

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工法・システムの高度化

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 (IRID)

29年度成果報告の構成

- I. 研究の背景・目的
- II. 研究の目標
- III. 実施項目とその関連
- IV. 実施スケジュール(全体)
- V. 実施体制
- VI. 実施内容
 - (1) 閉じ込め機能に関する技術開発
 - (2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発
 - (3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討
 - (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

I . 研究の背景・目的

【背景】

前期の事業では、福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた燃料デブリ・炉内構造物（以下、「燃料デブリ」という。）取り出し時の工法・システムの検討を実施し、成立性に関わる課題やリスクを抽出した。[前期(平成28年度)実施事業の実績(要旨)を参考資料に添付]

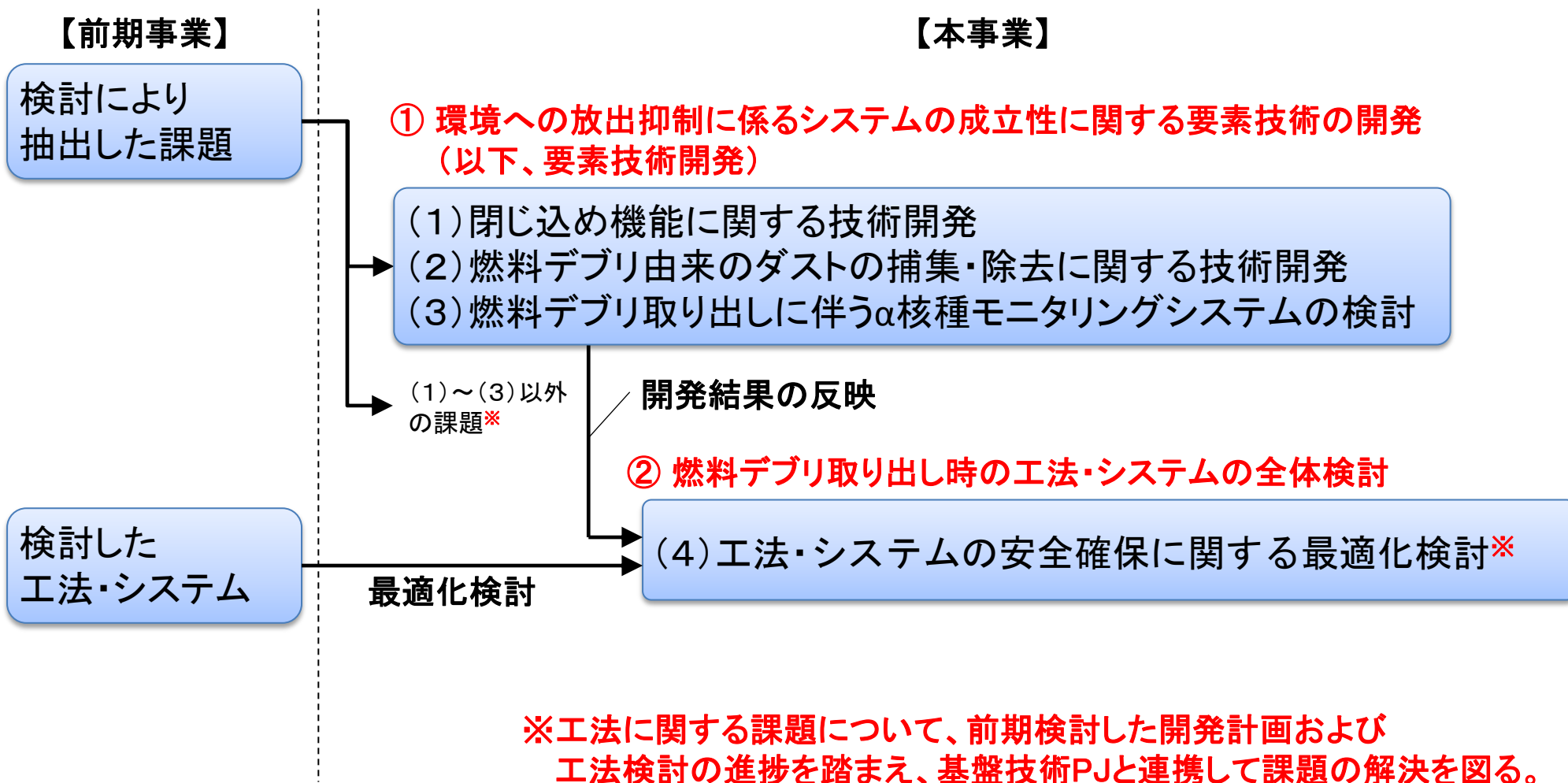
【目的】

本事業は、抽出した課題を解決していくために、工法・システムの高度化に関わる技術のうち安全確保上の課題である、「閉じ込め機能の確保」、「ダストの捕集・除去」、「 α 核種（ α 線を放出する放射性核種の総称名。）のモニタリング」等の解決に対応し必要に応じて要素試験を実施する。また、これらの技術開発の成果、および関連事業での検討結果を反映し、被ばく、保守等の観点で、工法・システムの安全確保に関する最適化検討（前期事業での検討項目の再検討・再評価の見直し、工法・システムの比較評価、燃料デブリ取り出しに関連する全体シナリオ検討等）を行う。

I. 研究の背景・目的(前期事業との関係)

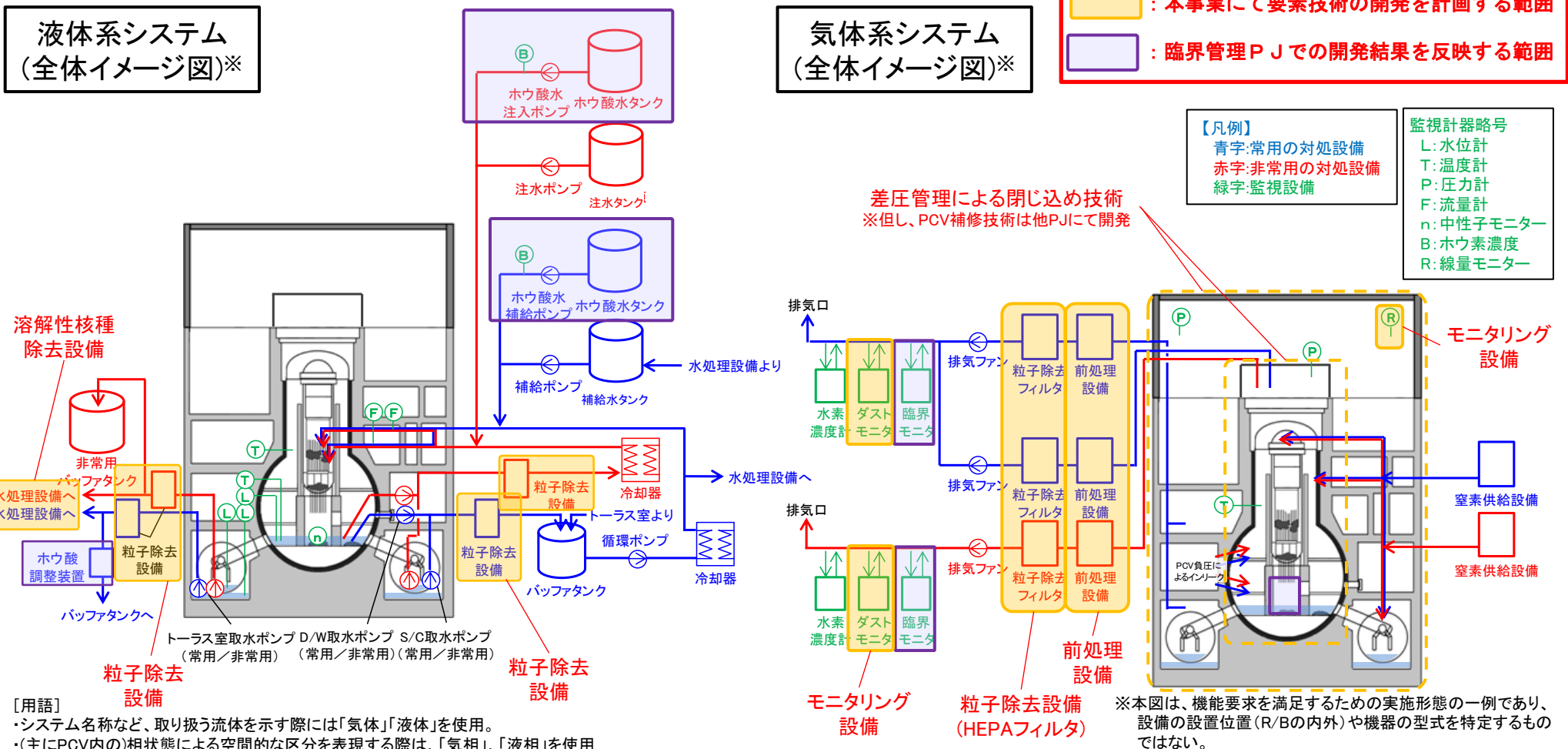
本事業と前期事業の関係を下記に示す。

本事業の内容[下記(1)～(4)]の位置づけは、大きく2つ(下記①, ②)に分類できる。



I. 研究の背景・目的(要素技術開発の範囲)

- 本事業にて **要素技術の開発を計画している範囲** を下図に示す。
- システムの最適化検討については、**安全に関わるシステム(異常時の対処設備を含む)** を検討の対象とする。(臨界管理PJなど他PJの成果も反映する。)



※本図は、機能要求を満足するための実施形態の一例であり、設備の設置位置(R/Bの内外)や機器の型式を特定するものではない。

II. 研究の目標

本事業では、工法・システムに関する安全確保上の課題である「閉じ込め機能の確保」、「ダストの捕集・除去」、「 α 核種（ α 線を放出する放射性核種の総称名。）のモニタリング」等の解決に必要な技術開発を行い、被ばく／保守性等の観点で、比較評価を行い、デブリ取り出しの安全確保に関する最適化検討を実施することにより、工法・システムの概念検討を完了をすることを目標とする。

実施目的を達成するための、実施内容毎の具体的目標を次紙以降に示す。

【本事業の主な実施内容（交付申請書ベース）】

- (1) 閉じ込め機能に関する技術開発
 - (i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発
 - (ii) 被ばく低減に関する技術開発※
- (2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発
 - (i) 気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発
 - (ii) 液相系の放射性物質の低減、除去対策の技術開発
- (3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討
 - (i) 気相中の α 核種の検出技術及びシステムの概念検討と開発計画の立案
 - (ii) 液相中の α 核種の検出技術及びシステムの概念検討と開発計画の立案
- (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

※被ばく低減を、工法・システムの最適化における指標の1つとして捉え、「(1)(ii)被ばく低減に関する技術開発」は(4)項と統合して検討を実施。[本報告資料の「IV. 実施内容」には、当該項目の個別項番なし。]

II. 研究の目標

(1)閉じ込め機能に関する技術開発	
(i)閉じ込め機能の確保のための技術開発	<p>建屋内、PCV内の差圧の管理条件が設定されていること。</p> <p>閉じ込め機能確保のための差圧管理のシステム有効性、PCV内部での水素滞留防止／火災爆発防止の有効性が確認されていること。</p> <p>建屋／PCVの気密向上の対応策が検討され、有効性の確認がされていること。</p> <p>(終了時目標TRL:レベル3)</p>
(ii)被ばく低減に関する技術開発	<p>燃料デブリ取り出し工事中あるいは事故発生時の更なる公衆や作業員の被ばく低減を目指したシナリオ検討が構築され、推定被ばく量が評価されていること。</p> <p>(終了時目標TRL:レベル3)</p>

II. 研究の目標

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発	
(i) 気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発	気相系の浄化機能に関して、安全確保および廃棄物低減を考慮し、効率的にダストを捕集・回収する方法が検討されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
(ii) 液相系の放射性物質の低減、除去対策の技術開発	液相系の浄化機能に関して、安全確保および廃棄物低減を考慮し、効率的に非溶解性および溶解性の放射性物質(α 核種)を捕集・回収する方法が検討されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)

II. 研究の目標

(3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討	
(i) 気相中の α 核種の検出技術及びシステムの概念検討と開発計画の立案	<p>気相中の α 核種のモニタリングに関し、既存技術によるモニタリングシステムが検討されていること。</p> <p>燃料デブリ取り出しに向けた気相中の α 核種モニタリングシステムの課題が抽出され、今後の開発計画が策定されていること。</p> <p>(終了時目標TRL:レベル3)</p>
(ii) 液相中の α 核種の検出技術及びシステムの概念検討と開発計画の立案	<p>液相中の α 核種のモニタリングに関し、既存技術によるモニタリングシステムが検討されていること。</p> <p>燃料デブリ取り出しに向けた液相中の α 核種モニタリングシステムの課題が抽出され、今後の開発計画が策定されていること。</p> <p>(終了時目標TRL:レベル3)</p>

II. 研究の目標

(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

工法・システムの安全確保に関し、本事業における技術開発で得られた成果および他プロジェクトで得られた成果を考慮した最適化検討がされていること。

(終了時目標TRL:レベル4)

<補足> 技術成熟度(TRL)の定義

レベル	本事業に対応した定義	フェーズ
7	実用化が完了している段階。	実運用
6	現場での実証を行う段階。	フィールド実証
5	実機ベースのプロト機を製作し、工場等で模擬環境下での実証を行う段階。	模擬実証
4	開発、エンジニアリングのプロセスとして、試作レベルの機能試験を実施する段階。	実用化研究
3	従来経験を活用、組み合わせによる開発、エンジニアリングを進めている段階。または、従来経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき開発、エンジニアリングを進めている段階。	応用研究
2	従来経験として適用できるものがほとんど無い領域の開発、エンジニアリングを実施し、要求仕様を設定する作業をしている段階。	応用研究
1	開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。	基礎研究

Ⅲ. 実施項目とその関連(実施項目)

- 昨年度までの検討により、燃料デブリ取り出し時の工法・システムの成立性に関わる以下の課題を抽出。

<安全要求を達成のために特に重要な課題>

- ・ 閉じ込め機能の確保
 - ・ 放射性微粒子の捕集・除去
 - ・ 放射性微粒子（特に α 核種）のモニタリング
- H29, 30年度は、上述の課題を解決するための要素技術の開発等を行うとともに、開発結果を踏まえて、デブリ取り出しの工法・システムの最適化検討を実施する計画としている。

【本事業の主な実施内容】

<工法・システムの成立性に関わる要素技術の開発>

- (1) 閉じ込め機能に関する技術開発
- (2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発
- (3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討

<工法・システムの全体検討>

- (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

Ⅲ. 実施項目とその関連(実施項目間の関係)

放射線防護の達成の手段として、閉じ込め(放出抑制)の機能をシステムにより確保する必要がある。本事業では、システム検討のインプット条件として重要な項目について要素開発を実施し[実施項目(1)~(3)]、その結果を工法・システムに反映する[実施項目(4)]計画している。

インプット条件(特に成立性に関わる項目) ※インプット条件の一部は他事業と連携して設定

【用語】DF: Decontamination Factor (除染係数)

安全要求
1Fの実機状態

- ・安全目標の設定
- ・深層防護の要求
- ・燃料デブリの状態
- ・PCV/建屋損傷状態

機能要求

- 実施内容(1)
 - ・閉じ込め機能確保のための必要差圧
 - ・水素濃度低減のための必要換気流量
- 実施内容(3)
 - ・被ばく評価に基づく必要検出放射能濃度
 - ・被ばく評価に基づく必要DF

詳細情報

- 実施内容(2)
 - ・捕集回収技術の性能情報
 - ・検出技術の性能情報
- 実施内容(3)
 - ・放射性微粒子の特性 (発生量/粒径/気相・液相への移行率 比重/化学形態)
 - ・放射性微粒子以外の特性(油などの不純物)
 - ・環境条件

検討の流れ (設備仕様)

閉じ込めの概念

- アウトプット (一例)
- ・バウンダリの構築方法
 - 気相: 差圧管理
 - 液相: 水位制御
 - ・システム構成(概略)

システム仕様

- ・目標差圧
- ・目標DF
- ・目標換気流量
- ・目標検出(管理)放射能濃度

各機器の仕様

- ・DF
- ・型式
- ・前処理方法

成立性検討

- ・系統仕様
- ・系統図
- ・配置図
- ...

実施内容(4) 実施内容(4)「工法・システムの安全確保に関する最適化検討」では、一連の検討を実施

Ⅲ. 実施項目とその関連(他研究との関係)

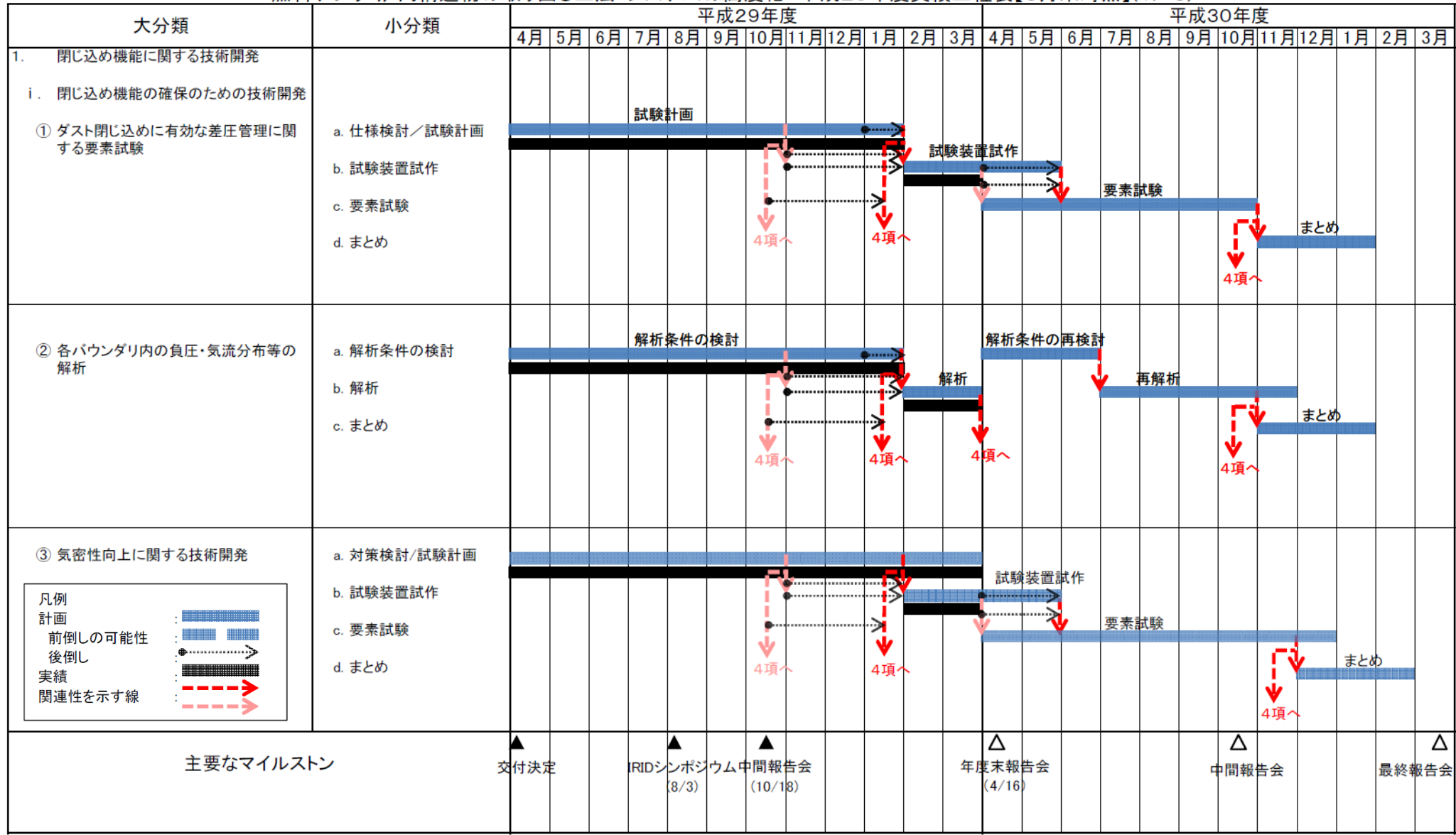
➤ 他事業と連携に関する実績を以下に示す。

No.	連携先	主な連携内容	連携方法※	本事業への(からの)主なInput/Output
1	基盤技術PJ	・基盤技術PJで開発中の技術(全般)を、本事業の工法検討に反映する。 ・基盤技術PJで開発中の技術(主に加工技術、局所回収設備)をシステム検討に反映する。	PJ合同の打合せを定期的実施(月1回)	Input: デブリ加工による粒子発生量・粒径など Output: 加工技術開発時の採取データに関する要求など
2	サンプリングPJ	・工法・システムを検討する上で、必要性のある情報をサンプリングPJにニーズとして提示する。		Input: サンプリング計画(PCV圧力など) Output: サンプリングのニーズ
3	臨界管理PJ	・安全の考え方など、共通で検討を進める。 ・機器／システムの取り合いがあるため、仕様の共有(摺合せ)を実施する。	No.1,2の打合せに適宜参画	Input: 臨界管理に関わる安全の考え方、中性子検出器仕様、システム仕様など Output: ガスモニタ検討条件(排気風量など)
4	内部調査PJ	・工法・システムを検討する上で、必要性のある情報を内部調査PJにニーズとして提示する。 ・内部調査結果を工法・システムの検討に反映する。	必要に応じPJ間の打合せを実施	Input: 内部調査結果(デブリ位置など) Output: 内部調査のニーズ
5	デブリ性状把握PJ 炉内状況把握PJ	・デブリ加工時の α 核種の挙動について、文献等での調査を頂き(具体的な内容・取得時期は調整中)、工法・システム検討に反映する。		Input: デブリの組成、液相から気相への移行率など Output: 取り出し時の温度条件など
6	収納・移送・保管技術PJ	・収納缶側のサイズ・水素対策上の制約等を工法検討に反映する。		Input: 収納缶仕様など Output: 取り出し量など
7	PCV補修PJ (捕修技術／実規模)	・デブリ取り出し時の安全要求などを共有し、PCV補修(止水)計画と工法・システムの整合を図る。		Input: 取り出し時の実現性が高いPCV水位、PCV補修方法 Output: PCV圧力(差圧)、排気風量
8	耐震PJ	・デブリ取り出し時のシステム構成や地震による波及的影響を共有し、安全シナリオを検討する。		Input: 耐震評価結果、大型機器損傷の想定 Output: 取り出し時のシステム構成

