

燃料デブリの調査、取り出しに関わる技術開発

2014年9月10日

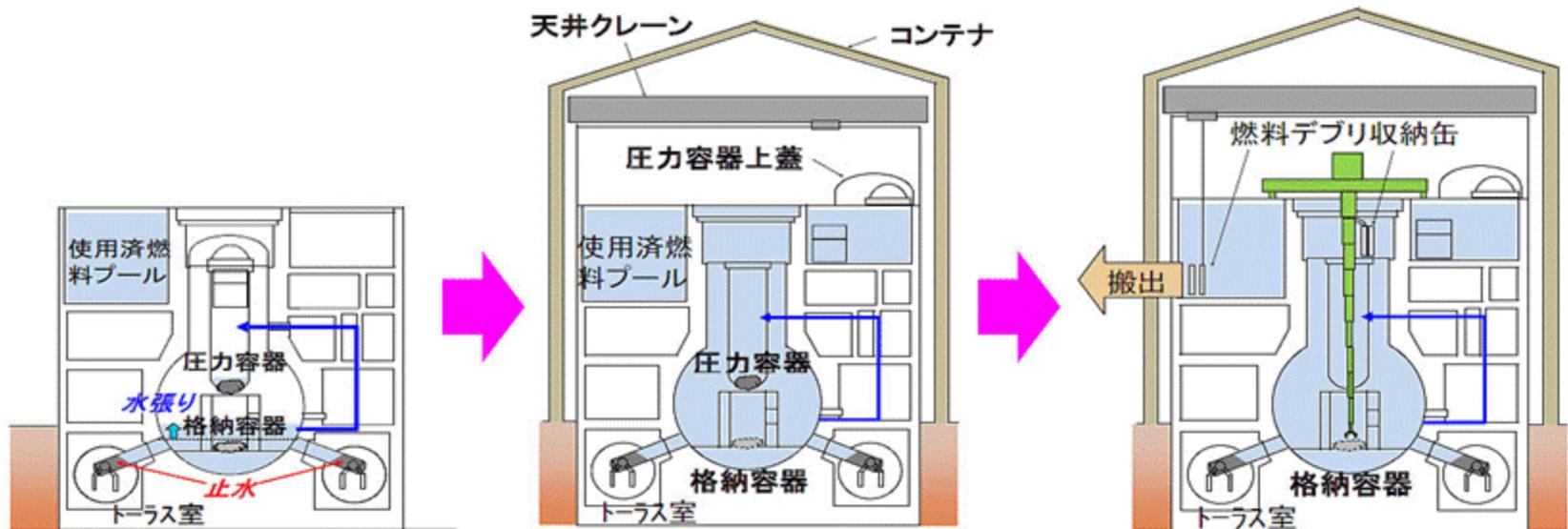
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

鈴木俊一

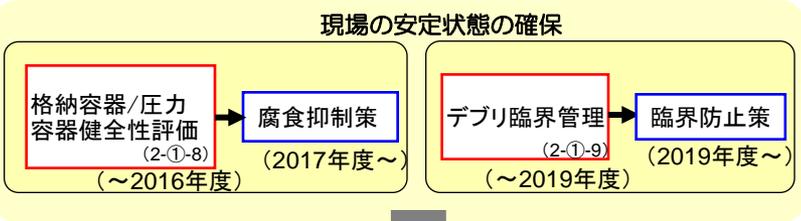
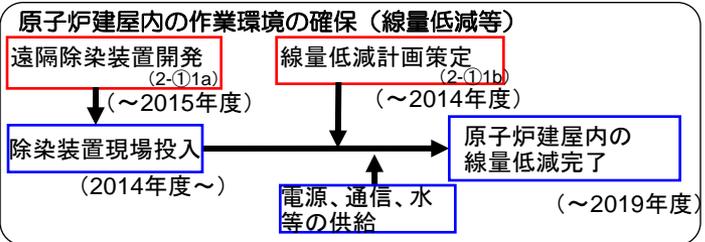
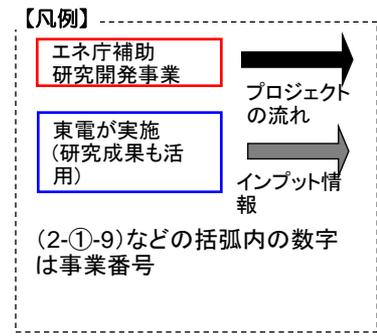
(プラント情報等の一部内容は、東電ホームページより引用)

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。

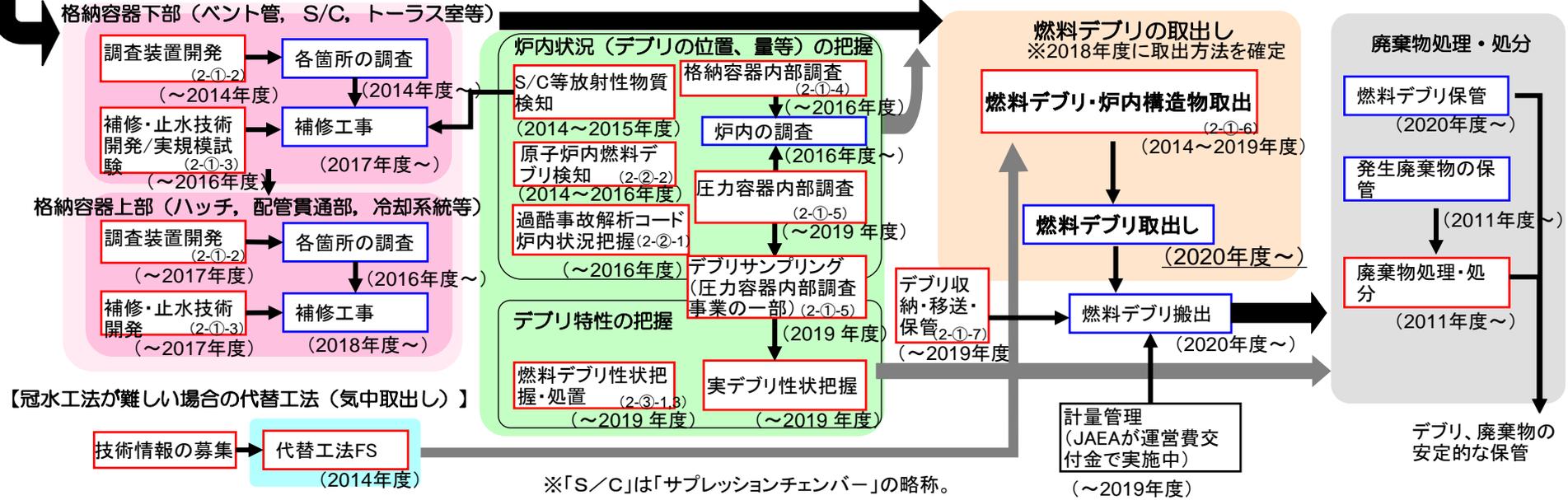


福島第一原発の廃炉・汚染水対策に係る研究開発等のフロー図

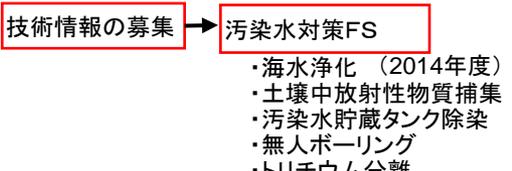


【冠水工法 (燃料デブリを冠水させた状態での取出し)】

- 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)



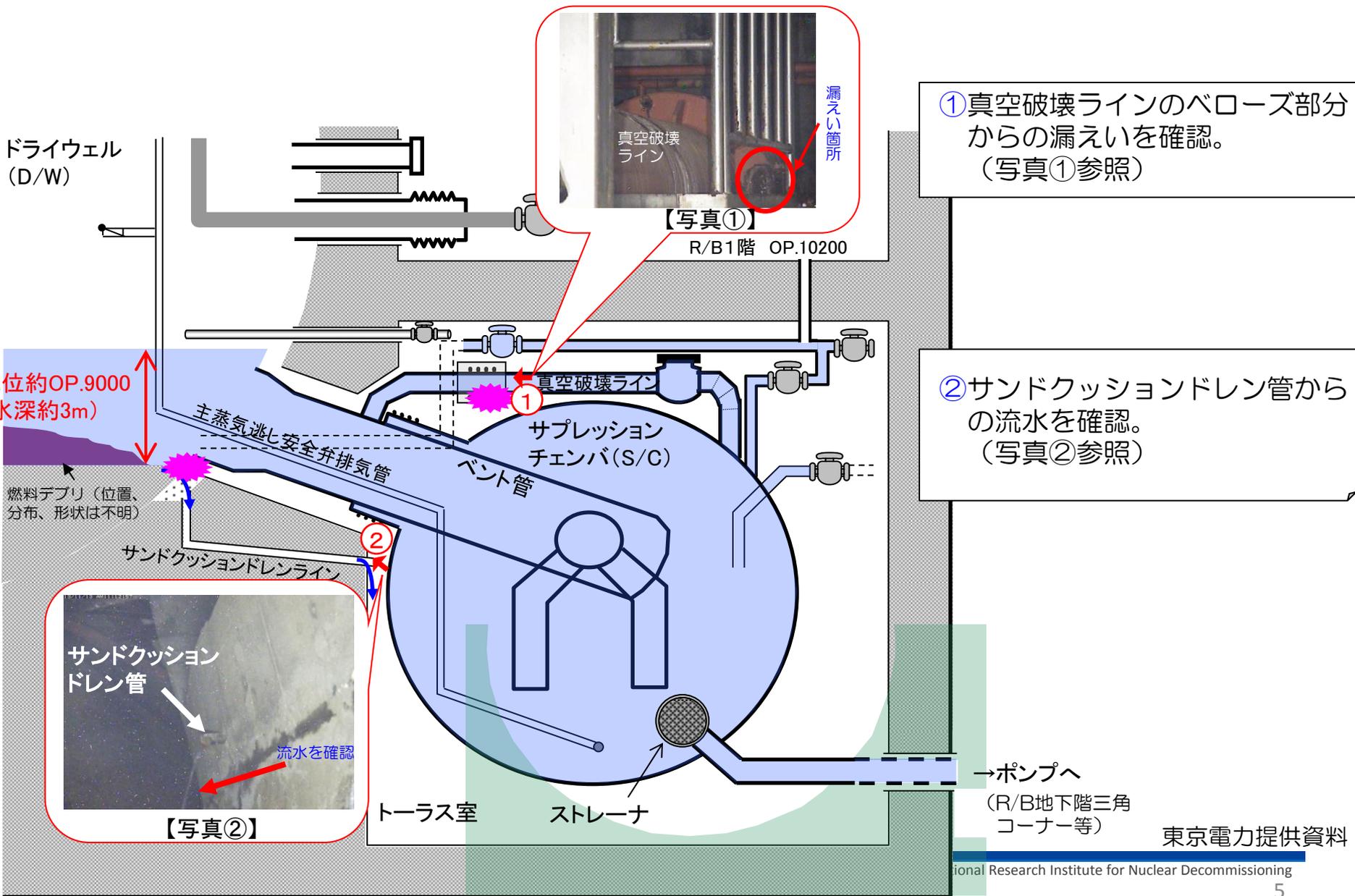
※「S/C」は「サブプレッションチェンバー」の略称。



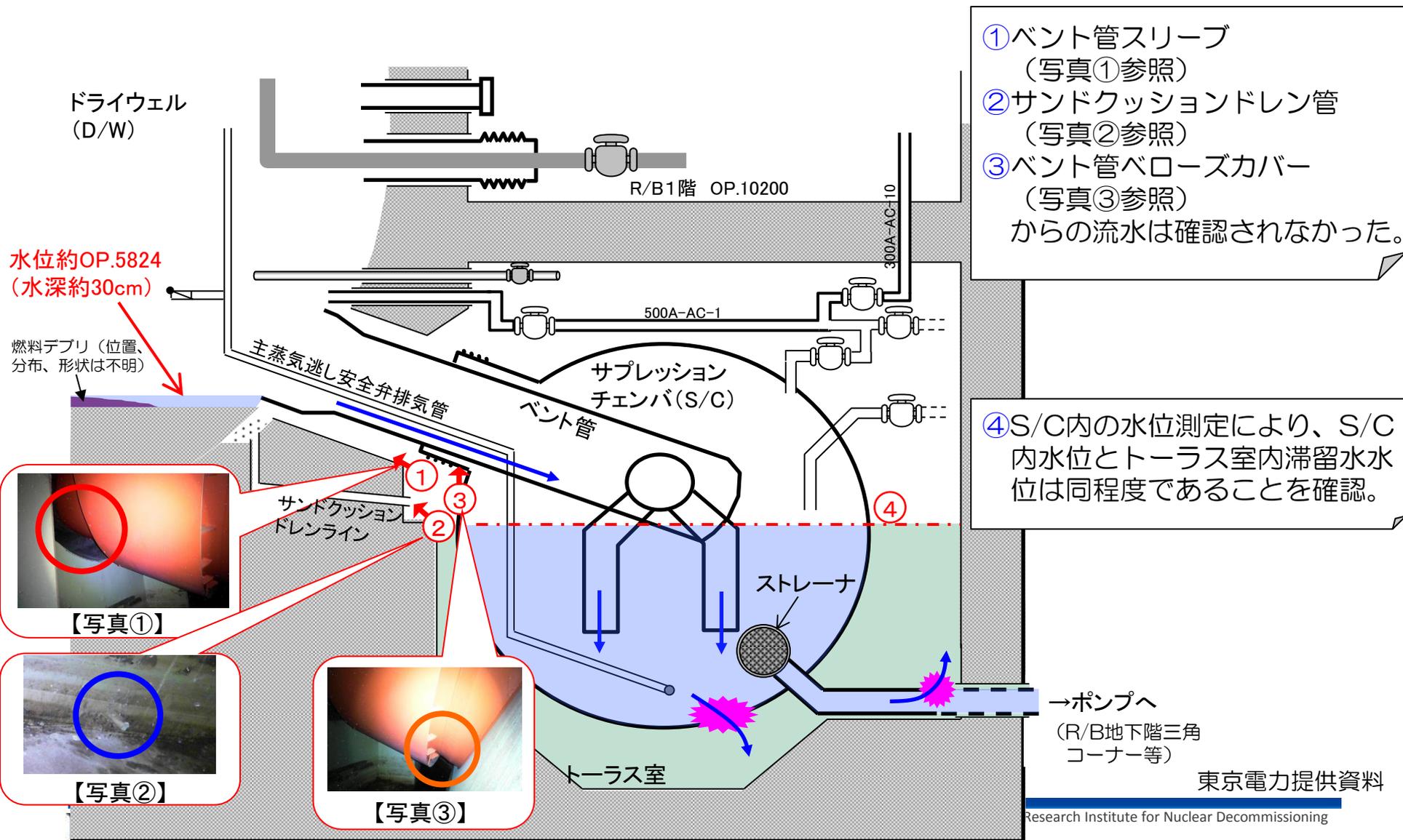
燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発

