

**H27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開発」

平成29年度成果報告

平成30年4月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

目次

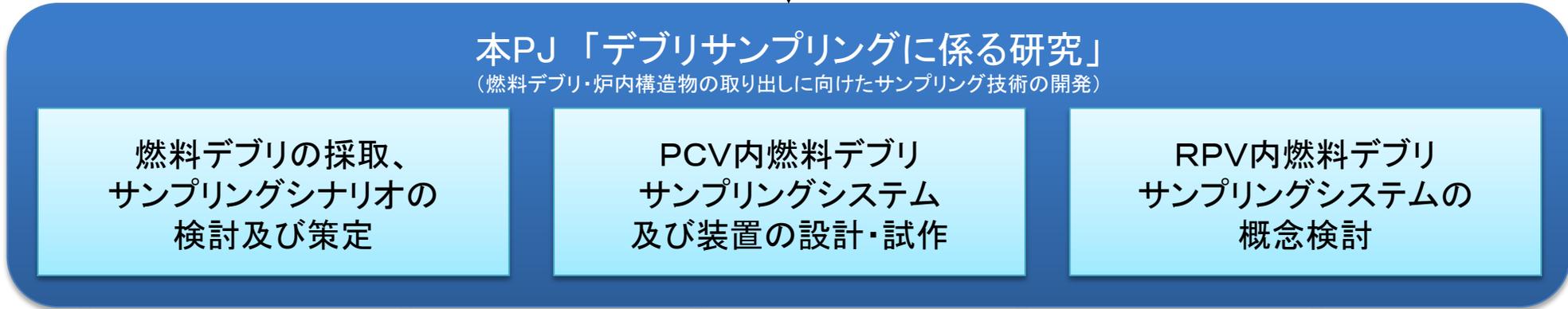
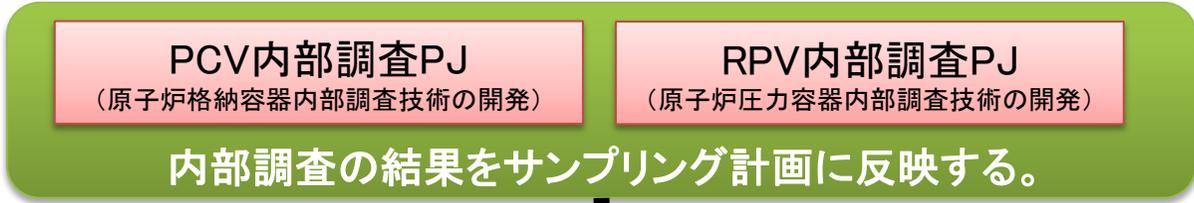
1. 研究の背景・目的	ページ
1.1 本研究が必要な理由	2
1.2 本研究の成果の反映先と寄与	3
2. 実施項目間、他研究との関連、目標	
2.1 本研究の実施項目	4
2.2 実施項目間、他研究との関係性	5-6
2.3 目標	7
3. 実施スケジュール	8
4. 実施事項・成果	
4.1 燃料デブリの採取、サンプリングシナリオの検討及び策定	
4.1.1 調査・採取計画の立案	9-13
4.1.2 開発技術の抽出	14
4.1.3 安全・システムの検討	15-16
4.2 原子炉格納容器内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・試作	
4.2.1 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計	17-23
4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討	24
4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計	25-27
4.3 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	28-31
4.4 目標に照らし合わせた達成度	32
5. まとめ	33

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号機のデブリ性状(成分や機械的性質など)については、臨界評価や燃料デブリ取り出し装置開発等に使用され、スリーマイルアイランド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されるデブリ性状から安全側に設定されている。
- しかしながら、実際の装置開発を適正に進めるに当たり、推定される性状が妥当なのか(安全側かどうかも含め)を確認するには実際の燃料デブリをサンプリングすることが必要である。
- このため、昨年度の研究では以下を実施した。
 - 燃料デブリのサンプリング全体シナリオの策定
 - 原子炉格納容器(PCV)内燃料デブリサンプリングの有用性の評価
 - PCV内燃料デブリのサンプリングの開発計画の策定・更新
 - PCV内燃料デブリサンプリングシステム・装置の設計検討
 - 原子炉圧力容器(RPV)内サンプリング装置の概念設計
- この研究成果をもとに、福島第一の最新の知見も踏まえ、サンプリング計画(サンプリングシナリオや開発計画)を見直すとともに、サンプリングシステムに関する技術課題の検討をさらに進める必要があり、本研究にて実施した。

1.2 本研究の成果の反映先と寄与



硬さ等の物性データ

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ーデータ

燃料デブリ取り出し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

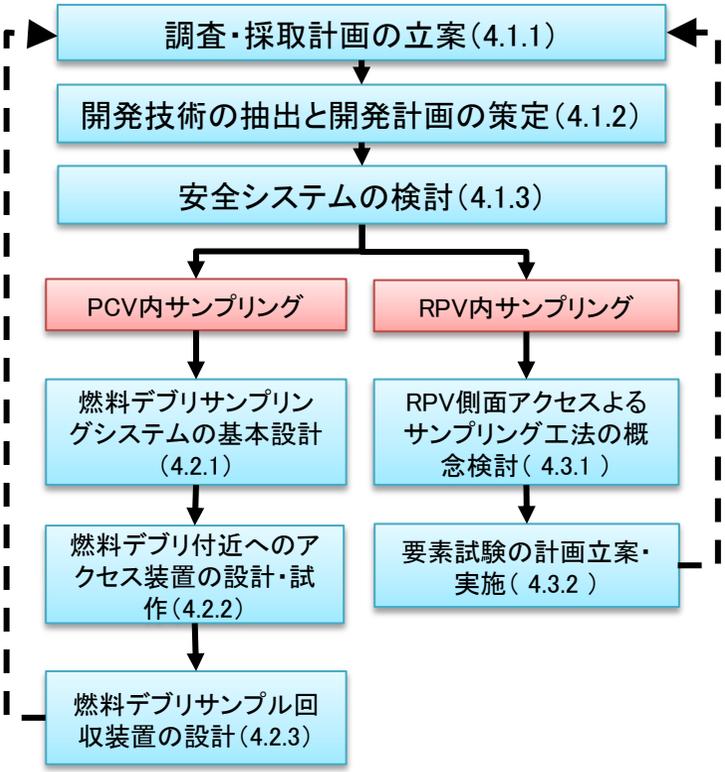
燃料デブリ取り出しの工法・装置等の詳細設計に係る各研究

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

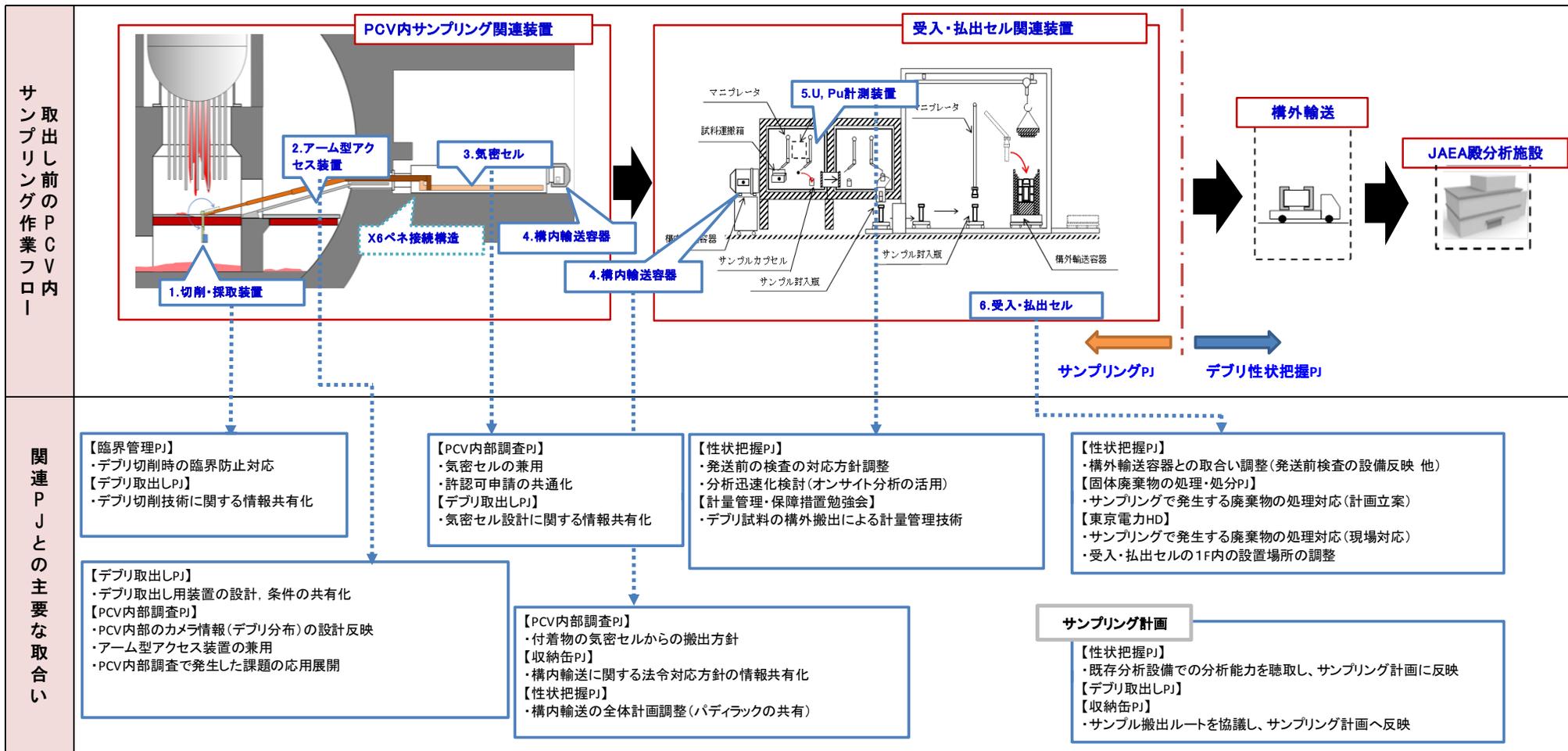
No.	実施項目	平成29年度の実施範囲	
4.1	燃料デブリの採取、サンプリングシナリオの検討及び策定	4.1.1 調査・採取計画の立案	サンプリングニーズや分析施設の処理能力、PCV内部調査結果を考慮してサンプリング計画を更新する。
		4.1.2 開発技術の抽出と開発計画の策定	本PJで開発が必要な技術(不足している技術)と、関連PJで開発中の技術で本PJへ適用可能な技術を抽出し、開発計画に反映する。
		4.1.3 安全システムの検討	サンプリング時の概略の安全解析を行い、安全システムの検討結果をサンプリングシナリオへ反映する。
4.2	PCV内燃料デブリサンプリングシステム及び装置の設計・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	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アクセス装置の検討	PCV内の燃料デブリに到達し、サンプル回収装置を搭載できるアーム型アクセス装置の検討を行う。
		4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計	小石・砂状デブリを回収する装置と切削粉状のデブリを回収する装置概念を検討し、要素試験を行う。
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	RPV内部調査PJで検討中の側面穴開け調査工法に適合するサンプリングシステムを検討する。
		4.3.2 要素試験の計画立案・実施	上部穴開け、側面穴開け調査工法に適合するサンプリングシステムについての要素試験計画を立案する。

