

1 F廃炉の戦略と遠隔技術の活用

2018年 8月6日

福田 俊彦

原子力損害賠償・廃炉等支援機構 (NDF)

「1F廃炉の戦略と遠隔技術の活用」

- ◆福島第一原子力発電所廃炉の戦略とこれまでの歩み
(遠隔技術を中心として)
- ◆燃料デブリのリスク低減戦略とこれまで実施した遠隔
技術を活用した調査
- ◆燃料デブリ取り出しに向けた方針と今後の進め方
- ◆燃料デブリ取り出しに向けた遠隔技術開発

福島第一原子力発電所廃炉の状況

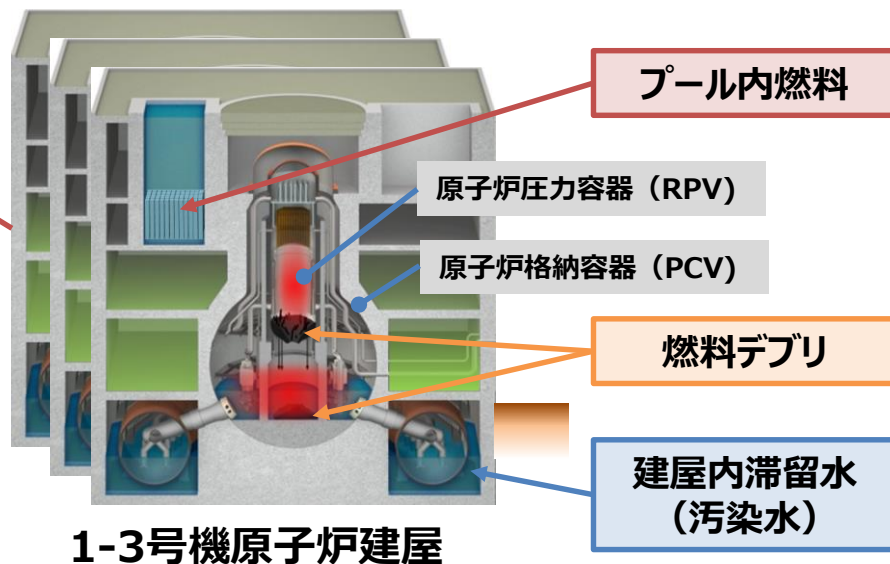
福島第一サイト



敷地面積* : 約4.4km²



「福島第一の廃炉は、堅牢な城攻め?!」

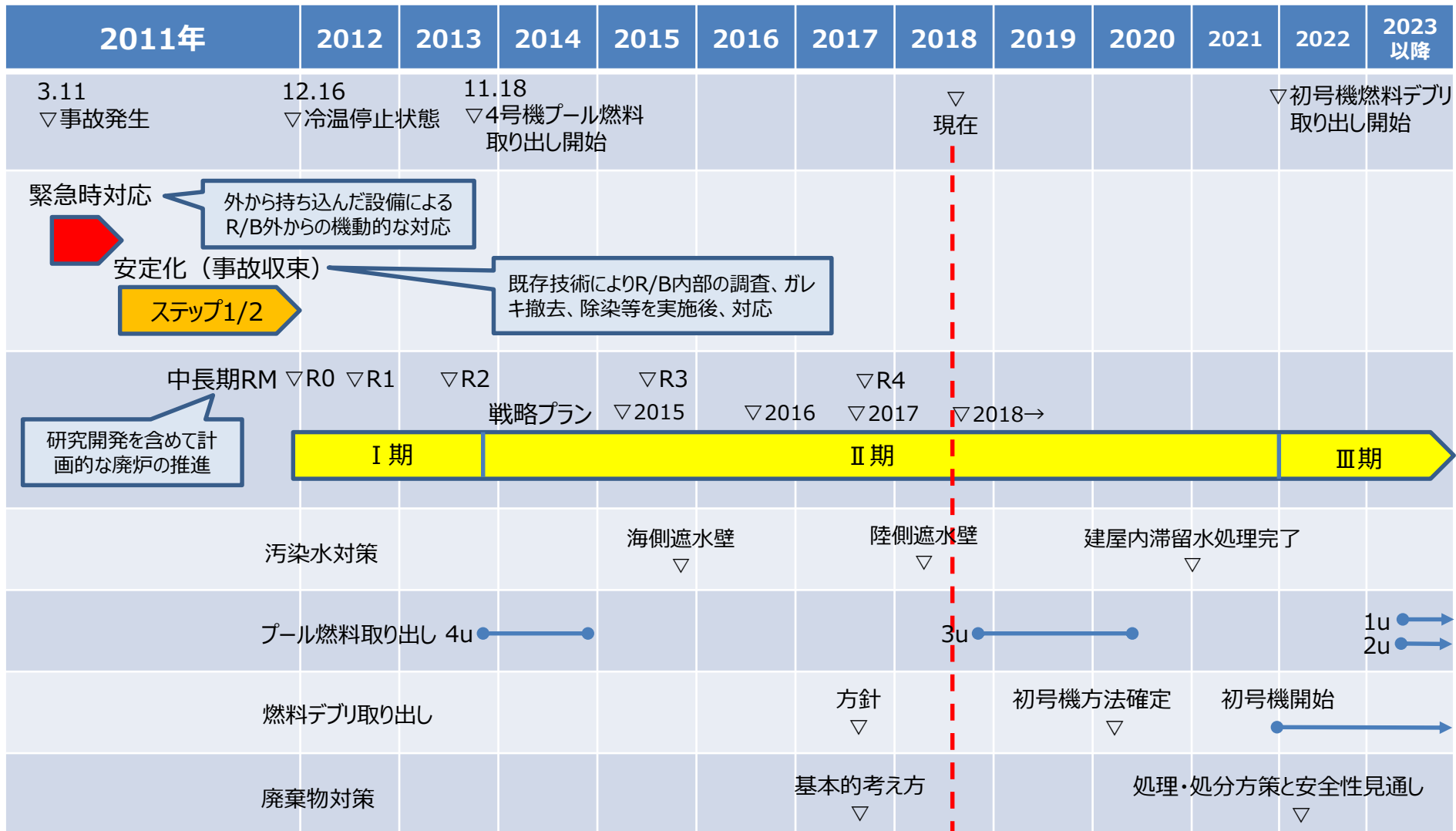


1-3号機原子炉建屋

*参考：英国セラフィールド約6km², 米国ハンフォードサイト約1500km²



福島事故対応・廃炉戦略の変遷



福島事故対応・廃炉の特徴と遠隔技術の必要性

福島事故対応・廃炉の特徴

- ① 既設機器・設備がほとんど使えない
- ② 広範囲の汚染・高放射線環境
- ③ 建屋・構造物の大きな損傷と建屋内外にガレキ散乱
- ④ 燃料デブリがPCV内に分散、使用済燃料は高所に存在
- ⑤ それぞれの号機で現場の状況が異なる
- ⑥ 現場の状況に不確かさが大きい



調査・作業のためのアクセス確保が最大の課題

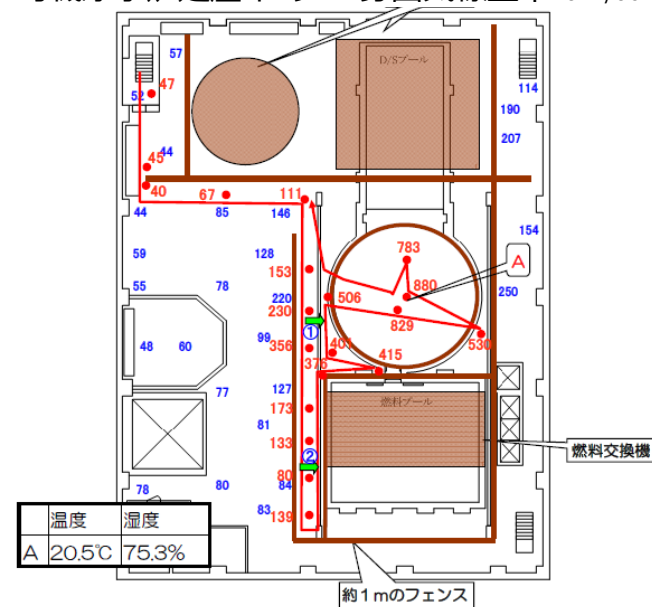


遠隔技術の有効活用が必須

3号機原子炉建屋1階 雰囲気線量率2016/08



2号機原子炉建屋オペフロ 雰囲気線量率2012/06



緊急時対応・安定化等における遠隔技術の活用例



消防車による注水



遠隔操作重機



調査用ロボット



ガレキ撤去用ロボット



走行ヘッド
(ジェットヘッド)



除染用ロボット



コンクリートポンプ車による使用済燃料への放水



年	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
調査用 (40基)	建屋内部他 ■	■	■	■ ■ ■	■ ■	■	PCV内部 ■	■
除染用 (20基)	■			3号機プール燃料/各号機原子炉建屋内 ■				
ガレキ 撤去用 (24基)	建屋周辺 ■	3号機プール燃料 ■					1号機プール燃料 ■	