※全般、Input/Outに関わる内容については、IRID内の審議結果を共有。

IV. 実施工程[工程表(1/3)]

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 平成29年度実績工程表【3月末時点】(1/3)



IV. 実施工程[工程表(2/3)]

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 平成29年度実績工程表【3月末時点】(2/3)

大分類	小分類	平成29年度												平成30年度											
		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. 閉じ込め機能に関する技術開発 ii. 被ばく低減に関する技術開発	a. シナリオ検討	[Gantt bar spanning from April 2017 to March 2018]																							
	b. 被ばく評価	[Gantt bar spanning from June 2017 to March 2018]																							
	c. まとめ	[Gantt bar spanning from March 2018 to March 2018]																							
		<p>※1項 ii. 「シナリオ検討」と「被ばく評価」および4項は逐次連携を図る。(煩雑となるため、1例のみ記載)</p>																							
2. 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発 i. 気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発	a. 概念検討/試験計画	[Gantt bar spanning from April 2017 to February 2018]																							
	b. 試験装置試作	[Gantt bar spanning from June 2017 to February 2018]																							
	c. 要素試験	[Gantt bar spanning from April 2018 to February 2019]																							
	d. まとめ	[Gantt bar spanning from February 2019 to February 2019]																							
		<p>4項へ 4項より※</p> <p>4項へ 4項より※</p> <p>4項へ</p> <p>4項へ</p>																							
ii. 液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発	a. 概念検討/試験計画	[Gantt bar spanning from April 2017 to February 2018]																							
	b. 試験準備/試験装置試作	[Gantt bar spanning from June 2017 to February 2018]																							
	c. 要素試験	[Gantt bar spanning from April 2018 to February 2019]																							
	d. まとめ	[Gantt bar spanning from February 2019 to February 2019]																							
		<p>4項へ</p> <p>4項へ</p>																							
凡例		<p>計画: [Blue bar]</p> <p>前倒しの可能性: [Blue bar with dashed line]</p> <p>後倒し: [Blue bar with arrow]</p> <p>実績: [Black bar]</p> <p>関連性を示す線: [Red dashed arrow]</p>																							
主要なマイルストーン		<p>▲ 交付決定</p> <p>▲ IRIDシンポジウム (8/3)</p> <p>▲ 中間報告会 (10/18)</p> <p>△ 年度末報告会 (4/16)</p> <p>△ 中間報告会</p> <p>△ 最終報告会</p>																							

IV. 実施工程〔工程表(3/3)〕

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 平成29年度実績工程表【3月末時点】(3/3)

大分類	小分類	平成29年度												平成30年度														
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月			
3. 燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリングシステムの検討	i. 気相中のα核種の検出技術及びシステムの概念検討と開発計画の立案	概念検討																										
		a. 概念検討												b. 開発計画の策定 ※必要に応じ実施														
	c. まとめ													まとめ														
ii. 液相中のα核種の検出技術及びシステム概念検討と開発計画の立案	a. 概念検討	概念検討																										
		b. 開発計画の策定 ※必要に応じ実施												c. まとめ														
	c. まとめ													まとめ														
4. 工法・システムの安全確保に関する最適化検討	a. 工法の最適化検討	工法の最適化検討																										
		b. システム最適化検討												c. まとめ														
	c. まとめ													まとめ														
<div data-bbox="43 992 410 1182" data-label="Complex-Block"> <p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> 計画: 青い帯 前倒しの可能性: 点線 後倒し: 逆点線 実績: 黒い帯 関連性を示す線: 赤い矢印 </div>		<p>1項 ii. より 1項 ii. へ※</p> <p>1項 ii. より 1項 ii. へ※</p> <p>※1項 ii. 「シナリオ検討」と「被ばく評価」および4項は逐次連携を図る。 (煩雑となるため、1例のみ記載)</p>																										
		<p>2項より1項より</p> <p>3項より1項より</p> <p>1項①、1項③、2項、②より</p> <p>2項より 3項より</p>																										
主要なマイルストーン		▲ 交付決定			▲ IRIDシンポジウム中間報告会 (8/3)						▲ IRIDシンポジウム中間報告会 (10/18)						△ 年度末報告会 (4/16)			△ 中間報告会						△ 最終報告会		

IV. 実施工程(まとめ)

- 概ね初期計画段階の実施工程通りに進捗している。
- 1. i 項「閉じ込め機能の確保のための技術開発」で解析・試験の実施開始時期の見直し(約3ヶ月後ろ倒し)を行っているが、後段工程や事業完了時点の成果への影響はない見込み。

[見直し理由]

外部有識者に意見を伺う場を設けるなど、より慎重に検討を進める計画としたため。

V. 実施体制

東京電力ホールディングス株式会社

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

- 全体計画の策定と技術統括のとりまとめ
- 技術開発の進捗などの技術管理のとりまとめ

日立GEニュークリア・エナジー株式会社

- 取出工法評価・要素試験の設計補助(A社)
- ダスト封じ込め試験(B社)
- PCV内の気流解析(C社)
- 気密性向上の技術開発(D社)
- 逆洗HEPA試験(Cavendish社[英国])
- 液体中粒子の除去性能試験(F社)
- デブリ評価・検出方法の検討(G社)
- ペDESTAL補強工法(清水建設株式会社)

東芝エネルギーシステムズ株式会社

- 窒素封入流量変化/PCV差圧測定(I社)
- バウンダリ内の負圧・気流分布解析(J社)
- R/Bの気密性向上対策案の検討および要素試験(K社)
- 被ばく評価に係わる設計助成(L社)
- 逆洗可能な乾式集じん機の要素試験(新日本空調株式会社)
- 湿式電気集じん機の小型化(株式会社IHI)
- HEPAフィルタの遠隔交換技術の開発(新日本空調株式会社)
- スラッジ回収技術の要素試験(株式会社IHI)
- 工法・システムの最適化検討に係わる検討補助(M社)
- 工法・システムの最適化検討に係わる設計助成(N社)
- 安全要求、安全設計に係わる設計助成(MPR社[米国])

三菱重工業株式会社

- 閉じ込め機能に関する検討助勢(Q社)
- ダストの捕集・除去に関する検討助勢(R社)
- ダストの捕集・除去に関する要素試験助勢(S社)
- 工法・システムの安全確保に関する最適化検討助勢(T社)

VI. 実施内容

(1) 閉じ込め機能に関する技術開発

(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

【目標】

- ・閉じ込めに有効なシステム設計条件(差圧など)の確認
- ・不活性化(水素燃焼防止)に有効なシステム設計条件(排気量、窒素封入量など)の確認
- ・気密性向上技術の検討

2017年度末:簡易手段による有効性の評価

- ・要素試験:試験計画の立案
- ・シミュレーション:試解析実施
- ・気密性向上技術:机上検討

2018年度末:要素試験／シミュレーションによる有効性の確認

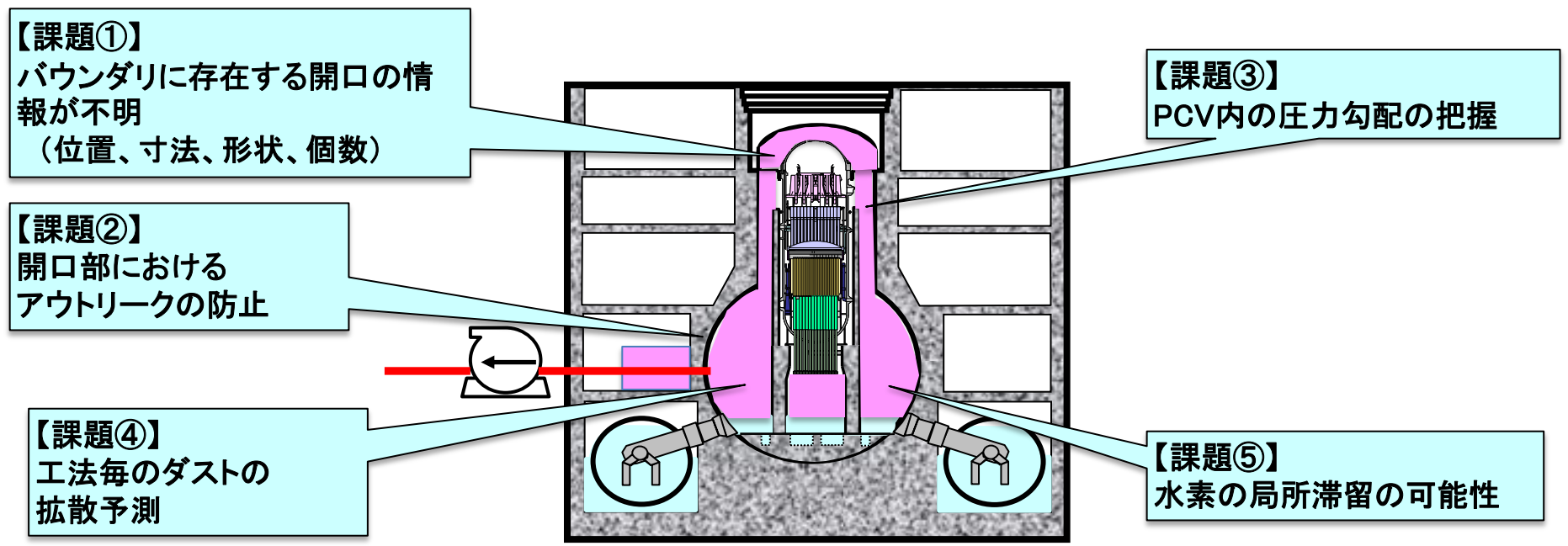
- ・要素試験:試験実施
- ・シミュレーション:解析実施
- ・気密性向上技術:机上検討(継続)、必要に応じモックアップ試験

VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

<技術開発により解決すべき課題>

- 燃料デブリ取り出し作業により発生するダストの閉じ込めは、バウンダリ範囲の設定とそのバウンダリに存在する開口に応じた排気を確保することによる負圧管理で行う方針。
- このバウンダリの設定と負圧管理による閉じ込め技術が成立するためには、以下の課題に対応した情報を入手する必要がある。



VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

<目的と開発の必要性>

- 前頁の課題に対して、目的とする設計に必要な情報をどのように取得するか対応方針を検討。
- 技術開発の対象として、解析、要素試験、実機での確認に分類して整理。
- 解析、要素試験、実機確認の何れかで必要な情報を取得できる技術を確立することを目標とする。

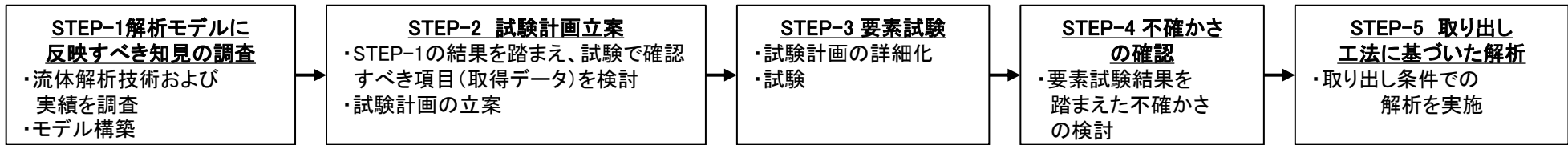
課題	設計に必要な情報	解析	要素試験	実機確認	備考
①バウンダリに存在する開口の情報	負圧維持に必要なとなる排気風量を決定づける開口情報	(実機に存在する開口情報は、解析では取得不可)	(実機に存在する開口情報は、要素試験では取得不可)	開口情報推定のための試験提案	
②開口部におけるアウトリークの防止	局所的にもインリークを担保可能な負圧値	(局所模擬の解析を試験結果と比較することでコードの検証を実施)	局所模擬の要素試験で負圧管理値の妥当性を確認	《決定した差圧管理値での運用》	破損したバウンダリに対する動的バウンダリの成立性の確認のために実施
③PCV内の圧力勾配の把握	負圧管理の説明性のために、局所的な圧力の偏りが無いことの確認	PCV全体の圧力分布を評価し、PCV全域で必要負圧を担保可能なことを確認	(解析にて確認。解析と要素試験の比較は②で実施。)	《代表点の圧力監視》	
④工法毎のダストの拡散予測	気相に浮遊するダストの位置と粒径の推定情報	PCV内のダスト挙動解析でダスト分布を確認	工法毎の発生ダスト情報取得(基盤技術PJ)	《ダスト濃度モニタリング》	局所回収とシステム側での回収の線引きの確認
⑤水素の局所滞留の可能性	水素滞留箇所、掃気に効果のある窒素流量、封入場所	水素分布解析により滞留発生箇所を評価し、窒素封入量、場所を検討。	(解析にて確認。解析と要素試験の比較は②で実施。)	《排気水素濃度監視。局所の水素濃度計測は困難》	

《》はデブリ取り出し時の対応案

VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

<進め方（実績と今後の計画）>



項目	平成29年度				平成30年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
マスター工程			中間報告会		年度末報告会		中間報告会	最終報告会
解析モデルに反映すべき知見の調査	[Progress bar from 1Q to 4Q]							
試験計画立案		[Progress bar from 2Q to 4Q]						
要素試験(解析との比較用データの取得)				[Progress bar from 4Q to 3Q]				
不確かさの確認					[Progress bar from 1Q to 2Q]			
取り出し工法に基づいた解析						[Progress bar from 2Q to 4Q]		
システム検討へのフィードバック								

解析結果の説明性を補強するために取得すべき項目の検討結果

試験計画

試験結果

不確かさの確認結果

閉じ込め(差圧管理) / 火災爆発防止のためのシステム条件

閉じ込め(差圧管理) / 火災爆発防止のためのシステム条件

システム構成・仕様の見直し

システム構成・仕様の見直し

VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

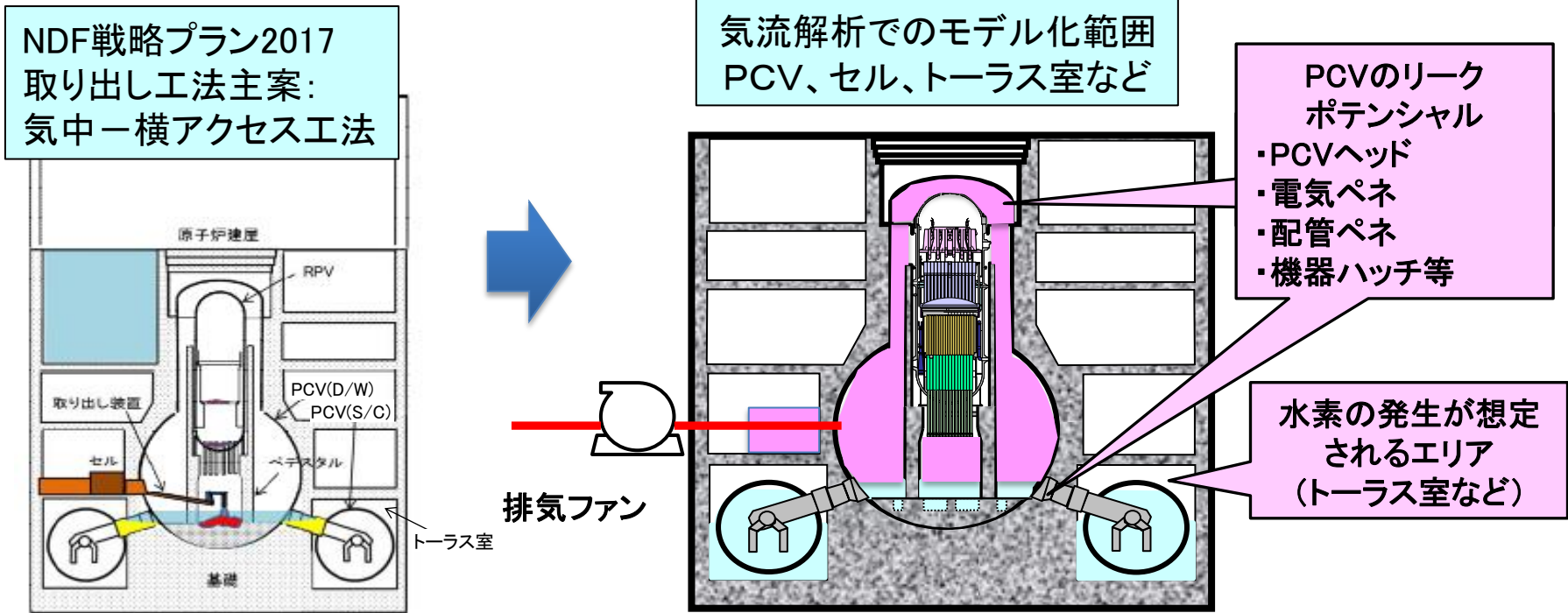
(a) 各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析

1) 目的

差圧管理条件(現地データ)や現場の損傷状況を考慮し、流動解析コード(GOTHIC、CFDコード等)により、1F解析モデルを構築。PCV内の全体気流挙動を把握した上で、以下の有効性の確認を目的とする。

- 閉じ込め機能確保のための差圧管理条件やシステムの有効性(ダスト放出抑制)の確認
- PCV内部での水素の滞留の可能性及び不活性ガスの供給によるPCV内部の火災爆発の防止の有効性の確認(建屋のうち水素が発生が想定されるエリア(トーラス室など)についても実施)

2) モデル化範囲



VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

(a) 各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析

3) 解析コードの選定(各評価モデルの適用例)

	集中パラメータモデル	分布パラメータモデル	数値流体解析モデル
解析目的	<ul style="list-style-type: none"> ・空間の巨視的な状態量の評価 ・空間同士の流れを評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・空間内の微視的な状態量の評価 ・空間内の流れを評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・空間内の微視的な状態量の評価 ・空間内の流れを評価
適用例	<p>[GOTHIC]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新規制基準 建屋水素挙動評価 ・蒸気伝搬(溢水)評価 ・1F事故解明 ・NUPEC ISP-35再現解析(開発元) <p>[MAAP]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新規制基準適合性評価 IS-LOCAにおける室温評価 BWR 電力各社 ・六ヶ所再処理施設における新規制基準に対する適合性評価 JNFL <p>[MELCOR]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・MELCORコードを用いた再処理施設の廃液沸騰事象解析 JAEA-Research2012-026 	<p>[GOTHIC]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新規制基準 建屋水素挙動評価 ・1F原子炉水位計挙動再現解析 ・NUPEC ISP-35再現解析(NRA) 	<p>[STAR-CD]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・NUPEC過剰水素処理(PCV内アンモニア触媒式FCS設置検討) <p>[GASFLOW-MPI]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・THAI(Germany) ・PANDA(Switzerland) etc (すべて開発元のV&V) ・BWR (Switzerland, Mexico, Germany)

VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

(a) 各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析

3) 解析コードの選定(デブリ取り出し時のPCV内流動評価への適用性)

モデル化に求められる要件	集中パラメータモデル	分布パラメータモデル	数値流体解析モデル
PCV内の気流の把握 (巨視的、微視的)	×	○	◎ <i>PCV(D/W), セル</i>
気流の解像度と解析容易性 (十分な解像度と感度解析が可能であること)	×	○	△
蒸気発生・蒸気凝縮などの相変化、 空間内の物質移動	○	○	△
エアロゾル挙動(拡散、自然沈着、 除去など)	○	○	△
水素挙動の把握 (滞留、置換)	○	○	○
建屋内挙動の把握 (PCV外とのインターフェース)	○	△	△