2.2 実施項目間、他研究との関係性(1/2)



	連携先	連携内容	連携時期
1	デブリ性状把握PJ	<ul style="list-style-type: none"> ・デブリ性状把握PJのH28年度成果報告会に参加し、情報を共有した。 ・デブリ性状把握PJと構外輸送容器の取り扱い条件の調整を実施した。(プロジェクト間調整会議) ・JAEA殿の既存分析設備での分析能力等を聴取し、サンプリング計画に反映した。(プロジェクト間調整会議) 	<ul style="list-style-type: none"> ・2017/6実施 ・2017/6実施 ・2017/12実施
2	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化PJ ・燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術の高度化PJ 	<ul style="list-style-type: none"> ・サンプリングPJより、PCV内でのサンプリング技術開発の進捗状況、安全確保の考え方や安全評価内容を説明し、情報を共有化した。調査用アーム型アクセス装置の共用化の考え方を説明した。(合同PJ会議) ・デブリ取り出し開始後のサンプリングのニーズを深掘りし、サンプル搬出ルート等を協議し、サンプリング計画へ反映した。(合同PJ会議) 	2017/4月以降 月1回ペースで実施
3	PCV内部調査PJ	<ul style="list-style-type: none"> ・PCV内部詳細調査用アーム型アクセス装置の共用化の考え方を説明した。(合同PJ会議) 	2017/6実施
4	収納缶PJ	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ取り出し開始後のサンプリングのニーズを深掘りし、サンプル搬出ルート等を協議し、サンプリング計画へ反映した。(合同PJ会議) 	2017/12実施
5	臨界管理PJ	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ切削時の臨界防止対応について調整を実施した。 	2017/6実施

2.2 実施項目間、他研究との関係性(2/2)



2.3 目標

事業内容	終了時目標TRL
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	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。 (情報整理のため技術成熟度(TRL)目標設定の対象外とする)
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	<p>① 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 燃料デブリ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が行われていること。 (終了時(平成30年度末)目標TRL:レベル3~4)</p> <p>② 燃料デブリ付近へのアクセス装置の設計・試作 PCV内の燃料デブリ付近に燃料デブリサンプル回収装置を持ち込むことが可能なアクセス装置の設計が行われていること。また製作が開始されていること。 (終了時(平成30年度末)目標TRL:レベル4)</p> <p>③ 燃料デブリサンプル回収装置の設計 燃料デブリサンプル回収装置の要素試験が行われていること。 (終了時(平成30年度末)目標TRL:レベル4)</p>
3) RPV内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討	RPV内部へのアクセス装置を中心にサンプリングシステムの概念が検討されていること。 (終了時(平成30年度末)目標TRL:レベル3)

3. 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 (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. 燃料デブリの採取、サンプリングシナリオの検討及び策定	① シナリオ策定	全体シナリオ策定																								
	② 開発計画の策定																									
	③ 工事成立性の検討																									
	④ シナリオの更新																								シナリオ更新	
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	i) 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計	① システム設計	システム設計																							
		② サンプリング用中性子モニタの適用性検討																								
		③ 高線量下でのポート遠隔接続技術の概念検討																								
	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	アクセス装置適用性検討																							
		② アクセス装置の設計・製作																							アクセス装置設計・製作	
	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の要素試験	小石、砂状デブリ回収装置の要素試験																							
		② 小石、砂状デブリ回収装置の設計・製作																							小石、砂状デブリ回収装置の設計・製作	
		③ 粉状デブリ切削回収装置の要素試験																								
		④ 気中切削回収装置の設計・製作																							気中切削回収装置の設計・製作	
	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																							要素試験	
		③ サンプリング計画の立案																							サンプリング計画の立案	
主要なマイルストーン																								年度報告	最終報告書提出	初号機の取り出し方法の確定
																								↑	↑	↑
																								↑	↑	↑
																								↑	↑	↑

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 調査・採取計画の立案 ①採取形態、位置、数に関する採取計画の更新

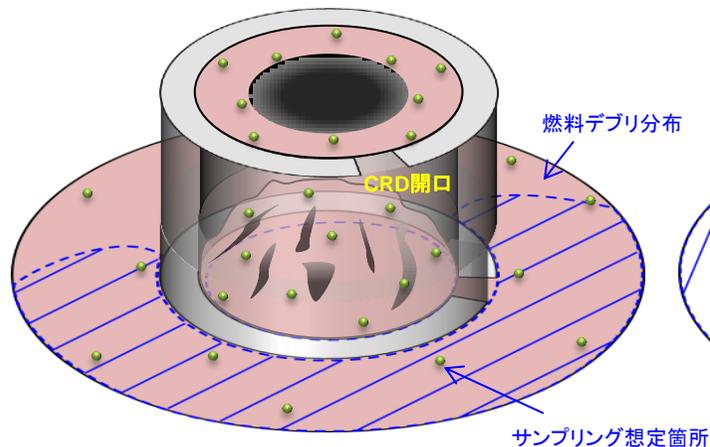
■ 1～3号機のPCV内部調査結果から、各号機サンプリングの技術ハードルを評価した。

号機	PCV内部調査結果	サンプリング難度		備考(根拠・補足説明)
1号機	ペDESTAL外側を調査	高	高	X6ペネ近傍が高線量
	厚い堆積物を確認	高		堆積物撤去が必要
2号機	ペDESTAL内側を調査	低	中	X6ペネ、ペDESTAL開口部共に利用可
	燃料デブリの大部分は気中に露出	中		切削粉の拡散対策
	落下、損傷物は少ない	低		干渉物回避が比較的容易
	堆積物は少ない	低		堆積物撤去が不要
	ペDESTAL外側への流出は未確認	高		作業員開口にアームが到達困難
3号機	ペDESTAL内側を調査	低	高	ペDESTAL開口部は閉塞なし
	高水位のため燃料デブリは水没	高		水位を下げるまでX6ペネ利用困難
	落下、損傷物を複数確認	高		干渉物回避が比較的難しい
	堆積物は少ないと推測される	低		堆積物撤去が不要

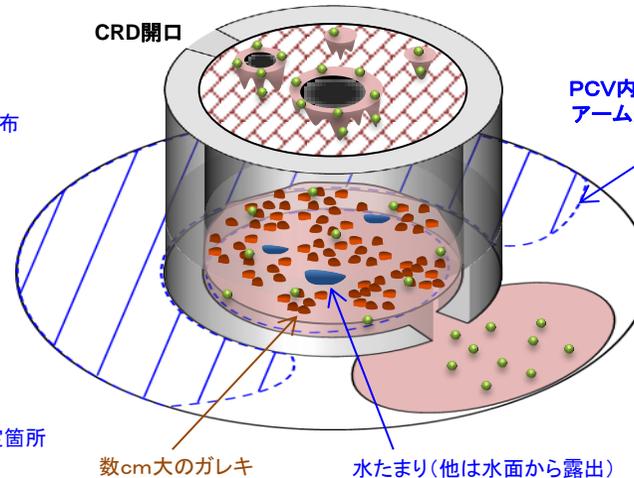
4.1.1 調査・採取計画の立案 ①採取形態、位置、数に関する採取計画の更新

- 分析施設での処理能力を考慮して1回のサンプリング数は30個(コアは6個)と暫定した。
- 1～3号機のPCV内部調査で得られた情報を考慮し、燃料デブリ分布を以下の3パターン仮定してサンプリングポイントを仮定した。(サンプリングの形態についてはNo.11)

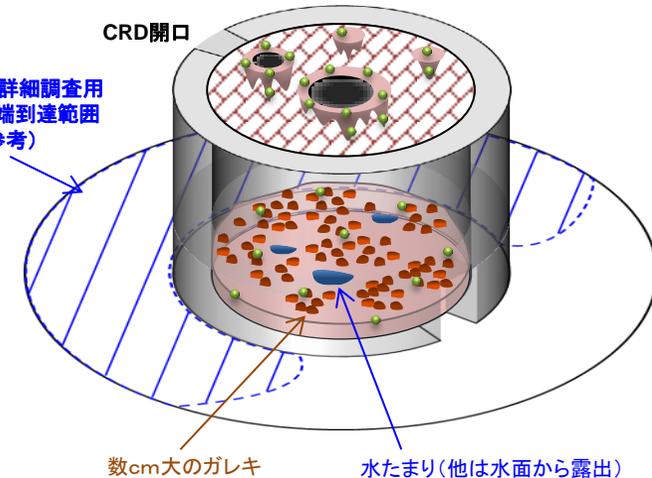
パターン1:ペDESTAL外側全周に拡散



パターン2:ペDESTAL外側の一部に拡散
ペDESTAL内側底部に大きな塊として堆積



パターン3:ペDESTAL外側には拡散なし
ペDESTAL内側底部に大きな塊として堆積



⇒以下の課題を抽出した。

- サンプリング主対象はガレキ、底部に塊として堆積した部位、および構造物付着部が考えられる。採取は数cm大のガレキの把持回収、付着部は構造物ごと切断回収など気中切削以外の方法も検討する必要がある。また燃料デブリ深さ30～60cmに対応する溶融炉心-コンクリート相互作用(MCCI)部の深度サンプリングの装置開発が必要である。
- 作業員開口から外側への燃料デブリ拡散調査が可能か検討する必要がある。

4.1.1 調査・採取計画の立案 ②全体シナリオの策定(PCV内サンプリング)

■ サンプリング対象別に安全要求を整理した。現状の安全システムではⅢまで実施できる見通し。

分類		Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ		Ⅴ
対象燃料デブリ		小石・砂状	切削粉(水中)	切削粉(気中)		切削コア(水中)
サンプルサイズ、質量		砂～φ10mm, 数g	φ0.1mm, 1g程度	φ0.1mm, 1g程度		φ10mm × L100mm, 100g
サンプル数		～30	～30	～30		～6
サンプル間隔		—	5～10cm	5～10cm		50cm
臨界	クライテリア	サンプルサイズ、量、ピッチ(上記、未臨界維持(Keff<0.95)からの制約条件)				
	臨界モニタ	不要※1	不要※1	不要※1		要
	吸収材散布	不要	不要	不要		不要
漏洩	クライテリア	法令上の線量限度※2	法令上の線量限度※2	法令上の線量限度※2		法令上の線量限度※2
	回収率	要求なし	要求なし	≥99.6%※3	要求なし	要求なし
	負圧維持	不要	不要	不要	要	不要
工具	切削(カバー)	なし(不要)	0.5h切削(不要)	0.5h切削(水シール)		3h切削(不要)
	押付け	未定	150～200N	150～200N		400～500N
	深さ	未定	表層	表層		10～100cm
アクセス装置		PCV内部詳細調査用アーム		状況により判断		サンプリング用アーム
計測装置		重量計測(重量全量をU, Puと仮定して輸送許認可対応する)				重量計測またはU, Pu計測
受入・払出しセル		要	要	要		要

