

ロボット技術が切り拓く原子力最前線
～福島第一原子力発電所廃炉に向けたロボット開発～

廃炉に向けたロボット開発

－ 開発の現状と今後の取り組み －

2015年12月4日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

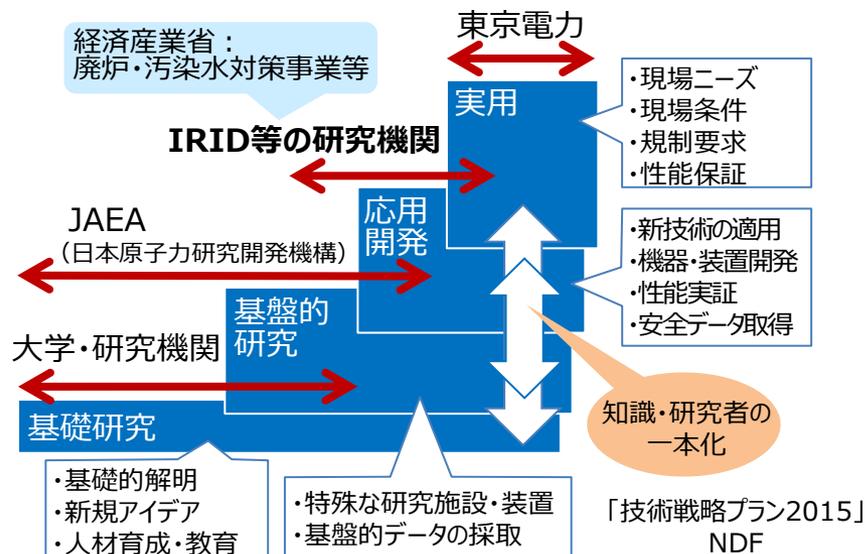
及川 清志

研究開発の位置づけ

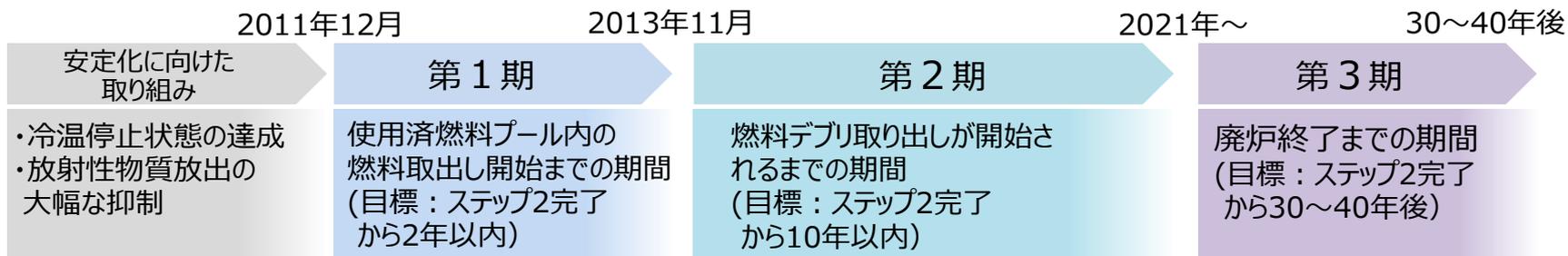
事業分野

- 原子炉の冷温停止状態の継続
- 滞留水処理（汚染水対策）
- 発電所全体の放射線量低減・汚染拡大防止
- 使用済燃料プールからの燃料取り出し
- 燃料デブリ取り出し
- 固体廃棄物の保管・管理と処理・処分に向けた計画
- 原子炉施設の廃止措置計画

