

H29年度, H30年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金

「燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発※」

令和元年度 報告会 (報告資料)

令和2年8月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

※ 事業開始時の事業名称は「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」であるが、廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第75回)において公開された2020年度研究開発計画に合わせ、「燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発」と変更した。

目次

1. 研究の背景・目的	ページ
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. 目標	4-5
3. 実施項目とその関連性、他研究との関連	
3.1 本研究の実施項目	6
3.2 実施項目間、他研究との関連性	7-9
4. 実施スケジュール	10
5. 実施体制図	11
6. 実施内容	
6.1 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定	
6.1.1 試験的燃料デブリ取り出し技術の開発計画の策定、更新	12-13
6.1.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの技術開発計画 の策定、更新	14
6.1.3 安全・システムの観点からの全体シナリオの策定、更新	15-16
6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発	
6.2.1 試験的燃料デブリ取り出しのための燃料デブリ回収装置の開発	17-19
6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発	20-38
7. まとめと今後の対応	39-41

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TMIやチェルノブイリ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試験的に取り出し、分析することが必要である。
- またで試験的燃料デブリ取り出しで必要となる切削、回収、輸送、監視などの技術は、段階的に規模を拡大した燃料デブリ取り出しへの活用が期待される。
- このため、**今年度は**主として以下の作業を実施している。
 - **燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定**
 - **燃料デブリ取り出しのための装置、システムの基本設計**
- 上記の作業で得られた成果や新たに見つかった課題、福島第一原子力発電所の最新状況を踏まえ、燃料デブリの試験的燃料デブリ取り出しの位置付けや目標を見直しながら、段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発を進める必要があり、本研究にて実施している。

1.2 本研究の成果の反映先と寄与

PCV*1内部調査技術の開発PJ

PCV*1内部調査の結果を反映する。

PCV*1内部詳細調査技術の開発PJ
(X-6ペネトレーションを用いた内部詳細調査技術の現場実証)

調査装置の開発進捗を反映する。

*1: 原子炉格納容器

本PJ「燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発」

燃料デブリの段階的に規模を
拡大した取り出し技術の開発
計画、取り出し計画の策定

燃料デブリの段階的に規模を
拡大した取り出しのための
装置、システムの開発

燃料デブリの試験的取り出し・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

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PJ
(臨界管理を含む)

- 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,
 - 燃料デブリ臨界管理技術の高度化
- 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
 - 臨界評価の妥当性確認

燃料デブリの
性状把握のため
の分析・推定技術
の開発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

燃料デブリの収
納・移送・保管
技術の開発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
分に関する研究開発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

PCV*1内部詳細調査技術の開発PJ
(X-6ペネトレーションを用いた
内部詳細調査の現地実証)

試験的燃料デブリ取り出しため
の燃料デブリ回収装置製作
・現地適用

段階的に規模を拡大した取り出し
(東電HD実施予定)

段階的に規模を拡大した
取り出し装置等の詳細設計

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

2. 目標 (1/2)

No.	事業内容	2019年度末時の目標技術成熟度(TRL)	
6.1	燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定	PCV内部調査結果や現場現状等を踏まえて、PCV内の燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画を策定し、必要に応じて更新されること。 (情報整理のため技術成熟度(TRL)目標設定の対象外とする)	
6.2	燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発	6.2.1 試験的燃料デブリ取り出しのための燃料デブリ回収装置の開発	1g程度の粒状燃料デブリが回収でき、燃料デブリ接触面をキャップする、あるいは、切り離すことで、燃料デブリ接触部を曝露せずに燃料デブリを回収できる装置が試作され、単体性能が確認されること。 (2019年度末時目標TRL: レベル4)
		6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発	<p>① 取り出し用アクセス装置 X-6ペネトレーションからペDESTAL底部にアクセスでき、取り出し時の先端ツールの支持など行え、安全に燃料デブリを構内輸送容器へ払い出すアーム・エンクロージャの基本設計が完了していること。(2019年度末時目標TRL: レベル4) エンクロージャ内でのマニピュレータ作業の検証に向けて、マニピュレータの準備等に着手していること。</p> <p>② 取り出し用アクセスルート構築装置 アクセス装置のエンクロージャとX-6ペネトレーションとの接続・離脱ができ、アームのアクセスルートを形成でき、エンクロージャ撤去時においてダストの飛散を防止するダブルドア接続が可能な接続構造体の基本設計が完了していること。 (2019年度末時目標TRL: レベル4) 試作機製作に向けて詳細設計に着手していること。 X-53ペネトレーションの活用概念検討に向けての準備に着手していること。</p>

H30年度補正予算 実施範囲

2. 目標 (2/2)

No.	事業内容	2019年度末時の目標技術成熟度(TRL)	
6.2	燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発	6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発	<p>③ 燃料デブリ切削・回収装置 小石・砂状燃料デブリ回収用、粉状燃料デブリ切削・回収用、円柱状燃料デブリ切削・回収用の各燃料デブリ回収装置が試作され、単体性能が確認されていること。 (2019年度末時目標TRL: レベル4~5)</p> <p>④ 中性子モニタシステム 水中から露出した燃料デブリからの中性子を計測することで、燃料デブリの臨界近接の程度を評価できるシステムの基本設計が完了していること。 (2019年度末時目標TRL: レベル4)</p> <p>⑤ 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車 X-6ペネトレーションに設置されるエンクロージャの側面に遠隔操作でアクセスし、燃料デブリの構内輸送容器(Padirac RD20)を搬送・接続・離脱できる台車システムの基本設計が完了していること。(2019年度末時目標TRL: レベル4)</p> <p>燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車の製作に向けて、詳細設計に着手していること。</p>

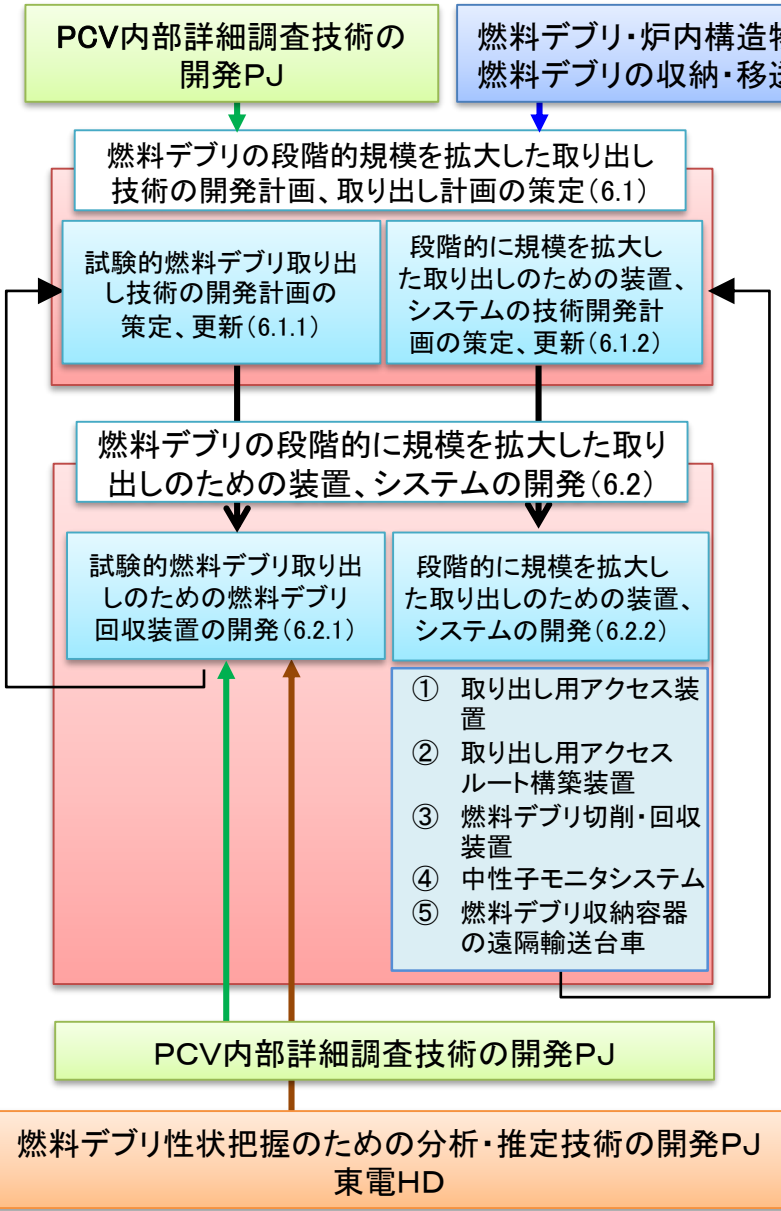
3. 実施項目とその関連性、他研究との関連

3.1 本研究の実施項目

No.	実施項目		2019年度の実施範囲	
6.1	燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定	6.1.1 試験的燃料デブリ取り出し技術の開発計画の策定、更新	PCV内部詳細調査PJの進捗を踏まえて、試験的燃料デブリ取り出し技術の開発工程を更新する。また計画を具体化する。	
		6.1.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの技術開発計画の策定、更新	PCV内部詳細調査PJの進捗を踏まえて、取り出し用アームや中性子モニタの開発計画を更新する。	
		6.1.3 安全・システムの観点からの全体シナリオの策定、更新	PCV内部詳細調査PJの進捗を踏まえて、燃料デブリ取り出しシナリオを更新する。	
6.2	燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発	6.2.1 試験的燃料デブリ取り出しのための燃料デブリ回収装置の開発	PCV内部詳細調査用アームに適用可能な燃料デブリ回収装置を開発する。 <ul style="list-style-type: none"> 2018年度試作機(2種類)の性能試験 	
		6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発	1) 取り出し用アクセス装置	<ul style="list-style-type: none"> 基本設計による設計妥当性確認 要素試験によるダブルドア、双腕マニピュレータ交換の成立性確認 アーム製作期間の精査および短縮策 エンクロージャ内のマニピュレータ作業検証の準備
			2) 取り出し用アクセスルート構築装置	<ul style="list-style-type: none"> 基本設計による設計妥当性確認 試作機の製作準備 X-53ペネトレーションの活用概念検討の準備
			3) 燃料デブリ切削・回収装置	<ul style="list-style-type: none"> 4種類の燃料デブリ回収装置概念の基本設計 試作機の製作 試作機の工場検証試験
			4) 中性子モニタシステム	<ul style="list-style-type: none"> 切削時常時監視についてのセンサ小型化検討 基本設計による設計妥当性確認
			5) 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車	<ul style="list-style-type: none"> 基本設計による設計妥当性確認 要素試験による台車・接続機構の成立性確認 製作に向けての詳細設計着手

H30年度補正予算 実施範囲

3.2 実施項目間、他研究との関係性(1/3)

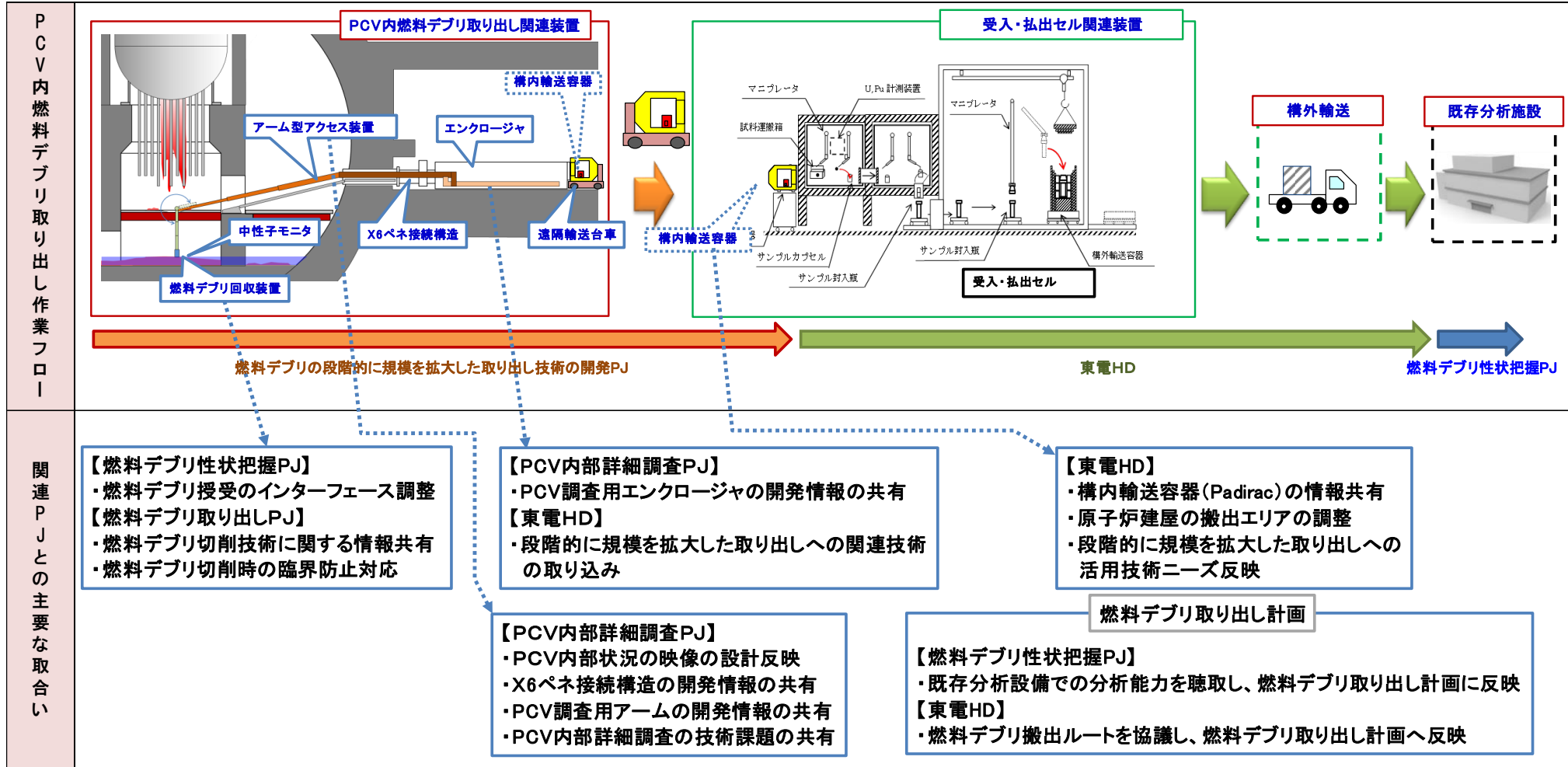


燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発PJ(臨界管理を含む)
燃料デブリの収納・移送・保管管理技術の開発PJ、東電HD

No.	連携先	連携内容	連携時期
1	燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発PJ	<ul style="list-style-type: none"> 試験的燃料デブリ取り出しに関する構外輸送の取扱いの調整 試験的燃料デブリ取り出しに関する既存分析設備での分析項目を聴取し、試験的燃料デブリ取り出しの実現性検討に反映 初号機の試験的燃料デブリ取り出し用燃料デブリ回収装置の設計状況を共有し、分析処理に適した燃料デブリが回収できる装置について意見交換 	2019/10月～ 適宜実施
2	PCV内部詳細調査技術の開発PJ	<ul style="list-style-type: none"> アクセスルート構築のため開発中の隔離部屋を取り出し用設備設置時に流用する課題について協議。 アーム型アクセス装置の開発状況を共有(*) 初号機の試験的燃料デブリ取り出し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(*) 	2019 (*は随時実施)
3	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PJ(臨界管理を含む) 燃料デブリの収納・移送・保管技術の開発PJ 東電HD	<ul style="list-style-type: none"> 2号機PCV内で撮影された燃料デブリ外観写真を用いて燃料デブリ回収箇所のニーズ調査を実施 燃料デブリ取り出し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 	2018年度に実施 (2019年度は必要に応じて実施)
4	東電HD	<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリ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 原子炉建屋出口付近での燃料デブリ搬出エリアを調整 段階的に規模を拡大した取り出しで活用したい燃料デブリ取り出し技術を聴取 	2019/4月～ 2020/3月 月例会議や個別打合せを適宜実施

