

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

平成29年6月26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

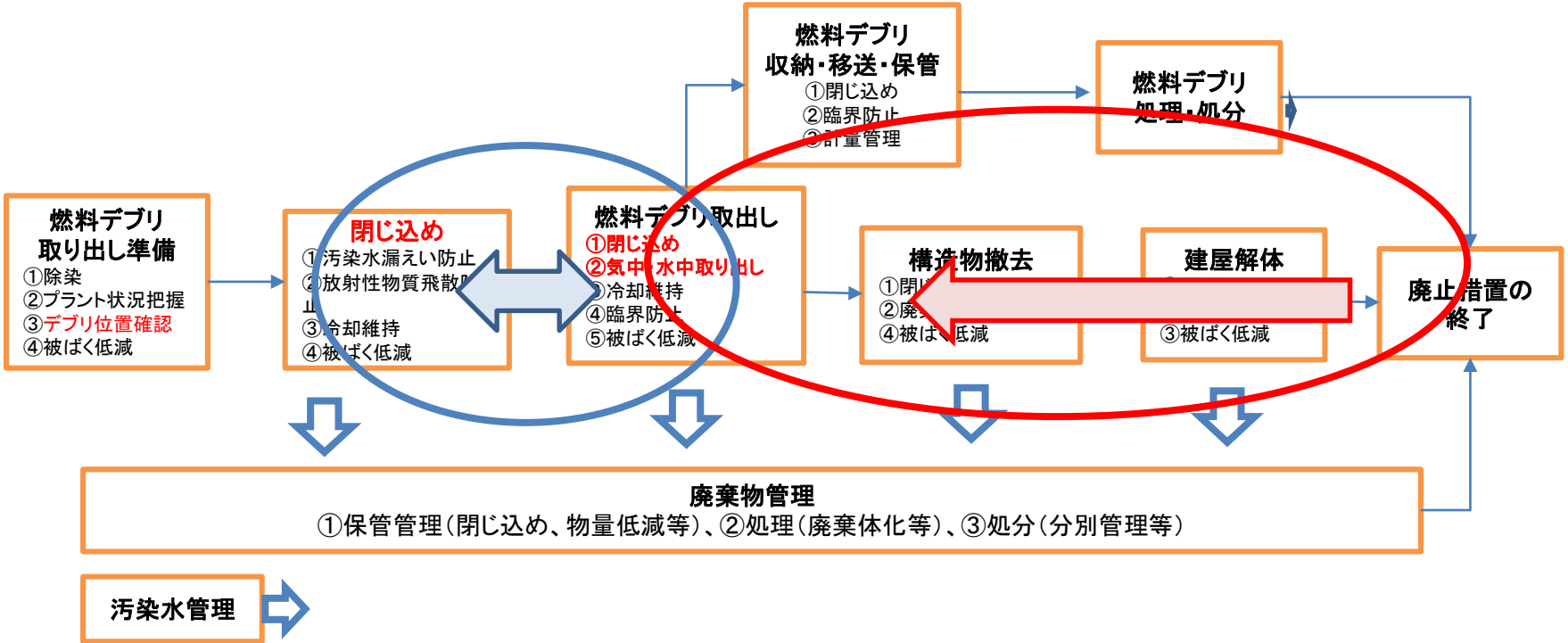
# 福島第一廃止措置における リスク管理の特徴

- 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て、ロバストな設計を行うことは、極めて重要である。
- 福島廃炉では、多種多様な放射性物質飛散状況が明確でなく、広範囲にわたっている。全体を先ずは覆ってリスクを下げてから、燃料デブリを取り出す手法も合理的かつ安全な手法と判断される。
- 現在IRIDが開発中の工法を本筋としながら、二の矢・三の矢の工法も併せて検討・準備することは重要。

# 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)

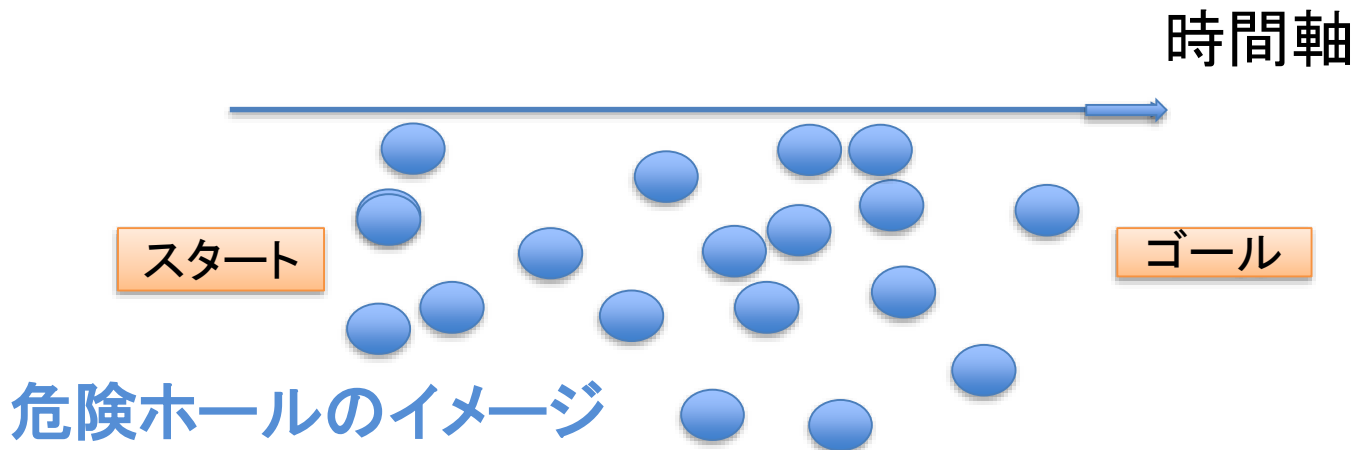
- ① 仮説を立てて将来予測
- ② 仮定にもとづき取り出し方法策定
- ③ 上記方法のリスクを検討
- ④ 予測をベースに投資
- ⑤ 成果を実現するために実行

## (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)



要求機能-機能構成-機能要素 — 機構要素-構造要素-全体構造

( テーマ - 課題 - 課題要素 — 具体的解決策 - 具体案 - 全体計画 )

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）
- ・取り出し工法の新たな概念（デブリGr）

## 3. 廃棄物（廃棄物Gr）

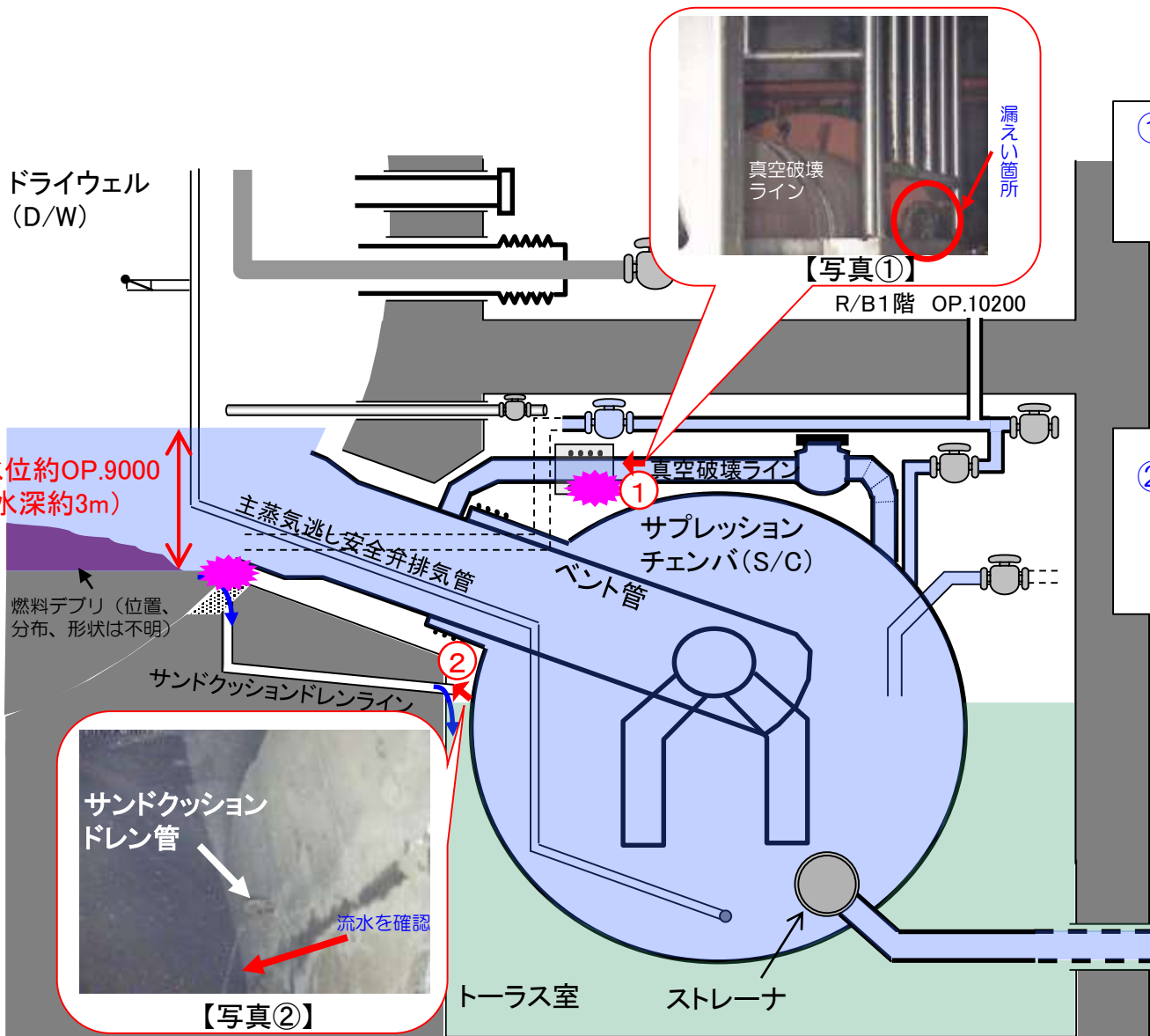
- ・何故失敗したのか
- ・エンドステートとは何か、安定化とは何か
- ・安定化の対象は何か、危険ホールは何か
- ・処理・処分の新たな概念



# 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



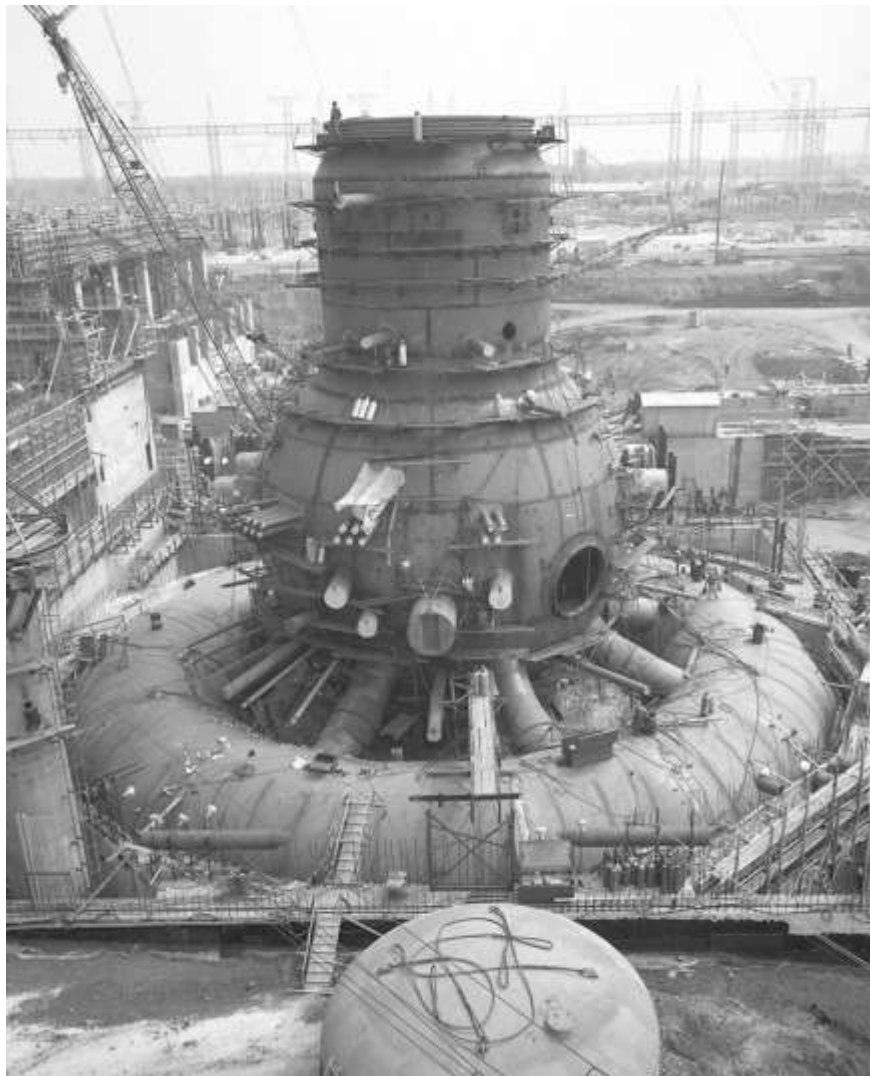
①真空破壊ラインのベローズ部分からの漏えいを確認。  
(写真①参照)

②サンドクッションドレン管からの流水を確認。  
(写真②参照)

→ポンプへ  
(R/B地下階三角コーナー等)

東京電力提供資料

## 沸騰水型原子炉(BWR) 格納容器(PCV)



「Browns Ferry Unit 1 under construction 1966.Sep.」  
Tennessee Valley Authority – TVA's 75th Anniversary webpage