*PCV(S/C),
建屋(トールス室など)*



GOTHIC Ver.8.2を適用

VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発 (a) 各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析

3) 解析コードの選定(まとめ)

各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析を実施するうえで、適用すべき流動解析コードに関する検討を実施した。

- 差圧管理条件や現場の損傷状況を考慮したPCV内挙動解析では、空間内の分布を評価する必要があるため、空間をメッシュ分割して熱水力的流動を把握できるモデルが必要
- また、建屋内(トラス室など)挙動の把握にはPCV(D/W)外からのガス流入／流出を模擬することになるが、解析容易性等を考慮し、集中パラメータモデルを適用することが合理的
- ダスト閉じ込め機能については、D/W内の気流だけでなく、エアロゾルの挙動の評価が必要
- 以上から、集中パラメータ、分布パラメータの同時適用が可能で、かつエアロゾル挙動評価も可能なGOTHICコード(最新Ver8.2)が最適な気流解析コードであると結論
(GOTHICに実装されているエアロゾル挙動モデルは調査中)

VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

(b) 差圧管理のための要素試験

1) 目的

局所的にもインリークを担保できる、ダスト閉じ込めに有効な負圧条件について、単純な体系での要素試験により確認し、実機での差圧管理条件を検討する。

開口部近傍の流速場データを取得することで、局所モデル解析の検証につなげる。

2) 実施項目

・開口を持つ容器内の圧力(内外差圧)条件をパラメータとし、開口近傍での流速場測定により、インリークとなっていることを確認する。

⇒ 限界差圧の把握、動的バウンダリの成立性の確認

・開口の寸法、形状、数は変更可能なようにし、ある負圧値に対して、開口の形態が影響を持つかどうかを確認する。

⇒ 詳細情報が不明な開口に対する推定情報の取得

・圧力(内外差圧)の条件は、1次バウンダリの圧力として設定している、 $-200 \sim -300 \text{Pa}$ を中心に、パラメータをふり、インリークを担保できる負圧値を確認する。

⇒ ファントリップ時の予備機起動までの余裕時間評価などに活用。(排気ファン停止時のPCV内圧力変動は解析で求める)

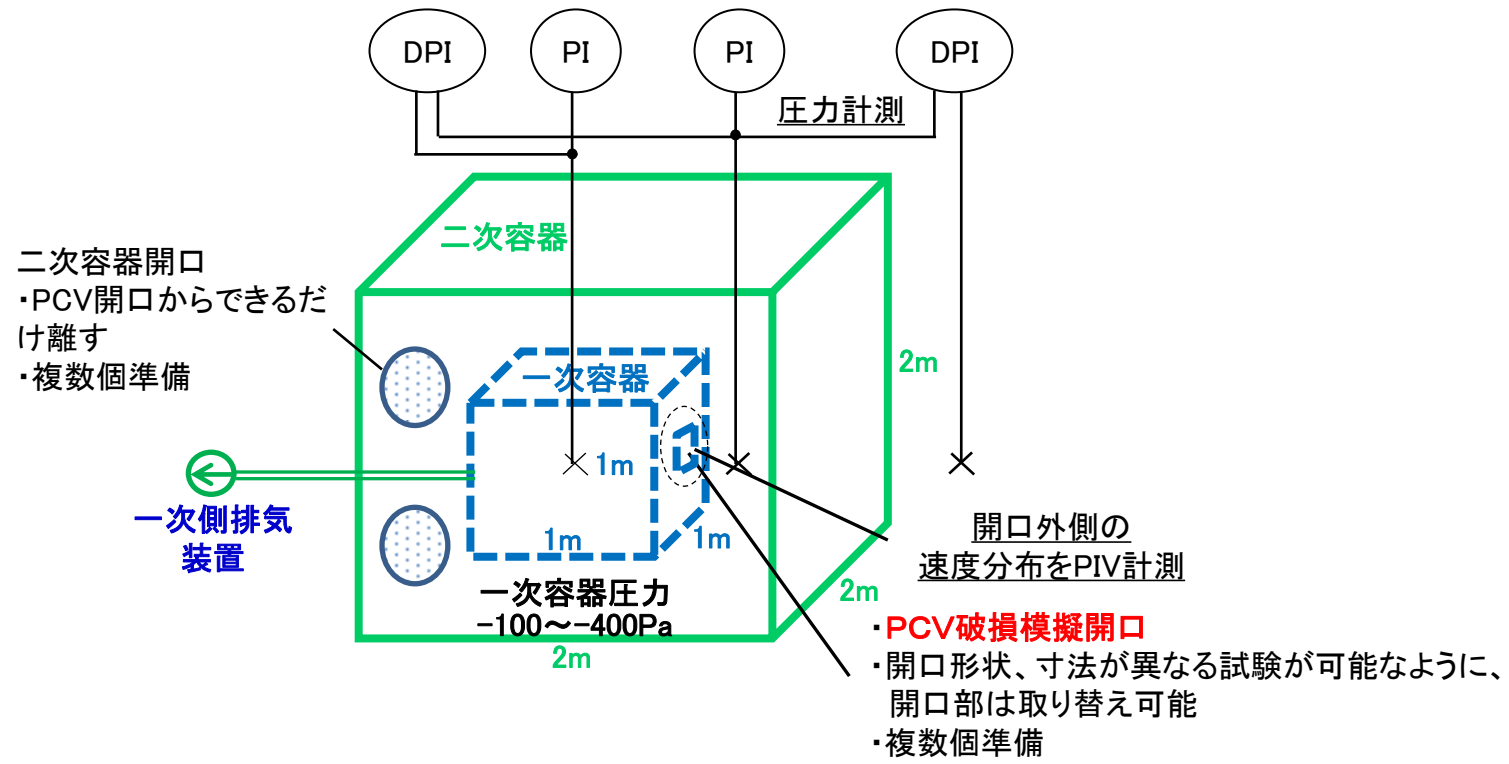
VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

(b) 差圧管理のための要素試験

3) 試験装置、主要計測項目(案)

- 一次容器(PCV模擬、1m角)、二次容器(2m角)の二重構造 ⇒ 可視化のためアクリル製
- 一次容器には、PCV破損口を模擬する開口を設置 ⇒ 開口面積を調整可能
- 一次側の排気量を調整して負圧状態を形成 ⇒ 圧力計測を実施
- 一次容器開口近傍の領域でも、インリーク状態となることを確認 ⇒ PIV(Particle Image Velocimetry)による流速場計測を実施
- 一次容器内に模擬ダスト粒子を入れるケースも想定
(模擬粒子の選定・代表性については議論要)

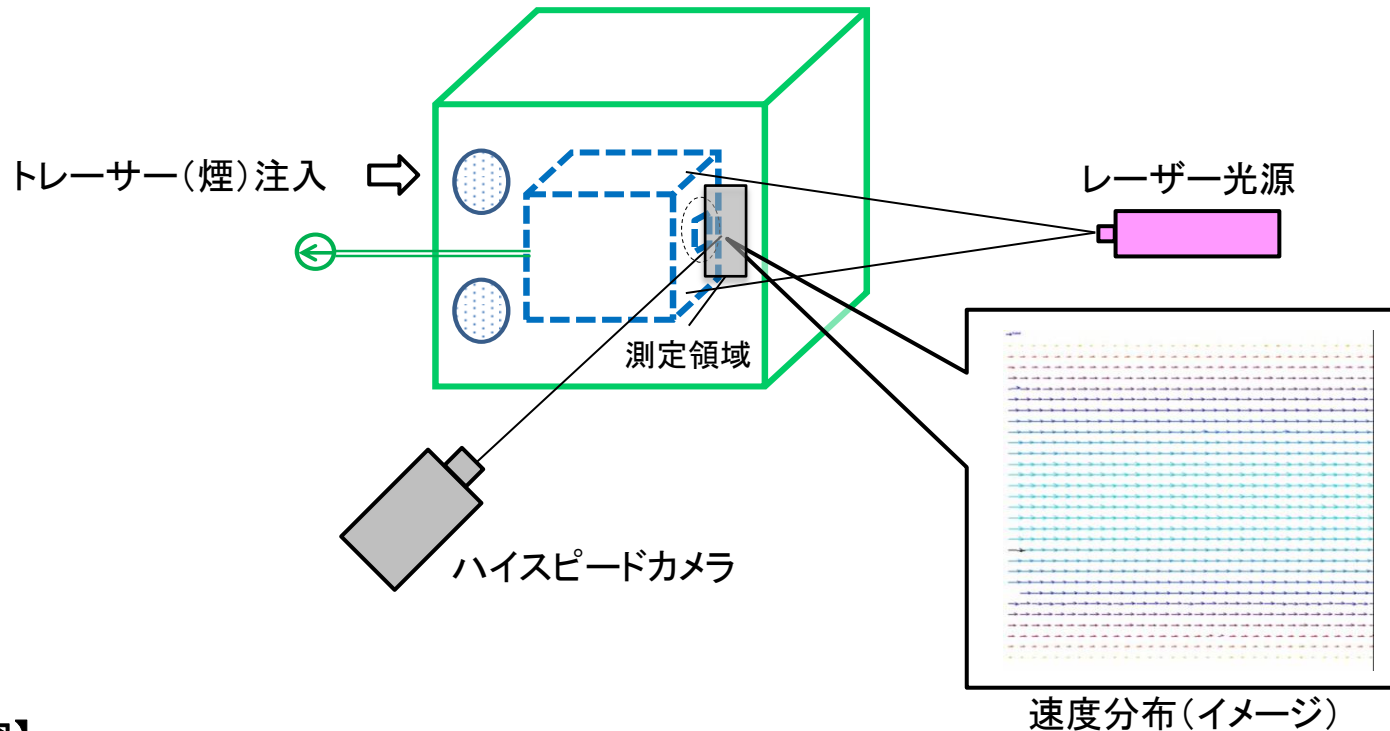


VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

(b) 差圧管理のための要素試験

4) 流速場計測のイメージ、試験パラメータ



【実施内容】

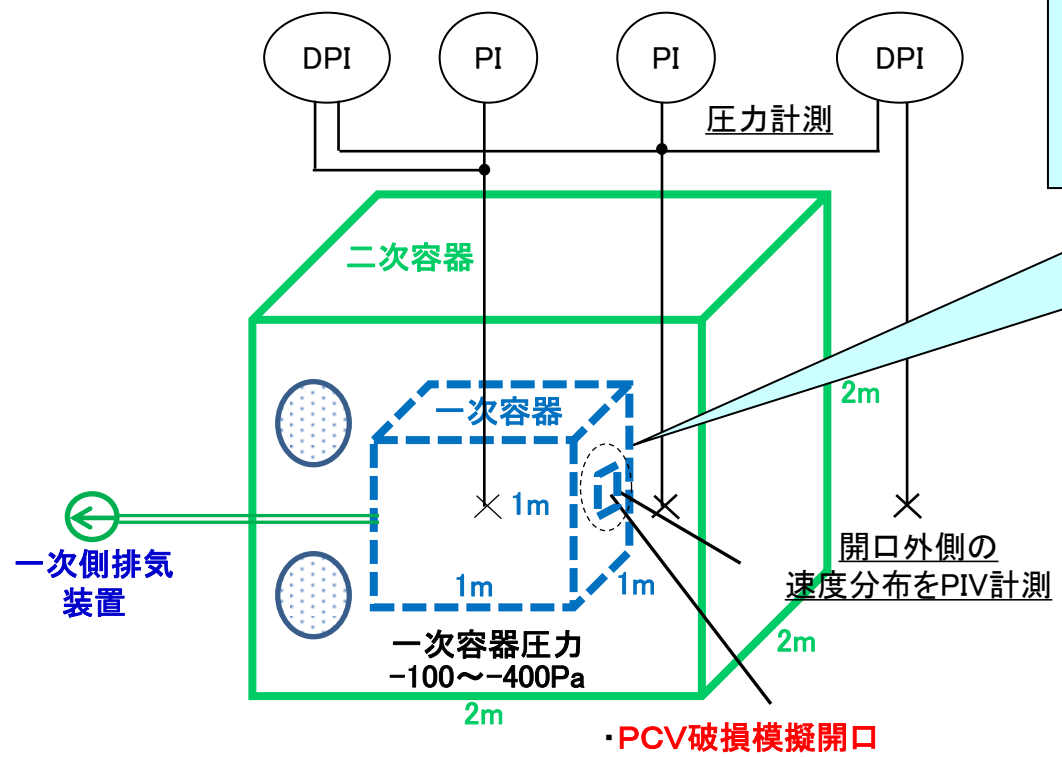
- ・1次容器内を負圧(圧力:-300Pa)に維持し、模擬損傷箇所近傍をハイスピードカメラで撮影、速度分布を算出 (ベース条件)
 - ⇒ インリークが確保されている(アウトリークが生じていない)ことを確認
 - ⇒ (気流解析での検証用データとして活用)
- ・1次容器内の圧力を-300Pa ~ -50Pa程度まで段階的に変化させ速度分布を計測
 - ⇒ **インリークを確保できる圧力(1次容器の内外差圧)を把握**
- ・模擬損傷箇所の大きさを変化させ、速度分布を計測

VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

(b) 差圧管理のための要素試験

5) 要素試験で模擬すべき項目



実機で想定される破損口形状を縮小模擬

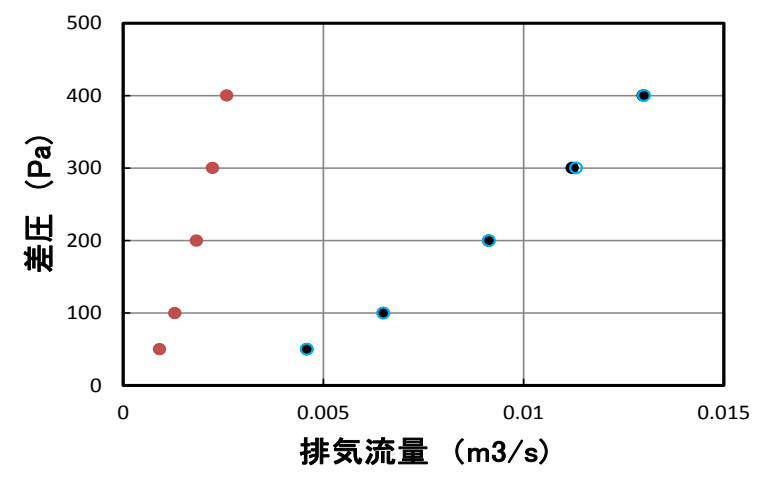
- ・PCVヘッドフランジ（周方向のリーク）
- ・電気ペネ（環状流路）、等
- ・上部（PCVヘッド）、側面（ペネ部）の開口組合せ

⇒ 一次容器の流動場に影響があるか？

試験結果の整理

- ・ 想定される破損口形状に対する限界差圧の把握
- ・ 排気流量Wと差圧ΔPの相関 ($\Delta P \propto W^2$)
- ・ 破損口形状・面積が異なると、上記相関式の係数も変化

⇒ 気流解析の破損口モデルに反映



VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

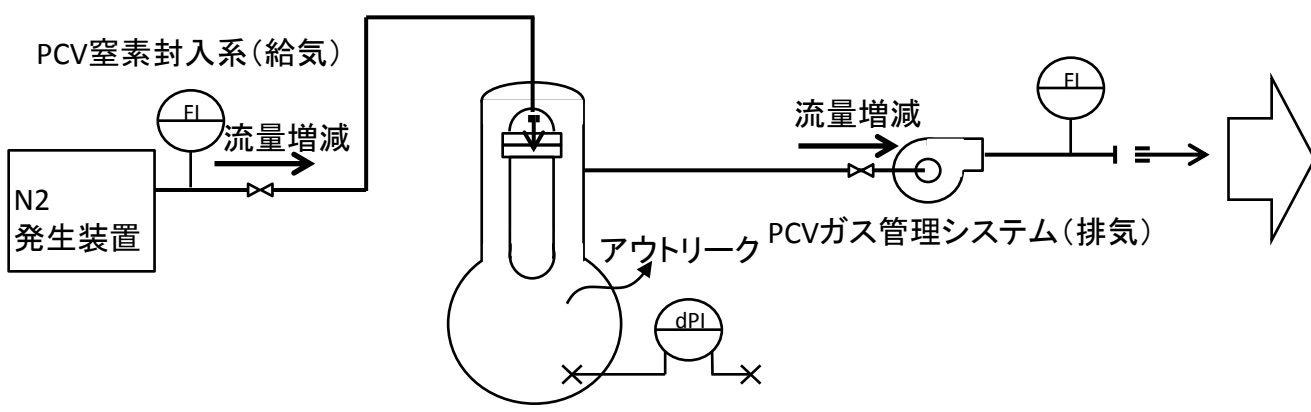
(c) 実機PCV開口面積推定のための試験

1) 実機PCV開口面積推定のための窒素封入量、排気風量増減試験提案

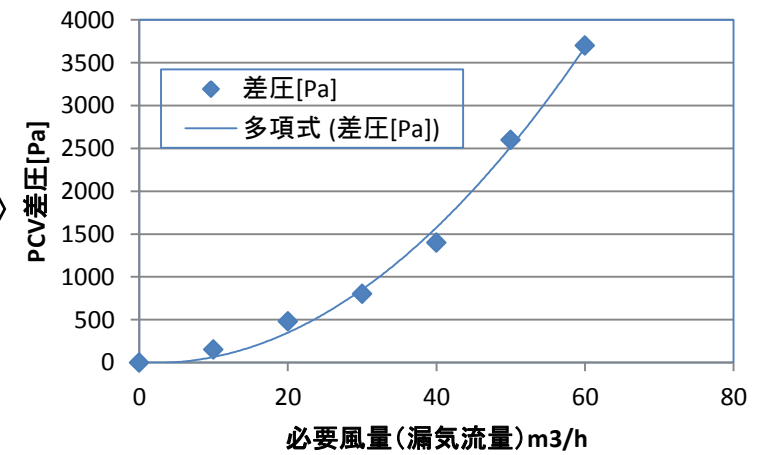
<試験目的>

1次バウンダリを形成するPCVの開口面積を推定し、1次バウンダリを一定の負圧に維持する際の必要風量（=ガス管理システムの必要風量）を決定するための手順検討、及び現地測定を行う。[現状の管理（PCVの不活性状態を維持するための弱正圧状態）を維持可能な範囲での調整運転。]

PCV（RPV）に窒素を給気している窒素封入系と、PCVから排気しているPCVガス管理システムの流量を変化させ、PCV内外差圧の変化を測定することにより、開口の抵抗係数を算出することで、開口面積を推定する。



給気量/排気量を変化させた際の差圧測定



PCVに開口がある状態でのPCV差圧と必要風量(イメージ)

VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

(c) 実機PCV開口面積推定のための試験

2) 実機PCV開口面積推定のための窒素封入量、排気風量増減試験準備項目 (検討中)

① 試験概要の提案(前2頁および本ページの内容)

a) 系統インリーク量推定試験

PCV圧力の目標値を一定とし、給気と排気の流量を変化させることでPCVガス管理システムおよびN2封入系のリーク量を推定する。

PCV圧力が一定であればPCVと同圧部分からのリーク量は一定。給気と排気の流量差の変化量は、PCVガス管理システムもしくはN2封入系のリークとして算出。

b) PCV開口面積推定試験

給気と排気の流量を変化させることでPCV圧力を変化させ、PCVからのリーク量を求め、開口面積を推定する(実際に求まるのは開口の『面積×抵抗係数』に相当)。[例: 1号機: 直径約10mmのオリフィス程度(2018.1.22運転データベース)]

② 実機システム仕様の確認 <<東電HD>>

排風機仕様、圧力、流量計測精度の確認(温圧補正の有無含む)

③ 試験必要システム仕様の検討 <<東電HD>>

上記a),b)の試験実施に必要な流量変更幅、圧力計、流量計精度について評価、現状設備の適用可否の確認を行い、必要に応じて実機改造提案を行う。

④ 試験実施および試験結果整理 <<東電HD>>

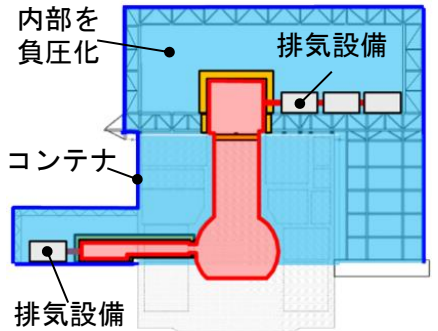
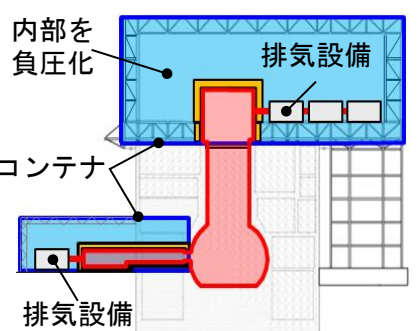
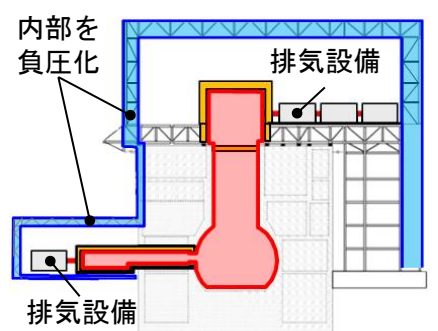
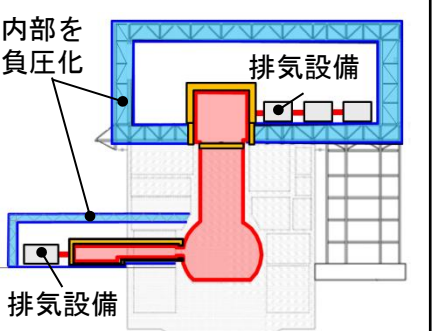
VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

