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 2017
概要版

2017 年 8 月 31 日

原子力損害賠償・廃炉等支援機構

目　次

1. はじめに 1
2. 戦略プランについて 2
1) 戦略プランの目的及び位置付け 2
2) 戦略プランの基本的考え方 2
i. 戦略プランの基本方針 2
ii. 5 つの基本的考え方 2
3. 放射性物質に起因するリスクの低減戦略 3
1) 福島第一原子力発電所の廃炉の進捗状況 3
2) 放射性物質に起因するリスク低減の考え方 4
i. 主要なリスク源 4
ii. リスクの推定と評価 4
iii. リスク低減措置の現状 6
iv. リスク低減時の課題 6
3) リスク低減戦略の展開 7
4. 燃料デブリ取り出し分野 8
1) 燃料デブリ取り出しの検討方針 8
2) 燃料デブリ取り出しにおける安全確保の基本的考え方 9
3) 号機ごとのプラント状況 9
4) 燃料デブリの有するリスク 11
5) 燃料デブリ取り出し工法実現性検討 13
i. 燃料デブリ取り出し工法実現のための技術要件 13
ii. 燃料デブリの安全・安定保管に係る技術要件 17
iii. 工法実現可能性の評価 17
6) 5 つの基本的考え方による総合評価 19
7) 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（戦略的提案） 20
i. 燃料デブリ取り出し方針の決定に向けた提言 20
ii. 方針決定以降の取組 21
5. 廃棄物対策分野 23
1) 廃棄物分野の戦略プランの検討方針 23
2) 国際的な放射性廃棄物対策における安全確保の考え方 23
3) 固体廃棄物に関する取組の現状 24
i. 保管・管理 24
ii. 性状把握 26
iii. 処理・処分 26
4) 固体廃棄物の処理・処分の基本的考え方の取りまとめに向けた提言（戦略的提案） 27
i. 固体廃棄物の特徴 27
ii. 固体廃棄物の管理の方針 27

iii. 固体廃棄物の管理の方針に沿った当面の取組と研究開発 28
6. 研究開発への取組 29
1) 研究開発の基本的な方針等 29
2) 廃炉作業への適用に向けた研究開発の推進 30
3) 研究開発の連携強化 30
i. ニーズから導き出された重要研究開発課題とその戦略的推進 30
ii. 中長期を見通した研究開発基盤の構築 31
iii. 人材の育成・確保 31
7. 国際連携の強化 32
1) 叡智の結集と活用 32
2) 国際社会への積極的な情報発信 32
3) 関係機関の密接な連携 32
8. 今後の廃炉プロジェクトの進め方 33
1) プロジェクトマネジメント機能の強化 33
2) 社会との関係 34
3) 廃炉プロジェクトの継続性への配慮 34

1. はじめに

原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下「NDF」という。）は、原子力損害賠償・廃炉等支援機構法（以下「NDF 法」という。）に基づき、法定業務である「廃炉等の適正かつ着実な実施の確保を図るための助言、指導及び勧告」及び「廃炉等を実施するために必要な技術に関する研究及び開発」の一環として、「東京電力ホールディングス㈱福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン」（以下「戦略プラン」という。）を 2015 年以降毎年取りまとめている。

福島第一原子力発電所の事故が発生して 6 年が経過する中、現場では陸側遮水壁をはじめとする汚染水対策や、使用済燃料プールからの燃料取り出しに進捗がみられるとともに屋外の作業環境も整ってきており、短期的な対応には一定の見通しがついてきた。また、中長期を見据えた対応については、燃料デブリ取り出しに向けた炉内調査や研究開発が進捗する一方で、今後の作業に向けた建屋内現場環境の厳しさも明らかになってきている。

このように、廃炉は中長期的な課題の対応へとフェーズが移行しつつある中で、廃炉の確実な実施を確保するため、事業者である東京電力ホールディングス㈱（以下「東京電力」という。）に対して、NDF に廃炉に要する資金を積み立てることを義務付ける等の措置を講ずるべく、原子力損害賠償・廃炉等支援機構法の一部を改正する法律が 2017 年 5 月に成立した。さらに、同月公表した新々・総合特別事業計画の中でも、福島第一原子力発電所の廃炉は福島再生の大前提であり、適正かつ着実に取組を進めていくこととしている。

新しい制度の下で、NDF は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、①廃炉に係る資金についての適切な管理、②適切な廃炉の実施体制の管理、③廃炉等積立金制度に基づく着実な作業管理等に当たることとなり、プロジェクトマネジメント等の面において、これまで以上に役割や責任が増大すると見込まれる（図-1）。

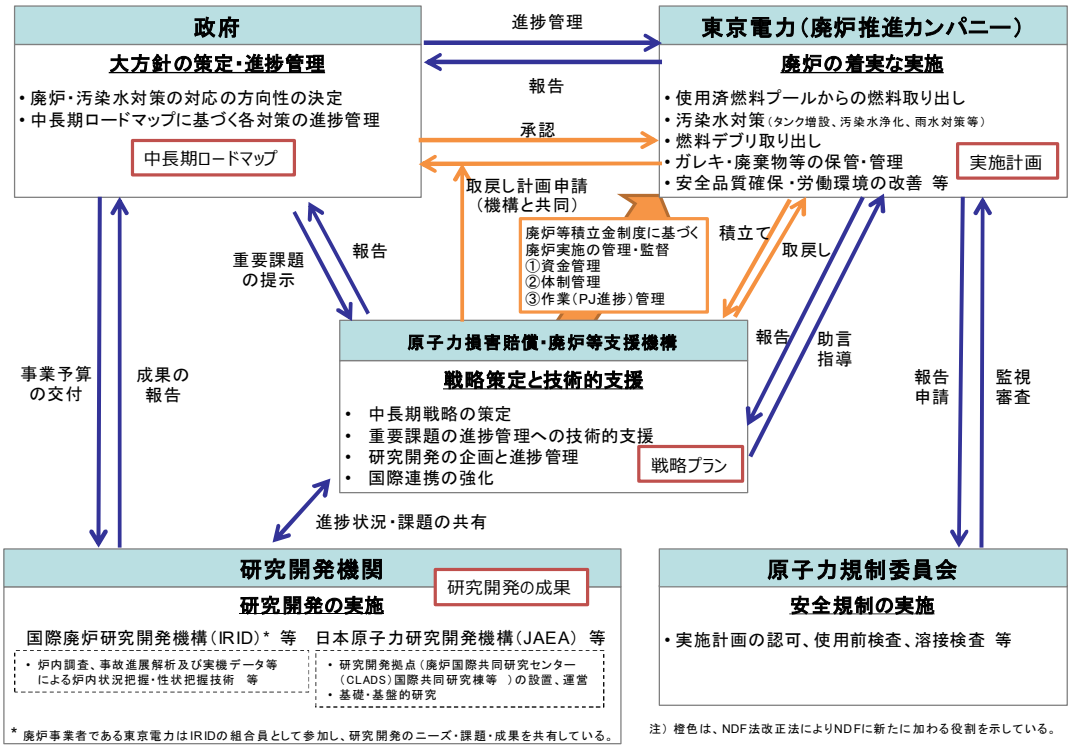


図-1　福島第一原子力発電所の廃炉に係る関係機関の役割分担

2. 戦略プランについて

1) 戦略プランの目的及び位置付け

戦略プランは、政府が策定する「東京電力㈱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。）の着実な実行や改訂の検討に資するための確かな技術的根拠を与えることを目的としている。

今回の戦略プラン 2017 においては、特に中長期ロードマップ（2015 年 6 月 12 日改訂）に示されたマイルストーンのうち「号機ごとの燃料デブリ取り出し方針の決定」及び固体廃棄物の「処理・処分に関する基本的な考え方の取りまとめ」に対して、戦略的な提案を行う。

福島第一原子力発電所の廃炉は、大きな不確実性を内在したプロジェクトであり、事故により、炉内等は容易に近づくことのできない放射線環境となっていることから、現状では、性状が確認できていない放射性物質、損傷の状態を確認できていない現場の機器・構築物が存在しており、不確実性をもたらしている。

これらの確認が難しい情報をすべて把握し、不確実性のない状態で廃炉を進めることが望ましいものの、そのためには多くの資源、特に膨大な時間を要することになる。

速やかな廃炉を目指すためには、ある程度の不確実性が存在していても、安全性の確保を最優先に、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、柔軟かつ迅速に取り組む姿勢が必要となる。

なお、柔軟かつ迅速に進めるに当たっては、長期的かつプロジェクト全体を俯瞰する視点で全体最適化を目指す姿勢や、想定とは異なる場合に備える姿勢も重要となる。

戦略プラン 2017 における 2 つの戦略的提案は、この基本的姿勢に基づいて、取りまとめたものである。

2) 戦略プランの基本的考え方

i. 戦略プランの基本方針

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」（以下「措置を講ずべき事項」という。）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、施設の経年劣化等により放射性物質に起因するリスクが上がる可能性もある。

このため、福島第一原子力発電所の廃炉は、「事故により発生した通常の原子力発電所にはない放射性物質に起因するリスクを、継続的、かつ、速やかに下げること」を基本方針とする。

ii. 5 つの基本的考え方

上記基本方針を達成する上での 5 つの基本的考え方を以下に示す。

- 基本的考え方 1：安全　　放射性物質に起因するリスク（注）の低減及び労働安全の確保
  （注）環境への影響及び作業員の被ばく
- 基本的考え方 2：確実　　信頼性が高く、柔軟性のある技術
- 基本的考え方 3：合理的　　リソース（ヒト、モノ、カネ、スペース等）の有効活用
- 基本的考え方 4：迅速　　時間軸の意識
- 基本的考え方 5：現場指向　徹底した三現（現場、現物、現実）主義

3. 放射性物質に起因するリスクの低減戦略

戦略プランでは、福島第一原子力発電所の廃炉の基本方針を達成するために、中長期の時間軸に沿った放射性物質に起因するリスクの低減戦略の検討を行う。このため主要なリスク源の分析及び評価を実施し、リスク低減のための措置を検討する。

1) 福島第一原子力発電所の廃炉の進捗状況

この一年でおおむね以下のようなリスク低減に向けた進捗が見られた。

(1) 汚染水対策

汚染水については、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」）に基づき対策が進められている。

「取り除く」については、多核種除去設備等での処理を進めている。

「近づけない」については、2016 年 3 月より陸側遮水壁の凍結を開始し、同年 10 月には海側の凍結を完了、山側も未凍結箇所 1 箇所を残すのみとなっている。海側凍結完了後、4m 盤の地下水汲み上げ量は 3 分の 1 程度（2017 年 3 月平均で約 118m^3/日）まで減少している。また、建屋内滞留水の処理にあわせてサブドレンによる建屋周囲の地下水位低下も進められ、これらに伴い、建屋への流入量は、2017 年 3 月の平均で 120m^3/日程度に減少してきている。

「漏らさない」については、周辺海域の放射性物質濃度は低い状態で安定している。

建屋内滞留水については、2020 年の処理完了に向けて、着実に処理を実施している。1 号機タービン建屋内滞留水の水位低下を進め、2017 年 3 月に最下階の床面まで滞留水を除去した。

(2) 使用済燃料プールからの燃料取り出し

1 号機では、原子炉建屋カバー壁パネルの取り外しが完了し、オペレーティングフロア（以下「オペフロ」という。）調査を開始し、ガレキ・燃料交換機の状況等、ガレキ撤去計画立案に必要な情報の取得を進めている。

2 号機では、燃料取り出しに向けた原子炉建屋周辺のヤードを整備し、オペフロへのアクセス構台の設置が完了した。

3 号機では、オペフロ線量低減策（除染、遮へい）が完了し、2017 年 1 月より燃料取り出し用カバー等設置作業を実施中である。

(3) 燃料デブリ取り出し

燃料デブリ取り出しに向けた炉内状況の把握を以下のように進めている。

1 号機では、ロボットによる原子炉格納容器（以下「PCV」という。）内部調査として、PCV 内 1 階から線量計及びカメラを吊り降ろし、ペデスタル外地下階と作業員アクセス口近傍の状況を確認する調査を実施し、PCV 底部に近づくほど線量が上昇する傾向及び底部に堆積物の存在を確認した。

2 号機では、ロボット等による PCV 内部調査を実施し、ペデスタル内のグレーチングの脱落や変形等の状況を確認した。

3 号機では、水中遊泳式遠隔調査装置（以下「水中 ROV」という。）による PCV 内部調査を実施し、ペデスタル内に溶融物が固化したと思われるものや、グレーチング等、複数の落下物、堆積物を確認した。また、ミュオン測定の現時点での評価において、RPV 内部には、炉心域及

び RPV 底部ともに、一部の燃料デブリが残っている可能性はあるものの、大きな高密度物質の存在は確認されていない。

(4) 廃棄物対策

発生量低減対策を継続するとともに焼却炉運転による保護衣保管量の低減が開始された。固体廃棄物の発生量予測の見直しを行い、保管管理計画を更新した。また、性状把握を目的に試料採取と分析が進められている。

