

平成30年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金  
「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発※」

## 2019年度実施分成果

2020年8月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

# 目次

1. 「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」  
の目的と目標
2. 前年度(2017～18年度)実施した事業の実績
3. 本事業の概要
4. 本事業の実施スケジュール
5. 本事業の実施体制
6. 補助事業の内容
7. 本事業の実施内容
  - 1)燃料デブリ取り出し工法の開発
  - 2)燃料デブリ取り扱い技術の開発
  - 3)燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発
8. まとめ
9. 実施目的を達成するための具体的目標

## 【燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発の目的】

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所(1F)では、核燃料が炉内構造物とともに溶融し、燃料デブリとして原子炉圧力容器(RPV)内及び原子炉格納容器(PCV)内に存在していると考えられる。

RPV及びPCV内部の燃料デブリは、現在未臨界状態にあると考えられるが、事故によってR/B、RPV、PCV等が損傷している等、プラント自体が当初設計とは異なる不安定な状態に置かれているため、燃料デブリを取り出して燃料デブリの未臨界状態を維持し、放射性物質の拡散を防止して安定な状態にする必要がある。

上記の背景のもと、本事業は、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」(以降、中長期ロードマップ)に基づき、東京電力ホールディングス(株)(東京電力)が実施するエンジニアリングやプロジェクト管理と連携しながら、大規模な燃料デブリ取り出し作業を実現することを目標に検討を実施する。本事業での開発成果は、東京電力が行うエンジニアリングに活用する。

本事業は、1Fの廃炉・汚染水対策に資する技術の開発を支援する事業を、中長期ロードマップ及び「2019年度廃炉研究開発計画」(廃炉・汚染水チーム会合／事務局連絡会議(第63回))に基づき行うことで、1Fの廃炉・汚染水対策を円滑に進めるとともに、我が国の科学技術の水準の向上を図ることを目的とする。

具体的には、R/B、PCV内でのアクセスルート構築に関わる干渉物撤去等の技術や燃料デブリ集塵・回収に関わる技術、燃料デブリ・炉内構造物取り出し時の安全確保のシステムに関わる各要素技術について、開発を実施する。

## 【開発全体の目標】

中長期ロードマップに基づき、更なる規模を拡大した燃料デブリ取り出し作業を実現することを目標に検討を実施する。

【実施期間】2019年4月～2021年3月(2ヶ年)

## 2. 前年度(2017～18年度)実施した事業の実績

### (1) 燃料デブリ・炉内構造物取り出し基盤技術

#### ① 燃料デブリの回収システムの開発

原子炉格納容器(PCV)底部の燃料デブリの回収プロセスを想定し、粉状の燃料デブリ回収システムに関する技術情報を整理した。また、加工した燃料デブリおよび小石状の燃料デブリについて、効率的に回収作業を行うためのツールに関する技術情報についても整理した。

#### ② 燃料デブリの切削・集塵システムの開発

MCCI生成物を対象にチゼル加工および超音波コアボーリングによる加工性確認試験を実施し、加工特性や加工速度を確認した。また、MCCI生成物の成分や模擬燃料デブリとしての試作方法などについて検討するとともに、実際に試作した試験体を加工試験において加工し加工廃液を分析することで粒径分布などのデータを取得した。

#### ③ 燃料デブリの拡散防止工法の開発

燃料デブリ取り出し作業に伴い、PCV底部の燃料デブリが、ベント管、サプレッションチェンバー等に拡散することを防止するために、PCV内に堰設置を想定した要素試験を実施し遠隔設置性などについて実現性を確認した。

#### ④ 作業セルに関する要素技術開発

セルの閉じ込めおよびPCVと接続する技術について比較し整理した。また、セルとPCV接続時のシール手段であるインフレートシールに関する要素試験を実施し、作業ステップの実現性確認および課題の抽出を行った。

#### ⑤ 燃料デブリ取り出し時の干渉物撤去技術の開発

- ✓ 気中-上アクセス工法において撤去する炉底部の干渉物撤去要素試験を実施し、CRDハウジングなどの基本的な切断手段や切断片の回収方法について確認した。
- ✓ 気中-横アクセス工法に関するペDESTAL内外およびBSWの干渉物撤去要素試験を実施し、狭隘部における基本的な切断・回収作業について実現可能な見通しを得た。
- ✓ ロボットアームとアクセスレール組み合わせ要素試験により課題を抽出し、燃料デブリ/干渉物の撤去に係る基本的な動作の成立性を確認した。

#### ⑥ 燃料デブリ取り出し装置の遠隔保守技術の開発

気中-横アクセス工法のセル内設備を例に遠隔保守の基本的な考え方を検討し、保守区分や保守設備などについて整理した。

## 2. 前年度(2017~18年度)実施した事業の実績

No.4

### (1) 燃料デブリ・炉内構造物取り出し基盤技術

**作業セルシール方法(インフレートシール)**

**生体遮へい壁穴開け**

**サプレッションチェンバーへの汚染拡大防止措置**

**干渉物および炉底部の撤去技術開発**

**ロボットアームとアクセスレールを組み合わせた動作性確認**

**横アクセス工法の燃料デブリ取り出し装置による干渉物撤去方法**

**燃料デブリの拡散防止の観点で有効な加工方法**

**干渉物**

**IRID**

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

## 2. 前年度(2017～18年度)実施した事業の実績

### (2) 燃料デブリ・炉内構造物取り出し時の安全システム技術

#### (i) 閉じ込め機能に関する技術開発

GOTHICコードによる気流解析によって、PCV内形状、破損口位置など幾何情報及び窒素注入、PCV排気などの風量及びその変化による流動、水素・酸素濃度分布、ダスト挙動への影響の定性的特徴を把握できることを確認した。これにより、燃料デブリ取り出し時における閉じ込め機能確保のため、窒素封入やPCV排気システムなどの系統設計に資する気流解析評価手法を確立した。

#### (ii) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発(気相)

既存技術調査を行い、優位技術を選定、機器型式の比較検討のために必要な情報のうち、1F適用において不足しているデータを要素試験により取得した。

#### (iii) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発(液相:非溶解性)

既存技術調査を行い、優位技術を選定、機器型式の比較検討のために必要な情報のうち、1F適用において不足しているデータを要素試験により取得した。

#### (iv) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発(液相:溶解性)

既存技術調査を行い優位技術(吸着材等)を選定、燃料デブリ取り出し時の水質条件での除去性能の評価が困難なことから、被ばく評価上支配的となるPu、AmのうちAmを用いた要素試験を実施。1F適用に向けた優位技術を1次スクリーニングするための除去性能のデータを取得した。

#### (v) 燃料デブリ取り出しに伴う $\alpha$ 核種モニタリングシステムの検討

- 気体系については、既存の $\alpha$ モニタリング技術でモニタリングが可能な見通しを得た。
- 液体系については、既存の $\alpha$ モニタリング技術での連続監視は困難な見通しであるが、液体中の濃度についてはレベル3までの作業員/公衆被ばくの観点での目標はなく、測定時間の要求が長ければ手動分析での対応が可能。

#### (vi) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

被ばく評価結果が判断基準を下回る結果となったことで、燃料デブリ取り出し時の環境制御システムについて成立性を見込みを得た。

## 2. 前年度(2017～18年度)実施した事業の実績

### (3) 燃料デブリ・炉内構造物取り出し時の臨界管理技術

#### (i) 臨界管理方法の確立

##### ① 取り出し工法検討を反映した管理方法・手順の検討

1日の取り出し量目標、スケジュールと臨界管理要求の整合性を確認した。

##### ② 段階的規模拡大時の臨界管理方法確立

内部調査から本格取り出しの管理方法を策定した。

#### (ii) 臨界管理技術の実装

MCCI生成物に対してチゼル加工および超音波コアボーリングによる加工性確認試験を実施し、加工特性や加工速度を確認した。また、MCCI生成物の成分や模擬燃料デブリとしての試作方法などについて検討するとともに、実際に試作したものを加工試験において加工し加工廃液を分析することで粒径分布などのデータを取得した。

##### ① 未臨界度測定・臨界近接監視技術

- ・ロボットアームにより運用可能な検出器ユニット、監視システム仕様を策定した。
- ・実機を模擬した大型体系での未臨界度測定の成立性を確認した。

##### ② 再臨界検知技術

- ・負圧管理システムの一環としての運用方法を策定し、臨界検知性を確認した。
- ・検出器校正技術を確立し、校正精度を定量化した。

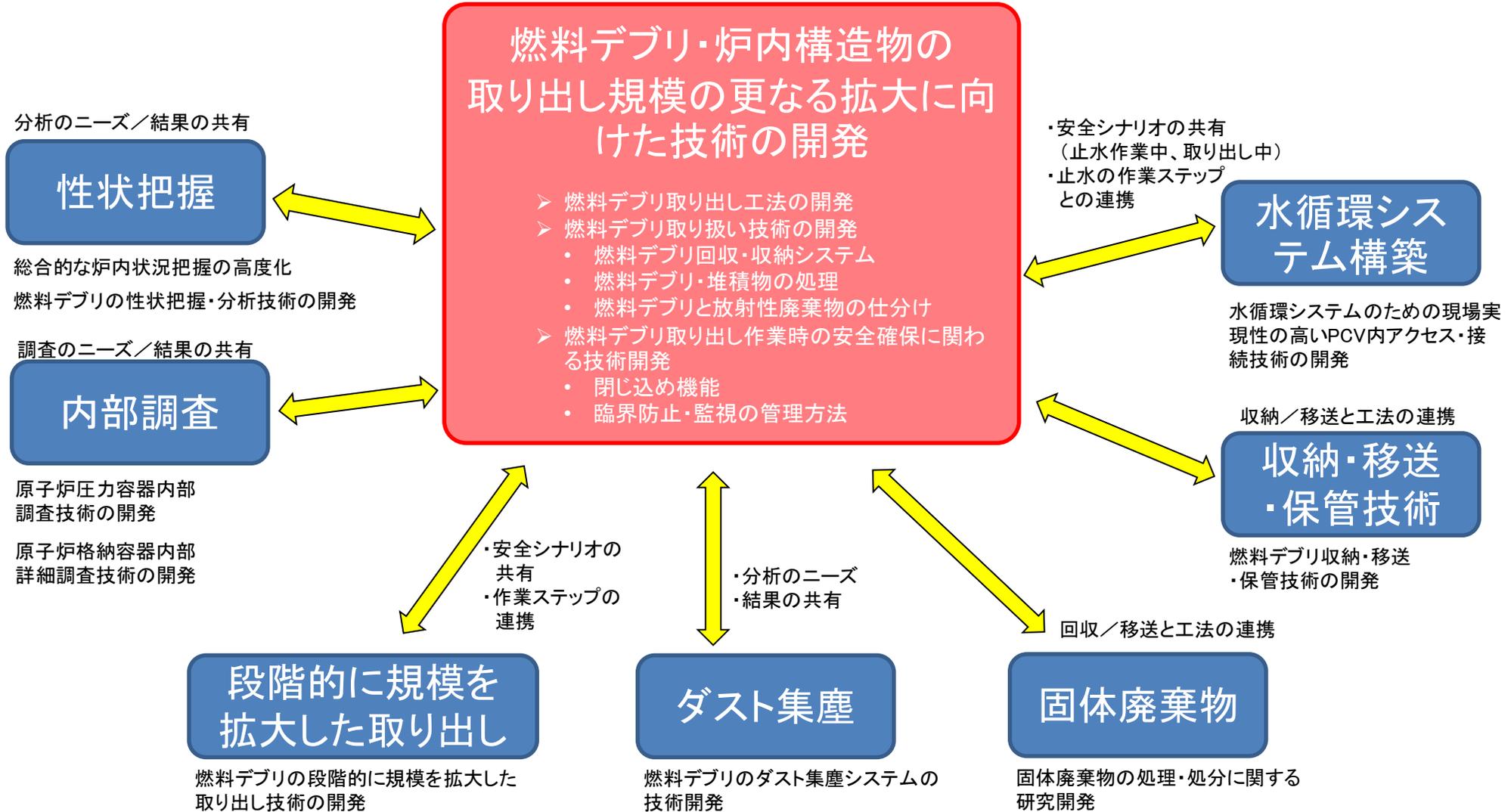
##### ③ 臨界防止技術

- ・非溶解性中性子吸収材の散布方法の概念を策定し、散布後の効果を確認する測定概念を策定した。
- ・非溶解性吸収材の長期照射によっても収納缶健全性に影響が出ないことを確認した。
- ・溶解性中性子吸収材適用時影響(漏えい時環境影響、コンクリートとの共存性)を評価した。

### 3. 本事業の概要

#### 3.1 他事業との連携

本事業では以下に記載している事業と連携し、必要に応じて合同会議を実施しております。



## 3. 本事業の概要

### 3.2 燃料デブリ取り出し技術開発の基本方針

本事業における計画を遂行するにあたり、主な対応方針について以下に記載する。

#### 【基本方針】

更なる規模を拡大した燃料デブリ取り出し作業を実現するために必要となるアクセスルート構築技術や燃料デブリの回収技術、閉じ込め機能維持に関わる技術について検討を実施する。

また、前年度における基盤技術開発事業やシステム高度化事業、臨界管理事業において設計検討を実施したもののうち、課題があるものについては、検討を具体化していくものとする。



#### 【基本方針に基づいた成果】

- 燃料デブリ取り出しのためのアクセスルート構築方法、作業手順および装置の成立性
- 燃料デブリの状態に応じた回収方法、容器への収納方法およびシステムの成立性
- 燃料デブリ・堆積物の処理に関する吸着剤データ、廃液処理設備の概念システムの検討結果
- 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに必要な技術調査結果
- 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に係る、閉じ込め機能および臨界防止・監視に関わる技術  
(ダスト中のエアロゾル除去効果の予測手法、PCVとアクセストンネル間の接続方法、未臨界度測定の成立性等)

具体的な開発項目および実施方針を次頁に示す。

## 3. 本事業の概要

### 3.2 燃料デブリ取り出し技術開発の基本方針

前項までの方針に基づき、公募の開発項目ごとの実施方針を以下のように定める。

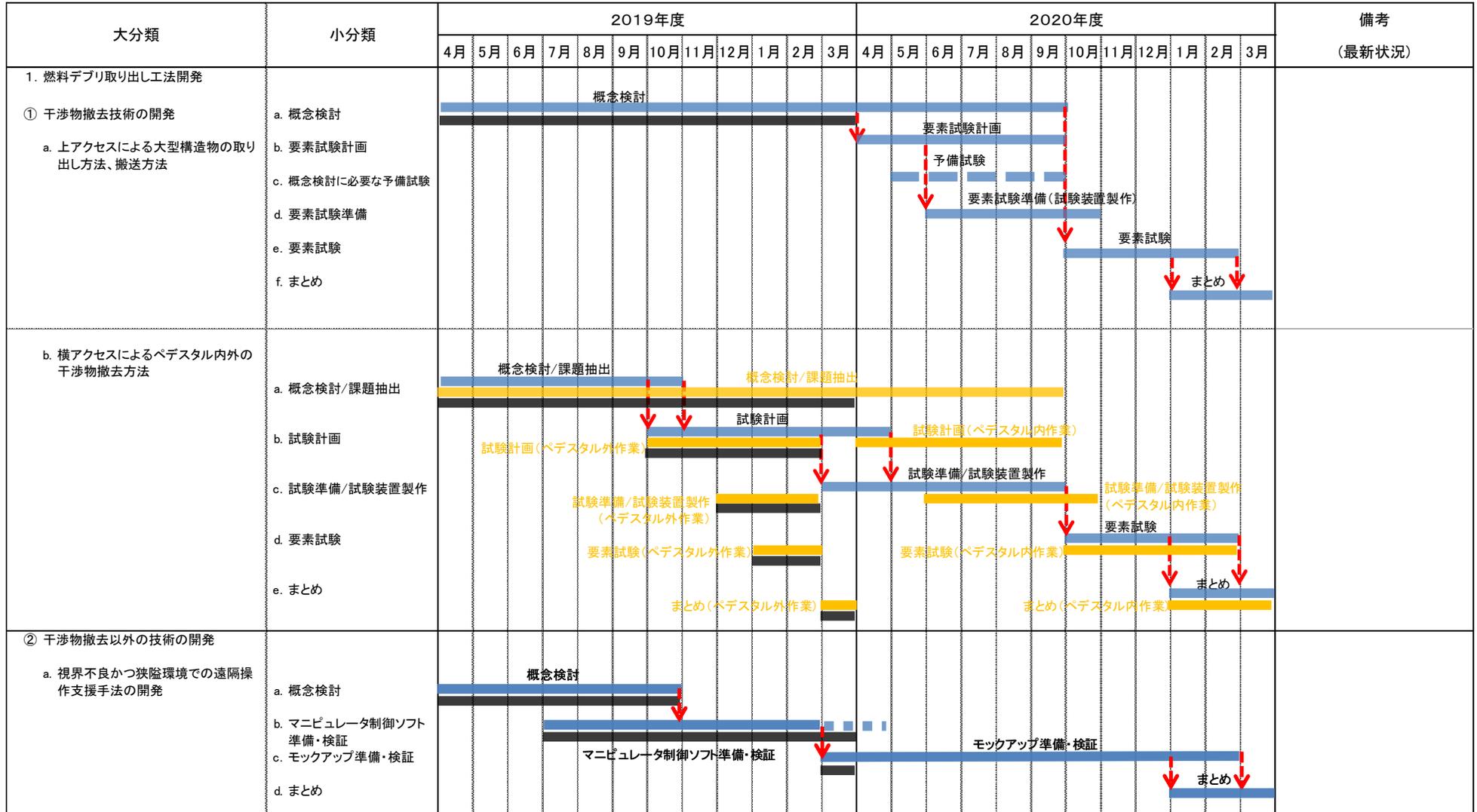
公募の開発項目	実施方針(案)	参照
1) 燃料デブリ取り出し工法の開発	現場情報等を踏まえて、RPV及びPCVに存在する燃料デブリを取り出すために必要なアクセスルートを構築する技術を開発する。また、遠隔装置の操作を支援するシステム、PCV外への汚染拡大を防止する技術、R/B内の被ばく線量低減のための遮へい体の構築等を考慮したアクセスルートの構築に必要と考えられる技術について技術開発を行う。	No.20 ~
2) 燃料デブリ取り扱い技術の開発 (i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発	燃料デブリ取り出しを効率化するために、燃料デブリの状態に応じた回収方法、容器への収納方法及びシステムを開発し、必要に応じ要素試験を実施し成立性を確認する。	No.143 ~
(ii) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発	燃料デブリから循環冷却水中に溶出すると考えられる溶解性核種の除去技術について、溶解性核種除去用吸着技術に関する要素試験を実施して最適な吸着材を選定する。また、液中から固形物を分離し、収納するための処理技術について、収納効率、遠隔操作、保守等を考慮した技術の開発を行い、廃液処理設備の概念システム設計を行う。	No.167 ~
(iii) 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関わる技術の調査	PCV内からの取り出された物を、燃料デブリと放射性廃棄物に仕分ける場合に必要となる技術を調査する。	No.204 ~
3) 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発 (i) 閉じ込め機能に関わる要素技術開発	アルファ核種を含むダストのPCV内での挙動の予測に必要なPCV内部の気流解析とエアロゾル挙動の解析技術の組み合わせについて研究開発するとともに、ダスト中のエアロゾル除去効果の予測と適切なモニタリング技術の選定や監視位置の検討を行う。また、PCV等の既設構造物との接続部の閉じ込め機能確保のための技術開発として、接続部の構造、工法、検査、シール材等の保守等について検討し、必要な要素試験を実施し技術の成立性を確認する。	No.229 ~
(ii) 臨界防止・監視に関わる要素技術開発	大型で複雑な燃料分布体系での未臨界度測定精度を確認し、未臨界度測定の成立性を確認する。また、中性子検出器の現場への適用性を確認する。 燃料デブリ取り出し時の燃料デブリの状態に応じた非溶解性中性子吸収材の使い分け方法や投入装置の概念設計等、非溶解性中性子吸収材の運用方法を検討する。	No.271 ~

# 4. 本事業の実施スケジュール

【凡例】

- : 計画
- : 計画(見直し後)\*
- - -: 前倒し着手を検討
- .....: 必要に応じて実施

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発 実施スケジュール(1/7)



# 4. 本事業の実施スケジュール

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発 実施スケジュール(2/7)

大分類	小分類	2019年度												2020年度												備考 (最新状況)
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
1. 燃料デブリ取り出し工法開発 ② 干渉物除去以外の技術の開発 b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法	a. 概念検討	概念検討																								
	b. 試験計画	試験計画																								
	c. 試験準備/試験装置製作	試験準備/試験装置製作												追加試験準備												
	d. 要素試験	要素試験												追加試験												
	e. まとめ	まとめ												追加試験まとめ												
c. セル設置に関わるアクセラート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討	a. 検討条件案の整理	検討条件案の整理																								
	b. アクセラート構築案の作成	アクセラート構築案の作成																								
	c. アクセラート構築案の絞り込み	アクセラート構築案の絞り込み												アクセラート構築案の絞り込み												
	d. アクセラート構築案の具体化検討	アクセラート構築案の具体化検討												アクセラート構築案の具体化検討												
	e. アクセラート構築案の成立性検討	アクセラート構築案の成立性検討												アクセラート構築案の成立性検討												
	f. まとめ	まとめ												まとめ												
d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法	a. 要求仕様策定、概念設計	要求仕様策定、概念設計																								
	b. 要素試験計画、要素評価装置仕様	要素試験計画、要素評価装置仕様																								
	c. 要素試験準備	要素試験準備												試験準備/試験装置製作												
	d. 要素試験	要素試験												要素試験												
	e. まとめ	まとめ												まとめ												

# 4. 本事業の実施スケジュール

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発 実施スケジュール(3/7)

大分類	小分類	2019年度												2020年度												備考 (最新状況)
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
2. 燃料デブリ取り扱い技術の開発 (i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発 a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発	a. 技術調査/概念検討	技術調査/概念検討																								
	b. 試験計画/試験装置製作	試験計画/試験装置製作																								
	c. 要素試験	要素試験												要素試験												
	d. まとめ													まとめ												
b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発	a. 概念検討	概念検討																								
	b. 要素試験計画策定	要素試験計画策定																								
	c. 概念検討に必要な予備試験	予備試験																								
	d. 要素試験準備	要素試験準備(試験装置製作)																								
	e. 要素試験	要素試験												要素試験												
	f. まとめ													まとめ												
(ii) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発 ① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術 a. 溶解性核種除去設備の概念システム設計	a. 概念検討	概念検討																								
	b. 要素試験計画	要素試験計画																								
	c. 要素試験準備	要素試験準備/試験用品手配																								
	d. 要素試験計画に必要な予備試験	Am吸着試験																								
	e. 要素試験	U, Puなどの吸着試験												U, Puなどの吸着試験												
	f. まとめ													まとめ												

# 4. 本事業の実施スケジュール

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発 実施スケジュール(4/7)

大分類	小分類	2019年度												2020年度												備考 (最新状況)
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
2. 燃料デブリ取り扱い技術の開発 (ii) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発 ① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術 b. ほう酸調整設備の概念設計	a. 前提条件の整理	前提条件の整理																								
	b. 試験項目の具体化(概念検討/調査含む)	試験項目の具体化(概念検討/調査含む)																								
	c. 要素試験計画の立案	要素試験計画の立案																								
	d. 要素試験/結果整理	要素試験/結果整理												(要すれば試験計画) (要すれば要素試験)												
	e. 概念設計													概念設計												
	f. まとめ																									まとめ
② PCV内から回収された堆積物等の処理技術 a. 回収液や廃液等の性状把握	a. 要素試験計画	要素試験計画																								
	b. 試験装置製作	試験装置製作																								
	c. パラメータ最適化検討試験													パラメータ最適化検討試験												
	d. 長期通水試験													長期通水試験												
	e. 適用技術選定																									適用装置選定
	f. 概念システム設計	概念システム設計																								
	g. まとめ																									まとめ
b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発	a. 文献調査	文献調査																								
	b. 試験計画立案	試験計画立案																								
	c. 有意技術要素試験													スラッジ分離技術要素試験 スラッジ収納・ハンドリング技術要素試験												
	d. 概念システム設計 ・粒子回収システム ・固形分分離システム													概念システム設計(粒子回収システム) 概念システム設計(固形分分離システム)												
	・収納・ハンドリング技術													概念システム設計(収納・ハンドリング技術)												
	e. まとめ	まとめ												まとめ												

# 4. 本事業の実施スケジュール

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発 実施スケジュール(5/7)

大分類	小分類	2019年度												2020年度												備考 (最新状況)
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
2. 燃料デブリ取り扱い技術の開発	(iii) 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関わる技術の調査																									
3. 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発	(i) 閉じ込め機能に関わる要素技術開発 ① PCV内でのダストの挙動予測技術																									
	② 接続部の閉じ込め機能確保技術 a. アクセストネルにおけるPCVとの接続方法																									

# 4. 本事業の実施スケジュール

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発 実施スケジュール(6/7)

大分類	小分類	2019年度												2020年度												備考 (最新状況)						
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月							
3. 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保 に関わる技術開発	デブリを模擬した未臨界面 測定手法	計画		準備				未臨界面測定手法 確認試験(KUCA)				評価																				
	(ii) 臨界面防止・監視に関わる要素技術開発 ① 臨界面監視の管理方法の技術開発 a. 未臨界面測定の実証性確認	計画		準備				未臨界面測定手法 確認試験(KUCA)				評価																				
b. 中性子検出器の現場への適用性確 認	代替中性子検出器の評価 (RosRAO社CORONA)	役務許可手続		試作仕様				装置製作				輸送		検出器 評価試験 (KUCA)		試験装置組み込み		評価														
	代替中性子検出器の評価 (IPL社半導体型)	準備		装置設計				装置設計・製作				検出器評価試験体系検討		検出器 評価試験 (KUCA)		評価																
	デブリ上への設置装置	計画・設計				装置製作				耐環境試験																						
c. 臨界面近接管理手順の検討	臨界面近接管理手順	測定手法 の成立												検出器候補 の選定												まとめ						

# 4. 本事業の実施スケジュール

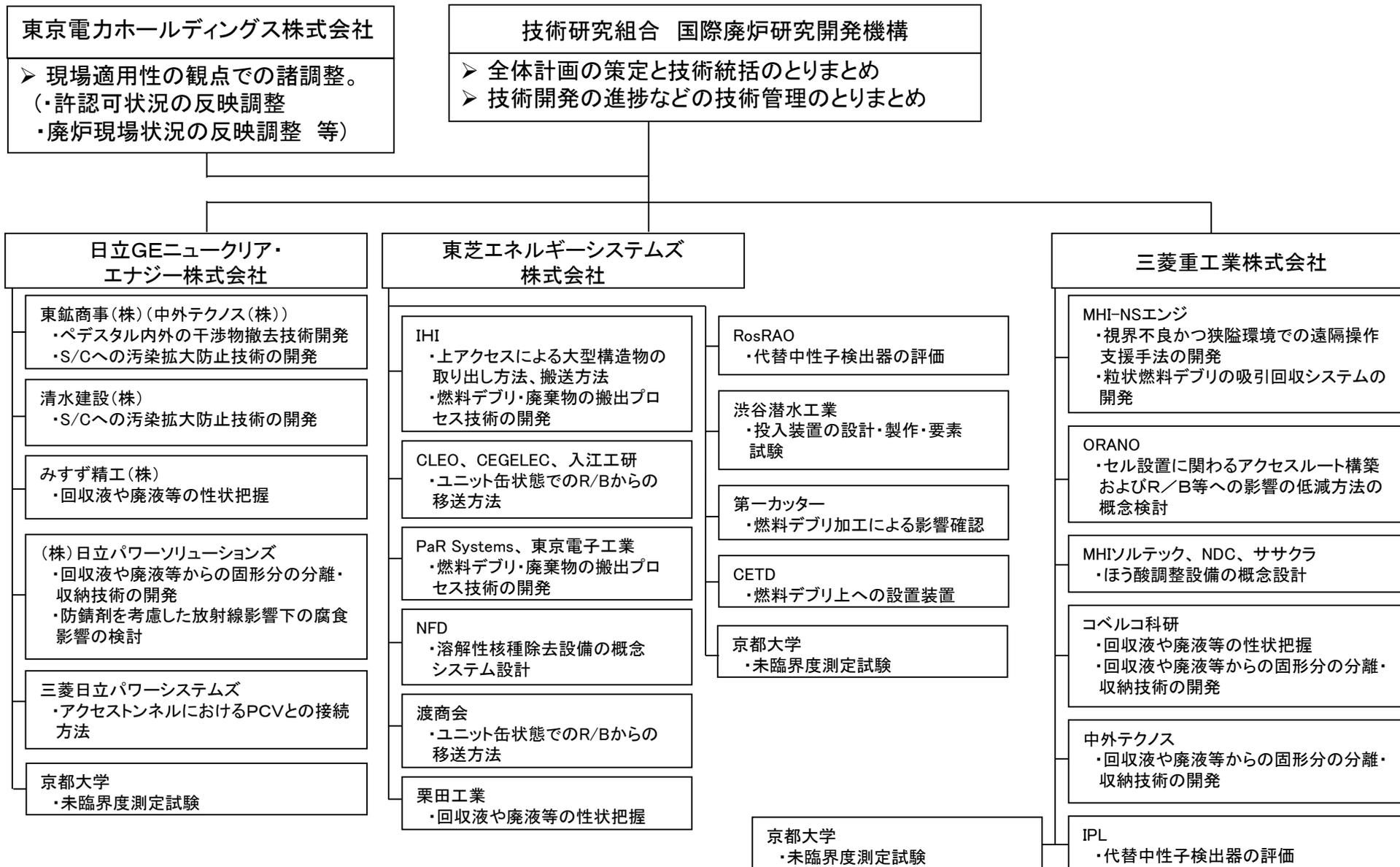
燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発 実施スケジュール(7/7)

大分類	小分類	2019年度												2020年度												備考 (最新状況)	
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月		
3. 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発 (ii) 臨界防止・監視に関わる要素技術開発 ② 臨界防止技術の開発 a. 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討	非溶解性中性子吸収材の使い分け方法の検討	シナリオ整理			条件整理			臨界解析			まとめ																
	投入装置の設計・製作・要素試験	計画			準備			水中投入試験			評価																
	デブリ加工による影響確認	計画			準備			吸収材加工試験			評価																
b. 放射線影響下での防錆剤の使用を考慮した腐食影響の検討	防錆剤を考慮した放射線影響下の腐食影響の検討	計画			準備			吸収材照射試験			評価																
主要なマイルストーン									▲						▲					▲					▲		
									中間報告(10/15)						中間報告(4/22)						中間報告					最終報告	

# 5. 本事業の実施体制



# 5. 本事業の実施体制



### 【目的】

東京電力ホールディングス（株）が行うエンジニアリングやプロジェクト管理と連携しながら設計検討と要素試験を実施し、燃料デブリ取り出し規模の更なる拡大に向けて、実機向け装置および安全確保のシステムの開発に着手できるようにする。

### 【本事業の主な事業内容】

#### 1) 燃料デブリ取り出し工法の開発

現場情報等を踏まえて、RPV及びPCVに存在する燃料デブリを取り出すために必要なアクセスルートを構築する技術を開発する。特に燃料デブリ取り出しの工程短縮を可能とする干渉物撤去技術について、実機の状態を想定した検討を行い、成立性を確認する。また、干渉物撤去技術以外の技術として、遠隔装置の操作を支援するシステムやPCV内の設備の保守方法、PCV外への汚染拡大を防止する技術、R/B内の被ばく線量低減のための遮へい体の構築等を考慮したアクセスルートの構築に必要と考えられる技術について技術開発を行う。

#### 2) 燃料デブリ取り扱い技術の開発

燃料デブリの状態に応じた回収・収納方法、システムの開発、溶解性核種の除去に際しての最適な吸着剤の選定、フィルタの逆洗等により生じた廃液の処理技術の開発を行う。また、燃料デブリと放射性廃棄物を仕分ける場合に必要となる技術について調査を行う。

#### 3) 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発

燃料デブリ取り出し作業時における公衆、作業員の安全を確保するために重要となる放射性物質の閉じ込め、臨界の防止、監視等の要素技術の開発を行う。

## 7. 本事業の実施内容

### 1) 燃料デブリ取り出し工法の開発

#### ① 干渉物撤去技術の開発

現場情報等を踏まえて、RPV及びPCVに存在する燃料デブリを取り出すために必要なアクセスルートを構築する技術を開発する。特に、燃料デブリ取り出しの工程短縮を可能とする干渉物撤去技術について、R/BやPCV内の設備の調査結果に基づく、ずれ、変形、破損等の状況やRPV等の未調査箇所については熱による変形等の具体的な状況を想定し、撤去を行うための技術、装置の基本仕様、手順を検討し、必要に応じ要素試験を実施することで、成立性を確認する。なお、以下に各アクセス工法において想定される干渉物となる設備等を記載する。

- ・RPVへの上アクセス工法: ウェルシールドカバー、PCVヘッド、RPVヘッド、炉内構造物等
- ・PCVへの横アクセス工法: R/B内(特にペネトレーション周辺)、ペDESTAL外、ペDESTAL内の機器、設備、配管等

主な開発検討項目として以下を含むものとし、必要に応じて要素試験を実施することにより課題を抽出し整理する。なお、検討に際しては保守についても考慮する。

#### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法。

- ・アクセスルートおよび構造物搬出方法について概念検討を実施。

#### b. 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法。

- ・共用ユーティリティに関する要素試験を実施し、工法の実現性を確認。

## 7. 本事業の実施内容【1)① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

#### ● 開発の目的

- 燃料デブリを取り出すために必要となる炉心部へのアクセスルート構築に係る作業手順や使用する装置を検討し、スルーポットの改善を図る。

#### ● 解決すべき課題

- アクセスルート構築に係る作業手順、使用する装置の具体化。
- 立案した作業手順、装置の成立性確認。
- スルーポット短縮化。

#### ● 開発の進め方

- 炉心部までの干渉物撤去(切断取り出し、容器収納、搬出)の手順具体化(机上検討)。
- 1～3号機の炉内損傷状況を想定し、損傷の激しい条件でも取り出せる手順、装置類(吊り具、遮へい、落下防止措置など)を検討。
- 机上検討の中で課題を抽出し、要素試験を行う必要のある炉内構造物や取り出しのポイント(切断・把持・吊り上げなど)について試験計画を立案し、要素試験を実施。
- 立案した工法の成立性およびスルーポット評価を行い、これまでの工法と比較評価を実施。

#### ● 得られる成果

- アクセスルート構築に係る作業手順、使用する装置の成立性。
- スルーポットの短縮。

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 検討フロー

: 今回報告

前期補助事業の  
成果と課題

昨年度プラン：構造物はその場で細断・容器収納搬出

- ・ 取り出し工程が31.3年(ルートA\*)、41.1年(ルートB\*)と長期に渡る(設定目標は10年)
- ・ 切断回数2000回、容器2100個(例:気水分離器)と多い
- ・ セルが大型化。コンテナへの荷重条件が厳しく(4500t)、配置に余裕が無い。

課題を受けた今年度の取り組み方針

- ・ 構造物や燃料デブリは、可能な限り一体(大くり)で取り出し、搬出

検討の前提条件

- ・ 干渉物撤去の各段階における作業エリアの雰囲気線量予測
- ・ 汚染の飛散と作業エリアの閉じ込め要求
- ・ 事故時の構造物の変形



具体的なプランの検討①  
構造物一括撤去・搬出

具体的なプランの検討②  
構造物大分割・除染の併用

プラン①を成立させるための  
課題と検討(含試験)

プラン②を成立させるための  
課題と検討(含試験)

一部は共通課題(技術の共有)  
例)構造物の吊り上げ技術など

↑ 補助事業での実施範囲

現場状況の調査(炉内構造物の損傷状況など)結果

実機での採用プラン選定

# 7. 本事業の実施内容【1)① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 開発工程

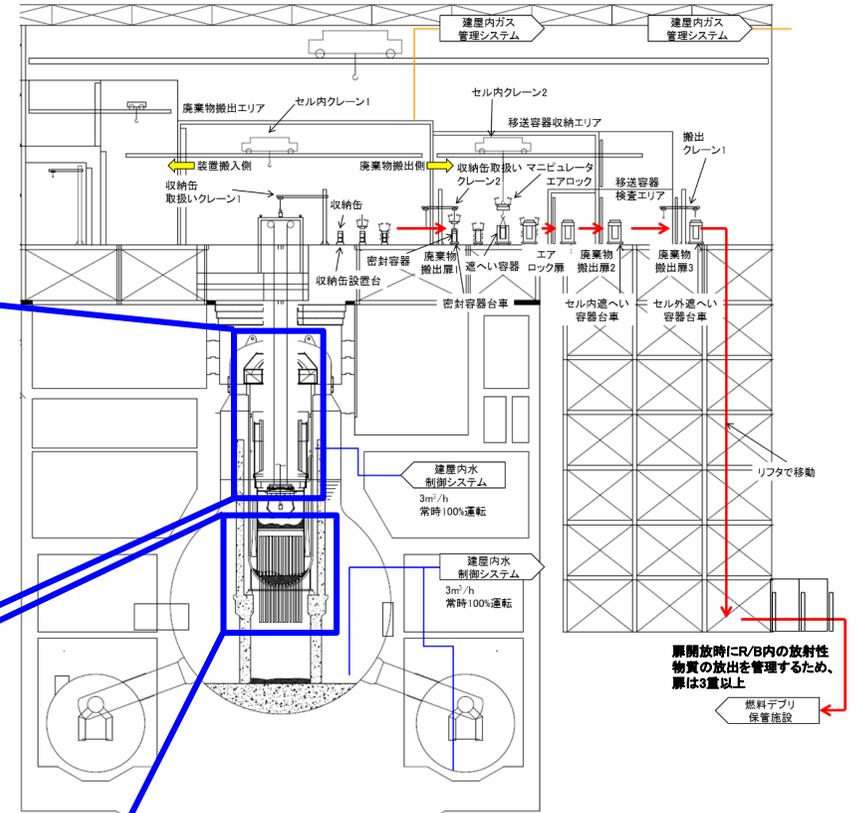
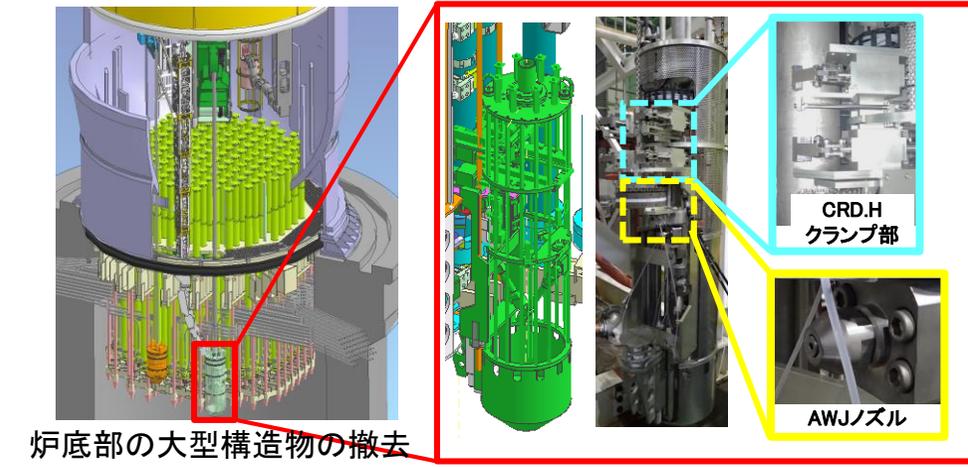
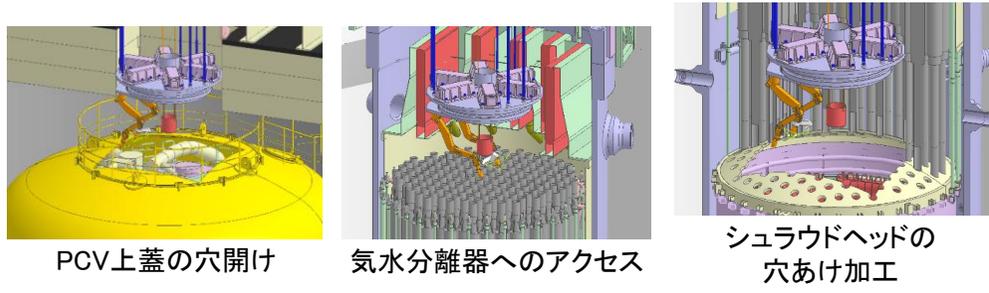


# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 前年度までの主な検討成果

- 最上階(オペフロ)から炉心部、炉心部からペDESTALまでのアクセスルート構築(干渉物撤去)のイメージを作成し、手順の検討を実施。
- 切り出し単位、切断部分の形状・厚さ、切断方法など手順の想定を行い、取り出し期間(スループット)の試算を実施。
- また、最も複雑かつ変形が大きいと想定される炉底部分については、模擬構造体を用いた要素試験を実施し、撤去手順の実現性を検証。



PCV内で構造物を細断し、UCに収納した上で搬出する方法は、作業性・作業時間の観点から難易度が高い

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 前期補助事業の結果に基づく課題・問題点

- 取り出し工程は、設定目標10年に対し31.3年(ルートA)、41.1年(ルートB)と試算。大幅な工程短縮が必要。  
【例】気水分離機切断回数2000回、容器2100個と **スループット** 切断回数が多いのが支配的。
- セルが大型化。建屋・コンテナへの荷重条件が厳しい(約4500t)。 **建屋負荷**
- オペフロ上のセル配置に余裕がなく、特定機器のトラブル時にバッファがない。作業全体の停止(潜在的な工程遅延)リスク。 **保守性・スループット**
- 汚染機材が集中し、作業員のアクセス性が悪いため、遠隔保守を多く必要とする。

### ■ 今期補助事業の検討方針と目標

- ✓ **スループットの改善**  
前年度までの工事期間評価では、アクセスルート構築約4年、燃料デブリ取り出し27.2~37.2年(案により相違)。そこで、10年完了を目標とし、アクセスルート構築1.5年、燃料デブリ取り出し8.5年を目標に設定する。
- ✓ **建屋負荷の改善**  
作業セル内での実施作業を見直し、セルへの必要

構造物をできるだけ大きく搬出し別建屋で細断する工法の実現性確認(※1)

全体準備(装置セット)	5
切り出しの作業時間(h)	55.65
位置決め(h)	0.5
切断(h)	0.03
合計(h)	0.53
切断回数	105
高さ11分割の切断作業時間(切断10回、h)	1060
位置決め(h)	0.5
切断(ウォータージェット想定、h)	0.03
合計(h)	0.53
切断回数	2000
その他の作業時間(h)	5355
切断片落下防止措置(h)	1
抜き取り搬送(h)	0.05
切断片を回収容器に収納(h)	0.5
回収容器の取り出し(h)	0.5
空回収容器の搬入・受入準備(h)	0.5
合計(h)	2.55
作業回数	2100
合計作業時間	6470.65
日数	269.6104
全体後片付け	5
<b>合計作業日数</b>	<b>279.6104</b>

セパレータ撤去手順と取り出し期間(ルートA)【前年度成果】

No.	工法	干渉物撤去作業期間	燃料デブリ取り出し作業期間	合計	備考
1	ルートA	シールドプラグ: 0.8年 シュラウドヘッドまで: 3.3年 合計: 4.1年	炉心部・炉底部: 14.6年 ペDESTAL内: 12.6年 合計: 27.2年	31.3年	シュラウドおよびジェットポンプは、撤去対象外。
2	ルートB	シールドプラグ: 1.5年 シュラウドヘッドまで: 2.4年 合計: 3.9年	炉心部・炉底部: 24.1年 ペDESTAL内: 13.1年 合計: 37.2年	41.1年	プラグ類は廃棄物容器で搬出 UC: φ400の場合 16.8年

スループットまとめ表(上アクセス工法)【前年度成果】

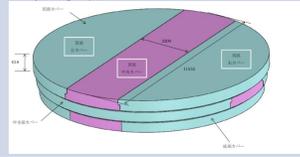
# 7. 本事業の実施内容【1)① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 検討の前提条件(撤去対象構造物の表面線量)

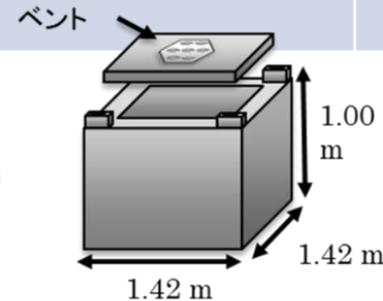
- 撤去すべき干渉物と汚染の予想および表面線量、収納する容器の条件

- MAAP解析結果や実機線量データから、構造物撤去の前提となる汚染と線量条件を算出した

構造物	汚染	寸法・質量	汚染から算出した表面線量
 シールドカバー	$1.0E+08\text{Bq}/\text{cm}^2$ ウェル内面・に一様に付着と想定	$11828 \times 3200 \times t618$ mm、55ton (中央、上段)	$3.8E+03\text{mSv}/\text{h}$ (表面) $3.4E+01\text{mSv}/\text{h}$ (10m) $7.6E+02\mu\text{Sv}/\text{y}$ (800m)
一番最初に取り外す			
 RPV上蓋	MAAP解析で算出 外表面 $3.08E+13\text{Bq}$ 内表面 $2.86E+15\text{Bq}$	$\Phi 6200 \times h2800\text{mm}$ 約90ton	$3E+04\text{mSv}/\text{h}$ (内面) $1E+04\text{mSv}/\text{h}$ (外面)
取り外し後の線量上昇が高い			
 気水分離器	MAAP解析で算出 $2.24E+16\text{Bq}$ (セパレータ) $4.77E+15\text{Bq}$ (シユラウドヘッド)	$\Phi 4800 \times h5080\text{mm}$ 約51ton	$6E+04\text{mSv}/\text{h}$ (上面) $7E+04\text{mSv}/\text{h}$ (側面)
最も線量が高い			

- 廃棄物収納容器(廃棄物PJで検討中)

- 廃棄物収納時の最大表面汚染 :  $10\text{Sv}/\text{h}$
    - 構内輸送時は移送容器に収納し、表面 $30\text{mSv}/\text{h}$



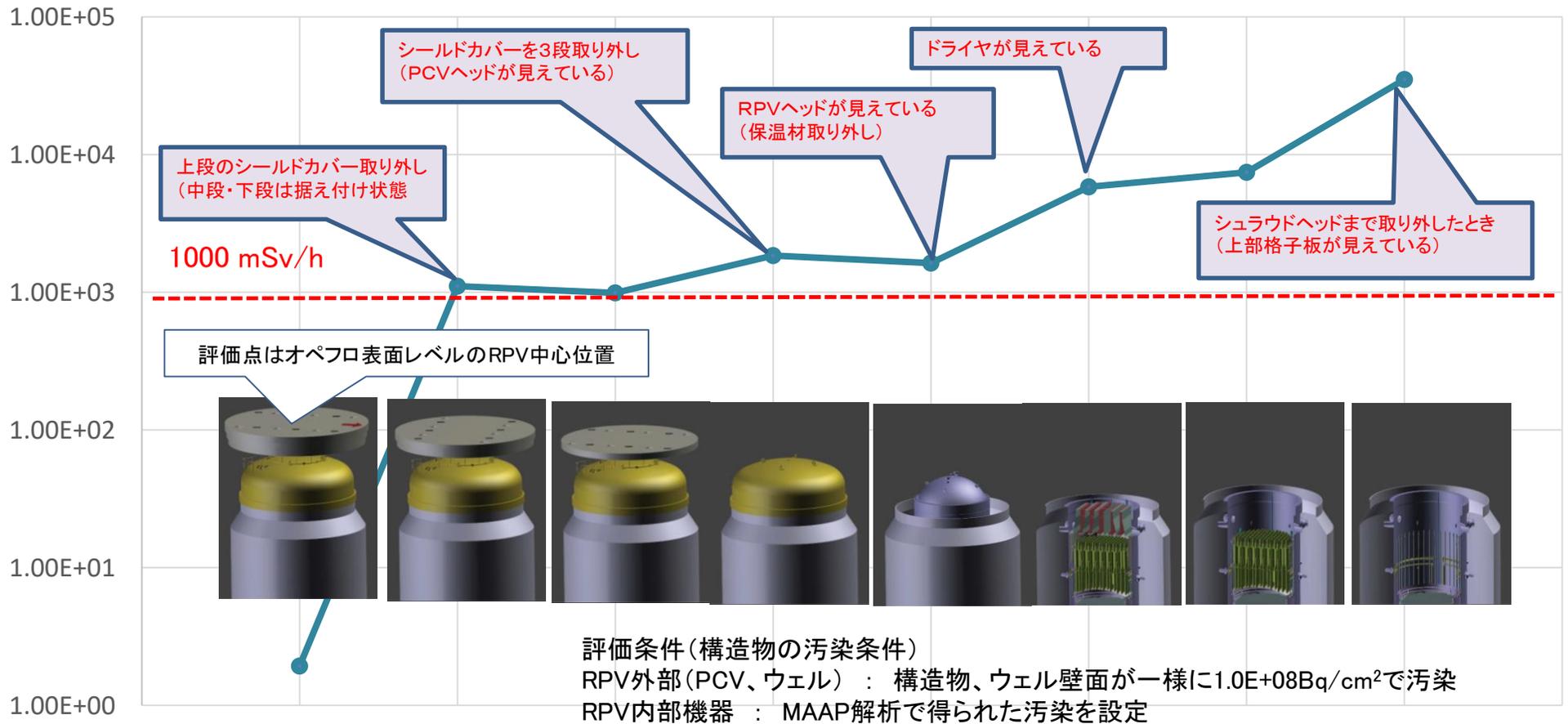
# 7. 本事業の実施内容 【 1)① 干渉物撤去技術の開発 】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 検討の前提条件(作業エリアの雰囲気線量)

#### ● 干渉物撤去の各段階における作業エリアの線量を算出

- 構造物の汚染をもとに、工事の各段階における、作業エリア(オペフロ、RPV中心)の雰囲気線量を算出
- シールドカバー上段を撤去した段階で1 Sv/hを超え(敷地境界線量は約800  $\mu$  Sv/y(@800m)、約90  $\mu$  Sv/y(@1000m)となる)、シールドカバーの上段を取外す前から遮へいを設置する必要がある。



# 7. 本事業の実施内容【1)① 干渉物撤去技術の開発】

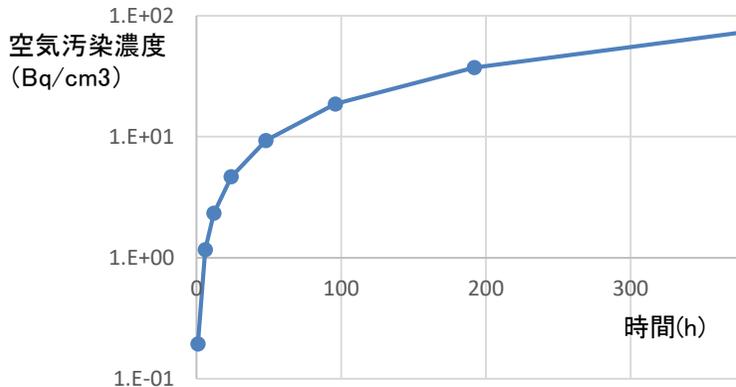
## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 検討の前提条件(作業エリアの汚染濃度)

- 汚染の飛散と作業エリアの閉じ込め要求(シールドカバー撤去時)
  - ・ 下段シールドカバー撤去後に原子炉ウェル面が露出。この際の作業エリアでの空気汚染濃度について評価し、閉じ込めの要求を検討。
  - ・ ウェル内面の汚染を設定(1.0E+8Bq/cm<sup>2</sup>)し、ダストの飛散率とウェル内面の体積から空気汚染濃度を予測。
  - ・ 汚染がウェル内に留まっていた場合、数Bq/cm<sup>3</sup>と評価。これは1Fの作業基準と比較しても非常に高いレベル。実際には再付着による低減効果もあるが、ウェルの気体は外部に放出させないこと(閉じ込め)が求められるとし、作業エリア計画に反映

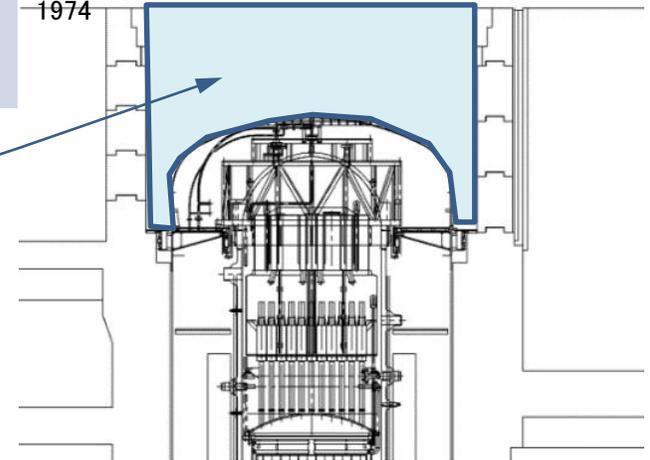
項目	設定値	備考
ウェル内面の付着汚染	4.14E+14Bq(ウェル内面) 7.48E+13Bq(PCV上蓋外表面)	Cs-137、Ba-137mが同量存在すると仮定
付着汚染の飛散率	1.0E-10/s	* 参考文献より
ウェル内体積	9.04E+08cm <sup>3</sup>	=ウェル内壁面放射エネルギー×1秒当たりのダスト飛散率×24時間÷ウェル内空間体積)

※:(参考文献)G.A.Sehmel et.al、PARTICLE RESUSPENSION RATES、BNWL-SA-5124、1974



1F作業装備の基準

装備	適用汚染濃度
半面マスク	~2E-03Bq/cm <sup>3</sup>
フードマスク	~2E-03
全面マスク	~2E-02
電動ファン式マスク	~2E-01
セルフエアセット	2E-03~



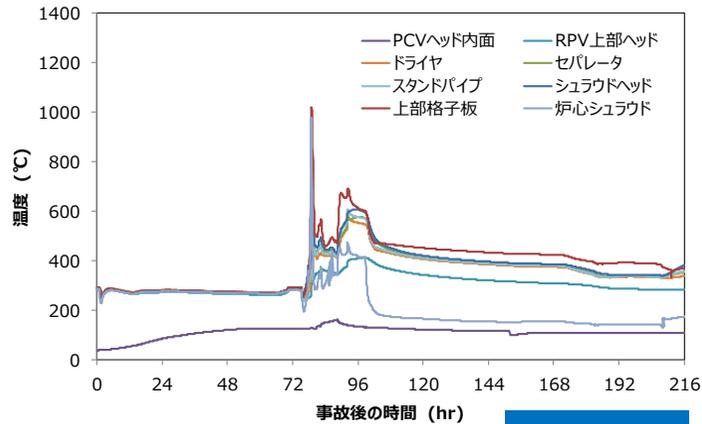
## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

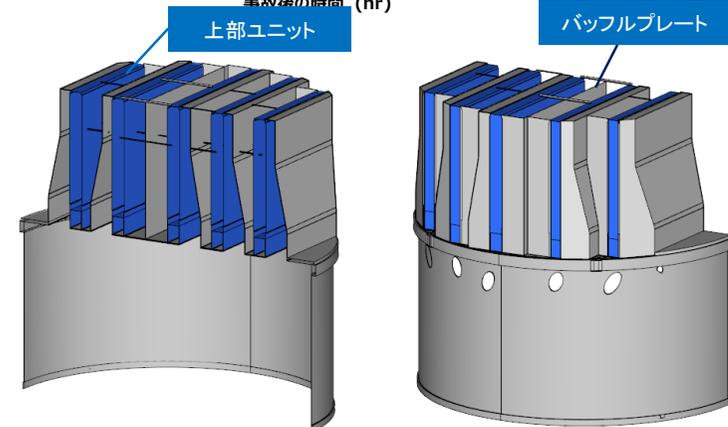
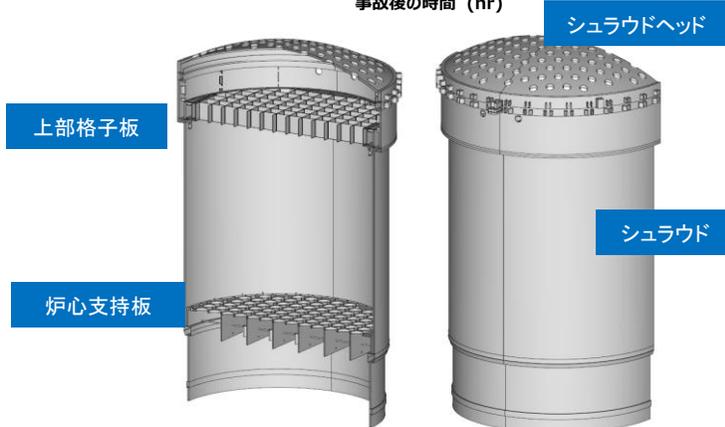
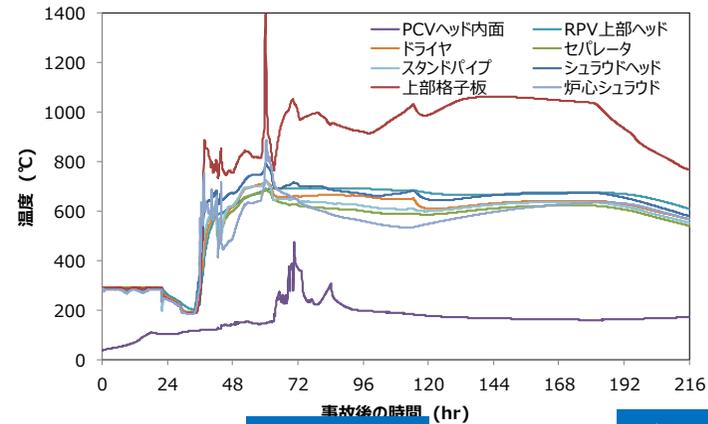
#### ■ 検討の前提条件(構造物の状態推定)

- 構造物の事故後高温状態での構造物の変形挙動予測
  - ・ 解析内容 (1)静的応力評価(短時間強度評価)  
(2)クリープ変形予測(長期間(最長3週間)における変形評価)
  - ・ 解析対象: シュラウドヘッド、シュラウド胴、ドライヤ
  - ・ 解析温度: MAAP解析から幅広に設定し650°C、700°C、800°C、900°C(最大)

1F-2 構造物温度変化



1F-3 構造物温度変化



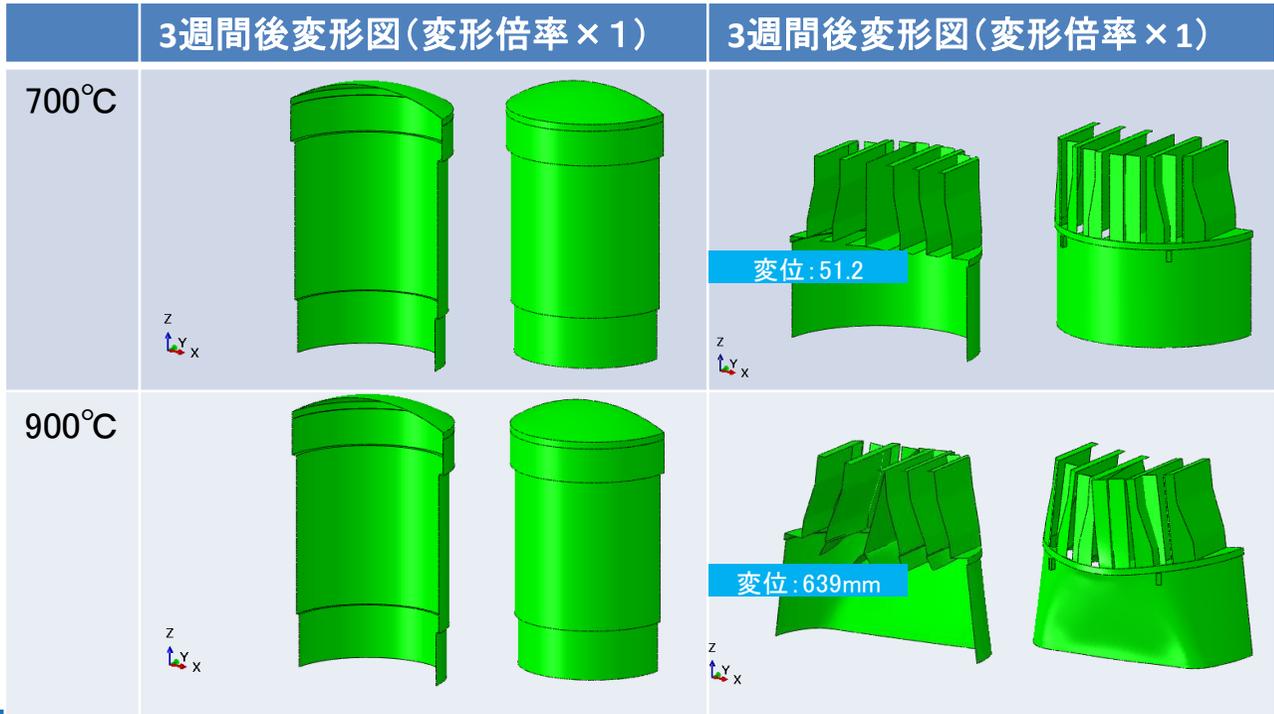
# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 検討の前提条件(構造物の状態推定)

- 構造物の事故後高温状態での構造物の変形挙動予測、結果とまとめ
  - MAAP解析によって得られた炉内構造物の温度変化をもとにして、構造物の変形を推定した。
  - 構造変形を幅広く推定するため、温度を最大約200℃高くし、変形の拘束となる部材の省略なども含めた。
  - 短時間静的応力評価では、900℃におけるドライヤの一部で降伏応力に至る点も見られたが、全体的には塑性変形は見られなかった。
  - 3週間クリープ変形評価では、シュラウドヘッド上端で若干の変形が見られたが、変位は1mm以下であり、傾くや崩壊するなど大きな形状変化は見られなかった。一方、ドライヤの変形評価では、中央部が沈みスカート部が広がる変形が見られ、沈む変位は600mmと大きくなった。周囲機器への接触などの影響を今後検討する。

- また、これらの変形はモデルの簡素化によることも考えられ、簡略しないモデルでの解析など考えられる。
- 各構造物上端の位置変化が一番大きい。今後の炉内調査などでは、上端の位置変化を測定することが、全体の構造物の変化を推定するために有効と思われる。また、今後の炉内構造物取り出し検討への構造物情報の反映を進める(変形した状態で撤去する検討)。



## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

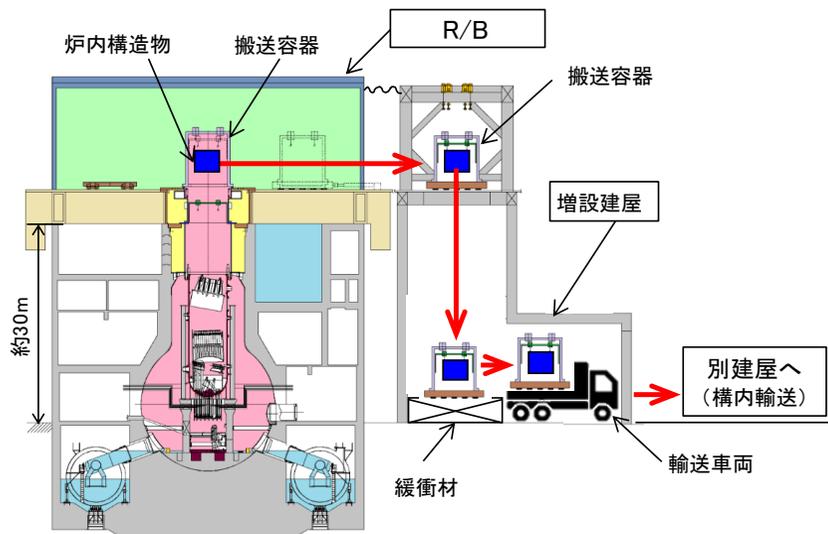
### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

#### ■ 新規上アクセス工法の概念

今期補助事業の検討の方向性：**構造物をできるだけ大きく搬出し別建屋で細断する工法の実現性確認**

#### 【プラン①】 構造物一括撤去・搬出

- ✓ 構造物単位で一括にて搬出。
- ✓ 炉心部は複数単位に分割、炉底部は下鏡を一体でRPVから切り離しを実施。
- ✓ 搬出対象物の遮へい・気密は容器、アクセスルートまたはそれらの組合せにて対応。
- ✓ 取り出した構造物の細断、容器への収納はR/Bから離れた建屋にて実施。



#### 【プラン②】 構造物大分割・除染の併用

- ✓ 構造物は可能な限り大きく搬出。搬送形態を踏まえ、除染と遮へいの組合せを実施。
- ✓ 除染や分割作業はSFP、DSP等にて実施。
- ✓ 原子炉ウェルを活用し、遮へいと気密を確保。
- ✓ 閉じ込め範囲は、原子炉ウェルと除染・分割エリア（SFPまたはDSP）を結んだエリア。遮へい軽量化のため可能な限り低い位置で閉じ込める。

#### 【用語補足】

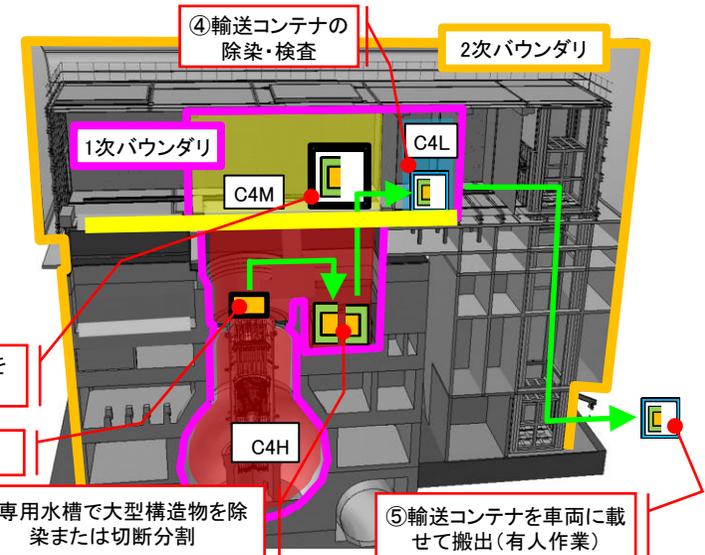
C4H: 高汚染エリア、作業員立ち入り不可  
 C4M: 中汚染エリア、緊急時に限り作業員立ち入り可  
 C4L: 低汚染エリア、通常時から作業員立ち入り可

③ 細断した大型構造物を輸送用コンテナに収納

① 大型構造物を移動

② 専用水槽で大型構造物を除染または切断分割

⑤ 輸送コンテナを車両に載せて搬出(有人作業)



## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

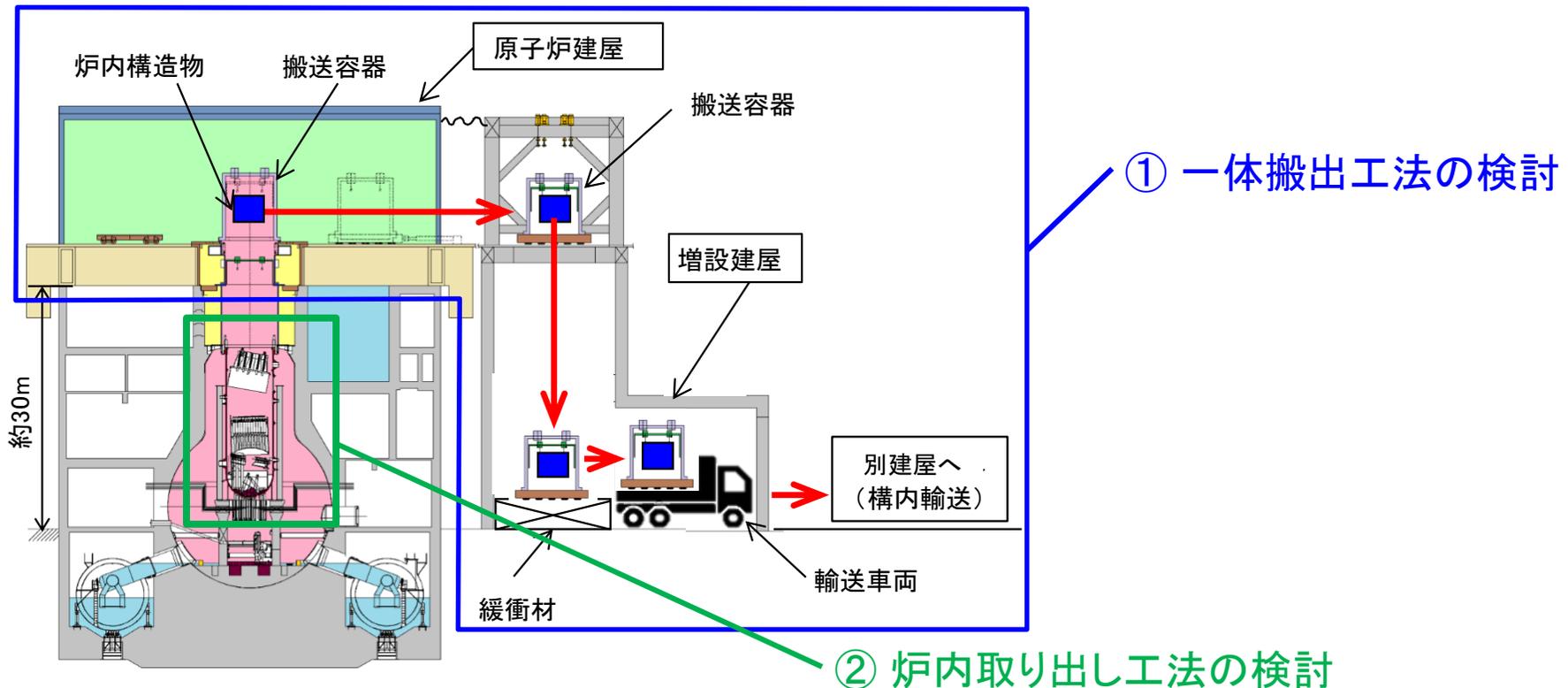
### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

#### ■ 具体的なプランの検討①(構造物一括撤去・搬出): 検討の進め方

構造物一体状態での取り出し工法の検討にあたっては、

①原子炉内から切り離した構造物の搬出と ②構造物の原子炉からの切り離しのそれぞれにおいて検討すべき課題が大きく異なる。

⇒ 工法を2つに分けて検討を行う(ただし、お互いに検討内容をフィードバックしながら進める)。



一体状態での取り出し工法の概念図

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 具体的なプランの検討①(構造物一括撤去・搬出): 一体搬出工法の検討

抽出した3案に対して比較評価を実施。

	(案A) 搬出容器方式	(案B) 連絡通路方式	(案C) 搬出容器+連絡通路方式
概念図			
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>容器およびウェル上の気密ゲートの成立性</li> <li>容器上または容器内への揚重機収納の成立性</li> <li>メンテナンスが困難。特に、容器設置の揚重機にて顕著。</li> <li>取り出し装置の非常回収が困難。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>連絡通路の質量の低減</li> <li>連絡通路上揚重機のメンテナンス/交換方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>容器+架台となるため門型架構の高さ寸法が増加し、連絡通路高さが大きくなる。</li> <li>揚重機のメンテナンスが困難</li> </ul>

各方式の中で大きな課題\*である①気密確保の成立性、②連絡通路の質量の低減要否について検討を実施

\*メンテナンス性も大きな課題の一つであるが、「気密確保の成立性」「連絡通路の質量の低減要否」の方が、各案の成立性を判断する上で、より重要であると考え、それらを優先して検討することとした。

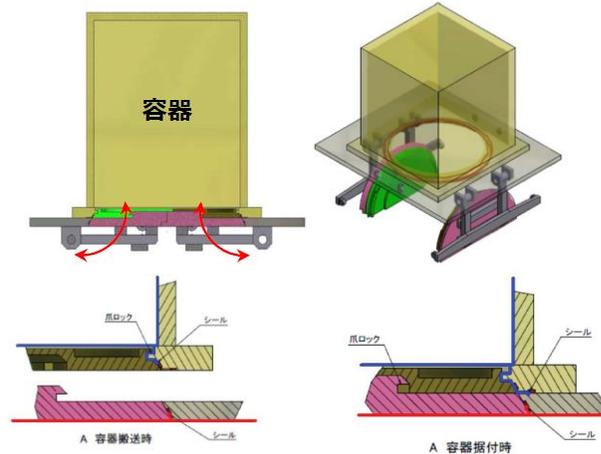
# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 具体的なプランの検討①(構造物一括撤去・搬出): 気密確保の成立性

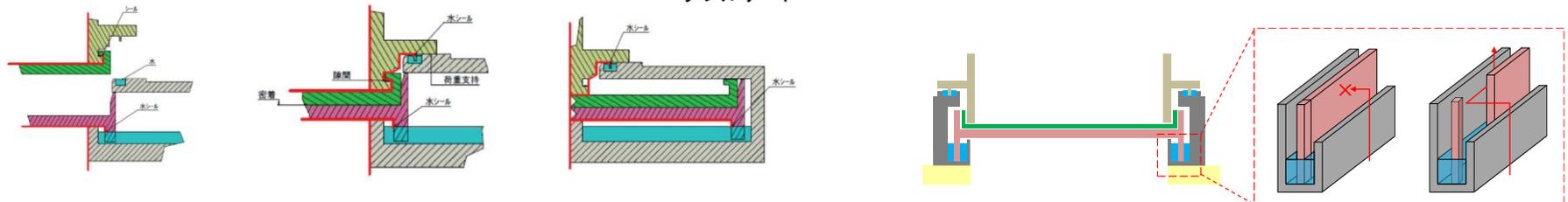
#### (A) ダブルドア方式

- 容器側と原子炉ウェル側(容器の接続先)の両方に遮へいを有する蓋を設ける。
- 容器側とウェル側の両方の蓋を接触させた後、回転動作を行うことで密着。その後、開閉動作を実施。
- 容器離脱の際に遮へい欠損が発生せず、原子炉内からの放射線の遮へいも確保可能。



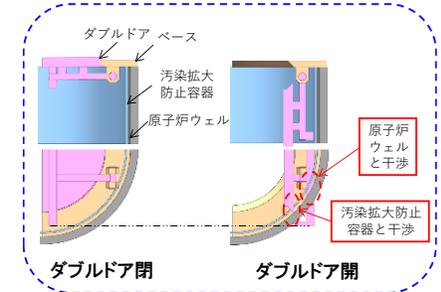
#### (B) ダブルゲート方式

- 容器側と原子炉ウェル側の両方に遮へいを有するゲートを設ける。
- 容器側とウェル側の両方の蓋を接触・密着させた状態で開閉動作を実施。
- これにより、容器離脱の際に遮へい欠損が発生せず、原子炉内からの放射線の遮へいも確保可能。



#### 【課題】

- ✓ ゲート合わせ面の線汚染の可能性
- ✓ ゲート駆動方法
- ✓ ウェルとの干渉



#### 【課題】

- ✓ 摺動部下面ゲートの汚染の引き込み(水汚染)
- ✓ ゲート合わせ面の線汚染の可能性
- ✓ ゲート駆動方法
- ✓ ゲート開時の側面からの汚染物質リーク

いづれも不成立。(案A)搬出容器方式における容器およびウェル上の気密ゲートの成立性については課題大と判断。

# 7. 本事業の実施内容【1）① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 具体的なプランの検討①(構造物一括撤去・搬出): 連絡通路遮へい厚の成立性

連絡通路の遮へい厚の成立性可否検討にあたり、連絡通路自体の質量について検討を実施。

#### 【検討方針】

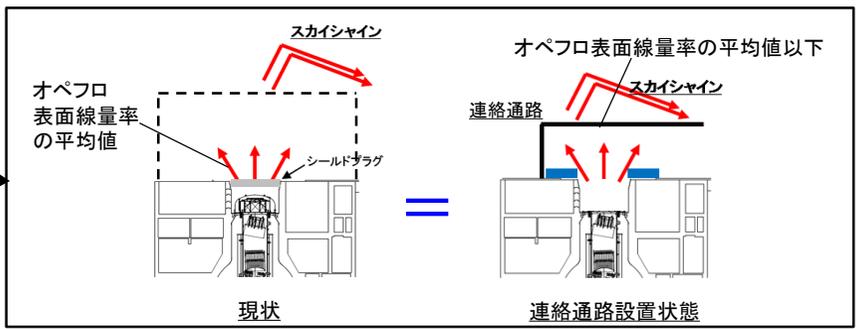
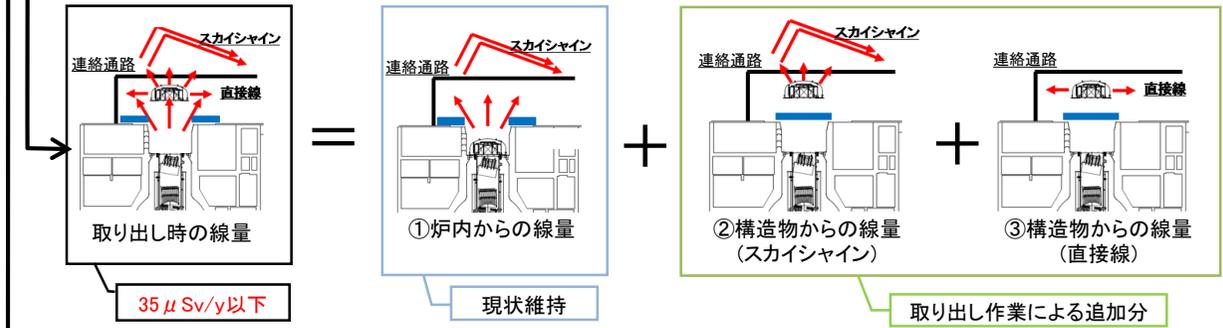
- ① 原子炉開放中(炉内構造物のオペフロ上への移動なし)の敷地境界における線量率が、現時点のオペフロから与える影響と同等なこと。
- ② 原子炉開放中(炉内構造物のオペフロ上への移動なし)の連絡通路表面での線量率が、現時点のオペフロでの表面線量率以下。
- ③ 炉内構造物をオペフロ上(連絡通路の内部)に移動した場合には、敷地境界における線量率が、 $35 \mu\text{Sv}/\text{年}^*1$ 以下。

#### 【試算条件】

- オペフロ表面の線量率(平均値):  
[1号機]125mSv/h、[2号機]120mSv/h、[3号機]105mSv/h
- RPVヘッド開放後の炉内の線量率:  
[1号機]30Sv/h、[2/3号機]:55Sv/h、
- 敷地境界での線量率:現状(20/2月末時点)以下
- 各号機から敷地境界までの距離:800m
- 連絡通路:[内寸]14,400×37,500×H22,000mm(仮定値)、鉄製

#### 【試算結果】

	オペフロ表面線量率(平均値) [mSv/h]	RPVヘッド開放後の炉内からの線量率 [Sv/h]	連絡通路仕様	
			遮へい厚 [mm]	質量 [ton]
1号機	125	30	190	3,844
2号機	120	55	220	4,443
3号機	105	55	220	4,443



試算した遮へい厚では、敷地境界での線量率が $35 \mu\text{Sv}$ を上回る  
 ⇒ 構造物の周囲にのみ最大130mm(約120ton)の追加遮へいを実施すれば $35 \mu\text{Sv}$ に対して十分に下回る

**遮へい厚については、低減可能な見通し**

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

#### ■ 具体的なプランの検討①(構造物一括撤去・搬出): 一体搬出工法の比較評価

気密確保の成立性、連絡通路の遮へい厚の成立性の検討結果から、候補案の再比較を実施

太字/下線: 重大な課題

方式	メリット	デメリット	課題	総合判定
案A (搬送容器方式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 汚染の範囲が小さい(気密ゲートが成立する場合)</li> <li>● 想定的に質量が小さい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 取り出しから輸送までが複雑</li> <li>● 設備数が多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>容器およびウェル上の気密ゲートの成立性</b></li> <li>● メンテナンスが困難。特に、容器設置の揚重機</li> <li>● 容器上または容器内に揚重機が収まらない</li> <li>● <b>取り出し装置の非常回収が困難</b></li> </ul>	×
案B (連絡通路方式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 設備数が少ない(メンテナンス対象が少ない)</li> <li>● 取り出しから輸送までシンプル</li> <li>● メンテナンス対象をウェル上から遠くに配置可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 汚染範囲が大きい</li> <li>● 設備質量が大きい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● R/Bへの負荷が大きい</li> </ul>	△
案C (連絡通路+搬送容器方式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 遮へい機能を容器に持たせることで、連絡通路の板厚を小さくすることができるため、質量の低減が見込める</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● オペフロ上容器の気密が完全に取りえないので、汚染が拡大する</li> <li>● 取り出しから輸送までが複雑</li> <li>● 設備数が多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 容器+架台となるため高さ寸法が増加し、連絡通路が大きくなる。(耐震性の懸案あり)</li> </ul>	△

上記比較結果から、案Bを優先して採用し、次年度より詳細検討を進めることとする。

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

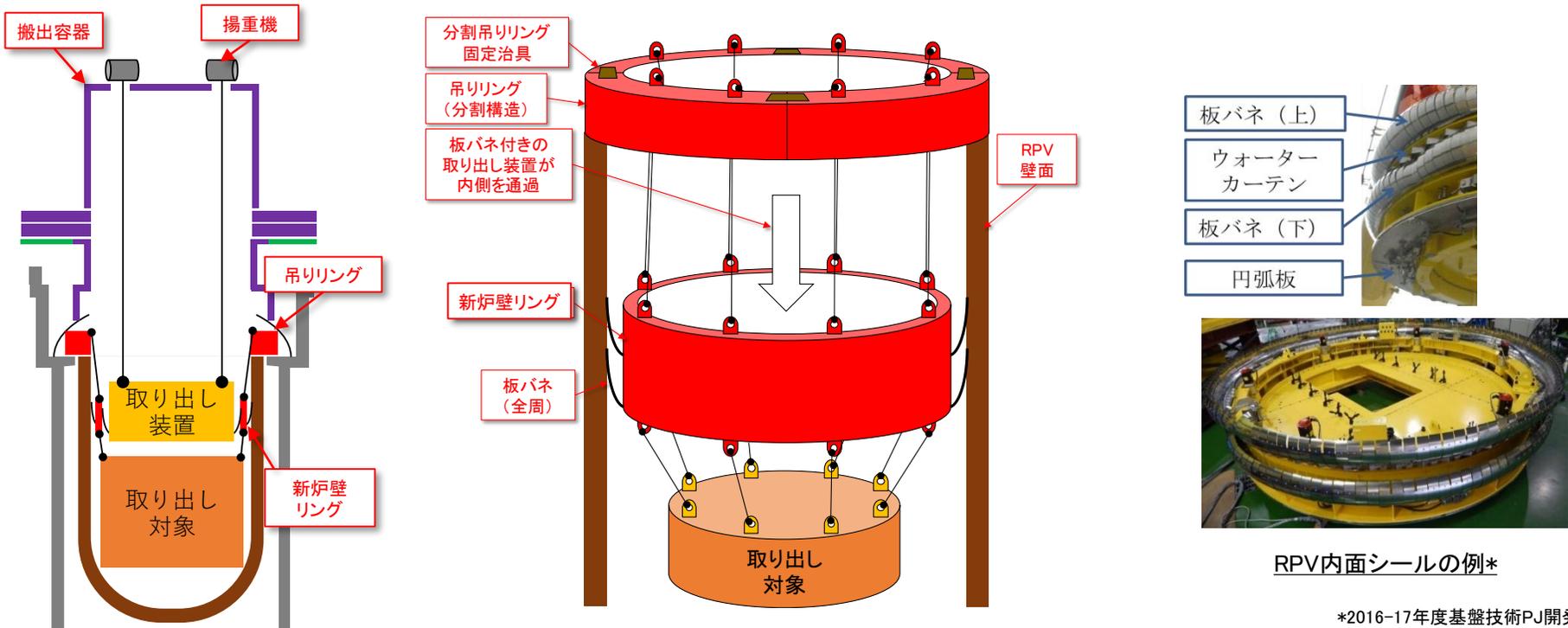
### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

#### ■ 具体的なプランの検討①(構造物一括撤去・搬出): 炉内取り出し工法の検討

炉内構造物を原子炉内からオペフロレベルまで引き上げる工法について検討を実施(搬出方法は前頁までの検討結果を前提)

#### 【炉内取り出し工法の考え方】

- ✓ 取り出し機能と吊り維持機能を分散する(対象物の落下防止維持状態での非常回収、装置メンテナンスの実現)  
⇒主要装置は取り出し装置、吊り維持装置の2構成
- ✓ 取り出し装置: 炉内構造物の切断、対象物の落下防止用ワイヤの取り付け作業の実施
- ✓ 吊り維持装置(吊りリングと新炉壁リング): 対象物(炉内構造物)の落下防止のための吊り維持機能
- ✓ 各装置下部からの汚染の拡散を防止(RPV内面シール)



RPV内面シールの例\*

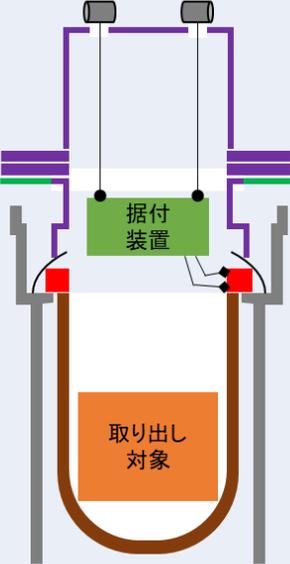
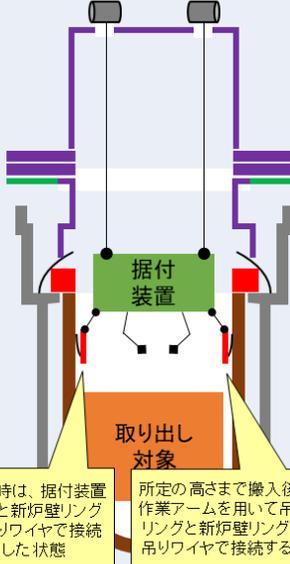
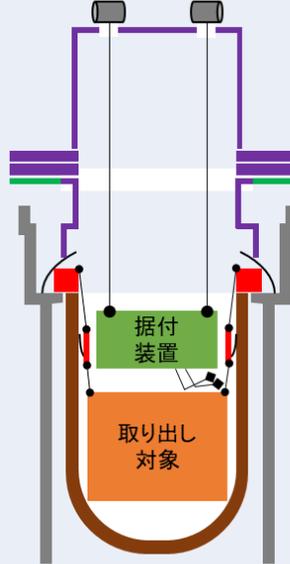
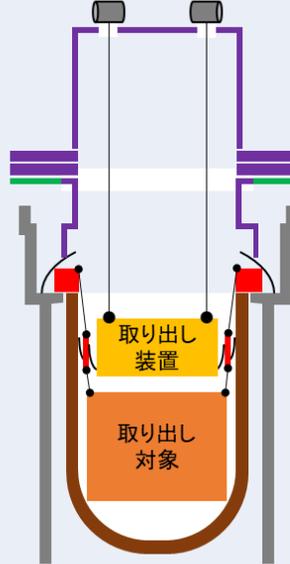
\*2016-17年度基盤技術PJ開発成果

# 7. 本事業の実施内容【1)① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 具体的なプランの検討①(構造物一括撤去・搬出): 炉内取り出し工法の検討

前頁での考え方にに基づき、取り出し手順の検討を実施。

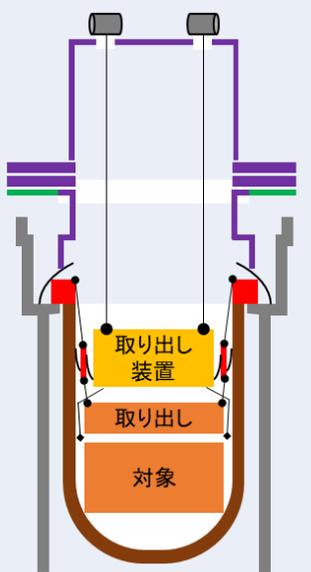
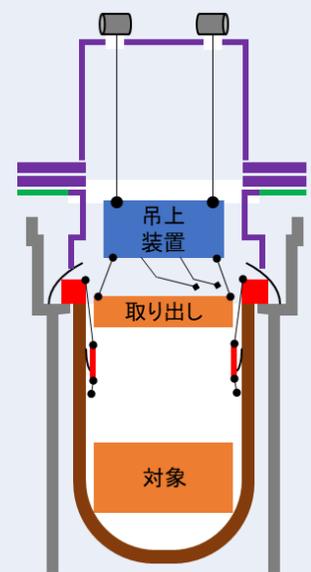
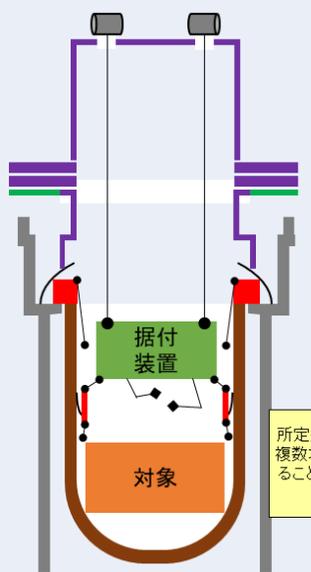
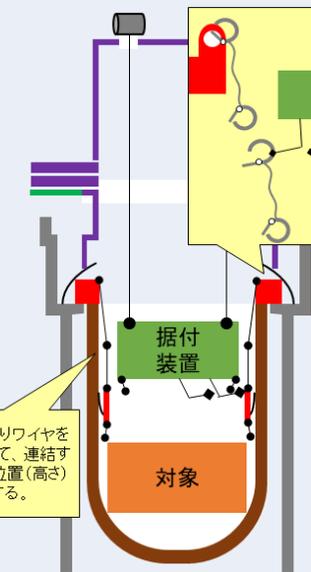
手順1	手順2	手順3	手順4
吊りリング設置	新炉壁リング搬入	取り出し対象接続	取り出し装置搬入
	 <p>搬入時は、据付装置下部と新炉壁リングを吊りワイヤで接続した状態</p> <p>所定の高さまで搬入後、作業アームを用いて吊りリングと新炉壁リングを吊りワイヤで接続する。</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>吊りリングを分割構造で搬入し、バルクヘッド上で組み立てる(搬出容器内径に対して吊りリングの外径大のため)。</li> <li>バルクヘッドと吊りリングを接続する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新炉壁リング外周の板バネをRPV内面に接触させる。</li> <li>新炉壁リング上部と吊りリングを吊りワイヤで接続する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取り出し対象に設定した吊り治具と、新炉壁リング下部を吊りワイヤで接続する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取り出し装置外周の板バネを新炉壁リング内面と接触させる。</li> </ul>

## 7. 本事業の実施内容【1)① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

#### ■ 具体的なプランの検討①(構造物一括撤去・搬出): 炉内取り出し工法の検討

前頁での考え方にに基づき、取り出し手順の検討を実施。

手順5	手順6	手順7	手順8
取り出し対象の切断	取り出し対象の引き上げ	新炉壁リングの吊り下げ	吊りリングからの吊りワイヤの延長
			
<ul style="list-style-type: none"> <li>取り出し装置に搭載した切断ツールを用いて、取り出し対象を切断する。</li> <li>取り出し装置を引き上げ搬出する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>吊上装置を搬入し、装置下部と切断した取り出し対象の吊り治具を吊りワイヤで接続する。</li> <li>吊上装置のアームで新炉壁リング下部と取り出し対象を接続している吊りワイヤを解除し、吊上装置ごと取り出し対象を引き上げる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>据付装置を搬入し、据付装置下部と新炉壁リング上部を吊りワイヤで接続する。</li> <li>据付装置のアームで吊りリングと新炉壁リングの接続を解除し、据付装置ごと新炉壁リングを吊り降ろす。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>吊りリングから垂れている吊りワイヤを延長し、吊りリングと新炉壁リングを接続する。</li> </ul>

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

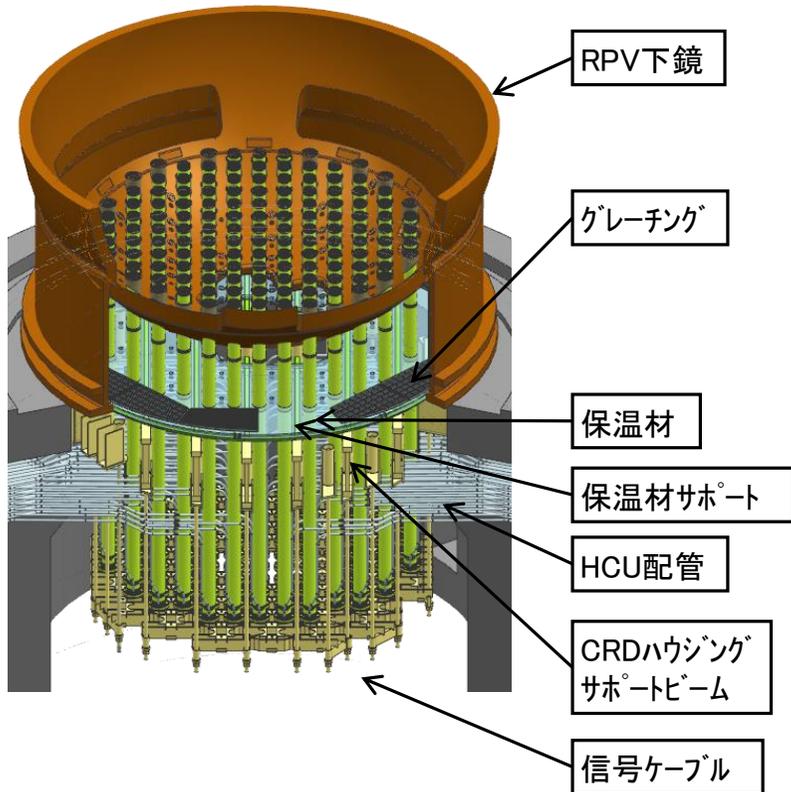
#### ■ 具体的なプランの検討①(構造物一括撤去・搬出): 炉内取り出し工法の検討

2018年度は、炉底部を対象とした要素試験を実施(UC内に収納)

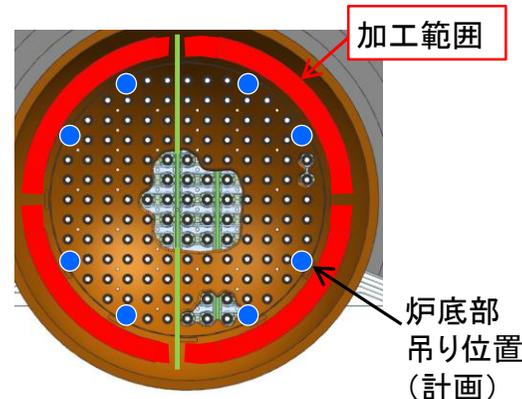
⇒ 一体取り出し工法とこれまでの細断工法と比較評価するため、上記試験と同様の炉底部を対象とした要素試験を計画中。

要素試験にあたり、炉底部の一体状態での取り出し方法の手順について検討を実施。

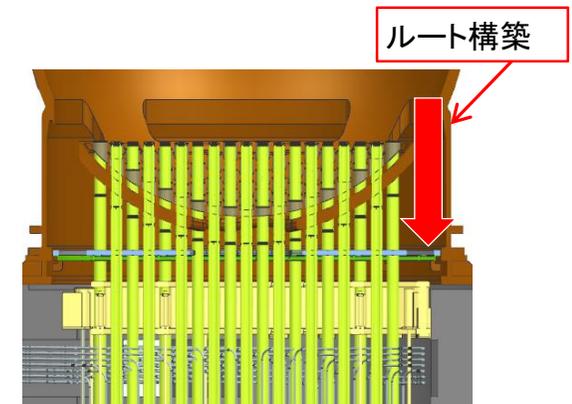
#### 【炉底部一体取り出しの概念】



- ✓ RPVに開口を設け、下部にアクセス
- ✓ RPV開口後は落下防止を実施
- ✓ 開口からアクセスし、構造物を順次切断  
(グレーチング、保温材、保温材サポート、HCU配管、信号ケーブル類、CRDハウジングサポートビーム)
- ✓ 落下防止対策の実施後に、RPVから下鏡を切り離し、炉底部を一体で吊り上げ



RPV下鏡の計画開口平面



RPV下鏡の計画開口断面

**検討した概略手順に基づき、次年度に各構造物の撤去方法を具体化し、要素試験を実施する。**

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

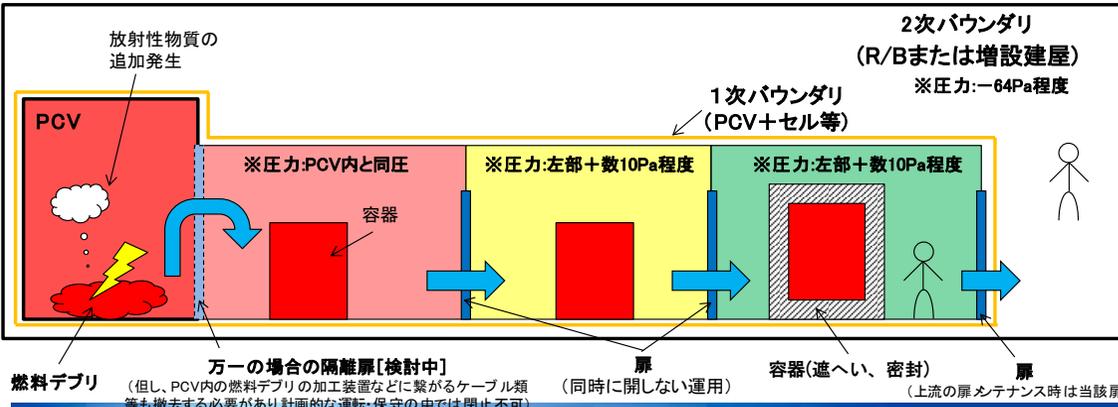
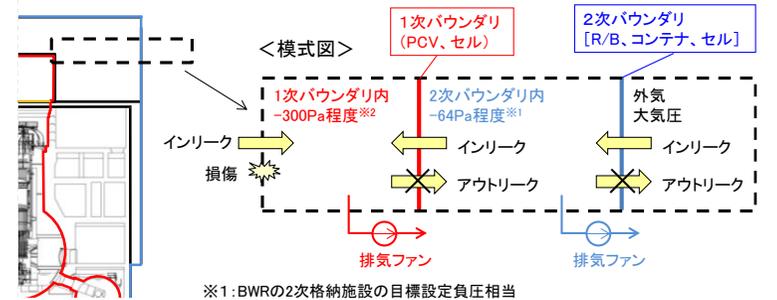
## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用): 基本方針

● 作業手順、設備配置計画として以下を設定した。

- 干渉物は、可能な限り大きく搬出する。この際、除染により遮へいを軽減するか、もしくは遮へいと組み合わせても十分に搬送可能な重量まで分割する(DSPか使用済み燃料プール(SFP)で実施)。
- 原子炉ウェルは、シールドカバーの撤去前に十分な遮へいと閉じ込めを行う。閉じ込めエリアの考えは前年度成果を踏襲し、1次/2次バウンダリの設置、1次バウンダリの細分化、負圧化による動的バウンダリの採用などを行う
- 大型構造物撤去後、細断エリアが不要になる。汚染閉じ込めエリアを小さくするため、エリアの設定を変更する。
- 燃料デブリは、なるべくRPVに近い位置で移送用容器に収納しそのまま搬出。乾燥、仕分け、収納缶への収納等保管に必要な作業はR/Bから離れた別建屋を設置して実施。セルの機能低減により軽量化を図る。

対象	機能	達成条件	必要設備 (代表的な動的機器)
1次バウンダリ (PCV、セル)	1次バウンダリから 2次バウンダリへの漏えいを 防止	1次バウンダリを 2次バウンダリより負圧 に維持	排気ファン (1次バウンダリガス管 管理設備)
2次バウンダリ (R/B、コンテナ、セル)	2次バウンダリから 環境(外気)への漏えいを防止	2次バウンダリを 外気より負圧に維持	排気ファン (2次バウンダリガス管 管理設備)



### バウンダリ概念図(構成イメージ)

- ✓ 1次バウンダリ、2次バウンダリは負圧を維持。
- ✓ 1次バウンダリは、汚染の拡大防止を考慮して複数段にて構成する方針。  
(PCV側の圧力を低く設定。2重扉の保守を考慮して扉は3重の構成。)
- ✓ PCV外側には、万一の場合の隔離扉の設置を検討。

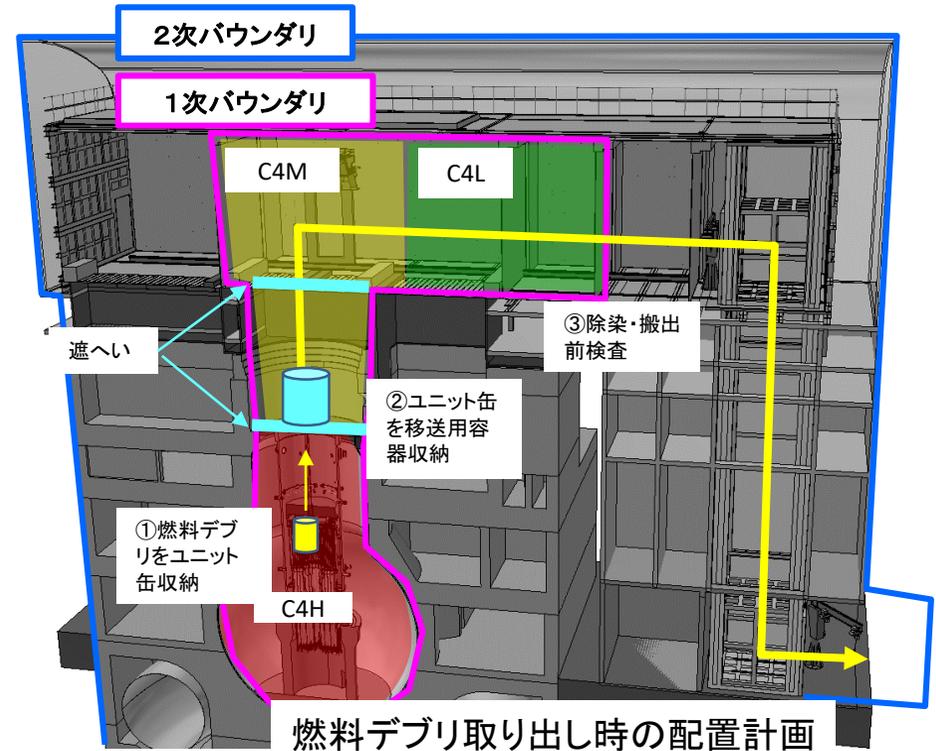
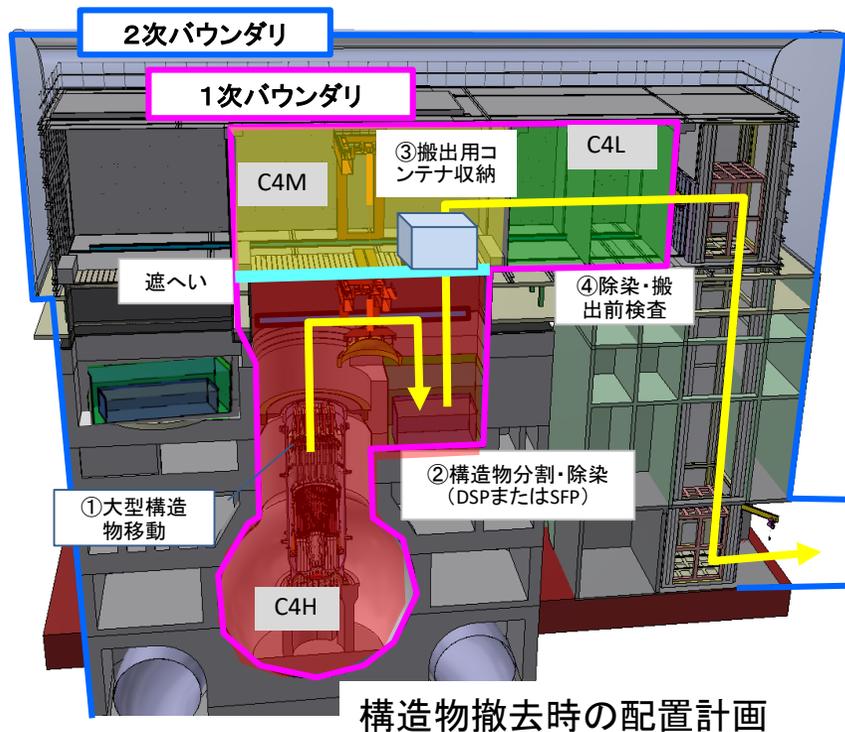
## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

