

燃料デブリ取り出し代替工法についての 情報提供依頼（RFI）

RFIの技術的側面

2013年12月17日

国際廃炉研究開発機構

（プラント情報等の一部内容は、東電ホームページより引用）

- 1 福島第一原子力発電所の現状
- 2 中長期ロードマップ
- 3 現行のR&Dプロジェクト

1 福島第一原子力発電所の現状

1～4号機の概要

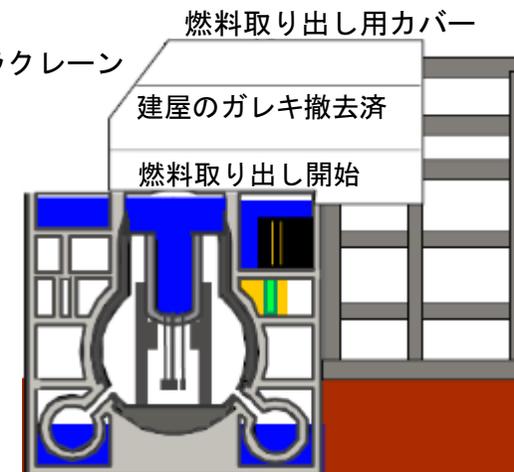
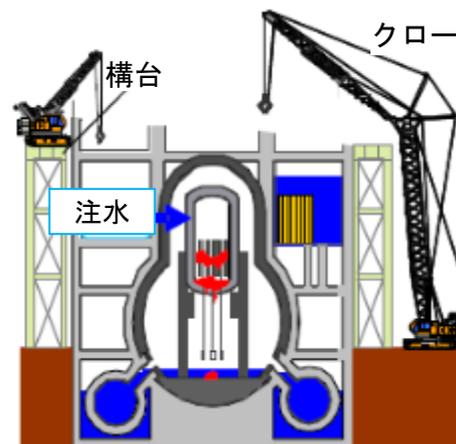
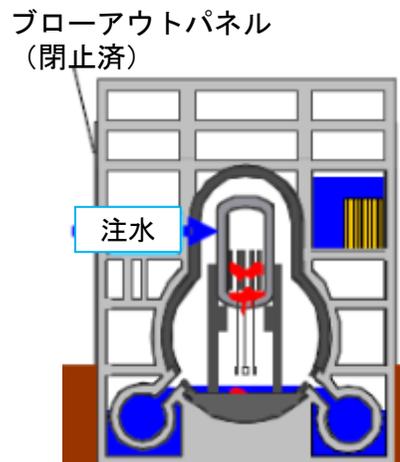
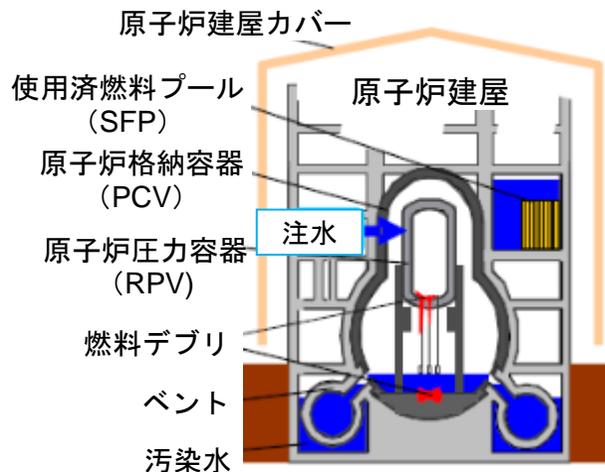
- 廃止措置の進捗状態は号機ごとに異なっている。
- 4号機の使用済燃料プールからの使用済燃料の取り出しは11月18日に開始された。

1号機

2号機

3号機

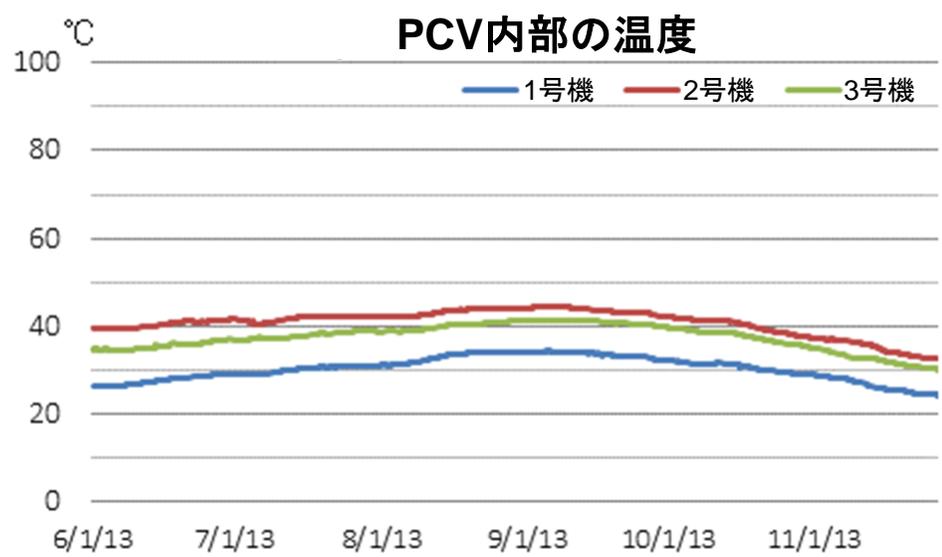
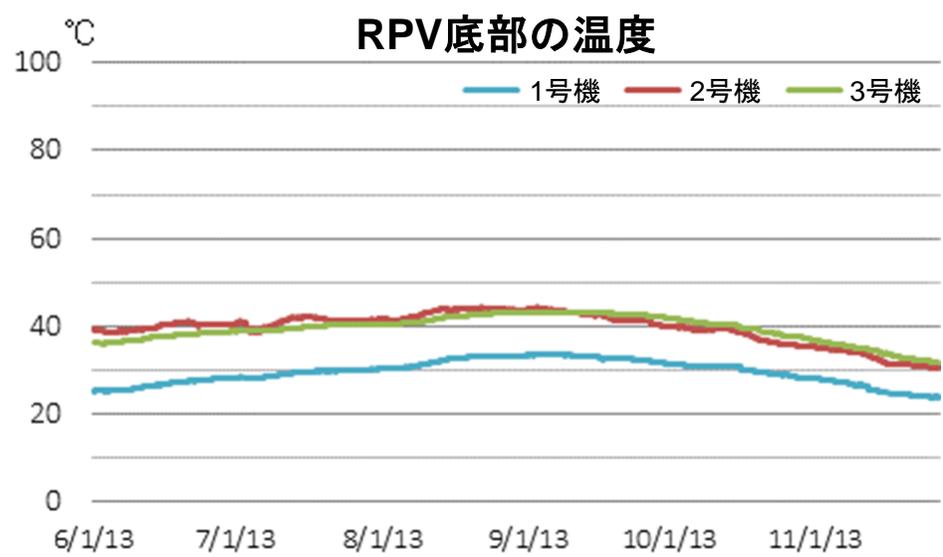
4号機



電気出力	460MW	784MW	784MW	784MW
商業運転開始日	1971年3月	1974年7月	1976年3月	1978年10月

1～6号機の炉心および使用済燃料プールの現状

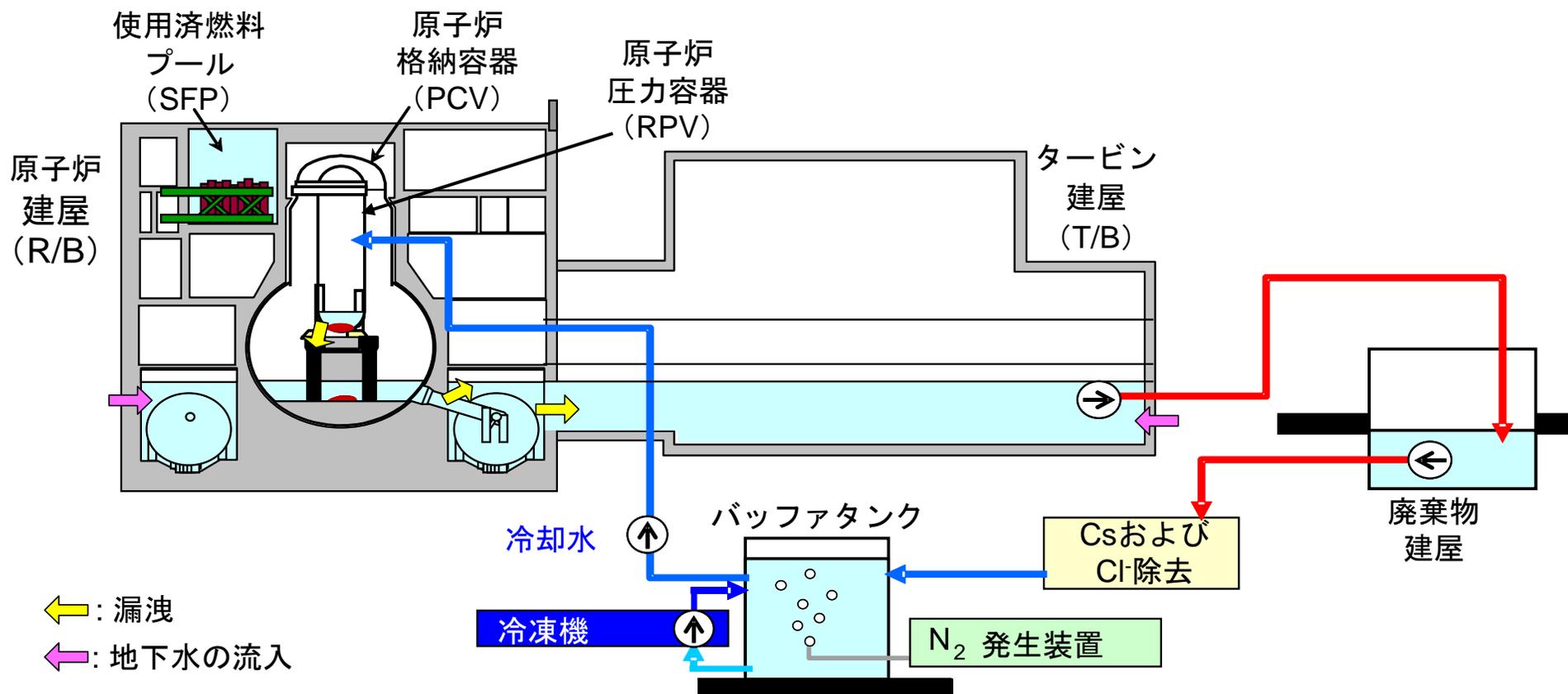
■ 1～3号機それぞれのRPV底部およびPCV内部の温度は安定した状態に維持されている。



		1号機	2号機	3号機	4号機	5/6号機
停止		○	○	○	(定期検査のため、 2011年3月11日には停止中)	
冷却	原子炉	○ 循環注水システムにより冷却			—	○ 冷温停止
	使用済燃料 プール	○ 空冷除熱システムにより冷却				○
閉じ込め		△ 汚染水が建屋に蓄積				○

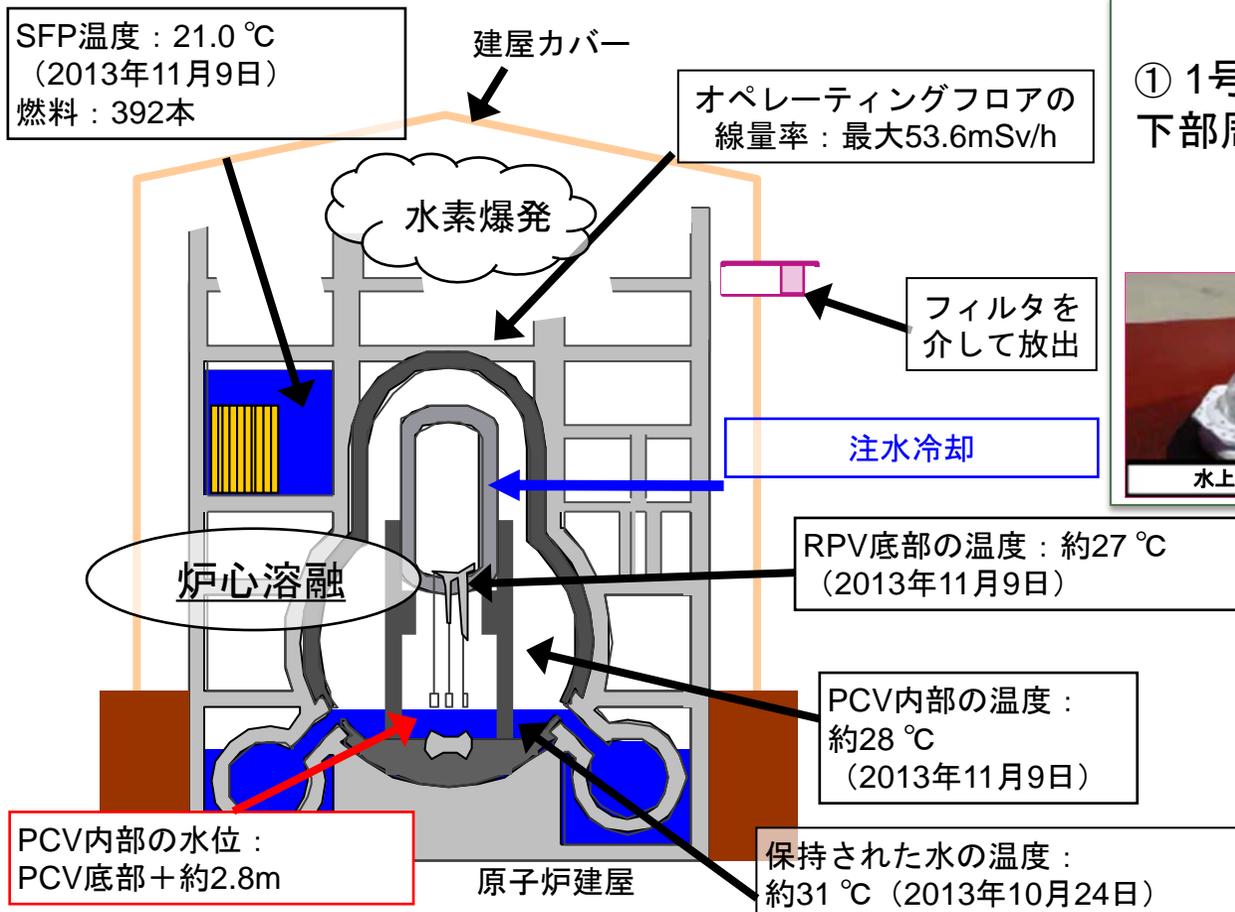
1～3号機の循環注水冷却の現状

- 冷却水はRPV、PCVおよびR/BからT/Bへ漏洩している。
T/Bにたまった水は、CsおよびCl除去システムで浄化された後に冷却水として再利用される。
- 地下水の流入は、多重性、多様性および独立性を有するシステムによって処理されるべき「汚染水」の量を増加させている。

