

平成26年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 原子炉压力容器内部調査技術の開発

完了報告

平成28年3月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

目次

1.概要

2.研究内容および成果

2.1 調査計画・開発計画の立案・更新

2.2 上部穴開け加工による調査技術の要素試験及び実現性評価

2.2.1 バウンダリ機能を維持するシステムの概念検討

2.2.2 炉心部へのアクセス技術の概念検討

2.3 燃料デブリサンプリング技術の調査及び実現性評価

2.3.1 関連プロジェクトの期待する成果・サンプリング実施内容等の整理

2.3.2 サンプリングに必要な構成装置の概念設計

2.3.3 デブリ輸送の評価に必要な項目・技術の精査・検討

3.実施体制

4.まとめと今後の対応

1. 概要

- RPV内部調査の目的
燃料デブリを取り出しをはじめとする今後の廃止措置を、安全かつ円滑に進めるため、現状不明確な箇所の情報取得。
- 技術開発の目的
必要な情報を整理して調査対象を明確にし、要求される調査を可能にする技術を開発する。
- 既存成果と今年度の内容

年度	実施内容
平成25年度	<ul style="list-style-type: none"> ● アクセスルート、調査装置の概略仕様検討、サンプリング計画を行い、RPV内部調査の全体計画を提案(立案)
平成26年度	<ul style="list-style-type: none"> ● 関連PJや現場から、RPV内部の調査ニーズを聞き取り、調査計画立案。 ● 配管ルート／穴開けルートのアクセス技術、調査技術の基本設計・要素試験を実施。 ● 燃料デブリサンプリングの目的、関連PJとの役割分担を明確化。
平成27年度	<ul style="list-style-type: none"> ● RPV内部の調査ニーズを再整理する ● バウンダリ機能維持システム、炉心部アクセス技術、燃料デブリサンプリング技術について、要素試験等で実現見込みを確認 ● RPV内部調査の計画・技術開発計画を立案・更新

2. 研究内容および成果

2.1 調査計画・開発計画の立案・更新

(1) RPV内部調査ニーズの再調査・深掘り

■ 調査ニーズの収集

廃止措置の完了に向け、ニーズを調査

- 各研究開発PJより、デブリ取出し作業の検討・装置開発と廃止措置の完了に必要なRPV内部の情報、及びその情報が必要となる時期を収集する。その後、個別に問い合わせ、詳細に把握。
- 廃止措置完了までの全体工事を考慮し、東京電力や現場からのニーズを収集。

■ 調査ニーズの分析

- 挙げられた調査ニーズに対し、具体的に取得したい情報や情報の活用方法、必要となる時期、その情報が得られない場合の影響等を把握。
- NDFの「技術戦略プラン2015」における「9つの技術要件」に対する情報提供として整理、同時に情報取得の必要性の強さを策定。
- 必要性の強さの整理基準
整理した情報の項目ごとに、「リスク低減のための5つの基本的考え方(安全、確実、合理的、迅速、現場指向)」を踏まえて判断する。今後、定量評価の適用など、客観的な評価を継続。

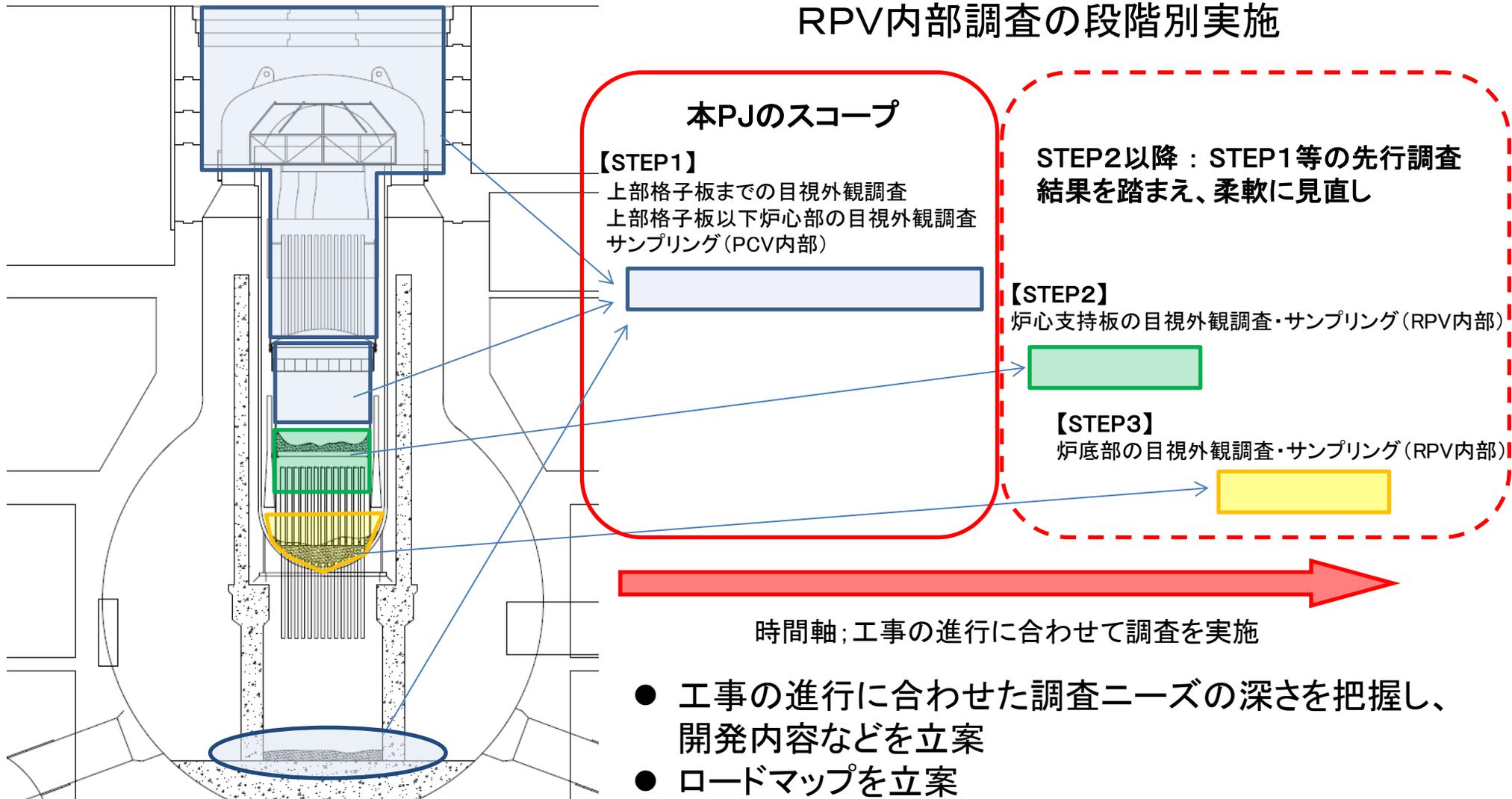
2.1 調査計画・開発計画の立案・更新

(2) RPV内部調査項目の更新

赤字:特に重要なもの

ニーズ	調査項目	調査内容
炉心部燃料デブリに至るアクセスルート上の情報	線量率	雰囲気線量の分布を計測(デブリ取出し作業のバウンダリ解放時にオペフロ線量を上げる要因の把握と装置耐久性の評価のため)
	干渉物の損傷状況	事故時のRPV内部(ドライヤ、セパレータ)の損傷状況をカメラ映像等で把握(安全な干渉物の加工、撤去のため)
	環境パラメータ(圧力、温度、水素)	直接計測し、分布を調査(安全なデブリ取出し作業計画立案と装置の耐久性評価のため)
炉心部・炉底部の情報	RPV内水位	カメラ映像で水位、流路、水たまりと大きさを調査(現状の冷却状況、水を張った際の臨界リスク評価のため)
	炉内のダスト状況	ダストサンプリング(構造物撤去時に拡散する可能性のある、ダスト量の把握のため)
	燃料集合体の状況、燃料デブリの分布	燃料デブリの位置、表面形状をカメラ映像で調査(デブリの量、切り株燃料の存在など臨界リスクの把握。粉、固まり、小石状などデブリ取出し工法の選定のため)。またデブリの温度を測定。
燃料デブリ、放射性物質の情報	燃料デブリ、FP(放射性物質)の組成、硬さ、空隙率、温度	サンプル採取、スミヤ調査(加工時のダスト評価と溶融した燃料デブリの臨界リスクの把握。デブリ取出し加工法検討のための物性値取得。代表性は取れないが、一部の情報でも想定範囲内であることを確認。)

(3) RPV内部調査の方針



2.1 調査計画・開発計画の立案・更新

(4) 上部穴開け加工による調査技術の開発項目・計画

■ 主要な検討課題(本年度の検討結果より抽出された課題も含む)

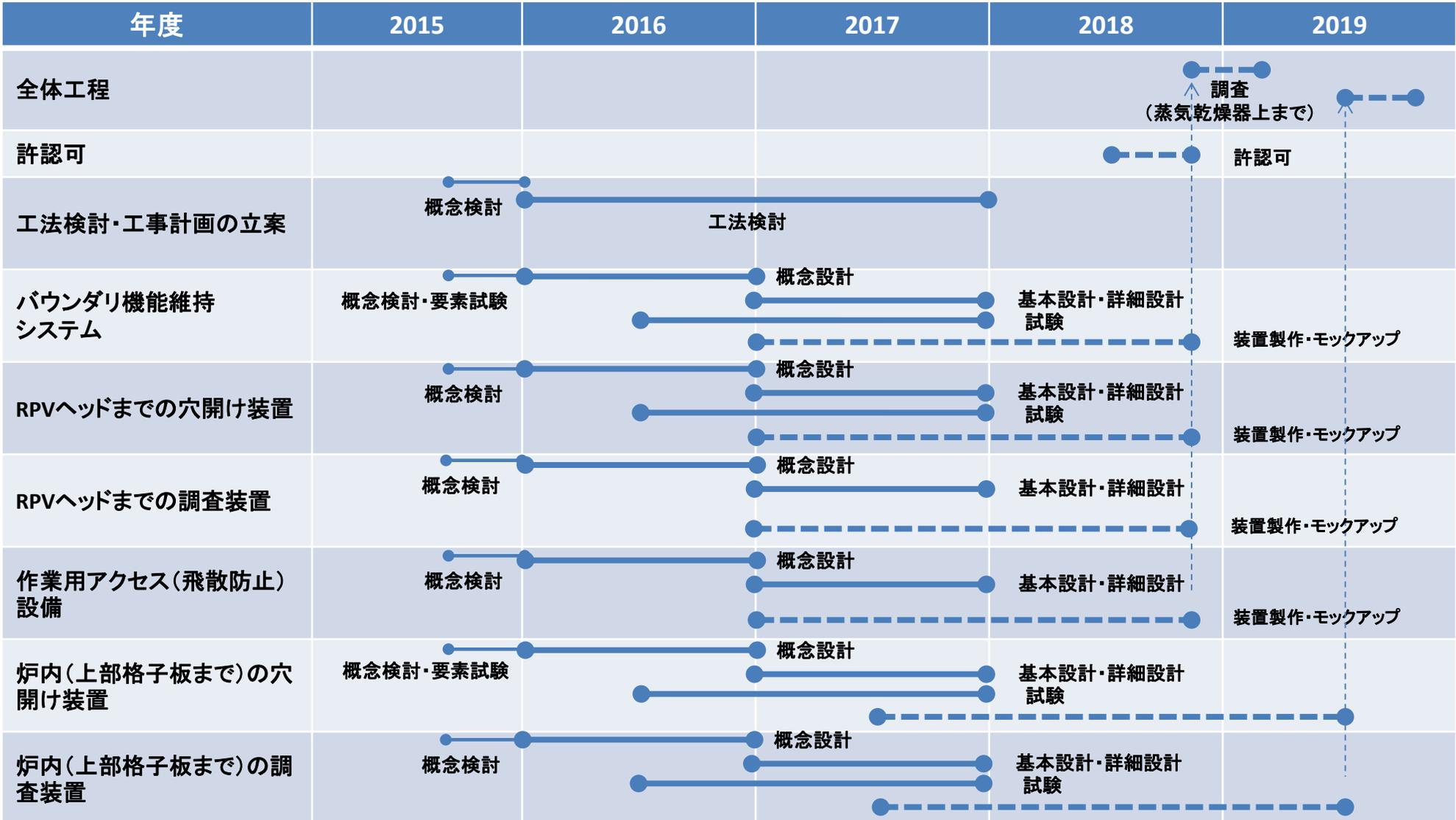
設備・装置	検討課題	難易度	実施期間	備考
工法検討・工事計画の立案	安全要求(被ばく、臨界防止)を満足する工法検討、作業エリアの除染・整理、ユーティリティの供給、調査装置等のメンテナンス・除染等の一連の作業計画立案等	○	2年	他PJとの調整
RPVヘッドまでの穴開け装置	遠隔による穴開けの位置決め方法、水素爆発を回避する穴開け技術、切断片落下防止対策等		2年	
バウンダリ機能維持システム	バウンダリ機能維持装置の遠隔交換方法、耐震設計、設置時の機能確認(現地試験)方法、調査終了後の処置方法等	●	2年	
RPVヘッドまでの調査装置	調査方法・要求精度の検討、汚染測定方法、調査装置の小型化等		2年	
作業用アクセス(飛散防止)設備	構造設計、オペフロとの取り合い方法の検討、換気空調システム設計、設備内装備の検討、線量評価等	○	2年	他PJとの調整
炉内(上部格子板まで)の穴開け装置	加工片の回収方法、切断装置の小型化等	●	2年	
炉内(上部格子板まで)の調査装置	アクセス方法の検討、調査方法・要求精度の検討等	●	2年	

(注) 難易度の定義は次の通り。●:特に技術的難易度が高い ○:確認・調整が必要

2.1 調査計画・開発計画の立案・更新

(5) 上部穴開け加工による調査技術の開発項目・計画

■2018年度中に調査開始としたエンジニアリング工程案



2.1 調査計画・開発計画の立案・更新

(6) PCV内燃料デブリサンプリング調査技術の開発項目・計画

■ 今年度の成果である**各装置の実現性評価結果等より主要な検討課題**を抽出・整理。

設備・装置	検討課題	難易度	実施期間	RPV内サンプリングとの共通性	備考
実施計画	サンプリング位置、数等の確定		1年		デブリ分布調査が必要
安全設計	監視・吸収材技術開発工程の確立	○	1年	✓	他PJとの調整
	規制要求(解析条件・判断基準)の確認	○	半年	✓	
切削・採取装置	試作機による性能確認	●	1年	✓	
	コアサンプリング性能の向上	●	1年	✓	試作の中で実施
アクセス装置	アクセス性確認・向上(構造の最適化)	●	1年		
	切削・採取装置との親和性確認		半年	✓	切削装置試作と並行で実施
	装置の最終選定		半年		切削装置試作と並行で実施
U,Pu計測装置	性能高度化(補正技術、サンプル多様化)	●	1年	✓	
	コールド・ホット試験実施による性能検証		2年	✓	
セル設備	規制要求(耐震条件等)の確認	○	半年	✓	
構外輸送	規制要求(計量管理等)の確認	○	半年	✓	計量管理の所掌も協議要

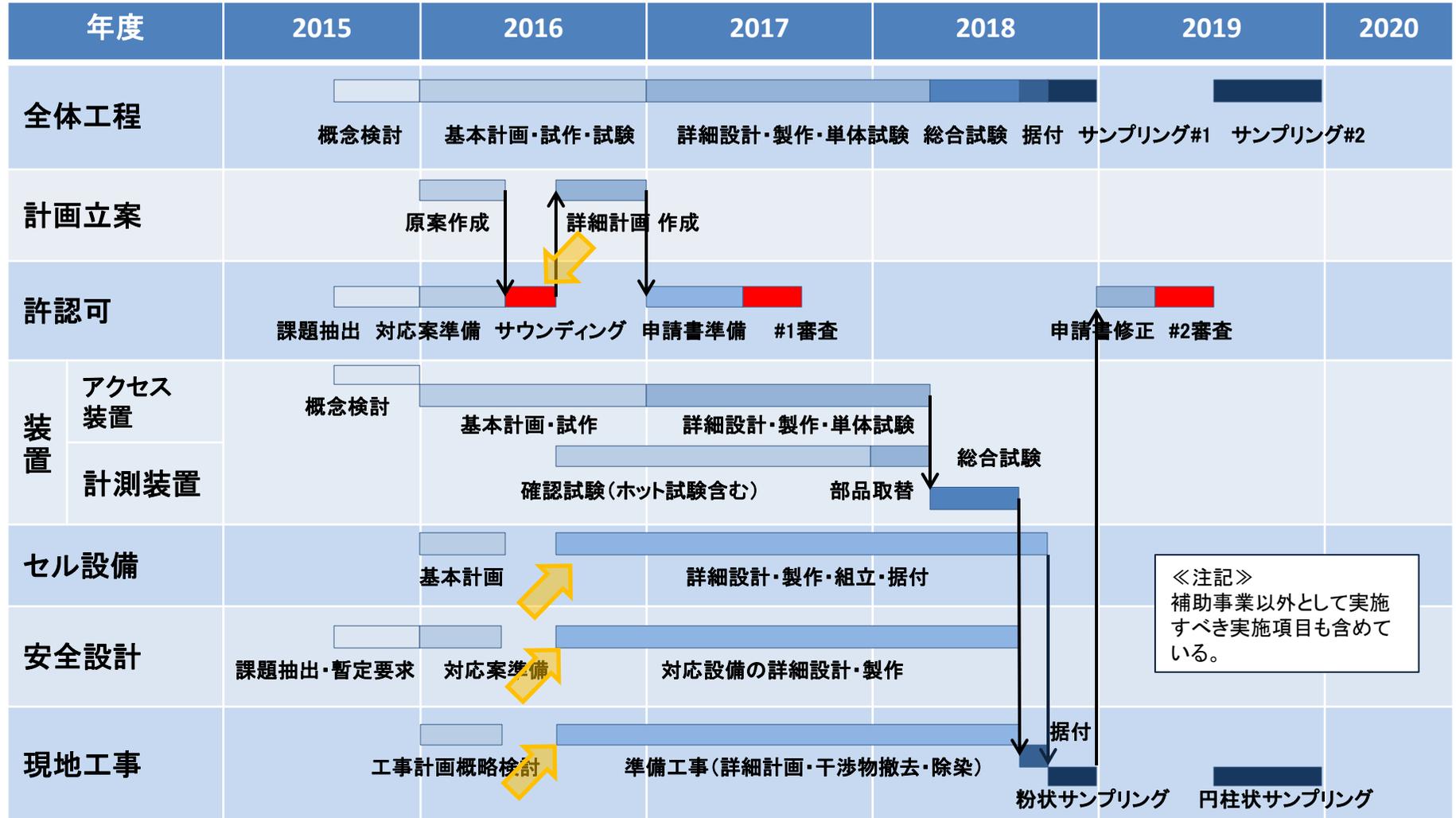
(注) 難易度の定義は次の通り。●:技術的難易度が高い ○:確認・調整が必要

- **次ステップとして、切削・採取装置の試作、アクセス装置の構造最適化、計測装置の性能高度化が重要。**
- **RPV内サンプリングの検討推進には、実施計画とアクセス性(方式検討)の検討が必要。**

2.1 調査計画・開発計画の立案・更新

(7) PCV内燃料デブリサンプリング調査技術の開発項目・計画

■2018年度中にサンプリング開始との前提条件で、エンジニアリング工程案を立案。



■2016年半ばの規制側へのサウンディングと、同年度下期の実設計・工事開始が重要。(➡)

2.2 上部穴開け加工による調査技術の要素試験及び実現性評価

(1) 上部穴開け加工によるRPV内部調査への要求項目

■ 安全からの要求

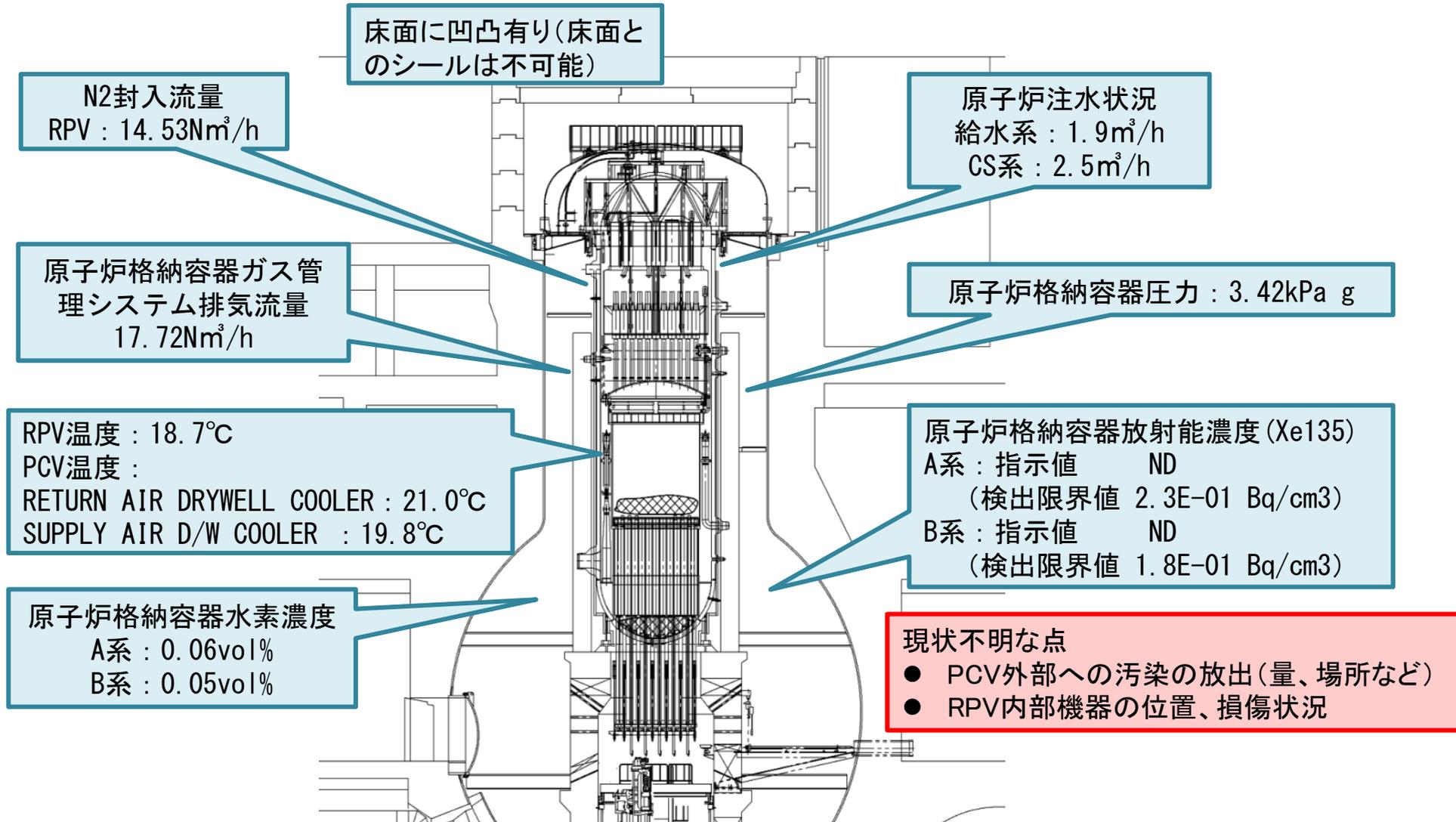
安全機能	内容
放射性物質の漏えい防止	異常時を含み調査中、常に、オペフロからの放射性物質の漏えいを防止、または基準値以下に抑制する。建屋内の気体中の放射性物質を増加させない。
燃料デブリの臨界防止	本調査による現状変化(水の使用、切粉の脱落等)が生じて、 <u>臨界となる可能性を抑制</u> 。異常な核分裂の発生を検出し、万一臨界となっても、収束措置。
火災・爆発の防止	<u>水素爆発を防止する</u>

