

1F廃炉事業の進め方を考える  
—燃料デブリ取り出し及び人材育成を中心に—

令和3年7月14日

東京大学大学院工学系研究科

総合研究機構 特任教授

鈴木俊一

# 自己紹介

鈴木俊一

神奈川県出身

昭和57年3月 東京大学工学部卒

昭和57年4月 東京電力(株)入社、福島第一原子力発電所

昭和60年4月 東京電力(株) 原子力本部原子力研究所軽水炉研究室

昭和63年9月～平成2年9月米国マサチューセッツ工科大学客員研究員

平成18年7月 同 技術開発本部技術開発研究所材料技術センター所長

平成26年1月 同 技術統括部部長(福島第一廃炉研究推進担当)兼原子力・立地本部兼技術研究組合国際廃炉研究開発機構 研究推進部長

平成26年9月 同 技術統括部部長(原子力技術開発担当)兼(福島第一廃炉研究推進担当)兼原子力・立地本部兼技術研究組合国際廃炉研究開発機構 開発計画部長

平成27年4月 東京大学大学院工学系研究科 原子力専攻 兼 原子力国際専攻 特任教授

平成31年4月～現在 東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構 兼 原子力国際専攻 特任教授

## 主な研究分野

福島廃炉及び復興に関する各種基礎研究並びに人材育成に従事。

専門分野は原子力材料工学、システム保全工学及び廃炉工学。主なテーマは福島第一廃炉における燃料デブリ性状推定及び取り出し工法に関する研究、廃棄物管理に関する研究、ジオポリマーに関する研究、燃料デブリ除熱システムに関する研究、福島復興に関する研究等。

## 主な経歴

○平成13年7月東北大学より博士号(工学)取得

○平成17年～平成19年ICGEAC(軽水炉プラント材料専門家国際会議)全体議長

○平成21年度東北大学客員教授(流体科学研究所)、

○平成22年～平成26年度 東北大学講師(未来科学技術共同研究センター)

○平成20年1月～平成23年3月、仏EDF MAI(Material Ageing Institute) Board Member

○平成19年9月～平成24年3月、JANTI「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会」幹事

○原子力学会(フェロー)、機械学会、保全学会、腐食防食学会(元副会長)、IRID技術アドバイザー

## 本日の内容

1. 現状と課題
  - 廃炉リスクの考え方
  - 現行の福島第一燃料デブリ取り出し工法
2. 燃料デブリ取り出しの新工法
  - 思考展開法の紹介
  - 大規模燃料デブリ取り出し工法
3. 廃炉人材育成

福島第一廃炉の最大の問題点

Unknown Unknowns

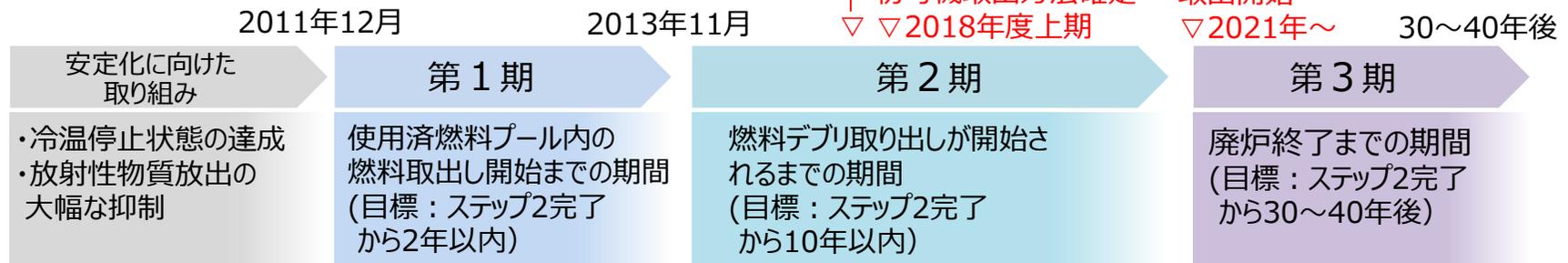
但し、答えを見つける事こそ  
工学の役割

# 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

# 研究開発の位置づけ

## 中長期ロードマップ（改訂3版※）

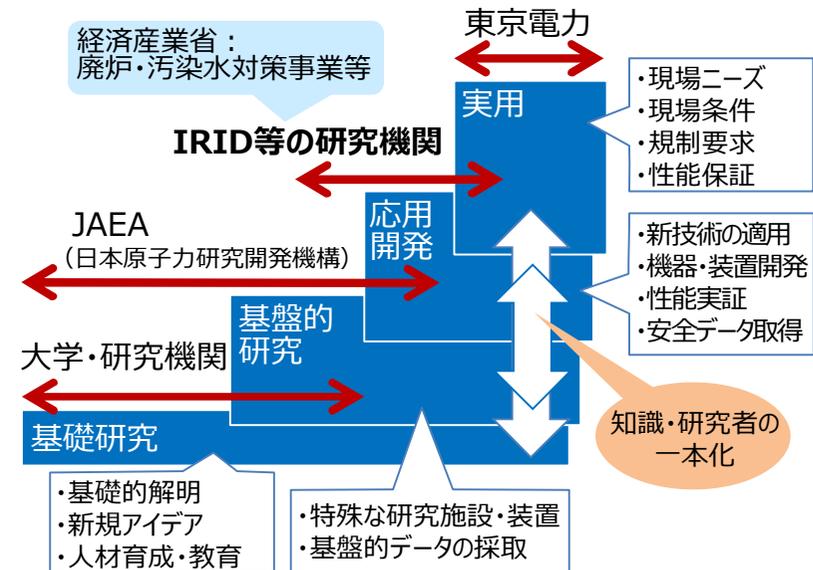


※：2015.6.12改訂

## 事業分野

- 原子炉の冷温停止状態の継続
- 滞留水処理（汚染水対策）
- 発電所全体の放射線量低減・汚染拡大防止
- 使用済燃料プールからの燃料取り出し
- 燃料デブリ取り出し
- 固体廃棄物の保管・管理と処理・処分に向けた計画
- 原子炉施設の廃止措置計画

## 研究開発の全体像



「技術戦略プラン2015」 NDF

# 戦略プランの基本的考え方

7

## 戦略プランの基本方針

事故により発生した通常の原子力発電所にはない放射性物質に起因するリスクを継続的、かつ、速やかに下げる

## 5つの基本的考え方

### ◆ 基本的考え方 1 : 安全

→ 放射性物質に起因するリスクの低減 (注) 及び労働安全の確保

(注) 環境への影響及び作業員の被ばく

### ◆ 基本的考え方 2 : 確実

→ 信頼性が高く、柔軟性のある技術

### ◆ 基本的考え方 3 : 合理的

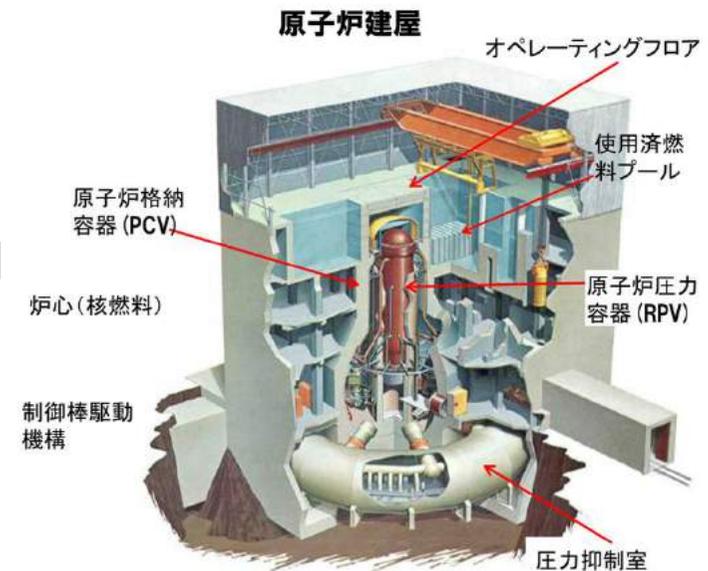
→ リソース (ヒト・モノ・カネ、スペース等) の有効活用

### ◆ 基本的考え方 4 : 迅速

→ 時間軸の意識

### ◆ 基本的考え方 5 : 現場指向

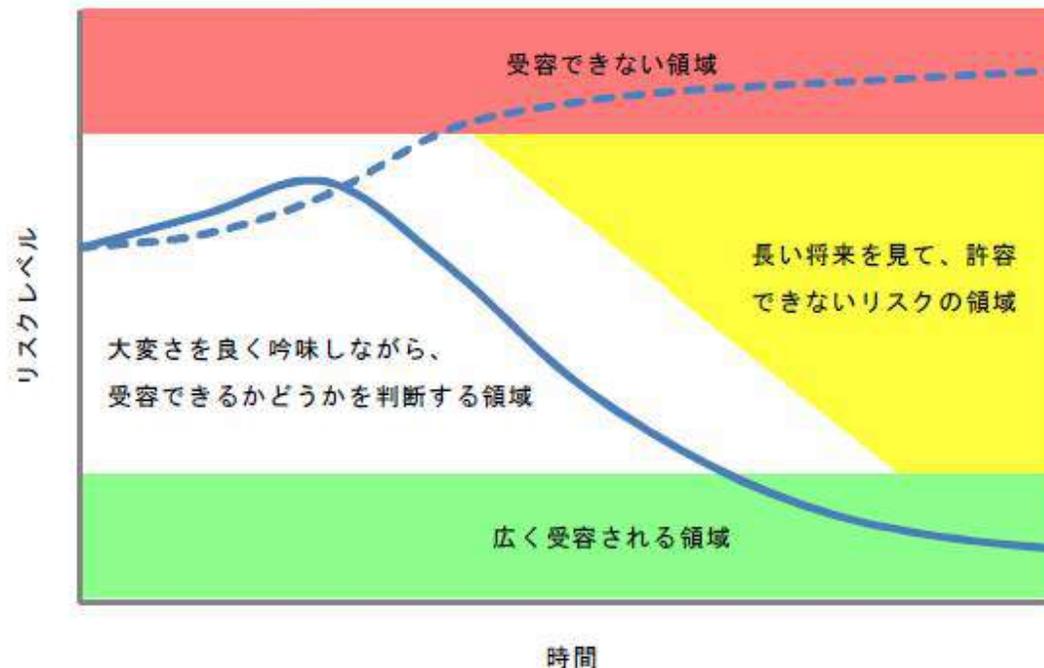
→ 徹底した三現 (現場、現物、現実) 主義



# 安全かつ速やかに

- 燃料デブリ取り出し作業によって一時的に増加するリスクが受容範囲内：  
安全要求事項とその達成
- 最新の原子力安全基準に沿って建設された施設に貯蔵できるまでの時間：  
例えば、スループット

リスクの時間変化<sup>1)</sup>



(略) リスク低減措置を実施する場合には、リスクレベルが一時的に増加する可能性があるものの、周到な準備と万全の管理によって、受容できない領域に入らないようにすることが可能である。このように、受容又は許容できない領域に入ることなく、リスクレベルを十分に下げることを目指すべきである(実線)。 M. Weightman, "The Regulation of Decommissioning and Associated Waste Management" 第1回福島廃炉国際フォーラム(2016年4月)。

[ref. 1) 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2017]

# 現状と課題

# 廃炉リスクにどのように 対応すべきか

—システム全体で考える—

# 廃炉リスク評価の望ましいプロセス

1. あらかじめリスク対応の基本的考え方を示す。
2. 具体的なリスクのリストアップと対応策の候補、及び概念を示す。
3. ステークホルダーとの議論
4. 意見反映の上、対応策の具体化
5. ステークホルダーとの意見交換
6. 規制庁からの認可
7. 工事実施
8. 成功事例・失敗事例をステークホルダーと共有し、次の対策に反映（PDCAをまわす）

- ・上記プロセスは短期的視点のみならず中・長期的視点も重要
- ・地元住民の方々との議論にはファシリテーターが必要

## リスク対応(案)の一例(強度評価の視点から)

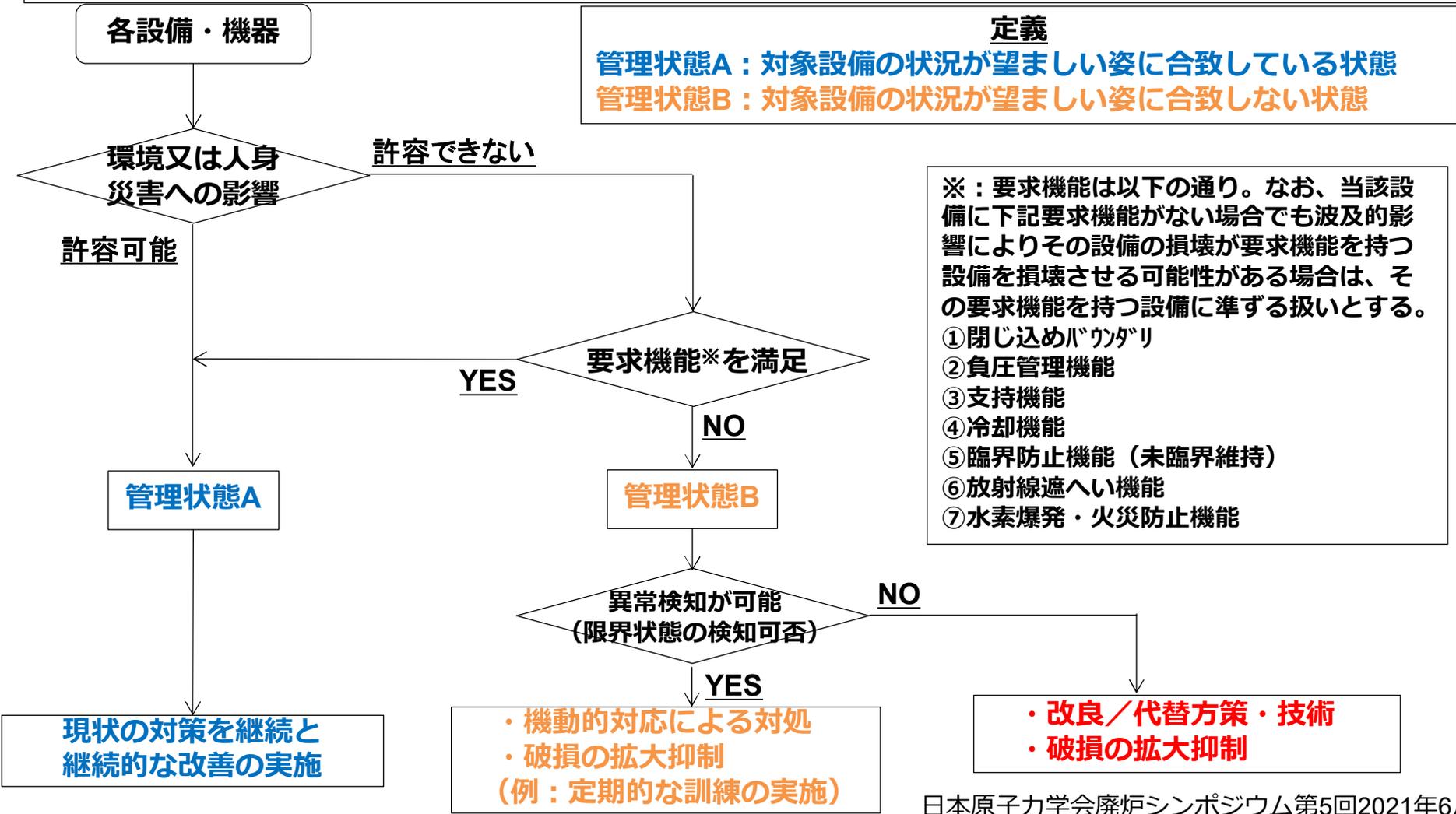
- 原子力学会廃炉検討委員会強度基準検討分科会では、**福島第一原子力発電所(1F)における強度評価の在り方について議論**している。
  - **福島第一原子力発電所事故前からある設備(既存設備)**
    - 知見から劣化状況や評価モデル等を推定し、強度評価を実施  
→アクセス困難なため、**設備状態が十分には把握されていない**
    - 設備の使用条件、要求機能は事故前後で大きく異なる  
→**事故炉の条件を考慮した強度評価が必要**
  - 通常炉とは異なる不確かさの大きさや要求機能を考慮した強度評価が必要である。  
→**事故炉である1Fの強度評価の在り方の体系化を検討**

# 体系化の基本的考え方

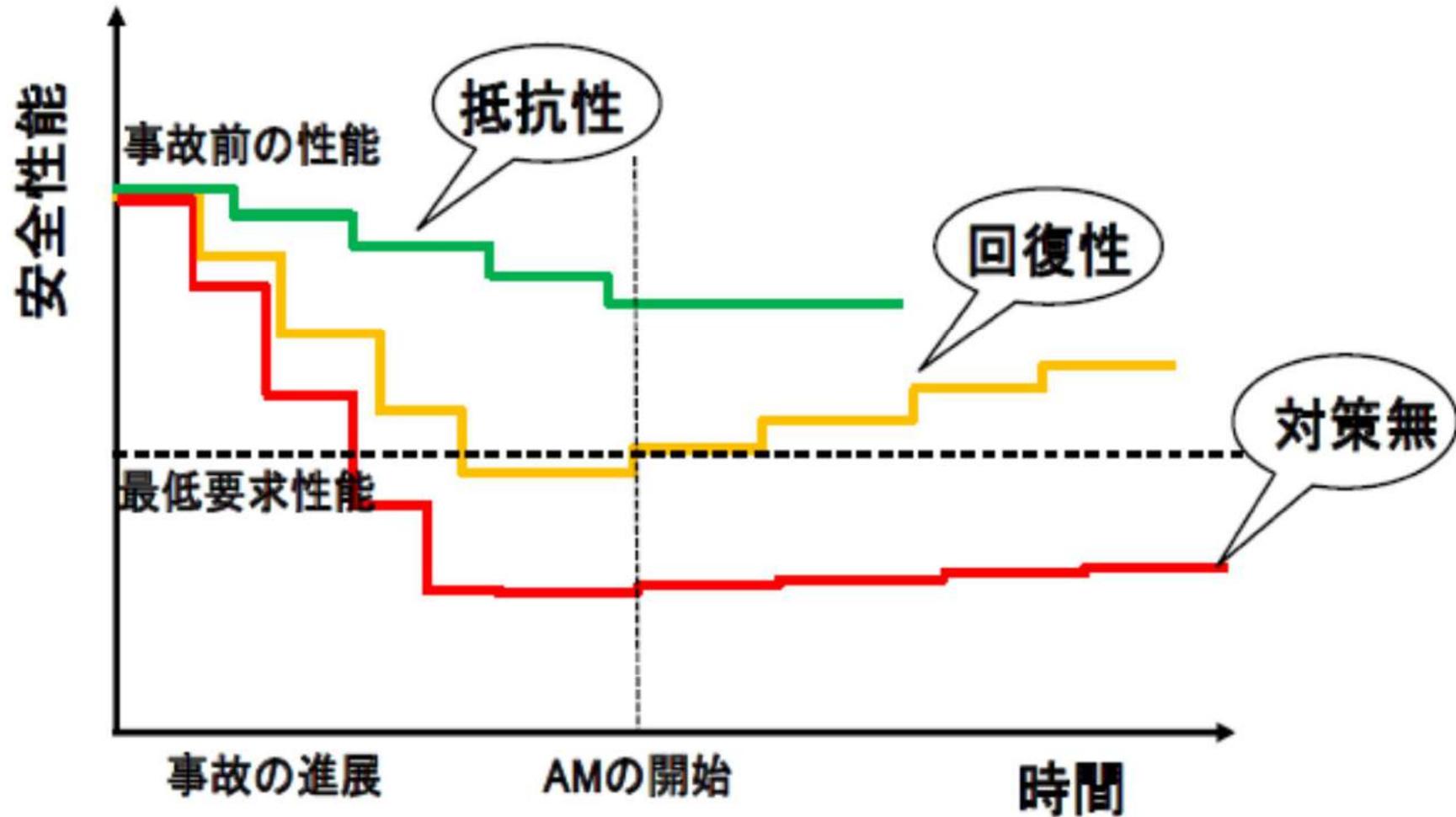
- ① 事故炉においても、原子力安全（環境と人を放射線の有害な影響から防止）が求められることは変わらない。  
→各設備が損壊した場合に**原子力安全に影響するのかが評価が必要**
- ② 原子力安全を達成するためには、各設備に求められる要求機能が確保されているのか、確認が必要である。  
→**1F設備に求められる要求機能の整理が必要**  
→**要求機能が確保できている／いないと判断する考え方の検討が必要**
- ③ 地震等により要求機能が確保できない可能性がある」と想定される場合には、その対策が必要である。  
→耐震強化等の発生防止対策が可能ならば、その対策が有効  
→**発生防止対策が困難な箇所への対応の検討が必要**
- ④ 1Fの設備状態は、廃炉作業の進捗とともに変化する。  
→**継続的（設備状態変化毎）に評価し、対策を見直すことが、安全性向上には必須**

# 管理状態評価フロー

- **設備・機器の管理状態を評価し、その状態に応じた対策を要求**する。
- 設備状態の変化（PCV水抜き等）や廃炉作業の進捗に伴って検査・補修等が可能になる等、状態が変化した場合には再評価する。  
→ **一旦評価すると終わりではなく、状況に対応して再評価する。**