### PCV開口部

ハッチ、ベント管、配管ペネ  
および電気ペネ

1号機 約150か所  
2号機 約200か所  
3号機 約190か所

# 閉じ込めで何が重要か？（機構）

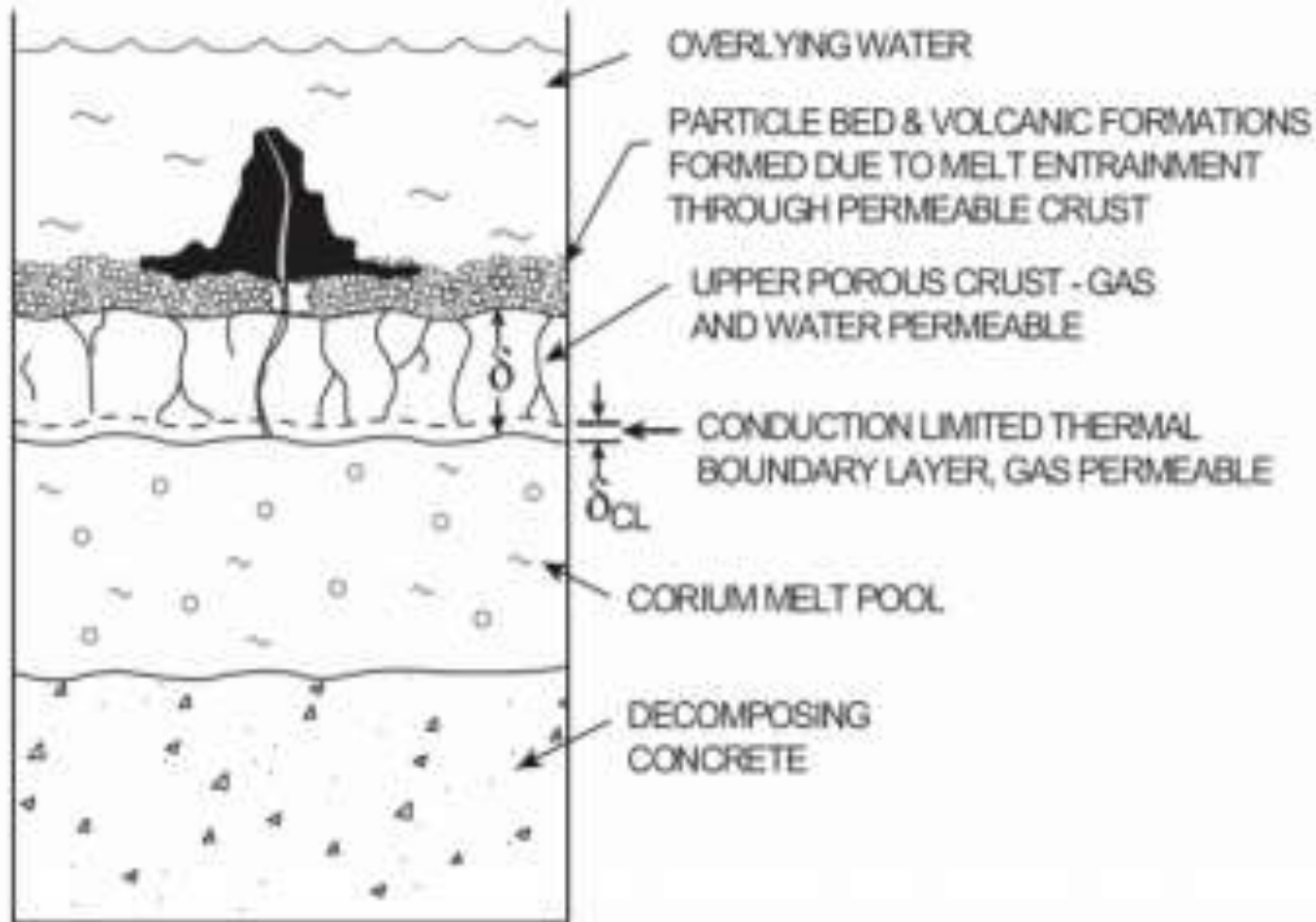
要求機能から求められる機構（一例）は、

- (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、 $\alpha$ 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、 $\alpha$ 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（極力、機械的切断を採用）
- (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）

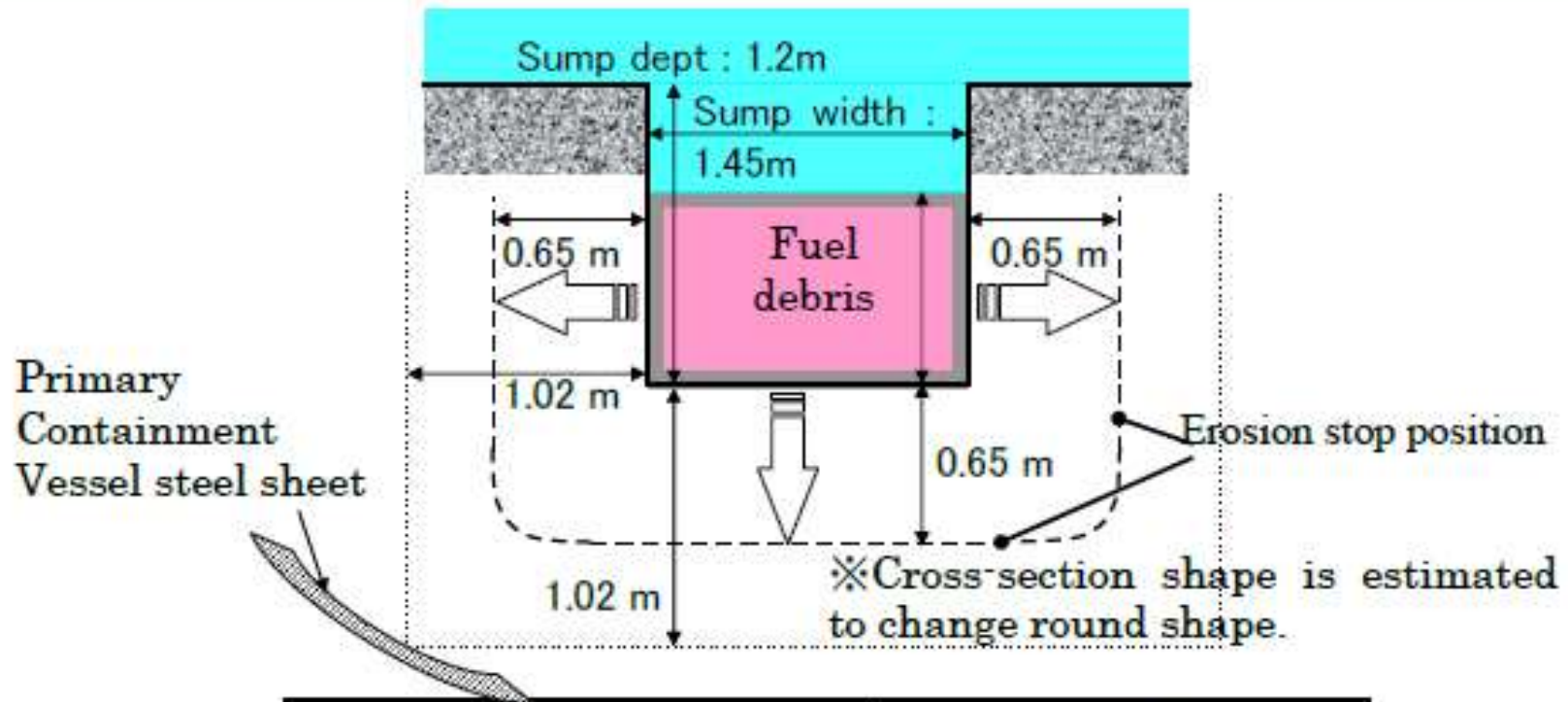
# Phenomena of MCCI



*phenomena during top flooding (ANL)*



# MCCI Analysis Result, Unit 1



Ratio of falling core	100%
Deposition thickness of fuel debris	0.81m
Erosion depth	0.65m

# 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）ジオポリマー等で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 $\alpha$ 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



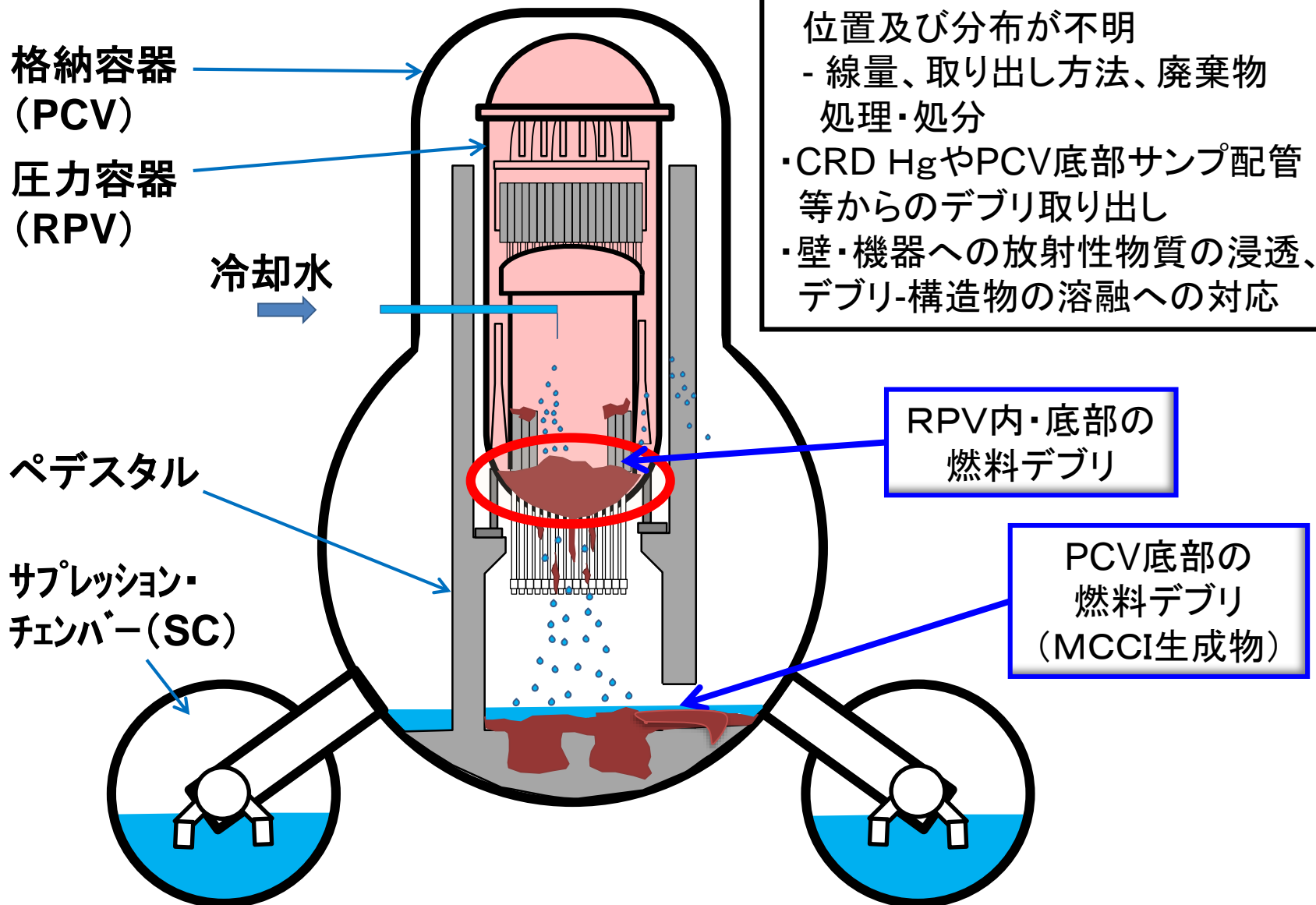
## PCV底部にあるMCCI生成物の取り出しで 何が重要か？（機構 続き）

- ・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
- ・整地して足場をすることにより、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)

- 気中一横アクセス工法
- 気中一上アクセス工法

# 現状



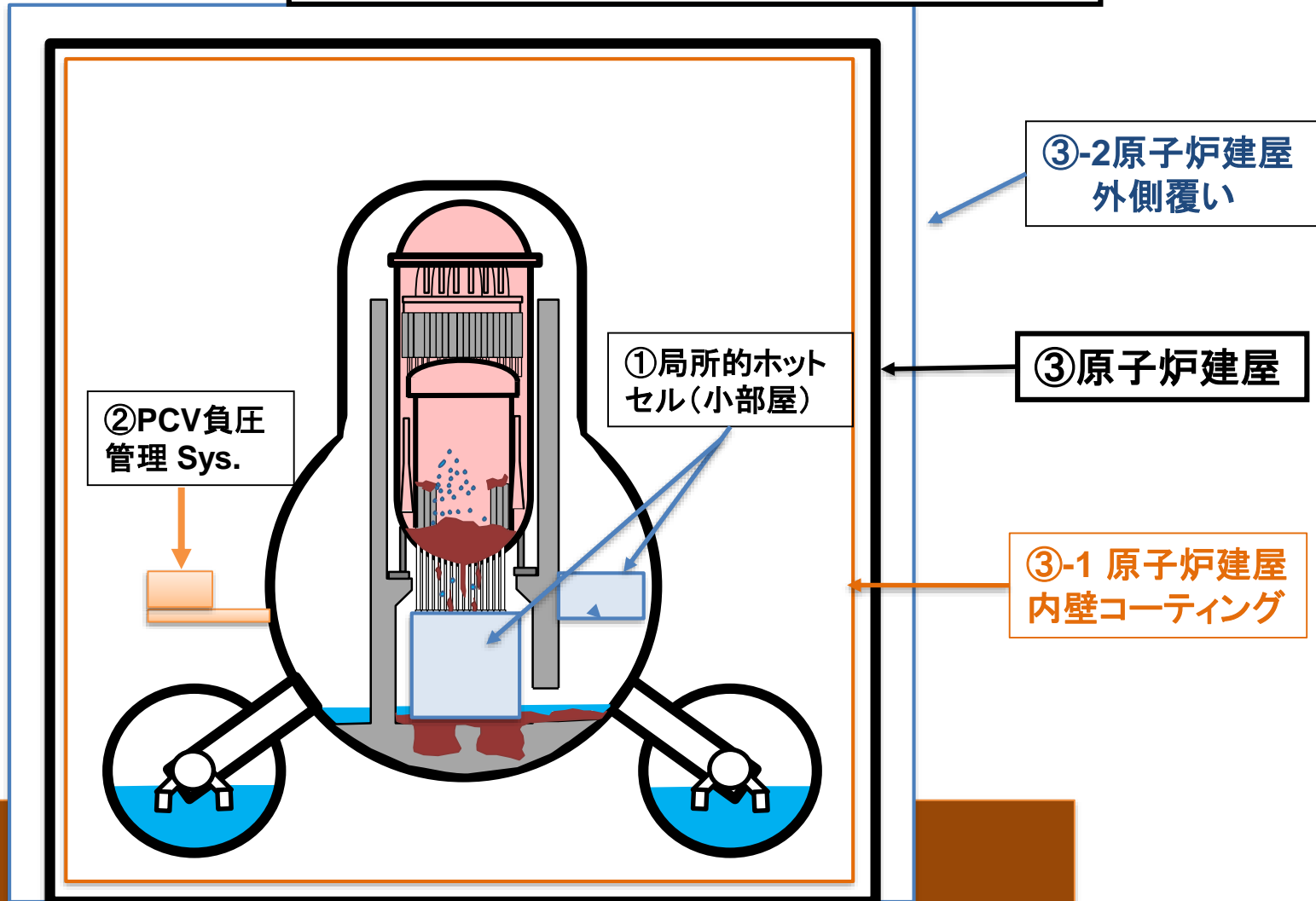
## 課題:

