

平成28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に向けたサンプリング技術の開発」

平成30年度実施分最終報告

令和元年7月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

## 目次

	ページ
1. 研究の背景・目的	
1.1 本研究が必要な理由	2
1.2 本研究の成果の反映先と寄与	3
2. 実施項目間、他研究との関連、目標	
2.1 本研究の実施項目	4
2.2 目標	5
2.3 実施項目間、他研究との関係性	6-8
3. 実施スケジュールと実施体制	
3.1 実施スケジュール	9
3.2 実施体制	10
4. 実施事項・成果	
4.1 燃料デブリの採取、サンプリングシナリオの検討及び策定	
4.1.1 開発技術の抽出と開発計画の策定	11
4.1.2 サンプリング工事の成立性検討	12
4.1.3 PCV内部詳細調査時の少量サンプリングの実現性検討	13-15
4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作	
4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計	16-26
4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討	27-37
4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作	38-52
4.3 RPV内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討	53-57
4.4 PCV内部詳細調査時の少量サンプル回収装置の試作	58-60
5. まとめ	61

# 1. 研究の背景・目的

## 1.1 本研究が必要な理由

- 福島第一原子力発電所1～3号機の燃料デブリ取り出しに向けて、装置開発や臨界評価等に燃料デブリ性状に関する情報が必要となる。これまでにスリーマイル島原子力発電所やチェルノブイリ原子力発電所での事故データや解析結果等から推定した値を使用している。しかしながら、装置開発を適正に進めるに当たり、推定値が妥当なのか(安全側かどうかも含め)を確認するには現場の燃料デブリをサンプリングし、分析することが必要である。
- またサンプリングで必要となる切削、回収、輸送、監視などの技術は、燃料デブリ取り出しへの活用が期待される。
- このため、昨年度から主として以下の作業を実施した。
  - ・ サンプリングで取得する情報の活用シナリオ
  - ・ 原子炉格納容器(PCV)内からの燃料デブリサンプリングのためのシステム・装置の設計検討
  - ・ 原子炉圧力容器(RPV)内からの燃料デブリサンプリングシステムの概念検討
- さらに、PCV内部調査の結果を踏まえて以下の作業を実施した。
  - ・ プラットフォーム開口からペデスタル底部へアクセスするためのアーム改良設計
  - ・ PCV内部詳細調査時点において、少量のサンプルを回収する方法、装置の検討・試作

# 1.2 本研究の成果の反映先と寄与

PCV\*1内部調査PJ  
(原子炉格納容器内部調査技術の開発)

PCV内部調査の結果を反映する。

PCV\*1内部詳細調査PJ  
(原子炉格納容器内部調査技術の開発)

調査装置の開発進捗を反映する。

\* 1: 原子炉格納容器

\* 2: 原子炉圧力容器

## 本PJ「燃料デブリサンプリングに係る研究」

燃料デブリの採取、  
サンプリングシナリオの  
検討及び策定

PCV\*1内燃料デブリ  
サンプリングシステム  
及び装置の設計・試作

RPV\*2内燃料デブリ  
サンプリングシステムの  
概念検討

## 燃料デブリサンプリング・分析

硬さ等の物性データ  
切削の速度、ダスト飛散状況

U, Pu, Gd等の  
成分データ

燃料デブリ  
分布データ

水素発生量  
等の成分データ

廃棄物インベントリ  
データ

### デブリ取り出しPJ

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化、燃料デブリ・炉内構造物の取り出し基盤技術の高度化  
・取り出しセルの系統設計、システム設計への反映  
・燃料デブリ取り出し工具の設計及び改良

### 臨界管理PJ

燃料デブリ臨界管理技術の高度化  
臨界評価の妥当性確認

### 炉内状況把握PJ

事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化  
炉内の解析結果の信頼性の確認

### 収納缶PJ

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発  
収納缶の安全性確認

### 固体・廃棄物の処理・処分PJ

固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発  
廃棄物の全体計画への反映

燃料デブリ取り出しの工法・装置等の詳細設計に係る各研究PJ

PCV\*1内部詳細調査  
(内部詳細調査技術の現地実証)

少量サンプリングの  
現地適用

### 小規模取り出し

(東電HD実施予定)

小規模デブリ取り出し装置等の詳細設計

## 2. 実施項目間、他研究との関連、目標

### 2.1 本研究の実施項目

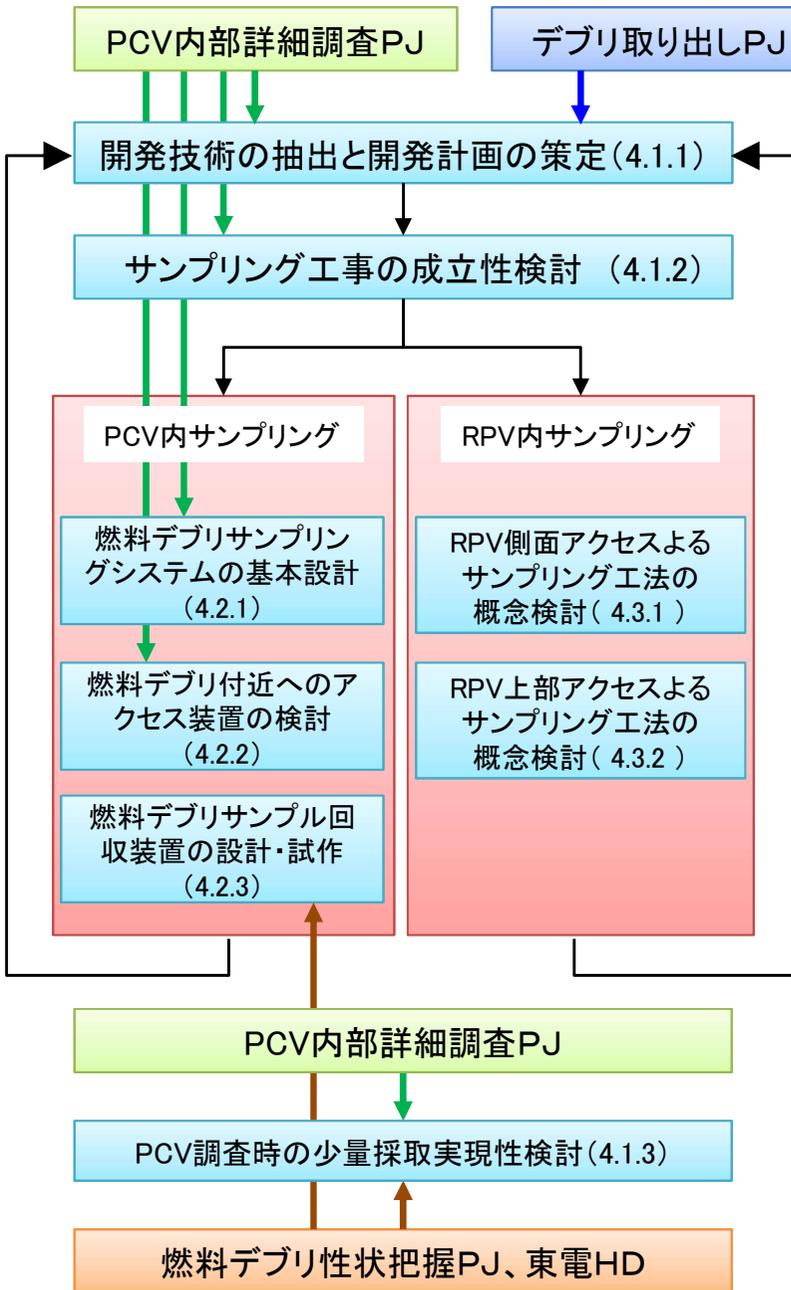
No.	実施項目	平成30年度の実施範囲	
4.1	燃料デブリの採取、 <b>サンプリングシナリオ</b> の検討及び策定	4.1.1 開発技術の抽出と開発計画の策定	本PJで開発が必要な技術(不足している技術)と、関連PJで開発中の技術で本PJへ適用可能な技術を抽出し、開発計画に反映する。
		4.1.2 サンプリング工事の成立性検討	平成29年度に検討したサンプリング時期と内容を踏まえ、現地状況と照らし合わせて工事の成立性に变化が無いかが検討する。
		4.1.3 PCV内部詳細調査時に少量の試料を採取する計画の実現性検討(※)	PCV内部詳細調査の最終段階において、少量の試料を採取する <b>少量サンプリング</b> の実現性を検討する。
4.2	PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作	4.2.1 燃料デブリサンプリング <b>システム</b> の基本設計	サンプリング時に要求される安全上の要求を満足するシステムの基本設計を行う。
		4.2.2 燃料デブリ付近への <b>アクセス装置</b> の検討	<b>小石・砂状、切削粉状から円柱状サンプリング</b> までをカバーするアーム型アクセス装置及びエンクロージャ(アクセス装置等の格納庫)について概念検討を行なう。
		4.2.3 燃料 <b>デブリサンプル回収装置</b> の設計・試作	小石・砂状の燃料デブリを回収する装置と切削粉状の燃料デブリを回収する装置概念を検討し、試作機の仕様設定を行う。
4.3	RPV内燃料デブリ <b>サンプリングシステム</b> の概念検討	4.3.1 RPV <b>側面アクセス</b> によるサンプリング工法の概念検討	側面アクセス特有のアクセス装置の概念等に関する技術課題の検討を行い、装置及びシステムの具現化を図る。
		4.3.2 RPV <b>上部アクセス</b> によるサンプリング工法の概念検討	上部アクセス特有のアクセス装置の概念等に関する技術課題の検討を行い、装置及びシステムの具現化を図る。
4.4	PCV内部詳細調査時の <b>少量サンプル回収装置(※)</b> の試作	PCV内部詳細調査時の少量サンプリングの作業計画を検討するとともに少量サンプル回収装置を試作し、単体での動作を確認する。	

(※) 以下、交付申請書の「微量の試料採取」や「微量サンプル回収装置」の「微量」という単語を「少量」と記載変更しています。

## 2.2 目標

No.	事業内容	終了時の目標技術成熟度(TRL)
4.1	燃料デブリの採取、 <b>サンプリングシナリオ</b> の検討及び策定	燃料デブリサンプリングの全体シナリオが策定され、燃料デブリサンプリングに必要な技術の開発計画が検討・更新されていること。 (目標TRL:情報整理のため対象外)
4.2	PCV内燃料デブリ <b>サンプリングシステム及び装置</b> の設計・試作	① 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計・試作 X-6ペネトレーションから②のアーム型アクセス装置を導入するための <b>接続構造及び設置工法概念</b> が構築され、試作機仕様が設定されていること。 $\alpha$ 核種を含む燃料デブリサンプルを安全に原子炉建屋出口まで搬送できる輸送システム概念が構築され、試作機仕様が設定されていること。(目標TRL:レベル4)
		② 燃料デブリ付近へのアクセス装置の設計 コア採取にも適用可能な10kg以上のサンプル回収装置を運べて、燃料デブリへの適正な押し付けができる <b>アーム型アクセス装置</b> と、 $\alpha$ 核種の漏えいを防止できる <b>エンクロージャ</b> の構造概念が構築され、試作機仕様が設定されていること。(目標TRL:レベル4)
		③ 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 燃料デブリ <b>サンプル回収装置</b> の試作機仕様が設定されていること。 (目標TRL:レベル4)
4.3	RPV内燃料 <b>デブリサンプリングシステム</b> の概念検討	RPV内部調査のアクセスルートを活用し、RPV特有の課題・リスクに配慮したサンプリングシステムの概念が検討されていること。 (目標TRL:レベル3)
4.4	PCV内部詳細調査時の <b>少量サンプル回収装置</b> の試作	PCV内部詳細調査時の少量サンプル回収装置を試作し、単体での動作が確認できていること。 (目標TRL:レベル4)

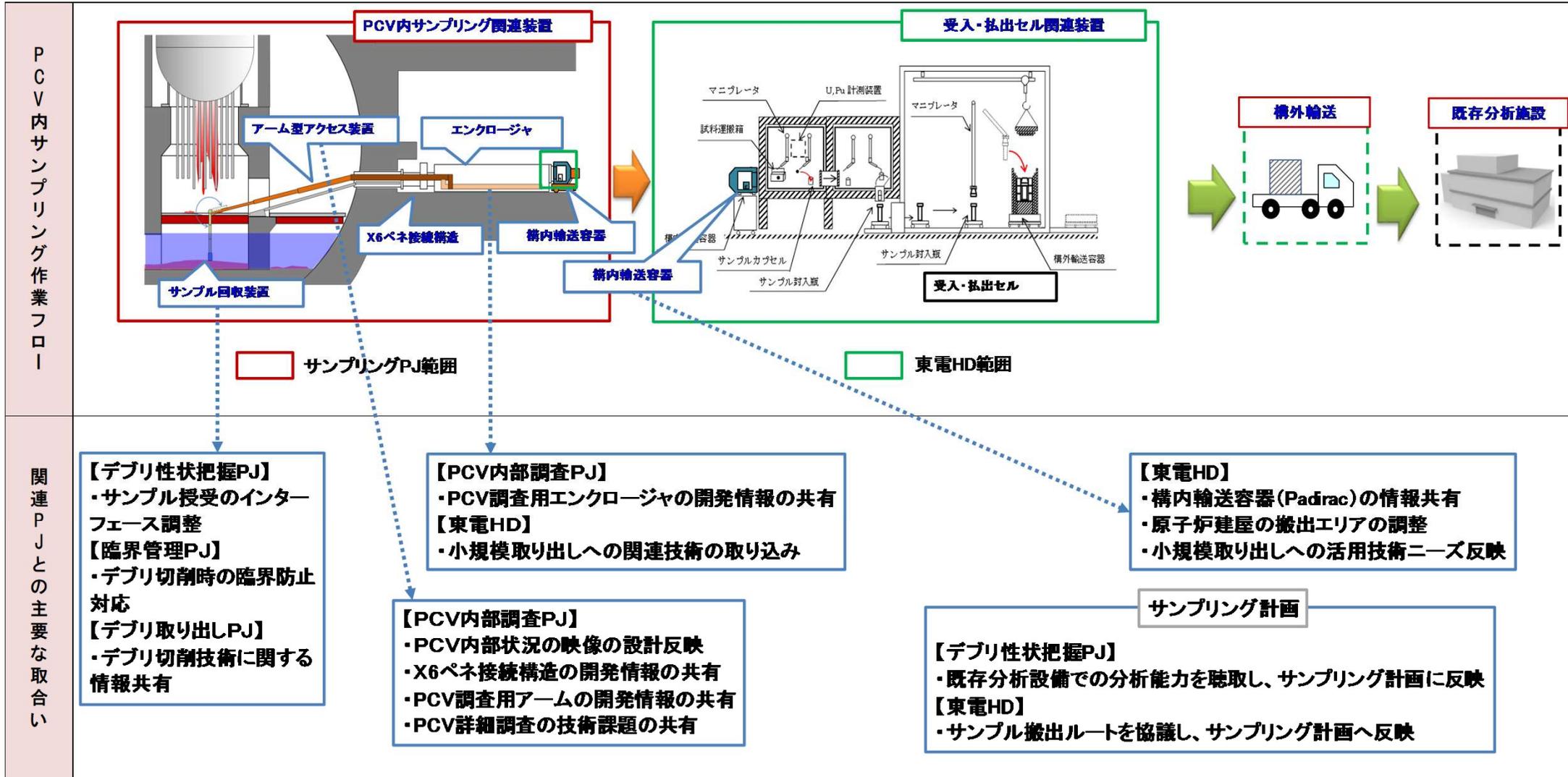
## 2.3 実施項目間、他研究との関係性(1/3)



No.	連携先	連携内容	連携時期
1	燃料デブリ性状把握(燃料デブリの性状把握・分析技術の開発)PJ	<ul style="list-style-type: none"> <li>少量採取に関する構外輸送の取扱いの調整</li> <li>少量採取に関する既存分析設備での分析項目を聴取し、少量採取の実現性検討に反映</li> <li>サンプル回収装置の設計状況を共有し、分析処理に適したサンプルが回収できる装置について意見交換</li> </ul>	2018/5月～10月 月1回ペース で実施
2	燃料デブリ取り出しPJ	<ul style="list-style-type: none"> <li>2号機PCV内の燃料デブリ外観写真を用いてサンプル回収箇所のニーズ調査を実施</li> <li>サンプリング作業時から分析結果取得までの間に得られる情報と、その活用先・活用方法・活用時期の具体的内容について深掘り調査を実施</li> <li>降水中での切削粉飛散率試験計画を紹介し、意見などを聴取</li> <li>α核種モニタ技術の開発状況を聴取</li> <li>超音波切削技術の開発状況を聴取</li> </ul>	2018/4月～ 2019/1月 月1回ペース で実施
3	PCV内部詳細調査PJ	<ul style="list-style-type: none"> <li>アクセスルート構築のため開発中の隔離部屋をサンプリング設備設置時に流用する課題について協議。</li> <li>アーム型アクセス装置の開発状況を共有(*)</li> <li>少量サンプリングに関するインターフェース情報やトレーニング計画を共有(*)</li> </ul>	2018/8 (*は随時実施)
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>収納缶PJ</li> <li>臨界管理PJ</li> <li>東電HD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2号機PCV内で撮影されたデブリ外観写真を用いてサンプル回収箇所のニーズ調査を実施</li> <li>サンプリングの実施段階から分析結果取得までの間に得られる情報と、その活用先・活用方法・活用時期の具体的なイメージを深掘りするためのニーズ再調査を実施</li> </ul>	2018/5月～7月
5	東電HD	<ul style="list-style-type: none"> <li>サンプル輸送先である受入払出しセルやグローブボックスのインターフェースを調整</li> <li>原子炉建屋出口付近でのサンプル搬出エリアを調整</li> <li>小規模取り出しで活用したいサンプリング技術を聴取</li> </ul>	2018/4月～ 2019/2月 月1回ペース で実施

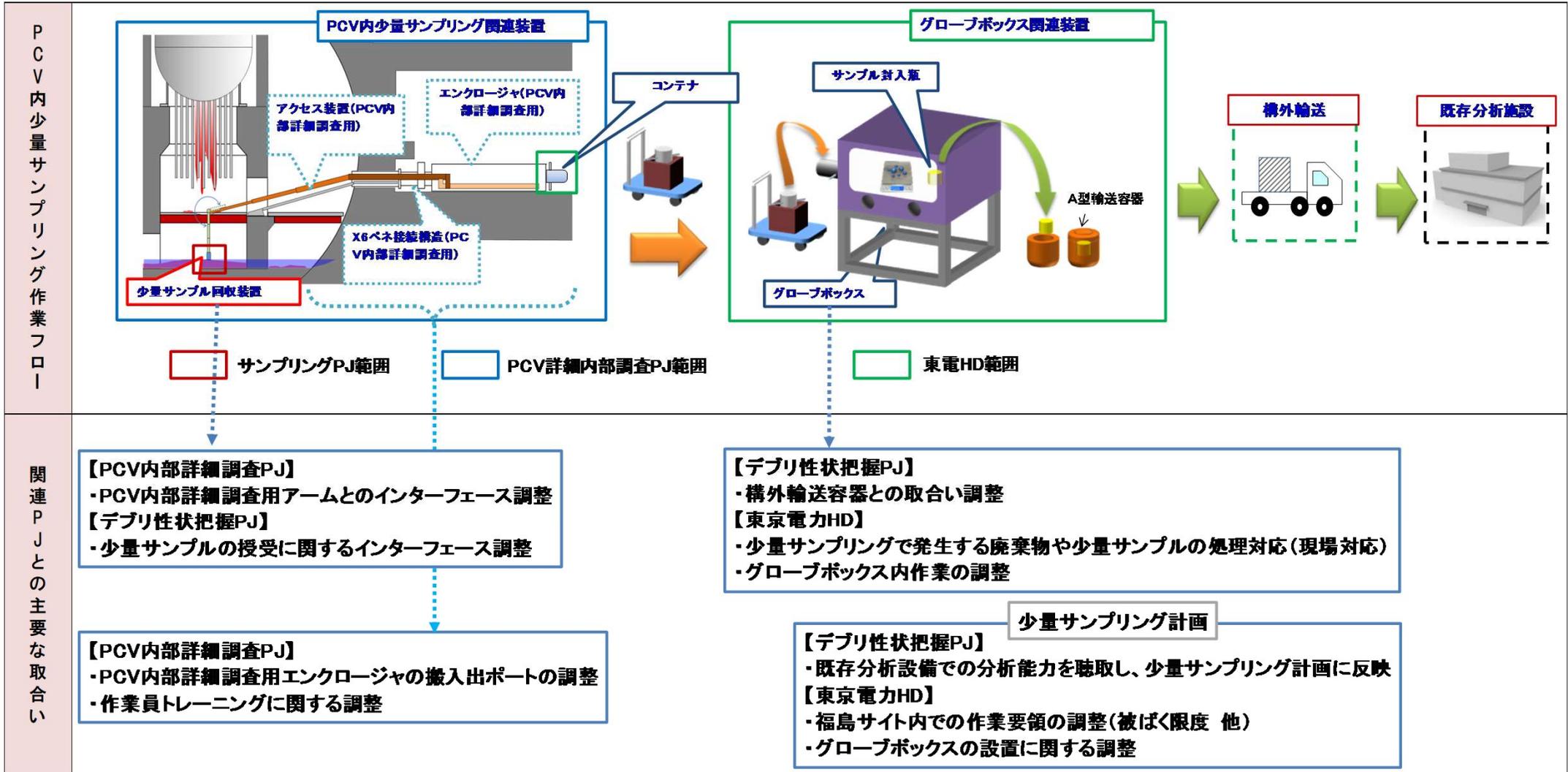
## 2.3 実施項目間、他研究との関係性(2/3)

