

福島第一廃炉研究マップの 俯瞰的アプローチについて ー燃料デブリ取り出し代替工法ー

平成28年11月18日

東京大学大学院工学系研究科

原子力国際専攻 特任教授

鈴木俊一

2

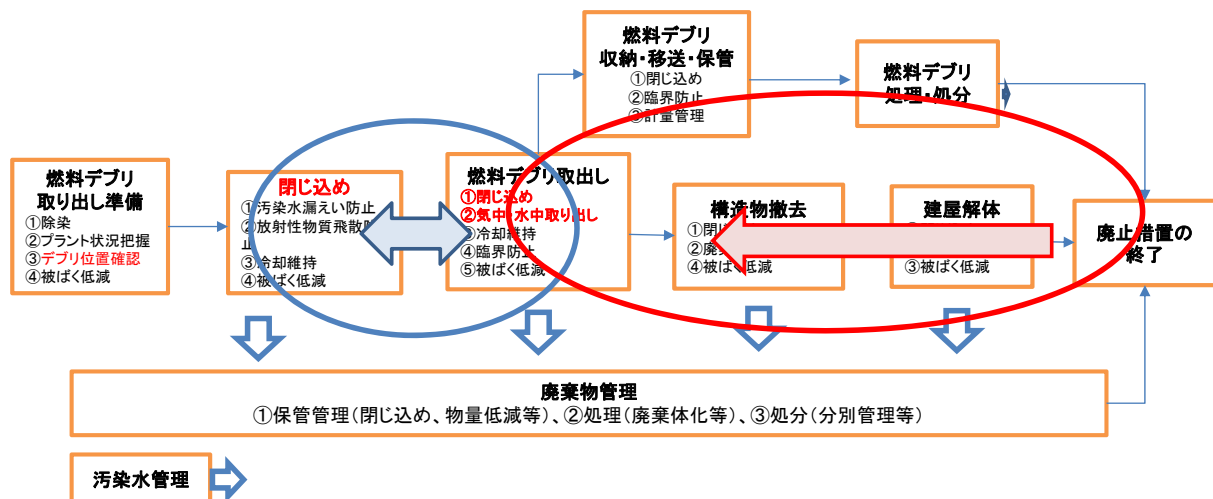
福島第一廃止措置における リスク管理の特徴

- 通常の原子炉と同様の廃止措置管理では危険
 - 例えば、リスクのわずかな増大も許さない工事を行うと、結果的にリスクの大きな増大を招く。また、時間的な先送りがリスク増大につながる。
- 現場を中心とし、時間・空間・対象(放射性物質)を考慮した、**俯瞰的なリスク管理**を実施する必要
 - 数多くの廃止措置作業が相互に関連している
- 5年、10年と長期に掛かる廃止措置を見越し、俯瞰的な管理のできる人材を戦略的に養成し、現場を初めとする廃止措置に投入していく事

— 廃炉研究開発に求められること —

- 将来が読めない不確実性の高い現象(社会)を完全に予測することは確かに困難である。
- 但し、将来何が起こりそうかリスクを含めて俯瞰し、仮説をたてた上で、あらかじめ何らかの備えをしておくことはできるだろう。
- この場合、影響度合いが大きいと思われる不確実な事象を徹底的に洗い出し、モニタリングすることによって仮説を検証することは重要である。
- 廃止措置完遂には、全体を見て将来のリスクを理解できる人材が必要であり、研究開発を通じて俯瞰的視野をもつ人材を育成することは極めて重要である。

俯瞰的廃止措置への対応 — 現在までの取り組み —



廃炉に本質的に必要な課題を見つけるには

(1) 意図的計画法 (Statisticな方法)

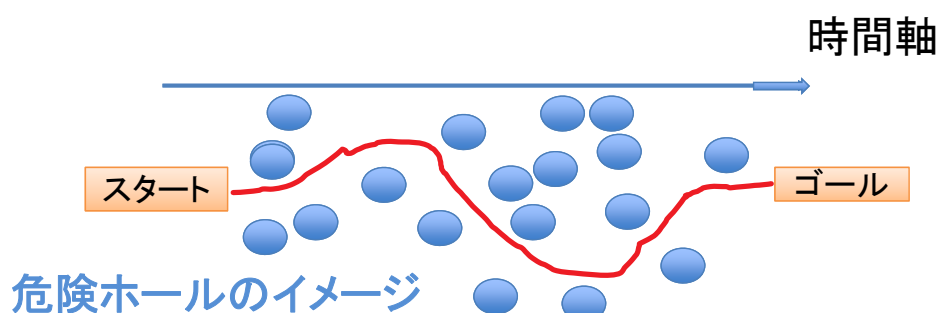
- ① 仮説を立てて将来予測
- ② 仮定にもとづき取り出し方法策定
- ③ 上記方法のリスクを検討
- ④ 予測をベースに投資
- ⑤ 成果を実現するために実行

(2) 仮説指向計画法 (Dynamicな方法)

- ① 取り出しのための目標設定
- ② どのような仮定を証明できれば目標達成可能か
(含むリスク検討)
- ③ 重要な仮定の妥当性検証のために計画を立案
- ④ 投資

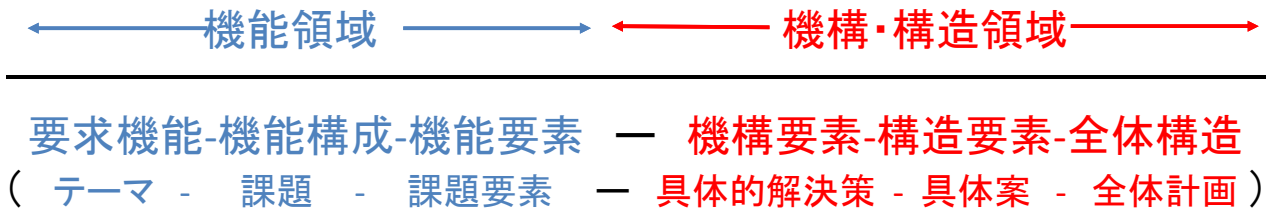
<ブレインストーミングの手順>

- ・ 何故失敗したのかを議論
 - ✓ 危険ホールの抽出 (時間軸を意識)
- ・ 成功するためにはどうすればよいか、既存概念に囚われないアイデアを抽出 (新規研究課題の抽出)
- ・ 外的リスクを踏まえての問題点・課題の議論
- ・ リスクを踏まえたアイデア改善案を抽出 (具体的な研究課題の抽出)
- ・ 時間軸を意識した成功パスを構築
- ・ パス毎にリスクを評価



思考展開方法

STEP 1. 思考展開図を作成する(参考:畑村洋太郎編、実際の設計)



- STEP 2. 異なるテーマで思考展開図を作成
- STEP 3. 仮説の分析と検証方法の検討
- STEP 4. 俯瞰的全体計画の作成
- STEP 5. 成功パスの探索
- STEP 6. 時間軸を入れて検討
- STEP 7. 仮説の分析と検証方法の再検討
- STEP 8. 時間軸を入れたシナリオ構築

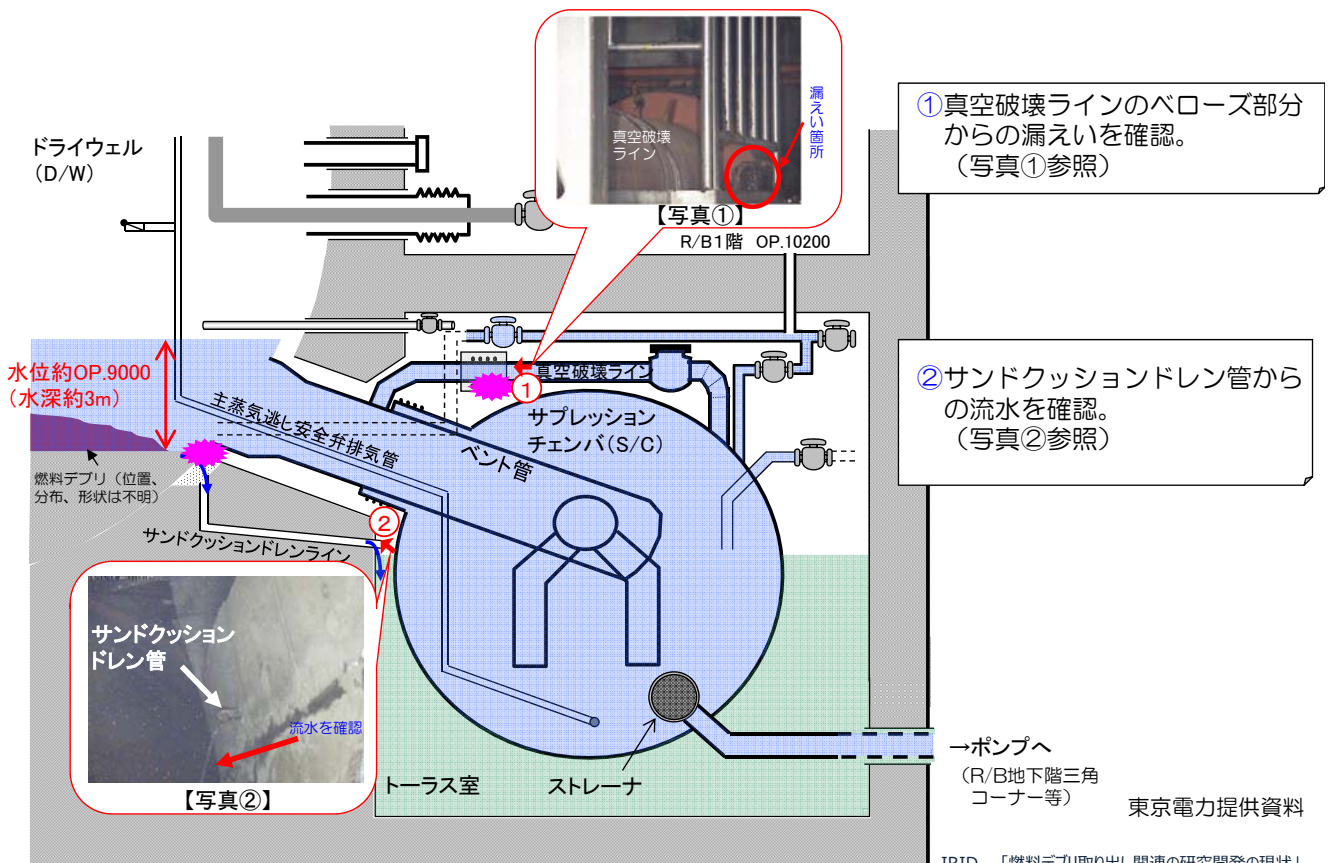
今までのブレスト実績 (主として機能の議論)

1. 閉じ込め
 - ・何故失敗したのか(デブリGr)
 - ・放射性物質を閉じ込めるには(デブリGr)
 - ・事故炉の深層防護とは何か(デブリGr)
2. 燃料デブリ取り出し
 - ・何故失敗したのか(デブリGr)
 - ・燃料デブリを気中で取り出すには(遠隔Gr)
 - ・MCCIを取り出すには(デブリGr、遠隔Gr)
 - ・許容状態とは何か(デブリGr)
3. 廃棄物(廃棄物Gr)
 - ・何故失敗したのか
 - ・エンドステートとは何か、安定化とは何か
 - ・安定化の対象は何か
 - ・危険ホールは何か

閉じ込めで何が重要か？（要求機能）

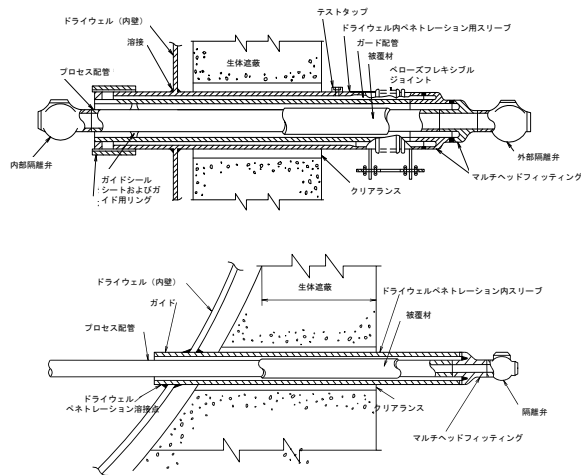
1. 放射性物質を外にださない
2. 被曝低減
3. 事故・故障も想定したリスクマネジメント（共通要因）
 - ①独立であって他に影響を及ぼさない（多重防護）
 - ②それぞれのシステムがノイズの影響を受けにくい（ロバスト）
 - ③システムに問題（電源喪失等）があっても、回復する（レジリエンス）

