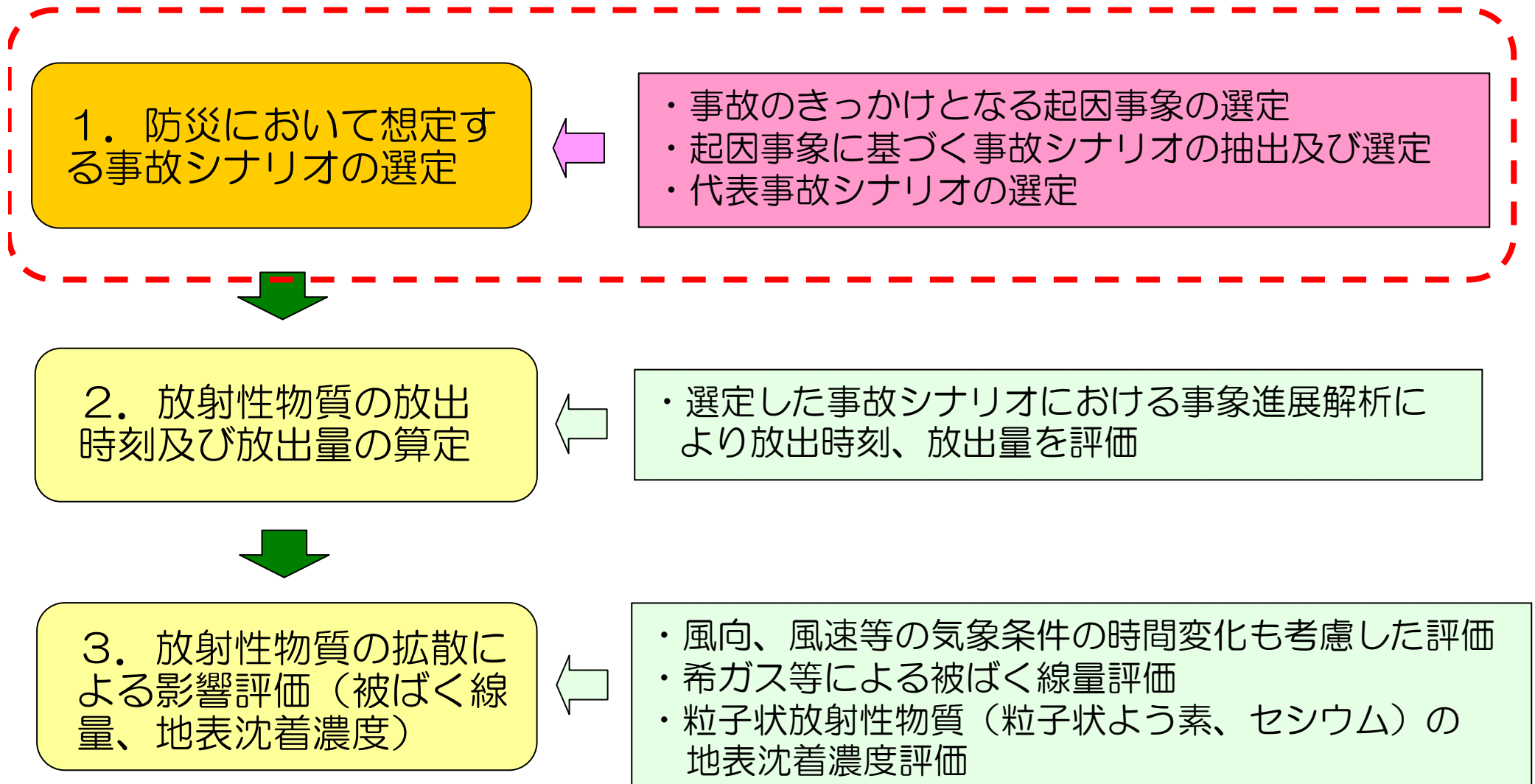


防災において想定する事故シナリオについて

平成26年2月11日

今回のご説明内容



防災において想定する事故シナリオ選定の考え方（深層防護の考え方の適用）

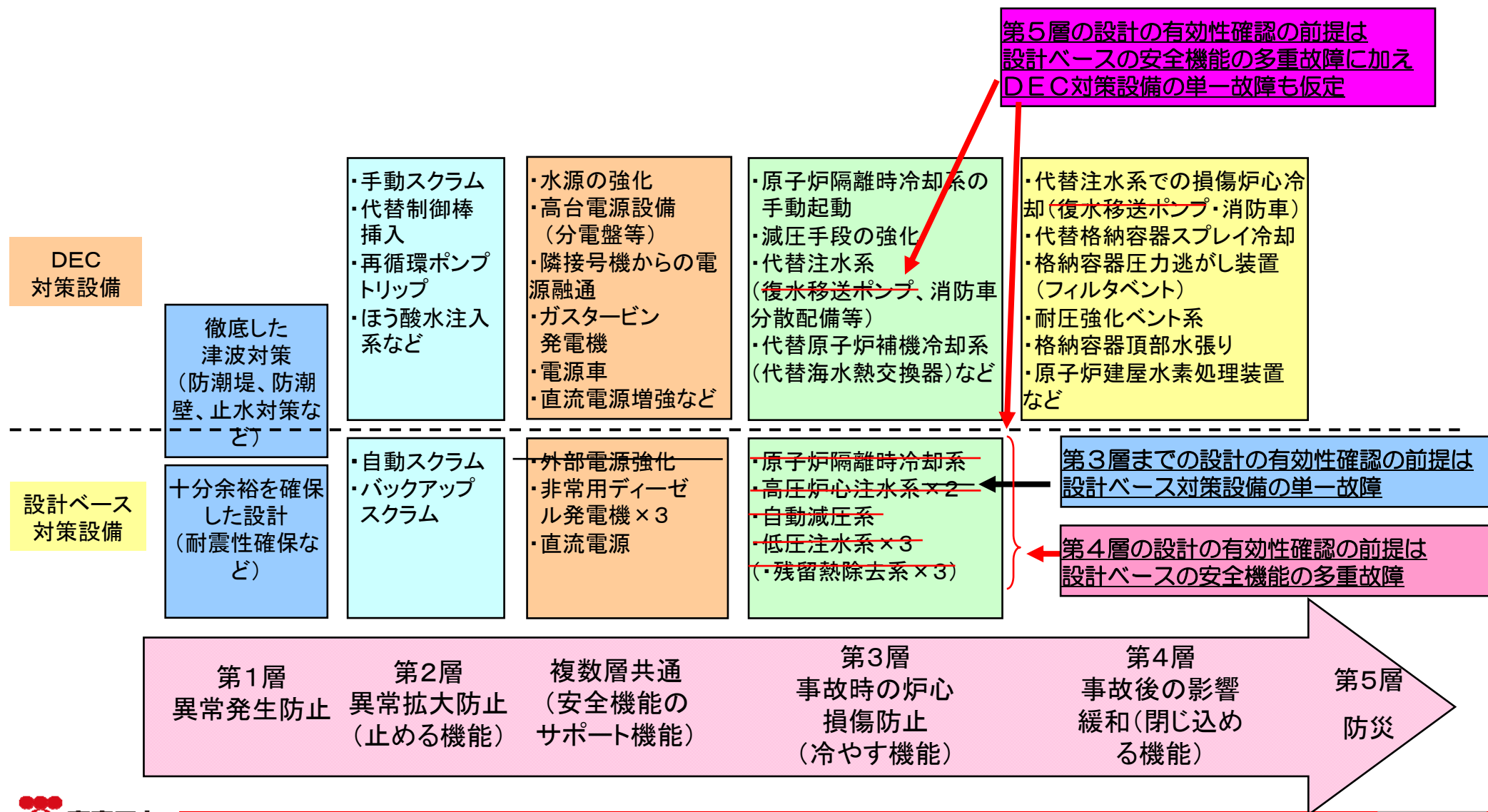
- 原子力発電所の安全は、深層防護の考え方により確保
- 深層防護は、第1層（異常発生防止）、第2層（異常拡大防止）、第3層（事故時の炉心損傷防止）、第4層（事故後の影響緩和）、第5層（防災）の防護の組み合わせにより実現
- 深層防護の第1層から第5層の各層の対策の有効性を以下の方法により確認

	第1層～第3層	第4層	第5層（防災）
前提条件	設計ベース対策設備の単一故障	設計ベース対策設備の多重故障	● 設計ベース対策設備の多重故障を伴う事故により放射性物質放出につながるシナリオ（1. 基本ケース） ● 設計ベース対策設備の多重故障に加えDEC対策設備の単一故障により放射性物質放出につながるシナリオ（2. 応用ケース）
有効性の確認方法	故障しなかった設計ベース対策設備によって設計基準事象に対する安全評価を実施	設計ベースを超える状態（DEC）に対応する設備（DEC対策設備）で重大事故等に対する有効性評価を実施	● 1. 基本ケース及び2. 応用ケースに対して、避難等を含む防災措置の有効性評価を実施