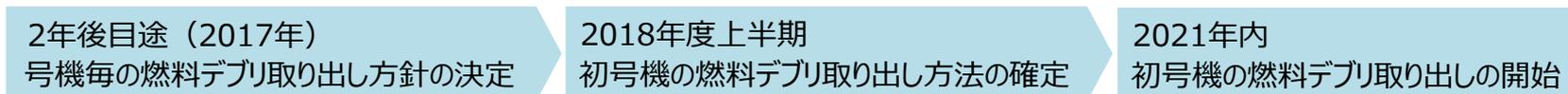
研究開発の全体像



中長期ロードマップ



燃料デブリ取り出し開始までのマイルストーン



燃料デブリ取り出し工程イメージ

燃料デブリ取り出し
技術の研究開発

燃料デブリ取り出し工法確定 2018年
燃料デブリ取り出し 2021年～

現状

冠水工法

気中工法（例）

使用済み燃料プール
から燃料の取り出し

作業、移動
エリアの除染

圧力容器内部調査
・燃料デブリ形態、拡散状況
・内部構造材損傷状況

格納容器内部調査
・燃料デブリ形態、拡散状況
・ペDESTAL、格納容器
損傷状況

炉内状況把握・分析

燃料デブリの性状把握

原子炉の構造健全性評価

燃料デブリの臨界管理

燃料デブリの収納・移送・保管

格納容器の水漏れ
調査、止水

燃料デブリ・炉内構造物取り出し
①工法・システム開発
・冠水／気中工法
②基盤技術開発

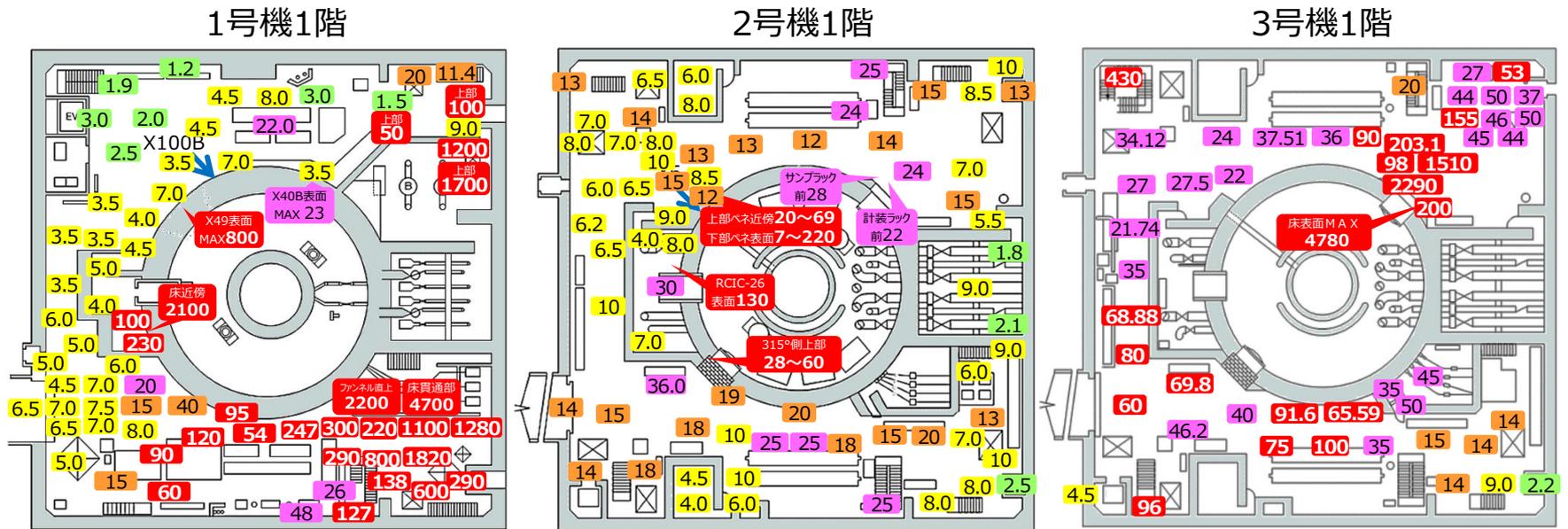
原子炉建屋・作業エリアの除染

除染技術開発の課題

漏えい箇所調査、補修等の各種作業を円滑に進めるためには、作業場所の環境改善が必要

- 高線量エリアでの作業
 - 多様な汚染形態／多様な作業場所への対応要
- ⇒
- 遠隔制御技術の確立
 - 対象部位ごとの仕様検討・開発

1～3号機の放射線量状況 2012年～2013年調査

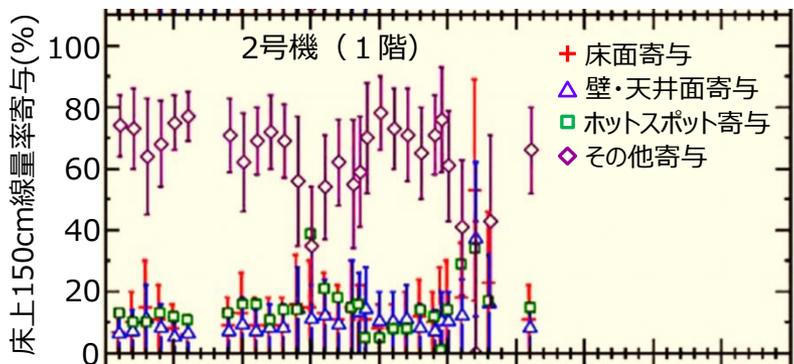


3mSv/h 以下 3mSv/h ~10mSv/h 10mSv/h ~20mSv/h 20mSv/h ~50mSv/h 50mSv/h 以上

「建屋内の空間線量率について」
東京電力 H25.3.22
を参考に作成

遠隔除染技術の開発

空間線量の構成



床上150cmへの線量率寄与割合 (H24年度現場調査)

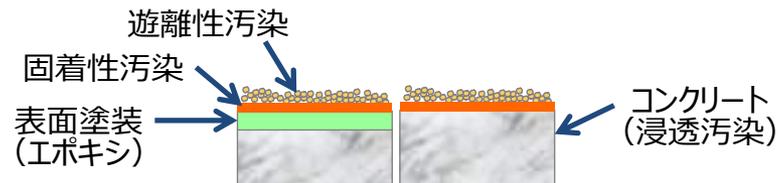
1~3号機原子炉建屋汚染状況調査の計画について 東京電力 H25.12.26



原子炉建屋の空間線量 (例)

汚染形態

遊離性、固着性、浸透汚染が混在

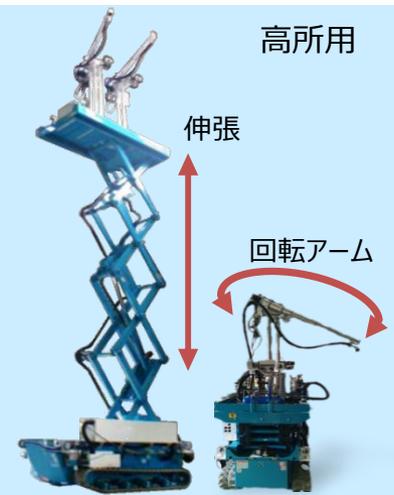


除染エリアへのアプローチ

低所(床、下部壁面)用



高所用



上部階用

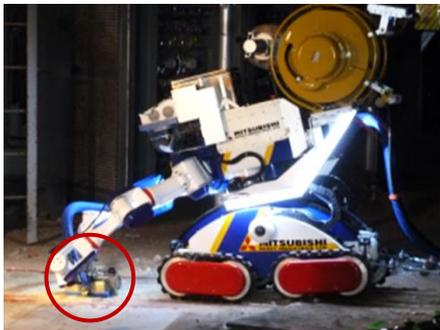


遠隔除染技術の開発

除染機能

- 多様な汚染形態、多様な作業場所に適用可能な除染機能を開発

吸引・ブラスト除染装置



吸引・ブラストノズル

高圧水ジェット除染装置



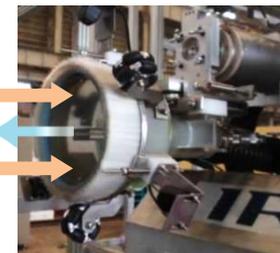
高圧水ノズル

高圧水ジェット
ノズルヘッド



ウォーター
ジェット

ドライアイスブラスト
ノズルヘッド



吸引
ドライアイス
ブラスト
吸引



高圧水ジェット
除染装置



ドライアイスブラスト
除染装置

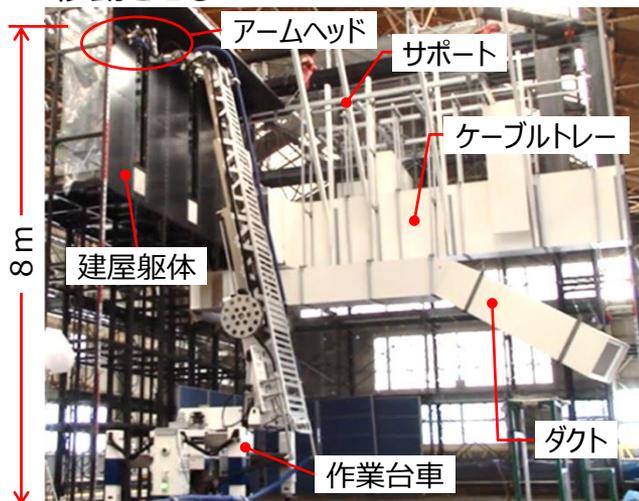
各除染方法の概要と対応可能な汚染形態の比較

除染方法	吸引回収	ブラスト	高圧水 ジェット	ドライアイス ブラスト	
概要	空気と共に汚染を吸引して回収	圧縮空気にてスチールグリットを吹付け、研削/回収	高圧水を噴付け、汚染は水と共に回収	圧縮空気にてドライアイスを吹き付け、研削/回収	
汚染形態	遊離性	○	—	○	—
	固着性	—	○	○	○
	浸透性	—	○	(○) 超高圧時	—

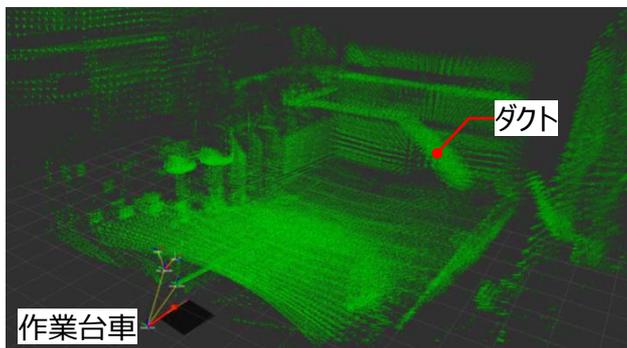
遠隔除染技術の開発

アプローチ技術

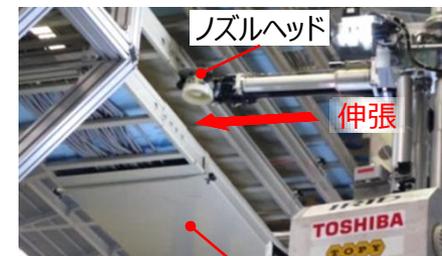
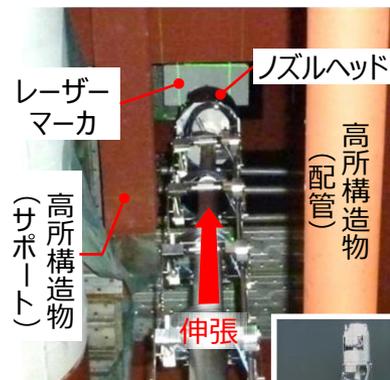
- 作業台車を除染作業のための適正な位置へ移動させる