プール燃料取り出し準備における遠隔技術の活用例

■がれき撤去主要解体ツール



油圧フォーク
鋼材の把持、吊り降ろし
作業に使用



油圧グラブバケット
スラブ上のがれきすくい
上げ作業に使用

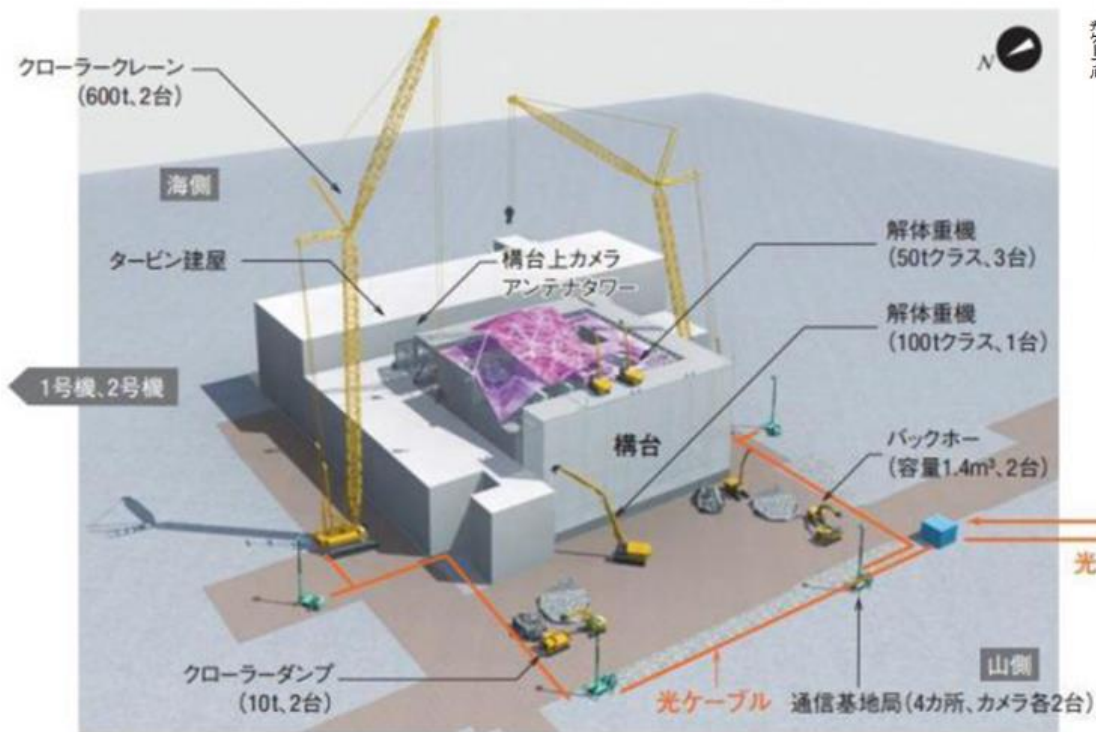


油圧カッター
屋根トラス、天クレの
切断に使用



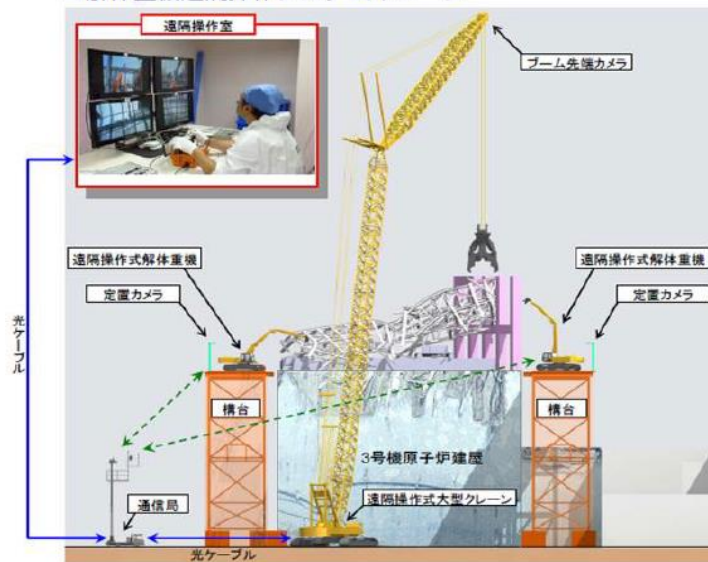
油圧ベンチ
散在がれきの撤去作業に
使用

■重機10台の遠隔操作によるがれき撤去と付属建屋解体のイメージ



(資料・写真:鹿島)

■解体重機遠隔操作システムイメージ



現場から500m離れた遠隔操作室。写真はクローラークレーンを操作する様子

燃料デブリのリスク低減戦略

燃料デブリの現状

- 一定の安定状態
 - 冷却維持
 - 未臨界維持
 - 放出量の大幅抑制



- リスクのある状態
 - 不確かさ
 - 不安定さ
 - 十分な管理ができない
- 中長期的には経年劣化によりリスクが上昇する恐れ

燃料デブリのリスク低減戦略

燃料デブリの速やかで安全な取り出し



燃料デブリの安全・安定保管

状況の調査・把握

取り出し時の安全確保

取り出し装置・工法

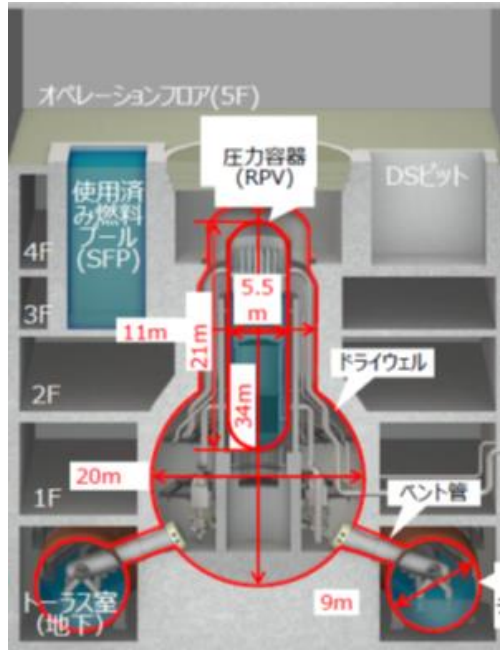
①PCV損傷箇所把握（トラス室、原子炉建屋内調査）

PCV補修工法開発

②原子炉内状況把握（燃料デブリ分布、PCV内部状況）
SA解析コード、ミュオン測定、PCV内部調査

燃料デブリ取り出し工法開発
PCV内水位：冠水or気中
アクセス方向：上or横

① PCV損傷箇所把握（トラス室調査）：遠隔技術の活用例



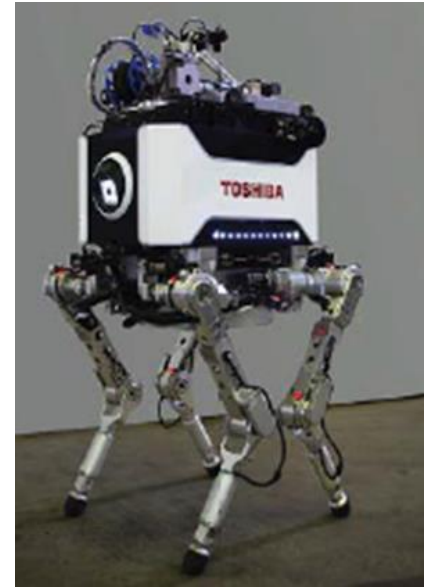
トラス室



1号用S/C上部調査装置



トラス室内調査装置



ベント管下部周辺調査
4足歩行ロボット



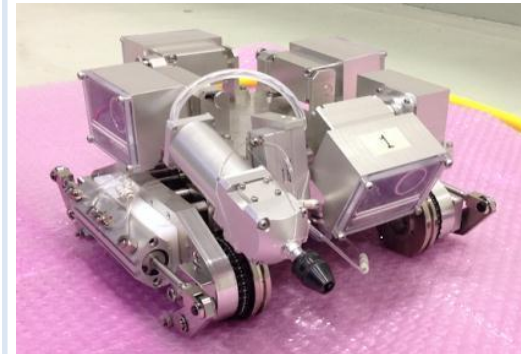
S/C内周側調査 水上ポート



トラス室壁面調査装置



トラス室壁面調査装置

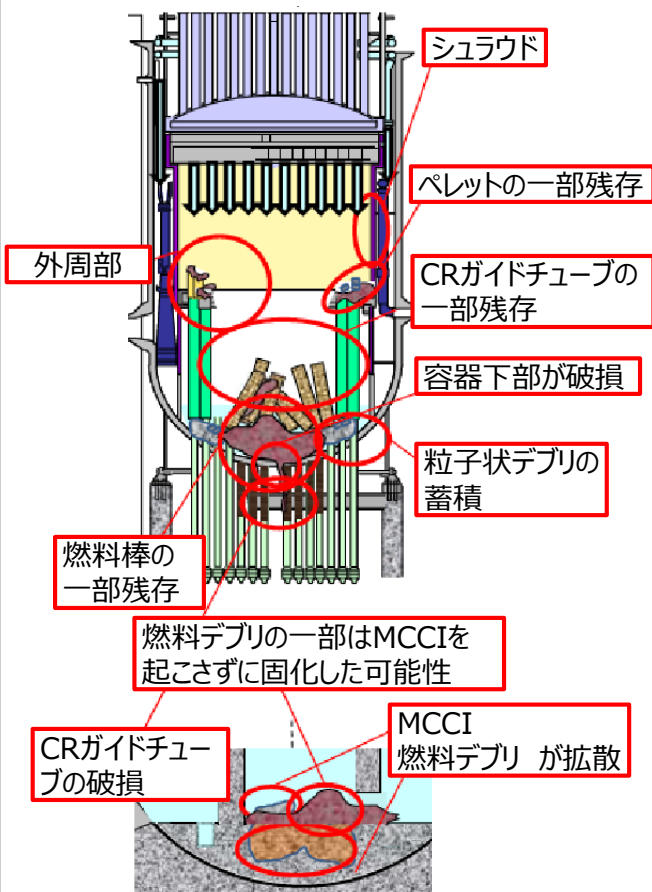


S/C下部外面調査装置

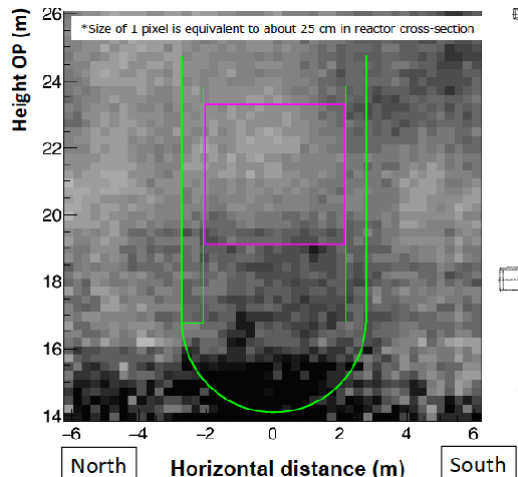
② 原子炉内状況の把握

シビア・アクシデント 解析コード

MAAPやSAMPSONから推測される状況

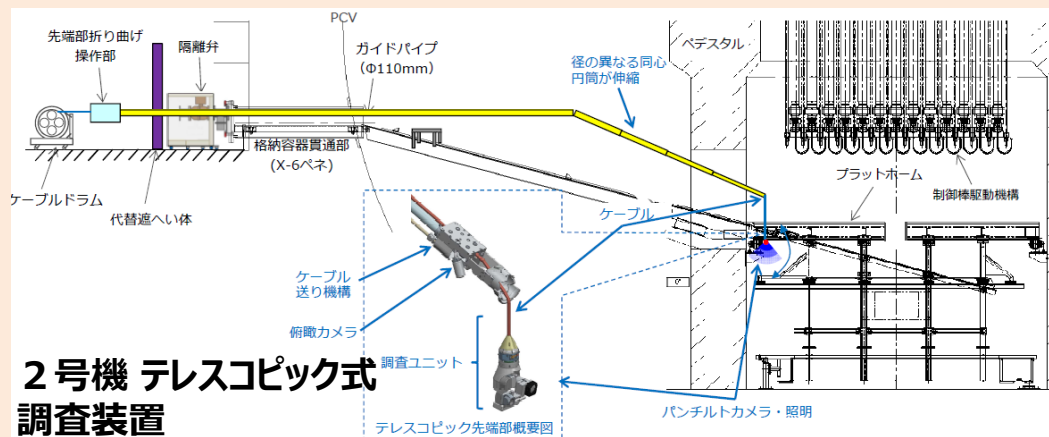


ミュオン測定



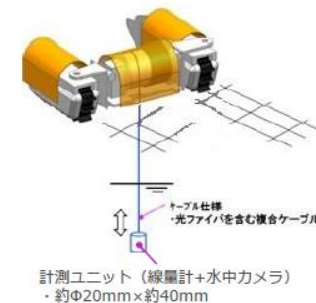
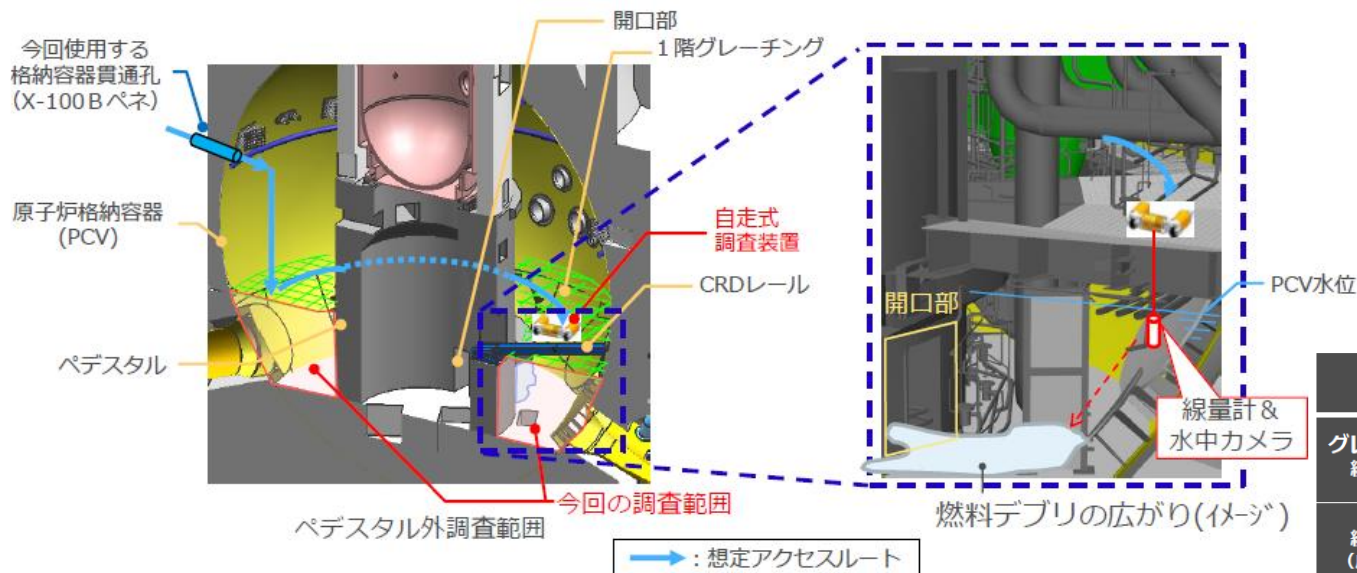
<http://photo.tepco.co.jp/en/index-e.htr.j>

