

平成26年度 技術研究組合国際廃炉研究開発機構シンポジウム

燃料デブリ取り出し関連の 研究開発の状況

平成26年7月18日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

※本発表内容は、経済産業省「平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業」「平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術開発費補助金」「平成25年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金」の成果を含む。
※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。

1～4号機の概要

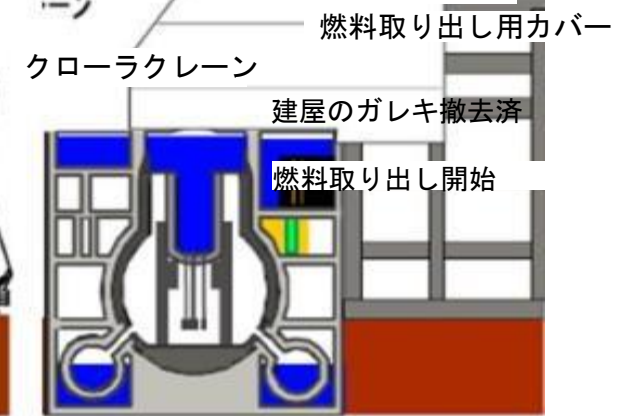
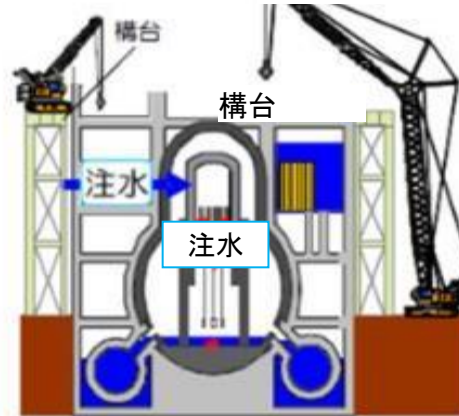
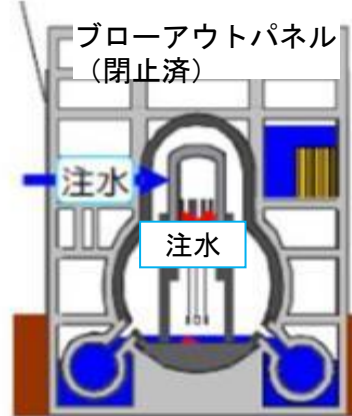
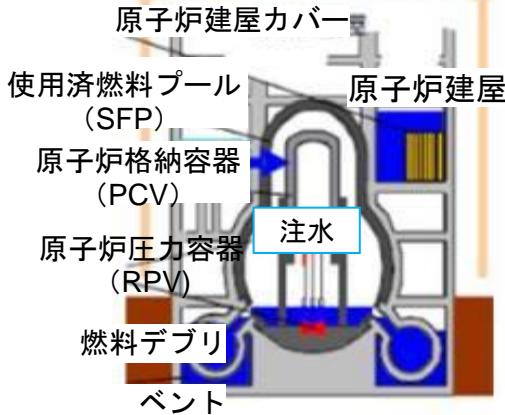
- 廃止措置の進捗状態は号機ごとに異なっている。
- 4号機の使用済燃料プールからの使用済燃料の取り出しは11月18日に開始された。

1号機

2号機

3号機

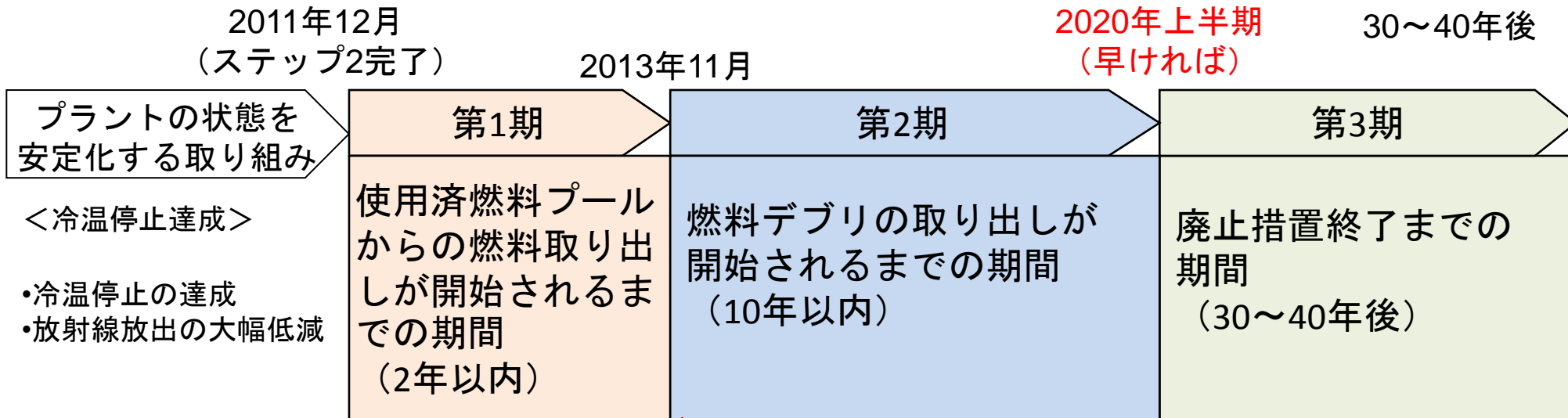
4号機



| | | | | |
|---------|---------|---------|---------|----------|
| 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 |

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。



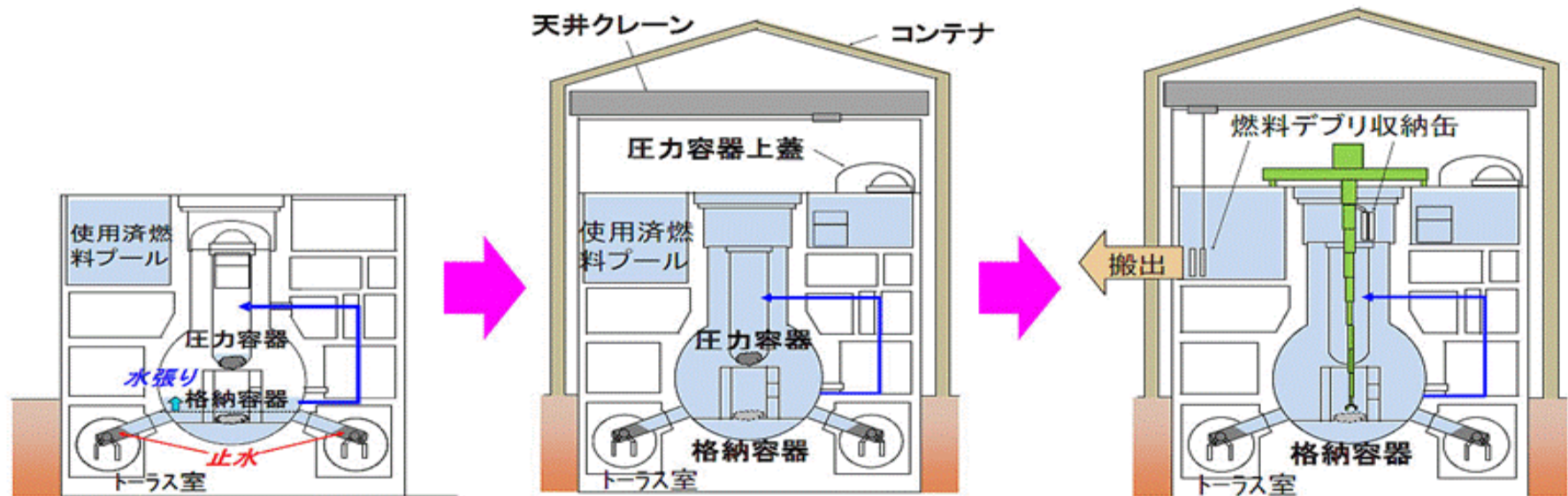
2013年11月18日に4号機SFPから最初の燃料集合体の取り出し開始

「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。



燃料デブリ取出しへ作業イメージ

- 燃料デブリを冠水させた状態で取り出す方法が、作業被ばく低減の観点から最も確実
- 格納容器の水張りに向けた調査・補修技術に加え、燃料デブリ取り出し・収納・保管に必要な研究開発を推進
- 燃料デブリ取出し代替工法について、国内外に技術情報提供依頼(RFI)を実施。



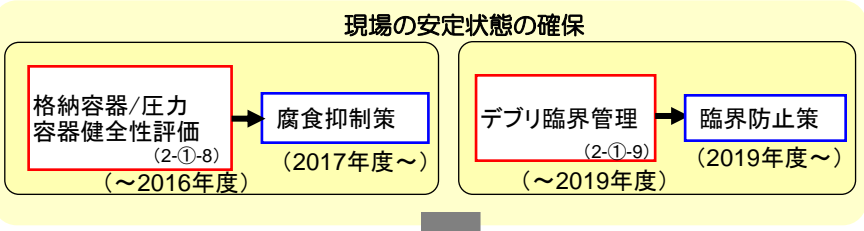
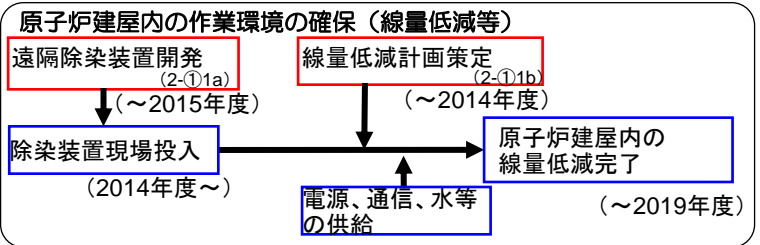
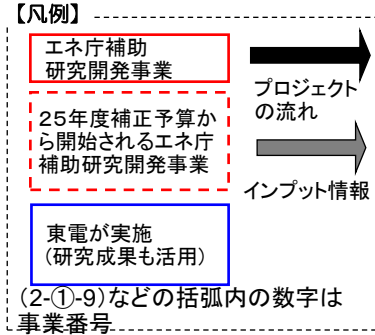
現行の廃止措置手順における主たる課題

- 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と予想される。

| | 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 |

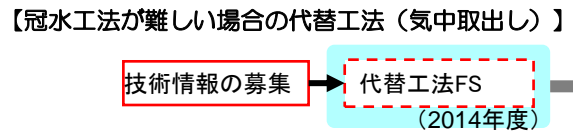
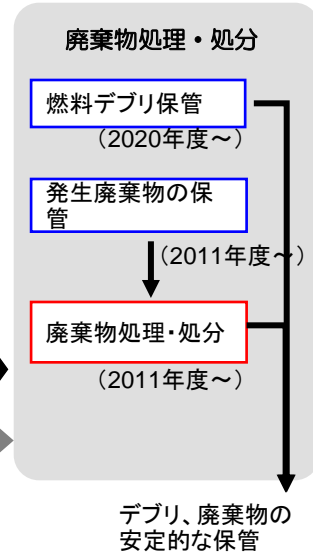
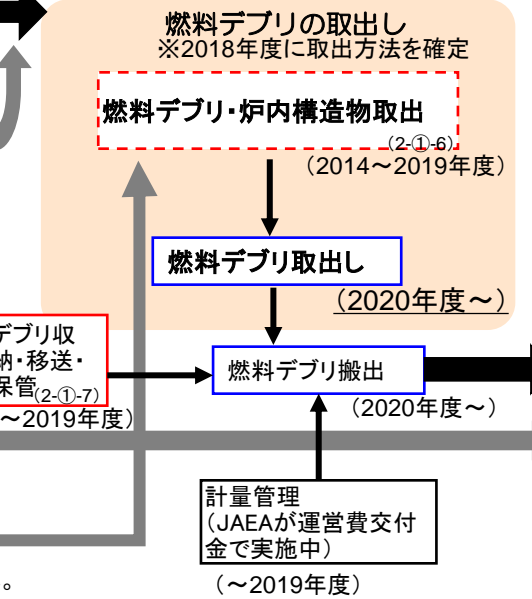
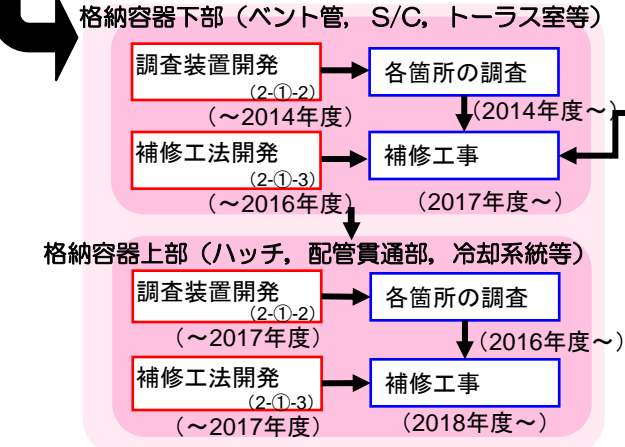
- TMI-2の経験は、廃止措置における燃料取り出し後の手順のためにより有効に活用しうる。

福島第一原発の廃炉・汚染水対策に係る研究開発等のフロー図

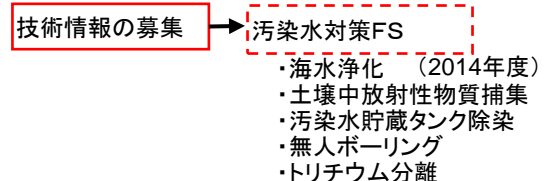
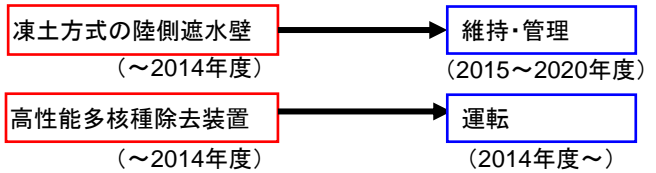


【冠水工法 (燃料デブリを冠水させた状態での取出し)】

- ①全部冠水 (格納容器上部まで水張りできる場合)
- ②部分冠水 (格納容器上部まで水は張れないが、燃料デブリの取り扱いは水中で行う場合)



※「S/C」は「サプレッションチェンバー」の略称。



出典：平成26年3月27日
廃炉・汚染水対策チーム会合/
事務局会議資料

燃料デブリ取り出しに係る研究開発プロジェクト

1. 使用済燃料プール燃料取り出しに係る研究開発

- (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
- (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

2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発

- (2-①-1) 原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発
- (2-①-2, 3) 原子炉格納容器水張りに向けた調査・補修（止水）技術の開発
- (2-①-4) 格納容器内部調査技術の開発
- (2-①-5) 圧力容器内部調査技術の開発
- (2-①-6) 燃料デブリ・炉内構造物取出技術の開発
- (2-①-7) 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発
- (2-①-8) 圧力容器／格納容器の健全性評価技術の開発
- (2-①-9) 燃料デブリの臨界管理技術の開発
- (2-②-1) 事故進展解析技術の高度化による炉内状況把握
- (2-②-2) 原子炉内燃料デブリ検知技術の開発

検知技術の開発

- (2-③-1, 3) 模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発

1. 使用済燃料プール燃料取り出しに係る 研究開発

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 (1-1)

使用済燃料プールから取り出した燃料集合体他の中長期的課題

○研究目的

燃料取出し作業に対して使用済燃料プール(SFP)の特異な環境(海水注入、瓦礫落下)の影響がないことは、4号機からの燃料取出し作業に先立って、SFP内新燃料調査や水質模擬腐食試験等により確認されている。本研究開発の目的は、海水注入および瓦礫混入の特異性を考慮した燃料集合体の**長期健全性評価および長期保管方法に関する検討を行う**ことである。

○1Fサイトの燃料集合体長期健全性評価の課題

1Fの燃料集合体健全性評価にあたり以下の特異性を考慮する必要がある。

- 海水注入によるSFP水質変化
 - 塩化物イオン等の海水成分混入、導電率増大
- SFPへの瓦礫混入
 - pH増加(アルカリ化)、燃料集合体の損傷(キズ、変形等)



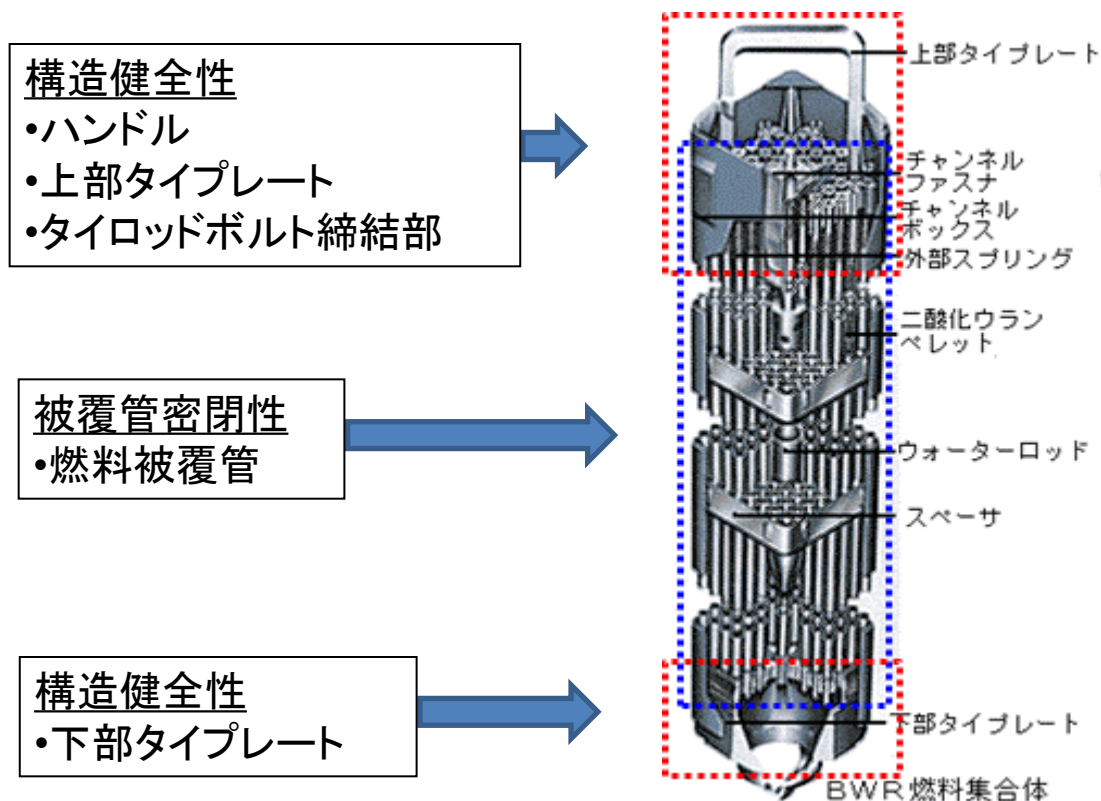
実機燃料等を用いた試験により実証的なデータを取得し、既存データと併せて条件を設定し1F燃料の長期健全性を評価する。

また基礎試験※により照射影響および加速試験法の検討を行う。

使用済燃料プールから取り出した燃料集合体の長期健全性

○使用済燃料プールSFPから共用プールに移送した燃料集合体が、長期保管後に中間貯蔵／処理施設での受入れが可能であること。

- 構造健全性 ⇒ 荷重伝達経路が構造強度を満足。
- 被覆管密閉性 ⇒ 燃料被覆管からFP漏洩による影響評価
(例えば乾式保管時の規格基準値以下)。



(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 (平成25年度成果-1-)

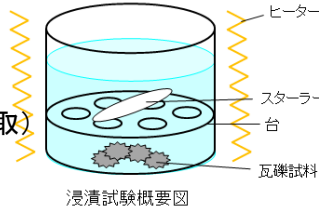
実施内容

瓦礫からの海水成分やコンクリート成分の溶出で、チャンネルボックス内の局所的水質に影響を及ぼすことが懸念されるため、本試験では、新燃料調査時に4号機から採取した瓦礫を用いた溶出試験を実施し、水質に与える影響を評価する。

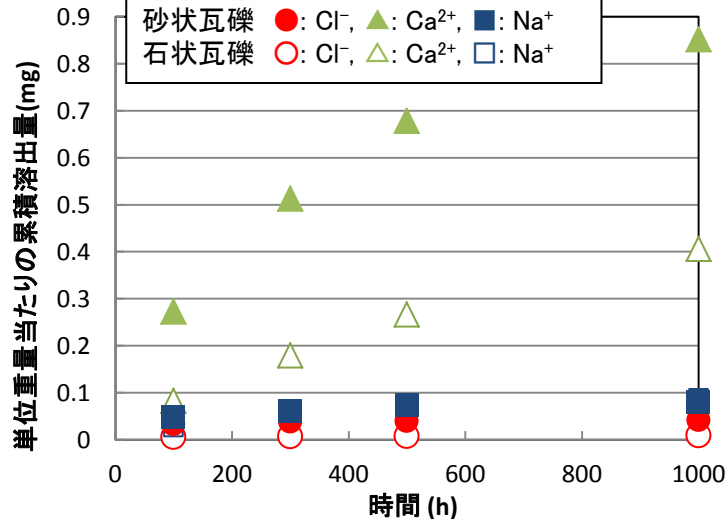
4号機のSFP燃料に混入していた瓦礫を用いた浸漬試験

□ 試験条件

- 瓦礫形状: 石状、砂状
- 溶液量: 100mL
- 浸漬温度: 60°C
- 浸漬時間: 1000hr (100、300、500hrで溶液採取)
- 雰囲気: 大気開放条件
- 測定方法: イオンクロマトグラフ、誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS)



□ 試験結果



1F瓦礫浸漬溶液のCl⁻, Ca²⁺, Na⁺濃度の累積溶出量

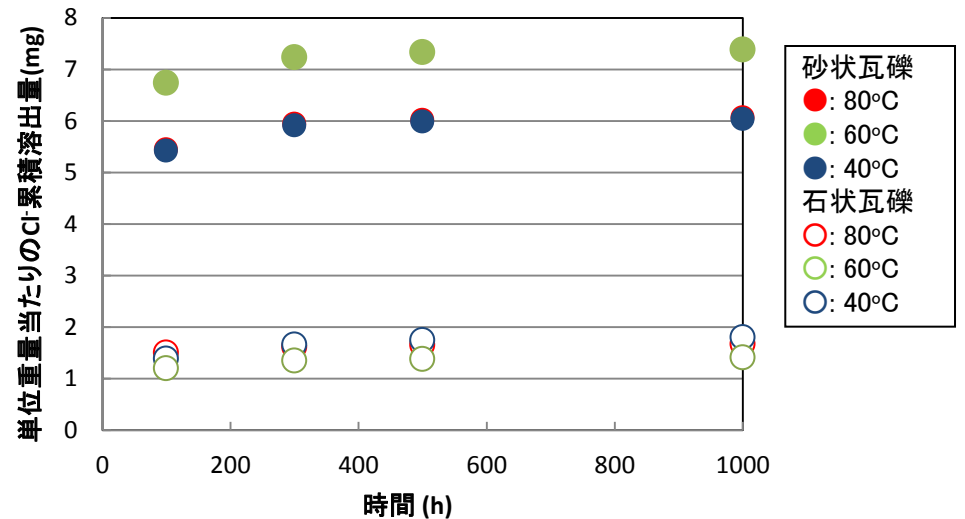
- ◆ 海水成分のCl⁻, Na⁺, コンクリート成分のCa²⁺を検出した。
- ◆ 浸漬時間とともに累積塩化物イオン濃度が飽和傾向。

模擬瓦礫を用いた浸漬試験

□ 試験条件

- 模擬瓦礫: 市販コンクリートを塩化物イオン濃度が6000ppm程度、水温が90°Cの海水模擬溶液に浸漬した瓦礫
- 瓦礫形状: 石状、砂状
- 溶液量: 100mL
- 浸漬時間: 1000hr (100、300、500hrで溶液採取)
- 浸漬温度: 40、60、80°C
- 測定方法、雰囲気はSFP燃料瓦礫浸漬試験と同等

□ 試験結果



模擬瓦礫浸漬溶液のCl⁻濃度の累積溶出量

- ◆ 浸漬時間とともに累積塩化物イオン濃度が飽和傾向。
- ◆ 温度による塩化物イオン濃度の溶出量依存性は見られなかった。

(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 (平成25年度成果-2-)

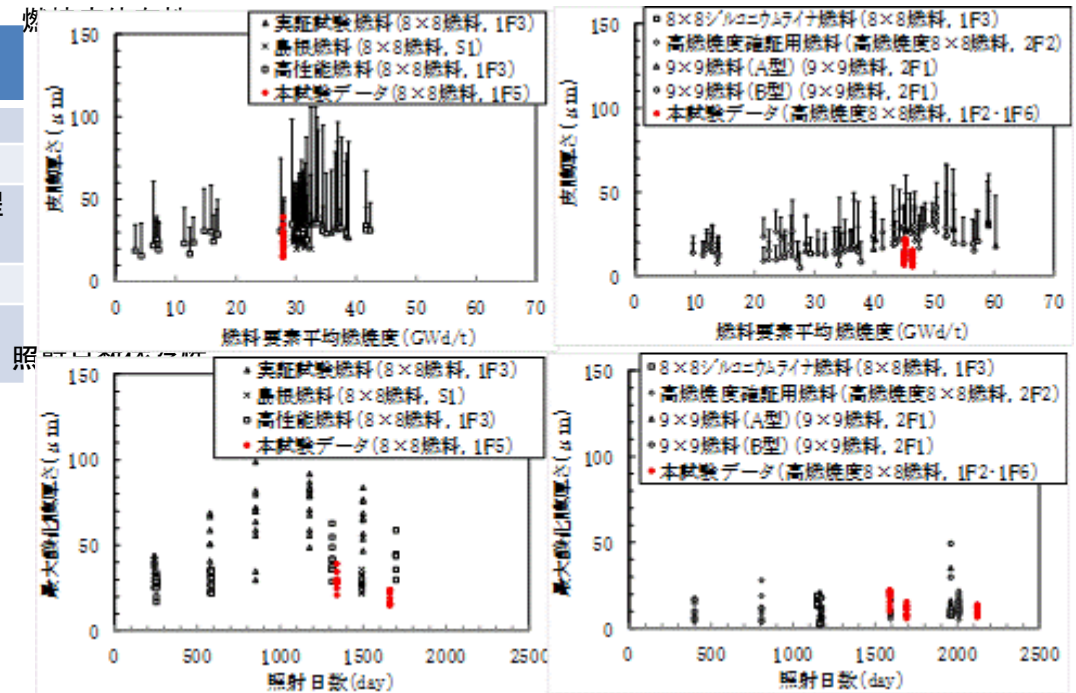
実施内容

共用プールに貯蔵中の使用済燃料を用いて燃料棒の酸化膜厚測定及び外観観察を実施し、今後の調査のための比較データを採取する。調査対象燃料については、燃料のタイプや使用履歴、被覆管の製造条件等を考慮し、選定する。

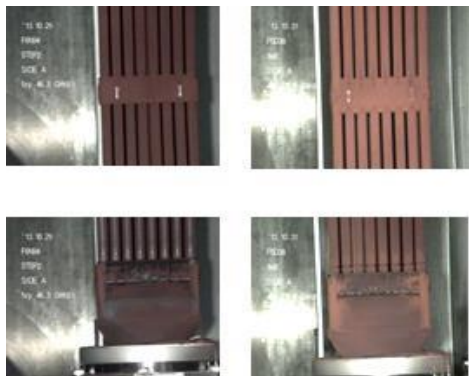
調査対象燃料の選定

| 燃料番号 | メーカー | 燃料タイプ | 燃焼度 (GWd/t) | Cy | 照射日数 | 備考 |
|-------|-------|---------|-------------|----|------|------------------|
| F2RN1 | NFI | STEP II | 45.1 | 4 | 1586 | 燃焼度が高い |
| F6N94 | GNF-J | STEP II | 46.3 | 5 | 1688 | 燃焼度が高い |
| F6M40 | GNF-J | STEP II | 44.9 | 6 | 2118 | 照射日数が2000日程度 |
| F5D38 | GNF-J | 8x8 | 27.8 | 4 | 1339 | 燃焼度が高い |
| F5C23 | GNF-J | 8x8 | 27.8 | 5 | 1659 | 燃焼度範囲は同等で照射日数が多い |

酸化膜厚さ測定



燃料集合体の外観



財団法人 原子力安全基盤機構 「平成17年度高燃焼度9×9型燃料信頼性実証成果報告書」平成18年7月
 財団法人 原子力安全基盤機構 「平成18年度高燃焼度9×9型燃料信頼性実証成果報告書」平成19年12月

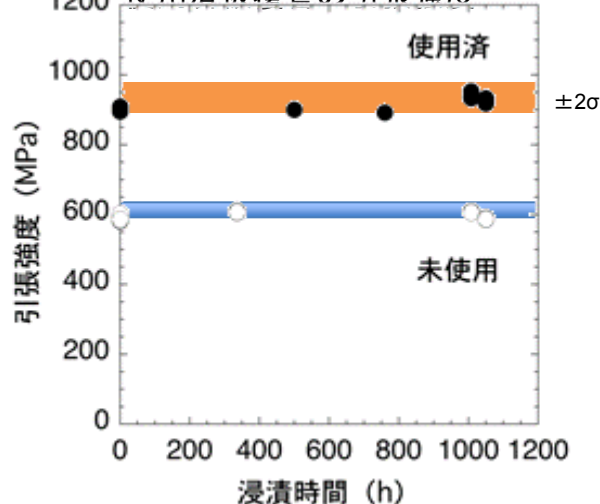
- ・外観観察では一様な褐色のクラッドに覆われており、特異な腐食挙動は認められなかった。また塩化物イオン増加による隙間腐食を示唆する局所的な錆の付着も認められなかった。
- ・酸化膜厚さ測定結果と従来データとの比較を行ったが、今回の測定結果は従来データの範囲内であり、特異な腐食挙動は確認されなかった。

(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 (平成25年度成果-3-)

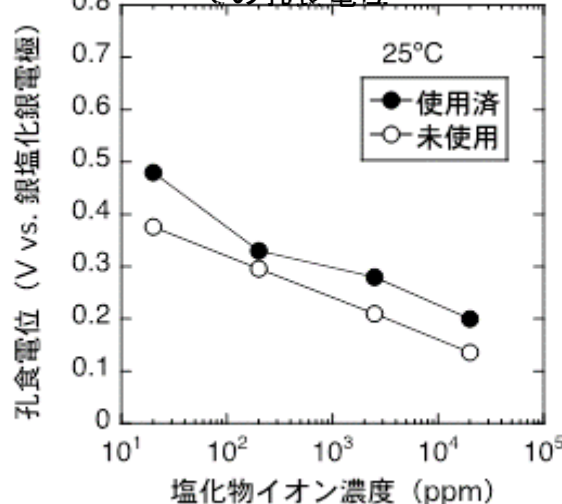
実施内容

- ①事故初期プール環境履歴が、被覆管の機械的強度に与えた影響を80°C海水に浸漬した被覆管のリング引張り試験で評価する。
- ②使用済被覆管の孔食発生への酸化皮膜の影響を、人工海水中での孔食電位測定により調査する。
- ③未使用被覆管の孔食発生への放射線場(高酸化性環境)の影響を、ガンマ線照射下で孔食電位測定を実施して評価する。

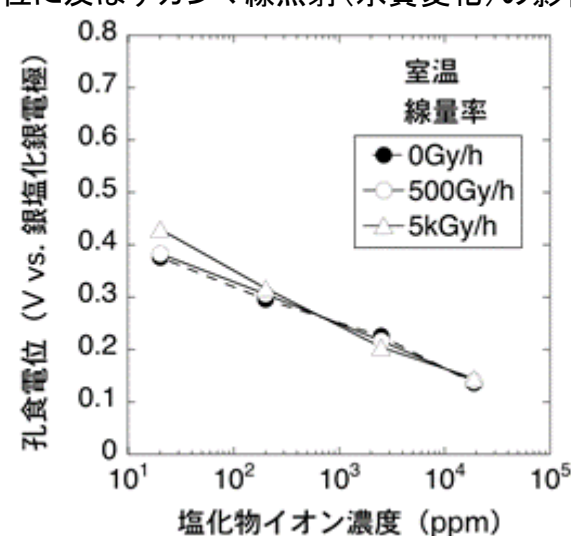
①80°Cで1000時間まで海水浸漬した
使用済被覆管の引張強度



②未使用及び使用済被覆管の希釈人工海水
での孔食電位



③希釈人工海水での未使用被覆管の孔食電位に及ぼすガンマ線照射(水質変化)の影響



試験結果(概要)

- ①高温海水への短期間の浸漬履歴は、強度特性に影響しない。
- ②酸化皮膜の存在により被覆管の孔食発生は抑制される傾向。
- ③放射線により、被覆管の孔食発生電位は低下しない。

まとめ

使用済燃料プール環境では、燃料被覆管の孔食発生の可能性は低く、腐食の観点からは、損傷していない被覆管は健全と推定される。

(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（平成26年度計画）

平成26年度の主要目標

平成25年度の事業成果等を反映し、SFPから取出した燃料の部材を用いた照射後試験計画を策定。非照射燃料部材模擬体の腐食試験、強度試験を行い、瓦礫等が腐食に及ぼす影響を評価し湿式保管時の長期健全性を判断する評価項目（水質データ等）を策定、また、4号機から共用プールに移送された燃料集合体の水中カメラによる評価等を行うことで、評価項目の妥当性を確認。乾式保管時の燃料健全性評価項目を検討し、その各項目の影響の大きさを試験により確認。また、長期健全性評価に係る基礎試験として、海水成分の移行評価及び健全な使用済燃料被覆管等を用いた腐食試験を実施。

平成26年度の実施内容

1. 燃料集合体の長期健全性評価のための技術開発

- ① 長期健全性評価のための試験条件検討
 - ・ SFPから取出した燃料の部材を用いた試験計画を策定する。策定にあたっては、平成25年度に実施した水質影響評価及び各腐食試験結果等を反映する。また、燃料部材の輸送計画を検討し計画に取り込む。
- ② 燃料構造材の長期健全性評価技術開発
 - ・ 燃料の構造等を模擬した未照射試験片による腐食試験及び強度試験を実施し、共用プールに持ち込まれる瓦礫等の腐食影響や、被覆管部損傷の腐食影響を評価する。
 - ・ 共用プールに保管している1F-4使用済燃料の水中カメラによる評価および酸化膜厚さ測定を行い、燃料の腐食状況を評価する。
 - ・ SFPから取出した使用済燃料の乾式貯蔵を想定し、瓦礫落下による傷等や瓦礫を含む水分の影響評価試験を実施する。

2. 長期健全性評価に係る基礎試験

- ① 模擬クラッド等を使った塩化物イオンの移行挙動試験を実施し、使用済燃料の表面クラッドにおける海水成分取込み量を評価する。
- ② ガンマ線照射下で海水及び瓦礫成分を含む溶液により使用済燃料被覆管等腐食試験を行い、局部的な水質変化の腐食への影響を評価する。

実施工程（平成26年度）

| 2014(前) | 2014(後) |
|---------|---------------------------|
| | 試験計画及び試験条件策定 |
| | 共用プール模擬環境下での未照射材腐食試験、強度試験 |
| | 共用プールでの取出し燃料集合体調査 |
| | 乾式貯蔵評価試験 |
| | 海水成分クラッド移行試験 |
| | ガンマ線照射下腐食試験 |

1. 使用済燃料プール燃料取り出しに係る研究 開発

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（1－2）

(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 (平成25年度成果-1-)

○研究目的

使用済燃料プールから取り出された使用済燃料は、取り出し後当面、同発電所内の共用プールに保管する計画であるが、将来の処理・処分に向けた方向付けを行う必要がある。このため、損傷燃料等の取扱いに係る国内外の事例等を調査することにより、再処理における技術的課題及びその対策を整理する。また、実施可否に係る判断指標を整備する上での必要な情報及び課題を整理する。

○実施内容

(1) 国内外における損傷燃料等に関する事例調査

再処理施設内での損傷燃料の移送・貯蔵等における課題抽出及び対応検討のため、法令報告書等公開資料・文献から国内事例における損傷燃料の取り扱い方法を調査。また、IAEA等の損傷燃料に関する文献や国際原子力情報システム(INIS)等のデータベースより国外事例を調査。

(2) 諸外国における損傷燃料等の取り扱い要件・判断基準等の調査

諸外国における燃料損傷状態を分別する確認項目、判断基準、燃料の検査方法等について文献調査等を実施。

(3) 再処理施設における損傷燃料等の取り扱い方法、事例の調査

現状の国内再処理施設の許認可における使用済燃料の取り扱いについての記載内容を整理。

(4) 再処理に向けた判断指標及び技術的課題の整理

上記結果を踏まえ、再処理の実施可否にかかる判断指標の整備に必要な情報及び課題、以降の研究計画に反映すべき損傷燃料等の取り扱いに係る技術的課題を抽出し対応策を整理。

○再処理に向けた判断指標及び技術的課題

- **再処理施設での損傷燃料の取り扱いを困難にする主な要因**
 - ・放射性物質の漏えい……プール水の汚染
 - ・機械的強度の低下……チャンネルボックス取り外し、ハンドリングへの影響
 - ・変形……チャンネルボックス取り外し、機器との干渉
 - ・不純物の同伴……化学処理工程等への影響
- **考えられる対応策(損傷状態、程度による)**
 - ・収納缶(密封(排気/排水機能)/非密封)
 - ・補修・補強
 - ・再組立
- **主な技術的課題**
 - ・ハンドリングへの影響(チャンネルボックス、収納缶、補修・補強の影響含む)
 - ・化学処理工程等への影響(腐食、製品、廃棄物、工程運転)
- **考えられる判断指標(再処理施設における許容範囲)**
 - ・放射性物質の漏えい率
 - ・変形量
 - ・不純物の同伴量
 - ・収納缶の構造・寸法 等

(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（平成26年度計画）

平成26年度目標

- ・高レベル廃液濃縮缶及び廃液貯槽を対象とした腐食試験を実施し、両機器材料への不純物成分の影響を把握。
- ・FP及び不純物共存条件での抽出試験により、不純物成分によるU・Pu製品への影響や、陰イオンによるU・Pu抽出への影響を把握。
- ・不純物を考慮したガラス試験片を作製し、不純物成分による基礎的なガラス物性値（ガラス転移温度等）への影響を把握。
- ・再処理施設における損傷燃料等の処理時の影響を網羅的に抽出・整理。

平成26年度の実施内容

損傷燃料等の化学処理工程等への影響の検討

① 不純物による再処理機器への腐食影響評価

高レベル廃液を取り扱う代表的機器として、高レベル廃液濃縮缶及び高レベル廃液貯槽を対象とし、FP成分を考慮した模擬液を用いた腐食試験（浸漬試験・電気化学試験）を実施し、不純物成分の腐食影響を評価。

② 不純物の工程内挙動評価

FP共存条件で不純物の抽出操作を行い、不純物のU・Pu製品系への移行の確認を行う。また、陰イオン共存条件でU・Puの抽出操作を行い、不純物によるU・Pu抽出への影響を評価。

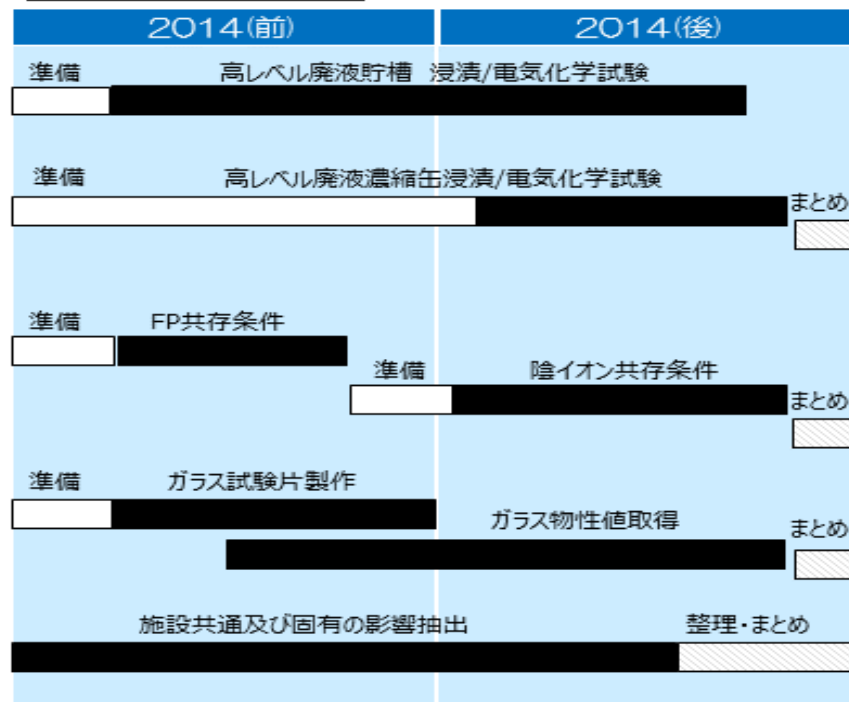
③ 不純物の廃棄体への影響評価

高レベル廃液の組成に基づく粉末試料を用いてガラス試験片を作製し、密度、ガラス転移温度、熱膨張係数等のガラス物性値を取得、不純物によるガラス固化体への影響を評価。

④ その他の影響の抽出及び整理

再処理施設において想定される影響を網羅的に抽出し、必要な研究要素の有無を整理。

実施工程（平成26年度）



2. 燃料デブリ取り出し準備に係る 研究開発

原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発 (2-①-1)

2-①-1 原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発（平成25年度成果-1-）

平成25年度主要目標

- (1) 上部階（爆発損傷階を除く原子炉建屋2階以上）及びフロア高所部の建屋内汚染の状況（雰囲気線量率、線源、汚染分布等）を確認する。
- (2) 上部階用遠隔装置の共用化の仕様検討及び設計を行う。フロア高所部の遠隔除染装置の設計、製作を行う。
- (3) 原子炉建屋1階のホットスポットに対して、必要な遮へい体を製作し、遠隔で設置可能であることを確認するための実証を行う。

平成25年度の実施内容

1. 汚染状況の基礎データ取得

1～3号機の原子炉建屋上部階及びフロア高所部を中心に線量率調査、汚染分布調査、表面汚染調査、内包線源調査、汚染浸透調査を行う。調査項目と対象箇所を下表に示す。汚染浸透調査においては、採取する浸透汚染（コンクリートコア）サンプルについて、オンサイト分析を行い、放射エネルギーを評価する。一部のサンプルについてはJAEAに輸送し、汚染浸透の詳細分析を行う。

| 号機 | 階層・エリア | 調査項目 | | | | | 備考 |
|-----|-----------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------|------------------|----------------------------------|
| | | 線量率調査 (線量率計) | 汚染分布調査 (カメラ) | 表面汚染調査 (線量率計ある いは推算線量計) | 内包線源調査 (推算線量計) | 汚染浸透調査 (コア分析) | |
| 1号機 | 1階・両側 | ○ | ○ | ○ ^{*2} | - | ○ | |
| | 1階・高所 | ○ | ○ | - | - | | |
| | 2階・全棟 ^{**1} | ○ | ○ | - | - | | |
| | 3階・全棟 ^{**1} | ○ | ○ | - | - | | |
| 2号機 | 1階・高所 | ○ | ○ | ○ ^{*2} | ○ ^{*3} | | |
| | 2階・全棟 ^{**1} | ○ | ○ | - | - | | |
| | 3階・全棟 ^{**1} | ○ | ○ | - | - | | |
| | 2階(オベフロ) ^{**1} ・全棟 | ○ | ○ | ○ | - | ○ | |
| 3号機 | 1階・高所 | ○ | ○ | - | - | | |
| | 2階・全棟 ^{**1} | ○ | ○ | - | - | | 2階へのアクセスは、階段部に ガレキが山積しているため不可 |