(d) 気密性向上対策の検討

燃料デブリ取り出し時の気密性向上対策として、コンテナ構造のコンセプト案を検討した。

- 全体コンテナ：既存設備全体を覆うコンテナ
- 個別コンテナ：燃料デブリ取り出しセルの周りだけを覆うコンテナ
- SSC (Single Skin Container)：コンテナ壁面を一重のパネルで構築
- WSC (Double Skin Container)：コンテナ壁面を二重のパネルで構築

	全体コンテナ SSC	個別コンテナ SSC	全体コンテナ WSC	個別コンテナ WSC
構造案	 <p>内部を負圧化 排気設備 コンテナ 排気設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ取り出しセルおよび、その付帯設備全体を覆う。(本格コンテナのイメージ) ・建屋に荷重をかけずに構築可能 	 <p>内部を負圧化 排気設備 コンテナ 排気設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上取り出しおよび横取り出しの燃料デブリ取り出しセルを個別に覆う。 ・建屋自体の躯体強度や架台設置が別途必要 	 <p>内部を負圧化 排気設備 排気設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ取り出しセルおよび、その付帯設備全体を覆う。 ・チェルノブイリでは本構造案を採用 ・建屋に荷重をかけずに構築可能 	 <p>内部を負圧化 排気設備 排気設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上取り出しおよび横取り出しの燃料デブリ取り出しセルを個別に覆う。 ・建屋自体の躯体強度や架台設置が別途必要
閉じ込め	コンテナで覆われた内部空間を負圧化し、閉じ込め。	燃料デブリ取り出しセルを個別にコンテナで多い、負圧化で閉じ込め。	コンテナのパネル間を負圧化し、閉じ込め。	コンテナのパネル間を負圧化し、閉じ込め。

VI. 実施内容

(1)(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

【まとめ】

(a) 各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析

- 平成29年度は、閉じ込め機能の確保に関し解析／試験の組み合わせによる検証方法、検証の解析コードの選定、解析条件の検討、および試解析を実施した。
- 平成30年度は、各バウンダリ内(全体領域)の負圧・気流の解析を実施する予定。

(b) 差圧管理のための要素試験

- 平成29年度は、要素試験による確認項目を検討した。[(a)と同時に検討]
- 平成30年度は、要素試験を実施し、限界差圧を評価する。

(c) 実機PCV開口面積推定のための試験

- 平成29年度は、試験方法の概念を検討した。
- 平成30年度は、試験方法の追加検討を実施し、東京電力HD殿への提案を実施する。

(d) 気密性向上対策の検討

- 平成29年度は、コンテナ構造のコンセプト案を検討した。
- 平成30年度は、コンテナ構造とそれらに付帯する設備の気密性向上対策の検討を実施する。

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

【目標】

燃料デブリ取り出し時に優位な技術選定、データ取得およびシステム検討

2017年度末：有効な型式の選定、システム検討

技術調査：技術マッピング作成、優位技術評価

要素試験：試験計画立案

システム検討：技術調査結果を踏まえたシステム検討

2018年度末：データ取得、システム検討

技術調査：なし（必要に応じて、追加の技術調査）

要素試験：試験実施

システム検討：要素試験結果を踏まえたシステム検討

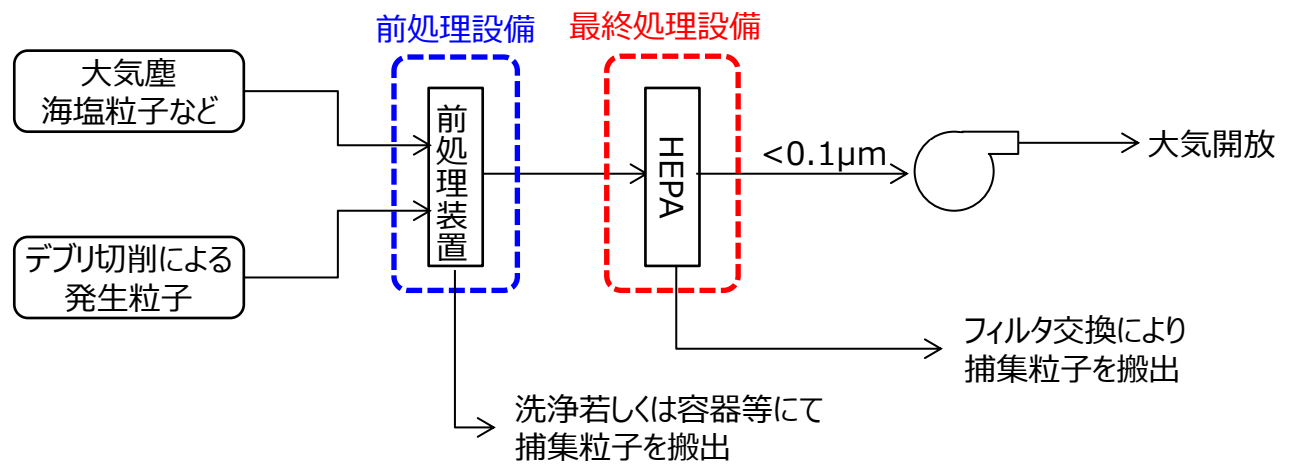
VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(i) 気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

1) 気体系システムの概要

- 気相系粒子捕集・除去設備の構成（案）は以下の通りである。
 - ① 気相系粒子捕集・除去設備の粒子捕集設備は、性能及び実績の面から、気体系システムの最終的な性能クレジットを取るため、最終段に高性能粒子フィルタ（HEPAフィルタ）を設置する。ただし目詰まりにより交換頻度が頻繁となる懸念がある。
 - ② 高性能粒子フィルタの保護/交換頻度低減を目的とし、粗取りを行う前処理装置を最終処理前に設置



前処理、最終処理の定義は以下とする 図 気相系粒子捕集・除去設備 構成（案）

- ① 前処理：大径粒子 $\sim 1\mu\text{m}$ （暫定、処理方式により見直し）
- ② 最終処理： $0.1\mu\text{m}$ 程度の粒子を捕集する

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(i) 気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

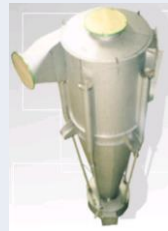
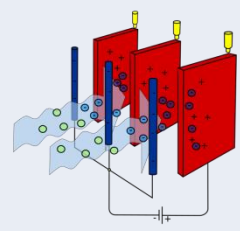
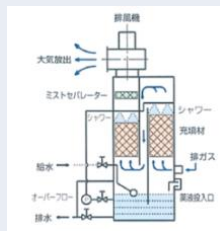
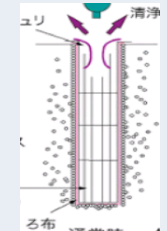
2) 技術ベンチマーク (優位技術の選定)

技術調査の結果から、処理能力・性能面でシステム条件を満足しないものを除外し、さらに類似原理の機器について、除去性能/廃棄物量/メンテナンス等の比較により優位技術を絞り込みを行った。

<複数型式選定の理由>

- ・実機のシステム入口条件(粒子径・量、pH、ホウ酸の有無など)は大きな不確定性を含むことから条件の変化に対応可能なように特性の異なる技術を選定。
- ・本事業では、配置検討用のシステム構成を1つ設定するが、実機条件に応じた組み換え方針も検討する。

表 気相系捕集・除去設備 (優位技術選定結果) [前処理装置]

型式	遠心式集じん	電気式集じん	洗浄式集じん	ろ過式集じん
原理・特徴	サイクロン式の集じん機。粒子にかかる抗力を減衰させることで、従来サイクロンより高効率で粒子を捕集。	汚れた空気の中に含まれる各種粒子に電荷を与え、集じん極に引き寄せることで粒子を捕集する。	水中充填材に粒子を通し、水中に粒子を捕捉する。	ろ布表面およびろ布内部に付着堆積した粒子層で、含じんガスに含まれる粒子をろ過する。
略図				
1 F適用に関する優位性	除去能力は相対的に低い。廃棄物が最小 (消耗品なし、廃液なし) かつ小型で適用範囲も広い。	除去能力が相対的に高い。但し、粒子の帯電性確認や、湿分対策 (スパーク防止) といった制約あり。	除去能力のデータが不足 (粒子に対し)。ガス成分の除去が必要となった場合に対応可能という他の型式にない優位性あり。	除去能力・適用範囲・実績の面で優位であるが、廃棄物あり。実績の多い有機系エレメントと、廃棄物低減の観点で金属エレメントを抽出

[補足] 使用可能条件が広く除去能力を確保する上でろ過式集じんの信頼性の高いろ過式集じんを抽出。
 なお、ろ過式集じんはフィルタ廃棄物が発生するため、フィルタレスの型式も抽出。


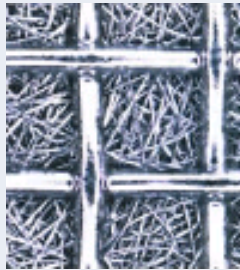

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(i) 気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

2) 技術ベンチマーク (優位技術の選定)

表 気相系捕集・除去設備 (優位技術選定結果) [最終処理装置]

型式	HEPA(グラスファイバー)	HEPA(金属)	ULPA(グラスファイバー)
原理・特徴	ろ布表面およびろ布内部に付着堆積した粒子層で、処理エアに含まれる粒子をろ過する。	細孔サイズを調整したフィルタにより気相中粒子を除去する。	ろ布表面およびろ布内部に付着堆積した粒子層で、処理エアに含まれる粒子をろ過する。
略図			
1 F適用に関する優位性	<u>目標除去性能 (DF=10⁵) を達成可能。許認可実績あり。</u>	除去性能はグラスファイバーと同等。許認可実績はないが、 <u>グラスファイバーより、廃棄物量・環境適用性の面で優位性があり。</u>	除去性能の面で優位性あり (HEPAより単品性能で約2ケタ上)。現状以上の除去性能が要求された場合の候補。

[補足] 環境放出する排気に対し、確実に高い除去能力を粒径に寄らず担保する必要性から、原理はろ過式集じんを選定。実績の多いHEPA(グラスファイバー)をベースに、入口条件や要求が変更への対応を考慮して2型式を追加で選定。

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(i) 気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

3) 要素試験の必要性

試験での確認項目	型式	要素試験の必要性	要素試験での確認項目 (取得データや判断基準) ※赤字は主な反映先
除去性能	遠心式集じん	UO ₂ の様な比重が高い粒子に対する除去性能のデータが不足。	模擬粒子に対するの除去性能 ⇒被ばく評価
	洗浄式集じん	ガス成分の除去を目的に使用することが一般的なため、粒子に対する除去性能のデータが不足	模擬粒子に対するの除去性能 ⇒被ばく評価
	ろ過式集じん 電気式集じん	- (入口条件が設定されれば設計可能)	
逆洗性能	ろ過式集じん(ろ材：金属)	粒径・湿度依存性に関する実績データが不足	模擬粒子・環境条件に対するの 差圧回復性能 ⇒交換頻度(要否)評価
	ろ過式集じん(ろ材：ガラスファイバー／有機繊維金属以外)	- (粒径・湿度依存性に関する実績データ多数)	
遠隔交換技術 (粒子回収容器)	共通(粒子を廃液として回収する型式は不要)	飛散を抑制しながら容器を交換する技術は、一般的に人または大型装置(工場内など)にて行っており、気体系システムの回収容器向けに開発が必要。	交換可能であること。 交換後の気密性が確保できること。 ⇒メンテナンス方針、機器配置
遠隔交換技術 (フィルタ)	角型フィルタ共通	角型フィルタに対し、気密性や耐震性を確保可能な遠隔交換技術の実績がなく、開発が必要。	交換可能であること。 交換後の気密性が確保できること。 ⇒メンテナンス方針、機器配置
	円筒型フィルタ共通 (水平方向の交換)	垂直方向の交換技術は大型(高さ10m以上)であり配置制約が大きい(R/B内の配置は困難)ことから、配置成立性の観点で小型で水平方向に交換可能な装置の必要性は高い。	交換可能であること。 交換後の気密性が確保できること。 ⇒メンテナンス方針、機器配置
	円筒型フィルタ共通 (垂直方向の交換)	- (六ヶ所／米・英再処理で技術あり)	

⇒「要素試験の必要性」に記載の不足データを取得するための要素試験を準備中。

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(i) 気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

4) 試験条件

主要な試験条件の設定と考え方を以下に示す。

分類	項目	試験条件	考え方	備考
模擬粒子	粒径	(前処理) 0.1、1、4 μm [暫定]	レーザー加工(0.1～数 μm)および機械加工(数 μm～)の粒子分布、および気体に随伴する最大粒径の評価結果を考慮。	・現在までに得られている加工時の粒径分布をもとに設定。 ・性能の粒径依存性を確認するため、単一粒径の試験は複数粒径で実施。
		(最終処理) 0.1、1 μm[暫定]	前処理で数 μm以上の除去が担保できれば、条件を絞ることを検討。	・複数粒径が同時に流れる場合の特性についても参考取得。(捕捉された粒子による除去性能の向上といった効果を想定)
	比重	二酸化タングステン(11) SUS316L(8) けい砂(2.6～2.7)	燃料(UO ₂)相当(11) 構造物(ステンレス)相当(8) コンクリート相当(2-3)	・燃料デブリを構成すると推定される材質の比重を参考に、複数の条件で試験を実施。比重依存性に関するデータを取得。
プロセス条件	流量	(流量に依存する機器) 100, 500, 1000, 2000 m ³ /h	以下を包含する条件。 100m ³ /h: 1号機実機開口での想定インリーク量+最低窒素封入量程度。 2000m ³ /h: 昨年度検討条件	・浄化目標がなく、システム側でもFIXしていない状態であるが、左記の考え方に基づき設定。 (条件外の流量となっても、遠心式以外は、エレメント数(面積)での調整が可能。遠心式については、試験データおよび既存データを踏まえた推定が必要。)
ガス組成	湿度	(前処理) ～100%	可燃性ガスの流入も想定し、前処理では、湿度調整しない場合を想定する。	・湿度の影響が小さいと推定される項目についても、念のため湿度2条件での試験を行い、確認することを検討。(但し、類似型式については、いずれかを代表として実施する等の試験ケース合理化を検討)
		(後処理) —	後処理では、前処理後の流体のため、温度調整による湿度調整は可能であることを前提。	・使用条件を広げるため、複数の湿度条件での試験実施要否を検討。

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(ii) 液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

1) 液体系システムの概要

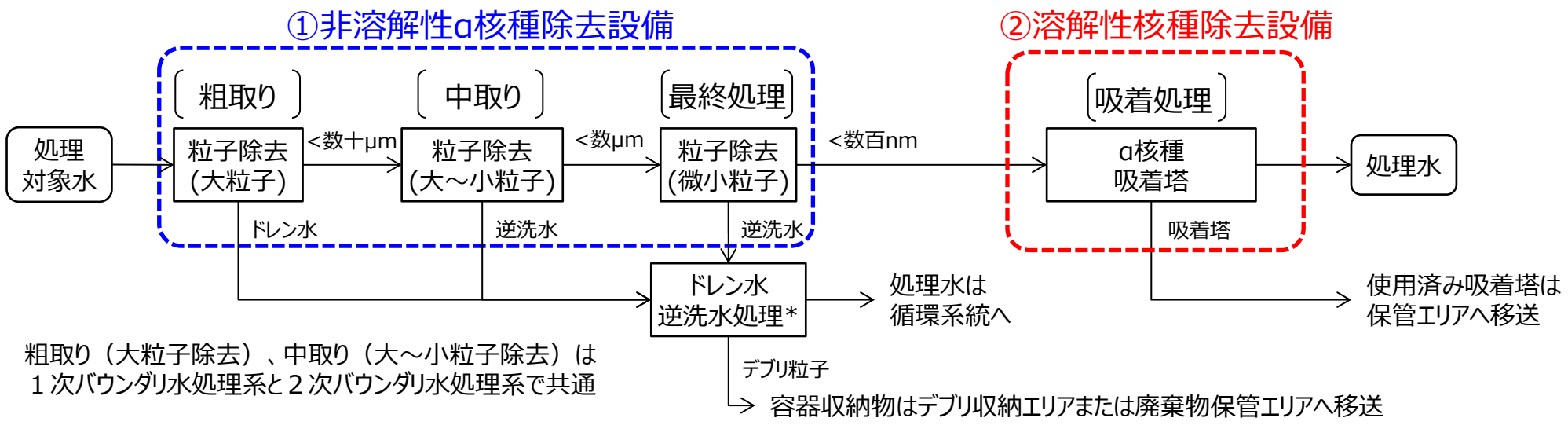
● 新設設備である循環冷却設備の構成（案）は以下の通りである。現状の炉注水量の3m³/h以上を処理できるものとし、循環流量10m³/hを基本条件とする。

① 非溶解性α核種除去設備

最大3種類の除去装置（フィルタ等）により構成。

② 溶解性核種除去設備

非溶解性核種除去の後段として、溶解性核種を除去する装置（吸着塔）により構成



粗取り（大粒子除去）、中取り（大～小粒子除去）は1次バウンダリ水処理系と2次バウンダリ水処理系で共通

- 粗取り、中取り、最終処理の定義は以下とする
- A) 粗取り：数十μm程度の粒子を捕集
 - B) 中取り：数μm程度の粒子を捕集
 - C) 最終処理：0.1μm程度の粒子を捕集

図 循環冷却浄化設備 構成（案）

*：ドレン水、逆洗水は連続で排出されるものではないため、別設備にて処理

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(ii) 液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

1) 液体系システムの概要（検討対象設備）

- 安全要求を満足する液体系システムを成立するために必要な検討項目は以下の通り。
 - ① 放出放射能の抑制（非溶解性α核種／溶解性核種の捕集）
 - ② 捕集した粒子状核種の回収
 - ③ 廃棄物（フィルタ等）の回収
 - ④ 廃棄物の低減
- 各課題の検討対象設備は下表の通り。

表 安全要求を満足するシステムの成立性に関わる課題と検討対象設備

システムの成立性に関わる課題		検討対象設備		
		循環冷却設備		汚染水処理設備
		非溶解性α核種除去設備	溶解性核種除去設備	
①	放出放射能の抑制	○	○	○
②	捕集した粒子状核種の回収	○	—	—
③	廃棄物（フィルタ等）の回収	○	○	—
④	廃棄物の低減	○	○	○

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(ii) 液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

2) 技術ベンチマーク (優位技術の選定)

技術調査の結果から、処理能力・性能面でシステム条件を満足しないものを除外し、さらに類似原理の機器について、除去性能/廃棄物量/メンテナンス等の比較により優位技術の絞り込みを行った。

※複数型式選定の理由は、気相系と同様。(P44参照)

表 液相系捕集・除去設備 (優位技術選定結果) [非溶解性(粒子)核種除去(粗取り/中取り)]

用途	粗取り		中取り	
型式	液体サイクロン	オートスレーナ	大容量フィルタ (バグフィルタ等)	大孔径精密ろ過 (MF膜) フィルタ
原理・特徴	対象水の流れを遠心力に代え、比重の重い粒子を分離。	スクリーン上に対象水を通すことで、粒子を除去する。フィルタは旋回流により自動洗浄可能。	筒状になったフィルタユニット内側に対象水をいれ、固形物を内側に、液を外側に抜く。	対象水を、細孔を通過させることで、粒子と水を分離。物理的強度が高いため、逆洗浄が可能。
略図				
1 F適用に関する優位性	遠心力で粒子を分離するため、 <u>比重の大きなデブリ粒子の除去に対して有効。</u>	遠心力に加え、ストレーナによる <u>粒径の大きな粒子を確実に分離できる。</u> かつ、 <u>機構がシンプル・小型でメンテナンス性が高い。</u>	フィルタ孔径を選定することで <u>比較的大きな粒子を確実に除去できる。</u> <u>多量の粒子を回収可能。</u>	フィルタ孔径を選定することで <u>比較的大きな粒子を確実に除去できる。</u> <u>逆洗による廃棄物低減が期待できる。</u>