表中では省略されている「分類Ⅰ」は燃料デブリではない堆積物(サンプリング対象外)を指す。

※1: サンプリング時の工具落下等の想定外事象について別途検討要

※2: No.16のシートを参照

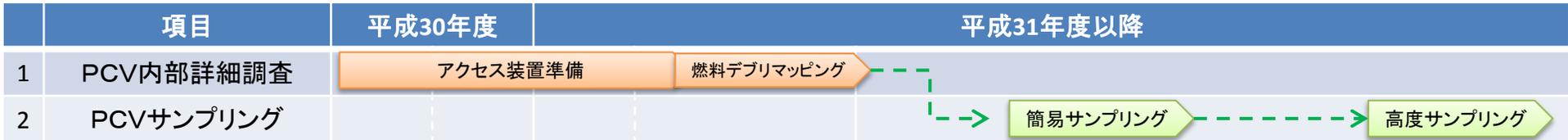
※3: No.17のシートを参照

4.1.1 調査・採取計画の立案 ③PCVサンプリング実施時期、工事の成立性検討

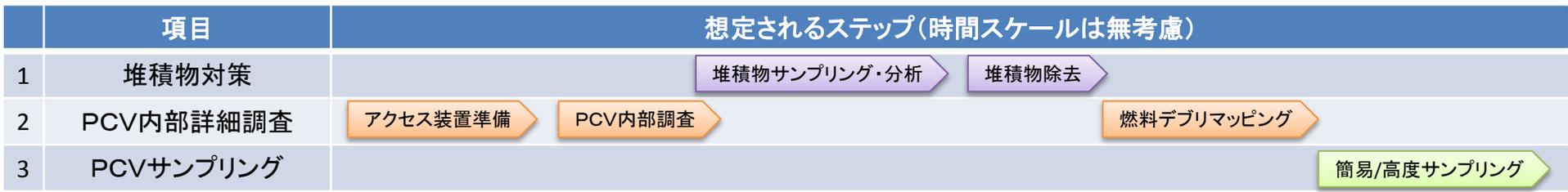
■ 関連する工事の工程を整理して、PCVサンプリング時期を検討した。(サンプリング許認可は未考慮)
 初号機のサンプリングは2つのフェーズ分ける方針とした。

<仮称>簡易サンプリング:小石・砂状および水中切削粉状デブリを対象, 高度サンプリング:気中切削粉状および円柱状デブリを対象

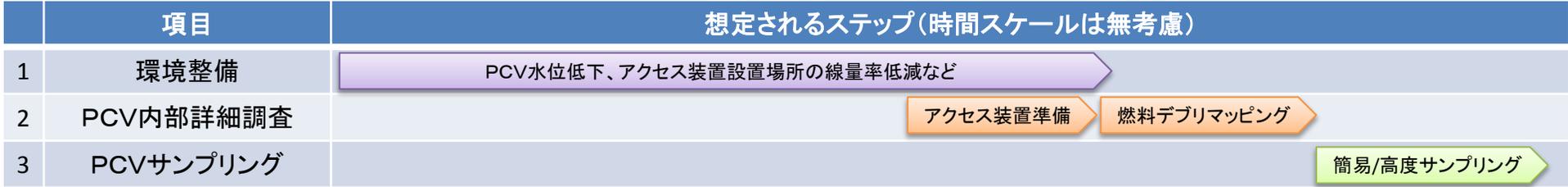
- ✓ 堆積物への対策や環境整備が不要な場合
 PCV内部詳細調査による燃料デブリマッピングが必要。計画に基づく体系的なサンプリングは最速で2020年度となるよう開発を進める。



- ✓ 堆積物への対策が必要な場合
 堆積物サンプリング、撤去、その後の燃料デブリマッピングが必要。



- ✓ 環境整備が必要な場合
 X6ペネのようなアクセスルート確保のためPCV水位低下等の環境整備、燃料デブリマッピングが必要。



4.1.1 調査・採取計画の立案 ④RPVサンプリング実施時期、工事の成立性検討

■ 関連する工事の工程を整理して、RPVサンプリング時期を検討した。

- ✓ 側面穴開け調査工法が適用できる場合(側面アクセス)
側面からのRPV調査による燃料デブリマッピングが必要。サンプリングはRPV内部調査時期に依存。
小石・砂状デブリを対象。

	項目	想定されるステップ(時間スケールは無考慮)		備考
1	空調機室屋上の整備	建屋上部 解体	干渉物撤去 作業架台の構築	空調機室屋上の干渉物 撤去が可能となる時期に 依存する
2	RPV内部調査	側面穴開け調査 燃料デブリマッピング		
3	RPVサンプリング	側面からのRPV サンプリング		

- ✓ 上部穴開け調査工法が適用できる場合(上面アクセス)
上面からのRPV調査による燃料デブリマッピングに先立ちSFP燃料取り出しおよびPCV内負圧化が必要。
サンプリングはRPV内部調査時期に依存
小石・砂状デブリ、気中切削粉状デブリを対象。

	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 燃料デブリマッピング			
4	RPVサンプリング	上面からのRPVサ ンプリング			

4.1.2 開発技術の抽出

- 本PJおよび他PJで開発中のサンプリング開発項目を整理した。

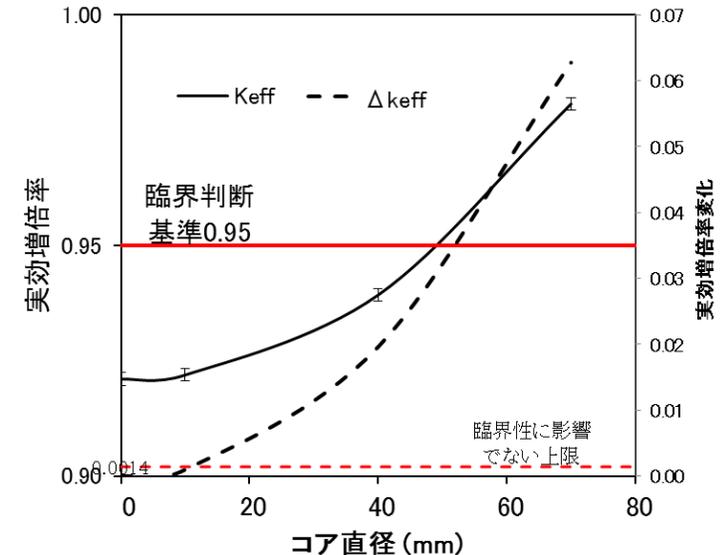
	抽出した開発項目	これまでの検討結果	開発方針
0	サンプリング計画 (PCV内部調査結果の反映)	至近の対象号機とした	新規の回収装置の概念とペDESTAL内部から外側にアクセスする技術を検討する
1,2	アクセス装置(アーム、エンクロージャ、アクセスルート)	サンプリング工具とのインターフェースを考慮し、PCV内部調査やRPV内部調査用装置をベースとした概念を具体化	エンクロージャやアクセスルート構築も踏まえた装置構成をまとめ、詳細設計を進める
3	回収装置	切削粉の回収率を高める軸シール、小型切削刃などの仕様を抽出した	簡易サンプリング工具等や気中サンプリング実現に向けた装置の改良及び条件緩和を検討していく
4	中性子モニタ	コアサンプリング時に使用可能な中性子モニタの一次スクリーニングを実施	基本設計と候補の絞り込みを進め、検出器の選定と仕様を確定させる
5	遠隔接続技術 (サンプル搬出時の構内輸送容器とエンクロージャの接続技術)	側面搬出ポートをベースとした候補技術の中から開発見通しの高いものを選定した	選定した技術によるシステム概念を検討し、要素試験を踏まえて基本仕様を設定する
6	サンプリングへの適用可能な技術の整理	サンプリングへ流用可能な技術(α 核種モニタ等)の抽出	α 核種モニタの検討状況を踏まえ2019年度から適用を進める。他の候補技術は2018年に必要性を再確認する。
7	分析能力評価	民間施設も含めた分析施設の活用でサンプル処理能力の向上余地あり	関連PJと協力して民間施設の処理能力の調査を進め、分析分担方針を決める
8	受入・払出しセル	技術的な開発課題はないことを確認	—

4.1.3 安全・システムの検討(サンプリング時の臨界安全解析)

サンプリング時の臨界管理方法を検討した。

分類	サンプリング	臨界管理		
燃料デブリ体系を変化させない	小片拾い上げ 細粉吸引	特段の管理は不要		
体系変化を伴うが、臨界性への影響は無視し得る	小規模コア ボーリング	①ボーリング径、深さ、ピッチ制限 ②中性子束変化の監視(簡易な臨界近接監視)	万一の臨界時の対応: 既存設備活用 ガス管理システム(臨界検知)+ 緊急ホウ酸注入設備	
臨界性への影響が生じる	大規模コア ボーリング	本格燃料デブリ取り出しと同様の管理(中性子吸収材事前投入、臨界近接監視)		

- ・臨界性に影響を与えないコアボーリング制限の検討
デブリ性状は不明であるため、ボーリングに伴う反応度変化が無視し得る範囲となる、ボーリング系、深さ、ピッチを評価
- ・コアボーリングに伴う実効増倍率(k_{eff})の変化(Δk_{eff})が臨界評価の不確定さ未満であれば、臨界性への影響は無視し得ると判断する。
- ・深さ1000mmサンプリングに伴う実効増倍率変化(右図)
コア直径15mm程度以下であれば、臨界影響は生じないと判断できるが、臨界近接監視(サンプリング実施位置近傍に中性子検出器を設置し、ボーリング前の中性子束レベルからの増加で臨界近接を検知)が有効



4.1.3 安全・システムの検討(サンプリング時の被ばく安全解析)

①評価の概要

- PCV正圧条件下で、PCVから放射性ダストが漏えいし、建屋内や環境へ放出された場合を想定し、公衆及び作業員への被ばく影響の程度を把握し、必要な被ばく低減対策を検討すべく、評価を実施した。
- 水系については現状同様放出されないことを前提とし、検討対象外。

②主な評価条件

- MOX燃料装荷で被ばく評価が厳しい3号機で代表
- 気中切削、水中切削、水中コアボーリングを仮定(切削量は暫定サンプル数^{※5}に基づく切削総量)
- 切削時の放射性ダストはPCVから全量放出を想定

※5: 分析施設処理能力の上限とは別途に決めた目標値

③被ばく評価結果・まとめ

- PCV正圧条件では、**気中切削が厳しく(メンテナンス場所等の作業員)、負圧管理等の措置が必要**
- 少量の水中切削は設備増強が不要**。但し、コアボーリングならば建屋近傍への立入制限が必要

項目	切削量	評価点 ^{※3}	評価線量 ^{※4}	目標線量	成立性
気中切削	36サンプル (360g)	メンテナンス場所	約70000mSv	20mSv ^{※1} 以下	×
		公衆	約6E-03mSv/y	0.1mSv/年 ^{※2} 以下	
水中切削	72サンプル (720g)	メンテナンス場所	約2mSv	20mSv ^{※1} 以下	○
		公衆	約1E-07mSv/y	0.1mSv/年 ^{※2} 以下	
水中コア ボーリング	100mm ×12サンプル (1200g)	メンテナンス場所	約4mSv	20mSv ^{※1} 以下	○
		公衆	約2E-07mSv/y	0.1mSv/年 ^{※2} 以下	

※1: 作業員に対する法令上の線量限度100mSv/5年より設定 ※2: 公衆に対する法令上の線量限度から設定(燃料デブリ取り出し時の暫定目標と同じ)