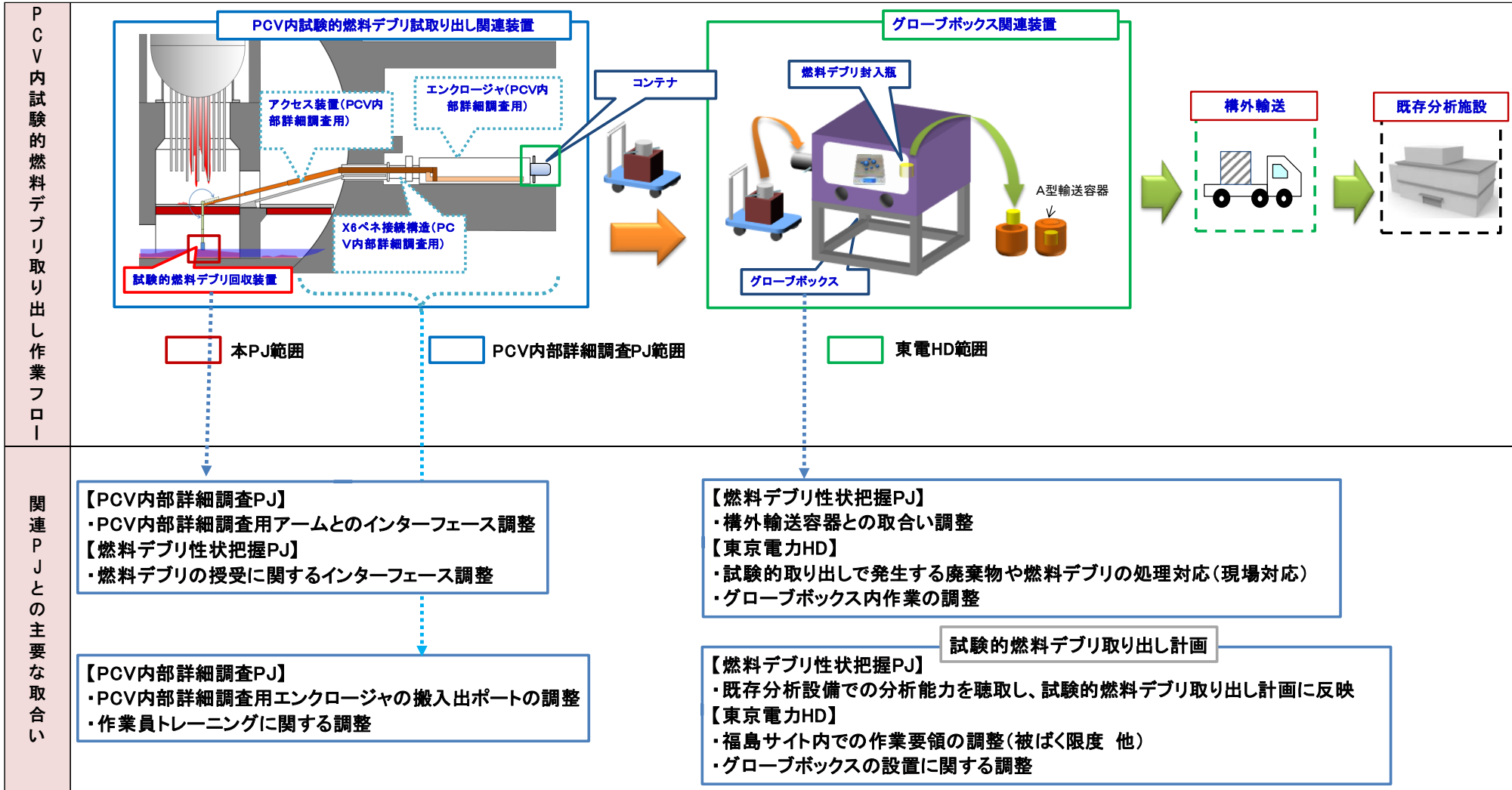
3.2 実施項目間、他研究との関係性(2/3)

■ PCV内の燃料デブリ取り出し作業フロー及び関連PJとの主要な取合い

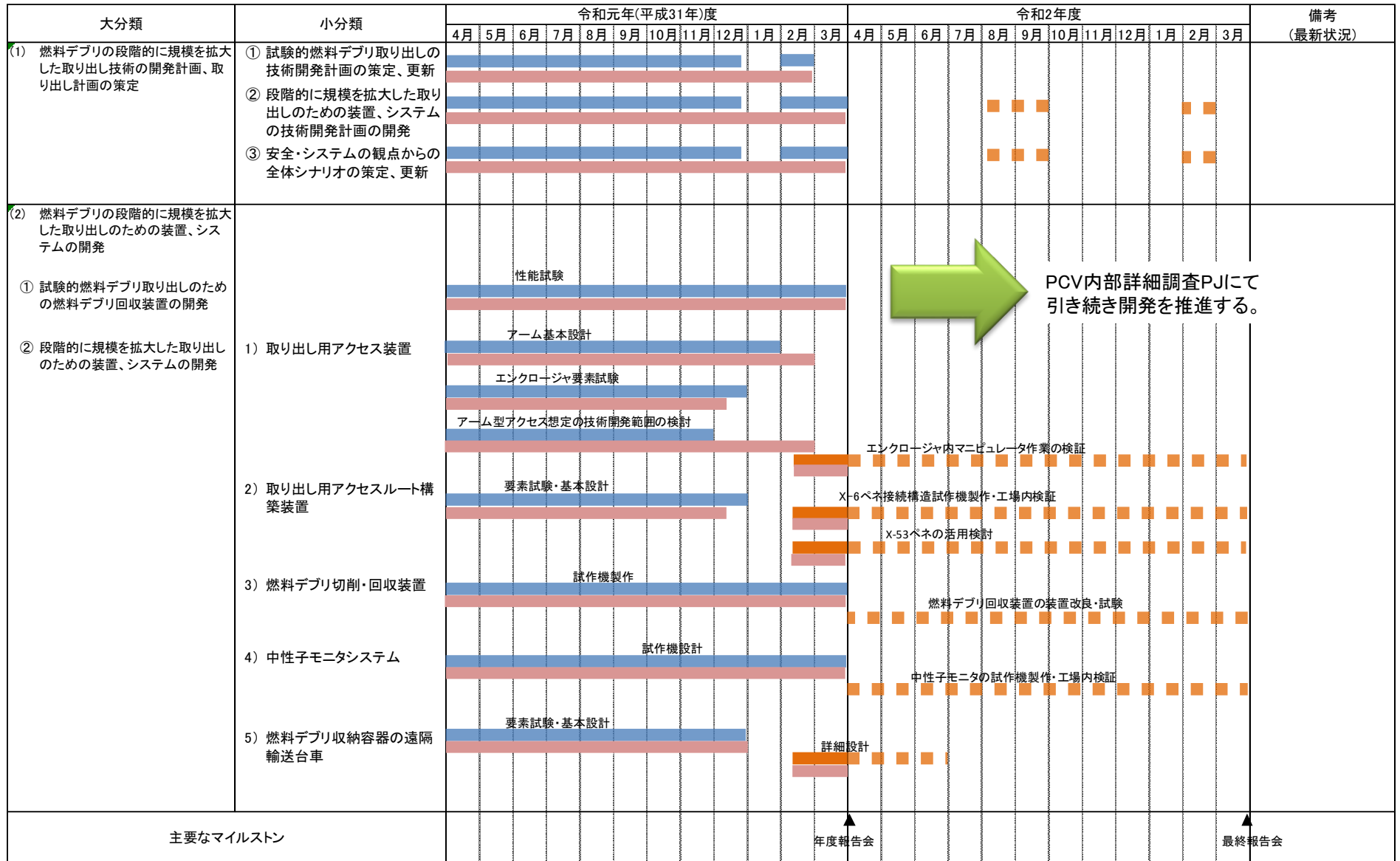


3.2 実施項目間、他研究との関係性(3/3)

■ PCV内部詳細調査時の試験的燃料デブリ取り出しの作業フロー及び関連PJとの主要な取合い



4. 実施スケジュール



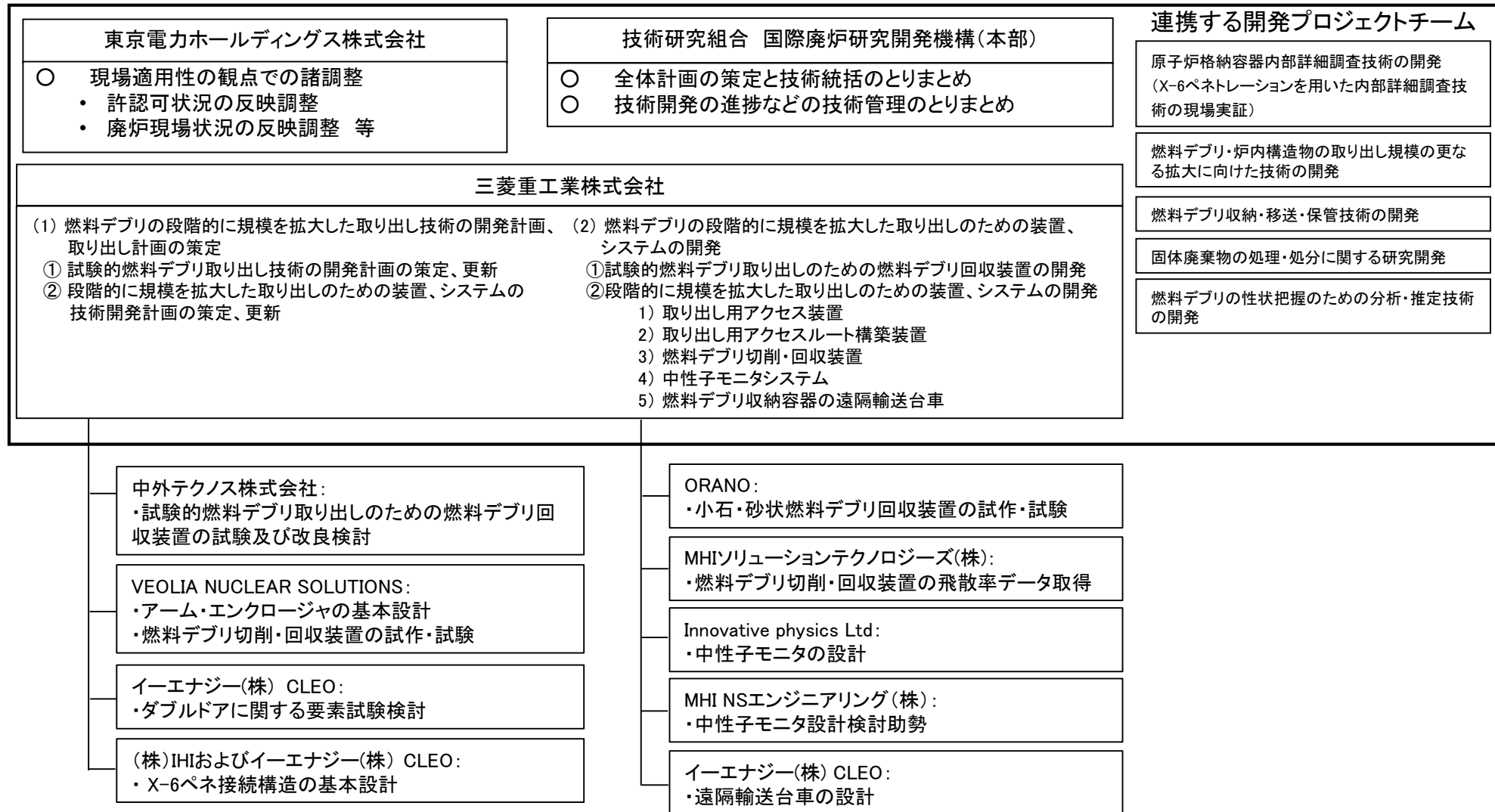
■ :実績
 ■ :平成29年度補正予算で実施
 ■ :平成30年度補正予算で実施
 ■ ■ ■ :平成30年度補正予算で実施予定

5. 実施体制図

実施体制図

実施責任者(正):川本 敦史 (技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID))

実施責任者(副):姉川 弘明 (IRID/三菱重工業株式会社)



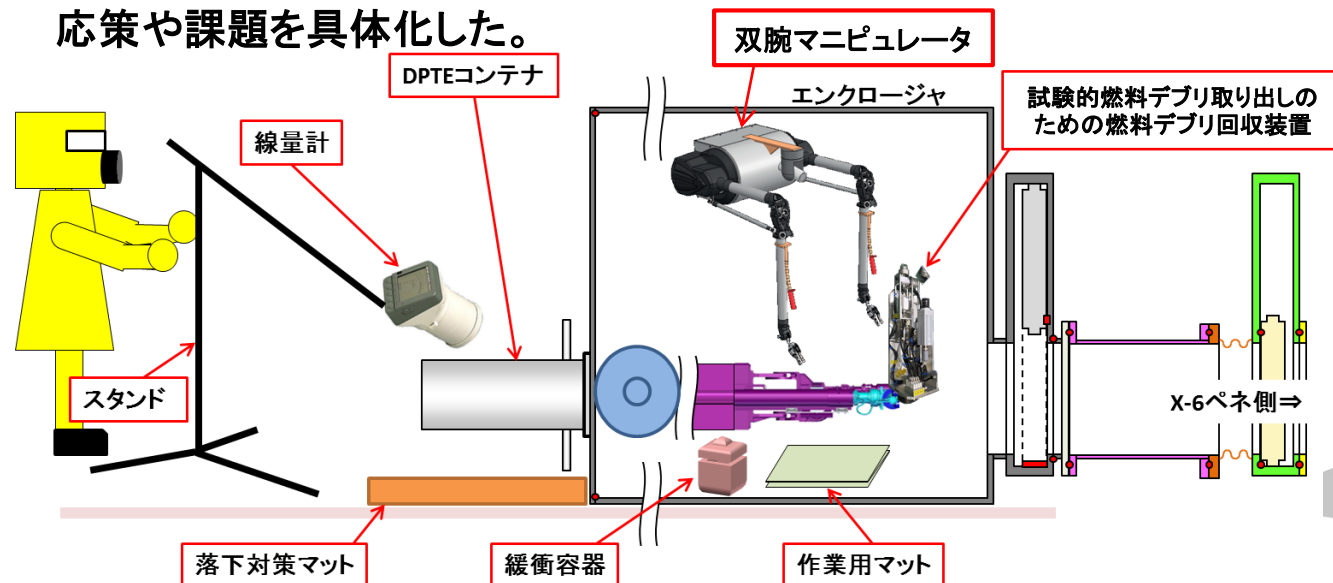
6. 実施内容

6.1 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定

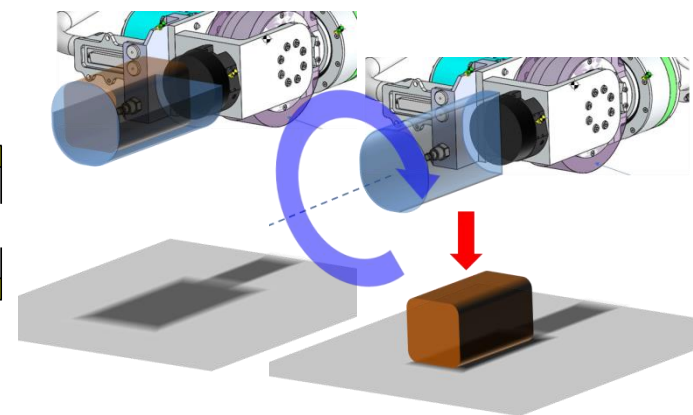
6.1.1 試験的燃料デブリ取り出し技術の開発計画の策定、更新(1/2)