### ■ PCV内サンプリング作業フロー及び関連PJとの主要な取合い



## 2.3 実施項目間、他研究との関係性(3/3)

### ■ PCV内部詳細調査時の少量サンプリングの作業フロー及び関連PJとの主要な取合い



# 3. 実施スケジュールと実施体制

## 3.1 実施スケジュール

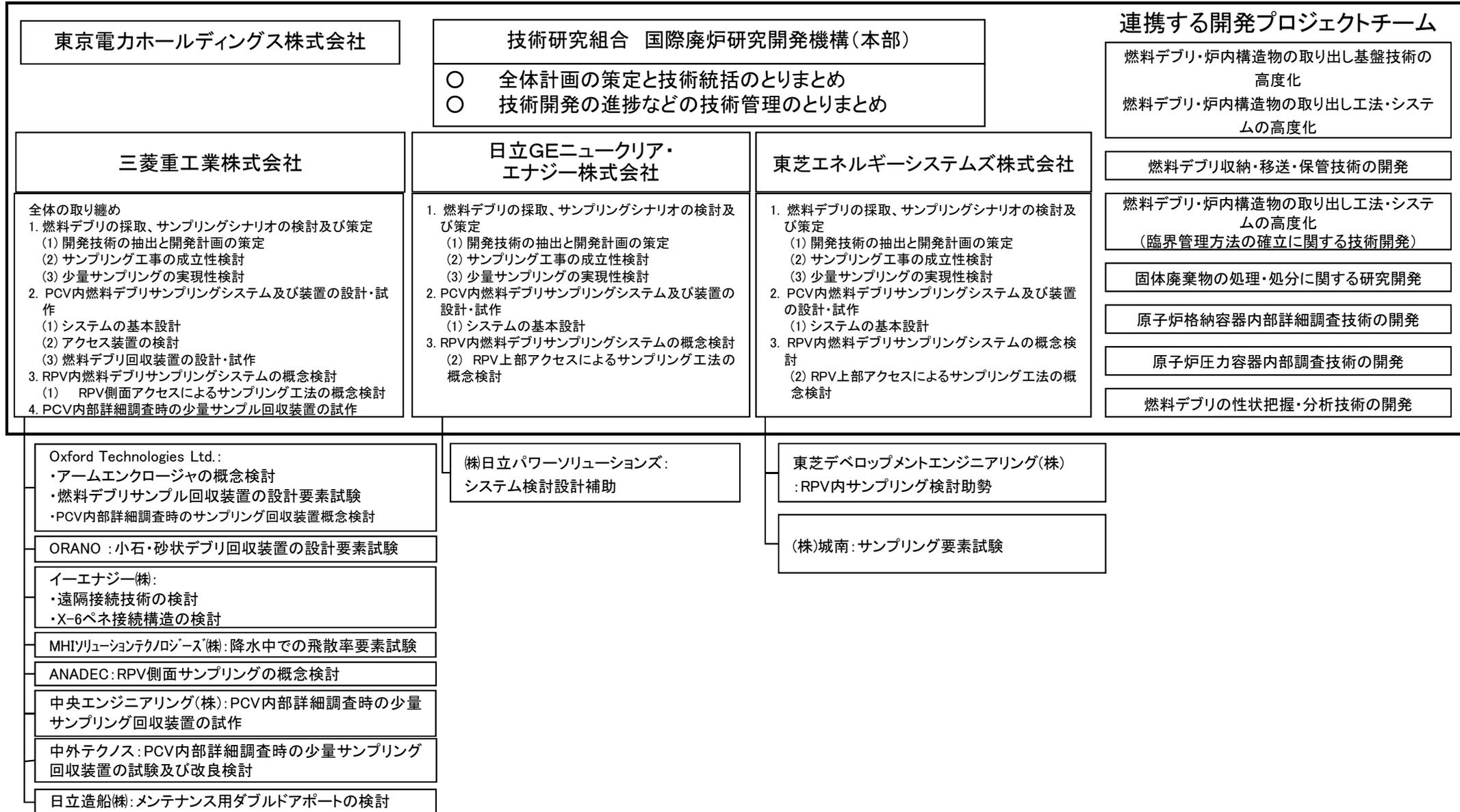
大分類	小分類	平成29年度												平成30年度												備考												
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月													
1. 燃料デブリの採取、サンプリングシナリオの検討及び策定	① -1 全体シナリオの策定	全体シナリオ策定																																				
	① -2 開発計画の策定																																					
	② 工事成立性の検討																																					
	③ PCV内部詳細調査時に微量の試料を採取する計画の実現性検討 ④ シナリオの更新																																					
2. 原子炉格納容器内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作	① システム設計	システム設計																																				
	② アクセスルート検討																																					
	i) 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計・試作																																					
	③ 中性子モニタ検討																																					
	④ 遠隔接続技術検討																																					
	ii) 燃料デブリ付近へのアクセス装置の設計・試作																																					
	① アクセス装置適用性・概念検討																																					
	② アクセス装置試作																																					
	iii) 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作																																					
	① 小石、砂状デブリ回収装置																																					
	② 粉状デブリ切削・回収装置																																					
	③ 円柱状デブリ切削回収装置																																					
④ 降水中での飛散率要素試験																																						
3. 原子炉圧力容器内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討	① 概念構築	概念構築																																				
	② 要素試験																																					
4. PCV内部詳細調査時の少量サンプル回収装置の試作	① 少量サンプル回収装置検討・試作																																					
主要なマイルストーン																																						

■ 計画  
■ 実績

# 3. 実施スケジュールと実施体制

## 3.2 実施体制

実施体制図



## 4. 実施事項・成果

### 4.1 燃料デブリの採取、サンプリングシナリオの検討及び策定

#### 4.1.1 開発技術の抽出と開発計画の策定

- 本PJおよび他PJで開発中のサンプリング関連技術を整理し、開発計画を見直した。

No.	抽出した開発項目	これまでの検討結果	今後の開発方針
1	アクセス装置(アーム、エンクロージャ)	PCV内部詳細調査用アーム型アクセス装置をベースとし、 <b>サンプリングに必要なペイロード、反力構造さらに干渉物回避能力や<math>\alpha</math>核種閉じ込め能力を改善した装置仕様を設定した。</b>	小規模燃料デブリ取り出しへ展開できるよう、長期運用のメンテナンス性や耐放射線性の向上を図る。またPCV内部詳細調査用アーム型アクセス装置開発のフィードバックを行う。
2	アクセスルート(X-6ペネ接続構造)	PCV内部詳細調査用X-6ペネ接続構造をベースとし、 <b>サンプリングに不可欠な<math>\alpha</math>核種閉じ込め能力を改善した装置仕様を設定した。</b>	小規模燃料デブリ取り出しへ展開できるよう、長期運用を想定した耐放射線性の向上を図り、試作を行う。
3	サンプル回収装置	小石状デブリや切削粉・コアの <b>回収装置の仕様を設定した。</b> 試験によりダスト発生を抑える装置構造の効果を確認した。	設計仕様に基づき、装置を試作し、模擬アームとの組合せ試験で遠隔でのサンプリング性能を確認する。
4	中性子モニタ	最新技術の比較評価を行い、 <b>燃料デブリ切削時の臨界監視に必要な感度を確保できる中性子モニタの基本仕様を確定した。</b>	小規模燃料デブリ取り出しへ展開できるように、装置を試作し、性能を確認する。
5	遠隔接続技術	<b>遮へい体付運搬容器の遠隔輸送システムの基本仕様を設定した。</b> また要素試験により目標の接続精度が得られた。	残りの要素試験を進めて、基本仕様に基づき、システムを試作し、性能を確認する。
6	少量サンプリング技術	PCV内部詳細調査用アームを用いた <b>少量サンプル回収装置を設計、試作した。</b> また安全にサンプルを搬出するための計画を策定した。	アームとの組合せや、マニピュレータによるサンプル取扱性を検証し、現地適用に供する装置を製作する。

## 4.1.2 サンプリング工事の成立性検討

- 1～3号機のPCV内部調査結果等から、各号機サンプリングの技術ハードルを評価した。

号機	アクセスルート	PCV内の状況	サンプリング工事成立性
1号機	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ X-6ペネ周辺エリアは高線量</li> <li>✓ X-6ペネへの機材搬入ルートが狭隘</li> <li>✓ X2またはX1の利用が現実的</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ペDESTAL内側は不明</li> <li>✓ ペDESTAL外側は堆積物で覆われている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 水中遊泳型調査装置(ROV)によるペDESTAL外側地下階からのアクセスとなり、現状はペDESTAL内側への入口である作業員アクセス口が使えるか判断できない状況</li> <li>✓ 開発中のサンプル回収装置が適用可能か判断できないが、堆積物のサンプリングは可能と考えられる</li> </ul>
2号機	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ X-6ペネ周辺エリアは短時間の立入が可能</li> <li>✓ 機材搬入ルートも幅2.5m程度確保されている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ペDESTAL内側の映像が得られ、燃料デブリの存在が確認されている</li> <li>✓ 干渉物はプラットフォーム構造物</li> <li>✓ ペDESTAL外側への燃料デブリの拡散は不明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ X-6ペネからCRD開口を經由したペDESTAL内側へのアクセスは可能</li> <li>✓ ペDESTAL底部の燃料デブリは固着していないものも確認されており、開発中のサンプル回収装置で小石状の燃料デブリ回収は可能と考えられる。</li> <li>✓ PCV内部詳細調査PJで、アーム型アクセス装置のペDESTAL内への導入が成功すれば、サンプリングも成立すると考えられる</li> </ul>
3号機	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2号機と同じ</li> <li>✓ ただしX-6ペネが水没しているため、機材設置前に水位を下げる必要がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ペDESTAL内側の映像が得られ、燃料デブリの存在が確認されている</li> <li>✓ 干渉物は落下したCRDが確認されているが全容は不明</li> <li>✓ ペDESTAL外側への燃料デブリの拡散は不明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 水位が低下すれば、2号機と同様にアーム型アクセス装置を導入できると考えられる</li> <li>✓ ただしペDESTAL内側にCRD等の落下物があり、直線的なアームの動きでは燃料デブリにアクセスできない恐れがある</li> </ul>

⇒ 現状は2号機PCV内のサンプリングが最も成立性が高いと判断される。

# 4.1.3 PCV内部詳細調査時の少量サンプリングの実現性検討

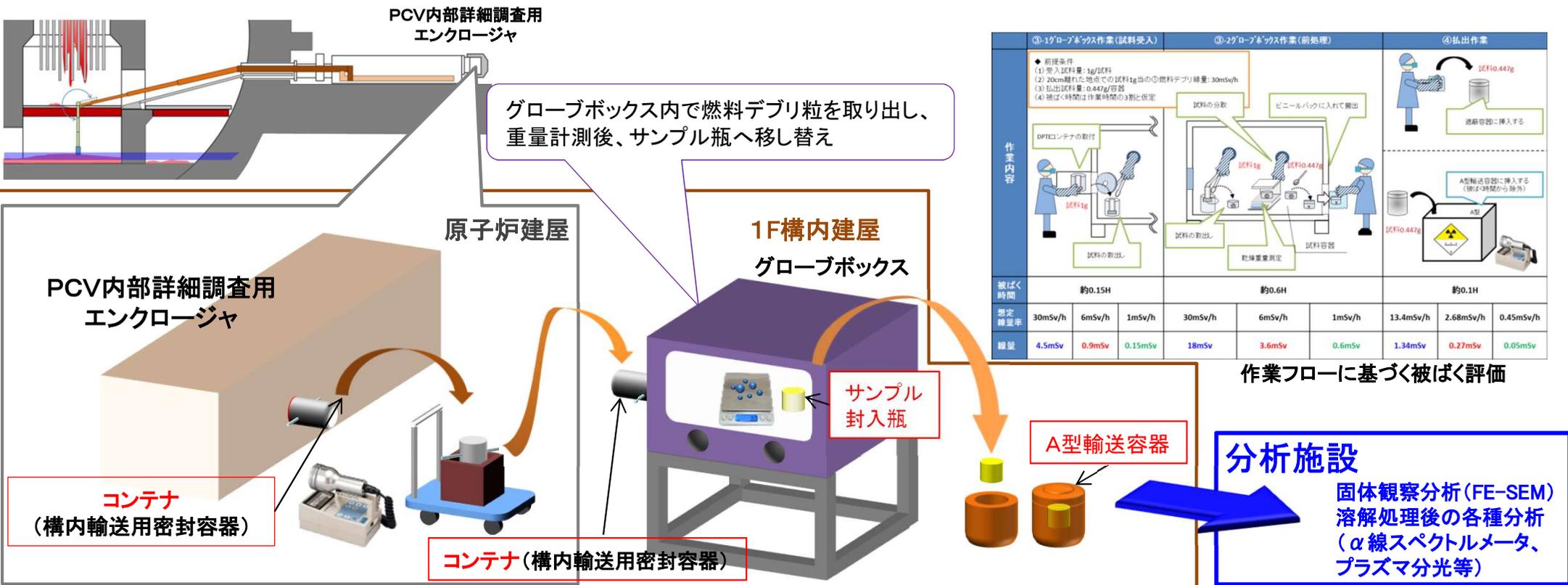
## ■ 目的、目標

PCV内部詳細調査の最終段階において、少量の燃料デブリをサンプリングすることの実現性を検討する。

⇒ 早期に燃料デブリサンプリングを実現し、燃料デブリ表層の状態を把握する。

## ■ 実施項目、成果

- ✓ 被ばく量を抑えるため、少量サンプリング方法を検討し、1g以下の採取に適した方法を抽出した。
- ✓ 上記のサンプリング方法によるサンプル回収装置概念を具体化した。
- ✓ 少量サンプリングにおける作業員被ばく量を評価し、実施可能な条件を設定した。



## 4.1.3 PCV内部詳細調査時の少量サンプリングの実現性検討

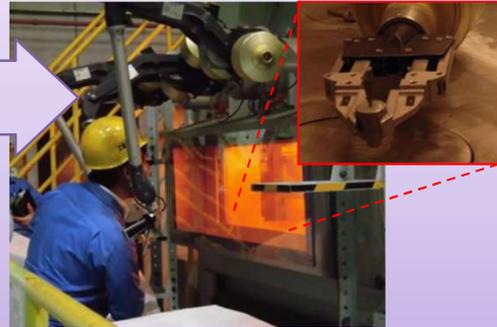
### ■ 成果

- ✓ 遠隔操作の習熟を目標としたトレーニングプログラムを検討した。

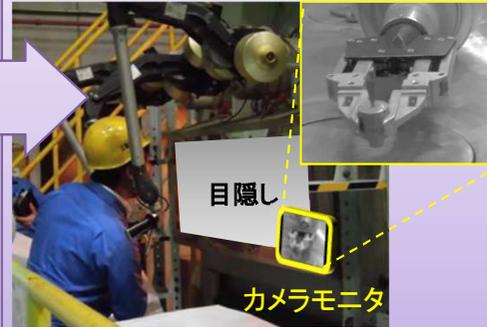
類似のマスタースレーブマニピュレータによる基本動作の習熟



ダミーのサンプル回収装置を用いた取扱性の習熟、および改良点(扱いにくい箇所)の抽出



現場環境を模擬し、カメラ映像を用いた取扱性の習熟、および改良点の抽出

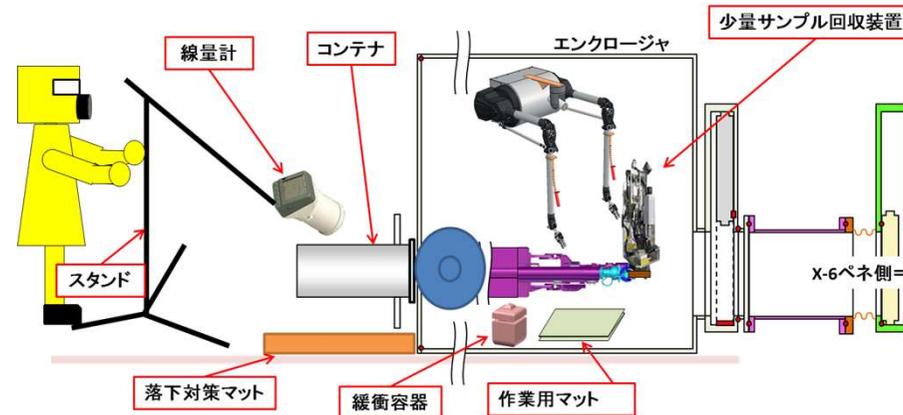


アームとの組合せ試験での遠隔操作型マニピュレータによる作業性確認



## 4.1.3 PCV内部詳細調査時の少量サンプリングの実現性検討

- 成果の反映先への寄与
  - ✓ 早期に燃料デブリサンプリングを行うことで燃料デブリ表層の情報を得ることができる。
- 現場への適用性の観点における分析
  - ✓ 万が一の燃料デブリ漏出に備えた除染作業などの対応策の具体化が必要



少量サンプリング時のリスクアセスメントを踏まえた安全対策イメージ

- 課題
  - ✓ アームとの組合せ試験やトレーニングによる工程への遅延影響の軽減
  - ✓ 作業員被ばく量の更なる低減策
  - ✓ サンプル漏出など高リスク事象についてアセスメントを行い、検証漏れ防止や対策具体化を図る
- 目標に照らした達成度
  - ✓ 実現性のある少量サンプリングの方法、装置概念および開発計画を策定した。
- 今後の予定
  - ✓ 「4.4 PCV内部詳細調査時の少量サンプル回収装置の試作」に続く。

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ①アクセスルートの検討

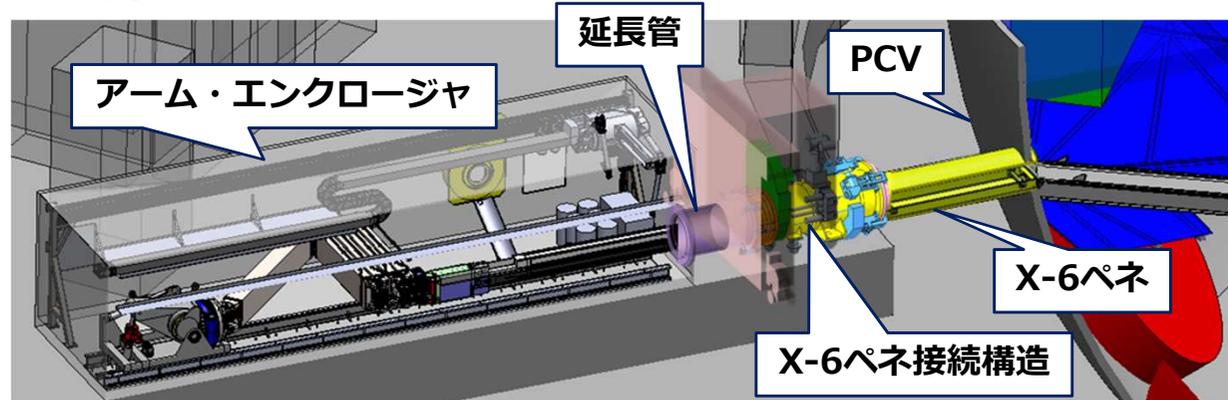
#### ■ 目的、目標

サンプリング用アームを収容するエンクロージャとPCVとの間のバウンダリとなる接続構造の構造概念および据付け・撤去方法を構築する。

⇒サンプリング用アームのPCVアクセスルートを構築する。

#### ■ 既存技術との対比

- ✓ PCV内部詳細調査用に開発中のX-6ペネ接続構造＋延長管(下図)に対して、燃料デブリサンプル中に含まれる $\alpha$ 核種の閉じ込め性を向上させる。また短尺化を図り、エンクロージャの設置位置をPCV側へ近づけて、サンプリング用アームの短尺化・ペイロード向上につなげる。



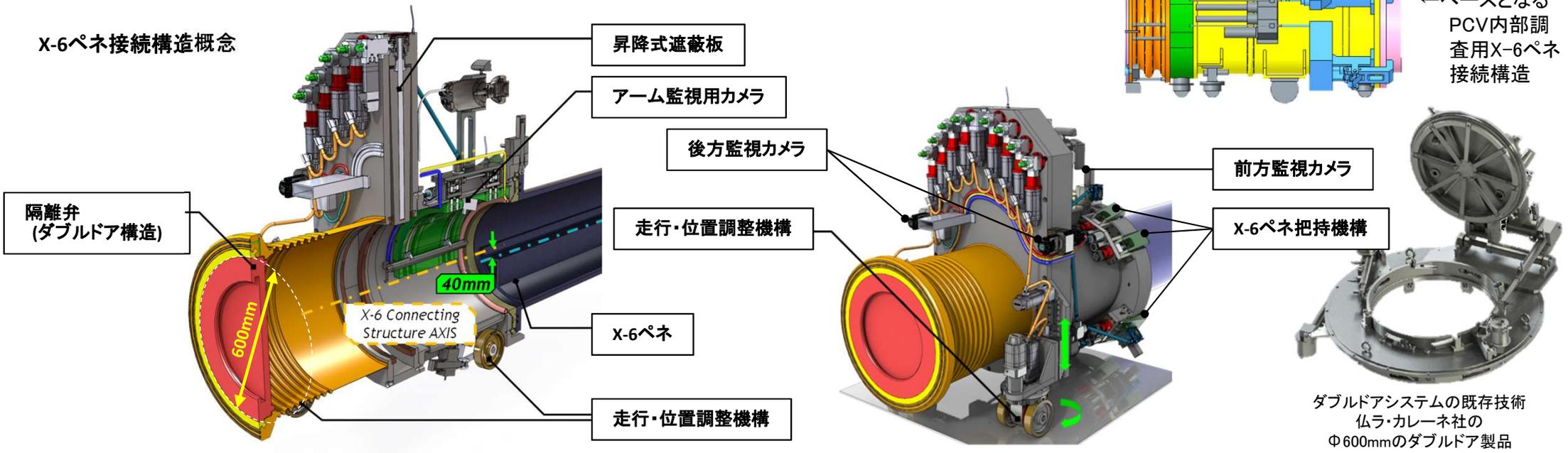
#### ■ 実施項目、成果

- ✓ ホットセルで活用されているダブルドアシステムを応用して、エンクロージャ撤去時の $\alpha$ 核種の閉じ込め性を向上できる見通しが得られた。
- ✓ 延長管の長さ(約1m)を短縮し、延長管と一体化したX-6ペネ接続構造概念を構築し、設計仕様を設定した。

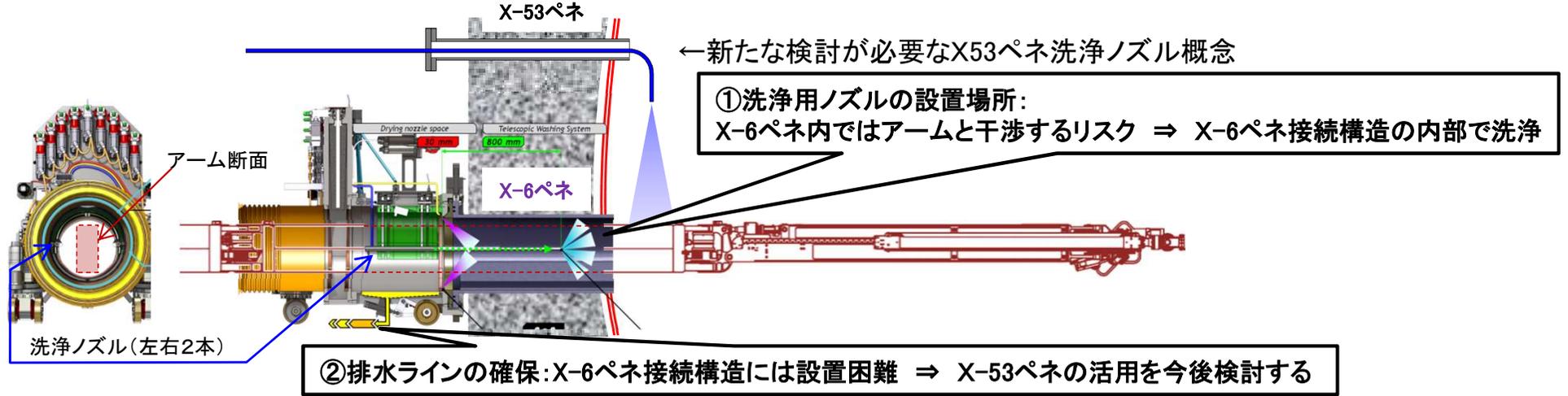
# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ①アクセスルートの検討

### ■ 成果 (X-6ペネ接続構造およびダブルドアシステム概念)



✓ アーム洗浄の課題も明らかとなった。



## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ①アクセスルートの検討

設定した基本仕様

#### ■ 成果の反映先への寄与

- ✓ サンプリング時のバウンダリ確保や、設備撤去時の放射性ダスト飛散の低減が図れ、被ばく低減と安全確保に寄与できる。

#### ■ 現場への適用性の観点における分析

- ✓ X-6ペネトレーションのフランジとの密着性やアームとの軸心調整に配慮した設計が必要
- ✓ 現場の高線量環境下での設置・撤去の作業性を確実にするためトレーニングが必要

#### ■ 課題

- ✓ PCV側への排水が可能なX53ペネからのサンプリング用アーム洗浄ラインの検討
- ✓ 各装置・機器のバックアップ方法や現場状況の改善策の検討
- ✓ 小規模燃料デブリ取り出しへの活用を想定したダブルドア部の耐用年数の向上、要素試験の実施

