

NPO自動化推進協会向け ご説明資料

廃炉の未来とロボット技術

2017年6月3日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

副理事長

新井 民夫

この成果は、経済産業省/廃炉汚染水対策事業費補助金の活用により得られたものです。

本日の構成

■ IRIDとその活動

- 廃炉技術の全体像
- 個別廃炉技術
- 廃止措置とは

- ロボット技術 1 廃炉用ロボット
- ロボット技術 2 ロボットの課題

- おわりに

1. IRIDの概要

【理 念】 将来の廃炉技術の基盤強化を視野に、**当面の緊急課題である福島第一原子力発電所の廃炉に向けた**技術の研究開発に全力を尽くす。

- **名 称** 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (略称：IRID「アイリッド」)
(International Research Institute for Nuclear Decommissioning)
- **設 立** 2013年8月1日 (認可)

- **組合員 構成員：835名** (2015年10月1日現在、役員を除く)
- **独立行政法人：2 法人**
(独) 日本原子力研究開発機構 (JAEA)、(独) 産業技術総合研究所 (AIST)
 - **メーカー等：4 社**
(株)東芝、日立GE ニュークリア・エナジー(株)、三菱重工業(株)、(株)アトックス
 - **電力会社等：12社**
北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)

オールジャパン体制

■ 事業費	年度	2013年度 (8月～)	2014年度	2015年度	2016年度 (推定)
	事業費		約45億円	約120億円	約150億円

2. IRIDの事業内容

▶ IRID事業の3本柱

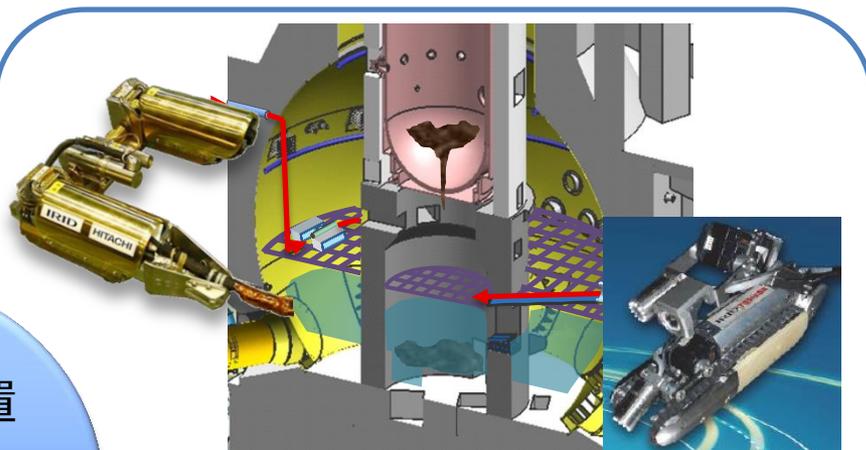


国際顧問との会議

1. 廃止措置
に関する
研究開発
を行います。

2. 廃止措置
に関する
**国際、国内
関係機関と
の協力**を推
進します。

IRID



格納容器内部調査ロボットの開発

3. 研究開発
に関する
人材育成
に取組みます。



「IRIDシンポジウム2016」で
のロボットのデモ

3. 中長期ロードマップの概要

2011年12月
【ステップ2 * 完了】

2013年11月

2021年12月

プラントの状態を
安定化する取り組み

- * ステップ2
- 放射性物質放出管理、放射線量大幅低減の達成
 - 冷温停止状態の達成

第1期

初号機の使用済燃料プール内の燃料取り出し開始まで
(2年以内)

第2期

初号機の燃料デブリ取り出し開始まで
(10年以内)

第3期

廃止措置終了まで
(30~40年後)



()内はステップ2完了からの期間

2013年11月18日に4号機使用済燃料プールから燃料取り出し開始

○中長期ロードマップは、2015年6月12日に改訂された。

○目標工程(マイルストーン)の明確化

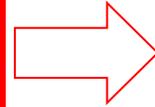
【燃料デブリ取り出し】

- **号機毎**の燃料デブリ取り出し**方針の決定** **2017年夏頃**
- **初号機**の燃料デブリ取り出し**方法の確定** **2018年度上半期**
- **初号機**の燃料デブリ取り出しの**開始** **2021年内**

4. IRIDの研究開発スコープ

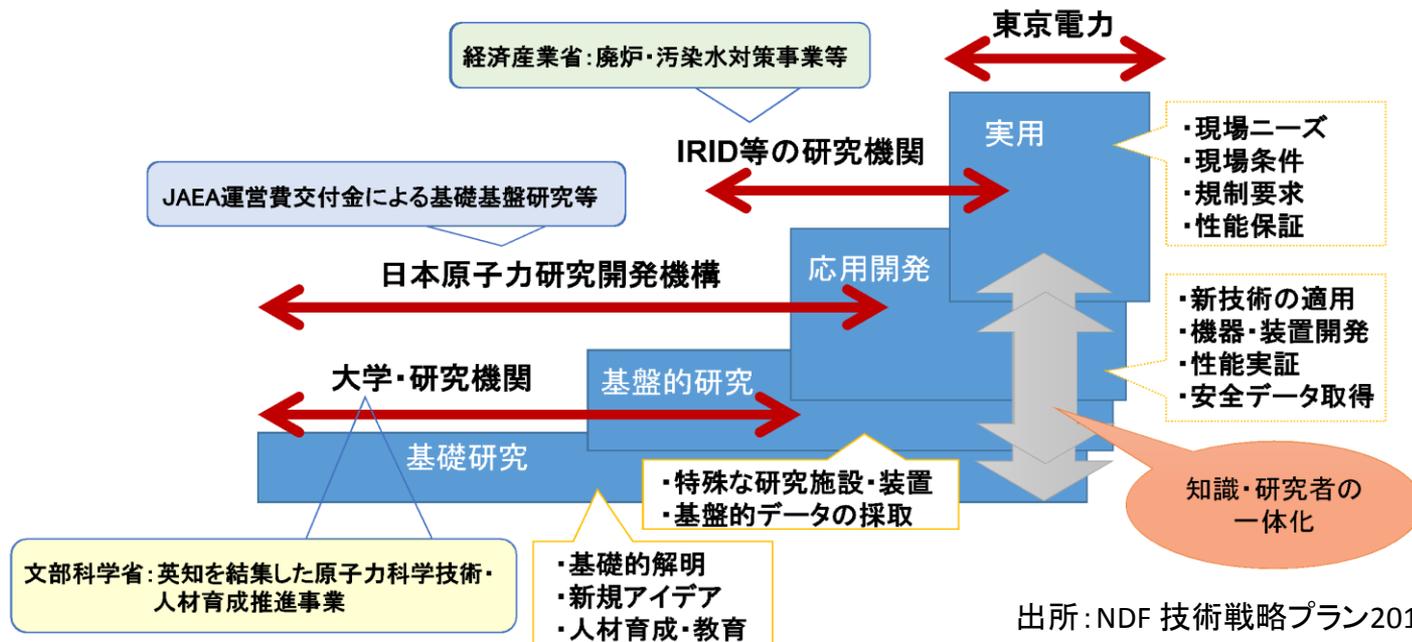
廃炉事業

- 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



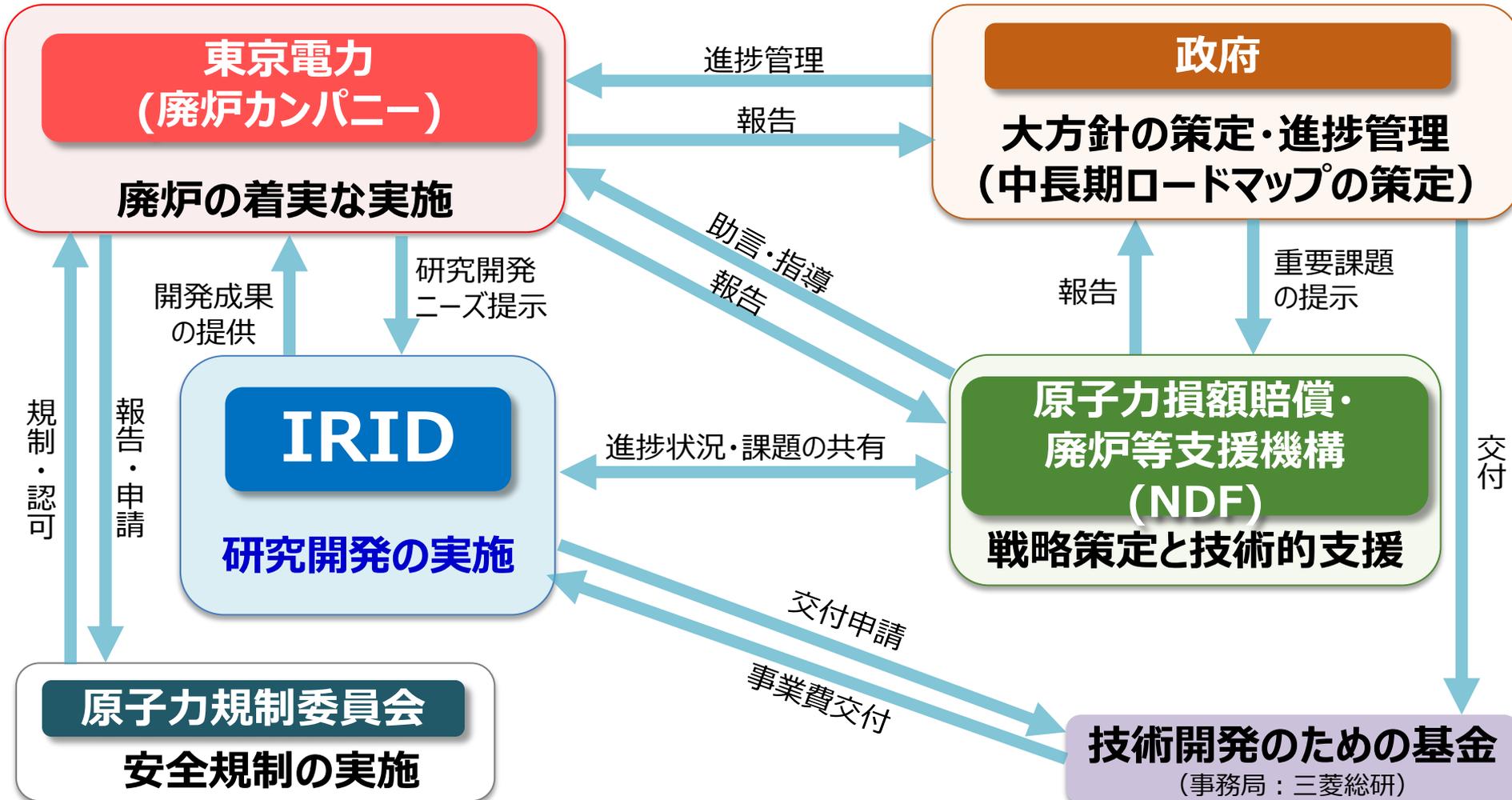
IRIDはこの分野のR&Dを担当

研究開発の全体像

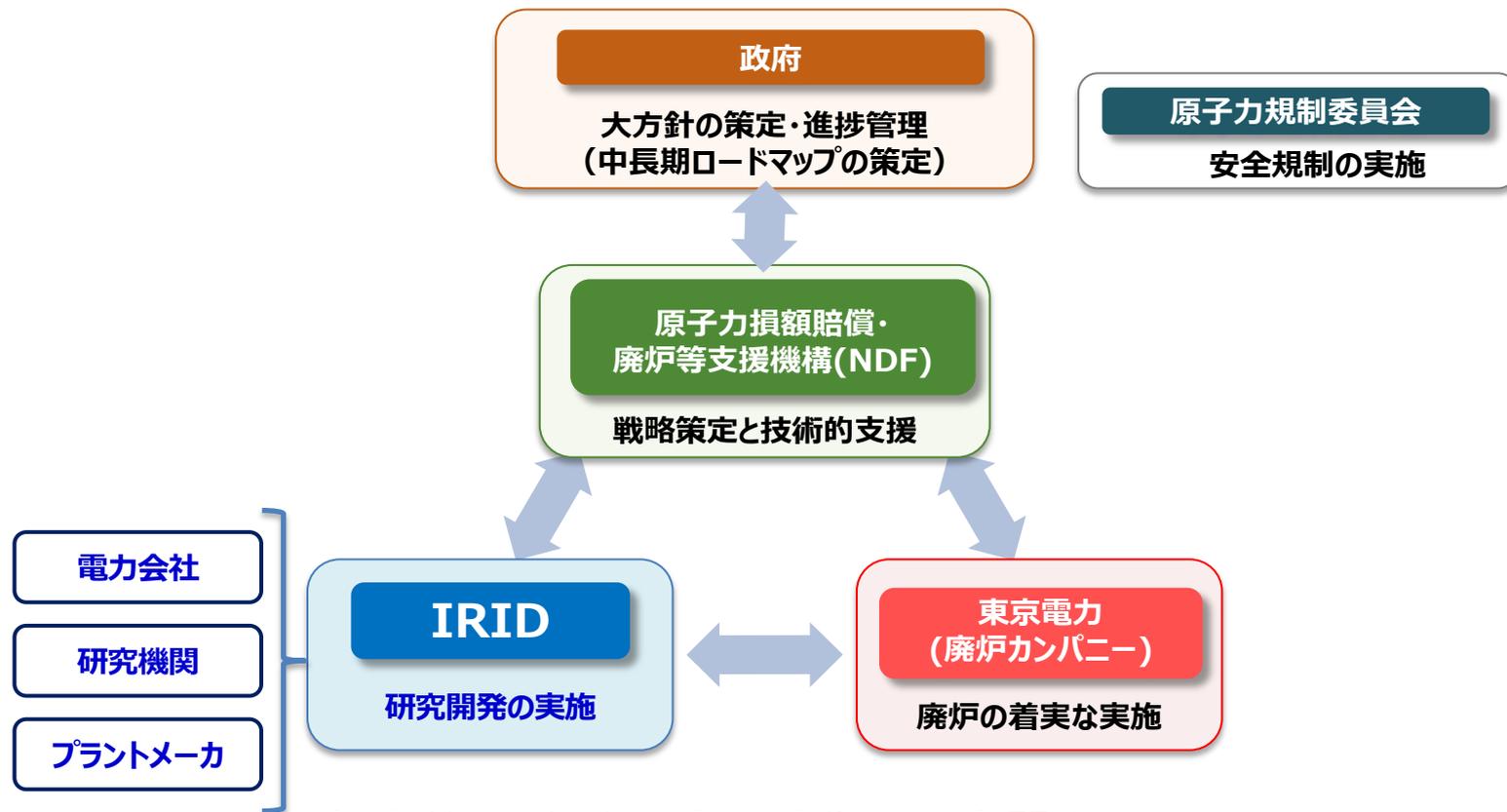


5. IRIDの役割

廃炉技術の基盤強化を視野に、当面の緊急課題にある福島第一原子力発電所の廃炉に向けた取り組みに注力



5. IRIDの役割（簡単化）



福島第1のための廃炉技術の研究開発

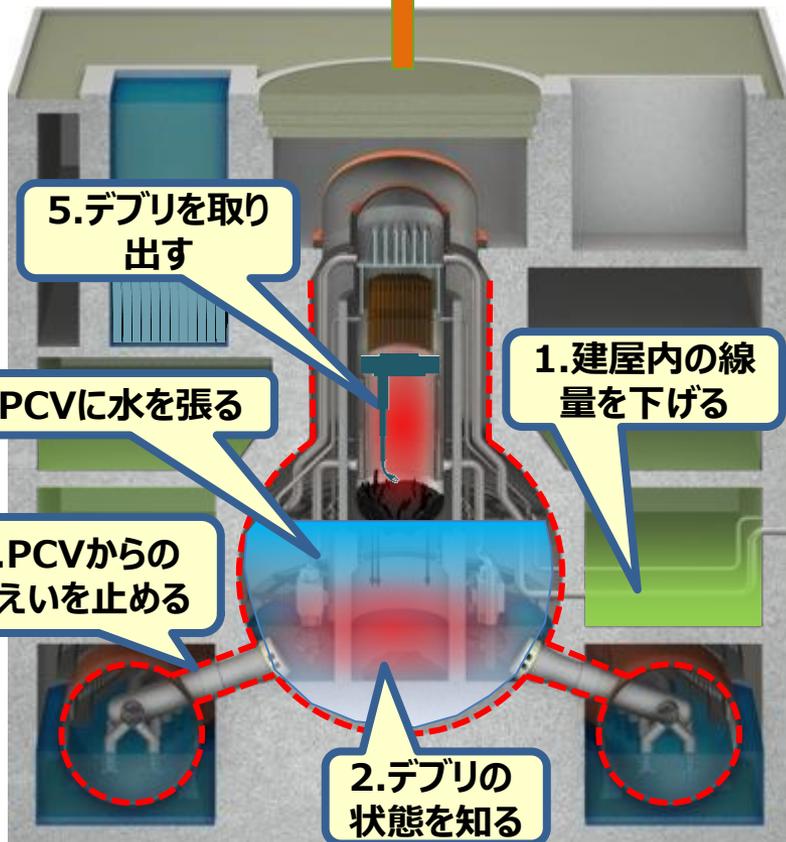
1. 統合的マネジメント
2. 国内外の叡智の結集
3. 人材育成

6. IRIDの研究開発プロジェクトとその目的

1. 建屋内の線量を下げる

- **遠隔除染**装置の開発

6. デブリを収納・移送・保管する



2. デブリの状態を知る

- ◎ 間接的に知る
 - **解析**による炉内状況把握
 - **宇宙線ミュオン**を利用した透視
- ◎ 直接的に知る
 - **PCV内部**調査、**RPV内部**調査

3,4. PCVの漏えいを止める、水を張る

- PCV**補修・止水**技術の開発
- PCV補修・止水**実規模試験**

5. デブリを取り出す

- デブリ取り出し**基盤技術**の開発
- デブリ取り出し**工法・システム**の開発
- **臨界管理**技術の開発

6. デブリを運びだし、保管する

- デブリ**収納・移送・保管**技術の開発

7. IRIDの研究開発プロジェクト(概要)

1. プール燃料取り出しに係る研究開発(1PJ)

使用済燃料プールから取出した燃料集合体の**長期健全性**評価

3 廃棄物に係る研究開発(1PJ)

固体廃棄物の
処理・処分
技術

2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発(12PJ)

除染・線量低減技術

R/B内の
遠隔除染
技術

2016.3終了

燃料デブリ取り出し技術

<安定状態の確保>

RPV/PCVの
健全性評価
技術

燃料デブリ
臨界管理
技術

<デブリ取り出し>

燃料デブリ・
炉内構造物取出
**工法・
システム**

補修・止水技術

PCV
漏えい箇所の
補修・止水
技術

PCV
漏えい箇所の
補修技術の
実規模試験

内部調査・解析・分析技術

<直接的調査>

**PCV
内部調査**
技術

**RPV
内部調査**
技術

燃料
**デブリ
性状
把握**

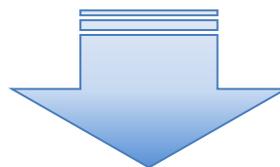
<間接的調査>

RPV内
**燃料デ
ブリ検知**
技術

総合的な
**炉内状況
把握**
の高度化

燃料デブリ・
炉内構造物取出
基盤技術

燃料デブリ
**収納・移送
・保管**技術



**14PJが
進行中**

8. 技術委員会／専門委員会を通じた連携

- 各PJの技術的課題を**専門委員（主に大学の先生）**に相談し、専門委員からのアドバイスを受けながら研究開発を遂行。

技術的課題

- 燃料デブリ取出し技術等の機器開発、遠隔技術
- 使用済み燃料・PCV・RPVの健全性評価
- PCV漏えい個所の補修・止水技術
- 炉内状況・燃料デブリ性状把握
- 放射性廃棄物処理・処分 他

IRID内体制



各分野の専門家によるレビュー・アドバイス

- 技術委員会(専門委員会の横断的上位組織)：**6回**開催(2013.12～2016.8)
- 専門委員会：**通算25回以上**開催
- 委員：各大学、外部研究機関の専門家・有識者の任命・参画