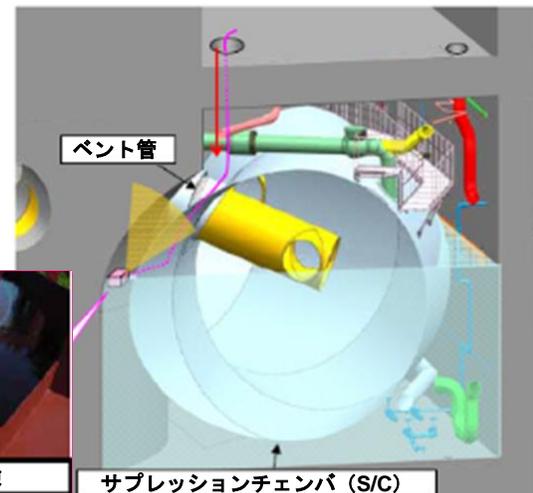


1号機の現状

- デブリの推定位置：燃料のほとんどはPCVへ落下している。
- **1号機のトラス室およびベント管の調査**（2013年11月） [図①]
 - 漏洩箇所が検出された（サンドクッションドレン管、サンドクッションリングヘッド）。
- **CCDカメラによるPCV調査**（2012年10月） [図②]
 - 水位：PCV底部から約2,800 mm、水温：約35 °C



① 1号機ベント管下部周辺の調査



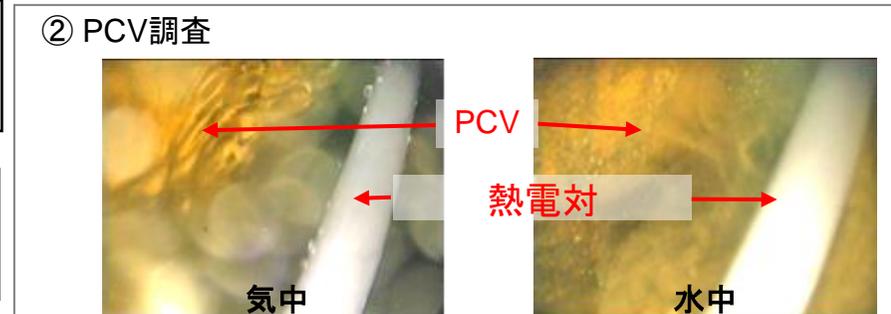
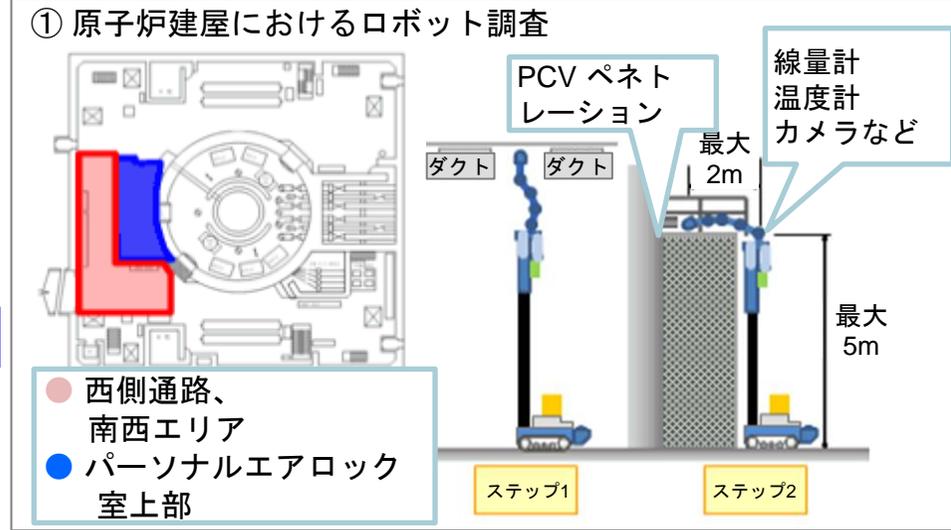
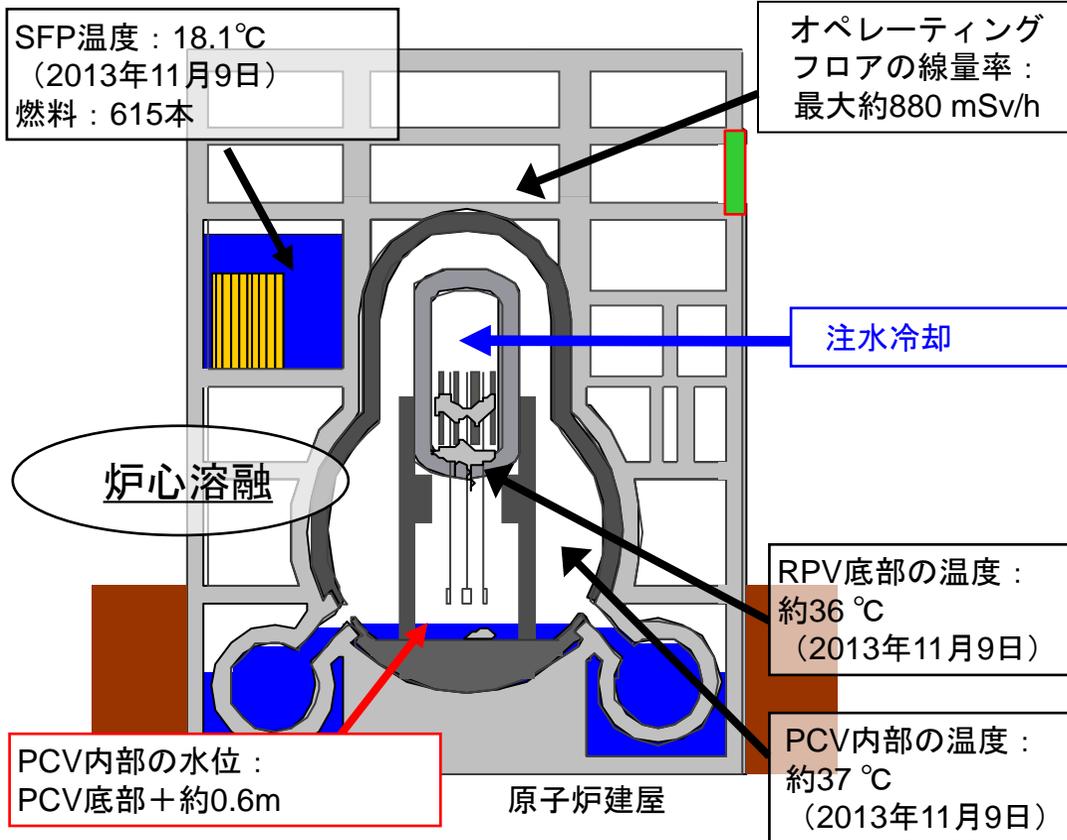
② PCV調査



2号機の現状

- デブリの推定位置：炉心部、下部プレナムおよびPCVに存在するが、これらの位置の間の比率は未定である。
- 原子炉建屋1階におけるロボット調査（2013年6月） [図①]
- ボアスコープによるPCV調査（2012年1月、3月） [図②]
水位：PCV底部から約600 mm、水温：約50 °C
- トーラス室における水位測定（2012年6月）
トーラス室水位OP* 3,270

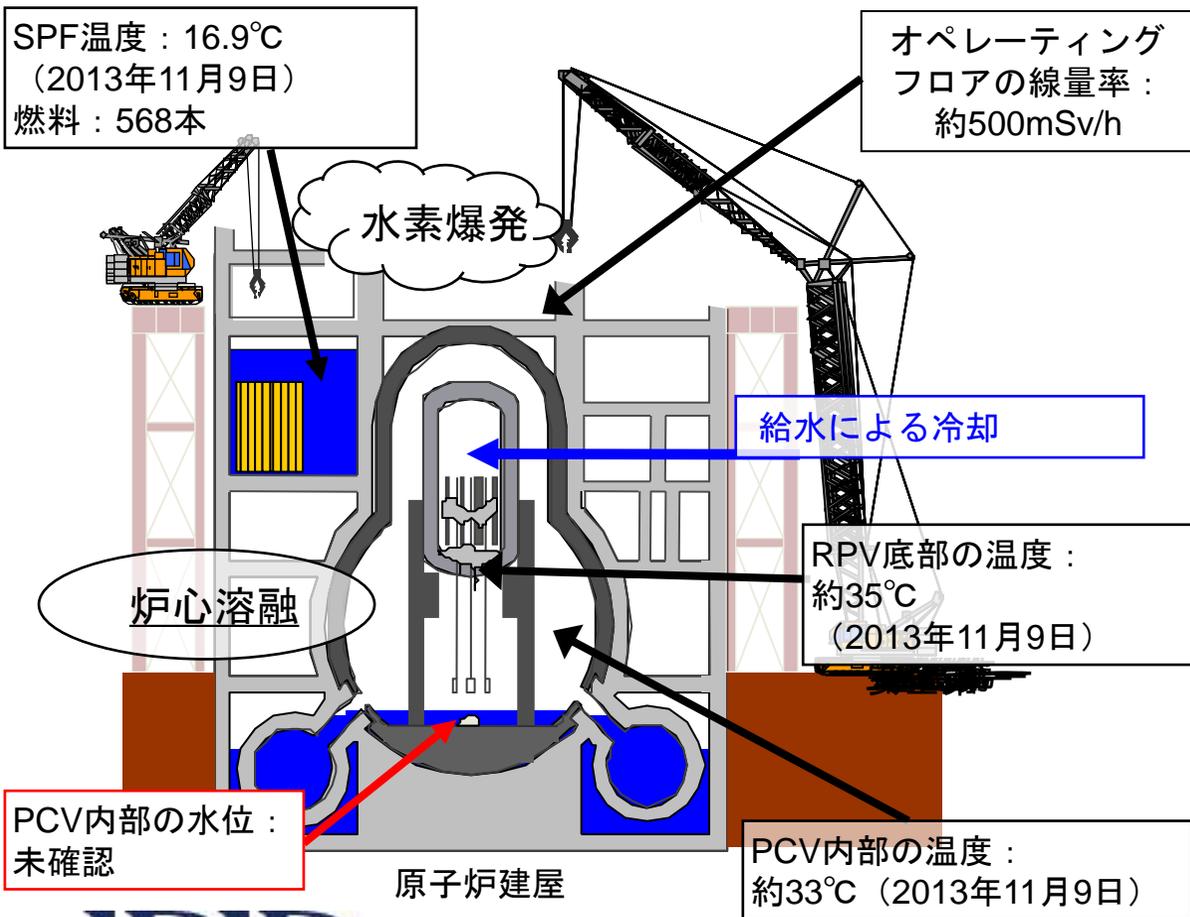
(*OP：小名浜潮位。地下水位)



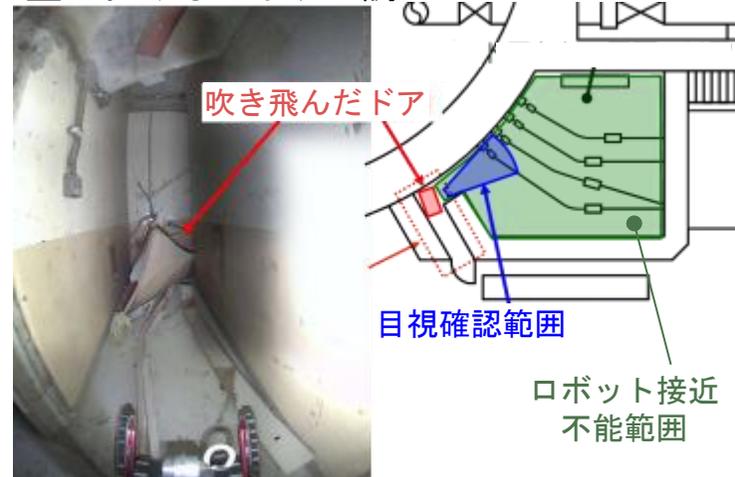
*プラント関連パラメータ（温度を除く）は2012年12月14日現在の値を示している

3号機の現状

- デブリの推定位置：燃料は炉心部、下部プレナムおよびPCVに存在すると推定されるが、これらの位置の間の比率は未定である。
- 原子炉建屋TIP室におけるロボット調査（2012年3月）
- トーラス室における水位測定（2012年6月、7月）
トーラス室水位：約OP 3,370.