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)

【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ベント管ベローズカバー (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】

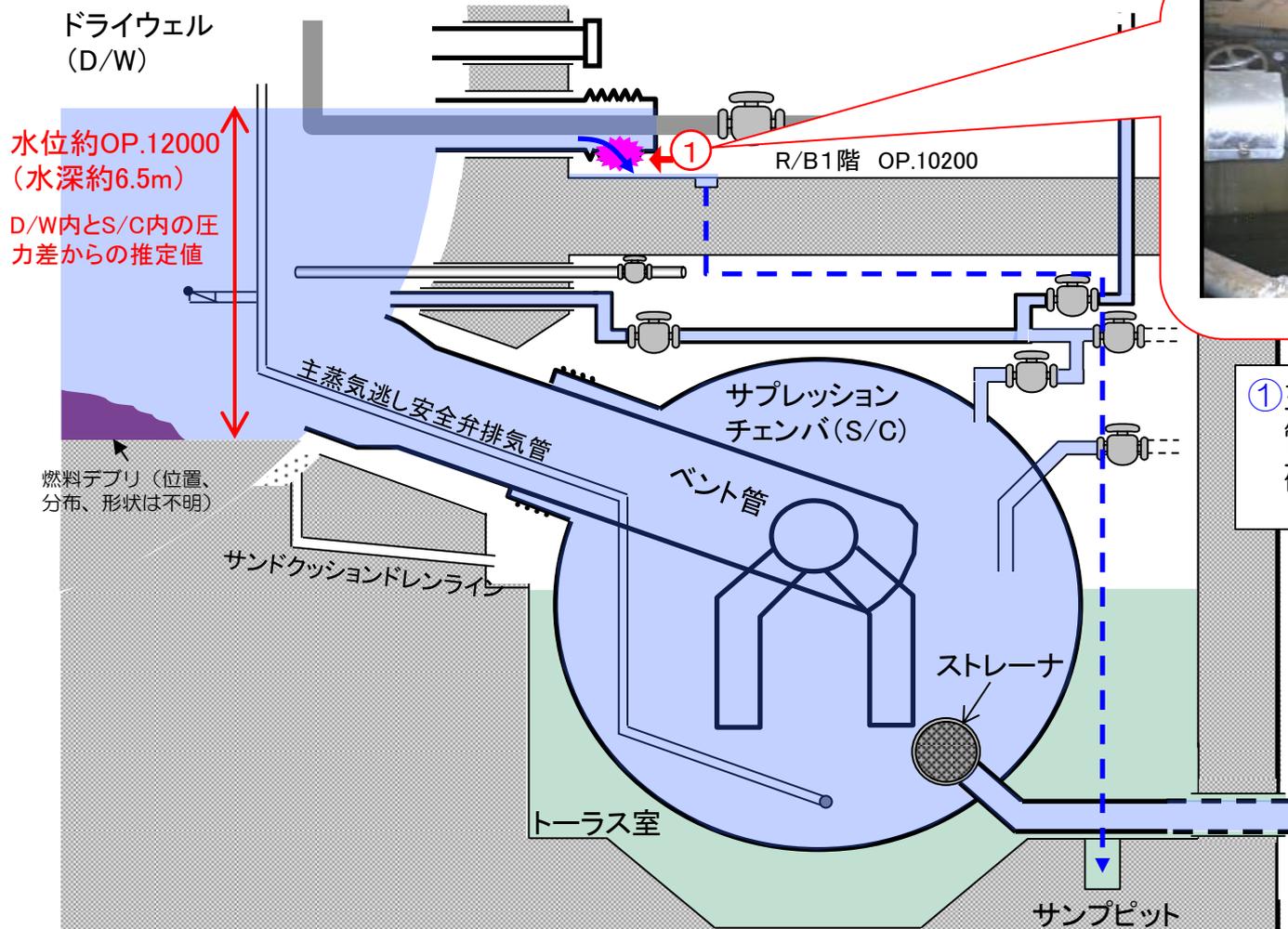


【写真②】



【写真③】

【3号機】PCV下部の現状イメージ図

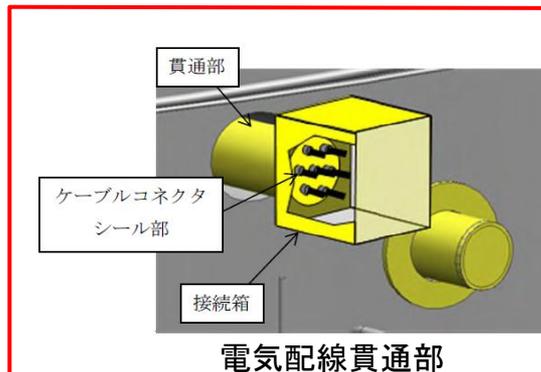
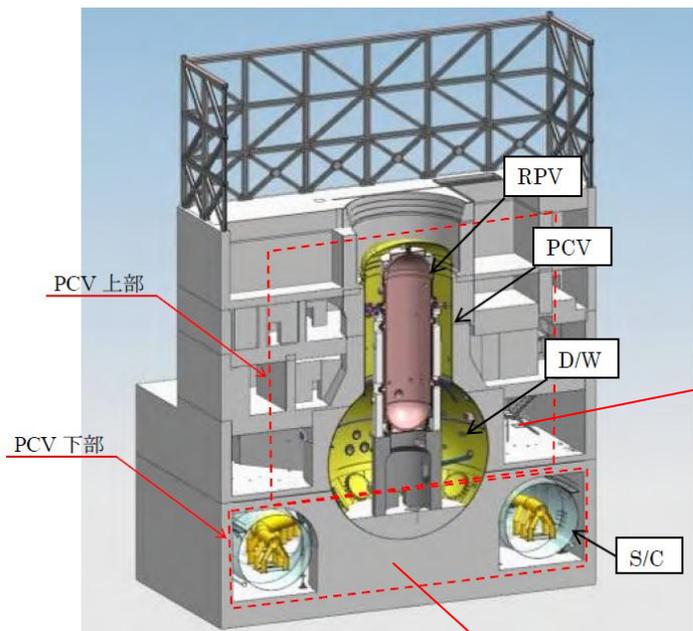


【写真①】

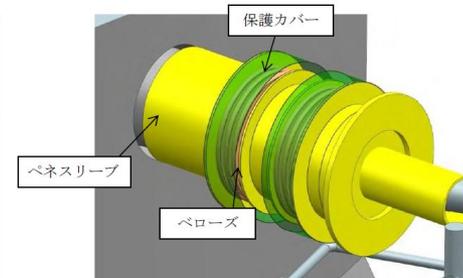
①主蒸気隔離弁室内の主蒸気系配管ベローズ付近からの漏えいを確認 (写真①参照)。

東京電力提供資料

格納容器補修技術の開発（補修対象箇所）

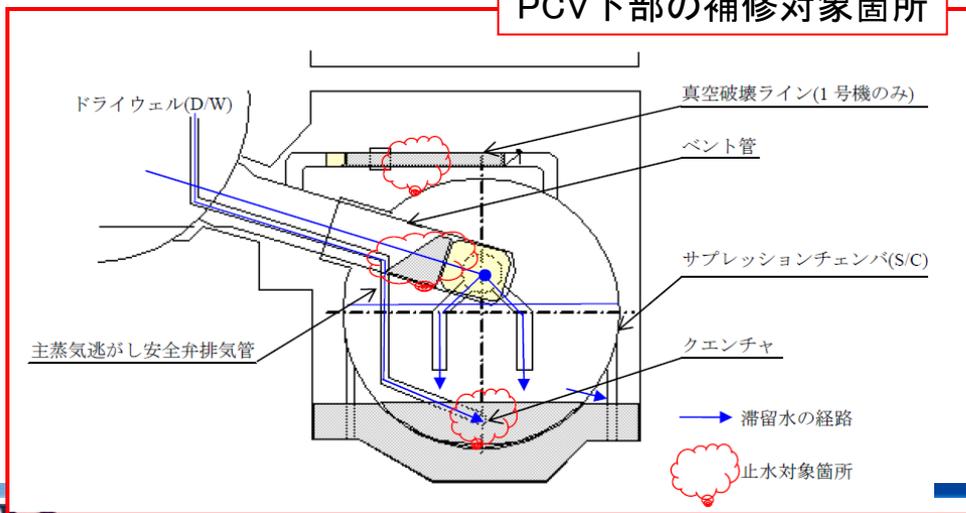


PCV 上部の補修対象箇所



配管貫通部ベローズ

PCV 下部の補修対象箇所



機器ハッチ

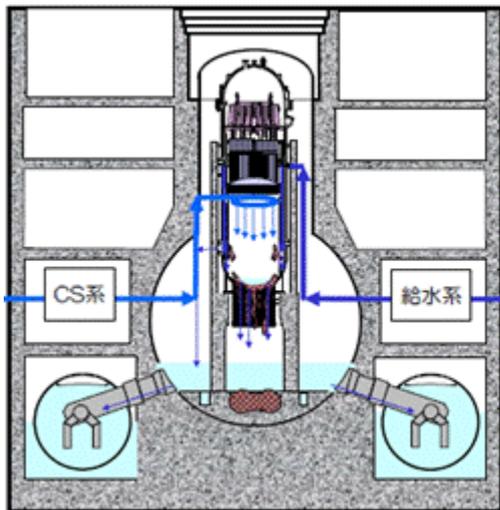
燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発

格納容器内部調査技術の開発 (2-①-4)

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】

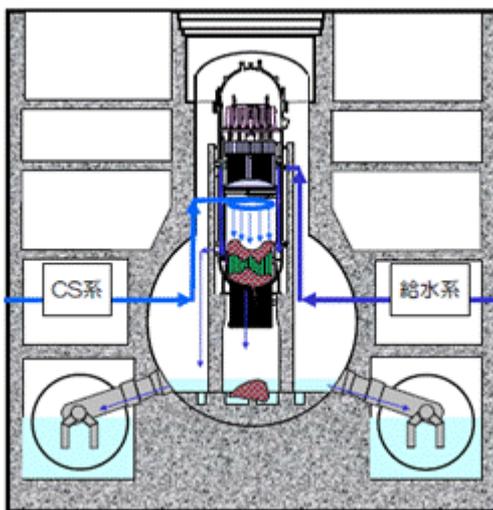


・溶融した燃料は、ほぼ全量がRPV下部プレナムへ落下しており、元々の炉心部にはほとんど燃料が存在していない

⇩ 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

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】

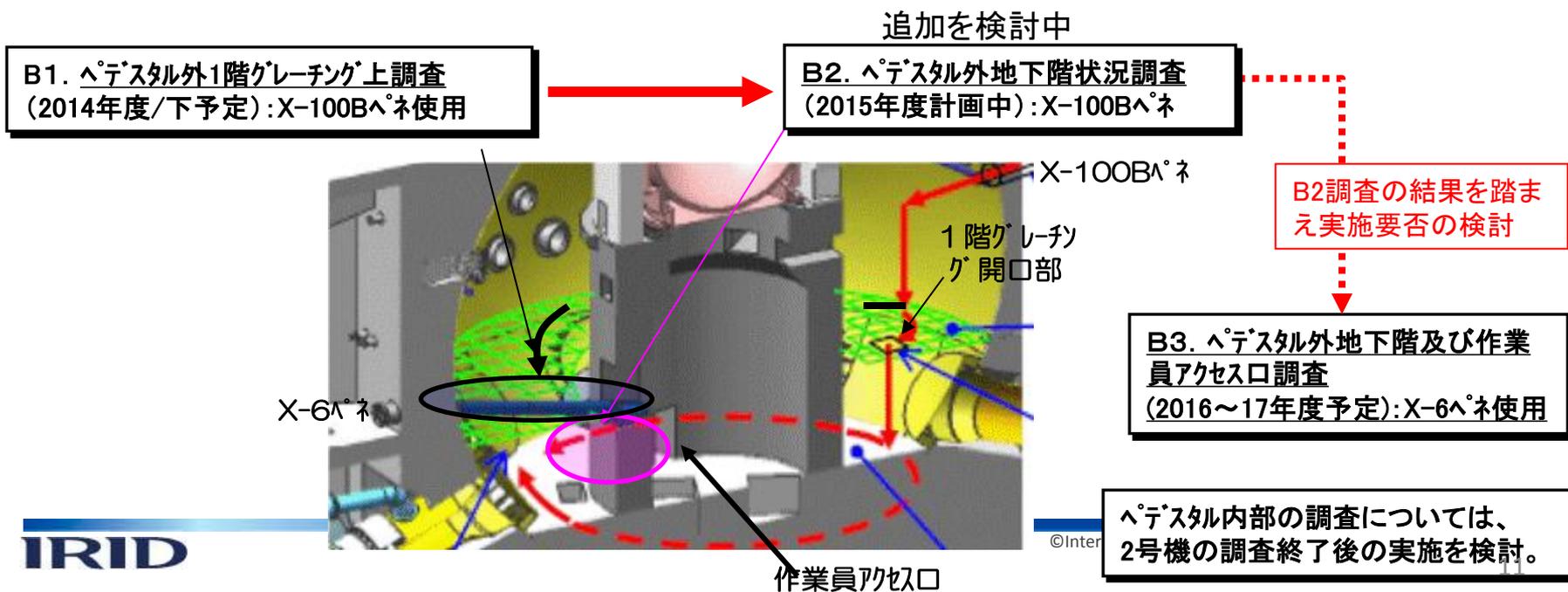
(1) X-100Bペネからの調査(～2015年度)