【1号機】PCV下部の現状イメージ図

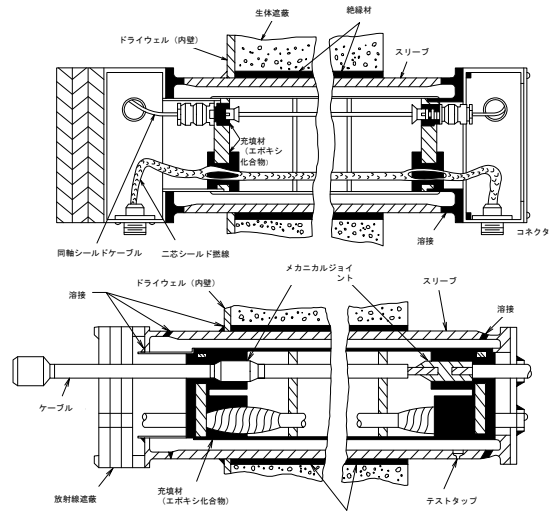


複雑かつ多様なペネトレーションによる困難な止水

- ハッチ、ベント管、配管ペネトレーションおよび電気ペネトレーションを含めた全体で多数かつ多種のペネトレーション（1号機：約150箇所、2号機：約200箇所、3号機：約190箇所）
- 一部のペネトレーションの形状は複雑であるため、止水が難しい。
- PCVペネトレーションには弁があり、PCV内に装置を挿入することは難しい。



機械ペネトレーションの概略図



電気ペネトレーションの概略図

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

IRID 燃料デブリ取出し代替工法についての情報提供依頼 (RFI) 2013年12月17日

閉じ込めで何が重要か？（機構）

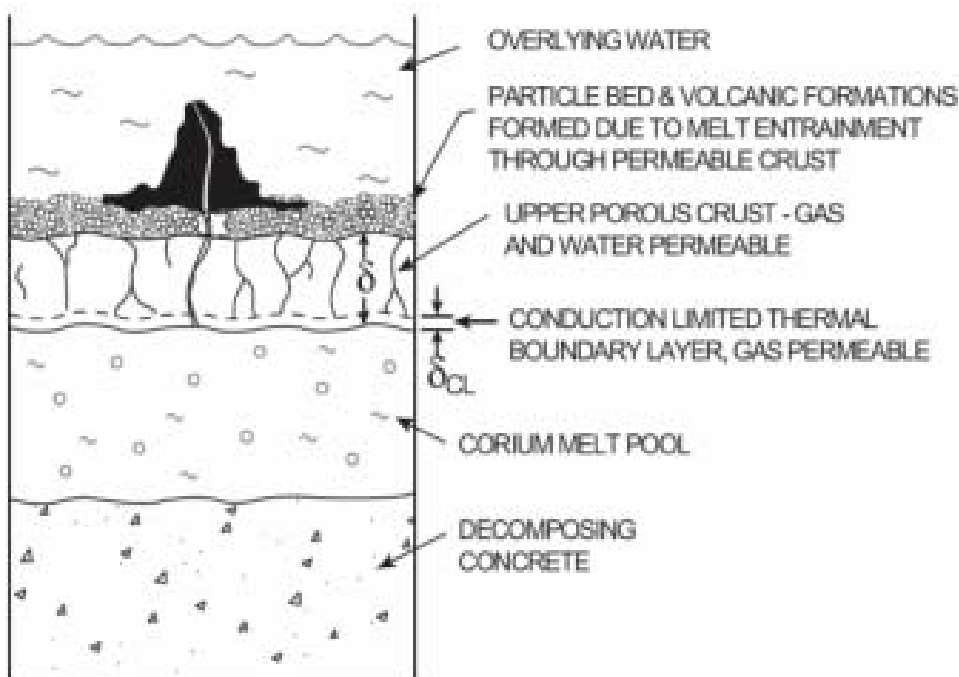
要求機能から求められる機構（一例）は、

- (1) 多重化し、最終壁で閉じ込める（想定外事象に備えて）
例) PCVでの閉じ込めは高線量作業であり極めて困難なことから、アクセス容易な原子炉建屋の内面をコーティングする、あるいは他建屋を壊してから原子炉建屋の外を覆う
- (2) 空調系は負圧管理とともに、 α 核種も含めた核種除去可能な空気浄化系を設置する
- (3) 閉じ込め空間は管理しやすいようにコンパクトとする
- (4) 核種モニタリング設備を設置し、 α 核種のモニタリングも可能とする
- (5) 燃料デブリ取り出し時の核種飛散（含むエアロゾル）の事前シミュレーションを行う
- (6) 他、作業立入制限やマスク常備などのマネジメント、等

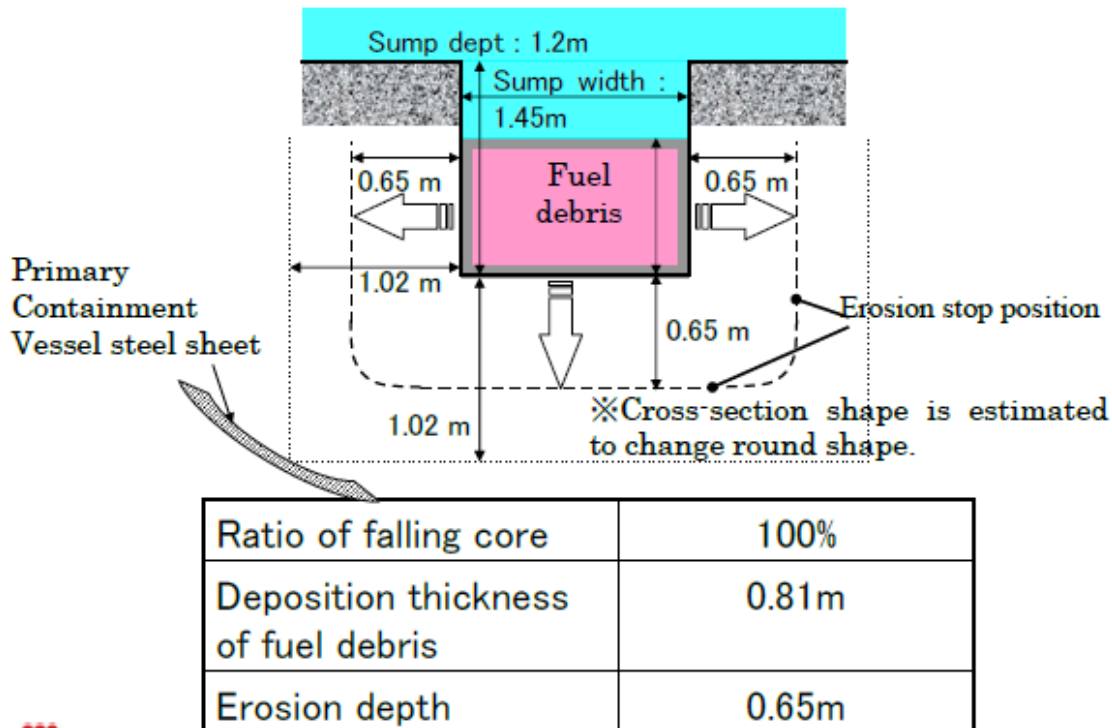
PCV底部にあるMCCI生成物の取り出しで何が重要か？（要求機能）

1. 放射性物質を外にださない
 - ①切断時の粉塵を飛散させない、
 - ②切断時の汚染水を外に出さない
2. 被曝低減
3. 取り出しに長期間を要しない（建屋損傷前に取り出す）
4. 再臨界防止
5. 事故・故障も想定したリスクマネジメント（共通要因）

Phenomena of MCCI



phenomena during top flooding (ANL)



PCV底部にあるMCCI生成物の取り出しで何が重要か？（機構）

（要求機能）

1. 放射性物質を外にださない
 - ①切断時の粉塵を飛散させない
 - ②切断時の汚染水を外に出さない
2. 被曝低減
3. 取り出しに長期間を要しない（建屋損傷前に取り出す）
4. 再臨界防止
5. 事故・故障も想定したリスクマネジメント（共通要因）

以上の機能から求められる機構（一例）は、

（例）**コンクリート等でMCCIを準安定化してから取り出すこと**により（燃料デブリ経年劣化、飛散防止、廃棄体処理の観点から）、以下の潜在的利点を得られる。

- ・**取り出し時にα核種を含めた粉塵を飛散させない**
- ・炉水がMCCIに接する量を制限し、汚染度を下げる

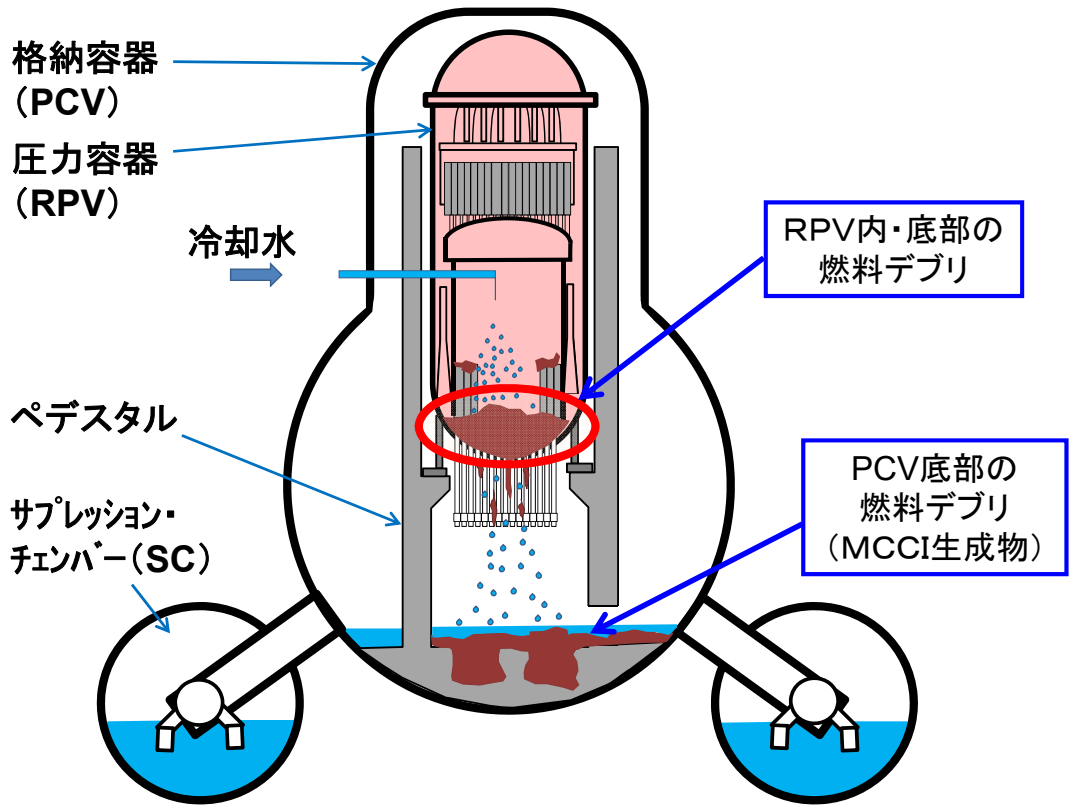
PCV底部にあるMCCI生成物の取り出しで 何が重要か？（機構 続き）

- ・燃料デブリは時間とともに変質する可能性があることから、
 - －上部アクセスの場合等、下部まで到達するのに時間がかかるが、その間、準安定状態を維持可能
 - －横アクセスでもペイロードが小さいマニピレータを使用すると取り出し終了まで長期間を有するが、その間も準安定状態を維持可能
- ・整地して足場を作ることにより、PCV底部並びにRPV下部から燃料デブリを取り出す多様な仕組みが構築できる
- ・燃料デブリ収納缶内を足場と同一材で充填することにより、安定保管が可能