[補足] 粗取りは、ろ過式・膜式集じんの前段階で粒径の大きい粒子 (数十μm以上) を除去することで廃棄物の低減を目的としていることから、フィルタレスで適用リスクの少ない遠心式より2型式を選定。
 中取りは、膜式集じんの前段階で比較的大きな粒子 (数μm以上) を確実に除去し、膜式の使用条件調整と廃棄物低減を目的としている。要求機能と適用性を考慮し、ろ過式より2型式を選定。

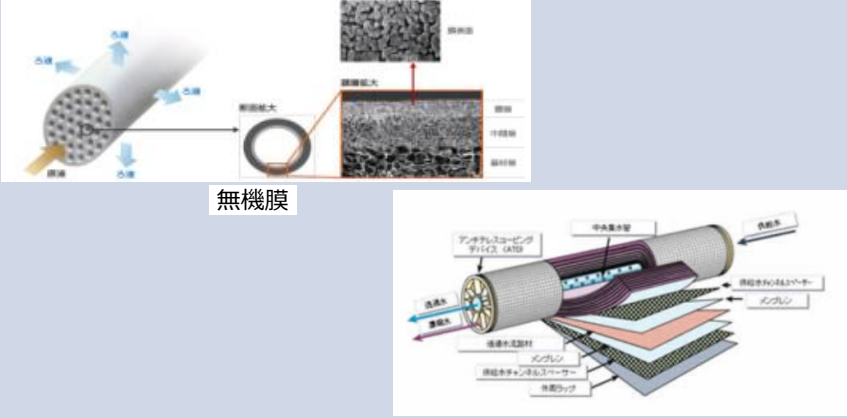
VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(ii) 液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

2) 技術ベンチマーク (優位技術の選定)

表 液相系捕集・除去設備 (優位技術選定結果) [非溶解性(粒子)核種除去(最終処理)]

用途	最終処理	
型式	M F 膜	U F 膜
原理・特徴	対象水を、細孔を通過させることで、粒子と水を分離。物理的強度が高いため、逆洗浄が可能。	
略図		
1 F適用に関する優位性	除去可能な最少粒径はU F 膜より大きい、閉塞リスクは相対的に低い。	除去可能な最少粒径はM F 膜より小さい、閉塞リスクは相対的に高い。

[補足] 溶解性核種を除去する吸着塔の閉塞 (交換頻度増加) を防止する観点で要求される0.1μm以上の粒子を確実に除去可能な型式として、一般産業界を含めて実績のある2原理 (2型式) を追加で選定。


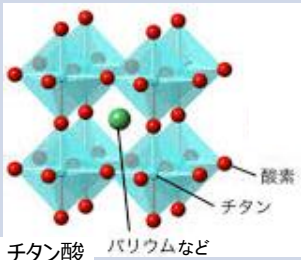
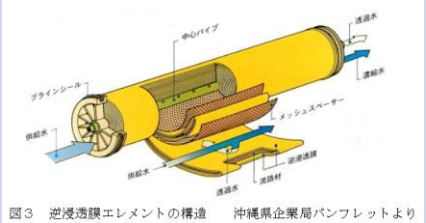
VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(ii) 液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

2) 技術ベンチマーク (優位技術の選定)

表 液相系捕集・除去設備 (優位技術選定結果) [溶解性核種除去]

型式	吸着塔 (母材が有機物)	吸着塔 (母材が無機物)	逆浸透膜 (ナノ膜を含む)
略図	 <p>例：タニコックス</p>	 <p>例：チタン酸 バリウムなど</p>	 <p>図3 逆浸透膜エレメントの構造 沖縄県企業局パンフレットより</p>
1 F適用に関する優位性	<p>イオン交換樹脂は吸着イオンに選択性はないが様々なイオンを同時に除去可能。タンニン酸化合物はアクチノイド元素を吸着することが知られている。ただし、高濃度ホウ酸共存下での既往知見がなく、試験確認が必要。</p>	<p>オキシソ添着活性炭、ゼオライト、チタン酸化合物、チタンケイ酸塩化合物などアクチノイド元素を吸着することが知られている。ただし、高濃度ホウ酸共存下での既往知見がなく、試験確認が必要。</p>	<p>逆浸透膜はほぼ全てのイオンに対して阻止能力を有することが知られている。同様に、ナノ膜は多くの多価イオンに対して阻止能力を有することが知られている。ただし、どちらの膜も回収したイオンを含んだ濃縮水が発生するため、濃縮水の処理方法を検討したうえで採用する必要がある。</p>

[補足] 廃液に含まれる溶解性の放射性物質を告示制限濃度程度まで除去可能という性能および 1 F で適用実績等を踏まえ吸着塔 (母材が有機物/無機物)と逆浸透膜の 2 原理 (3 型式) を選定。

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(ii) 液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

3) 要素試験の必要性 (全体)

分類	試験での確認項目	型式	要素試験の必要性	要素試験での確認項目 (取得データや判断基準) ※赤字は主な反映先
非溶解性核種除去	除去性能	液体サイクロン オートストレナ	UO ₂ の様な比重が高い粒子に対する除去性能のデータが不足。	模擬粒子に対する除去性能 ⇒被ばく評価
		ろ過式集じん (フィルタ、膜)	- (入口条件が設定されれば設計可能)	
	廃棄物に関する情報	ドレン水性状 (液体サイクロン、オートストレナ)	想定される比重・粒径分布に対するドレン水性状のデータが不足。	模擬粒子・環境条件に対するドレン水性状 ⇒ドレン水処理設備検討
		逆洗性能、逆洗水性状 (金属焼結フィルタ、MF膜、UF膜)	想定される比重・粒径分布に対する逆洗性能およびドレン水性状のデータが不足。	模擬粒子・環境条件に対する差圧回復性能、逆洗水性状 ⇒交換頻度(要否)評価、 逆洗水処理設備検討
溶解性核種除去	除去性能	吸着塔 (吸着材)	想定される核種・使用環境に対する除去性能のデータが不足。 五ホウ酸ナトリウムの影響が評価困難。	模擬廃液に対する除去性能。 (Pu等、一部の核種は期間内に入手困難なため文献調査での評価) ⇒設備容量、機器配置
	廃棄物に関する情報	吸着塔 (吸着材)	想定される核種・使用環境に対する除去性能(限界)のデータが不足。 五ホウ酸ナトリウムの影響が評価困難。	模擬廃液に対する通水可能量。 (Pu等、一部の核種は期間内に入手困難なため文献調査での評価) ⇒廃棄物発生量、メンテナンス方針

⇒「要素試験の必要性」に記載の不足データを取得するための要素試験を準備中。

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(ii) 液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

3) 要素試験の必要性 (既設汚染水処理設備)

- 液体系システムが構築された後も、既存水処理設備にて一定の核種除去性能を確保し、廃棄物発生量を現状と同程度以下まで抑制する必要がある。
- 既存水処理設備では、原子炉建屋内に流入する地下水など、循環冷却システム内に外部から加えられる水についての処理が必要となる。
- デブリ取り出し時の冷却水は、再臨界防止用に五ホウ酸ナトリウムを含む可能性があり、その場合には既存水処理設備の処理性能に影響を与え、廃棄物発生量が増加する可能性があることを腐食抑制 P J (平成28年度まで実施) にて確認している。
- 既存水処理設備での処理に影響する場合には、循環冷却システムから排出する時点で処理等の対応が必要となる可能性があることから、既存水処理設備での受入条件を明確化するために、昨年度までにデータを取得していない範囲について、試験によるデータ取得を行う。

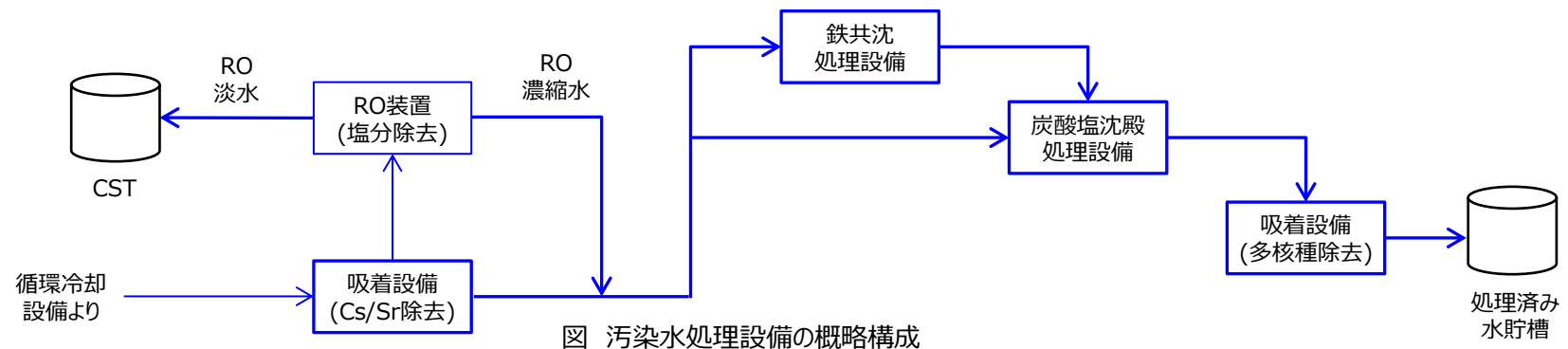


図 汚染水処理設備の概略構成

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(ii) 液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

4) 試験条件

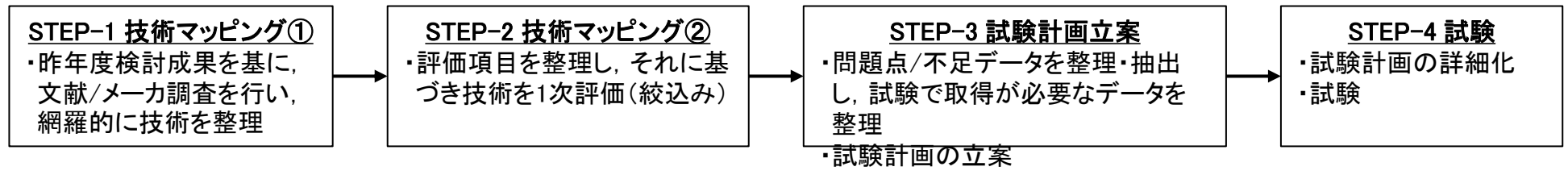
主要な試験条件の設定と考え方を以下に示す。

分類	項目	試験条件	考え方	備考
模擬粒子	粒径	(粗取り) 10、100～200 μm [暫定]	レーザー加工(0.1～数 μm)および機械加工(数 μm～)の粒子分布、および気体に随伴する最大粒径の評価結果を考慮。	<p>※基盤技術PJと調整要。</p> <p>・現在までに得られている加工時の粒径分布をもとに設定。</p> <p>・性能の粒径依存性を確認するため、単一粒径の試験は複数粒径で実施。</p> <p>・複数粒径が同時に流れる場合の特性についても参考取得。(捕捉された粒子による除去性能の向上といった効果を想定)</p> <p>・粗取り用設備は、数 μm以下の粒径に対して有効な除去(分離)は期待できないことから、試験条件としない。</p>
		(中取り) 0.1、5、10 μm[暫定]	粗取りで、一定以上の粒径の除去が担保できれば、条件を絞ることを検討。	
		(最終処理) 0.1、1 μm[暫定]	粗取り、中取りで、一定以上の粒径の除去が担保できれば、条件を絞ることを検討。	
	比重	二酸化タングステン(11) SUS316L(8) けい砂(2.6～2.7)	燃料(UO ₂)相当(11) 構造物(ステンレス)相当(8) コンクリート相当(2-3)	・燃料デブリを構成すると推定される材質の比重を参考に、複数の条件で試験を実施。比重依存性に関するデータを取得。
プロセス条件	流量	(流量に依存する機器) 3,10,20m ³ /h	以下を包含する条件。 3m ³ /h: 冷却の観点では3m ³ /hで十分なことが確認されている。 20m ³ /h: PCV浄化の観点で、約1ヶ月で冠水時の保有水量を置換可能な流量(D/Wなら、2週間程度で置換可能)	・浄化目標がなく、システム側でもFIXしていない状態であるが、左記の考え方に基づき設定。 (条件外の流量となっても、遠心式以外は、エレメント数(面積)での調整が可能。遠心式については、試験データおよび既存データを踏まえた推定が必要。)
液性	pH	中性 (工業用水 or 分散剤等で調整)	本試験では、粒径・比重に対する性能を確認することが目的のため、凝集によって粒径が変わる場合には、分散剤等を検討する。(事前にビーカー試験で確認)	実際の粒子は、pHによって挙動(凝集、析出、溶解)が変わると推定されるが、本技術開発では、実機のpH条件での粒径・比重が確認できた際に、性能評価をできる情報を得ることを目的とする。(合理的な試験方法として凝集の解消が難しい場合には、試験時の粒径を直接サンプリングにより測定し、粒径と機器性能の関係を整理する。)

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

【進め方】



項目	平成29年度				平成30年度				
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	
マスター工程			中間報告会				中間報告会		最終報告会
技術マッピング① (技術調査)	[Progress bar from 1Q to 3Q]			既存技術調査結果					
技術マッピング② (優位技術の絞り込み)			[Progress bar from 3Q to 4Q]		有意技術の選定結果				
試験計画立案 (概略計画)				[Progress bar from 3Q to 4Q]					
要素試験 (詳細計画、試験)					[Progress bar from 1Q to 4Q]				要素試験結果 (機器性能/配置条件)
システム検討への フィードバック				機器型式・仕様、系統構成の見直し			機器型式・仕様、系統構成の見直し		

VI. 実施内容

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

【まとめ】

- ダストおよび溶解性核種の除去について、国内外の既存技術を調査を実施した。
- デブリ取り出し時の適用について検討を行い、優位技術の選定した。
- 選定した優位技術について、システム最適化の検討のため、要素試験で取得すべきデータ・開発すべき技術の抽出を行った。
- 現在、要素試験の準備を進めており、平成30年度は主に要素試験の実施・評価を行う予定。

VI. 実施内容

(3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討

【目標】

・モニタリングの目標設定・システム検討、必要に応じ開発計画の立案

2017年度末:システム概略検討(成立性の判断が可能なレベル)

技術調査:技術マッピングの作成、有効な型式の評価

モニタリング対象、要求検知精度の設定

システム検討:技術調査結果を踏まえたシステム検討

2018年度末:システム概略検討、開発計画の立案

技術調査:技術マッピングの作成、有効な型式の評価

モニタリング対象、要求検知精度の設定

システム検討:技術調査結果を踏まえたシステム検討

※必要に応じ、課題に対する開発計画の立案

※本項は「II. 研究の目標」の以下項目に対応する。気相／液相を纏めて記載。

(3)(i) 気相中の α 核種の検出技術及びシステムの概念検討と開発計画の立案

(3)(ii) 液相中の α 核種の検出技術及びシステムの概念検討と開発計画の立案

VI. 実施内容

(3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討

1) α 核種モニタリングについて

種々のプラントパラメータを監視し、通常範囲内であることを確認しながら燃料デブリ取り出し作業は進められる。

放射性物質のモニタリングもその一部であり、モニタリング目的に応じて対象を設定する(例えば α 、 β 、 γ 、中性子束等)。以下の理由から α 核種モニタリングの既存技術の適用性検討(新規開発項目の有無確認)が必要。

- 燃料デブリ取り出しでは核燃料物質を加工して取り出すため、FP(核分裂生成物)に加えてPuを含む α 核種(内部被ばく影響が極めて大)の有意な飛散が想定される。そのため、 α 核種の監視が重要。
- 原子力施設ではFPのモニタリング技術は確立されている(ただし設置場所が高線量等の課題はある)。
- α 核種モニタリングは再処理施設や燃料加工施設に適用例があるものの、燃料デブリ取り出しでは既設と状況が大きく異なる。

なお、デブリ取り出しは段階的に進め、都度得られた知見を踏まえて次ステップのシステム見直しが図られていくが、 α 核種モニタリングにおいても同様に、取り出し量に応じた測定レンジを検討すると共に、必要に応じて得られた知見の反映をしていくものとする。

VI. 実施内容

(3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討

2) 検討内容

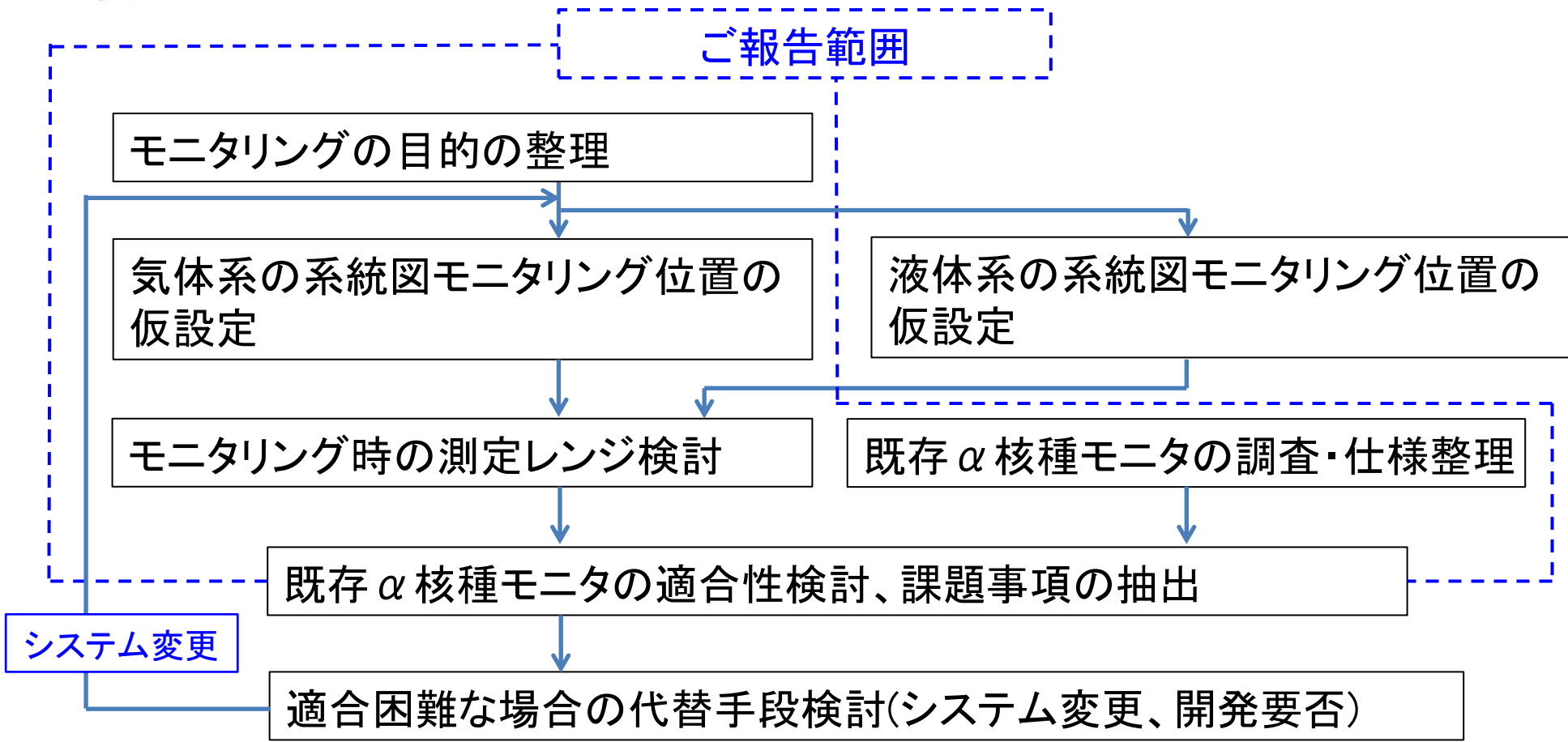
項目	検討内容
α 核種モニタリングの目的の整理	測定目的によって、モニタリング位置や測定レンジが異なるため、目的を整理。
α 核種モニタリング位置の仮設定	目的毎にモニタリング位置は異なり、モニタリング位置毎に想定濃度が異なる。測定レンジ検討のために設定。
測定レンジ検討	仮設定したモニタリング位置で必要な測定レンジを検討。
既存 α 核種モニタの調査・仕様整理	既存 α 核種モニタの適合性検討のための、既存 α 核種モニタの調査・仕様整理。
既存 α 核種モニタの適合性検討、課題事項の抽出	既存 α 核種モニタの調査・仕様整理結果から、既存技術での測定レンジ等に対する適合性を検討し、課題を整理。
適合困難な場合の代替手段検討 (システム変更、開発要否)	既存 α 核種モニタ適用に対する課題解決が困難な場合、システム変更の検討、開発要素を整理し、要すれば開発計画を策定。

VI. 実施内容

(3) 燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリングシステムの検討

3) α核種モニタリング検討の進め方

α核種モニタリング検討の進め方については以下の流れで検討する。検討の作業順位については、環境放出や作業従事者の呼吸摂取による内部被ばくの影響が大きい**気体系**を優先する。