#### ■ 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用): 基本方針

##### ● 大型構造物の撤去中のダスト飛散防止策(閉じ込めの基本方針(気相バウンダリ確保))

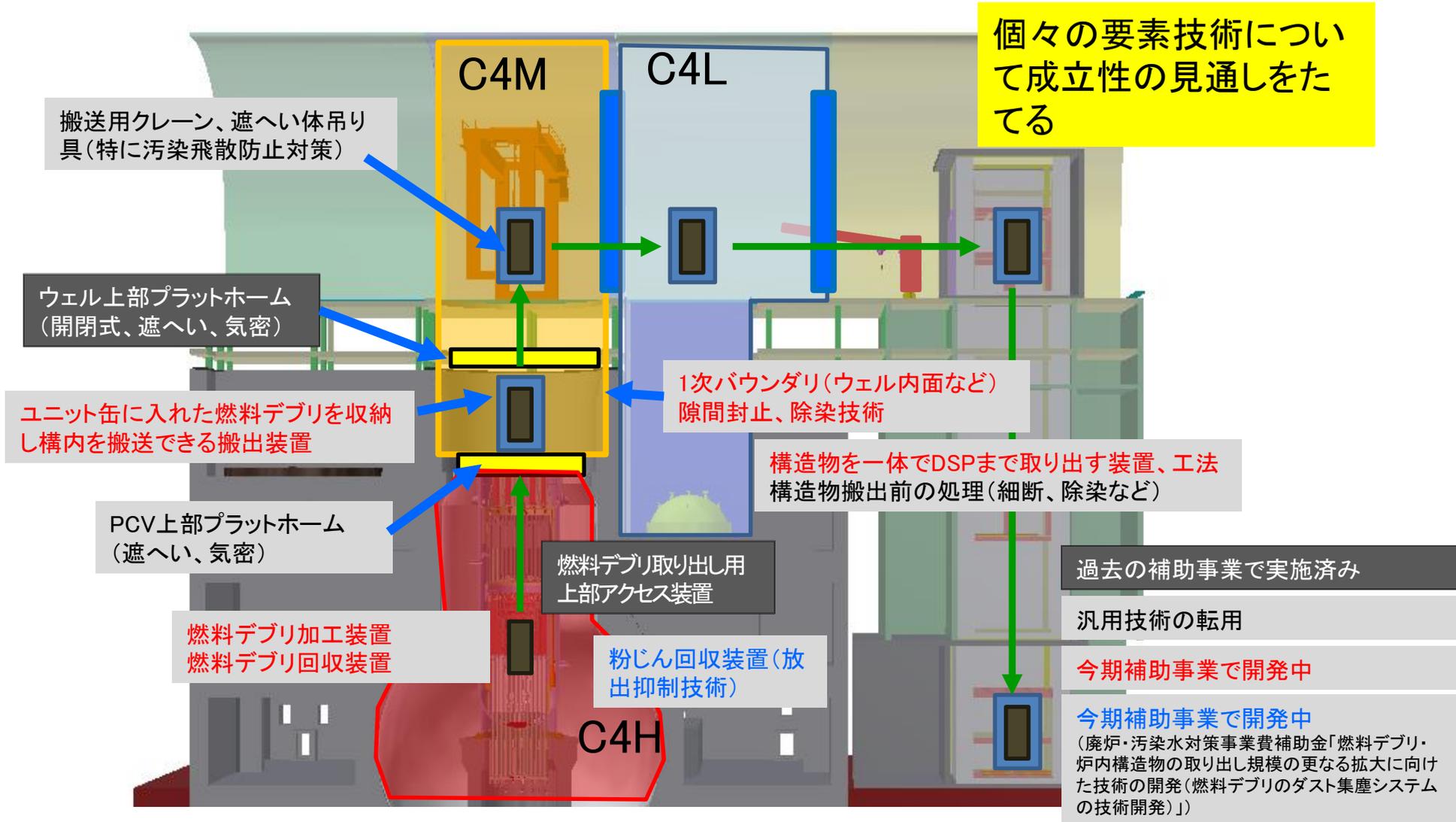
- 基本方針に基づき、構造物(干渉物)撤去工事および燃料デブリ取り出し工事における全体配置計画を立案。
- 構造物は、いったんDSPまたはSFPに取り出し分割・除染の上搬出。遮へい体をプール真上に配置することで建屋負荷を低減することができる(現状の見積もりで1000~1500ton程度(昨年までの半減以下)が期待できる)
- 構造物撤去後、全体配置を変更し、PCV上部に遮へい設置しウェルを除染
- DSP、SFPは機材や移送用容器の仮置き、メンテナンスに向けて準備。今後、全体配置を検討してゆく。



# 7. 本事業の実施内容【1）① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

- 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用): 計画の成立性確認に必要な要素技術



## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

- 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用):計画の成立性確認に必要な要素技術課題と開発方針(各要素技術の開発課題を抽出し開発方針を策定。)

ID	要素技術	開発課題	開発方針
1	搬出装置(容器)	<ul style="list-style-type: none"> <li>気密確保方法:接続部および遠隔動作部分(蓋、揚重機)</li> <li>輸送時の水素対策、臨界管理方法</li> <li>基本仕様仕様の策定[規格基準(構内輸送基準など)、燃料デブリの仕様、作業員の介在計画]</li> </ul>	'19/20補助事業で検討 7.1)②d.ユニット缶状態でR/Bからの移送方法
2	ウェル上部プラットフォーム	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料デブリ取り出し工事、炉内構造物撤去工事の開始前に設営が必要な設備</li> <li>移動式遮へい体の動作検証、閉止時の気密性能</li> </ul>	要素試験実施済【実機設計にて対応】
3	PCV上部プラットフォーム	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉ウェルなどスペースが限られている場所での開閉方法と機構</li> <li>PCVフランジ面への固定方法、固定手順</li> <li>モバイルセルや燃料デブリ取り出し装置との取り合い(気密構造)</li> <li>メンテナンスの方法、手順</li> </ul>	'19/20補助事業で検討('20年度の検討を計画)
4	ウェル内面など隙間封止、除染技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内構造物撤去工事の開始前に必要な作業。</li> <li>ウェル内面を1次バウンダリとするための処置</li> <li>ゲートプラグ隙間などへの封止技術とその施工方法、ウェルの除染、PCVの延長などの技術</li> </ul>	'19/20補助事業で検討(除染は既存技術対応) 7.1)①a.原子炉ウェルをバウンダリにする技術
5	構造物の一括撤去手法(除染、切断含む)	<ul style="list-style-type: none"> <li>大型構造物の搬出処理方法の選定と手順の検討、揚重機や吊り具</li> <li>除染可能範囲の設定</li> <li>遮へい体重量算出と使用可能な搬出用クレーン、最低必要な分割数の目途</li> <li>ドライヤユニットやセパレータなど複雑な構造物の切断技術</li> </ul>	'19/20補助事業で検討 7.1)①a.シールドカバーを一体で取り出す技術
6	燃料デブリ加工・回収装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存技術を大幅に上回る加工速度の達成、既存範囲を拡大した加工技術の調査</li> <li>燃料デブリ種別ごとの加工・回収工法選択(特に検討未実施の切り株燃料など)</li> <li>核反応生成物(FP)の放出と対処方法</li> </ul>	補助事業実施済 '19/20補助事業実施(継続。概念設計、要素試験継続)
7	粉じん回収装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>加工点近傍で発生した粉じんを、効率的に取り込む回収ヘッド、フードの検討</li> <li>メンテナンス性を考え水系へ粉じん捕獲するシステムの概念と捕獲効果、メンテナンス計画策定</li> </ul>	'19/20補助事業実施(概念設計、要素試験) 別の補助事業(集じん技術開発)で対応
8	燃料デブリ取り出し用上部アクセス装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>モジュール化によりメンテナンス性を向上させたアクセス装置概念</li> <li>メンテナンス方法立案</li> </ul>	要素試験実施済【実機設計にて対応】

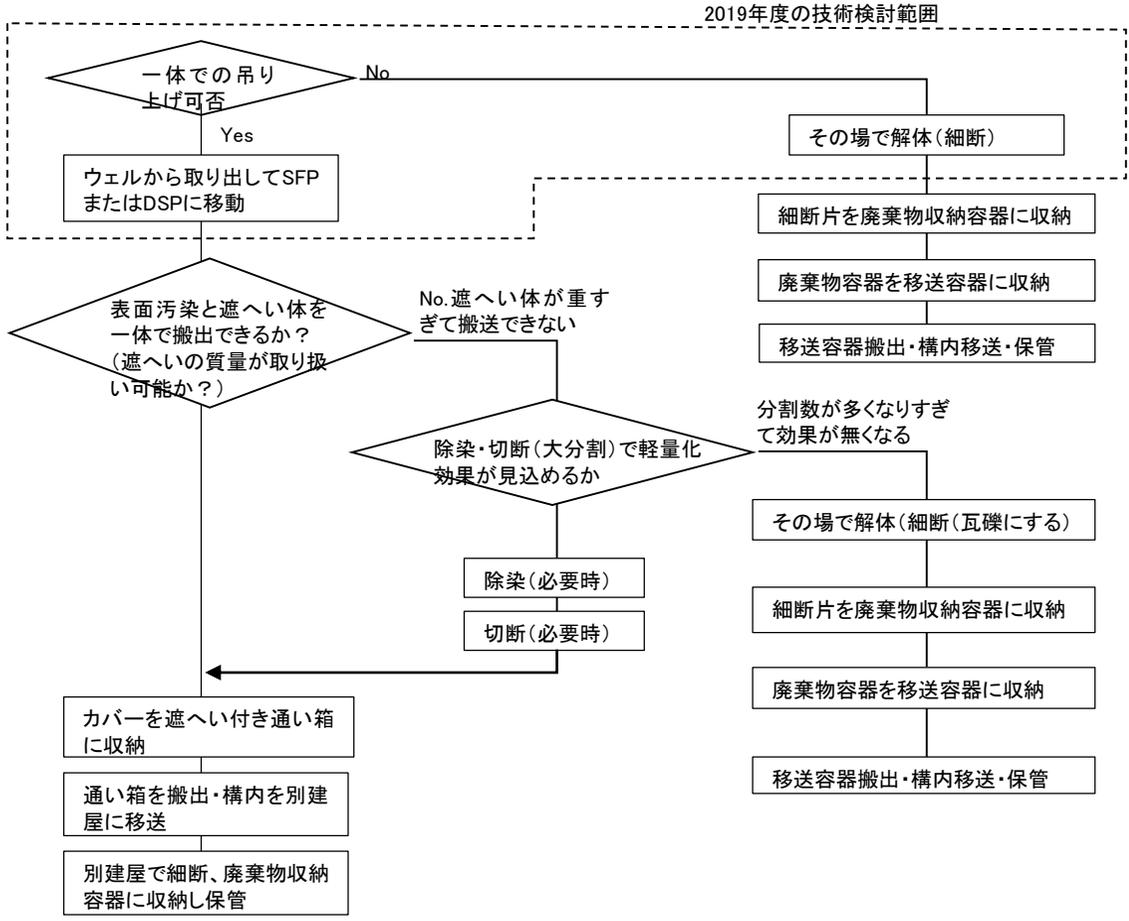
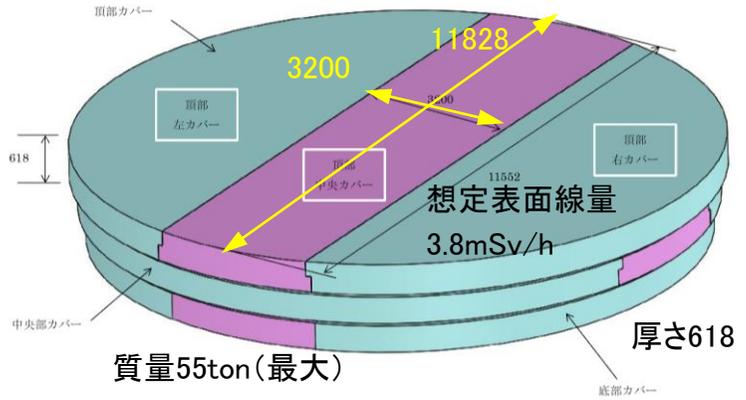
# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用): 計画の成立性確認に必要な要素技術

#### ● シールドカバーを一体でDSP(またはSFP)に取り出す技術

- ・ 廃棄物収納容器に収納され、1F構内に保管する
- ・ R/B内で細断・容器収納の他、一括搬出し別建屋で細断・容器収納、R/B内では大分割し搬出のうえ別建屋で細断・容器収納などのケースを考える
- ・ ただし、クリティカル工程短縮のため、R/Bでの作業(細断など)は最小限にして搬出することを指向する
- ・ 建屋搬出のため、効果があれば除染も考慮する
- ・ 最終的には、一括撤去、大分割、切断・除染などのいくつかのケースから、号機ごとの状態の違いも考慮して絞り込む。
- ・ それぞれのシナリオが成立するための要素技術を検討し、2019年度は一体での吊り上げ方法、その場での解体方法について検討する。



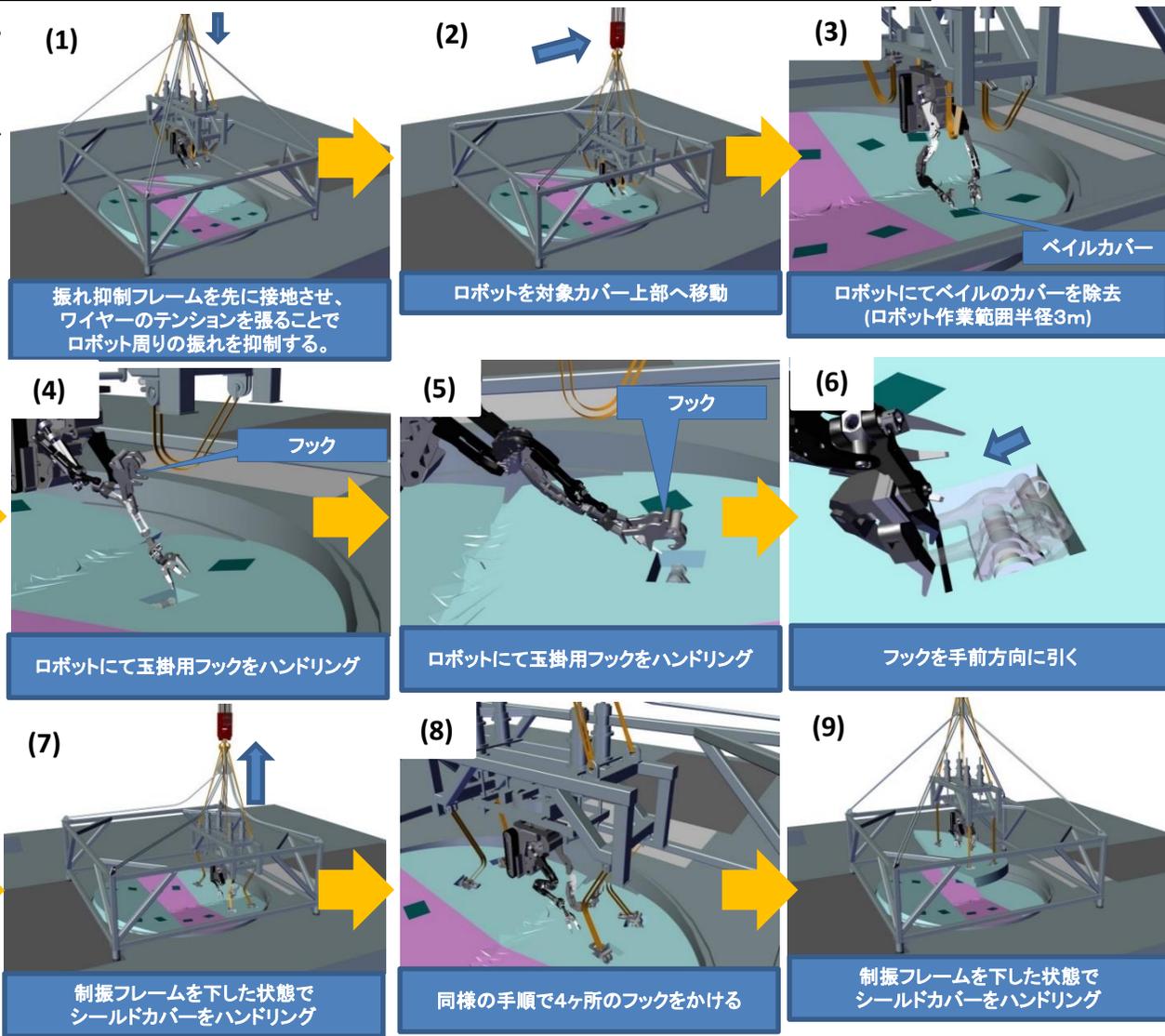
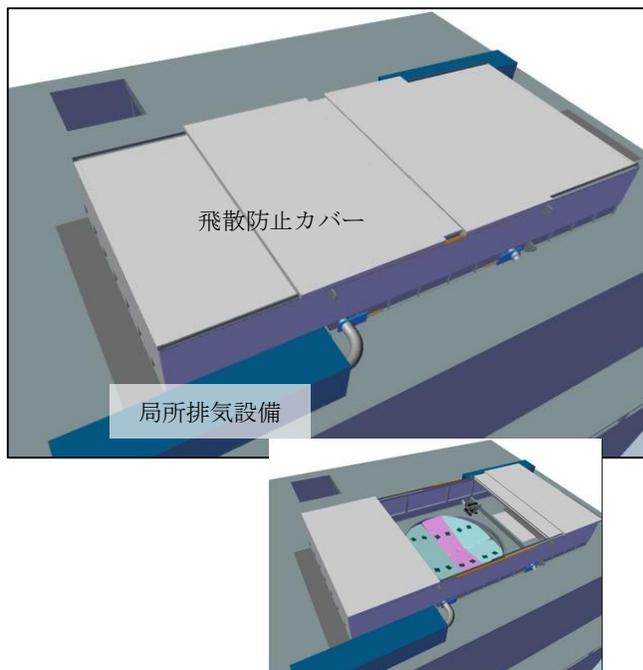
# 7. 本事業の実施内容 【 1)① 干渉物撤去技術の開発 】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用): 計画の成立性確認に必要な要素技術

#### ● シールドカバーを一体で取り出す技術 取り出し・移動シーケンス案

- 分割切断、除染、箱詰めなどの作業のため、シールドカバーをウェル上から移動する
- 移動先は、DSPや燃料プールなどを候補
- 汚染飛散防止および遮へいのため、カバー内で移動作業を完了させる。このため、カバー内に搬送できるクレーンを装備する。



# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

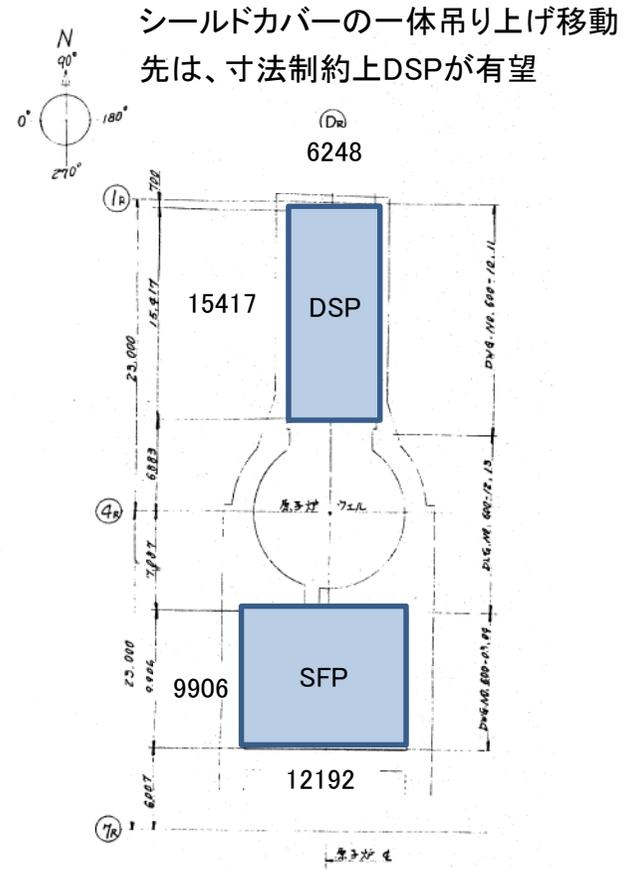
## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

### ■ 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用): 計画の成立性確認に必要な要素技術

#### ● シールドカバーを一体で取り出す技術

シールドカバーの一体吊り上げ移動に関わる、1~3号機の適用性と課題

工法と対象	1号機	2号機	3号機
シールドカバーと周辺の状況	全てのシールドカバーが脱落しており、下段(上から三層目)はウェルに落下し、PCVトップヘッドに接触している。ウェル壁ライナーに損傷(剥がれ)有。ウェルシールベローズ部に溜まり水有。 上段表面での最大線量約2sv/h。中段下側約1sv/h	シールドカバー上段表面の外観観察では、破損等は確認されていない。健全と推定される	シールドカバーの上段(上から一層目)に破損があり、中央部に凹みが確認されている。下段の状況は不明
状況情報出典	<a href="https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2019/d190829_07-i.pdf">https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2019/d190829_07-i.pdf</a> 廃炉汚染水対策チーム会合 第69回事務局会議 資料3-2 使用済燃料プール対策 「1号機原子炉建屋 SFP内干渉物調査及びウェルブラグ調査について」	<a href="https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2019/d190131_07-i.pdf">https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2019/d190131_07-i.pdf</a> 廃炉汚染水対策チーム会合 第62回事務局会議 資料3-2 使用済燃料プール対策 「2号機原子炉建屋オベフロ残置物片付後調査進捗について」	<a href="https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2014/d140227_06-i.pdf">https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2014/d140227_06-i.pdf</a> 廃炉汚染水対策チーム会合 第3回事務局会議 資料3 個別の計画毎の進捗状況 「福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋上部ガレキ撤去後の建屋躯体調査結果について」
適用可否	△ 健全性の判断が困難なため、適用可否の判断が難しい	○ 健全と推定されるため	△ 健全性の判断が困難なため、適用可否の判断が難しい
一体吊り上げ移動適用に向けた最低条件	・シールドカバーに強度(吊り上げ移送に耐えられる)があること ・破損部からのダスト飛散量が許容範囲であること	—	・シールドカバーに強度(吊り上げ移送に耐えられる)があること ・破損部からのダスト飛散量が許容範囲であること ・上段カバーの吊り上げ時に、下段が崩落しないこと
適用性判断に向けた課題	健全性判断手法の確立(シールドカバー内部の配筋の健全性確認) 下段を含めた状態確認	下段までの外観調査	健全性判断手法の確立(シールドカバー内部の配筋の健全性確認) 下段を含めた状態確認



## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

■ 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用):計画の成立性確認に必要な要素技術

● シールドカバーをウェル(その場)で解体する技術

一体取り出しの適用に課題が多い1、3号機などに向け、その場で解体(細断)する工法について比較検討を行った

工法	ウォータージェット工法(工法1)	ウォールソー工法(円盤ブレード)(工法2)	研り工法(工法3)
湿式/乾式	湿式破碎	湿式(超低水量)	乾式破碎
想定施工能力	0.2m <sup>3</sup> /日	3.2m <sup>3</sup> /日(深さ0.35m)	0.3m <sup>3</sup> /日
特徴	1)反力が小さい 2)座屈部等でも作業に影響しない	1)切断深さを管理可能 2)コンクリートと鉄筋切断が同時に可能	1)汎用重機での施工が可能 2)排水が発生しない
施工イメージ	1)反力が小さい。 2)鉄筋は研磨剤を吹き付け 3)破損部位が突然崩落しないように、上部より局所破碎を繰り返す	1)小型重機施工も研りよりも反力大。 2)切り離れた部位が落下しないよう掴み回収	1)細断物は治具掴み、または真空吸引等により回収 2)破損部位が突然崩落しないように、上部より局所破碎を繰り返す
主な課題	1)多量の作業水の排水処理設備が必要 2)噴射時の微水粒で作業視界不良になり易い	1)ダスト、飛び石等が発生する 2)入隅部は別工法で施工が必要 3)ブレードの移動、反力受けとなる治具を設置する必要がある	1)打撃・振動により周囲にマイクロクラックが発生する恐れがある 2)ダスト、飛び石等が発生する 3)鉄筋切断に時間がかかる
ウェル(特にウェルシールドベローズ)への落下リスク	排水、研磨剤、破碎物が落下し回収が難しい、またベローズの損傷防止対策要	切断切りくず、加工時の破片の落下防止処置が必要	加工片の落下防止処置が必要
反力	小	大	中
ダスト飛散	飛散防止カバー内での作業		
二次廃棄物	排水量 大量 研磨剤 大量 排水と研磨剤はともに回収	排水量 少量 廃ブレード 少量	廃治具 少量
施工日数	大	小	中
評価	排水が多量に発生すること、工期が長いことから合理的ではない。他工法で不具合が生じた場合(ジャンカ等でのスタック等)のスポット対策には有効と考えられる。	ダスト、飛び石は飛散防止カバーにより対策可能。 入隅部を工法3で実施することで、適用が可能となる。	ダスト、飛び石は飛散防止カバーにより対策可能。 鉄筋切断を工法2で事前に実施すると、工期短縮につながると考えられる。

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

#### ■ 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用):計画の成立性確認に必要な要素技術

#### ● シールドカバーを一体で取り出す技術

まとめ

- 上アクセスにおける干渉物であるシールドカバーの撤去について概念検討を実施した
  - R/Bで細断・廃棄物収納容器への収納搬出を行う従来案に加え、R/Bから一体で搬出し外部で細断以降の作業を行う案、R/Bで大分割を行って(軽量化の上)搬出し外部で細断以降の作業を行う案などを抽出した。
  - 各案のシナリオを選択する手順(フローチャート)と分岐点を定義したが、工法適用性は号機別に大きく異なる。
  - 手順のうち、原子炉ウェルからの一体吊り上げ案について、作業手順、装置の概念設計を行った。
  - R/B内で細断する案について、細断方法のリストを作成し、各案の比較評価を行った。
  - シールドカバーの一体吊り上げには、上段のみならず下段まで含めたシールドプラグの吊り上げ可否を検討する必要があり、実機調査でのデータなどが重要かつ重要である。
- 2020年度に補助事業で検討すべき主な課題
  - 号機別の取り出し手順の具現化。一体撤去は案を作成したので、原子炉ウェル上で細断する場合の細断工法、特に最下段の崩落やプラグ破片の落下を防止するための対策立案。
  - プラグ取り外し後に、ウェルの壁面に付着した汚染が飛散しないための除染やペイント処理方法
  - 一体吊り上げについては、可否の判断基準策定が必要。その後一体吊り上げ移動の搬送装置の設計。
- 将来、実機工事やエンジニアリングでの対応事項
  - 一体吊り上げを判断するための、実機情報の収集(特に配筋の状態、崩落リスク、吊り上げ時に予想される線量、汚染放出を評価するための汚染状況など)。
  - 撤去時のセル構成や遮へい設置時期、遮へい規模(厚さ)検討のため、ウェル内面やカバー表面の汚染状況調査

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

#### ■ 具体的なプランの検討②構造物大分割・除染の併用(計画の成立性確認に必要な要素技術)

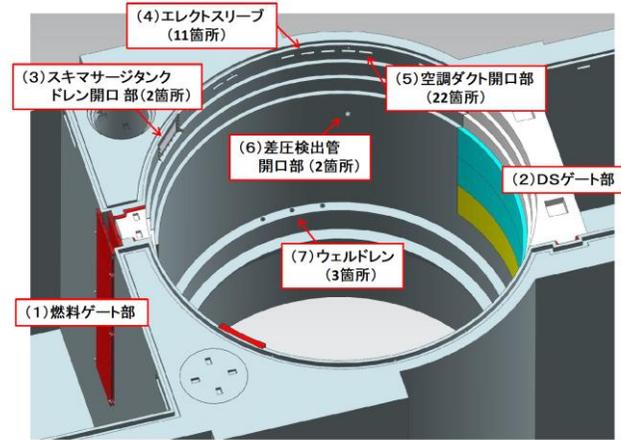
- 原子炉ウェルをバウンダリにするための開口部封止技術の開発
  - 基本要件機能
    - ・ バウンダリによる放射性物質の閉じ込め
    - ・ シール部に対する要求条件(目標値)
      - ・ 差圧:設計差圧に対する漏えい量を今後設定する  
(バウンダリ内負圧(-100Pa)維持のための想定系統流量と、開口に対すPCV表面積比から算出)
      - ・ 設計差圧:シール部が健全であることが必要な設計差圧を今後設定する。
      - ・ シール部の異常を検知できること。
      - ・ 保守時にも1次バウンダリの負圧(通常運転差圧)を維持できること。
    - ・ 作業員の被ばく低減
      - ・ 要求機能を達成するための手段: 完全遠隔作業を計画
      - ・ シール部に対する要求条件: 遠隔操作によりシール部の据付／交換ができること。
  - 環境要求条件
    - ・ 線量率 : (PCVフランジプラットフォーム設置後) : 5~10mSv/h  
(PCVフランジプラットフォーム設置前) : 約100Sv/h
    - ・ 温度: -7~40℃
    - ・ 湿度: バウンダリ外: 外気と同程度  
バウンダリ内: ≤99%
    - ・ 設計寿命: 50年(ただし消耗品は保守時に交換可能であること。)

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

- 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用):計画の成立性確認に必要な要素技術
- 原子炉ウェルをバウンダリにするための開口部封止技術の開発
  - ・ シールが必要な個所の抽出

#	部位名称	今回検討
1	空調ダクト開口部(22箇所)	○
2	スキマサージタンクドレン開口部(2箇所)	○
3	差圧検出管開口部(2箇所)	○
4	SFPゲート部(公称片側13mm)	○
5	スロット部のG1/G2ゲート管ドレン(1箇所)	○
6	DSPゲート部(公称片側13mm)	○
7	ウェルカバーと原子炉ウェル上部ヒナ段との隙間(公称片側13mm)	
8	ウェルカバーとカバー同士の隙間(公称13mm)	
9	ウェルカバーとスロットプラグ上段との隙間(公称13mm)	
10	ウェルカバーとD/Sプラグ上段との隙間(公称13mm)	
11	ウェルシールベローズ本体(損傷している場合)	
12	ウェルシールベローズと原子炉ウェル下部ヒナ段ライニングとの溶接部(損傷している場合)	
13	ウェルシールベローズとPCVフランジとの溶接部(損傷している場合)	
14	原子炉ウェルライニング板(損傷している場合)	
15	原子炉ウェルライニング板溶接部(損傷している場合)	
16	エレクトスリーブ(11箇所)	○
17	原子炉ウェルカプライナ上の手摺用ネジ穴⇒t25貫通無し	
18	ウェルドレン(3箇所)	○



今回の検討では、左記のうち代表的な構造として7か所を選定した。ウェルカバー関連(7箇所)は、撤去後、リークを考慮した新ウェルカバーに代替、溶接部の損傷の可能性(5箇所)は、損傷程度に応じた閉塞方法をとるか、一律にグラウド封止するものとした。

- ・ 被ばく評価を行う上でのレベル2、3発生時の対応方針

レベル区分	設定根拠	シール性能の指標(例:流量)	検出方法	事象発生の防止策	事象発生時のリカバリ
レベル1	差圧**Paで流量**m3/hを達成	**m3/h			
レベル2	レベル1の**倍	**m3/h			
レベル3	シールが全くなかった時	***m3/h			

2019年度作成したシール構造より、2020年度シール部ごとに作成する

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

- 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用): 計画の成立性確認に必要な要素技術
- 原子炉ウェルをバウンダリにするための開口部封止技術の開発(封止ステップ図)

<p>ステップ0: 前提条件</p>		<p>ステップ1: 清掃</p>
<p>・遮へいプラグ1層目は撤去され、2層目表面の除染・清掃が完了している。          ・ドレン前面に金網が設置してある。          ・破損や著しい変形等がない。</p>	<p>技術課題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・アクセスルート計画</li> <li>・モニタリング方法計画</li> <li>・自走作業ロボットに対する要求機能の整理</li> </ul>	<p>技術課題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・必要清掃レベルの設定</li> </ul>
<p>ステップ2: 封止材設置</p>	<p>ステップ3: シール材吹き付け</p>	<p>ステップ4: 検査</p>
<p>技術課題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・隙間量の許容値設定</li> </ul>	<p>技術課題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・施工可能時間の把握</li> <li>・吹き付け手順の確立</li> <li>・作業終了の判断根拠の確立</li> </ul>	<p>技術課題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・検査箱の構造</li> <li>・リーク場所特定方法</li> </ul>

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### a. 上アクセスによる大型構造物の取り出し方法、搬送方法

- 具体的なプランの検討②(構造物大分割・除染の併用):計画の成立性確認に必要な要素技術
- 原子炉ウェルをバウンダリにするための開口部封止技術の開発

#### まとめ

- 上アクセスによる燃料デブリ取り出し工法において必要な、原子炉ウェル部分をバウンダリにするための開口部封止技術を検討した
- 当該エリアに存在する開口部を調査し、検討を行う開口部を抽出した
- 汎用的に使用されている封止技術を調査し、その中から各開口部の封止技術を選定した。
- 選定した封止技術を用いた場合の施工案として、遠隔装置を用いた作業ステップ図を作成した。
- 今後の検討、2020年度実施内容として下記が挙げられる
  - ・ 作成した作業ステップに基づく、課題のリストアップ
  - ・ 封止のメンテナンス計画、万が一封止部から漏えいが発生した際のレスキュー計画、漏えいを未然に防ぐ監視計画などの立案
  - ・ メンテナンスやレスキューを含み、抽出した課題の解決方針、試験や解析などの計画
  - ・ 開口部封止以外のバウンダリ構築方法、例えばPCVフランジから延長管敷設との比較

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

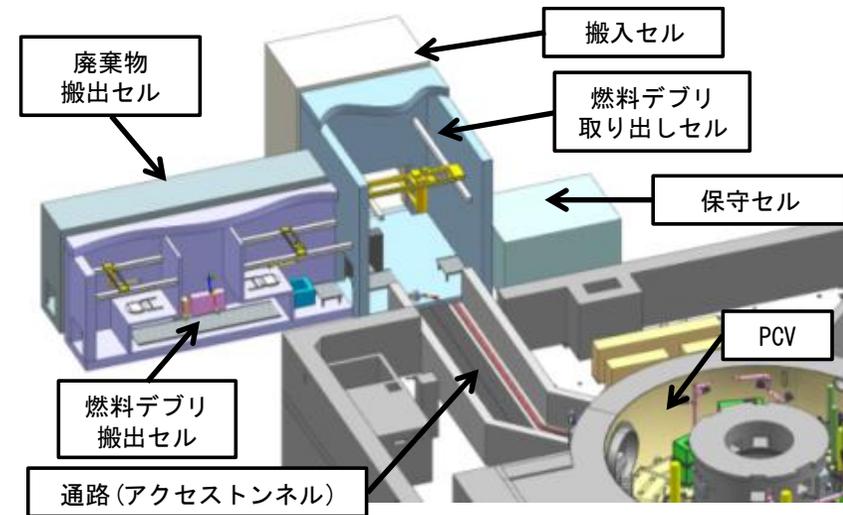
- 開発の目的
  - 燃料デブリを取り出すために必要となる機器ハッチからCRD開口部までのアクセスルート構築方法に関する検討を行う。
  
- 解決すべき課題
  - 遠隔作業範囲の拡大と作業効率化。
  - PCV内で使用する装置類のケーブルの処理方法。
  
- 開発の進め方
  - PCV内アクセスから干渉物撤去までの作業手順立案。
  - 機器ハッチからCRD開口部までのアクセスルート上の干渉物の撤去方法検討および要素試験。
  - PCV内で使用する装置のユーティリティ構築方法の開発。
  
- 得られる成果
  - PCV内アクセスから干渉物撤去までの作業手順。
  - 機器ハッチからCRD開口部までのアクセスルート構築方法。
  - PCV内で使用する装置のユーティリティ構築方法。

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

#### ■ 検討の前提条件

- ✓ PCVと増設建屋(\*1)を通路(アクセストンネル)で接続できること。なお、アクセストンネルは、R/B外から遠隔にて送り出すことで敷設する。
- ✓ アクセストンネル設置のため、ヤード整備、地下構造物対策および地上構造物撤去等を実施済であること。
- ✓ 複数の遠隔作業装置を使用し、PCV内での干渉物撤去作業、燃料デブリ取り出し作業を実施する。必要に応じ、PCV内で装置の組み立てを実施する。



PCVと増設建屋の接続イメージ

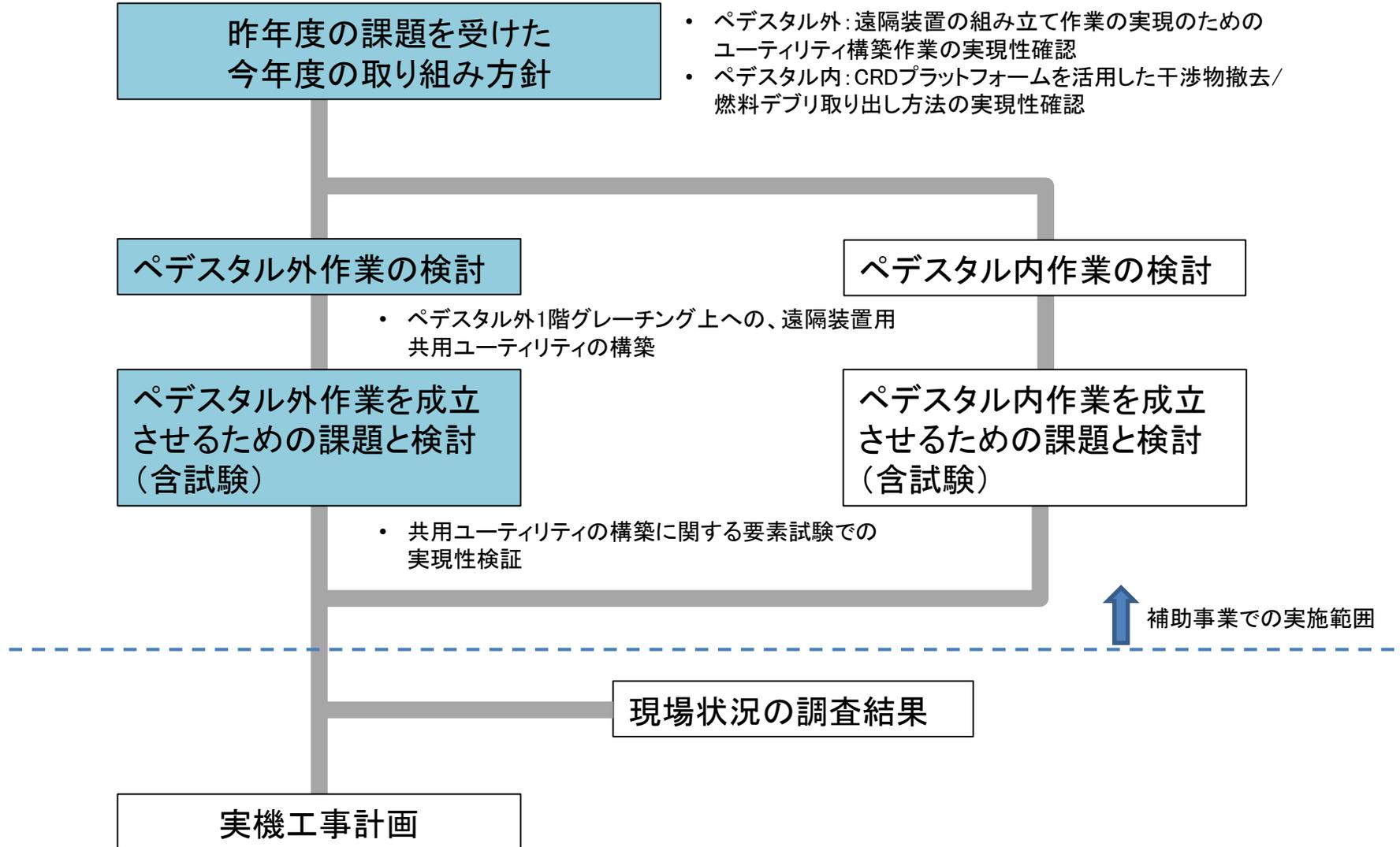
(\*1): 増設建屋の詳細機能は検討中であることから、燃料デブリ乾燥を含む保管に向けた前処理機能を持つ設備として定義する

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法

### ■ 検討フロー

: 今回報告

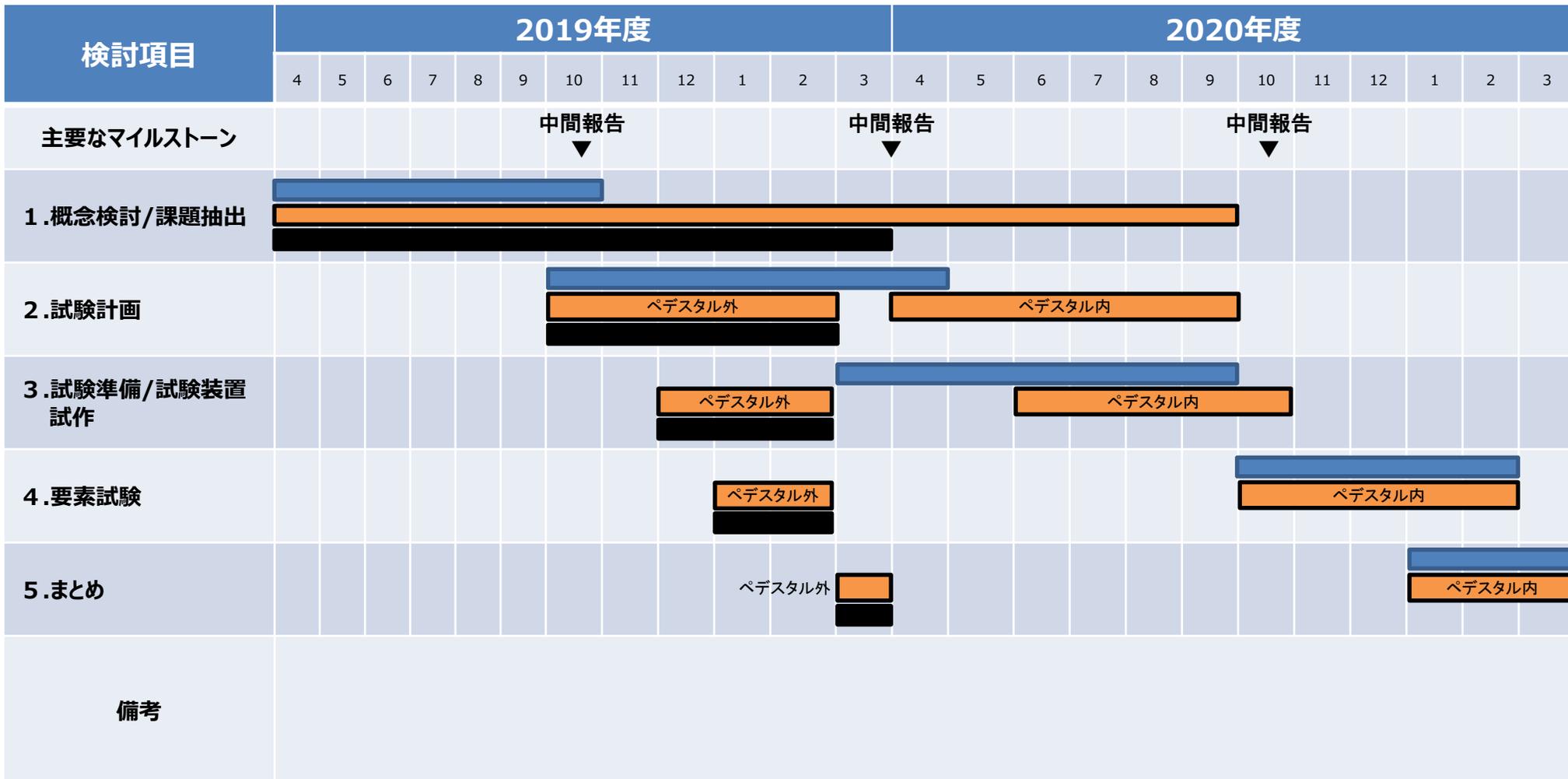


# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法

### ■ 開発工程

■ :計画  
 ■ :計画(見直し後)\*  
 ■ :実績

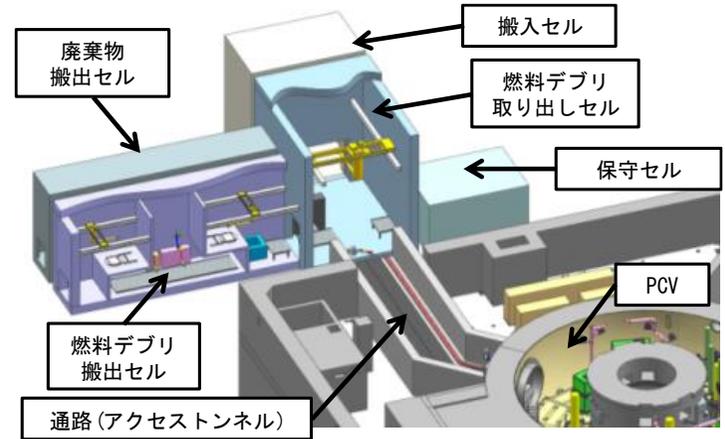


# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法

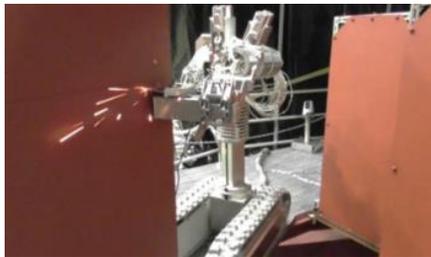
### ■ 検討の対象となる工法の概要

- ✓ PCVと増設建屋を通路(アクセストンネル)で接続。アクセストンネルは、R/B外から遠隔にて送り出すことで敷設する。
  - アクセストンネルの採用により、R/B内の床荷重を軽減可能。
  - 他工事とアクセストンネルの配置が干渉する場合は、アクセストンネルのルート変更により、干渉を回避可能(自由度の高い配置計画)。
  - アクセストンネルの接続先は、既存ペネのうち、機器ハッチを使用。
- ✓ 複数の遠隔作業装置を使用し、PCV内での干渉物撤去作業、燃料デブリ取り出し作業を実施。必要に応じ、PCV内で装置の組み立てを実施。
- ✓ 号機、ペDESTALの内外を問わない方法。

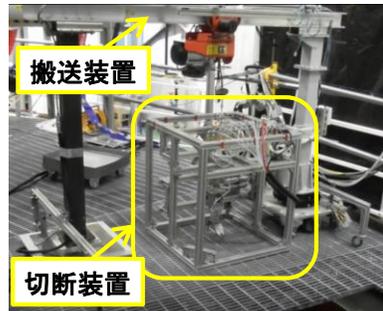


PCVと増設建屋の接続イメージ

### 【遠隔作業装置の例】



柔構造作業アーム(クローラ・双腕タイプ)



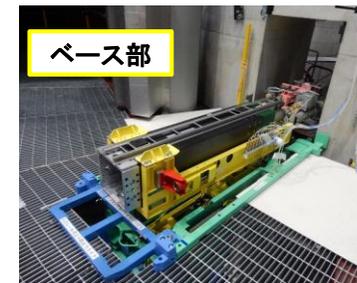
搬送装置と切断装置



柔構造作業アーム(多腕タイプ)



アーム部



ベース部

ペDESTAL内干渉物撤去装置

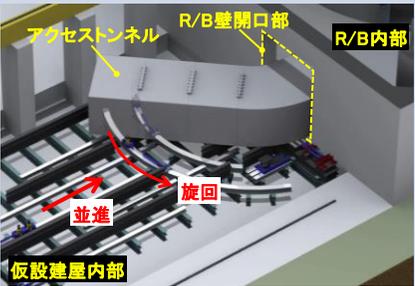
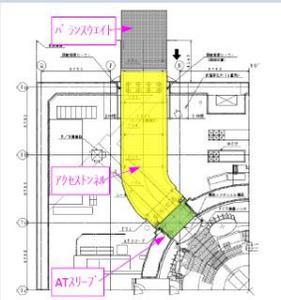
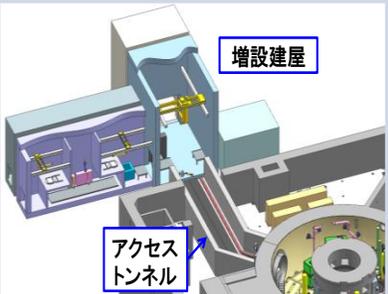
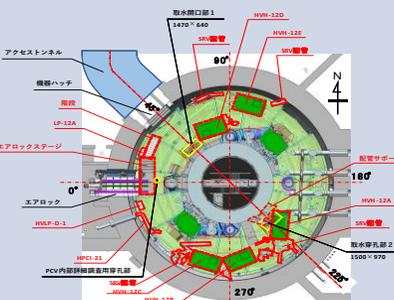
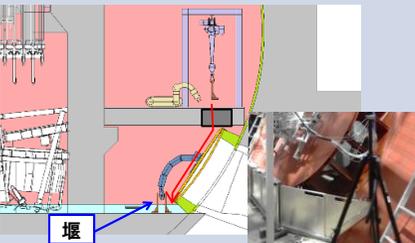
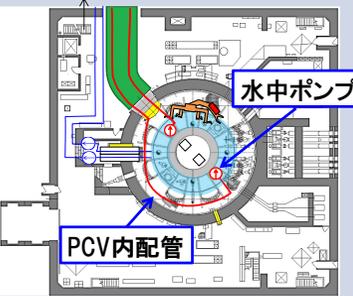
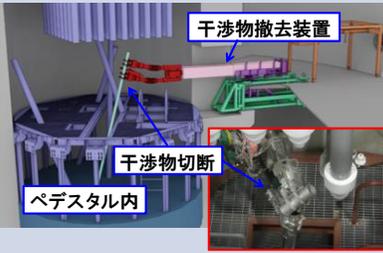
# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法

### ■ 主要作業ステップ

✓ 準備作業から燃料デブリ搬出までの一連の主要作業ステップは以下の通り。

         : 19-20年度での検討対象

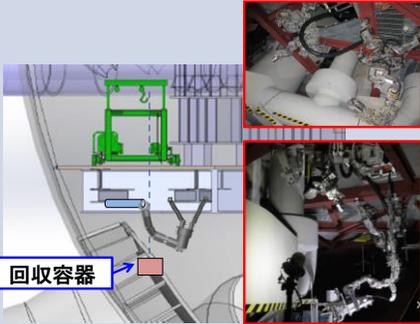
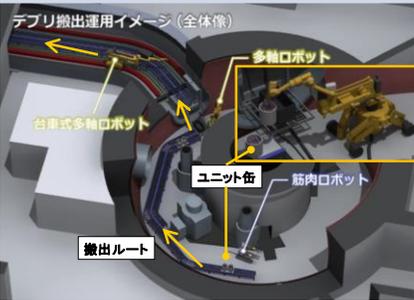
作業ステップ	① 仮設建屋構築 R/B壁面開放	② アクセストンネル送り出し	③ アクセストンネル接続	④ 増設建屋構築
ステップ図				
備考*	<ul style="list-style-type: none"> <li>概念検討実施済。</li> <li>既存技術での対応可能な見込みのため、次ステップ以降の検討を優先中。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>要素試験にて実現性確認を実施済(17-18年度)。</li> <li>実機重量を模擬した旋回要素試験を計画。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>本PJにてスリーブとPCV間の溶接方法に関する要素試験を実施予定(2020年度)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>事業者エンジニアリングにて詳細検討実施中。</li> </ul>
作業ステップ	⑤ ペDESTAL外干渉物撤去 (D/W内アクセスルート構築)	⑥ 汚染拡大防止堰設置	⑦ D/W内配管展開 水中ポンプ設置	⑧ ペDESTAL内干渉物撤去
ステップ図				
備考*	<ul style="list-style-type: none"> <li>D/W内(1階)の干渉物を撤去。</li> <li>地下階へのアクセス→配管の撤去作業に関する要素試験を実施済(17-18年度)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>D/W地下階にアクセス。</li> <li>汚染拡大防止用に堰を設置。</li> <li>ジェットデフ(J/D)周囲への堰設置に関する予備試験を実施済(17-18年度)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水循環システムを構築</li> <li>水循環PJにて、配管敷設・ポンプ設置に関する要素試験を実施済(19年度)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>梁を用いた干渉物撤去方法に関する要素試験を実施済(17-18年度)。</li> <li>CRDプラットフォームを活用した干渉物撤去要素試験を実施予定(2020年度)</li> </ul>

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法

### ■ 主要作業ステップ

 : 19-20年度での検討対象

作業 ステップ	⑨ 燃料デブリ取り出し	⑩ 燃料デブリ搬出
ステップ 図	 <p>回収容器</p>	
備考*	<ul style="list-style-type: none"> <li>図はペDESTAL外の作業例</li> <li>ペDESTAL内は干渉物撤去装置で作業</li> <li>梁を用いた燃料デブリ取り出し方法に関する要素試験を実施済(17-18年度)。</li> <li>CRDプラットホームを活用した燃料デブリ取り出しに関する要素試験を実施予定(2020年度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>概念検討実施済。</li> <li>本ステップの搬出作業の技術開発も必要であるが、前段ステップが実現可能でなければ、本ステップ自体が成立しないことから、前段ステップの検討を優先中。</li> </ul>

本補助事業では、ステップ③、⑤、⑥、⑧、⑨を対象とし検討を進めている。

(その他のステップは、別PJやエンジニアリングで検討中のものやこれまでに要素試験実施済みのもの)

- ✓ ステップ③については、「3)(i)②接続部の閉じ込め機能確保技術」(No.260~270頁)にて開発内容の詳細を説明する。
- ✓ ステップ⑤・⑧・⑨については、本項「1)①干渉物撤去技術の開発」にて開発内容の詳細を説明する(次紙以降参照)。
- ✓ ステップ⑥については、「1)②干渉物撤去以外の技術の開発(b.サプレッションチェンバへの拡散防止方法)」(No.88~107頁)にて開発内容の詳細を説明する。

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

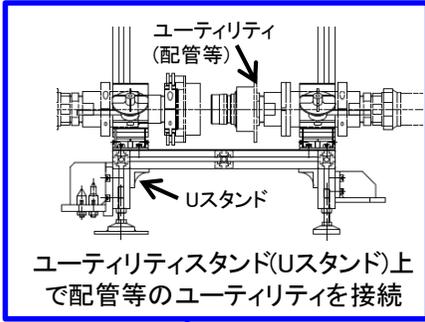
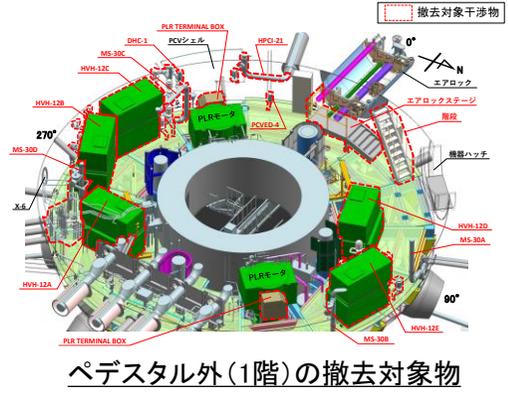
## b. 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法

### ■ ペDESTAL外干渉物撤去作業の全体戦略

- ✓ ペDESTAL外の干渉物撤去作業では、干渉物の撤去と撤去作業装置向けユーティリティの整備を並行して進める。
  - ⇒干渉物自体の撤去可否と同程度にユーティリティ整備の実現性可否の確認も重要  
(ユーティリティ整備の成立可否は干渉物の撤去方法に影響を及ぼすため)
  - ⇒本PJでは、干渉物撤去に優先して、ユーティリティの整備の実現性確認に取り組む。

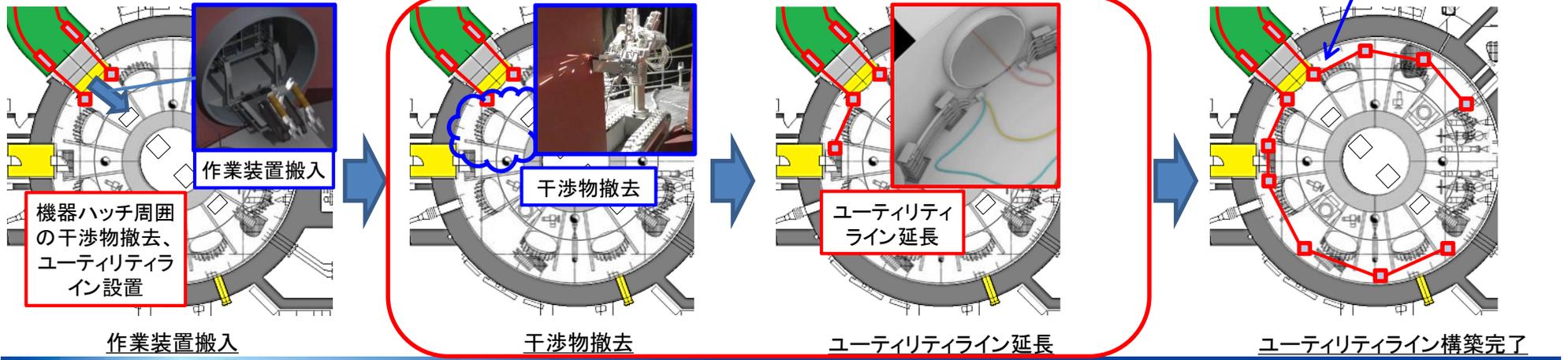
#### 【干渉物の撤去とユーティリティ整備の手順】

- (1) 機器ハッチより作業装置搬入
- (2) 機器ハッチ(PCV内側)周囲の干渉物を撤去
- (3) 機器ハッチ周囲にユーティリティ(水圧/電気)ライン設置
- (4) 作業装置のケーブル接続先を、設置したユーティリティラインに変更(つなぎ換え)
- (5) 周囲の干渉物を撤去
- (6) ユーティリティライン延長
- (7) (4)~(7)を繰り返す(CRD開口部まで)
- (8) ユーティリティライン構築完了



交互に繰り返し

— : ユーティリティライン  
 □ : Uスタンド



## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

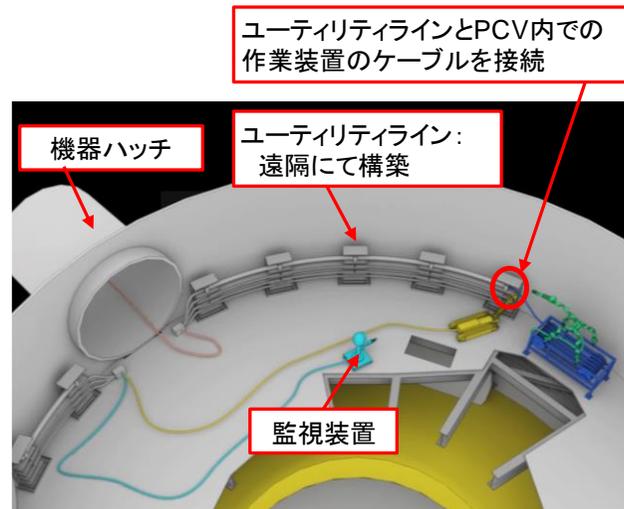
### b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

#### ■ 共用ユーティリティ構築方法の検討

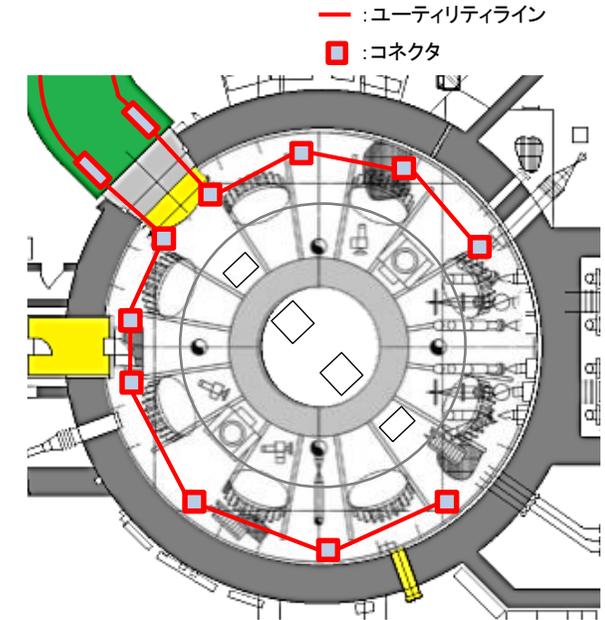
前年度にて抽出した課題であるPCV内で使用する遠隔装置の撤去装置・周辺設備の構築作業の遠隔化の解決案として、ペデスタル外周部への共用ユーティリティ設置を検討。

#### 【共用ユーティリティの概念】

- PCV内で使用する遠隔装置の駆動源である水(水圧)、電気を供給。
- ユーティリティラインの設置作業は、独立稼働する遠隔装置(柔構造作業アーム等)にて実施。
- ペデスタル内/外での干渉物の撤去作業、燃料デブリ取り出し作業に使用する遠隔装置は、作業場所近傍のコネクタと接続し、ユーティリティ(水圧/電気)を供給。
- 遠隔装置のケーブルの一端を、機器ハッチ(増設建屋)ではなく、作業場所近傍のコネクタとすることで、長尺のケーブルマネジメントが不要となる。



共用ユーティリティの概念図



共用ユーティリティの設置範囲(計画)

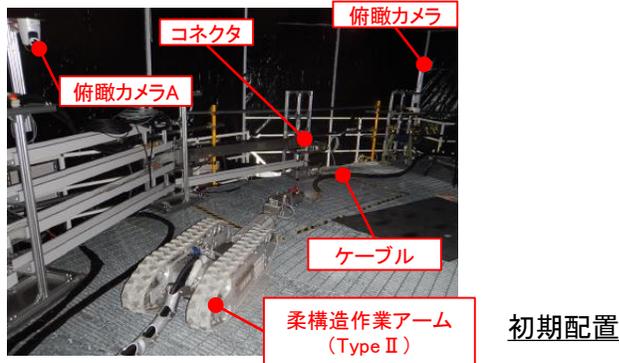
# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

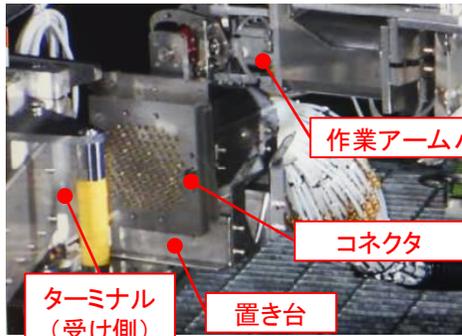
### ■ 共用ユーティリティ構築方法の検討

共用ユーティリティの設置について、柔構造作業アームを用いた遠隔での接続予備試験を実施。

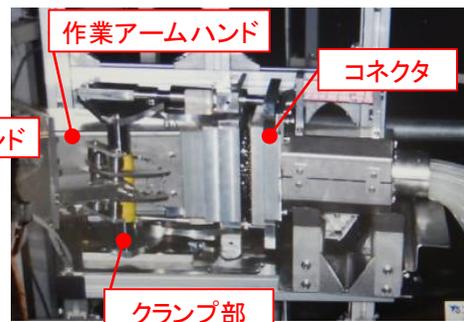
#### 【ペデスタル外模擬環境によるコネクタ接続予備試験状況】



初期配置



コネクタ設置状況



コネクタクランプ状況

確認項目	要領	判定基準	結果
接続可否	柔構造作業アームにてコネクタ把持・運搬し、ターミナルとコネクタを位置合わせした後、クランプし固定する。作業はカメラ映像のみで行う。	・把持・運搬時にコネクタを落下させないこと。 ・ターミナルとコネクタの位置合わせ後にクランプ可能なこと。	○
接続後の確認	接続作業の完了後、カメラ映像により、ターミナル・コネクタ間の接続部を確認する。	ターミナル・コネクタ間の接続部に変形がないこと。	○
漏えい有無	接続完了後、ターミナル内の配管に通水する。	各配管から漏えいがないこと。	○

✓ 遠隔操作でコネクタ接続が可能であることを確認。

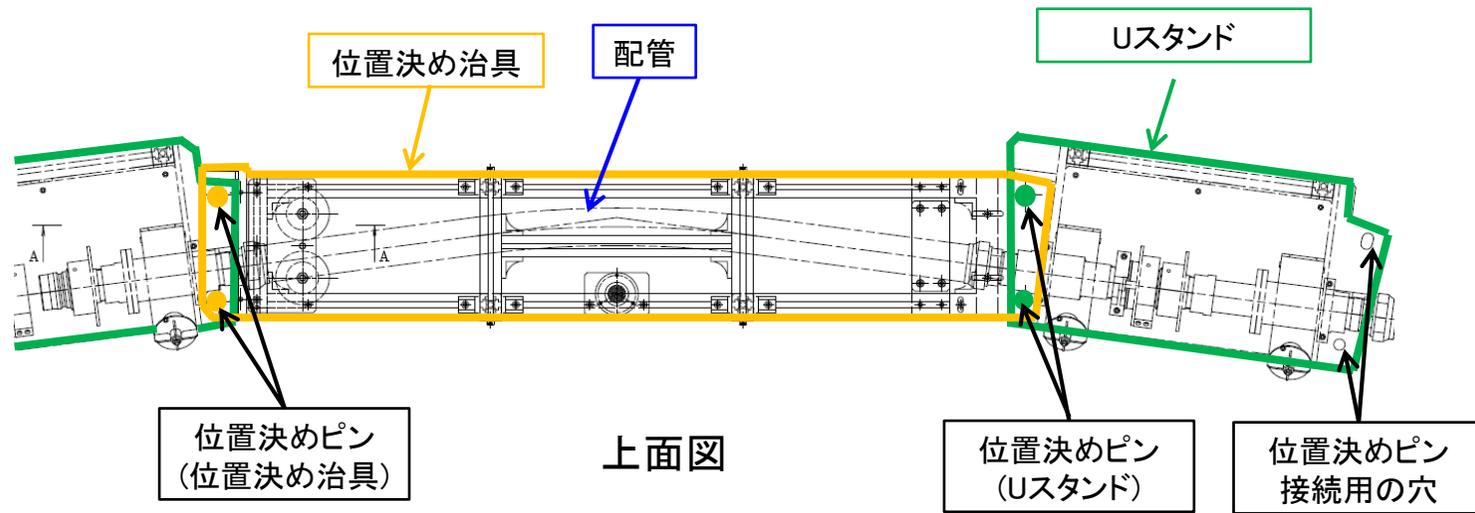
✓ 位置決め方法およびコネクタ接続完了の確認方法等が課題であり、解決策を検討した(次紙参照)。

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

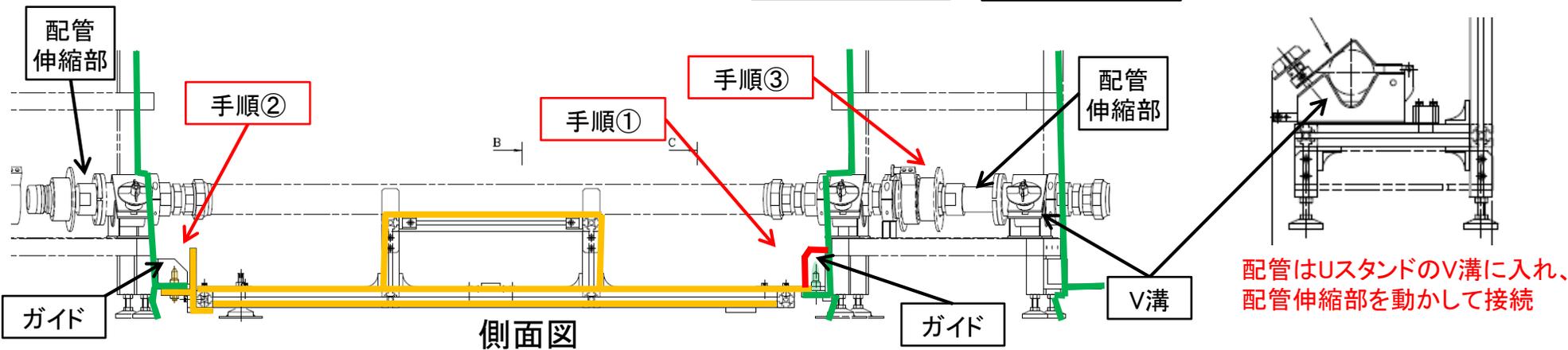
### ■ 共用ユーティリティ構築方法の検討

予備試験結果を踏まえ、検討した共用ユーティリティの構造は以下の通り。



#### 【接続方法】

- ① 位置決め治具をUスタンドのガイドに押し当て、位置決めピンに接続
- ② 新たなUスタンドを位置決め治具のガイドに押し当て、位置決めピンに接続
- ③ 上記①と②を繰り返してUスタンドをD/W内に設置後、Uスタンド上で配管を接続



配管はUスタンドのV溝に入れ、配管伸縮部を動かして接続

**上記構造での遠隔施工の妥当性を、要素試験※にて確認する**

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

### ■ ペデスタル外の作業ステップ

✓ 共用ユーティリティの構築をステップに含むペデスタル外の作業について、作業ステップを細分化し、作業内容の具体化と課題の抽出を行った。

#### 【ステップ④】増設建屋構築

(No.59頁参照)

  : 要素試験での確認対象

作業ステップ	1. 作業装置搬入、干渉物撤去(機器ハッチ周囲)、ユーティリティ設置	2. DW内(1階)干渉物撤去※	3-1. ユーティリティライン延長※ (位置決め治具の設置)
ステップ図	<p>機器ハッチ周囲の干渉物撤去、ユーティリティライン設置</p> <p>作業装置搬入</p>	<p>干渉物撤去</p>	<p>位置決め治具搬入・設置</p> <p>ユーティリティ(配管等)</p> <p>Uスタンド</p> <p>Uスタンドの概念図</p>
内容	<p>機器ハッチより作業装置を搬入し、機器ハッチ(PCV内側)周囲の干渉物を撤去する。その後、機器ハッチ(PCV内側)の周囲に、アクセストネルから延長されたユーティリティ(水圧/電気)ラインを設置する。</p>	<p>作業装置のケーブル接続先を前ステップで設置したユーティリティに変更する。その後、周囲の干渉物を撤去する。</p>	<p>作業装置を用いて、Uスタンド設置用の位置決め治具を所定位置まで搬入・設置する。</p>
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>アクセストネルから伸びたユーティリティの引き出し方法</li> </ul>	<p>(遠隔でのコネクタ接続可否、干渉物切断に関する要素試験を実施済[15-16年度])</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業装置での位置決め治具の把持可否</li> <li>作業装置での位置決め治具の運搬</li> <li>目標位置への設置精度</li> <li>位置決め治具の固定可否</li> </ul>

※1階の干渉物を撤去しながらユーティリティラインを構築(延長)するため、ステップ2→3-1～3-4を繰り返す。(CRD開口部近傍到達まで)

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

### ■ ペデスタル外の作業ステップ

: 今回の要素試験対象

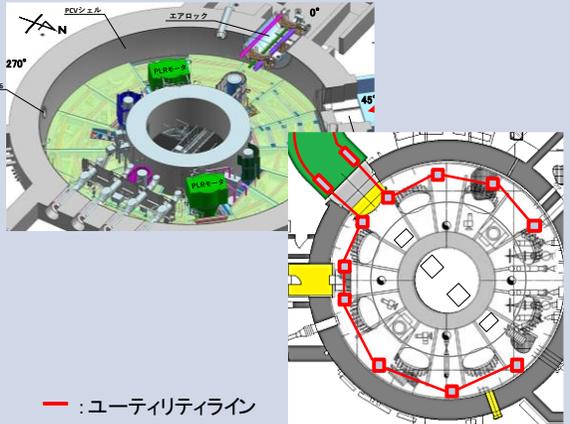
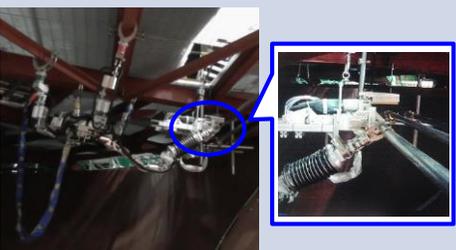
作業ステップ	3-2. ユーティリティライン延長※ (Uスタンドの設置)	3-3. ユーティリティライン延長※ (分割されたユーティリティラインの搬入)	3-4. ユーティリティライン延長※ (分割されたユーティリティラインの接続)
ステップ 図	<p style="text-align: center;">Uスタンドの概念図</p>	<p style="text-align: center;">Uスタンドの概念図</p>	
内容	作業装置を用いて、Uスタンドを所定位置まで搬入・設置する。	作業装置を用いて、分割された配管を所定位置まで搬入する。	分割された配管をUスタンド上に固定し、既設配管と接続する。
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業装置でのUスタンドの把持可否</li> <li>作業装置でのUスタンドの運搬</li> <li>目標位置への設置精度</li> <li>Uスタンドの固定可否</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業装置でのユーティリティラインの運搬</li> <li>目標位置への仮置き精度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uスタンドへの配管の固定</li> <li>作業装置での既設配管との接続</li> </ul>

※1階の干渉物を撤去しながらユーティリティラインを構築(延長)するため、ステップ2→3-1～3-4を繰り返す。(CRD開口部近傍到達まで)

# 7. 本事業の実施内容【1)① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法

### ■ ペDESTAL外の作業ステップ

作業 ステップ	4. D/W内(1階)干渉物撤去および ユーティリティライン敷設完了	5. グレーチング開口、 干渉物撤去装置吊り降ろし	6. D/W内(地下階)干渉物撤去
ステップ 図	 <p>— :ユーティリティライン</p>	 <p>開口装置</p>  <p>地下階用 干渉物撤去装置</p>	
内容	<p>ステップ2→3-1～3-4の繰り返しにより、D/W内1階の干渉物が撤去され、ペDESTAL外周囲に作業装置用のユーティリティが敷設された状態。</p>	<p>グレーチングを切断し、干渉物撤去装置を地下階へインストール。</p>	<p>ピット内に水中ポンプを設置するため、ピット内既設ポンプ等のピット付近の干渉物を撤去。堆積物がある場合には、堆積物の撤去を行う。</p>
課題	<p>(ステップ2～3-4と同様)</p>	<p>(グレーチングを切断・開口を設け、地下階に干渉物撤去装置をインストールする要素試験を実施済 [17-18年度])</p>	<p>(地下階の干渉物撤去に関する要素試験を実施済 [17-18年度])</p>

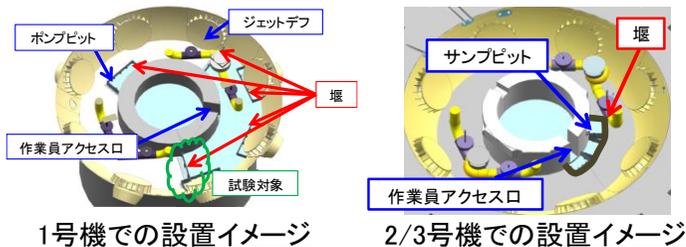
# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法

### ■ ペDESTAL外の作業ステップ

   : 今回の要素試験対象\*\*

作業ステップ	7-1. 汚染拡大防止堰設置※ (型枠の設置)	7-2. 汚染拡大防止堰設置※ (ドライモルタル投入)	8. D/W内配管展開、水中ポンプ設置
ステップ 図	<p>(図は1号機の場合の堰設置イメージ)</p>	<p>(図は1号機の場合の堰設置イメージ)</p>	
内容	<p>地下階用干渉物撤去装置等を用いて、グレーチング開口から折り畳んだ状態の堰(型枠)を搬入する。その後、地下階で展開・設置する。</p>	<p>遠隔装置(柔構造作業アーム等)で、展開した折り畳み堰内にドライモルタルを投入</p>	<p>D/W内に配管を展開し、ピット内に水中ポンプを設置する。</p>
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>開口(1200×600mm)から型枠(折り畳み状態)の搬入可否</li> <li>地下階での型枠の展開可否</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>展開した型枠内へのドライモルタルの投入可否</li> <li>ドライモルタル硬化開始までの時間内での地下階への搬入可否</li> </ul>	<p>(水循環PJにて、配管敷設・ポンプ設置に関する要素試験を計画[19年度中実施])</p>



※号機ごとに所望の堰が構築できるまで、7-1～7-2を繰り返す。

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

### ■ ペデスタル外の作業ステップ

: 今回の要素試験対象

作業ステップ	9. 堰の外側への排水ポンプ設置
ステップ 図	
内容	<p>堰の外側に水中ポンプを設置する。なお、堰の内側への水中ポンプの設置は、前ステップ(ステップ8)にて対応済み。設置後に水中ポンプを稼働。</p>
課題	(ステップ8と同様)



【ステップ⑧】ペデスタル内干渉物撤去

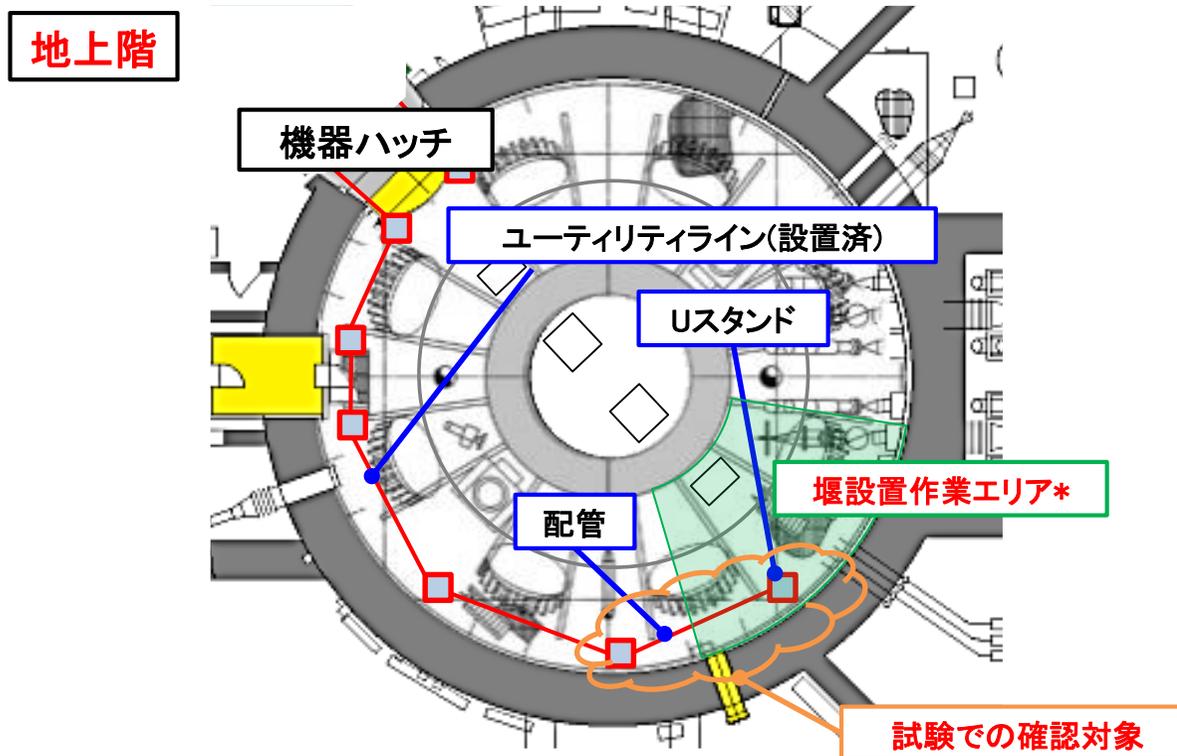
(No.59頁参照)

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

#### ■ 要素試験模擬範囲

- ✓ 前頁までに抽出した課題解決のため、共用ユーティリティ構築作業に関する要素試験を実施する。
- ✓ 共用ユーティリティの構築作業は延長作業の繰り返しのため、最終設置箇所を模擬し、それより前段のユーティリティは設置済みとする。



共用ユーティリティ構築試験模擬範囲

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

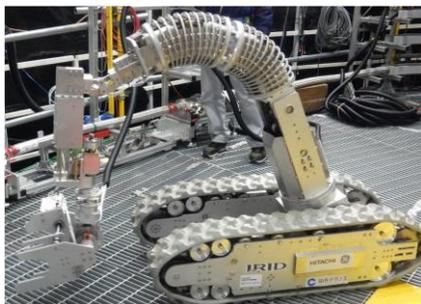
## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

### ■ 要素試験項目と判定基準

ID	試験項目	該当作業ステップ※1	試験要領・手順	判定基準	備考
1	スタンドの組み立て	3-1 3-2	(1)門型揚重機で位置決め治具を吊り上げ。 (2)目標位置(既設Uスタンド)まで位置決め治具を運搬。 (3)位置決め治具を既設Uスタンドのガイドに押し当てながら吊り降りし位置決め治具を既設Uスタンドに固定。 (4)門型揚重機でUスタンドを吊り上げ。 (5)(3)で設置した位置決め治具の他端までUスタンドを運搬。 (6)位置決め治具他端側のガイドに押し当てながら吊り降りし、Uスタンドを(3)で設置した位置決め治具の他端に固定。	<ul style="list-style-type: none"> <li>位置決め治具の吊り上げができること。</li> <li>位置決め治具およびUスタンドを目標位置まで運搬できること。</li> <li>位置決め治具とUスタンド間を固定できること。</li> </ul>	
2	ユーティリティラインの接続	3-3 3-4	(1)分割された配管を搬送台車上に設置。【人手作業】 (2)搬送台車にて、配管をUスタンド近傍まで運搬。 (3)門型揚重機にて、Uスタンド上に配管を設置。 (4)柔構造作業アームにて配管をUスタンドに固定し、接続。	<ul style="list-style-type: none"> <li>搬送台車にて、配管を目標位置まで運搬できること。</li> <li>搬送台車からUスタンド上に配管を設置できること。</li> <li>柔構造作業アームにて配管を接続できること。</li> </ul>	

※1: No.65～69頁中の作業ステップ参照

### 【要素試験使用装置】



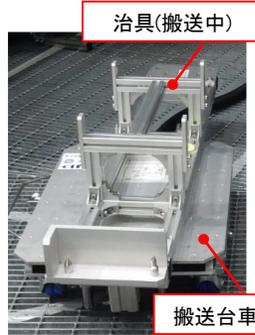
治具等の把持、作業補助

遠隔作業用柔構造アーム\*



治具等の搬送・設置

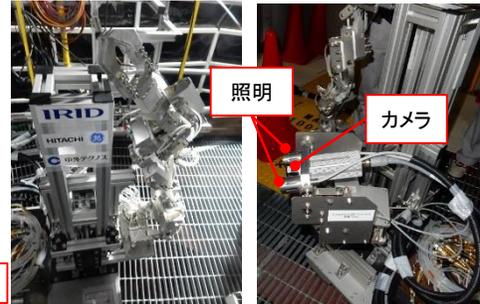
門型揚重機



搬送台車

治具等の搬送

搬送台車

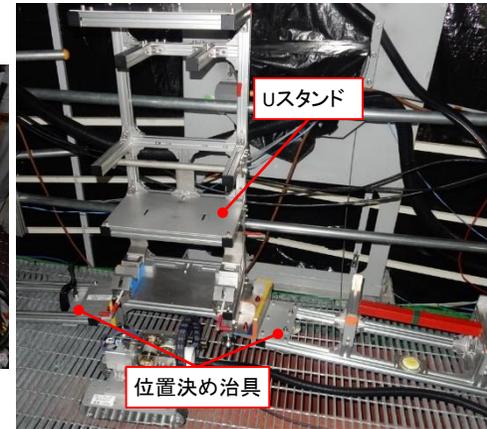


照明

カメラ

作業の監視

カメラ台車



Uスタンド

位置決め治具

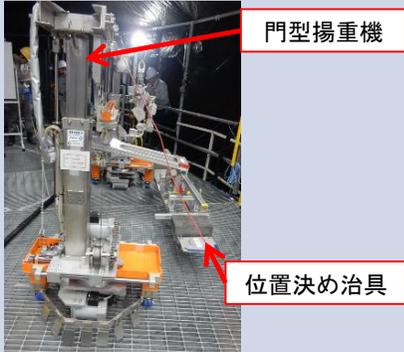
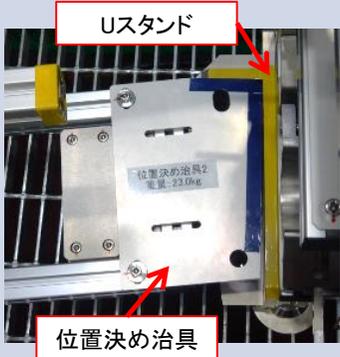
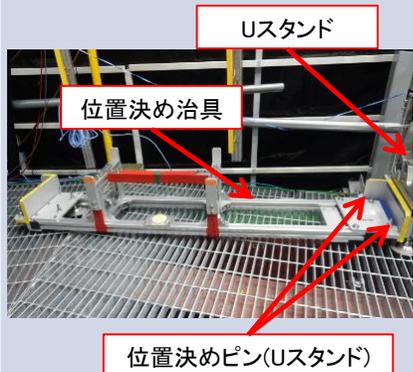
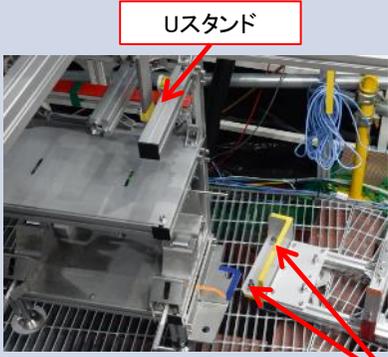
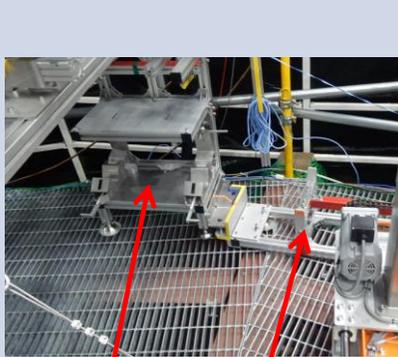
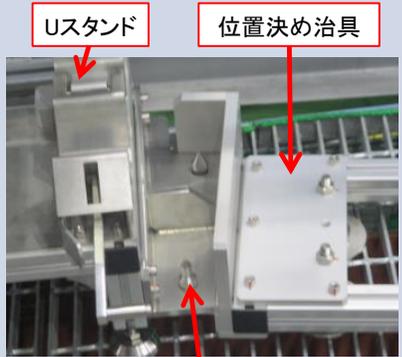
Uスタンド、位置決め治具

\*遠隔作業用柔構造アームには様々なバリエーションがあり、上記仕様はクローラタイプの一例である。

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

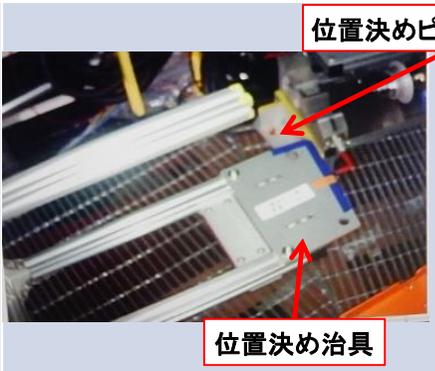
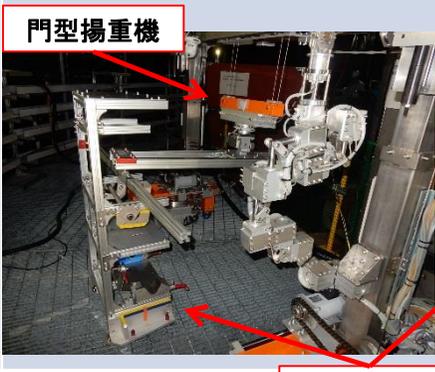
■ 試験手順(スタンドの組み立て) ※予備試験による確認

STEP	1. 位置決め治具を搬入	2. Uスタンドの位置決めピンに接続	3. 接続完了を確認	
動作図	 <p>門型揚重機</p> <p>位置決め治具</p>	 <p>Uスタンド</p> <p>位置決め治具</p>	 <p>位置決めピン(Uスタンド)</p>	 <p>Uスタンド</p> <p>位置決め治具</p> <p>位置決めピン(Uスタンド)</p>
	STEP	4. Uスタンドを搬入	5. 位置決め治具の位置決めピンに接続	6. 接続完了を確認
動作図	 <p>門型揚重機</p> <p>Uスタンド</p> <p>位置決め治具</p>	 <p>Uスタンド</p> <p>位置決めピン(位置決め治具)</p>	 <p>Uスタンド</p> <p>位置決め治具</p>	 <p>Uスタンド</p> <p>位置決め治具</p> <p>位置決めピン(位置決め治具)</p>

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

### ■ 要素試験結果(スタンドの組み立て)

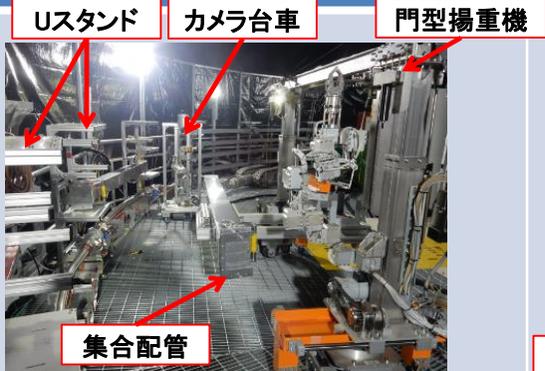
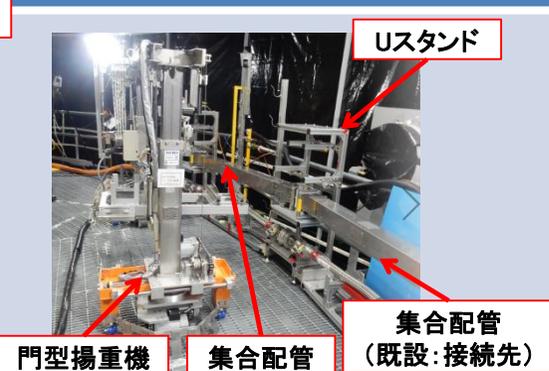
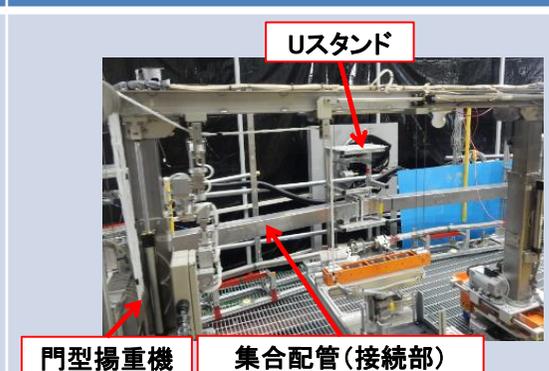
STEP	1. 位置決め治具を搬入	2. Uスタンドの位置決めピンに接続	3. 接続完了を確認	
動作図				
	STEP	4. Uスタンドを搬入	5. 位置決め治具の位置決めピンに接続	6. 接続完了を確認
	動作図			

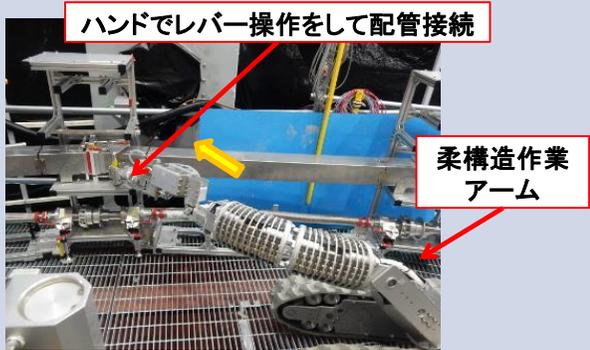
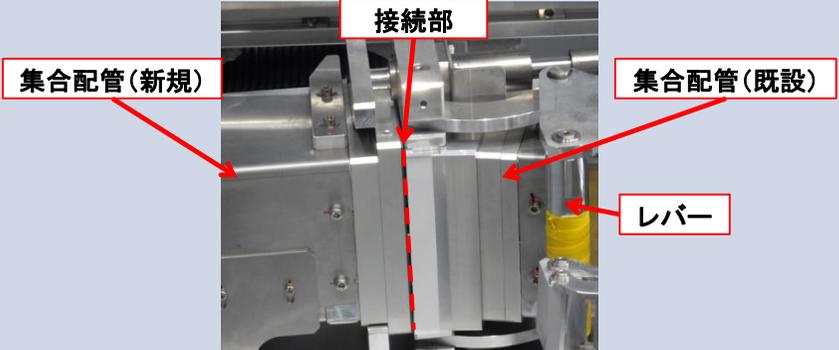
遠隔にて位置決め治具とUスタンドを設置・接続ができることを確認

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

■ 試験手順(ユーティリティラインの接続) ※予備試験による確認

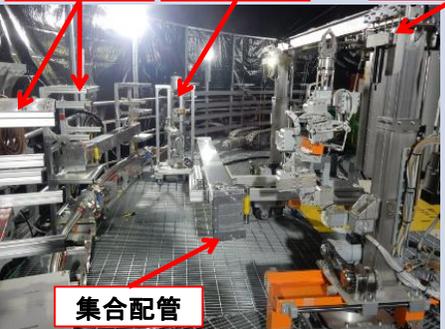
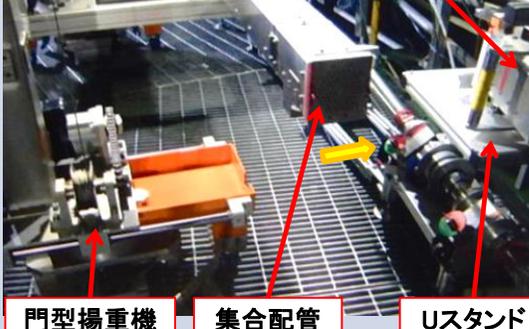
STEP	1. 配管準備【人手作業】	2. 配管運搬	3. 配管設置
動作図	 <p>Uスタンド カメラ台車 門型揚重機 集合配管</p>	 <p>Uスタンド 門型揚重機 集合配管 (既設:接続先)</p>	 <p>Uスタンド 門型揚重機 集合配管 (接続部)</p>

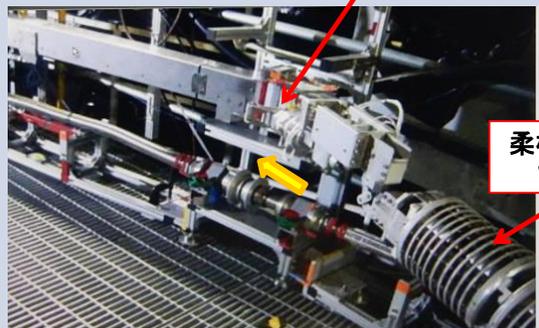
STEP	4. 配管接続	5. 接続完了を確認
動作図	 <p>手でレバー操作をして配管接続 柔構造作業アーム 集合配管 (新規)</p>	 <p>接続部 集合配管 (既設) レバー</p>

# 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

## b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

### ■ 要素試験結果(ユーティリティラインの接続)

STEP	1. 配管準備【人手作業】	2. 配管運搬	3. 配管設置
動作図	<p>Uスタンド    カメラ台車    門型揚重機</p>  <p>集合配管</p>	<p>集合配管(既設:接続先)</p>  <p>門型揚重機    集合配管    Uスタンド</p>	<p>集合配管(接続部)</p>  <p>門型揚重機    Uスタンド    レバー</p>

STEP	4. 配管接続		5. 接続完了を確認
動作図	<p>手でレバー操作をして配管接続</p>  <p>柔構造作業アーム</p>		<p>接続部</p> 

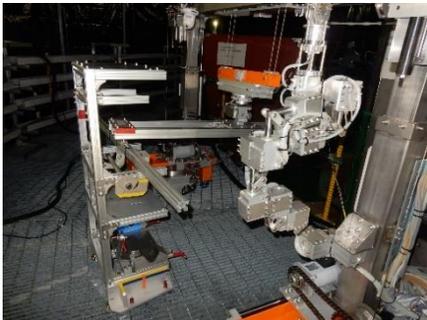
ユーティリティライン(集合配管)の設置、接続ができることを確認

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

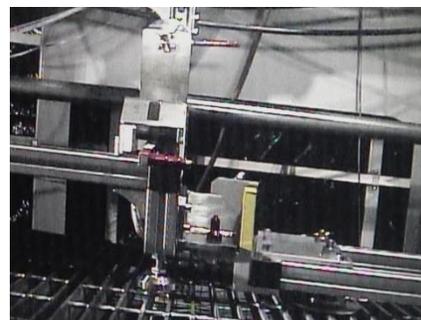
### b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

#### ■ 要素試験結果まとめ

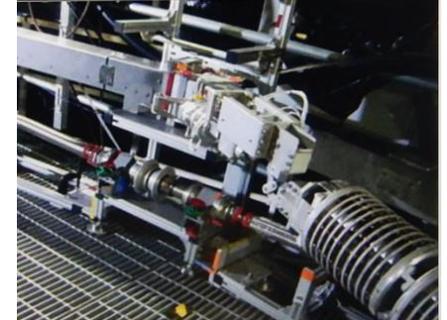
ID	試験項目	試験要領・手順	試験結果	備考
1	スタンドの組み立て	(1)門型揚重機で位置決め治具を吊り上げ。 (2)目標位置(既設Uスタンド)まで位置決め治具を運搬。 (3)位置決め治具を既設Uスタンドのガイドに押し当てながら吊り降ろし位置決め治具を既設Uスタンドに固定。 (4)門型揚重機でUスタンドを吊り上げ。 (5)(3)で設置した位置決め治具の他端までUスタンドを運搬。 (6)位置決め治具他端側のガイドに押し当てながら吊り降ろし、Uスタンドを(3)で設置した位置決め治具の他端に固定。	<ul style="list-style-type: none"> <li>門型揚重機で位置決め治具の吊り上げができることを確認。</li> <li>門型揚重機で位置決め治具およびUスタンドを目標位置まで運搬できることを確認。</li> <li>位置決め治具とUスタンド間を固定できることを確認。</li> </ul>	○
2	ユーティリティラインの接続	(1)分割された配管を搬送台車の上に設置。【人手作業】 (2)搬送台車にて、配管をUスタンド近傍まで運搬。 (3)門型揚重機にて、Uスタンド上に配管を設置。 (4)柔構造作業アームにて配管をUスタンドに固定し、接続。	<ul style="list-style-type: none"> <li>搬送台車にて、配管を目標位置まで運搬できることを確認。</li> <li>搬送台車から門型揚重機で配管を持ち上げ、Uスタンド上に配管を設置できることを確認。</li> <li>柔構造作業アームにて配管接続治具を使用して配管を接続できることを確認。</li> </ul>	○



スタンドの組み立て



ユーティリティラインの接続



**全ての判定基準を満足し、共用ユーティリティの構築作業(スタンドの組み立て、ユーティリティラインの接続)の実現性を確認。**

## 7. 本事業の実施内容【1】① 干渉物撤去技術の開発】

### b. 横アクセスによるペデスタル内外の干渉物撤去方法

#### ■ 抽出した課題と対応方針

No.	課題	内容	対応方針
1	グレーチング(床面)上の凹凸への対応方法	今回の試験では平らなグレーチング上に人手で高さ調整をしたUスタンドを設置したが、実機のグレーチングには段差があり配管の芯合せ等の組み立て作業時の誤差の原因となる。	Uスタンドのアジャスタを遠隔で伸縮するようにする。グレーチング上に足場板を敷設して水平面を確保する。
2	作業中の監視方法(カメラ・照明配置等)	Uスタンドと位置決め治具の接触面など、低所の位置合せ状況の確認が難しい。	各作業が見やすいよう、例えば作業装置の手先にカメラを取り付けて手元を確認する等、カメラ・照明配置の詳細検討を実施(実機工事計画時)。また、間接的に確認ができる構造の検討を実施。(カメラ台車の改造による改善効果を検証済)
3	装置類のケーブル処理	試験模擬範囲外(機器ハッチ~270°付近間)でのケーブルの余長部分については、人手で介助を実施。	狭い環境下で装置もケーブルも込み合っているため、遠隔での処理方法を検討する。(ケーブル送り台車による余長処理の有効性を検証済)

## 7. 本事業の実施内容

- 1) 燃料デブリ取り出し工法の開発
  - ② 干渉物撤去以外の技術の開発

干渉物撤去技術以外の技術として、遠隔装置の操作を支援するシステム、PCV外への汚染拡大を防止する技術、R/B内の被ばく線量低減のための遮へい体の構築等を考慮したアクセスルートの構築に必要と考えられる技術について技術開発を行う。

主な開発検討項目として以下を含むものとし、必要に応じて要素試験を実施することにより課題を抽出し整理する。

a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発。

- ・環境モデル(テスト版)を作成し、シミュレータ作成中。

b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法。

- ・遠隔操作を考慮した堰の構築方法として、型枠分割搬入方式に関する要素試験を実施。

c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討。

- ・R/B床荷重低減に向け、具体化に向けた構造検討を実施中。

d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法。

- ・燃料デブリをユニット缶状態で搬出する方法について概念検討を実施中。

## 7. 本事業の実施内容 【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発

#### ● 開発の必要性

##### 【一般技術】

- ・ オペレータは、マニピュレータの“手先”を見て操作する
- ・ マニピュレータの“肘”“肩”など他の関節の動きは、なりゆき任せ ⇒ “肘”“肩”が干渉しやすい



##### 【これまで補助事業で開発した手法】

- ・ “肘”“肩”を1つ1つ指示すれば、任意の方向へ動かせる

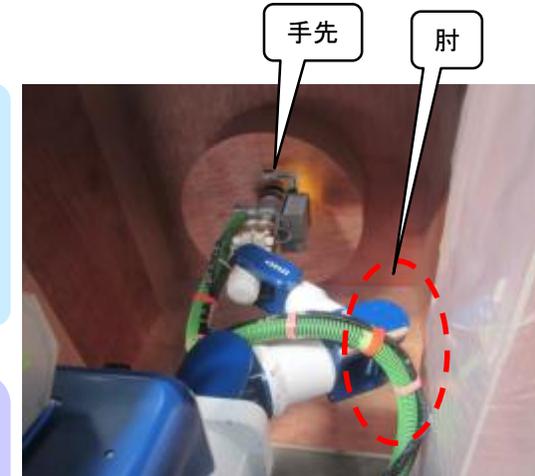
##### 【新たな課題】

- ・ マニピュレータのどの部位が干渉しそうか？
- ・ マニピュレータのどの軸をどちらへ動かせば回避できるか？  
⇒ 限られた視点/視野で全ての動作を監視することは難しい  
⇒ “手先”“肘”“肩”など多数の関節を一人のオペレータで同時操作はできない(複数人で連携操作することも難しい)

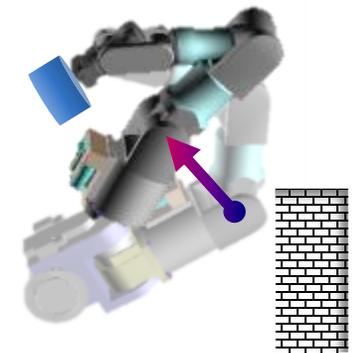


##### 【本開発の目標】

- ・ オペレータが、マニピュレータの“手先”の動きに集中できるよう“肘”“肩”の干渉回避動作を自動化する



X-6ペネの作業性検証の様子(除染PJ)