■ 調査ニーズからの要求

調査機能	内容
調査方法	調査対象部位に接近(アクセス)し、そのアクセスルート上において、 <u>直接計測、映像などのデータ取得</u> を行う。
調査範囲(到達エリア)	シュラウド内側の物理的に接近可能な全範囲とする。ただし、 <u>複数のアクセスルートで実現しても良い</u> 。
アクセスルート構築	PCV上蓋、RPV上蓋、炉内構造物を切断加工して炉心にアクセスする。アクセスルート構築に当たっては、 <u>作業量が最小</u> (板厚薄、開口寸法小、加工性高を総合的に評価)になること、 <u>閉止措置が容易</u> であること。

2.2 上部穴開け加工による調査技術の要素試験及び実現性評価

(2) プラントパラメータ(2号機 3月14日のデータの例)



2.2 上部穴開け加工による調査技術の要素試験及び実現性評価

(3) 号機ごとの条件、対応方針

	1F-1	1F-2	1F-3	対応方針
PCVヘッド曲率	8673mm	8347mm	同左	バウンダリ機能維持装置の設置検討は曲率の小さい1F-2/3を用いる
PCVヘッド厚さ	28mm	30mm	同左	
RPVノズル位置	中心から1220mm	同左	同左	
原子炉注水状況 (m3/h)	給水系: 2.4 CS系: 1.9	給水系: 1.7 CS系: 2.5	給水系: 2.1 CS系: 2.3	
PCV放射能濃度 (Bq/cm3)	A系: 1.00E-03 B系: 1.42E-03	A系: ND 検出限界 1.7E-01 B系: ND 検出限界 1.6E-01	A系: ND 検出限界 2.6E-01 B系: ND 検出限界 2.7E-01	
窒素封入流量 (Nm3/h)	RPV: 28.19	RPV: 14.52 PCV: -	RPV: 17.60 PCV: -N	約14~30Nm3/hの割合で、内部の空気が置換
PCVガス管理システム排気流量(Nm3/h)	20.4	19.13	19.97	バウンダリの内圧は1F-2の条件を用いる
PCV圧力(kPag)	0.52	3.77	0.26	1F-2; 3~6kPaで変動。10kPagを設計条件
PCV水素濃度 (vol%)	A,Bともに0.00vol%	A系: 0.03 B系: 0.02	A系: 0.06 B系: 0.07	PCV上部には水素滞留可能性を考慮

水素滞留の可能性を考慮する。

2.2 上部穴開け加工による調査技術の要素試験及び実現性評価

(4) 放射性物質の漏えい防止に関する要求条件

(1) 全面マスクでの作業環境 : $2E-3 \sim 2E-02$ (Bq/cm³) (東京電力 福島第一原子力発電所放射線管理仕様書より)

空气中放射能濃度 (Bq/cm ³)	半面マスク	フードマスク	全面マスク	電動ファン式 全面マスク	セルフ エアセット
$2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$	○	○	○	○	—
$2 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$	×	×	○	○	○
$2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-1}$	×	×	×	○	○
$2 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^0$	×	×	×	×	○
$2 \times 10^0 \sim$	×	×	×	×	○

(2) 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示(下記例)

放射性物質の種類	周辺監視区域外の空气中濃度限度(Bq/cm ³)
Cs-134	2E-05
Cs-137	3E-06
U-235	2E-02
Pu-239	4E-03

(3) 1号機建屋カバー解体、がれき撤去工事の警報設定値を参考

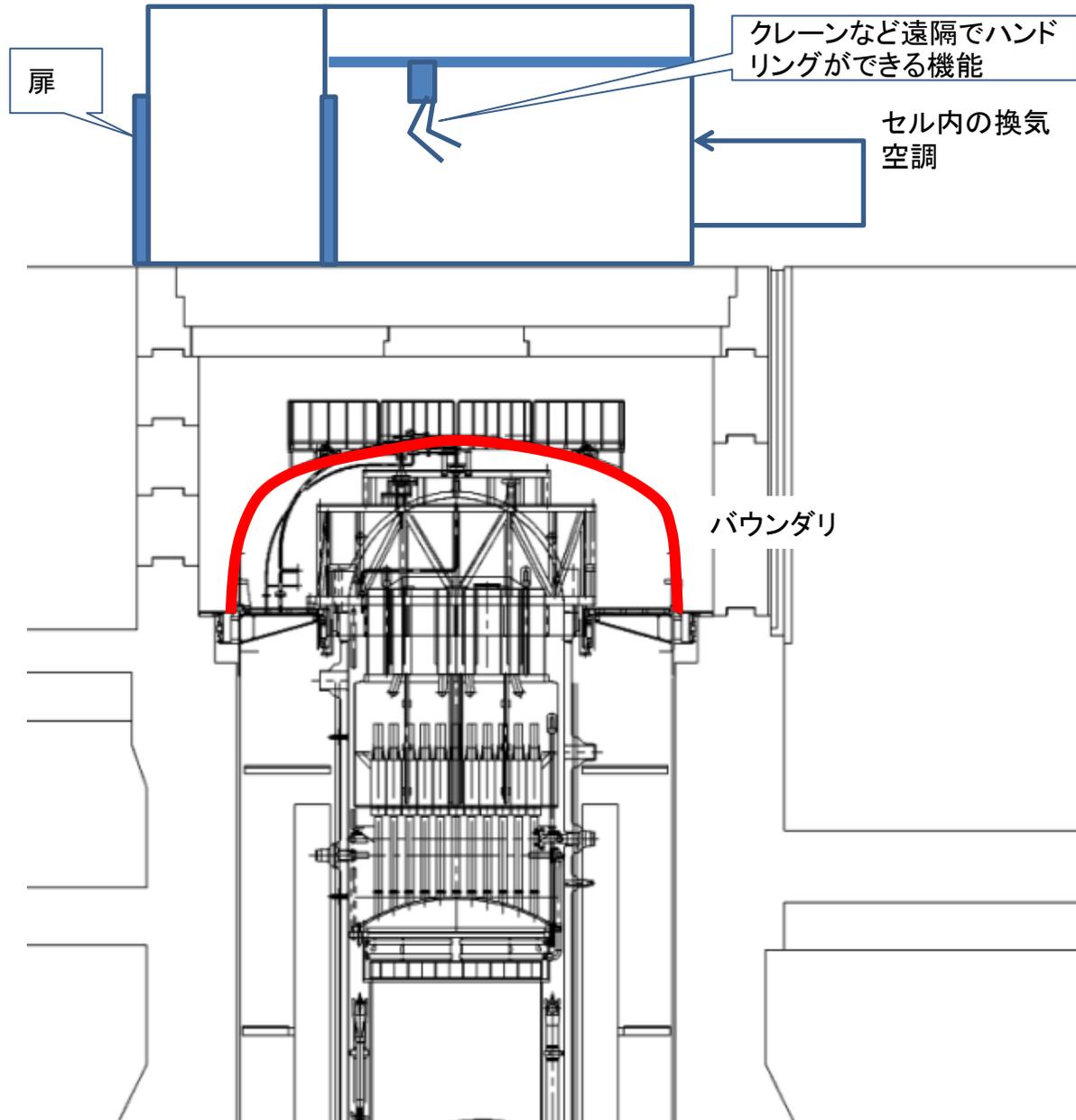
オペフロ上ダストモニタ : $5E-3$ Bq/cm³、敷地境界付近ダストモニタ : $1E-05$ Bq/cm³

(4) 検討の設定値として、下記の値を使用する。

オペフロ: 全面マスクの基準 $2E-3$ (Bq/cm³) 敷地境界 : カバー解体と同じく総量で $1E-5$ Bq/cm³

今後の許認可などを考え、対象核種や限度などの設定が必要

(5)作業ステップ検討

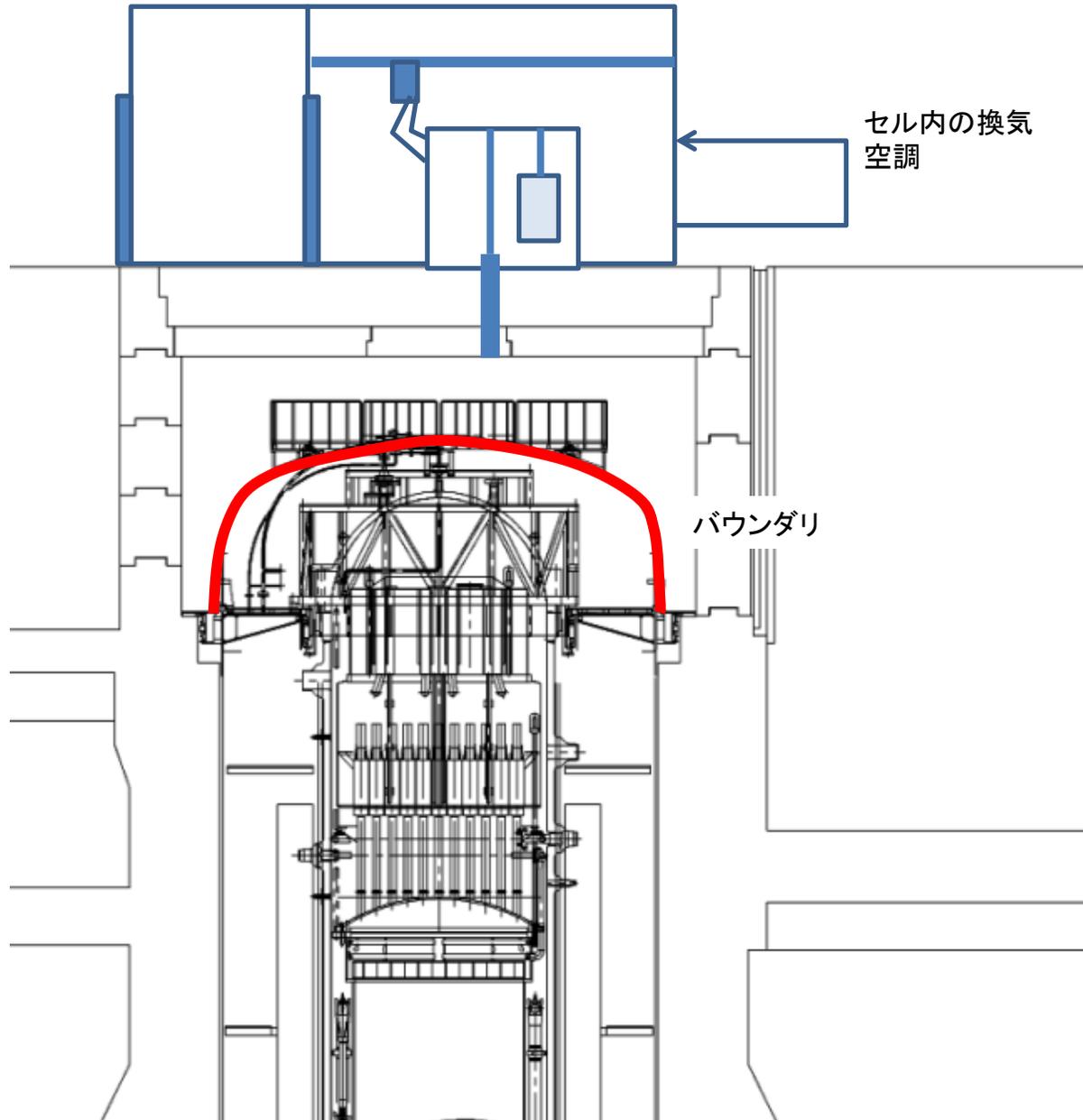


ステップ1: オペフロにRPV内部調査用のセルを設置

安全要求を満足させるため(何か異常があったらすぐに作業をストップさせるため)の準備が重要。

- PCV内部に、状態把握(情報収集)のため臨界モニタ、ダストやガスの検出モニタ機能を配置
- 水素爆発のリスクを把握しアラームを発生させるため、気体組成の把握(特に水素、酸素、窒素など)
- プラント状態監視を行い、RPV内部調査のオペレーションの判断に活用するため、プラント状態監視盤が必要

(5)作業ステップ検討



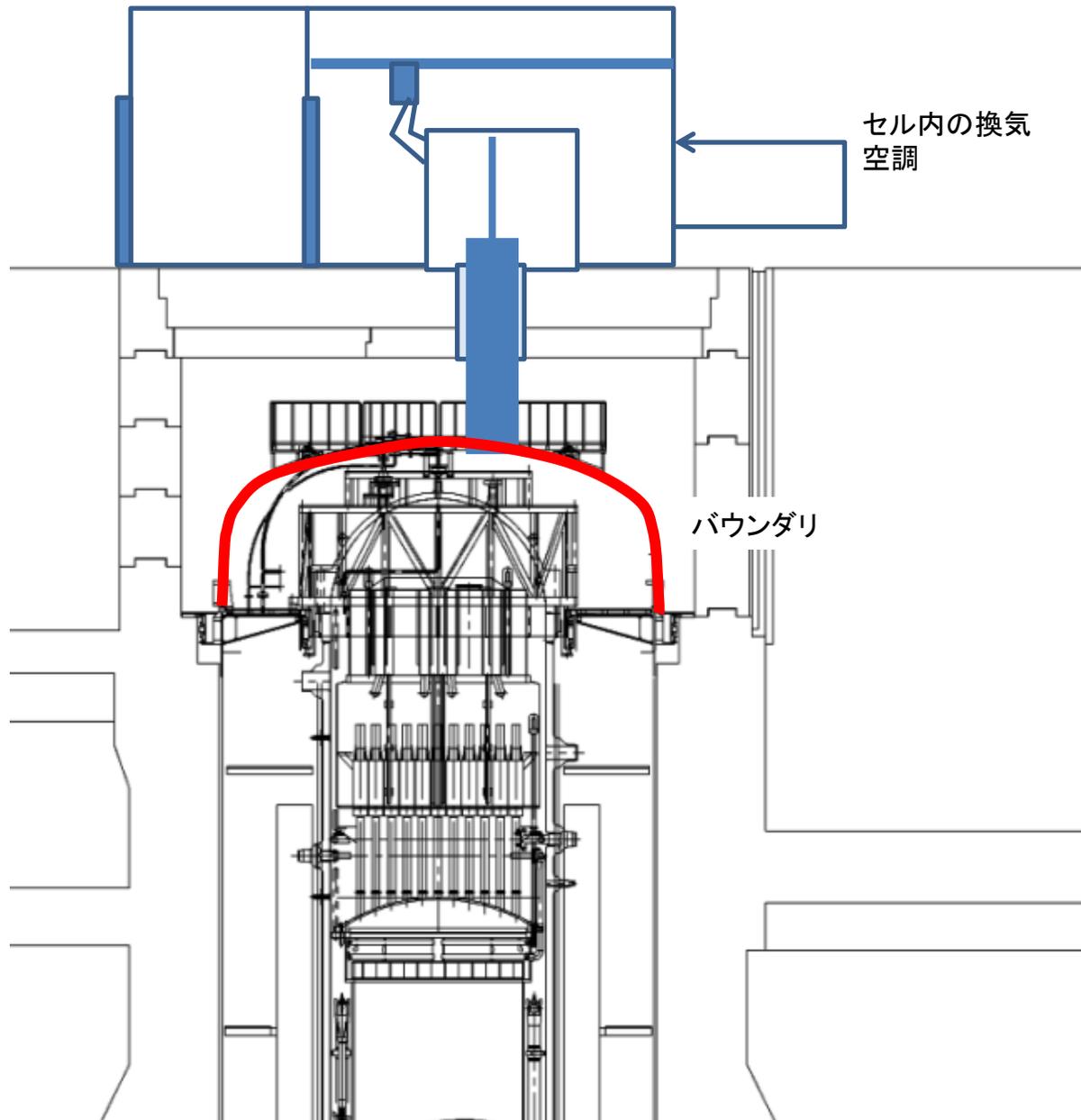
ステップ2: ウェルカバーの穴あけ

先行穴開けは小さく。内部を調査して安全であることの確認、状況を把握して穴を拡大。

- (1) 先行穴開け(可能な限り小さく)
- (2) 原子炉ウェル調査(線量、目視)
- (3) 本穴開け

- 原子炉ウェルからの汚染がセル内に入り込みセル内の汚染を防ぐため、セルの換気は作動させる。

(5)作業ステップ検討



ステップ3:バウンダリ装置 ガイドパイプの据付

ガイドパイプの内部に溶接装置と検査装置を配置し、内部から溶接。

(5)作業ステップ検討

ステップ4:PCVヘッド穴あけ→RPVヘッド穴開け

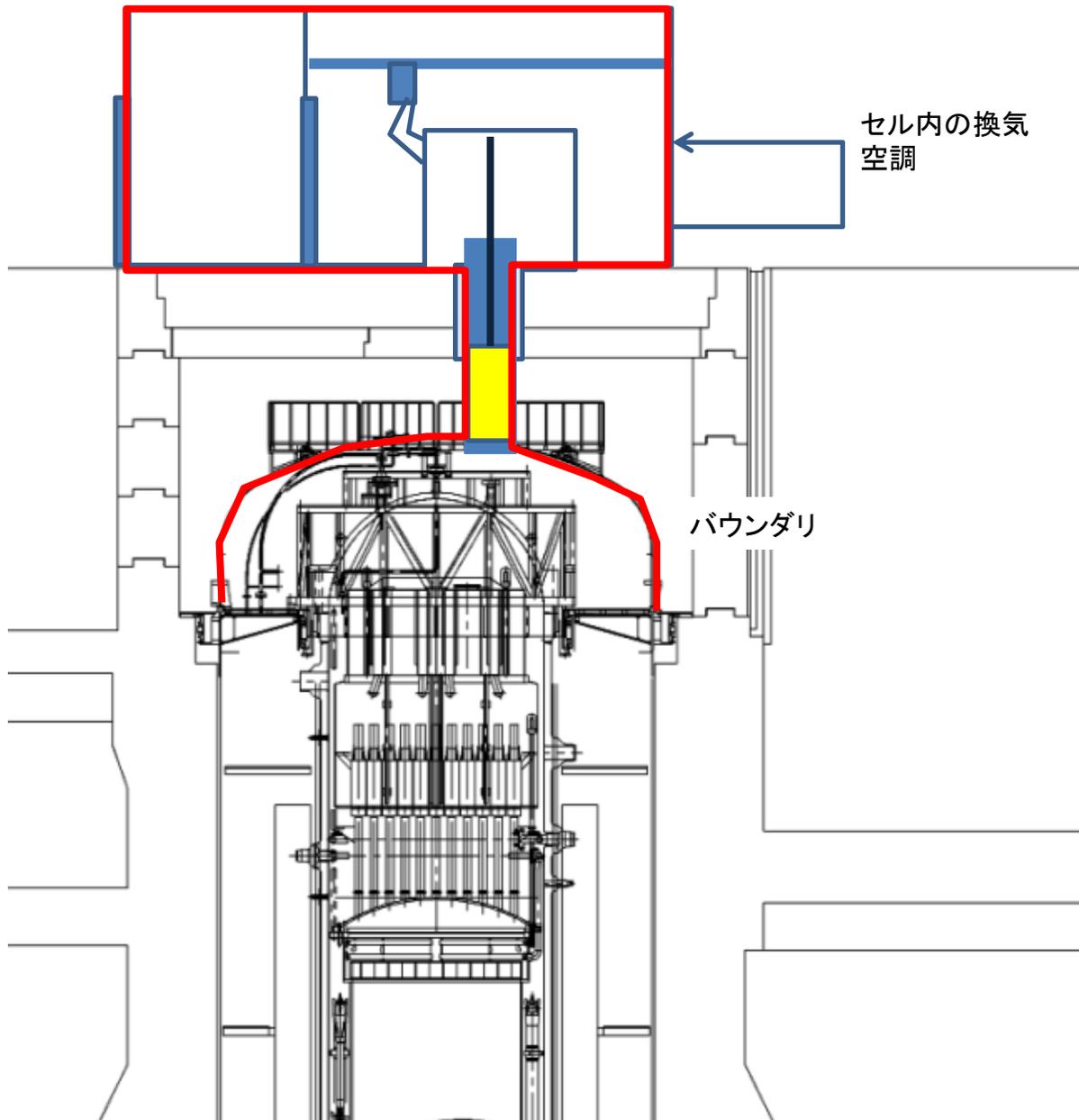
先行穴開けは小さく。内部を調査して安全であることの確認、状況を把握して穴を拡大。毎回、調査をしながら下に移動する。

- (1) 先行穴開け(可能な限り小さく)
- (2) 内部調査(線量、目視)
- (3) 本穴開け

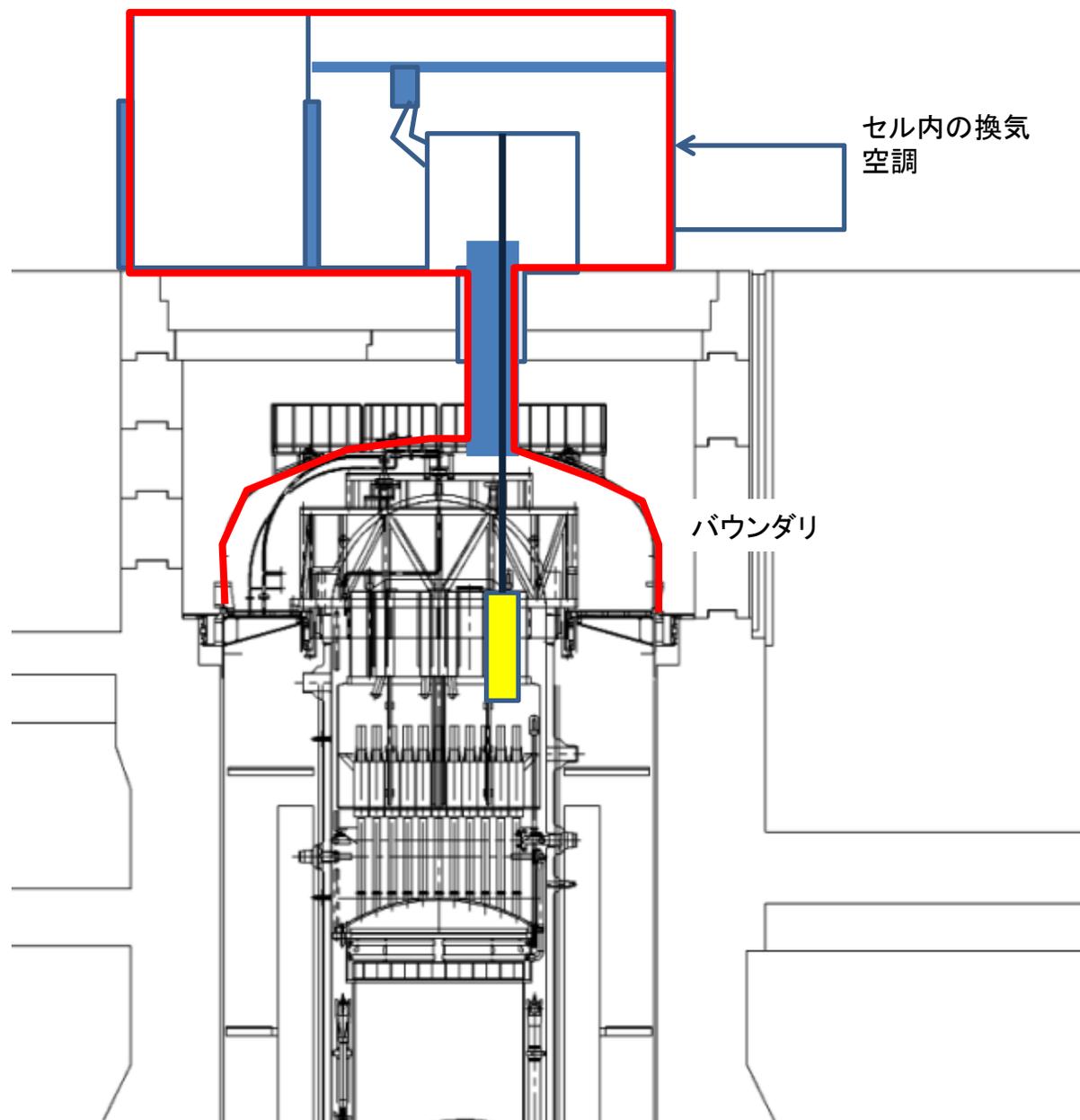
↓
保温材、RPVヘッド穴開け

【安全要求上の課題】

RPVヘッド、PCVヘッド穴開け時の**水素対策**が重要。穴あけに伴い水素がヘッドから放出される場合など、穴あけの成立のための発生状況を考慮し試験での検証が必要。