燃料デブリ取り出しに関する 代替工法検討の途中経過 （機構要素の検討は今後）

- ・気中－横アクセス工法
- ・気中－上アクセス工法

現状



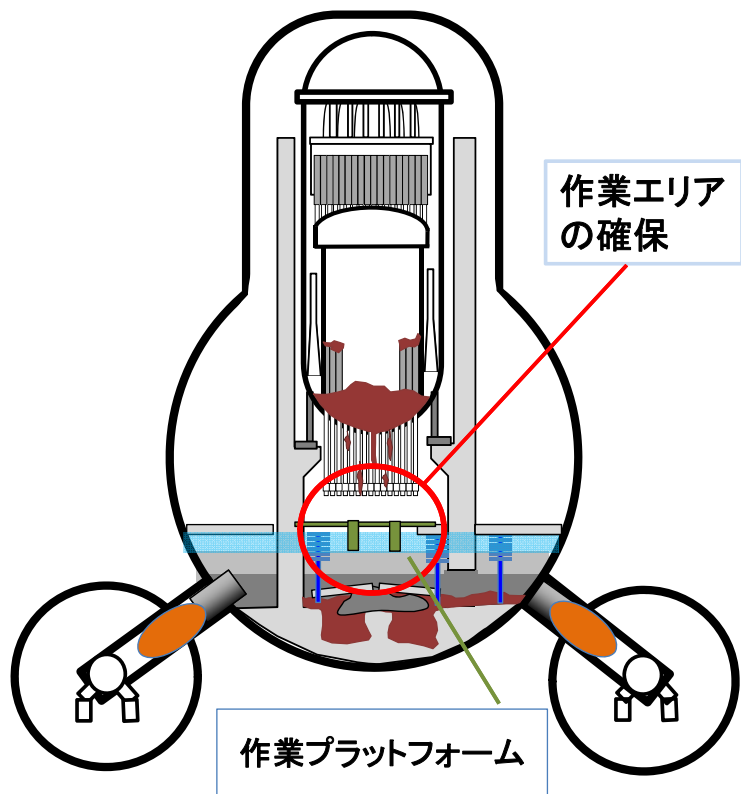
<燃料デブリ取出しに関する新たな工法>

—コンクリート等で燃料デブリを準安定化してから取り出す—

基本概念:

シンプルかつコンパクトに取り出しを行う
(閉じ込め空間を極力小さく)

- ペデ底部開口部高さまでコンクリート等を注入して燃料デブリを準安定化 (状況によりペデ内外)
- ペデ内にプラットフォームを新設して燃料デブリを取り出す



＜本工法の有効性＞

1. 燃料デブリ取り出し準備における潜在的利点

- 止水対策の簡易化(被曝低減、長期リスク対応)
 - ①シェルアタックの補修不要
 - ②止水作業(ベント管以外)不要(被曝低減)
 - ・PCV上部、底部、接続配管等多数
- PCVとトラス室の縁切り(リスク対応)
 - ①トラス室水位一地下水水位逆転現象防止
 - ②トラス室壁面貫通部止水不要？
- 耐震性向上(長期リスク対応、被曝低減)
 - ①S/C脚部補修工事不要(被曝低減)
 - ②ペDESTAL底部補強の検討が可能
- 臨界・腐食対応の簡易化(長期リスク対応)
 - ①臨界防止対策の簡易化
 - ②防錆剤添加減に伴う水処理ラインへの負荷低減
- 給水／燃料デブリ接触面積減に伴う汚染水濃度の低減(汚染水処理量低減、被曝低減)
- 燃料デブリ位置によらない冷却対策を検討可能

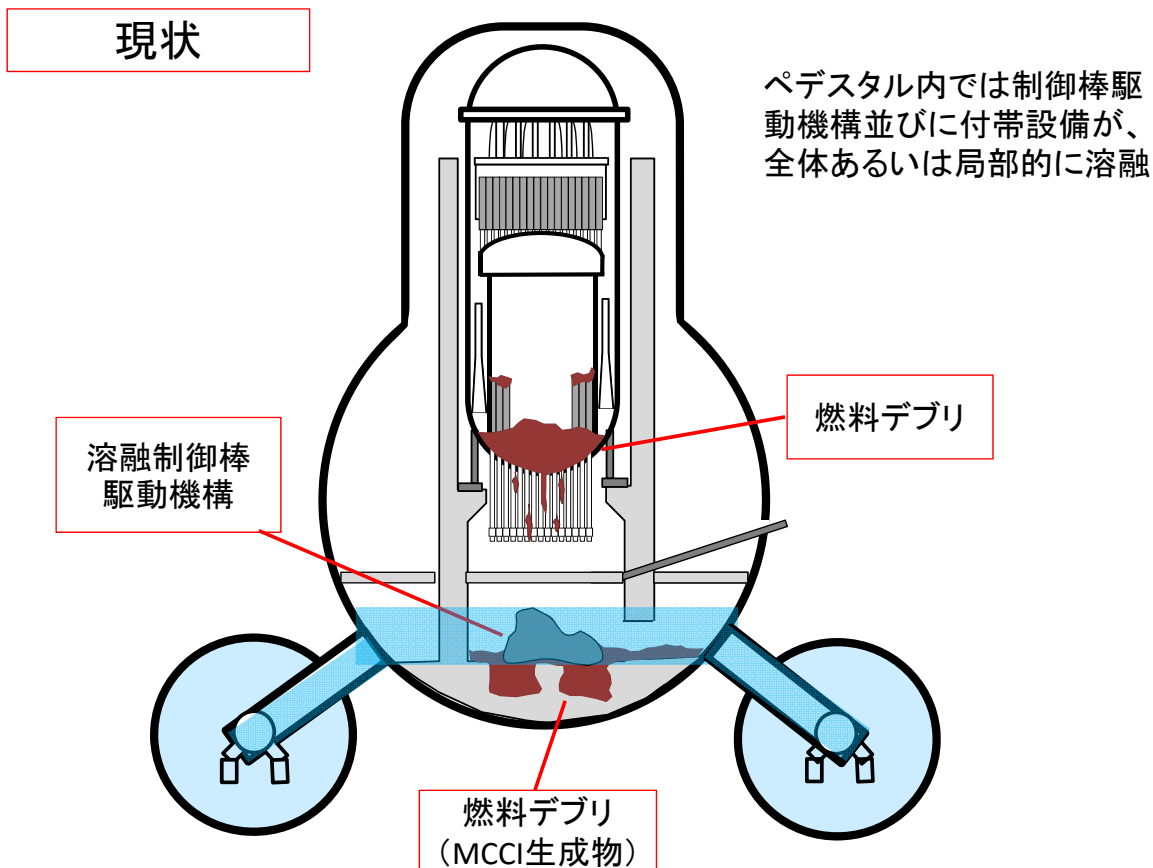
2. 燃料デブリ取り出しにおける潜在的利点

- (1) PCV底部MCCI生成物の取り出し
 - ①MCCI生成物の準安定化(長期リスク対応)
 - ・時間に伴う性状変化対策
 - ②燃料デブリ取り出し時の α 核種等飛散防止(安全)
 - ③足場確保に伴う取出し装置の設置容易化(作業性向上)
 - ④コンクリート遮蔽による線量低減(作業性向上、機器の耐放射線対策の容易化、被曝低減)
 - ⑤取出し時に発生する α 核種のトラス室への移行防止によるトラス室負圧管理不要(コスト低減)
 - ⑥RPV等上部構造物落下時の衝撃吸収(長期リスク対応)
- (2) RPV底部(近傍)燃料デブリの取り出し
 - ⑦ペDESTAL内作業プラットフォーム構築によるRPV・PCV同時デブリ取り出し作業(工程短縮)

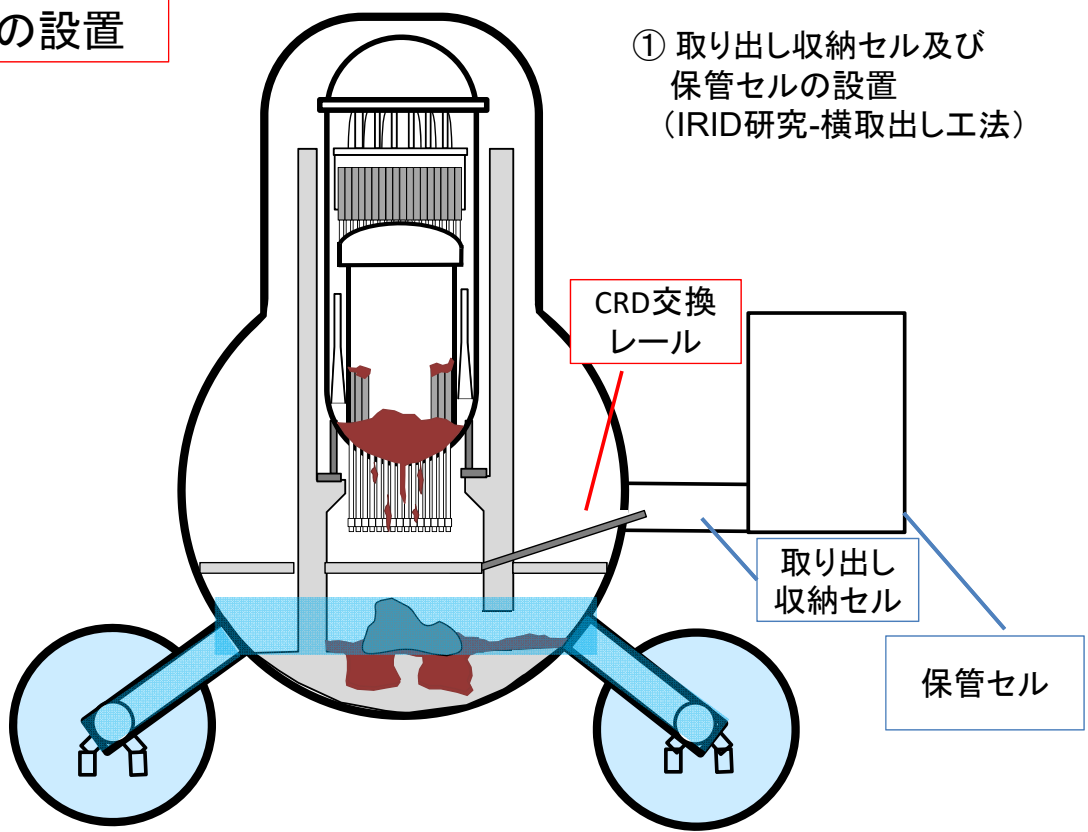
- ⑧-1. 水受け容器の設置によるRPV底部取り出し
 - ・循環ラインの短縮化(作業性向上)
 - ・臨界防止用ボロン投入の少量化(廃棄物低減)
- ⑧-2. RPV下部コンクリート敷設による下部からの取り出し
- ⑨ 上蓋非開放状態での燃料デブリ取り出しの可能性

3. 廃棄物における潜在的利点

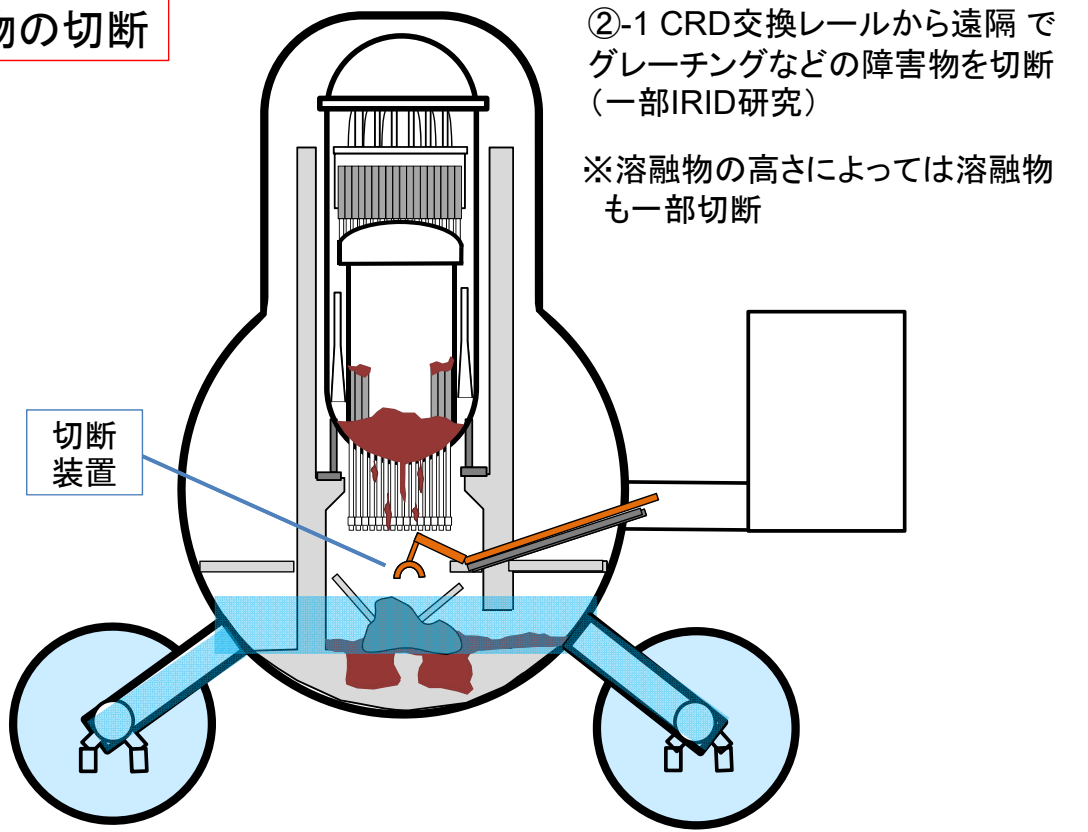
- ① 足場材と同一材を収納容器への注入することによる、MCCI生成物の長期保管の可能性
- ② ジオポリマーを利用し気中で取り出し保管した場合には、廃棄物長期保管の重要課題である水素・腐食対応簡素化の可能性