※技術委員会構成
委員長：岡本教授（東京大学）
委員：5名
技術アドバイザー：2名

9. 国際関係機関との協力の推進

国内外の叡智を結集するため、IRIDは「開かれた体制」の運営方針のもと、海外関係機関、専門家との関係を強化し活動

国際顧問会議

(年間1~2回開催しアドバイスを受けている)



海外研究機関/原子力機関との共同研究/技術協力

ウランを用いた大規模な模擬デブリの作製・分析
……カザフ、仏



海外への情報発信



損傷燃料の取出し・保管について議論
……ハンガリー

10. IRIDニーズとアカデミアシーズとのマッチング

「廃炉研究基盤プラットフォーム」他との連携

- JAEA「**廃炉研究基盤プラットフォーム**」の場を活用してIRIDニーズ（補足参照）をアカデミア（文科省人材育成プログラムで採択された7機関）へ開示し、アカデミアからのシーズ提供を呼びかけへ開示（H28.7.29第3回会合）。
- 連携会議、CLADの機能を生かした具体的なテーマ設定

スモールワークショップ

- ロボット関係でのスモールワークショップで学生との意見交換
- 筑波大（H28.2.9）、芝浦工大（H28.9.26）、東工大（H29.1.20全般）

個別訪問

- IRIDニーズに合致する（しそうな）**シーズを既に持っている大学とコンタクト**
 - 東北大学（H28.9.27：コールドスプレイ、摩擦攪拌融合）

他学会等との連携

- 地盤工学会：止水材（重泥水）について意見交換
- 日本保全学会・日本化学工業会他：研究開発状況の紹介
- 海洋研究開発機構（JAMSTEC）（H28.5.11）：深海探査の状況・技術確認

本日の構成

- IRIDとその活動

- 廃炉技術の全体像

- 個別廃炉技術

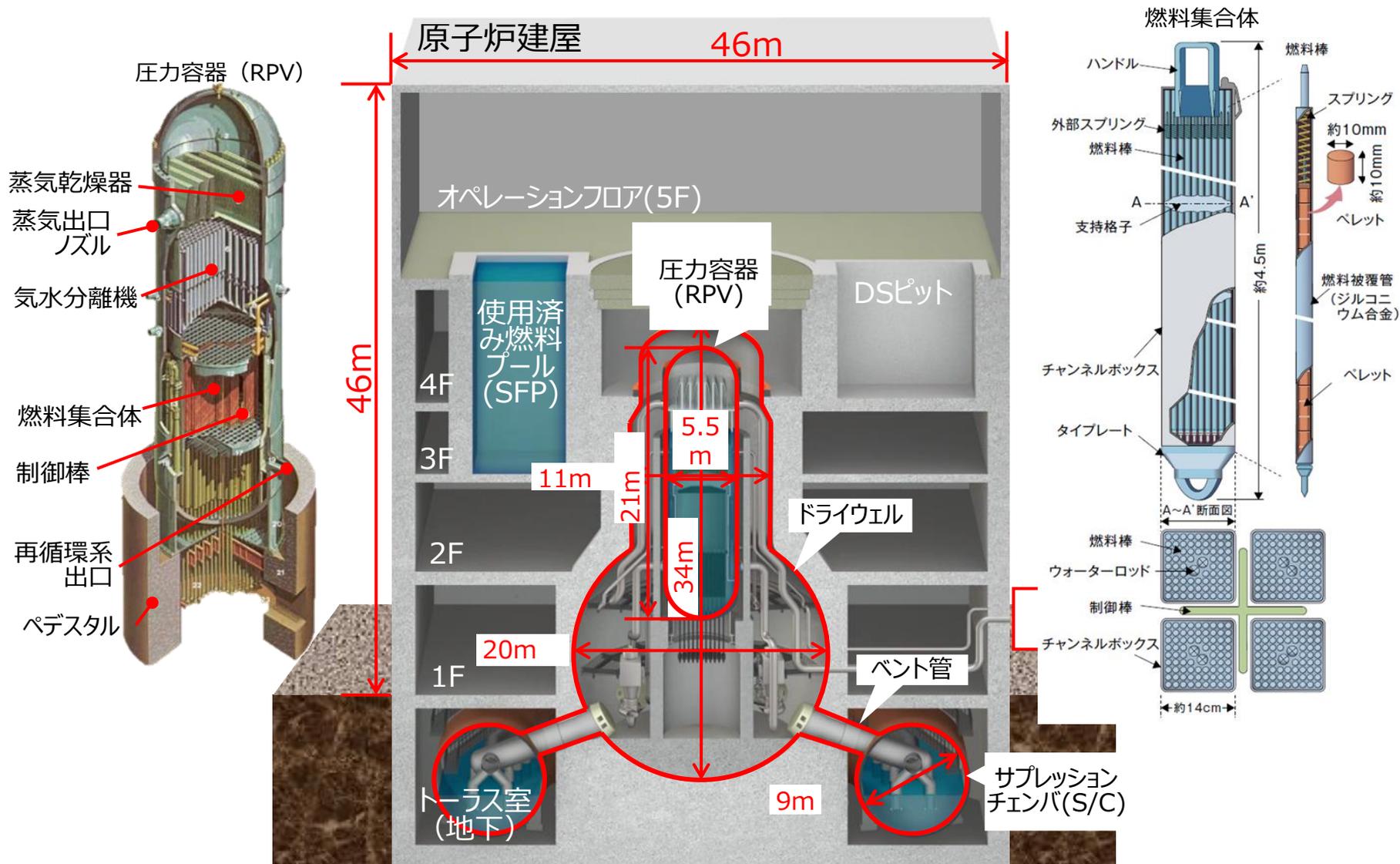
- 廃止措置とは

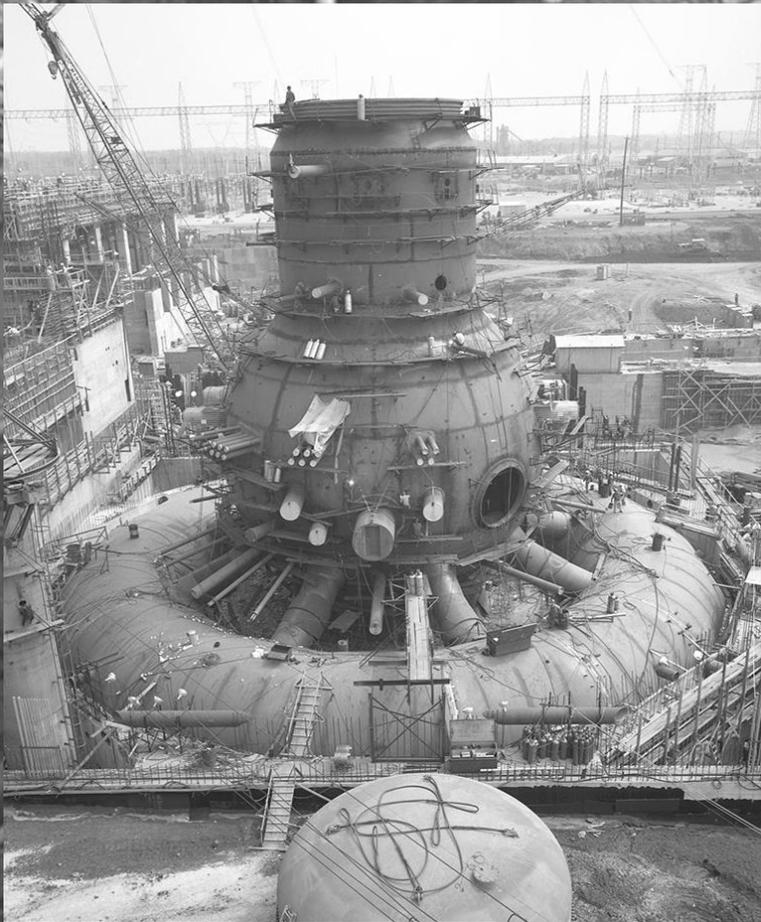
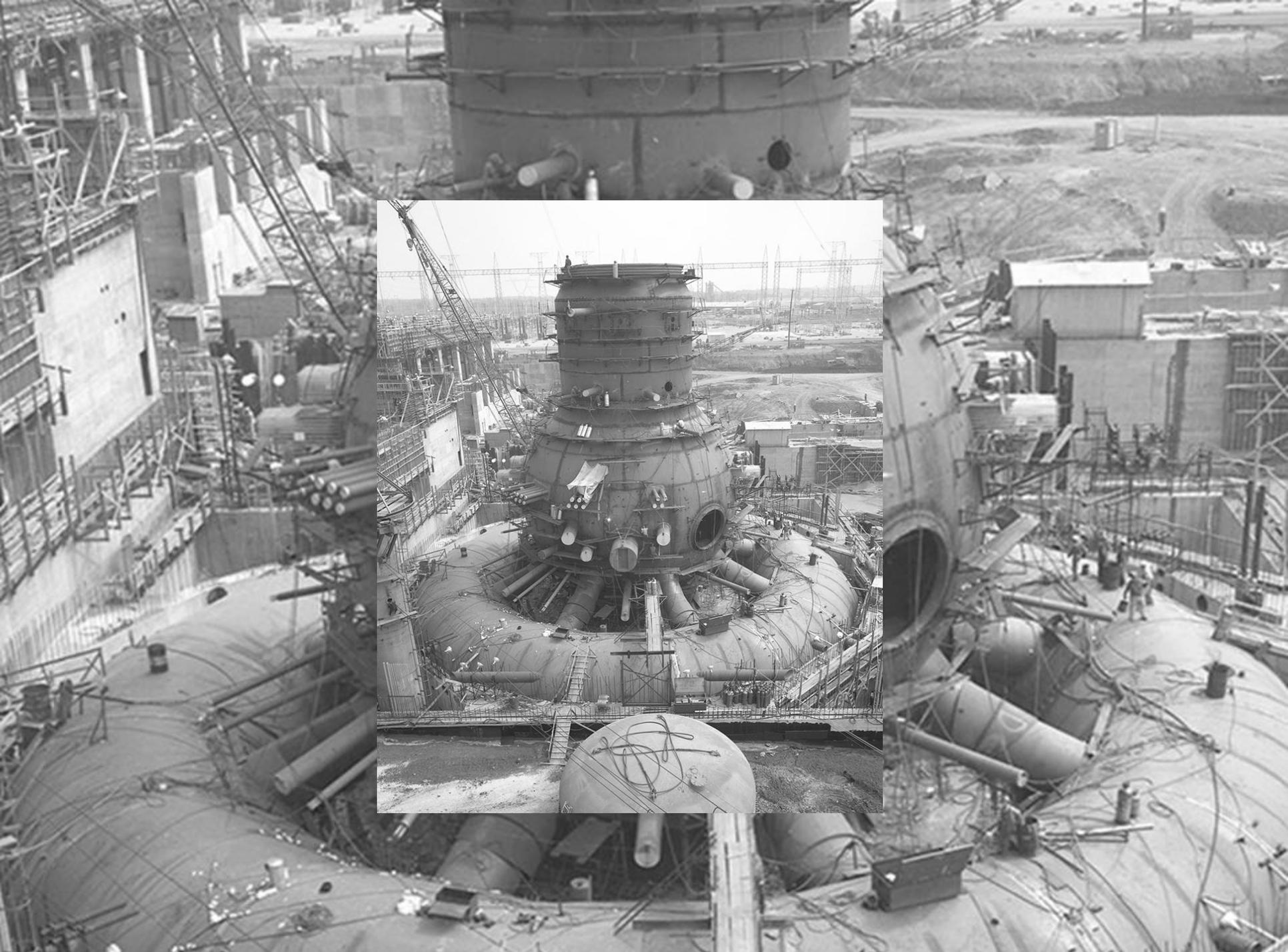
- ロボット技術 1 廃炉用ロボット

- ロボット技術 2 ロボットの課題

- おわりに

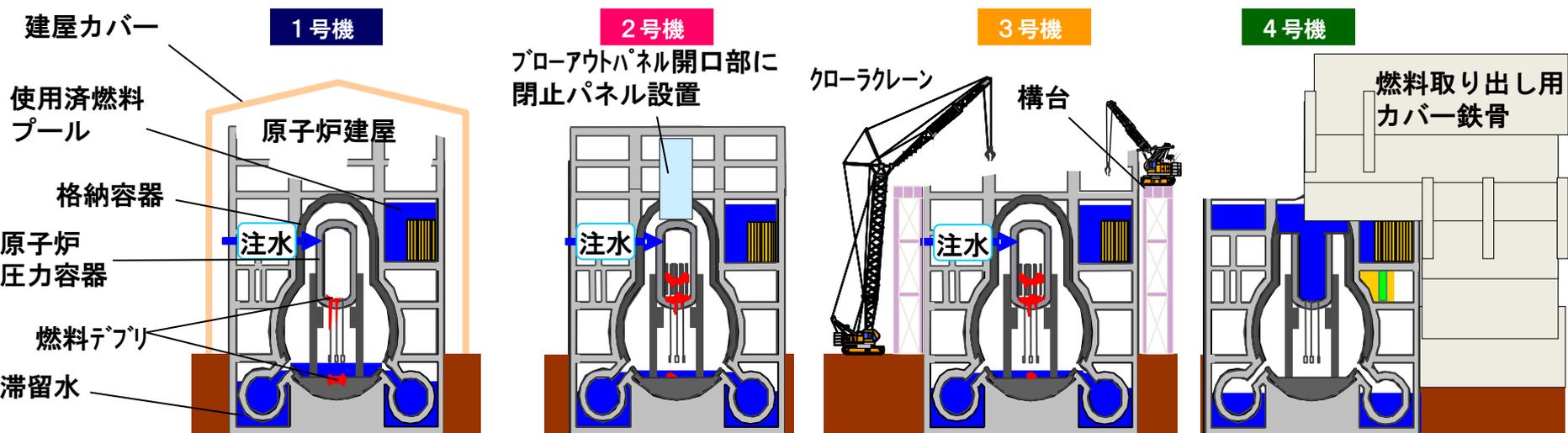
原子力発電所の構造





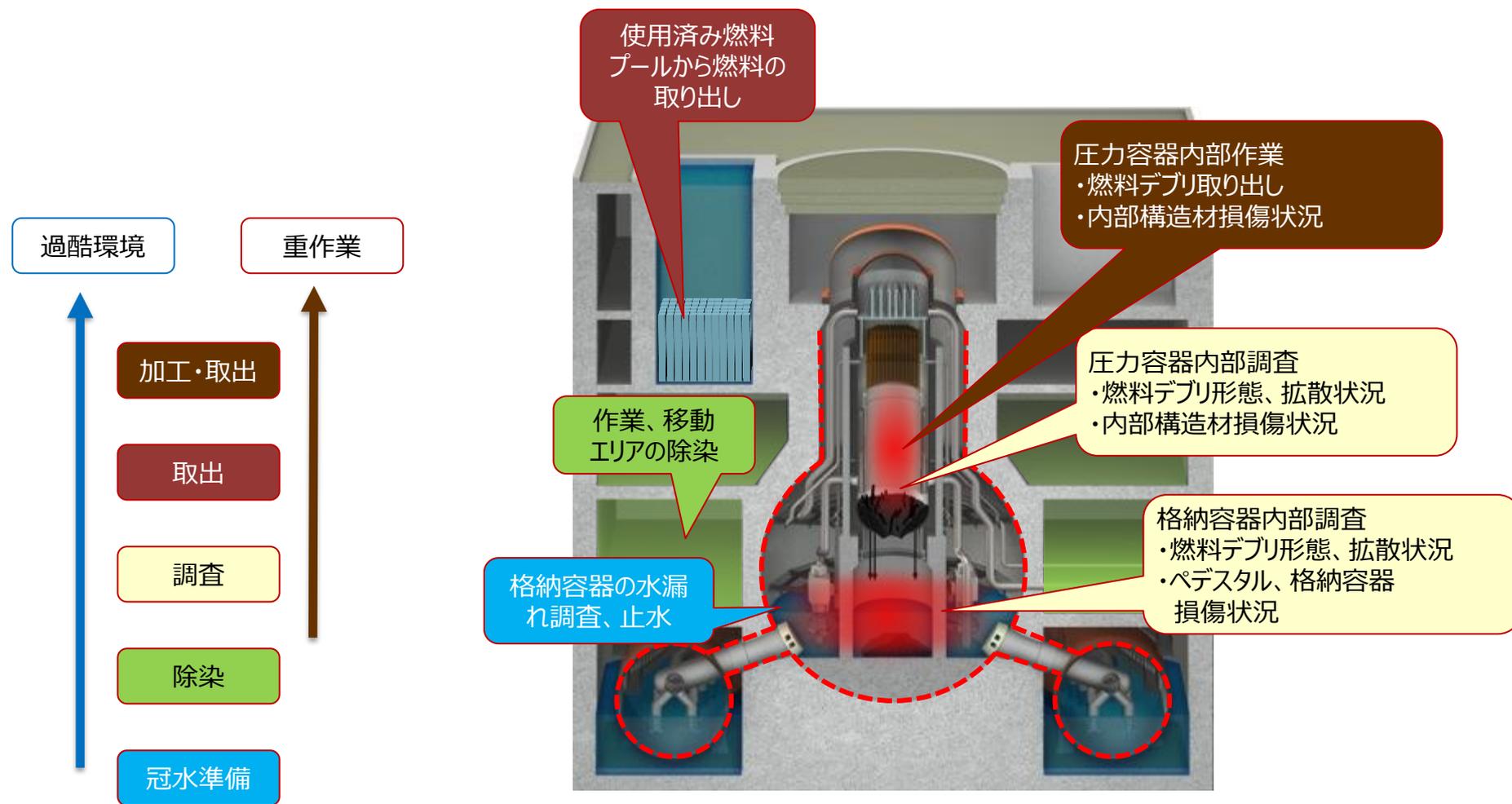
福島第一 1号機～4号機の現況

1号機：水素爆発。原子炉建屋外側にカバー設置。燃料のほとんどはPCV下部に融け落ちていると推定。
 2号機：燃料デブリはRPV中心部、下部プレナム、PCV下部に分散していると推定。
 3号機：水素爆発。燃料デブリはRPV中心部、下部プレナム、PCV下部に分散していると推定。
 4号機：水素爆発。燃料取り出しのためのカバー設置。使用済み燃料プールからの燃料取り出しを2013年11月から開始し、2014年12月に完了。



