

# 損傷を受けた構造物のリスク対応

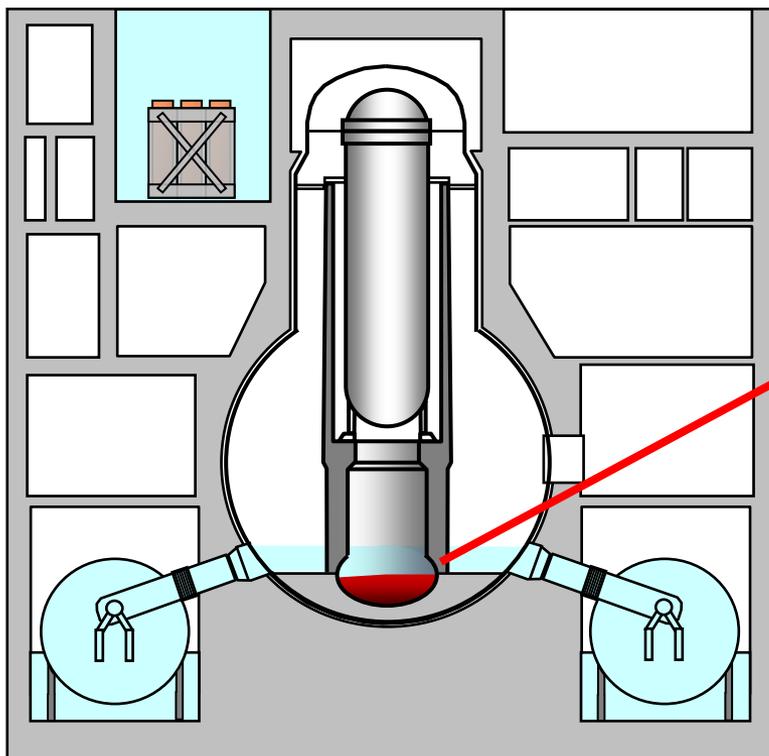
2024/3/26

東京大学 鈴木俊一

(強度基準検討分科会 主査)

# 1F事故前から設置されていた構造物の特徴

- 事故の影響を受けて**損傷した構造物が存在**
  - 例：1号機のペDESTAL（下図）

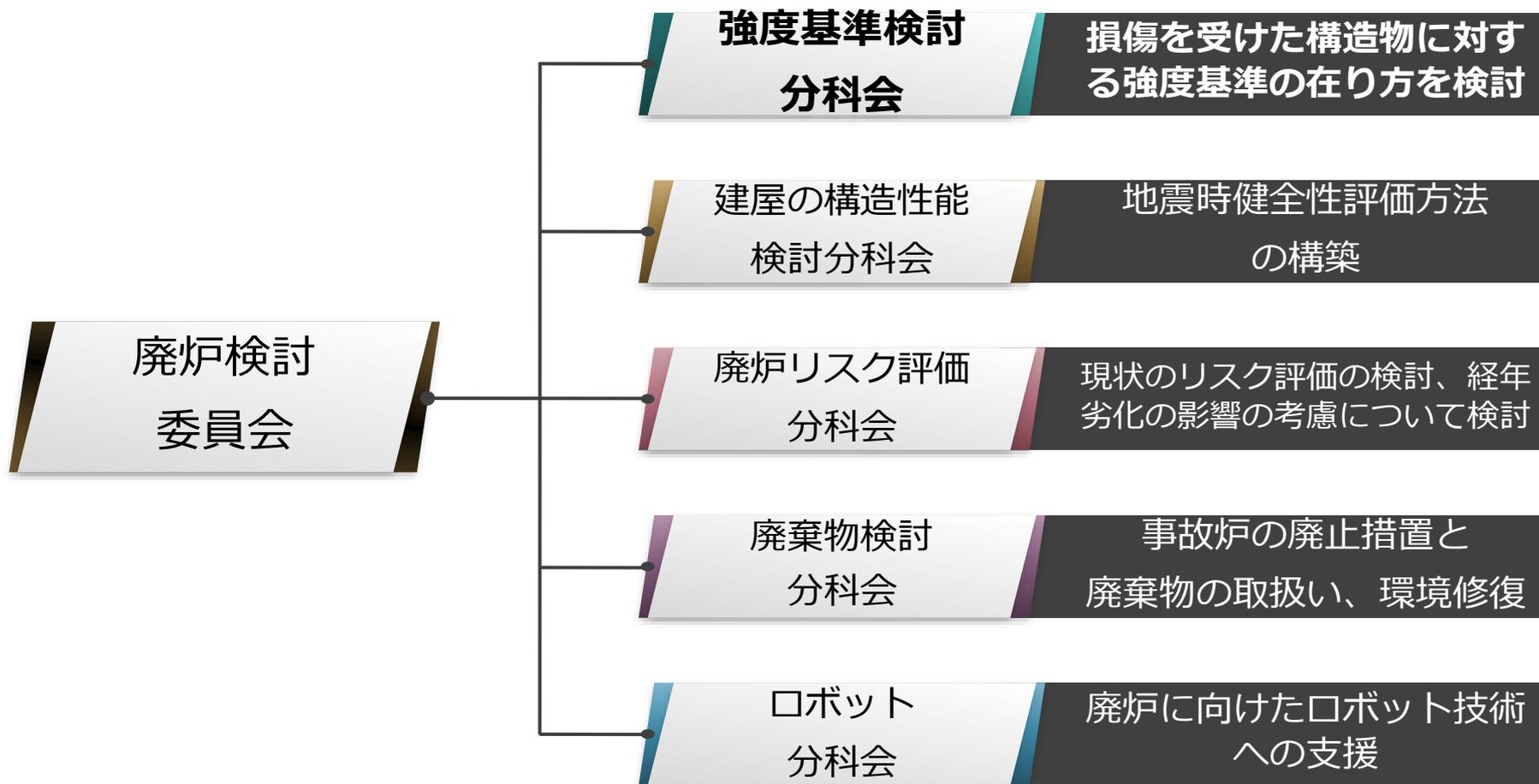


ペDESTAL開口部（右側基礎部）の状況

Ref. 東京電力ホールディングスホームページ

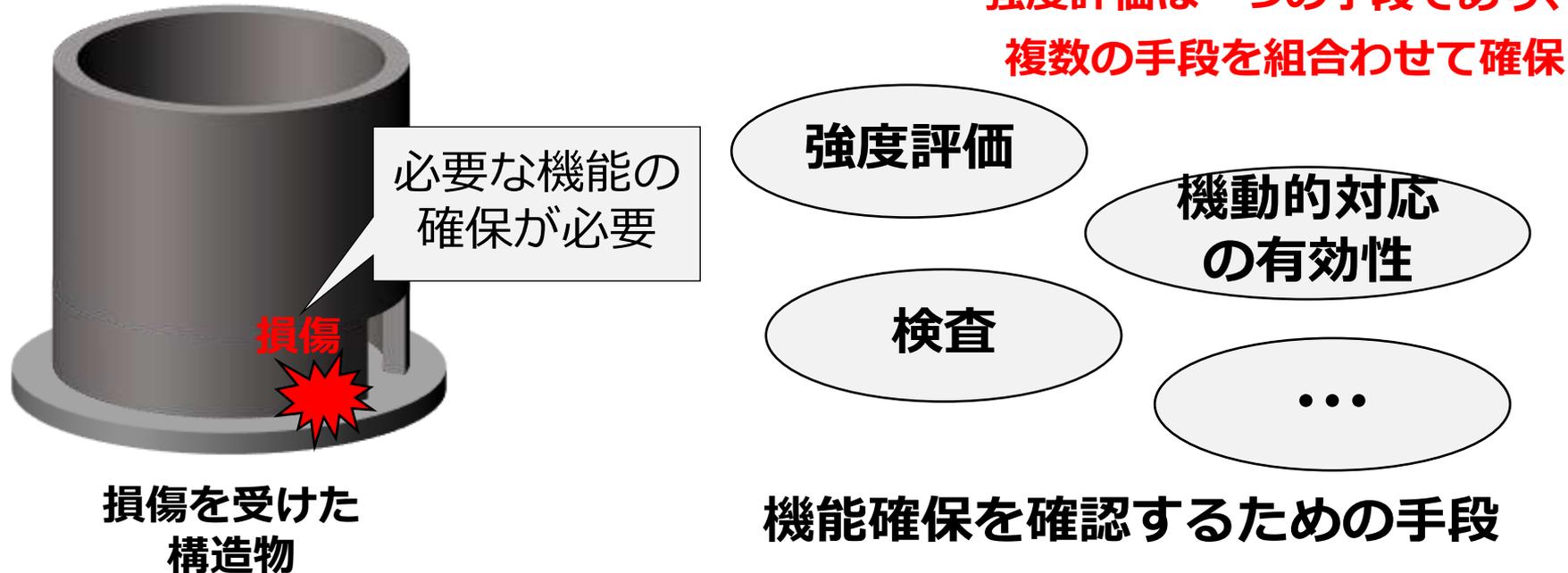
**廃炉作業中に必要な機能の確保が必要**

# 強度基準検討分科会



- 損傷を受けた構造物に対する強度基準の在り方を検討
- 本講演では、分科会での検討内容を紹介

# 分科会の検討事項



## 分科会の検討事項

本日の話題

1. 機能確保の確認に関する考え方
2. 強度評価方法

# 機能確保の確認に関する考え方の検討事項

## 1. 基本的な考え方の策定

- 機能確保の確認に関する基本的な考え方の策定

## 2. フローチャート

- 基本的な考え方を具体化

## 3. フローチャートのケーススタディ

- ペデスタル

# 1F強度評価の特徴

- 事故の影響を受けて損傷した構造物
  - 補修や詳細な検査は困難
  - **強度評価結果に大きな不確かさが存在**
- 通常炉の「設計想定を超える事象（BDBE）」
  - BDBEでは想定を超える地震等を対象
  - **荷重想定に不確かさが大きい**