VI. 実施内容

(3) 燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリングシステムの検討

4) α核種モニタリングの目的とモニタリング位置

防護対象を「一般公衆への影響(敷地外への影響)」と「作業従事者の影響」に分け、α核種モニタリング目的を「**運転監視**(取り出し作業によるPCV内濃度変化の監視)」「**放出監視**(管理放出)」「**漏洩検知**」に分類。

項目		放射線防護	
		I.一般公衆への影響(敷地外への影響)	II.作業従事者の影響
気体系	通常 運転時	●連続監視による管理放出の担保(放出監視)	●通常時には建物内へのリークなし、建物外の作業従事者についてはI.に包含される
	異常 発生時	●2次バウンダリのα核種の放出量把握(放出監視) ●PCV内部(1次バウンダリ内)のα核種濃度の把握は早期異常検知(運転監視)	●リーク等の異常発生を早期に検知(建物内作業従事者の退避等)(漏洩検知) ●PCV内部(1次バウンダリ内)のα核種濃度の把握は早期異常検知(運転監視)

また、目的に応じた以下の測定位置を想定して測定レンジ検討を行った。

運転監視: ①PCV内雰囲気監視可能な場所

放出監視: ②排気端からの放出量が監視可能な場所

漏えい検知: ③1次バウンダリからの漏洩が検知可能な場所

VI. 実施内容

(3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討

5) 測定レンジ要求

測定レンジの検討については、モニタに要求される測定レンジの上限値(運転範囲で想定される α 放射能濃度)、下限値(法令、モニタリング基準等からの要求)を総合的に判断する必要がある。このため、以下の項目に分けて測定必要濃度の検討を実施。

- ・ **設計で想定される放射能濃度**

本格デブリ取り出し時を想定し、PCV内雰囲気や排気口の放射能濃度評価から設定

- ・ **法令の空气中濃度限度**

周辺監視区域外の空气中及び放射線業務従事者の呼吸に対する法令上濃度限度から設定

- ・ **モニタリングに関する基準類**

放出放射性物質測定指針、事故時放射線計測指針、放射線モニタリング指針(JEAG4606-2017)から設定

- ・ **現状のバックグラウンド/アクションレベル**

現状R/Bダストサンプリングで設定されている目標検出限界値、アクションレベルから設定



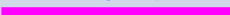


上記検討結果から**各モニタリング位置毎に測定レンジ要求を設定した。**

VI. 実施内容

(3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討

6) まとめ

- 平成29年度は気体系を中心に、 α 核種モニタリングの目的、測定レンジ、既存 α 核種モニタの調査・仕様整理および適合性について検討を実施した。
- 平成30年度は、主に液体系について検討を進め、また既存の α 核種モニタ技術の適用に課題がある場合は、代替案等の検討を実施する。

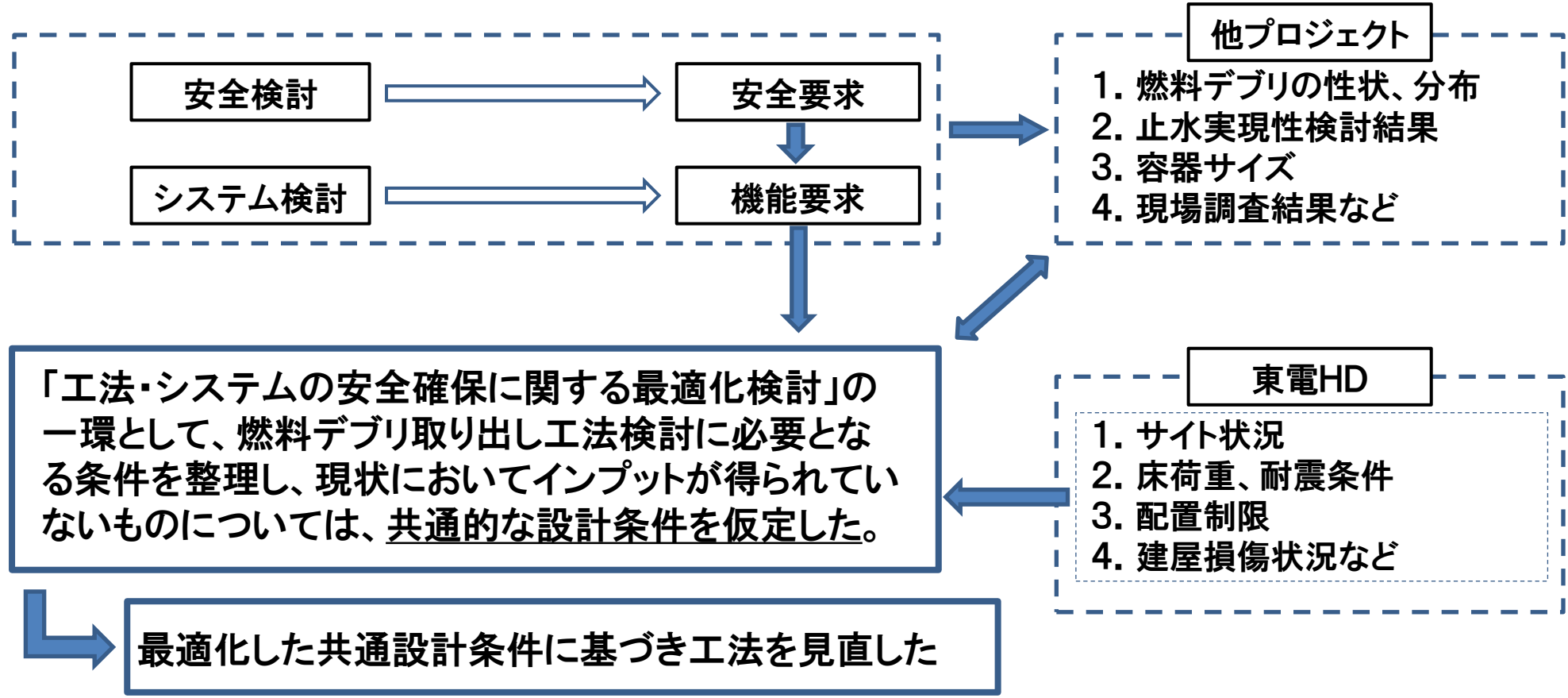
項目	平成29年度	平成30年度
目的の整理	気体系 	液体系 
検討用の諸条件の設定 (測定レンジ要求)	気体系 	液体系 
既存 α 核種モニタの調査・仕様整理	気体系 	液体系 
気体系の α 核種モニタの適合性検討	気体系 	
液体系の α 核種モニタの適合性検討		液体系 
まとめ(代替案、開発要否の検討)		 

VI.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

1) 工法設計条件の検討

燃料デブリ取り出し工法に関する検討に必要な設計条件について整理し、最適化した。



□: 工法側検討範囲 ➡: インプット、アウトプット

VI.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

2) 工法共通課題の抽出と対応

① 床荷重制限

横アクセス工法の共通課題であるR/B1階床荷重制限に対し、対応方針を策定した。

PLAN-A			PLAN-B			PLAN-C		
<p>2号機の配置例</p>			<p>1号機の配置例</p>			<p>2号機の配置例</p>		
R/B内セル重量	床荷重	床荷重許容量	R/B内セル重量	床荷重	床荷重許容量	R/B内セル重量	床荷重	床荷重許容量
軽量化検討中	4.9 ton/m ² 以下	4.9 ton/m ²	軽量化検討中	0 ton/m ²	4.88 ton/m ²	軽量化検討中	7 ton/m ² 以下	4.9 ton/m ²
<ul style="list-style-type: none"> セルを直線的に配置し、比較的大きな開口をR/Bの外壁に開けることを想定。 セルは搬送レールにてR/B外部より搬入・設置する。 R/Bの健全性を維持するために開口部の補強を検討する。(R/Bへの負荷が比較的大きい) 吊り橋方式により、外部に荷重を逃がすことにより床荷重の低減を検討中。 BSWとR/B外部の支持点で両端支持とし、セルの荷重を支える方式。 			<ul style="list-style-type: none"> R/B外の増設建屋とPCVをアクセストンネルで接続する工法を検討中。 アクセストンネルの荷重は、BSWとR/B壁で両端支持とし、R/B1階床への荷重はないものとして計画。 			<ul style="list-style-type: none"> セル、搬送台車等は、R/B 1階内に配置。 装置メンテや、燃料デブリは、搬送台車により、外部の増設建屋に移送。 機器セルや搬送台車は、荷重を大梁、BSW、R/B壁に伝達することで床荷重の低減を検討中。さらに敷鉄板等により、荷重分散を行い、床荷重の低減を計画。 		

VI.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

3) 横アクセス工法の検討

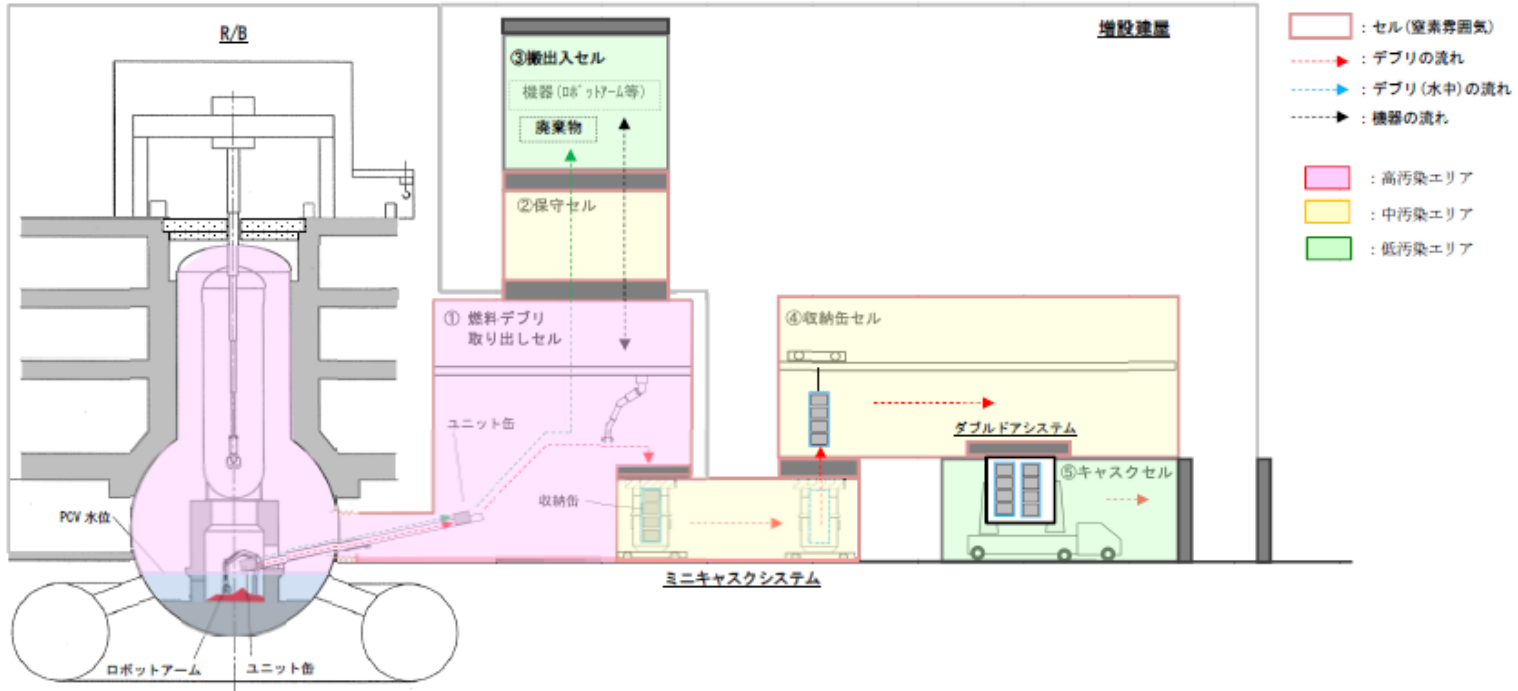
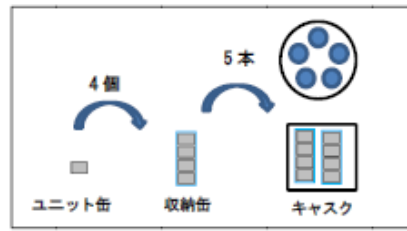
①PLAN-A:フロー図

コンセプト:PCV内作業の最小化



- ・作業員被ばくの低減
- ・遠隔機器のメンテナンス性向上

ユニット缶 : φ200×H200	(燃料デブリ : 約 15Kg 相当、充填率は 0.3 を想定)
収納缶 : ユニット缶 4 個分	(燃料デブリ : 約 60Kg 相当)
キャスク : 収納缶 5 本分	(燃料デブリ : 約 300kg 相当)



VI.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

3) 横アクセス工法の検討

①PLAN-A:ステップ図

(燃料デブリ取り出し/ペDESTAL内燃料デブリ撤去作業(ロボットアーム、アクセスレール))

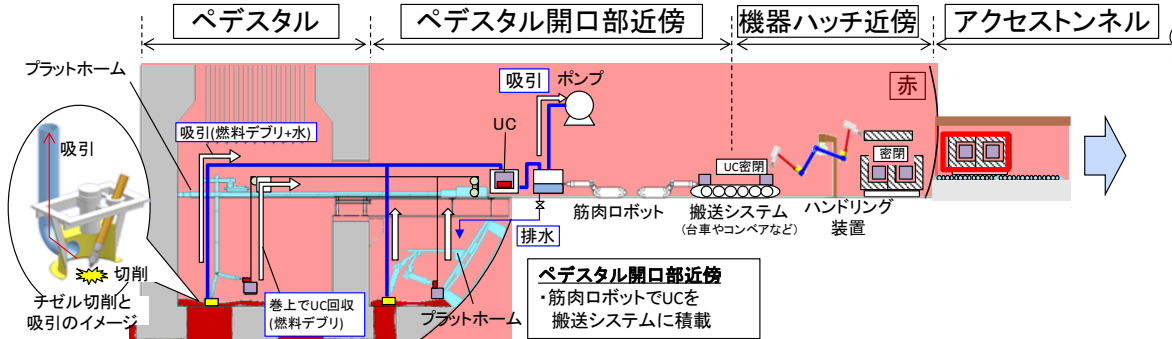
1. ロボットアームをセル内に搬入	2. ロボットアームをアクセスレールへ挿入	3. ロボットアームをアクセスレールに設置	4. アクセスレールを CRD 交換用開口にむけて傾ける
5. アクセスレールを伸長	6. ロボットアームを前進し、展開	7. ロボットアームを燃料デブリへアクセス	8. ロボットアームの先端ツールにより燃料デブリを切削
9. 切削した燃料デブリをアクセスレール上の台車に載ったユニット缶に回収	10. ユニット缶をレール上にある台車によりセル内に移送	11. セル内のマニピュレータでユニット缶にアクセス	12. セル内のマニピュレータで燃料デブリをユニット缶ごと収納缶に収納

VI.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

3) 横アクセス工法の検討

②PLAN-B:フロー図/エリア区分図



ペDESTアル内デブリ取り出し方法

- ・ペDESTアル内にプラットホームを設置
- ・レール上を走行するアームに各種ツールを把持させ燃料デブリを回収
- ・アーム先端の子ゼルなどで燃料デブリを切削し、吸引する
- ・吸引できないサイズの燃料デブリは、UCをペDESTアル地下に投入し、グラブなどで燃料デブリを把持して回収

ペDESTアル外デブリ取り出し方法

- ・ジェットデフにプラットホームを設置
- ・プラットホームに取り付けたアームに各種ツールを把持させ燃料デブリを回収
- ・アーム先端の子ゼルなどで燃料デブリを加工し、吸引する
- ・吸引できないサイズのデブリは、UCを地下に投入し、グラブなどで燃料デブリを把持して回収

機器ハッチ近傍

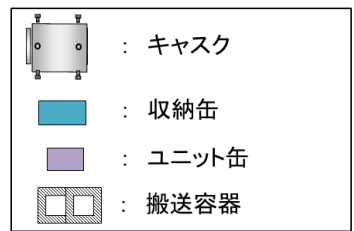
- ・ハンドリング装置でUCの蓋閉め(密閉)
- ・ロボットアームでUCをつかみ、搬送システムから搬送容器に装荷
- ・ハンドリング装置で搬送容器の蓋閉め(密閉)
- ※複数のUCを一度に搬出し、搬出効率を上げるため、搬送容器を使用

PLAN-Bのコンセプト

- アクセストンネルの活用による号機を問わない工法。
- アクセストンネルのルートによる配置の自由度。
- 既存の機器ハッチを使用。(損傷した原子炉建屋への負荷(床荷重含む)を最小化する)
(X-6開口拡大でも対応可能)
- 燃料デブリに取り出し装置本体が接近して取り出し作業を実施する。



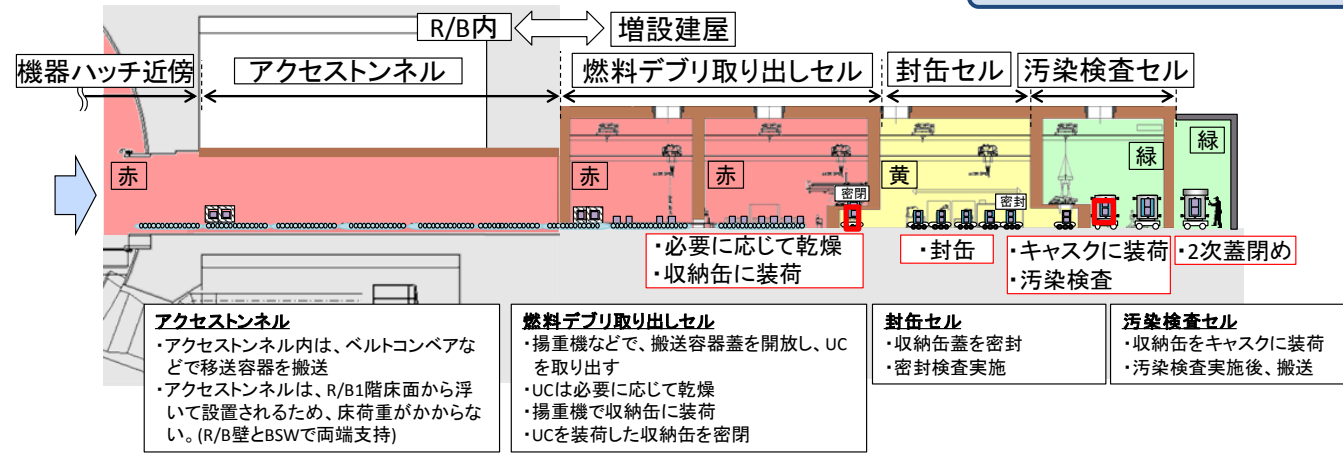
基盤技術開発で実現性の確認



【凡例】

- ・汚染大(赤)
- ・汚染小(黄)
- ・ほぼ汚染無し(緑)

□: 気密確保のポイント



アクセストンネル

- ・アクセストンネル内は、ベルトコンベアなどで移送容器を搬送
- ・アクセストンネルは、R/B1階床面から浮いて設置されるため、床荷重がかからない。(R/B壁とBSWで両端支持)

