

第30回 1F廃炉の先研究会

燃料デブリ取り出し 工法の検討状況

2024年2月20日

東京電力ホールディングス
福島第一廃炉推進カンパニー
高平 史郎

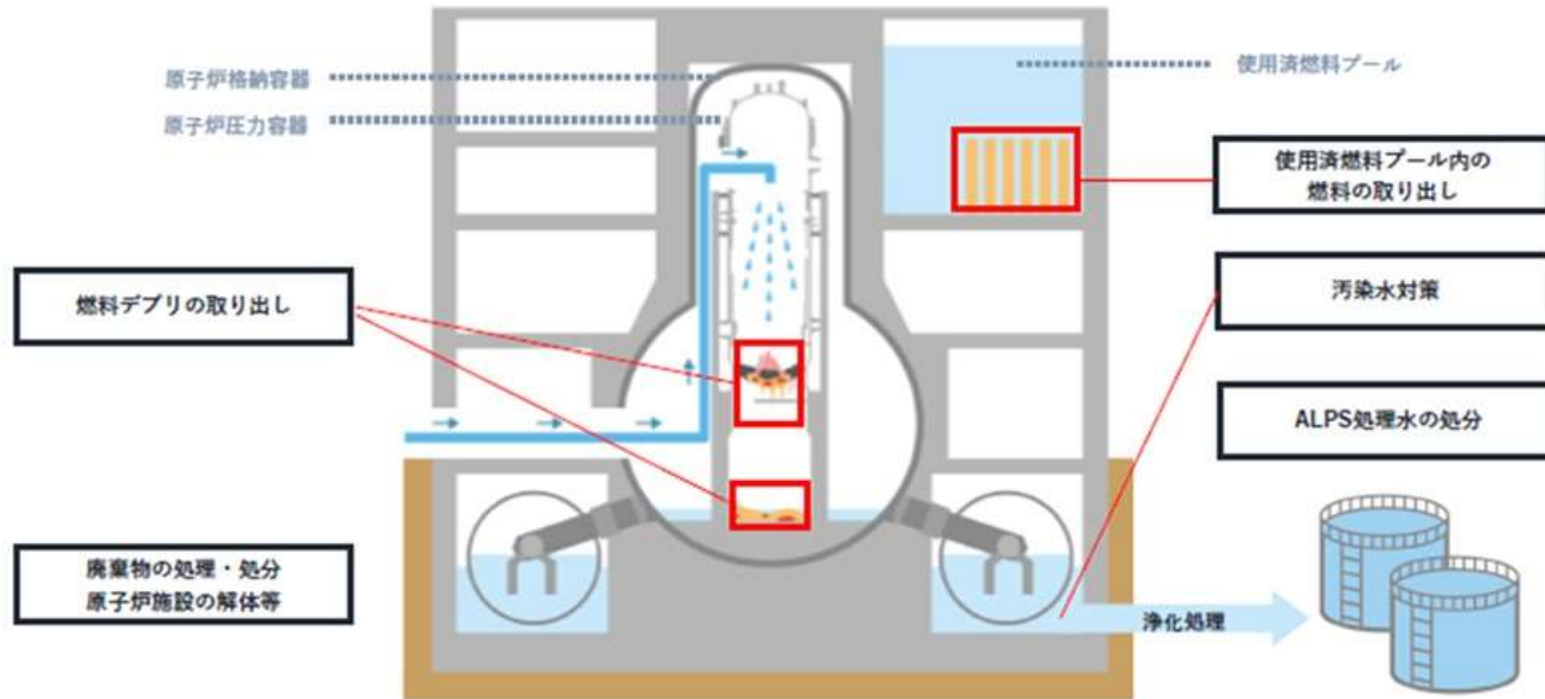
目次

1. はじめに
2. 燃料デブリの調査状況
3. 現場の整備状況
4. 廃棄物保管管理状況
5. 工法の検討状況
6. おわりに

はじめに

廃炉の主な取り組み

廃炉は、地域の皆さまや環境への放射性物質によるリスクを低減するための作業です。主な取り組みは5つに分けられます。



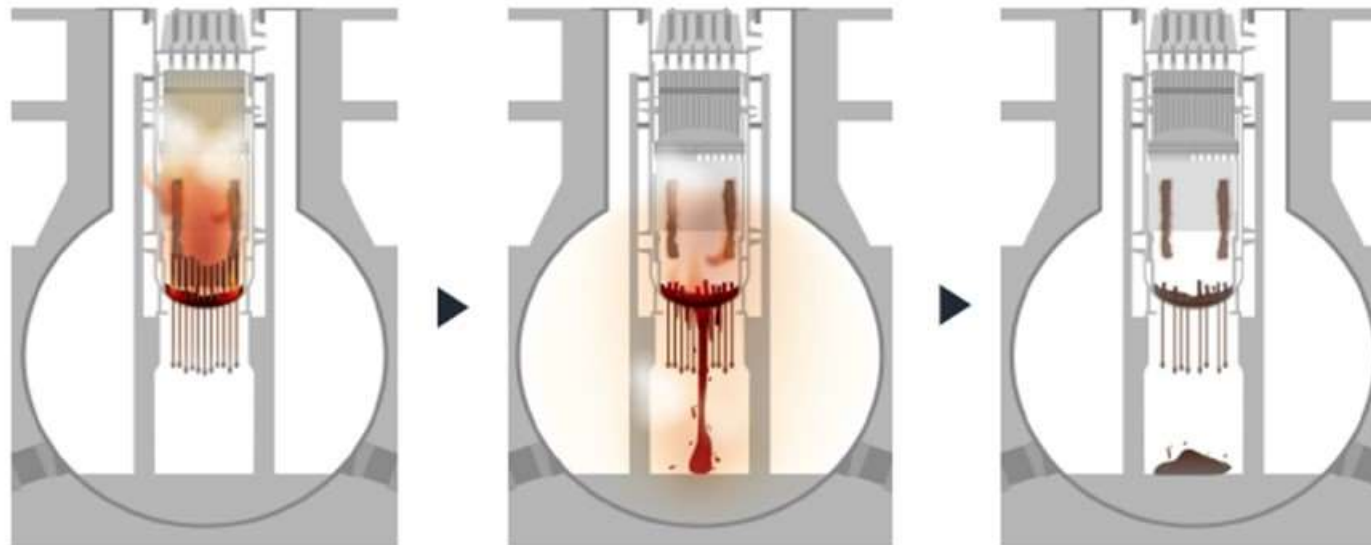
福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた進捗状況

主な課題	今までの実績・至近の取り組み	これから10年程度先までの計画	廃止措置の完了
 <p>汚染水対策 ALPS処理水対策</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 高濃度汚染水の浄化を2016年に完了（残水を除く） ▶ 汚染水の発生量を約470m³/日（2014年度）から約90m³/日（2022年度）まで減少 ▶ 港湾内の放射性物質濃度を事故直後の100万分の1程度まで減少 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 汚染水発生量の低減、建屋内滞留水の減少に向けた取り組みの継続 ▶ 将来の燃料デブリ取り出しの段階にあわせて必要な対策を実施 ▶ ALPS処理水の安全な放出（廃止措置完了までの期間を有効に活用）と、廃炉作業に必要な敷地を確保 <div style="text-align: center;">  </div>	
 <p>使用済燃料プール内の燃料の取り出し</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 3号機と4号機で燃料取り出しが完了 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 1号機と2号機の燃料取り出し ▶ 2031年内に、1~6号機燃料の取り出し完了 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>2024~2026年度開始</p> <p>2号機燃料取り出し</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>2027~2029年度開始</p> <p>1号機燃料取り出し</p>  </div> </div> <div style="text-align: right; margin-top: 10px;"> <p>2031年内 1~6号機燃料取り出し完了</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 冷温停止状態達成（2011年12月）から30~40年後の廃止措置完了が目標
 <p>燃料デブリ[※]取り出し <small>※原子炉内の溶融した燃料</small></p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 燃料が溶けた1~3号機は安定的に冷却し、冷温停止状態を維持 ▶ 燃料デブリ取り出しに向け原子炉格納容器の内部調査等を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 遅くとも2024年10月頃に、2号機の試験的取り出しを開始 ▶ 試験的取り出しの結果を踏まえて方法を検証・確認した上で段階的に取り出し規模を拡大 <div style="text-align: center;"> <p>試験的取り出し</p> <p>2号機</p> <p>段階的な取り出し規模の拡大</p> <p>1・3号機</p> <p>更なる取り出し規模の拡大</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 廃止措置に関する事項は廃炉作業や研究開発等の進捗状況を踏まえ、燃料デブリ取り出し開始以降に定める。
 <p>廃棄物対策</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 廃炉作業等で発生した固体廃棄物を表面検査に応じて分別し、主に屋外にて保管 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 2028年度内までに、すべての固体廃棄物の屋外での保管を解消（水処理二次廃棄物及び再利用・再使用対象を除く） <div style="text-align: center;"> <p>2028年度内 屋外保管の解消</p> <p>固体廃棄物貯蔵庫等 廃棄物関連施設の設置</p> </div>	

©Tejigo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

燃料デブリとは

事故当時、1～3号機は稼働中だったため炉心に燃料が格納されていました。事故発生後、非常用電源が失われたことで炉心を冷やすことができなくなり、この燃料が過熱、燃料と燃料を覆っていた金属の被覆管などが溶融しました。その溶融した燃料等が冷えて固まったものが燃料デブリです。



1～3号機の燃料デブリには継続的な注水を行っています。また、燃料デブリが持つ熱は事故の後から大幅に減少しており安定した状態を保っています。現在、原子炉格納容器内の温度は約20～35°Cで維持されています。

燃料デブリの取り出しのステップ

燃料デブリ取り出しは以下のステップで進めており、現在は、遠隔操作ロボットを活用しながら、原子炉格納容器の内部調査を行っています。また、取り出し作業における「安全性、確実性、迅速性、使用済燃料の取り出し作業状況」などから、燃料デブリ取り出しの「初号機」は「2号機」としています。現在、2号機の燃料デブリ試験的取り出しに向けて、準備を進めています。

原子炉格納容器の状況把握・取り出し工法の検討等

燃料デブリの取り出し

保管・搬出

1号機 3号機

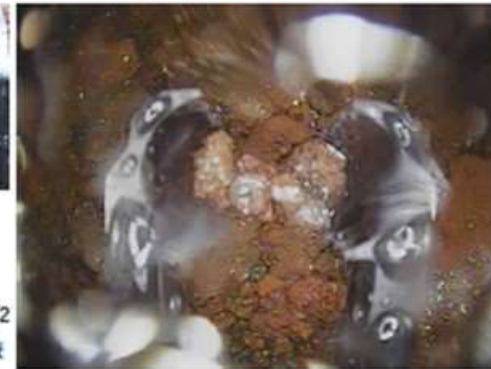


2号機



2019/2

原子炉格納容器 内部調査



(参考)燃料デブリ取り出しの方針 (2017年9月決定)

廃炉は、地域の皆さまや環境への放射性物質によるリスクを低減するための作業です。リスク低減につながる福島第一原子力発電所の「燃料デブリの取り出し」は、世界にも前例のない困難な取り組みです。

「中長期ロードマップ」において「燃料デブリ取り出し方針（5つ）」が定められています。

方針
1

ステップバイステップのアプローチ

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します。

方針
2

廃炉作業全体の最適化

準備工事から燃料デブリ取り出し工事、搬出・処理・保管および片付けまで、全体最適化を目指した総合的な計画として検討を進めます。

方針
3

複数工法の組み合わせ

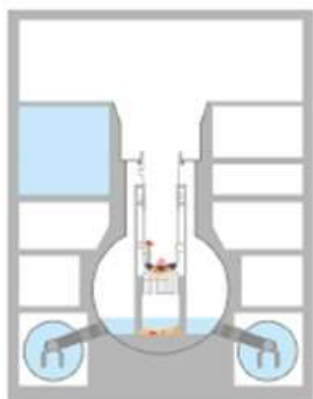
燃料デブリが存在する部位に応じた最適な工法を組み合わせ、原子炉格納容器底部は横、原子炉圧力容器内部は上からアクセスする工法を軸に検討します。

(参考)燃料デブリ取り出しの方針 (2017年9月決定)

「燃料デブリ取り出し方針」4・5

方針4 気中工法に重点を置いた取り組み

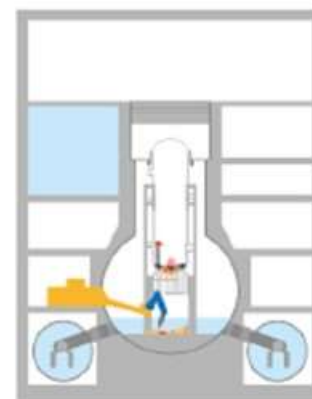
原子炉格納容器を水で満たす冠水工法は技術的な難度が高いため、気中工法に軸足を置いて取り組みを進めます。