※応用ケースを超過したケースについては、
3. 感度解析ケースとして影響の感度を見る

防災において想定する事故シナリオ選定の考え方（深層防護の考え方の適用）

深層防護の各層の厚みと各層の対策の有効性の確認のイメージ



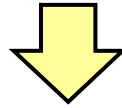
(参考) 深層防護の考え方について

- 深層防護は、主として多数の連続し独立した層の防護の組み合わせにより実現され、これらの層は周辺公衆や環境に対する有害な影響を及ぼす前に配置されなければならない。仮に1つの層の防護やバリアーが機能失敗した場合には、後続の層やバリアーが機能することになる。深層防護が適切に整備されれば、単一の技術的、人的、又は組織的失敗が有害な影響につながることはなくなり、また、失敗の組み合わせによっても重篤な影響につながる可能性は非常に小さくなる。
(IAEA 基本安全原則 (No.SF-1) (2006年11月) 抜粋)
- それぞれの異なる層の防護の独立性はプラントの深層防護の重要な要素であり、この独立性は一つの層の防護の機能失敗が他の層の失敗につながらないように対策を施すことによって達成される。
(IAEA 原子力発電所の安全：設計 (No.SSR-2/1) (2012年2月) 抜粋)
- 深層防護に関する議論は、概ね、①各層の定義と②各層間の独立性に行き着くのではない。層間の独立性は深層防護の重要な精神(要素)そのものではあるが、ここで、各層の“完全な独立”はあり得ない。戦略である深層防護の背景には、“何ごとも程度問題”という、より普遍的な原則が前提となっている。(原子力規制委員会更田氏 日本原子力学会「2013年秋の大会」)
- 多重防護において各防護レベルの独立性は重要な要素であるが、これは各防護レベルが相互に無関係に設計されるべきということを意味するものではない。防護策全体の性能を高めるためには、第1層から第5層までの防護策がバランスよく講じられ、一つ又は二つの層に負担が集中しないことが重要である。(原子力安全委員会 発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策—多重防護の考え方について—(平成24年9月) 抜粋)

1. 防災において想定する事故シナリオ（基本ケース）の選定の流れ

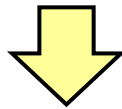
①事故のきっかけとなる起因事象の選定

- ・ 内部に起因するもの
- ・ 外部に起因するもの（地震、津波、その他自然現象）



②起因事象に基づく事故シナリオの抽出及び分類

- ・ 重要な安全機能をもつ系統の故障の組合せによりシナリオを漏れなく抽出（設計ベース対策設備の多重故障も考慮）
- ・ 抽出した事故シナリオを、事故の特徴によって分類



③D E C対策の有効性評価及び代表事故シナリオの選定

- ・ 分類した各事故シナリオに対して、設計ベース対策設備の多重故障を考慮した上で、D E C対策の有効性評価を実施
- ・ 最も事象進展の厳しいシナリオを代表事故シナリオに選定

1. ① 事故のきっかけとなる起因事象の選定

プラントに影響を与える事象について、内部で発生する事象と外部で発生する事象（地震、津波、その他自然現象）をそれぞれ分析し、事故のきっかけとなる事象（起因事象）について選定する

プラント内部で発生する事象

- プラントの外乱となる事象として、従前より許認可解析の対象としてきた事象
 - ・異常な過渡変化（外部電源喪失等）
 - ・事故（原子炉冷却材喪失等）
- 上記以外で、原子炉の運転に影響を与える事象
（非常用交流電源母線の故障、原子炉補機冷却水系の故障等）