#### ■ 目標に照らした達成度

- ✓ 基本仕様を設定し、所期の目標を達成した。

	要求仕様	基本仕様	備考
外形寸法	幅1.1m以下 高さ1.7m以下 長さ1.8m以下	幅0.8～1.1m 高さ1.66m 長さ1.72m	隔離部屋のステージ隔離部屋に搬入できる寸法
重量	2トン	2トン以下	PCV内部詳細調査用と同様
隔離弁	ダブルドア構造	同左	α核種漏えい対策
遮蔽機能	鉛70mm	同左	PCV内部詳細調査用と同様
圧力条件	差圧5kPa以上	差圧7kPa	PCV内圧と大気圧の差圧を考慮
駆動系	前後左右移動 高さ傾き調整 X-6ペネ把持 遮蔽板昇降	水平移動×2 高さ・傾き×3 X-6ペネ把持×4 遮蔽板昇降×1 洗浄ノズル×1 センタリング×3	モータ故障時のレスキュー継手部を確保した
アーム通過性	床面から580mmの高さに直径600mmの開口を設ける	同左	PCV内部詳細調査用と同様
アーム洗浄	アーム洗浄機能を備えること	洗浄機能あり	排水方法に課題あり
リークチェック性	シール部は2重化し、間を加圧監視できること	同左	PCV正圧での気密性を担保
耐放射線性	耐放射線性を有する材質とする	同左	想定環境線量率1000mGy/h

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

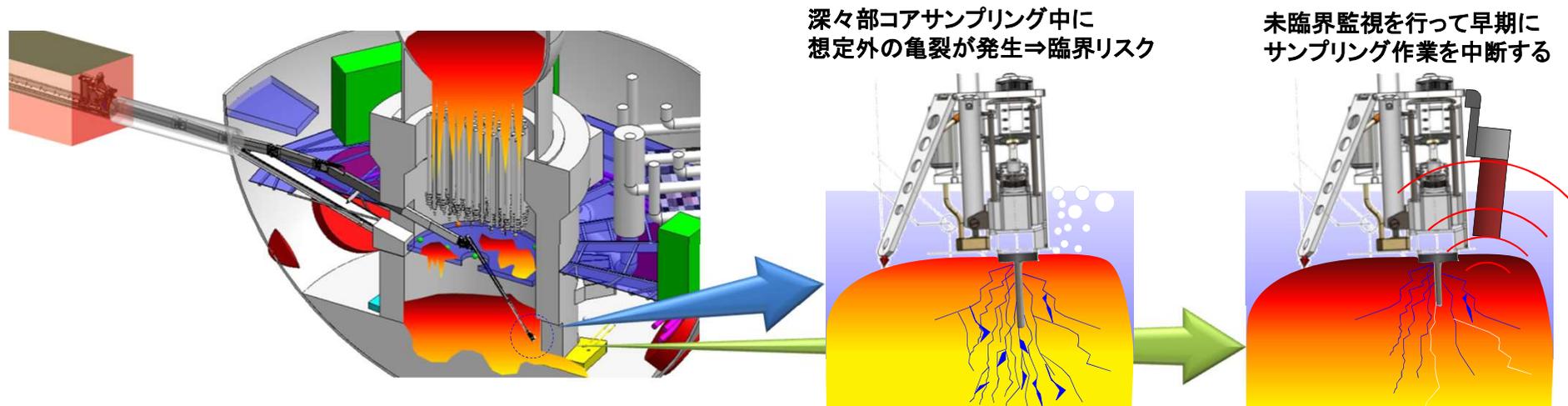
### 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ②中性子モニタの検討

#### ■ 目的、目標

サンプリング時の臨界近接を監視できる小型で軽量な中性子モニタの基本仕様を設定する。  
⇒**深々部のような長尺のコアサンプリングを行う際の臨界安全を念のため確認する。**

#### ■ 既存技術との対比

- ✓ 既存の高感度B10検出器の場合、重量が約150kgとなり、アーム型アクセス装置の想定ペイロード20kgではハンドリングができない。



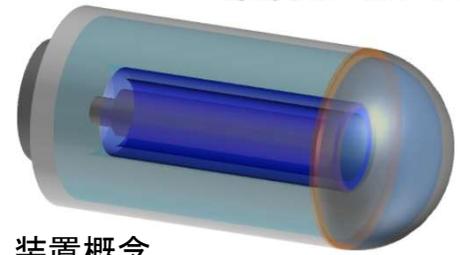
# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ②中性子モニタの検討

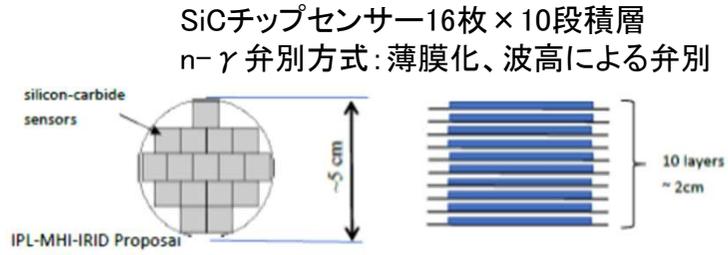
設定した基本仕様

### ■ 実施項目、成果

- ✓ サンプルング時の臨界リスク評価を元に中性子検出感度要求を0.01~0.1cps/nv以上と設定
- ✓ 最新技術の比較評価より、耐放射線性や監視性能に優れる小型SiC半導体検出器を選定
- ✓ サンプルングから燃料デブリ取り出しでの切削時同時監視に代わる監視方針を策定
- ✓ PCV内部詳細調査アームとのインターフェース条件から基本仕様を設定



装置概念



	要求仕様	基本仕様	備考
最大寸法	長さ500mm 直径140mm	同左	X-6ペネ通過可能であれば良い
重量	20kg未満	20kg未満	アームで持ち運べる重量
減速材	HDPE高密度 ポリウレタン	同左	感度向上のため
吸収材	Cd、B4C	同左 (信号処理部はW)	コリメートのため
感度計数率	0.1cps/nv 以上	4.5cps/nv以上	燃料検出下限値
必要計数	100cts/10min	同左	1nvあたり
計測時間	60分以下	同左	中性子束の強さによって短縮可能
γ線弁別	$\gamma/n > 10^5$	同左	
耐放射線性	100kGy以上	40MGy	

### 比較評価結果

検出器候補 【要求仕様】	サイズ ・重量	耐放射 線性	ケーブル長	径	臨界近接 監視	耐振 動性	保守性	許認 可性	総合 評価	備考
高感度B10検出器	×	○	○	×	◎	△	×	△	×	未臨界管理開発品
小型B10検出器	△	○	○	△	○	△	△	△	△	未臨界管理開発品
核分裂電離箱	◎	◎	△(~30m)	△	○	△	△	○	○	輸入許可手続き必要
小型SiC半導体検出器	◎	◎	△(~50m)	○	○	△	△	△	○	選定技術
小型CORONA検出器	○	○	△(~50m)	△	△	△	△	△	△	輸入許可手続き必要

(◎: 余裕有、○: 問題なく適合、△: 課題有、×: 適用困難)

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ②中性子モニタの検討

#### ■ 成果の反映先への寄与

- ✓ 小規模燃料デブリ取り出し時の臨界監視にも適用が期待される。

#### ■ 現場への適用性の観点における分析

- ✓ 他のセンサ、サンプル回収装置とのアーム付け替えとなるため、取扱い上の大きな課題はない。

#### ■ 課題

- ✓ 燃料デブリ切削時の同時監視ができないため、切削後の監視方法に対する安全ロジックの補強が必要。
- ✓ 耐放射線性を左右する半導体検出部のアンプの遮蔽性能

#### ■ 目標に照らした達成度

- ✓ 基本仕様を設定し、所期の目標を達成した。

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ③遠隔接続技術の検討

### ■ 目的、目標

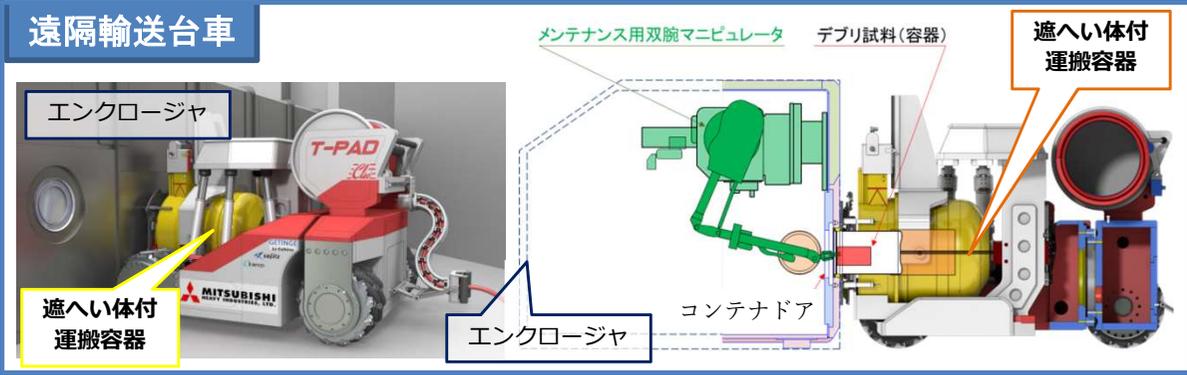
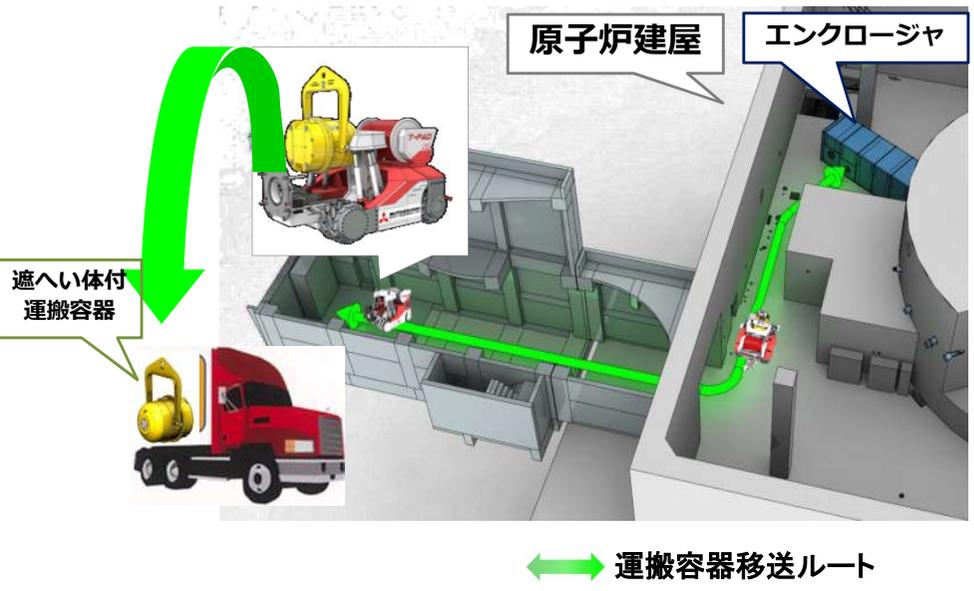
燃料デブリサンプルを高線量のエンクロージャ設置場所から搬出するため、構内輸送容器(重さ2~4トン)を遠隔操作で搬送し、エンクロージャに遠隔接続するシステムを開発する(既存技術は存在しない)。  
 ⇒ **サンプル搬出時の原子炉建屋内の作業員被ばくを低減する。**

### ■ 実施項目、成果

- ✓ 上期に構造概念を構築した遠隔輸送台車に関し、その成立性を確認するため、位置決め機能に関する**要素試験を行い、要求される位置精度を満足できることを確認した。**
- ✓ 建屋環境条件や要求性能を満足する装置の概念設計を行い、エンクロージャの搬出ポートに接続可能な遠隔輸送台車の仕様を具体化した。

### ■ 要求条件

- ✓ 搬出ポートから原子炉建屋大物搬入口までの約50mをレール敷設なしで遮へい体付運搬容器(重さ2~4トン)を移送できること
- ✓ 遮へい体付運搬容器(気密容器)を搬出ポートに遠隔操作で接続/離脱できること(非常時の脱出方法を考慮する)
- ✓ 原子炉建屋外の受入・払出しセルとの接続は、通常の遮へい体付運搬容器のマニュアル作業で行えること



# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ③遠隔接続技術の検討

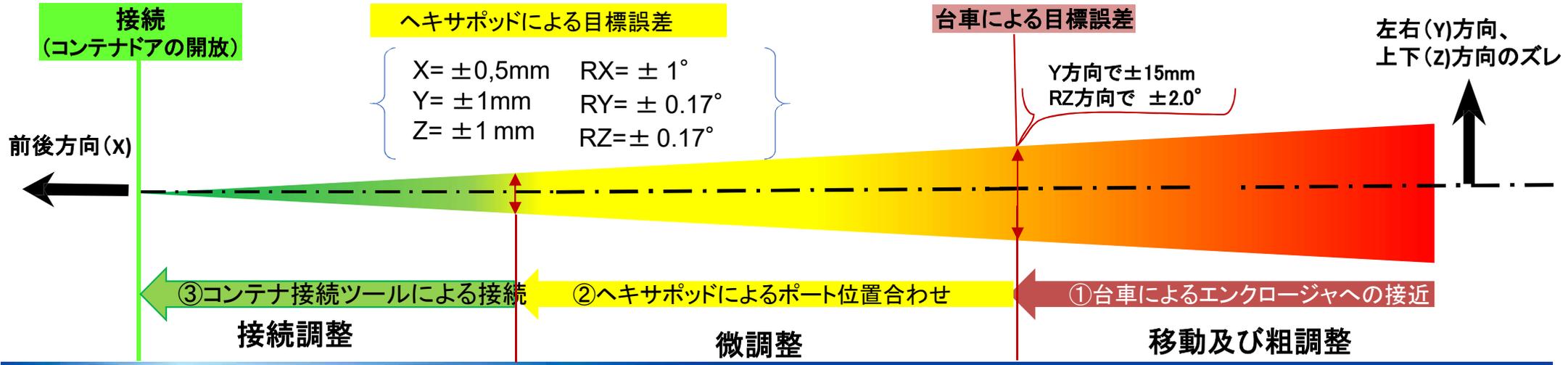
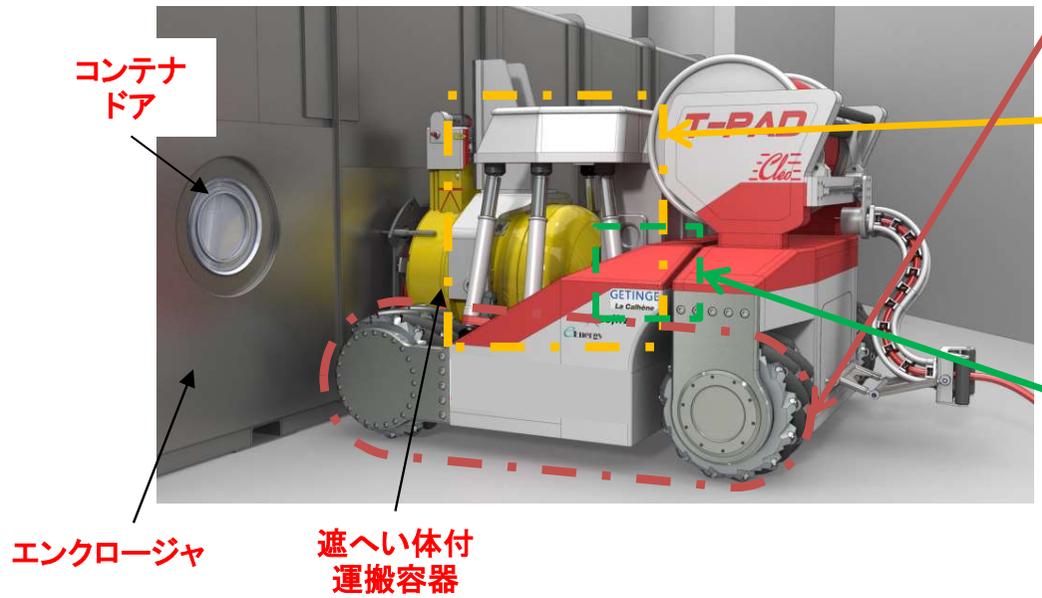
### ■ 成果(装置概念の検討:遠隔操作で遮へい体付運搬容器をコンテナドアに接続する手順)

遮へい体付運搬容器の遠隔輸送台車(T-PAD)

①: 台車(メカナムホイール)を用いて遮へい体付運搬容器の位置をエンクロージャのポート位置に粗調整する。

②: ヘキサポッドシステム\*1を用いて遮へい体付運搬容器の高さ、傾き等を微調整する。  
\*1: 6本脚(シリンダ)で1つの天板を支え、その天板の位置と傾きを微調整するシステム。

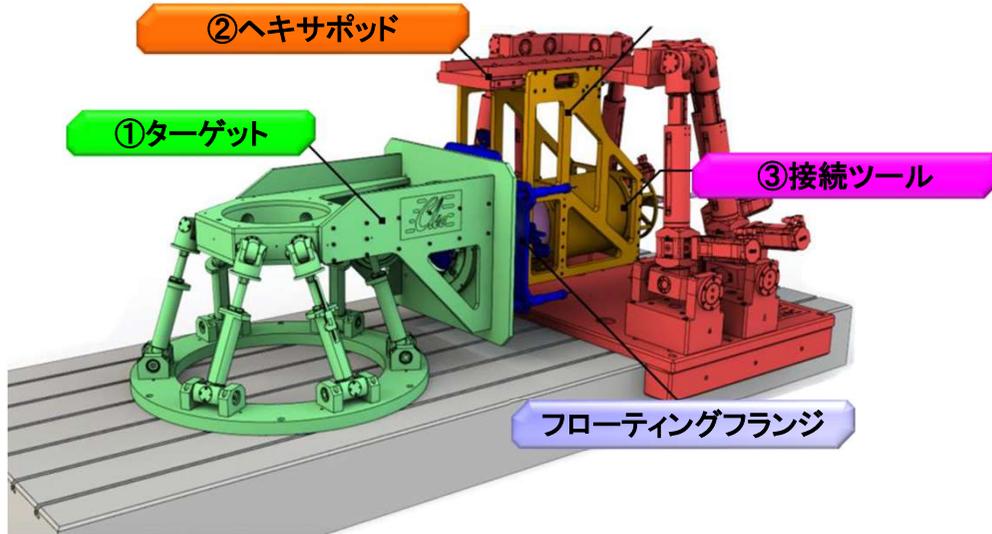
③: コンテナの接続ツールを用いて遮へい体付運搬容器とコンテナを接続する。



# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ③遠隔接続技術の検討

### ■ 成果(要素試験による位置決め精度の確認)



### ■ 要素試験結果

	接続位置の調整 *1			接続面の傾きの調整 *2		
	X軸	Y軸	Z軸	RX	RY	RZ
要求値	±0.5mm	±1.0mm	±1.0mm	±1.00°	±0.17°	±0.17°
測定値	0~+0.17mm	0~+0.41mm	0~+0.10mm	0~0.12°	-0.01~+0.01°	-0.02~+0.03°
評価	要求精度を達成した					

\*1)カメラによる位置調整 \*2)ドッキングプローブによる傾きの調整

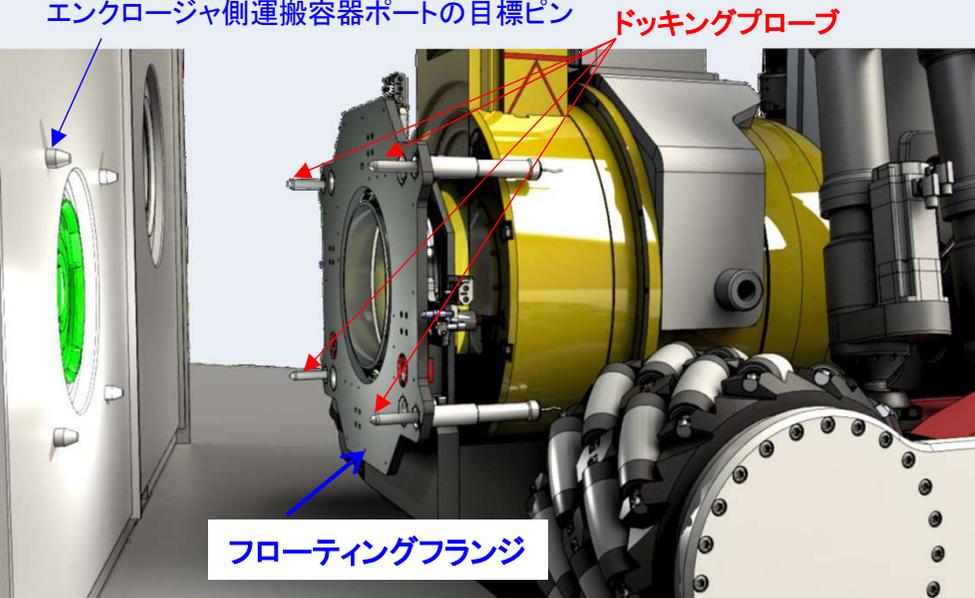
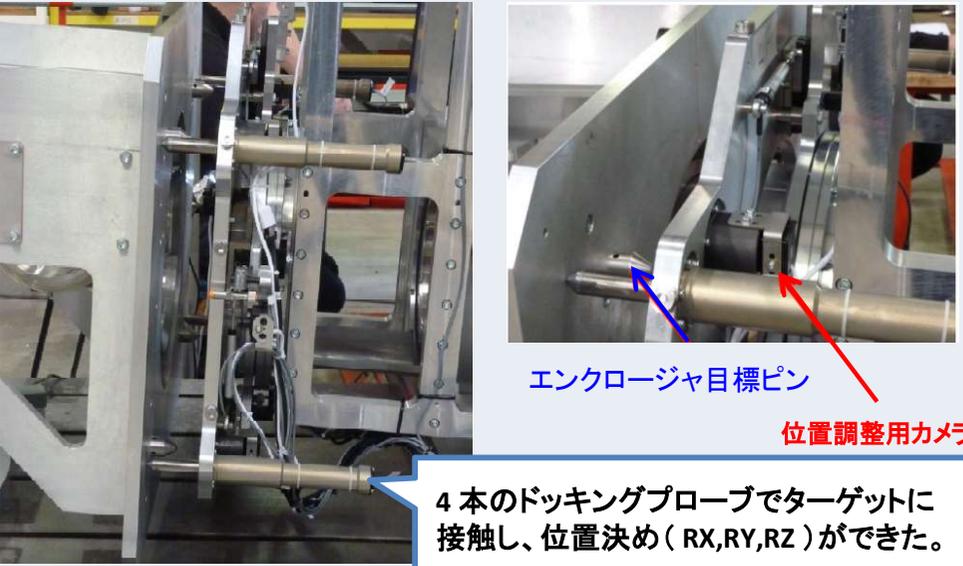
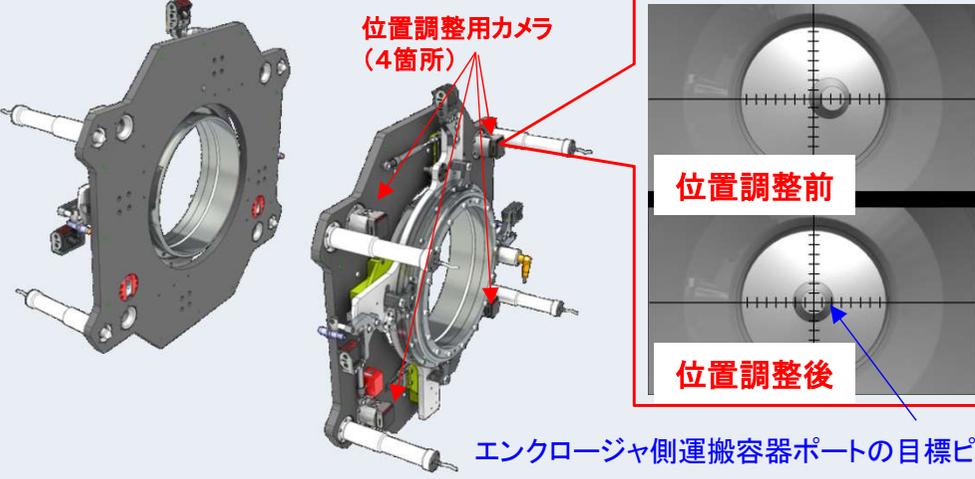
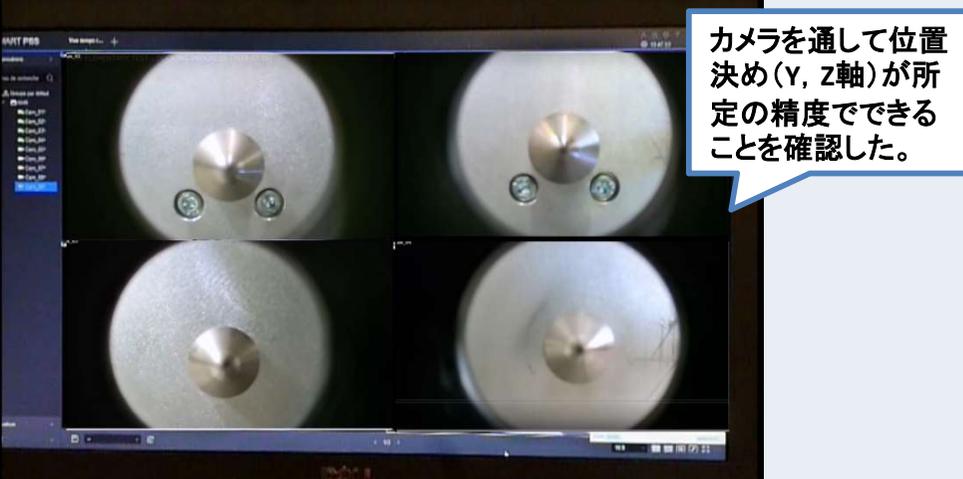
### ■ まとめ