気中工法

方針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

迅速に燃料デブリのリスクを低減する観点から、まず原子炉格納容器底部にある燃料デブリを、横から取り出します。



気中-横アクセス工法

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検討を進めています。

福島第一発電所廃炉の経緯

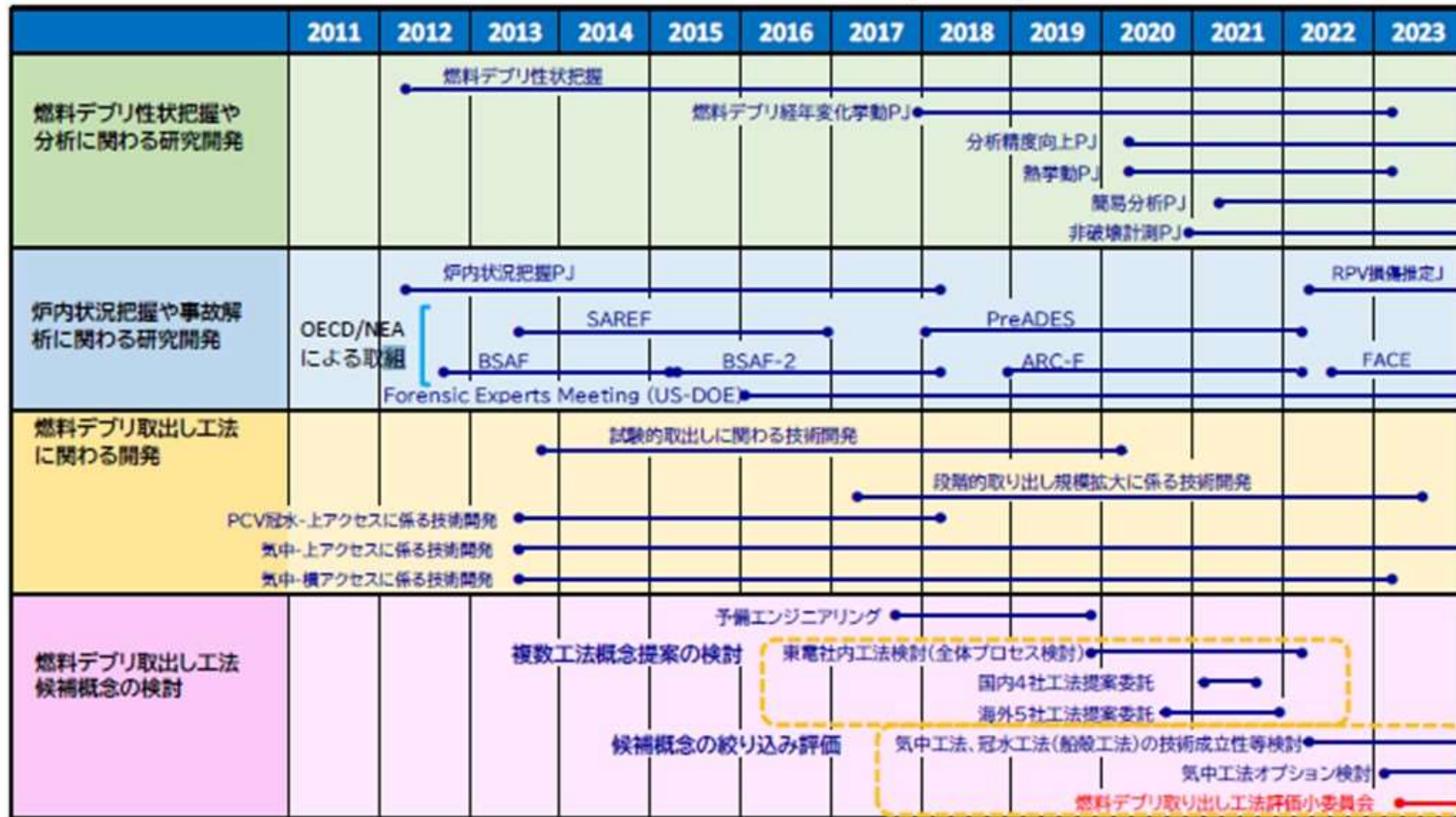
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
事故発生(2011/3/11)	●												
汚染水対応	● 海水トレンチからの漏洩停止 ● KURIONの設置 ● SARRYの設置		● ALPS処理の開始		● 高汚染水処理の完了			● 凍土壁の運用開始					
ALPS-処理水対応								● 政府による海洋放出の基本方針決定			● ALPS処理水の海洋放出計画の承認		● 海洋放出設備の設置完了
原子炉内部調査		● 2号機ベネトレーションからのカメラ挿入観察	● 1号機ベネトレーションからのカメラ挿入観察		● 1号機のミュオン観察		● 3号機ベネトレーションからのカメラ挿入観察	● 2号機のミュオン観察		● ROVによる3号機格納容器内水中観察	● 2号機格納容器内のカメラ吊り下げ観察		● ROVによる1号機格納容器底部の観察(ペDESTル等)
使用済燃料取出し					● 4号機からの使用済燃料取出し完了			● 3号機からの使用済燃料取出し完了					
放射性廃棄物対応		● 雑固体焼却処理設備の運用開始			● 固体廃棄物貯蔵庫第9棟運用開始		● 大型機器除染設備運用開始		● 増設雑固体焼却処理設備の運用開始		● 大型廃棄物保管庫第1棟建設開始		● 減容処理設備工事開始
組織の変更		● 廃炉推進カンパニ設立						● プロジェクト管理型組織に改編			● デコミテック社設立		



燃料デブリ取り出し検討の経緯

NDF、気中工法に軸足を置くことを提案

RMにて初号機を2号機と決定



2011 ————— 2020 ——— 2030 ————— 30～40年を目指す →

事故後状態安定化



使用済燃料回収完了:
2030年前頃

廃棄物保管・使用済燃料回収・汚染水管理・原子炉調査・技術開発



燃料デブリ取出しの準備(試験的取出しから段階的な取出し拡大)



燃料デブリ取出し本格化

建屋の解体等



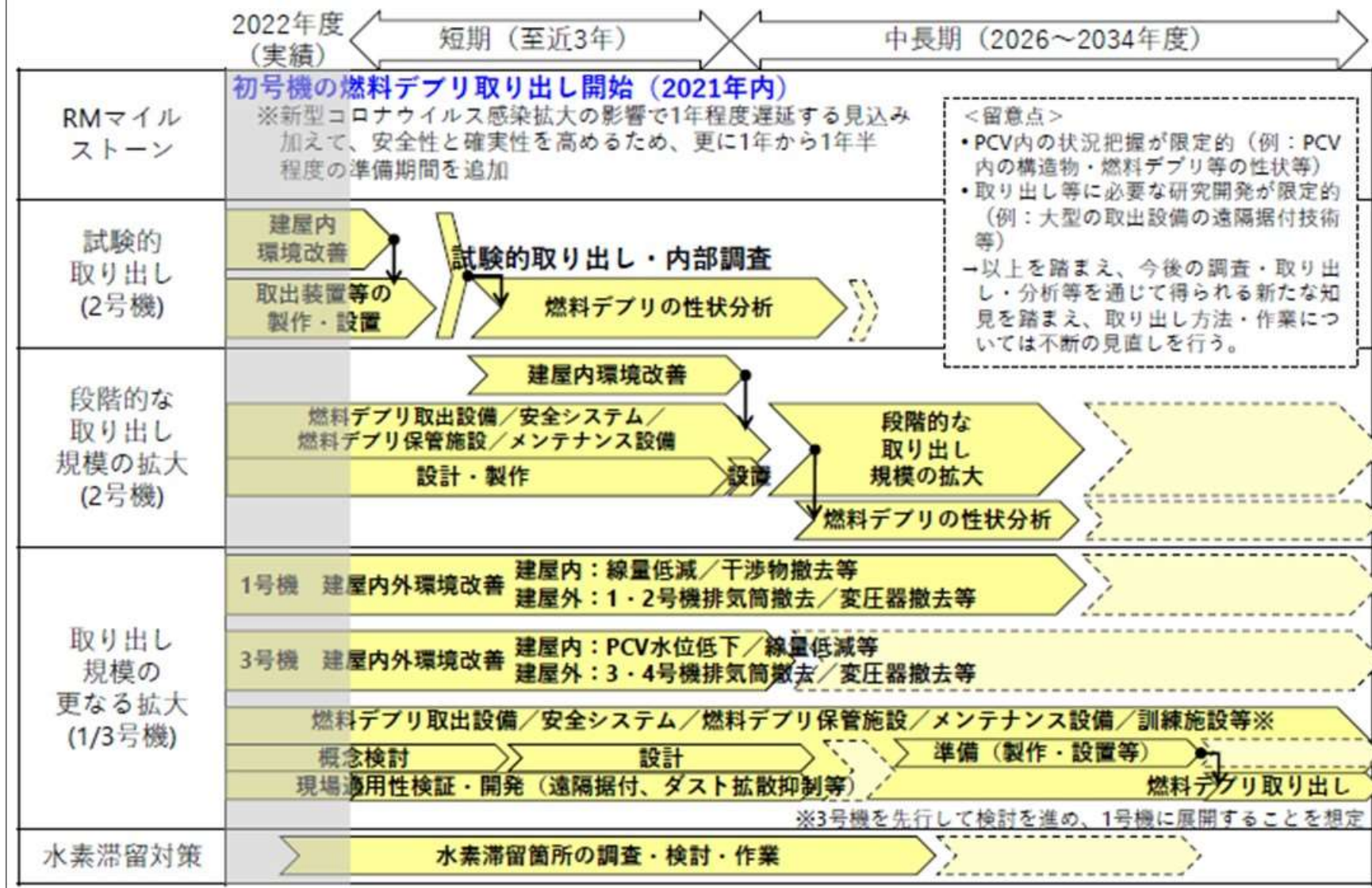
放射性廃棄物調査・技術研究・管理保管・減容・処理・処分等



- ✓ 1号機の使用済燃料取出し開始: 2027～2028年度
- ✓ 2号機の使用済燃料取出し開始: 2024～2026年度
- ✓ 燃料デブリ取出し: 2021年内に開始
(コロナ影響・安全確保のため2023年度後半目途)
- ✓ 原子炉建屋滞留水を2020年末の半分に低減: 2022年度～2024年度

燃料デブリ取り出し

- 今後の主要な作業プロセス (4/4)



燃料デブリ取り出しの進め方 (2号機)

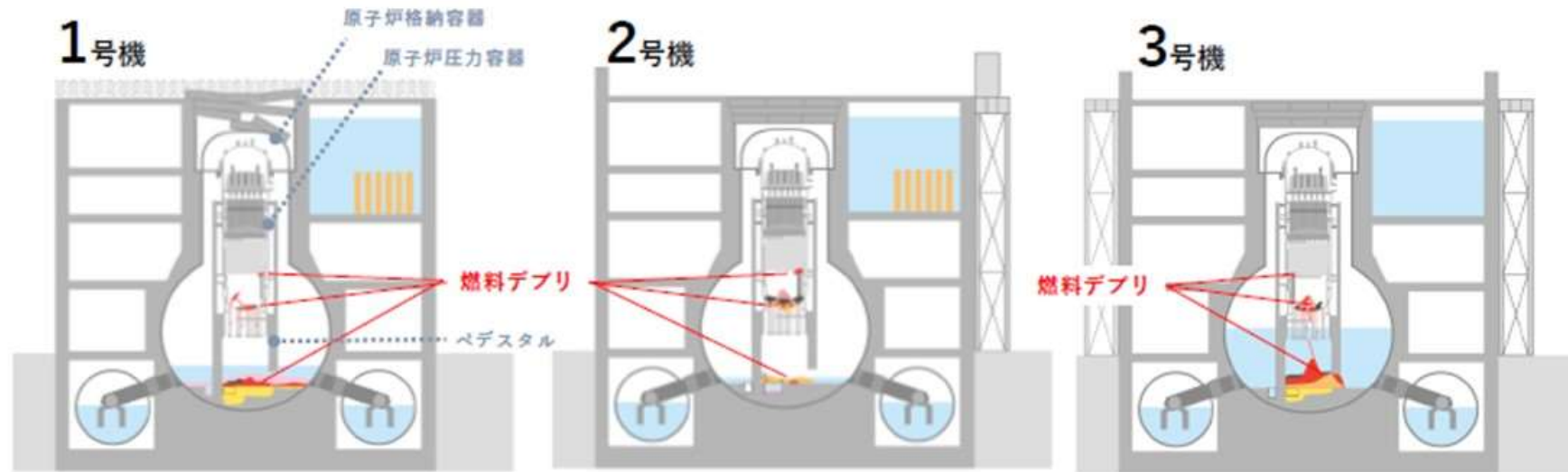
- 試験的取り出しに着手し、その結果を踏まえて方法を検証・確認した上で、段階的に取り出し規模を拡大していく、「ステップ・バイ・ステップ」の一連の作業として進めていく



燃料デブリの調査状況

1-3号機の燃料デブリ分布の推定

燃料デブリの取り出しに向けて、原子炉格納容器内の状況を把握するための様々な調査を行い、燃料デブリの分布を推定しています。原子炉格納容器内は放射線量が極めて高いことから、遠隔操作ロボットなどを活用して調査を行っています。



原子炉压力容器内にはほぼない状態。
ほとんどは原子炉格納容器内に溶け落ちている。

原子炉压力容器底部にある状態。
原子炉格納容器には少ない。

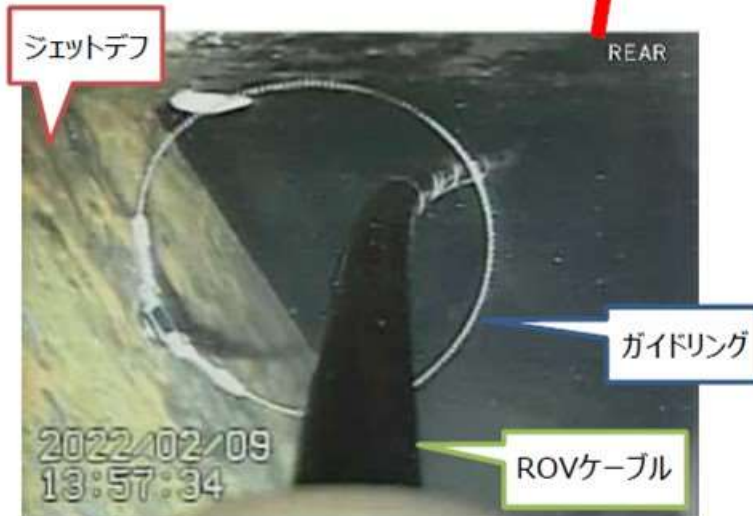
原子炉压力容器内には少ない。
原子炉格納容器内にある程度存在している。

ロ. ガイドリング④設置状況および215°付近調査状況<2月9日調査分>

※撮影日はいずれも2月9日



PCV東北東付近の状況(俯瞰)



ガイドリング④設置状況 (2月9日午後1時50分設置完了)



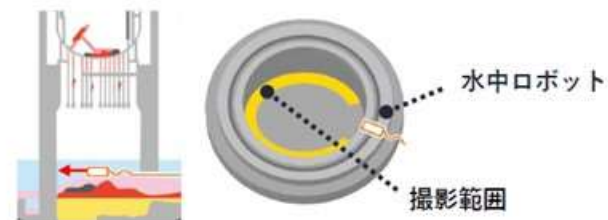
PCV東北東付近の状況 (近接)