(5)作業ステップ検討



ステップ5 : 炉内構造物穴開けドライヤ・セパレータの穴開け加工

【調査項目】

- 炉内構造物の損傷状況
- 放射線量
- 圧力、温度
- 水素濃度

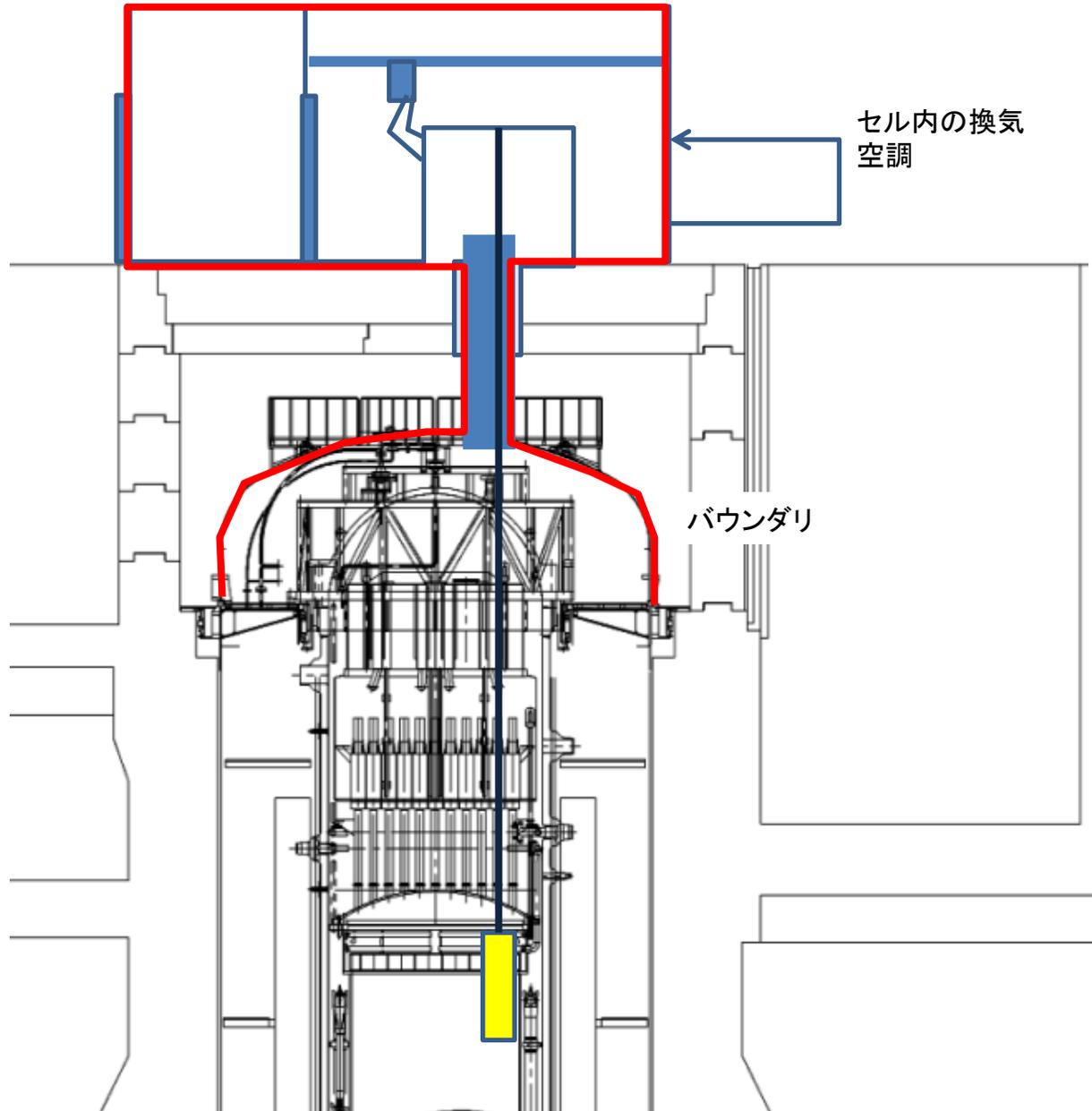
【安全要求上の課題】

切断に伴い発生する、放射性物質(ダスト、水中移行する切りくずなど)について、加工時の移行の把握が重要。

- (1) 放射性気体
- (2) ダスト
- (3) 水中から気中に放出されるもの
- (4) 水中の固形物
- (5) 溶出
- (6) 切りくず、切断片

安全系に係ることであり、研究開発で行うことが必要な課題。

(5)作業ステップ検討



ステップ6 : 炉心部調査

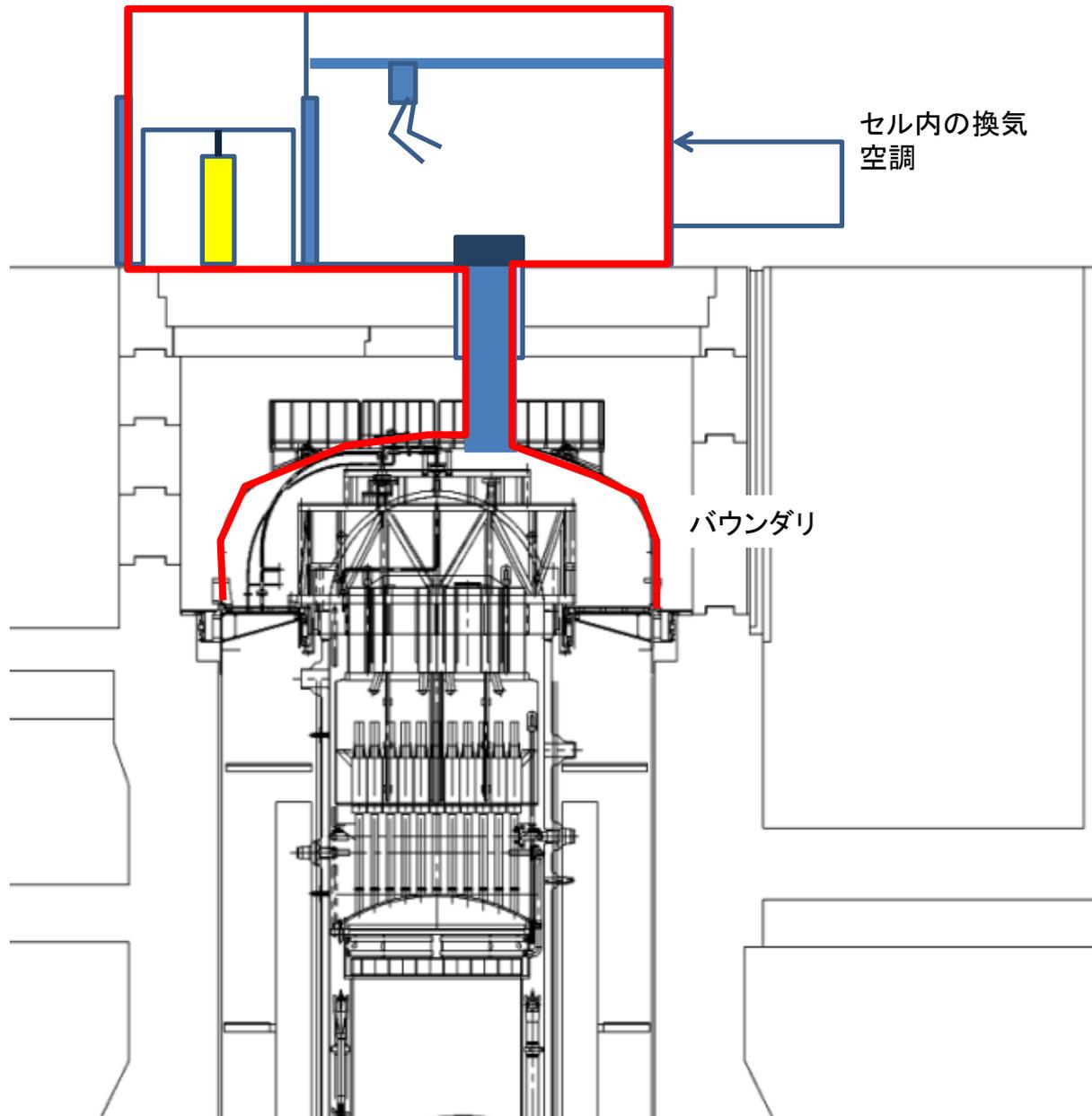
【調査項目】

- 燃料デブリの分布状況
- 燃料デブリの表面温度
- 切り株燃料の有無
- 放射線量
- 冷却状況 (RPV内水位、流路、水たまり大きさ等)
- ダストサンプリング
- 炉内燃料デブリサンプリング

(5)作業ステップ検討

ステップ7 : 調査用機器の搬出

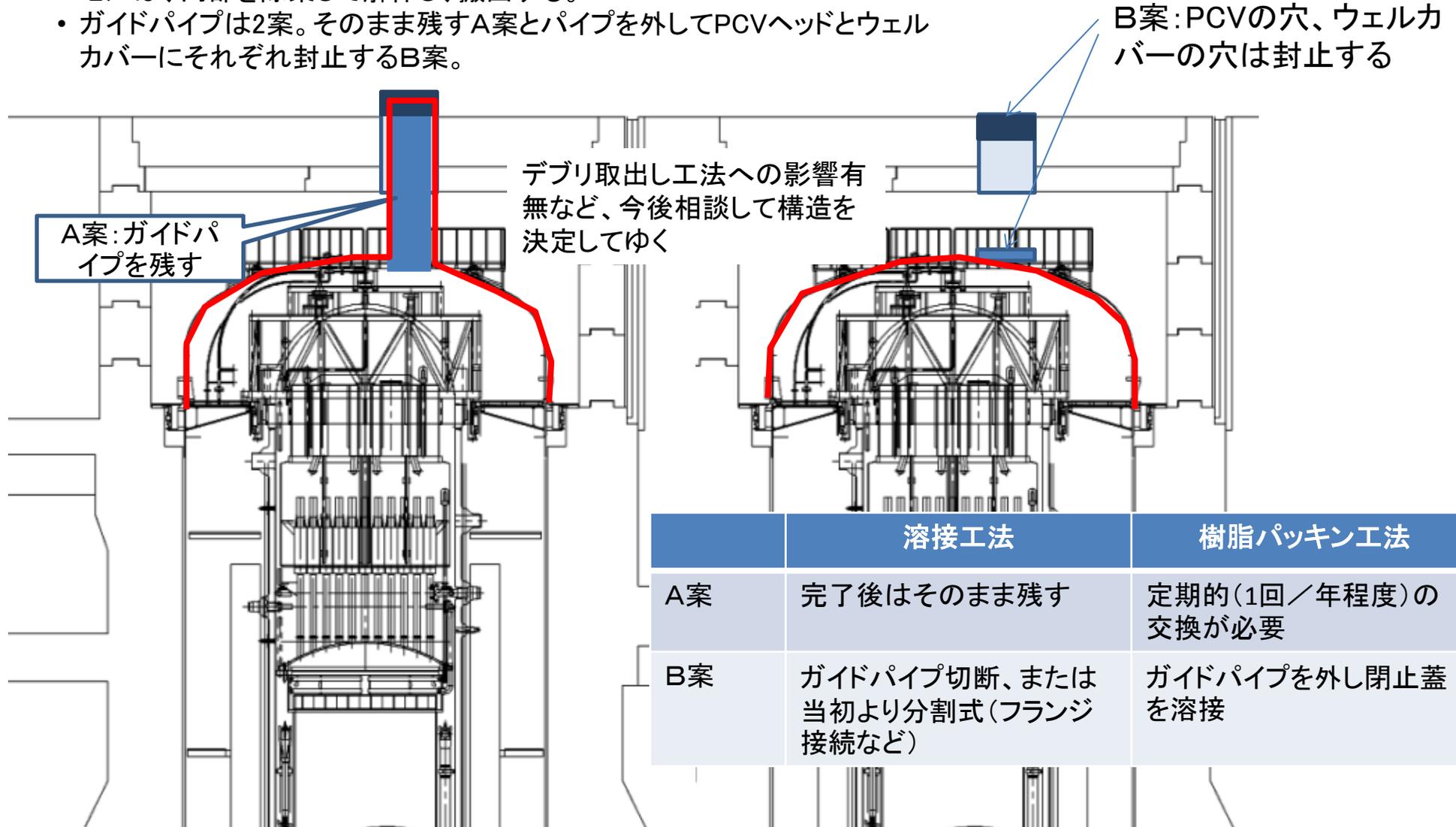
調査用機器は、セル内で必要に応じて除染を行った後、搬出する。



(5)作業ステップ検討

ステップ8 : 調査後の片づけ

- セルは、内部を除染して解体し、搬出する。
- ガイドパイプは2案。そのまま残すA案とパイプを外してPCVヘッドとウェルカバーにそれぞれ封止するB案。



2.2 上部穴開け加工による調査技術の要素試験及び実現性評価

(6) 上部穴開け加工による調査の概要と課題

- 全体概要検討から、各システム・工法・装置の課題を抽出して開発計画へ反映
- 本年度は、重要度の高いバウンダリ機能を維持するシステム及び炉心部へのアクセス技術について要素試験も含め検討を実施した。

作業用アクセス(飛散防止)設備
構造設計、オペフロとの取り合い方法の検討、換気空調システム設計、設備内装備の検討、線量評価、ユーティリティ供給等

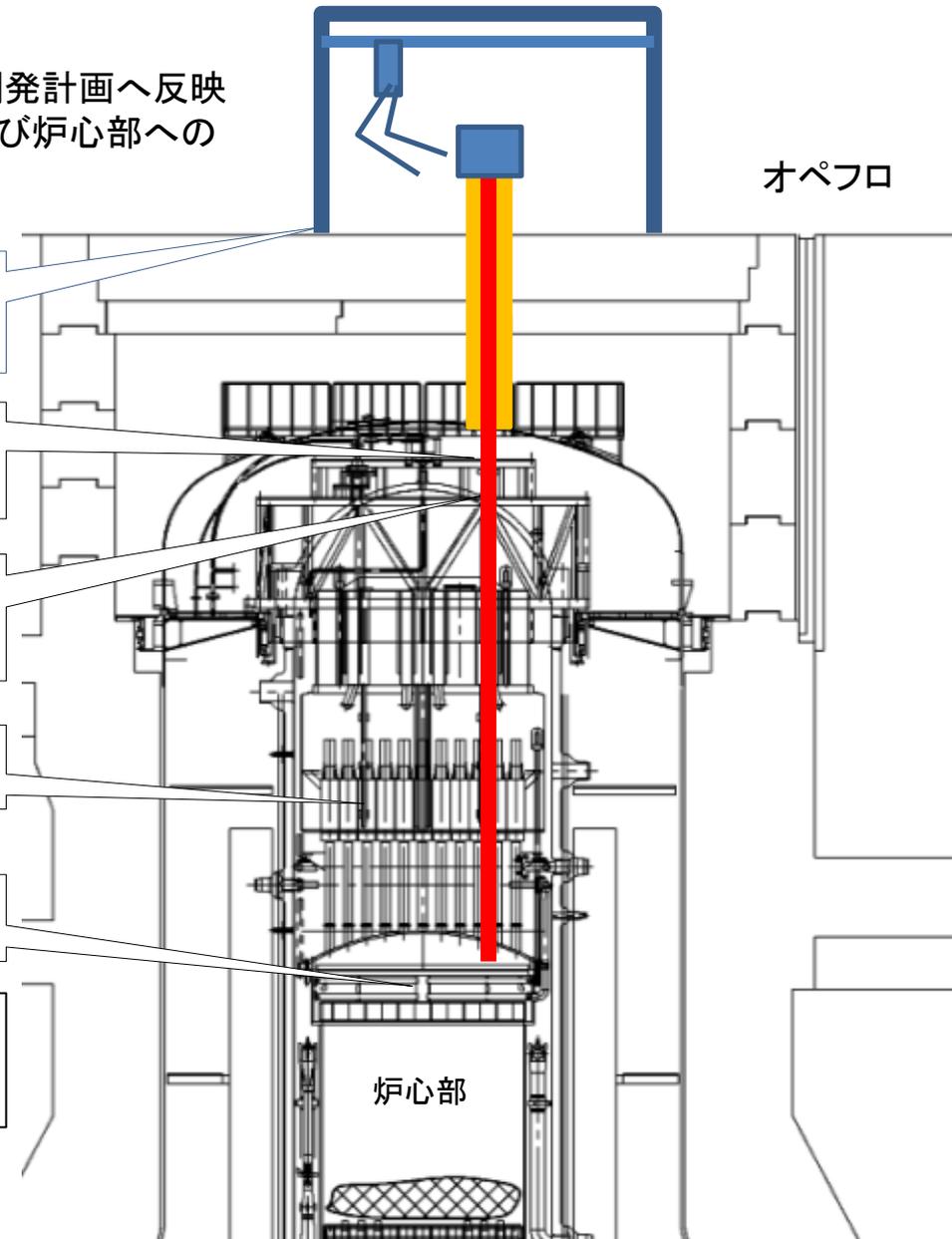
バウンダリ機能を維持するシステム
バウンダリ機能維持装置の遠隔交換方法、耐震設計、設置時の機能確認(現地試験)方法、調査終了後の処置方法等

ウェルカバー穴開け・RPVヘッドまでの穴開け
遠隔による穴開けの位置決め方法、水素爆発を回避する穴開け技術、切断片落下防止対策等

炉内(上部格子板まで)の穴開け
加工方法の検討、加工片の回収方法、切断装置の小型化等

炉内(上部格子板まで)の調査
アクセス方法の検討、調査方法・要求精度の検討等

工法検討・工事計画の立案
安全要求(被ばく、臨界防止)を満足する工法、作業エリア除染・整理、ユーティリティ供給、装置メンテナンス・除染等、一連の作業計画立案等



2.2 上部穴開け加工による調査技術の要素試験及び実現性評価

(7) 各ステップの代表装置、リスク、および複数案の要素検討などによる対策案

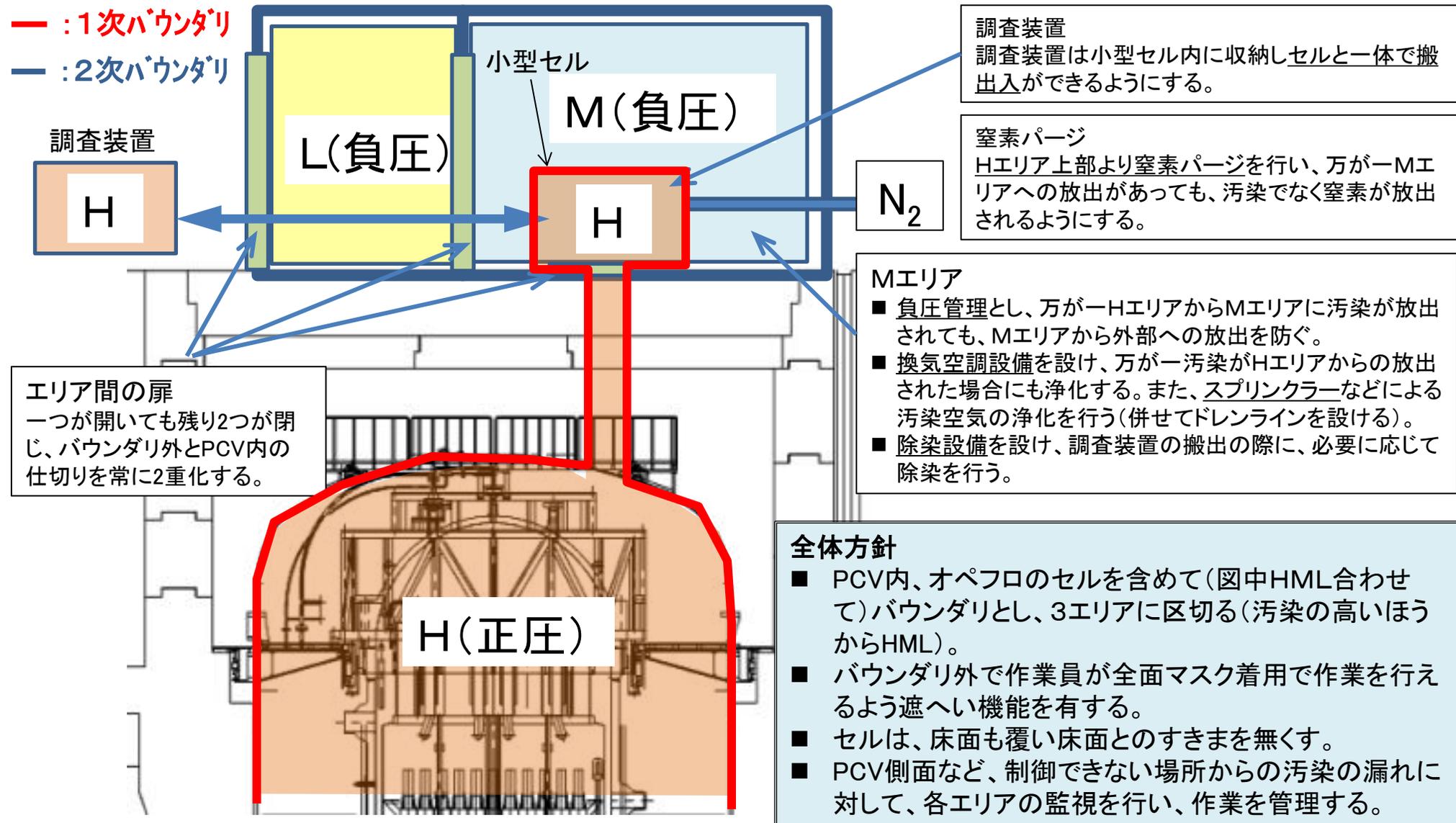
ステップ(装置)	代表機能	リスク	対応策
作業用アクセス(飛散防止)設備	放出抑制	放射性物質の漏えい・放出	<ul style="list-style-type: none"> ● セルおよび扉の多重化による、設備外への放射性物質の放出防止 ● セル内の圧力制御・換気空調による漏えい防止
バウンダリ機能を維持するシステム	放出抑制	放射性物質の漏えい・放出	<ul style="list-style-type: none"> ● 複数案のシール構造から選定 ● シール内部のパージによるバックアップ(漏れてもパージエアが放出) ● 耐震設計(評価は今後実施)
ウェルカバー穴開け・RPVヘッドまでの穴開け	切断	切断時の水素爆発	<ul style="list-style-type: none"> ● ヘッド上部に水素の可能性 ● (アブレシブの無い)水ジェット、電解加工など引火リスクの無い工法の立案
炉内(上部格子板まで)の穴開け	切断	狭あい部で切断片の分離	<ul style="list-style-type: none"> ● 複数案の切断工法から、基礎試験を通じて選定 ● 小型加工ヘッドの調査
炉内(上部格子板まで)の調査	アクセス調査	調査不可能 回収不可能	<ul style="list-style-type: none"> ● カメラ、潜望鏡など複数の調査工法から、基礎試験を通じて選定。 ● ガイドパイプなどで炉内構造物の切断エッジの影響のないアクセスルートづくり