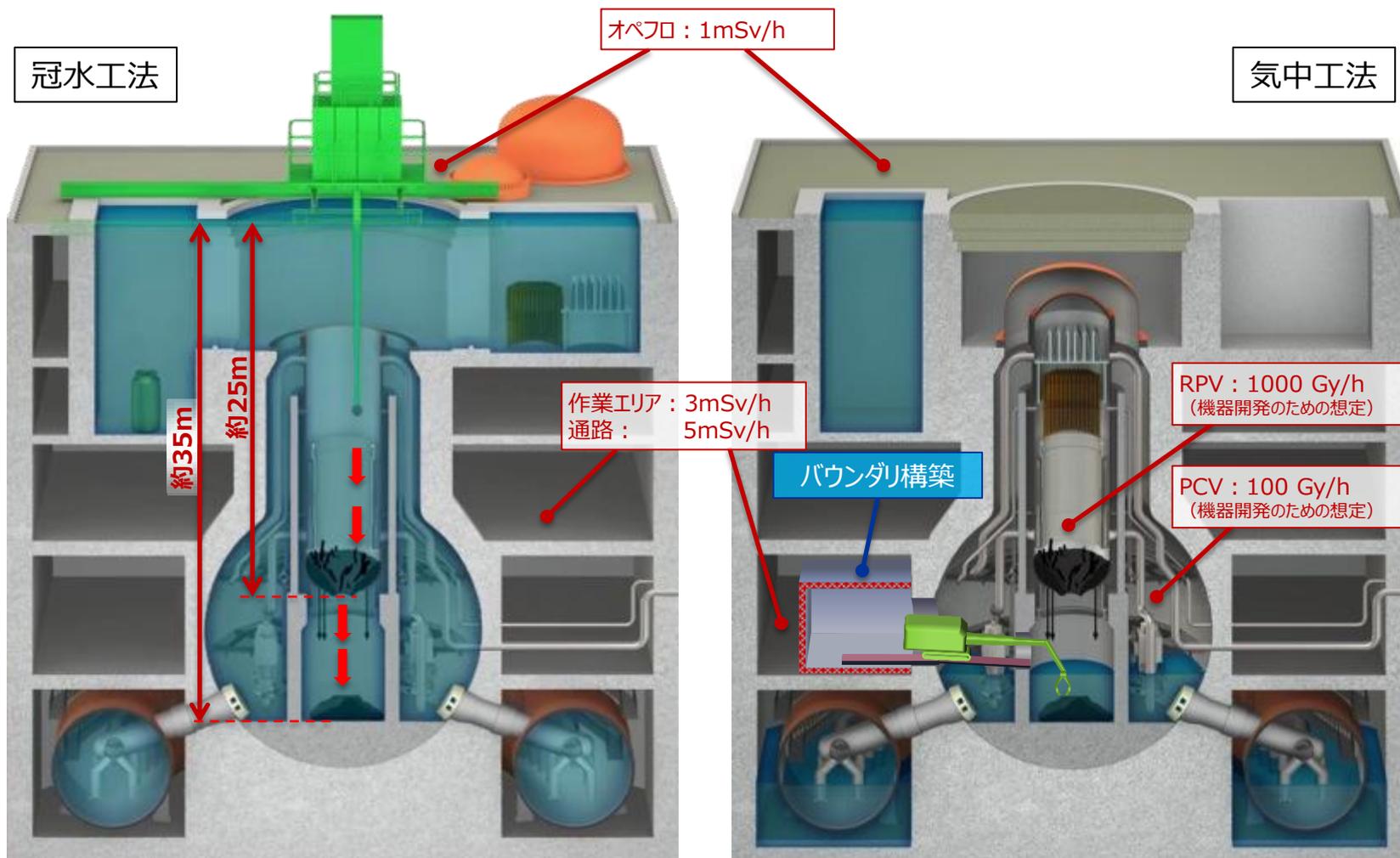
経済産業省 ▶ 東日本大震災関連情報 ▶ 廃止措置に向けた取組 <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning.html>

燃料デブリ取り出し(イメージ)

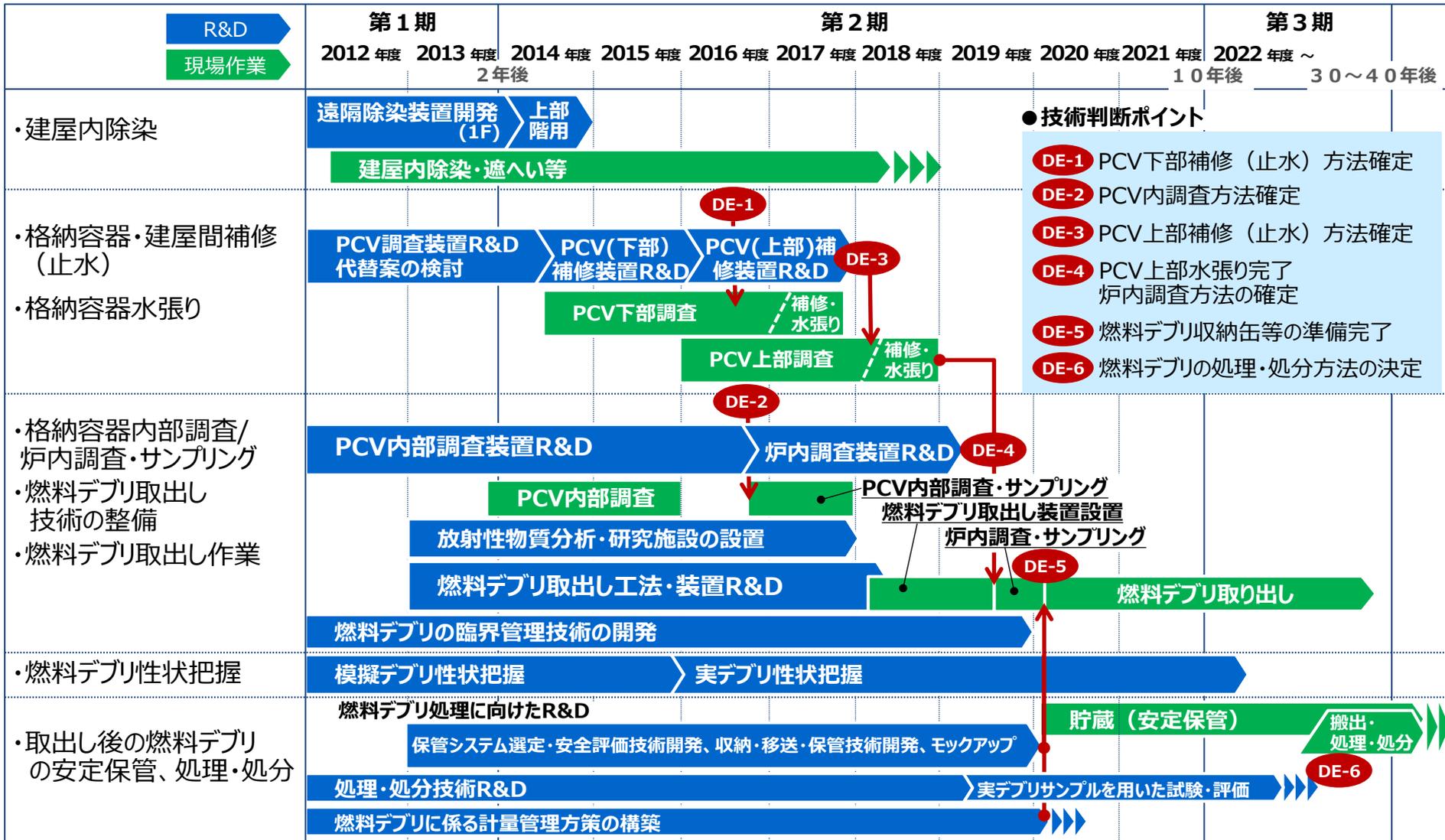


燃料デブリ取り出し(複数案)

燃料デブリ取り出し
2021年～



燃料デブリ取り出し計画（2号機）（中長期ロードマップ）



廃炉措置計画

過酷環境：放射性物質のリスク

多分野複合技術：連携作業、人材

社会

- アクセスできる空間や使えるリソースの制約
- 研究開発は国の仕事
- 社会的課題としての廃炉

技術

- 実際の内部状況が不明で手探りの状況
- あらゆる事態を想定した対処の検討
- 進捗によって廃炉措置全体の構想の変化



- 未踏分野：開発の立案と変更
- 長期計画：人材育成、産業技術化

本日の構成

- IRIDとその活動

- 廃炉技術の全体像

- 個別廃炉技術

- 廃止措置とは

- ロボット技術 1 廃炉用ロボット

- ロボット技術 2 ロボットの課題

- おわりに

遠隔除染技術

除染

デブリ調査

PCV補修

デブリ取出

収納・移送・保管

開発のニーズ

R/B内の線量が高く容易に人が近づけない。**作業場所の環境改善（線量低減）**が必要。

原子炉建屋（R/B）

使用済燃料プール

PCV

作業、移動エリアの除染

低所(床,下部壁面)用



吸引/ブラスト

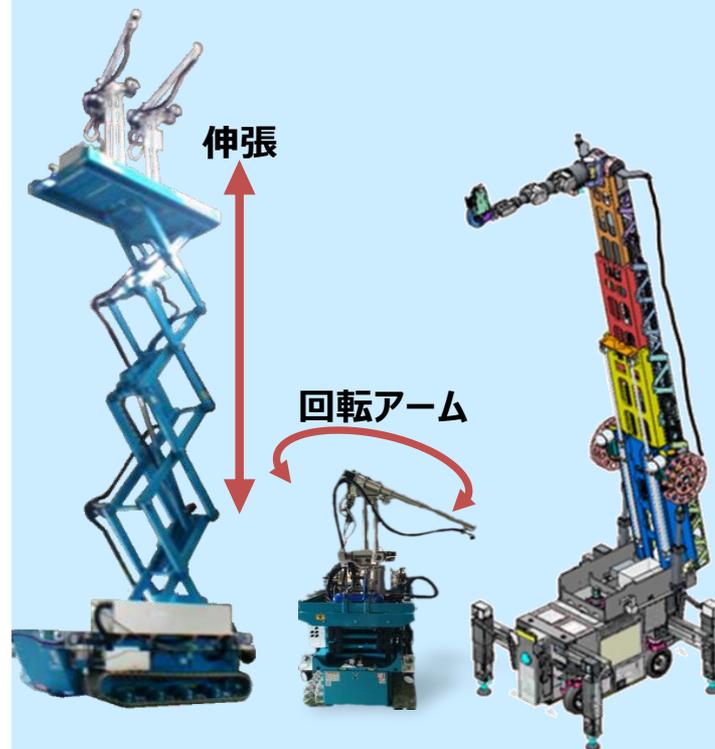


高圧水噴射



ドライアイズブラスト

高所用



上部階用



遠隔除染技術

除染

デブリ調査

PCV補修

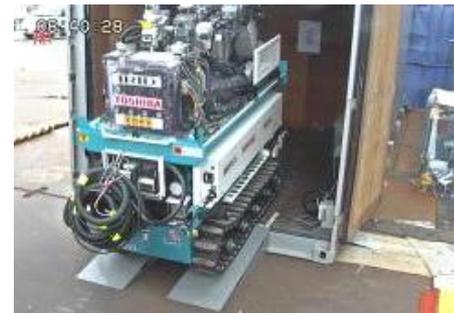
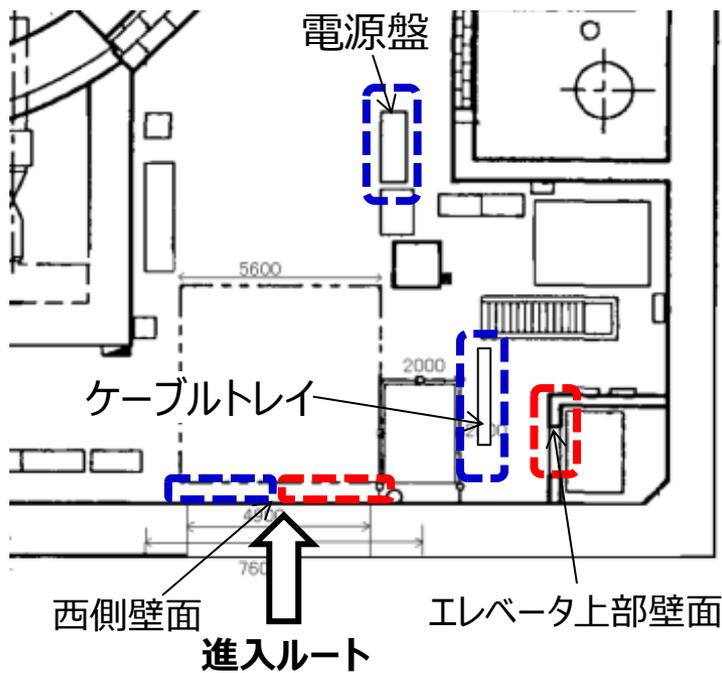
デブリ取出

収納・移送・保管

現場への適用（3号機）

2016年1月～2月に**3号機 R/B 1階**で吸引除染及びドライアイスブラスト除染を実施。

□ : 吸引 □ : ドライアイス



コンテナから搬出する場面



3号機R/B内への進入風景

大学との連携事例（遠隔除染技術の開発）

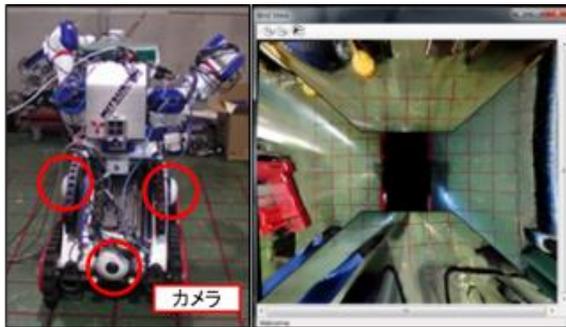
技術的課題

- カメラの情報のみでは**周囲の状況を把握しにくく**、ロボットの操作がしにくい。
- 多関節マニピュレータを狭い場所で動かすことは、**操作が複雑**で難しい。

採用済

周辺把握 1

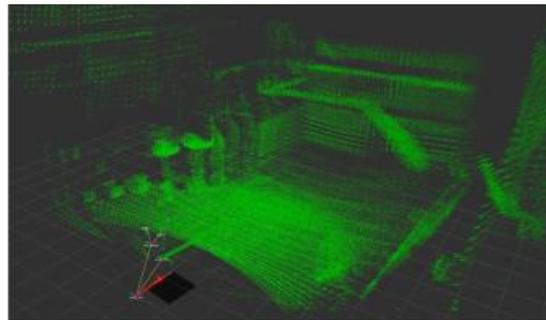
- 複数のカメラ画像を補正した**疑似俯瞰画像**表示技術



MEISTeRの疑似俯瞰画像

周辺把握 2

- カメラやレーザセンサによる**3Dマッピング**表示技術

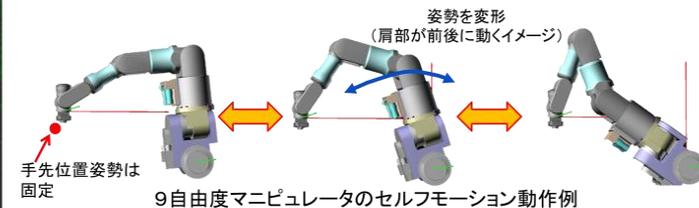


3Dマッピング画像

操作性向上

- 多自由度マニピレータの**セルフモーション***技術

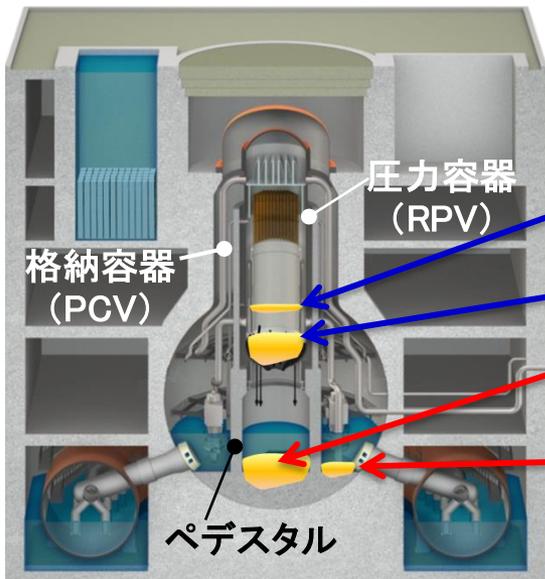
* : マニピレータの手先とベースを固定した状態で全体の形を変化させる動作



セルフモーション動作

総合的な炉内状況把握

原子炉建屋 (R/B)



 : RPV内
 : RPV外
 (単位：トン)

	1号機	2号機	3号機
場所	代表値※	代表値※	代表値※
炉心部	0	0	0
RPV底部	15	42	21
ペデスタル内側	157	146	213
ペデスタル外側	107	49	130
合計値	279	237	364

「代表値」：現時点において最も確からしい値。

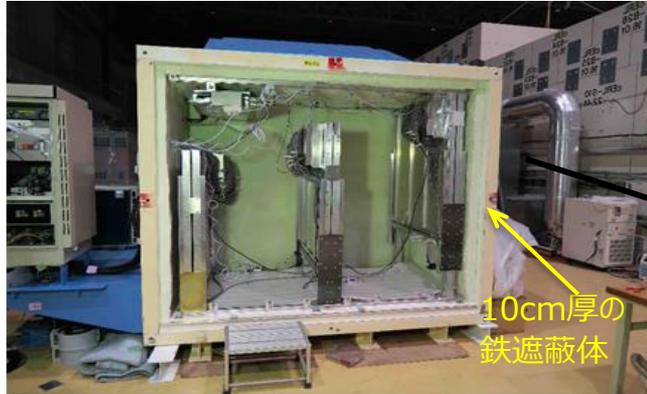
「推定重量」：燃料＋溶融・凝固した構造材（コンクリート成分を含む）

- ▶ 解析結果及び実機調査データ（温度データ、ミュオン測定、PCV内部調査等）を総合的に分析・評価。

ペデスタル底部のデブリが多い（80%以上）

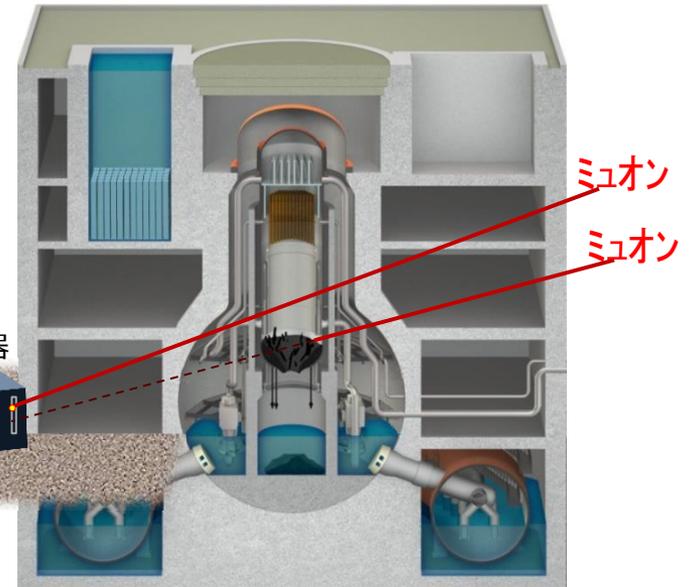
燃料デブリ検知 ～1号機ミュオン調査～

測定装置



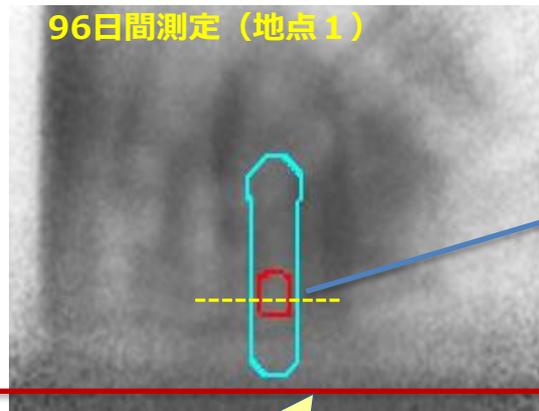
(約2.5mX2.0mX高さ2.1m)

ミュオン検出器



透過率の測定結果と分析結果

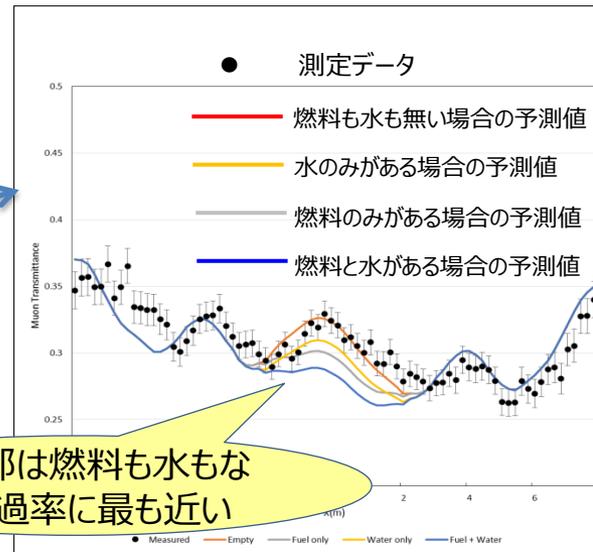
96日間測定 (地点1)



水平線近くは不鮮明

炉心部は燃料も水もない透過率に最も近い

測定値と予測値との比較 (炉心部透過率)