【今年度の成果1/2】

- ✓ 試験的燃料デブリ取り出し作業時のリスク(燃料デブリ漏えい等)アセスメントを行い、トラブル発生時の対応策や課題を具体化した。



試験的燃料デブリ取り出し時のリスクアセスメントを踏まえた安全対策イメージ



高線量燃料デブリのPCVへの返送・残置方法

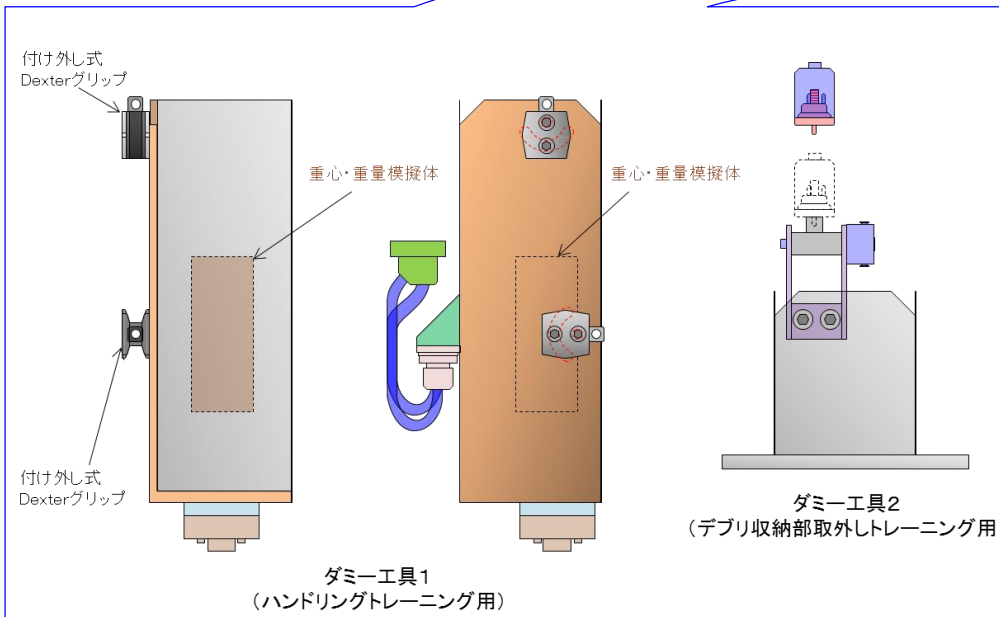
- ✓ 燃料デブリ漏えい時の対応策(除染方法)はエンクロージャ内での除染ツールを適用する計画とした。除染の効率・作業時間および廃棄物量などは次年度の双腕マニピュレータによるモックアップ検証試験にて評価する計画とした。
- ✓ 高線量率の燃料デブリを回収した場合のPCVへの返送方法を具体化した。
- ✓ グローブボックス内での燃料デブリの取り出し、重量測定、容器詰め替え作業などの方法を具体化した。

6.1 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定

6.1.1 試験的燃料デブリ取り出し技術の開発計画の策定、更新(2/2)

【今年度の成果2/2】

- ✓ 試験的燃料デブリ取り出しのための燃料デブリ回収装置の性能確認のため、以下の試験を策定した。
- ✓ 凹凸面のある模擬燃料デブリ表面からの燃料デブリ回収試験（現場状況を模擬し、性能を見極める）
- ✓ 内蔵カメラによる暗闇での燃料デブリ回収作業の監視状況評価試験（視認性を見極める）
- ✓ 繰り返し動作による可動部の信頼性確認試験（信頼性を高める）
- ✓ 過湿状態でのカメラ・ミラー部品の曇り止め対策試験（現場状況を模擬し、性能を見極める）
- ✓ トレーニング用マニピュレータ設備を用いた、遠隔取扱性試験（モックアップ検証前に早期に改善点を抽出する）



トレーニング用マニピュレータ設備

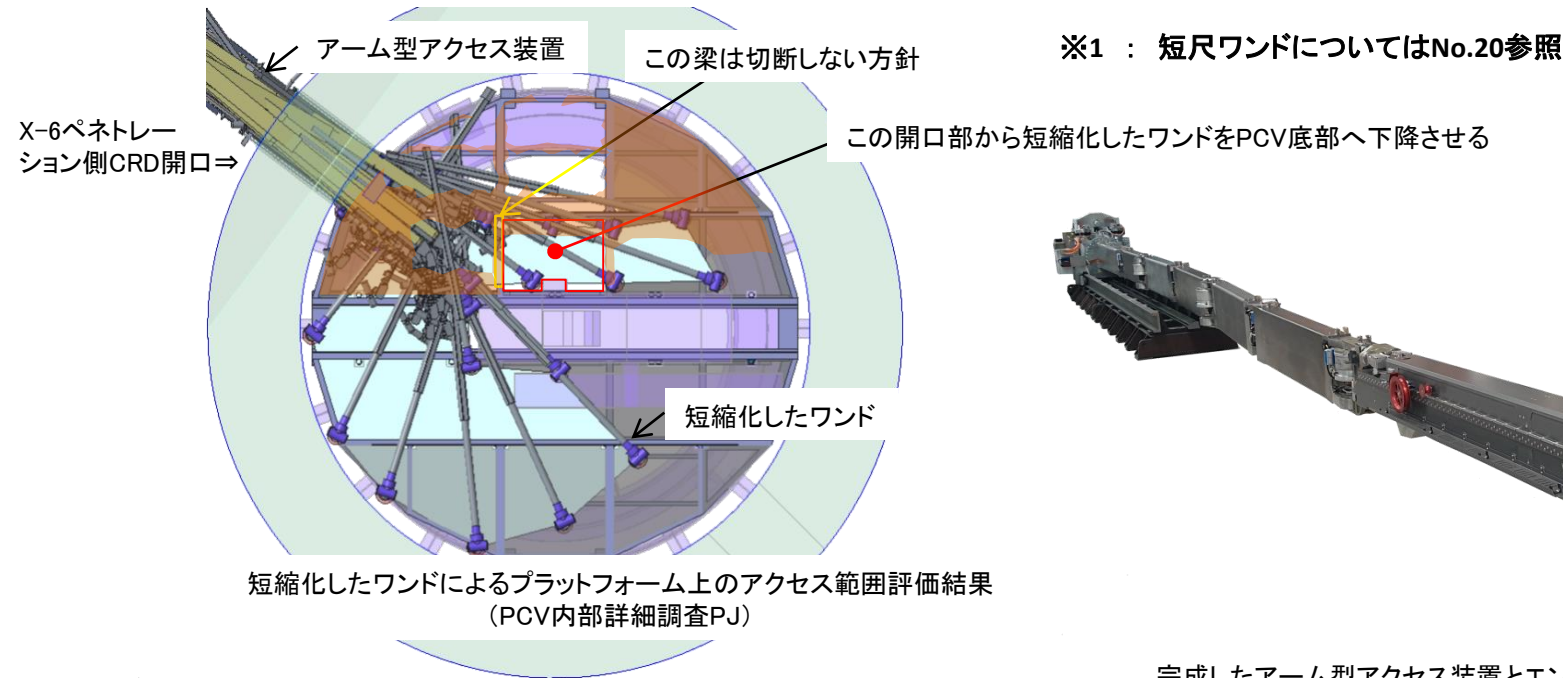


6.1 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定

6.1.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの技術開発計画の策定、更新

【今年度の成果】

- ✓ PCV内部詳細調査PJにおけるPCV底部へのアクセス検討状況を確認した。プラットフォームの梁切断は行わず、代わりに短尺ワンド※1を準備することでPCV底部へのアクセスを達成する計画。
⇒本PJでも短尺ワンドでアクセスする方針とした。
- ✓ PCV内部詳細調査PJで開発中のアーム型アクセス装置の製作期間をベースに、取り出し用アクセス装置の製作着手からモックアップ検証までの必要期間を約3年と評価した。(No.25参照)



完成したアーム型アクセス装置とエンクロージャ(PCV内部詳細調査PJ)

【今後の計画】

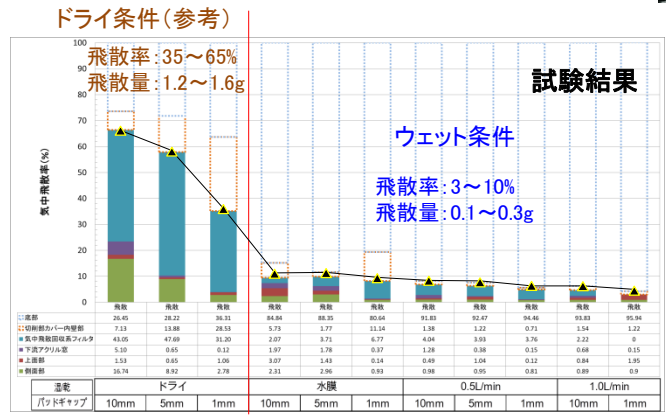
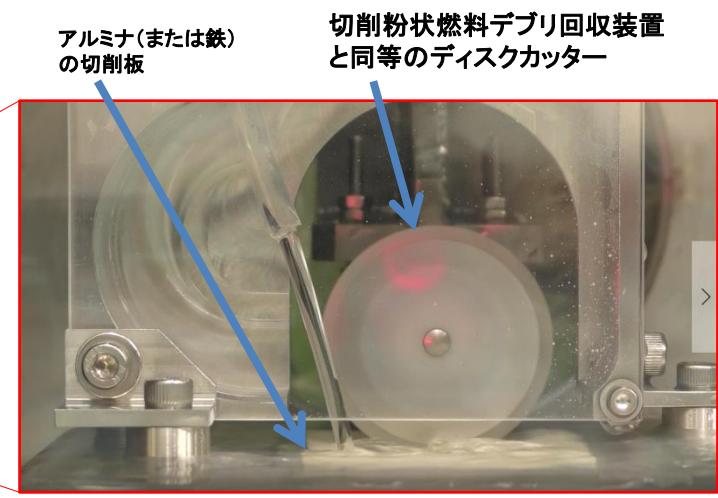
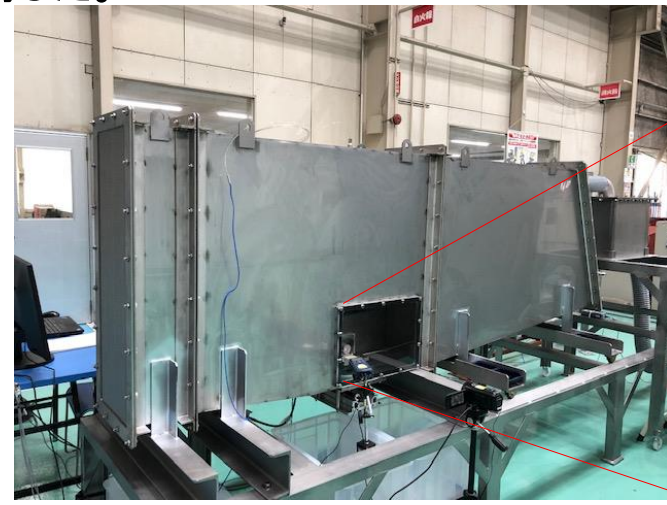
- ✓ 次年度も引き続き、関連PJの開発成果や現地の状況を反映しながら計画を更新する。

6.1 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定

6.1.3 安全・システムの観点からの全体シナリオの策定、更新 (1/2)

【今年度の成果1/2】

✓ 気中での切削粉の燃料デブリ取り出し早期実現にむけて、ディスクカッターによる燃料デブリ切削を模擬したダスト飛散率試験を実施し、飛散率データを取得した。また試験結果に基づき、切削粉状燃料デブリ回収装置に対する安全要求を検討した。



ウェット条件では飛散率3~10%程度であり、燃料デブリ切削・回収装置に燃料デブリ面から浮き上がると切削刃が止まる機構を備えることで、ダスト飛散の安全要求を満足させる。今後、PCV内でのダスト濃度評価について東京電力HDと調整を行う必要がある。

- 安全要求(暫定)
- ・ 切削中はディスクカッターが水中であることをカメラ等で監視すること。
 - ・ 回収装置が燃料デブリから浮き上がった場合、10秒以内に切削刃が停止すること。

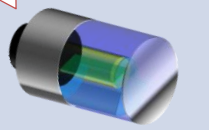
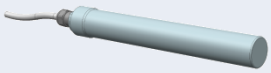
6.1 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定

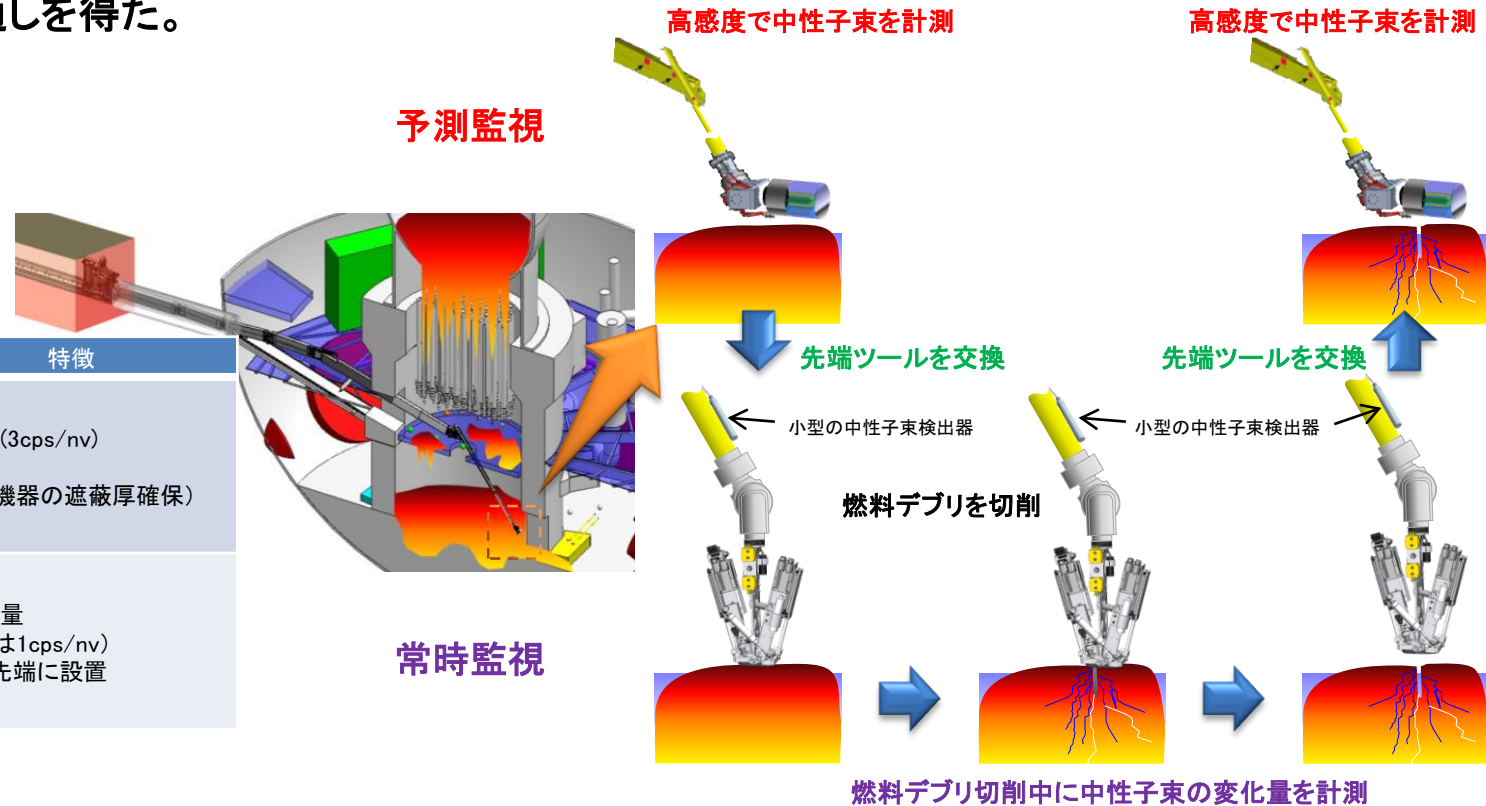
6.1.3 安全・システムの観点からの全体シナリオの策定、更新 (2/2)