*1: 小部屋は含まない *2: コアサンプルの表面汚染を調査 *3: 北西コーナーにて実施予定 *4: JAEA殿にサンプルを輸送して分析

2. 除染技術整理及び除染概念検討

H24で調査した汚染状況を踏まえ、上部階の除染に適した除染技術を選定（H24で実施した除染技術絞り込み結果の見直し）を行い、上部階及びフロア高所部除染のための基本方針を検討する。

3. 遠隔除染装置設計製作、遠隔除染実証

上部階に適用する遠隔除染装置の共用化のための仕様検討及び設計を行う。またフロア高所部除染に適用する遠隔除染装置の設計、製作を行う。また、平成24年度に実証した装置の改造等を行い、実機適用実証を行う。

4. 実機遮へい設置実証

原子炉建屋1階のホットスポットに対して、必要な遮へい体を製作し、遠隔で設置可能であることを確認するための実証を行う。

2-①-1 原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発 (平成25年度成果-2-)

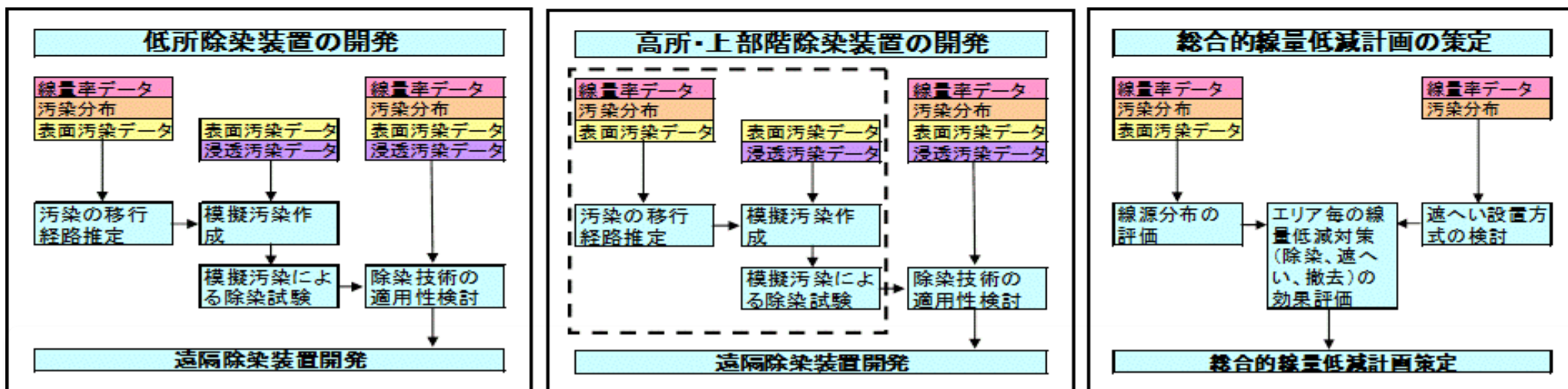
【基礎データの取得計画】

| 調査箇所 | | 線量率調査 | 汚染分布調査 | 表面汚染調査 | 浸透汚染調査 | 適用除染装置 |
|--------------|----|-------|--------|--------|--------|-------------|
| 2号機 5階(オペフロ) | | ○ | ○ | ○ | ○ | 上部階用除染装置 |
| 1号機 2階~3階 | | ○ | ○ | - | - | 上部階用除染装置 |
| 2号機 2階~3階 | | ○ | ○ | - | - | 上部階用除染装置 |
| 3号機 2階 | | ○ | ○ | - | - | 上部階用除染装置 |
| 1~3号機 1階 | 低所 | ● | ● | ● | ● | 低所用除染装置 |
| | 高所 | ○ | ○ | ○ | - | 高所用除染装置 |
| 1号南側 | | ○ | ○ | ○ | ○ | 低所用/高所用除染装置 |
| 地下階 | | - | - | - | - | |

●:H24年度調査
○:H25年度調査

【基礎データ取得により得られた成果の適用計画】

□:H24年度基礎データを活用



原子炉建屋1階床面・壁面(低所)の遠隔除染技術の開発－1－

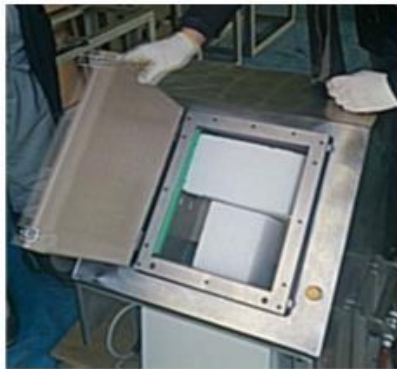
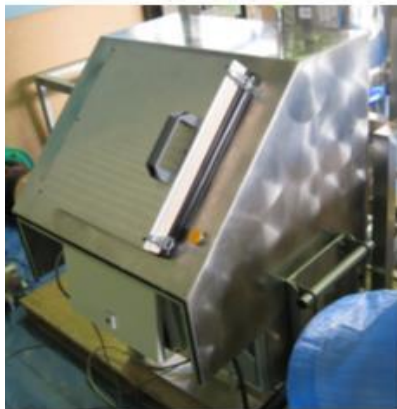
【ドライアイスブラスト除染装置の改良】

(1) 除染継続時間の向上

ドライアイスブロック充填量を増やし、除染継続時間を延ばす。

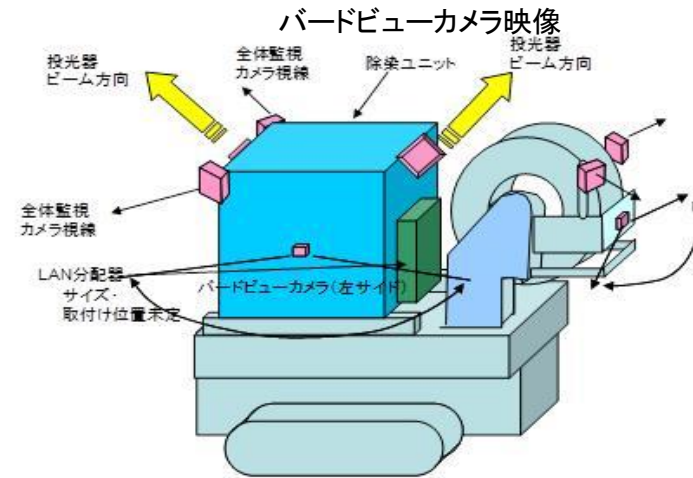


ブラスト噴射時間の3倍化
従来は30分、改造後は1.5時間



(2) 安全に移動速度を向上させるための改善(カメラ操作の効率化、光LANの採用)

◆アラウンドビューカメラを新規搭載し、移動中の台車全周の干渉を一画面で視認できるようにする(若しくは全体監視カメラ台数を増やしマルチ画面とする)。



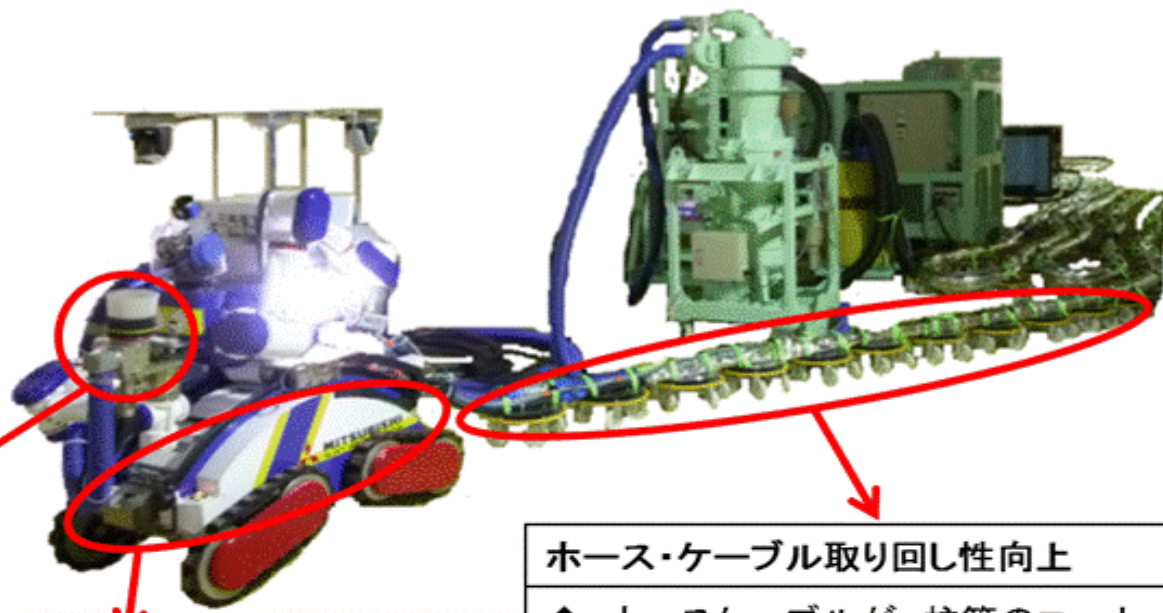
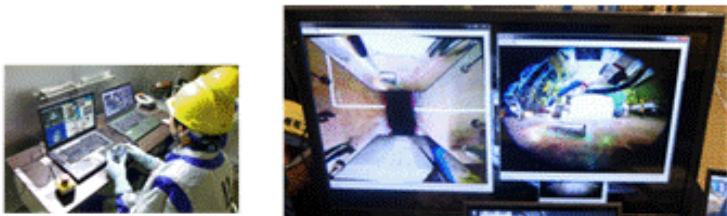
走行用カメラを台車1台につき、従来の4台から9台に増強

原子炉建屋1階床面・壁面(低所)の遠隔除染技術の開発-2-

【吸引/ブラスト装置の改良】

操作性向上

- ◆ 画面改良(アラウンドビューの導入)
- ◆ モニタの大型化
- ◆ ソフト改良(アーム教示データの流用)



吸引除染ヘッドの制作

回転ブラシを搭載し、かつ幅広な吸引除染専用ヘッドを製作



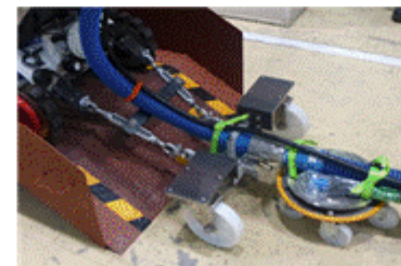
視認性向上

カメラ・照明配置を見直し



ホース・ケーブル取り回し性向上

- ◆ ホースケーブルが、柱等のコーナ部と干渉しないようキャスター台車の間隔の狭める調整を実施
- ◆ 先頭のキャスター台車を追従性の高い特殊仕様に変更



【1号機南側調査結果(1)】

ガンマカメラによる汚染状況調査

調査日時:2013年12月22日 ~ 12月24日(3日間)
 調査エリア:1号機原子炉建屋1階南側エリア
 調査項目:①線量率測定(床上1500mm及び50mm)
 ②ガンマカメラ撮影

測定点

- : 線量率のみ測定
- × : ガンマカメラ測定
(線量率も測定)
- ← : ガンマカメラ測定
(矢印の方向のみ、
仰角を変えて測定)
- ▲ : ガンマカメラ測定
(仰角0度[一部10度]のみ
南方向を中心に測定)

識別
 青色:12/22測定
 橙色:12/23測定
 赤色:12/24測定

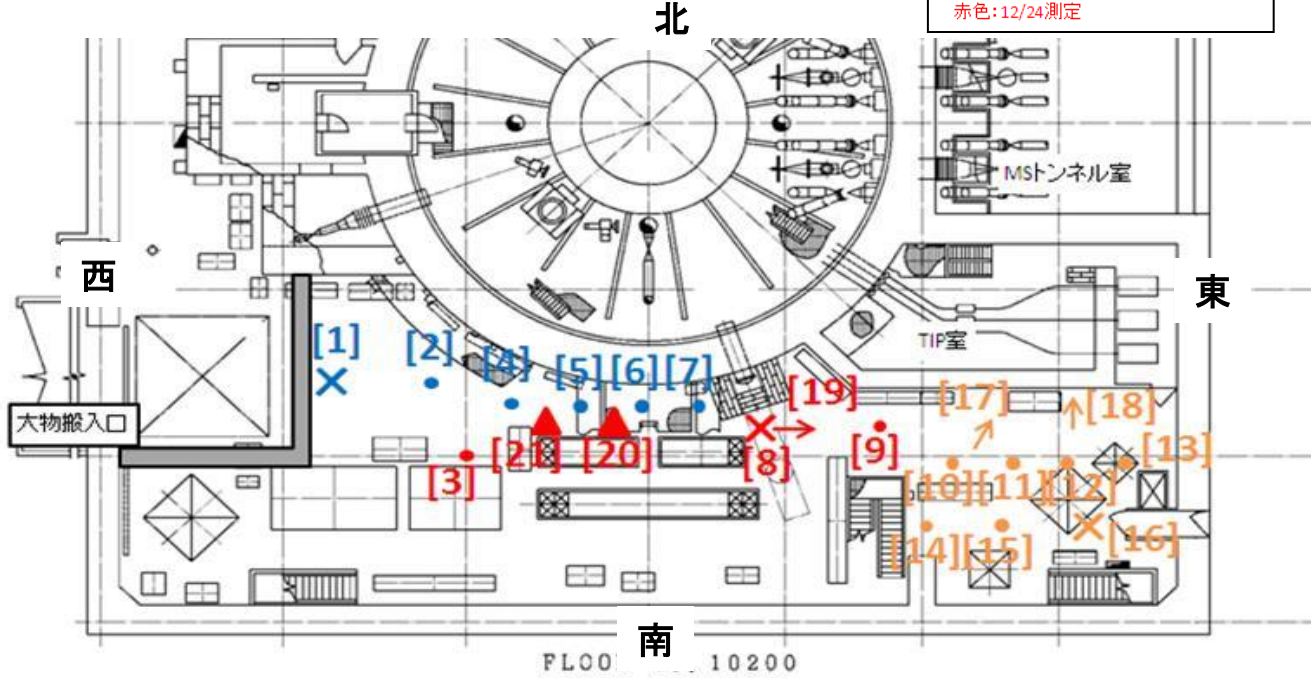


表 線量率計測定結果

| 測定 ポイント | 線量率測定(mSv/h) | |
|------------|--------------|--------|
| | 高さ1500mm | 高さ50mm |
| [1] | 12.97 | 15.87 |
| [2] | 30.84 | 20.19 |
| [3] | 105.5 | - |
| [4] | 61.95 | 40.83 |
| [5] | 65.17 | 42.99 |
| [6] | 25.52 | 31.85 |
| [7] | 41.65 | 17.55 |
| [8] | 52.32 | 30.64 |
| [9] | - | - |
| [10] | 1661.79 | 185.92 |
| [11] | 1096.64 | 330.98 |
| [12] | 510.51 | 274.30 |
| [13] | 313.57 | 244.23 |
| [14] | 139.11 | 38.17 |
| [15] | 91.31 | 35.44 |
| [16] | 166.98 | 133.37 |
| [17] | 659.38 | 157.75 |
| [18] | 202.94 | 144.04 |

図 1号機1階南側の汚染状況調査位置

【1号機南側調査結果(2)】

1号機1階南側のガンマカメラ調査結果(不活性ガス系配管概略評価)

ガンマカメラの撮影により、南東エリアの配管部分に高い汚染状況を確認。

(当該配管は、事故時のPCVベントにより蒸気が通過した配管)

概略評価により、不活性ガス系配管表面から50cm離れた位置での線量率は約900mSv/h程度と推定。

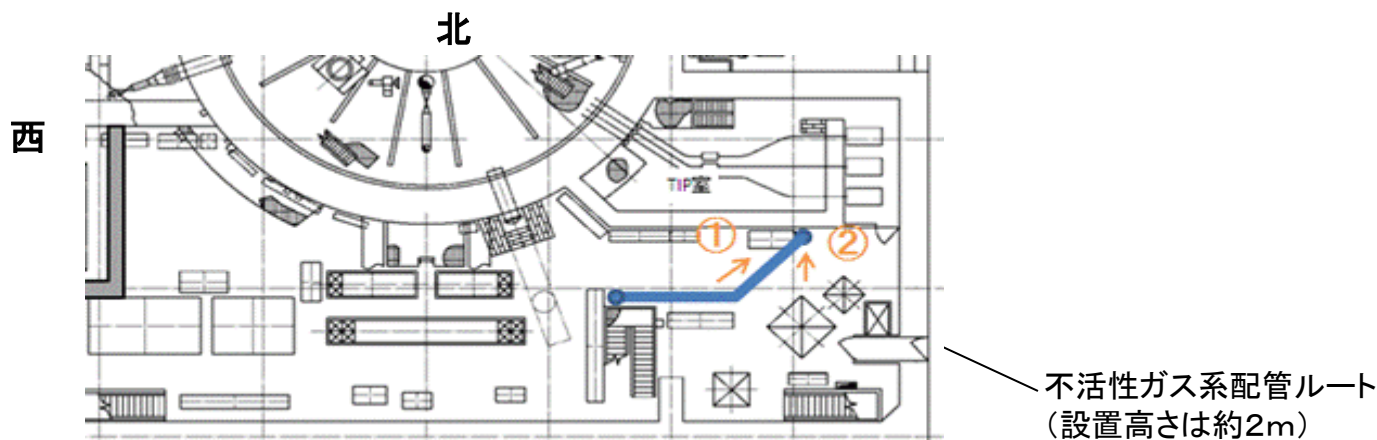


図 1階南側 不活性ガス系配管ルート及びガンマカメラ撮影位置

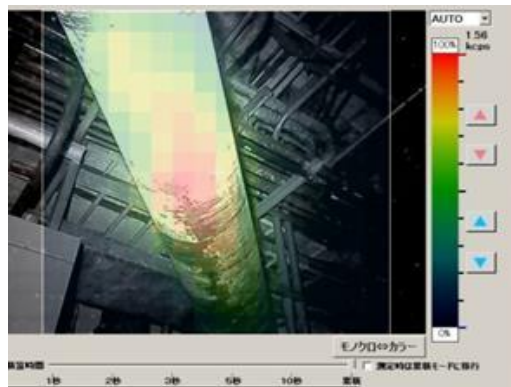


図 撮影位置①(上方撮影)



図 撮影位置①(壁側撮影)

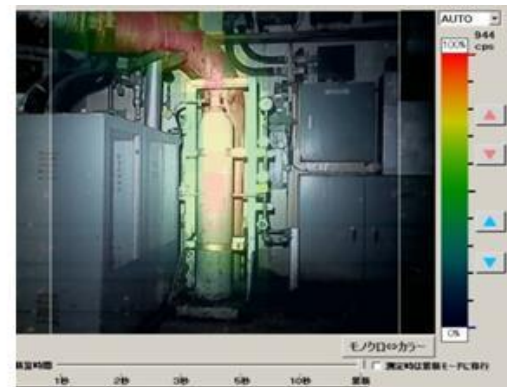





図 撮影位置②(壁側撮影)

【1号機南側調査結果(3) コアサンプリング調査】

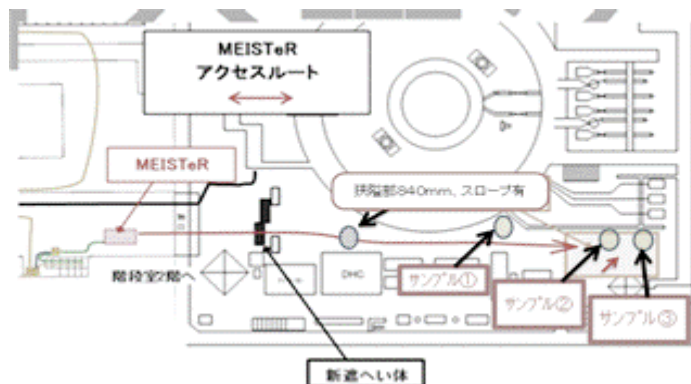
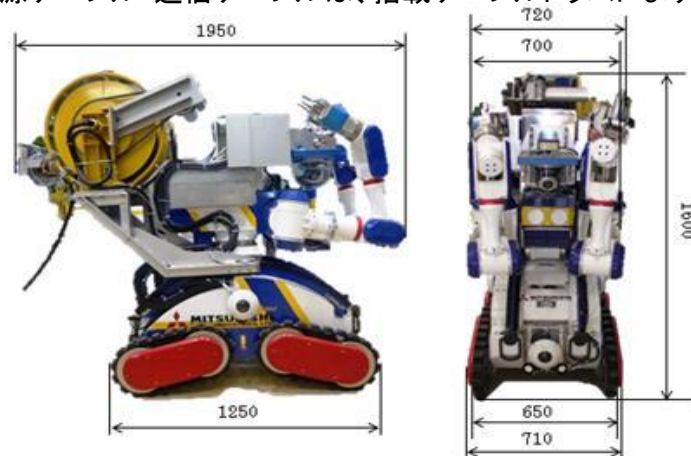
- ◆ 高線量が観測された以下の3箇所を選定し採取
- ◆ コアサイズはΦ45mm×60~70mm

| | サンプリング箇所状況 | サンプリング状況 |
|---------------|---|---|
| X6ペネ近傍 |  |  |
| 不活性系ガス配管貫通部周辺 |  |  |
| TIP 室扉左側壁 |  |  |

| | サンプル① | サンプル② | サンプル③ |
|-----------------|---|---|---|
| 採取場所 | X-6ペネ近傍 (ペネと配管の間) | AC配管根元の水跡近傍 | TIP室扉左側壁際近傍 |
| サンプル 外観 |  |  |  |
| 表面線量率 (塗装面側) | 0.10mSv/h | 0.27mSv/h | 0.09mSv/h |
| サンプル 形状 | φ約45mm×60~70mm (一部斜めあり) | | |
| 特記事項 | | 表面の一部に欠けあり (5mm×20mm程度) | |

コアサンプリング装置

- 除染作業ロボットとして使用しているMHI-MEISTeRの左腕にコア切削ドリル、右腕にコア回収ハンドを搭載
- 電源ケーブル・通信ケーブルは、搭載ケーブルドラムにより供給・回収



原子炉建屋1階天井・壁面(高所)及び原子炉建屋上部階の遠隔除染技術の開発－6－

【高所除染装置の基本方針】

- ◆高所部の線源は、ダクト、配管、サポート、電気品等に付着した汚染蒸気および天井面・壁面の無垢コンクリートに浸透した放射性物質等が考えられ、汚染形態は遊離性、固着性、浸透汚染が混在している状況が想定される。
- ◆複雑形状に付着した汚染の除去、コンクリートはつき等の異なる機能の要求に対し、「吸引/ブラスト」、「高圧水」、「ドライアイス」各除染法を用いた高所作業台車を設計製作。

| | 高圧水 | ドライアイスブラスト | 吸引/ブラスト |
|-------|--|--|---|
| 装置概念図 | <p>高圧水ノズル アーム (伸縮可能) 吸引ノズル</p> <p>6m高さ伸縮機構</p> | | <p>アームに搭載した先端ツール</p> <p>ブラストを高所へ案内するホースリール</p> |
| 除染方法 | <p>高圧水を除染対象に吹き付けて洗浄～固着物除去を行う。</p> | <p>ドライアイスのブロックをカキ氷のように削りながら、削ったドライアイス圧縮空気により、除染対象物の表面に噴射し、表面の汚染物を除去する。</p> | <p>【吸引】除染ヘッドに搭載する回収機構により、除去した汚染物を回収する。 【ブラスト】圧縮空気を用いて、研磨材を除染対象物に吹き付けて、除染対象物の表面を汚染物とともに研削する。</p> |

(2-①-1) 原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発（平成26年度計画）

平成26年度主要目標

- (1) 汚染水浸漬部の除染方法の検討を行う。また、汚染水浸漬部ドライアップ時のダスト拡散防止対策を検討する。
- (2) 上部階用遠隔装置の製作共用化の仕様検討及び設計を行う。フロア高所部の遠隔除染装置の設計、製作を行う。

平成26年度の実施内容

1. 汚染状況の基礎データ取得

汚染水浸漬部の汚染状況、対象箇所を考慮して、ドライアップ時のダスト発生抑制対策の検討を行う。また、模擬汚染を用いて、ダスト発生抑制対策の効果確認試験を行う。

2. 除染技術整理、除染概念検討

汚染水浸漬部の除染の概念検討を行う。概念検討にあたっては、実機の具体的な箇所を想定した検討を行う。

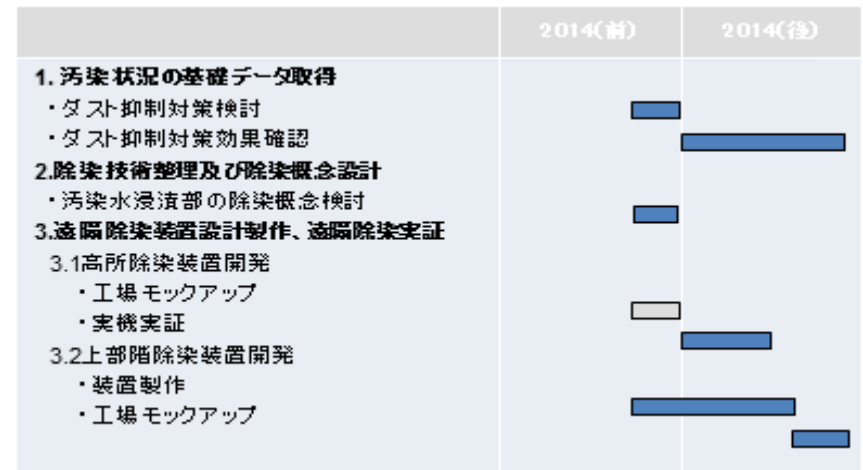
3. 遠隔除染装置設計製作、遠隔除染実証

3.1 高所除染装置の開発

H25年度に製作した高所除染装置の工場モックアップ試験を行う。高所除染装置の工場モックアップは、実機の高所の一部を模擬し、実施する。また、福島第一原子力発電所1号機～3号機のいずれかの原子炉建屋1階の高所部において、実機実証試験を行う。

3.2 上部階除染装置の開発

H25年度に設計を行った上部階除染装置の製作、工場モックアップを実施する。



2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

原子炉格納容器水張りに向けた調査・
補修(止水)技術の開発 (2-①-2, 3)

(2-①-2, 3) 格納容器水張りに向けた調査・補修(止水)技術の開発

- ・調査：下部用については、装置の設計、製作および工場モックアップ試験設備を製作し装置性能試験、実機適用性評価を完了。
上部用については、調査部位毎に装置設計・製作及び性能確認を完了。
- ・補修：下部用については、装置の設計・製作に向け、補修工法と止水材の詳細検討と要素試験を完了。
(止水) 上部用については、損傷可能性が高い箇所に適用する補修装置製作に向け、試験等成果を止水材の詳細設計に反映。

実施内容

1. 格納容器調査技術の開発

1.1 格納容器下部調査装置の開発

- ・格納容器下部調査装置・原子炉建屋から隣接建屋への漏水箇所の調査装置を製作。
工場モックアップ試験設備を製作し装置性能確認を完了。
- ・実機適用性評価(現場実証)の計画を策定し現場実証を完了。

1.2 格納容器上部調査装置の開発

- ・格納容器上部調査装置は、調査部位毎に装置設計・製作及び性能確認を実施。ドライwel外側開放部調査装置の漏えい特定用デバイスについては、基本タイプの小径ペネ向けを実施
- ・実機適用性評価の計画を策定。平成27年度に現場実証予定。

2. 格納容器補修(止水)技術の開発

2.1 格納容器下部補修装置の開発

- ・ベント管やサプレッションチェンバ等でバウンダリ構成する
ための補修装置の設計・製作に向けて、補修工法の詳細検討
(止水試験等による止水材の詳細検討や閉止補助材の最適化検討)を完了。

2.2 格納容器上部補修装置の開発

- ・損傷の可能性が高い箇所(ハッチフランジ、貫通部ベローズ、電気ペネ)に適用する補修装置の製作に向けて、止水試験等による 成果を止水材の詳細検討・設計に反映予定。

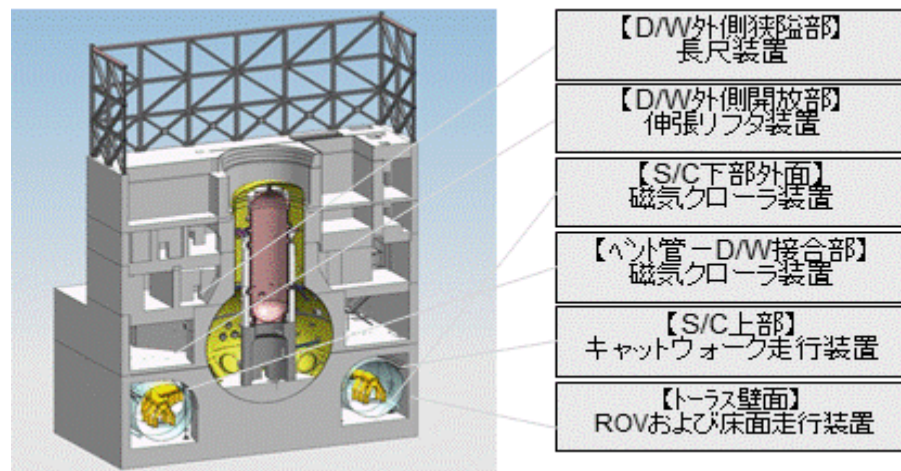
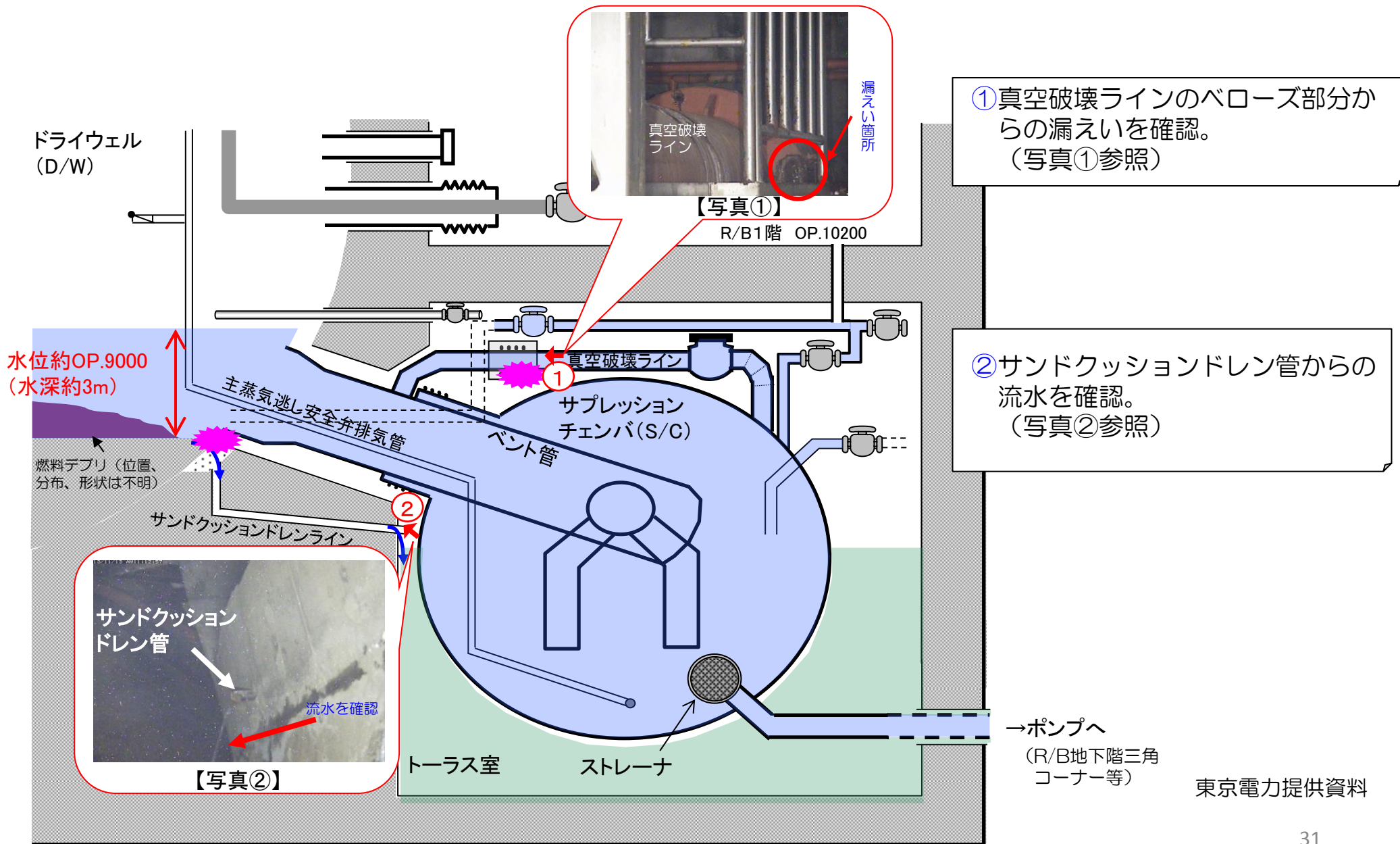
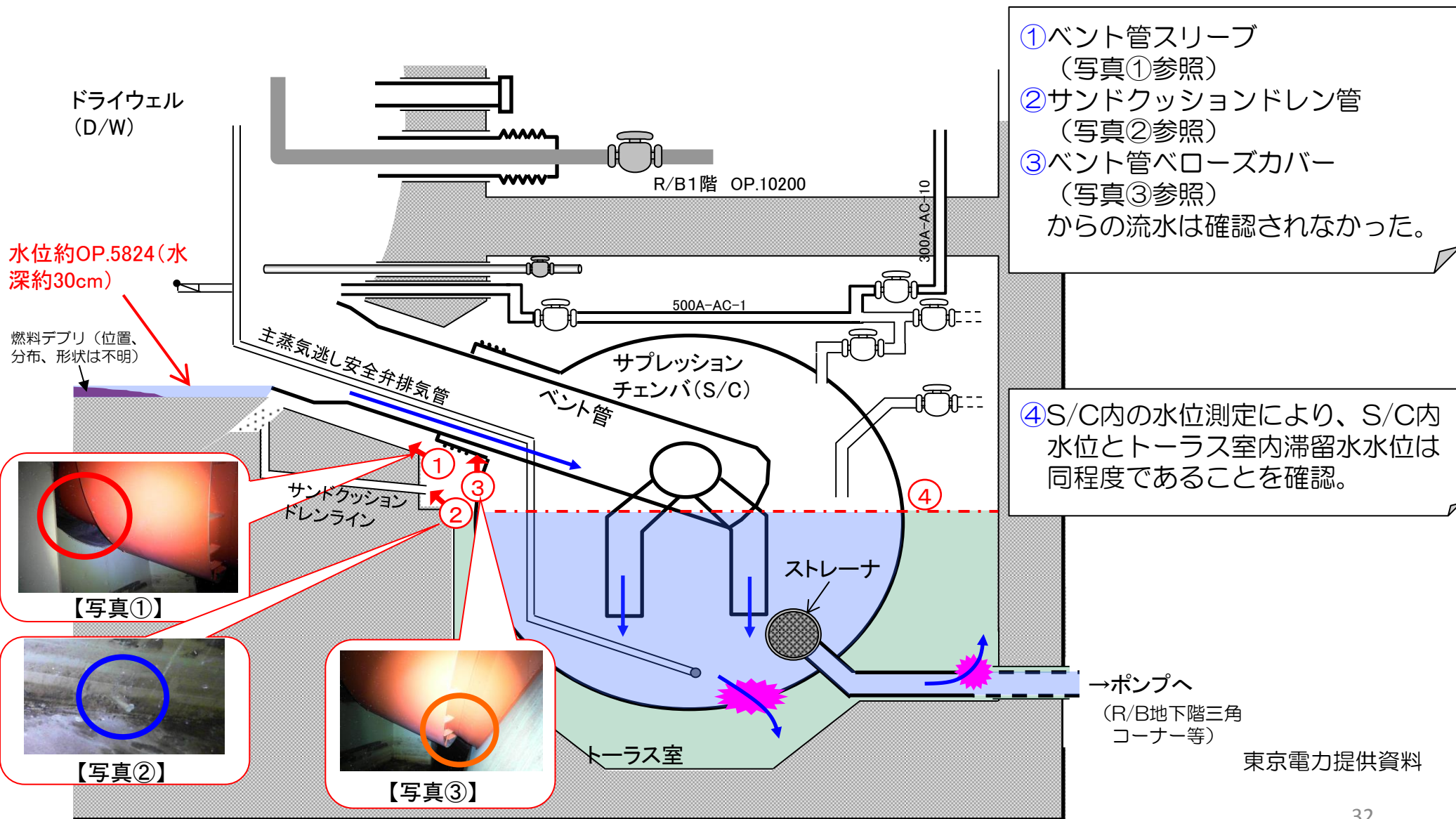


図 点検調査装置の利用場所

【1号機】PCV下部の現状イメージ図



【2号機】PCV下部の現状イメージ図



- ①ベント管スリーブ (写真①参照)
- ②サンドクッションドレン管 (写真②参照)
- ③ベント管ベロースカバー (写真③参照) からの流水は確認されなかった。

④S/C内の水位測定により、S/C内水位とトーラス室内滞留水水位は同程度であることを確認。



【写真①】

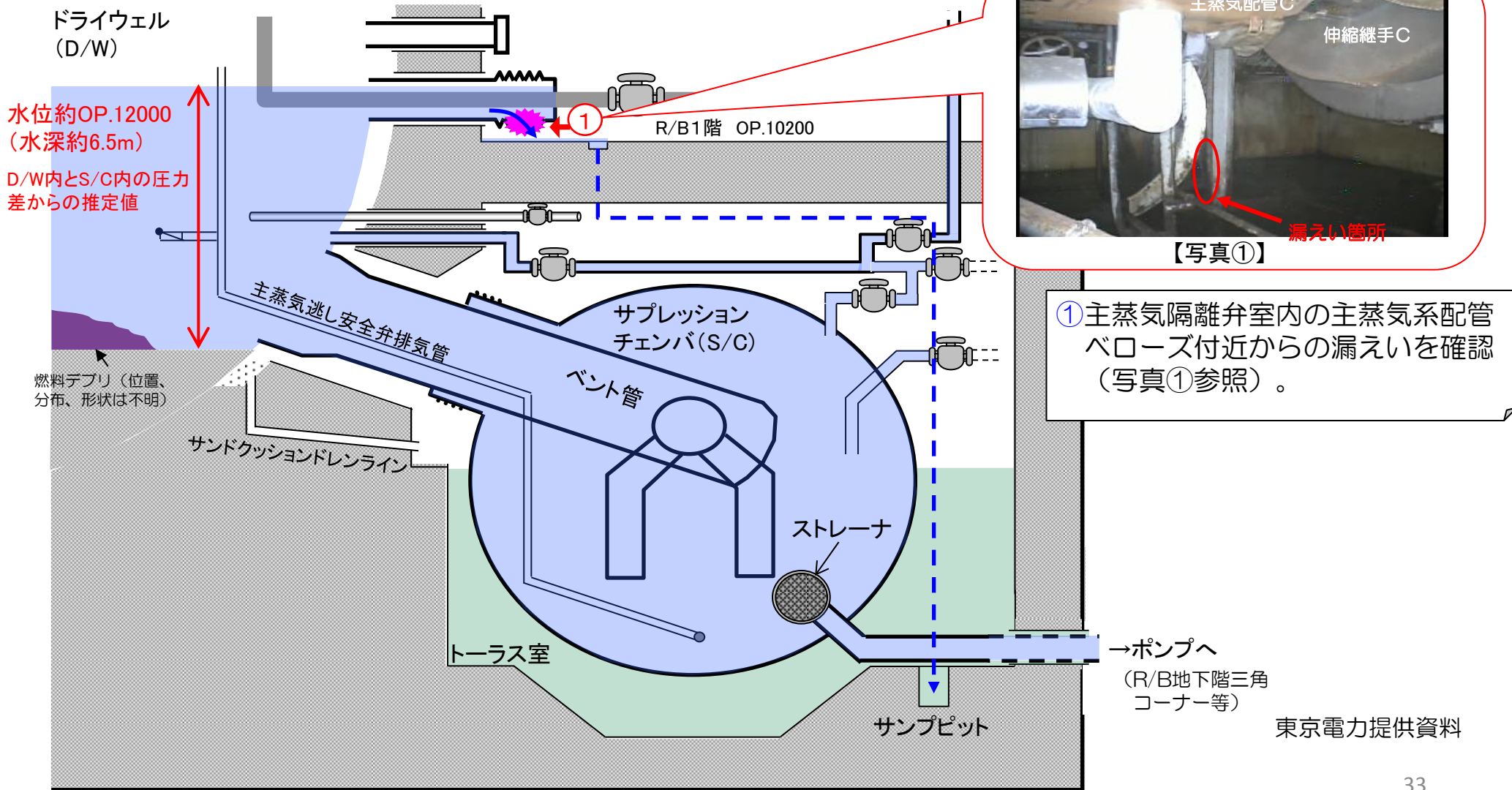


【写真②】



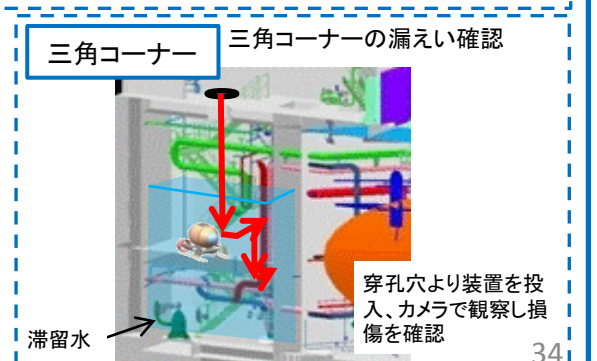
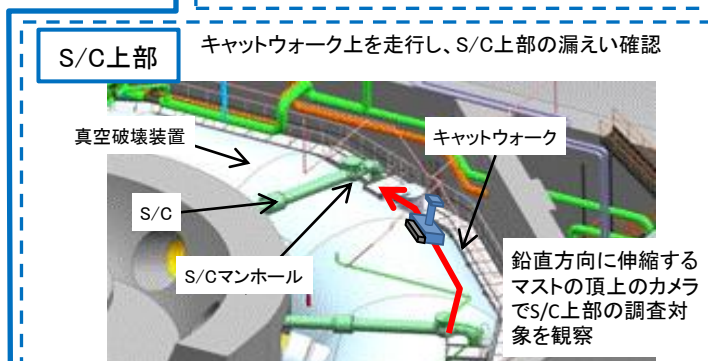
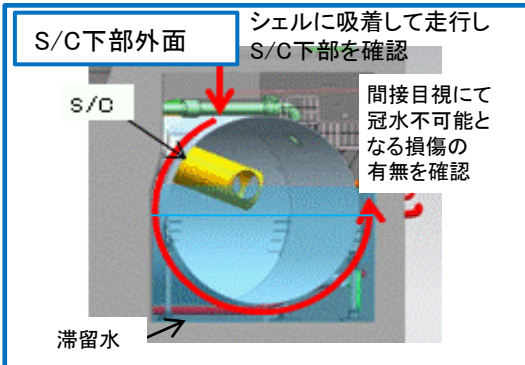
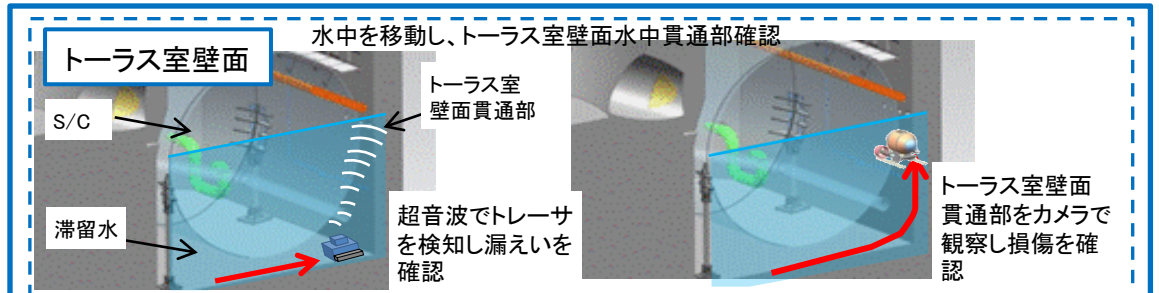
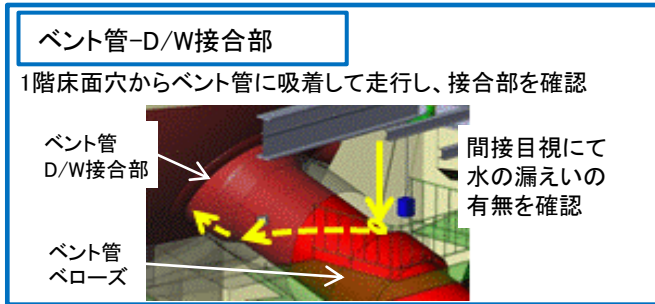
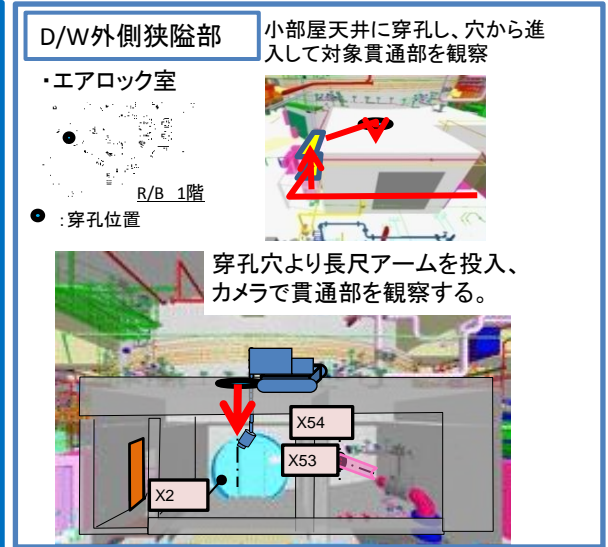
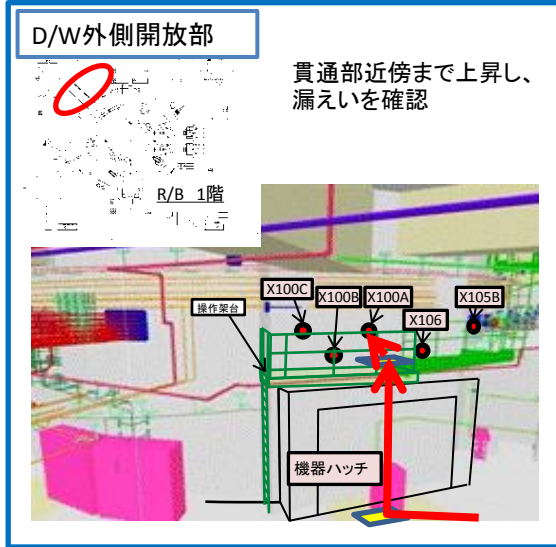
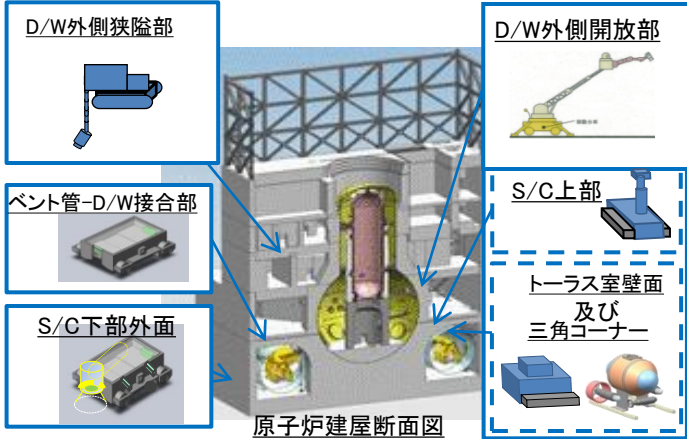
【写真③】