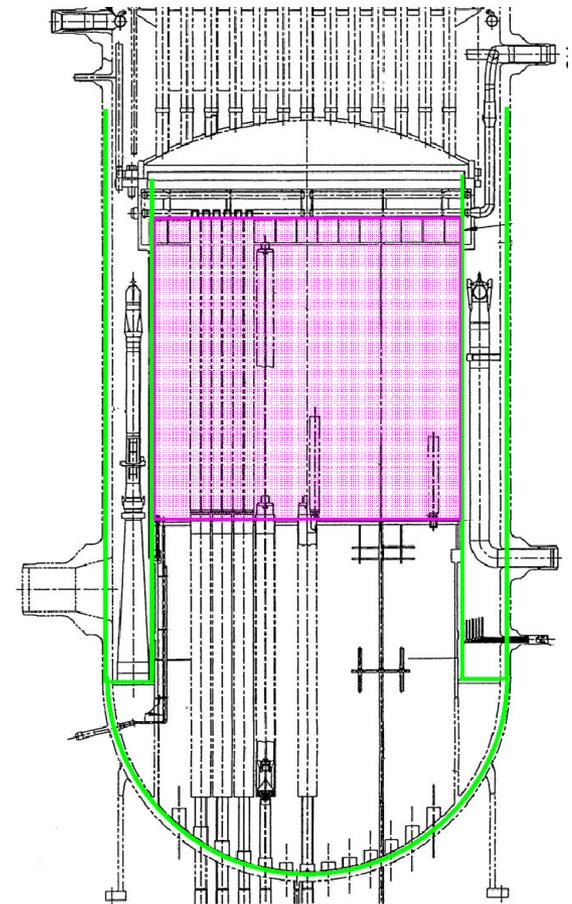
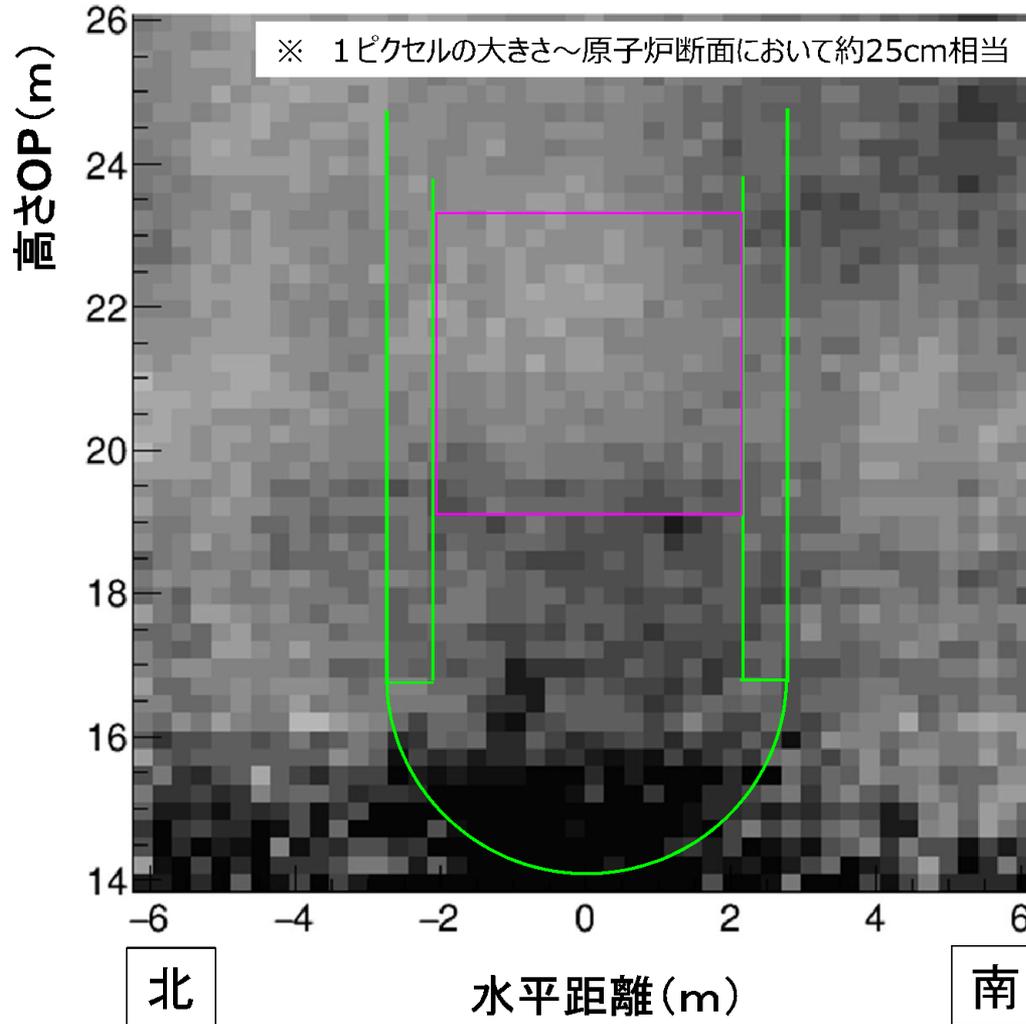


1号機では
炉心部に
燃料がない
と評価

燃料デブリ検知 ～2号機ミュオン調査結果～

- 圧力容器底部に燃料デブリと思われる高密度物質の影を確認。

(測定結果 H28.7.22 時点)



H28.7.28東京電力HD公表資料から引用

燃料デブリ検知 ～2号機ミュオン調査結果まとめ～

RPV

<RPV内に存在する物質質量>

(測定結果 H28.7.22 時点)

	評価結果 [ton]		(参考) 事故前の物質質量* [ton]
① 炉心域 (シュラウド内)	約20～50	評価結果の 不確かさ ～数十トン程度	約160 (燃料集合体) 約15 (制御棒)
② 圧力容器底部	約160		約35 (構造物) 水の影響は非考慮
合計 (①+②)	約180～210		約210
(参考) ③ 圧力容器上部	約70～100	ほぼ同じ	約80 (構造物)

測定期間：H28.3.22
～7.22

※ 設計上の重量。簡便のため、一部考慮していない構造物あり。
また、ミュオン測定は実際には斜めに見上げる方向に測定しているため、正確に一致するものではない。

- ▶ 燃料デブリの**大部分は圧力容器底部に存在**している
(東京電力HDによる推定)

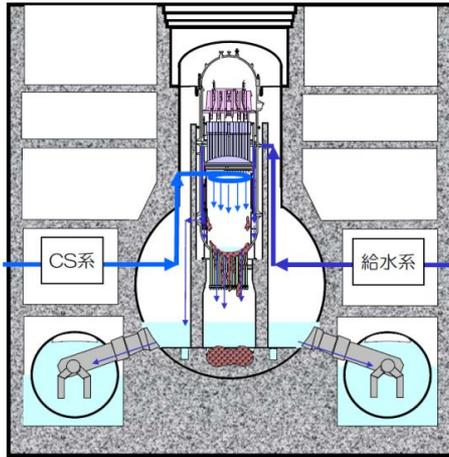
H28.7.28東京電力HD公表資料から引用

原子炉格納容器(PCV)内部調査

PCV内部調査の目的

- 燃料デブリ取り出しに向けて、原子炉格納容器内の燃料デブリの位置、状況を調査する
- 圧力容器を支持するペDESTAL等の状況を確認する

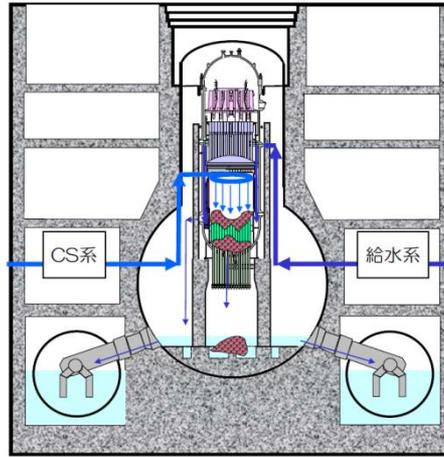
調査および調査装置の開発方針



1号機

- ・溶融燃料は、ほぼ全量がRPV下部プレナムへ落下、炉心部には殆ど燃料が存在せず

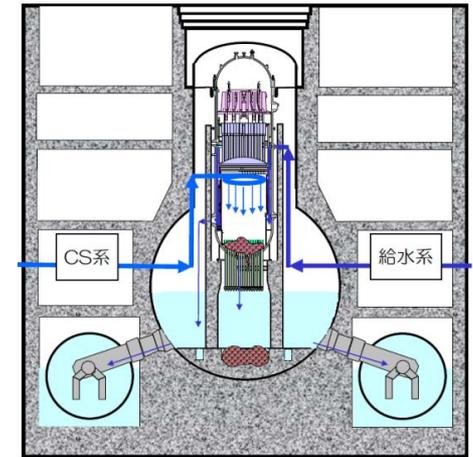
- ・燃料デブリのペDESTAL外側までの拡散の可能性から、ペDESTAL外側の調査を優先



2号機

- ・溶融した燃料のうち、一部は下部プレナムまたはPCVペDESTALへ落下、燃料の一部は炉心部に残存と推測

- ・ペDESTAL外側までの拡散の可能性低く、ペDESTAL内側の調査を優先
- ・3号機はPCV内の水位高く、1・2号機で使用予定のペネが水没の可能性あり、別方式の検討要



3号機

PCV内部調査技術

ペダスタル外側の調査（1号機）

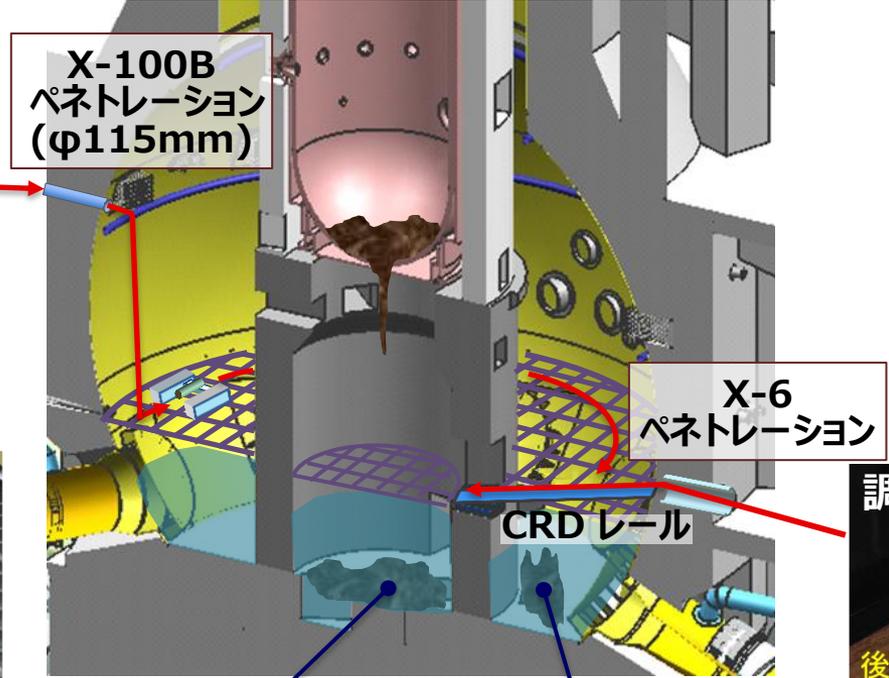
○形状変化型ロボット（B1調査）

ペダスタル内側の調査（2号機）

○クローラ型遠隔調査ロボット（A2調査）



変形

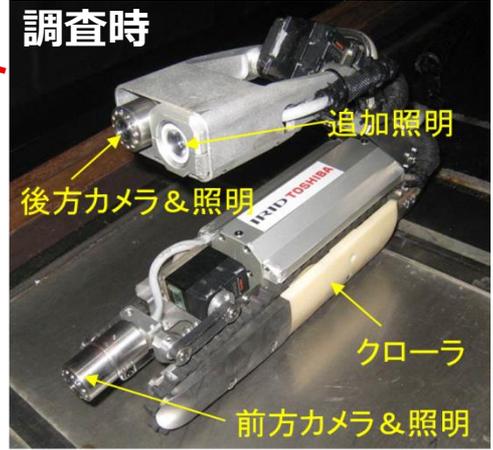


ペダスタル内
燃料デブリ
(イメージ)

ペダスタル外
燃料デブリ
(イメージ)



変形



デブリ取り出し技術

技術的課題

- **放射性ダストの閉じ込め**機能の確保
- **遠隔操作**技術の確立
- **被ばく低減・汚染拡大防止**技術の確立

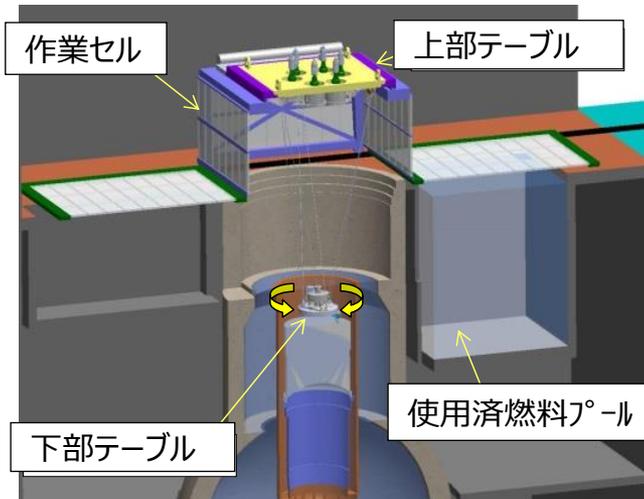
基盤技術の開発



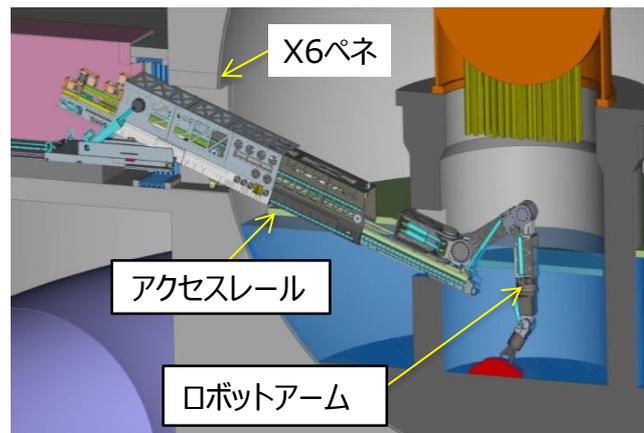
ロボットアーム



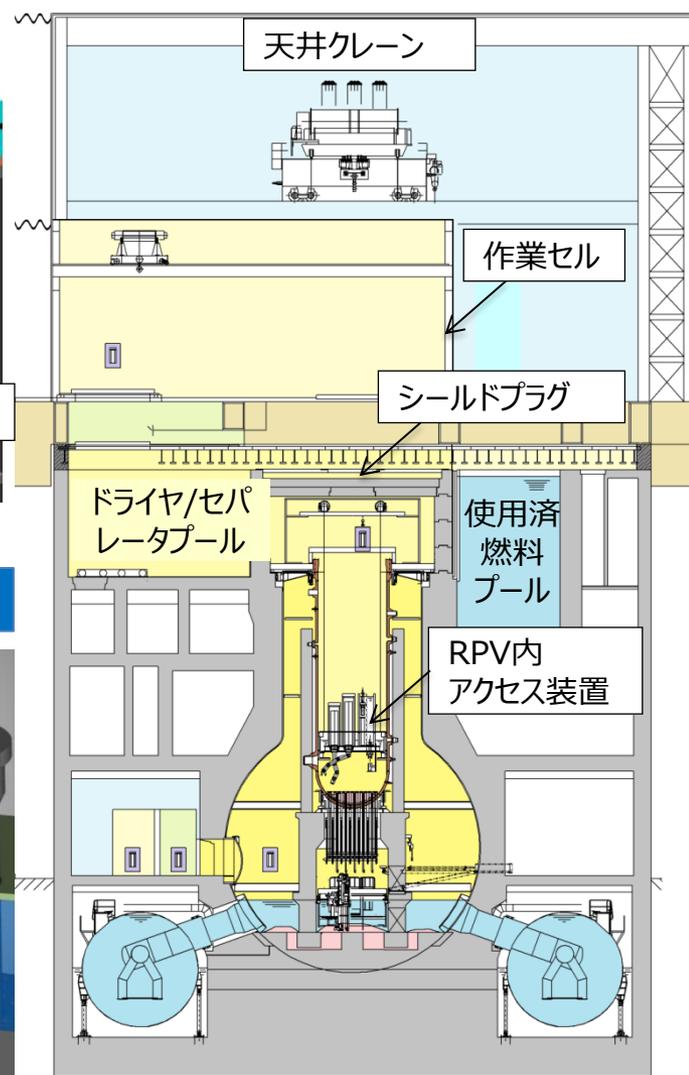
冠水-上アクセス工法（概念）



気中-横アクセス工法（概念）



気中-上アクセス工法（概念）

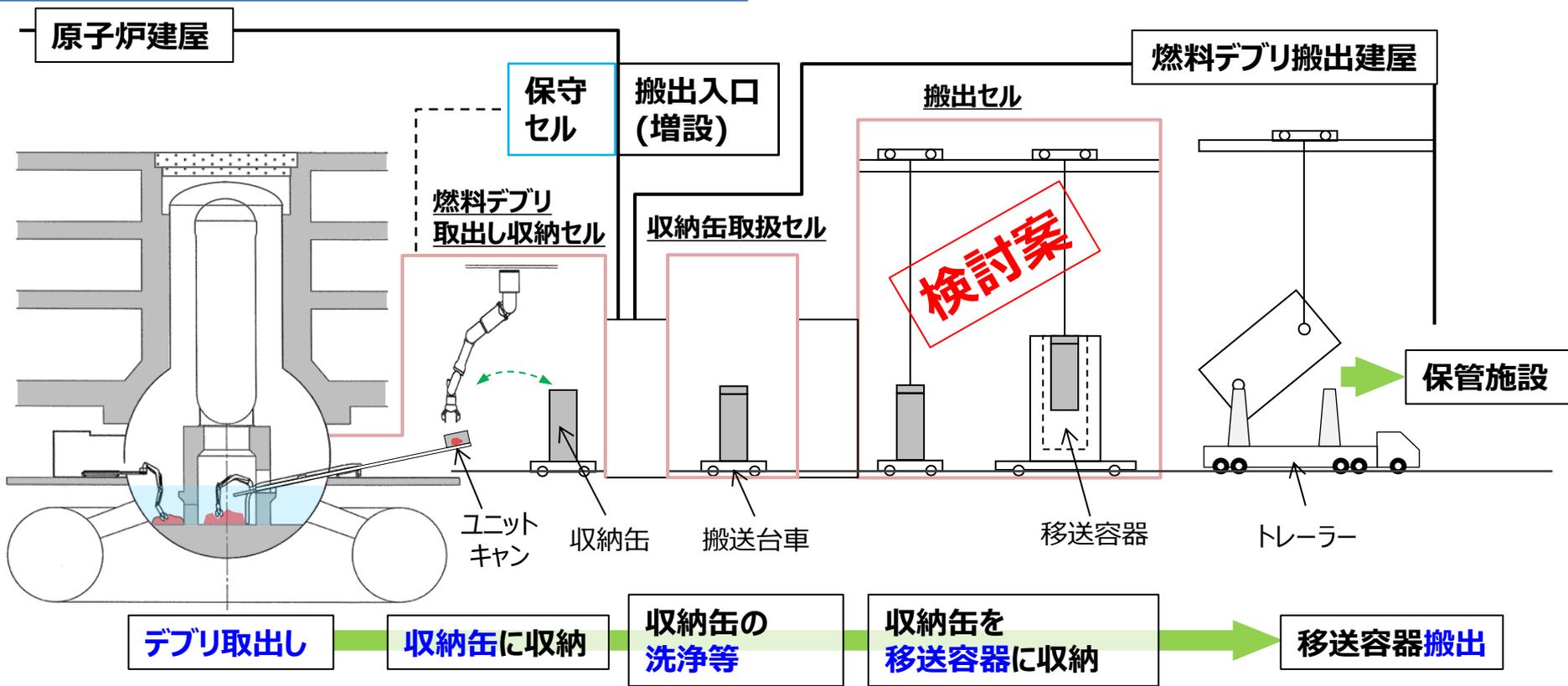


収納缶の設計

⇒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）



PCV補修・止水技術

除染

デブリ調査

PCV補修

デブリ取出

収納・移送・保管

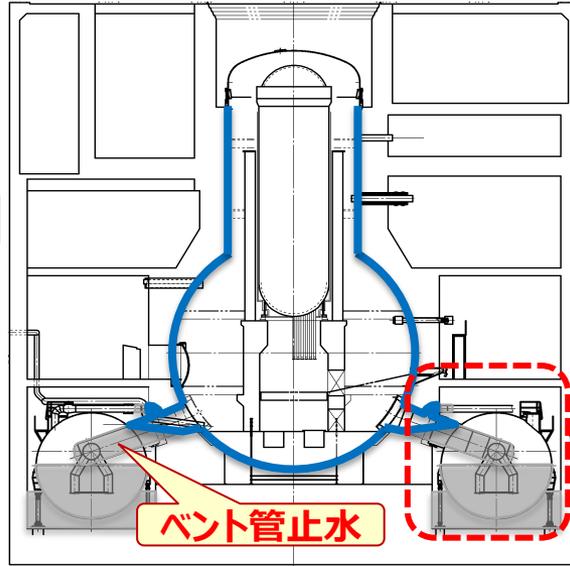
ベント管止水試験



ベント管

1 / 2 スケール試験体で
止水性能を確認 (工場)