(5) その他の具体的な対策

敷地内の環境改善として、4m 盤等のガレキ撤去やフェーシングを進めた結果、身体汚染のリスクが低減されたことから、当該エリアを一般服エリア（一般作業服又は構内専用服と使い捨て式防じんマスクで作業できる範囲）の運用区分とした。

2) 放射性物質に起因するリスク低減の考え方

リスク低減の原則は、リスク源に起因する人の健康や環境に対する負の影響の重大さ（以下「影響度」という。）を低減する活動あるいは手段と、負の影響が及ぼされる可能性（以下「起こりやすさ」という。）を低減するための活動あるいは手段を組み合わせ、リスク源のリスクの大きさ（以下「リスクレベル」という。）を速やかに低減し、リスクレベルが十分に低い状態を確保し維持することである。なお、リスク低減に当たっては、5 つの基本的考え方を踏まえて、リスク低減の最適化を検討することが重要である。

i. 主要なリスク源

福島第一原子力発電所における主要なリスク源として以下を検討の対象とする。

- 1～3 号機燃料デブリ、1～3 号機使用済燃料プール内燃料（以下「プール内燃料」という。）、共用プール内燃料、乾式キャスク内燃料
- 1～4 号機建屋、プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋内に滞留する汚染水（以下「建屋内滞留水」という。）、濃縮廃液等（タンク内に保管されている濃縮廃液等。ストロンチウム処理水を含む。）
- 固体廃棄物
  - ✓ 水処理二次廃棄物（吸着塔類、廃スラッジ、高性能容器に収納されたスラリー（以下「HIC スラリー」という。））
  - ✓ ガレキ等（固体廃棄物貯蔵庫内に収納されているガレキ類（以下「ガレキ類（貯蔵庫内）」という。）及び覆土式一時保管施設、仮設保管設備等にて保管されているガレキ類や伐採木等（以下「ガレキ等（屋外）」という。））
- 原子炉建屋、PCV 又は RPV 内で、事故により飛散した核分裂生成物により汚染された構造物、配管、機器など及び放射化された構造物（以下「建屋内汚染構造物等」という。）

ii. リスクの推定と評価

リスクレベルは、上記リスク源に含まれる放射性物質が放出された場合の「影響度」とその「起こりやすさ」の組合せとして表す。ここでは、英国原子力廃止措置機関（以下「英国 NDA」という。）が開発した SED（Safety and Environmental Detriment）スコアを参考にして、リスクの推定

と評価を行う。

「影響度」を表す指標として、SED の「潜在的影響度」を用いた。これは、リスク源が持つ放射性物質の量に、拡散のしやすさや人や環境への取り込まれやすさの観点から気体、液体、固体等の形態を加味し、リスク源の固有の不安定性を制御する安全機能が喪失した場合の復旧までの時間余裕を考慮に加えたものである。

「起こりやすさ」を表す指標として、SED の「管理重要度」を参考にした。これは、施設の健全性や閉じ込め機能等の要素の組合せでリスク源を序列化する因子と、リスク源の状態変化や梱包・監視状態等を組合せ要素とする因子とで構成され、各因子にスコアが設定されている。

主要なリスク源について、2017 年 3 月時点の情報に基づいたリスクレベルの例を図-2 に示す。

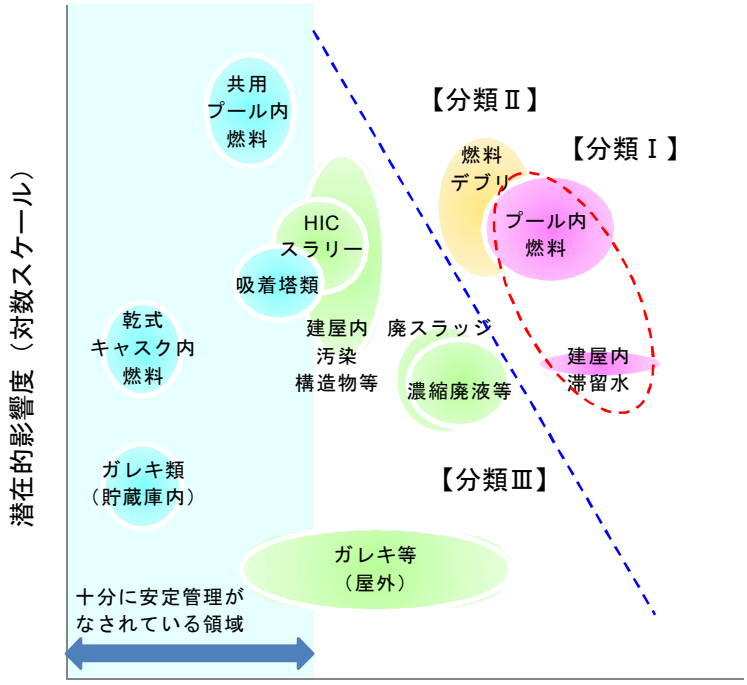


図-2　福島第一原子力発電所のリスク源が有するリスクレベルの例

図-2 では、潜在的影響度と管理重要度をスコア化する上で、各因子に対するデータの不確かさ等の影響を広がりによって示している。潜在的影響度に関しては、放射性物質の濃度や量、形態及び復旧までの時間余裕に対する推定の不確かさを考慮した。建屋内汚染構造物等及び燃料デブリについては、形態の不確かさを大きく設定した。管理重要度に関しては、二つの因子が本来定性的な情報を定量化したものであることを踏まえて、スコアの幅を不確かさとした。ガレキ等（屋外）については様々な保管状態を考慮した。

各リスク源のリスクレベルを比較した結果、図-2 のように分類Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに分類した上でリスク低減措置を検討することが適切であると考えられる。

共用プール内燃料、乾式キャスク内燃料、ガレキ類（貯蔵庫内）及び吸着塔類は、今後も管理を継続することによって十分に安定管理がなされている状態を維持することができる。これらは、健全な原子力発電所における設備と同程度の安定管理がなされている状態にあると考えられる。このため分類Ⅰ、Ⅱ、Ⅲと評価されるリスク源に対しては、この領域に持ち込むことを当面の目

標とする。

iii. **リスク低減措置の現状**

以下、前項で分類した各リスク源に対するリスク低減措置について述べる。

【分類Ⅰ】可及的速やかに対処すべきリスク源

プール内燃料は被覆管に閉じ込められた燃料棒であり拡散しにくい状態を保っている。一方、1,3 号機では建屋天井が欠損しガレキや重量物が落下していることが確認されている。このため、管理重要度が十分小さい共用プールへ移送されることが計画されており、ガレキ撤去等の準備が進められている。3 号機については、大型ガレキ撤去作業が完了したことにより、管理重要度が改善した。

建屋内滞留水は、1 号機タービン建屋内の復水器内貯留水の水抜きや、1 号機タービン建屋の最下階エリアの滞留水除去を実施しており、建屋内滞留水の放射性物質量の低減が図られている。また、サブドレン機能の強化や陸側遮水壁の一部閉合により、建屋内滞留水の水位を地下水よりも低く維持するための水位管理が強化された。今後も、放射性物質濃度が高いタービン建屋内の復水器内貯留水の水抜き等によって放射性物質量の低減を図っているところである。

【分類Ⅱ】周到な準備・技術によって安全・確実・慎重に対応し、より安定な状態に持ち込むべきリスク源

燃料デブリは、現在は一定の閉じ込め状態にあるが、様々な場所に様々な形態で存在することや、中長期的な形態や物性の変化の可能性が考えられることから、できるだけ早期に取り出し、適切な保管状態とすることを目指し、技術検討が進められているところである。

【分類Ⅲ】より安定な状態に向けて計画的に措置すべきリスク源

分類Ⅲは、リスクレベルの低減と十分に安定管理がなされた状態の確保に向け、措置すべきリスク源であり、濃縮廃液等、廃スラッジ、HIC スラリー、ガレキ等（屋外）、建屋内汚染構造物等が該当する。

これら分類Ⅲに区分されるリスク源は、分類Ⅰ、分類Ⅱに比べ総じてリスクレベルが低い状態にあり、また、今後も継続的な維持・管理を行うことによって、一定のリスクレベル状態を維持することができると考えられる。しかしながら、これらの中には、表面に放射性物質が付着することにより汚染したものやスラッジ状のもの、水素発生等の反応性を有しているもの等が含まれている。このため、今後も引き続き、十分に安定管理なされた状態に持ち込むべくリスク低減に向けた検討を継続し、計画的にリスク低減措置を実施していくこととしている。

iv. **リスク低減時の課題**

リスク低減措置を実施する際、一時的なリスクレベルの変化及び作業員の被ばくを考慮する必要がある。

リスク源が現在一定の安定状態にあるとしても、いつまでもその状態が許容されるわけではなく、また何もしなければ施設の劣化やリスク源の状態変化等により、時間とともにリスクレベルが増加する可能性がある。このような状況を回避するために、適切な時期までにリスク低減措置

を実施すべきである。

一時的にリスクレベルが増加する可能性がある場合は、その増加量を最小化することが重要である。しかしながら、最小化を目指すあまり、その準備や作業に長い時間をかけることになると、現存するリスクを長期間存続させることになりかねない上、作業員の被ばくが増加する可能性がある。したがって、一時的なリスクレベル増加の抑制は、現存するリスクの速やかな低減及び作業員の被ばく低減を総合的に判断して慎重に行うべきである。

このような時間に伴うリスクレベルの変化はリスク源によって異なるので、リスク源の特徴に応じた適切なタイミングを設定し、それに向けて周到な準備を行うことが重要である。また、様々な不確かさの下で作業を進めざるを得ないため、不確かさが解明されるたびに立ち止まって、計画を見直す柔軟さが必要である。

3)　リスク低減戦略の展開

主要なリスク源のうち分類Ⅰのプール内燃料や建屋内滞留水については、国と東京電力において既に対策が進められている。建屋内滞留水量の低減が進み、建屋内滞留水処理は 2020 年に完了する見通しであるが、汚染水対策はその後も引き続き必要であることを踏まえて、中期的な検討を進めることが求められる。

分類Ⅱの燃料デブリ、分類Ⅲの水処理二次廃棄物及びガレキ等については、それぞれ 4 章、5 章においてリスク低減戦略を述べる。

リスク低減措置を実施する上では､5つの基本的考え方の中でも安全の確保が最も重要であり、その基本的考え方を策定しておくことが有用である。ここで安全とは、施設及び種々の活動から生ずる放射線による有害な影響から人と環境を防護することであり、リスク源の各分類に適した考え方が必要である。

分類Ⅰのリスク源については、既に計画されたリスク低減措置を実施中又は準備中であり、そのための安全確保は、措置を講ずべき事項に則って進められている。

分類Ⅱ及び分類Ⅲのリスク源についても、基本的には措置を講ずべき事項に則って進めていくが、リスク低減措置の詳細はこれから具体化するところであり、安全確保の考え方もそれに応じたものとすべきである。その際、国際原子力機関（以下「IAEA」という。）や国際放射線防護委員会（以下「ICRP」という。）等の国際機関が提唱する安全の考え方に準拠するとともに、福島第一原子力発電所の状況を十分に考慮に入れ、関係機関と課題を共有しながら安全確保の基本的考え方を策定することが有効である。

分類Ⅱの燃料デブリの取り出しに係る安全確保の基本的考え方については、燃料デブリ及びその取り出し作業の特徴を把握する必要があり、4 章で詳しく述べる。分類Ⅲのうち、リスク低減措置の実行に伴って発生するものも含めた固体廃棄物については、通常の原子力発電所で発生していた廃棄物とは特徴が異なるため、保管・管理、処理・処分に係る安全を確保する必要があり、5 章で詳しく述べる。

4. 燃料デブリ取り出し分野

1)　燃料デブリ取り出しの検討方針

現在 1～3 号機の燃料デブリは、事故後の時間経過に伴い放射能量（Bq）、崩壊熱が大きく減少しているとともに、臨界、冷却、閉じ込め等に関するプラントパラメータは一定の安定状態を維持している。

しかしながら、現在確保されている安定状態は、損傷した原子炉建屋や溶融した炉心に対して、いわば暫定措置により一定の安定状態を維持している状況であり、炉内状況が十分把握できていないという“不確かさ”、事故により溶融した燃料や損傷した施設という“不安定さ”、厳しい放射線環境によるアクセスが困難なことによる“不十分 な管理”というリスク管理上の困難を抱えている。燃料デブリ取り出しは、このような状況を抜本的に改善して、より安定で安全な状態に持ち込むための方策であり、リスクに応じて、中期的リスクの低減と長期的リスクの低減という 2 つの視点の戦略が必要である。

中期的視点からのリスクとは、燃料デブリについて現在のところ維持されている”一定の安定状態”からの逸脱が発生し、外部に悪影響を与えるリスクである。不安定性の高い燃料デブリ（存在状態の不安定さや、物理・化学的な不安定性を伴う燃料デブリ）を回収して安定な保管状態に持ち込んだり、炉内での燃料デブリの状況や内部構造の状況を確認したりして適時適切な処置を施すことによって、原子炉をより安定に管理していくことができると期待される。