- 周囲環境をわかりやすく表示する画像生成技術
3Dマッピング画面 (筑波大学研究委託)



- 配管、ダクト、ケーブルトレイなどが錯綜した狭隘部に除染ツール（ノズルヘッド）をアクセスさせる

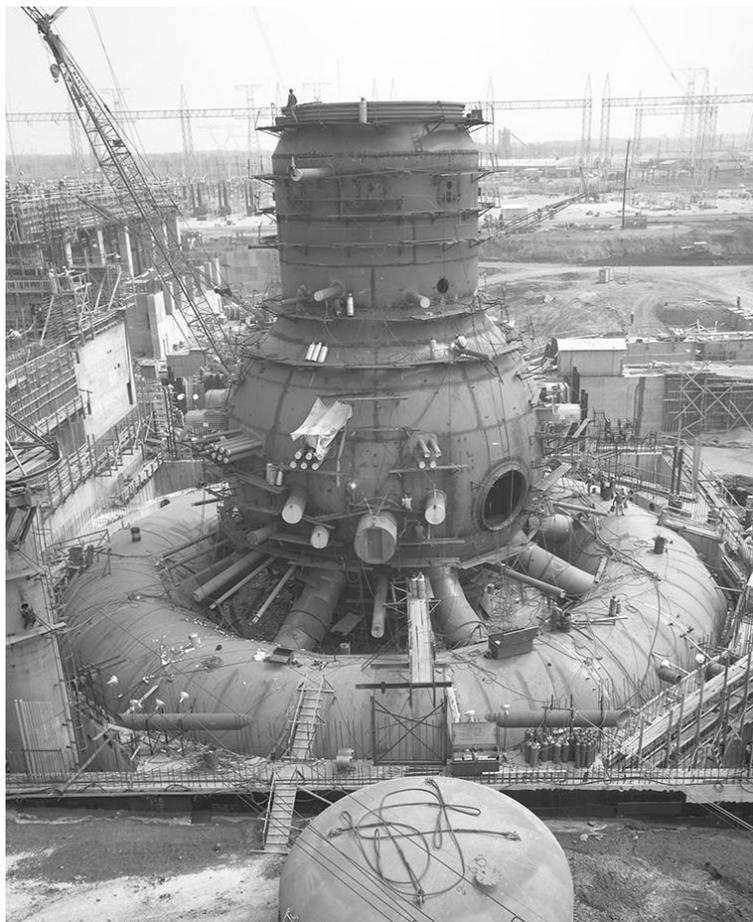


疑似俯瞰画像
(東京大学研究委託)



冠水工法のための漏えい調査・止水

沸騰水型原子炉(BWR) 格納容器(PCV)



「Browns Ferry Unit 1 under construction 1966.Sep.」
Tennessee Valley Authority – TVA's 75th Anniversary webpage

PCV開口部

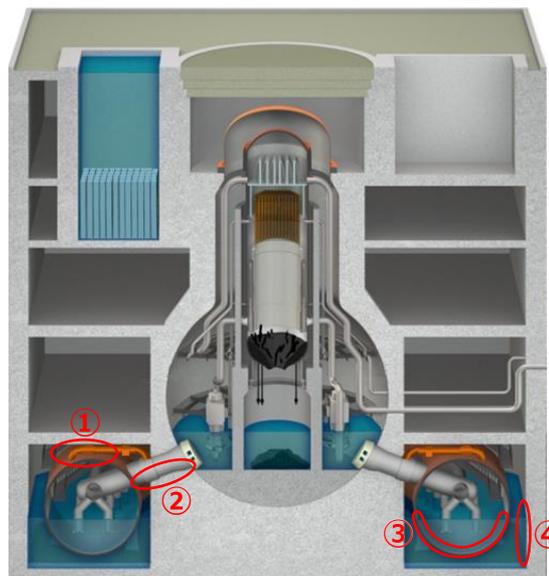
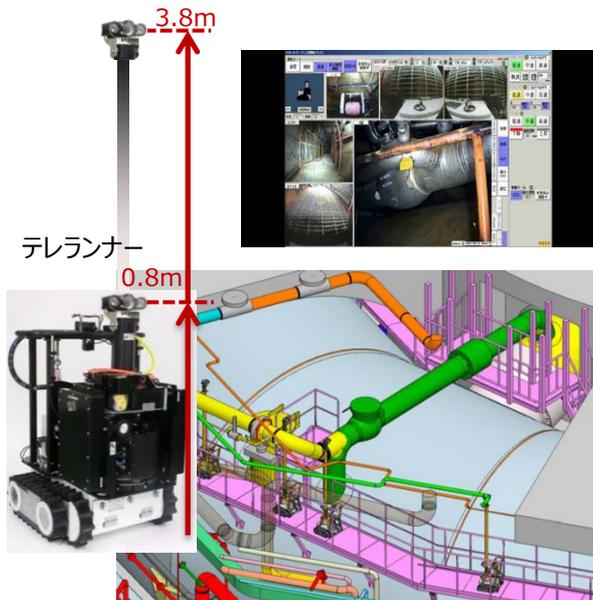
ハッチ、ベント管、配管ペネ
および電気ペネ