— : 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)

ベント管

サプレッション
チェンバ (S/C)

ダウンカマ

クエンチャ

トラス室
壁面

楡葉遠隔技術開発センター内に建設

作業フロア

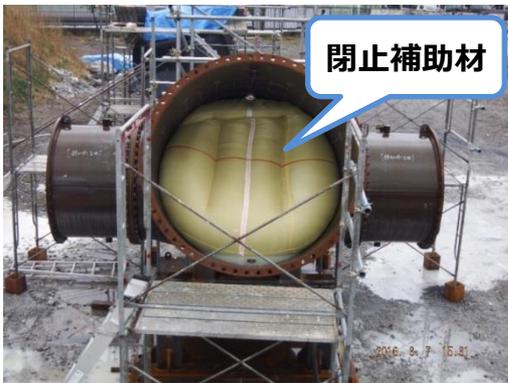
約30m

約18m

約13m

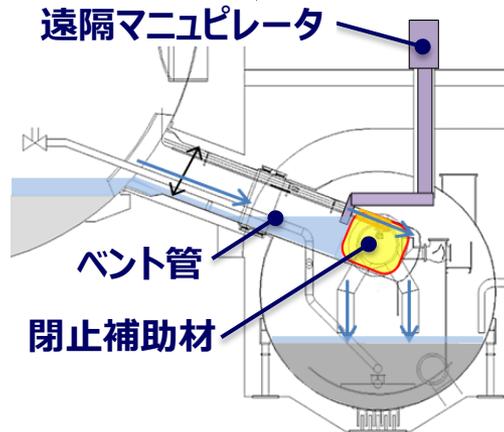
試験体

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)



遠隔マニピレータ

ベント管

閉止補助材

原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の 実規模試験

実規模試験の実施項目

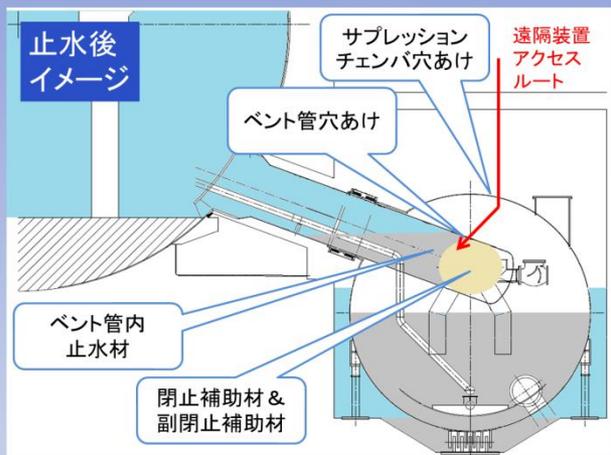
- ①ベント管止水技術
- ②サブプレッションチャンバー（S/C）内充填止水技術
- ③サブプレッションチャンバー（S/C）脚部補強技術

それぞれについて、施工性確認試験及び打設試験を行う。

原子炉格納容器漏えい箇所への補修技術実規模試験

① ベント管止水技術の概要

原子炉格納容器(PCV)からの漏えいの主経路となるベント管を止水し、水張りが出来る状態にすることを目的とした技術開発。



【候補材】

閉止補助材: アラミド系繊維

副閉止補助材: 高耐放射性ゴム等

ベント管内止水材: セメント系材料等

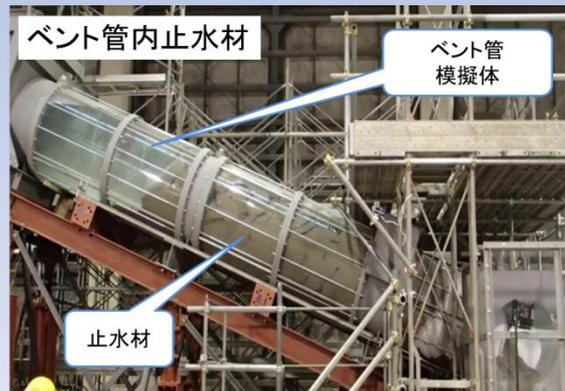


【実施手順】

① サブレーションチェンバ及びベント管へ穴あけ

② ベント管内へ閉止補助材展開及び副閉止補助材による隙間充填

③ ベント管内に止水材を打設



原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の実規模試験

② サプレッションチャンバ内充填止水技術の概要

S/C内外の流路となる配管端部(クエンチャ、ストレーナ)及びS/Cの損傷部(φ50mm以下を想定)を止水することを目的とした技術開発。また、ダウンカマ、真空破壊弁までを埋設してベント管止水のバックアップとしての役割も検討中。

【実施手順】

- ① サプレッションチェンバへ穴あけ
- ② サプレッションチェンバ内へ止水材打設
- ③ ストレーナ、クエンチャを埋設止水

※ダウンカマ、真空破壊弁を埋設止水(オプション)

工場試験(コンクリート打設中)

工場試験(ストレーナ埋設前)

【候補材】
サブプレッションチェンバ内止水材:
水中不分離性コンクリート

クエンチャ模擬

ストレーナ模擬

本日の構成

- IRIDとその活動

- 廃炉技術の全体像

- 個別廃炉技術

- 廃止措置とは

- ロボット技術 1 廃炉用ロボット

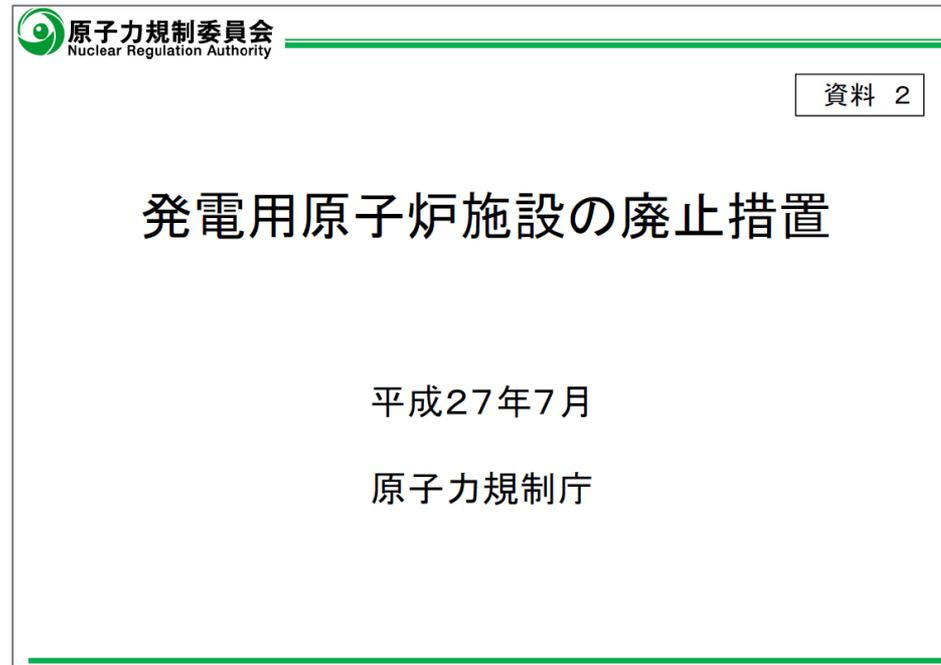
- ロボット技術 2 ロボットの課題

- おわりに

(参考)発電用原子炉の廃止措置

- 「平成27年度第1回松江市原子力発電所環境安全対策協議会」
(平成27年7月28日)において、原子力規制委員会が説明した資料

http://www1.city.matsue.shimane.jp/shisei/jyouhoukoukai/shingikai/H27/7/270728dai1_genshiryokuanzentaisaku.html



http://www1.city.matsue.shimane.jp/shisei/jyouhoukoukai/shingikai/H27/7/270728dai1_genshiryokuanzentaisaku.data/shiryo2.pdf

I 発電用原子炉施設の廃止措置の状況

世界の原子力発電所の廃止措置状況



(2012年1月16日現在のIAEAのPRIS(Power Reactor Information System)データベース(公開)に"Permanent Shutdown"と登録された小型炉も含む138基のうち、原子炉等規制法に基づく特定原子力施設に指定された福島第一原子力発電所1~4号機を除く134基を集計し作成。)

我が国の原子力発電所(平成27年4月1日現在)

- 商業用原子炉
- 研究開発段階炉



廃止措置中の発電用原子炉施設(平成27年6月1日現在)

	日本原子力発電㈱ 東海発電所	(国研)日本原子力研究開発機構 原子炉廃止措置研究開発センター (通称:ふげん)	中部電力㈱浜岡原子力発電所	
			1号機	2号機
所在地	茨城県那珂郡東海村	福井県敦賀市	静岡県御前崎市	
原子炉型式	黒鉛減速炭酸ガス冷却型 (GCR)	重水減速沸騰軽水冷却圧力管型 (ATR)	沸騰水型 (BWR)	
電気出力	16.6万kW	16.5万kW	54万kW	84万kW
原子炉設置許可日	昭和34年12月14日	昭和45年11月30日	昭和45年12月10日	昭和48年6月9日
運転期間	昭和41年7月25日～ 平成10年3月31日	昭和54年3月20日～ 平成15年3月29日	昭和51年3月17日～ 平成13年11月7日	昭和53年11月29日～ 平成16年2月21日
廃止措置計画申請	平成18年3月10日	平成18年11月7日	平成21年6月1日	
廃止措置計画認可	平成18年6月30日	平成20年2月12日	平成21年11月18日	

Ⅱ 廃止措置とは

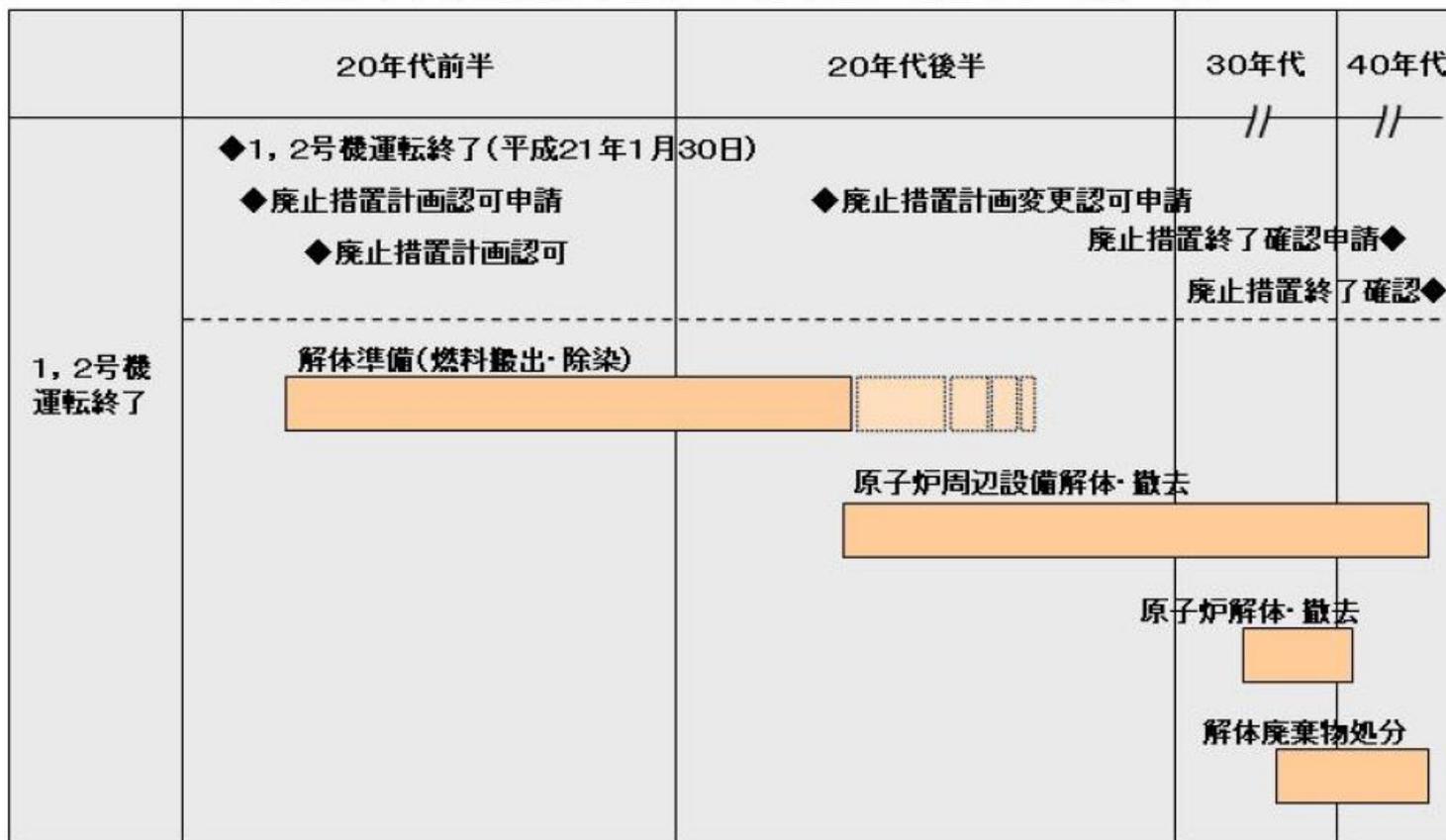
- ① 発電用原子炉施設の解体
- ② 保有する核燃料物質の譲渡し
- ③ 核燃料物質による汚染の除去
- ④ 核燃料物質によって汚染された物の廃棄
- ⑤ その他の措置

【核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律】
第43条の3の33第1項

廃止措置の工程例(浜岡原子力発電所)

浜岡原子力発電所1, 2号機の廃止措置は、廃止措置計画に基づき実施され、平成40年代までに完了する予定です。

浜岡原子力発電所1, 2号機の廃止措置の主要工程



(参考)廃止措置

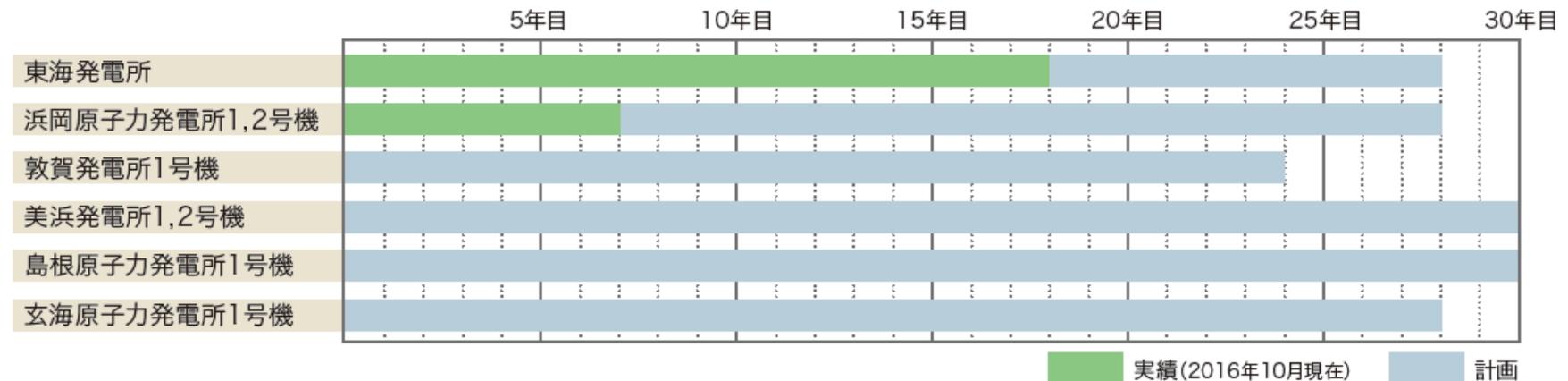
パンフレット「原子力発電所の廃止措置」電気事業連合 2016年10月版
http://www.fepec.or.jp/library/pamphlet/pdf/19_haisisochi.pdf



廃止措置の工程は、20～30年程度の長期にわたります

原子力規制委員会から認可された計画に基づき、原子力発電所から放射性物質（使用済燃料や、汚染された施設）を、安全に配慮して丁寧に取り除いていきます。2016年10月現在、商業用原子力発電所としては、日本原子力発電(株)東海発電所と、中部電力(株)浜岡原子力発電所1,2号機が廃止措置に入っています。

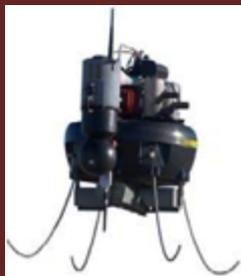
■廃止決定および廃止措置中の発電所における廃止措置の工程



本日の構成

- IRIDとその活動
 - 廃炉技術の全体像
 - 個別廃炉技術
 - 廃止措置とは
- ロボット技術 1 廃炉用ロボット
 - ロボット技術 2 ロボットの課題
- おわりに

廃炉に向けたロボット開発



東京電力ホームページ>写真・映像ライブラリー>写真・動画
<http://www.tepcoco.jp/tepcconews/library/index-j.html>

