

「燃料デブリ取り出し工法評価小委員会」
報告書

令和6年3月7日

原子力損害賠償・廃炉等支援機構
燃料デブリ取り出し工法評価小委員会

目次

| | |
|---|----|
| 1. 検討の背景 | 1 |
| 2. 燃料デブリ取り出し工法の概要..... | 2 |
| 2.1 燃料デブリ取り出しを困難にしている要因..... | 2 |
| 2.2 検討中の各工法の概要 | 3 |
| 2.2.1 気中工法 | 3 |
| 2.2.2 冠水工法 | 5 |
| 2.2.3 気中工法オプション（充填固化工法） | 6 |
| 3. 工法の評価 | 8 |
| 3.1 評価の前提条件 | 8 |
| 3.2 安全確保の基本方針 | 8 |
| 3.3 評価の考え方 | 9 |
| 3.4 各工法の評価と課題 | 9 |
| 4. 工法選定への提言..... | 15 |
| 5. 今後の進め方 | 18 |
| 5.1 東京電力における大規模取り出し工法の具体的な設計検討の進め方..... | 18 |
| 5.2 安全確保の具体化の進め方 | 18 |
| 5.3 小委員会によるフォローアップ | 19 |
| 5.4 関係地域の自治体や住民との対話 | 19 |

1. 検討の背景

東京電力ホールディングス株式会社（以下「東京電力」という。）・福島第一原子力発電所の廃炉を進めるに当たって、燃料デブリの取り出しは特に周到な準備を尽くしたうえで取り組むべきものであり¹、プール内燃料や建屋内滞留水についての取組が進むなかであって、技術的に最も大きな課題の一つとなっている。また、燃料デブリは、炉内状況の調査やプラントパラメータの解釈から安定状態にあると解されるものの、この状態が長期にわたって継続する保証はなく、設備の経年劣化等を通じて少しずつリスクが高まっていくことが懸念される。このため、なるべく早く燃料デブリを回収して、中長期的に安全性を確保することが望ましい。燃料デブリの取り出しは、中長期にわたる廃炉の成否を分ける極めて重要な取組である。

東京電力は燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大（以下「大規模取り出し」という。）のための工法概念を検討しているものの、炉内状況の不確かさや特殊な現場での工学的な確証が未だ途上にあることから工法の具体化が難しく、技術課題の検討が進まないことが、ますます工法の選定を難しくするという隘路に直面している。

このような状況を踏まえ、2030年代の大規模取り出し作業開始に向けて、炉内状況や技術面での不確かさを前提とした上で、今後の進め方の方向性や重点の置き方を示し、工法の設計検討を加速することが適切である。すなわち、設計検討の方向性を絞り込んだ上で、従来以上に具体的な設計検討を進め技術的課題を抽出して精緻な検討を進めることで、より確実な工法とする作業を重ねていく必要がある。この過程において、内部調査の進捗等による新たな情報に基づき工法の成立性に疑義が生じた場合は、設計検討の方向性に立ち戻って改めて絞り込みを行うといった、柔軟な進め方が求められる。

燃料デブリの取り出しは、前例のない技術的挑戦であるとともに社会的・政策的課題でもあることから、不確かさが大きいなかで設計検討の方向性を絞り込むに当たっては、国（原子力規制委員会、経済産業省）、東京電力、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下「NDF」という。）が協力して検討を進めるとともに、内外の技術的知見を集めた専門的かつ集中的な検討が必要である。このため、NDFの廃炉等技術委員会の議決を経て、同委員会の下に、「燃料デブリ取り出し工法評価小委員会」（以下「小委員会」という。）を設置し、国と東京電力の参加のもと、3号機を対象に大規模取り出し工法について、安全を大前提に技術成立性等を総合的に検討・評価し、現時点で設計検討を進めるべき工法について提言することとした。

本報告書は、本小委員会の成果として、現在検討されている各工法の概要を示した上で、各工法の評価、評価結果に基づいた提言及び今後の進め方を取りまとめたものである。

¹ 原子力損害賠償・廃炉等支援機構「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2023」より引用

2. 燃料デブリ取り出し工法の概要

2.1 燃料デブリ取り出しを困難にしている要因

事故炉である福島第一原子力発電所は通常炉とは大きく異なる特殊な環境であり、工法を検討するに当たっては、燃料デブリ取り出しを困難にしている以下の要因を十分に認識する必要がある。

- ① 原子炉格納容器（以下「PCV」という。）・原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）内が極めて高線量
PCV・RPV内の線量当量率は数 Sv/h～数百 Sv/h オーダーであり、人が入ることができない。
- ② 原子炉建屋内が高線量
原子炉建屋内の線量当量率は数 mSv/h～数十 mSv/h オーダーであり、人が入るのは短い時間に限定される。
- ③ 現場情報の不足
上記①、②の制約から現場情報の取得が困難であり、大きな不確かさを伴う推定に基づき検討しなければならない部分が多い。
- ④ 閉じ込め障壁構築
既存の原子炉建屋、PCVを閉じ込め障壁とする場合は、事故により損傷していること及び経年劣化を考慮しなければならない。一方、新たな閉じ込め障壁を構築する場合には現場の状況に応じた耐震性などを考慮する必要がある。
- ⑤ 臨界の可能性
未臨界状態が維持されているPCV・RPV内の状況に対して、燃料デブリの分布などに変化を与えた際の臨界の可能性について考慮が必要である。
- ⑥ 廃棄物の発生物量
廃炉作業に伴い新たに発生する固体廃棄物については、敷地における保管管理全体の負荷を軽減するため、可能な限り発生量を低減していく必要がある。