資料提供: 国際廃炉研究開発機構 (IRID)・日立GEニュークリアエナジー

1号機

ペDESTラル開口部から撮影したパノラマ画像

ペDESTラル内は「床面より1 m程度の高さに棚状堆積物」があり、その下部では「コンクリートが一部消失し、鉄筋が露出」しています。また、「床面全体にわたり高さ1 m未満の堆積物」があり「上部の構造物の一部が落下していること」を確認しました。

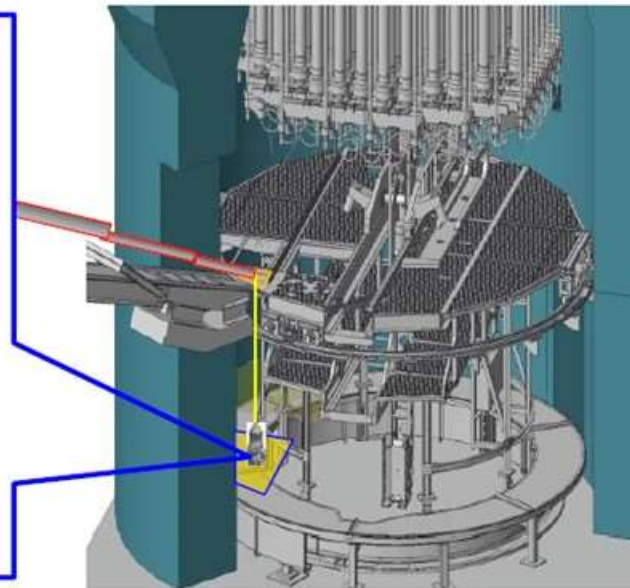
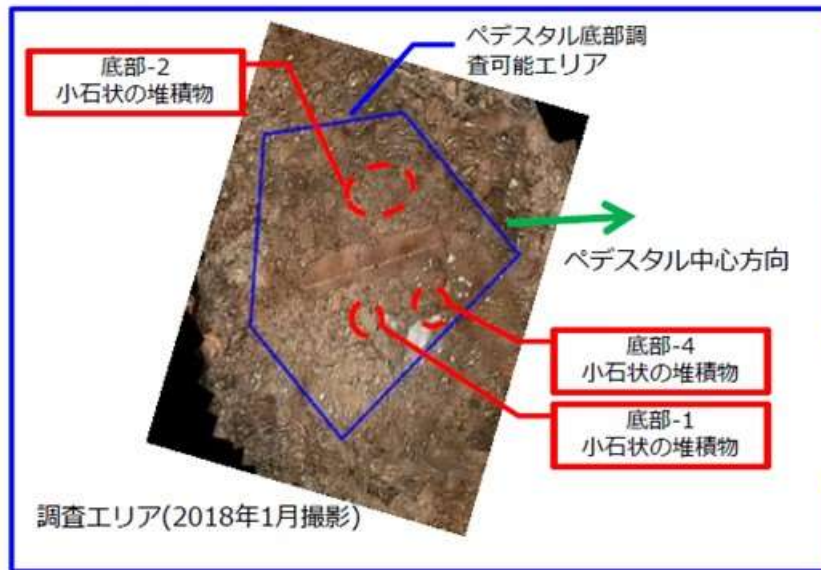


▼ペDESTラル内下部



3. 調査結果（ペDESTAL底部）（1/3）

■ 小石状の堆積物が動くことを確認した。



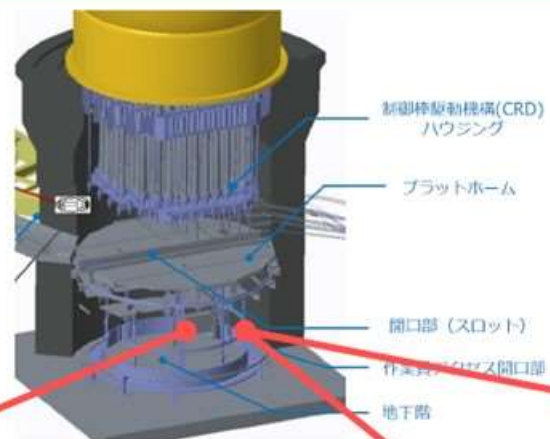
底部-1の調査状況

底部-2の調査状況

底部-4の調査状況

調査日：2019年2月13日

2. 画像取得結果（ペDESTAL内）（3/3）

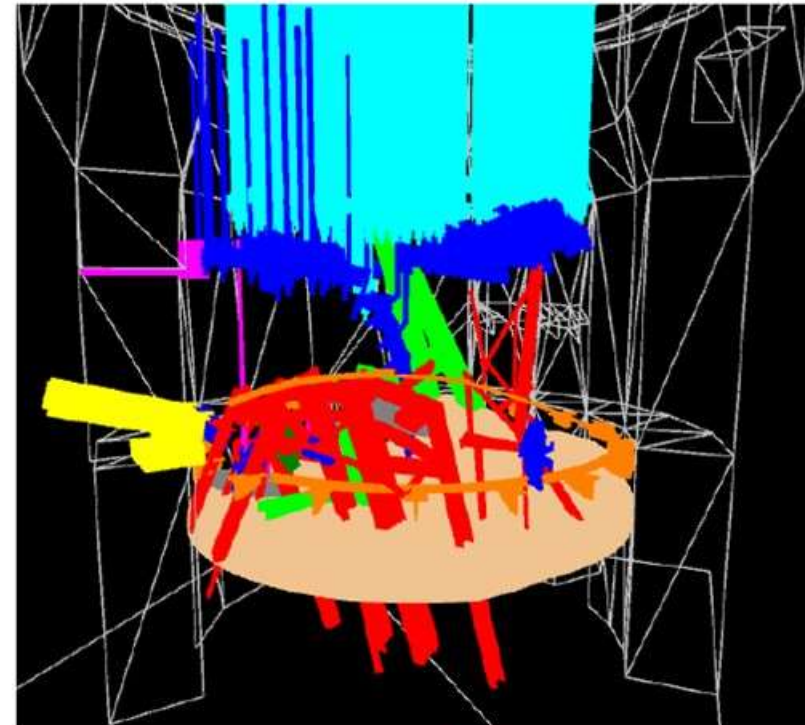
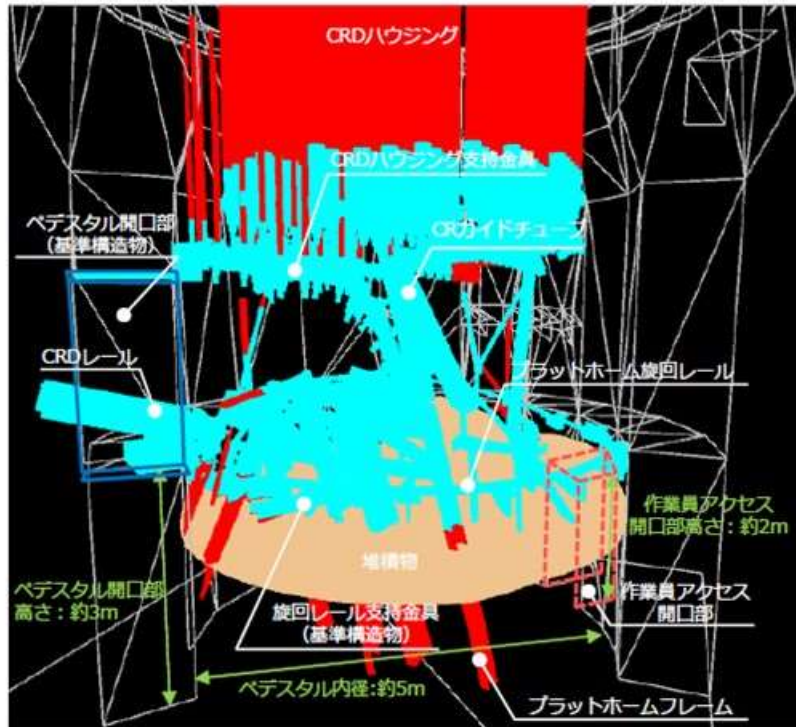


- ・ペDESTAL下部において小石状や砂状の堆積物を確認した。
- ・グレーチング等の複数の落下物を確認した。

2. 映像を確認した構造物の範囲



- 映像を確認して復元した構造物と、映像では確認できないため設計情報に基づき推定して復元した構造物がある
- ペDESTAL開口部および一部の旋回レール支持金具には大きな損傷が見られなかったため、これらの構造物は事故前と同じ位置にあったと考え、3次元復元時における位置の基準とした
- なお、ペDESTAL内の状況を全体的に把握するために復元しており、構造物の配置はおおよそその位置である



- | | | | |
|---|---|---|--|
| : 映像を確認した構造物 | : 映像を確認できなかった構造物 (設計情報から推定) | : プラットホーム、架台等の構造物 | : CRガイドチューブ |
| | | : プラットホーム旋回モータ | : CRD交換レール |
| | | : CRDハウジング支持金具 | : プラットホーム旋回レール、支持金具 |
| | | : CRDハウジング | : 端子箱、電線管、パイプ |
| | | | : グレーチング |

©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

映像作成：東芝エネルギーシステムズ(株)

現場の整備状況

1. 背景と目的

- 廃炉中長期実行プラン2020において、燃料デブリ取り出しに向けて原子炉建屋内の環境改善を進めていくこととしている。
- これまでも建屋内で一部環境改善を進めてきたが、燃料デブリ取り出しなどの作業のニーズに応じて、今後一層環境改善を進めていくことが必要。
- 2020年7月より、2号機において廃炉中長期実行プラン2020に基づき西側エリアの干渉物撤去が開始されることから、これに併せて最近の環境改善の取り組みと至近の工事計画の概要について報告する。

廃炉中長期実行プラン2020における原子炉建屋内環境改善計画

燃料デブリ取り出しステージ	号機	環境改善計画
燃料デブリ取り出しの開始	2号機	作業現場である原子炉建屋1階西側エリアの放射線量（5mSv/h程度）の低減のため、放射線源の調査や撤去等を進める。
段階的な取り出し規模の拡大	2号機	原子炉建屋1階西側エリア放射線量の更なる低減を進める。
取り出し規模の更なる拡大	1/3号機	作業現場の放射線量を下げるために放射線源の調査や撤去等（特に、高汚染配管）を進めるとともに、今後の作業の障害となる設備等を撤去する。

出典：東京電力HDホームページ 2020年3月27日公表 廃炉中長期実行プラン2020より抜粋

(参考) 空間線量率の推移



■: <3mSv/h
 ■: <5mSv/h
 ■: <7mSv/h
 ■: <10mSv/h
 ■: >10mSv/h
 ■: >20mSv/h
 ■: >50mSv/h