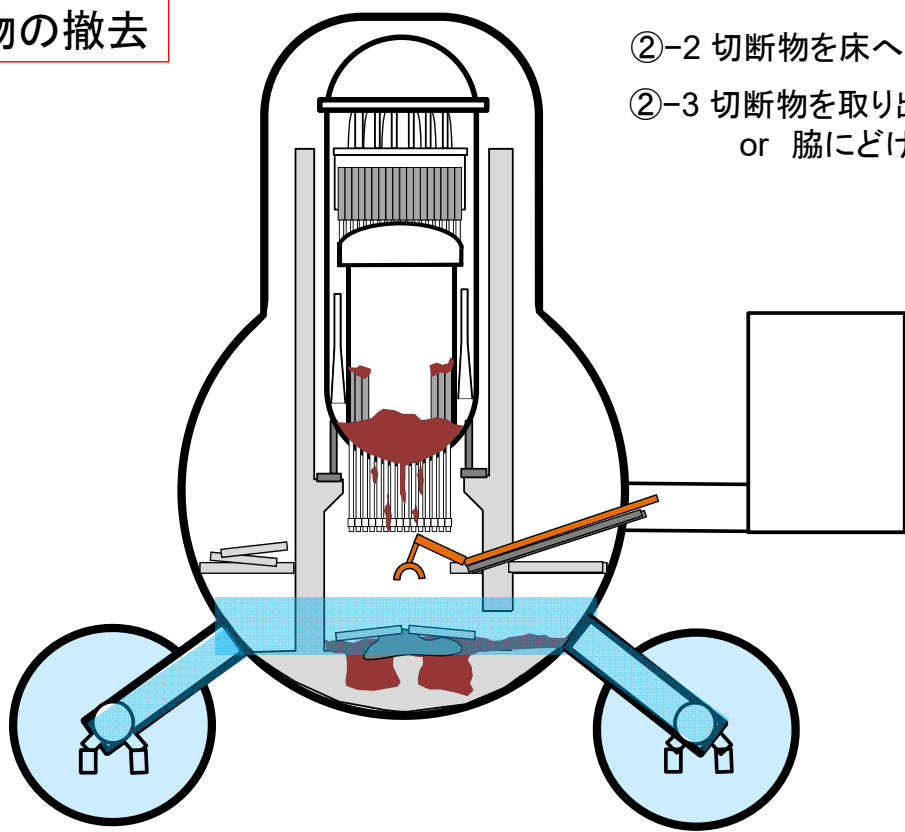
セルの設置



障害物の切断

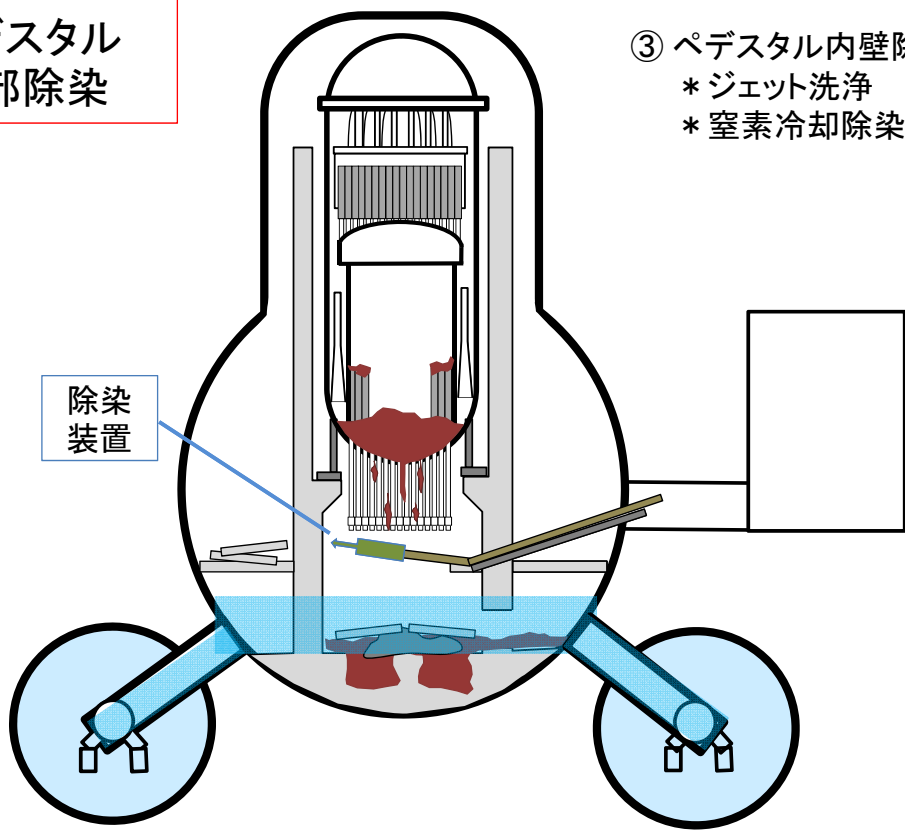


障害物の撤去



- ②-2 切断物を床へ落下
- ②-3 切断物を取り出す
or 脇にどける

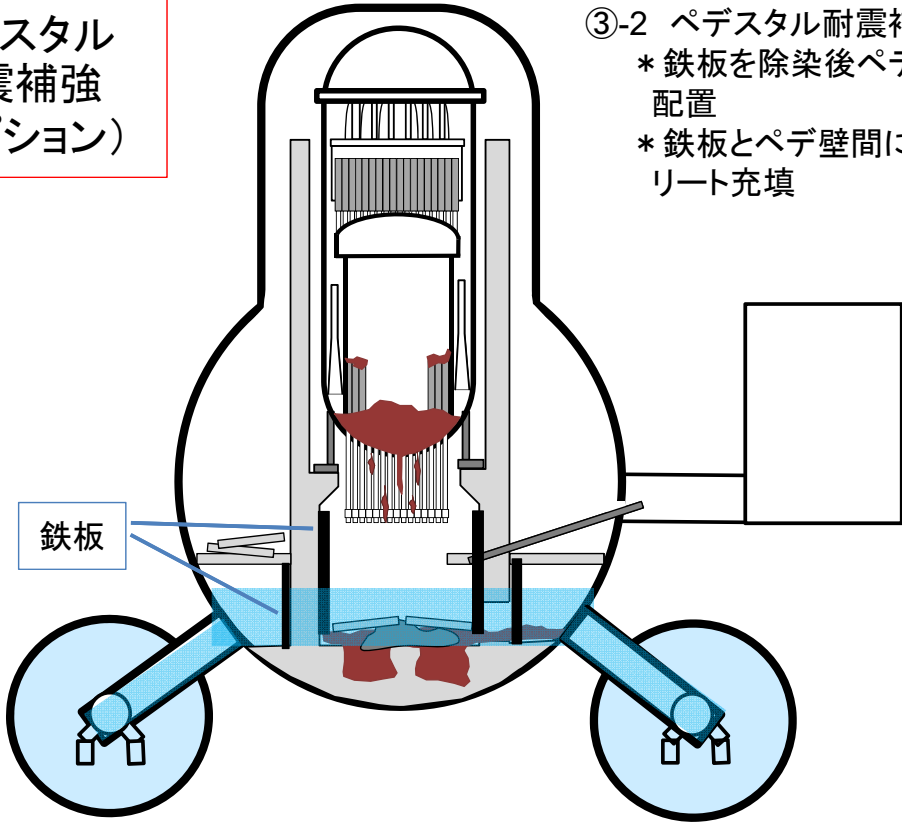
ペDESTアル
内部除染



- ③ ペDESTアル内壁除染
- * ジェット洗浄
- * 窒素冷却除染

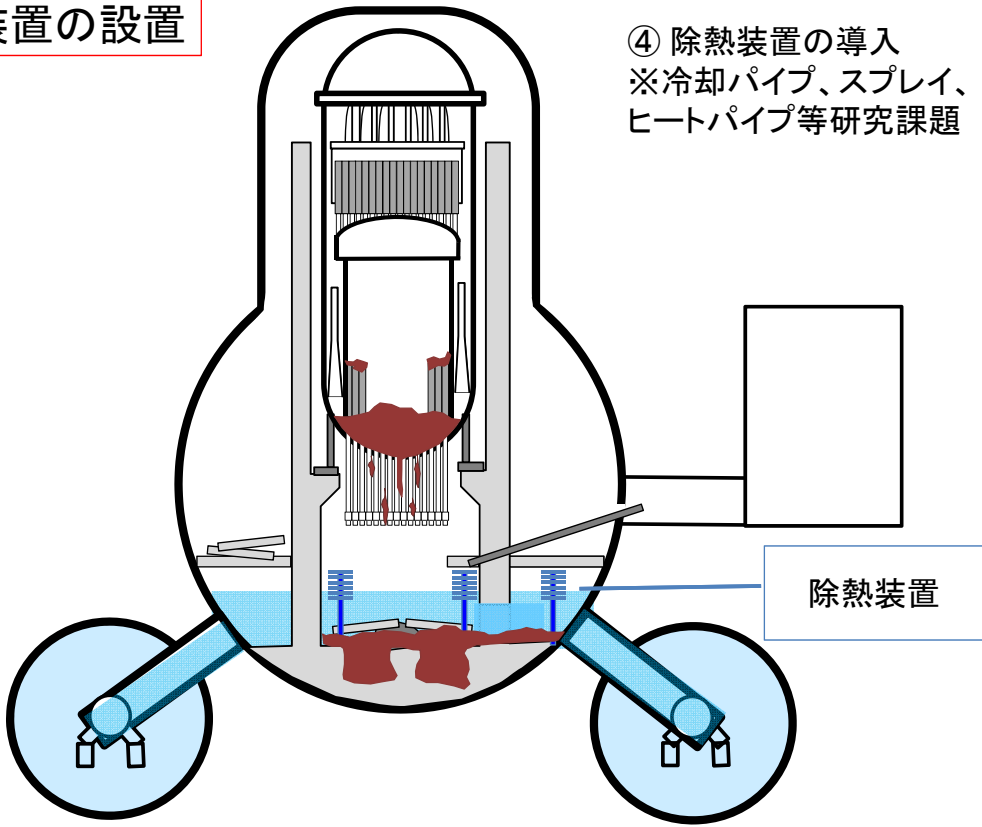
ペDESTAL耐震補強
(オプション)