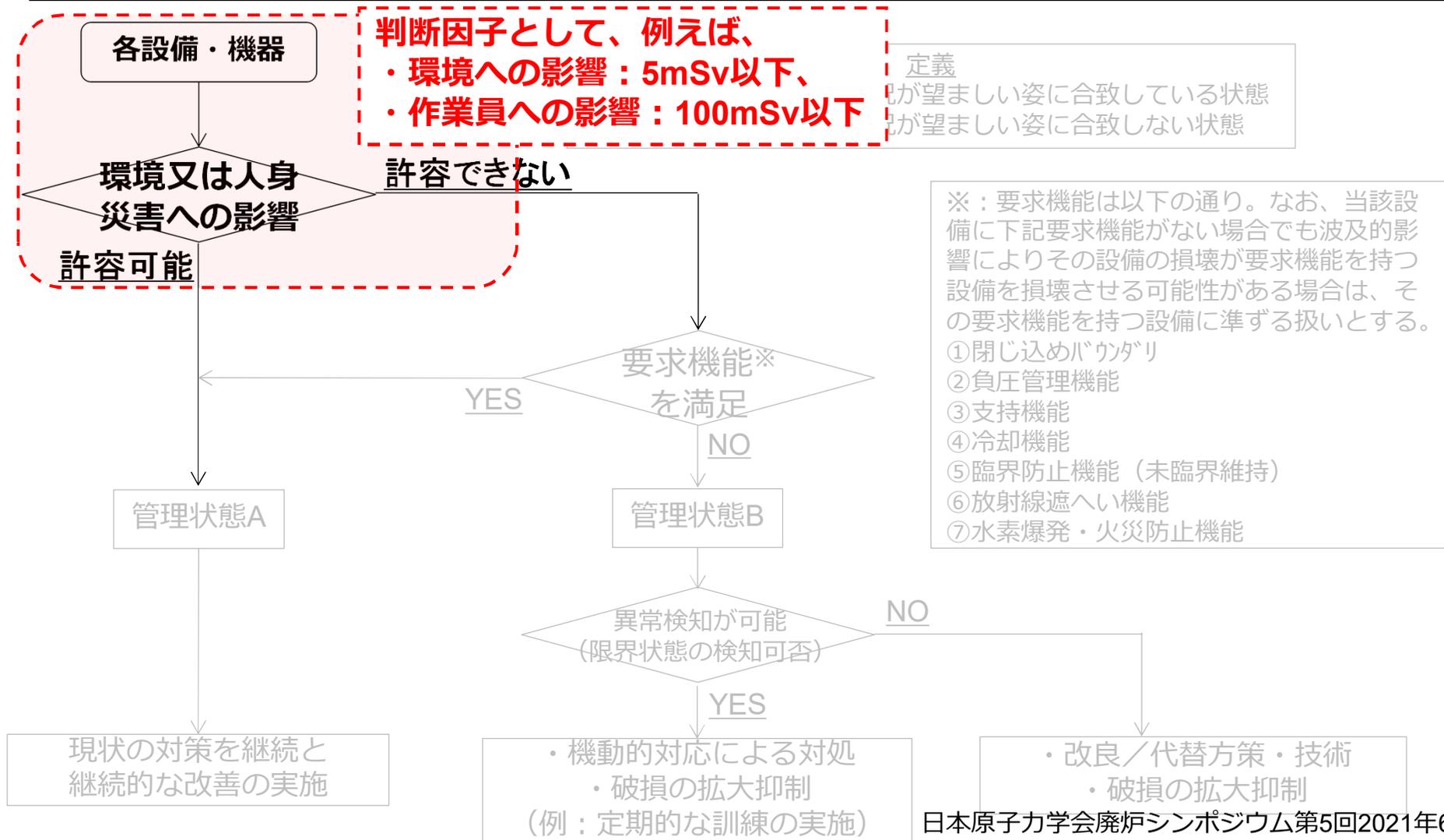
# レジリエンス



## 破損拡大抑制による安全性レジリエンス向上

# 判断「環境又は人身災害への影響」について

- 初めに、評価のインプットとして、検査可能範囲等の設備状態を整理する。
- **本判断では、対象設備が原子力安全に影響を与えるのかを判断**する。
- **様々な判断因子（被ばく量、インベントリ量、多重性・多様性、Form Factor 等）**があり、今後具体化が必要である。

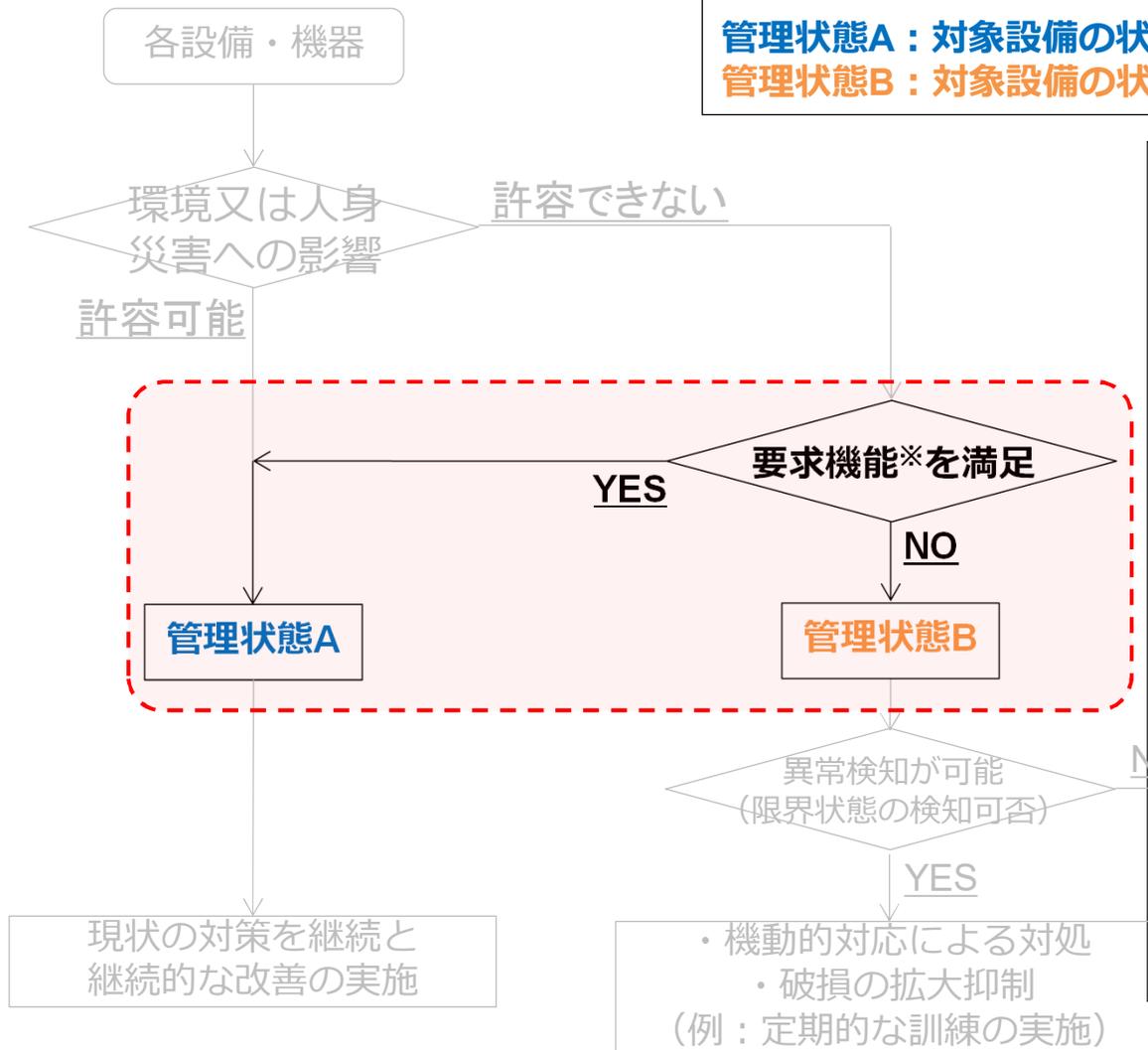


# 判断「要求機能を満足」について

- 本判断では、各設備に求められる要求機能を確保できているかを確認する。
- 次スライドのフローを用い、要求機能を満足しているかを判断する。
- 要求機能は、廃炉リスク評価分科会報告書を参考に7機能を記載。

## 定義

管理状態A：対象設備の状況が望ましい姿に合致している状態  
管理状態B：対象設備の状況が望ましい姿に合致しない状態



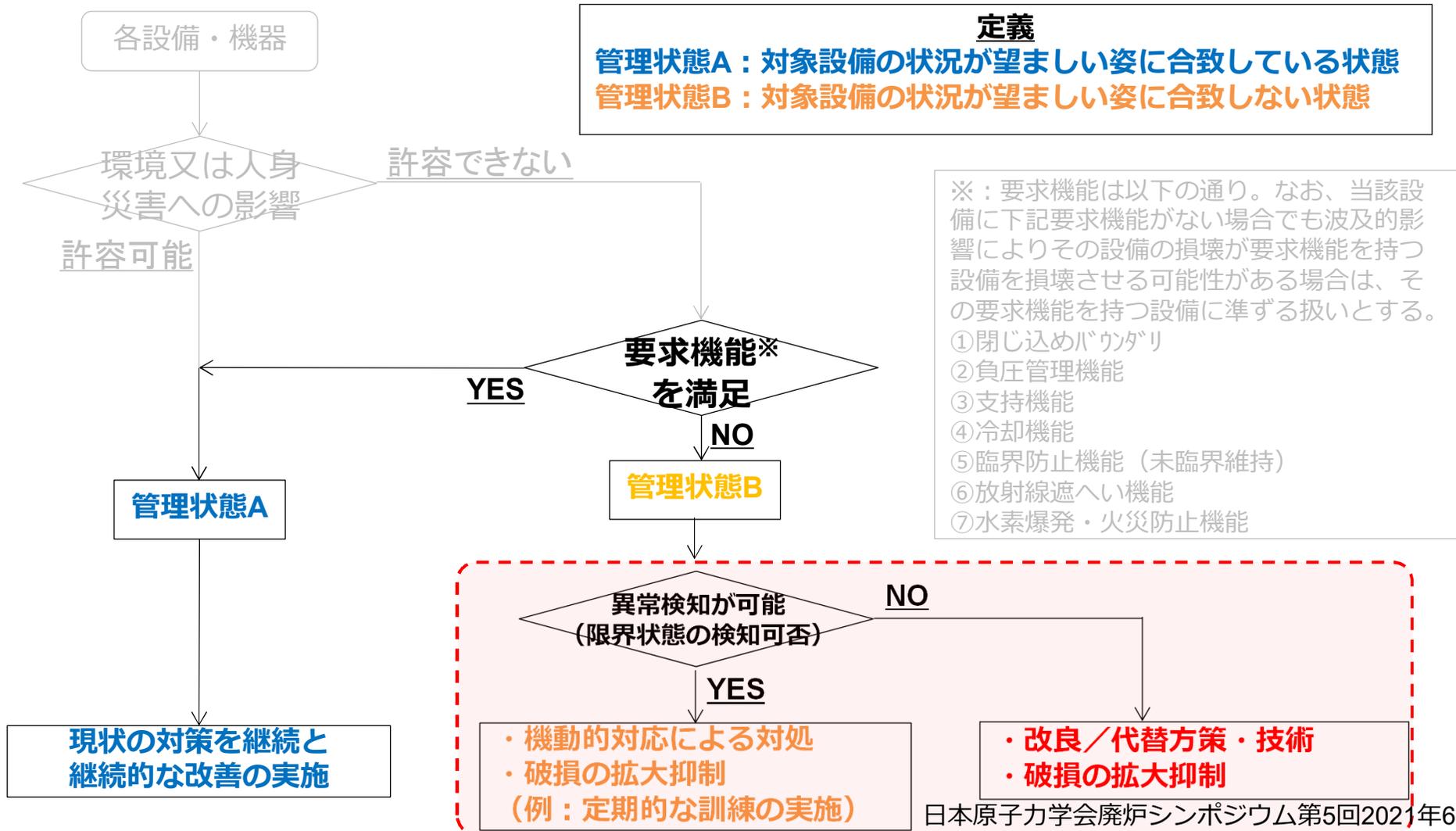
※：要求機能は以下の通り。  
なお、当該設備に下記要求機能がない場合でも波及的影響によりその設備の損壊が要求機能を持つ設備を損壊させる可能性がある場合は、その要求機能を持つ設備に準ずる扱いとする。

- ① 閉じ込めバウンダリ
- ② 負圧管理機能
- ③ 支持機能
- ④ 冷却機能
- ⑤ 臨界防止機能（未臨界維持）
- ⑥ 放射線遮へい機能
- ⑦ 水素爆発・火災防止機能

改良/代替方策・技術  
・破損の拡大抑制

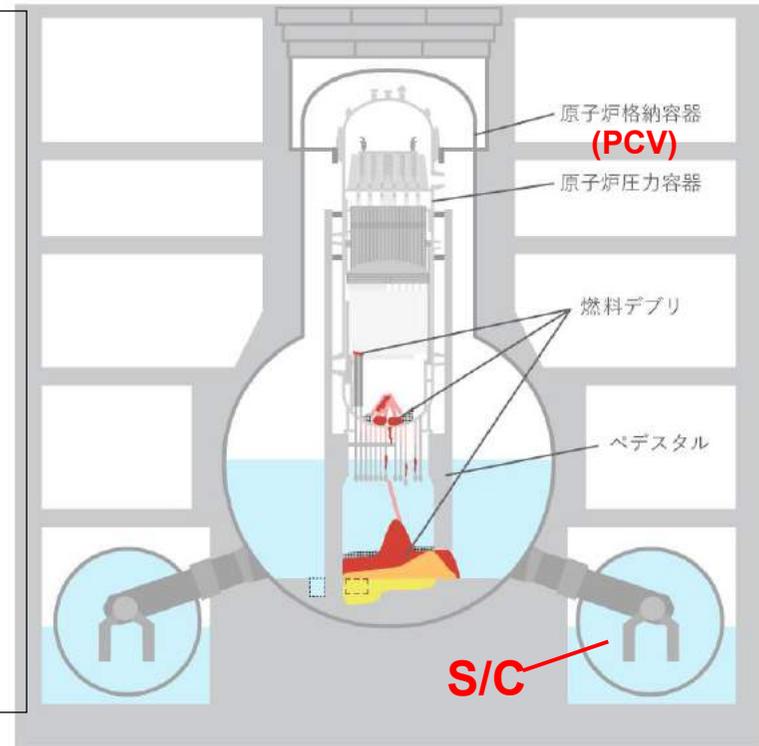
# 判断「異常検知が可能」について

- **フロー評価時点で異常検知が可能な場合**
  - 検知後の対応として、**機動的対応等を要求**
- **フロー評価時点で異常検知が困難な場合**
  - 様々な技術等を活用した**改良/代替方策等を要求**



# 3号機サブプレッションチェンバー(S/C)の状況

- 東日本大震災後、**満水状態**になっている。
- **震災後の機器の劣化を考慮した耐震性評価**が実施されている\*。
- 震災後20年(2031年まで)の劣化を考慮し、耐震評価を実施した結果、**最も厳しい部位においても、求められる機能が維持される**ことが確認されている。
- 現在、長期的なリスク低減の観点から、震災後20年までに実施可能な耐震性向上として、**PCV(S/C)水位低下が計画**されている。

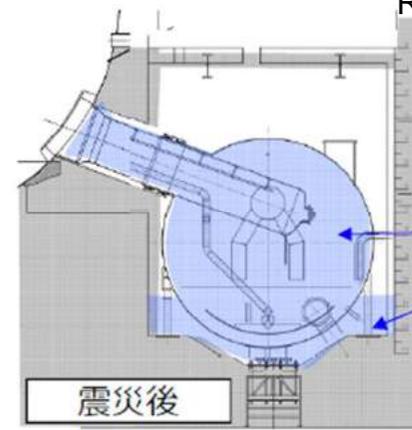
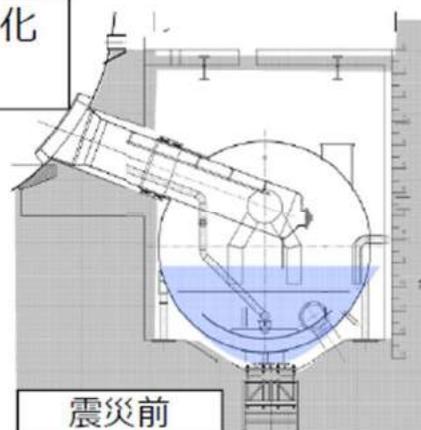


※第75回特定原子力施設監視・評価検討会 資料1-1

## 3号機の状況 (推定)

Ref. 東京電力HDのHP (一部加筆)

S/C内部の状態変化  
(震災前/後)

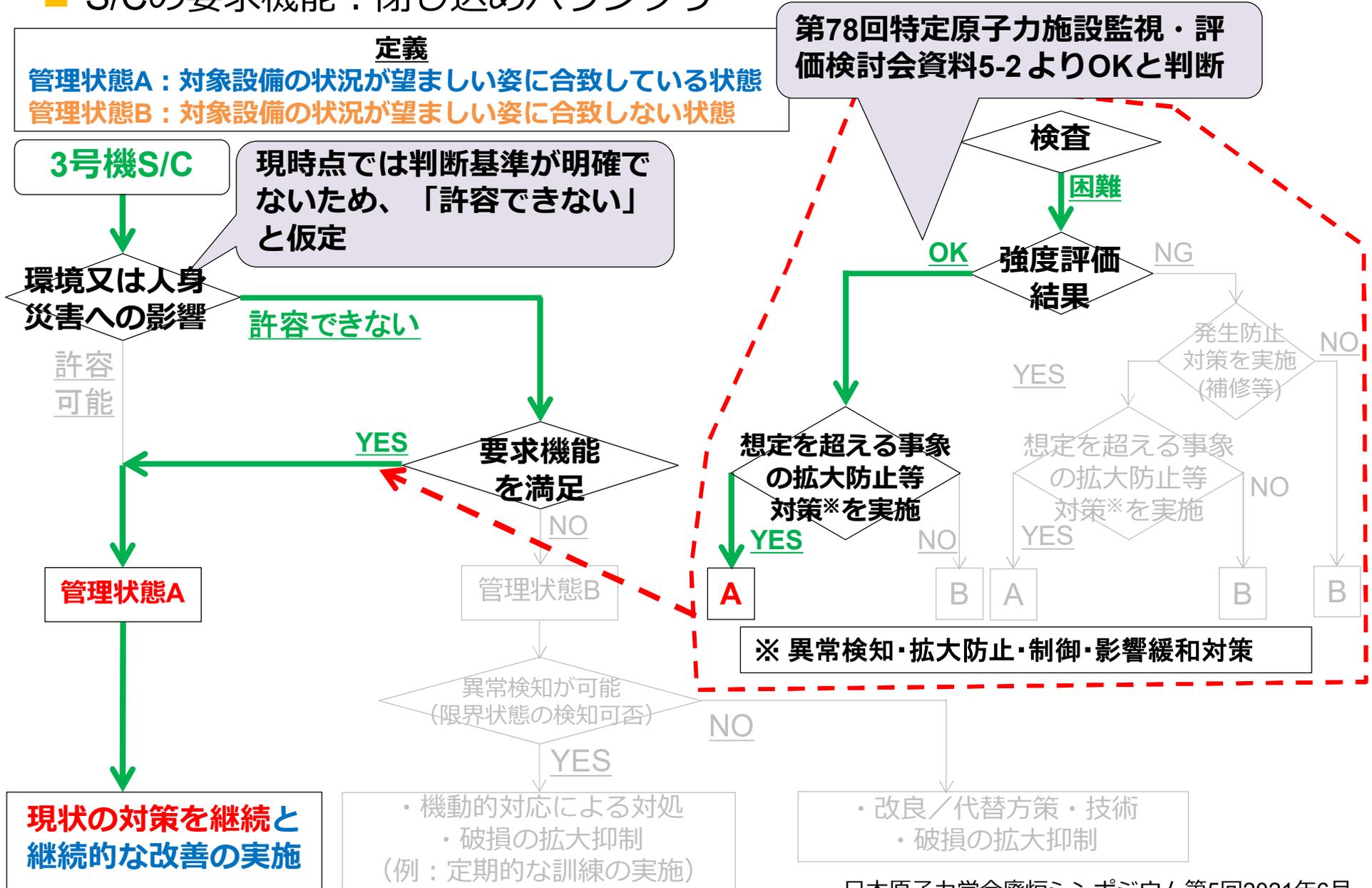


S/C : 満水を想定  
建屋滞留水

➡ S/Cシェル、サポ-ト部等の劣化を考慮

# ケーススタディー(現状の対策)

## ■ S/Cの要求機能：閉じ込めバウンダリ



# ケーススタディー(現状の対策)

## ■ S/Cの要求機能：閉じ込めバウンダリ

### 定義

管理状態A：対象設備の状況が望ましい姿に合致している状態

管理状態B：対象設備の状況が望ましい姿に合致しない状態

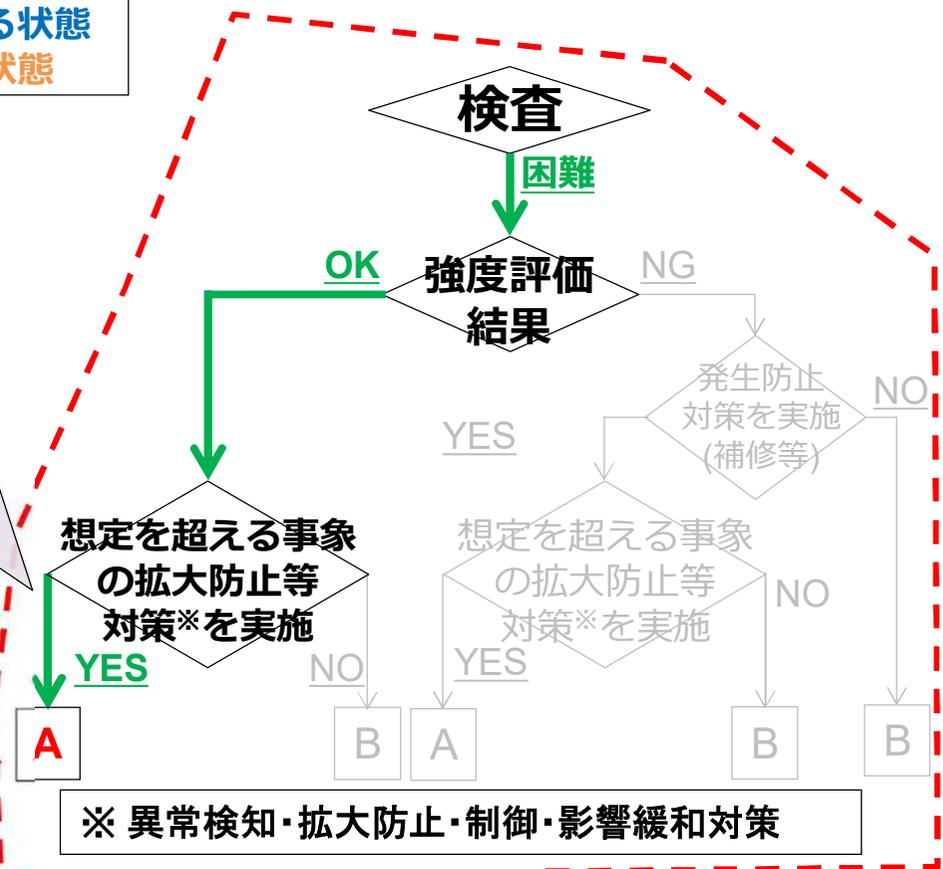
### 3号機S/C

- **S/Cが損傷した場合の想定事象**
  - ✓ 「トラス室水位上昇」  
→ 「地下水位との逆転」
- S/C接続配管破断を仮定した場合、**トラス室（建屋）水位とサブドレン水位の逆転に3週間**  
→ 3週間以内にサブドレン水位上昇と建屋水位低下の対応により**水位逆転防止可能と想定**
- 常設の他に仮設移送設備を準備  
⇒ 上記対策を**YESと判断し、管理状態Aと判定**