長期的視点からのリスクとは、燃料デブリに含まれる毒性の高い核燃料物質が、建屋の劣化に伴って将来的に環境中に漏えいして環境汚染が発生するリスクである。本来我が国では、使用済燃料は、再処理により高レベル放射性廃棄物を分離・安定化した上で人間環境から隔離する（地層処分）ことによって、超長期の安全性を確保することが基本方針とされている。したがって、原子炉建屋での閉じ込めを確保できる期間内（数十年程度）に燃料デブリを回収して、これを、十分に管理された安定保管の状態に移した上で、最終的には、バックエンド事業と同程度のリスクにすることが、基本方針である。

こうした視点を踏まえれば、チェルノブイリ原子力発電所 4 号機の事故への取組から懸念されるように、核燃料物質を回収の見通しなく長期的に放置することは、当面の閉じ込めに効果があるとしても、長期にわたる安全管理が困難であり、世代間での安易な先送りと言わざるを得ない。

したがって、福島第一原子力発電所の廃炉においては、このような取組は採用せず、以下のように燃料デブリ取り出しを進めることとする。

燃料デブリ取り出しでは、中期的リスク低減と長期的リスク低減の両方が重要である。燃料デブリ取り出しの初期のオペレーションにおいては、中期的リスクの低減を重視し、同時に、できるだけ効率的な燃料デブリの回収が可能な方法を選定する必要がある。この方法で一定の燃料デブリが取り出され中期的リスクが低減され、”広く社会に許容される低いリスクレベル”を確保することが当面の目標と言える。その上で、その後の更なる燃料デブリ取り出しや施設解体などの取組によって、より長期的な視点でのリスク除去（核燃料物質の除去と隔離）を目指すこととなる。

燃料デブリを取り出す作業は、現在の安定状態に手を加え、燃料デブリにアクセスし、状態変

化をもたらす行為であり、作業に付随するリスク（作業中の不具合等に起因する放射性物質の漏えいや作業者の被ばくなど）が伴う。また、廃炉に投入できる人材、時間等のリソースは無限ではない。このため、燃料デブリ取り出し作業に伴うリスクを許容される範囲に低く抑えることができる安全、確実、かつ、現実的な方法で実施する必要がある。すなわち、中長期ロードマップ（2015 年 6 月改訂）でも示されている「工程優先ではなくリスク本位の姿勢」を踏まえ、燃料デブリ取り出しによる速やかなリスク低減と取り出し作業時のリスク抑制を適切なバランスで両立させる必要がある。

2)　燃料デブリ取り出しにおける安全確保の基本的考え方

燃料デブリ取り出しにより速やかなリスク低減を目指すことと取り出し作業時のリスク抑制を両立させるために、国際的な安全原則及び福島第一原子力発電所の安全確保上の特徴、燃料デブリ取り出し作業におけるリスク等を考慮して、安全確保のための基本的考え方として安全機能とその実現のための考え方を整理した。

(1) 安全機能の考え方

- 放射性物質の放出量を限定的な範囲にとどめるために閉じ込め機能（放出抑制・管理）の確保に係る事項及びその喪失を防ぐための措置が必要である。
- PCV 内の放射性物質濃度又は放射線量の上昇抑制のため、崩壊熱の除去・臨界管理に加えて燃料デブリが粉体化して拡散することを可能な限り抑制することも考慮すべきである。
- 通常作業はもとより、想定される外部事象（地震、津波等）及び内部事象（故障、誤操作等）に対する備えが必要である。
- 作業員の被ばくについて、通常時被ばくは線量限度を遵守するとともに可能な限り低減すること、事故対応を行う作業員の被ばくとして緊急時線量基準を遵守することが必要である。

(2) 安全機能を実現するための考え方

- 事故炉の廃炉作業であることを前提として、既に存在する設備等の有効活用を図るとともに設備対応のみならず作業管理との組合せを検討することが重要である。
- 準備作業やメンテナンス等に伴う作業員の被ばくを低減するために、静的な構造物と動的機器を用いた負圧維持の組合せによる閉じ込め機能確保や恒設設備による対応だけではなく可搬型設備を用いた機動的対応の活用を含めて検討することが重要である。
- 深層防護の適用について、防護レベルの階層やその独立性の必要性は慎重に検討する必要がある。各々の事象進展の早さ・規模や現場作業上の制約を考慮すると異常の発生防止よりも拡大防止対策に重点をおくことが有効なリスク低減対策になる場合があり得る。
- PCV 内部の不確かさの存在を認識し、計画段階における想定との差異を発見した場合に柔軟に計画変更が行えることが重要である。
- 安全評価に当たっては、線量評価における代表的個人は実際の生活習慣や敷地周辺の環境状況を考慮して設定する等、現実的な管理目標や評価条件を設定することが重要である。

3)　号機ごとのプラント状況

燃料デブリ取り出しに向けた検討には、以下の内部状況の把握に可能な限り取り組む必要があ

る。

- 燃料デブリの分布の情報（燃料デブリ取り出し方針の検討においては概略の位置と量）
- 燃料デブリへのアクセスが可能であることを確認する情報、また、アクセスのための障害物撤去等が必要な場合、現実的に行えるかの判断のための情報
- 周囲の構造物や燃料デブリの落下等の危険がなく取り出し工事が安全に行えることを確認する情報、また、安全確保のための事前工事が必要な場合、現実的に行えるかの判断のための情報

このため、これまで事故進展解析による燃料溶融過程の全体像把握や、実機のプラントパラメータを用いた熱バランスやトレンドに基づく評価等により、燃料デブリの分布や構造物の状況、環境状況等に関する総合的な分析・評価を進めるとともに、実機における PCV 内部調査で取得した映像、温度、放射線量等から炉内状況を確認し、また、ミュオン測定による燃料デブリの分布調査を進めてきている。現時点における各号機の燃料デブリ分布の推定を表-1 に示す。

(1) 1 号機

- 燃料デブリの分布としては、RPV 底部に付着する等、少量存在している可能性があるものの、大部分は PCV 底部床面にあると推定している。解析によれば、その一部は作業員アクセスロを通じてペデスタル外側に拡がった可能性がある。
- アクセスルートについては、小型ロボットによる PCV 内部調査により、ペデスタル外側グレーチングからドライウェル底部へのアクセスが可能であることを確認した。
- 周囲の構造物等の状況については、PCV 内部調査において画像で確認した範囲ではペデスタル外壁面及び構造物には大きな損傷は確認されなかった。

(2) 2 号機

- 燃料デブリの分布としては、RPV 底部に多くが存在し、ペデスタル底部には、少量が存在すると推定される。
- アクセスルートについては、小型ロボット等による PCV 内部調査により、ペデスタル開口部付近までアクセス可能であることを確認した。
- 周囲の構造物等の状況については、PCV 内部調査において画像で確認した範囲ではペデスタル内側においてグレーチングの一部が落下していること及び CRD ハウジング等の大型構造物の落下は見られないことを確認した。また、ペデスタルプラットホーム部のペデスタル内壁面に、ひび割れ等異常は確認されなかった。

(3) 3 号機

- 燃料デブリの分布としては、RPV 底部に一部の燃料デブリが残っている可能性はあるが、2 号機と比較して多くの燃料デブリが PCV 底部に存在するものと推定される。PCV 内部調査により、ペデスタル内に、溶融物が固化したと思われるものを確認した。
- アクセスルートについては、小型ロボットによる PCV 内部調査により、ペデスタル開口部を経てペデスタル内側へアクセスすることが可能であることを確認した。
- 周囲の構造物等の状況については、PCV 内部調査において、ペデスタル内に複数の構造物の損傷や CRD ハウジング支持金具の一部脱落を確認した。また、調査した範囲において、グレーチングはプラットホーム上には確認されず、ペデスタル内下部に落下しているもの

が確認された。ペデスタル内下部には、複数の落下物や堆積物が確認された。

今後、燃料デブリの取り出しに資するために、PCV 内部の実機調査を継続することにより詳細な炉内の情報を取得するとともに、適切な時期にサンプリングを行い燃料デブリの性状などの情報を得ることが重要である。

また、RPV 内部の調査は、PCV 内部の調査結果を踏まえつつ、調査の必要時期を検討し、計画を立案する。

実機調査では、燃料デブリの分布や形態に関する詳細情報（燃料デブリの 3 次元的な分布情報、粒状か塊状か等の燃料デブリの形態に関する情報）、及び炉内の環境データ（温度、線量率、中性子束等）を継続的に取得し、取り出し装置の設計や取り出し計画の合理化に資することが重要である。

4)　燃料デブリの有するリスク

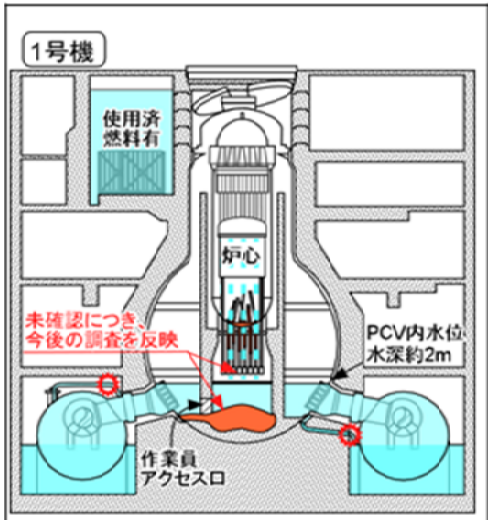
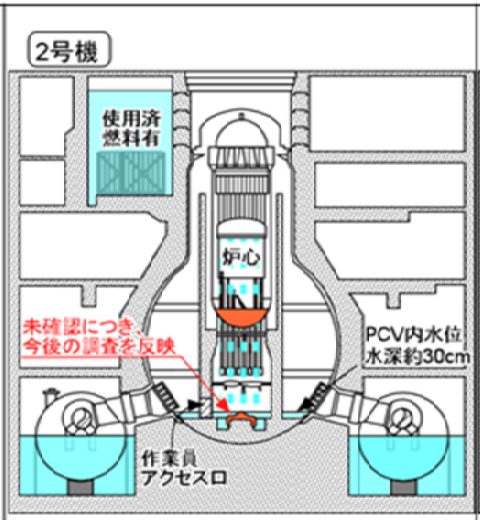
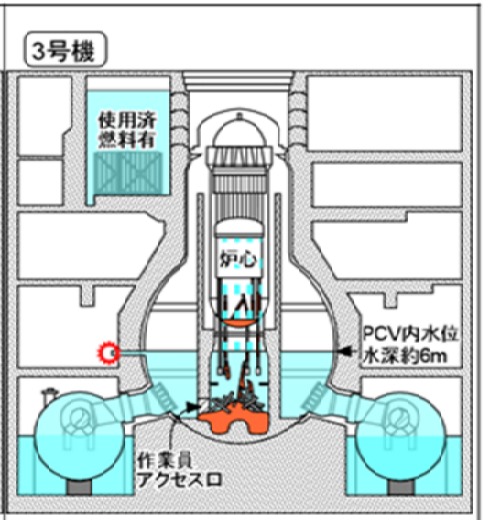
燃料デブリは、様々な場所や状態にあると推定され、異なる性状を有すると考えられる。このため、それぞれのリスクレベルは異なっていると考えられる。また、燃料デブリの不安定性や、閉じ込め機能の健全性は、経時的に変化することも考えられる。したがって、これらに起因して、拡散性、冷却等の制御性、閉じ込め機能等に影響が及ぼされることで、燃料デブリのリスクレベルが変化する可能性について考慮する必要がある。

燃料デブリのリスクレベルは、微粒子等の移動性が高く、体内に取り込まれやすい形態の存在割合に大きく影響する。また、その固有の不安定性に起因して燃料デブリの一部が溶出したり粒子化することにより移動性の高い形態が増加すれば、冷却材に随伴して循環冷却系に流れたり、万一、閉じ込め機能が大きく損なわれた場合に、気体や冷却材の流れ等に随伴して漏えいするリスクも高まると考えられる。このため、微粒子や小破片状といった拡散・移動性の高い形態の燃料デブリを優先的に回収し、安定的に管理することは、リスクレベルを比較的早期に低減でき、かつ、リスク低減効果が高い対応であると考えられる。

また、溶融炉心-コンクリート反応（以下「MCCI」という。）生成物の性状や不安定性に不確実性が高いことや、PCV 内に落下した燃料デブリの閉じ込め機能の多重性が低いこと、並びに、崩壊熱の制御状態（冷却性）や閉じ込め機能の経時的変化に対する不確実性が高いこと等から、PCV に落下した燃料デブリ（特に MCCI 生成物）のリスクレベルは、RPV 内燃料デブリに比較してより高い状態にあると考えられる。このため、PCV 底部の燃料デブリの調査を実施し、その性状や不安定性、制御状態や閉じ込め状態を確認することには意義があると考えられる。

なお、燃料デブリ取り出し作業では、吸引・切削・粉砕等の外的作用が加わることで、移動性の高い燃料デブリが移動する、燃料デブリが微粒子や小破片状となる、あるいは、崩落する等により、燃料デブリのリスクレベルが変化する可能性にも配慮することが必要である。したがって、燃料デブリ取り出しを行う上では、リスクレベルが過度に変化しないよう、必要な調査を行い、燃料デブリの状況に合わせて適切かつ計画的な作業を行うことが重要である。