【3号機】PCV下部の現状イメージ図



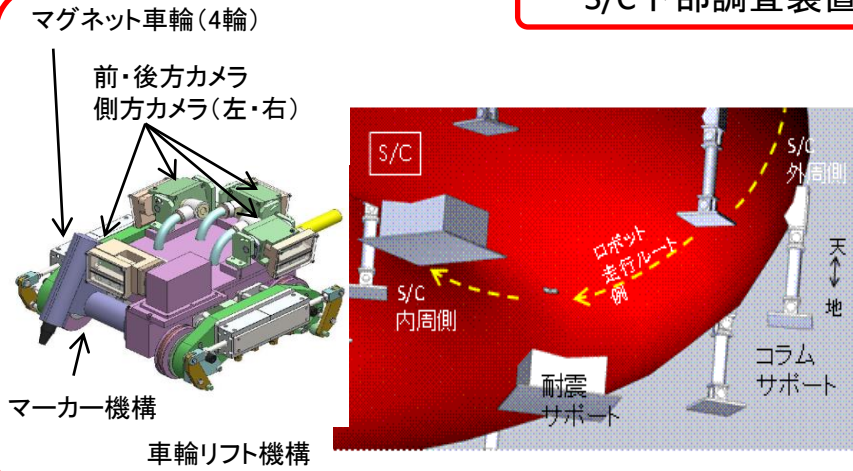
点検調査装置の開発 (1) (各施工対象部位)

各施工対象部位の詳細

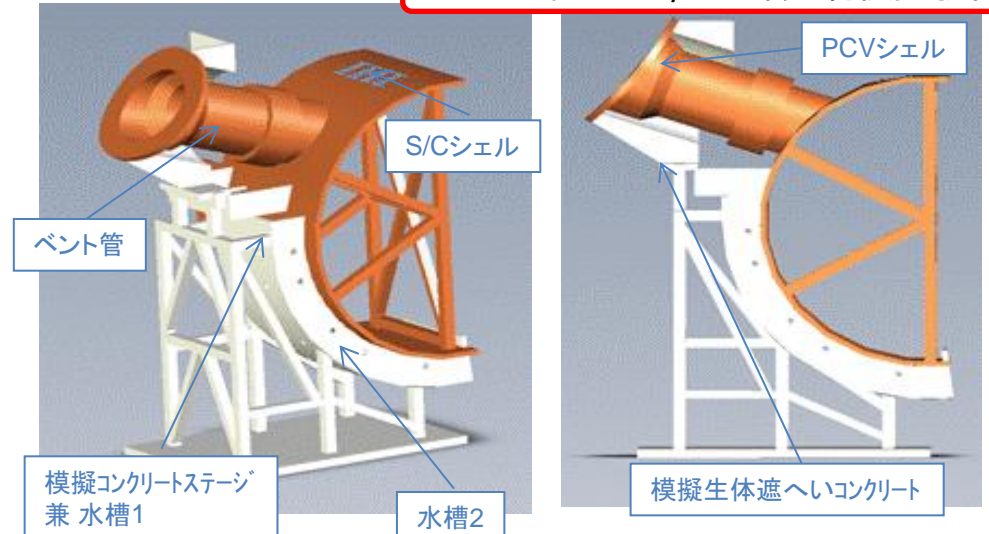


点検調査装置の開発(2) (ベント管-D/W接合部及びS/C下部調査装置)

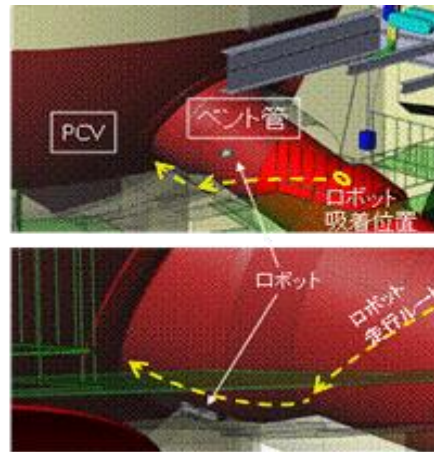
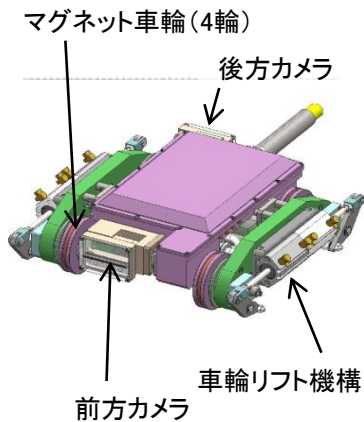
S/C下部調査装置



ベント管及びS/C上部実規模試験体



ベント管-D/W接合部調査装置



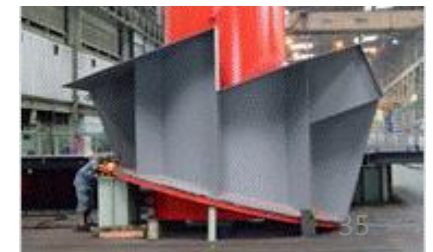
S/Cシェルおよび水槽組立状態



地下ピット設置状態



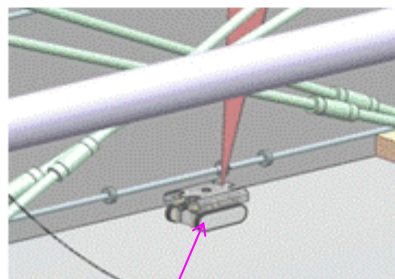
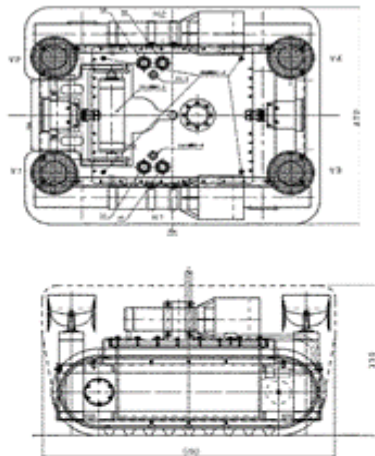
ベント管および
コンクリートスリーブ部(縦置き)



- ・ベント管・S/Cに対して、オールポジションの吸着が可能。
- ・高さ5mm、幅15mm程度の段差乗り越えが可能。
- ・どんな位置、姿勢でも車輪が浮くことなく走行可能。

点検調査装置の開発(3)(トラス室壁面・S/C上部・D/W外側狭隘部調査装置)

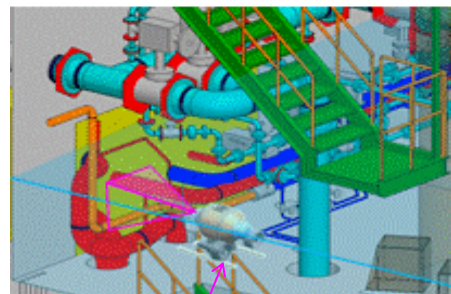
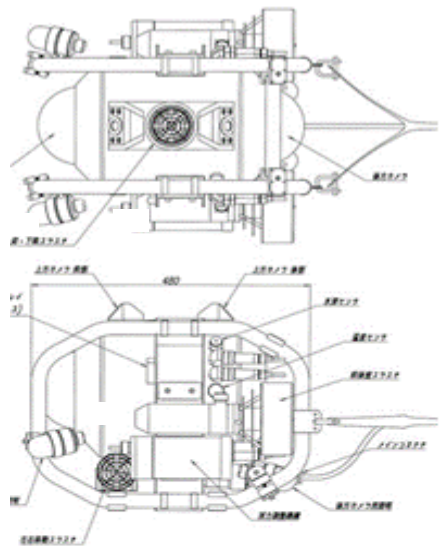
V1~V4、H1~H2
4ヶの垂直スラスタ
2ヶの水平スラスタ



水中床面走行装置

水中床面走行装置

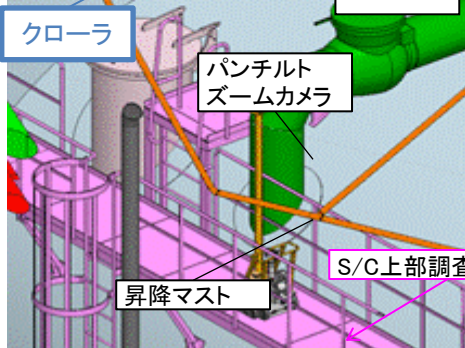
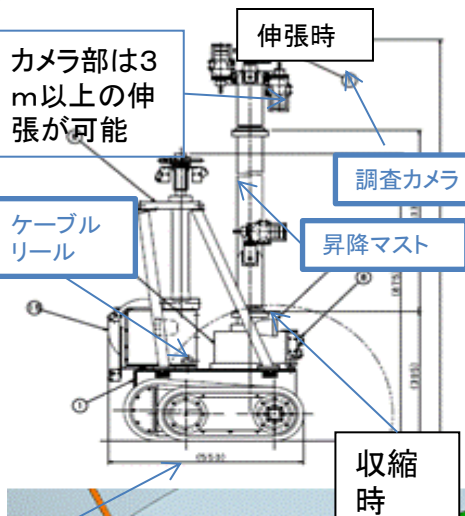
- ・小型で水中床面走行、水中遊泳可能な調査装置。
- ・ソナー装置を搭載し、水中での漏えい箇所の調査が可能。



水中遊泳装置

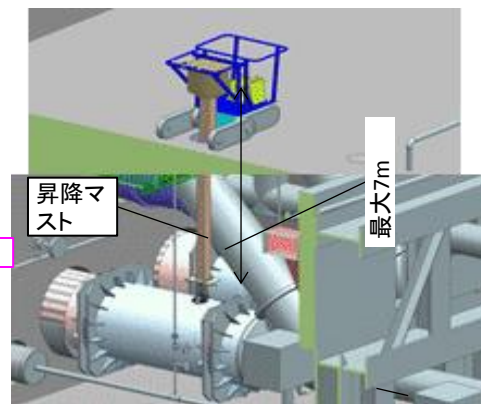
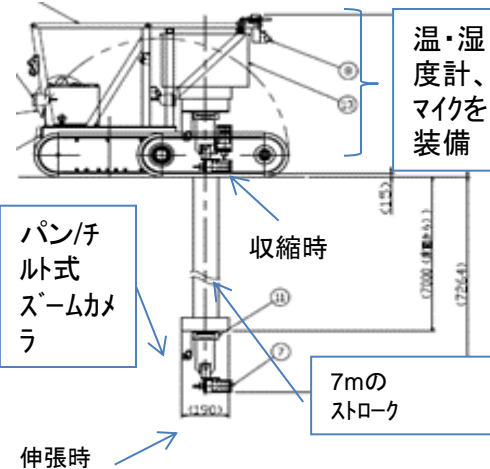
水中遊泳装置

- ・マグネットカップリングの採用によりスラスタは長寿命で、メンテナンス性に優れる。
- ・カメラ部は上下左右に約90°の移動範囲を有し、広範囲な視野角を有する。



S/C上部調査装置

- ・搭載したカメラ部は3m以上伸張可能で、S/C上部構造物の状態を観察可能。
- ・装置寸法は口600mmに収まる。
- ・またS/C上部キャットウォーク上を走行可能。



D/W外側狭隘部調査装置

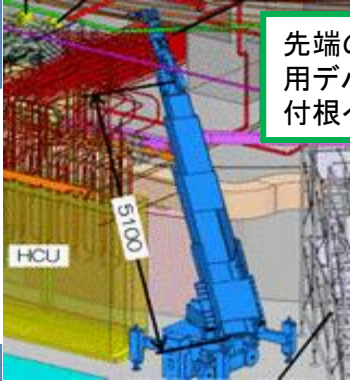
- ・部屋内にカメラ部分を伸張(最大7m)し、内部の対象部位の観察を行う。
- ・走行時はカメラ部を収納し、自立走行が可能。

点検調査装置の開発(4) (D/W外側開放部調査装置)

調査方法

高所のPCVペネにアクセスして漏えいを調査

代表的な調査対象ペネ

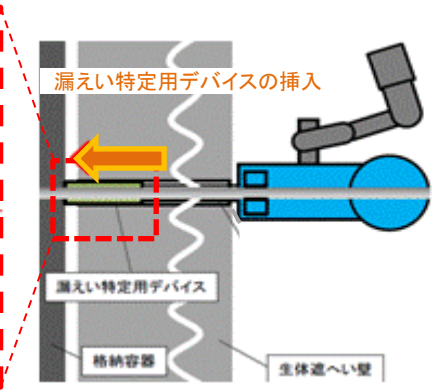
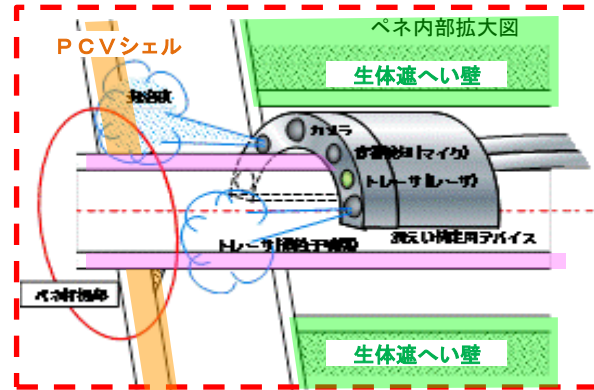


先端の漏えい特定用デバイスをペネ付根へ挿入する

CRDMマカロニ配管

ペネ付根部での調査イメージ

大気中で窒素ガス流れを検出する



装置の全体図(赤字部:製作範囲)

7軸マニピュレータ

荷揚げモジュール

漏えい特定用デバイス

ヘッド部

台車とマニピュレータはNEDO機を活用

台車

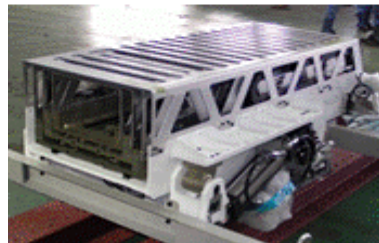
装置の設計、製作状況

漏えい特定用デバイス

ヘッド部



荷揚げモジュール(製作中)

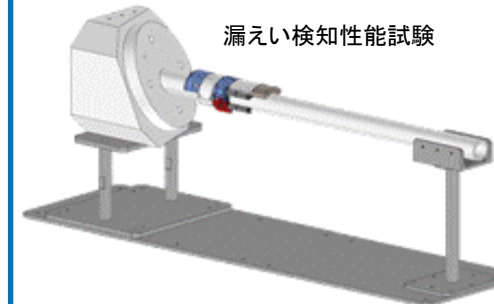


漏えい特定用デバイス(ヘッド部)

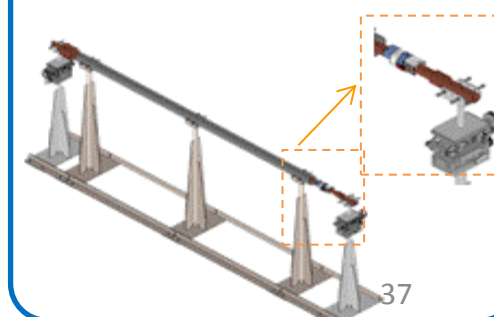


実機模擬試験(準備中)

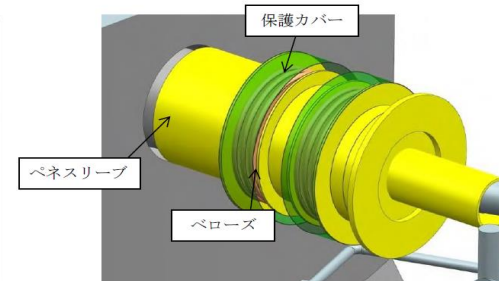
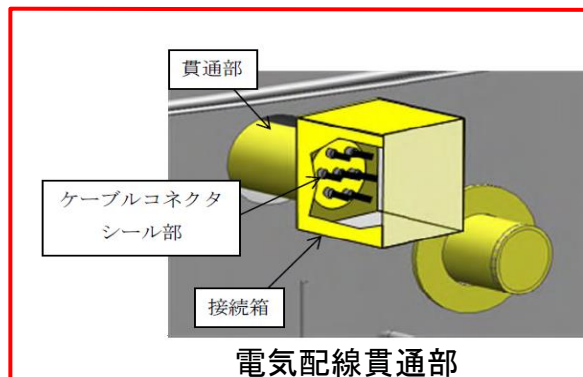
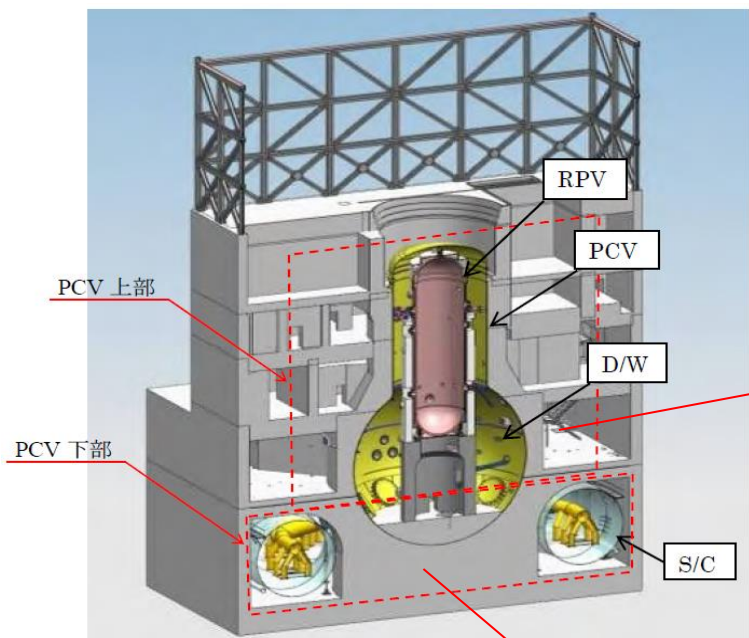
漏えい検知性能試験



駆動性能検証試験

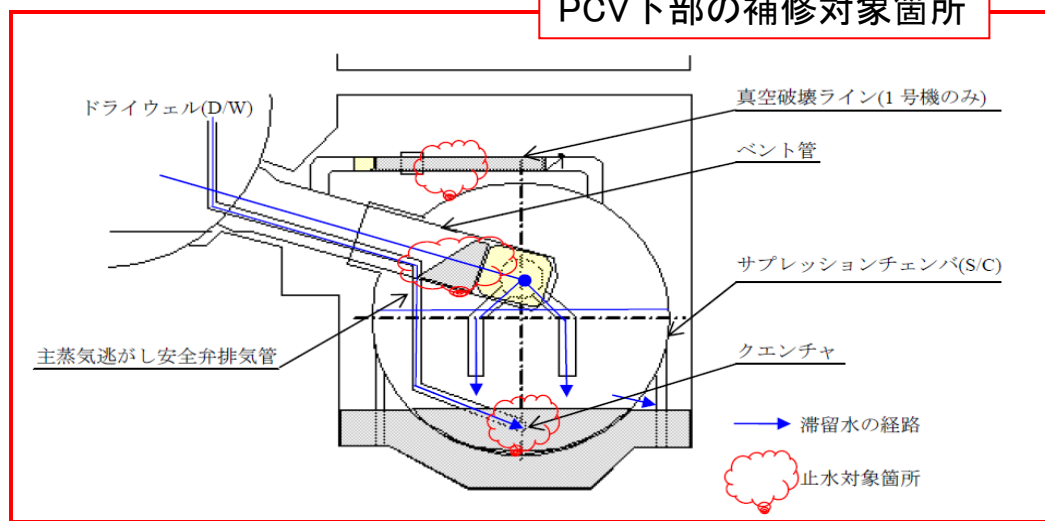


格納容器補修技術の開発(1)(補修対象箇所)



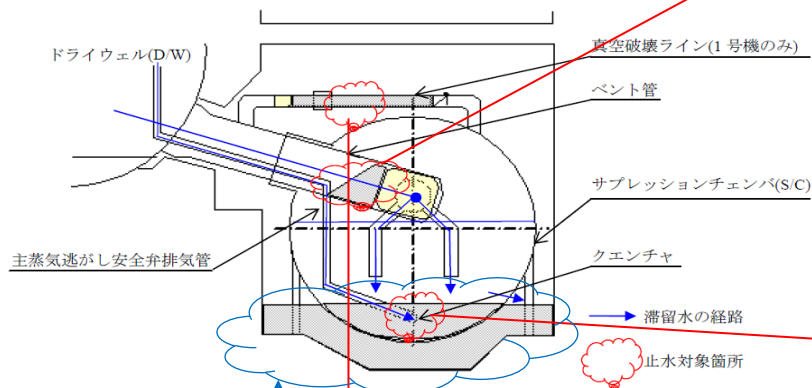
PCV上部の補修対象箇所

PCV下部の補修対象箇所

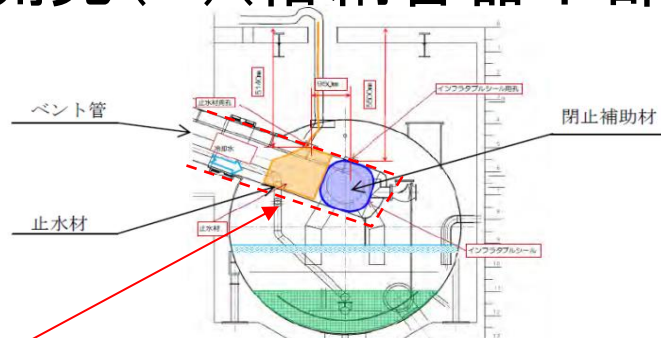


格納容器補修技術の開発(2)(格納容器下部)

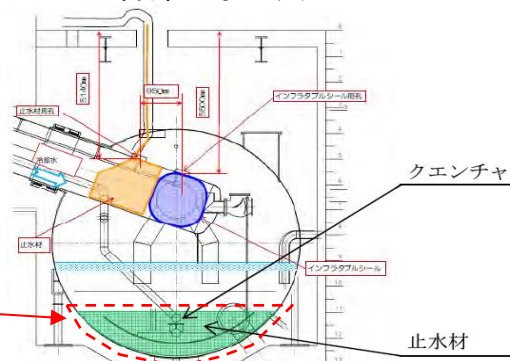
PCV下部補修工法の概念



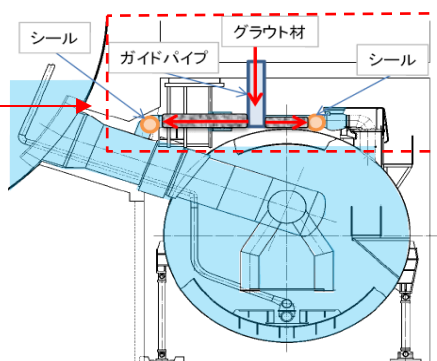
サプレッションチェンバの補強



ベント管部止水工法

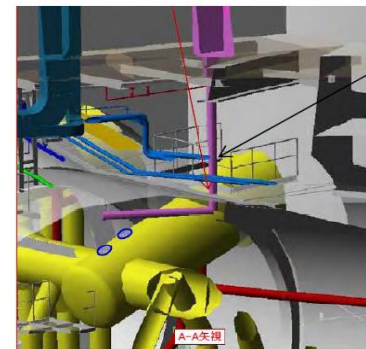


クエンチャ部止水工法(H25年度は計画範囲外)



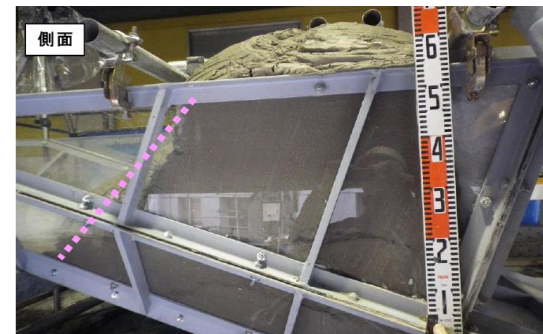
真空破壊ライン部止水工法(1F-1特有)

H24年度の成果(例)



マニピュレータ

格納容器下部補修装置概念



側面

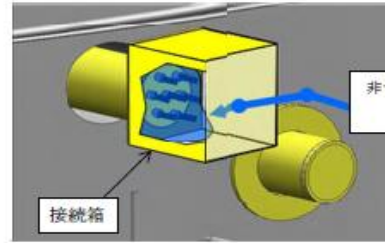
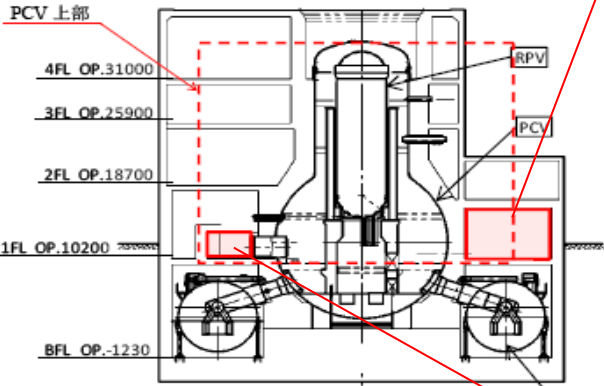
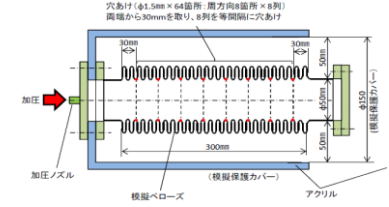
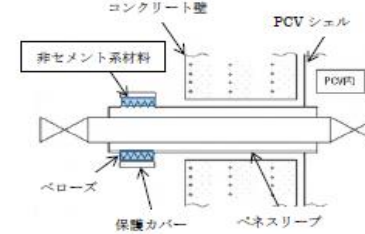
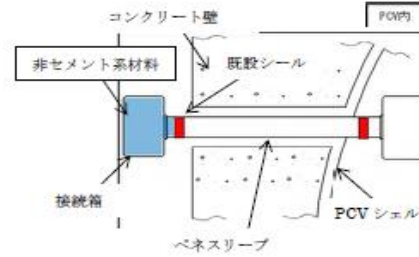
ベント管部止水材要素試験



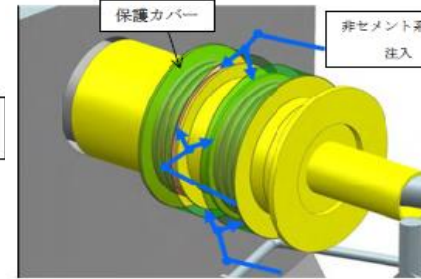
閉止補助材要素試験

格納容器補修技術の開発(3)(格納容器上部)

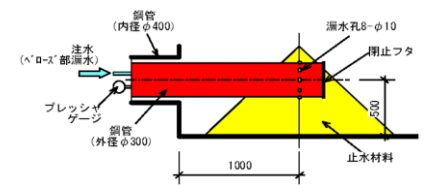
PCV上部補修工法の概念



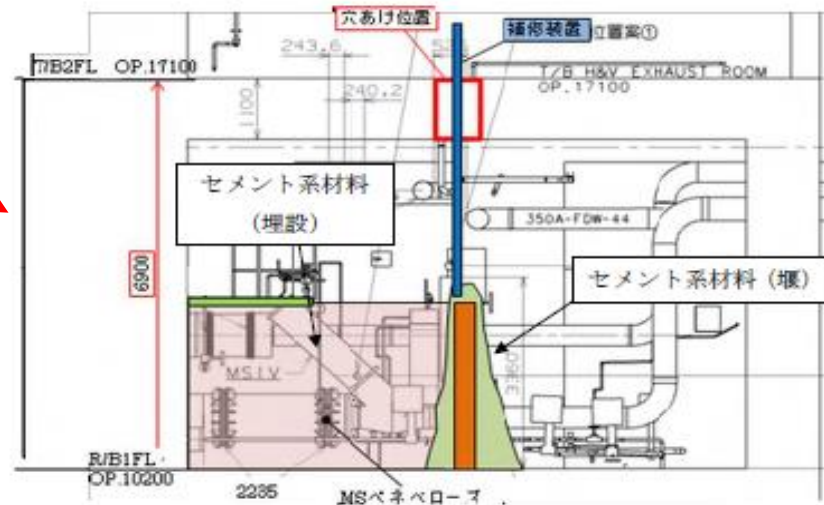
D/W外側開放部補修工法



D/W外側開放部止水材要素試験



D/W外側狭隘部止水材要素試験



D/W外側狭隘部補修工法

(2-①-2, 3) 格納容器水張りに向けた調査・補修（止水）技術の開発（平成26年度計画）

平成26年度主要目標

【格納容器調査技術の開発】

- 格納容器上部調査装置のうち、ドライウェル外側狭隘部調査装置は、昨年度の成果及び対象部位へのアクセス状況を踏まえ、改良仕様の検討を完了する。ドライウェル外側開放部調査装置は、工場モックアップ試験の成果を踏まえ、改良仕様の検討を完了する。またドライウェル外側開放部調査装置は特殊ベネ（大口径ベネと著しい偏芯があり且つベネ群の中央に位置するベネ）のための漏えい特定用デバイスについて装置改良検討作業の一環として概念検討を完了する。
- 新規調査対象（格納容器ナックル部）用装置の概念検討を完了する。

【格納容器補修（止水）技術の開発】

- 現場適用性のある止水工法として、①格納容器下部補修（止水）装置の詳細設計、要素試験方案の策定を完了、②格納容器上部補修（止水）装置の改良仕様検討、要素試験方案の策定を完了する。

平成26年度の実施内容

【格納容器調査技術の開発】

1. 下部点検調査装置の開発

- 平成25年度事業で開発完了予定。

2. 上部点検調査装置の開発・改良

- ドライウェル外側狭隘部調査装置は、昨年度の成果及び対象部位へのアクセス状況を踏まえ、改良仕様の検討を完了する。ドライウェル外側開放部調査装置は、工場モックアップ試験の成果を踏まえ、改良仕様の検討を完了する。特殊ベネ向けのデバイスは基本設計を完了する。
- 新たに必要となった②格納容器ナックル部調査装置の概念検討を完了する。

【格納容器補修（止水）技術の開発】

1. 格納容器下部補修（止水）工法および装置の開発

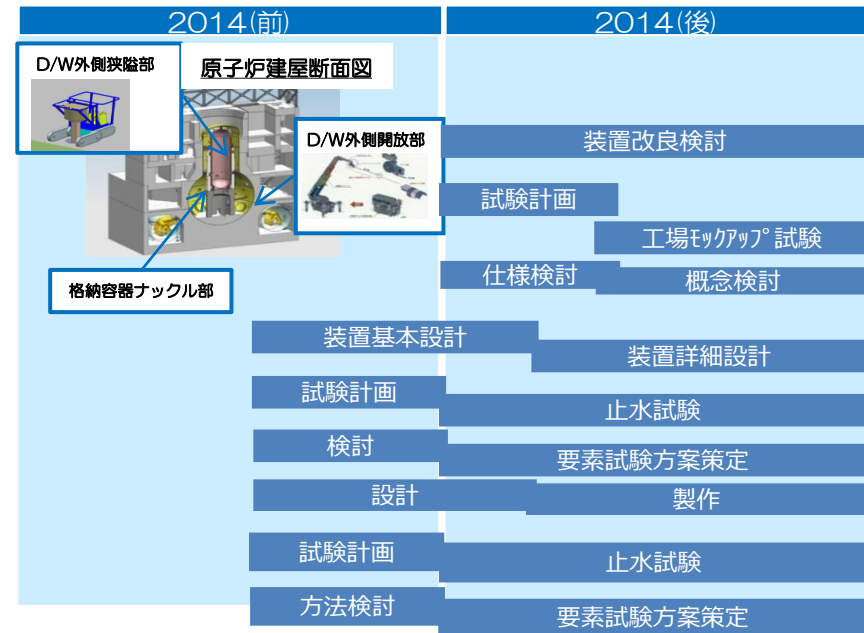
- ベント管、クエンチャ、ダウンカマ、サプレッションチェンバ、S/C接続配管などでバウンダリ構成するための補修装置の詳細設計を完了する。これらの部位の補修に適用する止水材の1/2スケールの止水試験等を実施し適用性の確認を完了する。トラス室壁面、三角コーナー、建屋間スリーブの止水について対象部位と止水方法について検討し、要素試験方案の策定を完了する。

- モックアップ試験用の試験体および試験装置の設計・製作に着手する。

2. 格納容器上部補修（止水）工法および装置の開発

- 損傷の可能性が高い箇所（ハッチフランジ、貫通部ベローズ、電気ベネ）について1/2程度のスケールでの止水試験を実施し、適用性の確認を完了する。系統配管については、必要に応じ、要素試験方案の策定を完了する。

実施工程（平成26年度）



2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

格納容器内部調査技術の開発 (2-①-4)

全体計画(PCV内部調査の目的と目標)

【 PCV内部調査の目的 】

燃料デブリの取出しに先立ち、PCV内の状況を把握することが重要であり、PCV内の状況を把握するための調査技術の開発を目的とする。

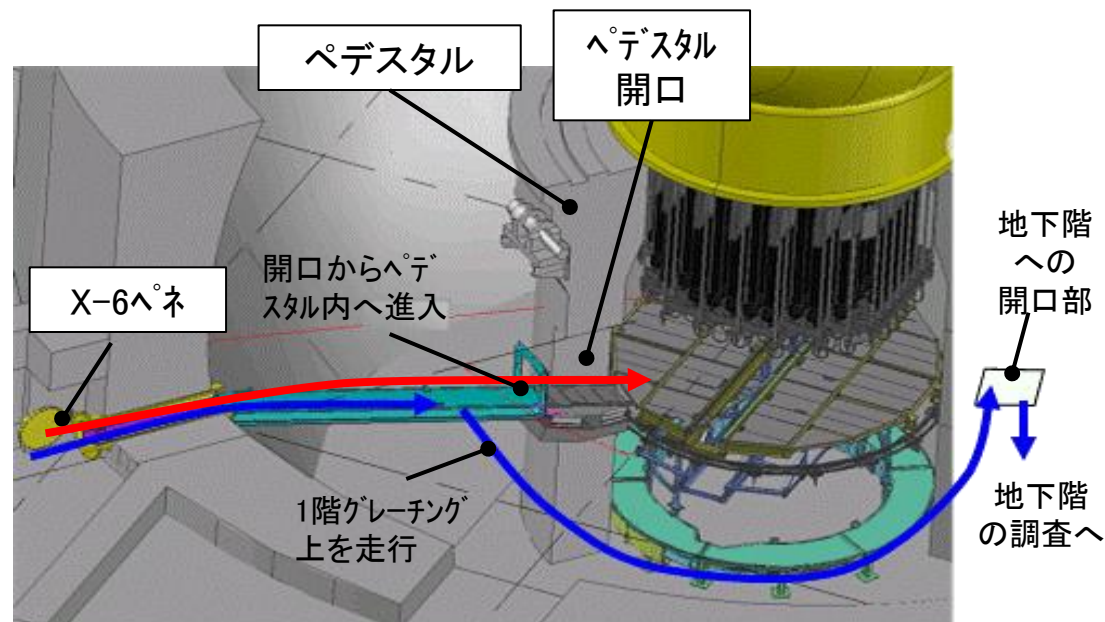
【 PCV内部調査の目標 】

燃料デブリは、RPVを經由してPCV内に存在すると推定されており、PCV内部映像を取得する計測器、デブリの可能性のある溶融物を検知する計測器、および、調査対象部位へアクセスする装置の開発を目標とする。



以下の実施を開発の最終ゴールと位置づける。

- ①溶融物 計測装置の開発
- ②アクセス装置(ペDESTAL内)の開発
- ③アクセス装置(ペDESTAL外)の開発
- ④上記装置の現場実証試験



ペDESTAL内のアクセス: →

ペDESTAL外のアクセス: →

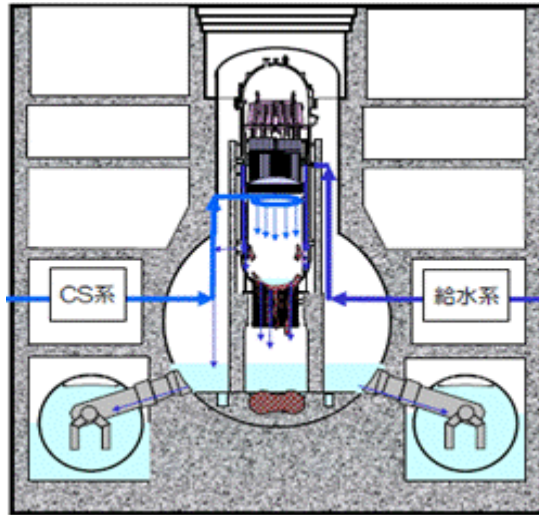
調査のアクセスイメージ:*1

*1: 本アクセスルートは、今後の検討により変更の可能性あり

調査及び調査装置の開発方針

1～3号機の炉心・PCVの状況推定(*1)より、開発方針を以下に設定

【1号機】

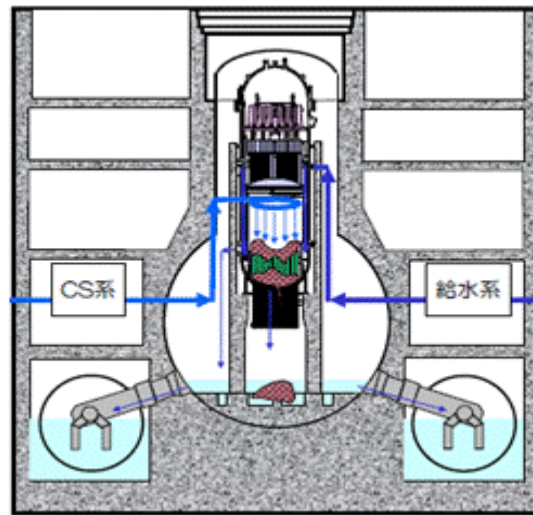


・溶融した燃料は、ほぼ全量がRPV下部プレナムへ落下しており、元々の炉心部にはほとんど燃料が存在していない

⇩ 開発方針

・燃料デブリがペDESTAL外側まで広がっている可能性があり、ペDESTAL外側の調査を優先して開発を推進する

【2号機】



・溶融した燃料のうち、一部はRPV下部プレナムまたはPCVペDESTALへ落下し、燃料の一部は元々の炉心部に残存していると考えられる
・尚、3号機では従来の予測よりも多くの燃料がPCV内に落下していると推定。

⇩ 開発方針

・1号機と比べると、燃料デブリがペDESTAL外側まで広がっている可能性は低く、ペDESTAL内側の調査を優先して開発を推進する
・尚、3号機はPCV内の水位が高く、1・2号機で使用予定のペネが水没している可能性があり、別方式を検討する必要がある。

*1:【出展元】東京電力殿ホームページ(平成25年12月13日)「福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容
器の状態の推定と未解明問題に関する検討第1回進捗報告」より抜粋

(2-①-4) 格納容器内部調査技術の開発 (平成25年度成果)

- ・ペDESTAL外の事前調査(格納容器内の映像、線量、温度等を取得)について、1号機用の調査装置は製作・機能検証試験を完了。ペDESTAL内の事前調査について、2号機は遮へいブロック取り外し装置と調査装置の製作・機能検証試験を完了予定。
- ・デブリの存在が推定されるペDESTAL内外の本格調査(燃料デブリの分布状態、形状の測定)に向けた更なるアクセス部位用の調査装置に関して、基礎検討及び要素試験を完了予定。