## 1FとBDBEの共通点

**強度評価結果の不確かさが大きいこと**

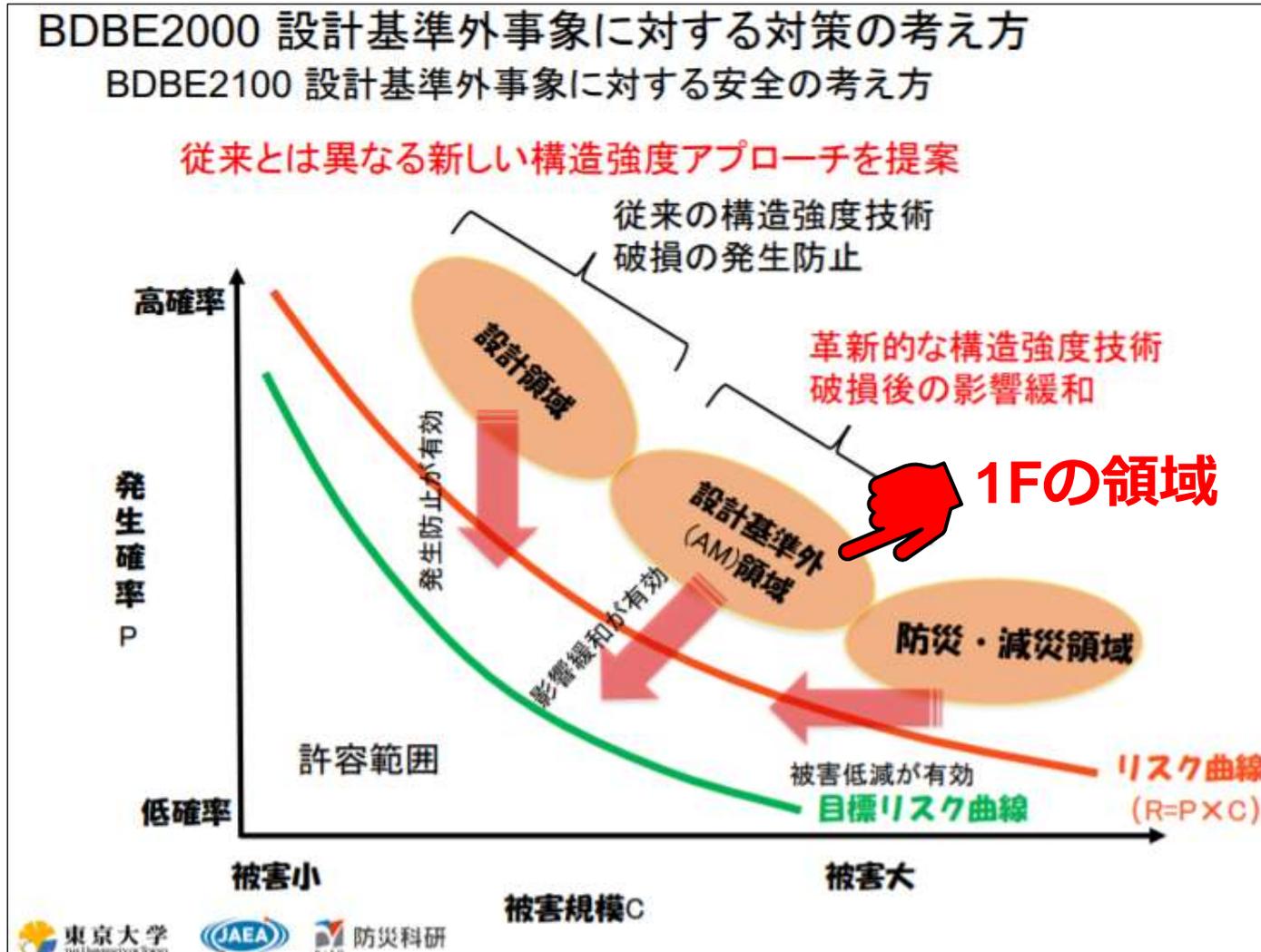
	<b>Design Basis Events</b> <b>設計想定事象</b>	<b>Beyond Design Basis Events</b> <b>設計基準を超える事象</b>
<b>Requirements</b> <b>要求性能</b>	<b>Serviceability and Safety</b> <b>供用性と安全性</b>	<b>Safety and Resilience</b> <b>安全性とレジリエンス</b>
<b>Approach and countermeasure</b> <b>取り組みと対策</b>	<b>Prevention of failure occurrence against assumed events (high probability and low impact)</b> <b>想定事象に対する故障発生の防止(高確率・低影響)</b> <b>Safety I (Design)</b>	<b>Mitigation of consequence after beyond design basis events (low probability and high impact)</b> <b>設計基準を超えた事象発生後の影響の軽減(低確率・高影響)</b> <b>Safety II (Design + Management)</b>
<b>Countermeasure from system safety</b> <b>システム安全対策</b>	<b>Multiplication and Diversity of systems</b> <b>システムの多重性と多様性</b>	<b>Portable devices. Accident management, Passive safety</b> <b>ポータブル装置、事故マネジメント受動的安全性</b>
<b>Countermeasure from structure</b> <b>構造からの対策</b>	<b>Strengthen to prevent assumed failure</b> <b>想定故障を防ぐための強化</b>	<b>Necessary</b> <b>必要</b>

Ref: N.Kasahara et al., "DEVELOPMENT OF FAILURE MITIGATION TECHNOLOGIES FOR IMPROVING RESILIENCE OF NUCLEAR STRUCTURES", SMiRT 27, Yokohama Japan, March3-8, 2024 –Division VII

# 1Fに適したリスク対応（1 / 2）

- リスク対応として、機能確保の状態を確認する必要有
- 従来、強度評価により確認しているが、1Fではその結果に大きな不確かさが存在
- 強度評価がOKの場合でも、残余のリスクに対する対策が曖昧であり、強度評価のみで機能確保の状態を判断することは不適（1Fでは特に）
- 限られたリソースを有効に活用するためには、強度評価以外の方法も組合わせ、様々な情報から、機能確保の状態を確認することが有効な手段
- 特に、機能を持つ構造物への対策（補修等）の難易度が高いため、システム全体で機能確保することが非常に重要

# 1Fに適したリスク対応（2 / 2）



Ref. 笠原「破壊制御技術導入による大規模バウンダリ破壊防止策に関する研究」(令和2年度 原子力システム研究開発事業成果報告会)に追記

- リスク低減のため、影響緩和も有効

# 基本的な考え方の策定

- 「機能確保の確認に関する考え方」の検討にあたり、基本的な考え方として、4点を設定

## ①事故炉にも原子力安全は求められる

- 構造物が地震等により、損壊した場合に原子力安全に影響するか評価が必要

## ②機能確保されているか確認が必要

- 事故後の構造物が持つ要求機能の整理が必要
- 機能確保の判断方法について検討が必要

## ③機能確保できない場合の対策の検討が必要

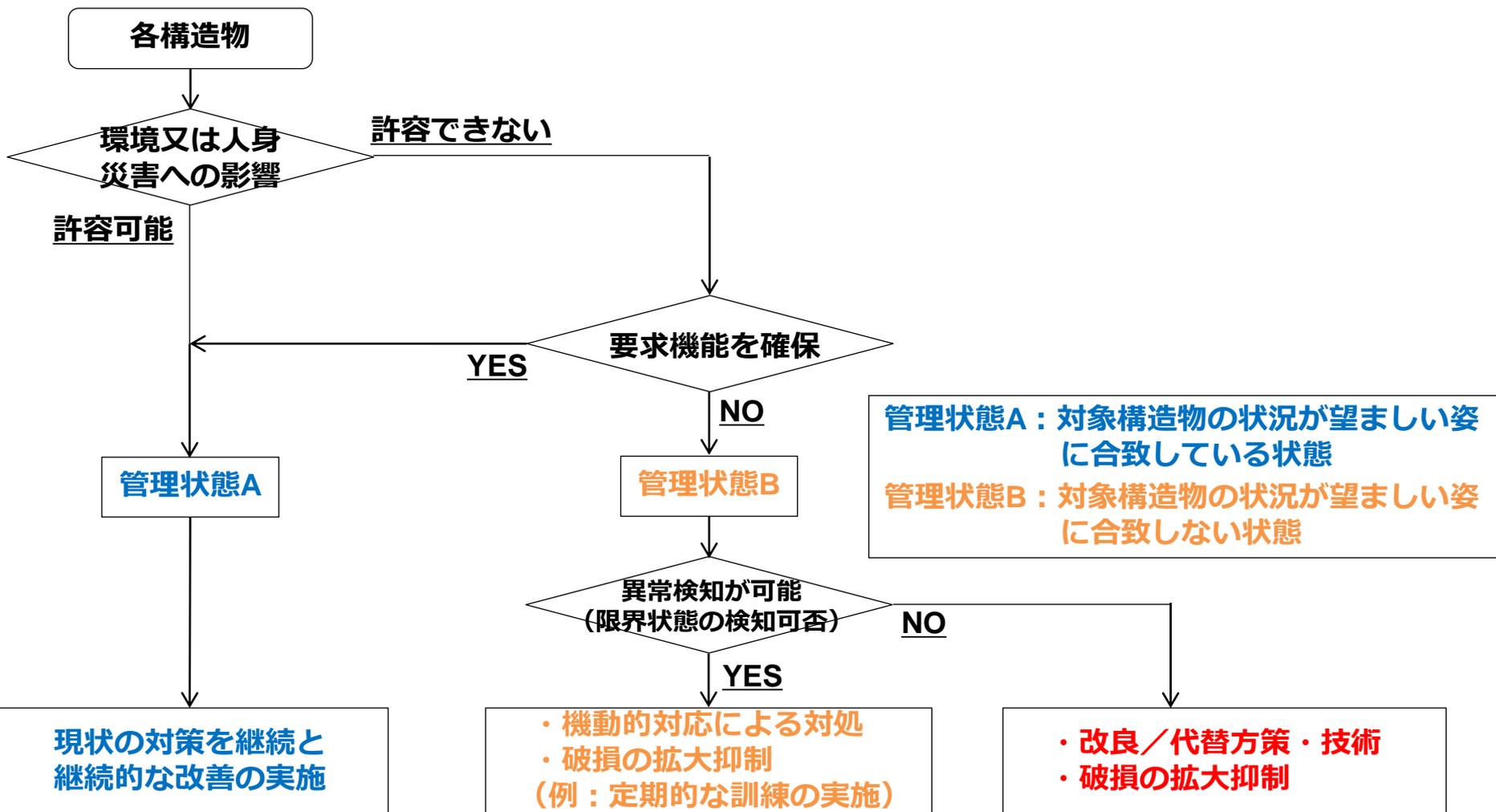
- 耐震強化等の発生防止対策が可能であれば、有効
- 困難な場合の対応の検討が必要

## ④廃炉作業と共に変化する構造物の状態は変化

- 継続的（荷重の変化等）に評価し、対策を見直す必要がある

# 「機能確保の確認に関する考え方」のフロー

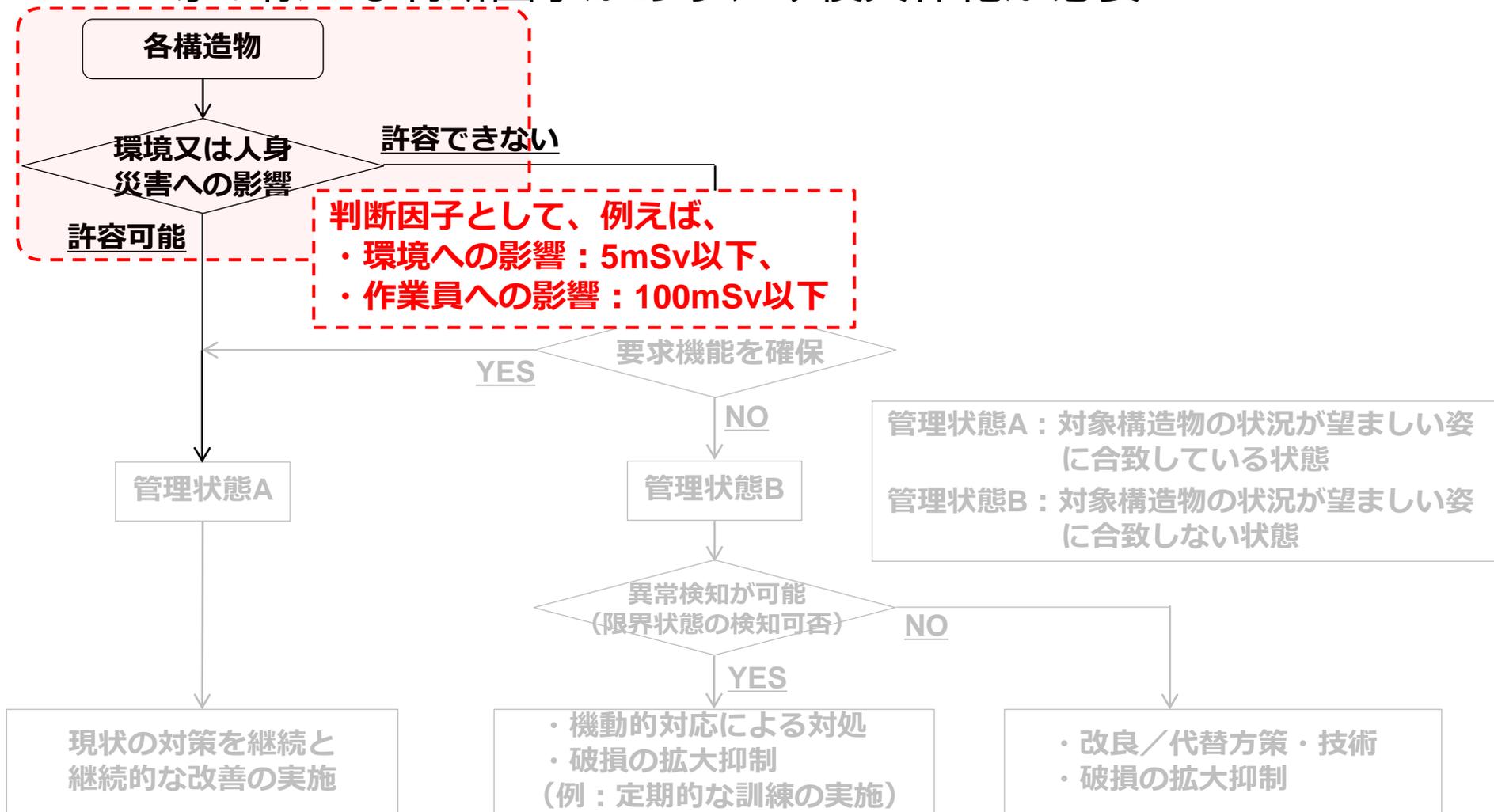
- 基本的な考え方を基にフロー化
  - **構造物の管理状態を評価し、管理状態に応じた対策を実施**
  - 一旦評価すると終わりではなく、継続的に評価を実施