**現状の対策を継続と継続的な改善の実施**

- ・機動的対応による対処
- ・破損の拡大抑制  
(例：定期的な訓練の実施)

- ・改良／代替方策・技術
- ・破損の拡大抑制



※ 異常検知・拡大防止・制御・影響緩和対策

■ 破損の拡大抑制技術 (例)

① 砂利をいれる (レジリエンス対応：  
a. 緊急対応的に破損影響緩和、対応時間の延長)

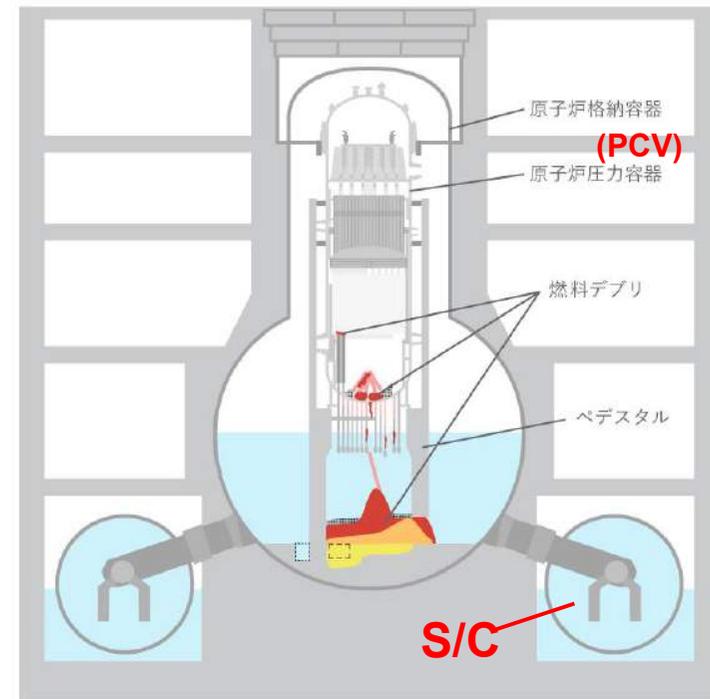
b. 破壊制御、荷重点再配分)

■ 改良・代替方策/技術 (例)

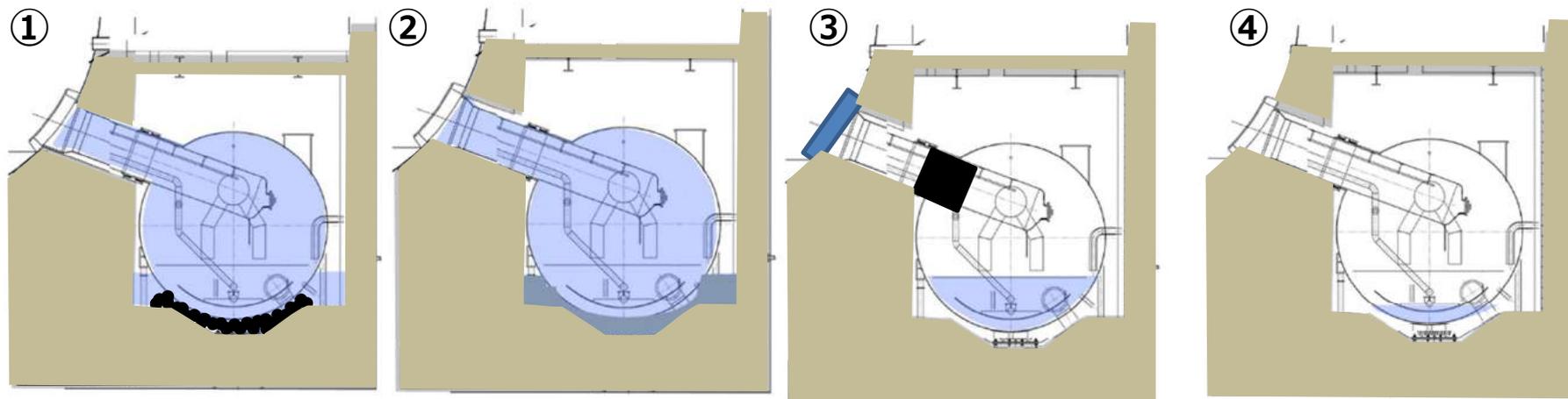
② S/C底部グラウト打ち

③ ベント管/ジェットデフ止水

④ S/C水抜き



Ref. 東京電力HDのHP (一部加筆) 3号機の状況 (推定)



# 燃料デブリ取り出し

(試験的取り出し～段階的取り出し)

- 燃料デブリを取り出す作業は、現在の安定状態に手を加えて、燃料デブリにアクセスし、状態変化をもたらすため、作業に付随するリスク（作業中の不具合等に起因する一定の安定状態からの逸脱さらには建屋の劣化による放射性物質の漏えいや作業者の被ばくなど）を低減する必要がある
- 将来何が起こりそうかを俯瞰し、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が肝要であり、特に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

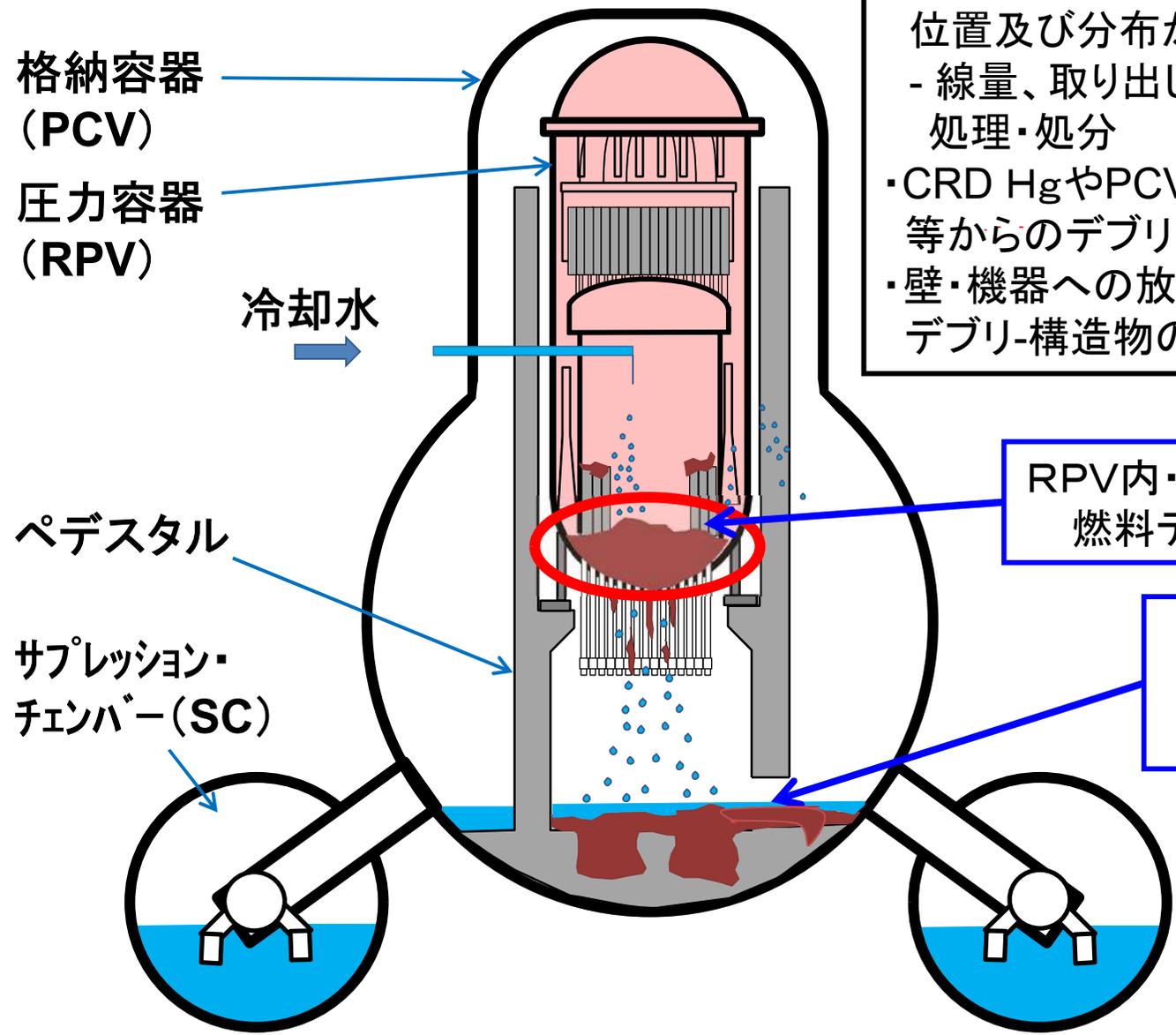
## 論点2

- 工法検討にあたっては、燃料デブリ取り出しによる速やかなリスク低減と、長期間にわたる取り出し作業時のリスク抑制を適切なバランスで両立させる必要がある。
- 事故や故障を想定し、それぞれの措置が独立で互いに影響を及ぼさず（リダンダント）、擾乱の影響を受けにくく（ロバスト）、問題（電源喪失など）があっても回復する（レジリエント）機能が求められる

## 論点3

- 燃料デブリ取出しの目標を設定し、目標達成に関わる一連のプロセスを俯瞰し、時間軸を考慮した成功パスを複数構築することが重要
- とくに、燃料デブリは様々な場所、様々な形態で存在することや、中長期的な形態や物性の変化の可能性が考えられ、燃料デブリ取り出しや取出し後の保管、廃棄物管理も考慮して、多方面から多様化を狙い、様々な手法の検討を行うことが必要。
- 長期にわたることから、学生・若手技術者等若手人材育成を計画的に実施することは重要

現状



格納容器 (PCV)

圧力容器 (RPV)

冷却水

ペDESTAL

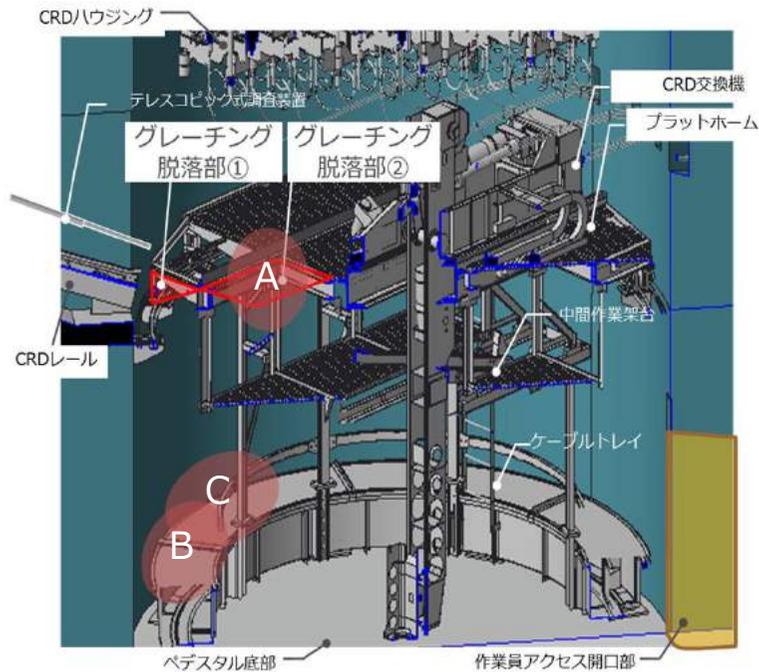
サプレッション・チェンバー (SC)

RPV内・底部の燃料デブリ

PCV底部の燃料デブリ (MCCI生成物)

- 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

# PCV内部調査結果(2号機)



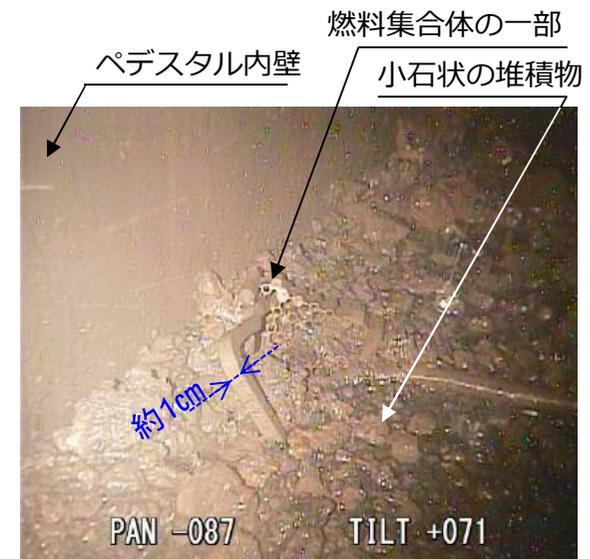
- ペDESTAL底部の全体に、小石状・粘土状に見える堆積物を確認
- 燃料集合体の一部（上部タイププレート）がペDESTAL底部に落下しており、その周辺に確認された堆積物は燃料デブリと推定



撮影場所A グレーチング脱落部②



撮影場所B ペDESTAL底部



撮影場所C ペDESTAL底部

# 燃料デブリ取り出し工法の検討

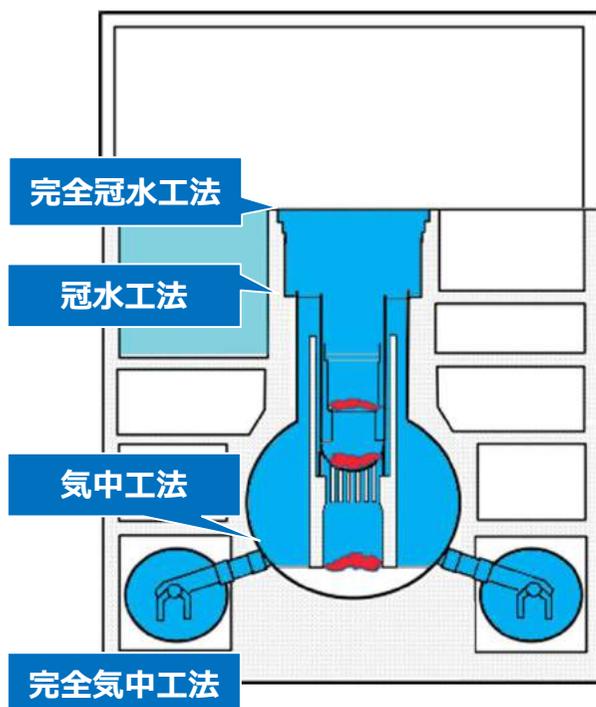
## 燃料デブリ取り出し工法オプションの検討

先行事例のTMI-2\*取出し工法（冠水）に対して、過酷事故の影響によるPCV上部までの水張りの困難さなど、福島第一の状況に沿った燃料デブリ取り出し工法を検討する

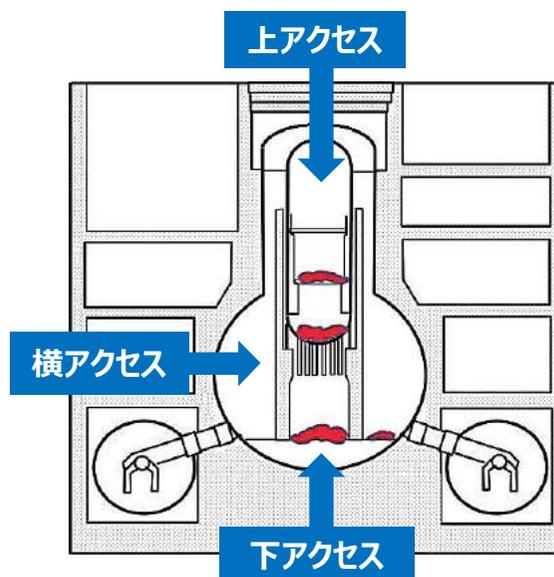
\*TMI-2：スリーマイル島原子力発電所2号機

- PCVの上部まで水を張らず、燃料デブリが気中に露出した状態で取り出す工法の検討
- PCV内に広く分布していると推定される燃料デブリを取り出すためのアクセス方法の検討

### PCV水位レベルに応じた工法分類



### 燃料デブリへのアクセス方向



### PCV水位とアクセス方向の組み合わせ

		アクセス方向		
		上	横	下
水位	完全冠水	a.		
	冠水	a.		
	気中	b.	c.	
	完全気中			

冷却性能評価の困難さ

新たにアクセスルートを構築する困難さ

アクセス口から水が流出する可能性

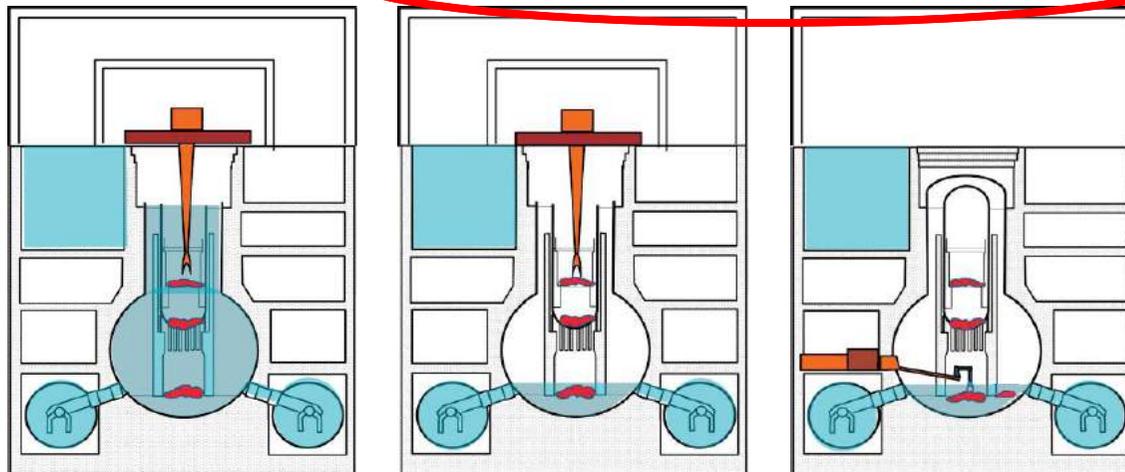
重点的な検討対象としない

「技術戦略プラン2015」NDF

## 選定した燃料デブリ取り出し工法オプション

下図はNDF「技術戦略プラン2015」より抜粋

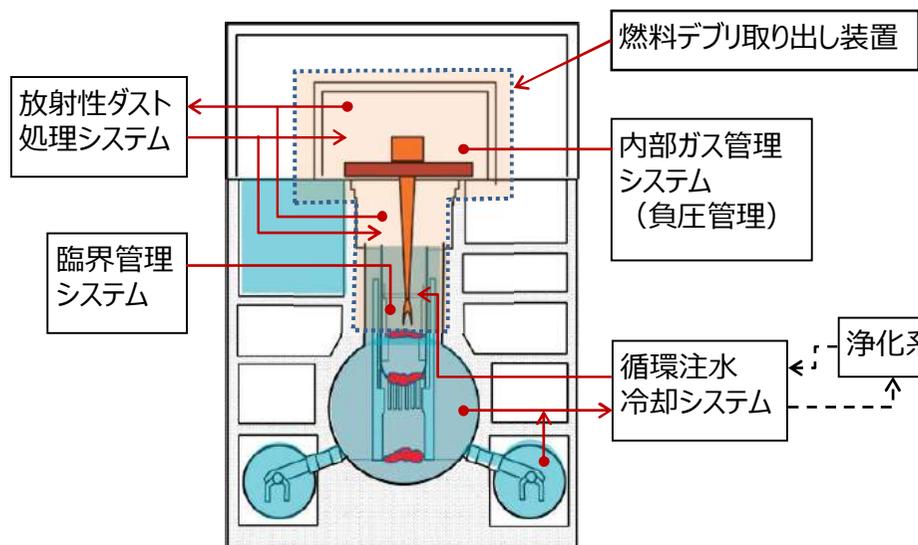
x a. 冠水-上アクセス工法    **b. 気中-上アクセス工法**    **c. 気中-横アクセス工法**



### 工法実現性を見極めに必要な要素技術

- ✓大型構造物取り出し時の汚染拡大防止技術
- ✓RPV内等燃料デブリ取り出し時の汚染拡大防止技術
- ✓燃料デブリへのアクセス技術
- ✓燃料デブリ取り出しの遠隔作業技術
- ✓燃料デブリ取り出しの切削・集塵、視覚・計測技術

## システムの概念、工法実現性の検討

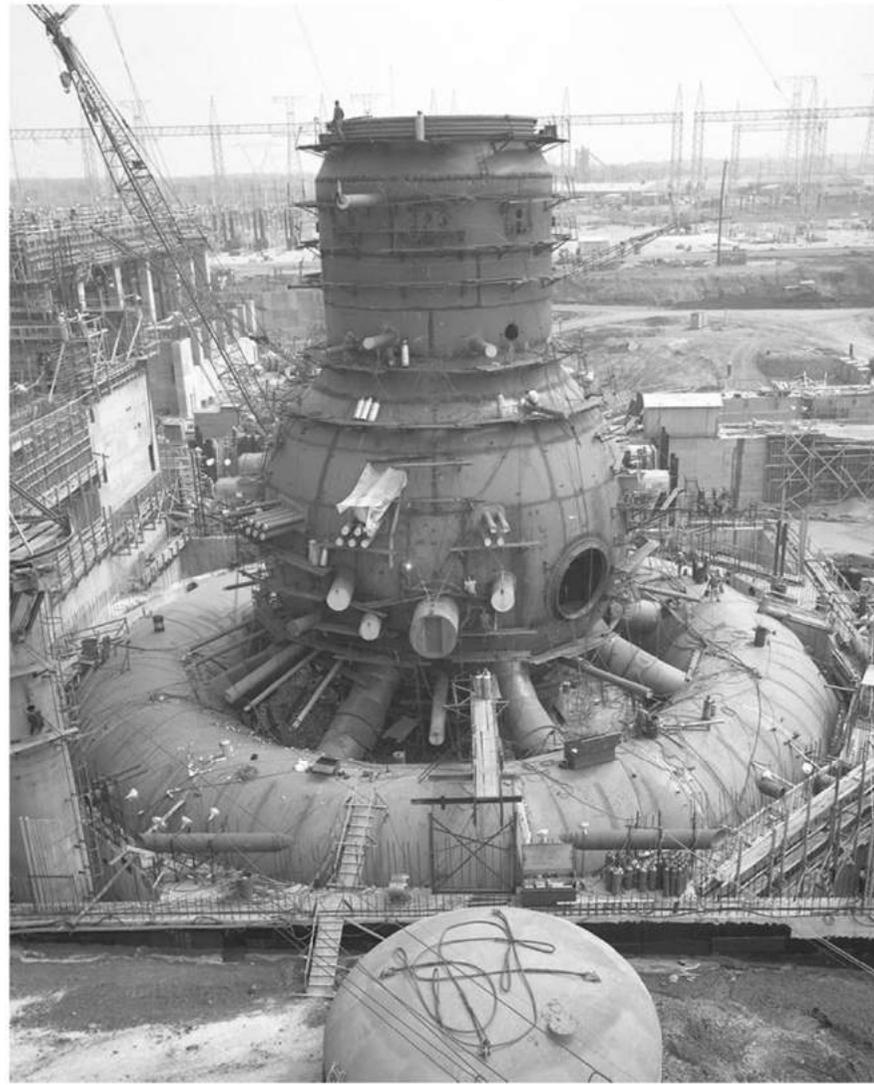


### 燃料デブリ取り出し装置設計の上での留意事項

- ✓装置の耐放射線性、メンテナンス性
- ✓燃料デブリ取り出し工事効率向上
- ✓収納缶や他の機器との取り合い
- ✓装置周りの放射性ダスト回収設備・装置

参考：平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金（燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化事業）」及び「同（燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業）」に係る補助事業者公募要領 平成27年6月23日