実施内容

1. PCV内部事前調査装置の開発

下記装置について、来年度の実証試験に向けてた開発を実施中。

(1) X-100Bからの調査装置(1号機)

装置の製作を完了し、機能検証試験を完了した。今後、平成26年度までに機能検証で抽出した改善対応を行う。

(2) X-6遮蔽ブロック取外し装置(2号機)

装置の各構成品(マニピュレータ、エンドエフェクタ等)の製作完了、装置の組立を実施中。現地調査の結果判明した、取扱い対象物の重量大について、対応を検討し開発計画へ反映中。

(3) X-6ペネからの調査装置(2号機)

前年度に実施したX-53からの調査で得られた成果及び課題について、移動機構の装置構成への変更を検討、開発へ反映。 今後、平成26年度までに装置の製作・機能検証試験を行う予定。

2. アクセス方法と装置の開発(ペDESTAL内/外アクセス装置)

ペDESTAL内/外のそれぞれに対するアクセス装置の構想検討を実施し、要素試作の仕様を策定中。また、アクセス装置のPCV内投入時に必要な放射性物質飛散防止装置の概念検討も実施。今後、平成28年度までに要素試作・試験を実施する予定。

3. 検査装置・技術の開発(デブリ計測装置)

光切断方式による形状計測技術について、装置のシステム構成を立案。また、計測に対するPCV内の外乱環境(霧状、雨状等)を模擬した要素試験を実施中。

各号機の開発ステップ（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レール使用可否の調査等)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

B1. ペDESTAL外1階グレーチング上調査
(2014年度/下予定):X-100Bペネ使用

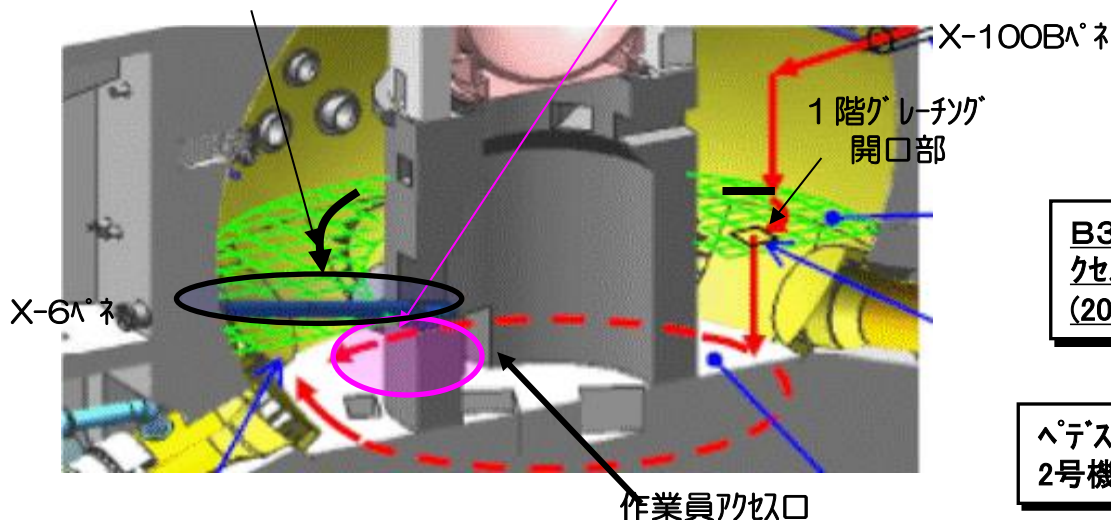
追加を検討中

B2. ペDESTAL外地下階状況調査(2015
年度計画):X-100Bペネ

B2調査の結果を踏まえ
実施要否の検討

B3. 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。



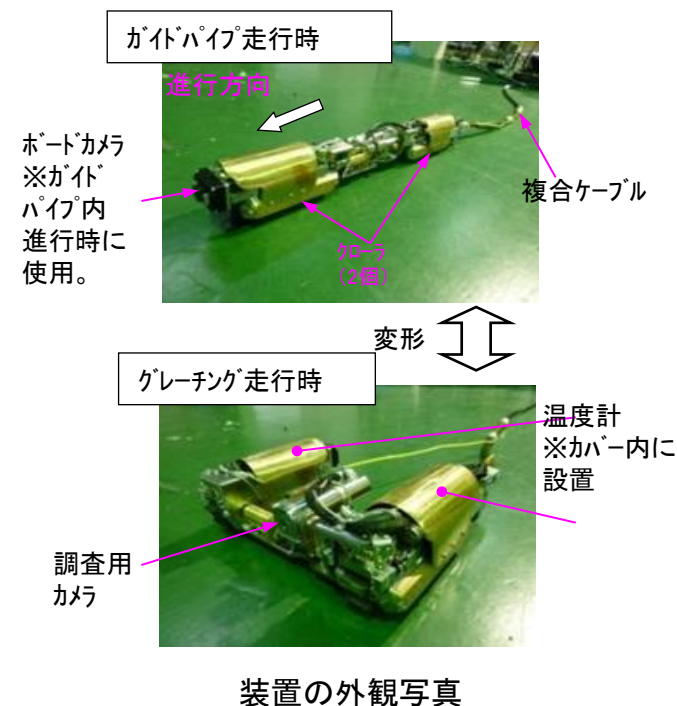
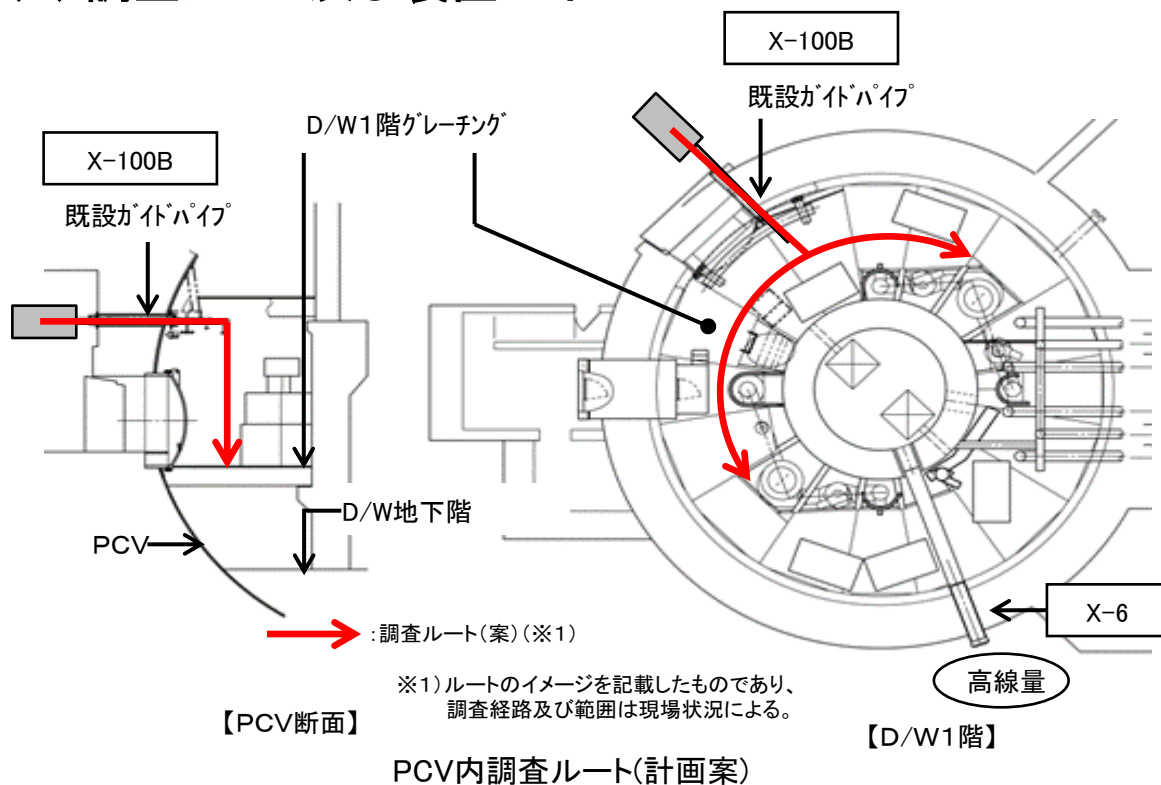
開発状況(ペDESTタル外 装置)

ペDESTタル外 1階グレーチング上調査装置

(1) 装置概要

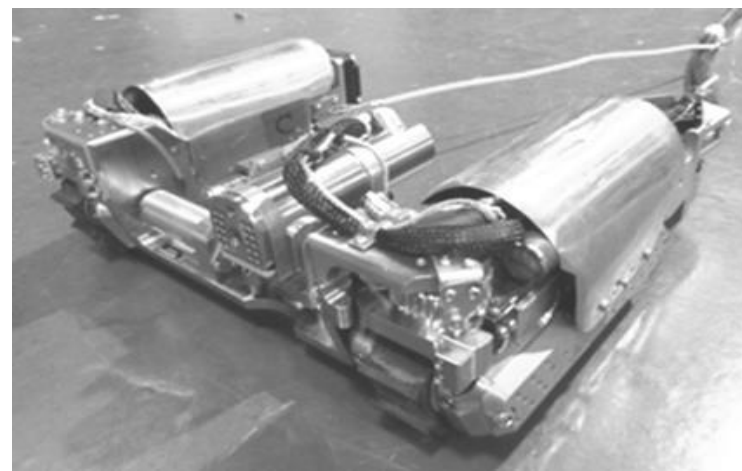
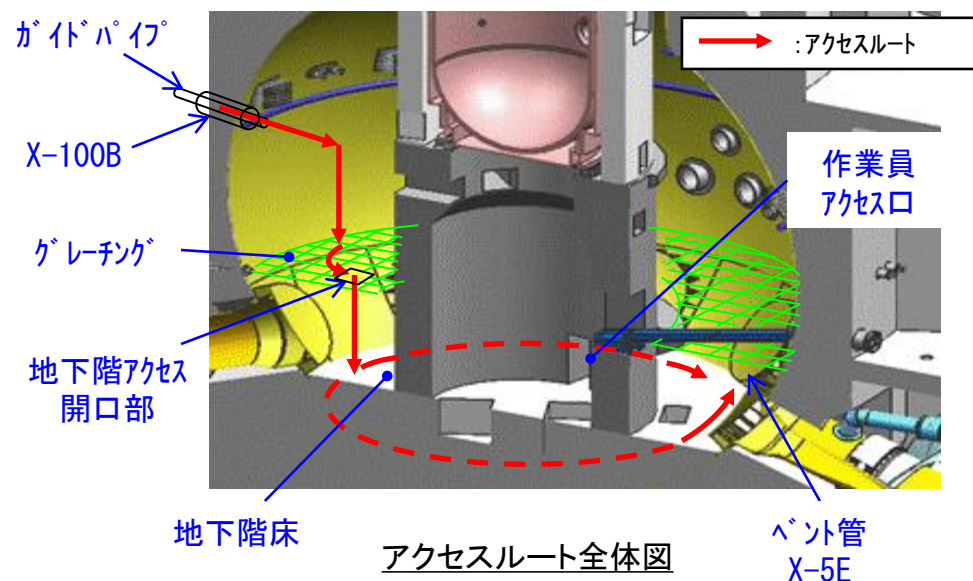
狭隘なアクセス口(X-100Bペネ貫通口:内径φ100mm)からPCV内へ進入し、グレーチング上を安定走行可能な、形状変形機構を有するクローラ型装置

(2) 調査ルート及び装置のイメージ



1号機水上ポート調査結果による追加調査検討

- ・1号機での、水上ポートによるサンドクッションドレン管からの流水を受け、PCV内部のデブリの状況を早期に確認する必要性があり、新たな追加調査を計画中。
- ・X-100Bペネからペデスタル外側の地下階に装置を降下させ、デブリの広がりが推定される作業員アクセス口近傍までアクセスさせることを検討中。
- ・装置は、ペデスタル外 1階グレーチング上調査(B1)で開発中の形状変形クローラをベースにして、地下階アクセス仕様に改良することで計画中。



各号機の開発ステップ (2号機)

【調査対象部位】: プラットホーム上(プラットフォーム上面, CRDハウジング下部)及び下(地下階)

【調査及び装置開発ステップ】

(1) X-6ペネ(Φ115mm)からの調査(～2014年度)

・X-6より、ペDESTAL内部プラットフォームの状況調査を2014年度/下に計画。:A2

(2) X-6(穴径拡大、またはペネ開放)からの調査(2015～2016年度):A3～A4

・デブリ可視化装置を投入し、ペDESTAL内部の調査を行う。

A1. CRDレール状況調査(2013/8実施済)

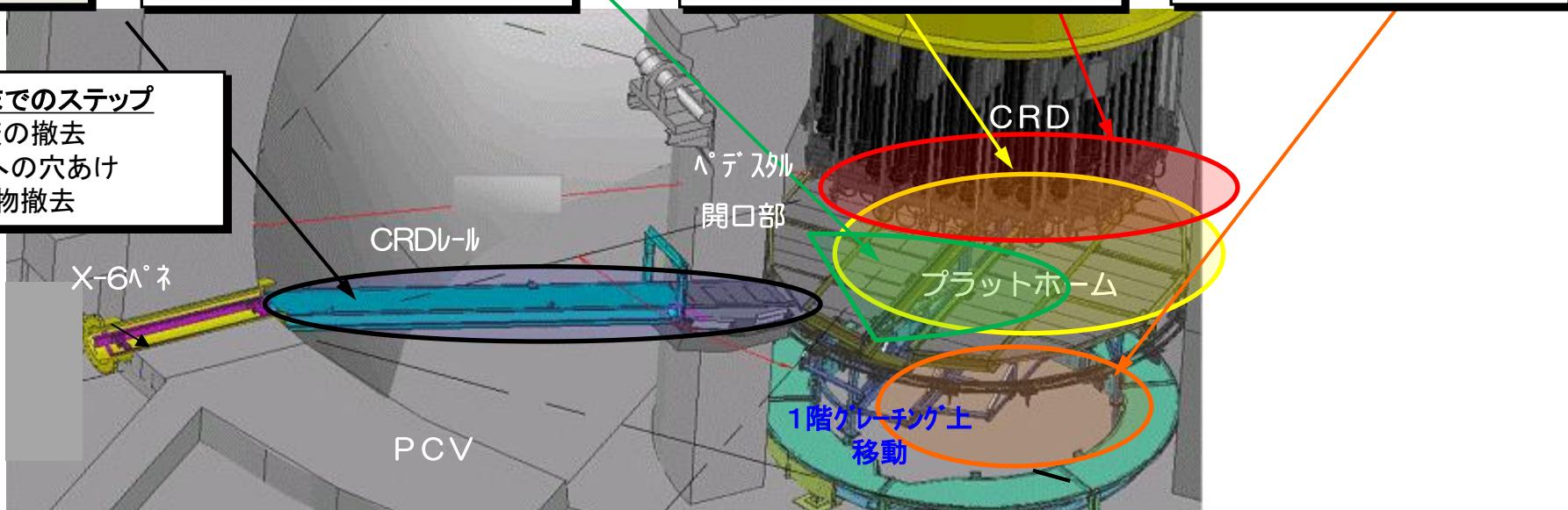
A2. ペDESTAL内部プラットフォーム状況調査(2014年度/下予定)

A3. CRD下部及びプラットフォーム状況調査(2015年度/下予定)

A4. ペDESTAL地下階の状況調査(2016年度/下予定)

X-6ペネ使用までのステップ

- ・ペネ前遮蔽の撤去
- ・ペネハッチへの穴あけ
- ・ペネの内包物撤去



ペDESTAL外部の調査については、A2～A4の内部調査結果を踏まえて実施要否を検討。

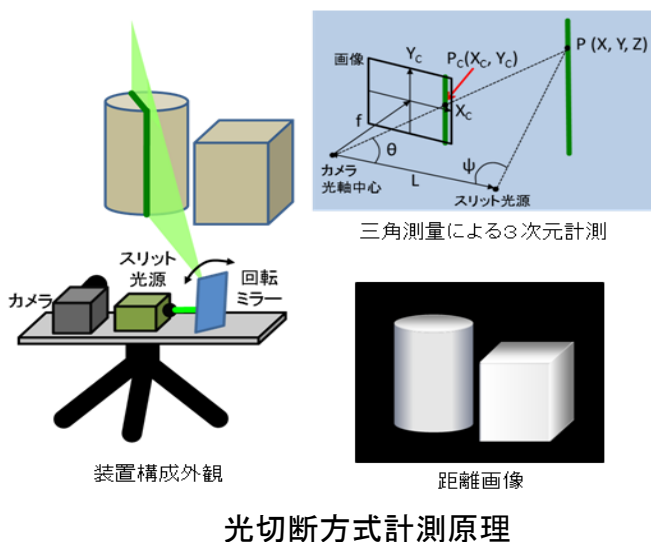
開発状況（燃料デブリ計測装置）

(1) 開発目標

燃料デブリと推定される溶融物の位置と分布を把握する計測装置を開発する。

(2) 実施内容

- ・H24年度に選定した光切断方式をもとに装置基本設計を実施する。
- ・要素試験により適用条件下による性能を確認し、基本設計の妥当性を評価する。
- ・また、光切断方式以外の計測手法(成分計測等)について追加調査を行い、その計測手法を用いた装置の成立性を評価する。



| No. | 分類 | 計測手法 |
|-----|--------------|--------------------|
| 1 | 温度分布計測 | プローブ型温度計 |
| 2 | | 放射温度計 |
| 3 | 放射線計測 | 線量計 |
| 4 | | ガンマ線検出器 |
| 5 | | コンプトンカメラ |
| 6 | 成分計測（直接計測） | レーザー誘起蛍光法 |
| 7 | | レーザー誘起ブレイクダウン発光分光法 |
| 8 | 成分計測（サンプリング） | 気体サンプリング |
| 9 | | 固体サンプリング |

外観・形状計測以外の計測手法整理

(3) 開発要素

- ・霧状大気中、雨滴共存大気中、水中環境下での計測性能と耐放射線性の両立
- ・アクセス装置に搭載できる小型、軽量化と計測性能の両立

(2-①-4) 格納容器内部調査技術の開発 (平成26年度計画)

平成26年度主要目標

100Gy/hの高放射線環境下で、原子炉格納容器(PCV)内部事前調査(映像、線量及び温度データを取得)のための調査装置の実機実証試験を完了する。あわせて、デブリの存在が推定されるPCV内のペDESTAL内外にアクセスする、本格調査(燃料デブリ分布状態や形状の測定)のための調査装置の基本設計の完了と一部部品の製作を完了する。

平成26年度の実施内容

※1、2が事前調査(映像、線量、温度、障害物の状況等の調査)、
3、4が本格調査(燃料デブリの分布状態、形状の測定)。

1.ペDESTAL内部プラットフォームの状況調査装置の開発と実証試験

- ① 前年度の開発を基に検証試験や改善を実施して装置開発を完了する。
- ② 2号機X-6ペネを使用した実証試験を実施。
(装置は、X-6ペネ前の遮へいブロックを遠隔で取外す装置、X-6ペネのハッチ穴あけ装置及びX-6から格納容器内へアクセスする調査装置)

2.ペDESTAL外 調査装置の開発と実証試験

- ① 前年度の開発を基に検証試験や改善を実施して装置開発を完了。
- ② 1号機X-100Bペネを使用した実証試験を実施。
(装置は、X-100Bから格納容器内へアクセスする調査装置)

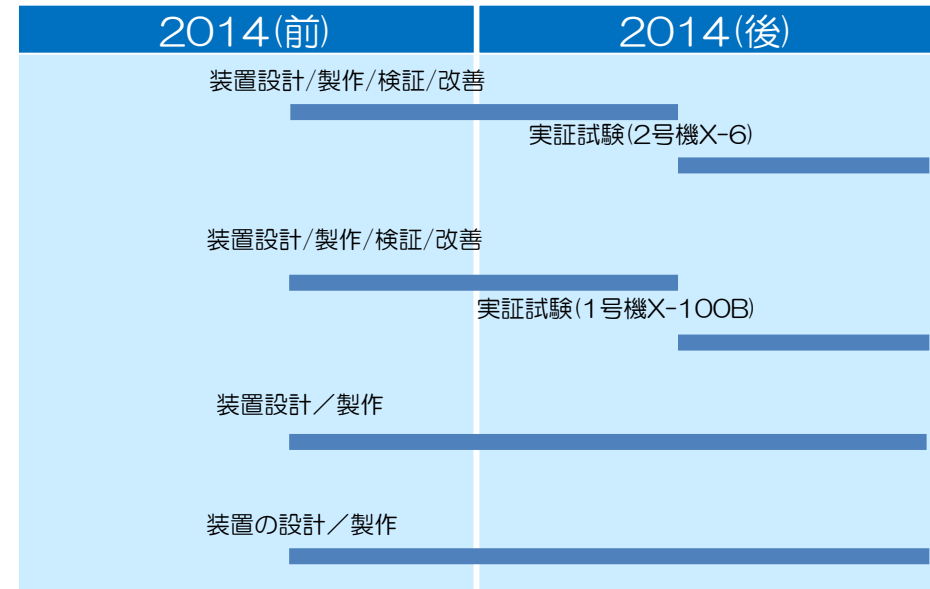
3.ペDESTAL内/外の更なる調査に向けた装置の開発

デブリの存在が推定される部位(プラットフォーム上、ペDESTAL地下階及び作業員アクセス口近傍)へアクセスする装置の基本設計完了と、一部製作に着手(平成28年3月完了予定)。

4.デブリ計測装置の開発

光切断法等の計測手法を活用したデブリ計測装置について、上記3.の装置への搭載化検討や設計・製作を実施。

実施工程 (平成26年度)



2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

圧力容器内部調査技術の開発 (2-①-5)

全体計画(RPV内部調査の目的)

【 RPV内部調査の目的 】

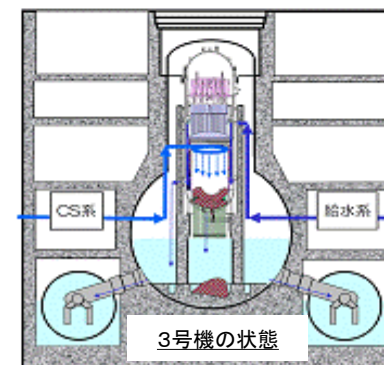
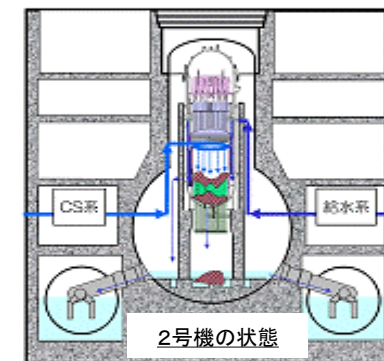
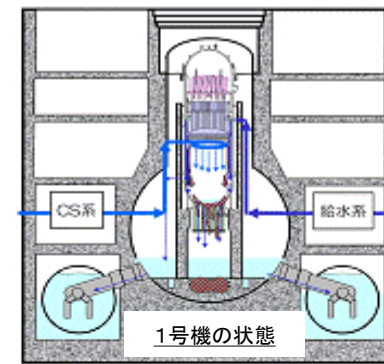
RPV内部調査では、RPV内部の燃料デブリの位置、炉内構造物の損傷状態、RPV内の温度、線量等を取得することを目的とする。

本Prj(RPV内部調査Prj)では、上記の調査を可能にする技術開発を行う。

【 期待される成果の例 】

RPV内部調査で取得する情報と、期待される成果の例を以下に示す。

| 取得する情報 | 期待される成果 |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • デブリ、炉内構造物の目視映像 • 炉内雰囲気、デブリの線量 • 炉内雰囲気、デブリの温度 | プラントの内部の状態を直接確認することができ、デブリ取出し計画、機器装置開発にフィードバックできる。 |
| <ul style="list-style-type: none"> • デブリのサンプリング | 現状はデブリがどのようなものかわかっていないが、少量のサンプルを採取・分析することによってデブリの組成などを確認することができる。 |



【炉心損傷状態の推定】

(2-①-5) 圧力容器内部調査技術の開発（平成25年度成果）

原子炉圧力容器（RPV）内部の燃料デブリの位置、炉内構造物の損傷状態、RPV内の温度、線量等を取得するため、調査対象部位までのアクセス方法、調査方法、及びサンプリング方法を検討し、RPV内部の高線量下（暫定1,000Gy/h）での調査技術の整理を行い、RPV内部を調査する技術開発計画（2015年度・2017年度：系統配管経由調査技術、2018年度：RPV上部穴あけ調査技術、2019年度：原子炉開放後調査技術）を立案した。

実施内容

1. RPV内部調査計画の立案

◆ 主要調査項目・調査時期の検討

RPV内部調査にて実施する調査項目を選定したうえで、調査項目、調査時期等を検討し、下記2. にて技術開発計画（2015年度・2017年度：系統配管経由調査技術、2018年度：RPV上部穴あけ調査技術、2019年度：原子炉開放後調査技術）を立案した。

◆ アクセスルートの検討

RPV内部を調査するルートとして、配管からアクセスする方法、RPV上部に穴を開けてアクセスする方法、原子炉開放後にアクセスする方法について、候補となるアクセスルートを抽出し、アクセス性を評価し、候補ルートを選定した。(図1)

2. 技術開発計画の立案

◆ アクセス技術

RPV内部へのアクセスルートの検討結果に基づき、既存技術を調査したうえで、障害物の貫通技術等の開発課題を抽出した。

◆ 調査技術（耐放カメラ、線量計等）

既存技術の調査したうえで適用性を検討し、耐放射線性等の対処に係る課題を抽出した。

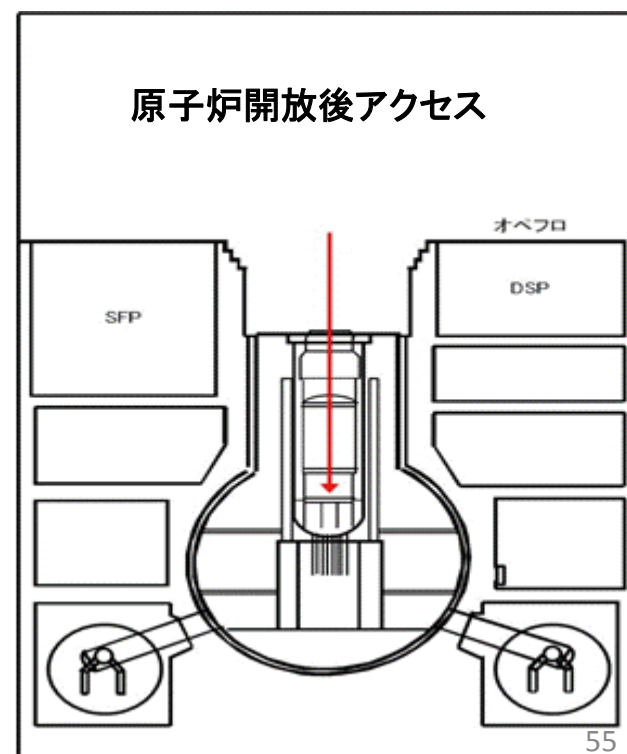
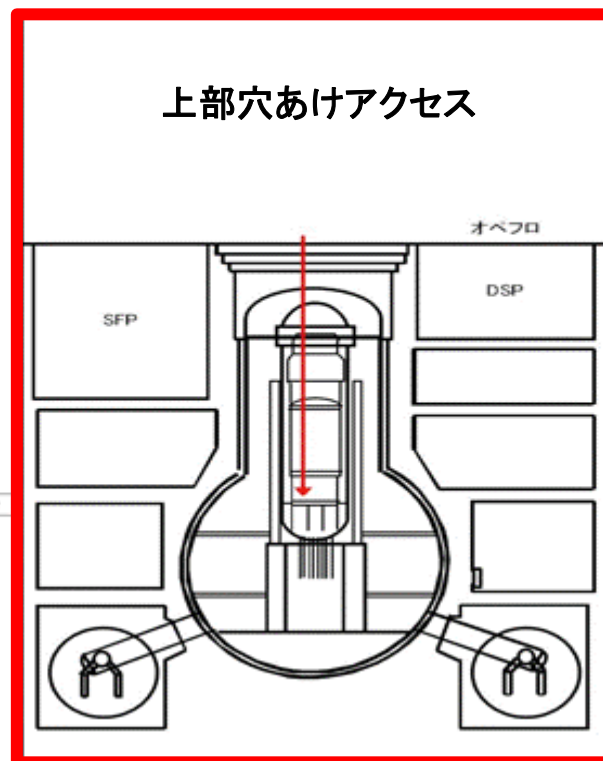
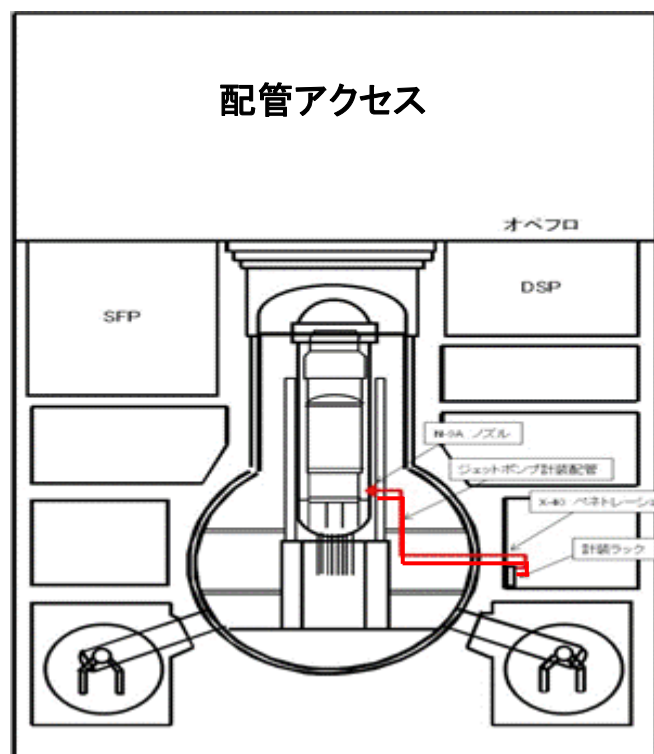
◆ サンプリング技術

既存技術の調査を行い、サンプリング工法の概念検討を実施し、課題を整理し、開発計画を立案した。

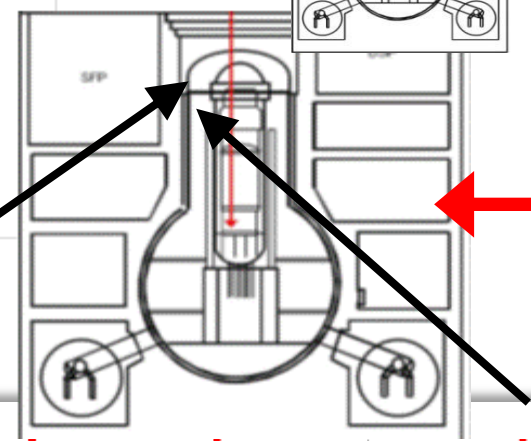
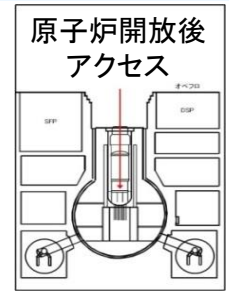
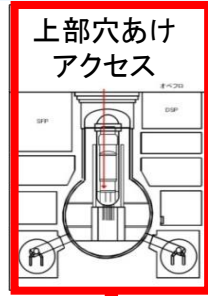
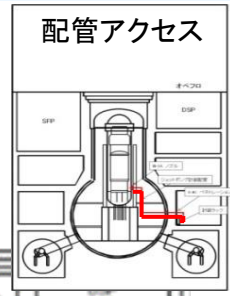
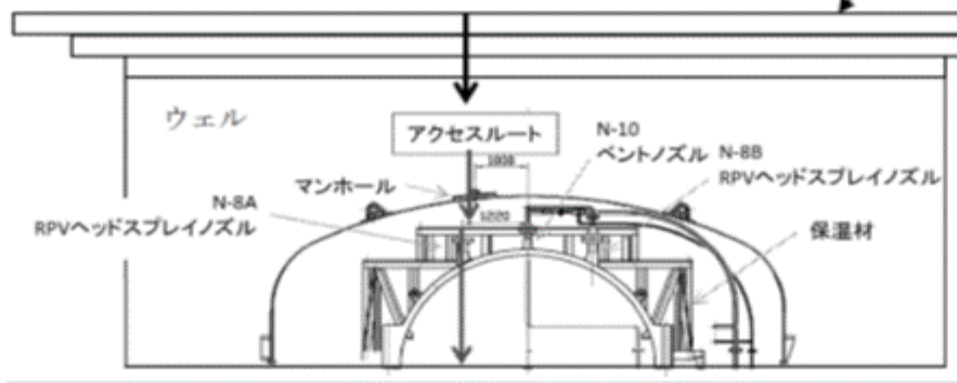
R P V内部へのアクセスルートの検討

表 アクセス技術の開発計画（上部穴あけアクセスの例）

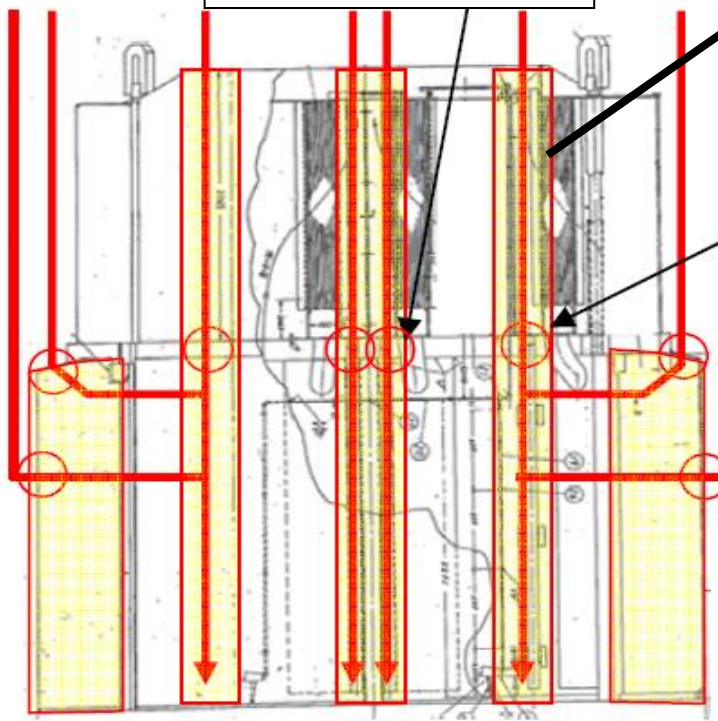
| No | 開発技術要素 | 課題 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | |
|----|-----------|--------------------------------|------|------|------|------|------|--|
| 1 | 穿孔技術 | 蒸気乾燥器、気水分離器の穴あけ | ■ | | | | | |
| 2 | 拡管技術 | 蒸気乾燥器、気水分離器の穴径拡管 | ■ | | | | | |
| 3 | 遠隔操作技術 | 曲がり、狭隘部の通過、作業状態の監視 | ■ | | | | | |
| 4 | バウンダリ形成技術 | オペレーションフロア（シールドプラグ）上でのバウンダリ再形成 | ■ | | | | | |



シールドプラグ



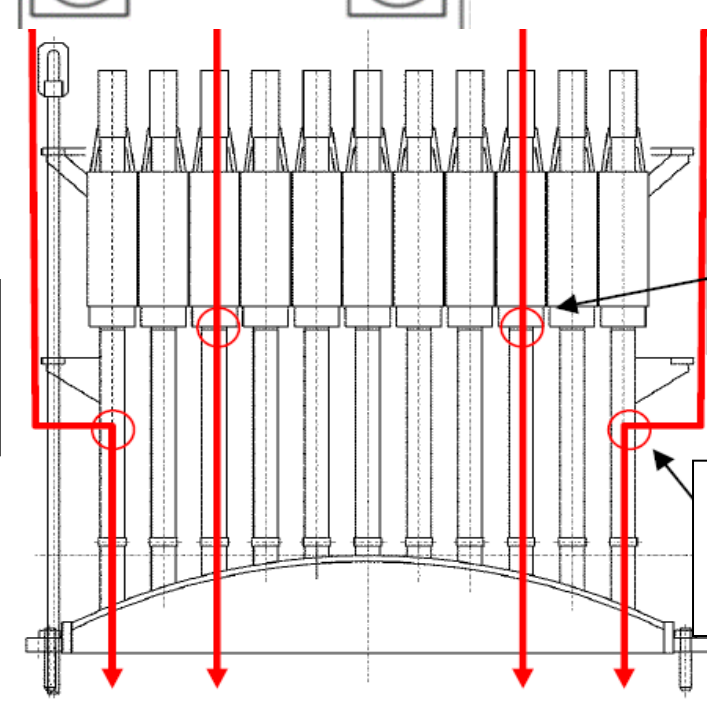
蒸気乾燥器
底板ドレン配管口



蒸気乾燥器
底板ドレン受
貫通穴

蒸気乾燥器
底板周縁部
貫通穴

蒸気乾燥器
側板貫通穴



気水分離器
入口管開口部
(インレット)

気水分離器
入口管側面
貫通穴

RPV内部調査アクセスルート（配管からのアクセス）

RPV内部調査計画の立案 アクセス方法の検討 （配管からのアクセスルート）

選定結果（3号機の例）

- RPVに開口部を有する系統として、ジェットポンプ計装ライン、給水系配管、コアスプレイ系配管などを抽出した。
- 系統配管の曲り、弁の開閉状態等、装置概念設計に応じた通過可能寸法の確保有無等が課題であり、装置設計にあわせ更なる絞り込みを実施していく。

給水A系（給水ノズルN4A, B）

OP26601

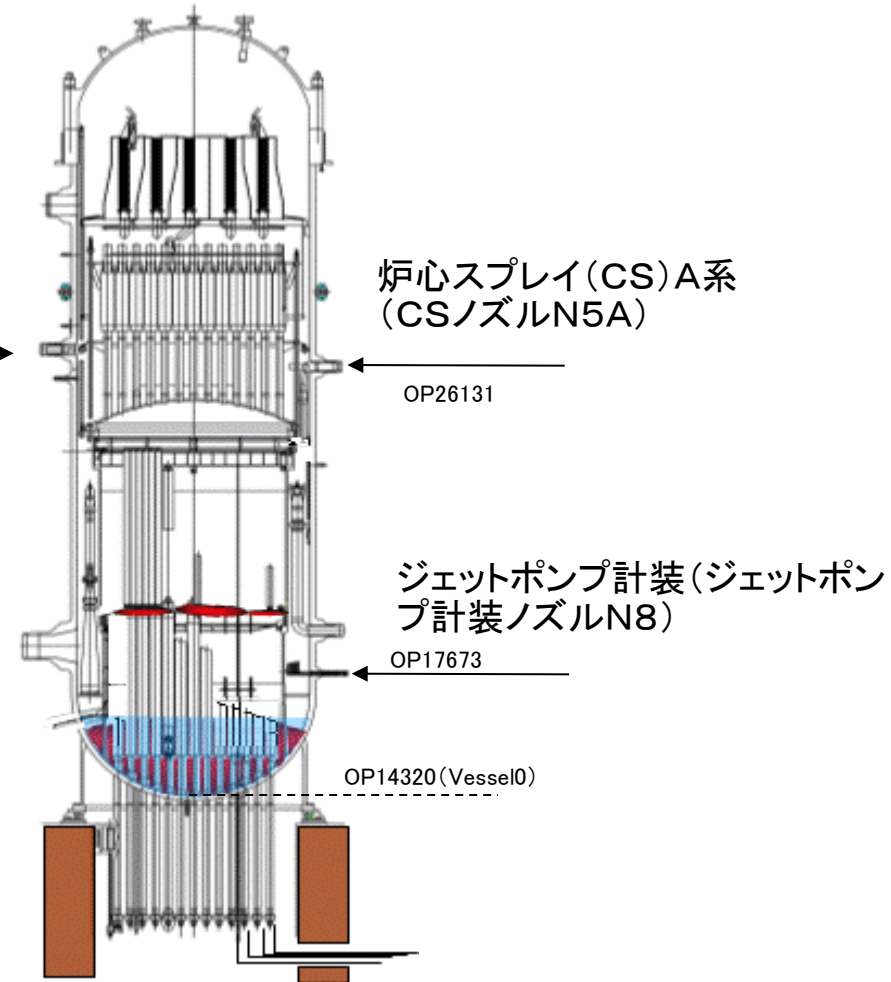
炉心スプレイ(CS)A系
(CSノズルN5A)

OP26131

ジェットポンプ計装(ジェットポンプ計装ノズルN8)

OP17673

OP14320 (Vessel0)



(2-①-5) 圧力容器内部調査技術の開発(平成26年度計画)

平成26年度主要目標

- ・原子炉圧力容器(RPV)内部を調査する技術(2015年度・2017年度:系統配管経由調査技術、2018年度:RPV上部穴あけ調査技術、2019年度:原子炉開放後調査技術)を開発するために、1,000Gy/h(暫定値)の高放射線環境下でRPV内部の映像、線量、温度を計測するためのアクセス装置、調査装置、サンプリング装置のシステム設計及び基本設計を完了する(アクセス装置)。
- ・アクセス装置、調査装置、サンプリング装置を構成する要素技術(遠隔穴あけ装置等)について、試作・試験を完了する。

平成26年度の実施内容

1. アクセス装置の開発

① 配管を経由してRPV内部にアクセスする技術について、装置のシステム設計を行い、構成する要素技術の試作・試験を完了する。
また、RPV内部への早期アクセス実現に向け、下記2. で開発を行う調査装置の寸法、重量等をインプットとして、装置の基本設計及び詳細設計を完了する。

② RPV上部からアクセスする技術(RPV上部に穴を開けてアクセスする技術、原子炉開放後にアクセスする技術)について、装置のシステム設計を行い、構成する要素技術の試作・試験を完了する。また、下記2. で開発を行う調査装置の寸法、重量等をインプットとして、装置の基本設計を完了する。

2. 調査装置の開発

調査環境やアクセスルート寸法制約等を考慮したカメラ等装置のシステム設計を実施。構成する要素技術の試作・試験を完了する。調査装置の基本設計を行い、上記1. のアクセス装置の設計に資する寸法、重量等のインプット情報を提示する。

3. サンプリング装置の開発

燃料デブリのサンプリングについて、加工・回収方法を考慮したサンプリング装置のシステム設計・基本設計を行い、構成する要素技術の試作・試験を完了する。

工程表

| 事項/年度 | H26上期 | H26下期 |
|-----------------------|-------|-------|
| 1. アクセス技術の開発 | | |
| 配管アクセス | | |
| ・装置のシステム設計 | ■ | |
| ・装置の基本設計 | | ■ |
| ・装置の詳細設計 | | ■ |
| ・要素試作・試験 | | ■ |
| RPV上部アクセス | | |
| ・装置のシステム設計 | ■ | |
| ・装置の基本設計 | | ■ |
| ・要素試作・試験 | | ■ |
| 2. 調査技術の開発 | | |
| ・装置のシステム設計 | ■ | |
| ・装置の基本設計 | | ■ |
| ・要素試作・試験 | | ■ |
| 3. サンプリング技術の開発 | | |
| ・装置のシステム設計 | ■ | |
| ・装置の基本設計 | | ■ |
| ・要素試作・試験 | | ■ |

2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

事故進展解析技術の高度化による炉内
状況把握 (2-②-1)

全体計画

目的

福島第一原子力発電所の廃止措置の円滑な実施に資するため、炉内状況およびデブリの分散状況等を解析を主体として把握する

炉内状況把握・解析分野

プラント状況実測、遠隔可視化(東電)