# 判断「環境又は人身災害への影響」について

## ● 構造物の損傷による原子力安全への影響有無を判断

- 被ばく量、インベントリ量、多重性・多様性、Form Factor等の様々な判断因子があり、今後具体化が必要



# 判断「要求機能を確保」について

## ● 建造物の機能が確保されているかを確認

- ・ 具
- ・ 要

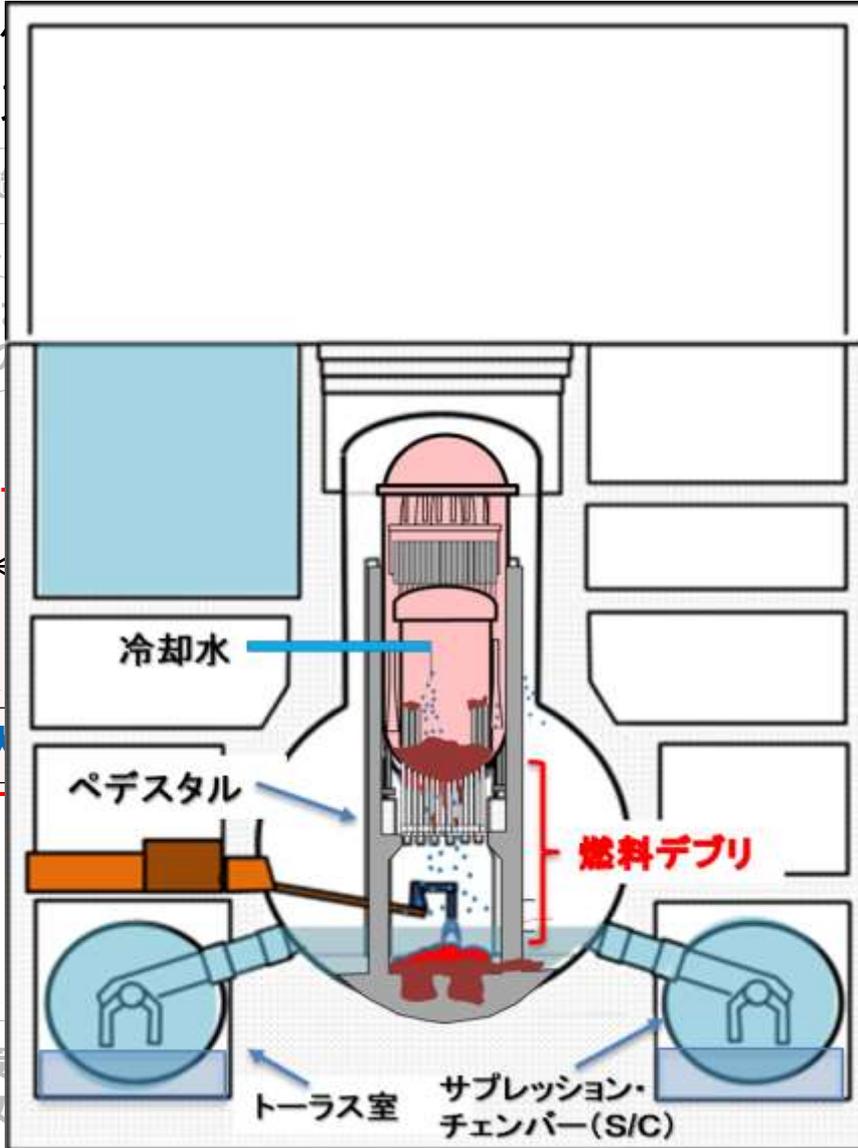
各構造

環境又は  
災害への

許容可能

管理状

現状の対策  
継続的な改



ド) で評価

書を参考に7機能を挙げた

状態A：対象建造物の状況が望ましい姿  
に合致している状態

状態B：対象建造物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、  
波及的影響も考慮する。

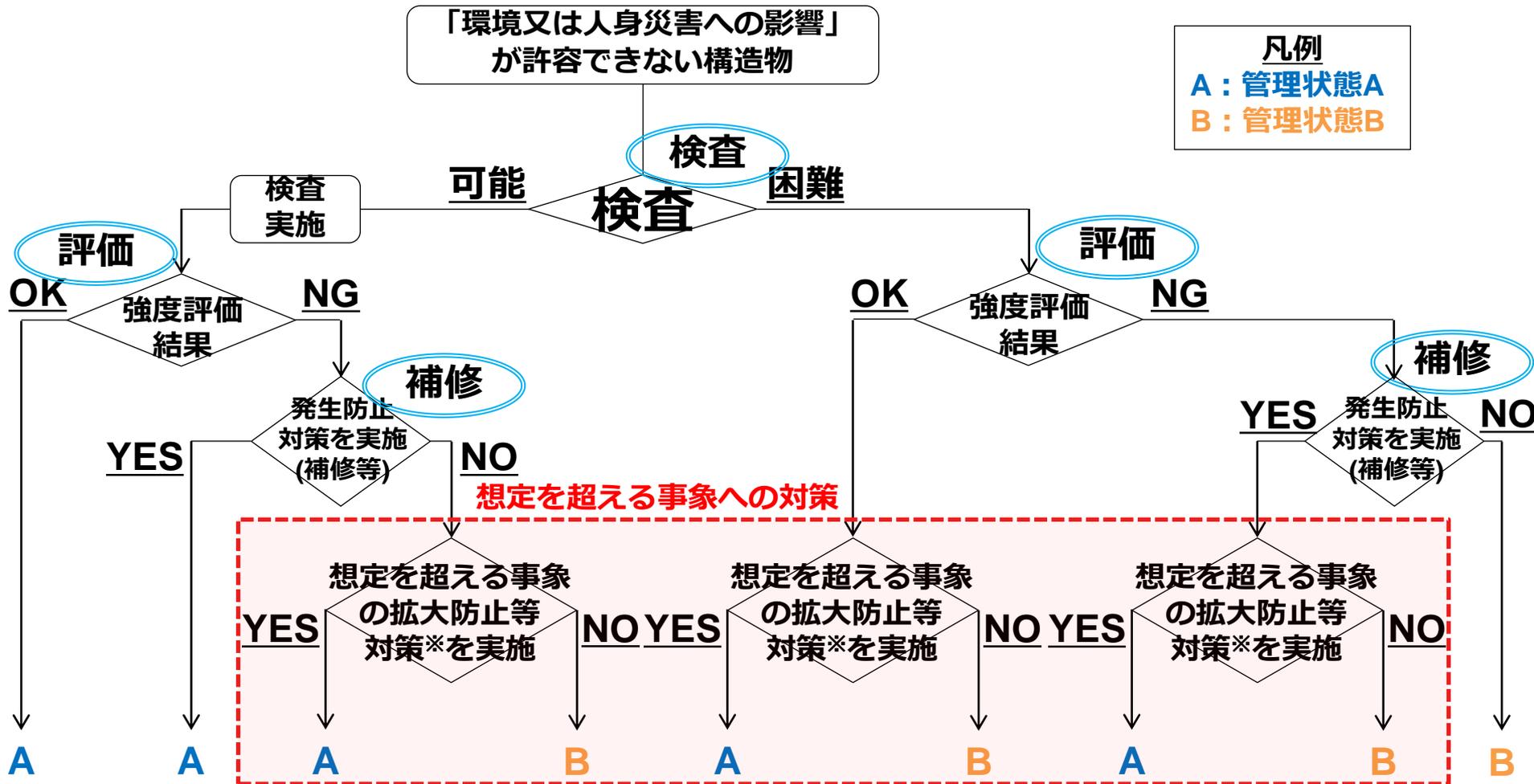
- ① 閉じ込めバウダリ
- ② 負圧管理機能
- ③ 支持機能
- ④ 冷却機能
- ⑤ 臨界防止機能（未臨界維持）
- ⑥ 放射線遮へい機能
- ⑦ 水素爆発・火災防止機能