【今年度の成果2/2】

- ✓ 円柱状燃料デブリなどの燃料デブリ切削時における臨界安全を確保するため、予測監視と常時監視の組合せによる中性子監視の方法を検討。感度要求を予測監視3cps/nv, 常時監視1cps/nvに設定した。
- ✓ 常時監視向けの小型SiC半導体型検出器による中性子モニタを検討した。直径30mm×長さ300mmで感度1cps/nvを達成できる見通しを得た。

PCV内部詳細調査用の中性子検出器と異なり、コリメータが臨界監視用に最適化される。

	装置概念	特徴
予測監視	 Φ140×500mmL, 20kg以下	<ul style="list-style-type: none"> ・高感度(3cps/nv) ・長寿命 (電子機器の遮蔽厚確保)
常時監視	 Φ30×300mmL, 300~1000g	<ul style="list-style-type: none"> ・小型軽量 (感度は1cps/nv) ・ワンド先端に設置



【今後の計画】

- ✓ 次年度も引き続き、関連PJの進捗や現地の状況を反映しながらシナリオを更新する。

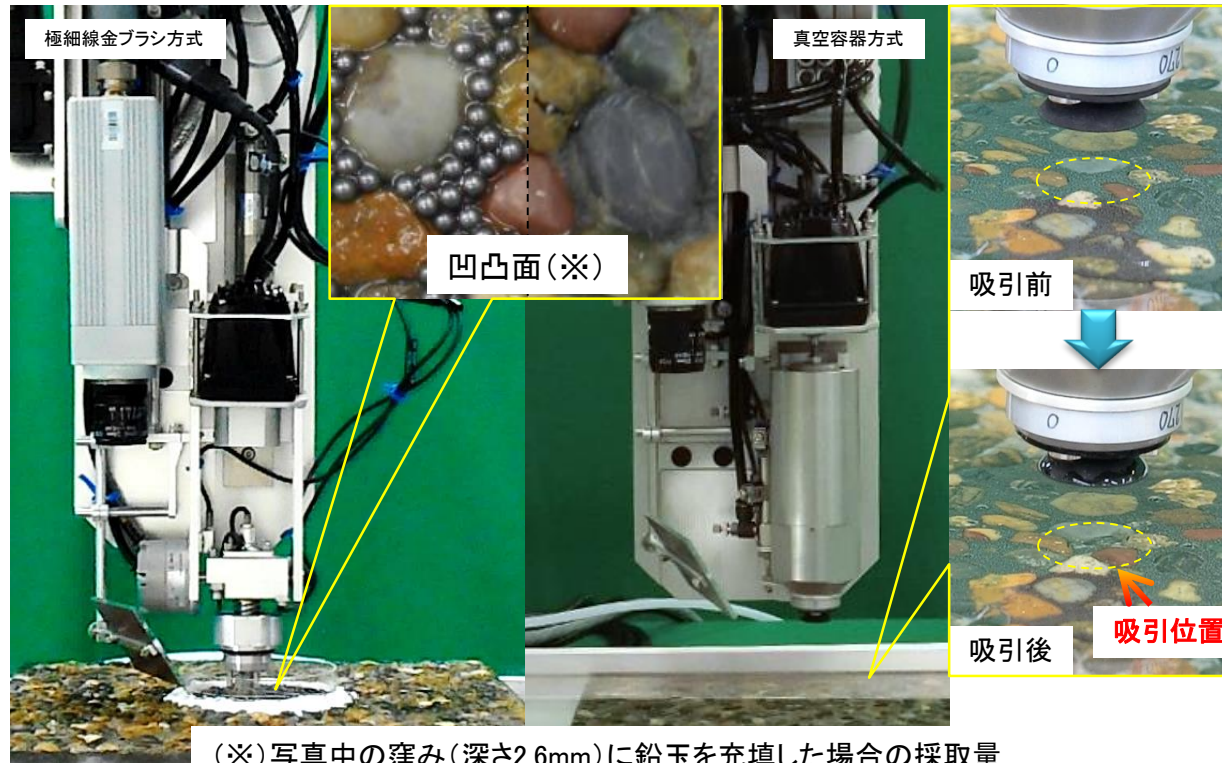
6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.1 試験的燃料デブリ取り出しのための燃料デブリ回収装置の開発 (1/3)

【目標】1g程度の少量の粒状燃料デブリが回収でき、燃料デブリ接触面をキャップする、あるいは、切り離すことで、燃料デブリを回収できる装置を試作し、単体性能を確認する。

【今年度の成果1/3】

- ✓ 試作した「極細線金ブラシ方式」、「真空容器方式」に対し、凹凸面のある模擬燃料デブリ表面からの燃料デブリ回収試験によりデブリ回収性能を評価した。



(※) 写真中の窪み(深さ2.6mm)に鉛玉を充填した場合の採取量

回収量計測結果(金ブラシ方式)

模擬デブリ	凹凸面(※)	フラット面(参考)
0.35mm鉛玉	0.07~0.10g	0.07g
1.0mm鉛玉	0.23~0.36g	0.50g
2.0mm鉛玉	0.25~0.32g	1.57g

回収量計測結果(真空容器方式)

模擬デブリ	凹凸面(※)	フラット面(参考)
0.35mm鉛玉	1.95~2.36g	0.16g
1.0mm鉛玉	0.17~0.41g	0.36g
2.0mm鉛玉	針の内径φ2.1mmでは採取できず	

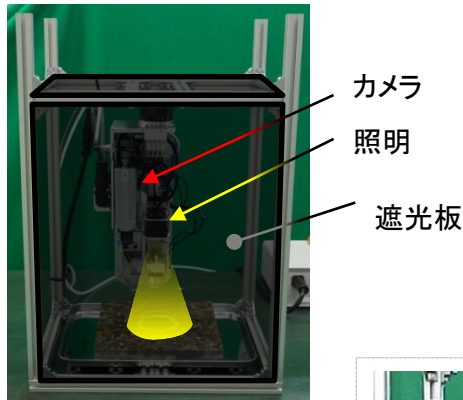
- ✓ 「極細線金ブラシ方式」では凹凸面で0.07~0.3g程度を回収できる可能性がある。
- ✓ 「真空容器方式」では凹凸面で小さい粒径のものを2g前後回収できる可能性がある。

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

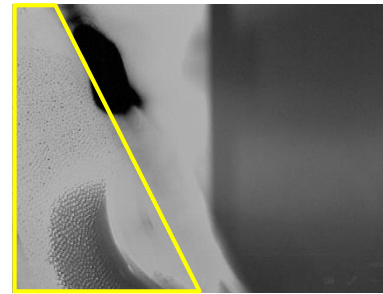
6.2.1 試験的燃料デブリ取り出しのための燃料デブリ回収装置の開発 (2/3)

【今年度の成果2/3】

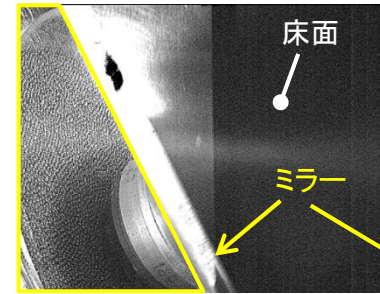
- ✓ 内蔵カメラによる暗闇での燃料デブリ回収作業の監視状況評価試験や、繰り返し動作による可動部の信頼性確認試験によりPCV内環境への適合性や可動部の信頼性を確認した。



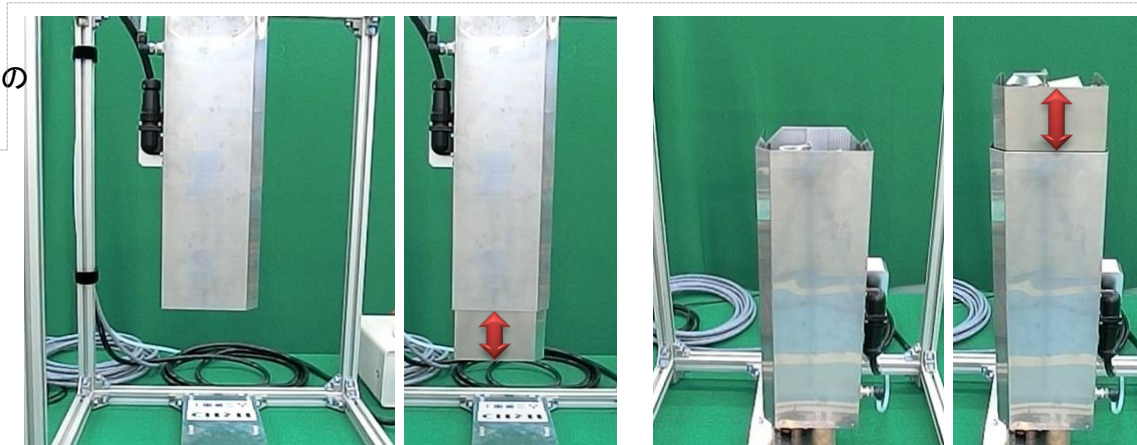
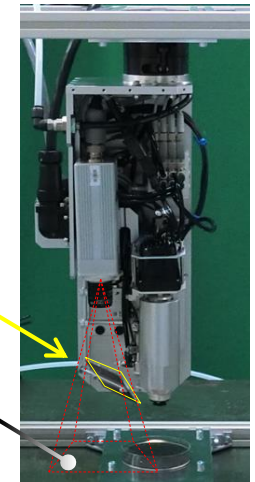
暗闇での燃料デブリ回収作業の監視状況評価試験イメージ



照度過剰によるハレーション状況



絞り調整によるコントラストの改善状況



上向き状態と下向き状態での繰り返し動作試験状況

- ✓ 絞り調整でコントラストを最適化した。また繰り返し動作試験より、駆動系のゆるみ箇所を修正した。

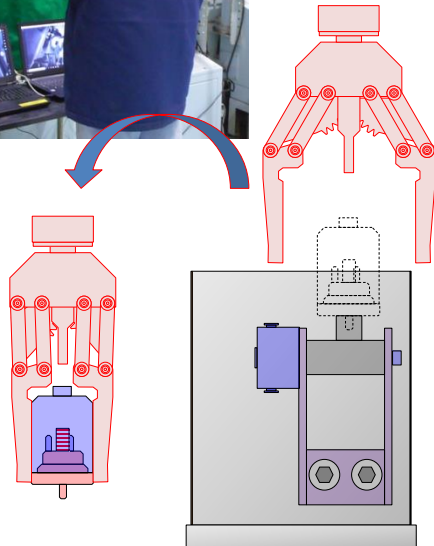
6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.1 試験的燃料デブリ取り出しのための燃料デブリ回収装置の開発 (3/3)

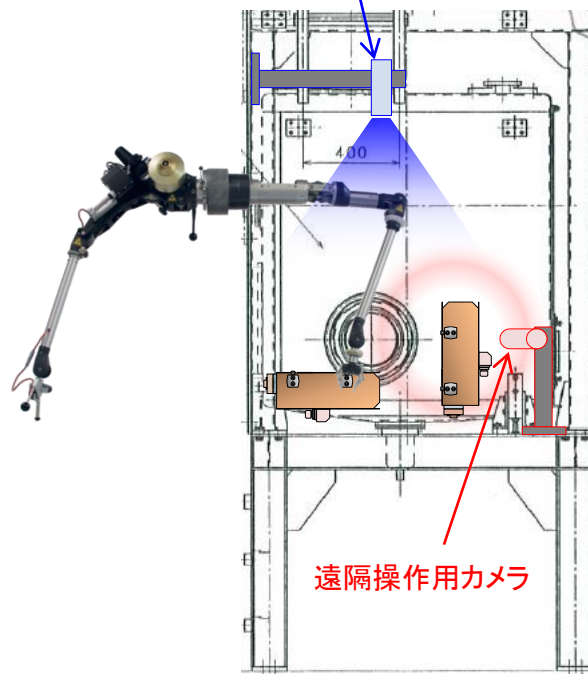
【今年度の成果3/3】

- ✓ 過湿状態でのカメラ・ミラー部品の曇り止め対策試験で界面活性剤による曇り防止対策を確認した。
- ✓ トレーニング用マニピュレータによる遠隔取扱性試験で個別の作業性を確認し、改良点を抽出した。

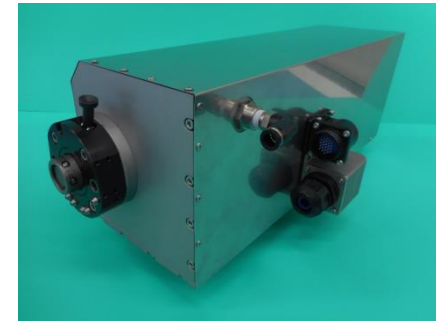
トレーニング用マニピュレータによる取扱性試験



作業状況の記録用カメラ

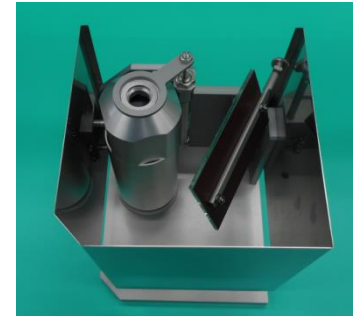
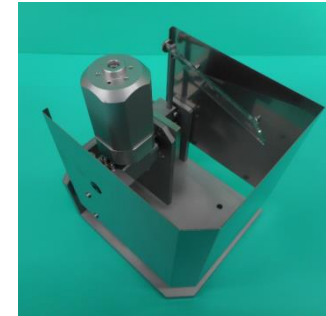


外形と重量・重心を模擬したダミー工具1



遠隔でアームへの取り付け作業ができることを確認

燃料デブリ回収部を模擬したダミー工具2(上:金ブラシ方式、下:真空容器方式)



遠隔で燃料デブリ収納部の取外しができることを確認

- ✓ 実機ベースのプロト機にて、工場で模擬環境下での実証を行った⇒TRL5に到達。

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

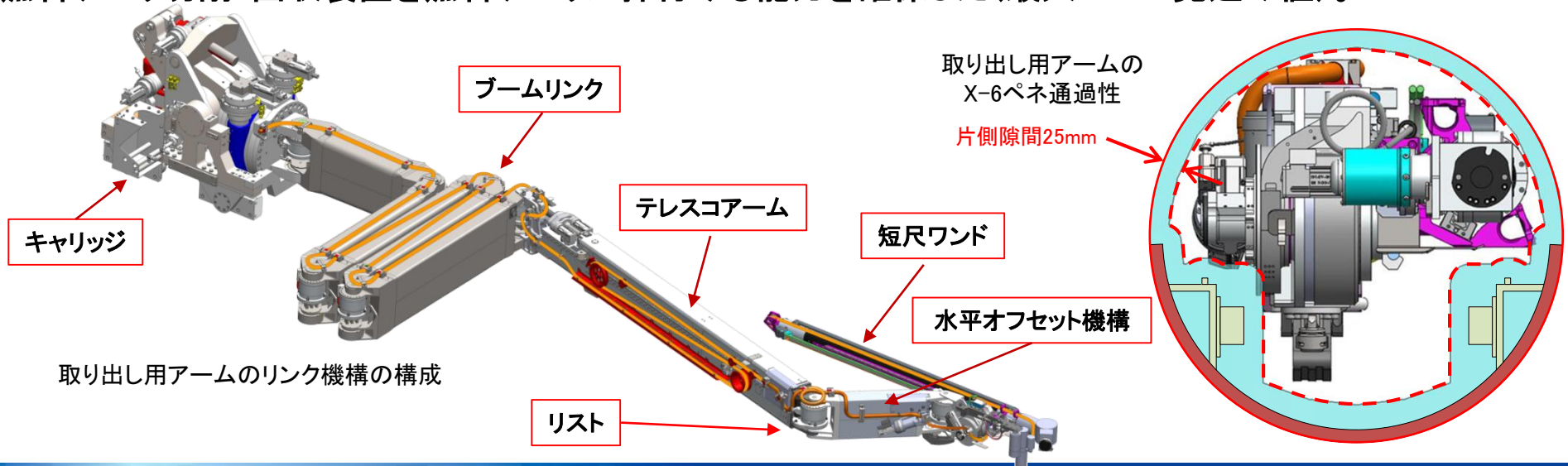
6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