【資源エネルギー庁委託事業】

発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業
(過酷事故解析コードを活用した炉内状況把握)

- 解析コード改良と実機事故解析
 - ・MAAPグループ(東芝、日立GE)
 - ・SAMPSONグループ(エネ総工研)
- 熱流動解析等による個別事象評価
- 国際協力: OECD/NEAベンチマーク解析PJ(BSAF)等

JAEA: モックアップ試験(海水熱伝達試験など、2013年度～)

AESJ: 「シビアアクシデント評価」研究専門委員会

(2-②-1) 事故進展解析技術の高度化による炉内状況把握 (平成25年度成果)

燃料デブリの位置等の炉内状況を推察するための事故進展解析技術の高度化 (炉心損傷進展モデル改良、下部プレナム内デブリ挙動モデル改良等) を完了。高度化した事故進展解析技術の成果を活用し、現場オペレーションから得られる新たな情報も踏まえながら、炉内状況を把握するための検討を実施し、格納容器に落下したデブリ比率は、1号機が最大、2、3号機はそれより少なく同等であると評価した。

実施内容

1. コード改良・モデルの追加の妥当性の確認

平成24年度に完成したP I R T (Phenomena Identification and Ranking Table) に対し、その重要度ランクを改めて感度解析にて確認し、改定した。

2. 解析コードの改良・高度化

P I R Tの結果、サイトのオペレーションから得られる情報、既存の模擬試験の結果、最新知見等に基づき解析コード (MAAP、SAMSON) の改良し、解析精度を向上させた。

3. 改良コードによる解析 (MAAP、SAMPSON)

改良した最新版コードと構築したデータベースに基づき1～3号機の事故進展/炉内状況の把握に関する解析を実施し、モデル改良の影響を確認した。

4. CFDによる個別事象解析

鋳造シミュレーションコードを用いたデブリ拡がり試験解析を行い、実機体系でのデブリ拡がり挙動評価への適用性を確認した。

5. モックアップ試験

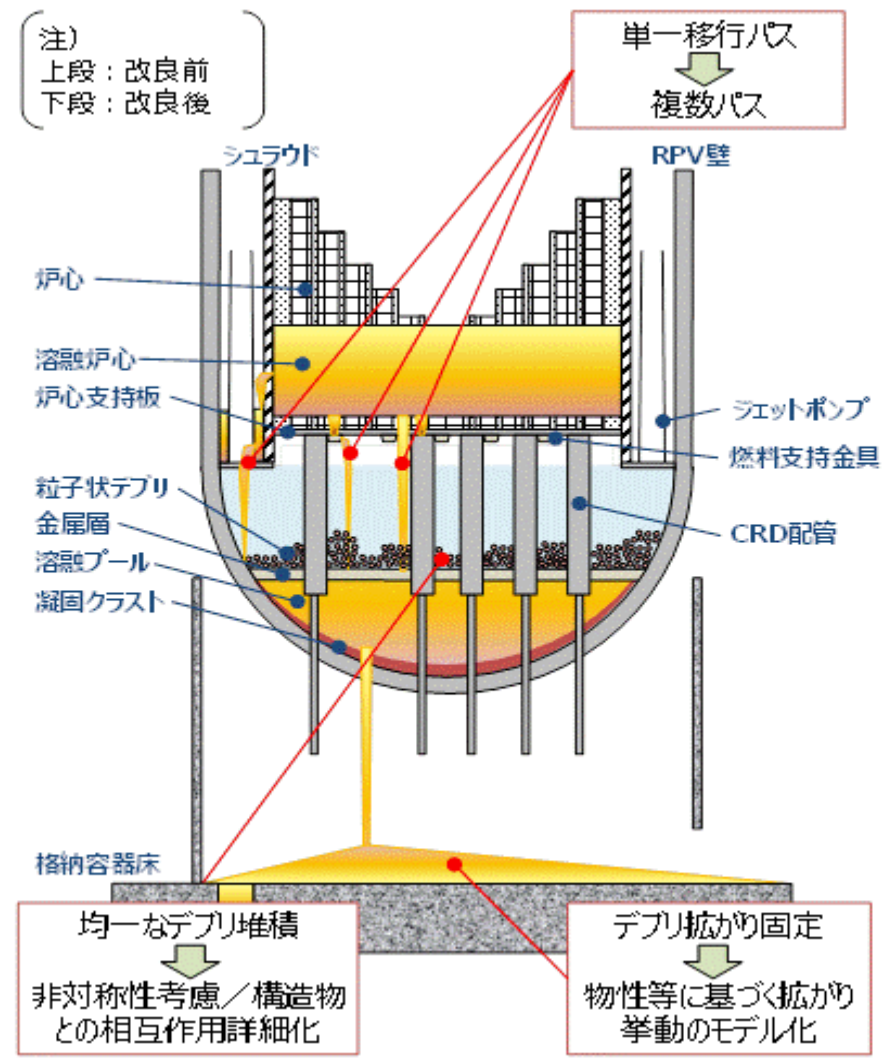
シビアアクシデント事象進展の詳細分析に資する模擬試験等 (海水熱伝達試験、熔融燃料落下挙動試験) を実施し、海水注入時に対する、従来の熱伝達評価式の適用性などを確認した。

MAAPのモデル改良・追加

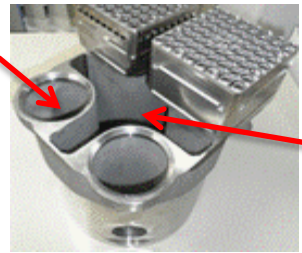
MAAPコードの改良により、デブリ位置の推定、プラント挙動の評価精度を高める

■MAAP5コードの改良と検証

- 下記改良項目及びその高度化仕様に基づいたコード改良を米国EPRI委託にて実施
- 炉心損傷進展モデル改良
(溶融物の移行経路を複数考慮)
- 下部プレナム内デブリ挙動モデル改良
(堆積形態、構造物相互作用)
- 格納容器内デブリ挙動モデル改良
(拡がり挙動、コンクリート相互作用)
- 改良されたコードの検証
- 個別現象のモデルを要素試験等により検証
- プラント全体挙動は実機試験等により検証



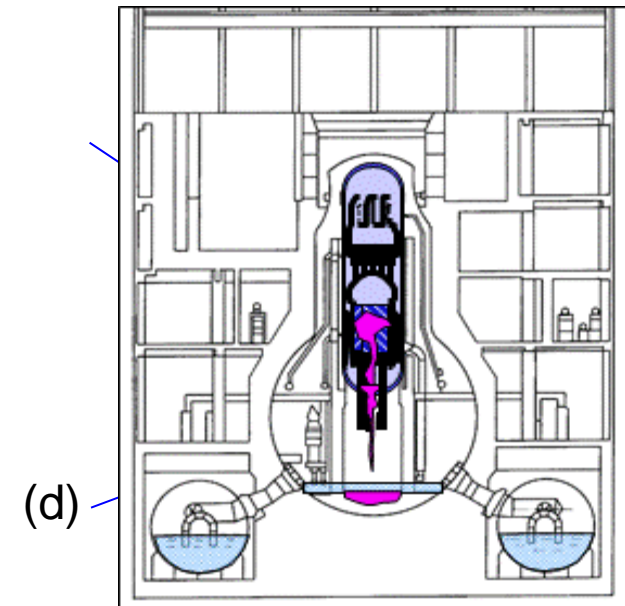
追加された経路①
燃料が乗っている
穴にデブリが落下



追加された経路②
制御棒(十字型)が
挿入されている穴に
デブリが落下

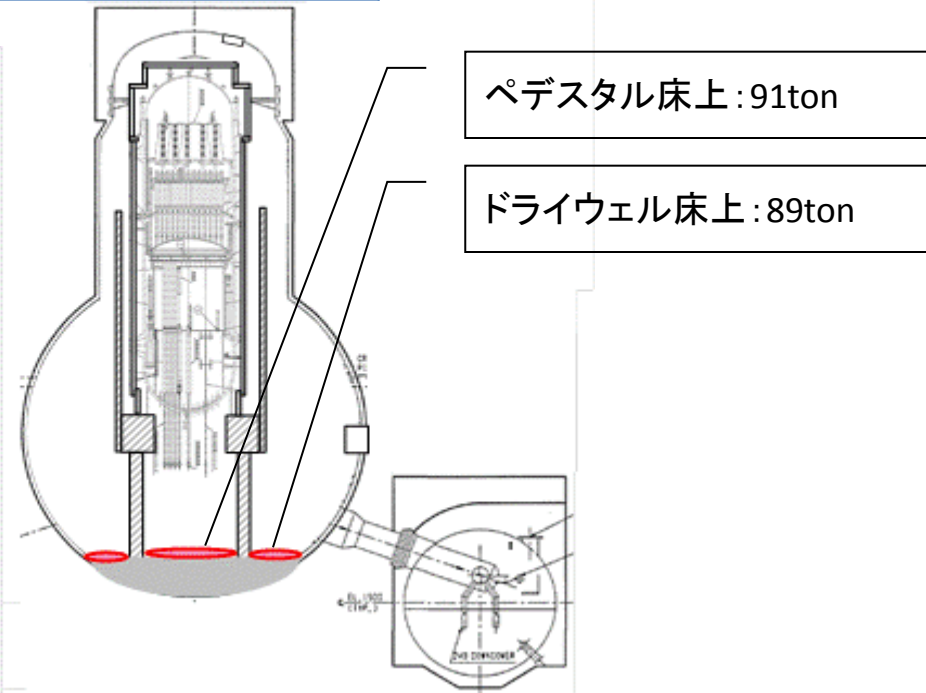
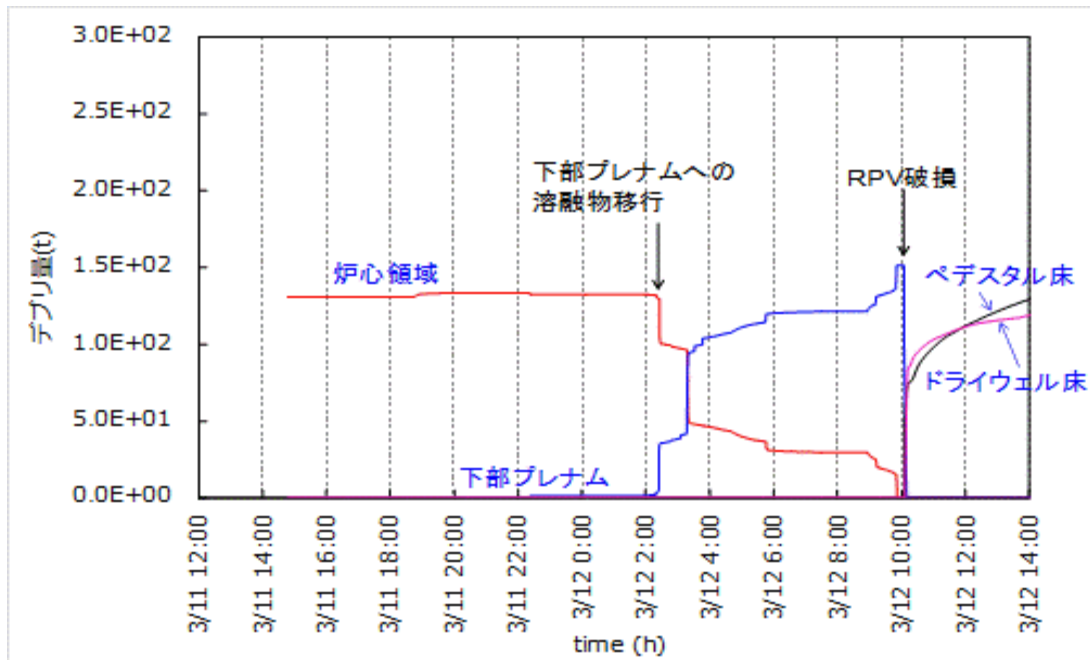
SAMPSONのモデル追加・改良

- (a) 格納容器内圧力抑制プールの温度成層化現象のモデル化
 - ・水の自然循環を解く3次元流動モデルを開発(座標系:デカルト/円筒)
 - ・2号機を対象とした解析で、RCIC動作時の解析機能を検証
- (b) 下部プレナムへの流出経路モデルの改良と下部プレナムにおける溶融物と構造材/冷却材との相互作用モデル
 - ・炉心溶融物の下部プレナムへの流出経路を解析により検討し、モデルを改良
 - ・溶融物と構造材/冷却材相互作用モデルを開発し、機能を検証
- (c) 高温条件での共晶反応及び酸化反応モデルの改良
 - ・ B_4C 及び鉄の酸化反応モデルを追加
 - ・ B_4C と鉄との共晶反応モデルを開発し、機能を検証
- (d) 圧力容器の下部における溶融物・構造材相互作用モデル
 - ・相互作用モデルを開発し、機能を検証



MAAPコードによる1号機事故解析

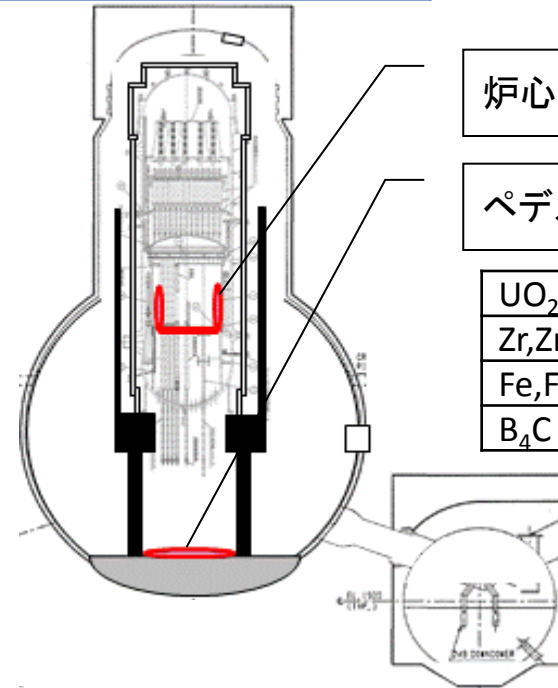
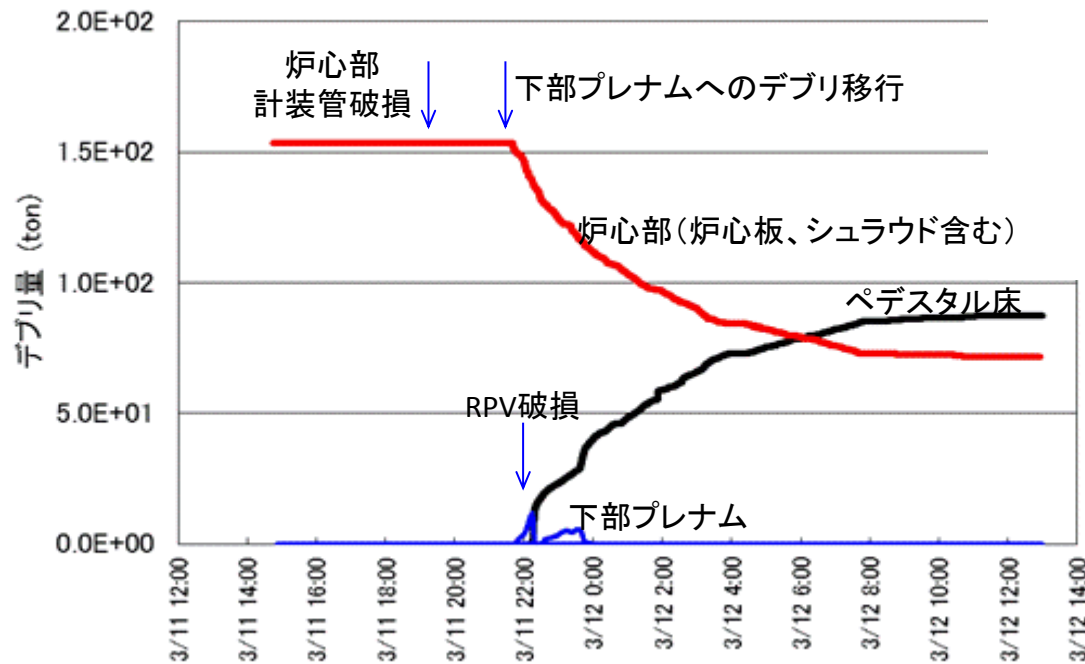
| イベント | 発生時刻 |
|-------------------------|------------------|
| 原子炉水位 ≤ 燃料有効部上端 | 2011/3/11 17:50頃 |
| 炉心損傷 (燃料棒最高温度 ≥ 1200°C) | 2011/3/11 18:40頃 |
| 炉心溶融 (燃料棒最高温度 ≥ 2200°C) | 2011/3/11 18:50頃 |
| RPV破損 | 2011/3/12 10:00頃 |



(注) 2011/3/12 13:00頃のデブリ量 (燃料、構造材)

SAMPSONコードによる1号機事故解析

| イベント | 発生時刻 |
|-------------------------|------------------|
| 原子炉水位 ≤ 燃料有効部上端 | 2011/3/11 17:50頃 |
| 炉心損傷 (燃料棒最高温度 ≥ 1200°C) | 2011/3/11 19:40頃 |
| 炉心溶融 (燃料棒最高温度 ≥ 2200°C) | 2011/3/11 22:00頃 |
| RPV破損 | 2011/3/11 22:10頃 |



炉心 : 72ton

ペDESTAL床上 : 88ton

| | |
|---|----------|
| UO ₂ , U ₃ O ₈ | 33.6 wt% |
| Zr, ZrO ₂ | 34.2 wt% |
| Fe, Fe ₂ O ₃ | 31.3 wt% |
| B ₄ C | 0.9 wt% |

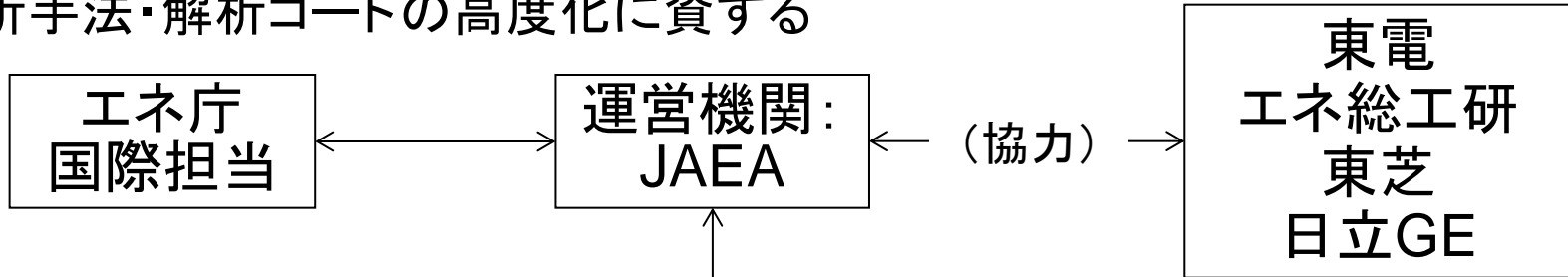
(注) 2011/3/12 13:00頃のデブリ量 (燃料、構造材)

国際協力: OECD-NEA BSAFプロジェクト

Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (BSAF)

期間: 2012年11月～2014年10月

目的: ①専門家の叡智を結集し、事象進展および炉内状況に関する知見を得る
②解析手法・解析コードの高度化に資する



参加機関:
日本: JAEA, JNES, 電中研, エネ総工研
フランス: IRSN, CEA
ロシア: ROSATOM, IBRAE
ドイツ: GRS
スイス: PSI
アメリカ: USNRC他
韓国: KAERI
スペイン: CSN

国際プロジェクト会議*、WEBサイト (<https://fdada.info/index>) を通じた情報の共有

| | | |
|------------|-----------------|-----------|
| *・準備会議 | 2012年6月18日-20日 | パリ(NEA本部) |
| ・第一回会議 | 2012年11月6日-8日 | 東京 |
| ・第二回会議 | 2013年10月15日-17日 | パリ(NEA本部) |
| ・第三回会議 | 2014年6月 | 東京 |
| ・第四回会議(最終) | 2014年10月 | パリ(NEA本部) |

2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

原子炉内燃料デブリ検知技術の開発 (2-②-2)

プロジェクトの概要

● 圧力容器内(①)と格納容器下部(②)の燃料デブリの位置、量の把握が重要

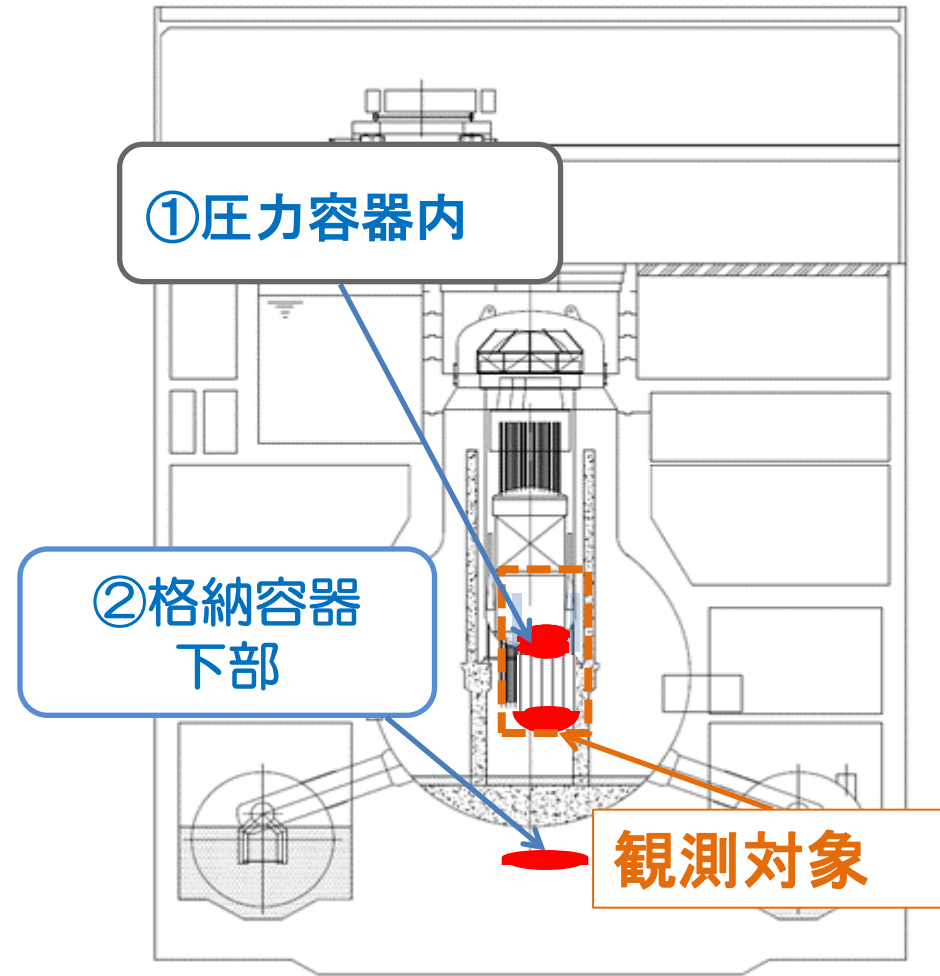
- ◆ 燃料集合体の損傷状態
- ◆ 狭隘部への溶融燃料の流れ込み有無
- ◆ 燃料デブリの密度等の詳細分布

⇒ 取り出し手順や工法の具体化



圧力容器内部は
高放射線場で
アクセス困難

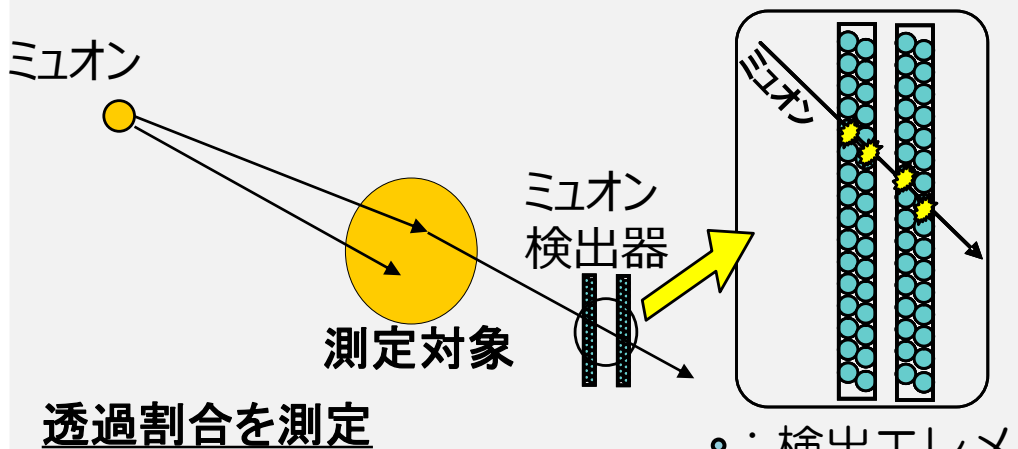
ミュオンによる透視技術で
早期に燃料デブリ分布を
廃炉技術開発に提供



● 燃料デブリ位置

プロジェクトの概要（ミュオン観測技術）

透過法

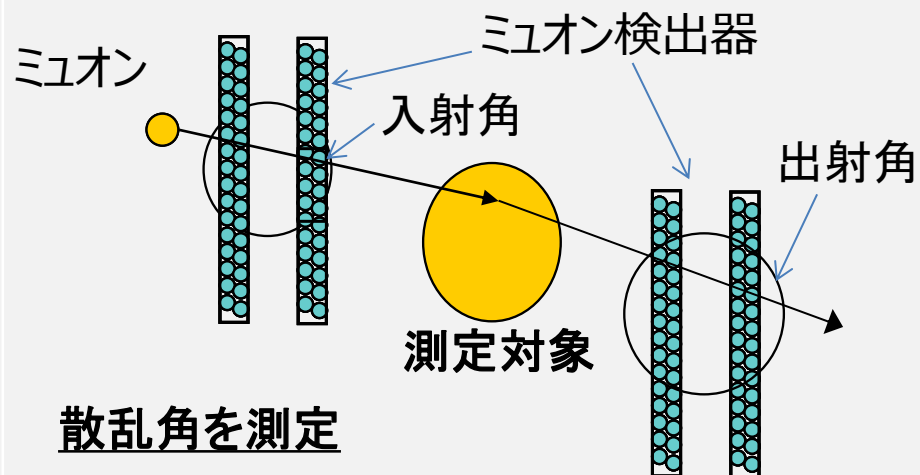


飛来方向の物質有無(2次元)

識別能力(燃料デブリ): 1m程度

一つの小型ミュオン検出器(早期適用可)

散乱法



散乱位置の物質有無(3次元)

識別能力(燃料デブリ): 30cm程度

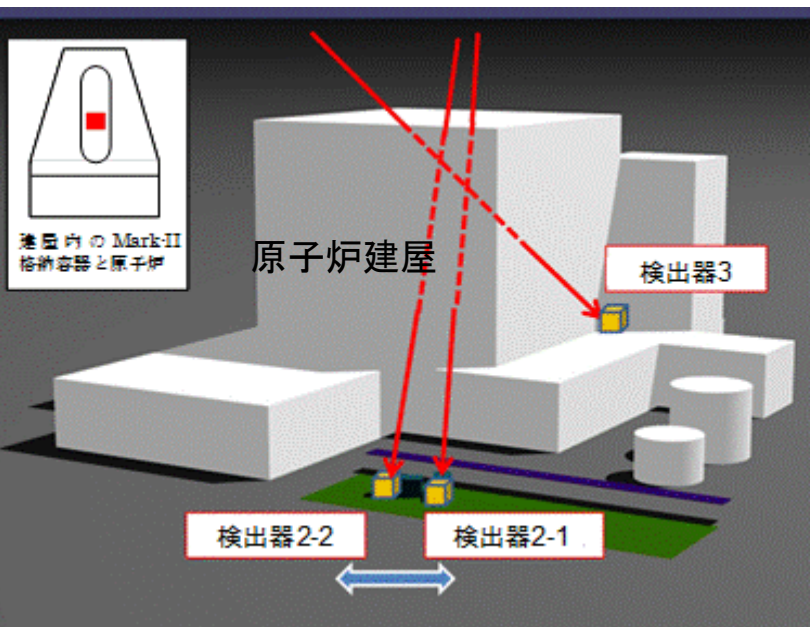
2つの大型ミュオン検出器(開発要)

ウラン等の重元素を識別可能

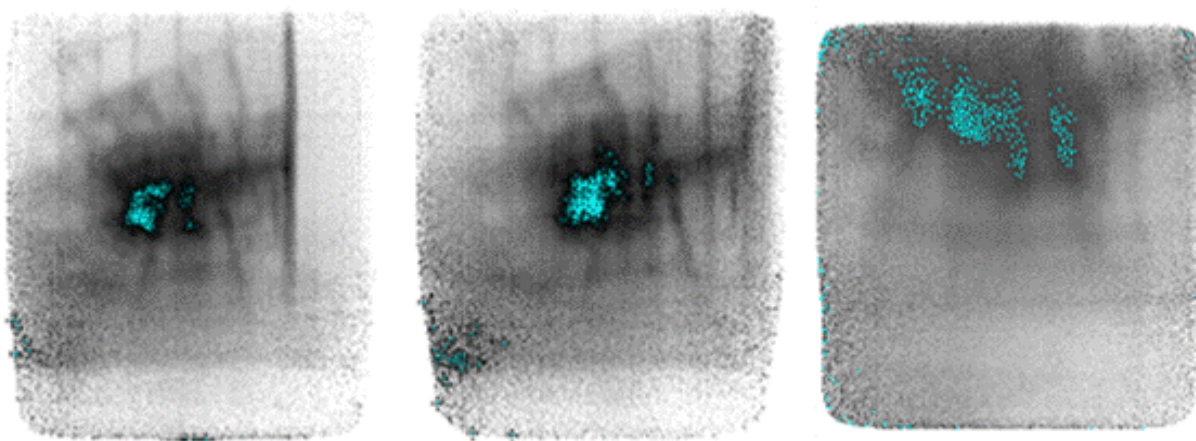
これまでの成果概要（ミュオン透過法）

日本原子力発電所(株) 東海第二原子力発電所にて、同規模の装置で測定

- 原子炉内には燃料がない
- 使用済燃料プールには燃料があるとの測定結果。



東海第二発電所での測定位置
(3地点)



検出器2-1

検出器2-2

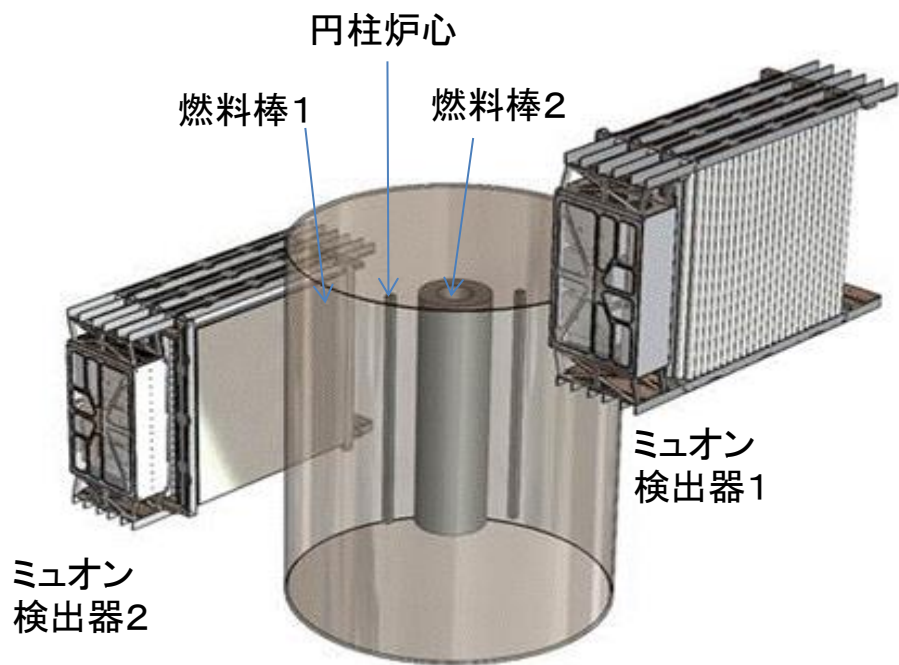
検出器3

各地点での測定結果

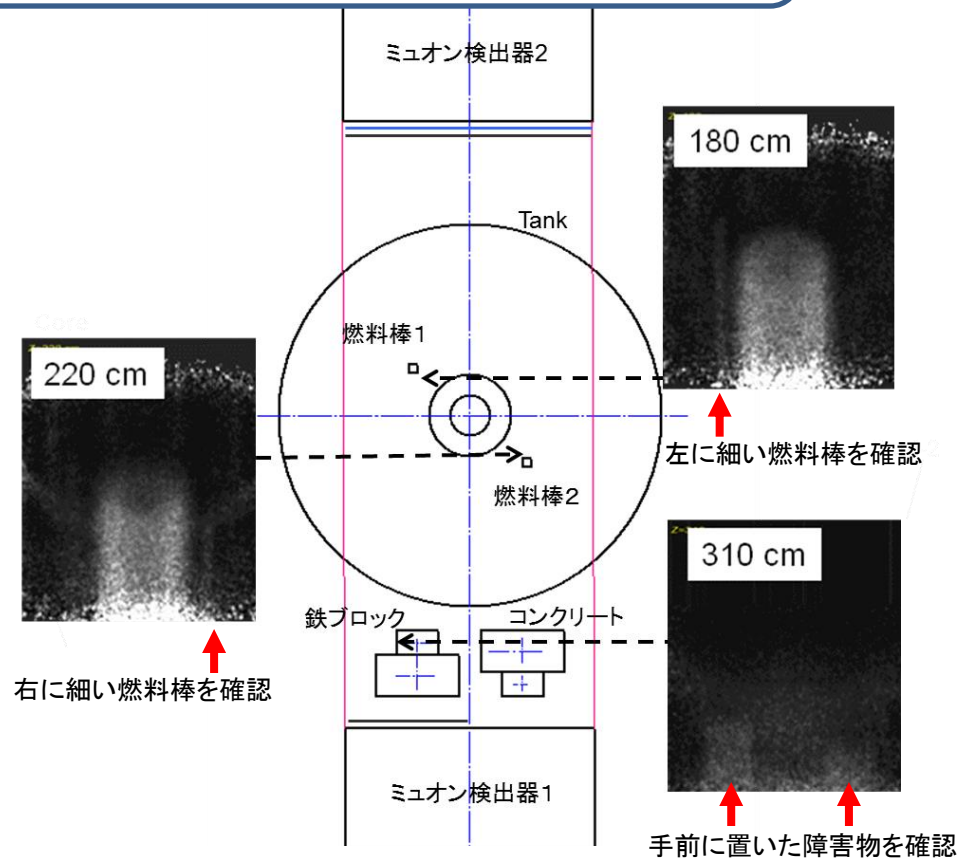
釣り鐘型の格納容器の外に密度の高い物質が存在

これまでの実績（ミュオン散乱法 1 / 3）

- 福島第一原発の1/10スケールの研究炉でウラン識別試験
- シミュレーションは実験値と3%以内で一致
- 福島第一原発で30~40cm識別能力の達成目途

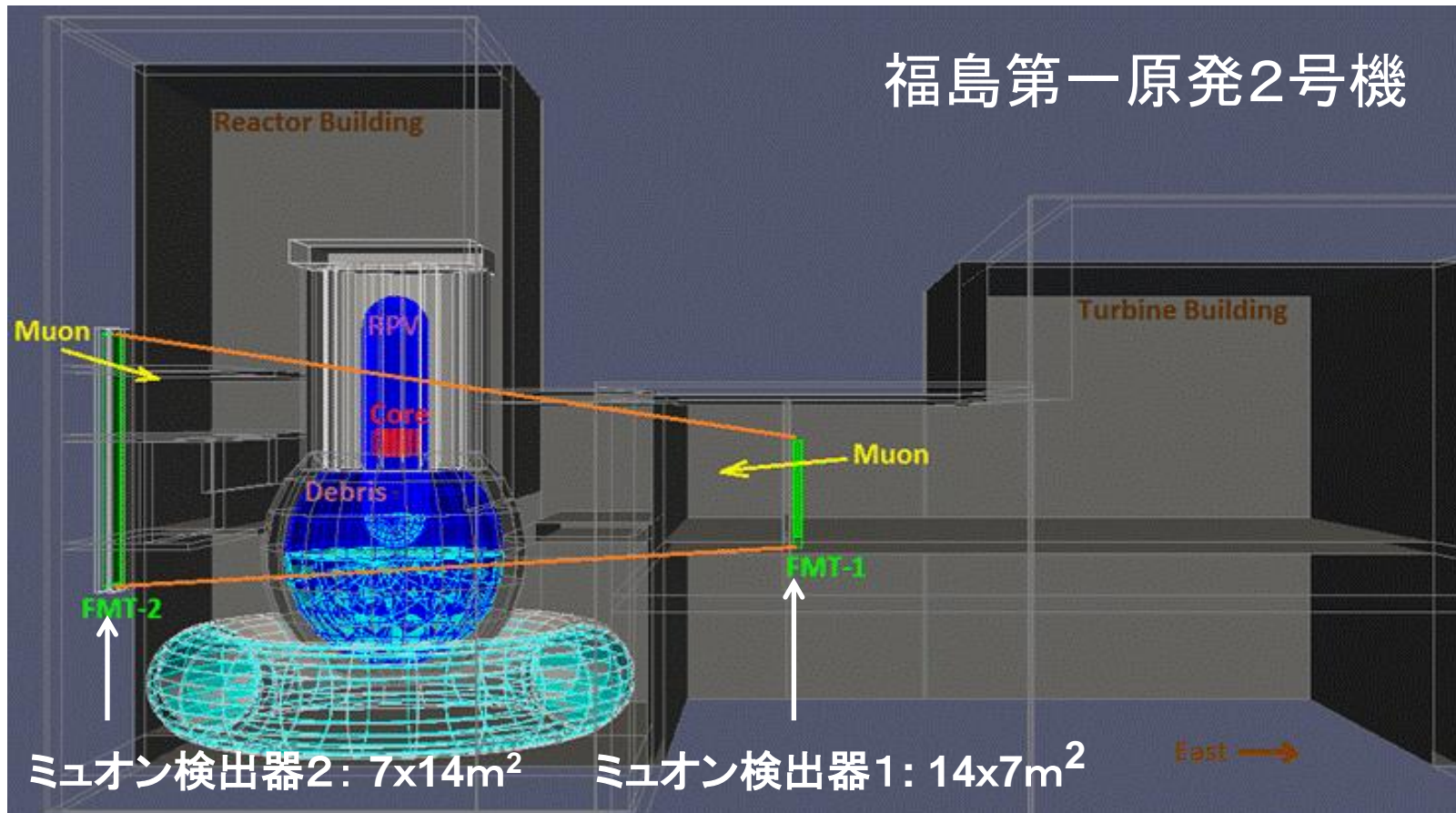


測定体系



3次元測定での各断面での画像

これまでの実績（ミュオン散乱法2/3）

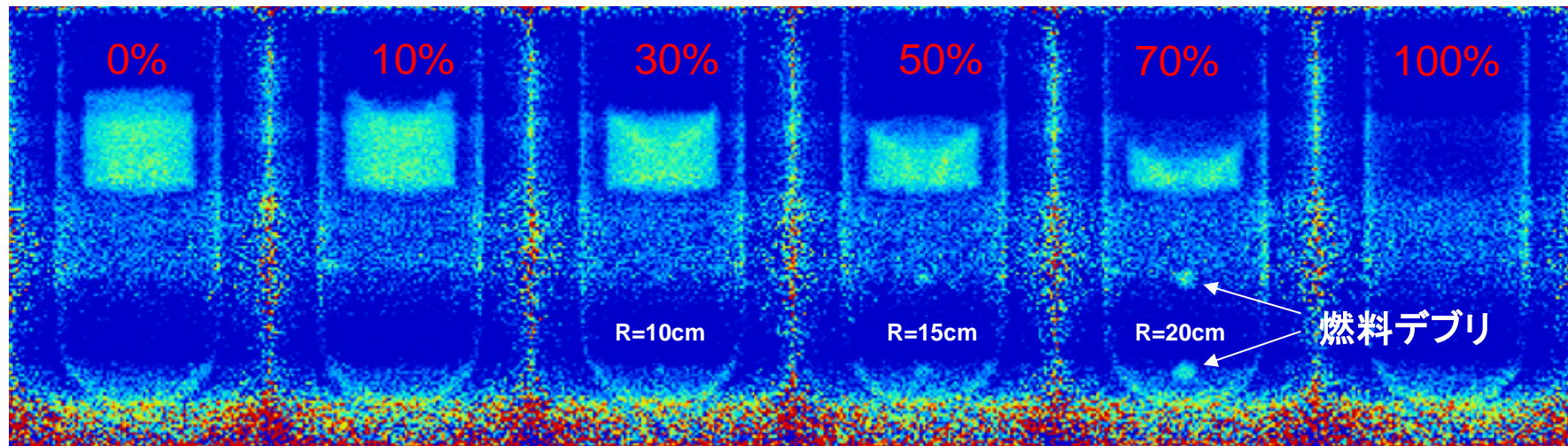


数値シミュレーションを2号機の実規模体系で実施

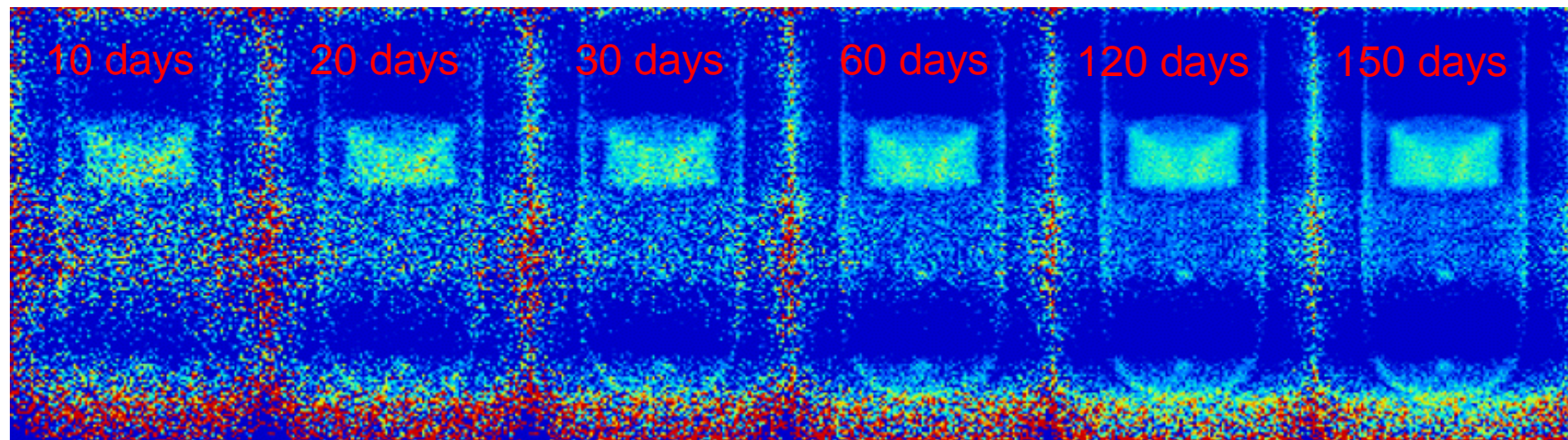
これまでの実績（ミュオン散乱法3/3）

0 ~ 100% 溶融炉心 模擬、90日測定.

(数値シミュレーション結果)



50%溶融炉心模擬, 10 ~ 150 日測定.