プラント外部で発生する事象

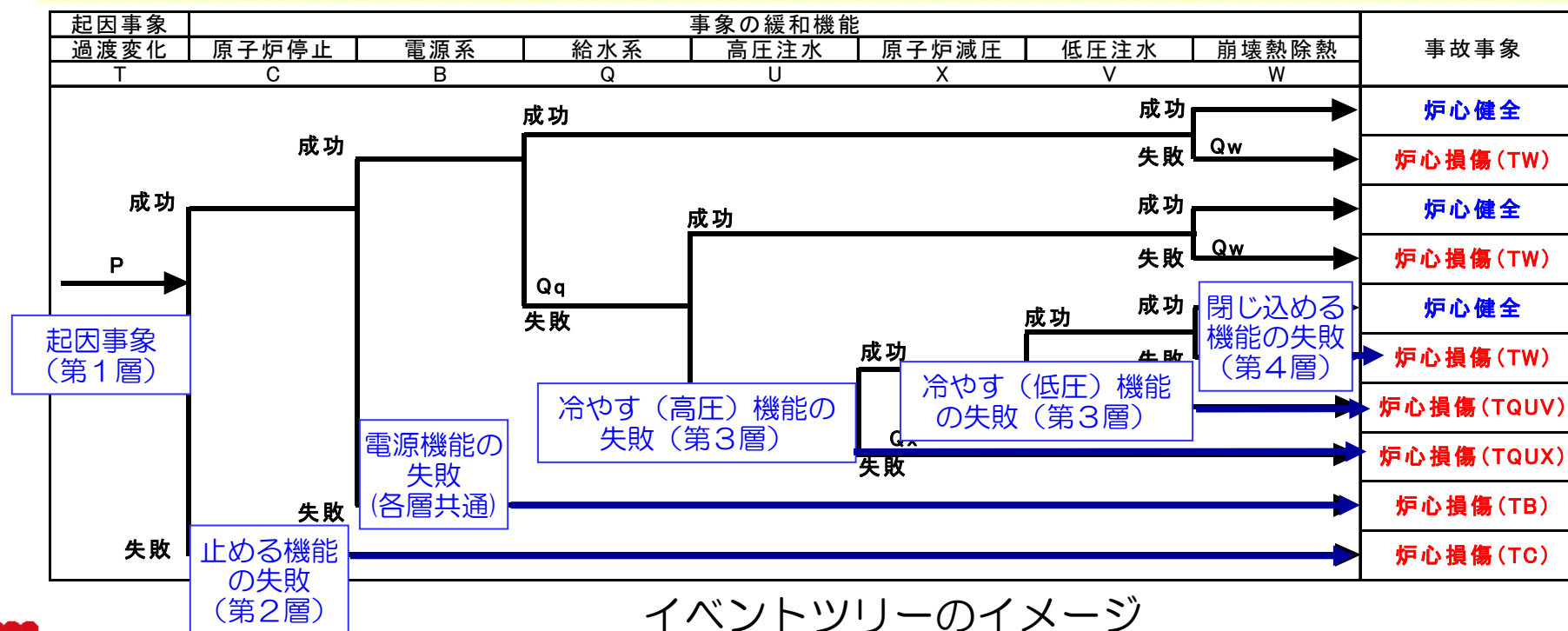
- 地震及び津波
 - 地震、津波以外の自然現象の約40事象から、柏崎刈羽の地域性等を考慮して6事象（強風、竜巻、火山、落雷、積雪、低温）にスクリーニング。
- ↓
- 設計の基準を大幅に超える規模の事象発生を想定した上で、プラントに有意な頻度で影響を与えると考えられる場合は、考慮すべき起因事象とする

事故のきっかけとなる事象（起因事象）を選定

1. ② 起因事象に基づく事故シナリオの抽出及び分類

- イベントツリー等により、事故のきっかけとなる事象（起因事象）を出発点に、事象がどのように進展して最終状態に至るかを、安全機能を有する系統の動作の成否を分岐として樹形状に展開し、事故シナリオを漏れなく抽出
- 抽出した事故シナリオを、事故進展の特徴によってグループ別に分類

- ・崩壊熱除去機能喪失 (TW) : 崩壊熱の除去に失敗して炉心損傷に至るグループ
- ・高圧・低圧注水機能喪失 (TQUV) : 低圧注水に失敗して炉心損傷に至るグループ
- ・高圧注水・減圧機能喪失 (TQUX) : 高圧注水に失敗して炉心損傷に至るグループ
- ・全交流動力電源喪失 (TB) : 電源を失うことにより炉心損傷に至るグループ
- ・原子炉停止機能喪失 (TC) : 止める機能を喪失して炉心損傷に至るグループ
- ・LOCA時注水機能喪失 (LOCA) : LOCA時に注水に失敗して炉心損傷に至るグループ



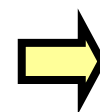
1. ③ DEC対策の有効性評価

運転中原子炉

- (a) 高圧・低圧注水機能喪失 (TQUV)
- (b) 高圧注水・減圧機能喪失 (TQUX)
- (c) 全交流動力電源喪失 (TB)
- (d) 崩壊熱除去機能喪失 (TW)
- (e) 原子炉停止機能喪失 (TC)
- (f) 原子炉冷却材喪失時注水機能喪失 (LOCA)**
- (g) インターフェイスシステムLOCA



DEC対策設備の機能により炉心損傷に至らず



大LOCAではDEC対策設備が機能しても炉心損傷

運転停止中原子炉

- (a) 崩壊熱除去機能喪失
- (b) 全交流動力電源喪失
- (c) 原子炉冷却材の流出
- (d) 反応度の誤投入



炉心損傷に至らず

使用済燃料プールの水位低下

(参考) 原子力災害対策指針の各EAL (10条/15条相当事象) は、確率論的リスク評価 (PRA) の知見等を踏まえて放出時刻及び放出量の観点から網羅的に抽出されたこれらの事故シナリオグループに対応又は包含される

