

燃料デブリ取り出し工法の検討状況

2017年9月13日
日本原子力学会
水化学部会企画セッション
@北海道大学

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)
高守 謙郎

この成果は、経済産業省/廃炉汚染水対策事業費補助金の活用により得られたものです。

無断複製・転載禁止 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

ご紹介の内容

- 1. 燃料デブリ取出し工法**
2. 安全要求と安全システム

燃料デブリ分布の推定

ミュオン測定結果

1号機

- 炉心域に大きな燃料の塊はなし
(原子炉圧力容器底部の測定はなし)

2号機

- 原子炉圧力容器底部に燃料デブリと考えられる高密度の物質を確認
- 炉心域にも燃料が一部存在している可能性あり

3号機 (速報)

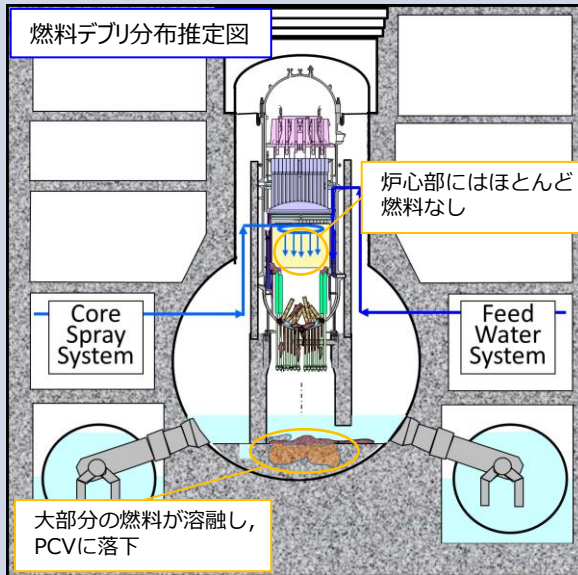
- 現時点での評価では、原子炉圧力容器内部には一部燃料デブリが残存する可能性はあるものの、大きな高密度物質の存在は確認できていない。
(継続測定・詳細評価中)

↓ 結果を燃料デブリ分布の推定に反映

↓ 結果を燃料デブリ分布の推定に反映

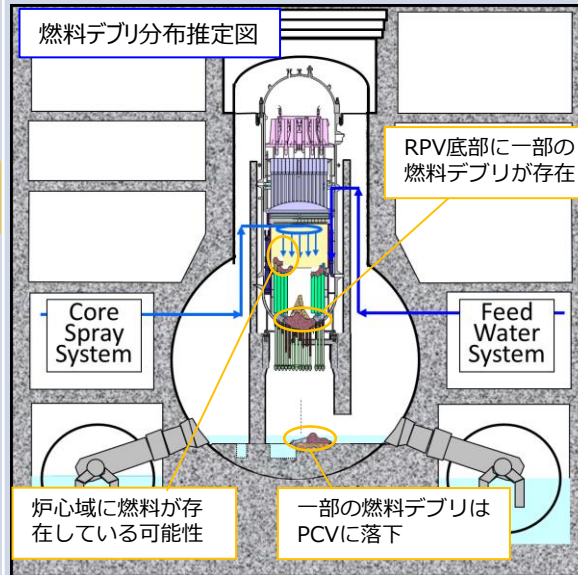
↓ 今後、格納容器内部調査やミュオン測定などで得た知見を燃料デブリ分布の推定に反映予定

1号機



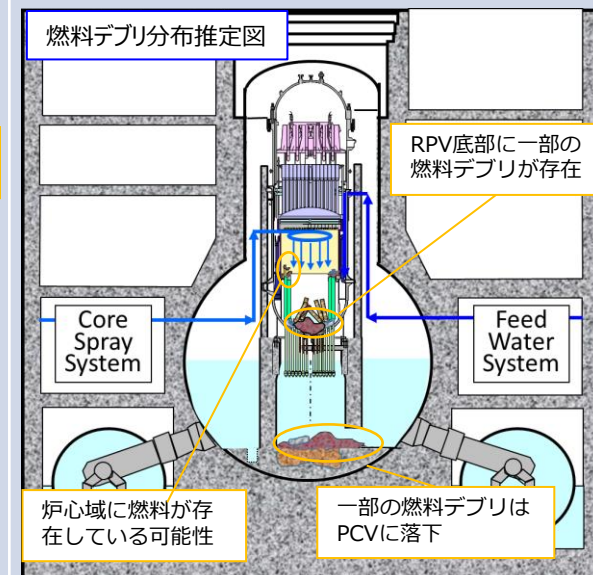
- 溶融した燃料がほぼ全量が格納容器に落下し、元々の炉心部にはほとんど燃料が存在しない

2号機



- 溶融した燃料のうち、一部は原子炉圧力容器下部プレナムおよび格納容器へ落下し、燃料の一部は元々の炉心部に残存
- 3号機は2号機よりも多くの燃料デブリが格納容器に落下していると推定

3号機



現状の燃料デブリ分布の推定 (※)

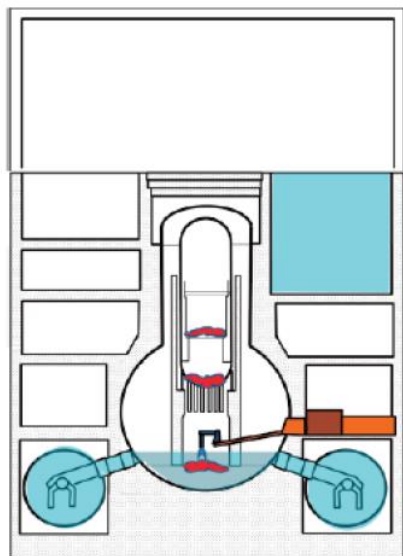
※ 「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）」(IRID, IAE)
第2回福島第一廃炉国際フォーラム講演資料より抜粋 (<http://ndf-forum.com/program/day2.html>, 2017年7月3日)

燃料デブリ取り出し工法

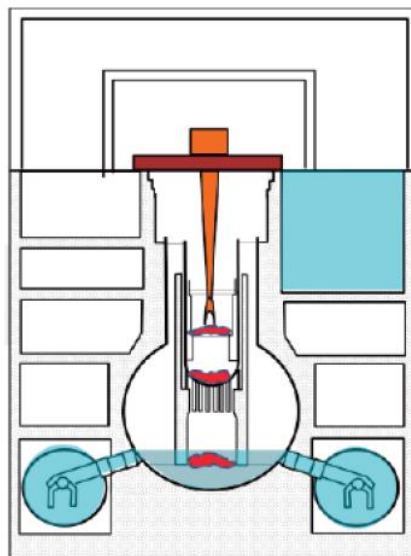
取り出し工法（3工法）における前提条件（仮定）

■ 残存する構造物は極力活用する

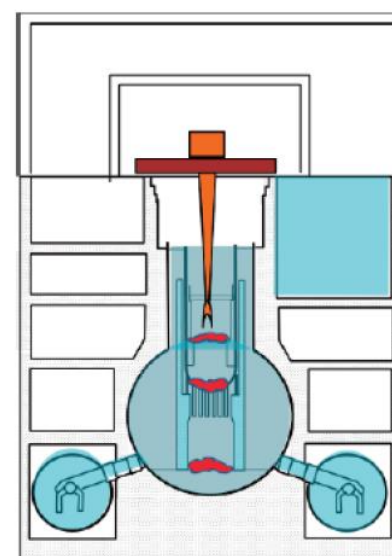
項目	気中－横 アクセス工法	気中－上 アクセス工法	冠水－上 アクセス工法
D/W水位	トラス室天井面レベル以下		TAF以上
PCV上部補修	なし（現状程度の開口）		あり
RPVヘッドの開放有無	開放なし	開放	
取出しセルの設置フロア	1階	オペフロ	