2.2.1 バウンダリ機能を維持するシステムの概念検討

(1) バウンダリ機能維持装置の全体概要

— : 1次バウンダリ

— : 2次バウンダリ



2.2.1 バウンダリ機能を維持するシステムの概念検討

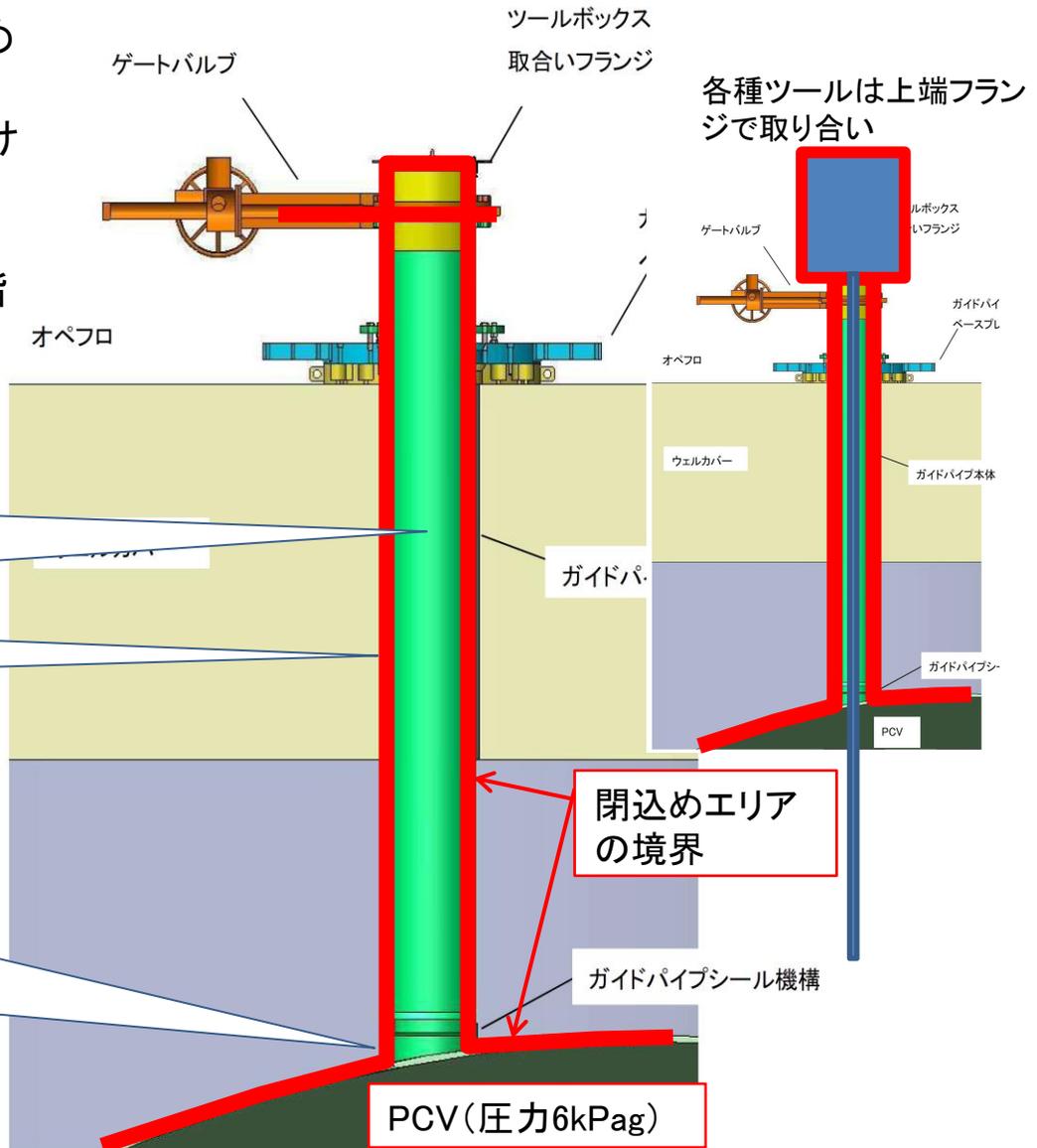
(2) ガイドパイプの設置

- PCVヘッドにガイドパイプを設置し、新たに閉じ込めエリアを構築
- 近傍の干渉物が無いことや曲率が小さい(取り付け部の半径が大きい)ことなどから、PCV上蓋に設置する。
- セルとの系統取り合いなどは今後の基本設計段階で検討する。

- ガイドパイプの寸法は、RPV切断装置の取り合いを考え、**内径約400mm**とする。切断装置の設計とともに最終決定する(RPVヘッド加工装置の外形寸法φ400mmより)

- ガイドパイプとウェルカバーの隙間は、シールなど管理できる状態にする。

- PCVとの取り合い: 既設PCVヘッドとの取り合い部から原子炉ウェルへの漏れが無いようにする。
- **万が一のバックアップとして、ガイドパイプ内を窒素パージ(約5~10kPag)とする**



2.2.1 バウンダリ機能を維持するシステムの概念検討

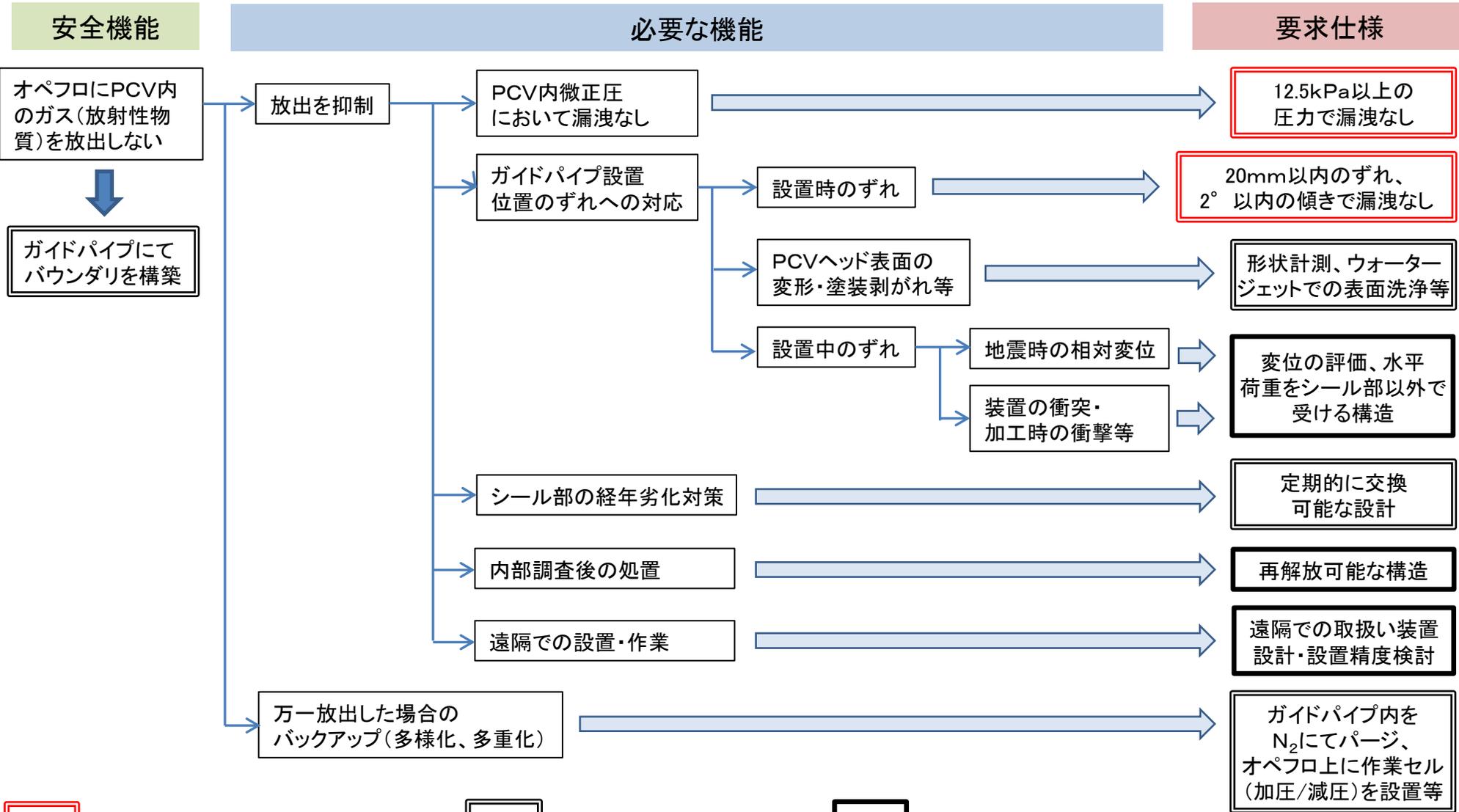
(3) シール構造ガイドパイプ接続方法の検討・比較

■PCVとの取り合い部 シール構造案の比較

評価項目	①溶接工法	②エポキシ樹脂工法	③ろう付け工法	④樹脂パッキン工法
シール機能	○ 要素試験にて耐圧試験を実施し、シール機能に問題ないことを確認。 (他国プロ※にて確認)	○ 要素試験にて耐圧試験を実施し、シール機能に問題ないことを確認。 (他国プロ※にて確認)	△ PCV面とガイドパイプ面に5mmのギャップがある場合、シール機能が満足できない。 (他国プロ※にて確認)	○ 要求仕様:漏えい無し(50リットル/h以下) 実現性を要素試験で確認。
施工の容易さ	○ トーチの位置合わせ等の技術が必要だが、実現性は十分あり。 (他国プロ※にて確認)	△ PCVヘッド表面またはガイドパイプ表面に予めエポキシ樹脂を塗布する必要があり、遠隔作業を考慮すると難易度は高い。	△ PCVヘッド表面に予めろう付け用のプールを構築する必要があり、遠隔作業を考慮すると難易度は高い。	◎ 押付けるのみであるため他の工法に比べ施工は容易。 要求仕様:押付け力制御、角度調整可能 実現性を要素試験で確認。
シール部の交換要否(経年劣化)	○ 交換不要だが、定期的 に外観調査が必要。	△ 耐放性の観点で定期的にシール部の切断・再施工が必要で作業の難易度が高い。	○ 交換不要だが、定期的 に外観調査が必要。	△ 耐放性の観点で定期的に交換が必要(交換周期は1年に一回)。
調査終了後の処置	△ ガイドパイプがオペフロ上に残る。(他工事との干渉が予想される。)	△ ガイドパイプがオペフロ上に残るが、耐放性の観点から切断し、別の手段で閉止をする必要がある。	△ ガイドパイプがオペフロ上に残る。(他工事との干渉が予想される。)	△ 調査後はPCV開口部を閉止することでオペフロ上に干渉物として残らない。(閉止方法は別途検討が必要)
その他	△ 溶接実施後の検査に関し、検査項目について未調整(許認可を考慮)。	溶接と樹脂パッキンが有望		—

2.2.1 バウンダリ機能を維持するシステムの概念検討

(4) シール構造ガイドパイプ接続方法の要求仕様



 : 今年度要素試験にて実現性を確認
 : 今年度机上検討を実施
 : 次年度以降に検討実施

2.2.1 バウンダリ機能を維持するシステムの概念検討

(5) 樹脂パッキン工法による設備概念の検討および要素試験

■ 要求条件

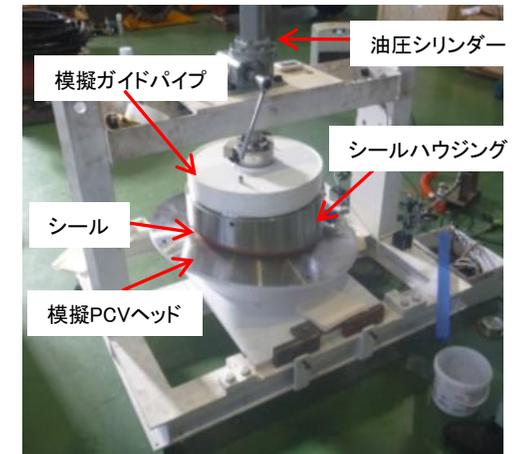
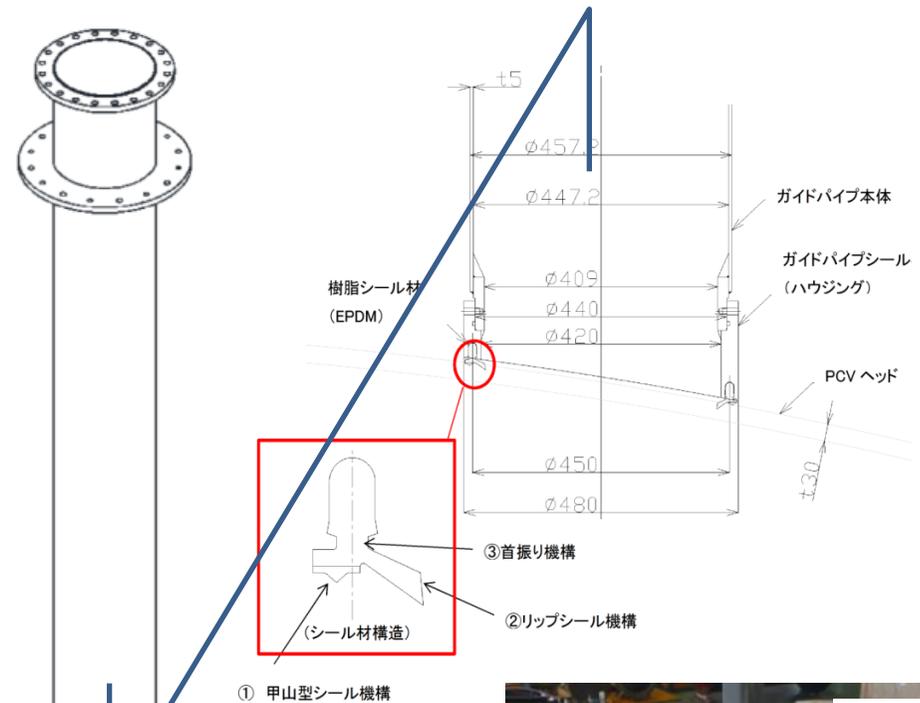
- 設計圧力：内圧10kPag
- 環境条件
温度：0～40℃
湿度：最大100%(結露あり)
放射線：最大3000Gy/h(炉内環境と同一として)

■ 設計仕様(樹脂パッキンシール案)

- 材質：ステンレス鋼(SUS304)
- 寸法：φ約400mm×h4000mm
- 概略質量：約400kg
- 取り合い
上端はゲートバルブを介して調査機器を接続
下端はPCVヘッドとのシール部を接続
- シール材質：EPDM、シリコンゴム
- シールの構造
リップシール(接触面のうねりに追従する特性)
甲山型シール(接触面の粗さに追従する特性)

■ 要素試験にて、リークが無いことを確認

- 試験機材：パイプの径、模擬PCVヘッドの曲率は実機設計と同一
- パイプの高さは短尺化(押しつけ力は自重を模擬)
- 位置ずれ(±20mm)、角度ズレ(±2度)を模擬
- リーク試験内圧：12.5kPa(設計圧力の125%)



2.2.1 バウンダリ機能を維持するシステムの概念検討

(6) 樹脂パッキン工法による据付け装置の概念検討および要素試験

■ 設置手順

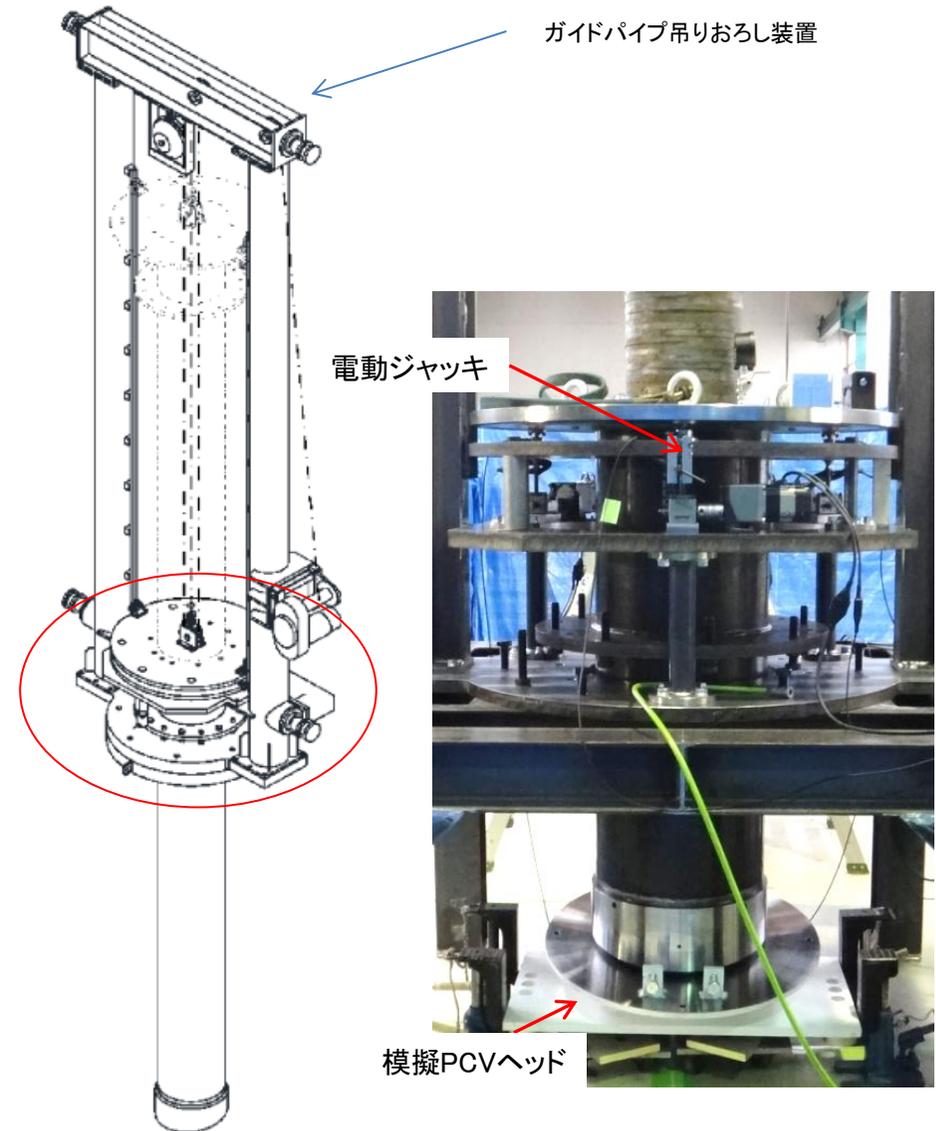
- ガイドパイプ吊りおろし装置をオペフロに設置
- ウィンチにより、ガイドパイプをワイヤにてウェルカバーの開口内に吊りおろし
- 吊りおろし装置下部の据付け調整機構に装備された電動ジャッキを調整し、ガイドパイプの押し付け力、押し付け角度を調整し、固定

■ 設計仕様

- 吊りおろし機構
容量：定格1000kg
落下防止機構(ワイヤ繰り出し速度検知)
- 据付調整機構
調整方式：電動ジャッキ式
数量：3台
ストローク：50mm(調整角度2°より)
容量：3000N

- 要素試験にて、傾き調整、押し付け力調整が可能であることを確認

- 傾き調整範囲 ±2度以内
- 押し付け力調整範囲：0～6.5kN



2.2.2 炉心部へのアクセス技術の概念検討

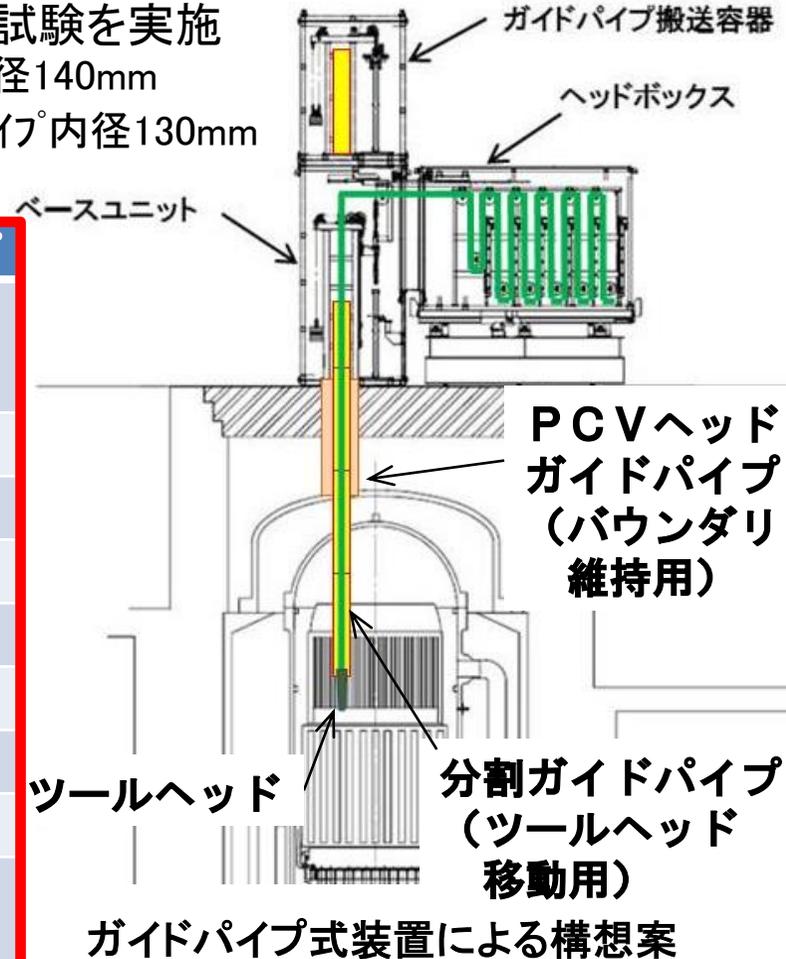
(1) 炉心アクセス装置の概念検討

全体方針

■ 炉内構造物(蒸気乾燥器、気水分離器等、上部格子板までを対象)の穴開け切断加工は、ウェルカバーからPCVヘッドにバウンダリが構築され、PCVヘッド・RPVヘッドまでの穴開け後に実施する。

■ 装置の構成要素 → 今後、システムの概念設計、試作試験を実施

- ツール(ヘッド)・・・構造物を上方から切断、加工片除去で開口穴径140mm
- ツール移動システム・・・RPVヘッド予備スル直下(暫定)にガイドパイプ内径130mm
- 遠隔操作・監視システム、用役・動力供給システム



ガイドパイプ式装置による構想案

項目	ワイヤ吊下げ	ロッド吊下げ	ガイドロッド	ガイドパイプ
原理	ワイヤ先端のヘッドをワイヤ巻上で上下	ロッド先端のヘッドをロッド昇降で上下	昇降するロッドをガイドにヘッドが上下	昇降するパイプ内をガイドにヘッドが上下
オペフロ設置	○ ワイヤ収納	△ 分割要	△ 分割要	△ 分割要
RPV内進入	△ スル進入	○ ロッド	○ ロッド	○ パイプ
炉内干渉回避	× 困難	△ 回避	△ 回避	○ パイプ内部
切断反力保持	× 困難	△ 支持	△ 支持	○ パイプ固定
ヘッド交換	× 位置合せ	× 位置合せ	△ 干渉回避	○ 干渉なし
ヘッド回収	× 再進入	× 再進入	○ ガイド	○ ガイド
減量・減容	○ 収納容易	△ 分割要	△ 分割要	△ 分割要
用途後アクセスルート確保	× 存置なし	× 存置なし	△ ロッド存置	○ パイプ存置

2.2.2 炉心部へのアクセス技術の概念検討

(2) 穴開け切断加工方法の概念検討

全体方針：遠隔、狭隘、複雑形状の炉内構造物(蒸気乾燥器・気水分離器等)を上方から切断、加工片除去で穴開け加工して開口作業を実施する。

■ 適用可能な既存技術 → プラズマ、レーザ、ウォータージェット切断を検討

➤ **非接触加工方法**によって検討(機械・放電加工は、小型化・反力、位置決めに難)