1号機

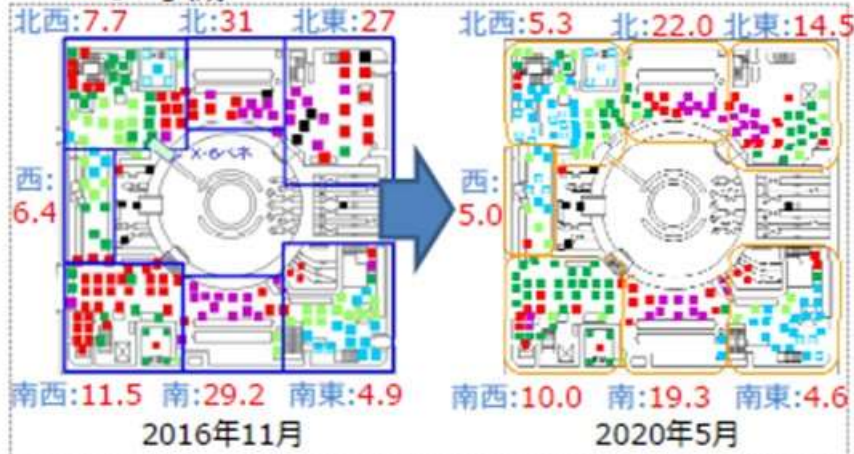


2号機

原子炉建屋1階 各エリアの平均値 単位: mSv/h

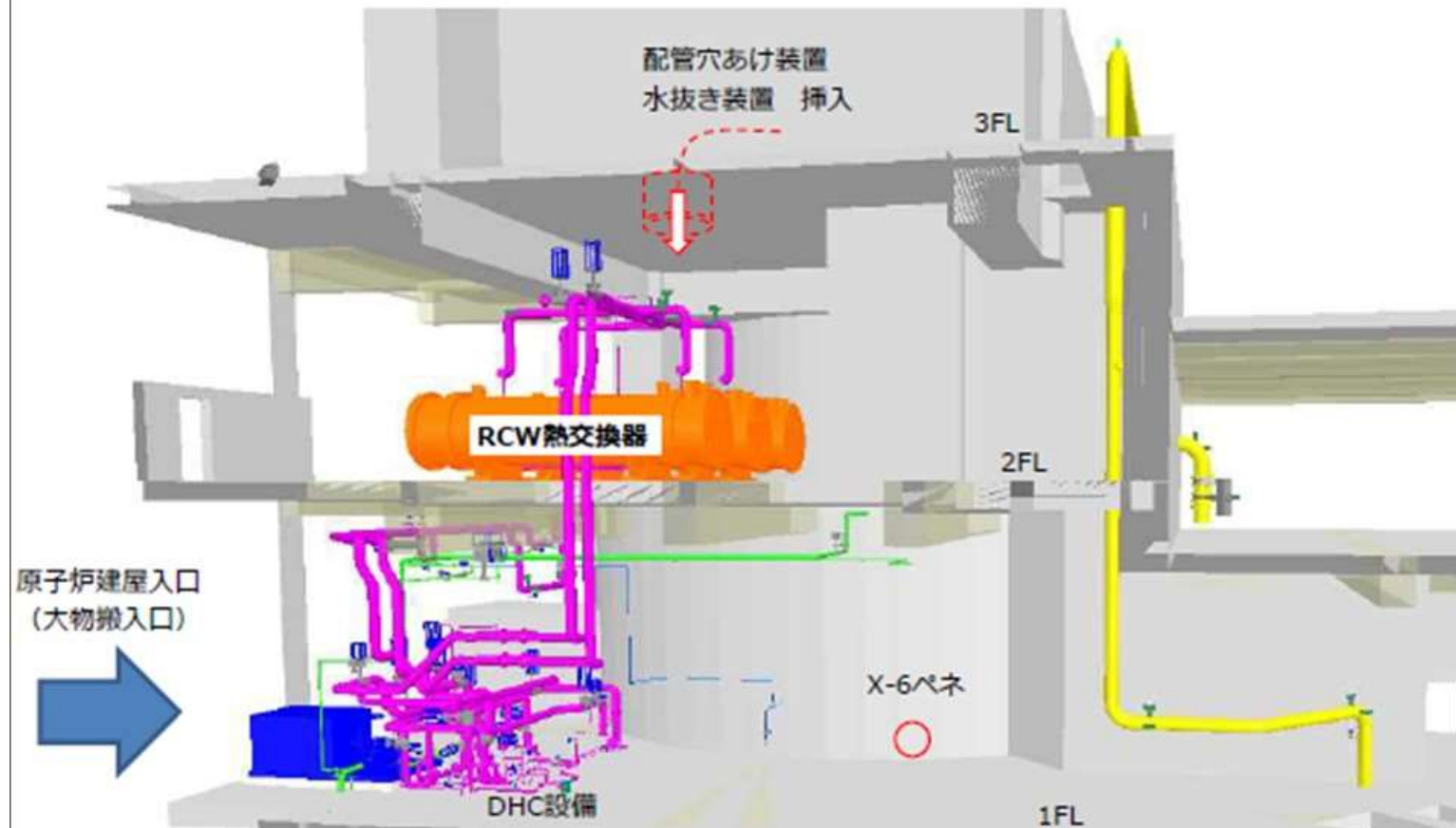


3号機



3. (1) 1号機の具体的取組

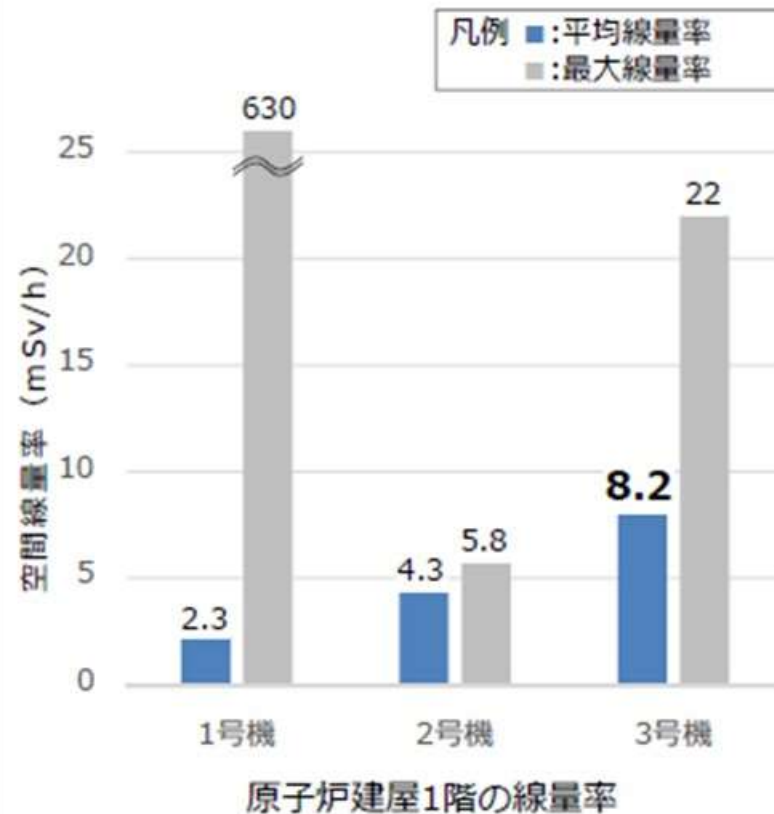
- X-6ペネのある南側エリアの線量低減を計画。局所的な高線量箇所となっているRCW系統（RCW熱交換器、DHC設備）から順に線量低減を進める。
- 高線量の2階を避け、3階の床面に穴をあけてRCW熱交換器へアクセスし、内包水を排水することで線量低減を行う（～2022年度）。



※ RCW(Reactor Building Cooling Water System) : 原子炉補機冷却水系
DHC(Drywell Humidity Control System) : ドライウェル除湿系

3. (3) 3号機の具体的取組

- 他号機に比べて1階面の空間線量率が高く、全体的に線量低減を実施する必要があるが、まずは作業員出入口のある北西エリアから進める（～2021年度）。
- 線源は機器（電源盤、計装ラックなど）および床・壁面であることから、撤去や除染を中心に線量低減を行う。



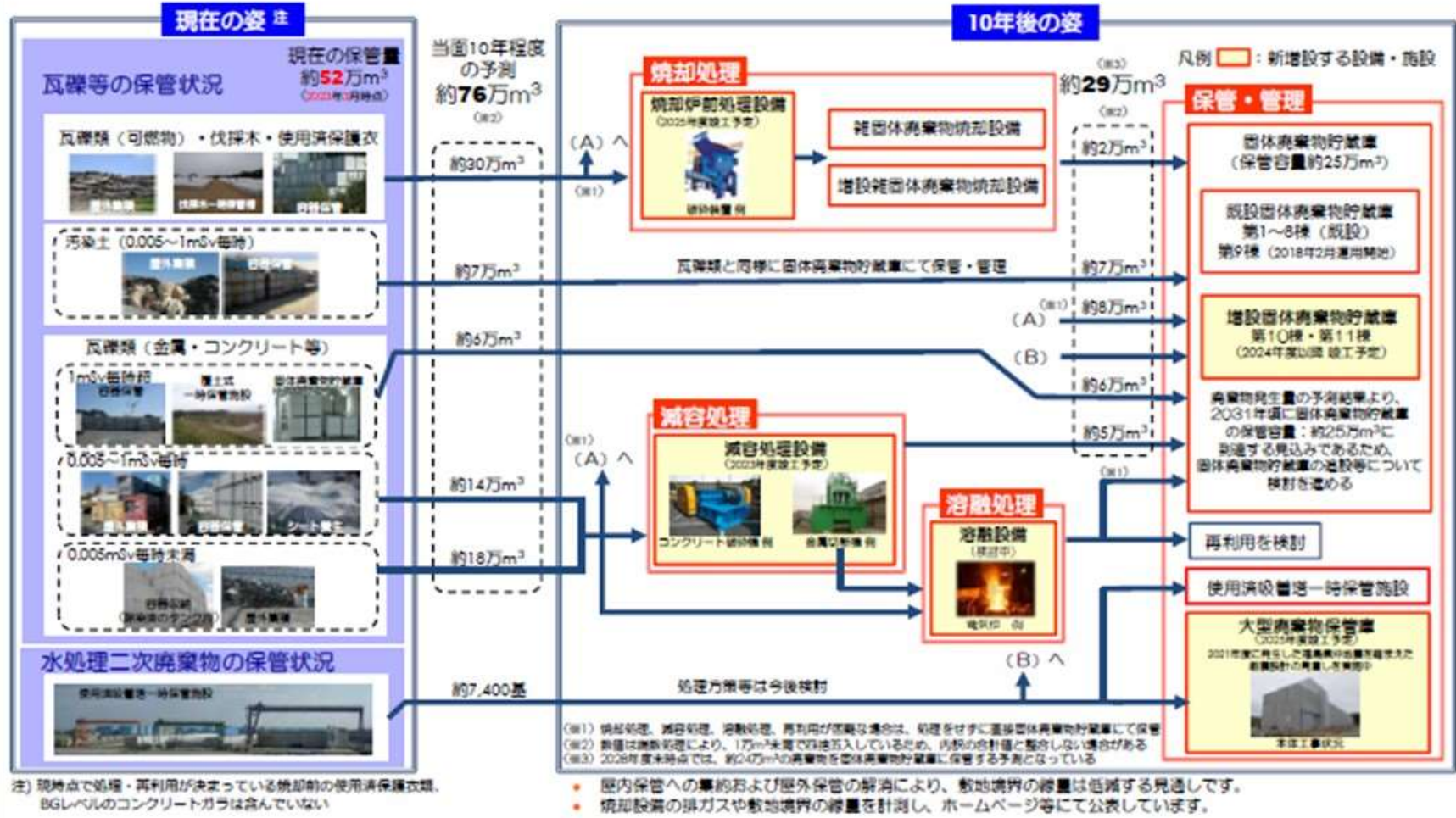
計装ラックおよび電源盤の線源
(ガンマカメラ画像)



3号機原子炉建屋1階（南西）

廃棄物保管管理状況

7. 2023年11月改訂版 保管管理計画の概要



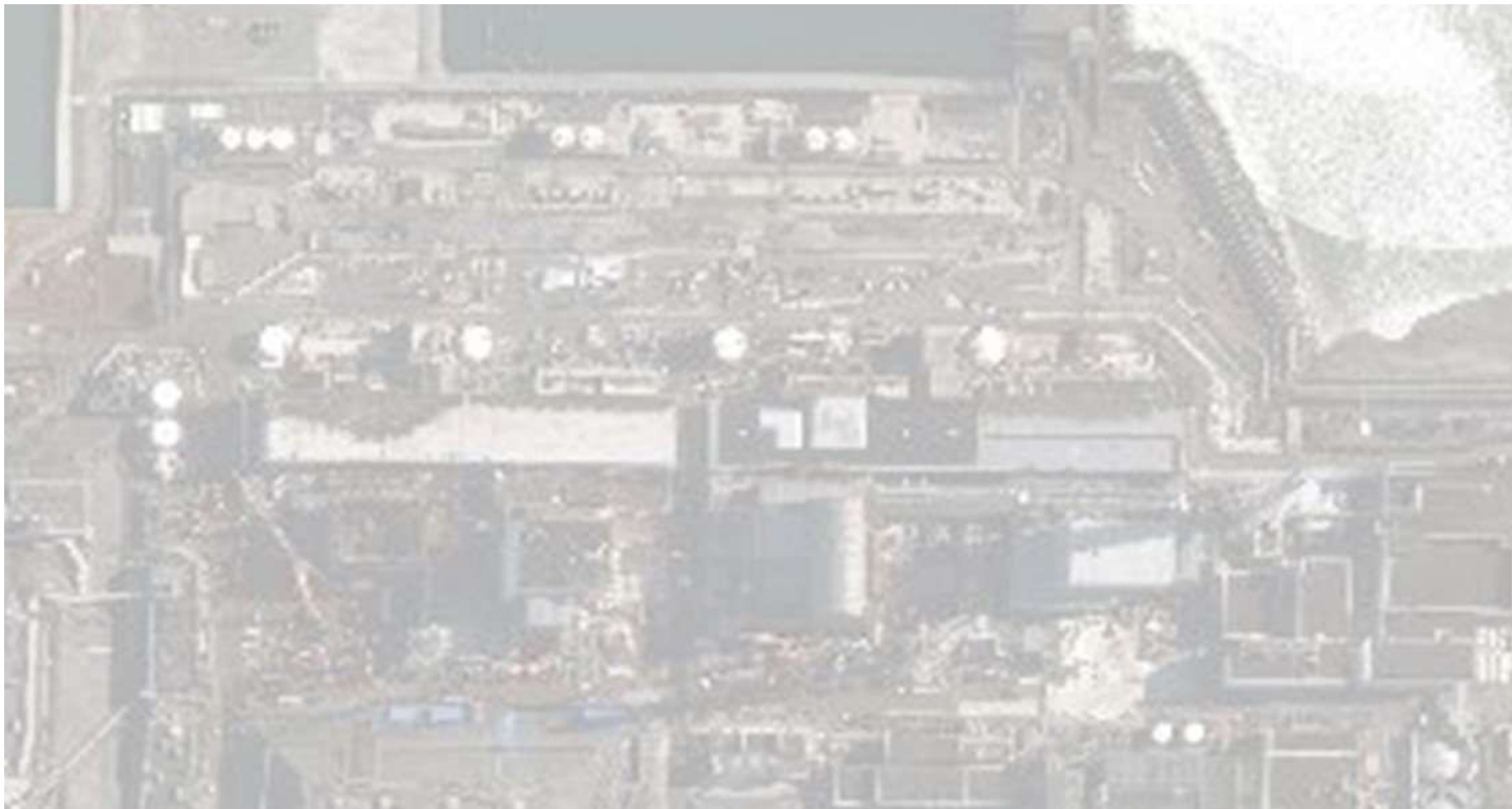
8. 今後の燃料デブリ取り出し準備工事等で発生する廃棄物

8

- 今後の燃料デブリ取り出し準備工事等で発生する廃棄物量について記載
(本文記載：20ページ)
- 燃料デブリ取り出し準備工事で発生する廃棄物
 - 燃料デブリ取り出し準備工事では、取り出し工法によらず、1～4号機周辺の建屋の解体および震災前に発生した樹脂等で、少なくとも約30万m³の廃棄物が発生すると試算
 - 上記には、燃料デブリ取り出しにおいて発生する燃料デブリの他、取り出しに際して発生するPCV内の高線量構造物、R/B内の高線量機器、並びに燃料デブリ取り出しで設置した設備等の撤去物量は含んでいない
- 震災前に発生した放射性廃棄物
 - 原子炉内で照射された使用済制御棒、チャンネルボックス等で約0.2万m³の廃棄物が発生すると試算
 - 使用済制御棒、チャンネルボックス等は、使用済燃料プールに貯蔵もしくはサイトバンカに保管
- その他廃棄物
 - 将来廃棄物として発生が予想される物量の多い代表的なものとして、ALPS処理水放出後の溶接タンク、構内保管している構内専用車両で、合わせて約15万m³の廃棄物が発生すると試算
 - これらの廃棄物は、建設中の減容処理設備や計画・検討中の溶融設備にて可能な限り減容・除染を行い、将来の敷地利用に向けた計画的な減容・保管について検討していく
- ✓ 上記の廃棄物については、現時点で発生時期について見通しを得ていない
- ✓ また、雑固体廃棄物焼却設備や建設中の減容処理設備で実施する焼却・破碎等の減容効果を見込んでいない
- ✓ そのため、減容効果を見込んだ廃棄物発生量を今後精査し、確保が必要な固体廃棄物貯蔵庫の保管容量を試算、保管管理計画へ反映する

