

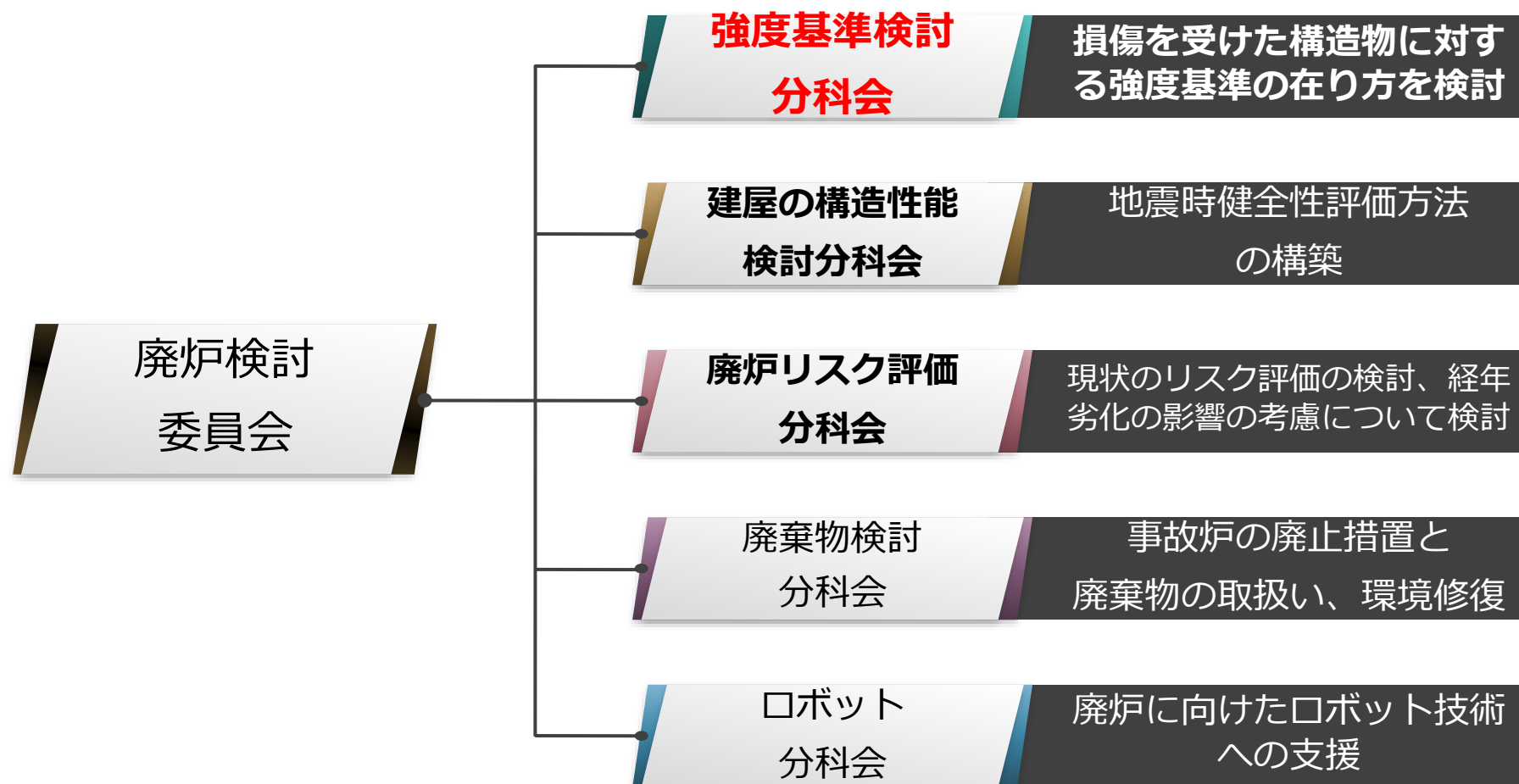
損傷を受けた構造物に対しての 強度基準の在り方

2023/3/15

東京大学 鈴木 俊一

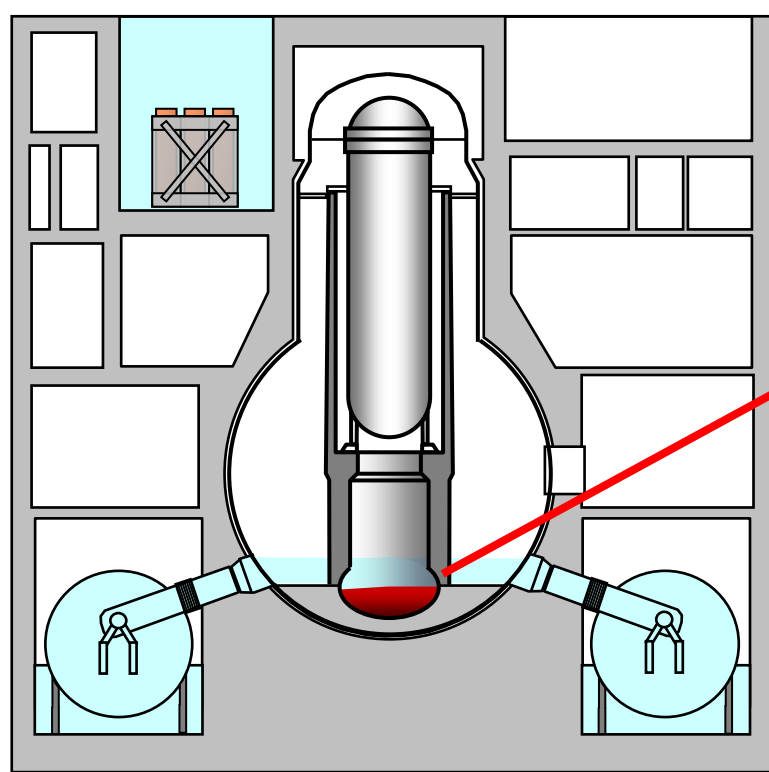
強度基準検討分科会について

- 廃炉委の分科会の一つとして、2019年に設置。
- 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**。



福島第一原子力発電所の構造物の特徴

- 1F事故前から設置されていた構造物
 - **事故の影響を受けて損傷した構造物も存在**する
 - ・ 例：1号機のペデスタル（下図）
 - 損傷を受けた構造物は、**廃炉作業中にも必要な機能を確保する必要がある。**



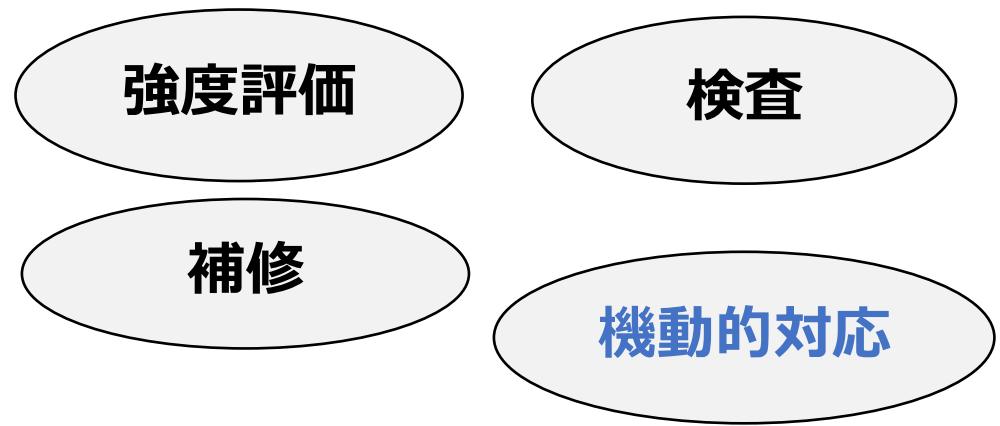
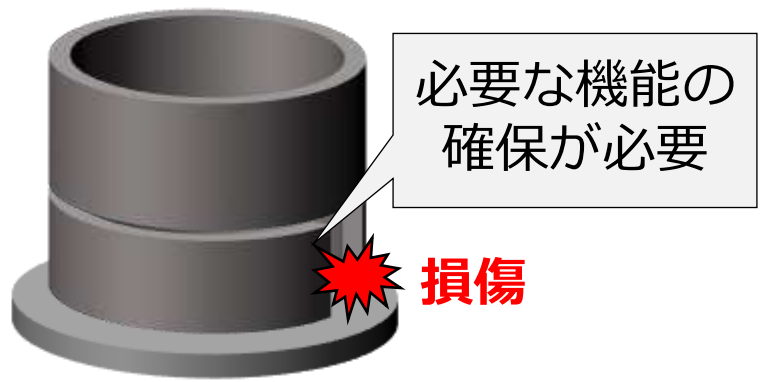
ペデスタル開口部（右側基礎部）の状況

出典：東京電力ホールディングス

1号機のペデスタルの状況

強度基準検討分科会の活動基本方針

強度評価は一つの手段であり、
複数の手段を組合わせて確保



損傷を受けた
構造物

機能確保を確認するための手段



- ## 分科会の検討事項
1. 機能確保の確認に関する考え方
 2. 強度評価方法(含む経年劣化)