1) 取り出し用アクセス装置(アーム・エンクロージャ等) (1/6)

【目標】アーム・エンクロージャの基本設計を完了する。具体的にはPCV内部詳細調査用アーム設計をベースに、プラットフォームからのペデスタル底部へのアクセス性を向上させる。また燃料デブリ切削・回収装置を支持できるようにペイロードを10kgから20kgに向上させる。さらに燃料デブリの閉じ込め性を向上させる。

【今年度の成果1/5】

- ✓ 概念検討結果を元にアクセス装置とエンクロージャの基本設計を実施した。
- ✓ アームのペイロードをPCV内部詳細調査用アームよりも向上できる見通しを得た(10⇒20kg)。
- ✓ アーム型アクセス装置のリンク機構の構成を見直し、新たに水平オフセット機構を追加した。プラットフォームの開口状況の制限を考慮してPCV底部へのアクセス範囲を向上させた(2.8m²:見込み値)。
- ✓ 燃料デブリ切削・回収装置を燃料デブリに押付ける能力を確保した(最大400N:見込み値)。



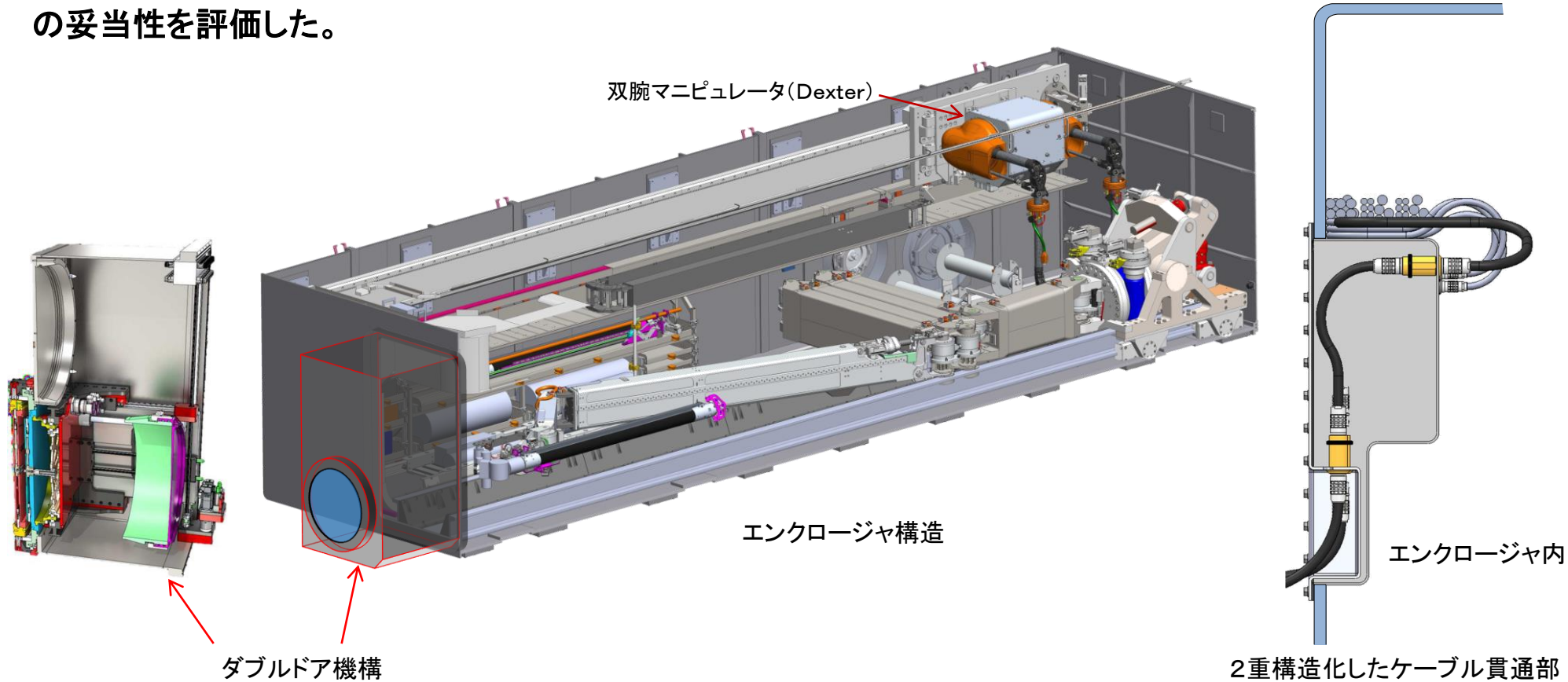
6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

1) 取り出し用アクセス装置(アーム・エンクロージャ等) (2/6)

【今年度の成果2/5】

- ✓ X-6ペネ接続構造とのダブルドア接続を実現するエンクロージャの基本設計を行った。また燃料デブリの閉じ込め性を向上するため、ケーブル貫通部やリング部は2重構造とした。
- ✓ PCV内部詳細調査用のアーム・エンクロージャとの要求仕様の相違点を踏まえ設計変更箇所を整理し、その妥当性を評価した。



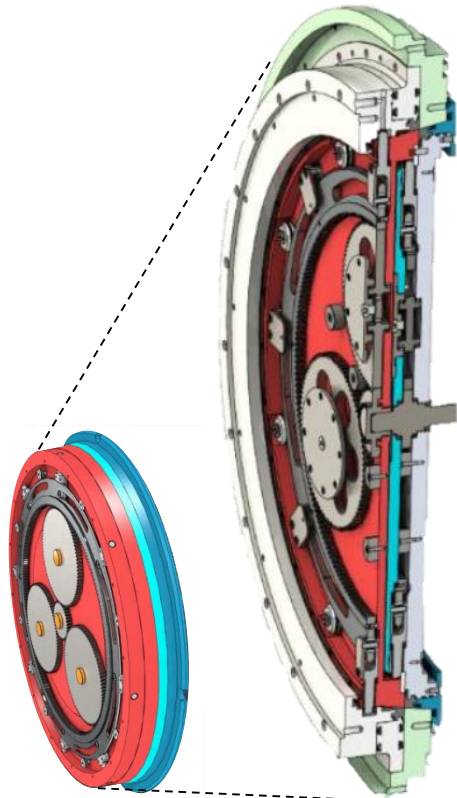
6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

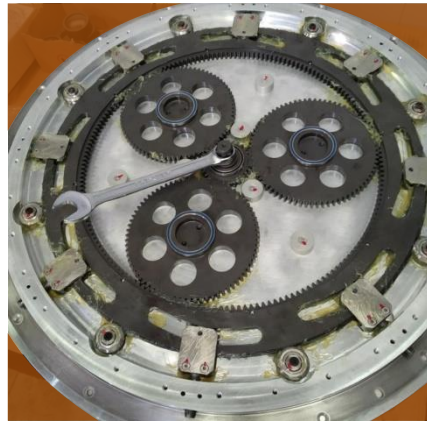
1) 取り出し用アクセス装置(アーム・エンクロージャ等) (3/6)

【今年度の成果3/5】

- ✓ X-6ペネ接続構造ダブルドア機構については要素試験を実施し、ダブルドア部のシール性と遠隔接続について繰り返し試験で設計通りの性能を確保できることを確認した。



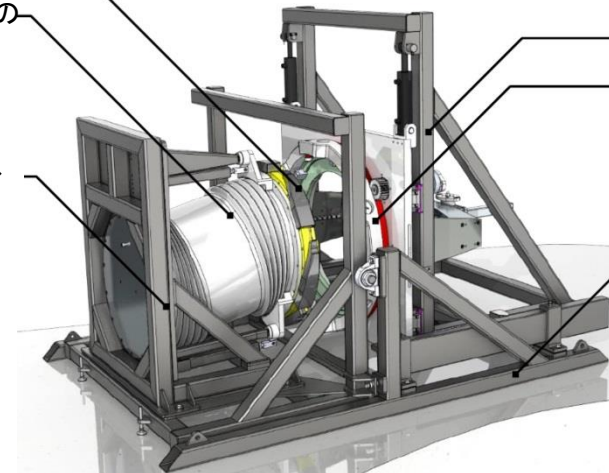
ダブルドア構造と要素試験体



X-6ペネ接続構造の接続部

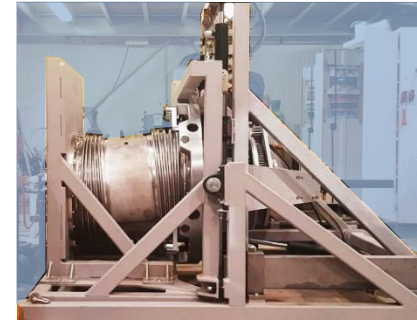
X-6ペネ接続構造の
模擬ペローズ

固定用架台



ドッキング時の高さ調整機構

エンクロージャの接続部



エンクロージャとX-6ペネ接続構造のドッキング機構の要素試験装置

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

1) 取り出し用アクセス装置(アーム・エンクロージャ等) (4/6)

【今年度の成果4/5】

- ✓ ダブルドアの接続を50回繰り返し、シール部の漏れが $10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以下を維持していることを確認。(図1)
- ✓ ダブルドア同士のシール性についても上記と同じ試験結果を得た。(図2)
- ✓ X-6ペネ接続構造の後部ベローズを最大100mm × 20回繰り返し偏心させ、上記と同じ結果を得た。(図3)
- ✓ X-6ペネ接続構造の後部ベローズとエンクロージャ側のクランプ機構を20回繰り返しドッキングさせ、上記と同じ結果を得るとともに、クランプ時の必要トルクのデータを得た。トルクデータは夏・冬の温度変化を想定し、4°Cと20°Cでデータを取得した。(図4, 5)

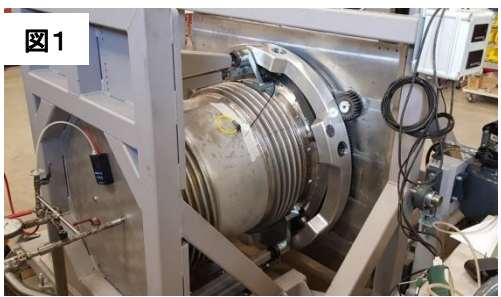


図1

ダブルドア接続部の漏えい試験状況



図2

ダブルドア同士の漏えい試験状況



図3

ベローズを上偏心させた漏えい試験状況



図4

クランプ機構の駆動歯車

クランプ機構の試験状況

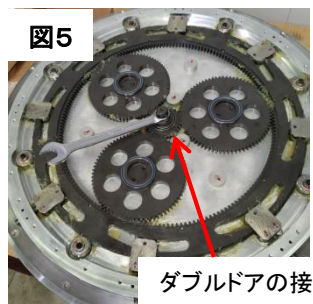
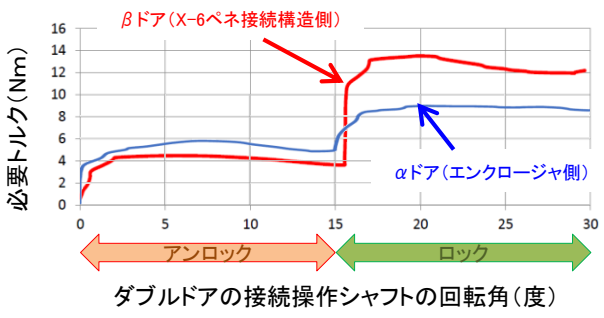
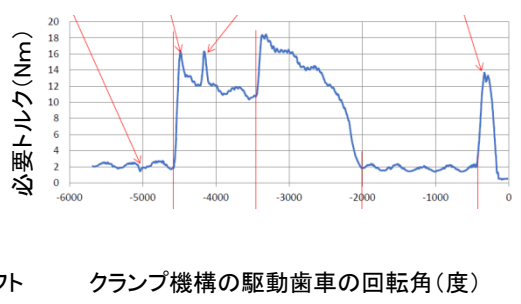


図5

ダブルドアの接続操作シャフト



クランプ機構の駆動歯車の回転角(度)

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

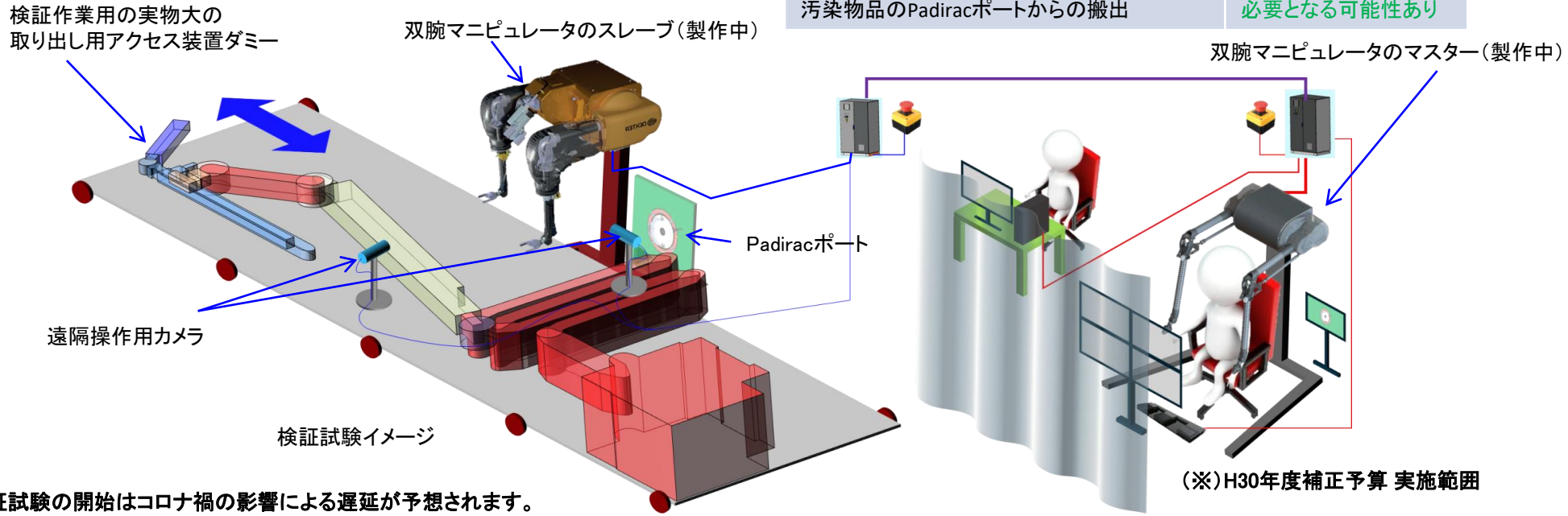
6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

1) 取り出し用アクセス装置(アーム・エンクロージャ等) (5/6)

【今年度の成果5/5】

- ✓ エンクロージャ内マニピュレータ作業の検証(※)のため、双腕マニピュレータを用いた検証試験計画を策定した。
- ✓ 段階的な燃料デブリ取り出し用の双腕マニピュレータを2020年度9月を目標に製作し、10月より検証試験を開始する見通しを得た。