TEPCO

原子炉建屋周辺状況



工法の検討状況

工法検討の際の留意点

- 通常炉とは異なる特殊な環境であることも踏まえ、安全の確保については、要求事項を適切に設定して工法を検討することが重要である。
- 燃料デブリの位置・量・性状等の現場情報が重要であり、これまでの内部調査、解析評価、過去の知見等を基に総合的に分析・評価し、工法検討に必要な情報を推定している。今後もこのような取組を継続し、内部調査等で新たに得られる成果を適宜、工法検討のための情報に反映していくことにより工法検討の精度を向上させるべきである。
- 工法の検討では、複数の道筋を検討した上で、その後得られる内部調査等の現場情報、技術検討等の進捗に応じ、道筋の組合せや絞り込みを行うことが重要である。また、複数の道筋を検討する上では、準備工事から燃料デブリ取り出し完了までの各プロセスに潜むリスクの管理が必要であり、常にリスクレベル及びリスクへの対応策を確認しながら、燃料デブリ取り出しシナリオを策定する必要がある。
- 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、工法に係る要求事項に加え、発電所全体を見据えた要求事項（敷地利用面積、既存設備との取り合い、地下水対策、廃棄物対策等）をより明確に設定して進めるべきである。
- 課題等の見落としを防ぐため、工事シーケンスの各作業に対し、技術成立性に大きく影響する可能性のある課題を網羅的に抽出すべきである。抽出された課題は、現場適用性、技術成立性の視点で対応できることを確認しておく必要がある。
- 工法を評価する際は、5つの視点(安全、確実、合理的、迅速、現場指向)に基づき、現場適用性、技術成立性を確認する評価に加え、事業継続性に係る評価も判断指標とする必要がある。また、工法検討の初期段階から評価に用いる判断基準を明確にすべきである。

リスク低減における基本的考え方

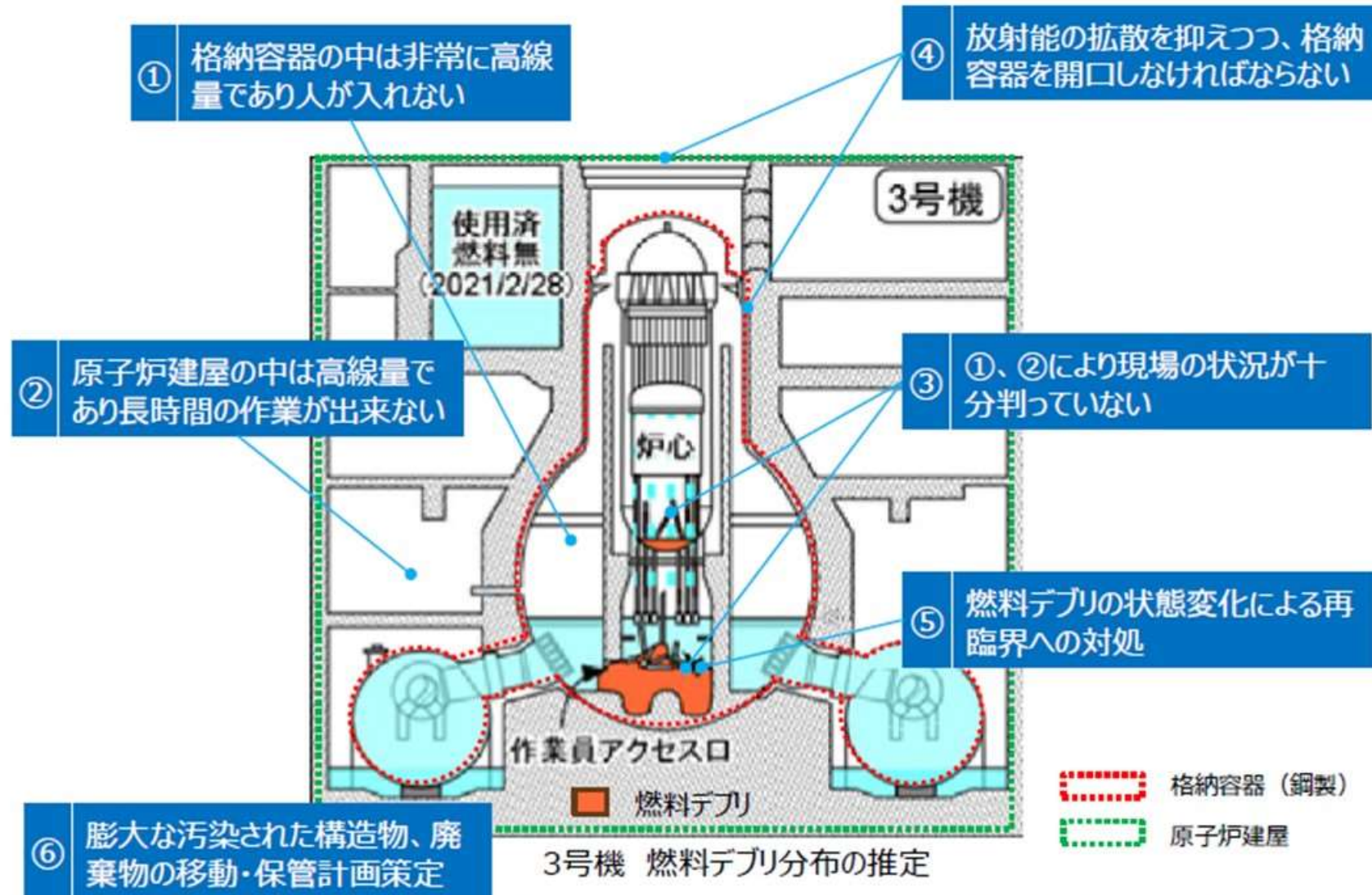
(5つの基本的考え方)

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

5つの基本的考え方を実際の現場に適用した場合、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（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（確実、合理的）、現場の厳しい条件下でも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。

2. 燃料デブリ取り出しの難しさ



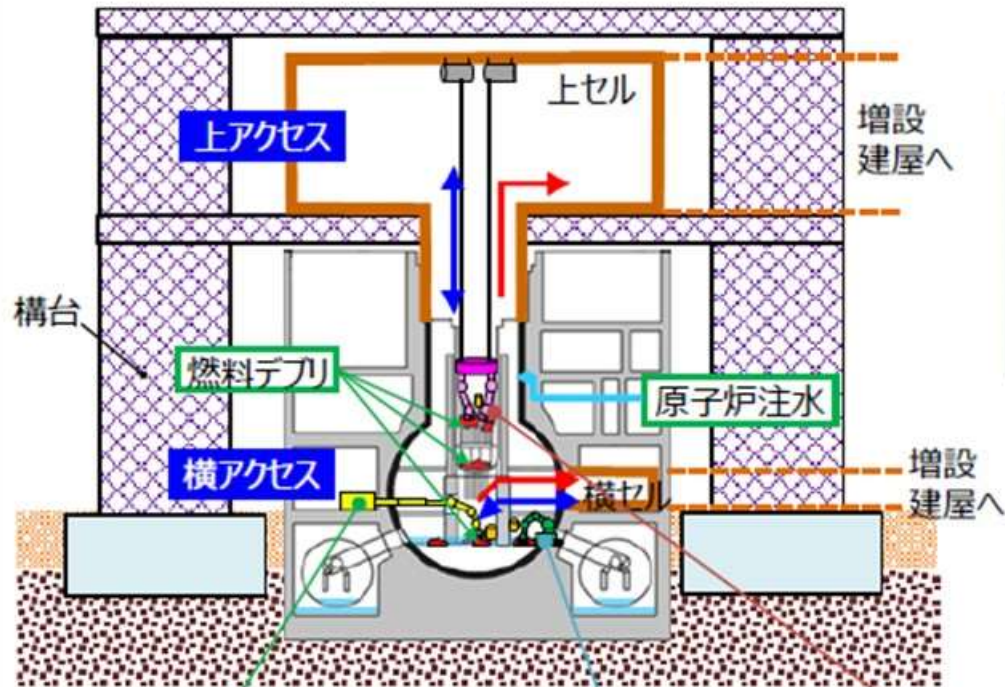
図の提供：原子力損害賠償・廃炉等支援機構

無断複製・転載禁止 燃料デブリ取り出し工法評価小委員会

3

3. 燃料デブリを取り出す方法

3.1 気中工法



【概要】
燃料デブリが気中に露出した状態で、水をかけ流しながら取り出す工法

遠隔操作装置の例



図の提供：東京電力ホールディングス（株）



ROVの例



プラットフォーム型アクセス装置の例

無断複製・転載禁止 燃料デブリ取り出し工法評価小委員会

3. 燃料デブリを取り出す方法

3.1 気中工法

利点	課題
<ul style="list-style-type: none">◆高線量下での作業のため、遠隔操作装置を使用。 技術力向上に貢献◆現場環境をあまり変化させず、現状のまま取り出しするため、他の工法への変更など、柔軟に対応可能◆水を溜めるなど、燃料デブリに与える状況変化が少ないので、臨界管理が比較的容易	<ul style="list-style-type: none">◆遠隔操作装置の故障対策など信頼性の向上を図ること◆遮へいや汚染拡大を抑制するための構築物が大きくなり、撤去する周辺建屋などが増え、準備に時間を要す◆燃料デブリへのアクセスが可能となった時点からの現場調査となり、遠隔操作装置の改善など、燃料デブリ取り出しに時間を要す

気中工法の課題

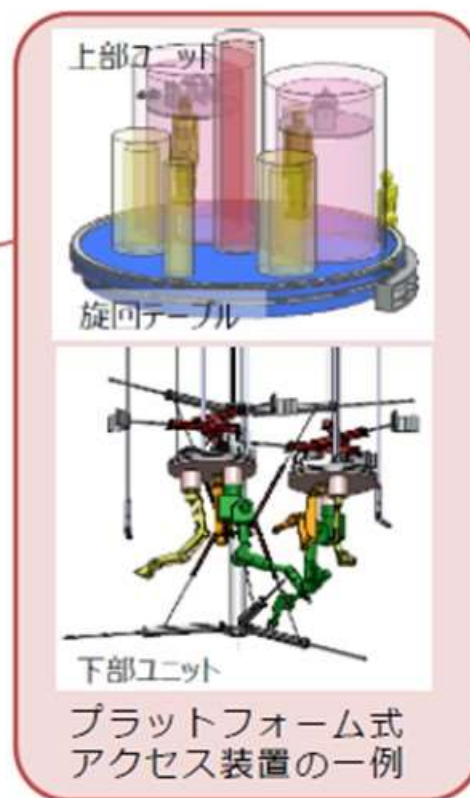
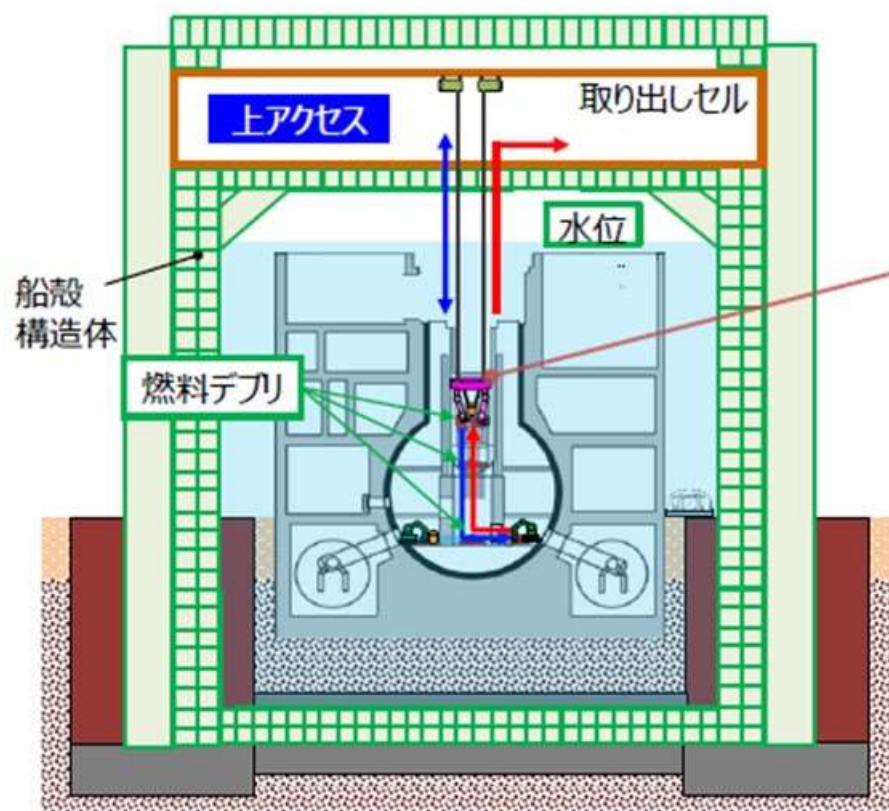
要因	課題
要因① PCV・RPV内が高線量	PCV・RPV内での全ての作業が遠隔操作装置を用いた作業となることが課題。想定も含め必要になる作業を特定した上で、遠隔操作装置の機能、構造、安全要件を設定すべきである。
要因② 原子炉建屋内が高線量	建屋内作業は一部人手作業が可能であるものの、その場合は環境改善とともに被ばく管理が課題。線量低減が困難な場合は遠隔操作装置を用いた作業となるため、要因①と同様な対応が必要である。
要因③ 現場情報の不足	現場の調査結果が限られているため、現場情報の不確かさを前提とした工法を検討することが課題。そのため、PCV内部調査による現場情報取得を進めるとともに、それでも現場状況が特定できない場合は、柔軟に対応できるような遠隔操作装置、作業手順等を検討する必要がある。
要因④ 閉じ込め障壁構築	上アクセス用構台の耐震成立性と既設構造物との取り合い部の気密性が課題。対応策として耐震条件の妥当性評価及び上部荷重を減らす方策の検討や気密性を確保する構造等の検討が必要である。また、既設構造物を閉じ込め障壁として活用するため、事故による損傷及び経年劣化を考慮した気密性、耐震性も課題。今後の長期使用に鑑み、損傷状況や劣化・腐食状況等を監視・調査・評価し、これらを考慮した耐震性、構造健全性等を継続的に確認していく必要がある。
要因⑤ 臨界管理	現場に適した臨界管理の具体化が課題。設計面の対応策としては、複数の監視手段の活用、加工作業の制限等の設定、中性子吸収材を投入できる設備の設置を検討する。他方、運用面の対応策としては、状態変化量を把握し、臨界近接を検知した場合には、作業停止、中性子吸収材投入及び作業再開判断によって臨界を防止する。
要因⑥ 廃棄物管理	新規構造物の建設に干渉するエリアの建屋解体物や掘削された土壌等の膨大な廃棄物量の扱いが課題。発電所敷地内の廃棄物全体の保管計画を立て、発生する廃棄物を保管できることを確認しておくべきである。