③-2 ペDESTAL耐震補強
* 鉄板を除染後ペDESTAL壁に配置
* 鉄板とペDESTAL壁間にコンクリート充填

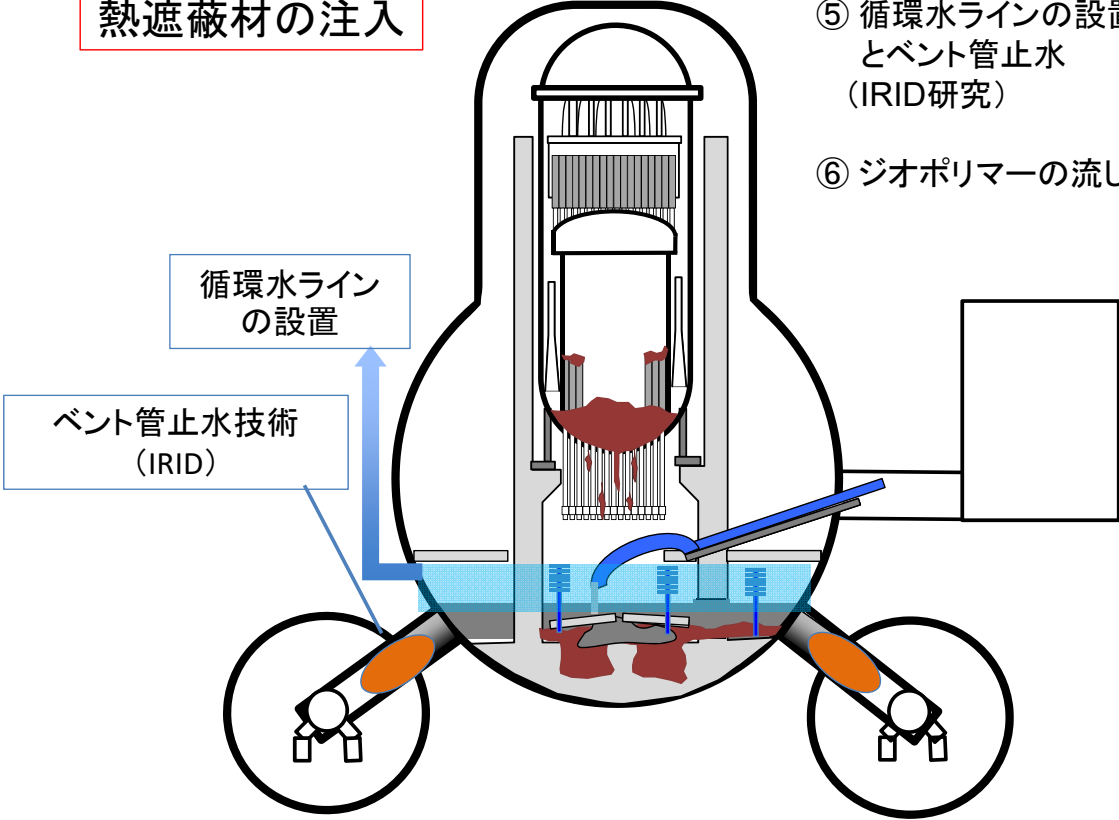


除熱装置の設置

④ 除熱装置の導入
※冷却パイプ、スプレイ、ヒートパイプ等研究課題



熱遮蔽材の注入

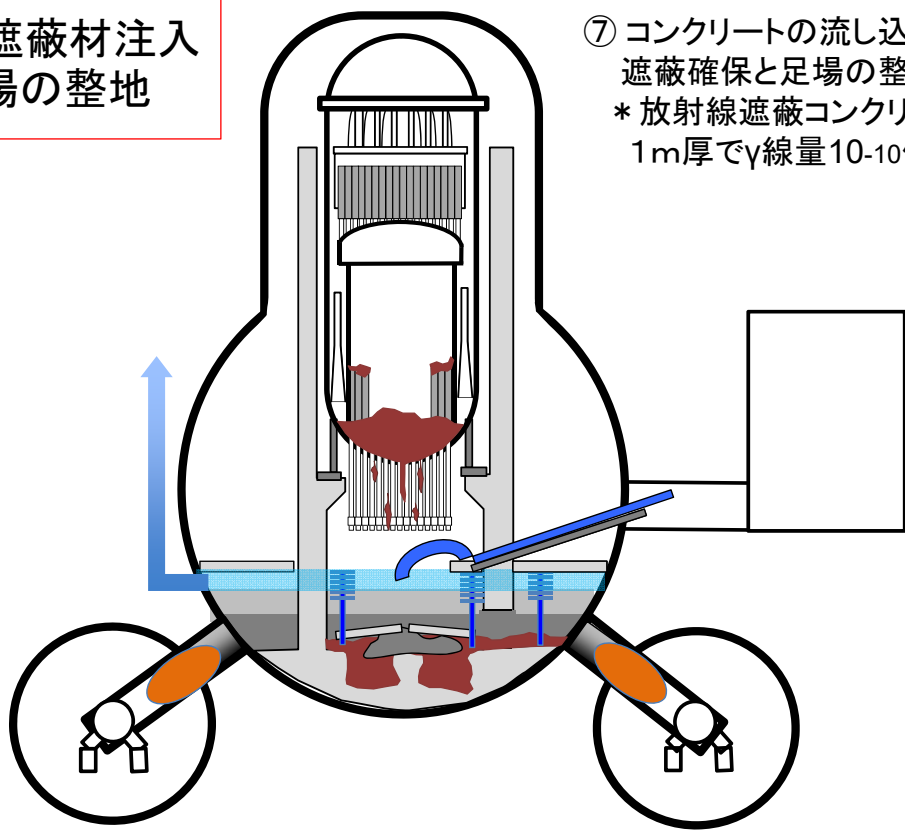


- ⑤ 循環水ラインの設置とベント管止水 (IRID研究)
- ⑥ ジオポリマーの流し込み

循環水ラインの設置

ベント管止水技術 (IRID)