※3: 代表例として、最も厳しくなるメンテナンス場所の作業員と公衆の結果を示している。この他、原子炉建屋近傍や操作場所の作業員の評価を実施。

※4: 評価値は保守側の仮定に基づく数値(切削時の放射性ダスト全量がPCV外へ放出する想定など)であり、今後も精査を進める予定。

4.2.1① システムの基本設計(未臨界維持)

■ 4.1.1(No.11)で定義したサンプリング形態Ⅱ～Ⅴのリスクと必要対策は以下の通り。

分類	臨界リスク	必要対策
Ⅱ	臨界リスク:無	特段の対策不要
Ⅲ	臨界リスク:無※(ひびが入る可能性は別途検討)	特段の対策不要
Ⅳ	臨界リスク:無※(冷却材かけ流しの状況ではⅢと同じ想定となる)	・サンプリング操作、範囲の順守
Ⅴ	臨界リスク:無※(コア破片、ひび等の影響は、適切なサンプリング間隔の維持で対処)	臨界モニタ必要(未臨界度監視注) 注:ひび、形状変化の影響を考慮する ・サンプリングサイズ、間隔の順守

※ 適切な作業手順・作業量の制限下においてリスク無を意味する

分類	漏洩リスク	必要対策	
		気体系システム	液体系システム
Ⅱ	<ul style="list-style-type: none"> 堆積粉塵が舞い上がる可能性あり。 これまでに類似の状況はある。 	設備対策は不要 <ul style="list-style-type: none"> 作業員は退避。これまでの類似の状況と同様に、サンプリング前後でα濃度を確認。 	
Ⅲ	<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリ切削粉が飛散。 	設備対策は不要 <ul style="list-style-type: none"> 作業員を退避。サンプリング前後でα濃度を確認。 	設備対策は不要 <ul style="list-style-type: none"> アクションレベルに対するα核種濃度監視は必要。
Ⅳ	<ul style="list-style-type: none"> PCV負圧管理なしでは、気中での切削がある場合、放射性粉塵の漏えいリスクが高まる。 	PCV負圧管理が必要 <ul style="list-style-type: none"> 工具改良で飛散量低減できればⅢと同じ対応となる可能性有。 	
Ⅴ		設備対策は不要 <ul style="list-style-type: none"> 作業員を退避。サンプリング前後でα濃度を確認 	

■ サンプリング規模に応じてPCV内α核種濃度を評価した。

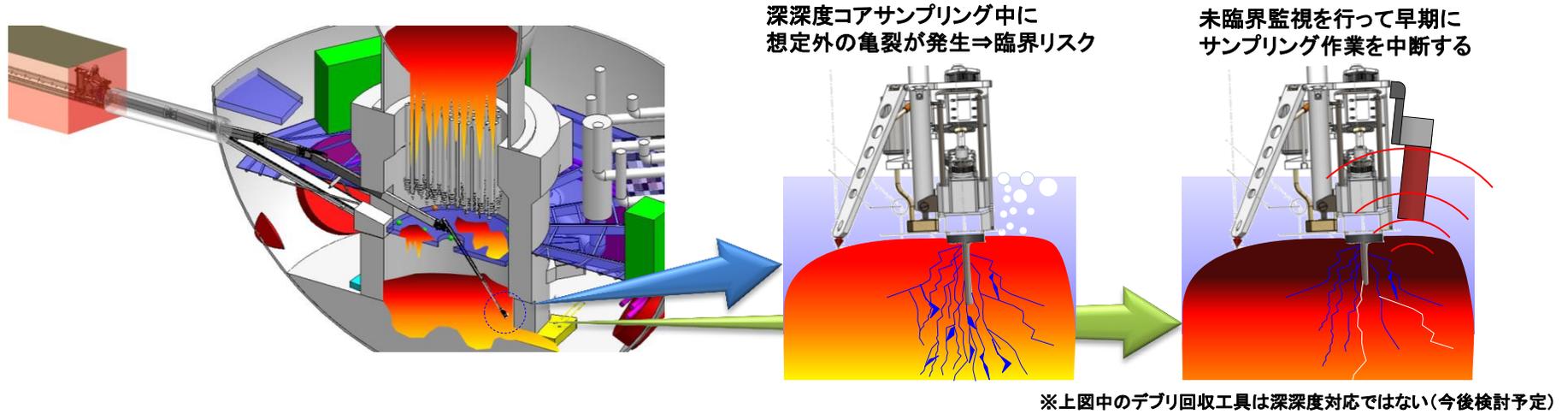
✓ 気中サンプリングを成立させるには**飛散量の抑制対策(回収率向上等)**か**PCV負圧化**が必要。

サンプリング形態(分類)	水中切削粉(Ⅲ)	気中切削粉(Ⅳ)	水中コア(Ⅴ)
サンプル量×サンプル数	1g×30個	1g×30個	100g×6個
PCV内目標値を超過しないために必要な切削時の粉塵回収率(%)	要求なし (全量漏洩でも成立)	99.6% (あるいは負圧化が必要)	要求なし (全量漏洩でも成立)

【分類の説明】Ⅱ:小石・砂状, Ⅲ:切削粉(水中), Ⅳ:切削粉(気中), Ⅴ:切削コア(水中)

4.2.1② サンプリング用中性子モニタの適用性検討 (要求仕様)

- 長尺コアサンプリング(深さ方向の性状データ把握やMCCI部の調査が目的)では、切削時の燃料デブリへの負荷によって想定を上回る亀裂により臨界リスクが残る可能性がある。
- コアサンプリング装置使用と同時に使用する中性子モニタの成立性評価のため、**要求仕様を暫定した。**



項目	サイズ	重量	積算線量	環境線量率	感度
要求	Φ 40mm (暫定)	10kg	6kGy以上	100Gy/h	φ 10mm × 深さ100mmを1hで掘削するペースで臨界近接を検知できること 0.01~0.1cps/nv以上
根拠	X6ペネ内に持ち込み可能なサイズ	アームのペイロード上限	100Gy/hで6h×10回使用できること	A2' 調査結果に余裕を確保する	要素試験では2~3hを要したが、切削が早い場合を想定する
備考	工具との形状調整が必要	—	—	—	感度確保のために素子数が多くなるとケーブル芯線不足のリスクあり

注) センサと深深度コアサンプリングのための燃料デブリ回収工具とのインターフェースは今後検討が必要

4.2.1② サンプル用中性子モニタの適用性検討 (候補技術の比較評価)

■ 候補技術を以下観点で比較評価した。(◎:余裕有、○:問題なく適合、△:課題有、×:適用困難)

- サイズ・重量 :アーム許容荷重及びツールユニット寸法への適合、工具との並立性有
- 積算線量 :γ線量率1000Gy/h環境下で使用した場合でも十分な寿命有
- ケーブル長 :アーム搭載時を考慮して検出器-信号処理部間 60m程度確保可能性
- ケーブル径 :アーム搭載の複合ケーブル仕上り外径内、アーム屈曲への対応可能性
- 臨界近接監視 :中性子源増倍法による臨界近接監視実現可能性(使用時間、感度含め考慮)
- 耐振動性 :サンプリング工具使用時の同時監視可能性(バックアップ機能)
- 保守性 :ツールユニット遠隔交換、サンプリングセル内電子機器遠隔交換可能
- 許認可性 :信頼性、実績の有無

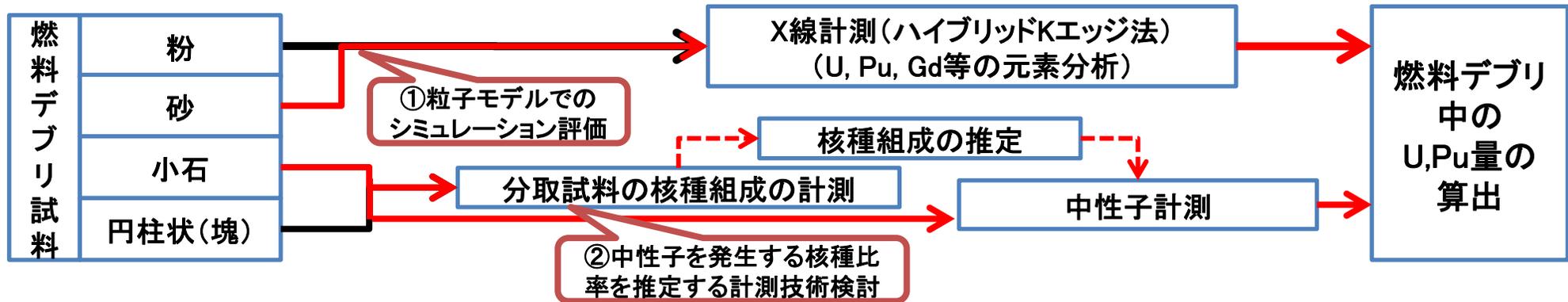
凡例:
 実線枠…
 一次スクリーニングにて
 使用可とした候補技術
 破線枠…
 小型化・軽量化を見据えて
 継続検討を行う候補技術

検出器候補 【要求仕様】	サイズ ・重量	積算 線量	ケーブ ル長	ケーブ ル径	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)	△	○	△	△	○	△	ワイドレンジ NIS
小型半導体検 出器	◎	×	△(~ 50m)	○	△	△	△	△	×	Rhombus社 開発技術
小型中性子検 出器	◎ (推定)	不明	不明	不明	△ (一般論)	△ (一般論)	不明	不明	-	RosRAO社 開発技術

*:最新の内部調査情報により条件緩和があれば「△」となる可能性あるが、臨界管理PJでは「×」と評価済み。

4.2.1③ U, Pu計測装置の検討

- 粉、砂、小石、円柱状などの燃料デブリ試料に対し、複数の計測装置を組合わせたシステムを検討中である。今年度は、砂と小石の分析条件に着目し、シミュレーションによる定量的な測定精度評価を実施した。



■ 検討結果

① 砂状デブリを対象としたX線計測のシミュレーション評価

次に示す条件においてU含有量の分析精度は～10%程度(X線計測条件が理想的な場合)と評価された。

・粒径: 100 μ m以下 ・試料中に均一に分散。・空隙率(上面視)20%以下 ・測定レンジ: 129～1291mg/cm²

試料中のU, Puの偏在による測定誤差は上記の理想的条件においても、1gの試料につき約300mgとなる。従って、現状のサンプリングシナリオ(質量計測で全量燃料と扱う)に対し、優位性はないことが分かった。

② 小石を対象とした複合計測システム(パッシブ中性子計測+X線計測+ α 計測)の計測技術の検討

小石から分取した微量試料をX線計測及び α スペクトル比計測により、中性子を発生する核種の比率を算出することで、パッシブ中性子によるU, Pu計測ができる可能性を見出した。なお、分取した微量試料と、分取元の小石試料の核種組成が同一であることが前提であるので、当該前提条件の裏付けデータが必要。

⇒ 構外輸送の計量方法として適用するためには、①での偏在を解消する試料調整技術の開発とその実証、②での破壊分析による燃料デブリの均質性のデータ蓄積が必要である。これに対し、現状評価される測定誤差と構外輸送の試料量(粉・砂:約50g/回、小石・円柱状:約800g/回)を鑑みると、質量計測(全量核物質とする)と比べて、本測定装置の適用メリットは低い。

4.2.1④ 受入・払出しセルの検討(自動化検討)