表-1　1号機～3号機の燃料デブリ分布の推定

	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少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)	・作業用出入口を通してペデスタル外側に燃料デブリが拡がった可能性あり	・作業用出入口を通してペデスタル外側に燃料デブリが拡がった可能性は小さい	・作業用出入口を通してペデスタル外側に燃料デブリが拡がった可能性があり

注）燃料デブリの推定は2016年度「廃炉・汚染水対策事業費補助金(総合的な炉内状況把握の高度化)」中間報告(平成28年度成果報告)及び一部2017年度の調査結果に基づき作成。

5)　燃料デブリ取り出し工法実現性検討

燃料デブリ取り出し方法を検討する上でまず重要なのは、水中、気中どちらの方式を選択するかである。一般的に、燃料デブリのように高線量の汚染物を扱う場合、原子力発電所で行なわれているように水に遮へい機能とダスト飛散防止機能を持たせる水中方式と再処理施設で行なわれているように鉄セルに遮へい機能を持たせ、負圧管理によりダスト飛散防止を図る気中方式がある。ただし、福島第一原子力発電所の場合は、水中、気中の二者択一というよりは、大きな構造物の中で最低限必要な水による冷却を維持しつつ、さらに水にどこまでの遮へい・ダスト飛散防止機能を期待するか、すなわち、水位をどのレベルにするかという判断となる。

また、燃料デブリを取り出すためには、そこまでアクセスする必要があり、事故で損傷しているとはいえ、依然堅牢な構造を有している PCV 等に開口を設け、アクセスルートを構築しなければならない。通常の定期検査用には、燃料交換や原子炉内作業を実施するためのオペフロから PCV ヘッド/RPV ヘッド等を開口して上からアクセスするルートと原子炉下部における CRD 交換や PCV 内作業を実施するための原子炉建屋 1 階にある CRD ハッチや機器ハッチを開口して横からアクセスするルートの 2 通りがある。燃料デブリ取り出しにおいてもその存在場所に応じて、これら 2 つのアクセスルートを基本とするのが現実的である。

このように、燃料デブリ取り出し方法のポイントは、水位とアクセスルートである。これら水位とアクセスルートの組合せとなる燃料デブリ取り出し方法の実現可能性を評価するために、典型的な工法として、3 つの重点工法（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）を選定した。これは、戦略プラン 2015、2016 において、燃料デブリへのアクセス方向について上、横、下の 3 通りと、PCV 水位について、完全冠水、冠水、気中、完全気中の 4 通りの組合せに対して、実現可能性の観点から重点的に取り組む工法を絞り込んだものである。これらの工法に対する技術要件を提示し、これまでの研究開発により概念設計及びフィージビリティ・スタディを進めてきた。

冠水-上アクセス工法は、PCV を完全に冠水させるか、あるいは燃料デブリの存在する場所までは冠水させることで、水による放射線の遮へい効果と放射性ダストの飛散抑制効果に期待する工法であり、原子炉の型式、事故の規模、冠水の範囲は異なるが米国スリーマイルアイランド原子力発電所 2 号機（以下「TMI-2」という。）で採用され成功した工法である。

気中-上アクセス工法及び気中-横アクセス工法は、燃料デブリの一部を気中の状態で取り出しを行う工法であり、燃料デブリへのアクセスをオペフロから行う場合を上アクセス、PCV 横から行う場合を横アクセスとした。

i.　燃料デブリ取り出し工法実現のための技術要件

燃料デブリ取り出し工法実現のための技術要件として、以下がある。

(1)　閉じ込め機能の構築
(2)　冷却機能の維持
(3)　臨界管理
(4)　PCV・建屋の耐震性
(5)　作業時の被ばく低減

(6) 労働安全の確保
(7) 燃料デブリへのアクセスルートの構築
(8) 燃料デブリ取り出し機器・装置の開発
(9) 系統設備、エリアの構築

これらの技術要件に対する、これまでの研究開発等の取組状況について以下に整理する。

(1) 閉じ込め機能の構築

福島第一原子力発電所 1 号機から 3 号機については通常の原子炉建屋等に要求される閉じ込め機能と同等の性能は確保できていない可能性が高いため、負圧管理等を組み合わせた閉じ込めを検討する必要がある。

具体的な閉じ込め機能としては、PCV と取り出し用セルからなる一次閉じ込め境界と、原子炉建屋とコンテナ等からなる二次閉じ込め境界を確保することを検討している。この閉じ込め機能は、微粒子状の燃料デブリを含む水を回収する「液相部」と粉塵を回収し内部を負圧に維持する「気相部」とで構成される。

A. 液相部の閉じ込め機能構築

PCV 上部（原子炉建屋 1 階より上部）は、現場の高線量がアクセスを困難にしており、補修箇所の調査自体が進んでいない。また、補修対象となり得る貫通部が多数存在し、止水の完全実施及びその長期間にわたる維持は技術的に難しい。

PCV 下部補修（地下階）技術としてベント管止水技術、ストレーナ止水技術、ダウンカマー止水技術等の開発が進められており、PCV 補修と水位の適切な設定及び回収システムの組合せにより気中工法においては閉じ込め機能を確保できる可能性がある。

また、PCV 内水位の設定においては、PCV 内汚染水が全量トーラス室に落水するような万一の異常発生時においても、トーラス室内の滞留水水位と建屋外の地下水水位の逆転が生じ、環境への放射性物質放出の影響が発生しないように検討する必要がある。

B. 気相部の閉じ込め機能構築

α 核種を中心とする放射性物質の閉じ込めについては、現在の PCV 内圧や窒素供給量を踏まえると PCV の負圧維持装置（ガス循環系、フィルター付き排気装置など）は、一般に用いられているシステム構成や装置規模の範囲の中で実現できると考えられ、さらに、気密性を高めるために、PCV へのインリークの抑制手法（溶接補修、シール材塗布等）の開発が行われている。また、二次閉じ込め境界として原子炉建屋に建屋カバーやコンテナを設置して微負圧に管理することにより、一次閉じ込め境界からの漏えいを回収処理するシステムについても検討している。

(2) 冷却機能の維持

燃料デブリは、崩壊熱を発生しているため燃料デブリ取り出し時においても冷却機能の維持が要求される。しかしながら、崩壊熱は時間とともに減少していくものであり、冷却機能の要求は、時間とともに低下していく。RPV 底部の温度監視等から、現状は一定の安定状態にあると考えられ、燃料デブリ取り出しに当たって求められる冷却能力の確保は可能であると考えられる。今後は循環水冷却システムについて検討を重ね、燃料デブリ取り出し作業の開始に向けた備えを行っていく。

(3) 臨界管理

炉心溶融によって生じた燃料デブリが再臨界に至る可能性は低いと考えられるが、PCV 水位の上昇や燃料デブリ取り出し作業による形状変化によってその可能性の程度が変化し得ることや PCV 内の状況や燃料デブリに関する情報に不確かさが大きいことから、臨界発生を防止する手法に加え、臨界を検知・停止する手段を組み込むことで再臨界による人及び環境への影響を防止することを検討している。このため、燃料デブリが再臨界に至る条件を把握する取組や臨界防止の信頼性を高めるための技術や臨界検知技術の開発が進められている。今後も得られる PCV 内の状況や燃料デブリ等の情報を反映して、管理方法の実現性を高めていく。

(4) PCV・建屋の耐震性

原子炉建屋、PCV 及び RPV 等の主要部分は、これまで検討した範囲では、事故による損傷、40 年間分の経年劣化及び燃料デブリ取り出しに必要な設備や PCV 内冷却水による重量増等を考慮しても、各号機、重点的に取り組む 3 つの工法すべてにおいて基準地震動 Ss（600Gal）に対して比較的大きな耐震裕度を確保できる結果が得られている。

耐震裕度が比較的小さい S/C 脚部については、PCV 下部の補修方法の影響を大きく受けることも考慮し、詳細な解析モデルによる強度評価を実施中である。これまでの評価によるとベント管止水やストレーナ止水といった補修方法の場合は、耐震裕度を確保できる結果が得られている。

ペデスタルについては、事故時の高温履歴やその後の冷却水注入による影響を考慮し、耐力及び剛性の低下を実験及び解析で評価しており、その場合でも基準地震動 Ss に対して耐震裕度を確保できる評価が得られている。

これらの評価は、今後の調査や設計の進捗に応じ、より詳細に実施していく必要がある。

(5) 作業時の被ばく低減

高線量下での作業が中心となるため、作業員被ばくの低減を図る必要がある。このため PCV 補修時の被ばく、取り出し作業エリアの除染や既設設備の撤去等の準備作業での被ばく及び取り出し作業による汚染拡大や被ばくについての評価が必要である。

PCV 補修時の被ばくについては、作業エリアの線量率が 3mSv/h に低減できると仮定した場合でも、原子炉建屋 1 階から 4 階までのエリアに損傷の可能性のある貫通部が多いため、冠水工法のための PCV 上部止水を行う場合には、作業員被ばく線量が過去の年間総被ばく線量の数倍になると推定されている。これに対し、気中工法のための PCV 下部止水は補修が必要な部位は限定され作業員被ばく線量は過去の年間総被ばく線量以下になると推定される。このような検証状況を踏まえて、線量低減と工法についてさらに検討を進める必要がある。

燃料デブリ取り出し作業は基本的に遠隔作業となることから、工法あるいはアクセスルートによる被ばく線量の差は生じないと考えられる。なお、遮へいセルの設置については、今後、設置技術を確立する必要がある。

(6) 労働安全の確保

福島第一原子力発電所における燃料デブリの取り出しは、世界でも類を見ない作業であり、かつ、その作業環境も過酷なものである。そのような環境下で安全な作業を遂行するために、労働災害の撲滅は最も重要な課題のひとつである。そのため、モックアップによる訓練、並びに不測の事態に対する対処方法等をあらかじめ検討するとともに、現場の作業環境及び作業条

件等の改善についても、実施計画を策定する段階で具体的に検討することが肝要である。

(7) 燃料デブリへのアクセスルートの構築

3)項の号機ごとのプラント状況によれば、燃料デブリは RPV 内部及び PCV 底部の両方に存在している可能性がある。それぞれの燃料デブリへのアクセスルート構築について、各工法（上アクセス工法、横アクセス工法）にて検討している。

RPV 内部の燃料デブリに対しては、上アクセスが適していると考えられるが、そのルート構築はウェルシールドプラグ撤去、PCV・RPV 上部開放や炉内構造物撤去と作業規模が大きく、燃料デブリに到達するまでに相応の期間を要する。一方、横アクセスによる RPV 内部の燃料デブリへのルート構築は現時点では技術的難度が高いと考えられる。

PCV 底部の燃料デブリに対しては、PCV 内部調査の実績等を踏まえると横アクセスのルート構築には比較的短期間で燃料デブリに到達できる可能性があるが、今後の内部調査の結果を考慮する必要がある。一方、上アクセスによる PCV 底部の燃料デブリへのルート構築については、RPV 内部の燃料デブリ取り出し後に RPV 底部の機器を撤去することが必要であり、遠隔操作の距離の長さや RPV 底部の状況の不確かさなどから、技術的難度が高いと予想される。また、ペデスタル外側にある燃料デブリに対しては、ペデスタルが障壁となり、更に技術的難度が高いと考えられる。なお、横アクセスの場合、3 号機に関しては、現時点で PCV 内水位が 6m 程度あり、取り出しの際には適切な水位まで低下させる必要がある。

RPV 内部及び PCV 底部の両方に燃料デブリが存在する可能性を踏まえれば、横／上アクセスの組合せ等、両方向からのアクセスについても検討する必要がある。

(8) 燃料デブリ取り出し機器・装置の開発

各工法において、PCV 底部及び RPV 内部で燃料デブリ取り出しを行う主要装置として、各工法の作業ステップ検討より抽出された要素技術（切削装置、視覚装置、横アクセスにおけるセルに係る遠隔シール溶接等）の開発が進んでおり、引き続き、実用化に向けた開発を継続していく。開発に当たっては、高い放射線、水分の存在、高いダスト密度等、過酷な環境条件であり、人が直接作業することは不可能であると考えられ、遠隔作業が必須であることを念頭に、装置には特段の頑強性と保守性及び異常発生時の救援機能の確保などが求められる。また、工法検討において抽出された課題（気中での作業におけるα核種の扱い、塊状燃料デブリの切削等）についても重要課題として検討を進める必要がある。

(9) 系統設備・エリアの構築

燃料デブリ取り出し作業に当たっては、閉じ込め区画の負圧管理や PCV 等の水位管理及び循環水の冷却・浄化等により、安全に作業を行うための環境を構築する必要がある。安全確保の観点から必要とされる「気相、液相の閉じ込め機能」や「冷却」「臨界管理」等の機能を確保するために必要な各種システムの概念及び各システム設置に必要なスペースについて検討した。気相、液相の閉じ込め機能に係るシステムについては、燃料デブリ取り出し時及び異常時の環境への被ばく影響の概略評価を行った。

閉じ込めシステムの検討の結果、冠水工法における異常発生時の大量の漏えい水の取扱いに課題が残るものの、システムを適用した場合の環境への被ばく影響の概略評価では、過大とならない試算結果が得られており、工法としての実現可能性がある。ただし、α核種による内部被ばくの可能性もあり、更なる飛散防止等による被ばく低減対策の検討を進めていく必要があ