ヘキサポッドを用いることで、遮へい体付運搬容器の遠隔接続に必要な位置調整が可能な見通しを得た。

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ③遠隔接続技術の検討

### ■フローティングフランジによる位置合わせの詳細(計画と試験)

計画	試験
 <p>エンクロージャ側運搬容器ポートの目標ピン</p> <p>ドッキングプローブ</p> <p>フローティングフランジ</p> <p>位置調整用カメラ (4箇所)</p>	 <p>エンクロージャ目標ピン</p> <p>位置調整用カメラ</p> <p>4本のドッキングプローブでターゲットに接触し、位置決め (RX,RY,RZ) ができた。</p>
 <p>位置調整前</p> <p>位置調整後</p> <p>エンクロージャ側運搬容器ポートの目標ピン</p>	 <p>カメラを通して位置決め (Y, Z軸) が所定の精度でできることを確認した。</p>

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 ③遠隔接続技術の検討

#### ■ 下期の成果

- ✓ 非対称形状のヘキサポッドを用いた微調整機能の要素試験を行い、要求される位置精度を満足できることを確認した。
- ✓ 遠隔輸送台車の概念設計を行い、仕様を具体化した。

#### ■ 課題

- ✓ 台車の除染、部品交換などのメンテナンス方法
- ✓ 遮へい体付運搬容器を原子炉建屋内から建屋外に持ち出す際のエリア管理
- ✓ 接続ツール及び台車の車輪に関する課題の検証(要素試験による設計検証)
- ✓ 各装置・機器のバックアップ方法や現場状況の改善策検討が必要。
- ✓ リスクアセスメントを踏まえたシステム概念の改善(安全性)

#### ■ 目標に照らした達成度

- ✓ 計画通り進捗しており、完了時に所定のTRLに到達した。

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

### ■ 目的、目標

PCV内部詳細調査用アーム設備の設計を元に、サンプリングに対応可能な装置概念を検討する。  
⇒特にα核種を漏えいさせないエンクロージャのバウンダリ強化やメンテナンス性向上を図る。

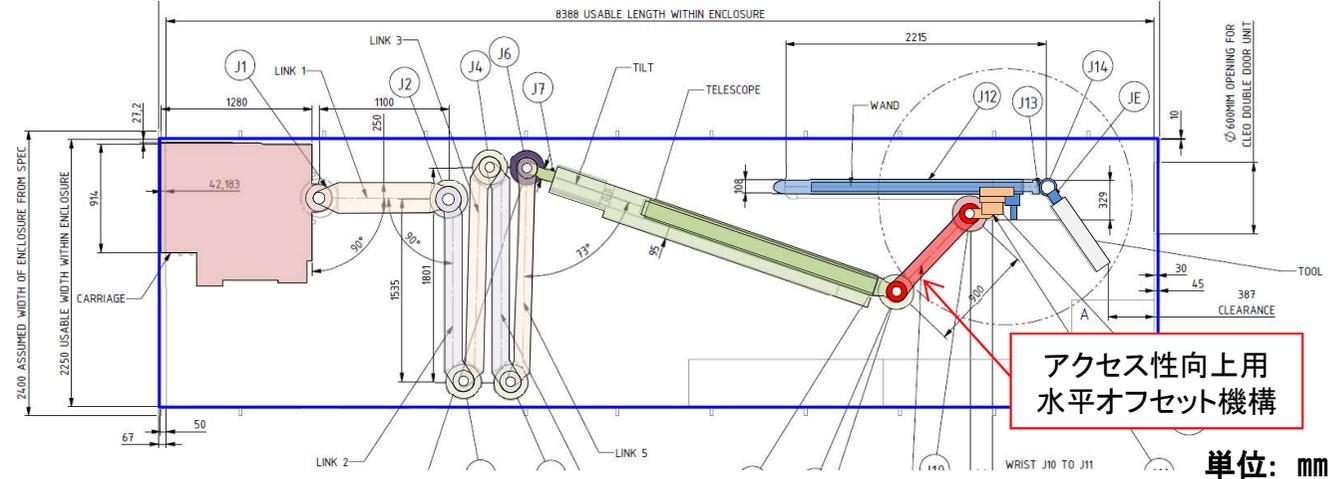
### ■ 実施項目、成果(サンプリング用アーム)

✓ PCV内部調査で判明したプラットホーム状況を踏まえ、PCV底部へのアクセス性向上概念を検討した。



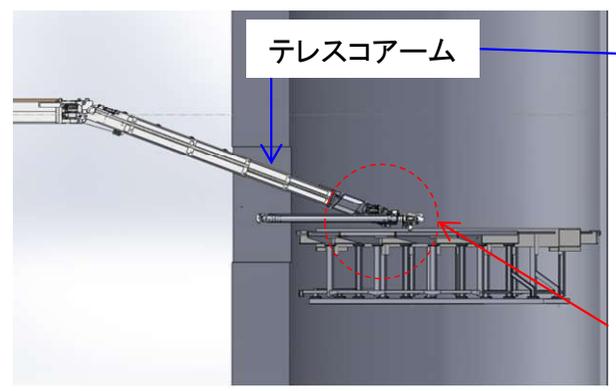
PCV内部調査結果

プラットフォーム上の開口部

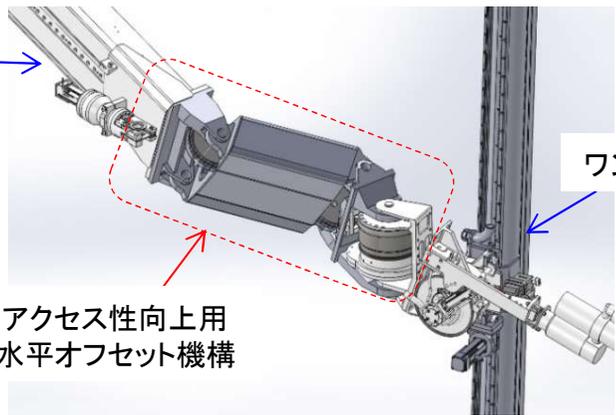


アクセス性向上用  
水平オフセット機構

単位: mm

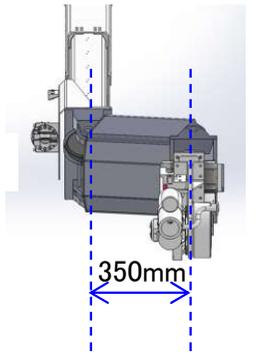


テレスコアーム

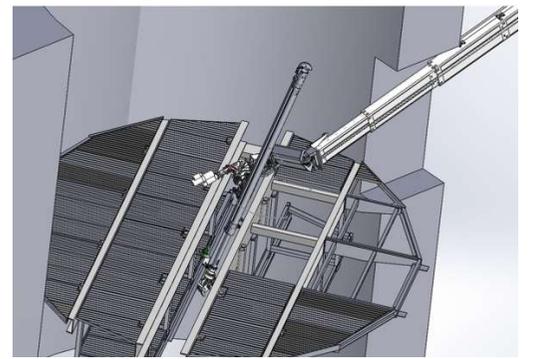


アクセス性向上用  
水平オフセット機構

ワンド



水平オフセット概念



プラットフォーム上の開口部通過イメージ

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

#### ■ 成果(サンプリング用アーム)

- ✓ サンプル回収装置とのインターフェースを考慮した基本仕様を設定した。

	要求仕様	基本仕様	備考
アクセスルート	X-6ペネ	同左	PCV内部詳細調査用アーム設計をベースとする。
搭載ツール	小石・砂状デブリ回収装置 切削粉状デブリ回収装置 円柱状デブリ回収装置 中性子モニタ、レーザスキャナなど	同左	ペイロードは燃料デブリ回収装置重量より20kgとした。
押付け反力	500N以上	同左	円柱状燃料デブリ回収装置からの切削要求による。
耐放射線性	PCV内に進入する部位は1MGy	同左	1年以上の使用を想定(カメラなど交換可能な部品を除く)
防塵・防水	IP65以上	IP65	アーム洗浄を考慮する

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

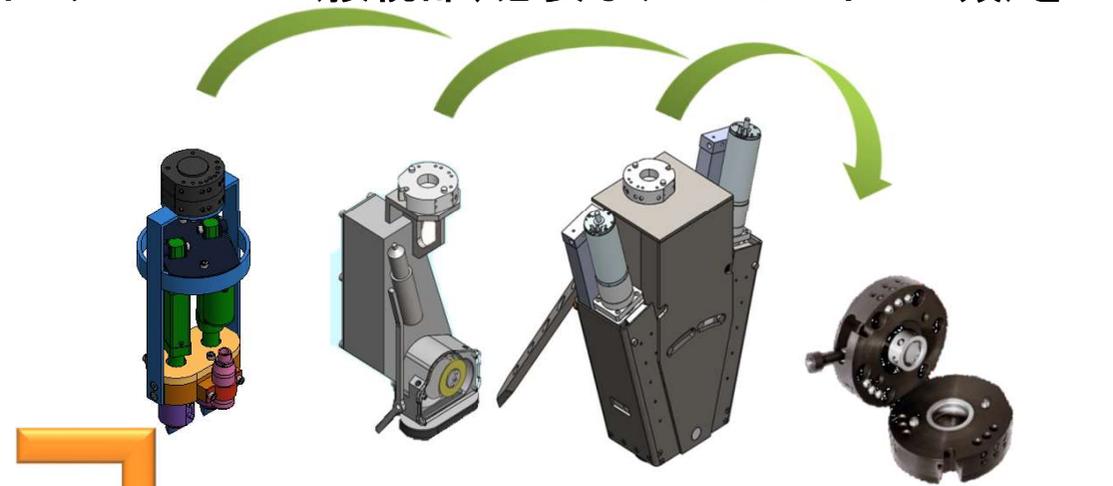
### ■ 成果(サンプリング用アーム)

- ✓ 搭載ツールは以下の構成とし、アームとのインターフェース(接続部、必要なケーブル・ホース類)を設定した。

要求仕様

サンプル回収装置向けケーブル・ホース種類	数量
同軸ケーブル	4本
平行ケーブル(0.25sqを想定)	33芯
Φ6mmホース	1本
Φ4mm × 1kPaホース	6本

燃料デブリマッピングセンサ向けケーブル・ホース種類	数量
同軸ケーブル	4本
平行ケーブル(0.25sqを想定)	39芯
Φ6mmホース	1本
光ファイバ	2本

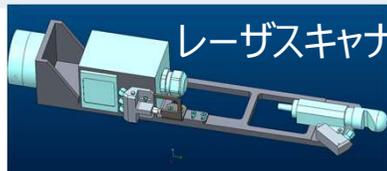


サンプル回収装置(20kg以下)

アームとの接続部はPCV内部詳細調査用アームと同等とした。

#### 基本仕様

ケーブル・ホース種類	数量
同軸ケーブル	4本
平行ケーブル(0.25sqを想定)	39芯
Φ6mmホース	1本
Φ4mm × 1kPaホース	6本
光ファイバ	2本



レーザスキャナ



ガンマカメラ

中性子センサ

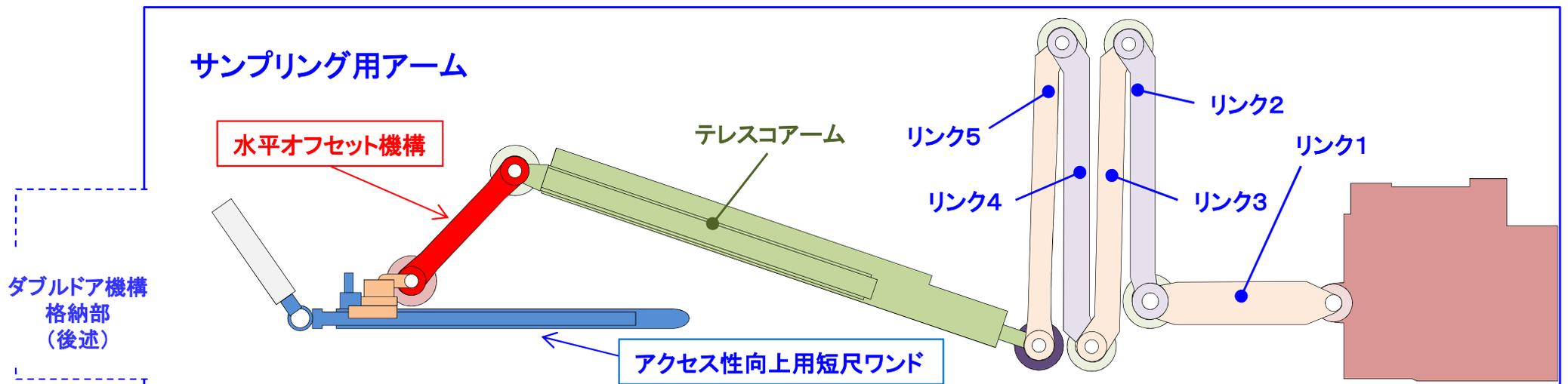
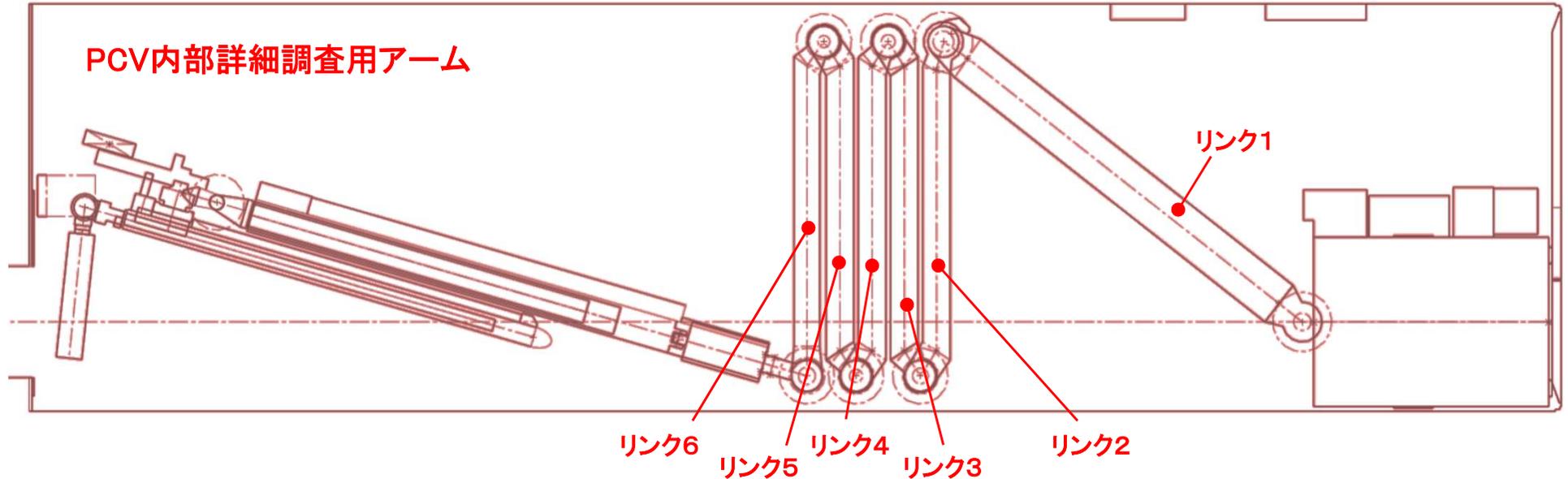


## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

#### ■ 成果(エンクロージャ)

- ✓ リンクの本数を低減し、20kgペイロードを確保したアームとの取合いを設定した。

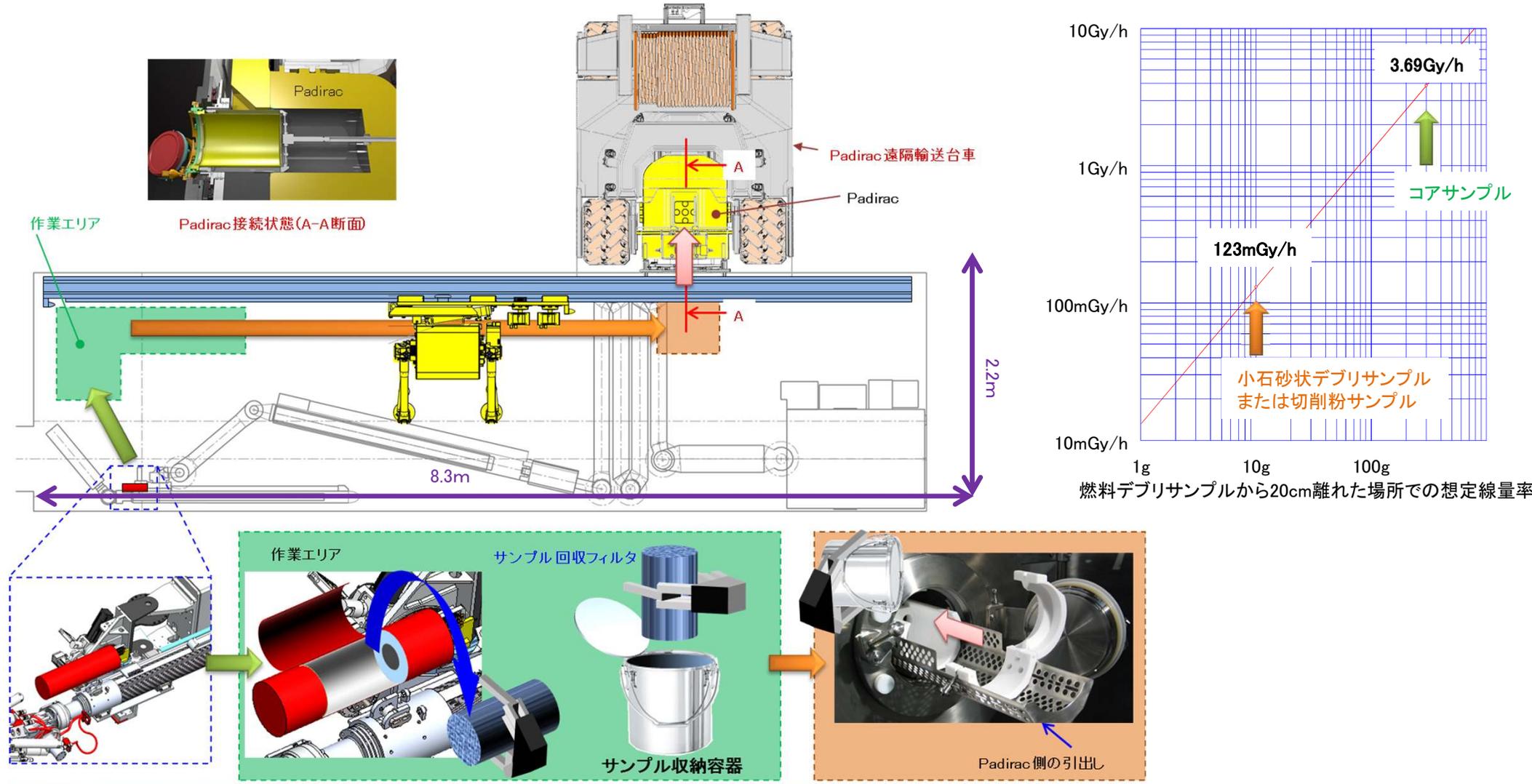


# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

### ■ 成果(エンクロージャ)

- ✓ 燃料デブリサンプルの動線を具体化し、作業エリアから構内輸送容器(遮へい体付運搬容器)までの設備の耐放射線性仕様と放射線防護策を設定した。

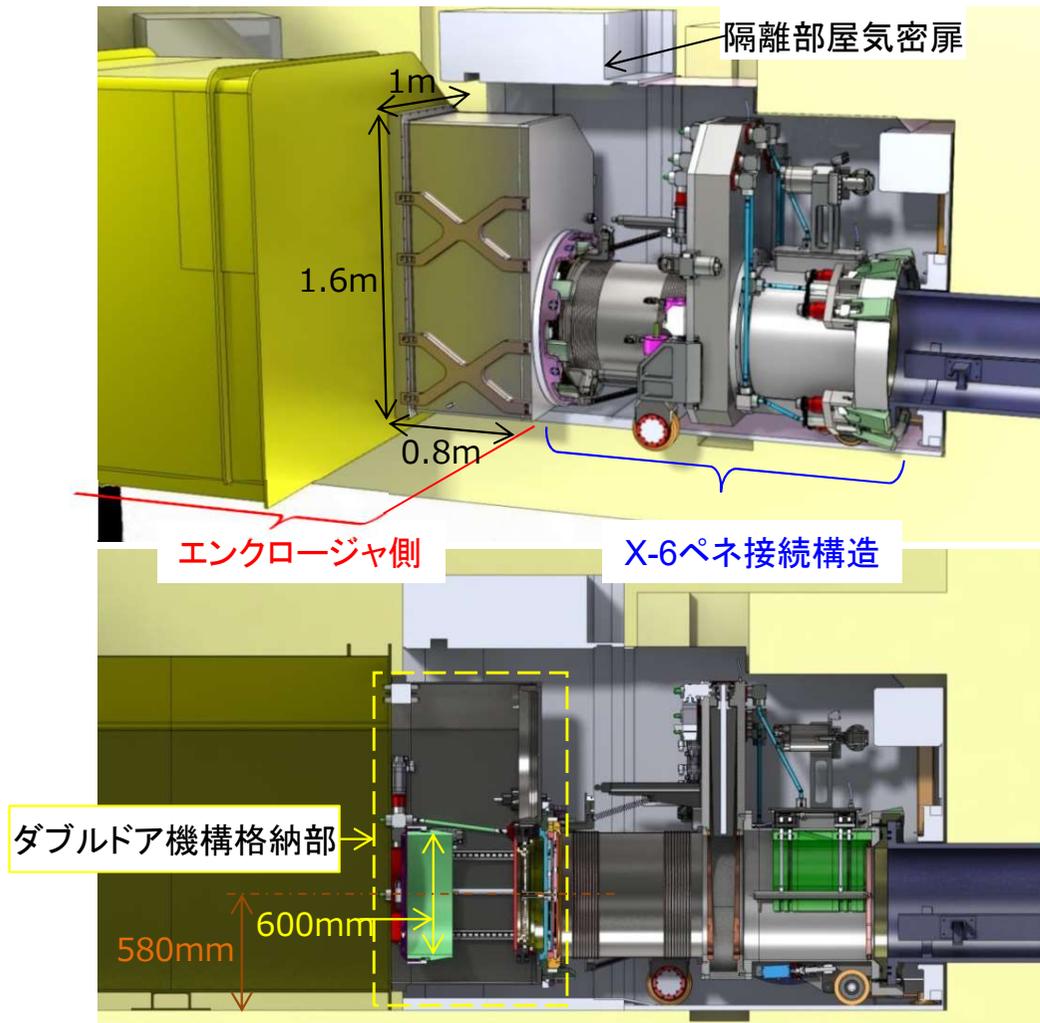


## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

#### ■ 成果(エンクロージャ)

- ✓ X-6ペネ接続構造とのダブルドア機構を具体化し、インターフェース仕様を設定した。



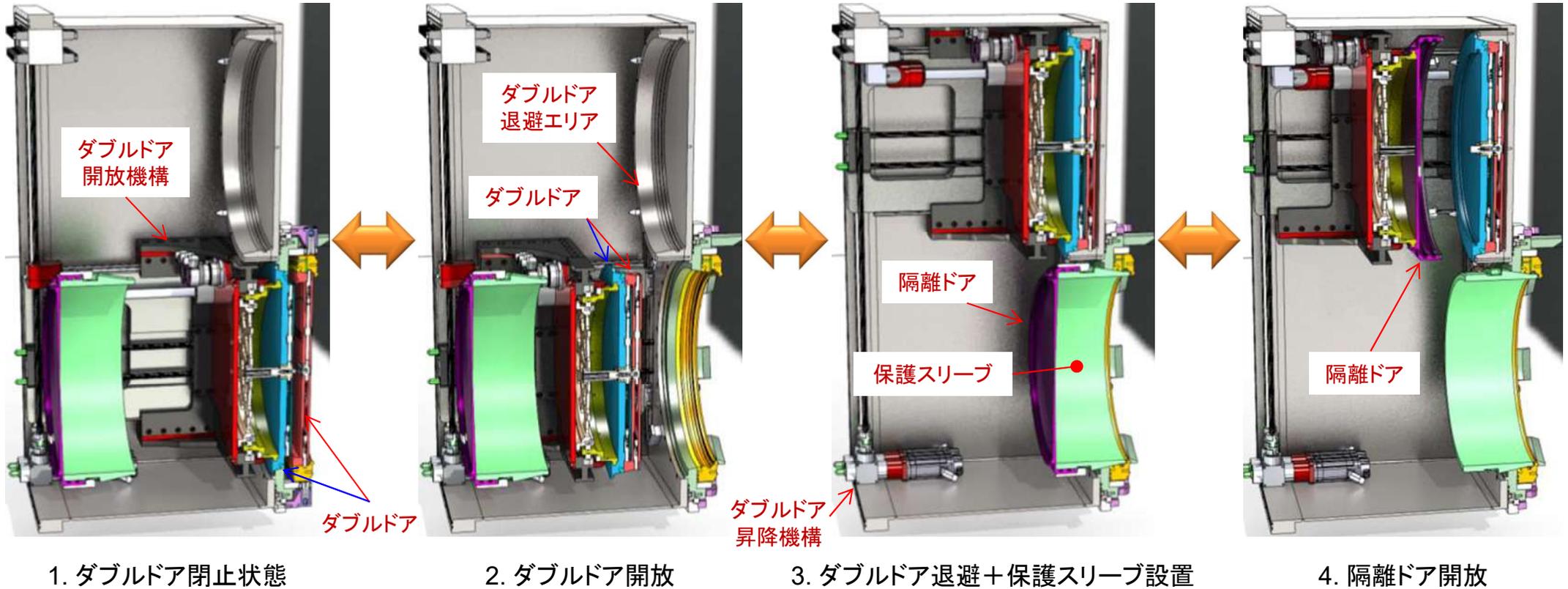
	要求仕様	基本仕様	備考
外形寸法	幅1.2m以下 高さ1.7m以下 長さ1m以下	幅1m 高さ1.6m 長さ0.8m	隔離部屋気密扉内に搬入できること
重量	2トン以下	1.5トン	エンクロージャ搬送台車の制限
開閉回数	30回以上	1000回程度	要素試験による検証が必要
圧力条件	差圧5kPa程度	差圧7kPa	PCV内圧と大気圧の差圧を考慮
駆動系	X-6ペネ側接続×1 ダブルドア把持×1 ダブルドア着脱×1 ダブルドア前後×1 ダブルドア昇降×1 保護スリーブ×1 隔離ドア着脱×1	同左	モータ故障時のレスキュー工具の接続部を確保する。
アーム通過性	床面から580mmの高さに直径600mmの開口を設けること	同左	PCV内部詳細調査用アームと同様
シール面保護	保護スリーブでアーム通過時の汚れ付着を防止すること	同左	
リークチェック性	シール部は2重化し、間を加圧監視できること	同左	PCV正圧での気密性を担保する。
耐放射線性	耐放射線性を有する材質とする	同左	想定環境線量率500mGy/h

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

### ■ 成果(エンクロージャ)

✓ 仏ラ・カレーネ社のダブルドア技術をベースにφ600mmのダブルドア機構を検討した。

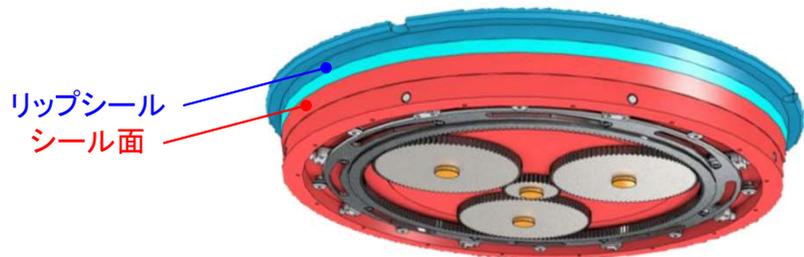


1. ダブルドア閉止状態

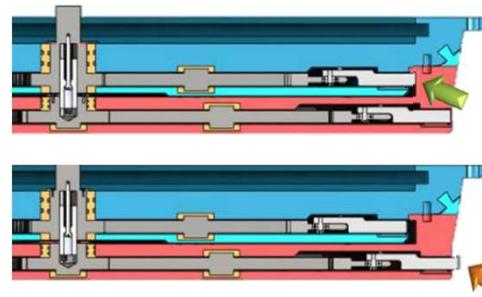
2. ダブルドア開放

3. ダブルドア退避+保護スリーブ設置

4. 隔離ドア開放



ダブルドア構造概念(下面カバーを外した状態)



ダブルドア合体状態  
(青いドアの固定ピンが赤いドアと連結する)

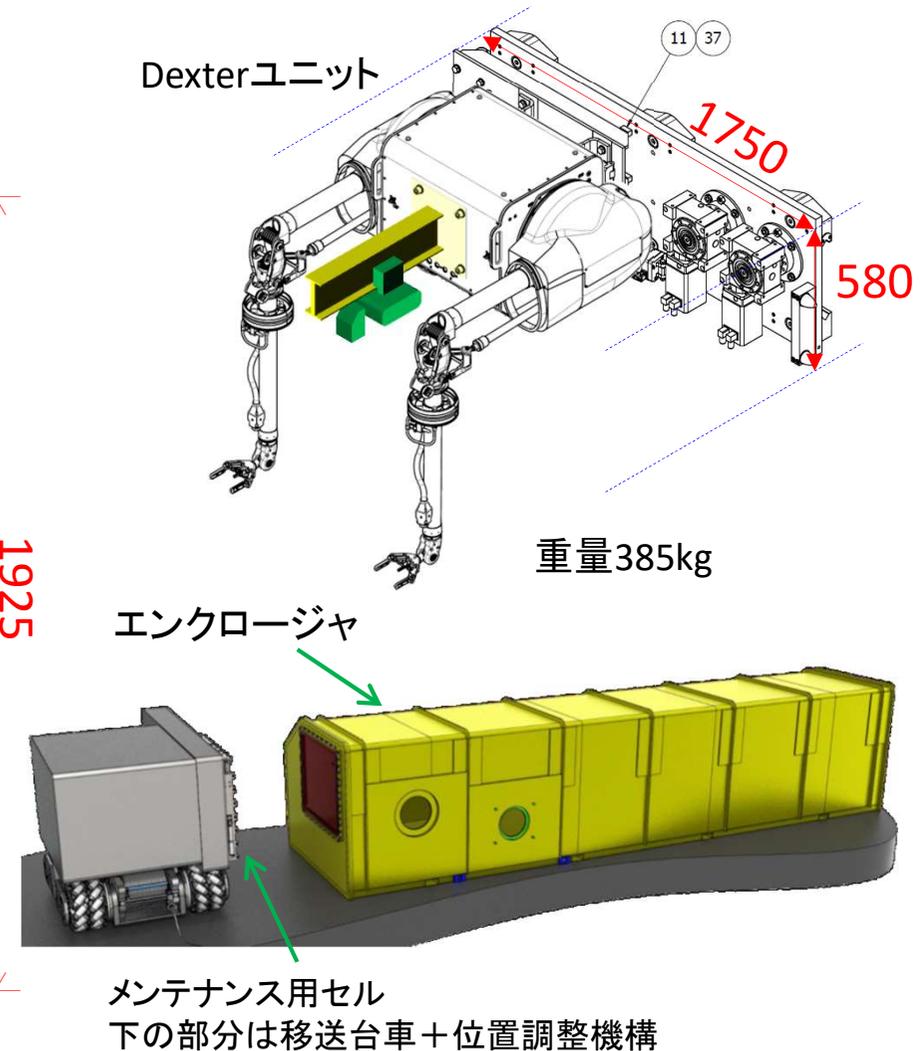
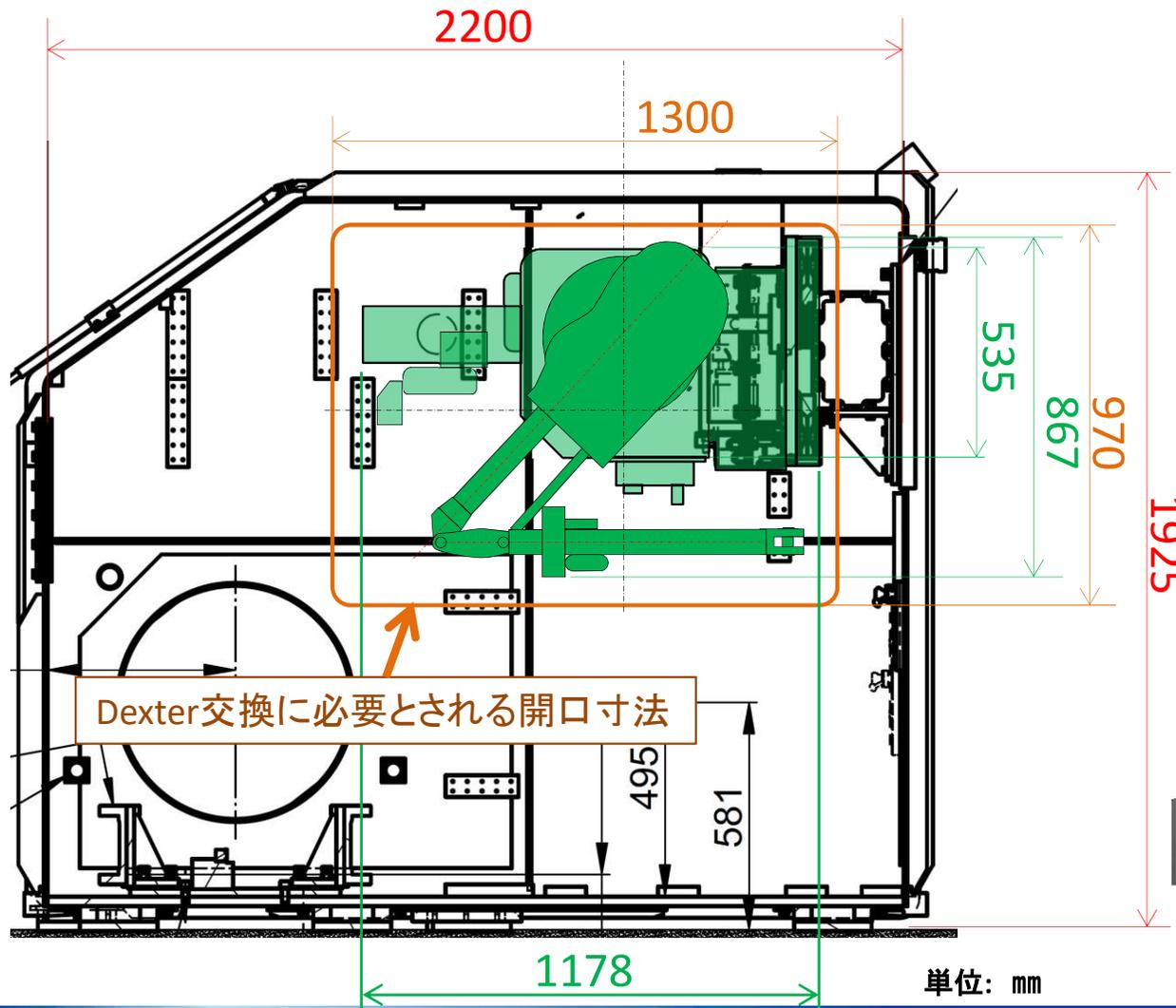
ダブルドア分離状態  
(赤いドアは周方向8つの固定ピンでポート側に固定される)

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

#### ■ 成果(エンクロージャ)

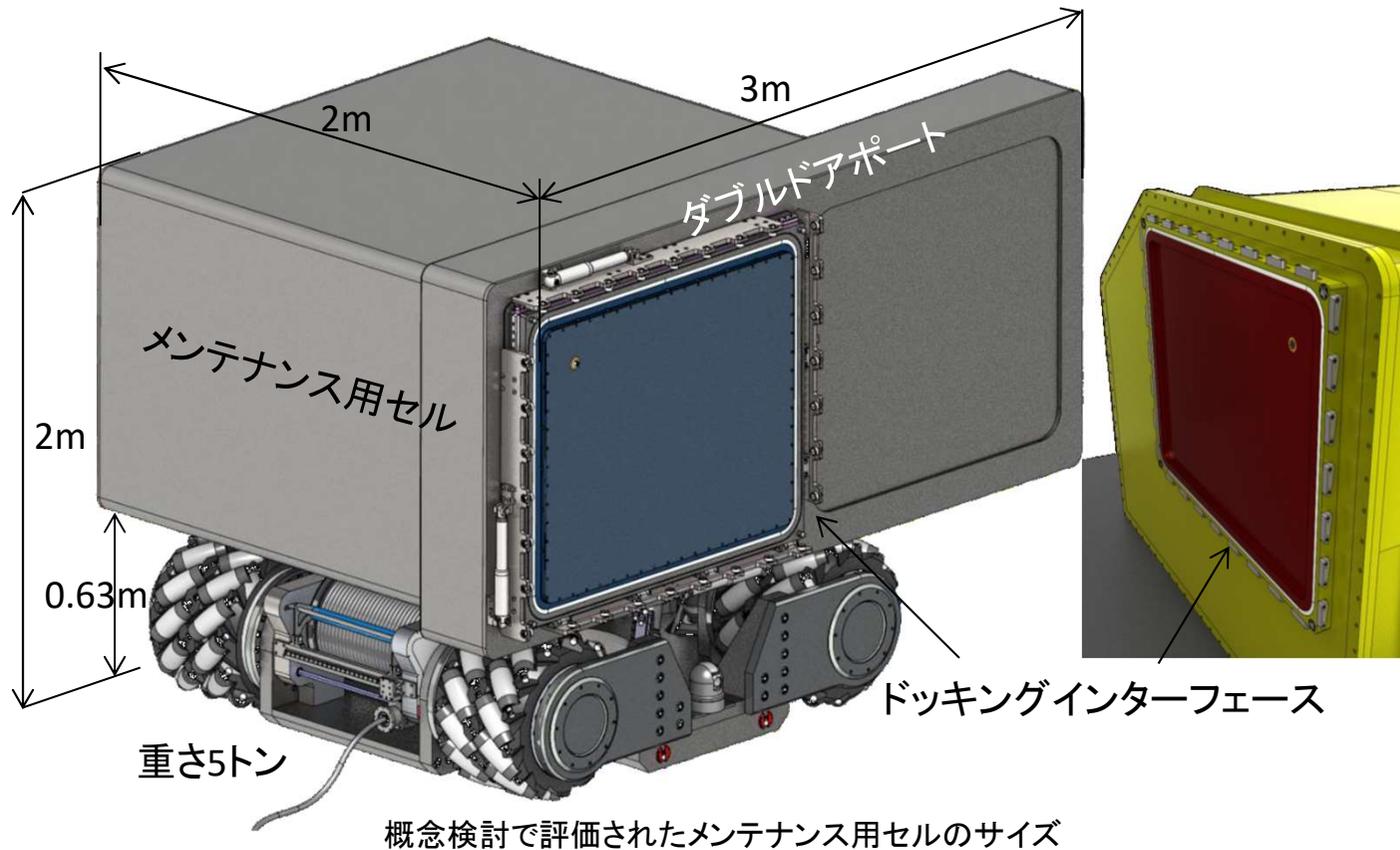
- ✓ エンクロージャ背面からの双腕マニピュレータ(Dexter)の交換を想定した、背面パネルのダブルドアポートの構造概念を検討し、開発課題の抽出を行った。



## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

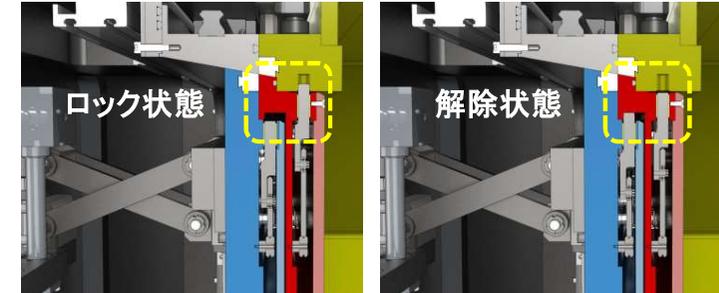
### 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

#### ■ 成果(エンクロージャ)

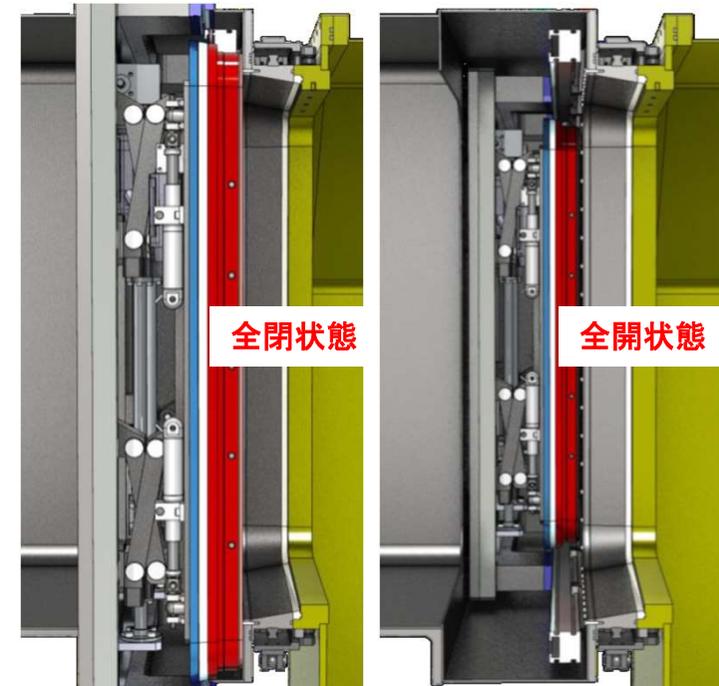


⇒ ダブルドアポート概念を構築した。またDexterを収容可能なメンテナンス用セルの概略仕様を設定した。今後、以下の課題について検討を行う必要がある。

- ✓ 移送台車+位置調整機構(遠隔輸送システムの応用)
- ✓ Dexterの搬出入機構
- ✓ ダブルドア着脱メカニズムなどが故障した時の対応



ダブルドア着脱メカニズム



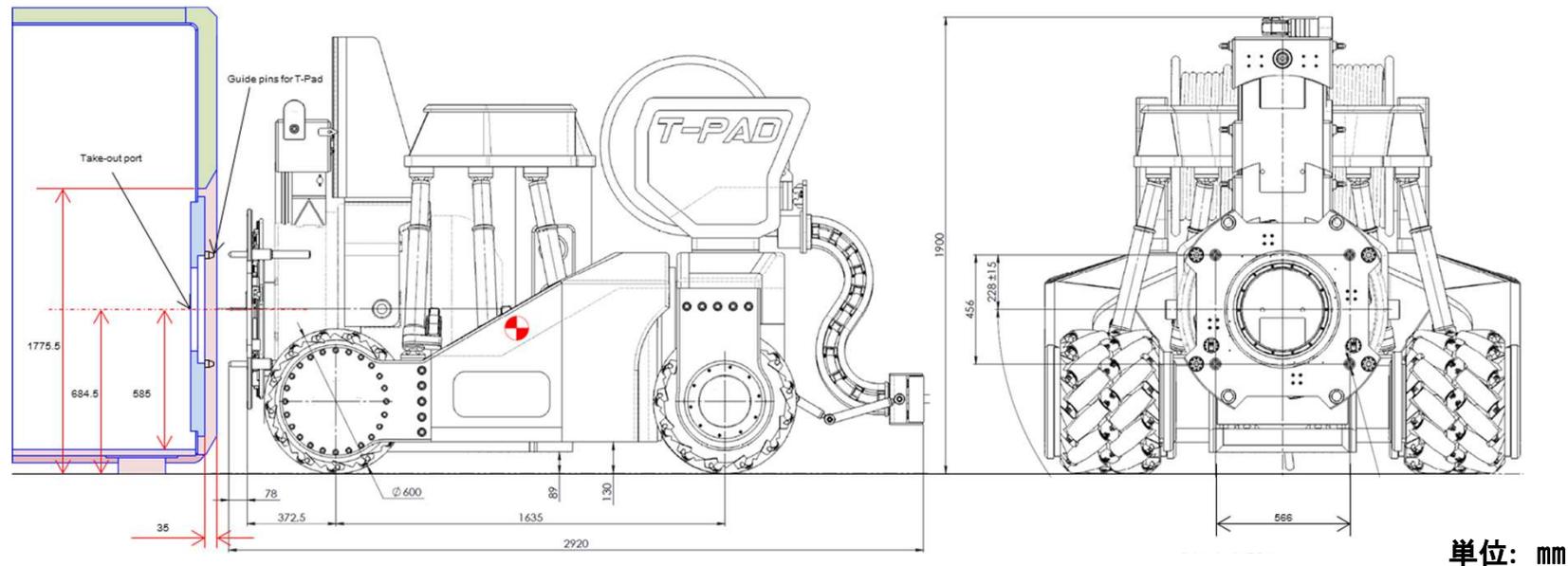
ダブルドア開閉メカニズム

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

#### ■ 成果(エンクロージャ)

- ✓ エンクロージャと遮へい体付運搬容器の遠隔輸送システム(T-PAD)とのインターフェース仕様を設定した。



#### ■ 成果の反映先への寄与

- ✓ サンプリングの安全な実施だけでなく、小規模取り出しシステムへの適用も期待される。

#### ■ 現場への適用性の観点における分析

- ✓ アーム故障時の非常回収方法の検証をモックアップ試験で行う必要がある。
- ✓ また双腕マニピュレータの交換作業の検証についてもモックアップ試験で行う必要がある。