■ 受入・払出セルの内部にロボットを設置し、セル内作業の自動化について検討した。結果を以下に示す。

項目	セル内作業の自動化(ロボット)		セル内作業を手動(MSM*)	
1.作業の手動・自動化範囲	すべての作業について自動化は可能		すべての作業は手動にて実施	
2.作業時間 パディラックからのサンプル取り出しから 構外輸送する前の保管までの時間	粉状サンプル (30サンプル)	コアサンプル (6サンプル)	粉状サンプル (30サンプル)	コアサンプル (6サンプル)
	約75時間	約252時間	約90時間	約288時間
3.保守	<ul style="list-style-type: none"> ・MSMに比べ検出器が多いので保守時間が長くなる。 ・ロボットは機械装置であり、6ヶ月毎の運転なので、保守方法の具体化検討が必要。 		<ul style="list-style-type: none"> ・従来通りの保守となる。 	
4.開発要素	自動化システムの開発が必要		該当なし	
5.導入期間(詳細設計～工場検査まで)	18ヶ月程度		18ヶ月程度	

* MSM: Master-Slave Manipulator

■ 結論

- ・ 作業時間の短縮等を考慮すれば、ロボットのメリットはあるが、**半年ごとの分析施設への搬出量(粉状30個またはコア状6個)が少ないため、そのメリットは大きくはない。**ただし処理量が多い場合はメリットがある。
- ・ 一方、保守の観点からは若干MSMの方が有利である。

⇒**受入・払出セルの自動化については採用しない。**

4.2.1⑤ 高線量下での遠隔接続技術の概念検討 (検討条件)

■ 背景・必要性

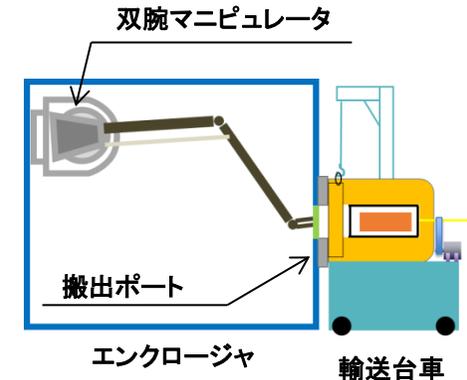
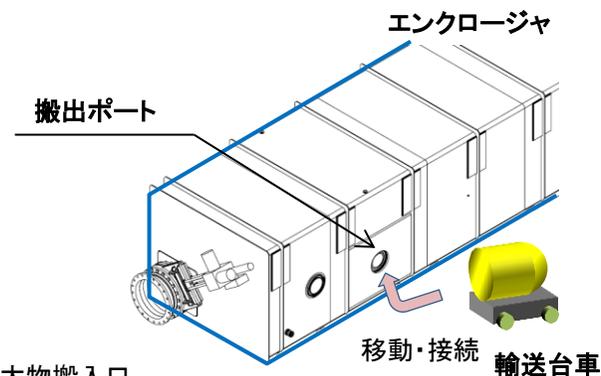
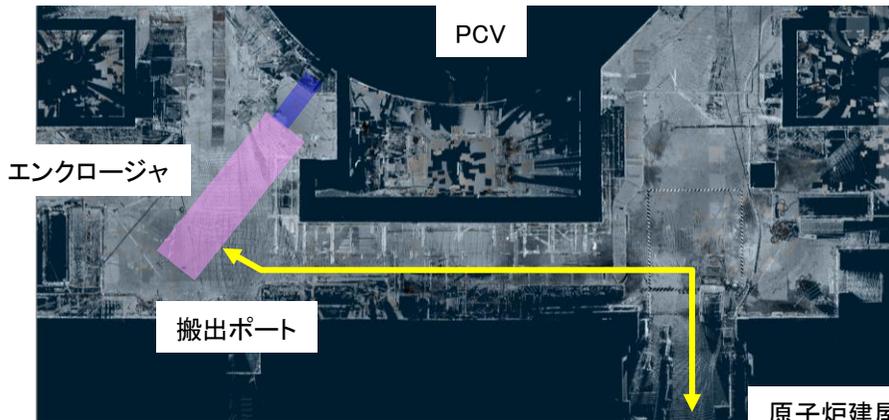
- ✓ 燃料デブリサンプルを搬出するためエンクロージャに設けた搬出ポートに構内輸送容器に遠隔操作で接続し、燃料デブリサンプルを双腕マニピュレータで移し替える。⇒作業員被ばくを低減する

■ 実施内容

- ✓ 通常のホットセルで実績のある技術と比較し、成立見通しのある方式を抽出する。
- ✓ 各方式の技術課題を整理・評価して、次年度以降の方針と開発計画を決定する。

■ 要求条件

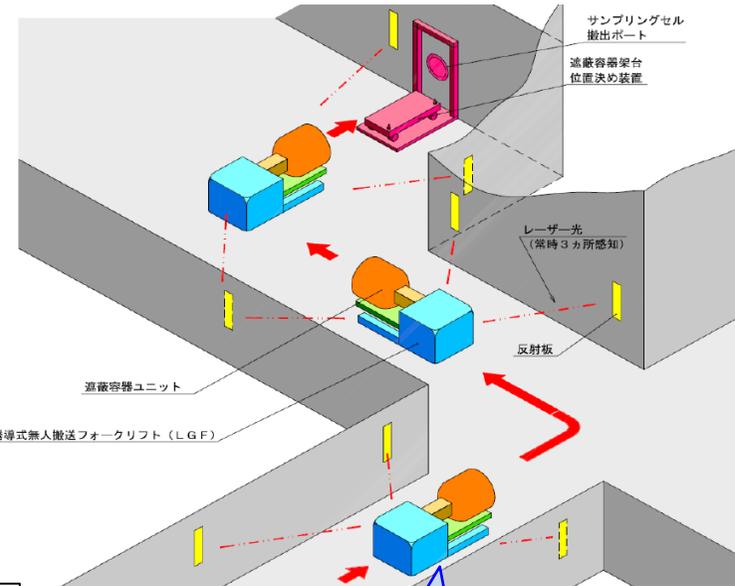
- ✓ 搬出ポートから原子炉建屋大物搬入口までの約50mをレール敷設なしでキャスク移送できること
- ✓ キャスク(気密容器)が搬出ポートに接続／離脱できること(非常時の脱出方法を考慮する)
- ✓ キャスクには十分な遮蔽を持たせ、原子炉建屋外での作業員被ばくを抑制できること
- ✓ 受入・払出しセルとの接続は、通常のマニュアル作業で行えること



4.2.1⑤ 高線量下での遠隔接続技術の概念検討 (技術提案例)

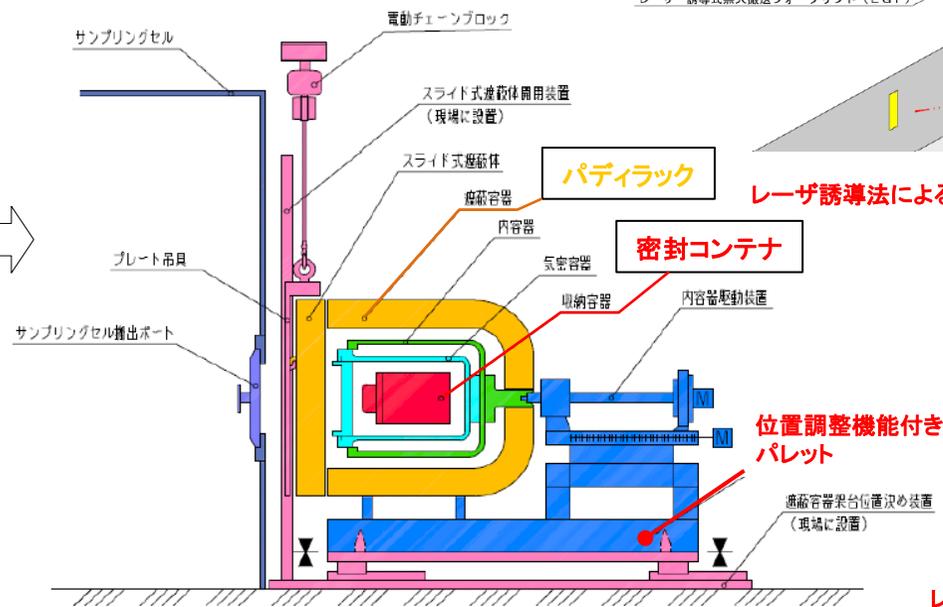
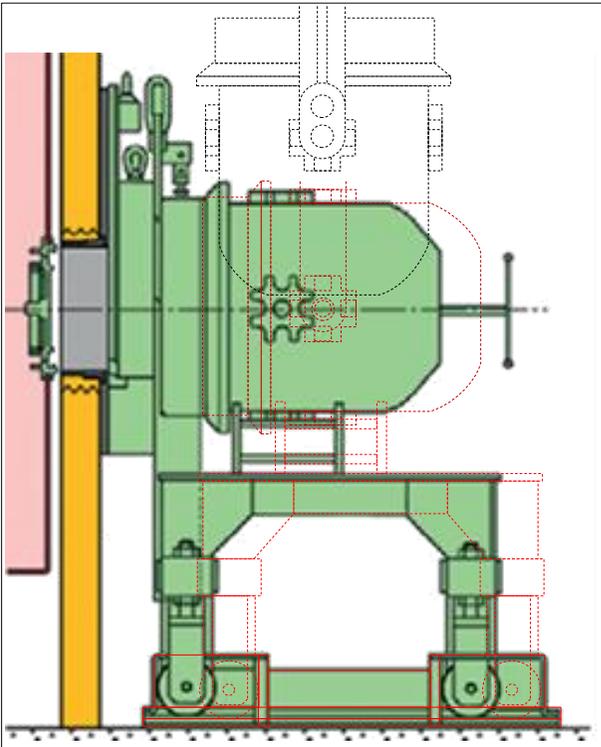
■ 側面アクセス方式の提案例

- パディラックを横向きにし、位置調整機能付きパレットに載せて、無人フォークリフトでエンクロージャ側面に接続する。
- 無人フォークリフトの走行にはレーザー誘導法を応用する。
- パディラック内の密封コンテナの**自動接続システムが課題**。
- 原子炉建屋外では通常のパディラックシステムに早変わり。



