在の施設を含めて 200 リットルドラ

ム缶で約 100 万本相当を埋設する計画であり、最終的には 200 リットルドラム缶で約 300 万本相当の規模にすることも考えられている。

表 A9-2 原子力発電の運転に伴い発生する放射性廃棄物の種類

廃棄物の種類		廃棄物の例	発生場所	処分の方法(例)
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	放射能レベルの 極めて低い 廃棄物	原子力発電所	トレンチ処分
		放射能レベルの 比較的低い 廃棄物		ビット処分
		放射能レベルの 比較的高い 廃棄物		中深度処分
	ウラン廃棄物		ウラン濃縮・燃料加工施設	中深度処分、ビット処分、トレンチ処分、場合によっては地層処分
	超ウラン核種を含む放射性廃棄物 (TRU廃棄物)		再処理施設、MOX燃料加工施設	地層処分、中深度処分、ビット処分
高レベル放射性廃棄物		ガラス固化体	再処理施設	地層処分
クリアランスレベル以下の廃棄物		原子力発電所解体廃棄物の大部分	上に示した全ての発生場所	再利用/一般の物品としての処分



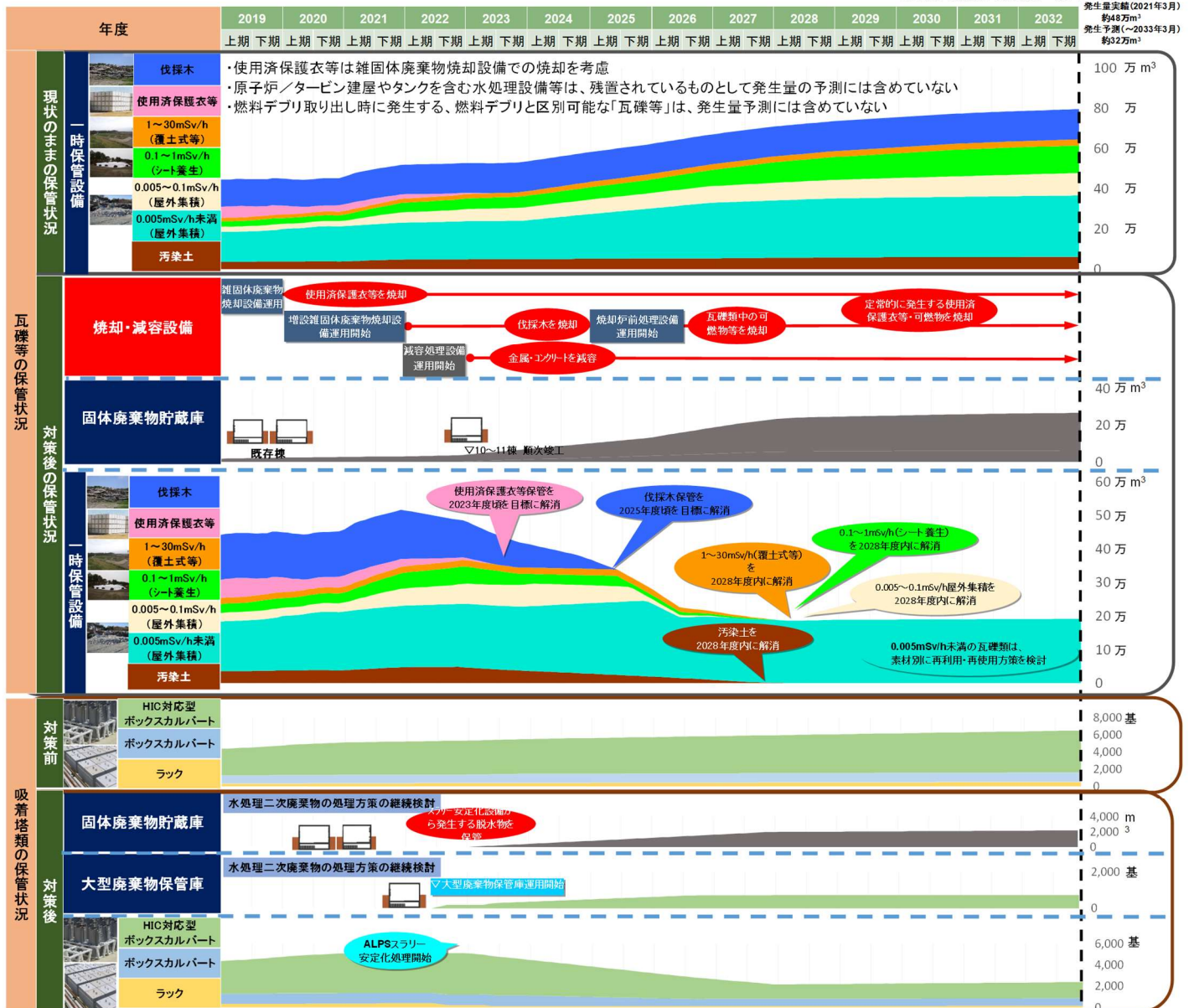
図 A9-2 日本原燃（株） 低レベル放射性廃棄物埋設センター

添付資料10 福島第一原子力発電所の固体廃棄物の保管管理計画の全体イメージ¹⁶⁰

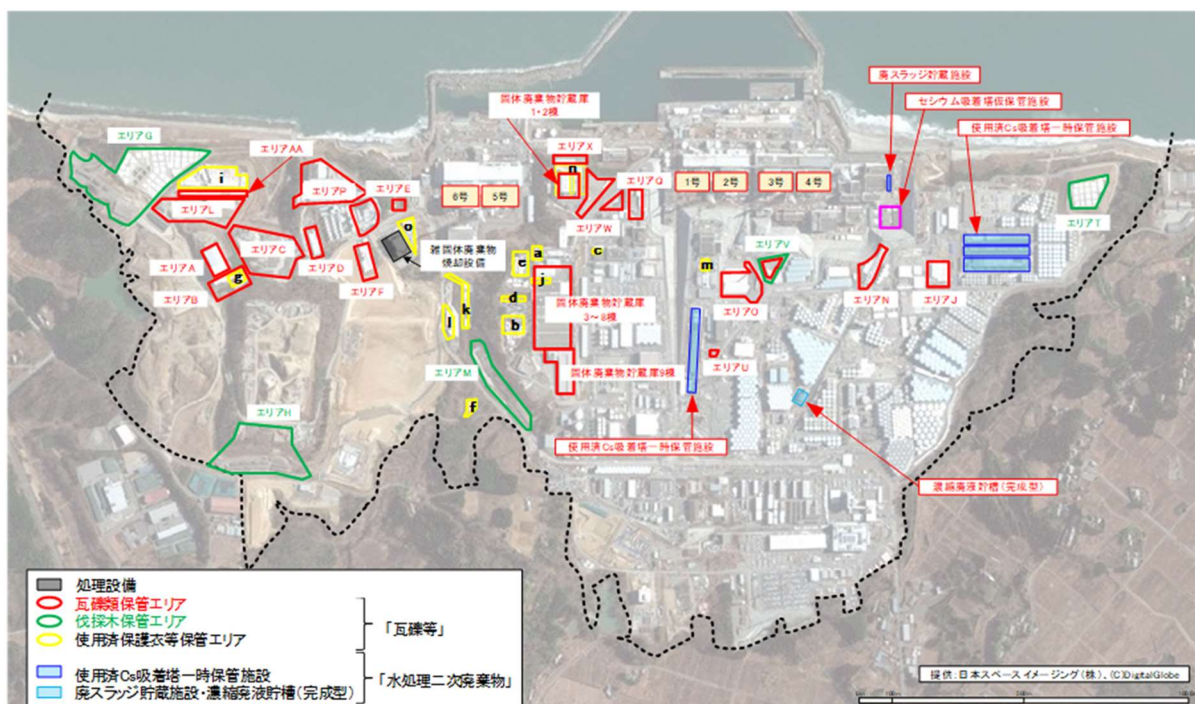
東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の固体廃棄物の保管イメージ