2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発
(2-①-7)

全体計画（目的と目標）

【燃料デブリ収納・移送・保管技術開発の目的】

1FではTMI-2と比較して以下に示すような条件に相違がある

- 1F-1～3の燃料デブリはRPV下部、PCV内に存在。位置や性状が不明。
- 建屋内は高線量で、人のアクセスが困難。
- 燃料は、TMI-2より燃焼度・濃縮度が高く、収納・移送・保管条件が厳しい。
- 炉内への海水注入により、腐食の進行も懸念。

TMI-2では専用の収納缶を開発、収納缶を使用して燃料デブリの収納・移送・保管作業を実施。収納作業は、RPV上部に作業台を設置、炉内で収納缶に燃料デブリを収納。

本研究は、1F燃料デブリの収納・移送・保管技術の開発として、TMI-2の実績等を参考に、1Fの状況にあった燃料デブリ収納缶及び収納缶取扱い技術の開発を行う。

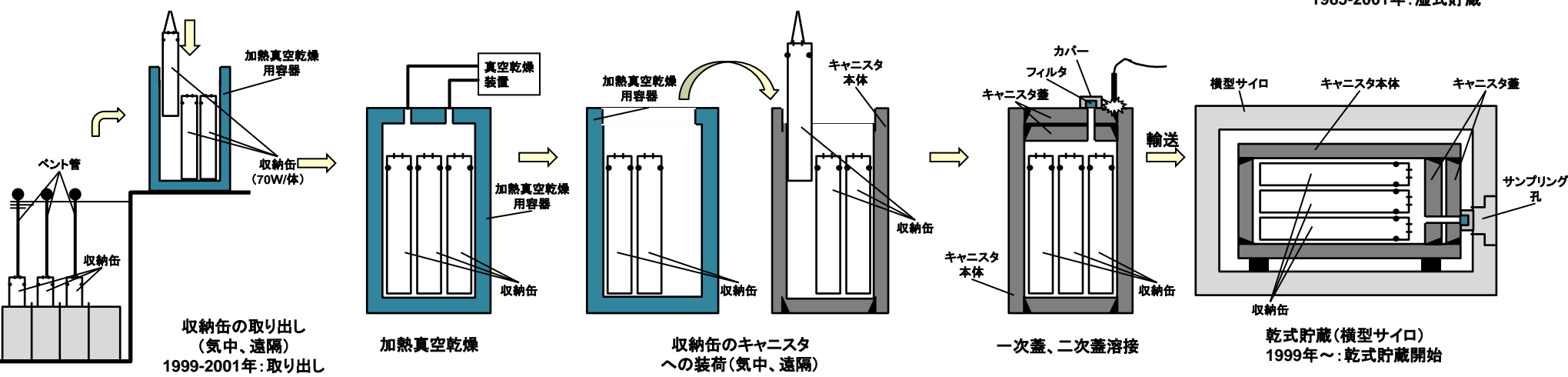
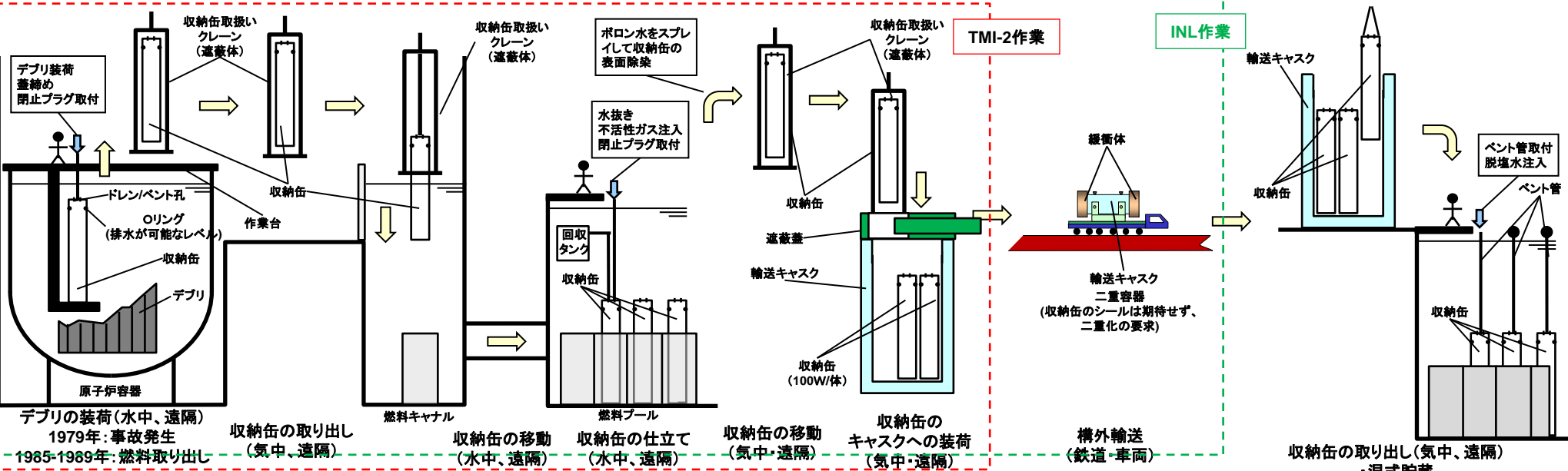
【開発の目標】

1F実施計画に基づき、燃料デブリ取出しは、臨界未満に維持、安全な取出し、飛散防止、適切な遮へい、冷却、貯蔵、作業員及び敷地内外の安全確保が求められる。

- 1F燃料デブリの収納・移送・保管に適した収納缶の要求仕様を設定、収納缶材料を選定
- 燃料デブリ収納缶の安全性に関する評価手法を開発
- モックアップ試験用収納缶を設計・製作し、燃料デブリ取出しのモックアップ試験に供する

破損燃料移送・保管に関する調査（1）

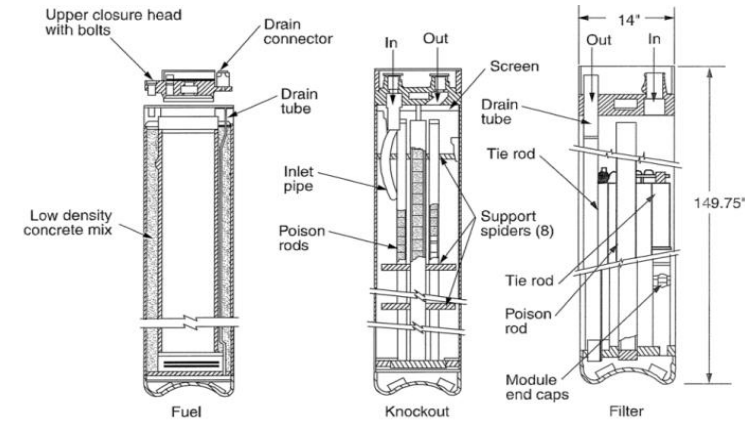
（TMI-2燃料デブリ処理の概要）



破損燃料移送・保管に関する調査 (2)

破損燃料移送・保管に関する調査結果の概要

| | TMI-2事例 (燃料デブリ移送) | TMI-2事例 (燃料デブリ保管) | Paks事例 | 仏破損燃料輸送 | |
|--------------|-------------------------------|--|--|--|----------|
| 収納物 | 燃料デブリ (燃料が溶融) | 同左 | 被覆管の破損 (燃料溶融なし) | ピンホールリーク | |
| 湿式・ 乾式 | 半乾式(排水のみ実施し、 乾燥処理は行っていない。) | 乾式 | 湿式 | 乾式 | |
| 収納缶 の有無 | 収納缶使用 | 収納缶使用 | 収納缶使用 | 収納缶なし(健全燃 料と同様に輸送) | |
| 基本的な 安全設計 | 閉込め | 収納缶は湿式保管中、発生した水素は、蓋のスクリーンフィルタを経由して常時ベントする構造 収納缶の移送容器(キャスク)は密封構造とし、水素再結合触媒で水素発生量を管理した。 | 収納缶は密封機能なし。発生した水素はキャニスタに設けられたHEPAフィルタを経由してベント | 収納缶は使用していない キャスクは輸送期間中の水素濃度を解析評価。輸送前に水素濃度を測定。 | |
| | 遮蔽 | 遮蔽は周辺機器で担保し、収納缶自体の肉厚は構造等の要素で決定 | 同左 | 同左 | キャスクで担保 |
| | 臨界 | 収納缶内は最適減速の保守的設定(収納缶に収容する燃料デブリは燃料集合体1体以下と設定し、運用でも管理) | 最大濃縮度の新燃料が最大容量まで収納された収納缶を、キャニスタに12本装荷した条件で臨界評価を実施。 | 収納缶内は最適減速の保守的設定 | 健全燃料と同じ |
| | 除熱 | 収納缶当たりの最大収納量で評価 | 同左 | 除熱容量のみ記載(詳細不明) | 健全燃料での評価 |



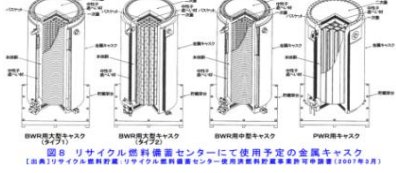
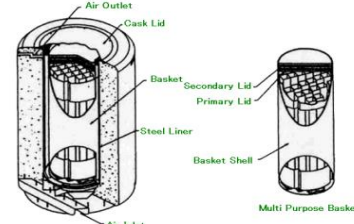



米TMI-2で使用された燃料デブリ用収納缶事例(参考)
 出展: DOE/SNF/REP-084 TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis(2013)より



米TMI-2燃料デブリの保管システム(参考)
 出展: Andrew P. Szilagyi, Three Mile Island Unit 2 Overview and Management Issues, OECD-Nuclear Energy Agency – 12th Meeting of the WPDD, France(2011)より

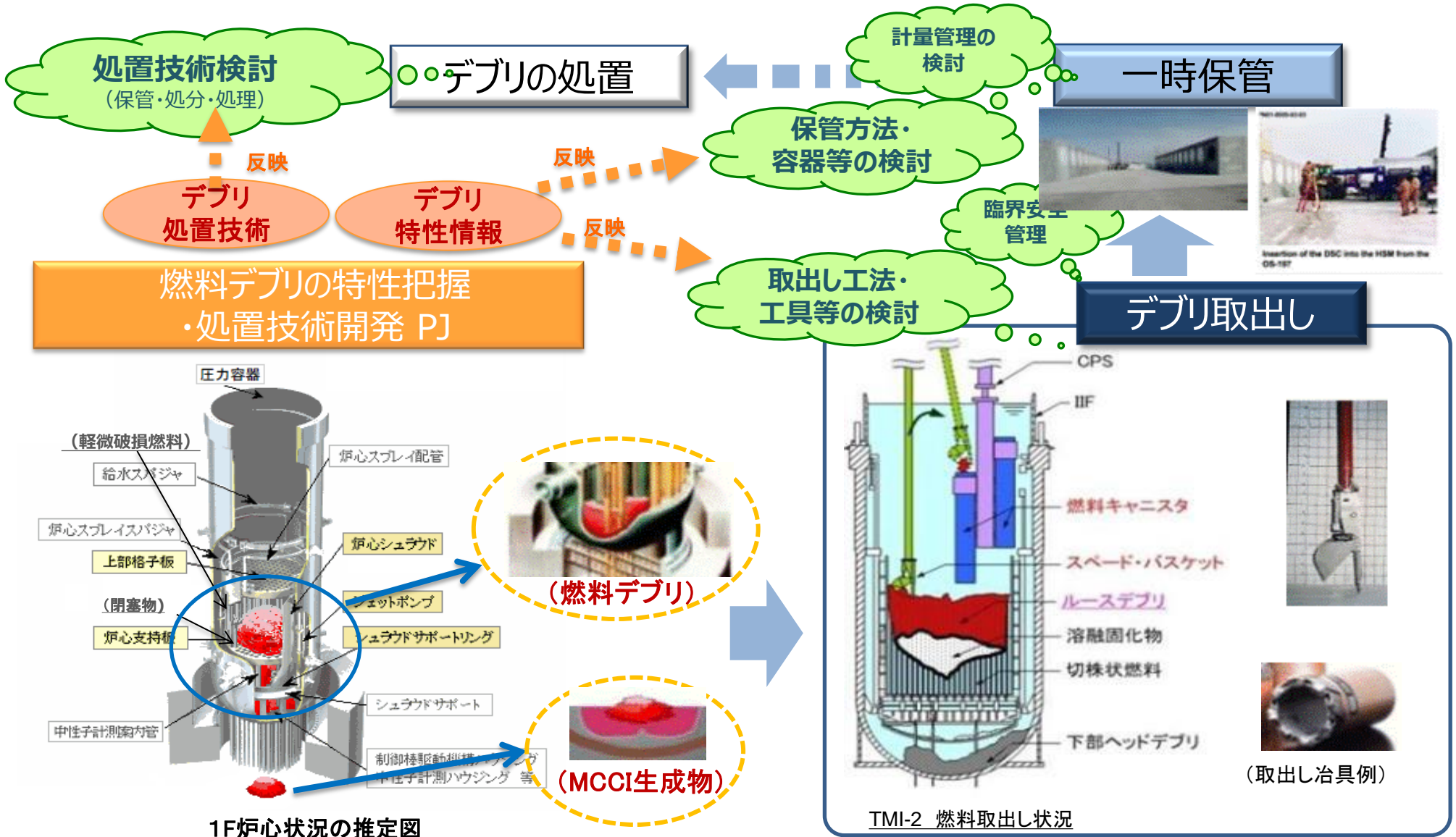
保管システムに関する検討

| 保管方式 | 湿式 | | 乾式 | | |
|---------|---|--|--|--|--------------------------|
| | プール方式 | 金属キャスク方式 | コンクリート遮蔽式(横型サイロをふくむ) | ポルト方式 | |
| 概要図 |  |  リサイクル燃料貯蔵(株)HPより  |  図13 横型サイロおよびコンクリートキャスクの概念 <small>(出典)藤下拓也、三枝利有、伊藤千浩、小松達一、吉村英二、海外圏における使用済燃料中間貯蔵技術の動向、日本原子力学会誌、Vol.42、No.11、72(2000)</small> |  Jenny Morris, Contingency Options for the Dry Storage of Magnox Spent Fuel in the UK, ICEM 09/DECOM(2009) | |
| 安全機能の担保 | 密封 | ・プール水及び原子炉建屋 | ・一次蓋、二次蓋の金属ガasket方式 | ・キャニスタの一次蓋、二次蓋の溶接構造 | ・同左 |
| | 遮蔽 | ・プール水及び原子炉建屋 | ・金属キャスク本体(鋼、中性子遮蔽材等の組み合わせ)及び建屋 | ・コンクリートキャスク本体(鋼、コンクリートの組み合わせ) | ・建屋(コンクリート) |
| | 臨界防止 | ・燃料ラックの幾何学的配置(必要に応じて燃料ラック材料) | ・金属キャスクバスケットの幾何学的配置(必要に応じてバスケット材料) | ・キャニスタやバスケットの幾何学的配置(必要に応じてバスケット材料) | ・同左 |
| | 除熱 | ・プール水による循環冷却 | ・金属キャスク表面の自然冷却 | ・キャニスタ表面の自然冷却 | ・同左 |
| 長所 / 短所 | 輸送対応 | ・収納物を輸送用キャスクへ収納する必要あり | ・輸送・貯蔵兼用キャスクが開発されておりキャスクをそのまま輸送可能。 | ・キャニスタを貯蔵用キャスクから輸送用キャスクに詰替える必要あり(輸送・貯蔵兼用キャスクを使用する例もある) | ・キャニスタを輸送用のキャスクに収納する必要あり |
| | 点検等の容易さ | ・収納物はそのまま水中保管されているので取出や状態確認等が容易 | ・収納物がキャスクに収納されているため収納物の確認は、プール/ホットセル等で行う必要がありプールより不利。 | ・収納物が溶接封入されたキャニスタに収納されているうえ、収納物の確認は、プール等で行う必要がある。 | ・同左 |
| | 必要面積 | ・貯蔵密度が高く設置面積を小さくできる可能性がある。 | ・貯蔵密度はプールより低い。 | ・貯蔵密度は金属キャスクより低い。(保管のための設置面積が大きい。) | ・貯蔵密度は金属キャスクより高い。 |
| | 拡張性 | ・容量拡大は建屋新設等が必要で大掛かり。 | ・費用の多くを占めるキャスク増設で対応できるため少しずつの拡張が可能 | ・同左 | ・容量拡大は建屋新設等が必要で大掛かり。 |
| | 維持費 | ・冷却の継続や水質管理が必要で割高 | ・電装品等の維持作業のみで、割安。 | ・同左 | ・同左 |
| | 法令整備 | ・国内実績があり法令等が整備済 | ・同左 | ・海外実績はあるが国内実績はなく法令整備が課題 | ・同左 |

2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ
処置技術の開発 (2-③-1, 3)

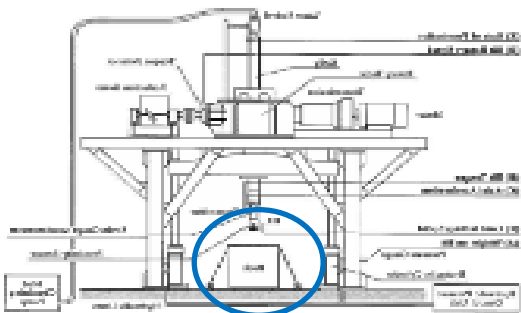
燃料デブリ特性把握プロジェクトの概要



燃料デブリ性状把握の目的

デブリ取出し装置開発 注)

(注: デブリ取出しPJ側で試験実施)



(掘削要素試験のイメージ)



コールド試験体
コールド試験体

・切削性・穿孔性への影響を検討。
・物性データの情報を総合し、コールド模擬試験体の製作へ反映

デブリ取出しPJ
反映先:
・デブリ取出し工法検討
・取出し治具の開発、他

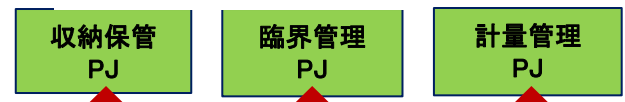


コールド模擬試験体の検討

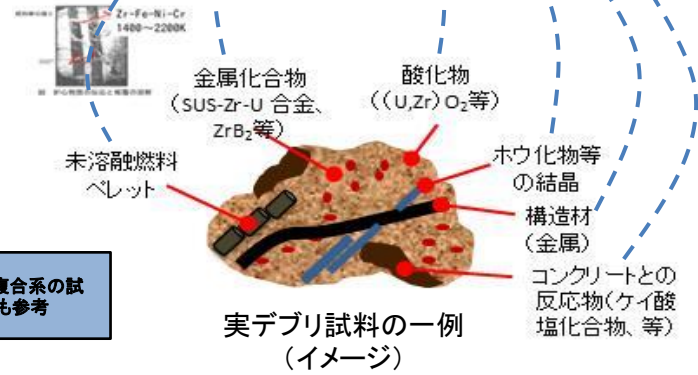
デブリ物性情報

カザフでの複合系の試験結果も参考

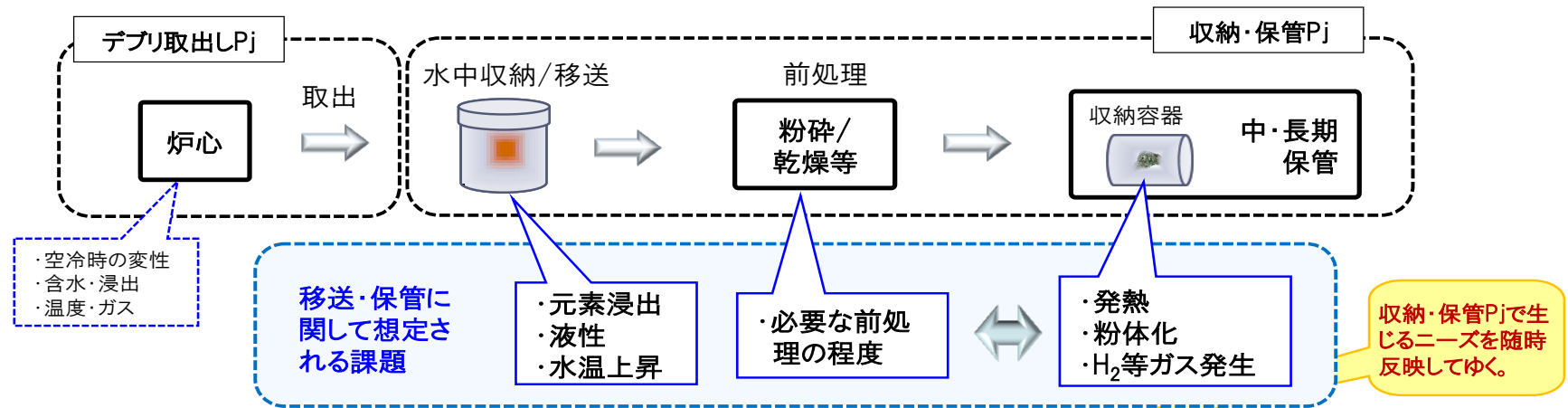
(その他のPjへの物性情報の反映)



<模擬デブリによる特性把握>
(物性データ)
・機械特性: 硬度、弾性率、破壊靱性、等
・熱的特性: 融点、熱伝導率、比熱、等
・その他: 粒径、形状、空隙率、密度、化学形、等
個々の部位についての物性情報を収集



燃料デブリ処置技術開発の目的



□ 収納・保管pjでの懸念事項→ニーズ

| 項目 | カテゴリー |
|------------------------|--------|
| 燃料デブリへの水の吸収量 | 含水・脱水 |
| 常温で乾燥させた場合の水の放出量 (速度) | 含水・脱水 |
| 加熱して乾燥させた場合の水の放出量 (速度) | 含水・脱水 |
| 浸水時の放射性物質の溶出量 (速度) | 変性(水中) |
| 浸水時のハロゲン元素の溶出量 (速度) | 変性(水中) |
| 大気中保管時の放射性物質の放出量 | 変性(気中) |
| 真空中の放射性物質の放出量 | 変性(気中) |

適宜、現場作業や他Pjの進捗に応じてニーズを反映してゆく。

【検討内容】

- ・ 課題・懸念事項に影響する因子の評価
- ・ 評価方法の検討(試料、パラメータ、評価項目)
- ・ 既知の文献情報、一般産業界の類似例の調査

【開発項目】・・・現状で想定される開発課題

- ➔ 含水・脱水挙動評価 (形状既知の試料による評価)
- ➔ 水中での浸水・特性評価 (使用済燃料の浸水試験等の結果参照、あるいはホット試験)
- ➔ 気相中での変性試験

デブリPj(H26年度)

(2-③-1, 3) 模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発

燃料デブリ取出し技術の検討に向けて、実際のデブリの性状を推定するため、それを模擬した材料（模擬デブリ）を作製して硬さ等のデータを取得した。また、燃料デブリ取り出し後の処置シナリオを検討するため、既存の燃料処理技術の適用性や技術課題を抽出し、取りうる選択肢を比較して、得失を明らかにした。

実施内容

デブリ特性の把握 (2-③-1)

① 燃料デブリの取出し技術開発に必要な物性値の検討

- 種々の模擬材について、切削性への硬さ等の影響度を把握した。
- 炉内の金属部材の混入を想定し、高Zr領域の(U,Zr)O₂や、Fe含有模擬デブリの機械的特性の測定、測定値の化学系毎の物性分布推定への反映等を行った。

② 1F事故に特有な反応の把握

- 制御材との反応で、合金相やホウ化物が生成する可能性を確認した。また、コンクリートとの反応（MCCI）で、酸化物（ガラス質）と合金層が分離する傾向を確認。最も硬い物質はホウ化物と推定された。
- 一部の燃料に含まれていたGdについて、それが酸化物模擬デブリ（(U,Zr)O₂）の熱物性に与える影響とその範囲を確認した。

③ 実デブリ特性の推定

- 上記の結果から、デブリの特性リスト（暫定版）を作成した。

デブリ処置技術の開発 (2-③-3)

① 燃料デブリ処置シナリオ検討に向けた技術的要件の整理

- 取出し後の燃料デブリの処置シナリオについて、各選択肢を比較し、得失を明らかにした。
- 既存の使用済燃料輸送容器の適用性を評価した。また、保管に影響する燃料デブリの含水性等の重要度が高いと判断した。

② デブリの分析に係る要素技術検討

- MCCI生成物を含む各種模擬デブリについて、分析の前処理技術である融解プロセスの基礎データを取得した。

③ 既存燃料処理技術の適用性検討

- 模擬デブリの、湿式及び乾式処理への適合性について、基礎データを取得した。

(2-③-1) 模擬デブリを用いた特性の把握（研究開発の進め方）

検討方針

- 最新の1Fプラントデータや事象進展解析の結果を反映して、炉内デブリの化学形等を推定。
- 適宜、現場やデブリ取出しPjと情報交換し、ニーズに合わせて項目を見直す。(②～⑤でも同様)
- 現在、調整中の他Pj(収納保管、臨界安全、計量管理)ニーズを踏まえて必要な項目を見直す。
- 国際的な知見(SA研究、TMI-2等)を反映する。

- 主要な工法(穿孔など)に対して、影響の大きな物性を検討し、工法に応じた模擬デブリの選定基準となる物性を検討する。
- 模擬デブリを用いて、主要なデブリ材料について機械的物性データを取得する。
- 組成や不純物の影響などを含めた幅広いデータを取得する。
- 早期に多くのデータを必要とすることから、種々の可能性を考慮し前もって幅広いデータを取得。

- 模擬デブリを用いて、1F特有の反応の影響を評価する。
- 炉内の状況などについては並行して解析が進められているため、種々の可能性を考慮し前もって幅広いデータを取得。

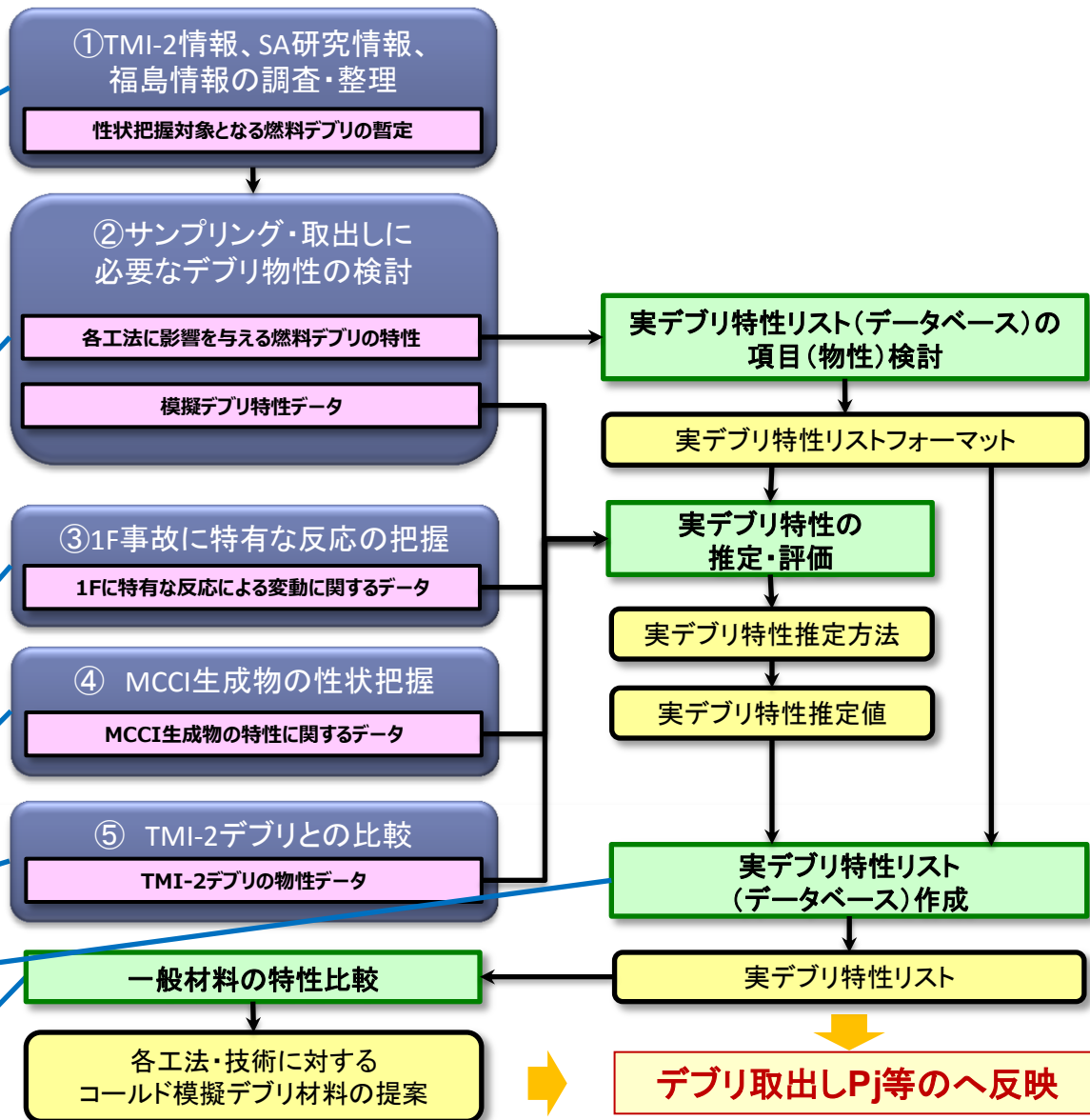
- 海外知見や国際協力を有効に活用し、MCCI現象及び生成物に関する情報を入手する。

- TMI-2デブリを用いて物性データを取得する。

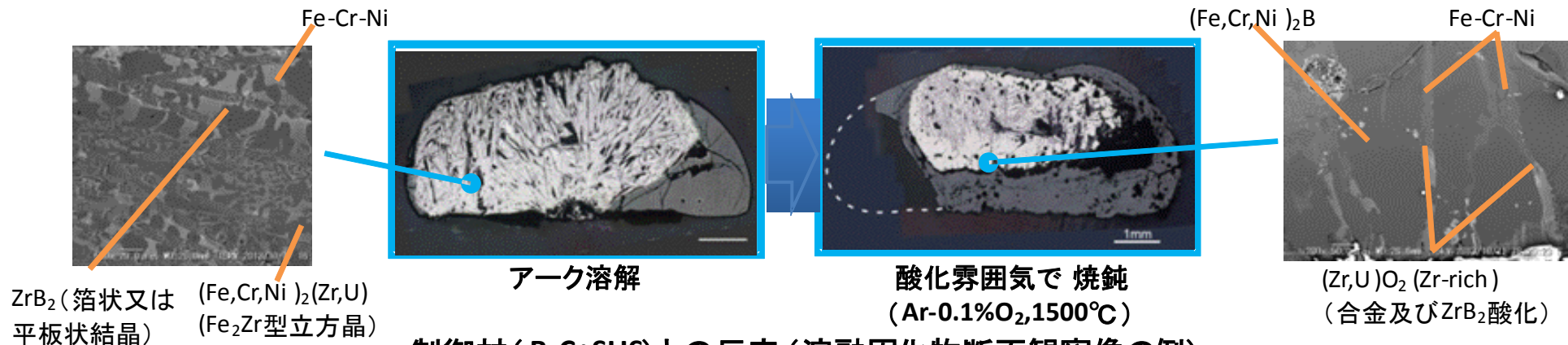
- 取得したデータ・情報を基に実デブリ特性を推定し、特性リストとして取りまとめる。

- 影響の大きい特性が類似する一般材料を選定し、各工法・技術に対するコールド模擬デブリ材料を提案する。

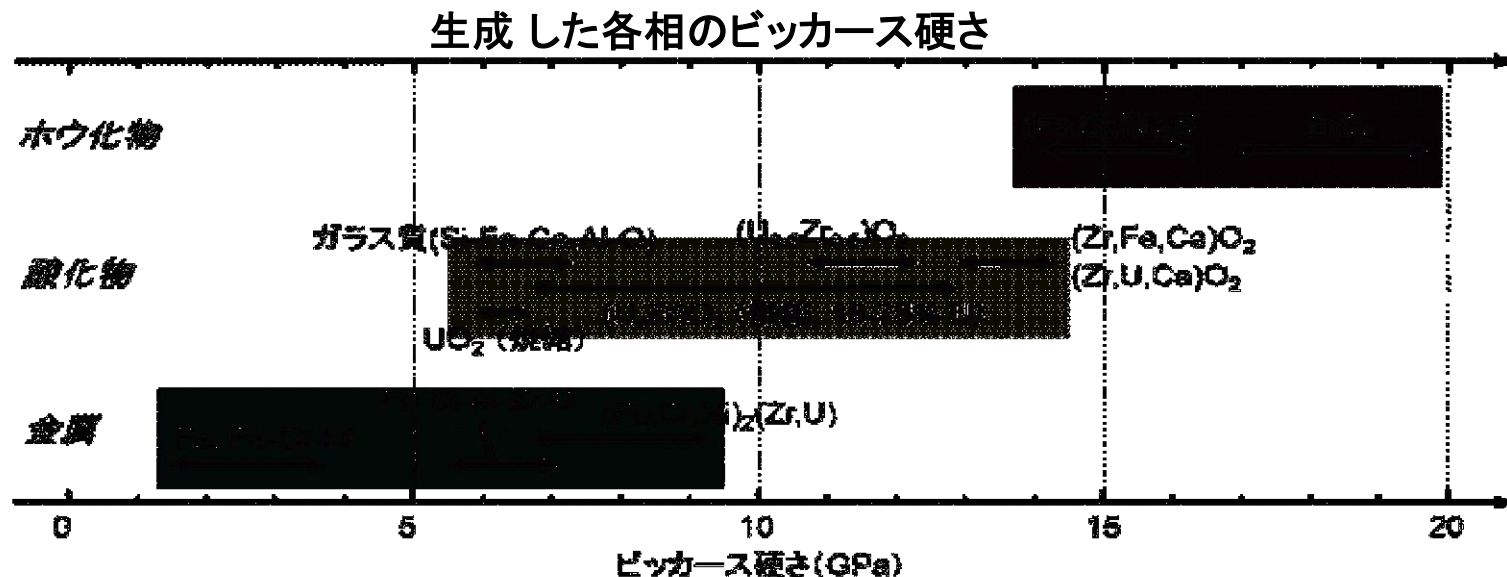
検討の進め方



(2-③-1) 模擬デブリを用いた特性の把握 (平成25年度成果)



制御材 (B₄C+SUS) との反応 (溶融固化物断面観察像の例)
(制御棒と燃料が溶融した場合にできる固化物の組織等に係る知見を取得)



(デブリの化学系 (ホウ化物、酸化物、金属) 毎に硬度の分布を推定)

(2-③-1) 模擬デブリを用いた特性の把握 (平成26年度計画) — 金属セラミックス溶融固化体製作及び特性評価 —

- 取出し機器に対して加工が困難と想定される金属/セラミックス不均一溶融固化体を製作し、機器開発用モックアップ体製作のための材料特性を試験評価し、モックアップ体製作方法を策定する。

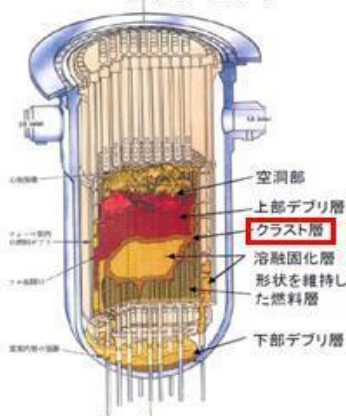
【主要成果】

- 金属とセラミックスの境界部などのマクロ・ミクロ観察、化学分析、硬さ、破壊靱性等のデータを取得。

背景

TMI-2: 金属/セラミックス固化したクラスト層形成^[1,2]
 ⇒ 靱性の高い金属 + 硬くもろい酸化物の複合により
 破碎や切断が困難
 ⇒ 1Fでは溶融燃料が落下して金属製構造物を一部溶融させた後固化し、酸化物と金属の混合固化物の生成が推定
 ⇒ 不均一な複合物の性状を把握する必要がある

TMI-2のデブリ分布



クラスト層
 - 金属+セラミックス不均一固化



金属部 UO₂
 断面マクロ組織

実施方法

(1) 金属/セラミックス溶融固化体製作試験

溶解したUO₂ + Zr混合物 (60kg) をステンレス鋼製構造物に落下。
 金属とセラミックスが不均一に急冷固化した溶融固化体を製作。

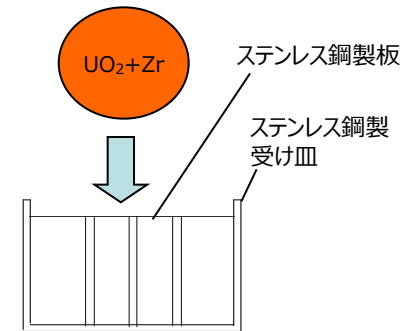
(2) 材料評価

金属とセラミックスの境界部およびその周辺に着目し、断面マクロ・ミクロ観察、化学成分分析、硬さ、破壊靱性測定を実施。

(3) 金属/セラミックス溶融固化モックアップ体設計

機器開発用モックアップ体の材料選定、設計を行い製作仕様を策定。
 現有知見に基づく1Fデブリ性状の推定結果から製作条件を設定。

デブリ取出しへ反映



試験体系

2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

燃料デブリの臨界管理技術の開発 (2-①-9)

全体計画（目的と目標）

【 臨界管理技術開発の目的 】

現状の燃料デブリは臨界になっていないと考えられるが、今後の燃料取り出し作業等に伴いデブリ形状や水量が変化した場合でも再臨界を防止するために、臨界管理手法及びモニタリング技術を開発する。

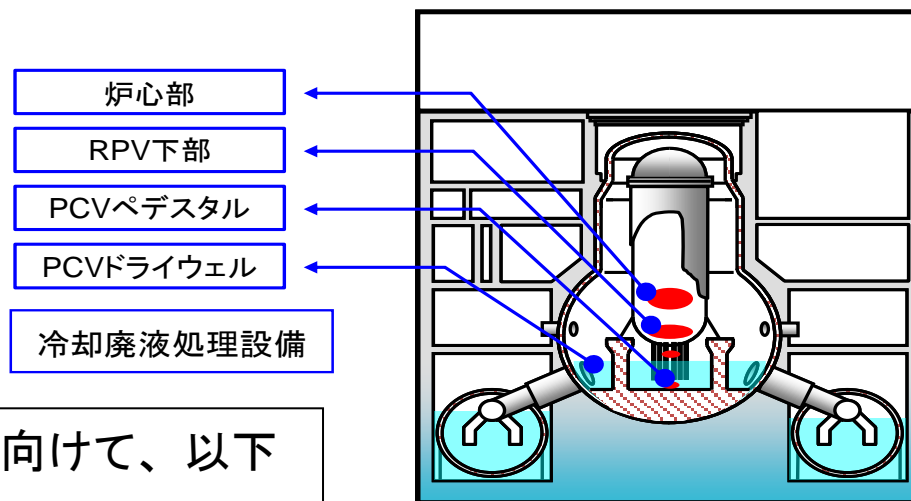
【 臨界管理技術開発の目標 】

燃料デブリは、RPVを経由してPCV内に存在すると推定されている。廃液処理及び冷却設備への流出まで想定した臨界評価およびモニタリング技術の開発、および、燃料デブリ取出し時の再臨界防止のための中性子吸収材開発を目標とする。



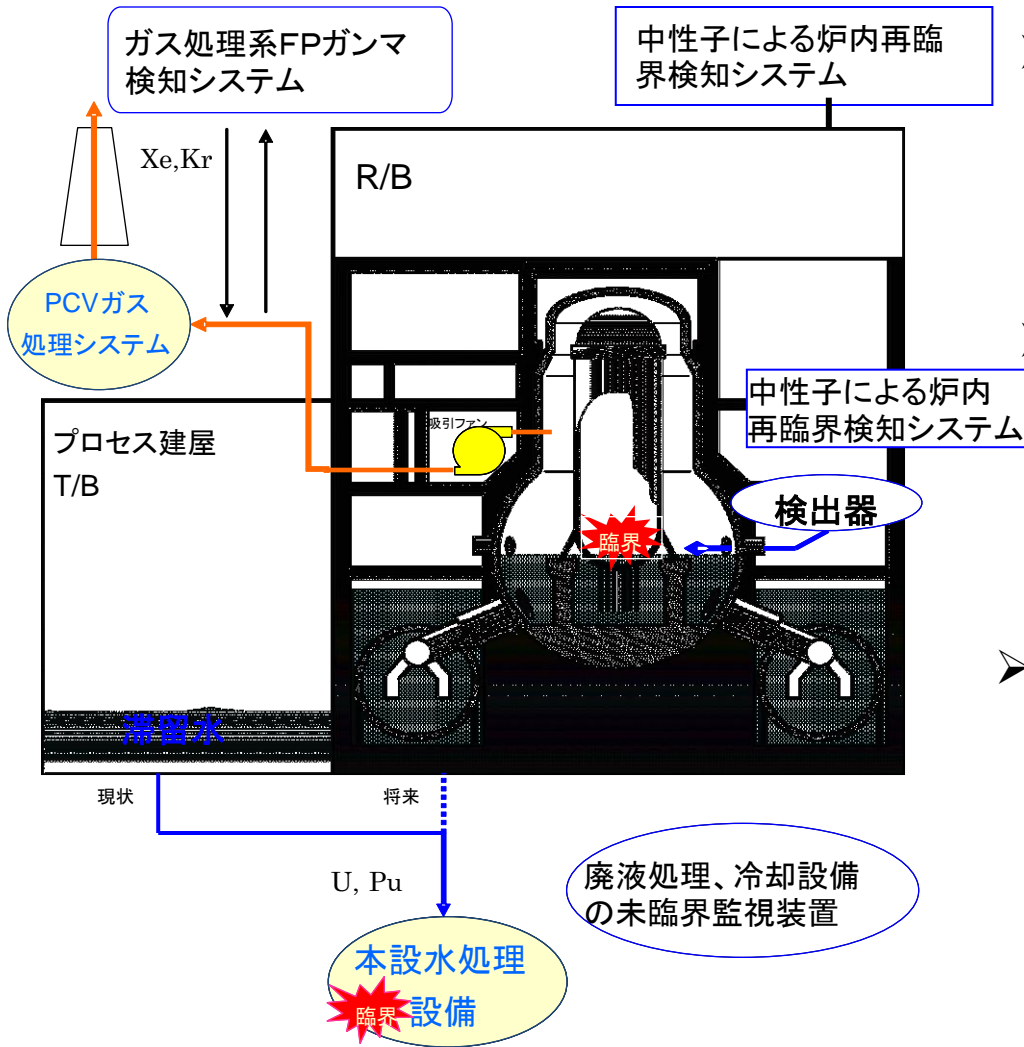
ロードマップ：2020上半期の燃料デブリ 取出しに向けて、以下の開発を実施する。

- ①臨界評価技術の開発
- ②廃液処理・冷却設備未臨界管理技術開発
- ③炉内の再臨界検知技術の開発
- ④臨界防止技術の開発



想定される燃料デブリの位置

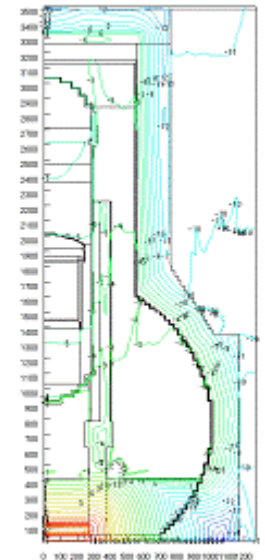
未臨界監視および再臨界検知の概要



➤ PCV内部と外部で臨界管理の要求は異なるため、目的に応じて未臨界監視と再臨界検知を使い分ける。
(デブリ取出し前の段階を想定)