# 沸騰水型原子炉(BWR) 格納容器(PCV)



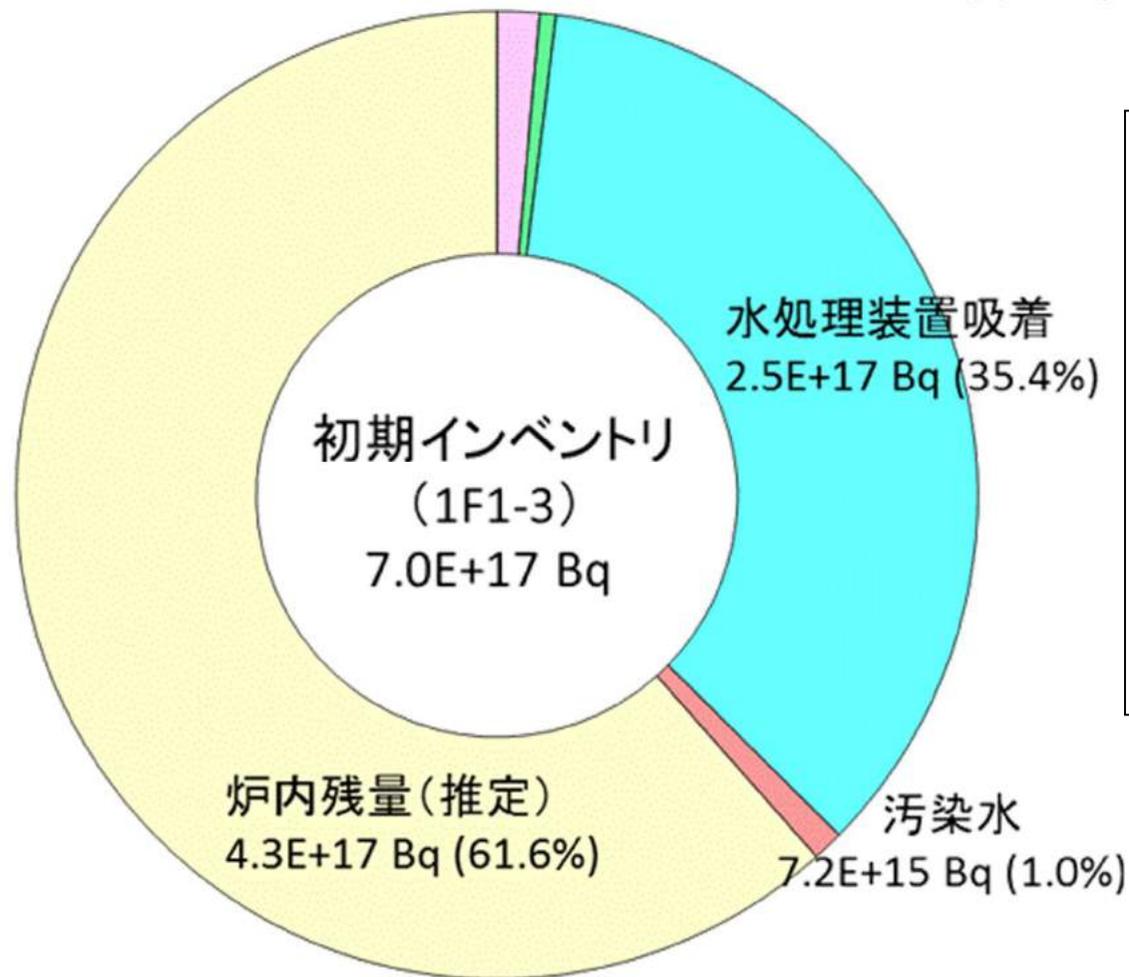
PCV開口部  
ハッチ、ベント管、配管ペネ  
および電気ペネ  
1号機 約150か所  
2号機 約200か所  
3号機 約190か所

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

# 性状把握

## Cs-137の放出量予測

大気放出  $1.0\text{E}+16$  Bq (1.4%) 海洋放出  $3.8\text{E}+15$  Bq (0.5%)



### 規制庁評価(2021)

1. Cs-137 総量1-3号機  
約70京Bq

#### 2. 号機別

①1号: 100兆~200兆Bq

②2号: 2京~4京Bq

③3号: 3京Bq

## 閉じ込めで何が重要か？（要求機能）

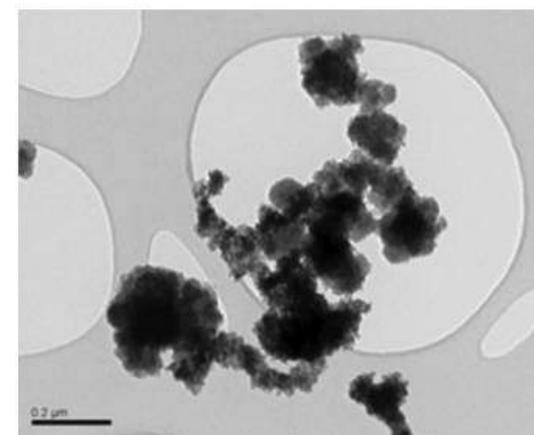
1. 放射性物質を外にださない
2. 被曝低減
3. 事故・故障も想定したリスクマネジメント  
（共通要因）
  - ①独立であって他に影響を及ぼさない  
（多重防護）
  - ②それぞれのシステムがノイズの影響を受けにくい（ロバスト）
  - ③システムに問題（電源喪失等）があっても、回復する（レジリエンス）

# 切断時に発生するエアロゾルの特徴

- エアロゾルの特徴と未解明項目
  - 寸法: 約0.2-0.4 $\mu\text{m}$
  - 形状: 球状、フラクタル、繊維状(材料による)
  - 濡れ性: 粒子表面組織に依存する撥水性、親水性
  - 電気的特性: 放射線環境下でのイオン化によってプラスに帯電か、種々の電気的特性
  - 粒子の発生と再浮遊特性は明確ではない



エアロゾルの効果的な除去のためには、切断対象材料の粒子の物理的、熱水力、化学的、電気的特性を把握する必要がある



気中レーザー切断での典型的なエアロゾルクラスター

# スプレーによるエアロゾル捕集

## 影響因子

- ・ ブラウン運動
- ・ 慣性衝突
- ・ 接触
- ・ 拡散泳動
- ・ 熱拡散
- ・ 静電気力

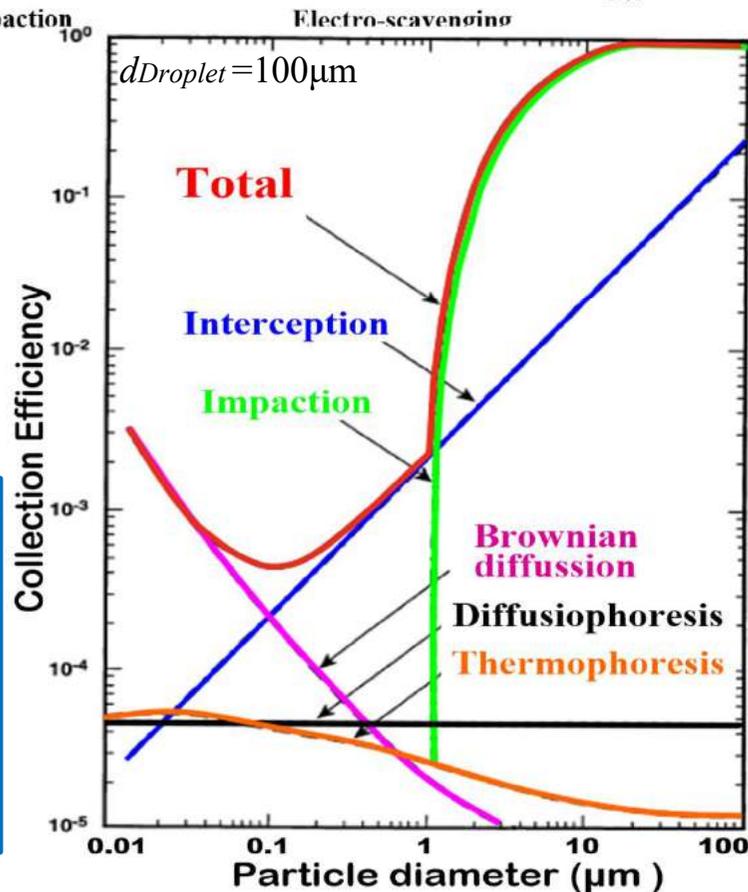
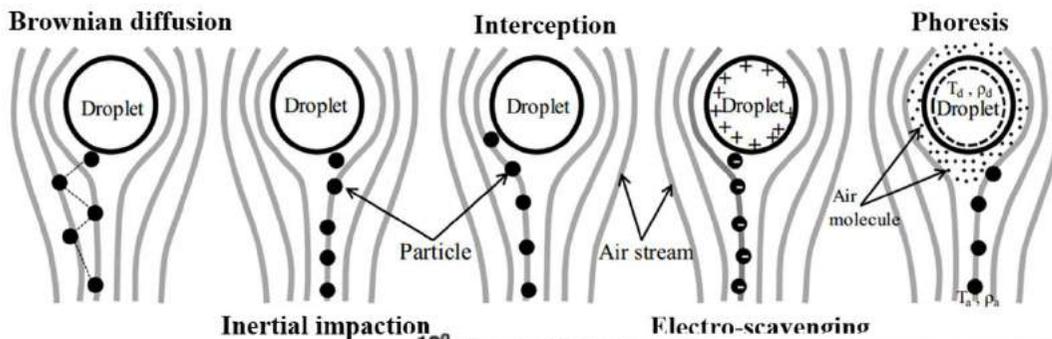
## 液滴捕集効率 E (非電荷のケース)

- ・ 粒子径によって異なる因子が支配的
- ・ Greenfield Gap: 0.1-1 $\mu\text{m}$ の粒子径



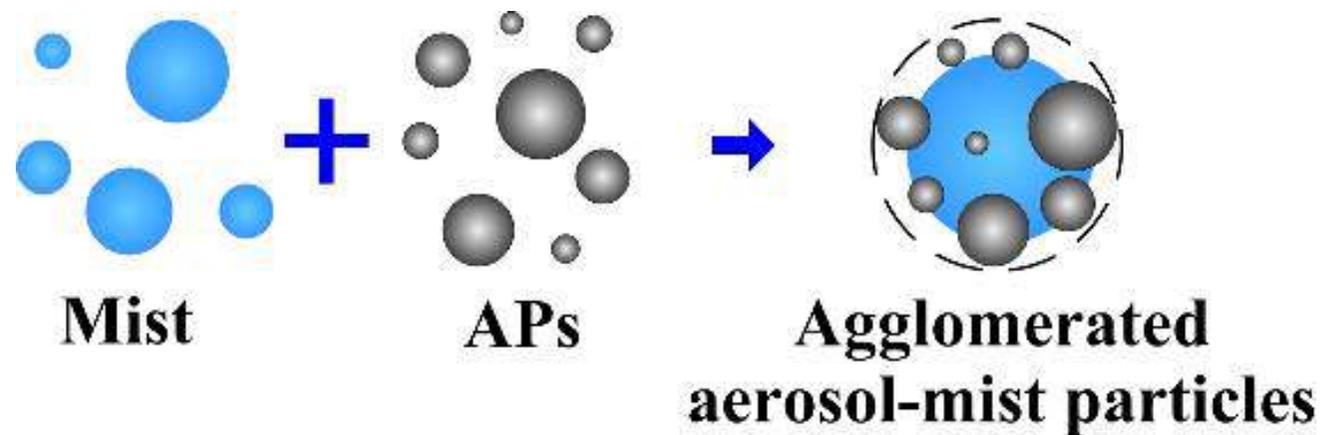
**研究目的: 効率的なスプレーシステムの確立**

- ・ 種々の特性のエアロゾル粒子による捕集把握
- ・ 捕集効率 (特にGreenfield gap) の向上
- ・ 発生汚染水の最小化
- ・ 伝熱シミュレーション



Ardon-Dryer K, et al. Atmospheric Che. Phy, 2015; Murata K K, et al. NRC, 1997.

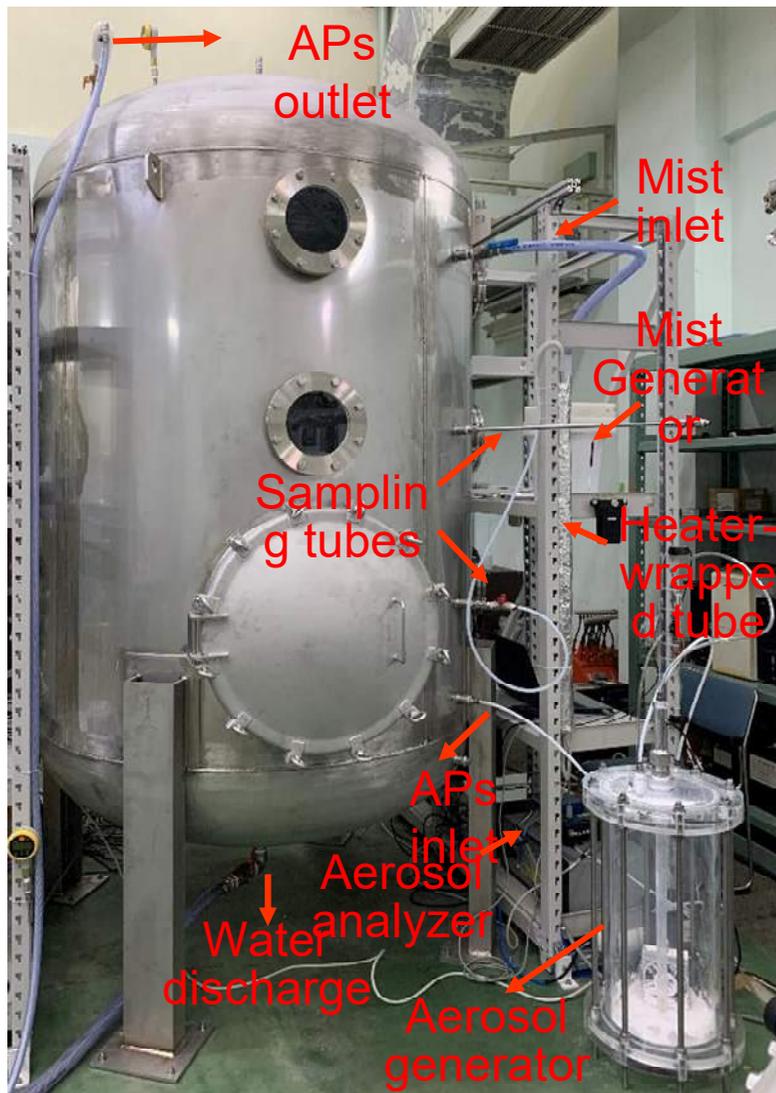
## 新たな提案: 水ミストの利用



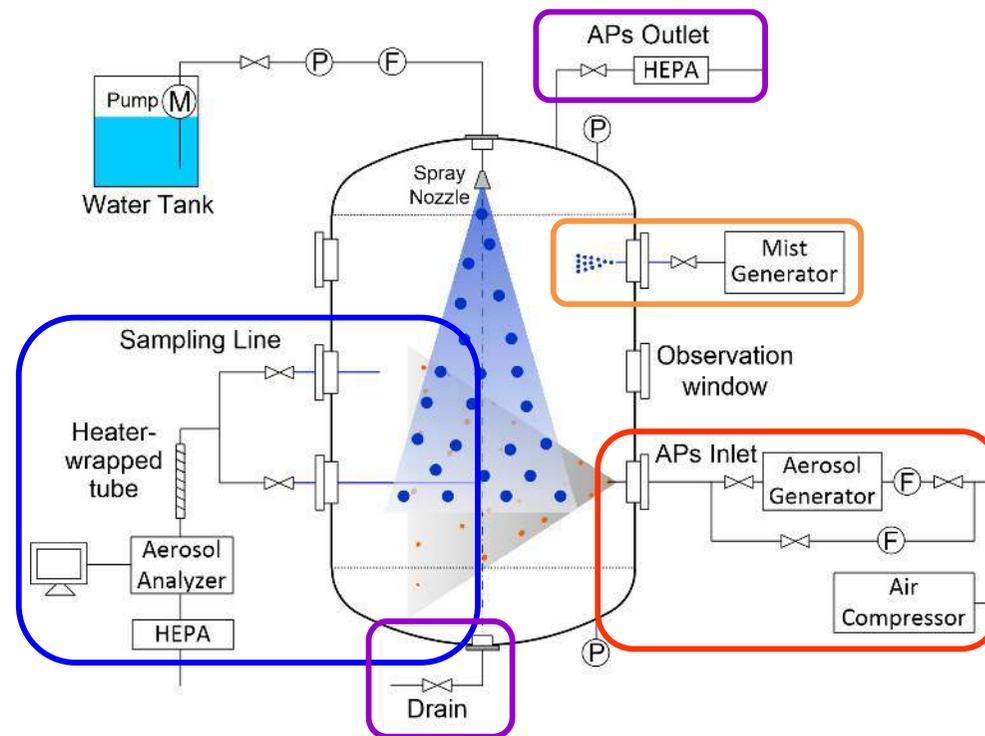
原理：微小粒子を水ミストで捕捉・集合させ、大きな粒子にしてフィルターで除去する

# 燃料デブリ飛散防止技術の開発

## - エアロゾル捕集試験 -



UTARTS Experiment setup view

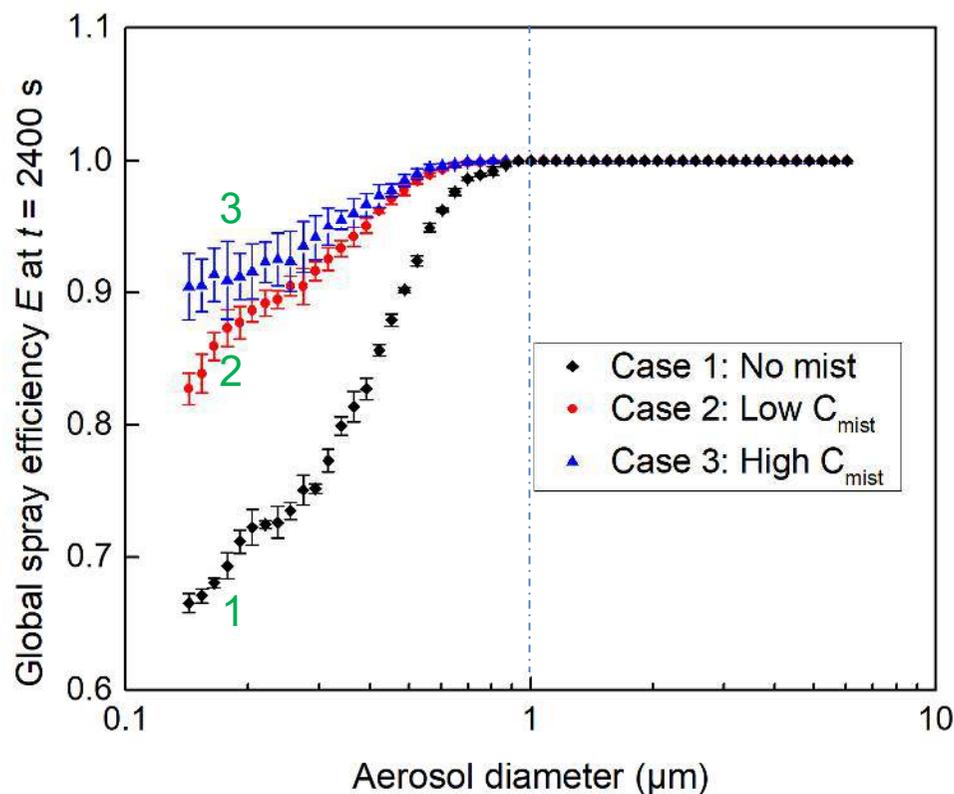


**Mist Generation System**  
**APs Generation System**  
**Cn\_APs Measurement System**  
**APs Outlet & Water Discharge System**