- ・敷地境界線量への影響が高い瓦礫等から優先的に建屋内保管に移行
- ・可能な限り、可燃物は焼却、金属・コンクリートは減容処理した上で、建屋内に保管
- ・今後の廃炉作業の進捗状況や瓦礫等発生量の将来予測の見直し等を、適宜反映していく

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社



¹⁶⁰ 東京電力、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 2021年7月版、2021年7月29日



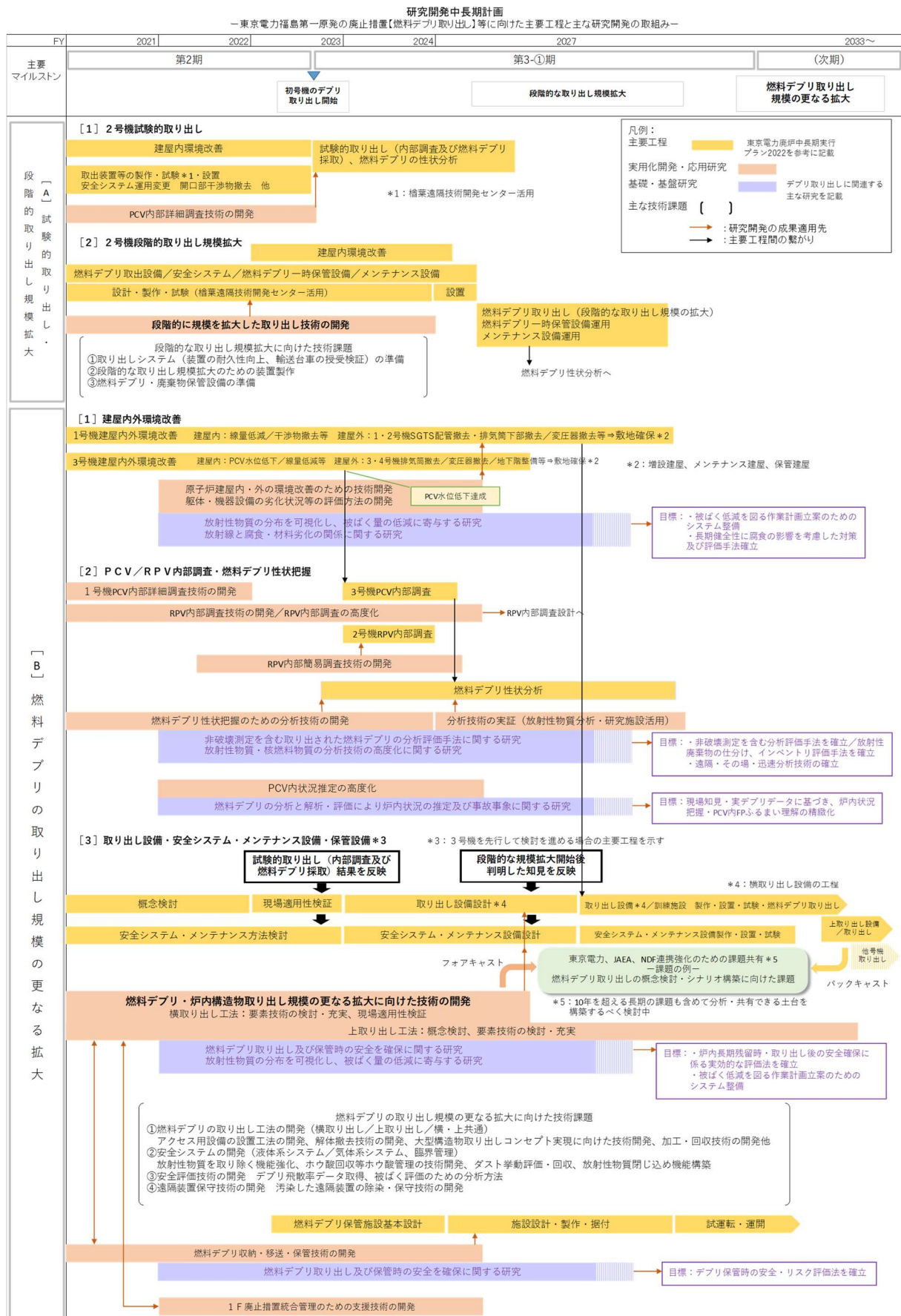
(a) 「ガレキ等」及び「水処理二次廃棄物」の保管状況



(b) 「ガレキ等」及び「水処理二次廃棄物」の保管の将来像

図 A10-1 福島第一原子力発電所構内における「ガレキ等」及び「水処理二次廃棄物」
の保管状況及び保管の将来像

添付資料11 研究開発中長期計画





添付資料12 廃炉・汚染水対策事業における研究開発のこれまでの取組¹⁶¹

【A】試験的取り出し・段階的取り出し規模拡大

〔A 1〕2号機試験的取り出し

- ・原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発（X-6 ペネトレーションを用いた内部詳細調査技術の現場実証）（2018～2019 年度）
（関連事業）原子炉内燃料デブリ検知技術の開発（ミュオン活用）（2014～2015 年度）
原子炉格納容器内部調査技術の開発（2011～2017 年度）
原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発（2017～2018 年度）

〔A 2〕2号機段階的取り出し規模拡大

- ・燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発（2017～2022 年度）
※2020 年度事業名称変更（旧名称：燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けたサンプリング技術の開発）

【B】燃料デブリの取出し規模の更なる拡大

〔B 1〕建屋内外環境改善

- ・原子炉建屋内の環境改善のための技術開発（2021～2022 年度）
- ・圧力容器／格納容器の耐震性・影響評価手法の開発（2016～2017 年度）
（関連事業）圧力容器／格納容器の健全性評価技術の開発（2011～2013 年度）
圧力容器／格納容器健全性評価技術の開発（2014～2015 年度）
- ・原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発（2014～2015 年度）
（関連事業）建屋内の遠隔除染技術の開発（2011～2013 年度）

〔B 2〕PCV／RPV 内部調査・燃料デブリ性状把握

- ①原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発（2021～2022 年度）
（関連事業）原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発（堆積物対策を前提とした内部詳細調査技術の現場実証）（2018～2020 年度）
- ②原子炉圧力容器内部調査技術の開発（2013～2023 年度）
- ③燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（2017～2022 年度）
（関連事業）模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発（2011～2014 年度）
燃料デブリに係る計量管理方策の構築（2011～2013 年度）
実デブリ性状分析（2014 年度）