2.2 検討中の各工法の概要

2.2.1 気中工法

気中工法は、燃料デブリが気中に露出した状態もしくは低水位で浸漬した状態で取り出す工法である。

オペレーティングフロア（以下「オペフロ」という。）上に閉じ込め設備を設置した上で、原子炉ウェルを開放し、上方向から PCV 内にアクセスする「上アクセス」と、地上階にて PCV 側面に閉じ込め設備を設けた上で横方向から PCV 内にアクセスする「横アクセス」を組み合わせた方法としている。上アクセスは、作業開口を大きくできること、直接のアクセスが可能であることを踏まえ、RPV 内とペDESTAL内の燃料デブリを主に上アクセスで取り出し、上からのアクセス性が悪いペDESTAL外の燃料デブリを横アクセスで取り出す。その際、ダスト飛散抑制などのため、必要に応じて燃料デブリ取り出し実施箇所へ水をかけ流しながら作業を進める。ペDESTAL内外で、燃料デブリ加工時の切削粉の蓄積防止等による臨界対策や RPV からの重量物落下対策等の安全対策を実施するために、横アクセスは上アクセスに先行して実施することを検討する。取り出し時のダスト飛散抑制、汚染拡大抑制のため、必要な閉じ込め障壁を構築する。1次閉じ込め障壁を PCV 等で、2次閉じ込め障壁を原子炉建屋等で構成することを基本とする。また、気相系閉じ込めシステムを1次/2次閉じ込め障壁に設置し、閉じ込め障壁内外の圧力差により動的な閉じ込めを実施する。

上アクセスによる燃料デブリ取り出しでは、閉じ込め等の機能を持たせたセルや取り出し用機器等の高重量物をオペフロ上に設置する必要があるため、これらを支持し耐震性を確保するため、大掛かりな構台を新たに設置する必要がある。構台は、タービン建屋との干渉を避けるため、原子炉建屋を南北方向に跨ぎ、免震層を介して構台が支える構造とする。また、原子炉建屋南側に増設建屋を配置し、建屋内には安全システム（気相系、液相系）、水処理、デブリ/廃棄物の移送前処理等を行う設備を設置する。

取り出した燃料デブリは原子炉建屋と接続した増設建屋に搬送し、移送前処理として移送容器への収納・水素濃度計測等を実施する。移送容器は増設建屋から保管前処理施設へ移送し、保管前処理として燃料デブリの分析、仕分け、乾燥を行う。その後、保管容器に収納し、保管施設で保管する。

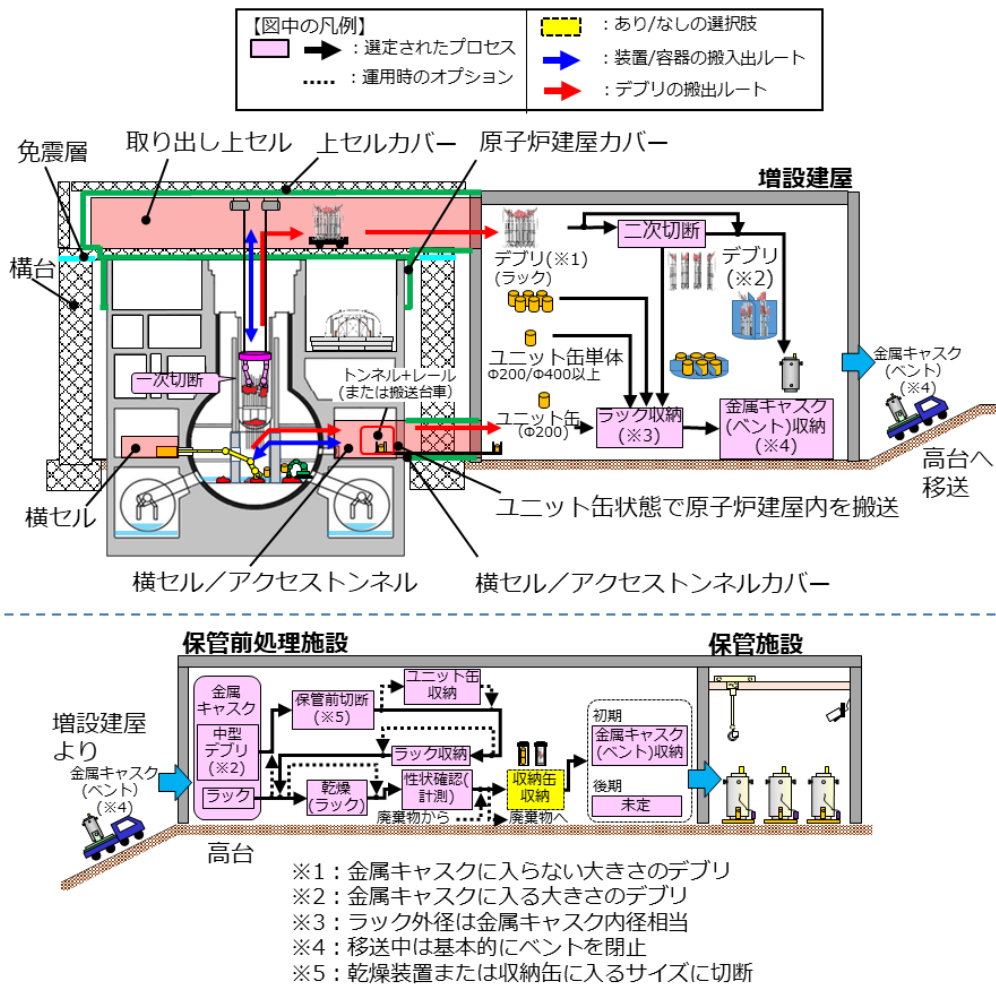


図1. 気中工法 取り出し・移送・保管の全体プロセスフロー

2.2.2 冠水工法

冠水工法は、船殻構造体と呼ばれる新規構造物で地下から屋上までの原子炉建屋全体を囲い、この構造体の内部に水を満たし、原子炉建屋全体を冠水させて燃料デブリを取り出す工法である。水の遮蔽効果により燃料デブリ取り出し作業エリアの線量低減が可能となる。船殻構造体は、3層の厚い鋼板による複雑な支持構造によって構築されるもので、閉じ込め障壁として、原子炉建屋と水の全ての重量を支え十分な耐震性を持つように設計される。