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討

#### ■ 課題

- ✓ 小規模燃料デブリ取り出しへの活用を想定したダブルドア部の耐用年数の向上
- ✓ PCV内部詳細調査用アームの開発状況を考慮した製作期間の評価
- ✓ グレーチングの破損状況を反映した3Dモデルによるサンプリング姿勢の検討
- ✓ エンクロージャ内の火災対応(リスク、検知方法、対策)検討
- ✓ エンクロージャ内作業の柔軟性を確保できるようスペース・コネクタ等の予備や裕度の確保
- ✓ ワンド下降動作の監視方法(PCV内部詳細調査の対応を設計へ反映)
- ✓ Dexter交換用ダブルドアの成立性検討
- ✓ 重要な問題点及び高リスク事象の分析推進による検証漏れ防止
- ✓ 遠隔操作オペレータの育成

#### ■ 目標に照らした達成度

- ✓ 基本仕様を設定し、所期の目標を達成した。

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ①小石・砂状デブリ回収装置の設計

#### ■ 目的、目標

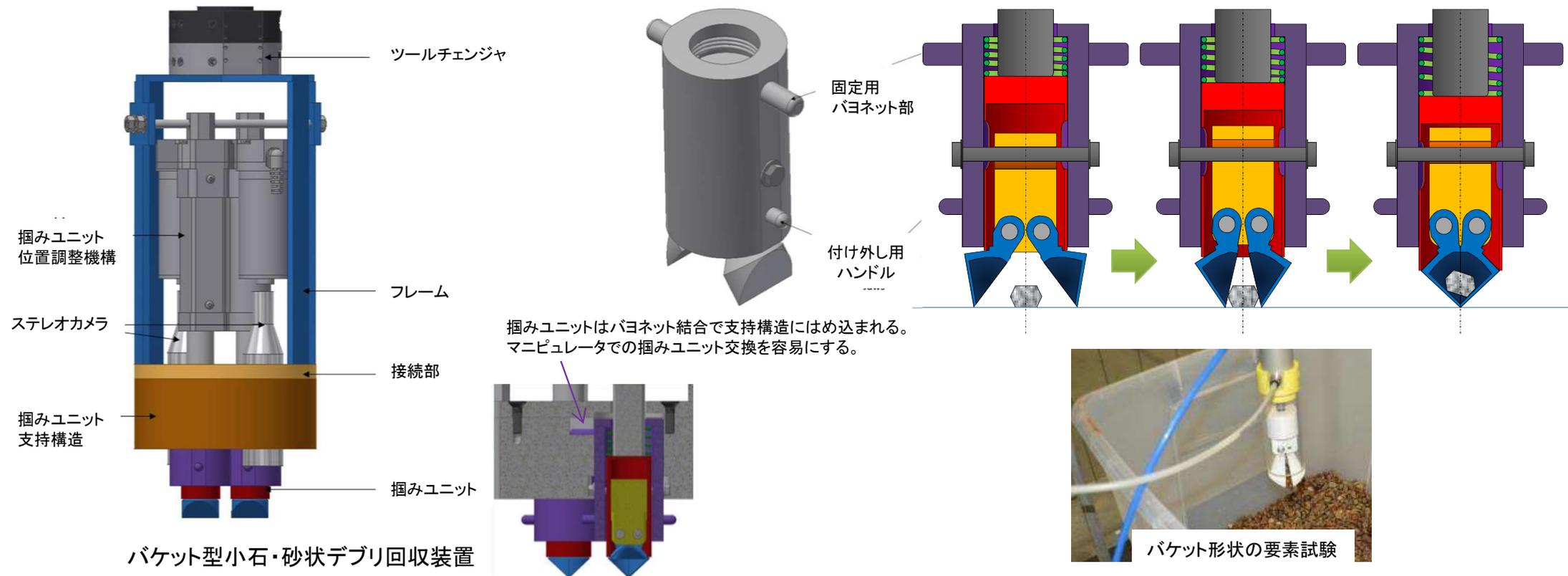
PCV底部に確認された小石・砂状デブリの回収に適した装置概念を検討し、要素試験等により試作機仕様を設定する。

#### ■ 実施項目、成果(バケット型)

- ✓ 1cm角程度の小石状の燃料デブリを回収可能な掴みユニットによる装置概念を検討した
- ✓ 廃棄物量を抑えるため、掴みユニットのみを取り外せ、サンプル容器にもなる設計とした

掴みユニット

掴みユニット動作



## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

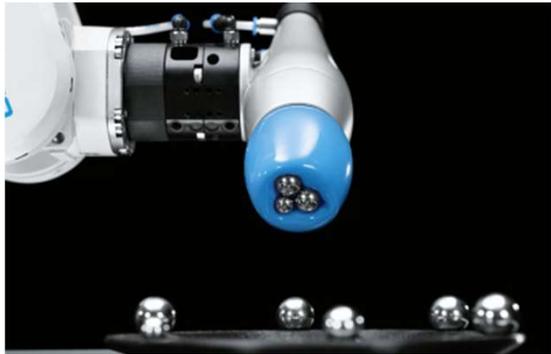
### 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ①小石・砂状デブリ回収装置の設計

#### ■ 成果(バケット型)

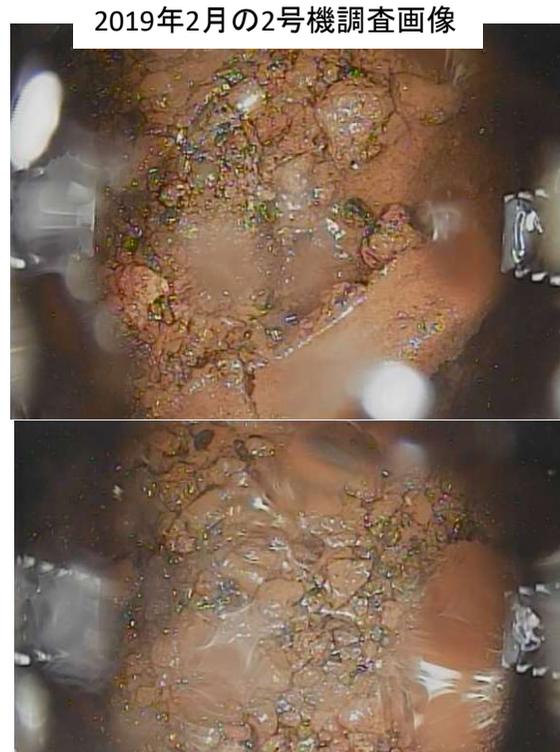
- ✓ 1cm角程度の小石状の燃料デブリを回収可能な掴みユニット方式の装置概念を検討し、基本仕様を設定した。

#### ■ 成果(フレキシブルグリッパ型)

- ✓ バケット型よりも掴み位置精度の要求が緩和されるフレキシブルグリッパ型の装置仕様を検討した。



市販のフレキシブルグリッパの例



2019年2月の2号機調査画像

小石状の燃料デブリが多数観察されている

バケット型小石・砂状デブリ回収装置の基本仕様

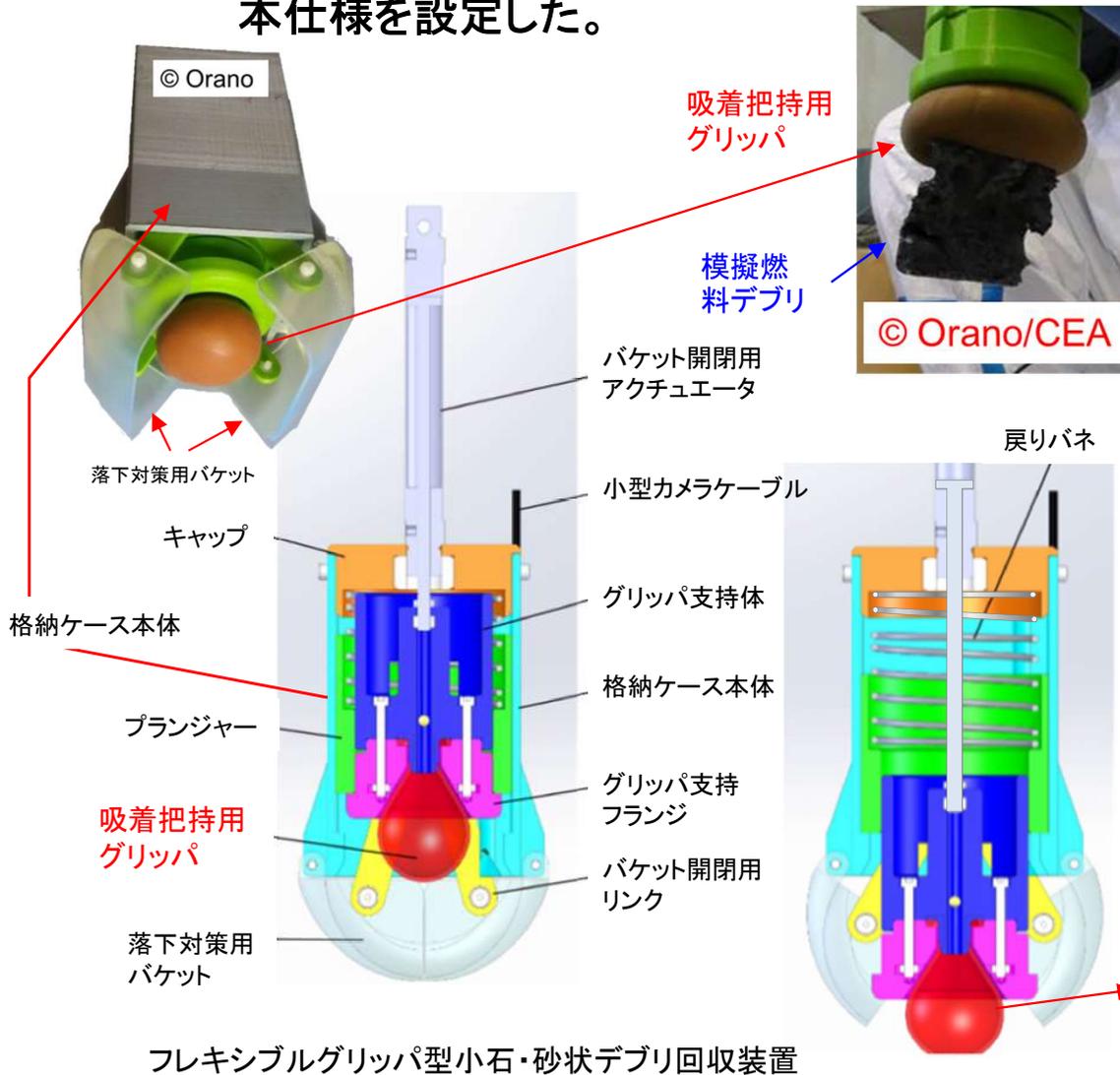
	要求仕様	基本仕様	備考
最大寸法	長さ390mm 直径140mm or 幅150mm × 高さ160mm	長さ357mm 直径140mm	遮へい体付運搬 容器にて搬出入 できること
重量	20kg未満	11kg	アームペイロード で持ち運べること
対象 燃料デブリ	1cm角程度 質量10g	同左	採取ニーズより
搬出形態	半密封である こと	掴みユニット で半密封	エンクロージャの 汚損抑制
監視系	カメラを備える こと	ステレオカメラ	ターゲット位置合 わせのため
駆動系	なるべく電気 を用いること	電動アクチュ エータ×2	
再利用性	再利用可能な こと	掴みユニット 以外再利用	

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ①小石・砂状デブリ回収装置の設計

### ■ 成果(フレキシブルグリッパ型)

- ✓ 1cm角程度の小石状の燃料デブリを回収可能なフレキシブルグリッパ型の装置概念を検討し、基本仕様を設定した。



フレキシブルグリッパ型小石・砂状デブリ回収装置の基本仕様

	要求仕様	基本仕様	備考
最大寸法	長さ390mm 直径140mm or 幅150mm × 高さ160mm	長さ250mm 直径120mm	遮へい体付運搬容器にて搬入できること
重量	20kg未満	10kg以下	アームペイロードで持ち運べること
対象燃料デブリ	1cm角程度 質量10g	同左	採取ニーズより
搬出形態	半密封であること	格納ケースで半密封	エンクロージャの汚損抑制
監視系	カメラを備えること	小型カメラ	ターゲット位置合わせのため
駆動系	なるべく電気を用いること	アクチュエータ×1 吸引ポンプ×1	吸引ポンプはワンド付け根に設置する
再利用性	再利用可能なこと	格納ケース以下は交換品	交換品は安価な部品のみとする



試作した吸着把持用グリッパ  
左から「イボ付きシリコン」「ラテックス」「シリコン」

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ①小石・砂状デブリ回収装置の設計

- 成果の反映先への寄与
  - ✓ 切削を伴わず、ダスト飛散リスクの少ない燃料デブリサンプリングが期待される。
- 現場への適用性の観点における分析・課題
  - ✓ アームとの組合せによるサンプリング作業性への影響評価が必要
  - ✓ 双腕マニピュレータによる掴みユニット等の部品交換作業のトレーニングが必要
- 目標に照らした達成度
  - ✓ 基本仕様を設定し、所期の目標を達成した。

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

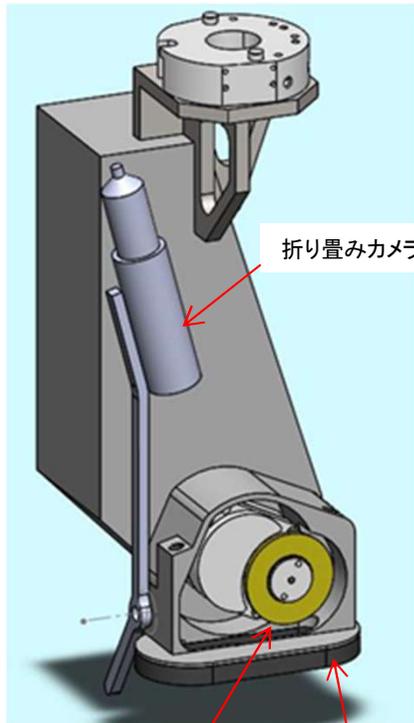
## 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ②粉状デブリ切削・回収装置の設計

### ■ 目的、目標

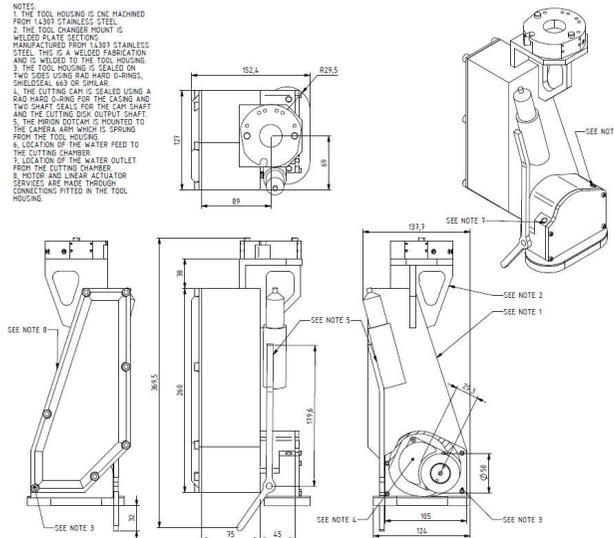
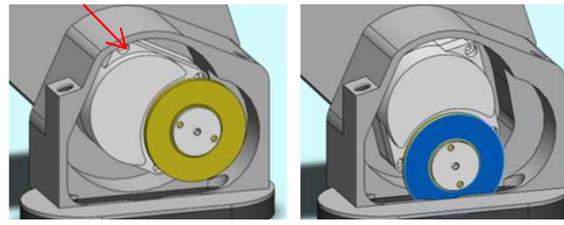
PCV底部やグレーチングに付着した燃料デブリを切削して粉状燃料デブリを回収する装置概念を検討し、要素試験等により試作機仕様を設定する。

### ■ 実施項目、成果

✓ ディスクカッターによる装置の基本仕様を設定した。



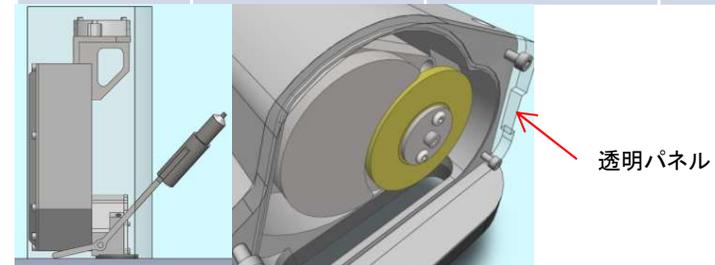
切削刃押し付けカム機構



切削刃 (ディスクカッター)  
密着シール部

粉状デブリ切削・回収装置の構造

	要求仕様	基本仕様	備考
最大寸法	長さ390mm 直径140mm or 幅150mm × 高さ160mm	長さ370mm 幅127mm 高さ152mm	遮へい体付運搬容器にて搬出入できること
重量	20kg未満	8.7kg	アームペイロードで持ち運べること
対象燃料デブリ	燃料デブリから10g以下の切削粉	同左	採取ニーズより
搬出形態	半密封であること	フィルタで半密封	エンクロージャの汚損抑制
監視系	カメラを備えること	折り畳みカメラ	切削状態監視のため
駆動系	なるべく電気を用いること	DCモータ×1 アクチュエータ×1 水ポンプ×1	水ポンプはワンド付け根に設置する
再利用性	再利用可能なこと	フィルタ、切削刃は交換品	切削刃交換は次頁参照



カメラ展開状態

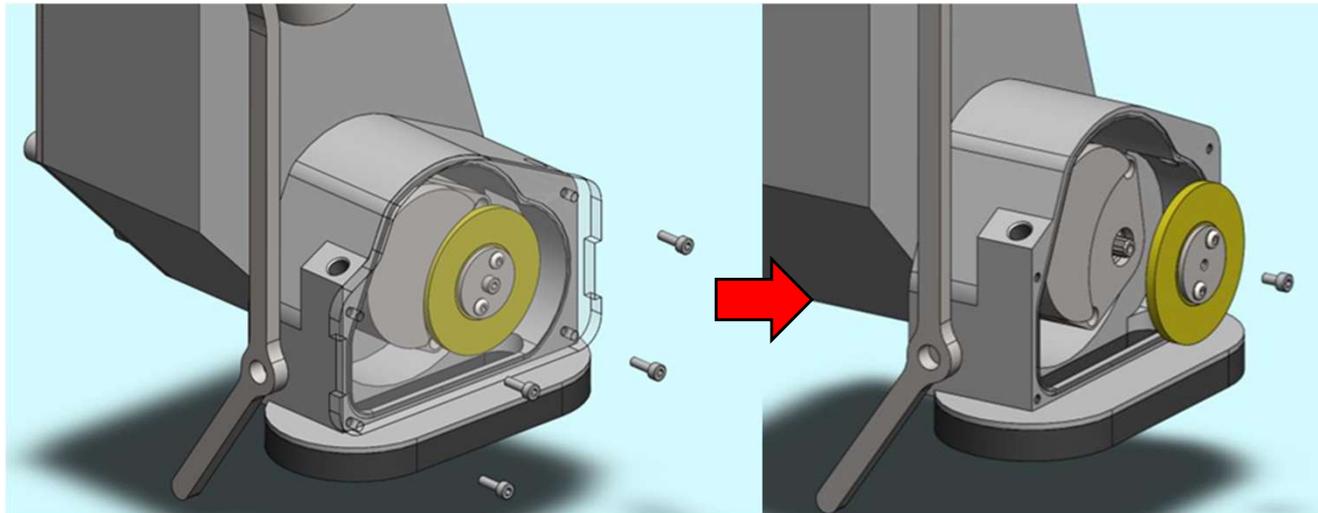
カメラ視野 (VRシミュレーション)

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

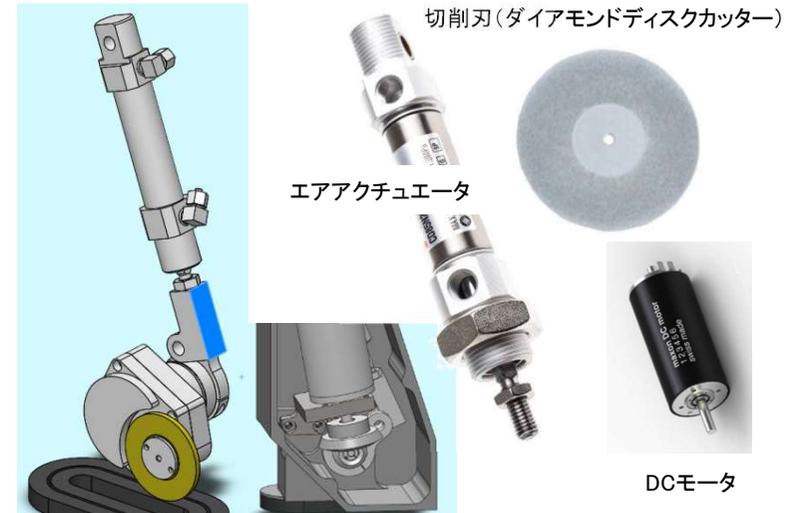
### 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ②粉状デブリ切削・回収装置の設計

#### ■ 成果

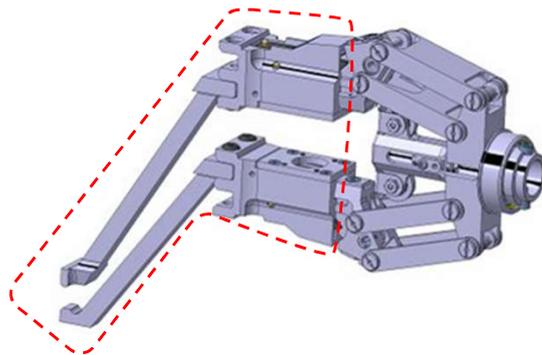
- ✓ マニピュレータに専用の微細作業用フィンガを取り付けることで、ディスク刃を回収装置本体から取り外せる構造とし、装置の再利用性を高め、廃棄物量低減を図った。