遠隔調査



1号機 PCV内部調査 (2017年3月の調査結果)

燃料デブリが拡散した可能性のあるペDESTAL外の状況を確認



測定点	D0	BG	D2
グレーチング上線量[Sv/h]	7.8	3.8	12
最下点線量[Sv/h] (床面からの高さ)	1.5 (約1m)	11 (約0.3m)	6.3 (約1m)

■ 撮影した代表的な画像は以下の通り



3/20 D2最下点撮影



3/18 D0最下点撮影



3/19 BG最下点撮影

- ペDESTAL開口部近傍のPCV底部の状況を初めて撮影
- PCV底部、配管等に堆積物を確認
- 水中に入ると線量は低くなるが、床面に近づくと線量が上昇
- 既設構造物について大きな損傷は確認されなかった
- ✓ 今後、得られた画像データと線量データを元にPCV床面の状況を検討する

2号機 PCV内部調査 (2018年 1月の調査結果)

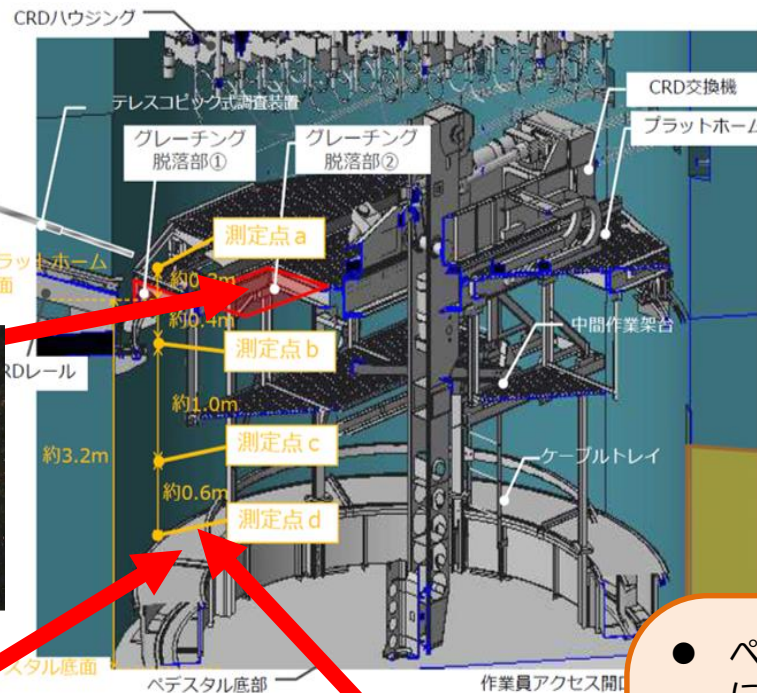
燃料デブリが存在する可能性のあるプラットフォーム下の状況を確認



PCV外部
X6ペネ前作業エリア



堆積物の
付着
PAN -061 TILT 000
グレーチング脱落部②



測定点	線量率※1,2 [Gy/h]	温度※2 [°C]
a	7	21.0
b	8	21.0
c	8	21.0
d	8	21.0

【参考：ペDESTAL外※3】
線量率：最大42[Gy/h]
温度：最大21.1[°C]

※1：Cs-137線源で校正
※2：誤差：線量計±7%
温度計±0.5°C
※3：調査装置内に測定器が収納された状態で測定したため参考値



堆積物
落下物
PAN -077 TILT +002
ペDESTAL底部

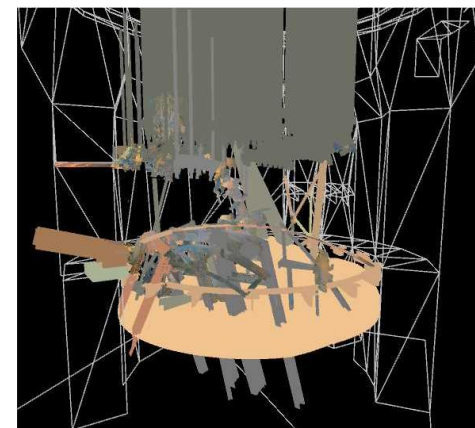
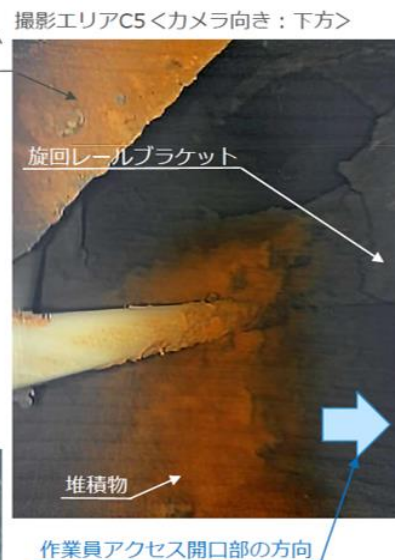
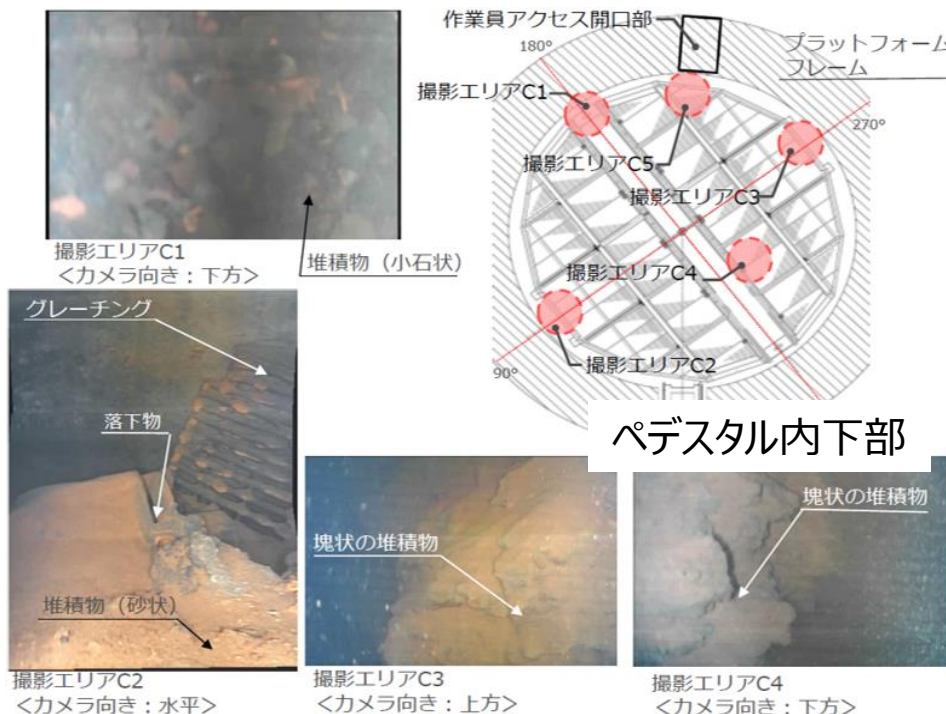


ペDESTAL内壁
燃料集合体の一部
小石状の堆積物
PAN -087 TILT +071
ペDESTAL底部

- ペDESTAL底部の全体に、小石状・粘土状に見える堆積物を確認
- ペDESTAL底部に燃料集合体の一部が落下しており、その周辺の堆積物は燃料デブリと思われる
- 線量率はペDESTAL外部よりペDESTAL内
が低い傾向
- ✓ 今後、取得した画像や線量等のデータについて解析を進める

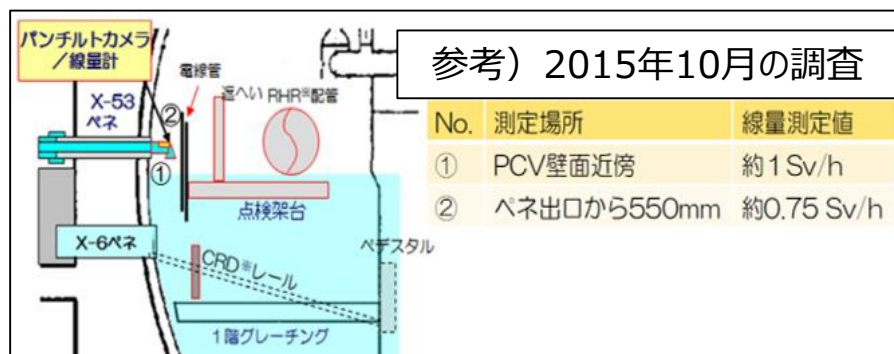
3号機 PCV内部調査 (2017年7月の調査結果)