項目	プラズマ切断	レーザ切断	ウォータージェット切断	放電加工	ガス切断	機械加工
切断能力	薄板～厚板	薄板～	薄板～厚板	薄板～厚板	～厚板	～厚板
切断速度	速い	やや速い	遅い	遅い	やや遅い	速い
切断精度	粗	精密	精密～中	精密	粗	精密
切断品質	熱影響大 ドロス大	熱影響小 ドロス小	熱影響なし バリなし	熱影響小 高品質	熱影響大 ノロ発生	熱影響なし バリ発生
位置決め スタンドオフ	着火距離が ややルーズ	焦点距離が シビア	ルーズ	電極距離が シビア	ルーズ	接触式切断 がシビア
ツール角度	ややルーズ	ややシビア	ややルーズ	シビア	ルーズ	ややシビア
特記	ヒューム大	ヒューム極小	高圧水	電解液	ヒューム小	切削油
機械条件	△ 低速難	○ 薄板向き	○ 位置 決め容易	× 位置 決め困難	× ステン レス	× 小型化・ 反力
環境条件	○ 窒素	△ 水中困難	○ 高圧水	× (電解液)	× (酸素)	△ 切削油
安全条件	△ ガス, 電気, ヒューム	△ ガス, ヒューム	△ 研磨剤	△ 電気	△ ガス, 作火	△ 工具 消耗

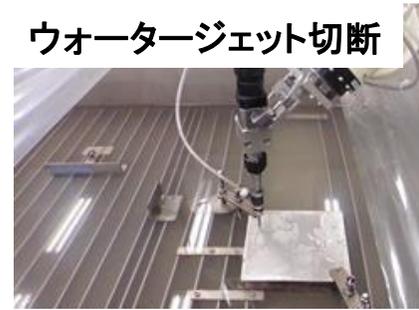
プラズマ切断



レーザ切断



ウォータージェット切断



2.2.2 炉心部へのアクセス技術の概念検討

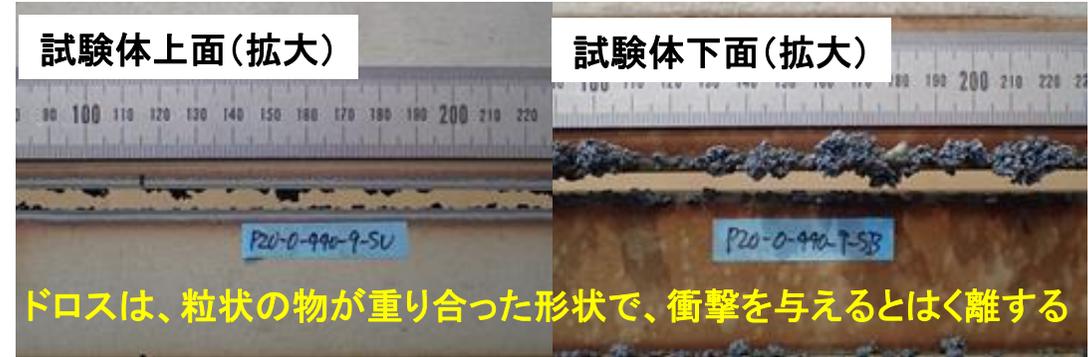
(3) 平板試験体による要素試験

■ ① プラズマ切断による平板切断要素試験

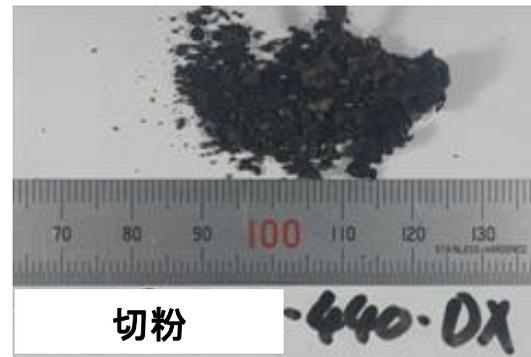
項目	試験条件
出力	アーク電流 130/280/440 A
用役	作動 Ar-H ₂ 18 L/min シールド N ₂ 90 L/min
切断速度	基準 525~1000 mm/min × 100/50/25 %
スタンドオフ距離	基準 9.5 mm ±50%
ツール角度	0/30/45 deg

項目	試験結果
板厚	5~45 mm
切断幅	表面 3~11 mm 裏面 1~16 mm
切断状況	(右図参照)
切粉	硬い鉄粒 1~5mm

注 ドロス: 溶融金属が冷却で固化、再溶着したもの



ドロスは、粒状の物が重り合った形状で、衝撃を与えるとはく離する



- ・薄板・低速でアーク消失発生あり。スタンドオフ距離の影響大。
- ・ドロス発生大。
ドロスフリーの条件出し困難。
- ・切粉は高密度・硬い鉄粒で、切断面の噛込みで分離困難の見通し。

2.2.2 炉心部へのアクセス技術の概念検討

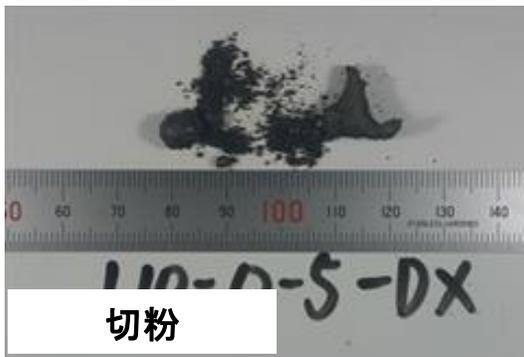
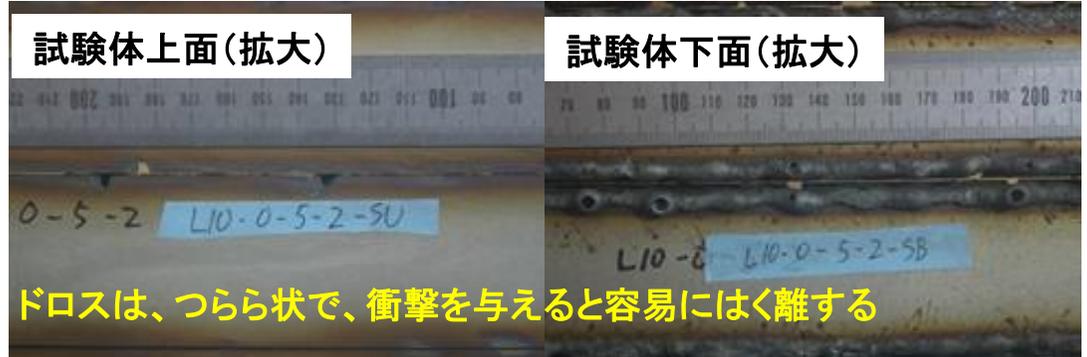
(3) 平板試験体による要素試験

■ ②レーザー切断による平板切断要素試験

項目	試験条件
出力	CO ₂ レーザー 2/3/5 kW(連続出力)
用役	アシスト O ₂ 160 L/min
切断速度	基準 100~1000 mm/min × 100/50/25 %
スタンドオフ距離	基準 4 mm ±30%
ツール角度	0/30/45 deg

項目	試験結果
板厚	5~20 mm
切断幅	表面 0.5~9 mm 裏面 0.5~12 mm
切断状況	(右図参照)
切粉	脆い酸化物 1~10mm

注 セルフバーニング: 急激な酸化反応による溶融金属の吹き返し現象



- ・セルフバーニング発生あり。ツール角度の影響大。
- ・ドロス発生大。パルス出力でセルフバーニング抑制可能性あり。
- ・切粉は脆く、切断面の噛込みで分離に支障があるも、破碎で分離の可能性あり。

2.2.2 炉心部へのアクセス技術の概念検討

(3) 平板試験体による要素試験

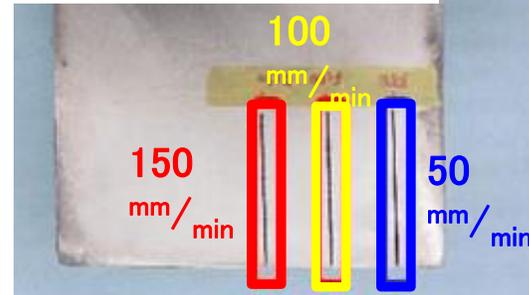
■ ③ウォータージェット切断による平板切断要素試験

項目	試験条件
出力	高圧水 343MPa 1/4 L/min
用役	アブレイシブ(研磨剤) ガーネットサンド 0~500 g/min
切断速度	基準 40 mm/min 穿孔時 0 mm/min
スタンドオフ距離	基準 2 mm ~ 50 mm
ツール角度	0/30/45 deg

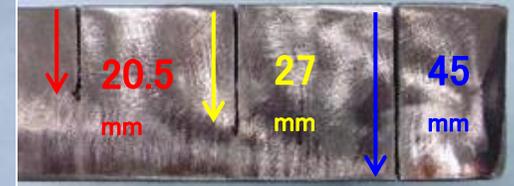
項目	試験結果
板厚	5~45 mm
切断幅	表面 1~2 mm 裏面 0.6~1 mm
切断状況	(右図参照)
切粉	微細(<0.5 mm)

(試験は安全のため水中で実施)

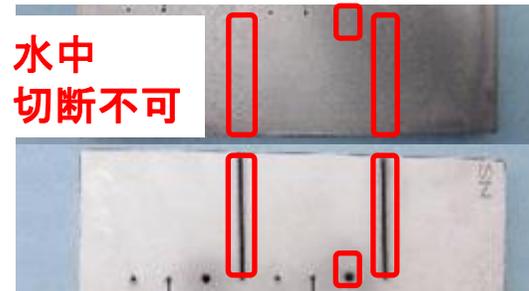
切断速度比較 試験体上面



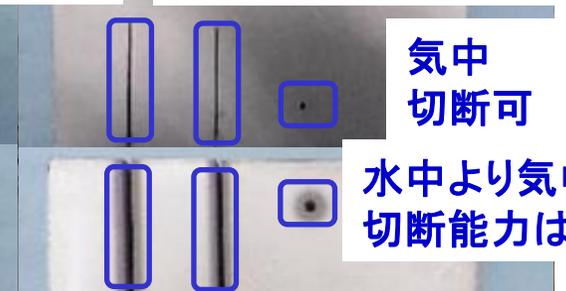
試験体断面



水中・気中切断比較 試験体下面(水中)

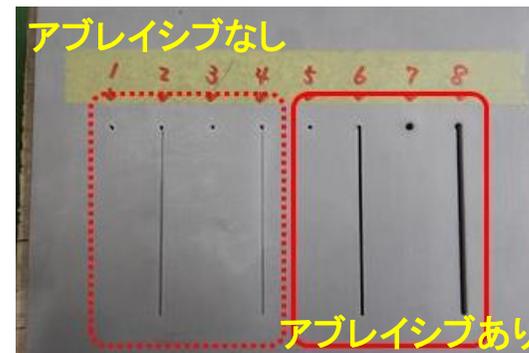


試験体下面(気中)



水中より気中の切断能力は大

試験体上面(水中)



試験体上面(気中)

- ・アブレイシブありは速度40mm/minで45mm厚を切断可。高速でも150mm/minで20mm深を切削可。
- ・ツール角度よりスタンドオフの影響大。距離50mmでも20mm厚を切断可。
- ・切粉は微細で、**切断面の噛込み等、分離に支障なし**

2.2.2 炉心部へのアクセス技術の概念検討

(3) 平板試験体による要素試験(まとめ)

- 非接触加工方法によって平板切断要素試験を実施
- 平板試験体で切断特性を確認、炉内加工の適用性を評価(切断条件, 状態)
 - プラズマ切断 ドロス大、硬い切粉の噛込みで分離困難
 - レーザ切断 ドロス大だが、脆い切粉の噛込みで分離に支障あるも、切粉の破碎で分離の可能あり
 - **ウォータージェット切断** 切粉微細、噛込みで分離支障なし。切幅小で切粉発生小。 →有力候補

項目	プラズマ切断	レーザー切断	ウォータージェット切断
用役	アーク電流 130 / 280 / 440 A 作動 Ar-H ₂ 18 L/min シールド N ₂ 90 L/min	CO ₂ レーザ 2 / 3 / 5 kW:連続 アシスト O ₂ 160 L/min	高圧水343MPa 1 / 4 L/min アブレイブ(研磨剤) ガーネットサント 500g/min
切断速度	基準 525~ 1000 mm/min	基準 100~ 1000 mm/min	基準 40 mm/min 20~150mm/min 穿孔時 0 mm/min
距離	基準 9.5 mm ±50%	基準 4 mm ±30%	基準 2 mm ~ 50 mm
角度	0/30/45 deg	0/30/45 deg	0/30/45 deg
板厚	5~45 mm	5~20 mm	5~45 mm
切幅	× 表 3-11 mm 裏 1-16 mm (ドロス大)	△ 表 0.5-9 mm 裏 0.5-12 mm (ドロス大の原因となるセルフ パニングをパルス制御で抑制 の可能性あり)	○ 表 1-2 mm 裏 0.6-1 mm (ドロスなし)
切粉	× 硬い鉄粒 1~5mm	△ 脆い酸化物 1~10mm	○ 微細 <0.5 mm

ウォータージェット切断
(アブレイブ)による
模擬試験体要素
試験を実施

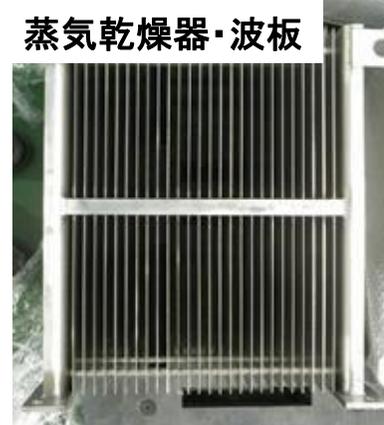
炉内構造物の穴
開け作業の可否、
作業状況を確認

2.2.2 炉心部へのアクセス技術の概念検討

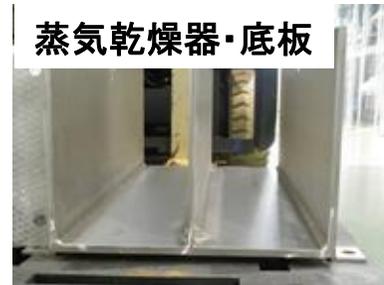
(4) 模擬試験体による要素試験

- ウォータージェット切断(アブレイシブ)によって模擬試験体穴開け要素試験を実施
 - 模擬試験体で穴開け可否, 作業状況確認(構造物を上方から切断, 開口)

炉内構造物	想定寸法	試験体(切断対象)
蒸気乾燥器 波板	φ 5404 波板t1.2 w228 × h1943	波板t1.2 × 穴 φ 140 × h50
蒸気乾燥器 波板 (中央位置)	φ 5404: 穴開け不要 波板t1.2 w228 × h1943	(RPV/ズル直下でない) 波板t1.2 × 穴 φ 140 × h50
蒸気乾燥器 底板	底板t13 側板t13 × h1943 中央板t6	底板t12 × 穴 φ 140 側板t12 × h150 中央板t6
気水分離器 本体(上部筒)	φ 337 × h2565 内筒t6/中筒t3/外筒t3	穴 φ 140 × h100 × 2 内筒t6/中筒t3/外筒t3
気水分離器 本体(下部筒)	φ 337 × h1938 ベーン w10 × t159 内筒t6/中筒t3	穴 φ 140 × h100 ベーン w10 × t100 内筒t6/中筒t3
スタンドパイプ	横板t3 × h76	横板t3 × h76
シュラウドヘッド	φ 4813 × h884 × t51	穴 φ 140/□140 × t45
上部格子板	□298: 穴開け不要 格子板t9 × h384	(RPV/ズル直下でない) 交差部分穴開け 格子板t10 × h150



蒸気乾燥器・波板



蒸気乾燥器・底板



気水分離器



シュラウドヘッド(中心部)



シュラウドヘッド(周辺部)



上部格子板

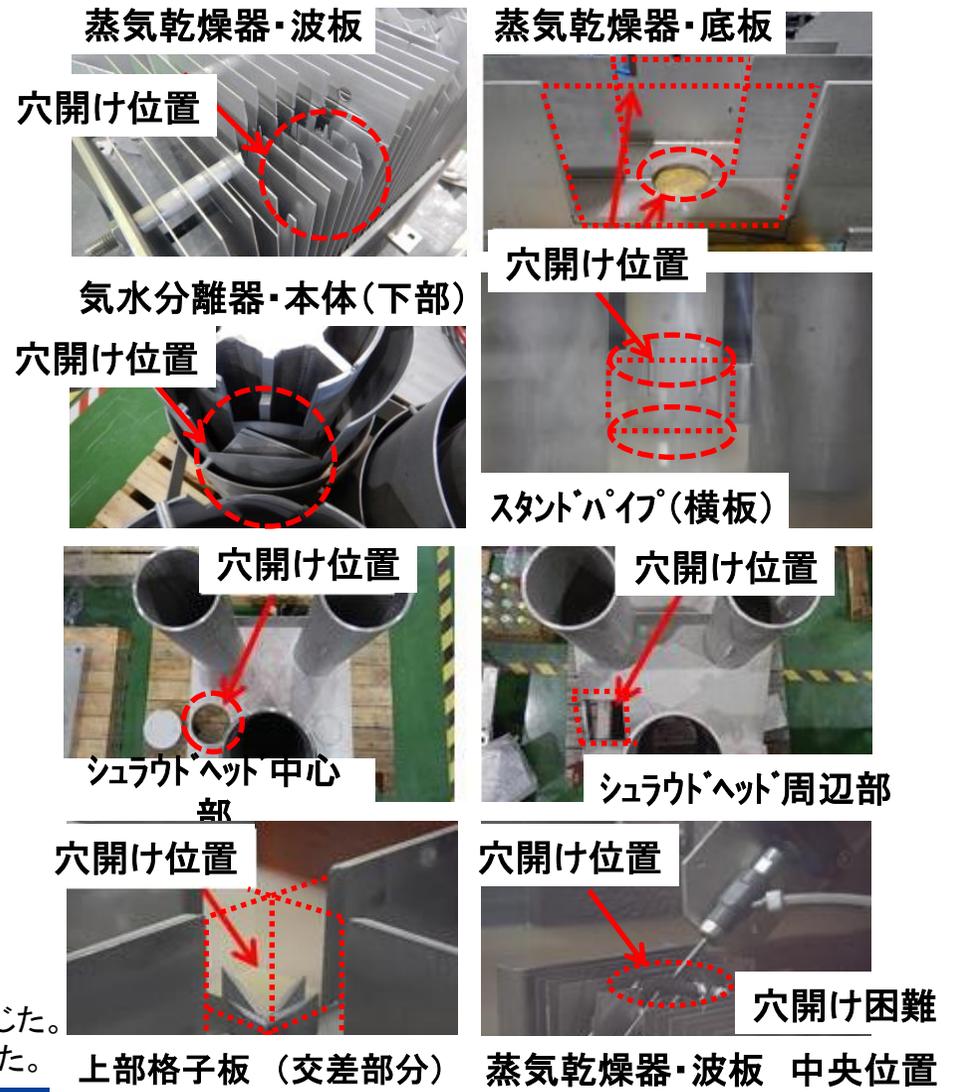
注: 想定寸法は, 1Fの号機毎炉内構造物の概略寸法の最大値、保守側を抽出

2.2.2 炉心部へのアクセス技術の概念検討

(4) 模擬試験体による要素試験(まとめ)

- ウォータージェット切断(アブレイシブ)によって炉内構造物を上方から切断、穴開けに見通し
 - 蒸気乾燥器・波板の中央位置への穴開けは困難(レーザ切断等代替、ルート設定の検討)

炉内構造物	試験結果	作業試算
蒸気乾燥器 波板	○ 25.2min (1943/50)	時間 16h、高圧水 3623L 研磨剤 490kg、切粉1kg
蒸気乾燥器 底板	○ 111.7min (1943/150)	時間 24h、高圧水 5353L 研磨剤 723kg、切粉16kg
気水分離器 本体(上部筒)	○ 89.6min (2565/100/2)	時間 19h、高圧水 4252L 研磨剤 575kg、切粉6kg
気水分離器 本体(下部筒)	○ 33.1min (159/100)	時間 1h、高圧水 195L 研磨剤 26kg、切粉0.3kg
スタントパイプ シュラウドヘッド	○ 中心 30.2min 周辺 27.6min	時間 0.5h、高圧水 107L 研磨剤 14kg、切粉1kg
上部格子板	○ 68.2min (384/150)	時間 3h、高圧水 646L 研磨剤 87kg、切粉0.8kg
蒸気乾燥器 波板中央位置	× 穴開け困難 (薄板の暴れ)	・ルート設定の検討 ・代替切断(レーザ)の検討 (実力確認として試験)
合計	(シュラウドヘッド分 は平均値、切粉 比重7.9)	時間 63.5 h、高圧水 14.2 kL 研磨剤 1916 kg、切粉24kg

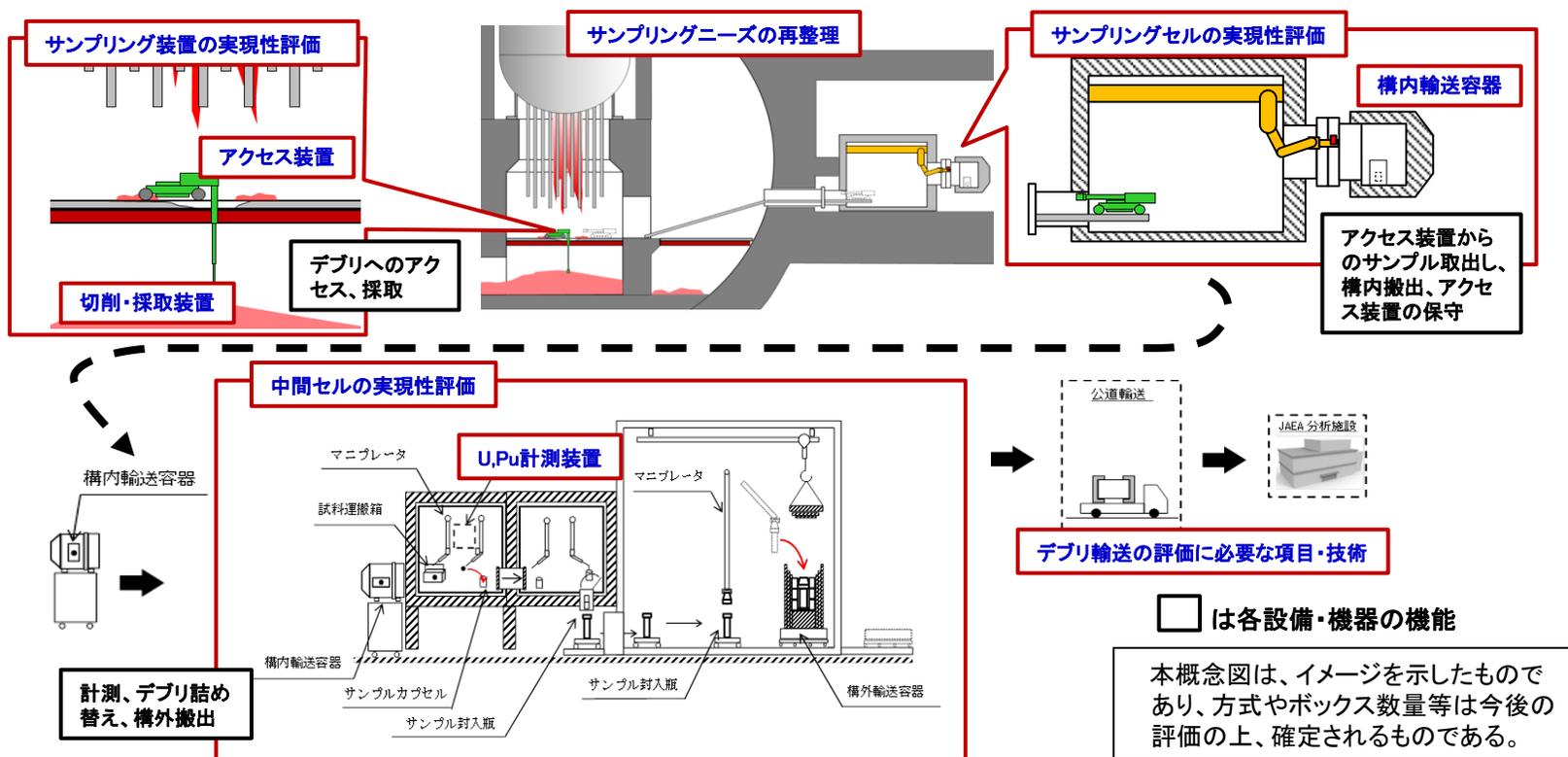


注: 時間は()内の寸法比, 高圧水は3.7L/min, 研磨剤は0.5kg/minを時間に乗じた。
切粉は保守的に考慮した切幅2mm×板厚×切断速度×時間を比重に乗じた。