3. 燃料デブリを取り出す方法

3.2 冠水工法

【概要】

バウンダリとして船殻構造体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燃料デブリを取り出す工法



図の提供：東京電力ホールディングス（株）

無断複製・転載禁止 燃料デブリ取り出し工法評価小委員会

6

3. 燃料デブリを取り出す方法

3.2 冠水工法

利点	課題
<ul style="list-style-type: none">◆原子炉建屋全体を冠水させることにより、作業員が現場で作業可能◆原子炉建屋を構造物で完全に覆うので、原子炉建屋からの放射能漏えいを抑制することができる	<ul style="list-style-type: none">◆原子炉建屋を囲む構造物を設置するので、撤去する周辺建屋などが増え、準備に時間を要す◆原子炉建屋の地盤にトンネルを掘る場合など、そこに放射能がある前提で工事を検討する必要がある◆原子炉建屋の地盤も含めて、構築物を組み立てるような実績のない工事となるので、実証試験など、着工前の準備に時間を要す

冠水工法の課題

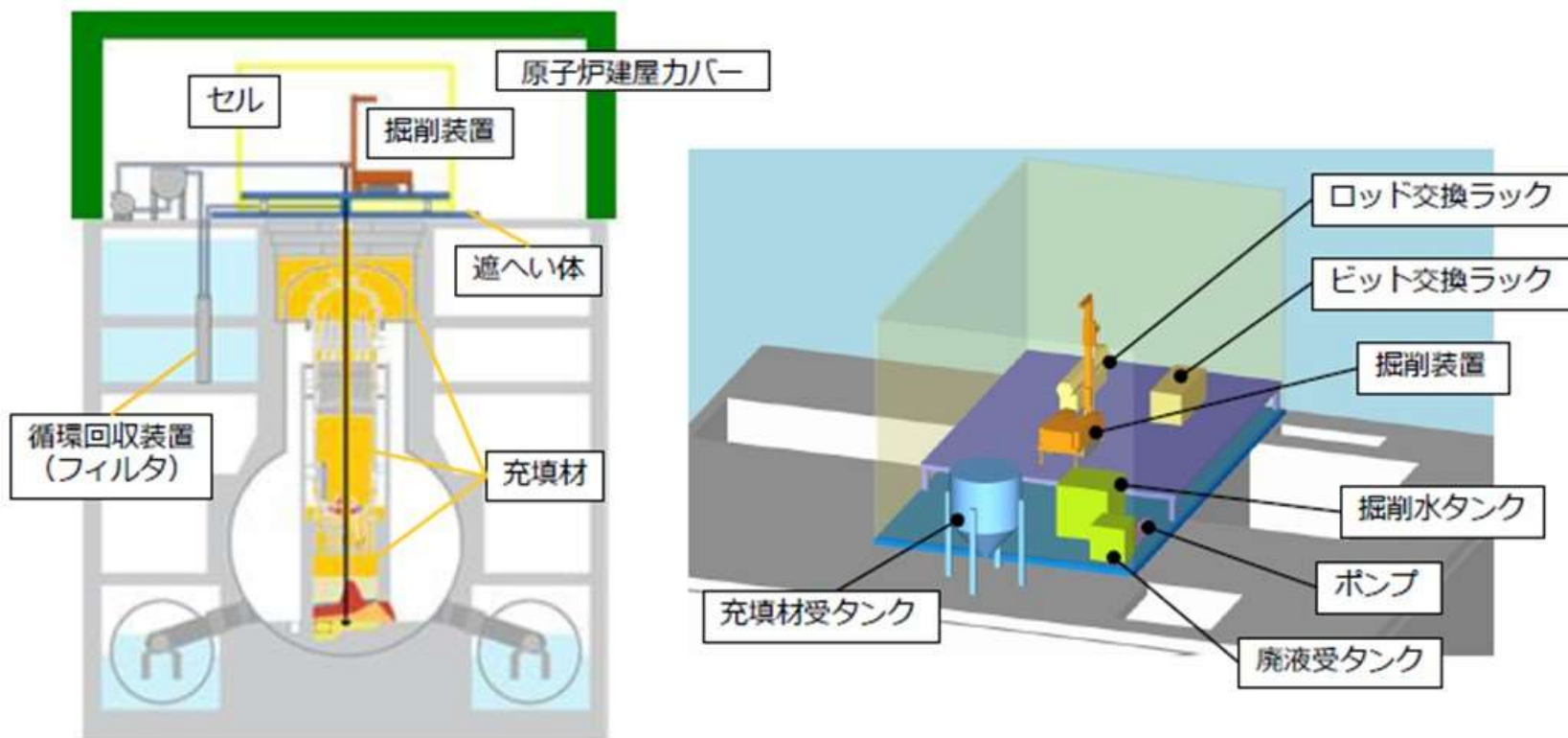
要因	課題
要因① PCV・RPV内が高線量	冠水させた水の遮へい効果により船殻構造体内で取り出し作業を行う中間架台上には人が近付くことが可能であるが、PCV・RPV内の作業については、全て遠隔作業となるため、気中工法（RPV注水）案と同様な対応が必要である。
要因② 原子炉建屋内が高線量	船殻構造体設置前に行うRPV注水設備の配置変更などの準備作業の一部では、原子炉建屋内での作業が必要となるため、気中工法（RPV注水）案と同様な対応が必要である。
要因③ 現場情報の不足	船殻構造体の構築のための仮設構造物設置に関し、原子炉建屋周辺土壌が汚染している可能性を完全には排除できないことが課題。掘削土壌（地下水を含む）が汚染している前提での工事成立性を検討する必要がある。
要因④ 閉じ込め障壁構築	現場情報の不確かさを前提とした工法検討に加え、特に船殻構造体底部はシールドトンネル内の空間に横アクセスのみで組み立てることが課題。溶接施工、検査方法の実現性について確認する必要がある。また、汚染した保有水を万一にも3層の閉じ込め障壁を持つ船殻構造体の外部に漏れいさせないことが課題。閉じ込め障壁間へ漏れいした水を検知し、その後の復旧対策を検討しておく必要がある。なお、施工時及び地震時における仮設構造物、周辺地盤及び船殻構造体の健全性については、水圧（内部水、地下水）、土圧、地震荷重等を考慮した有限要素法による解析・評価で成立性の見込みを確認している。
要因⑤ 臨界管理	気中工法（RPV注水）案と同様の課題がある。加えて、万一の臨界に備えた対応策として常時ホウ酸水環境とする場合には、ホウ素濃度の維持管理やホウ酸の供給管理等が課題となる。
要因⑥ 廃棄物管理	船殻構造体の建設のため、ヤード整備に干渉する建屋解体物や掘削された土壌等の廃棄物量が膨大となることから、気中工法（RPV注水）案と同様な対応が必要である。

3. 燃料デブリを取り出す方法

3.3 充填固化工法

【概要】

充填材により燃料デブリを安定化させつつ現場線量を低減し、掘削装置により燃料デブリを構造物や充填材ごと粉砕・流動化して循環回収する工法



図の提供：原子力損害賠償・廃炉等支援機構

無断複製・転載禁止 燃料デブリ取り出し工法評価小委員会

8

3. 燃料デブリを取り出す方法

3.3 充填固化工法

利点	課題
<ul style="list-style-type: none">◆ オペフロに遮へい体を設置し、また、原子炉内を充填材で覆うことにより作業員が現場で作業可能◆ 燃料デブリを充填固化することにより、作業に伴う拡散を抑制可能◆ 簡素なセルやカバーとなり、支持構造物設置のための周辺建屋などの撤去が不要となる	<ul style="list-style-type: none">◆ 充填材の種類や充填範囲など、さまざまな充填方法が考えられ、現場に合わせた、充填材の選定や充填方法の検討、更には掘削以外の取り出し方法のオプションも含めて検討しておく必要がある◆ 充填材が新たな廃棄物となるため、廃棄物を極力少なくなるような充填方法を検討する必要がある

充填固化工法の課題

要因	課題
要因① PCV・RPV内が高線量	掘削した燃料デブリ等は水との混合状態で回収されることになるため、その際の外部への漏えい防止が課題。万一の漏えいに備えた検知方法や汚染拡大防止策、汚染後の復旧方法の検討が必要である。
要因② 原子炉建屋内が高線量	ペDESTAL内底部に充填材を注入する際は、横アクセスで実施することになると考えられるため、充填ホースの敷設方法の検討が課題。過去の2号機PCV内部調査の実施例を参考に検討することになると見込まれる。
要因③ 現場情報の不足	充填材を注入することによって、掘削性を確保できる充填状態にすることが課題。様々な状況を想定しても適切に充填できる充填材の選定並びに手順の検討が必要であり、充填材に要求される機能を明確にした上で開発を進めるべきである。また、燃料デブリを充填材で覆うため、崩壊熱の除熱も要否を含め課題。崩壊熱の除熱が阻害される可能性についても検討しておかなければならない。
要因④ 閉じ込め障壁構築	原子炉建屋及びオペレーティングフロア（以下「オペフロ」という）上に設置するセルの耐震成立性や、気密性を確保することが課題。対応策としてオペフロに設置する機器類を具体化させた上で耐震評価を実施するとともに、気密性を確保する構造等を検討すべきである。なお、要求される遮へい機能は気中工法（RPV注水）案よりも軽減されることが見込まれる。一方、原子炉建屋、PCV等の既設構造物を閉じ込め障壁として活用するため、気中工法（RPV注水）案と同様な対応が必要であるが、充填材を期待どおりに充填できれば、経年劣化等の影響を緩和できると見込まれる。
要因⑤ 臨界管理	気中工法（RPV注水）案と同様の課題がある。本オプション固有の対策として、例えば、燃料デブリ回収ラインを臨界しない寸法に制限すること、中性子吸収材を充填材にあらかじめ添加することなどが想定される。
要因⑥ 廃棄物管理	大量に使用する充填材を全て放射性廃棄物として扱わなければならないことが課題。このため、充填範囲の縮小化を検討することや、発電所敷地内の廃棄物全体の保管計画を立て、発生する廃棄物を保管できることを確認しておくべきである。また、燃料デブリ近傍部から回収した掘削粉は燃料デブリ、構造物及び充填材が混合しているため、燃料デブリと廃棄物の仕分け方法も検討しておくべきである。

おわりに

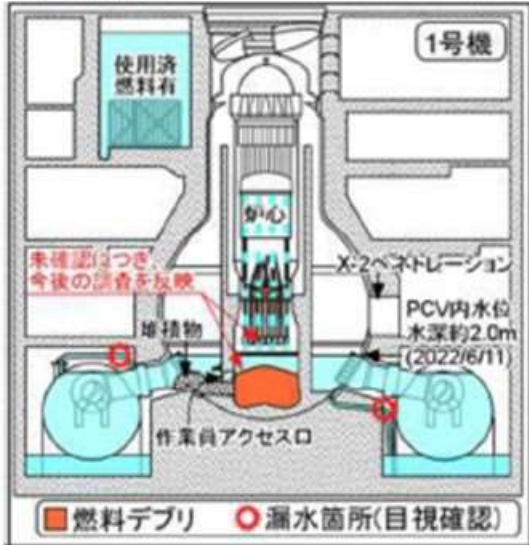
結論

- 中長期RMの方針に沿って、初号機での試験的取出しから規模の拡大を進め、2030年頃からは燃料デブリの取出しを本格化させる計画である。
- 当面、サイトの安定維持や短中期的なリスク低減の作業を優先的に進めると同時に、長期リスクの低減を目指すために「燃料デブリの取出し」を本格化させていく必要がある。
- 事故後12年間の現場での取組結果や研究開発の成果を背景に、本格的燃料デブリ取出しの工法を評価し選定するための作業が東電やNDFにおいて進められている。
- 国を挙げた組織連携体制の下で、東電によるエンジニアリング作業が進められていく見通しである。
- 燃料デブリ取出しに関しては、東電が慎重に設計等の準備を進めて、安全が確保された工法を実現していく事が重要である。このためには、規制当局と事業者間の情報共有や認識共有の取組が期待される。

【参考】 燃料デブリ等の状況

燃料デブリの存在状態(推定および観察)

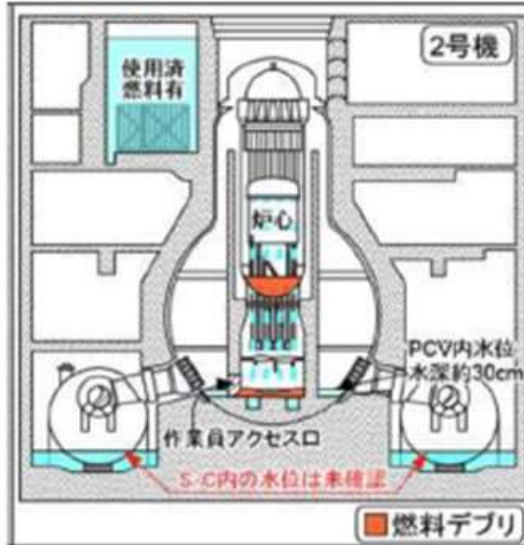
1号機



1号機PCVペDESTAL内(2022-2023)