1. ③ 有効性評価結果を踏まえたフィルタベントを使用する事故シナリオ

	1. 基本ケース (設計ベース対策設備多重故障)	2. 応用ケース (設計ベース対策設備多重故障+DEC対策設備単一故障)	3. 感度解析ケース (応用ケースを超過)	参考ケース (新潟県ご要望事項)
(a) T Q U V (冷やす(低圧)機能の失敗)	炉心損傷せず (復水移送ポンプ) ※ () 内は期待できる対策設備	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(4時間後)) (大LOCAに包含)	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(6時間後)) (大LOCAに包含)	炉心損傷+フィルタベント (消防車格納容器注水(4時間後)) 追加シナリオ(3)(29頁～33頁) ※炉心注水不能を仮定
(b) T Q U X (冷やす(高圧)機能の失敗)	炉心損傷せず (減圧強化対策)	炉心損傷 (フィルタベントなし) (現場での手動減圧)	—	—
(c) T B (SBO) (電源機能の失敗)	炉心損傷せず (増強された蓄電池で原子炉隔離時冷却系の運転継続)	炉心損傷せず (消防車炉注水(4時間後))	—	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(12時間後)) 追加シナリオ(2)(24頁～28頁) ※福島第一事故の類似ケース
(d) T W (除熱機能の失敗)	炉心損傷せず (原子炉隔離時冷却系+フィルタベント)	炉心損傷せず (原子炉隔離時冷却系+耐圧強化ベント)	—	—
(e) T C (止める機能の失敗)	炉心損傷せず (代替制御棒挿入+再循環ポンプトリップ)	炉心損傷せず (再循環ポンプトリップ+ほう酸水注入系)	—	—
(f) 大 L O C A (LOCA時の注水機能の失敗)	炉心損傷+フィルタベント (ガスタービン発電機+復水移送ポンプ) (10頁～14頁参照)	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(4時間後)) (追加シナリオ(1) 15頁～20頁参照)	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(6時間後)) (大LOCA応用ケースに包含)	—

※「2. 応用ケース」で炉心損傷後ベントに至るケースについて、「3. 感度解析ケース」として確認

1. ③ 有効性評価結果に基づく事故シナリオの選定（基本ケース）

大破断LOCAシナリオは、設計ベースの安全機能の喪失を仮定すると、DEC対策設備が機能しても炉心損傷を回避できず、第4層と第5層による対策が必要となる

➤ 第4層：事故のマネジメント

【ガスタービン発電機による給電＋復水移送ポンプによる代替原子炉注水及び代替格納容器スプレイ】により、放射性物質の格納容器閉じ込め時間を確保し、
【フィルタベント】を通じたベントにより長期に及ぶ土地汚染を防止