気中－横アクセス工法



気中－上アクセス工法

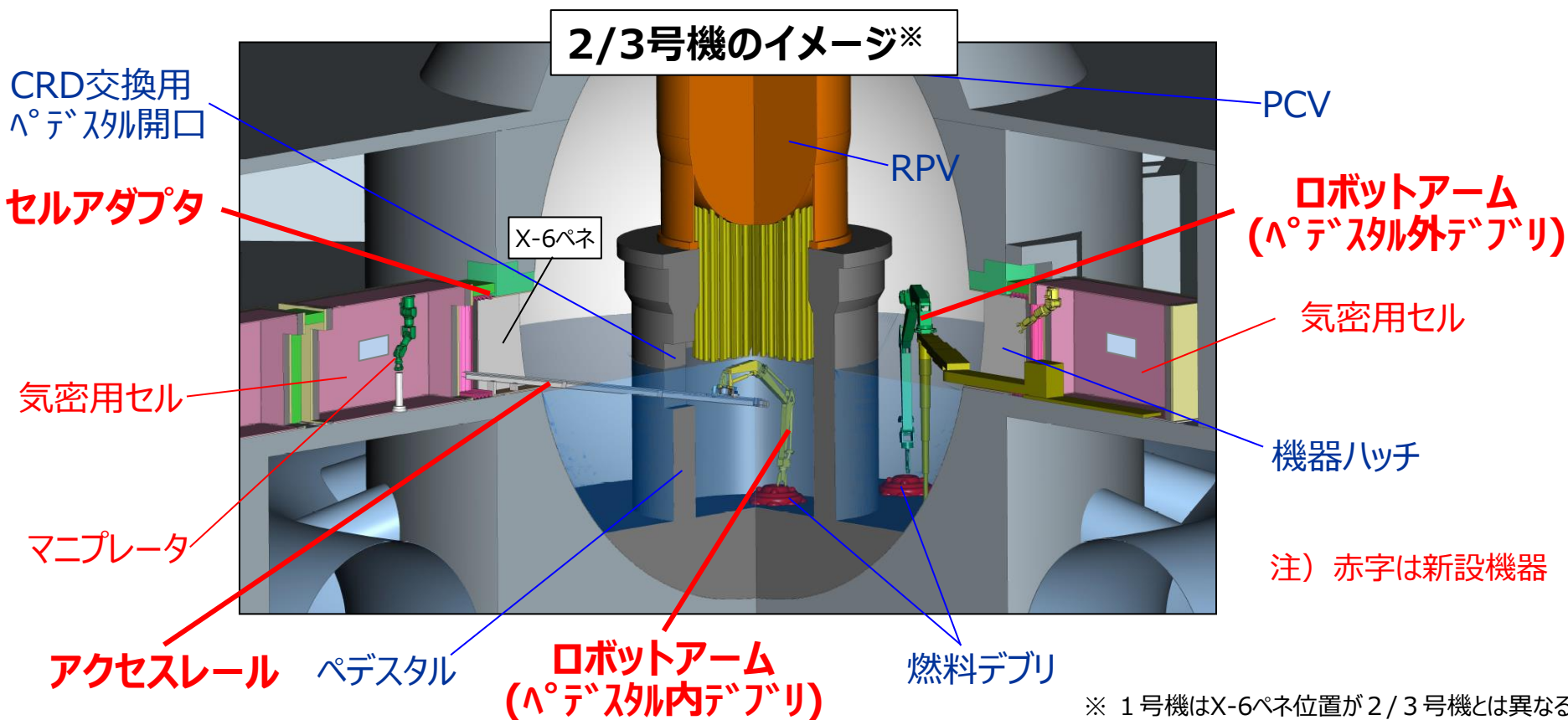


冠水－上アクセス工法

【PLAN-A】アクセスレール方式～取り出しイメージ～

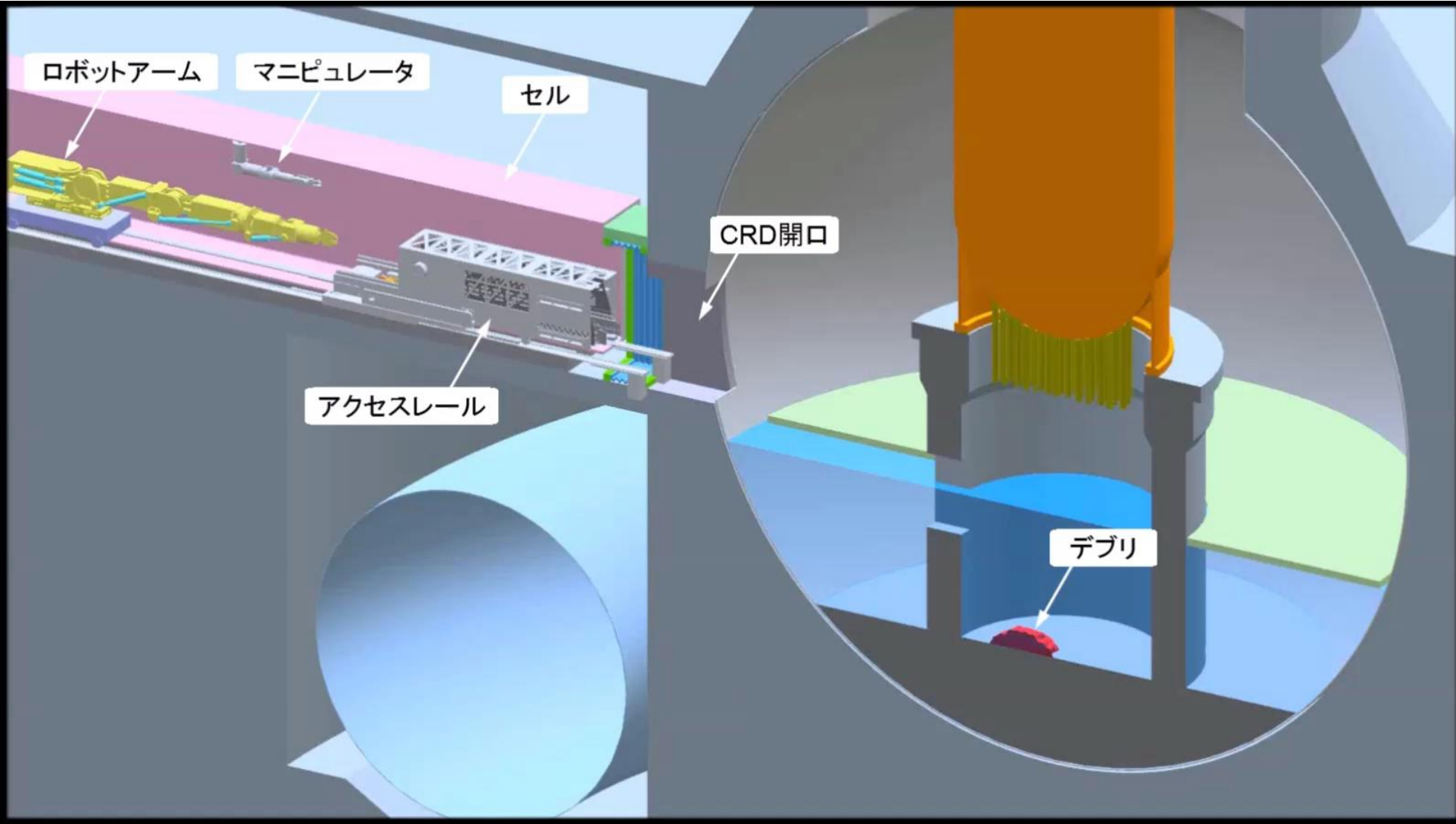
デブリ搬出方法

- ペDESTAL「内」デブリ⇒**X-6ペネからアクセスレールをペDESTAL内に挿入**させ、ロボットアームを使って回収。
- ペDESTAL「外」デブリ⇒**機器ハッチから**ロボットアームを使って回収。