クローラタイプ・ロボット

Quince



CBRNE災害（科学、生物、放射性物質、核、爆発物）の際に、消防等の隊員に代わって現場に進入し、状況調査を行うことを目的に開発

（国際レスキューシステム研究機構、千葉工業大学、東北大学が共同で開発）

ロボカップ2007、2009世界大会運動性能の部で優勝したクローラ型ロボットKenafを改良

高い運動性能（階段、段差、ガレキ走破性）をもとに、映像撮影、環境モニタリング、軽量物のハンドリングに威力を発揮

田所諭「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」2011

田所諭「国際レスキューシステム研究機構の活動」2011

千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo) <http://www.furo.org/>

サーバイランナー



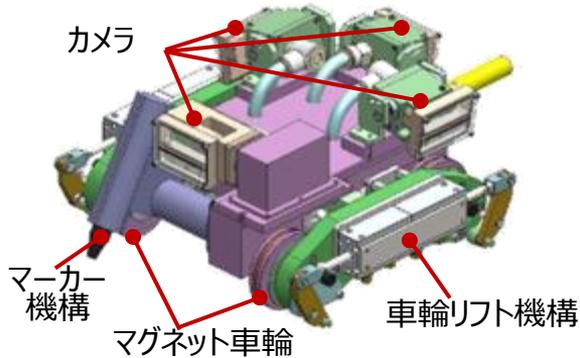
FRIGO-MA



磁気吸着移動ロボット

サプレッションチェンバ (S/C) やベント管上の漏えいなどの調査を行うため、磁力で鋼鉄製壁面に吸着し、全面を移動可能なクローラを開発。

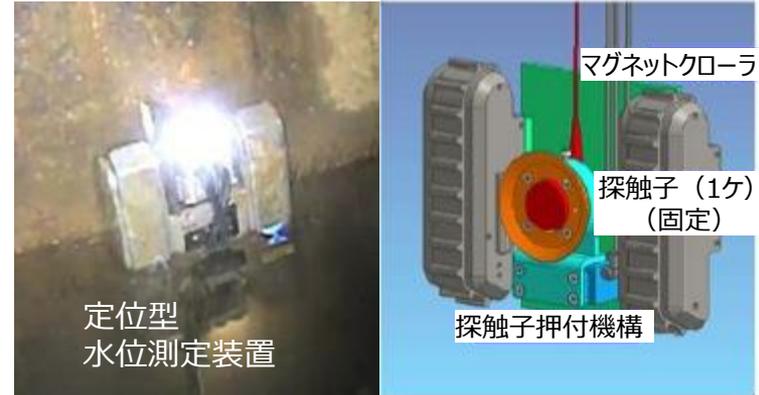
SC-ROV



S/C上の亀裂、漏えいを調査

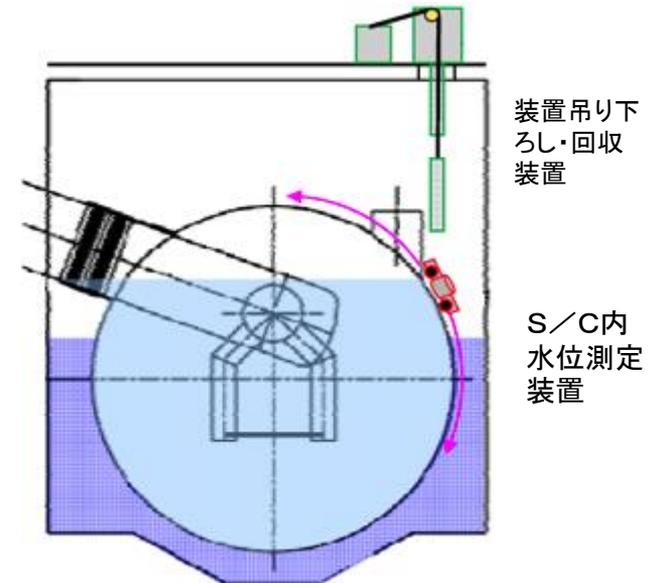
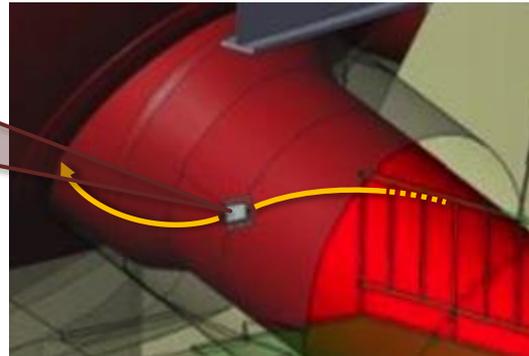


S/C内水位をS/C外面より超音波で測定する



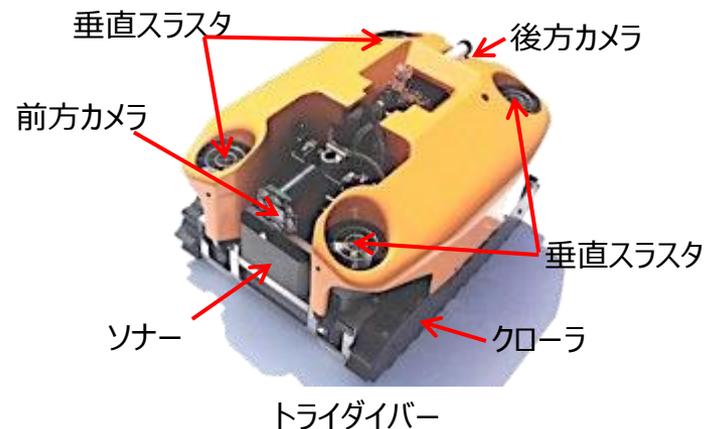
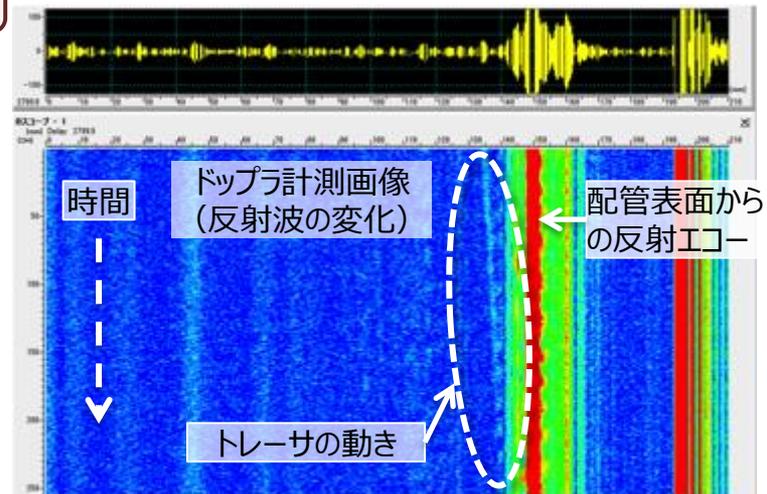
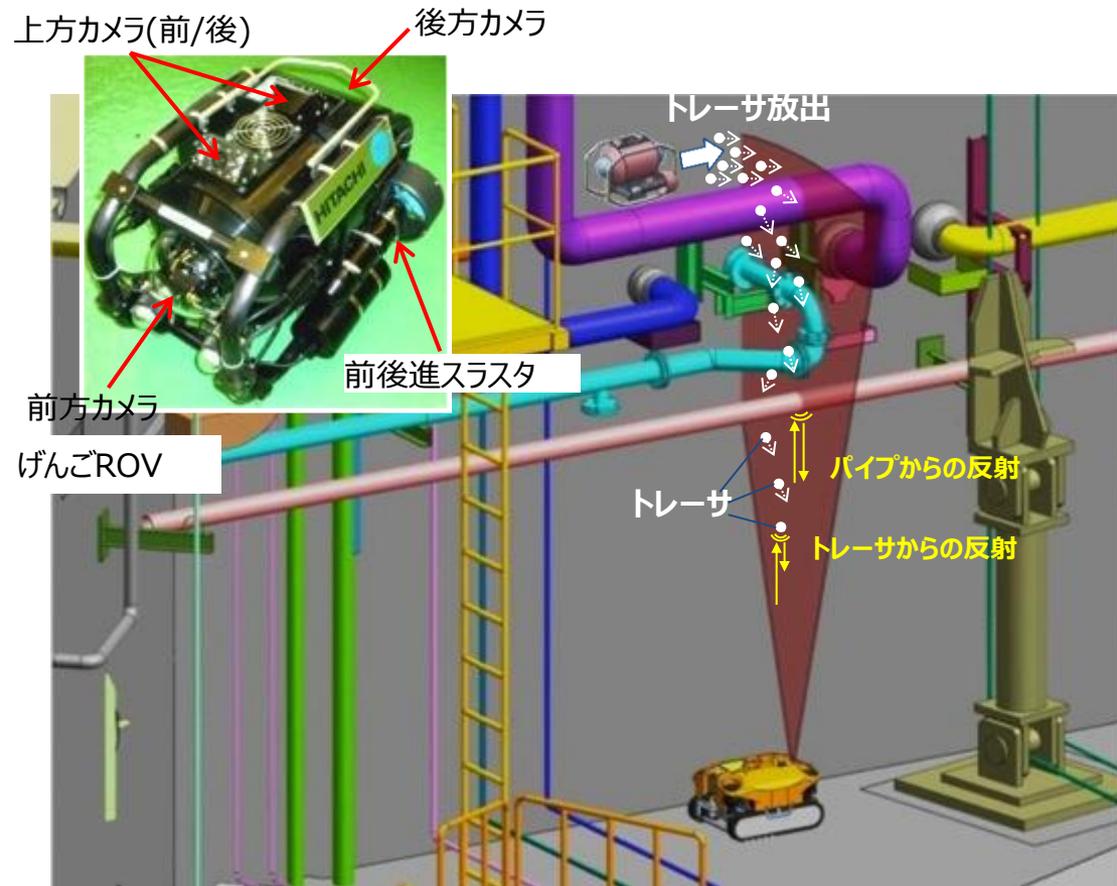
ベント管上を移動し、PCV接合部の漏えいを調査

VT-ROV



水中ロボット

トラス室壁面の水没したペネ貫通部の漏えいを調査するための水中調査ロボットを開発。水中の漏えいを調査するために、超音波ソナーによるドップラ計測機能を装備する。



作業ロボット(その1)

除染装置およびPCV内部調査のアクセスルート確保、ならびに線量低減のために、無人重機を活用

双腕作業ロボット
ASTACO-SoRA



交換先端工具



3号機大物搬入口周辺の障害物除去
(2013.7.25-8.23)



建設作業機器のロボット化

破碎ロボット
BROKK(スウェーデン)



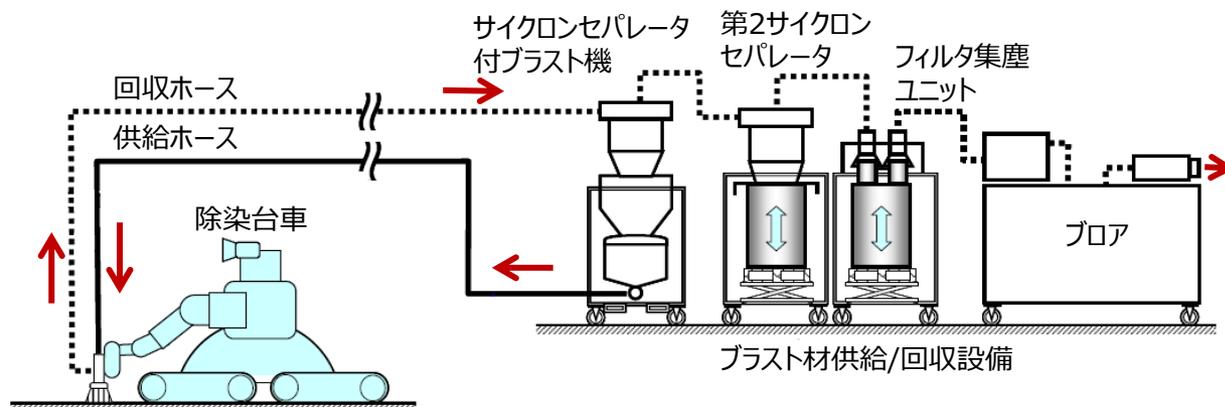
Bobcat



作業ロボット(その2) 除染ロボット

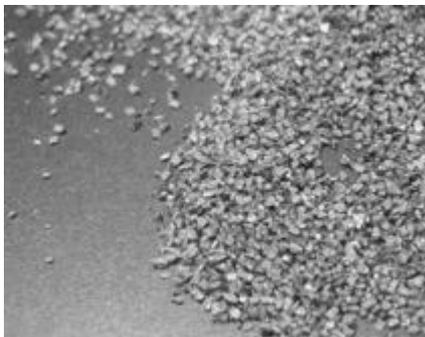
原子炉格納容器漏えい箇所調査・補修等の作業環境改善のため、現場の汚染状況にあった遠隔除染装置を開発

ブラスト・吸引除染装置



研磨剤を除染対象に噴射、表面を研削する工法。
噴射後の研削材（スチールグリット）を回収し、セパレータで汚染と分離後再利用。

ブラスト（径0.3mmスチールグリット）



高圧水除染装置



ドライアイスブラスト除染装置



本日の構成

- IRIDとその活動
- 廃炉技術の全体像
- 個別廃炉技術
- 廃止措置とは
- ロボット技術 1 廃炉用ロボット
- ロボット技術 2 ロボットの課題
- おわりに

廃炉ロボットの課題

福島第一原子力発電所の事故対応

放射性物質によるリスク
から人や環境を守る

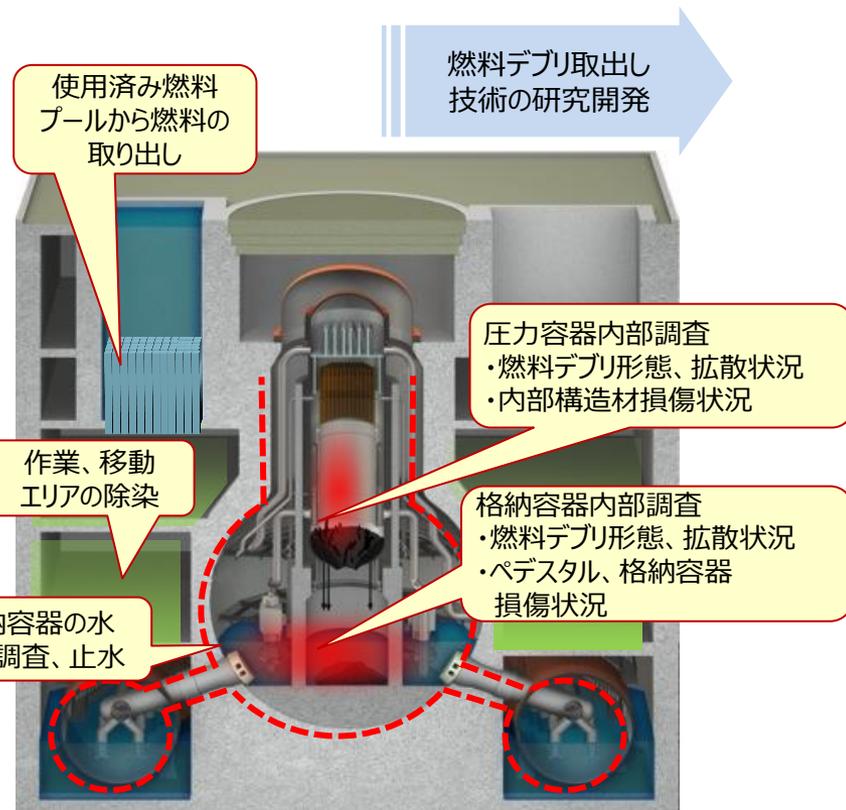
<廃炉措置>

- 人が近づけない高放射線環境
- 安全最優先で着実な調査や作業

→ **ロボット技術を活用した
遠隔基盤技術**

<課題の難しさ>

- 実際の内部状況が不明で手探りの状況
- アクセスできる空間や使えるリソースの制約
- あらゆる事態を想定した対処の検討
- 進捗状況によって廃炉措置全体の構想の変化



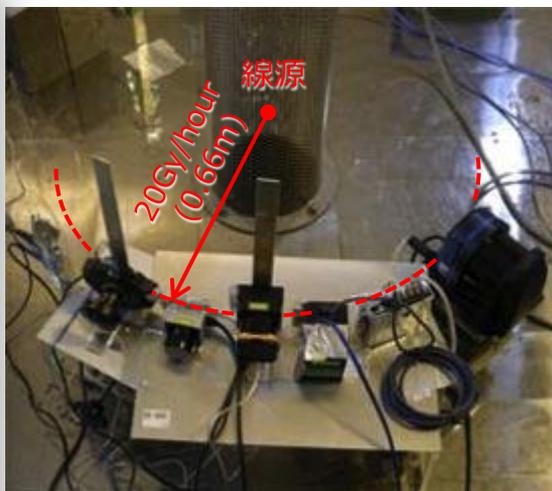
- 想定ベースの仕様設定
- 高信頼な特注製品
- 人間機械系の導入
- 開発途中での仕様変更

電子機器に対する放射線の影響

- 1号機: 原子炉建屋内線量: 1階約数ミリ～約4000mSv/h以上(南側)
 2号機: 原子炉建屋内線量: 1階約数ミリ～約30mSv/h、オペフロ最大880mSv/h
 3号機: 原子炉建屋内線量: 1階約20ミリ～約4000mSv/h以上(北側の一部)、オペフロ最大約2000mSv/h

構成要素部品の放射線耐力を把握し、遮蔽材なしでの高放射線下の運用可能性を検討

参考: ガンマ線の影響を1/10とする遮蔽 = 鉛版: 2-30mm / 鋼鉄: 7-80mm



ガンマ線照射試験

ガンマ線照射試験 (20Gy/hour-40Gy/hour)

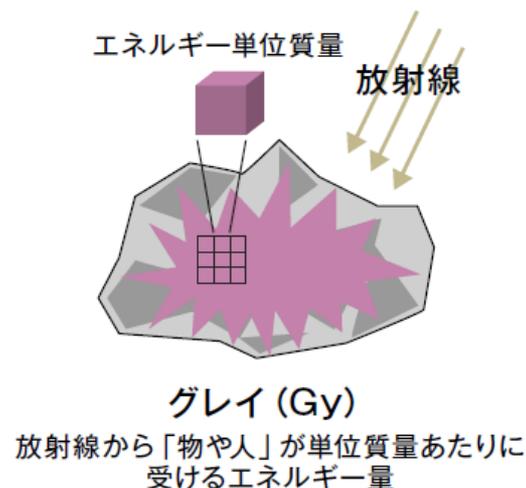
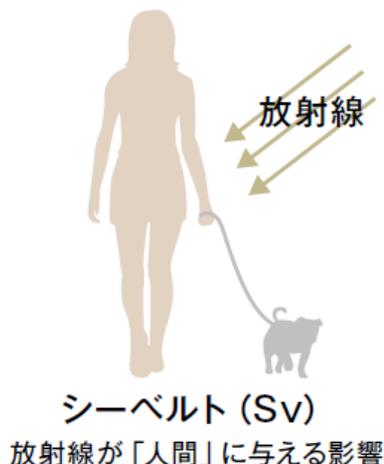
スキャナ式レンジセンサ	124Gy
カメラ	169Gy
CPUボード、電池 モータ・ドライバ 無線機、LANハブ 3次元距離画像センサ 広角ネットワークカメラ 通信デバイス等	200Gy以上

1Gy/hourの高放射線下でも100時間以上の動作が可能

「汎用重機やロボットにおける耐放射線評価と管理方法の基本的な考え方」対災害ロボティクス・タスクフォース 2011年4月27日

グレイとシーベルトの関係

$$\text{シーベルトの値} = \text{グレイの値} \times \text{放射線荷重係数}^{*1} \times \text{組織荷重係数}^{*2}$$



◆放射線荷重係数

放射線の種類	放射線荷重係数
光子(ガンマ線、エックス線)	1
電子(ベータ線)	1
陽子	2
アルファ粒子、核分裂片、重い原子核	20
中性子線	2.5 ~ 20 (エネルギーの連続関数で設定)

◆組織荷重係数

組織・臓器	組織荷重係数	組織・臓器	組織荷重係数
乳房	0.12	食道	0.04
赤色骨髄	0.12	甲状腺	0.04
結腸	0.12	唾液腺	0.01
肺	0.12	皮膚	0.01
胃	0.12	骨表面	0.01
生殖腺	0.08	脳	0.01
膀胱	0.04	残りの組織・臓器	0.12
肝臓	0.04		