¹⁶¹ 廃炉研究開発情報ポータルサイト（<http://www.drd-portal.jp/>）

燃料デブリの性状把握（2015～2016 年度）

燃料デブリの性状把握・分析技術の開発（2017～2018 年度）

（その他の研究開発）

・総合的線量低減計画の策定（2012～2013 年度）

・サプレッションチェンバ等に堆積した放射性物質の非破壊検知技術の開発（2014 年度）

・総合的な炉内状況把握の高度化（2016～2017 年度）

（関連事業）炉内状況把握のための事故進展解析技術の高度化（2011 年度）

事故進展解析技術の高度化による炉内状況の把握（2012～2013 年度）

過酷事故解析コードを活用した炉内状況把握（2014 年度）

事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化（2015 年度）

[B 3] 取り出し設備・安全システム・メンテナンス設備・保管設備

①燃料デブリ取り出し工法の開発（2021～2022 年度）

（関連事業）燃料デブリ・炉内構造物の取り出し技術の開発（2014 年度）

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化（2015～2018 年度）

燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基礎技術開発（2015～2018 年度）

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術開発（2019
～2021 年度）

②安全システム（2021～2022 年度）

（関連事業）燃料デブリ臨界管理技術の開発（2012～2016 年度）

③遠隔装置保守技術の開発（2021～2022 年度）

④燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発（2014～2022 年度）

⑤福島第一原子力発電所廃止措置統合管理のための支援技術の開発（2021～2022 年度）

（その他の研究開発）

・原子炉格納容器水循環システム構築技術の開発（2018～2019 年度）

・燃料デブリ・炉内構造物の取り出し基盤技術の高度化（2017～2018 年度）

（関連事業）燃料デブリ・炉内構造物の取り出し基盤技術開発（2015～2016 年度）

・原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の開発（2016～2017 年度）

（関連事業）格納容器漏えい箇所特定技術の開発（2011～2013 年度）

格納容器補修技術の開発（2011～2013 年度）

格納容器水張に向けた補修（止水）技術の開発（2014～2015 年度）

- ・ 原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の実規模試験（2016～2017 年度）
（関連事業）原子炉格納容器漏えい箇所の補修・止水技術の実規模試験（2014～2015 年度）
- ・ 圧力容器／格納容器の腐食抑制技術の開発（2016 年度）

【C】廃棄物対策

- ・ 固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発（2013～2023 年度）
（関連事業）汚染水処理に伴う二次廃棄物の処理・処分技術開発（2012 年度）
放射性廃棄物の処理・処分技術の開発（2012 年度）
事故廃棄物処理・処分技術の開発（2014 年度）

（その他の対策）

【I】使用済燃料対策

- ・ 使用済燃料プールから取り出した燃料集合体の長期健全性評価（2015～2016 年度）
（関連事業）使用済燃料プールから取り出した燃料集合体他の長期健全性評価（2012～2014 年度）
- ・ 使用済燃料プールから取り出した損傷燃料等の処理方法の検討（2013～2014 年度）

【II】汚染水対策

- ・ トリチウム分離技術検証試験（2014～2015 年度）
- ・ 汚染水処理対策技術検証（2014 年度）
- ・ 凍土方式遮水壁大規模実証（2014 年度）
- ・ 高性能多核種除去設備（高性能 ALPS）整備実証（2014 年度）

添付資料13 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業（英知事業） 選定課題

課題解決型廃炉研究プログラム 令和3年 選定課題(8課題)

提案課題名	研究代表者 [所属機関]	参画機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹 [東北大学]	芝浦工業大学、東京工業大学、日本工業大学、木更津工業高等専門学校、日本原子力研究開発機構
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データベースの高度化	宇埜 正美 [福井大学]	大阪大学、東京工業大学、東北大学、日本原子力研究開発機構
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一 [東京大学]	東京都市大学、産業技術総合研究所、株式会社アトックス、日本原子力研究開発機構
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫 [工学院大学]	名古屋大学、東京電力ホールディングス株式会社、日本原子力研究開発機構
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史 [大阪大学]	京都大学
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太郎 [東北大学]	富山高等専門学校、福島大学、日本原子力研究開発機構
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮 [自然科学研究機構 核融合科学研究所]	弘前大学
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦 [東京工業大学]	原子力環境整備促進・資金管理センター、岡山理科大学、東北大学、日本原子力研究開発機構

国際協力型廃炉研究プログラム 令和3年 選定課題(4課題)

提案課題名	研究代表者 [所属機関]	参画機関
日英原子力共同研究:2課題		
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	三輪 修一郎 [東京大学]	株式会社アトックス、日本原子力研究開発機構、University of Bristol

燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	浅間 一 [東京大学]	有限会社ライテックス、日本原子力研究開発機構、University of Sussex
日露原子力共同研究:2 課題		
福島第一発電所 2,3 号機の事故進展シナリオに基づくFP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直 [東京工業大学]	九州大学、日本原子力研究開発機構、Saint Petersburg State University
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹 [東京工業大学]	産業技術総合研究所、National Research Nuclear University (MEPhI)