- ・燃料デブリ、Cs, Co含有材等の位置及び分布が不明
- 線量、取り出し方法、廃棄物処理・処分
- ・CRD HgやPCV底部サンプル配管等からのデブリ取り出し
- ・壁・機器への放射性物質の浸透、デブリ-構造物の溶融への対応

## 閉じ込め

第一の壁：局所的ホットセル

第二の壁：PCV

第三の壁：原子炉建屋（内面コーティング）  
または、原子炉建屋外側覆い

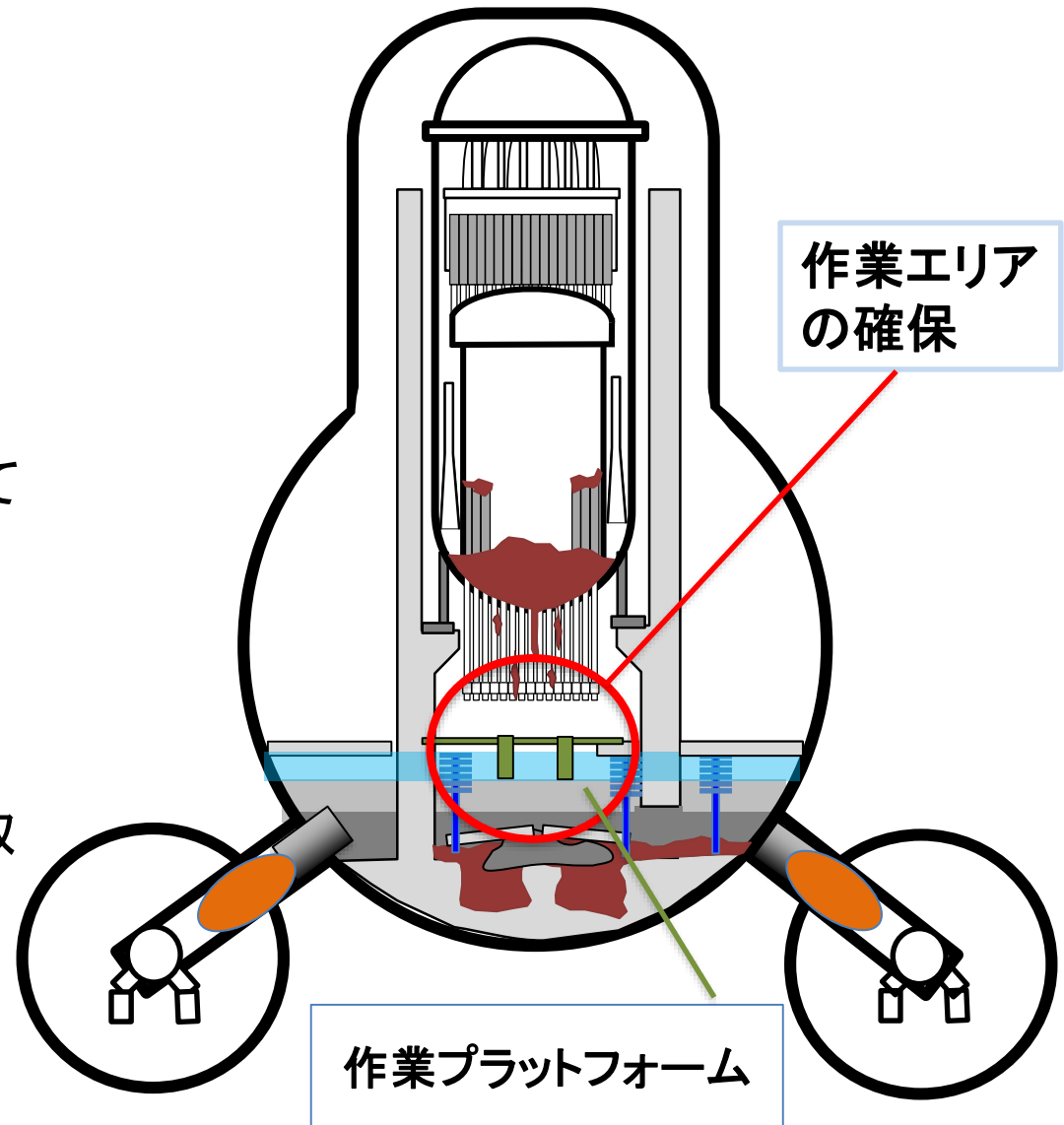
# ＜燃料デブリ取出しに関する新たな工法＞

## —ジオポリマー等で燃料デブリを準安定化してから取り出す—

基本概念：

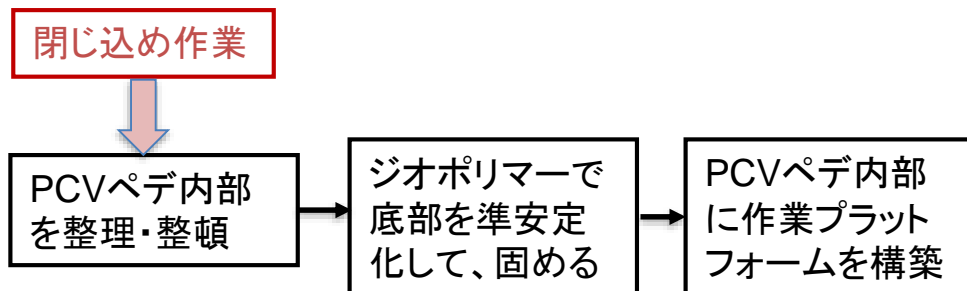
シンプルかつコンパクトに  
取り出しを行う  
(閉じ込め空間を極力小さく)

- ペデ底部開口部高さまで  
ジオポリマー等を注入して  
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

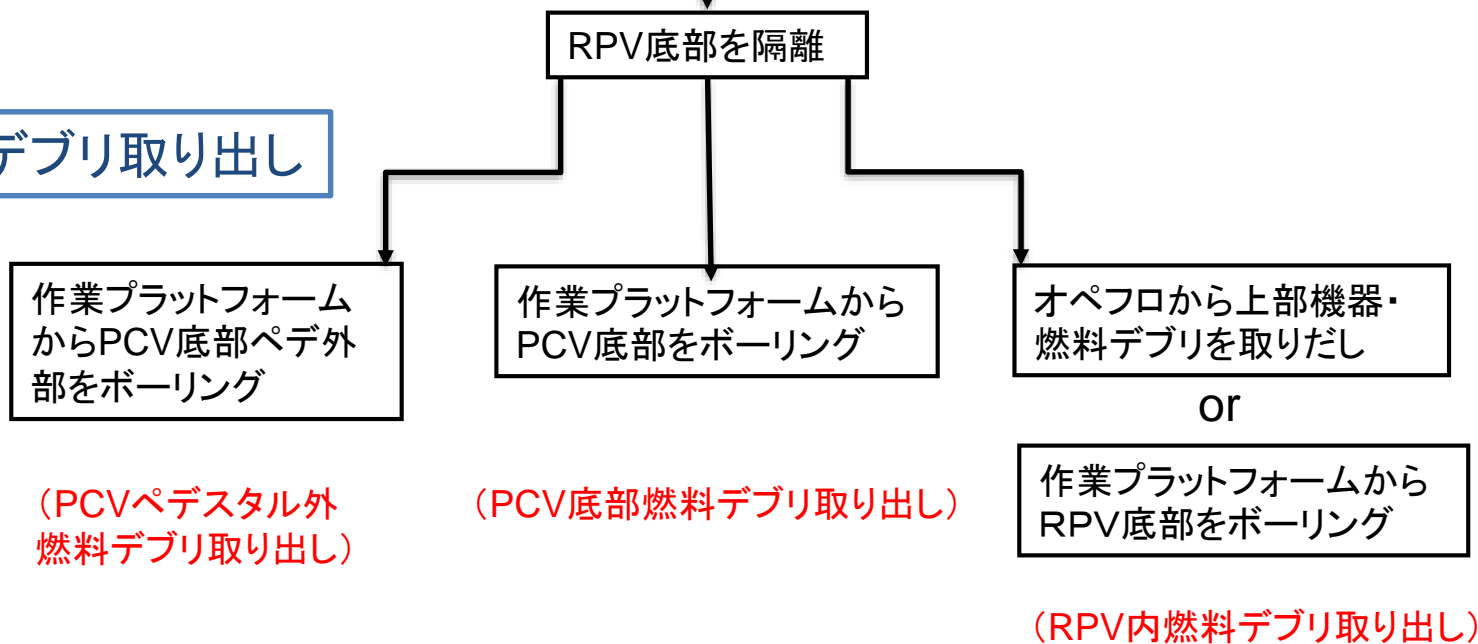


# 燃料デブリ取り出し工程の手順

## 1. 燃料デブリ取り出し準備



## 2. 燃料デブリ取り出し



## <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とトーラス室の縁切り(リスク対応)
  - ①トーラス室水位—地下水水位逆転現象防止
  - ②トー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 $\alpha$ 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 $\alpha$ 核種のトーラス室への移行防止によるトー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 ペデ内天井設置によるRPV底部及び下部取り出し
- ⑨ 上蓋非開放状態での燃料デブリ取り出しの可能性

(3) 安全上の利点(水冷が不必要になった時点)

- ⑩ 臨界管理が不要となるため時間のかかる臨界検知ガス管理が不要。
- ⑪ 余分な水がないため水素対策が不要となり、上記と併せて負圧管理のみが管理項目となる。
- ⑫ 熱が出ない、溶融しない、圧力が上がらない、化学反応がないため、バウンダリー簡素化が可能(再処理の概念)  
(静的バウンダリーのセル+動的バウンダリーの空調系)

### 3. 廃棄物における潜在的利点

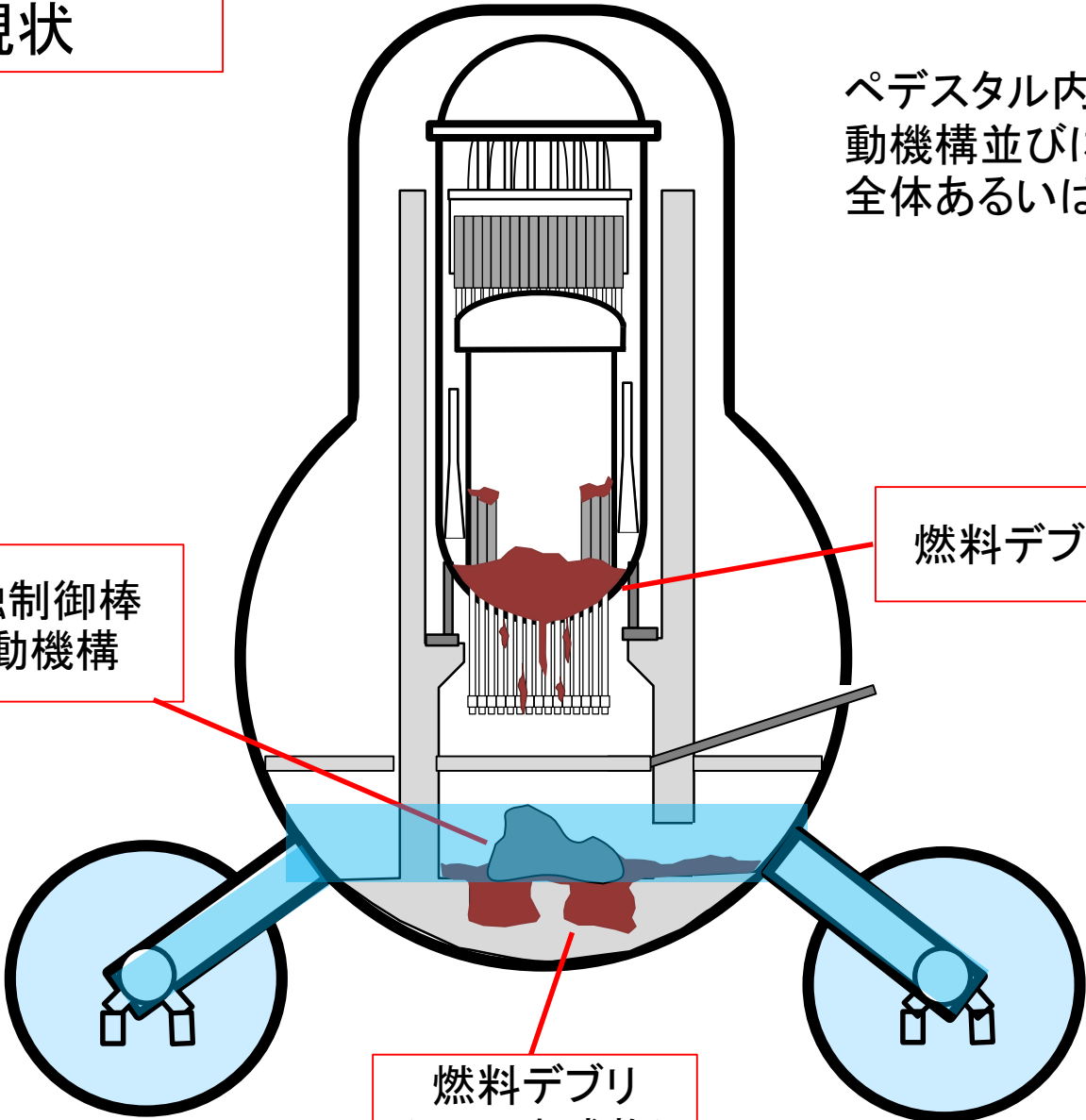
- ① 足場材と同一材を収納容器への注入することによりMCCI生成物の長期保管が可能
- ② ジオポリマーを利用して気中で取り出し保管した場合、廃棄物長期保管の重要課題である水素・腐食対応の簡素化が可能