2.3 燃料デブリサンプリング技術の調査及び実現性評価

2.3.1(1) デブリサンプリングから分析までの全体フロー

- アクセス装置と切削・採取装置から成るサンプリング装置、サンプリングセル、中間セルの各装置・設備の実現性評価、上流のニーズ再整理及び下流の構外輸送要件の検討が**今年度のスコープと成果**。



■ 目標達成レベル

U, Pu計測(X線)	U, Pu計測(中性子)	切削・採取装置	アクセス装置	セル関連	デブリ輸送
3	3	3	4	4 - 5	—

技術成熟度(TRL)の定義 1:基礎研究 2:応用研究(従来経験なし) 3:応用研究 4:実用化研究 5:模擬実証 6:フィールド実証 7:実運用

2.3.1 (2) 関連プロジェクトの期待する成果

■ サンプルング時期毎による必要性再調査

- 進捗により、重要度は変動するが、**効果が大きい時期は2018年以前**である。
- その場合、成果は**後続号機の許認可に使用できる可能性が高い**。(有用性は大きい)

サンプルング時期毎の必要性

要求プロジェクト	要求項目	必要時期(年)						期待される効果
		2016	2017	2018	2019	2020	2021	
想定工程(初号機)			▲ デブリ取出し方針決定	▲ デブリ取出し工法確定			▲ デブリ取出し許認可	
臨界管理 〔炉内の水張作業・ デブリ取出し作業〕	U/Pu濃度、Gd濃度、U濃縮度、核種定量 他	○	○ ~ △	○ ~ △	△	△	△	例えば、Gd成分の存在を仮定できれば、 臨界リスク対策の合理化(臨界防止のための 必要なホウ素濃度を低減(8500ppm→6400ppm))により 設備の合理化 が期待でき、また、少数でも実測結果が示せれば、 審査を円滑に進めることが可能。
収納缶 〔収納缶設計〕	U/Pu濃度、Fe,Cr濃度、Cl濃度、密度 他	○	△	△	△	△	△	燃料デブリの成分を把握できれば、 収納缶の構造の簡素化や収納効率の拡大 等の設計の合理化が可能。また、審査を円滑に進めることも期待できる。
デブリ取出し 〔取出し装置と他装置との取合い〕	硬さ、靱性、圧縮強度、発熱量 他	△	△	△	×	×	×	硬さのデータがあれば、幅広い範囲をカバーする複数の方式の掘削装置の開発が不要となり、 設備、装置の合理的に寄与 し、開発コストを抑えられる可能性がある。

○: 必要(重要度大)、△: 望ましい、×: 参考(デブリ取出し作業に支障なし)

2.3.1 (3) サンプルング実施項目の整理

■ 目的(確認事項)

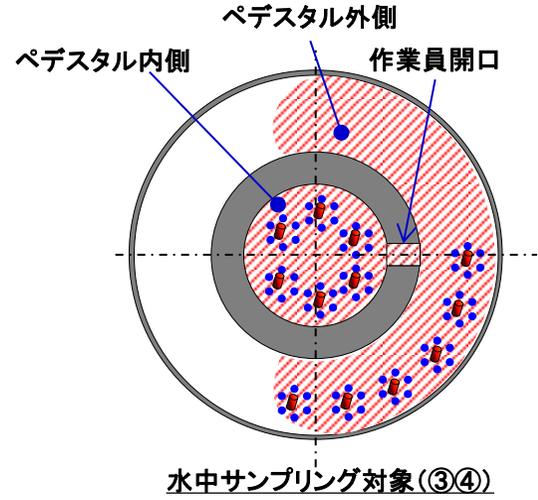
➢ 各サンプルングシステムの検討に際し、条件設定が必要なため、サンプルング実施項目を設定する。

■ サンプルング実施項目

- ペDESTAL内/外、気中/水中で4つの範囲がサンプルング対象(下図①~④)
- サンプル形態は粉状および円柱状の2種類

■ サンプルング設計条件

- サンプルの採取箇所・個数を暫定(デブリ分布調査結果により見直し)
[粉状サンプル数は100個以上、必要に応じ追加採取も可能]
- サンプルの寸法・重量を暫定(計測装置や切削要素試験により見直し)
- RPV直下、ペDESTAL外のプラットフォームに開口を仮定・設定
- サンプルング間隔(0.5m以上)を設定 (臨界管理の観点から妥当性を確認)
- 作業時間を設定(粉状サンプルは1時間/個、円柱状サンプルは6時間/個)



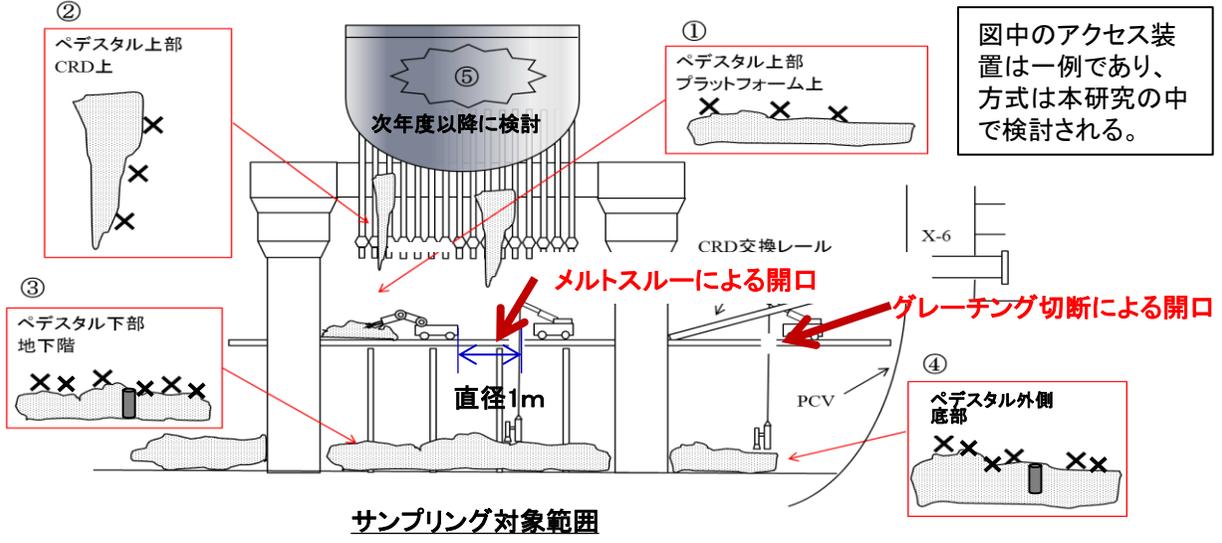
■ 実施項目は、水中の粉状サンプルングを最優先とし、それに続き水中の円柱状、気中の粉状の順とする。

サンプルの寸法・重量(暫定)

形態	寸法・重量
粉状サンプル : x	10mg ~ 1g
円柱状サンプル :	100g程度 φ10 × L100mm

サンプルング個数

サンプルング対象	粉状サンプル	円柱状サンプル
① (気中)	3個 × 6箇所	0
② (気中)	3個 × 6箇所	0
③ (水中)	6個 × 6箇所	1個 × 6箇所
④ (水中)	6個 × 6箇所	1個 × 6箇所
サンプル数	108個	12個



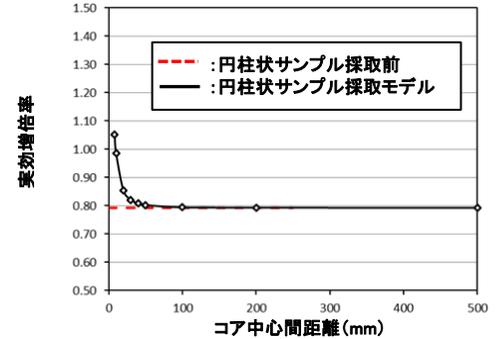
2.3.1 (4) サンプルング中の再臨界を防止する等の安全対策

■目的(確認事項)

- サンプルング設計条件の妥当性確認と切削・採取装置への要件を検討する。

■臨界評価

- ひびが入る範囲も考慮した無限体系の**安全側モデル**を用いて、**サンプルング1回当りの反応度添加量を解析**。
- 設計条件「**サンプルング間隔50cm**」では**影響が生じず、妥当性を確認**。
- 併せて**臨界管理対策案**として以下設備を**要求事項**として策定。

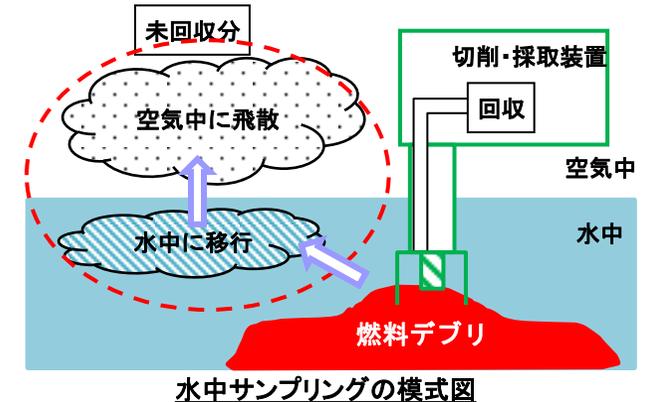


サンプルングに伴う反応度変化

臨界管理対策案	サンプル切削量制限 サンプルング間隔制限	溶解性／非溶解性 中性子吸収材	臨界近接監視 システム	備考
臨界防止(PS)	○	△	△	△は規制要求の場合のみ実施
臨界時影響緩和(MS)	—	○	○	

■放射性物質放出量評価(閉じ込め)

- PCVは微正圧(ガスリークあり)、水処理系は濾過システム経由で循環(有意なリークなし)の**暫定条件**で解析。
- 「**水中の未回収量10mg/h以下**」を暫定要求として算定。気中では**0.008mg/h以下**との暫定評価結果なるも、**精緻な解析が必要**。



方法	放射能濃度の制限値	未回収分の制限重量*1
気中サンプルング	全面マスクの着用基準濃度	8.1E-03[mg/h]
水中サンプルング	全面マスクの着用基準濃度	1000[mg/h]
	水処理設備の入口のPu-238放射能濃度	10[mg/h]

*1 燃料デブリ取り出し時はPCV内の負圧化(雰囲気リークなし)等の対策を行うため、未回収量の制限重量は大幅に改善される。

■検討課題

- 解析条件・判断基準の規制側意向確認、臨界対策案の技術開発工程、評価の精緻化・高度化 等

2.3.2 (1) 切削・採取装置(1/2)

(i) 目的(確認事項)

条件設定した作業時間内での切削及び未回収量制限内での回収が実現できることを確認する。

(ii) 粉末・円柱状サンプルの切削

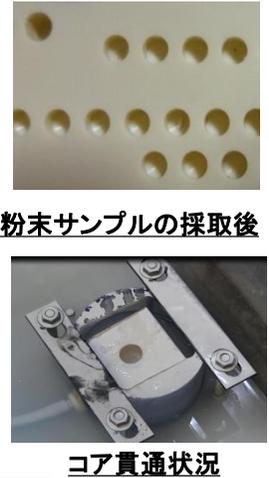
■試験条件

- 切削供試材は、デブリの想定硬さ(5.9~24)を考慮して、アルミナ、ジルコニア、鉄を選定
- 切削工具は、市販品で小径、高耐久性、多用途な工具を選定

■粉状サンプルの要素試験(目標1000mg)

いずれも押付力は10kgfで切削

	供試材	アルミナ(硬さ17.5)	ジルコニア(硬さ10.7)	鉄(硬さ2.5)
切削工具	A: 電着ダイヤモンドドリル	約 800mg	約2500mg	約 150mg
	B: ダイヤモンドコーティングドリル	約4100mg	約5000mg	約 400mg
	C: 焼結ダイヤモンドドリル	約 800mg	約 400mg	約3800mg
	D: 電着ダイヤモンドバー(側面方式)	約 51000mg	約 35000mg	約90000mg
	平均粒径	4.2μm	4.6μm	34.1μm



■円柱状サンプル要素試験結果(目標100mm)

	供試材	アルミナ(硬さ17.5)	ジルコニア(硬さ10.7)	鉄(硬さ2.5)
切削工具	A: ダイヤモンドビット(単層)	2.6~2.7mm	0.5mm	0.5mm
	B: メタルビット	0mm	0mm	9.0mm(板貫通)
	C: ボンドビット(多層)	—	100mm(板貫通)*	約20~30mm*



*: 押付力30kgf以上。それ以外の押付力は、10~13kgf

■評価結果

- 粉末サンプルは切削可能。条件次第で円柱状サンプルもジルコニア、アルミナは切削可能。

■検討課題

- 切削・採取装置の試作機による性能確認の実施、コアサンプリングの性能向上。

2.3.2 (1) 切削・採取装置(2/2)

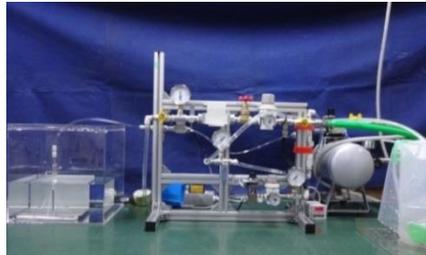
(iii) 粉末サンプルの採取(回収)

■試験条件

- 採取模擬粉体:市販の鉄粉 3 μ m、30 μ m※
- 粉体の投入量:350mg (フィルター底部に2mm堆積する量)
- フィルタ:メッシュ 1 μ m (市販の金属製最小ろ過度を選定)
- **水中環境下で実施**

■回収の要素試験(暫定目標 10mg/h以下)

模擬粉体粒 径(μ m)	採取量(mg)			未回収量(mg)
	底部	側部	全体	
30	320	10	330	20 (94%)
3	90	60	150	200 (43%)



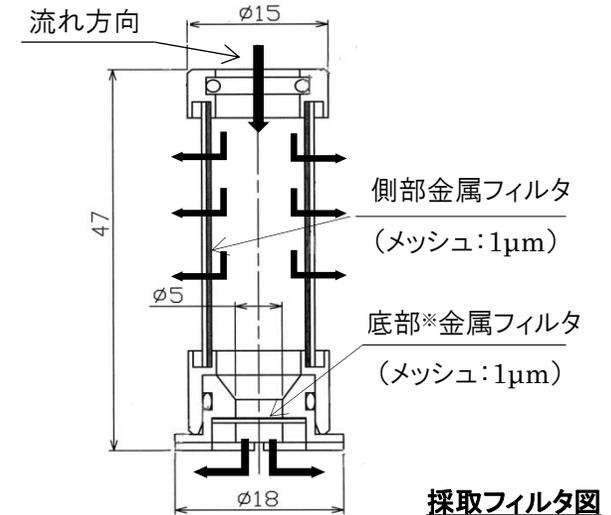
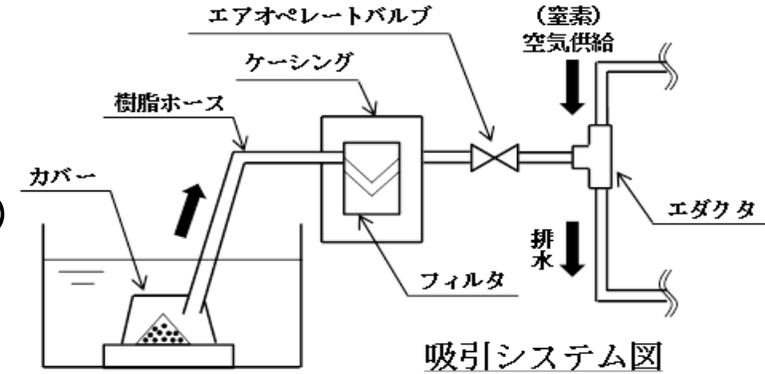
試験装置外観



採取フィルタ(粉体回収時)

()内は回収率を示す

※切削した粒径から選定



※計測装置に使用するのは金属 フィルタの底部のみ

■評価結果

- エダクタを用いた**水中吸引システムによる粉体の採取は可能**。
- 粒径が小さいと目詰まりして採取量は低い。**粒径とフィルタ面積の最適化の検討が必要**。

■検討課題

- 切削・採取装置の試作機による性能確認(最適工具の選定を含む)の実施。
- 気中での**粉末サンプル採取における高効率回収装置の概念構築が必要**。

2.3.2 (2) アクセス装置 (1/4)

(i) 目的(確認事項)

X-6ペネのスペース制約及びアクセス要求範囲を満足するアクセス装置の実現性を確認する。

(ii) アーム型【核融合実験装置JET等に導入実績あり】

■基本機器構成

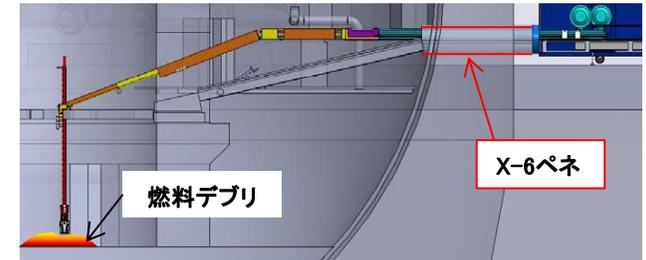
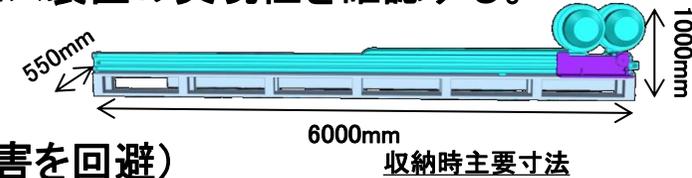
- 多関節アーム+伸縮アームを採用(空中移動で段差などの障害を回避)
- サンプリングセル内に直動式トロリーシステムを具備

■基本仕様

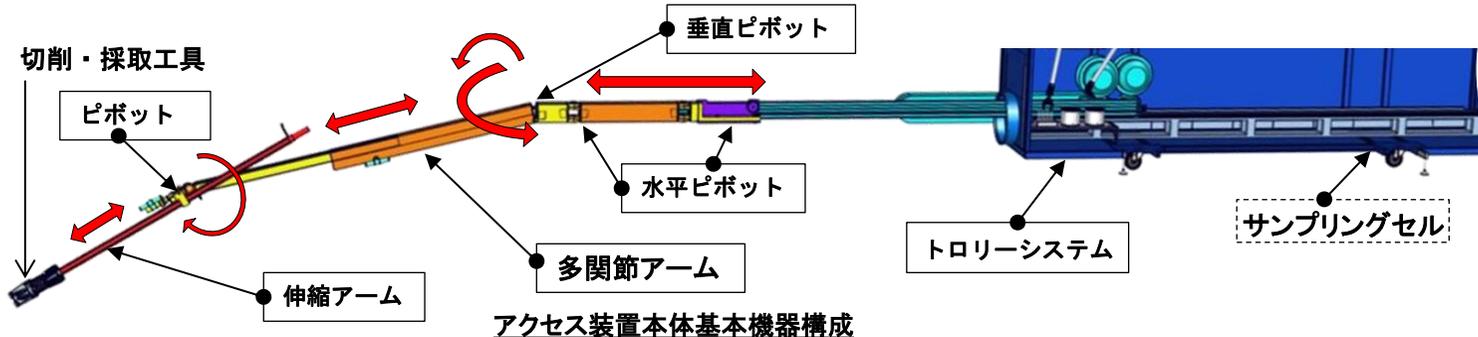
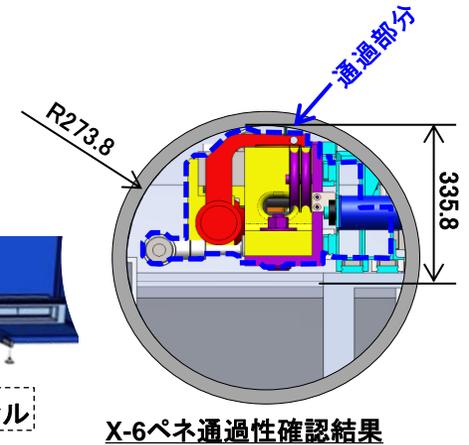
- 多関節アーム
 - ・駆動方式 ;耐磁性モータ駆動方式
 - ・単体質量 ;約500kg(アーム可動部分)
- 伸縮アーム
 - ・駆動方式 ;スライド機構と傾動機構の組合せ
 - ・可搬荷重 ;40kg(先端工具質量)
 - ・許容反力 ;約50kgf

■検討課題

- アクセス範囲を広げる関節構造の最適化が必要



アクセス装置伸長状態



アクセス装置本体基本機器構成

2.3.2 (2) アクセス装置 (2/4)

(iii) 遊泳式ROV型【セラフィールドで導入実績あり】

■基本機器構成

- 気中／水中で走行式／遊泳式ROVを適用

■基本仕様

➢ 走行式ROV

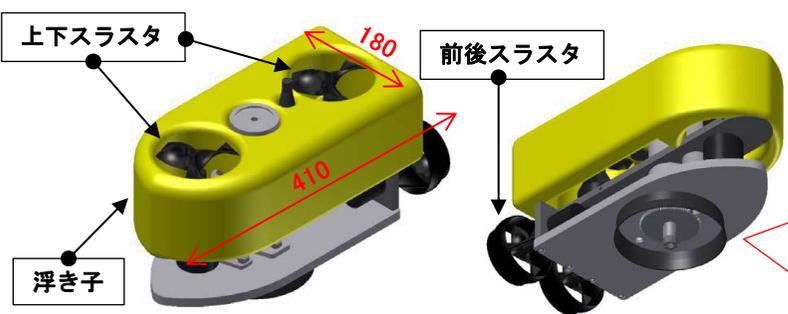
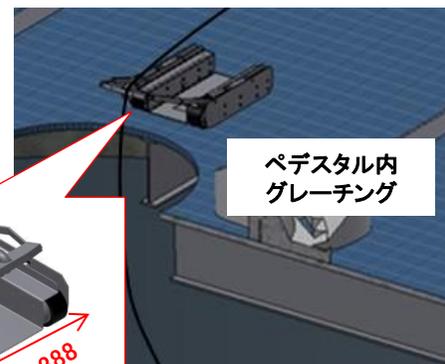
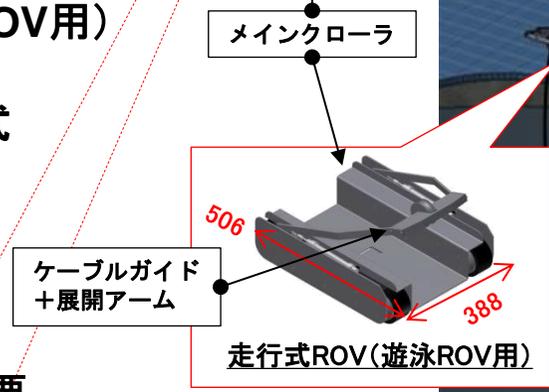
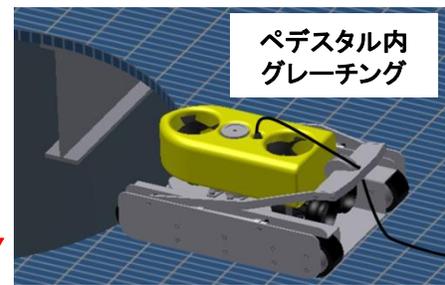
- ・走行方式 ; 耐放性モータ駆動クローラ走行方式
- ・クローラ構成 ; メインクローラ2系統
- ・可搬荷重 ; 10kg
- ・単体質量 ; 約35kg(気中用)、約20kg(遊泳ROV用)