“肘”“肩”の干渉回避動作イメージ

## 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発

- 開発の目的

- 視界不良かつ狭隘環境において、ロボットを遠隔操作するオペレータの作業負担を軽減し、操作の効率化を図れる制御手法を開発する

- 解決すべき課題

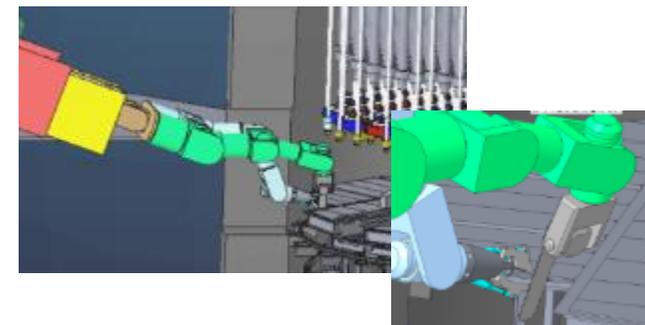
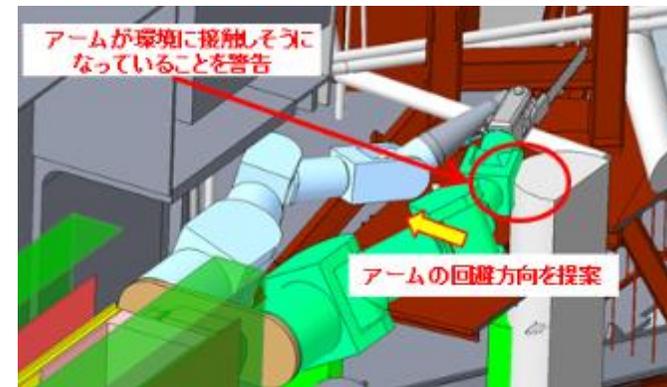
- 狭隘で視界不良なPCV内の環境において、視野が制限される条件下で、接触を回避しながら、アクセス装置の遠隔操作を行うことは、オペレータの負担が大きいため、その操作をアシストする遠隔操作技術が必要。
- 既存の技術では、ロボットのティーチング等によりロボットの効率的な動作を可能としているが、状況が不明確で変化するPCV内では、オペレータのロボットの操作に時間がかかるものと予想される。

- 開発の進め方

- 干渉物回避手法の概念検討
- 干渉物回避プログラム(マニピュレータ制御ソフト)の開発
- 要素試験による有効性の検証

- 得られる成果

- PCV内で作業する装置の干渉回避
- 短時間で操作可能にすることで、オペレータの負担を低減



# 7. 本事業の実施内容 【 1)② 干渉物撤去以外の技術の開発 】

## a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発

### ● 検討フロー

遠隔操作における課題の整理

干渉回避手法の概念検討

干渉物回避プログラム(マニピュレータ制御ソフト)の開発

要素試験による有効性の検証(シミュレータ)

今年度の成果

環境地図の生成・干渉物回避プログラムへの適用

モックアップ試験用ロボットへの適用

要素試験による有効性及び実現性の評価(モックアップ試験)

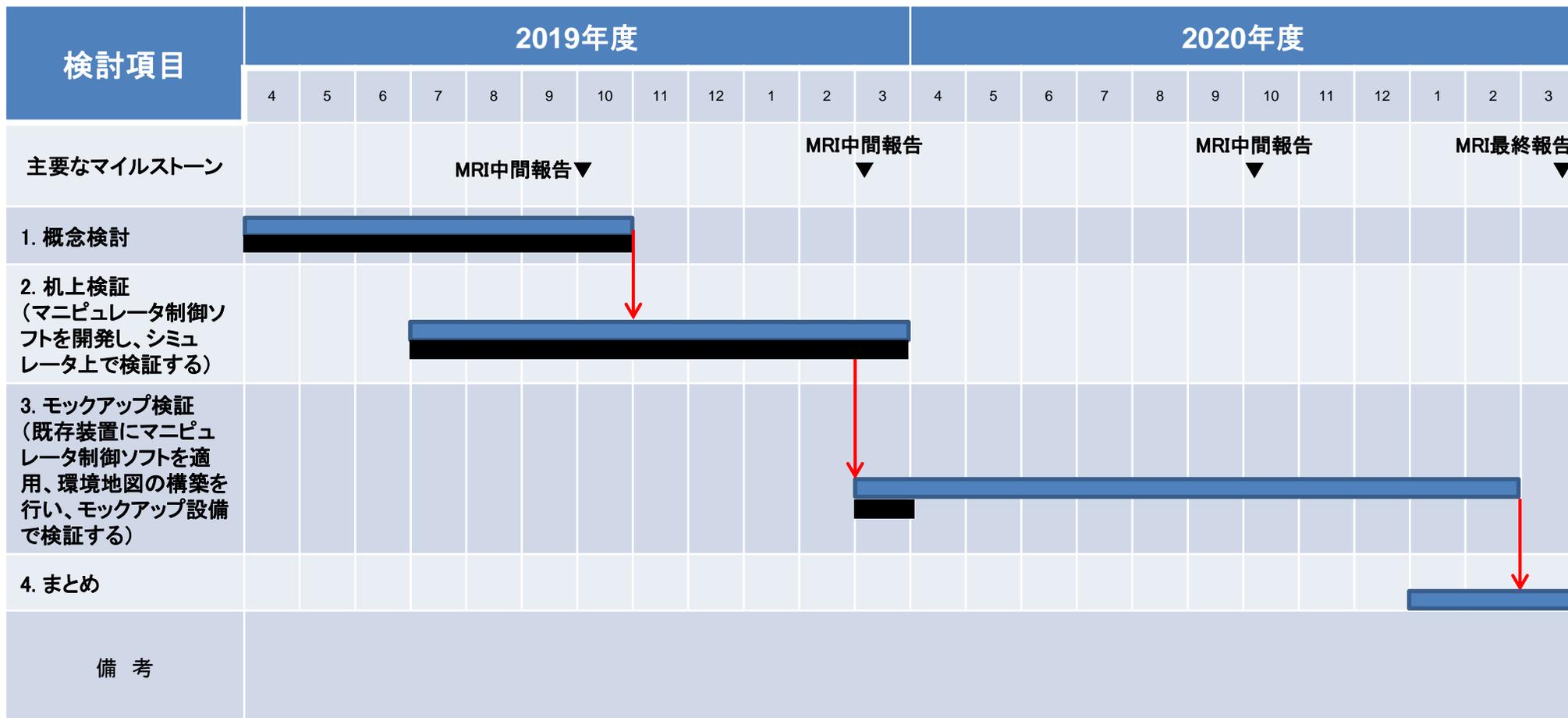
今後の課題と対応方針の抽出

# 7. 本事業の実施内容【1）② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発

- 開発工程

【凡例】 計画:  実績:

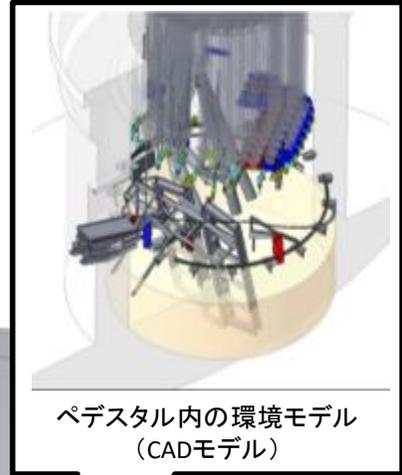


## 7. 本事業の実施内容 【 1)② 干渉物撤去以外の技術の開発 】

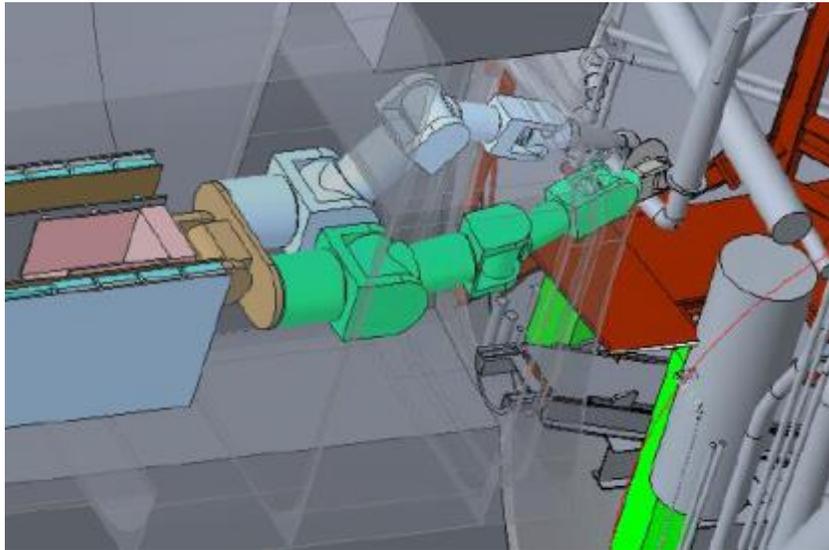
### a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発

#### ● 検討の前提条件

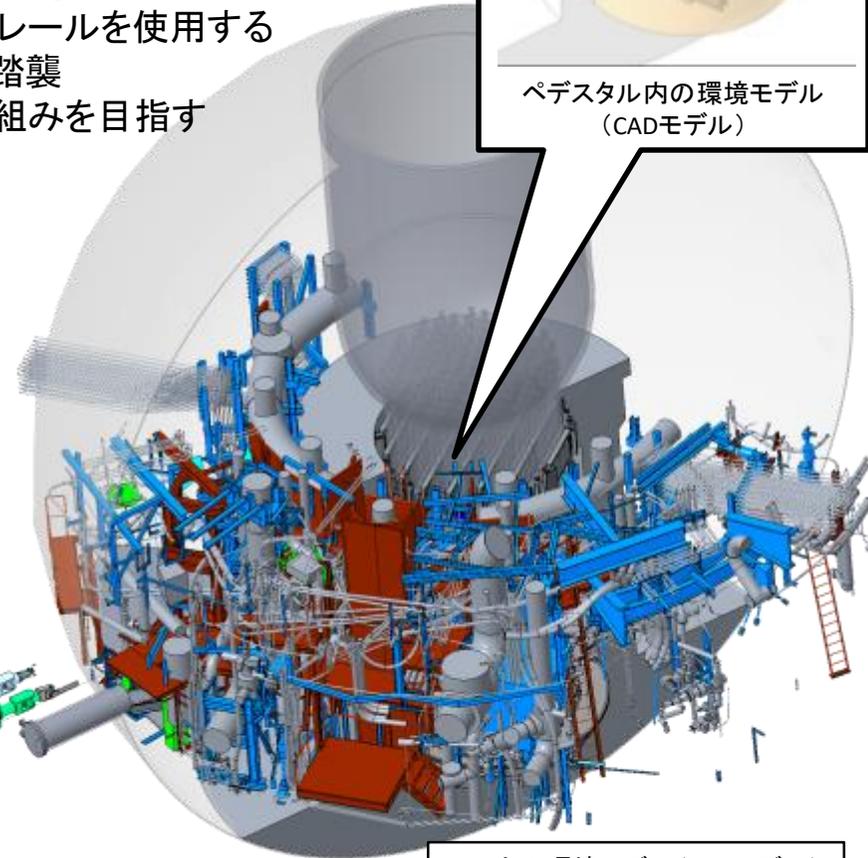
- タスクとして、『PCV内の干渉物撤去作業』を設定
  - ← 狭隘かつ視界不良な環境下で、接触を回避しながら遠隔操作を行うため
  - ← 状況が不明確かつ、作業進捗に伴って変化する難しい環境のため
- 対象は2/3号機で、なるべく実際の状況を模擬した環境モデルを使用する
- ロボットモデルは、一例として2本のマニピュレータ+アクセスレールを使用する
  - ← 現行の「燃料デブリの大規模取り出し」工法検討を踏襲
  - ← 将来的に他の多関節ロボットへの展開が可能な仕組みを目指す



ペDESTAL内の環境モデル  
(CADモデル)



干渉物撤去作業(CADモデル)



PCV内の環境モデル(CADモデル)

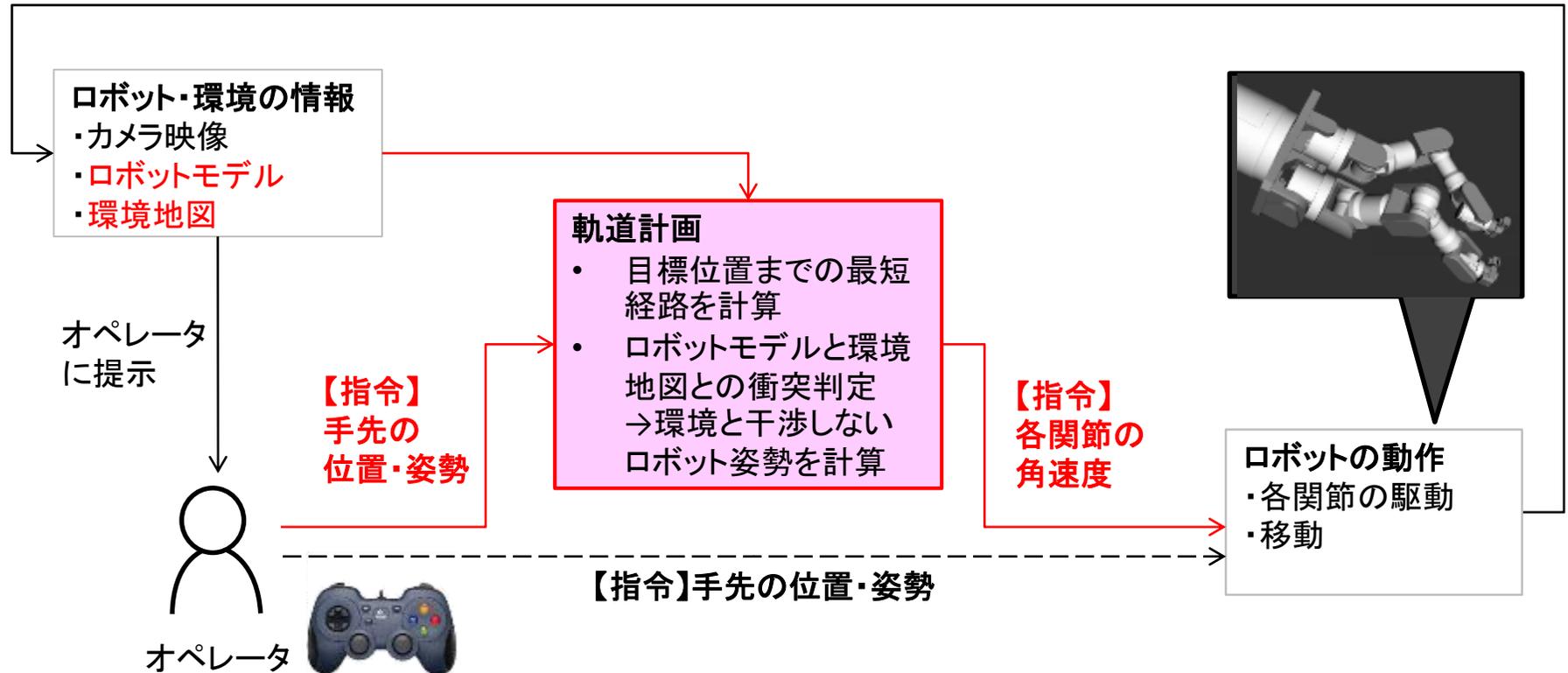
## 7. 本事業の実施内容 【 1)② 干渉物撤去以外の技術の開発 】

### a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発

#### ● 概念検討(制御フロー)

##### ➤ 概念検討したマニピュレータ制御フロー

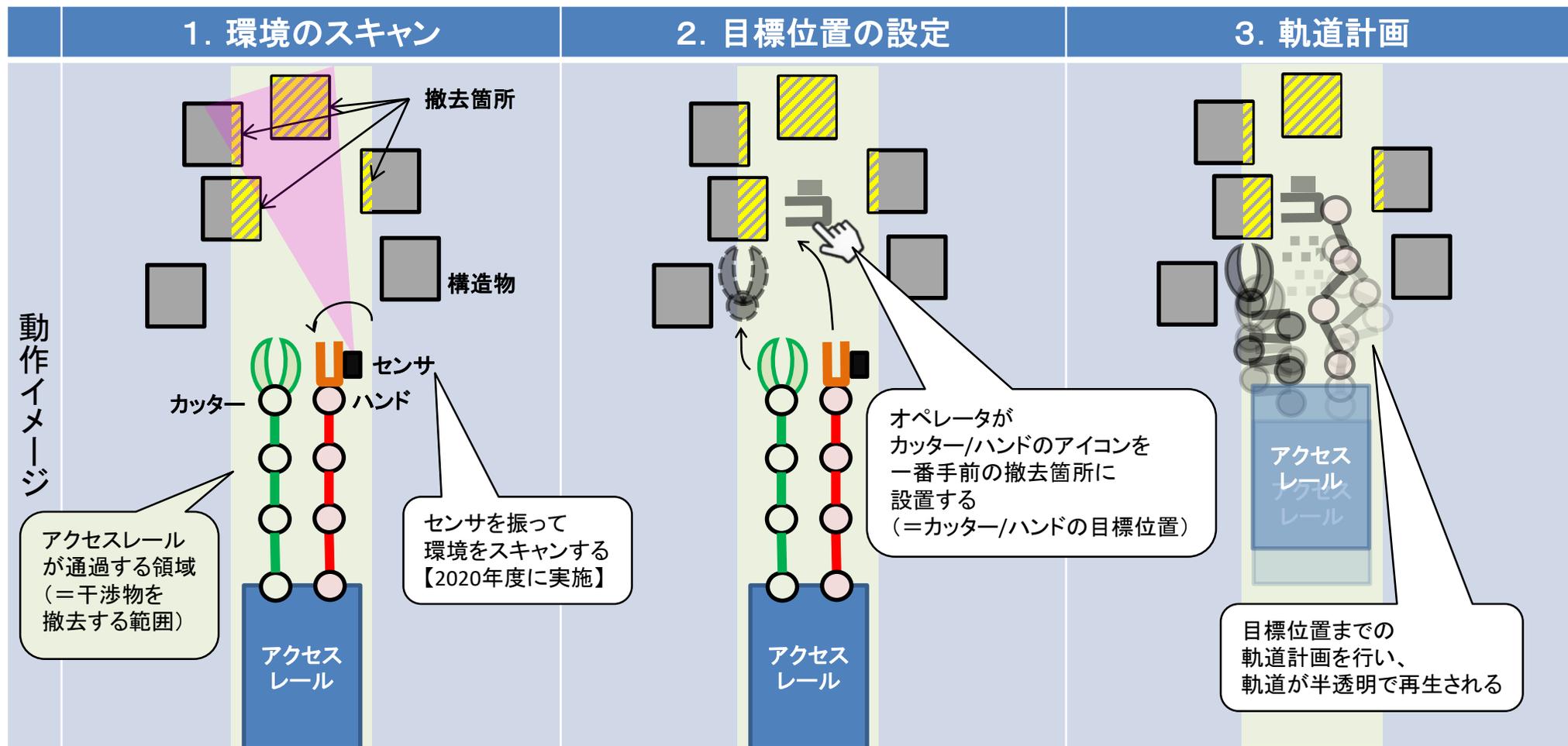
- オペレータの遠隔操作(マニピュレータの手先操作)によるロボット動作を基本とし、必要に応じて『干渉物を自動回避』する動きを反映する



# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発

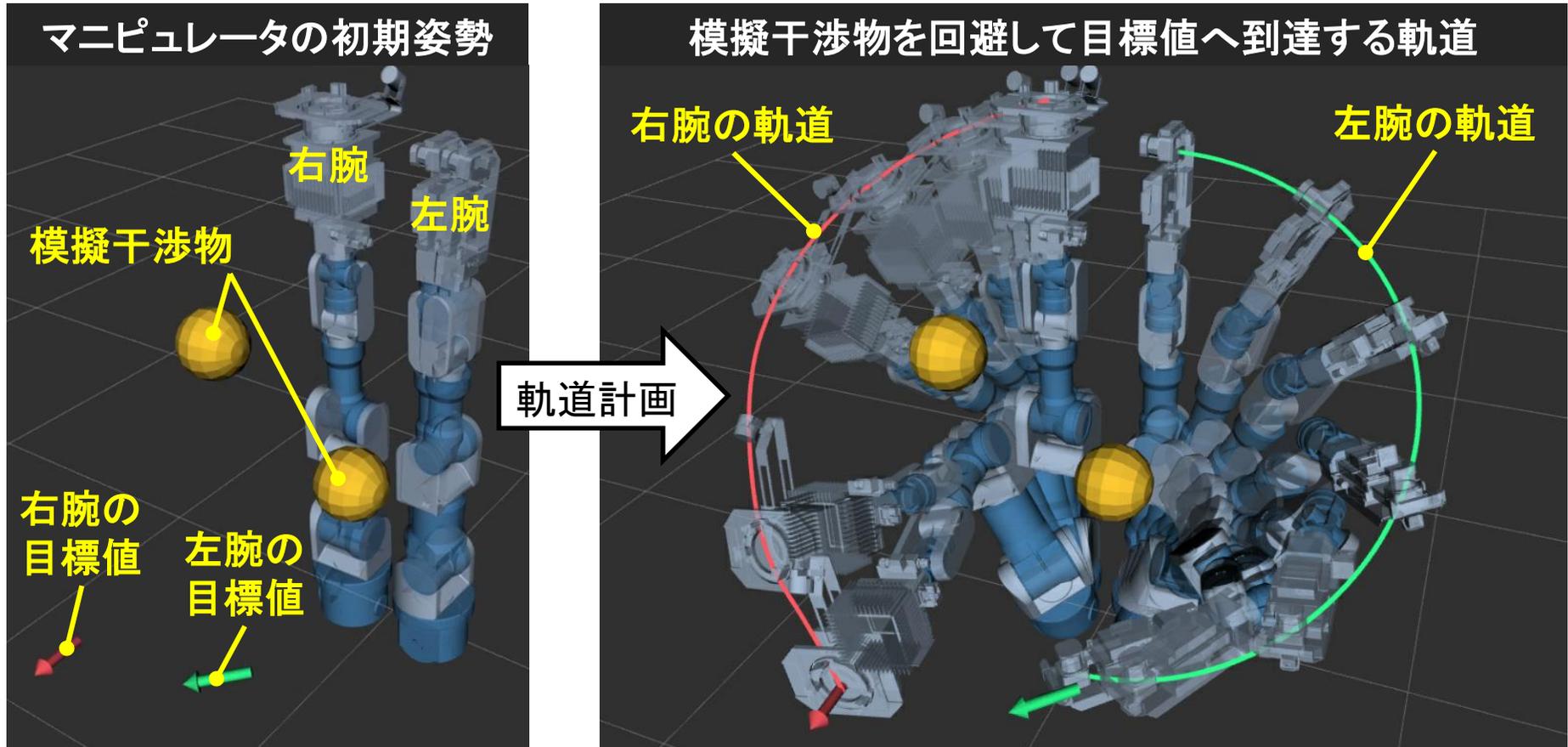
### ● 概念検討(作業手順)



## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発

- シミュレータ検証の様子



# 7. 本事業の実施内容 【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## a. 視界不良かつ狭隘環境での遠隔操作支援手法の開発

### ● 実施内容

	2019年度	2020年度
システム構成	<p>【2019年度の進捗状況】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・干渉回避プログラム作成済み</li> <li>・パラメータ調整中</li> </ul>	
実施内容	<p>検証中のシミュレータ画面</p>	
	<p>シミュレータ上でロボットモデルを操作して検証</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軌道計画の頻度について、最適値を導出する</li> <li>・ 各種パラメータの最適値を決定する</li> </ul>	<p>モックアップの中で実機を操作して検証</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ モックアップの環境地図を生成し、衝突判定を行う</li> <li>・ 実機を用いて、シミュレータ検証の妥当性を確認する</li> </ul>

## 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

- 開発の目的
  - 堰の遠隔設置を考慮した更なる作業性の向上。
  - 遠隔設置した堰の性能評価。
  
- 解決すべき課題
  - 堰の漏えいを考慮した作業ステップの具体化。
  - 遠隔作業範囲の拡大および作業の効率化。
  
- 開発の進め方
  - 遠隔設置に関する効率化した作業ステップの検討。
  - 作業ステップに基づく実現性確認のための要素試験計画。
  - 要素試験による作業性の確認と、堰からの漏水量の評価。
  - 堰設置後の漏えい等のリスクを考慮した、長期健全性に対する概念検討。
  
- 得られる成果
  - 遠隔設置に関する効率化した作業ステップ。
  - 要素試験による作業性の確認結果および堰からの漏水量の評価結果。
  - 堰設置後の漏えい等のリスクを考慮した、長期健全性に対する概念検討結果。

## 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

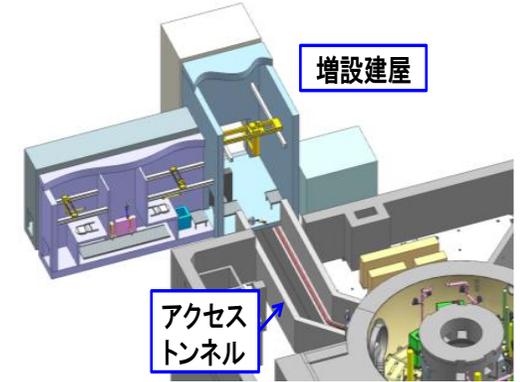
### b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

#### ■ 前提条件

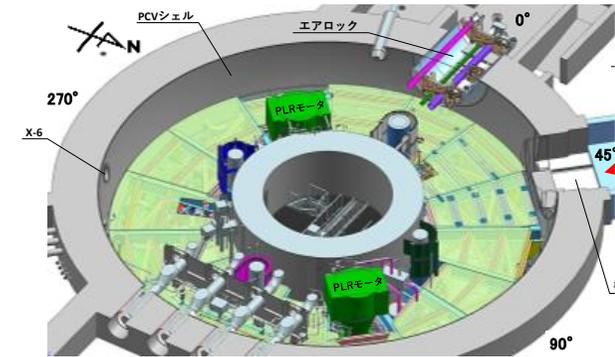
- ✓ PCVと増設建屋が通路(アクセストンネル)で接続されており、ペDESTAL外干渉物が撤去されていること。  
(D/W内アクセスルートが構築されていること)
- ✓ 堰設置位置周囲の堆積物が撤去されていること。
- ✓ D/W水位が現状の2号機以下、すなわちベントノズル下端以下であること。

#### ■ 開発目標

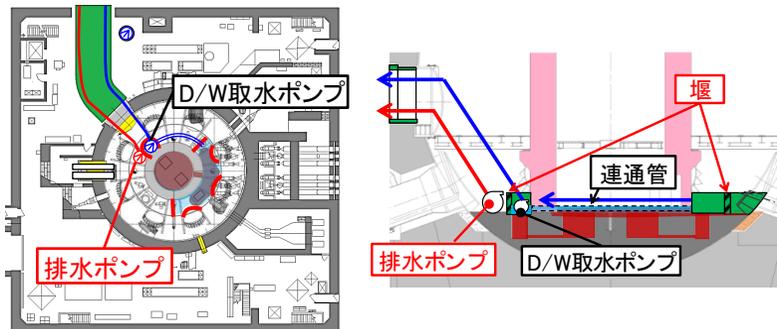
- ✓ 堰の内外に設置するポンプでの排水と組み合わせ、S/C等への漏えいを防止する。



増設建屋およびアクセストンネル



ペDESTAL外干渉物撤去状態



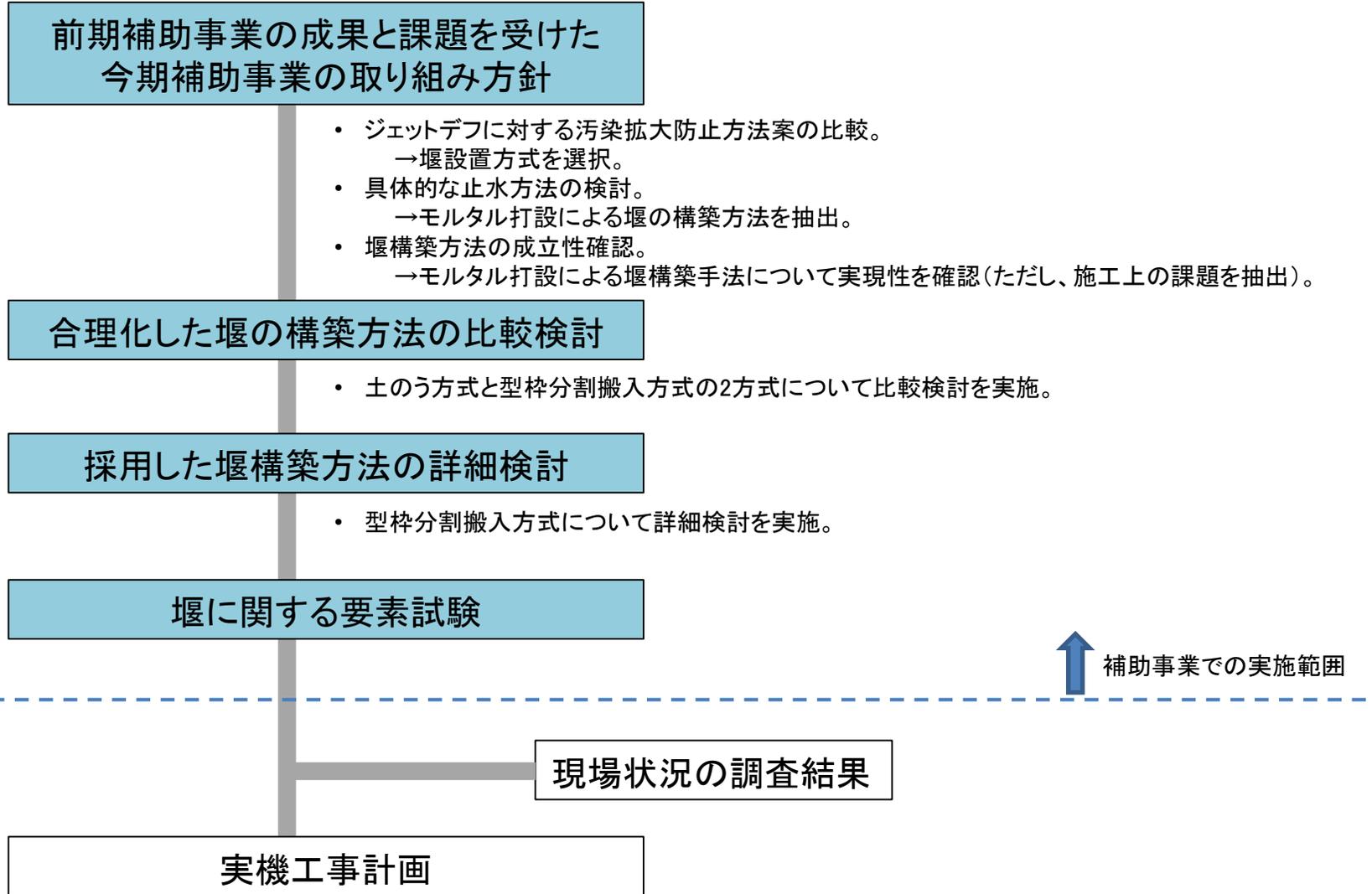
ポンプ設置位置(例)

# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 検討フロー

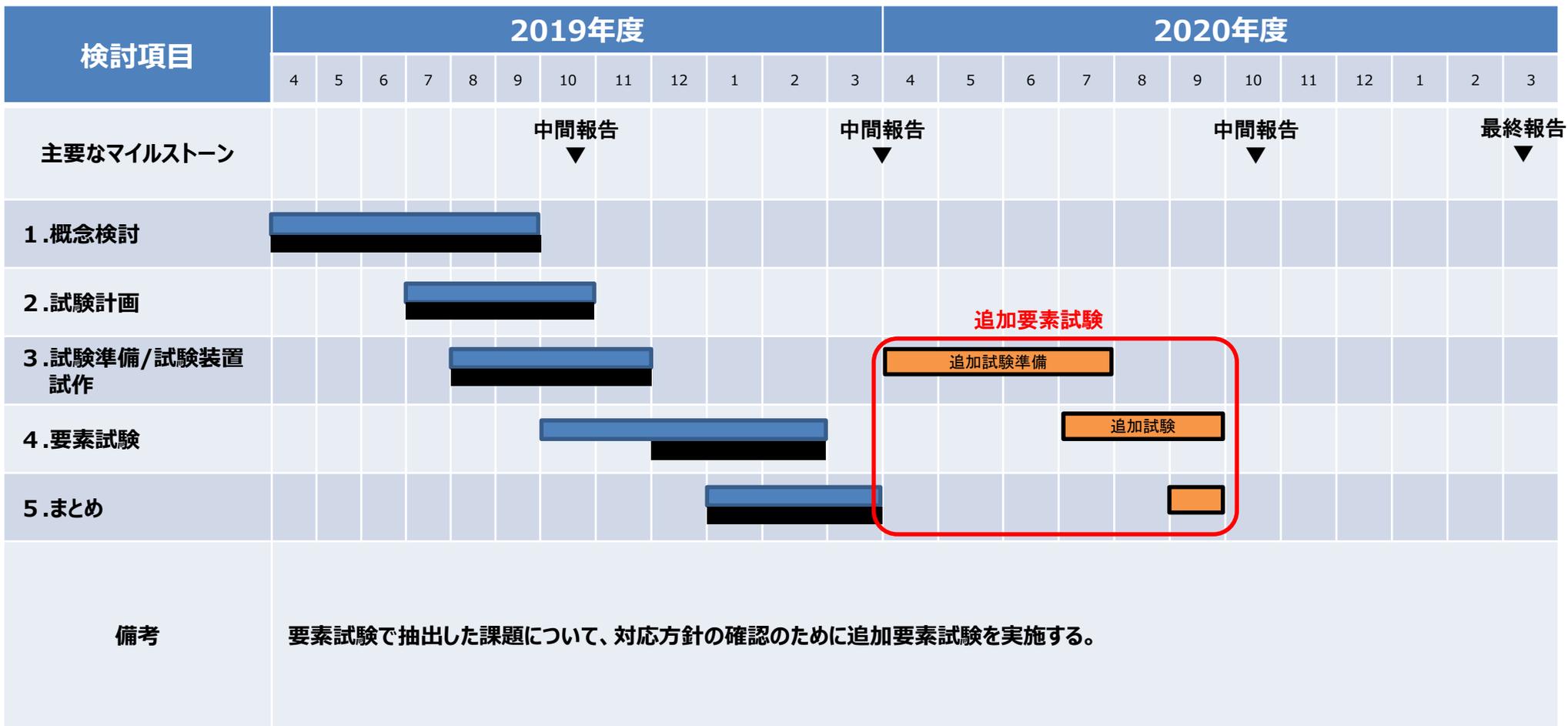
: 今回報告



# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 開発工程

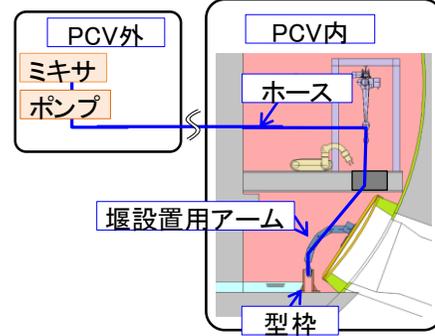


# 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

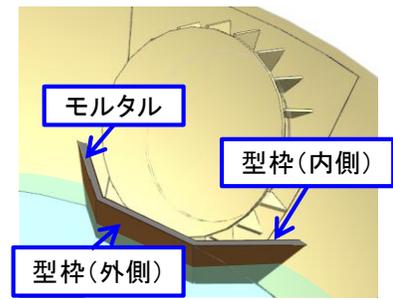
## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 前年度までの検討結果

- ジェットデフに対する汚染拡大防止方法案の比較。  
→堰設置方式を選択。
- 具体的な止水方法の検討。  
→モルタル打設による堰の構築方法を抽出。
- 堰構築方法の成立性確認。  
→モルタル打設による堰構築手法について成立性を確認。  
(抽出した課題は以下の通り)



堰構築のためのモルタルの打設イメージ



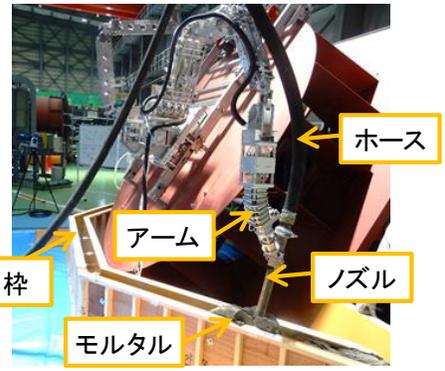
汚染拡大防止堰イメージ

### 試験により抽出した課題と対応方針

ID	課題	対応方針
1	モルタルを充填するホースを型枠上の所定の位置に設定することが難しかった。 (現状ではホースを真上から降ろす必要があり、グレーチングの開口範囲が広がってしまう。)	堰単体(土のうなど)で堰を構築可能かなどを含め、施工がしやすい方法について検討して、要素試験を実施する。 (遠隔装置による堰の設置性確認試験、堰の止水性確認試験など)
2	堰設置後は堰の外側の水の排水をするためのポンプや配管が必要だと考えられる。	上記の試験に合わせて、堰の外側の水を排水するポンプ、配管の設置性などの確認試験を実施する。
3	堰設置後に漏えいが発生するリスクがある。	長期健全性を担保するため、遠隔補修方法などを検討する。



堰型枠の設置作業の様子



堰型枠へのモルタル充填作業の様子

# 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

S/Cへの汚染拡大防止用の堰について、遠隔操作を考慮した構築方法について比較検討を実施。

	従来方式	【合理化案1】 土のう方式	【合理化案2】 型枠分割搬入方式	
特徴	型枠を設置し、型枠内に遮水材(モルタル)を投入する [水を加えたモルタルをホースで圧送する]	遮水性のある袋を積み上げる [ドライモルタルを入れた袋を積み上げる]	折り畳み式の型枠(メッシュ式)を複数個使用。型枠を搬入後、展開・設置し、型枠内に遮水材(ドライモルタル)を投入	
評価	遮水性	○	▲ 積み上げ方に依存。隙間なしに積み上げる必要あり。	△ 完全遮水は困難であるが、水位差の確保は可能
	遠隔操作性	▲ ホース位置決め、型枠の設置	▲ 隙間のない積み上げ方実現への対応	△ 型枠の配置・設置
	凹凸面への追従性	○	△ 袋を押し付けても追従性は限定的	△ 型枠からのドライモルタルの漏出による
	長期健全性 (メンテナンス頻度)	○	△ 袋の材質に依存	○
総合評価	▲	▲	△	



従来方式



土のう方式

折り畳み式型枠



ドライモルタル(接液後)

型枠分割搬入方式

【凡例】○:良好、△:一部課題あり、▲:課題あり(△よりも課題が大きい)

- ✓ 従来方式の最大の課題であった遠隔操作性の解決方法として、土のう方式と型枠分割搬入方式の2方式を検討。
- ✓ 土のう方式については、遠隔操作での隙間の無い積み上げ方法、床面の凹凸面への追従性が課題。
- ✓ 型枠分割搬入方式(折り畳み式の型枠(メッシュ)にドライモルタルを投入する方法)については、モルタル硬化までの時間制約下での作業の成立性、メッシュ袋の最適な粗さ・材質の選定が課題。

## 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

#### ■ 合理化案1、2の採用可否

##### ✓ 床面(凹凸面)への追従性:

- 土のう方式では外力による押しつけを行っても限定的。改善のためには袋内の遮水材量を減らす等、要求機能を満足できない方法となることから、対応は困難。
- 型枠分割搬入方式では、メッシュ袋の採用により、凹凸面への追従性を確保可能。

##### ✓ 遠隔操作性:

- 土のう方式では、遠隔にて隙間の無い積み上げを実現するのは難易度が高く、従来方式と同程度(従来方式の大きな課題は、遠隔でのホース位置決め)。
- 型枠分割搬入方式では、折り畳み・展開が容易なXフレーム構造の採用により、遠隔操作での搬入・設置が可能。

##### ✓ 遮水性:

- 土のう方式では積み上げ方に依存することから遮水性の確保難。
- 型枠分割搬入方式では、予備試験により水位差を確保可能であることを確認済(別途、メッシュモルタル硬化時間制約下での作業成立確認が必要)。

⇒ 型枠分割搬入方式を採用する。



人手



遠隔

土のうの積み上げ方法の比較



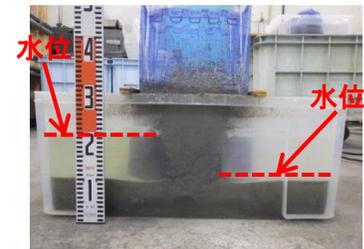
凹凸面への追従性(土のう)



型枠:折り畳み状態



型枠:展開後

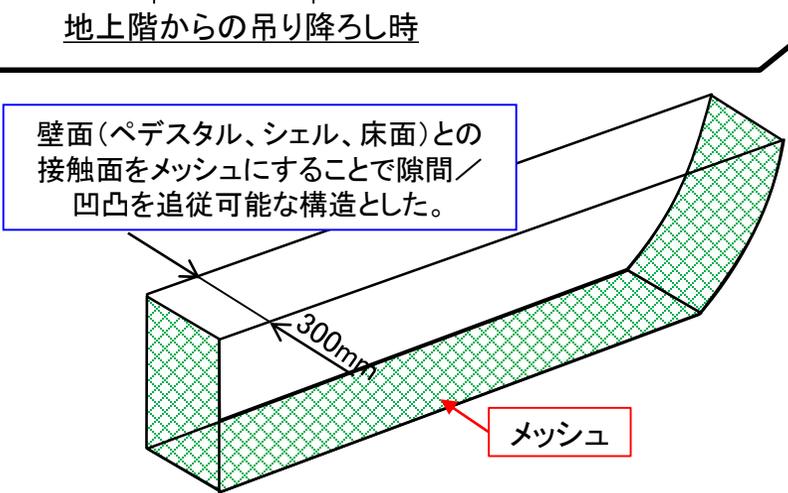
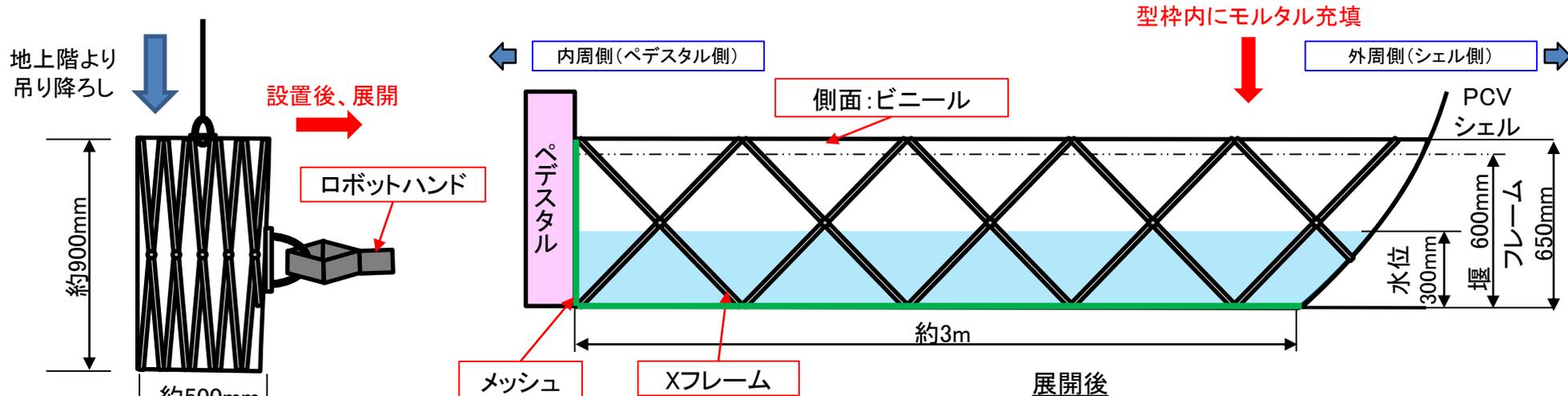


モルタル硬化後の排水状況

# 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

詳細検討を実施した型枠分割搬入方式による堰構築イメージを以下に示す。



予備試験の様子\*1



展開中



展開完了

\*1: 展開構造確認を目的とした予備試験のため、全面にビニールで試作

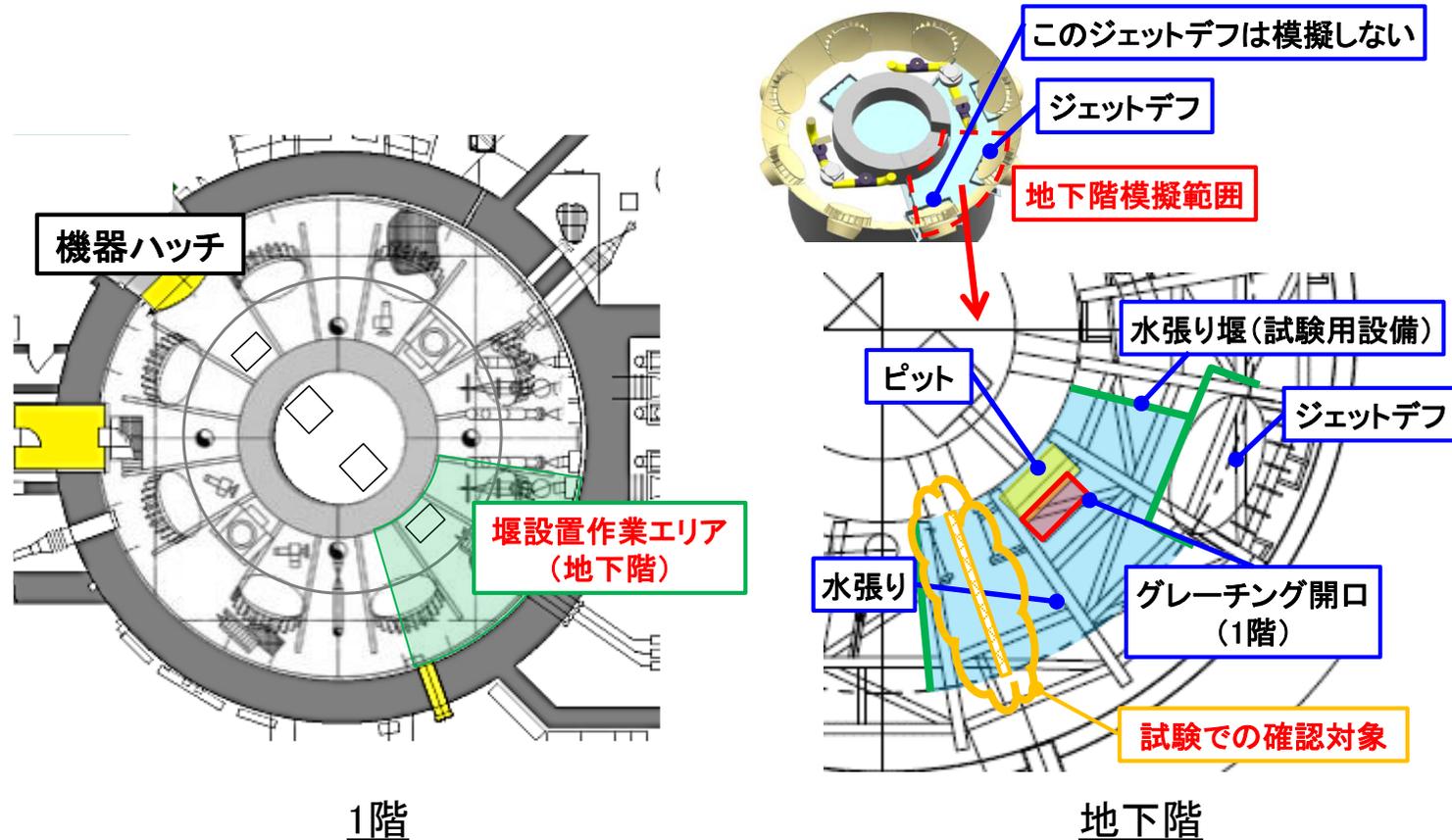
**上記構造での遠隔施工の妥当性を、要素試験※にて確認する**

## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

#### ■ 要素試験模擬範囲

- ✓ No.65～69頁に示す作業ステップにて抽出した課題解決のため、堰構築に関する要素試験を実施する。
- ✓ 堰の構築作業は、実機では水中での設置作業であることから、水張り状態で試験を行う。床面・壁面への止水性を確認するため、ペDESTAL外壁-PCV内壁に接するように堰を設置することで模擬する。



# 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 要素試験項目と判定基準

ID	試験項目	該当作業ステップ※1	試験要領・手順	判定基準	備考
1	型枠の搬入・展開	7-1	(1)門型揚重機で型枠を吊り上げ。 (2)門型揚重機を既設開口上まで移動させる。 (3)門型揚重機のウインチを用いて、型枠を地下階に吊り下ろす。 (4)柔構造作業アーム(地下階)にて型枠を把持し、門型揚重機のウインチを巻き上げる。 (5)柔構造作業アームにて型枠を展開する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>門型揚重機を開口上に位置決めできること。</li> <li>開口(1200×600mm)から型枠を搬入できること。</li> <li>型枠を展開できること。</li> </ul>	
2	ドライモルタルの投入	7-2	(1)柔構造作業アームにて型枠直上にホース(ドライモルタル投入用)を位置決めする。 (2)柔構造作業アームにてホースを移動させながら型枠内にドライモルタルを投入する※2。 (2)簡易堰(試験用)と堰の間の水を抜く。【人手作業】 (3)漏れい量を測定する。【人手作業】	<ul style="list-style-type: none"> <li>型枠内にドライモルタルを投入できること。</li> <li>モルタルが固化すること。</li> <li>水抜きにより堰の内外で水位差ができること。</li> <li>堰からの漏れいがないこと。(目標)</li> </ul>	※2: ホース内へのモルタル投入は人手にて実施

※1: No.65～69頁中の作業ステップ参照

### 【要素試験使用装置】

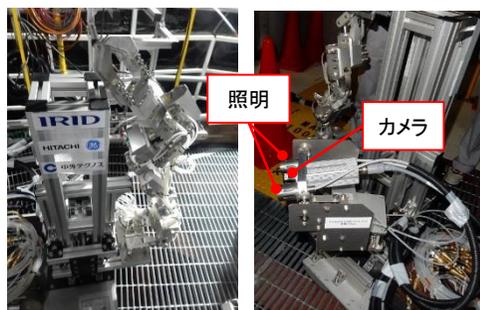


治具等の把持、作業補助



治具等の搬送・設置

門型揚重機

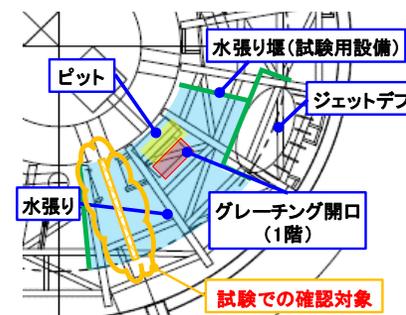


作業の監視

カメラ台車



型枠



試験イメージ

### 遠隔作業用柔構造アーム\*

\*遠隔作業用柔構造アームには様々なバリエーションがあり、上記仕様は歩行タイプの一例である。

# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 試験手順(型枠の搬入・展開) ※予備試験による確認

ID	試験項目	該当作業ステップ	試験要領・手順	判定基準	備考
1	型枠の搬入・展開	7-1	(1)門型揚重機で型枠を吊り上げ。 (2)門型揚重機を既設開口上まで移動させる。 (3)門型揚重機のウインチを用いて、型枠を地下階に吊り下ろす。 (4)柔構造作業アーム(地下階)にて型枠を把持し、門型揚重機のウインチを巻き上げる。 (5)柔構造作業アームにて型枠を展開する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>門型揚重機を開口上に位置決めできること。</li> <li>開口(1200×600mm)から型枠を搬入できること。</li> <li>型枠を展開できること。</li> </ul>	

#### STEP 1. 門型揚重機で型枠吊上げ → 2. 門型揚重機開口上へ移動



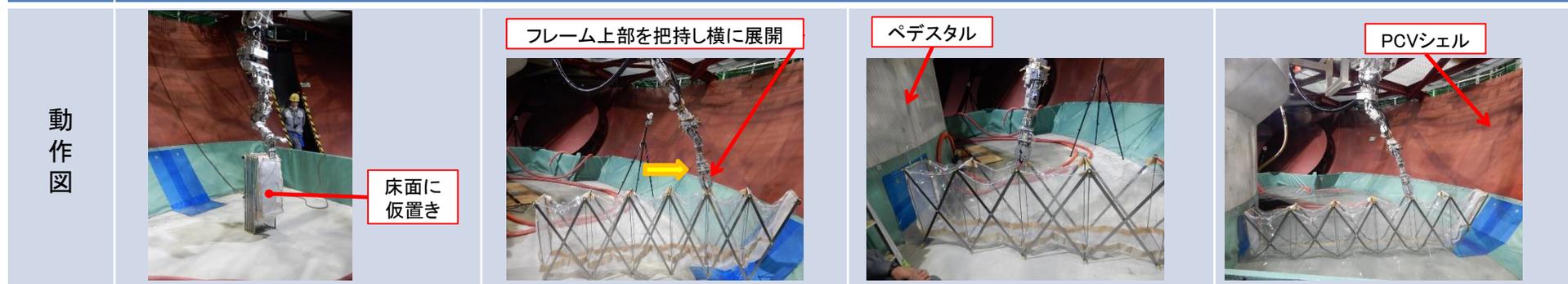
#### STEP 3. 型枠吊り下ろし



#### STEP 4. 型枠受渡し



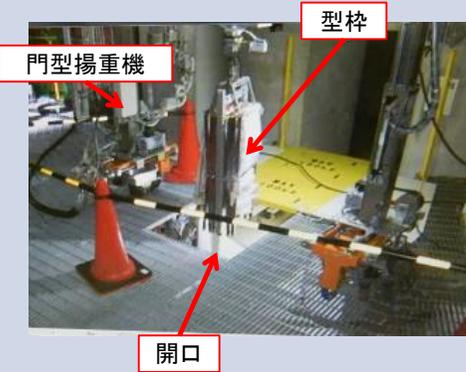
#### STEP 5. 型枠展開

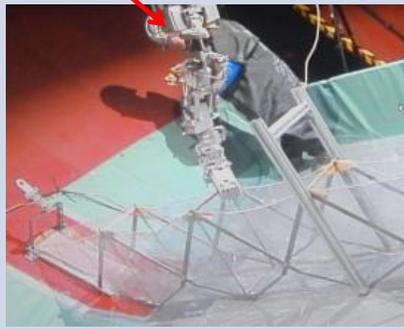
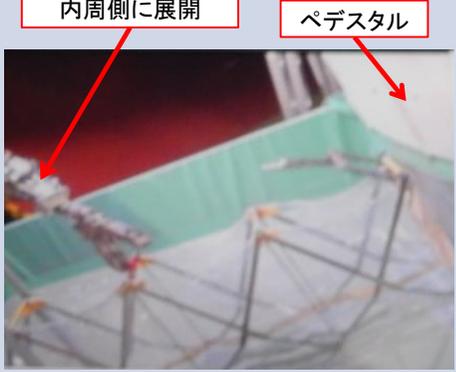


# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 要素試験結果(型枠の搬入・展開)

STEP	1. 門型揚重機で型枠吊上げ → 2. 門型揚重機開口上へ移動	3. 型枠吊り下ろし	4. 型枠受渡し
動作図			

STEP	5. 型枠展開			
動作図				

型枠の搬入・展開ができることを確認

# 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 試験手順(ドライモルタルの投入) ※予備試験による確認

ID	試験項目	該当作業ステップ	試験要領・手順	判定基準	備考
2	ドライモルタルの投入	7-2	(1)柔構造作業アームにて型枠直上にホース(ドライモルタル投入用)を位置決めする。 (2)柔構造作業アームにてホースを移動させながら型枠内にドライモルタルを投入する※2。 (2)簡易堰(試験用)と堰の間の水を抜く。【人手作業】 (3)漏れい量を測定する。【人手作業】	<ul style="list-style-type: none"> <li>型枠内にドライモルタルを投入できること。</li> <li>モルタルが固化すること。</li> <li>水抜きにより堰の内外で水位差ができること。</li> <li>堰からの漏れいがないこと。(目標)</li> </ul>	※2: ホース内へのモルタル投入は人手にて実施

**STEP 1. 型枠上へのホース位置決め**

動作図

柔構造作業アーム

ホース

型枠

内周側(ペDESTAL側)

外周側(シェル側)

人手でモルタル投入

ホッパ

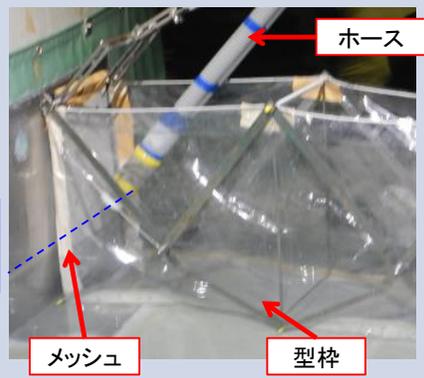
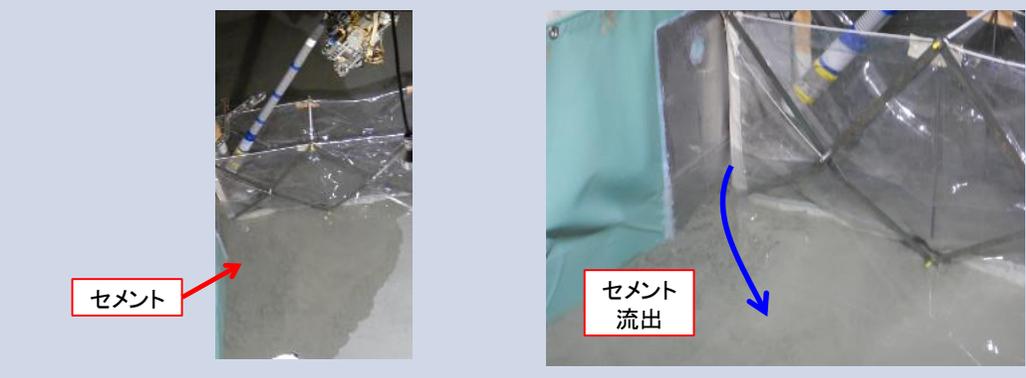
ホース

グレーチング上

# 7. 本事業の実施内容 【 1)② 干渉物撤去以外の技術の開発 】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 要素試験結果(ドライモルタルの投入)

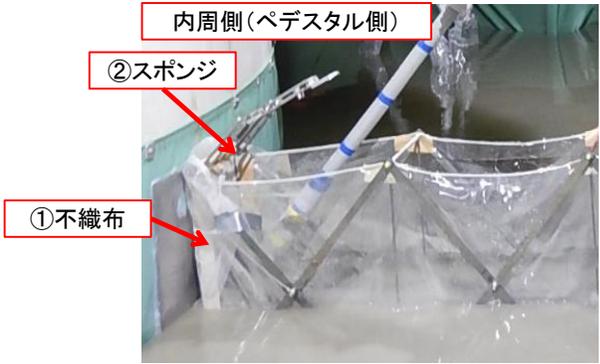
STEP	1. ホース位置決め(内周側)	2. モルタル投入
動作図		

ホース位置決め、モルタル投入ができることを確認したが、  
型枠と壁面の隙間からのセメントの流出が大きい。

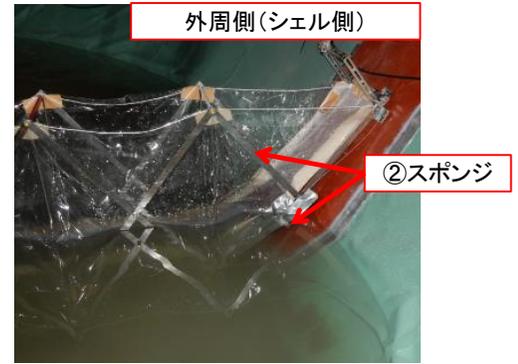
⇒試験を中断し、メッシュ目開き、壁面との隙間対策後試験を継続した。

#### 【対策内容】

- ①メッシュ(目開き1mm)の外側に不織布を取り付け。
- ②壁面との隙間をスポンジで閉止。(外周側、内周側の片側)



内周側の堰の状況



外周側の堰の状況

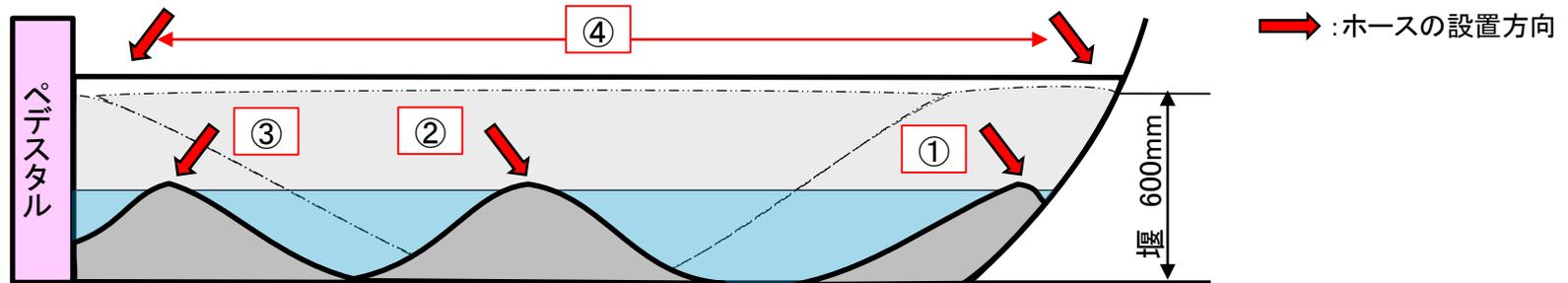
## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

#### ■ 要素試験結果(ドライモルタルの投入)

- ✓ 前述の隙間対策後、モルタルの投入を継続、モルタル投入を完了した。(投入状況は次頁)
- ✓ モルタルの投入箇所については、モルタルの積み上がり状況を見ながら以下の手順で実施した。

No.	投入位置	内容	基準
①	外周側底面	壁面との隙間および底面が埋まるようにモルタルを投入する。	モルタルの山の頂点が気中に出るまで投入。
②	中央底面	底面のメッシュが埋まるようにモルタルを投入する。	モルタルの山の頂点が気中に出るまで投入。
③	内周側底面	壁面との隙間および底面が埋まるようにモルタルを投入する。	モルタルの山の頂点が気中に出るまで投入。
④	気中全域	モルタル高さが600mmになるよう全体にモルタルを投入する。	気中部の積み上がり状況を確認しながら投入。



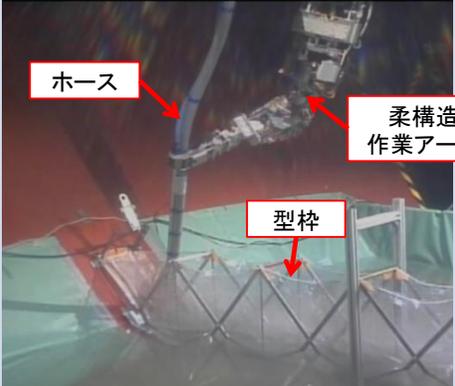
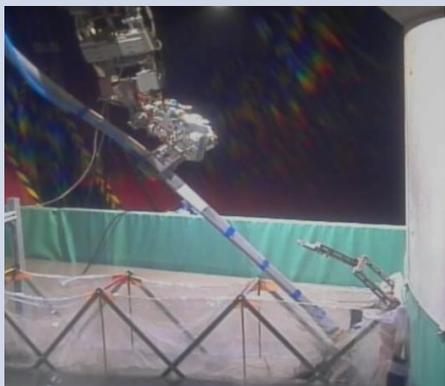
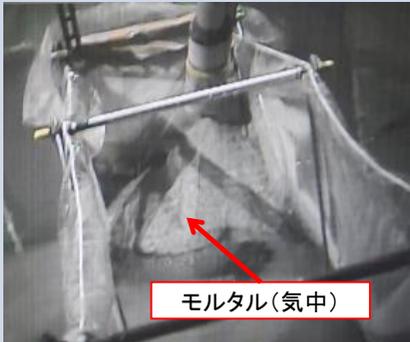
モルタル投入位置及び積み上がり状況(推定)

# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 要素試験結果(ドライモルタルの投入)

✓ 前述の対策後、モルタルの投入を継続、モルタル投入を完了した。

STEP	1. ホース位置決め、モルタル投入 (①外周側)	2. ホース位置決め、モルタル投入 (②中央部)	3. ホース位置決め、モルタル投入 (③内周側)
動作図			
STEP	4. モルタル投入監視状況(③内周側)		5. モルタル投入完了後
動作図			

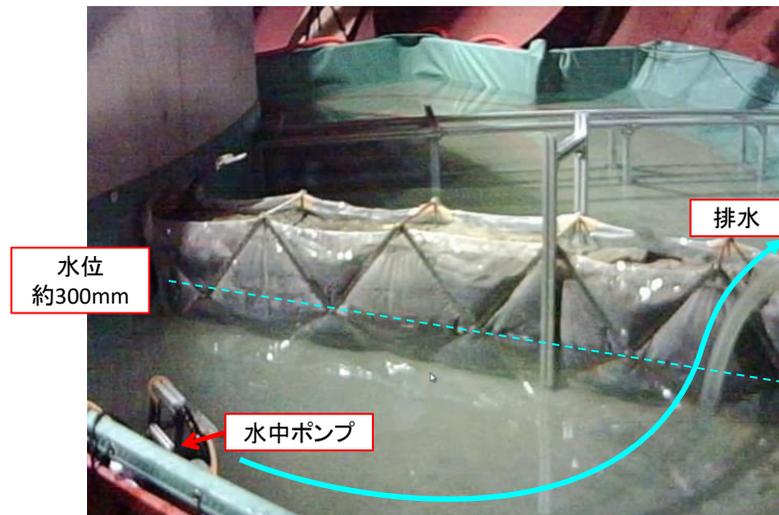
## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

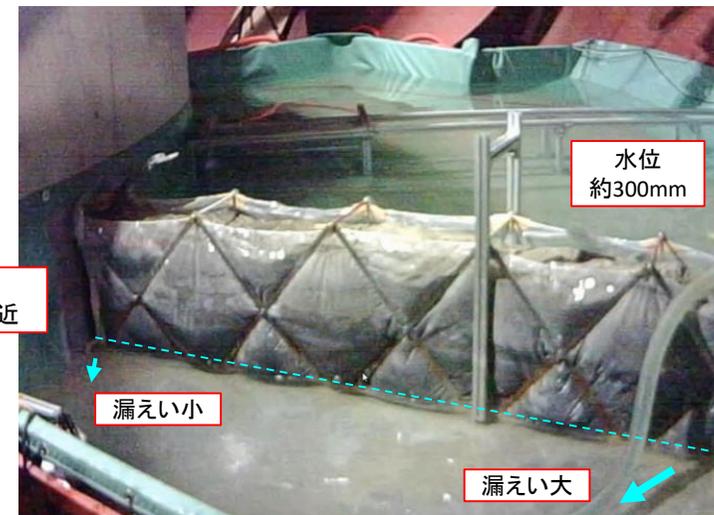
#### ■ 要素試験結果(ドライモルタルの投入):漏水量の確認状況

- ✓ モルタル硬化後、水抜きにより堰の内外で水位差ができることを確認したが、堰の外周側からの漏れい  
が大きくすぐに水位差がなくなった(10分程度)。

→特に外周側について、隙間をスポンジで埋めていたが、メッシュ袋が壁面に密着するように膨らんでい  
なかったため、漏れい量が大きかった。



堰外側水抜き前の状況



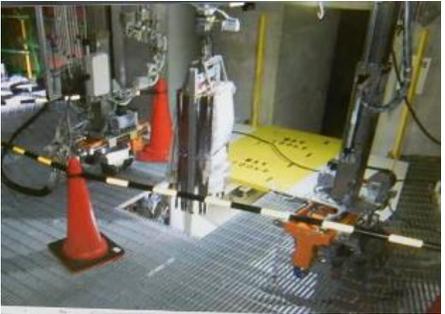
堰外側水抜き直後の状況

# 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

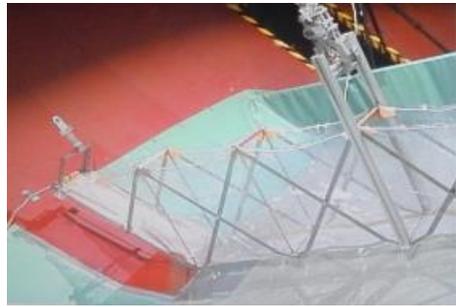
## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 要素試験結果まとめ

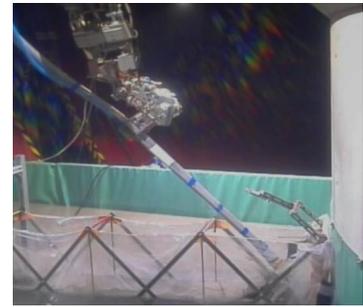
ID	試験項目	試験要領・手順	試験結果	備考	
1	型枠の搬入・展開	(1)門型揚重機で型枠を吊り上げ。 (2)門型揚重機を既設開口上まで移動させる。 (3)門型揚重機のウインチを用いて、型枠を地下階に吊り下ろす。 (4)柔構造作業アーム(地下階)にて型枠を把持し、門型揚重機のウインチを巻き上げる。 (5)柔構造作業アームにて型枠を展開する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>門型揚重機を開口上に位置決めできることを確認。</li> <li>門型揚重機で開口(1200×600mm)から型枠を地下階に搬入でき、柔構造作業アーム(地下階)にて型枠を把持できることを確認。</li> <li>柔構造作業アーム(地下階)にて型枠を展開できることを確認。</li> </ul>	○	
2	ドライモルタルの投入	(1)柔構造作業アームにて型枠直上にホース(ドライモルタル投入用)を位置決めする。 (2)柔構造作業アームにてホースを移動させながら型枠内にドライモルタルを投入する※1。 (2)簡易堰(試験用)と堰の間の水を抜く。【人手作業】 (3)漏えい量を測定する。【人手作業】	<ul style="list-style-type: none"> <li>柔構造作業アーム(地下階)にてホースを位置決めし、型枠内にドライモルタルを投入できることを確認。</li> <li>水中に投入したモルタルが固化することを確認。</li> <li>型枠内にモルタルを投入できたが、メッシュからセメントが大量に流出。</li> <li>水抜きにより堰の内外で水位差ができるが、堰からの漏えいが大きくすぐに水位差がなくなる。</li> </ul>	▲	※1: ホース内へのモルタル投入は人手にて実施



型枠の搬入



型枠の展開



ドライモルタル投入



堰外観

遠隔操作性に関する判定基準を満足していることを確認できたが、  
堰の構造、遮水性に課題あり。

## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

#### ■ 抽出した課題と対応方針

No.	課題	内容	対応方針
1	型枠と壁面の隙間の閉止方法	型枠と壁面の隙間が大きいと隙間を埋めきれず壁面と密着しないため、止水ができない。	メッシュの目の粗さ等再度検討して <u>追加要素試験を実施する。</u>
2	メッシュからのセメントの流出防止方法	メッシュの目が粗いためモルタルのセメント成分が流出してしまう。	上記改善と合わせて <u>追加要素試験を実施する。</u>
3	漏えい発生時の補修方法	長期間の中で漏えい量が増えた場合に補修する必要があるが、現状の方法では補修は困難。	机上検討を行った後、 <u>追加要素試験を実施する。</u> 今回の要素試験のように止水ができない場合のバックアップ工法としても検討する。
4	モルタル投入状況の確認方法	モルタルの投入状況を型枠外から監視することは困難。(今回は人手でホース付近にカメラを設置して試験を実施した。)	カメラ・照明の詳細配置にて対応(実機工事時)。

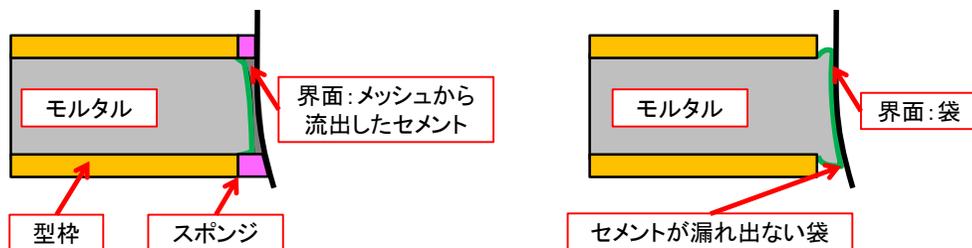
No.1～3について追加要素試験を実施する。

# 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## b. サプレッションチェンバ(S/C)への汚染拡大防止方法

### ■ 追加要素試験計画

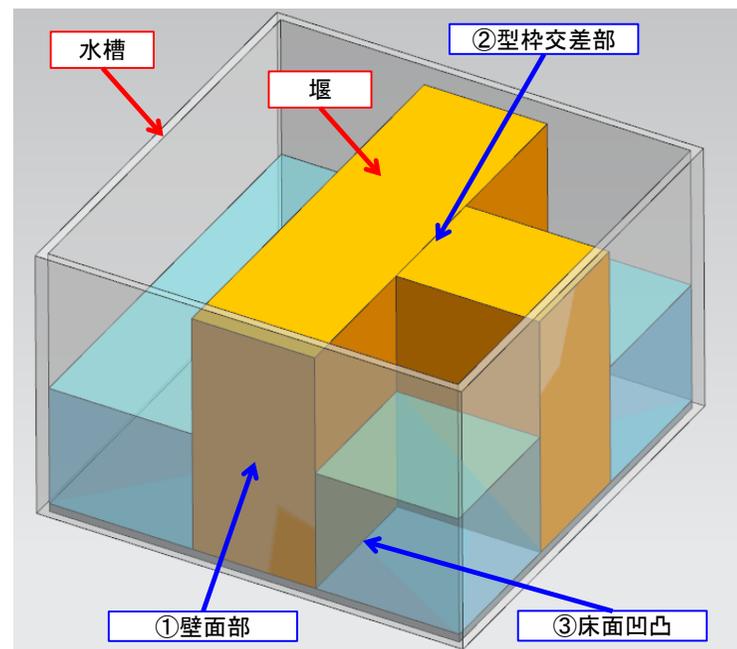
- ✓ 下表に示す項目を確認するための要素試験を計画中。
- ✓ 壁面と型枠間の「密着性」と、メッシュからの「流出対策」に主眼を置き、構造見直し、予備試験後、以下に示す要素試験を実施予定。
- ✓ 要素試験では堰の長さ方向の影響を考慮したスケールで実施する。



予備試験イメージ

#### 追加要素試験確認事項

No.	確認事項	判定基準
1	壁面との密着性	型枠と壁面の隙間がある場合で壁面と密着して止水ができるか。
2	型枠交差部の密着性	2つの型枠が交差する部分で堰同士が密着して止水ができるか。
3	床面凹凸への追従性	床面に凹凸がある場合でも止水ができるか。
4	漏えい発生時の補修方法	上記の界面に漏えいが生じた場合に補修できるか。(上流側からの作業を想定。)



追加要素試験試験体イメージ

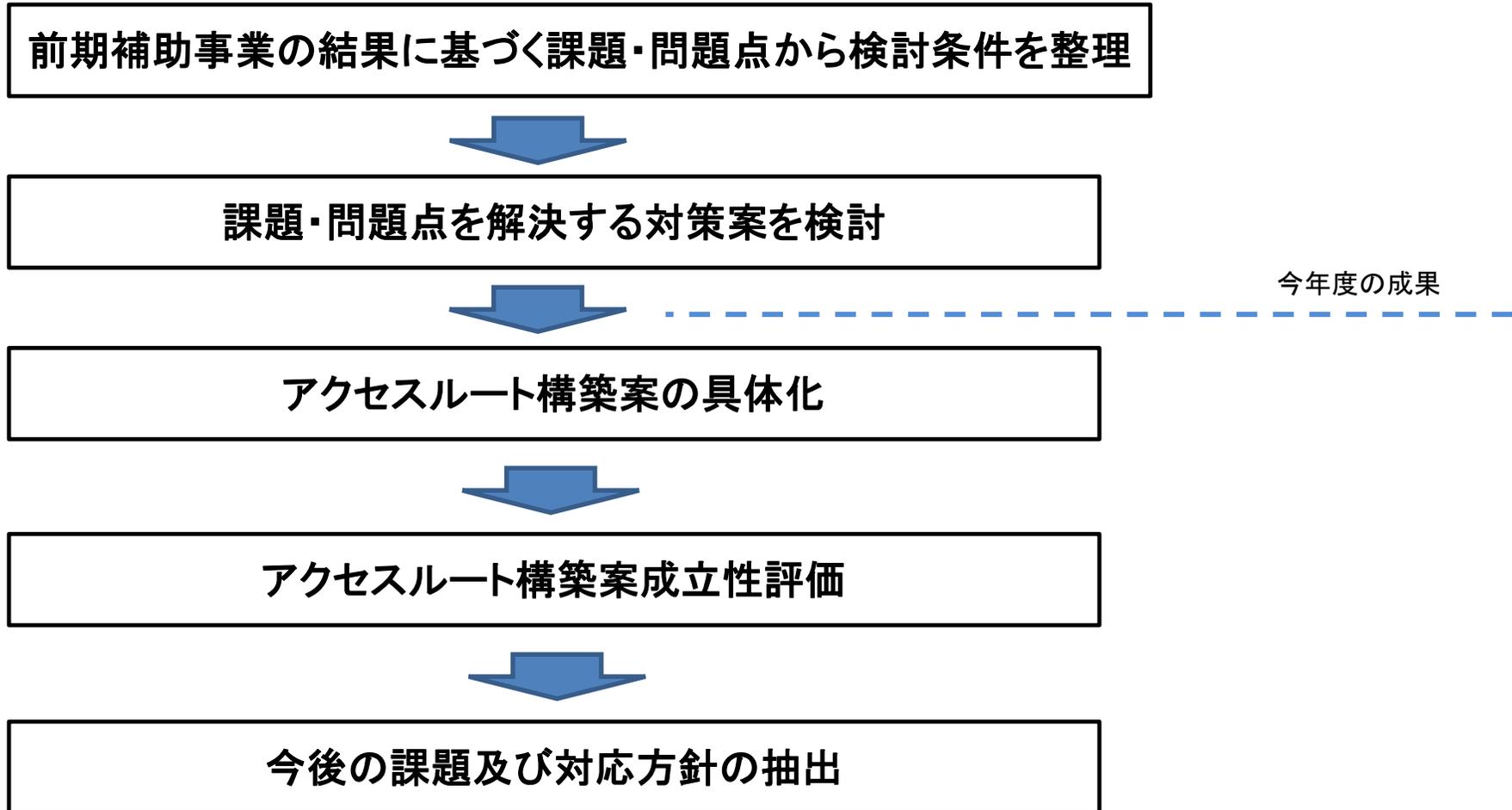
### c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

- 開発の目的
  - 設計段階に向けて、昨年度までの検討結果である工法案に他のPJの進捗、安全面、設置場所の制約条件等の検討を加え、燃料デブリ取り出し設備の構成・配置案を再検討することで、成立性確認のための工法計画の精緻化を図る。
- 解決すべき課題
  - R/B内外の床面の許容荷重値を満足させるための設備の軽量化が必要。
  - R/B外側の撤去困難な既設設備との干渉を避けるための設備配置の最適化が必要。
- 開発の進め方
  - 設備軽量化と設置エリア最適化に向けた検討条件の詳細化と再整理
  - 設備軽量化およびエリア最適化方法案の検討
  - 取り出し設備の設置、搬入、据付工法案の検討
  - 取り出し工法案の具体化検討と成立性評価
- 得られる成果
  - 成立性のある燃料デブリ取り出し設備の構成、配置案および取り出し工法案の精緻化

## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

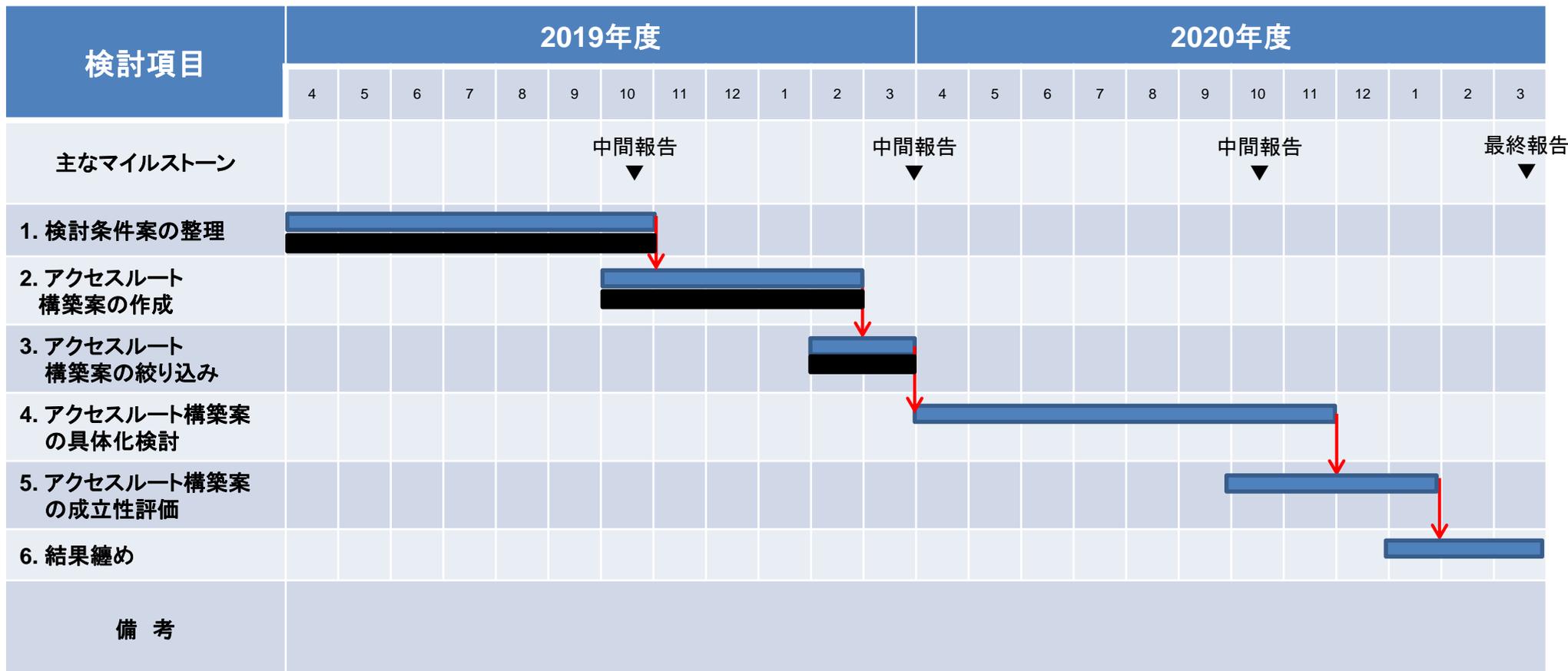
#### ● 検討フロー



# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

### ■ 開発工程



# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

### 【前年度までの主な成果】

セルでバウンダリを確保し、ロボットアームでPCV側面からアクセスすることにより、燃料デブリを回収する工法案について、以下の開発コンセプトの燃料デブリ取り出し設備の構成、配置案を考案。

### 開発のコンセプト(開発の狙い)

#### ○最短距離でのアクセスを考慮

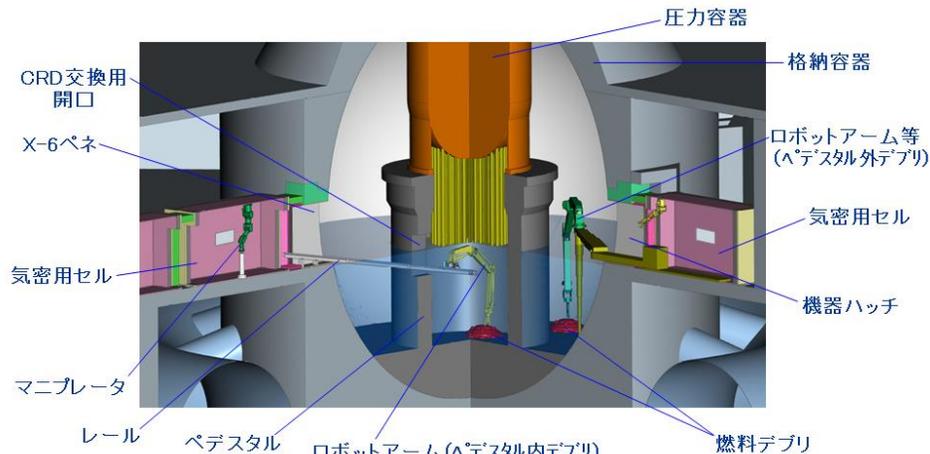
→最少の干渉物撤去で大型機器をPCV搬入する思想を  
基に、素早く燃料デブリにアクセスする工法を検討

#### ○六ヶ所再処理(RRP)で培ったセル構造の採用

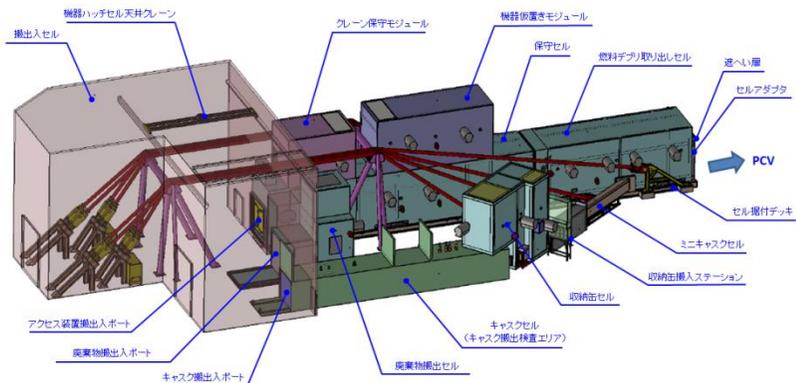
→作業員被ばくの低減に実績のある技術を基に、最新知見を加え、信頼性の高いシステム構成を考案

#### ○軽水炉の保全工事や再処理分野で知見を有している遠隔 マニピュレーターの活用

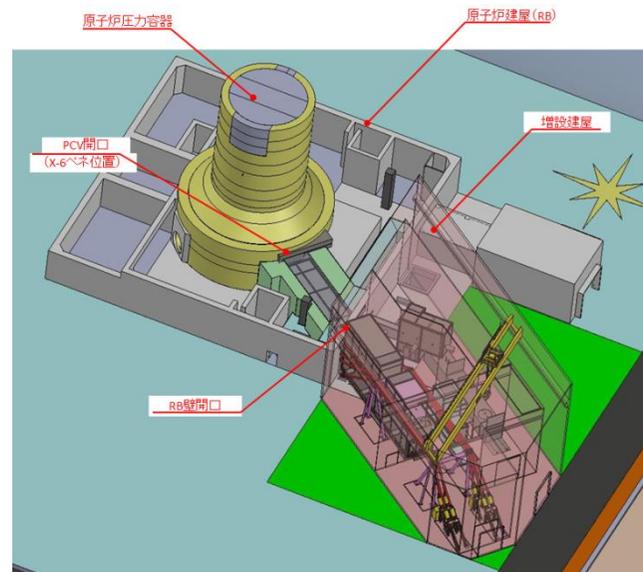
→実績を考慮した現実的な作業・保守計画を基に、特殊な環境を考慮した工法の検討



アクセスルートの概念図



前年度迄の設備構成案



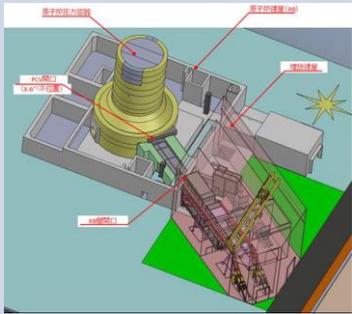
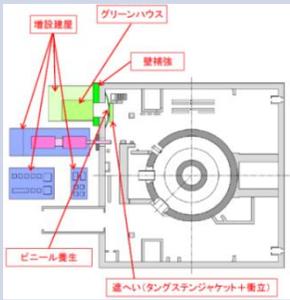
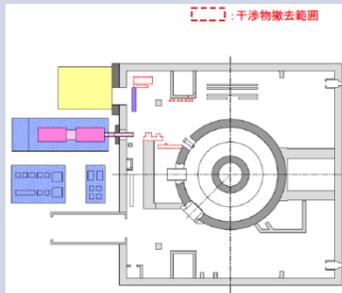
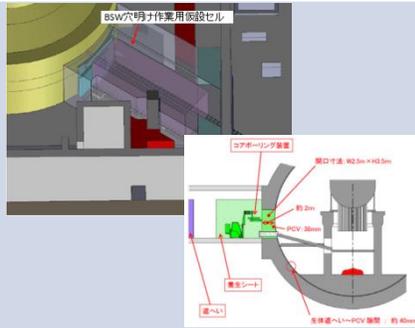
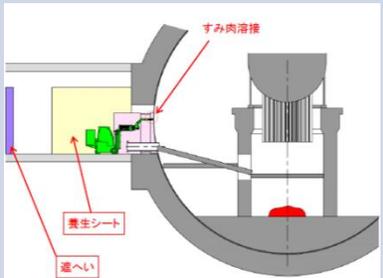
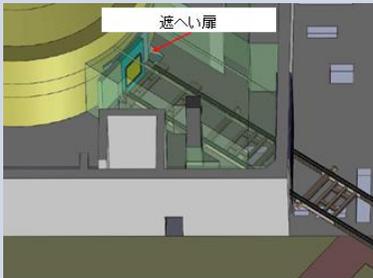
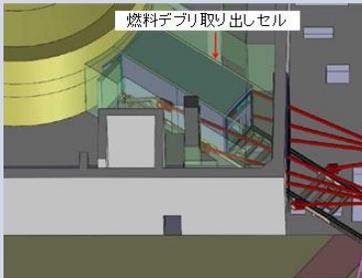
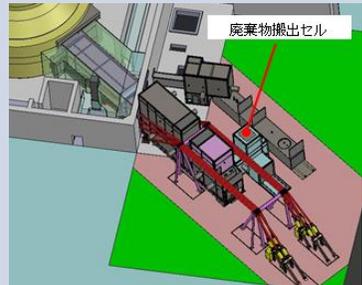
前年度迄の設備配置案

# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

### 概略作業ステップ(1/2)

 : 2019-2020年度の検討範囲

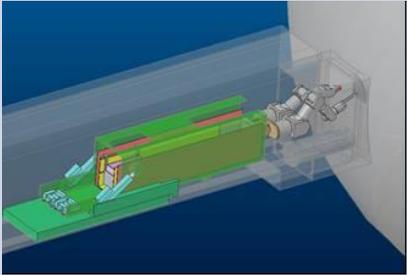
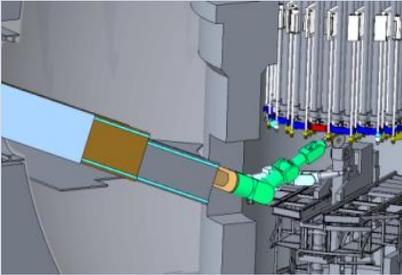
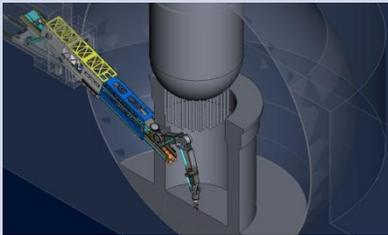
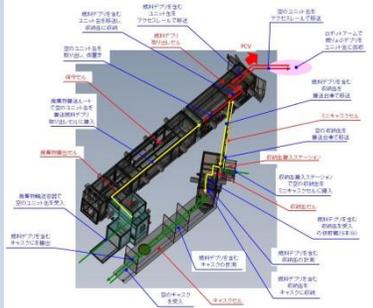
作業ステップ	増設建屋設置	R/B壁開口作業	R/B内干渉物撤去	BSW穴開け
ステップ図				
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に概略規模検討を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に概念検討実施済</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に東芝殿にて開発した穴開け工法を転用予定</li> </ul>
作業ステップ	セルアダプタ溶接	遮へい扉の据付	燃料デブリ取り出しセルの据付	R/B外部のセルの据付
ステップ図				
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>2016-2017年度に要素技術開発を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に概念検討実施済</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に概念検討実施済</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に概念検討実施済</li> </ul>

# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

### 概略作業ステップ(2/2)

 : 2019-2020年度の検討範囲

作業ステップ	PCV壁開口	PCV内干渉物撤去	燃料デブリ取り出し	燃料デブリの搬出
ステップ図				
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に概念検討実施済</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に概念検討実施済</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に概念検討実施済</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017-2018年度に概念検討実施済</li> </ul>

本補助事業では、R/B内に設置する燃料デブリ取り出しセルの重量に起因するR/B床面荷重が許容値を超えるという課題を解決するために、燃料デブリ取り出しセルの小型軽量化を意図し、アクセス方式の見直し、燃料デブリ取り出しセル内の機器配置見直し、セル固定方法の見直し等の検討を実施する。



## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

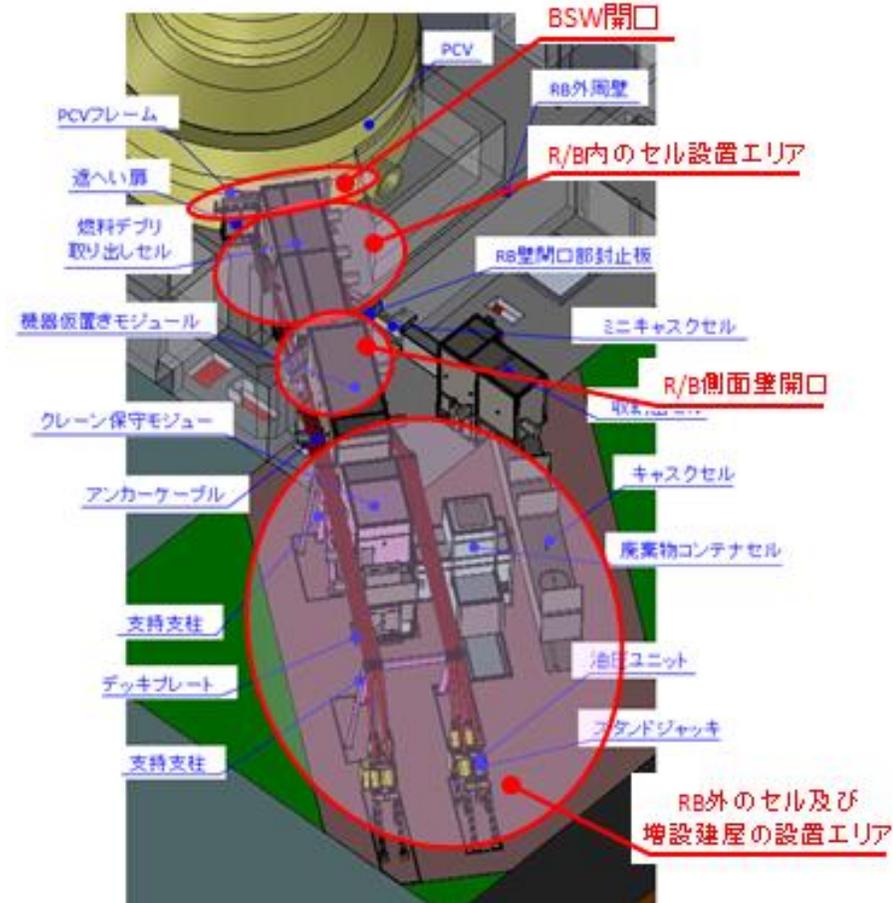
### c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

#### ■ 前提条件

- R/B外のセル及び増設建屋のエリアが整地され、セル及び増設建屋を設置可能である。
- R/B側面壁に開口を設け、R/B内にセルを搬入し、設置が可能である。
- R/Bの所定のエリアの干渉物が撤去され、セルの設置エリアが確保されている。
- BSWに開口を設け、PCVにセルを接続するエリアが確保されている。

#### ■ 開発目標

- セルの自重の低減及びセル自重による荷重の分散化により、R/B床面荷重の低減を目指す。
- 吊り橋状セル据え付け架台の廃止により、R/B外部での局所的な荷重の集中を防止。



## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

R/B内のセル(燃料デブリ取り出しセル)の小型軽量化に向けた検討項目

目的	検討項目	概要
セルの自重の低減	① アクセス方式の変更	アクセスレール方式を廃し、固定レール方式とすることで、セル高さの低減を図る
	② セルの高さ低減	セル内機器の構成、配置を見直すことで、セル高さの低減を図る。
	③ セルの遮へい体取り付け範囲の検討	燃料デブリの搬送方式エリアを制限することで、遮へい体重量の低減を図る。
	④ 遮へい厚の低減	合理的な範囲で、遮へい厚の低減を図ることで、遮へい重量の低減を図る。
セル自重による荷重の分散化	⑤ 設置架台による床面荷重の分散化	セルの底部に設ける架台により、セルによる床面荷重を分散させる。

- R/B外のセルについては、前年度までの補助事業にて検討を行った結果、特に大きな問題となっていない。従って、R/B内外のセルの設置に伴う荷重負荷を低減化に向けては、R/B内に設置される燃料デブリ取り出しセルの小型軽量化を主眼とし、検討を進める。

# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

### 今後の検討の流れ

① アクセス装置の小型化検討

② セルの小型化検討



③ 遮へい体取付範囲の検討

④ 遮へい厚の検討



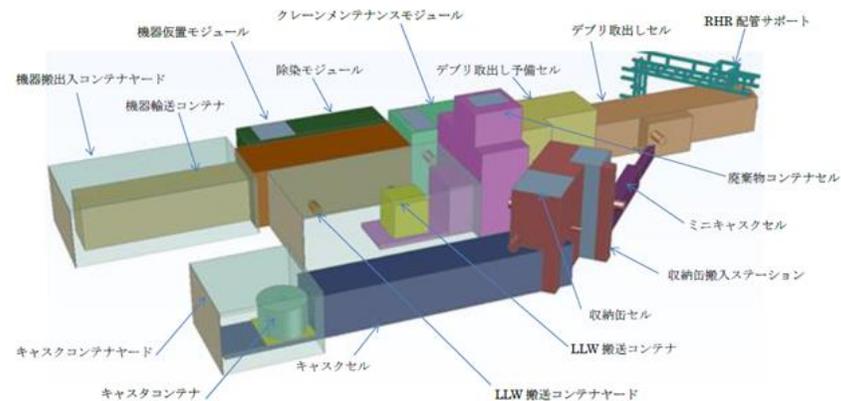
⑤ 設置架台による床面荷重分散化検討



セルサイズ、重量と想定床面荷重の評価

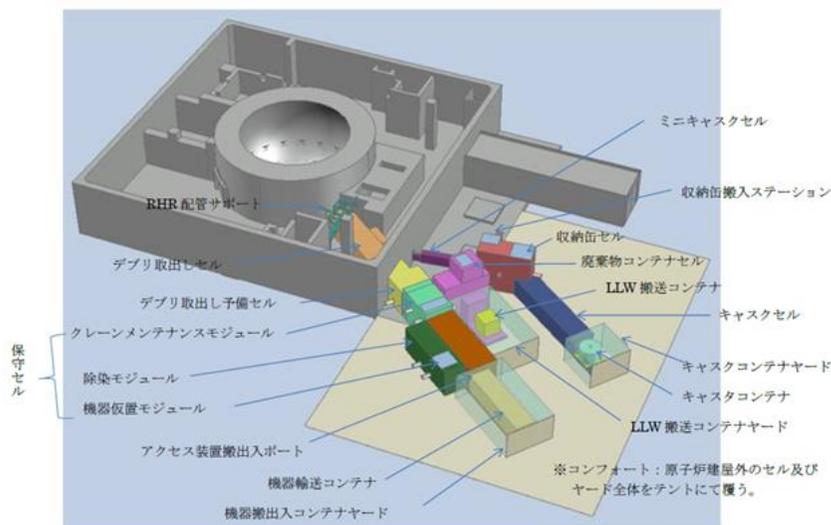


燃料デブリ取り出し作業の作業、設備運用、設備配置、設置工事、保守・メンテナンス等観点から、見直し案の有効性と実現性に関する評価を実施



※コンフォート：原子炉建屋外のセル及びヤード全体をテントにて覆う。

設備構成見直しイメージ図



※コンフォート：原子炉建屋外のセル及びヤード全体をテントにて覆う。

設備配置見直しイメージ図

## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

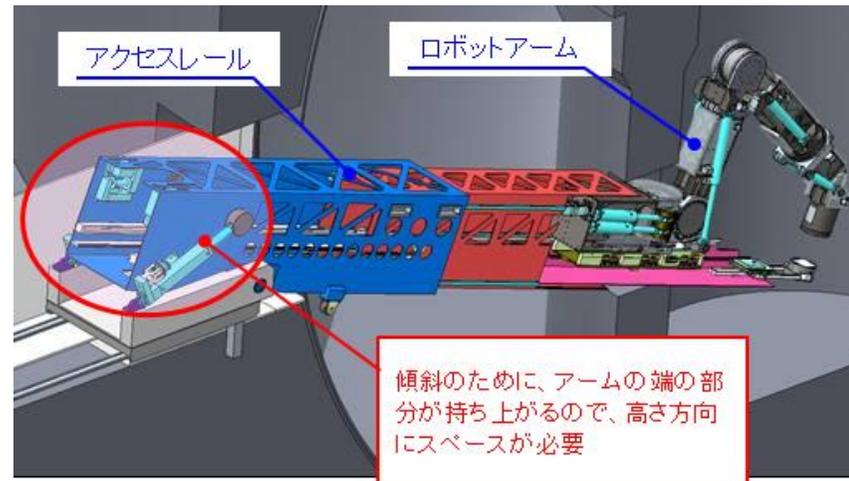
No.118

### c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

#### ① アクセス方式の変更

##### 前年度までのアクセス装置に関する課題

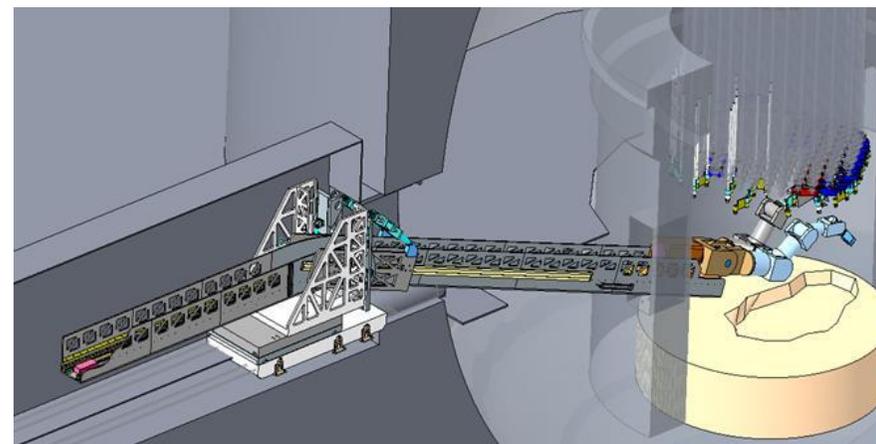
- アクセスレールを傾斜、延伸させ、アクセスルートを確保する方式であり、傾斜のために、セル内に高さ方向のスペースが必要
- PCVに対して比較的大型のアクセス装置出し入れを行うために、セル内にも比較的大きなスペースが必要



前年度までのアクセス装置概要図

##### 検討方針

- アクセスレールを廃し、固定レール方式を採用することにより、セルの高さ方向のスペースを低減
- 最も大きなアクセスレール(縮小時:8.7m×1.9m×2.5m;24ton)をやめることで、アクセス装置の搬出入のスペースを低減
- アクセスレールに代わる固定レールの構造、設置方法、ロボットアーム及びユニット缶の搬送方法の具体化を図り、成立性を検証する。



固定レール方式の概念図

##### 今後の対応

- 次年度に具体化を図る。

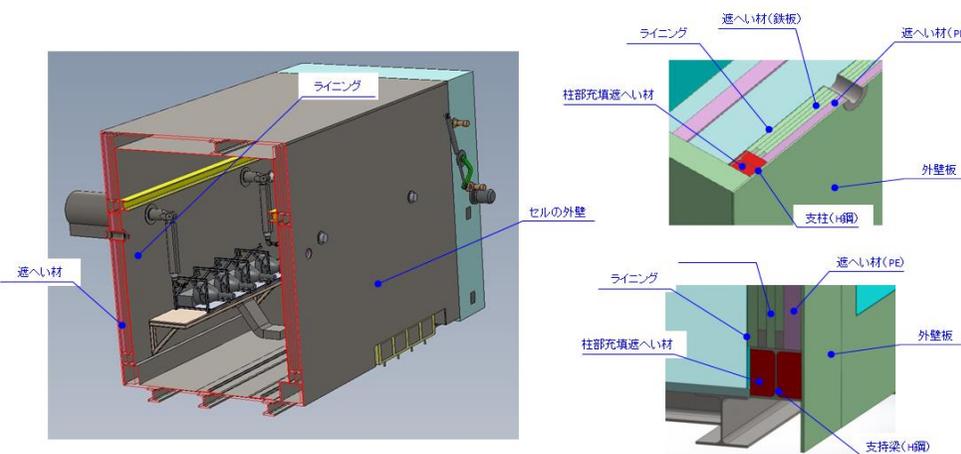
# 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