水中遊泳式 遠隔調査装置 (水中ROV) によるペDESTAL内部の調査

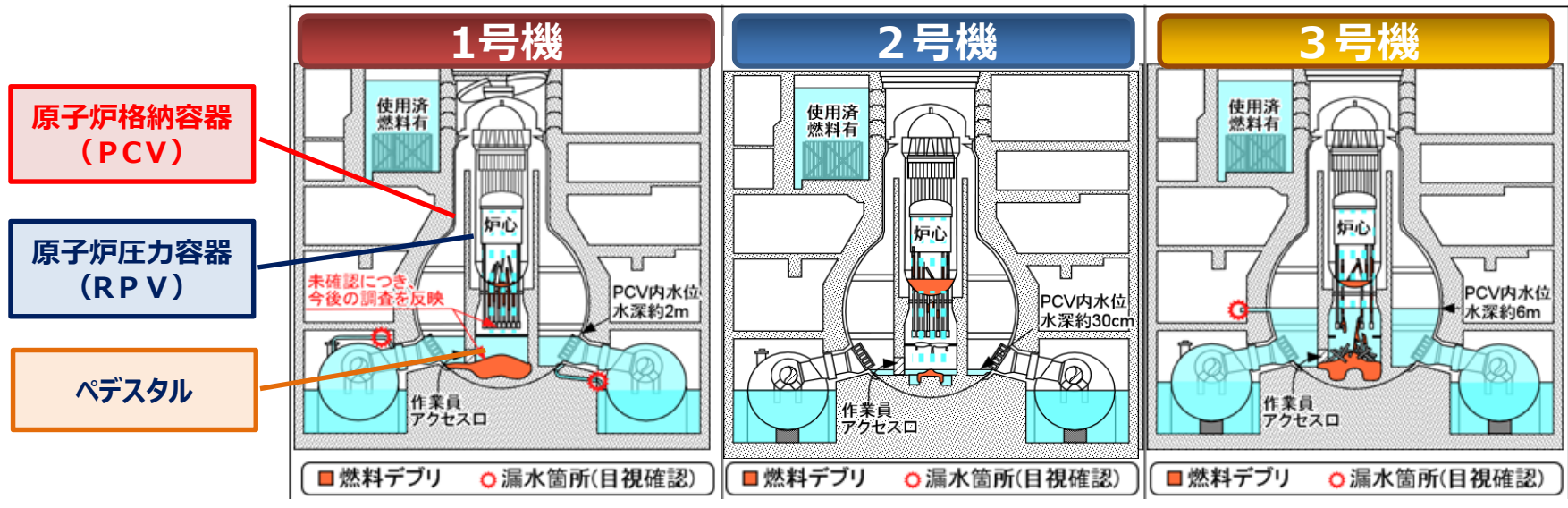


映像からのペDESTAL状況の3次元復元

- ペDESTAL内下部に、砂状、小石状や塊状の堆積物を確認
- 作業員アクセス開口部は視認できなかったが、近傍に堆積物を確認
- ✓ 今後、得られた情報を基に、干渉物となる構造物の状態・位置や「燃料デブリの性状・位置」から、取り出し装置および先端治具の設計や取り出し手順等を検討していく



号機ごとの燃料デブリの状況（推定）

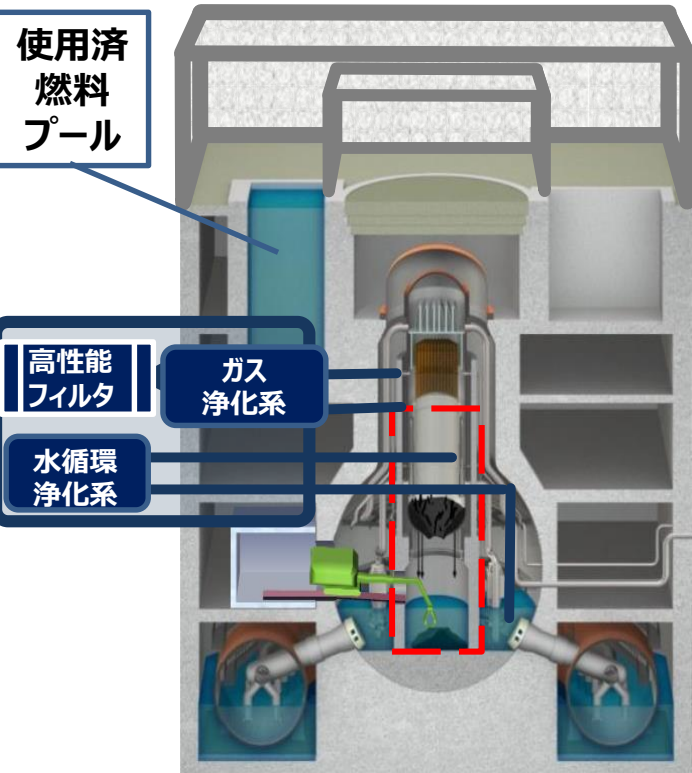


<p>燃料デブリの状況 (分布推定)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ●原子炉圧力容器 (RPV) 底部に少量存在 ●大部分は原子炉格納容器 (PCV) 底部に存在 	<ul style="list-style-type: none"> ●原子炉圧力容器 (RPV) 底部に多くが存在 ●ペDESTAL (原子炉本体を支える基礎) 底部に少量が存在 	<ul style="list-style-type: none"> ●原子炉圧力容器 (RPV) 底部に一部残っている ●2号機に比べ多くが原子炉格納容器 (PCV) 底部に存在
----------------------------	--	--	--

燃料デブリ取り出し方針

【燃料デブリ取り出しには、安全性を最優先に周到な準備が必要】

- 1 : 放射性物質の漏洩防止
- 2 : 作業員被ばくの低減
- 3 : 燃料デブリを安全に回収



技術要件

地震時における格納容器 (PCV) や建屋の健全性維持

労働安全の確保

作業員被ばく低減 (除染・遮へい)

放射性物質の閉じ込め機能の確保

燃料デブリ取り出し装置の開発

再臨界の防止

格納容器 (PCV) 内及び建屋内水位管理

取り出し方針

- ① ステップ・バイ・ステップのアプローチ
- ② 廃炉作業全体の最適化
- ③ 複数の工法の組み合わせ
- ④ 気中工法に重点を置いた取組
- ⑤ PCV底部に横からアクセスして取り出すことを先行

【燃料デブリ取り出し方針決定後の取組】

予備エンジニアリング

研究開発の絞り込み・重点化



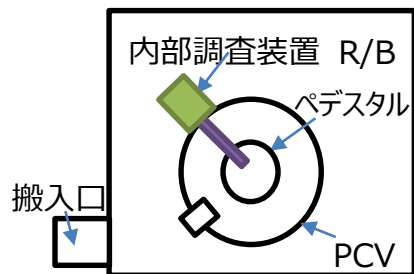
技術開発から具体化に向けたエンジニアリングのフェーズへ

燃料デブリ取り出しステップ・バイ・ステップのイメージ

ステップ・バイ・ステップのアプローチ

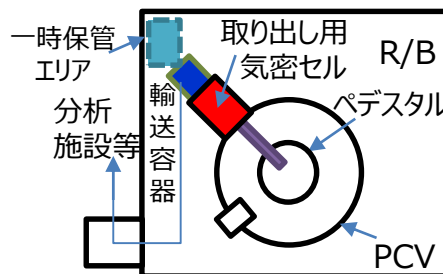
- 原子炉格納容器（PCV）底部へ横アクセスで取り出しを先行
- 新たな知見を踏まえた柔軟な計画の下、段階的に規模を拡大

段階的プロセスのイメージ



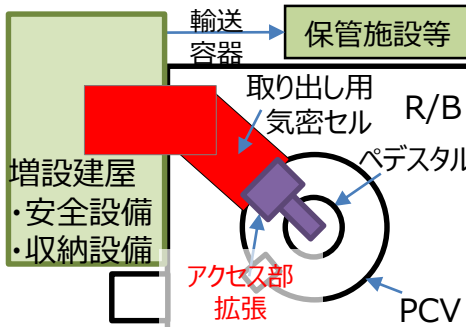
① 詳細内部調査

- ✓ 既存PCV開口を利用し、燃料デブリ取り出しに資する情報、知見を入手、反映（内部状態、燃料デブリ分布等の調査）
- ✓ 堆積物等の性状把握のため採取、分析



② 小規模な取り出し

- ✓ 燃料デブリの性状分析のために必要な量の堆積物等を採取
- ✓ 大規模取り出しを行うための事前段階として、調査設備や現状の安全設備を活用し、少量の燃料デブリを継続的に取り出す
- ✓ 保管方針を定めて建屋内等の一時保管エリアへ保管



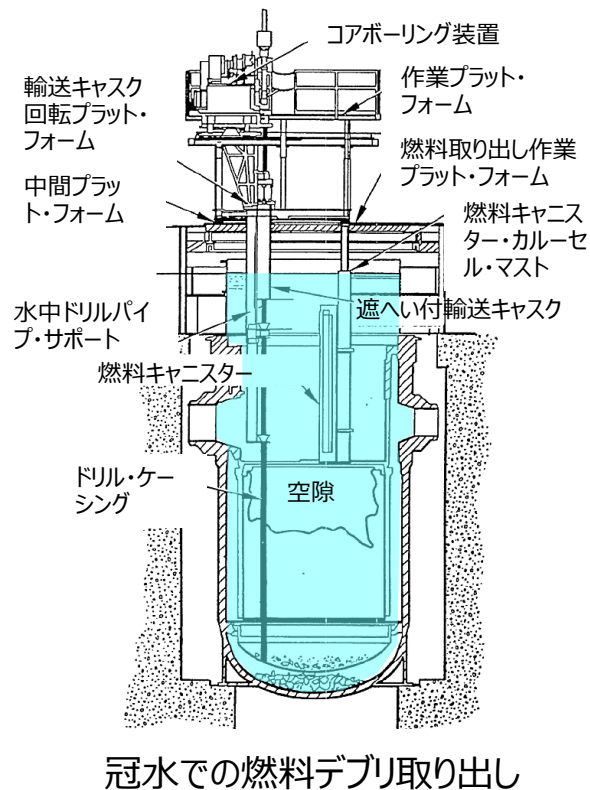
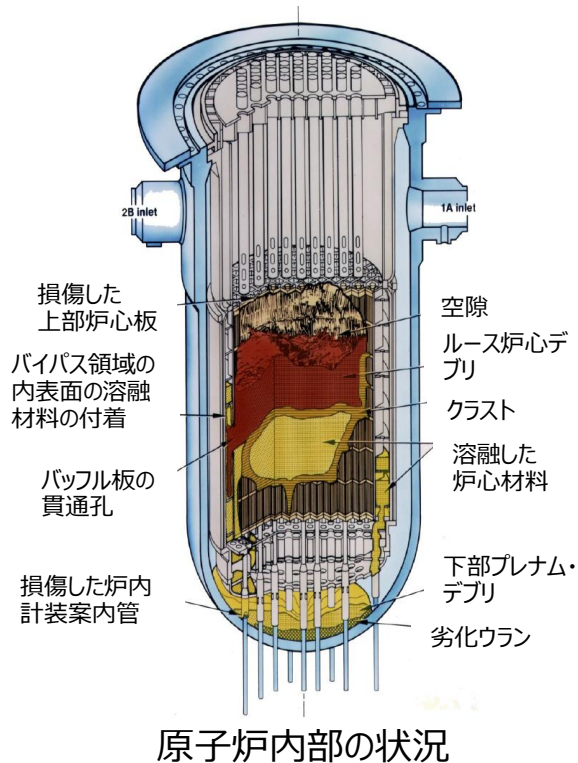
③ 大規模な取り出し

- ✓ 継続的な燃料デブリ取り出しとして、PCV開口拡大等を行い、長期的作業に必要な安全設備、保管設備（保管方針含む）を準備し、作業環境を整えた上で実施

燃料デブリ取り出し TMI-2の戦略（参考）

TMI-2の特徴

- ✓ 燃料デブリがRPV内に留まっていた ⇒ 高汚染・作業範囲が限定的
- ✓ 燃料デブリが冠水状態で作業可能 ⇒ 遮蔽、ダスト飛散防止が容易
- ✓ 原子炉上部の放射線量が比較的低 ⇒ 人が原子炉上部へアクセス可能