課題解決型廃炉研究プログラム 令和2年 選定課題(8 課題)

提案課題名	研究代表者 [所属機関]	参画機関
若手研究:2 課題		
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 [東京大学]	長岡技術科学大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄 [物質・材料研究機構]	海洋研究開発機構、電力中央研究所、日本原子力研究開発機構
一般研究:6 課題		
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸 [高エネルギー加速器研究機構]	北海道大学、産業技術総合研究所、名古屋大学、日本原子力研究開発機構
$\alpha/\beta/\gamma$ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現:ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊 [東北大学]	量子科学技術研究開発機構、物質・材料研究機構、日本原子力研究開発機構
β 、 γ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文 [日本分析センター]	新潟大学、九州大学、大成建設株式会社、量子科学技術研究開発機構、日本原子力研究開発機構
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平 [東京大学]	国立環境研究所、株式会社太平洋コンサルタント、太平洋セメント株式会社、名古屋大学、北海道大学、日本原子力研究開発機構
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完 [北海道大学]	福井大学、電力中央研究所、日本原子力研究開発機構
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二 [アイラボ株式会社]	日本原子力研究開発機構

国際協力型廃炉研究プログラム 令和2年 選定課題(2課題)

提案課題名	研究代表者 [所属機関]	参画機関
日英原子力共同研究:2課題		
革新的水質浄化剤の開発による環境問題 低減化技術の開拓	浅尾 直樹 [信州大学]	自然科学研究機構分子 科学研究所、東北大学、 Diamond Light Source
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリ ターン技術の研究開発	鎌田 創 [海上・港湾・航空技術研 究所 海上技術安全研究所]	高エネルギー加速器研究機 構、日本原子力研究開発機 構、Lancaster University

共通基盤型原子力研究プログラム 令和元年(平成31年) 選定課題(7課題)

提案課題名	研究代表者 [所属機関]	参画機関
若手研究:2課題		
ウラニル錯体化学に基づくテラーメイド型 新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一郎 [東京工業大学]	日本原子力研究開発機 構
動作不能からの復帰を可能とする多連結移 動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康 [電気通信大学]	—
一般研究:5課題		
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原 子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章 [名古屋大学]	日本原子力研究開発機 構
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器 別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏 [東北大学]	広島大学、大阪大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微 粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史 [大阪大学]	(同一機関内連携)
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付け る新たな評価系の構築	飯塚 大輔 [量子科学技術研究開発 機構]	東京大学
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の 開発	大曲 新矢 [産業技術総合研究所]	北海道大学

課題解決型廃炉研究プログラム 令和元年(平成31年) 選定課題(4課題)

提案課題名	研究代表者 [所属機関]	参画機関
Multi-Physics モデリングによる福島2・3号 機ペDESTAL燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史 [早稲田大学]	大阪大学、日本原子力 研究開発機構
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物の フッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔 [日立 GE ニュークリア・ エナジー株式会社]	埼玉大学、日本原子力 研究開発機構
アパタイトセラミックスによるALPS 沈殿系廃 棄物の安定固化技術の開発	塚原 剛彦 [東京工業大学]	電力中央研究所、日本 原子力研究開発機構

拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治 [東京工業大学]	日本原子力研究開発機構
--	-------------------	-------------

研究人材育成型廃炉研究プログラム 令和元年度(平成 31 年) 選定課題 4 課題

提案課題名	研究代表者 [所属機関]	参画機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一 [東京大学]	福島大学、神戸大学、日本原子力研究開発機構
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆 [福島大学]	株式会社パーキンエルマー・ジャパン、株式会社化研、日本原子力研究開発機構
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	塚原 剛彦 [東京工業大学]	株式会社ヴィジブルインフォメーションサービス、日本原子力研究開発機構
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介 [東北大学]	長岡技術科学大学、日本核燃料開発株式会社、九州大学、日本原子力研究開発機構