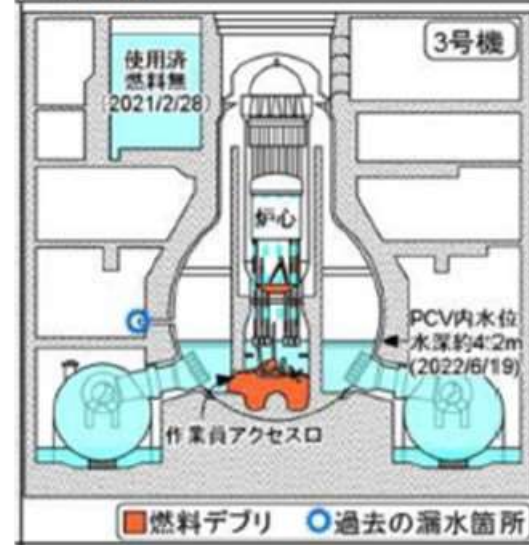
2号機



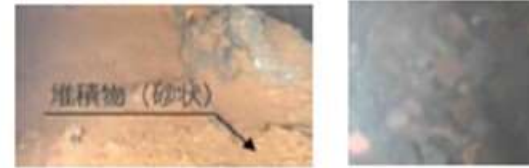
2号機PCVペDESTAL内(2018)



3号機



3号機PCVペDESTAL内(2017)



2015年実施MAAPによる事故進展解析結果

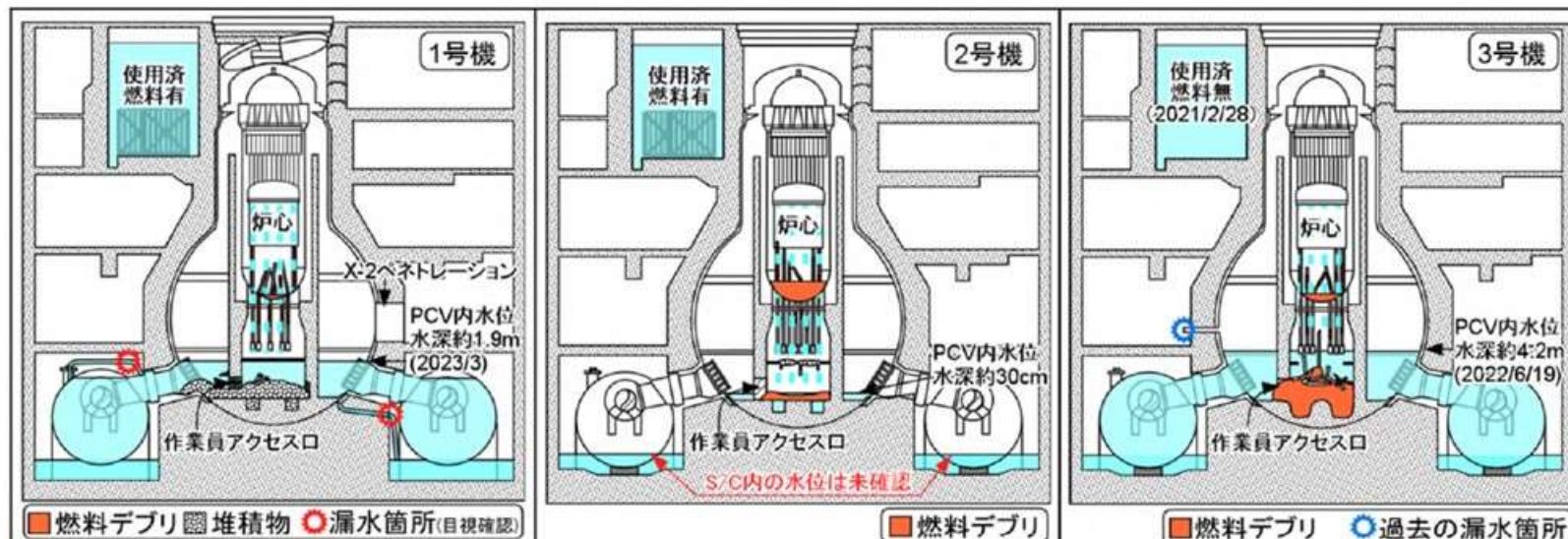
RPV内	炉心部 (t)	0
	RPV底部 (t)	15
PCV内	ペDESTAL内側 (t)	109(78)
	ペDESTAL外側 (t)	33(52)
合計 (t)		287

RPV内	炉心部 (t)	0
	RPV底部 (t)	25
PCV内	ペDESTAL内側 (t)	92(37)
	ペDESTAL外側 (t)	102(4)
合計 (t)		260

RPV内	炉心部 (t)	0
	RPV底部 (t)	25
PCV内	ペDESTAL内側 (t)	103(51)
	ペDESTAL外側 (t)	96(6)
合計 (t)		281



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 (A°ペスタル内側)	・ペスタル内側床面に大部分の燃料デブリが存在。	・ペスタル内側床面に一定量の燃料デブリが存在。	・ペスタル内側床面に2号機と比較して多くの燃料デブリが存在。
PCV底部 (A°ペスタル外側)	・作業員アクセス口を通してペ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※1	・R/B 1階X-6ペ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。

アクセスルート及び周囲の構造物の状況

	1号機	2号機	3号機
	<p>・鉄筋の露出は作業員アクセス口周辺及びベDESTAL内側表面で確認。</p>		
燃料デブリへのアクセスルートに関する情報※2	<ul style="list-style-type: none"> ・グレーチング上側から、ベDESTAL外側のドライウェル底部へのアクセス可能。 ・X-6ベネからベDESTAL内につながるCRDレール周辺の状態は確認できず。 	<ul style="list-style-type: none"> ・CRDレール上やベDESTAL開口部付近には大きな障害物なし。 ・ベDESTAL開口部からベDESTAL内側底部へのアクセスが可能であることを確認。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベDESTAL開口部からベDESTAL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	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員アクセス口部において、内部の鉄筋、インナースカートが露出し、RCW系配管が欠損。 ・ベDESTAL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ベDESTAL外側壁面に大きな損傷なし。 ・ベDESTAL外側の堆積物から中性子線とEu-154のガンマ線を検出。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベDESTAL内底部に燃料集合体の一部が落下していたが、調査した範囲では、CRDハウジングサポートには大きな損傷はなし。 ・ベDESTAL内側壁面及びベDESTAL内の既設構造物(CRD交換機等)には大きな損傷なし。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベDESTAL内において複数の構造物の損傷や落下物(一部は炉内構造物と推定可能)、CRDハウジングサポートの一部脱落、変形を確認。 ・ベDESTAL内側壁面に大きな損傷なし。

【参考】

2号機試験的取り出し

2号機 燃料デブリ試験的取り出し作業 [主なステップ]

試験的取り出し装置を原子炉格納容器の貫通孔から、原子炉格納容器に進入させ原子炉格納容器内の障害物の撤去作業を行いつつ、内部調査や試験的取り出しを進める計画です。

ステップ①

隔離部屋の設置



ステップ②

X-6 ペネ^{*}の蓋の開放



ステップ③

X-6 ペネ内の堆積物の除去

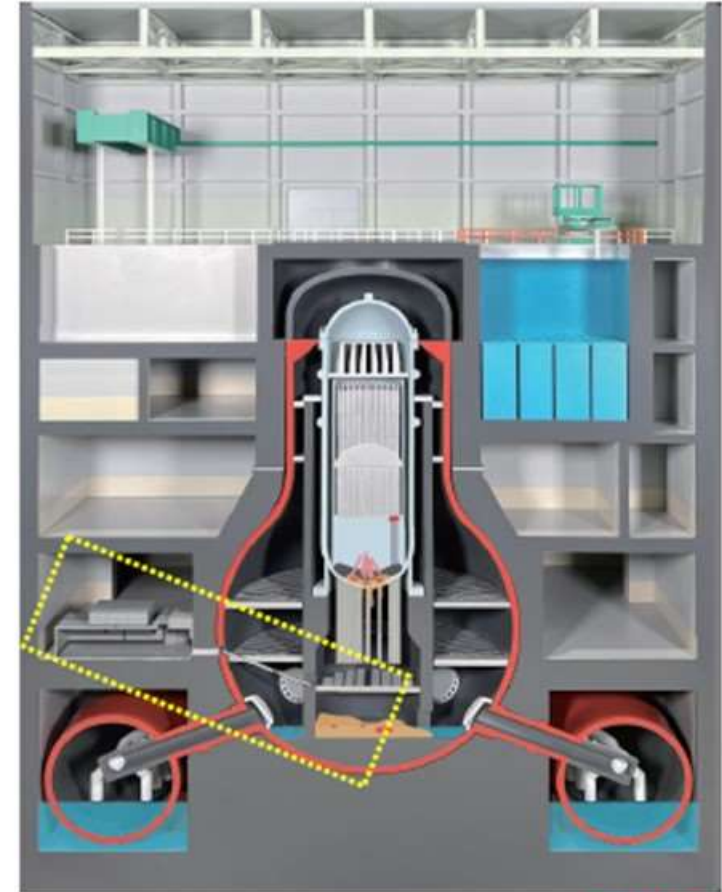


ステップ④

X-6 ペネから「試験的取り出し装置（遠隔操作ロボット）」を原子炉格納容器内部に進入させ、内部調査や試験的取り出しを行う。

試験的取り出し装置の
試験・開発

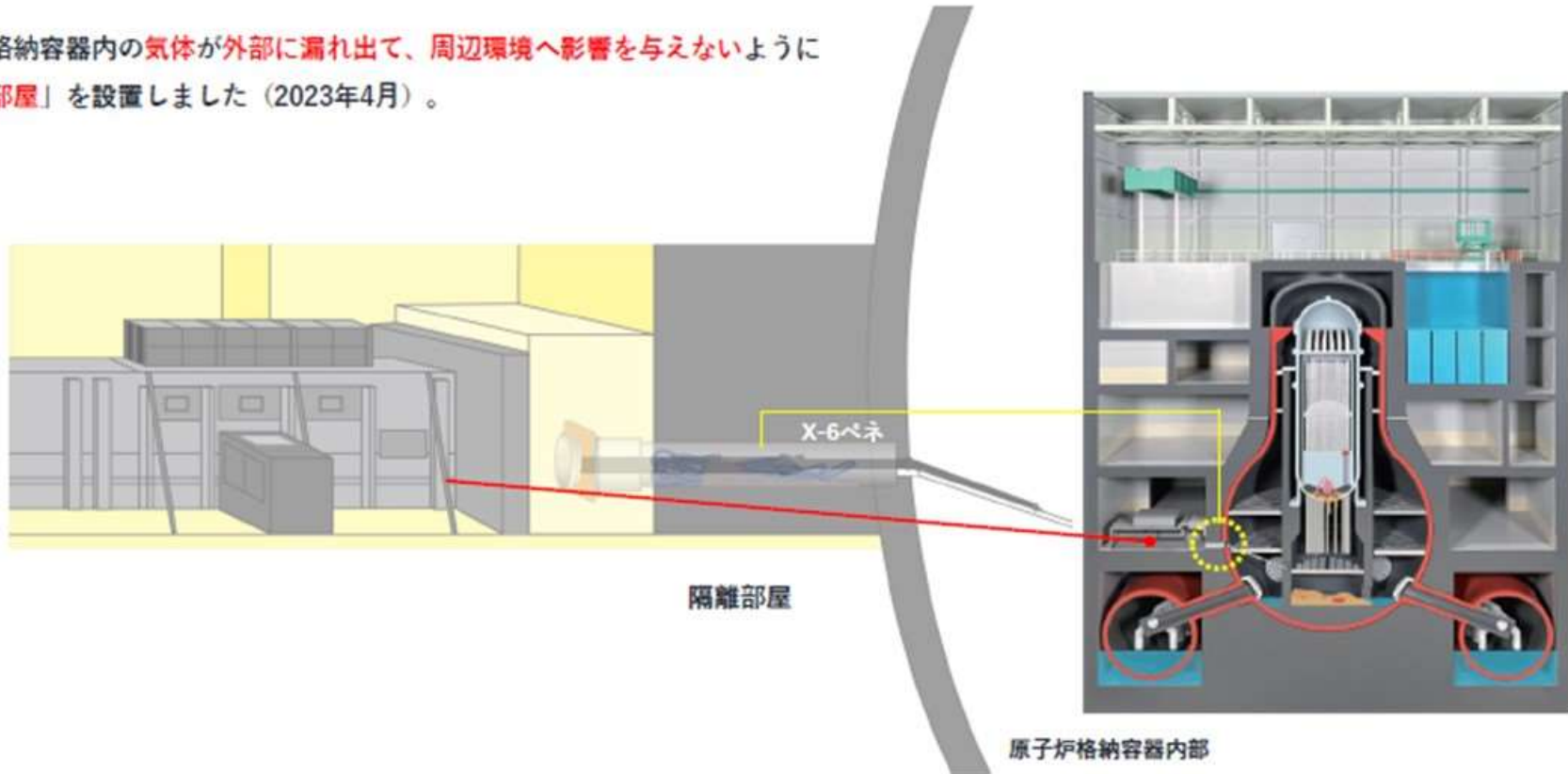
^{*}X-6ペネ：原子炉格納容器に通じる作業用の貫通孔（ペネトレーション）



TEPCO 43

ステップ① 隔離部屋の設置

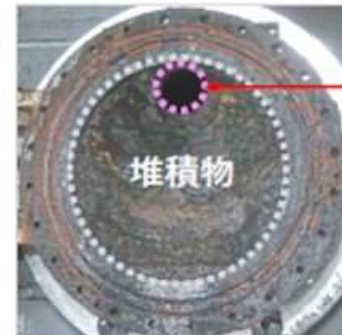
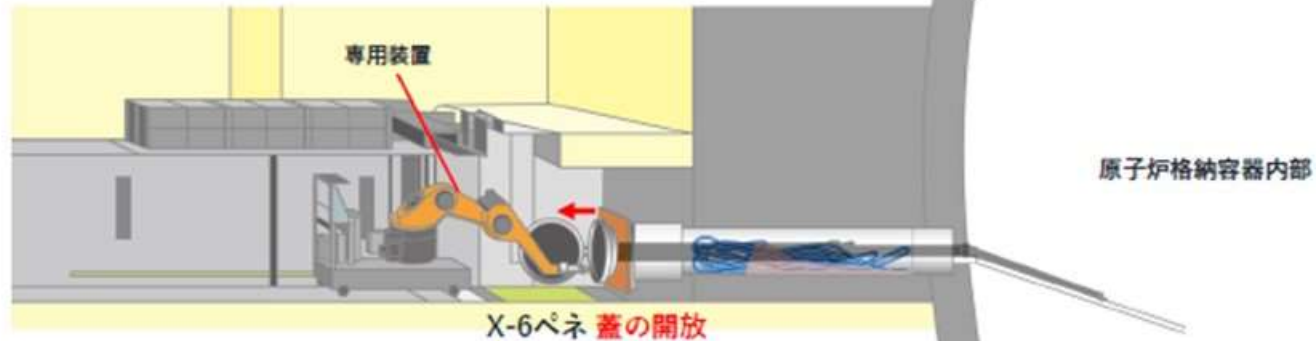
原子炉格納容器内の**気体**が外部に漏れ出て、**周辺環境へ影響を与えないように**
「**隔離部屋**」を設置しました（2023年4月）。