レーザー誘導法による無人フォークリフトのR/B建屋内移動概念

通常のパディラックによる側面アクセス



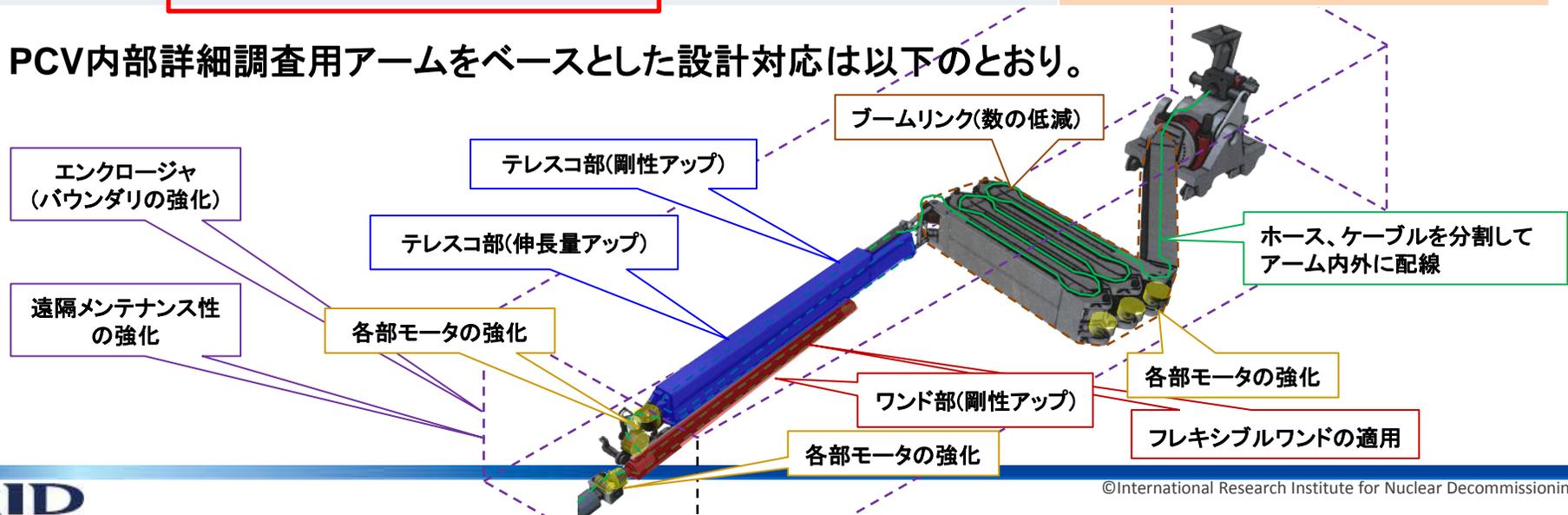
レーザー誘導法を適用した無人フォークリフトの例

4.2.2 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討(サンプリング用アームの検討)

■ サンプリング用アームの要求仕様及び設計対応は以下のとおり。

項目	サンプリング用アーム仕様	PCV内部調査アーム仕様	設計対応
重量	20kg以上 (工具10kg以上+中性子モニタ10kgを想定)	最大10kg	各部モータの強化 ワンド・テレスコ部の剛性アップ ブームリンク数の低減
ホース数	10本(概念検討結果より) (エアモータ、3アクチュエータ、給排水)	バンドル径30mm以下 曲げ半径60mm以下	ホース、ケーブルを分割して アーム内外に配線
ケーブル数	約30芯(概念検討結果より) (リミットスイッチ、吸引ポンプ、中性子モニタ等)		
アクセス範囲	少なくともペDESTAL内側全域に 接触可能(A2' 調査結果より) グレーチング付着物へのフレキシ ブルな接触が可能	センサ計測範囲も加味して ペDESTAL内はほぼ全域 ペDESTAL外は70%	ブームリンク数の低減による テレスコ部の伸長量アップ フレキシブルワンドの適用

■ PCV内部詳細調査用アームをベースとした設計対応は以下のとおり。



4.2.3 燃料デブリサンプル回収装置の設計(設計条件)

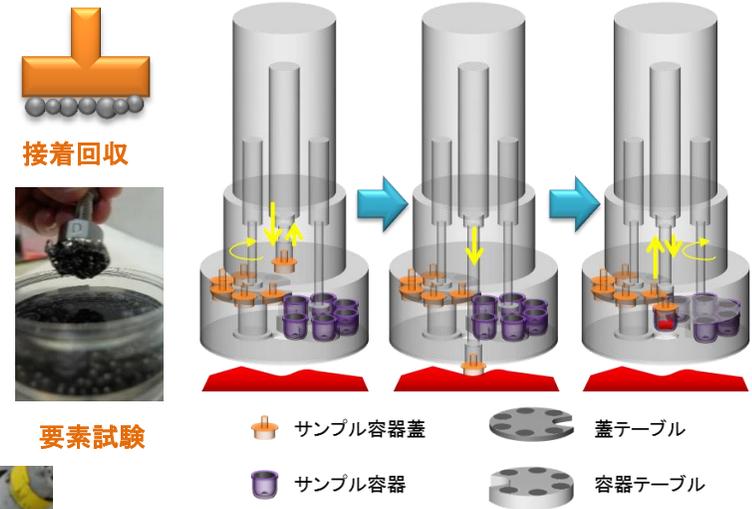
- 小石・砂状または水中での切削粉状の燃料デブリとして分析に必要な量を採取できること。
 - 小石・砂状の場合：数g、粒径は10mm以下
 - 切削粉(水中)の場合：1g程度、粒径は0.1mm程度
- サンプリング対象部位の想定環境に耐えられること。
 - 線量率：300～1000Sv/h
 - 温度：25～40℃
 - 雰囲気：気中(湿度100%)または水中
- アーム型アクセス装置の先端に設置できる大きさ、重量であること。
PCV内部調査用アームの流用を前提とすれば以下の通りとなる。
 - 大きさ：最大でΦ140mm×740mmL
 - 重量：10kg以下
- アームが收容されるエンクロージャの物品搬入出ポートから出し入れ可能であること。
PCV内部調査用アームエンクロージャの流用を前提とすれば以下の通りとなる。
 - 搬入ポートサイズ：Φ320mm×500mmL
 - 搬出ポートサイズ：Φ250mm×400mmL
- サンプリングの方法
 - 1回の採取で6サンプリング
 - 1回の採取に係る時間は、1時間程度
 - X6ペネを通して、PCV内部にアクセス



PCV内部詳細調査用アーム装置概念

4.2.3① 小石・砂状デブリ回収装置の設計

- 策定されたPCV内のサンプリングシナリオに対応した、小石・砂状デブリサンプル回収のための要素試験を行った。
- 回収時にα核種を飛散させないような回収方法としての**接着回収**、**すくい上げ回収**の2方式に着目した。
- エアシリンダーとDCモータの組合せによる**接着回収**の基本構造を検討した。



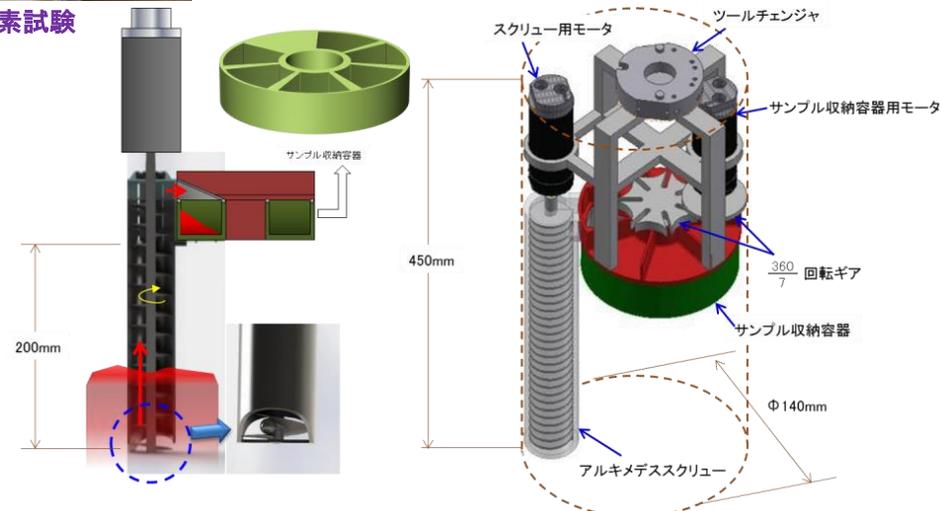
- **アルキメデススクリュー、掴み装置、吸引装置**についてすくい上げ回収の要素試験を行った。



要素試験

- DCモータ2つの組合せによる**すくい上げ回収のアルキメデススクリュー**概念を検討した。

- スクリュー用モータを正転させて深さ200mm程度までの砂状デブリをすくい上げる。
- 不要分はスクリュー逆転により元の場所へ戻す。
- サンプル収納容器は7つに仕切られて、6つをサンプル収納に利用できる。

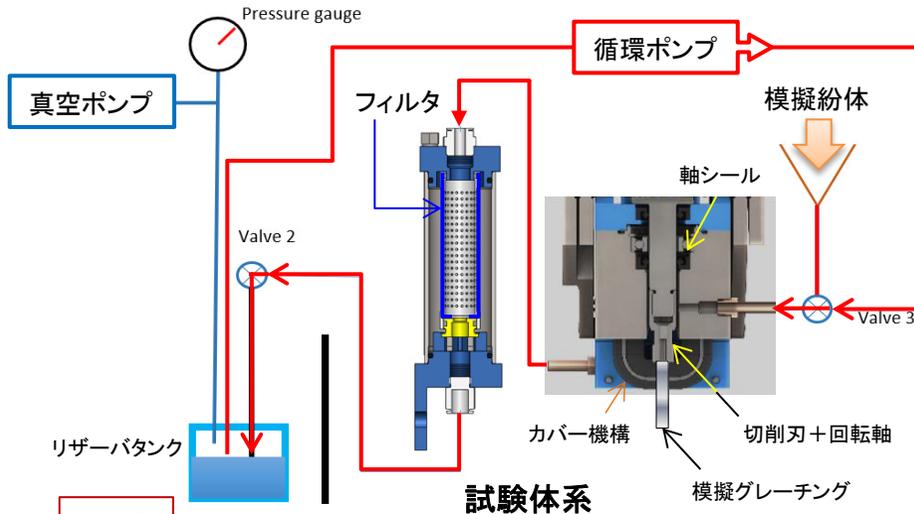


4.2.3② 粉状デブリ切削・回収装置の設計(回収率試験)

■ 切削粉の回収率検討

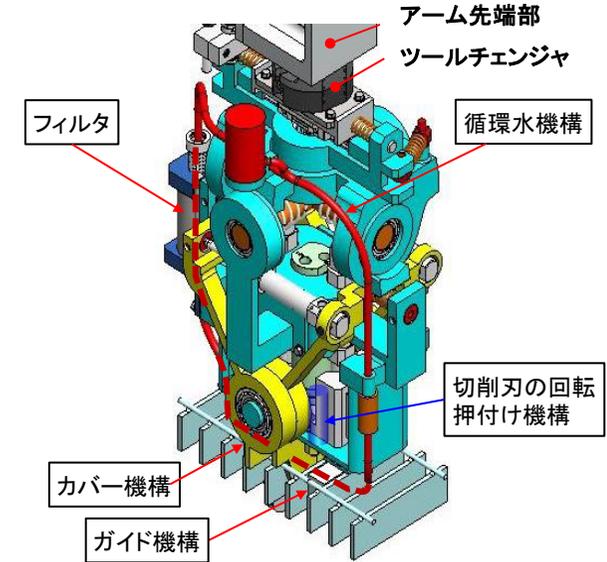
- カバー機構のシールが回収率に与える影響を調べる。
⇒ 単一シール構造と、2重シール+パテ注入構造の2案

ケース	カバー機構シール	模擬粉体	備考
A-1	単一シール構造 (ニトリルゴム)	ジルコニア粉	回収率
B-1		鉄粉	残留位置の評価
C-1		切削粉	切削粉の挙動評価
A-2	2重シール+パテ	ジルコニア粉	回収率
B-2		切削粉	切削粉の挙動評価