燃料デブリ取り出しセル

- ・揚重機などで、搬送容器蓋を開放し、UCを取り出す
- ・UCは必要に応じて乾燥
- ・揚重機で収納缶に装荷
- ・UCを装荷した収納缶を密閉

封缶セル

- ・収納缶蓋を密封
- ・密封検査実施

汚染検査セル

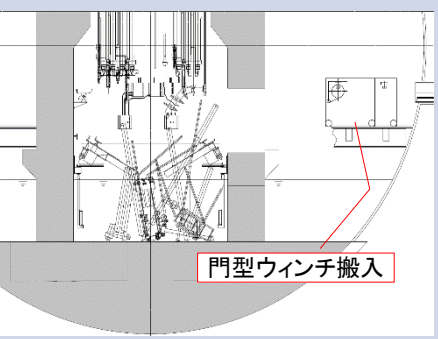
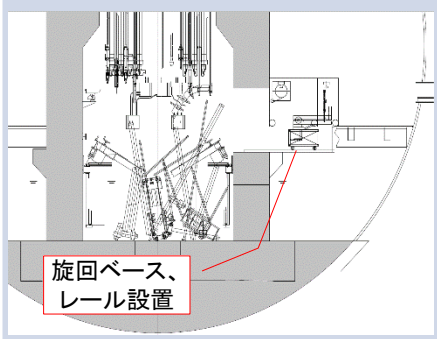
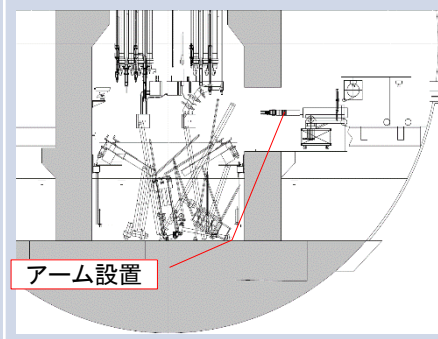
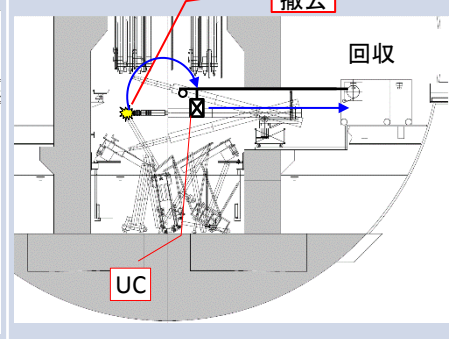
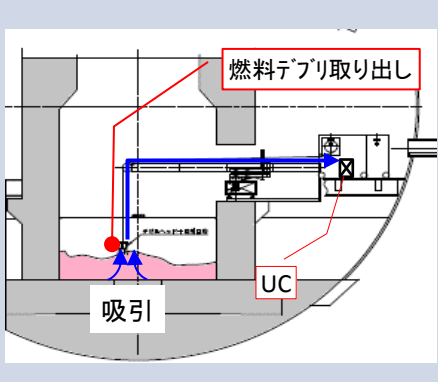
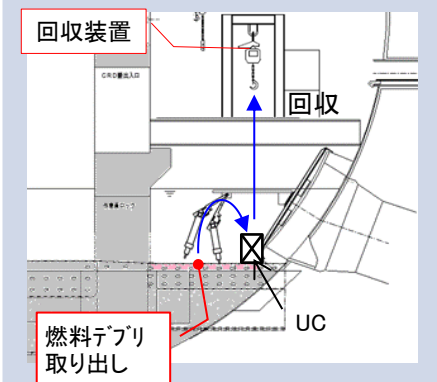
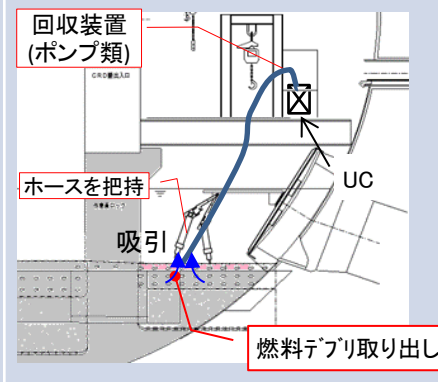
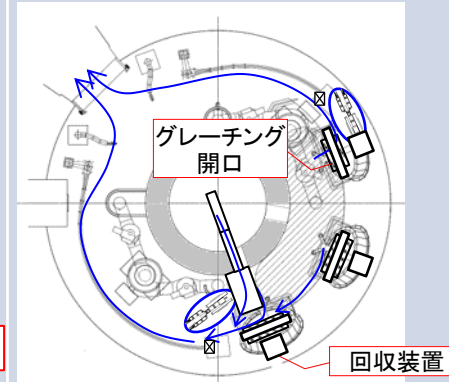
- ・収納缶をカヤスクに装荷
- ・汚染検査実施後、搬送

VI.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

3) 横アクセス工法の検討

②PLAN-B:ステップ図(PCV内準備作業/ペDESTAL内・外燃料デブリ撤去作業/収納缶への受け渡し作業)

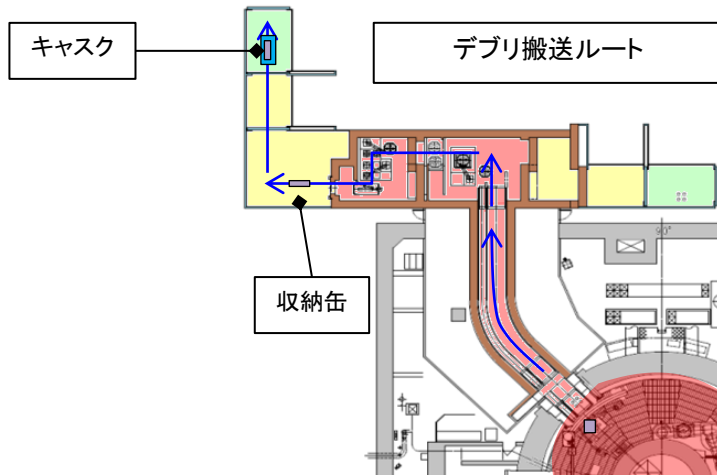
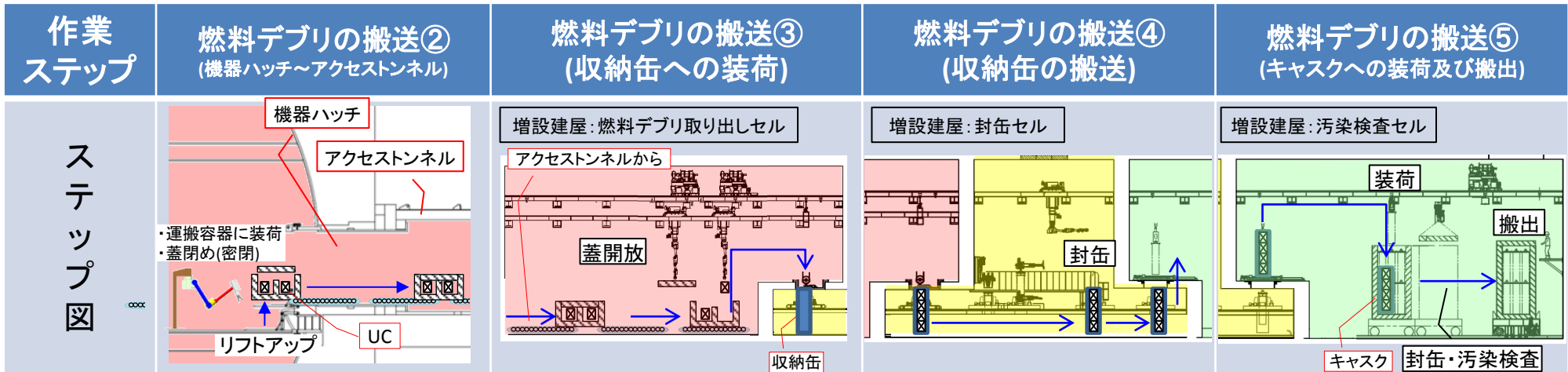
作業 ステップ	燃料デブリ 取り出し装置搬入	燃料デブリ 取り出し装置設置①	燃料デブリ 取り出し装置設置②	ペDESTAL内燃料デブリ (干渉物)取り出し(把持)
ステップ 図	 <p>門型ウインチ搬入</p>	 <p>旋回ベース、 レール設置</p>	 <p>アーム設置</p>	 <p>撤去 回収 UC</p>
作業 ステップ	ペDESTAL内燃料デブリ 取り出し例(切削、吸引)	ペDESTAL外燃料デブリ 取り出し(把持)	ペDESTAL外燃料デブリ 取り出し(吸引)	燃料デブリの搬送① (搬送システムで搬送)
ステップ 図	 <p>燃料デブリ取り出し 吸引 UC</p>	 <p>回収装置 回収 UC 燃料デブリ 取り出し</p>	 <p>回収装置 (ポンプ類) ホースを把持 吸引 UC 燃料デブリ取り出し</p>	 <p>グレーチング 開口 回収装置</p>

VI.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

3) 横アクセス工法の検討

②PLAN-B:ステップ図(PCV内準備作業/ペDESTAL内・外燃料デブリ撤去作業/収納缶への受け渡し作業) 干渉物撤去実現性確認のための要素試験を計画中。



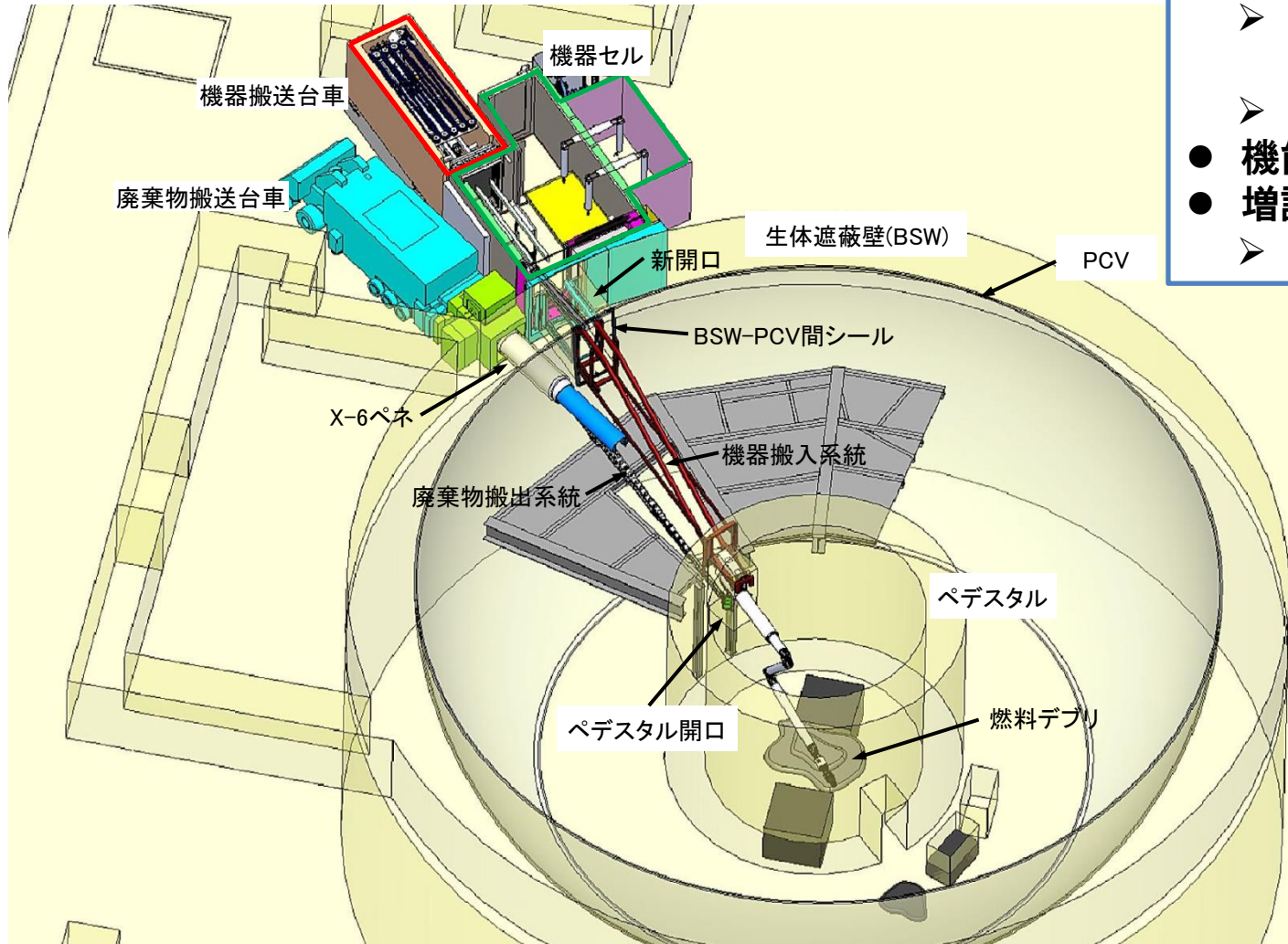
※:バウンダリ間の移動は、ダブルドアやエアロックを検討中

VI.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

3) 横アクセス工法の検討

③PLAN-C:外観図



PLAN-Cのコンセプト

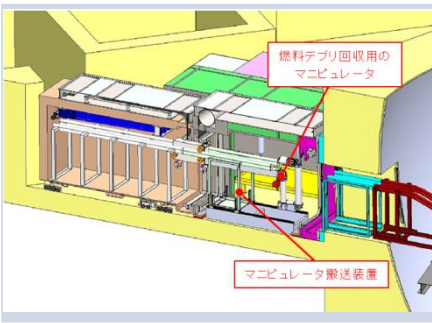
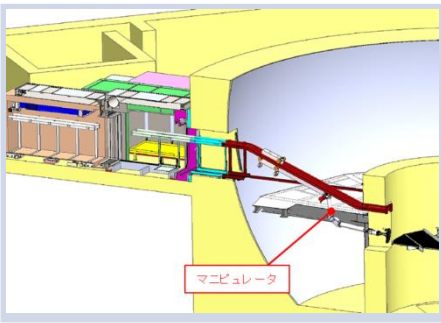
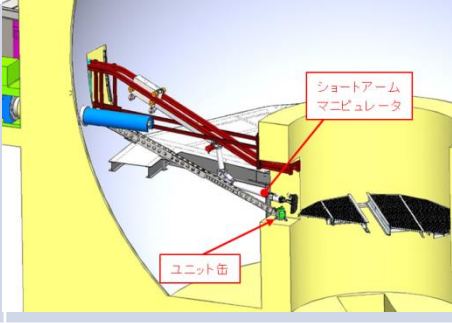
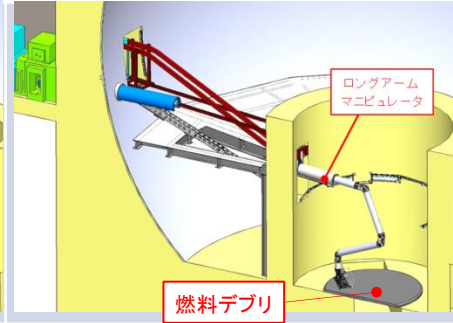
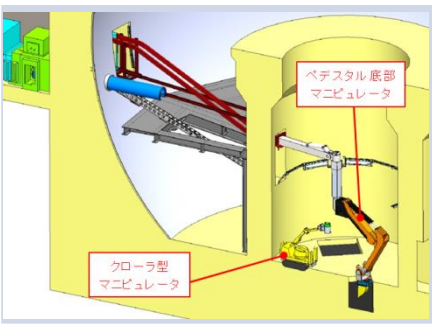
- 干渉物の撤去範囲を極小化
 - PCV内のアクセスルート上に大口径配管等の大物干渉物なし
 - R/Bの新開口なし
- 機能ごとにセルと動線を分割
- 増設建屋の設置場所の自由度高
 - 廃棄物搬送台車による移送

VI.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

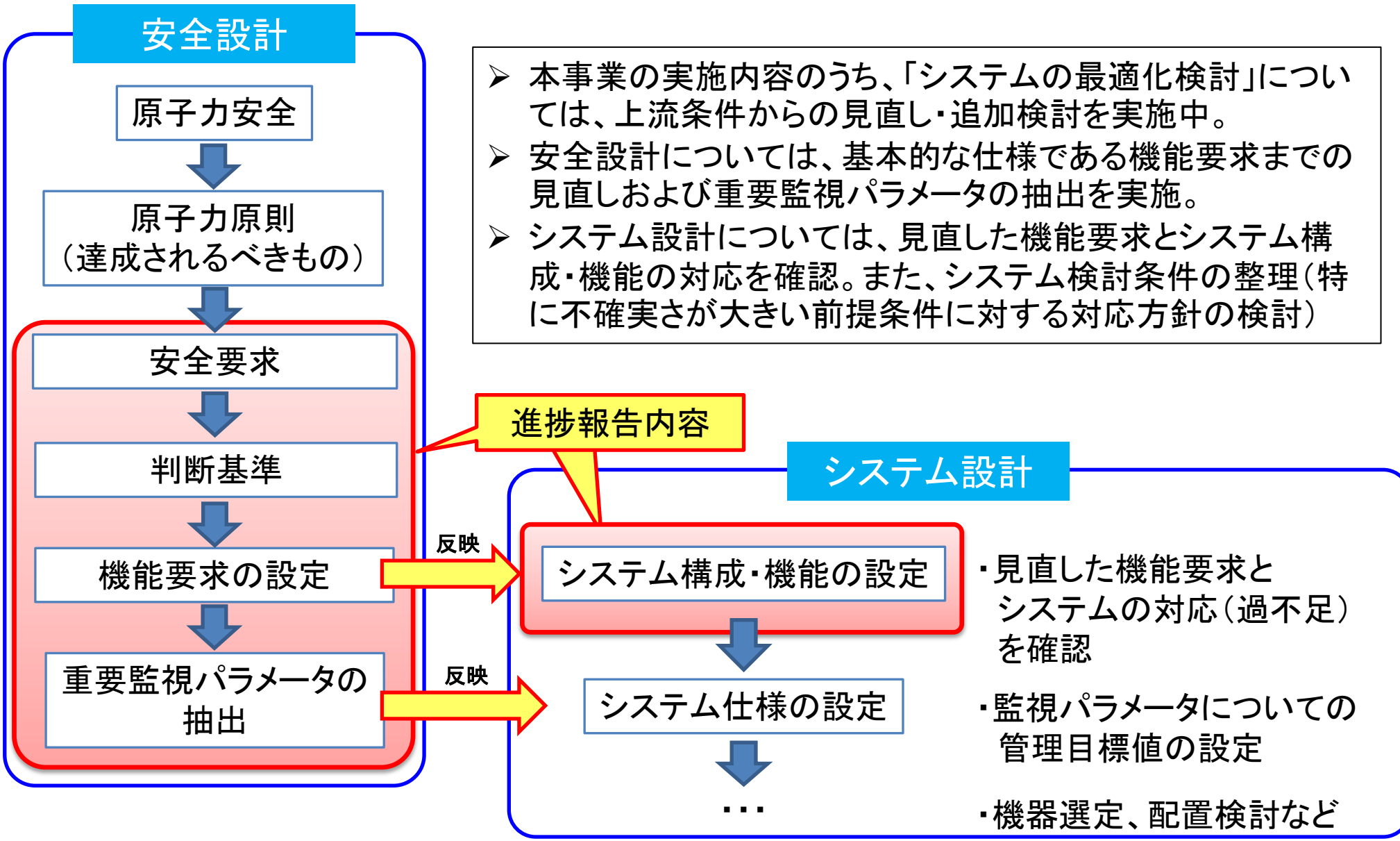
3) 横アクセス工法の検討

③PLAN-C:ステップ図(燃料デブリ取り出し/ペDESTAL内外構造物・燃料デブリ撤去作業)

作業 ステップ	燃料デブリ回収用マニピュレータの機器セルへの搬入1	燃料デブリ回収用マニピュレータの機器セルへの搬入2	RPVペDESTAL内構造物・燃料デブリの回収①-1	RPVペDESTAL内構造物・燃料デブリの回収①-2
ステップ 図				
作業 ステップ	RPVペDESTAL内構造物・燃料デブリの回収②			
ステップ 図				

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討



VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(a) システム概念のブラッシュアップ

システムについては、昨年度検討をベースとして、最適化に見直しを進めている。
 検討の流れをした図に示す。

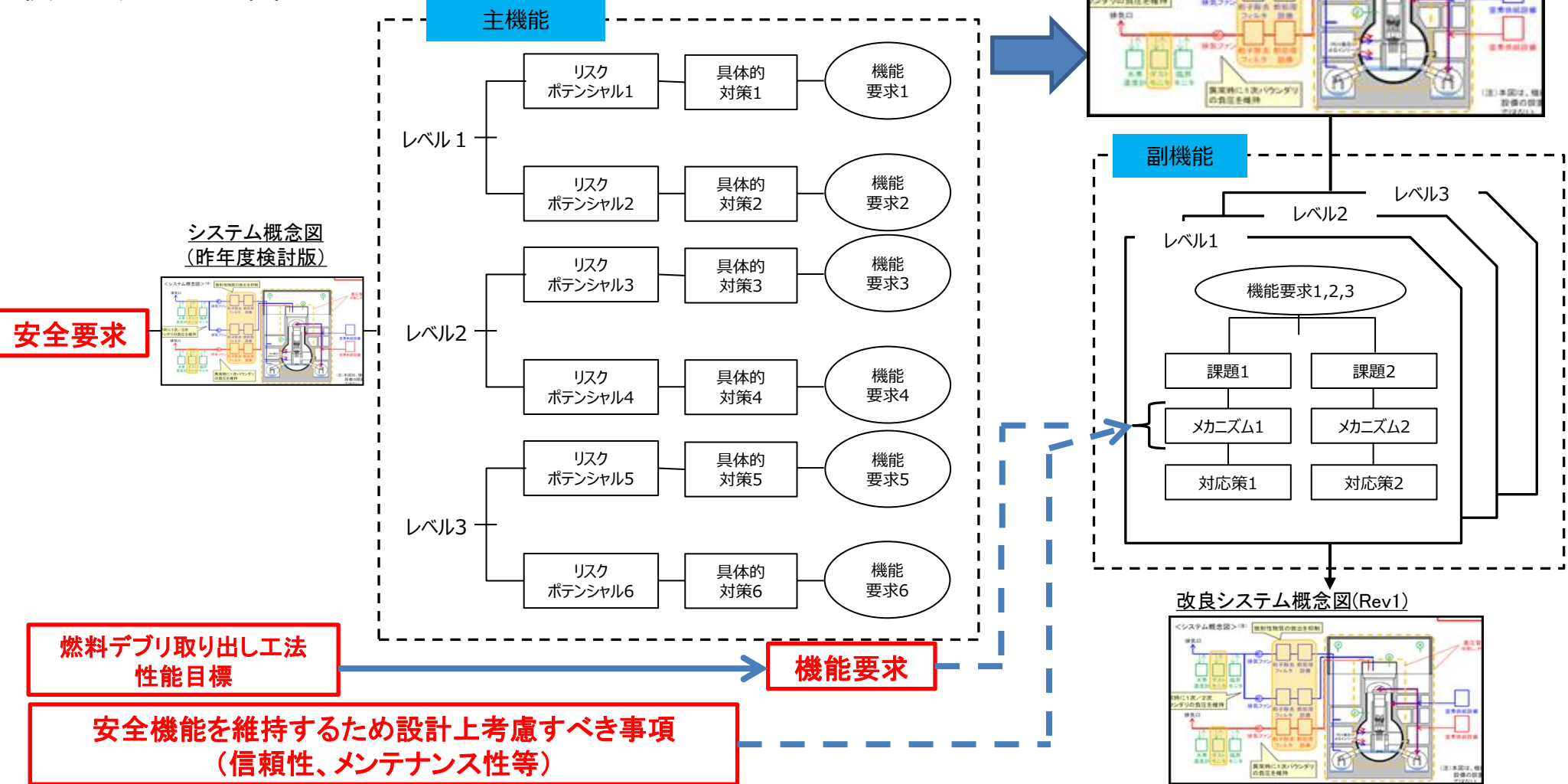


図. 安全要求から設計への落とし込み

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(a) システム概念のブラッシュアップ

1) 安全要求の再検討 (1/2)