NO

- ・ 改良／代替方策・技術
- ・ 破損の拡大抑制

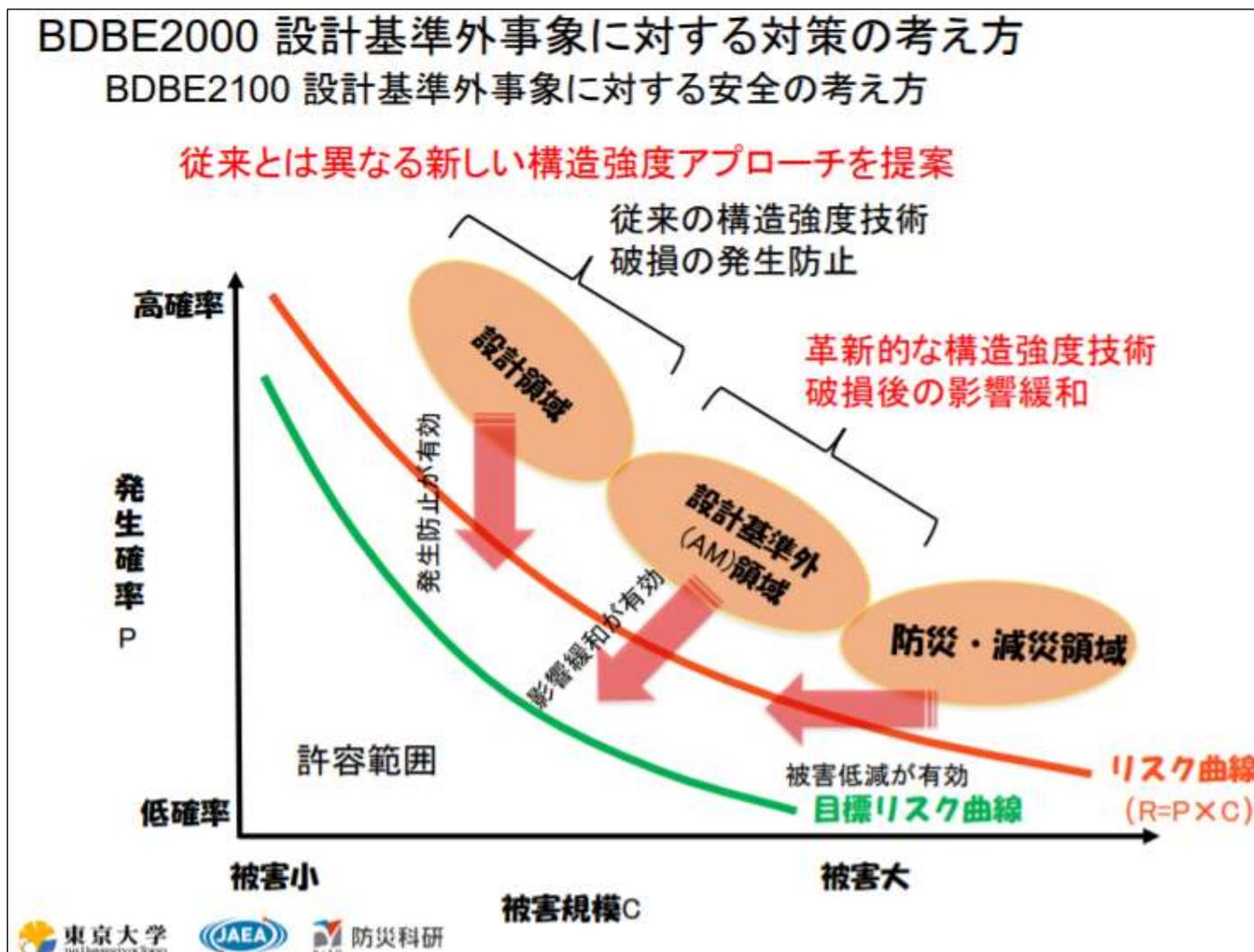
# 要求機能を確保できているかの判断について

- 「保全の3本柱である検査・評価・是正（補修等）」と「想定を超える事象への対策」の4点で判断

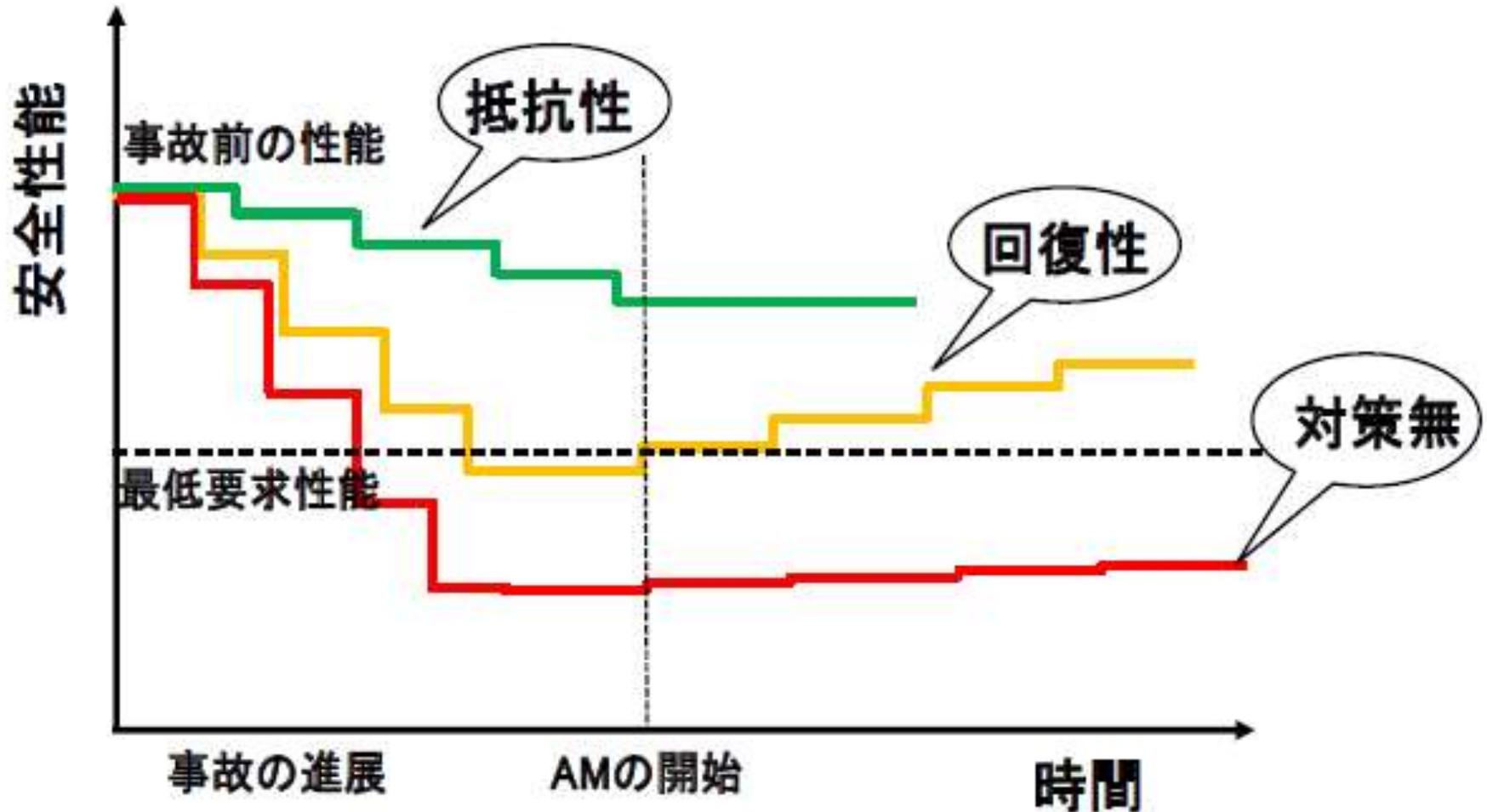


# 判断「想定を超える事象への対策」について

- 想定を超える事象への対応には、影響緩和が有効



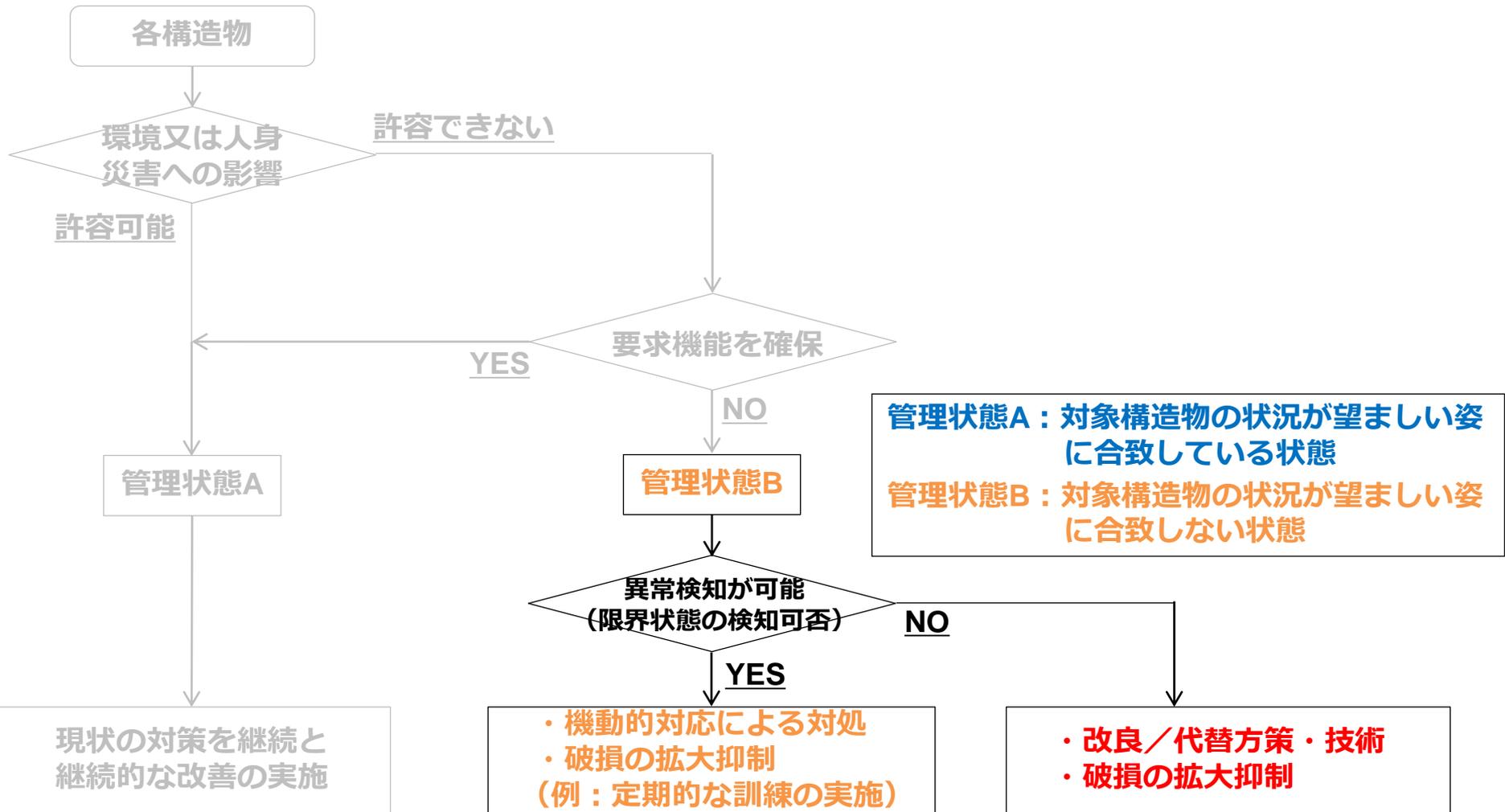
# 破損の拡大防止による安全性レジリエンス向上



## 破損拡大抑制による安全性レジリエンス向上

# 判断「異常検知が可能」について

- 事象の進展が遅い1Fの特徴を考慮すると、**異常を検知できれば、機動的対応が有効な手段**となる



# ケーススタディ：1号機ペデスタルの状況

**The observed base parts show concrete at the lower inner part of the pedestal eroded and rebars exposed.**

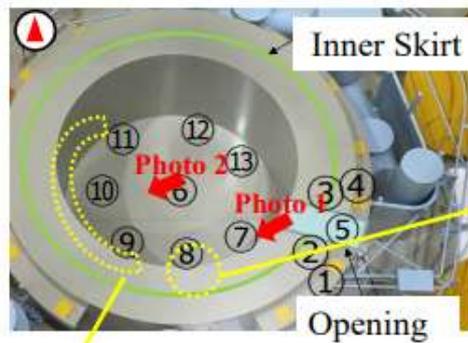
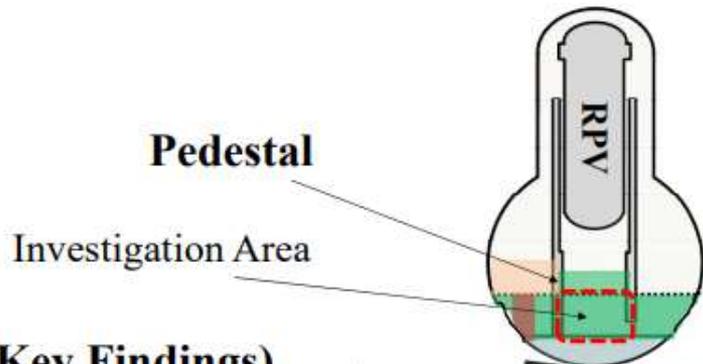