- ※1 放射線の種類による影響の違いを表す
 ※2 臓器等の組織別の影響の受けやすさを表す

電気事業連合会 デジタルパンフレット「原子力・エネルギー図面集」 <http://fepc-dp.jp/>

原子炉建屋・作業エリアの除染

除染技術開発の課題

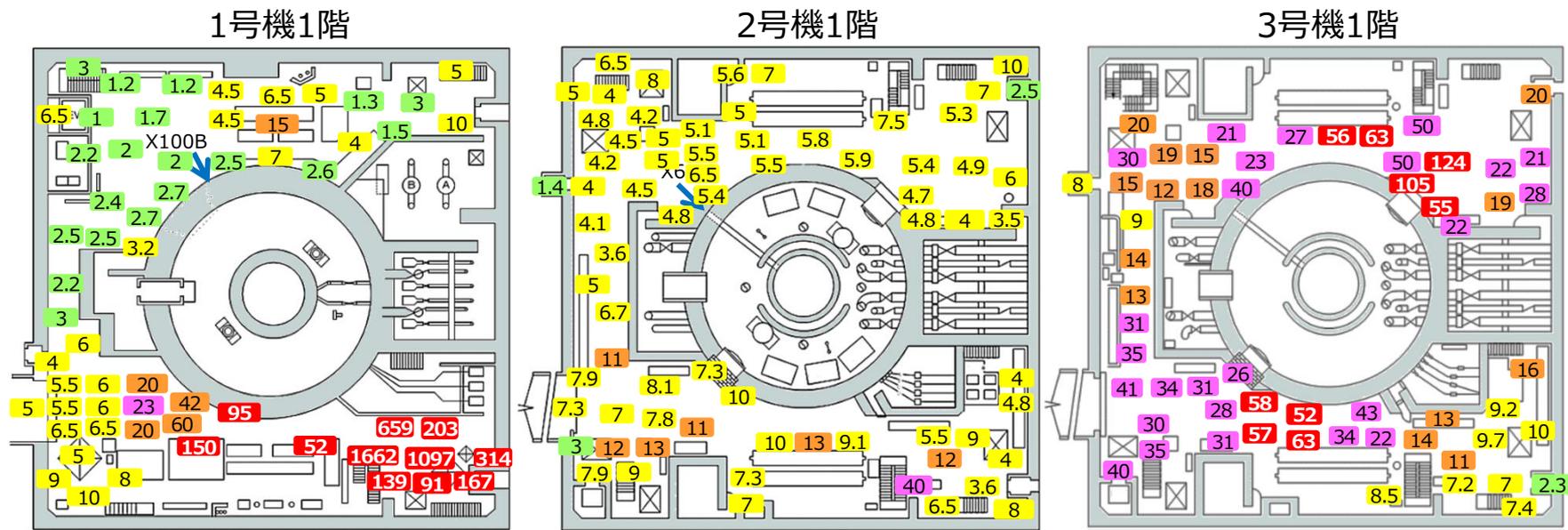
従事者の線量限度：1年間で50mSv、5年間で100mSv
作業エリア：3 mSv/h、アクセスルート：5 mSv/h

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

課題

- 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 2014年～2015年調査



3mSv/h 以下

3mSv/h～10mSv/h

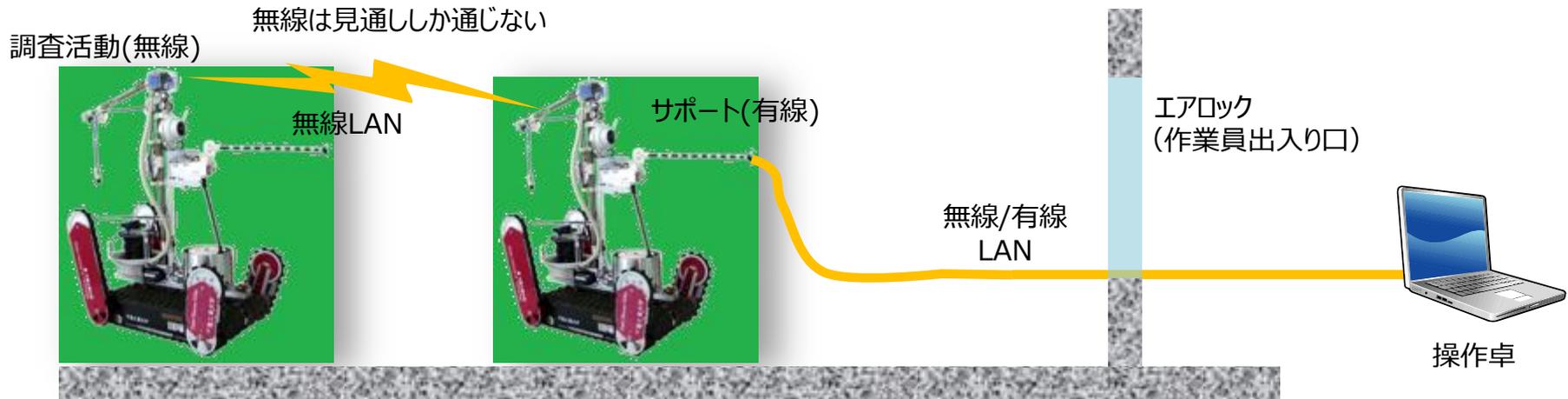
10mSv/h～20mSv/h

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

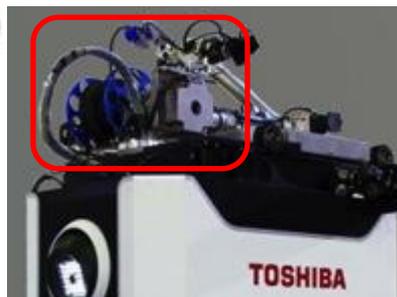
遠隔制御



移動中に配線がからまる、切れるなどを回避する、配線の「繰り出し／巻き取り機構」が必要



Quince



4足歩行ロボット



水上ボート

光ケーブル
リール本体

繰出し装置

ケーブル繰出し

千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo) <http://www.furo.org/>

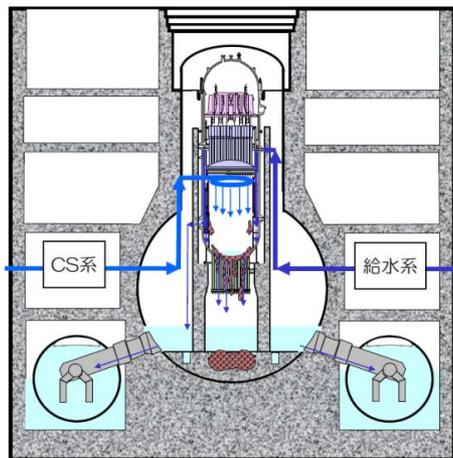
千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構プロジェクトチーム「Quinceによる福島原発対応」2011.6.8

原子炉格納容器（PCV）内部調査

PCV内部調査の目的

- 燃料デブリ取り出しに向けて、原子炉格納容器内の燃料デブリの位置、状況を調査する
- 圧力容器を支持するペDESTAL等々の状況を確認する

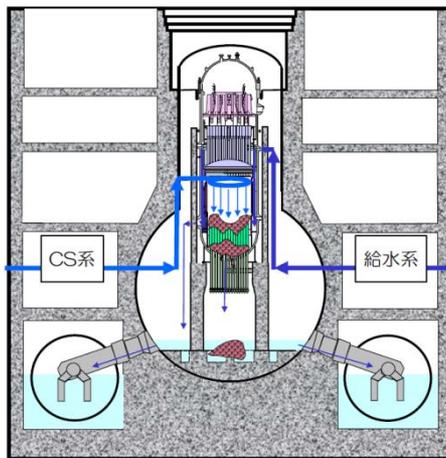
調査および調査装置の開発方針



1号機

- ・溶融燃料は、ほぼ全量がRPV下部プレナムへ落下、炉心部には殆ど燃料が存在せず

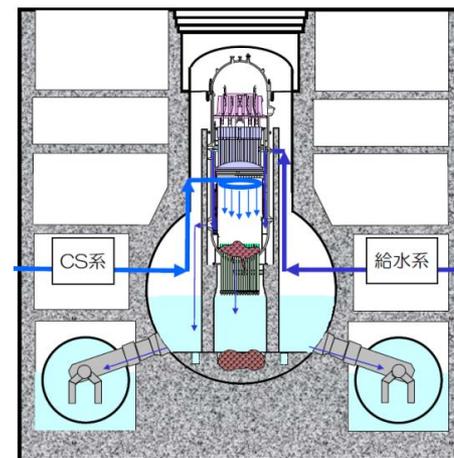
- ・燃料デブリのペDESTAL外側までの拡散の可能性から、ペDESTAL外側の調査を優先



2号機

- ・溶融した燃料のうち、一部は下部プレナムまたはPCVペDESTALへ落下、燃料の一部は炉心部に残存と推測

- ・ペDESTAL外側までの拡散の可能性低く、ペDESTAL内側の調査を優先
- ・3号機はPCV内の水位高く、1・2号機で使用予定のペネが水没の可能性あり、別方式の検討要

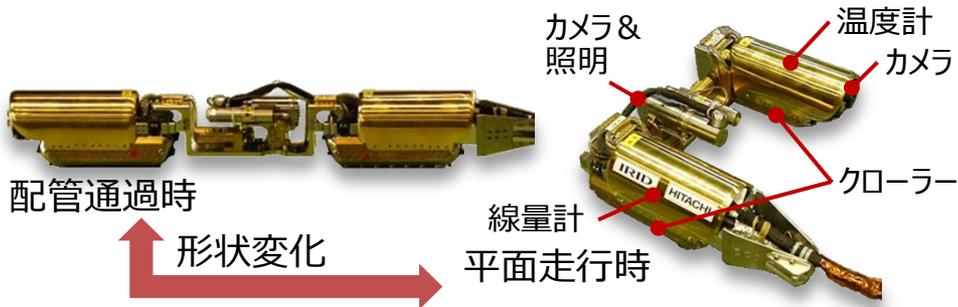


3号機

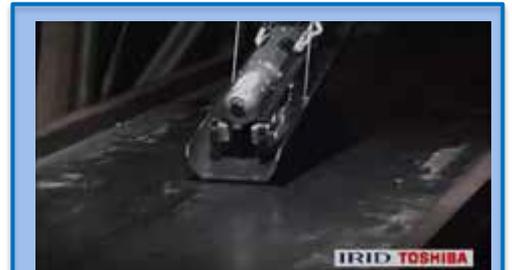
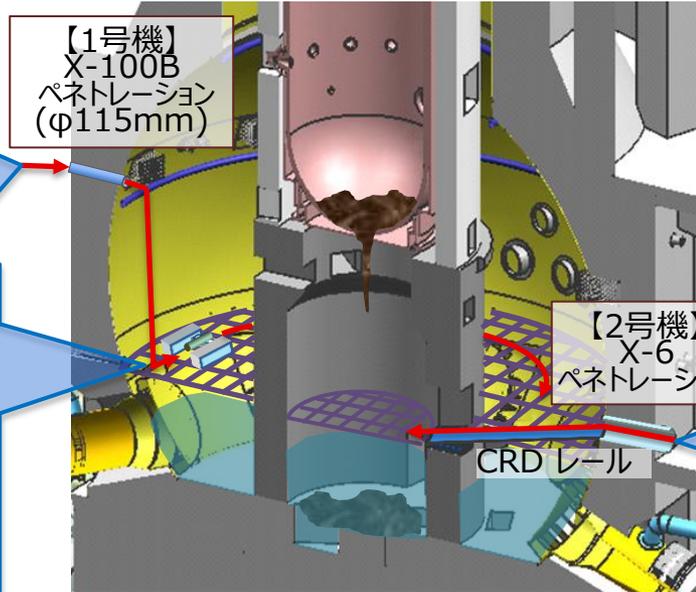
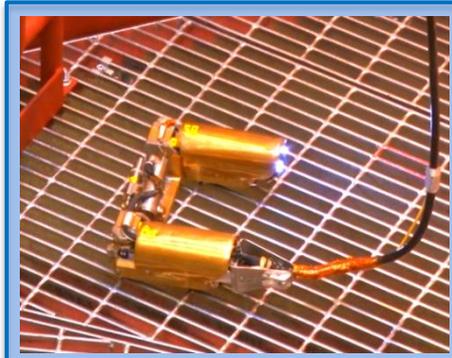
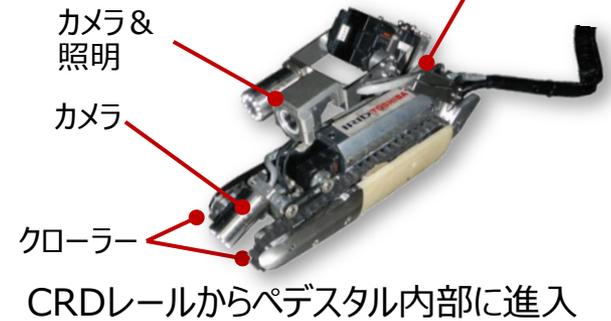
PCV内部調査

PCV内部調査ロボットの開発

形状変化型ロボット(1号機)



クローラ型遠隔操作ロボット(2号機) 起き上がり機構

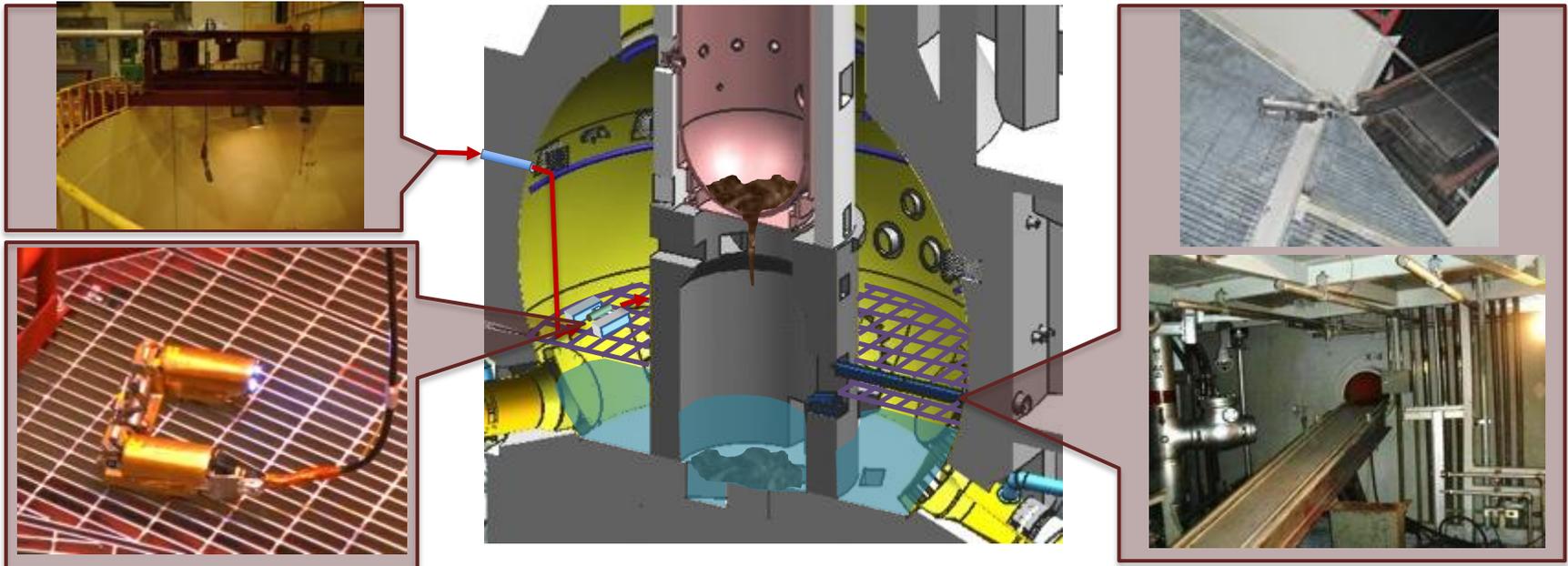


PCV内部調査ロボット

PCV内部調査のため、100mmの配管の通過、グレーチング（格子状の鋼材）平面の走行、凹凸のある面上の安定走行可能な、小型ロボットを開発中

形状変化型ロボット(1号機用)

CRDレール走行小型ロボット(2号機用)



形状変化型ロボットの開発

課題:

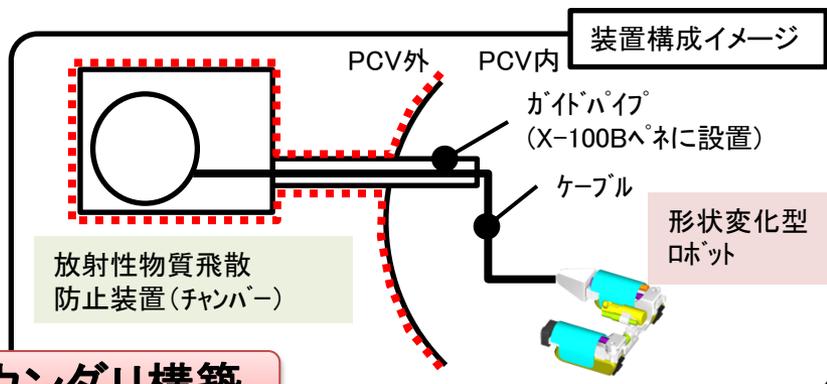
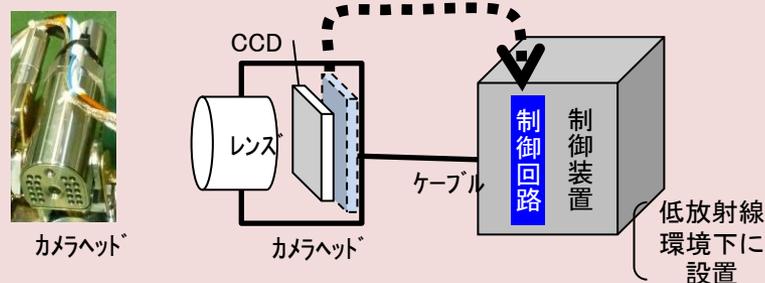
- (1) 狭隘空間 ($\phi 100\text{mm}$) と安定走行の両立
- (2) 過酷環境 (高線量, 暗闇, 蒸気雰囲気等)
- (3) 放射性物質の飛散防止



「映像」「温度」「線量率」
情報の収集

1000Gy 耐放射線

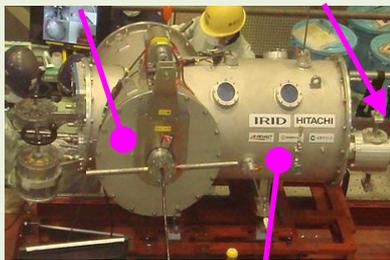
放射線に弱い制御回路を制御装置側 (低放射線環境下) へ移設



バウンダリ構築

ケーブル
送りドラム

ガイドパイプとの
取合部



調査装置を内包

ガイドパイプ走行時



変形

グレーチング走行時



形状変化機構



格納容器内部調査(1号機)

【調査対象部位】：ペDESTAL (外) 地下階 作業員アクセス口近傍

【調査及び装置開発ステップ】

(1) X-100Bペネからの調査 (～2015年度)

X-6ペネが高線量であり、現状接近可能なX-100B(Φ100mm)を使用して、優先度が高い以下のペDESTAL外からの調査を計画。

- ① PCV内の1階グレーチング上の情報 (CRDレーン使用可否の調査等) を取得。：B1
- ② 2013年11月の水上ボートによるトラス室調査結果を受け、ペDESTAL (外) 地下階(作業員アクセス口及び近傍ベント管)の映像取得に特化した調査を計画。：B2

(2) X-6からの調査(2016～2017年度)

- ① ペDESTAL (外) 地下階に対して、デブリ形状計測装置を搭載し更なる状況把握を行う。：B3

追加を検討中

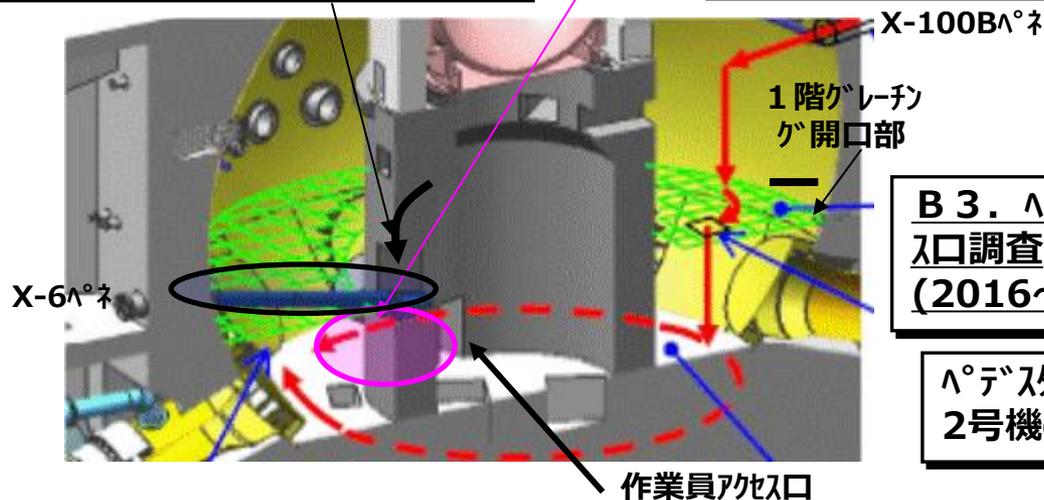
**B 1. ペDESTAL外1階グレーチング上調査
(2015年4月完了) : X-100Bペネ使用**