※ 1号機はX-6ペネ位置が2/3号機とは異なる

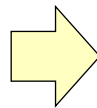
【PLAN-A】アクセスレール方式～取り出しイメージ～(動画)



【PLAN-A'】アクセストンネル方式～コンセプト～

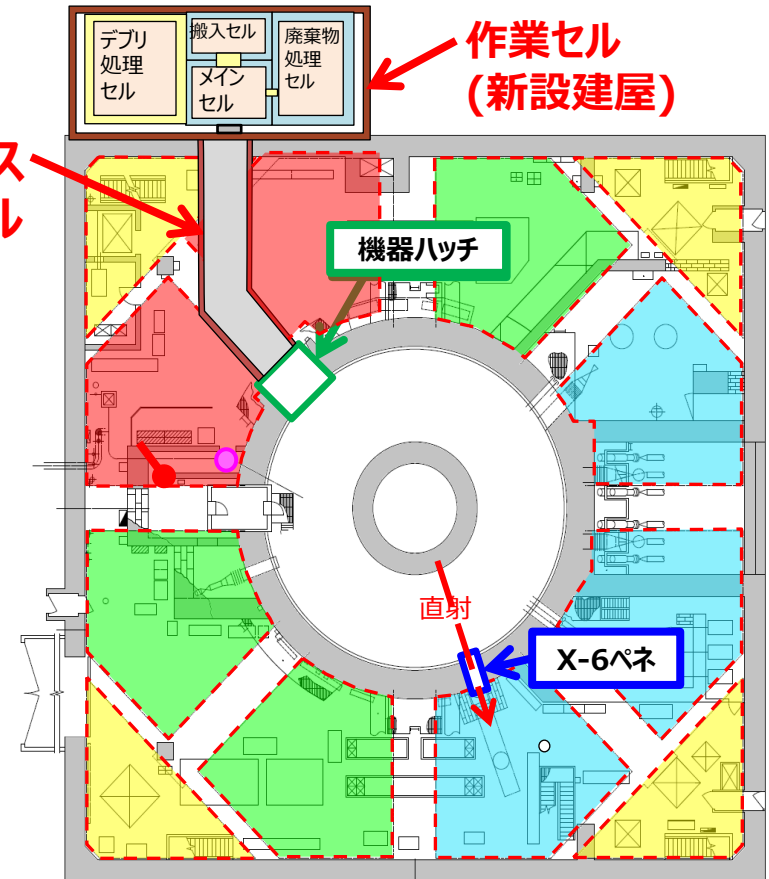
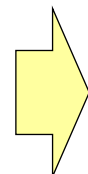
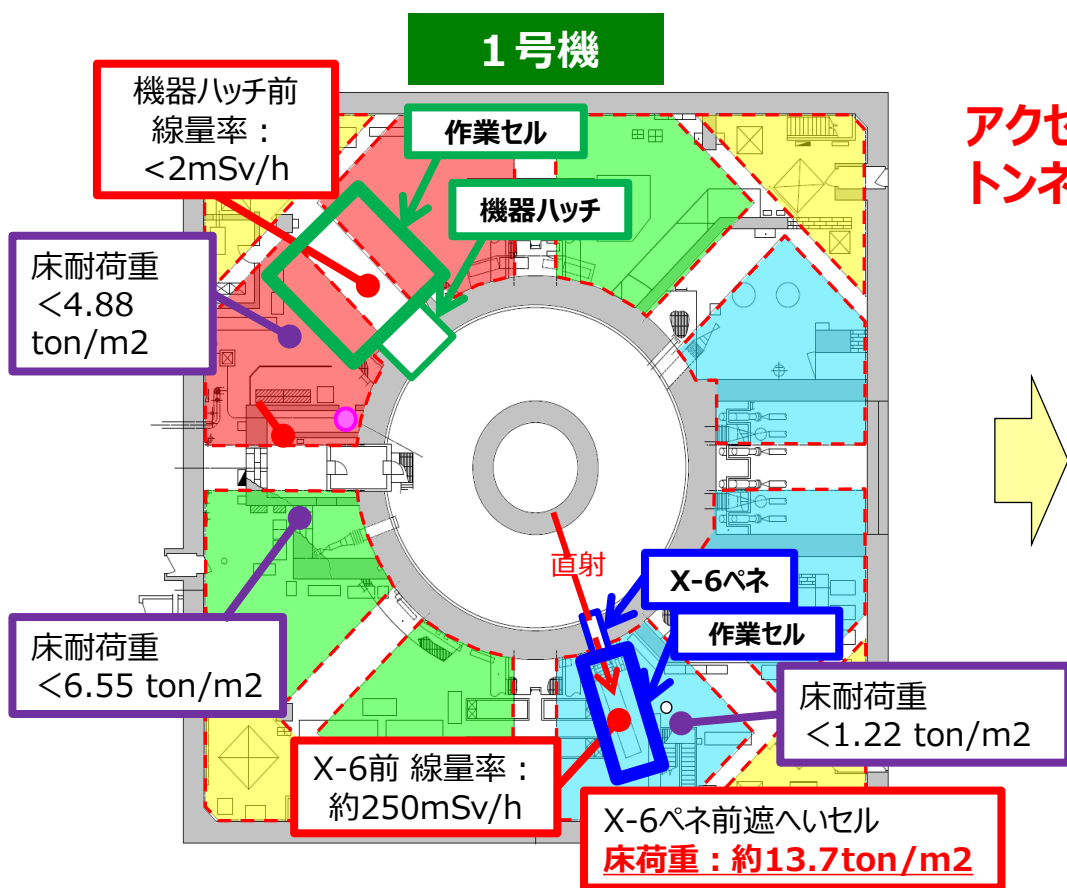
■ 1号機R/B 1階の制約条件