TIP室におけるロボット調査



トーラス室における
水位調査

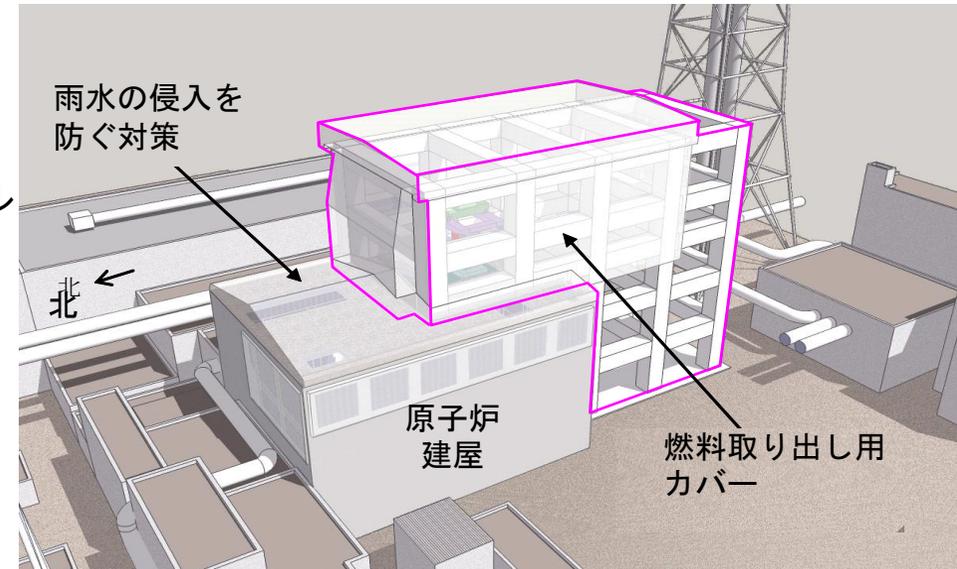
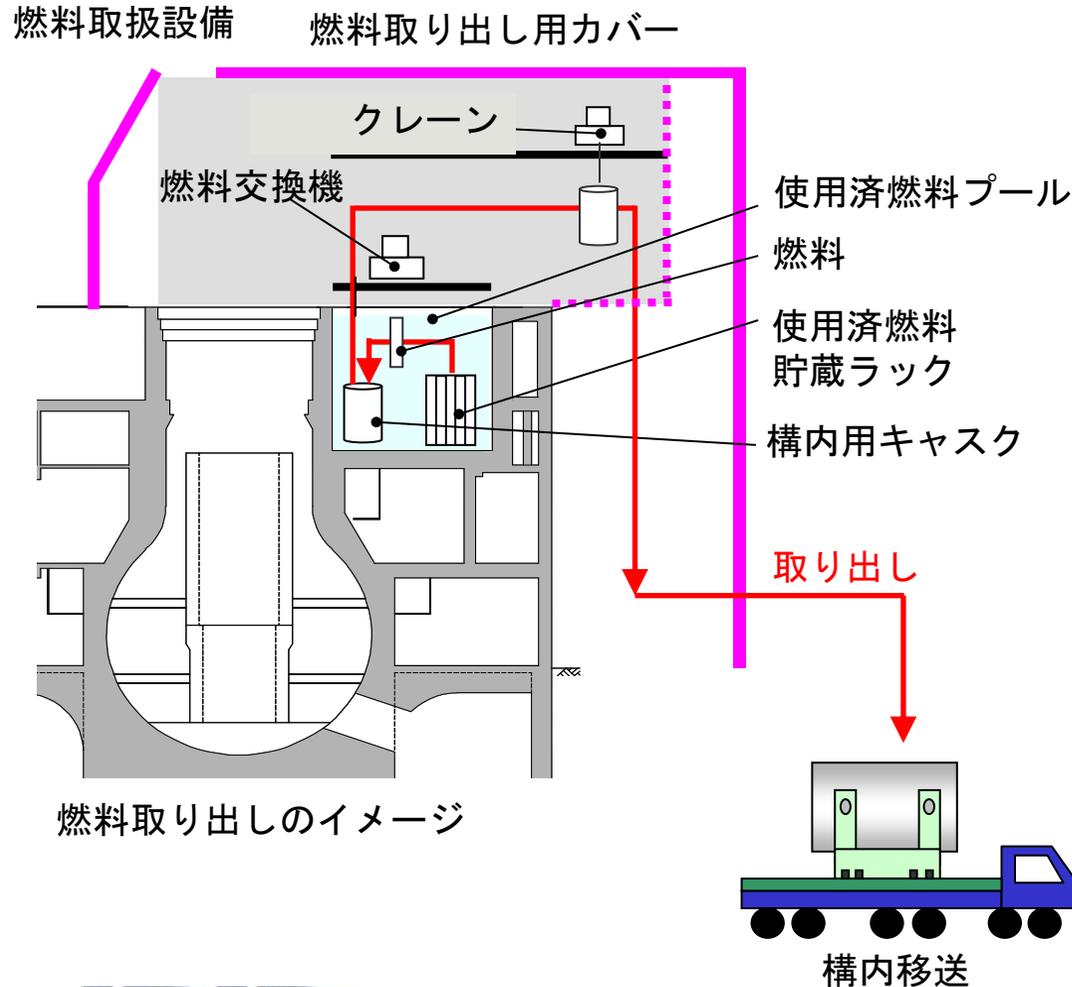
水位	
トーラス室	OP 3,370
階段室	OP 3,150



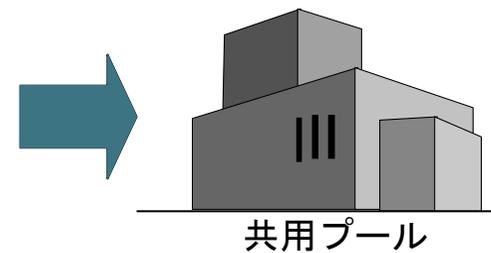
北西階段室

4号機の現状

- 作業環境を改善するためならびに作業中の放射性物質の飛散よび放出を防止するために、燃料取り出し用カバーが設置された。
- 4号機では2013年11月18日に燃料取り出しが開始された。



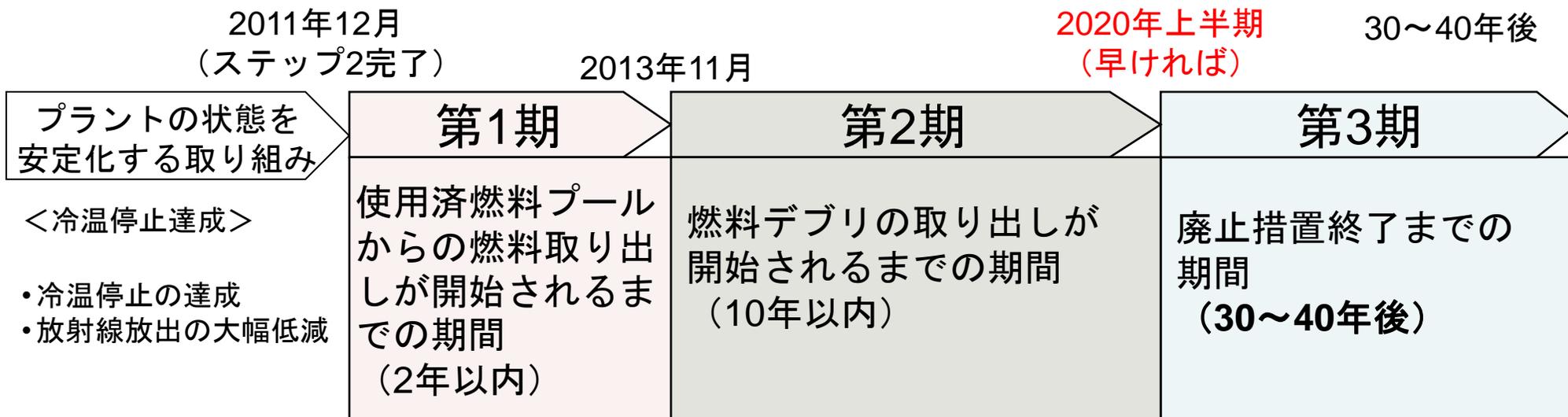
4号機における燃料取り出し用カバーのイメージ



2 中長期ロードマップ

中長期ロードマップの概要

- 中長期ロードマップは2013年6月に改訂された。
- 段階的アプローチが確認された。
- 4号機SFPからの燃料取り出しは2013年11月に開始された。



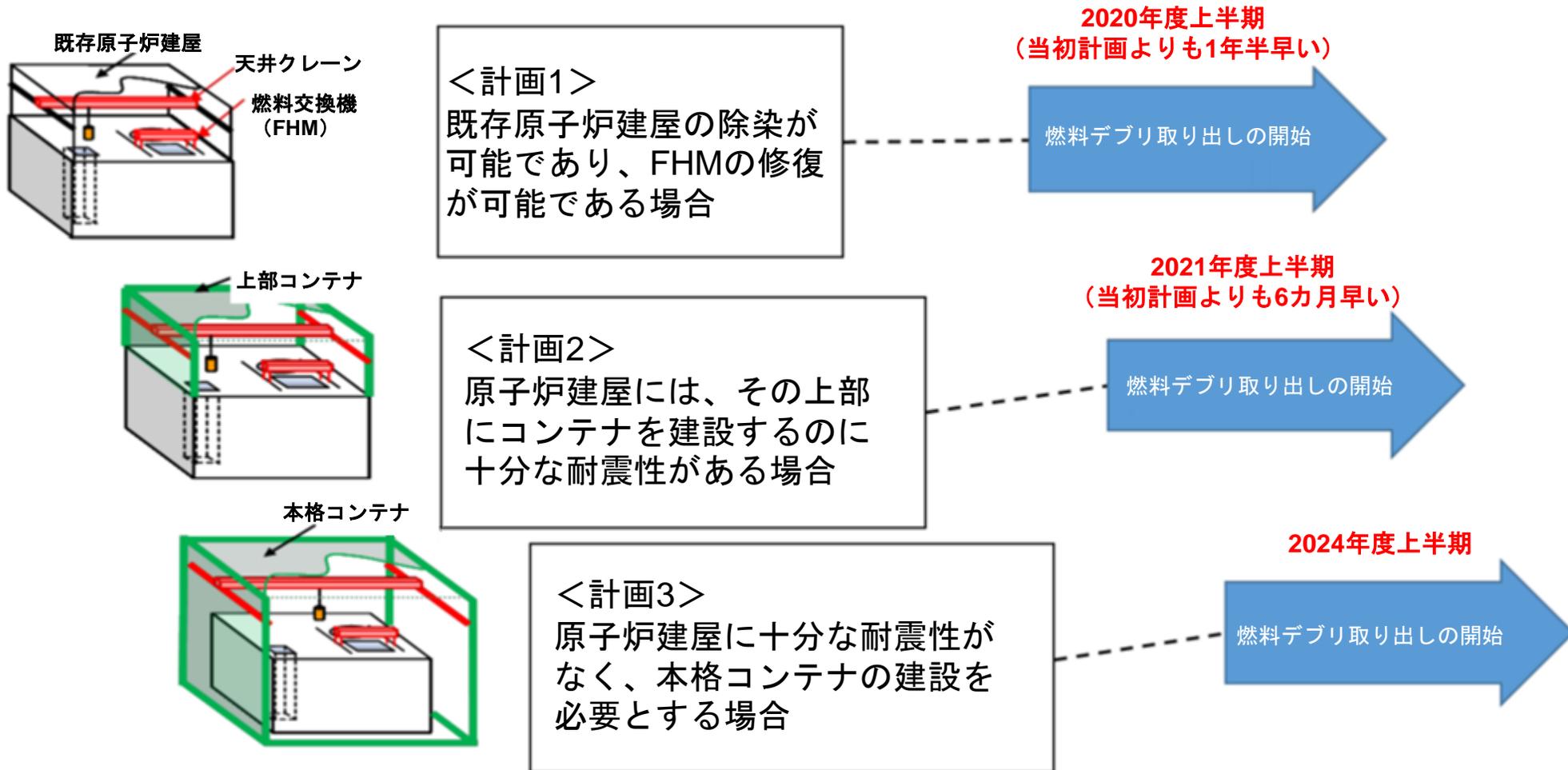
2013年11月18日に4号機SFPから最初の燃料集合体の取り出し開始



「福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた中長期ロードマップ」は、2013年6月27日に改訂された。