➢ 遊泳式ROV

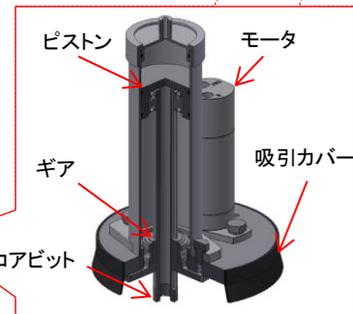
- ・走行方式 ; 耐放性モータ駆動固定スラスト方式
- ・スラスト構成 ; 前後方向2系統、上下方向2系統
- ・可搬荷重 ; 2~4kg程度
- ・単体質量 ; 7kg(水中で浮力中性化)

■検討課題

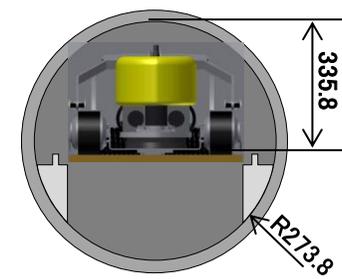
- 遊泳ROVと切削・採取工具の一体構造最適化が必要



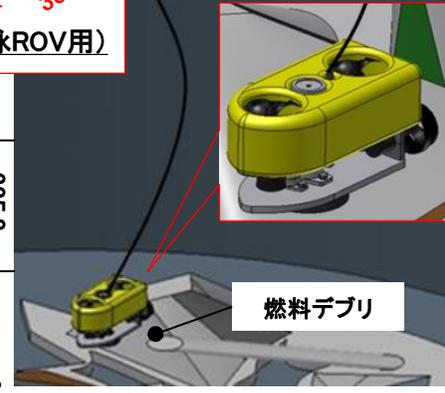
水中サンプリング用遊泳式ROV [吸引カバーと上下スラストで吸着]



切削・採取工具概念



X-6ペネ通過性確認結果



アクセス装置アクセス状態

2.3.2 (2) アクセス装置 (3/4)

(iv) 自走式ROV型

■基本機器構成

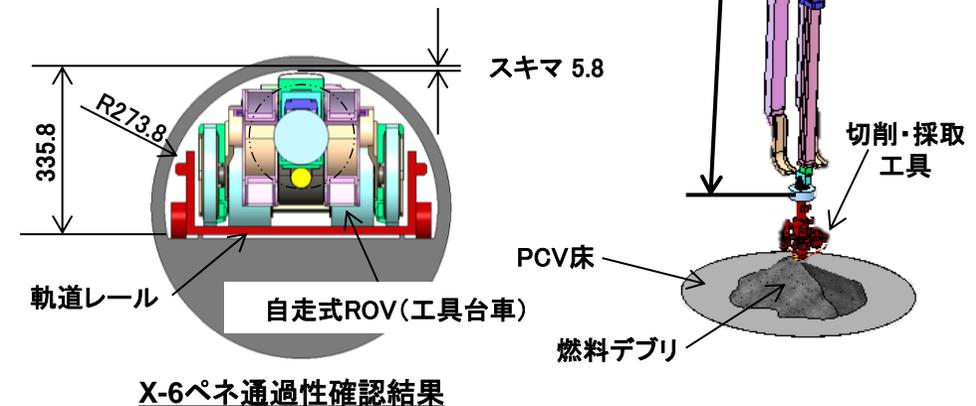
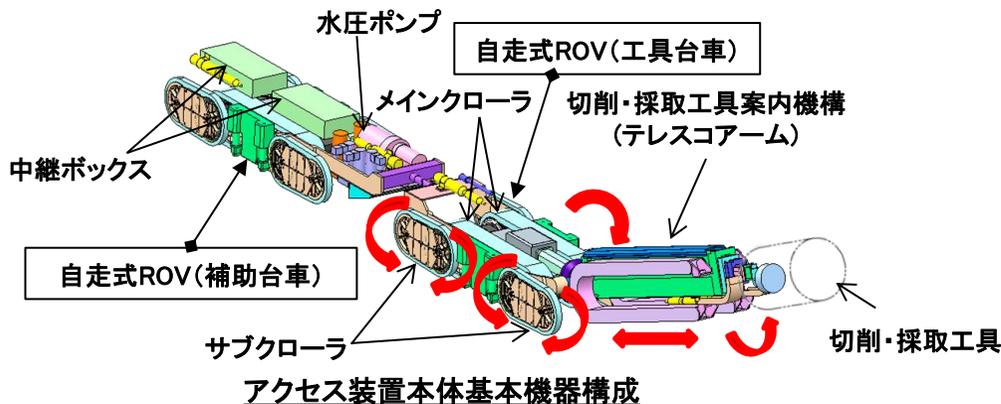
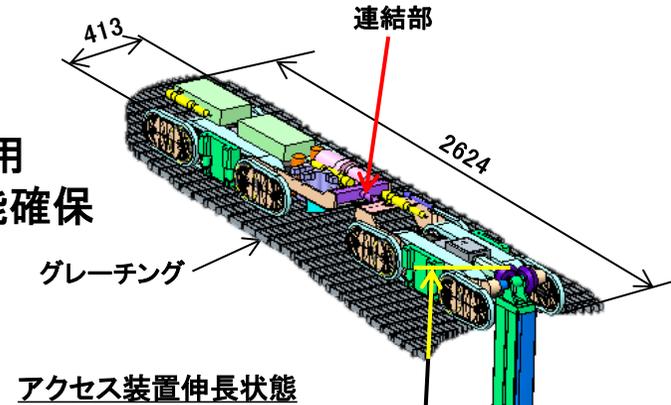
- 重心バランスの良い2連台車(工具台車+補助台車)方式を採用
- メインクローラ+サブクローラ採用により優れた段差乗越え性能確保
- ペDESTAL内・外用でアクセス装置を共用

■基本仕様

- ・ROV構成 ; 工具台車と補助台車の2連結構成
- ・走行方式 ; モータ駆動クローラ走行方式
- ・クローラ構成 ; メインクローラ2系統×2台, サブクローラ4系統×2台
- ・可搬荷重 ; 70kg(テレスコーム先端で10kg)
- ・許容反力 ; 約35kgf
- ・単体質量 ; 約110kg(工具台車) 約90kg(補助台車)

■検討課題

- 更なる小型化と2連自走式台車のPCV移動性の確認が必要



2.3.2 (2) アクセス装置(各方式の比較)(4/4)

(v) 各方式概念の技術的比較 [◎:良好 ○:良い △:課題あり]

技術的な観点での評価項目	アーム型	遊泳&走行ROV型	自走式ROV型
ペイロード	◎ 大(約40kg)	△ 小(約4kg)	○ 中(約10kg)
アクセス範囲	△ やや狭い	○ 広い	△ やや狭い
走行面の影響	◎ 影響なし	△ 影響あり	○ やや影響あり
大型構造物の干渉	△ 回避が難しい	○ 回避が容易	△ 回避が難しい
操作性(位置精度)	○ 良い(高い)	△ やや難(目視レベル)	△ やや難(目視レベル)
工具(反力)の保持安定性	◎ 高い	△ 不安定	○ 良い
付帯作業(グレーチング切断)	○ 良い	◎ 不要	○ 良い
保守性	◎ 先端工具のみ交換要	△ ROV本体の交換要	△ ROV本体の交換要
故障時回収性	○ 回収性有り	△ 近距離ならウインチ回収	△ 近距離ならウインチ回収
耐放性	○ 問題ない見通し	○ 問題ない見通し	○ 問題ない見通し
セル設計へのインパクト	△ 大(サイズ、重量)	◎ 小	△ 大(サイズ、重量)

(vi) 評価結果

- 予想性能が見極められ、いずれも成立性が見通しを得たが、各方式に一長一短あり。
- 現時点では、**アーム型が有力候補**なるも、アクセス範囲向上が不十分な場合は遊泳型ROVが次点

(vii) 検討課題

- 構造の最適化を行い、アクセス性向上が望まれる。
- 切削・採取装置の試作機結果やデブリ分布情報をもとに、最終選定を行う必要がある。

2.3.2 (3) U, Pu計測装置(X線計測)(1/2)

- ※1: 厚さ換算で20~2000 μm
- ※2: 総合分析精度10%を満足するために $\pm 25\%$ を試験条件とする
- ※3: 傾斜 = $(b-a)/(2 \times \text{平均値})$

(i) 目的(確認事項)

- 溶解液中のサンプルの定量分析に使用されるX線計測方法(K吸収端分析、蛍光X線分析)を固体試料(粉状サンプル)に適用すべく、シミュレーションによる性能評価を行い、その成立性を検討する。

(ii) K吸収端分析(KED)のシミュレーション評価

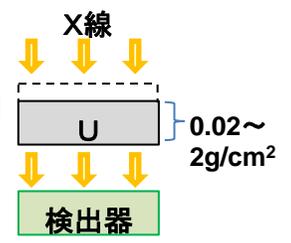
- KEDによるUの定量分析性能をシミュレーションで評価した。
- 溶液の実測データと比較し、推定した性能は以下の通り。

①U量計測可能範囲

- ✓ 0.02~2g/cm² (UO₂単独)^{※1}で計測可能
- ✓ $\phi 8\text{mm}$ フィルタの回収UO₂換算量は、約0.5g

①U量計測可能範囲評価結果

U量(g/cm ²)	2.0	0.6	0.2	0.02
測定誤差(%)	4.0	3.1	0.0	-9.2
判定	○	○	○	△



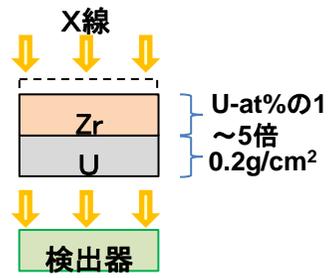
①U量計測可能範囲評価モデル

②不純物の影響

- ✓ 共存するZr等の不純物の影響が少ない

②不純物の影響評価結果

Zr量(at%比U)	5	4	2	1
測定誤差(%)	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
判定	○	○	○	○



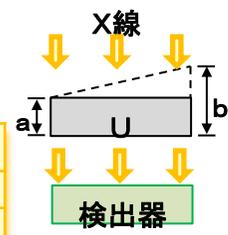
②不純物の影響評価モデル

③サンプル表面の傾斜

- ✓ サンプル厚さに対して $\pm 25\%$ 以下なら影響が少ない

③サンプル表面の傾斜評価結果

傾斜(%) ^{※3}	60	40	25	5
測定誤差(%)	-13.0	-7.7	-1.0	0.1
判定	×	△ ^{※2}	○	○



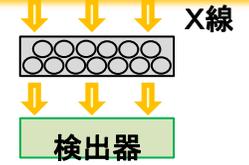
③サンプル表面の傾斜評価モデル

④粉末粒径の影響

- ✓ 粉末粒径が100 μm 以下で、粒径の影響が少ない

④粉末粒径の影響評価結果

粒径(μm)	0.1	1	10	100	1000
測定誤差(%)	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-28.0
判定	○	○	○	○	×



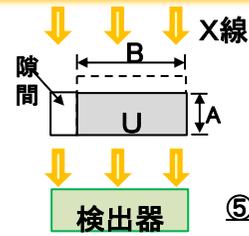
④粉末粒径の影響評価モデル

⑤空隙率の影響

- ✓ 空隙率が10%以下で、影響が少ない

⑤空隙率の影響評価結果

空隙率(%)	0	10	20	30
測定誤差(%)	0	-8.6	-18.3	-29.3
判定	○	○	×	×



⑤空隙率の影響評価モデル

2.3.2 (3) U, Pu計測装置(X線計測) (2/2)

(iii) 蛍光X線(XRF)のシミュレーション評価

- Uの蛍光スペクトルを基準にPu、Cm^{※1}、Gd^{※1,※2}の相対強度をシミュレーションにて評価し、分析に十分な強度を有することを確認した。

※1:中性子計測における補正用データとして活用する。

※2:臨界管理PJからの要求により、オンサイト計測を検討する。

- エネルギーが小さいGdは試料厚さによる影響を受ける。

(iv) 評価結果

- シミュレーション評価から、フィルタに回収した**デブリ粉末サンプルのU, Pu量は計測可能と確認**。
- KED計測により、以下の条件下で**分析精度10%程度でUを計測できる見込みである**。

厚さ:20~2000 μm (UO_2)、表面傾斜:25%以内、粒径:100 μm

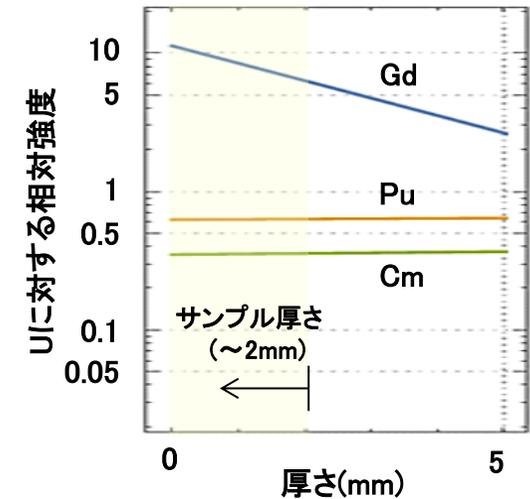
(1~2mm厚さ)、空隙:10%以下

- XRF計測により、**Pu, Gd, Cmの計測は可能**。但し、Gdは、サンプル厚さにより、スペクトル強度が変動するため、補正技術の検討が必要。
分析精度は、KED計測と同程度と推定される。

(v) 検討課題

- スキャン機能による補正やサンプルの前処理(平坦化等)等による分析精度の向上
- 試作機、模擬試験体での実測データ(コールド、ホット)による性能評価の実施

注) U (98.4keV)、Pu(103.8keV)
Cm(109.3keV)、Gd(43.0keV)

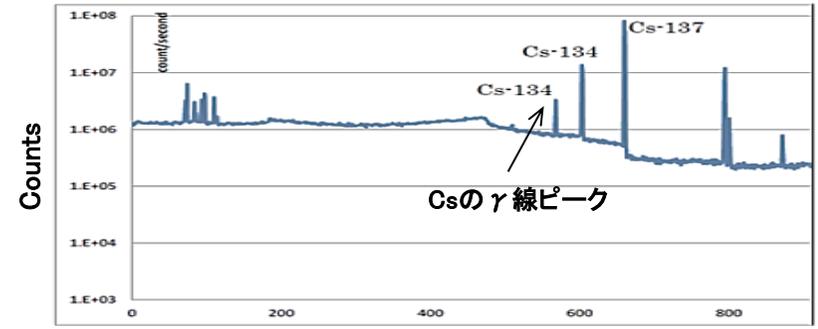


各元素の相対強度と試料厚さの関係

2.3.2 (3) U, Pu計測装置(中性子計測) (1/2)

(i) 目的(確認事項)

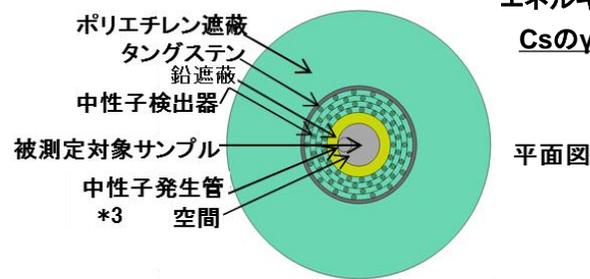
- 円柱状サンプルに対してはX線が透過しないため、中性子計測方法(γスペクトル測定、パッシブ中性子計測、アクティブ中性子計測)の適用性をシミュレーションにより性能評価し、その成立性を確認する。なお、燃料デブリの場合、燃焼度が不明、組成が不明確であり、対応できる中性子計測装置が必要となる。



エネルギー(keV)
Csのγ線スペクトルのイメージ図

(ii) γ線スペクトル測定シミュレーション評価

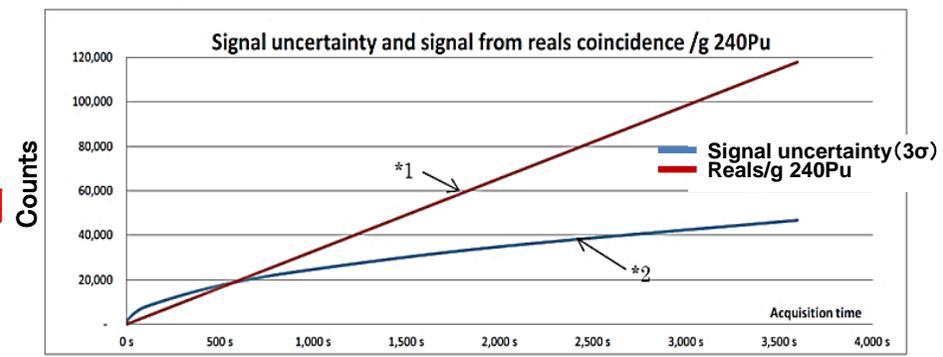
- モデルを構築しシミュレーションの結果、最大燃焼度65GWd/tの燃料にて燃焼度指標核種であるCs-134, Cs137のピークを確認。
- Csのピーク比をもとに、ORIGENにより **U/Pu組成比が同定可能。**



*3 アクティブ中性子計測時のみ使用
中性子計測装置のイメージ図

(iii) パッシブ中性子計測シミュレーション評価

- サンプルと減速材、検出器の測定体系をモデル化。
- 同時発生する中性子を計測することで**Pu-240が計測可能**。但し、Cmから放出されるバックグラウンド中性子計数が多いと両者の識別が困難。
- 識別に必要な計測時間は燃焼度により異なるが、最大1時間あれば識別可能。

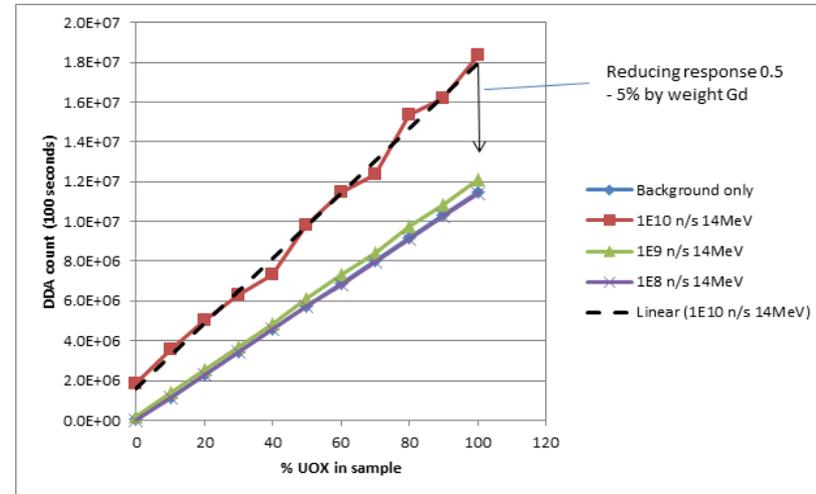


時間(s) *1: Pu-240 同時計数値 *2: Cm-244 計数値の3σ
パッシブ法によるCmの影響

2.3.2 (3) U, Pu計測装置(中性子計測) (2/2)

(iv) アクティブ中性子計測のシミュレーション評価

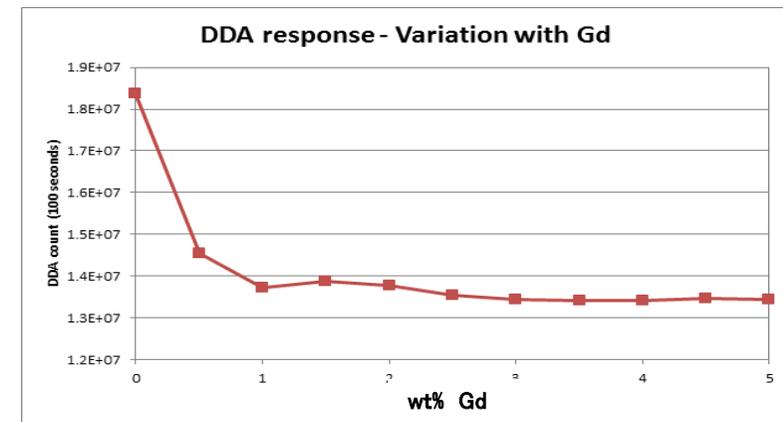
- 中性子照射量をパラメータにシミュレーションし、 $1.0E+10n/s$ 程度が必要な照射条件であることを確認
- 炉内構造物(Fe, Ni, Cr)とUOXの存在量の組合せで数%以内の誤差で直線性が得られることを確認
- 中性子吸収材(Gd, B, Hf)の影響を評価し、B, Hfの影響は無視できるが、Gdは1.0wt%以下の範囲で影響があることが判明。精度向上のため、**他の計測法でGd量を算出し、計測値を補正**することが必要。
- 蛍光X線分析により得られるGd量にて補正する等の対応が必要なものの、円柱状サンプルの**U-235, Pu-239, 241の核分裂性物質(Fissile量)**が評価可能。



必要な照射条件

(v) 評価結果

過去の固体廃棄物の計測技術・実績を基にしたシミュレーション結果から、**円柱状サンプルのU, Pu量は可能と確認し、その分析精度は30%程度^{*1}と期待できる。**



Gdの影響

(vi) 検討課題

- サンプル組成(コンクリートの影響)の多様化、MOX燃料デブリの影響評価
- 試作機、模擬試験体での実測データ(コールド、ホット)による性能評価の実施

*1: 各計測誤差から推測した値

2.3.2 (4) サンプルセルの概念検討(1/2)

■目的(確認事項)

- 開発要素の有無を確認するため、サンプリングに必要な関連構成機器を組合せたサンプリングセルの概念を構築し、課題を整理して成立性を確認する。

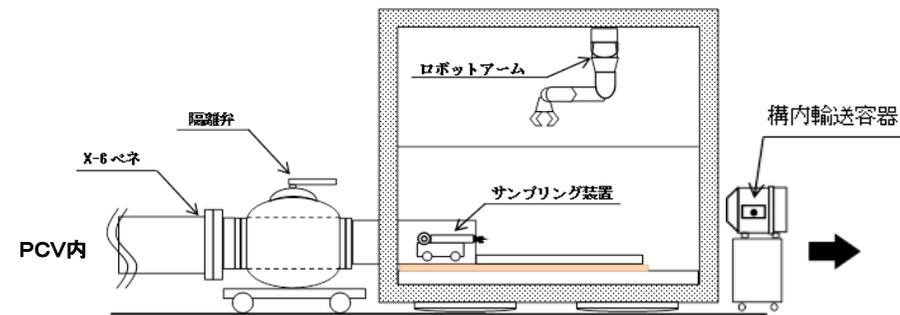
■機能要求

- 主機能は、**PCV内からのデブリ試料の受入れ、構内輸送容器へ詰め替えての中間セルへの移送**
- 安全性機能も考慮して、サンプリングセルに要求される以下の機能を整理

①放射性物質の閉じ込め機能(圧力管理)	②遮蔽機能
③アクセス装置の取扱い・保守作業	④臨界防止対策の設備対応
⑤X-6ペネとの取合い	⑥自動化による作業員の被曝低減
⑦現場環境を考慮した設置・据付方法	⑧構内輸送容器との取合い

■設計方針

- 多重性
 - ✓ 送風機、窒素製造装置等動的機器は必要に応じて多重化。
- 異常時の対応
 - ✓ 外電喪失時、サンプリングセルに窒素供給が困難な場合には、給排気系の隔離弁を閉とし内部雰囲気は漏れ出ないようにする。
- 圧力管理
 - ✓ **PCV<サンプリングセル<パネルハウスの順に圧力を高くする。**
 - ✓ 各境界部に設置されたシール部等からの万が一のリークに対しても、外からPCV側への流れを形成。