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ル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



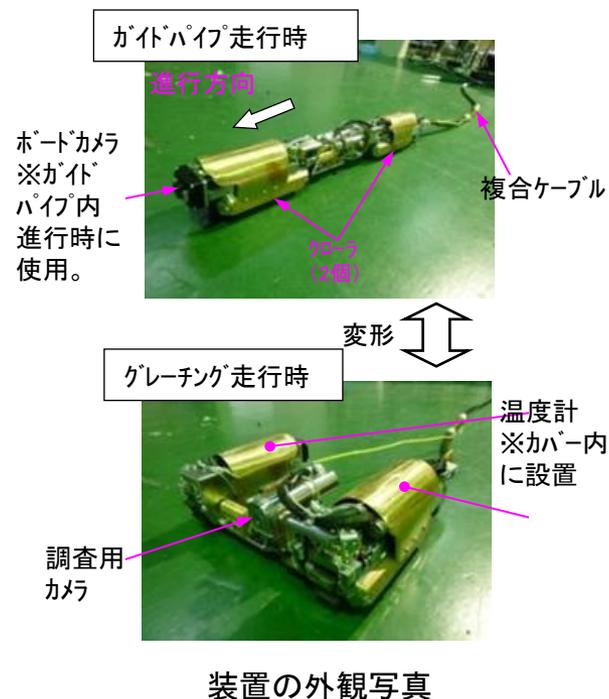
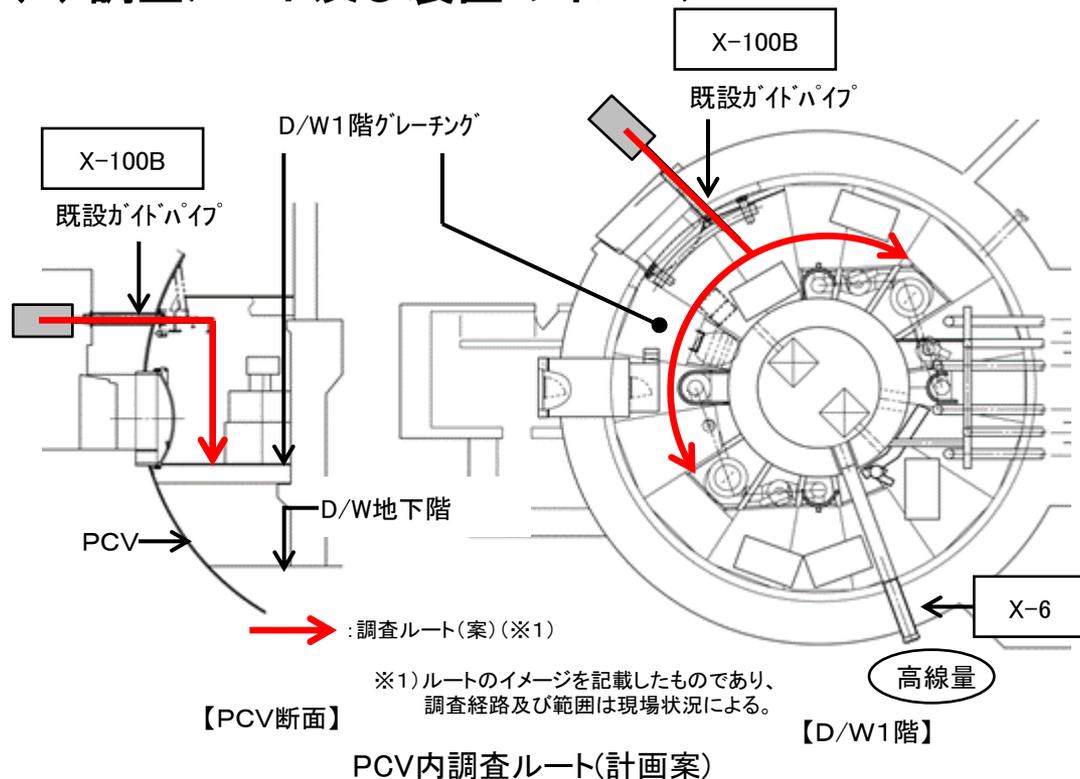
開発状況(ペDESTタル外 装置)

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



各号機の開発ステップ（2号機）

【調査対象部位】：プラットフォーム上(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、ペデスタル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、ペデスタル内部の調査を行う。

A1. CRDレール状況調査(2013/8実施済)

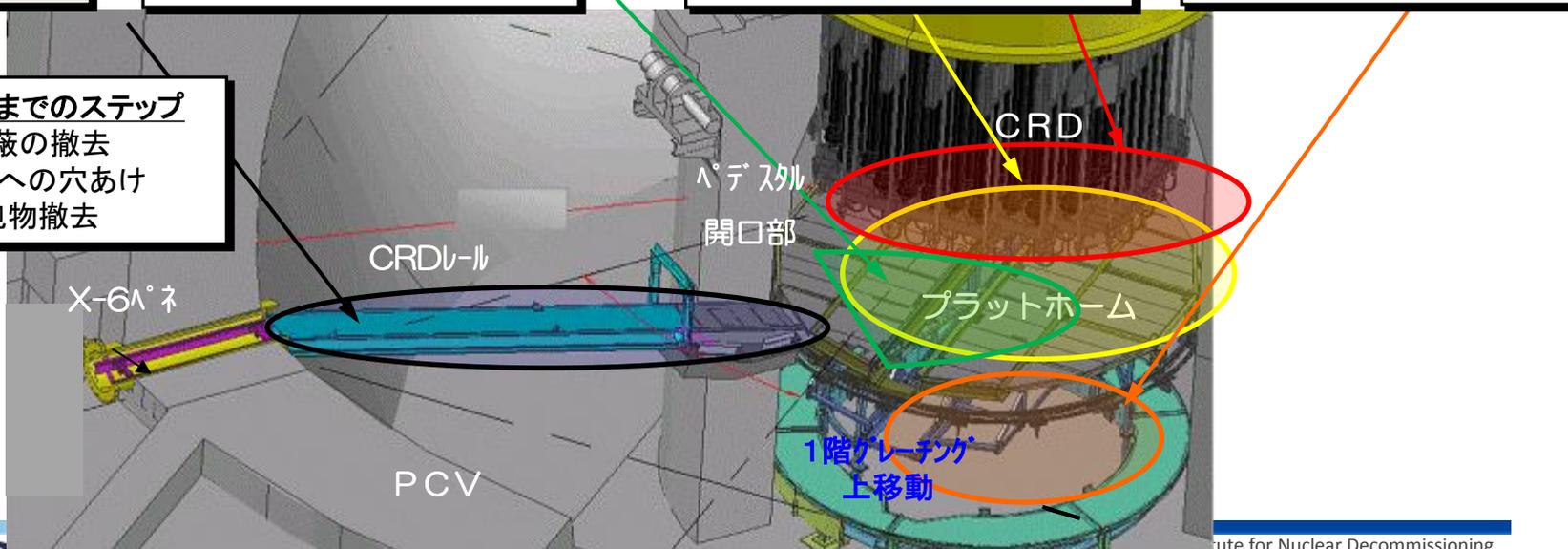
A2. ペデスタル内部プラットフォーム状況調査(2014年度/下予定)

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. ペデスタル地下階の状況調査(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



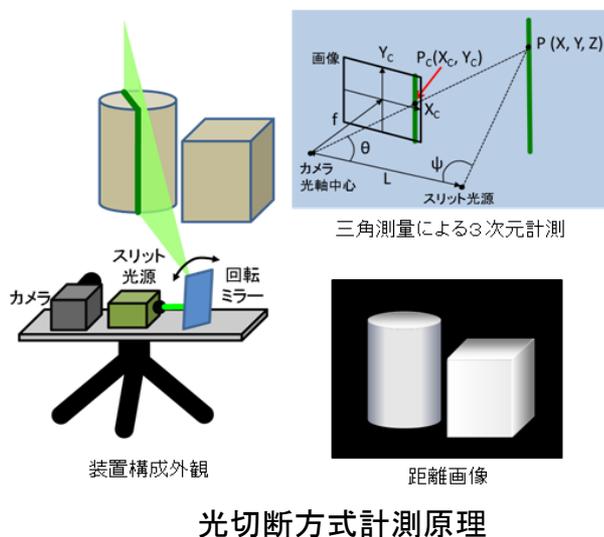
開発状況（燃料デブリ計測装置）

(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

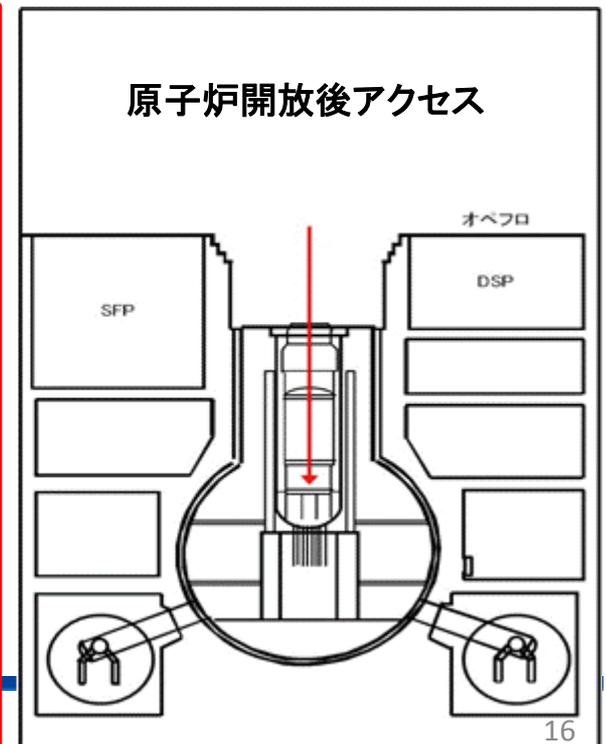
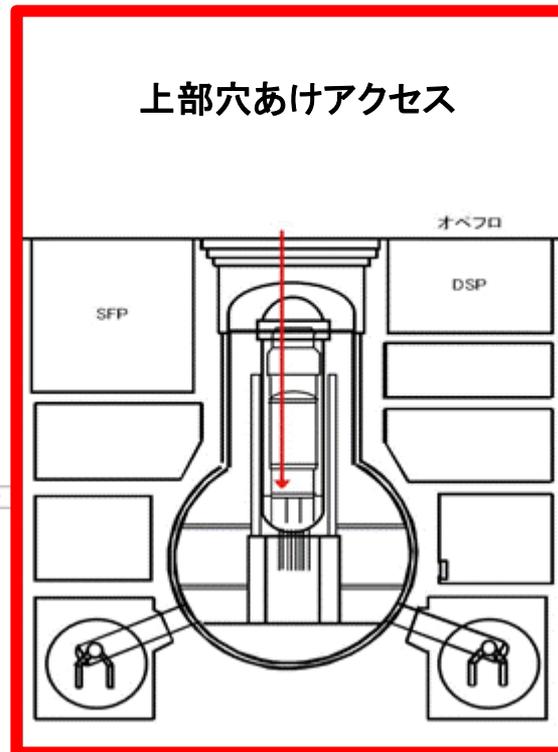
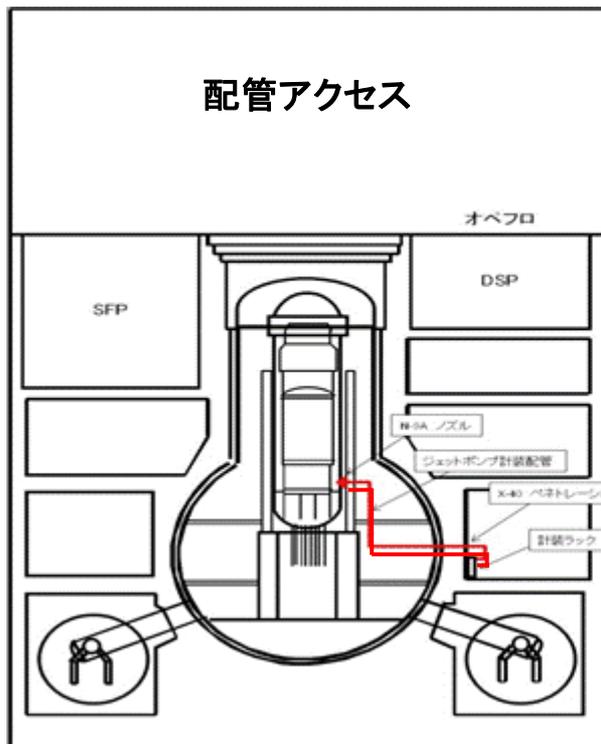
燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発