検証作業(1/2)	専用補助具の要否	検証作業(2/2)	専用補助具の要否
燃料デブリ回収装置のアクセス装置への付け外し	必要となる可能性あり	アクセス装置やエンクロージャの除染	必須と予想される
燃料デブリ回収装置の部品交換	必須と予想される	Padiracポートドアのメンテナンス	必要となる可能性あり
燃料デブリ回収装置からの燃料デブリ輸送	必要となる可能性あり	燃料デブリ収納容器の搬出	不要と予想される
		汚染物品のPadiracポートからの搬出	必要となる可能性あり



検証試験の開始はコロナ禍の影響による遅延が予想されます。

(※)H30年度補正予算 実施範囲

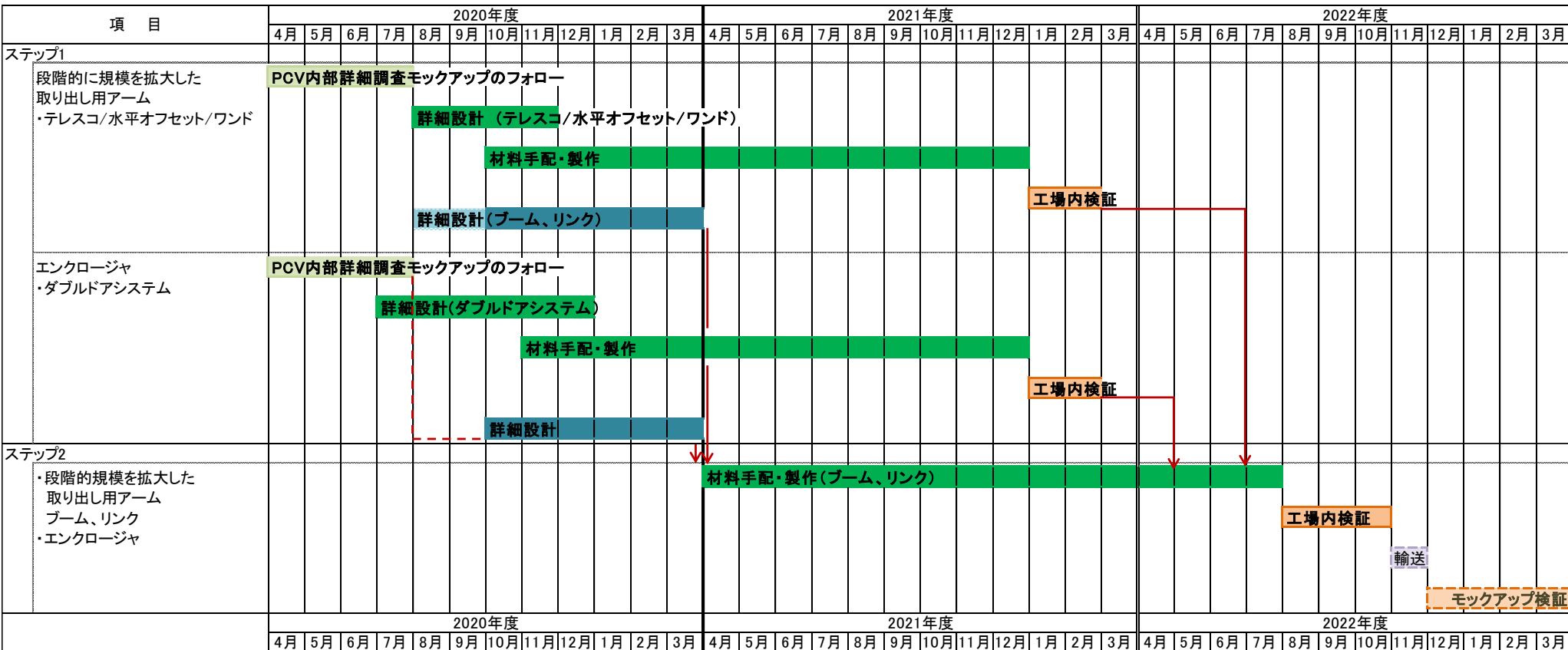
6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

1) 取り出し用アクセス装置(アーム・エンクロージャ等) (6/6)

【アーム・エンクロージャの開発検討結果】

✓ アーム・エンクロージャの試作からモックアップ検証までには**約3年**が必要と評価した。



✓ PCV内部詳細調査用アームの試作結果を踏まえると、今後の試作を経て機能試験を実施するTRL4に到達。

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

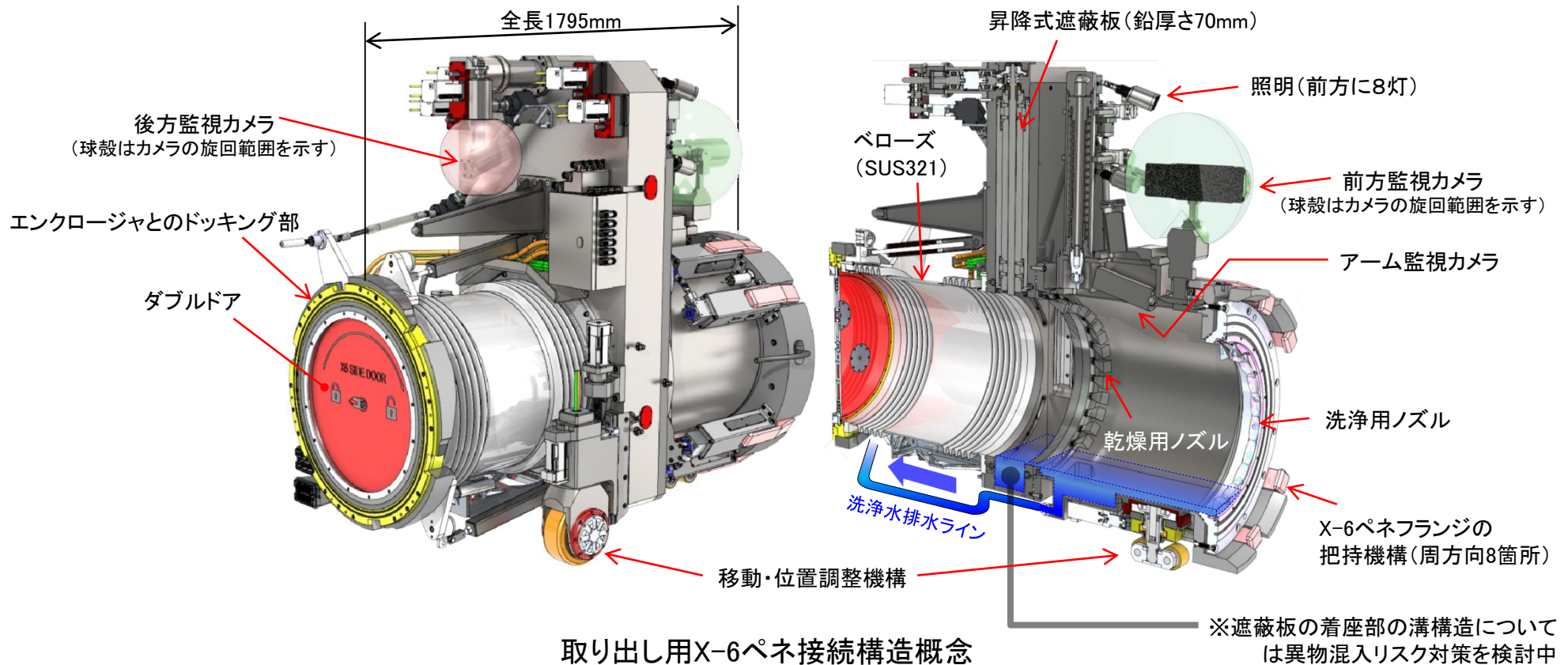
6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

2) 取り出し用アクセスルート構築装置(X-6ペネ接続構造) (1/2)

【目標】アクセス装置のエンクロージャとX-6ペネトレーションとの接続・離脱ができ、アームのアクセスルートが形成でき、エンクロージャ撤去時にてダストの飛散を防止するダブルドア接続が可能な接続構造体进行設計する。

【今年度の成果1/2】

✓ 2018年度の概念検討結果を元にX-6ペネ接続構造の基本設計を実施。



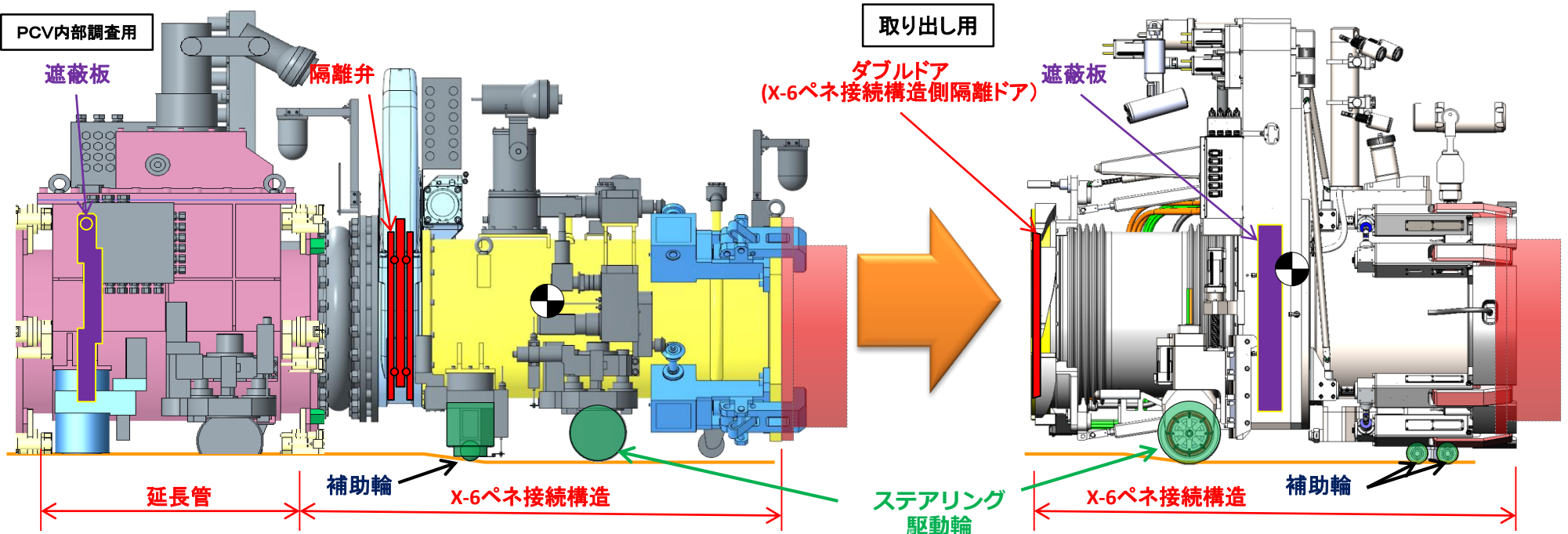
6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

2) 取り出し用アクセスルート構築装置(X-6ペネ接続構造) (2/2)

【今年度の成果2/2】

- ✓ PCV内部詳細調査用のものと要求仕様の相違点を踏まえ、設計変更箇所を整理し、その妥当性を評価した。
- ✓ 下期より基本設計に基づき、試作機の製作に着手(2020年度末までに工場内検証を行う)



PCV内部詳細調査用と取り出し用のX-6ペネ接続構造比較

【今後の計画】

- ✓ 試作機の製作～工場内検証を2020年度末までに完了する。試作を経て機能試験を実施するTRL4に到達。

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

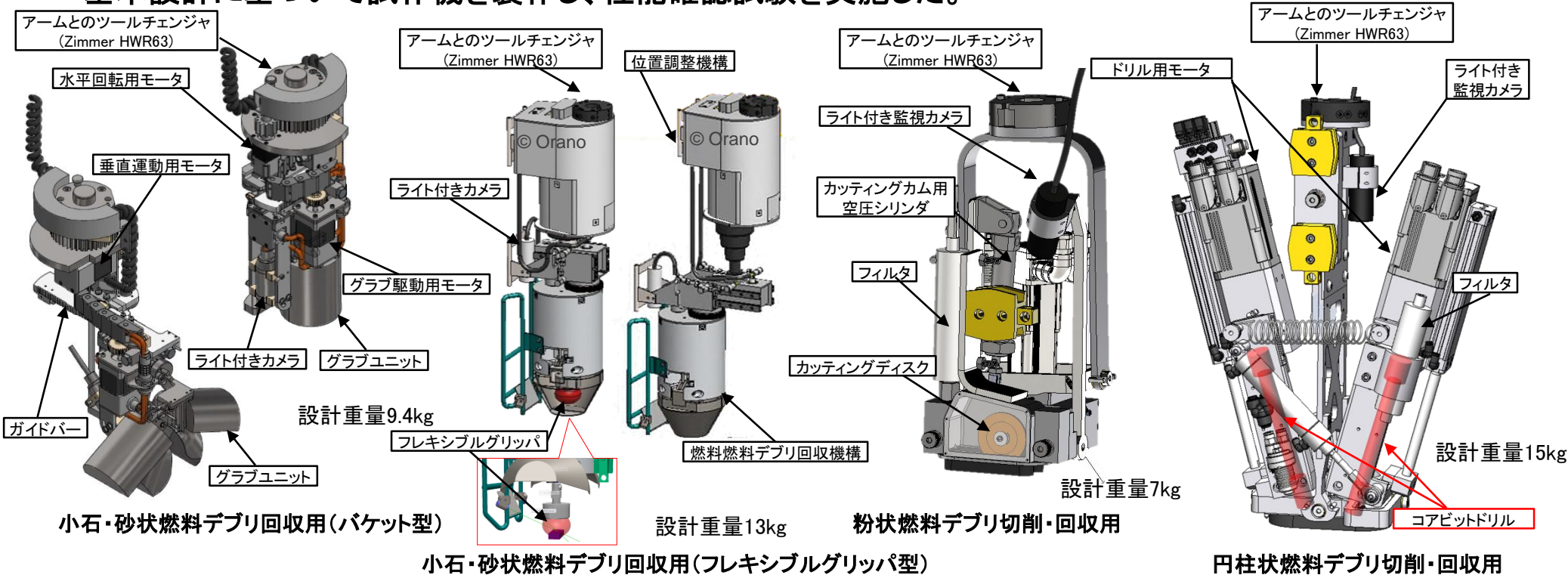
6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

3) 燃料デブリ切削・回収装置(小石・砂状燃料デブリ回収用、粉状燃料デブリ切削・回収用、円柱状燃料デブリ切削・回収用等) (1/3)