Photo 1: Point ⑧ at pedestal base

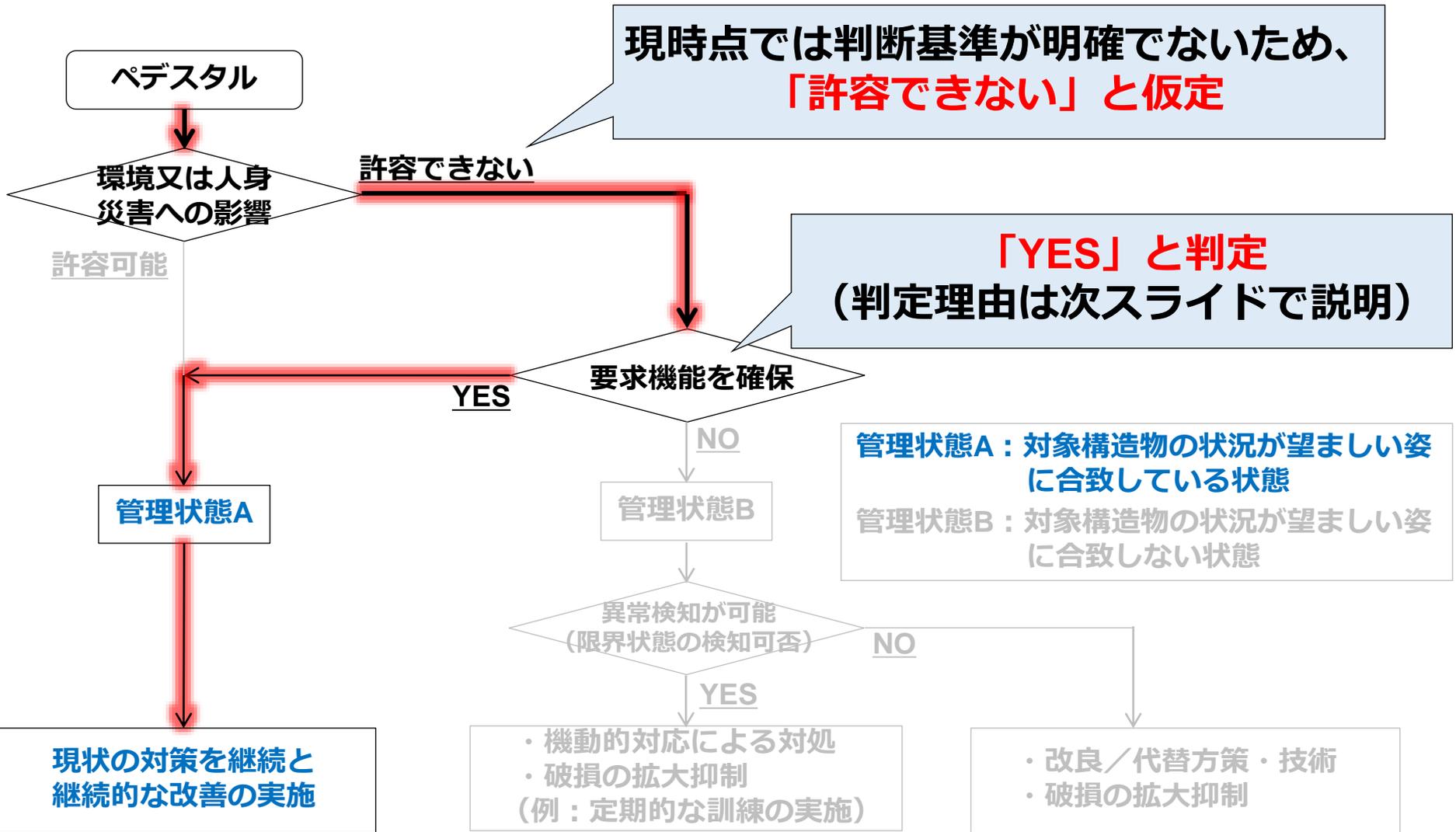


Photo 2: Point ⑨, ⑩ and ⑪ at pedestal base

## (Key Findings)

- Pedestal concrete has been eroded around almost its entire circumference.
- The missing sections are all approximately the same height.

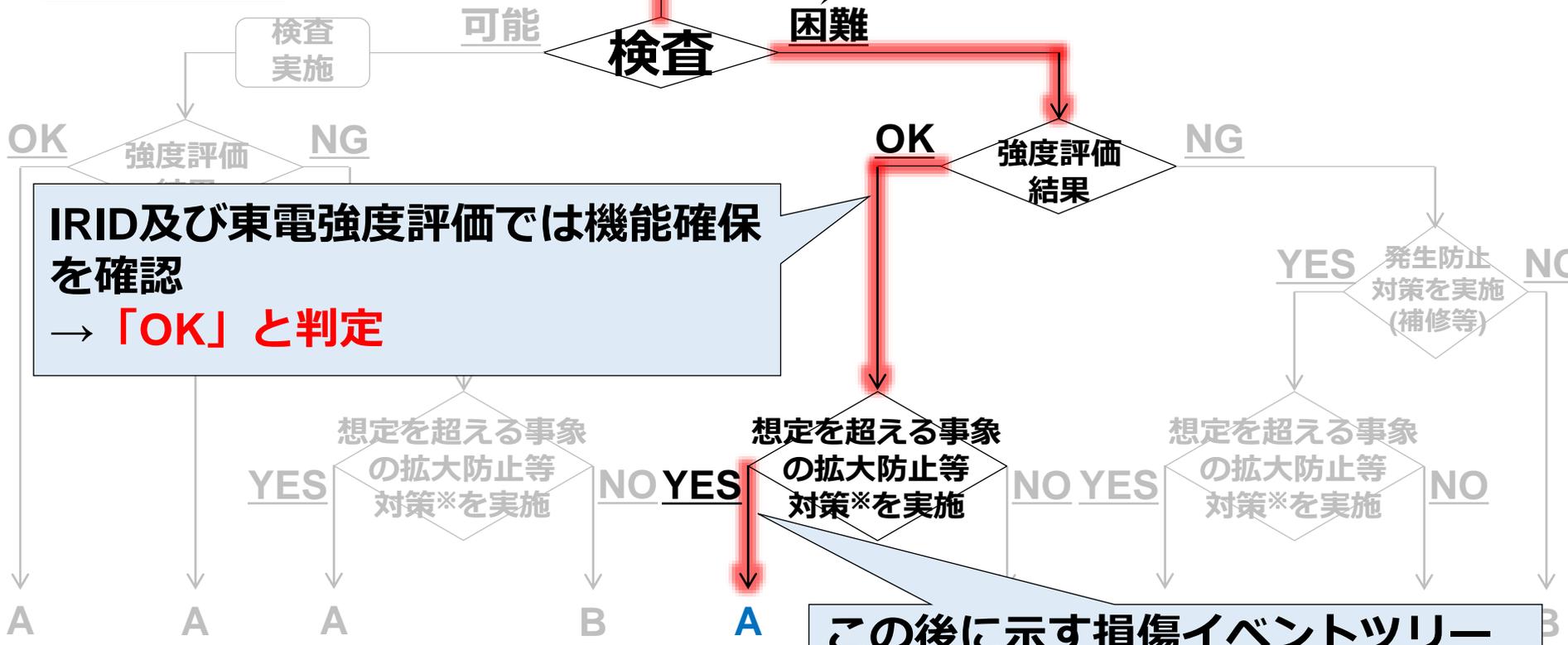
# ケーススタディ結果 (1 / 2)



# ケーススタディ結果 (2 / 2)

**凡例**  
**A : 管理状態A**  
**B : 管理状態B**

カメラで部分的に状態を確認できている状態のため、「**検査困難**」と判定



IRID及び東電強度評価では機能確保を確認 → 「**OK**」と判定

この後に示す損傷イベントツリーから、対策が準備されていることを確認 → 「**YES**」と判定

※ 異常検知・拡大防止・制御・影響緩和対策

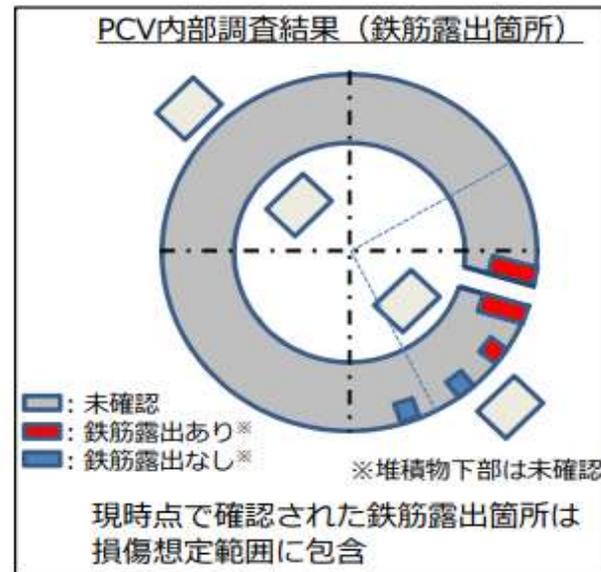
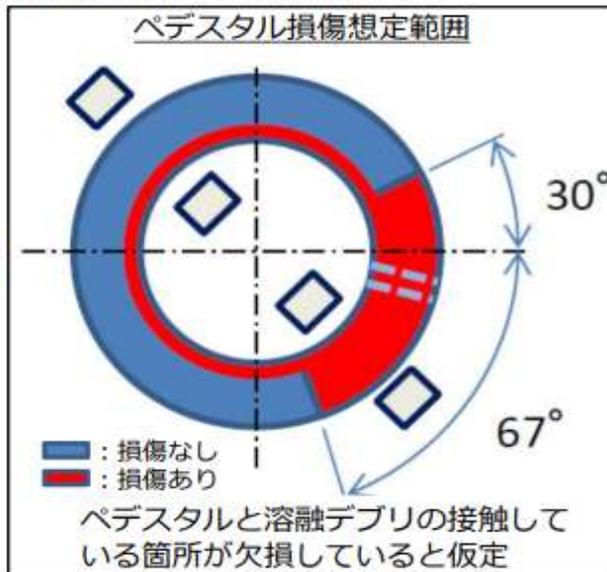
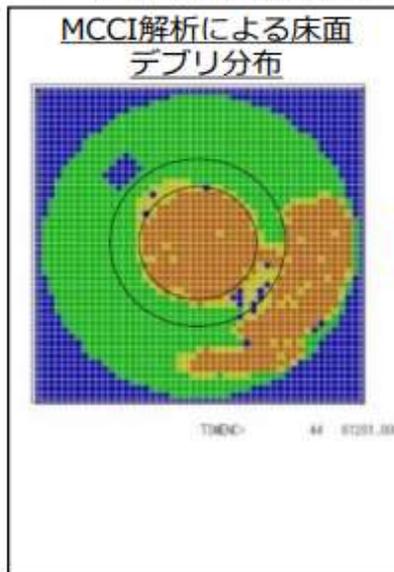
# 強度評価例 (1/2)