ステップ② X-6ペネの蓋の開放

2023年10月、隔離部屋に専用装置を投入し「X-6ペネの蓋の開放」を行いました。
それにより、蓋の入口付近が堆積物で覆われていることを確認しました。

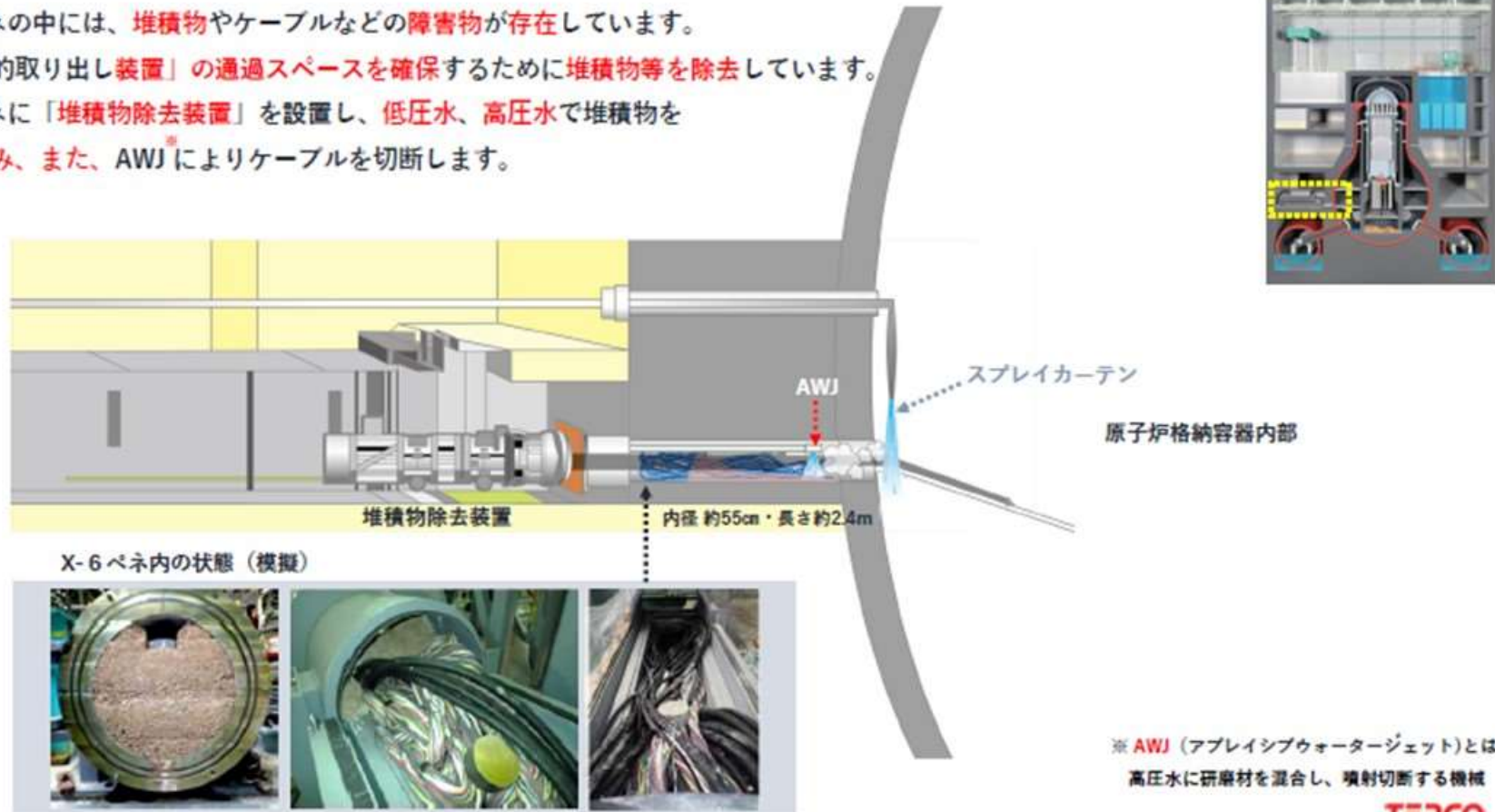
(作業にあたっては、隔離部屋周辺に設置している作業管理用ダストモニタ指示値を確認し
ダストの上昇など、異常がないことを確認しました。)



2017年の調査時に
調査装置を挿入した穴

ステップ③ X-6ペネ内の堆積物の除去

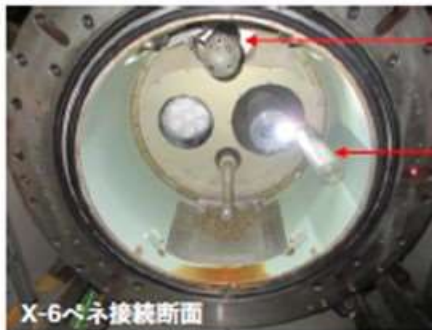
X-6ペネの中には、**堆積物**やケーブルなどの**障害物**が存在しています。
「**試験的取り出し装置**」の**通過スペース**を確保するために**堆積物等を除去**しています。
X-6ペネに「**堆積物除去装置**」を設置し、**低圧水**、**高圧水**で堆積物を**押し込み**、また、**AWJ**によりケーブルを切断します。



ステップ③ X-6ペネ 堆積物の除去

まずは、堆積物除去装置（低圧水）のドーザツール（棒状の装置）で堆積物の突き崩しを行い、低圧水の噴射による堆積物除去作業を実施しました。事前のモックアップと比較し、堆積物の除去に時間を要していますが、徐々に堆積物が除去できており、ケーブル類を確認しました。また、今後は計画通り、堆積物除去装置（高圧水・AWJ）によるケーブル等の除去を実施する予定です。

■堆積物除去装置（低圧水）

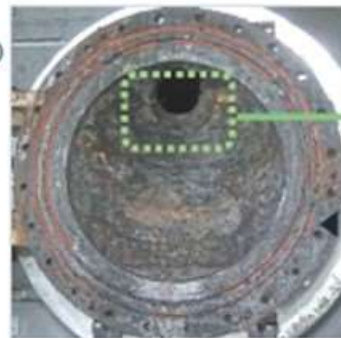


挿入ノズル（低圧水）

ドーザツール
（棒状の装置）

X-6ペネ接続断面

▼X-6ペネの蓋 開放時の写真



▼堆積物除去の状況

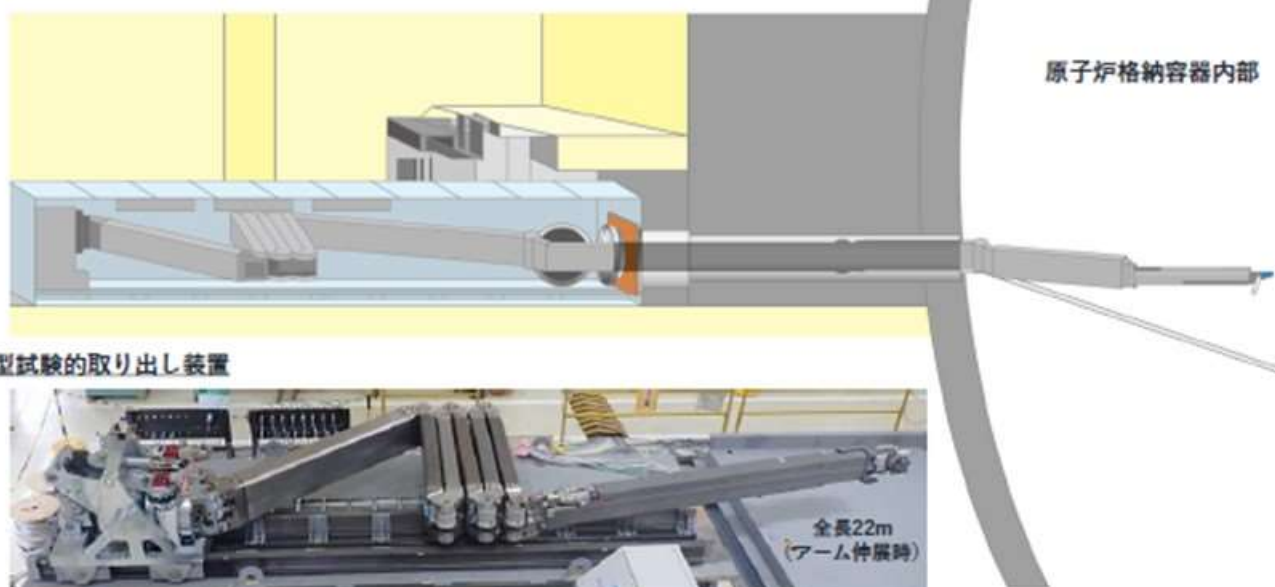


ステップ④ 内部調査・試験的取り出し [アーム型試験的取り出し装置]

X-6ペネ等の狭い部分を通過させるため、**精緻な運転制御性を有し、伸縮が可能な「折りたたみ式」**の構造を採用しています。

AWJで、装置を進入させる際の**干渉物を除去し、アクセスルート**を構築します。

装置の先端に**各種センサを搭載し、内部調査**を行います。また、「**金ブラシ**」または「**真空吸引容器**」を取り付け、**燃料デブリ**を採取します。



■アーム型試験的取り出し装置



ステップ④ 内部調査・試験的取り出し [テレスコ式試験的取り出し装置]

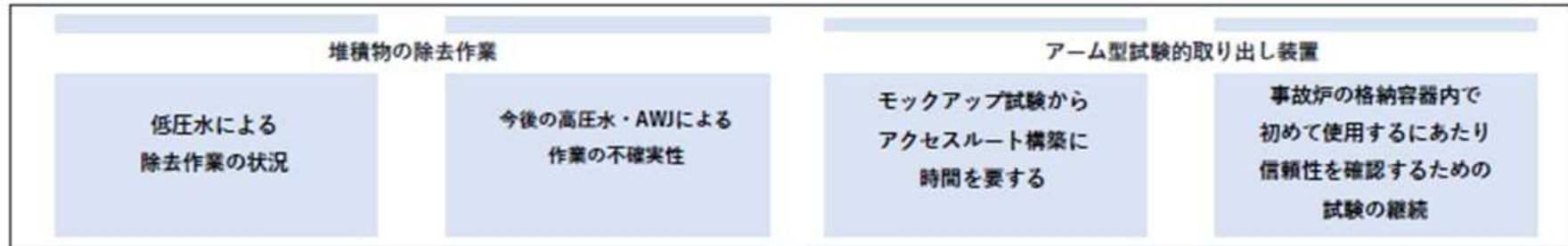
ロボットアームに加えて、これまでの調査等で用いた実績があり、ペDESTAL底部までアクセス性が確認できており構造・制御性が比較的簡素化できる「**テレスコピック式試験的取り出し装置**」(以下、**テレスコ式試験的取り出し装置**)についても並行して設計・製作を進めています。



- 過去の内部調査で使用実績があり、堆積物が完全に除去しきれていなくても投入が可能です。
- 「テレスコ式試験的取り出し装置」で原子炉格納容器内の堆積物除去後の状態を確認することで、「アーム型試験的取り出し装置」によるアクセスルート構築などの作業の確実性が向上できると考えています。

ステップ④ 内部調査・試験的取り出しの進め方について

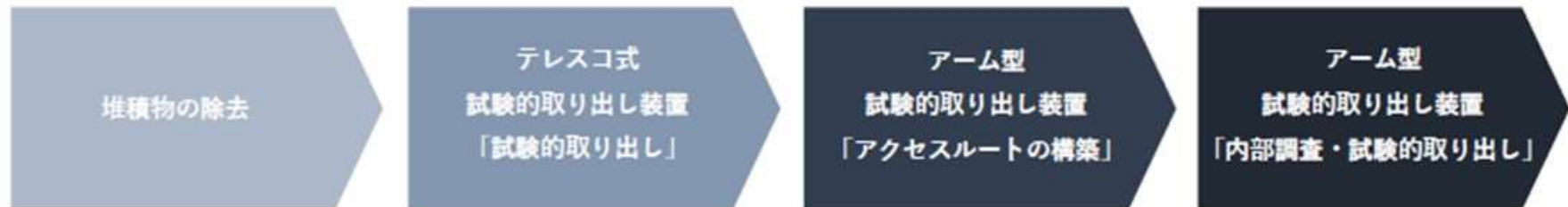
堆積物除去の状況などもふまえ、以下の進め方で内部調査・試験的取り出しを行います。



●燃料デブリの**性状把握のための燃料デブリの採取を早期に確実に行う必要があるため、はじめに「テレスコ式（伸縮式）試験的取り出し装置」**を使用することとし、**その後「アーム型試験的取り出し装置」**による内部調査および燃料デブリの採取を**継続する方針**です。

●試験的取り出しの**着手時期は、遅くとも2024年10月頃**を見込んでいます。

今後も堆積物除去作業、試験的取り出し作業について、**安全確保を最優先**に着実に進めていきます。



「試験的に取り出した燃料デブリ」について

「試験的に取り出した燃料デブリ（最大数 g 程度）」は、輸送容器に入れ、茨城県内の既存分析施設へ輸送し、性状の分析等を行います。



※グローブボックス：放射性物質を閉じ込めるステンレス及び樹脂製の密閉容器