放射線遮蔽材注入と足場の整地

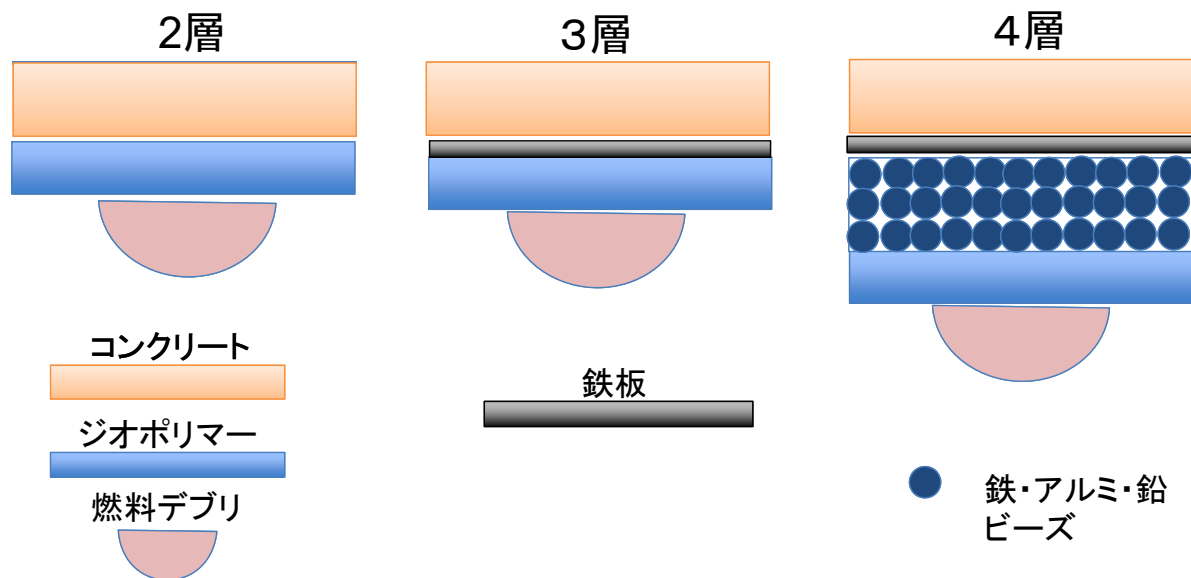


- ⑦ コンクリートの流し込み、遮蔽確保と足場の整地
* 放射線遮蔽コンクリート
1m厚でγ線量10-10倍に低減

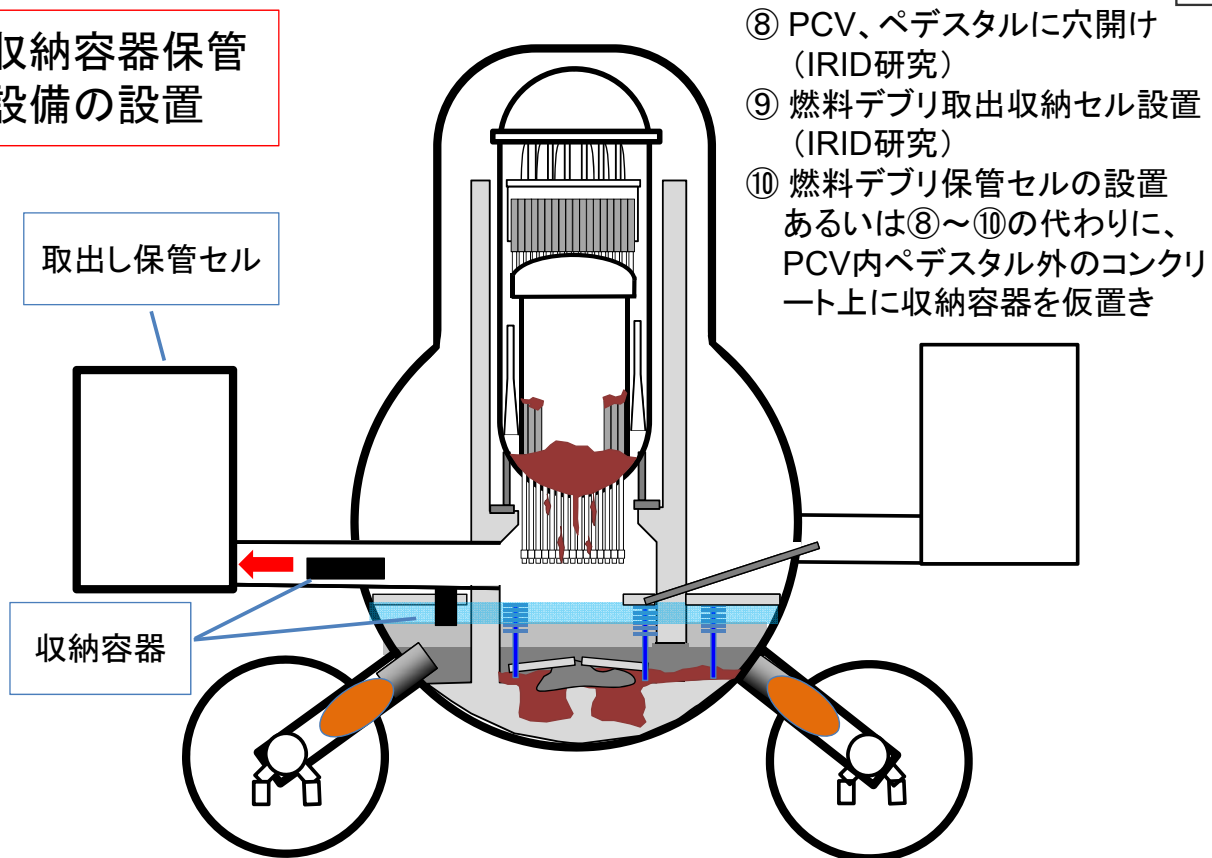
ジオポリマーの活用

特徴

- ・耐熱性に優れる
- ・耐放射線性に優れる
- ・放射性物質の閉じ込め性に実績あり
- ・保有水なし

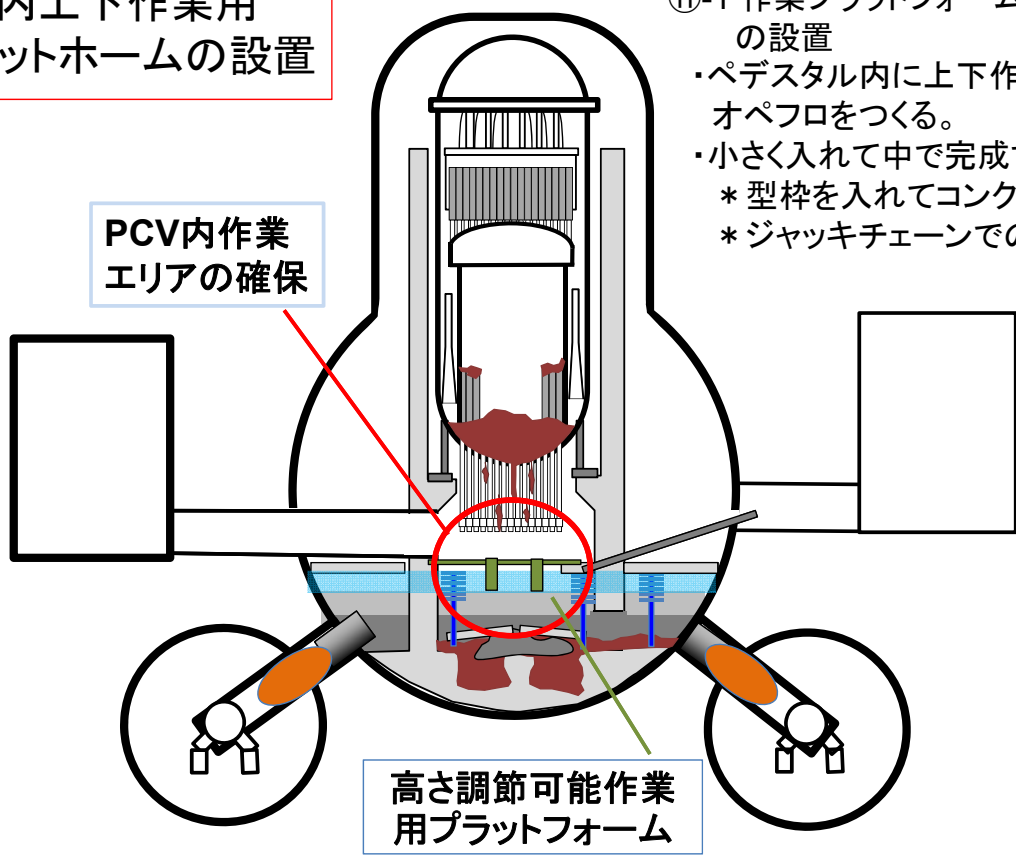


収納容器保管設備の設置



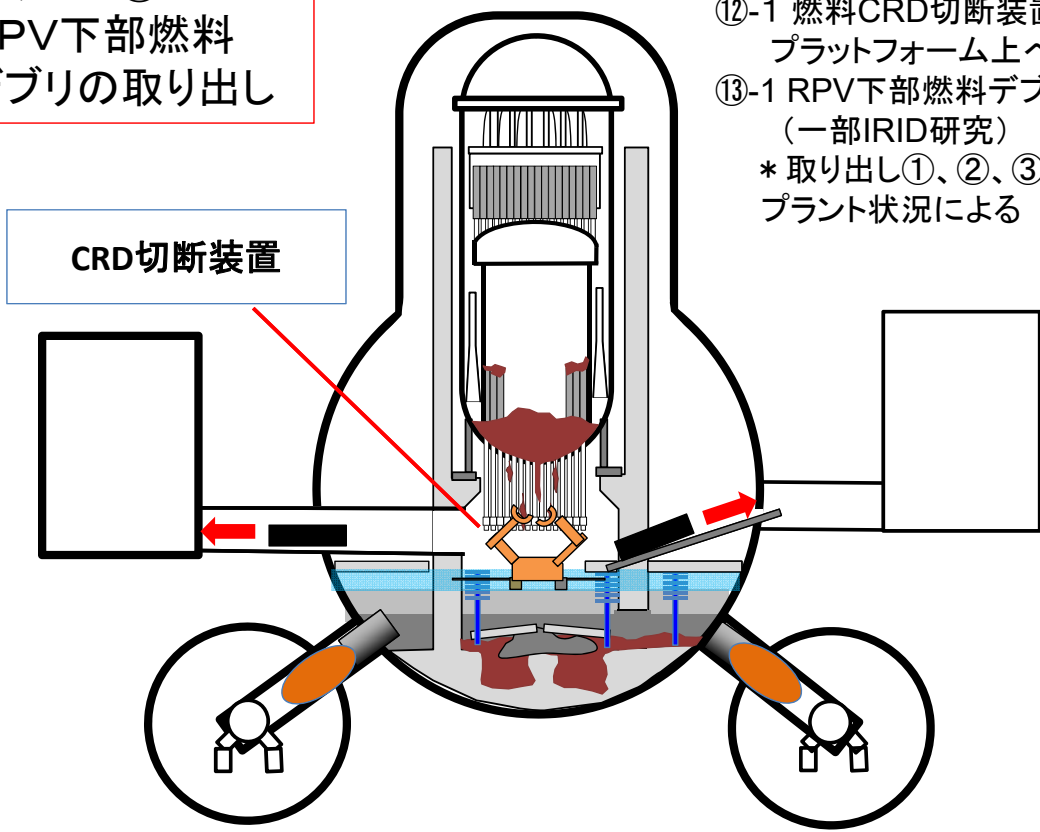
PCV内上下作業用
プラットフォームの設置

- ⑪-1 作業プラットフォーム(ペデ内)の設置
 - ・ペDESTAL内に上下作業が容易なオペフロをつくる。
 - ・小さく入れて中で完成する。
 - * 型枠を入れてコンクリで固める。
 - * ジャッキチェーンでのばす。



取り出し①
RPV下部燃料
デブリの取り出し

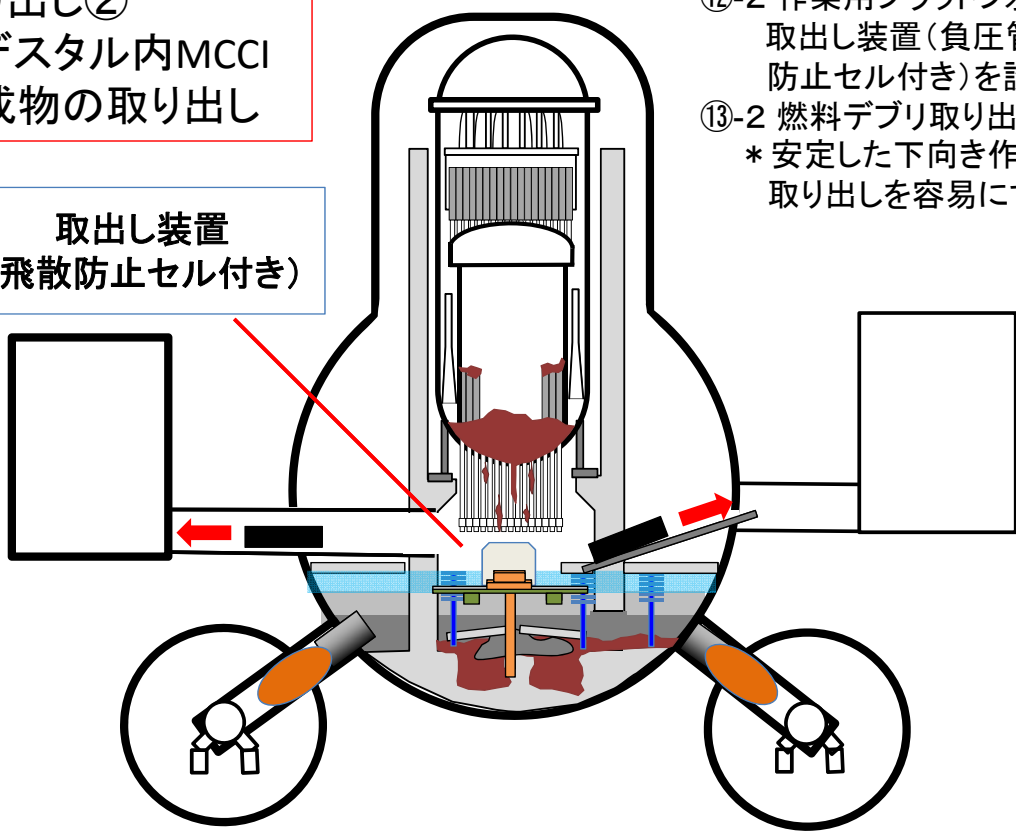
- ⑫-1 燃料CRD切断装置のプラットフォーム上への設置
- ⑬-1 RPV下部燃料デブリ取り出し (一部IRID研究)
 - * 取り出し①、②、③の順番はプラント状況による



取り出し②
ペDESTAL内MCCI
生成物の取り出し

取出し装置
(飛散防止セル付き)

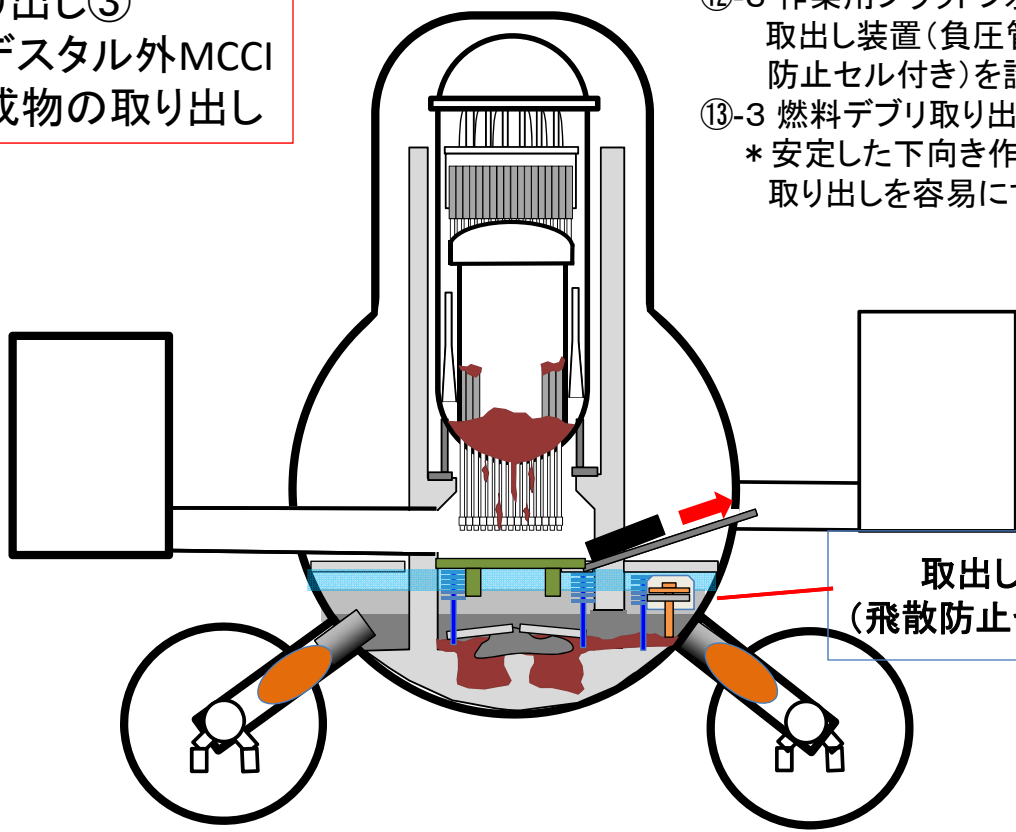
- ⑫-2 作業用プラットフォームに
取出し装置(負圧管理飛散
防止セル付き)を設置
- ⑬-2 燃料デブリ取り出し
* 安定した下向き作業により、
取り出しを容易にする