1号機	約150か所
2号機	約200か所
3号機	約190か所

点検調査装置の開発

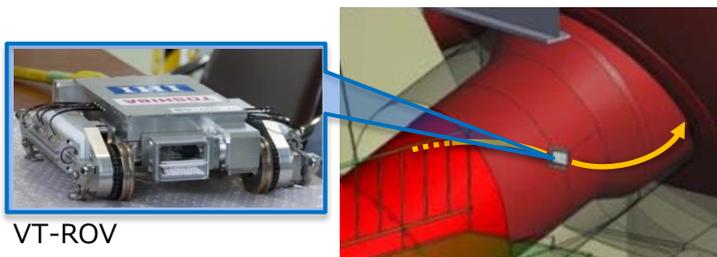
① S/C* 上部調査装置

*S/C：サプレッションチェンバ（圧力抑制室）
S/C上部構造物からの漏えいの調査



② ベント管-D/W接合部調査装置

ベント管付根部の水漏れをカメラで調査



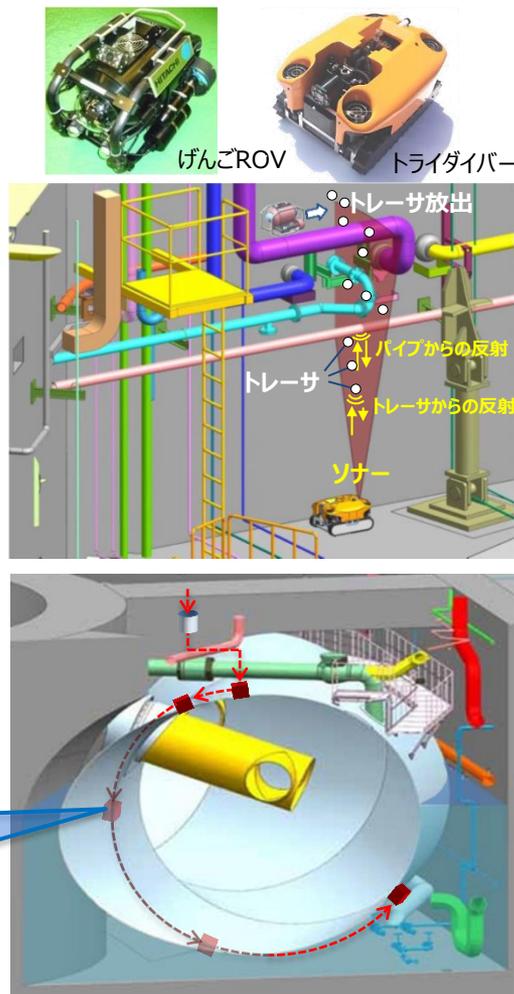
③ S/C下部調査装置

水没部の直径30mm以上の
の穴の有無を調査



④ 水中遊泳・床面走行装置

水中・濁水中の壁面貫通部の調査



格納容器補修技術の開発

漏水の確認

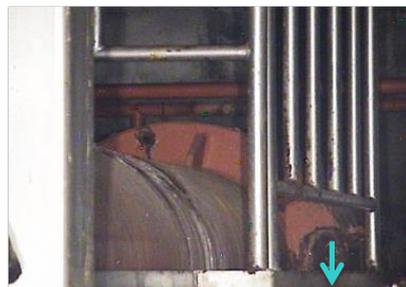
主蒸気配管伸縮継手部



サンドクッション・ドレン管

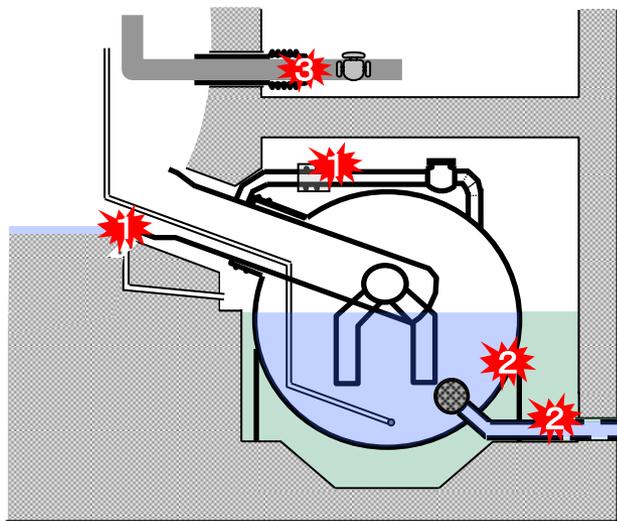


真空破壊ライン伸縮継手カバー部

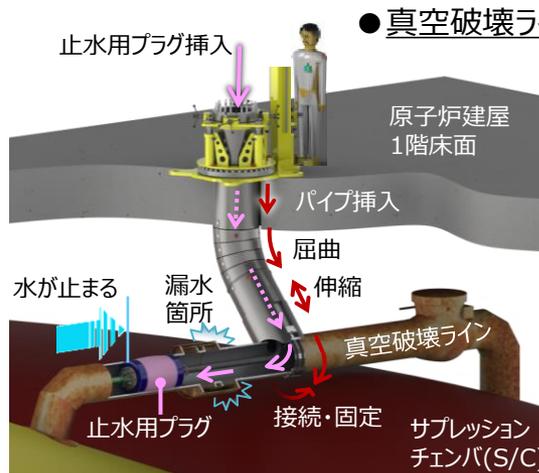


東京電力提供資料

漏水箇所

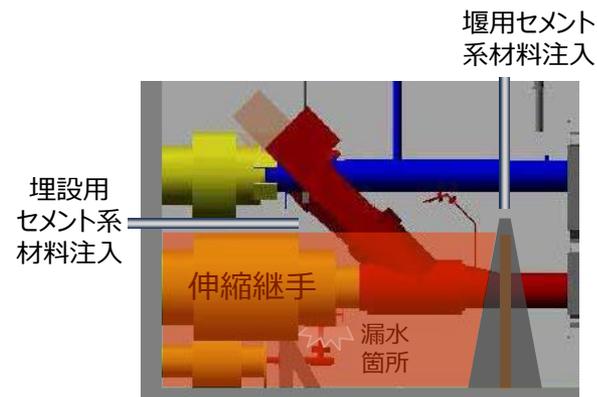


● 真空破壊ライン止水

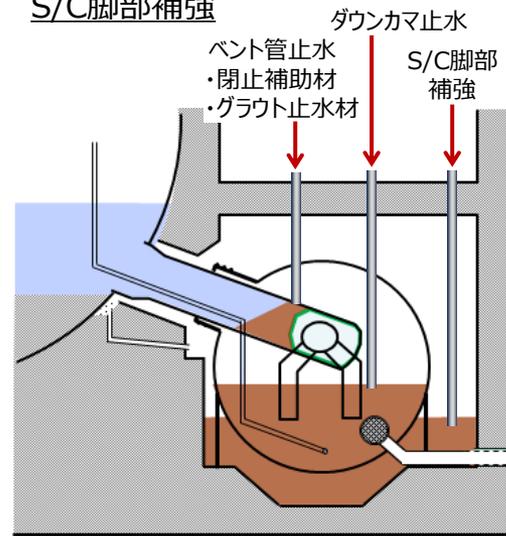


止水工法

● 貫通部の止水 (小部屋内)



● ベント管止水 S/C脚部補強

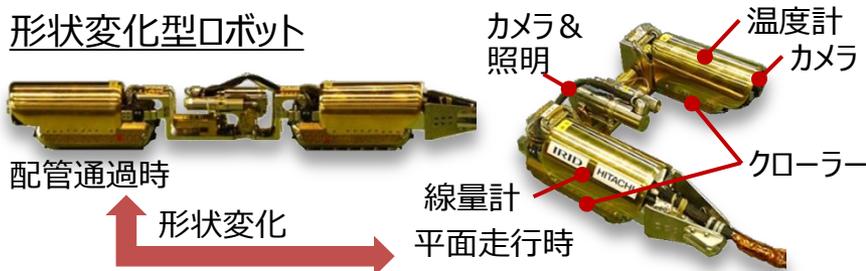


格納容器 (PCV) 内部調査

PCV内部調査ロボットの開発

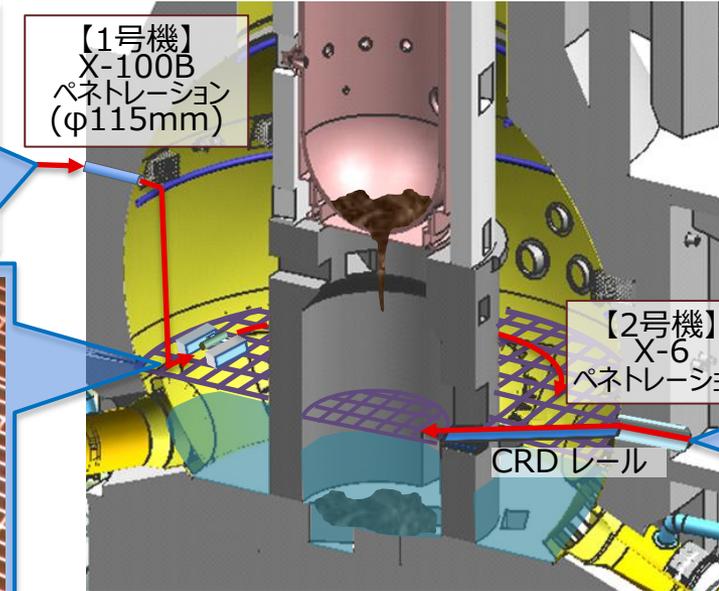
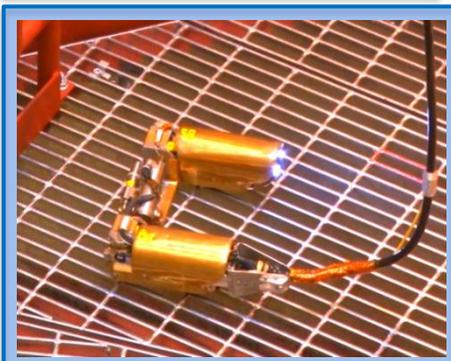
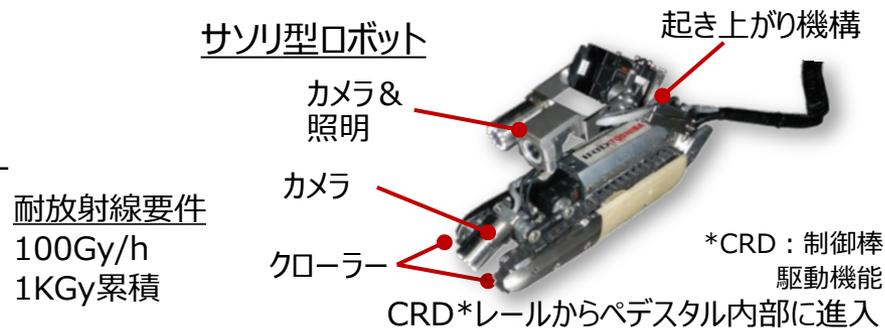
- 約φ100mmのガイドパイプを通るスリム形状と、PCV内での安定した走行能力の両立
- 過酷環境（高放射線量、暗闇、蒸気雰囲気等）における運用と、「映像」「温度」「線量率」情報の収集