燃料デブリ取り出しのための複数の計画（2号機の例）

- 燃料デブリの取り出しを加速化するために、複数の計画が並行して検討され実施される。



1～4号機の予定スケジュール

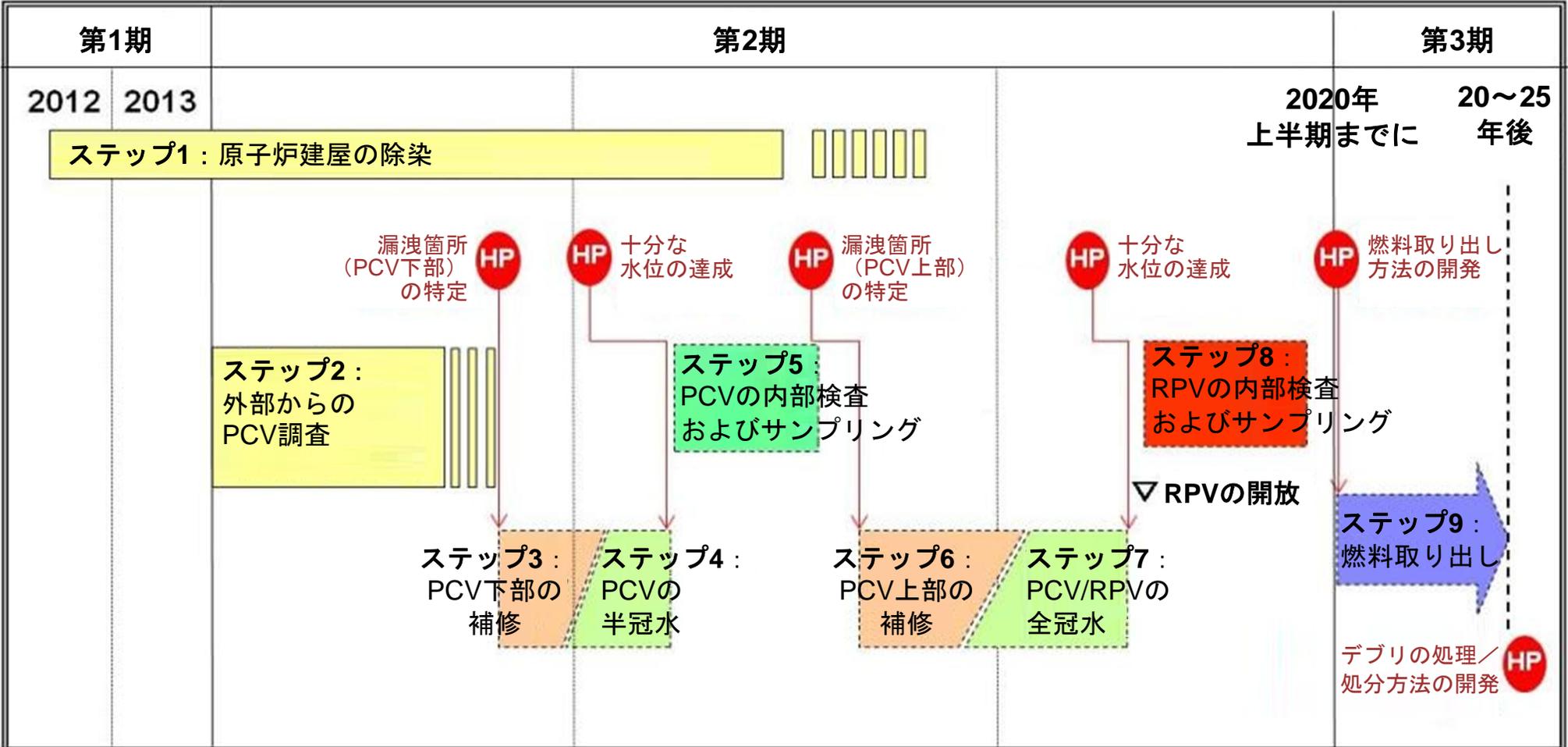
- 4号機の燃料取り出しは2013年11月に開始された（当初計画よりも1カ月早い）。
- デブリの取り出しは2020年度上半期に開始される予定である（最も早い場合）。

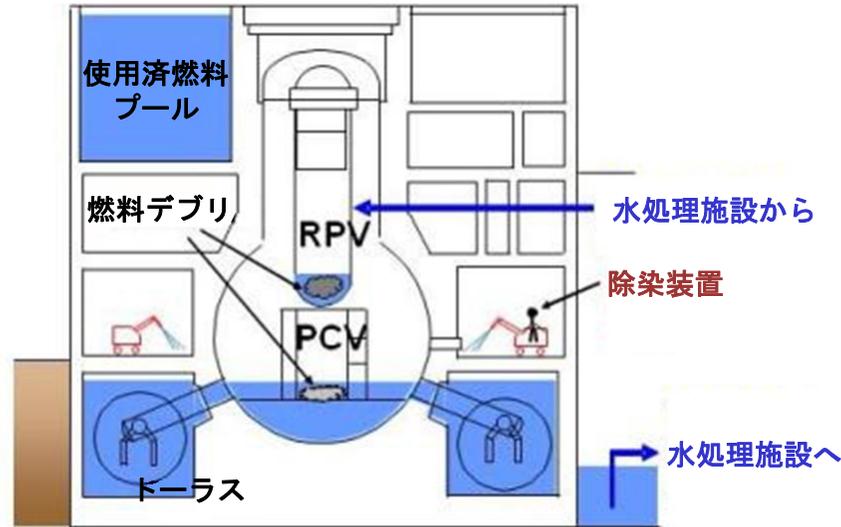
	SFPからの燃料棒取り出し開始 (目標スケジュール)	燃料デブリ取り出し開始 (目標スケジュール)
1号機	2017年度上半期（最も早い場合） ～ 2017年度下半期	2020年度上半期 ～ 2022年度下半期
2号機	2017年度下半期（最も早い場合） ～ 2023年度上半期	2020年度上半期 ～ 2024年度上半期
3号機	2015年度上半期	2021年度下半期（最も早い場合） ～ 2023年度下半期
4号機	2013年11月 (当初計画よりも1カ月早い)	—

現行の冠水法を前提とする燃料デブリ取り出しのためのステップ

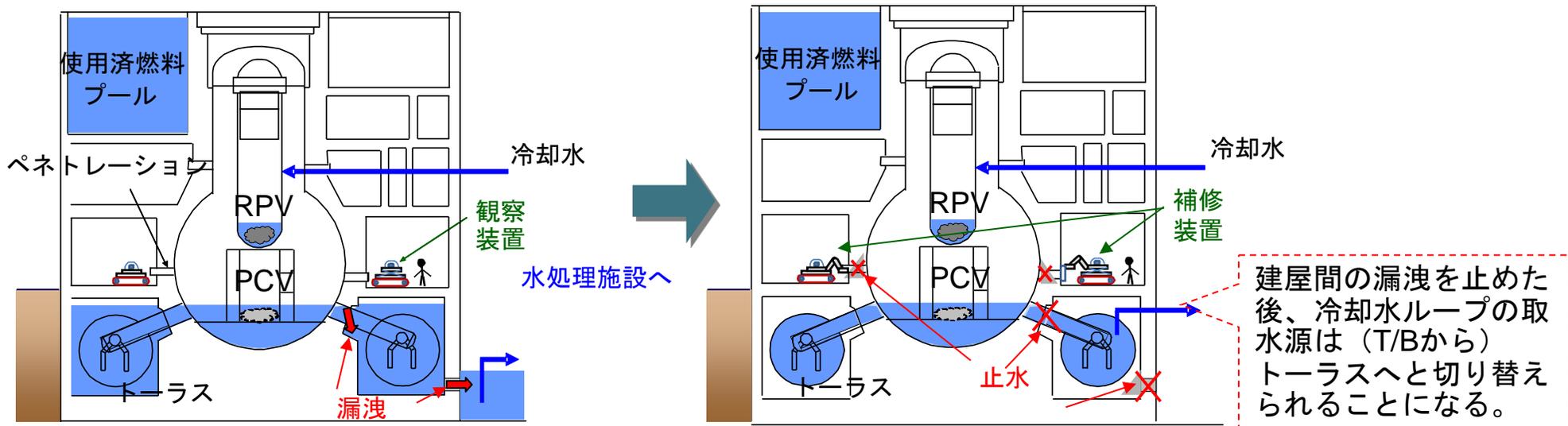
■ 現在最も信頼できる燃料デブリ取り出し方法は、作業プロセスの間の放射線被ばくのリスクを低減するために、燃料デブリが水で覆われた状態を保つことによってそれを取り出すことであるとみなされている。

HP : 技術的なホールドポイント

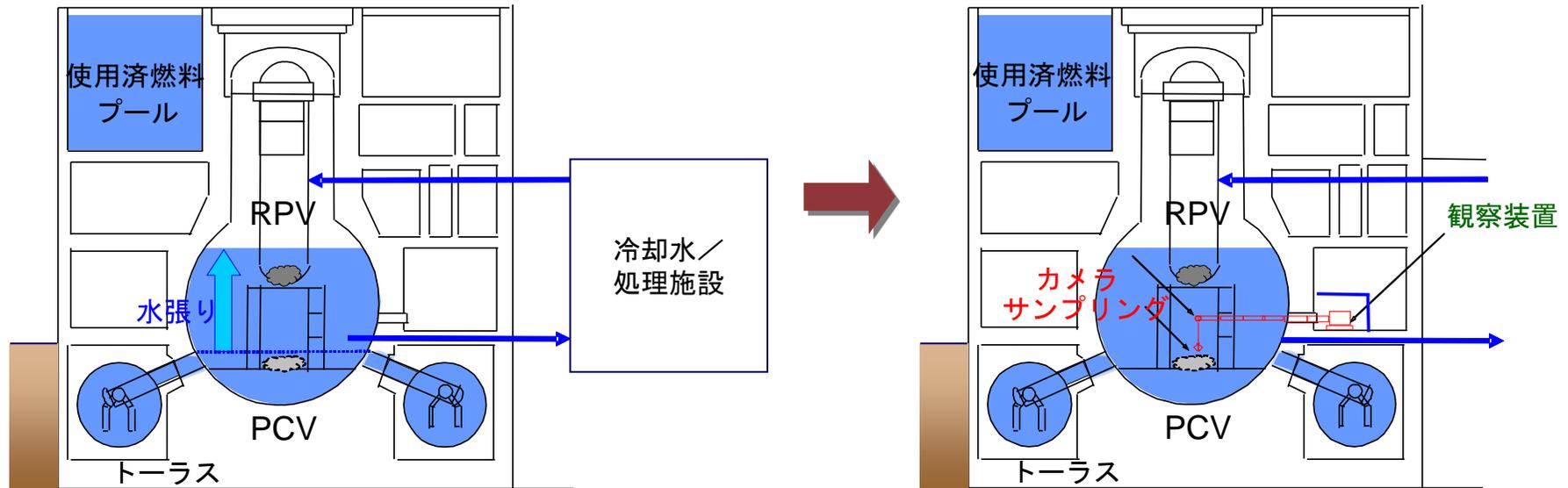




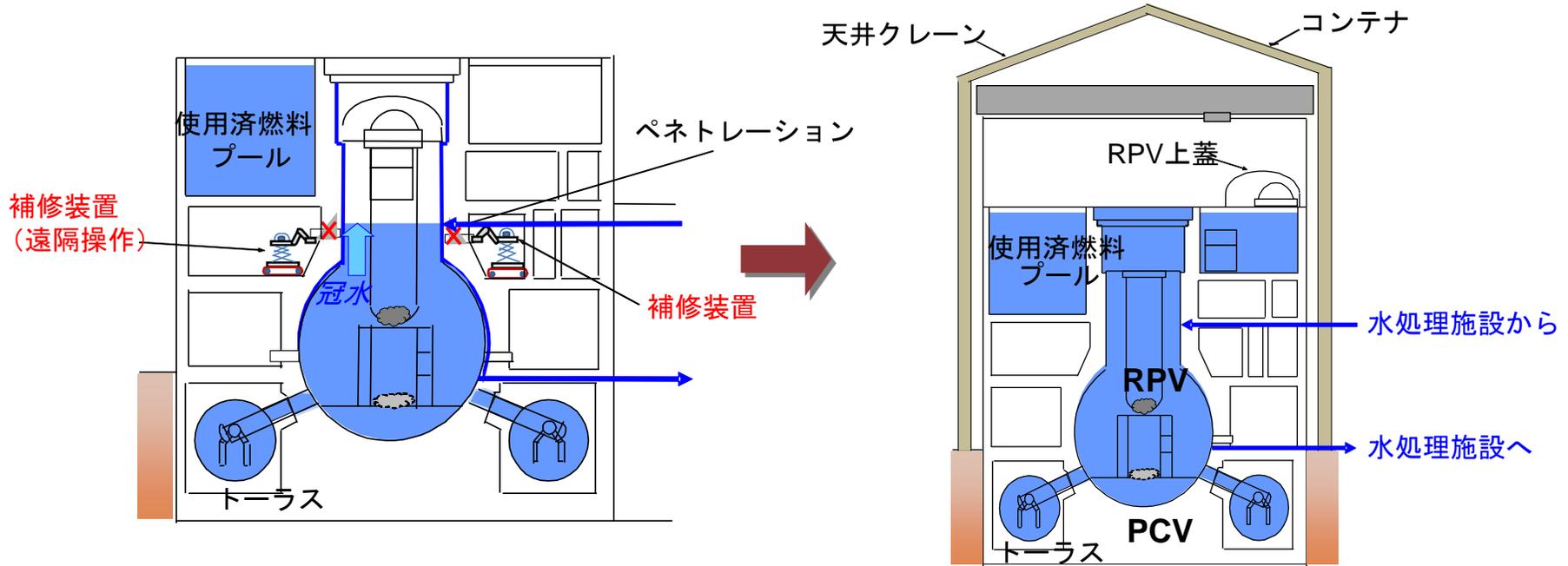
- この領域の除染は今後の作業のために不可欠である。
 - 高圧洗浄、コーティングや研削などの実行可能性は、国のR&Dプログラムの中で調査される。
 - 複合的な遮蔽の使用が必要となる可能性がある。
- **主たる課題および問題点：**
 - 高線量（～5 Sv/h）
 - R/B内に散乱したガレキなどの障害物
 - BWR 4のコンパクト設計ゆえにスペースが比較的小さいこと