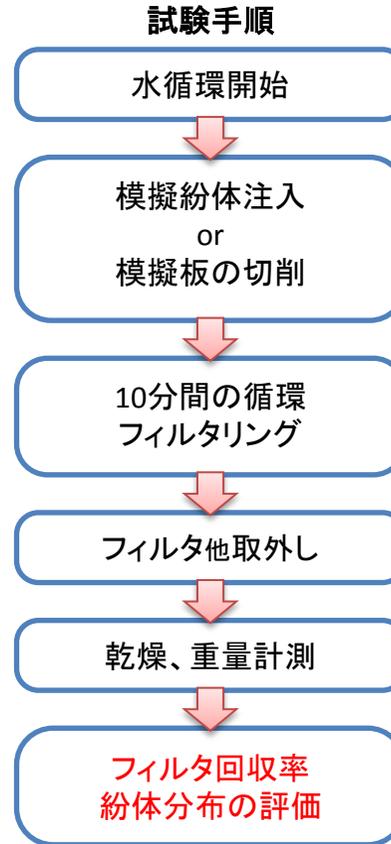


結論

循環構造等により回収率向上を図れた。しかし目標の99.6%を担保することはできなかった。気中サンプリング実現に向け更なる構造改良や回収目標の現実的な見直しを検討していく。



回収装置概念(鳥瞰図)



試験結果

ケース	ノミナル回収率	保守側の回収率*1
A-1	97.9%	94.1%
B-1	77.4% *2	67.1% *2
C-1	99.7%	93.9%
A-2	104.1%	38.5%
B-2	102.7%	39.6%

*1: システム構成部品の質量減少を考慮した場合

*2: 鉄の凝集効果により回収率が悪化

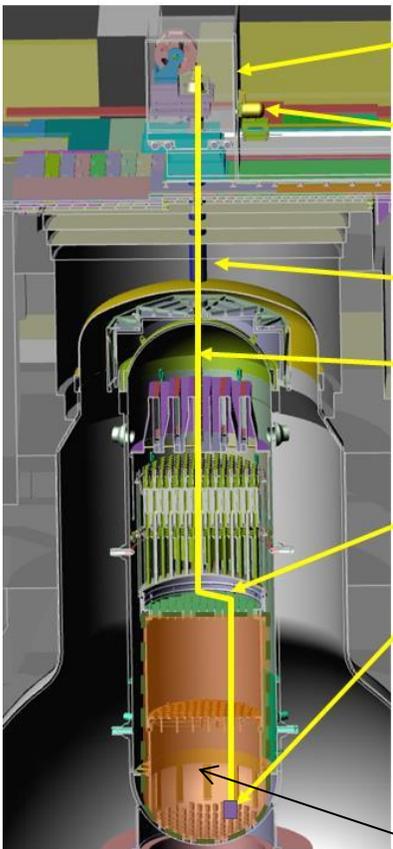
4.3 原子炉圧力容器内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討

(1) 上部アクセス：開始時の状態と装置全体構成

原子炉圧力容器(RPV)サンプリング特有の前提条件 RPVサンプリング特有の設計条件

- 使用済みプール燃料取り出し作業完了(設備撤去済み)。
- RPV内部調査工事で設置したガイドパイプ(延長管)等のバウンダリ構造設置済み
- PCV/RPV内は負圧化

- 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



オペフロ作業セル
PCVとバウンダリを構成。セル外短時間作業のため遮へい機能。

構内輸送容器
サンプル搬出用、PCV内サンプリングと共通設計。

ガイドパイプ
PCVバウンダリを延長。

炉内アクセス装置
オペフロからシュラウドヘッドまで垂直アクセス。

炉内展開装置
炉心で水平展開し、炉心部昇降。

サンプル回収装置
サンプル回収。粒・小石状デブリの回収と、加工粉、円柱状デブリ回収用の付け替え

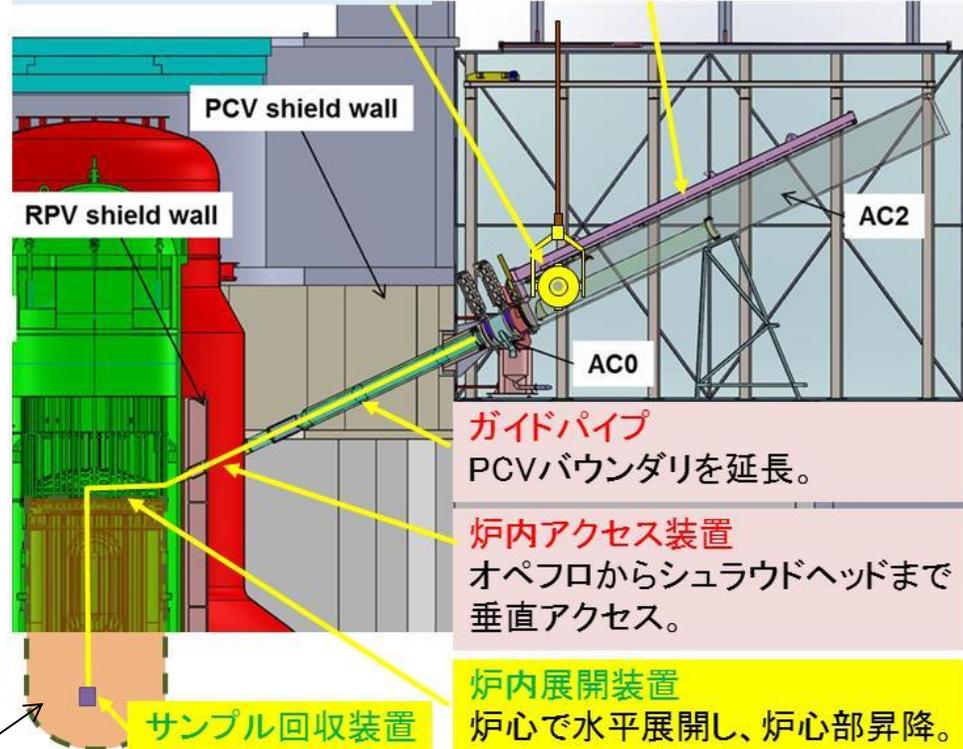
汎用技術の適用を検討

他PJ成果の適用を検討

本PJで開発に注力

構内輸送容器
サンプル搬出用、PCV内サンプリングと共通設計。

オペフロ作業セル
PCVとバウンダリを構成。



ガイドパイプ
PCVバウンダリを延長。

炉内アクセス装置
オペフロからシュラウドヘッドまで垂直アクセス。

炉内展開装置
炉心で水平展開し、炉心部昇降。

サンプル回収装置

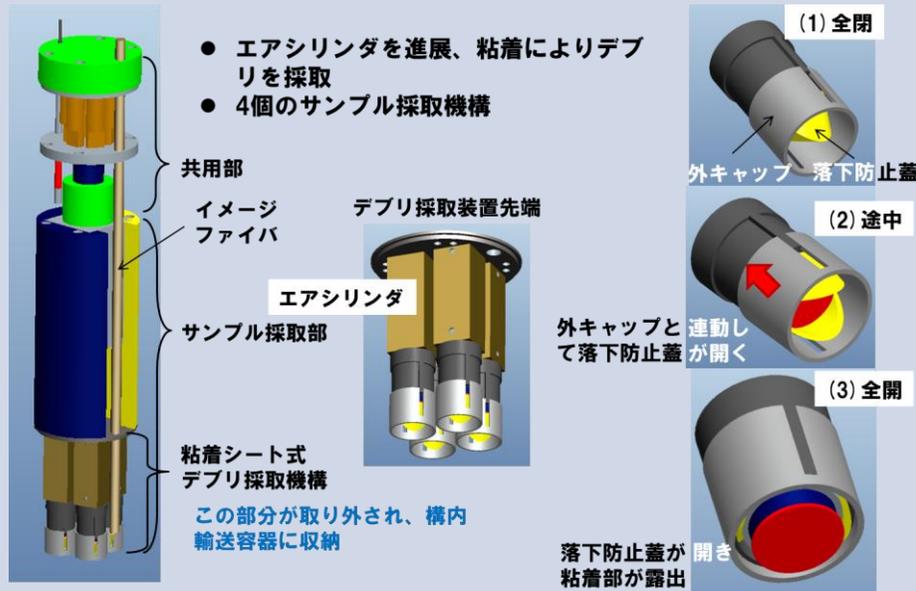
採取対象範囲

(2) サンプル回収装置概念

小石・砂状サンプル回収

粘着により燃料デブリを採取

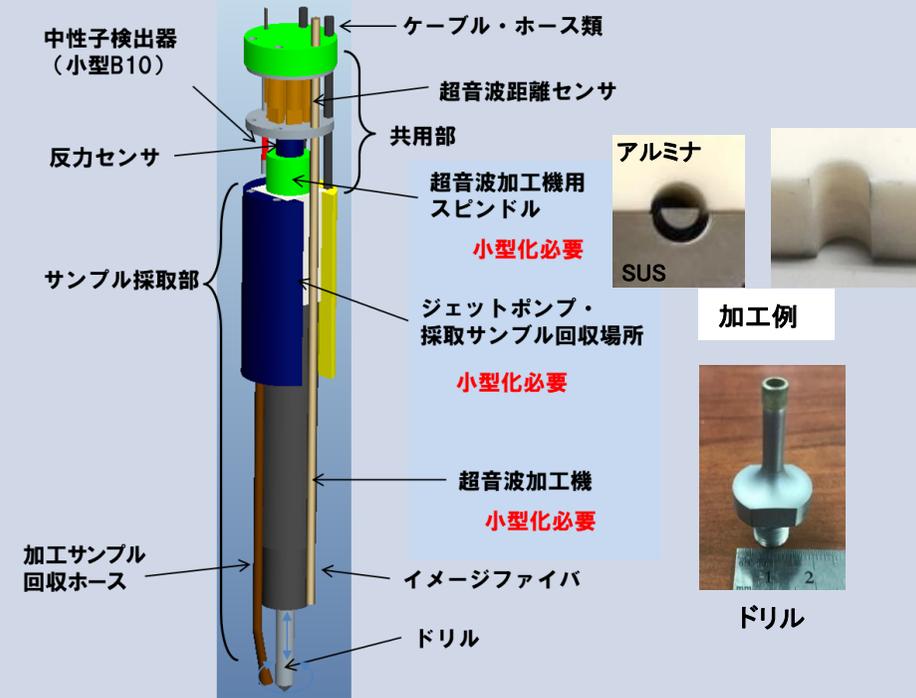
開閉式の落下防止蓋により確実に回収
蓋の開閉と粘着の押し付けをエアシリンダで実施