【目標】小石・砂状燃料デブリ回収用、粉状燃料デブリ切削・回収用、円柱状燃料デブリ切削・回収用の各燃料デブリ回収装置を試作し、単体性能を確認する。

【今年度の成果1/3】

- ✓ 2018年度の概念検討結果を元に4種類の燃料デブリ回収装置の基本設計を実施。
- ✓ 基本設計に基づいて試作機を製作し、性能確認試験を実施した。



6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

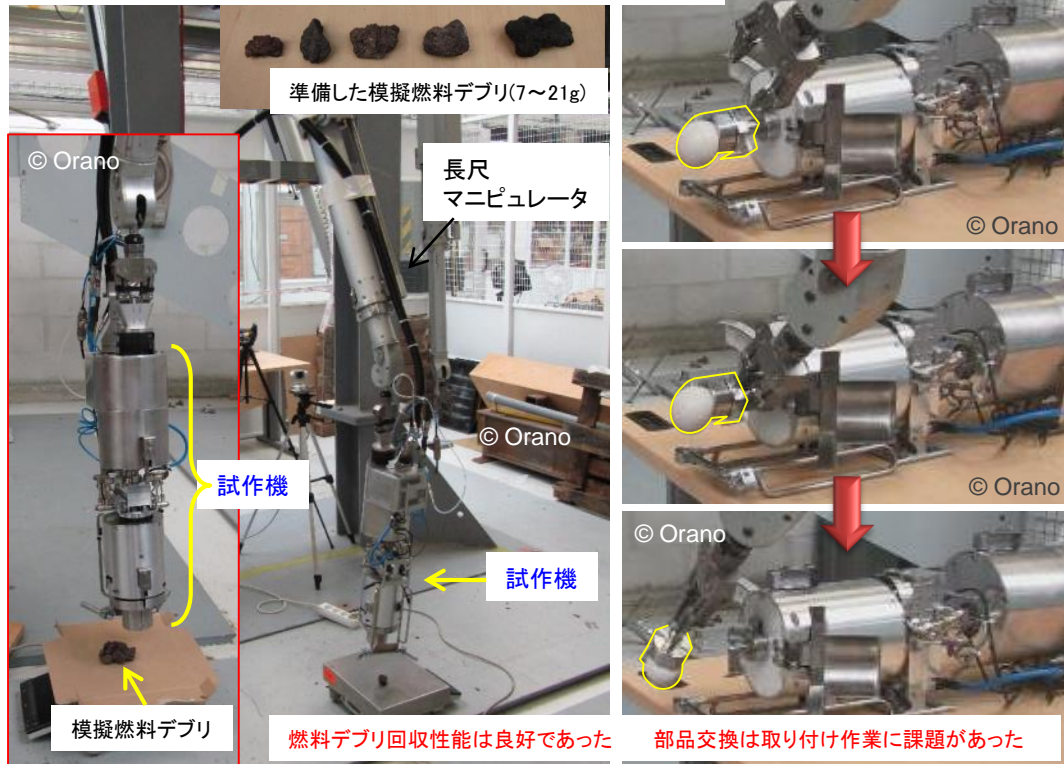
6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

3) 燃料デブリ切削・回収装置(小石・砂状燃料デブリ回収用、粉状燃料デブリ切削・回収用、円柱状燃料デブリ切削・回収用等) (2/3)

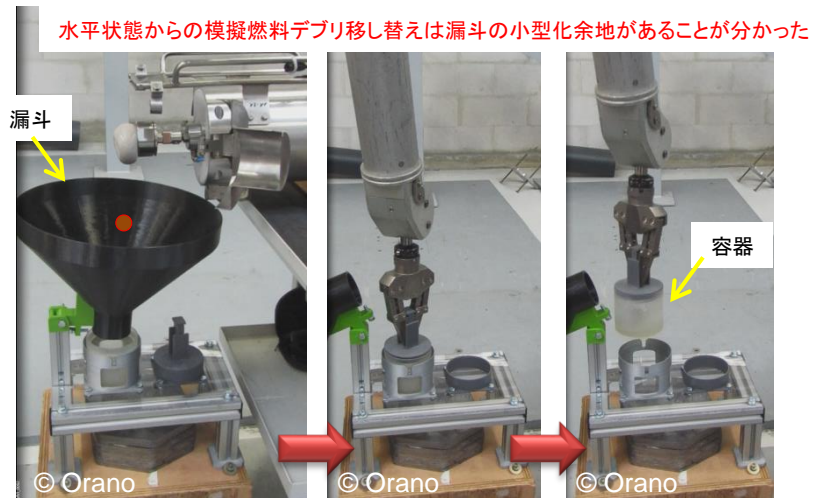
【今年度の成果2/3】

✓ 基本設計に基づいて試作機を製作し、性能確認試験を実施した。

小石・砂状燃料デブリ回収用(フレキシブルグリッパ型)の性能試験



水平状態にした移送試験



模擬燃料デブリを容器に移し替える遠隔作業の試験

取り出し用アームの代替として長尺マニピュレータを利用した試験 マニピュレータによる部品交換の試験

✓ 設計通りの性能を有していることを確認するとともに、改良点を抽出した。

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

3) 燃料デブリ切削・回収装置(小石・砂状燃料デブリ回収用、粉状燃料デブリ切削・回収用、円柱状燃料デブリ切削・回収用等) (3/3)

【今年度の成果3/3】

✓ 基本設計に基づいて試作機を製作し、性能確認試験を実施した。



✓ 設計通りの性能を有していることを確認するとともに、改良点を抽出した。

【今後の計画】

✓ 機能試験を実施し、今後改良を加えて工場で模擬環境下での実証を行う⇒TRL4~5に到達。

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

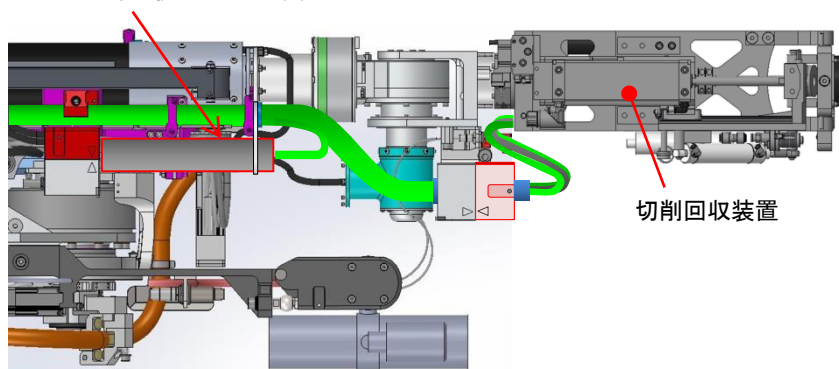
4) 中性子モニタシステム(臨界近接監視用等) (1/3)

【目標】水中から露出した燃料デブリからの中性子を計測することで、燃料デブリの臨界近接の程度を評価できるシステムの基本設計を完了する。

【今年度の成果1/3】

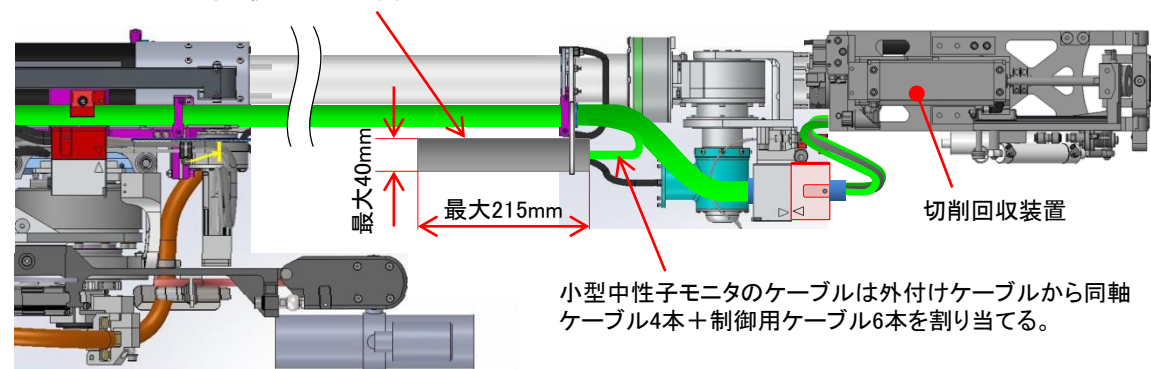
- ✓ 概念検討結果と前述6.1.3項の安全・シナリオの観点から、中性子監視の検討結果を元に中性子モニタシステムの要求仕様を設定した。
- ✓ 燃料デブリ切削時に中性子束の変化を監視するための常時監視用小型中性子モニタの取り出し用アームへの搭載方法について検討を行い、直径40mm×長さ215mm以下であればワンドの先端に搭載する余地があることが分かった。(下図)
- ✓ 上記要求仕様や取り出し用アームとの取り合い条件を踏まえて2種類の中性子モニタの基本設計を行った。

常時監視用の小型中性子モニタ



ワンドを畳んだ時の状態

常時監視用の小型中性子モニタ



ワンドを伸ばした時の状態

小型中性子モニタのケーブルは外付けケーブルから同軸ケーブル4本+制御用ケーブル6本を割り当てる。

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

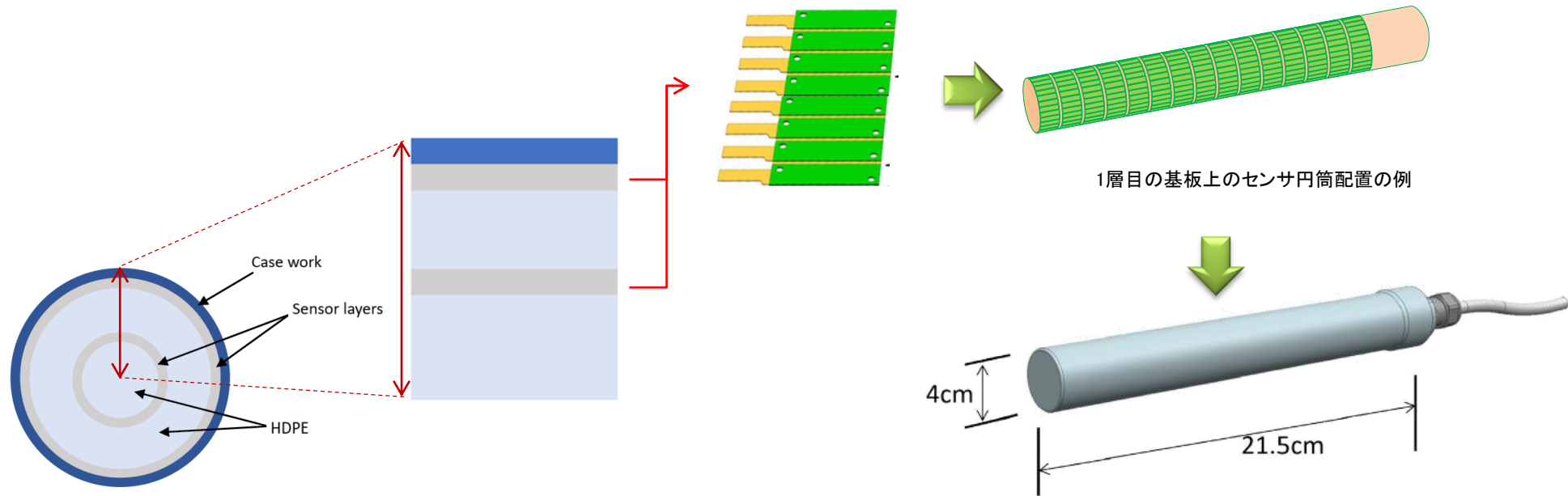
6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

4) 中性子モニタシステム(臨界近接監視用等) (2/3)

【今年度の成果2/3】

✓ 常時監視用小型中性子モニタの基本設計(PCV内部詳細調査のセンサー技術から小型化を図る)

- ・SiC半導体型(フレキシブル基板 円筒配置)
- ・材質:アルミ(本体)
- ・減速材 HDPE(高密度ポリエチレン)
- ・ガンマ遮へい 鉛 なし→ガンマ除去効果の低下でS/N比が悪化するが、熱中性子の吸収が減少する分、減速材が少ない効果を相殺して感度向上に寄与
- ・感度:1cps/nv以上
- ・サイズ:φ40mm×215mm
- ・耐放射線性:100Gy/h、累積5MGy
- ・全体重量:1.4kg
- ・防水/防塵性:IP68



今後、製作設計の段階で具体的な基板の実現方法、サブモジュール化の検討、サミング回路の構築、信号取出し方法の検討を進め、組立・検証試験を実施。臨界近接の可能性を計数率の変動で評価する。

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

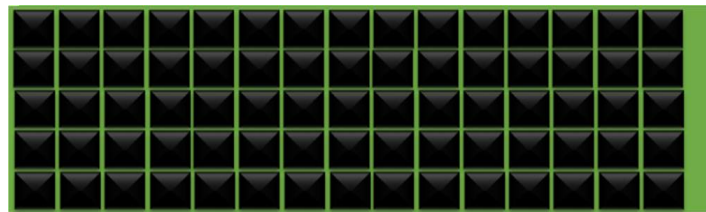
6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

4) 中性子モニタシステム(臨界近接監視用等) (3/3)

【今年度の成果3/3】

✓ 予測監視用中性子モニタの基本設計(PCV内部詳細調査のセンサー技術を応用)

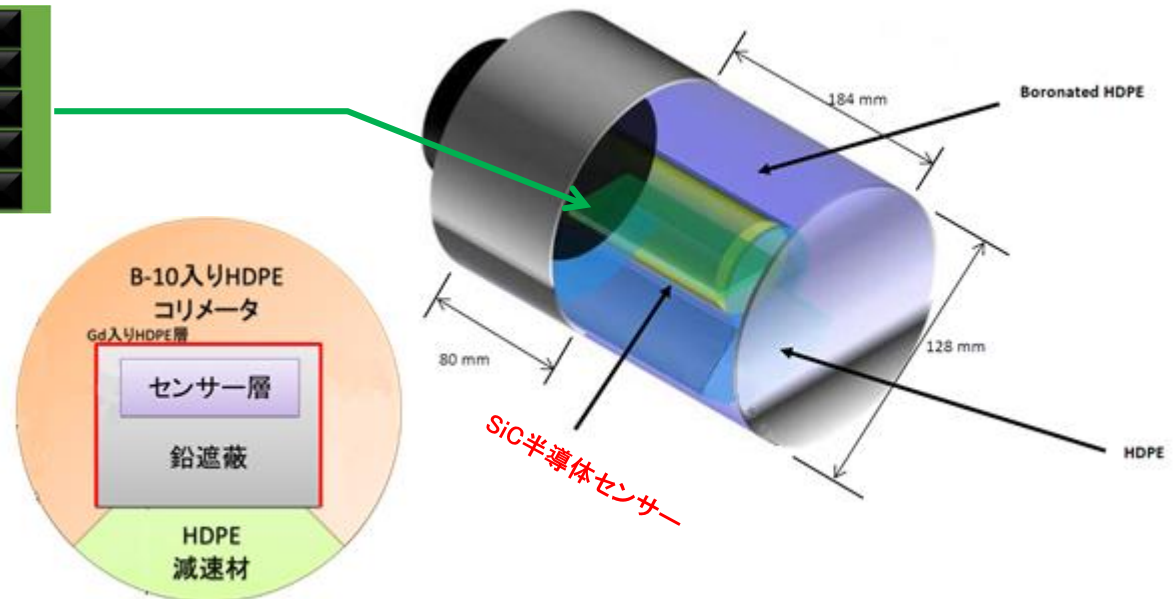
- ・SiC半導体型
- ・材質:アルミ(本体)
- ・減速材 HDPE(高密度ポリエチレン: 空中デブリからの高速中性子も十分減速させ、感度よく計測できる)
- ・PCV内部詳細調査用の中性子検出器をベースにコリメータの構造を最適化する。(コリメータ材質 B-10入りポリエチレン+Gd入りHDPE)
- ・感度:3cps/nv以上
- ・サイズ:φ128mm×264mm(ヘッドのみ、エクステンション込みで500mm)
- ・耐放射線性:500Gy/h、累積5MGy
- ・防水/防塵性:IP68
- ・全体重量:13kg
- ・ガンマ遮へい 鉛



SiC半導体センサー概念

【今後の計画】

- ✓ 試作機の製作～工場内検証を2020年度末までに完了する予定。現段階でTRL4に到達。



6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

5) 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車 (1/5)

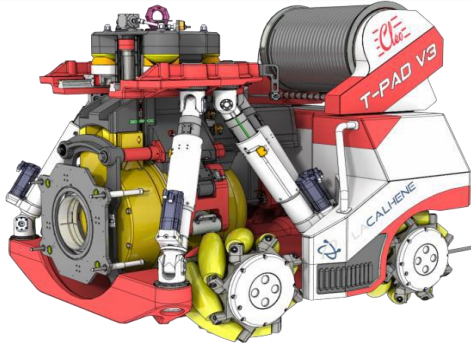
【目標】

X-6ペネトレーションに設置されるエンクロージャの側面に遠隔操作でアクセスし、燃料デブリの構内輸送容器 (Padirac RD20)を搬送・接続・離脱できる台車システムの基本設計を行う。