➤ 第5層：防災

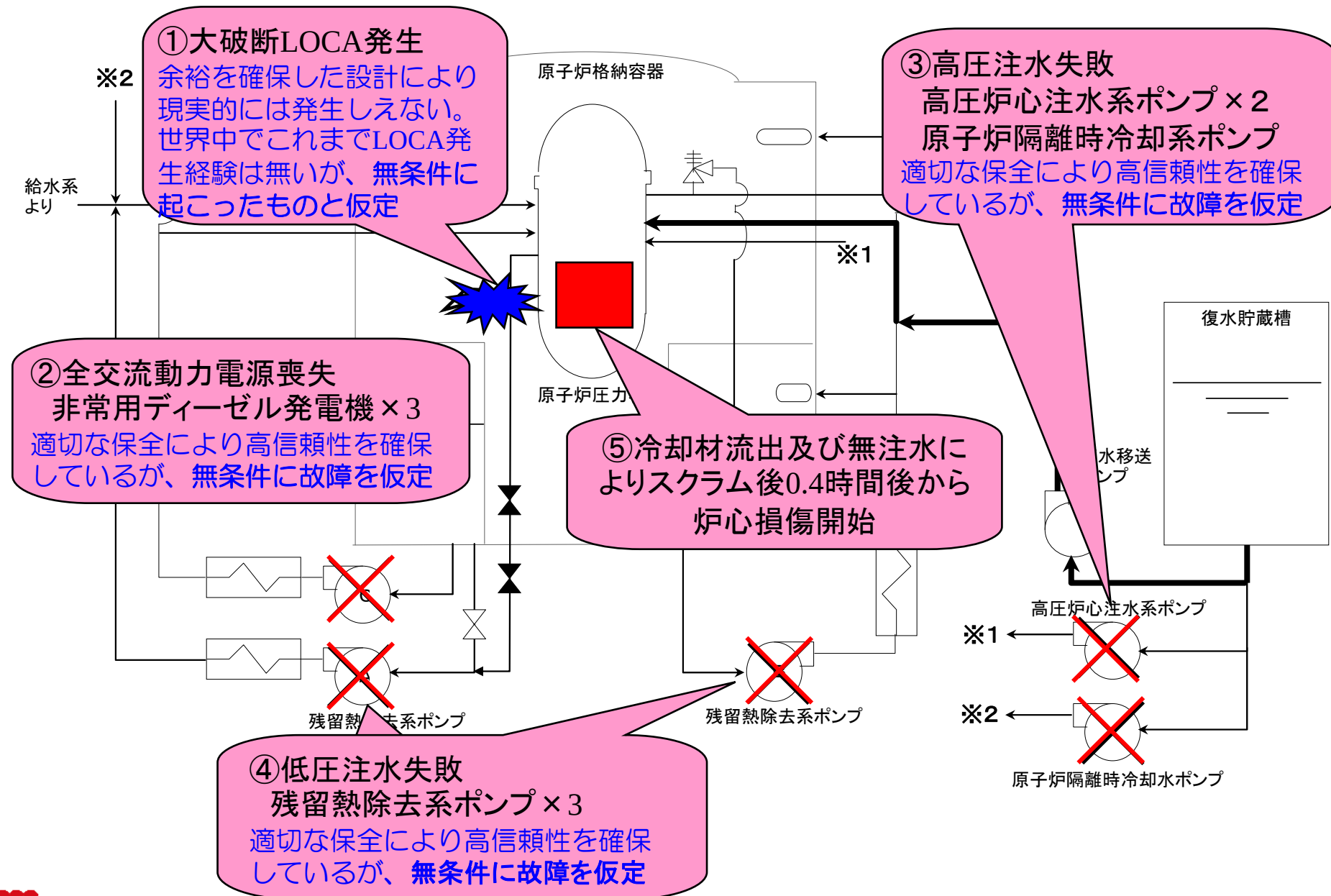
第4層で確保した時間と、避難等の措置により、地域の皆さまの安全を確保

【DEC対策設備が共通する要因により設計ベース設備と共倒れしない理由】

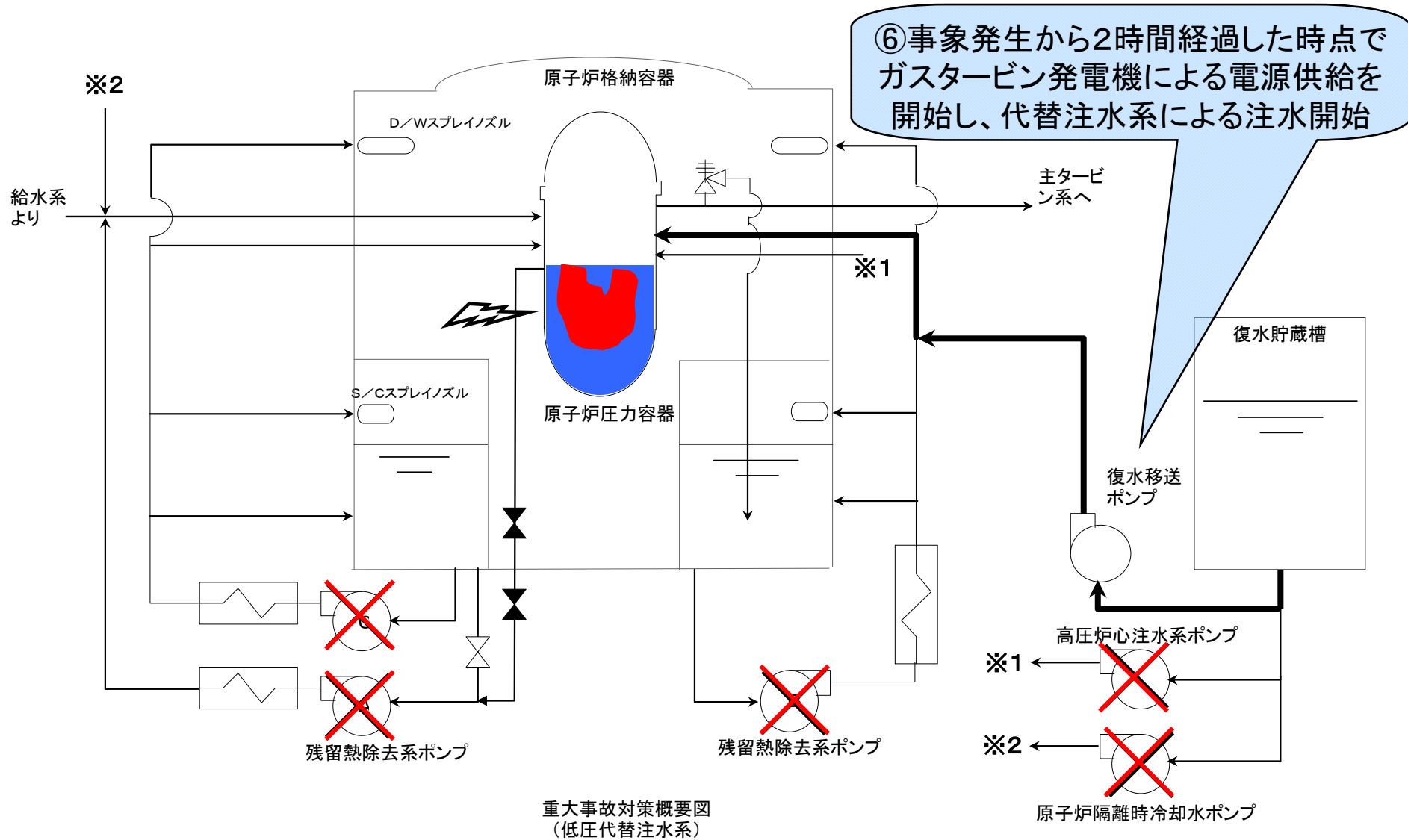
- ✓ ガスタービン発電機：屋外の高台に配置しており、共通要因によって非常用ディーゼル発電機と共倒れしない
- ✓ 復水移送ポンプ：ポンプの運転に冷却水を必要とせず、個別に区画化されており、さらに駆動に必要な電源も守られることから、共通要因によってECCSと共倒れしない
- ✓ フィルタベント：動作に必要な弁操作は遮蔽壁の外側から操作可能であり、共通要因によって第3層の冷やす機能と共倒れしない