切削紛・切削コアサンプル回収

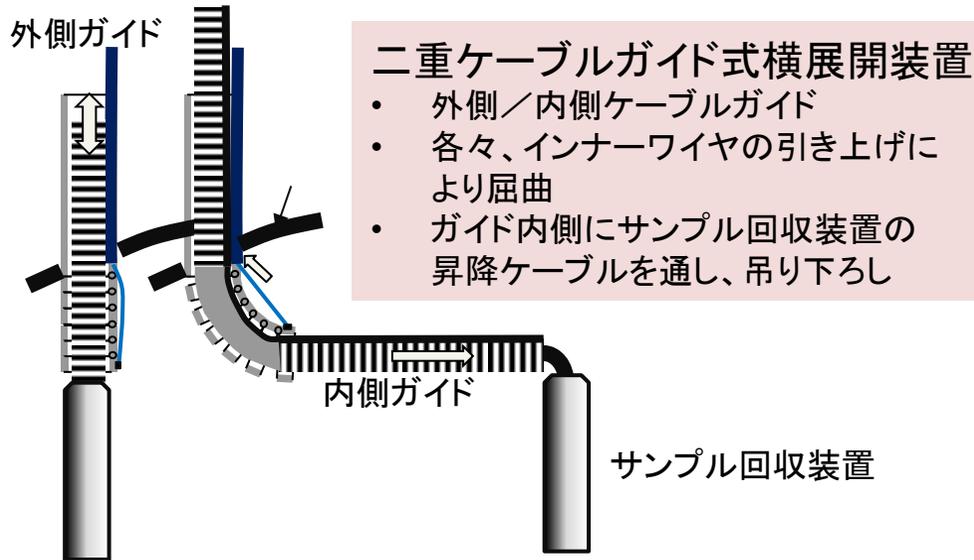
塊状の燃料デブリから超音波加工による切削紛・切削コアの切り出し

金属部分から酸化物部分まで同一加工方法でサンプル採取



(3) RPV上部アクセス：アクセス方法の検討

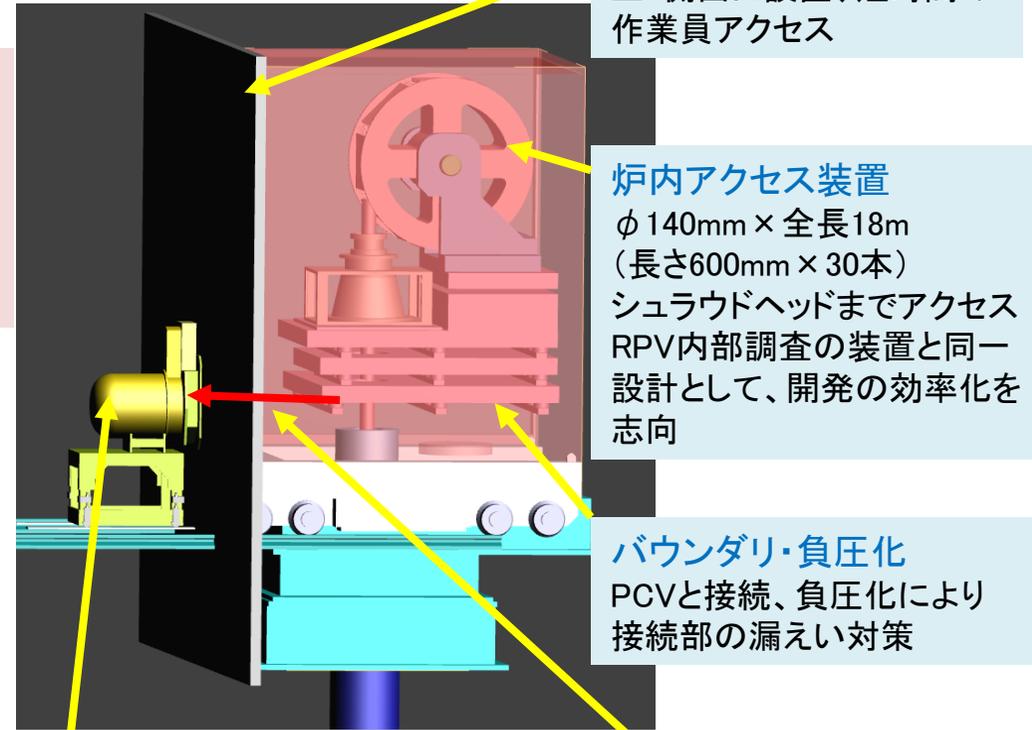
炉内展開装置



主たる課題

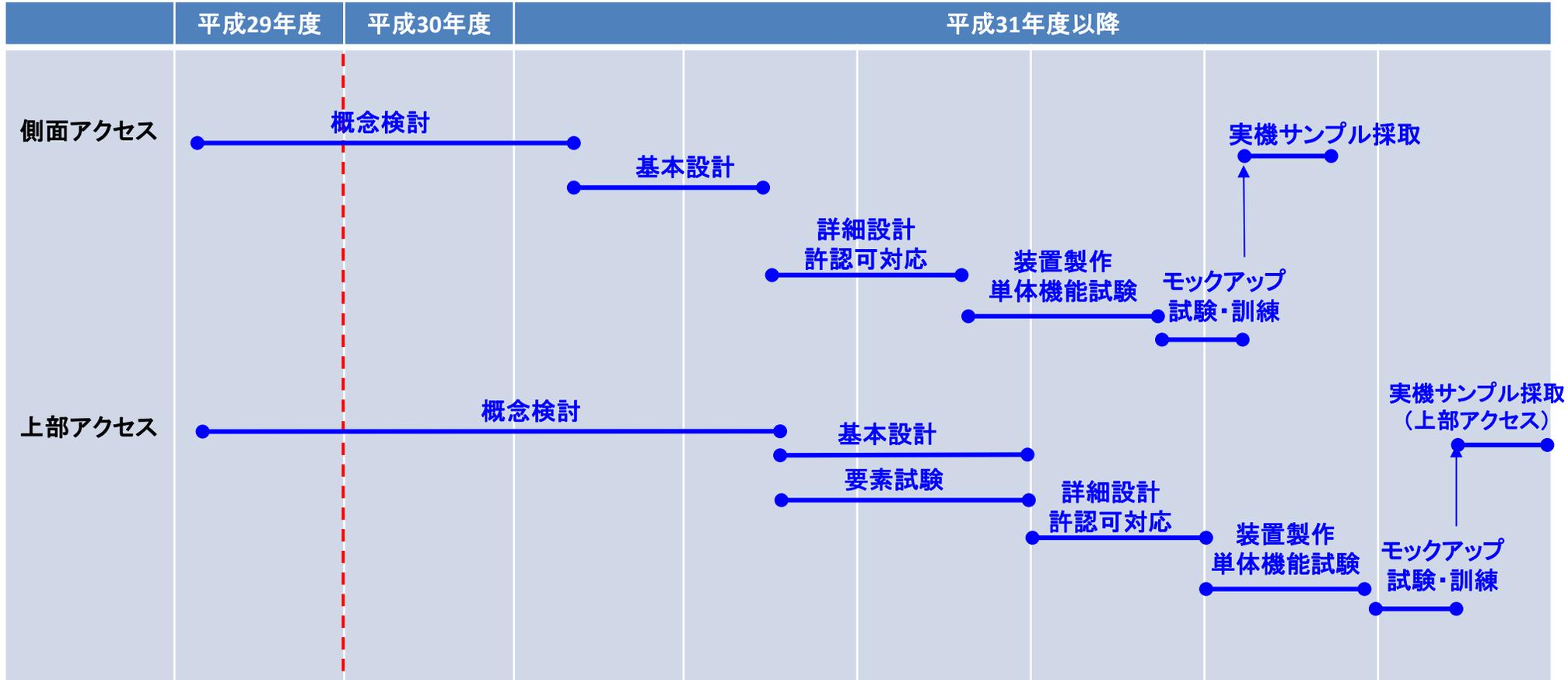
- セル遠隔設置技術、輸送容器の遠隔取扱技術
- 遠隔によるメンテナンス計画と装置計画
- 寸法制約や回収装置の質量・反力を満足する展開機構

オペフロ作業セル



4.3 RPV内燃料デブリサンプリングシステムの概念検討

(5) 想定される実機工事と開発スケジュール



4.4 目標に照らし合わせた達成度

実施内容	平成29年度目標達成指標	達成状況	課題又は今後の対応
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	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。 (TRL目標設定対象外)	PCV内部調査結果などを考慮してサンプリングを2ステップで進めるなどのシナリオを構築し、開発計画の更新を行い、目標を達成した。	関連PJの進捗や、サイトの状況を開発計画に適宜反映する。
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	<p>① 燃料デブリサンプリングシステムの基本設計 燃料デブリ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が行われていること。</p> <p>② 燃料デブリ付近へのアクセス装置の検討 PCV内の燃料デブリ付近に燃料デブリサンプル回収装置を持ち込むことが可能なアクセス装置の検討が行われていること。</p> <p>③ 燃料デブリサンプル回収装置の設計 燃料デブリサンプル回収装置の要素試験が行われていること。</p>	<p>①サンプリング時の安全解析に基づく、安全システム(中性子モニタ等)の要求仕様の整理、U、Pu計測装置やセル自動化、遠隔接続技術の検討及び、開発計画のまとめ等システムの基本設計を行い目標を達成した。(TRL:3)</p> <p>②アクセス装置の検討としてPCV調査用アームの適用性評価、回収装置とのインターフェース要求を踏まえたサンプリング用アームの要求条件と基本仕様を設定を行い、目標を達成した。(TRL:3)</p> <p>③小石・砂回収および切削粉回収のための装置概念を検討し、要素試験を実施し、目標を達成した。(TRL:4)</p>	<p>①高度サンプリングで必要とされる臨界モニタの候補概念を絞り込み、基本設計を行う。</p> <p>②サンプリング用アームの設計方針を定め、基本設計を次年度より開始する。</p> <p>③切削粉回収装置の要素試験を進め、気中での飛散量低減を図るとともに、1回あたりの切削量及び実施回数も考慮して安全要求の緩和を図る。</p>
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内部へのアクセス装置を中心にサンプリングシステムの概念が検討されていること。	RPVサンプリングシステム概念を検討、技術課題を抽出し、及び開発計画の策定を行い、目標を達成した。(TRL:3)	技術課題に基づき要素試験計画を策定する。 側面からのサンプリング用アクセス装置の概念を具体化する。

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

- PCV内サンプリングは内部調査結果等を考慮して**至近の対象**を設定し、既存設備で対応可能な簡易サンプリング(小石・砂状と水中切削粉状)と安全システム強化が必要な高度サンプリング(気中切削状とコア状)の**2ステップで実施**する計画を立案した。
- RPV内サンプリングは、内部調査結果に依存する部分が大きいため至近の対象号機は策定できないが、**小石・砂状デブリ等を対象**とする計画を立案した。
- 本PJで開発が必要な技術と、他PJで開発中のサンプリングに適用可能な技術を整理し、開発計画を策定した。主な開発項目には、中期的には**高性能バウンダリ構造の開発や回収目標の現実的な見直し**など、長期的には **α 核種モニタや中性子モニタの開発**などが挙げられた。

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

- 安全システムは、**小石・砂状と水中切削粉状デブリのサンプリングは既存設備で成立**する。臨界リスクよりコア状サンプリングには中性子モニタが、被ばくリスクより気中切削ではPCV内負圧化か切削粉の回収率向上が必要と評価した。
- 燃料デブリを扱うために内部調査よりバウンダリを高性能化した装置開発が必要と判断し、合わせてサンプリング用アームの開発仕様も検討して開発計画を策定した。
- 小石・砂状デブリと粉状デブリの回収装置概念を検討し、要素試験を行った。装置の改善による回収率の向上や回収目標の現実的な見直しが必要であることを確認した。

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

- 工法に適合するアクセス装置、サンプル搬出システム等の要求条件を検討した。
- システムやアクセス装置についての技術課題を抽出し、要素試験計画を策定した。