国際協力型廃炉研究プログラム 令和元年(平成 31 年) 選定課題(4 課題)

提案課題名	研究代表者 [所属機関]	参画機関
日露原子力共同研究:2 課題		
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹 [東京工業大学]	東京都市大学、ロシア国立原子力研究大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫 [慶應義塾大学]	理化学研究所、日本原子力研究開発機構、カザン大学
日英原子力共同研究:2 課題		
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努 [北海道大学]	アドバンエッジ株式会社、日本原子力研究開発機構、シェフィールド大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実 [静岡大学]	神戸市立工業高等専門学校、ランカスター大学

(注) 採択後生じた事情の変更等により、実施内容(事業計画、契約金額等)の変更及び採択の取消しを行うことがある。

添付資料14 国際連携の強化に係る主な活動実績

表 A14-1 政府間の枠組み

枠組み	内 容
日英原子力年次対話	2012 年 4 月の日英首脳会談における共同声明の付属文書として発出された「日英民生用原子力協力の枠組み」に基づき開催（2012 年 2 月～）
原子力エネルギーに関する日仏委員会	2012 年 10 月の日仏首脳会談の際に発表された共同宣言に基づき設立（2012 年 2 月～）
日米廃炉及び環境管理ワーキンググループ	2011 年 3 月の原子力事故後の日米協力関係に基づき、民生用二国間協力を一層強化するため、2012 年 4 月に設立が決定。同委員会の下に「廃炉及び環境管理ワーキンググループ（DEMWG）」が設置された（2012 年 12 月～）
日露原子力ワーキンググループ	2016 年 9 月の日露首脳会談で承認された 8 項目の協力プランの一つとしてエネルギー分野が掲げられたことに基づき、原子力ワーキンググループが設置された（2016 年 9 月～）

表 A14-2 組織間の協力協定・取り決め

国内機関	海外機関	内 容
NDF	NDA	廃炉等に関わる様々な技術的知見に関する情報交換、人材交流などについて定めている（2015 年 2 月締結）
NDF	CEA	廃炉等に関わる様々な技術的知見に関する情報交換、人材交流などについて定めている（2015 年 2 月締結）
東京電力	DOE	アンブレラ契約を締結し、必要に応じて情報交換を実施（2013 年 9 月締結）
東京電力	セラフィールド社	廃止措置時のサイト運営等に関する分野での情報交換協定を締結（2014 年 9 月）
東京電力	CEA	廃止措置に関する分野での情報交換協定を締結（2015 年 9 月）
JAEA	NNL	原子力の研究開発に関する先進技術、先進燃料サイクル、高速炉、放射性廃棄物に関する包括的取り決め
JAEA	CEA	溶融炉心-コンクリート相互作用等に関する特定技術課題に関する協力取り決め
JAEA	ベルギー原子力研究センター	原子力研究開発分野及び福島事故の研究に関する協力取り決め
JAEA	原子力安全問題研究センター（ウクライナ）	福島第一原子力発電所とチョルノービリの廃止措置研究等に関する覚書の締結
JAEA	IAEA	燃料デブリの特性把握に関する研究取り決め

表 A14-3 海外に向けた情報発信（国際会議の開催、登壇（2021 年 9 月～2022 年 8 月））

会議名称	時期	発信機関
第 64 回 IAEA 総会サイドイベント	2021 年 9 月	NDF 経済産業省 東京電力
IAEA 福島第一原子力発電所事故後 10 年の進捗に関する国際会議	2021 年 11 月	NDF 経済産業省 東京電力
日英原子力対話	2021 年 12 月	経済産業省
海外向けブリーフィング	2022 年 2 月	経済産業省
米国 Waste Management 2022	2022 年 3 月	東京電力 IRID
米国 Regulatory Information Conference	2022 年 3 月	NDF
福島リサーチカンファレンス	通年実施	JAEA