る。また、エリアの構築については、系統設備等の設置に必要なスペースを算出しているところであるが、具体的に設置エリアを検討するにあたっては、原子炉建屋内の高線量エリアの取扱いや他作業との干渉も考慮し、建屋外への設置も含めて検討していく必要がある。燃料デブリ取り出し方針の決定後は、現場の状況を踏まえた適用性を検討すべきである。

燃料デブリ取り出しに当たって内部状況の監視は必須であるため、現在、システム等の検討の中で各種の計測が計画されており、計測システム（可視化、圧力、温度、放射線、臨界（希ガス濃度他）、水素濃度等）の具体化が今後の重要な課題である。

ii. **燃料デブリの安全・安定保管に係る技術要件**

取り出した燃料デブリや廃棄物を安全かつ安定に保管することは、工法に係わらず共通して必要となることであり、以下の技術要件について備えるべきである。

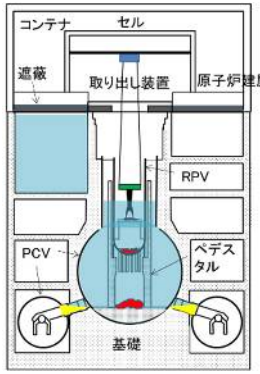
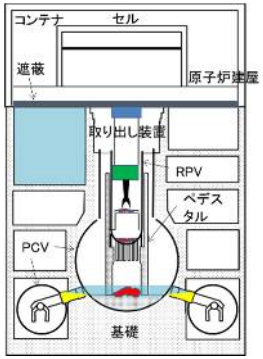
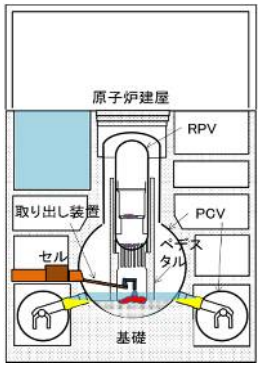
- 燃料デブリの取り扱い（収納・移送・保管）
  取り出した燃料デブリを収納する収納缶の設計・製作から移送・敷地内保管までのシステムを構築して、安全かつ安定な敷地内保管を行うことを計画し、必要な施設等の整備を行う。
- 燃料デブリ取り出し作業で発生する廃棄物の取り扱い
  燃料デブリ取り出し作業の準備工事、取り出し工事、後片付け等の段階で発生する炉内外から解体・撤去される構造物や工事上の交換部品等の様々な廃棄物について、安全性を確認しながら適切に分類・保管することを計画し、必要な施設等の整備を行う。
- 保障措置
  燃料デブリの取り扱いに対応した透明性のある保障措置方策が、燃料デブリ取り出し開始前までに構築されるように、関係者で緊密に連携して備えを行っておくべきである。

iii. **工法実現可能性の評価**

安全で確実な燃料デブリの取り出し作業を行うとの観点から、3 工法について実現可能性を評価したまとめを以下に示す（表-2）。

- 冠水工法の実現には、止水するための PCV 補修が必須であるが、PCV 上部には損傷の可能性がある部位が多数存在し、それぞれの部位に適した遠隔技術を開発することは難しく、調査や補修のために総被ばく量も過大となり、閉じ込め機能構築の観点から現時点では実現性は低いと考えられる。
- 一方で、気中工法での閉じ込めは PCV 内を負圧に維持することで達成できる可能性があることから、α核種を封じ込める負圧維持機能の技術開発を継続するべきである。
- 燃料デブリの推定分布から燃料デブリの取り出しを完遂するには、現時点では上アクセス工法と横アクセス工法の組合せが必要と考えられるが、調査や技術開発は続いており、柔軟に最適な方法を探っていくべきである。

表-2　燃料デブリ取り出し工法の実現可能性の評価まとめ

燃料デブリ取り出し工法		冠水−上アクセス	気中−上アクセス	気中−横アクセス
工法概念図（イメージ） ＊：赤色部分 燃料デブリ存在想定 ＊：水色部分 水張り範囲の想定 ＊：黄色部分 ベント管止水				
主要な技術要件				
閉じ込め機能の構築	液相部	・冠水時の水圧に耐える止水技術の難度高 ・PCV 上部は貫通部が多く、遠隔補修技術の難度高 ・保有水量が多く異常時の漏えい防止策が必要	・冠水に比べ耐水圧が低く、技術難度はやや低 ・PCV 上部の補修の必要な貫通部は限定的 ・水位設定によっては、異常時も漏えい抑制が可能	・冠水に比べ耐水圧が低く、技術難度はやや低 ・PCV 上部の補修の必要な貫通部は限定的 ・水位設定によっては、異常時も漏えい抑制が可能
	気相部	・負圧維持機能を待つ空調系統が必要だが、設備規模は小さくて済む可能性有	・α核種閉じ込めのため、負圧維持機能を持つ空調系統が必要。設備規模は大きくなるが、実現の可能性有	・α核種閉じ込めのため、負圧維持機能を持つ空調系統が必要。設備規模は大きくなるが、実現の可能性有
冷却機能の維持		・冷却維持は可能	・冷却維持は可能	・冷却維持は可能
臨界管理		・炉心部水張り時の臨界防止が課題	・炉心部への冠水作業がない分、再臨界となる可能性低	・炉心部への冠水作業がない分、再臨界となる可能性低
PCV・建屋の構造健全性（耐震性）		・PCV 内冷却水及び建屋上部に設置される燃料デブリ取り出し装置類の重量増も、主要部分については耐震裕度を確保	・建屋上部に設置される燃料デブリ取り出し装置類の重量増も、主要部分については耐震裕度を確保	・燃料デブリ取り出し装置類は、１階に設置されるため、上アクセスより耐震上有利
作業時の被ばく低減		・PCV 上部には損傷の可能性のある貫通部が多いため、止水に係る作業員被ばく線量は過去の年間総被ばく線量の数倍と推定	・PCV 下部止水にかかる作業員被ばく線量は過去の年間総被ばく線量以下と推定	・PCV 下部止水にかかる作業員被ばく線量は過去の年間総被ばく線量以下と推定
アクセスルートの構築	RPV 内部	・RPV 内部の燃料デブリ取り出しは、炉内構造物などの撤去が必要となり作業規模が大きくなる可能性有	・RPV 内部の燃料デブリ取り出しは、炉内構造物などの撤去が必要となり作業規模が大きくなる可能性有	・RPV 内部の燃料デブリに対しては現時点では難度高
	PCV 底部	・PCV 底部の燃料デブリに対しては、RPV 底部に開口をあけるため、横アクセスに比べて作業規模が大きくなる可能性有	・PCV 底部の燃料デブリに対しては、RPV 底部に開口をあけるため、横アクセスに比べて作業規模が大きくなる可能性有	・PCV 底部の燃料デブリに対しては、上アクセスに比べて作業規模を小さくできる可能性有
工法に関する実現可能性評価		・止水のための遠隔補修技術の開発難度が高 ・補修にかかる総作業員被ばく量が過大	・α核種を閉じ込める負圧維持の技術開発継続が必要 ・横からアクセスとの組合せが必要な可能性有	・α核種を閉じ込める負圧維持の技術開発継続が必要 ・上からアクセスとの組合せが必要な可能性有

6)　5 つの基本的考え方による総合評価

前項での技術的な実現可能性の評価を含め、福島第一原子力発電所の廃炉を進める上での継続的なリスク低減のための 5 つの基本的考え方に基づき、燃料デブリ取り出しの方法について総合的な評価を行った。

燃料デブリ取り出し方針とは、燃料デブリ取り出し作業の開始段階から終了段階までの全体プロセスを視野に入れた上で、各号機において燃料デブリへの本格的アクセスを開始する上での基本となる考え方であり、現時点で想定し得る燃料デブリ取り出し工法の基本概念となるものである。この基本概念には、燃料デブリ取り出しの全体工程におけるリスク低減の観点から、取り出しを行う燃料デブリの部位及びアクセスの順序や組合せ、取り出し時における PCV の水位等の取り出し工法の骨格となる要素が含まれる。

以下に、評価結果を示す。

(1)　燃料デブリ取り出し時の水位に関する評価

燃料デブリの存在する高さまで PCV を水で満たす冠水工法は、放射性ダストの飛散防止や放射線の遮へい効果の観点からのメリットは大きく、可能であれば同工法を採用することが期待される。

しかしながら、3 つの事故炉はいずれも PCV 上部にアクセス性や構造の異なる貫通孔を多く有し、これらの貫通孔からの水の漏えいを防止するには、補修作業の遂行と性能保証の両面で難度の高い課題の解決が必要と考えられる。特に、現在の建屋内除染の状況を踏まえると、補修時の作業員被ばくが甚大になると予想され、作業員被ばくを低減すべき「安全」の観点からは現状の技術を前提とした冠水工法の適用は難度が高いと考えられる。

一方、気中工法では、ガス管理システムの構築による気相部での放射性物質の閉じ込めが必要となるものの、現在の研究開発と炉内外の状況を前提とすれば、１～３号機いずれの場合においても、気中における燃料デブリ取り出しに向けて、更に研究開発を加速し、現場適用性の検討を進めるべきと考えられる。

なお、建屋内の線量を下げるための取組を継続するとともに、将来、冠水工法の実現性を改めて議論することも視野に入れ、これまでの研究開発で得られた知見と残る課題については適切に蓄積して、将来の利用の可能性に備えるべきである。

(2)　アクセスルート

RPV 内部にある燃料デブリは、現時点では横からアクセスして取り出すのは困難と考えられ、オペフロ（上方向）からのアクセスが必要となる。

また、PCV 底部にある燃料デブリは、オペフロ(上方向)からアクセスして取り出すのは、燃料デブリに到達するまでに時間を要することや、遠隔操作の距離が長いことなどから、技術的難度が高くなることが予想される。また、ペデスタル外側にある燃料デブリを上方向から取り出すには、ペデスタルが物理的な障壁となる。これまでの PCV 底部の調査における作業の経験から、横アクセスの場合には、比較的小規模の装置、設備から開始できると考えられる。したがって、PCV 底部にある燃料デブリは、PCV 側面部（原子炉建屋 1 階レベル）からアクセスして取り出す方がより現実的であり、作業員被ばくの低減とメンテナンスの観点からも横アクセスが合理的と考えられ、さらに、具体的な基本設計を行い、実現性についての確証を得る必要

がある。

(3) 先行して燃料デブリ取り出しを開始する炉内の部位

福島第一原子力発電所の 3 基の事故炉はいずれも、程度の違いはあるが、RPV 内部にも PCV 底部にも燃料デブリが存在すると考えられる。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という視点からは、以下の理由で、最初に PCV 底部にある燃料デブリを横アクセスにより取り出すことが現実的である。

- 現実的なエンジニアリングの実施可能性として、1～3 号機とも PCV 底部への横からのアクセスルートについて、それぞれの PCV 底部調査を通じて一定の知見が蓄積されてきていること。
- 準備作業開始後、実際に燃料デブリに到達できる期間が RPV 内部に上からアクセスする場合は、PCV 底部に横アクセスする場合に比べて、燃料デブリに到達するまでの期間が長くなると予想されること。
- 全体としての廃炉工程の合理性の点から、PCV 底部に向けた横アクセスの準備は、上下両方の作業における安全確保等の課題はあるものの、プール燃料の取り出し作業と並行して行い得ること。また、RPV 内部の燃料デブリ取り出しまでに一定の時間余裕が得られることで、結果として、炉内構造物の Co-60 に起因する線量の低減を見込めること。

燃料デブリは、1 号機及び 3 号機は PCV 底部に多くの量の燃料デブリが存在すると推定され、2 号機は PCV 底部に存在する燃料デブリは少ないと推定されたが、最近行われた 2 号機の PCV 内部調査の結果からは、2 号機においても一定量の燃料デブリがペデスタル底部にあることが示唆された。

以上から、燃料デブリ取り出しを開始する炉内の部位については、PCV 底部への取組を先行することが合理的と判断される。

7) 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（戦略的提案）

i. 燃料デブリ取り出し方針の決定に向けた提言

燃料デブリの潜在リスクをできる限り早く低減することが重要な一方、燃料デブリに関する情報や取り出し技術の開発は未だ限定的であり、不確実性が大きいことを踏まえる必要がある。このような状況で燃料デブリ取り出しを検討するには、短期的な計画は緻密に立案し、長期的な計画は俯瞰的な視野で不確実性に柔軟に対応できるような枠組みで立案することが重要である。

したがって、燃料デブリ取り出しの検討においては、現時点で最も確からしい基本概念を定め、次に、これを基に工事の実現性を見極めるためのエンジニアリング作業を進める。その後、燃料デブリへの取り出しを進めながら並行して得られる内部の調査結果を、次のアクセスと取り出しに随時反映し、燃料デブリ取り出しの確度を上げていくべきである。すなわち、燃料デブリの取り出し作業は、周辺状況や次のターゲットの調査と混然一体となったものであり、小さくても確実な成功例を分析しつつ少しずつ規模を拡大していくステップ・バイ・ステップのアプローチにより、徐々に必要な情報量を増やし、状況に応じて柔軟に進めていくべきである。