**B 2. ペDESTAL外地下階状況調査
(2016年度計画中) : X-100Bペネ**

B2調査の結果を踏まえ実施要否の検討

**B 3. ペDESTAL外地下階及び作業員アクセス口調査
(2016～17年度予定) : X-6ペネ使用**

ペDESTAL内部の調査については、2号機の調査終了後の実施を検討。



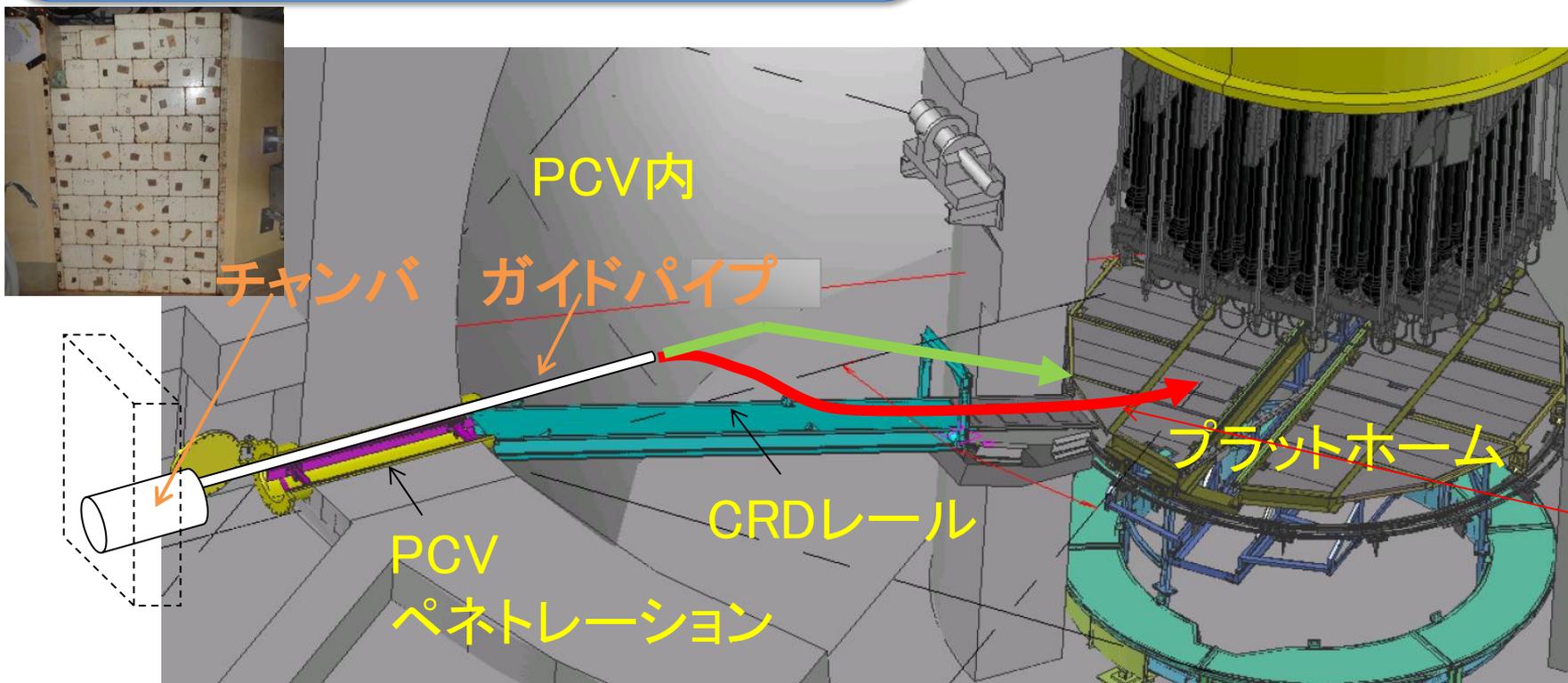
ペデスタル内部調査

課題:

- (1) 狭隘空間 ($\phi 100\text{mm}$) と安定走行の両立
- (2) 過酷環境 (高線量, 暗闇, 蒸気雰囲気等)
- (3) 放射性物質の飛散防止
- (4) 遮へいブロックの遠隔取外し



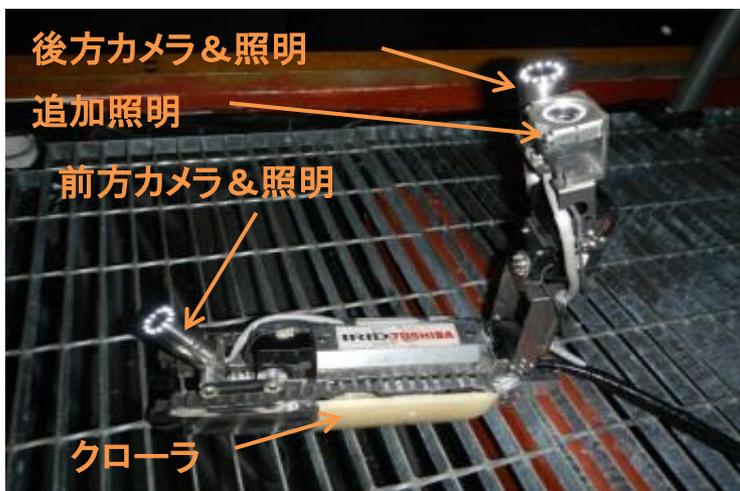
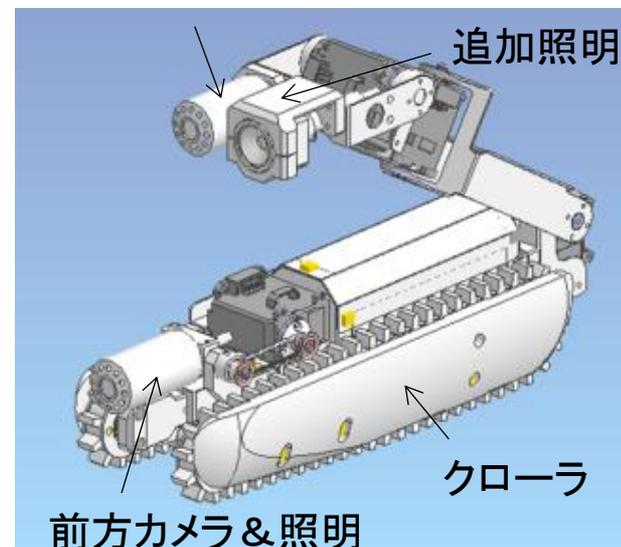
「映像」「温度」「線量率」
情報の収集



クローラ型遠隔操作ロボット

- ・内径約φ100mmのガイドパイプを通過。
- ・調査時は後方カメラを起こし、後方カメラによる高い空間認知性(+起き上がり)を実現。
- ・集光度の高い追加照明により、霧滴中における視認性を向上。
- ・耐放射線性:1000Gy以上(積算)
- ・気密性のあるチャンバから装置を送り出すことで作業中の放射性物質の飛散を防止。

後方カメラ&照明

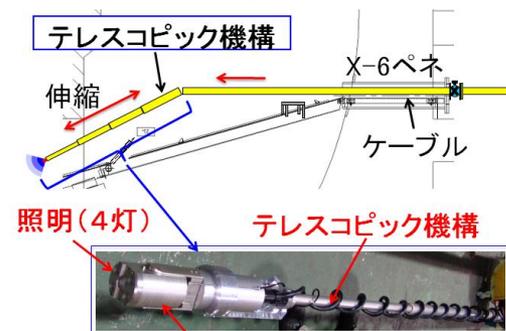


モックアップでのプラットフォーム上調査

リスク対策として、CRDレール上の堆積物除去装置及びペDESTAL内事前確認装置(代替調査方法)も開発。



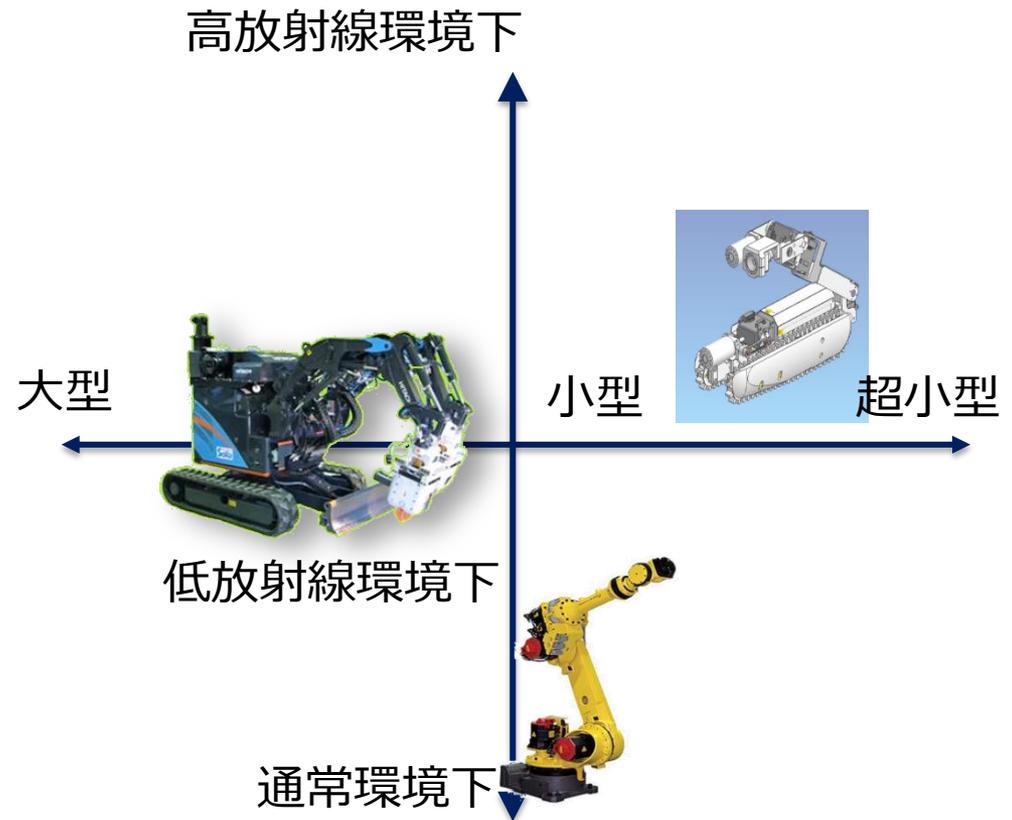
堆積物除去装置



ペDESTAL内事前確認装置

開発対象機器の分類軸

- 遠隔 ⇔ 直接
 - 手動 ⇔ 半自動 ⇔ 自動
 - 特殊目的 ⇔ 汎用目的
 - 大型 ⇔ 小型 ⇔ 超小型
- 決定論的 ⇔ 確率論的



ロボット技術とシステム技術

合意形成
プロジェクト管理

人材育成
産業応用

システム統合技術
シミュレーション技術
データベース技術



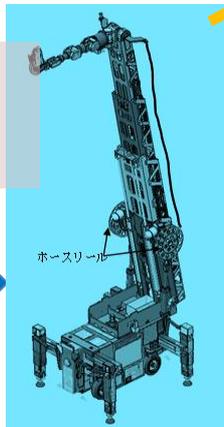
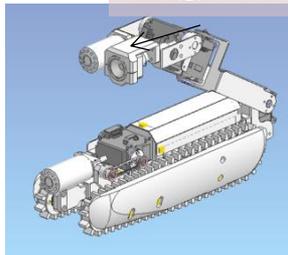
マンマシンインタフェース
作業員訓練・教育

加工技術
保管技術

遠隔制御技術
通信技術

極小化技術
耐放射線技術

除染技術
耐故障技術、復帰技術、廃棄技術



臨界制御技術
事故進展解析

原子力工学

本日の構成

- IRIDとその活動
- 廃炉技術の全体像
- 個別廃炉技術
- 廃止措置とは

- ロボット技術 1 廃炉用ロボット
- ロボット技術 2 ロボットの課題

■ おわりに

IRIDの研究開発プロジェクト(概要)

1. プール燃料取り出しに係る研究開発(1PJ)

使用済燃料プールから取出した燃料集合体の**長期健全性**評価

2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発(12PJ)

除染・線量低減技術

R/B内の
遠隔除染
技術

2016.3終了

燃料デブリ取り出し技術

<安定状態の確保>

RPV/PCVの
健全性評価
技術

燃料デブリ
臨界管理
技術

<デブリ取り出し>

燃料デブリ・
炉内構造物取出
**工法・
システム**

補修・止水技術

PCV
漏えい箇所の
補修・止水
技術

PCV
漏えい箇所の
補修技術の
実規模試験

内部調査・解析・分析技術

<直接的調査>

PCV
内部調査
技術

RPV
内部調査
技術

燃料
デブリ
性状
把握

<間接的調査>

RPV内
燃料デブ
リ検知
技術

総合的な
炉内状況
把握
の高度化

燃料デブリ・
炉内構造物取出
基盤技術

燃料デブリ
収納・移送
・保管技術

3 廃棄物に 係る研究開発 (1PJ)

固体廃棄物の
処理・処分
技術

IRIDの目的 研究開発

1. 統合的マネジメント
2. 国内外の叡智の結集
3. 人材育成

マネジメント改善に向けた取り組み

1. IRIDデザインレビュー（IDR）の導入（H27.10.23～）

【目的】プロジェクト全体をマネジメントするための内部レビュー・ステアリング機能を強化し（「ステージゲート方式」によるデザインレビューの導入）、**研究開発の手戻りや失敗のリスクを低減**させること。

2. 安全レビューWGの設置（H28.2.5～）

【目的】研究開発成果の実機適用を見据え、各々のプロジェクトに対して**原子力安全の観点からレビュー・助言**を行い、設計段階から原子力安全を確保すること。

3. 共通基盤技術レビューWGの設置（H28.9.2～）

【目的】共通性を有する要素技術（共通基盤技術）について、専門的かつユーザー視点に立ち効率的かつ効果的なレビューを行い、**IRID共通基盤技術の品質の維持・向上**を図ること。

実機への適用にあたっての課題

- 課題のうち、自分たちだけでは解決が難しく、**大学等研究機関の力を借りたい**、研究開発ニーズ（基礎・基盤技術）を集約。

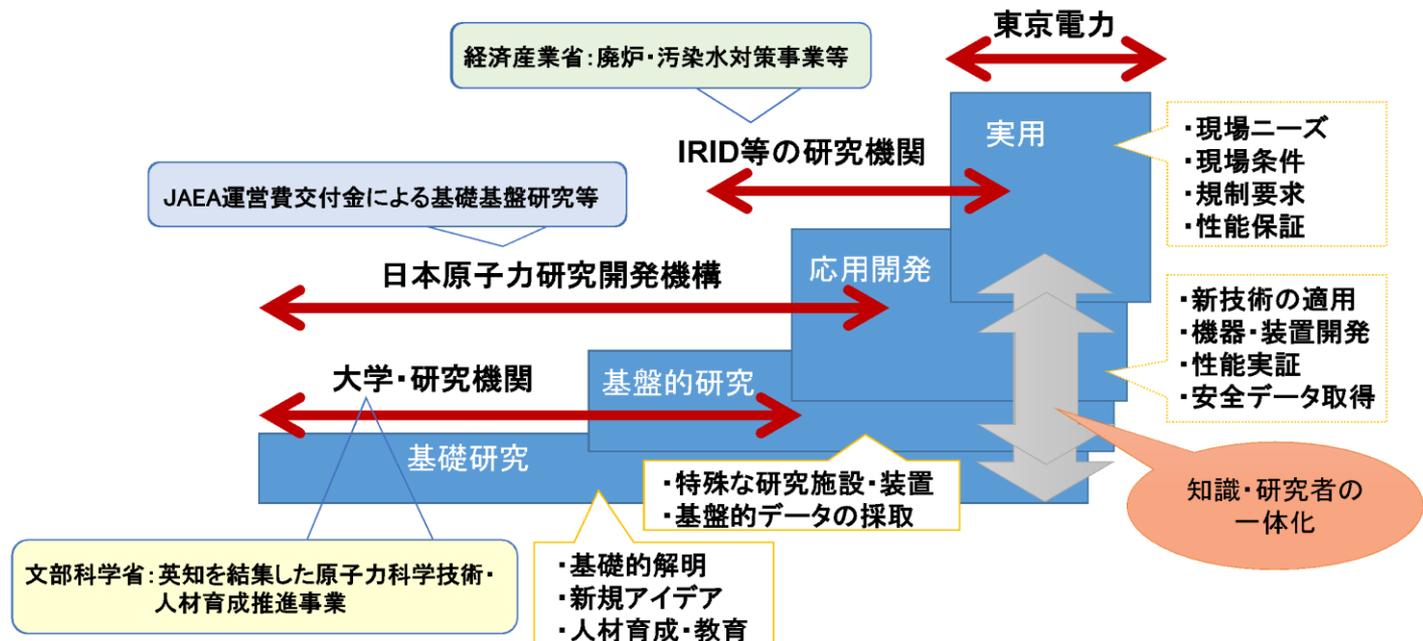
25件のニーズ

技術分野	ニーズ件数※
使用済燃料プールからの燃料取出し技術	2
PCV補修・止水技術	7
内部調査技術（PCV、RPV）	7
構造健全性評価技術	3
臨界管理技術	4
廃棄物処理・処分技術	2

※2016.1.12Up Date

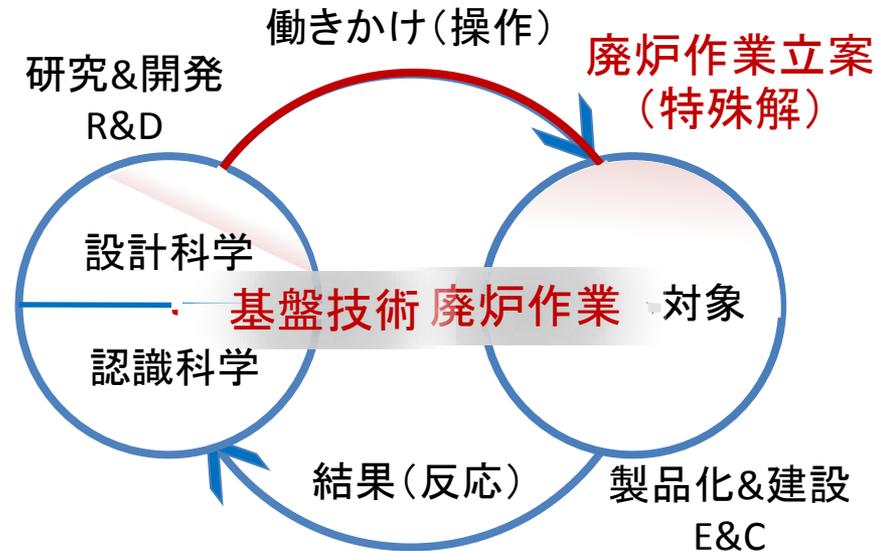
長期的人材育成(1)

- 30～60年間に亘る長期的な人材育成
 - ✓ 1世代のエンジニア＝10年、3～6世代間での知識・技能伝達
 - ✓ 開発研究の基礎となるデータベースの必要性
- 廃炉用機器開発は特殊解の設計・エンジニアリング作業
 - ✓ 設計科学として体系化の必要性
 - ✓ 技術解は特許として公開・保護



長期的人材育成(2)

- 認識科学と設計科学の違い
- エンジニアリング知識の体系化とその保持方法
 - ✓ ものづくり中心の成果主義
 - ✓ 国の開発予算の制約



おわりに

ご清聴ありがとうございました

連絡先

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

副理事長 新井 民夫

E-mail: tamio-arai@irid.or.jp