設計ベース対策設備が多重故障する各事故シナリオのうち、DEC対策設備が機能しても炉心損傷及びフィルタベントを伴う「大LOCA＋全ECCS機能喪失＋全交流動力電源喪失(SBO)」シナリオを防災の事故シナリオの基本ケースとして提案

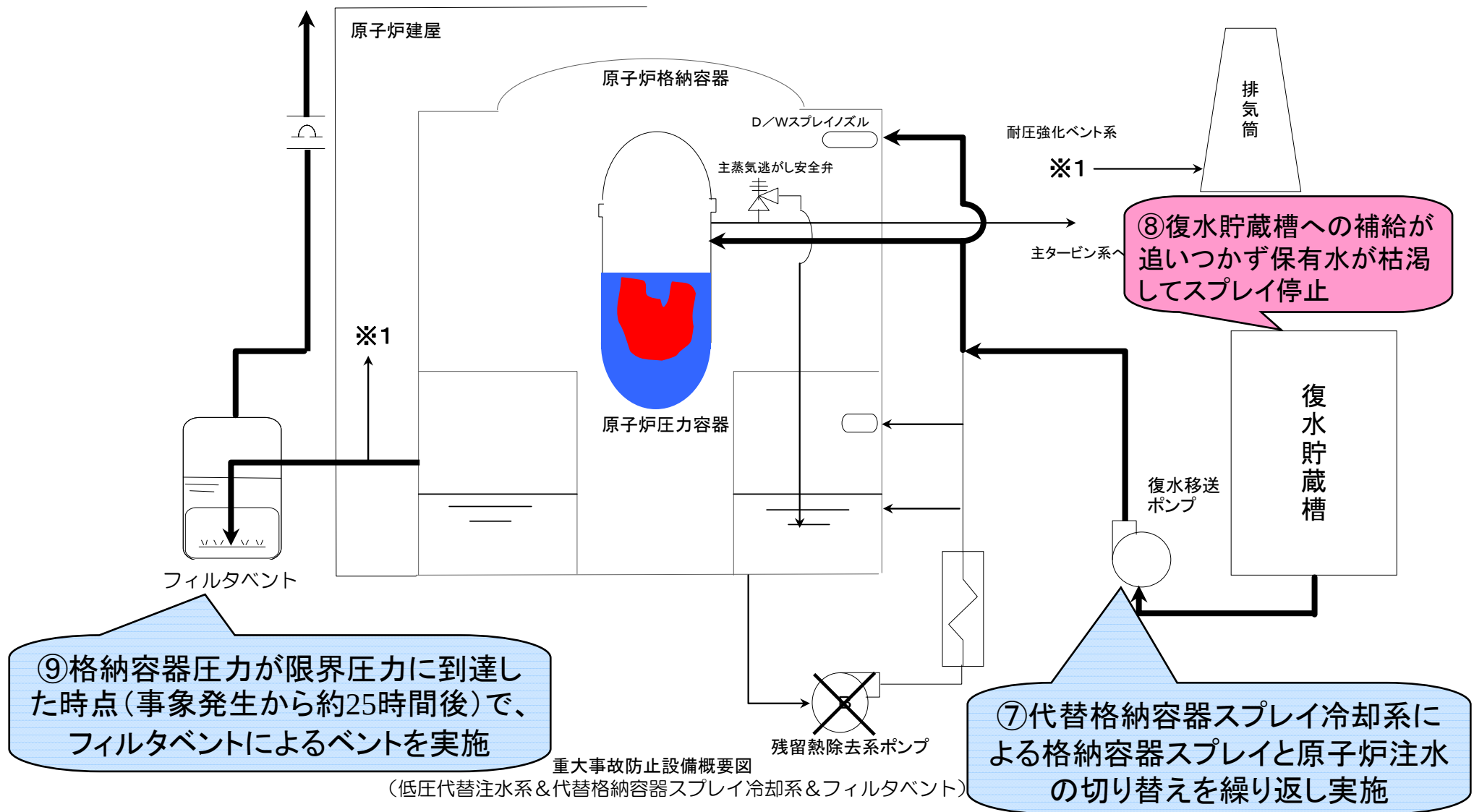
1.③「大LOCA+全ECCS機能喪失+SBO」シナリオ（基本ケース）の事象進展(1/4)