- 漏洩箇所はPCVの外部から調査され補修されることになる。
- 主たる課題および問題点：
 - PCV内部の高い線量率および湿度
 - 「漏洩が疑われる箇所」の多くは視界が悪い水中である
 - 補修作業は、燃料冷却のために高放射性の冷却水が流れている中で実施しなければならない



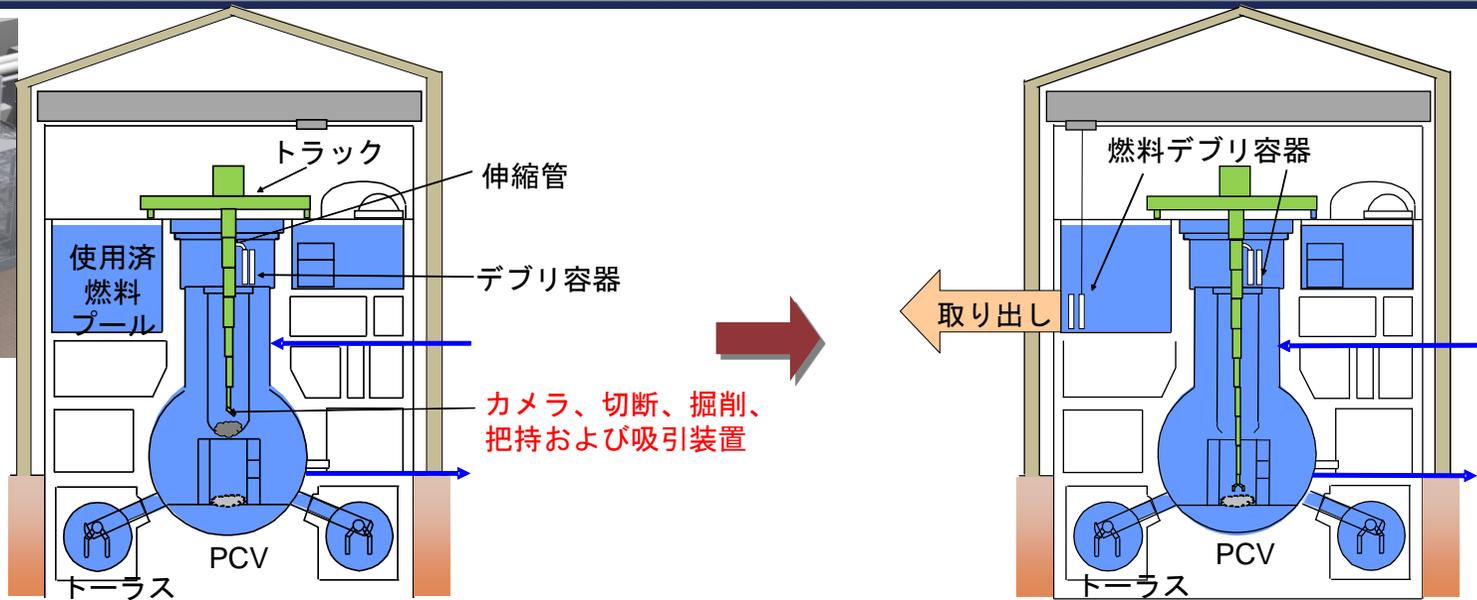
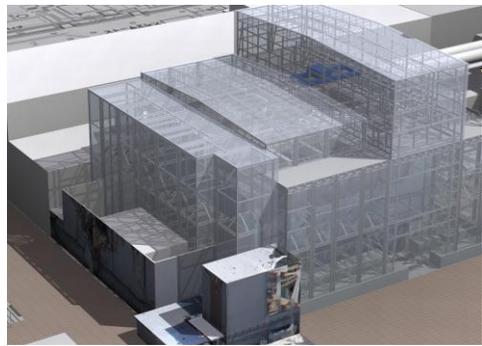
- PCV下部を水で満たす（冠水）。
- 燃料デブリの分布および特性が調査されることになる。
- **主たる課題および問題点：**
 - 高線量率、限られた接近可能性および視界が悪いこと
 - PCVの冠水が達成されると、調査装置のために耐漏洩ペネトレーションが必要とされる。
 - 未臨界評価



- (1) PCV上部の補修後に、PCV/RPV全体を水で満たす。
- (2) 燃料取り出しのためにR/Bコンテナおよび天井クレーンが設置されることになる。
- (3) 十分な水が得られたら、RPV/PCV上蓋は取り外されることになる。

■ **主たる課題および問題点：**

- 高線量率、限られた接近可能性
- 冠水後の耐震安定性は、水の量を考慮して維持されなければならない
- PCVからの放射性物質の放出を防止する
- 未臨界評価



- RPV内部および燃料デブリの状態が調査されることになる。
- 燃料デブリおよびRPV内部構造物を取り出されることになる。
- **主たる課題および問題点：**
 - 高線量率、限られた接近可能性および視界が悪いこと
 - 必要な装置の開発
 - 未臨界評価
 - 取り出されたデブリの貯蔵
 - 燃料デブリは複雑なRPV底部構造物の上に落下していることが想定される（BWRはPWRよりもはるかに複雑である）
 - 燃料デブリはRPV外に落下している可能性がある（TMI-2ではRV内に保持）
 - さまざまな種類の金属およびコンクリートと混合されたデブリの中性的、機械的および化学的特性の多様性

現行の廃止措置手順における主たる課題

- 最終目標は原子炉建屋（R/B）から燃料を取り出すことである。
- 燃料取り出し手順は、以下のような相違のために、TMI-2の場合よりもはるかに複雑になるだろう。

	TMI-2	福島第一
R/Bの損傷	限定的	水素爆発による損傷 (1、3、4号機)
水バウンダリ	RVは健全なままだった	RPV/PCVはいずれも損傷している (1~3号機)
燃料デブリ位置	RV内にとどまった	RPV外に落下したかもしれない
容器の底部	構造物なし	制御棒駆動機構を伴う複雑な構造

- TMI-2の経験は、廃止措置における燃料取り出し後の手順のためにより有効に活用しうる。

3 現行のR&Dプロジェクト

廃止措置に係るR&Dプログラム

1. 使用済燃料プールから取り出した燃料等に係る研究開発

赤字：以下のスライドで説明する

- 1.1 使用済燃料プールから取り出した燃料集合体他の長期健全性評価（2011～2017年度）
- 1.2 使用済燃料プールから取り出した損傷燃料等の処理方法の検討（2013～2017年度）

2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発

- 2.1 遠隔操作機器および装置を用いた燃料デブリ取り出し
 - 2.1.1a 原子炉建屋内部の遠隔除染技術の開発（2011～2014年度）
 - 2.1.1b 総合的線量低減計画の策定（2012～2013年度）
 - 2.1.2, 3 原子炉格納容器に水張りに向けた調査・補修（止水）技術の開発（2011～2017年度）
 - 2.1.4 原子炉格納容器内部調査技術の開発（2011～2016年度）
 - 2.1.5 原子炉圧力容器内部調査技術の開発（2013～2019年度）
 - 2.1.6 燃料デブリ・炉内構造物の取出工法・装置開発（2014～2020年度）
 - 2.1.7 燃料デブリ収納・輸送・保管技術開発（2013～2019年度）
 - 2.1.8 原子炉圧力容器／原子炉格納容器の健全性評価技術の開発（2011～2016年度）
 - 2.1.9 燃料デブリの臨界管理技術の開発（2012～2019年度）
- 2.2 炉内状況の確認および解析
 - 2.2.1 事故進展解析技術の高度化による炉内状況の把握（2011～2020年度）
- 2.3 燃料デブリの特性の確認およびその処理準備
 - 2.3.1, 2, 3 模擬デブリを用いた特性の把握、実デブリの性状把握、燃料デブリ処理技術の開発（2011～2020年度）
 - 2.3.4 燃料デブリに係る計量管理方策の構築（2011～2020年度）

3. 固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発

（2011年度～）

1～3号機における建屋の汚染調査 (2.1.1a)

■ 除染計画を策定するために、1～3号機の原子炉建屋の線量レベル／放射線源調査ならびに汚染物質試料の分析が実施されている。

プラント	階数 (原子炉建屋)	ロボットを用いた遠隔調査			作業者による調査				
		線量率調査	放射線源調査	表面状態調査	汚染状態調査				
					遊離性表面汚染調査			浸透汚染調査	
					固着性表面汚染調査			床	機器
1号機	1階	●	●	●	●	●	●	●	●
	2階				●				
	3階				●				
2号機	1階	●	●	●	●			●	
	2階				●				
	3階				●				
3号機	1階	●	●	●	●			●	
調査目的		建屋内部の線量率分布の確認	相対線量率分布の確認	床、壁および機器の表面状態の確認	汚染分布の確認			汚染分布の確認	
調査内容		高さ0.05mおよび1.5mにおける線量率を約3mメッシュで測定	ガンマカメラを用いて線量率分布を測定	カメラを用いて床面、壁面および機器表面をビデオ撮影	分析のため表面堆積物をハケなどで、固着物をペイントストリッパーで採集			コンクリートコアサンプリングおよび分析	

線量／放射線源調査結果

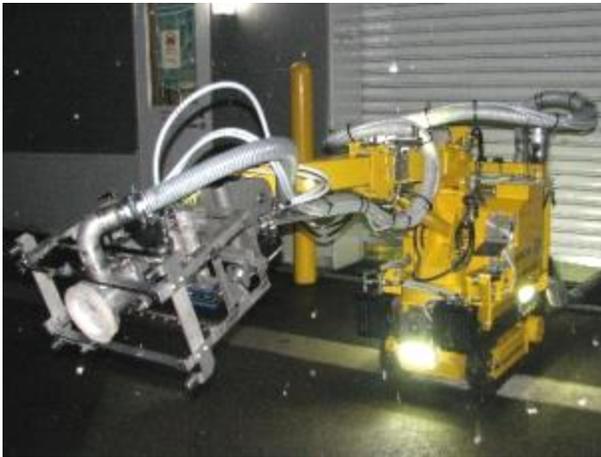
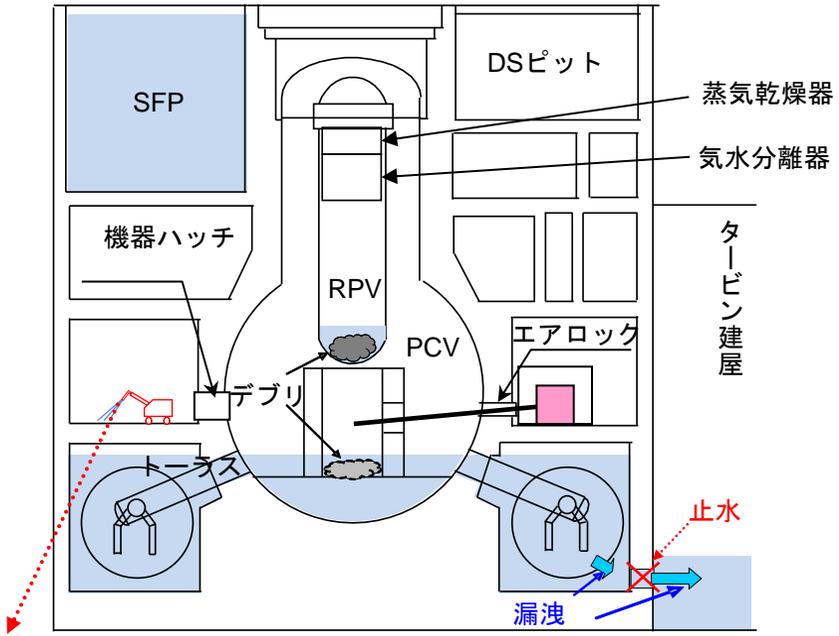
- 線量率調査結果
 - 1号機：3.2～8.9mSv/h
 - 2号機：6.8～30.3mSv/h
 - 3号機：15.8～124.7mSv/h
- 放射線源調査結果
 - 主たるホットスポットは格納容器ペネトレーションシール、水圧制御ユニット(HCU) および3号機の機器ハッチ



放射線源調査結果 (ガンマカメラ) の例 (3号機南側HCU)
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

建屋内部の除染 (2.1.1a)