燃料デブリ取り出し作業の様子

出典：NUREG/KM-0001, Supplement1

燃料デブリ取り出しへの遠隔技術適用の難しさ

遠隔技術適用10の挑戦

- ① 極めて厳しい放射線環境：耐放射線性（電子部品、特に、カメラ）
- ② 厳しい作業環境（暗い、湿潤、ダスト等）：視覚の確保、耐候性
- ③ 損傷した構造物、障害物の存在（ガレキ、水、堆積物等）：障害物の回避・撤去
- ④ インフラの不在（電力、通信、計器）：有線による電源供給・情報伝達、自己位置検出
- ⑤ 長いアクセス距離と重量物の移動：長い移動距離と必要なペイロードの両立
- ⑥ 不明で多様な燃料デブリ性状（硬さ、粘さ等）：多様なツールの準備
- ⑦ 安全機能（閉じ込め、冷却、未臨界、不活性化、構造健全性）との両立：特に、 α 核種等の閉じ込めを確保しつつモノを出し入れするシステム、必要最小限の開口部
- ⑧ 離れた場所からの遠隔オペレーション：マン・マシン・インターフェイス
- ⑨ 長期間のオペレーション：高い信頼性の装置・保守性の確保
- ⑩ トラブル、想定外事象の発生可能性：レスキュー機能の確保



個々の課題解決と要素技術開発及びそれらを統合したシステム開発により克服可能

新たなステージに入った遠隔技術開発

◆ 燃料デブリ取り出しは、難度の極めて高い遠隔技術活用の新たなステージ-IV

ステージ - I

場所：屋外
 目的：ガレキ撤去、運搬
 遠隔技術：
 ・既存大型重機
 特徴：
 ・緊急性

ステージ - II

場所：原子炉建屋内
 目的：除染、調査
 遠隔技術：
 ・小型重機,ロボット
 特徴：
 ・ガレキ,狭隘
 ・電力,通信の確保

ステージ - III

場所：PCV内
 目的：調査
 遠隔技術：
 ・小型ロボット等
 特徴：
 ・小さなアクセス
 ・全く不明な状況
 ・閉じ込め確保

ステージ - IV

場所：PCV内
 目的：デブリ取り出し
 遠隔技術：
 ・大型ロボット等
 特徴：
 ・大きなアクセス
 ・デブリの搬出と閉じ込め確保両立
 ・長いリーチ,重量物
 ・複雑なシステム
 ・長期作業とメンテ

ステージ - I

ステージ - II

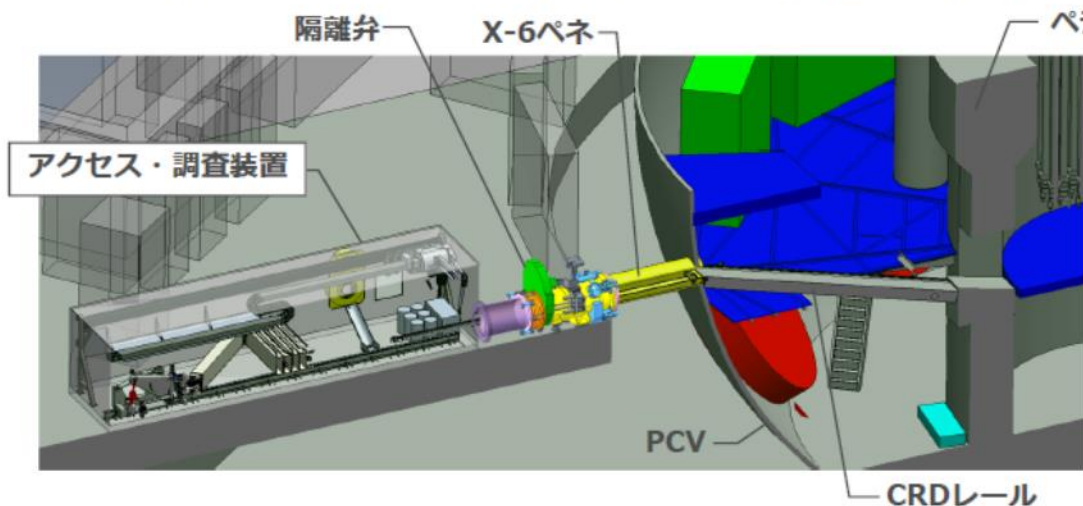
ステージ - III

ステージ - IV

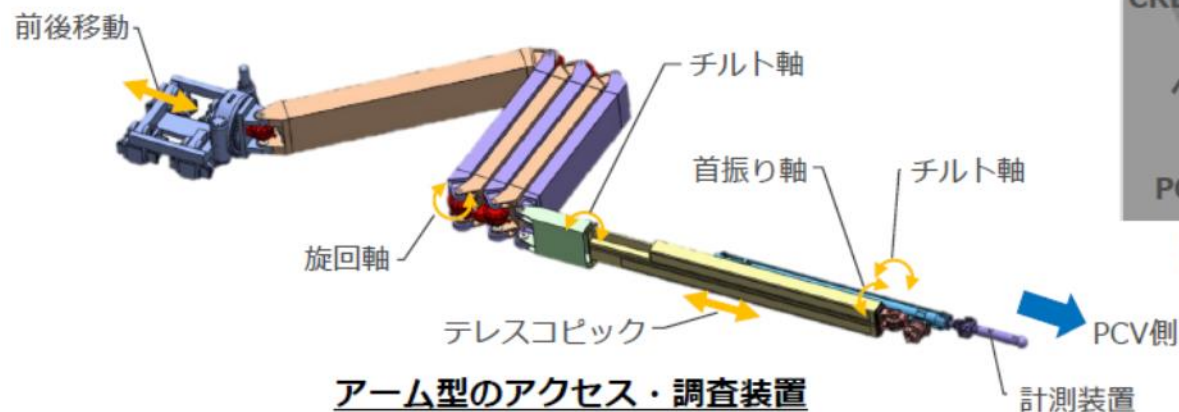
	ステージ - I	ステージ - II	ステージ - III	ステージ - IV
環境	低放射線	高放射線	極高放射線	極高放射線
規模	大型	中型	小型	大型
型式	移動型	移動型	移動型	据付型
用途	作業用	調査・作業用	調査用	作業用
使用期間	短～中期	短期	短期	長期（常設）
開発要素	無	小	中	大

燃料デブリ取り出しに係わる遠隔技術開発 (1) PCV内部詳細調査-1

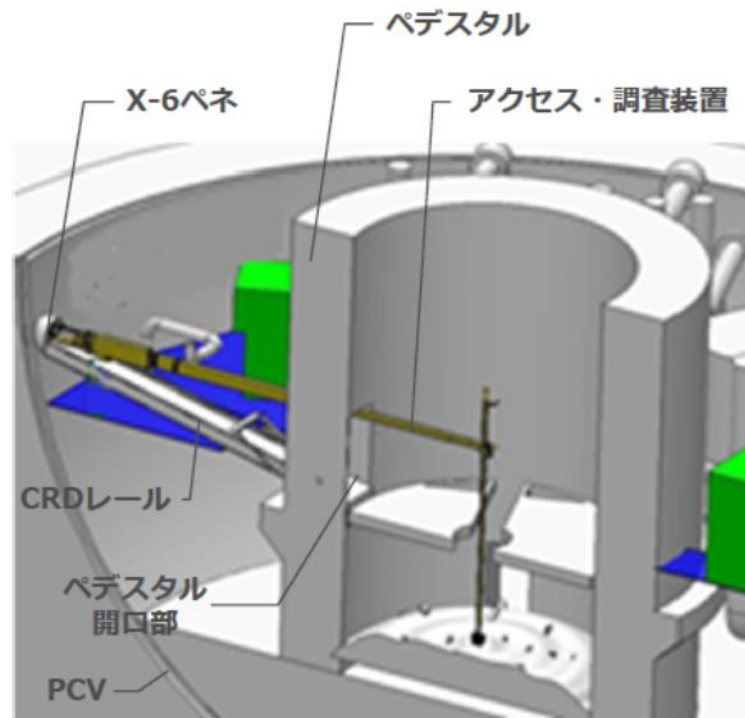
- 今後のPCV内部調査においては、再度X-6ペネから広範囲の調査が可能であるアーム型のアクセス・調査装置を用い、PCV内の構造物の詳細な分布や線量率分布等を把握することを検討



X-6ペネ前におけるアクセス・調査装置 設置案

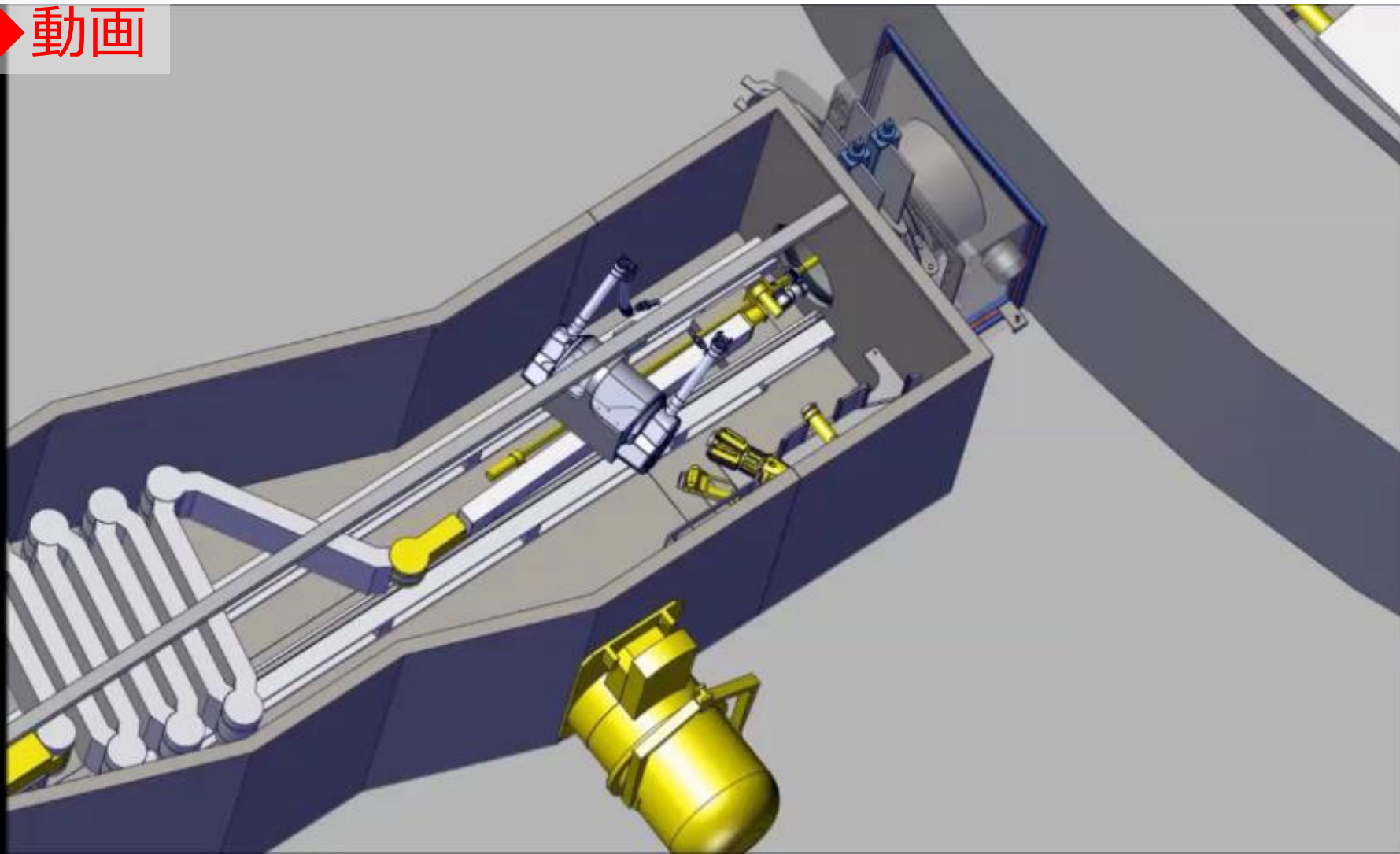


アーム型のアクセス・調査装置

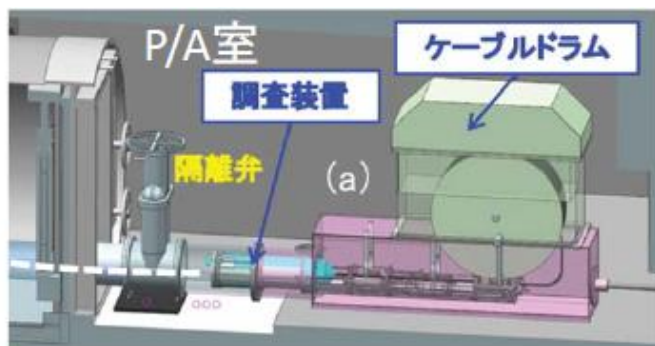
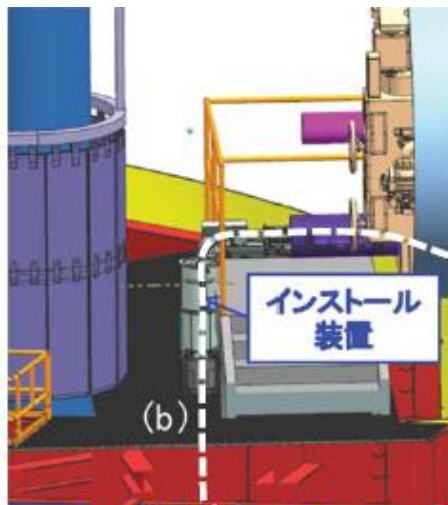