機能確保の確認に関する基本的な考え方

- 「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点を設定した。

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

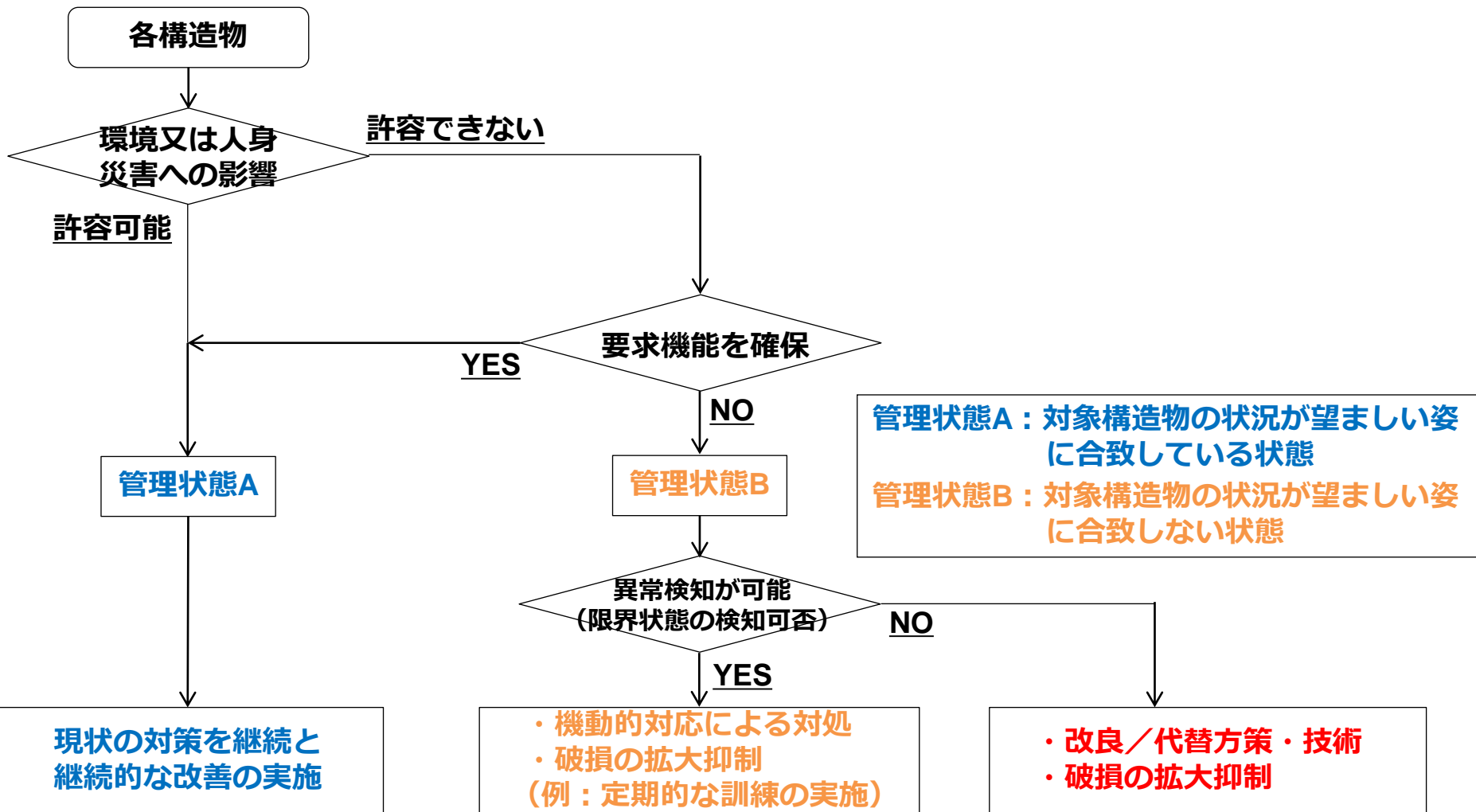
- 耐震強化等の発生防止対策が可能であれば、有効
- 困難な場合の対応の検討が必要

④廃炉作業とともに変化する 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

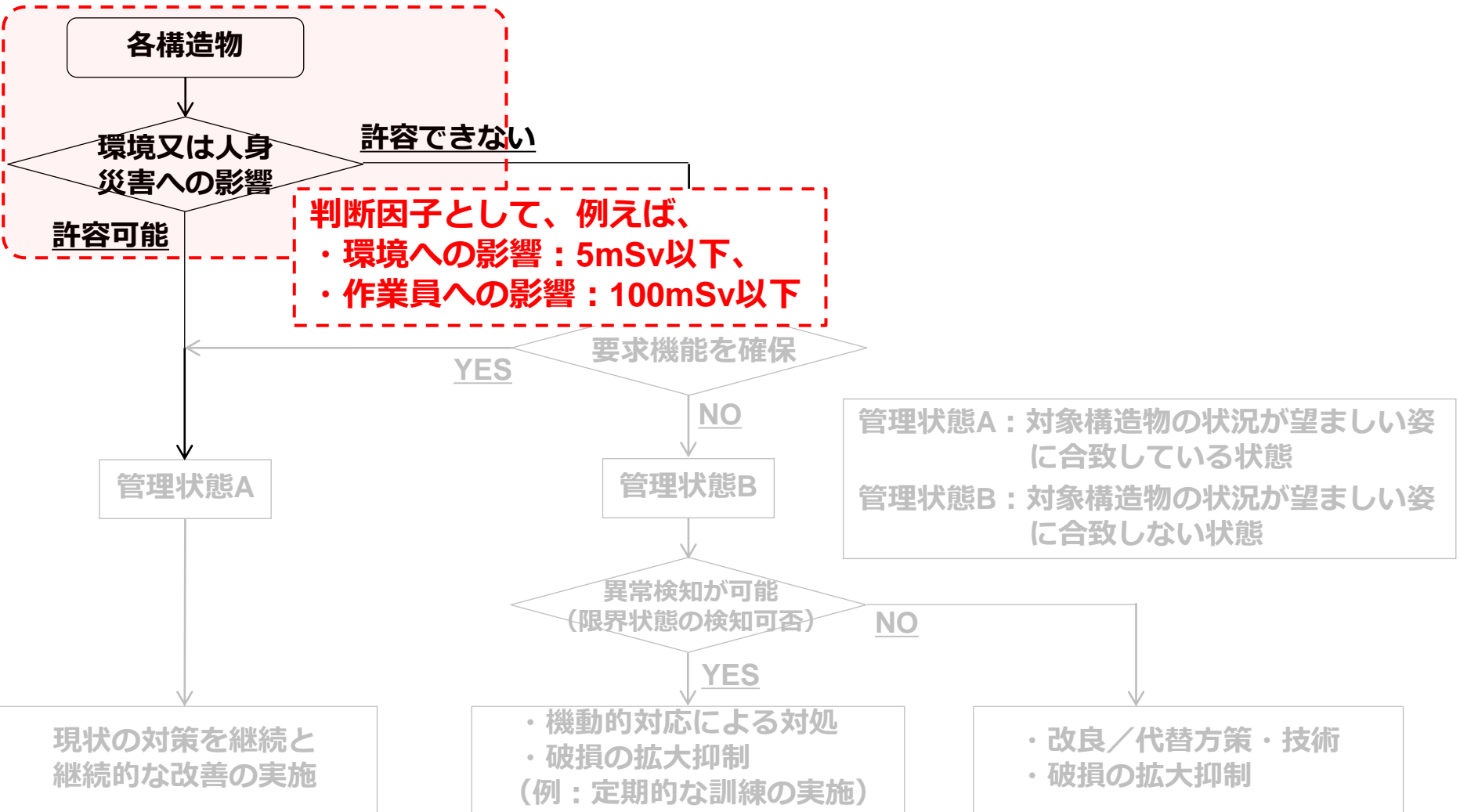
「機能確保の確認に関する考え方」のフロー図

- 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

- 建造物の損傷による**原子力安全への影響有無を判断**する。
 - 被ばく量、インベントリー量、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**する。