圧力容器内部調査技術の開発 (2-①-5)

RPV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	■					



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

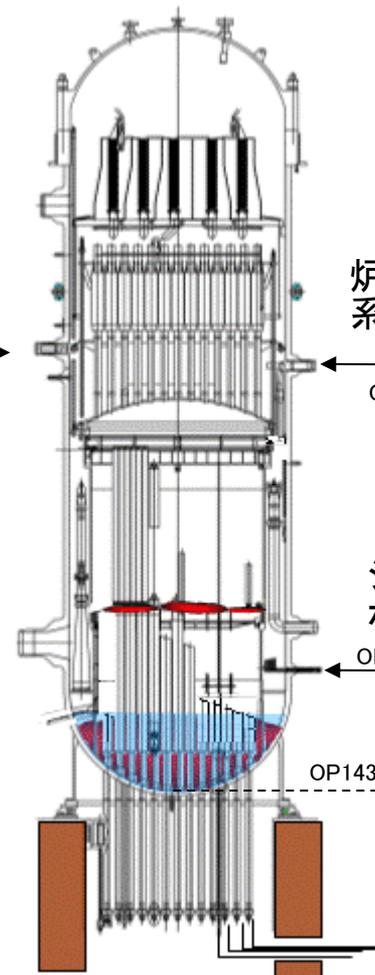
炉心スプレイ(CS)A
系（CSノズルN5A）

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)



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)

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

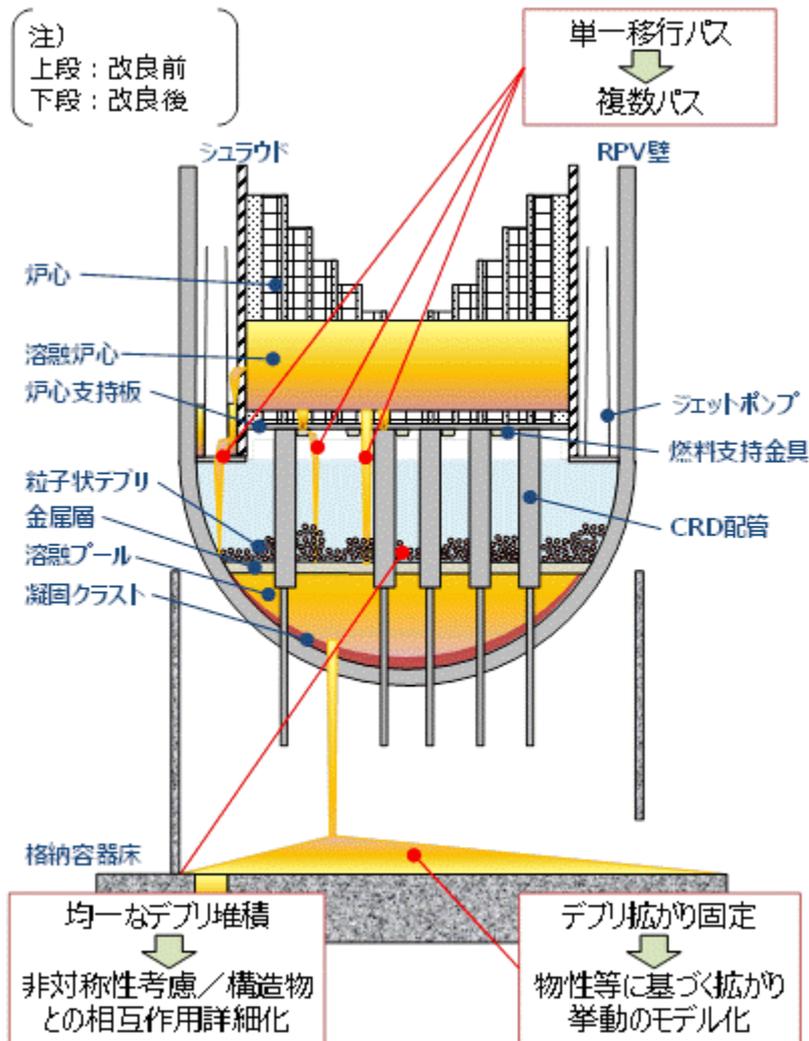
■MAAP5コードの改良と検証

●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

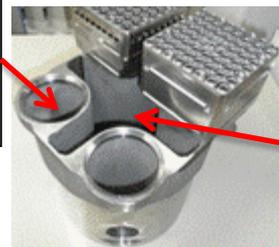
- 炉心損傷進展モデル改良
(溶融物の移行経路を複数考慮)
- 下部プレナム内デブリ挙動モデル改良
(堆積形態、構造物相互作用)
- 格納容器内デブリ挙動モデル改良
(拡がり挙動、コンクリート相互作用)

●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



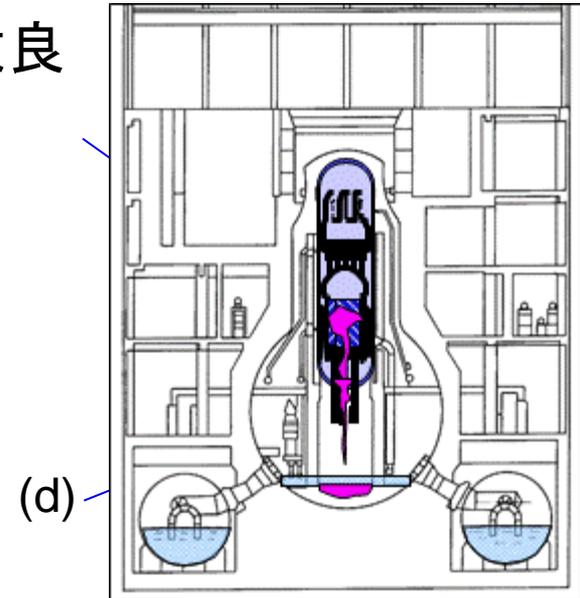
追加された経路①
燃料が乗っている
穴にデブリが落下



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

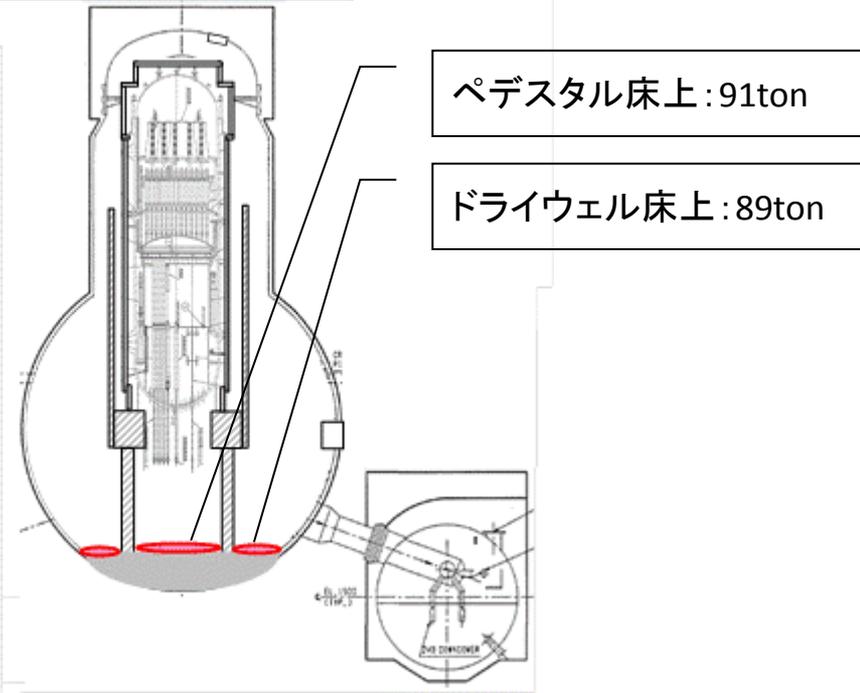
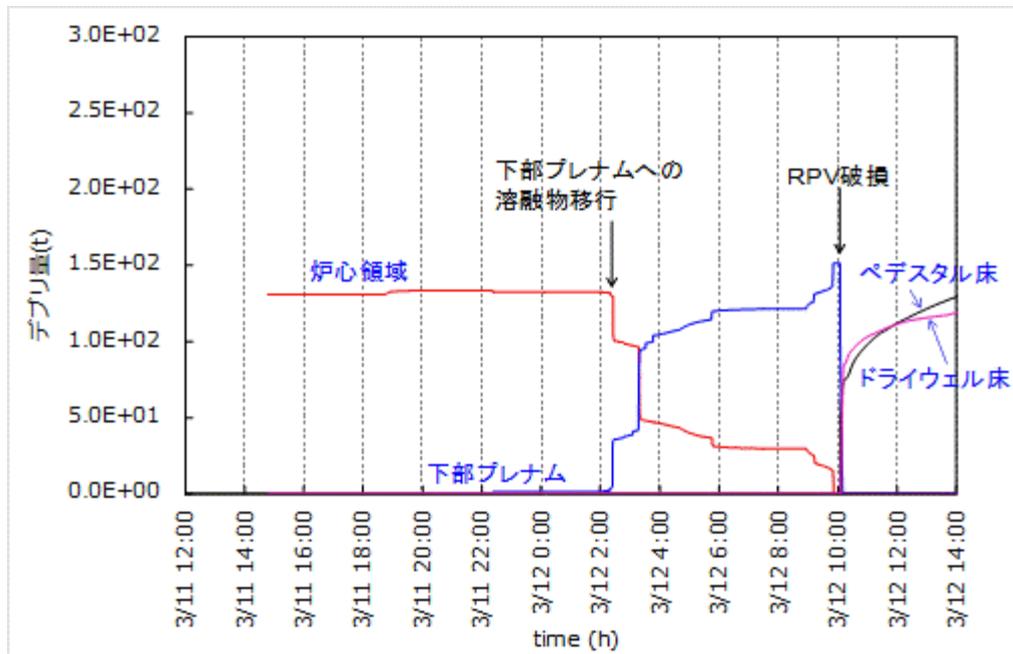
SAMPSONのモデル追加・改良

- (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℃)	2011/3/11 18:40頃
炉心溶融 (燃料棒最高温度 ≥ 2200℃)	2011/3/11 18:50頃
RPV破損	2011/3/12 10:00頃



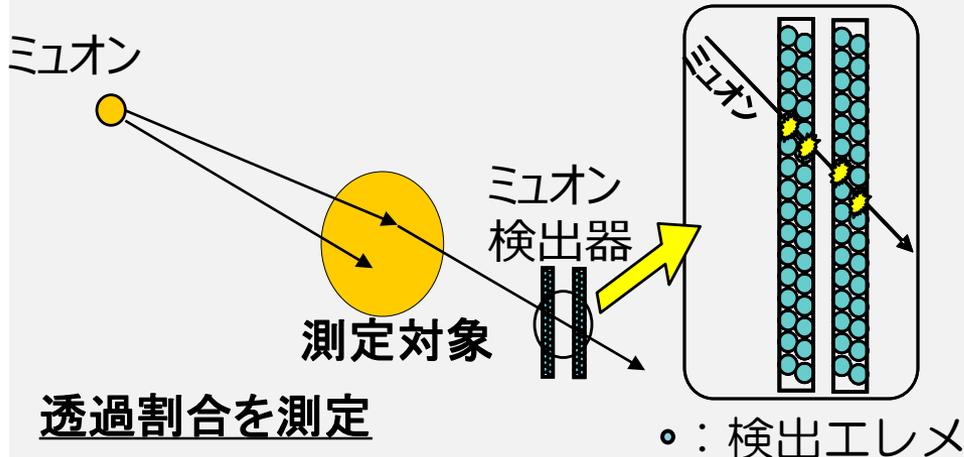
(注) 2011/3/12 13:00頃のデブリ量 (燃料、構造材)