以上を踏まえ、燃料デブリ取り出し方針の決定に向けた提言を以下に示す。

(1) 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こと。

(2) 先行して着手すべき燃料デブリ取り出し方法を設定した上で、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こと。

(3) 燃料デブリ取り出しの完遂に向けて、様々な工法の組合せが必要になることを前提とすること。

(4) 気中工法に軸足を置いて、予備エンジニアリング、研究開発等を進めていくこと。

(5) まず、PCV 底部の燃料デブリの取り出しに重点を置いて取組を進め、その過程において得られる知見や経験を踏まえて常に見直しを行うこと。

(6) 最初に PCV 底部の燃料デブリにアクセスするルートとしては、PCV の横方向からのアクセス（横アクセス工法）から検討を進めていくこと。以下は本工法による工事に係る留意点である。

- 作業現場の放射線量低減
- 水位コントロール技術の確立
- セルの接続技術の確立とエリアの確保

ii. **方針決定以降の取組**

燃料デブリ取り出し方針決定に続く「初号機の燃料デブリ取り出し方法の確定」、更には、実際の工事計画の立案の加速化に向けて、方針決定後においては以下の項目に重点的に取り組むべきである。

(1) 予備エンジニアリング

予備エンジニアリングにおいては、燃料デブリの取り出し方針を踏まえ、研究開発やシステム概念検討の成果の現場適用性を検討し、燃料デブリ取り出しに関わる工程を具体化する。

なお、予備エンジニアリングの結果を踏まえ、必要に応じて燃料デブリ取り出し方法を見直すことも考えられる。

(2) 研究開発の絞り込み・重点化による技術開発の加速と実用化

- PCV 内部調査の追加実施
- RPV 内部調査の実施
- 気中工法を実現するために必要なα核種管理システムの成立性の見極め
- 横アクセス工法実現のために必要な研究開発の推進およびモックアップ施設の在り方の検討
- 燃料デブリの収納、移送保管に関するシステムや保管施設の準備、取り出し作業に伴って発生する廃棄物に関する研究開発

(3) 燃料デブリ取り出し開始に向けた道筋

燃料デブリ取り出しを開始するためには、燃料デブリ取り出し装置の準備ばかりでなく、内部調査等による現場の確認、現場の環境整備、取り出した後の保管施設の準備、更に、それらの許認可の実施や、福島第一原子力発電所の実情に鑑みた現実的な保障措置方策の構築に向け

た計画を立案しておく必要がある。

このためには、今後、燃料デブリ取り出し方針の決定を踏まえ、国内規制当局や IAEA などの国際機関とのコミュニケーションも重要となる。

以上、燃料デブリ取り出し開始までには様々な検討事項があるが、燃料デブリ取り出しプロジェクトを進めるに当たっては、以下の点への配慮が重要である。

- プロジェクトの継続性への配慮

燃料デブリ取り出し作業は、作業準備から取り出し作業及び収納・移送・保管まで長期にわたるプロジェクトであり、作業を安定的に継続できる環境を構築し、燃料デブリのより安定した管理状態への移行を早期に達成するためのマネジメントを継続することが重要である。

- 全体最適化

燃料デブリ取り出しを、「安全」「確実」「合理的」「迅速」「現場指向」の観点から実行するためには、号機単位の最適化だけでなく、号機間の設備の統合等、福島第一原子力発電所サイト全体で行われる廃炉に向けた作業の最適化も考えていく必要がある。

また、初号機の取り出し作業に続いて、次にどの号機のどの部位の燃料デブリを対象にするのが合理的か、作業の合理性、経験の活用等の視点を踏まえ、全体としてプロジェクトの最適化を目指す必要がある。

- 地元や社会との緊密なコミュニケーション

燃料デブリ取り出し作業計画の策定及びその実施に当たっては、安全確保を最重点として考えるとともに、安心の観点からの地元や社会の理解を十分に踏まえることが肝要である。

5. 廃棄物対策分野

1) 廃棄物分野の戦略プランの検討方針

中長期ロードマップにおいて、廃棄物対策分野の取組は、2017 年度内に「固体廃棄物の処理・処分に関する基本的な考え方」を取りまとめることとされている。

福島第一原子力発電所事故に由来する固体廃棄物(※)は、通常の原子力発電所で発生していた廃棄物とは特徴が異なると考えられる。このため、固体廃棄物の性状把握が行われ、処理・処分に向けた検討が行われているとともに、リスク低減の考え方に則って固体廃棄物の保管対策が実施されているところである。

本章では、固体廃棄物の性状に関する情報が蓄積されつつある現状を踏まえ、放射性廃棄物における安全確保の国際的な考え方を整理した上で、今後の固体廃棄物対策への対応方針を示すこととする。この対応方針は、基本的な考え方の取りまとめに資する提言ともなるものである。

(※)戦略プランにおける「固体廃棄物」及び「固体廃棄物の管理」の用語については、次の通りとしている。

「固体廃棄物」:

中長期ロードマップに倣い、事故後に発生したガレキ等には、敷地内での再利用等により廃棄物あるいは放射性廃棄物とされない可能性があるものもあるが、これら及び事故以前から福島第一原子力発電所に保管されていた放射性固体廃棄物を含めたものである。また、対策の方針が同様である水処理二次廃棄物を追加する。なお、燃料デブリは含めない。

「固体廃棄物の管理」:

IAEA では、「放射性廃棄物管理とは、運営及び操作の観点から放射性廃棄物の収集、分別、前処理、処理、廃棄体化、輸送、保管及び処分に係るすべての活動」とされ、また、管理すべき放射性廃棄物には、事故に由来する放射性廃棄物も含まれている。固体廃棄物についても、その発生から処分に至るまでの全ての活動を指すものとした。

2) 国際的な放射性廃棄物対策における安全確保の考え方

ICRP や IAEA において取りまとめられている放射性廃棄物管理における安全確保の考え方は、福島第一原子力発電所の事故以前に発生した事故に伴う放射性廃棄物の経験も踏まえた全ての放射性廃棄物に対するものであり、固体廃棄物の対策の安全確保を検討するに際し、参考とすべきものである。以下に、放射性廃棄物管理における国際的な安全確保の考え方を示す。

- 全ての放射性廃棄物の管理のための好ましい戦略は、放射性廃棄物を閉じ込め、接近可能な生物圏から隔離することである。この戦略は、放射性廃棄物の管理活動から生じる、残留量の放射性核種を含む排出物の放出、あるいは関連する規準を満たす物質のクリアランスを排除しない。
- 放射性廃棄物は、当初、さまざまな形態で発生するかもしれない。放射性廃棄物の管理活動において、放射性廃棄物は一般に安定した固体の形態にするために処理され、それらの保管、輸送および処分を容易にするため可能な限り減容され、固定される。
- 処分に先立って実施されるあらゆる段階を含む処分前管理においては、各段階で放射性廃棄物の性状を把握し、分類することが必要である。
- 処分前管理において、保管は管理の方法に柔軟性を付与する手段として重要であることから、処分前管理の各段階において適切な保管が実施可能であるべきである。

- 固体廃棄物の保管は、その後の管理に適した状態で、検査、モニタリング、取り出し、及び保存されることが可能な方法で実施されなければならない。
- 処理の決定を行う際に、各管理段階で将来的に予想されるあらゆる要求が、可能な限り考慮されなければならない。

3)　固体廃棄物に関する取組の現状

i.　保管・管理

現在までに発生している固体廃棄物は、ガレキ等と水処理二次廃棄物に大別される。ガレキ等は炉心燃料を起源とした核種の気中への飛散・拡散等により、水処理二次廃棄物は水中へ溶解した同起源の核種の吸着処理等により生じたものである。燃料デブリ取出しにより発生する廃棄物等は今後発生する（図-3）。固体廃棄物は、種類や表面線量率に応じた安全な保管・管理が継続されている（表-3）。施設整備も着々と進められ、雑固体廃棄物焼却設備の運転により使用済保護衣等の減容処理が進められている。

保管管理計画では、当面10年程度に発生する固体廃棄物の物量予測を念頭に、固体廃棄物の保管・管理におけるより一層のリスク低減を目指し、可能な限り減容を行った上で、建屋内保管へと集約していくための計画が示されている。

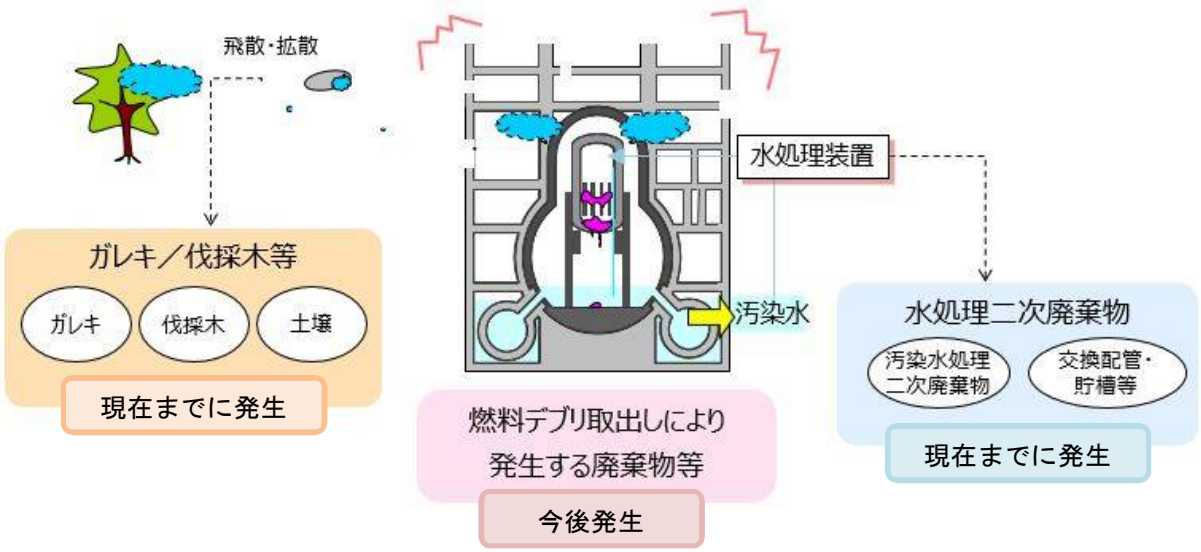


図-3　固体廃棄物の汚染源と核種の移行経路の概要[1]

[1] 技術研究組合　国際廃炉研究開発機構（IRID）、平成 26 年度（2014 年度）補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金（固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発）」最終報告、平成 2017 年 8 月

表-3　固体廃棄物の保管・管理状況[2]

(a)　ガレキ類・伐採木・使用済保護衣等の管理状況（2017.4.30 時点）

ガレキ類

表面線量率（mSv/h）	保管方法	保管量（m^3）/ 保管容量（m^3）（割合）
≦0.1	屋外集積	147,900 / 214,300（69%）
≦1	シート養生	30,900 / 71,000（44%）
1～30	覆土式一時保管施設、仮設保管設備、容器	20,800 / 27,700（75%）
＞30	容器（固体廃棄物貯蔵庫内）	8,300 / 12,000（69%）
合計	----	207,900 / 325,000 (64%)

伐採木

分類	保管方法	保管量（m^3）/ 保管容量（m^3）（割合）
幹根	屋外集積	79,500 / 144,500 (55%)
枝葉	伐採木一時保管槽	19,600 / 24,900 (79%)
合計	----	99,100 / 169,400 (59%)

使用済保護衣等

保管方法	保管量（m^3）/ 保管容量（m^3）（割合）
容器	67,500 / 71,200 (95%)

(b)　水処理二次廃棄物の管理状況（2017.5.18 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吸着塔		758	本	3,628 / 6,239 (58%)
	第二セシウム吸着装置吸着塔		188	本	
	多核種除去設備等保管容器	既設	1,365	基	
		増設	1,044	基	
	高性能多核種除去設備使用済吸着塔	高性能	73	本	
	多核種除去設備処理カラム	既設	9	塔	
	モバイル式処理装置等使用済吸着塔及びフィルタ		191	本	

廃スラッジ

廃スラッジ貯蔵施設	597	m^3	597 / 700 (85%)

濃縮廃液

濃縮廃液タンク	9,379	m^3	9,379 / 10,700 (88%)

[2] 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議（第 42 回）、資料 3-4、放射性廃棄物処理・処分

ii. **性状把握**

固体廃棄物の処理・処分を検討するためには、固体廃棄物の核種組成、放射能濃度等の性状が把握されていることが必要である。このため、事故以降に発生したガレキ等、及び水処理二次廃棄物を主な対象に試料採取や分析が実施され、これまで 6 年間で約 300 試料の分析結果が蓄積されてきている。試料の採取場所の例を図-4 に示す。

これまでの分析結果の蓄積を踏まえ、一部の汚染の特徴が推定できつつあるが、更なる分析が必要である。また、性状把握を推進するため、分析データと移行モデルに基づく評価データを用いて性状を把握する方法の構築も進められている。