現状

ペDESTAL内では制御棒駆動機構並びに付帯設備が、全体あるいは局部的に溶融

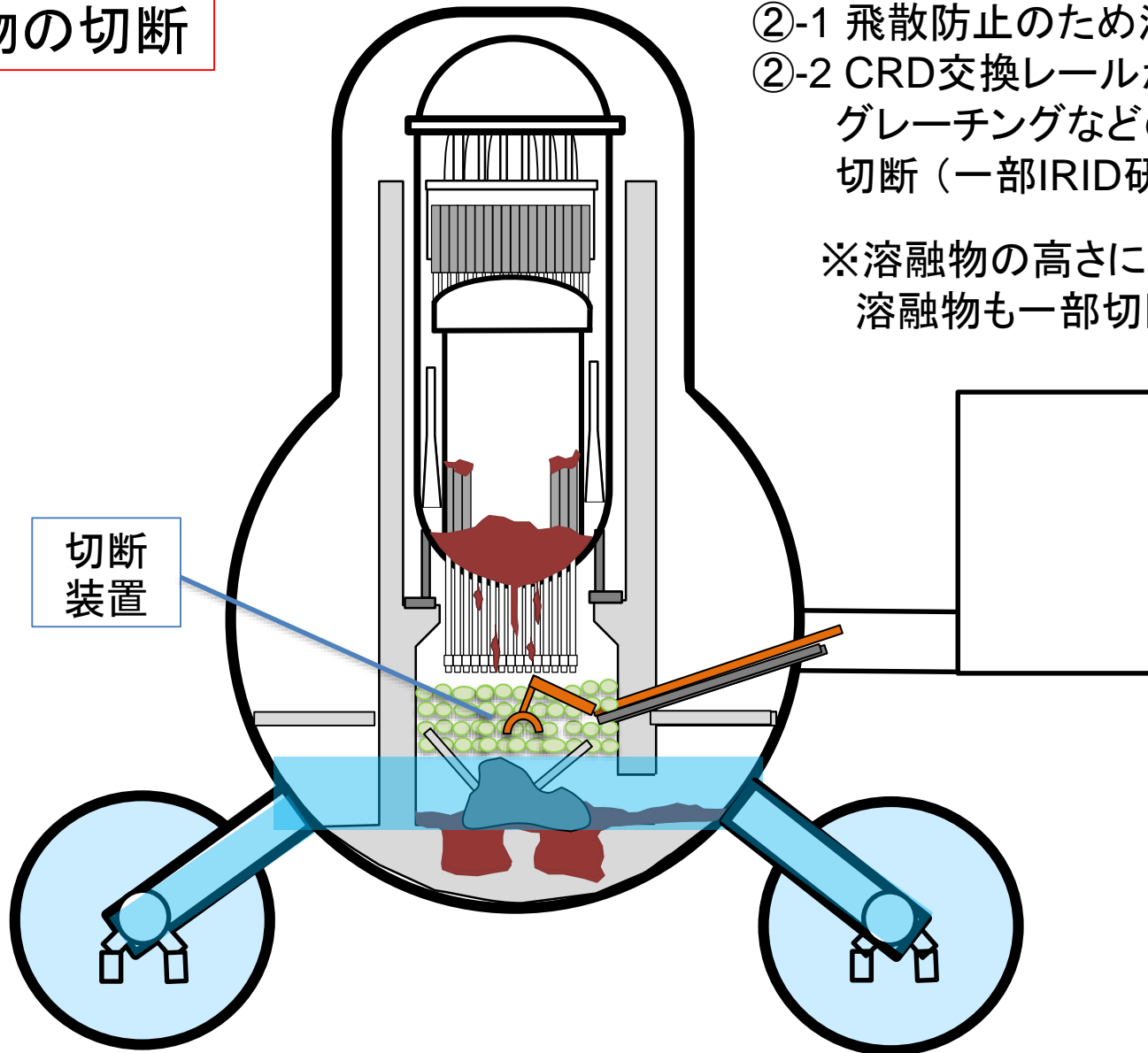
溶融制御棒駆動機構

燃料デブリ



燃料デブリ (MCCI生成物)

## 障害物の切断

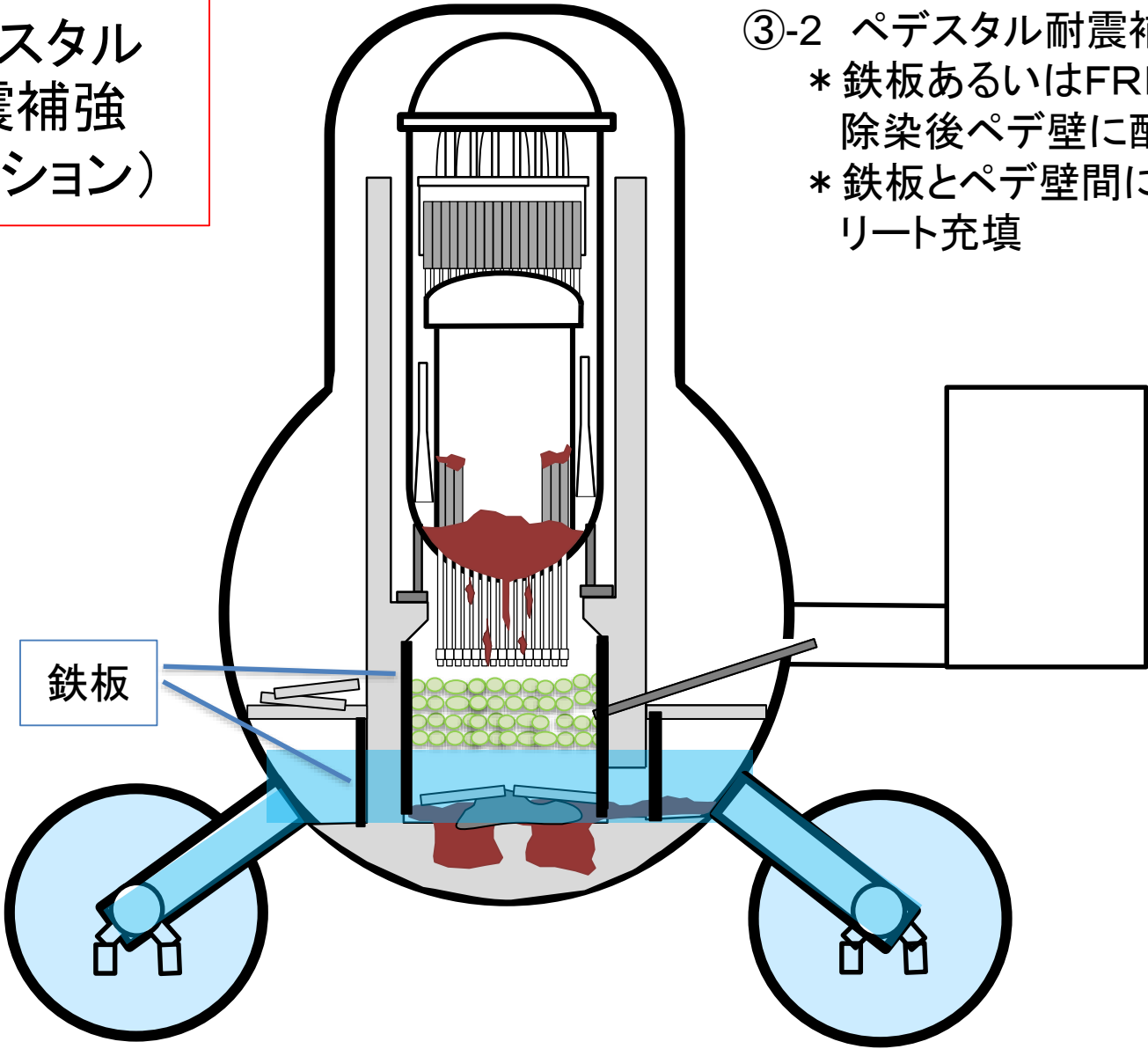


- ②-1 飛散防止のため泡を張る
- ②-2 CRD交換レールから遠隔で  
グレーチングなどの障害物を  
切断（一部IRID研究）

※溶融物の高さによっては  
溶融物も一部切断

ペDESTAL耐震補強  
(オプション)

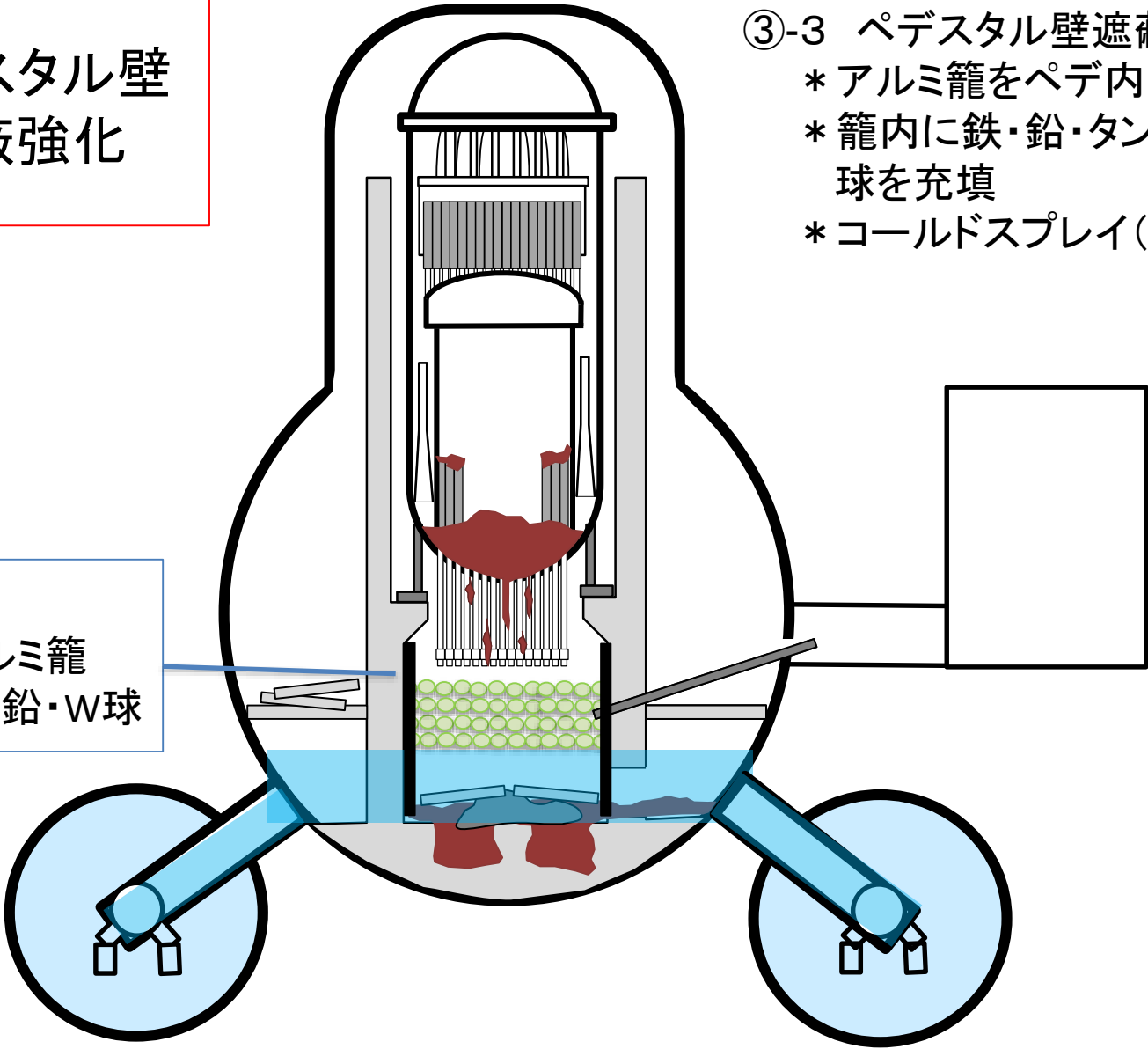
- ③-2 ペDESTAL耐震補強
- \* 鉄板あるいはFRPを  
除染後ペDESTAL壁に配置
- \* 鉄板とペDESTAL壁間にコンク  
リート充填