形状変化型ロボット



φ115mmのペネトレーションからPCV内へ進入

サソリ型ロボット



PCV内部調査

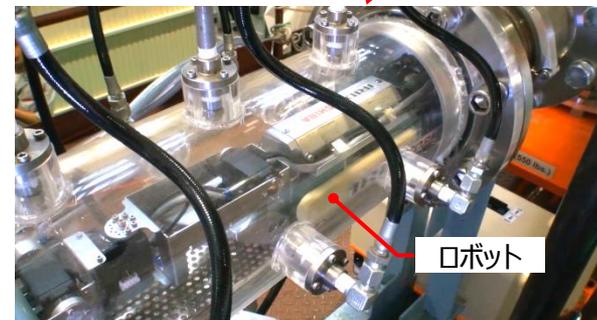
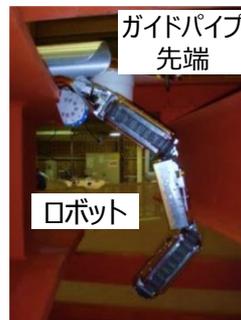
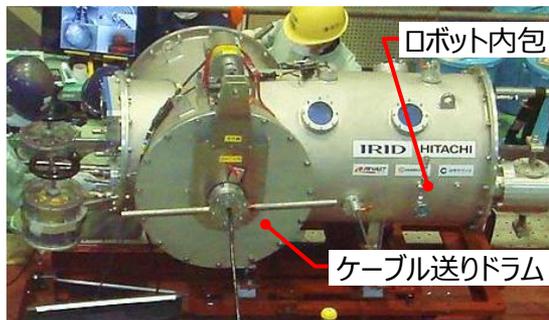
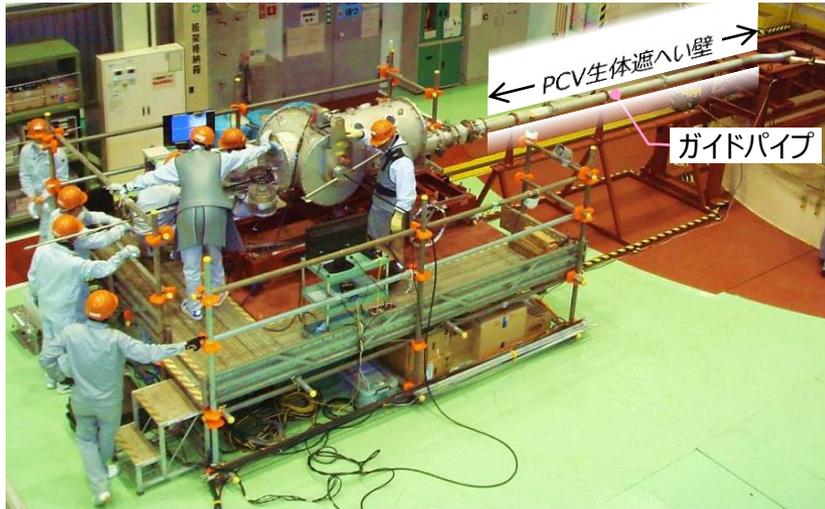
バウンダリーを構築するシステム全体像

放射性物質飛散防止装置（チャンバー）

- 約φ100mmのガイドパイプを通して、狭隘空間からPCV内にロボットをアクセスさせる
- PCVからの放射性物質を飛散させずにロボットをPCV内投入／調査を可能とするバウンダリーを構築する

形状変化型ロボット用チャンバー

サソリロボット用チャンバー

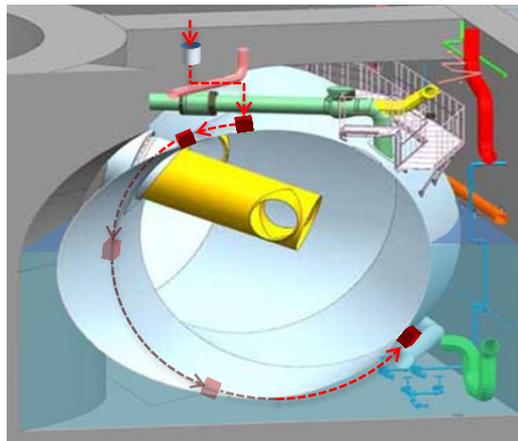


モックアップ試験

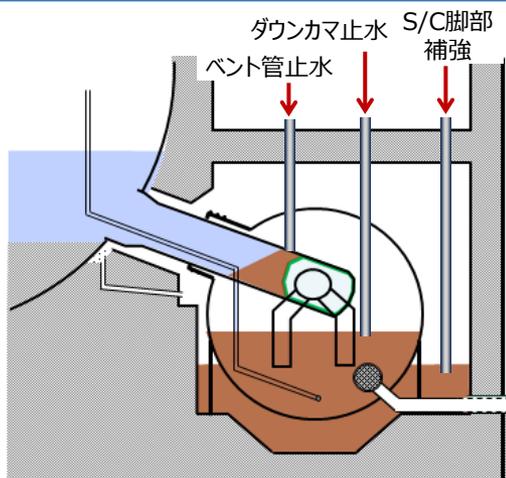
遠隔操作機器・装置の
開発・実証のための施設

- 実際の現場サイト内において機器・装置の適用性を試行錯誤しながら確認することを避け、機器・装置の実証を繰り返し試験できる環境が必要

S/C下部調査装置



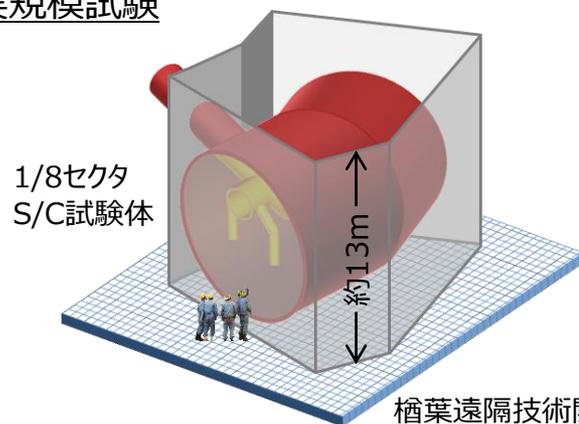
PCV下部補修工法



ベント管内へ止水材を充填する
「止水工法」基礎試験



実規模試験

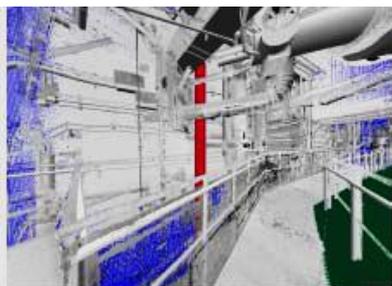


楢葉遠隔技術開発
センター内に建設中

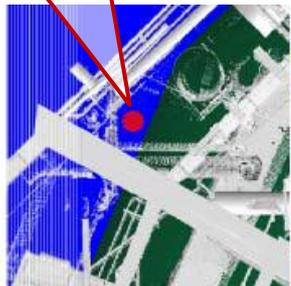
可視化技術

原子炉建屋内部状況の3D画像化

3D レーザースキャナー
40,000,000 点データ/10 分



(水平面)