## (参考2) IRIDにおけるペDESTAL部の耐震性・影響評価について

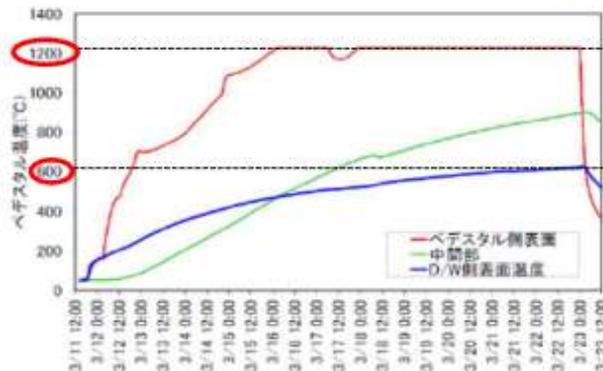


### ■ ペDESTAL解析モデルの損傷範囲と温度条件

#### ➤ モデル損傷範囲：MCCI解析結果を考慮し設定



#### ➤ 温度条件：MAAP解析結果を考慮し設定



MAAP解析結果より以下を設定  
ペDESTAL内側：1200°C  
ペDESTAL外側：600°C

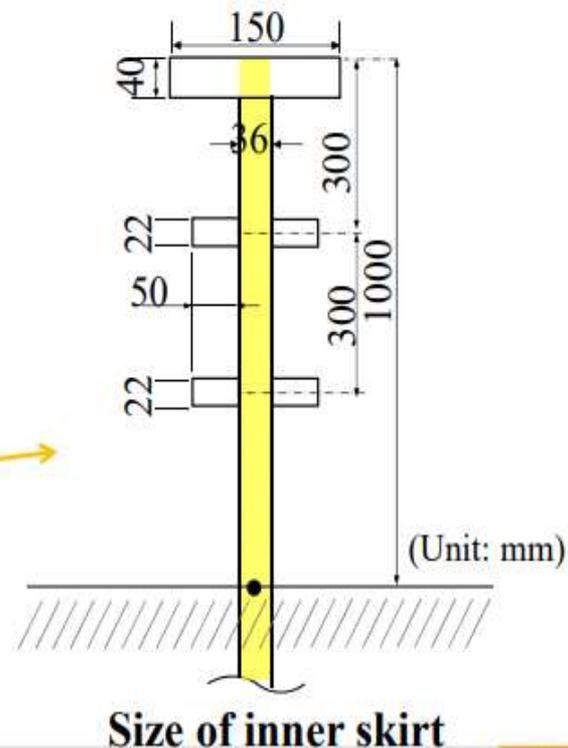
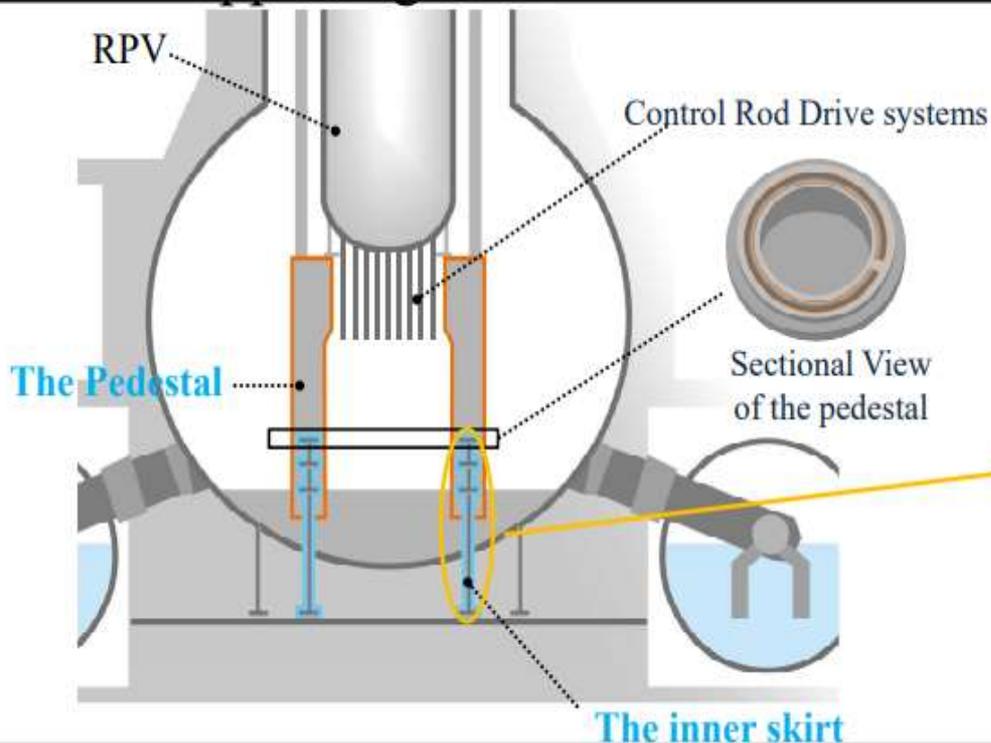


## Assessment and measures based on the findings at Unit 1

### (1) Evaluation of the strength of the inner skirt

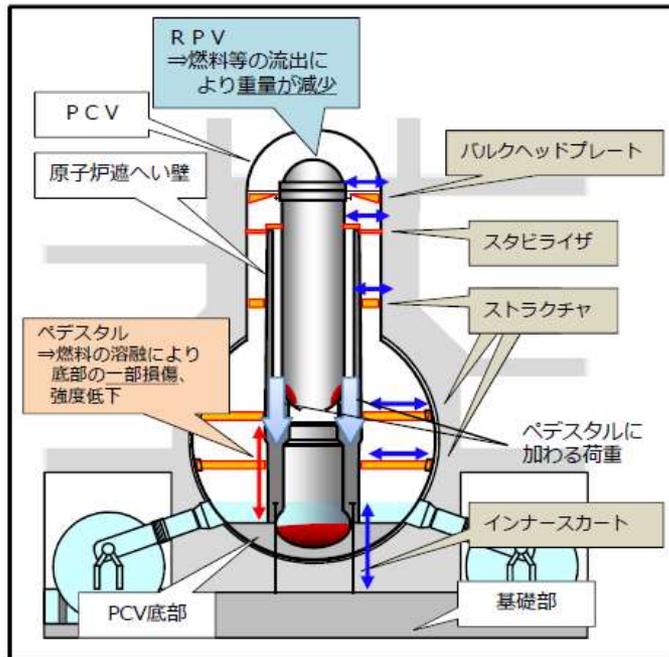
- Assuming an earthquake of 600gal, which is almost the same scale as the earthquake on March 11, 2011, we assessed the impact on the inner skirt.
- It was evaluated that the inner skirt could withstand the stress generated by a 600gal earthquake.

## Structure supporting the RPV before the accident



# 損傷ET作成のため、ペDESTALの要求機能を整理

- ペDESTALが有する機能として、**RPV支持機能**が挙げられる（具体的な設備は下図参照）。
- 波及的影響の観点からは、**臨界防止機能**、**閉じ込めバウンダリ機能（液相、気相）**が挙げられる。
  - これら機能に関する設備を下表に示す。
  - その他に、負圧管理機能、冷却機能等が挙げられるが、今回の検討では対象外とする。



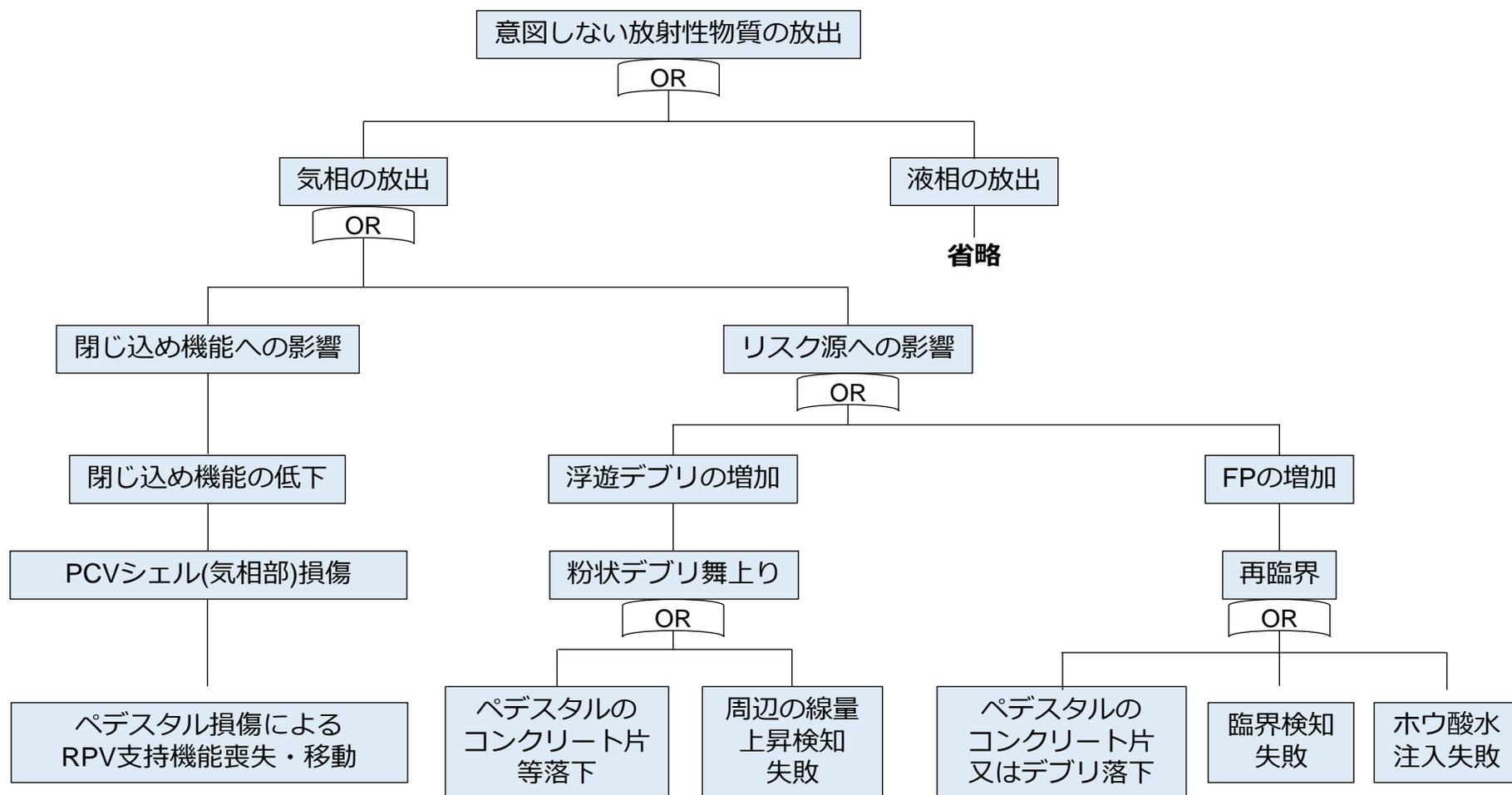
機能	設備
臨界防止機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>希ガスモニタ、MP（可搬型含む）、RPV底部温度計</li> <li>ホウ酸水注入設備</li> </ul>
閉じ込めバウンダリ機能（液相）	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCV水位計</li> <li>PCV注水設備（ポンプ、消防車）</li> <li>トラス室水位計（可搬含む）</li> <li>トラス室取水設備（可搬含む）</li> </ul>
閉じ込めバウンダリ機能（気相）	<ul style="list-style-type: none"> <li>D/W圧力計</li> <li>PCVガス管理設備</li> </ul>

## RPV支持機能を持つ設備<sup>[1]</sup>

## 各機能に関連する設備一覧<sup>[2]</sup>

# マスターロジックダイアグラムの検討

- 起因事象を体系的に分析するため、マスターロジックダイアグラムを用いた。  
→結果を**損傷イベントツリーのヘディングに反映**。
- レベル5は、ペDESTAL関連の内容のみ記載。