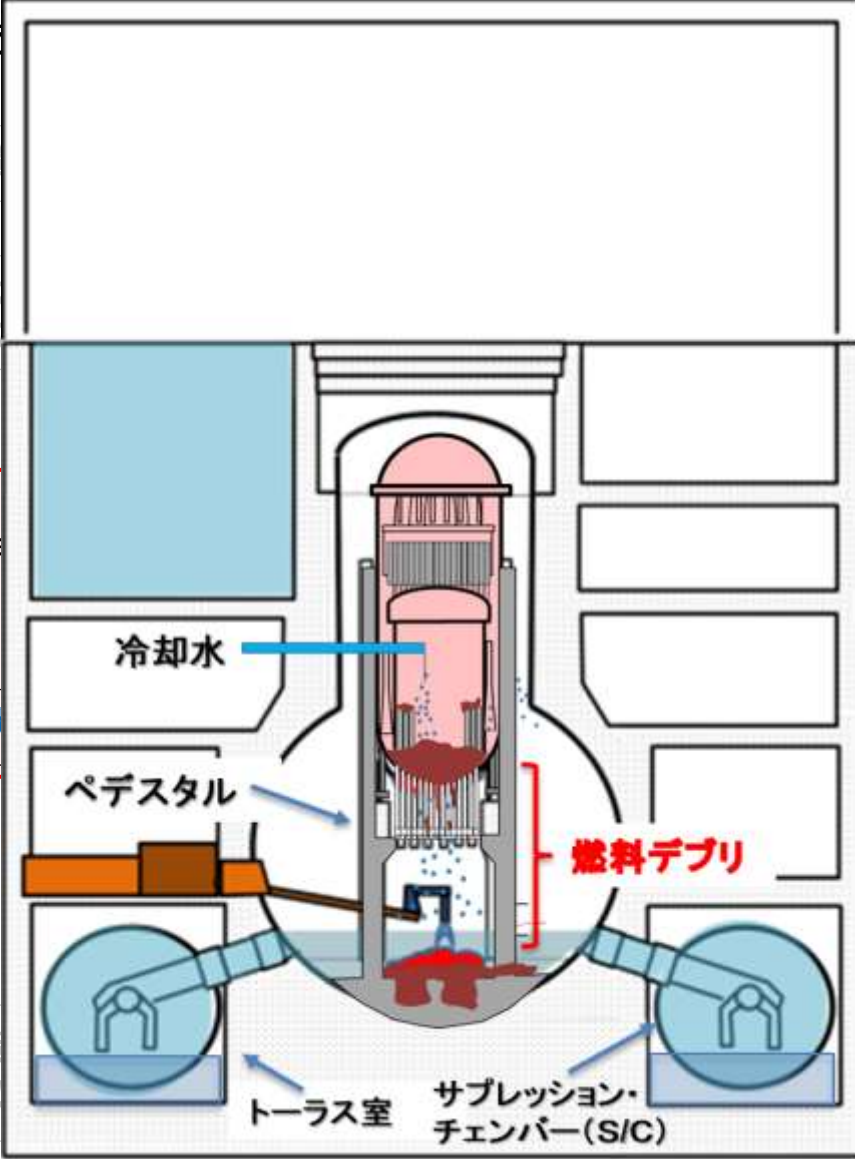
➢ 具体的には、**別のフロー（次スライド）で評価**

➢ 要

報告書を参考に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

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

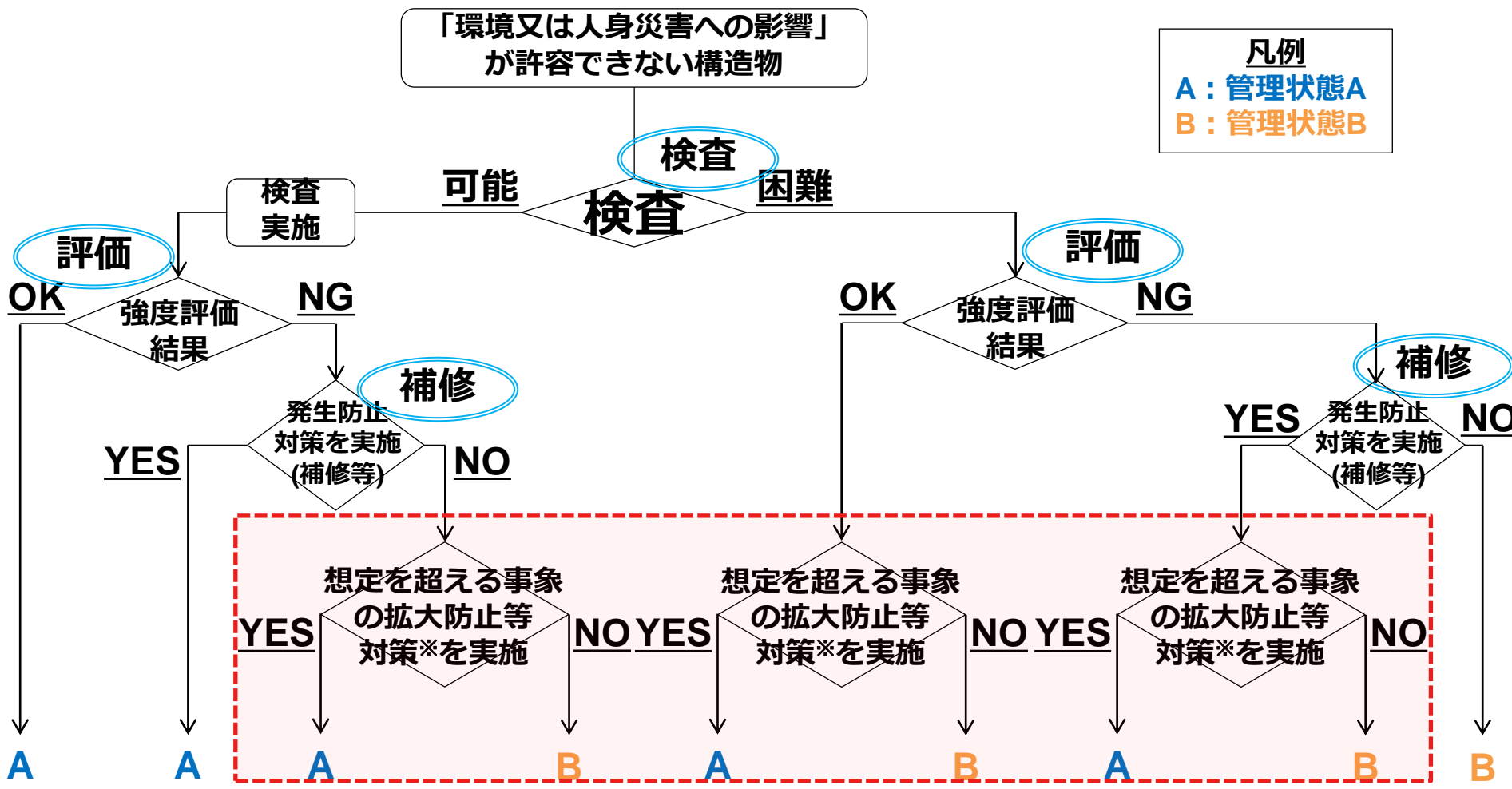


- ※：要求機能は以下の通り。なお、波及的影響も考慮する。
- ① 閉じ込めバウンダリ
 - ② 負圧管理機能
 - ③ 支持機能
 - ④ 冷却機能
 - ⑤ 臨界防止機能（未臨界維持）
 - ⑥ 放射線遮へい機能
 - ⑦ 水素爆発・火災防止機能

・改良／代替方策・技術
・破損の拡大抑制

要求機能を確保できているかの判断について

- 要求機能を確保できているかは、**検査・強度評価・補修・想定を超える事象への対策**の4点で判断する。
 (想定を超える事象への対応は、システム全体の影響緩和策が有効)