ディスク刃交換手順



切削メカニズム



微細作業用フィンガを取り付けたDexterマニピュレータのハンド



核融合実験装置JETでの適用例

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ②粉状デブリ切削・回収装置の設計

### ■ 成果

- ✓ 要素試験の結果を元にディスクカッター駆動部、密着シール部、フィルタ部の仕様を設定した。

切削刃押し付け機構

切削ユニット

切削刃回転機構

要素試験状況

アルミナ切削粉

SUS切削粉

アルミナ切削粉

SUS切削粉

フィルタユニット

コアビット (200N程度の押し付け力が必要)

ディスク刃 (10N程度の押し付け力が必要)

切削部外観 (上半分がSUS、下半分がアルミナ)

切削部外観 (アルミナ)

密着シール試験状況

密着シール試験体系

圧力計測

押し付け力

カメラ観察

Pressure Regulator

Pressure gauge

Valve 1

Valve 2

Valve 3

Vacuum pump

Water Funnel

Water overflow

Sealing Cup

Water

Rough and uneven surface

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ②粉状デブリ切削・回収装置の設計

#### ■ 成果の反映先への寄与

- ✓ 密着シールおよび流水による切削粉のフィルタ回収により、ダストの飛散を防止し、気中に露出したグレーチング上の燃料デブリサンプリングへの早期適用が期待される。

#### ■ 現場への適用性の観点における分析・課題

- ✓ アームとの組合せによるサンプリング作業性への影響評価が必要
- ✓ 双腕マニピュレータによる切削刃等の部品交換作業のトレーニングが必要
- ✓ サンプリング時の火災リスク評価が必要
- ✓ グレーチングの破損状況を反映した3Dモデルによるサンプリング姿勢の検討
- ✓ 重要な問題点及び高リスク事象の分析推進による検証漏れ防止が必要

#### ■ 目標に照らした達成度

- ✓ 基本仕様を設定し、所期の目標を達成した。

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ③円柱状デブリ切削・回収装置の設計

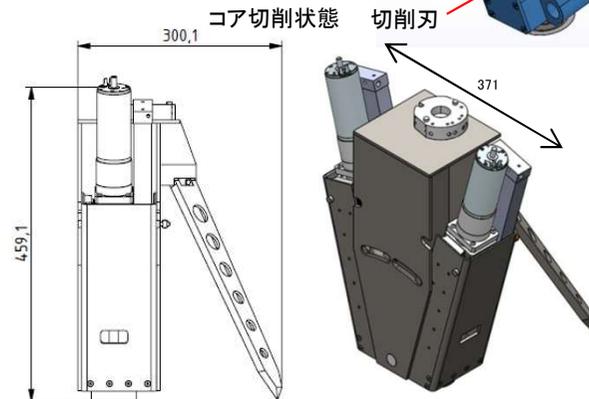
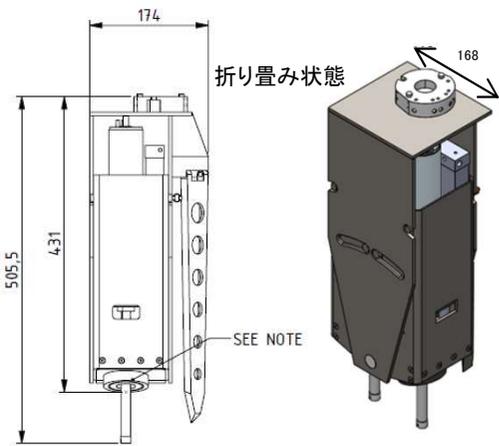
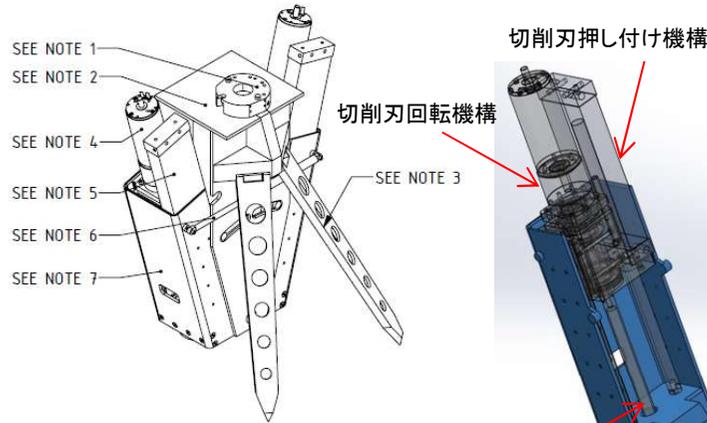
### ■ 目的、目標

PCV底部の燃料デブリを切削して円柱状燃料デブリを回収する装置概念を検討し、要素試験等により試作機仕様を設定する。

### ■ 実施項目、成果

✓ 2つのドリルをV字配置する装置の基本仕様を設定した。

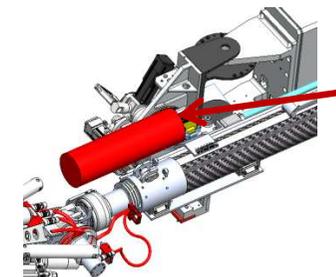
- NOTES:  
 1. ZIMMER TOOL CHANGER  
 2. DRILL BODY - MACHINED STAINLESS STEEL PLATE  
 3. STABILISING LEGS - MACHINED STAINLESS STEEL  
 4. DRILL MOTOR - MAXON RE50 dc  
 5. DRILL LINEAR ACTUATOR - SMC MUB32  
 6. OPENING ACTUATOR  
 7. DRILL SUPPORT STRUCTURE - STAINLESS STEEL  
 8. EPDM FOAM SEAL



円柱状燃料デブリ切削・回収装置の構造概念

単位: mm

	要求仕様	基本仕様	備考
最大寸法	長さ500mm 直径140mm or 幅150mm × 高さ160mm	長さ431mm 幅168mm 高さ174mm	基本仕様の幅、高さでも、X-6ペネ通過可能であるので、許容する。
重量	20kg未満	20kg未満	アームペイロードで持ち運べること
対象燃料デブリ	燃料デブリから φ10 ×100mmコア	同左	採取ニーズより
搬出形態	半密封であること	コアビット内に半密封	エンクロージャの汚損抑制
監視系	カメラを備えること	カメラなし	ワンド付け根のカメラで監視
駆動系	なるべく電気を用いること	DCモータ×2 電動アクチュエータ×2 水ポンプ×1	水ポンプはワンド付け根に設置する
再利用性	再利用可能なこと	フィルタ、切削刃は交換品	切削刃交換は前頁参照



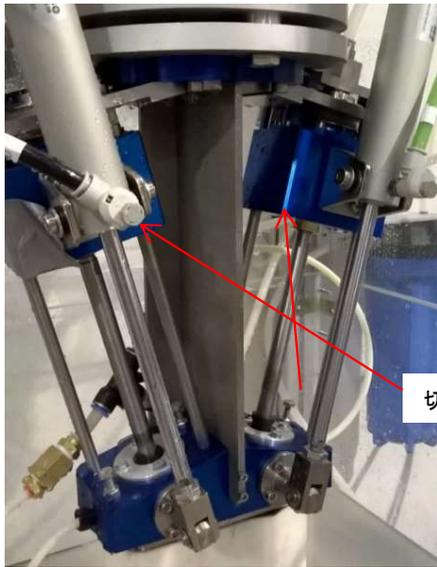
切削粉回収フィルタはワンドの先に配置することで工具サイズの制約を回避する。

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

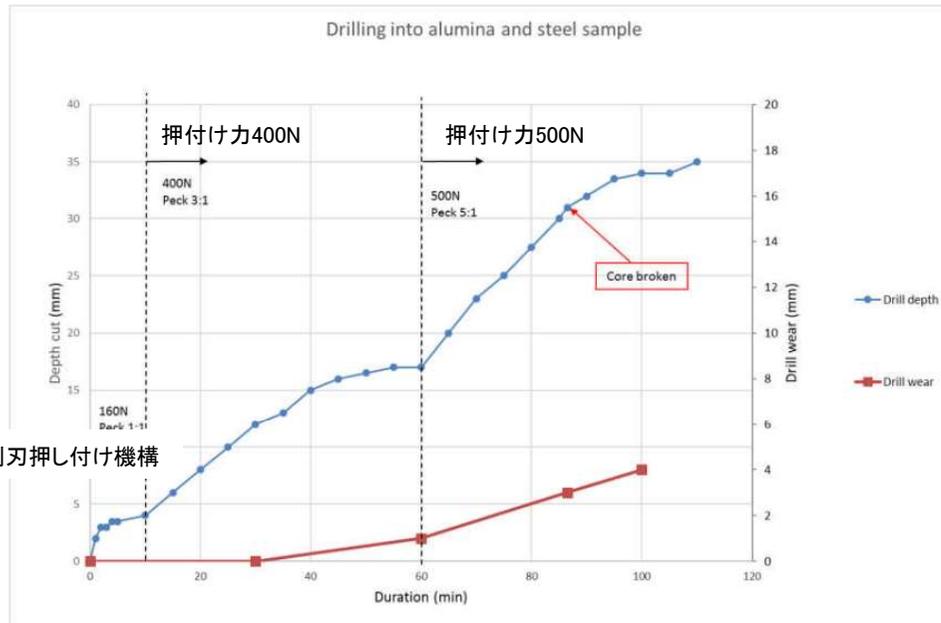
## 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ③円柱状デブリ切削・回収装置の設計

### ■ 実施項目、成果

- ✓ 要素試験の結果を元に駆動部、密着シール部、フィルタ部の仕様を設定した。
- ✓ またサンプリングアームの押付け力の要求(500N)を設定した。



切削刃押し付け機構



コアボーリング時の押付け力と切削深さの変化



V字コアボーリングで得られた2本のアルミナの例

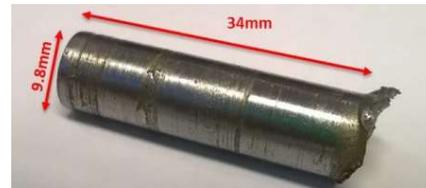


焼結ダイヤモンドコアビット

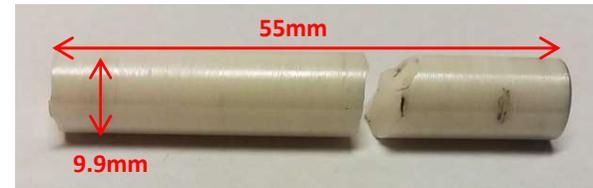
要素試験状況(2つのコアボーリング機構をV字に配置)



試験用アルミナ板の例



コアボーリングされたSUSの例



コアボーリングされたアルミナの例(途中でコア折れが発生)

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ③円柱状デブリ切削・回収装置の設計

#### ■ 成果の反映先への寄与

- ✓ 切削粉の飛散を抑制し、PCV底部でのコアサンプリングが期待される。

#### ■ 現場への適用性の観点における分析・課題

- ✓ アームとの組合せによるサンプリング作業性への影響評価が必要
- ✓ 双腕マニピュレータによるコアビット等の部品交換作業のトレーニングが必要
- ✓ サンプリング時の火災リスク評価が必要
- ✓ 重要な問題点及び高リスク事象の分析推進による検証漏れ防止が必要
- ✓ 試作段階での切削粉回収フィルタの検証が必要

#### ■ 目標に照らした達成度

- ✓ 基本仕様を設定し、所期の目標を達成した。

# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

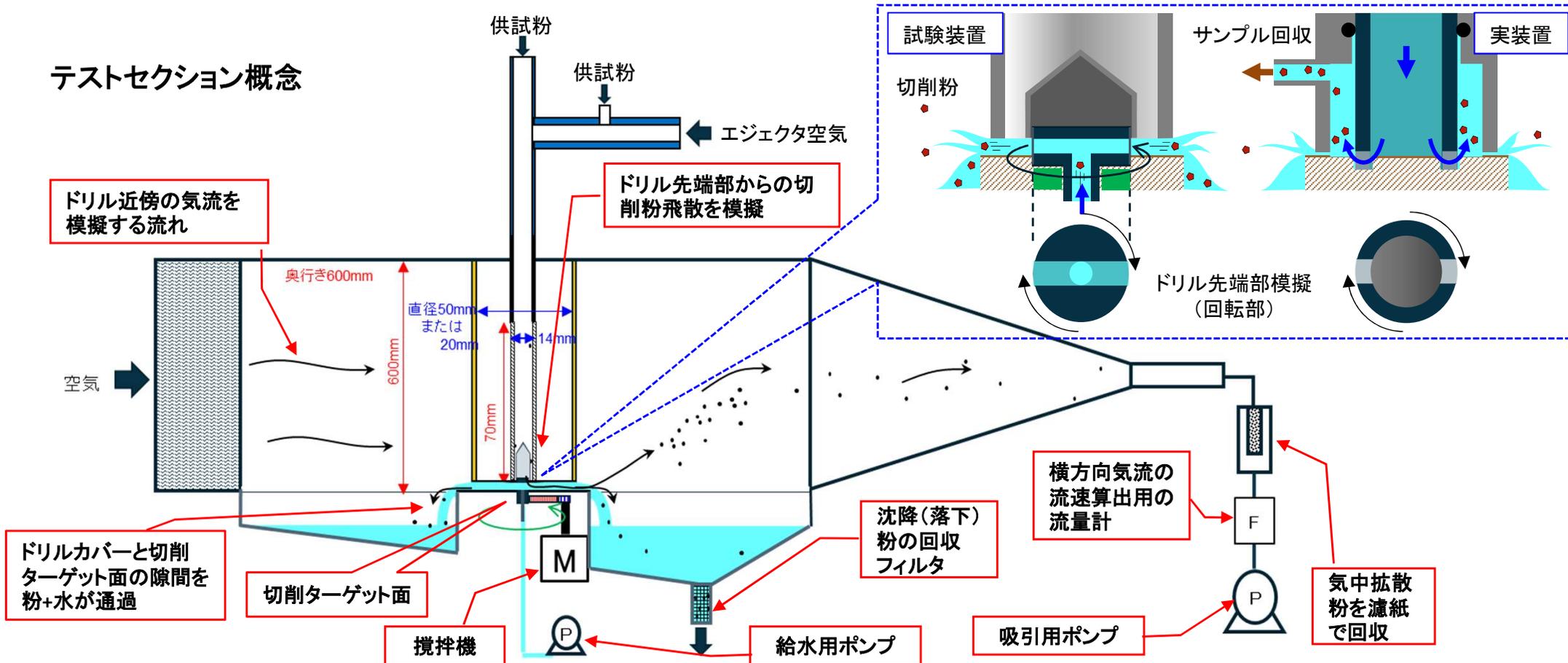
## 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ④降水中での切削粉飛散率のデータ収集

### ■ 目的、目標

降水中あるいは冷却水を切削刃周囲に注水した条件での切削粉飛散率を測定し、PCV正圧条件での被ばく安全評価に適用する。

### ■ 実施項目、成果

✓ 類似研究での試験方法を参考に、サンプル回収装置の特徴を考慮した試験計画を策定。

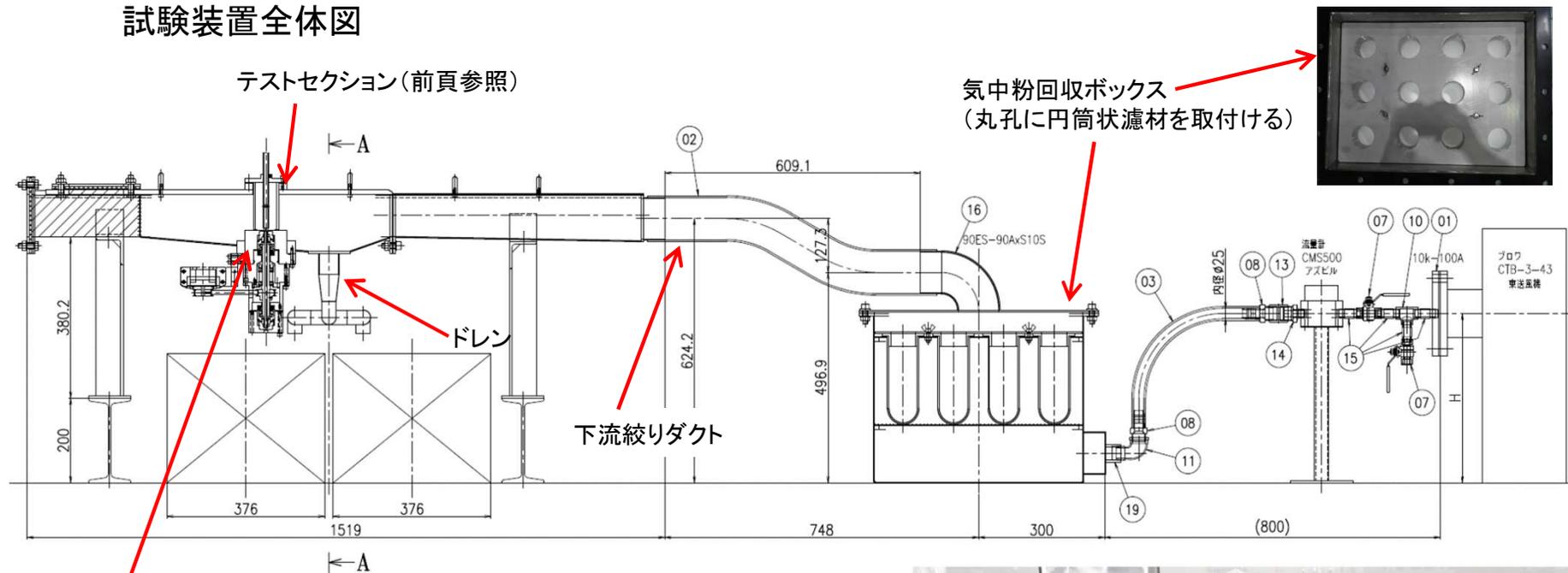


# 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

## 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ④降水中での切削粉飛散率のデータ収集

### ■ 成果

試験装置全体図



単位: mm

被切削部取付孔



完全ドライ条件の試験状況



表面ウェット条件の試験状況



試験装置全景



試験装置全景

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ④降水中での切削粉飛散率のデータ収集

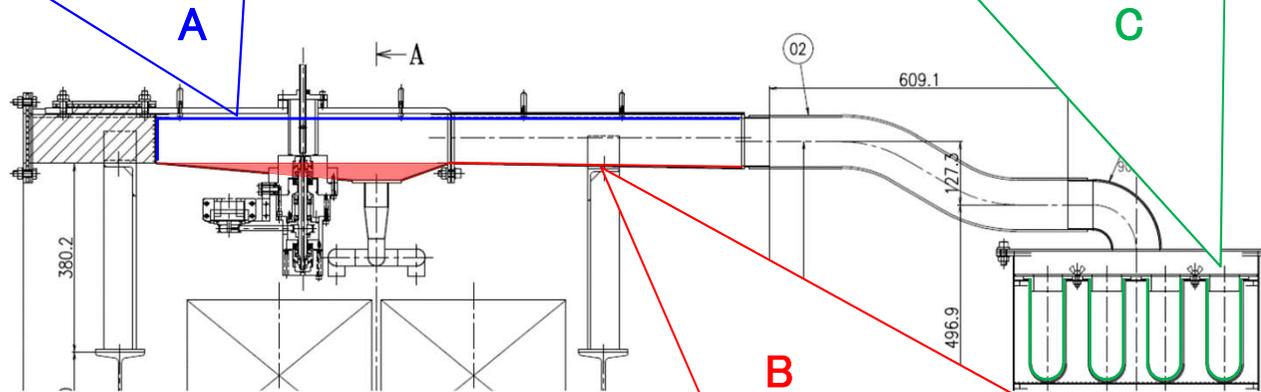
#### ■ 成果

- ✓ 飛散率データを取得した。流水条件では粉体量によるが飛散率は1%を下回っており、有意な低減効果が確認された。

	完全ドライ条件 (10分間)	表面ウェット条件 (10分間)	流水条件	
			(10～20分間)	(40～60分間)
テストセクション上部A	0.001g以下	0.001g以下	0.001g以下	
テストセクション底部B	14.53g	8.38～17.64g	30.95～32.46g	127.43～195.51g
フィルター一部C	0.20g	0.13～0.18g	0.23g	0.07～0.35g
飛散率:(A+C)/(A+B+C)	1.35%	0.74～2.01%	0.71～0.75%	0.04～0.22%

テストセクション上部には有意な粉末の飛散・付着は確認されなかった

捕捉された飛散粉末の質量は12個のフィルタの質量増加分を0.1mg単位で計測した



$$\text{飛散率} = \frac{A+C}{A+B+C}$$

模擬切削粉のほとんどはテストセクション底部に留まる、あるいは水中に捕捉された。  
捕捉された粉末質量は刷毛、タオルワイプを用いて完全に拭き取り、乾燥後に質量増加分を0.1mg単位で計測した。

## 4.2 PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

### 4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計・試作 ④降水中での切削粉飛散率のデータ収集

#### ■ 成果の反映先への寄与

- ✓ 切削装置構造や切削条件に応じて切削粉飛散率を把握でき、サンプリングのみならず小規模燃料デブリ取り出しなどでの適正な被ばく評価が可能となる。

#### ■ 現場への適用性の観点における分析

- ✓ 特になし

#### ■ 課題

- ✓ 実機条件を安全側に模擬した試験条件となっていることを説明できるロジックの構築
- ✓ サンプル回収装置の試作段階でのドライ条件粒径分布データ収集

#### ■ 目標に照らした達成度

- ✓ 切削状況を模擬した試験装置を製作し、飛散率データを取得し、飛散率低減効果確認した。

#### ■ 今後の予定

- ✓ 小規模燃料デブリ取り出し等で検討している燃料デブリ切削装置を模擬した試験体系でのデータ収集

## 4.3 RPV内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討

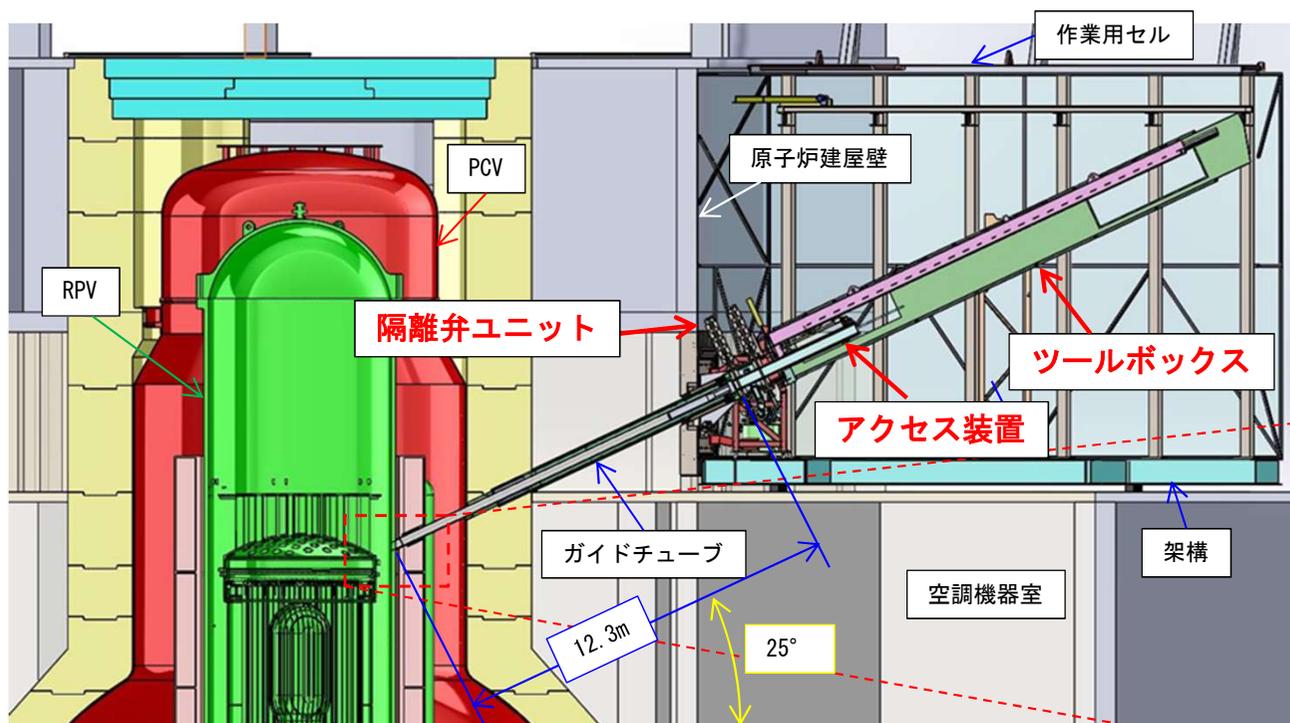
### 4.3.1 RPV側面アクセスによるサンプリング工法の概念検討

#### ■ 目的、目標

RPV内部調査の側面アクセスルートを活用し、RPV特有の課題・リスクに配慮したサンプリングシステムの概念を検討する。⇒RPV内サンプリングのニーズに対応可能なシステム概念を準備する。