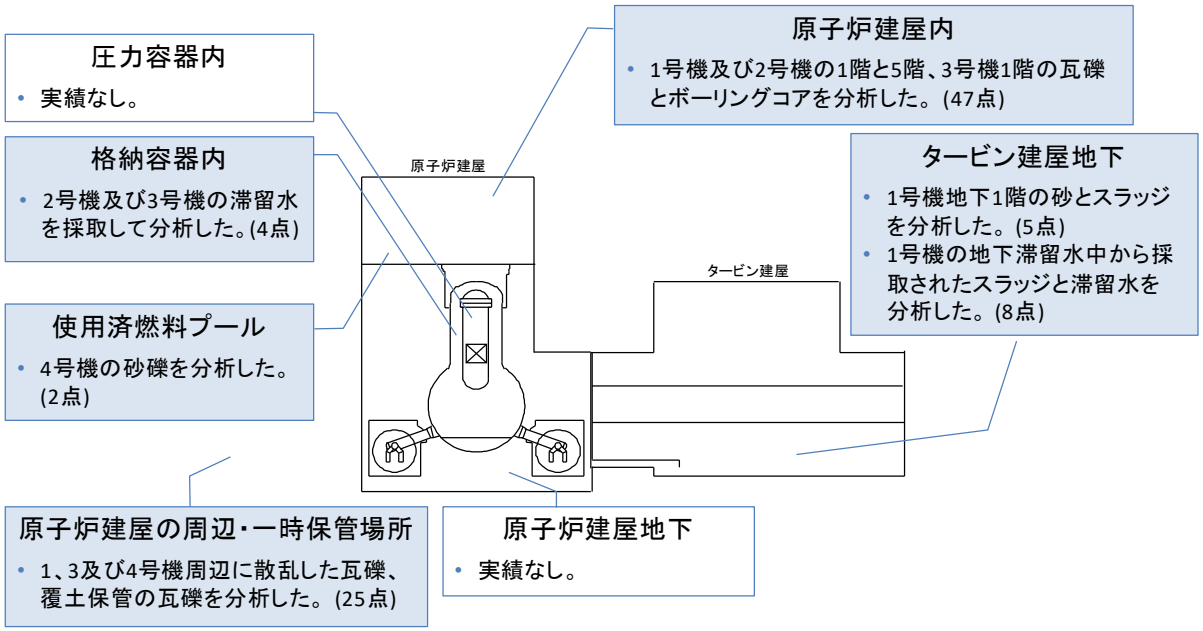


図-4　試料の採取場所の例[3]

iii. **処理・処分**

固体廃棄物のうち、水処理二次廃棄物は流動性が高いものもあること、わが国で処理・処分を行った実績のない材料や成分が含まれていること及び比較的高線量であることから、安定化、固定化のための処理技術の開発が優先的に行われている。適用可能な廃棄体化技術の絞り込みのため、実績のある技術が選定され、非放射性物質による模擬廃棄物を用いた固化基礎試験が実施された。固化の可否と、固化物の健全性確認データ等（固形化の条件、強度等）を取得した。

処分については、暫定的な核種組成等に基づき、既存処分概念を例に、処分の観点から廃棄物の分類評価を試行的に検討した。固体廃棄物の特徴を踏まえた処分概念の検討に資するため、海外の事例調査等を実施した。

[3] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 ／日本原子力研究開発機構、福島第一原子力発電所の固体廃棄物試料分析（現状までの成果報告）、2017 年 5 月 25 日、p4

4)　固体廃棄物の処理・処分の基本的考え方の取りまとめに向けた提言（戦略的提案）

i. 固体廃棄物の特徴

これまでの取組及び研究開発の成果を踏まえて推定される固体廃棄物の特徴は以下のとおり。

- 固体廃棄物は、通常の原子炉施設の運転時に発生する放射性固体廃棄物と比べて、発生量が大量であるとともに、その中で比較的高線量の固体廃棄物が占める割合も多い。
  固体廃棄物の主要な汚染源が燃料デブリであることから、固体廃棄物中の放射能濃度は、使用済燃料の放射能濃度を超えることはない。
- 固体廃棄物の核種組成及び放射能濃度は、通常の原子炉施設の運転時に発生する放射性固体廃棄物と比べて多様である。
- 固体廃棄物のうち水処理二次廃棄物には、流動性が高いものもあり、あるいは水素を発生させる高線量のものが多く含まれており、また、我が国で処理・処分を行った実績がない材料も多く含んでいる。
- 事故直後に発生した固体廃棄物には、化学的性質が処分前管理や処分の安全性に影響を与える可能性が懸念される物質及び化学的有害性が環境に影響を与える可能性が懸念される物質が存在している。
- 処分の検討に不可欠な固体廃棄物の全体の発生量や性状は、今後の廃炉作業の進捗等に応じて順次明らかになっていく。

ii. 固体廃棄物の管理の方針

放射性廃棄物管理及び放射線防護の国際的な考え方と、事故以降の廃炉に向けた取組や性状把握の結果から推定される固体廃棄物の特徴を踏まえると、処分の見通しを得るまでの間は、処分前管理のうち性状把握、保管・管理、先行的処理等に重点を置くこととなる。以下の固体廃棄物の管理の方針を提案する。

- 閉じ込めと隔離の徹底
  固体廃棄物の管理においては、放射性物質の飛散・漏えいを防止するための閉じ込めと人の接近を防止するための隔離を徹底することにより、人が有意な被ばくを受けないようにする。
- 固体廃棄物量の低減
  固体廃棄物の管理の負荷を軽減するため、廃炉に係る作業に伴って発生する固体廃棄物について、可能な範囲で固体廃棄物量を低減していく。
- 性状把握の推進
  今後の分析試料数の増加に対応するため、分析施設・設備の整備や分析要員の確保・育成による計画的な分析能力の向上と、研究開発による性状把握の効率化を進める。
- 保管・管理の徹底
  固体廃棄物の保管・管理における更なる安全性の向上を図る観点から、保管管理計画を着実に実施していく。
  処分の検討に不可欠な固体廃棄物の全体の発生量や性状は、今後の廃炉作業の進捗状況や計画の明確化に伴って順次明らかになっていく。このため、今後順次発生する固体廃棄物

は、その性状を踏まえて、より安全かつ合理的な保管・管理を行うとともに、福島第一原子力発電所の敷地内で確実に保管・管理ができるよう、保管容量を確保する。

- 処分を念頭に置いた先行的処理方法の選定手法の構築
  固体廃棄物のより安全かつ合理的な保管・管理をするため、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方法を合理的に選定する手法を構築する。

iii. **固体廃棄物の管理の方針に沿った当面の取組と研究開発**

- 閉じ込めと隔離の徹底
  閉じ込めと隔離を徹底するため、必要に応じて、容器収納や固定化等の措置を行うとともに、保管場所を適切に設定し、保管場所に固体廃棄物を保管することにより隔離した上で、モニタリング等の適切な管理を行う。
- 固体廃棄物量の低減（物量低減、減容処理）
  固体廃棄物量を低減するため、搬入の抑制、再使用・再利用及び減容等の取組を継続していく。
- 性状把握の推進
  分析能力の向上については、分析施設・設備の整備や既存分析施設・設備の活用を中長期観点から計画的に進めるとともに、人材育成及び技術伝承に係る体制を早期に構築していく。また、性状把握の効率化に係る研究開発については、分析データと移行モデルに基づく評価データを相補的に組み合わせて固体廃棄物の性状を把握する方法を構築するとともに、分析試料数の最適化や分析方法の簡易・迅速化等の研究開発を行う。
- 保管・管理の徹底
  固体廃棄物の保管・管理における更なる安全性の向上を図る観点から、 固体廃棄物貯蔵庫外で一時保管してきた固体廃棄物等を、可能な限り減容して、建屋内保管へ集約する。
  今後順次発生する固体廃棄物の性状を踏まえ、保管・管理期間中に水処理二次廃棄物等から発生する水素ガス量の評価方法の検討等を進め、安全確保の観点から更なる対策が必要となる時期を評価し、対策の内容について検討を行う。
  燃料デブリ取り出しに伴って発生する固体廃棄物について、保管・管理方法等の検討を、燃料デブリの取り出し方法及び保管方法の検討と合わせて進める。
- 処分を念頭に置いた先行的処理方法の選定手法の構築
  先行的処理に係る選定手法として、設定した複数の処分方法に対して、絞り込んだ処理方法に基づく暫定的な廃棄体の仕様ごとに安全性の評価を実施し、その結果に基づいて処理方法を選定する手法を構築する。
- 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
  各分野の検討状況や課題を共有し、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しながら研究開発を進めていく。
- 継続的な運用体制の構築
  固体廃棄物の管理を安全かつ着実に継続していくため、固体廃棄物の管理に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を構築する。
- 作業員の被ばく低減対策等
  関連する法令等に基づいて、被ばく管理、安全管理、健康管理等をより徹底していく。

6. 研究開発への取組

1)　研究開発の基本的な方針等

i. 基本的な方針

NDF では NDF 法に基づき研究開発業務実施方針を策定し、本方針に基づき、国内外の叡智を結集させ、中長期ロードマップに基づく取組の着実な実行を技術的に支えるための幅広い研究開発をマネジメントしてきたところである。今後、号機ごとの燃料デブリ取り出し方針が決定されることにより、こうした研究開発の進め方も新たな段階に入ることとなる。また、廃炉の実施に向けた具体的な工程が明らかになることにより、各主体が担うべき役割もより明確化されていくと考えられる。この際、研究開発成果の現場への適用に向けては、国と事業者が適切に役割分担し、着実に進めることが必要であり、また、国及び関連する研究機関の役割としては、中長期を踏まえた基礎研究拠点・研究基盤の構築が更に期待されることになると考えられる。各研究機関は、廃炉の状況や廃炉に関する理工学的な諸課題（ニーズ）を検討した上で取り組む基盤的な研究開発により、廃炉に必要な技術を補完・補強していくことが期待される。

ii. 研究開発の全体像

福島第一原子力発電所の廃炉に係る研究開発は、基礎・基盤研究から応用研究、開発・実用化に至るまで多様な実施主体により行われている（図-5）。NDF は、各機関における研究開発活動を実効的かつ効率的に推進するため全体の最適化に取り組んでいる。

更に、国内のみならず海外の叡智をも結集するという観点からは、経済産業省の「廃炉・汚染水対策事業」には海外企業も参加している。また、経済協力開発機構/原子力機関（以下「OECD/NEA」という。）において事故進展解析の国際共同研究 BSAF プロジェクト等が進められている。文部科学省の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」では海外機関との共同研究も進められている。

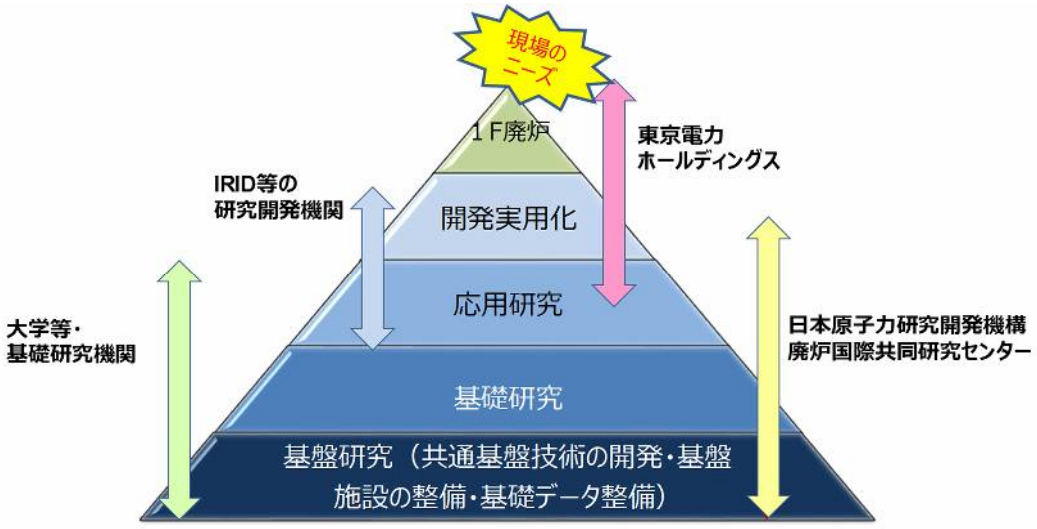


図-5　福島第一原子力発電所の廃炉に関連する主な研究開発機関の役割分担イメージ

2)　廃炉作業への適用に向けた研究開発の推進

i.　東京電力が実施する研究開発

東京電力は、福島第一原子力発電所の廃炉の実施主体として研究開発を実施するとともに、経済合理性を有しつつ優れた国内外の技術について、現場の状況に応じて、必要な技術導入・実証を進めることが重要である。東京電力は、廃炉に必要な実現性の高い研究開発を今後も積極的に実施するとともに、廃炉・汚染水対策事業によって開発された技術要素を現場に適用するためのエンジニアリングを推進していくことが期待される。特に、燃料デブリ取り出し等に必要なエンジニアリングの進展に併せて、今後は、自らが実用装置の開発等を進めることが期待される。

ii.　廃炉・汚染水対策事業

経済産業省の廃炉・汚染水対策事業はこれまでに一定の成果を上げてきているが、こうした研究開発は、廃炉作業におけるニーズを的確に把握した上で、最新の炉内状況や廃炉作業の工程、個々の研究開発プロジェクトの実際の進捗状況に合わせて、その全体が現実的かつ実効的なものとなるよう機動的に見直していくことが重要である。