PCV内へのアクセス・調査装置の展開案

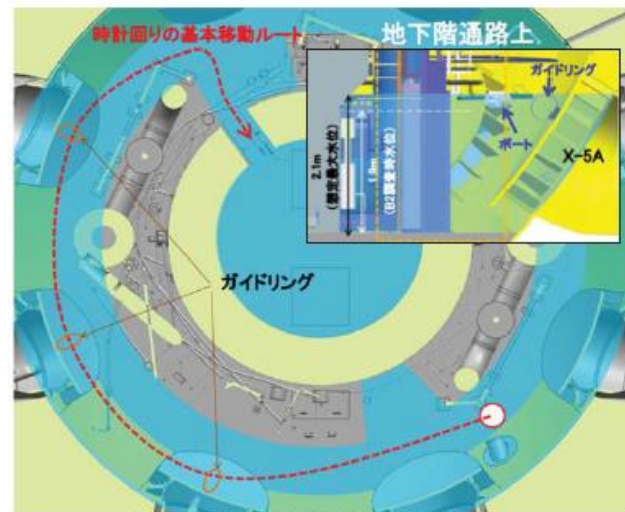
◆動画



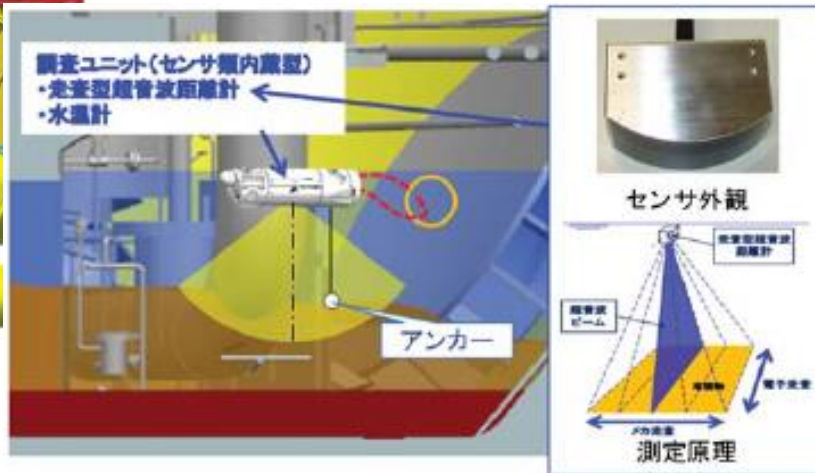
燃料デブリ取り出しに係わる遠隔技術開発 (1) PCV内部詳細調査-3



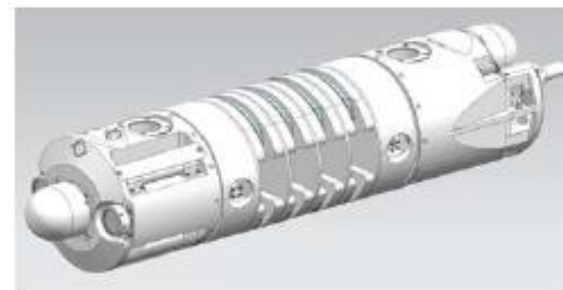
1号機アクセス・調査装置の構成



地下階広範囲移動方法



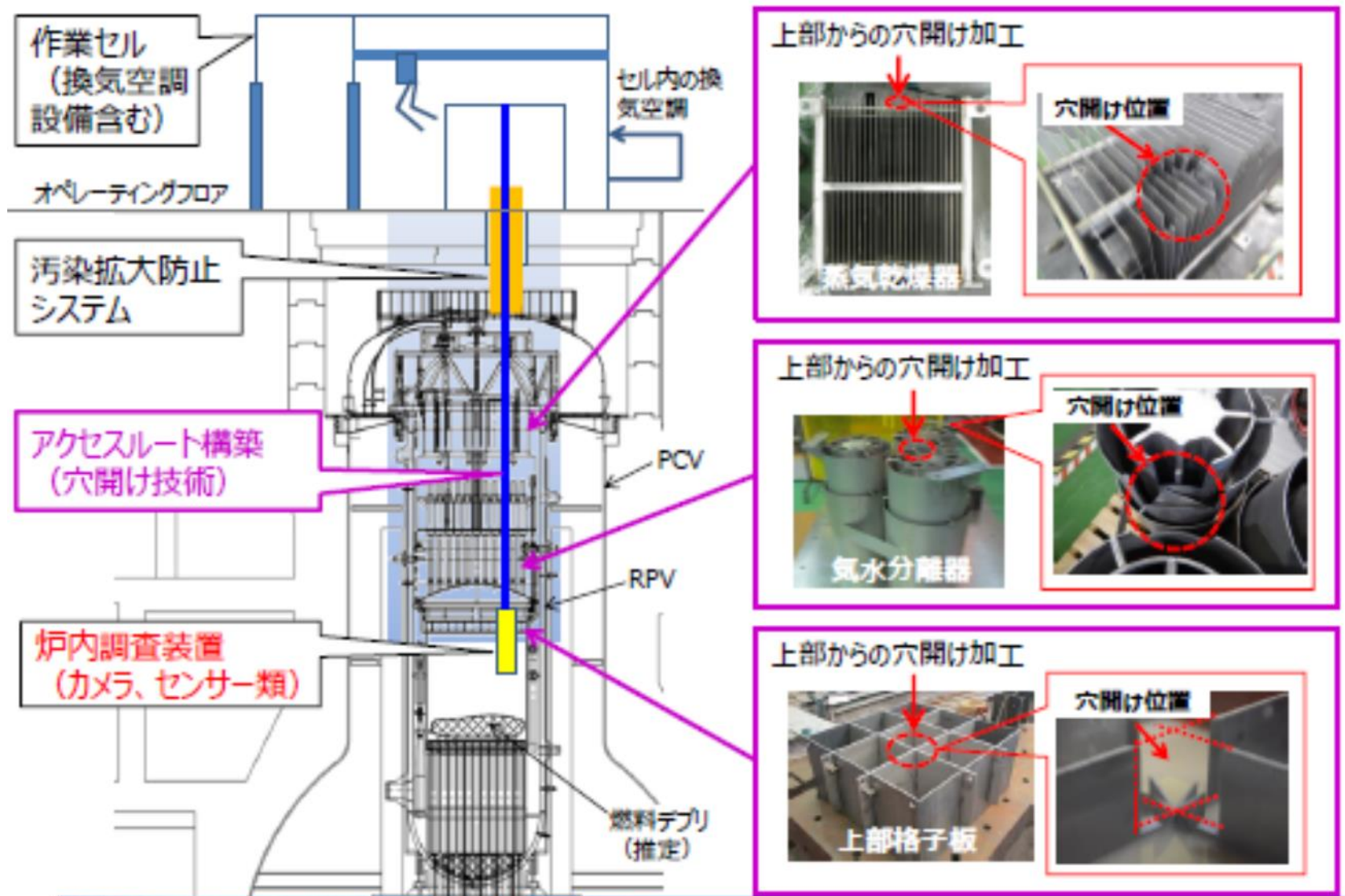
走査型超音波距離計測



- ガイドリング取付用ROV
- 直径: $\phi 25\text{cm}$
 - 長さ: 約1.1m
 - 推力: 25N以上

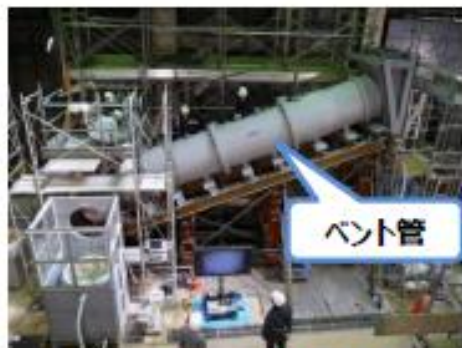
水中遊泳型装置

燃料デブリ取り出しに係わる遠隔技術開発 (2) RPV内部調査



燃料デブリ取り出しに係わる遠隔技術開発 (3) PCV下部止水技術

ベント管止水試験



ベント管

1 / 2 スケール試験体で
止水性能を確認 (工場)

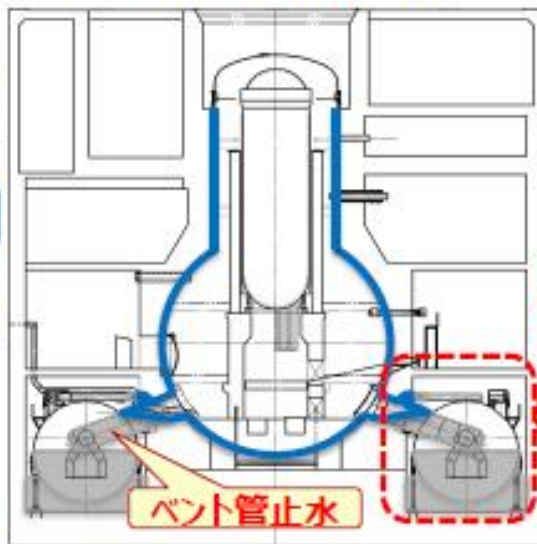
閉止補助材止水試験



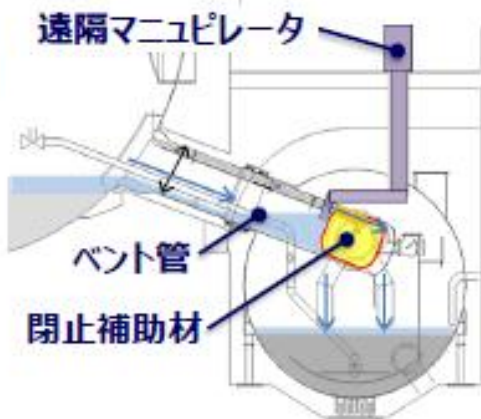
閉止補助材

1 / 1 スケール試験体で閉止補
助材の止水性能を確認 (屋外)