### ② セルの高さ低減

#### 前年度までのセルに関する課題

- 燃料デブリ取り出しセルの重量(382ton)の大半は、構造材を含む遮へい材の重量(360ton)で占められている。
- 作業員保護のため、セルの側面部に遮へい体に取り付けられており、重量低減のためには、セル高さの低減が有効
- アクセスレールからユニット缶回収には、傾斜したアクセスレールの上部からユニット缶を吊り上げる必要があり、上部にクレーンが走行するスペースを設ける必要があった。



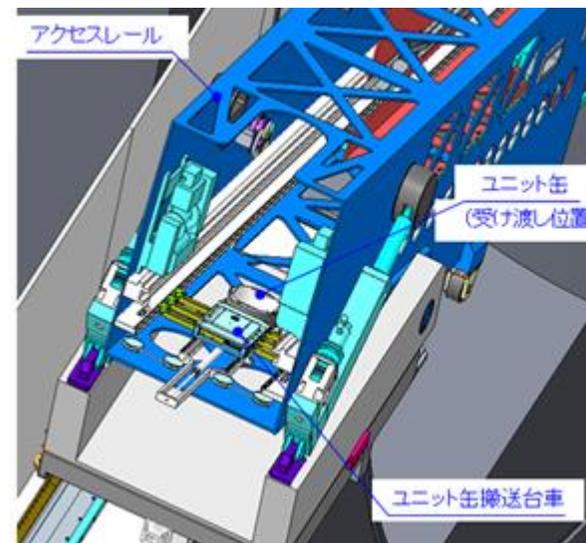
前年度までの燃料デブリ取り出しセルの遮へい材構造図

#### 検討方針

- アクセスレールを廃することにより、アクセスレールからのユニット缶の回収、搬送方法の見直しが必要。
- セル高さの低減を図るため、天井部の走行クレーンによりユニット缶を回収する方式の見直しを行う。

#### 今後の対応

- 次年度に具体化を図る。



前年度までのユニット缶搬送台車構造図

# 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

## c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

### ③ セルの遮へい体取り付け範囲の検討

#### 前年度までの遮へい体に関する課題

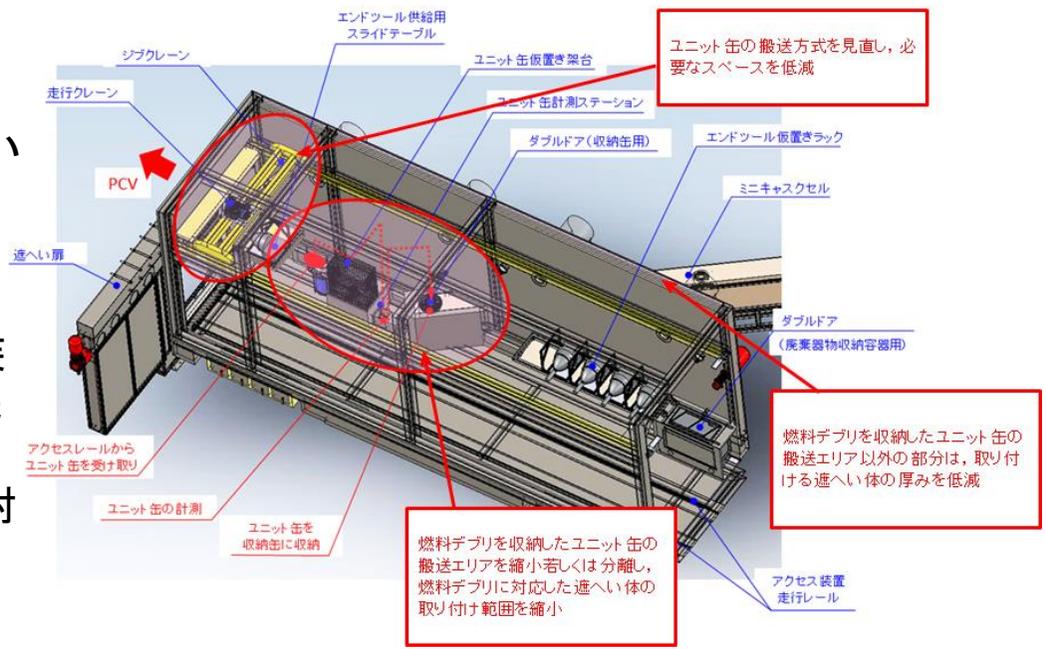
- 燃料デブリに対しては、線源強度に対応した厚い遮へい体を設置することが必要。
- セル内では、遮へい効果の無いユニット缶の状態では燃料デブリが取り扱われる状態であった。
- 燃料デブリ取り出しセルでは、大型のアクセス装置の取り扱いのために、比較的広い空間を確保することが必要であった。
- そして、セル側面の全体に渡って燃料デブリに対応した厚い遮へい体の取付が必要になった。
- 結果として、遮へい体の取り付け面積が増大し、セル重量が増加することとなった。

#### 検討方針

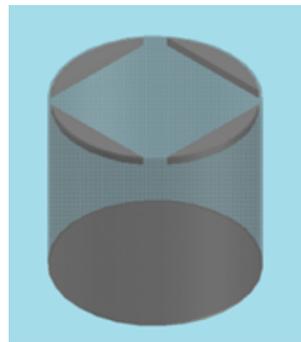
- ユニット缶の取り扱い方法を見直すことで、燃料デブリの取り扱いエリアを縮小し、燃料デブリに対応した厚い遮へい体の取付面積を低減する。

#### 今後の対応

- 次年度に具体化を図る。



遮へい体取り付け範囲の検討に関する概念図



ユニット缶

#### 想定ユニット缶仕様

- 外形寸法: φ210mm × 200mm
- 乾燥重量: 10kg
- 最大デブリ収納量: 50kg
- 平均デブリ収納量: 15kg
- 最大総重量: 60kg

## 7. 本事業の実施内容【1】② 干渉物撤去以外の技術の開発】

### c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

#### ④ 遮へい厚の低減

##### 前年度までの遮へい厚に関する課題

- ・ 遮へい厚を保守的に設定していた。
- ・ 合理的な範囲で条件を見直すことにより、遮へい厚をある程度低減可能

##### 対応

- ・ 線源条件を合理的な範囲で見直し
- ・ セル周辺の線量率に関するクライテリアを合理的な範囲で見直し
- ・ 考慮する線源検討条件を運転条件を考慮し見直し

##### 一次検討結果

- ・ 必要遮へい厚(2cm鉄+5cmPE+21cm鉄⇒鉄2cm+PE5cm+鉄18.5cm)
- ・ 同一取付面積で、12%程度遮へい重量を低減

##### 今後の対応

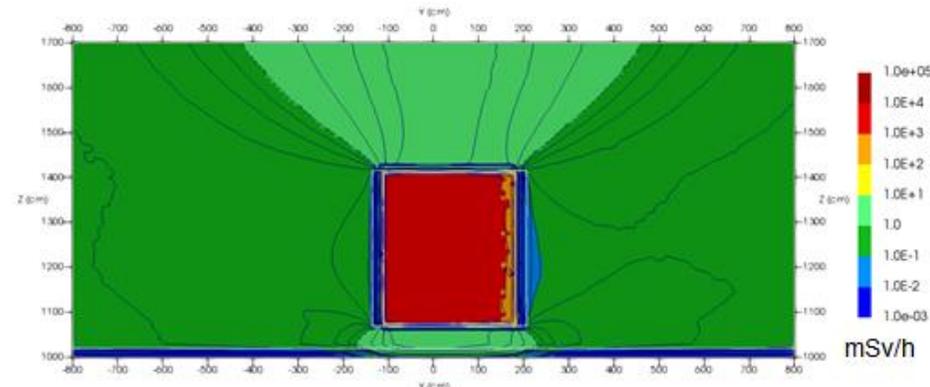
- ・ 他の項目との組み合わせにより、更なるセル重量の低減を図る。

PCV内部の線源条件

	2017年度検討	今回
線源形状	φ5m、高さ20m	同左
燃料デブリ(UO <sub>2</sub> )重量	78ton(1号機)	107ton(2号機)
線源	1号機 冷却10年 (JAEA-Data-Code-2012-018)	同左
中性子スペクトル	Watt型 Pu-239	同左
中性子実効増倍率	0.7	0.6

ユニット缶の線源条件

	2017年度検討	今回
Unit Can 形状(1体)	φ21cm、高さ20cm	同左
Unit Can 体数	1	4
燃料デブリ(UO <sub>2</sub> )重量	50kg	60kg(15kg×4体)
中性子スペクトル	Watt型 Pu-239	同左
中性子実効増倍率	0.7	0.6



通常時の解析結果

## 7. 本事業の実施内容【1)② 干渉物撤去以外の技術の開発】

No.122

### c. セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討

#### ⑤ 設置架台による床面荷重の分散化

##### 前年度までのセル設置架台に関する課題

- R/B1階床面の荷重許容値
- R/Bは、前年度までのセルの様な重量物の設置を考慮して設計されておらず、局所的な荷重の集中も避ける必要がある。
- 前年度迄のセル据え付け架台の様な方式は、床面荷重低減の観点では有利
- しかし、地震の荷重や変位への対応が複雑で、難しくなる。



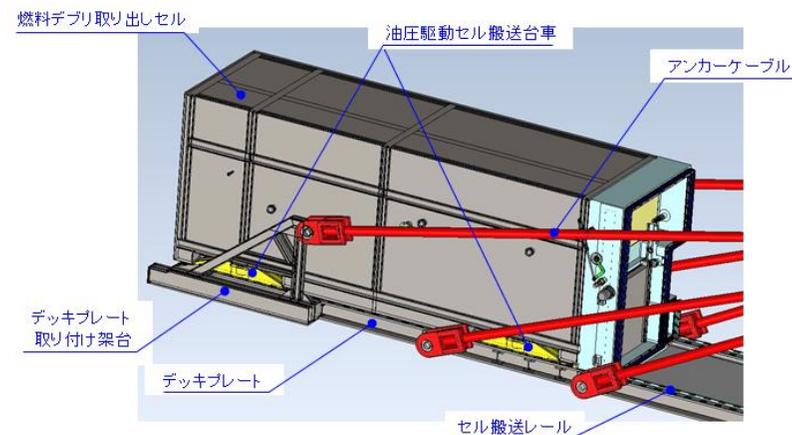
##### 検討方針

- セルの底部に架台を設けることにより、セル荷重を十分に分散させるとともに、セルをR/B床面に設置、固定する方法で検討を進める。
- 奇をてらわないオーソドックスな方法ではあるものの、地震の際の荷重や変位に対する対応が比較的容易で、現実的な方法

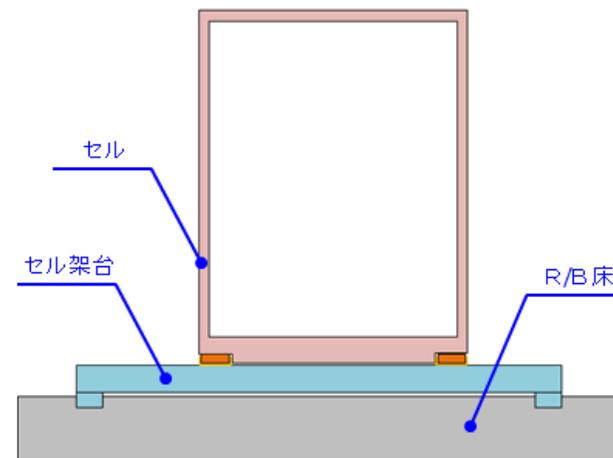


##### 今後の対応

- 他の項目との組み合わせにより、床面荷重の低減を図る。



前年度迄のセル据え付け架台概要図

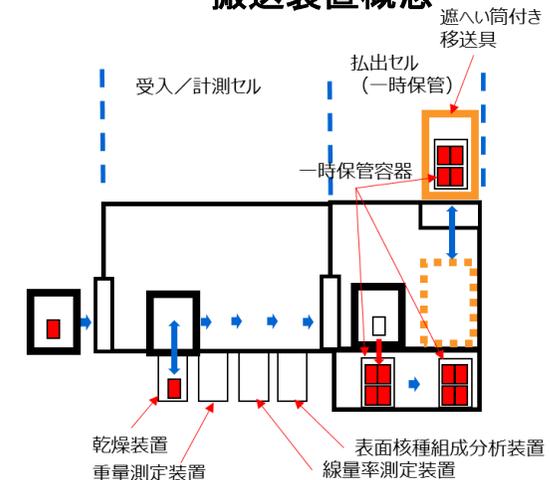
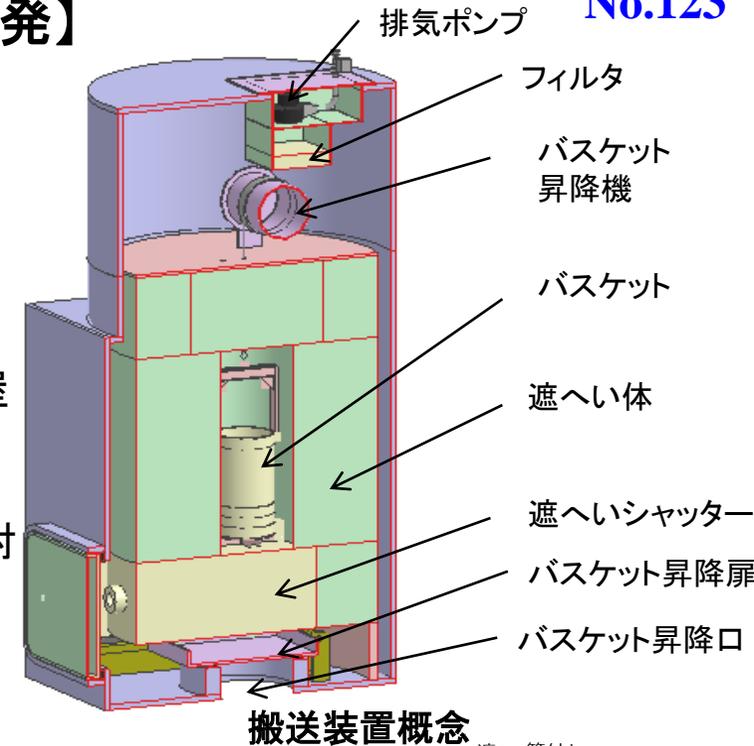


セル架台概要図

## 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

- 開発の目的
  - ユニット缶をR/Bから離れた建屋へ搬送する方法を開発する。
- 解決すべき課題
  - 密封など燃料デブリ収納容器の搬出処理をR/Bから離れた建屋で実施する場合、建屋までの搬送用の閉じ込め装置が必要
  - 閉じ込め装置の概念検討、成立性の検証が必要
  - 燃料デブリ保管容器への閉じ込め処理を行う建屋概念が未検討
- 開発の進め方
  - ユニット缶状態でR/Bから離れた建屋への搬送検討
    - 搬送時間の1次評価、閉じ込め装置の仕様策定
    - 技術開発項目を抽出し、要素試験や解析などで成立性評価（水素発生、冷却、遮へいなど）
  - 閉じ込め装置の適用を前提に、燃料デブリ保管のための処理を行う建屋の概念と要求仕様の検討
  - 閉じ込め装置及び建屋機器の保守メンテナンス、通常点検、故障時等を考慮した必要処理系統数の検討
- 得られる成果
  - 燃料デブリをユニット缶状態で搬送する装置の成立見込み



燃料デブリ保管のための処理を行う建屋(イメージ)

## 7.本事業の実施内容【1）②）干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ 検討の流れ

既存設計の問題点と課題、  
改善のねらい

- 既存検討における作業手順
- 建屋配置検討
- 課題に対する解決策
- 燃料デブリの搬送案

改善する設計の概念検討

- 燃料デブリ取り出し工法、レイアウトと組み合わせた設備の概念検討
- 各ステップにおける、搬送装置と建屋バウンダリの組み合わせ
- 基本機能要求
- 燃料デブリを収納したユニット缶の搬送で必要となる安全機能
- 安全要求に基づく基本設計条件
- 取り扱い要求に基づく基本設計条件
- 設計仕様と課題の設定

技術課題への対応

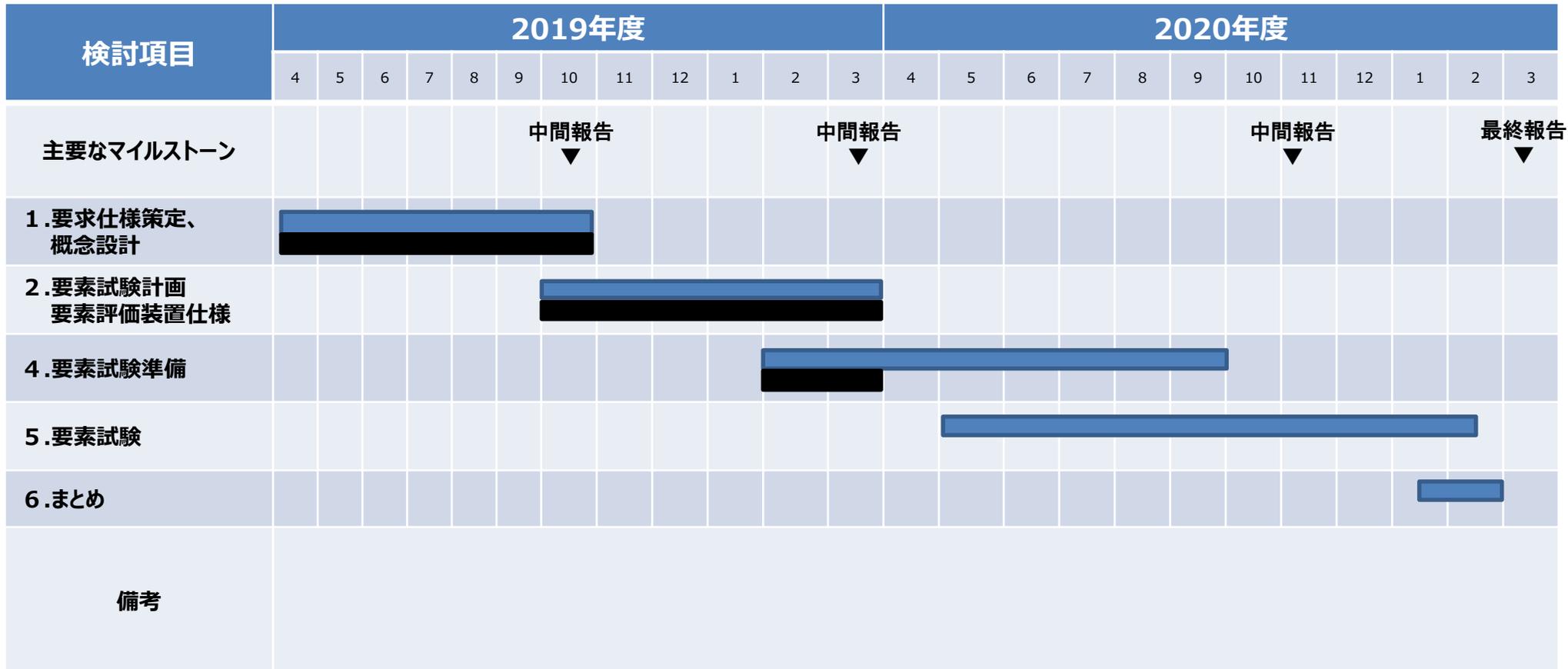
- 扉部の閉じ込め機構
- 水素爆発の防止
- 取扱作業ステップ、設備配置と作業工程の評価

まとめ(2019年度の成果／2020年度の予定)

# 7. 本事業の実施内容【1)②干渉物撤去以外の技術の開発】

## d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

### 開発スケジュール

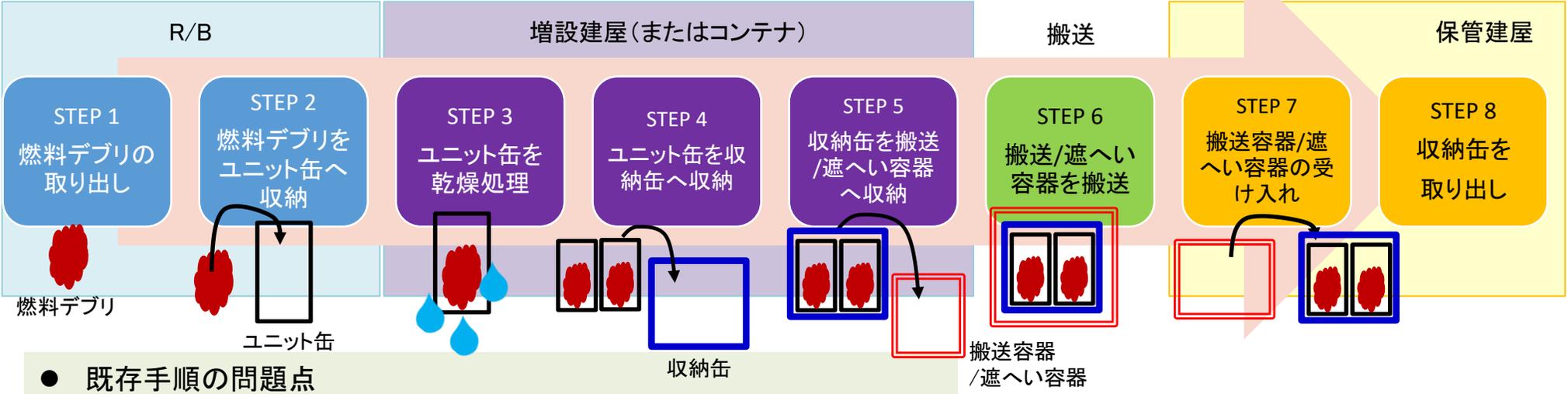


# 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

## d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

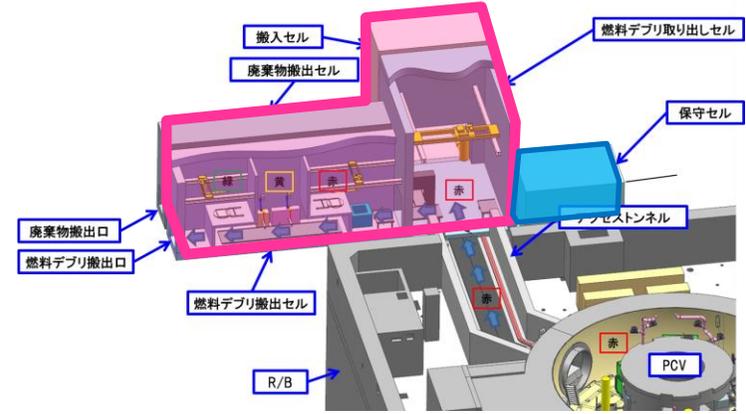
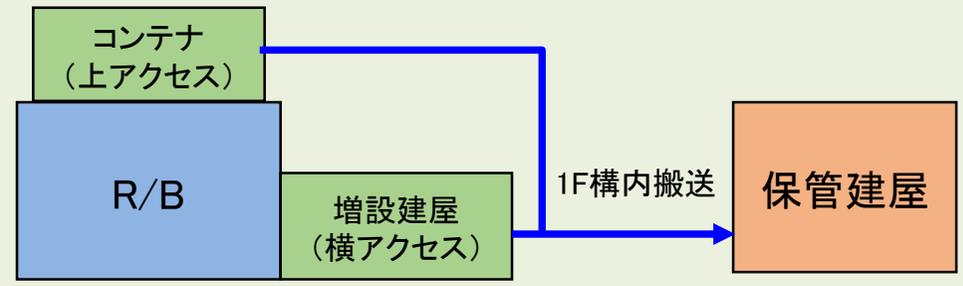
■ 既存設計の問題点と課題、改善のねらい(既存検討における作業手順)

- ユニット缶は、乾燥後に収納缶に収納し、保管建屋にて保管
- R/Bからの搬送時には、気密/搬送/遮へい容器に収納
- 搬送前の作業は、R/Bに隣接して建設する増設建屋またはR/B上コンテナで実施



### ● 既存手順の問題点

- 増設建屋の規模が大きく、サイトのレイアウトに影響
- 上アクセスのコンテナも3000~5000ton規模の遮へい
- 号機ごと、上/横アクセス毎に増設建屋(コンテナ)が必要



増設建屋の例

## 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ 既存設計の問題点と課題、改善のねらい(建屋配置検討)

- 1F-1～3に増設建屋を設置した場合の影響を検討した
- 各号機の山側エリアに増設建屋を配置すると、広い範囲を増設建屋で占めてしまい、他の作業(例えば大物搬出入のクレーンの設置)ができなくなる問題点などが想定される

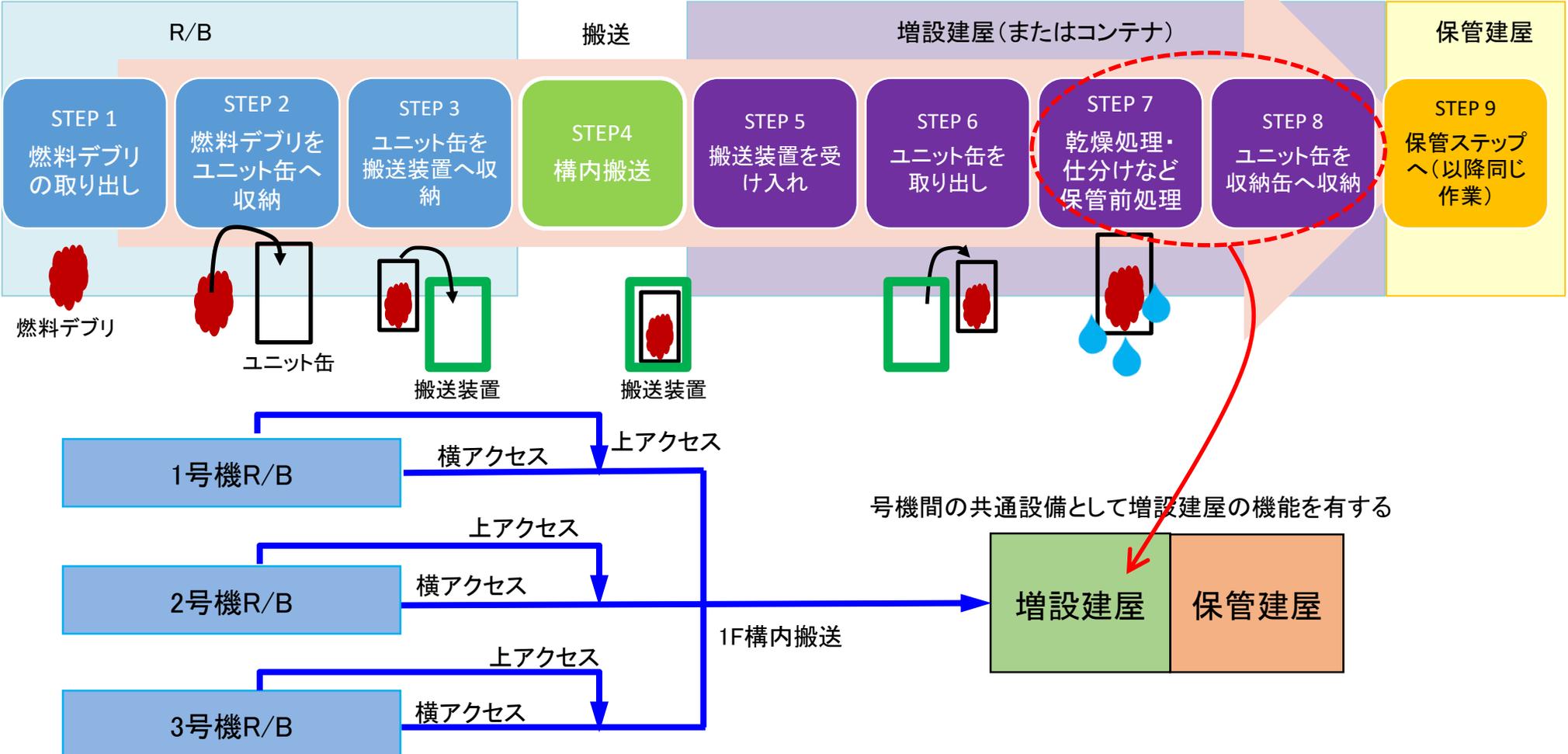


# 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

## d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

### ■ 既存設計の問題点と課題、改善のねらい(課題に対する解決策)

- 増設建屋をR/Bから分離して設置し、構内を搬送する
- 設置した増設建屋は、号機、上／横アクセス共用設備とする
- この際、水切り／収納缶への収納を行わない状態での搬送となる



## 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ 既存設計の問題点と課題、改善のねらい(燃料デブリの搬送案)

- ・遠隔設置した増設建屋への搬送では、構内を管理区域(トレンチなど)で結ぶ案2と、構内を搬送する案3が考えられる。
- ・案3はメリット大だが開発要素があるため、本事業で概念検討を実施する。

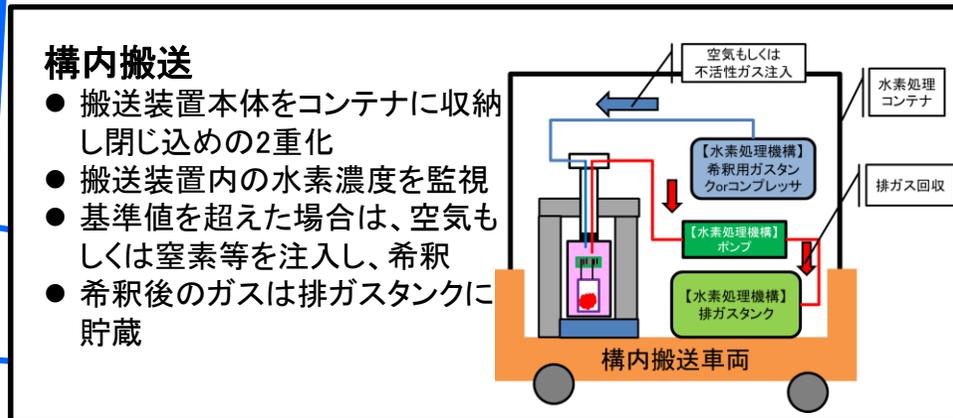
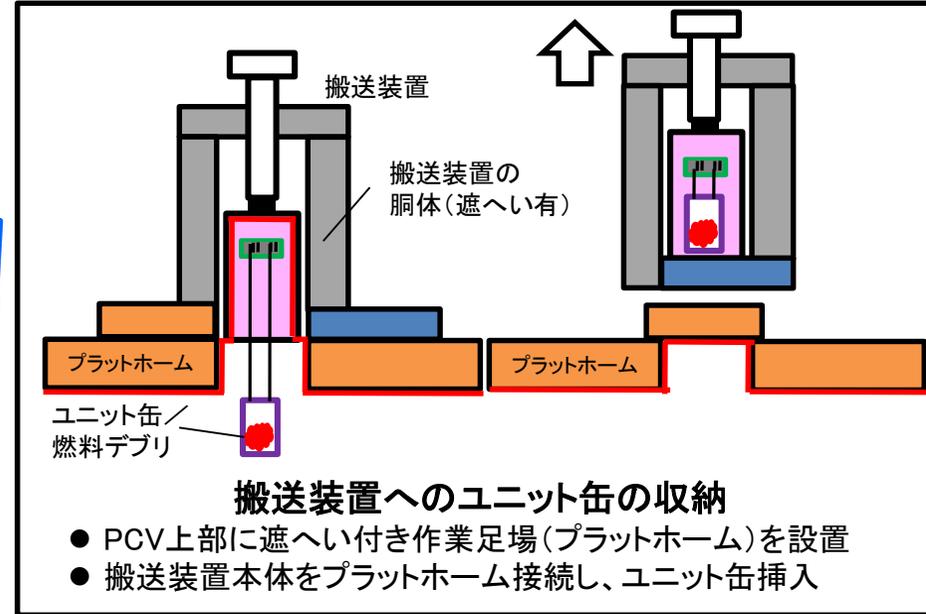
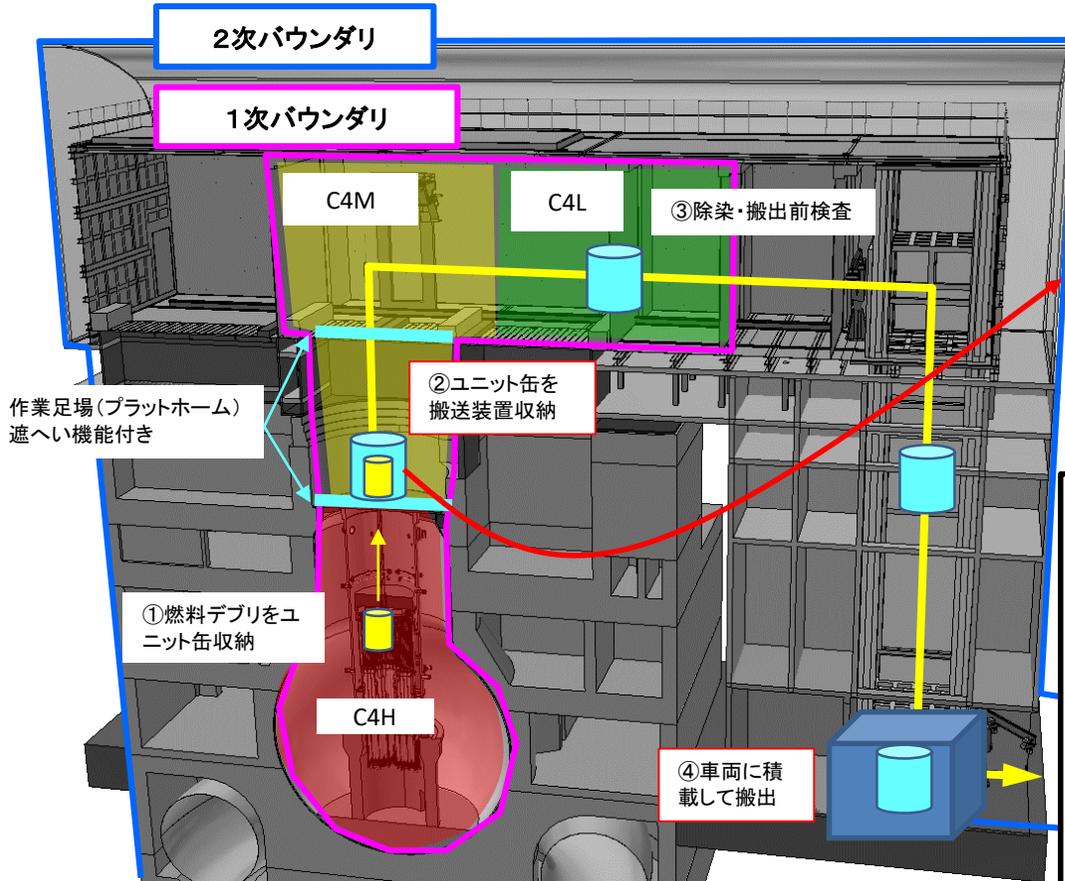
	イメージ図	概要	メリット／デメリット	開発要素
案1		<b>【既存検討案】</b> R/Bに隣接する増設建屋で燃料デブリの乾燥／各種容器収納作業を行う。	<b>【メリット】</b> 水切り状態の燃料デブリを構内搬送することなく乾燥処理できる。 <b>【デメリット】</b> 各号機ごとに増設建屋をそれぞれ設けるため、敷地配置、コンテナへの制約大きい。	管理区域で接続しているため搬送に開発要素はない。
案2		<b>【トンネル案】</b> R/Bと増設建屋の間は、ユニット缶を乾燥処理せずにそのまま輸送するため管理区域(トンネル)を設ける。	<b>【メリット】</b> R/B周辺に増設建屋を設けることなく燃料デブリを搬送できる。 <b>【デメリット】</b> 各号機ごとに搬送用トンネル(放射線管理区域)の設置可否検討が必要。	管理区域で接続しているため搬送に開発要素はない。
案3		<b>【構内搬送案】</b> ★燃料デブリ搬送システム R/Bからは、乾燥処理前のユニット缶を構内搬送する。	<b>【メリット】</b> R/Bへの設備追加量の最小化。 増設建屋の設置位置の自由度大。	乾燥処理しないユニット缶を構内搬送する装置の開発。 <b>ユニット缶状態で1F構内を搬送できる搬送装置とそれを運用する搬送システムを検討。</b>

# 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

## d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

### ■ 改善する設計の前提条件整理(燃料デブリ取り出し工法、レイアウトと組み合わせた設備の概念検討)

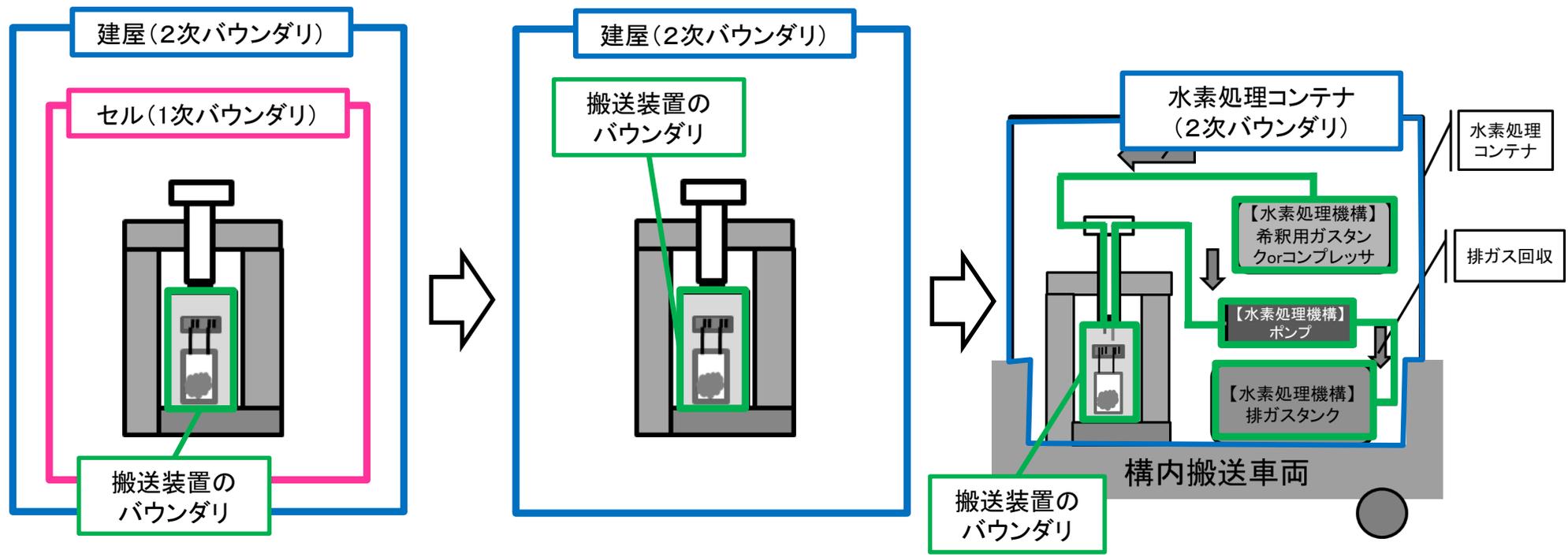
- 建屋やコンテナへの荷重条件を緩和するため、オペフロ設置セルの遮へいを最小化
- ユニット缶を収納缶を使用せずに建屋外に搬出し構内搬送



# 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

## d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

■ 改善する設計の前提条件整理(各ステップにおける、搬送装置と建屋バウンダリの組み合わせ)



【建屋セル(1次バウンダリ)内搬送時】

- 閉じ込めは、以下で実施。
- 搬送装置本体
  - セル(建屋1次バウンダリ)
  - 建屋(2次バウンダリ)

【建屋セル外(2次バウンダリ)】

- 閉じ込めは、以下で実施。
- 搬送装置本体
  - 建屋(2次バウンダリ)

【構内搬送時】

- 閉じ込めは、以下で実施。
- 搬送装置本体
  - 搬送用コンテナ

## 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ 改善する設計の前提条件整理(基本機能要求)

##### ● 作業ニーズ

- ・燃料デブリを収納したユニット缶を装荷し、R/Bから離れた増設建屋まで構内を搬送し、ユニット缶を取り出す。

##### ● 搬送対象物

- ・容量(収納するユニット缶数量): 1基
- ・ユニット缶: 右記タイプ1を基本(拡張としてタイプ2の実現性も検討する)

##### ● 環境条件(設定値)

- ・温度 : 0~40°C
- ・湿度 : 最大100%(結露あり)
- ・環境線量 : 最大3000Gy/h(炉内環境と同一として)

##### ● ユニット缶の収納機能

- ・ユニット缶1基を炉内(炉底部)から吊り上げて内部に収納できること
- ・吊り上げ揚程: 約14m(炉心支持板の高さよりPCVフランジまでを吊り上げと想定)

##### ● 搬送仕様

- ・1日の搬送数量 : 10基(24時間作業)
- ・取り扱い範囲 : 建屋

(R/Bおよび増設建屋)内および発電所構内に限定(構外は取り扱わない)

##### ・作業員のアクセス(作業介在)

C4Lでの1次バウンダリ搬出前検査は作業員が介在

C4Mでのハンドリング作業、蓋の閉止確認、除染作業を遠隔装置で実施できるよう設計する

表. 搬送するユニット缶の仕様(収納缶PJの情報を基に設定)

	タイプ1	タイプ2
外形寸法	Φ206 × h403 mm	Φ386 × h403 mm
UO2重量(最大)、※1	41.5 kg	150 kg
水分含有率	30%	30%
水素発生量、※1	0.5 L/hr	1.7 L/hr
酸素発生量	0.25 L/hr	0.85 L/hr
燃料デブリの大きさ	粒径0.1 mm以上	

※1: 収納缶PJでは2基のユニット缶をまとめて搬送した場合の仕様を策定しているが本PJでは1基として仕様を定めた

## 7.本事業の実施内容【1）②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ 改善する設計の概念検討(燃料デブリを収納したユニット缶の搬送で必要となる安全機能)

安全機能	内容
漏えい防止	搬送装置からの放射性物質の漏えいによる作業員や公衆の被ばくの防止
遮へい	放射線による作業員や公衆の被ばくを防止する
未臨界維持	未臨界の維持
冷却・除熱	燃料デブリの温度上昇による安全阻害要因の防止
安全機能を維持するために必要な機能	搬送装置の取り扱いを考慮し、漏えい防止や未臨界維持など必要な安全機能を維持するために適切な構造強度
	発生する水素の爆発防止
	使用期間中の材料の腐食や劣化などの経年変化に対する、閉じ込め機能などの維持
	ジルカロイなどの粉体金属による火災防止
機能維持のための基本 要求事項(一般的な共通事項)	使用環境条件での機能維持
	必要な信頼性、必要に応じ多重化、多様化
	必要な検査、メンテナンスが実施可能な設備
	必要な監視機能の装備
	必要な運転操作、特に必要な現場操作が実施可能な設備
	ハザード(内部、外部)への適切な対処が可能な設備

## 7.本事業の実施内容【1)②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ 改善する設計の概念検討(安全要求に基づく基本設計条件)

安全原則		機能要求	設計方針
放射性物質の過大な放出防止	放射性物質の閉じ込め	燃料デブリを収納したユニット缶を収納し、取り扱い中における汚染の漏えいを防止する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・搬送装置本体(水素処理機構を含む)による閉じ込め区域(1次バウンダリ)に加え、管理区域外への搬出時には本体・水素処理機構をコンテナ(2次バウンダリ)に収納し、コンテナを取り扱う。</li> <li>・水素処理機構においてタンクに貯蔵された排ガスは、管理区域外では外部に放出せず、R/Bまたは増設建屋の気相処理システムへ引き渡す。</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>・搬送装置本体は、水素発生に伴い異常時は正圧になる可能性があるため、コンテナは負圧管理し、万が一搬送装置本体から汚染が放出されても、コンテナから外部への放出を防ぐ。</li> <li>・コンテナには換気空調設備を設け、万が一汚染が搬送装置本体から放出された場合にも、コンテナ内の気体を浄化する。また、搬送装置本体およびコンテナ内側は遠隔装置による除染ができるように設計する。</li> </ul>
			コンテナの開口扉は2重化し一つが開いても残り一つが閉じているようにし、輸送装置本体の閉じ込めと合わせ仕切りを常に2重化する。
			使用期間中の材料の腐食や劣化などの経年変化を考慮し、シール部の健全性を保てるように交換を可能にする。
			取り扱い中に輸送装置が落下や転倒などの衝撃を受けないように、取り扱い設備には適切な耐震クラスの設定や転倒防止の対策を行う。加速度などは今後検討する。

## 7.本事業の実施内容【1）②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ 改善する設計の概念検討(安全要求に基づく基本設計条件)

安全原則		機能要求	設計方針
放射性物質の過大な放出防止	放射性物質の異常な追加生成の防止	追加核分裂反応の防止	搬送装置本体の幾何学形状により、燃料デブリの未臨界を維持する。取り扱い中に臨界防止機能を喪失する重大な損傷を生じないように、取り扱い中に輸送装置が落下や転倒などの衝撃を受けないように、取り扱い設備には適切な耐震クラスの設定や転倒防止の対策を行う。
		異常な加熱の防止	搬送装置本体の放熱で健全性を維持(シール部の許容温度範囲を維持する)できる構造とする。
		切削による異常な放射性物質の拡散の防止(適用外)	
放射線による過大な被ばくの防止		輸送装置本体外部に作業員が直接アクセスできるように放射線の遮へいを行う。	搬送装置本体外面での放射線量が2 mSv/h以下となるよう遮へい構造を設ける。 搬送装置本体外部で作業が行えるよう、汚染を閉じ込める
作業員の過大な被ばく・内部被ばくの防止	作業員の被ばく低減のための設計	遮へい、汚染・線量区分の適切な設定と被ばくを低減する遠隔保守および燃料デブリ構内搬送動線とする。	
	作業員の被ばく低減のための運転管理	被ばく低減のための運転方法、保守計画および作業管理とする。	
滞留水素による火災・爆発の防止	水素爆発下限を維持するための水素濃度あるいは酸素濃度の管理	水素が溜まらない構造とする。 水素処理機構で水素濃度が設計値未満を維持できるように希釈する。希釈による排ガスは搬送装置本体に接続したタンクに放出し、搬送中は一次貯蔵する。	

## 7.本事業の実施内容【1)②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ 改善する設計の概念検討(取り扱い要求に基づく基本設計条件)

安全原則	機能要求	設計方針
遠隔操作性	遠隔作業によって搬送装置本体を作業足場上に設置できること	遠隔操作によって、搬送装置の位置決め、設置、プラットフォームへの固定ができること
		遠隔操作によって、プラットフォームと搬送装置の開口部蓋の開閉ができること
		遠隔操作によって、搬送装置の除染作業ができること
放射性物質の閉じ込め	万が一の場合に、作業員がプラットフォーム上(搬送装置本体外側)にアクセスできること	プラットフォームと搬送装置本体の界面からの放射性物質の漏えいを防止すること。また、耐震クラスを設定し、地震時にも放射性物質の漏えいを防止することができるようにする。
	搬送装置本体搬出のため、外表面は除染できるようにすること	搬送装置本体を1次バウンダリから搬出するため、装置本体の外表面を除染できるような構造とする
メンテナンス	遠隔メンテナンス	PCVプラットフォーム部分の装置について、遠隔でのメンテナンス、消耗品交換が可能なこと
		作業員が常時アクセス可能な部分の機器は、人で作業でのメンテナンス、消耗品交換が可能なこと

## 7.本事業の実施内容【1）②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

- 改善する設計の概念検討(設計仕様と課題の設定)  
設計方針と法規制対応方針に基づく設計仕様、課題の抽出

設計仕様の具体化、精緻化については、今後技術課題への対応の具体化を反映して策定してゆく。

搬送装置設計仕様・		特に検討・試験などで確認が必要な課題	本PJでの検討
閉じ込め	<ul style="list-style-type: none"> <li>搬送装置からの漏えい、搬送装置とプラットホーム接続部からの漏えいが制限値以下</li> <li>取り扱い中の想定事象に対し、搬送装置が破損せずに閉じ込めを維持</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ユニット缶の収納／払い出し時に開閉する扉部の「閉じ込め」および「汚染防止」を両立させて構内搬送できる構造の検討が必要。</li> <li>扉部の開閉を含む運用は遠隔操作で行える構造が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業フローの策定とリスク評価。リスクが残る事象に対してシミュレーションや試験等で閉じ込めを維持する構造強度を有することを確認する</li> <li>装置概念を策定し、シール試験等による実現性検討</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンテナ外表面:0.4 Bq/cm<sup>2</sup>以下 ※1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>特になし(設計段階で想定する汚染箇所が除染しやすい構造とする)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>簡易に除染できる構造とする</li> </ul>
臨界防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>取り扱い中の想定事象に対し、搬送装置が破損せずにユニット缶の形状を維持できること</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>特になし(なお、ユニット缶の基本設計完了後に取り扱い条件の検討が必要)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業フローの策定とリスク評価。リスクが残る事象に対してシミュレーションや試験等で形状を維持する構造強度とする</li> </ul>
除熱	<ul style="list-style-type: none"> <li>搬送装置の部材が、各機能を損なわない温度を維持する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造設計の実現性を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>シミュレーション等で確認する</li> </ul>
遮へい	<ul style="list-style-type: none"> <li>搬送装置表面:2 mSv/h</li> <li>表面から1mの距離:0.1 mSv/h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造設計の実現性を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>シミュレーション等で確認する</li> </ul>
水素爆発防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素爆発下限界濃度(4vol%)を十分に下回る状態を維持する。維持に当たっては1F構内搬送中に高圧ガスを用いない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素発生に伴う搬送装置本体内部の圧力上昇防止策 →高耐圧仕様にするると搬送装置が大型化(+重量増)。圧力上昇を避けつつ水素濃度を低下させるシステムの検討</li> <li>搬送装置内部の水素濃度は遠隔監視し、通常作業では遠隔操作で水素処理できる構造が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>空気や窒素などの不活性ガスの注入による水素処理システムの成立性を机上検討や試験等で確認する</li> </ul>

# 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

## d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

### ■ 技術課題への対応(扉部の閉じ込め機構)

- 扉部の構造に対して、遮へい・閉じ込め機能の分離／一体。また扉部開放動作機構で、3種類の扉部構造を立案
- いずれも長所／短所があり、評価項目の優先順位付けやシール部分の試験など検討を継続し、評価する。

評価項目  【凡例】 ◎：他案に比べて特に優れている ○：◎に劣るが△よりは優れている △：他案に比べて課題が多い		「遮へい／閉じ込め 分離」コンセプト 		「遮へい／閉じ込め 一体」コンセプト 	
		【リニア方式】 密封蓋をレールの直動移動で着脱する	【スイング方式】 密封蓋をPCV内に設置したアームで弧のように移動させ、着脱する	【プラグ方式】 遮へい厚を持たせた密封蓋(プラグ)をPCV内に設置したアームで着脱する	
取り扱いき性	プラットホーム上占有面積(フットプリント)	○	○	◎ 遮へい機能と閉じ込め機能をプラグに包含することで他案に比べてコンパクト化が期待できる	
	扉部重量	○ 密閉蓋のクランプ機構が必要となり、スイング方式と比べて重量増	◎	△ 密閉蓋に遮へい厚を持たせることから重くなる	
	プラットホーム上設置機器全体重量	△	△	○ 他案に比べて機器構成部材が少なく、比較的軽量	
	扉閉動作速度	評価予定	評価予定	評価予定	
原子力安全	遮へい機能	○	△ プラットホームの遮へい部との取り合い見当が必要	△ アームがPCV上にせり上がり、線源になるため、線量低減策が追加が必要	
	閉じ込め機能	評価予定	評価予定	評価予定	
	扉部落下リスク	○	○	△ プラグをアームで扱う際の固定機構もしくは、落下リスク低減の検討が必要	

# 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

## d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

### ■ 技術課題への対応（扉部の閉じ込め機構）

- 各方式の構造イメージを示す

※各構造は今後の設計進捗に伴い変更する可能性がある

「遮へい／閉じ込め分離」コンセプト	【リニア方式】	<p>ユニット缶 収納部</p> <p>密閉蓋 (搬送装置本体)</p> <p>密閉蓋 (プラットフォーム)</p> <p>プラットフォーム</p> <p>ガイドレール (鉛直移動)</p> <p>ガイドレール (水平移動)</p>	【スイング方式】	<p>ユニット缶 収納部</p> <p>PCVプラットフォーム (セル側)</p> <p>PCVプラットフォーム (PCV側)</p> <p>アーム</p> <p>ガイドレール</p>
	【プラグ方式】	<p>搬送装置本体</p> <p>ユニット缶</p> <p>プラグ (搬送装置本体)</p> <p>プラグ (プラットフォーム)</p> <p>プラグ 取り扱いアーム</p>		

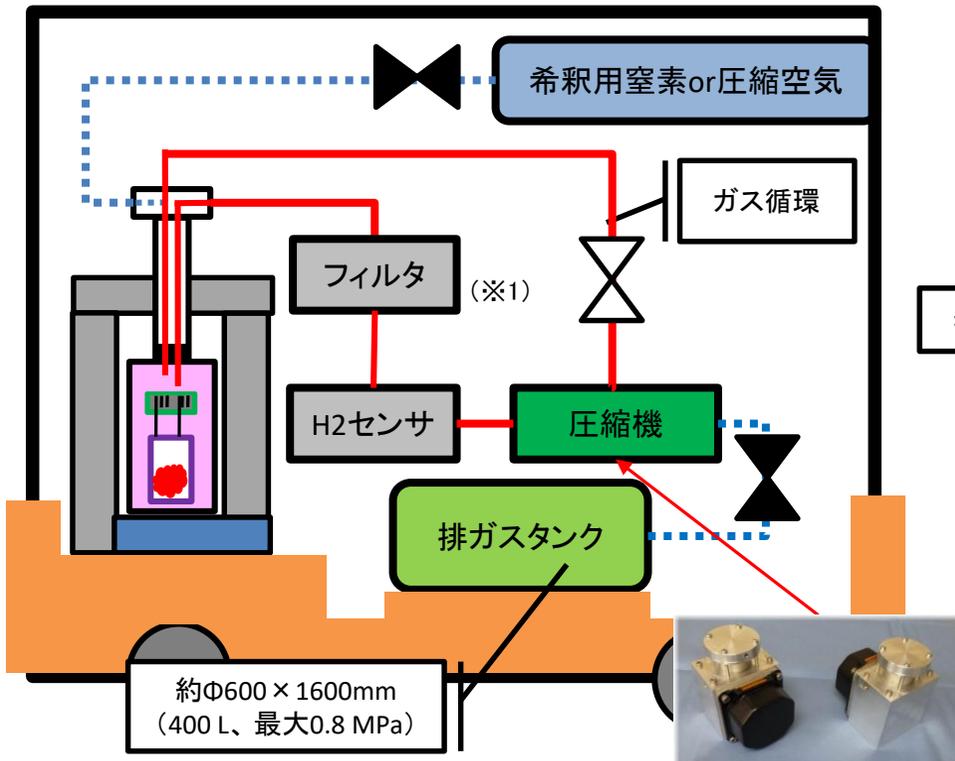
## 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ 技術課題への対応（水素爆発の防止）

- 水素濃度を、爆発下限(4Vol%)以下に維持、設定値(2.5Vol%)以下に管理
- 搬送装置本体の水素濃度を常時監視。基準値を超えた場合、希釈用ガスを注入。浄化後、排ガスは圧縮機で廃ガスタンクに一時的に貯留。排ガスタンクは最大で約7日間連続貯留とする。タンクの小型化(希釈時に随時追加)も検討。
- 貯留した排ガスは、搬送先またはR/Bの換気空調系統に引き渡す。

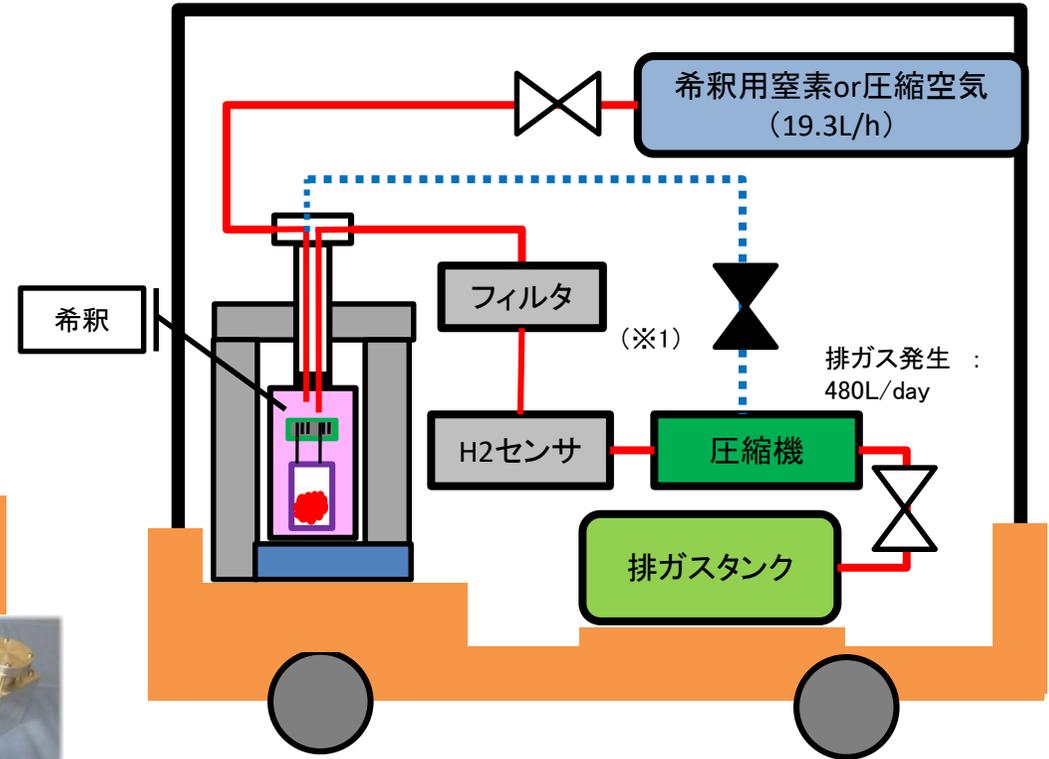
#### ① 通常監視時



※1: フィルタは高線量化を考慮して搬送装置本体内部への設置も検討

ピストン式 真空・加圧気密コンプレッサー

#### ② 水素発生時(希釈時)



# 7.本事業の実施内容【1】②干渉物撤去以外の技術の開発】

## d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

### ■ 技術課題への対応（取扱作業ステップ、設備配置と作業工程の評価）

- 目標：1日当たり10個のユニット缶を搬送
- クレーンや台車などを使用したセル間の搬送、セル間仕切りの開閉動作、搬出前の検査など、一連の取り扱い作業シーケンスを抽出。各作業に作業時間を充当させ、全体の取り扱い時間を評価。
- 仕切り扉の同時開放の禁止や複数の搬送設備の使用にあたっての待ち時間の設定などを考慮して、1日の全体取り扱い計画を立案。
- 約2.5時間間隔で搬出が可能。1日10台とすると目標時間は2.4時間以下であり2系統の搬出ルートで成立する。なお、1台の動きに着目するとR/B内取扱いが11.5時間要するため、全体としては10台の搬送装置が必要となる。

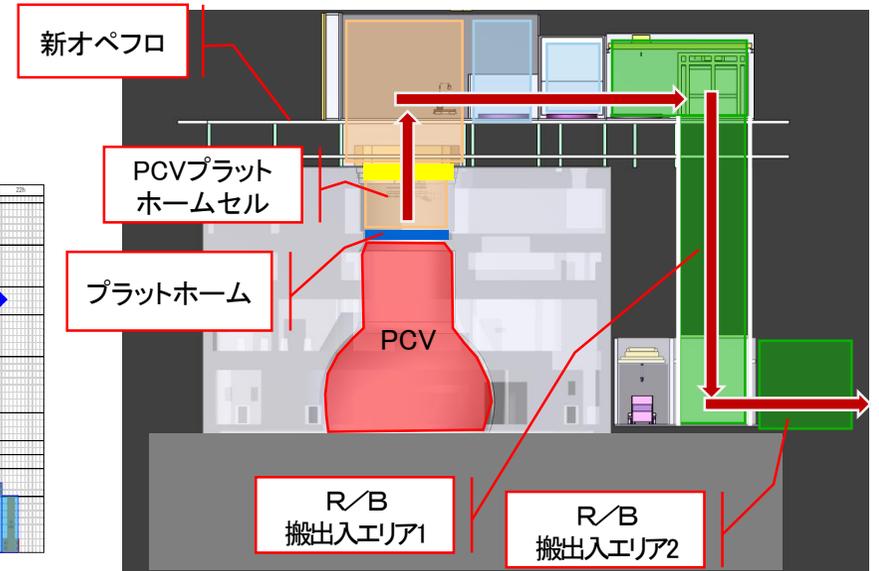
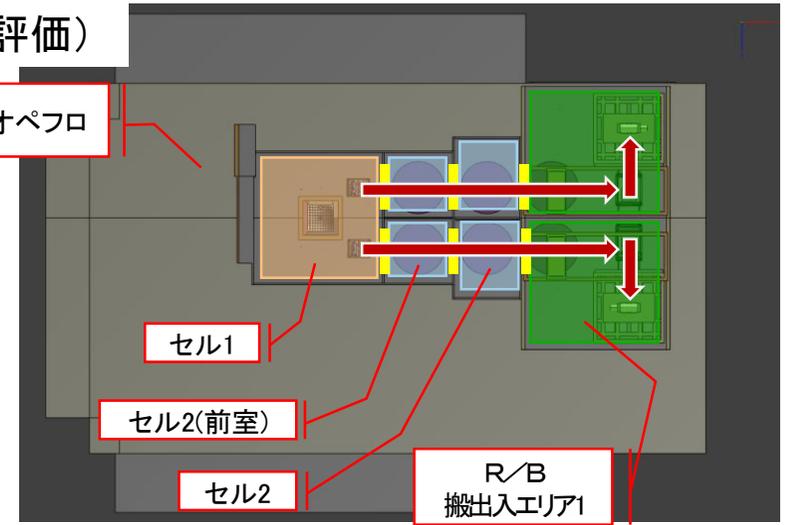
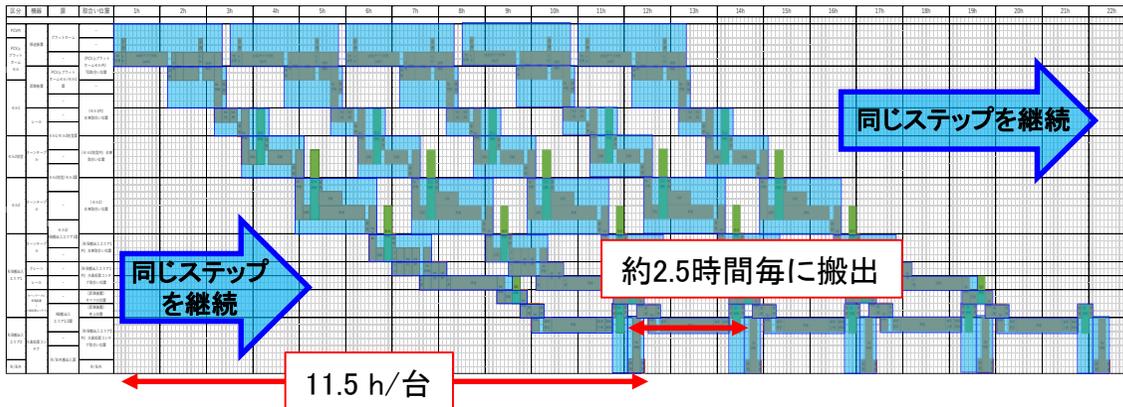


表. 1ラインに注目した燃料デブリ搬送装置の搬出タイミングチャート



## 7.本事業の実施内容【1）②干渉物撤去以外の技術の開発】

### d. ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法

#### ■ まとめ

#### ● 2019年度の成果

- 搬送装置による燃料デブリ構内搬送案に基づく建屋セル配置を策定
- ユニット缶／燃料デブリの仮定諸元に基づく搬送要求基本機能を策定
- 原子力安全／関連法規に基づく、安全要求基本機能を策定
- 上記、搬送要求および安全要求の基本機能に基づく、設計方針の策定および技術課題を抽出
- 重要技術課題である扉部(ダブルドア)と水素処理機構の概念を設計
- 搬送装置を用いた燃料デブリ搬送スループットについて評価および成立を確認

#### ● 2020年度の実施予定内容

- 解析およびシール部単体の試験等による、扉部(ダブルドア)のコンセプト絞り込み、成立性評価
- 要素試験等による水素処理機構のコンセプト成立性評価(要素構成を試作)
- 安全解析を見越した搬送装置本体の強度強化の予備解析
- 解析および試験等による、ユニット缶回収用のウィンチの構造成立性評価
- ユニット缶把持機構の構造設計および成立性評価、取り扱い動作手順検討と課題・対策案の作成。特にトラブル事象の検討。
- 燃料デブリ搬送スループットのさらなる改善に向けたR/B内の設備配置検討

## 7. 本事業の実施内容

### 2) 燃料デブリ取り扱い技術の開発

#### (i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発

PCV内にはRPV内の溶融損傷燃料に加えて、ペDESTAL底部等の構造物上の様々な場所に堆積する燃料デブリが多様な状態(ルース燃料デブリ、汚泥状、微細(粉)燃料デブリ、破碎/切削等の加工による燃料デブリ等)で存在する。燃料デブリ取り出しを効率化するために、燃料デブリの状態に応じた回収方法、容器への収納方法及びシステムを開発し、必要に応じ要素試験を実施し成立性を確認する。

要素試験では、回収効率を評価するデータ等を取得し、燃料デブリの場所、状態を考慮した燃料デブリ取り出し効率の評価に役立てる。また、取り出し効率を高める収納方法、システムについて、安全確保と現場適用性を考慮した概念検討を行う。

主な開発検討項目として以下を含むものとし、必要に応じて要素試験を実施することにより課題を抽出し整理する。

#### a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発。

- ・ポンプストレナの最適形状を検討中。
- ・圧力計/流量計を用いないセパレータの満杯検知方法を検討中。

#### b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発。

- ・燃料デブリの状態、性状を推定し、取り出し方法を立案中。

## a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発

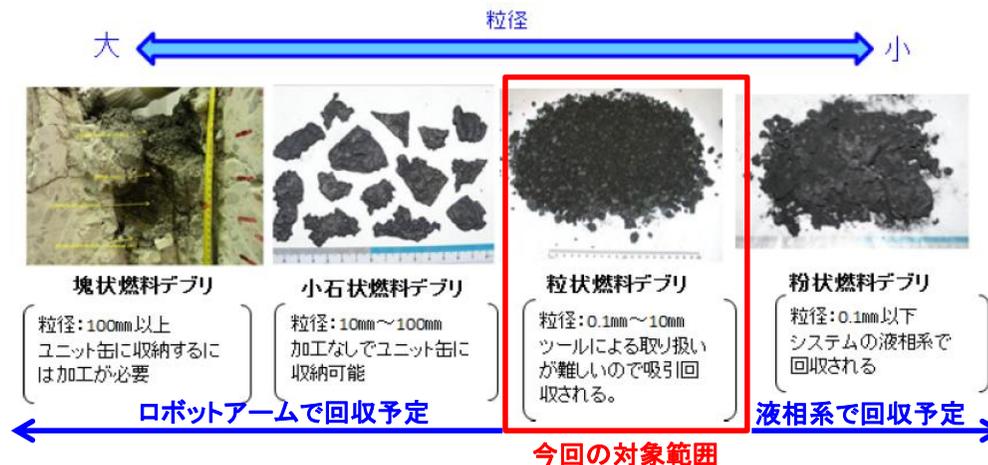
- 粒状燃料デブリ吸引回収システムの開発の目的
  - ロボットアームや液相系で回収困難な粒状燃料デブリを回収することにより燃料デブリの取りこぼしを防ぐことを目的として、粒状燃料デブリ吸引回収システムを開発する。

- 解決すべき課題
  - 1F環境を想定した、仕様、装備、保守、運用性等の具体化。

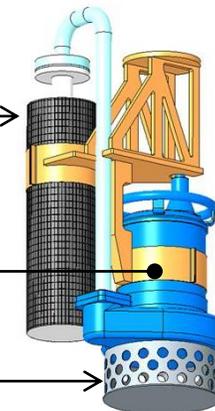
- 開発の進め方(前期補助事業にて抽出した主要課題より)
  - 本システムに適したポンプストレーナ形状の検討
  - ユニット缶(セパレータ)の満杯検知方法の検討
  - ユニット缶(セパレータ)の交換方法の検討
  - 気中からの吸引に適したポンプ型式の検討  
(水中からの吸引ポンプ型式は検討済)

上記の結果を踏まえ、要素試験を実施し、システムの成立性を検討する。

- 得られる成果
  - 1F環境に適した粒状燃料デブリ吸引回収システムの具体化した仕様。



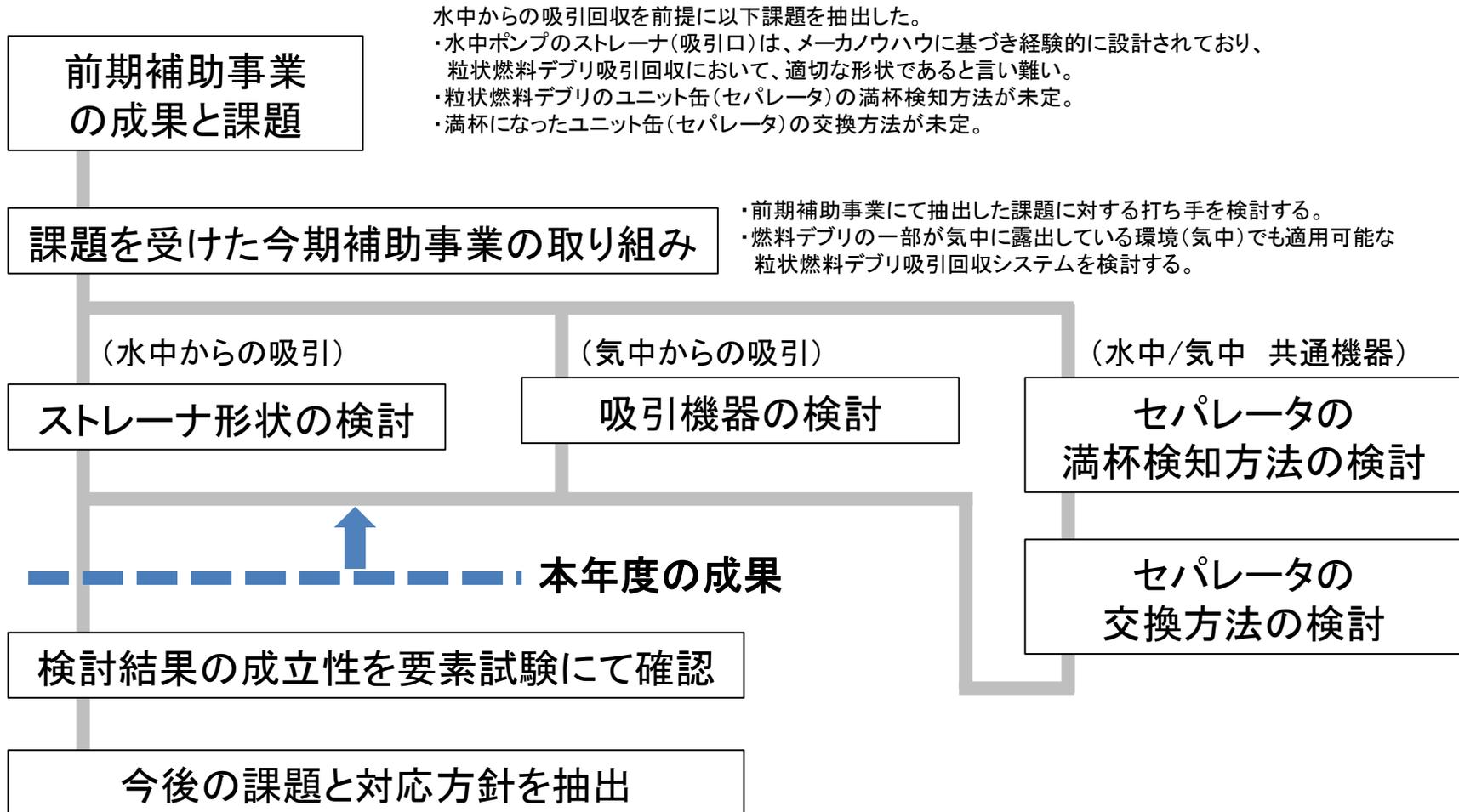
- <セパレータ>
  - ・遠隔操作による交換方法の検討
  - ・セパレータ目開きの検討
  - ・セパレータ目詰まり、満杯検知方法の検討
- <ポンプ>
  - ・ポンプ型式の選定
- <ポンプストレーナ>
  - ・粒状燃料デブリの吸引に適した形状の検討



粒状燃料デブリ吸引回収システム 検討課題

## a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発

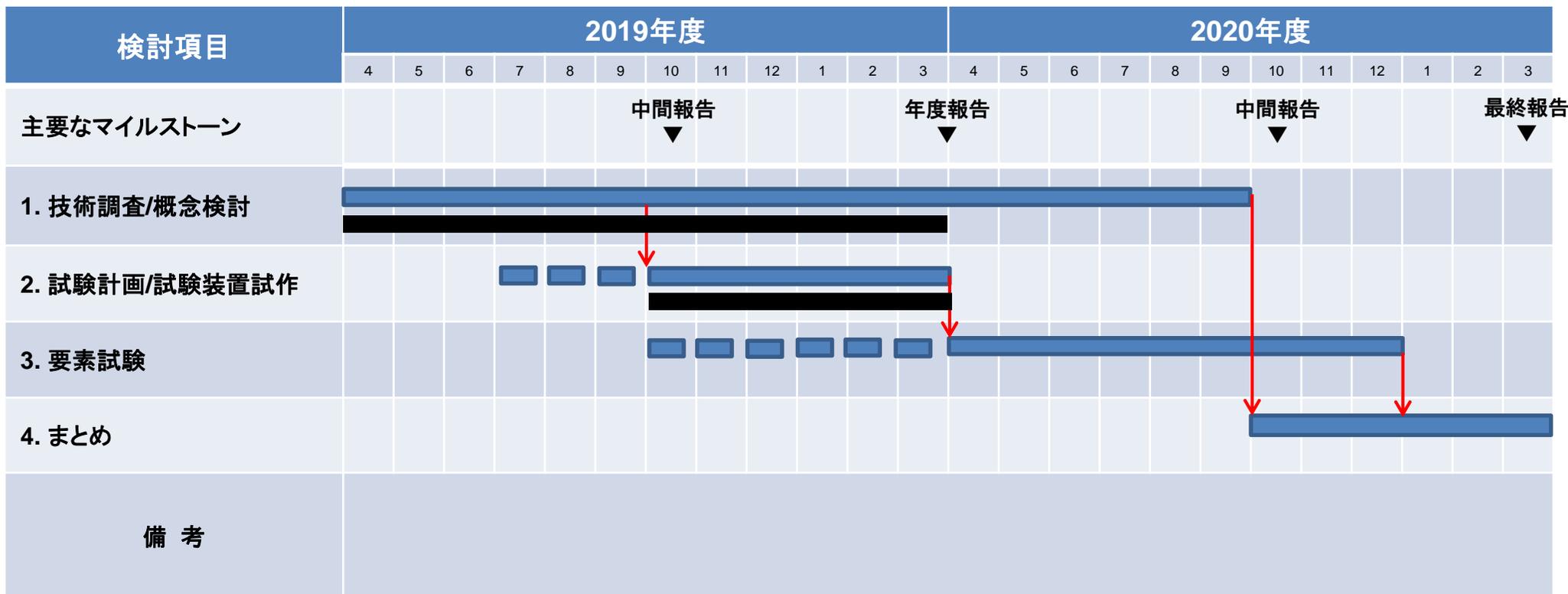
### ● 検討フロー



# 7. 本事業の実施内容【2)(i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発】

## a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発

### ■ 開発工程



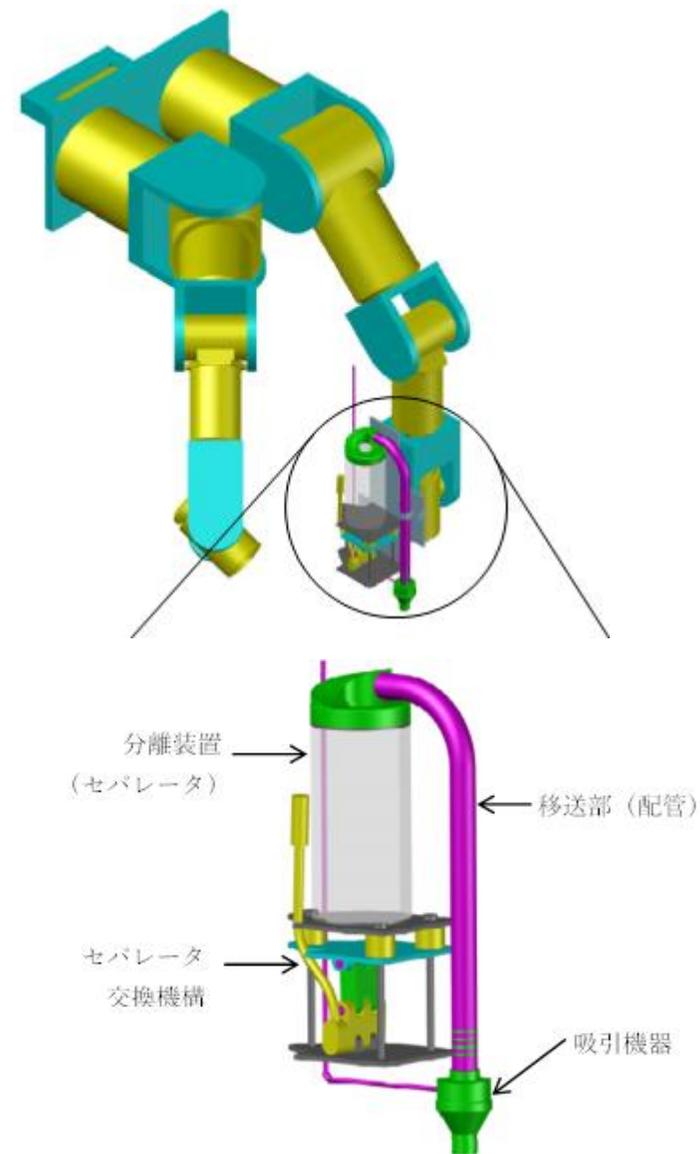
### a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発

#### ● 検討の前提条件

- ロボットアームが、粒状燃料デブリにアクセスできること。
- 水中からの吸引の場合、水中ポンプの運転に必要な水位（概ね20cm程度）があること。
- 粒状燃料デブリで満杯になった捕集機器（セパレータ）は、ロボットアームをセル内に収納した後、セル内のマニピュレータにて取外す。
- 粒状燃料デブリ吸引回収システムの保守も、セル内のマニピュレータにて行う。

#### ● 開発目標

- 炉底部に存在すると考えられる粒状燃料デブリ（0.1mm～10mm）を効率的に回収する吸引回収システムの開発



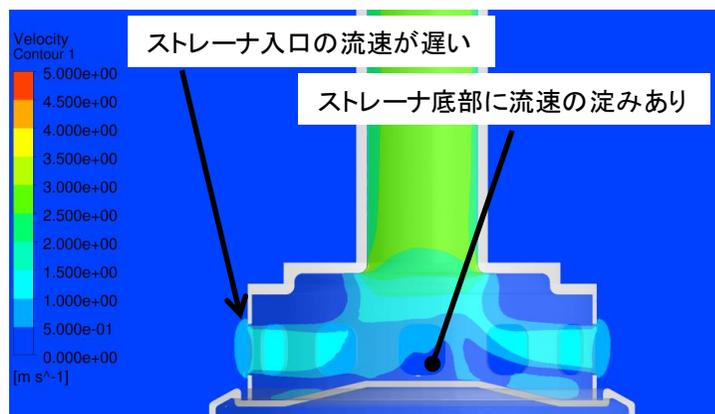
## a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発

### a) 粒状燃料デブリ吸引回収システムに適したポンプストレナ形状の検討

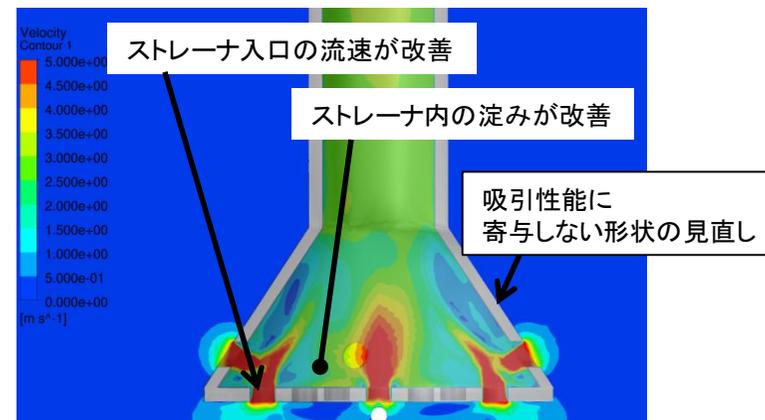
- 粒状燃料デブリ吸引回収を安定的に行うため、以下を満足するストレナ形状を検討した。
  - ・ ポンプ詰まり防止のため、所定以上の大きさの固形物は吸引しない
  - ・ 終末沈降速度×1.5倍の2.7m/s以上の流速で吸引する
  - ・ 吸引された粒子がストレナの中で滞留しない
- 検討の結果、上記を満足するストレナ形状とすることが出来た(右下図参照)。
- 参考までに、メーカー標準のストレナの流動解析を行った結果を左下図に示す。



水中ポンプ ストレナ図



メーカー標準ストレナ(吸引口)流動解析結果



改良型ストレナ(吸引口)流動解析結果

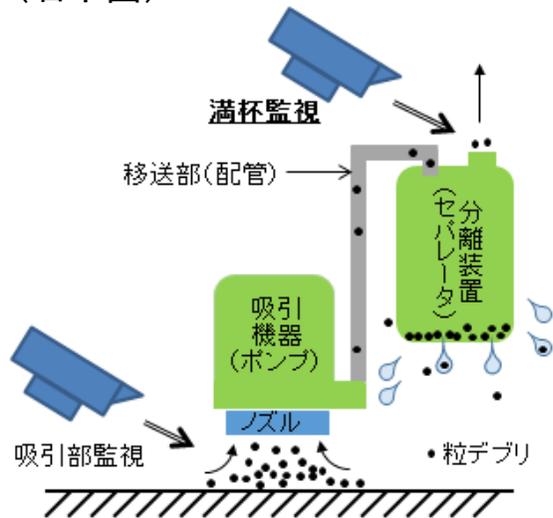
## a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発

### b) ユニット缶(セパレータ)の満杯検知方法の検討

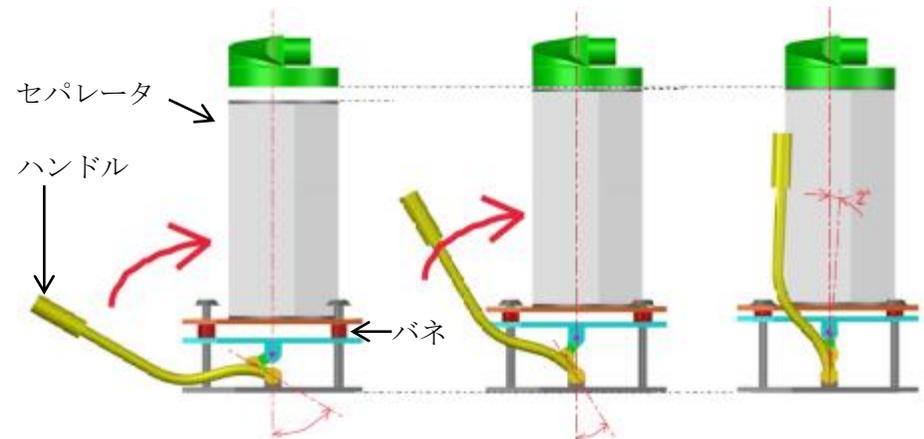
- ポンプの吐出圧や流量の変化等を測定し、満杯を検知する方法は、直接的でなく間接的に満杯を検知する方法なので、誤検知や正確性に課題が残る。
- そこで、監視用にロボットアームに搭載されるカメラで、直接的にセパレータの満杯検知を行う方法を検討した。
- セパレータ上部に孔を開け、セパレータが燃料デブリで満杯になった際、セパレータ上部孔より燃料デブリが噴出すると考えられるので、これをカメラで監視する方法を検討した(左下図)。

### c) ユニット缶(セパレータ)の交換方法の検討

- 遠隔操作で容易に交換できる構造として、トグル機構+バネによるワンタッチ取付/取外し機構を検討した。(右下図)



セパレータ満杯検知方法 イメージ図



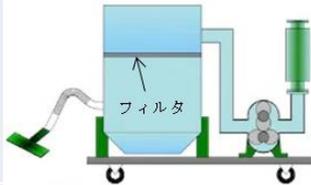
セパレータ交換機構案

# 7. 本事業の実施内容【2)(i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発】

## a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発

### d) 気中からの吸引に適したポンプ型式の検討

- 気中からの吸引に適したポンプ型式抽出のため、スクリーニングを実施した。
- スクリーニング結果より、圧縮エアを駆動源とするエジェクターポンプを抽出した。

型 式		エジェクターポンプ (駆動源:圧縮エア)	エジェクターポンプ (駆動源:高圧水)	真空吸引式
原理/特徴		特殊ポンプに分類される。 駆動流体入口、輸送流体入口、吐出口と3つのポートを有し、駆動流体入口より駆動用の流体を吹き込み、負圧を発生させ吸引する。可動部ない為、信頼性が高い。		ピストンタイプ、ルーツタイプ等のポンプにより容器内を負圧とし、その負圧を利用し流体を吸引する。エジェクターポンプに比べ、メンテナンス部品が多い。
略図				
動力		圧縮エア (インリーク防止用の窒素(100m³/h)を駆動源と想定)	高圧水 (液相系の循環水(10m³/h)を駆動源と想定)	電気 (ロボットアームを介し、ケーブルで供給)
固形物 移送性 (机上検討)	気中	比重11、粒子サイズ10mm程度と推定	比重11、粒子サイズ0.1mm程度と推定	比重11、粒子サイズ10mm程度と推定
	水中	不明	比重11、粒子サイズ5mm程度と推定	不明
耐放性		耐放性あり(金属製)		耐放性の劣る部品が含まれる
水切り		水を吸引・移送しても、後段のセパレータで水切り可能		水の排出機構がないため、水切り方法を別途検討する必要あり
評価		<ul style="list-style-type: none"> <li>PCV内の気相系への影響について考慮する必要があるが、影響を与えない範囲であれば適用可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>カタログ情報より、明らかに気中からの吸引性能(流速)が低く、目的の粒子を吸引することが出来ないことから除外した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>負圧維持、水切り方法、防水、メンテナンス方法について検討する必要あり、開発課題が多いことから除外した。</li> </ul>

## 7. 本事業の実施内容【2)(i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発】

No.151

### a. 粒状燃料デブリの吸引回収システムの開発

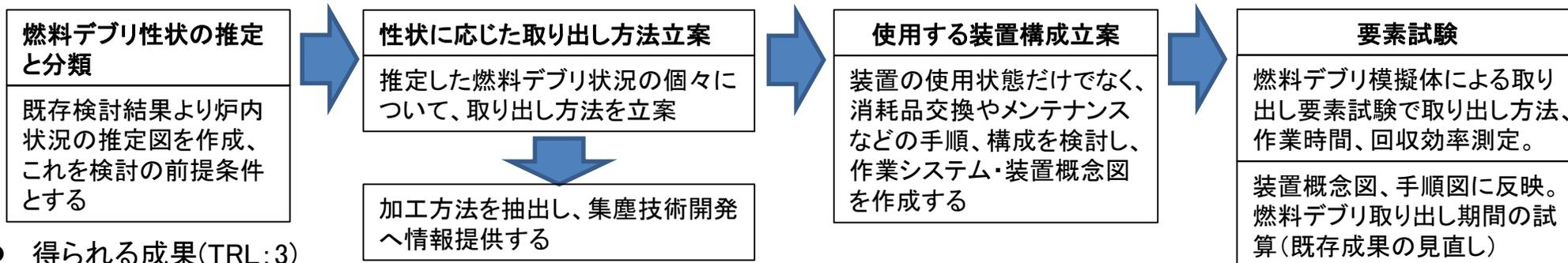
#### ● 本年度の概念検討結果

- 水中／気中からの吸引に対する検討状況は以下の通り。
- 次年度は「気中からの吸引」のポンプ吸引口検討後、要素試験を実施予定。

項目	水中からの吸引	気中からの吸引	備考
吸引機器選定	水中ポンプを選定	エジェクターポンプを選定 (駆動源:圧縮エア)	
ポンプ吸引口 検討	CFD解析により適切な ストレーナ形状を評価	未 (水中からの吸引で適用した方法 で来年度以降に検討予定)	
セパレータ 満杯検知方法	監視カメラによる 満杯検知方法を考案	同左	・水中/気中共通の機器 ・0.1mm以上捕集可能な形状を 検討予定
セパレータ 交換方法	トグル機構+バネによる ワンタッチ取付/取外し 機構を検討	同左	・水中/気中共通の機器
評価	次年度に実施	次年度に実施	

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

- 開発の目的
  - 燃料デブリ取り出しの効率化のため、燃料デブリの状態に応じた回収方法、容器への収納方法及びシステムを開発し、必要に応じ要素試験を実施し成立性を確認する。
- 解決すべき課題
  - 想定した様々な燃料デブリの回収手順、使用装置具体化
  - 立案した作業手順、装置の成立性確認
  - 作業時間評価の精度向上、短縮化
- 開発の進め方
  - 溶融固化、粒子状、ペレット、損傷燃料など、燃料デブリの様々な形態を前提条件として整理し、回収工法(手順・必要な装置)を検討(粒径や切り株燃料など、状態に応じた回収方法検討)
  - 作業時間短縮化、稼働中保守、故障時対応等を考慮
  - 切断方法の調査と採用検討(加工能力やダスト評価など)、必要に応じて要素試験
  - 加工～掴み～ユニット缶収納・搬出の工法成立性検討
  - 作業時のデブリ落下などの評価と必要な機能検討
  - 別PJ「燃料デブリ・炉内構造物の取り出しに向けた技術開発(燃料デブリのダスト集塵システムの技術開発)」と連携



- 得られる成果(TRL:3)
  - 燃料デブリの状態(溶融固化、粒子状、ペレット、損傷燃料など)に応じた回収工法(手順、必要な装置)の概念立案
  - 要素試験による、立案した工法の成立性評価
  - 作業時間、想定されるデブリ取り出し期間の試算

# 7. 本事業の実施内容【2)(i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発】

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

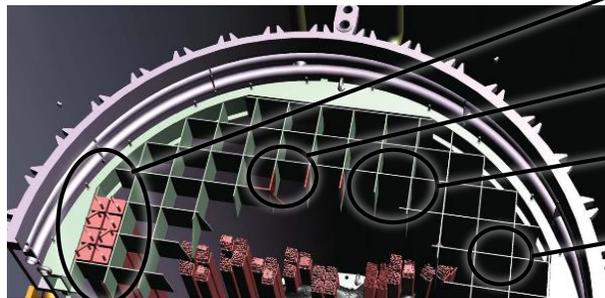
### ■ 開発工程



# 7. 本事業の実施内容 【 2)( i ) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発 】

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

■ 検討の前提条件 (RPV内燃料デブリの状態推定: 上部格子板・炉心近傍)  
 既存の推定結果をまとめ、取り出し検討のために推定図を作成



損傷のない燃料集合体
損傷のない制御棒
中央付近が溶融して開口
中央付近でクリープ変形 溶融燃料の付着無し
損傷無し 溶融燃料の付着なし

燃料棒や炉心支持板上に粉・粒状燃料デブリ(アブレイシブ含む)や燃料ペレットが堆積	焼けたペレット 粒状の溶融固化燃料 アブレイシブ
外周部から中央部に倒れこんで、加工・回収装置に衝突する可能性がある燃料集合体が存在	損傷なし
	おおむね直立
	傾き、隣に接触
	横倒し
燃料支持金具が炉心支持板上に残存	内部に燃料デブリ付着
	炉心支持板と固着
炉心支持板上で周囲の構造物が溶融して固化	
炉心支持板とシュラウド胴の間に入り込んだ溶融燃料デブリ	

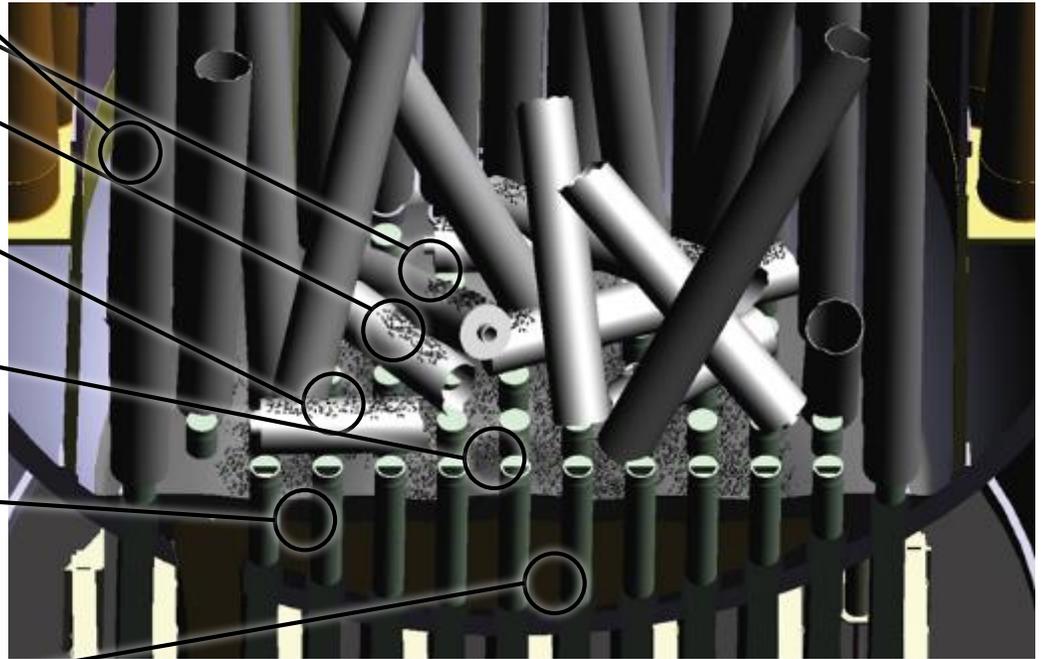


「総合的な炉内状況把握の高度化」(平成29年度成果報告; 2018年6月) デブリ分布・RPV・PCV状態の推定図  
 「福島第一原子力発電所の廃炉のための技術弾略プラン2018」1~3号機の燃料デブリ分布の推定 などに基づき作成

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

### ■ 検討の前提条件 (RPV内燃料デブリの状態推定: 下部プレナム、炉底部)

正立: 損傷なし	
折り重なって倒壊	溶融燃料デブリの付着は僅か
	多くの溶融燃料デブリが付着
バラバラになったペレット/被覆管、 構造物(ハンドル/燃料支持金具)	融着なし
	融着あり
粒状に冷え固まった溶融物(金属リッチ)	融着なし
	融着あり
クラスト状燃料デブリ	独立して存在
	他の構造物(CRD/下鏡)と融着
溶融金属: プール状	金属リッチ
	セラミックリッチ
溶融金属ボール状	金属リッチ
	セラミックリッチ



「総合的な炉内状況把握の高度化」(平成29年度成果報告; 2018年6月) デブリ分布・RPV・PCV状態の推定図  
 「福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2018」1~3号機の燃料デブリ分布の推定 などに基づき作成

# 7. 本事業の実施内容【2)(i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発】

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

### ■検討の前提条件(RPV内燃料デブリの状態を種類別に分類)

燃料デブリの分類			質量 (t)	組成	気孔率	硬さ	融点
上部格子板周辺	損傷の無い燃料集合体および炉内構造物	損傷のない燃料集合体	51				
		損傷のない制御棒					
	損傷のない上部格子板						
	損傷した上部格子板						
炉心支持板上部の燃料デブリ (切り株燃料)	形状を保持した燃料棒が残存 (燃料棒であることが判断できる)	損傷規模が小さく直立する切り株燃	17	UO <sub>2</sub> ZrO <sub>2</sub> (U,Zr)O <sub>2</sub> Zr(O)	~10%	燃料6GPa 被覆管 1~3GPa	燃料2850°C 被覆管 1850°C
		大きく損傷した切り株燃料					
		損傷し周囲の構造物に支えられた切り株燃料					
		横倒しになった燃料集合体					
		損傷のない燃料支持金具					
炉心支持板、燃料支持金具周辺	燃料支持金具が炉心支持板上に残存	損傷のない炉心支持板	17				
		損傷して周囲と溶融固化した燃料支持金具					
		損傷して周囲と溶融固化した炉心支持板					
		固着せず堆積した塊状燃料デブリ					
	堆積している燃料デブリ	固着せず堆積した小石状燃料デブリ	17	(U,Zr)O <sub>2</sub> (Zr,U)O <sub>2</sub>	~88%	6~ 10GP	2500~ 2700°C
		固着せず堆積した粉・粒状燃料デブリ					
		炉心支持板上で固着した燃料デブリ					
		シュラウドと炉心支持板の間で溶融固化した塊状燃料デブリ					
CRGT周辺 (炉心支持板から炉底部までの間)	CRGT・制御棒駆動機構起立または損傷し倒壊して残存	損傷なく直立して残存するCRGT	15				
		倒壊し損傷の少ないCRGT					
		倒壊して燃料が付着したCRGT					
炉底部	炉底部で固化した燃料デブリの塊 CRDハウジング	炉内構造物と溶融固化した燃料デブリ	85	(U,Zr)O <sub>2</sub> (Zr,U)O <sub>2</sub> ZrO Fe	~88%	6~17GPa	1075~ 2700°C
		損傷なく残存するCRDハウジング					
	炉底部の堆積物	固着せず堆積した塊状燃料デブリ	35	(U,Zr)O <sub>2</sub> (Zr,U)O <sub>2</sub>	~30%	6~10GPa	2500~ 2700°C
		固着せず堆積した小石状燃料デブリ					
		固着せず堆積した粉・粒状燃料デブリ					

### b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

#### ■RPV内燃料デブリの種別に応じた回収方法の立案

- 回収方法を立案するにあたっての方針
  - 200mm以下の大きさの燃料デブリは、加工無しで回収する
    - ・ 10mm以上は拾い上げ(バケット、ジャミング吸着パッドなど)
    - ・ 10mm以下は吸引など
  - 溶融固化した塊
    - ・ 単純動作で加工速度の速いチゼル(スパイキーハンマー)や脆い部分はバケットで崩すことを優先するが、アクセス性や対象物の物性で崩せない場面を想定し、下記代替プランを準備
      - ⇒ディスクソー(粉じんの少ない、動作が単純)
      - ⇒コアボーリング⇒炉内が安定しない(崩れる)可能性あり超音波の併用も考慮⇒セリ矢で開口部の拡幅
      - ⇒レーザー(およびガウジング)
- 燃料集合体、燃料棒
  - ・ 損傷が無くそのまま取り外せるものは、長尺のモバイルセルに引き込み
  - ・ 損傷した燃料は、油圧カッターやバケットで切断(むしり取りながら)切り取りを優先するが、材料が硬いなどで切断できない場面を予想し、下記代替プランを準備
    - ⇒ディスクソーで一部ずつ切り取り
- 構造物
  - ・ 炉内構造物は、溶融固化部を超音波チゼルなどでそぎ落とし切断
    - ⇒塊の燃料支持金具や炉心支持板はディスクソー
    - ⇒厚肉のシュラウドやCRGTなどはレーザー、AWJ
    - ⇒薄肉の上部格子板は油圧カッター

# 7. 本事業の実施内容【2)(i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発】

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

### ■RPV内燃料デブリの種別に応じた回収方法の立案

対象	コアボーリング 超音波コアドリル	ディスクソー		油圧カッター	バケット	チゼル ハンマー	AWJ	レーザー切断 レーザーガウフング
		丸鋸*1	切断砥石*2					
損傷のない燃料集合体								
加工せず回収								
損傷のない制御棒		○					△	◎
損傷のない上部格子板		○					△	◎
損傷・変形した上部格子板		○					△	◎
損傷規模が小さく直立する切り株燃			○	◎				
大きく損傷した切り株燃料			△	○	◎			
損傷し周囲の構造物に支えられた切り株燃料			◎	○				
横倒しになった燃料集合体			△	○	◎			
損傷のない燃料支持金具								
加工せず回収								
損傷のない炉心支持板		○					△	◎
損傷して周囲と溶融固化した燃料支持金具			◎				△	○
損傷して周囲と溶融固化した炉心支持板			◎				△	○
固着せず堆積した塊状燃料デブリ			◎			○		
固着せず堆積した小石状燃料デブリ								
固着せず堆積した粉・粒状燃料デブリ								
加工せず回収								
炉心支持板上で固着した燃料デブリ			◎		△	○		○
シュラウドと炉心支持板の間に溶融固化した塊状燃料デブリ								◎
損傷なく直立して残存するCRGT		○					△	◎
倒壊し損傷の少ないCRGT		○					△	◎
倒壊して燃料が付着したCRGT			◎				△	○
炉内構造物と溶融固化した燃料デブリ	△		○		△	◎		
形状を維持したCRDハウジング		○					△	◎
固着せず堆積した塊状燃料デブリ			◎			○		
固着せず堆積した小石状燃料デブリ								
加工せず回収								
固着せず堆積した粉・粒状燃料デブリ								
加工せず回収								

※1: 切削により対象を加工  
 ※2: 砥粒による研削で対象を加工

◎: 最も適用性が高い加工法  
 ○: 適用性の高い加工法  
 △: 課題があるが適用が見込める加工法

### b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

#### ■RPV内燃料デブリの種別に応じた回収方法の立案

##### ● 基本要件機能

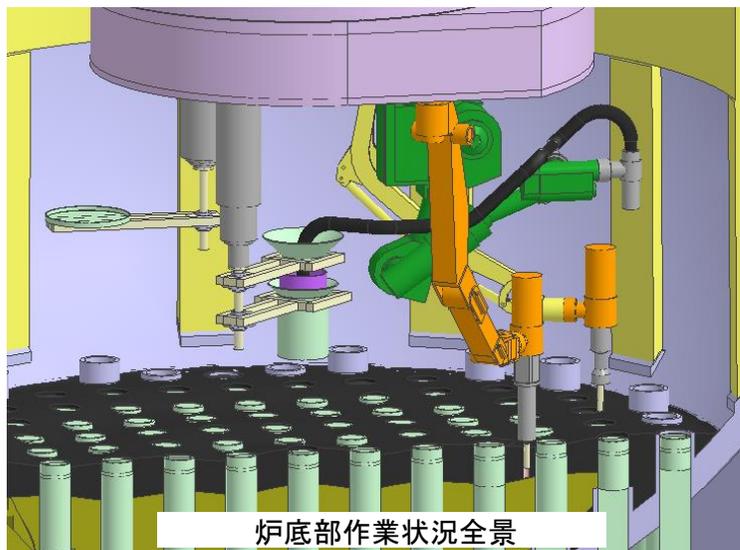
- ・ 先端ツール(加工ツール、回収ツール)は、上部格子板の高さより下方で圧力容器の内側全域にアクセスできること(具体的な制約は2020年度に策定)
- ・ 先端ツールは、PCV内で着脱し交換できること。
- ・ 消耗品交換などのメンテナンスのため、先端ツールはPCV上部のプラットフォームより搬出する。このため、ユニット缶を搬出する開口を通過できること。
- ・ マニピュレータが操作可能な力以下であること(一般的なパワーマニピュレータのペイロード2000N以下)
  - ・ 加工ツール質量500N、加工時反力1000N以下とする。
- ・ 炉心部および炉底部に供給できるユーティリティとして以下とする
  - ・ 電源：3φ、200V、10A
  - ・ 水：約1m<sup>3</sup>/h
  - ・ 高圧空気：(圧力、流量は気相系の既存検討成果を参考に、2020年度に策定)