# 損傷イベントツリー (一部)

- PCV閉じ込めバウンダリ (気相) 損傷による外部放出に関する損傷イベントツリーを検討

起因事象	RPV支持機能		PCV閉じ込め機能 (気相)			最終状態	対策
地震	ペDESTタルによる支持	大口徑配管等 ペDESTタル以外の 支持構造物による支持	RPV移動	PCVシェル (気相部)	コンクリ等の 落下による ダスト飛散		
成功	成功	成功				外部放出なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>・必要に応じて設置中の原子炉建屋大型カバー (換気設備有)、均圧・負圧化による外部放出抑制</li> <li>・フィルタ設置</li> <li>・事前に各階に仮設のダスト放射線モニタを設置し、線量上昇を検知</li> <li>・加えて、上記対策</li> </ul>
	失敗	移動なし				外部放出なし	
		移動あり 損傷なし				外部放出なし	
		損傷あり	落下なし			外部放出なし	
			落下あり	成功		外部放出 (気体)	
				失敗		外部放出 (気体)	

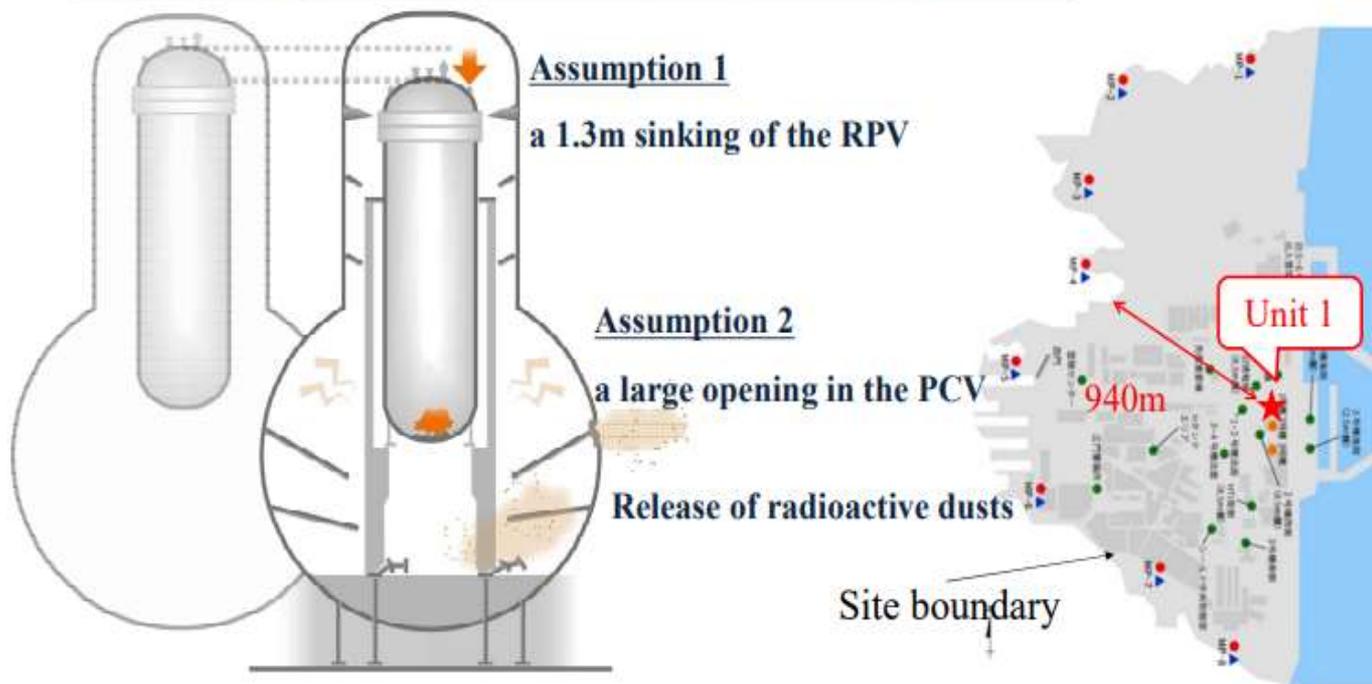


## Assessment and measures based on the findings at Unit 1

(2) Evaluation of the exposure dose at the site boundary based on the conservative scenario

- The additional exposure at the site boundary is estimated to be less than 0.04 mSv, even under conservative scenarios, such as "a 1.3m sinking of the RPV" and "a large opening in the PCV".

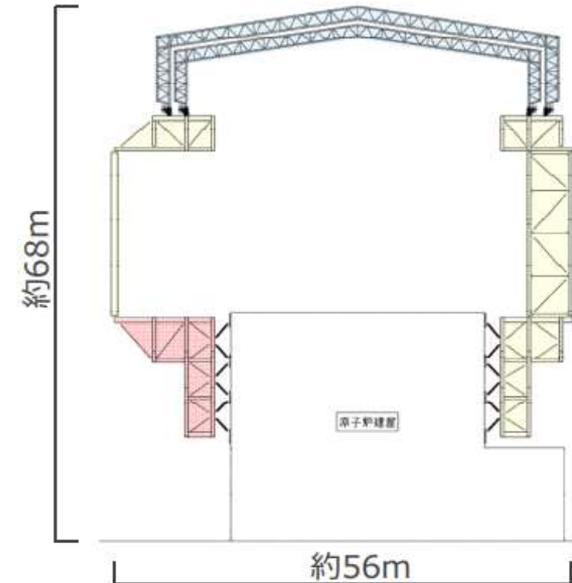
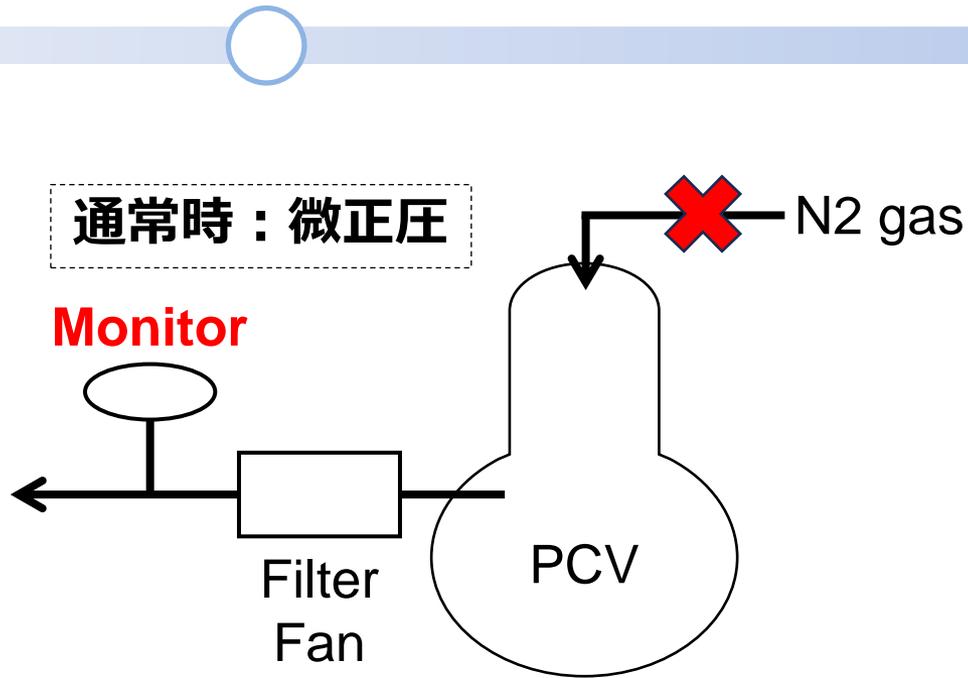
### An example of the conservative scenario



# 破損の拡大抑制対策

検知

拡大防止・制御・影響緩和対策



Ref. 東電HD「1号機燃料取り出し用カバーのうち大型カバーの設置について」

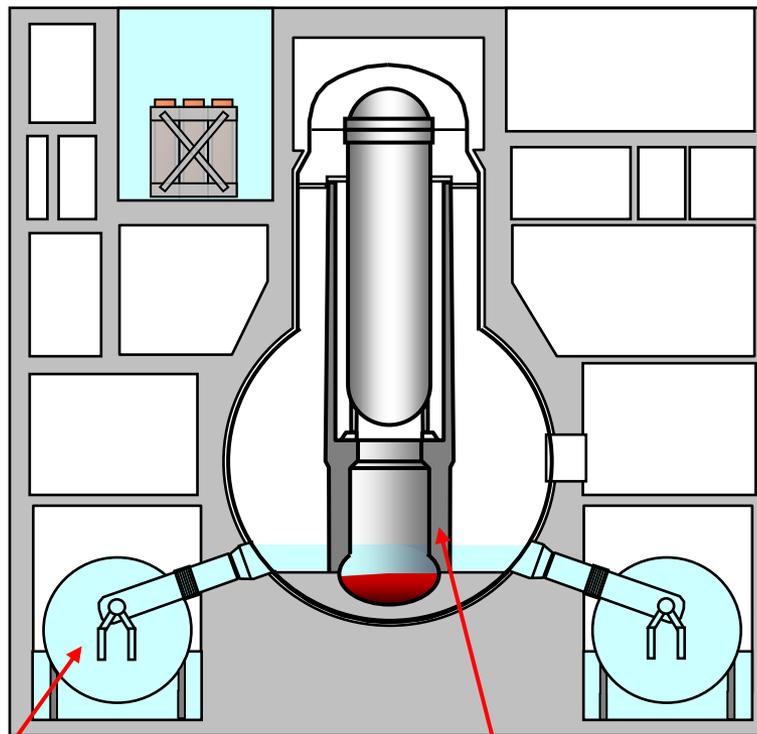
ダストモニタリングシステム  
モニタリングポスト

N2ガス封入停止

建屋大型カバー

- その他にも機動的対応を準備

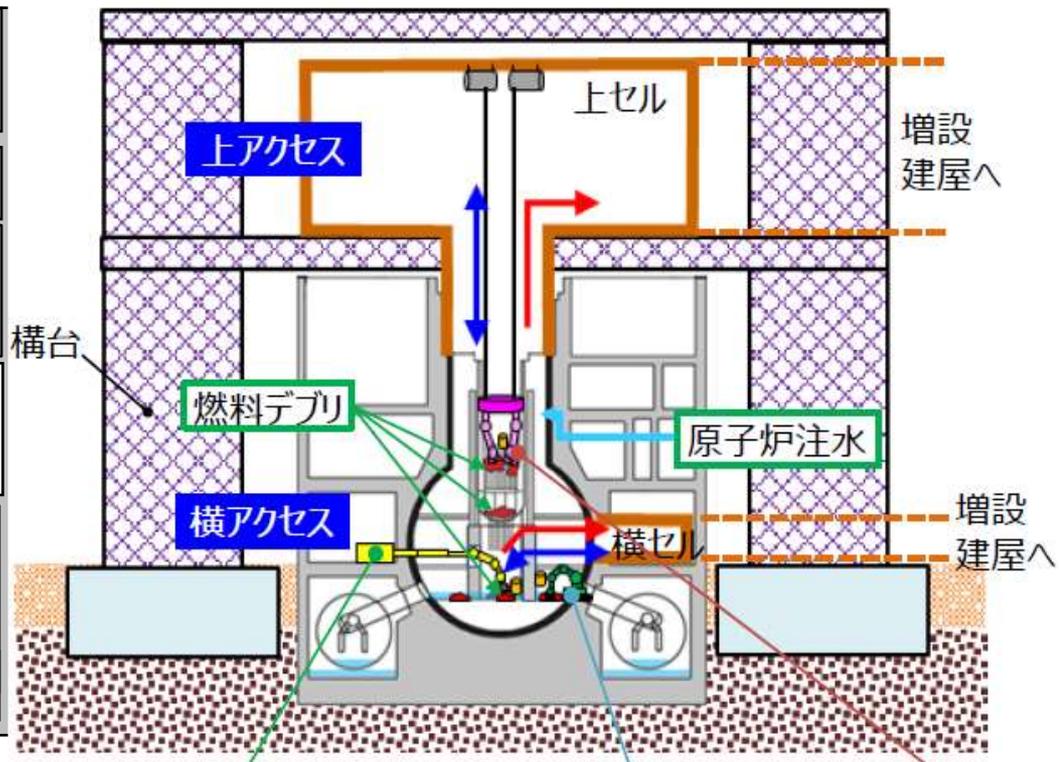
# 燃料デブリ取り出し気中工法



通常と異なり、満水  
(一部号機)