#### ■ 実施項目

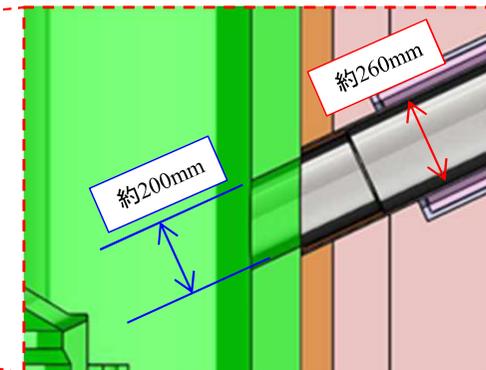
平成29年度に検討したシステム概念を元に、RPV特有の課題やリスクに対するアセスメントを実施して、システムの改善点を抽出し、システム概念を更新した。



側面穴開け調査システム概念

#### RPVサンプリング特有の前提条件

- RPV内部調査工事で設置したガイドチューブ(延長管)等のバウンダリ構造設置済み:開口部の内径約200mm
- PCV/RPV内はアクセス装置導入時に負圧化
- RPV内想定線量率:5000Sv/h
- RPV内想定温度:50℃
- RPV内の干渉物撤去:想定しない
- 採取対象範囲:炉心領域より下側



# 4.3 RPV内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討

## 4.3.1 RPV側面アクセスによるサンプリング工法の概念検討

### ■ 成果

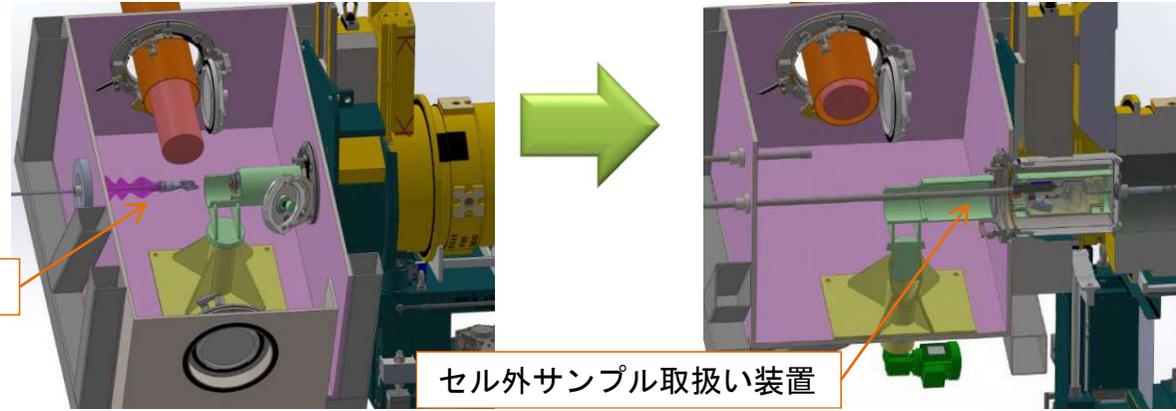
- ✓ リスクアセスメントによる課題を抽出し、弱点を克服するべくシステム概念を見直した

#### サンプル移し替え区画

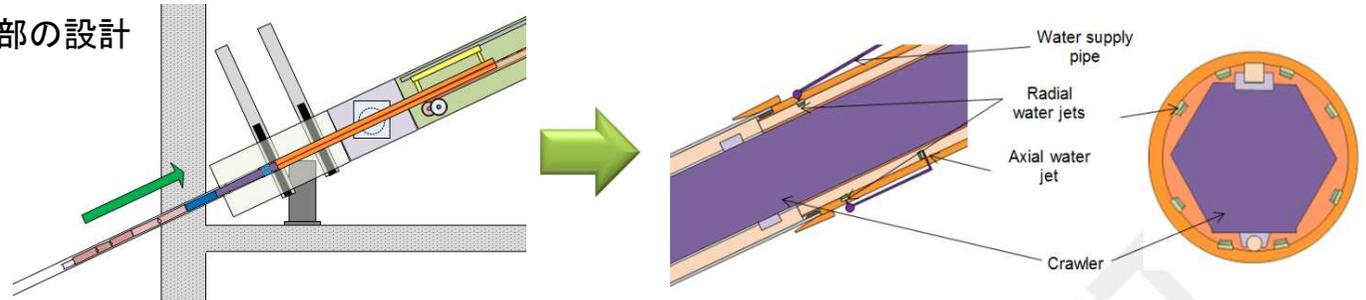
サンプル取扱い装置の故障時に対応できるよう装置をセル内からセル外へ移し、交換を容易にする。

セル内サンプル取扱い装置

セル外サンプル取扱い装置



洗浄システムの排水が漏れないように接続部の設計を見直し。

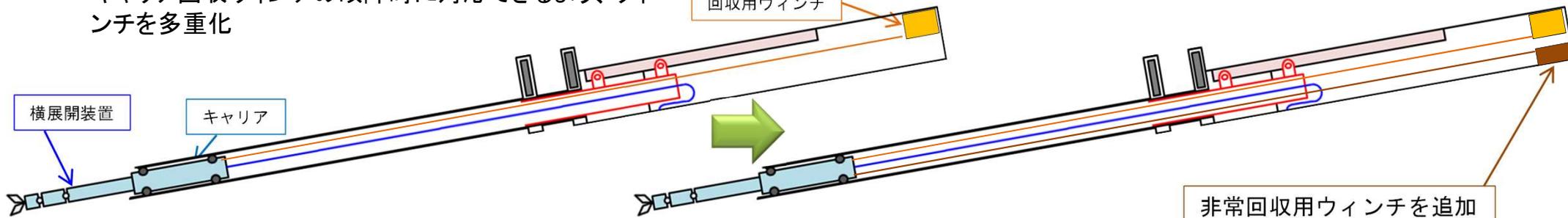


#### アクセス装置

キャリア回収ウインチの故障時に対応できるよう、ウインチを多重化

回収用ウインチ

非常回収用ウインチを追加



## 4.3 RPV内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討

### 4.3.2 RPV上部アクセスによるサンプリング工法の概念検討

#### ■ 目的、目標

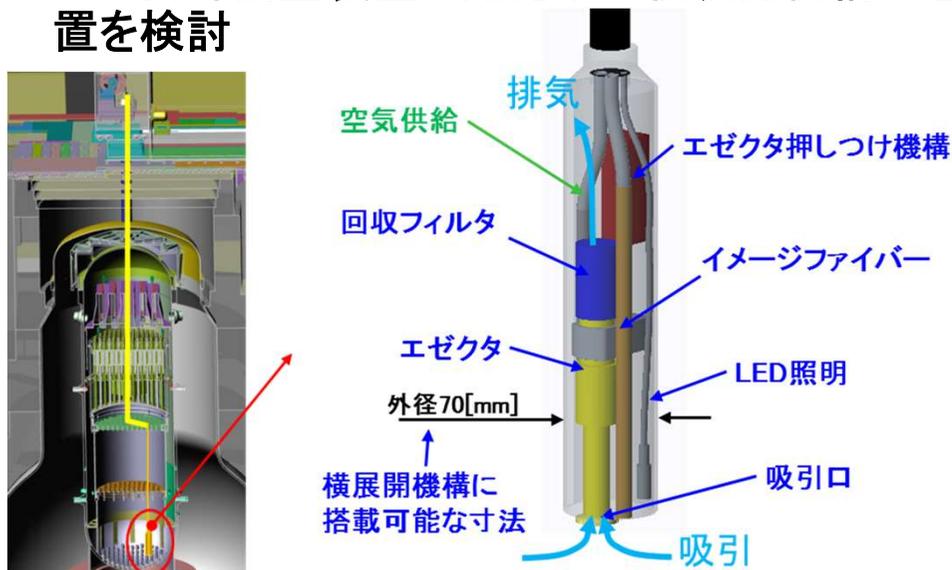
RPV内部調査の上部アクセスルートを活用し、RPV特有の課題・リスクに配慮したサンプリングシステムの概念を検討する。⇒RPV内サンプリングのニーズに対応可能なシステム概念を準備する。

#### ■ 実施項目

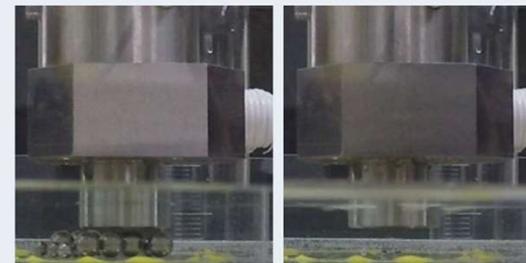
- ✓ 要素試験により吸引による小石状燃料デブリの回収装置概念を具体化した。
- ✓ 平成29年度に検討したシステム概念を元に、RPV特有の課題やリスクに対するアセスメントを実施して、システムの改善点を抽出し、システム概念を更新した。

#### ■ 成果

- ✓ エゼクタ吸引によりサンプルを採取する案を検討
- ✓ エゼクタ吸引方式での気中・水中でのサンプル回収性を検討
- ✓ RPV内部調査装置で開発中の横展開機構に適用可能な寸法(φ70×L320[mm])でサンプル回収装置を検討



SUS球吸引試験  
 試験環境：水中、気中  
 球径：φ1、3、5、10mm  
 供給圧：0.3MPa  
 ノズルギャップ：5mm



吸引前

吸引後

# 4.3 RPV内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討

## 4.3.2 RPV上部アクセスによるサンプリング工法の概念検討

### ■ 成果

✓ 開発計画を更新した

項目	想定されるステップ(時間スケールは無考慮)	備考
1 オペフロ上の整備	SFP燃料取り出し → カバー建屋・構台の撤去 → 新オペフロ構築 遮蔽体改造	SFP燃料取り出しの進捗に依存する。
2 PCV環境整備	PCV内負圧化	
3 RPV内部調査	上面穴開け調査	
4 RPVサンプリング	上面からのRPVサンプリング	

#### 【RPV内サンプリング工事への着手に関する課題】

※実施可能時期によっては「上アクセスによる燃料デブリ取り出し作業」内での実施も検討要

- ① オペフロ上の整備 (サンプリング作業用のセル等の設備が設置可能な状態)
  - ・SFP燃料取り出しの完了およびSFP燃料取り出し用設備(カバー建屋・構台)の撤去
  - ・新オペフロ構築 (オペフロ上で作業員が作業可能なような遮蔽も考慮)
    - ※3号機: R/Bの損傷が大きいいため考慮要 (他号機よりR/Bへの負荷を少なくする必要があり、時間を要する可能性あり)
- ② PCV環境整備
  - ・PCV(RPV)内の負圧化
- ③ RPV内部調査 (準備含む)
  - ・シールドプラグへの穴あけ [1号機: シールドプラグが傾いているため対策要]
  - ・炉心部に到達するルートの実立 (φ 140mm以上の開口要)

#### 【RPV内サンプリングの技術的課題】

- ・アクセス方法 [RPV内部調査でのアクセスルート流用可否]
- ・アクセスのための干渉物撤去 [被ばく評価、撤去方法等]

## 4.3 RPV内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討

### 4.3.1-2 RPV側面/上部アクセスによるサンプリング工法の概念検討

- 成果の反映先への寄与
  - ✓ RPV内の状況把握に寄与できると期待される。
- 現場への適用性の観点における分析
  - ✓ RPV内部調査設備をベースとするため現場適用性はRPV内の調査結果を踏まえて評価することになる。
- 課題
  - ✓ RPV内部調査の時期が未定。
  - ✓ 各装置・機器のバックアップ方法や現場状況の改善策検討が必要。
- 目標に照らした達成度
  - ✓ RPV側面/上部アクセスによるサンプリングシステムの概念を構築し、所期の目標を達成した。

## 4.4 PCV内部詳細調査時の少量サンプル回収装置の試作

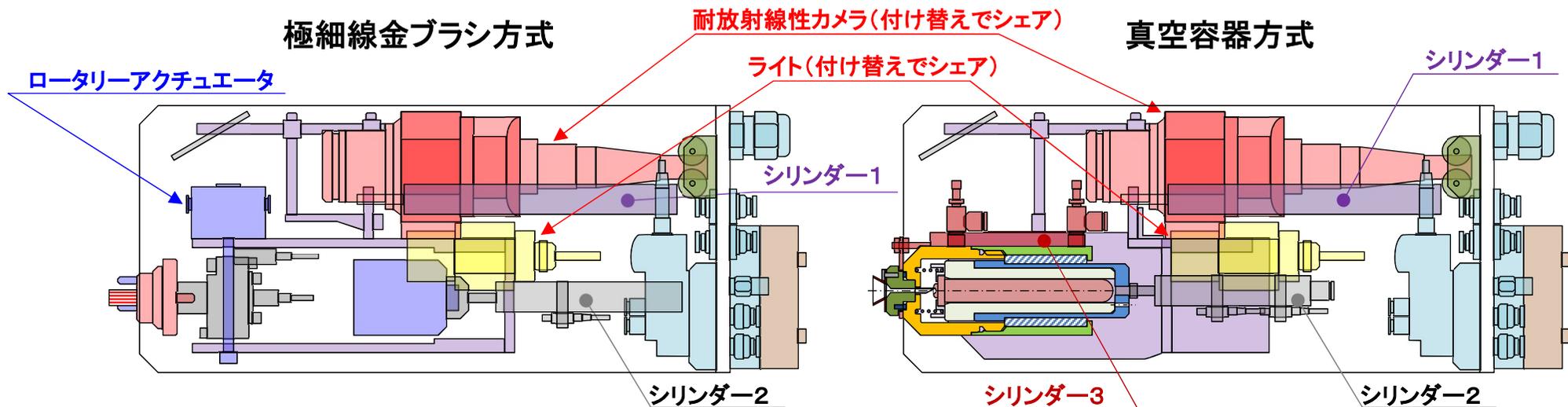
### ■ 目的、目標

PCV内部詳細調査の最終段階において、少量の燃料デブリをサンプリングするための回収装置を設計・試作する。

⇒ **早期に燃料デブリサンプリングを実現し、燃料デブリ表層の状態を把握する。**

### ■ 実施項目・成果

✓ 「4.1.3 PCV内部詳細調査後の少量サンプリングの実現性検討」で選定した極細線金ブラシ方式と真空容器方式の2種類のサンプル回収装置を設計・試作した。



以下の条件でアームとの組合せ試験用の試作機の製作・工場検査を行った。

- ✓ サンプル回収装置は各方式の1基を製作した。
- ✓ シリンダ、ロータリーアクチュエータなどキーパーツは組立と並行して耐放射線性試験を実施した。
- ✓ 試作したサンプル回収装置は、2019年度以降のアームとの組合せ試験後に改良設計を行い、それぞれ3基製作する計画。

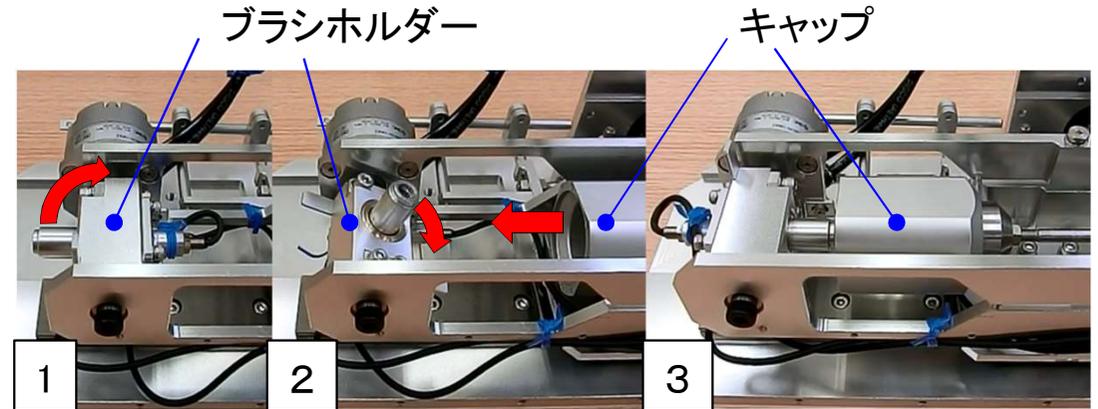
# 4.4 PCV内部詳細調査時の少量サンプル回収装置の試作

## ■ 成果

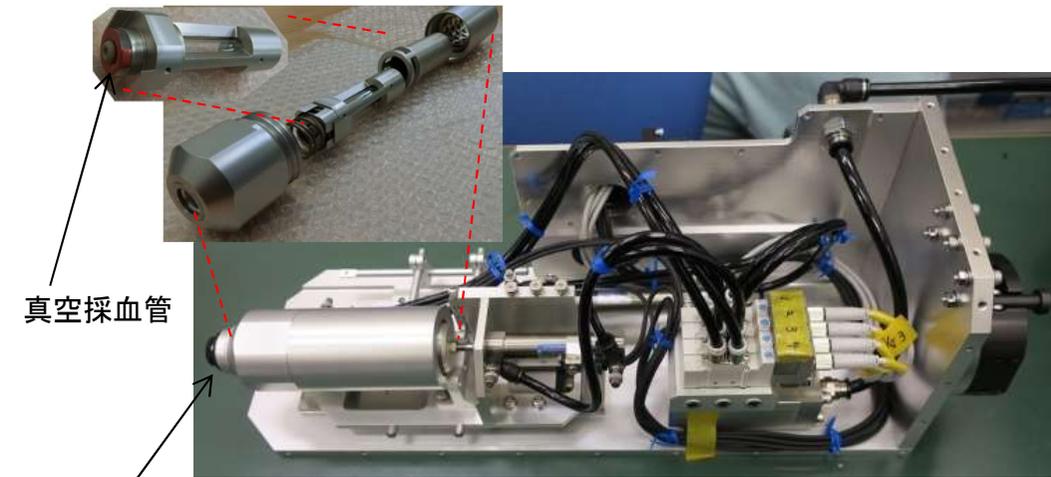
- ✓ 少量サンプリングを確実にを行うための方式として、極細線金ブラシ方式と真空容器方式の2種類のサンプル回収装置を選定し、設計、試作を行った。また、その装置が単体で動作することを確認した。



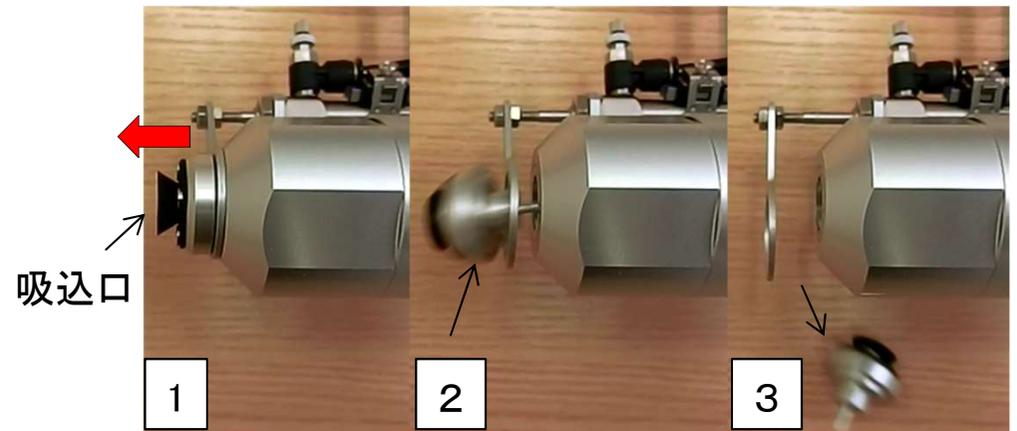
極細線金ブラシ方式 試作機



極細線金ブラシ方式 ブラシホルダー回転・キャップ取付け動作



真空容器方式 試作機



真空容器方式 吸込口取外し動作

## 4.4 PCV内部詳細調査時の少量サンプル回収装置の試作

- 成果の反映先への寄与
  - ✓ 早期に燃料デブリサンプリングを行うことで燃料デブリ表層の情報を得ることができる。
- 現場への適用性の観点における分析
  - ✓ 装置取扱性について、分析・輸送に向けた改善策の具体化が必要
- 課題
  - ✓ アームとの組合せ試験やトレーニングで判明した使いにくさの改善
  - ✓ 作業員被ばく量の更なる低減策
- 目標に照らした達成度
  - ✓ 実現性のある少量サンプリングの方法・装置概念および開発計画に従い、試作機を製作した。
- 今後の予定
  - ✓ 模擬燃料デブリを用いた性能試験を行う。
  - ✓ マニピュレータによる取扱いトレーニングを行い、改善点を抽出する。
  - ✓ PCV内部詳細調査用アームとの組合せ試験を行い、改善点を抽出する。
  - ✓ 改善点を踏まえた装置改造および再トライ用のサンプル回収装置を製作する。
  - ✓ PCV内部詳細調査時に現場適用する。

## 5. まとめ

### 1.燃料デブリの採取、サンプリングシナリオの検討及び策定

- 小規模燃料デブリ取り出しへの適用を想定した開発計画を策定した。
- 少量サンプリングのための装置設計を行い、実現性を評価した。

### 2.原子炉格納容器内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作

- X-6ペネ接続構造の装置仕様を設定した。 $\alpha$ 核種放出抑制のためダブルドアシステムを適用した。
- 中性子モニタの基本仕様を設定した。小型軽量で耐放射線性に優れるSiC半導体型とした。
- サンプル構内輸送のための遮へい体付運搬容器の遠隔輸送システムの基本仕様を設定した。運搬容器ドッキングに必要な位置決め性能を要素試験により確認した。
- サンプリング用アーム、エンクロージャの基本仕様を設定した。小規模燃料デブリ取り出しに適用できるようにメンテナンス用セルの接続構造にダブルドアポート概念を構築した。
- 各種サンプル回収装置概念を具体化し、それぞれの基本仕様を策定した。
- 飛散率試験で燃料デブリ切削時のダスト飛散データを取得できる装置を開発し、試験により開発中のサンプル回収装置の飛散率抑制効果を確認した。

### 3.原子炉圧力容器内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討

- RPVサンプリングシステム概念のリスク評価を行い、概念の見直しを行った。

### 4.PCV内部詳細調査時の少量サンプル回収装置の試作

- 少量サンプル回収装置を試作し、単体で動作することを確認した。