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（ミュオン観測技術）

透過法

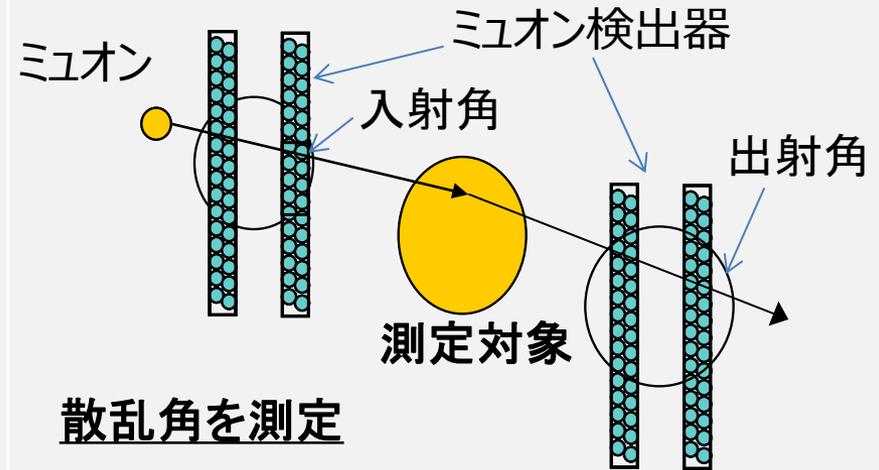


飛来方向の物質有無(2次元)

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

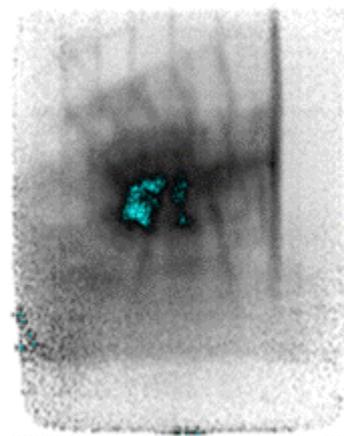
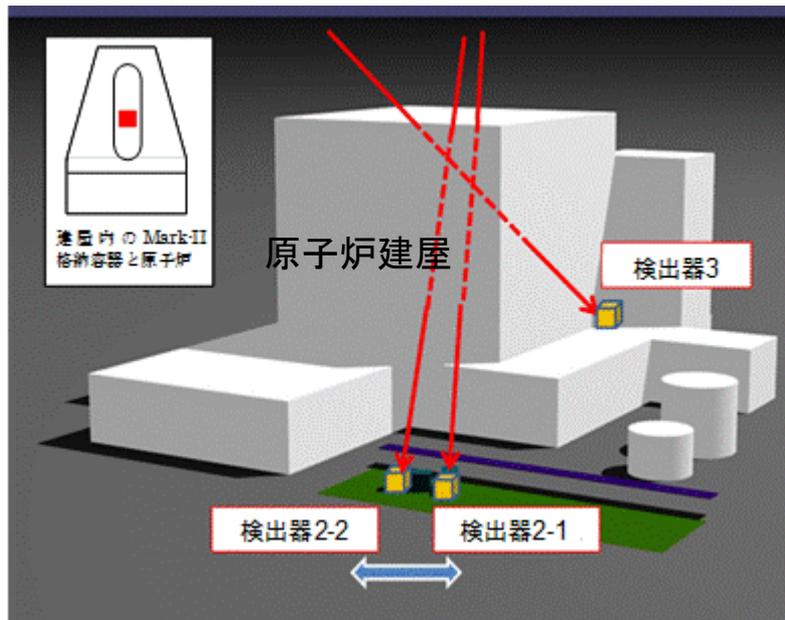
2つの大型ミュオン検出器(開発要)

ウラン等の重元素を識別可能

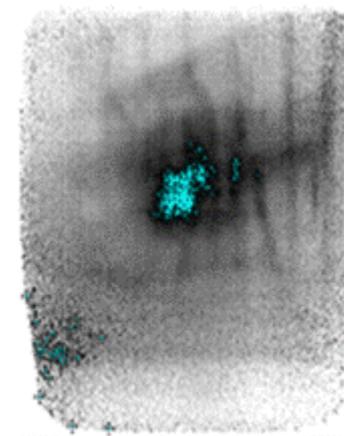
これまでの成果概要（ミュオン透過法）

日本原子力発電東海第2原子力発電所にて、同規模の装置で測定

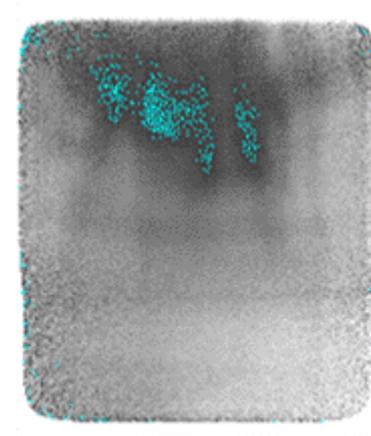
- 原子炉内には燃料がない
- 使用済燃料プールには燃料があるとの測定結果。



検出器2-1



検出器2-2



検出器3

東海第二原子力発電所での測定位置

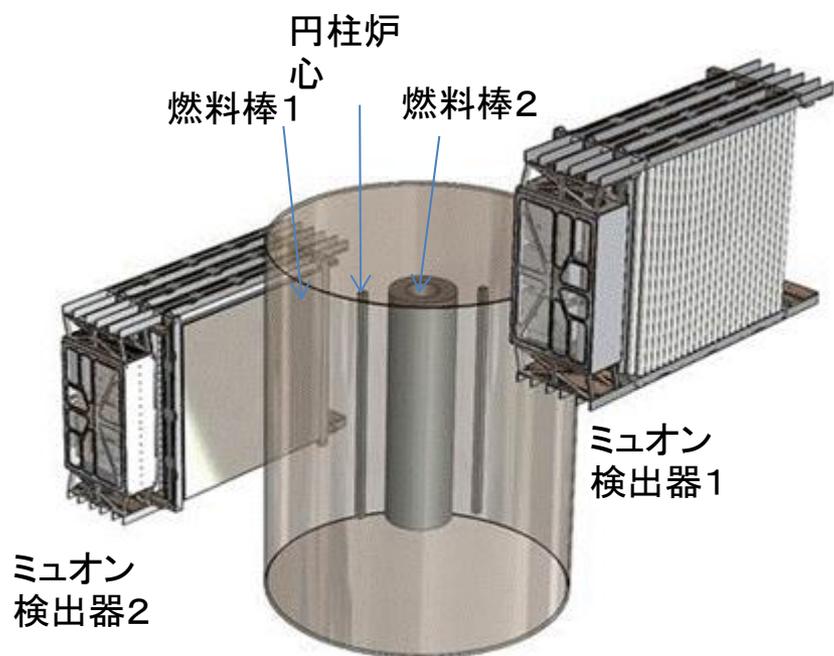
(3地点)

各地点での測定結果

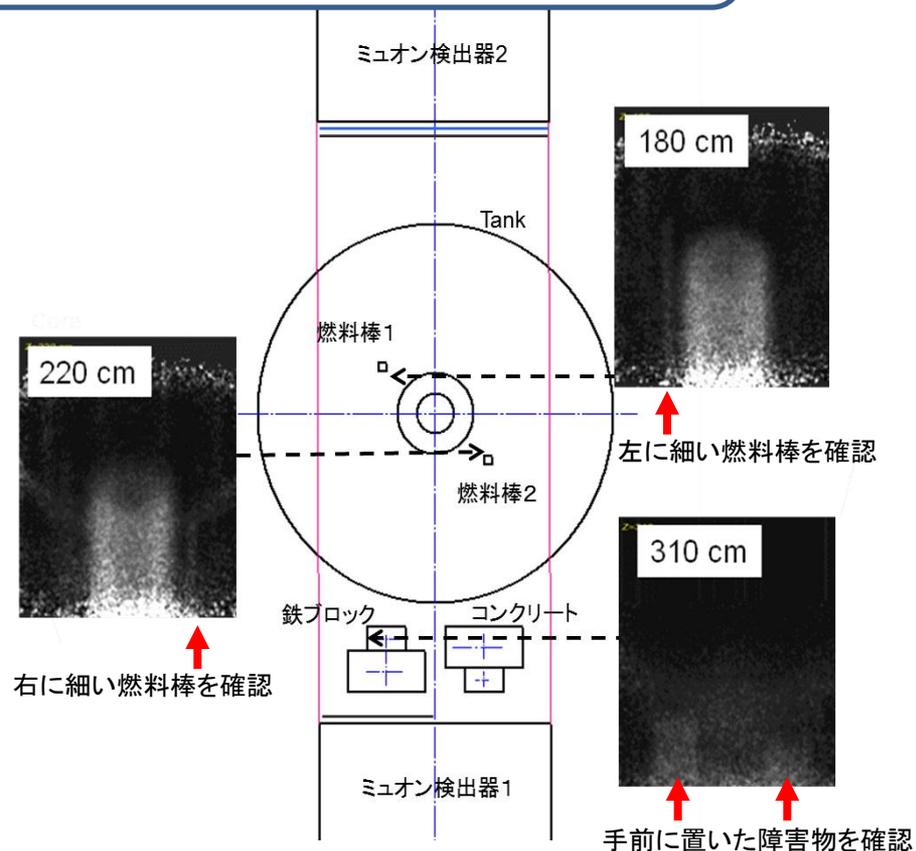
釣り鐘型の格納容器の外に密度の高い物質が存在

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

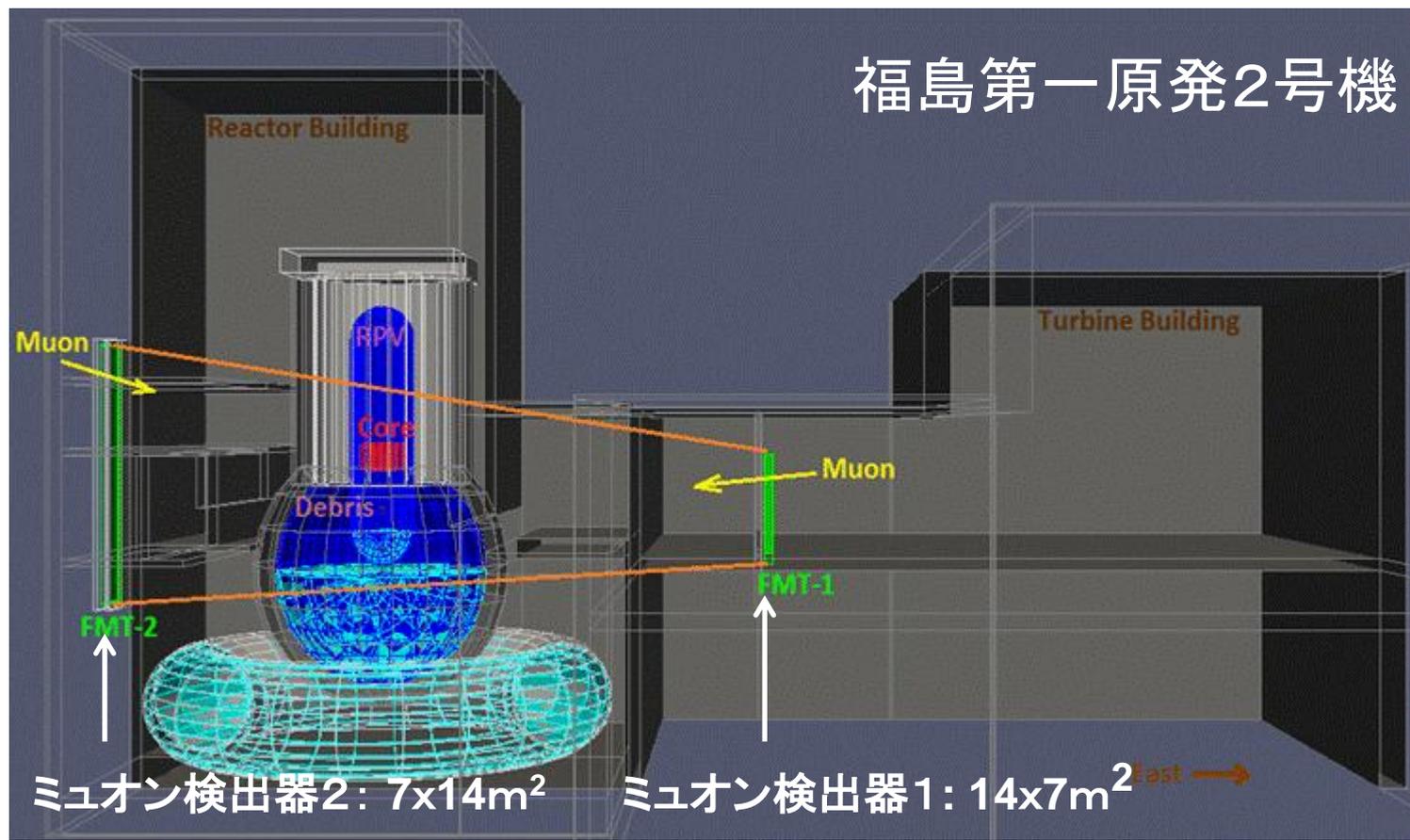


測定体系



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

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)