オペフロに設置するセル内より遠隔操作装置を水中に下ろして、RPV内やペDESTAL内外の炉内設備や燃料デブリを取り出す。なお、ペDESTALの外側については、ペDESTALの内側から地下階にある作業員アクセス口を経由してアクセスする。

水と接触する内壁及びオペフロに設置するセルを1次閉じ込め障壁、船殻構造体内部を2次閉じ込め障壁、外壁を遮水閉じ込め障壁とした3層構造としている。また、気相系閉じ込めシステムを1次/2次閉じ込め障壁に設置し、閉じ込め障壁内外の圧力差により動的な閉じ込めを行う。

船殻構造体上部の取り出しセルには燃料デブリ取り出し装置などの上アクセス関連設備、安全システム（気相系、液相系）、水処理、デブリ/廃棄物の移送前処理を行う設備等を設置する。取り出された燃料デブリの移送前処理は遮蔽容器への収納までを水中で行い、容器の洗浄・水切り・蓋締め・検査を気中にて行う。移送容器に含まれる水分の放射線分解に対して可燃限界以下の水素濃度を担保するため、収納量の制限を行う。移送容器は船殻構造体から保管前処理施設へ移送され、保管前処理として燃料デブリの分析、仕分け、乾燥を行う。その後、保管容器に収納し、保管施設で保管する。

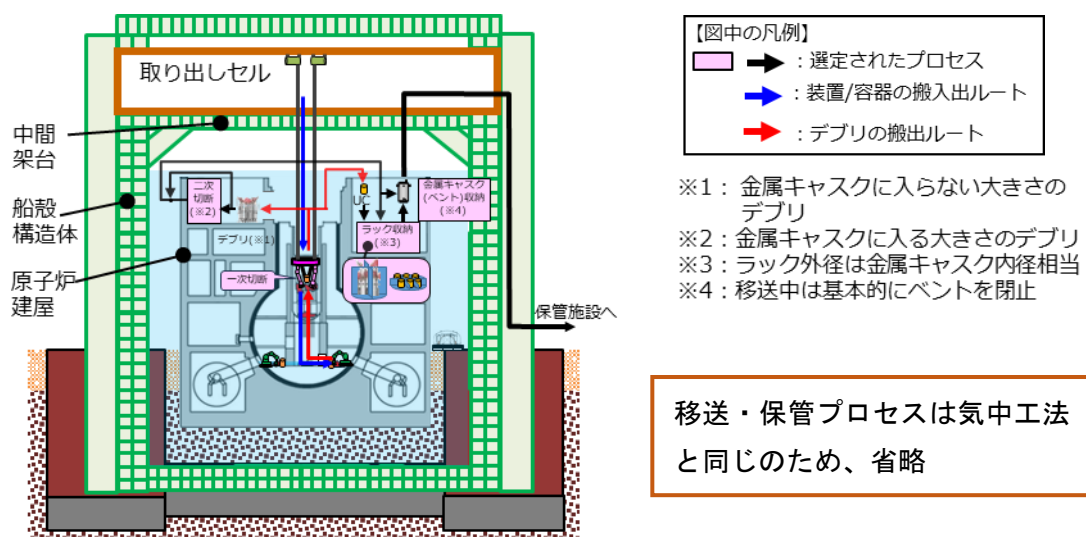


図 2. 冠水工法の取り出しプロセスフロー

2.2.3 気中工法オプション（充填固化工法）

気中工法オプション（充填固化工法）は、ペDESTAL内側、ペDESTAL外側底部、RPV内部、原子炉ウェル等に、一定時間の後に固まる流動性がある充填材を注入して物理的に安定固化した上で、オペフロに設ける比較的小さな開口部から遠隔操作装置を用いて、燃料デブリや炉内構造物等を取り出す工法である。固化された部分については掘削等の方法により回収し、固化しない部分については適切な遠隔操作治具により回収を行う。

横方向よりペDESTAL内底部に充填材等を注入して安定固化し、さらに、上方向から原子炉ウェル以下の空間（PCVヘッド下部、RPV内部、ペDESTAL内側の残りの部分等）のうち、固化することが適切と判断される箇所に充填材等を注入して安定固化する。

取り出し作業については、オペフロから開口部を介して遠隔操作治具を挿入し、ペDESTAL底部までの燃料デブリや充填材を掘削することとし、ペDESTAL外の底部といった充填固化していない空間がある場合は、ケーシングを設置して燃料デブリや充填材を掘削する。

なお、充填固化する箇所は、一時的な安定化が急がれる箇所、掘削法で回収することが効率的な箇所、充填材による γ 線の遮蔽効果によりオペフロでの線量低減効果が期待される箇所等が想定される。固化対象となる部分は、内部調査の結果や取り出しのアクセス開始後の内部確認の状況によって変わり得るが、状況に応じて、原子炉ウェル以下の全体を充填するケース、RPV内部の一部だけを充填するケース、RPV内部全体を充填するケース、PCV底部ペDESTAL内全体を充填するケースやこの一部だけを充填するケース等、部分的充填を含めて様々な可能性が考えられる。内部調査の結果や掘削回収のアクセス性等を勘案して検討する。

充填固化した部分の掘削には、コアボーリングやクラッシュ（圧砕、小割等）などの固体のまま回収を行う方法と、水を循環させることで掘削屑をフィルタ型回収容器に移送して回収する方法が考えられる。

オペフロ上には閉じ込め機能を持たせたセルや取り出し用機器、セルを覆うセルカバー等を設置するため、これらを支持する構台を新たに設置する。

取り出し時のダスト飛散抑制、汚染拡大抑制のため、2重化した閉じ込め障壁を構築する。気中工法と同様に、1次閉じ込め障壁はPCV等で、2次閉じ込め障壁は原子炉建屋等で構成される。ただし、気中工法と比較すると、充填材が燃料デブリ等を覆うため、ダスト飛散抑制、汚染拡大抑制をより強固にすることが期待できる。また、気相系閉じ込めシステムを1次/2次閉じ込め障壁に設置し、閉じ込め障壁内外の圧力差により動的な閉じ込めを実施する。