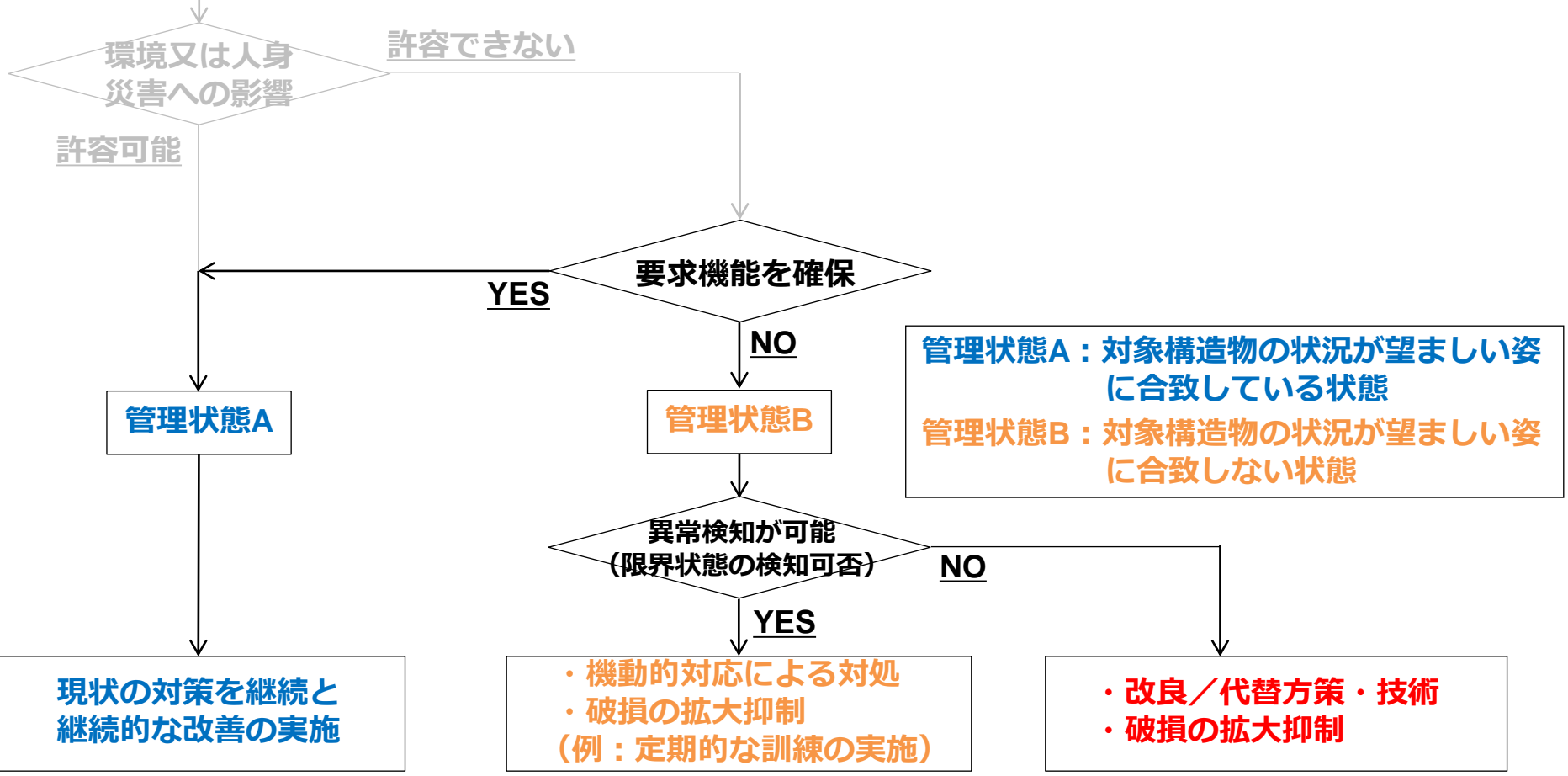


※ 異常検知・拡大防止・制御・影響緩和対策

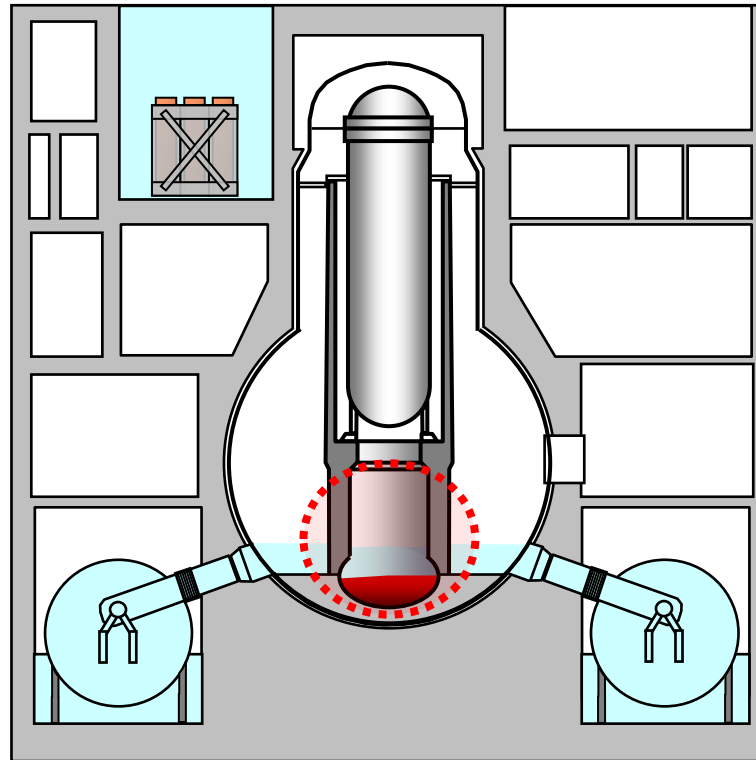
【赤枠内】システム全体として考える領域
 : 事象発生後の破損シーケンスを想定して評価

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、機動的対応が可能と考えられる。
検知可能な場合、**検知後の対応（機動的対応等）を要求。**
- 検知不可能な場合、**様々な技術等を活用した改良／代替方策等を要求**（**各構造物** 検知機能を持つものを含む）。