##### ● 環境要求条件

- ・ 線量率：炉内、炉底部：3000mSv/h
- ・ (PCVフランジプラットフォーム設置後)：5～10mSv/h
- ・ 温度：-7～40℃
- ・ バウンダリ内：≤99%
- ・ 設計寿命：50年(ただし消耗品は保守時に交換可能であること。)

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

### ■RPV内燃料デブリの種別に応じた回収方法の立案



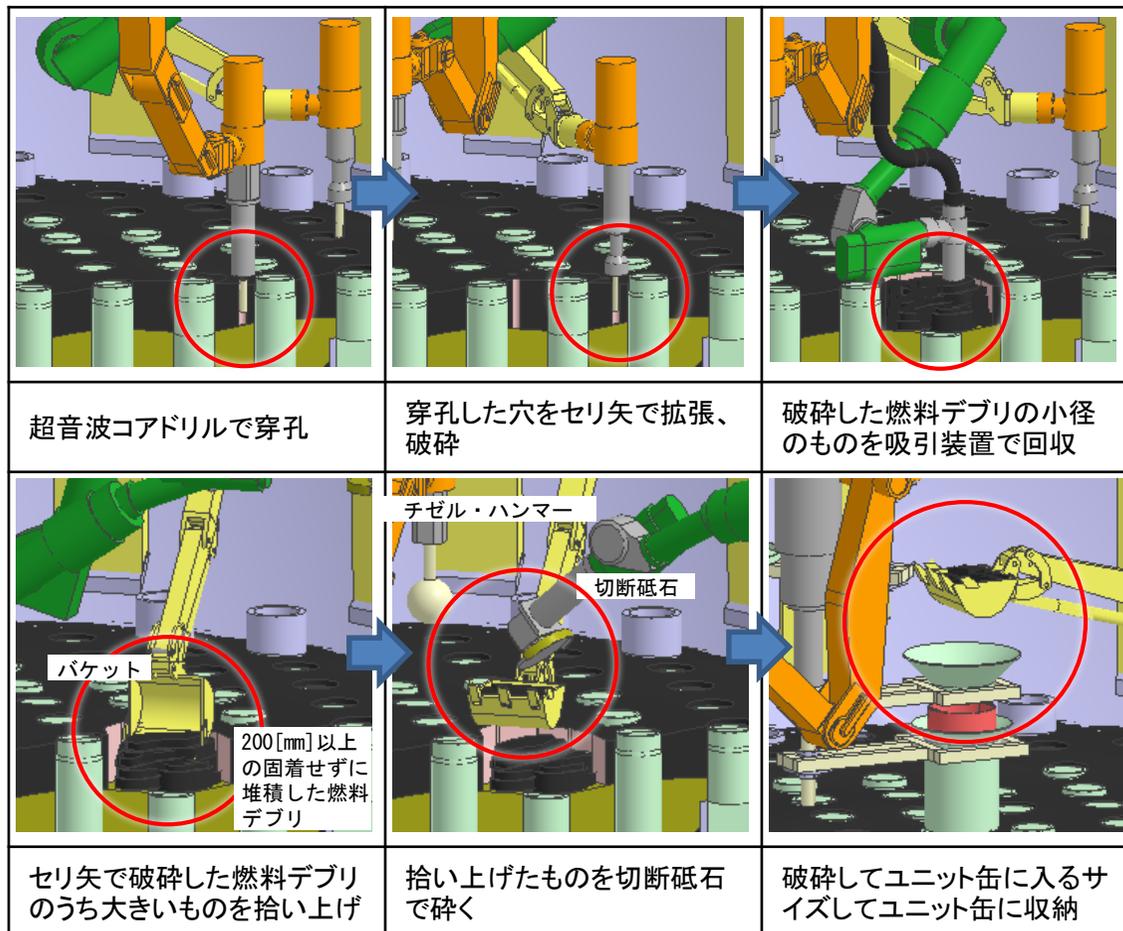
炉底部作業状況全景

#### ●回収方法の検討

アセスメントモデル図を用いて、適合する加工回収工器具を選定した。その工器具を用いてのステップ図を作成し、回収方法の有効性・実行可能性・効率性について総合的な検討を実施した。

#### ●今後の検討内容：課題項目の抽出

- ・ 工具相互間の取り合いの成立性
- ・ カメラ配置等による可視性の確認
- ・ 想定トラブルの抽出とレスキュー方法
- ・ 総合的保守実現性



炉底部作業ステップ図の例

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

### ■RPV内燃料デブリの種別に応じた回収方法の立案

#### 加工候補技術の加工性調査

金属とセラミックは、通常それぞれに適した工具を用いて、切断加工が行われる。

炉内の状況予測を踏まえ、金属とセラミックによる複合材料に対して、同一工具による切断加工の要素試験を実施し、課題を抽出する。

工具	対象	課題	試験内容
油圧カッター	残存燃料棒や切り株燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 金属(被覆管)とセラミックス(燃料ペレット)が混在する対象の切断可否、切断時の挙動把握</li> <li>➢ 刃先形状の違いが切断時挙動に与える影響</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 油圧カッターによる加工可否</li> <li>➢ 燃料棒切断時における課題の抽出</li> </ul>
切断砥石	燃料リッチな燃料デブリ	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 金属(炉内構造物)とセラミックス(熔融燃料)が混在する対象を同じ工具、同じ加工条件で同時に加工可能か</li> <li>➢ 金属とセラミックスを同時に加工した場合の工具寿命</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 切断砥石による加工可否</li> <li>➢ 加工速度や工具寿命</li> <li>➢ 切断砥石による加工時の課題</li> </ul>
チップソー	金属リッチな燃料デブリ	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 金属(炉内構造物)とセラミックス(熔融燃料)が混在する対象を同じ工具、同じ加工条件で同時に加工可能か</li> <li>➢ 金属とセラミックスを同時に加工した場合の工具寿命</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ チップソーによる加工可否</li> <li>➢ 加工速度や工具寿命</li> <li>➢ チップソーによる加工時の課題</li> </ul>

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

### ■RPV内燃料デブリの種別に応じた回収方法の立案 加工候補技術の加工性調査(油圧カッター)

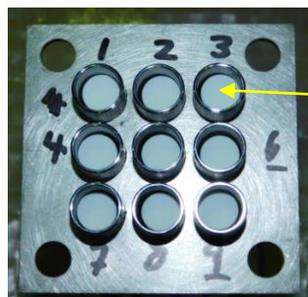
#### ● 使用したツール・試験装置

- 市販のハンディ油圧カッターを使用

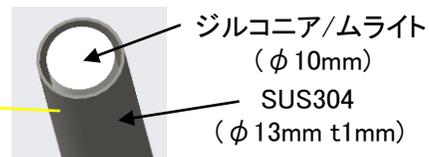


#### ● 試験体

- 残留燃料や切り株燃料への適用を想定
- 燃料棒を模擬。1本/9本、圧縮強度を変化



3本x3本 試験体



参考：セラミックスの圧縮強度

ジルコニア	約4000MPa
ムライト	約160MPa
(参考)UO <sub>2</sub>	約1000MPa

試験体	1本直交切断	3x3本直交切断
ジルコニア 健全で硬い状態を想定	 切断可(所要10秒) 刃先に欠損、変形あり ジルコニアは小石状に破砕	 9本中1本のみ切断可 残り8本中4本はジルコニアは破砕されているが切断できず 刃先に欠損、変形あり
ムライト 過酷状況下で脆化した状態を想定	 切断可(所要8秒) 刃先は目立った損傷なし ムライトは粉末状に破砕	 切断可(所要10秒) 刃の根元付近に小さな欠損発生

- 油圧カッターによる被覆管は剪断により切断、燃料は圧縮力によって破砕しながら加工できることを確認
- 燃料が脆化した場合は油圧カッターが有効であると推察
- 脆化していない場合は、バケットなどの破砕具で先に燃料ペレットを破砕する、工具を組み合わせ工法が有用と推察

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

### ■RPV内燃料デブリの種別に応じた回収方法の立案 加工候補技術の加工性調査(切断砥石)

#### ● 使用したツール

- セラミック加工用の2種類のダイヤモンド砥粒工具
- 精密加工用縦型スライシング装置を使用

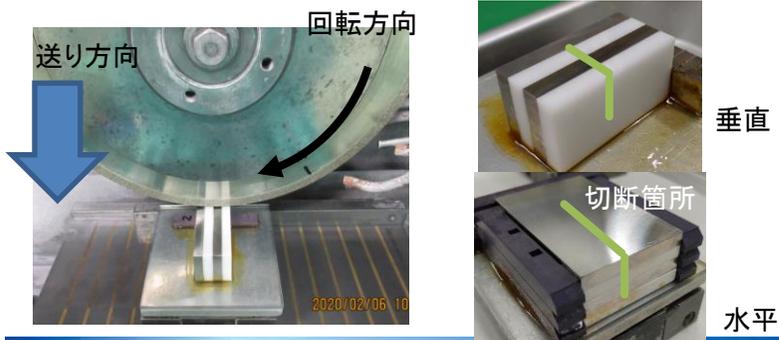
工具径	200 mm
送り速度	4 mm/min
工具回転数	2000 rpm
切削液	使用せず、防錆剤のみ添加
目標加工深さ	17mm



	砥粒保持強度	砥粒	特徴
電着ブレード	強い	一層	強固に保持した砥粒
メタルブレード	やや強い	多層	損耗すると下層砥粒が露出

#### ● 試験体

- SUS304 (t5mm)板とジルコニア板(t5mm)を4層積層
- 積層と加工(切込み)方向を変化



	垂直	水平
電着 ブレード	 加工を続けると砥粒が損耗し目詰まりが発生 切断後の砥粒状態(顕微鏡写真)	 加工中に異音が発生し加工中止。砥粒が損耗し目詰まりが発生
メタル ブレード	 加工性良好 砥石は損耗し径が短くなる	 加工性良好 砥石は損耗するが加工性は持続

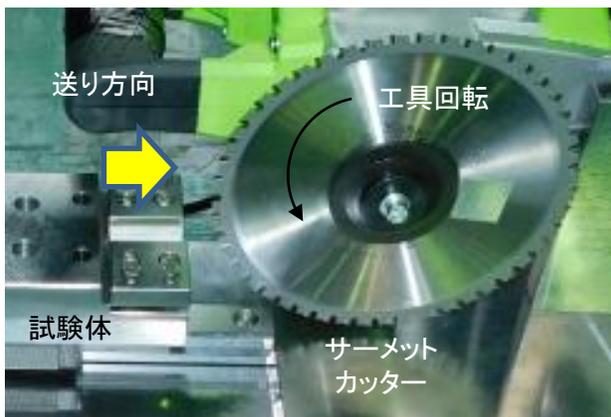
- 電着ブレード、メタルブレードで切削液を使わない条件でも金属とセラミックスを積層した試験体の切断が可能であることを確認
- メタルブレードの方が工具寿命は長く、約19,000[mm<sup>2</sup>]と推測
- 加工速度(断面積)は80mm<sup>2</sup>/min

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

### ■RPV内燃料デブリの種別に応じた回収方法の立案 加工候補技術の加工性調査(チップソー)

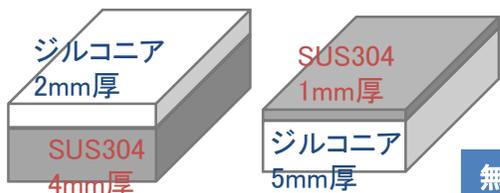
#### ● 使用した工具

- 市販乾式サーメットカッターを使用



#### ● 試験体

- 熔融固化燃料の模擬(ジルコニア)と金属(SUS304)の積層構造を模擬



金属リッチ

セラミックリッチ

無負荷回転数	3500rpm
鋸刃外径	185mm
鋸刃肉厚	1.6mm
刃数	48

試験体	送り 12mm/min	送り 60 mm/min
金属リッチ	<p>金属は加工可、ジルコニアは破片化</p>	<p>ジルコニア、金属共に切込みは入るがカッターも損傷する</p>
セラミックリッチ	<p>ジルコニアは割れ、金属は切込まれる チップの角が欠ける</p>	<p>ジルコニアは割れが発生、チップの角が欠ける カッターの台金も損傷</p>

- 刃が当たった箇所でクラックが発生し、進展することでジルコニア板が割れることを確認
- ジルコニアと刃の衝突により刃先のチップが損傷
- チップ損傷でステンレスに対する加工性が低下し、バリが発生

# 7. 本事業の実施内容【2)(i) 燃料デブリ回収・収納システムの技術開発】

## b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

### ■燃料デブリの加工・回収プロセスの検討 加工候補技術の加工性調査 まとめ

工具	試験内容	試験結果	抽出された課題
油圧カッター	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 想定燃料デブリ(特に溶け残った燃料棒)の加工可否</li> <li>➢ 燃料棒切断時における課題の抽出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 被覆管は剪断(塑性変形)、燃料は圧縮力によって破砕する。要する時間は数秒～10秒程度</li> <li>● 燃料の硬度が高い場合は、複数の燃料棒をまとめて切断が難しい。作業手順などの検討が必要。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 脆化していない対象の切断方法</li> <li>➢ 破砕と組み合わせる手順</li> <li>➢ 切断力の向上</li> </ul>
切断砥石	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 想定燃料デブリ(特に溶融固化した燃料デブリ)の加工可否</li> <li>➢ 加工速度や工具寿命</li> <li>➢ 切断砥石による加工時の課題</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 金属とセラミックを積層した試験体の切断が可能。金属と燃料が混ざり合って溶融固化したデブリの加工可能性はある</li> <li>● 加工速度は、断面積80mm<sup>2</sup>/minと遅い</li> <li>● メタルブレードの方が工具寿命は長い</li> <li>● 加工可能面積はメタルブレードで約19,000[mm<sup>2</sup>]と推測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 塊のデブリを切り取る手順</li> <li>● 対象の凹凸に倣わせる位置制御、等加工支援技術</li> <li>● 砥粒の大きさや量、ボンドの種類、スリットの導入など</li> </ul>
チップソー	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 想定燃料デブリ(特に溶融固化した燃料デブリ)加工可否</li> <li>➢ 加工速度や工具寿命</li> <li>➢ チップソーによる加工時の課題</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● セラミックは、クラックの進展により材料が破砕し加工が進むが、刃先のチップが同様に損傷することを確認</li> <li>● 金属単体であれば問題なく加工は進むが、チップ損傷でステンレスに対する加工性が低下し、バリが発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● セラミックの加工性が低く、UO<sub>2</sub>の溶融固化物などが混ざる燃料デブリには砥石のほうが適用性が高い。</li> </ul>

### b. 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発

#### ■RPV内燃料デブリの種別に応じた回収方法の立案

##### ● まとめと今後の方針

- 1～3号機の情報を総合したRPV内部の状態を推定し、想像図を作成した。
  - 既存の、炉内状況把握や燃料デブリ性状把握プロジェクトの情報。
  - まとめた情報をもとにして、RPV内部の燃料デブリ取り出し工法の検討に使用。
- 溶融の有無や形状などで種別した、各燃料デブリの回収手法を選定
  - 回収手法に基づき、炉内での使用する回収装置を立案し、推定される動作手順を検討
- 油圧カッター、ディスクソーについて、フィービリティを確認するための予備試験を実施
  - 使用工具による金属／セラミクスへの適用性を確認し、大まかな適用可能範囲を把握
- 今後(2020年度)への課題
  - 今回策定した燃料デブリ取り出し装置と動作手順の概念をもとに、課題をまとめる。
    - 機器や搬送中燃料デブリの落下など、予想されるトラブル事象と対応方針の検討
    - 燃料デブリを収納する容器への搬送、容器の搬送
    - 安全系統側への影響(切りくずの流出、ユーティリティ(水、ガス)供給、臨界監視手順)
  - 2019年度は燃料デブリと接触する先端ツールの検討、今後は全体構成図をまとめてゆく。
    - 昨年度までの成果である保守方針の取り込み、装置メンテナンス計画への反映
    - 装置メンテナンス計画、トラブル事象への対応方針の取り込み、配置計画に反映
    - 全体構成を成立させるためのセル設置、構築手順の検討
    - 適用したときの装置案、目標達成に必要な加工能力などを算出し、目標値への適合を評価。

## 7. 本事業の実施内容

### 2) 燃料デブリ取り扱い技術の開発

#### (ii) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発

##### ① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術

燃料デブリから循環冷却水中に溶出すると考えられる溶解性核種の除去技術について、溶解性核種除去用吸着技術に関する要素試験を実施して最適な吸着材を選定する。要素試験は、アルファ核種を対象として行う。また、その結果を踏まえ、吸着除去設備の概念システム設計を行う。

主な開発検討項目として以下を含むものとし、必要に応じて要素試験を実施することにより課題を抽出し整理する。

#### a. 溶解性核種除去設備の概念システム設計。

- ・アルファ核種(U、Pu等)を用いた吸着試験の計画立案に必要な予備試験を実施中。

#### b. ほう酸調整設備の概念設計。

- ・ほう酸イオンの析出挙動把握試験を実施中。

# 7. 本事業の実施内容

## 2) 燃料デブリ取り扱い技術の開発

### (ii) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発

#### ① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術

燃料デブリ取り出し時の汚染水処理システムの概念図を下段に示す。

: 本項目の事業で試験を行う設備

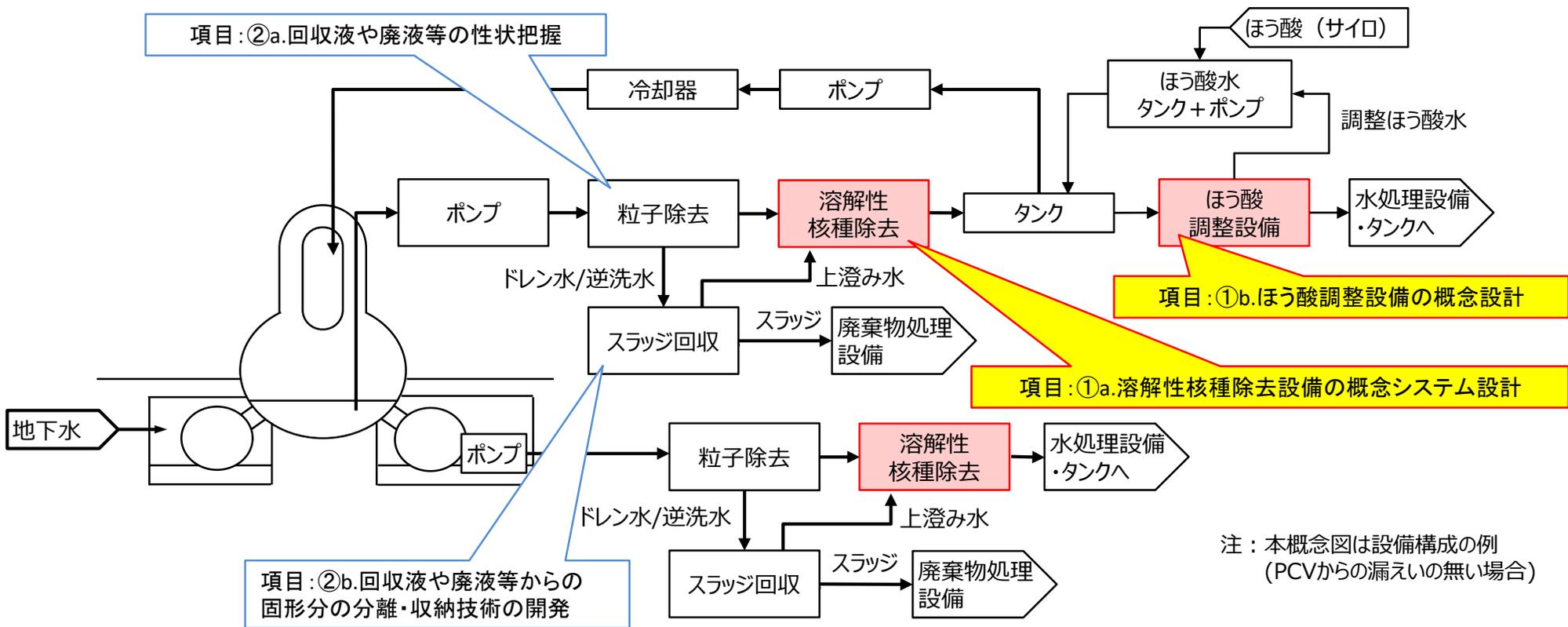


図. 燃料デブリ取り出し時の液体系システム(概念図)と要素試験の実施対象

## a. 溶解性核種除去設備の概念システム設計

- 開発の目的
 

$\alpha$  核種 (Pu、U、Np、Am、Cm) を吸着除去する吸着材の種類および使用量を選定するためのデータ取得を行う。
- 解決すべき課題
 

溶解性核種除去設備で使用する  $\alpha$  核種吸着材の核種吸着性能のデータが不足。
- 開発の進め方
  - (1) 要素試験準備
    - ① 実機想定水質の整理
    - ② 想定水質におけるアルファ核種の存在形態の検討
    - ③ Am以外のアルファ核種 (Pu、U、Np等) を吸着除去する吸着材の文献調査と候補吸着材の選定
    - ④ 吸着試験方法(条件、手順)の検討
  - (2) 要素試験計画に必要な予備試験
    - ② 想定水質におけるアルファ核種の存在形態の検討
  - (3)  $\alpha$  核種 (U、Pu等) を用いた吸着試験(浸漬試験、流通試験)
- 得られる成果
 

溶解性核種除去設備で使用する  $\alpha$  核種吸着材を選定するためのデータ。

<<核種吸着性能の確認試験の例>>

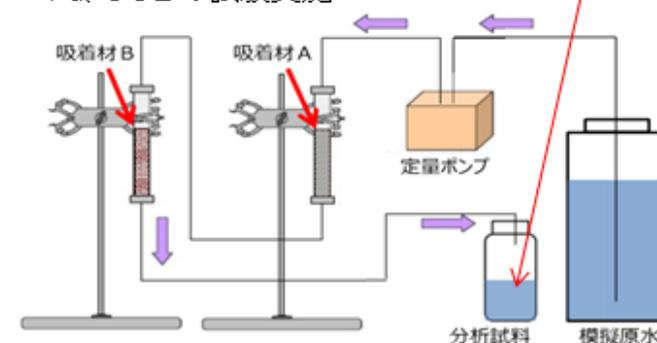
- ① 浸漬試験
  - ・精度の高い試験手順確立
  - ・Pu、Uなどの試験実施

試験開始前後で容器中の被吸着質の物質濃度を測定し、吸着量を測定



- ② 流通試験
  - ・核種使用量を低減可能な試験手順確立
  - ・Pu、Uなどの試験実施

被吸着質の物質濃度の経時変化を測定し、初期DFを把握



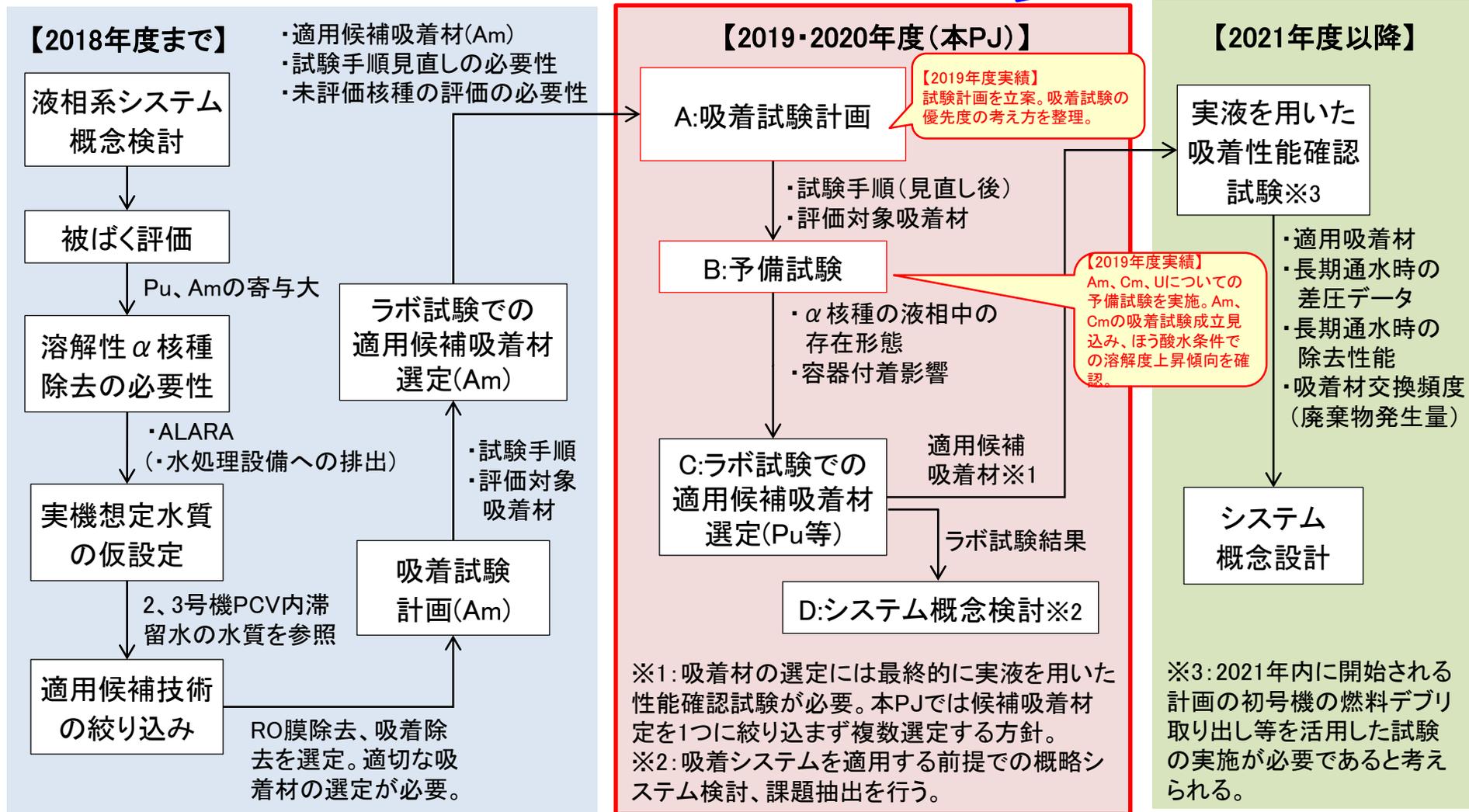
# 7. 本事業の実施内容【2)(ii)① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術】

## a. 溶解性核種除去設備の概念システム設計

### ◆ 検討フロー

2018年度まで、本PJ、および本PJ以降の取り組みを以下フローに示す。

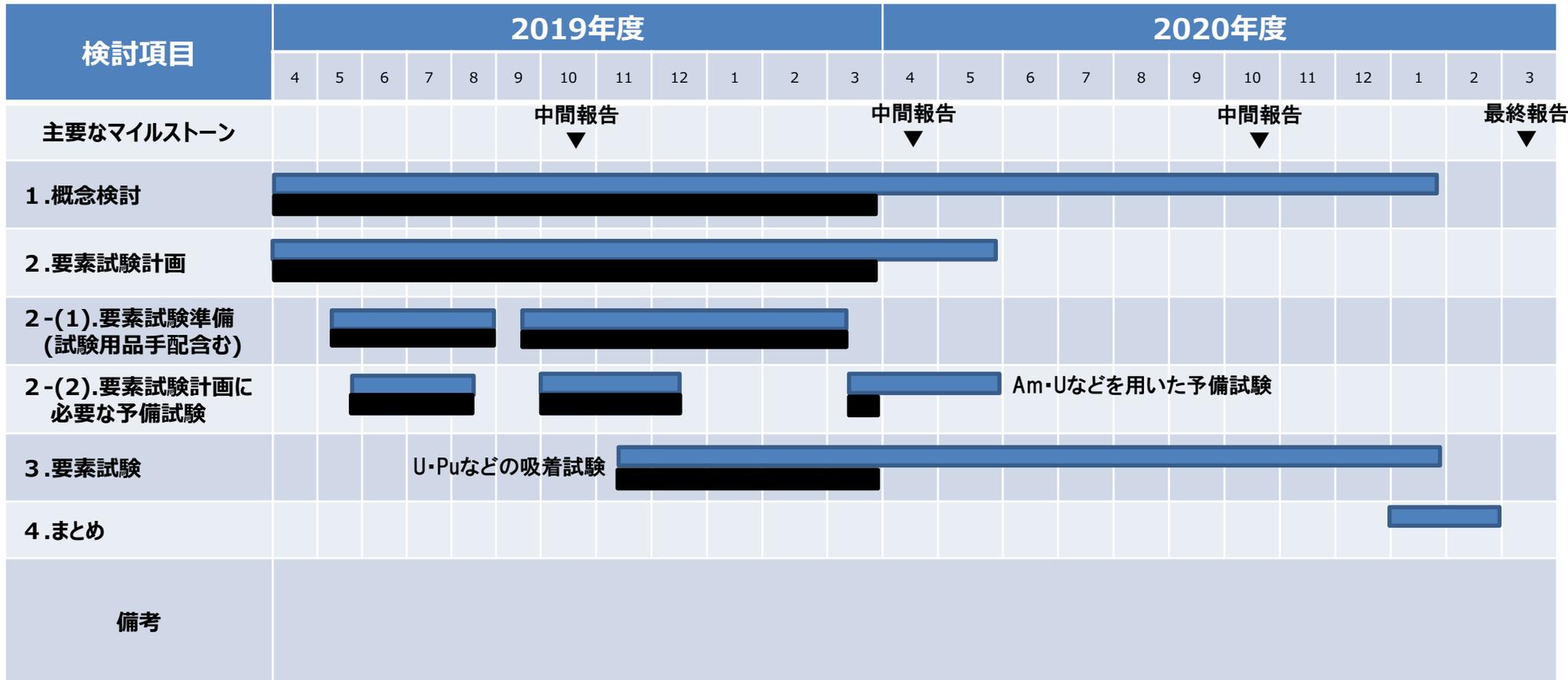
2019年度は主に(候補吸着材選定のための)吸着試験における前提条件を、予備試験等を交えて整理した。



# 7. 本事業の実施内容【2)(ii)① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術】

## a. 溶解性核種除去設備の概念システム設計

### ◆ 開発工程



# 7. 本事業の実施内容【2)(ii)① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術】

## a. 溶解性核種除去設備の概念システム設計

◆ 候補吸着材の選定：既往文献の調査結果・ $\alpha$ 核種の溶液中の存在形態から候補材を選定。

① 既往文献を調査し、除去対象核種元素ごとに候補吸着材を選定

$\alpha$ 核種	候補吸着材	選定の考え方(文献調査)
Pu	クリノプチロライト	実地下水での試験実績にて $10^3$ オーダーのKdあり
	チャバサイト	実地下水での試験実績にて $10^2$ オーダーのKdあり
Am	クリノプチロライト	実地下水での試験実績にて $10^3$ オーダーのKdあり
	ケイチタン酸	30%希釈海水(ほう素3000ppm)での試験実績にて $10^3$ オーダーのKdあり
Cm	該当なし	酸性領域で評価している吸着材文献はあるが中性付近での研究結果はない
U	モルデナイト	NaCl( $10^{-3}$ mol/l $\sim 10^{-1}$ mol/l) pH6 $\sim 7$ での試験実績にて $10^3$ オーダーのKdあり
	吸着サイト添着活性炭	KNO <sub>3</sub> (I=0.1) pH7 $\sim 8$ での試験実績にて $10^4$ オーダーのKdあり
Np	X型ゼオライト	0.1M NaCl/0.001mol/l HCl pH6での試験実績にて $\sim 800$ ml/gのKdあり

② 除去対象 $\alpha$ 核種の存在形態を考慮して候補吸着材を選定

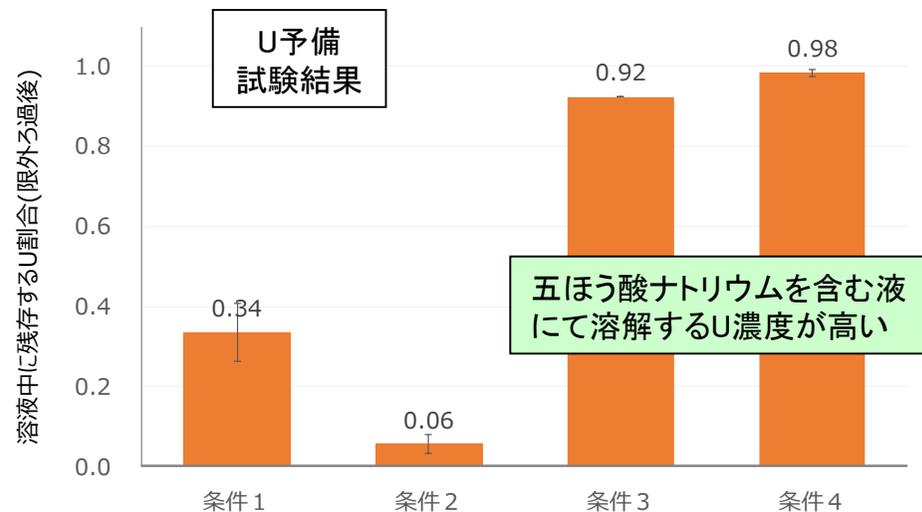
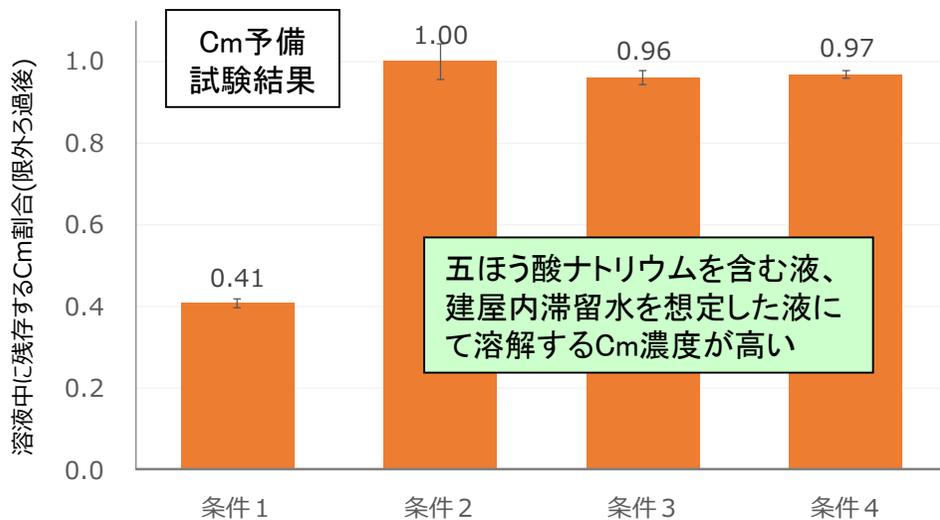
$\alpha$ 核種の存在形態		候補吸着材	選定の考え方
イオン	2価陽イオン 分子状イオン	ゼオライト・チタン酸・ ケイチタン酸	陽イオンの吸着能を有する吸着材として選定。なお、昨年度補助事業におけるAm試験において高い吸着率を確認済み。
	3価陽イオン	リン酸ジルコニウム	3価イオンの吸着能を有する吸着材として選定。
コロイド		活性炭	中性物質の吸着に優れるため、コロイドや有機物と反応した分子の除去を期待。

# 7. 本事業の実施内容【2)(ii)① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術】

## a. 溶解性核種除去設備の概念システム設計

- ◆ 予備試験：想定する水質によるAm、Cm、Uの溶解程度の差を確認している。  
Pu、Npについては2020年度に評価予定。

実機想定 水質条件 一覧	試験液 条件	海水 成分	コンク リート 成分	ほう酸 水添加	条件					想定	
					温度 [°C]	Clイオン 濃度 [ppm]	Caイオン 濃度 [ppm]	ほう素 濃度 [ppm]	pH		SS 濃度 [ppm]
	1	なし	なし	なし	10~40	20程度	<1	<1	中性付近	<1	PCV内滞留水
	2	あり	あり	なし	10~40	350程度	40程度	<1	弱アルカリ	<1	建屋内滞留水
予備試験 実施条件	3	なし	なし	あり	10~40	20程度	<1	7,000	弱アルカリ	<1	PCV内滞留水(ほう酸水添加あり)
	4	あり	あり	あり	10~40	350程度	40程度	7,000	弱アルカリ	<1	建屋内滞留水(ほう酸水添加あり)
	5	なし	あり	なし	10~40	20程度	飽和	<1	高	<1	PCV内滞留水にコンクリート成分溶出



## a. 溶解性核種除去設備の概念システム設計

◆ 吸着試験：机上評価や予備試験結果より試験に優先度をつけたうえで吸着試験実施中。

- 被ばく影響が大きく、告示濃度の低いPu、Am、Cmは吸着除去の優先度が高い。
- 予備試験により溶液中の $\alpha$ 核種濃度の上昇する可能性が示唆された海水成分およびほう酸添加条件は優先度が比較的高い。
- Cs・Srの共存により $\alpha$ 核種吸着性能が低下する可能性があることから次いで優先度が高い。ただし、溶解度の低いU、Npは相対的に優先度が下がる。
- Caの溶出影響はデータ取得の優先度は高いものの、pH上昇に伴うキャリアの沈殿を伴うためCm、Amについては評価困難。U、Np、Puについては評価可否を今後予備試験にて確認予定。
- 当初計画していた通水試験は、優先度の高い試験を実施することで実施対象外となる見込み。

α核種 元素	浸漬試験（平衡状態での吸着容量確認）								通水試験		吸着材 寿命
	循環 冷却水	共存イオン影響							DF		
		海水 成分	Ca(コンク リート)	炭酸	Cs	Sr	ほう酸	その他	初期 通水時	長期 通水時	
U	△/×	△/×	(▲/×)	×	(▲)	(▲)	○	▲	▲	×	×
Np	(△/×)	(△/×)	(▲/×)	×	(▲)	(▲)	(○)	▲	▲	×	×
Pu	(◎)	(○)	(○/×)	×	(△)	(△)	(○)	▲	▲	×	×
Am	◎	○	×	×	△	△	○	▲	▲	×	×
Cm	◎	○	×	×	△	△	○	▲	▲	×	×

・凡例 ◎:優先度高い、○:優先度比較的高い、△:優先度比較的低い、▲:優先度低い、×:本PJ内での試験評価困難  
 ・カッコ表記は予備試験実施前のため想定であることを示している。

### b. ほう酸調整設備の概念設計

- **開発の目的**

安全系システムとして、溶解性中性子吸収材を用いた臨界管理に必要な設計要求(設備ニーズ)を整理し、プロセスの具体化する。

五ほう酸ナトリウム使用時の物性データ(五ほう酸ナトリウムの物性、析出挙動等、蒸発時の移行データなど)を取得し、設計要求を整理していく。

- **解決すべき課題**

五ほう酸ナトリウムの析出挙動等の物性データの取得。

五ほう酸ナトリウムの物性データを考慮した臨界管理システムへの設計要求の整理。

実機環境下(線量等)での臨界管理システムの運転・保守への要求検討。

- **開発の進め方**

五ほう酸ナトリウムのふるまいについて、文献調査、要素試験(要すれば実機を想定した試験)を行い、設計に必要なデータを取得する。

取得データを用いて臨界管理システムへの要求を整理する。

払い出し先(既存水処理設備相当)へのほう酸の移行量を提示し影響を確認する(要すれば要素試験等を実施)。

- **得られる成果**

実機設計に向けた物性データ。

五ほう酸ナトリウムを使用した臨界管理システム概念。

払い出し先へのほう酸の移行量とその影響。

### b. ほう酸調整設備の概念設計

#### 【背景：概要】

- ・ 補助事業(臨界管理PJ)では、燃料デブリ取り出し時の臨界管理方法として、溶解性と非溶解性の中性子吸収材の双方を用いる場合について技術開発に取り組んでいる。
- ・ 臨界管理PJ(2018年度)の技術開発として、溶解性中性子吸収材を用いたシステムは液相系システム(循環ループ系統)と密に関係することから、液相系システムを含めた前提条件を仮決めした上で系統構成案を作成し、課題の抽出と検討を実施している。
- ・ 本事業では昨年に引き続き、抽出した課題解決に向けた検討を実施する。
- ・ 抽出した課題(詳細は次葉参照)
  - 課題① 五ほう酸ナトリウムの析出  
系内(PCV、循環ループ、ほう酸調整設備)でのほう酸析出と系統への影響
  - 課題② 五ほう酸ナトリウム、pH調整剤の注入量  
系内(PCV、循環ループ、ほう酸調整設備)でのほう酸損失(ほう酸注入系の負担増)
  - 課題③ 五ほう酸ナトリウムの移行量  
払い出し先へのほう酸移行量と影響
  - 課題④ ほう酸調整設備の運転保守方針  
課題①～③を踏まえた実機環境下での運転保守方針の整理

## b. ほう酸調整設備の概念設計

### 【五ほう酸運用システムの課題】

#### 課題① 五ほう酸ナトリウムの析出

- 系統内(PCV、循環ループ、ほう酸調整設備)でのほう酸化合物析出と系統への影響
- 各箇所での想定水質に対する五ほう酸ナトリウムの析出条件の整理(文献調査、要素試験)
  - ほう酸析出時の影響と対策の検討(析出しない運転条件範囲等の検討)

#### 課題② 五ほう酸ナトリウム、pH調整剤の注入量

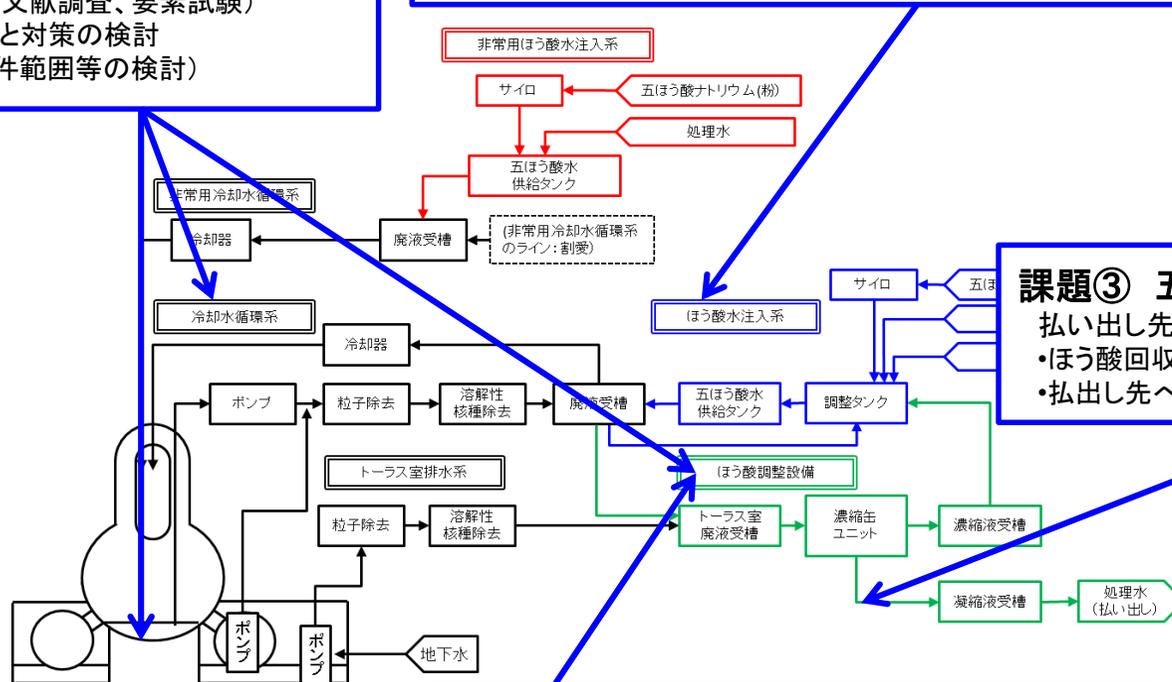
- 系統内(PCV、循環ループ、ほう酸調整設備)でのほう酸損失(ほう酸注入系の負担増)
- 析出条件の確認、核種除去でのほう素吸着量の確認(前項a.で確認)
  - ほう酸損失量の評価

#### 課題③ 五ほう酸ナトリウムの移行量

- 払い出し先へのほう酸移行量と影響
- ほう酸回収性能の確認(要素試験)
  - 払い出し先への移行量と影響確認

#### 課題④ ほう酸調整設備の運転保守方針

- 実機環境下での運転保守方針
- ほう酸環境下におけるDF性能の確認(前項a.で確認)

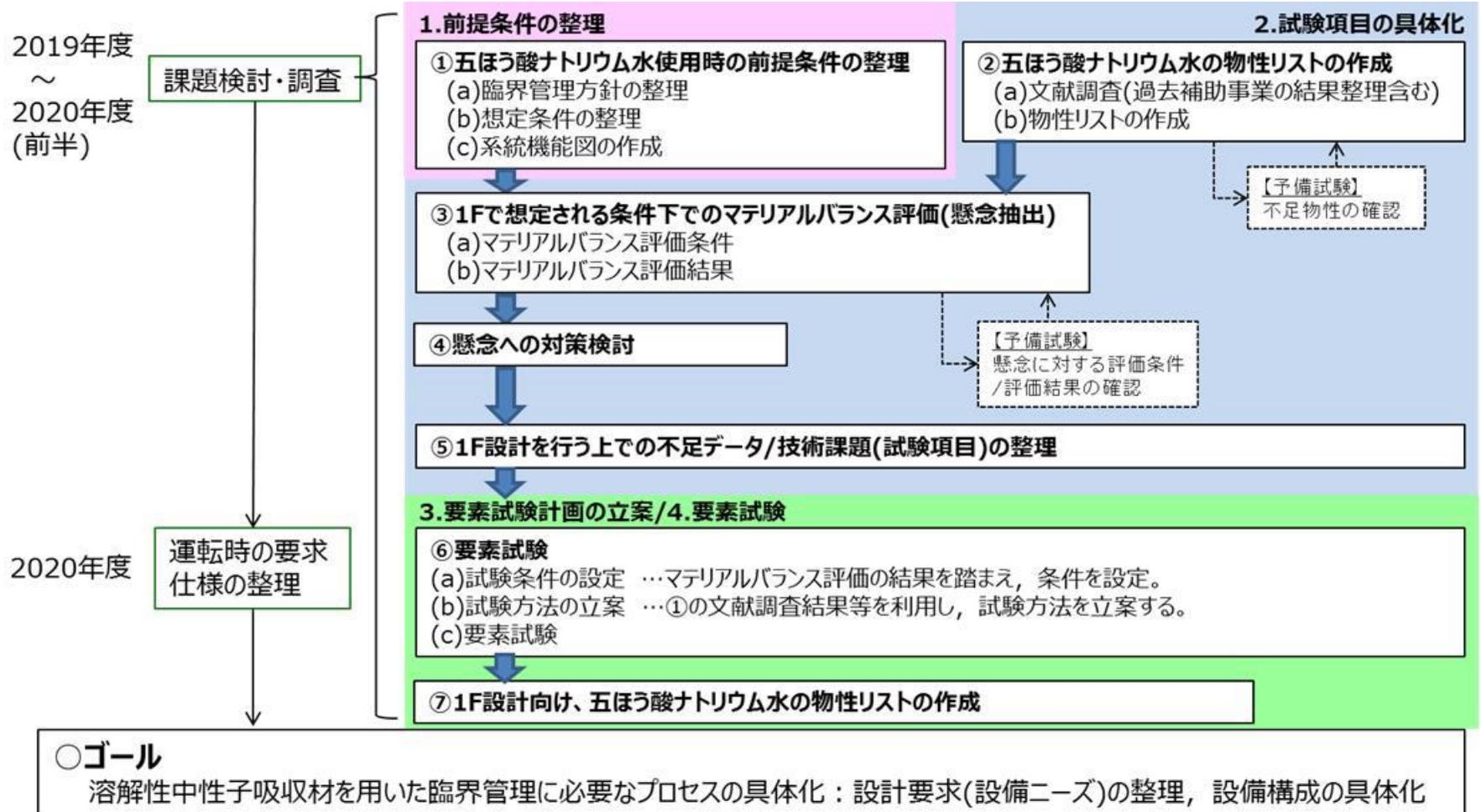


# 7. 本事業の実施内容 【 2)( ii )① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術 】

## b. ほう酸調整設備の概念設計

### ○作業フロー

系統設計段階でデータ不足がないよう、これまでの補助事業の検討成果及び追加の文献調査を基に、五ほう酸ナトリウムの基礎物性を整理した上で、不足データを要素試験で取得する。



# 7. 本事業の実施内容 【 2)(ii)① 循環冷却水中の溶解性核種の除去技術 】

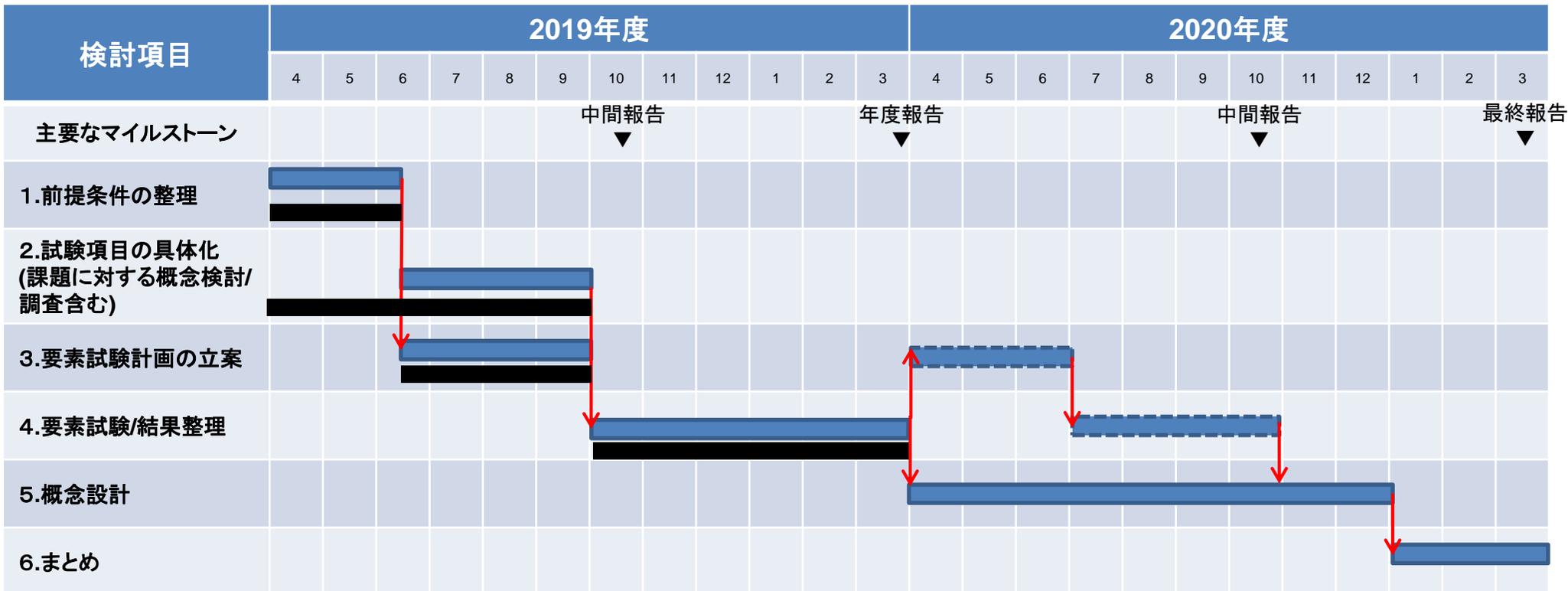
## b. ほう酸調整設備の概念設計

### ○今後の予定

<2020年度計画>

- CaとBの析出、Na/B比変化による析出要素試験の結果評価。
- 必要に応じて追加試験を実施。
- 並行して、析出物の対策検討を実施。

### ○工程



## b. ほう酸調整設備の概念設計

### ①五ほう酸ナトリウム水使用時の前提条件の整理

五ほう酸ナトリウム水使用時の開発課題を検討する上での前提整理のため、以下を検討した。

#### ● 臨界管理方針の整理

- ・安全要求  
核反応による異常な放射性物質の生成防止
- ・機能要求  
レベル1: 管理基準値内に未臨界度を維持すること  
レベル2: 想定異常の臨界近接を検知して、取り出し作業を停止することで、臨界を防止すること  
レベル3: 臨界を検知して、速やかに停止すること
- ・達成手段  
中性子吸収材(五ほう酸ナトリウム水)による未臨界維持及び異常の停止

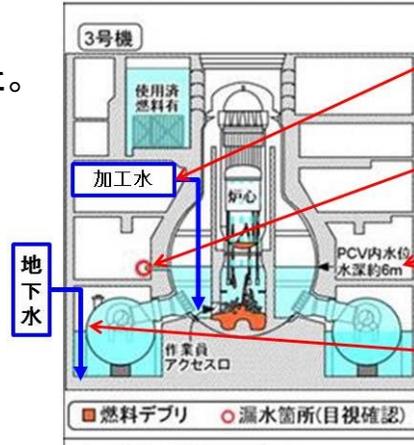
#### ● 想定条件の整理

#### ● 系統機能図の作成



前提条件を基に1Fで想定されるマテリアルバランス評価条件を整理へ

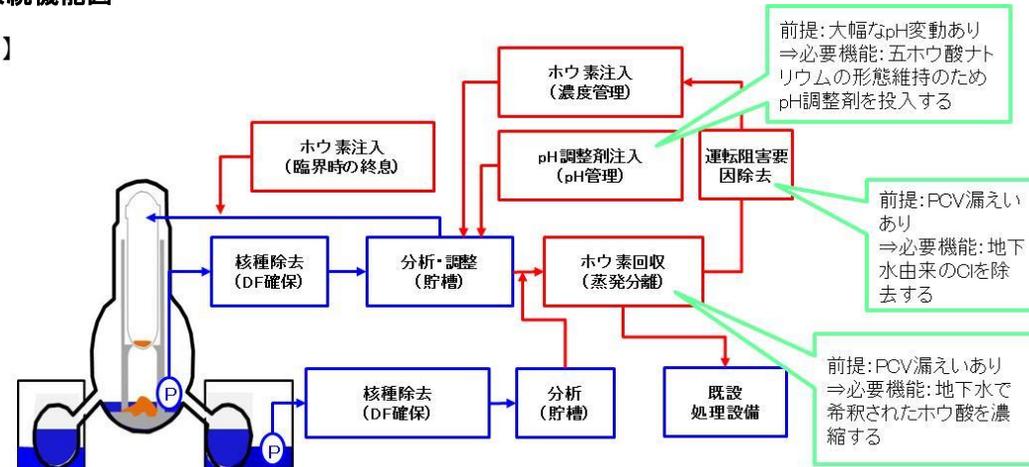
#### ➤ 想定条件の一例(PCV周り)



- 加工水**  
中性子吸収材として五ほう酸ナトリウムを使用する場合、加工水についても五ほう酸ナトリウムが使用される前提とする。  
最大流入量は2.2m<sup>3</sup>/hとする。
- PCV(D/W・S/C)からトラス室への漏えい**  
漏えいありと漏えいなしの2パターンを想定する。なお、最大漏えい量は3m<sup>3</sup>/hとする。  
(昨年度の液相系システムの検討条件を最大漏えい量として想定)
- ③水位**  
水位が一定以上ある前提とする。  
(少なくとも2号機相当のD/W底部+30cmがあると想定)
- 地下水**  
一定量が流入する前提とする(PCV漏えいありの場合に影響する)。  
なお、最大流入量は2.1m<sup>3</sup>/hとする。  
(昨年度の液相系システムの前提条件を踏襲)

#### ➤ 系統機能図

【例】



前提: 大幅なpH変動あり  
⇒必要機能: 五ほう酸ナトリウムの形態維持のためpH調整剤を投入する

前提: PCV漏えいあり  
⇒必要機能: 地下水由来のClを除去する

前提: PCV漏えいあり  
⇒必要機能: 地下水で希釈されたホウ酸を濃縮する

## b. ほう酸調整設備の概念設計

### ②五ほう酸ナトリウム水の物性整理

五ほう酸ナトリウム水に対する物性調査及び析出に関する文献調査を実施した。

#### ●調査結果

- (i) Caイオン 200mg/L程度の共存で析出物形成の可能性有
- (ii) Mgイオン 350mg/L程度の共存で析出物形成の可能性有
- (iii) Na/B比 Na/B比(モル比)が0.12~0.43を逸脱すると析出物形成の可能性有(五ほう酸ナトリウムは通常0.2)

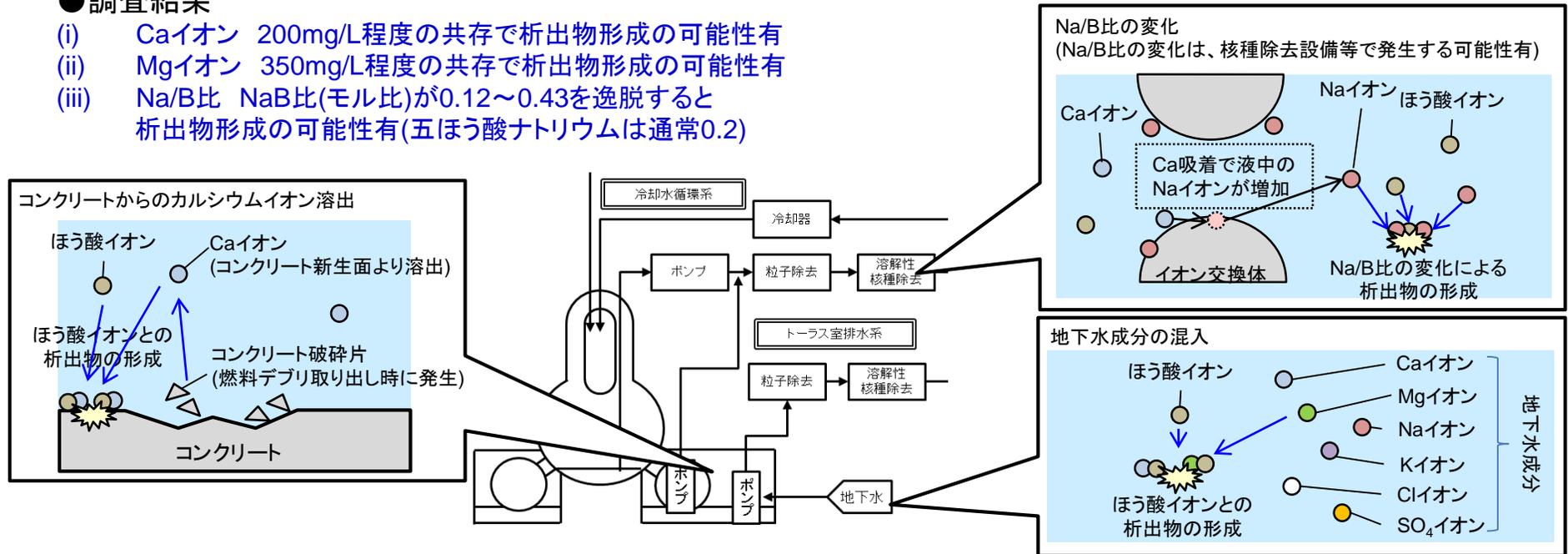


図 燃料デブリ取り出し時の系統とコンクリート及び地下水からの混入物

### ③1Fで想定される条件下でのマテリアルバランス評価

前提条件を基に1Fで想定されるマテリアルバランス評価条件を整理し、Bの消費等の懸念項目に対して、マテリアルバランス評価を実施。



影響度を評価してデータ取得の必要性を判断し、試験計画に展開

## b. ほう酸調整設備の概念設計

### ④懸念への対策検討

### ⑤1F設計を行う上での不足データ/技術課題(試験項目)の整理

文献調査等を基に、五ほう酸ナトリウム水使用時に想定される懸念について、起因事象、事象進展及び課題、対策、試験項目を整理した。

#### ●析出に関する整理結果

起因事象	考えられる事象進展	課題、対策、試験項目											
燃料デブリの切削	<p>Caイオンの溶出 (コンクリート由来) → Caイオンとほう酸イオンの析出反応</p>	<p><b>【課題】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ほう素濃度の低減</li> <li>・析出による閉塞</li> <li>・系統機器への影響 (フィルタ負荷増加) (冷却器等の性能低下)</li> </ul> <p><b>【対策】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・運転管理による析出防止 →Caイオン/Mgイオンの管理 →Na/B比の調整</li> <li>・析出物の除去</li> </ul> <p><b>【試験項目】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・運転管理の目安の確認 →Caイオン、Mgイオンの許容限度 →Na/B比の許容限度</li> <li>・析出物の除去方法の確認 →析出物の成分等</li> </ul>											
地下水の混入	<p>Naイオンの増加 →Na/B比変動 → 溶液中のほう酸イオンの形態変化(低溶解度化合物の形成)に伴う析出</p> <table border="1" style="margin: 10px auto;"> <thead> <tr> <th>形態</th> <th>化学式</th> <th>溶解度(g/L as B)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>五ほう酸ナトリウム</td> <td><math>\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}</math></td> <td>49(30°C)</td> </tr> <tr> <td>ほう酸</td> <td><math>\text{H}_3\text{BO}_3</math></td> <td>12(30°C)</td> </tr> <tr> <td>四ほう酸ナトリウム</td> <td><math>\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}</math></td> <td>7.8(30°C)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Ca/Mgイオンの増加 → Caイオン/Mgイオンとほう酸イオンの析出反応</p>		形態	化学式	溶解度(g/L as B)	五ほう酸ナトリウム	$\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	49(30°C)	ほう酸	$\text{H}_3\text{BO}_3$	12(30°C)	四ほう酸ナトリウム	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
形態	化学式	溶解度(g/L as B)											
五ほう酸ナトリウム	$\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	49(30°C)											
ほう酸	$\text{H}_3\text{BO}_3$	12(30°C)											
四ほう酸ナトリウム	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	7.8(30°C)											

### b. ほう酸調整設備の概念設計

#### ⑥要素試験

##### 【目的】

- 五ほう酸ナトリウム水の析出挙動を確認し、その対策(析出防止の管理基準やほう素濃度維持方法等)を検討する。

##### 【課題】

- コンクリートに含まれるCaイオン、Mgイオン等はほう酸イオンと反応し、析出物を形成する恐れがある。この場合の影響(濃度域、温度域や共存イオンの影響)が不明確。
- ほう酸イオンはNa/B比の変化で低溶解度のほう素化合物が増え、析出物を形成する恐れがある。この場合の影響(溶解/析出範囲)が不明確。

##### 【実施内容】

- Caイオン、Mgイオン、その他の不純物共存時の五ほう酸ナトリウムの溶解/析出挙動の確認
- Na/B比変化時の溶解析出挙動確認
- 析出物を除去するための方法の検討
- 不純物イオン、Na/B比等の管理方法の検討

##### 【目標】

- 不純物イオン(特にCa、Mg)濃度、Na/B比等の管理基準の策定
- 析出物対策立案

## b. ほう酸調整設備の概念設計

### ⑥要素試験

【試験条件範囲及び得られる成果】

表 試験条件表

項目	試験範囲	備考
B濃度(mg/L as B)	510~10000	
Na/B比	0.06~1.0	文献の25°Cでの析出可能性がある点より設定
Caイオン濃度(mg/L)	0~800	Ca(OH) <sub>2</sub> の飽和濃度より設定
Mgイオン濃度(mg/L)	0~800	Caと同等と仮定し設定

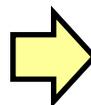


表 管理基準値イメージ

項目	管理値	備考
B濃度(mg/L as B)	510~10000	
Na/B比	XX~XX	20°Cで析出しない範囲
Caイオン濃度(mg/L)	<XX	20°Cで析出しない範囲
Mgイオン濃度(mg/L)	<XX	20°Cで析出しない範囲

### 【試験方法】

- 所定の溶液を調整し、所定時間、温度で攪拌
- 所定時間後、ろ過し、ろ液、フィルター、ビーカ洗浄液を別々に分取。
- ろ液、フィルタの成分分析を実施(B、Na、Ca、Mg等)

### 【評価方法】

- 溶液中、回収固形物中の対象成分の分析を行い、添加元素及びほう素化合物の析出量を求める。
- ほう素化合物が析出しない各成分の濃度範囲を求める。

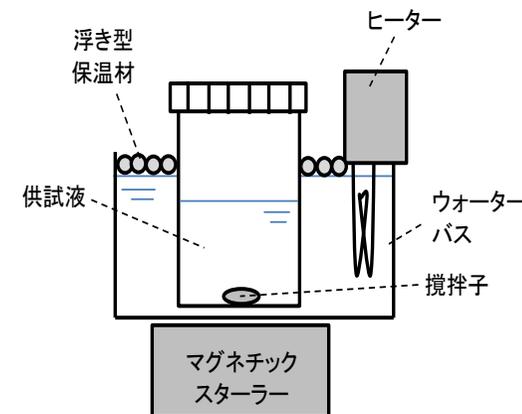


図 試験装置イメージ

## b. ほう酸調整設備の概念設計

### ⑥要素試験

#### 【Caイオンの影響】

- Ca(OH)<sub>2</sub>添加時、380mg/L as Ca 以上で析出を確認。
- 析出物のCa/Bモル比は0.3程度。文献情報を考慮し、析出物はCa<sub>2</sub>B<sub>6</sub>O<sub>11</sub>・13H<sub>2</sub>Oと推定。

#### 【Na/B比の影響】

- Na/B比<0.1で析出を確認。
- 析出物はBが主体であり、文献情報を考慮し、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>と推定。
- 計画通り試験が進捗しており、当初計画通りの成果が得られつつある。

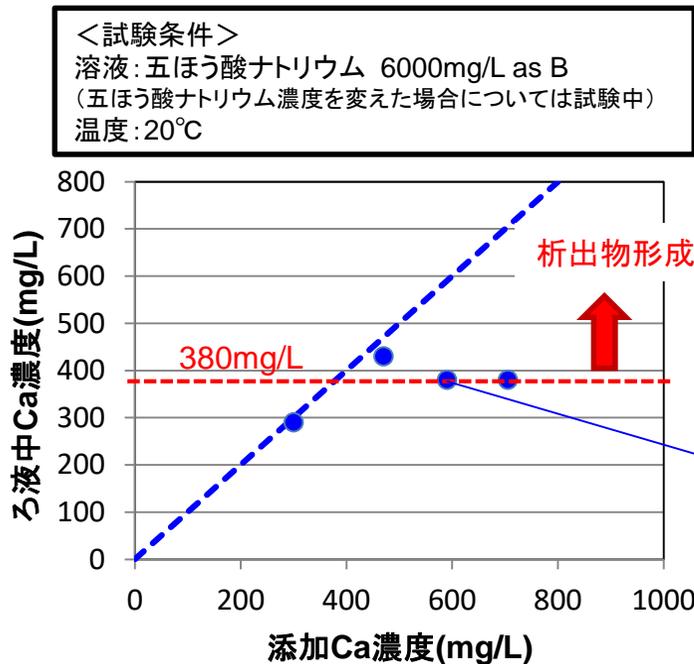
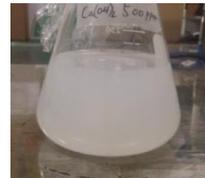


図1 Ca添加による析出試験結果 概要

590mg/L as Ca添加時の析出物外観



Na/B比 0.08時の析出物外観



<試験条件>  
 溶液:五ほう酸ナトリウム 6000mg/L as Bにほう酸または水酸化ナトリウムを添加しNa/B比を調整  
 (五ほう酸ナトリウム濃度を変えた場合については試験中)  
 温度:20℃

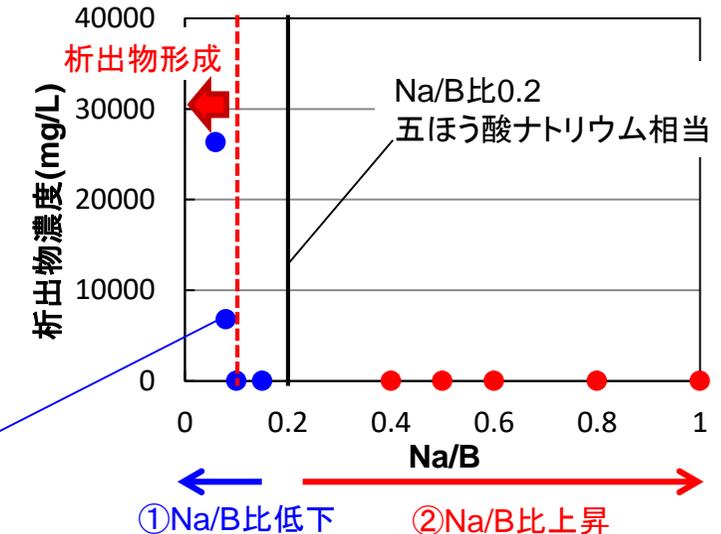


図2 Na/B比変化の影響確認試験

## 7. 本事業の実施内容

### 2) 燃料デブリ取り扱い技術の開発

#### (ii) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発

#### ② PCV内から回収された堆積物等の処理技術

PCV内底部等に存在する燃料デブリを含む堆積物の回収時には堆積物を含む回収液の発生や、また、燃料デブリ取り出し作業時には、循環冷却水系のフィルタ等を逆洗する場合に、固形物を含む廃液等の発生がある。これらの取り扱い、保管にあたっては、液中から固形成分を分離することが、安全性、減容等の観点から必要である。そこで、液中から固形物を分離し、収納するための処理技術について、収納効率、遠隔操作、保守等を考慮した技術の開発を行い、廃液処理設備の概念システム設計を行う。

主な開発検討項目として以下を含むものとし、必要に応じて要素試験を実施することにより課題を抽出し整理する。

#### a. 回収液や廃液等の性状把握。

- ・非溶解性核種除去の候補装置である中取りフィルタの差圧対策試験を一部実施。

#### b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発。

- ・回収液や廃液中の固形分の分離技術として、凝集沈降分離の適用可能性を確認中。

# 7. 本事業の実施内容

## 2) 燃料デブリ取り扱い技術の開発

### (ii) 燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発

#### ② PCV内から回収された堆積物等の処理技術

燃料デブリ取り出し時の汚染水処理システムの概念図を下段に示す。

: 本項目の事業で試験を行う設備

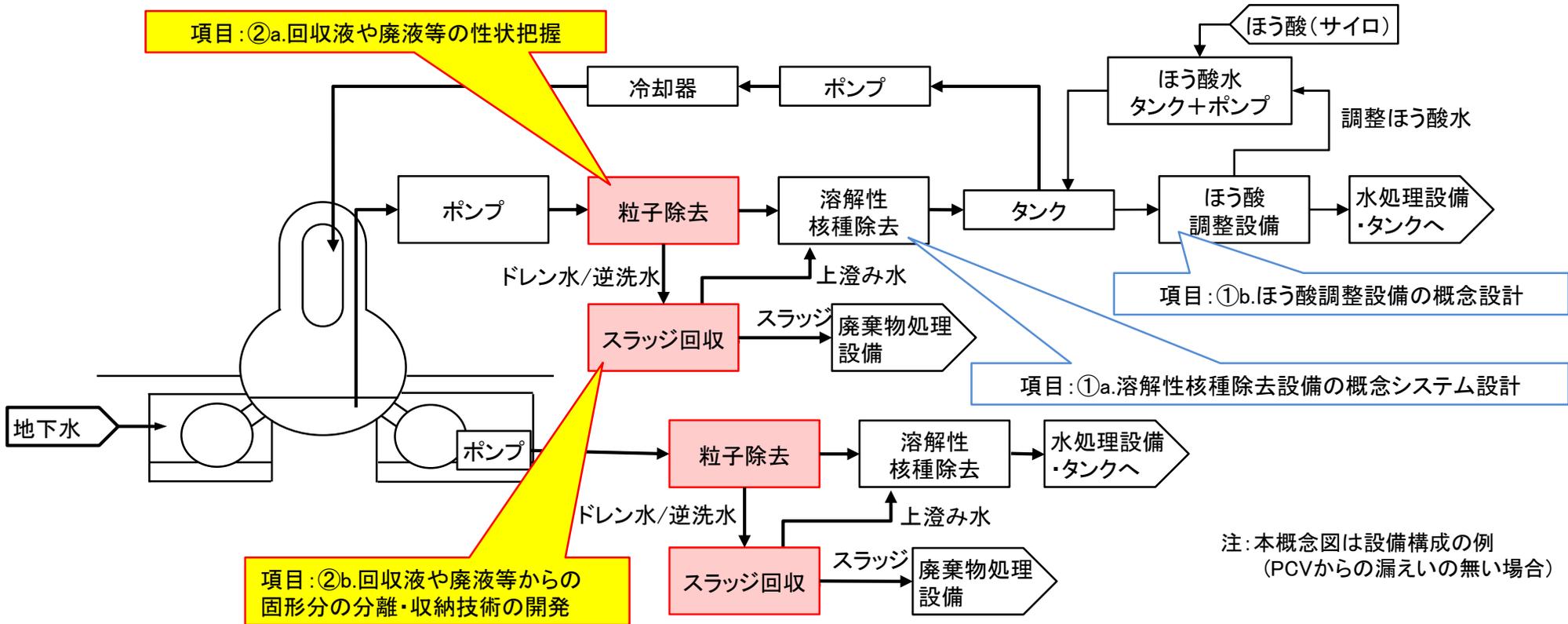


図. 燃料デブリ取り出し時の液体系システム(概念図)と要素試験の実施対象

## 7. 本事業の実施内容【2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】No.188

### a. 回収液や廃液等の性状把握

#### ● 開発の目的

非溶解性核種除去設備に適用する粒子捕集機器を選定するため、フィルタ通水試験を実施することにより粒子捕集率、差圧挙動、発生廃液性状などのデータ取得を行う。

#### ● 解決すべき課題

- 適用する粒子捕集技術が未選定。
- 粒子捕集機器の設計適正化が必要。
- 長期通水した場合の粒子捕集機器の逆洗性能等のデータが不足。

#### ● 開発の進め方

- ① フィルタ負荷適正化試験。
- ② 逆洗条件の最適化試験。
- ③ 非溶解性臨界防止剤の影響評価試験(必要に応じて実施)。
- ④ 長期通水試験。

#### ● 得られる成果

粒子除去設備へ適用する粒子捕集機器候補の設計適正化および運用データの取得。

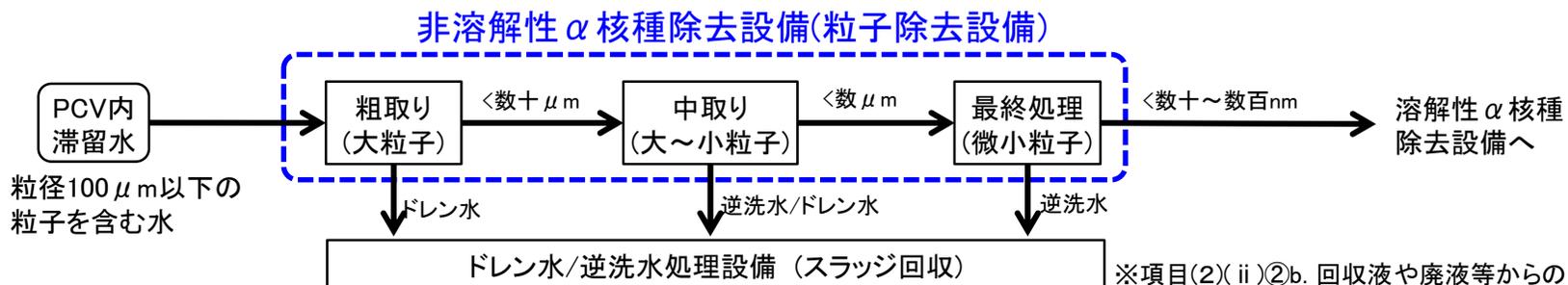


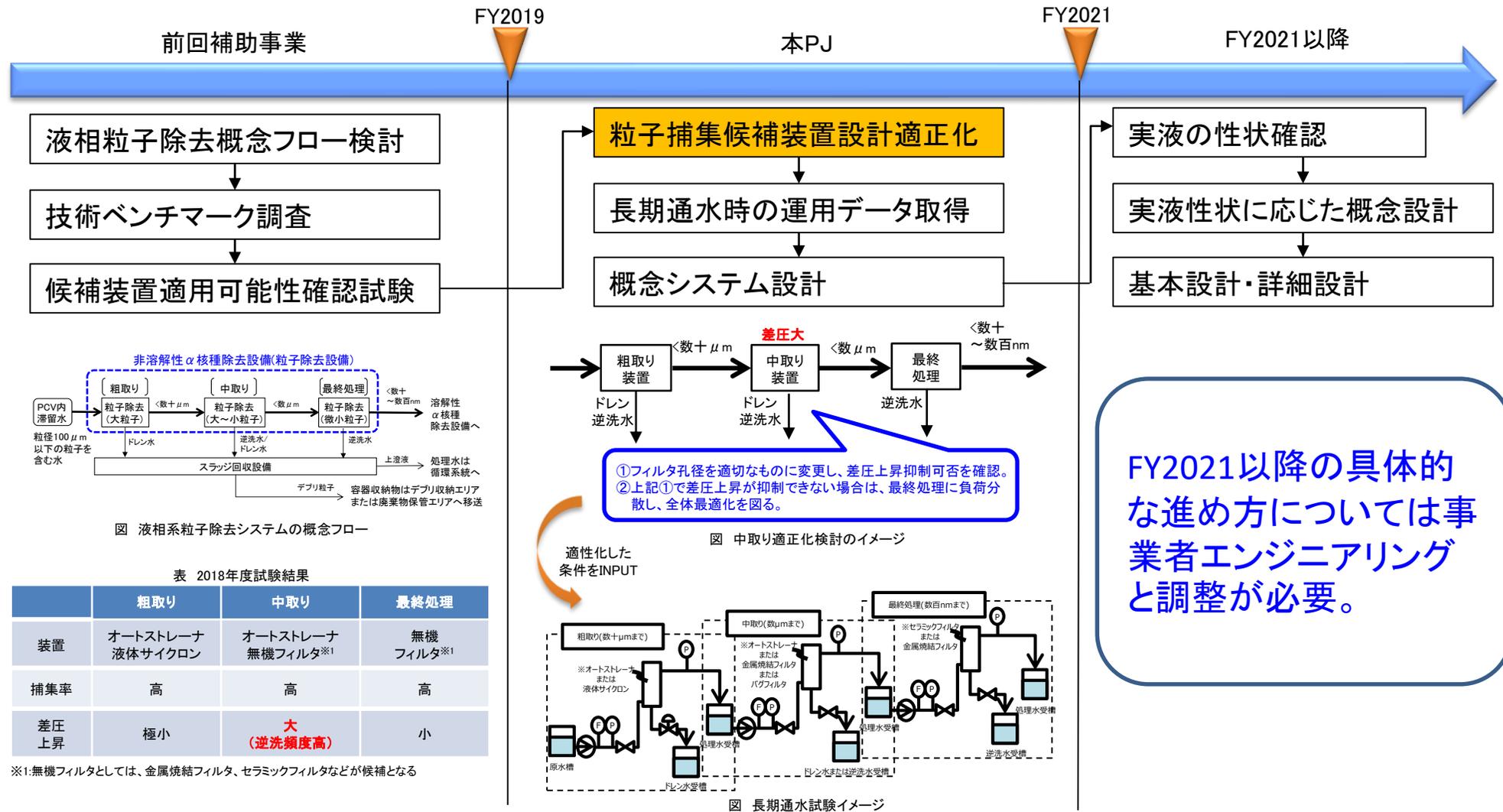
図 粒子除去設備系統構成の概念図

※項目(2)(ii)②b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発に記載

# 7. 本事業の実施内容【2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】No.189

## a. 回収液や廃液等の性状把握

- 検討フロー;本PJでは、前回補助事業で抽出した候補装置の設計適正化と長期運用データの取得を行い、概念システム設計に反映する。



FY2021以降の具体的な進め方については事業者エンジニアリングと調整が必要。

表 2018年度試験結果

	粗取り	中取り	最終処理
装置	オートストレーナ 液体サイクロン	オートストレーナ 無機フィルタ※1	無機 フィルタ※1
捕集率	高	高	高
差圧 上昇	極小	大 (逆洗頻度高)	小

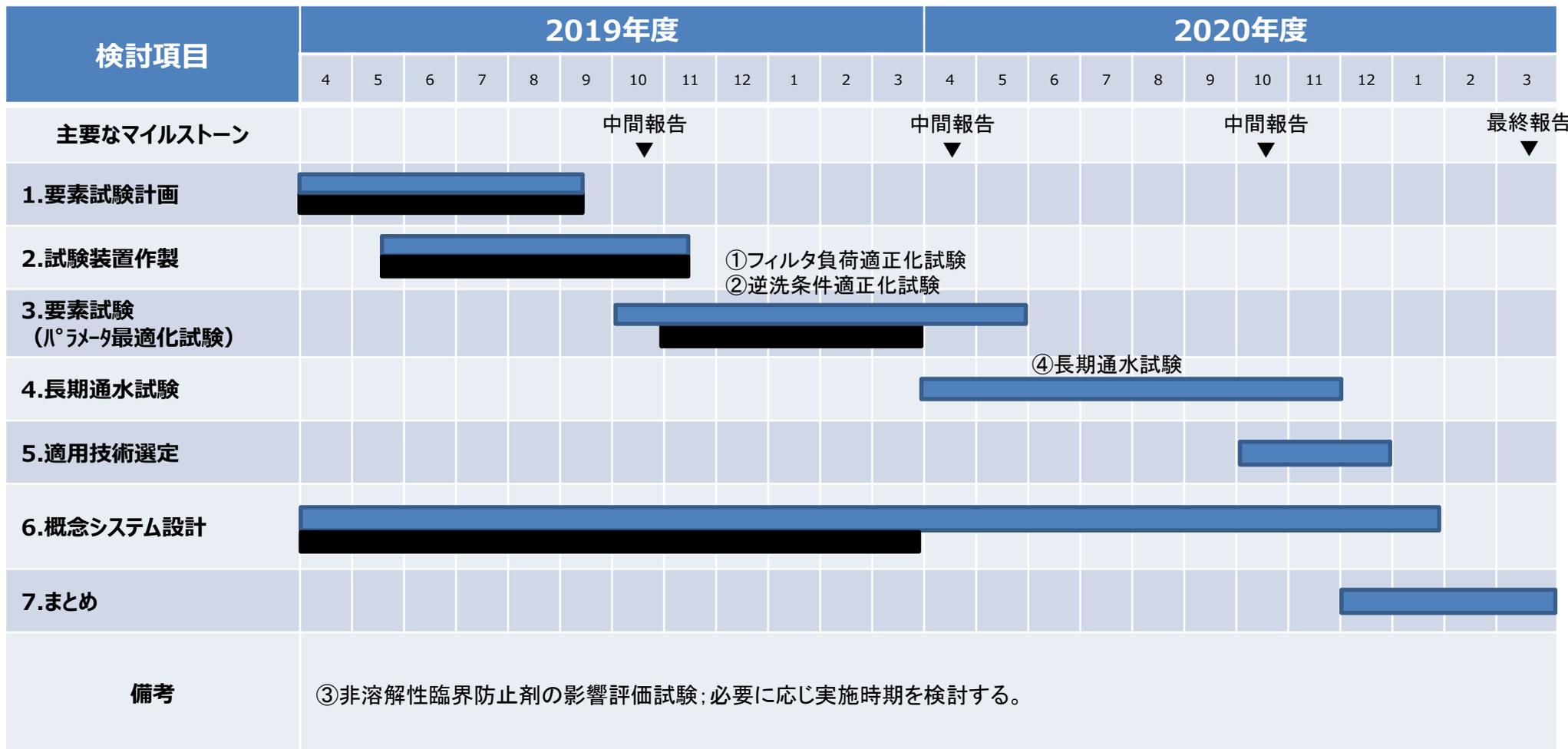
※1:無機フィルタとしては、金属焼結フィルタ、セラミックフィルタなどが候補となる

図 長期通水試験イメージ

# 7. 本事業の実施内容【 2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】 No.190

## a. 回収液や廃液等の性状把握

### ■ 開発工程



## 7. 本事業の実施内容【 2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】 No.191

### a. 回収液や廃液等の性状把握

#### ➤ 前提条件

#### ✓ 適用する粒子捕集機器候補

前年度までの試験結果、文献調査を基に下表のように選定した。

表 フィルタ通水試験 粒子捕集機器一覧

No.	系統	粒子捕集機器	フィルタメッシュサイズ	備考
1	粗取り	オートストレーナ	50 $\mu$ m	2018年度補助事業と同じメッシュサイズを選定
2	中取り	オートストレーナ	10、20 $\mu$ m	メッシュサイズ5 $\mu$ mのオートストレーナでは差圧上昇が顕著であったため、メッシュサイズの大きいフィルタで試験を実施
		金属焼結フィルタ	2、5、10、20 $\mu$ m	メッシュサイズ2 $\mu$ mの金属焼結フィルタでは差圧上昇が顕著であったため、メッシュサイズの大きいフィルタで試験を実施
3	最終処理	UF膜(セラミックフィルタ)	10、50、100nm	メッシュサイズ50、100nmのUF膜では差圧上昇が緩やかであったため、10nmのUF膜についても試験を実施

今回  
報告

#### ✓ 模擬粒子成分

燃料デブリの成分は、燃料成分、構造材成分、コンクリート成分におおまかに分けられる。

各成分を模擬するための粒子成分を下表に示すように設定した。

表 フィルタ通水試験 模擬粒子成分

No.	模擬対象		模擬粒子	
	粒子成分	比重	粒子成分	比重
1	二酸化ウラン	約11	炭化タングステン	約15
			二酸化タングステン	約11
2	炉内構造物	約8	SUS316L	約8
3	コンクリート	約2~3	ケイ砂	約3

## 7. 本事業の実施内容【 2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】 No.192

### a. 回収液や廃液等の性状把握

#### ➤ 前提条件

#### ✓ フィルタ通水試験 試験条件

処理対象水の液条件をもとに、フィルタ通水試験の共通条件を下表に示すように設定した。

表 フィルタ通水試験 試験条件

No.	項目	条件	備考
1	温度	常温(25℃程度)	除去性能の温度依存性は小さいと想定されるため常温とした。
2	pH	中性(無調整)	pHの影響により粒子が凝集、析出、溶解する可能性があるが、そうした場合には変化する因子は粒子径、SS濃度と考えられる。本開発では、粒子径とSS濃度を試験パラメータとして評価するため、仮に実機pHと試験pHが異なっていたとしても、その性能評価に資するデータを取得できるものとする。
3	五ほう酸ナトリウム	0ppm	2018年度の補助事業成果より、五ほう酸Naの影響は小さいと想定されるため無添加とした。
4	塩分	0ppm	燃料デブリ取り出し時の運用はPCV漏えいの有無により変わるが、塩分濃度の高いPCV漏えいありの条件であっても、塩分濃度は塩化物イオン数百ppm程度であり、流体の密度、粘度への寄与は小さいため考慮しない。
5	SS濃度	30ppm ~ 300ppm ※	基本条件を100ppmとし、加速試験条件300ppm、粗取り考慮条件30ppmとした。
6	粒子径	0.1 μm ~ 100 μm	非溶解性核種除去設備での想定捕集粒径
7	流量	3~10m <sup>3</sup> /h ※	現状の炉注水量の3m <sup>3</sup> /hと取り出し作業にて使用すると想定される水量を考慮し、10m <sup>3</sup> /hを基本条件とした。

※試験条件はフィルタ負荷が同様になるよう調整(例; 流量10m<sup>3</sup>/h × SS濃度100ppm ≒ 流量3m<sup>3</sup>/h × SS濃度300ppm )

## 7. 本事業の実施内容【2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】No.193

### a. 回収液や廃液等の性状把握

#### ➤ 試験結果

- ✓ フィルタ孔径を変更(5→20  $\mu\text{m}$ )し、SS濃度の保守性を排除(100ppm→30ppm)した条件で試験を行ったが、差圧上昇時間(通液時間)に変化はなかった。
- ✓ 粒径を実液系想定(50~0.1  $\mu\text{m}$ )とした場合、差圧上昇は緩和されたが粒子捕集率は低下。
- ✓ 粒子捕集率低下分については、後段の最終処理の負荷になるため影響評価が必要。

表 2018-2019年度試験結果概要

	2018年度	2019年度	
装置	オートストレーナ	オートストレーナ	
フィルタ孔径	5 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$ (差圧が比較的小さかった粗取りの孔径に近づけた)	
粒径	5 $\mu\text{m}$ 単一	50 $\mu\text{m}$ 単一	50~0.1 $\mu\text{m}$ 混合 (実液系想定)
流量	10m <sup>3</sup> /h	10m <sup>3</sup> /h	
SS濃度	100ppm (粗取り未考慮)	100ppm、30ppm (粗取り有無を考慮)	30ppm (粗取り考慮)
粒子捕集率	約90%		約30% (残60%程度は最終処理の負荷となる)
差圧上昇	大 (通液時間約10sec)		小 (通液時間約10min※1)

※1:差圧トレンドからの試算値(試験データから近似曲線を作成し算出した)

# 7. 本事業の実施内容 【 2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術 】 No.194

## a. 回収液や廃液等の性状把握

### ➤ まとめ

- ✓ 今回の試験では通液時間約10minの見通しを得たが、この条件でもなお逆洗頻度が高いため、中取りを実施する場合、中取りシステムの多系統化等の対策が必要と推察される。

### ➤ 今後の予定

- ✓ 最終処理の負荷適正化試験。
- ✓ 中取り多系統化の検討。
- ✓ 粗取り・中取り(必要に応じ)・最終処理 組合せ長期通水試験。

表 通液時間とドレン・逆洗水量等の関係(参考)

通液時間	ドレン・逆洗水量※1 (m <sup>3</sup> /y)	ドレン・逆洗回数 (回/y)	濃縮率※2 (倍)
10sec	2207520	3153600	0.04
10min	36792	52560	2.4
1h	6132	8760	14
24h	256	365	343

※1: 1回当たりのドレン・逆洗水の合計を700Lと仮定。

※2: 年間通水量(10m<sup>3</sup>/h × 24h/d × 365d/y=87600m<sup>3</sup>/y) ÷ ドレン逆洗水量

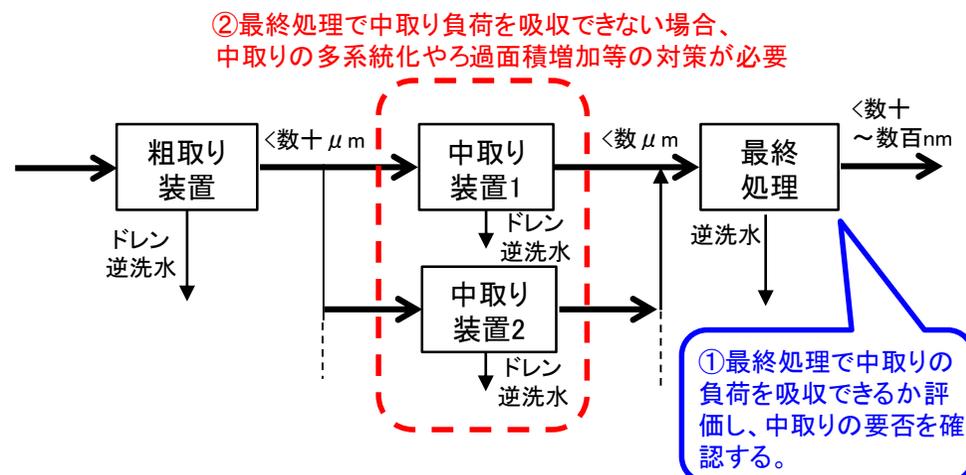


図 今後の検討方針

## 7. 本事業の実施内容【2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】No.195

### b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発

#### ● 開発の目的

- 粒子除去設備から発生する廃液等に含まれる固形分の分離技術を選定する。
- 選定された固液分離技術の実機適用性を要素試験により評価する。

#### ● 解決すべき課題

- 廃液中に含まれる微粒子は、自然沈降するのに数時間から数十時間を要し、固液分離を促進する技術の開発が必要。
- 分離した固形分の収納、遠隔操作、保守等を考慮した設備の具体化に必要なデータが不足。

#### ● 開発の進め方

- 文献調査による固液分離技術の選定。
- 文献調査による凝集剤の選定。
- 凝集剤を選定するための予備試験。
  - ① 模擬廃液を使用した凝集剤の沈降分離効果の確認(ビーカー規模試験)。
  - ② 凝集剤の吸着材への影響評価(バッチ試験)。
  - ③ 試験装置(沈降分離槽)の設計・製作。
- 沈降分離槽の実機適用性を確認するための要素試験。
  - ④ 沈降分離槽を使用した凝集沈殿試験。
  - ⑤ 凝集剤の吸着材への影響評価(バッチ試験、カラム通水試験)。

#### ● 得られる成果

- 凝集剤添加による凝集沈降技術の実機適用性の評価結果。
- 沈降分離槽の概念設計と運用データの取得。

# 7. 本事業の実施内容【 2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】No.196

## b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発

➤ 検討フロー;本PJでは、ビーカー試験にて凝集沈降の適用性を、装置試験にて操作・運用性を確認する。

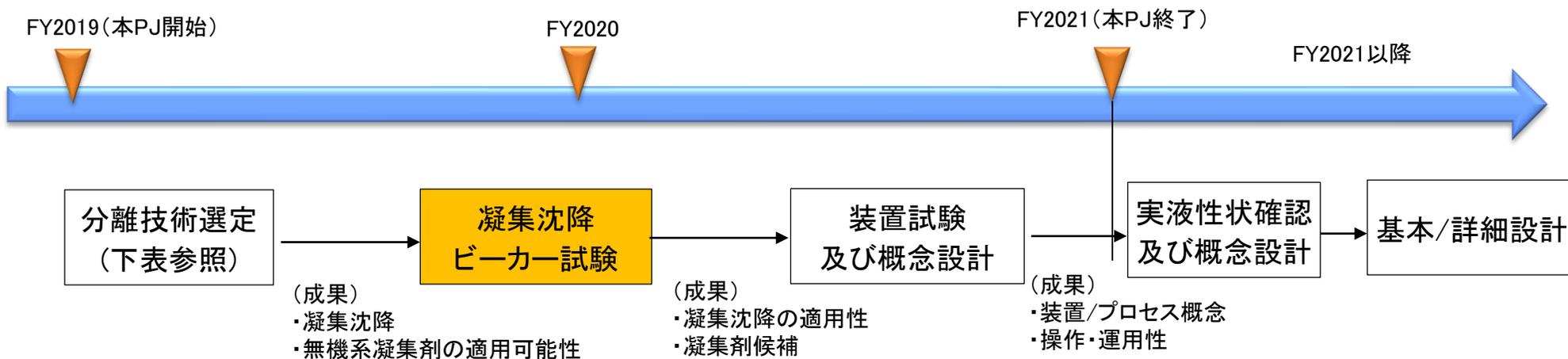
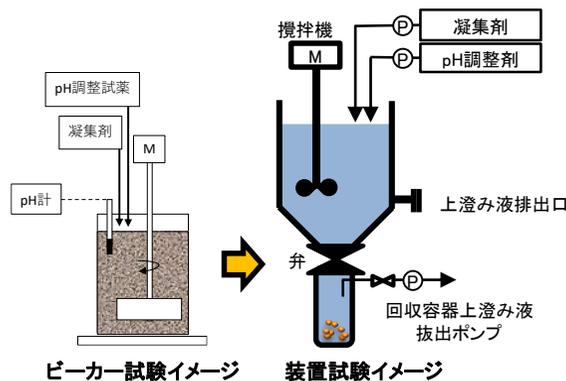


表 固液分離方法の特徴とスラッジ回収への適用性(文献調査まとめ)

固液分離法	特徴	スラッジ回収への適用性
凝集沈降	<ul style="list-style-type: none"> <li>・分離能は主に粒子表面性状(電荷等)に依存。⇒粒径が多少変動しても冗長性有。</li> <li>・燃料デブリとの接触を考慮し、凝集剤は基本的に無機系。</li> <li>・後段吸着システム等に対する凝集剤の影響が不明。</li> </ul>	○
遠心分離	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が簡易で保守性に優れる。</li> <li>・分離能は粒径や比重に強く依存する。</li> </ul>	△
ろ過	<ul style="list-style-type: none"> <li>・分離能は粒径に強く依存する。</li> <li>・微粒子の分離には顕著な差圧上昇を伴う可能性有。</li> <li>・脱水性には優れる(フィルタプレス等)。</li> </ul>	△
浮上法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・粒子の比重に強く依存(比重大だと浮上しない)。</li> <li>・浮上粒子の回収方法の検討が必要。</li> </ul>	×



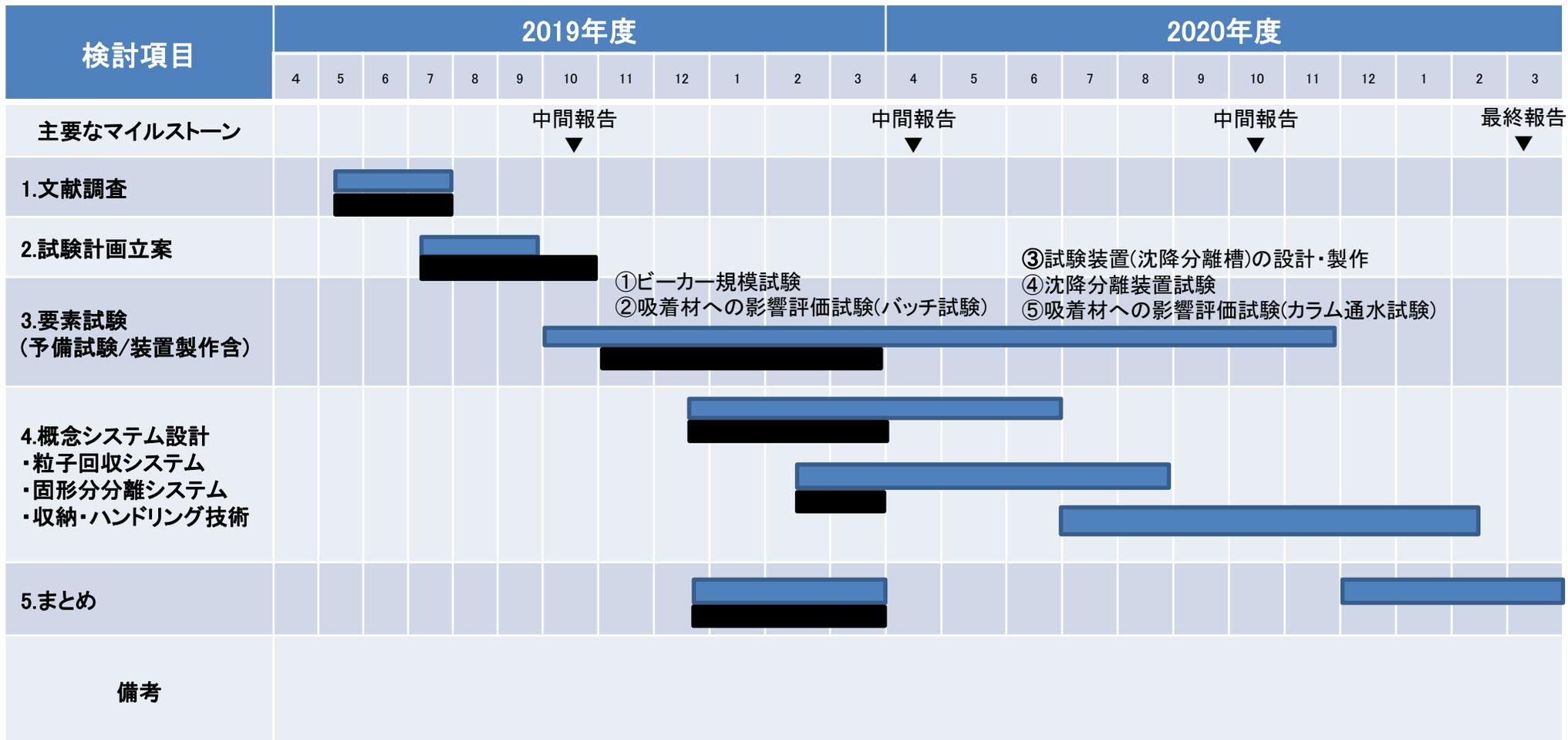
試験における確認項目  
 ・沈降時間、スラッジ体積、吸着材への影響  
 ・pH、水温、ほう酸有無といったパラメータの影響 等

FY2021以降の具体的な進め方については事業者エンジニアリングと調整が必要。

# 7. 本事業の実施内容【2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】 No.197

## b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発

### ➤ 開発工程



- ①ビーカー規模試験
- ②吸着材への影響評価試験(バッチ試験)
- ③試験装置(沈降分離槽)の設計・製作
- ④沈降分離装置試験
- ⑤吸着材への影響評価試験(カラム通水試験)

# 7. 本事業の実施内容【2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】No.198

## b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発

### ➤ 試験内容及び前提条件

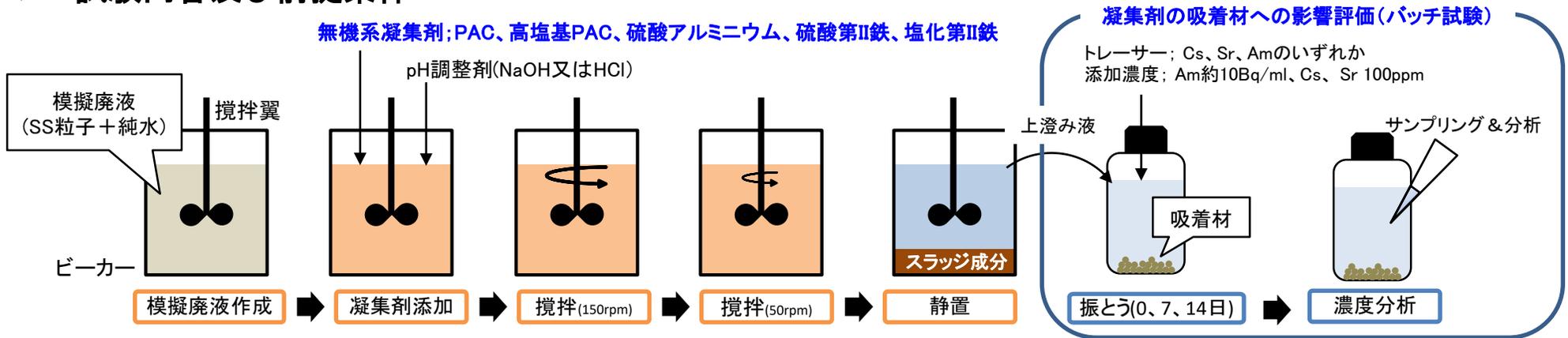


図 ビーカー規模沈降分離試験及び吸着材影響評価バッチ試験 イメージ

表 ビーカー規模沈降分離試験 前提条件

No.	項目	試験条件	条件設定根拠
1	凝集剤濃度	100～1500ppm	メーカー推奨値をもとに設定。
2	SS種類	①SiO <sub>2</sub> のみ(基準条件) ②3成分混合(WC、SUS、SiO <sub>2</sub> )	①SiO <sub>2</sub> のみは保守的条件(沈降し難いもの)として設定。 ②比較のため、実廃液を模擬した3成分混合条件でも試験を実施。
3	SS粒径	0.1～100 μm(基準条件; 0.1 μm)	前段の粒子回収設備の粒径範囲をもとに設定。
4	SS濃度	2000～20000ppm (基準条件; 10000ppm)	前段の粒子回収設備の入口条件100ppmの100倍濃縮である10000ppmを基準とし、その上下条件をパラメータとして評価。
5	pH	7±約2(基準条件; 6～7)	メーカー推奨値7を基準に上下条件を評価。
6	水温	10～40℃(基準条件; 25℃)	基準条件は25℃。四季変動考慮。
7	吸着材への影響	Cs・Sr吸着材:チタンケイ酸塩 α核種(Am)吸着材:活性炭	既往の検討結果から代表的な吸着材を選定。 凝集剤添加濃度1000ppm(前段のビーカー試験から設定)の上澄み液で試験。
8	五ほう酸ナトリウム	0～7000ppm as B	処理液にほう酸が混入した場合の影響を評価。