回収容器に収納された燃料デブリ等の移送、保管については、気中工法案や冠水工法案を参考にした検討が必要である。

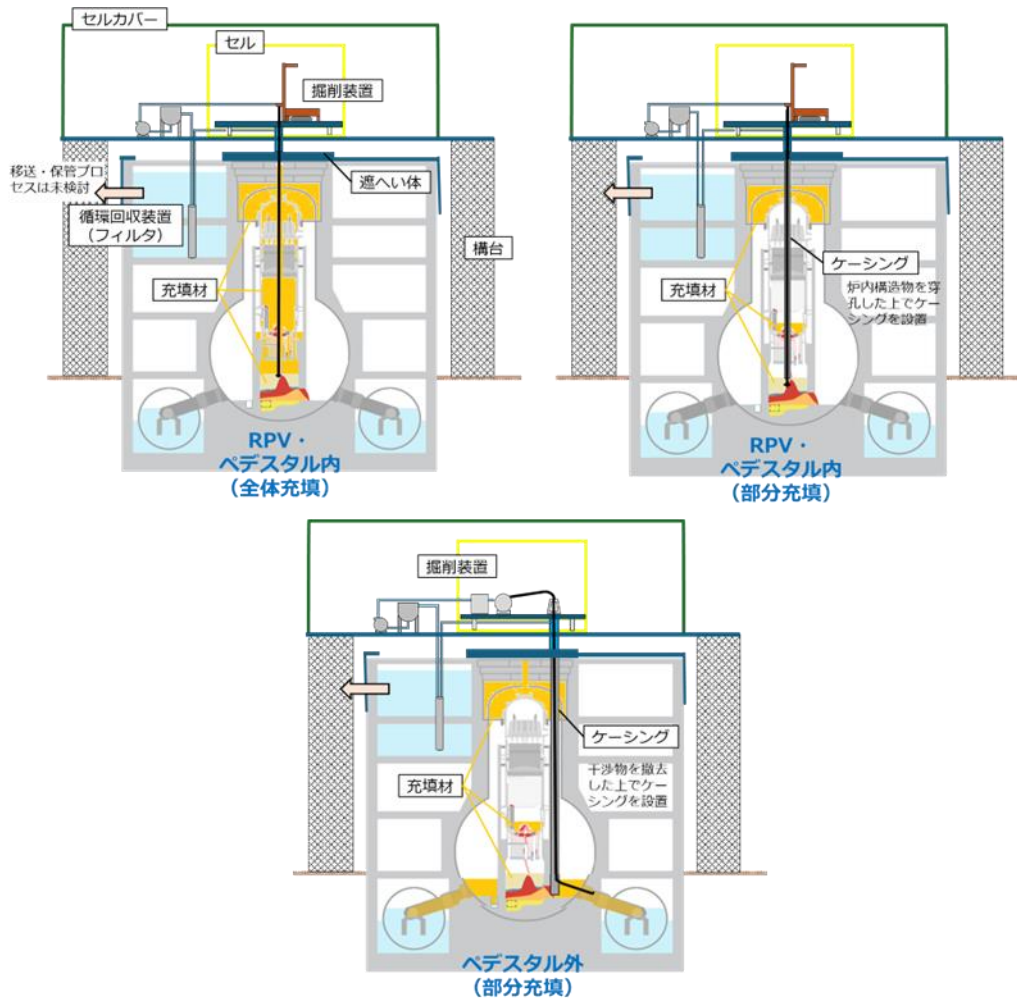


図 3. 気中工法オプション（充填固化工法）の概要

3. 工法の評価

3.1 評価の前提条件

工法の評価を実施するに当たり、本小委員会では前提条件を以下のように設定している。

- ・大規模取り出しが最初に行われると予想される 3 号機を検討対象とし、1・2 号機については、今回の検討結果を参考として、個々の条件に沿った工法を別途検討する。
- ・解析等により推定されている燃料デブリ分布に対する工法を評価する。
- ・原子炉建屋の解体や廃棄物の処理・処分については、回収された廃棄物の状況や性状を精査した上で検討することとし、本評価での検討対象は、取り出した燃料デブリの安定保管に至るまでとする。
- ・敷地境界の一般公衆被ばく線量については、検討の初期設定として、現行体系に基づく。

なお、例えば燃料デブリ分布等については、今後の内部調査等で得られる情報等により、上記の前提条件とは異なる新たな課題が判明することも考えられる。そうした場合は、設計検討の途中段階であっても取り出しシナリオの変更や、場合によっては遡って工法自体の見直しもあり得るものとする。

3.2 安全確保の基本方針

福島第一原子力発電所の特殊性として、多量の放射性物質が様々な形態（非定型）で非密封状態にあること、放射性物質や閉じ込め障壁の状況等の現場情報に大きな不確かさがあること、現状の放射線レベルが極めて高いこと、閉じ込め障壁等の更なる劣化が懸念されることから時間軸を意識した対応が必要なこと、他方で放射性物質放出の原因となる内在エネルギーが低いため一般に事象の進展は緩やかと考えられることなどが挙げられる。工法の検討に当たっては、これらの特殊性を十分に認識し、安全の確保を最優先に進める必要がある。以上を踏まえ、安全確保の基本方針を以下のように設定した。

<安全確保の基本方針>

- ・なるべく早くサイトをより安定した状態に持ち込むとともに、残留リスクをできる限り低減すること
- ・廃炉作業中の放射線影響を安全基準以下に確実に抑えるとともに、できる限り低減すること。特に、特殊な放射線作業環境が予想されることから、作業員の安全確保に最大限の注意を払うこと
- ・周辺地域住民や関係自治体等に放射線影響はもちろんのこと、心理的影響や社会的影響を与えないように、万全を尽くすこと