- 周囲線量率：全エリア高い
- 床耐荷重：作業セル（遮へい重量物）設置は厳しい



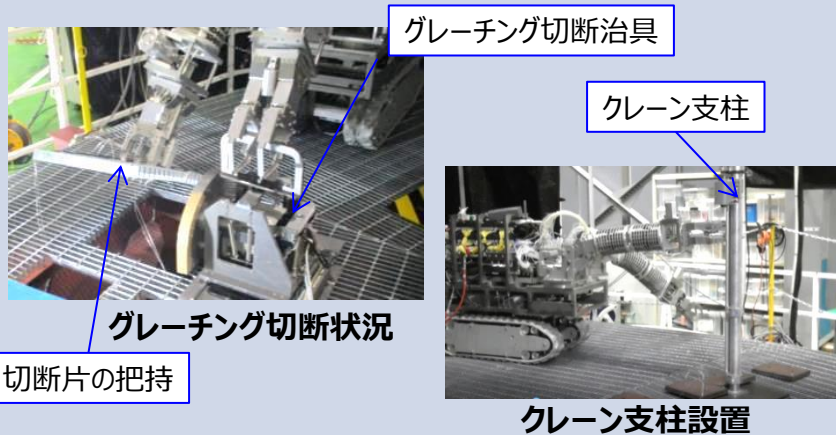
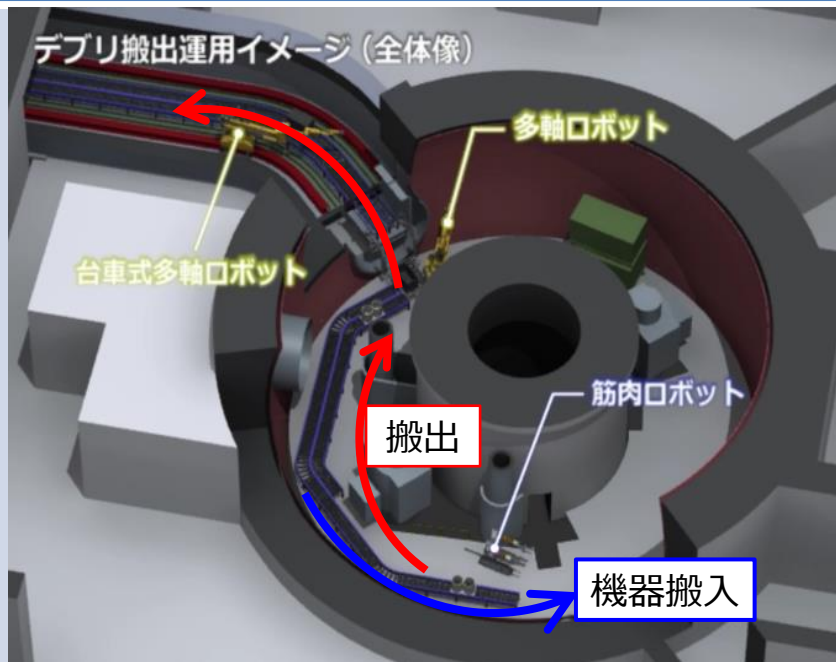
■ アクセストンネル方式のコンセプト

- ① 作業員の接近は新設建屋までとする（1階フロアでの作業を最小化）
- ② 1階床への荷重負担を軽減

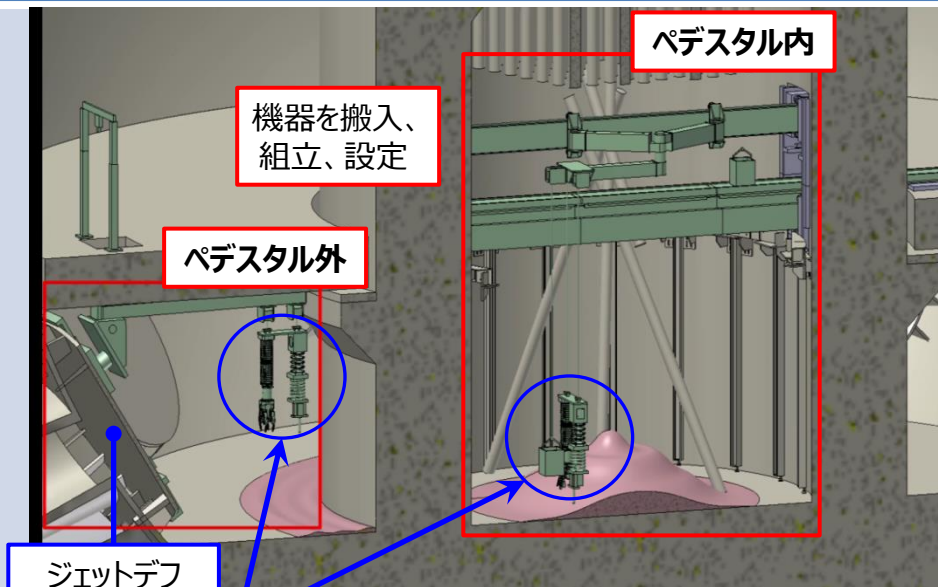


【PLAN-A´】アクセストネル方式～デブリ搬出～

デブリの搬出(イメージ)



ペDESTAL内外デブリの回収(イメージ)



先端ツールの例



【PLAN-A´】アクセストンネル方式～デブリ搬出～(動画)