■ 燃料デブリ取り出しに備えるためのPCVの調査や漏洩補修などの作業環境を改善するために、現場の汚染状態に応じた遠隔操作除染装置を開発



高圧水噴射除染装置



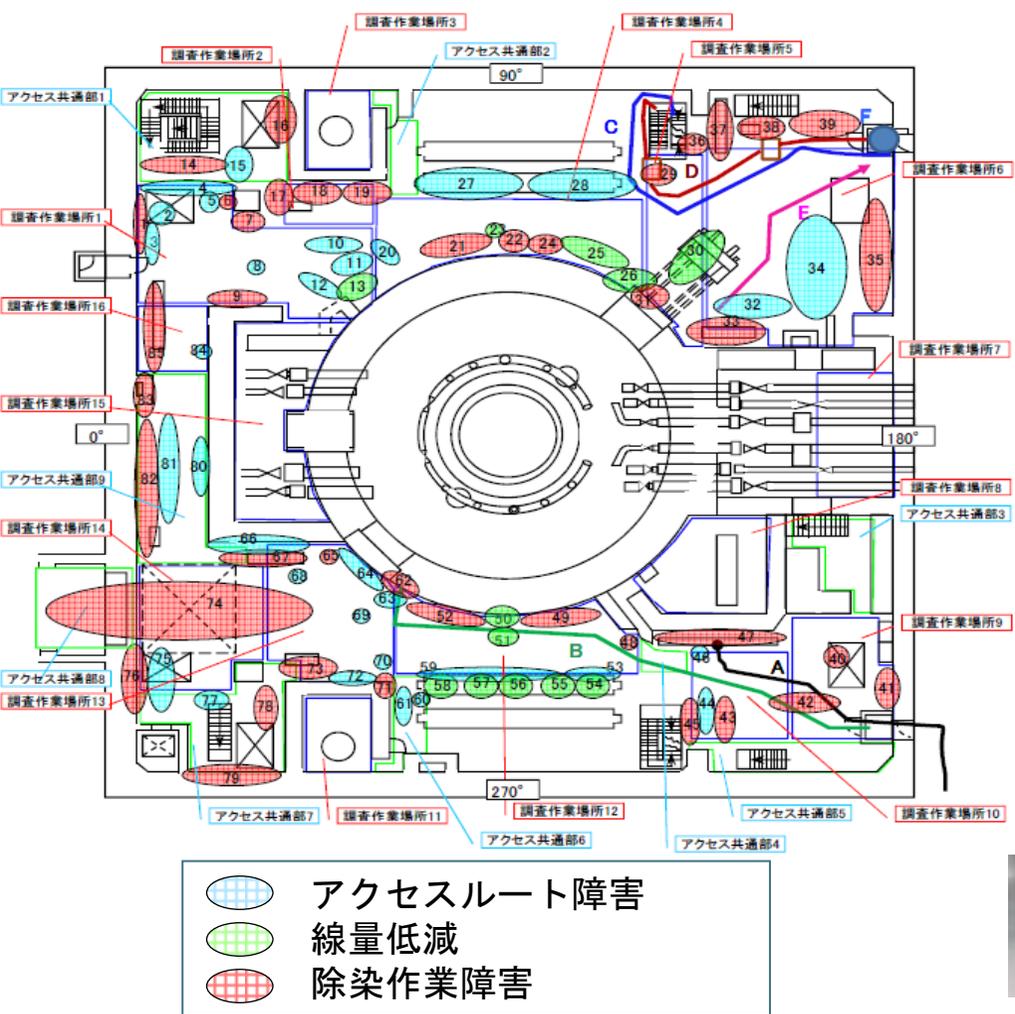
ドライアイスブラスト除染装置



ブラスト／吸引除染装置

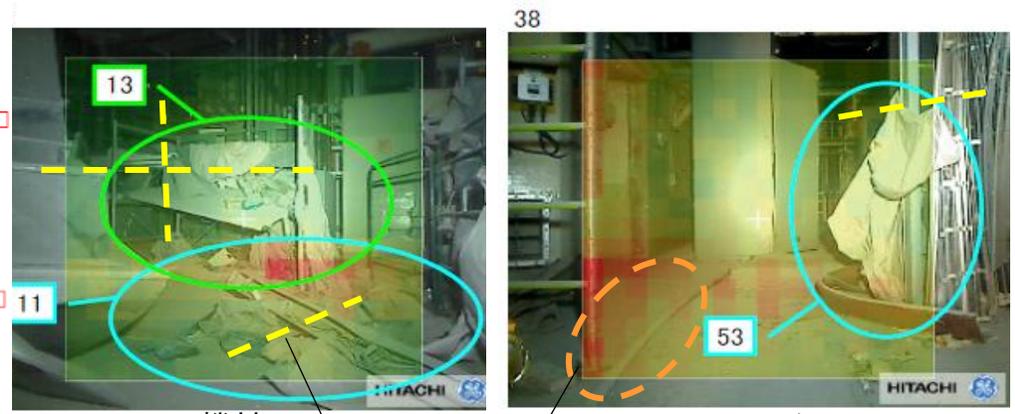
建屋内部の除染 (3号機の例) (2.1.1a)

■ 3号機におけるガレキの回収は以下のように計画されている。



3号機1階

ガレキのイメージ



機材

N2ホースおよびHCUフェンス



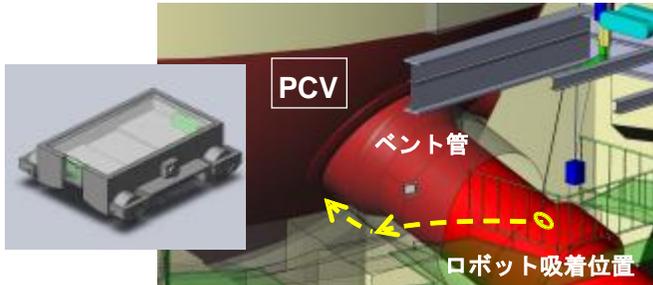
落下したダクト

ホースおよびケーブル
→ 整理することが必要

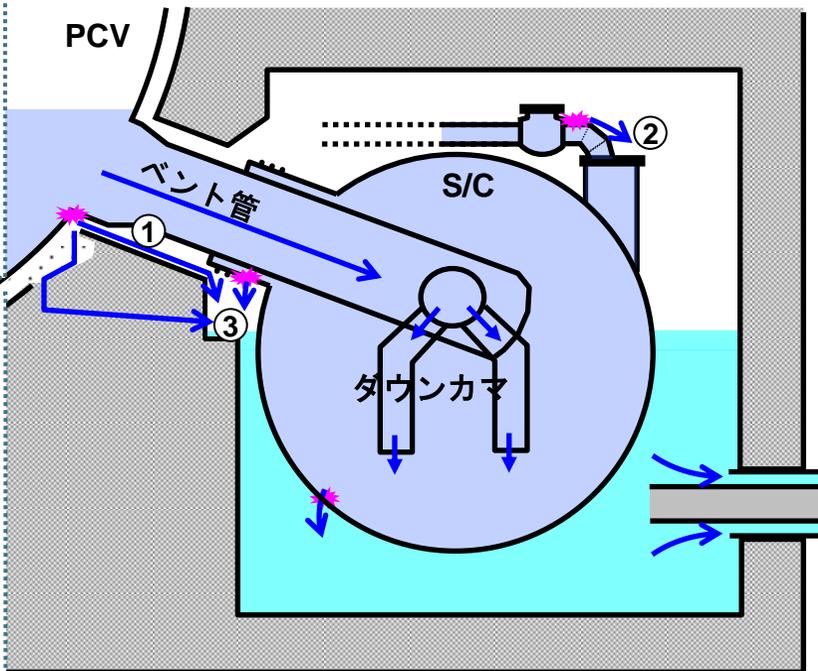
大きな物体およびサポート付属物
→ 切断することが必要

装置	特徴
① ベント管接合部調査ロボット	ベント管の外部表面に吸着し、損傷を調査するためにベント管とコンクリート壁の間からベント管とD/Wの接合部に接近する。
② S/C上部調査ロボット	トラス室外側のキャットウォークから高所（最高で約3m）にあるS/C上部に接近した後、その構造物からの漏洩を調べる。
③ 四足歩行ロボット（および小型走行車）	ベント管の下部付近から写真撮影が可能な範囲内で、漏洩の存在など、S/C内部の状態を確かめる（事前調査）ために用いられる。 1号機の三角コーナーは現在水没しており、接近することができない。

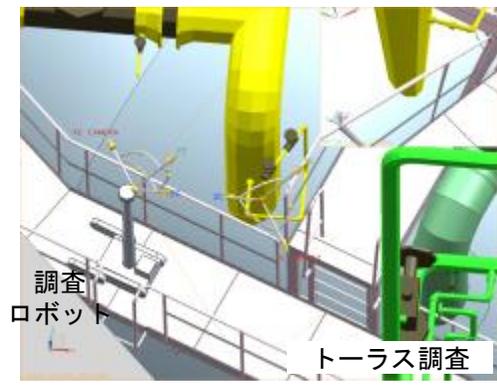
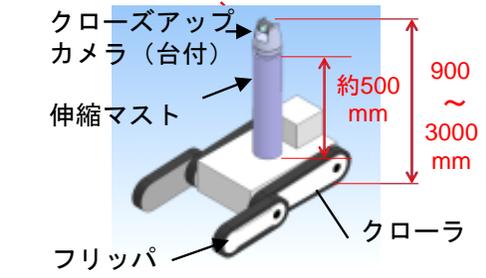
① ベント管ジョイントの調査ロボット



② 四足歩行ロボット

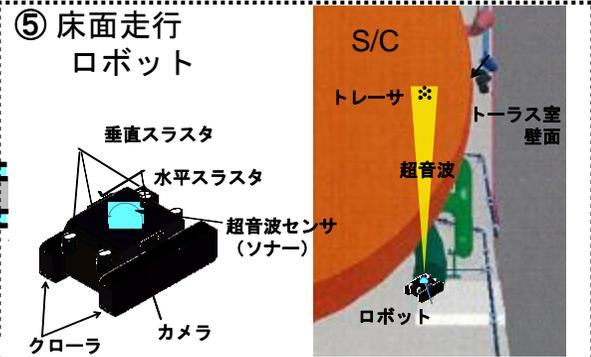
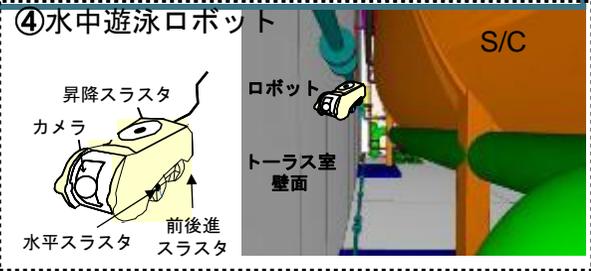
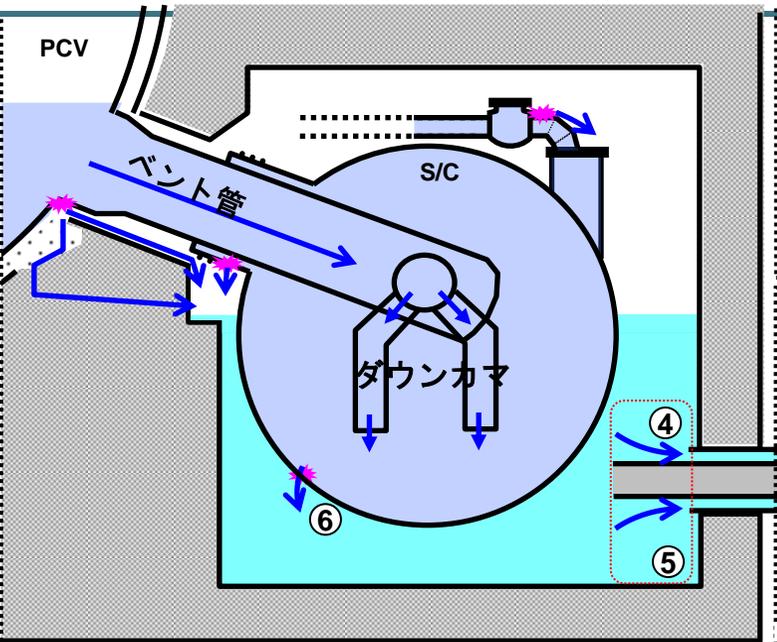
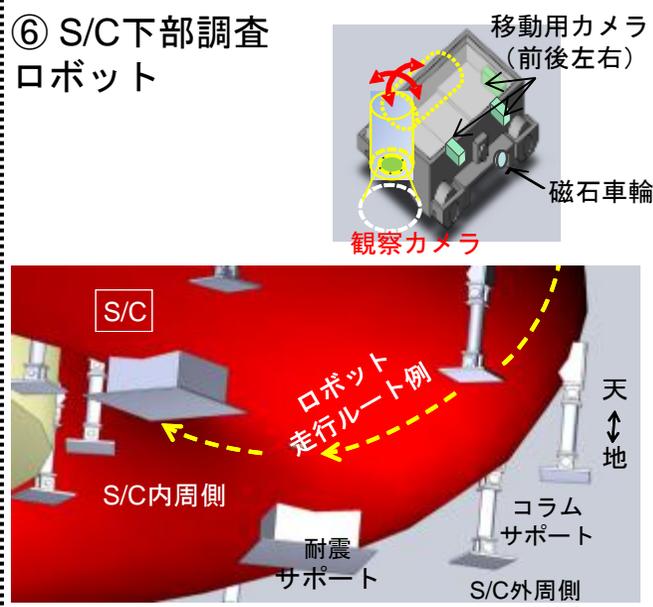


③ S/C上部調査ロボット



水中ロボット (2.1.2,3)

開発装置		特徴
トラス室水中壁面調査ロボット	④ 水中遊泳ロボット	カメラ映像を見るオペレーターによって遠隔操作される（極めて狭い場所で用いられる）。建屋ペネトレーションシールの損傷を調べるために用いられる（このロボットは2013年度下半期中に用いられるようになるの見込まれる）。
	⑤ 床面走行ロボット	水中床面を走行し、離れた場所における漏洩を調べるために超音波を用いる。
⑥ S/C下部調査ロボット		S/C外部、外部構造物およびペネトレーション配管における損傷を調べるために、S/Cの外部表面に吸着する。
⑦ 水中遊泳ロボットの「自己位置検知」、「長尺ケーブル処理」および「形状／水流検知」技術開発（要素技術は他の開発装置に適切に反映される）。		
⑧ S/C内部水位測定ロボットの「鋼製容器内水位の非破壊測定」、「鋼製曲面上の移動」、「自己位置検知」および「トラス室へのアクセス」技術開発。		



水中遊泳ロボットおよびS/C水位測定ロボット (2.1.2&3)