【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。

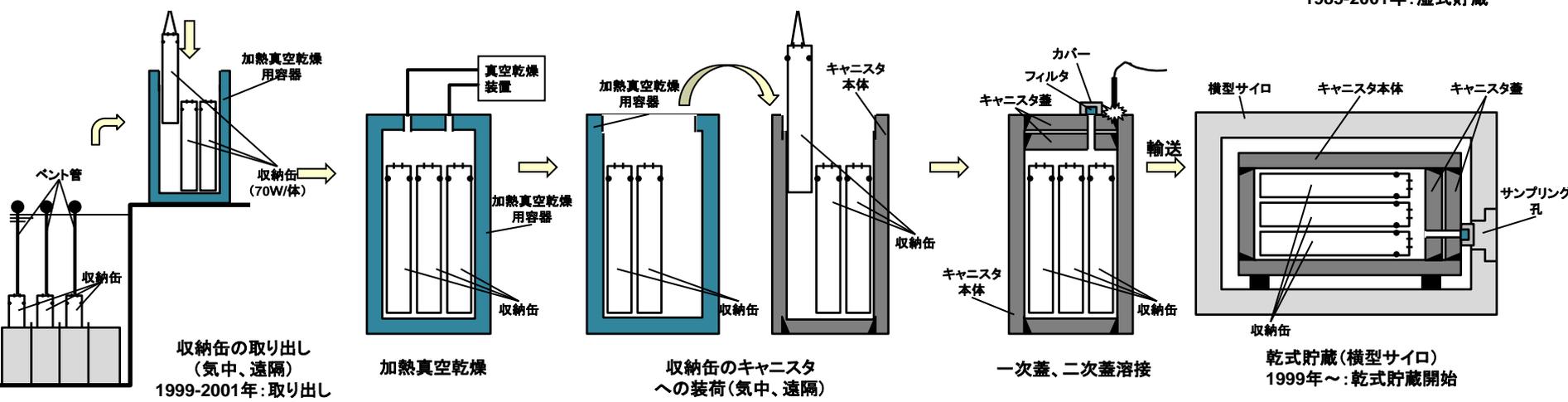
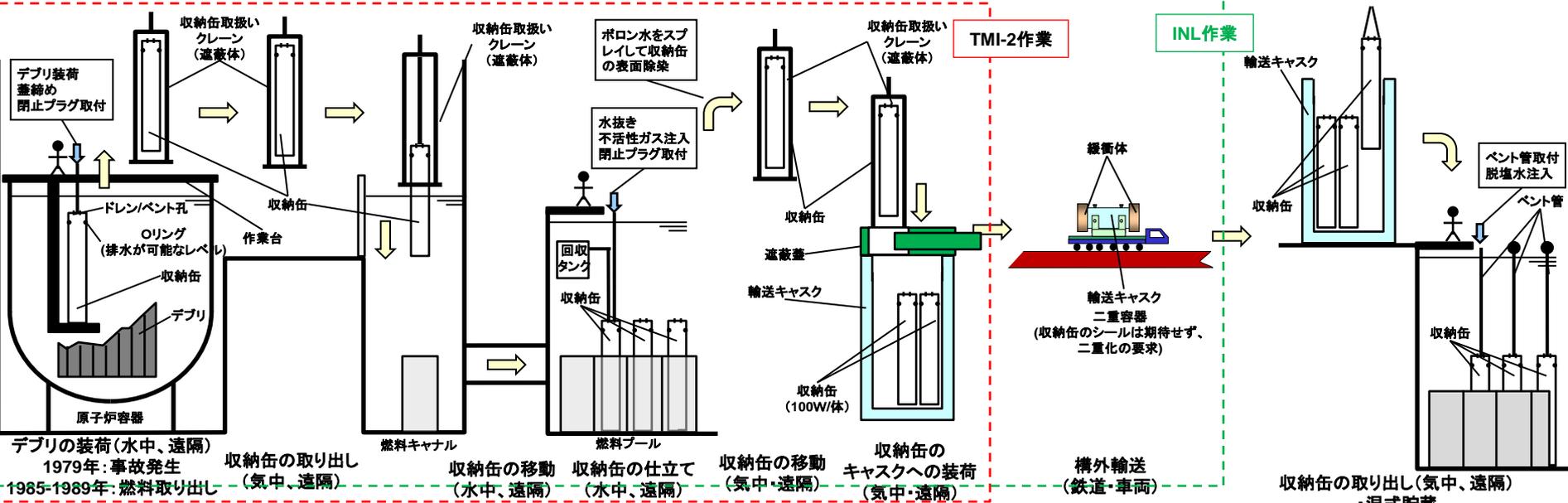
【開発の目標】

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燃料デブリ収納・移送・保管に適した収納缶要求仕様を設定、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

(TMI-2燃料デブリ処置の概要)



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)

模擬デブリを用いた特性の把握（研究開発の方針）

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。

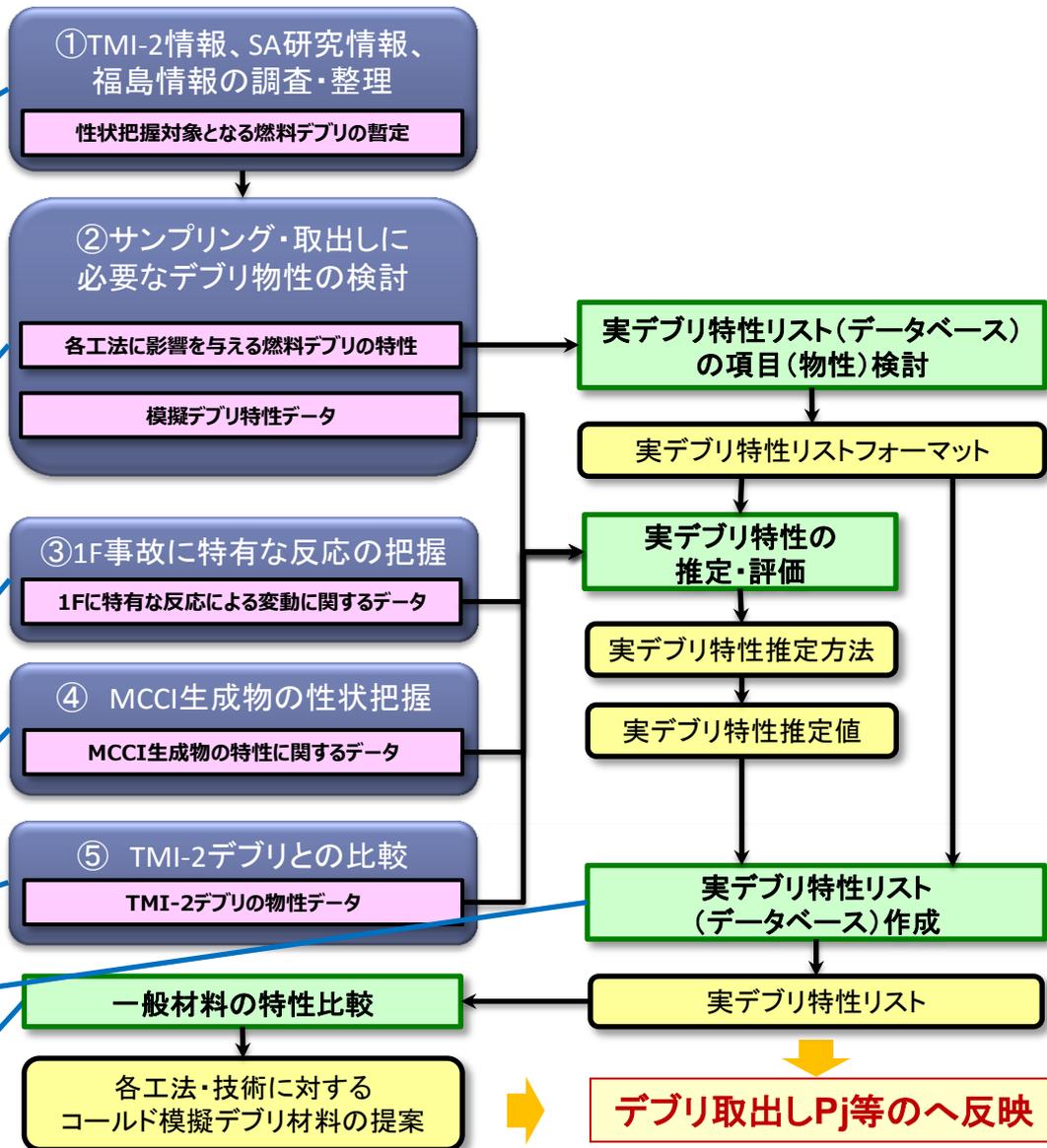
- 海外知見や国際協力を有効に活用し、MCCI現象及び生成物に関する情報を入手する。

- TMI-2デブリを用いて物性データを取得する。

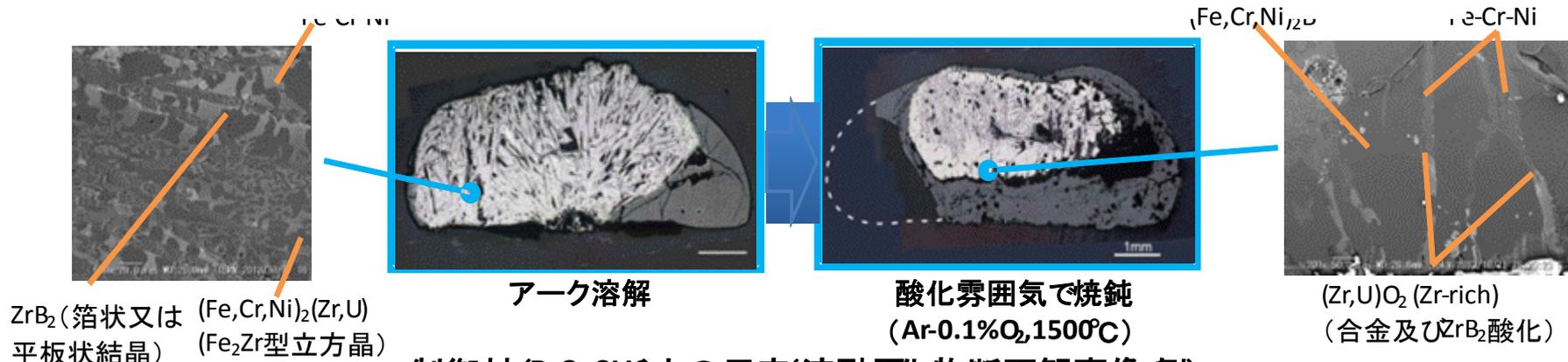
- 取得したデータ・情報を基に実デブリ特性を推定し、特性リストとして取りまとめる。

- 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

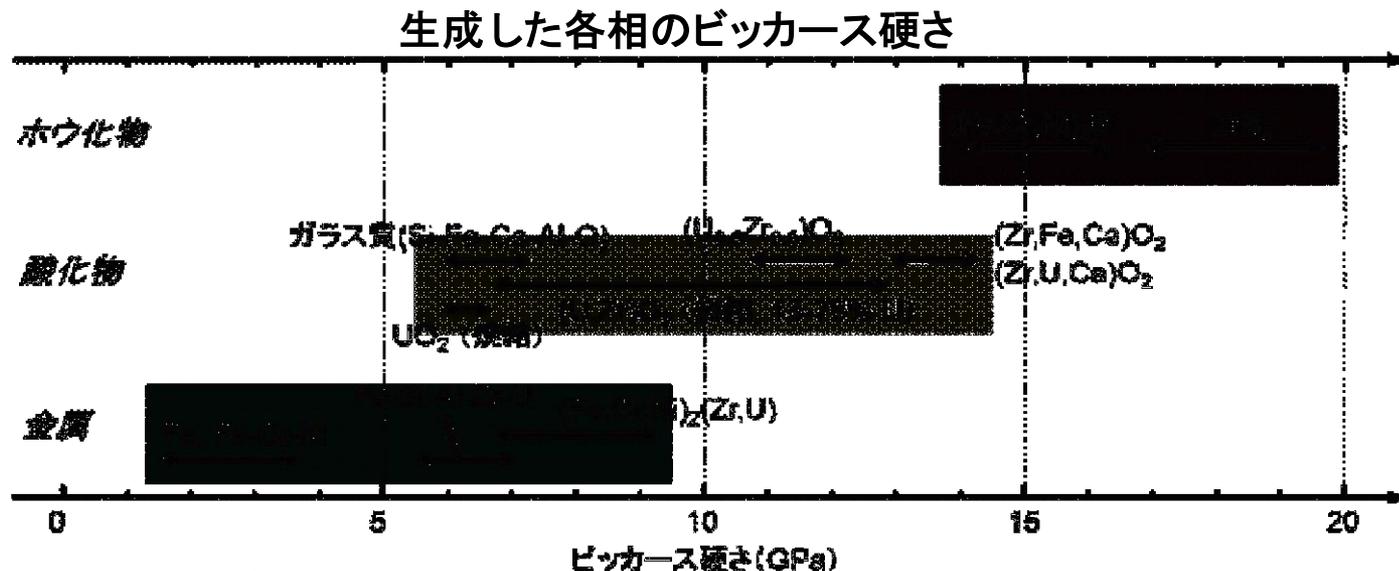


模擬デブリを用いた特性の把握（平成25年度成果）



制御材 (B_4C+SU9) との反応(溶融固化物断面観察像例)

(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)