# 7. 本事業の実施内容 【 2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術 】 No.199

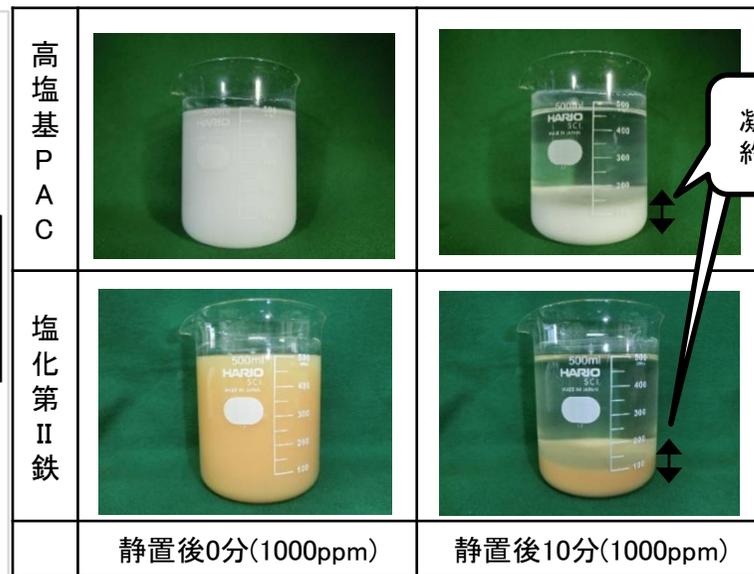
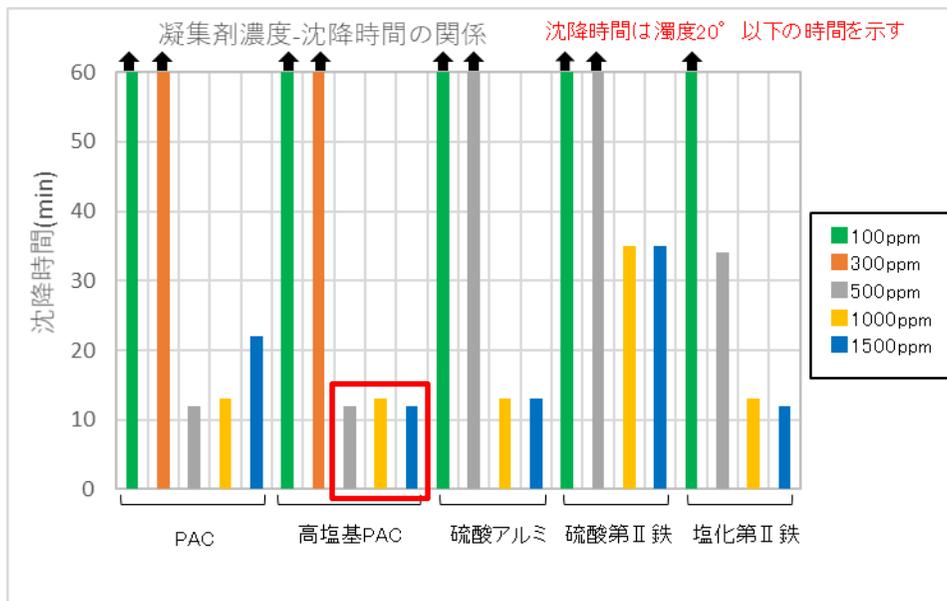
## b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発

### ➤ 試験結果(一例)

- ✓ ほう酸無添加系において、凝集剤添加濃度と沈降時間について評価。
- ✓ **どの凝集剤も添加濃度1000ppm以上で凝集沈降した(沈降時間40分以内)。**
- ✓ PACや高塩基PACは添加濃度500ppmでも沈降性良好。
- ✓ PAC1500ppmでは沈降時間が増加(添加量が多すぎると沈降時間長くなる)。

#### <試験条件>

凝集剤濃度: 100~1500ppm、廃液濃度: ケイ砂(SiO<sub>2</sub>)0.1 μm 10000ppm、ほう素(B)0ppm、廃液pH(凝集剤添加後pH調整時): 7±0.5  
 液温: 25°C、攪拌速度/時間: 強攪拌150rpm × 5min → 弱攪拌50rpm × 15min、液量440mL



# 7. 本事業の実施内容【2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】No.200

## b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発

### ➤ 試験結果(まとめ)

- ✓ ほう酸無添加系における凝集沈降の有効性を確認した。
- ✓ 今後、ほう酸添加時の影響を評価し、適切な凝集剤を選定する。

表 ビーカー規模沈降分離試験 試験結果概要

No.	項目	試験条件	試験結果
1	凝集剤濃度	100～1500ppm	<ul style="list-style-type: none"> <li>・どの凝集剤も添加濃度1000ppm以上で凝集沈降を確認。</li> <li>・沈降時間と凝集剤添加濃度から凝集剤の優劣をつけると、上から高塩基PAC、PAC≒塩化第II鉄、硫酸アルミ、硫酸第II鉄。</li> <li>・No2以降のパラメータ試験の基準添加濃度を1000ppmと設定。</li> </ul>
2	SS種類	①SiO <sub>2</sub> のみ(基準条件) ②3成分混合(WC、SUS、SiO <sub>2</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・①②どちらの条件でも凝集沈降は確認された。沈降時間は同程度。</li> <li>・凝集物の容積は3成分混合の方が小さい(比重大の粒子を含むため圧密化すると推察)。</li> </ul>
3	SS粒径	0.1～100 μm (基準条件;0.1 μm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・沈降時間は0.1 μmでは10～15分程度、1 μm以上では5分程度。</li> <li>・粒径大きい方が凝集沈降に有利。</li> </ul>
4	SS濃度	2000～50000ppm (基準条件;10000ppm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SS20000ppmまでは沈降性良好(50000ppmは沈降せず)。</li> <li>・高塩基PACはSS濃度高いほど沈降時間が短い。</li> </ul>
5	pH	7±約2 (基準条件;7±0.5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適正pH範囲は、高塩基PACがpH6～8.5、塩化第II鉄がpH4.5～7.1。</li> <li>・実機pHを中性～塩基性と想定すると、高塩基PACの方がpH調整剤使用量を抑制できる可能性有。</li> </ul>
6	水温	10～40℃ (基準条件;25℃)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本温度範囲での影響は確認されず(基準25℃と同じ結果となった)。</li> </ul>
7	吸着材への影響	Cs・Sr吸着材:チタンケイ酸塩 α核種(Am)吸着材:活性炭	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上澄み液を添加しても吸着性能に大きな変化なし(除去率ほぼ100%)</li> </ul>
8	五ほう酸ナトリウム	0～7000ppm as B	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試験中。</li> </ul>

ほう酸無添加系

## 2. 技術開発の進捗状況(要素試験結果)

### 2)(ii)②b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発

#### ➤ 2019年度まとめ

✓ ほう酸無添加系にて、凝集沈降分離の適用可能性を確認した。

#### ➤ 今後の予定

✓ ほう酸添加系での凝集剤の適用性確認及びその結果を受けた概念プロセス設計。

✓ 凝集沈降装置試験による運用性の確認、課題の抽出及び対策検討。

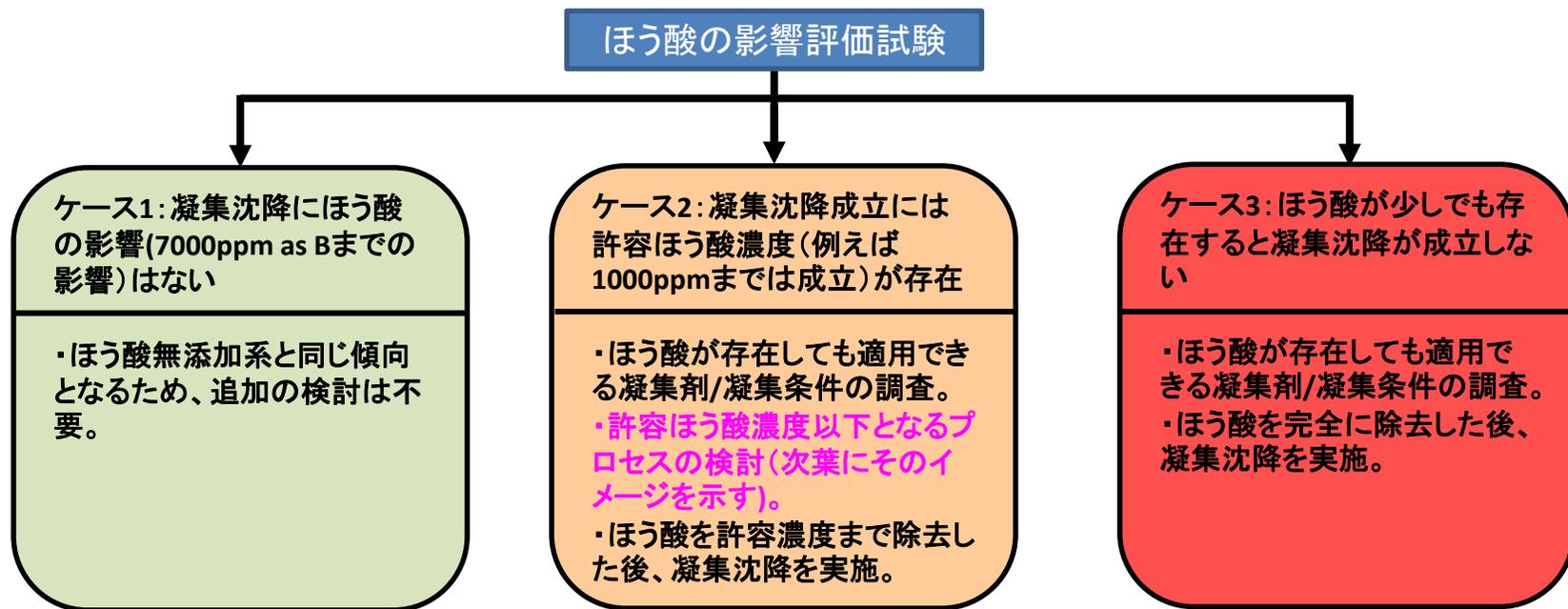


図 ほう酸の影響による検討ケースの分岐

## 2. 技術開発の進捗状況(要素試験結果)

### 2)(ii)②b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発

#### ➤ 許容ほう酸濃度存在ケースの概念システム案(参考)

- ✓ 逆洗水にほう酸を含まない外部水を用いることで、凝集沈降が適用できる可能性がある。

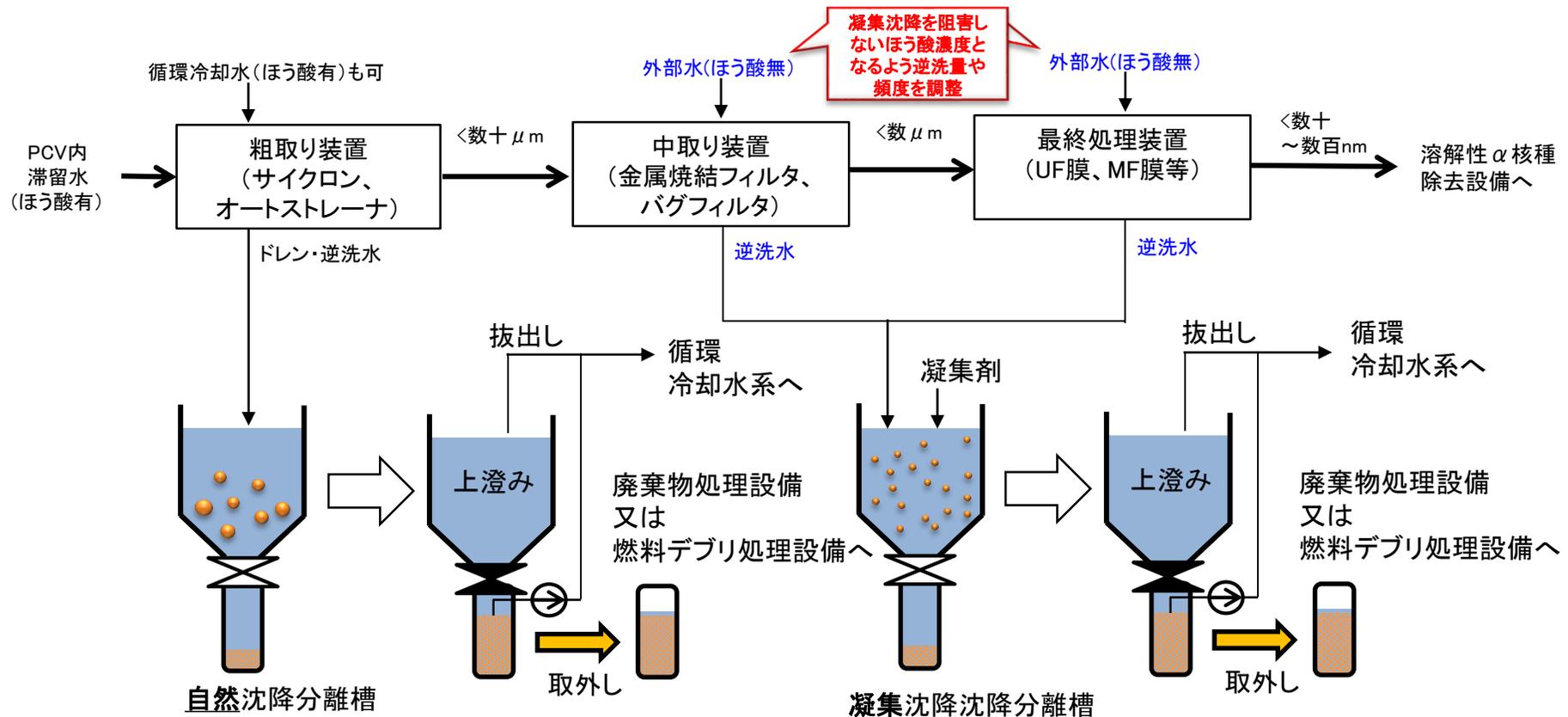


図 凝集沈降システムの概念案(許容ほう酸濃度存在ケース)

# 7.本事業の実施内容【2)(ii)② PCV内から回収された堆積物等の処理技術】No.203

## b. 回収液や廃液等からの固形分の分離・収納技術の開発

### ➤ 試験装置(沈降分離槽)の設計・製作

✓ 試験装置の概念図を作成し、必要機器を抽出した。

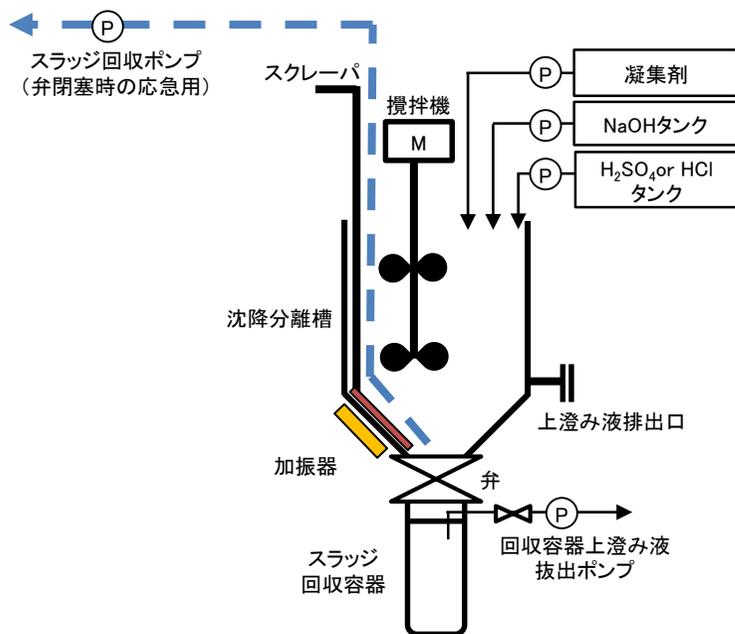


図 試験装置概念図

表 試験装置仕様案

No.	機器名称	員数	備考
1	沈降分離槽	1式	槽高さはビーカー試験の沈降時間を基に設定。
2	スラッジ回収容器	1式	アクリル製。形状や寸法・容量は、ビーカー試験結果及び収納缶を参考に設定。
3	ゲート弁	1式	電動駆動方式のゲート弁
4	タンク	3個	凝集剤試薬用×1、pH試薬用×2
5	ポンプ	5個	凝集剤供給用×1、pH試薬供給用×2、上澄液抜出用×1、スラッジ抜出用×1
6	攪拌機	1式	ビーカー試験の攪拌速度を基に設定
7	スクレーパ	1式	手動式。槽に付着した粒子を除去するため、
8	加振器	1式	槽付着粒子除去及び弁閉塞防止用
10	配管	1式	処理前後の液の移送用
11	pH計	1式	ビーカー試験と同スペックのものを想定。
12	濁度計	1式	ビーカー試験と同スペックのものを想定。
13	架台	1式	装置設置用

## 7. 本事業の実施内容

### 2) 燃料デブリ取り扱い技術の開発

#### (iii) 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関わる技術の調査

PCV内から取り出されたものを、燃料デブリと放射性廃棄物に仕分ける場合に必要となる技術を調査する。

仕分けを行うための方法について検討し、実現性の評価について、「燃料デブリの収納・移送・保管技術の開発」及び「固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発」等の関連事業とともに実施する。

##### ① 仕分けに関するシナリオ策定に向けた検討

- ・前提条件(仕分け要求)の整理し、仕分け要求フローを検討した。

##### ② 仕分けに必要な技術の検討

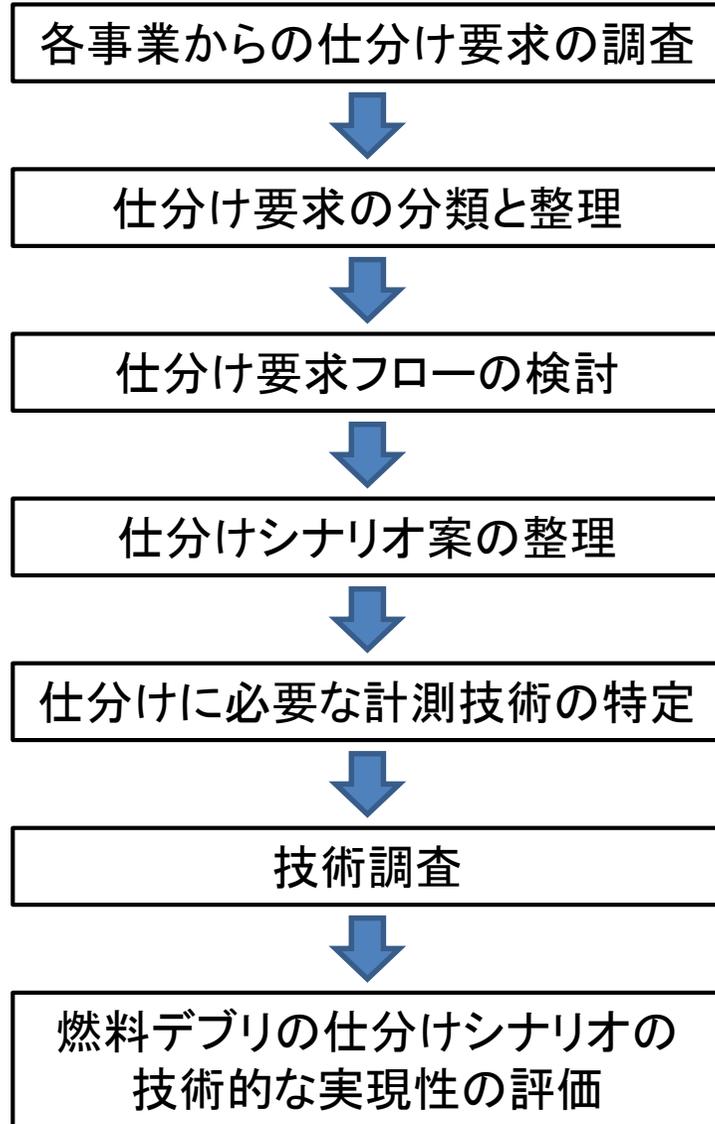
- ・各仕分け判定方法の適用場所を整理し、技術調査の要否を検討した。
- ・技術調査を実施し、仕分けへの適用可能性を検討した。

##### ③ 燃料デブリの仕分けシナリオの技術的な実現性の評価

- ・技術調査結果を基に、各仕分けポイントの技術的な実現性を評価し、実現性を考慮した仕分けシナリオを策定した。

- 開発の目的
  - 燃料デブリとして保管する量を低減するため、燃料デブリと放射性廃棄物を仕分け(分別)
  - 燃料デブリと放射性廃棄物が仕分けできる技術の実現可能性の評価
- 解決すべき課題
  - 燃料デブリ/放射性廃棄物の仕分け方法の導出
  - 燃料デブリ/放射性廃棄物の仕分け手順(シナリオ)及び仕分け実施場所が未定
- 開発の進め方
  - 取り出し、移送、保管の観点から、仕分けに関する要件を整理
  - 要件の整理結果から、燃料デブリの仕分け方法案を設定
  - 燃料デブリの仕分けに必要な処置及び計測技術を特定
  - 燃料デブリの仕分けに必要な処置及び計測技術に関する調査
  - 燃料デブリの仕分けのシナリオ案及び実施場所案の設定
  - 燃料デブリ/放射性廃棄物の仕分けに必要な開発課題と難易度の整理
- 得られる成果
  - 燃料デブリ/放射性廃棄物の仕分け方法の設定
  - 燃料デブリ/放射性廃棄物の仕分けに必要な開発課題の特定

## ■ 検討フロー



目的、対象、仕分け内容、実施方法、実施場所、必要な技術、要求側で想定する課題、関連する事業などをアンケート調査

以下に分類・整理して検討対象を設定

- ①各事業内で検討する要件
  - ②取合い条件として設計で検討する要件
  - ③検討対象とする仕分け要件
- } 検討対象外

仕分け要件と実施場所から考えられるすべての仕分け要求ポイントを論理的に、機械的に並べたフロー図を作成

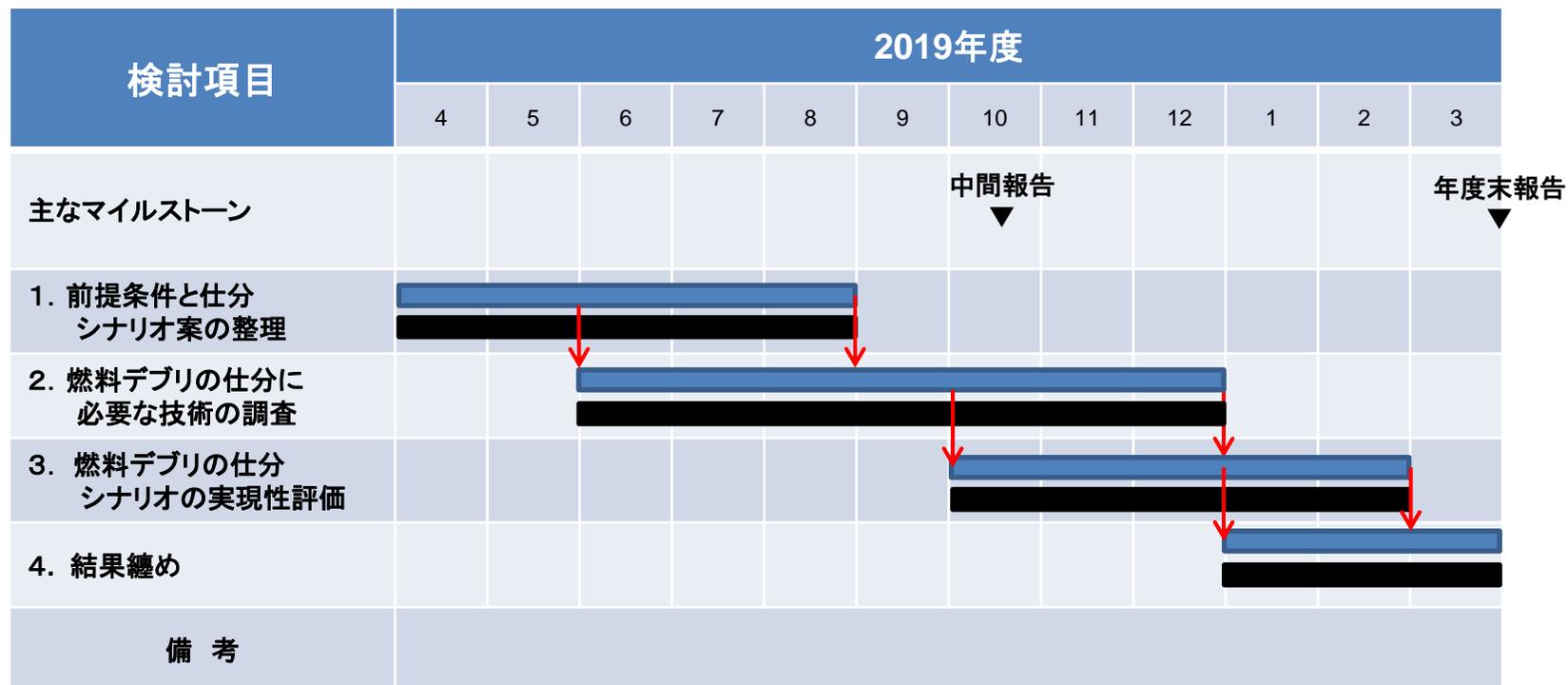
各仕分けポイントの得失評価、技術的な実現性の想定を基に、仕分け要求フロー図から複数の仕分けシナリオ案を作成

判定方法として必要な計測技術について、バックグラウンドの大小の観点で実施場所を分類し、技術調査対象を特定

目視(画像)判定技術、PCV内核物質分布推定技術、核物質測定技術の調査を行い、適用可能性を評価

技術調査結果を基に、各仕分けポイントの技術的な実現性を評価し、実現性を考慮した仕分けシナリオを策定

## ■ 開発工程



## ■ 前提条件(仕分け要求)の整理

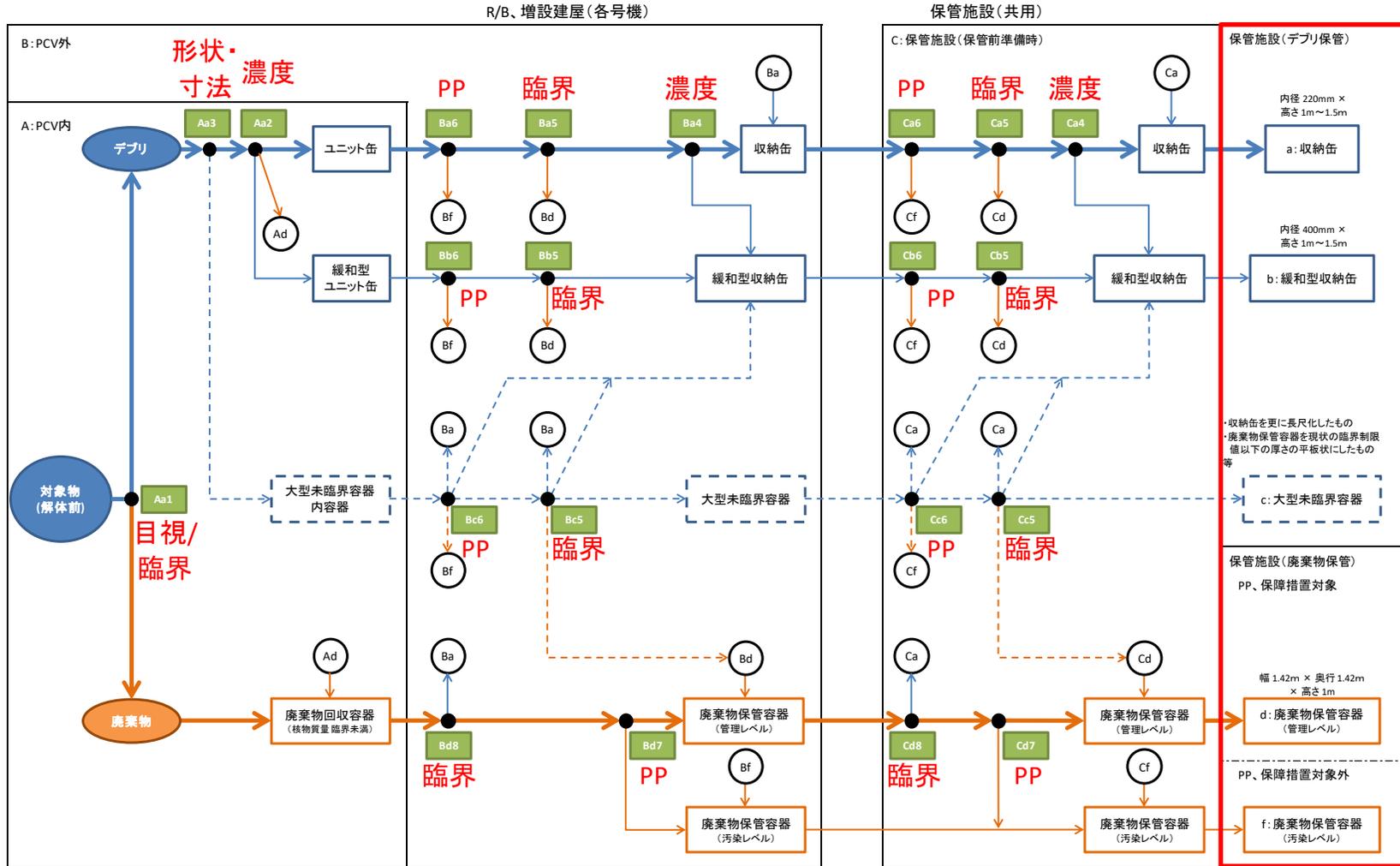
抽出した仕分け要求の中から、検討対象とする仕分けの要件(目的、対象物、仕分けの実施場所、判定方法、判定基準、想定される課題、仕分けの得失等)を整理した。

### ● 検討対象とする仕分け要求

番号	目的	趣旨、仕分け内容	仕分けの実施場所	必要な技術
1	臨界安全の確保	有意な核燃料物質を含むものは形状管理の容器(収納缶)に収納して臨界安全を確保	A:PCV内	目視(画像)判定/核物質分布推定/臨界安全管理用核物質測定
2	取り出しスループットの向上	核物質量が小さい回収物は収納缶より大型の緩和型収納缶に収納	A:PCV内	核分裂性物質濃度測定用核物質測定
3		対象物大の回収物は大型未臨界容器に収納	A:PCV内	目視による形状・寸法の把握
4	燃料デブリ保管規模の縮小	核物質量が小さい回収物は収納缶より大型の緩和型収納缶に収納	B:各号機 PCV外 C:保管施設	核分裂性物質濃度測定用核物質測定
5		核物質量が小さい回収物は廃棄物容器に収納		臨界安全管理用核物質測定
6		保障措置対象外の回収物は廃棄物容器に収納		PP、保障措置の終了判断用核物質測定
7	廃棄物の保管・管理の合理化	保障措置対象と保障措置対象外の廃棄物を分別	B:各号機 PCV外 C:保管施設	PP、保障措置の終了判断用核物質測定
8		廃棄物に未臨界の制限値を超えない核物質質量しか含まれていないことを確認	A:PCV内 B:各号機 PCV外 C:保管施設	臨界安全管理用核物質測定

■ 仕分けに関するシナリオ策定に向けた検討結果の概要(仕分け要求フロー図)

仕分け要件と実施場所から考えられるすべての仕分け要求ポイントを物流フローにそって、論理的に、機械的に並べたもの



- 前提条件
- ① PCV内では、燃料デブリ、廃棄物は内容子に入れられる
  - ② 内容子は、PCV外にてそれぞれ対応する外容器(収納缶、廃棄物保管容器等)に入れられる
  - ③ 大型未臨界容器は従来検討されていない新しい概念なので、点線で表記する

仕分けポイントを●で示す。仕分けポイントは、仕分けを行う場合の場所と順序を示しており、必ずそのポイントで仕分けを行うことを意味するものではない。上流側で仕分けが完結した場合は、下流側の仕分けを実施する必要はない。

仕分けポイントの表記法  
 1桁目: 区域記号  
 2桁目: ライン記号  
 3桁目: 仕分け要件番号

■ 仕分けに関するシナリオ策定に向けた検討結果の概要

## ● 仕分け分類結果と判定基準(暫定案)

仕分け分類	仕分け要件の番号	判定基準(暫定)				
		(右記のいずれも満足しない)	燃料デブリ中のU-235濃度: 1.5wt%相当の反応度以下 <sup>*1</sup>	収納缶への収納が困難な大きさのもの	核物質量が3.7kg/容器以下 <sup>*2</sup>	核物質量が、核物質防護対象、保障措置終了となる量(未定)以下
a: 収納缶 (内径220mm、高さ約1m)	1	○	—	—	—	—
b: 緩和型収納缶 (内径400mm)	1、2、4	—	○	—	—	—
c: 大型未臨界容器 <sup>*3</sup>	1、3	—	—	○	—	—
d: 廃棄物保管容器 (管理レベル)	1、5、7、8	—	—	—	○	—
f: 廃棄物保管容器 (汚染レベル)	1、5、6、7、8	—	—	—	○	○

\*1: 収納缶PJの過去の評価で、燃料デブリが全てU-235とU-238で構成されると仮定した場合に、燃料デブリに占めるU-235の重量割合1.7wt%程度以下であれば、内径400mmの収納缶が適用できるという結果が得られていることから、この1.7wt%に余裕を見込んで1.5wt%と設定

\*2: 保管時の配置・段積み等を考慮して、最小臨界量(約30kg)を8個の廃棄物保管容器で等分して設定

\*3: 大型未臨界容器については、アイデア段階であり、具体的な仕様は未設定

■ 仕分けに必要な技術の検討結果(技術調査対象の特定)

仕分け要件整理で抽出した判定方法について、判定の難易度に影響するバックグラウンドの大小の観点で実施場所を分類し、それぞれ技術調査の対象該否を設定した。(下表の○が調査対象)

No.	判定(測定)技術	適用場所及びバックグラウンドの目安			備考
		A:PCV内 (内容器収納前) 数10～数100 Sv/h	B:各号機 PCV外 (RB、増設建屋) 数mSv/h レベル	C:保管施設 (保管前準備時) 500 μSv/h 以下 (アンバー区域)	
1	目視(画像)判定 ・識別見本*1による照合 ・画像処理判定(AI含む)	○ (1-A)	○ (1-B)	○ (1-C)	*1) 構造材の形状データ等、目視判定の判断材料となるもの
2	PCV内核物質分布推定	○ (2-A)			事故時挙動解析、サンプリング分析結果から分布図を作成 ⇒ 直接、分布を測定する技術を調査
3	核物質測定(核種、濃度)				
	①核分裂性物質濃度測定用	○ (3①-A)	○ (3①-B)	○ (3①-C)	・緩和型収納缶への収納可否判断用
	②臨界安全管理用	○ (3②-A)	○ (3②-B)	○ (3②-C)	・廃棄物保管容器への収納可否判断用
	③PP、保障措置の終了判断用		○ (3③-B)	○ (3③-C)	・PP、保障措置対象の判断用

注) 下段の記号は、調査技術の適用場所を示すため、判定(測定)技術の番号と適用場所の記号(A、B、C)を組み合わせたもの

## ■ 仕分けに必要な技術の検討結果(技術調査対象技術)

既存の判定(測定)技術を調査し、原理、性能、使用環境、装置構成・サイズ、測定時間(測定速度)、使用実績、適用場所、課題を調査票に整理

●:想定するもの

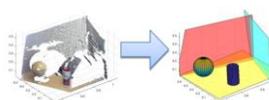
調査対象技術	適用を想定する判定(測定)目的											
	目視(画像)判定			分布推定	濃度測定			臨界安全管理			PP、保障措置	
	1-A	1-B	1-C	2-A	3①-A	3①-B	3①-C	3②-A	3②-B	3②-C	3③-B	3③-C
反射率計測	●	●	●	—	—	—	—	—	—	—	—	—
画像判定	●	●	●	—	—	—	—	—	—	—	—	—
パッシブα線計測	—	—	—	●	●	●	●	●	●	●	—	—
パッシブγ線計測	—	—	—	●	●	●	●	●	●	●	—	—
パッシブ中性子計測	—	—	—	●	●	●	●	●	●	●	—	—
アクティブX線計測	—	—	—	—	●	●	●	●	●	●	—	—
X線透過	—	—	—	—	—	●	●	—	●	●	—	—
宇宙線散乱計測	—	—	—	—	—	●	●	—	●	●	—	—
アクティブ中性子計測	—	—	—	—	—	—	—	—	●	●	●	●
パッシブ中性子計測+γ線計測	—	—	—	—	—	—	—	—	●	●	●	●
パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測	—	—	—	—	—	—	—	—	●	●	●	●

## ■ 仕分けに必要な技術の検討結果(主な測定技術調査票(1/4))

表-1 測定技術調査票

技術名称	反射率計測技術(ハイパースペクトルカメラ)	
原理	<p>・ハイパーカメラで対象表面の反射率分布を取得し、事前測定した各種材料とのスペクトルと比較することで、材質を識別する。</p> <p>・得られる情報は表面に限定されるため、比較的損傷の少ない構造物等に適用することで、構造物表面の材質(燃料成分の付着の有無等)を大まかに評価する。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p>図1: 鉱石の材料評価の例 <a href="https://www.kiv.co.jp/hyperspectral/case_study/case_study06.html">https://www.kiv.co.jp/hyperspectral/case_study/case_study06.html</a>より引用</p> <p>図2: ウラン鉱石のスペクトル PRELIMINARY STUDY ON THE DETECTION OF RADIOACTIVITY WITH AIRBORNE REMOTE SENSING SYSTEMS より引用</p>	
性能	分解能	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定対象表面のコンクリート、金属などの大まか組成成分が分かる程度</li> <li>測定対象表面のみのデータになるため、測定対象物の燃料成分の重量やUO2等の割合の測定は不可</li> <li>測定対象物の損傷が比較的少ない場合、その画像と構造物の設計図面を照合することで、測定対象物が何かを推定できる可能性あり</li> </ul>
	測定下限値	絶対値での評価は困難
使用環境(バックグラウンド)	詳細不明(遮蔽体が必要)	
装置構成・サイズ	<p><b>【装置構成】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>カメラ及びそれを操作する機構が必要</li> <li>カメラは対放射線性がないため、遮蔽体が必要</li> <li>データはケーブルで伝送する</li> </ul> <p><b>【サイズ】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>遮蔽体のサイズ依存するため、対放射線性試験などで評価が必要</li> <li>カメラ単体(Headwall社Nano-Hyperspec): 約76 × 76 × 120 mm(移動用機構、遮蔽体を除く)</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>図3: カメラの外観例 (Headwall社Nano-Hyperspec)</p> <p>図4: 構造のイメージ</p>	
測定時間(測定速度)	1画像あたり、数秒 ※画角はレンズによって異なる。	
使用実績	一般的な鉱石の仕訳実績あり。UO2やデブリの測定実績なし	
適用場所	1A, 1B, 1C。ただし、容器収納後は蓋を開けるなどの作業が必要	
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象内部の組成情報が得られない(×)</li> <li>※表面状態(組成分布)の大まかな確認のみ使用する場合は△</li> <li>遮蔽体の設計および耐放射線性の評価が必要(△)</li> <li>カメラの操作機構の開発が必要(△)</li> <li>照明の種類、配置の最適化検討が必要(△)</li> <li>水分などによるスペクトルの変動影響評価が必要(△)</li> <li>事前にウランなどの測定対象材料のスペクトルデータの作成が必要(△)</li> </ul>	

表-2 測定技術調査票

技術名称	画像判定技術(カメラ画像、3D形状を活用した構造物判定)	
原理	<p>・可視カメラで対象の外観を撮影した画像や、レーザー光線によるTOF(タイム・オブ・フライト、Time Of Flight)方式のレーザーキャナーなどで測定した対象の外観形状を構造物の外観写真や図面データなどと比較し構造物の種類を識別する。</p> <p>・構造物の外観写真や図面データなどと比較するため損傷の少ない構造物に適用が限定されるが、市販センサ(認識処理は別)で構造物の種類が識別できる可能性がある。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>図1: 車載カメラによる画像認識の例 <a href="https://jp.mathworks.com/discovery/image-recognition.html">https://jp.mathworks.com/discovery/image-recognition.html</a>より引用</p> <p>図2: 形状フィッティングの例 <a href="https://jp.mathworks.com/discovery/image-recognition.html">https://jp.mathworks.com/discovery/image-recognition.html</a>より引用</p>	
性能	分解能	<ul style="list-style-type: none"> <li>外観(形状・寸法)に特徴的な違いがある構造物の種別を識別可能</li> <li>外観(形状・寸法)と図面データなどを比較するため、損傷のある対象には適用不可。</li> </ul>
	測定下限値	周囲の状況や測定対象に依存。
使用環境(バックグラウンド)	半導体センサを使用するため、高線量環境では遮蔽体が必要。 耐放射線カメラの場合は、耐放性があるため遮蔽体は不要。	
装置構成・サイズ	<p><b>【装置構成】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>カメラ/レーザーキャナー及びそれを操作する機構が必要。</li> <li>外観画像や外観形状から構造物を識別する処理が必要。</li> <li>半導体センサ(カメラ/レーザーキャナー)は耐放射線性がないため、遮蔽体が必要(耐放射線カメラ使用時は除く)。</li> <li>データはケーブルで伝送。</li> </ul> <p><b>【サイズ】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>遮蔽体のサイズ依存するため、耐放射線性試験などで評価が必要</li> <li>耐放射線性カメラ単体: 約Φ41 × 250[mm]</li> <li>レーザーキャナー単体(FARO社 FOCUS150): 約230x183x103mm</li> </ul> <p>※移動用機構、遮蔽体を除く</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>図3: 耐放射線性カメラの外観例 (Diakont社 STS-40M)</p> <p>図4: レーザスキャナーの外観例 (FARO社 FOCUS150)</p>	
測定時間(測定速度)	可視カメラ: 1画像あたり1秒以下(画角はレンズによって異なる) レーザーキャナー: 数分~数十分(測定範囲、測定ピッチによって異なる)	
使用実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>車載カメラによる画像認識</li> <li>PCV内部調査(3号機)で取得した画像評価の一部</li> </ul>	
適用場所	1A	
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>損傷のある対象には適用不可(×)</li> <li>類似の構造物と識別が不可能な可能性あり(×)</li> <li>遮蔽体の設計および耐放射線性の評価が必要(△)</li> <li>カメラ/レーザーキャナーの操作機構の開発が必要(△)</li> <li>識別処理の検討が必要(△)</li> <li>トレーニングデータ(学習データ)が必要(△)</li> <li>照明の種類、配置の最適化検討が必要(△)</li> </ul>	

## ■ 仕分けに必要な技術の検討結果(主な測定技術調査票(2/4))

表-7 測定技術調査票

技術名称	パッシブγ線計測技術(CdTeセンサ)																																									
原理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CdTe半導体とγ線の相互作用で生じた電荷量を測定</li> <li>・事前に準備した変換係数を用いて、電荷量をCdTe半導体への付与エネルギーに変換</li> <li>・エネルギー分布から入射したγ線の放出核種を評価</li> <li>・Eu-154由来γ線束の有無やその量から核燃料の有無やその量を推定</li> </ul>																																									
性能	分解能	12.9keV @662keV																																								
	測定下限値	測定時間に依存 例: $8.6 \times 10^{-3} / \text{cm}^2/\text{s}$ @1274keV																																								
使用環境 (バックグラウンド)	使用済み燃料集合体測定時の実績値: 19.4Gy/h																																									
装置構成・サイズ	 <p>燃料デブリ検知装置を用いて使用済燃料使用時の応答を測定</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>機器</th> <th>項目</th> <th>仕様</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">CdTe半導体検出器</td> <td>外形</td> <td>φ7 mm×51 mm</td> </tr> <tr> <td>ケーブル</td> <td>同軸ケーブル2本(番号、高圧)、リアンプ駆動用ケーブル1本、60m</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">改良型小型B-10線検出器</td> <td>外形</td> <td>φ7 mm×100 mm</td> </tr> <tr> <td>ケーブル</td> <td>同軸ケーブル1本、60m</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">遮蔽体</td> <td>外形</td> <td>62 mmW×113 mmD×78 mmH</td> </tr> <tr> <td>材質</td> <td>タングステン (17.9 g/cm<sup>3</sup>)</td> </tr> <tr> <td>重量</td> <td>英中: 8.5 kg, 水中: 7.0 kg</td> </tr> <tr> <td>遮蔽厚</td> <td>下部: 40 mm, 側面部・背面部: 24 mm</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">水封容器</td> <td>外形</td> <td>φ140 mm×100 mm</td> </tr> <tr> <td>材質</td> <td>アルミニウム</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">結合ケーブル</td> <td>外径</td> <td>7.7 mm</td> </tr> <tr> <td>線心数</td> <td>同軸: 3心, 単線線: 4心</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">電源・信号処理装置</td> <td>AWG</td> <td>同軸: 26, 単線線: 30</td> </tr> <tr> <td>電源</td> <td>高圧電源: 最大+1000 V リアンプ電源: NiMH規格</td> </tr> <tr> <td>下-収量</td> <td colspan="2">ノートPC</td> </tr> </tbody> </table>		機器	項目	仕様	CdTe半導体検出器	外形	φ7 mm×51 mm	ケーブル	同軸ケーブル2本(番号、高圧)、リアンプ駆動用ケーブル1本、60m	改良型小型B-10線検出器	外形	φ7 mm×100 mm	ケーブル	同軸ケーブル1本、60m	遮蔽体	外形	62 mmW×113 mmD×78 mmH	材質	タングステン (17.9 g/cm <sup>3</sup> )	重量	英中: 8.5 kg, 水中: 7.0 kg	遮蔽厚	下部: 40 mm, 側面部・背面部: 24 mm	水封容器	外形	φ140 mm×100 mm	材質	アルミニウム	結合ケーブル	外径	7.7 mm	線心数	同軸: 3心, 単線線: 4心	電源・信号処理装置	AWG	同軸: 26, 単線線: 30	電源	高圧電源: 最大+1000 V リアンプ電源: NiMH規格	下-収量	ノートPC	
機器	項目	仕様																																								
CdTe半導体検出器	外形	φ7 mm×51 mm																																								
	ケーブル	同軸ケーブル2本(番号、高圧)、リアンプ駆動用ケーブル1本、60m																																								
改良型小型B-10線検出器	外形	φ7 mm×100 mm																																								
	ケーブル	同軸ケーブル1本、60m																																								
遮蔽体	外形	62 mmW×113 mmD×78 mmH																																								
	材質	タングステン (17.9 g/cm <sup>3</sup> )																																								
	重量	英中: 8.5 kg, 水中: 7.0 kg																																								
	遮蔽厚	下部: 40 mm, 側面部・背面部: 24 mm																																								
水封容器	外形	φ140 mm×100 mm																																								
	材質	アルミニウム																																								
結合ケーブル	外径	7.7 mm																																								
	線心数	同軸: 3心, 単線線: 4心																																								
電源・信号処理装置	AWG	同軸: 26, 単線線: 30																																								
	電源	高圧電源: 最大+1000 V リアンプ電源: NiMH規格																																								
下-収量	ノートPC																																									
測定時間 (測定速度)	測定環境に依存 例: 使用済み燃料集合体測定時の実績: 3分以上																																									
使用実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用済燃料集合体を利用した放射線環境下で動作確認済み</li> <li>・1F-1PCV内部詳細調査でROVIに搭載して使用予定</li> </ul>																																									
適用場所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2-A(センサ走査要)</li> <li>・3②-A, 3②-B, 3②-C(他技術や事前分析・解析結果と組合せ要)</li> </ul>																																									
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適用環境に応じた遮蔽及びコリメータ設計(Δ)</li> <li>・ウラン重量への換算方法(Δ)</li> <li>・同位体元素の濃度測定(×: 3①-A,B,C)</li> <li>※他技術や事前分析・解析結果と組合せて測定対象の有無や濃度の高低の推定に使用する場合にはΔ。</li> </ul>																																									

表-16 測定技術調査票

技術名称	パッシブ中性子計測技術(改良型小型B-10センサ)																																									
原理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・B-10と熱中性子との核反応で生じた荷電粒子のエネルギーに相関を持つ電荷量(波高値)を測定</li> <li>・波高値スペクトルを測定し、任意の領域を中性子計測領域と定め、計数値を取得</li> <li>・事前に取得した熱中性子感度を利用して計数値から熱中性子束を評価</li> <li>・熱中性子束の有無やその量から核燃料の有無やその量を推定</li> </ul>																																									
性能	分解能	—																																								
	測定下限値	測定時間に依存(熱中性子感度: 0.2 cps/nv)																																								
使用環境 (バックグラウンド)	線量率耐性: 650Gy/h 累積線量: 1MGy以上(付帯ケーブルが制約)																																									
装置構成・サイズ	<p>外形: φ7mm × 100mm ケーブル: 同軸ケーブル1本</p>  <p>燃料デブリ検知装置を用いて使用済燃料使用時の応答を測定</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>機器</th> <th>項目</th> <th>仕様</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">CdTe半導体検出器</td> <td>外形</td> <td>φ7 mm×51 mm</td> </tr> <tr> <td>ケーブル</td> <td>同軸ケーブル2本(番号、高圧)、リアンプ駆動用ケーブル1本、60m</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">改良型小型B-10線検出器</td> <td>外形</td> <td>φ7 mm×100 mm</td> </tr> <tr> <td>ケーブル</td> <td>同軸ケーブル1本、60m</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">遮蔽体</td> <td>外形</td> <td>62 mmW×113 mmD×78 mmH</td> </tr> <tr> <td>材質</td> <td>タングステン (17.9 g/cm<sup>3</sup>)</td> </tr> <tr> <td>重量</td> <td>英中: 8.5 kg, 水中: 7.0 kg</td> </tr> <tr> <td>遮蔽厚</td> <td>下部: 40 mm, 側面部・背面部: 24 mm</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">水封容器</td> <td>外形</td> <td>φ140 mm×100 mm</td> </tr> <tr> <td>材質</td> <td>アルミニウム</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">結合ケーブル</td> <td>外径</td> <td>7.7 mm</td> </tr> <tr> <td>線心数</td> <td>同軸: 3心, 単線線: 4心</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">電源・信号処理装置</td> <td>AWG</td> <td>同軸: 26, 単線線: 30</td> </tr> <tr> <td>電源</td> <td>高圧電源: 最大+1000 V リアンプ電源: NiMH規格</td> </tr> <tr> <td>下-収量</td> <td colspan="2">ノートPC</td> </tr> </tbody> </table>		機器	項目	仕様	CdTe半導体検出器	外形	φ7 mm×51 mm	ケーブル	同軸ケーブル2本(番号、高圧)、リアンプ駆動用ケーブル1本、60m	改良型小型B-10線検出器	外形	φ7 mm×100 mm	ケーブル	同軸ケーブル1本、60m	遮蔽体	外形	62 mmW×113 mmD×78 mmH	材質	タングステン (17.9 g/cm <sup>3</sup> )	重量	英中: 8.5 kg, 水中: 7.0 kg	遮蔽厚	下部: 40 mm, 側面部・背面部: 24 mm	水封容器	外形	φ140 mm×100 mm	材質	アルミニウム	結合ケーブル	外径	7.7 mm	線心数	同軸: 3心, 単線線: 4心	電源・信号処理装置	AWG	同軸: 26, 単線線: 30	電源	高圧電源: 最大+1000 V リアンプ電源: NiMH規格	下-収量	ノートPC	
機器	項目	仕様																																								
CdTe半導体検出器	外形	φ7 mm×51 mm																																								
	ケーブル	同軸ケーブル2本(番号、高圧)、リアンプ駆動用ケーブル1本、60m																																								
改良型小型B-10線検出器	外形	φ7 mm×100 mm																																								
	ケーブル	同軸ケーブル1本、60m																																								
遮蔽体	外形	62 mmW×113 mmD×78 mmH																																								
	材質	タングステン (17.9 g/cm <sup>3</sup> )																																								
	重量	英中: 8.5 kg, 水中: 7.0 kg																																								
	遮蔽厚	下部: 40 mm, 側面部・背面部: 24 mm																																								
水封容器	外形	φ140 mm×100 mm																																								
	材質	アルミニウム																																								
結合ケーブル	外径	7.7 mm																																								
	線心数	同軸: 3心, 単線線: 4心																																								
電源・信号処理装置	AWG	同軸: 26, 単線線: 30																																								
	電源	高圧電源: 最大+1000 V リアンプ電源: NiMH規格																																								
下-収量	ノートPC																																									
測定時間 (測定速度)	測定環境に依存 例: 使用済み燃料集合体測定時の実績(PCV内部詳細調査PJで実施): 1分程度																																									
使用実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用済燃料集合体を利用した放射線環境下で動作確認済み</li> <li>・1F-1PCV内部詳細調査でROVIに搭載して使用予定</li> </ul>																																									
適用場所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2-A(センサ走査要)</li> <li>・3②-A, 3②-B, 3②-C(他技術や事前分析・解析結果と組合せ要)</li> </ul>																																									
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・指向性(中性子減速材やコリメータの搭載性)(Δ)</li> <li>・ウラン重量への換算方法(Δ)</li> <li>・同位体元素の濃度測定(×: 3①-A,B,C)</li> <li>※他技術や事前分析・解析結果と組合せて測定対象の有無や濃度の高低の推定に使用する場合にはΔ。</li> </ul>																																									

## ■ 仕分けに必要な技術の検討結果(主な測定技術調査票(3/4))

表-19 測定技術調査票

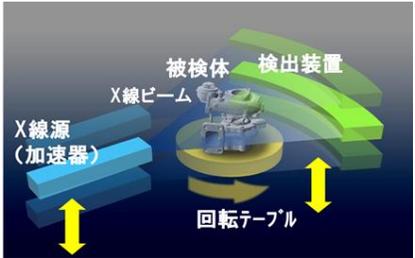
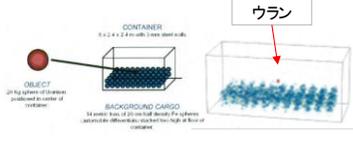
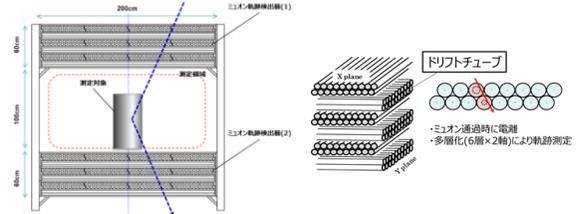
技術名称	X線透過(高エネルギーX線CT法)	
原理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・撮像原理は医療用X線CTと同様。</li> <li>・測定対象物を回転テーブルにより一回転させて撮像。</li> <li>・X線源に加速器(LINAC)を使用することにより、大型構造物、高密度物質の断層撮像が可能。</li> </ul> <small>※1 <a href="http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/catalog/industrial_ct/pdf/HIXCT-BR-070_j.pdf">http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/catalog/industrial_ct/pdf/HIXCT-BR-070_j.pdf</a> ※2 上版、他: 日本原子力学会2019秋の大会予稿集</small>	
性能	分解能	画像分解能: 0.4mm <sup>※1</sup>
	測定下限値	-
使用環境 (バックグラウンド)	通常環境程度(各号機PCV外、または保管施設での使用を想定)	
装置構成・サイズ	<p>&lt;以下は、※1関連情報&gt;                  構成: X線源(加速器)、回転テーブル、X線検出器(ラインセンサ)                  サイズ: 概略4m×4m(フットプリント、メンテナンスエリア含む)                  測定対象物重量: 最大100kg程度                  測定対象物高さ: 最大1000mm程度                  X線透過能力: 鉄320mm、コンクリート1080mm (9MVのX線源を使用した場合)                  その他: X線検出器前面にコリメータを設置し、測定誤差(画質劣化)の原因となる散乱線の影響を低減</p> 	
測定時間 (測定速度)	10~15秒/断面(※1) (第3世代撮像(一回転撮像方式)、シングルエネルギー) →ユニット缶(内寸高さ360mm)を測定対象とした場合、3600~5400秒(約1~1.5時間)	
使用実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物ドラム缶内部状態観察(※1)</li> <li>・燃料集合体検査(回転+並進撮像方式) <small>石見、他: JAEA-Data/Code 2014-012</small></li> <li>・各種非破壊検査(自動車エンジン等機械部品(※1)、橋梁(※2)等)</li> </ul>	
適用場所	3①-B、3①-C、3②-B、3②-C	
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・単一X線エネルギーでの断層像から得られるのは、密度分布情報のみだが、複数のX線エネルギーを用いる方法(※2)により元素情報を取得し、ウラン等の核燃料と、鉄、コンクリートを識別できる可能性あり(Δ)</li> <li>・同位体識別不可。同位体比測定等、他の計測・評価方法等との組み合わせ要(Δ)</li> <li>・デブリ由来のγ線による測定精度への影響低減(Δ)</li> <li>・BG低減(Δ)</li> </ul>	

表-20 測定技術調査票

技術名称	宇宙線散乱計測技術(ミュオン散乱法)	
原理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・宇宙線ミュオンが物質を通過するに、通過する物体の原子番号に応じた角度で散乱する特性を利用し、散乱角の大きさ、広がりから物質中の組成を解析する。</li> <li>・原子番号が大きい物質ほど散乱角が大きく、鉄などに比べウランを選択的に評価できるが、同位体分析は不可</li> <li>・宇宙線を利用するため線源が不要</li> <li>・大まかな3次元分布も取得可能</li> </ul>  <p>図1 鉄14tonの中の20kgのウラン球を検知 [1]LA-UR-04-3985, Information Extraction from Muon Radiography Data</p>	
性能	分解能	ウラン:直径8cm、重量20kg[1] ※容器の大きさ、環境の空間線量率および測定時間に依存
	測定下限値	ウラン単体の測定では1~10kg程度 ※容器の大きさ、環境の空間線量率および測定時間に依存
使用環境 (バックグラウンド)	可能な限り低バックグラウンドでの使用を前提 ※空間線量率の上限は、検出器の大きさで変わる。	
装置構成・サイズ	<p>【装置構成】 2つのミュオン軌跡検出器から構成され、上段のミュオン軌跡検出器で得られた軌跡と、下段のミュオン軌跡検出器での軌跡から、散乱地点および散乱角を測定する。</p> <p>【サイズ】 サイズは2.5m×1.5m×3m程度(電源盤、制御盤含まず。) ※環境の線量率や測定時間に依存するため最適化が必要</p>  <p>図2: 装置構成の例      図3 検出器の構成</p>	
測定時間 (測定速度)	1ユニットの測定あたり約数分~1時間[1] ※空間線量率および検出器の有効測定面積で変わる	
使用実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>・セキュリティシキヤナ</li> <li>・低線量下で使用済み燃料入りのキャスク(PWR用MC-10Cask)の測定実績あり <small>Phys. Rev. Applied 9, 044013, "Verification of Spent Nuclear Fuel in Sealed Dry Storage Casks via Measurements of Cosmic-Ray Muon Scattering"</small></li> </ul>	
適用場所	3①-B、3①-C、3②-B、3②-C	
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・BGおよびデブリからのγ線の影響でミュオンの測定効率が低下する。遮蔽体を追加するとγ線の影響は低減可能だが、燃料の検知精度が低下するため、最適化の検討が必要(Δ)</li> <li>・同位体の識別、濃縮度が測定できないため、平均濃縮度等から導出する方法の検討が必要(Δ) ※同位体比や、燃焼度が測定できる手法(燃焼度モニタなど)と組み合わせることで、測定精度、確度の向上の可能性あり。</li> <li>・IF環境下(放射線、粉塵、振動など)での長期的な運用、メンテナンス方法の検討が必要(Δ)</li> </ul>	

# 7. 本事業の実施内容 【 2)(iii) 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関わる技術の調査 】

## ■ 仕分けに必要な技術の検討結果(主な測定技術調査票(4/4))

表-21 測定技術調査票

技術名称	アクティブ中性子計測技術(高速中性子直接問いかけ(FNDI)法)	
原理	①中性子発生装置から高速中性子を試料に照射 ②試料及び計測装置の体系内で熱中性子に減速される。 ③試料内に含まれる核分裂性物質が核分裂を誘発し即発中性子が放出される。 ④計測体系に設置された中性子検出器により計測される。 ⑤核分裂中性子の消滅時間と計測により核物質量を計算評価する。	
性能	分解能	核物質(U-235,Pu-239,Pu241)の総量が計測可能 比較的短時間で計測可能。 高速中性子を使用するために、大型で高密度の容器に適用できる。
	測定下限値	分可能に関しては不明。
使用環境 (バックグラウンド)	可能な限り低バックグラウンドでの使用を前提とする。	
装置構成・サイズ	構成設備 ①中性子検出器バンク(中性子検出器、減速材等含む) ②中性子発生装置(DT管) ③信号処理部 ④計算評価用計算機	
	デブリ収納缶の周辺に検出器バンクを設置する構造であり、また高速中性子を減速させるための減速材及び中性子発生装置動作時の周辺の放射線レベルを低減するための遮へいを周辺に設ける必要があり、かなり大規模となる。 装置サイズ:2m(W) x 2m(D) x 2.2m(H)	
測定時間 (測定速度)	要求される検出限界に応じて測定時間に変化する。 一般的に 計測セルのバックグラウンド計測、収納缶の搬入、計測、搬出の合計で1時間程度。	
使用実績	JAEA 人形峠環境技術センター ウラン廃棄物の計量管理用測定装置(JAWAS-N)	
適用場所	3②-B、3②-C、3③-B、3③-C	
課題	収納缶内のデブリの状況把握が最も大きな課題。(△)	

表-23 測定技術調査票

技術名称	パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測技術(圧縮減容ドラムを対象としたγスペクトロメトリー及び中性子計測装置)	
原理	1.γスペクトル計測装置 2.Passive中性子計測装置 3.Active中性子計測装置  で得られる計測結果の基づく  a.全U及び全Pu量評価 b.Alpha Activity (Pu,Cm,全α) c.Beta Activity (Cs137,Sr90-Y90,Pu241) d.崩壊熱  を評価する。	
性能	分解能	核分裂性物質質量 ・計測結果から得られる統計誤差:約10% ・校正誤差:約30%
	測定下限値	検出限界: ・U235+Pu239+Pu241の合計で100mg ・U235+U238+Pu239+Pu241の合計で100g
使用環境 (バックグラウンド)	γスペクトル計測装置は十分に低いバックグラウンドに抑える必要がある。 中性子計測装置は検出器の特性により検出器周辺で2rad/h以下となるように周辺及び測定対象からのγ線レベルを低減する必要あり。 従って、周辺バックグラウンドレベルの高い場所是不向き。	
装置構成・サイズ	計測対象ドラム:直径 約1m 高さ 約1.5m	
	γスペクトル計測装置: 高純度Ge検出器 ドラム回転及び上下駆動装置 設置スペース:不明 中性子計測装置: 計測セル3面方向に各83本の中性子検出器(有感長:1000mm) 合計249本 中性子発生装置2セット 発生中性子:2E+9 n/sec 中性子減速材で構成する計測セル 設置スペース:計測セル10m×10m×10m (中性子発生装置付属機器及び計測装置は含まず)	
測定時間 (測定速度)	γスペクトル計測装置:15 ~ 45min 中性子計測装置:45 ~ 60min	
使用実績	La Hague圧縮減容施設	
適用場所	3②-B、3②-C、3③-B、3③-C ただし、装置が大型でありRBへの設置は難しいと思われる、装置に応じた設計が可能となる新增設建屋や保管準備施設への設置が想定される。	
課題	計測対象が再処置工場から排出されるハル・エンドピースであり内容物の素性が明らかである。一方、燃料デブリに関しては、内容物を特定できないことから密度、材質等の評価に重要なパラメータをどの様に評価するのが大きな問題となる。 従って、これらの不確定要素を把握するために、tomographyの様な内容物の密度、分布の状態等を推定評価できる計装装置の追加設置が必要となる可能性が高い。(△) その結果、装置の規模が大きくなることが予想される。(△)	

■ 仕分けに必要な技術の検討結果

● 調査技術ごとの評価(1/3)

○:適用が見込める  
 △:実現の可能性がある  
 ×:現段階で、実現性に乏しい  
 -:対象外  
 A:PCV内(内容器収納前)  
 B:各号機PCV外(RB、増設建屋)  
 C:保管施設(保管前準備時)

調査対象技術	性能 ①分解能 ②測定下限値	主な仕様 ①耐放射性または使用環境実績 ②機器サイズ ③測定時間	主な課題点	[1] 目視(画像)判定	[2] PCV内核物質分布推定	[3①] 核分裂性物質濃度測定用	[3②] 臨界安全管理用	[3③] PP、保障措置の終了判断用
						燃料デブリ中のU-235濃度:1.5wt%相当の反応度以下	核物質量3.7kg/容器以下	未定
反射率計測	①表面の大まか組成分布が分かる程度 ②絶対値での評価は困難	①詳細不明(遮へい体が必要) ②76×76×120mm ③1画像あたり、数秒	・対象内部の情報が得られない ・測定対象材料のスペクトルデータ作成	*1 A:× B:× C:×	—	—	—	—
画像判定	①特徴的な違いがある構造物の種類を識別可能 ②—	①遮へい体が必要 ②約230×183×103mm ③カメラ:1画像あたり1秒以下、レーザスキャナ:~数10分	・損傷のある対象には適用不可 ・学習データが必要	*2 A:△ B:△ C:△	—	—	—	—
パッシブα線計測(アルファカメラ)	*3 ①位置分解能:2cm程度 ②アルファ放射能:4Bq/cm <sup>2</sup>	①詳細不明(遮へい体が必要)*3 ②400×300×250mm ③1画像あたり、数秒から数分最大1000秒程度	・高線量γ線、β線発光の影響 ・対象内部の情報が得られない	—	*1 A:×	—	—	—
パッシブα線計測	①— ②測定時間に依存	①線量率耐性:350Gy/h ②センササイズ3×3mm ③測定環境に依存	・α線感度 ・ウラン重量への換算方法 ・同位体濃度測定	—	*1 *4 A:△	A:× B:× C:×	*1 *4 A:△ B:× C:×	—

\*1:対象表面の情報取得は可能性あり

\*2:核燃料の特定は不可。ただし、形状計測などで仕分けのサポートへは適用できる可能性あり

\*3:固体廃棄物PJで開発中。暫定値

\*4:他センサや手法との組合せ要

## ■ 仕分けに必要な技術の検討結果

### ● 調査技術ごとの評価 (2/3)

○:適用が見込める  
 △:実現の可能性はある  
 ×:現段階で、実現性に乏しい  
 -:対象外  
 A:PCV内(内容器収納前)  
 B:各号機 PCV外(RB、増設建屋)  
 C:保管施設(保管前準備時)

調査対象技術	性能 ①分解能 ②測定下限値	主な仕様 ①耐放射性または使用環境実績 ②機器サイズ ③測定時間	主な課題点	[1] 目視(画像)判定	[2] PCV内核物質分布推定	[3①] 核分裂性物質濃度測定用	[3②] 臨界安全管理用	[3③] PP、保障措置の終了判断用
						燃料デブリ中のU-235濃度:1.5wt%相当の反応度以下	核物質量3.7kg/容器以下	未定
パッシブγ線計測	①12.9keV @662keV ②測定時間に依存	①19.4Gy/h(使用済み燃料集合体測定時の実績値) ②検出器サイズΦ7×51mm ③測定環境に依存	・遮へい/コリメータ設計 ・ウラン重量への換算方法 ・同位体濃度測定	—	*4 A:△	A:× B:× C:×	*4 A:△ B:△ C:△	—
パッシブ中性子計測	①— ②測定時間に依存	①線量率耐性:650Gy/h ②検出器サイズΦ7×100mm ③測定環境に依存	・指向性 ・ウラン重量への換算方法 ・同位体濃度測定	—	*4 A:△	A:× B:× C:×	*4 A:△ B:△ C:△	—
アクティブX線計測	①— ②μgオーダのウランを検知可能	①ラボ分析前提 ②不明 ③不明	・高BG環境下測定 ・同位体濃度測定 ・サンプル取り出し方法	—	A:×	A:× B:× C:×	A:× B:× C:×	—
X線透過	①画像分解能:0.4mm ②—	①通常環境程度 ②(フットプリント)4×4m ③10~15秒/断面(ユニット缶:1~1.5Hr)	・ウラン等と鉄・コンクリートの識別 ・BG、燃料デブリ由来のγ線影響低減	—	—	*5 A:— B:△ C:△	*6 A:— B:△ C:△	—

\*4:他センサや手法との組合せ要

\*5:核物質の重量を推定する。U-235濃度の換算は濃縮度、組成比を仮定する等により再評価する必要あり。

\*6:測定対象の総重量等で補正するなどによる再評価の必要あり。

## ■ 仕分けに必要な技術の検討結果

### ● 調査技術ごとの評価 (3/3)

○:適用が見込める  
 △:実現の可能性はある  
 ×:現段階で、実現性に乏しい  
 -:対象外  
 A:PCV内(内容器収納前)  
 B:各号機 PCV外(RB、増設建屋)  
 C:保管施設(保管前準備時)

調査対象技術	性能 ①分解能 ②測定下限値	主な仕様 ①耐放射性または使用環境実績 ②機器サイズ ③測定時間	主な課題点	[1] 目視 (画像) 判定	[2] PCV 内核物質 分布推定	[3①] 核分裂性物質 濃度測定 用	[3②] 臨 界安全 管理用	[3③] PP、 保障措置 の終了判 断用
						燃料デブリ 中のU-235 濃度 :1.5wt%相 当の反応度 以下	核物質 量3.7kg/ 容器以 下	未定
宇宙線散乱計測	①ウラン: 直径8cm、重量20kg <sup>*7</sup> ②ウラン単体で1~10kg程度	①空間線量率の上限0.3~0.5mSv/h程度 ②2.5m × 1.5m × 3m ③1ユニットあたり、数分~1Hr	・BG、燃料デブリからのγ線の影響 ・同位体識別、濃縮度の導出	—	—	A:— B:△ C:△ <sup>*5</sup>	A:— B:△ C:△ <sup>*6</sup>	—
アクティブ中性子計測	①不明(核物質総量が計測可能) ②不明	①低BGでの使用を前提 ②2m × 2m × 2.2m ③1Hr程度(BG計測、搬入、計測、搬出)	・容器内の収納物の状況把握	—	—	—	A:— B:△ C:△ <sup>*8</sup>	B:△ C:△ <sup>*9</sup>
パッシブ中性子計測 + γ線計測	①全ての誤差要因を総合的に評価し測定値の30% ②不明	①廃棄物ドラムをマニピュレータで操作できる程度 ②不明 ③不明	・容器内の収納物の状況把握	—	—	—	A:— B:△ C:△ <sup>*8</sup>	B:× C:×
パッシブ・アクティブ中性子計測 + γ線計測	①統計誤差約10%、校正誤差約30% ②U235+Pu239+Pu241:100mg 上記+U238:100g	①BGの高い場所には不向き ②(設置スペース:計測セル)10m × 10m × 10m ③γスペクトル計測:15~45分、中性子計測:45~60分	・容器内の収納物の状況把握 ・装置の大型化	—	—	—	A:— B:△ C:△ <sup>*8</sup>	B:△ C:△ <sup>*8 *9</sup>

\*5:核物質の重量を推定する。U-235濃度の換算は濃縮度、組成比を仮定する等により再評価する必要あり。

\*6:測定対象の総重量等で補正するなどによる再評価の必要あり。

\*7:遮へい機能付き収納缶に対象を入れた場合の性能

\*8:核分裂性物質核種の構成比が既知であることを前提に評価している。⇒燃料デブリでは燃焼度を推測する等の他の計測手法を併用

\*9:燃料デブリを測定対象とした場合の検出限界・計測誤差を再評価する必要あり。

## ■ 仕分けに必要な技術の検討結果

### ●まとめ

○:適用が見込める技術  
 △:実現の可能性がある技術  
 ×:現段階で、実現可能性のある技術なし

No.	判定(測定)技術	適用場所		
		A:PCV内 (内容器収納前)	B:各号機 PCV外 (RB、増設建屋)	C:保管施設 (保管前準備時)
1	目視(画像)判定	(1-A) △画像判定	(1-B) △画像判定	(1-C) △画像判定
2	PCV内核物質分布推定	(2-A) △パッシブα線計測 △パッシブγ線計測 △パッシブ中性子計測		
3	核物質測定(核種、濃度)			
	①核分裂性物質濃度測定用	(3①-A) ×	(3①-B) △X線透過(高エネルギーX線CT法) △宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法)	(3①-C) △X線透過(高エネルギーX線CT法) △宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法)
	②臨界安全管理用	(3②-A) △パッシブα線計測 △パッシブγ線計測 △パッシブ中性子計測	(3②-B) △パッシブγ線計測 △パッシブ中性子計測 △X線透過(高エネルギーX線CT法) △宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法) △アクティブ中性子計測(FNDI法) △パッシブ中性子計測+γ線計測 △パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測	(3②-C) △パッシブγ線計測 △パッシブ中性子計測 △X線透過(高エネルギーX線CT法) △宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法) △アクティブ中性子計測(FNDI法) △パッシブ中性子計測+γ線計測 △パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測
	③PP、保障措置の終了判断用	—	(3③-B) △アクティブ中性子計測(FNDI法) △パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測	(3③-C) △アクティブ中性子計測(FNDI法) △パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測

### ■ 燃料デブリの仕分けシナリオの技術的な実現性の評価(仕分けシナリオの評価)

#### ① 前提条件

- 同一内容の仕分けを複数の場所で行うことは考えない。(上流側で仕分けしていれば下流側では仕分けを行わない。)
- 各号機PCV外(RB、増設建屋)よりも保管施設(保管前準備時)の方が低バックグラウンドで、仕分け設備の設置スペース確保は容易であり、仕分け設備の設置性は保管施設側が優位であるとする。
- PCV内では核物質測定が他に比べて難しい可能性があり、PCV内での燃料デブリ・廃棄物の仕分け(Aa1)が目視(画像)判定のみでは対応困難な場合も想定する。

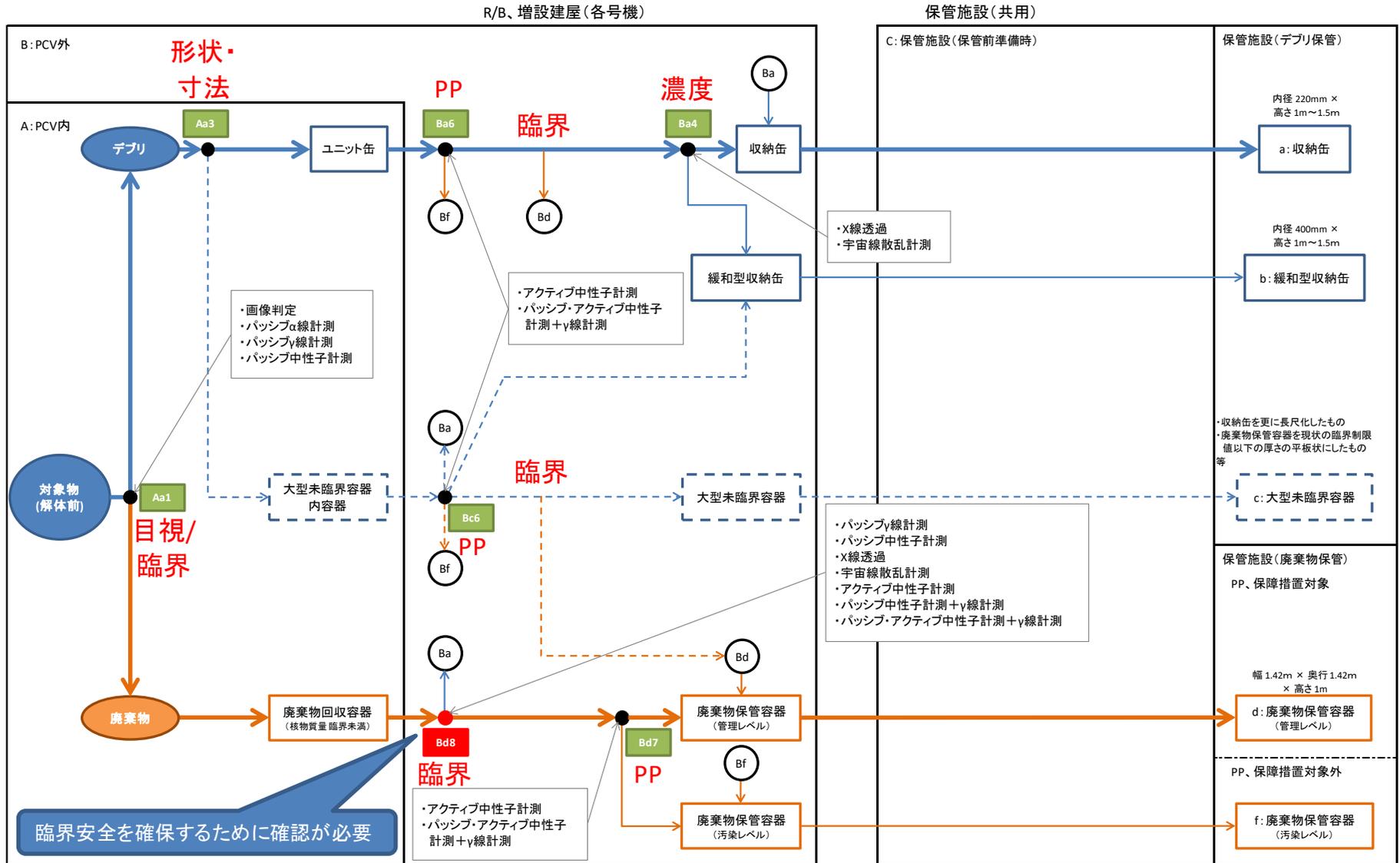
#### ② 実現性を考慮した仕分けシナリオの策定

- シナリオA：なるべく早い段階で仕分けるとしたシナリオ
- シナリオB：仕分け設備の設置性を重視したシナリオ
- シナリオC：PCV内での燃料デブリ・廃棄物の仕分け(Aa1)が困難な場合①  
(なるべく早い段階で仕分け)
- シナリオD：PCV内での燃料デブリ・廃棄物の仕分け(Aa1)が困難な場合②  
(仕分け設備の設置性を重視)

# 7. 本事業の実施内容 【 2)(iii) 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関わる技術の調査 】 No.222

## ■ 燃料デブリの仕分けシナリオの技術的な実現性の評価(仕分けシナリオの評価)

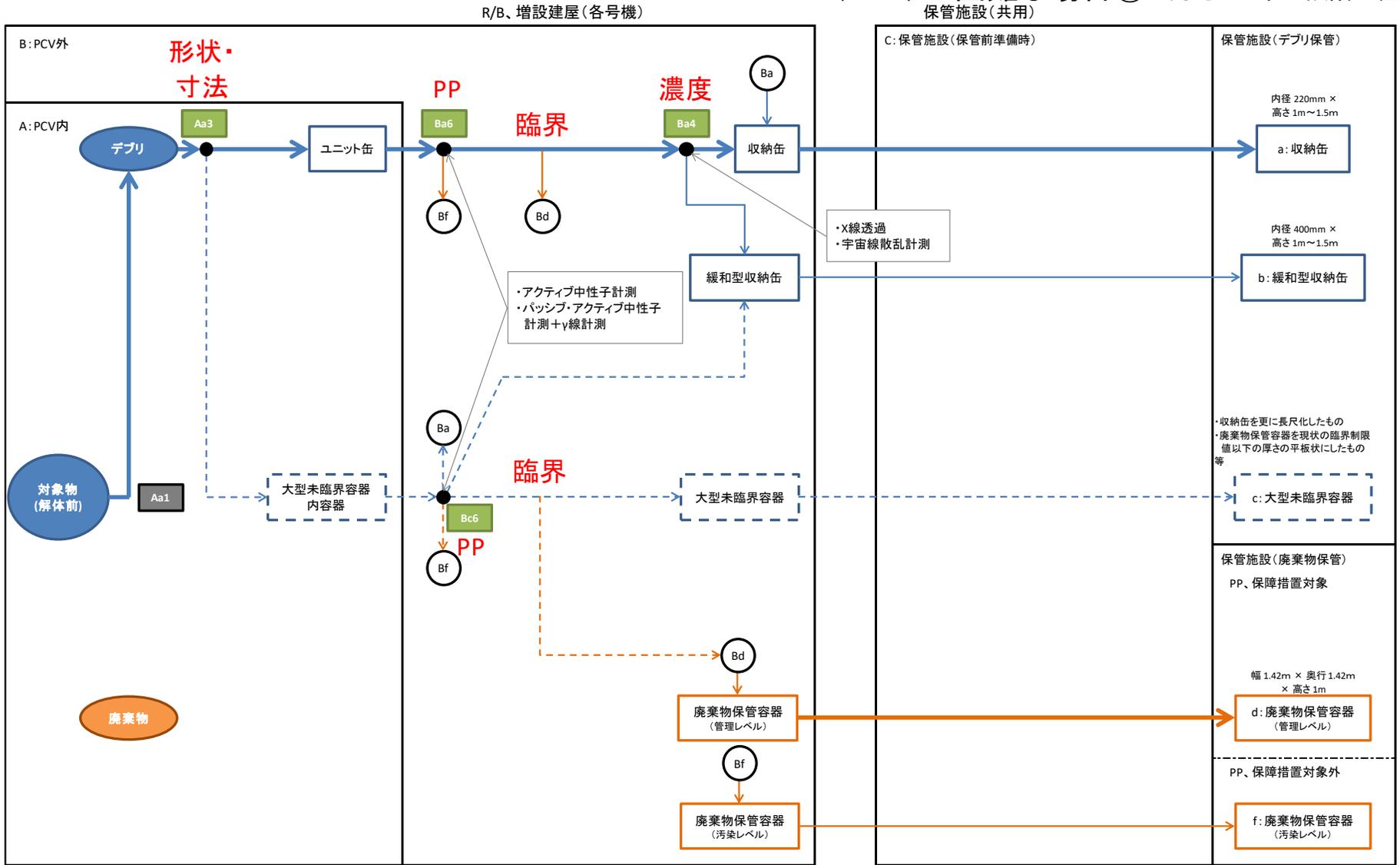
シナリオA：なるべく早い段階で仕分けるとしたシナリオ





# 7. 本事業の実施内容 【 2)(iii) 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関わる技術の調査 】 No.224

## ■ 燃料デブリの仕分けシナリオの技術的な実現性の評価(仕分けシナリオの評価) シナリオC：PCV内での燃料デブリ・廃棄物の仕分け (Aa1)が困難な場合① (なるべく早い段階で仕分け)

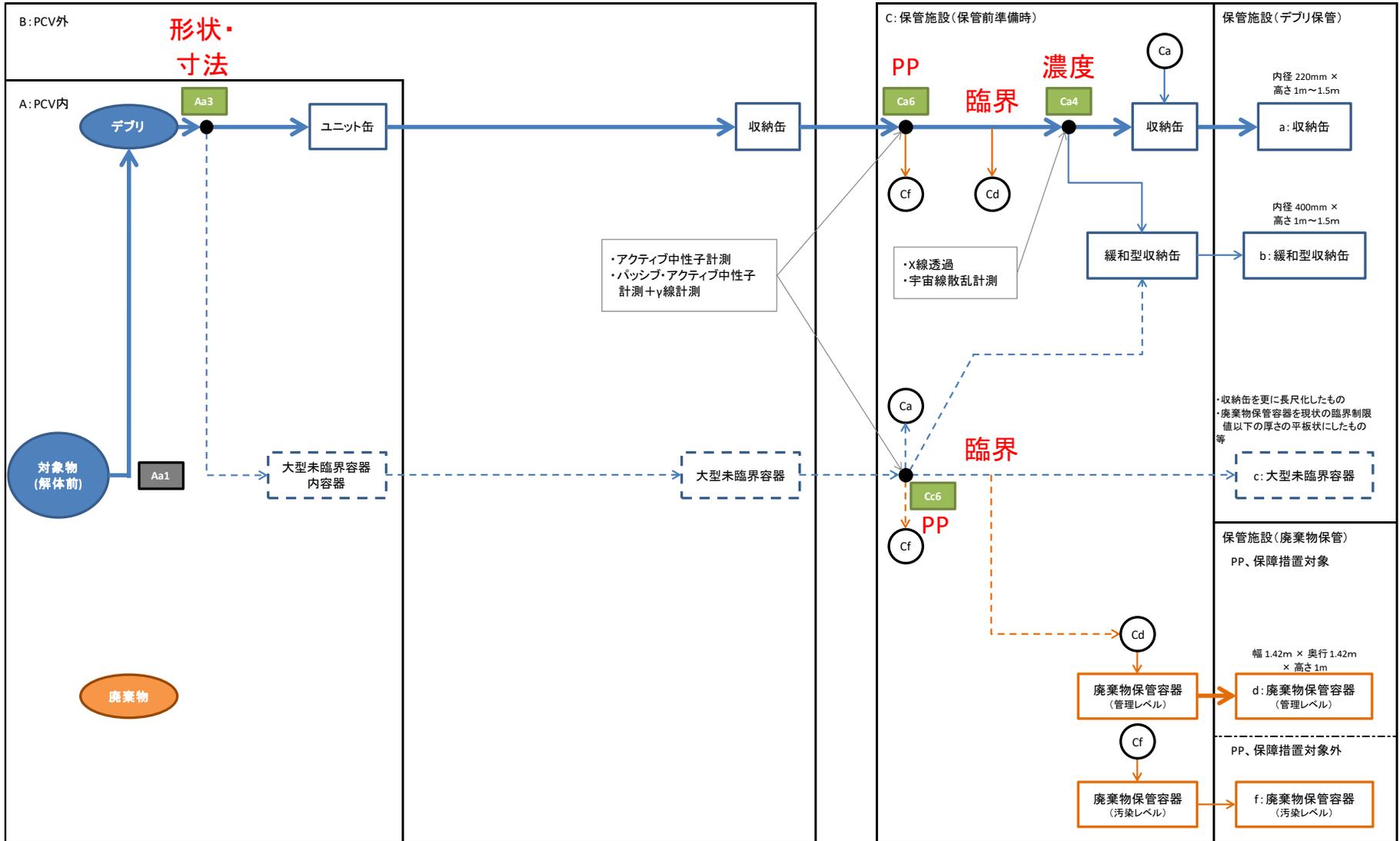


# 7. 本事業の実施内容 【 2)(iii) 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関わる技術の調査 】 No.225

## ■ 燃料デブリの仕分けシナリオの技術的な実現性の評価(仕分けシナリオの評価) シナリオD：PCV内での燃料デブリ・廃棄物の仕分け (Aa1)が困難な場合② (仕分け設備の設置性を重視)

R/B、増設建屋(各号機)

保管施設(共用)



## ■ 燃料デブリの仕分けシナリオの技術的な実現性の評価(仕分けシナリオの比較)

仕分けシナリオ(主な実施場所)		利点	欠点	評価
シナリオA (A:PCV内 B:PCV外)	なるべく早い段階で仕分け	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ ホットセルを共用できる</li> <li>➢ 移送前に仕分けが終わるため、移送物量が最適化できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 各号機に仕分け設備が必要</li> <li>➢ 燃料デブリ取り出し設備と仕分け設備が混在するため設置場所確保に課題が想定される</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 移送物量の最適化など仕分けの効果が大きいが設備の設置性に課題が想定される</li> <li>➢ PCV内仕分けの難易度が高い</li> </ul>
シナリオB (A:PCV内 C:保管施設)	仕分け設備の設置性を重視	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 仕分け設備を共用化できる</li> <li>➢ シナリオAに比べて仕分け設備の設置場所確保が容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 保管施設にホットセルが必要</li> <li>➢ シナリオAに比べて収納缶の移送物量低減効果が低い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 設備の共用化、設置性にメリットがあるが収納缶の移送物量低減効果が低い</li> <li>➢ PCV内仕分けの難易度が高い</li> </ul>
シナリオC (B:PCV外)	PCV内での燃料デブリ・廃棄物の仕分け(Aa1)が困難な場合① (なるべく早い段階で仕分け)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ PCV内作業がシナリオA、Bに比べて少ない</li> <li>➢ シナリオAに比べて仕分けポイントが少ない</li> <li>➢ (シナリオAの利点と同様)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ シナリオA、Bに比べてユニット缶の払い出し量が多い</li> <li>➢ シナリオAに比べてBa6の処理量が増加</li> <li>➢ (シナリオAの欠点と同様)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ PCV内での仕分け作業が少ないが設備の設置性に課題が想定される</li> </ul>
シナリオD (C:保管施設)	PCV内での燃料デブリ・廃棄物の仕分け(Aa1)が困難な場合② (仕分け設備の設置性を重視)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ PCV内作業がシナリオA、Bに比べて少ない</li> <li>➢ シナリオBに比べて仕分けポイントが少ない</li> <li>➢ (シナリオBの利点と同様)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ シナリオA、Bに比べてユニット缶の払い出し量が多い</li> <li>➢ シナリオBに比べてCa6の処理量が増加</li> <li>➢ 保管施設にホットセルが必要</li> <li>➢ 全シナリオの中で収納缶の移送物量が最も多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ PCV内及びPCV外での仕分け作業が最も少なく、難易度は低いがユニット缶の払い出し量や収納缶の移送物量低減効果は低い</li> </ul>

### ■ まとめ(課題と今後の対応)

#### 課題

- ① 技術調査の結果、現状技術のまま仕分けに適用できる技術はなく、実現の可能性がある技術については、それぞれの課題について、たとえば、測定対象の性状把握を行って測定誤差を補正するなどの対応策が必要である。＜計測技術＞
- ② PCV内での核物質測定は難易度が高いため、仕分けの実現のためには複数の手法の組み合わせが必要である。＜計測技術＞
- ③ 廃棄物容器に入れる際には、臨界安全を「担保」するための何らかの確認手段が、安全上必ず求められるはずであり、その計測手段については開発が必要である。＜計測技術＞
- ④ どのシナリオでも燃料デブリ保管量の低減は可能である。しかし、取り出し作業量の低減のためにはPCV内での仕分けが有効であり、移送物量の低減の効果を高めるためには、より早い段階(PCV内やPCV外)での仕分けが有効である。一方、早い段階での仕分けはバックグラウンドレベルや設置スペースなどの設置性に課題が大きく、相反する結果となる。＜シナリオ＞
- ⑤ 仕分けそのものはコスト増加要因であり、仕分けによる燃料デブリ保管や廃棄物保管のコスト低減効果との得失を評価する必要がある。＜シナリオ＞

### ■ まとめ(課題と今後の対応)

#### 今後の対応

仕分けの実現に向けて、今後取り組むべき事項

- ① シナリオ決定には、仕分けの実施や、どの段階で仕分けるかを定める必要がある。これらについては燃料デブリ取り出しの全体計画を踏まえて選定していくべきであり、事業者による検討が求められる。〈シナリオ〉
- ② 各シナリオで必要となる画像判定技術や核物質測定技術の開発が必要である。公開情報・文献を中心とした技術調査により適用性を判断することは困難であり、今後の開発にあたっては、計測器、遮へい構造、データ解析技術などについて、ベンダーを交えて検討することが重要である。〈計測技術〉
- ③ 本検討では、仕分けの実施を前提として、シナリオを検討した。今後、仕分け設備仕様の具体化、配置検討、経済性評価などにより、仕分けの有効性を検証していく必要がある。〈シナリオ〉

## 7. 本事業の実施内容

### 3) 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発

#### (i) 閉じ込め機能に関わる要素技術開発

##### ① PCV内でのダスト挙動予測技術

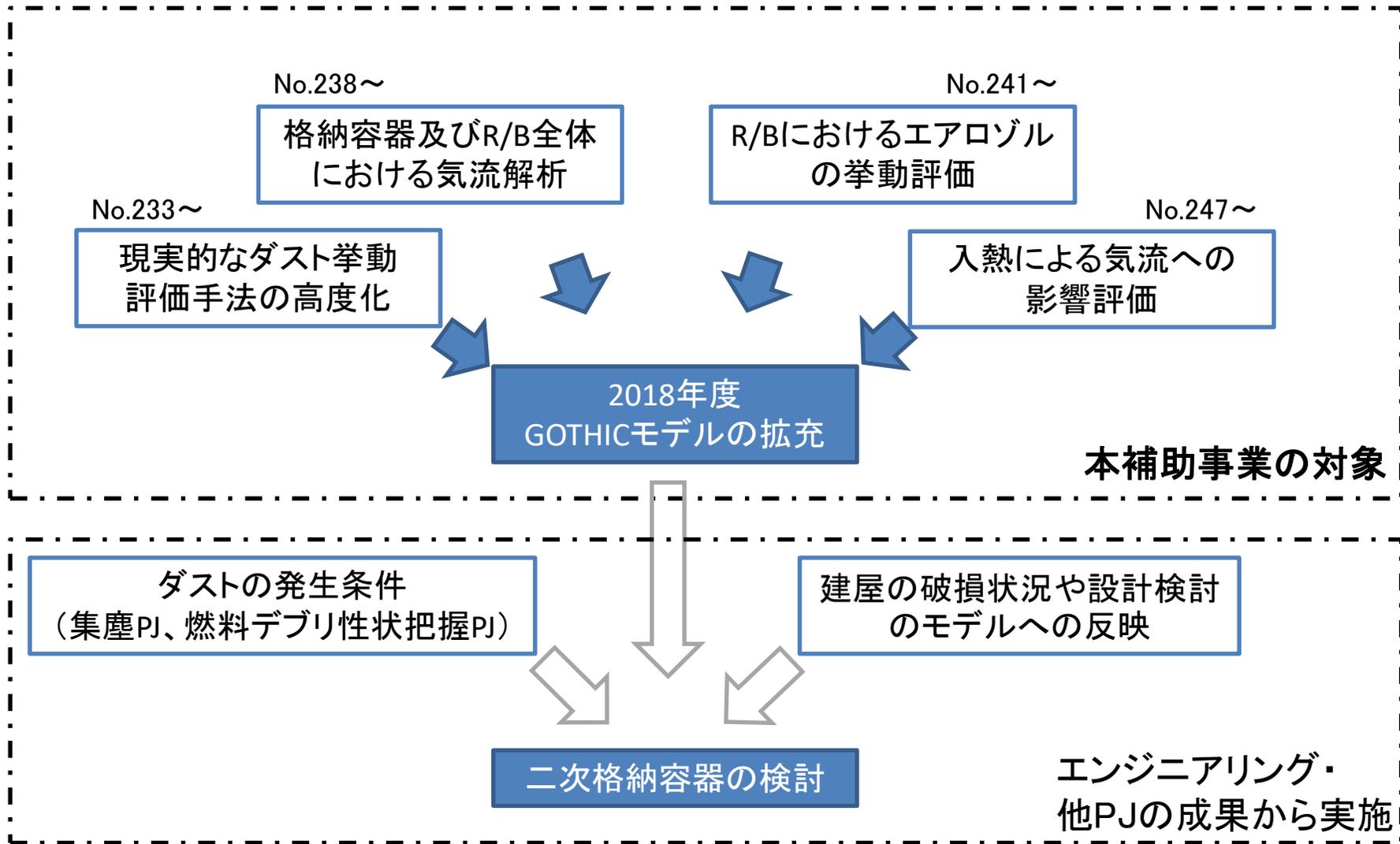
公衆、作業員の安全を確保する観点で、閉じ込め機能は重要である。燃料デブリ加工時に発生するアルファ核種を含むダストのPCV内での挙動の予測に必要なPCV内部の気流解析とエアロゾル挙動の解析技術の組み合わせについて研究開発するとともに、R/B内での挙動予測を行うための解析モデルの拡張に関する開発を行う。これによって、ダスト中のエアロゾル除去効果の予測と適切なモニタリング技術の選定や監視位置の検討を行う。

主な開発検討項目として以下を含む。

#### a. 気流解析

- ・現実的なダスト挙動評価手法の高度化を実施した。
- ・格納容器及びR/B全体における気流解析を実施した。
- ・入熱による気流への影響について評価した。

# 7. 本事業の実施内容 【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】



## ● 開発の目的

- 前期補助事業までの検討において、GOTHICコードによるPCV内でのダスト挙動予測の手法を構築し、系統設計に適用できる可能性を得た。今年度は、昨年度未検討の課題について検討し、以下2項目を達成することを目的とする。
  - ・ 異常時における放射性ダストの閉じ込め機能確保に向けたR/Bの気密性及びガス管理システムの要求仕様(換気率、負圧度)の策定
  - ・ PCVからのダスト異常漏えい発生時において、R/B内のモニタリングにおける公衆及び作業員被ばく低減の観点から有効な監視位置の抽出

## ● 解決すべき課題

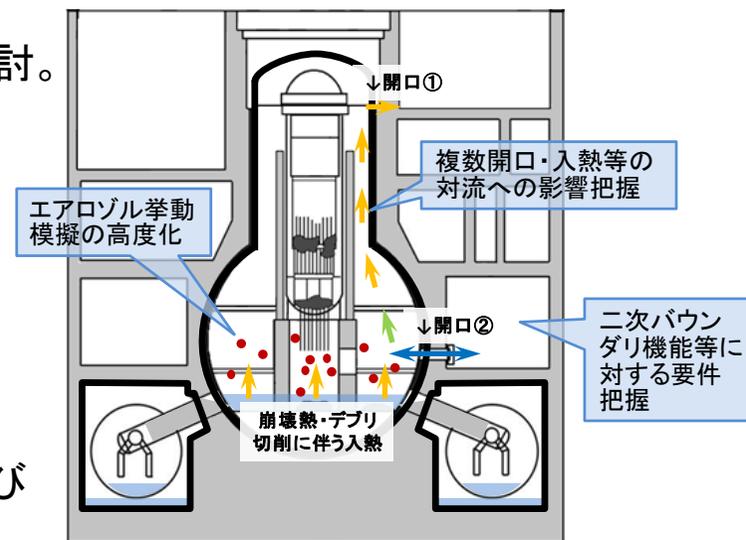
- エアロゾル除去メカニズムにおいて、再浮遊を考慮した評価手法の検討。
- R/Bを考慮した気流解析への影響の検討。
- 崩壊熱/燃料デブリ加工時の入熱による気流への影響の検討。

## ● 開発の進め方

- 現実的なダスト挙動評価手法の高度化
- 格納容器及びR/B全体における気流解析
- R/Bにおけるエアロゾルの挙動評価
- 入熱による気流への影響評価

## ● 得られる成果

- 異常時における閉じ込め機能確保のためのR/Bの気密性及びガス管理システムの要求仕様(換気率、負圧度)
- PCVからの異常漏えい発生時においてR/B内のモニタリングにおける公衆及び作業員被ばく低減の観点から有効な監視位置の抽出



## ■ 開発工程

検討項目	2019年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
主なマイルストーン							中間報告 ▼					年度末報告 ▼
1. 現実的なダスト挙動評価手法の高度化		■										
2. 格納容器及びR/B全体における気流解析				■			■					
3. R/Bにおけるエアロゾルの挙動評価				■			■					
4. 入熱による気流への影響評価				■								
5. まとめ										■		
備考												

## 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

### ①現実的なダスト挙動評価手法の高度化(1/5)

- ✓ 今年度実施事項[I] -重力沈降以外のダスト除去メカニズムを考慮した評価手法の確立-
  - ・重力沈降以外のメカニズムによるダストの除去メカニズムに関わる知見の適用
    - GOTHIC各除去メカニズムおよび現象解析モデルを調査した。調査の結果、1F格納容器内環境を考慮すると、重力沈降を適切に考慮することでエアロゾル挙動評価は可能であることがわかった。
  - ・各種除去メカニズムを考慮した上での空間ダスト濃度分布の適切な評価手法の検討を実施
    - 重力沈降が支配的である場合、空間濃度分布評価においては、メッシュ感度(特に重力の作用方向)が大きい結果。モデルのファインメッシュ化を実施することで空間浮遊ダスト(及び排気移行量)を適切に評価できるようになった。
  
- ✓ 今年度実施事項[II] -湿潤環境によるダスト除去効果の確認-
  - ・粒径成長による除去促進効果の確認
    - 湿潤環境における粒径成長は吸湿性エアロゾルの場合のみであり、燃料デブリ取り出しで発生するダストに吸湿性のものは含まれないと考えられるため、湿潤環境を特に意識する必要はないことが明らかとなった。
  - ・凝縮水落下による除去促進効果の確認
    - PCV内部調査で観測されている雨だれ状の落水について、除去効果を検討したが、スプレーによる除去とはならず、効果は小さいことから、考慮の必要はないことが明らかとなった。

## 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

### ①現実的なダスト挙動評価手法の高度化(2/5)

✓ 今年度実施事項[III] -再浮遊を考慮したダスト挙動評価手法の確立-

・再浮遊ダスト挙動を適切に模擬するための手法検討

→GOTHICV8.3の再浮遊モデルは、二相流境界での液滴エンタインメントがモデル化されており、1Fエアロゾル解析では適用できないとの結論。機構論的モデルの組み込みも可能であることが明らかとなったが、流速を見ると、再浮遊が生じないことが明らかとなったため、考慮の必要はないことがわかった。

# 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

## ①現実的なダスト挙動評価手法の高度化(3/5)

	メカニズム	環境支配要因	適用性検討	PCV環境	気流解析における取扱い方針
自然除去	重力沈降	なし	2018年度実施の妥当性確認により適用可の結論	—	自然除去において支配的であり、かつ適用性が確認できているため、GOTHICの当該モデルを常に <b>有効にして評価</b> する。
	慣性衝突	Stokes数 (流速 ノズル径)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GOTHICモデルの捕集効率が50%程度となるStk数領域(～0.3)での適用性を確認</li> <li>・Stk数が小さいと慣性衝突は発生しにくい、GOTHICモデルではそのような領域でも除去が計算されるため、非保守的となる傾向</li> <li>・ただし、低Stk数領域で評価される捕集効率は極めて小さく(&lt;1E-5)、無視しうる程度であることから影響を及ぼさない</li> </ul>	低Stk領域 (～1E-5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PCV内環境では慣性沈着が生じるような流速とはならないため、GOTHICの当該モデルを<b>無効にして評価</b>する。(有効にしても実質的に問題ないが傾向としては非保守的となるため。)</li> <li>・高Stk数が想定される状況があれば、影響も大きく、適用性も確認できるため、有効にする。</li> </ul>
	拡散沈着	流速	<ul style="list-style-type: none"> <li>・拡散沈着は壁面近傍(～1E-4m)での現象であり、乱流によりエアロゾルが壁面近傍に輸送されても、拡散沈着の対象となる領域が全空間に対して極めて小さいため、効果は限定的である。</li> <li>・GOTHICの拡散モデルは、管内気液二相流(乱流)を想定した試験結果をフィッティングしたモデルを採用しており、大空間におけるドライな状態を模擬したものではない。</li> </ul>	配管内等に比べ極めて大空間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・乱流拡散は、作用する領域は限定的であり、大空間においては重力沈降に対して有意に影響することはない。よって、<b>無効にして評価</b>する。</li> <li>・配管内乱流等に注目する場合は有効にして評価する。</li> </ul>
	熱泳動	温度勾配	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GOTHICではヒートシンク表面で発生する</li> <li>・GOTHICモデルは媒質ガスの熱運動速度論に基づくモデルであることを確認。このため、広い温度領域で適用可能であると判断</li> <li>・ただし、温度差が極めて小さい状況では、重力沈着が支配的となることから影響を及ぼさない</li> <li>・サブミクロンオーダーの粒径では寄与を持つ可能性</li> <li>・大きな体系では効果が限定的である</li> </ul>	想定される温度差は5℃程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適用性については確認できたが、温度差が殆どない状況では影響はないため、<b>無効にして評価</b>しても差し支えない。(有効にしても問題ない)</li> <li>・配管内などの小さな体系で、大きな温度差があり、かつ小さい粒径を扱う場合は有効にして評価する。</li> </ul>
	拡散泳動	濃度勾配  (または水蒸気凝縮率)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GOTHICでは、冷壁面で水蒸気凝縮が生じる場合に発生する</li> <li>・小さい濃度差(窒素ガス中で希薄な水蒸気を含む場合)において、水蒸気移動量を拡散係数を用いて評価した場合に比べGOTHIC計算値は数十倍大きくなることを確認</li> <li>・これは、GOTHICが蒸気凝縮率から水蒸気移動量を計算しており、その凝縮率とガス拡散移動が相違しているためと考えられる</li> <li>・熱泳動と拡散泳動の沈着速度は一般的に同等であり、GOTHIC評価値には懸念が残る</li> </ul>	想定される濃度差は(0.3mol/m3)程度  注)5℃の飽和水蒸気濃度の差	<ul style="list-style-type: none"> <li>・濃度差が殆どない(水蒸気凝縮が殆ど発生しない)状況では影響はなく、あえて考慮する必要がないため、<b>無効にして評価</b>する。(濃度差が生じる場合でも、沈着を過剰に評価する可能性があるため、有効にすべきではない。)</li> </ul>