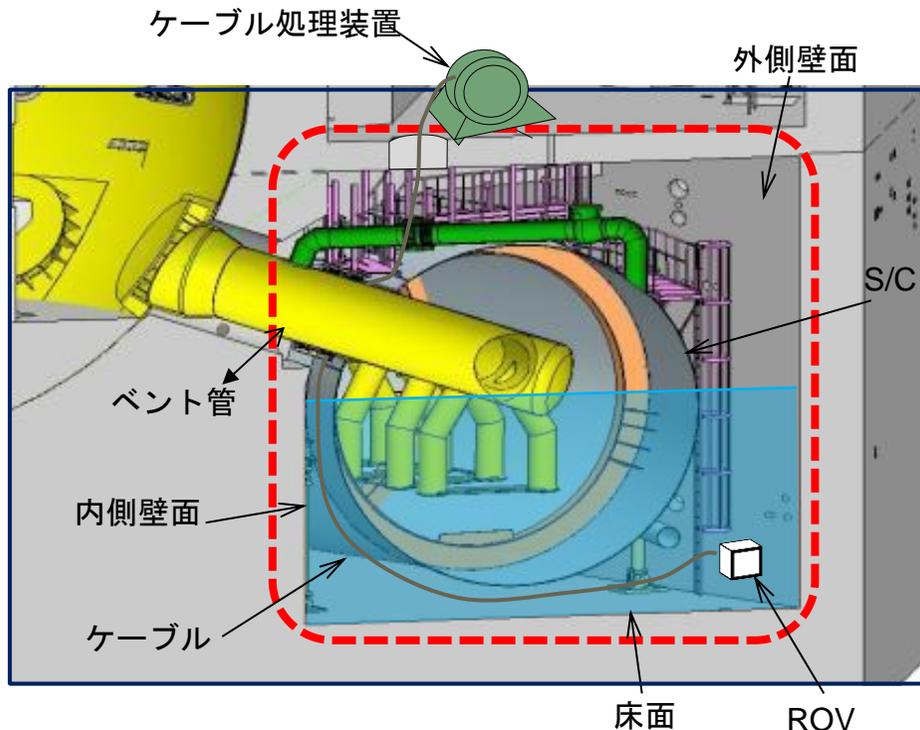
⑦ 水中遊泳ロボット

必要とされる装置

- ・ 水中遊泳ロボット

必要とされる技術

- ・ 自己位置検知技術
- ・ 長尺ケーブル処理技術
- ・ 形状／水流検知技術



⑧ S/C水位測定ロボット

必要とされる装置

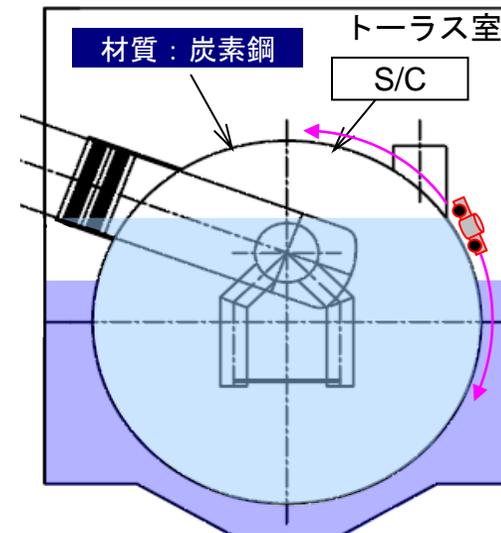
- ・ 鋼製曲面を移動可能な水位測定ロボット

必要とされる機能

- ・ S/Cの外からS/C内部の水位を測定

必要とされる技術

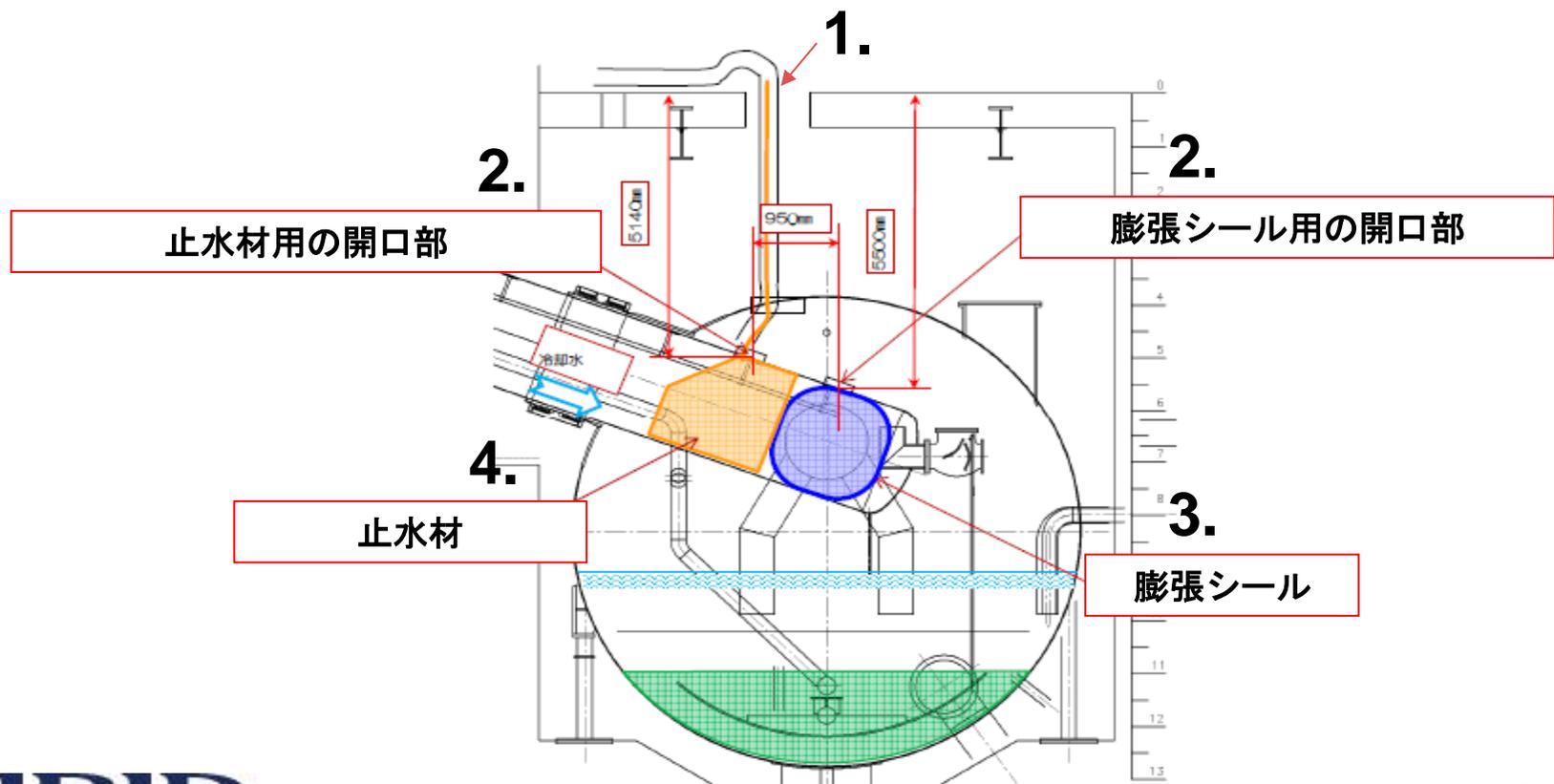
- ・ 鋼製容器内水位の非破壊測定技術
- ・ 鋼製曲面上を移動するための技術
- ・ 自己位置検知技術
- ・ トーラス室へのアクセスに関する技術



PCV下部のための補修（止水） 概念（2.1.2&3）

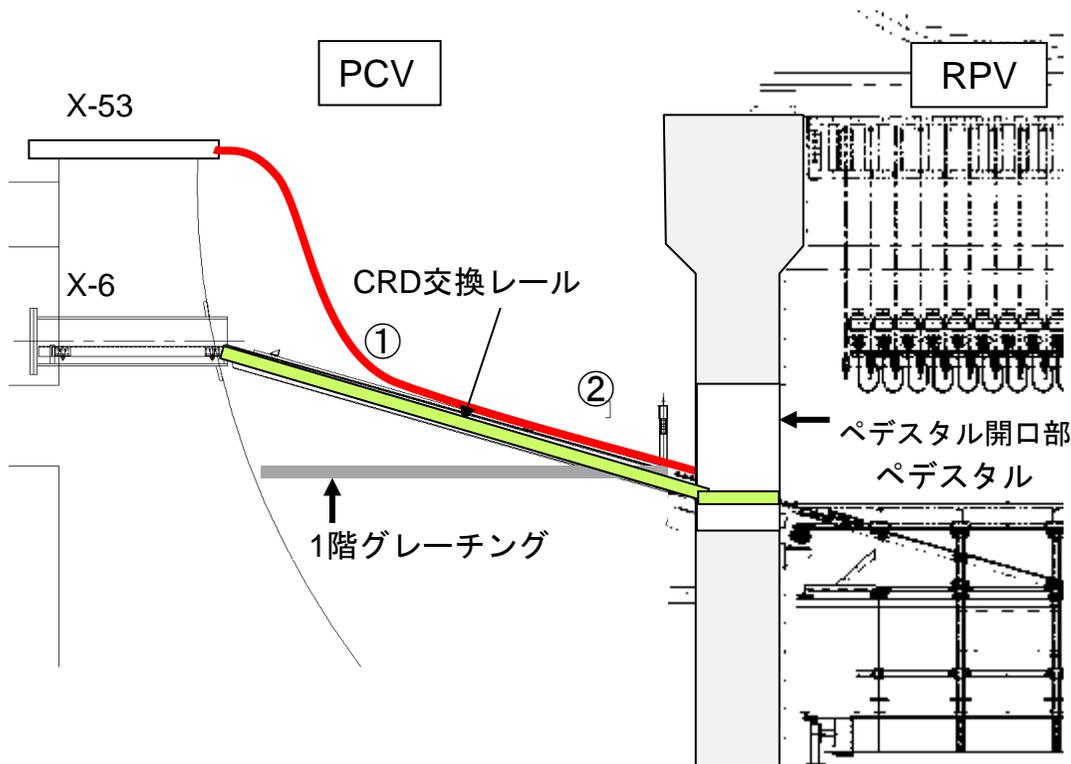
S/Cの補修方法 [ベント管に栓をしてS/Cを隔離する]

- 1. 地上階のスラブに開口部を作る。
- 2. S/C シェルおよびベント管に開口部を作る。
- 3. ベント管に膨張シール端を取り付ける。
- 4. 膨張シール上側のベント管に止水材を注入する。



- 1号機：X-100Bペネトレーションを通して温度計、CCDカメラ、線量計、水位センサなどをPCVに挿入
- 2号機：X-53ペネトレーションを通して温度計、内視鏡および線量計をPCVに挿入