— : 補修・止水範囲

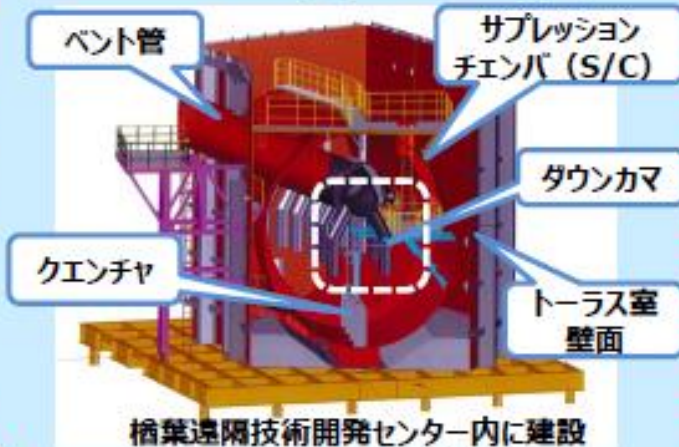


ベント管止水



実規模試験体を用いた試験

実規模試験体 (1/8セクター)



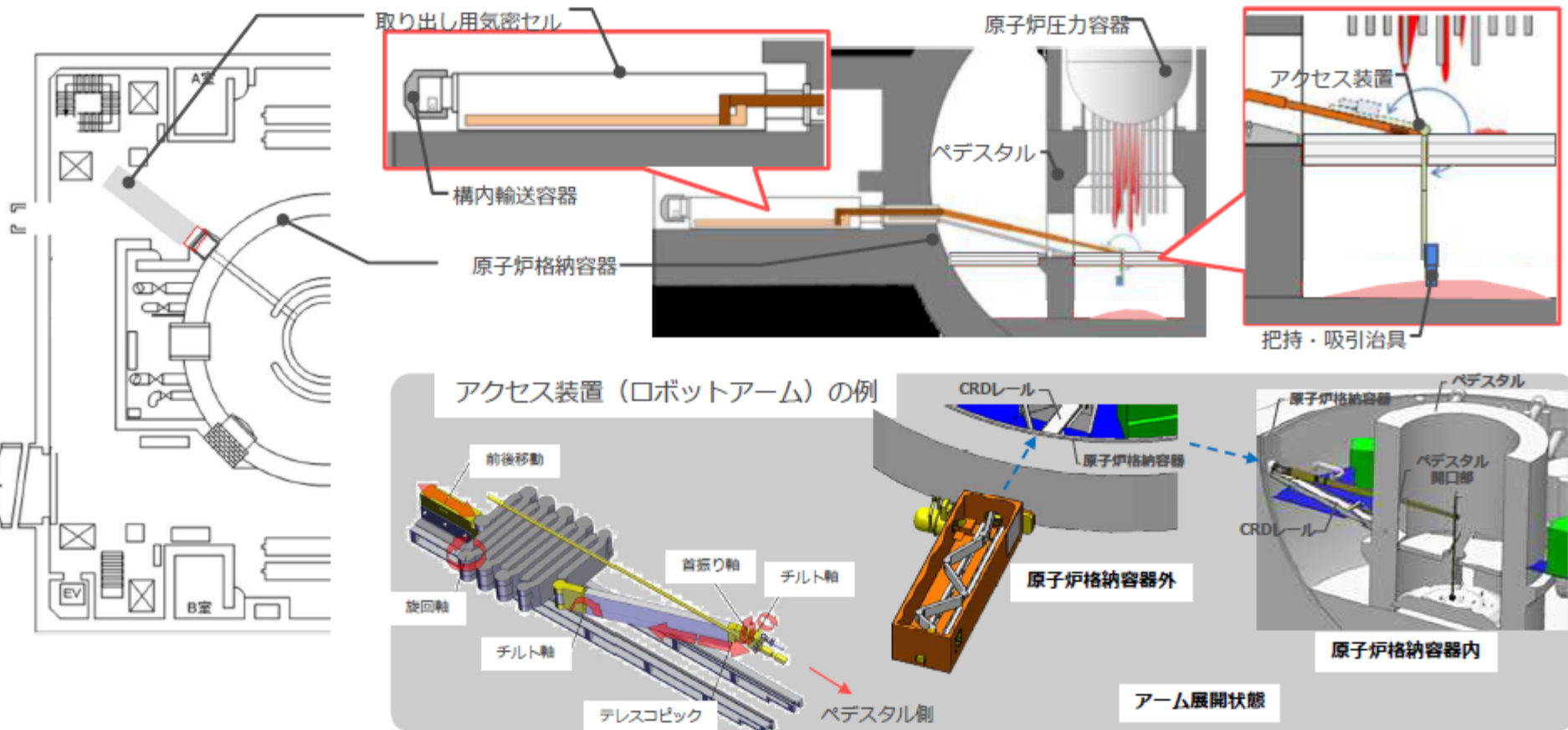
楡葉遠隔技術開発センター内に建設



遠隔マニピレータ

燃料デブリ取り出しに係わる遠隔技術開発 (4) 小規模な取り出し

- アクセス装置を原子炉建屋 1 階の格納容器貫通孔から原子炉格納容器内に挿入し、原子炉格納容器底部にある燃料デブリを横からアクセスして取り出す
- PCV・建屋に新規開口を設けない（構造に影響を与えない）規模で、ガス・水・臨界管理に与えないような、燃料デブリの把持など小規模な作業から着手を想定

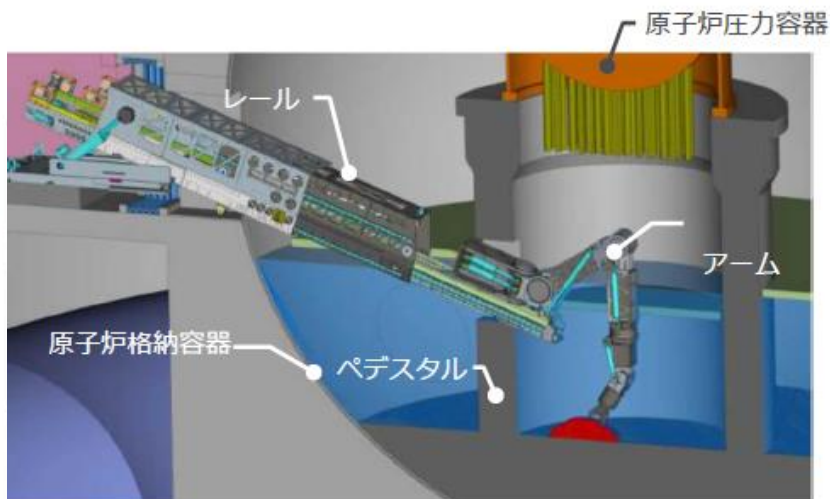


燃料デブリ取り出しに係わる遠隔技術開発 (5) 大規模な取り出し-1

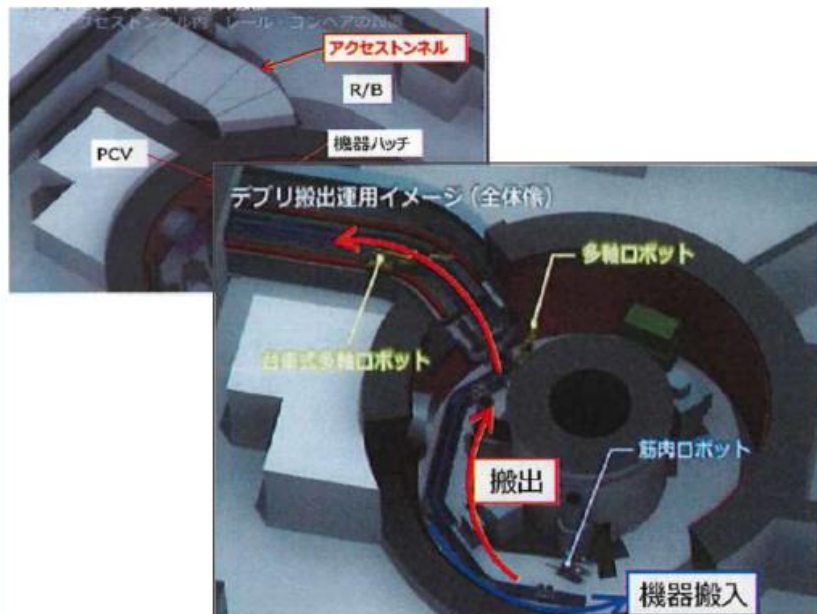
概要

- ・塊状デブリの掘削等大規模な取り出し
- ・臨界管理・閉じ込め機能（気体系統/水系統）等を強化

横アクセス工法 (例)



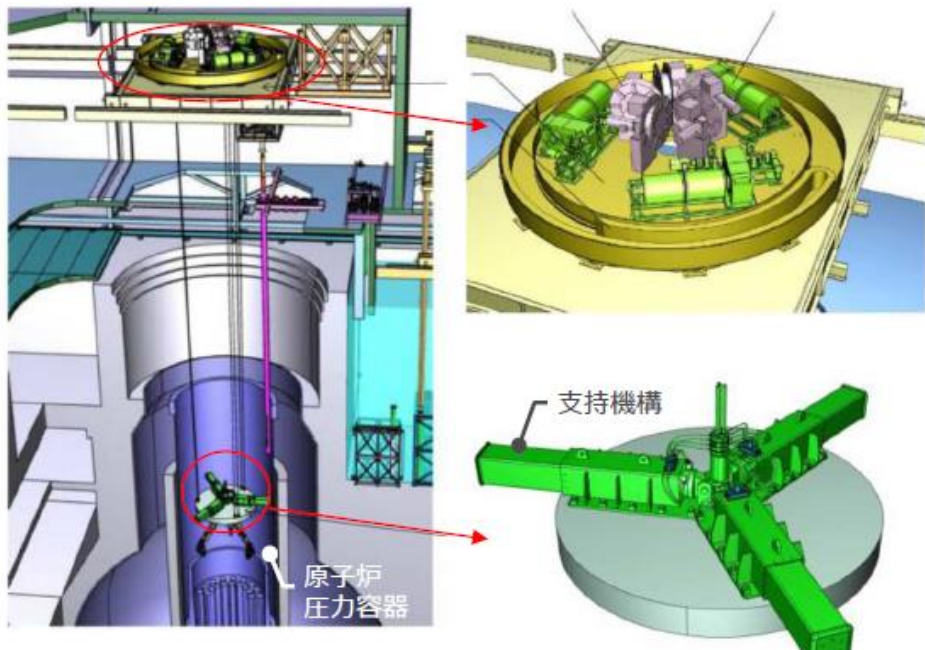
横アクセス工法 (例)