(上面)

天井 (1階床) から機器を降
ろすためのルートが見つかった

空間放射線量の可視化

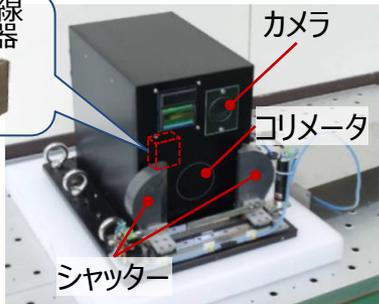
ガンマ線
検出器

ガンマカメラ

カメラ

コリメータ

シャッター

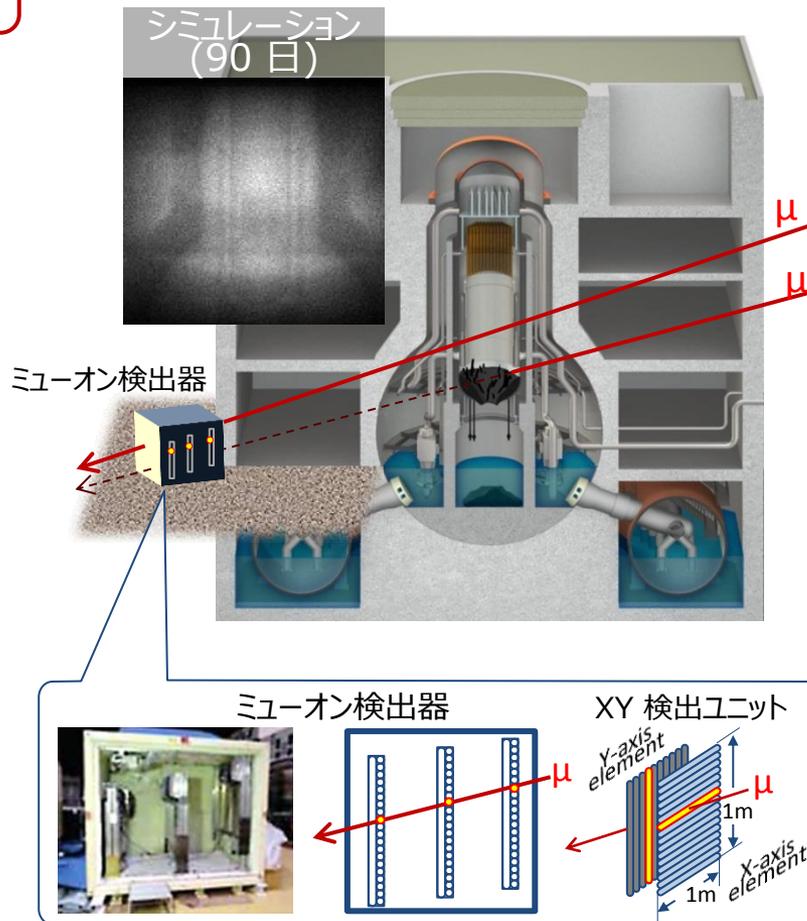


パイプの中にホットスポッ
トが存在する



圧力容器内の燃料デブリの可視化

原子炉内燃料デブリ検知技術の開発



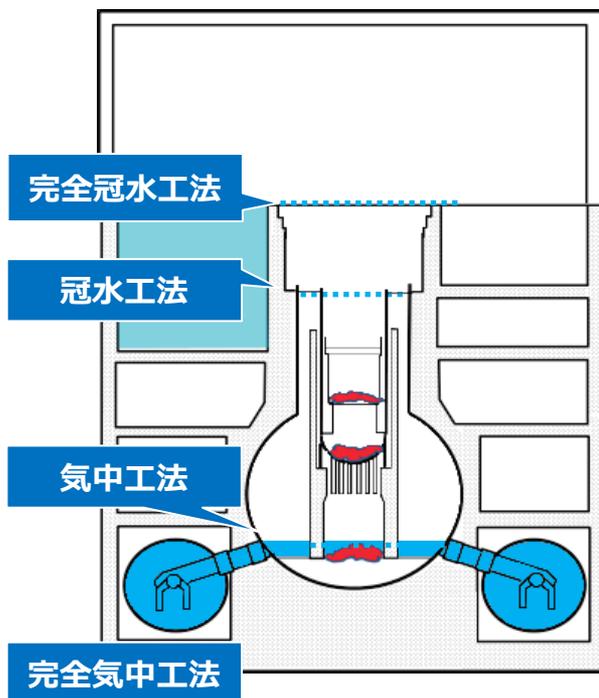
今後の取り組み – 燃料デブリ取り出し工法検討

燃料デブリ取り出し工法オプションの検討

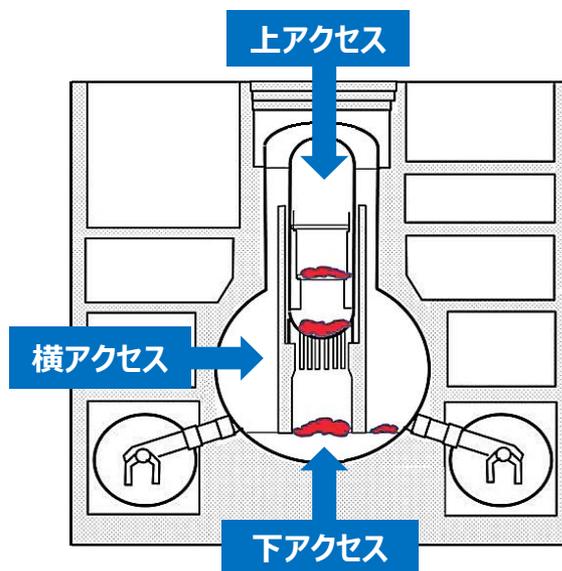
先行事例のTMI-2取り出し工法（冠水）に対して、過酷事故の影響によるPCV上部までの水張りの困難さなど、福島第一の状況に沿った燃料デブリ取り出し工法を検討する

- PCVの上部まで水を張らず、燃料デブリが気中に露出した状態で取り出す工法の検討
- PCV内に広く分布していると推定される燃料デブリを取り出すためのアクセス方法の検討