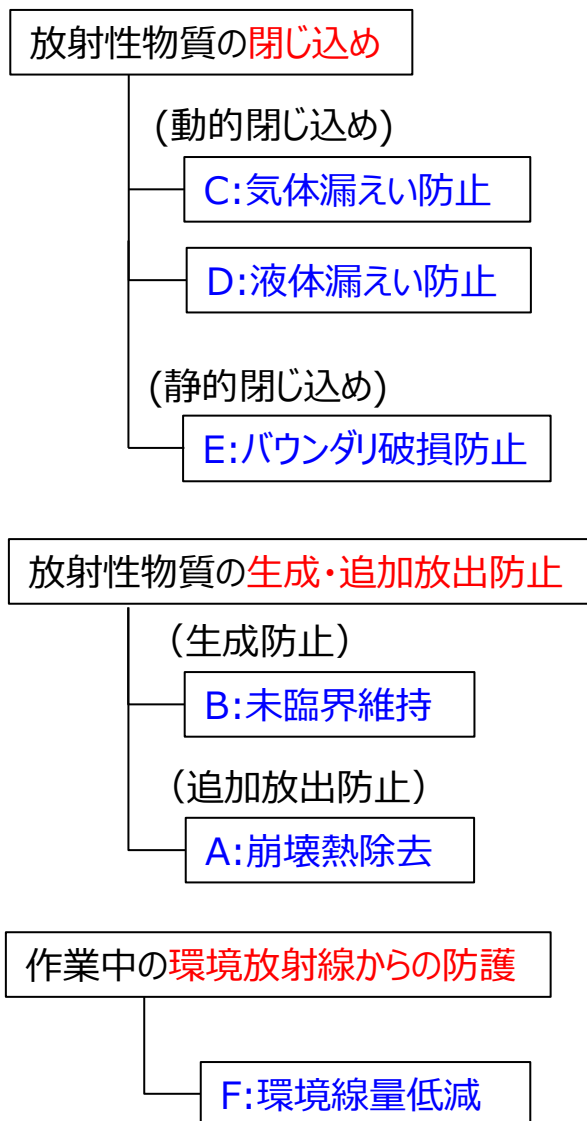
横接近工法 作業ステップ

ご紹介の内容

1. 燃料デブリ取出し工法
2. 安全要求と安全システム

1.2 デブリ取り出し時の安全要求（原子力安全→安全要求）

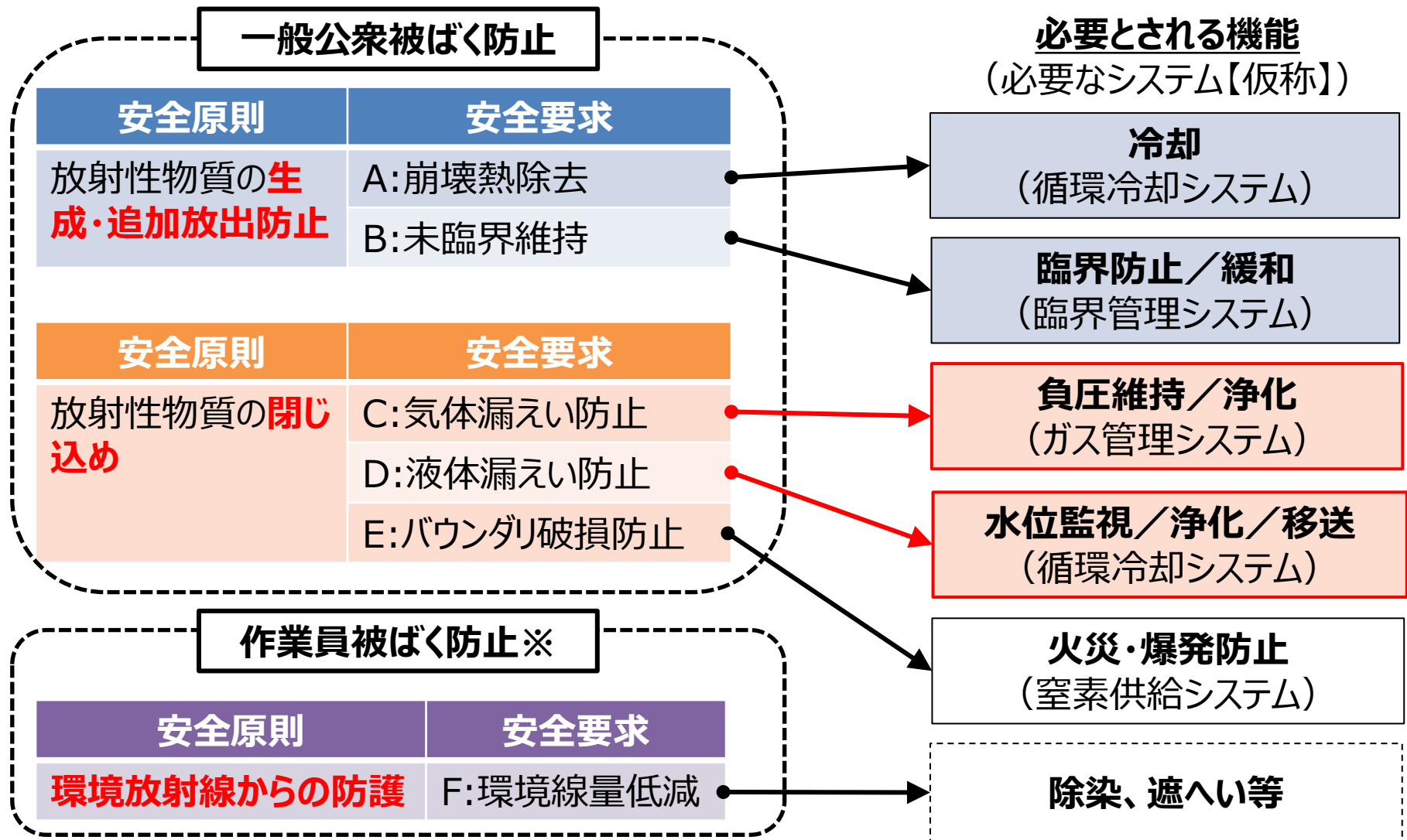
原子力安全	安全原則 (達成されるべきもの)		基本安全機能 (防護されるべきもの)	安全要求 (維持されるべきもの)
人と環境を放射線リスクから防護する	放射性物質の大規模な放出防止（一般公衆被ばくの防止）	放射性物質の閉じ込め	バウンダリによる閉じ込め	(動的閉じ込め) C:気体漏えい防止
		(動的閉じ込め) D:液体漏えい防止		
		(静的閉じ込め) E:バウンダリ破損防止		
		放射性物質の生成・追加放出防止	臨界管理	B:未臨界維持
		冷却管理	A:崩壊熱除去	
廃炉作業に伴う環境放射線からの防護（作業員被ばくの防止）	放射線管理	F:環境線量低減		



1.2 デブリ取り出し時の安全要求 安全機能の目的

安全機能	安全機能の目的
冷却機能	放射性物質の 追加放出 につながる高温状態、燃料デブリ形状が変化する溶融を防止し、有意な放射性物質の放出につながる事象への発展を防止する。
漏えい防止 (気体)	燃料デブリ取り出しに伴い、 気中飛散 する放射性物質の漏えいを防止して、気中の放射性物質を低減して管理放出する。
漏えい防止 (液体)	燃料デブリ取り出しに伴い 水中に移行 する放射性物質の漏えいを防止して、液体の環境への放出を防止する。液体から気体に移行した放射性物質を低減して管理放出する。
臨界防止	燃料デブリ取り出しに伴う臨界による有意な放射性物質の 新たな生成 を防止する。
火災・爆発防止	放射線水分解により発生する 水素の火災・爆発 、及び燃料デブリ取り出しに伴う 粉塵火災 を防止し、有意な放射性物質の放出につながる事象への発展を防止する。