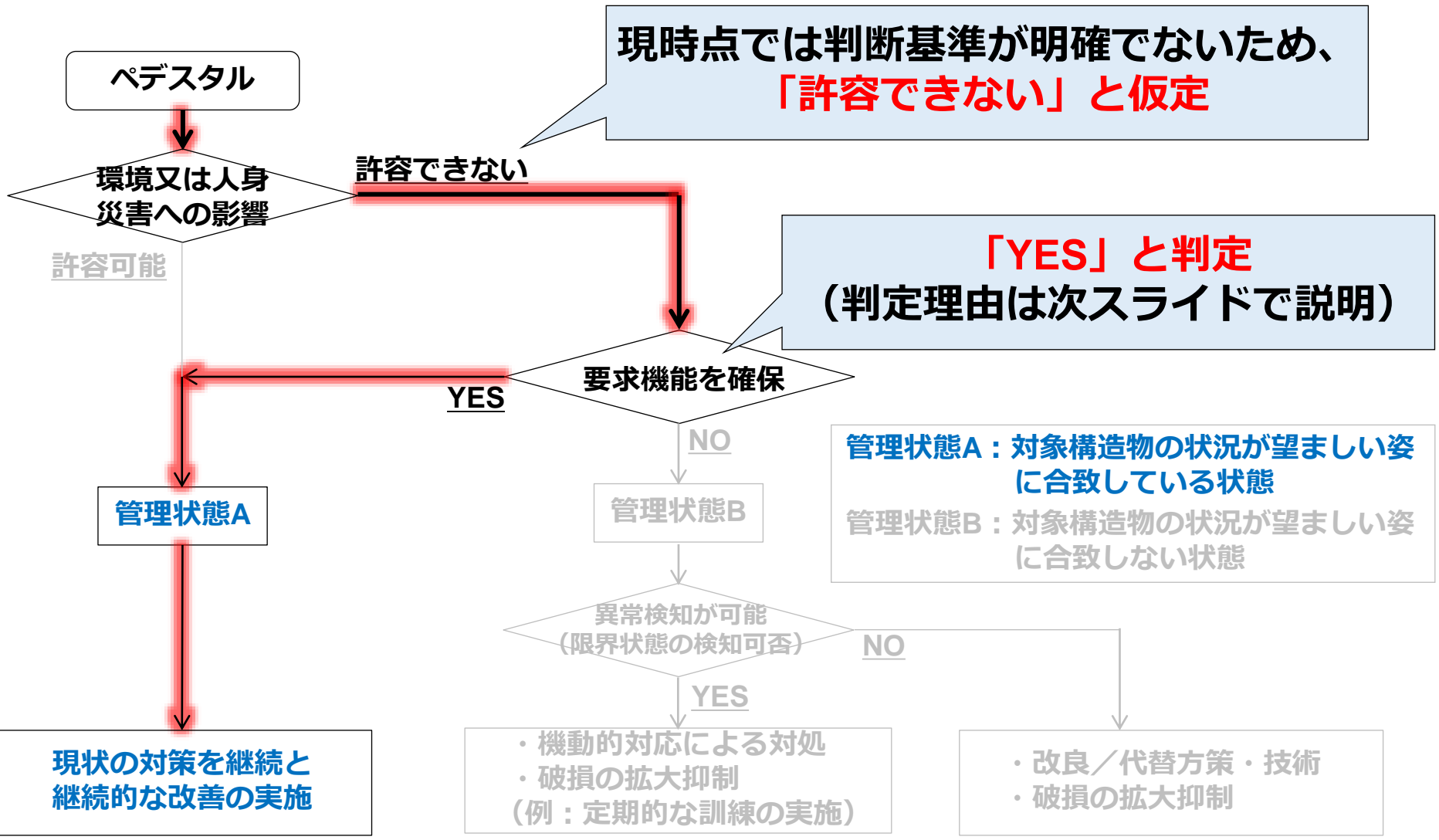
ケーススタディ①：1号機ペデスタル



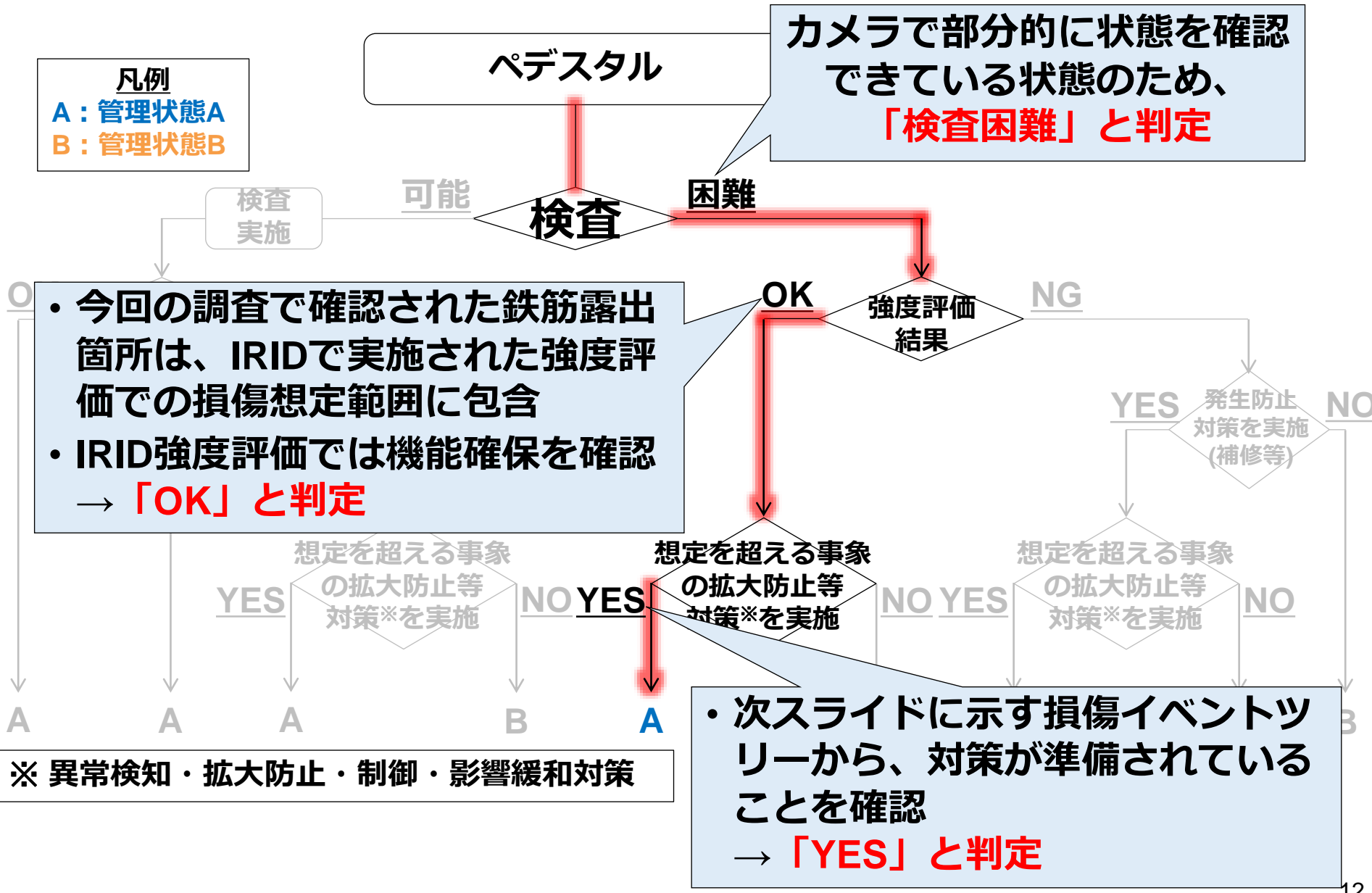
1号機ペデスタル

- **開口部壁面に損傷**を確認
- IRIDでは、2016年度に**ペデスタルの一部が劣化、損傷した状態において、機能を維持することを強度評価で確認**

ケーススタディ結果（1号機ペデスタル）



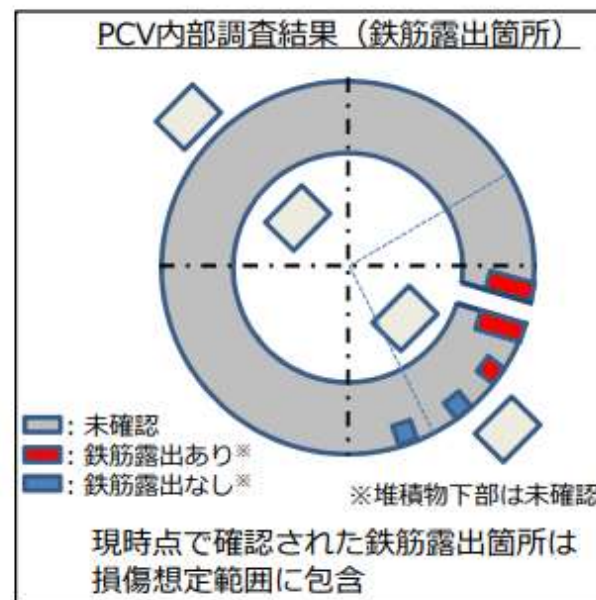
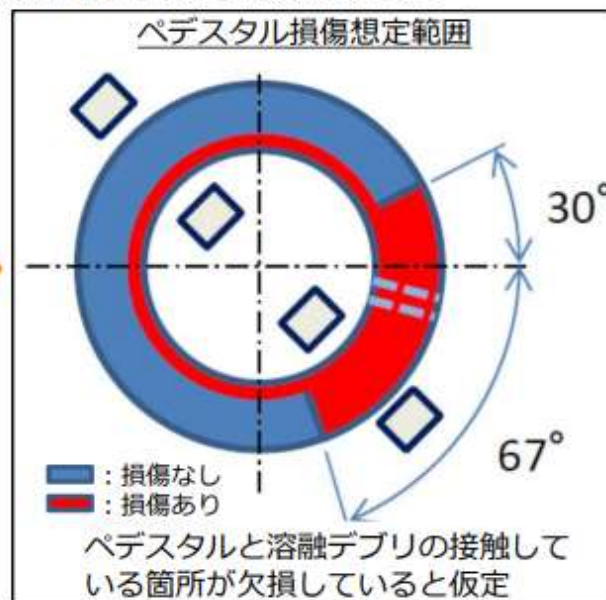
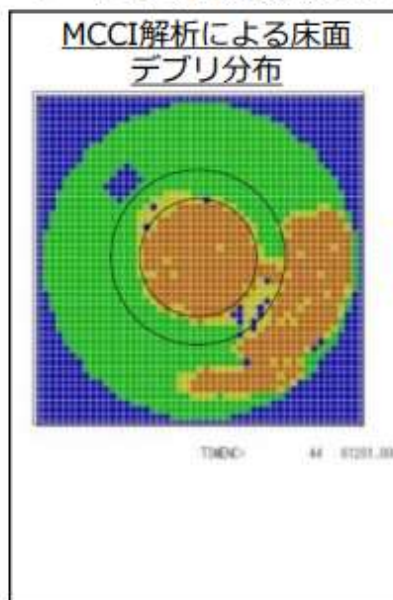
ケーススタディ結果 (1号機ペデスタル)



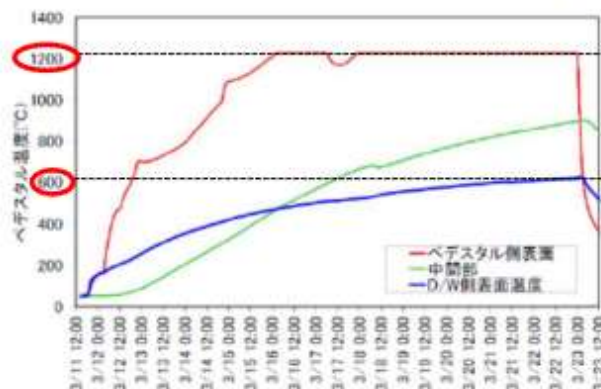
(参考2) IRIDにおけるペDESTAL部の耐震性・影響評価について

■ 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



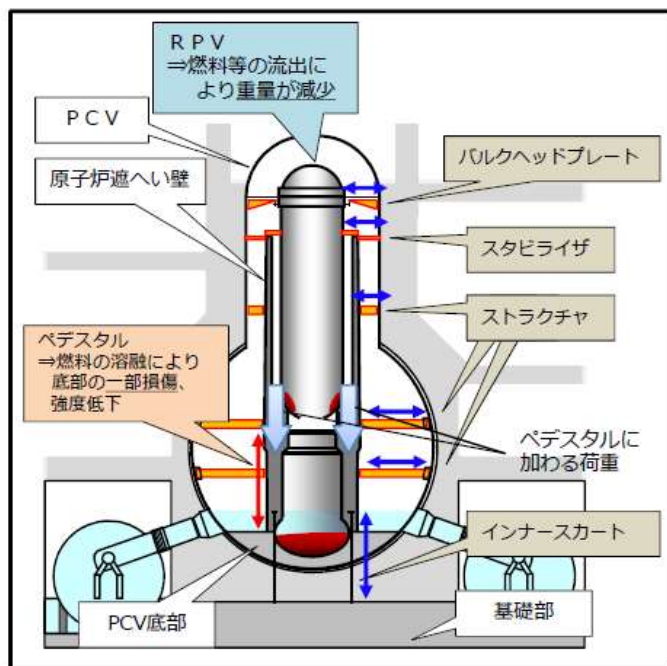
➤ 温度条件：MAAP解析結果を考慮し設定



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

ペDESTALに関する要求機能

- 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、**閉じ込めバウンダリ機能（液相、気相）、****臨界防止機能**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。



RPV支持機能を持つ設備^[1]