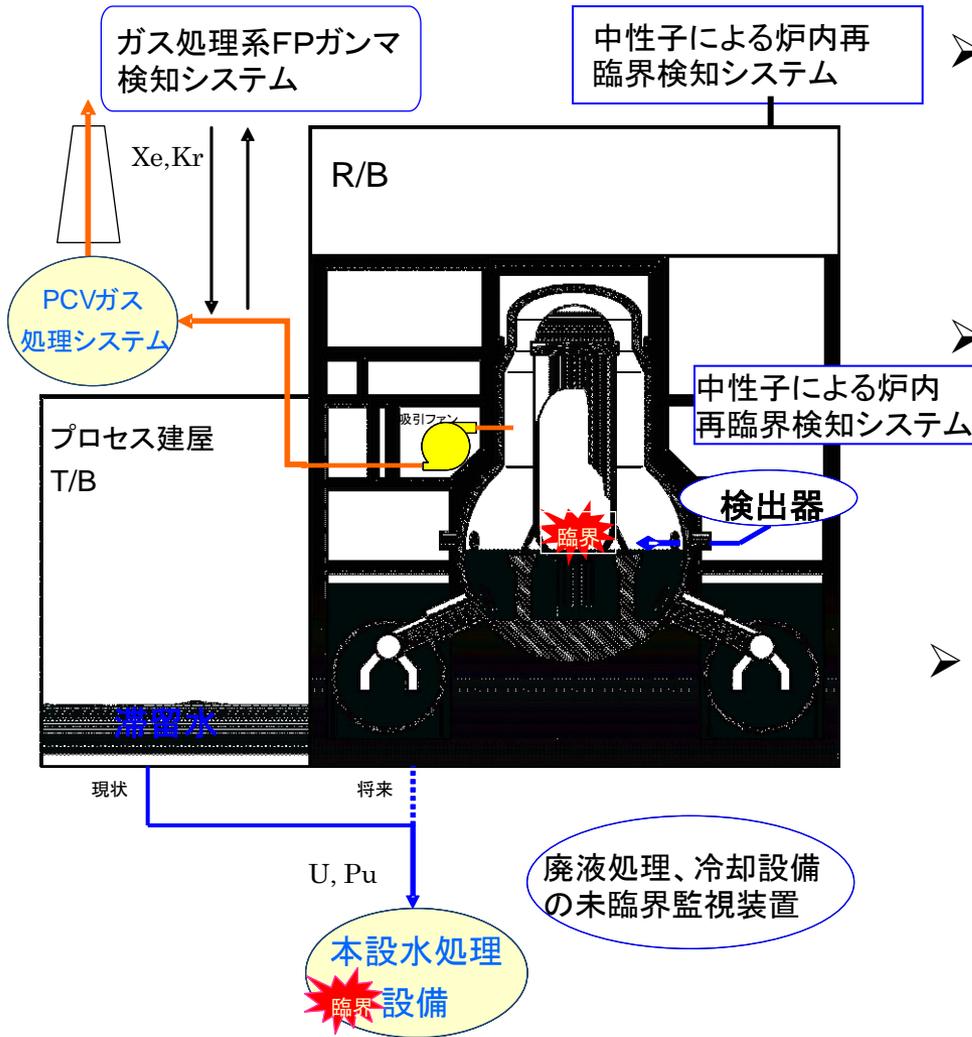


(デブリの化学系(ホウ化物、酸化物、金属)毎に硬度の分布を推定)

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 (2-②-1)

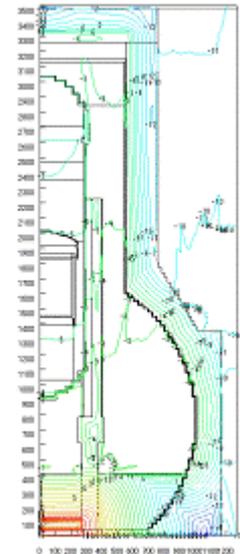
未臨界監視および再臨界検知の概要



➤ 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。
(デブリ取り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。
=>再臨界検知

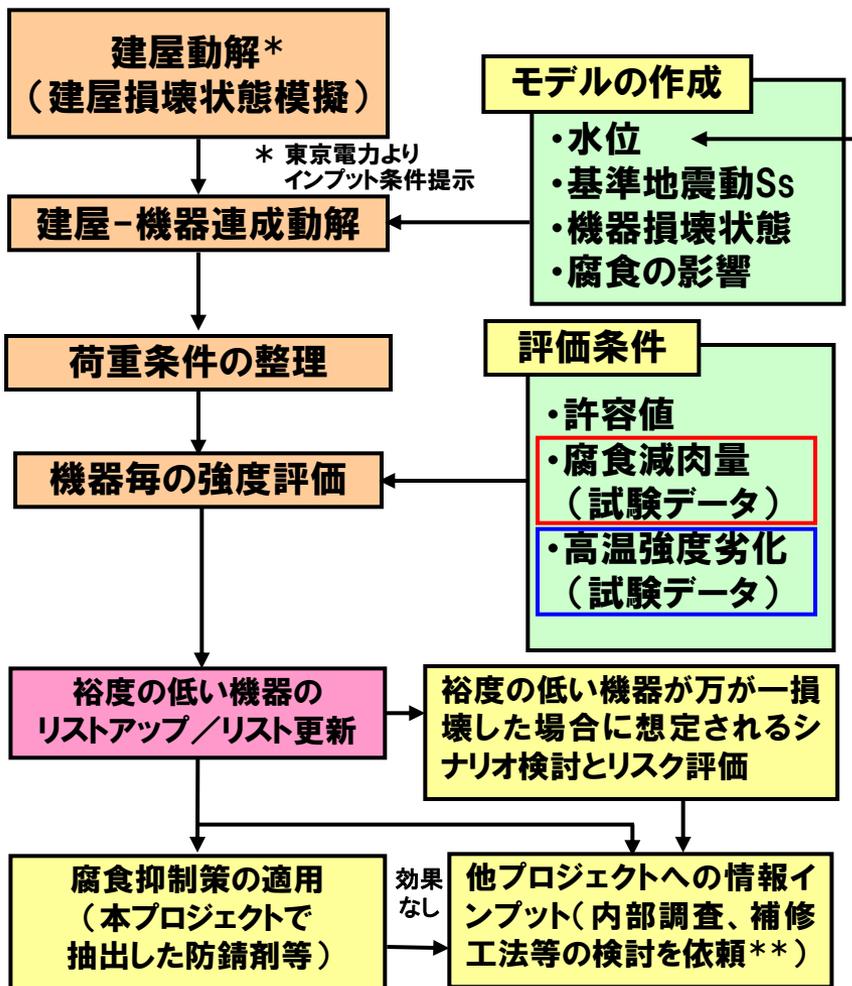


PCV内臨界時の中性子線分布

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)

健全性評価全体評価フロー



* 東京電力より
インプット条件提示

モデルの作成

- 水位
- 基準地震動Ss
- 機器損壊状態
- 腐食の影響

評価条件

- 許容値
- 腐食減肉量
(試験データ)
- 高温強度劣化
(試験データ)

裕度の低い機器が万が一損壊した場合に想定されるシナリオ検討とリスク評価

他プロジェクトへの情報イン
プット(内部調査、補修
工法等の検討を依頼**)

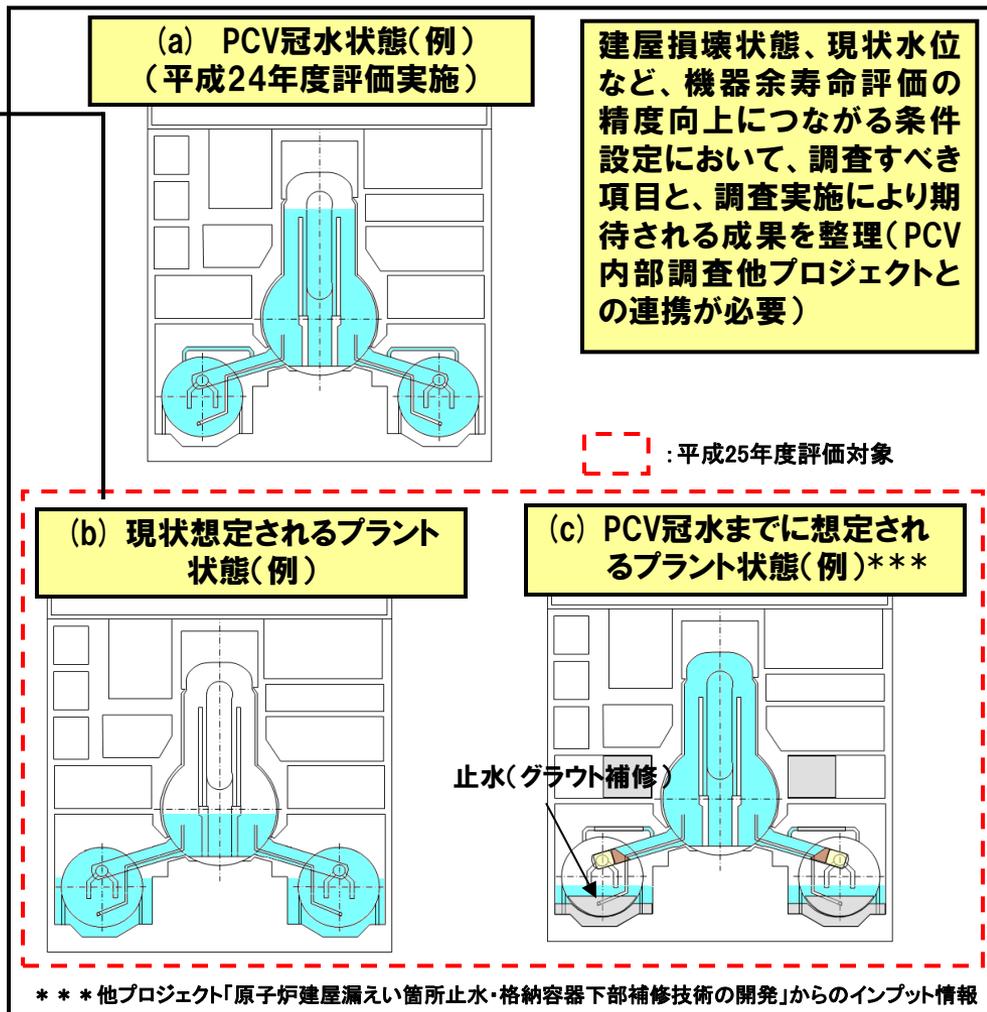
効果なし

** 機器設計や構造の専門家を中心とした検討が不可欠であり、現状の研究開発体制の見直しが必要

□ : 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)

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)

研究方針

① 燃料デブリ取出工法

燃料デブリ取出し工法は各プラント(1～3号機)の状態を考慮する必要があるが、プラントごとに状態が異なり、各プラントに適した取出し工法が定まっていない。

⇒PCVを冠水させて取り出す工法(完全冠水)に加えて、冠水できない場合の代替工法として、部分冠水(PCV上部まで水を張らない)または気中で取り出す工法(部分気中、完全気中)を比較し評価する。現状の1～3号機の状態及び推定情報を整理した上で、各プラントに対する各工法の適用性を評価する。

② 燃料デブリ取出し技術

性状が不明確な燃料デブリや、溶融した炉内構造物を加工して取り出す技術が必要となるが、1Fに適用可能な確立された技術がない。

⇒前例として、TMI-2で実施した燃料デブリ取出しや、国内プラントにおける大型改造工事が挙げられる。これらの実績のある技術を中心に、燃料デブリを模擬した試験体の加工試験を実施し、適用可能な技術を選定する。炉内構造物の取出しに関しては、炉内構造物が設計通りの状態ではない可能性があることから、このような状況を想定した上で適用可能な技術の開発を行う。