デブリ取り出し時の安全要求（安全要求→機能要求）

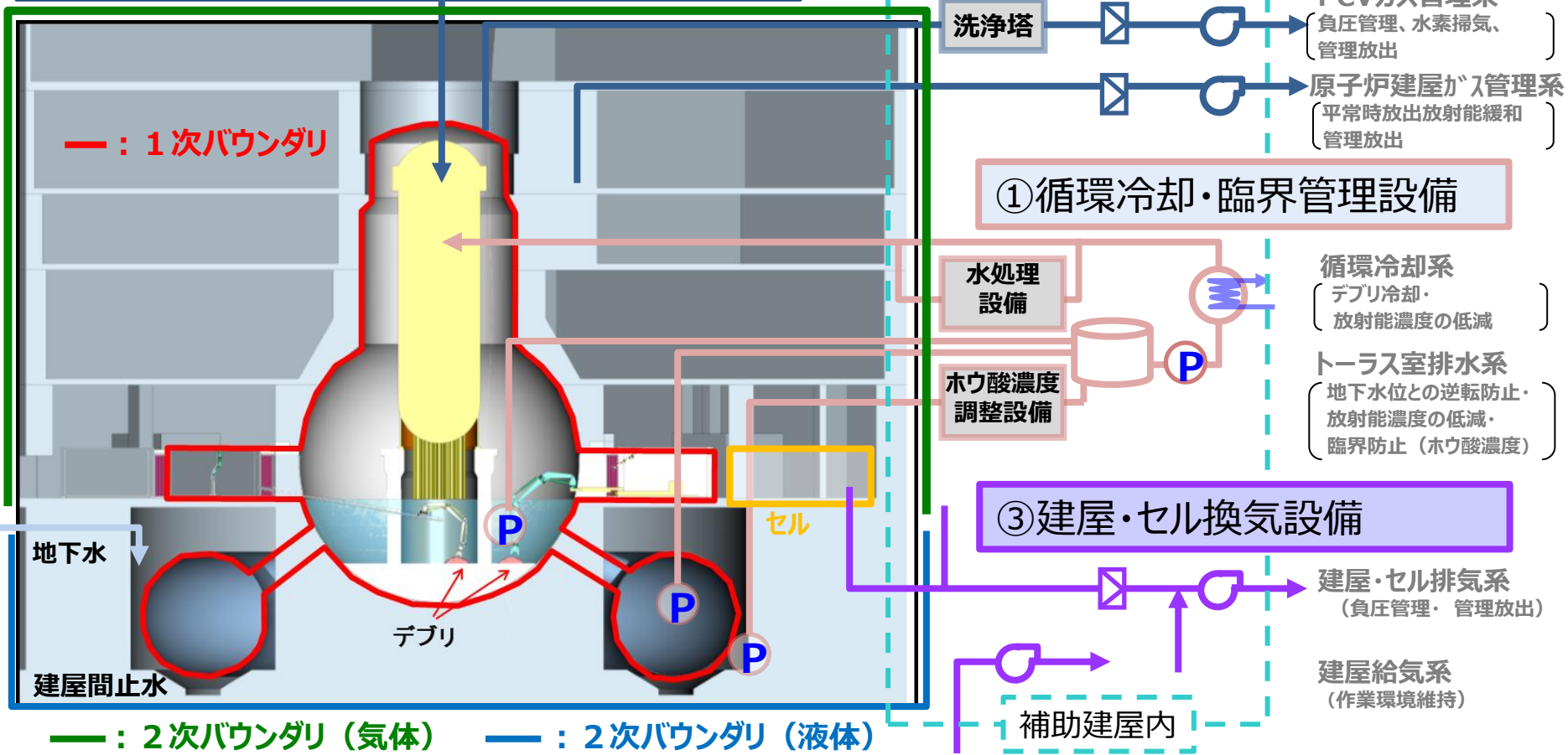


※デブリ取出し・廃炉作業。事故時の作業員（敷地内）被ばくは一般公衆に準じ評価してゆく。

気中－横アクセス工法の概念設計状況 安全系システム

必要な安全機能

1. 冷却
2. 閉じ込め（負圧，トーラス室水位制御）
3. 不活性化（火災・爆発防護）又は掃気
4. 未臨界

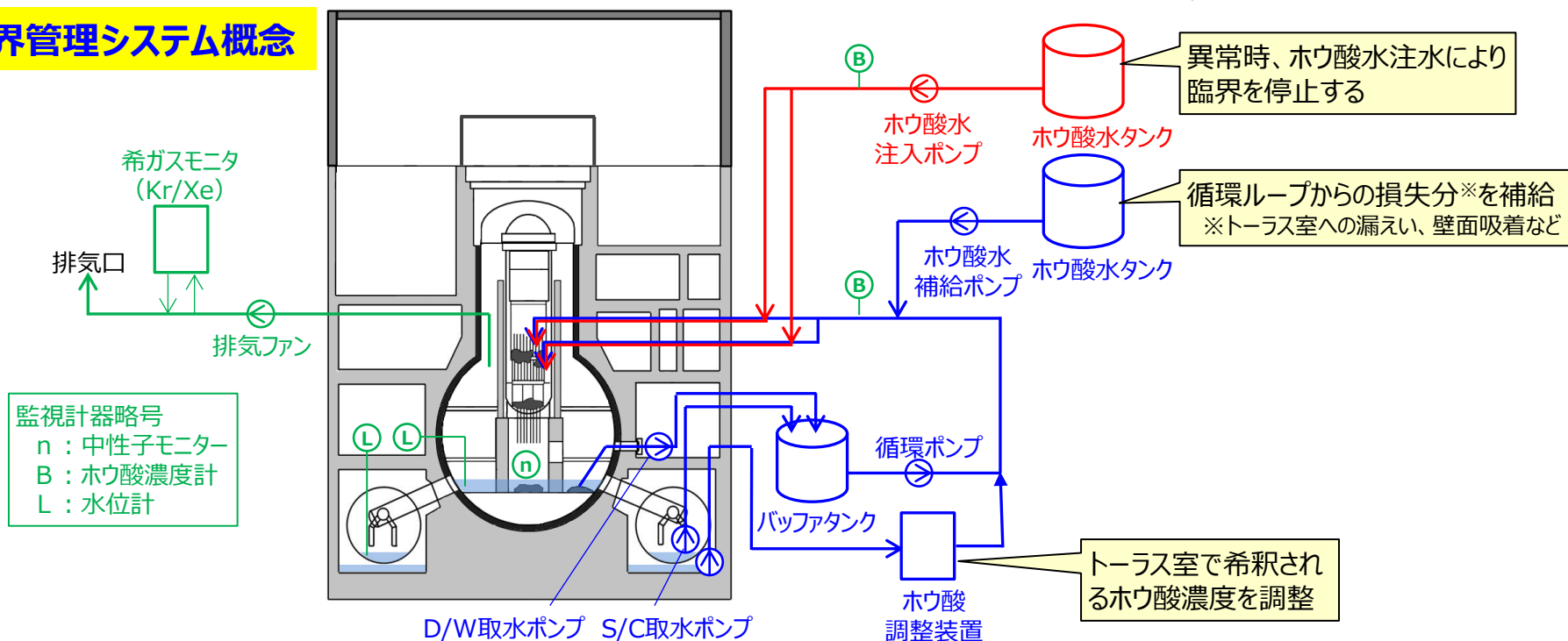


安全要求と機能要求 (臨界：未臨界維持)

安全要求	機能要求		
B：燃料デブリの未臨界を維持し、臨界を防止できること (未臨界維持)	通常時	B-1	形状管理等による未臨界維持、又は中性子吸収材による臨界防止※
	異常時	B-2	中性子吸収材投入による臨界の停止
	監視機能	B-3	中性子束の監視
		B-4	D/Wガス中のKr/Xe濃度の監視
		B-5	D/W水位監視

※形状等で未臨界のクレジットが取れない場合

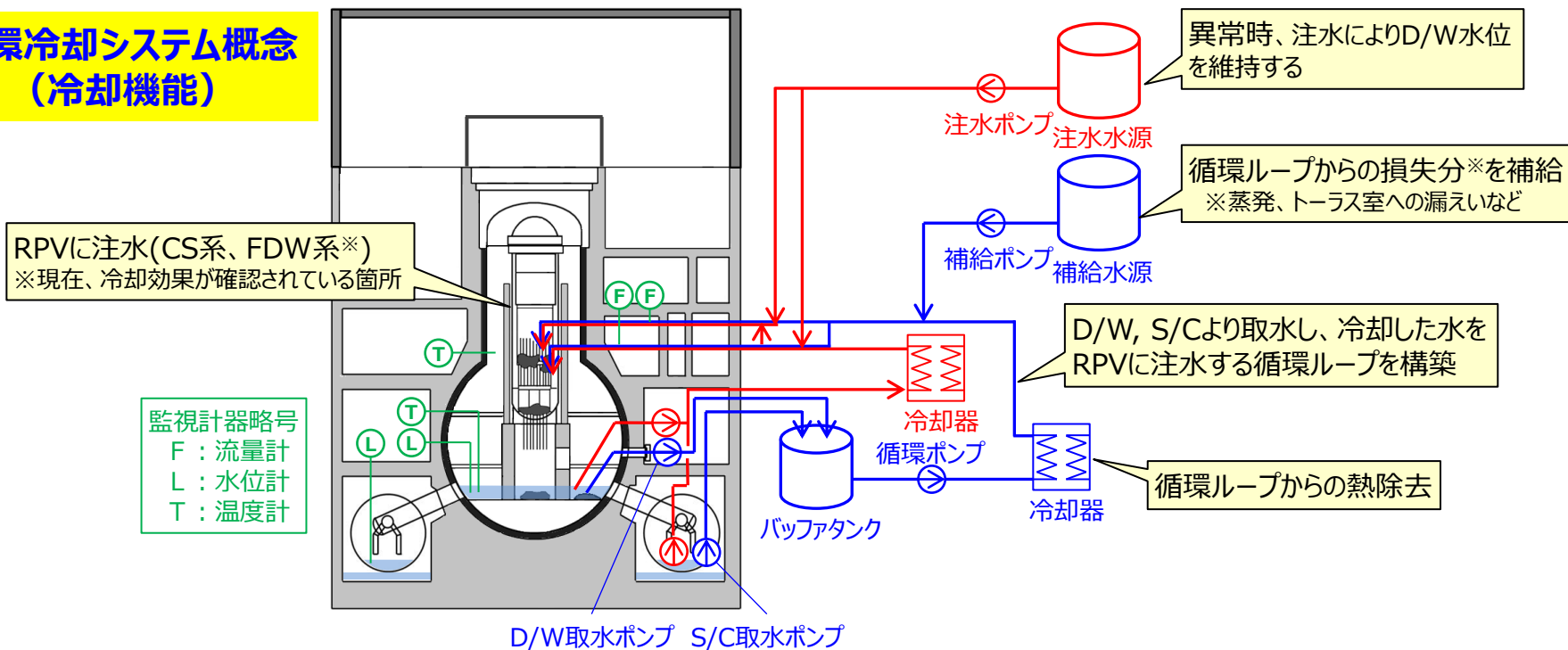
臨界管理システム概念



安全要求と機能要求 (冷却：崩壊熱除去)