本年度は、以下の観点より、再検討を実施。

- ・ 原子力安全の目的から特定原子力施設の燃料デブリ取り出し設備の安全要求を定義するにあたり、達成すべき事項(安全基準など)の明確化
- ・ 特定原子力施設の燃料デブリ取り出し作業においては作業員の役目が重要であり、また、システムのメンテナンス、検査において作業環境下における放射線防護に対する対策は、システムの成
立性にも影響する。
よって、作業員を放射線リスクから防護する要求を追加
- ・ 特定原子力施設の特徴を考慮し、可燃性ガス及び金属粉じんによる燃焼、爆発防止を安全要求として追記

(次葉に今年度設定した安全要求を示す)

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(a) システム概念のブラッシュアップ

1) 安全要求の再検討 (2/2)

原子力安全		安全原則(達成されるべきもの)		基本的安全要求	安全要求(例)
人と環境を放射線リスクから防護する	公衆と環境を放射線リスクから防護する	放射性物質の過大な放出防止	放射性物質の閉じ込め	バウンダリによる放射性物質の閉じ込め	気体中の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止
					液体系の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止
				炉内から取り出された放射性物質の移送容器による閉じ込め	移送容器による放射性物質の漏えい防止
				追加核分裂反応の防止	臨界による異常な放射性物質の生成防止
		放射性物質の異常な追加生成の防止	異常な加熱の防止	燃料デブリの異常な温度上昇による放射性物質の放出防止	
			切削による異常な放射性物質の拡散の防止	燃料デブリ、構造物の切削による異常な放射性物質の拡散の防止	
			放射線による過大な被ばくの防止	外部被ばくに対する防護	直接放射線による過大な被ばく防止のための遮へい
作業員を放射線リスクから防護する	作業員の過大な外部被ばく・内部被ばくの防止 <ul style="list-style-type: none"> —デブリ取り出し作業に必要な新規装置設置に伴う被ばく —デブリ取り出し関連作業に伴う被ばく —デブリ取り出し関連以外のサイト内作業員の被ばく 	作業員の被ばく低減のための設計	遮へい、汚染・線量区分の適切な設定と被ばくを低減する遠隔保守及び動線等システム設計		
		作業員の被ばく低減のための運転管理	被ばく低減のための運転方法、保守計画及び作業管理		

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(a) システム概念のブラッシュアップ

2) 機能要求の再検討 (1/3)

- 安全要求毎に、想定リスクに対応する機能を要求として体系的に整理
- 機能要求は、各深層防護レベルにおいて設定し、また、前段の機能喪失を想定した要求については、システム設計の重要な前提条件となるため明示した。
- 可燃性ガス及び金属粉じんによる爆発については、現時点では設計条件が確定していないことから、機能要求として複数案設定した。

(次葉に今年度設定した機能要求を示す)

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(a) システム概念のブラッシュアップ

2) 機能要求の再検討 (2/3)

安全要求	レベル	機能要求 (暫定)
気体中の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止	レベル1/2	管理基準値以下にバウンダリ内気相中放射性物質濃度を低減すること
		動的バウンダリ機能に依拠する箇所を除き、気相中放射性物質の漏えいを静的バウンダリによって防止すること
		安全基準で許容される以上の気相中放射性物質の漏えいを動的バウンダリにより防止すること
		動的バウンダリを維持するための排気において、安全基準で許容される以上の気相中放射性物質の環境への放出を防止すること
	レベル3	必要な場合にバウンダリを隔離できること (臨界事故及びデブリ冷却喪失時含む) (隔離可能な放出経路に対して)
		事故時の動的バウンダリ機能に依拠する箇所を除き、気相中放射性物質の漏えいを事故時の静的バウンダリによって防止すること
		安全基準で許容される以上の気相中放射性物質の漏えいを事故時の動的バウンダリにより防止すること
		事故時の動的バウンダリを維持するための排気において、安全基準で許容される以上の気相中放射性物質の環境への放出を防止すること
液体系の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止	レベル1/2	バウンダリ内液相中放射性物質濃度低減機能と相まって、トーラス室の液相中放射能濃度を管理基準値以下とするように、液相中放射性物質の漏えいを静的バウンダリにより防止すること
		管理基準値以下にバウンダリ内液相中放射性物質濃度を低減すること
		気相部開口部を通じたバウンダリからトーラス室への液相中放射性物質の漏えいを動的バウンダリにより防止すること
液体系の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止	レベル1/2	トーラス室からの環境中への液相中放射性物質の漏えいを動的バウンダリにより防止すること
	レベル3	トーラス室から環境中への液相中放射性物質の漏えいを動的バウンダリにより防止すること
核分裂反応による異常な放射性物質の生成防止	レベル1/2	未臨界を維持すること
	レベル3	事故時に速やかにデブリの再臨界を終息すること

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(a) システム概念のブラッシュアップ

2) 機能要求の再検討 (3/3)

安全要求	レベル	機能要求 (暫定)
燃料デブリの異常な温度上昇による放射性物質の放出防止	レベル1	バウンダリ内温度監視値が異常に上昇しないようにデブリを冷却すること
	レベル2	デブリの温度上昇によりバウンダリ内気相中放射性物質濃度が過渡時の管理値以下となるようデブリを冷却すること
	レベル3	デブリの温度上昇によりバウンダリ内気相中放射性物質濃度が事故時の管理値以下となるようデブリを冷却すること
燃料デブリ、構造物の切削による異常な放射性物質の拡散の防止	レベル1/2	バウンダリ内気相／液相中放射性物質濃度低減機能と相まって、バウンダリ内放射性物質の管理基準値以下となるようにデブリ、構造物を切削すること
遮へい、汚染・線量区分の適切な設定と被ばくを低減する遠隔保守及び動線等システム設計	レベル1/2	適切な線量、汚染区分を設定し、それに基づいたシステム設計であること
	レベル3	事故時において適切な線量、汚染区分を設定し、それに基づいたシステム設計であること
被ばく低減のための運転方法、保守計画及び作業管理	レベル1/2	安全基準以下となるように、運転方法及び保守計画を立案し、それに基づいて通常時の作業を管理すること
	レベル3	安全基準以下となるように、事故対応方法を確立し、それに基づいて作業を管理すること
金属粉じんと酸素の反応により火災が発生しない条件を維持すること	レベル1	管理基準値以下に酸素濃度を低減すること
	レベル2	酸素濃度が管理基準値を越えた場合において、金属粉じんの発生を速やかに抑制できること
	レベル3	急激な酸素濃度が上昇した場合において、バウンダリ内の金属粉じん濃度を低減できること
可燃性ガスによる火災爆発が生じないように可燃限界以下に維持すること	レベル1/2	管理基準値以下に酸素濃度を低減すること
	レベル3	酸素濃度が管理基準値を越えた場合、水素濃度を管理基準値以下に維持すること
プラント状態を把握するために監視すること	レベル1/2/3	プラント状態が把握できるような監視機能を有すること
	レベル1/2/3	環境への放射能放出を管理するための監視機能を有すること

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(a) システム概念のブラッシュアップ

3) オブジェクティブ・ツリーを活用した要求事項の明確化

安全要求

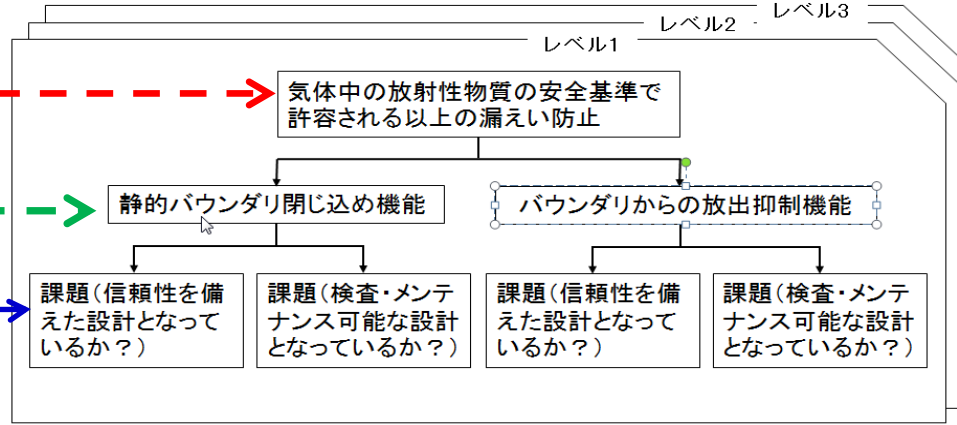
原子力安全より			
原子力安全	安全原則 (達成されるべきもの)	基本的な安全要求	安全要求 (例)
	放射性物質の閉じ込め	バウンダリによる放射性物質の閉じ込め 炉内から取り出された放射性物質の移送容器による閉じ込め 追加核分裂反応の防止	気体中の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止 液体系の放射性物質の安全基準で許容される以上の漏えい防止 移送容器による放射性物質の漏えい防止 核反応による異常な放射性物質の生成防止
	放射性物質の異常な追加生成の防止	異常な加熱の防止 切削による異常な放射性物質の拡散の防止	燃料デブリの異常な温度上昇による放射性物質の放出防止 燃料デブリ、構造物の切削による異常な放射性物質の拡散の防止
	放射線による過大な被ばく防止	外部被ばくに対する防止 作業員の被ばく低減のための設計	直接放射線による過大な被ばく防止のための適切な設計 遠程、汚染・線量区分の適切な設定と被ばくを低減する遠隔保守及び運転システム設計
リスクから防護する	作業員を放射線リスクから防護する	作業員の被ばく低減のための設計 作業員の被ばく低減のための運転管理	遠程、汚染・線量区分の適切な設定と被ばくを低減する遠隔保守及び運転システム設計 被ばく低減のための運転法、保守計画及び作業管理

機能要求

機能要求

- 金属粉じんと酸素の反応により火災が発生しない条件を維持すること
- 可燃性ガスによる火災爆発が生じないように可燃限界以下に維持すること
- プラント状態を把握するために監視すること
(必要に応じて追加)

オブジェクティブ・ツリー



対応策検討事項

・安全機能を維持するため設計上考慮すべき事項

分類	安全機能を維持するため設計上考慮すべき事項(例)
機能維持のための基本要素事項	機能維持を期待すべき環境条件にて機能が維持されること
	既存設備の機能や健全性に期待する場合には、期待できることを確認すること
	必要な信頼性を備えた設計であること(電源等サポート系含む)
	必要な検査・メンテナンスが可能な設計であること
	必要な監視機能を有すること
ハザードへの対応	必要な運転操作(特に現場操作)が実施可能であること
	内部ハザード(火災・爆発・落下物含む)に適切に対処すること
	外部ハザード(地震、津波)に適切に対処すること

必要に応じて安全要求へ

動的バウンダリ機能に依拠する箇所を除き、気相中放射性物質の漏えいを静的バウンダリによって防止すること

動的バウンダリを維持するための排気に対して、安全基準で許容される以上の気相中放射性物質の環境への放出を防止すること

(以下、省略)

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(b) 管理目標値の検討

機能要求の見直しに合わせて、監視パラメータ・管理目標値の検討を実施中。

・安全要求から展開される機能要求に基づき、下記3つの観点から重要パラメータを抽出。

- ① 機能要求に達成基準が定義されているパラメータ
- ② 機能要求では達成基準が明確ではないが、機能要求を達成していることを定量的に確認するために必要となるパラメータ
- ③ ①および②を補完するためのパラメータ

・抽出した重要パラメータについて、管理目標値を含む各設定／条件値(管理目標値／安全解析条件値／アクションレベル)の検討を実施中。

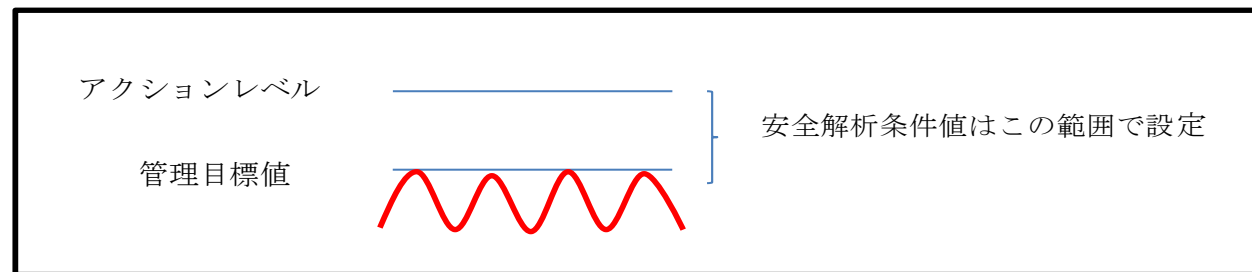


図. 設定と管理状態レベルの関係

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(c) 被ばく評価の成果について

- | | |
|-------------|---|
| ① 平常時の被ばく評価 | ● 平時時、事故時の敷地境界の被ばく評価手法については、2016年度までに整備済み |
| ② 事故時の被ばく評価 | ● 2016年度に平常時及び事故時の敷地境界の被ばく評価から成立性確認評価を実施済み |
| | ● 2017年度のシステム共通化検討等の進捗を考慮して変更内容に応じて再評価 |
| ③ 作業員の被ばく評価 | ● 作業員被ばくは、配置等の条件も必要となるため、2016年度は傾向把握の簡易評価のみ実施 |
| | ● 2017年度は作業員被ばくの考え方を整理し、検討に必要な線量区分、汚染区分等について既設原子力施設の設定を調査 |
| | ● 作業員被ばくについては、通常運転時に加えて保守時の評価も重要となるため、被ばく評価するプラント状態(深層防護レベル)、作業員の立ち入り等の検討条件について整理 |

特に作業員被ばく評価は、取り出し成立性に重要となるため、システム共通化、配置検討等の進捗と合わせて作業員被ばく評価を進める。

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(d) システム検討の前提条件の分類と共通化の状況

システム構築に関わる前提条件には不確かさがある。前提条件(特に実機状態)によってシステム仕様・構成は変化するが、前提条件が明らかになった段階で、工法によらず共通の考えに基づきシステムを選定できる様、事前に**複数の前提条件の想定と、対応するシステムの整理を進めている。**

システム検討の前提条件		共通化の状況※	システム検討の前提条件に関わる主な実施内容
大分類	分類		
①システムへの基本要求	安全要求	なし	—
	機能要求	あり (酸素濃度制限要否)	<ul style="list-style-type: none"> ・被ばく評価 ・機能要求のブラッシュアップ ・要素技術開発結果の反映
②システム仕様	システム構成	あり (再循環ループ有無、非常用系の多重化有無、非常用系の仮設対応可否)	<ul style="list-style-type: none"> ・要素技術開発結果の反映 ・システム信頼性に関する検討 ・メンテナンス方針の検討
	機器仕様	なし	<ul style="list-style-type: none"> ・要素技術開発結果の反映
③システム配置	配置条件	なし	<ul style="list-style-type: none"> ・要素技術開発結果の反映 ・配置可能エリアの再設定

※実設計段階で決定すべき事項を除く。

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(d) システム検討の前提条件の分類と共通化の状況

・整理状況： 機能要求関連 **＜火爆防止：酸素濃度制限要否＞**

共通化項目の1例として、火災・爆発の防止に関連した前提条件の設定状況を以下に示す。

➤ 目標水素濃度

可燃限界濃度(4%)未満という共通の条件を設定。 **＜共通化済み＞**

[補足]

- ・燃料デブリ取り出し時に現在と同様の窒素封入(流量、注入点)を実施した場合、負圧化に伴うインリーク空気による希釈効果が加わる分だけ、水素濃度は基本的に現状より低下すると考えられる。
そのため、昨年度検討では、現在と同様のRPV窒素封入とPCV掃気での水素濃度対策仮定した。
- ・本事業では、水素滞留箇所が不明であるため、窒素+インリーク空気によって水素濃度が十分に抑制されることを、解析で確認する計画としている。この結果を受けて共通の機能要求達成条件(流量、注入点)を設定する。

➤ 目標酸素濃度

可燃性固体の燃焼・爆発防止に対する要求が明確となっていないため、複数の前提条件を設定。これによりシステム構成も複数検討している。

⇒ 「システム構成の差異」および「今後の進め方」を次紙に示す。

昨年度の検討条件（水素・酸素濃度）

システム構成 (次紙参照)	システム検討 前提条件	備考
案1	水素濃度: 4%未満 酸素濃度: 制限なし	水素希釈に必要な窒素を注入。
案2	水素濃度: 4%未満 酸素濃度: 制限あり(極力低下)	酸素希釈に必要な窒素を注入。 (案1より窒素流量を増加)

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(d) システム検討の前提条件の分類と共通化の状況

火災・爆発の防止の観点から酸素濃度低減を達成する方法としては、**局所的な対応も有効**と考えられることから、**基盤技術PJと連携**し検討を進める。また、**酸素濃度制限は腐食抑制にも影響**し、酸素濃度制限のための窒素封入量増加は**臨界監視性（排気風量が多いと難しくなる）**に影響する。これらの相関を考慮した判断が必要。

	案1	案2	その他 (工法での対応)
前提条件 (機能要求)	酸素濃度低減 要求なし	酸素濃度低減 要求あり	酸素濃度低減 要求あり
イメージ図	<p>水素滞留の恐れのある個所に必要に応じ注入(水素対策)</p>	<p>PCV全体の酸素濃度を希釈するために多量の窒素を注入</p> <p>必要に応じ、水素滞留の恐れのある個所にも注入</p>	<p>切削箇所近傍に必要に応じ窒素を注入</p> <p>局所回収装置(粒子飛散防止効果あり)</p>
概要	水素滞留の恐れのある箇所に、水素希釈に必要な窒素を封入。 (水素対策のみ。可燃性固体による爆発の考慮なし。)	(インリーク量と比較し)多量の窒素を封入し、PCVの広範な範囲の酸素濃度を低下し、可燃性固体による爆発を防止	切削箇所近傍への窒素封入と局所回収装置を組み合わせ、局所的な酸素濃度低下+粉塵の飛散防止により、可燃性固体による爆発を防止
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・窒素封入量: 小(～40m³/h)※1 ・酸素濃度低減範囲: 特になし※2 ・水素対策専用 <p>※1: 現状に近い運用 ※2: インリーク量次第で効果がある可能性あり</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・窒素封入量: 大(～1000m³/h) ・酸素濃度低減範囲: PCV全体※3,4 ・水素対策兼用 <p>※3: 酸素濃度はインリーク量に依存する ※4: インリーク箇所近傍を除く</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・窒素封入量: 小～大(今後検討) ・酸素濃度低減範囲: 切削箇所近傍※5 ・水素対策は別途必要 <p>※5: 局所回収装置の設置が前提</p>

VI. (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

(ii) システムの安全確保に関する最適化検討

(d) システム検討の前提条件の分類と共通化の状況

【今後の進め方】

- 可燃性固体の爆発防止に必要な条件を設定する。
- 酸素濃度低減が必要な場合、対策方法については、局所的な対策も含めて検討を進める。(⇒基盤技術PJとの調整要)
- 酸素濃度低減対策については、窒素封入量だけでなくインリーク量にも依存することから、閉じ込めに関する要素技術開発(実機開口の情報、気流解析の結果[水素滞留防止の有効性確認])を踏まえて対策の見直しを行う。
- 酸素濃度は、腐食抑制にも影響し、酸素濃度制限のための窒素封入量増加は、臨界監視性に影響するため、これらの総合的な判断を行うための評価検討を行う。

<酸素濃度制限要否に関するシステム検討の流れ>