# 水ミストによる粒子の凝集効果

□ Global spray efficiency  $E$  at spraying time  $t = 2400s$ :

$$E = \frac{C_n(t)|_{t=0s} - C_n(t)|_{t=2400s}}{C_n(t)|_{t=0s}}$$



Global spray efficiency at  $t=2400s$

## Remarks:

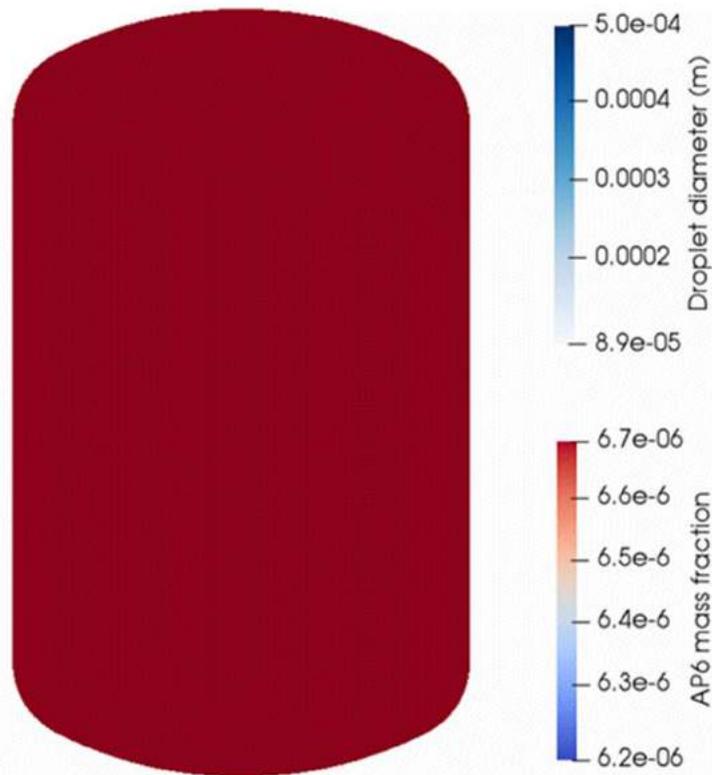
- When  $D_{APs} > 1 \mu\text{m}$ ,  $E = 1$ ;
- When  $D_{APs} < 1 \mu\text{m}$ , obviously mist has potential to improve  $E$ ;
- Higher  $C_{mist}$  leads to higher  $E$ ;

# シミュレーション結果 ( UTARTS )

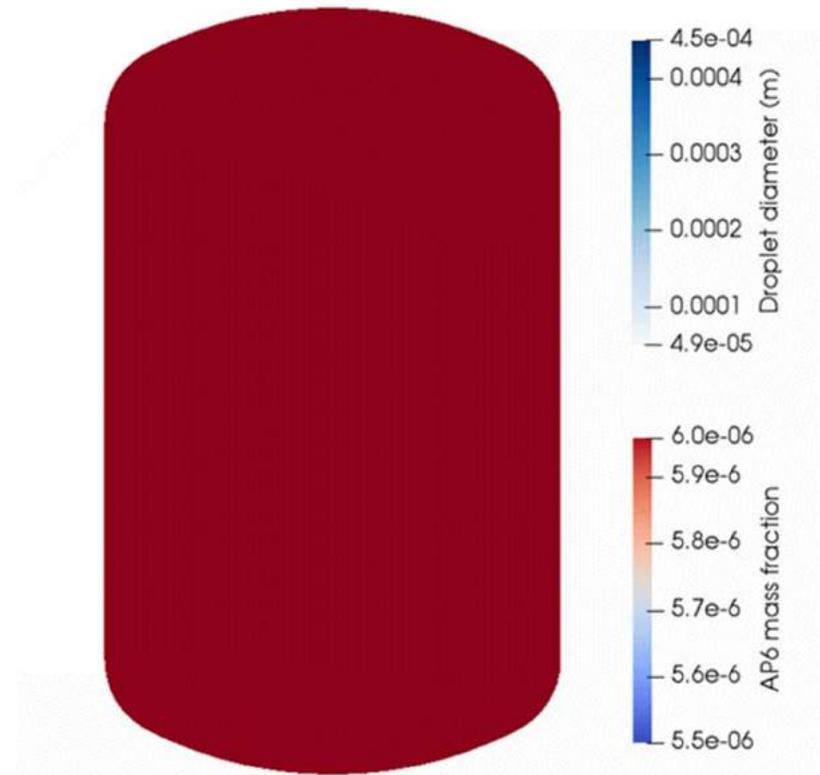
39

## □ スプレー液滴とエアロゾルの質量割合:

- **Spheres:** spray droplets (with color refers to droplet diameter);
- **Background of slice:** Aerosol mass fraction of AP6 ( $0.6\mu\text{m}$ );



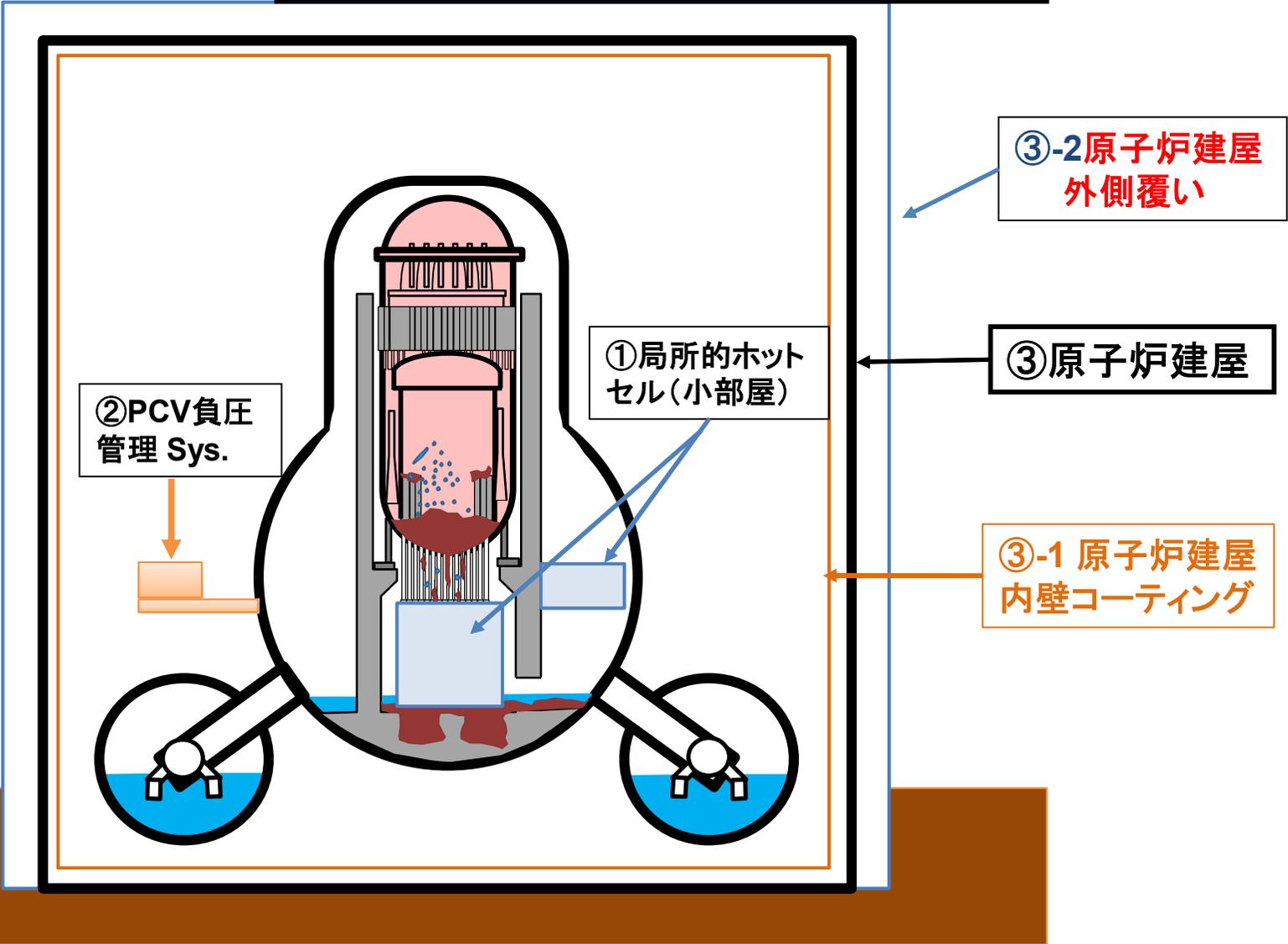
(a) Case 1: narrow spray angle  $27^\circ$   
(first 50s, play speed  $\times 6$  times)



(b) Case 2: wide spray angle  $66^\circ$

閉じ込め

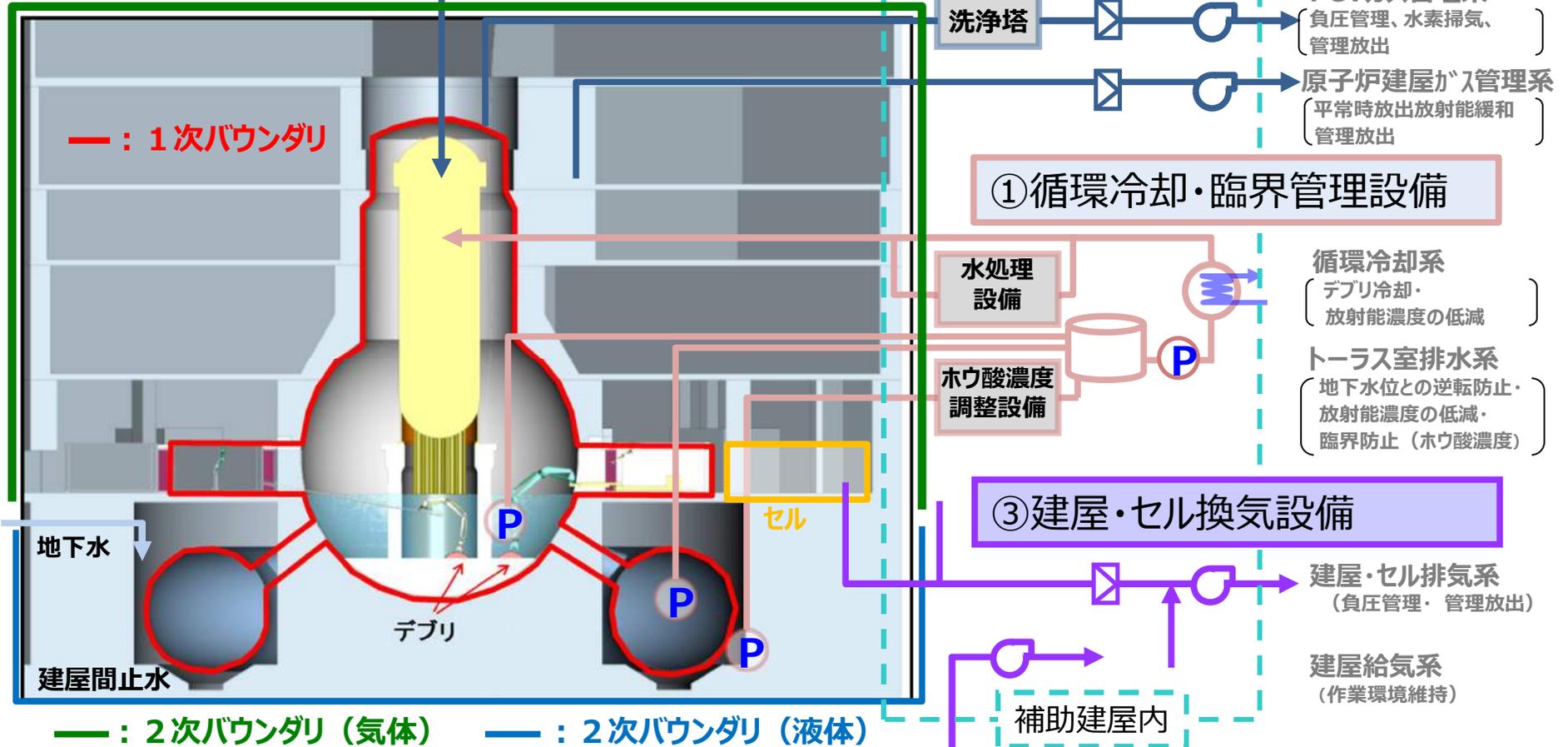
第一の壁：局所的ホットセル  
第二の壁：PCV  
第三の壁：原子炉建屋外側覆いまたは原子炉建屋（内面コーティング）



# 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

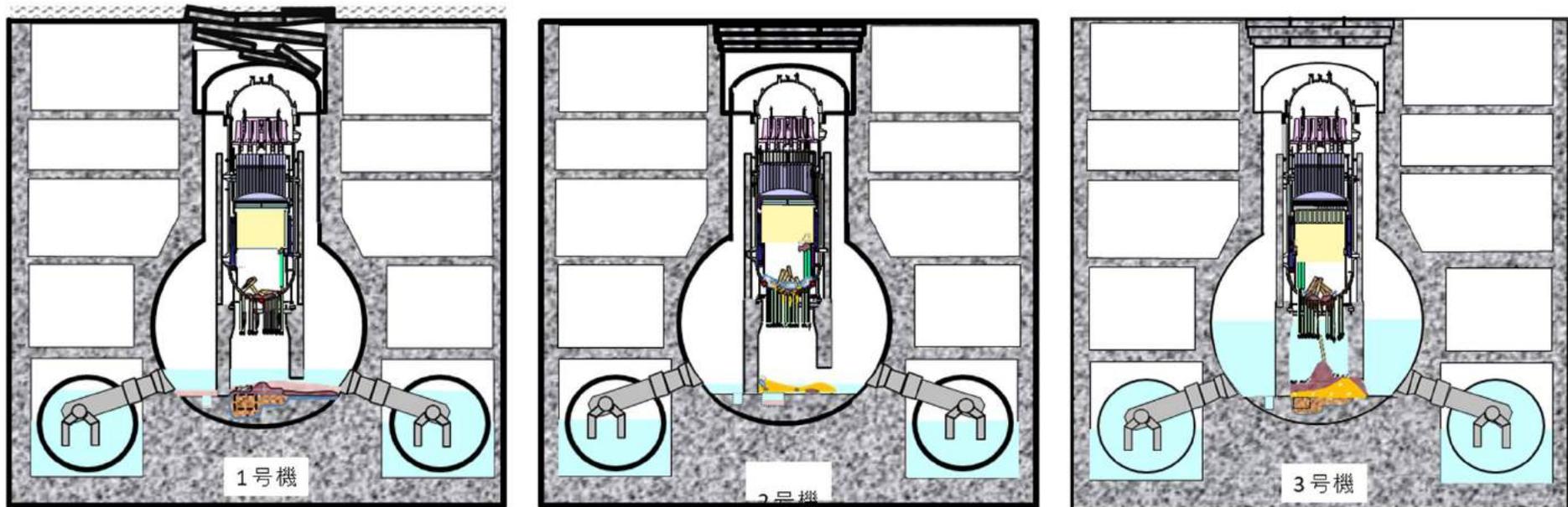


# 燃料デブリの取り出しで何が重要か？ (要求機能)

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)

# 1～3号機の状態推定

	燃料デブリ分布			格納容器水位	
	炉心部	圧力容器底部	格納容器	ドライウェル水位※	圧力抑制室水位
1号機	ほとんどない	ほとんどない	大部分	約2m	ほぼ満水
2号機	少ない ∨	多い ∨	少ない ∧	約0.3m	中間
3号機	少ない	少ない	ある程度	約6m	満水



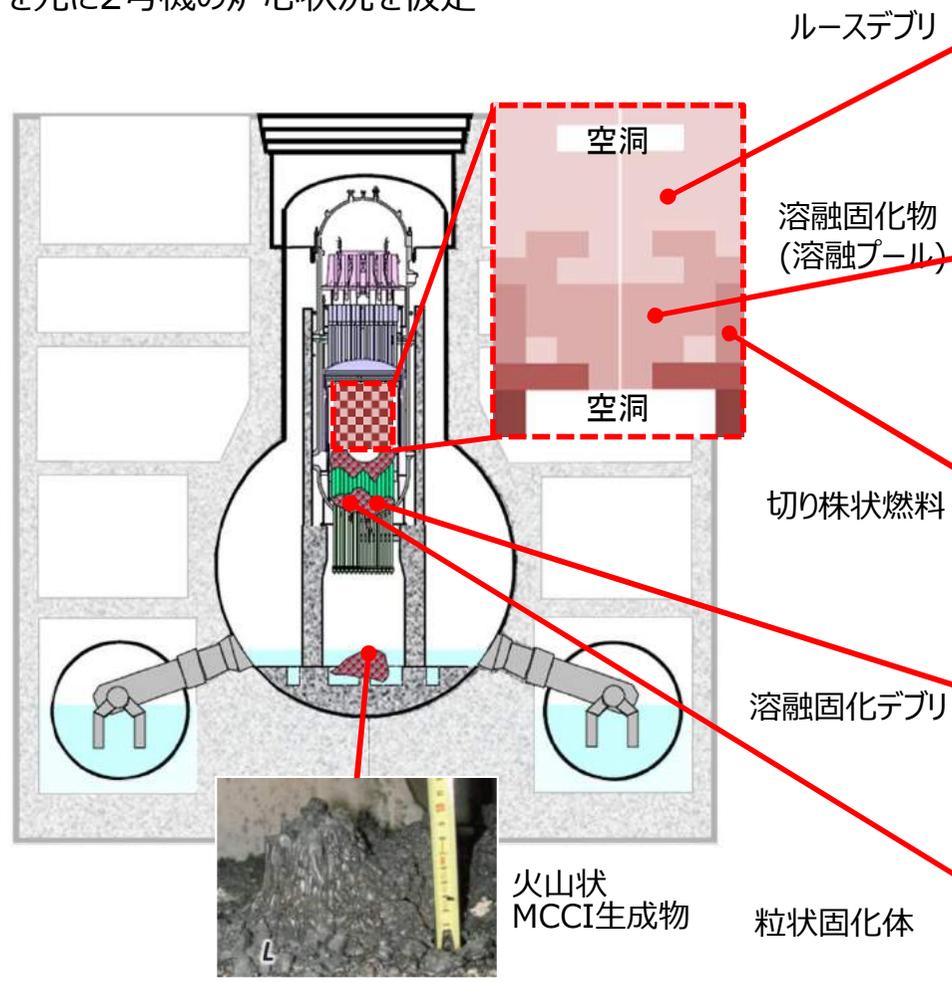
※ 2021年1月時点の水位（2021年2月13日に発生した地震の影響により1号機と3号機の格納容器（ドライウェル）水位は変化）

燃料デブリ総量: 約900トン(推定)

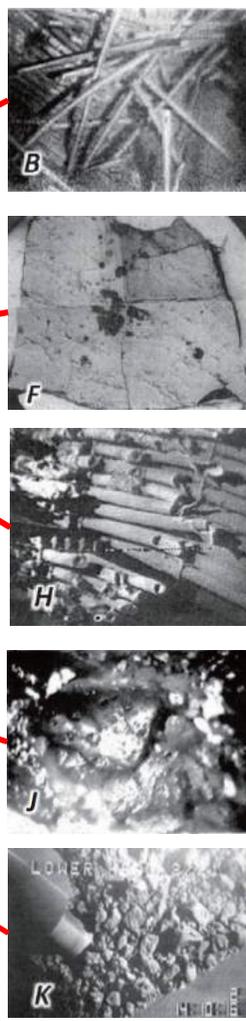
# 圧力容器内燃料損傷の推定

## 事故進展解析コードによる炉心状況仮定

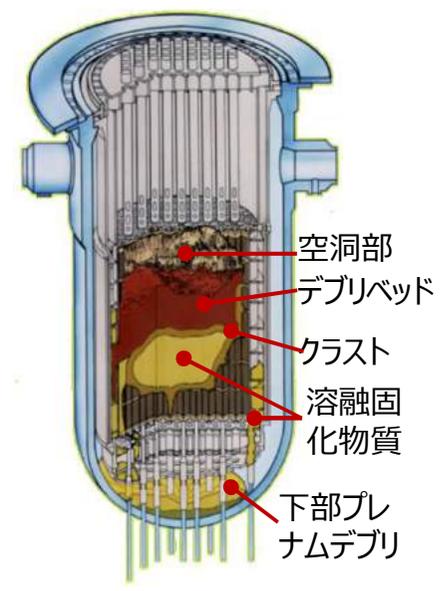
SAMPSONの解析結果に対して、TMI-2事故事例を元に2号機の炉心状況を仮定



## TMI-2の炉心状況情報



TMI-2の燃料溶融 1979USA



「技術戦略プラン2015／燃料デブリ性状の推定」 NDF

# 燃料デブリの性状把握

## 模擬デブリの生成

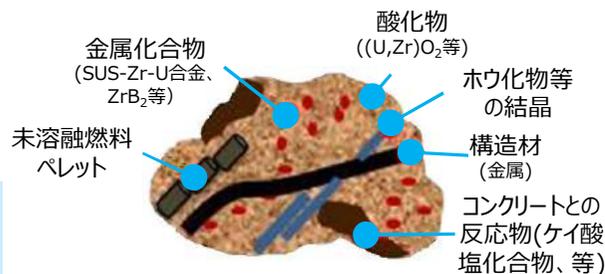
### ●生成する酸化物、金属の推定

→熱力学平衡計算

(炉内の燃料分布、酸素濃度、温度)

酸化物： (U,Zr) O<sub>2</sub>

金属： Zr(O)、Fe<sub>2</sub> (Zr、U)



実デブリのイメージ図



TMI-2で採取された燃料デブリ

## 福島第一に特有な反応の把握

### ●ホウ素との反応生成

B<sub>4</sub>C制御材由来のホウ化物は顕著に硬く、切削工具へ負担となる可能性あり

### ●コンクリートとの高温反応 (MCCI\*)

\*Molten Core Concrete Interaction

コンクリート組成、溶融温度・時間により生成物組成異なる

コンクリート侵食面間に多層の酸化物層

### ●海水塩との高温反応

## 燃料デブリのサンプリング・取出しに必要な物性値の検討

### ●物理特性

(形状、大きさ、密度/空隙率、硬さ、弾性率、破壊靱性)

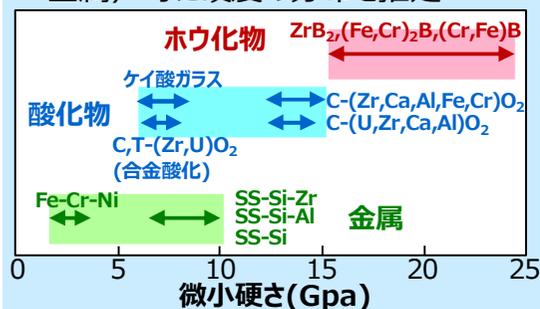
### ●熱的特性

(比熱、熱伝導率、融点)