安全要求	機能要求	
A：燃料デブリの崩壊熱を除去できること (崩壊熱除去)	通常時	A-1 注水(かけ流し)による冷却
		A-2 D/W水位の維持(水位制御機能)
	異常時	A-3 注水(かけ流し)による冷却
		A-4 D/W水位の維持(水位維持機能)
	監視機能	A-5 注水流量の監視
		A-6 D/W水位・水温・気温の監視

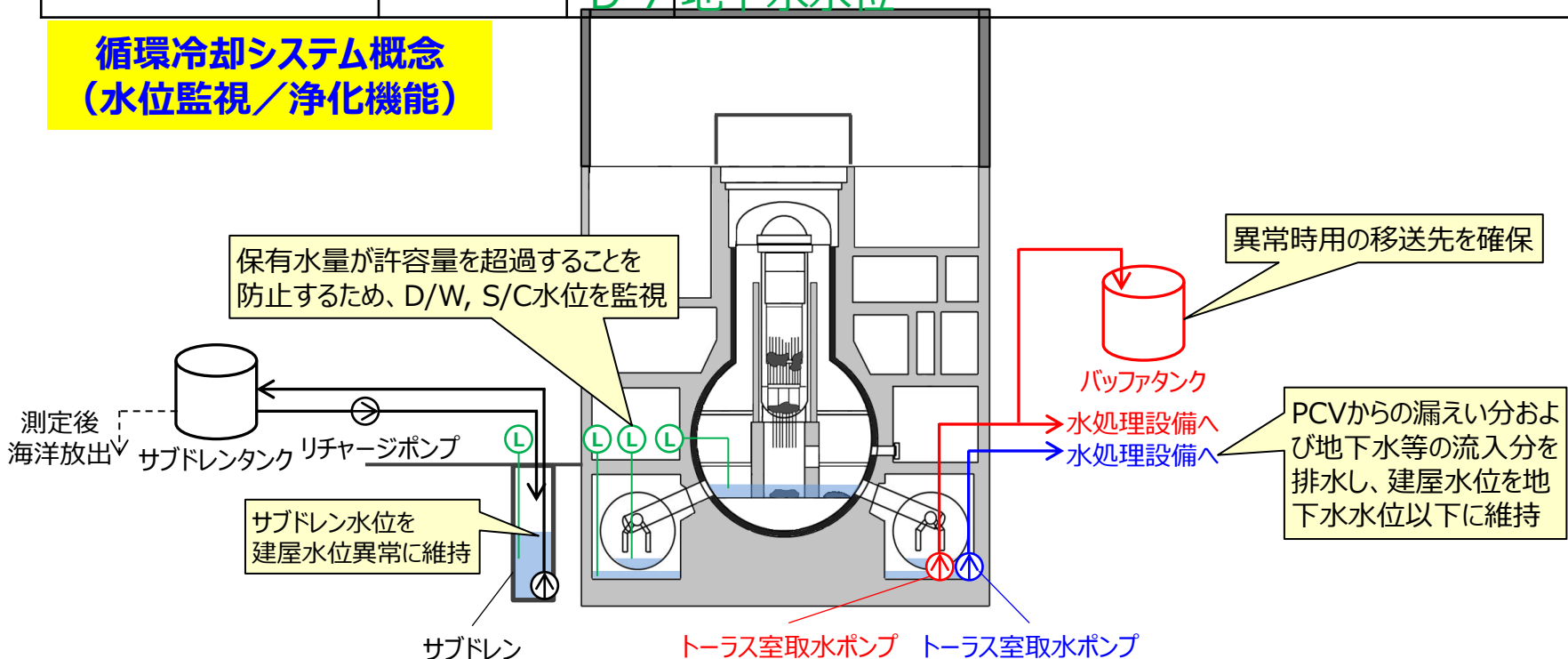
循環冷却システム概念 (冷却機能)



安全要求と機能要求 (トーラス室からの漏えい抑制)

安全要求	機能要求	
D : 液体系 の放射性物質の漏えい防止できること (放射性物質の放出抑制)	通常時	D-1 トーラス室と地下水の水位差の管理
		D-2 PCV下部止水による、D/W→トーラス室への漏えい量の抑制(トーラス室放射能濃度低減)
		D-3 D/W水位の制限(水位逆転防止)
	異常時	D-4 トーラス室と地下水の水位差の管理
		D-5 トーラス室滞留水を移送・貯留する機能
	監視機能	D-6 トーラス室水位
		D-7 地下水水位

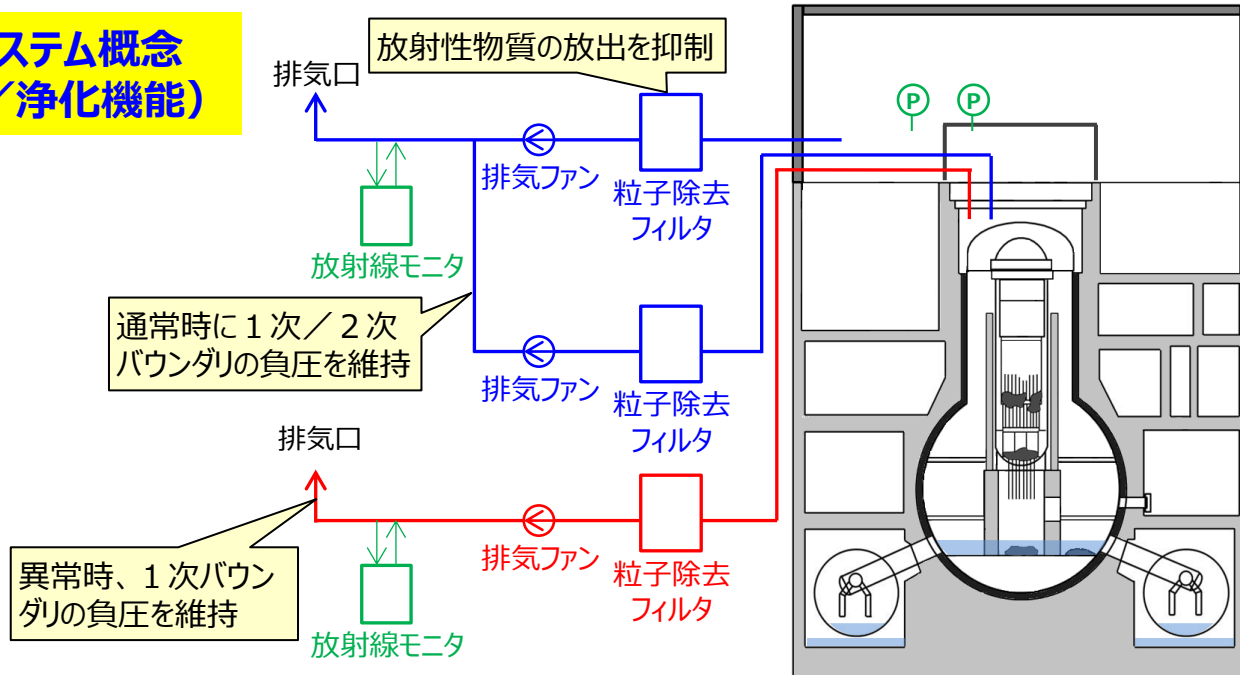
循環冷却システム概念 (水位監視/浄化機能)