ペDESTAL壁  
遮蔽強化

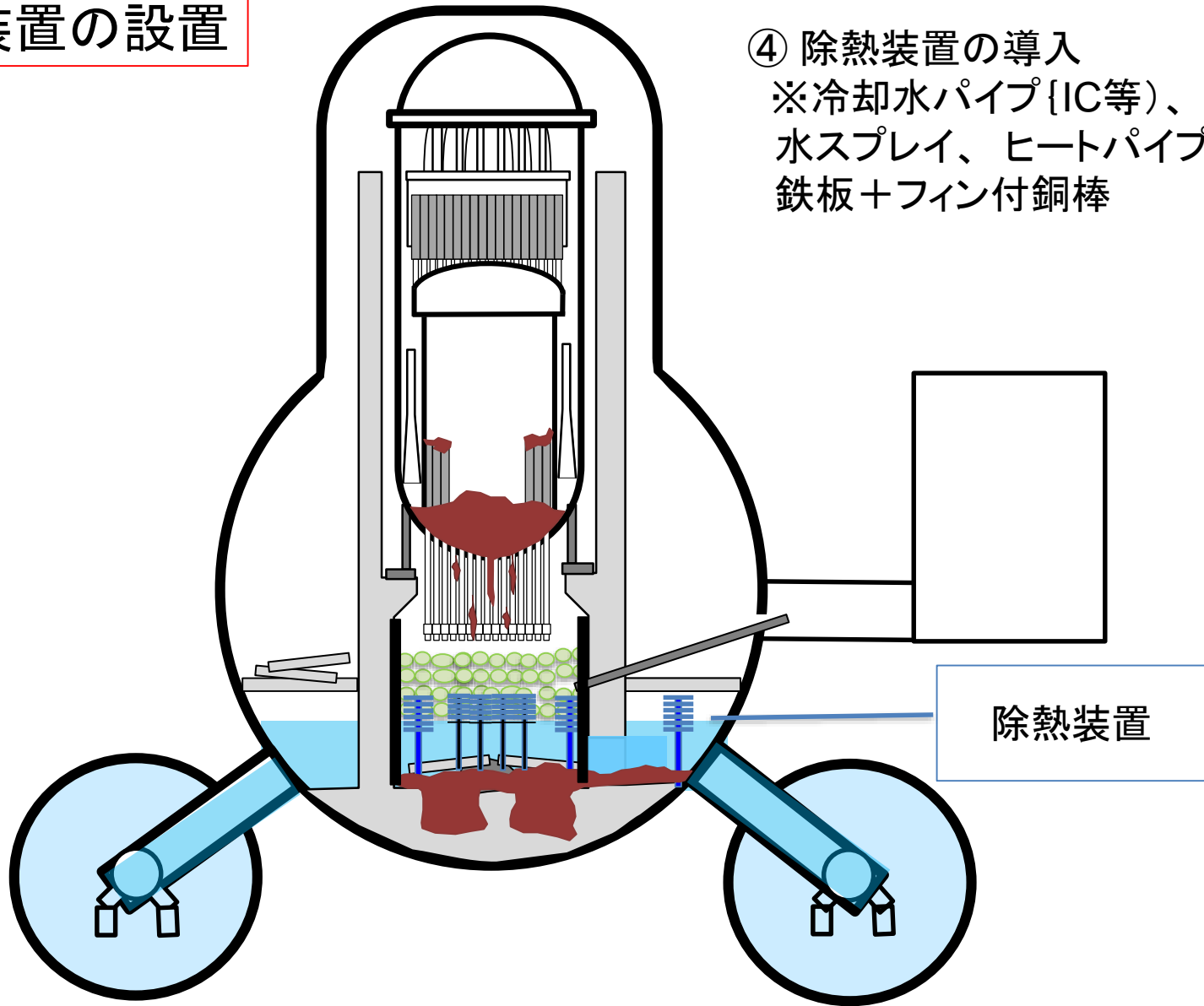
- ③-3 ペDESTAL壁遮蔽
- \* アルミ籠をペデ内に設置
  - \* 籠内に鉄・鉛・タングステン球を充填
  - \* コールドスプレイ(鉄・鉛)

遮蔽壁  
外側:アルミ籠  
内側:鉄・鉛・W球

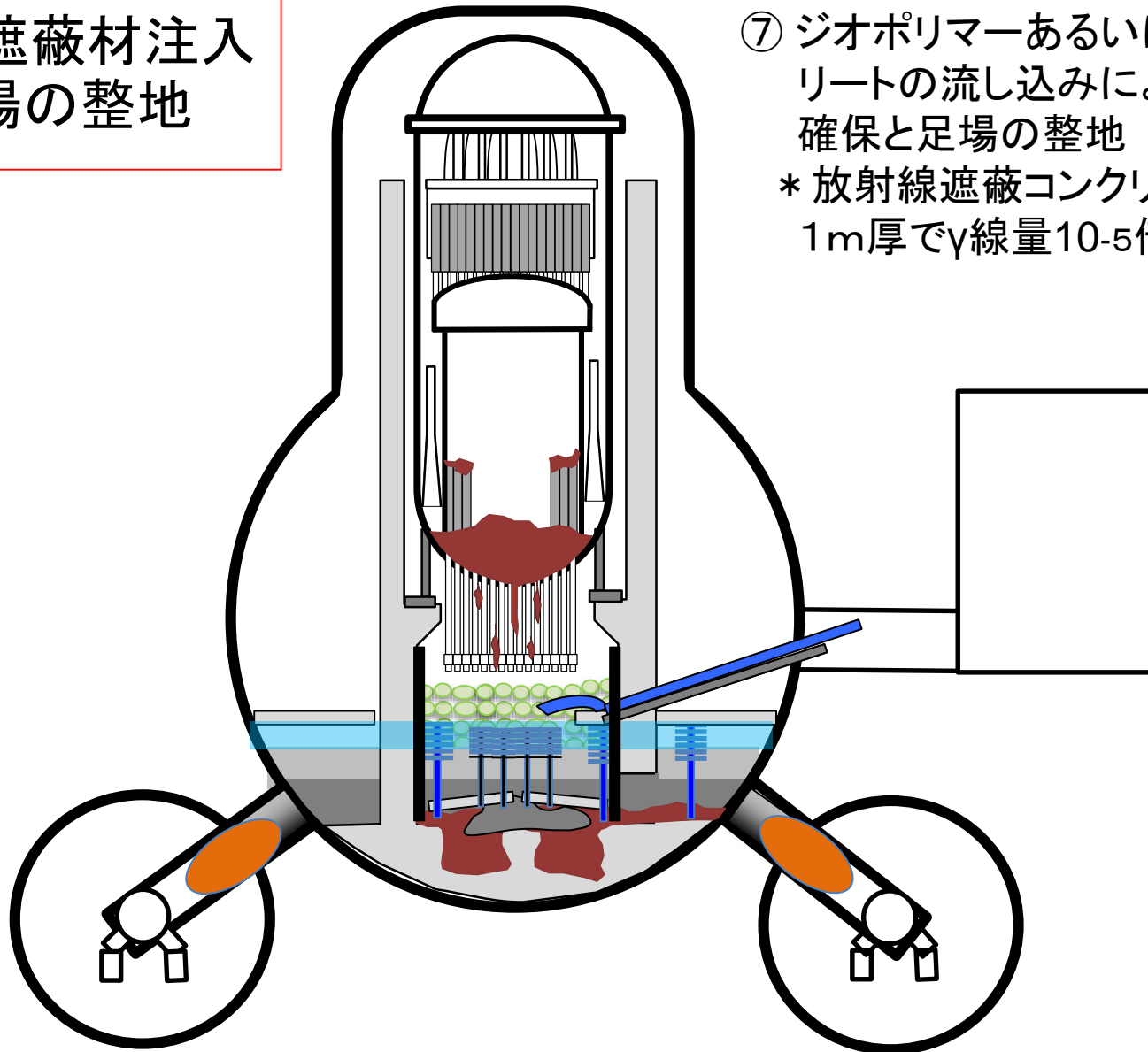


# 除熱装置の設置

④ 除熱装置の導入  
※冷却水パイプ{IC等)、  
水スプレイ、ヒートパイプ、  
鉄板+フィン付銅棒



## 放射線遮蔽材注入 と足場の整地



⑦ ジオポリマーあるいは、コンクリートの流し込みによる遮蔽確保と足場の整地

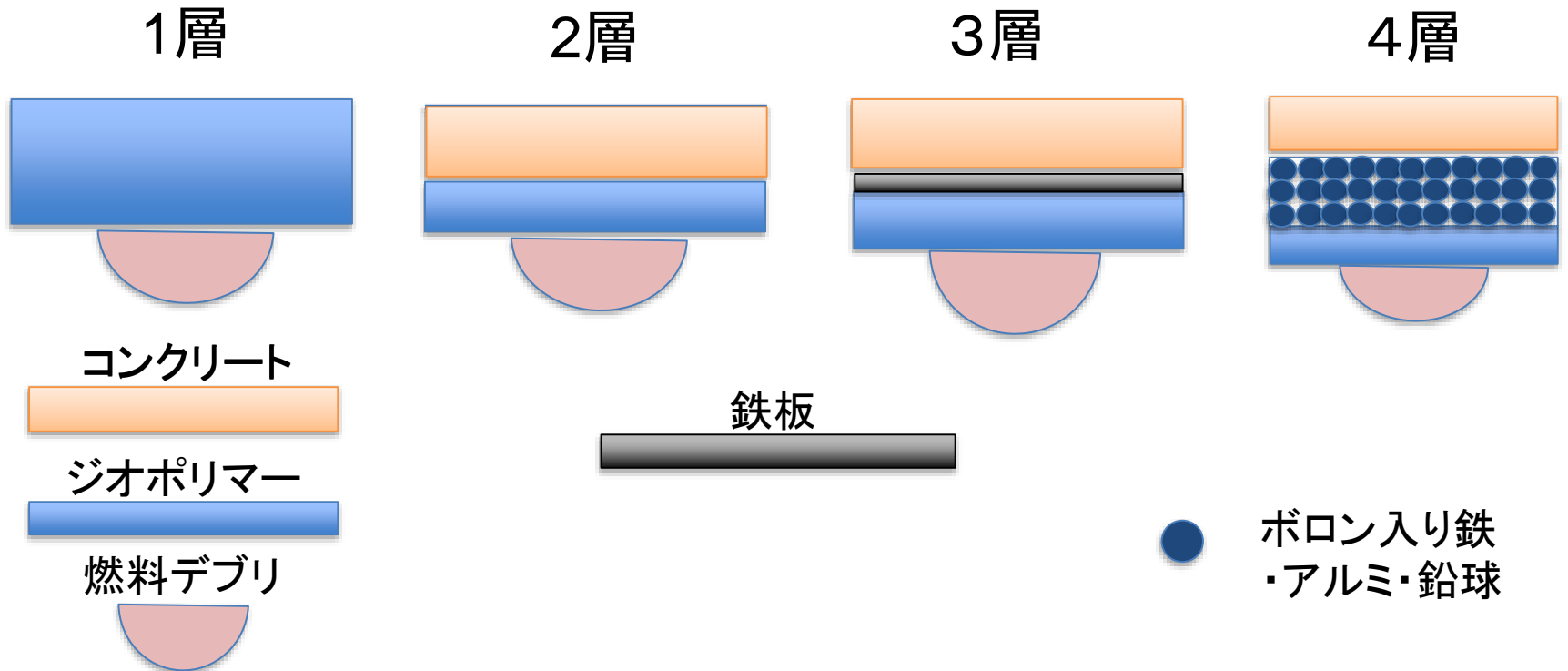
\* 放射線遮蔽コンクリート  
1m厚で $\gamma$ 線量10-5倍に低減



# 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(保管時に水素を発生しない)



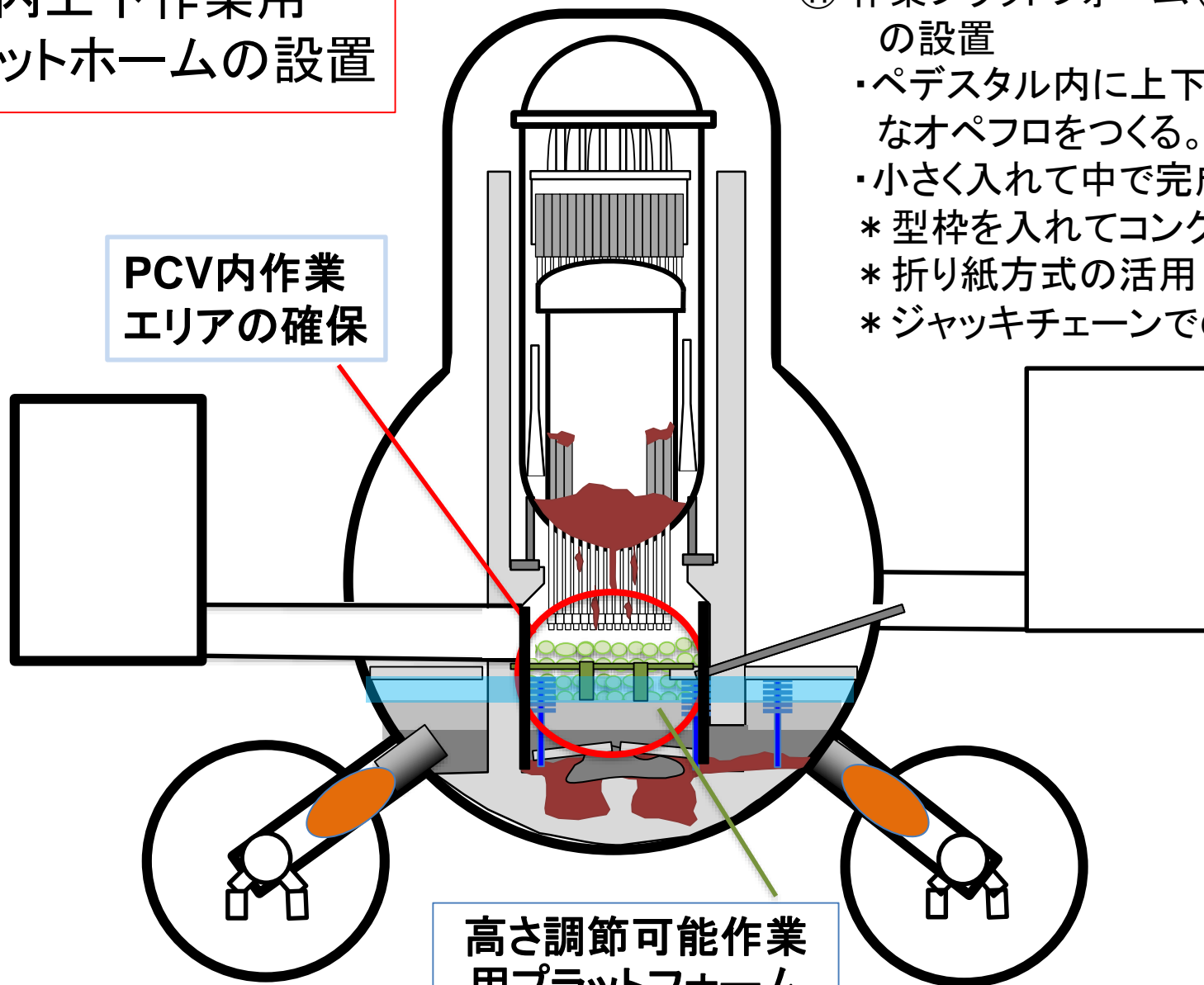
## チェルノブイリにおけるジオポリマーの使用

A bindersystem named EKOR, developed in the Kurchatov Institute, Russia, commercialised by Eurotech and described as a `silicon - based geopolymer`, was applied as a sealing and dust - reduction agent as a part of the construction of the sarcophagus protecting the damaged reactor core.