周囲放射線量および温度の測定位置



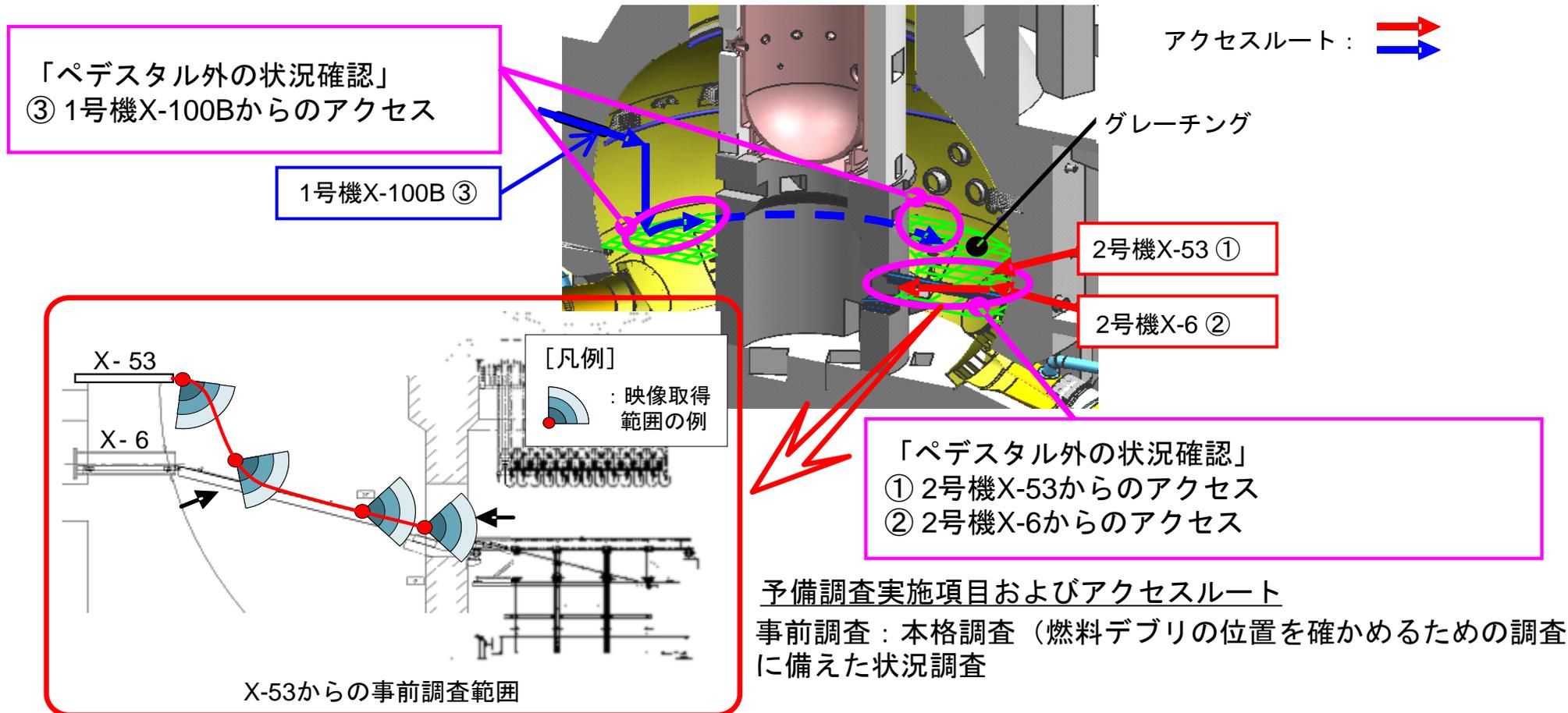
2号機のCRD交換レール



イメージ処理後の画像

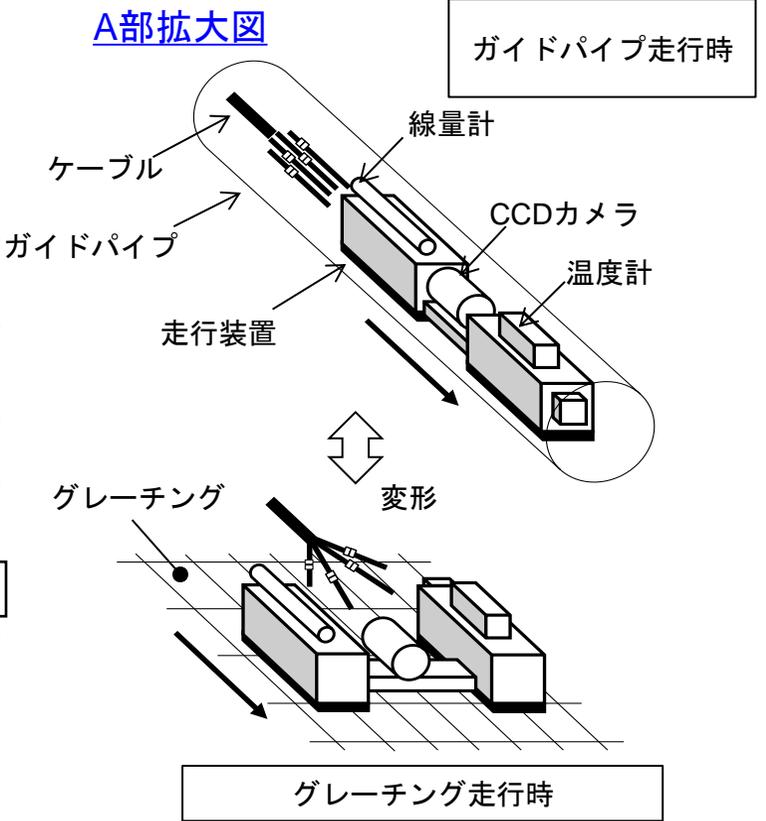
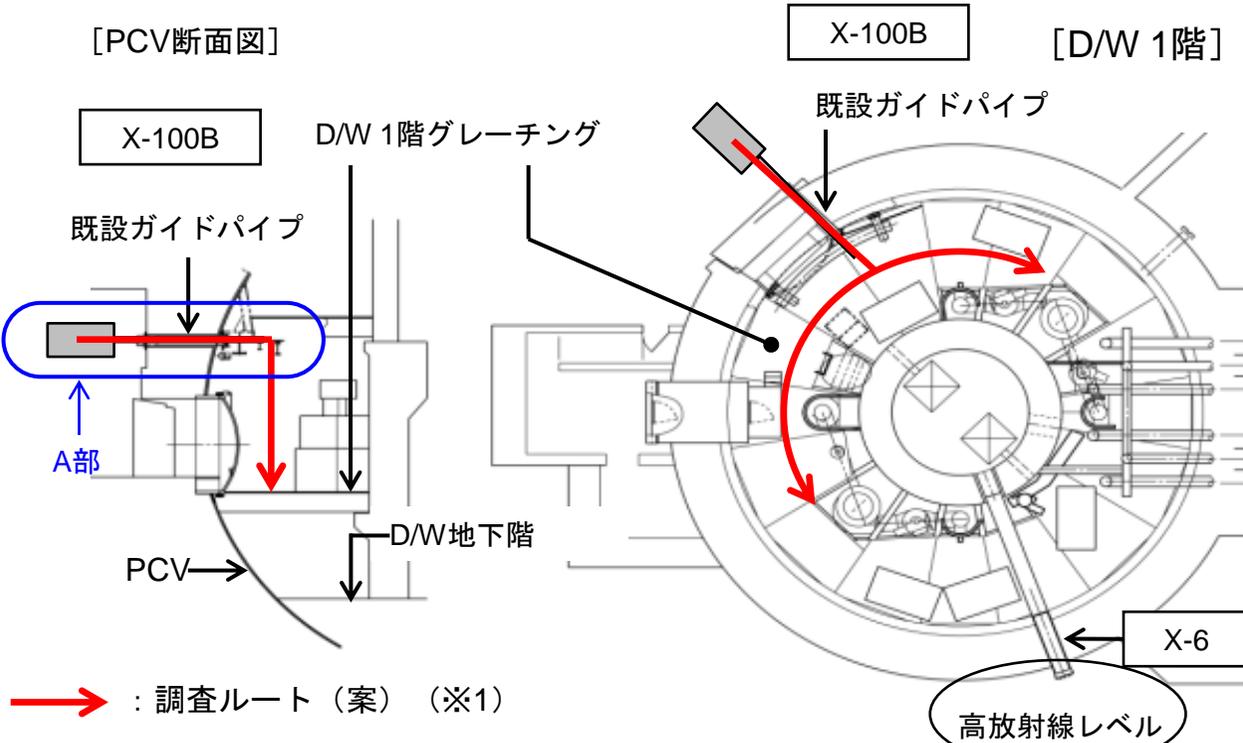
PCVの内部調査（将来計画(1)） (2.1.4)

- 1号機：X-100BペネトレーションからPCV内へ調査装置を挿入し、装置はPCV1階グレーチング上を移動してペDESTAL外を調査
- 2号機：X-53ペネトレーションからCRD交換レールおよびペDESTAL開口部近傍を調査
CRD機器ハッチ（X-6）を通して調査装置を挿入



PCVの内部調査（将来計画(2)） (2.1.4)

- 1号機X-100Bを通しての調査装置の挿入
 - 狭いアクセスパイプ（X-100Bペネトレーション：内径φ100mm）からPCVに挿入された後、形状を変えることができ、グレーチングに沿って安定走行することが可能なクローラ型装置



※1) ルートの概念イメージ
 実際の調査ルートおよび調査範囲は現場状況に基づいて決定

PCV内部調査ルート（案）

装置の概念イメージ

RPVの内部調査 (2.1.5)

RPVの内部調査は、燃料デブリの取り出しに先立ってRPV内部の情報を得るために実施される。

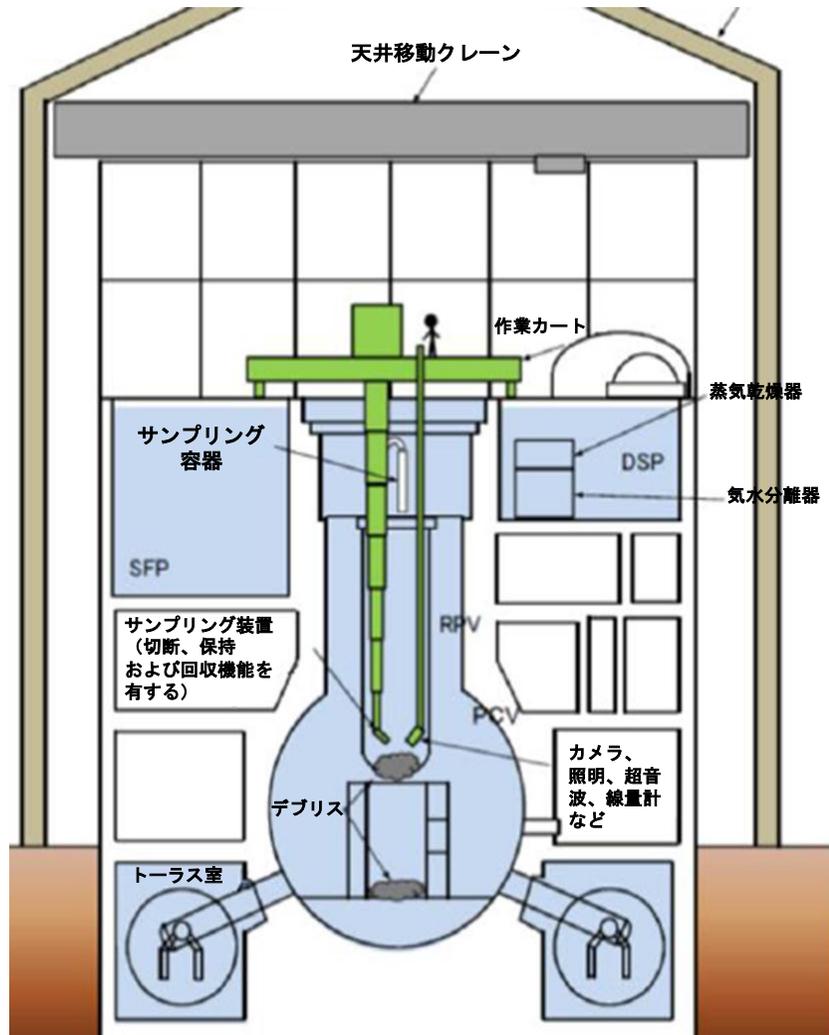
- 燃料デブリを取り出す方法のシナリオをレビュー
- シナリオに基づいて調査の目的を明確化
- 調査の項目および対象部分を決定

スケジュール

項目/年度	第1期			第2期					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
				(初期)			(中期)		
1. 計画立案									
2. アクセス技術の開発									
3. 研究技術の開発									
4. サンプルング技術の開発									
5. 実機への適用可能性の評価試験									

▽1 ▽2

▽1 (2018年度下半期) : RPV内部調査方法の定義
 ▽2 (2019年度下半期) : RPV内部調査の開始



燃料デブリ収納・移送・保管技術開発 (2.1.7)

燃料デブリの輸送・貯蔵技術の調査を実施し、他の研究開発と連携をとりつつ

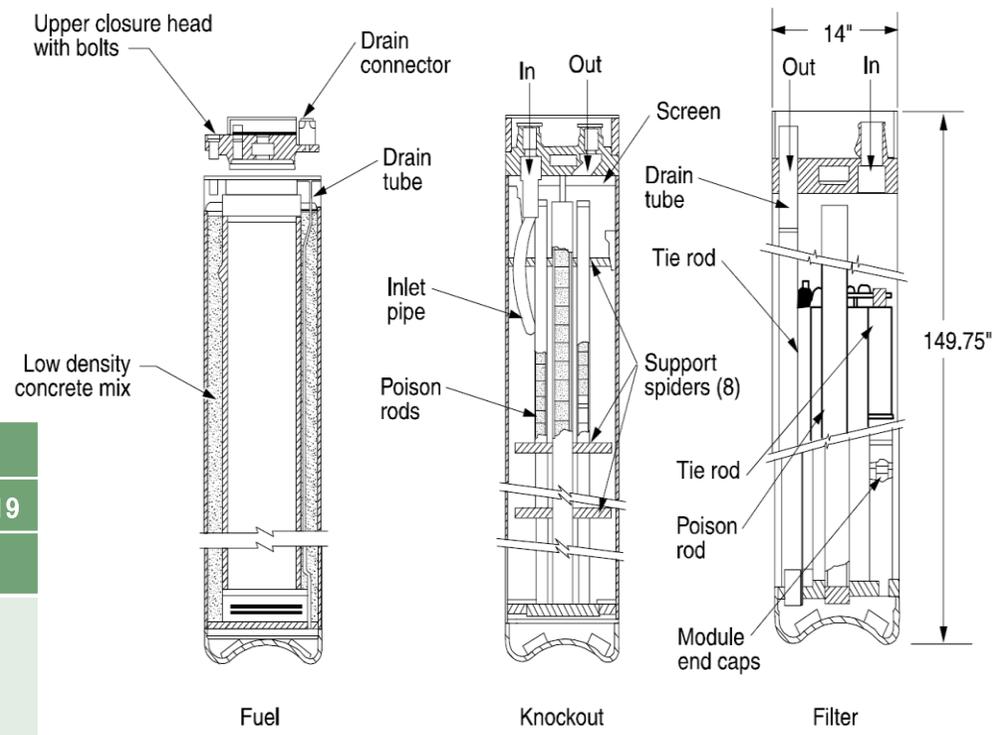
- 燃料デブリ収納缶の安全評価技術を開発
- 燃料デブリ保管システムの検討
- 収納缶及び移送・保管のための取扱装置を設計・試作し燃料デブリ取出しに供する

スケジュール

事項／年度	第1期		第2期				
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1. 破損燃料送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案	■						
2. 燃料デブリの保管システムの検討		■					
3. 事前調査結果に基づく安全評価技術の開発		■	■	■			
4. 燃料デブリ燃料の収納技術の開発				■	■	■	■
5. 収納缶の移送・保管技術の開発					■	■	■

収納缶開発/設計/試作

取扱装置開発/設計/試作



収納缶の例(TMI-2)

原子炉の状態を推定するための事故進展解析 (2.2.1)

事故進展解析を行うために現行の過酷事故解析コードを用いる。

- 実際のパラメータおよびPIRTとの比較に基づいてコード改良項目を特定する。
- 事故進展解析コードの改良項目を進める。
- 炉心およびPCVの状態を推定し特定するために、改良解析コードを用いる。