PCV水位レベルに応じた工法分類



燃料デブリへのアクセス方向



PCV水位とアクセス方向の組み合わせ

		アクセス方向		
		上	横	下
水位	完全冠水	a.		
	冠水	a.		
	気中	b.	c.	
	完全気中			

冷却性能評価の困難さ

新たにアクセスルートを構築する困難さ

アクセス口から水が流出する可能性

重点的な検討対象としない

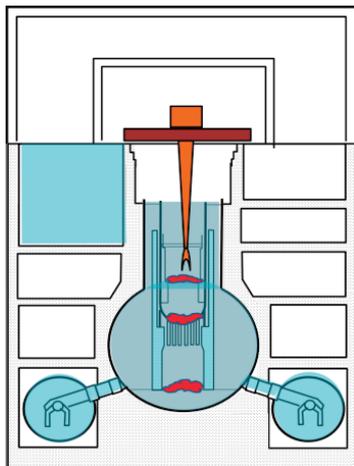
「技術戦略プラン2015」NDF

燃料デブリ取り出しの工法

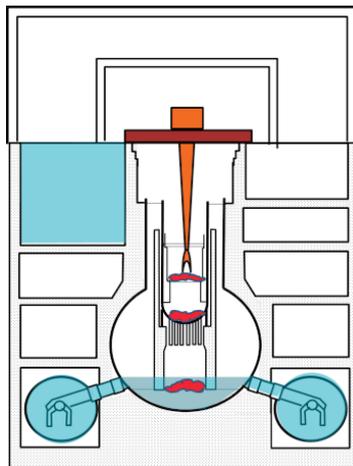
選定した燃料デブリ取り出し工法オプション

「技術戦略プラン2015」
NDF

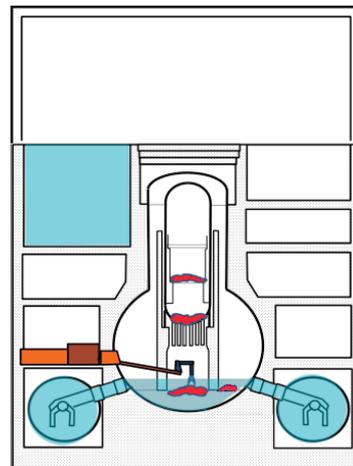
a. 冠水－上アクセス工法



b. 気中－上アクセス工法



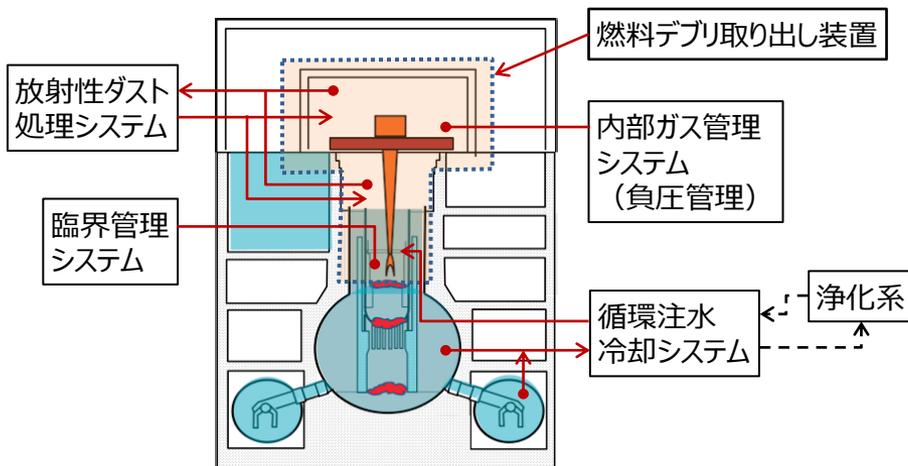
c. 気中－横アクセス工法



工法実現性の見極めに必要な要素技術

- ✓大型構造物取り出し時の汚染拡大防止技術
- ✓RPV内等燃料デブリ取り出し時の汚染拡大防止技術
- ✓燃料デブリへのアクセス技術
- ✓燃料デブリ取り出しの遠隔作業技術
- ✓燃料デブリ取り出しの切削・集塵、視覚・計測技術

システムの概念、工法実現性の検討



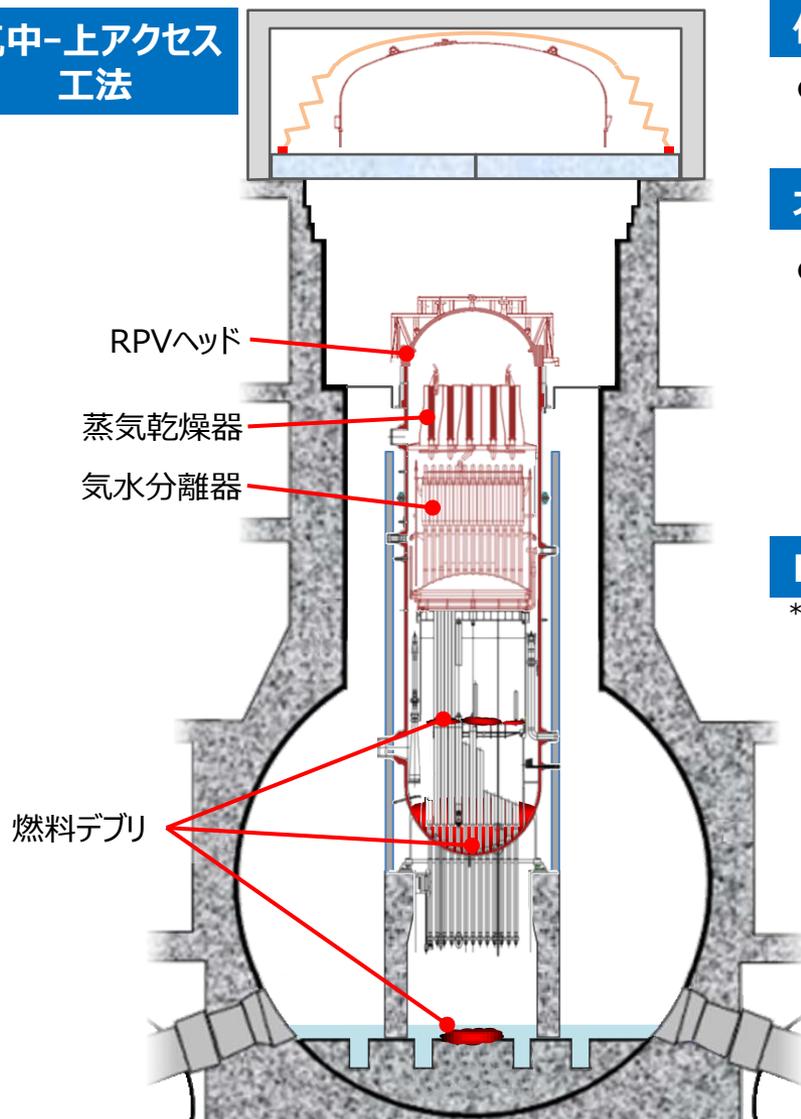
燃料デブリ取り出し装置設計の上での留意事項

- ✓装置の耐放射線性、メンテナンス性
- ✓燃料デブリ取り出し工事効率向上
- ✓収納缶や他の機器との取り合い
- ✓装置周りの放射性ガスト回収設備・装置

参考： 平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金（燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化事業）」及び「同（燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業）」に係る補助事業者公募要領 平成27年6月23日