John L. Provis, Jannie S.J. van Deventer Editors, "Alkali Activated Materials"

## PCV内上下作業用 プラットフォームの設置

PCV内作業  
エリアの確保



高さ調節可能作業  
用プラットフォーム

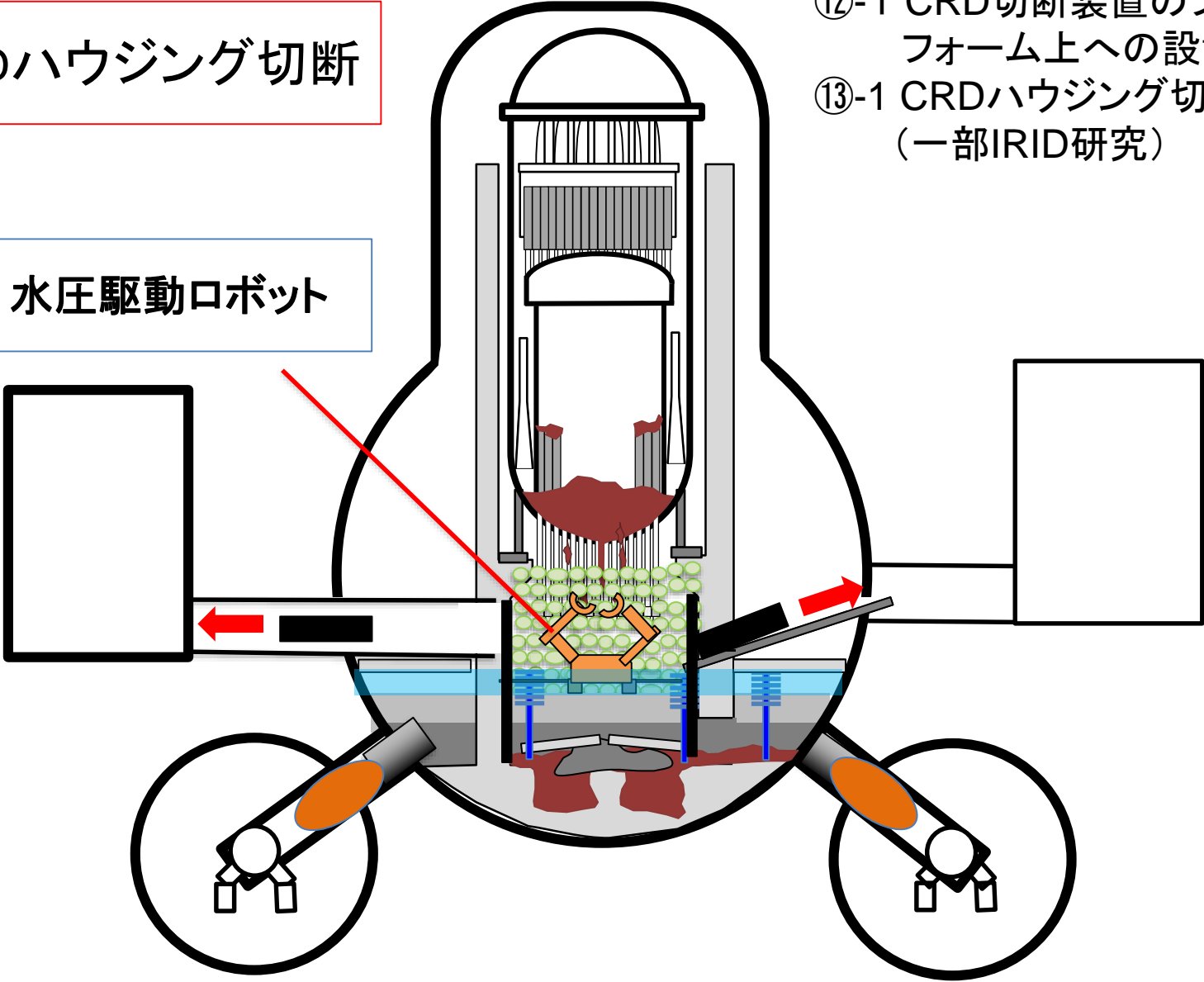
### ⑪ 作業プラットフォーム(ペデ内) の設置

- ・ペデスタル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
  - \* 折り紙方式の活用
  - \* ジャッキチェーンでのぼす

CRDハウジング切断

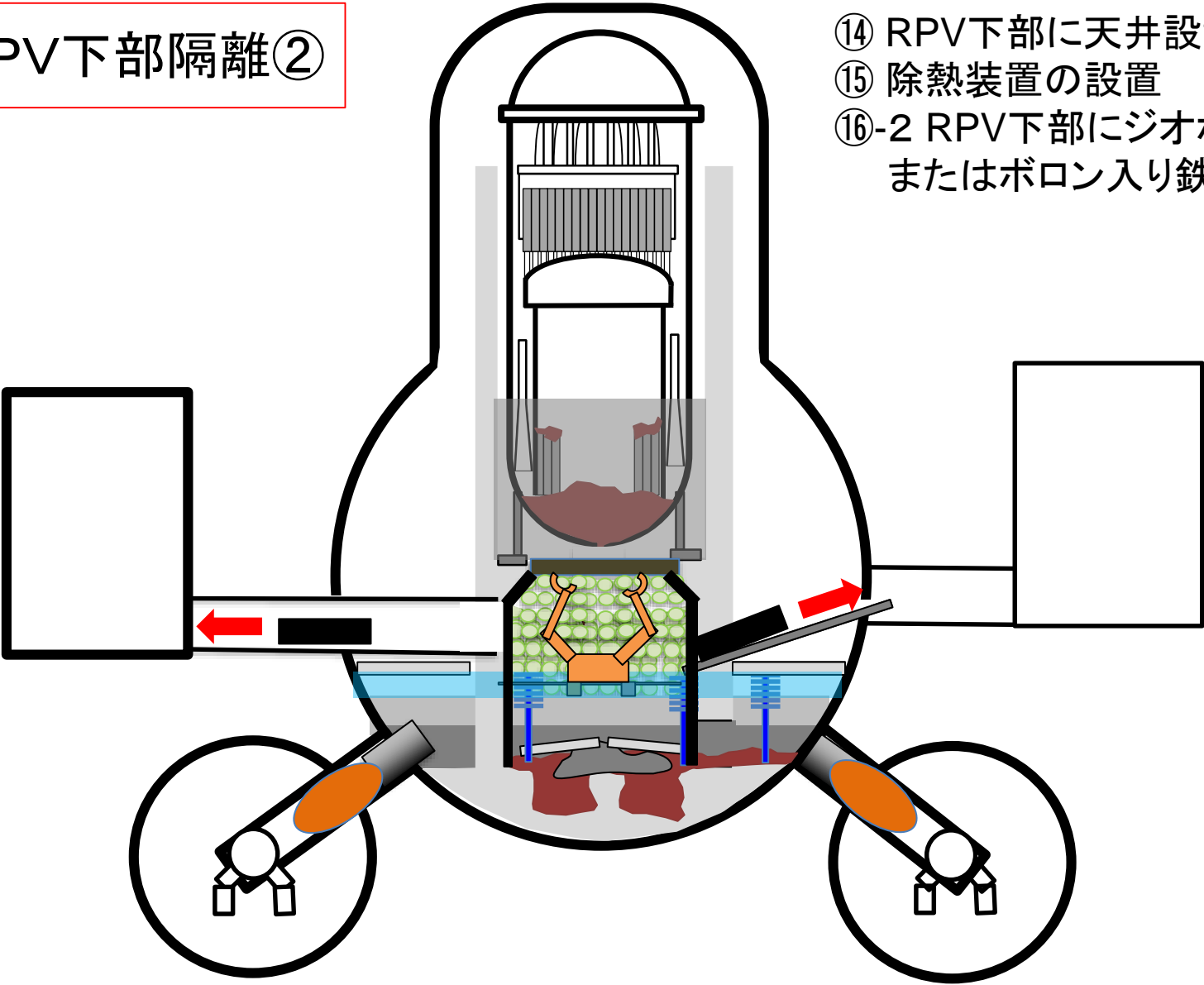
水圧駆動ロボット

- ⑫-1 CRD切断装置のプラットフォーム上への設置
- ⑬-1 CRDハウジング切断 (一部IRID研究)