3.3 評価の考え方

5つの基本的な考え方（安全、確実、合理的、迅速、現場指向）の観点で、表1に示す評価項目を設定した。

表 1. 5つの基本的な考え方の観点での評価項目

| 項目 | 5つの基本的な考え方の観点での評価項目 |
|------|--|
| 安全 | 閉じ込め、遮蔽、臨界、耐震などに関する安全確保の考え方と判断の基準に対する適合性 |
| 確実 | 信頼性（技術成熟度） |
| | 不確かさに対する柔軟性 |
| 合理的 | 効率性 |
| 迅速 | 時間軸の意識（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）ただし、本項目は工程（工事・運転・保守）で評価 |
| 現場指向 | 施工性、作業性、操作性 |
| | メンテナンス性 |

併せて、その他の評価として、リソース、工程（工事・運転・保守）、他工法への変更可否、1・2号機への展開可能性を評価項目とした。

3.4 各工法の評価と課題

2.2節で示した3工法について、上記の評価項目を用いて評価を実施した。長期間にわたって検討されてきた気中工法に比べて、冠水工法は比較的検討期間が短く、また気中工法オプションは更に検討期間が短いものの、現時点で得られている情報と合理的に見込まれる課題への対応を基に評価を行った。

各工法の準備工事、建設工事、燃料デブリ取り出し作業、移送・保管、保守の一連の作業プロセスを分析し、そこに内在する課題を抽出し対応策を検討した上で、技術成立性を評価した。評価結果として、それぞれ解決すべき課題は残されているものの、現時点で明らかに技術的に成立しないと考えられる工法はなかった。表2に主な課題を示す。また、リソース、工程（工事・運転・保守）、他工法への変更可否、1・2号機への展開可能性を指標として各工法を比較評価した結果を表3-1、表3-2に示す。

表 2. 主な課題

| 評価項目 | 気中工法 | 冠水工法 | 気中工法オプション |
|-----------------------|--|---|---|
| 安全確保の考え方と判断の基準に対する適合性 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>作業員被ばく</u> ・ 構台の免震構造の成立性 ・ 既設建造物の経年劣化の対応 ・ <u>燃料デブリと廃棄物との仕分け</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>作業員被ばく</u> ・ ほう酸水環境下での液相システムの成立性 ・ 通常水環境下での臨界管理方法 ・ 緊急ほう酸注入系の成立性 ・ <u>燃料デブリと廃棄物との仕分け</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>作業員被ばく</u> ・ 原子炉建屋上に設置する設備の耐震性 ・ <u>燃料デブリと廃棄物との仕分け・保管シナリオ</u> |
| 信頼性（技術成熟度） | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>トラブル時の対応</u> ・ <u>臨界管理の設備、運用などの具体化</u> ・ 遠隔操作装置の十分な検証 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>トラブル時の対応</u> ・ <u>臨界管理の設備、運用などの具体化</u> ・ 水中で使用する遠隔操作装置の十分な検証 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>トラブル時の対応</u> ・ <u>臨界管理の設備、運用などの具体化</u> ・ 充填状態の確認方法 ・ 水循環・回収系統の検討 ・ 新規に設置する装置の具体化 |
| 不確かに対する柔軟性 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>事前に内部調査が必要</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>事前に内部調査が必要</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>事前に内部調査が必要</u> ・ 崩壊熱対策の検討 |
| 効率性 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料デブリ加工・回収方法の選定 ・ 上荷重（遮蔽重量）の低減 ・ <u>新規構造体の設計適正化</u> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 視認性確保 ・ ペDESTAL外作業の検討 ・ <u>新規構造体の設計適正化</u> ・ 準備工事で発生する廃棄物量 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 掘削以外の取り出し方法の検討 ・ 切削回収水の処理方法 ・ 掘削に伴うスラッジ状廃棄物の処理 ・ 燃料デブリと高線量廃棄物の発生量 |
| 施工性、作業性、操作性 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>燃料デブリ性状が不明</u> ・ 地盤改良時の水位逆転対策 ・ オペフロとの取合い構造物の取付手順 ・ アクセス設備設置時の非常回収方法 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>燃料デブリ性状が不明</u> ・ 船殻構造体の現場施工性（施工中における地震時の地盤安定性、水位逆転対策、汚染している前提での工事を含む） ・ 内包水の漏えい時の対応 ・ 安定化設備*のタービン建屋以外への移設先、リルートの方法、運用（工事期間中を含む） | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>燃料デブリ性状が不明</u> ・ ペDESTAL内への充填ホースの敷設方法 ・ 充填材・充填方法の検討 ・ オペフロとの取合い構造の具体化 |
| メンテナンス性 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 既設との取合い部のメンテナンス、トラブル対応 ・ トラブル時のフル遠隔による復旧方法 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 閉じ込め障壁間への漏水検知とその後の復旧対策 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 掘削回収水のセル内又は外部への漏えい防止 |