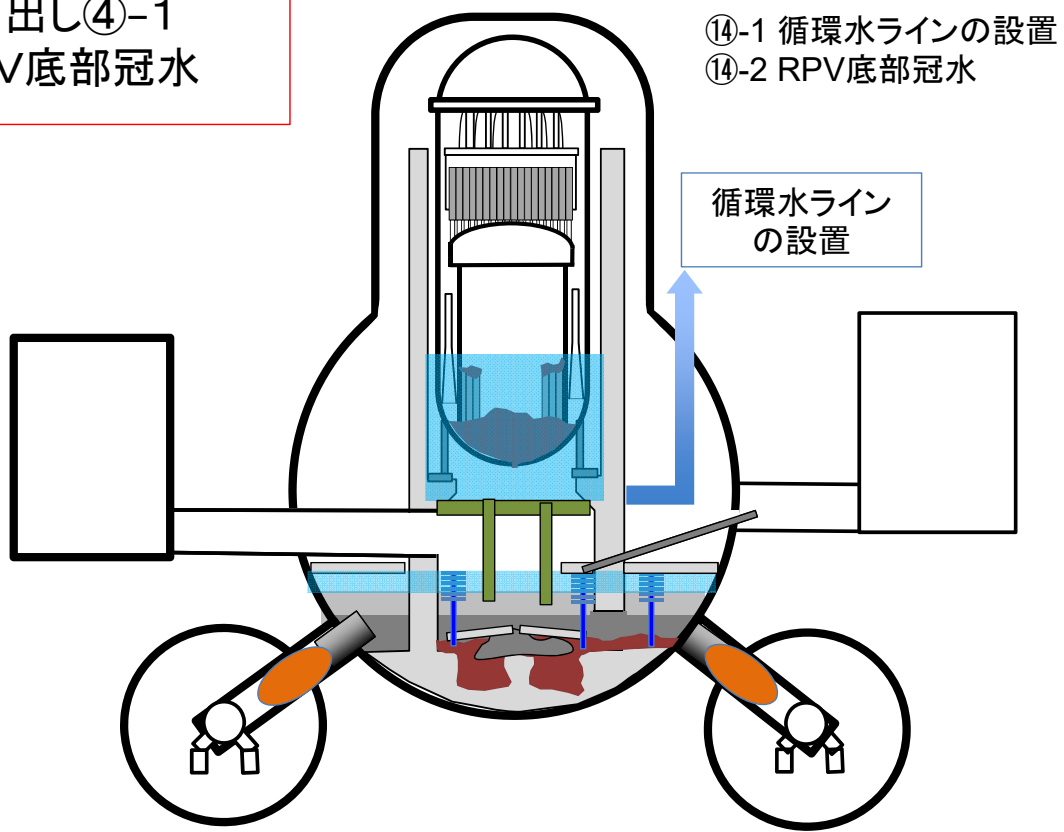
取り出し③
ペDESTAL外MCCI
生成物の取り出し

- ⑫-3 作業用プラットフォームに
取出し装置(負圧管理飛散
防止セル付き)を設置
- ⑬-3 燃料デブリ取り出し
* 安定した下向き作業により、
取り出しを容易にする

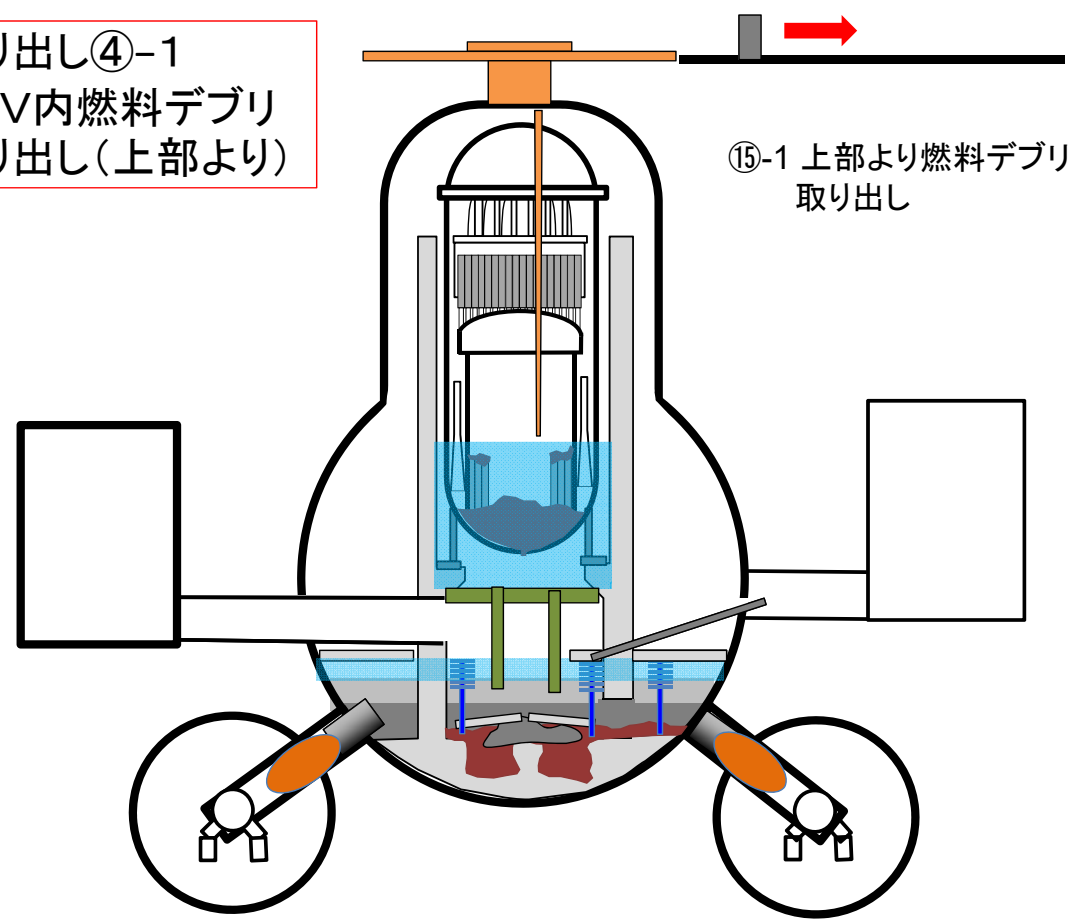
取出し装置
(飛散防止セル付き)



取り出し④-1
RPV底部冠水

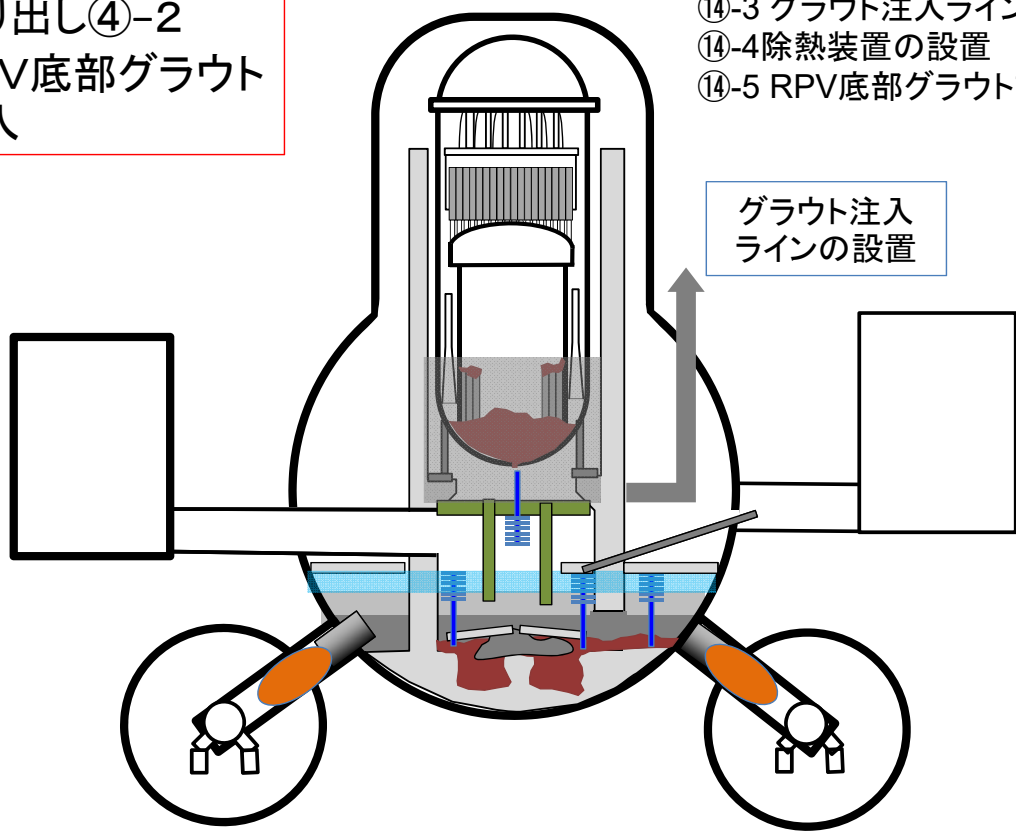


取り出し④-1
RPV内燃料デブリ
取り出し(上部より)



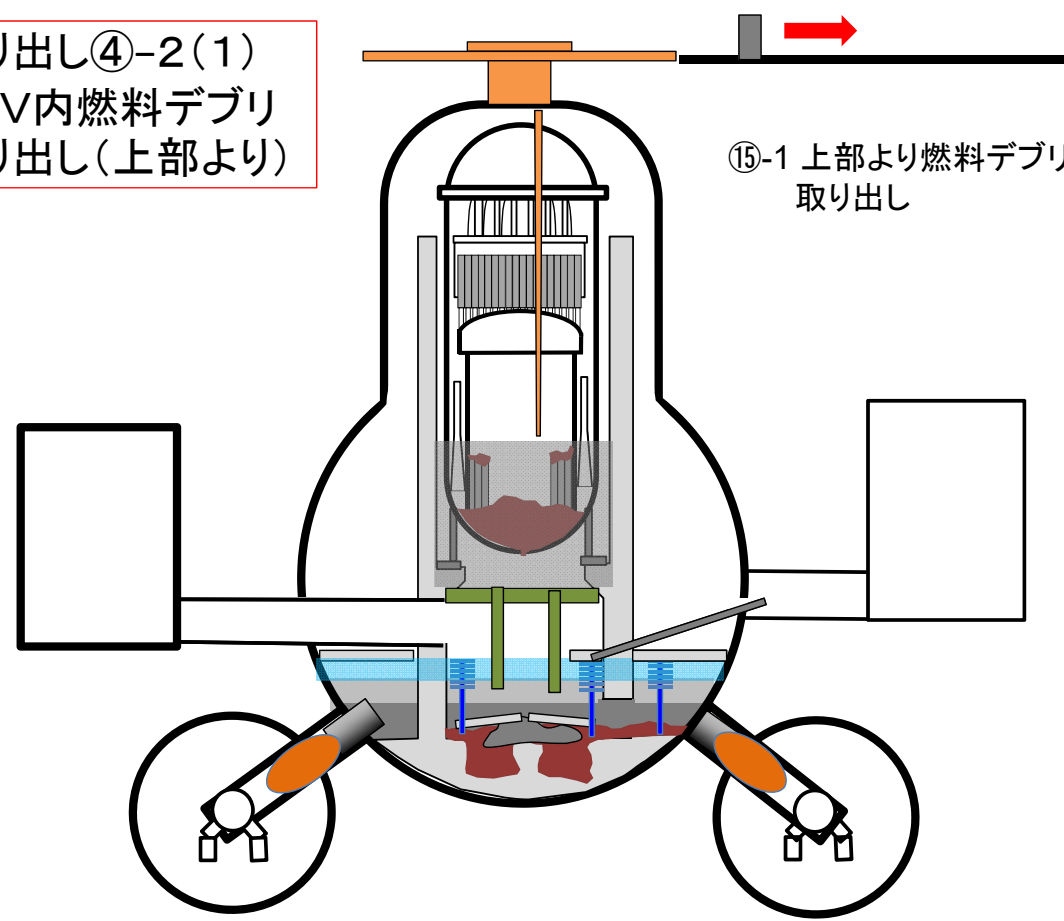
取り出し④-2
RPV底部グラウト
注入

- ⑭-3 グラウト注入ラインの設置
- ⑭-4 除熱装置の設置
- ⑭-5 RPV底部グラウト詰め



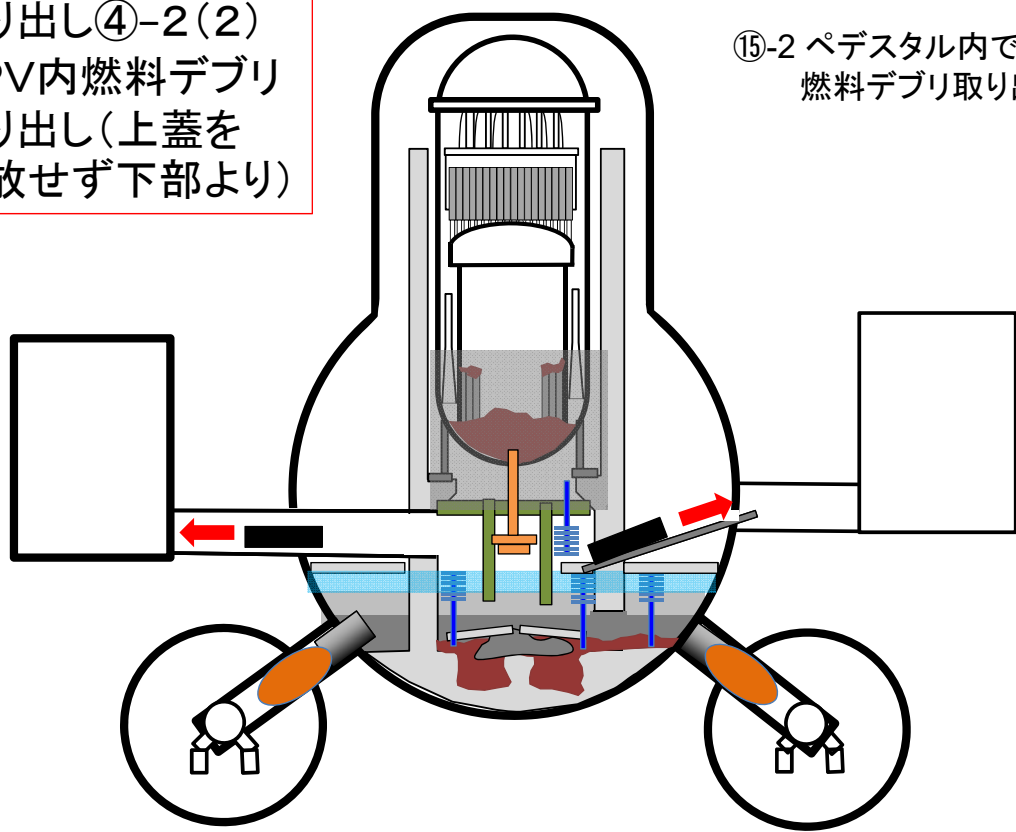
取り出し④-2(1)
RPV内燃料デブリ
取り出し(上部より)