汚染拡大防止技術

気中-上アクセス工法



作業員の被ばく低減

- シールドプラグに代わる開閉式カバーの設置
水充填式により、不要時の軽量化と形状の追従性を実現

大型構造物取り出し時の汚染拡大防止

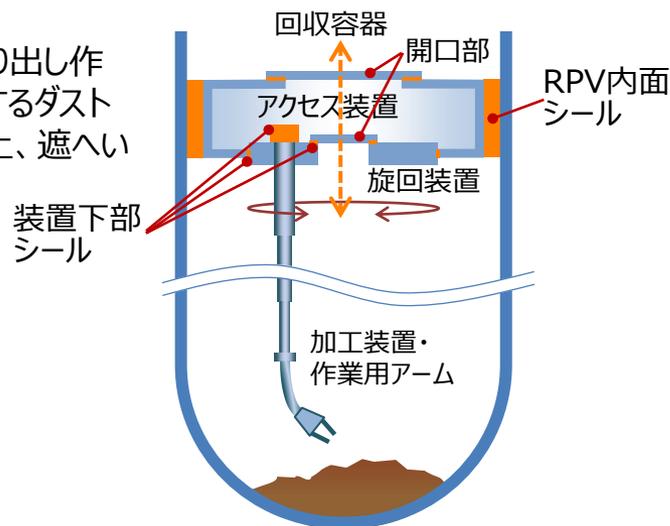
- ダスト飛散防止のための、エリア間仕切りフィルム、シートの開発



RPV*内燃料デブリ取り出し時の汚染拡大防止

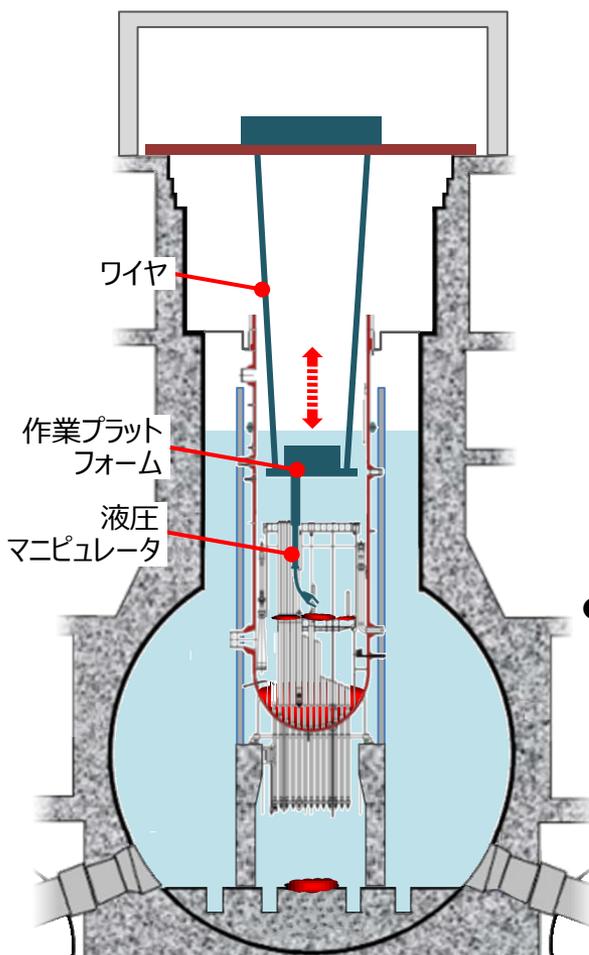
*RPV：圧力容器

- 燃料デブリ取り出し作業中に発生するダスト等の拡散防止、遮へい技術の開発

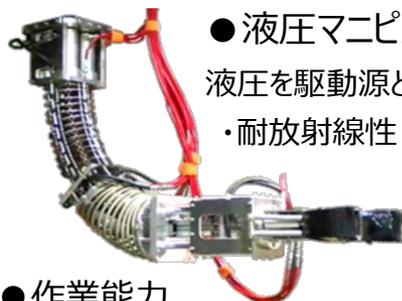


遠隔作業技術

冠水工法



遠隔ハンドリング技術



● 液圧マニピュレータの開発

液圧を駆動源とした小型・高出力マニピュレータ

・耐放射線性 10kGy/h以上、2MGy以上

● 作業能力

燃料デブリへのアクセス

・先端負荷15kgでの、移動速度2mm/秒
先端位置精度±2mm程度の安定制御

・加工時の反力を受けることを想定

燃料デブリの取り出し（横アクセス）

・垂直下向き200kg保持、持ち上げ最大45度

・100kgを水平まで持ち上げ可能

・柔構造による障害物との干渉影響を吸収

● 切削技術（一例）

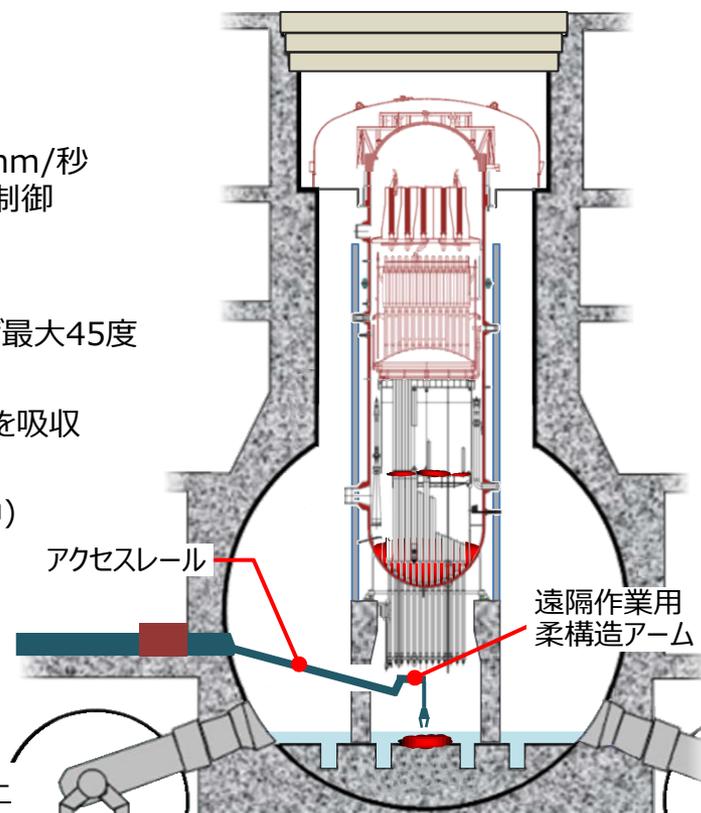
・コアボーリング ・プラズマ加工（水中）



● 計測技術

・耐放射線性の確認・限界能力の向上

気中-横アクセス工法



まとめ

廃炉に向けたロボット開発（現状）

- 「冠水工法」を前提とし、止水作業を行うために、作業エリア、アクセスルートの除染を行い、漏水箇所の調査・特定するために遠隔制御ロボットを開発
 - ✓除染ロボット：多様な汚染形態に適応する除染機能、及び、配管、ダクト、ケーブルトレイなどが錯綜する狭隘部に除染ヘッドをアクセスさせる遠隔制御技術を開発
 - ✓PCV漏えい調査ロボット：狭隘部、壁面（炭素鋼）、高所、水中など多様な調査対象に適応する移動機能を有する調査ロボットを開発
 - ✓PCV内部調査ロボット：細い配管から進入するスリムさとPCV内部の広範な移動機能を両立、電子回路の分離・外置き構造による高い耐放射線性を確立（100Gy/h、1kGy累積）

これからの取り組み

- 「冠水」「気中－上アクセス」「気中－横アクセス」の燃料デブリ取り出し工法を設計、各々の工法を構成する要素技術の開発・評価
 - ✓汚染拡大防止技術（大型構造物やRPV内燃料デブリ取り出しにおける）
 - ✓燃料デブリアクセス技術（上アクセスのプラットフォーム／セル、横アクセスのアクセスレールなど）
 - ✓遠隔作業技術（液圧マニピュレータなど）、切削・集塵、視覚・計測技術3工法への適用性、工法技術の実現性等について、各要素技術の評価結果を分析、取りまとめる

燃料デブリ取り出し工法に係る技術要件

- 1:PCV・建屋の構造健全性の確保 2:臨界管理 3:冷却機能の維持 4:閉じ込め機能の構築
5:作業時の被ばく低減 6:燃料デブリ取り出し機器・装置の開発 7:燃料デブリへのアクセスルートの構築 8:系統設備、エリアの構築 9:労働安全の確保

「技術戦略プラン2015」NDF

ご清聴ありがとうございました