下線は工法共通の課題

※安定化設備：原子炉注水設備、PCV ガス管理システム、N2 ガス供給設備、各種計測機器などの運転安定化に必要な設備

表 3-1. その他の評価（他工法への変更可否以外）

| 評価項目 | 気中工法 | 冠水工法 | 気中工法オプション |
|--------------|--|--|--|
| リソース | <ul style="list-style-type: none"> ・準備工事：干渉建屋撤去が必要 ・建設工事：構台/増設建屋設置が必要 ・廃棄物：干渉建屋撤去等が必要 | <ul style="list-style-type: none"> ・準備工事：干渉建屋撤去が必要 ・建設工事：船殻構造体設置が必要 ・廃棄物：干渉建屋撤去等が必要 | <ul style="list-style-type: none"> ・準備工事：干渉建屋撤去が必要 ・建設工事：構台設置が必要 ・廃棄物：干渉建屋撤去等が必要 |
| 工程（工事・運転・保守） | <ul style="list-style-type: none"> ・準備工事：中期 ・建設工事：中期 ・取り出し時：工法間で同程度と想定 ・遠隔操作装置故障時リカバリ：長期 | <ul style="list-style-type: none"> ・準備工事：長期 ・建設工事：長期 ・取り出し時：工法間で同程度と想定 ・遠隔操作装置故障時リカバリ：短期（セル内に入域可能） | <ul style="list-style-type: none"> ・準備工事：中期 ・建設工事：短期 ・取り出し時：工法間で同程度と想定 ・遠隔操作装置故障時リカバリ：短期（セル内に入域可能） |
| 他工法への変更可否 | 次頁に記載（各工法の変更する前の状態から他工法へ変更する場合の内容、影響度合いをまとめたもの） | | |
| 1・2号機への展開可能性 | <ul style="list-style-type: none"> ・単独採用可否：可能 ・同時採用可否：可能 | <ul style="list-style-type: none"> ・単独採用可否：可能 ・同時採用可否：検討要 | <ul style="list-style-type: none"> ・単独採用可否：可能 ・同時採用可否：可能 |

表 3-2. その他の評価（他工法への変更可否）

| 工法 | 変更する前の状態 | 変更後の工法 | | | | | |
|-----------------|----------|--|-------|------------|-------|--|-------|
| | | 気中工法 | | 冠水工法 | | 気中工法オプション | |
| | | 内容 | 影響度合い | 内容 | 影響度合い | 内容 | 影響度合い |
| 気中工法 | 干渉建屋等撤去中 | — | — | 変更可 | 小 | 変更可 | 小 |
| | 新設工事開始後 | — | — | 新設設備の撤去が必要 | 大 | 変更可 | 小 |
| 冠水工法 | 干渉建屋等撤去中 | 変更可 | 小 | — | — | 変更可 | 小 |
| | 新設工事開始後 | 上アクセスには新設設備を流用可能、横アクセスが必要な場合には新設設備の干渉範囲のみ撤去が必要 | 中 | — | — | 上アクセスには新設設備を流用可能、横アクセスが必要な場合には新設設備の干渉範囲のみ撤去が必要 | 中 |
| | 水張後 | 水抜き後、同上（ただし、内部調査が必要） | 大 | — | — | 水抜き後、同上（ただし、内部調査が必要） 水中で充填固化が可能な場合には、冠水のままとすることも考えられる | 中 |
| 気中工法オプション | 干渉建屋等撤去中 | 変更可 | 小 | 変更可 | 小 | — | — |
| | 新設工事開始後 | 構台の増設あるいは改造が必要 | 中 | 新設設備の撤去が必要 | 中 | — | — |
| 気中工法オプション（構台無し） | 干渉建屋等撤去中 | 変更可 | 小 | 変更可 | 小 | — | — |
| | 新設工事開始後 | 新設設備の撤去が必要 | 小 | 新設設備の撤去が必要 | 小 | — | — |

(1) 気中工法の評価

<長所>

- ・気中工法は、現在気中で維持されている状況を大きく変化させずに取り組むため、状態変更に伴う懸案等が少ない。
- ・冠水工法よりも早期に燃料デブリ取り出し作業が開始できる。
- ・上アクセスの中でも複数の工法の中からの選択、また、上アクセスと横アクセスの組み合わせなど、内部の状況に応じた燃料デブリ加工・回収方法を選定できる。

<課題>

- ・現場が高線量であるため、他工法と比較して多種多様の遠隔操作装置が必要であり、開発・設計・検証に長い期間を要する上に、現場投入後に設計変更を余儀なくされる可能性もある。遠隔操作装置のレスキューに相当な時間が掛かることを考えると、高線量環境下での復旧方法又はセル内を高線量環境にさせない方法の検討も必要である。
- ・高線量の燃料デブリと廃棄物を上から取り出すため、オペフロに高重量のセル、取り出し機器の設置が必要となり、これらを支持し十分な耐震性を確保するための構台の規模が大きくなる。

(2) 冠水工法の評価

<長所>

- ・炉内からの強い γ 線に対して、水遮蔽によりオペフロでの線量を低減させることで、上部からの遠隔操作が容易となり、作業員被ばくの低減等への裕度を拡大させる。合わせて、ダスト飛散抑制の効果も期待できる。
- ・強固な閉じ込め障壁（船殻構造体）により、原子炉建屋全体を外部から完全に隔離できる。
- ・遠隔機器故障時のレスキューは、オペフロから人手による操作が可能である。

<課題>

- ・建屋の下部地盤での船殻構造体構築における現場施工性（施工中における地震時の地盤安定性、施工時の地下水対策、大規模な船殻構造体製作の品質保証等）の検証と安定化設備のタービン建屋以外の移設先の確保等が必要である。
- ・大量の保有水の管理（水質管理・漏洩防止・腐食対策等）に加えて、入念な臨界管理が必要である。
- ・船殻構造体の設備規模が膨大である。
- ・準備工事期間が最も長く、燃料デブリ取り出し作業の開始時期が最も遅い。

(3) 気中工法オプションの評価

<長所>

- ・RPV やペDESTAL底部にある燃料デブリ等を充填材で固めることにより一旦安定化させることができる。また、固化体にすることで取り出しの際の扱いを統一化・単純化させることができる。
- ・充填材による遮蔽効果、および比較的小さな開口から炉内にアクセスすることなどから、オペフロでの線量低減が期待される。これにより、オペフロに設置するセルやそれを覆うセルカバー、これらを支持する構台等の規模を簡素化できる可能性がある。また、機器故障時のレスキューにおいてオペフロでの作業員による直接操作が期待できる。
- ・掘削装置は、遠隔操作となるが、構造は1軸鉛直方向の動きを基本とし、シンプルである。また、掘削対象物に応じて先端ビット等を交換可能であるため、柔軟性がある。
- ・気中工法、冠水工法と比較し、設備の規模が小さく、最も早期に燃料デブリ取り出し作業を開始できる可能性がある。