サンプリングセルの概要

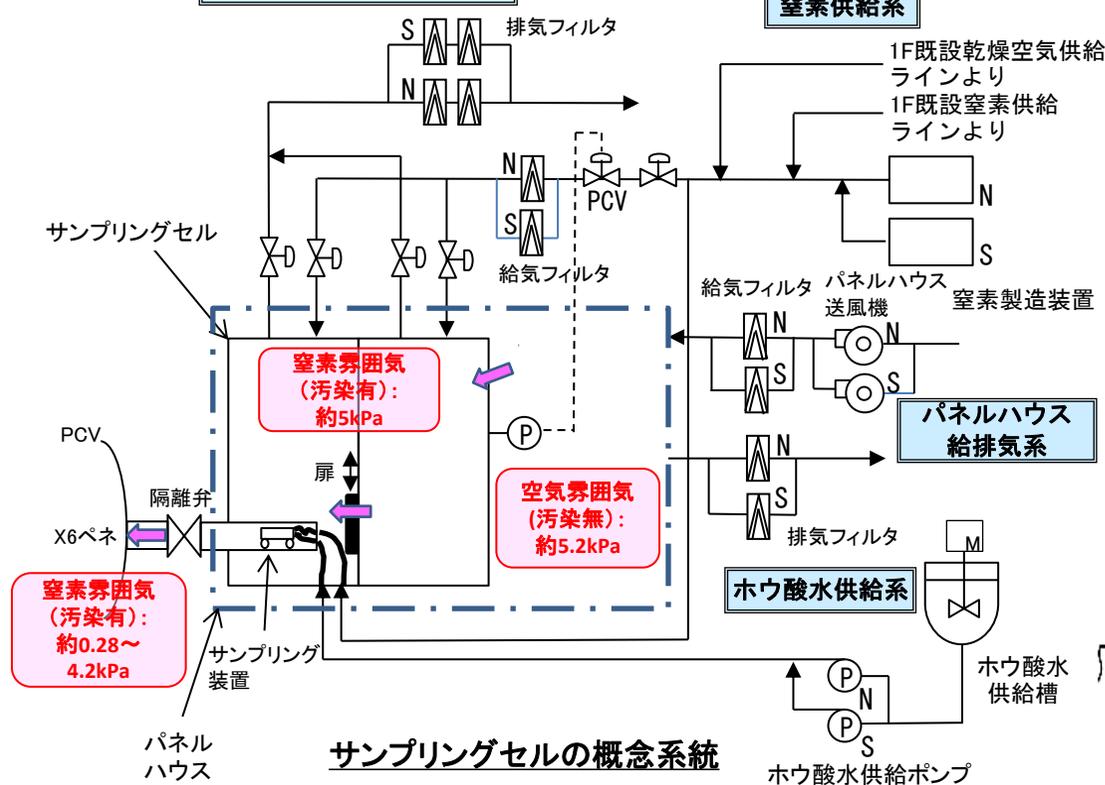
本概念図は、サンプリングセルのイメージを示したものであり、アクセス装置やハンドリング機器等は今後の評価の上、確定されるものである。

2.3.2 (4) サンプルセルの概念検討(2/2)

■ 系統概念の検討結果

- 多重性、異常時の対応を配慮
- シール部等からの放射性物質の漏洩の防止のため、PCV側への流れを形成し、**圧力管理**を実施

■ サンプルセル給排気系



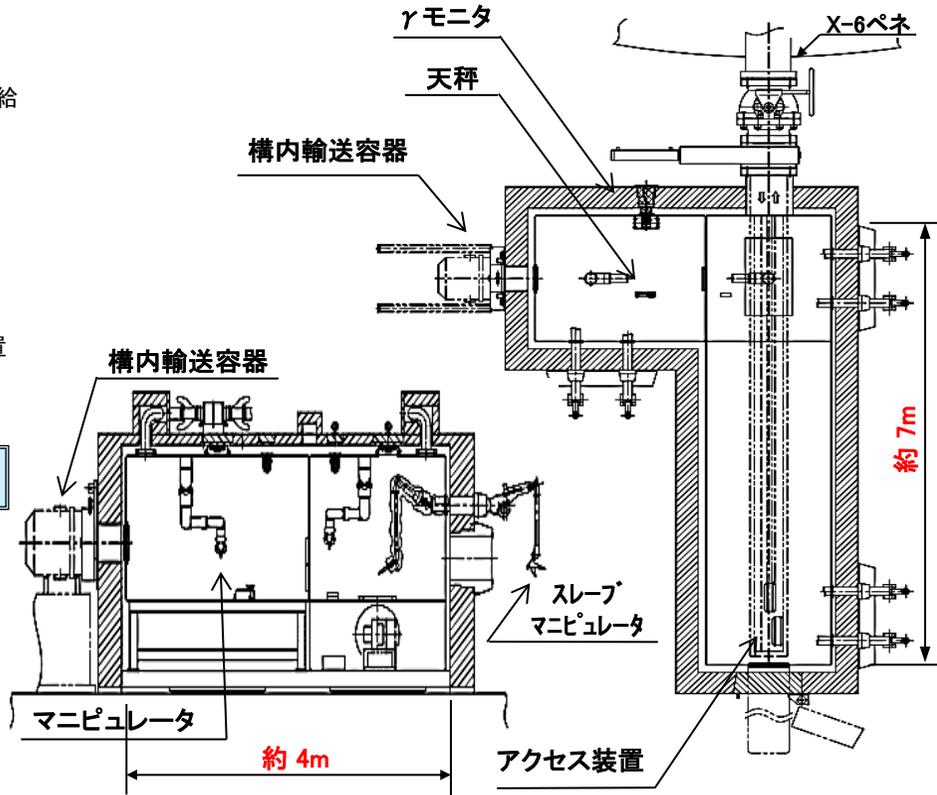
サンプリングセルの概念系統

■ 評価結果と検討課題

- 特に大きな開発要素が無いことを確認。
- アクセス装置の選定結果を反映したセル構造の詳細検討と規制要求確認結果の反映。

■ 構造概念の検討結果

- アクセス装置の概念検討結果を反映
- 外形寸法は、**約4m×約7m**(アーム型アクセス装置)



本概念図は、サンプリングセルのイメージを示したものであり、設計進捗により見直すものである。

サンプリングセルの概念構造(アーム型)

2.3.2 (5) 中間セルの概念検討(1/3)

■目的(確認事項)

- 開発要素の有無を確認するため、サンプリングに必要な関連構成機器を組合せた中間セルの概念を構築し、課題を整理して成立性を確認する。

■機能要求

- 主機能は、**サンプリングセルからサンプルの受入れ、構外輸送容器へ詰め替え及び輸送前の検査対応**
- 安全性機能も考慮して、中間セルに要求される以下の機能を整理
 - ①放射性物質の閉じ込め機能(圧力管理)
 - ②遮蔽機能
 - ③表面汚染検査および外表面の除染
 - ④構外輸送に関する検査(U, Pu計測等)
 - ⑤アクセス装置の補修
 - ⑥サンプルの一時保管

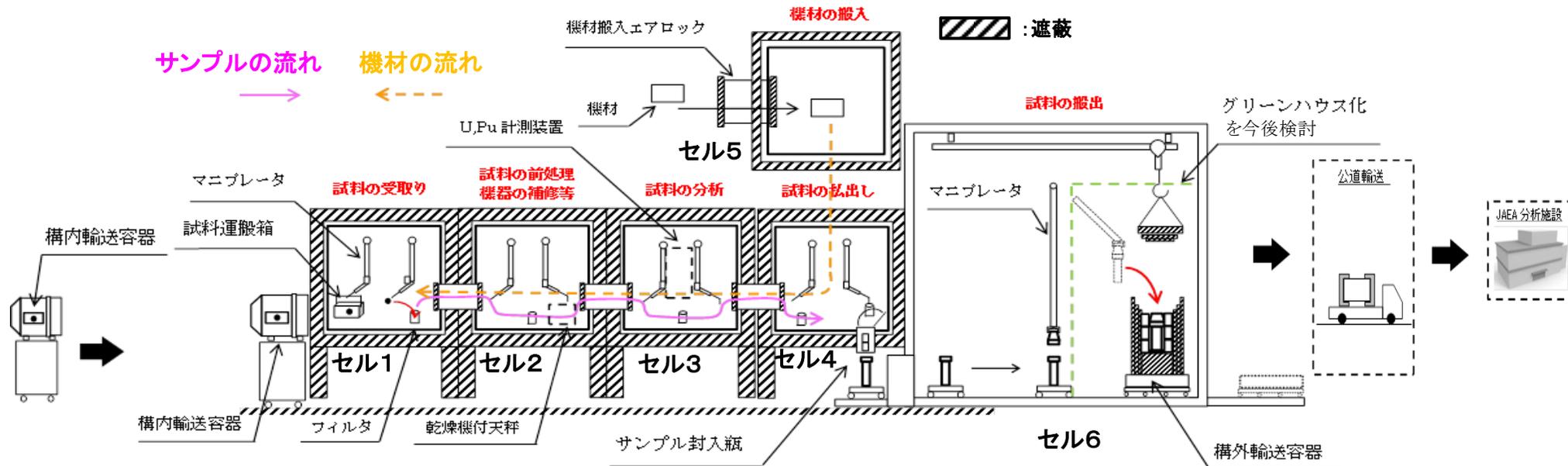
■設計方針

- 多重性
 - ✓ 排風機、排気フィルタは多重化。
- 異常時の対応
 - ✓ 外電喪失時には、非常用電源に接続されたセル排風機の起動により、セル内の負圧を維持。
- 圧力管理
 - ✓ 負圧による放射性物質の閉じ込め機能。
- モジュール化
 - ✓ 各セルは機能毎にモジュール化し、将来の取り替え・転用を考慮。
- 被曝低減
 - ✓ 遮蔽を設置して作業員の被曝低減を図る。

2.3.2 (5) 中間セルの概念検討(2/3)

■設備全体概念の検討結果

- 各セルは、圧力管理のためセル内通路には扉を設けるとともに、マスタースレーブマニプレータを設置(予備機も配慮)。
- セル1では構内輸送容器から試料運搬箱に入ったデブリサンプルを取出し、セル2にて乾燥と重量計測を行う。
- その後、セル3でデブリサンプルに含まれるU, Pu量を計測し、セル4にてデブリサンプルをサンプル封入瓶に詰め、セル6へ搬出する。
- サンプル封入瓶は、セル6にて構外輸送容器に詰められる。
- アクセス装置の補修のため、機材搬入設備(セル5)及び補修エリア(セル2)を準備する。

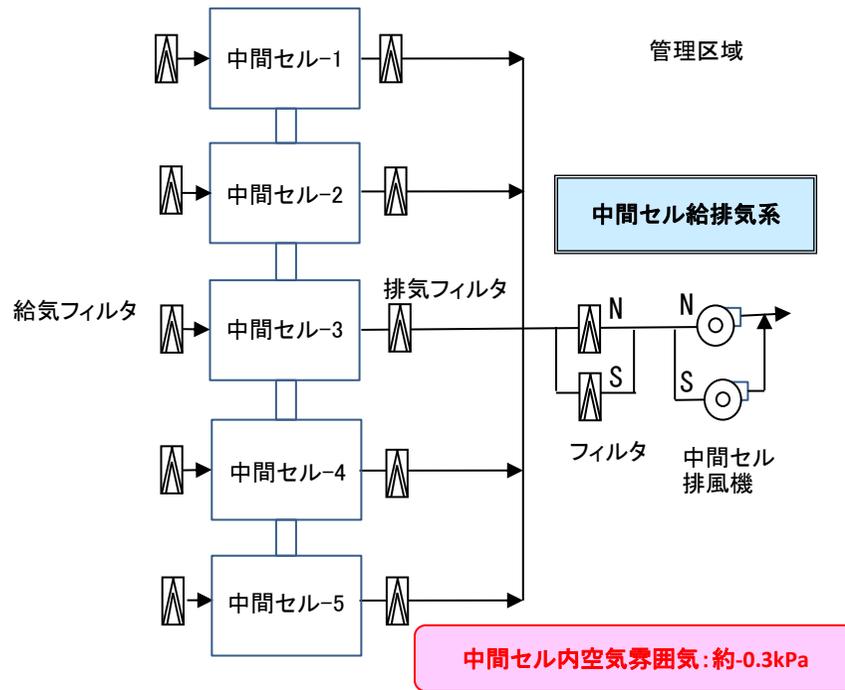


中間セルの概要

2.3.2 (5) 中間セルの概念検討(3/3)

■ 系統概念の検討結果

- 高性能粒子フィルタによる放射性物質の放出低減
- 動的機器の多重性

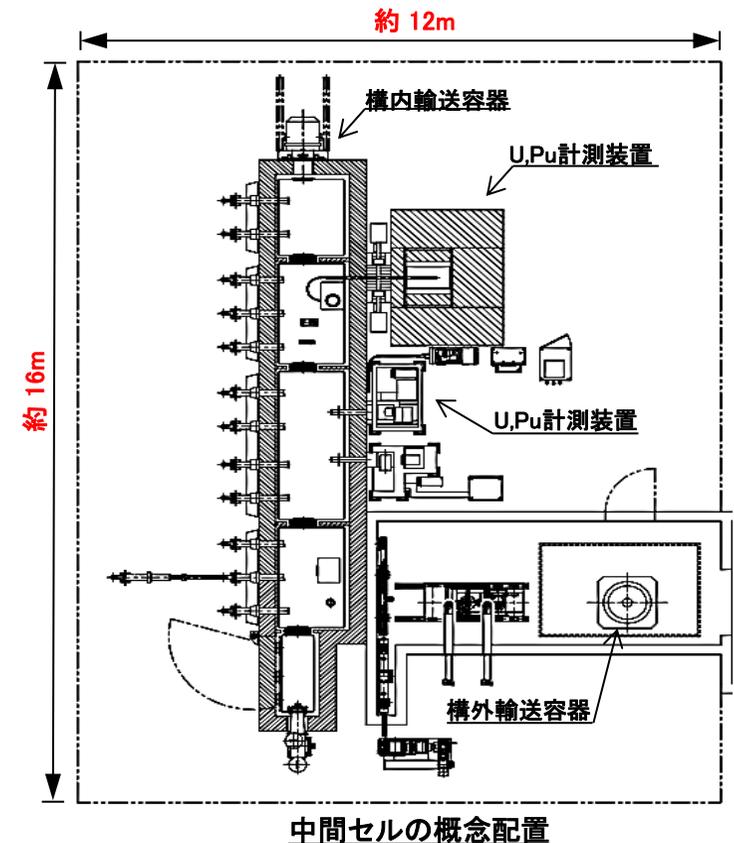


■ 評価結果と検討課題

- 特に大きな開発要素が無いことを確認
- 許認可に係る規制要求(耐震等)の確認が検討課題

■ 構造概念の検討結果

- 設置スペースは、約12m×約16m
- 各構成機器の検討結果や構外輸送容器(性状把握PJ)の取合条件を反映
- 構外輸送に関する検査要求を反映
- 遮蔽厚さは計算より30cm(炭素鋼)に設定



2.3.3 デブリ輸送の評価に必要な項目・技術の精査・検討

■目的(確認事項)

➤ デブリ輸送の評価に必要な項目を調査し、技術の適用性(対応可否)を検討する。

■**デブリの構外輸送に必要な項目を調査**(輸送容器の開発を担当するデブリ性状把握PJとの共同調査)

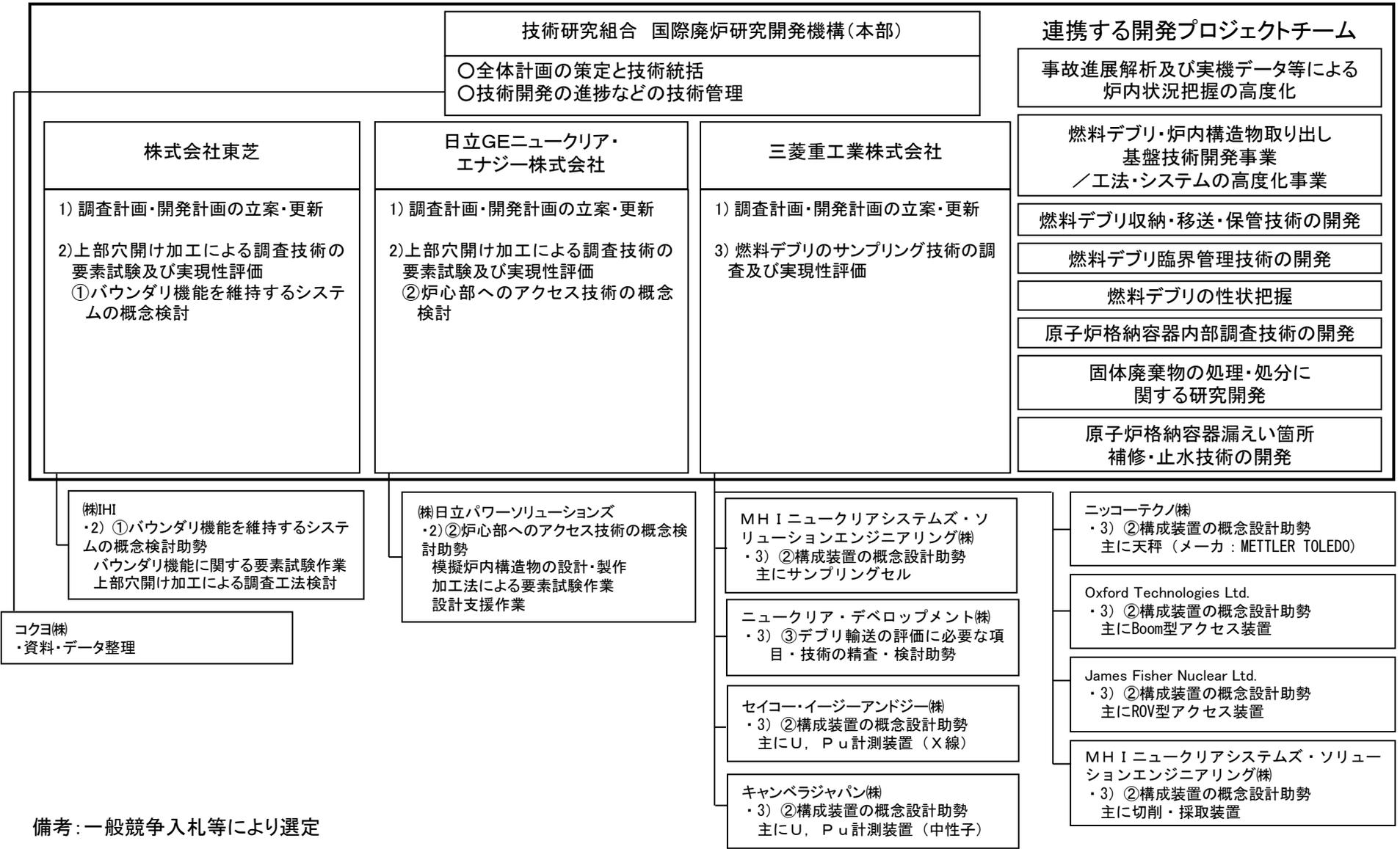
No	検査項目	検査方法及び判定基準	対応可否	補足説明
1	外観検査	輸送物の外観を目視で検査し、表面状況(傷、割れ等)及び形態に異常がないこと。	○	
2	吊上げ検査	容器を吊上げた後、吊上げ金具部の外観を目視で検査し、異常がないこと。	○	
3	重量検査	容器及び収納物の合計重量が7.5トン以下であること。	○	
4	表面密度検査	スミヤ法により輸送物の表面密度を検査し、α核種: 0.4Bq/cm ² 以下、β, γ各種: 4Bq/cm ² 以下。:	○	
5	線量当量率検査	輸送物の線量当量率が表面で2mSv/h以下、1mの距離で100μmSv/h以下であること。	○	
6	未臨界検査	装填時に収納した収納容器に影響を及ぼすような変形、破損等の異常がないこと。	○	
7	収納物検査	収納物の外観、数量等を目視検査する。照射済燃料は、運転記録等により放射能の量、燃焼度、発熱量等を確認する。	■	検査内容は規制側に確認が必要。想定される検査項目は、重量、U, Pu量(同位体量)、主要γ核種量、発熱量、水分量。
8	*1 温度測定検査	輸送物の表面温度を測定し、人が容易に近づくことができる表面で85℃以下であること。	○	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>○: 使用済燃料と同様の検査内容と想定され、対応可能な見込み ■: 従来と異なる対応となるため、規制側との調整が必要</p> </div>
9	気密漏洩検査	0.64MPaG以上の圧力を加え、漏洩率の合計が 3×10^{-2} refcm ² /sを超えないこと。	○	
10	圧力測定検査	輸送物の表面温度を測定し、内圧に換算して設計基準以下であること。	○	
11	計量管理 *2	U, Pu量又は核分裂性物質(Pu239+Pu241+U235)	■	

*1: 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則、 *2: 国際規制物質の使用等に関する規則

■評価結果及び検討課題

- **輸送物の発送前検査に関し、想定される検査項目に対応する計測装置適用により、基本的に対応可能。**
- **収納物検査、計量管理について規制側への早期サウンディング、対応体制構築が必要。**

3. 実施体制



備考: 一般競争入札等により選定

4. まとめ

■ 調査計画・開発計画の立案・更新

- 平成30年度を目標にPCV上部からRPV内部へ到達して調査すること、及び燃料デブリをサンプリングすることを目標としたRPV内部調査計画・開発計画を更新すべく、ニーズの再調査を実施した。
- ニーズ見直し結果、要素試験結果を踏まえて調査計画を見直し、課題を抽出して開発計画を立案した。

■ 上部穴開け加工による調査技術の要素試験及び実現性評価

- 上部穴開け加工による調査システム・工法の概念検討を実施した。また、付帯設備も含めた調査装置全体のシステム設計を実施し、各システム・工法・装置の検討課題を抽出。
- 上部穴開け加工時の代替バウンダリ設備とその設置方法の概念検討を実施した。既設のPCVヘッドと新設するガイドパイプとのシール機構(シール性、制御性)に係る要素試験を実施し、バウンダリ機能に実現性があることを確認した。
- 遠隔、狭隘、複雑形状の炉内構造物(蒸気乾燥器・気水分離器等)の穴開け加工の実現性について、要素試験を実施(非接触加工方法のレーザ切断・プラズマ切断・ウォータージェット切断を対象)し、調査ルート構築の実現性があることを確認した。

■ 燃料サンプリング技術の調査及び実現性評価

- サンプル実施内容と設計条件を設定するとともに、安全要求についても整理を実施。
- サンプルの切削及び回収について要素試験を実施し、成立性を見通しを得たが、切削・採取装置の試作・性能試験が不可欠。
- アクセス装置3種類の概略仕様と得失を評価し、いずれの実現性も確認。切削・採取装置の試作結果を考慮して、アクセス装置を最終選定する。
- U, Pu含有量現場計測技術において、X線計測及び中性子計測とも実現性を見通しを得たが、補正技術等、分析精度の向上が課題。
- サンプリングセル及び中間セルとも概念設計を実施し、実現性を確認。
- 燃料デブリ輸送時許認可要件の調査では、今後、計量管理要否等、規制側への早期サウンディングが必要と確認。
- RPV内サンプリングの実現性評価には、アクセス方法等の固有の概念検討が必要。

4. まとめ

【指示】

デブリ取出し方針の決定や方法の確定のために結局何が言えるのか、試験結果から導かれることを一枚にまとめること。

【回答】

■ 成果の活用

- RPV内部調査Pjでは、デブリ取出しPjや臨界管理Pjなど、関連するPjから調査のニーズを集め、そのニーズに答えるかたちで調査仕様を策定している。RPV内部調査Pjで調査に係る装置など技術開発を進め、その成果で行われるRPV内部調査にて得られる情報は、ニーズに答える形で関連Pjに提供され、関連Pjの活動において活用される計画である。
- 関連Pjでは、現状不明確な箇所、想定・仮定している箇所の情報を直接的に把握することになり、これがRPV内部調査の目的となる。
- 開発時の試験結果は、RPV内部調査の実現に向けた技術開発の成果になり、実現に向けた課題の一つ一つを解決している過程にあると言える。

■ 今後の展開

- 今後も、最新の調査ニーズ、現場状況、要素試験結果などから調査計画・開発計画を逐次更新し、開発に反映させてゆく。今後、要素試験や概念設計を進める段階で抽出される技術などについても、開発計画に反映させてゆく。