# 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

## ①現実的なダスト挙動評価手法の高度化(4/5)

	メカニズム	環境支配要因	適用性検討	1F PCV環境	気流解析における取扱い方針
湿潤影響	吸湿粒径成長	相対湿度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・エアロゾルが湿分を吸収し粒径が成長することで除去が促進される効果であるが、GOTHICではモデル化されていない</li> <li>・粒径成長が顕著なのは、海塩粒子などの潮解性を有するエアロゾルや湿分を吸収するゼオライト、シリカゲル等、一部の粒子である(これらは相対湿度100%未満でも湿分を吸収)</li> <li>・これら以外のエアロゾル(疎水性)の湿分吸収による粒径成長は限定的である</li> <li>・U3O8、Feの酸化物、などは、湿潤環境の凝集過程で形状因子が変化し、重力沈降が促進される効果が報告されている</li> </ul>	相対湿度は最大で100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>・機械的切削により吸湿性を有するエアロゾルの発生は考えにくい</li> <li>・吸湿性のないエアロゾルも幾分か粒径成長は考えられるが、効果は限定的である</li> <li>・よって、湿潤環境下においても、吸湿による粒径成長を考慮する必要はないため、新たに、<b>モデル化は行わない</b>。(但し、多分散を考慮する場合は、エアロゾル性状により考慮を要する場合がある)</li> </ul>
	雨だれ状の落水による除去	液滴密度 温度差	<ul style="list-style-type: none"> <li>・雨だれによる除去メカニズムとしては、スプレー効果が考えられる</li> <li>・スプレーによるエアロゾル除去として、GOTHICでは、スプレー液滴とエアロゾルのAgglomerationが取り扱われる</li> <li>・Agglomerationとしては、乱流拡散、重力沈降が考慮される</li> <li>・しかし、スプレーによる除去メカニズムは一般的に、液滴周りの気流に関わる、慣性衝突、さえぎり、ブラウン拡散、泳動によるものである</li> <li>・工学的スプレーのように液滴個数密度が大きくなると、除去対象範囲が大きくなり、除去効果が期待できる</li> <li>・液滴温度が低く、液滴表面で蒸気凝縮が発生する場合は泳動系除去メカニズムが働き、有意な捕集効率を期待できる</li> </ul>	液滴密度が小さい 温度差は僅か(5°C程度)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GOTHIC除去モデルが液滴周りの気流によるものではないため、別途、モデルの組み込みが必要となる</li> <li>・しかし冷却水による雨だれ、ドレン水の蒸発・凝縮量程度では、液滴個数密度が低くスプレー除去とはならない</li> <li>・また、液滴と空間の温度差がない状況では、泳動系除去が働かず、除去効率は極めて小さい</li> <li>・よって、現状見られる雨だれ状の落水による除去を考慮する必要はなく、新たな<b>モデル化は行わない</b>。</li> </ul>

## 7. 本事業の実施内容 【 3)( i )① PCV内でのダスト挙動予測技術 】

### ①現実的なダスト挙動評価手法の高度化(5/5)

メカニズム	環境支配要因	適用性検討	1F PCV環境	気流解析における取扱い方針
再浮遊 (ドライ環境)	流速	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GOTHICV8.3の再浮遊モデルは、環状気液二相流境界での液滴エントレインメントをモデル化したもので、ドライ条件には適用できない</li> <li>・ドライ条件で沈着した一次粒子の再飛散は生じにくい、沈着量が増加し粉体層が形成されると、微少凝集粒子が再飛散するようになる。</li> <li>・せん断応力と付着力の力学的バランスで再浮遊量を評価するモデルの作成は可能と考えられる</li> <li>・ただし、10m/s未満の流速では、継続的な再飛散は発生しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・想定される流速は、0.6m/s未満 (PCV内)</li> <li>0.3m/s未満 (R/B内)</li> </ul> ※99%累積値	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GOTHICの再浮遊モデルは適用不可</li> <li>・凝集粒子の再飛散を評価するモデルの組み込みは可能であるが、ドライな表面にドライエアロゾルが沈着する状況があるとしても、継続的な再浮遊が発生するほどの気流は発生しない</li> <li>・よって、新たに、<b>モデル化は行わない</b></li> </ul>

## 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

### ② 格納容器及びR/B全体における気流解析(1/3)

- ✓ R/Bを考慮したGOTHIC解析モデルの構築  
→GOTHICコードの各模擬方法の特徴を調査し、建屋モデルの構築方法について検討。これまでの調査から垂直フローパスを経由したエアロゾル輸送自体は計算できないものの、気流随伴による輸送は評価可能であることから、垂直、水平フローパスを用いたR/Bモデルを構築。
- ✓ R/Bを考慮した場合のPCV内圧力の大気圧追従性の確認、その結果として負圧の維持可否の評価  
→R/Bモデル構築後、大気圧変動を条件として与えた圧力挙動評価を実施し、2018年度と同様に、PCV圧力が大気圧に追従しないことを確認。
- ✓ R/Bの破損状況による建屋の気密性把握  
→建屋破損条件を与えた圧力挙動評価を実施。建屋健全である場合は負圧化による機密性確保が可能。また、オペフロが大気開放されている場合でも、その下階から排気を行い、かつ、オペフロへの流路を絞ることにより、負圧化による機密性確保が可能であることを確認。

# 7. 本事業の実施内容 【 3)( i )① PCV内でのダスト挙動予測技術 】

## ② 格納容器及びR/B全体における気流解析(2/3) ～解析条件～

【2号機: 建屋破損なし】

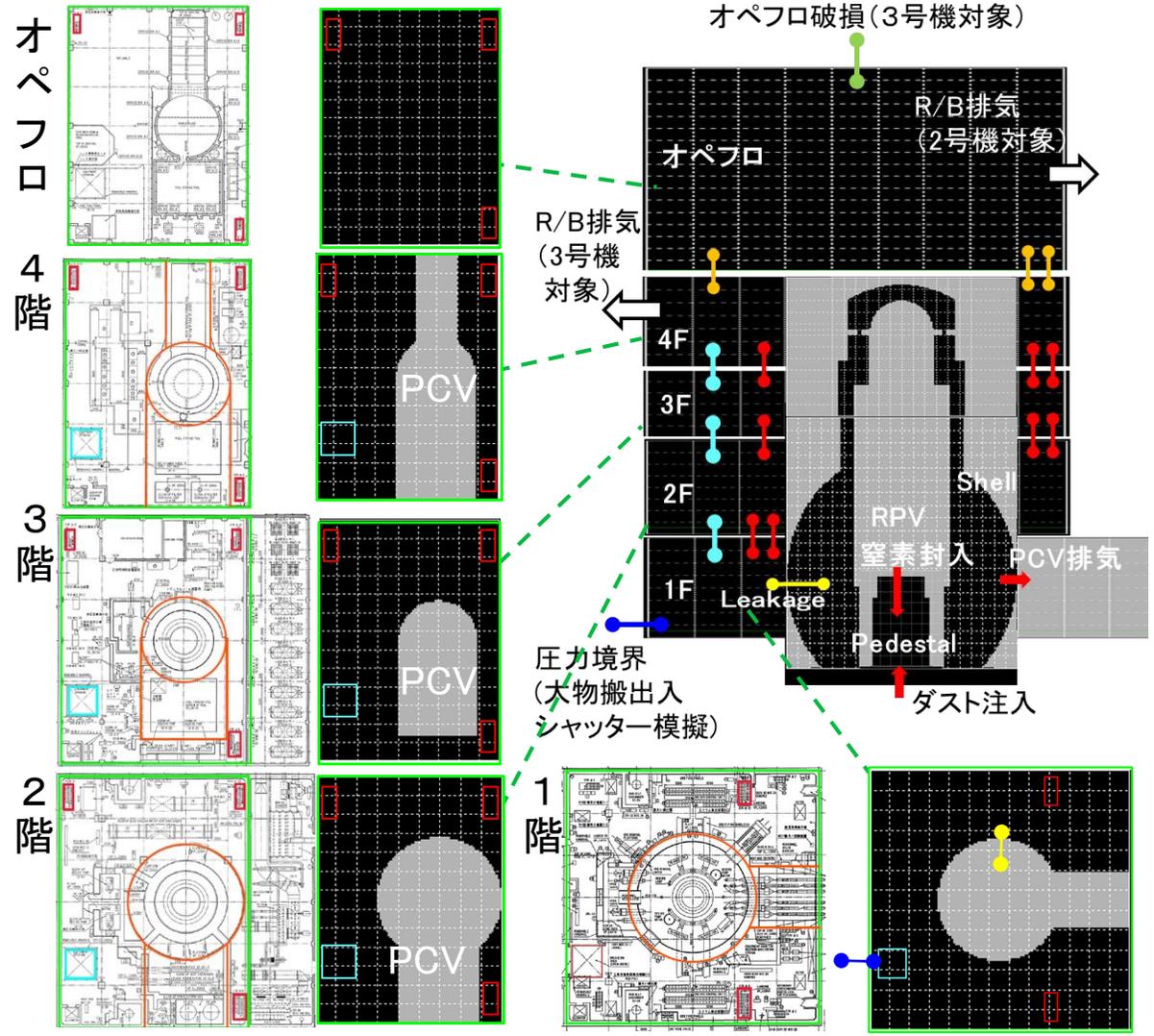
- ✓ オペフロから10,000[m<sup>3</sup>/h]にて排気 (等流量境界)
- ✓ オペフロ破損による圧力境界は考慮しない

【3号機: 建屋破損あり】

- ✓ オペフロ天井部の破損を想定 (圧力境界)
- ✓ 建屋4階から10,000[m<sup>3</sup>/h]にて排気 (等流量境界)
- ✓ 4階からオペフロ間へ繋がる階段面積は、建屋負圧対策実施を想定 (流路面積を1/100とする)

【R/B共通事項】

- ✓ 地上階(1階から5階)の二次格納施設をモデル化の対象とする
- ✓ 建屋フロア間の機器ハッチは開放状態。但し、オペフロの機器ハッチは閉止
- ✓ 階段室扉は開放
- ✓ フロア間流路は階段室、および機器ハッチとし、それぞれを垂直Flowpathでモデル化
- ✓ 1階の機器搬出入シャッターは締め切りであるが、機密性がないため大気圧等圧境界とする
- ✓ 各フロアのうち自由空間に含まれない領域(PCVやMSTンネル室)をBlockageで閉塞

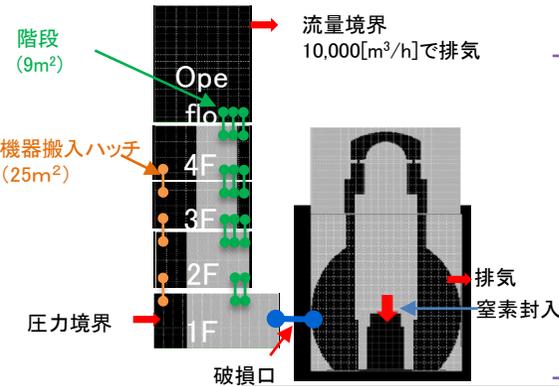


# 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

## ② 格納容器及びR/B全体における気流解析(3/3)

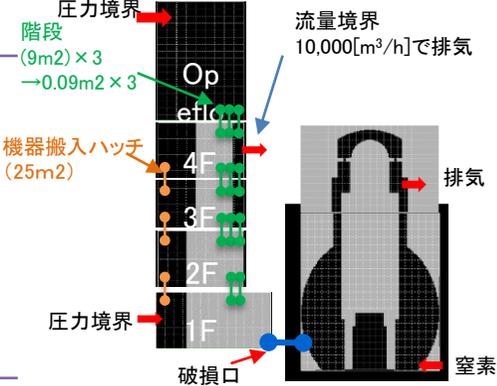
- ✓ 建屋の気密性が確保されている状況(建屋破損なし)では、現状のオペフロから10,000[m<sup>3</sup>/h]で排気を行うことで建屋の負圧化が可能。また、PCV内も建屋に対して0.1kPa程度の負圧を達成できる見込み
- ✓ 建屋の気密性が喪失(オペフロ天井の破損;建屋破損あり)では、オペフロからの排気に意味がないため、建屋排気を4Fに移設した評価を実施したが、オペフロ側からの外気流入により、負圧化できない結果
- ✓ 建屋対策として、オペフロ-4F間の階段断面を1/100(0.09m<sup>2</sup>×3本)に絞ることで、建屋を0.1kPa程度に負圧化できる結果。また、PCV内も建屋に対して0.1kPa程度の負圧を達成できる見込み

【建屋破損なし】

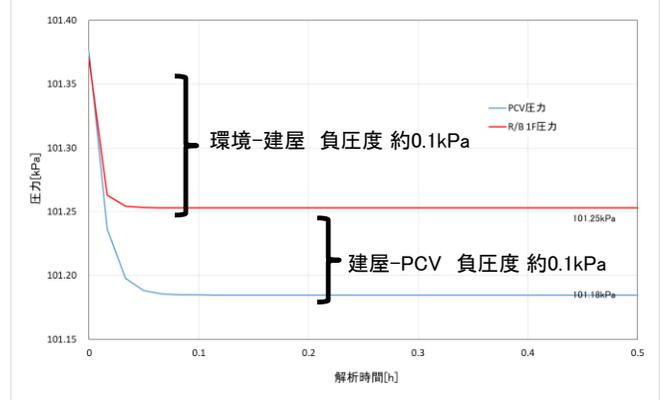
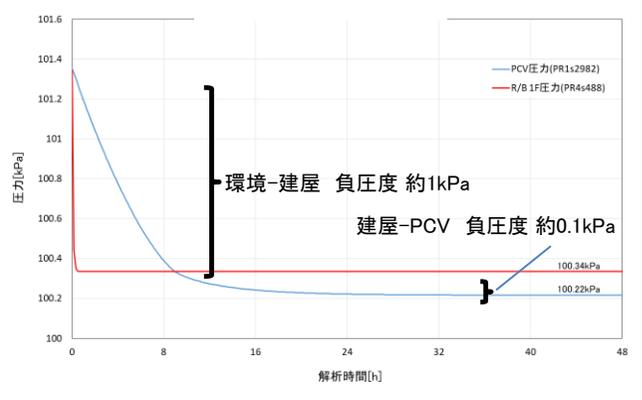


解析条件	風量
窒素封入	<b>15.6 Nm<sup>3</sup>/h</b> RPV頂部から封入した窒素は全量RPV底部からPCVに流出すると仮定
破損口	D/W球殻部を仮定 前年度検討より、面積は <b>1.0E-4m<sup>2</sup></b> を使用する
PCVからの排気風量	<b>16.8 Nm<sup>3</sup>/h</b> 前年度検討より、PCV外側を大気と仮定した場合、PCV負圧度0.1kPaを達成するために必要な風量

【建屋破損あり】



解析条件	風量
窒素封入	<b>1700 Nm<sup>3</sup>/h</b> 前年度検討より、負圧及び酸素濃度緩和のため必要な風量をRPV底部からの封入
破損口	D/W球殻部を仮定し 前年度検討より、面積は <b>1.0E-2m<sup>2</sup></b> を設定
PCVからの排気風量	<b>2000 Nm<sup>3</sup>/h</b> 前年度検討より、PCV外側を大気と仮定した場合に、PCV負圧度0.1kPa、及び酸素濃度緩和のために必要な風量



## 7. 本事業の実施内容 【 3)( i )① PCV内でのダスト挙動予測技術 】

### ③R/Bにおけるエアロゾルの挙動評価(1/6)

R/B内エアロゾル挙動評価に向け、R/Bモデルを含めた解析条件を設定。建屋気密性が喪失している、3号機相当において、PCV漏洩条件として最も厳しい、PCV排気停止後、窒素封入および燃料デブリ切削が継続されている場合を想定したR/B内エアロゾル挙動評価を実施した。

#### ✓ R/Bにおけるダスト異常漏洩時の挙動評価

R/Bダスト挙動評価を実施し、以下のような知見を得た。

- 気相流速が速いエリアでは、ダスト沈着量が少なく、流速が遅い(淀み)エリアでは、沈着量が多い傾向を確認。気流流速が重要なパラメータであることが明らかとなった。
- 漏洩検知モニタリングの観点からは、沈着量が多いエリアで一定時間経過後、沈着FPからのバックグラウンドの影響により、空間線量率を正しく計測できない可能性が明らかとなった。

#### ✓ R/Bダスト挙動に関する感度解析

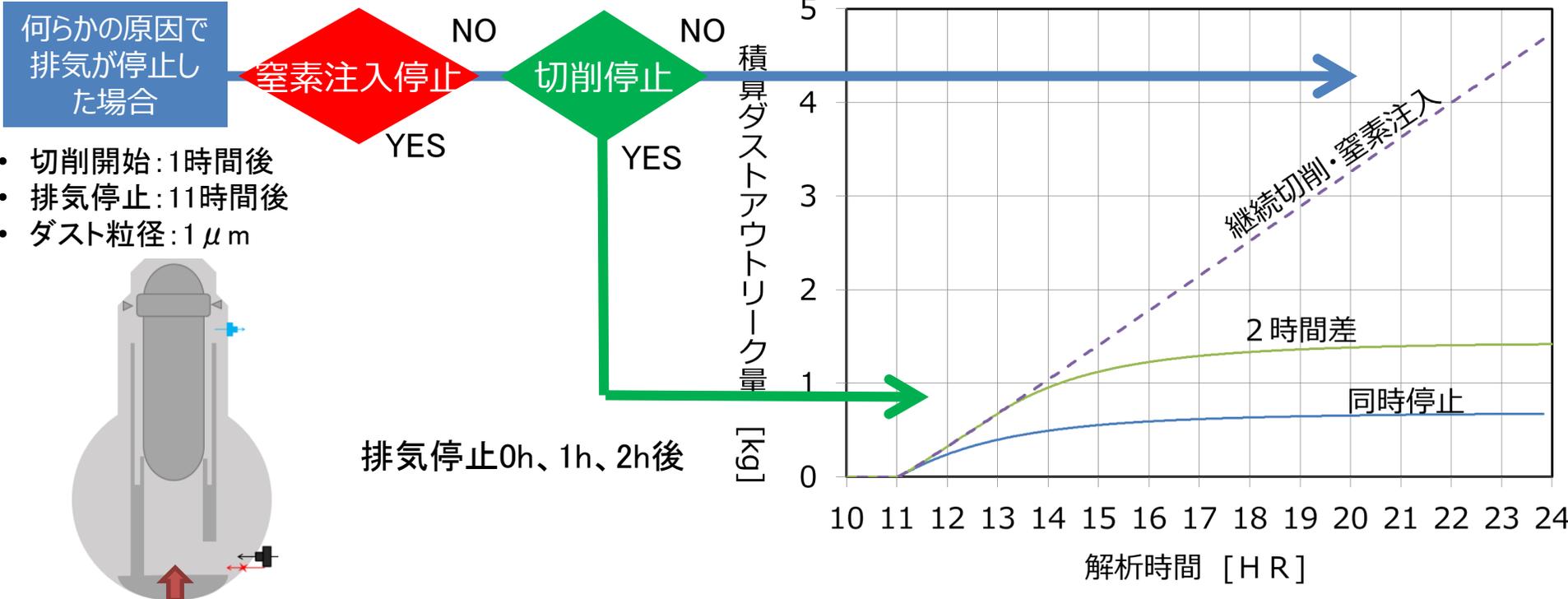
PCV破損口位置による影響、PCV排気システム停止時の対応による影響、建屋空調条件による影響を感度解析として評価し、以下の知見を得た。

- 異常漏えい検知後、早急にダスト切削を停止することで、汚染拡大を防止可能
- R/Bを負圧状態に維持できない場合でも、建屋排気実施により、環境へのダスト漏洩は発生しない結果。これにより、建屋内負圧化を図らなくとも、閉じ込め機能を担保できる可能性。
- ただし、建屋内負圧化を図らない場合、漏洩階の汚染は拡大。また、建屋での沈着が増加するため、建屋排気へのダスト移行は減少。
- 建屋排気未実施の場合、PCVからの漏洩ガスにより、環境へダストが漏洩する結果。ダスト閉じ込めとして、建屋の換気は必須。

# 7. 本事業の実施内容 【 3)( i )① PCV内でのダスト挙動予測技術 】

## ③R/Bにおけるエアロゾルの挙動評価(2/6)

✓ PCVからのダストアウトリーク量を検討するため、2018年度に感度解析を行った結果、**PCV排気停止時、窒素注入継続で、且つダスト継続切削**が最も厳しいことが分かっている。よって、同様の条件を使用し、建屋内ダスト漏洩評価を実施する。



\* 2018年度閉じ込め機能確保のための技術開発研究成果より

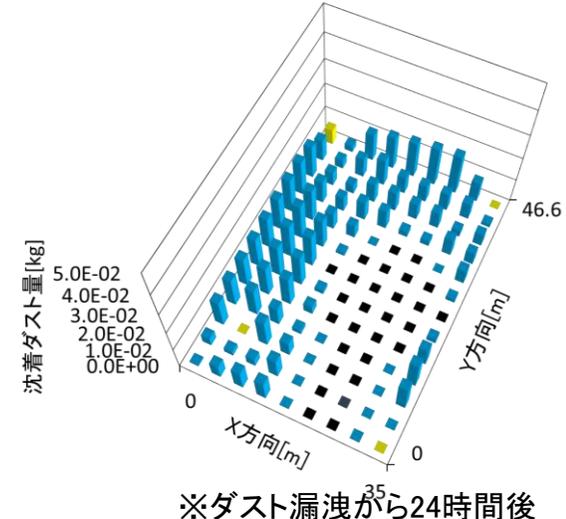
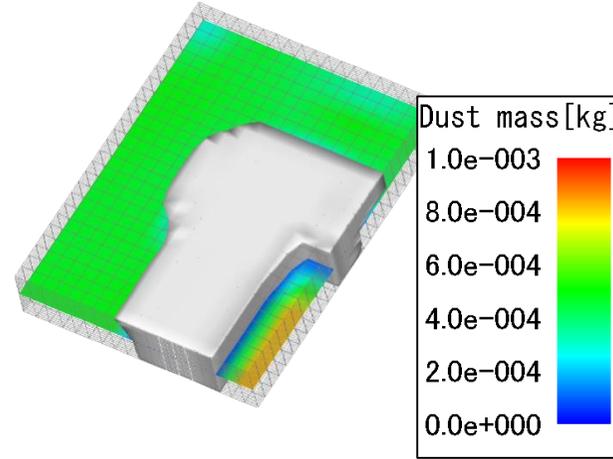
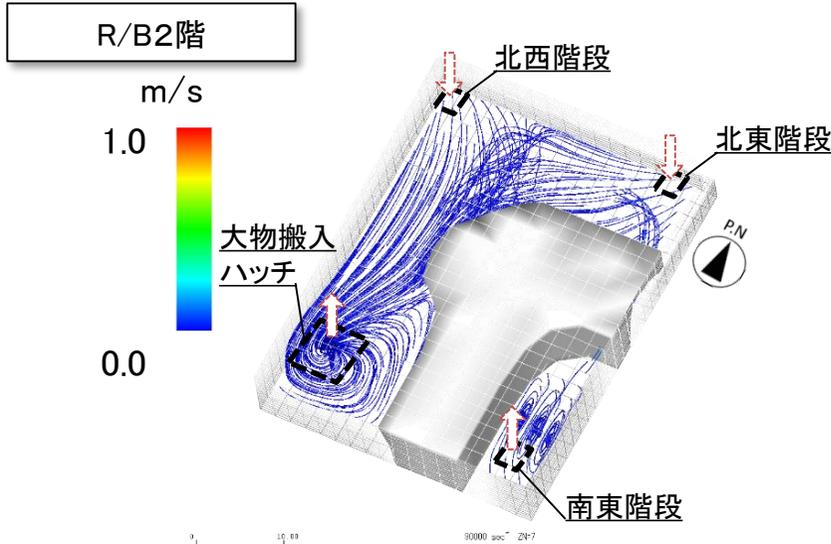
# 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

## ③R/Bにおけるエアロゾルの挙動評価(3/6) ~エアロゾル質量分布~

【ベースケース解析結果(1階から2階)】

**ダスト空間浮遊量** ※中心高さ

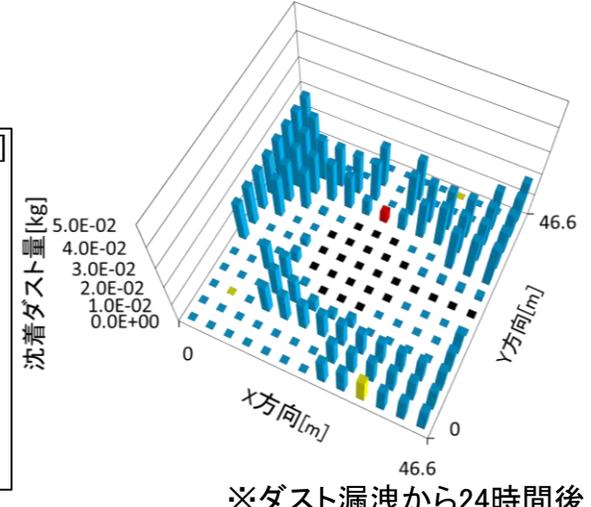
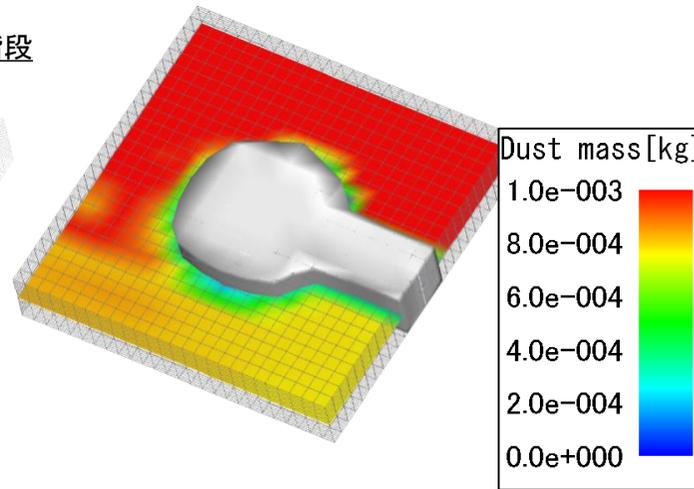
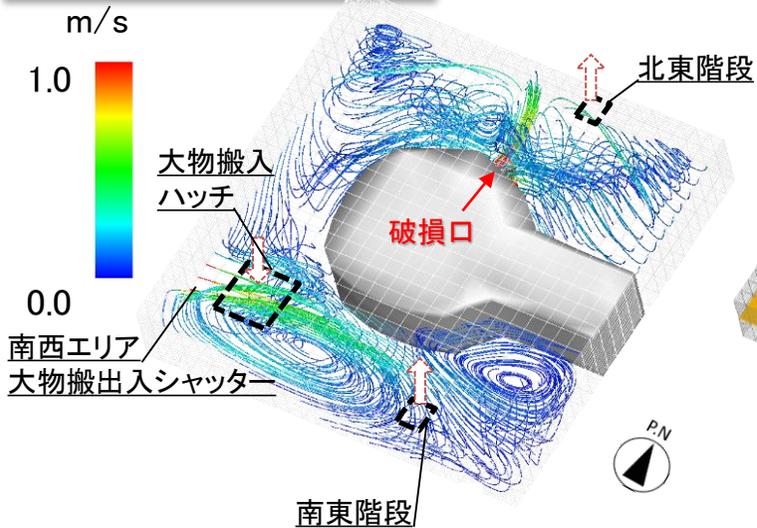
**ダスト沈着量**



R/B1階(漏洩フロア)

**ダスト空間浮遊量** ※中心高さ

**ダスト沈着量**

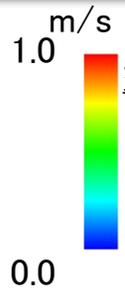


# 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

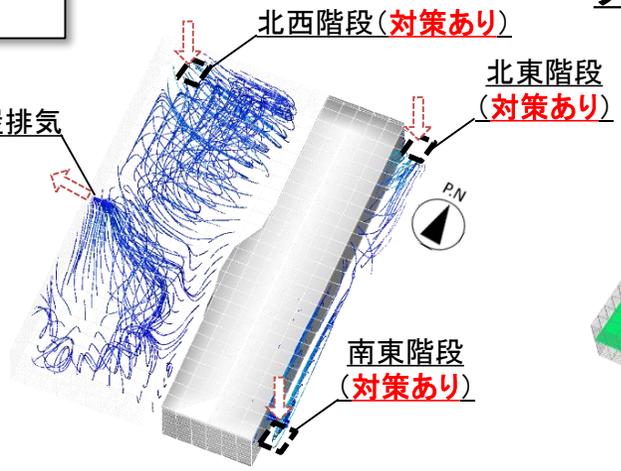
## ③R/Bにおけるエアロゾルの挙動評価(4/6) ~エアロゾル質量分布~

【ベースケース解析結果(3階から4階)】

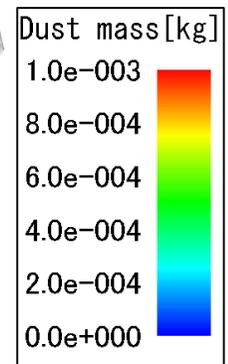
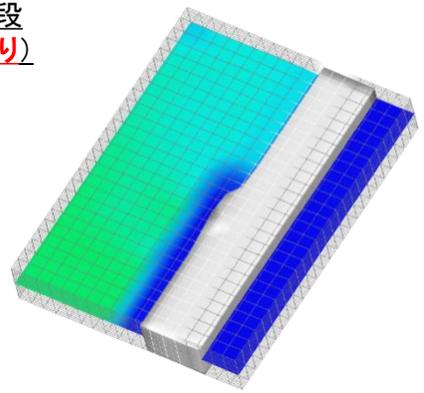
R/B4階



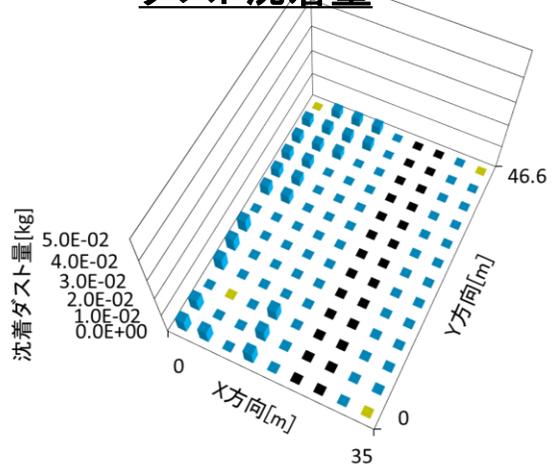
建屋排気



### ダスト空間浮遊量 ※中心高さ

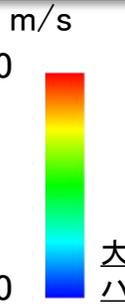


### ダスト沈着量

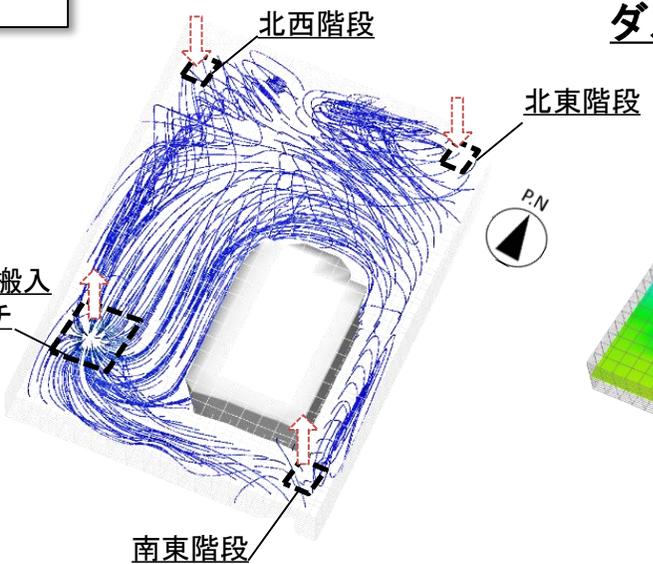


※ダスト漏洩から24時間後

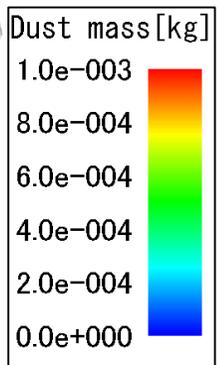
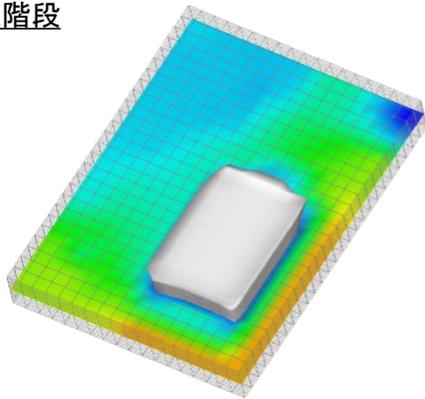
R/B3階



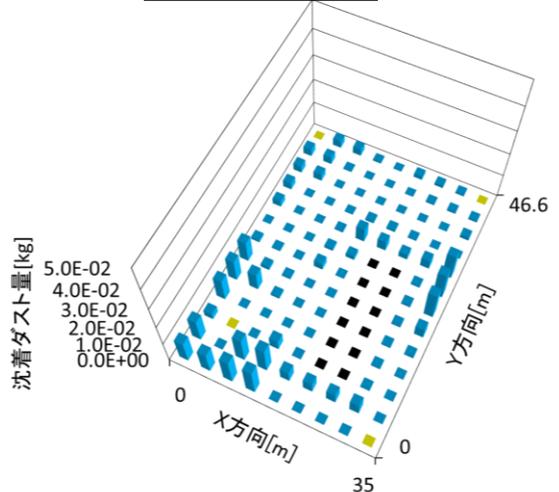
大物搬入ハッチ



### ダスト空間浮遊量 ※中心高さ



### ダスト沈着量



※ダスト漏洩から24時間後

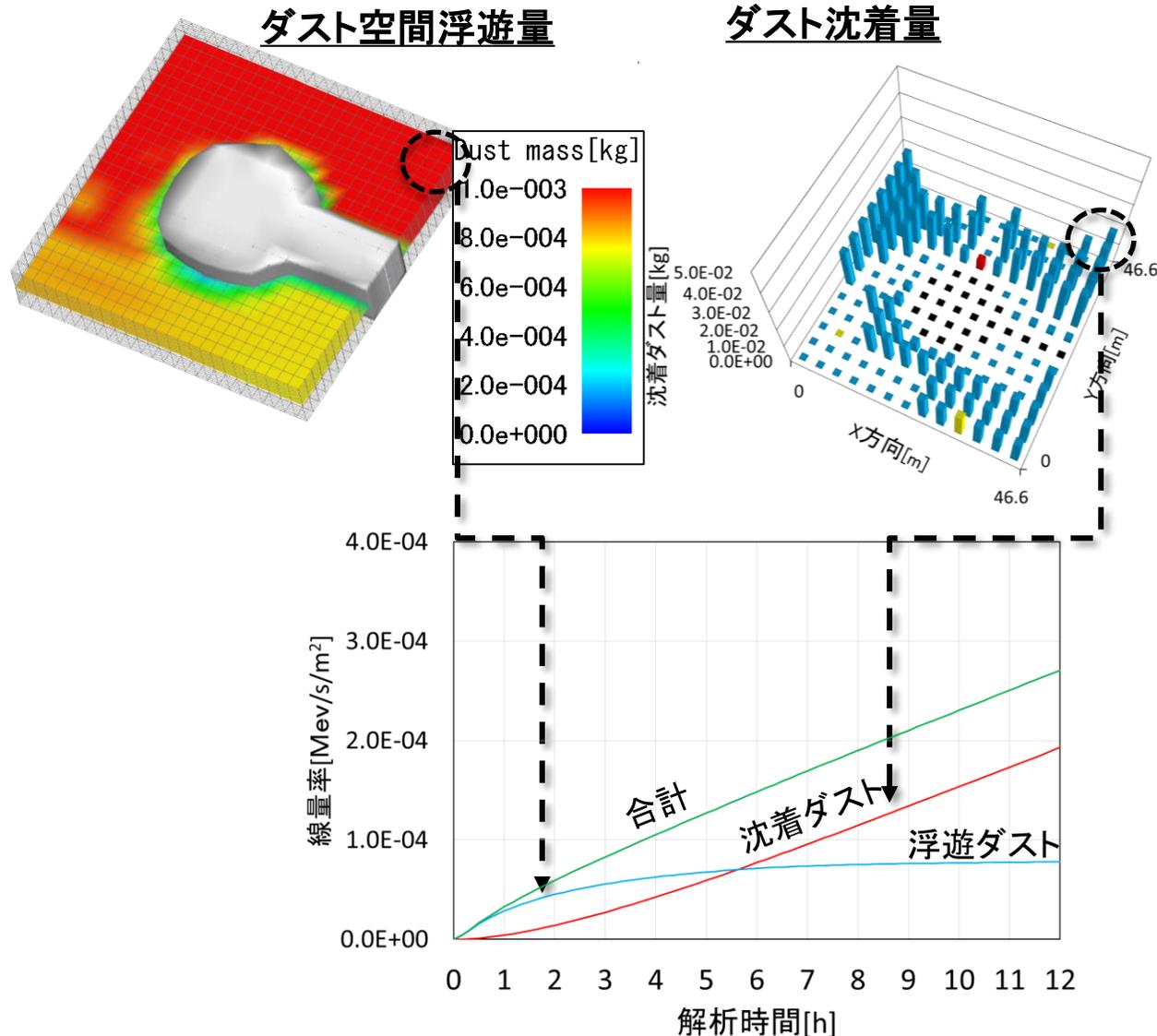
# 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

## ③R/Bにおけるエアロゾルの挙動評価(5/6) ～モニタリング線量率寄与～

- ✓ 一辺が3mの立方体に浮遊するFPと、それがすべて床面に沈着した場合の線量率寄与を簡易的に評価すると、浮遊FPの寄与が沈着FPの約3倍となる
- ✓ 沈着量が最も厳しいエリアにおいて、5.5時間までは浮遊ダストの線量率寄与が優位で、それ以降は、沈着ダストによる寄与が高くなる



- ✓ モニタリングの観点から、ダスト沈着量の多いエリアでは、一定時間経過後、空間線量が適切に計測できない可能性がある



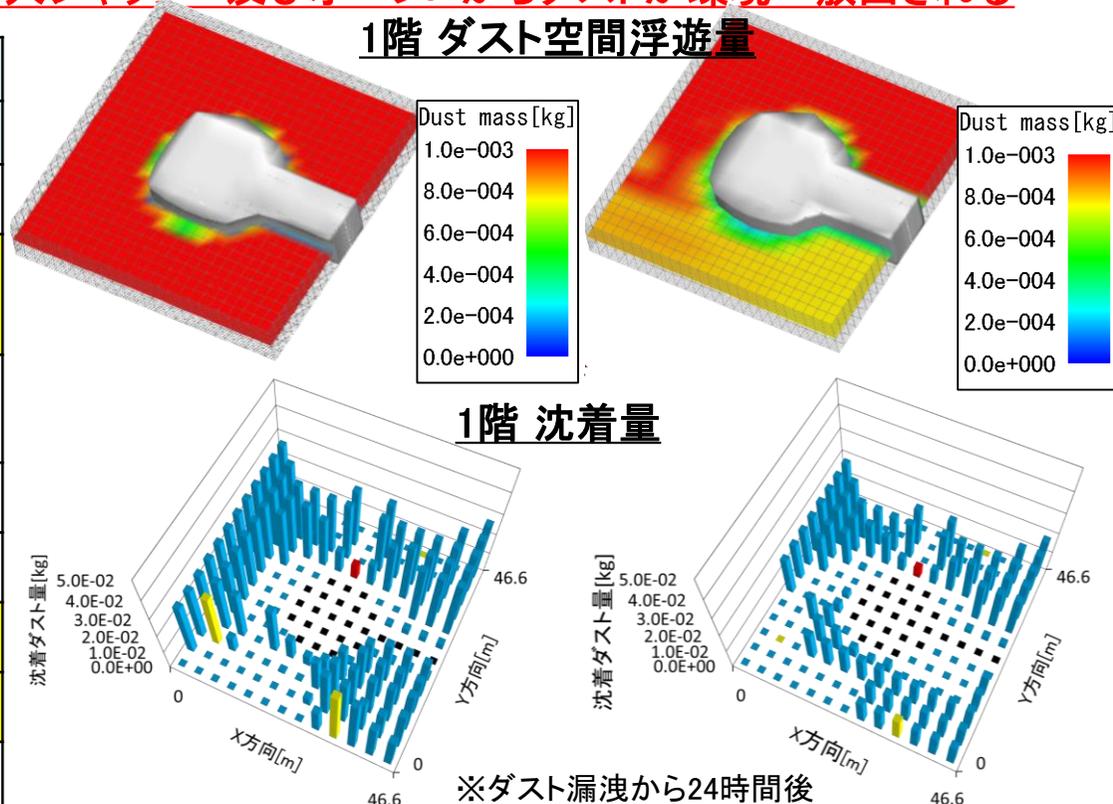
# 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

## ③R/Bにおけるエアゾルの挙動評価(6/6) ～建屋側対策による感度解析～

- ✓ 負圧対策未実施の場合でも、**ダストは環境へ放出されない可能性**
- ✓ 負圧対策未実施の場合、**建屋内ダストが増加**し、建屋1階から2階の汚染が拡大する
- ✓ 負圧対策を実施することで、建屋内のダスト量を減少し、汚染を防ぐことが可能である一方、**建屋排気ダストが増加**する
- ✓ さらに、**建屋排気を実施しない場合、大物搬出入シャッター及びオペフロからダストが環境へ放出される**

階段室面積	負圧対策実施	負圧対策未実施	
	0.09[m <sup>2</sup> ]	9.0[m <sup>2</sup> ]	
負圧度	0.1[kPa-diff]	0.0[kPa-diff]	
オペフロ外気吸込み	2.0[kg/s] (Gas)	2.9[kg/s] (Gas)	
4Fダスト排気量	5.2[kg]	2.1[kg]	
※ ダスト質量	4F	0.3[kg]	0.2[kg]
	3F	0.4[kg]	0.5[kg]
	2F	0.9[kg]	2.4[kg]
	1F	2.1[kg]	3.8[kg]
大物シャッター外気吸込み	0.9[kg/s] (Gas)	0.04[kg/s] (Gas)	

※ 浮遊+沈着量合計



負圧対策未実施  
(0[kPa-diff])

負圧対策実施  
(0.1[kPa-diff])

### ④入熱による気流への影響(1/9)

- ・燃料デブリの崩壊熱や燃料デブリ切削時にダスト及び床面近傍が高温になった場合、上昇気流によりダストもより多く舞い上がり、漏えい量や排気への移行量が大きくなる懸念がある。
- ・PCV内に温度勾配が生じ、且つPCV破損口が複数ある場合は煙突効果により破損口を介した気流の出入りが生じることになる。これによりダスト挙動に影響を与えられられる。

#### ✓ 今年度実施事項[I]

- 燃料デブリの崩壊熱や燃料デブリ切削時における入熱の気流に対する影響の評価手法含めた検討-
- 代表的切断法として熱的な影響の大きいプラズマ切断と、アシストガス量が多いレーザ切断を選定し、文献を基にダスト発生量と入熱量(切断時の放熱および切断されたダストの崩壊熱)を評価。また、入熱量を気流に付加するモデルを構築。
- アシストガスの吹き出しや入熱にともなう排気風量の増大を考慮し、入熱による気流温度の上昇などを解析で確認。

#### ✓ 今年度実施事項[II]

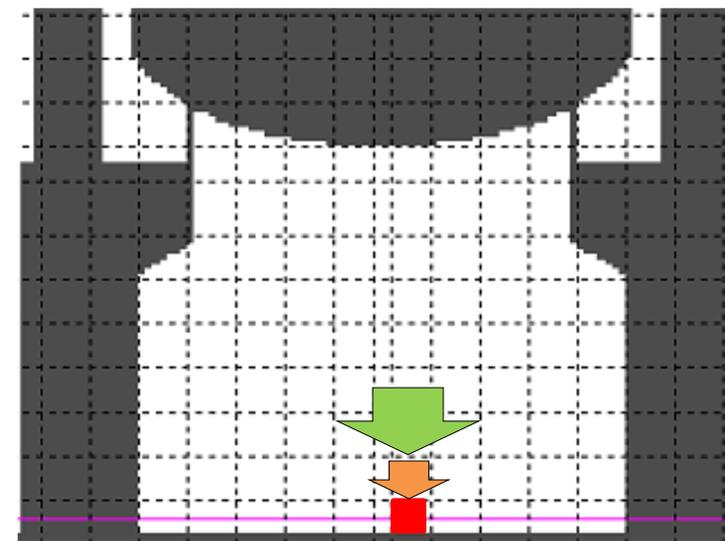
- 入熱による温度勾配の把握と、それに基づく破損口位置と煙突効果の関係性把握-
- GOTHICモデルに、PCV・建屋コンクリート間隙を模擬するサブボリュームを追加。高さや流況の異なる破損口位置2ケースを設定。
- PCV内を-200 Paから-300 Paの負圧に設定した場合、PCV内部とPCV外側間隙の間に煙突効果によるアウトリーク無し。PCV内圧力の上昇要因として切断時の放熱が支配的。

## ④入熱による気流への影響(2/9)

- ✓ 切断法として熱的に影響が大きいプラズマ切断とアシストガス量が多いレーザ切断を選定し、文献を基にダスト発生量と入熱量(切断時の放熱および切断された燃料デブリの崩壊熱)を検討。
- ✓ 入熱量の付加モデルを構築。燃料デブリ切断位置でプラズマガス・アシストガスの流れに排気熱損失を付加。

### 入熱による影響評価のパラメータ案の検討

解析条件	プラズマ切断	レーザ切断
切断電流・レーザ出力	200 kW(600 A)	6 kW
稼働率 <sup>*1</sup>	50%、25 %	50%、25 %
プラズマガス・アシストガス	Ar、 N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
ガス流量 <sup>*2</sup>	19.5 L/min	175 L/min
排気熱損失 <sup>*3</sup>	7%	7%
ダスト発生量(水中切断) <sup>*2</sup>	$3.7 \times 10^{-6}$ kg/s	$1.8 \times 10^{-6}$ kg/s
ダスト粒径 <sup>*4</sup>	$0.05 \times 10^{-6}$ m	$1.0 \times 10^{-6}$ m



⇩ ダスト    ⇩ アシストガス  
■ 加熱部

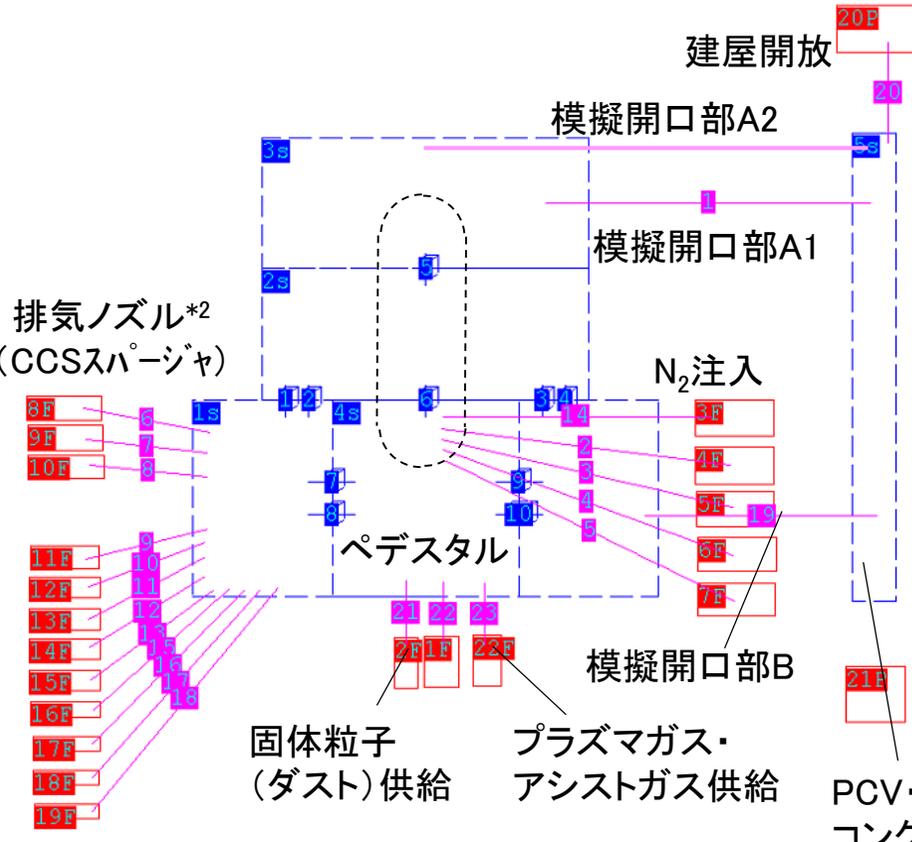
### ダストとガスおよび入熱量の付加

- \*1: 作業時間からトーチの引き上げ・移動等の非加熱時間を除いた正味切断時間の割合(50%、見積値を引用)。
- \*2: 稼働率50%時の値。
- \*3: 鋳造分野でのプラズマガスの排気熱損失割合の評価値を利用。水中切断では排気に同伴する熱量以外は、熱容量とサブクールが大きい水に移行すると仮定。
- \*4: JPDR解体実地試験プラズマ切断のダスト粒径分布を引用。SUS304レーザ切断時のダスト粒径分布を引用。

# 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

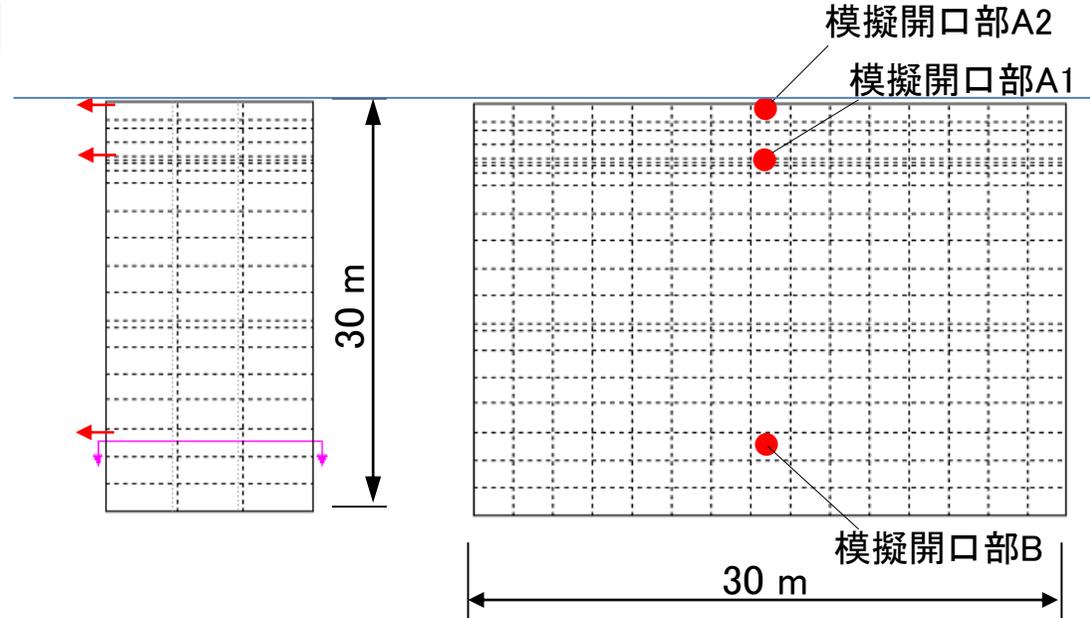
## ④入熱による気流への影響(3/9)

- ✓ 煙突効果を解析するため、GOTHICモデルに、PCV外側にPCVと建屋コンクリートの間隙を模擬するサブボリュームを追加。上部破損口の模擬開口部について、高さと流況の異なる位置(A1:トップヘッドフランジ、あるいはA2:トップヘッド頂部)を検討。
- ✓ PCVトップヘッド近傍の開放部を建屋と連通。\*1



### コントロール・ボリュームの設定

\*2: 今回の解析では現状の排気系を模擬。



### PCV・建屋間隙のサブボリューム設定

\*1: アウトリークが発生して間隙の温度が上昇した場合は、配管貫通孔を通じて建屋とのガスの置換を考慮したモデルを設定する予定であったが、今回の解析結果では、アウトリークが発生しないことを確認できたため、考慮は不要と判断した。

## 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

### ④入熱による気流への影響(4/9)

- ✓ 燃料デブリ切断状況を模擬した解析を行い、煙突効果とダスト拡散挙動を評価。
- ✓ 本プロジェクトの評価<sup>[5]</sup>に基づき、解析ではPCV内を-200 Paから-300 Paの負圧になるよう排気流量を設定。

#### 切断工法毎の排気流量

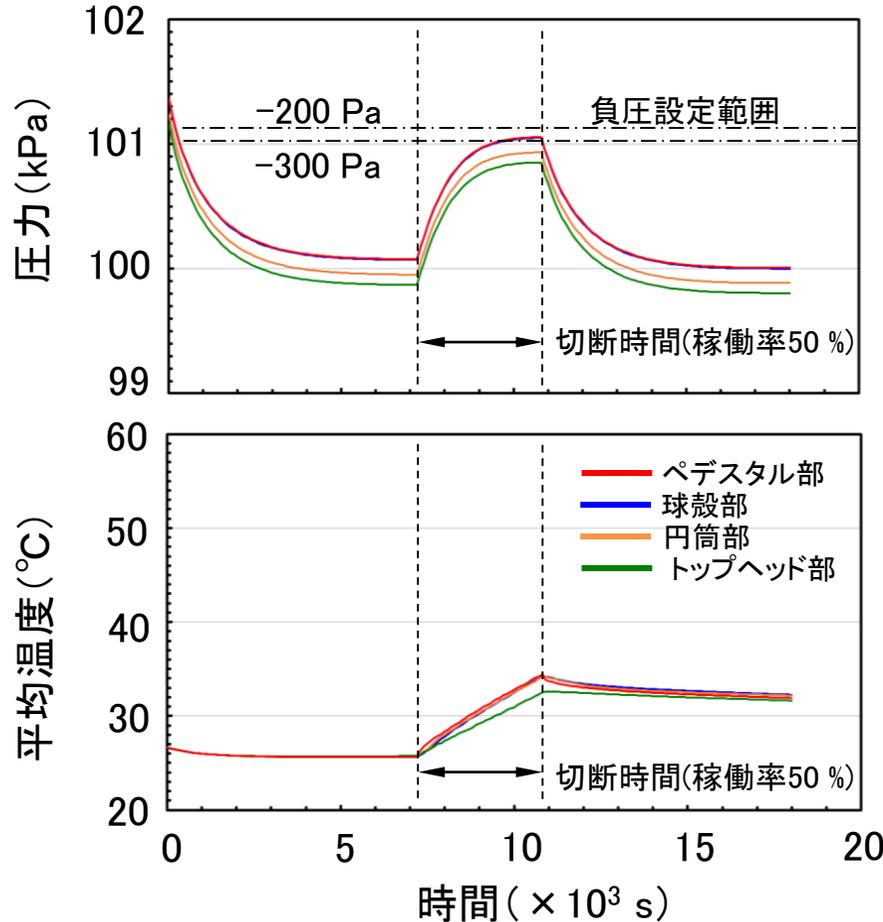
ケース No.	切断工法	開口位置 切断稼働率	排気流量	切断時最大圧力 [負圧]
1	プラズマ (水中)	トップヘッドフランジ 50%	3.96 kg/min (0.066 kg/s)	101.11 kPa [-215 Pa]
2		トップヘッドフランジ 25%	3.38 kg/min (0.056 kg/s)	101.05 kPa [-275 Pa]
3		トップヘッド頂部 50%	3.96 kg/min (0.066 kg/s)	101.11 kPa [-215 Pa]
4	レーザ (水中)	トップヘッドフランジ 50%	2.88 kg/min (0.048 kg/s)	101.11 kPa [-215 Pa]
5		トップヘッドフランジ 25%	2.88 kg/min (0.048 kg/s)	101.05 kPa [-275 Pa]
6		トップヘッド頂部 50%	2.88 kg/min (0.048 kg/s)	101.11 kPa [-215 Pa]
7	プラズマ (気中)	トップヘッドフランジ 50%	11.8 kg/min (0.196 kg/s)	101.04 kPa [-285 Pa]

- ✓ 放熱量が多い水中プラズマ切断のプラズマガス流量(19.5 L/min、稼働率50%時)は、レーザ切断のアシストガス(175 L/min)より1オーダー少ないにも関わらず、負圧維持のための排気流量が約38%増加した。
- ✓ ガス発生量が比較的少ない気中プラズマ切断(13.5 L/min)では、排気流量が水中切断より増加した。
- ✓ PCV内の圧力が上昇する要因として切断時の放熱が支配的と考えられる。

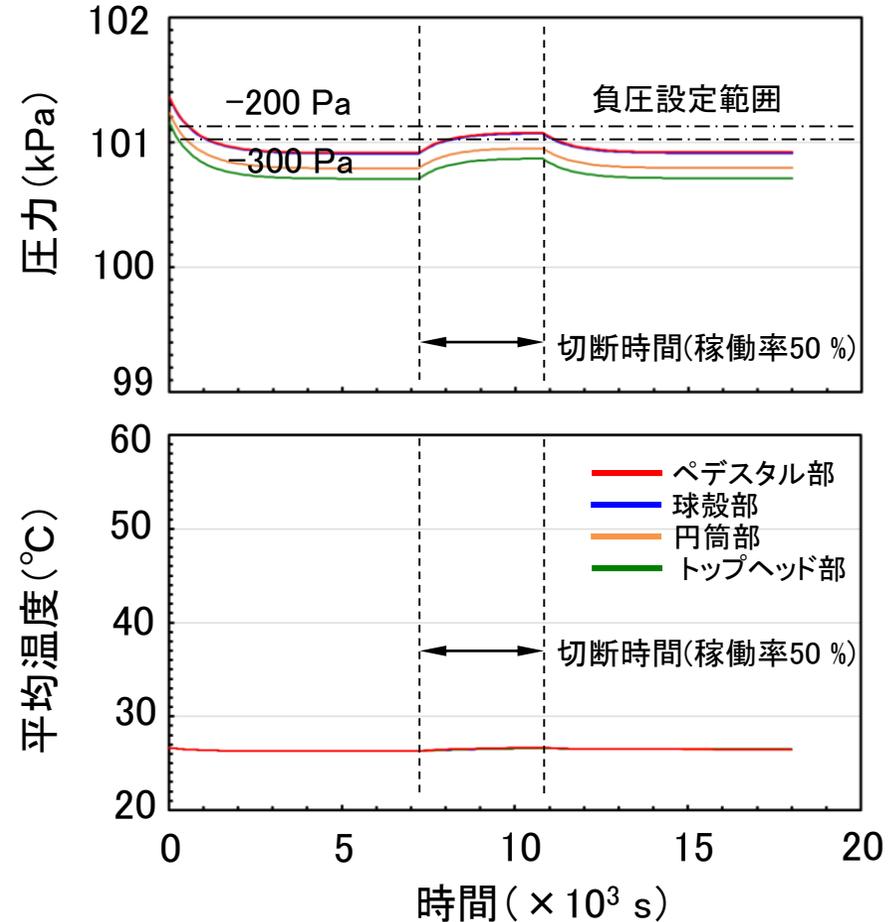
## ④入熱による気流への影響(5/9)

### 切断時のPCV内圧力と温度の挙動(切断工法の比較)

✓ 1ケースの解析は、計算上の負圧安定化2 h、実際の切断時間1 h、クールダウン2 hの計5 h。



水中プラズマ切断(フランジ開口)

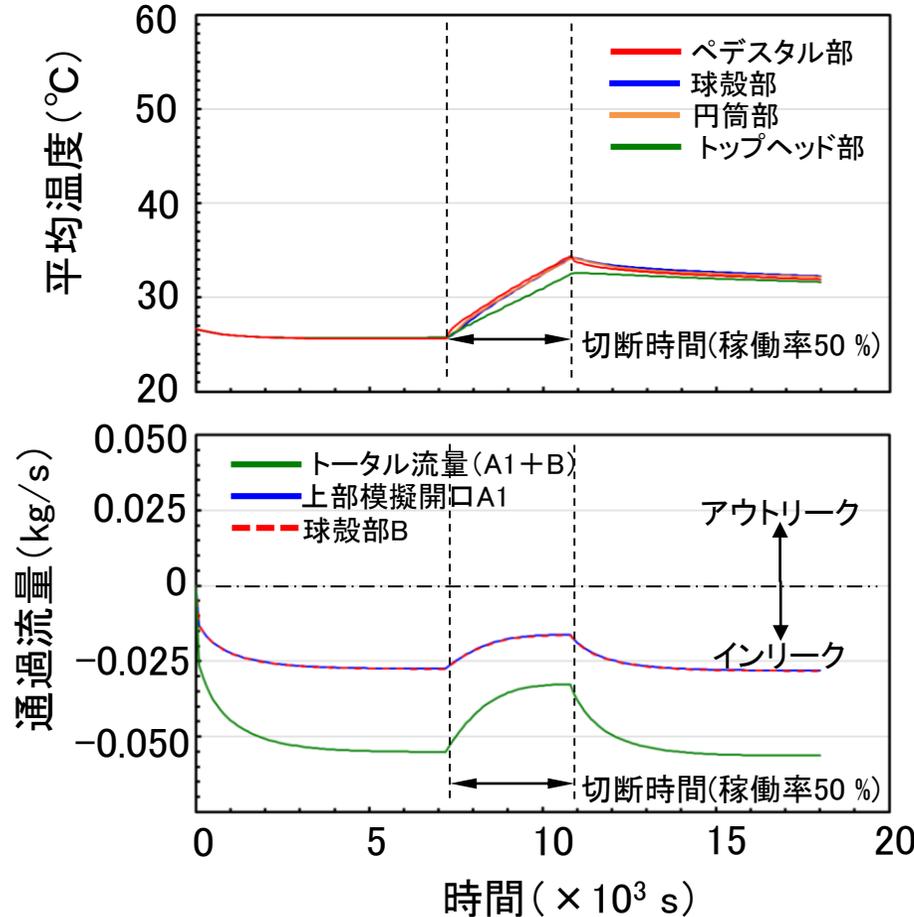


水中レーザ切断(フランジ開口)

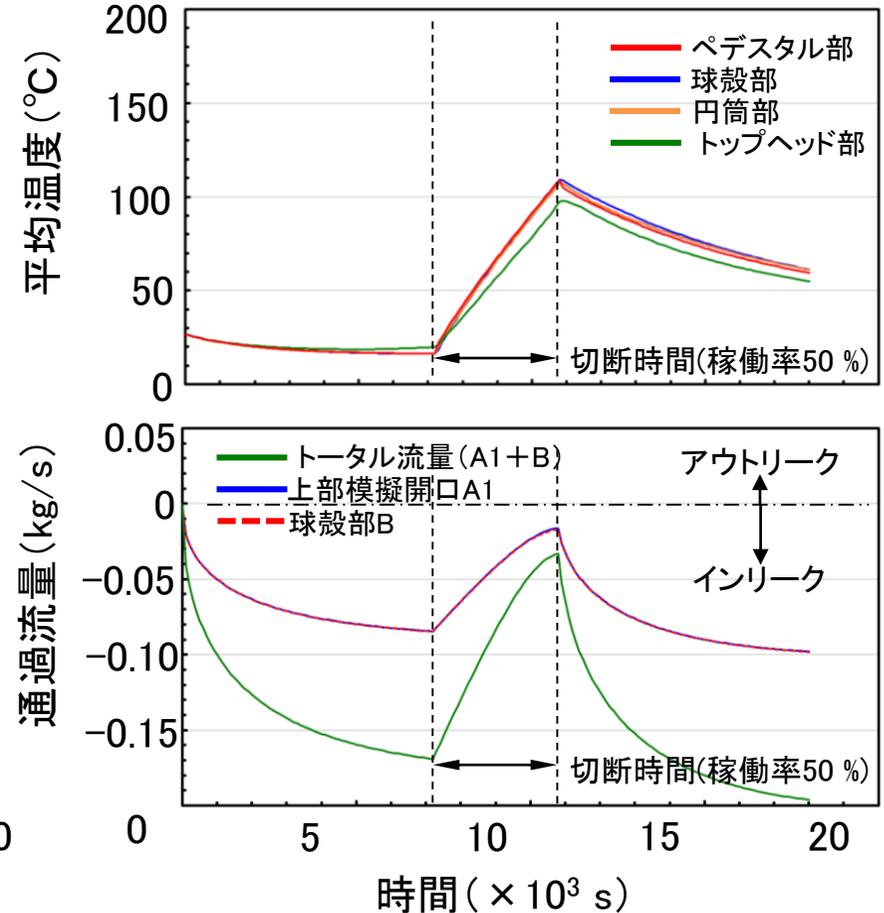
- ✓ 水中レーザ切断は圧力変化と温度上昇が少ないことから、保守的に水中プラズマ切断で煙突効果を評価する。
- ✓ 圧力分布図から窒素封入と排気、開口部からのインリーク等による局所的な圧力の偏りは見られなかった。

## ④ 入熱による気流への影響(6/9)

プラズマ切断時のPCV内各部の温度と開口部通過流量の挙動(水中切断と気中切断の比較)



水中プラズマ切断(フランジ開口)

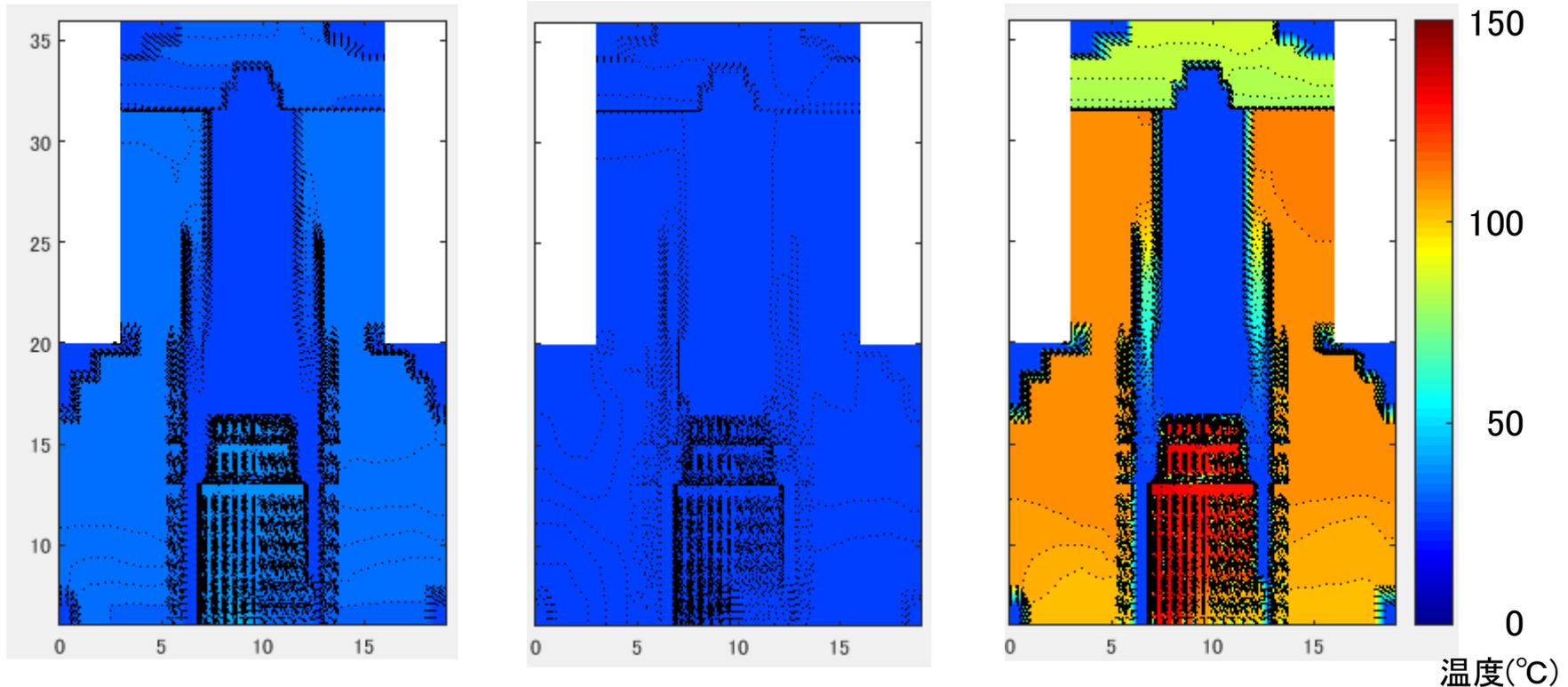


気中プラズマ切断(フランジ開口)

- ✓ 水中プラズマ切断では入熱によってPCV各部に温度差が生じたが、アウトリークの発生には至らなかった。
- ✓ また、開口部位置による差はほとんど見られなかった。
- ✓ 気中プラズマ切断では水中切断より顕著にPCV各部の温度が上昇したが、アウトリークは発生しなかった。

## ④入熱による気流への影響(7/9)

### 切断終了時のPCV内温度分布



ケース1 (10800 s)

- ・水中プラズマ切断
- ・稼働率50 %
- ・トップヘッドフランジ開口

ケース4 (10800 s)

- ・水中レーザー切断
- ・稼働率50 %
- ・トップヘッドフランジ開口

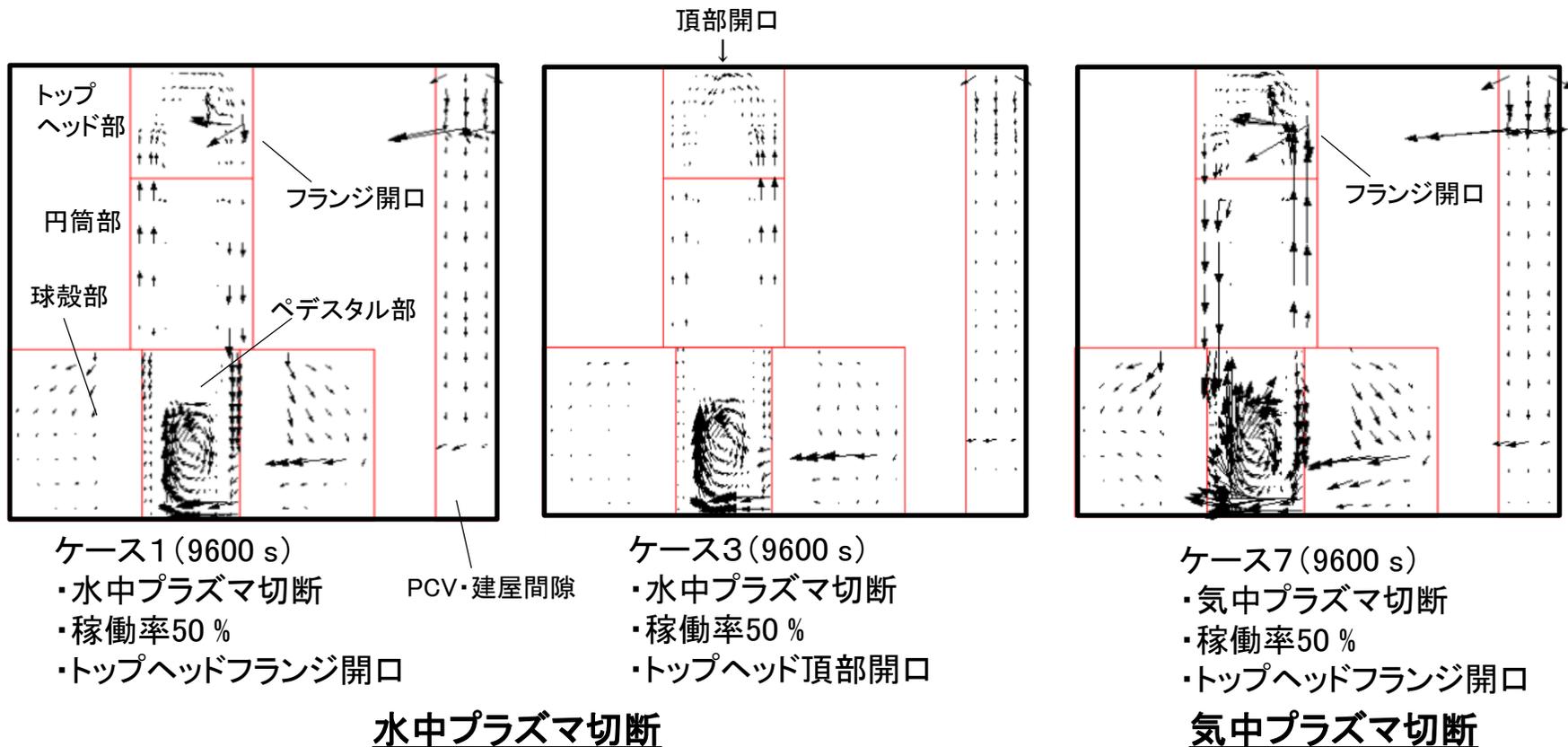
ケース7 (10800 s)

- ・気中プラズマ切断
- ・稼働率50 %
- ・トップヘッドフランジ開口

- ✓ 切断工法毎の熱流の差異による高さ方向の温度変化が観察された。また、圧力分布も評価し、密度差による高さ方向の圧力変化が観察された。
- ✓ 温度差が比較的大きい気中と水中のプラズマ切断を対象に、気流を比較する。

## ④入熱による気流への影響(8/9)

### 切断時のPCV内の速度分布(開口部位置と切断条件)



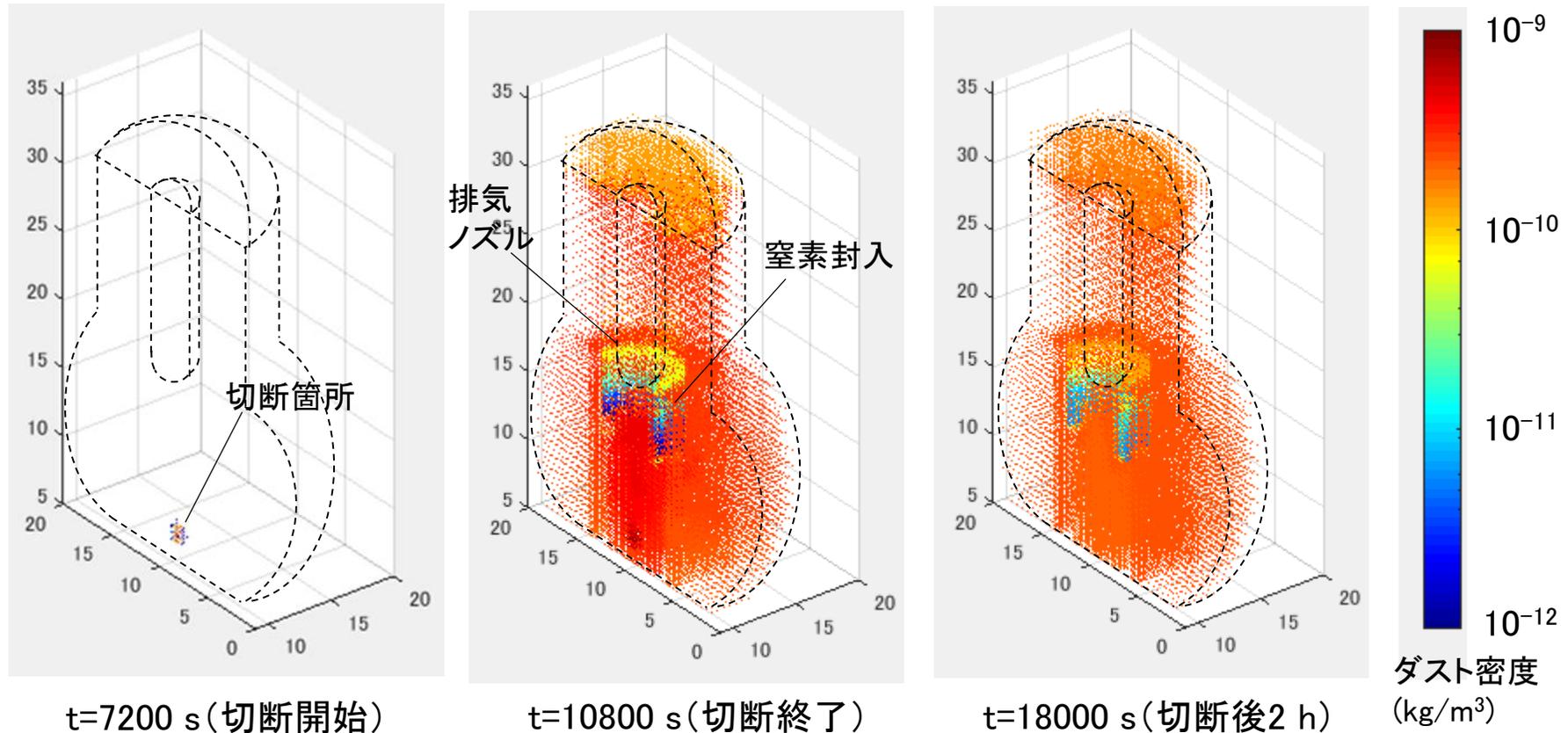
- ✓ フランジ開口ではPCV内側に向かうインリーク流れを確認した。頂部開口では間隙側の速度ベクトルからインリーク流れを確認した。
- ✓ 気中プラズマ切断ではPCV円筒部や球殻部の対流が顕著になったが、煙突効果によるアウトリークは発生しなかった。

## 7. 本事業の実施内容【3)(i)① PCV内でのダスト挙動予測技術】

No.255

### ④入熱による気流への影響(9/9)

PCV内のダスト濃度分布(水中プラズマ切断、稼働率50%、フランジ開口)



- ✓ 切断終了時はペDESTAL部のダスト濃度が高かった。切断終了後2 hでは、濃度がいく分低下したものの、PCV全体にダストが分布した。
- ✓ また、頂部開口条件では、フランジ開口と比較して大きな差異は見られなかった。
- ✓ 水中プラズマ切断ではダスト濃度の減少に時間を要した。排気中のダスト濃度を管理する場合は、排気流量の増加が必要となる可能性がある。

### ⑤まとめ(1/4)

◆ 燃料デブリ取り出しにより発生するダストの挙動を評価するため、以下4項目の技術開発を実施した。各実施項目における成果を以下にまとめる。

#### ① 現実的なダスト挙動評価手法の高度化

・GOTHICコードにおけるエアロゾルモデルの妥当性及び1Fへの適用性を調査し、**重力沈降のみの考慮でエアロゾル挙動評価は可能**と判断。

#### ② 格納容器及びR/B全体における気流解析

・新たにR/Bモデルを構築し、建屋の破損有無をパラメータとした圧力挙動解析を実施。**建屋破損を想定した条件下においても、排気位置や流路を絞る等の対策で、負圧化(気密性担保)が可能**である見通しを得た。

#### ③ R/Bにおけるエアロゾルの挙動評価

・R/Bモデルを用いたエアロゾル挙動評価を実施し、異常漏えい検知のための適切なモニタリング箇所抽出に向けた知見、及びエアロゾルの沈着傾向を把握した。  
・建屋空調条件等を変化させた感度解析を実施し、**閉じ込め機能確保のために必ずしも建屋内負圧が必要ではない可能性**があるが、**建屋内排気は必須である**見込みを得た。

#### ④ 入熱による気流への影響

・ダスト発生量と、崩壊熱や燃料デブリ切断時の放熱などの入熱を検討し、入熱量を気流に付加するモデルを構築。  
・解析で切断工法ごとの必要排気流量を把握するとともに、温度勾配や破損口位置の影響を評価し、**想定される負圧では煙突効果が生じない**ことを確認。

### ⑤まとめ(2/4)

開発項目として掲げていた以下2項目についての成果は以下の通りである。

- ① 異常時における閉じ込め機能確保のためのR/Bの気密性及びガス管理システムの要求仕様  
⇒建屋4階から10,000[m<sup>3</sup>/h]の排気による換気率を前提として、オペフロ-4F間の流路面積を現在の1/100(0.09[m<sup>2</sup>]程度)に絞ることが必要であると言える。すなわち、オペフロ-4F間の流路面積を絞る負圧化対策案がR/Bの気密性及びガス管理システムの要求仕様の一つとなり得る。
  
- ② PCVからの異常漏えい発生時においてR/B内のモニタリングにおける公衆及び作業員被ばく低減の観点から有効な監視位置の抽出  
⇒適切な監視位置としては、PCV漏洩ガスの流速が速い位置でのモニタリングが最適である。なお、PCV漏洩ガスの流速が速い位置はPCV破損口近傍であるが、PCV破損位置が不明な状況においては、流速が続いて速い漏洩ガスの各階間の主流路となる階段室、ハッチ近傍が最適である可能性が考えられる。  
⇒適切なモニタリング技術の選定としては、漏洩検知の観点から空間浮遊量を測定する必要があると考えられるため、沈着FPからのバックグラウンド線量を拾わないような対策(例えば、コーメータを設置するなど)が有効であると考えられる。

### ⑤まとめ(3/4)

- ◆ 1F環境を考慮した、エアロゾルの物理的挙動に基づくダスト挙動評価手法を構築した
- ◆ ここで得られた成果を用いることで、燃料デブリ取り出しに向けた以下のようなエンジニアリングにおいて、様々な検討が可能となった
  - ・ 切削加工方法、及び切削加工時のPCV内環境
  - ・ 切削作業シーケンスのイメージトレーニング
  - ・ PCVガス管理システムの最適化
  - ・ 閉じ込め機能確保に向けたR/B対策および換気システムの最適化
  - ・ アウトリークを防止できるシステム運転条件と過渡時の安全裕度評価
  - ・ 異常時漏洩モニタリングや緩和対策の検討 など
- ◆ 個別エンジニアリングに向けては、本PJで開発した解析手法を用いて、現場調査や実機試験の成果などを適宜反映した条件を設定し、また、必要に応じてモデルの拡張・修正を行い、試験結果と突き合わせるなどしながら、解析の信頼性を確保していく必要がある。

### ⑤まとめ(4/4)

◆ 残る課題としては以下のようなものが挙げられる

➤ 解析精度向上に向けた課題

- 粒径分布を考慮した多分散における挙動の確認
- セルサイズ以下の局所熱流動挙動の影響評価(CFD等) など

⇒**ダスト集塵PJや燃料デブリ性状把握PJ等の成果をもとに、加工方法に応じたエアロゾル条件(粒径分布、組成、形状因子)およびその発生条件(発生量、発生速度など)を適切に反映できる評価手法の開発を補助事業等を通じて実施。**

➤ 実機の評価に向けた課題

- 内部調査PJと連携した切削着手前のダスト付着状態の把握
- 取り出し工法に応じた実機PCV、R/Bモデル化
- 燃料デブリ性状把握PJと連携したダスト物性と発生量の評価
- 切削加工方法等に応じた実際のエアロゾル条件の設定 など

⇒**他PJ及びエンジニアリングの進捗に基づき、実施。**

## 7. 本事業の実施内容

### 3) 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発

#### (i) 閉じ込め機能に関わる要素技術開発

#### ② 接続部の閉じ込め機能確保技術

燃料デブリ取り出しのための作業セル等、R/Bに設置する大型の新設設備について、PCV等の既設構造物との接続部の閉じ込め機能確保のための技術開発として、接続部の構造、工法、検査、シール材等の保守等について検討し、必要な要素試験を実施し技術の成立性を確認する。

主な開発検討項目として以下を含むものとし、必要に応じて要素試験を実施することにより課題を抽出し整理する。

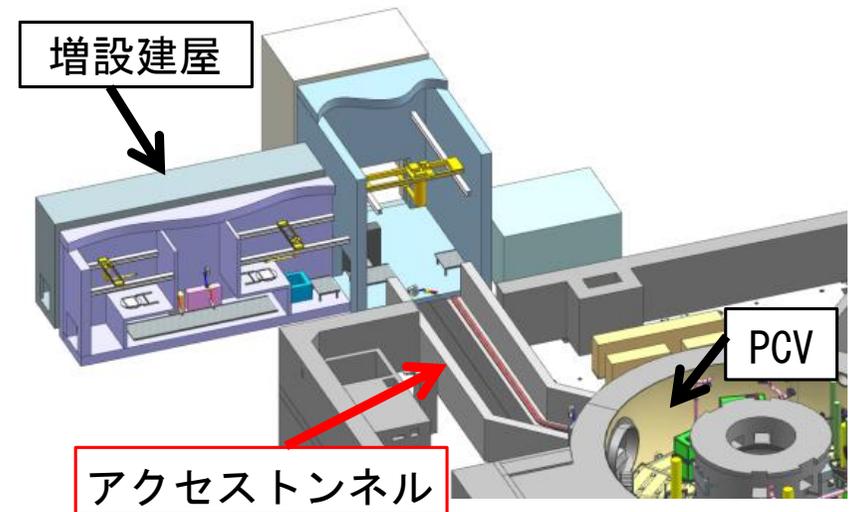
#### a. アクセストンネルにおけるPCVとの接続方法。

- ・アクセストンネル接続部の基本要件について整理中。
- ・機器ハッチ前遮へいプラグの取り外し手順を考慮したアクセストンネル接続完了までの作業ステップを検討した。

- 開発の目的
  - 片持ちによる送り出し方法の実現性が確認されたアクセストンネルについて、PCVとの接続手順およびシール方法の検討を行う。
- 解決すべき課題
  - PCVとの接続構造(シール方法)および設置手順の確立。
- 開発の進め方
  - 遠隔作業を考慮した機器ハッチ前遮へい体取り外しからアクセストンネルのPCV接続までの作業手順の立案。
  - PCVとスリーブ、スリーブとアクセストンネルの取り合い構造検討および要素試験による実現性確認。
  - 遮へい機能の見直しと軽量化に関する概念検討。
- 得られる成果
  - 遠隔作業を考慮した機器ハッチ前遮へい体取り外しからアクセストンネルのPCV接続までの作業手順。
  - PCVとスリーブ、スリーブとアクセストンネルの取り合い構造の実現性確認結果。
  - 遮へい機能の見直しと軽量化に関する概念検討結果。

### ■ アクセストンネル設置に関する前提条件

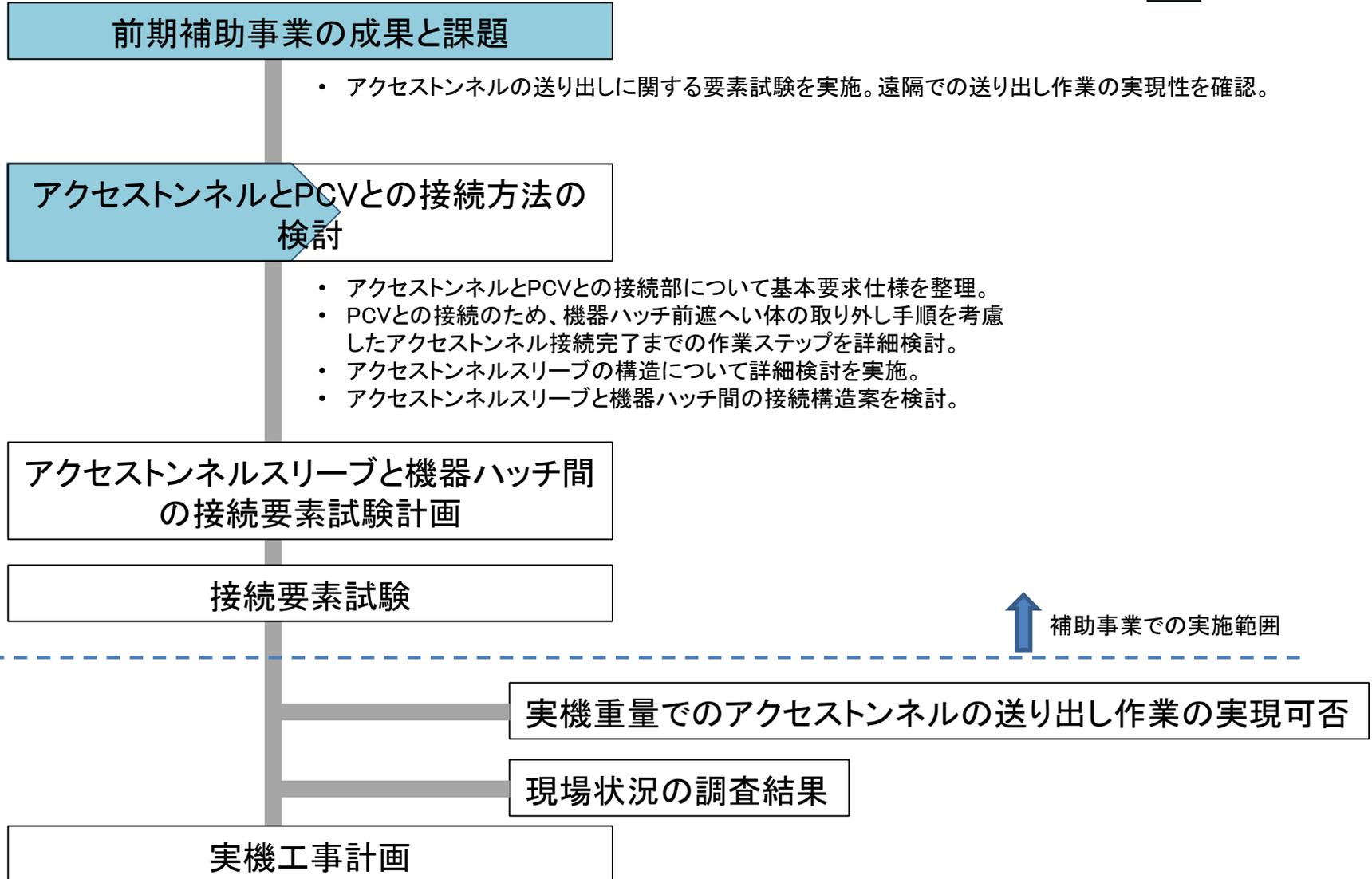
- ✓ アクセストンネル設置のため、ヤード整備、地下構造物対策および地上構造物撤去等を実施済であること。
- ✓ アクセストンネルでPCVと接続する増設建屋が建設可能であること。
- ✓ アクセストンネル設置のため、R/B外壁に開口が設置可能であること。なお、アクセストンネルはR/B外から遠隔にて送り出すことで敷設する。



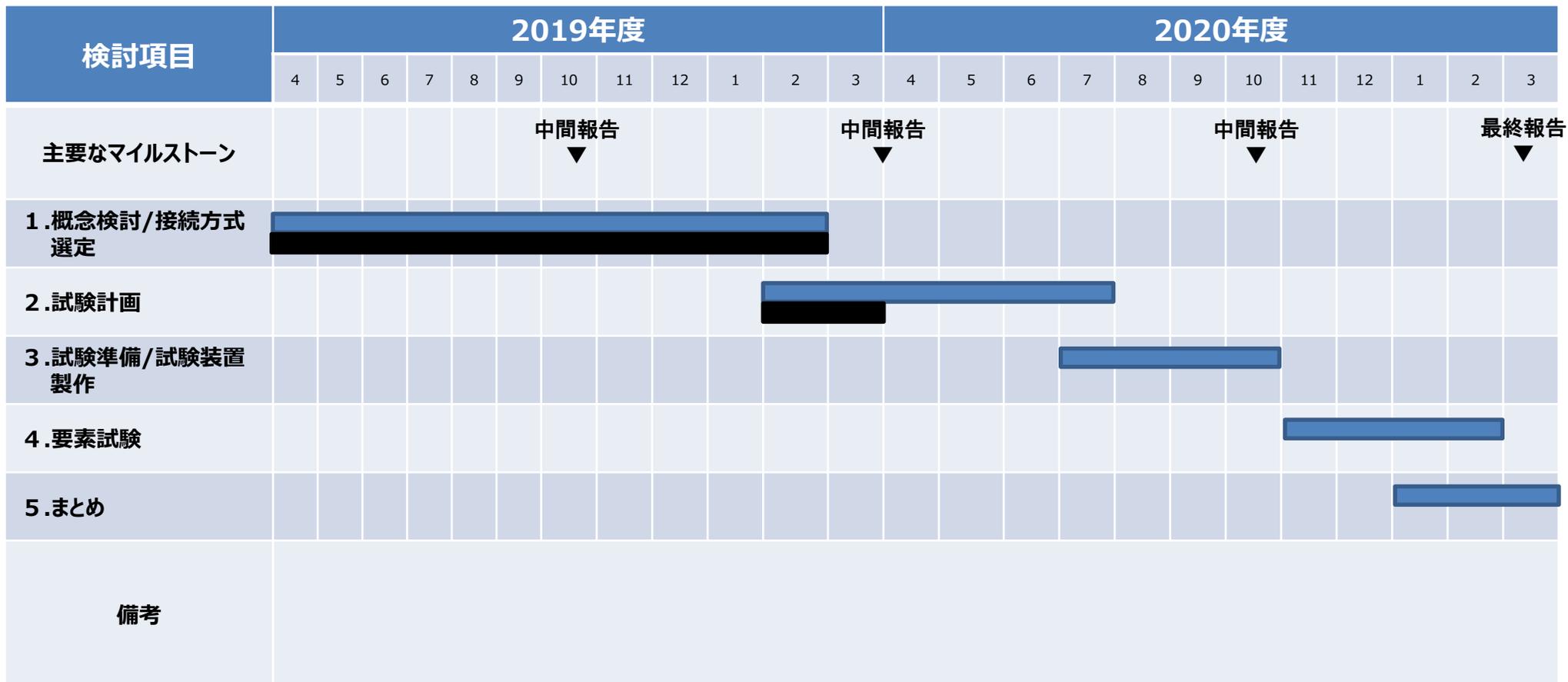
PCVと増設建屋の接続イメージ

## ■ 検討フロー

: 今回報告



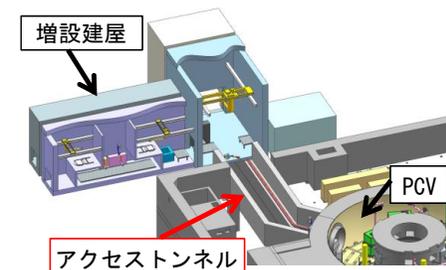
## ■ 開発工程



# 7. 本事業の実施内容【3)(i)② 接続部の閉じ込め機能確保技術】

## ■ アクセストンネル接続部の基本要件仕様

- ✓ アクセストンネル設置工法については、前年度までに、遠隔での送り出し方法について要素試験を実施し、実現性の見通しを得た。
- ✓ 本補助事業(19-20年度)では、PCVとの接続方法に関する検討を実施する。
- ✓ 接続部分の検討にあたり、アクセストンネル接続部の基本要件について整理を実施中。
- ✓ 基本要件を踏まえた対応方針を今後検討した後、必要となる要素試験実施を計画。(要素試験は20年度に実施予定)



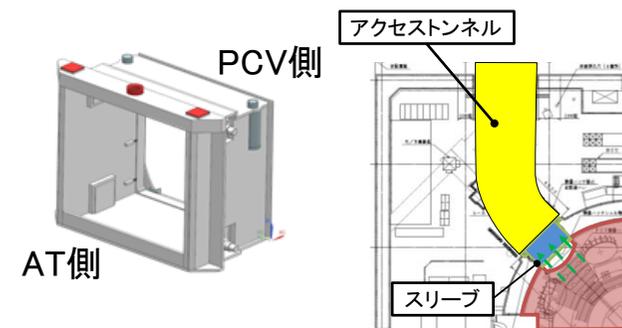
アクセストンネルの概念

表. アクセストンネルにおけるPCVとの接続部の基本要件【DRAFT】

	項目	仕様
基本要件	要求機能	放射性物質を閉じ込められること
	接続部に対する要求仕様条件	差圧: -100Paに対する漏えい量: ○○以下
		設計差圧○○Paに対して接続部が健全であること。
		保守時にも1次バウンダリの負圧(通常運転差圧)を維持できること。
	作業員の被ばく低減	完全遠隔作業にて、接続作業、保守作業が可能であること。
	設計寿命	50年
	水平最大変位	地震動に耐えられること(水平最大変位: ±○○mm)
	床面耐荷重	750ton/m <sup>2</sup> (遮へいプラグの設置部耐荷重値)を満足すること。
有効開口径	□1500mm	
環境条件	線量率	(R/B 1階)5~10mSv/h (PCVシェル外壁付近)10~100Sv/h
	温度	-7~40℃
	湿度	≤100%



遠隔送り出しの実現性の確認試験の様子(前年度成果)



アクセストンネルスリーブのイメージ

# 7. 本事業の実施内容【3)(i)② 接続部の閉じ込め機能確保技術】

## ■ アクセストンネル工法の作業ステップ

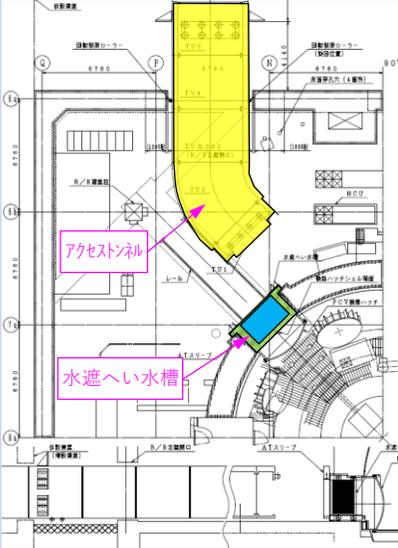
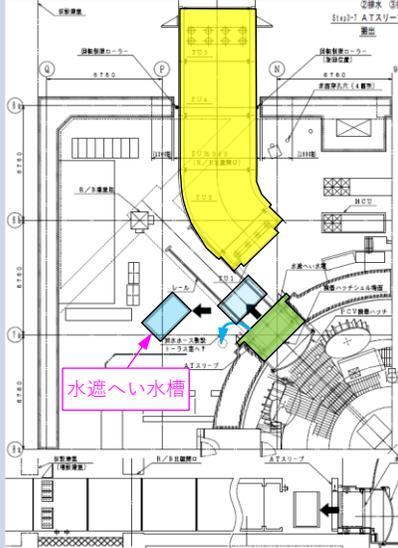
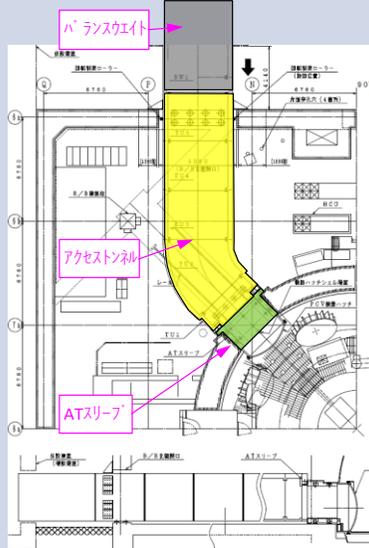
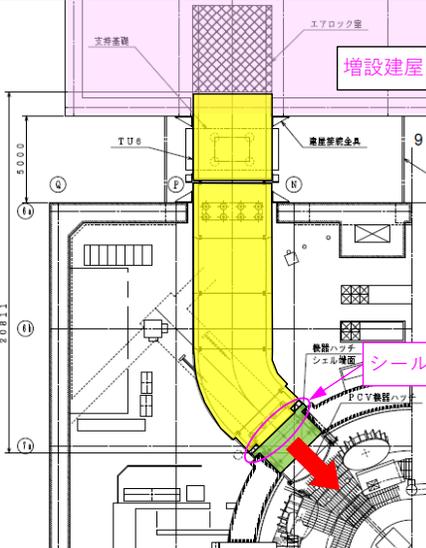
- ✓ 前年度までは、主に、R/B外→R/B内でのアクセストンネルの送り出しに関するステップを検討。
- ✓ 今回は、PCVとの接続のために、機器ハッチ前遮へい体の取り外し手順を考慮したアクセストンネル接続完了までの作業ステップを検討。

【アクセストンネル設置ステップ図(1/2)】

Step.1	Step.2	Step.3	Step.4
<p>仮設遮へい</p> <p>ATスリーブ 模擬体</p> <p>ATスリーブ</p> <p>機器ハッチ遮へい体</p>	<p>ATスリーブ 模擬体; 錆取り装置搭載</p>	<p>シール溶接</p> <p>ATスリーブ; 溶接装置搭載、水遮へい水槽と入替</p>	<p>水遮へい注水</p> <p>ホース</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• アクセストンネルスリーブ(以下、ATスリーブ)搬入、仮置き</li> <li>• ATスリーブ模擬体搬入、仮置き</li> <li>• 機器ハッチ遮へい体引き出し時の遮へい設置</li> <li>• 機器ハッチ遮へい体引き出し、撤去</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3Dスキャン実施</li> <li>• ATスリーブ模擬体挿入設置</li> <li>• ATシール溶接前処理(錆取り)</li> <li>• ATスリーブ模擬体撤去</li> <li>• ATスリーブ設置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3Dスキャン実施</li> <li>• ATスリーブ挿入設置</li> <li>• ATスリーブシール溶接</li> <li>• 溶接検査 (検査項目については別途検討)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ATスリーブ内水遮へい注水</li> <li>• 仮設遮へい取り外し、撤去</li> <li>• 機器ハッチ遮へい体解体、撤去 (北側開口から搬出)</li> </ul>

## ■ アクセストネル工法の作業ステップ

【アクセストネル設置ステップ図(2/2)】

Step.5	Step.6	Step.7	Step.8
			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 仮設建屋の設置</li> <li>• AT設置</li> <li>• AT送り出し</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ATスリーブ内水遮へい排水</li> <li>• ATスリーブ内水遮へい水槽取り外し、搬出</li> <li>• AT接続</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 仮設建屋(一部)解体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 増設建屋建設(換気空調他設備完成)</li> <li>• AT先端キャップ取り外し</li> <li>• AT本体とATスリーブ溶接</li> <li>• 機器ハッチ開口</li> </ul>

# 7. 本事業の実施内容【3)(i)② 接続部の閉じ込め機能確保技術】

## ■ ATスリーブの接続方法の検討

### ➢ ATスリーブ構造

✓ ATスリーブの構成要素である変位吸収機構について詳細検討を実施。

### 【地震時の変位量の設定】

水平方向に±12.5mmの変位量の確保が必要



適用部分での面間距離は350mm程度。

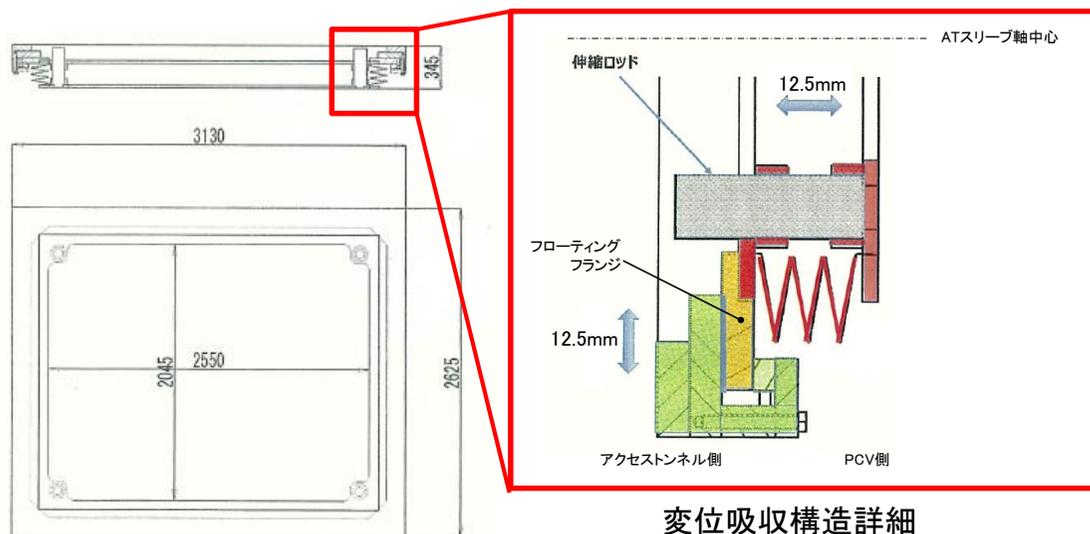
ベローズ構造等の既存技術での対応は困難のため、新規構造の検討を実施。

水平方向変位\*

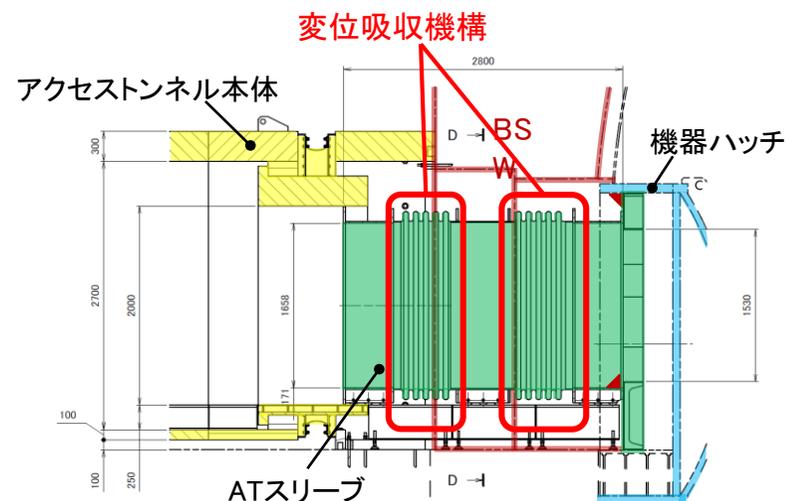
位置	OPからのレベル[mm]	評価点 [mm]	水平変位 [mm]
ハッチ上端	12905	13490	12.5
ハッチ中央	11260	11180	9
ハッチ下端	9675	9760	7