- ⑮-1 上部より燃料デブリ
取り出し



取り出し④-2(2)
RPV内燃料デブリ
取り出し(上蓋を
開放せず下部より)

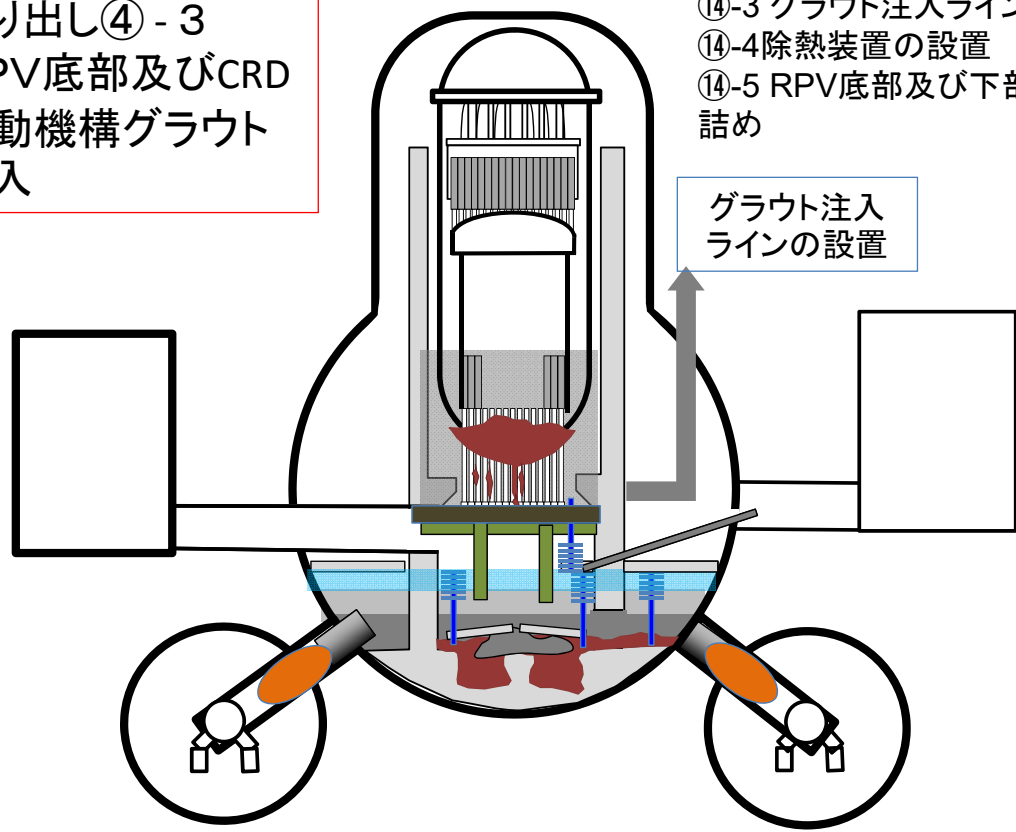
⑮-2 ペDESTAL内
燃料デブリ取り出し



取り出し④-3
RPV底部及びCRD
駆動機構グラウト
注入

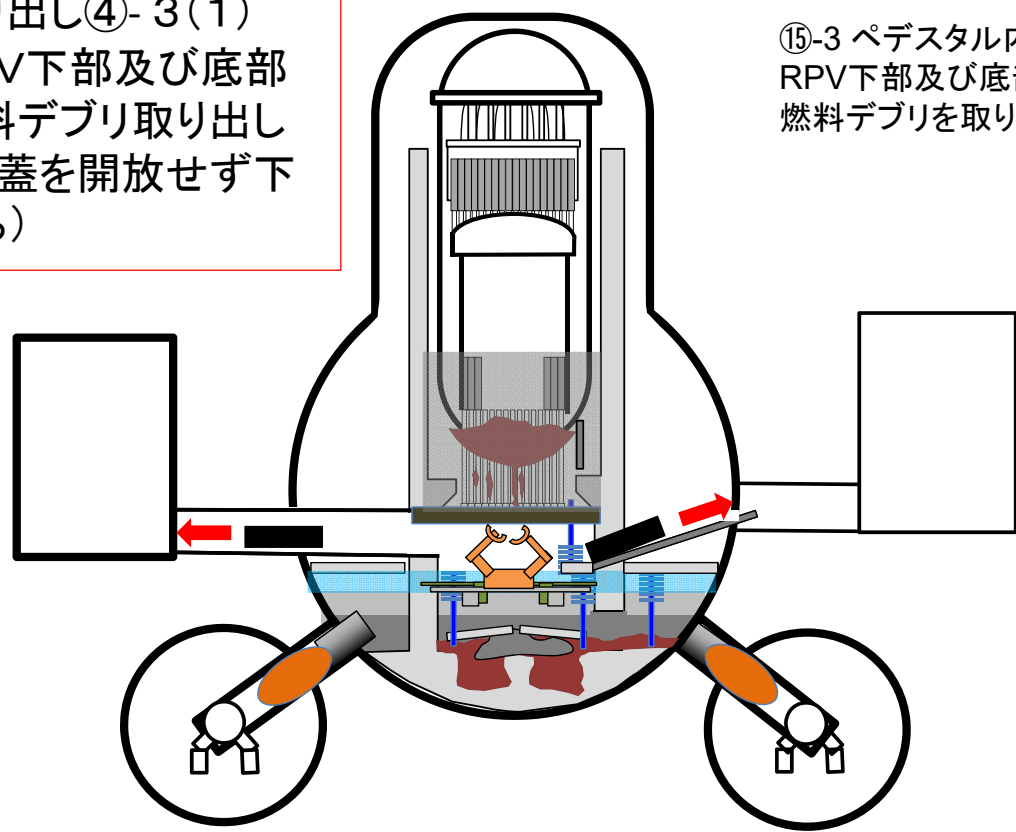
⑭-3 グラウト注入ラインの設置
⑭-4 除熱装置の設置
⑭-5 RPV底部及び下部グラウト
詰め

グラウト注入
ラインの設置



取り出し④- 3(1)
RPV下部及び底部
燃料デブリ取り出し
(上蓋を開放せず下
から)

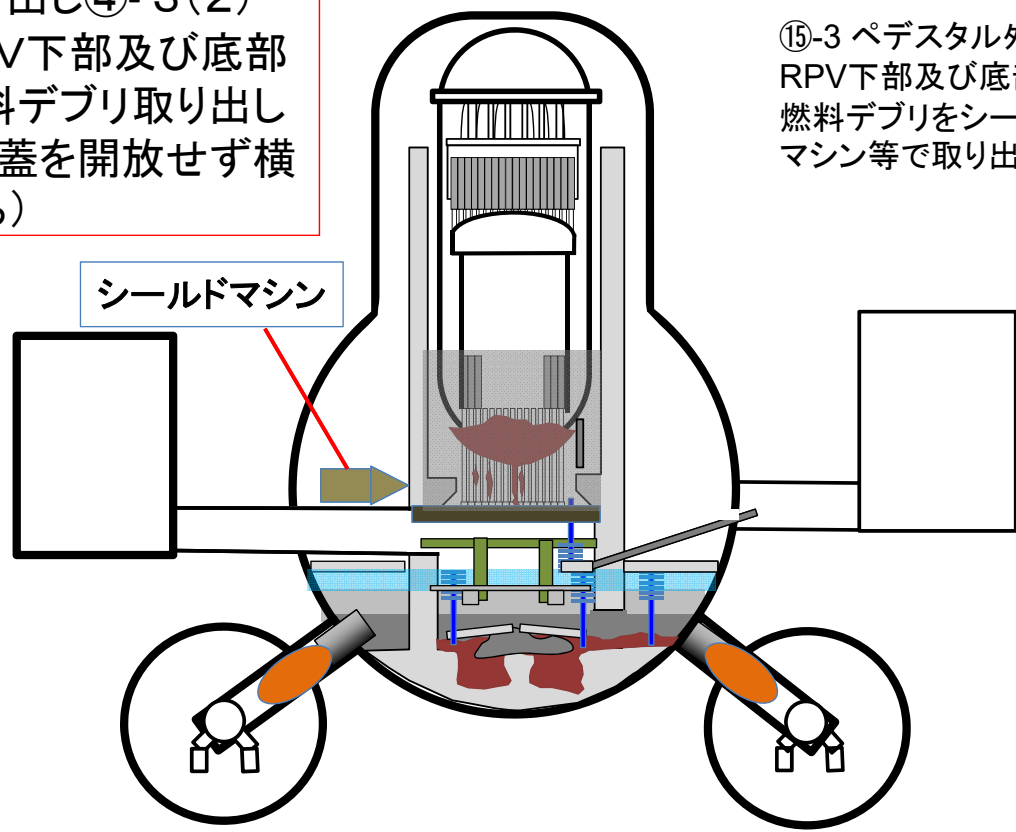
⑮-3 ペDESTAL内で
RPV下部及び底部の
燃料デブリを取り出し



取り出し④- 3(2)
RPV下部及び底部
燃料デブリ取り出し
(上蓋を開放せず横
から)

⑮-3 ペDESTAL外から
RPV下部及び底部の
燃料デブリをシールド
マシン等で取り出し

シールドマシン



<工法成立のための課題>

- ① ジオポリマー、コンクリートの施工性評価(含む埋め戻し)
- ② 施工材の耐久性・強度評価(IRID水中不分離コンクリートや早大重泥水技術+高レベル廃棄物保管技術の情報活用)
- ③ MCCI生成物及びRPV底部の除熱
- ④ 耐環境・放射線ロボットの開発(IRID液圧マニピュレータの活用)
- ⑤ ペDESTAL内機器撤去(IRIDペデ内アクセス装置の活用)
- ⑥ デブリ取り出し装置・治具の開発^⑧(IRID取り出し技術の活用)
- ⑦ PCV側面アクセス技術(IRID遠隔シール溶接技術の活用)
- ⑧ 負圧管理システムの構築(IRID技術の活用)
- ⑨ 小循環水ライン(IRID技術の活用)またはグラウト注入ラインの設置と切り替え手順
- ⑩ 水・放射性物質のシール性確保(IRID技術の活用)
- ⑪ キャスク保管時の臨界評価(IRID研究参考)
- ⑫ 収納缶内ジオポリマーの水素発生量評価
- ⑬ 廃棄物量の低減

<今までのブレインストーミングのまとめ>

○燃料デブリ取り出しにおいて、本質的に何が幹であるか上位の概念を議論した結果、コンパクトな空間で放射性物質を閉じ込めて取り出すことが重要との結論に至った。

○今後は得られた要求機能に基づき、他分野も参考にしつつ可能な機構を検討し、リスク評価を行いながら、工学的成立性を追求する。

謝辞

本内容は、文科省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」の東京大学「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成」プログラムの成果である。