### ●TMI-2 デブリとの比較

模擬デブリはTMI-2デブリの硬度をほぼ網羅

デブリの化学系 (ホウ化物、酸化物、金属) 毎に硬度の分布を推定



取出し用ツール類の分類

カッティング

原理：打撃・衝撃

回収

原理：ピック&プレース

カッティング

原理：せん断

吸引

原理：吸引

カッティング

原理：溶断

コアボーリング

原理：研削・圧縮

# 燃料デブリ取り出しに必要な技術開発の例

## 1. 建屋内の線量を下げる

- 遠隔除染装置の開発

## 2. デブリの状態を知る

- ◎ 間接的に知る
  - 解析による炉内状況把握
  - 宇宙線ミュオンを利用した透視
- ◎ 直接的に知る
  - PCV内部調査、RPV内部調査

## 6. デブリを収納・移送・保管する

## 5. デブリを取り出す

## 4. PCV水位の制御

## 3. PCVからの漏えいを止める

## 1. 建屋内の線量を下げる

## 2. デブリの状態を知る

## 3,4. 漏えいを止め、循環冷却を確立する

- PCV補修・止水技術の開発
- PCV補修・止水実規模試験

## 5. デブリを安全に取り出す

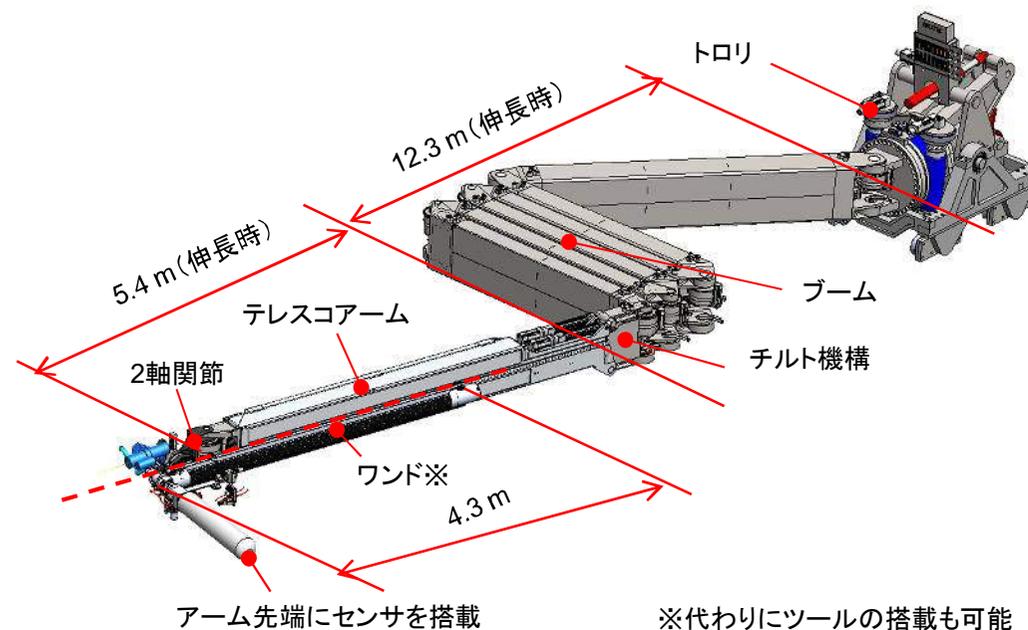
- デブリ取り出し基盤技術の開発
- デブリ取り出し工法・システムの開発
- 臨界管理技術の開発

## 6. デブリを運びだし、安全に保管する

- デブリ収納・移送・保管技術の開発

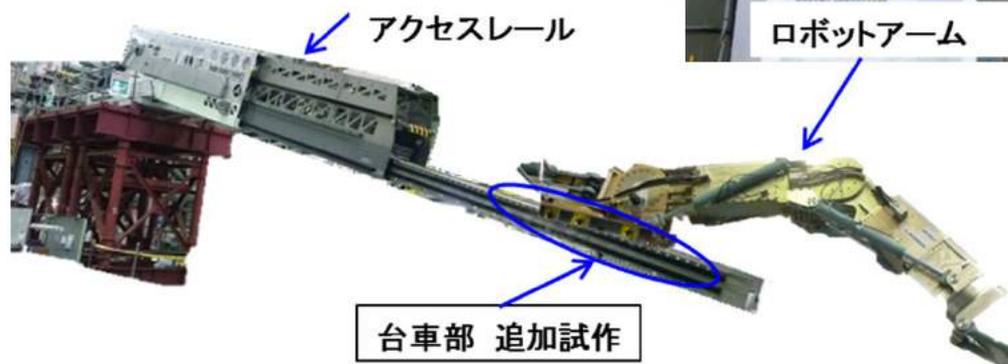
## 小規模取り出し(アーム型アクセス装置)

- 制御棒駆動機構メンテナンス用の格納容器貫通部(X-6ペネ)を通じて広範囲にアクセス可能なアーム型アクセス装置を製作中
  - アーム全長約22 m
  - 10 kgまでの調査装置を搭載可能



# 段階的燃料デブリ取り出し拡大

- 干渉物撤去・燃料デブリ取り出しに共通の技術開発（**取り出し装置の動作確認**）
  - **アクセスレール・ロボットアーム（各々単体機能試験済）の組合せ機能試験**



組合せ機能試験イメージ

# 切削技術の開発・遠隔チゼル加工の例

- 要求事項を満たす切削技術の構成を検討中
- コアボーリング, ディスクソー, 超音波コアドリル, 油圧カッター, チゼル, アブレイブウォータージェット(AWJ), レーザーガウジング 他
- 加工速度

No.	チゼル種類	チゼル本数	加工状況/チゼル形状	加工結果状況	加工速度*1
1	電動駆動式	1本			28.74 kg/h*1 (287kg/日*1)
2	電動駆動式	1本			43.38kg/h*1 (433kg/日*1)
3	エア駆動式	2本			255.576kg/h*1 (2.5ton/日*1)

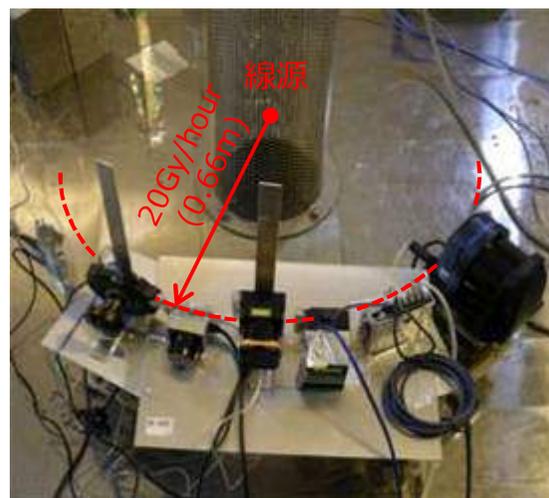
\*1：予備試験結果であるため、加工速度は参考値とする。加工目標は、300kg/日。1日の作業時間は10時間。

# 電子機器に対する放射線の影響

- 1号機：原子炉建屋内線量：1階約数ミリ～約4000mSv/h以上(南側)  
 2号機：原子炉建屋内線量：1階約数ミリ～約30mSv/h、オペフロ最大880mSv/h  
 3号機：原子炉建屋内線量：1階約20ミリ～約4000mSv/h以上(北側の一部)、オペフロ最大約2000mSv/h

構成要素部品の放射線耐力を把握し、遮蔽材なしでの高放射線下の運用可能性を検討

参考：ガンマ線の影響を1/10とする遮蔽 = 鉛版：2-30mm / 鋼鉄：7-80mm



ガンマ線照射試験

## ガンマ線照射試験 (20Gy/hour-40Gy/hour)

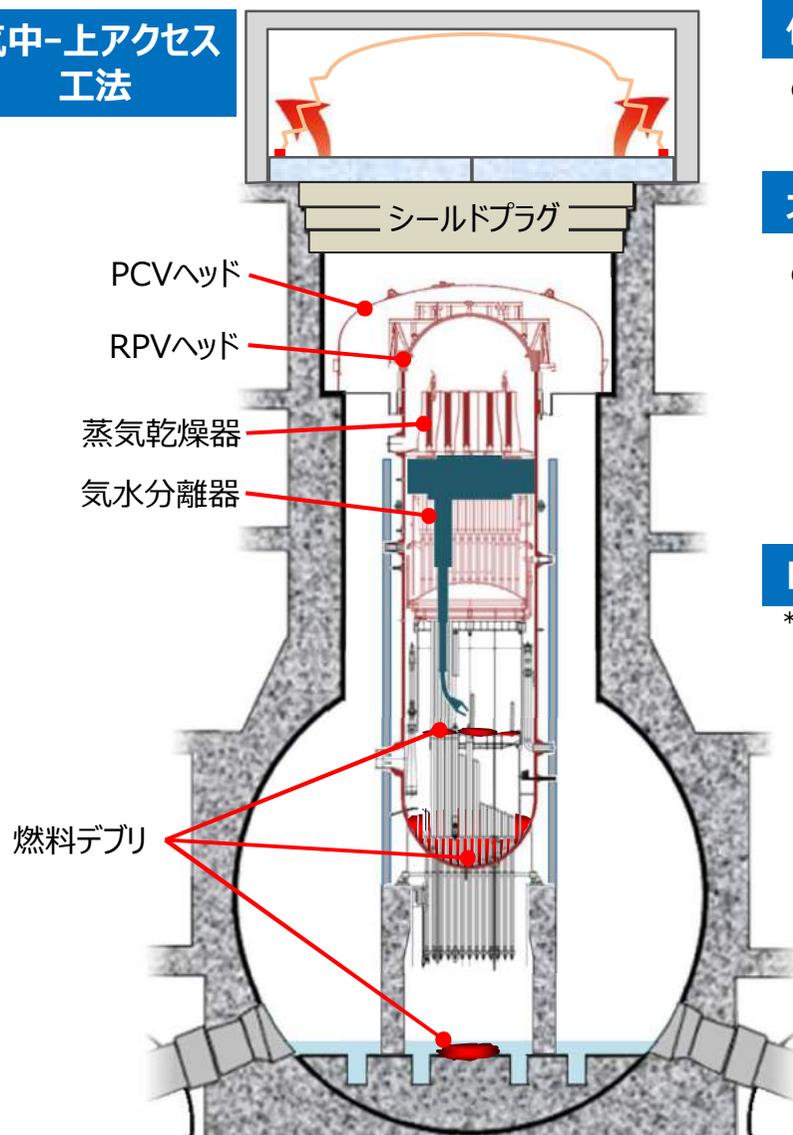
スキャナ式レンジセンサ	124Gy
カメラ	169Gy
CPUボード、電池 モータ・ドライバ 無線機、LANハブ 3次元距離画像センサ 広角ネットワークカメラ 通信デバイス等	200Gy以上

1Gy/hourの高放射線下でも100時間以上の動作が可能

「汎用重機やロボットにおける耐放射線評価と管理方法の基本的な考え方」対災害ロボティクス・タスクフォース 2011年4月27日

# 汚染拡大防止技術(例)

## 気中-上アクセス 工法



## 作業員の被ばく低減

- シールドプラグに代わる開閉式カバーの設置  
水充填式により、不要時の軽量化と形状の追従性を実現

## 大型構造物取り出し時の汚染拡大防止

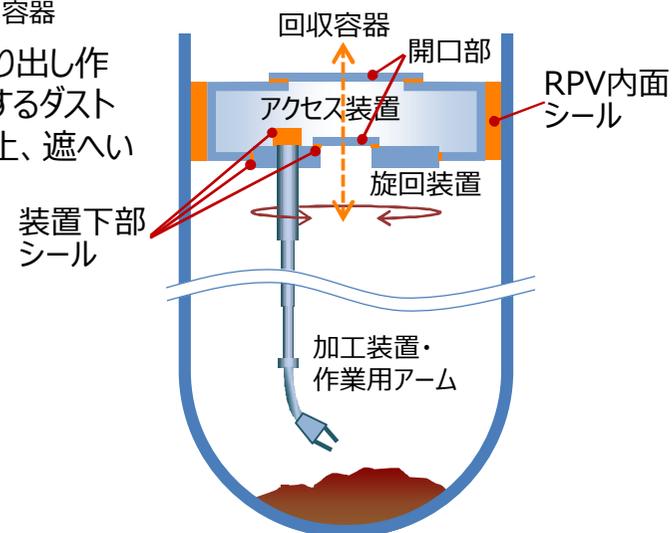
- ダスト飛散防止のための、エリア間仕切りフィルム、シートの開発



## RPV\*内燃料デブリ取り出し時の汚染拡大防止

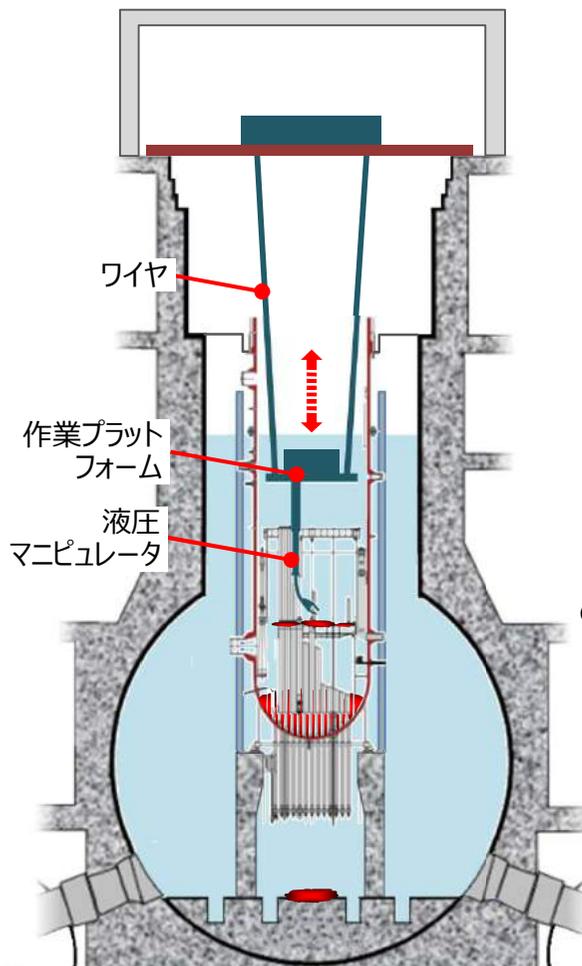
\*RPV：原子炉圧力容器

- 燃料デブリ取り出し作業中に発生するダスト等の拡散防止、遮へい技術の開発



# 遠隔作業技術(例)

## 冠水工法



## 遠隔ハンドリング技術



### ● 液圧マニピュレータの開発

液圧を駆動源とした小型・高出力マニピュレータ  
 ・耐放射線性 10kGy/h以上、2MGy以上

### ● 作業能力

#### 燃料デブリへのアクセス

- ・先端負荷15kgでの、移動速度2mm/秒  
先端位置精度±2mm程度の安定制御
- ・加工時の反力を受けることを想定

#### 燃料デブリの取り出し (横アクセス)

- ・垂直下向き200kg保持、持ち上げ最大45度
- ・100kgを水平まで持ち上げ可能
- ・柔構造による障害物との干渉影響を吸収

### ● 切削技術 (一例)

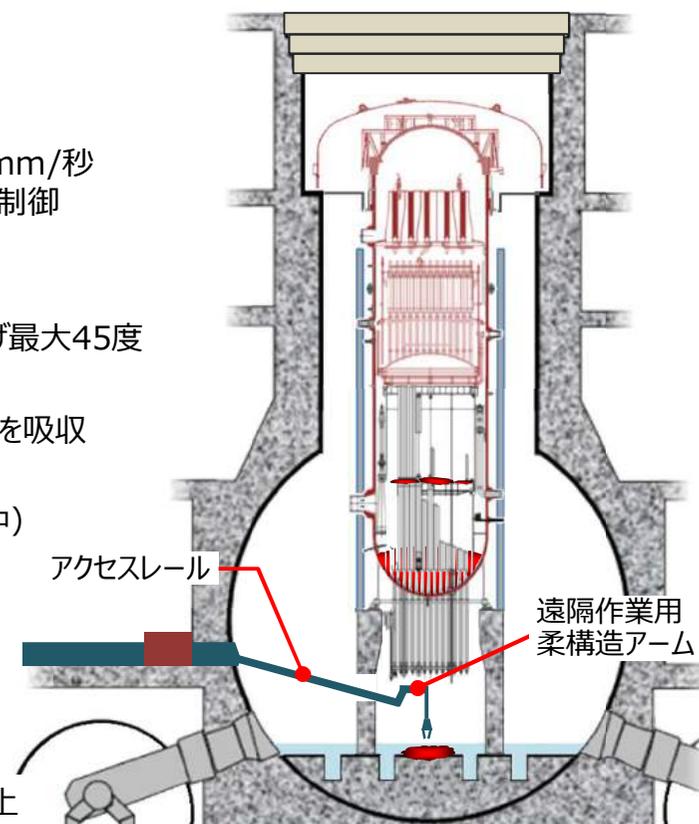
- ・コアボーリング ・プラズマ加工 (水中)



### ● 計測技術

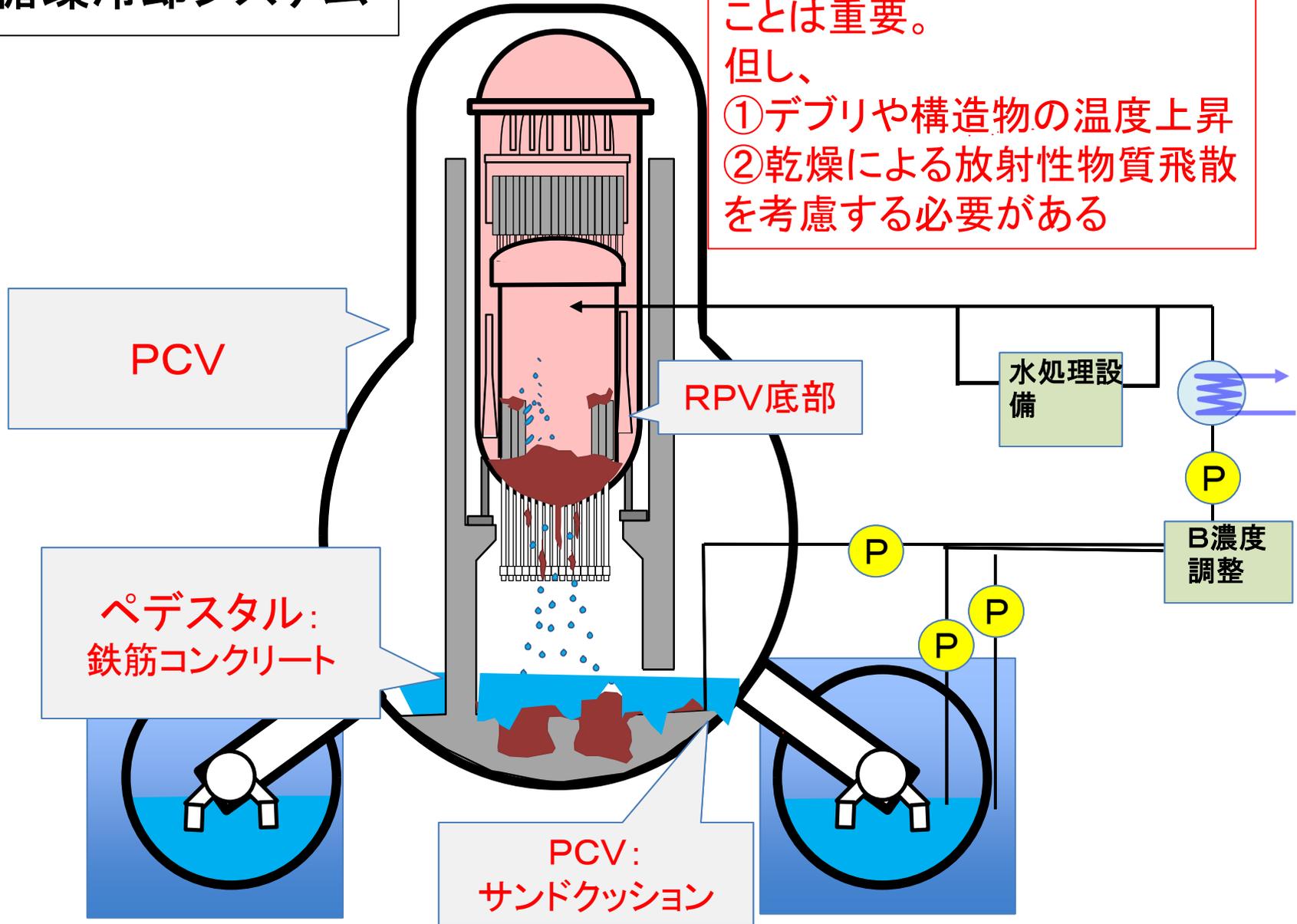
- ・耐放射線性の確認・限界能力の向上

## 気中-横アクセス工法



# 燃料デブリ取り出し時の循環冷却システム

今後は循環水由来の汚染を減らすため、注水量を減らすことは重要。  
但し、  
①デブリや構造物の温度上昇  
②乾燥による放射性物質飛散を考慮する必要がある



PCV

RPV底部

ペデスタル:  
鉄筋コンクリート

PCV:  
サンドクッション

水処理設備

B濃度調整

P

P

P

P

# 燃料デブリ取り出し時の課題

- ① 閉じ込めを確実に行う
  - ・ 多数の未確認貫通部
  - ・ 取り出し時の放射性物質飛散防止
  - ・ 汚染水漏えい対策
- ② 安全に燃料デブリを取り出す
  - ・ RPV底部(含むCRDM)の安定性
  - ・ ペDESTAL基礎部の安定性
  - ・ 取り出し環境(線量、温度)
  - ・ 循環冷却ラインの健全性
  - ・ 取り出し量・期間
  - ・ 臨界管理
- ③ 将来の廃棄物管理をしやすくする
  - ・ 多種・多量の分散している
  - ・ 廃棄物分別・管理