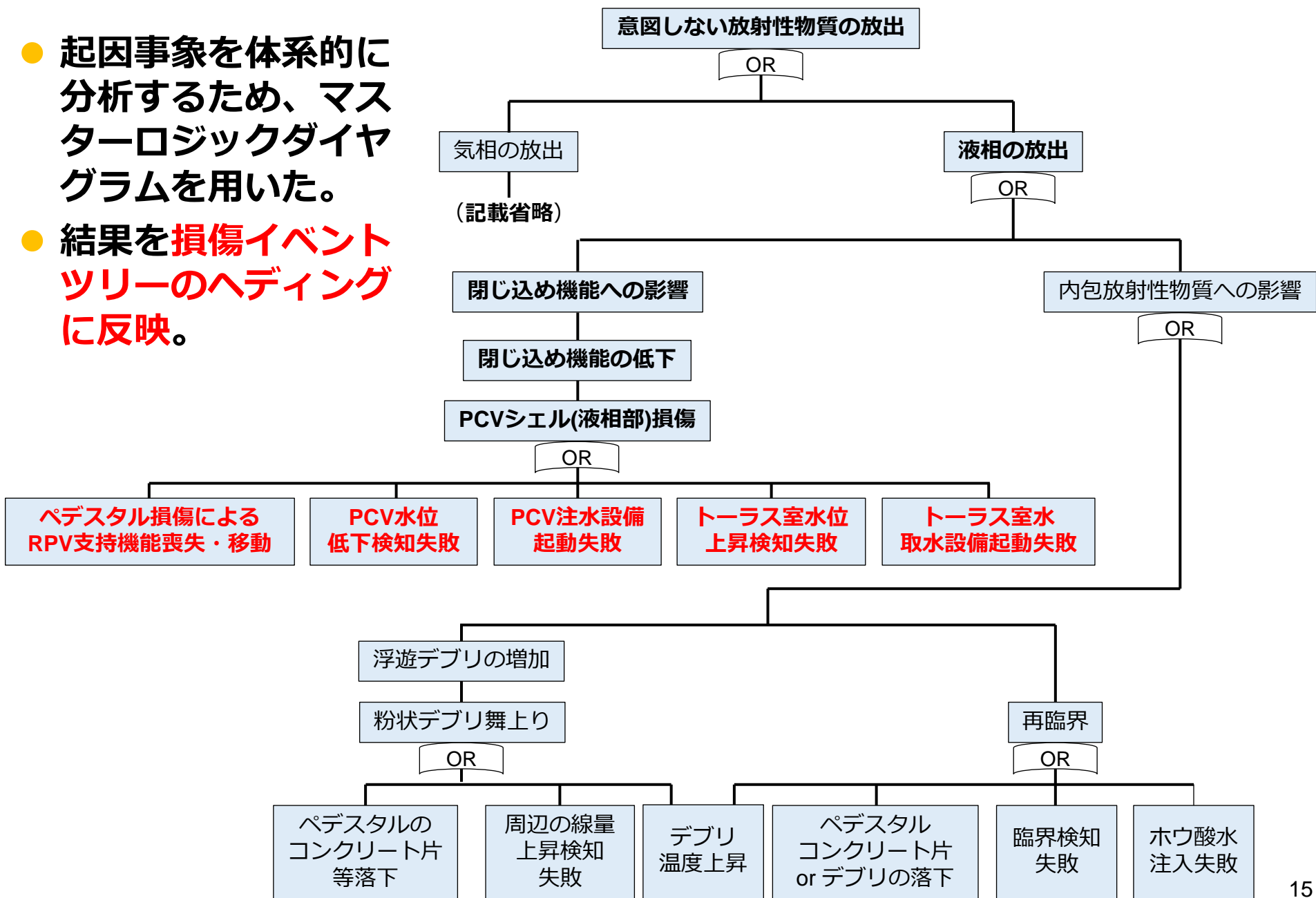
機能	設備
閉じ込めバウンダリ機能（液相）	<ul style="list-style-type: none"> ● PCV水位計 ● PCV注水設備（ポンプ、消防車） ● トーラス室水位計（可搬含む） ● トーラス室取水設備（可搬含む）
閉じ込めバウンダリ機能（気相）	<ul style="list-style-type: none"> ● D/W圧力計 ● PCVガス管理設備
臨界防止機能	<ul style="list-style-type: none"> ● 希ガスモニタ、MP（可搬型含む）、RPV底部温度計 ● ホウ酸水注入設備

各機能に関連する設備一覧^[2]

[1] 第100回特定原子力施設監視・評価検討会 資料3、[2] 福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画他より作成

マスターロジックダイアグラム

- 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。



損傷イベントツリーの一例

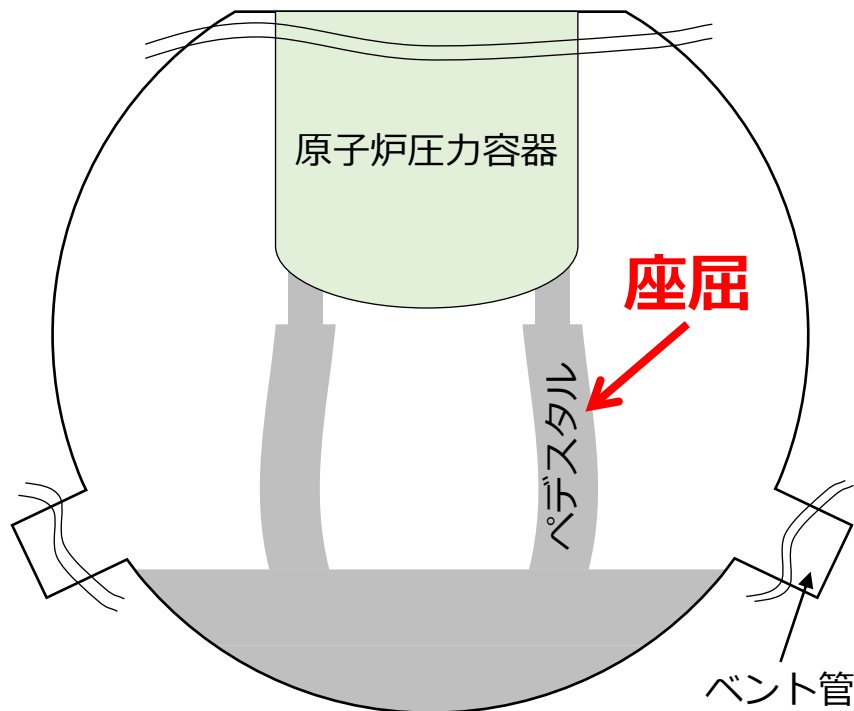
- PCV閉じ込めバウンダリ損傷による外部放出に関する損傷イベントツリーを検討。

地震	RPV支持機能		閉じ込めバウンダリ・冷却機能（液相）				最終状態	対策	
	RPV支持	RPV移動	PCVシェル（液相部）	PCV水位低下検知	PCV注水設備起動	トラス室水位上昇検知			トラス室水取水設備起動
	成功							外部放出なし	
	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	成功	成功	成功	成功	外部放出なし	
							失敗	外部放出（液体）	<ul style="list-style-type: none"> ・可搬ポンプによるトラス室水の取水 ・水位計の多重化 等
						失敗	外部放出（液体）		
					失敗			外部放出（デブリ温度上昇に伴う気相への放出）	<ul style="list-style-type: none"> ・代替注水・スプレイライン（ペネ等からの注水）による飛散防止 ・代替PCV水位計の設置
					失敗			外部放出（デブリ温度上昇に伴う気相への放出）	

- 最終形態は**汚染水の外部放出とダストの気相への放出**。
- 対策は、**可搬型ポンプによる取水、代替注水・スプレイラインによる飛散防止等**。

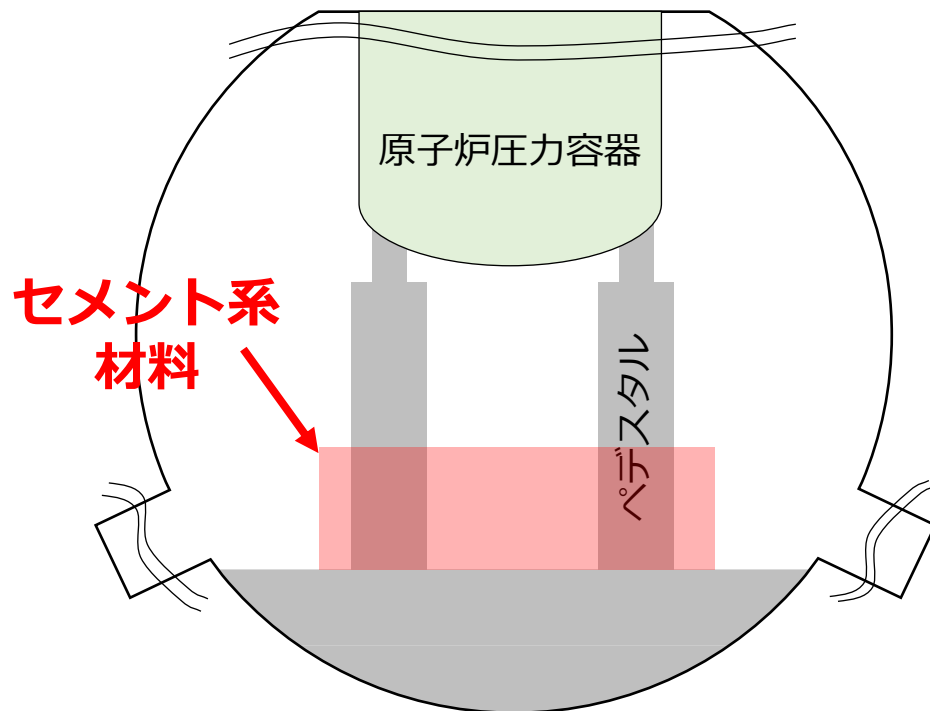
改良／代替方策・技術（発生防止対策の一例）

- 今回は管理状態Aと評価されたが、**管理状態Bかつ、異常検知ができない場合に考えられる策を検討。**
 - ペDESTALの損傷モードとして、**座屈**が挙げられる（左図）
 - 座屈補剛材の設置も考えられるが、その他に**ペDESTAL下部にセメント系材料を注入**する対策も考えられる（右図）



原子炉格納容器(PCV)