➤ PCV外部の廃液処理、冷却設備においては、設備をメンテナンスする作業員の臨界による被ばくリスクを未然に防ぐ必要がある。
=>未臨界監視

➤ PCV/RPV内部において臨界になった場合、直接放射線はPCV壁外側に届かないため、被ばくリスクは極めて小さい。一方、比較的広い範囲の状況を監視することが重要である。
1
=>再臨界検知



PCV内臨界時の中性子線分布

炉内の再臨界検知技術の開発

開発目標: RPV内又はPCV内において燃料デブリが再臨界となった場合を検知するため、中性子およびFP γ 線による再臨界検知システムを開発する

H25年度開発成果 [中性子による再臨界検知システム]

- ・再臨界検知システム仕様の検討
 - RPV内又はPCV内において燃料デブリが再臨界となった場合に、放出される中性子を検知するシステム仕様策定
 - PCV内外の中性子線量分布解析結果に基づき、PCV内設置を前提として
 - ・検出器選定 (^{10}B 比例計数管、原子炉用核分裂電離箱)
 - ・システム設計実施、システム試作、成立性確認試験
 - ^{10}B 比例計数管の耐 γ 線試験、システム試験により成立性を評価 [産総研施設活用]
- ➡ H25年度で開発完了。水張り時の臨界検知性能を評価し、臨界管理手法に活用。

H25年度開発成果 [FP γ 線による再臨界検知システム]

- ・検知時間短縮のため、監視対象核種として現行のXe-135に加えKr-87/88を測定可能とする。
- ・Kr-87/88は設置場所で濃度が大きく異なるため、条件毎に最適システム構成を検討
- ・Kr-87/88測定時にもXe-135(従来測定核種)を同時に測定できることを確認
- ・感度向上の一方式である同時計数の効果を検証
- ・1F-1自発核分裂推定濃度に基づいて、推奨システム構成を検討
 - ・水張り時間の短縮効果の評価
 - ・Kr/Xe比を用いた未臨界度推定法の検討
 - ・臨界管理手順への組み込み検討

臨界防止技術の開発

開発目標

- ・燃料デブリ取り出しの際に再臨界を防止するための手段として、溶解性および非溶解性の中性子吸収材を開発する。

H25年度開発成果 [非溶解性中性子吸収材]

- ・候補案(吸収材、バインダ)の基礎的特性試験項目検討
 - ・候補材の試作／調達。基礎的特性により燃料デブリ取り出し作業への適用性を評価。基礎特性、機械的・熱的特性に課題はなく、溶出特性から候補材スクリーニング。
 - ・今後の開発方針策定(耐放射線性確認試験計画立案)
- ➡ 耐放射線試験実施により第2次スクリーニング。デブリ取出し時の適用に向け、投入時の均一性担保のための適用工法を検討し、臨界管理手法に反映する。

H25年度開発成果 [溶解性中性子吸収材]

- ・溶解性中性子吸収材(五ホウ酸ナトリウムなど)適用に伴う各種課題整理、検討計画立案
 - 炉内の材料健全性(耐食性)に及ぼす影響検討、ガルバニック腐食試験追加内容抽出
 - ほう素、塩素混入に伴う水の放射線分解による水素発生への影響確認のための放射線照射試験(JAEA高崎研におけるガンマ線照射試験)実施。
 - 廃液処理手法における核種除去性能への影響、中性子吸収材の分離または回収方法の検討実施
- ➡ 追加腐食試験を実施し、溶解性吸収材適用方法を決定し、臨界管理手法へ反映
燃料デブリ収納缶などへの影響を評価する。

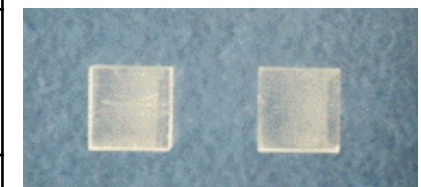
臨界防止技術の開発（例、非溶解性中性子吸収材）

溶出特性を踏まえた候補材スクリーニング結果

| カテゴリ | 中性子吸収材候補 | 耐放射線性能試験 | 方針 |
|-------|---|----------|----------------------------|
| 固体 | B ₄ C/金属焼結材 | 実施 | 必要に応じて、コスト等を踏まえて基材金属を選定 |
| | B、Gd入ガラス材 | 実施 | 溶出量の小さい亜鉛ホウ酸ガラスを選定 |
| | 中空ボロン | 保留* | 溶出特性の改善が必要（特定工法（水中漂流）の候補材） |
| | Gd ₂ O ₃ 粒子 | 実施 | |
| | セメント/ Gd ₂ O ₃ 粒子 | 実施 | |
| 液体→固体 | 水ガラス/ Gd ₂ O ₃ 粒子 | 保留* | 溶出特性の改善が必要 |
| 液体 | B ₄ Cゲル材 | 保留* | 溶出特性の改善が必要 |
| | スラリー/ Gd ₂ O ₃ 粒子 | 実施 | |

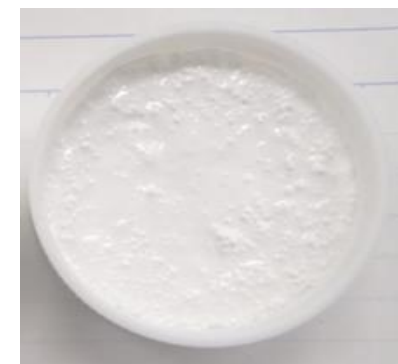


B₄C/金属焼結材



B・Gd入りガラス

10mm



スラリー/Gd₂O₃粒子

保留*: 特性改善が示された上で、耐放射線性能試験実施を判断

図 選定候補材例

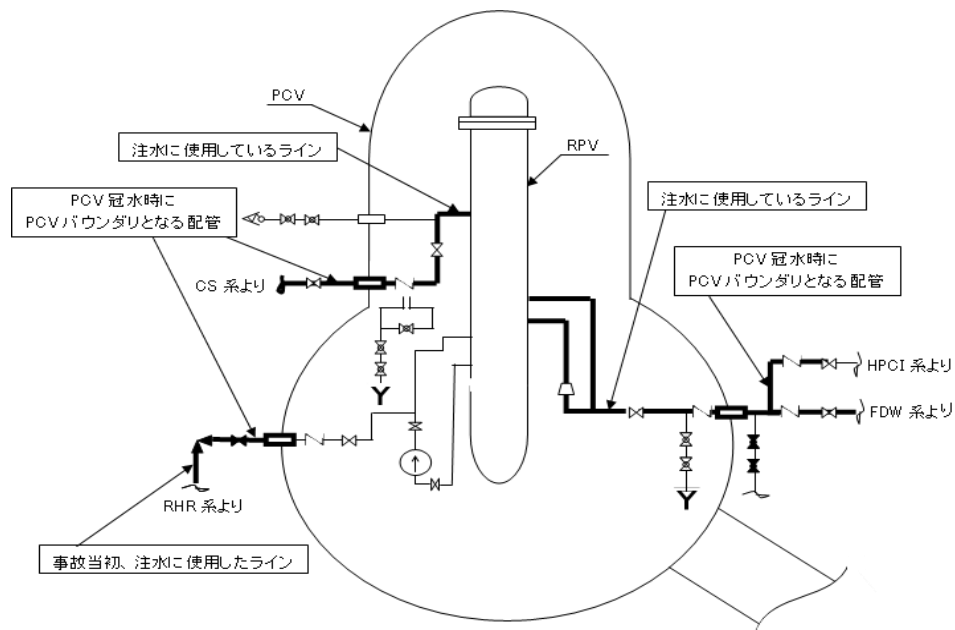
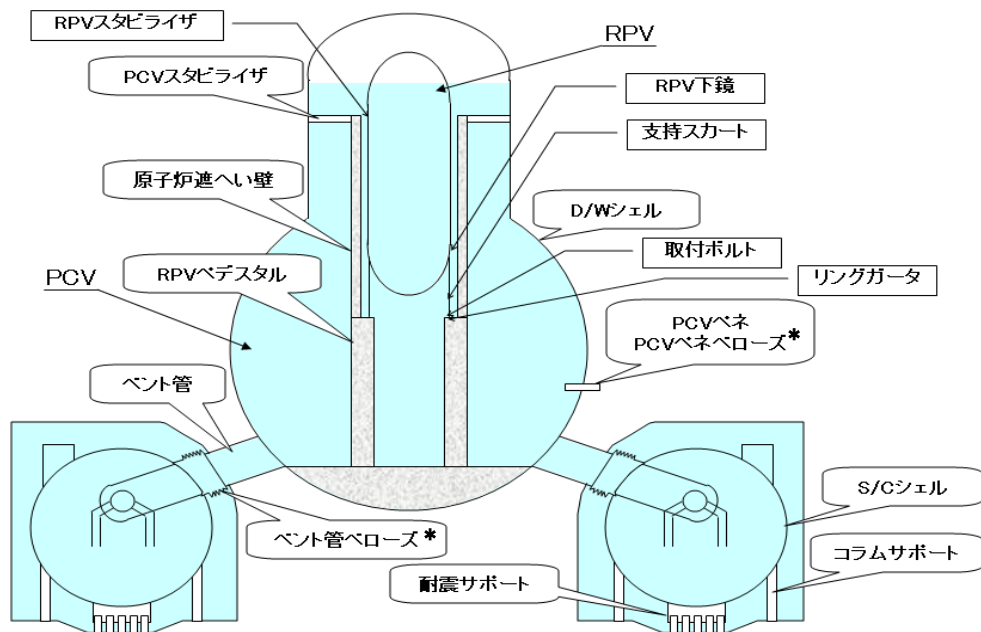
2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

圧力容器／格納容器の健全性評価
技術の開発 (2-①-8)

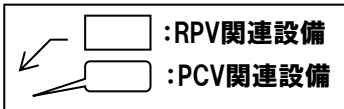
全体計画（目的と目標）

○シビアアクシデント後の1F原子炉圧力容器（RPV）／格納容器（PCV）、RPVペDESTAL及び原子炉注水配管について、腐食速度等に関する定量的データを取得し、長期間の腐食減肉を考慮した耐震強度評価を実施する。

○長期構造健全性確保のための腐食抑制策の検討と効果確認、実機適用性の評価を行い、燃料取り出しまでの機器健全性維持に資する。



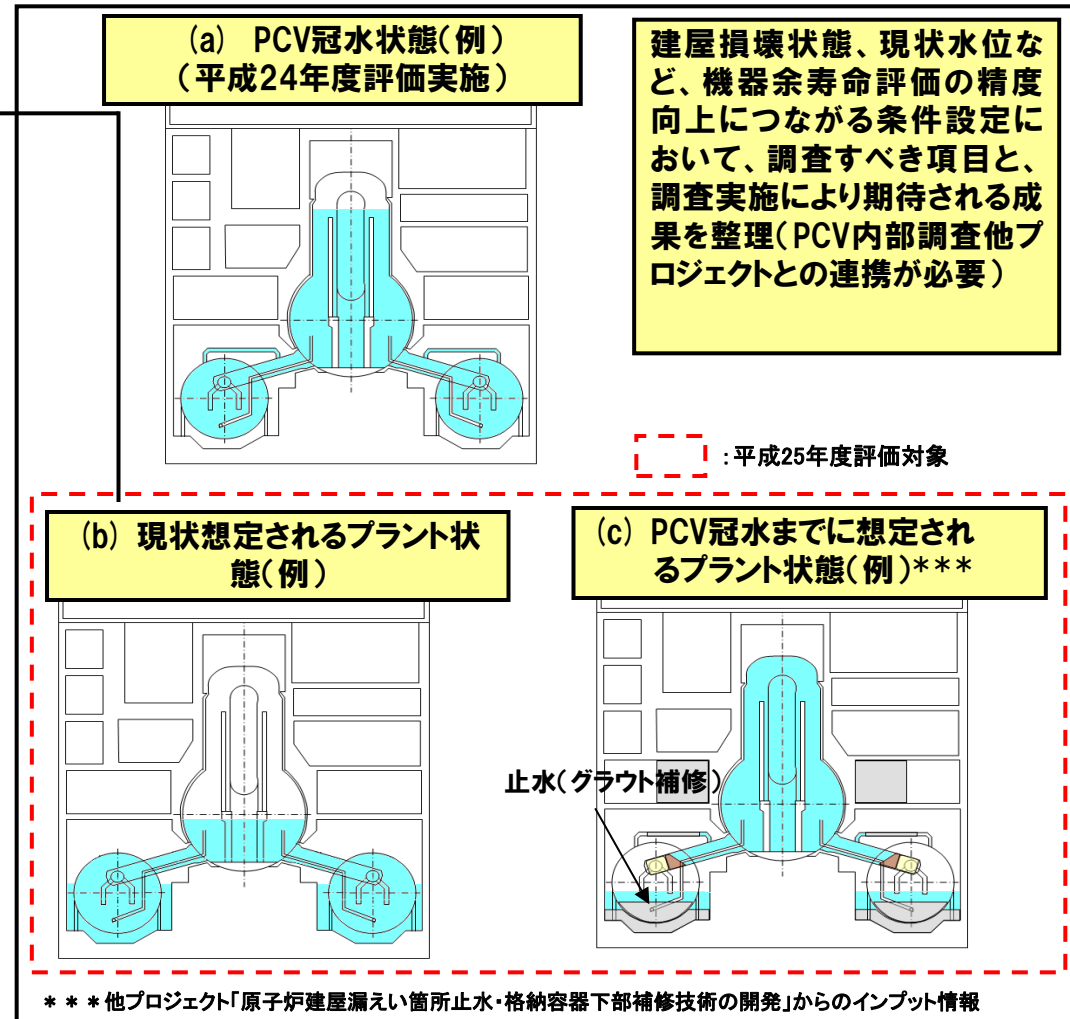
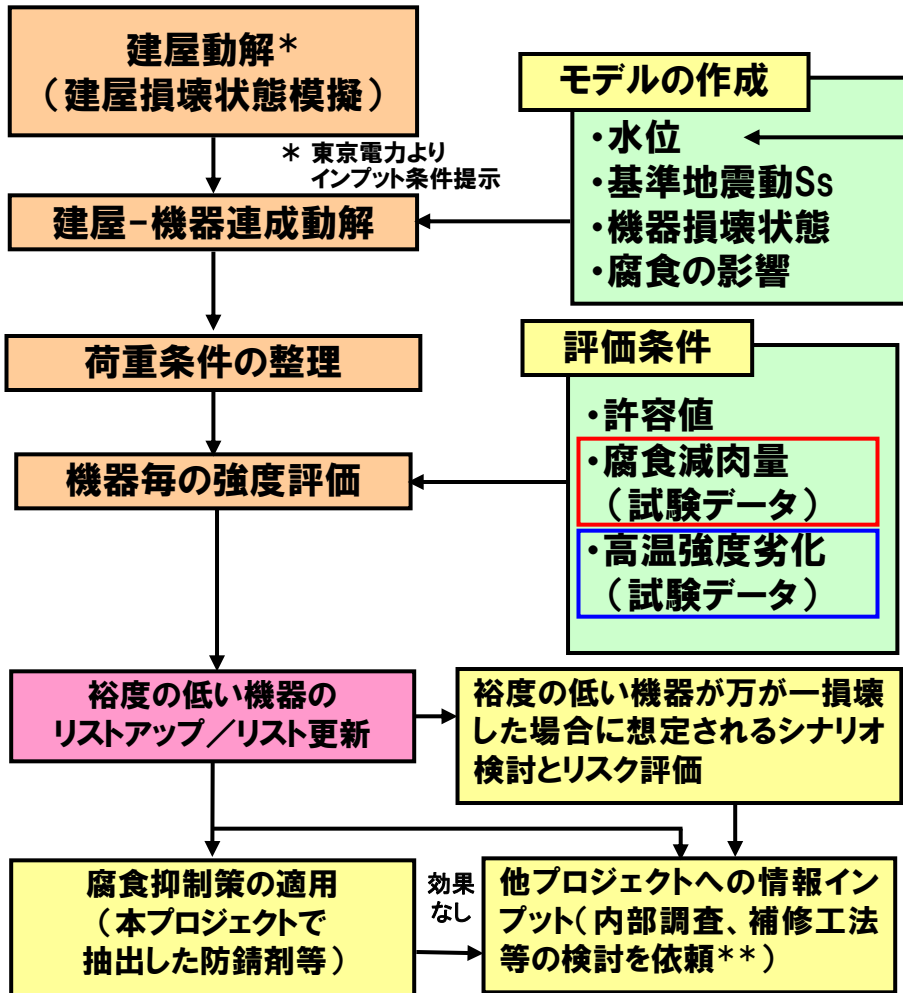
太線範囲：原子炉注水配管



* 当該材質はステンレス鋼であり、すでにSCCによるひびが発生している可能性があるため、補修もしくは冠水バウンダリから除外される工法を検討中であり、評価対象外とする。

健全性評価(余寿命評価)対象部位(例)

健全性評価全体評価フロー



建屋損壊状態、現状水位など、機器余寿命評価の精度向上につながる条件設定において、調査すべき項目と、調査実施により期待される成果を整理(PCV内部調査他プロジェクトとの連携が必要)

--- :平成25年度評価対象

□ :平成24年度実施 □ :平成24-27年度実施

余寿命評価の概略フロー(例)

現状及びPCV冠水までに想定されるプラント状態から
推定されるPCV内水位(例)

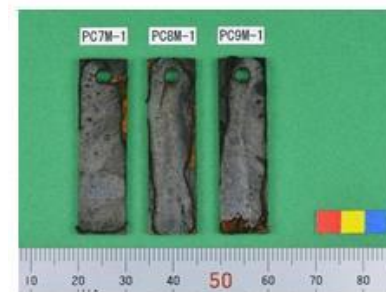
腐食抑制策の開発 — 亜硝酸ナトリウム添加試験結果 —

目的

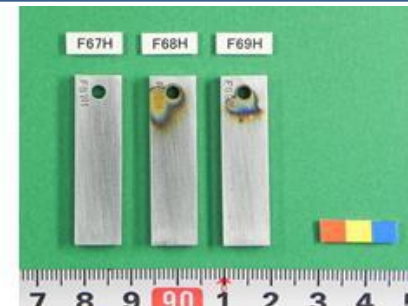
原子炉容器構造材料等（PCV材炭素鋼SGV480）に対する腐食抑制効果を確認するため、実機プラントにおいて軸受冷却水系に使用実績のある亜硝酸ナトリウムを用いて腐食抑制策確証試験を実施し、定量的データを取得する。また、得られたデータから実機への適用において適切と考えられる添加濃度について検討する。

亜硝酸ナトリウム添加試験マトリクス (50℃、200倍希釈海水、大気飽和)

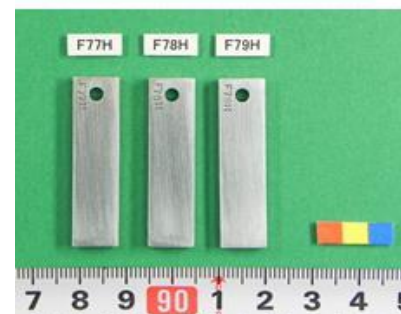
| 亜硝酸ナトリウム濃度(ppm) | 気液環境 | 試験時間 | | | |
|-----------------|------|------|------|------|-------|
| | | 50h | 100h | 500h | 2000h |
| 濃度①(200) | 液相 | ● | ● | ●(1) | — |
| 濃度②(400) | 液相 | ● | ● | ●(2) | ● |
| 濃度③(2000) | 液相 | ● | ● | ● | — |
| 濃度②(400) | 気液界面 | ● | ● | ●(3) | — |



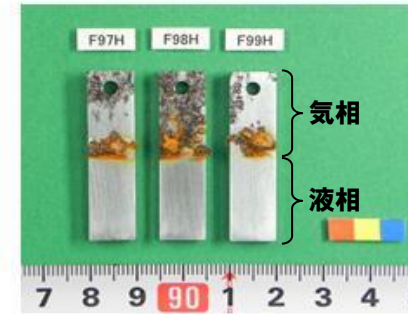
防錆剤なし（液相）



(1) 200ppm添加（液相）



(2) 400ppm添加（液相）



(3) 400ppm添加（気液界面）

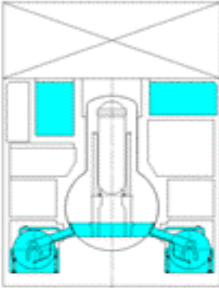
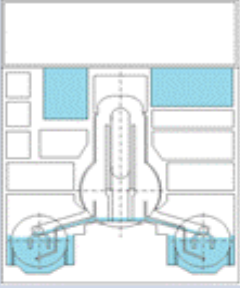
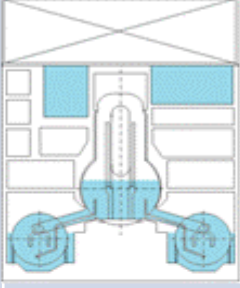
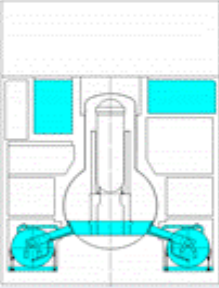
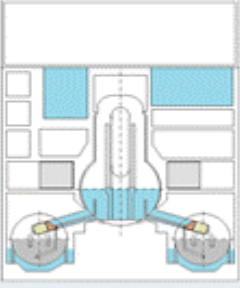
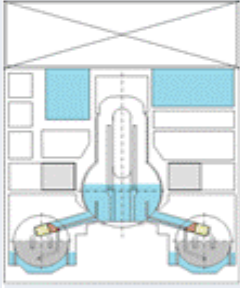
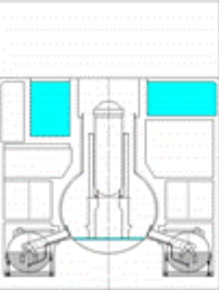
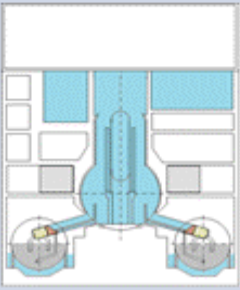
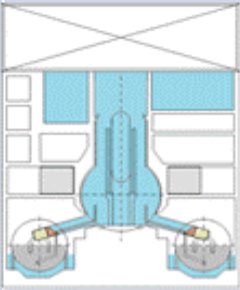
試験結果

- ・亜硝酸ナトリウムを400ppm以上添加した場合、液相部の腐食は防止された。
- ・気液界面では、液相部の腐食は防止されたが、気相部に腐食が認められた。

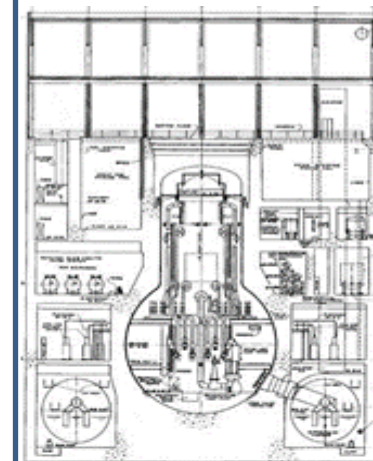
試験後試験片の外観観察結果（一例）

耐震強度評価方針

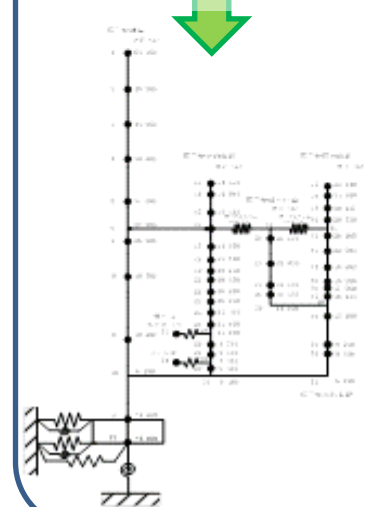
デブリ取出し工法を検討する上で優先順位の高い想定プラント状態(各プラント3ケース)について、地震応答解析による荷重から各機器の強度評価を実施。

| プラント /ケース | 1F-1 | 1F-2 | 1F-3 |
|--------------|---|--|---|
| H25-1 |  <ul style="list-style-type: none"> ○現状想定 ・建屋損傷 ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・真空破壊管内:満水 ・トラス室水位:OP3680 |  <ul style="list-style-type: none"> ○現状想定 ・建屋健全 ・D/W水位:約0.6m ・S/C内:OP3100 ・ベント管内:底部流水 ・トラス室水位:OP3200 |  <ul style="list-style-type: none"> ○現状想定 (事故後約3年) ・建屋損傷 ・D/W水位:約6.5m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・トラス室水位:OP3200 |
| H25-2 |  <ul style="list-style-type: none"> ○トラス室水位制御 ・建屋損傷 ・オベフロ階付加設備:約5100t ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・真空破壊管内:満水 ・トラス室水位:OP-300 |  <ul style="list-style-type: none"> ○OPCV部分冠水 ・オベフロ階付加設備:約5500t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約5m ・S/C内:コンクリートOP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位:OP-300 |  <ul style="list-style-type: none"> ○OPCV部分冠水 ・オベフロ階付加設備:約3900t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約6.5m ・S/C内:コンクリートOP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位:OP-300 |
| H25-3 |  <ul style="list-style-type: none"> ○S/C補強 ・建屋損傷 ・オベフロ階付加設備:約5100t ・D/W水位:約0.3m ・S/C内:コンクリートOP3570 ・ベント管内:空気 ・真空破壊管内:空気 ・トラス室水位:OP-300, コンクリートOP-485 |  <ul style="list-style-type: none"> ○OPCV冠水 ・オベフロ階付加設備:約5500t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約35m ・S/C内:コンクリートOP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位:OP-300 |  <ul style="list-style-type: none"> ○OPCV冠水 ・オベフロ階付加設備:約3900t ・小部屋埋設 ・D/W水位:約35m ・S/C内:コンクリートOP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位:OP-300 |

地震応答解析



建屋-機器連成解析モデル化(例)



RPV構造健全性評価結果（例）

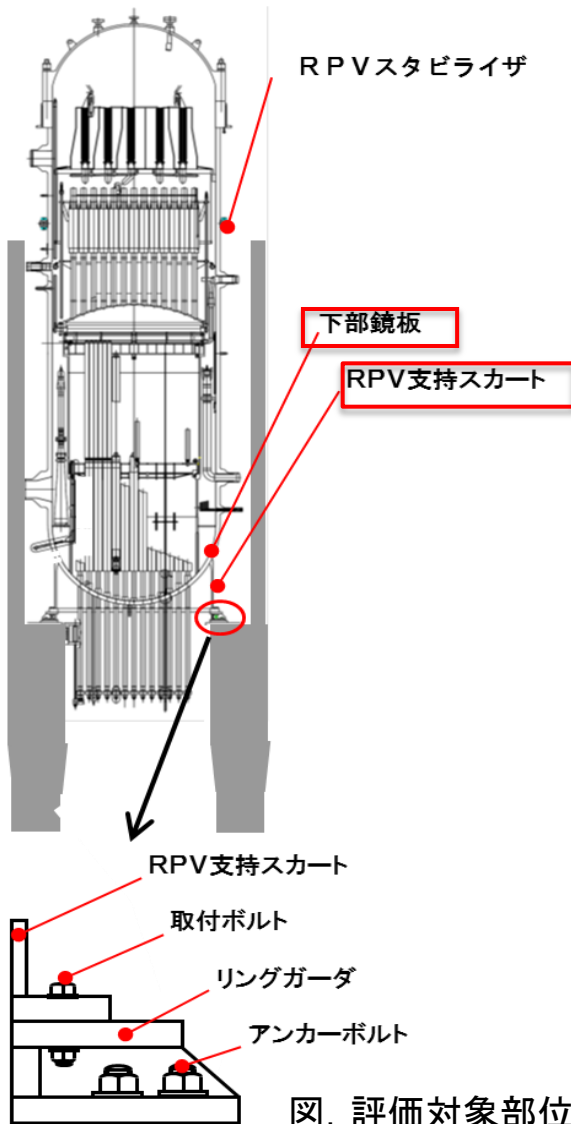


図. 評価対象部位

支持スカート(一次応力)

(MPa)

| ケース | 1号機 | | 2号機 | | 3号機 | |
|------|------|-----|------|-----|------|-----|
| | 応力強さ | 許容値 | 応力強さ | 許容値 | 応力強さ | 許容値 |
| 25-1 | 58 | 360 | 39 | 360 | 38 | 360 |
| 25-2 | 59 | | 40 | | 39 | |
| 25-3 | 59 | | 71 | | 61 | |

支持スカート(圧縮)

| ケース | 1号機 | | 2号機 | | 3号機 | |
|------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| | 座屈評価値※ | 許容値 | 座屈評価値※ | 許容値 | 座屈評価値※ | 許容値 |
| 25-1 | 0.188 | 1 | 0.113 | 1 | 0.112 | 1 |
| 25-2 | 0.192 | | 0.118 | | 0.115 | |
| 25-3 | 0.191 | | 0.213 | | 0.182 | |

※; 座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$ (出展: JEAC4601-2008)

下部鏡板(一次応力)

(MPa)

| ケース | 1号機 | | 2号機 | | 3号機 | |
|------|------|-----|------|-----|------|-----|
| | 応力強さ | 許容値 | 応力強さ | 許容値 | 応力強さ | 許容値 |
| 25-1 | 195 | 540 | 105 | 540 | 130 | 540 |
| 25-2 | 227 | | 110 | | 133 | |
| 25-3 | 227 | | 104 | | 124 | |

※; 本表の応力強さは工認記載の応力強さを基にプラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

全ての評価対象部位において、発生応力は許容値以下

PCV構造健全性評価結果（例）

評価結果(1号機)

評価条件：
 ・耐震条件 : Ss波
 ・評価温度 : 50℃
 ・供用状態 : Ds
 ・腐食減肉量 : 右記表参照

<評価ケースについて>

ケース25-1: 腐食10年後相当
 ケース25-2: 腐食15年後相当
 ケース25-3: 腐食15年後相当

評価結果:

② ベント管(評価部位: ベント管とD/W胴の接合部)
 一次応力評価結果

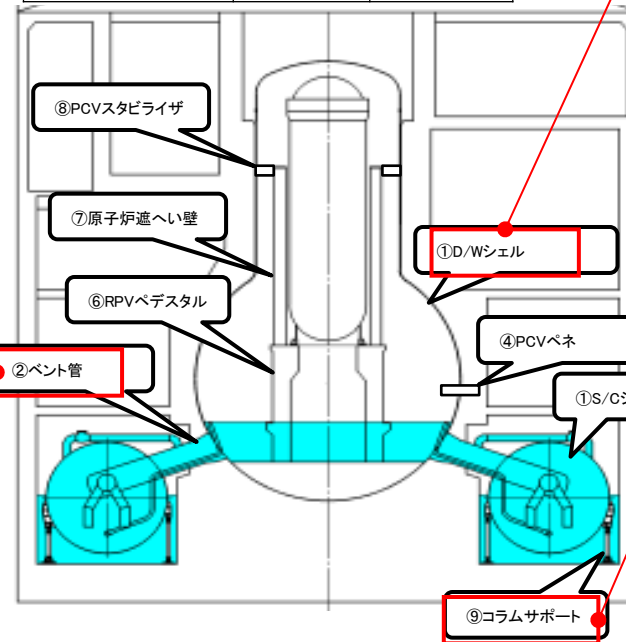
| 評価ケース | 応力強さ (MPa) | 許容値 (MPa) | 裕度 |
|-------|------------|-----------|------|
| 25-1 | 117 | 423 | 3.61 |
| 25-2 | 142 | 423 | 2.97 |
| 25-3 | 144 | 423 | 2.93 |

1号機 ドライウェル推定減肉量(片面) (mm)

| 事故後 | 10年 | 15年 |
|-------|------|------|
| 推定減肉量 | 2.15 | 2.44 |

1号機 サプレッションチェンバ
 推定減肉量(片面) (mm)

| 事故後 | 10年 | 15年 |
|-------|------|------|
| 推定減肉量 | 1.09 | 1.36 |



評価設備(例: ケース25-1)

①-1 D/Wシェル(評価部位: サンドクッション部)
 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

| 評価ケース | 応力強さ (MPa) | 許容値 (MPa) | 裕度 |
|-------|------------|-----------|------|
| 25-1 | 124 | 423 | 3.41 |
| 25-2 | 140 | 423 | 3.02 |
| 25-3 | 128 | 423 | 3.30 |

注: コラムサポートの許容値(f_c 及び f_b)は常温でF値をSu値とし評価(圧縮に対してはF値を1.2Sy値とした)

⑨ コラムサポート(評価部位: 外側コラムサポート)
 一次応力評価結果

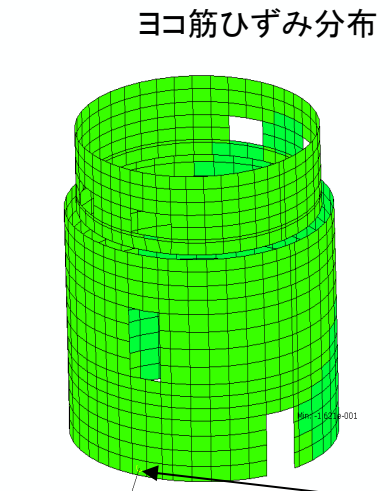
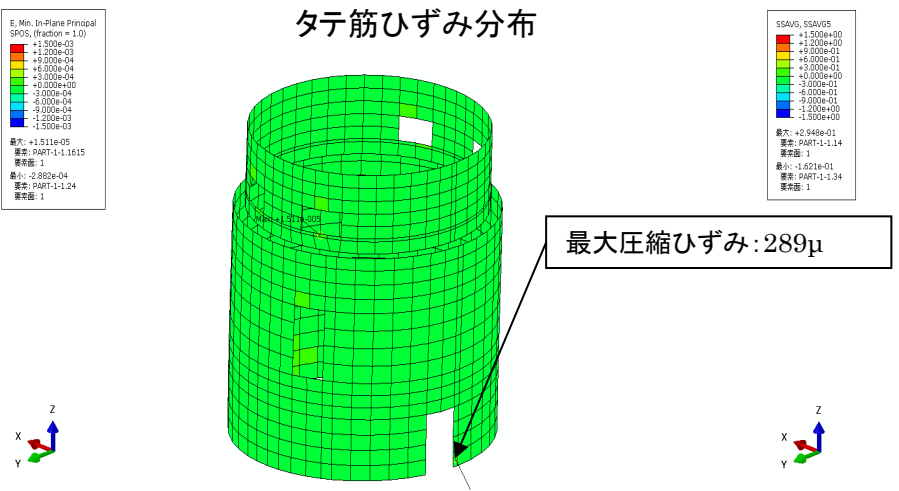
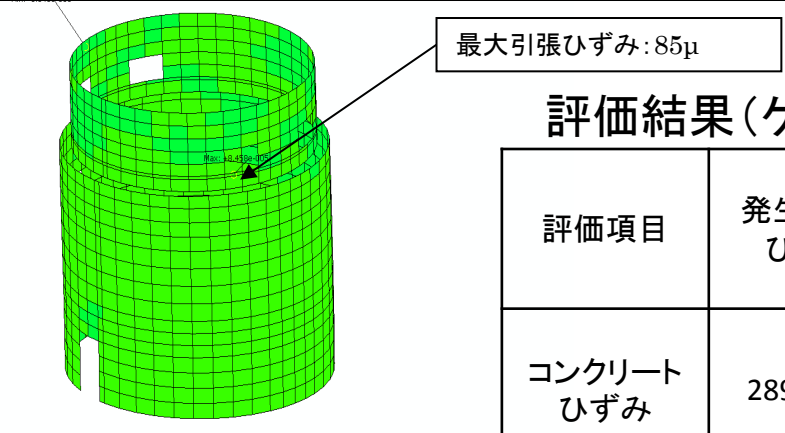
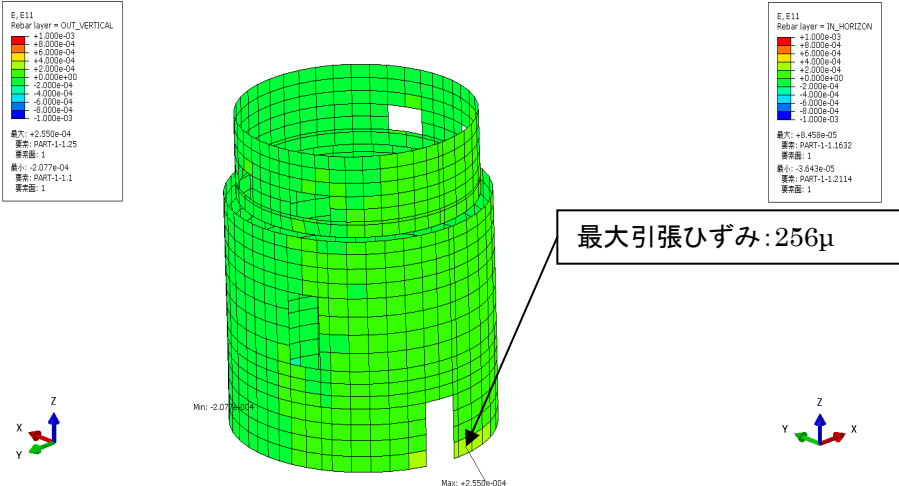
| 評価ケース | 組合せ応力(圧縮+曲げ) $\sigma_c / f_c + \sigma_b / f_b$ | 許容値 | 裕度 |
|-------|---|-----|------|
| 25-1 | 1.083 | 1 | 0.92 |
| 25-2 | 0.946 | 1 | 1.05 |
| 25-3 | 2.354 | 1 | 0.42 |

PCVバウンダリ機能としての評価部位においては発生応力が許容値を下回ったが、サプレッションチェンバ支持構造物については許容値を上回る結果となった。今後、詳細評価や補強(トラス室内をセメント系材料等で埋設するなど)対策の検討を進める。

RPVペDESTAL健全性評価結果（例）

評価結果(1号機)

• 全ての評価項目において、発生応力・ひずみが評価基準値を下回った。
 • ただし、現状では、熔融燃料デブリによる侵食等の影響が考慮されておらず、今後、侵食影響をどのように想定するかも含め、検討が必要。



評価結果(ケースH25-2)

| 評価項目 | 発生応力・ひずみ | 評価基準*1 |
|-----------|------------------------|-------------------------|
| コンクリートひずみ | 289 × 10 ⁻⁶ | 3000 × 10 ⁻⁶ |
| 鉄筋ひずみ | 256 × 10 ⁻⁶ | 5000 × 10 ⁻⁶ |
| 面外せん断力 | 354N/mm | 1823N/mm |

*1: 評価基準は、「日本機械学会 発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 JSME S NC1-2003」に基づき算定

平成26-27年度実施内容

PCV冠水工法の成立性評価フロー

①H25年度の機器評価で裕度が確保できなかった機器の補修(補強)対策を整理

【裕度が確保出来なかった、または低かった機器】

- ・1F-1:コラムサポート
- ・1F-2/3:原子炉遮へい壁、コラムサポート、耐震サポート

PCV補修技術の開発実施者との協議

②補修(補強)や燃料取り出し設備等の新たなプラント情報を追加した地震応答解析モデル(建屋-機器連成)の構築、解析の実施

【地震応答解析の条件】

- ・H25年度のH25-2及びH25-3をベースとした2ケース
- ・基準地震動Ss(従来Ss:最大加速度600Gal)
- ・原子炉建屋地震応答解析モデル:H25年度使用したモデルを流用

③算定された荷重条件による機器の耐震評価

【評価対象設備】

- ・PCV冠水バウンダリ及び注水冷却設備の機能維持に関わる機器
- ・PCV補修技術の開発で補修対象箇所としている機器は除外

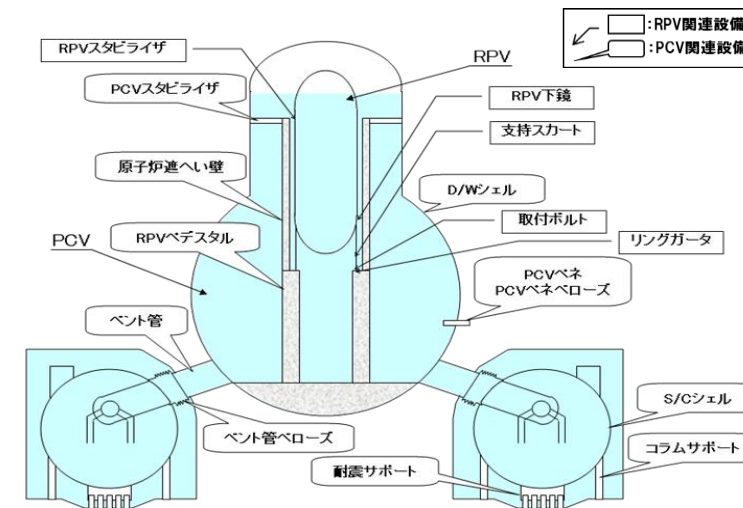
④裕度が低い機器の詳細評価

【詳細評価手法】

- ・有限要素法等による実機を模擬した評価
- ・判定基準(許容値等の設定):原子力関連の規格・基準による許容値体系に囚われず、機器に要求される機能維持が達成できるような基準を設定

H25年度に実施された地震応答解析ケース

| プラント /ケース | 1F-1 | 1F-2 | 1F-3 |
|--------------|--|---|---|
| H25-1 | <ul style="list-style-type: none"> ○現状認定 ・建屋建金 ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・高定圧導管内:満水 ・トラス室水位 ・OP380 | <ul style="list-style-type: none"> ○現状認定 ・建屋建金 ・D/W水位:約3.0m ・S/C内:OP5100 ・ベント管内:底部流水 ・トラス室水位 ・OP3200 | <ul style="list-style-type: none"> ○現状認定 ・(事故後約3年) ・建屋建金 ・D/W水位:約3.5m ・S/C内:満水 ・ベント管内:満水 ・トラス室水位 ・OP3200 |
| H25-2 | <ul style="list-style-type: none"> ○トラス室水位制御 ・建屋建金 ・オフフロ階付加設備 ・約5500 ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・高定圧導管内:満水 ・トラス室水位 ・OP-300 | <ul style="list-style-type: none"> ○PCV部分冠水 ・オフフロ階付加設備 ・約5500 ・小部屋埋設 ・D/W水位:約1.5m ・S/C内: ・コンクリート:OP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位 ・OP-300 | <ul style="list-style-type: none"> ○PCV部分冠水 ・オフフロ階付加設備 ・約3900 ・小部屋埋設 ・D/W水位:約1.5m ・S/C内: ・コンクリート:OP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位 ・OP-300 |
| H25-3 | <ul style="list-style-type: none"> ○S/C挿入 ・建屋建金 ・オフフロ階付加設備 ・約5100 ・D/W水位:約0.3m ・S/C内: ・コンクリート:OP3570 ・ベント管内:空気 ・高定圧導管内:空気 ・トラス室水位 ・OP-300 ・コンクリート:OP-485 | <ul style="list-style-type: none"> ○PCV冠水 ・オフフロ階付加設備 ・約5500 ・小部屋埋設 ・D/W水位:約3.5m ・S/C内: ・コンクリート:OP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位 ・OP-300 | <ul style="list-style-type: none"> ○PCV冠水 ・オフフロ階付加設備 ・約3900 ・小部屋埋設 ・D/W水位:約3.5m ・S/C内: ・コンクリート:OP1900 ・ベント管内:補修考慮 ・トラス室水位 ・OP-300 |



評価対象設備(例)

2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究 開発

燃料デブリ・炉内構造物取出技術の開発 (2-①-6)

燃料デブリ取り出し冠水工法 の説明(CG)