<課題>

- ・充填材の選定（流動性・硬化時間調整性・固化後の機械的物性・熱伝導性・化学的安定性・放射線による劣化性等）、充填方法、充填状態の確認方法の確立が必要。
- ・掘削対象物に応じた先端ビット等の選定、検証が必要。
- ・充填範囲に応じて廃棄物発生量が増大する。また、スラッジ状で回収する場合には、その取扱いに注意が必要。

4. 工法選定への提言

3.4節の工法の評価から、何れの工法にも課題があり、各工法を構成する技術には不確かさ（設計・基礎データ・技術確証等）が伴うことが確認された。一定の設計検討・研究開発（試行的な設計検討や、有用技術の確証のための研究や開発等）を進めないと、3つの工法について明確な判断を下すことは困難である。

一方で、燃料デブリ取り出しの遅れが、事業全体のリスク増を招く懸念があることを考慮すると、現時点で把握できている各工法の技術的特徴を前提に、重点的に設計検討を開始すべき工法を示すことが適切である。その際、一つの工法に固執することなく、各工法の長所を活かし課題を補完し合うシナリオ（以下「取り出しシナリオ」という。）を検討することが望ましい。

また、現実的な設計検討を進めるためには内部調査、サンプリング・分析が必須である。内部調査により既設建造物の損傷状況、燃料デブリの量・分布（RPV内の切株燃料の有無も含む）、線量分布等の情報が得られることで、燃料デブリへのアクセスルート構築や取り出し方法・装置等の設計検討に反映することができる。サンプリング・分析により燃料デブリの性状を把握することで、燃料デブリ加工、臨界管理、収納・移送・保管、廃棄物管理、計量管理等の設計検討に活用することができる。

以下の考え方に沿って、今後、重点的に取り組むべき取り出し工法やシナリオの方向性を検討した。

<工法選定の基本的考え方>

- ① シンプルで、かつ、初期の段階での設備設置の規模が過大とならず、情報、経験等を積み上げながら方向修正できること
- ② 今後の内部調査により取り出し工法やシナリオの方向性を修正する必要性等が生じた場合はその結果を反映しやすいこと
- ③ 燃料デブリ取り出しに時間が掛かり過ぎることで、事業全体の持続性や成立性が不安定にならないように、プロジェクト全体としてみた迅速性を重視すること
- ④ 技術成立性を左右するような重要技術課題に対して、設計検討や研究開発の見通しを持ちやすいこと
- ⑤ 遠隔操作装置はなるべく簡素でメンテナンス性に優れるものとし、遠隔作業と直接作業とが相補う運用を可能とすること
- ⑥ 公衆への被ばくリスクを合理的に小さくできるとともに、特に、作業員被ばく量の抑制に対応しやすいこと
- ⑦ 工法やシステムの安全確保の考え方や根拠について信頼性を持って提示でき、かつ、合理的な安全裕度を見込めること

上記の<工法選定の基本的な考え方>に沿い、以下の通り提言する。

気中工法は、現場環境を大きく変化させずに燃料デブリを取り出すため、状態変更に伴う懸案等が少ない。また、上アクセスと横アクセスの組み合わせなど、内部の状況に応じた燃料デブリ加工・回収方法を選定できる。他方で、システム全体の規模が大きく全てを遠隔操作装置に依存するため、現地でのヤード計画との整合性、工事シーケンスの成立性、遠隔操作性や全体の稼働率等のパフォーマンス上の懸念が大きい。こうした懸念を解消するためには、現場の現実的な制約や条件を加味した気中工法の設計検討を行うことが必要である。また、気中工法オプションの考え方を気中工法に合流させることによって、気中工法の課題のいくつかを解決できる可能性がある。例えば、気中工法オプションの手法を部分的に活用し、オペフロでの線量を低減することで気中工法の課題を一定程度改善し得ることが期待される。今後の設計検討に当たっては、気中工法オプションとの相補的な関係を検討することが適切である。

冠水工法は、水遮蔽の効果により、現場の高線量に伴う様々な問題を解決し得る期待があるものの、設備や工事規模が大きく、取り出し開始時期が最も遅いこと、事業としての非可逆性が高いこと、船殻構造体の現場施工性に不確かさがあること、大量の水を扱う困難さ等の問題があり、本格的に着手すべき工法として現時点で選択することは困難と考える。一方、高線量物質を水中で扱うことのメリットは大きく、気中工法では困難な箇所の取り出しが容易になる可能性や作業効率を考慮すると、将来、気中工法から水遮蔽の機能を活用できる工法に移行する可能性も否定できない。このため、水遮蔽の機能を活用できる工法について、原子炉建屋下部を含む近傍の地盤を調査するなど、併行して検討を進めるべきである。

気中工法オプションは、設備全体の規模が小さく装置がシンプルであり、また充填固化することにより燃料デブリを一旦安定化できる効果に期待できる。しかしながら、この期待を満たすような充填材の選定が完了していないこと、必要な箇所を充填固化させる充填材注入の技術検討が未成熟であること、固化部分の掘削や回収物の扱いに関わる設計検討が不足していること等、技術的な検討が不足していることが否定できない。また、工事シーケンスや回収作業の全体像を明らかにする必要がある、現時点でこの工法単独での成立性について判断することは時期尚早である。気中工法オプションの基本的成立性を確認するための設計検討と研究開発を通じて、充填材の選定や回収方法等について見通しが得られれば、気中工法オプションばかりでなく、充填固化の機能を活用した気中工法の発展が期待される。今後は、気中工法オプションの機能を適用して、気中工法と合わせた取り出しシナリオを想定すべきである。

なお、3工法の評価に当たっては、特に臨界管理と耐震性、廃棄物管理の在り方についてリスクに応じた現実的な安全確保の観点から特段の検討を行った。臨界管理については、モニタリングによる臨界近接検知を通じて未臨界領域で燃料デブリ取り出しを行う管理を工法評価の前提とした。また、耐震性については、内在するエネルギーが低く、過