鉛直方向変位\*

位置	OPからのレベル[mm]	評価点 [mm]	鉛直変位 [mm]
ハッチ上端	12905	13490	0.12



検討中の変位吸収機構の構造案



アクセストンネルとPCVとの接続部構造の一例

次年度にATスリーブ本体と組み合わせ、詳細構造を継続検討する

# 7. 本事業の実施内容【3)(i)② 接続部の閉じ込め機能確保技術】

## ■ ATスリーブの接続方法の検討

### ➤ 機器ハッチとATスリーブの接続構造

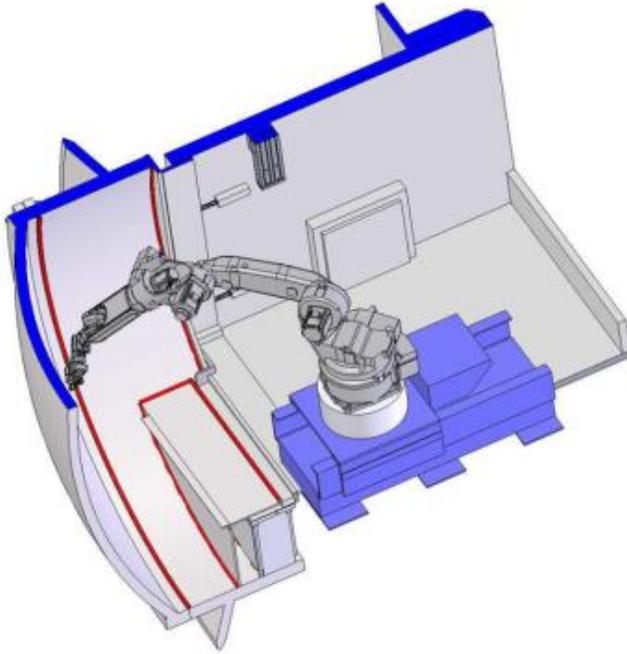
✓ 複数の溶接接続構造案を検討し、比較評価を実施

		ケース1	ケース2	ケース3
		<ul style="list-style-type: none"> <li>機器ハッチ内足場は部分撤去</li> <li>ATスリーブは機器ハッチシェル端面に溶接</li> <li>ATスリーブの下側は、足場シールカバーを介して機器ハッチシェルの内面に溶接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(機器ハッチ内足場は撤去しない)</li> <li>ATスリーブは機器ハッチシェルの端面に溶接</li> <li>足場の上にプレートを設置し、ATスリーブの下側と機器ハッチ内面および機器ハッチ扉と溶接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機器ハッチ内足場は部分撤去</li> <li>機器ハッチ内の下側にATスリーブと取合うプレートを溶接</li> <li>ATスリーブに延長スリーブを追加</li> <li>機器ハッチ内面とATスリーブ取り合いプレートを溶接</li> </ul>
ATスリーブ内への汚染閉じ込め		◎ 接続部は全て溶接	○ プレート下の扉開閉部のシールなし	◎ 接続部は全て溶接
施工性	設置ステップ数	△ 足場撤去あり	◎ 足場撤去なし	△ 足場撤去あり
	ATスリーブ以外の部品点数	○ 足場シールカバー駆動機構あり	◎ プレートのみ	◎ プレートのみ
	開先合わせ(機器ハッチ内)	○ 足場シールカバーが機器ハッチと上手く取合うか検討が必要	◎ 足場プレートは置くだけを想定	△ 取合いプレートの設置精度が必要(ATスリーブに対する水平度/距離)
	溶接作業性	○ 構造不連続溶接あり	○ 比較的容易	◎ 周溶接のみ
総合評価		○	○	△

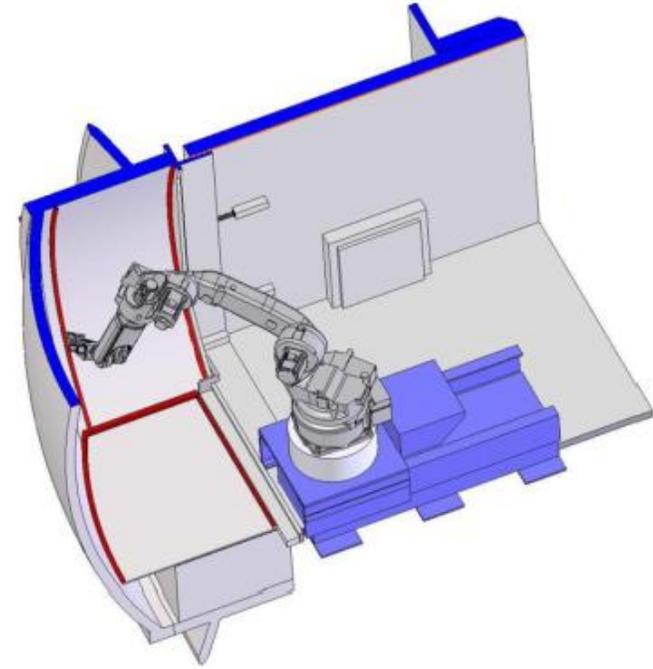
ケース1、2を主案とし、今後の検討を進めることとする。

### ■ ATスリーブの接続方法の検討

#### ➤ 機器ハッチとATスリーブの接続構造



機器ハッチへのATスリーブ溶接箇所(ケース1の場合)



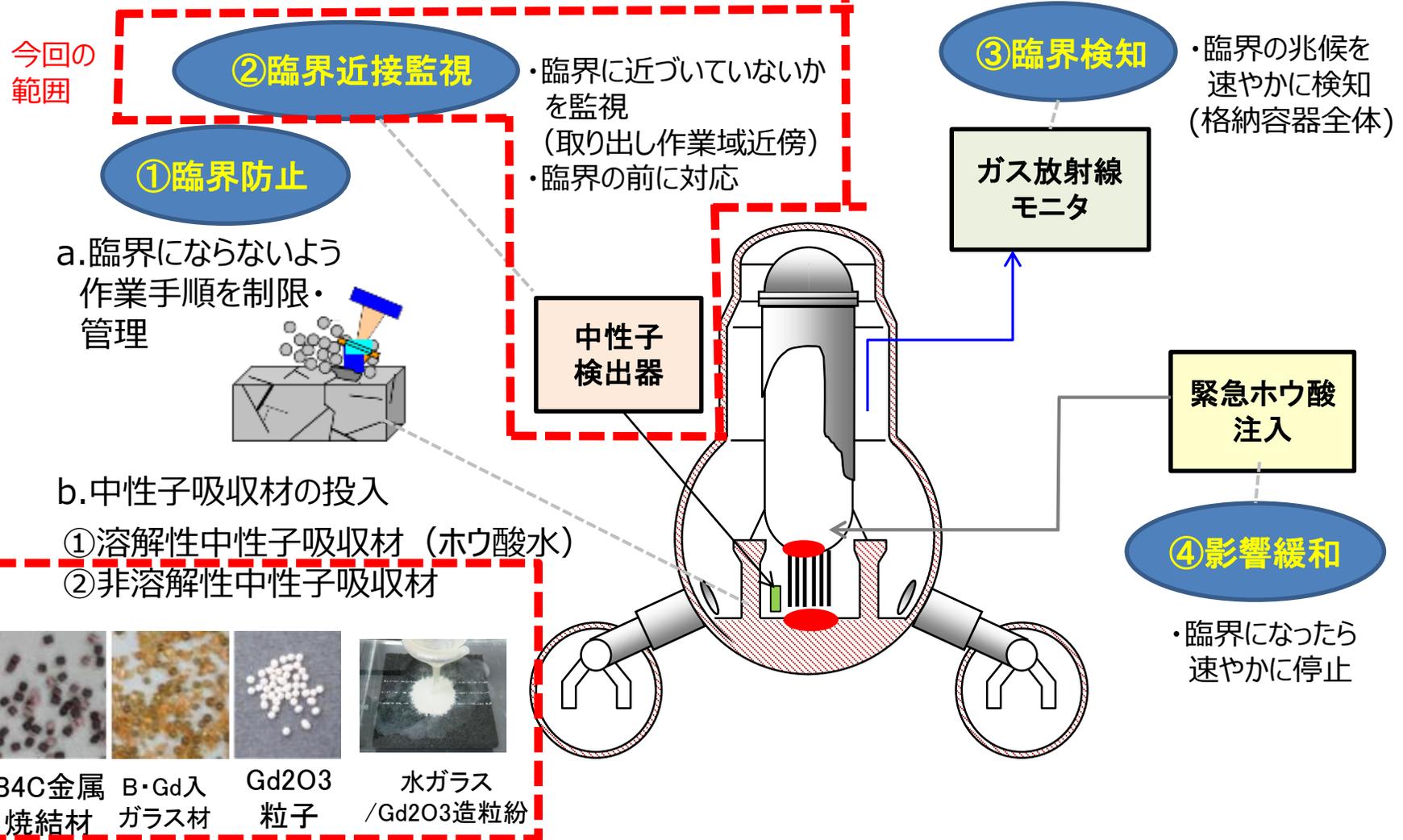
機器ハッチへのATスリーブ溶接箇所(ケース2の場合)

ATスリーブ自体の構造を次年度早期に決定した上で、  
次年度に溶接接続に関する要素試験計画を立案・試験を実施する。

# 7. 本事業の実施内容

## 3) 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関する技術開発 (ii) 臨界防止・監視に関する要素技術開発

- 臨界管理のための技術開発の全体像



## 7. 本事業の実施内容

### 3) 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関する技術開発

#### (ii) 臨界防止・監視に関する要素技術開発

##### ① 臨界監視の管理方法の技術開発

#### これまでの開発成果と本年度の実施内容

最終目標	実機適用までの達成目標	達成状況	本年度の内容
未臨界度測定技術の確立	① 測定手法の確立	炉雑音法と中性子源増倍法を組み合わせた手法を選定(完了) 測定誤差低減のための検出器感度・配置を検討	
	② システム仕様策定	検出器、測定回路等のシステム仕様を策定(完了)	
	③ 中性子検出器の仕様	中性子検出器の仕様策定と試作機用の検出器選定	小型軽量化に向けて代替中性子検出器候補(RosRAO/IPL)の仕様検討
	④ システム設計・試作	試験用システムとして中性子検出器と測定回路と分析用PCで構成されるシステムを試作	
	⑤ 未臨界度測定の成立性確認	均一燃料デブリ模擬条件で確認(KUCA試験#1/#2) 大型燃料デブリ模擬条件で確認(KUCA試験#3)	不均一な燃料デブリ/非溶解性中性子吸収材を用いた条件の確認試験(KUCA試験#4)
燃料デブリ取り出しシステムへの組み込み	① 中性子検出器の現場への適用性確認	ロボットアームで移送するための中性子検出器ユニットの仕様項目を整理 ケーブルハンドリング概念を策定	中性子検出器ユニット構造の検討
	② 電磁ノイズ対策	模擬ノイズによる影響を評価、対策案を整理	ノイズ対策の検討
	③ 臨界近接管理手順の検討	測定に要する時間を評価	デブリ取り出し工法の各ステップでの臨界近接監視の手順

## 7. 本事業の実施内容

### 3) 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関する技術開発

#### (ii) 臨界防止・監視に関する要素技術開発

##### ① 臨界監視の管理方法の技術開発

燃料デブリ取り出し作業に起因する臨界の発生を防止するためには監視しながら、慎重な取り出し作業が求められる。そこで、福島第一原子力発電所の状態を模擬した大型で複雑な燃料分布体系での未臨界度測定精度を確認し、未臨界度測定の成立性を確認する。また、関連事業「燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業(小型中性子検出器の開発)」の成果を踏まえ、中性子検出器の現場への適用性を確認する。あわせて、東京電力のエンジニアリングと連携し、臨界近接監視手順の策定、管理パラメータの設定方法を含む管理手順の立案等を行い、現場適用のための実証計画の策定等の検討を行う。

主な開発検討項目として以下を含むものとし、必要に応じて要素試験を実施することにより課題を抽出し整理する。

##### a. 未臨界度測定の成立性確認

- ・京都大学臨界試験装置(KUCA)において未臨界度測定試験を実施した。

##### b. 中性子検出器の現場への適用性確認

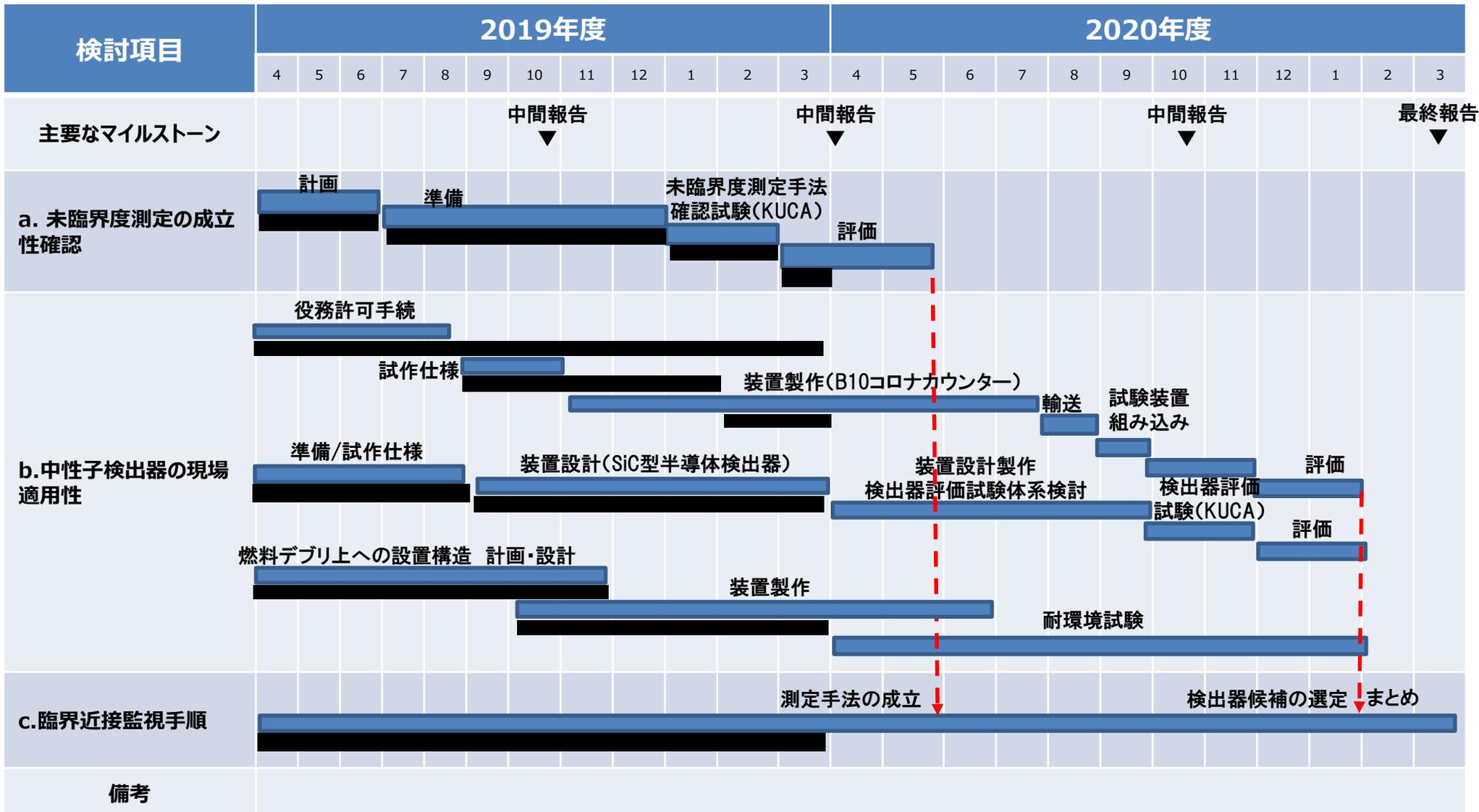
- ・未臨界度測定の観点から、有望と判断される中性子検出器を選定した。

##### c. 臨界近接管理手順の検討

- ・燃料デブリ取り出し工法の各ステップでの臨界近接監視の手順を整理した。

# 7. 本事業の実施内容 【 3)(ii)① 臨界監視の管理方法の技術開発 】

## ● 開発工程



## a. 未臨界度測定の実成性の確認

- 開発の目的

- 2号機ペDESTALのように、大きく広がった燃料デブリの未臨界度を測定する手法を開発する。

- 解決すべき課題

- (最小臨界量よりも)大きな燃料デブリでは、局所的に臨界になり易い部分となり難い部分が混在していると考えられ、こうした不均一の体系に対する未臨界度測定の知見がない。
- 燃料デブリ加工・取り出しの際には、非溶解性の中性子吸収材を投入する可能性があるため、未臨界度測定への影響が懸念される。

- 開発の進め方

- 京都大学臨界試験装置(KUCA)において大型不均一燃料デブリを模擬した未臨界体系を構築し、臨界近接監視システムを用いて未臨界度測定試験を行う。(図1)
- また、炉心部と検出器の間に中性子吸収材を配置した体系において未臨界度測定試験を行う。(図2)

- 得られる成果

- 燃料デブリの未臨界度測定において見込むべき誤差
- 燃料デブリに対する測定の方法(検出器感度、配置、測定時間)

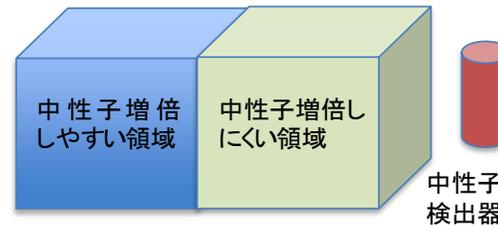


図1 不均一体系の試験イメージ

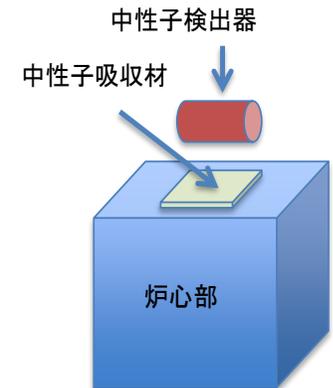


図2 中性子吸収材を用いた試験イメージ

# 7. 本事業の実施内容【3)(ii)① 臨界監視の管理方法の技術開発】

## a. 未臨界度測定の実成性の確認

### ● 試験装置の概要

- 京都大学臨界試験装置(KUCA)(図1)
- 燃料:濃縮ウラン
- 減速材:ポリエチレン(固体減速材)
- 濃縮ウランセルの枚数やポリエチレンセルの枚数、吸収材含有セル等の枚数を変えて所望の燃料デブリ模擬炉心を準備する。

### ● 臨界近接監視システム

- 中性子検出器:B-10比例計数管型×3本(図2、3)
- 観測された中性子信号の時刻歴を100nsecの間隔で識別して記録(図4)
- ファインマン $\alpha$ 法による分析を行う

### ● 試験期間

2020.2.18~2020.2.27

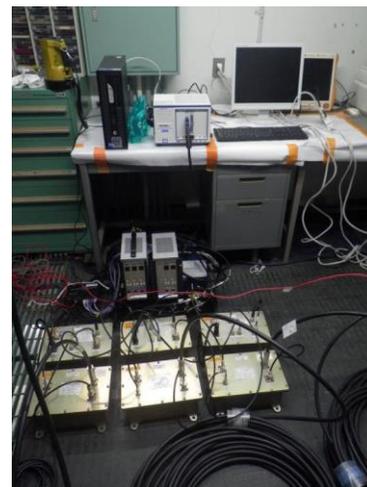


図3 測定装置

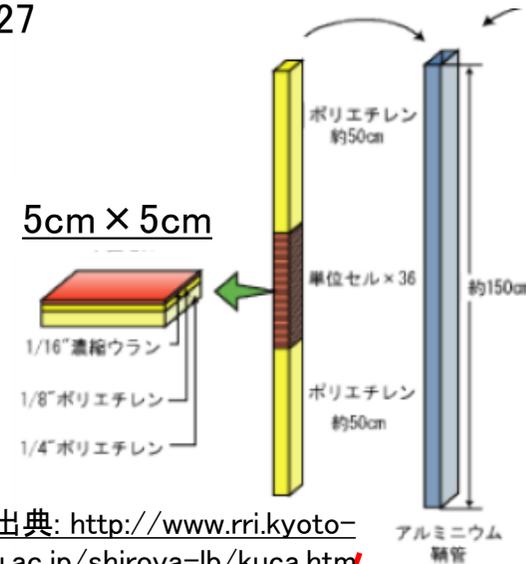


図1 KUCA臨界実験装置

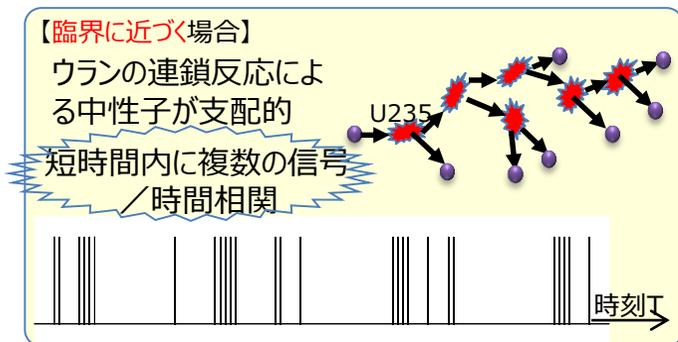


図4 中性子信号の時系列データ



図2 B-10比例計数管型 中性子検出器

## a. 未臨界度測定の実成性の確認

### ● 試験の目的

- 不均一な燃料デブリ分布へのフィンマン $\alpha$ 法による未臨界度測定の適用性確認
- 中性子吸収材が混合する燃料デブリ分布への未臨界度測定の適用性確認

### ● 試験の方法

- Uとポリエチレンと黒鉛の構成を変えて反応度の異なる3種類の燃料で不均一分布を模擬(図1)
- 一部に中性子吸収板(LiF)を混合して非溶解性吸収材が混合した状態を模擬(図2)
- 3本中性子検出器の配置を変えて未臨界度を測定(図1、2)

### ● 試験の結果

- ファインマン $\alpha$ 法に必要な中性子信号(時系列データ)を採取した(本年度はデータ採取まで)
- 得られたデータの分析・評価は次年度に実施する

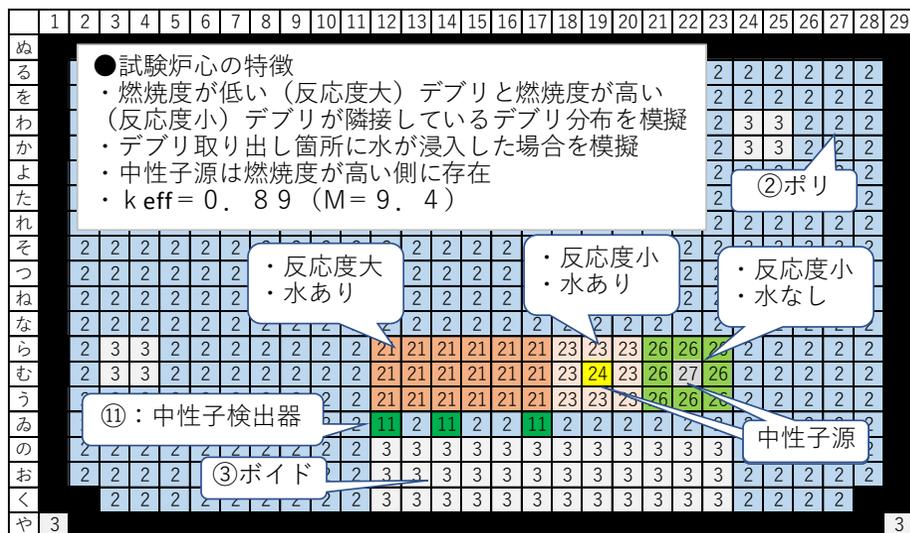


図1 不均一な燃料デブリ分布を模擬した試験炉心

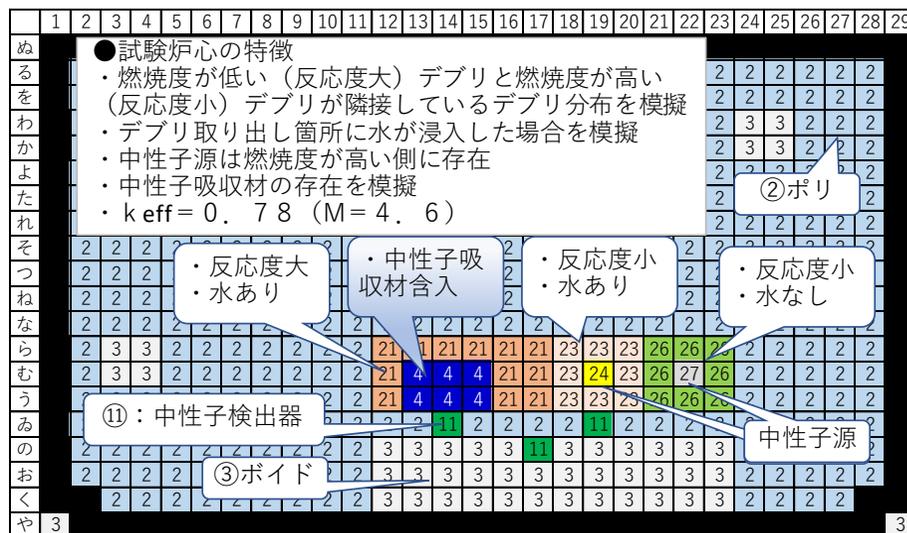


図2 中性子吸収材の混合を模擬した試験炉心

## b. 中性子検出器の現場への適用性確認

### ● 開発の目的

- 燃料デブリの未臨界度を測定するために、ロボットアームで搬送して燃料デブリ上に設置可能な中性子検出器ユニットの基本仕様を策定する。(図1)

(注)ユニット:複数のセンサーと遮へい、場合によってはプリアンプを含む一体構造を示す

### ● 解決すべき課題

- 燃料デブリの未臨界度を測定するための中性子検出器には、高感度・高時間分解能・ガンマ線耐性・電磁ノイズ耐性、が求められる。
- ロボットアームで搬送するためには、小型・軽量化が求められている。

### ● 開発の進め方

- (b-1) 小型軽量化に向けた代替中性子検出器候補の仕様検討(その1 RosRAO社Corona型)
- (b-2) 小型軽量化に向けた代替中性子検出器候補の仕様検討(その2 IPL社SiC型)
- (b-3) 検出器ユニット構造の検討(B-10/He-3比例計数管)
- (b-4) ノイズ対策の検討

### ● 得られる成果

- 中性子検出器ユニットの基本設計
- 中性子検出器の代替候補

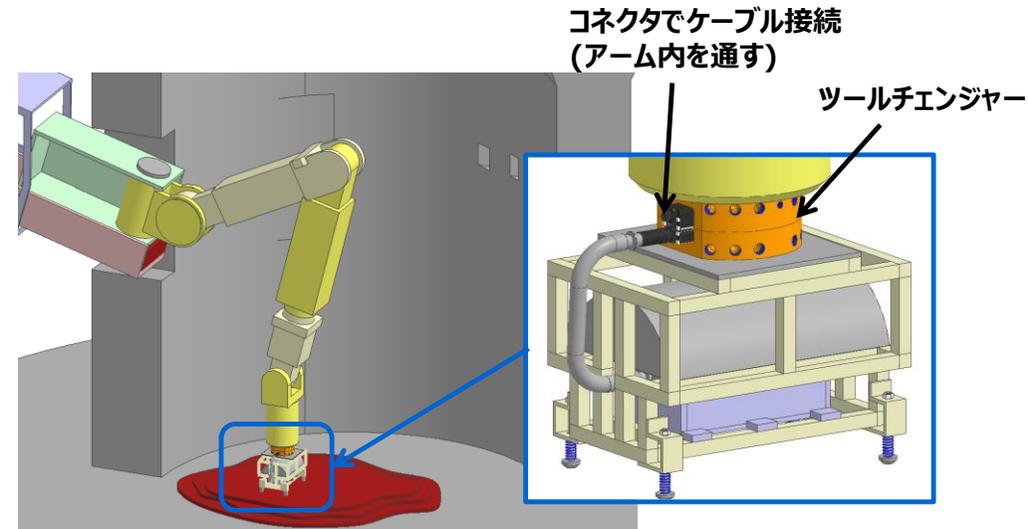


図1 横取り出し工法における中性子検出器ユニットのイメージ

# 7. 本事業の実施内容【3)(ii)① 臨界監視の管理方法の技術開発】

## b. 中性子検出器の現場への適用性確認

### b-1. 小型軽量化に向けた代替中性子検出器候補の仕様検討(その1 RosRAO社Corona型)

#### ● 実施内容

関連事業「燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業(小型中性子検出器の開発)」の成果を踏まえ、小型中性子検出器(Corona検出器)の現場への適用性確認のための試作機の仕様をまとめた。

#### ● 今後の実施計画

小型中性子検出器の設計及び試作をすすめ、臨界集合体試験設備(KUCA)での性能確認試験により現場への適用性を確認する。

#### KUCAで性能試験するための試作機(検出部)に対する要求仕様

項目	要求仕様
環境条件	温度：0～40℃ 湿度：結露しないこと γ線バックグラウンド線量率：～100mGy/hr
寸法	KUCAを構成するアルミ製角パイプの内部に収容できる大きさとし、有感長は炉心高さ350mmとして設定する。
材質	封入ガス：Ar、He 中性子コンバータ： <sup>10</sup> B 及び <sup>3</sup> He
熱中性子感度	2cps/nv以上 ( <sup>10</sup> Bタイプ) 15cps/nv以上 ( <sup>3</sup> Heタイプ)



Corona検出器

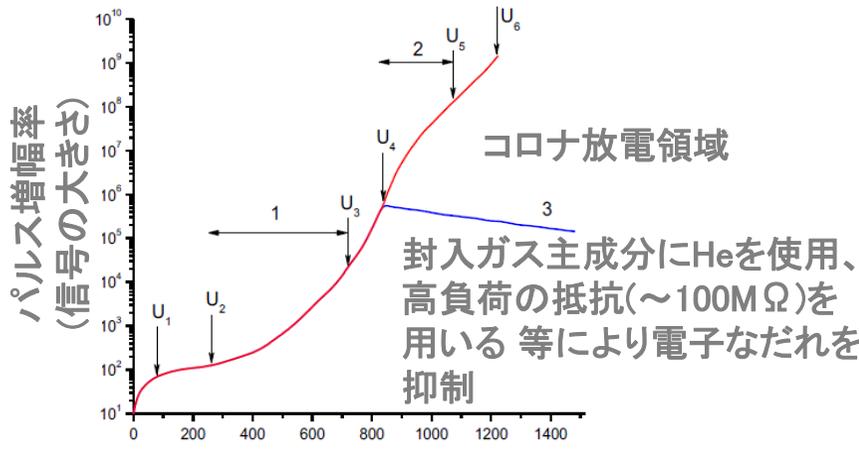


図1 Corona検出器の概要

# 7. 本事業の実施内容 【 3)( ii )① 臨界監視の管理方法の技術開発 】

## b. 中性子検出器の現場への適用性確認

### b-2. 小型軽量化に向けた代替中性子検出器候補の仕様検討(その2 IPL社SiC型)

#### ● 実施内容

関連事業「燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業(小型中性子検出器の開発)」の成果を踏まえ、小型中性子検出器(半導体中性子検出器)の現場への適用性確認のための試作機の仕様をまとめた。

#### ● 今後の実施計画

小型中性子検出器の設計及び試作をすすめ、臨界集合体試験設備(KUCA)での性能確認試験により現場への適用性を確認する。

#### KUCAで性能試験するための試作機(検出部)に対する要求仕様

項目	要求仕様
環境条件	温度：0～40℃ 湿度：結露しないこと γ線バックグラウンド線量率：～100mGy/hr
寸法	KUCAを構成するアルミ製角パイプの内部に収容できる大きさとし、有感長は炉心高さ350mmとして設定する。
材質	基材：薄型SiC半導体 中性子コンバータ： <sup>10</sup> B 及び <sup>157</sup> Gd
熱中性子感度	要求仕様としては熱中性子感度は10cps/nvとするが、有感長、外径サイズ等から具体的な実現可能な感度を詳細設計・製作段階で評価する



(参考)原子炉格納容器内部調査技術の開発で検討が進められている検出器(検出部)案

## 7. 本事業の実施内容【3)(ii)① 臨界監視の管理方法の技術開発】

### b. 中性子検出器の現場への適用性確認

#### b-3. 検出器ユニット構造の検討(He-3比例計数管)

#### ● 実施内容

- 検出器ユニット(※)の設計／製造上の課題に対応するため、検出器ユニット(および中性子検出器)の設計を見直した。

※ 検出器ユニットは、燃料デブリ取り出しの準備期間および燃料デブリ取り出し中の未臨界度測定に用いることを想定したものである(次ページ参照)。

表1 検出器ユニットの設計／製造上の課題と対応の方針

課題	課題に対する対応の方針	2019年度 実施概要	2020年度 実施予定
重量の低減 (目標:50kg未満)	He-3比例計数管の設計パラメータ(検出器の)を見直すことで、耐放射線性の向上を図る。	He-3比例計数管の設計検討	He-3比例計数管の試作試験による成立性確認
環境条件への対応	1Fの環境条件に耐えうる構造を検討する。試作／試験により実力を確認する。	検出器ユニットの設計検討	検出器ユニットの試作試験による成立性確認
電磁ノイズの影響の低減	検出器ユニットにプリアンプを内蔵することでS/N比(信号対ノイズ比)の向上を図る。		
遠隔操作でのケーブルの取り扱い	ツールチェンジャ方式(ロボットアーム内部にケーブルを這わせる)を採用することで、格納容器内でのケーブルの取り扱いそのものをなくす。	-	ツールチェンジャの試作試験による成立性確認

## 7. 本事業の実施内容【3)(ii)① 臨界監視の管理方法の技術開発】

### b. 中性子検出器の現場への適用性確認

#### b-3. 検出器ユニット構造の検討(He-3比例計数管)(続き)

#### ● (補足) 検出器ユニットの運用

- 検出器ユニットは、(A)大規模取り出しの準備期間 および (B)日毎の未臨界度測定に用いる。

表1 燃料デブリ(大規模)取り出し時の未臨界度測定／臨界近接監視

作業フェーズ		測定の内容	測定頻度の目標	測定時間の目標
A	大規模取り出しの準備期間	①検出器ユニットで、大規模取り出しを開始する前の段階で局所的な未臨界度の分布を測定する。適切に未臨界度が得られることを確認するため、最初の1回だけは長時間の測定を行う。	最初の1回	1週間／1回
			以降数10回程度	1時間／1回
B	日毎の取り出し作業開始前	①検出器ユニットで、日毎の燃料デブリ取り出し前に十分に深い未臨界であることを確認する(Cの測定で基準とする未臨界度と計数率を取得する。)	2回／1日	1時間／1回
C	日毎の取り出し作業実施中	②単体検出器で、日毎の燃料デブリ取り出し中に、臨界近接に至っていないことを確認する。	1回／1回の加工or回収	10分間／1回
D	実効的な中性子源強度の変化が認められた時	燃料デブリの形状の変化／検出器の移動等が認められた場合に、①検出器ユニットおよび②単体検出器で、Cの測定で基準とする未臨界度と計数率を取得し直す。	必要時	1時間／1回
E	その他必要と認められた時	何等かの要因で未臨界の程度を把握する必要が認められた場合(トラブル時)に測定を行う。	必要時	1日間／1回

## b. 中性子検出器の現場への適用性確認

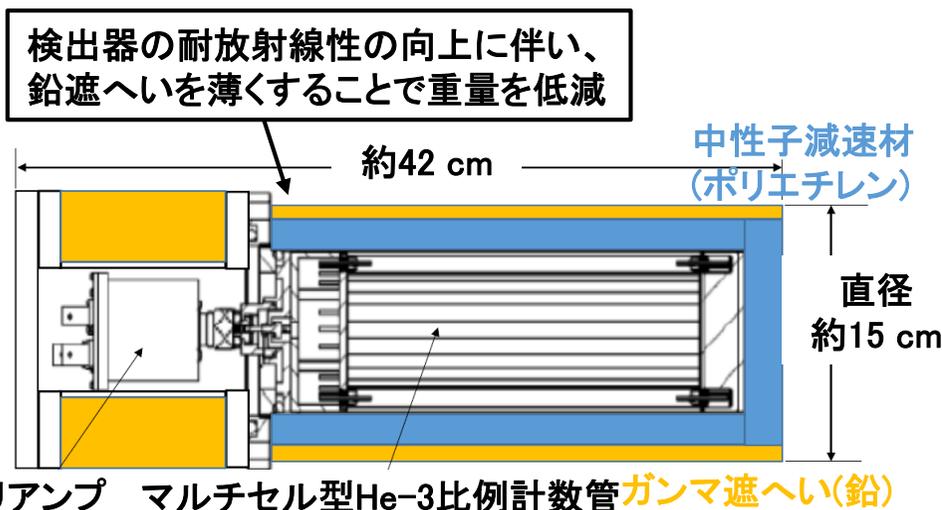
### b-3. 検出器ユニット構造の検討(He-3比例計数管)(続き)

- これまでに得られた成果

- 検出器の設計パラメータを見直すこと(マルチセル型He-3比例計数管の採用)で、重量を大幅に低減できる見通しが得られた。
  - ・ 昨年度の設計案 約120 kg ⇒ 約40 kg(プリアンプなし)、約60 kg(プリアンプあり)

- 今後の実施計画

- 検出器ユニット(検出器、ツールチェンジャ含む)を試作し、試験により、設計の成立性を確認する。



※ 上部および側部には、測定対象ではない燃料デブリからの中性子を遮へいするための、中性子遮へい(ポリエチレン)を取り付ける予定

図1 検出器ユニットの構造(案)

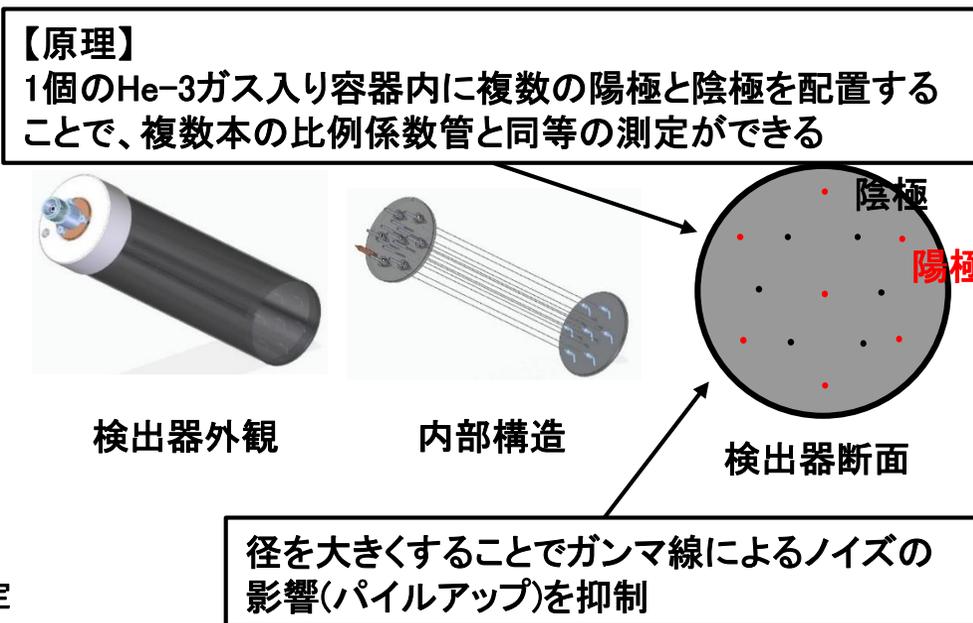


図2 マルチセル型He-3比例計数管の原理及び構造(案)

## b. 中性子検出器の現場適用性確認

### b-4. 取り出し装置由来ノイズの対策

#### ● 背景

横取り出し工法では、燃料デブリ取り出し装置のケーブルと中性子検出器のケーブルは同じペダスタル開口部やPCV貫通部を通す可能性が高く(図1)、中性子計測系はケーブルの近接による誘導ノイズにより計測が影響を受ける[1]。

#### ● 実施内容

・B-10比例計数管-プリアンプ間のケーブルを銅網シールドで覆った耐ノイズケーブル(図2)により、誘導ノイズの波高値が最大1桁低減する事を確認した(図3)。

・取り出し装置用ケーブルと検出器用ケーブルを近接させた試験(図4)により、誘導ノイズの影響無く共存が可能であることを確認した(表1)。

#### ● 残された課題

・電源系統からの回り込みによるノイズ対策(電気系統の独立、ノイズ除去/抑制)

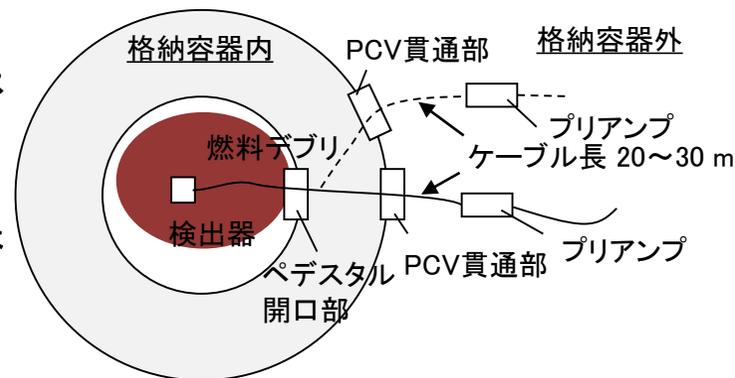


図1. 1F適用時の設置イメージ

#### 模擬ノイズ試験

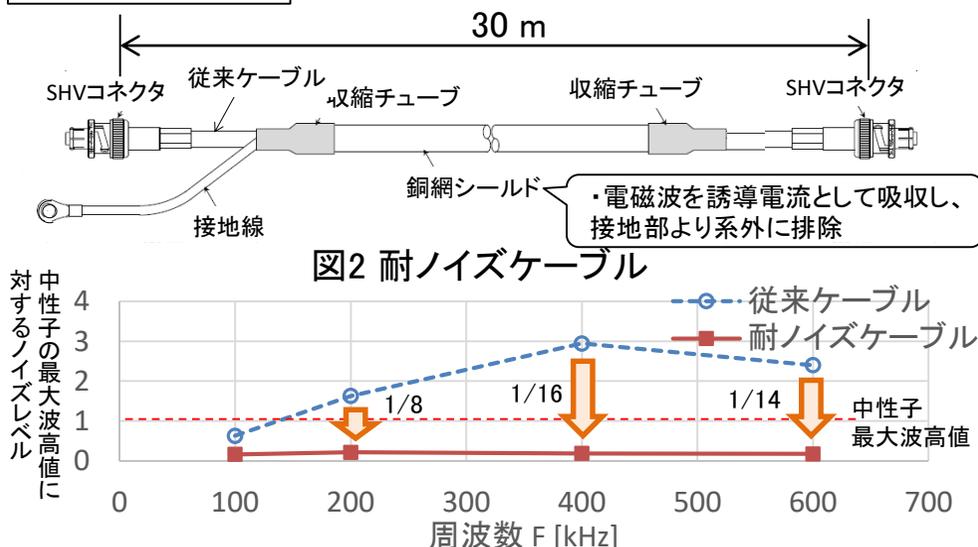


図3 誘導ノイズ低減効果(誘導ノイズ電流値200 mAの時)

#### 共存試験



図4. 取り出し装置との共存試験

表1. 取り出し装置由来の誘導ノイズによる感度低下割合

ケーブル種類	従来ケーブル	耐ノイズケーブル
パイプソー	32 %	0 %
水圧アーム	0 %	0 %
電動クローラ	50 %	0 %

[1] IRID、平成29年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高感度化(臨界管理方法の確立に関する技術開発)」研究報告

## 7. 本事業の実施内容【3)(ii)① 臨界監視の管理方法の技術開発】

### c. 臨界近接管理手順の検討 ～工法との調整～

#### ● 実施内容

燃料デブリ取り出し時の臨界近接管理手順を検討するため、現在検討されている燃料デブリ取り出し工法(横アクセス3工法、上アクセス2工法、次ページ図)ごとに、取り出し各ステップでの臨界管理方法を検討し、適用すべき臨界近接監視方法を検討した。

#### ● 今後の実施計画

- ・今回整理した工法・取り出し設備からの制約条件に基づき臨界近接監視システムの概念を確立する。
- ・工法検討に臨界管理の要求・懸念事項を反映し、現場の管理手順を確立する。

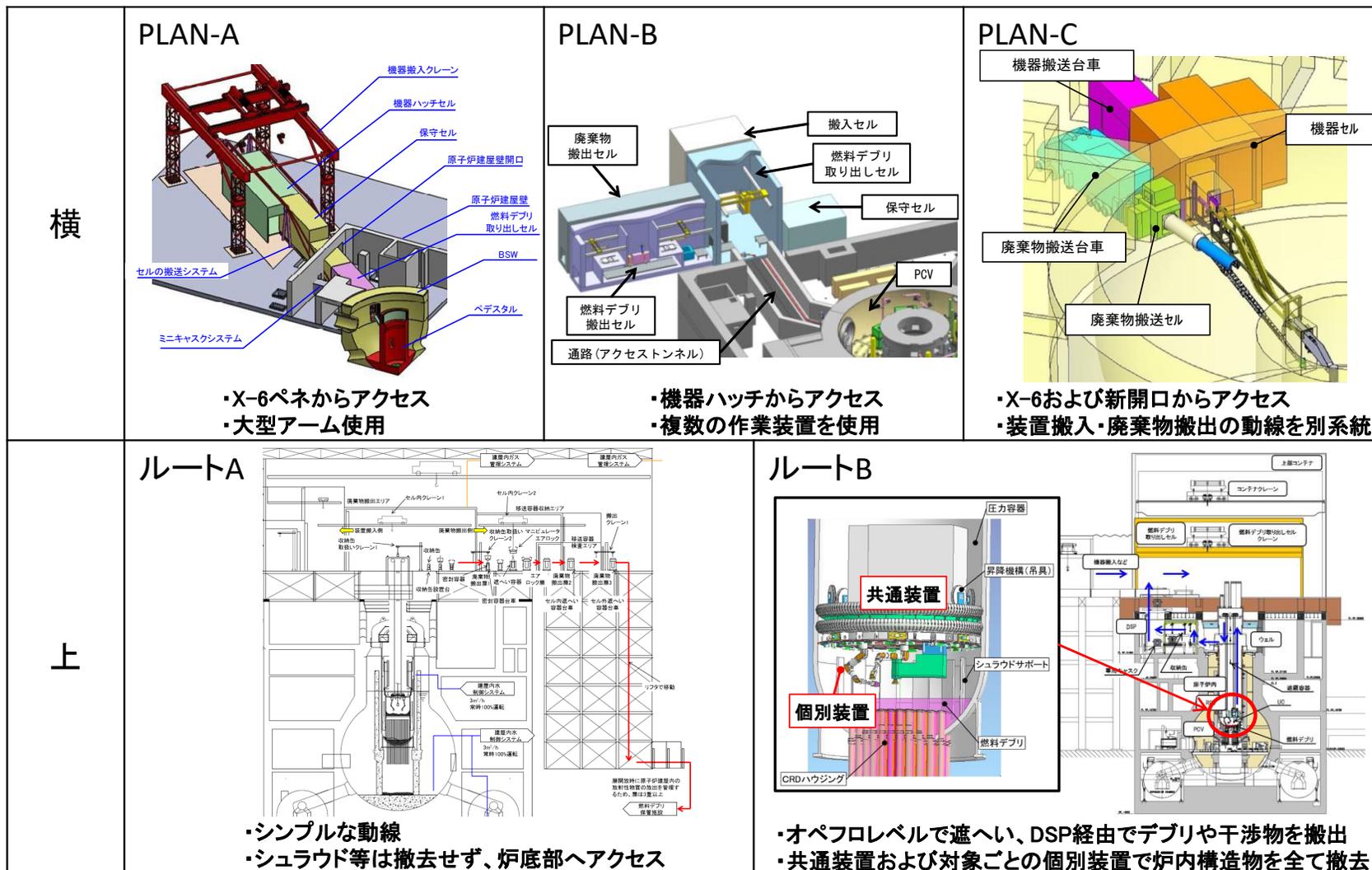
表 取り出し各ステップでの臨界管理方法検討(工法との調整の観点)

項目	明確にすべき点	観点
臨界近接監視システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・監視を行うステップ、監視の方法、使用する検出器</li> <li>・取り出しシステムの搭載・可搬重量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界近接監視システム検討条件の明確化</li> <li>・取り出し手順との整合性確認</li> </ul>
臨界管理方法(加工制限等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界管理が必要なステップ、臨界管理の要求</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・取り出し手順との整合性確認</li> </ul>
非溶解性中性子吸収材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・吸収材投入が必要となる可能性のあるステップ</li> <li>・取り出しシステムの搭載・可搬重量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アームへの吸収材投入装置搭載の検討条件明確化</li> </ul>
臨界管理上の注意点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界管理から注意を求める事項</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設備の故障モードの分析・対応に向け、臨界面での懸念事項を明確にする。</li> </ul>

# 7. 本事業の実施内容【3)(ii)① 臨界監視の管理方法の技術開発】

## c. 臨界近接管理手順の検討 ～工法との調整～

図 検討中の工法(横アクセス:PLAN-A～C、上アクセス:ルートA、B)



# 7. 本事業の実施内容【3)(ii)① 臨界監視の管理方法の技術開発】

## c. 臨界近接管理手順の検討 ～臨界近接監視の考え方～

臨界近接監視の機能を3種類の検出器で実現

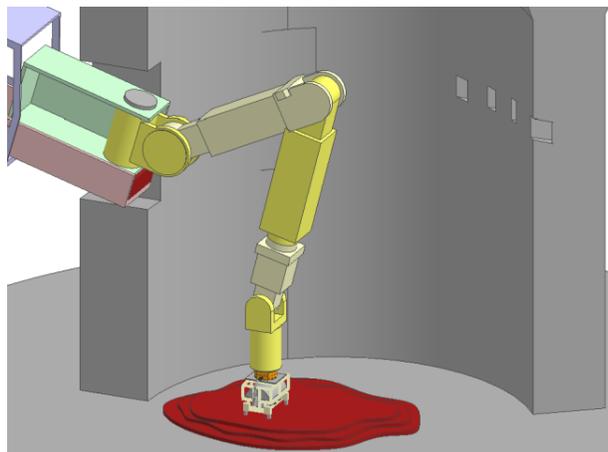
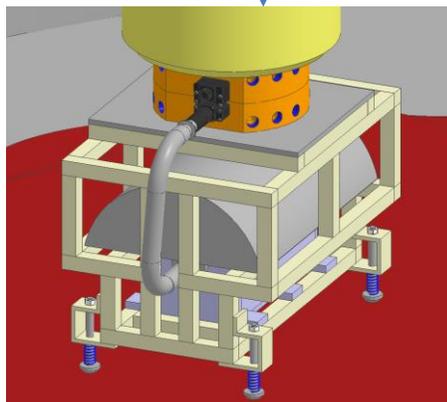


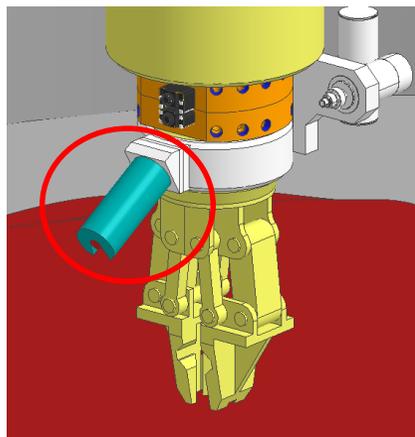
表 臨界近接監視用検出器の機能整理

名称	中性子検出器ユニット	単体検出器	再臨界検知用検出器
使用目的	作業前状態の把握	加工着手判断	予期せぬ変化の検知
機能	未臨界度測定	加工前後の臨界近接監視	加工中の中性子束連続監視
	中性子増倍率の絶対値測定	中性子増倍率の相対変化測定	
形態	燃料デブリ上設置型	アーム搭載型	燃料デブリ上設置型
重量	120～150kg 現在、小型化検討中	30～50kg	30kg以下
計測時間	数日から1週間	10分程度	連続
測定点	取り出し開始点近傍の1点	加工位置に応じて、適宜移動させる。	同左



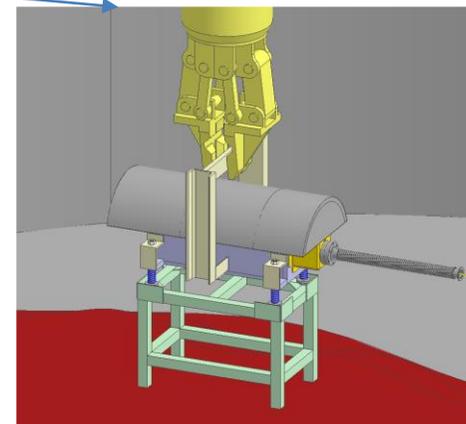
中性子検出器ユニット

- ・高感度を得るため複数の検出器を含む
- ・燃料デブリ加工箇所を局所的に測定する



単体検出器

- ・1個の検出器で構成される
- ・燃料デブリ加工箇所を局所的に測定する



再臨界検知用検出器

- ・1個の検出器で構成される
- ・加工箇所から離れた位置でエリア全体を俯瞰的に監視する

# 7. 本事業の実施内容【3)(ii)① 臨界監視の管理方法の技術開発】

## c. 臨界近接管理手順の検討 ～取り出しステップへの臨界管理の展開～

・取り出しステップに臨界管理の考え方を展開し、監視システムへの制約条件や、臨界管理上の注意点を整理した。

取り出し各ステップでの臨界管理方法・要求の例

ステップ	サブステップ	アーム最大搭載重量	加工制限・臨界管理方法	吸収材事前投入可能性	臨界近接監視			その他の臨界防止対策	備考(*2)
					未臨界度測定	一定量加工毎の監視	加工中連続監視		
2. PCV内干渉物撤去・燃料デブリ取り出し準備									
③PCV内干渉物撤去	4)干渉物の加工・切削	(PCV内への搬入)~100kg (アーム搭載)~30kg	燃料デブリと推定される付着物なし: 制約なし	—(*1)	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ペDESTアル内堆積物への切断片の落下防止</li> <li>・ペDESTアル内堆積物への上部の重量物の・落下防止(CRD等への接触防止対策)</li> <li>・切断ツール落下防止対策)</li> </ul>	*1 変形量の判断基準は最小臨界重量(30~60kg)
			付着物あり(変形量小*1): 下部堆積物上への切削粉落下量制限	—	—	—	—		
			付着物あり(変形量大): ・臨界近接監視を行いながらの加工 ・下部堆積物上への切削粉落下量の制限	○ 臨界近接時	—	加工・切削の前後で中性子束測定・臨界近接監視	バックアップとして加工中の連続監視を求められる可能性あり		

取り出し工法のステップ区分(臨界側でサブステップを挿入)

検出器や非溶解性吸収材投入装置の制約条件

臨界管理法の方法、加工制限など

非溶解性吸収材を適用する可能性のあるステップ

どのような臨界近接監視を行うか?その方法。

臨界管理からの注意点(主に付随事象の発生防止対策)

\*1 “—”は非該当を意味する。  
\*2 特記事項ない場合はブランクにしている。

## 7. 本事業の実施内容

### 3) 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関する技術開発

#### (ii) 臨界防止・監視に関する要素技術開発

#### ② 臨界防止技術の開発

#### これまでの開発成果と本年度の実施内容

最終目標	実機適用までの達成目標	達成状況	本年度の内容
臨界防止技術の確立	① 候補材の選定	基礎特性、照射特性、核的特性の確認により非溶解性中性子吸収材の候補材を選定(4種類の候補材を選定)	—
	② 施工性の確認と未臨界維持条件の仕様	想定した使用法による投入必要量を試算 チゼルによる破碎燃料デブリでの施工性確認、および吸収材分布確認と未臨界維持評価(固体型吸収材)	
	③ 腐食影響の評価	長期照射試験から、水素発生G値は設計値未満および吸収材成分が溶出した希釈海水はpH6以上	照射下での防錆剤効果に及ぼす影響の評価
	③ 副次的影響の評価	収納缶本数および廃棄量は固体型吸収材で最大約10%、固化型吸収材で最大約40%増加	
燃料デブリ取り出しシステムへの組み込み	① 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討	吸収材の投入方法を策定 チゼルによる燃料デブリ加工に対する吸収材投入手順を策定(ペDESTAL下のMCCI燃料デブリを想定)	水中投入できることの確認 加工による影響の確認
	② 吸収材投入装置の設計	吸収材投入装置の重量・寸法制約、吸収材搬送経路制約を踏まえて吸収材投入装置概念を策定	
	③ 取り出し装置との組み合わせ検証	燃料デブリ位置毎の燃料デブリ加工方法に対する適用吸収材を整理	

## 7. 本事業の実施内容

### 3) 燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発

#### (ii) 臨界防止・監視に関わる要素技術開発

##### ② 臨界防止技術の開発

燃料デブリ取り出し時の燃料デブリの状態に応じた非溶解性中性子吸収材の使い分け方法や投入装置の概念設計等、非溶解性中性子吸収材の運用方法を検討する。また、燃料デブリ加工が非溶解性中性子吸収材の機能に与える影響等を要素試験により確認し、運用方法の検討へ反映する。さらに放射線影響下での防錆剤の使用を考慮した環境における、非溶解性中性子吸収材の構造材等への腐食影響を検討する。

主な開発検討項目として以下を含むものとし、必要に応じて要素試験を実施することにより課題を抽出し整理する。

#### a. 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討

- 非溶解性中性子吸収材を水中で投入できることを試験で確認した。
- 吸収材の加工による影響を試験で確認した。

#### b. 放射線影響下での防錆剤の使用を考慮した腐食影響の検討

- 防錆剤とB・Gd入ガラス材の併用が可能であることを照射試験で確認した。

## 7. 本事業の実施内容 【 3)(ii)② 臨界防止技術の開発 】

### a. 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討

#### ● 開発の目的

- 臨界を防止するための非溶解性中性子吸収材を燃料デブリに対して投入するための装置を開発する。

#### ● 解決すべき課題

- これまでに固体や固化体(液体→固体に変化)の中性子吸収材が開発されてきた(図1)。これらを投入する装置の概念を検討したが(図2)、水中で使用できるか、不明である。
- 中性子吸収材は燃料デブリ加工前に投入され、燃料デブリと一緒に加工される運用が想定されている。固体タイプの吸収材については加工による影響を試験で確認したが、固化体タイプの吸収材については不明である。

#### ● 開発の進め方

- 吸収材を投入する装置の設計仕様と運用方法を検討する。
- 燃料デブリの状態を仮定し、中性子吸収材の使い分け方法を検討する。
- 中性子吸収材を投入した状態の模擬デブリを加工する要素試験を行い、燃料デブリ加工が中性子吸収材の機能に与える影響を確認する。

#### ● 得られる成果

- 中性子吸収材の投入装置の基本仕様
- 中性子吸収材の運用方法

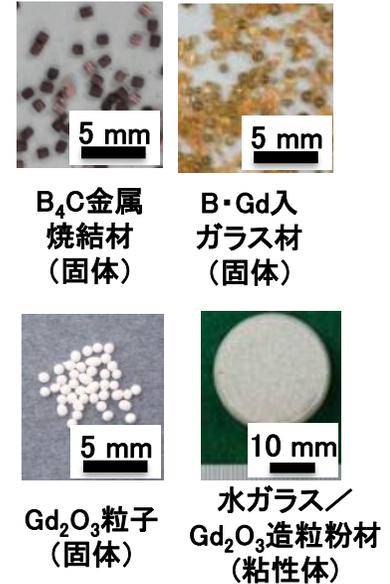


図1 非溶解性中性子吸収材

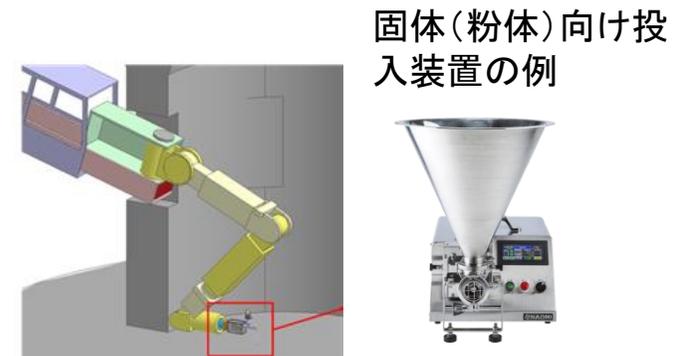
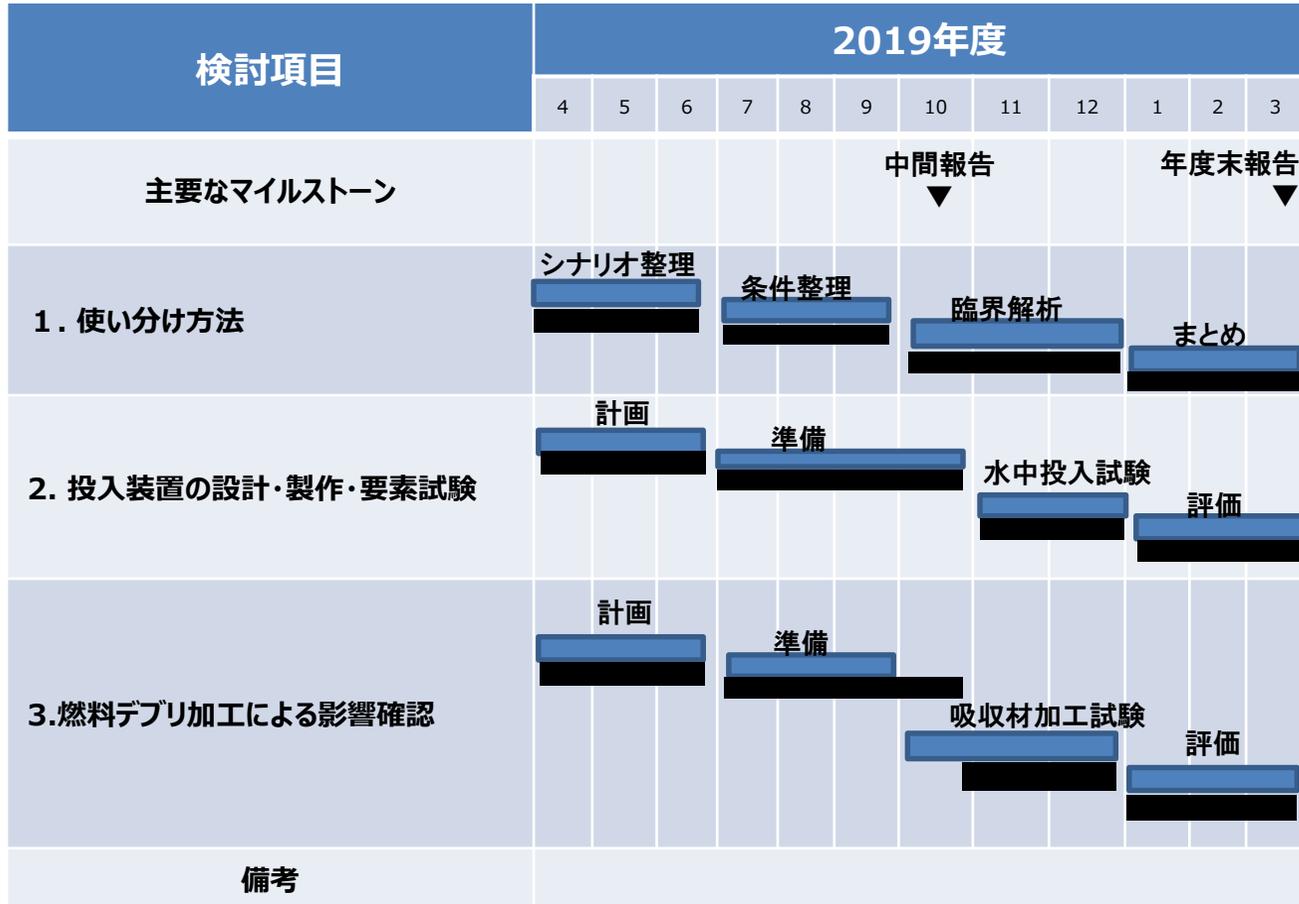


図2 ロボットアームに吸収材投入装置を実装するイメージ

# 7. 本事業の実施内容 【 3)(ii)② 臨界防止技術の開発 】

## a. 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討

- 開発工程



# 7. 本事業の実施内容 【 3)(ii)② 臨界防止技術の開発 】

## a. 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討 吸収材の使い分け方法

- 燃料デブリの形状は、棒状、粒状など、様々な形状が想定される。様々な燃料デブリ形状に対応して、中性子吸収材も最適なタイプを使い分ける。
- 非溶解性中性子吸収材は、固体タイプと、時間経過により液体から固体へ固化するタイプ(水ガラスタイプ)に分けられる。水ガラスタイプは、投入直後に流動性・粘性を有するため、残存燃料(切株燃料)が垂直に林立するような場合(図5)、燃料デブリの間隙が小さい場合(図3、4)、燃料デブリ表面の凹凸が大きい場合(図6)には有効である。

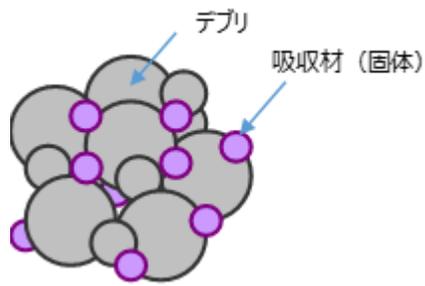


図1 小石状燃料デブリに固体タイプの吸収材を使用

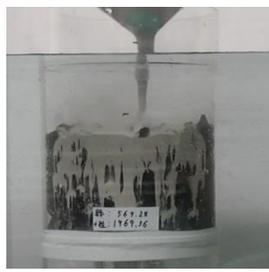


図3 小石状燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用

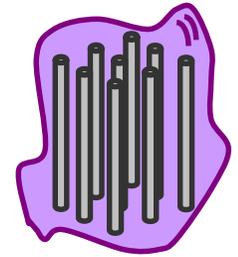


図5 棒状燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用

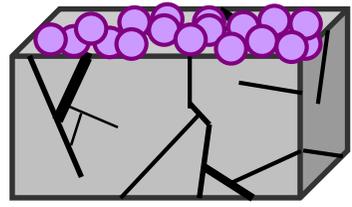


図2 岩盤状燃料デブリに固体タイプの吸収材を使用

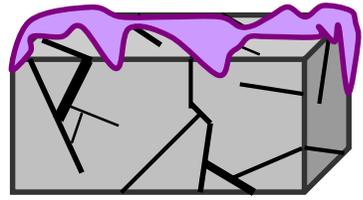


図4 岩盤状燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用



図6 凹凸の大きな燃料デブリに液体→固化タイプの吸収材を使用

## 7. 本事業の実施内容【3)(ii)② 臨界防止技術の開発】

### a. 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討 中性子吸収材の水中投入試験

- 試験の目的
  - ・ 投入装置のベースとなる技術は気中での使用を想定しており、これまで水中で使用された実績は無い。
  - ・ 水深が深くなると水圧に抗して吸収材を吐出することが困難になると予想される。
  - ・ 水中において固体および粘性体の非溶解性中性子吸収材の投入が可能であることを確認する。
- 試験の方法
  - ・ 1F-3号の水位を想定して、水中5m環境の水圧(0.5気圧)を模擬するため、再圧チャンバに設置した水槽内で試験を行った。(図1)
  - ・ 吸収材の投入速度を評価した。

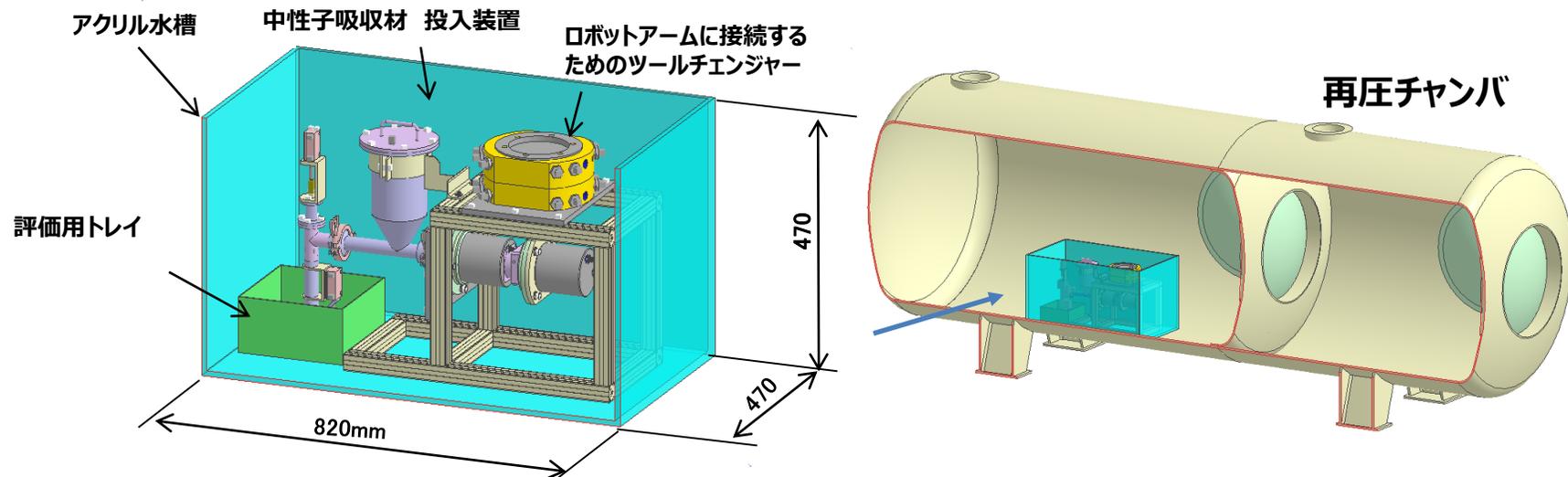


図1 試験装置の概要

# 7. 本事業の実施内容【3)(ii)② 臨界防止技術の開発】

## a. 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討 中性子吸収材の水中投入試験(続き)

### ● 試験結果

- 固化体(Gd粒子タイプ)および粘性体(水ガラスタイプ)のどちらも、水深5m相当の水中において、安定した速度で吸収材を投入できた。(図1)
  - 目標とする投入速度を達成することができた。(図2)
- Gd粒子タイプ: 3.3g/sec  
水ガラスタイプ: 2.8L/min  
(1日の取り出し燃料デブリ300kgに対して必要とされる量を30分で投入するものと仮定して算出)
- 水中向けに試作したツールチェンジャーについて水深5mの耐水性能が確認された。(図3)  
(JIS防水規格IP7に準じて30分間の静的浸漬試験)

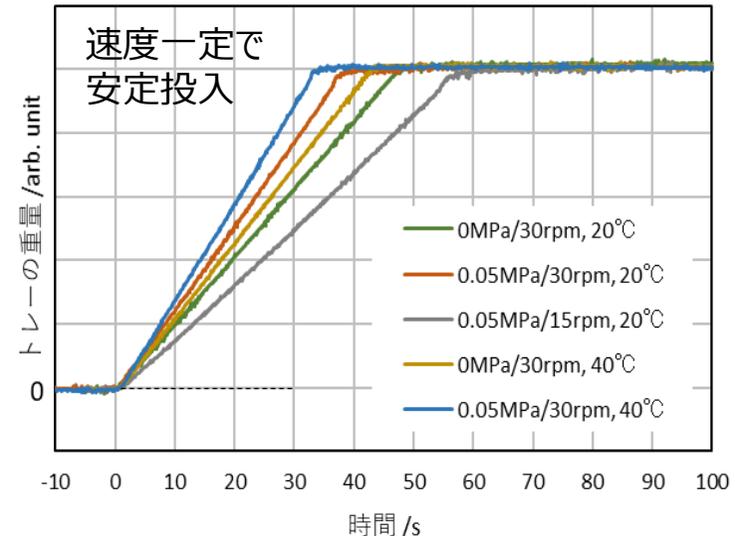


図1 吸収材投入量の時間変化(水ガラスタイプ)

### ● 実機適用時の課題

- 水ガラスタイプの吸収材を投入する際に、沈降しない微粒子が舞上がり水が濁った。水処理系システムへの影響や燃料デブリ加工作業の視認性への影響を確認する必要がある。

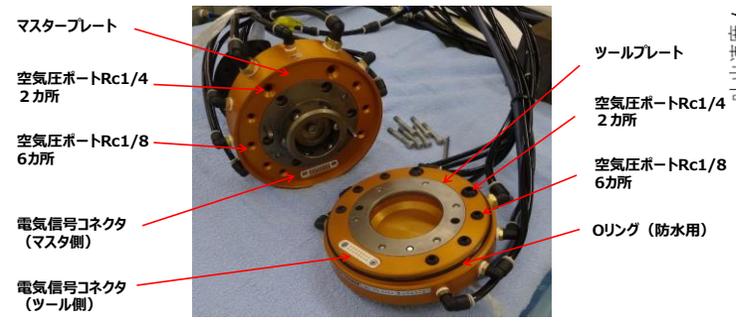


図3 水中向けに試作したツールチェンジャー

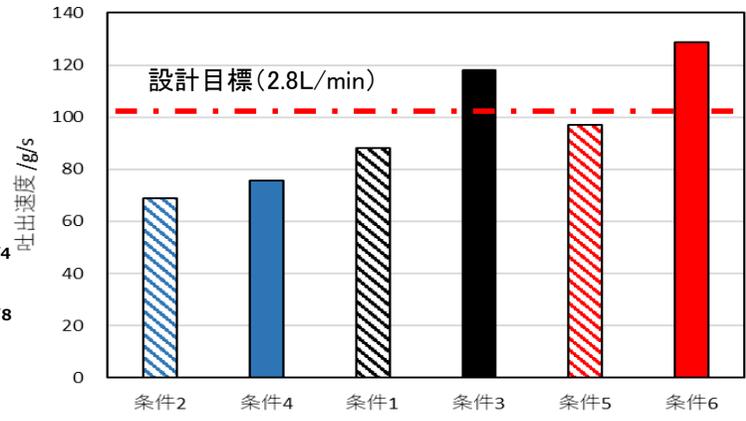


図2 吸収材の投入速度(水ガラスタイプ)

# 7. 本事業の実施内容 【 3)(ii)② 臨界防止技術の開発 】

## a. 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討 燃料デブリ加工による影響確認

### ● 試験の目的

- 燃料デブリの上に吸収材を散布した状態で燃料デブリを加工する際に、加工による影響を把握する(図1)。
- 吸収材が有効に機能すること(加工後に燃料デブリと吸収材が混合すること)を確認する。
- 吸収材が覆っていたとしても燃料デブリ加工が問題なく行われることを確認する。
- 加工された吸収材の細粉の大きさ(粒径)を調べる。

### ● 試験の方法

- 模擬燃料デブリとして、MCCIデブリを想定して圧縮強度を調整したモルタルを作成
- 模擬燃料デブリの表面に吸収材(水ガラスタイプ)を滴下(図2)
- チゼル加工装置(電動ハンマー)を用いて模擬燃料デブリ表面(深さ5cm程度)を破碎(5cm間隔で9箇所)(図3)
- 水中(粒径測定)および気中(混合測定)で実施



吸収材 (水ガラスタイプ)

図2 水ガラスタイプ吸収材(粘性固化体)

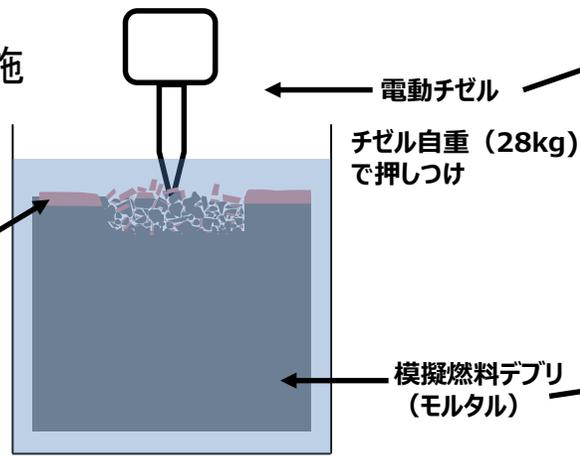


図1 チゼル加工のイメージ



図3 試験装置の概要イメージ

# 7. 本事業の実施内容【3)(ii)② 臨界防止技術の開発】

## a. 非溶解性中性子吸収材の投入装置、運用方法の検討 燃料デブリ加工による影響確認(続き)

### ● 試験結果

- 9箇所での加工に要した時間は90~150秒であり、吸収材の有無によって有意な差は見られなかった。
- チゼル加工後の破砕片を回収し、ふるいで分級し、重量を計測して、粒径分布データが得られた(図1)。吸収材ありの場合には、粒径250[μm]未満の微細片が多くなる傾向が見られた。中性子吸収材が粉碎もしくは分解し生じた微小分散物に由来するものと考えられる。本成果を水処理システム設計のインプットとして提示する。

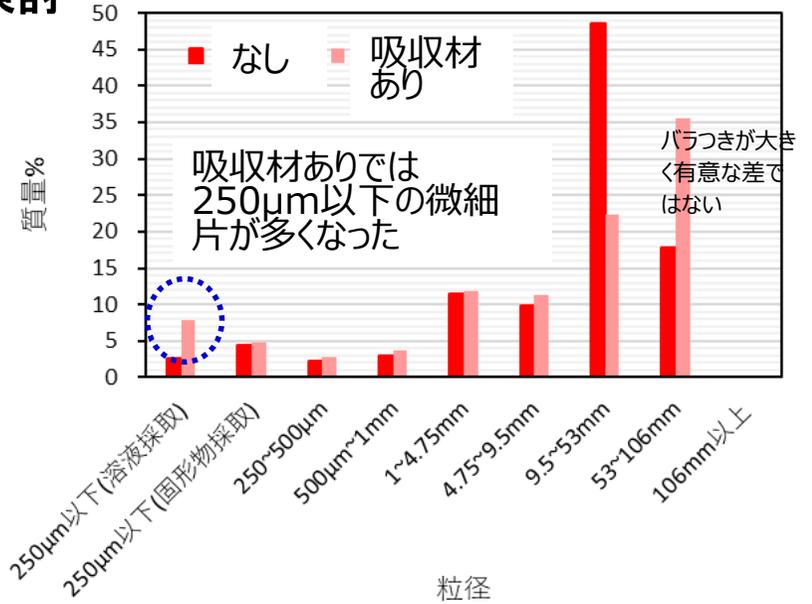


図1 チゼル加工による破砕片の粒径分布

- 加工後の試験体をエポキシ樹脂で含浸固化し、コアボーリングでΦ30[mm]の分析用サンプルを採取し、深部(5-7cm)まで中性子吸収材(Gd)が浸入(混合)していることが確認された。(図2; 白色箇所)(図3)

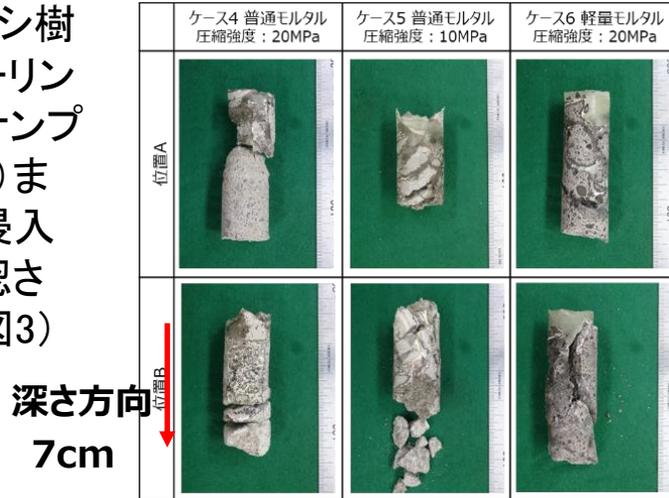


図2 コアボーリング採取した分析用サンプル

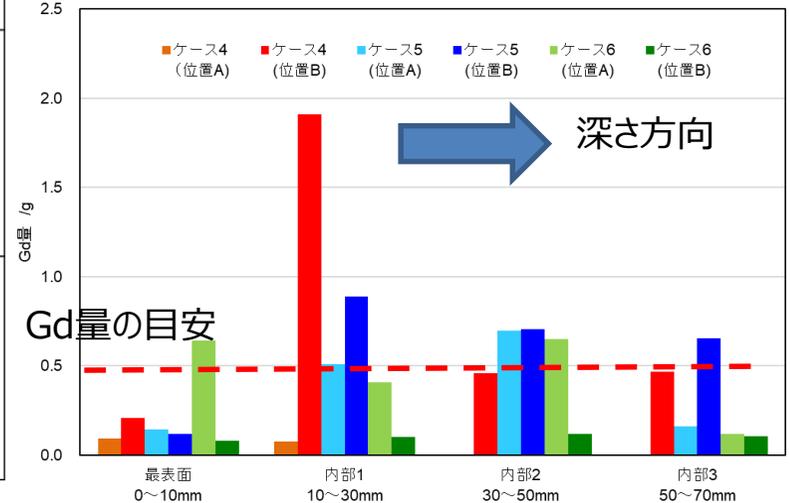


図3 加工後の深さ方向に含まれる吸収材(Gd)重量

## 7. 本事業の実施内容【3)(ii)② 臨界防止技術の開発】

### b. 放射線影響下での防錆剤の使用を考慮した腐食影響の検討

- 開発の目的
  - 臨界を防止するための非溶解性中性子吸収材を開発する。
- 解決すべき課題
  - これまでに中性子吸収材による腐食影響を長期ガンマ線照射に伴う水質変化の観点で評価してきた。残された課題は、炉水環境としてPCV腐食抑制のために防錆剤(表2)の使用を考慮する場合である。
- 開発の進め方
  - ガンマ線照射環境での腐食挙動に及ぼす影響が不明な希土類を含む中性子吸収材について、防錆剤効果に及ぼす影響を実験的に評価する。(表1)
- 得られる成果
  - 適用可能な防錆剤と非溶解性中性子吸収材の組合せ

表2 防錆剤と検討対象水質

分類	防錆剤	検討対象水質	
		B濃度 (ppm)	pH
I.	Na <sub>2</sub> B <sub>10</sub> O <sub>16</sub>	≥4000	(8-9)
II.	Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> +Na <sub>2</sub> B <sub>10</sub> O <sub>16</sub>	<4000	(8-9)
III.	ZSMMP	<(40)	6-8
IV.	ZSCMP	<(40)	≥10

括弧内は実績値

表1 選定候補材の溶出特性と副次的影響評価状況

分類	候補材	溶出特性		取り出し時		後続工程	
		pH	溶出成分	燃料デブリ加工 (チゼル)	防錆対策 (机上検討※)	収納缶 (長期照射)	廃棄物
固体	B <sub>4</sub> C金属焼結材	7~9	Fe、 B	影響なし	影響なし	設計内	評価済
	B・Gd入ガラス材	6~9	B、 Gd、 <b>希土類</b>	影響なし	<b>実験的評価要</b>	設計内	評価済
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粒子	7~9	Gd	未評価	影響なし	設計内	評価済
液体→固体	水ガラス/Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 造粒粉材	12	Na、 Gd、 Ca	影響なし	水質調整必要	設計内	評価済

ZSMMP: 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩、ZSCMP: 亜鉛/モリブデン酸ナトリウム混合リン酸塩

※pHおよび溶出成分を基に机上検討

# 7. 本事業の実施内容 【 3)(ii)② 臨界防止技術の開発 】

## b. 放射線影響下での防錆剤の使用を考慮した腐食影響の検討

- 開発工程

検討項目	2019年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
主要なマイルストーン							中間報告 ▼				年度末報告 ▼	
1. 計画	■			■			■			■		
				詳細試験計画 GST高崎研実験課題採択								
2. 試験準備				■			■			■		
							試験付帯設備設営 試験片・試験液準備					
3. 吸収剤照射試験							■			■		
							吸収材照射試験					
4. 試験結果評価										■		
										評価		
備考												

## 7. 本事業の実施内容【3)(ii)② 臨界防止技術の開発】

### b. 放射線影響下での防錆剤の使用を考慮した腐食影響の検討

- 防錆対策との組合せ
  - B・Gd入ガラス材溶出液とpH域が合致する分類I. II. III.に対して評価した(表3)。
- 実験方法
  - 防錆対策を決定した試験方法に原則準拠し、吸収材溶出成分(表4)を含有した試験液を用いて、PCV用炭素鋼SGV480に対して腐食試験を実施した。
  - QST高崎研ガンマ線照射施設において、防錆対策決定時と同じ線量率4 kGy/hで試験した。
  - 均一腐食に対して浸漬腐食試験、局部腐食に対して酸化皮膜型防錆剤(分類I.およびII.)について電気化学試験を実施した。

表3 試験液の構成と実験的評価

分類	防錆剤		吸収材	人工海水濃度	水質		実験的評価	
	成分	機構			B濃度(ppm)	pH	均一腐食	局部腐食
I.	Na <sub>2</sub> B <sub>10</sub> O <sub>16</sub> 4000 ppm (as B)	酸化皮膜	B・Gd入ガラス材	1000倍希釈	4000	8	浸漬腐食	電気化学
II.	Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> 5000 ppm +Na <sub>2</sub> B <sub>10</sub> O <sub>16</sub> 1000 ppm	酸化皮膜	B・Gd入ガラス材	1000倍希釈	1000	8-9	浸漬腐食	電気化学
III.	ZSMMP 4000 ppm	沈殿皮膜	B・Gd入ガラス材	10000倍希釈	0.6-0.8	7-8	浸漬腐食	—

ZSMMP: 亜鉛/炭酸ナトリウム混合リン酸塩

表4 吸収材(B・Gd入ガラス材)からの溶出成分 [ppm]

B	Ba	Zn	Bi	La	Gd
0.6-0.8	0.4-0.6	0.1-0.2	0.07	0.01	0.01

# 7. 本事業の実施内容【3)(ii)② 臨界防止技術の開発】

## b. 放射線影響下での防錆剤の使用を考慮した腐食影響の検討

### 【試験結果】

- 均一腐食(浸漬腐食試験)(図1)
  - いずれの防錆対策も腐食量を大幅に低減し、吸収材溶出成分の影響はなかった。
- 局部腐食(電気化学測定・試験)(図2)
  - 線量率4 kGy/hのガンマ線照射環境で吸収材溶出成分を含有した場合、自然浸漬電位が上昇し局部腐食が生じやすい方向に変化した。
  - 電位の測定値を基準に条件を設定し、局部腐食の進展性を評価したところ、吸収材溶出成分を含有した場合においても、自然浸漬電位の測定値に対して0.45 V以上の余裕をもって進展性がなかった。
- 防錆対策との共存性
  - 分類I、IIおよびIIIの防錆対策に対して、B・Gd入ガラス材溶出成分との共存が可能であることを確認した。

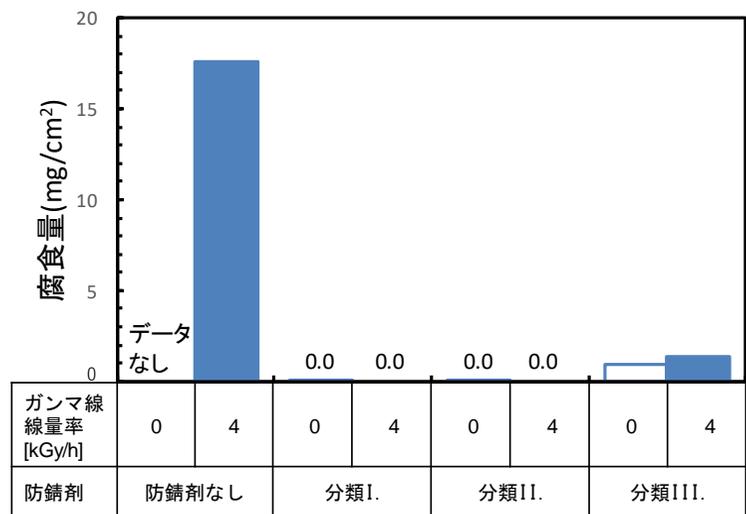


図1 浸漬腐食試験(500 h)による腐食量 (B・Gd入ガラス材溶出成分あり)

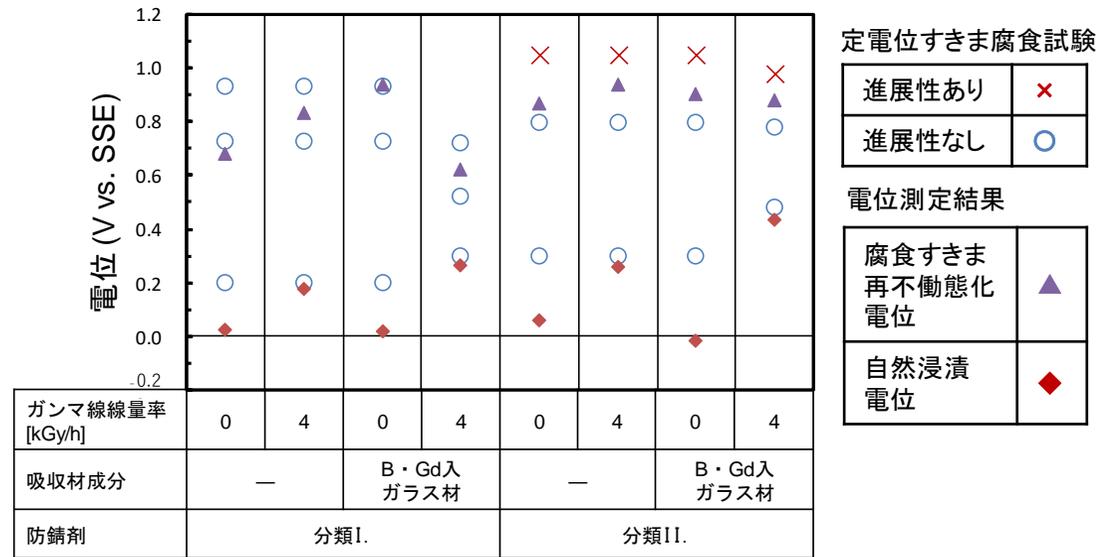


図2 電気化学試験による局部腐食進展評価 ※吸収材成分を含まないデータは腐食PJ結果から引用

## 8. まとめ

### (1)燃料デブリ取り出し工法の開発

#### ①干渉物撤去技術の開発

- 上アクセス工法におけるアクセスルートおよび構造物搬出方法の概念検討を実施。次年度に要素試験の計画立案・試験を行い、工法の実現性の確認を行う。
- 横アクセス工法における共用ユーティリティに関する要素試験を実施し、工法の実現性を確認した。

#### ②干渉物撤去以外の技術の開発

- 遠隔操作支援手法について、環境モデル及びシミュレータ作成し、シミュレータ上でロボットモデルを用いて干渉回避ができることを確認した。次年度に、部分モックアップによる遠隔操作支援手法の有効性を検証する。
- S/Cへの汚染拡大防止方法について、遠隔での堰構築に関する要素試験を実施。堰の遠隔施工性は確認できたものの、止水性能について課題を抽出したため、次年度に追加試験にて再検証を行う。
- R/B内の床面荷重軽減に向けて、セル周辺の必要遮へい厚設定の最適化、アクセスレールの構造の見直しによるセル高さの軽減により、R/B内のセルを軽量化案を検討した。次年度に検討した方法の有効性と実現性の評価を行う。
- ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法について、燃料デブリをユニット缶状態で搬送する閉じ込め装置(モバイルセル)の概念検討を実施。次年度に要素試験にて検討した方法の実現性を確認する。

## (2)燃料デブリ取り扱い技術の開発

## (i)燃料デブリ回収・収納システムの技術開発

- 粒状燃料デブリの吸引回収システムについて、ポンプストレナの形状最適化や適用環境に合わせたポンプ型式を抽出。次年度に要素試験にて検証を行う。
- 燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス技術の開発として、燃料デブリの状態、性状を推定し、取り出し方法を立案中。また、機械切断について加工要素試験を行い、切断工具・切断対象に応じた課題を抽出。次年度に適用対象の整理を行う。

## (ii)燃料デブリ・堆積物の処理に関わる技術開発

## ①循環冷却水中の溶解性核種の除去技術

- アルファ核種(U、Pu等)を用いた吸着試験の計画立案に必要な予備試験を一部実施し、実機想定水質の液にAm、Cm、Uを添加したときの容器付着影響、溶解程度の差を確認した。今後はNp、Puについても同様の予備試験を行ったうえで、吸着試験を行う。
- ほう酸イオンの析出挙動を検討した結果、CaイオンやNa/B比変化による析出リスクを確認した。引き続き要素試験により詳細を検討中である。

## ②PCV内から回収された堆積物等の処理技術

- 非溶解性核種除去の候補装置である中取りフィルタの差圧対策試験を一部実施し、課題と今後の方針を整理した。今回の検討範囲(中取りの試験条件変更のみ)では、中取り時の差圧上昇を抑制することが困難であったため、最終処理への負荷分散、又は中取り系統の多系統化を今後検討する。
- 回収液や廃液中の固形分の分離技術として、ほう酸無添加系における凝集沈降分離の適用可能性を確認した。今後は、ほう酸添加時の影響について確認した上で、操作・運用性確認試験(装置試験)を実施する。

## 8. まとめ

### (2)燃料デブリ取り扱い技術の開発(続き)

#### (iii)燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関わる技術の調査

- 燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け技術について、各仕分けポイントの技術的な実現性を評価し、実現性を考慮した仕分けシナリオを策定した。

### (3)燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発

#### (i)閉じ込め機能に関わる要素技術開発

##### ①PCV内でのダスト挙動予測技術

- 現実的なダスト挙動評価手法の高度化を実施し、格納容器及びR/B全体における気流解析を実施。エアロゾルの物理的挙動に基づくダスト挙動評価手法を確立した。
- 燃料デブリの崩壊熱、及び加工時の入熱を考慮した気流解析を実施。想定される負圧状況下では煙突効果によるアウトリークは発生しないことを確認した。

##### ②接続部の閉じ込め機能確保技術

- アクセストンネルを用いたPCVとの接続方法について、作業ステップを検討し、接続部の基本要求进行整理中。また接続方法に関する比較検討を実施。次年度に溶接によるPCVとの接続方法の実現性を要素試験にて確認する。

## 8. まとめ

### (3)燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発(続き)

#### (ii)臨界防止・監視に関わる要素技術開発

##### ①臨界監視の管理方法の技術開発

- 未臨界度測定の実現性を確認するため、京都大学臨界試験装置にて中性子計測試験を実施して、採取したデータを分析中。
- 中性子検出器の現場への適用性確認について、未臨界度測定の観点から、有望と判断される中性子検出器を選定した。中性子検出器ユニットの構造設計を行い、従来よりも軽量化できる見込みが得られた。また、加工装置の発するノイズ対策法を検討し、耐ノイズケーブルの効果を確認した。
- 複数の燃料デブリ取り出し工法ごとに各ステップでの臨界管理の考え方を整理して、臨界近接監視の方法と制約条件、臨界管理上の注意点を整理した。

##### ②臨界防止技術の開発

- 非溶解性吸収材の投入装置を試作して試験を行い、目標速度で水中投入できることを確認した。また、吸収材を投入後にチゼルで加工する試験を行い、加工後に燃料デブリと吸収材が混合することを確認した。
- 放射線影響下での防錆材の使用を考慮した腐食影響の検討について照射試験を実施し、防錆材とB・Gd入ガラス材の併用が可能であることを確認した。

## 9. 実施目的を達成するための具体的目標

(1)燃料デブリ取り出し工法の開発	
①干渉物撤去技術の開発 ・上アクセスによる大型建造物の取り出し方法、搬出方法	上アクセス工法におけるアクセスルートを確保するための工法(干渉物の撤去を行うための技術、装置の基本仕様および手順など)について、遠隔操作や保守・被ばく低減などを考慮に入れて検討され、要素試験による工法の成立性が確認できていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
・横アクセスによるペDESTAL内外の干渉物撤去方法	機器ハッチからのCRD開口までのPCV内のルートにおいて、ルート上の干渉物撤去方法に影響を及ぼす遠隔装置のユーティリティ構築方法に関する工場での要素試験が完了しており、判定基準を満足していること。または、解決すべき課題と対応方針が明確であること。 (終了時目標TRL:レベル4)
②干渉物撤去以外の技術の開発 ・視界不良かつ狭隘環境下での遠隔操作支援手法の開発	オペレータ作業負荷を低減し、効率化を図るために遠隔操作ロボットが自動で干渉物を回避する制御手法を開発し、シミュレータ検証及び要素試験等によりその制御手法を適用した場合の有効性と実現性が評価され、今後の課題の抽出及び対応方針が示されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
・S/Cへの汚染拡大防止方法	堰を用いたS/Cへの汚染拡大防止方法について、工場での要素試験が完了しており、要素試験の判定基準を満足していること。または、解決すべき課題と対応方針が明確であること。 (終了時目標TRL:レベル4)
・セル設置に関わるアクセスルート構築およびR/B等への影響の低減方法の概念検討	R/B内外のセルの設置に伴う荷重負荷を低減するために、セルを小型化する工法案及びセルの設置方法案を考案し、その有効性と実現性が評価され、今後の課題の抽出及び対応方針が示されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)

### (1)燃料デブリ取り出し工法の開発(続き)

<p>②干渉物撤去以外の技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・ユニット缶状態でのR/Bからの移送方法。</li></ul>	<p>燃料デブリを収納したユニット缶をR/Bから搬出し、別建屋まで構内を搬送する機器に関し、閉じ込めや臨界防止、水素発生対策などの安全設計や機器仕様策定などの概念検討を行い、閉じ込め機構や水素処理機構の要素試験などによる工法・機器の成立性が確認できていること。 (終了時目標TRL:レベル3)</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## 9. 実施目的を達成するための具体的目標

<b>(2)燃料デブリ取り扱い技術の開発</b>	
(i)燃料デブリ回収・収納システムの技術開発 ・粒状デブリの吸引回収システムの開発	粒状の燃料デブリ吸引回収システム案が構築され、要素試験等により燃料デブリの回収速度等の有効性とロボットアームへの搭載性や運用方法等の実現性が評価されるとともに、今後の課題の抽出及び対応方針が示されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
・燃料デブリ・廃棄物の搬出プロセス	これまで「総合的な炉内状況把握の高度化(2017年度)」で推定した多岐にわたる燃料デブリ(溶融固化、粒子状、ペレットなど)に対して、炉心部、炉底部およびペDESTAL内にアクセスし、当該位置での燃料デブリの切断加工、容器収納、搬出など一連の回収手順および必要な装置の概念検討を行い、加工や取り扱い装置の要素試験などによる工法・機器の成立性が確認できていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
(ii)燃料デブリ・堆積物の処理に関する技術開発 ①循環冷却水中の溶解性核種の除去技術	溶解性 $\alpha$ 核種除去設備とほう酸調整設備について、概念設計結果に基づく設備の有効性及び成立性が、要素試験などにより検証されていること。 (終了時目標TRL:レベル3~4)
②PCV内から回収された堆積物等の処理技術	固液分離、及び固形分の回収・収納に係る廃液処理設備の概念設計結果の有効性及び成立性が、要素試験などにより検証されていること。 (終了時目標TRL:レベル4)
(iii)燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに関する技術の調査	燃料デブリの仕分けに関するシナリオ案を策定し、シナリオ案に基づく仕分けに必要な技術調査を行い、技術調査結果に基づく仕分けシナリオ案の現場環境を考慮した実現性の評価と課題の抽出がなされていること。 (終了時目標TRL:レベル2)

## 9. 実施目的を達成するための具体的目標

<b>(3)燃料デブリ取り出し作業時の安全確保に関わる技術開発</b>	
<b>(i)閉じ込め機能に関わる要素技術開発</b> <b>①PCV内でのダストの挙動予測技術</b>	閉じ込め機能に関するバウンダリ内での気流、エアロゾル挙動予測のための解析モデルの拡張を行い、より適切評価手法が検討されていること。また、閉じ込め機能確保のためのPCV、R/Bのバウンダリ機能(静的)及びガス管理機能(動的)の要件が検討されていること。 PCVからのダスト漏えい時におけるR/B内エアロゾル挙動を予測し、モニタリング監視位置等の検討結果が示されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
<b>②接続部の閉じ込め機能確保技術</b>	アクセストンネルとPCV(機器ハッチ)の接続部の構造および接続方法について、アクセストンネルスリーブと機器ハッチ間の接続に関する要素試験の判定基準を満足していること。または、解決すべき課題と対応方針が明確であること。 (終了時目標TRL:レベル4)
<b>(ii)臨界防止・監視に関わる要素技術開発</b> <b>①臨界管理の管理方法の技術開発</b>	中性子検出器候補の未臨界度測定への適用性が確認されていること。 中性子検出器を燃料デブリ上に設置するための構造体について基本設計が行われ、課題と成立性が示されていること。 (終了時目標TRL:レベル4)
<b>②臨界防止技術の開発</b>	非溶解性中性子吸収材の副次的影響である腐食影響や燃料デブリ加工に伴う影響が確認されていること。 非溶解性中性子吸収材を投入するための装置について基本設計が行われ、課題と成立性が示されていること。 (終了時目標TRL:レベル4)

## 用語説明(1/3)

No.	用語	説明
1	1F	福島第一原子力発電所
2	R/B	原子炉建屋
3	PCV	原子炉格納容器
4	RPV	原子炉圧力容器
5	CRD	制御棒駆動機構
6	オペフロ	オペレーティングフロア
7	DSP	機器貯蔵プール
8	SFP	使用済燃料プール
9	X-6ペネ	PCV配管貫通部の一つ
10	S/C	サブプレッションチェンバー
11	ジェットデフ	ジェットデフレクター
12	インフレートシール	膨張性のシール材
13	セルアダプタ	PCVとセルを繋ぐピースのこと
14	M/U体	モックアップ体
15	BSW	生体遮へい壁
16	MCCI	溶融炉心-コンクリート相互作用
17	UC	ユニット缶(燃料デブリを入れる容器)
18	AWJ	アブレイシブウォータージェット
19	HVH	空調ユニット
20	HCU	水圧制御ユニット

## 用語説明(2/3)

No.	用語	説明
21	CRGT	制御棒案内管
22	JPDR	動力試験炉 (Japan Power Demonstration Reactor)
23	MAAP	米国電力中央研究所(EPRI)所有の過酷事故解析コード
24	GOTHICコード	汎用熱流動解析コードの1つ(開発元はEPRI/ ZACHRY)
25	煙突効果	PCV内外の気体の密度差により、複数の破損口を介した循環流が形成されてアウトリークに至る事象

## 用語説明(3/3)

No.	用語	説明
1	TRL7	実用化が完了している段階。
2	TRL6	現場での実証を行う段階。
3	TRL5	実機ベースのプロト機を製作し、工場等で模擬環境下での実証を行う段階。
4	TRL4	開発、エンジニアリングのプロセスとして、試作レベルの機能試験を実施する段階。
5	TRL3	従来経験に応用、組合せによる開発、エンジニアリングを進めている段階。または、従来経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき開発、エンジニアリングを進めている段階。
6	TRL2	従来経験として適用できるものがほとんど無い領域の開発、エンジニアリングを実施し、要求仕様を設定する作業をしている段階。
7	TRL1	開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。