コンクリート消失  
(1号機)

S/C・ペDESTAL

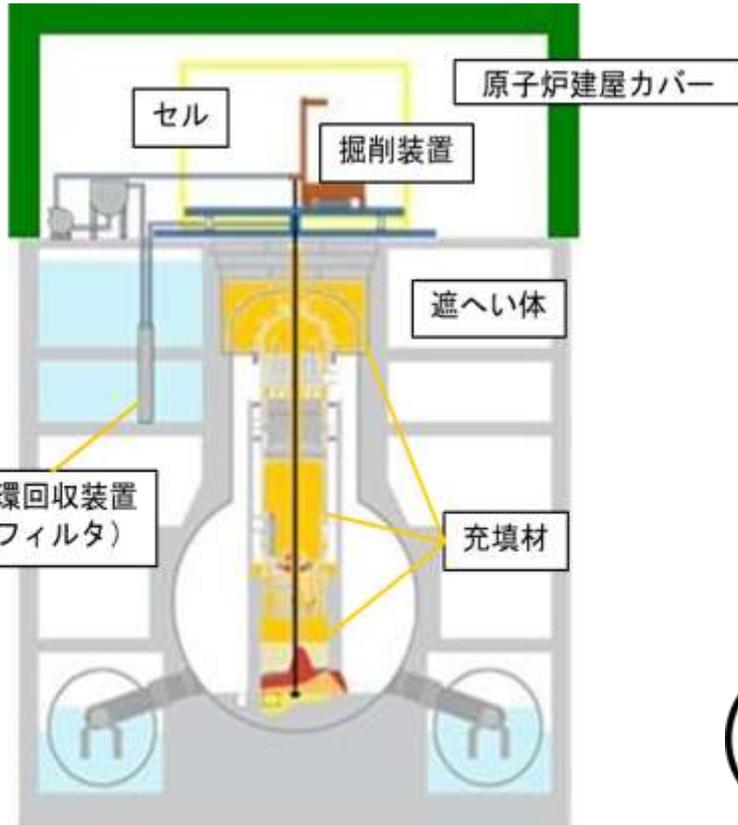


出典：第7回福島第一廃炉国際フォーラム講演資料

燃料デブリ取出し関連

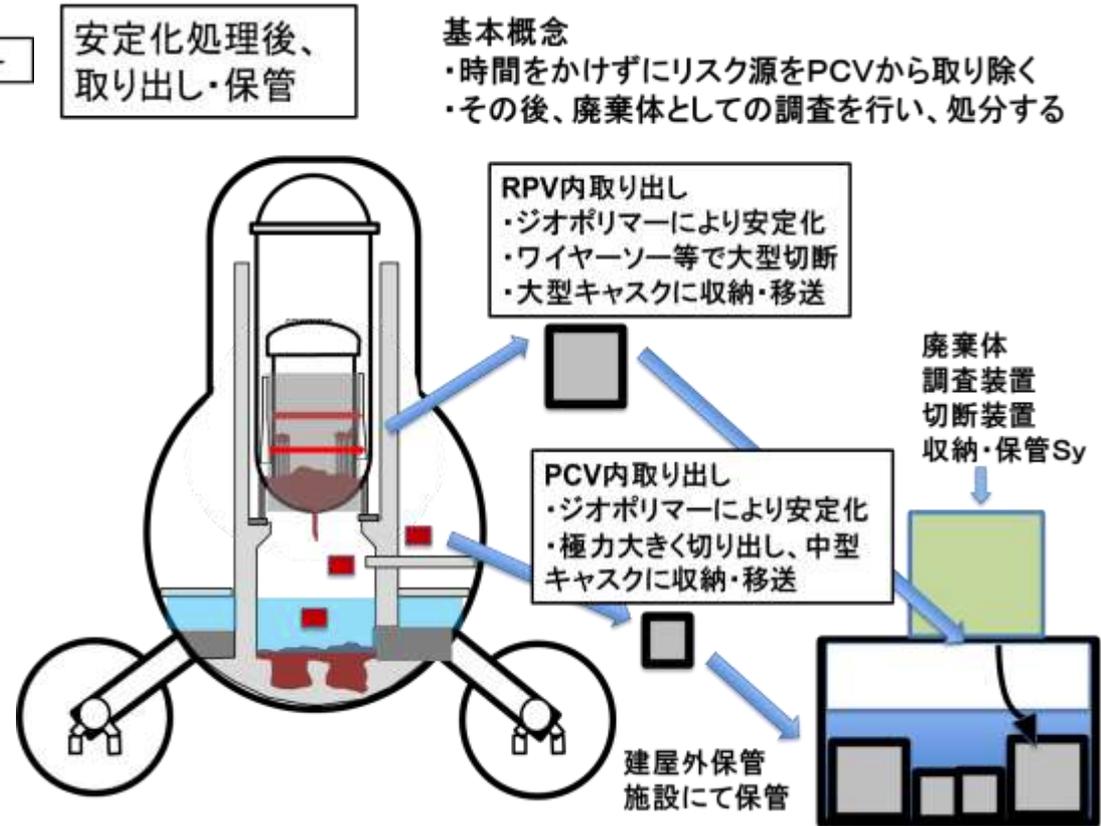
# 燃料デブリ取り出し工法（充填固化工法）

## NDF案



安定化処理後、  
取り出し・保管

## 東大案

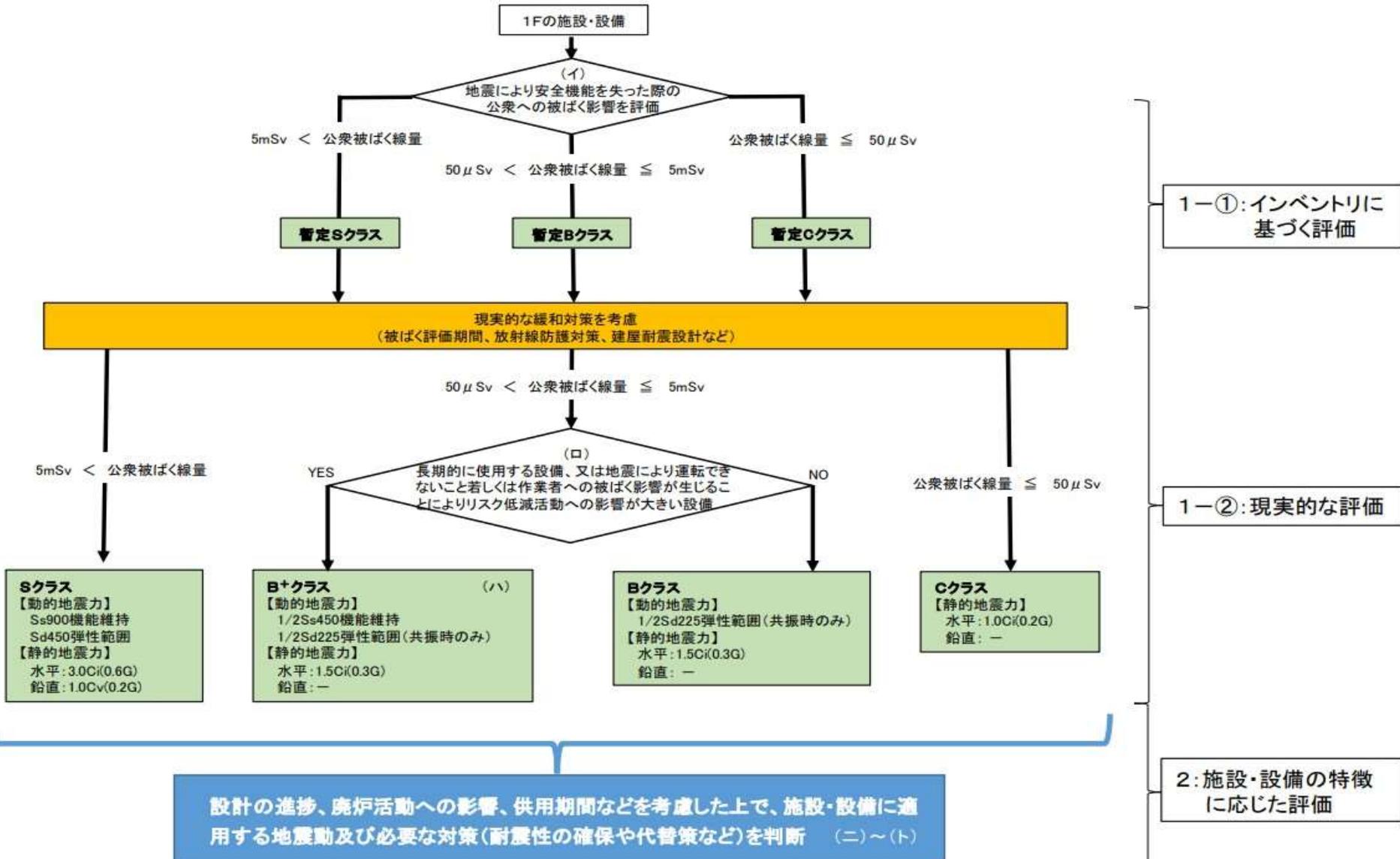


NDF HP: 令和5年度第7回福島第一廃炉  
国際フォーラム

セメント系材料等の充填固化により、①被曝低減、②放射性物質の飛散防止を図れる

# 耐震クラス分類と地震動の適用の考え方(規制庁)

耐震クラス分類と施設・設備の特徴に応じた地震動の設定及び必要な対策を判断する流れ



設計の進捗、廃炉活動への影響、供用期間などを考慮した上で、施設・設備に適用する地震動及び必要な対策(耐震性の確保や代替策など)を判断 (ニ)~(ト)

# BDBE概念を適用した耐震クラスのお考え方(提案)

- 構造物の壊れ方 → 圧力が低ければ  
→ 大規模 or 破損しにくく、破損  
局所的 に時間がかかる → **1Fの特徴**
- 評価に不確実性がある → 異常の検知、影響緩和が重要
- 破壊の防止(既存の概念)ではなく、  
破損拡大の防止(影響緩和) → BDBE概念の適用



- ・ PCVは既に耐圧部ではなく、損傷時の被曝レベルが許容され、異常検知並びに破損拡大防止策等の柔軟な対応が可能であれば、必ずしも耐震クラス S (Ss900) の評価は必要ではない。
- ・ 燃料デブリを取り出すためには、安全性を確保しつつ、迅速化を図れる実現可能な工法を選択する必要がある。

**ご静聴有難うございました。**