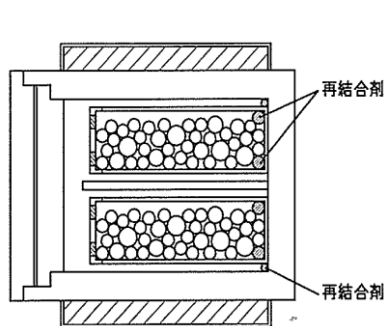
安全要求と機能要求 (放射性ダスト放出抑制)

安全要求	機能要求	
C : 気体系 の放射性物質の漏えい防止できること (放射性物質の放出抑制)	通常時	C-1 1次バウンダリ内(PCV)の負圧維持
		C-2 2次バウンダリ内(R/B等)の負圧維持
		C-3 放射性物質の放出抑制 (浄化)
	異常時	C-4 1次バウンダリ内(PCV)の負圧維持
		C-5 放射性物質の放出抑制 (浄化)
	監視機能	C-6 1次バウンダリ圧力の監視
		C-7 2次バウンダリ圧力の監視
		C-8 放出放射能の監視

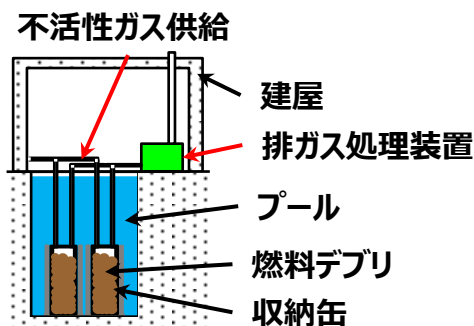
ガス管理システム概念 (負圧維持/浄化機能)



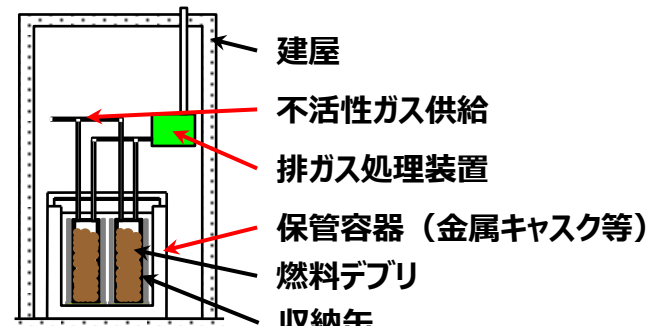
収納缶を移送・保管時に必要となる移送容器及び保管施設への要求機能（案）



半乾式（水分残留）（例）



湿式保管方式（例）



乾式方式（例）

主要要目		要求機能	課題
移送容器	未臨界	移送容器内で収納缶の配置を規定すること	収納缶内のデブリの放出による影響設定（収納缶設計で検討）
	除熱	燃料デブリを冷却できること	なし（デブリは使用済燃料と同等以下の発熱量であり、自然冷却可能）
	遮蔽	必要な遮蔽板厚を有すること	なし（移送キャスクに適切な板厚設定をすれば問題なし）
	閉じ込め	放射性物質が密封可能であること	なしの見込み（2重蓋構造で対応可能な見込み）
		水素発生の対策	移送時の時間制限／移送容器内の触媒設置等（収納缶設計で検討）
	構造/材料	取扱時に構造健全性が維持されること	取扱時に想定される発生荷重に対する構造健全性評価手法の開発、移送時の腐食対策検討（収納缶設計で検討）
保管施設（湿式/乾式）	未臨界	通常時/事故時に未臨界性を維持すること	（湿式のみ）プール水喪失事故時の未臨界性維持可能な保管施設の検討
	除熱	燃料デブリを冷却できること	なし（建屋換気またはプール水、貯蔵容器内での自然冷却は可能）
	遮蔽	必要な遮蔽板厚を有すること	なし（プール内保管または移送キャスクに適切な板厚設定をすれば問題なし）
	閉じ込め	放射性物質が密封可能であること	なしの見込み（建屋のシステム構成は既存プラントで実績あり。貯蔵キャスクは2重蓋構造で対応可能な見込み）
		水素発生の対策	なしの見込み（建屋側に排ガス処理装置を設けることで対応可能。なお、乾燥処置が課題なる可能性がある。（デブリ性状PJによる要素試験結果で判断する。））
	構造/材料	貯蔵時に構造健全性が維持されること。	なしの見込み（建屋（プール）側に水処理装置を設けることで対応可能）

材料毎の腐食条件の整理

炭素鋼、ステンレス鋼、Ni基合金、Ti合金のすきま腐食への耐性を評価

表 塩化物イオン及び過酸化水素の発生環境における腐食評価例

	湿式環境	半乾式環境	乾式環境
炭素鋼 (全面腐食の腐食量管理または五ホウ酸ナトリウムによる不動態皮膜)	水質が中性近傍では腐食量管理ができるが腐食による膨れ等の評価要。 五ホウ酸ナトリウム添加のような環境では不動態皮膜が形成されてすきま腐食等の局部腐食発生のリスク高。	塩化物イオンの局所濃縮により局部腐食発生のリスクは湿式よりも高くなる。	腐食発生の可能性は低い。
オーステナイト系ステンレス (不動態皮膜)	50℃環境において過酸化水素3.4ppmの環境では、塩化物イオン10ppm程度で隙間腐食は生じない。⇒アルカリ環境では局部腐食への耐性が向上する知見もあり。		
炭素鋼 + オーステナイト系ステンレス (炭素鋼の設置は一部分) (犠牲防食)	内面に炭素鋼を設置することでSUS316Lに対する防食効果が期待できる。炭素鋼の減肉の知見の蓄積が必要だが内面を不活性雰囲気にするので進行は遅いと推定。	水分の局所化に伴い犠牲防食有効範囲が限定されるため、リスクあり。	
二相ステンレス (不動態皮膜)	SUS329J4Lは65℃環境において過酸化水素0.4ppmで塩化物イオン10ppm程度まで耐食性が期待できる。		
ニッケル基合金 (不動態皮膜)	過酸化水素85ppmで塩化物イオン100ppm程度まで耐食性が期待できる。 (Alloy22：外挿による類推)		
チタン及びチタン合金 (不動態皮膜)	100ppm程度の低塩化物イオン濃度条件での、Ti-Gr.12の耐すきま腐食性はNi基合金より高く、すき間腐食発生の可能性は低い。 (チタンは水素脆化に対する感受性が高い材料だが、50年の使用期間では影響はないと推察。(評価要))		

まとめ 水化学に期待する事項（現在の課題から）

■ 安全システムの第1層、第2層を構成する設備

- 健全性維持, とりわけ液相・気相の腐食抑制（水質・環境管理）
- 冷却水循環システムにおける燃料デブリ等汚染水の浄化
- 中性子吸収剤濃度管理（5ホウ酸ナトリウムを適用する場合）

■ 燃料デブリ収納・移送・保管プロセス

- 水素発生管理、抑制
- 収納管の腐食抑制（乾式保管でない場合）

End of presentation