今後、号機ごとの燃料デブリ取り出し方針が決定され、実機適用のための設計等のエンジニアリングが開始されることとなる。これらの工程の進捗に伴い、研究開発プロジェクトもエンジニアリングとの連携をより一層図るべく、国と事業者の役割分担が適切なものとなるよう、不断に見直しを行うことが必要である。

3)　研究開発の連携強化

福島第一原子力発電所の廃炉に係る研究開発には多数の機関が関わっており、関係機関における研究開発の取組内容に関する理解と共有、廃炉現場と研究現場との協力及び連携の確保が重要である。このため、NDF は廃炉研究開発連携会議を開催している。更に研究開発ニーズ・シーズの双方向連携の場の強化と国内外の研究者の参画を促すため、廃炉研究開発情報ポータルサイトも開設したところである。

更に、アカデミアでは、廃炉基盤研究プラットフォームや、福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会といった横の連携が進んでいる。

今後は、各種研究開発主体が、今後もモチベーションを維持しつつ研究開発に継続的に携わっていけるよう、インセンティブの確保が課題である。

i. **ニーズから導き出された重要研究開発課題とその戦略的推進**

今後 30～40 年程度の長期にわたる福島第一原子力発電所の廃炉事業を安全着実かつ効率的に推進するに当たっては、原理の理解や理論に基づいた理工学的検討も含め、中長期をにらんだ研究開発戦略を立案することが必要である。このため、NDF は研究連携タスクフォースを設置して議論を行い、戦略的かつ優先的に取り組むべき更なる研究開発課題・ニーズとして、重要研究開発課題を抽出した。更に廃炉基盤研究プラットフォームに課題別分科会が設置され、これら重要研究開発課題について研究開発戦略の策定作業が進められている。

これら重要研究開発課題は、廃炉の状況や廃炉に関する理工学的な諸課題（ニーズ）を検討した上で取り組む基盤的な研究開発であり、その実施に当たっては、コア人材ないしコア研究を中心とする拠点が形成され、長期的に事業に携わっていくことのできる体制を前提とするべきである。このため、国等は重要研究開発課題ごとの研究開発戦略の策定状況も踏まえながら、これら課題に係る研究開発の実施及び支援に着手するとともに、この研究開発をより効果的に実施するために必要な制度についても検討することが期待される。

ii. **中長期を見通した研究開発基盤の構築**

前項で述べた重要研究開発課題の実施をはじめ、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、研究開発基盤の整備や技術知識の蓄積が必要不可欠である。

2017 年 4 月には、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する場として、JAEA/CLADS の国際共同研究棟が福島県富岡町に開所したところであり、国をはじめとする関係機関は、JAEA/CLADS を更に活用するための方策を講じるべきである。

また、ハードウェアとしての研究基盤の構築も重要であり、JAEA においては 2016 年 4 月に楢葉遠隔技術開発センターが本格運用開始し、大熊分析・研究センター（放射性物質分析・研究施設）の建設も進んでいる。福島県内を中心に、廃炉・汚染水対策及び環境除染対策に関連する研究施設が立地し、廃炉研究開発における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。

iii. **人材の育成・確保**

研究開発活動を長期間、持続的に実施するため、研究者・エンジニアなどの育成・確保等の人材に関する取組を着実に進めることが重要である。文部科学省の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」では、大学等を中心に研究活動を通じた積極的な人材育成の取組が行われている。

また、福島第一原子力発電所の廃炉事業のような長期かつ大規模のプロジェクトでは、学術的見地から理工学的検討を行うことのできる研究開発のコア人材や、俯瞰的な視野を備え、個々の技術シーズを統合して実用的な機能を有するシステムとして完成させることのできる人材（システムインテグレータ人材）の育成が重要であり、前述の重要研究開発課題の実施を通してその取組を進めているところである。

一方、企業等に所属して現場で働く技術者の育成・能力向上も重要である。今後も、技術士、原子炉主任技術者など関連資格試験も含めその取得を奨励する等、企業等は従業員の能力向上に努めることが期待される。

7. 国際連携の強化

福島第一原子力発電所の廃炉は、我が国が経験したことのない極めて複雑かつ困難な事業である。他方、海外においては、事故施設、汚染サイトのクリーンアップや廃止措置に関する多くの経験、知見が存在する。それらを積極的に学び活用することは、福島第一原子力発電所の安全確保と廃炉の加速に有益であることから、国内関係機関は国際連携の強化を積極的に進める必要がある。

1) 叡智の結集と活用

海外の知見・経験を活かすべく、NDF は、IAEA や OECD/NEA といった国際機関の活動への参加、英国 NDA、フランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）と情報交換等に関する覚書の締結及び、英国、米国、フランス、ロシアと日本の政府間の枠組みの下での議論に参画しているほか、英国、フランス、スペイン、米国の著名な専門家を海外特別委員として招へいして助言を得るなどといった国際連携活動を行っている。また、NDF は、廃炉研究開発連携会議を主催するなどして、各機関における研究開発を実効的かつ効率的に推進するための全体最適化に取り組んでいる。

技術的難度の高い取組が本格化していく中で、海外の知見、経験から学ぶことの重要性は高まっており、引き続き、海外の廃止措置等に関する知見・経験の収集・活用を積極的に行い、国際的な評価を受ける等、国内外の叡智の結集と活用により、福島第一原子力発電所の廃炉を進めていくことが重要である。

2) 国際社会への積極的な情報発信

NDF は政府と密接な連携をとりながら、福島第一廃炉国際フォーラムや IAEA 総会サイドイベントの開催、WM シンポジウム（Waste Management Symposia）への登壇等を通じて、福島第一原子力発電所の廃炉の取組を紹介するとともに、OECD/NEA の活動等を通じて、福島第一原子力発電所に関する情報を提供している。

情報発信に当たっては、事故を起こした我が国の国際社会に対する責任を果たすため、国際社会に開かれた形で廃炉を進めていくことが重要である。加えて、廃炉を牽引し得る人材の関心を惹きつけ、世界の叡智を結集することに寄与するため、課題や進捗、成果の情報を国際社会に対して積極的に発信し、助言・評価を受けつつ、廃炉を進めていくことが重要である。

また、風評被害の発生を防ぐことも必要であり、国際社会の正確な理解が形成されるように努め、分かりやすい情報の発信をより一層、強化していくべきである。

3) 関係機関の密接な連携

廃炉の推進にあたり、政府、NDF、IRID、JAEA、東京電力といった国内関係機関はそれぞれの役割に応じて国際連携活動を実施している。これらの活動で得られた情報の共有も重要であり、この観点からも国内関係機関の間における密接な連携を一層強化していくことが重要となる。

8. 今後の廃炉プロジェクトの進め方

戦略プラン 2017 において、2 つの戦略的提案を提示した。今後、それらを踏まえて福島第一原子力発電所における廃炉の取組は更に一歩進んだフェーズへと移行し、燃料デブリ取り出し等技術的難度の高い取組が本格化していく中で、プロジェクトマネジメントの重要性は増大していくこととなる。NDF においても、1 章で述べたように、今後、廃炉の実施の管理・監督の主体として、プロジェクトマネジメントへの関与を強めていくこととなる。

また、プロジェクトの着実な推進を図る上では、地域住民の皆様からの信頼を得ていくことも重要である。

1)　プロジェクトマネジメント機能の強化

福島第一原子力発電所の廃炉においては、汚染水対策や使用済燃料プールからの燃料取り出し等の多岐にわたるプロジェクトが同時並行的に、かつ、相互に関連を持ちながら進められている。今後、更に燃料デブリ取り出しという、技術的難度が高く、かつ、これまでの取組との関連性や連続性を見極めながら実現を図る必要のある取組が本格化していく。

この廃炉プロジェクトは、世界に類を見ない技術的困難に挑戦する取組であり、また、社会的にも地域の復興の前提となるものであることから、本プロジェクトを推進する意義は極めて大きい。そして、その遂行の困難さ、複雑さを踏まえれば、プロジェクトマネジメントをいかに効果的かつ統合的に行うかが、廃炉プロジェクトの成否の鍵を握ることとなる。

特に、不確実性の大きい福島第一原子力発電所の廃炉プロジェクトの着実な推進のためには、その遂行に影響を及ぼすプロジェクトリスクを特定し、それらの重要度を分析し、必要な対策を講じていくというプロジェクトリスク管理が重要となる。

福島第一原子力発電所の不確実性の大きい環境下で現場作業を進めるに当たっては、計画立案時の情報や想定と作業進捗に伴って得られた情報の相違が大きい場合には、予定通りの作業が困難となる可能性があり、このようなプロジェクトリスクと常に向き合いながら進めていかなければならない。また、様々な取組が同時並行的に行われる福島第一原子力発電所の廃炉においては、それら作業間の整合性をいかにとるかが大きな課題となる。このような廃炉プロジェクト全体の継続的な推進に関わるプロジェクトリスクについては、より適切な対応を図っていく必要がある。

米国や英国等の廃止措置においては、プロジェクトの遂行に関わる様々なリスクに対し、対応策の検討・実施を行うことと併せて、様々なリスクの顕在化の可能性を考慮に入れた上で、プロジェクト全体のスケジュールやコストへの影響度を評価する取組も行われている。このような先行事例にも学びつつ、プロジェクトリスクへの効果的な対応を図っていくことが重要である。

また、廃炉プロジェクトの遂行には、国民の信頼確保が極めて重要な基盤となる。国民からの信頼を継続的に得ながら、廃炉等積立金制度の適切な運用を図るため、廃炉の実施主体である東京電力と廃炉実施の管理・監督の主体である NDF は、それぞれの役割分担やアカウンタビリティを明確化し、プロジェクト全体へのガバナンスを強化することで、廃炉作業や資金管理の透明性を確保しつつ、プロジェクトの着実な推進を図っていく必要がある。

2)　社会との関係

廃炉を着実に進める上で、地域住民の皆様とのコミュニケーションの重要性は国内外の有識者及び廃炉を経験した機関から指摘されている。特に、福島第一原子力発電所の廃炉においては、例え軽微であっても安全に関わるようなトラブル等が発生すると、地元住民の皆様の不安を招き、復興や帰還に向けた意欲が大きく削がれるとともに、風評被害にもつながる等、地域に影響を与える可能性がある。このため、まず、十分な注意を持ってトラブル発生の防止に取り組むことは論を待たないが、万一発生させた場合においても誠実かつ丁寧な説明を尽くすことが重要である。その第一歩は正確で分かりやすい情報発信であり、トラブルの発生時はいうに及ばず、その後の安全対策の実施状況及び現場における安全管理の改善状況についても積極的に発信すべきである。

その上で、廃炉工程の各段階において、地域住民の皆様に対して、リスク低減の基本方針に対する共通理解を得ていく必要がある。また、可及的速やかに除去すべきリスクと慎重に取り組むべきリスクに分ける必要があることについても、地域住民の皆様と共通理解とすることが重要である。

このようなコミュニケーションは、発信側と受信側とで情報を共有するだけでは不十分であり、適切な対話を重ね、発信側と受信側のギャップを縮小するように相互に努力し、こうした過程を積み重ねていくことが重要である。政府においては「廃炉・汚染水対策福島評議会」の開催等を、NDF においては「福島第一廃炉国際フォーラム」の開催等を、東京電力においても、福島県主催の「福島原子力発電所の廃炉に関する安全確保県民会議」での地域住民の皆様への説明・対話等をそれぞれ進めているところである。

風評被害は、リスクが顕在化しなくとも、不安があるというだけで被害がもたらされる場合もあり得る。また、事故後 6 年を経過してもなお、事故直後のイメージが払拭されずに定着していることによる影響も指摘されている。

既に発生している風評被害への対応や放射性物質に起因するリスクの低減等を実施するに当たっての対応の遅れ、作業員の被ばく量やコストの増加等の発生により、廃炉の取組に対する社会の評価を低下させ、これらが更に対策の実施を遅らせるという悪循環にも繋がりかねない。

このような風評被害の更なる発生を防止するためには、放射性物質の漏えい等を発生させないように適切に管理するとともに現存するリスクを速やかに低減することが、何よりも重要である。加えて、地域住民の皆様、報道関係者、市場関係者及び流通業者はもちろん、海外を含む消費者に対して、正確性と透明性を大前提としつつ、適時適切な情報発信に努めるとともに、丁寧なコミュニケーションを継続していくことが重要である。

3)　廃炉プロジェクトの継続性への配慮

福島第一原子力発電所の廃炉では、長期にわたる事業の継続性の確保が生命線となり、技術的知識や情報の継承と人的能力や意欲の継続が重要となる。このため、プロジェクトマネジメント、研究開発、エンジニアリング、現場管理等が継続的に実施できる仕組みと、これを担う多種多様な人材の確保が必要である。具体的には、知識や経験の管理、データベース化、アーカイブ化と、それを活用・継承する仕組みを構築するとともに、実際に係わる人が、誇りと意欲を持ち、安心して、キャリアを形成できる環境整備が望まれる。