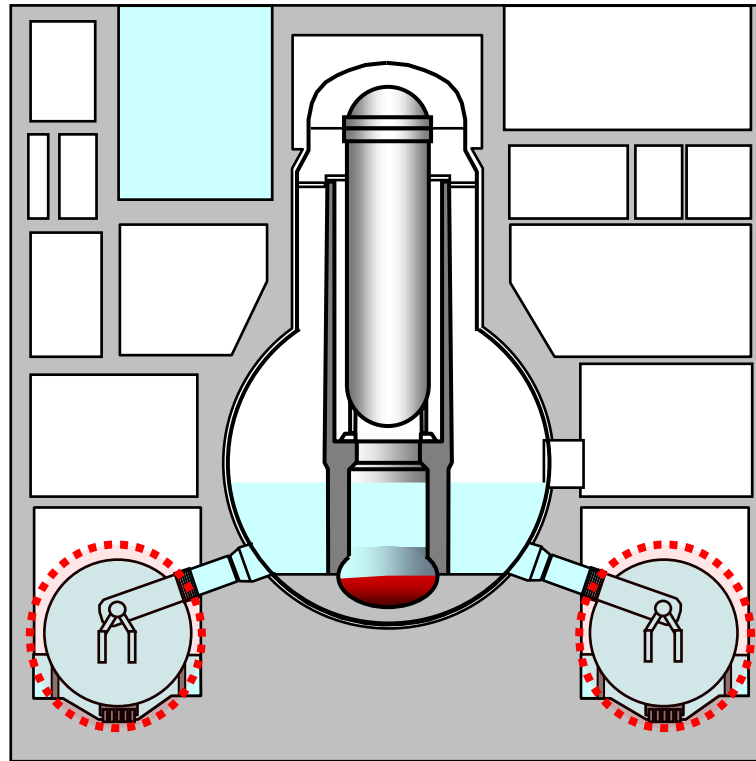
ペDESTALの損傷モード



原子炉格納容器(PCV)

PCV内へのセメント系材料注入

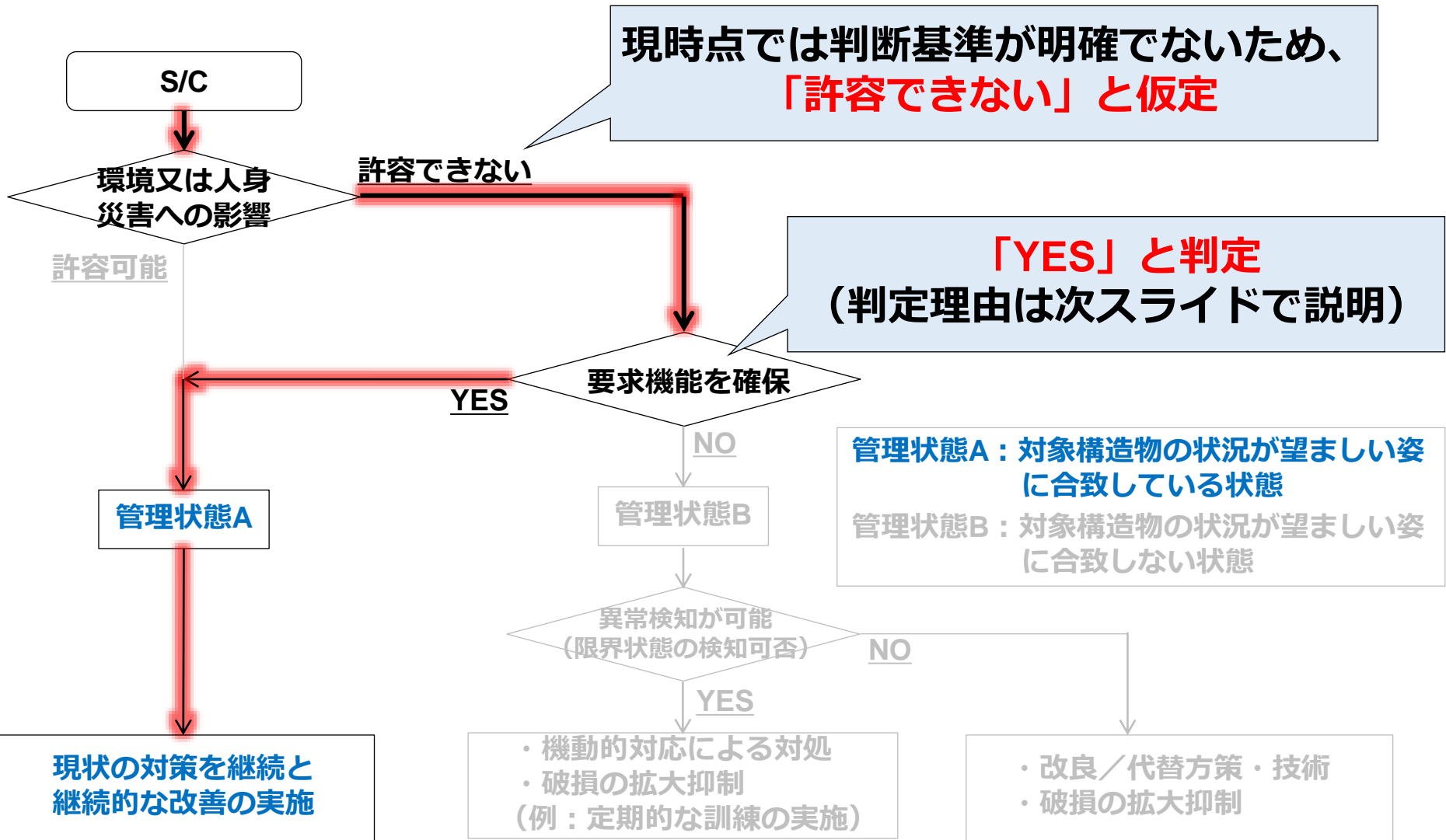
ケーススタディ②：3号機S/C



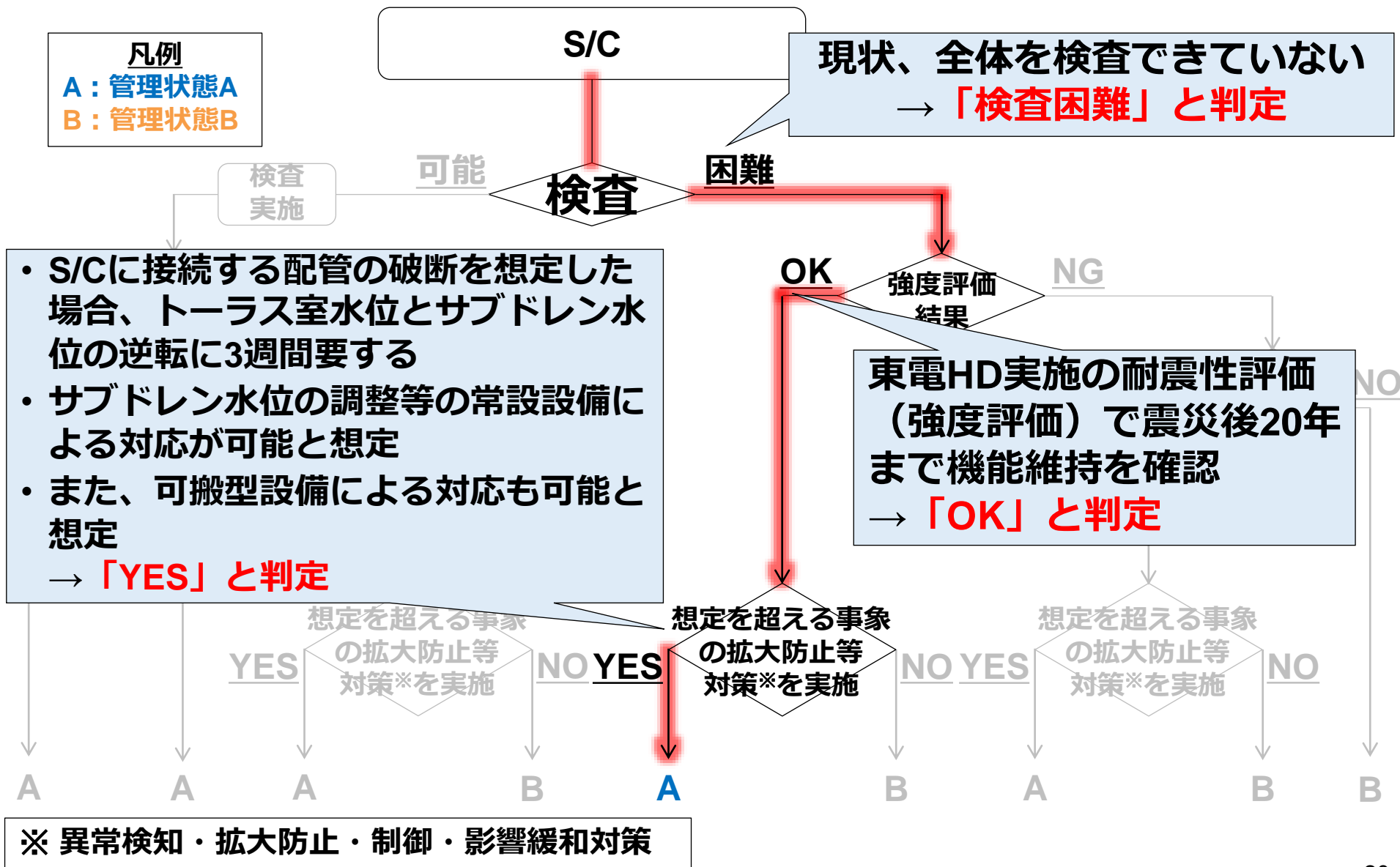
3号機サプレッション・チェンバ(S/C)