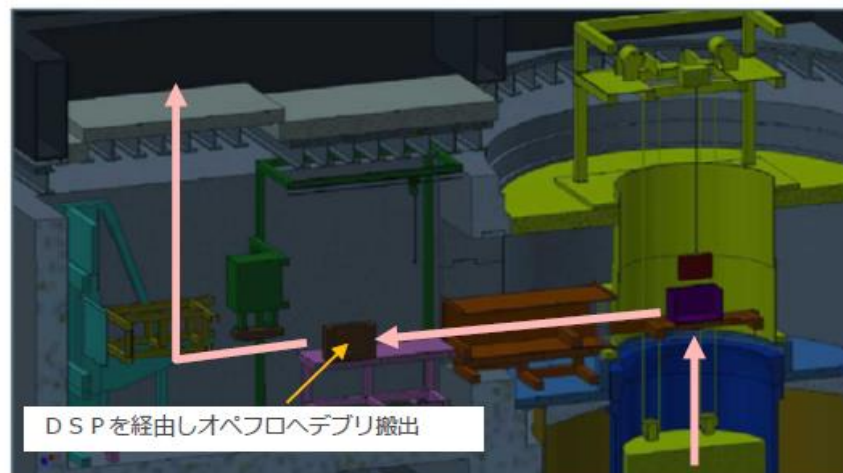
作業用ロボ

燃料デブリ取り出しに係わる遠隔技術開発 (5) 大規模な取り出し-2

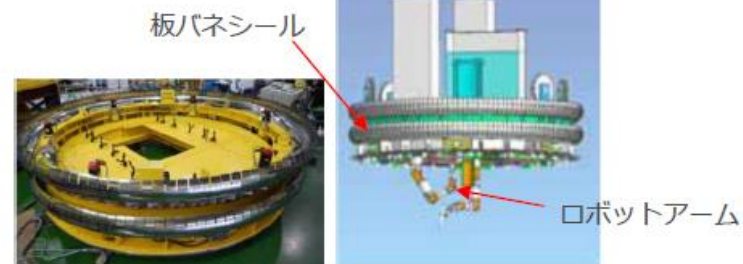
上アクセス工法 (例)



上アクセス工法 (例)



アクセス装置



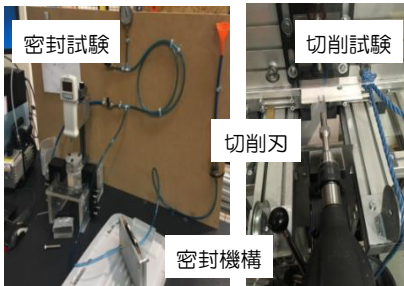
燃料デブリ取り出しに係わる遠隔技術開発 (6) 要素・計測技術



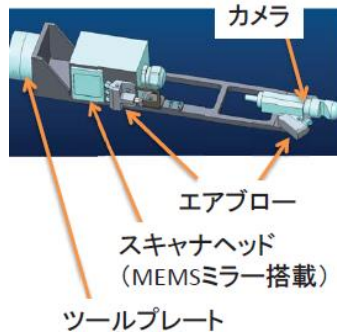
水中非貫通レーザー切削ヘッドの開発



チゼル加工予備試験



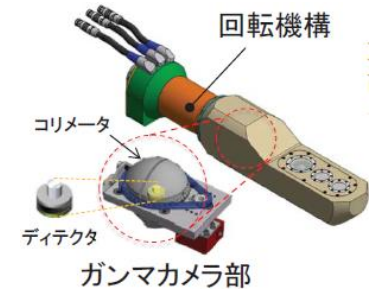
デブリの切削採取工具の要素試験



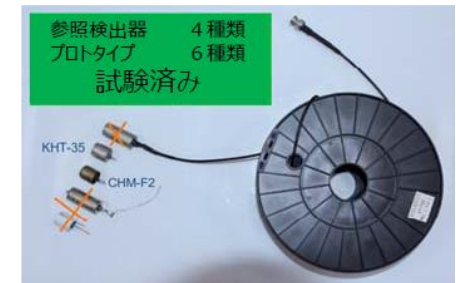
光切断法による形状寸法計測装置の開発



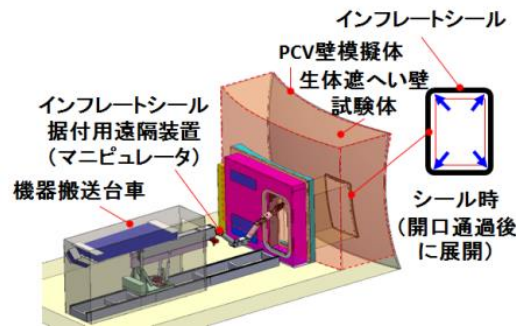
耐放射線撮像管カメラの開発
(線量率10kG/h 累積線量2MGy)



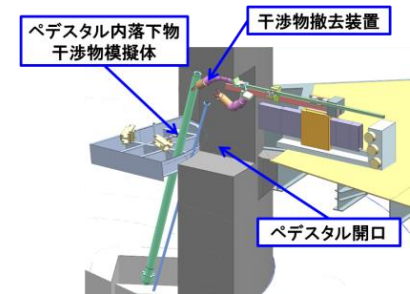
ガンマカメラによる放射線計測装置の開発



小型中性子検出器の開発
(コロナカウンター 核分裂電離箱)



インフレートシール要素試験



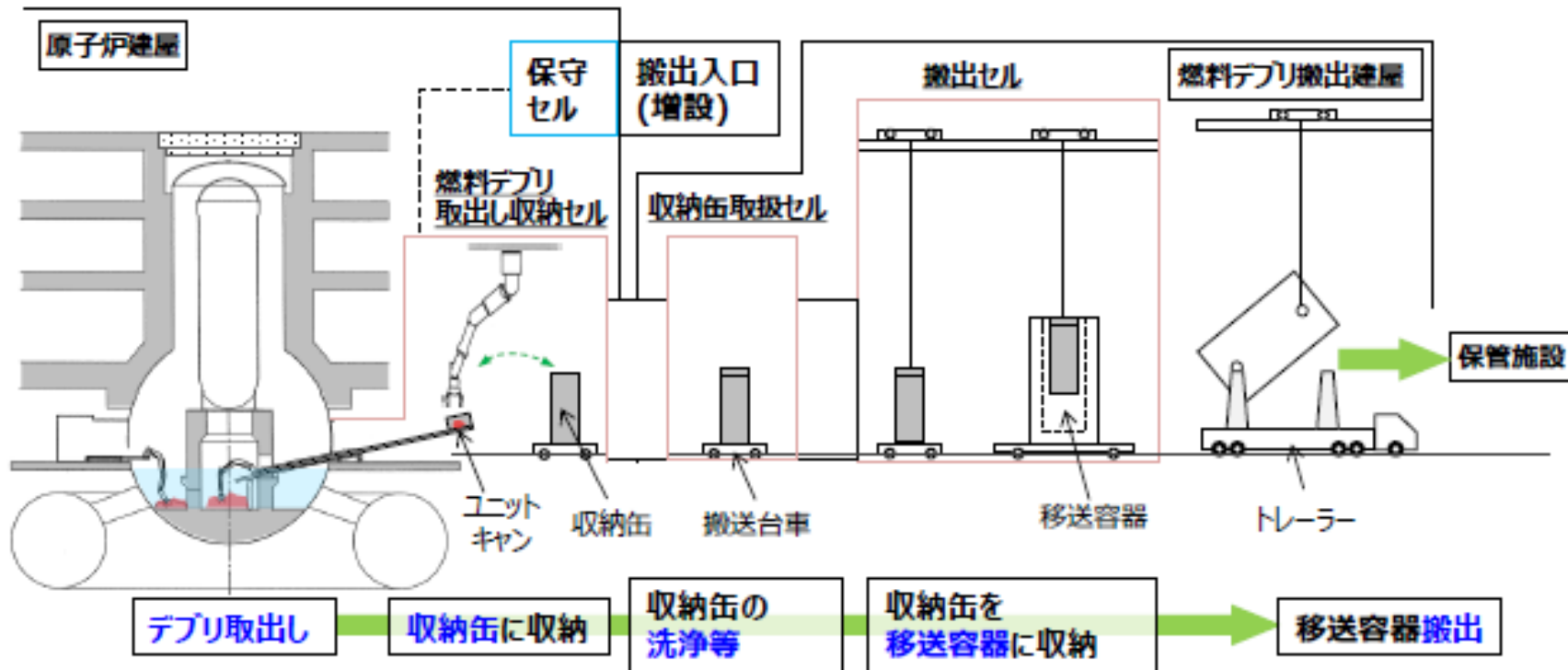
ペDESTAL内干渉物撤去要素試験

燃料デブリ取り出しに係わる遠隔技術開発 (7) 収納・移送・保管

収納缶の設計 ⇒ 1F固有の課題に対処

- 燃焼度と濃縮度が高い→**反応度高**
- コンクリートとの溶融生成物→コンクリート中の水分の放射線分解による**水素発生**
- 海水注入、計装ケーブル他との溶融→**塩分**の影響、**不純物**の混入

移送方法 (気中-横アクセス工法の場合: 例)



遠隔モックアップ戦略

◆ V&V (Verification & Validation)と開発モックアップ

- 要求事項に対するリスク評価によるモックアップ試験目的の明確化
- 要求、設計、製品の各段階の妥当性確認へのステークホルダーの関係構築

◆ 環境モックアップ

- 燃料デブリ取り出しの全体遠隔システムを検証するためには、環境モックアップ試験において、不確定な 1 F現場環境を模擬して適用性を確認
- 燃料デブリ取り出し開始以降のPCV内状態解明に応じて、環境モックアップを更新し、環境モックアップ試験を重ねることでリスクを低減
- 号機毎の状態の特徴、取り出し工法（横アクセス、上アクセス）等を考慮しつつ、共用、改造等を含め合理的なコスト、期間とする計画策定

◆ 訓練モックアップ

- 運転関係者は環境モックアップの段階から参加し、訓練モックアップを効率的、効果的に行うとともに、装置異常等への柔軟な対応力を養成
- 3DシミュレーションやVRの利用は、モックアップ試験数、訓練時間の低減に有効
- 燃料デブリ取り出しの長期的な視点で、運転、保守、改良の訓練が必要

まとめ

- ✓ 1F廃炉では、その放射線環境の厳しさ等により遠隔技術の活用が必須
- ✓ これまで、調査、ガレキ撤去、除染等さまざまな場面で遠隔技術が活躍
- ✓ 1F廃炉は、燃料デブリ取り出しの具体化に向けた新たなフェーズに移行
- ✓ 燃料デブリ取り出しは本丸であり、遠隔技術適用に対する難課題の見本市
- ✓ 世界のいかなる遠隔技術適用の経験もそのまま活用できない異なる状況
- ✓ 遠隔技術の活用も新たなステージに移行（本丸突入）
- ✓ 成功裡に現場適用するためには以下がキー
 - ◆ 世界の叡智を結集し、個々の課題解決と要素技術開発
 - ◆ 個々の要素技術開発を統合したシステムとしての技術開発
 - ◆ 現場適用性を検証・改善し、訓練する戦略的なモックアップ
- ✓ プログラム/プロジェクト管理体制のさらなる強化も重要

資料提供への謝辞

本講演にあたっては、東京電力HD及び国際廃炉研究開発機構（IRID）に以下のように多くの資料提供をしていただきました。

（東京電力HD）

- 福島事故対応・廃炉の特徴と遠隔技術の必要性（画像） P.4
- 緊急時対応・安定化等における遠隔技術の活用例（画像） P.5
- プール燃料取り出しにおける遠隔技術の活用例（画像） P.6
- トーラス室調査における遠隔技術の活用例（画像） P.8
- 原子炉内状況の把握、3号機PCV内部調査（画像） P.9,12

（IRID）

- トーラス室調査における遠隔技術の活用例（画像） P.8
- 原子炉内状況の把握、1～3号機PCV内部調査（画像） P. 9,10,11,12
- PCV内部調査-1、-2、-3（画像、動画） P. 19,20,21
- RPV内部調査（画像） P.22
- PCV下部止水（画像） P.23
- 小規模な取り出し、大規模な取り出し-1、-2（画像） P. 24,25,26
- 要素・計測技術（画像） P.27
- 収納・移送・保管（画像） P.28

深く感謝します。

ご清聴ありがとうございました