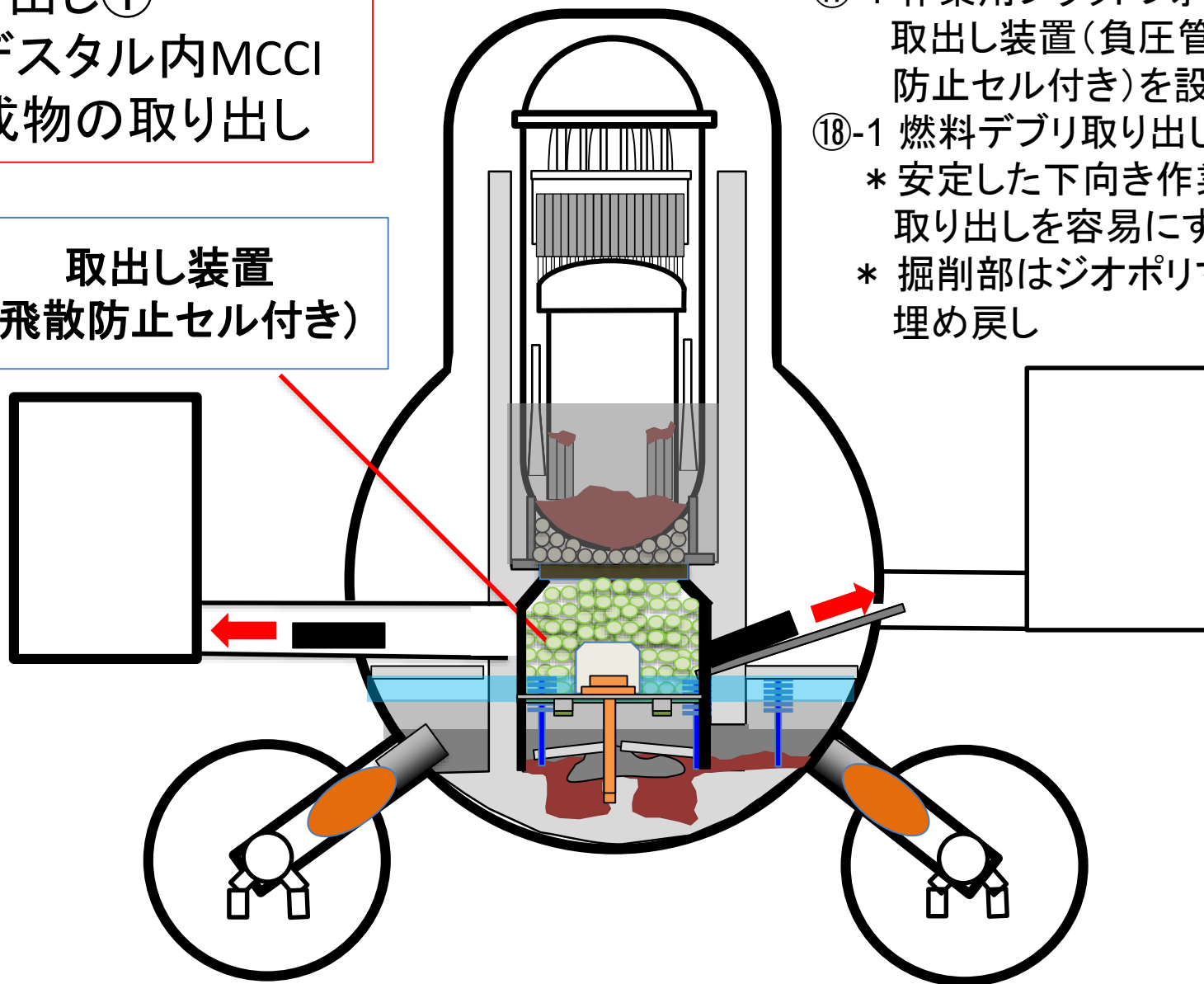
RPV下部隔離②

- ⑭ RPV下部に天井設置
- ⑮ 除熱装置の設置
- ⑯-2 RPV下部にジオポリマー  
またはボロン入り鉄球注入



取り出し①  
ペDESTAL内MCCI  
生成物の取り出し

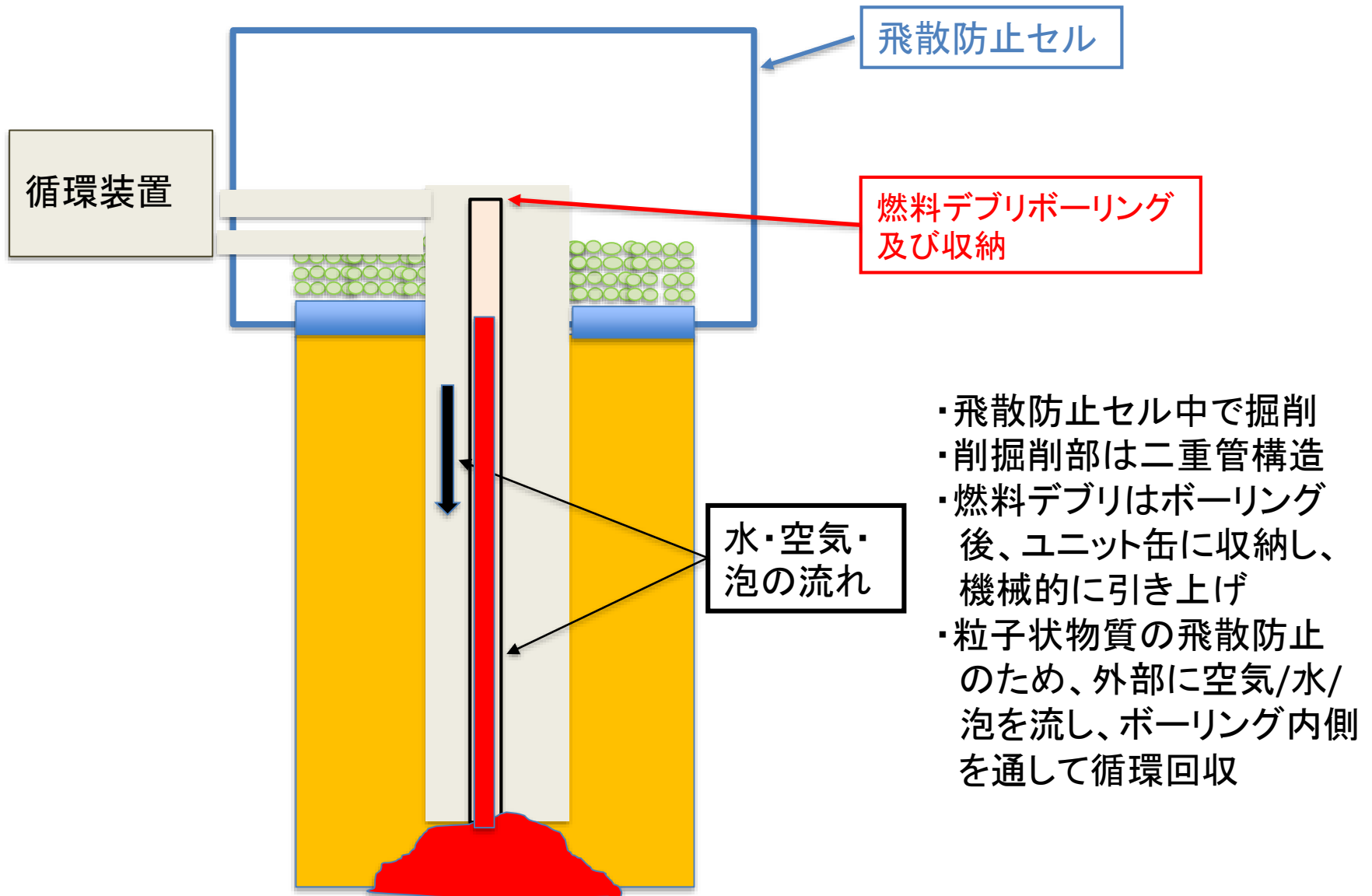
取出し装置  
(飛散防止セル付き)



⑰-1 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

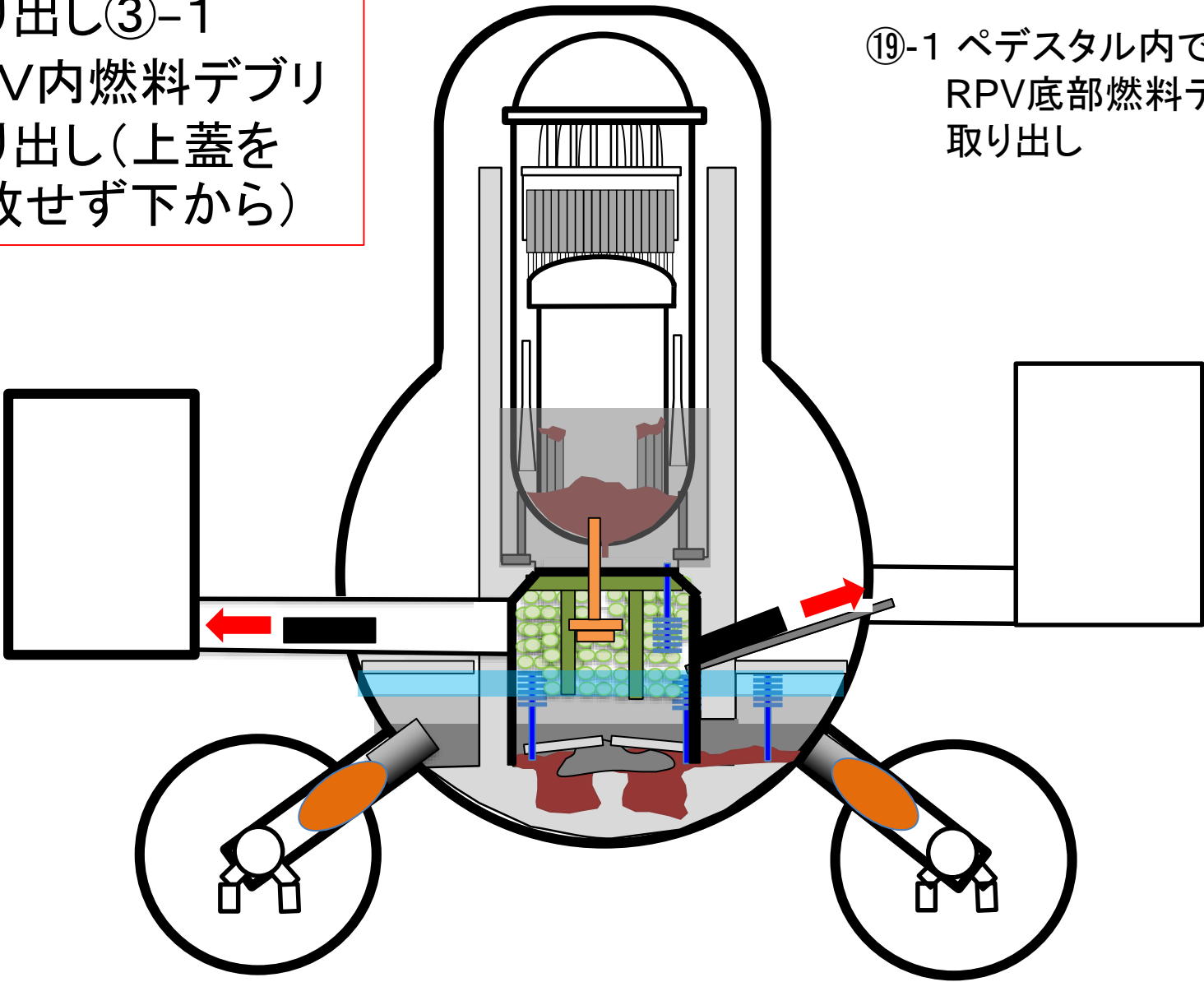
⑱-1 燃料デブリ取り出し  
\* 安定した下向き作業により、  
取り出しを容易にする  
\* 掘削部はジオポリマー等で  
埋め戻し

# 取り出し装置の構造(1)



取り出し③-1  
RPV内燃料デブリ  
取り出し(上蓋を  
開放せず下から)

⑱-1 ペDESTAL内  
RPV底部燃料デブリ  
取り出し

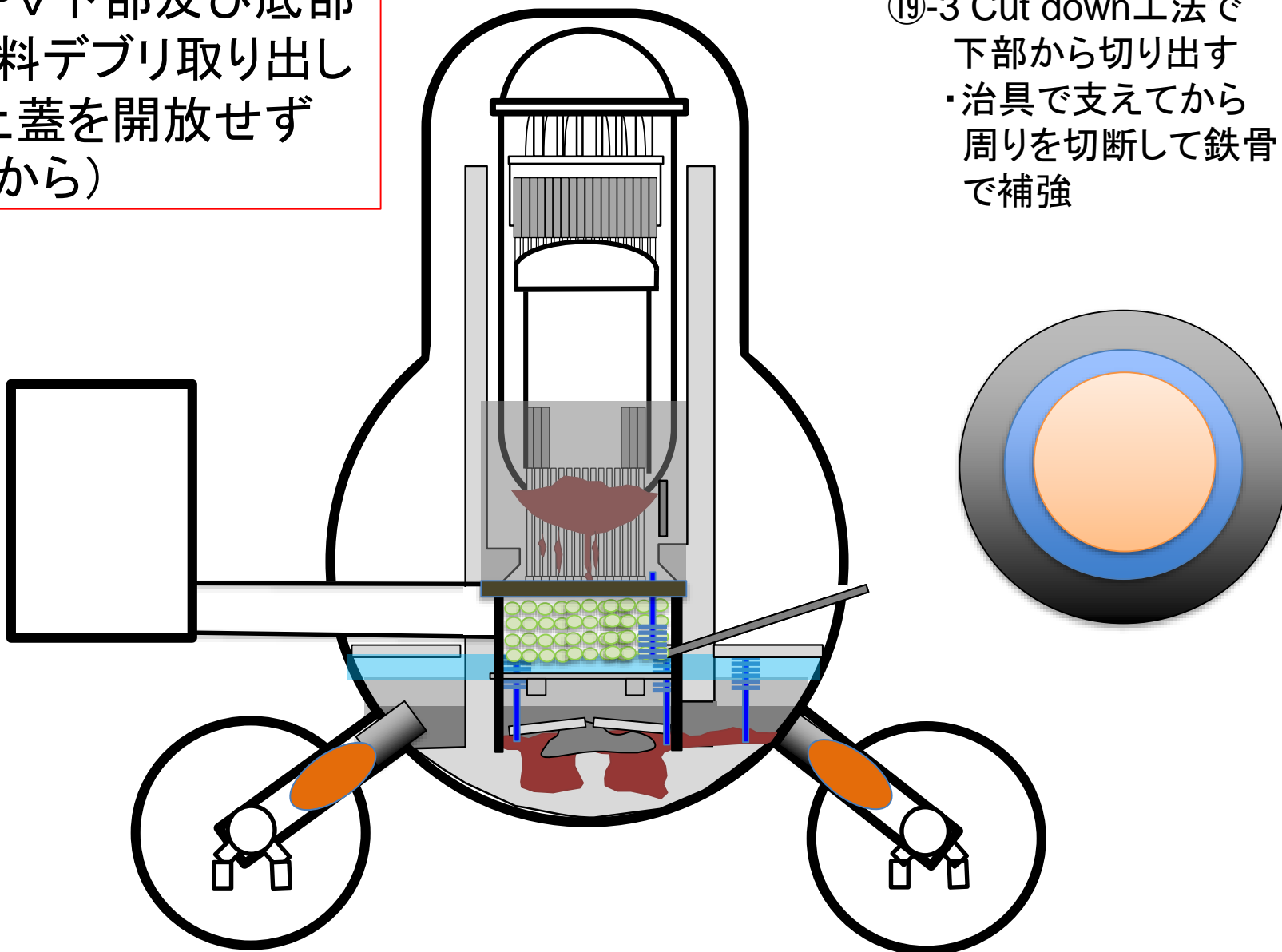




### 取り出し③-3

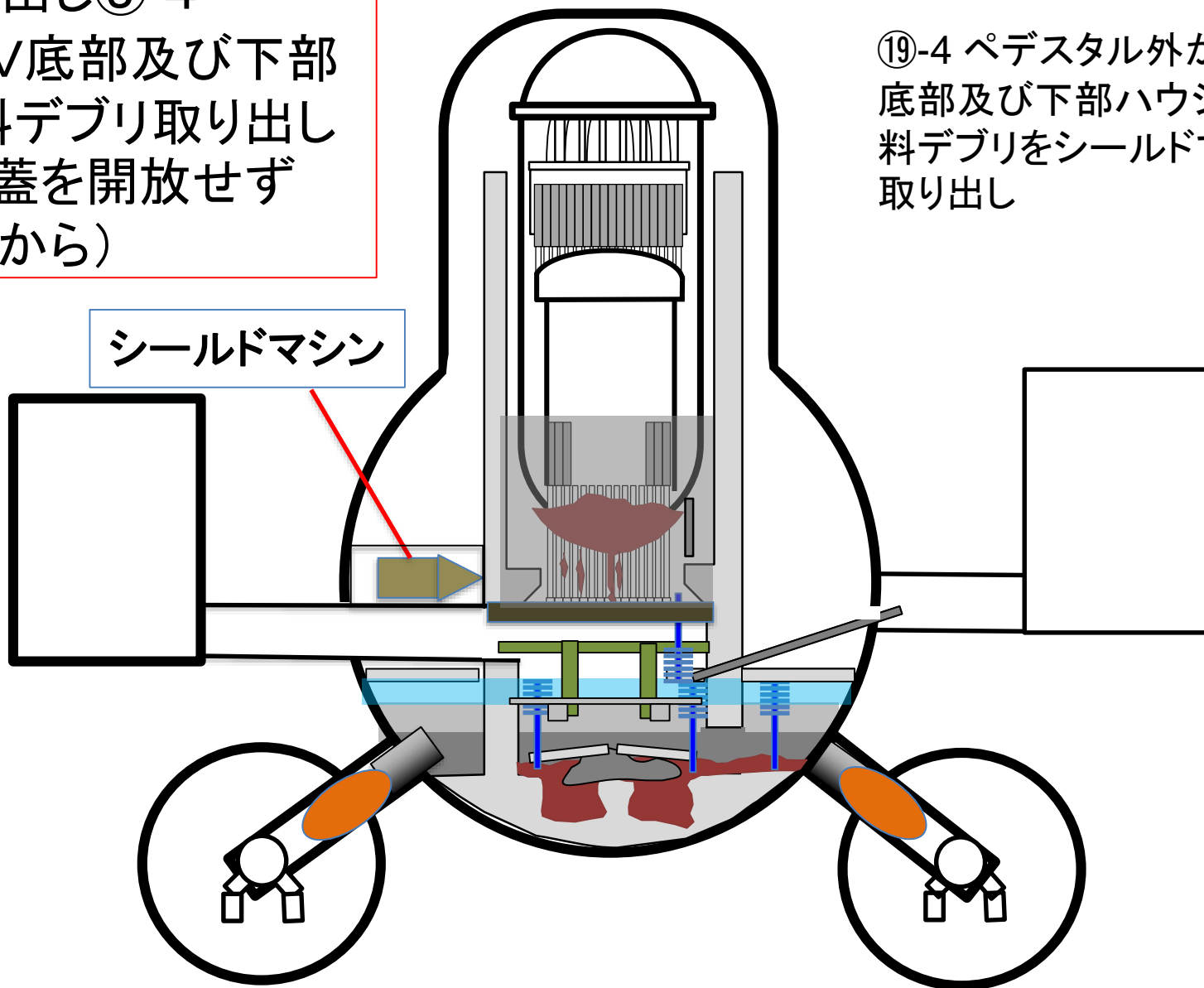
RPV下部及び底部  
燃料デブリ取り出し  
(上蓋を開放せず  
下から)