## 燃料デブリ取り出しの キーポイント(IRID)

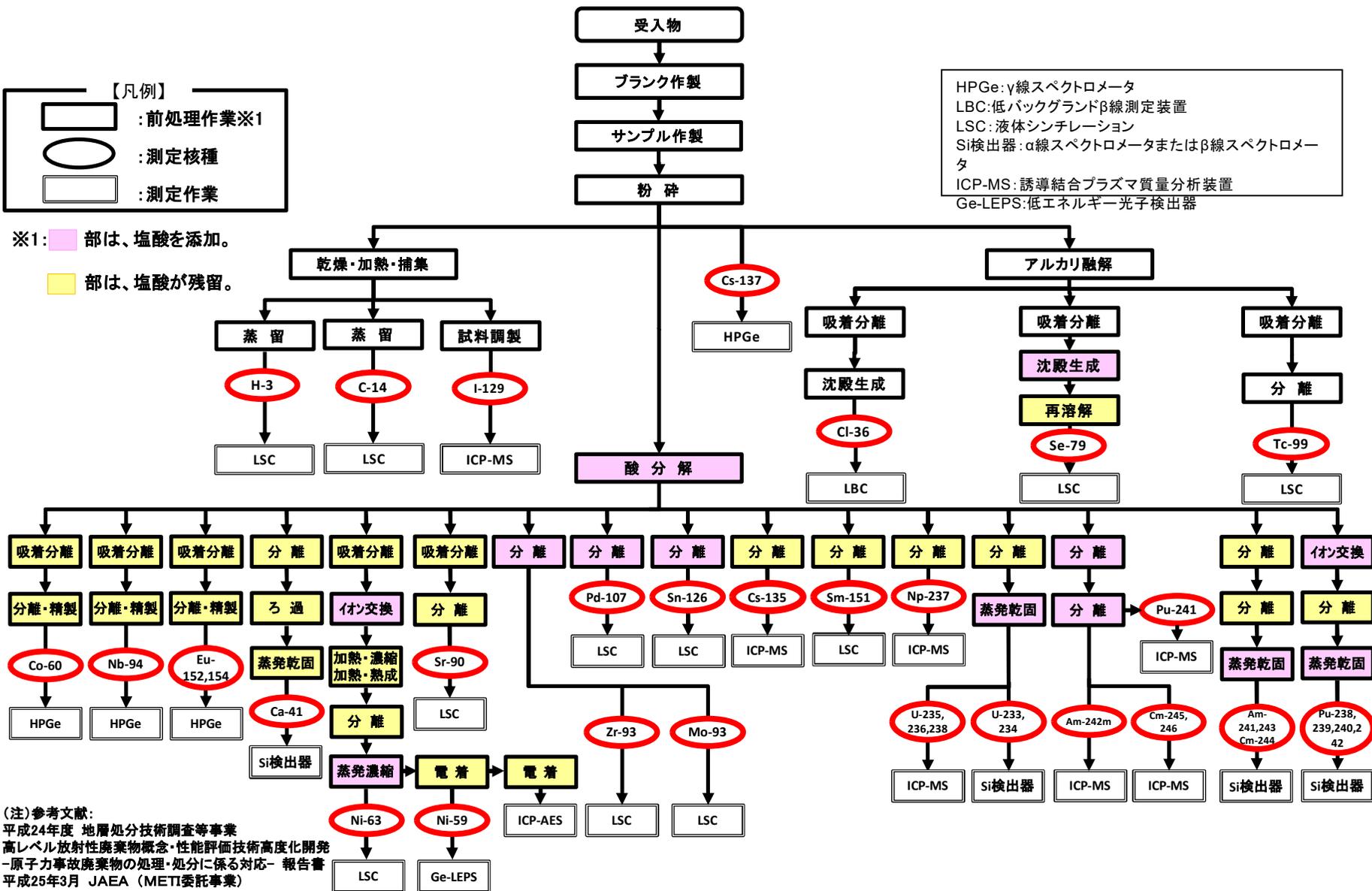
- 安全性
- 実用性: 遠隔操作  
自動操作、保守性
- 検証と訓練  
(モックアップ等)
- 安全要求と安全設計

# 性状把握に関する研究開発 廃棄物試料の分析方法



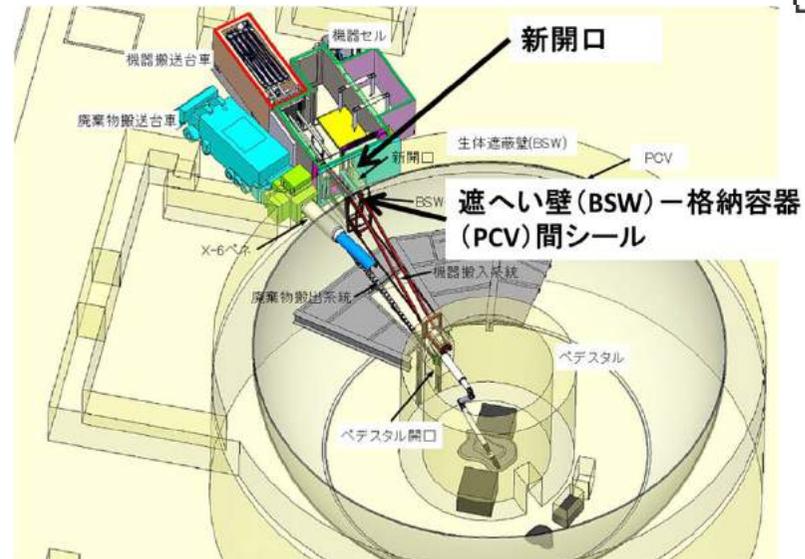
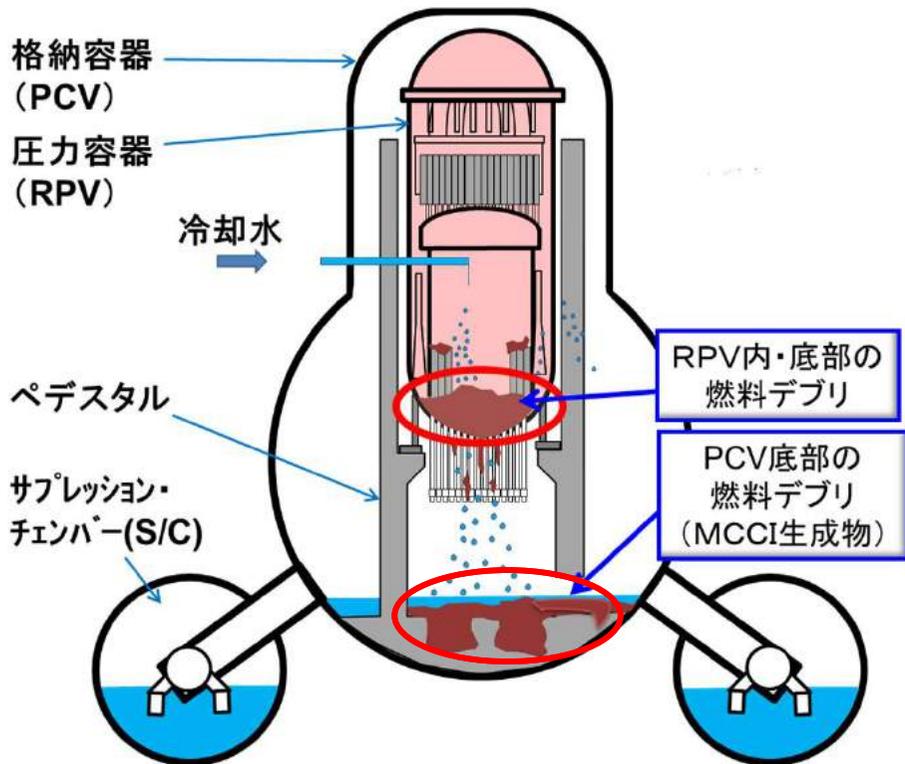
HPGe: γ線スペクトロメータ  
 LBC: 低バックグラウンドβ線測定装置  
 LSC: 液体シンチレーション  
 Si検出器: α線スペクトロメータまたはβ線スペクトロメータ  
 ICP-MS: 誘導結合プラズマ質量分析装置  
 Ge-LEPS: 低エネルギー光子検出器

※1:   部は、塩酸を添加。  
  部は、塩酸が残留。



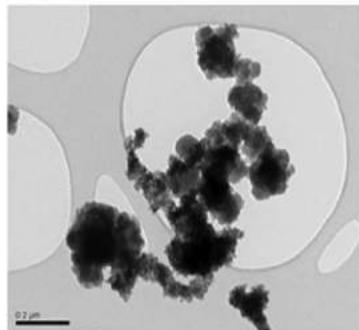
(注)参考文献:  
 平成24年度 地層処分技術調査等事業  
 高レベル放射性廃棄物概念・性能評価技術高度化開発  
 -原子力事故廃棄物の処理・処分に係る対応- 報告書  
 平成25年3月 JAEA (METI委託事業)

# 現状の課題のまとめ

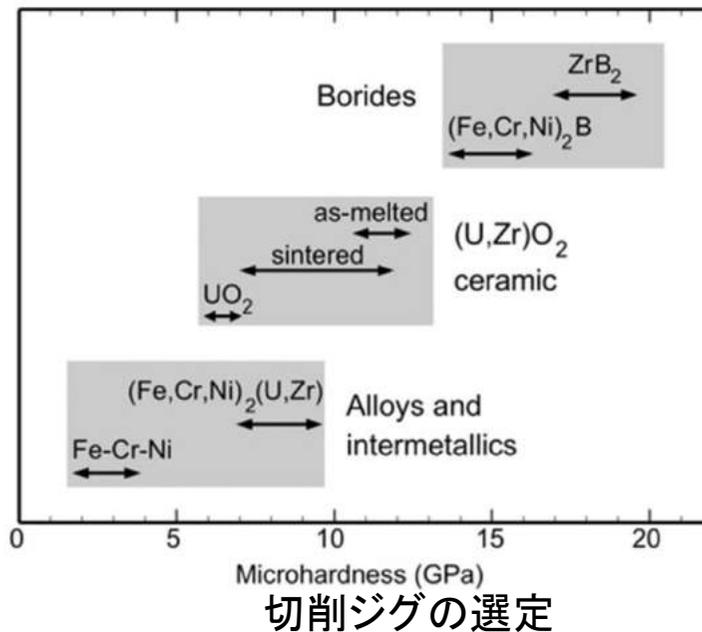


現状の燃料デブリ取り出し方法

**重要な視点:**  
 技術的困難度があり、長期にわたる福島第一廃炉を廃棄物管理も含めて俯瞰して考える必要がある



エアロゾル対策



切削ジグの選定

最適な燃料デブリ取り出しを行うためには燃料デブリ分布を予測する必要がある

# 燃料デブリ取り出しの 新工法

(取り出し規模の更なる拡大)

大規模取り出しをどのように行うか？

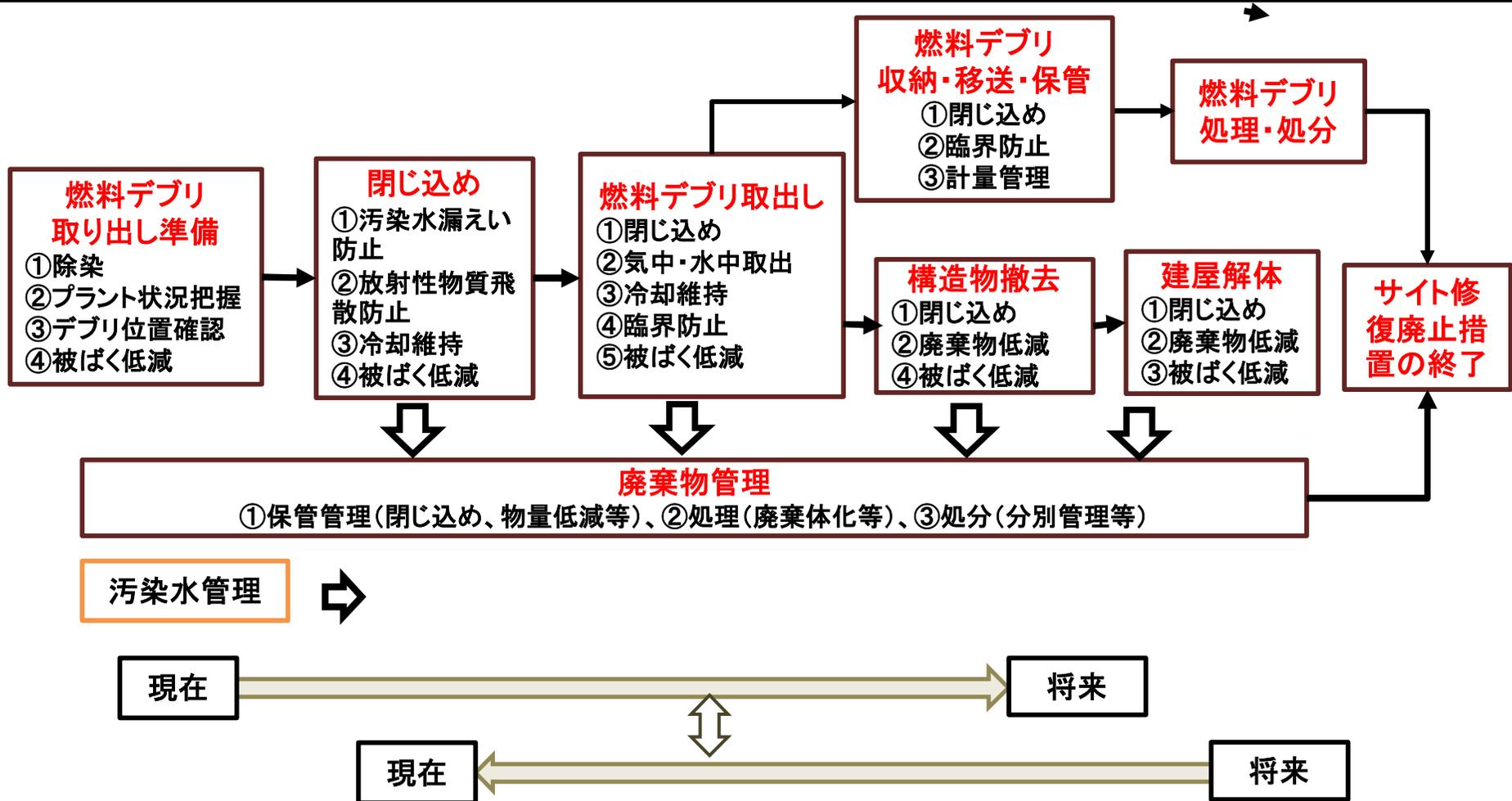
# 思考展開プロセス

## － 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。
- 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。

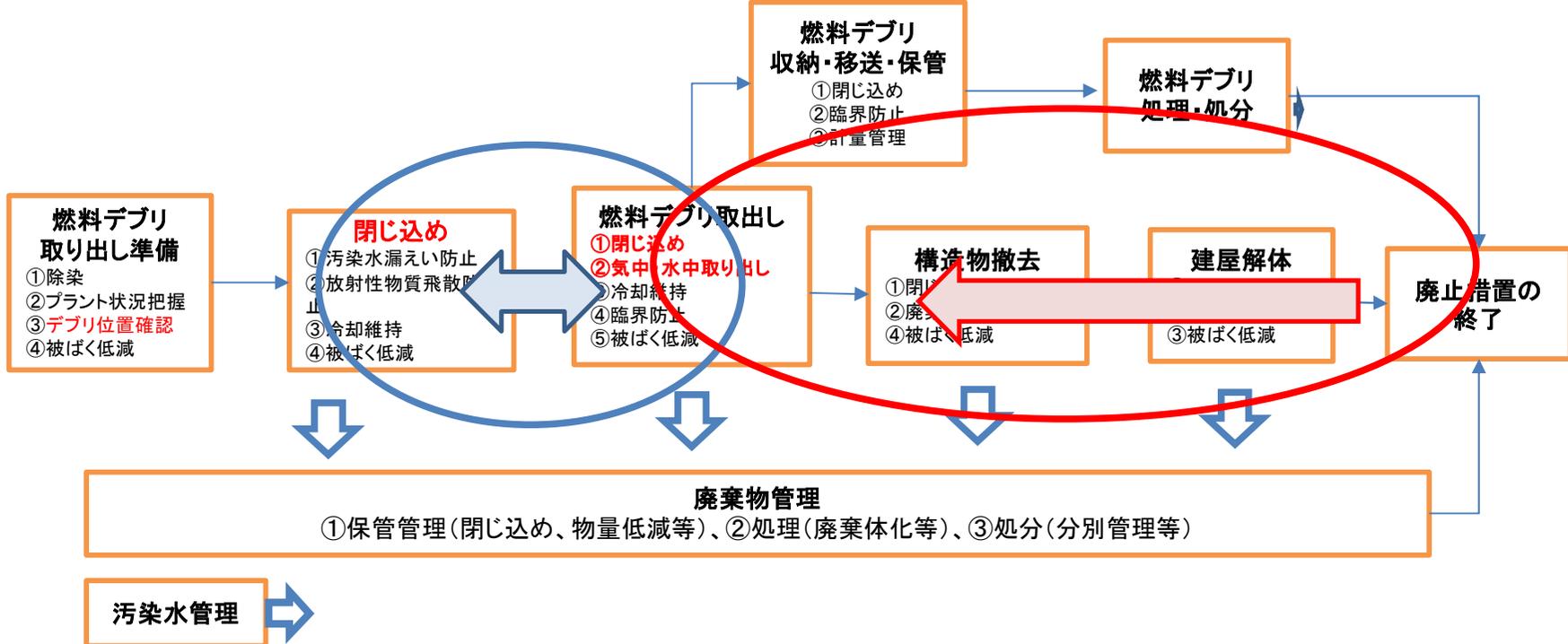
# 俯瞰的廃止措置 -エンドステートから全体を俯瞰する-

- ・ 燃料デブリ取り出し、建屋解体、廃棄物処理・処分など、廃炉全体工程を俯瞰して、将来のリスクを低減する工程・作業を推定する
- ・ そのためには、現状とエンドステートの両側から全体を俯瞰することが重要



# 俯瞰的廃止措置への対応

—エンドステートあるいは中間エンドステートから現在を俯瞰する—



# 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)

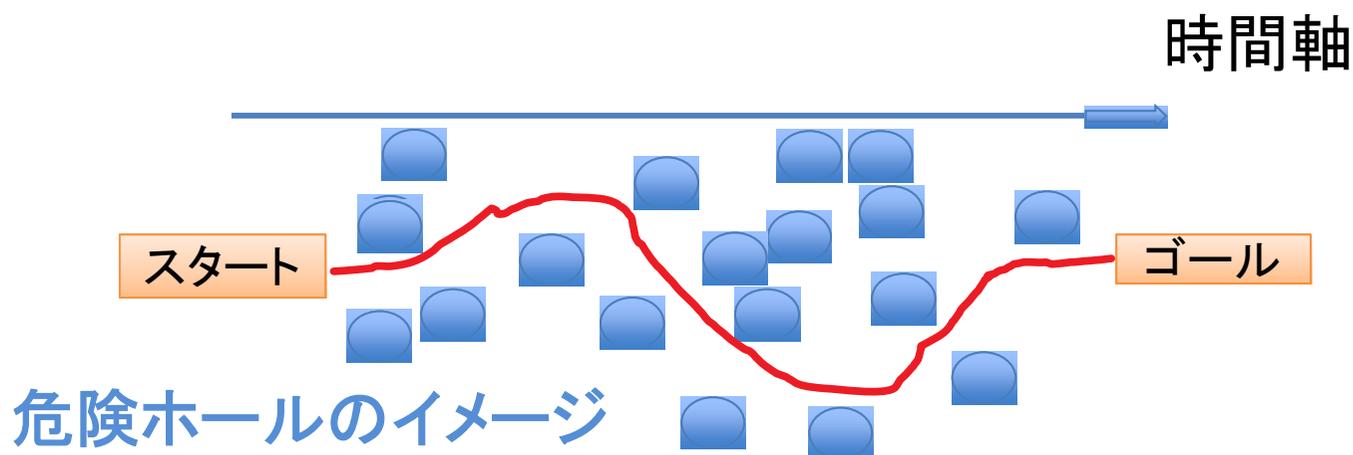
- ① 仮説を立てて将来予測
- ② 仮定にもとづき取り出し方法策定
- ③ 上記方法のリスクを検討
- ④ 予測をベースに投資
- ⑤ 成果を実現するために実行

## (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

## < 新たな工法考案の手順 >

- ・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

# 遠隔技術でPCV内燃料デブリを調査するには？

1. 放射性物質を外にださない
2. 被曝低減
3. 調査に時間を要しない(放射線影響の少ないうちに終了)
4. 不整地(グレーティング)での調査を可能とする
5. 多数回の調査を可能とする
6. 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)として、  
「グレーティング上での調査の他、上部空間を活用した調査を行う」

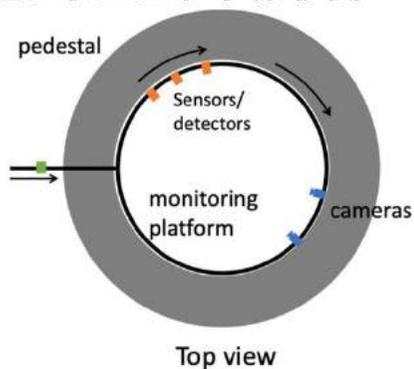
- 例) ①ロボットを使って内部に軌道をつくり、**その上で測定機器を動かす(環境構造化)**
- ②**その後の調査を継続可能とするため、空間支持モジュールを自動で構築し、搬送ルートを確保する**
- ③**トータル線量を下げるため高速カメラで内部を短時間で測定し、3次元俯瞰画像で蒸気などのノイズを除去して再生する**

# 機能を分離して極カシンプルな構造に

## —モニタリングプラットフォームの構築—

- ✓ペデスタル内に，カメラ/計測デバイスが移動可能なプラットフォームを構築し，計測・可視化を行うことで作業状況をモニタリング
- ✓取り出し装置と機能分離することで故障リスクを減らす