- 震災後、**満水状態**
- 東電HDでは、震災後の経年劣化を考慮した耐震性評価を実施
→**震災後20年まで機能維持**
- 長期的なリスク低減の観点から、**水位低下に向けた作業を実施中**

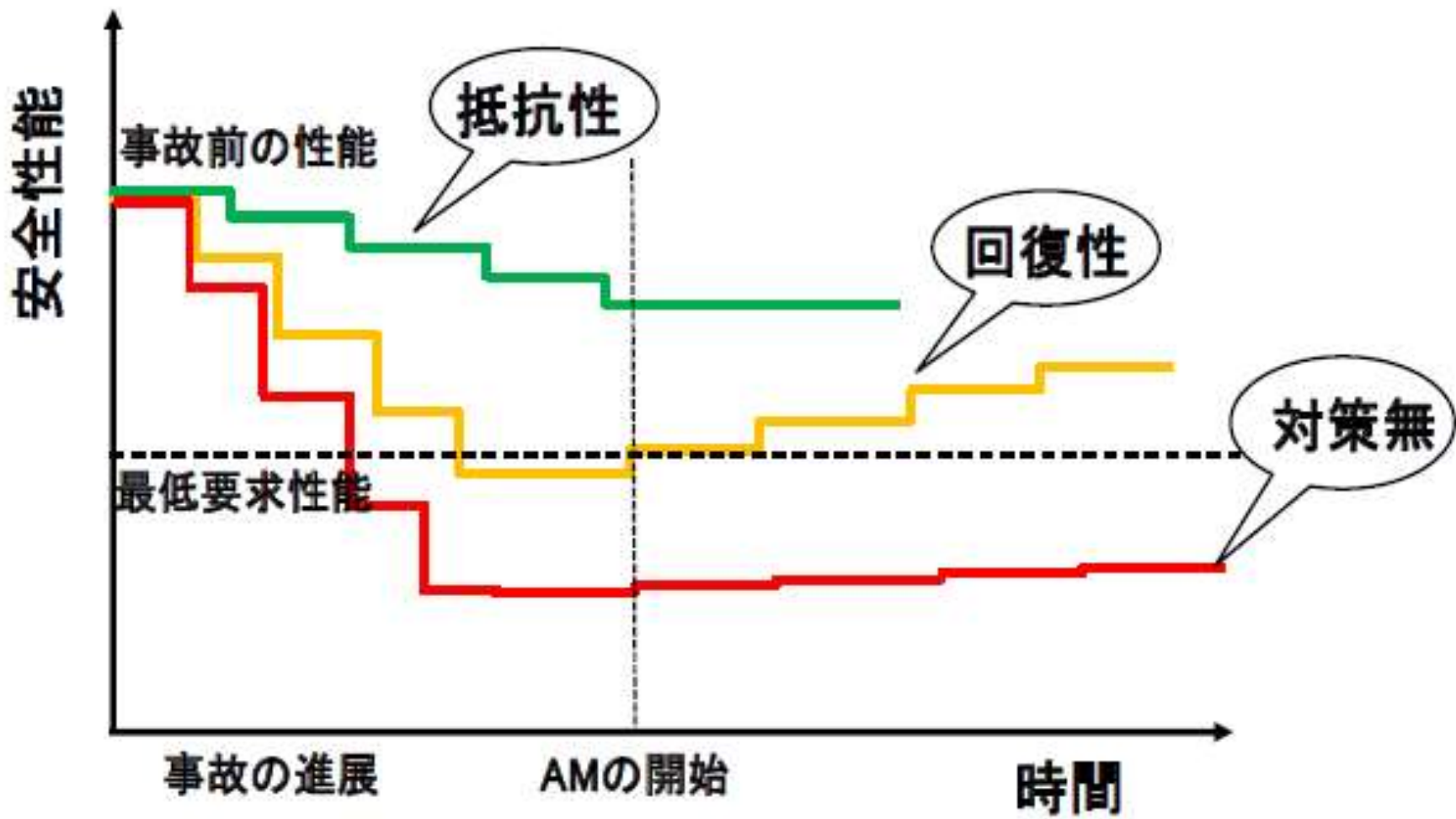
ケーススタディ結果 (3号機S/C)



ケーススタディ結果 (3号機S/C)



破損の拡大抑制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

Ref. 笠原他「原子炉構造レジリエンスを向上させる破損の拡大抑制技術の開発 (1)開発計画」日本原子力学会2021年春の大会

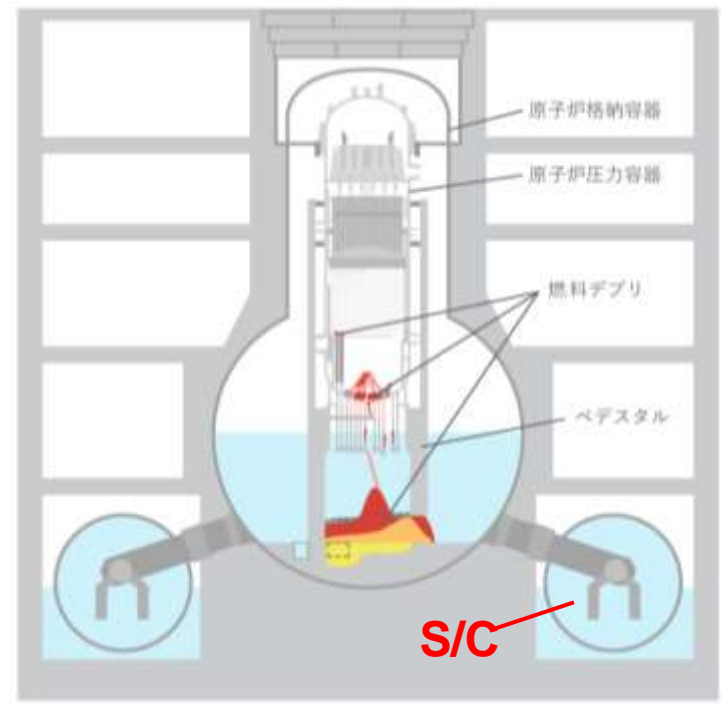
破損の拡大抑制、改良・代替方策・技術の例

■ 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))

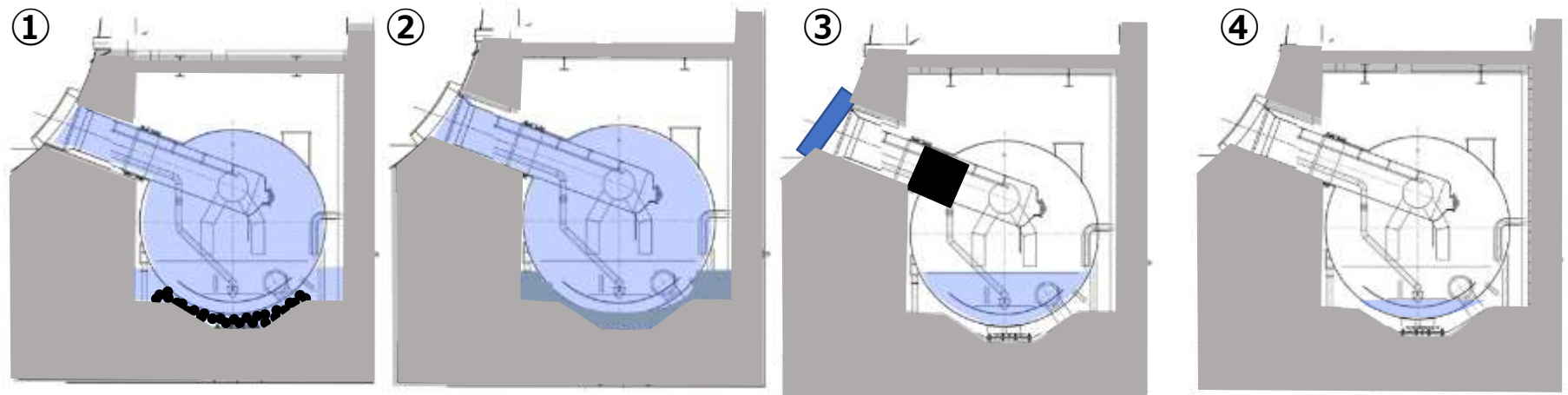
■ 改良・代替方策/技術 (例)

- ②S/C底部グラウト打ち
- ③ベント管/ジェットデフ止水
- ④S/C水抜き



3号機の状況 (推定)

出典：東京電力HDのHP (一部加筆)



出典：第75回特定原子力施設監視・評価検討会 資料1-1の図を使用して作成

今後の予定

- 1Fを対象とした新たな検知技術・補修技術や腐食等経年劣化評価並びに、設計想定を超える場合の強度評価についても検討を行う予定である。
- 検討にあたっては、原子力学会廃炉検討委員会「建屋の構造性能検討分科会」や「廃炉リスク評価分科会」等と連携をとり、構造物・機器単体のみならず構成するシステム全体の機能維持に関して適切な基準の考え方を提言する。

ご静聴有難うございました。