【今年度の成果1/4】

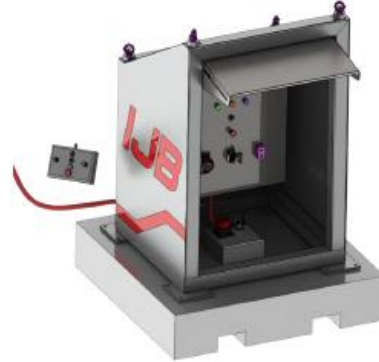
- ✓ 遠隔輸送台車の基本設計を実施し、装置仕様を取り纏めた。
- ✓ 遠隔接続に関わる要素試験を実施した。

①遠隔輸送台車本体 (T-PAD)



大きさ : 約L2600 × W2020 × H2200
 重量 : 17.3ton (本体+RD20)
 電気容量: 約 27.0 kVA (400V)

②中継盤 (IJB)



大きさ: 約1500 × 1500 × 2100
 重量: 約700kg
 電気容量: 約 38.1 kVA (400V)

③中央制御装置 (OPS)



免震重要棟に設置

大きさ: 約5900 × 1700 × 2000
 総重量: 900kg
 電気容量: 約 1.9kVA (230V)

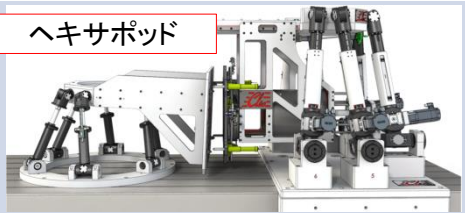
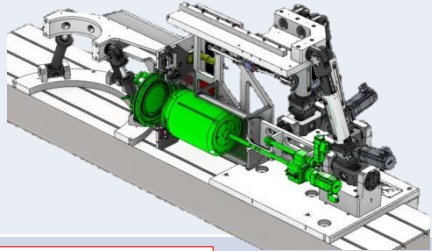
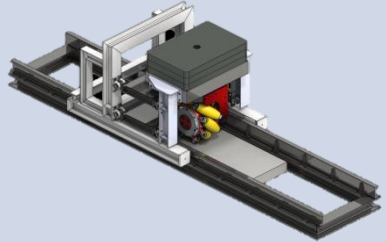
6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

5) 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車 (2/5)

【今年度の成果2/4】

✓ コンテナの接続性及びメカナムホイールの走行性に関する試験を実施し、その機能を確認した。

検討項目	課題	検証内容	イメージ図
① ヘキサポッド システムによる 微調整	✓ 4トン程度のPadiracをミリ単位で6軸で微調整する機能(接続する為の要求される位置精度)の確認。	実機と同形状のヘキサポッドを試作し、位置決め性能を確認した。(2018年度実施済) 2019年度に実施した内容	 ヘキサポッド
② 接続ツール (押し出し+回転) によるコンテナ接 続調整	✓ コンテナを押し出し、エンクロージャ側のポートと接合後、回転する機能及び安全性の確認(押し出し、回転トルク、噛み込み防止対策 他)	模擬接続ツールを試作し、接続時のトルクデータ等を取得した。また、コンテナと模擬搬出ポートの接続試験を20回繰り返し実施し、 スムーズな接続機能を確認した。 (上記①のヘキサポッドによる位置決め機能を含めた一連の作業を検証した)	 コンテナの接続ツール
③ 台車による移動 及び粗調整 (メカナムホイール の走行性試験)	✓ エンクロージャ近傍までの移動機能の確認(現場床面の状況を考慮した設計検討) ✓ エンクロージャの搬出ポート位置への粗調整機能の確認 ・水平方向: ±15mm以下 ・回転方向: ±2.5° 以下	台車の車輪(メカナムホイール)を試作し、Padiracを積載した場合と同等の重量をかけた条件での性能確認を実施した。 その結果、計画した走行性能を確認できた。 また、構成部品(ローラ)に関し、最適な部材を選定した。	 メカナムホイール

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

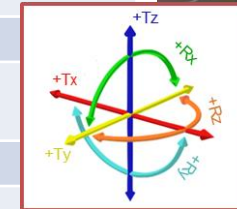
6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

5) 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車 (3/5)

【今年度の成果3/4】

✓ 要求条件を満足できる基本仕様を設計検討した。

No.	項目	設計要求条件	基本設計仕様
1	運転(操作方法)	免震重要棟からの遠隔操作	信号ケーブル、光ファイバーによる通信
2	温度	-8°C ~ 40°C	左記条件に対応可能な部品、装置を選定
3	湿度	10% ~ 100%	計器及び電気品に対し防湿形の器具の選定
4	放射線	1K Gy程度	耐放射線性の部品を採用。耐放射線性の弱い部品(電子部品)は、鉛遮へいBOX内への電子部品の配置
5	電源仕様	50 Hz、200 V/400 V	50 Hz、200 V(1.9kVA)/400 V(38.1kVA)
6	清浄度(防水・粉塵)	床面に水及び粉塵有り。	IP55以上の対策を実施
7	汚染レベル	α 核種による汚染の可能性あり。	除染可能な構造及び材質とした。
8	輸送容器の重量・寸法	4050 kg、 ϕ 860 mm × L958 mm	Padirac RD20
9	経路幅、高さ	幅2.5m、高さ2.3m	W 2036 × L 3000 × H 2160 mm
10	床の重量制限	4.9 ton/m ²	3.4 ton/m ²
11	路面状況	(スロープ高さ60mm他)	メカナムホイールの要素試験を行い、想定される路面を走行できることを確認した。
12	微調整機能	以下の位置精度以内にセットできること。 Tx: ± 0.5 mm、Ty, Tz: ± 1.0 mm Rx: $\pm 1^\circ$ 、Ry, Rz: $\pm 0.17^\circ$ (*1)	ヘキサポッドの要素試験を行い、要求仕様を満足する機能を有することを確認した。
13	移動及び粗調整機能	以下の位置精度以内に停止できること。 Tx, Ty: ± 15 mm、Rz: $\pm 2.5^\circ$ (*1)	メカナムホイールの机上検討及び要素試験を行い、適合する機能を有することを確認した。



*1: コンテナを接続させる目標位置に対する各方向の誤差を示す。

6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

5) 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車 (4/5)

【今年度の成果4/4】

✓ 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車の詳細設計(H30年度補正予算 実施範囲)に着手した。

現場での安全性を考慮した基本設計の妥当性確認及び保守計画並びに試作機の設計・製作の事前検討等を進めている。主要な検討項目は、以下の通り。

なお、詳細設計は引き続き2020年2月から実施している。

(1) 遠隔輸送台車の安全性に関する設計妥当性評価

- ①安全性(被ばく低減等)や不具合リスクの深掘り検討及びその対策の検討
- ②耐震対策の詳細検討(エンクロージャへの衝突防止用ストッパ等)
- ③不適合発生時のレスキュー対策の具体化

(2) 遠隔輸送台車の保守計画の具体化検討

- ①保守方法の検討(現場での保守の具体化及び現場作業の整理)
- ②構成部品が故障した場合の復旧方法の整理(現場での作業性の考慮)

(3) 試作機の設計・製作を円滑に進めるための事前検討

- ①工場試験の実施内容の具体化検討 (ダミーPadirac等の試験治具の検討)
- ②全体計画・スケジュールの整理

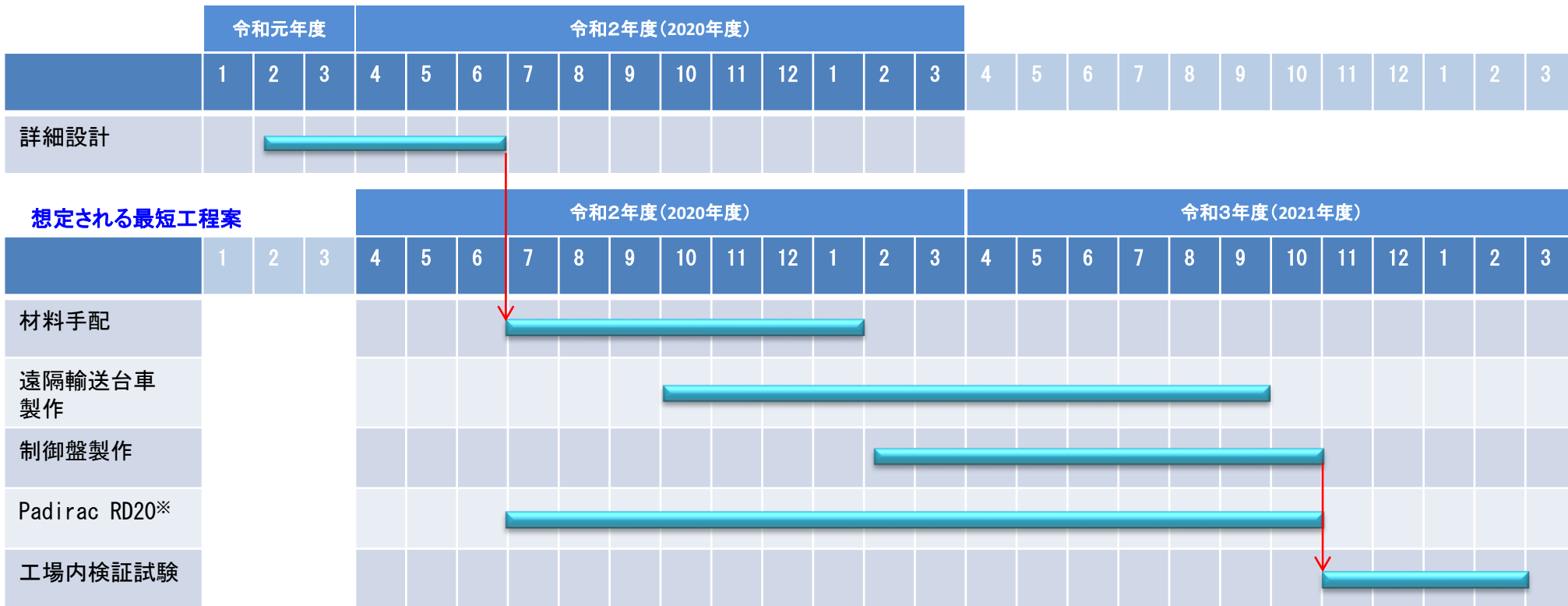
6.2 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

6.2.2 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

5) 燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車 (5/5)

【燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車の開発検討結果】

✓ 今後、試作機の詳細設計を進める。製作～工場内検証は最短で2カ年で完了できる見通し。



※ 工場内検証用の模擬体を準備することを計画する。

✓ 試作を経て機能試験を実施するTRL4に到達。

7. まとめと今後の対応

1. 燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発計画、取り出し計画の策定

▶ 試験的燃料デブリ取り出し技術の開発計画の策定、更新

- ・ 試験的燃料デブリ取出し作業時のリスク(燃料デブリ漏えい等)アセスメントを行い、トラブル発生時の対応策や課題を具体化した。
- ・ グローブボックス内での燃料デブリの取り出し、重量測定、容器詰め替え作業などの方法を具体化した。

▶ 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの技術開発計画の策定、更新

- ・ PCV内部詳細調査PJにおけるPCV底部へのアクセス検討状況を確認した。プラットフォームの梁切断は行わず、代わりに短尺ワンドを準備することでPCV底部へのアクセスを達成する計画。
⇒本PJでも短尺ワンドでアクセスする方針とした。
- ・ PCV内部詳細調査PJで開発中のアーム型アクセス装置の製作期間をベースに、取り出し用アクセス装置の製作着手からモックアップ検証までの**必要期間を約3年と評価**した。

▶ 安全・システムの観点からの全体シナリオの策定、更新

- ・ 気中での切削粉の燃料デブリ取り出し早期実現にむけて、ディスクカッターによる燃料デブリ切削を模擬したダスト飛散率試験を実施し、飛散率データを取得した。また試験結果に基づき、粉状燃料デブリ切削・回収装置に対する安全要求を設定した。
- ・ 円柱状燃料デブリなどの燃料デブリ切削時における臨界安全を確保するため、予測監視と常時監視の組合せによる中性子監視の方法を検討。
⇒感度要求を予測監視3cps/nv, 常時監視1cps/nvに設定した。
- ・ 常時監視向けの小型SiC半導体型検出器による中性子モニタを検討した。
⇒直径30mm×長さ300mmで感度1cps/nvを達成できる見通しを得た。

7. まとめと今後の対応

2.燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

▶ 試験的燃料デブリ取り出しのための燃料デブリ回収装置の開発

- ・ 試作した「極細線金ブラシ方式」、「真空容器方式」に対し、凹凸面のある模擬燃料デブリ表面からの燃料デブリ回収試験により燃料デブリ回収性能を評価した。
- ・ 「極細線金ブラシ方式」では凹凸面で0.07～0.3g程度を回収できる可能性があることが分かった。
- ・ トレーニング用マニピュレータによる遠隔取扱性試験で、改良点を抽出した。
- ・ PCV内部詳細調査用アームの完成が当初計画から大幅に遅れた為、組合せ試験が年度内に実施できなかった。
⇒ 2020年度以降に組合せ試験を行うこととし、初号機の試験的燃料デブリ取り出しのための燃料デブリ回収装置の開発はPCV内部詳細調査PJへ移管する。

▶ 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

【取り出し用アクセス装置(アーム・エンクロージャ等)】

- ・ アームのペイロードをPCV内部詳細調査用アームよりも向上させた(10⇒20kg)。
- ・ アーム型アクセス装置のリンク機構の構成を見直し、新たに水平オフセット機構を追加した。プラットフォームの開口状況の制限を考慮してPCV底部へのアクセス範囲を向上させた(2.8m²:見込み値)
- ・ X-6ペネ接続構造ダブルドア機構については要素試験を実施し、ダブルドア部のシール性と遠隔接続について繰り返し試験で設計通りの性能を確保できることを確認した。
- ・ エンクロージャ内の燃料デブリ取扱作業を想定してマニピュレータと模擬アーム・エンクロージャを用意し、モックアップ検証を行う。

7. まとめと今後の対応

▶ 段階的に規模を拡大した取り出しのための装置、システムの開発

【取り出し用アクセスルート構築装置(X-6ペネ接続構造)】

- ・ 2018年度の概念検討結果を元にX-6ペネ接続構造の基本設計を実施。
- ・ PCV内部詳細調査用のものとの要求仕様の相違点を踏まえた、設計変更箇所を整理し、その妥当性を評価した。
- ・ **下期より基本設計に基づき、試作機の製作に着手(2020年度末までに工場内検証を行う)**

【燃料デブリ切削・回収装置(小石・砂状燃料デブリ回収用、粉状燃料デブリ切削・回収用、円柱状燃料デブリ切削・回収用等)】

- ・ 2018年度の概念検討結果を元に4種類の燃料デブリ回収装置の基本設計を実施。
- ・ 基本設計に基づいて試作機を製作し、性能確認試験を実施した。

【中性子モニタシステム(臨界近接監視用等)】

- ・ 燃料デブリ切削時に中性子束の変化を監視するための常時監視用小型中性子モニタの取り出し用アームへの搭載方法について検討を行い、ワンドの先端に搭載出来ることを確認した。
- ・ 常時監視用小型中性子モニタの基本設計/予測監視用高感度中性子モニタの基本設計を実施。

【燃料デブリ収納容器の遠隔輸送台車】

- ・ 遠隔輸送台車の基本設計を実施し、装置仕様を取り纏めた。
- ・ コンテナの接続性及びメカナムホイールの走行性に関する試験を実施し、その機能を確認した。
- ・ **試作機の詳細設計を進め、製作～工場内検証を2カ年で行う。**