プラットフォーム上を  
センサユニットが移動



東大統合廃炉工学講座を中心として，神戸大，福島大，JAEA，会津大と連携

# 燃料デブリ取り出し、移送及び長期保管 「安定化」とは何か？

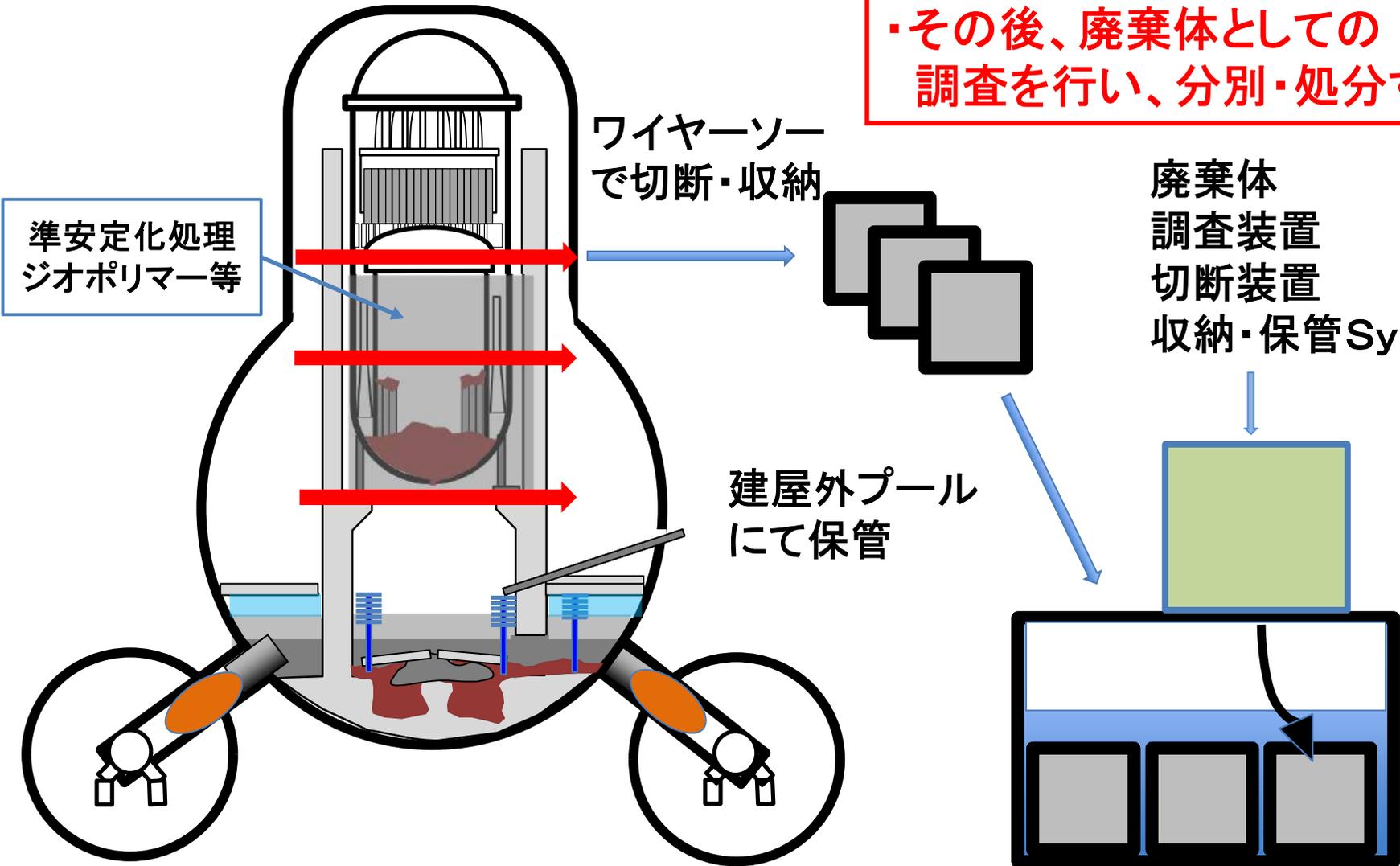
## 安定化とは、「放射性物質を移動しないこと」

そのためには、①切断時に極力放射性物質を飛散させない  
②構造物が作業中も維持されていることが重要  
(例えば、RPV底部やペDESTAL基部)

- ・一旦リスクのある対象部を固めて安定化し、放射性物質が移動しにくい状態にしてから、切断等燃料デブリ取出し作業を開始
- ・固める材料の特性としては、耐高温性、耐放射線性、水素発生しにくい特性が要求され、ジオポリマーは候補材の一つ  
(ジオポリマー: Si、Al、Oとアルカリ金属イオンを主成分とする非晶質無機化合物)

# 大規模燃料デブリ取り出し(案)

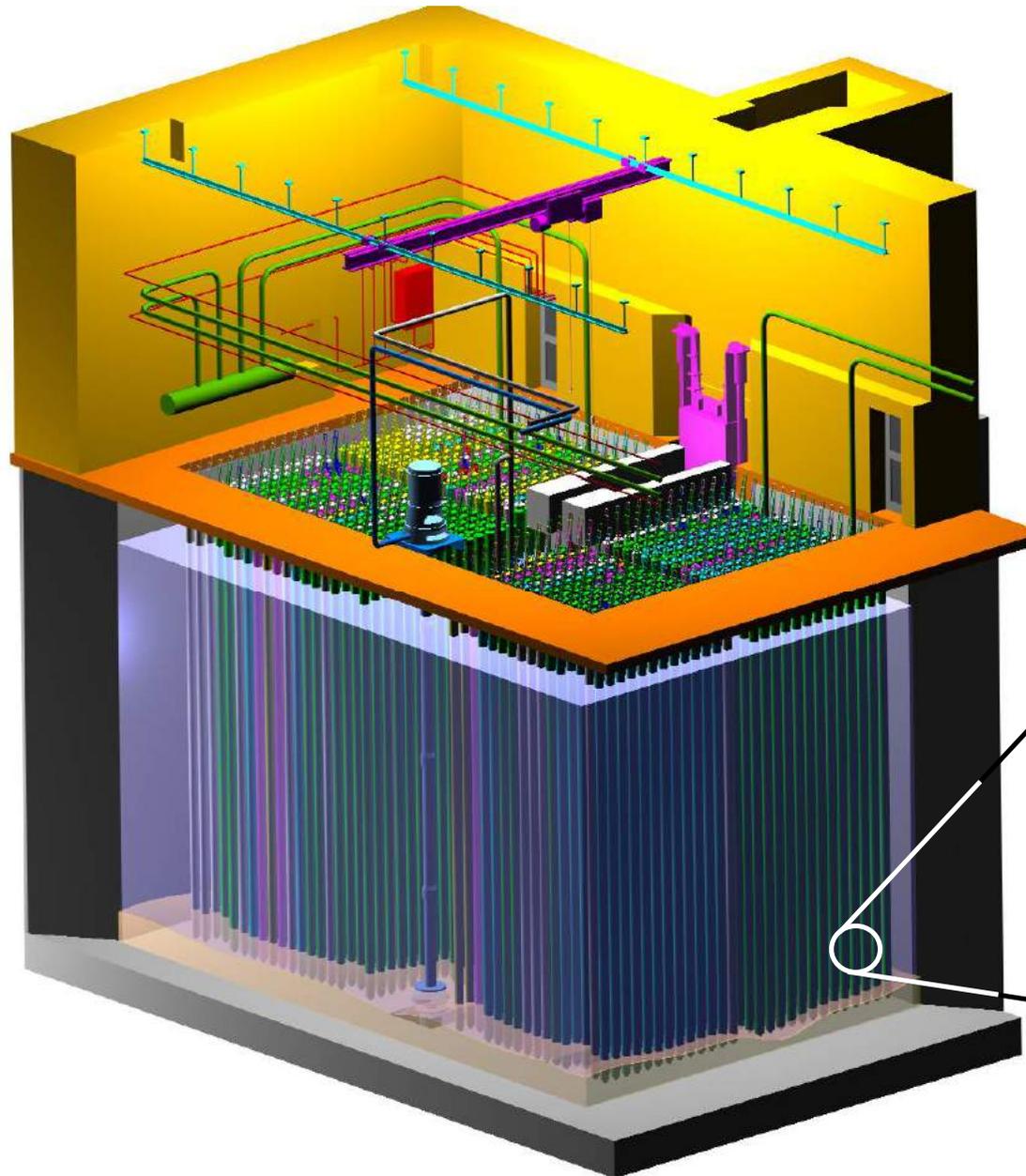
- ・時間をかけずにリスク源をPCVから取り除く
- ・その後、廃棄体としての調査を行い、分別・処分する



# ジオポリマーと他材料の特性比較

パラメータ	単位	ジオポリマー	コンクリート	金属(銅)
耐熱温度	[°C]	1000	<500	1085
核種浸出性	[-]	9-14	8.6	-
線減衰係数	[cm <sup>-1</sup> ]	0.317	0.311	0.578
圧縮強度	[MPa]	76.67	31.11	-
熱伝導率	[W/m・K]	1	1	403
G値(H <sub>2</sub> )	[10 <sup>-7</sup> mol/J]	0.09-0.113	0.8	-
凝結時間	[hour]	<0.1	>5.5	-

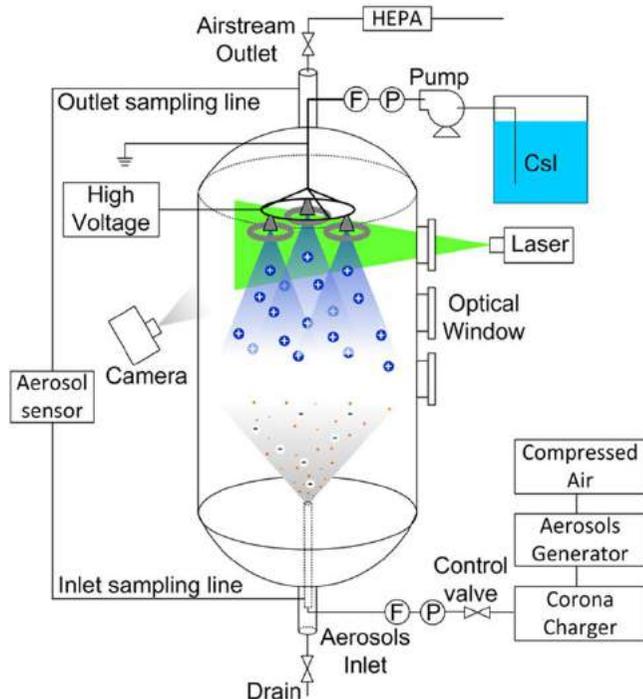
# 廃棄物安定化による長期保管



Model scheme of the Long-term storage with the layer of the sludge at the bottom and its distribution



スプレーによるエアロゾル捕集

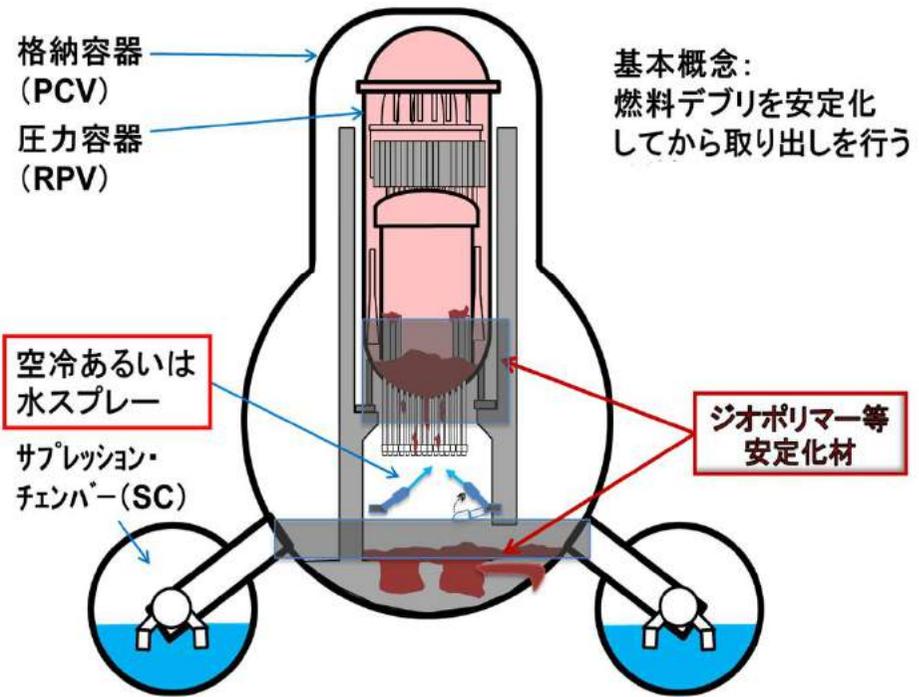


微粒子捕獲試験装置(東大東海村キャンパス)



- ① 実機スプレー装置への発展  
(プラントメーカーA社とのコラボ)
- ② 手術時のコロナ粒子飛散対策への発展  
(東大病院とのコラボ)

安定化処理後の燃料デブリ取り出し時の水スプレー工法(イメージ)



基本概念:  
燃料デブリを安定化  
してから取り出しを行う



- 燃料デブリ大規模  
取り出し工法への発展  
(プラントメーカーB社とのコラボ)

# 廢爐人材育成

# 廃炉に必要な人材

- リスクを俯瞰できること
  - 時空間を超えて複雑に絡み合う課題を把握する
- 現場を良く理解していること
  - 原子炉の運転・保守経験者も必要
  - OJTなどで、何が必要かを理解する
- 変化していく課題に柔軟に対応できること
  - 課題解決／マネジメントのできる技術者
- 社会的影響を考えられること

最先端研究経験、マネジメント能力  
課題解決能力、国際経験など

# 廃炉に関する学生意見

文科省廃炉人材プログラムにおいて平成28年にDOEハンフォード原子力サイトとNASA ジョンソン宇宙センターを訪問した際の、廃炉と宇宙との類似点・相違点に関する学生意見

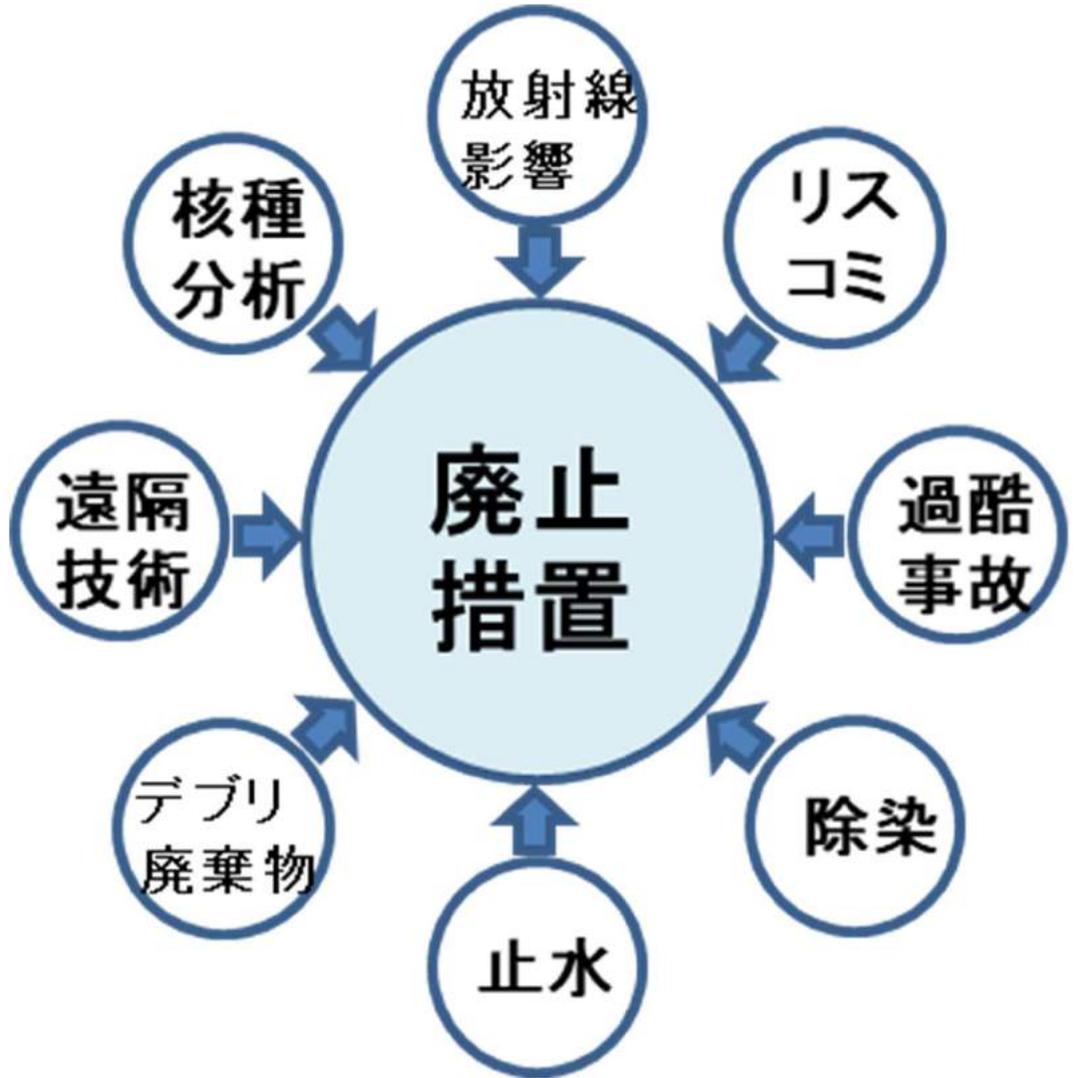
## <参加学生の主な意見・感想>

- ・廃炉と宇宙開発の相違は、原子力分野ではロボットは危険な作業を代行しているのに対して、宇宙開発では人との協調に重点が置かれていた点。一方、共通点としては、ともに多重防護やフェイルセーフといった何が起こるか判らない環境にあって失敗を補償する枠組みが重要視されている点が印象に残った。
- ・ともに国家的大規模プロジェクトであり、一旦決まった手法に対して異なるコンセプトを途中で採用することは困難であるが、計画推進のためにはプロジェクトの区切りごとに計画を見直すことが極めて重要であると感じた。

- ・相違点は、廃炉はネガティブなイメージ、宇宙開発はポジティブなイメージであること、また線量やロボット開発の目的に相違があること。共通点はともに最先端技術、国際的であり国民の理解が必要であり、長期間を要するプロジェクトである点。
- ・廃炉事業と社会との良好な関係を築くためには、ハンフォードにあるパシフィックノースウェスト研究所のウェブサイトを活用した住民参加型意思決定方式の導入などにより、時間をかけて地元から理解を得る努力を継続することが重要と感じた。
- ・今後廃炉を建設的に進めていくには、階層化された情報共有システム、及び若手技術者への前向きなチャレンジ精神を育成する土台が必要。

多くの学生は、現場ならではの工夫や教訓、技術と社会との接点の在り方を学ぶと同時に、数々の難題を乗り越えてきた国内外の技術者の自負心と誇りを強く認識し、自らの成長の糧としてきている。ある意味学生にとって挑戦しがいのある具体的な研究テーマに取り組めたことは、分野を問わず将来につながる大きな機会に巡り合えたともいえる。

# 「知の力」の集積 廃炉の魅える化：知識集約から社会展開へ

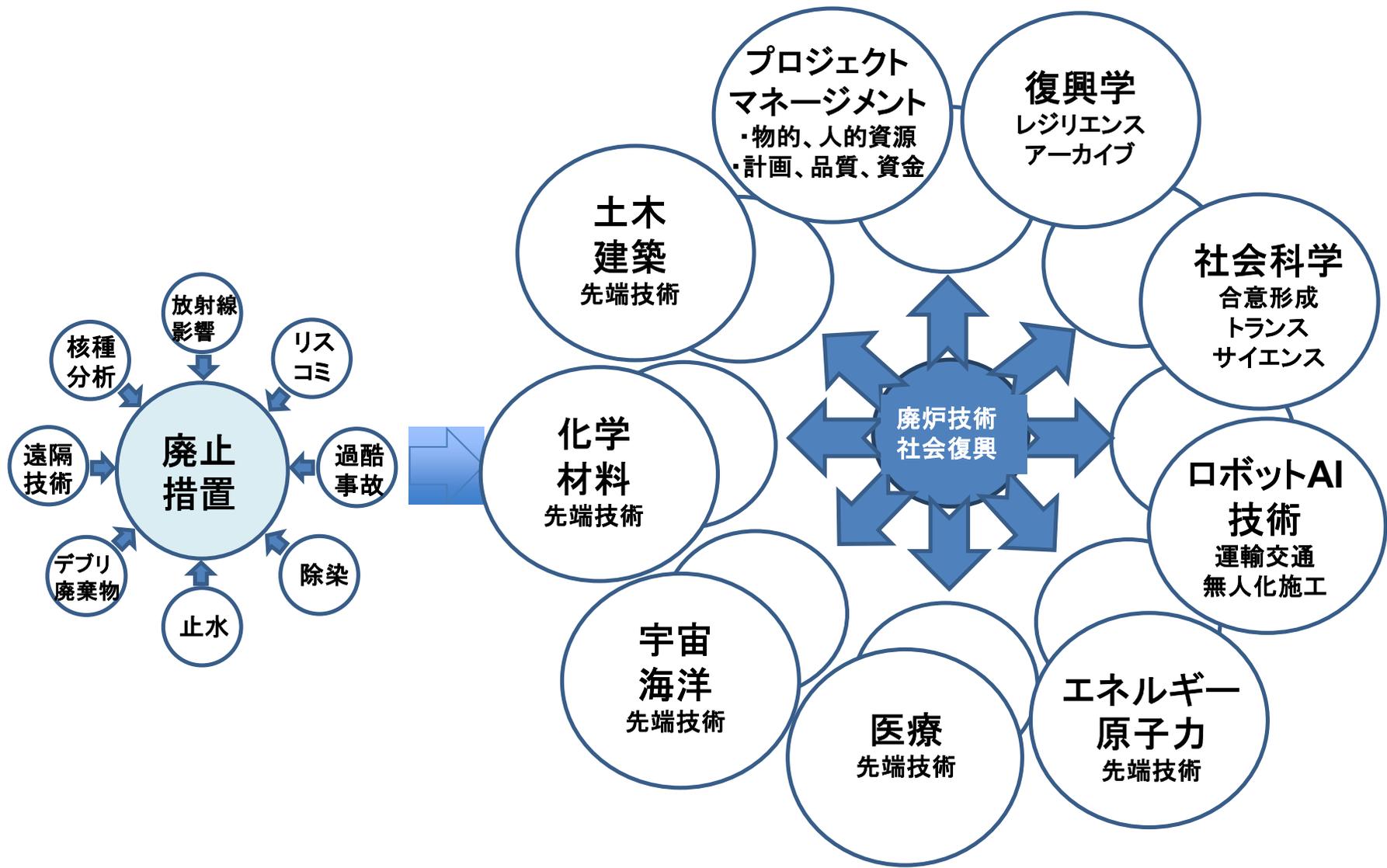


多種多様な分野  
融合が必要

- ・原子力工学
- ・放射線医学
- ・機械工学
- ・化学工学
- ・材料工学
- ・ロボット工学
- ・土木工学
- ・建築工学
- ・土質工学
- ・環境工学
- ・生物学
- ・社会科学 等

# 「知の力」の集積

## 廃炉の魅える化：知識集約から社会展開へ



# What is “Risk” ?

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \frac{\text{Fragility}}{\text{Resilience}}$$

( Wisner, Ben et al, 2004 At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters)

- ✓ Solution for filling the gap between Technology and Social acceptability for nuclear decommissioning
- ✓ Stakeholders' Involvement
- ✓ Systems need to be managed not only for productivity or stability, they also need to be managed for resilience (D.H.Meadows)

# 最後に

福島第一廃炉及び周辺エリアの復興は、福島復興の両輪。福島でこそ可能な研究・開発の実施とともに、次世代を見据えた新たな生活基盤の創造が極めて重要であり、産・官・学・国・自治体、並びに地元住民との強い連携のもと、一緒に廃炉・復興の在るべき姿を考える仕組みを創る必要がある。

また、長期にわたり継続的かつ発展的に取り組むためには、次世代を支える若者にとって、浜通りが魅力あるエリアとなることが望まれ、目指すべき将来像を年代・立場をこえて一緒に描きながら、一步一步着実に実現に向けて歩む必要がある。

ご清聴ありがとうございました