度に保守的な想定が取り出し作業の長期化によるリスク増を招くこと等を踏まえ、閉じ込めが失われた場合に作業員や敷地境界に対してどのような影響を与えるかという観点から、現場の実態に則した耐震設計を講じることとした。さらに、廃棄物管理については、工法検討において廃棄物発生量を極力少なくすることを目指すものの、工法を比較評価する際には廃棄物発生量は決め手とはならず、一方で廃棄物の性状（例えば、スラッジ）は工法検討に影響を与え、課題となることに留意することとした。

加えて、いかなる工法であれ、PCV や RPV 内部の状況の十分な理解が、その設計や安全確保の前提となる。今までに実施された内部調査によって、PCV 底部の一部については状況が明らかになってきているが、PCV の底部の調査未実施箇所や上部、RPV の内部については、ほとんど情報が得られていない。このため、今後、内部調査を加速していくことが重要となるが、今後の時間的目標を考えれば、工法の設計検討と内部調査が同時併行で行われることが不可欠であると考えられる。

気中工法オプションにおける「ウェルシールドプラグに設ける小規模な開口部からのRPV内部へのアクセス」は、上アクセスによるRPV内部調査と類似する特徴を備えている。上アクセスにより、人手作業が可能となるような小開口から必要に応じて部分的に充填固化しながらRPV内部までアクセスルートを構築し、小型カメラによる内部調査、コアボーリング等により燃料デブリをサンプリングする作業は、充填の範囲やコアボーリングを拡張しつつ、燃料デブリの取り出しに円滑に移行できる可能性がある。

上記を総合的に考慮すると、以下のように進めることが適切と考える。

- ・気中工法と気中工法オプションの組み合わせによる設計検討・研究開発を開始することとする。
- ・これと併行して、小規模な上アクセス等による内部調査を進める。
- ・水遮蔽の機能を活用した工法についても、併行して検討を行う。

5. 今後の進め方

5.1 東京電力における大規模取り出し工法の具体的な設計検討の進め方

前述のように、東京電力はできるだけ速やかに、本報告書の提言に基づき具体的な設計検討を開始する必要がある。設計検討に当たっては、将来的な大規模取り出し設備の建設や取り出し作業の担い手をも想定しつつ、内外の専門的知見を集約しながら検討体制を構築することが出発点となる。

本報告書の提言にあたっては、大きな不確かさのなかで設計検討の方向性を絞り込むとともに、今後検討すべき課題を抽出した。東京電力は、具体的な設計検討を進めることと併行して、内部調査や研究開発など本報告書で示された課題に取り組むことが求められる。また、内部調査や研究開発、燃料デブリサンプルの分析といった不確かさの幅を減らすあらゆる機会をとらえて、本提言で示された設計検討の方向性を継続的に検証する必要がある。

なお、既に投下したリソースに対する説明責任などを顧慮するあまり当初の計画に拘泥したりすることなく、今後の内部調査等の進捗によって新たな情報が得られ、それに基づいて工法選択に再検討の必要性が生まれた場合には、方針変更をためらうことなく改めて工法の見直しに取り組むべきである。

また、燃料デブリ取り出し作業において想定されるリスクや異常事象の抽出、その対応についての影響評価（安全評価等）、それを踏まえた作業再開の考え方や判断基準等の検討も併行して進める必要がある。

5.2 安全確保の具体化の進め方

燃料デブリ取り出しは、特殊な条件・環境で行う未経験の作業であることや通常炉とはリスクの特徴が異なることから、福島第一原子力発電所独自の安全確保の考え方と判断の基準を設けることが必要となる。今後の大規模取り出し工法の具体的な設計検討を進めるに当たっては、閉じ込め、遮蔽、未臨界維持などに関する安全確保の考え方と判断の基準を具体化し設定する必要がある。

安全確保の考え方と判断の基準は設備や作業の規模、ひいては工程に大きく影響を与えるものであり、長期化に伴ってリスクが高まらないように適切に設定する必要がある。燃料デブリ取り出し開始の遅れを回避するためには、安全確保の考え方・判断の基準とその根拠をできるだけ正確かつ早期に原子力規制委員会に提示し、規制側からの見解や示唆を踏まえて、基本設計や詳細設計に反映していく。

現時点での安全に関わる主な論点の例を下記①～③に示す。

【現時点での安全に関わる主な論点の例】

① 大規模取り出し工法における設備の耐震設計の考え方

東京電力が実態に則した耐震設計を行う際の設計条件などについて

② 燃料デブリ取り出し時の臨界管理の考え方

安全評価の一部として想定すべき臨界シナリオの抽出、各シナリオにおける発生可能性の評価、発生防止策、モニタリング、対応策、影響評価などについて

③ 廃棄物の保管の考え方

取り出した燃料デブリの水素発生や臨界管理を考慮した保管方法等について

5.3 小委員会によるフォローアップ

本報告書は、大きな不確かさのなかで工法を評価して提言をまとめたものであるため、今後の東京電力における設計検討、内部調査、研究開発等を通じて、提言に示された設計検討の方向性を継続的に検証していく必要がある。また、東京電力が具体的なシステムや機器についての設計を加速するに先立って、1～2年程度でその後の見通しを整理することが求められる。このため、本小委員会は当面存続し、東京電力の設計検討・研究開発をフォローアップすることとしたい。

5.4 関係地域の自治体や住民との対話

本報告書で行った提言は、技術的・専門的知見による評価に基づいて実施した。安全最優先の視点に立てば、まさに技術的・専門的知見を有する者が責任をもって実施すべき活動であると言える。他方で、本小委員会の活動・成果が、関係地域の自治体や住民などの方々の安心に繋がることも重要である。

このため、本報告書の内容、東京電力の設計検討の実施状況等については、関係地域の自治体や住民との対話を行うことで十分に共有することが必要である。

以上