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

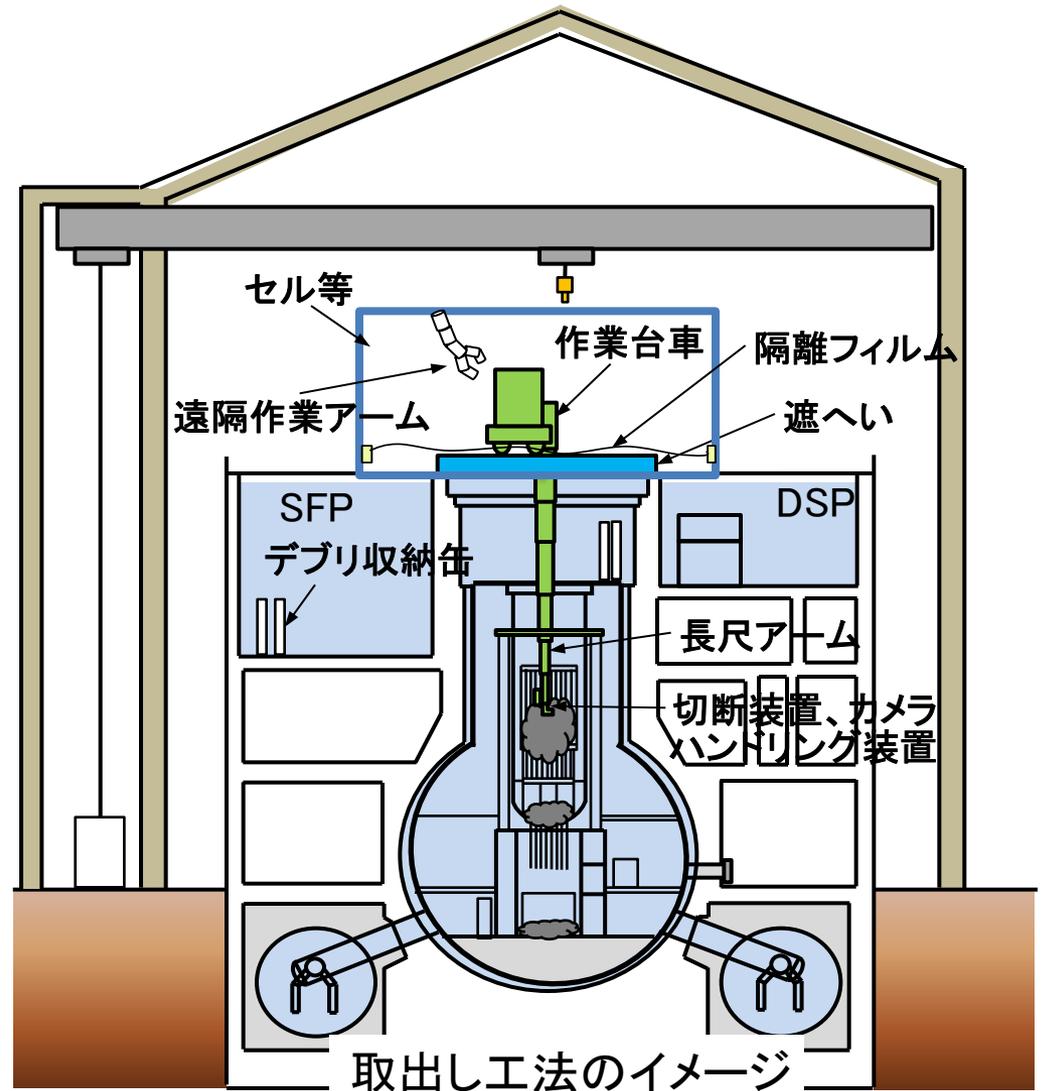
- ①セラミック試験体の切断試験
- ②試験体製作

(2)遠隔作業

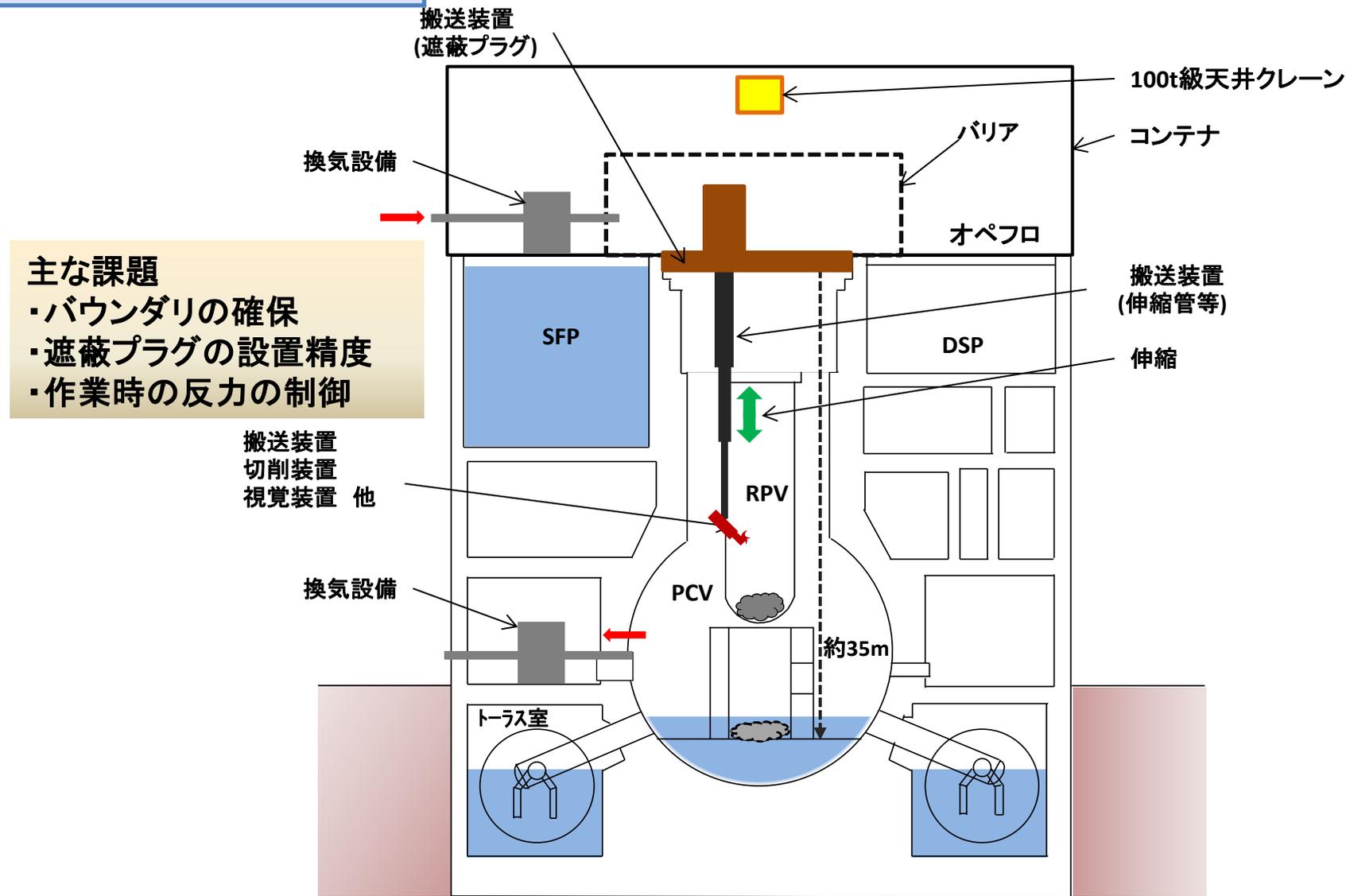
- ①長尺アーム制御技術
- ②遠隔作業アーム試作(セル内含む)

(3)汚染拡大防止

- ①隔離フィルム・シートの選定

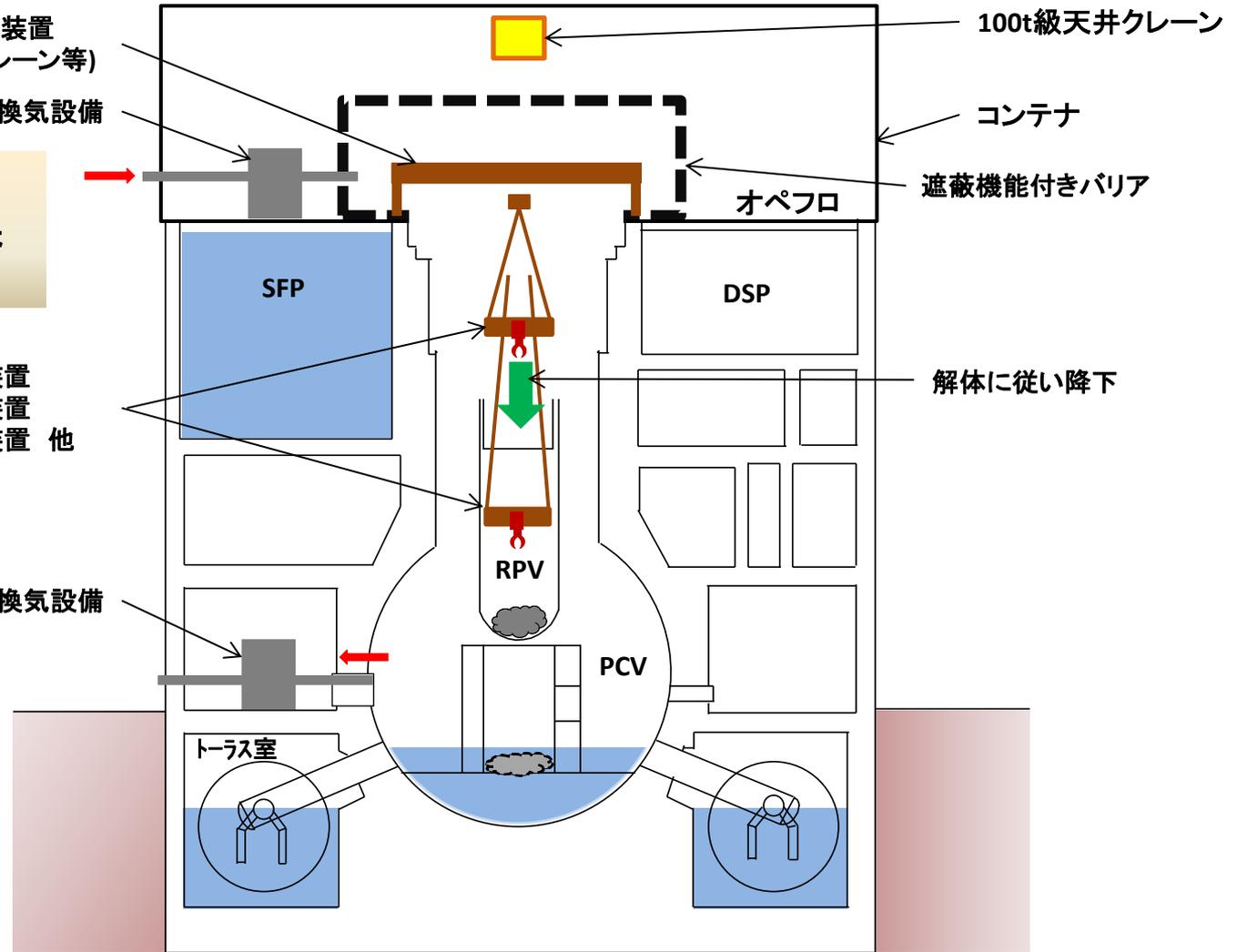


燃料デブリ取り出し



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



IRID 図 気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

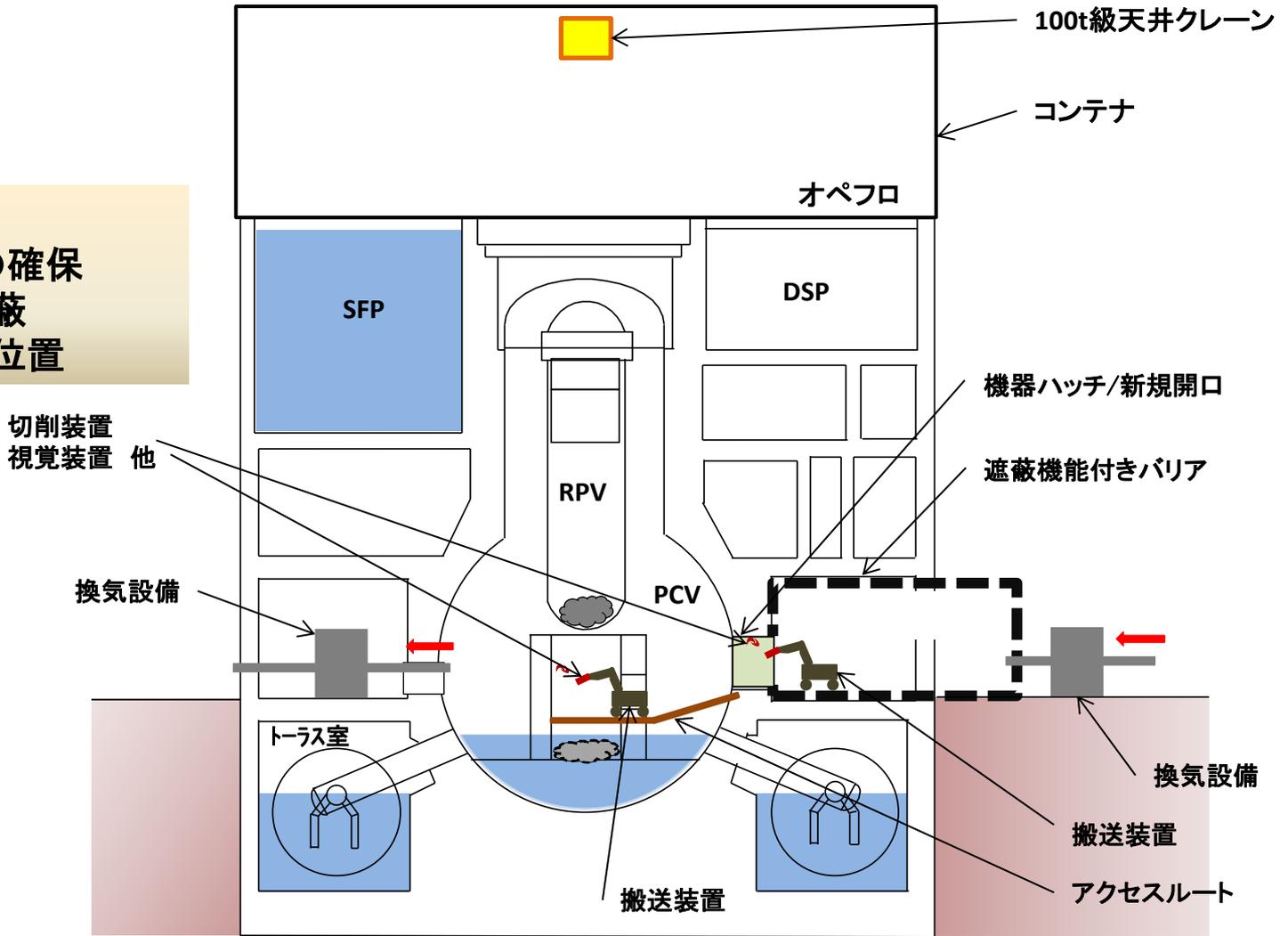


図 気中で側面から取り出す工法

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）

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。
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。