⑬-3 Cut down工法で  
下部から切り出す  
・治具で支えてから  
周りを切断して鉄骨  
で補強

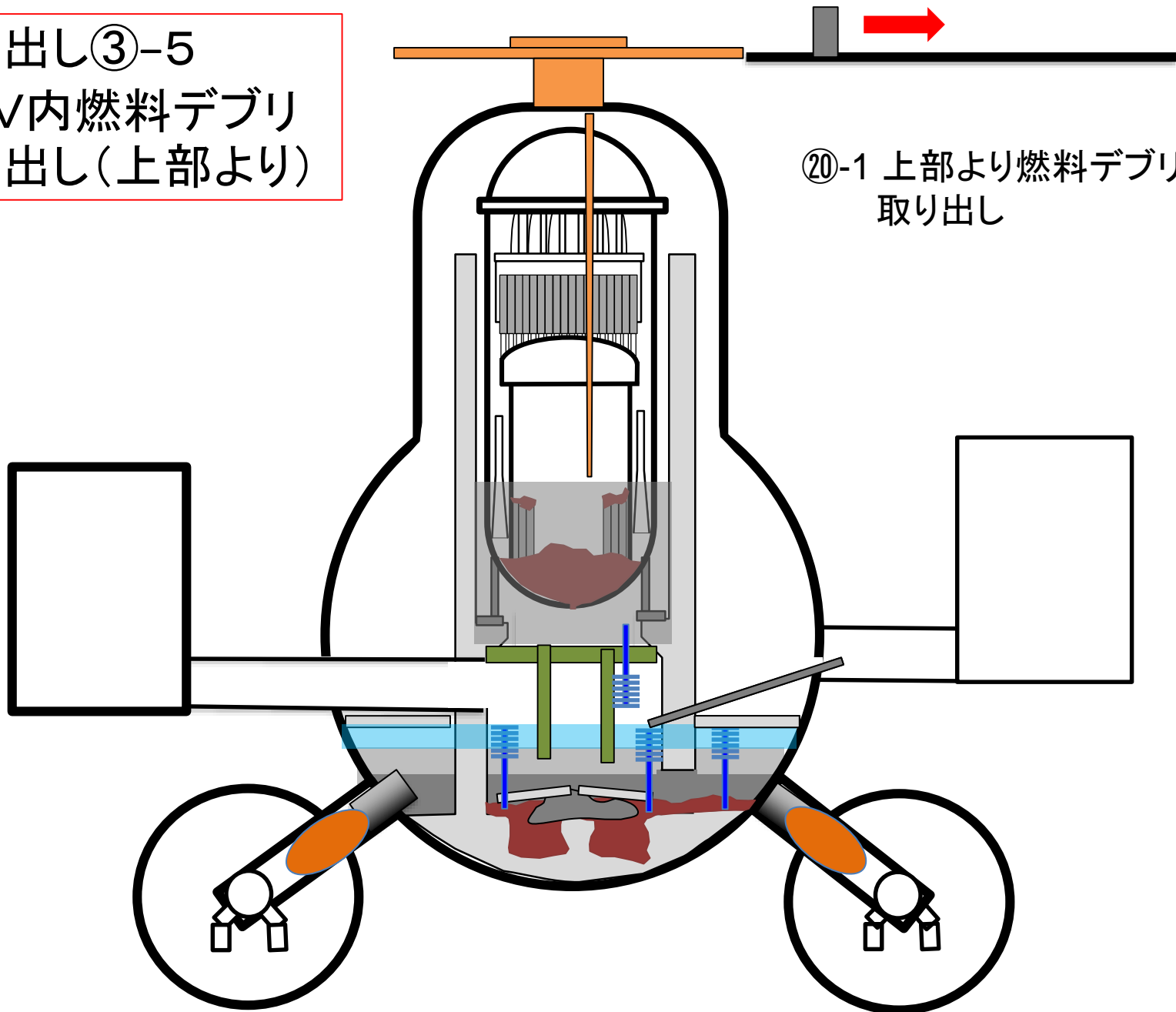


取り出し③-4  
RPV底部及び下部  
燃料デブリ取り出し  
(上蓋を開放せず  
横から)

⑱-4 ペDESTAL外から、RPV  
底部及び下部ハウジングの燃  
料デブリをシールドマシン  
等で取り出し

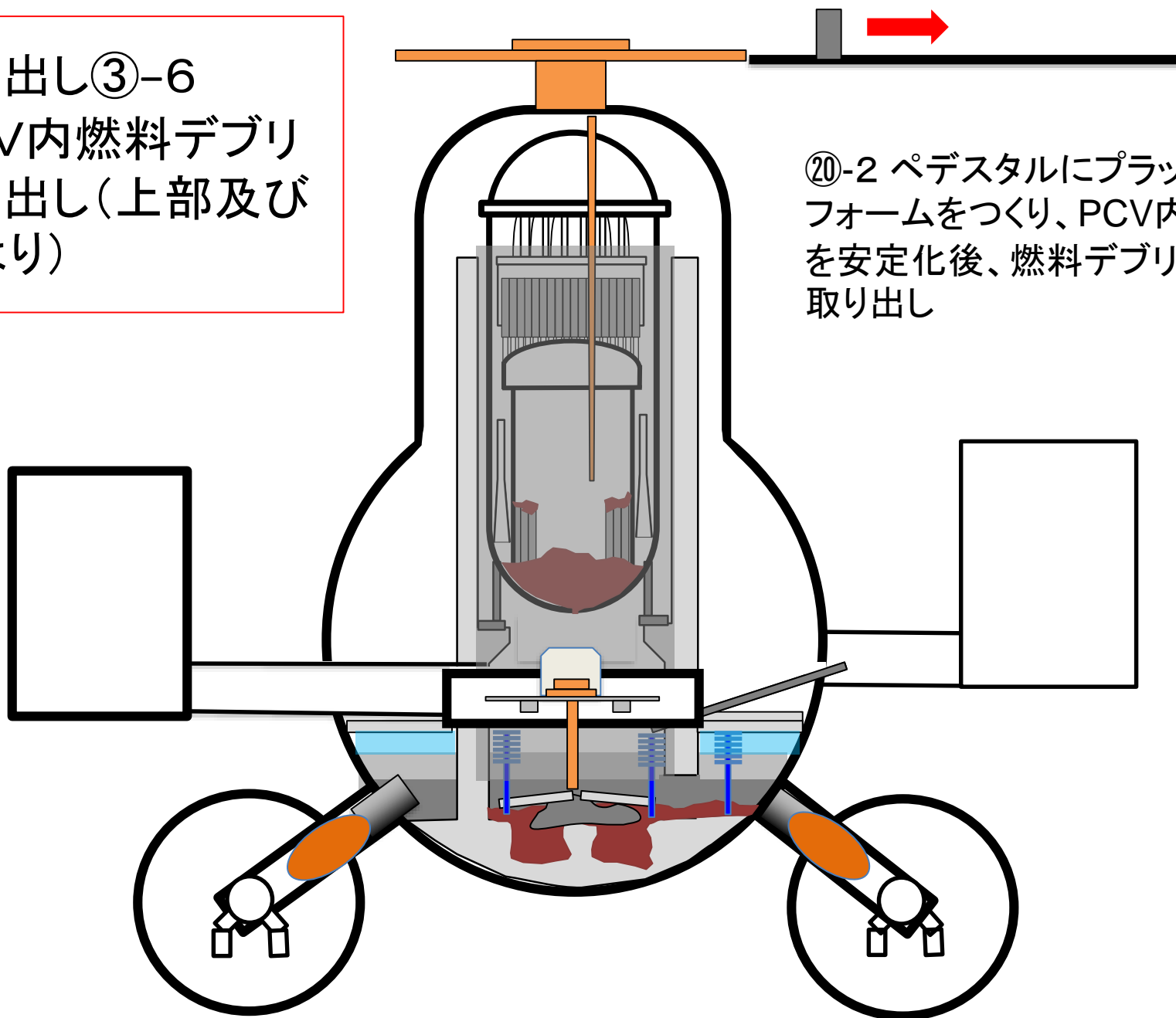


取り出し③-5  
RPV内燃料デブリ  
取り出し(上部より)



⑳-1 上部より燃料デブリ  
取り出し

取り出し③-6  
RPV内燃料デブリ  
取り出し(上部及び  
横より)

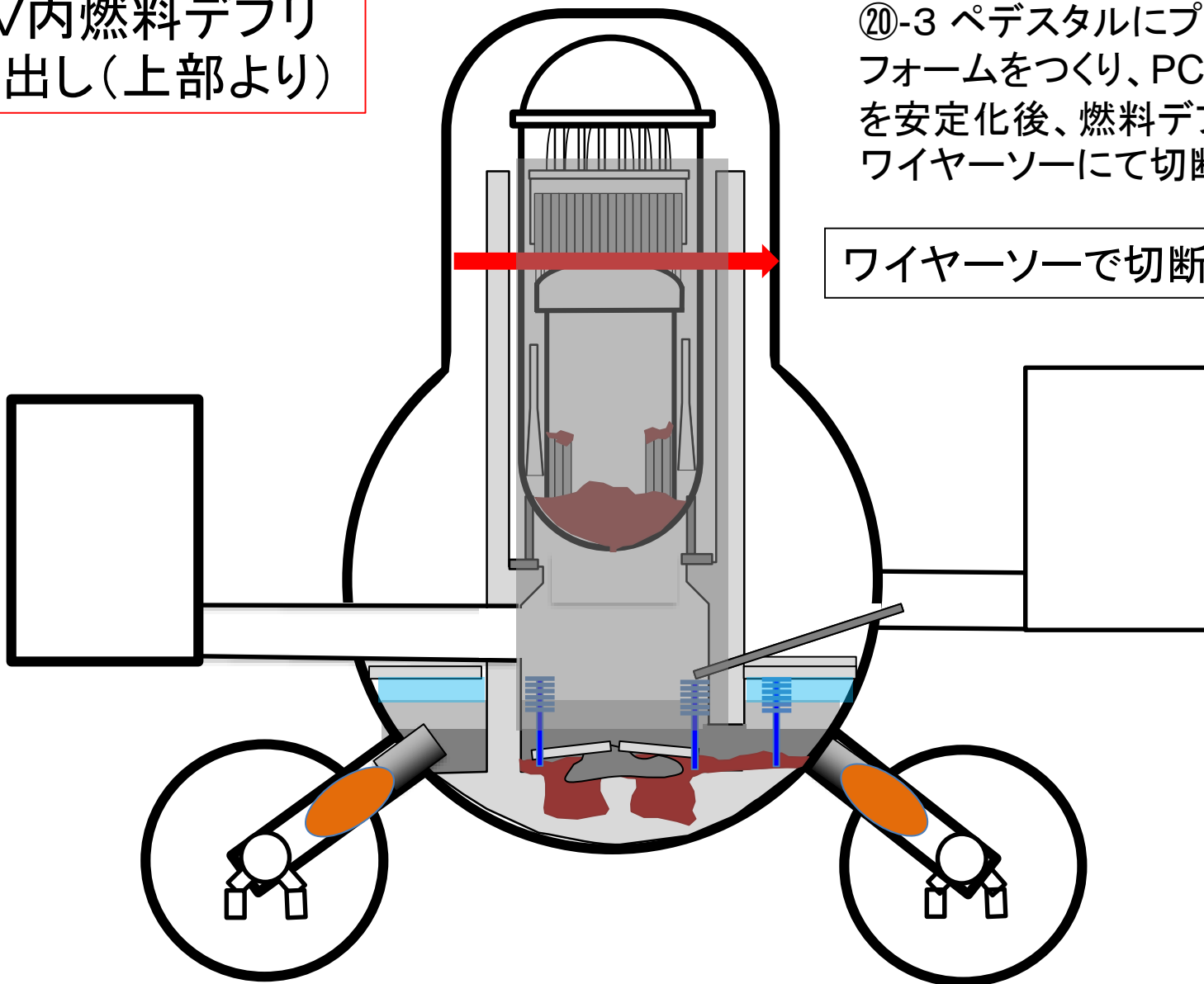


⑳-2 ペDESTALにプラット  
フォームをつくり、PCV内  
を安定化後、燃料デブリを  
取り出し

取り出し③-7  
RPV内燃料デブリ  
取り出し(上部より)

⑳-3 ペDESTALにプラットフォームをつくり、PCV内を安定化後、燃料デブリをワイヤーソーにて切断

ワイヤーソーで切断



## <工法成立のための課題>

(赤字:IRID研究)

- 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 施工材の耐放射線・強度評価(赤字: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(赤字:IRID液圧マニピュレータの活用)
- ⑤ ペDESTAL内機器撤去(赤字: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(赤字:IRID取り出し技術の活用)
- ⑦ PCV側面アクセス技術(赤字: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(赤字:IRID技術の活用)
- ⑨ 小循環水ライン(赤字: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(赤字:IRID技術の活用)
- ⑪ キャスク保管時の臨界評価(赤字: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、廃棄物管理を含めたリスク評価を行いながら、二の矢、三の矢としての成立性を追求する。

### 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。