(2-①-6) 燃料デブリ・炉内構造物取出技術開発の概要

◎工法検討

プラント状態情報、関連技術開発、現地調査結果等を考慮してシナリオを検討する必要がある。

⇒多くの情報を総合的に評価し、不明点は想定することも必要。

⇒既存技術調査も含め、本pjで検討

◎燃料デブリ取出し作業の開発課題

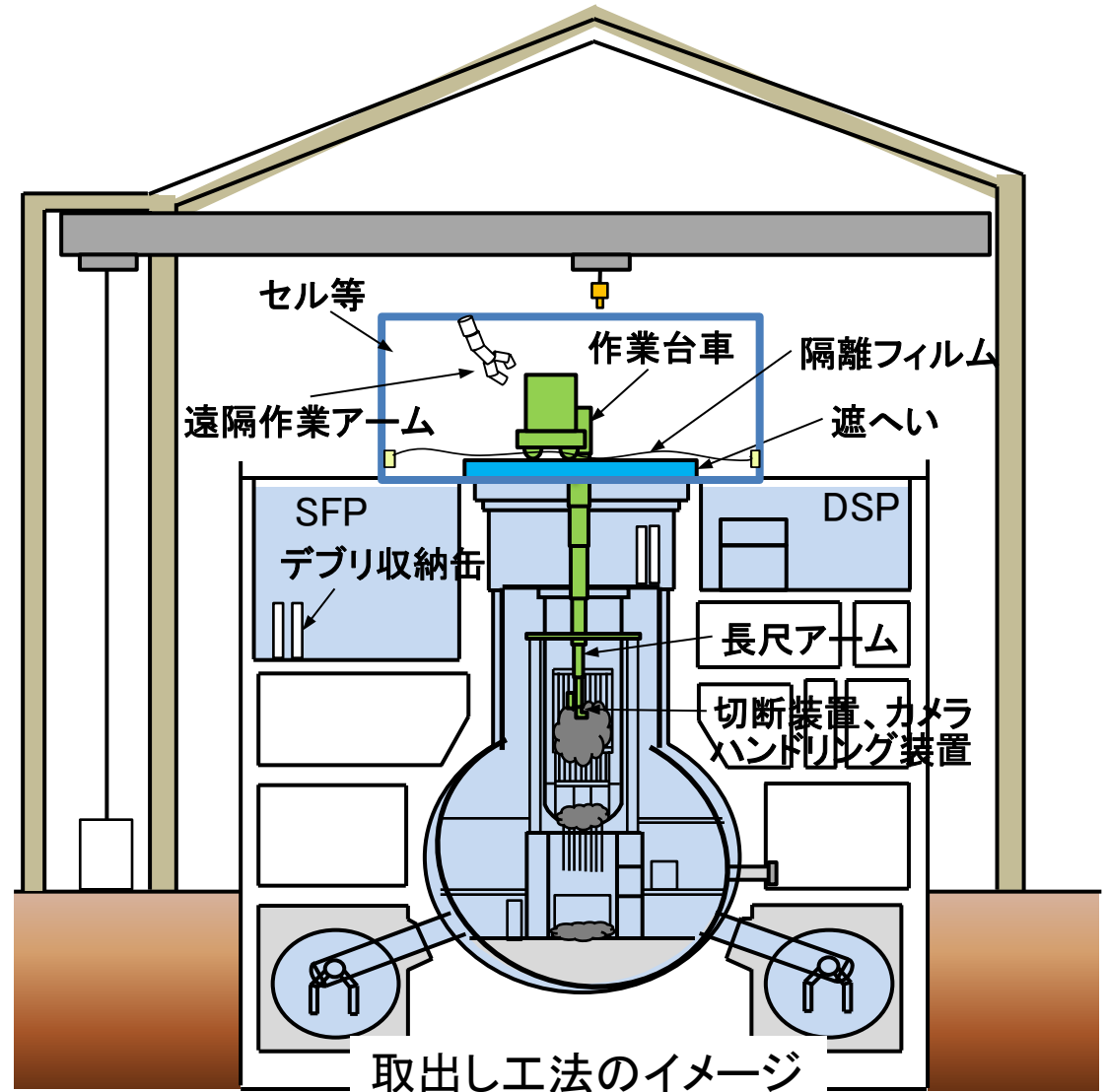
工法によらず、燃料デブリ取出し作業共通の課題で主なものは下記。

- ①燃料デブリ切断
- ②遠隔作業
- ③汚染拡大防止
- ④遮へい
- ⑤臨界防止

◎要素試験

上記課題のうち、燃料デブリ切断、遠隔作業、汚染拡大防止の要素試験を実施。

- (1)燃料デブリ切断
 - ①セラミック試験体の切断試験
 - ②試験体製作
- (2)遠隔作業
 - ①長尺アーム制御技術
 - ②遠隔作業アーム試作(セル内含む)
- (3)汚染拡大防止
 - ①隔離フィルム・シートの選定



(2-①-6) 燃料デブリ・炉内構造物取出技術の開発(平成26年度計画)

平成26年度主要目標

圧力容器内やオペフロから最大約35m下方にある格納容器内の燃料デブリを取り出すため、既存技術を調査・整理した上で、燃料デブリ取出し工法の評価・立案を行い、研究開発の計画を立案。可能なものについては、装置開発に着手する。

平成26年度の実施内容

1. 既存技術の調査

既存のカタログも参照しながら、燃料デブリを取り出すために必要な既存技術(TMI で実績のある装置を含む)の調査および整理を実施。

2. 燃料デブリ取出工法および開発計画の立案

圧力容器および格納容器内から燃料デブリを取出す工法(取出し時の冷却システム、放射線遮へい、放射性物質の飛散防止対策、燃料デブリを収納缶に回収・輸送する方法、等含む)について評価等を実施し、開発計画を立案。

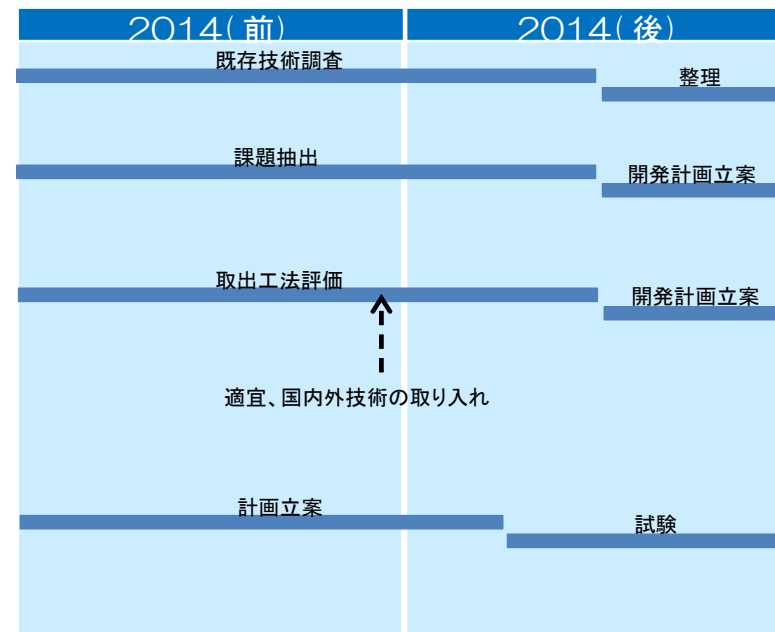
立案に当たっては、高放射線下であることを考慮し、画像処理システムや電子デバイスについても評価を実施。

※国内外から広くデブリ取り出しに係る提案を募る仕組みを利用し、有用な技術及び工法の提案については積極的に取り入れながら研究開発を実施。

※現在のプラント状態から格納容器上部の水張り状態まで、想定される環境状態を考慮し、水中/気中でのデブリ及び炉内構造物等の取出し工法の検討を実施

3. 燃料デブリ取出し装置開発/要素試験

上記記載の既存技術の調査結果、開発計画等を反映し、要素試験、装置開発に着手。TMIで実績のあるデブリの加工技術、炉内構造物等の切断に用いられている技術でデブリを模擬したセラミック試験体の加工を行う試験計画を立案し、セラミック試験体の加工試験を実施



燃料デブリ取り出し代替工法に関する 国内外への情報提供依頼について

情報提供依頼（RFI）の内容

トピックA: PCV/RPV内部調査

A-1:工法の概念検討 (以下、例)

- ① カメラ等の調査装置の内部への挿入方法
 - a. 配管/ペネトレーション等の既存の貫通孔の活用
 - b. 新たな貫通孔の穿孔
 - c. 作業員の被ばく低減の観点から考えた、貫通部の遮蔽方法及び機器操作方法
- ② 外部からの測定による燃料デブリ位置の推定方法等

A-2:必要とされる技術 (以下、例)

- ① 高度計測技術 (カメラ、線量計、温度計等)
 - a. 高性能光学機器 (カメラ等)、その他の計測技術(超音波、レーザー等)
 - b. 計測機の制御技術、情報伝送技術
- ② 炉内にある物質が燃料デブリか否かを判別するための技術

トピックB: 燃料デブリ取り出し

B-1:工法の概念検討 (以下、例)

- ① PCV上面から燃料デブリへ水中でアクセス
 - ② PCV上面から燃料デブリへ気中^{*1}でアクセス
 - ③ PCV側面から燃料デブリへ気中^{*1}でアクセス
 - ④ PCV下面から燃料デブリへ気中^{*1}でアクセス
- *1 部分的冠水を含む

B-2:必要とされる技術 (以下、例)

- ① 燃料デブリ取り出しに関する技術 (切り出し、吸引)
- ② 長い距離でも制御能力に優れる遠隔操作型のマニピュレーター等の機器・装置
- ③ 高線量の燃料デブリからの遮蔽技術
- ④ 高放射線環境下で作動する装置・設備
- ⑤ 横からまたは下部からのアクセスを実現するために建屋コンクリート、PCVに穴を開ける機器・装置
- ⑥ PCV/RPV中で取り出し前に燃料デブリを安定保管する技術

情報提供依頼（RFI）の結果

| RFIの募集分野 | | 合計 | 国別内訳 | | | | | | | |
|----------------------------|------------------|------------|------|----|----|----|----|------|---|---|
| | | | 日 | 米 | 英 | 独 | 仏 | ベルギー | 加 | 露 |
| PCV/RPV トピックス 内部調査 | A-1：工法の概念 検討 | 33 | 20 | 7 | 3 | - | 2 | - | 1 | - |
| | A-2：必要とされる 技術 | 58 | 32 | 6 | 10 | 6 | 2 | 2 | - | - |
| 燃料 デブリ 取り出し トピックス | B-1：工法の概念 検討 | 43 | 23 | 8 | 3 | 2 | 5 | - | 1 | 1 |
| | B-2：必要とされる 技術 | 60 | 41 | 7 | 3 | 4 | 2 | 2 | - | 1 |
| 合計（情報件数） | | 194 | 116 | 28 | 19 | 12 | 11 | 4 | 2 | 2 |

およそ6割の情報が日本国内から、4割の情報が海外から寄せられた。

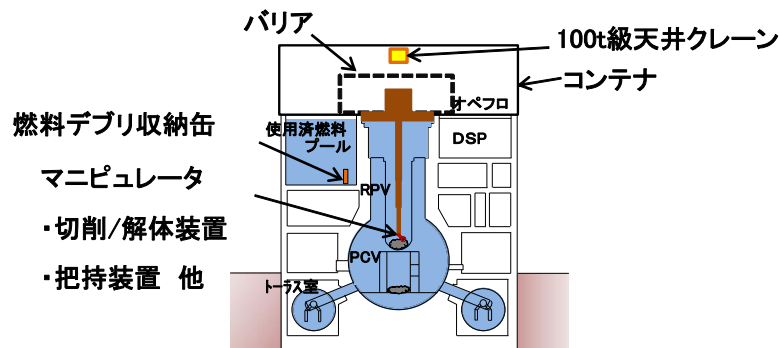
冠水工法と代替工法の比較説明

冠水工法 : 燃料デブリを冠水させた状態で取り出す工法で、燃料デブリの切断と収納を水中で行う。

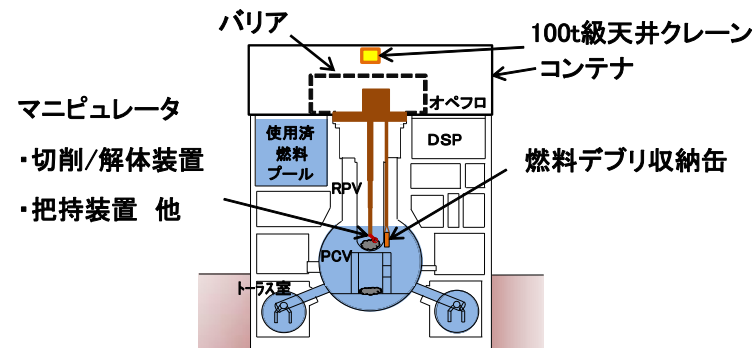
代替工法 : 燃料デブリの切断又は収納のいずれか、あるいは両方を気中で行う。

例

冠水工法

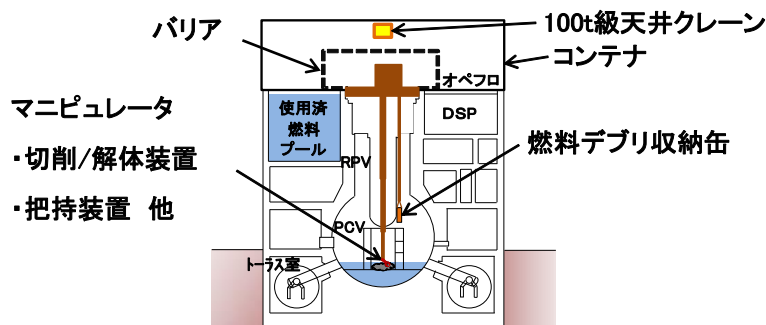


燃料デブリの切断と収納を水中で行う

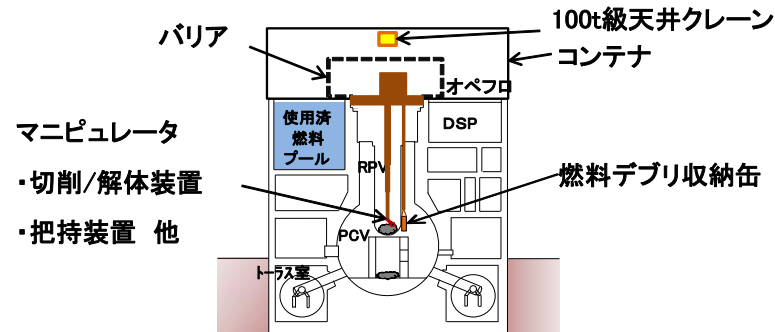


燃料デブリの切断と収納を水中で行う (PCV一部浸水)

代替工法



燃料デブリの収納を気中で行う



燃料デブリの切断も収納も気中で行う

提供された情報の分類・整理 A：PCV/RPVの内部調査

A-1: 概念検討

| 大分類 | No. | 中分類 | 提案件数 |
|------------|-----|-------------------------|------|
| 機器を内部に投入 | 1 | 上部 (新たに穿孔して) | 1 |
| | 2 | 側面 (既存のペネトレーションを通して) | 3 |
| | 3 | 側面 (新たに穿孔して) | 3 |
| PCV外部からの測定 | 4 | 側面 | 2 |
| | 5 | 下部 | 1 |

A-2: 必要とされる技術

| 大分類 | No. | 中分類 | 提案件数 |
|--------|-----|--------------------|-------|
| 直接測定 | 6 | 放射線 | 8 |
| | 7 | 熱 | 1 |
| | 8 | 元素分析 | 2 (2) |
| 直接観察 | 9 | カメラ | 10 |
| | 10 | ファイバースコープ | 2 |
| | 11 | 超音波 | 6 |
| | 12 | レーザースキャナ | 2 |
| | 13 | その他 | 1 |
| 間接測定 | 14 | ミュオン | 4 |
| | 15 | X線、 γ 線、中性子 | 3 |
| | 16 | AE法 | 1 |
| 環境整備 | 17 | 臨界管理・被ばく線量シミュレーション | 5 |
| | 18 | 水位 | 2 |
| | 19 | ホットセル | 1 |
| | 20 | 光源 | 1 |
| アクセス技術 | 21 | マニピュレータ | 5 |
| | 22 | ロボット(水中) | 2 |
| | 23 | ロボット(陸上) | 6 |
| | 24 | ロボット(水陸両用) | 6 |
| | 25 | 切断・穿孔 | 6 |
| | 26 | 耐放射線部品 | 10 |

* 提案件数について:

トピックスの分類は、IRIDが独自に再評価したため、提案者の分類と異なる場合があります。()内は、汚染水RFIのうち燃料デブリRFIにも該当すると考えられるもの。

提供された情報の分類・整理

B : PCV/RPVからの燃料デブリ取り出し/ C : その他

B-1: 概念検討

| 大分類 | No. | 中分類 | 提案件数 |
|------|-----|-----------|-------|
| 冠水工法 | 27 | 上部 | 5 |
| | 28 | 下部 | 2 |
| 気中工法 | 29 | 上部 | 7 |
| | 30 | 上部・側面併用 | 7 |
| | 31 | 側面 | 7 |
| | 32 | 下部 | 4 (1) |
| その他 | 33 | 化学的方法 | 3 |
| | 34 | RPV/PCV以外 | 2 |
| | 35 | その他 | 2 (6) |

C: その他

| 大分類 | No. | 中分類 | 提案件数 |
|------|-----|------|------|
| テーマ外 | 50 | テーマ外 | 7 |

B-2 : 必要とされる技術

| 大分類 | No. | 中分類 | 提案件数 |
|---------|-----|---------------|-------|
| 燃料デブリ切断 | 36 | 機械的 | 5 (2) |
| | 37 | 熱的(プラズマ) | 1 |
| | 38 | 熱的(レーザー) | 8 (1) |
| 燃料デブリ回収 | 39 | 安定固化 | 4 |
| | 40 | 分類 | 1 |
| | 41 | 容器(一時保管) | 4 |
| | 42 | 被ばく管理 | 2 |
| 環境整備 | 43 | 遮蔽 | 5 (1) |
| | 44 | 除染 | 3 |
| | 45 | 止水 | 2 (2) |
| | 46 | 水処理 | 3 |
| | 47 | マニピュレータ | 12 |
| アクセス技術 | 48 | ロボット(燃料デブリ除去) | 3 (1) |
| | 49 | 切断・穿孔 | 1 |

- 冠水工法(燃料デブリの切断と収納容器への収納をすべて水中で行う工法)
- 気中工法(燃料デブリの切断と収納容器への収納のうち、一部もしくは全てを気中で行う工法)。

提供された情報の紹介

— 工法の代表例 —

内部調査

主な課題

- ・作業スペースの確保
- ・バウンダリの確保

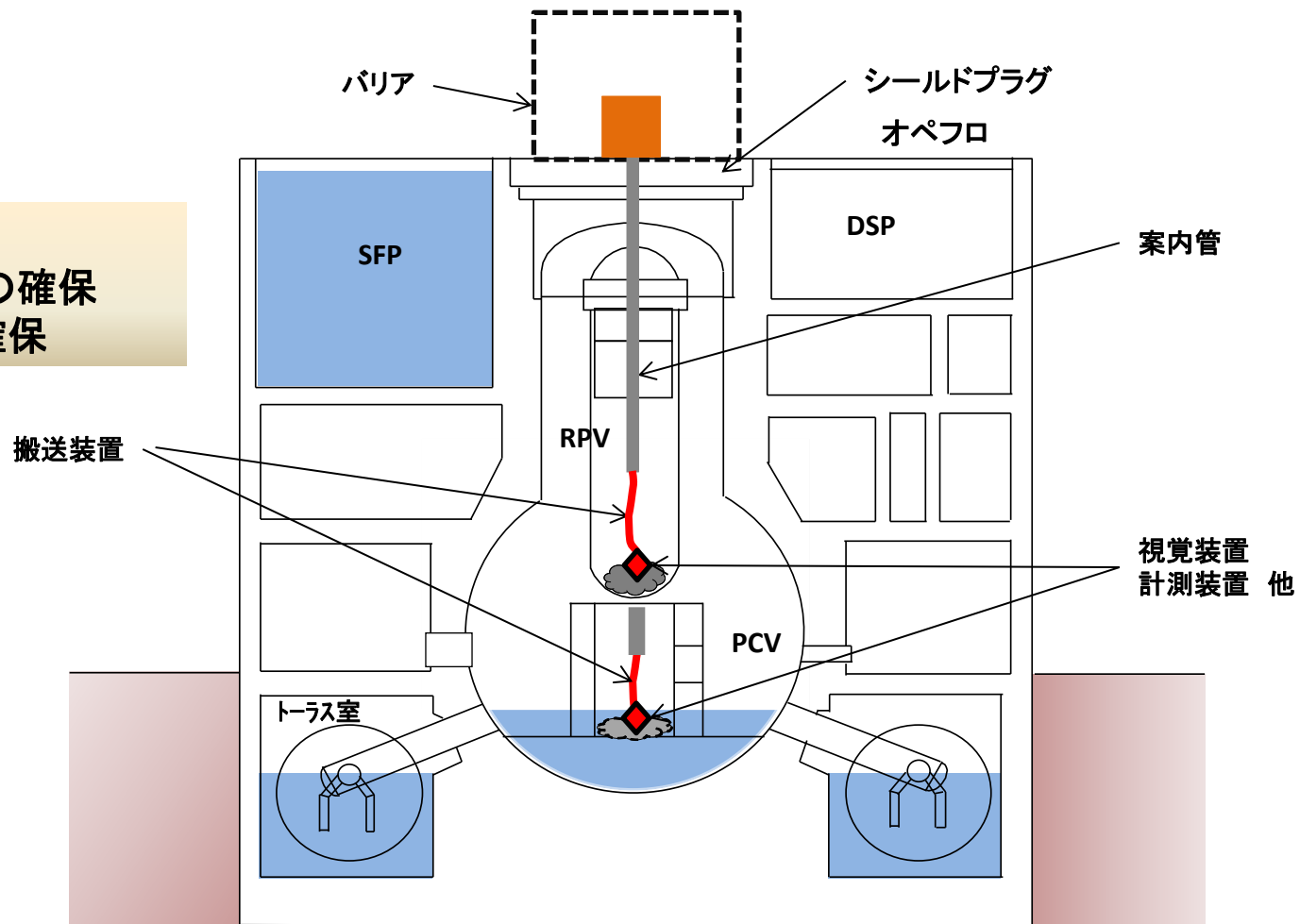


図 上部から穿孔して調査する工法(シールドプラグから)

内部調査

主な課題

- ・バウンダリの確保
- ・穿孔場所/穿孔技術

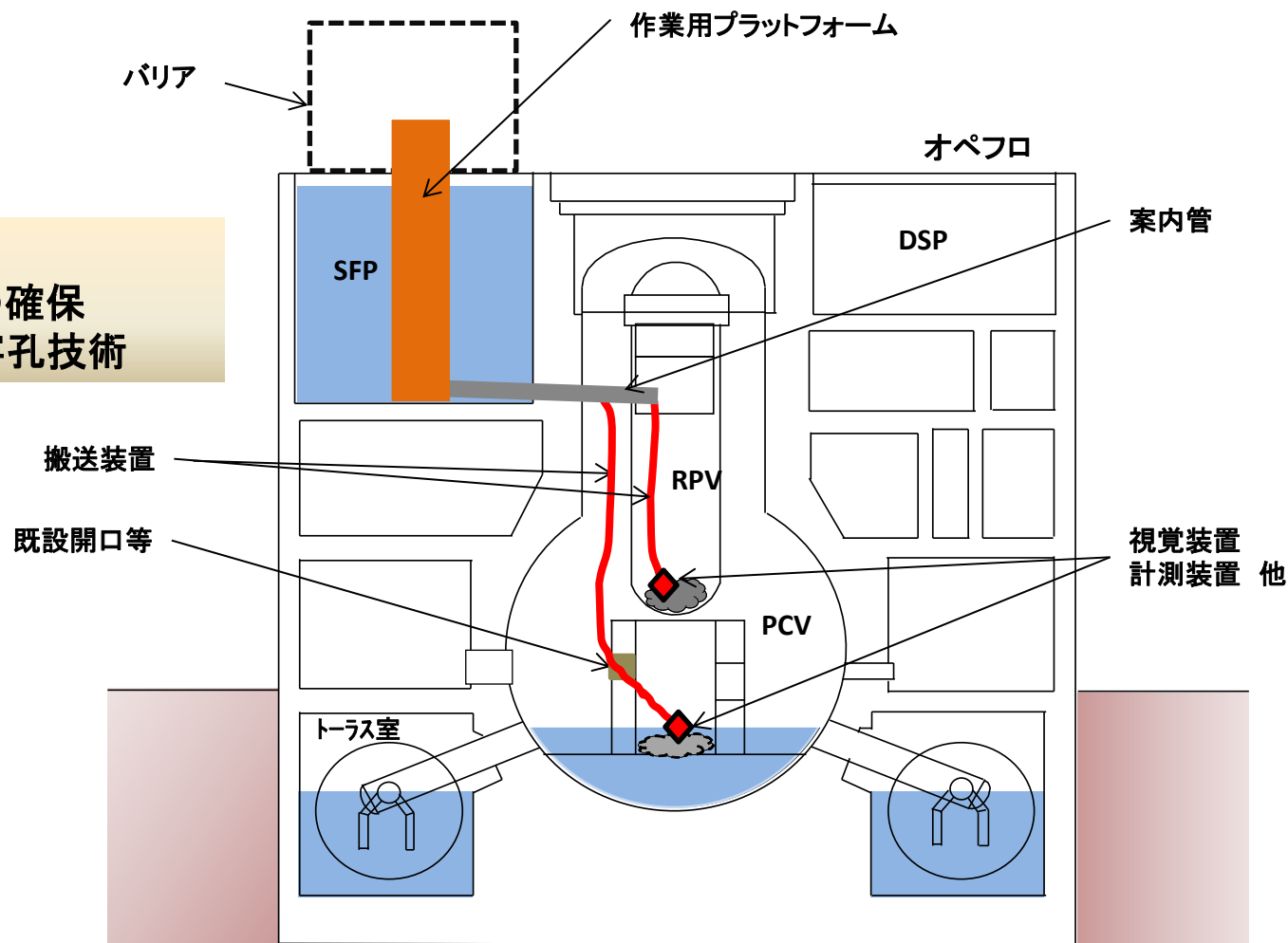


図 上部から穿孔して調査する工法(SFPから)

内部調査

主な課題

- ・アクセス距離
- ・RPVへのアクセス方法

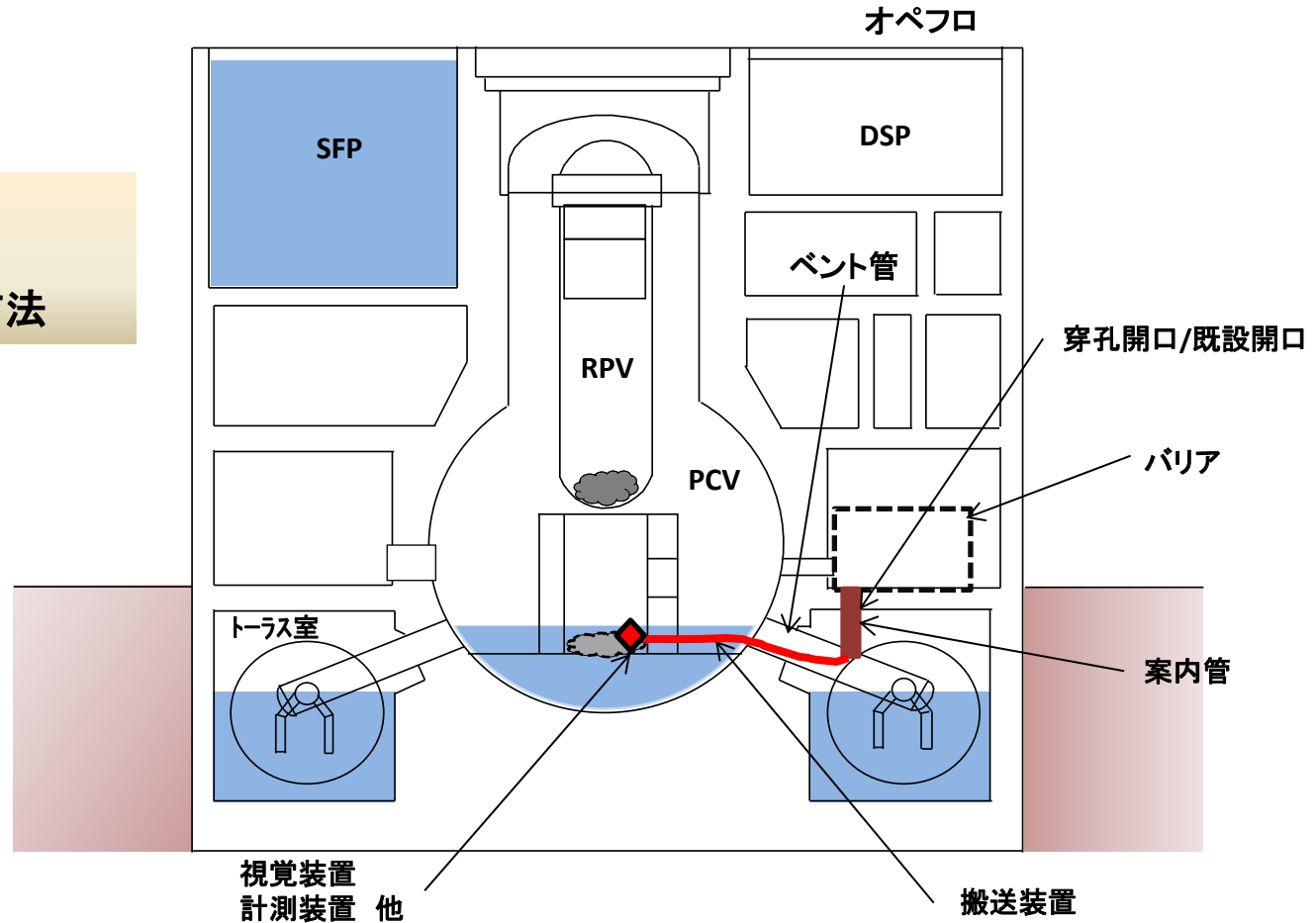


図 ベント管からPCV下部を調査する工法

燃料デブリ取り出し

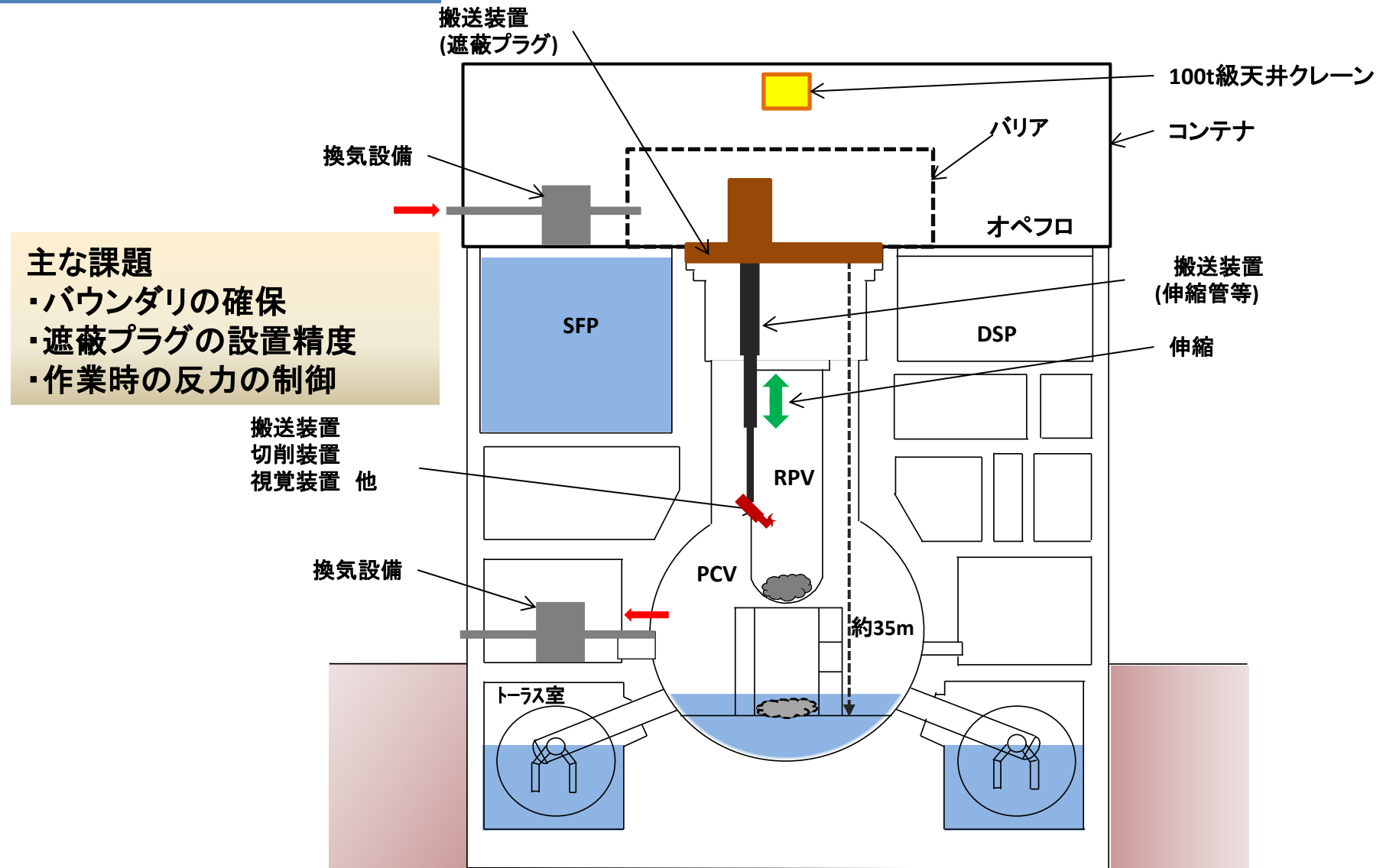


図 気中でオペフロに遮蔽プラグを設置し取り出す工法

燃料デブリ取り出し

主な課題
・バウンダリの確保
・作業時の遮蔽

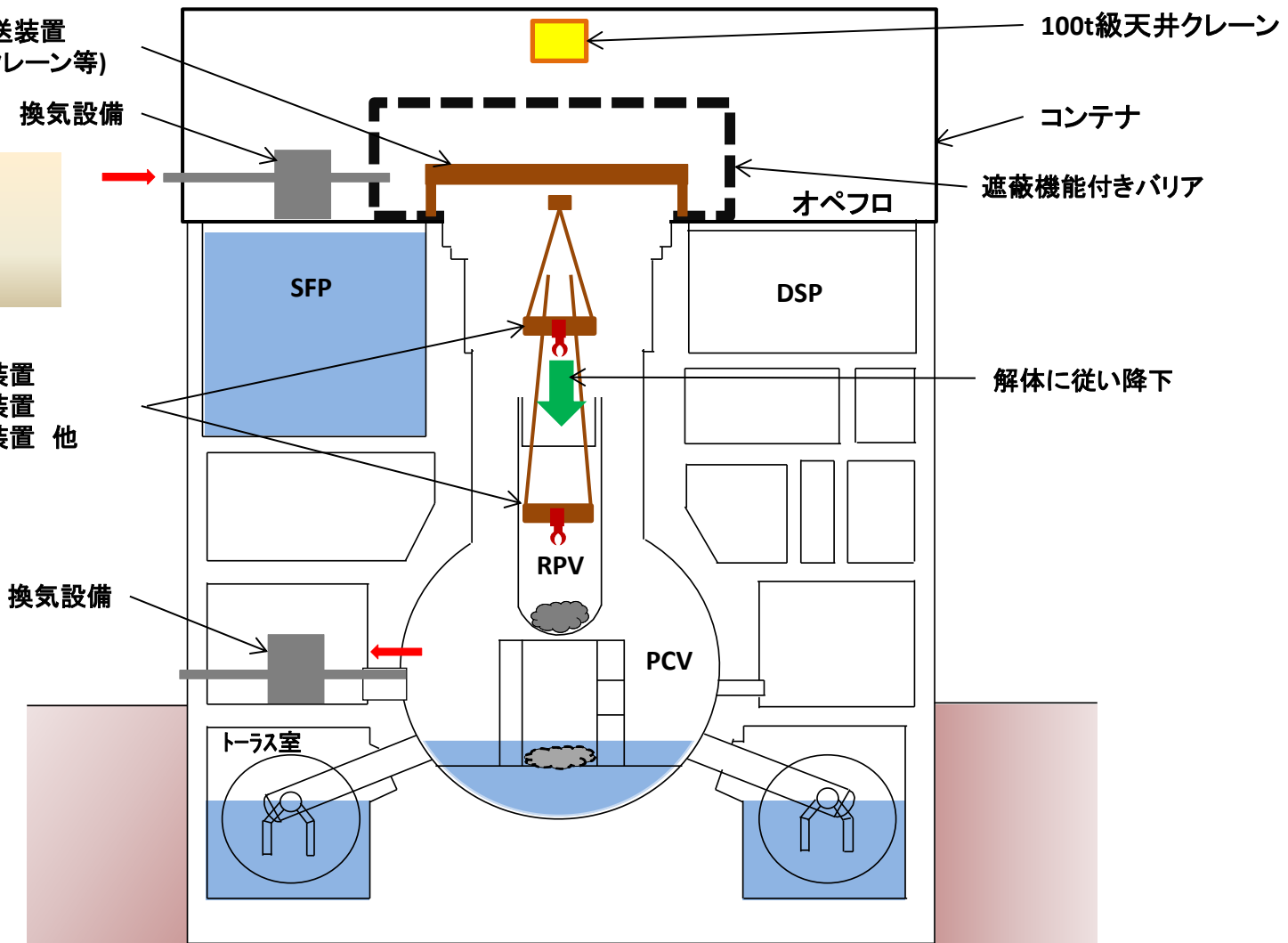


図 氣中でオペフロから装置本体を降ろしながら取り出す工法

燃料デブリ取り出し

主な課題

- ・バウンダリの確保
- ・作業時の遮蔽
- ・進入開口の位置

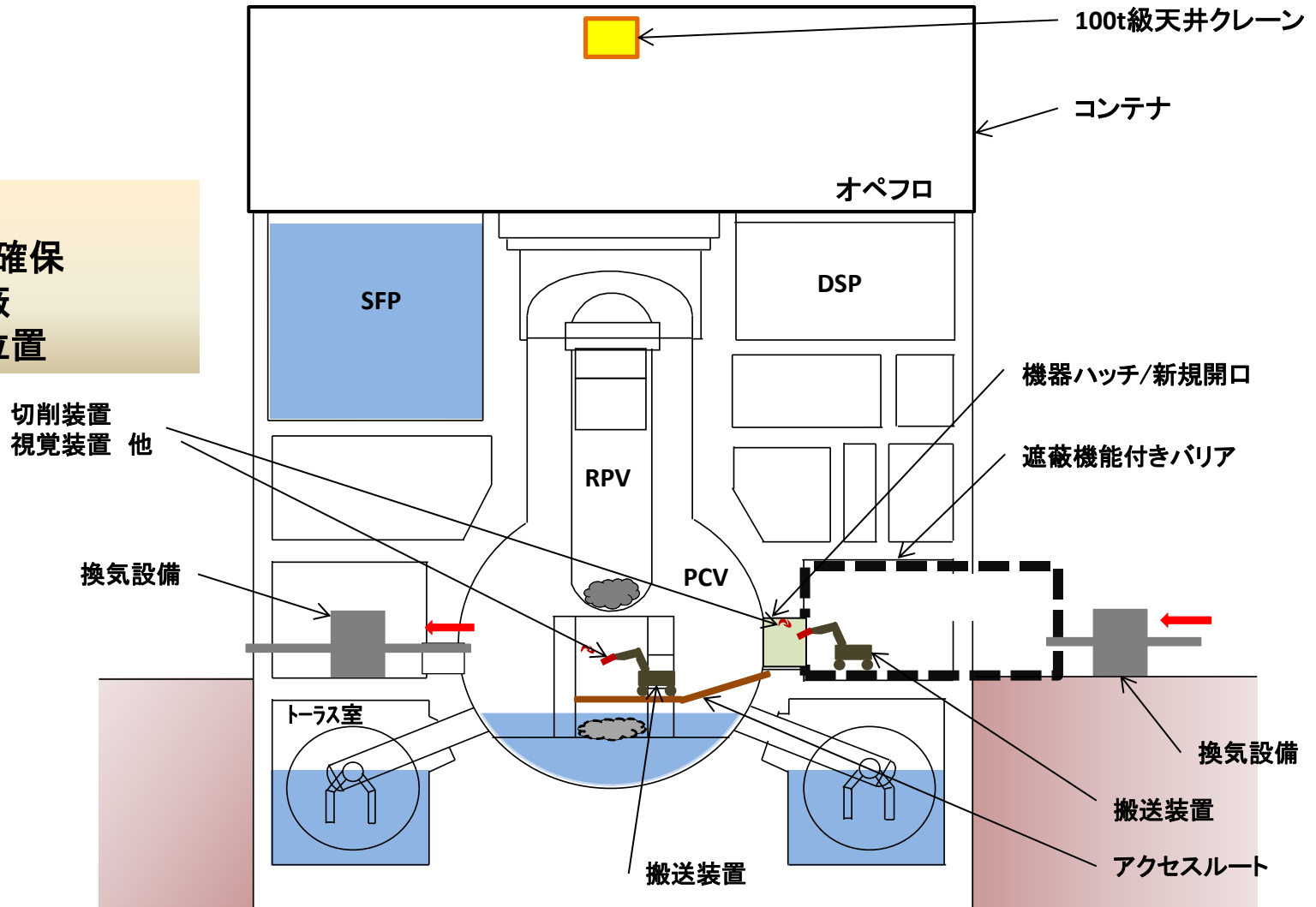


図 気中で側面から取り出す工法

燃料デブリ取出し代替工法の概念検討と要素技術の実現可能性検討についての提案公募（RFP）

本年6月27日より、燃料デブリ取り出し代替工法に関する提案公募を三菱総研が実施中。 IRID の燃料デブリ調査チームは本件に関する技術支援を行っている。

事業説明

①燃料デブリ取出しの代替工法に関する概念検討事業

気中において、燃料デブリを安全かつ確実に取り出すための工法の概念検討を行う。

②代替工法のための視覚・計測技術の実現可能性検討事業

過酷な条件の下、高線量下でも使用可能なコンパクトで軽量の照明機能を有した内部観察のための視覚機材や、燃料デブリ識別等のための計測機材の実用化検討を行う。

③代替工法のための燃料デブリ切削・集塵技術の実現可能性検討事業

燃料デブリの切削を可能とする機材（集塵機能も含む）の実用化検討を行う。

注)工法に依存する度合いの強い搬送技術あるいはコンクリートや鋼鉄製壁面の切削技術等の提案は工法が具体化してから必要に応じて募集するものとする。

最後に ー燃料デブリ取り出しに向けてー

- ▶ 福島第一における燃料デブリ取出し作業は、TMI-2と比較して一層の困難が予想される。作業の全体戦略、取出し工法、デブリ取出しツールの開発については、国内外の叡智を結集する必要がある。
- ▶ 燃料デブリ取り出し達成のためには、関連する各プロジェクトの目的・ゴールを明確にした上で、部分最適ではなく、全体最適となるように計画し、柔軟に技術開発を行う必要がある。
- ▶ 戦略の策定にあたっては、End-State（最終的にどうしたいか）を考え、実現可能な様々なオプションを検討し、その結果、第一案だけでなく必ず代替案を準備しておくことが重要である。