表 A14-4 海外に向けた情報発信（英語版ウェブサイト等による情報発信）

名称	発信機関
廃止措置に向けた取組 (http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/)	経済産業省
各国大使館への福島第一原子力発電所からの海洋放出及び海水モニタリングに関する年次報告	経済産業省 外務省
原子力損害賠償・廃炉等支援機構ホームページ (https://www.dd.ndf.go.jp/english/)	NDF
廃炉研究開発情報ポータルサイト (http://www.drd-portal.jp/en/)	NDF
廃止措置に向けた取組 (https://fukushima.jaea.go.jp/en)	JAEA
技術研究組合国際廃炉研究開発機構ホームページ (http://irid.or.jp/en/)	IRID
福島への責任 (https://www.tepco.co.jp/en/hd/responsibility/revitalization/index-e.html)	東京電力
各国メディアへのプレスリリース英文概要提供	東京電力
廃炉・汚染水・処理水対策事業事務局 (https://en.dccc-program.jp/)	三菱総合研究所 (事業受託者)

表 A14-5 主な海外機関との連携プロジェクト

プロジェクト名	内容・期間	国内対応機関
IAEA プロジェクト		
DAROD	・ 損傷原子力施設の廃止措置・修復に関する課題への取組で得られた知識や経験（規制、技術、制度・戦略）を各国で共有 ・ 実施期間：2015 年～2017 年	NDF
OECD/NEA プロジェクト		
BSAF	・ 11 か国の研究機関や政府機関が参加し、各国参加機関において過酷事故解析コードを用いた福島第一原子力発電所事故の進展、炉内の燃料デブリと FP の分布等に関するベンチマークを実施。各国参加機関による現象論のモデル化に関する知見等を活用。 ・ 事故時の測定データや事故後の放射線量に関する情報データベースを共有。 ・ 実施期間：2015 年～2018 年	IRID JAEA 東京電力
ARC-F	・ 12 か国の研究機関や政府機関が参加し、BSAF プロジェクトを引き継いで、更に詳細に事故の状況を探り、今後の軽水炉の安全性向上のための研究に活用。 ・ 実施期間：2019 年～2021 年	原子力規制庁 電力中央研究所 JAEA
PreADES	・ 燃料デブリの相状態や組成情報など、その特徴を理解するのに役立つ特性情報を共有。 ・ 燃料デブリ分析ニーズ及び優先度をまとめた「燃料デブリ分析表」の拡充。 ・ 分析の課題及び分析施設情報の整理 ・ 実施期間：2018 年～2021 年	経済産業省 原子力規制庁 電力中央研究所 JAEA、IRID NDF、東京電力
FACE	・ ARC-F 及び PreADES を統合する形で立ち上がったプロジェクト。 ・ 燃料デブリのサンプル分析や事故シナリオの解析を実施。 ・ 分析の結果を参加国間で共有する。 ・ 実施期間：2022 年～2026 年	経済産業省 原子力規制庁 JAEA、NDF 東京電力
TCOFF	・ 福島第一原子力発電所（1F）の事故進展を参考に、炉心・燃料溶融モデルや FP ふるまいモデル、及びその基礎となる熱力学データベースを高度化。得られた材料科学的な知見に基づき、1F 事故条件での炉心・燃料溶融、核分裂生成物ふるまい、デブリ特性や生成メカニズムを詳細評価。材料科学的知見及び詳細評価の結果を PreADES、ARC-F、TAF-ID 等の国際協力、及び、IRID 事業等の国際廃炉プロジェクトに提供。 ・ プロジェクト予算を文部科学省が拠出。 ・ 実施期間：2017 年～2019 年	文部科学省 JAEA 電力中央研究所 東京工業大学
EGCUL	・ 由来が不明な廃棄物に対するキャラクタリゼーション方法について議論。	経済産業省 NDF、JAEA 東京電力