1.③「大LOCA+全ECCS機能喪失+SBO」シナリオ（基本ケース）の事象進展(2/4)

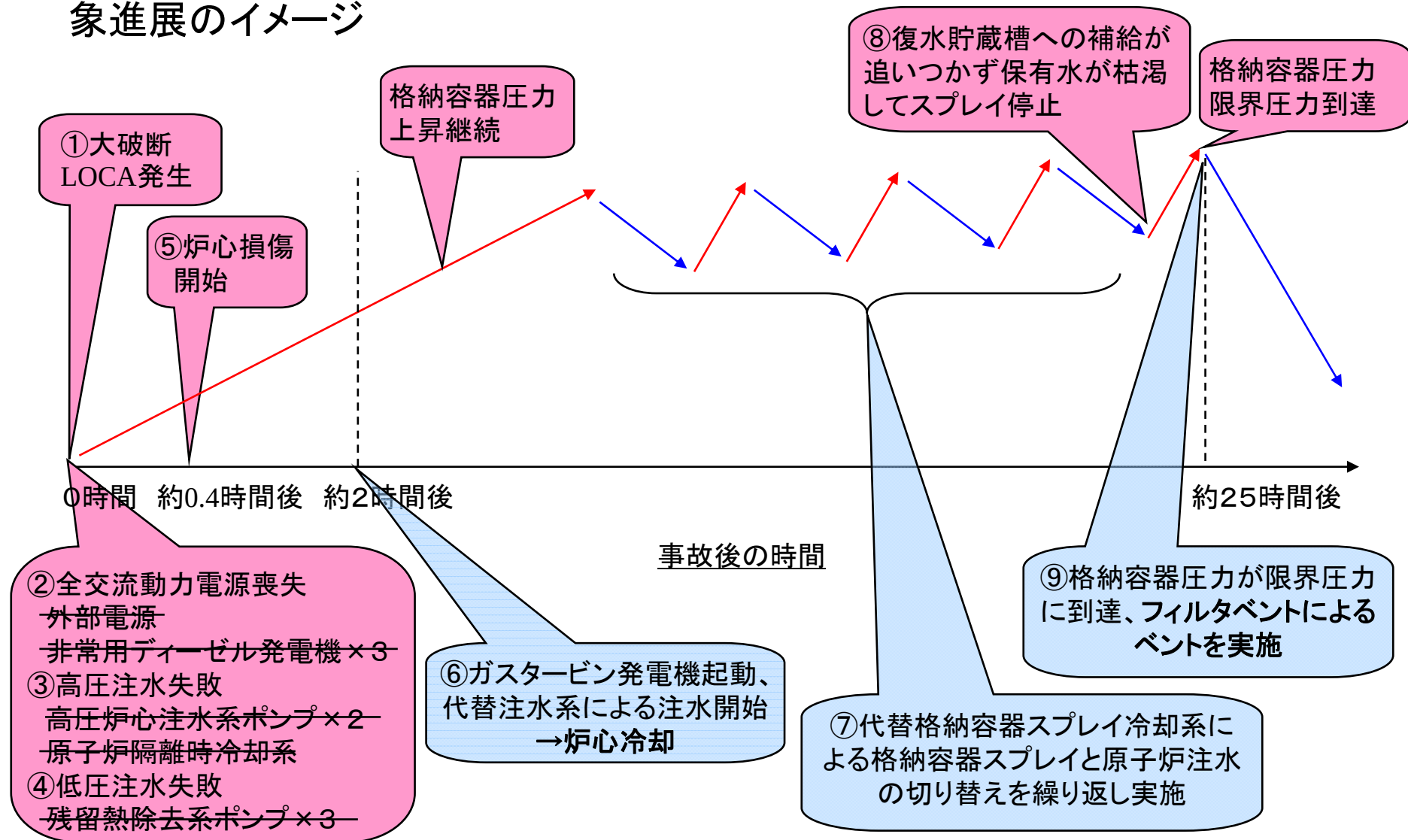


1.③「大LOCA+全ECCS機能喪失+SBO」シナリオ（基本ケース）の事象進展(3/4)



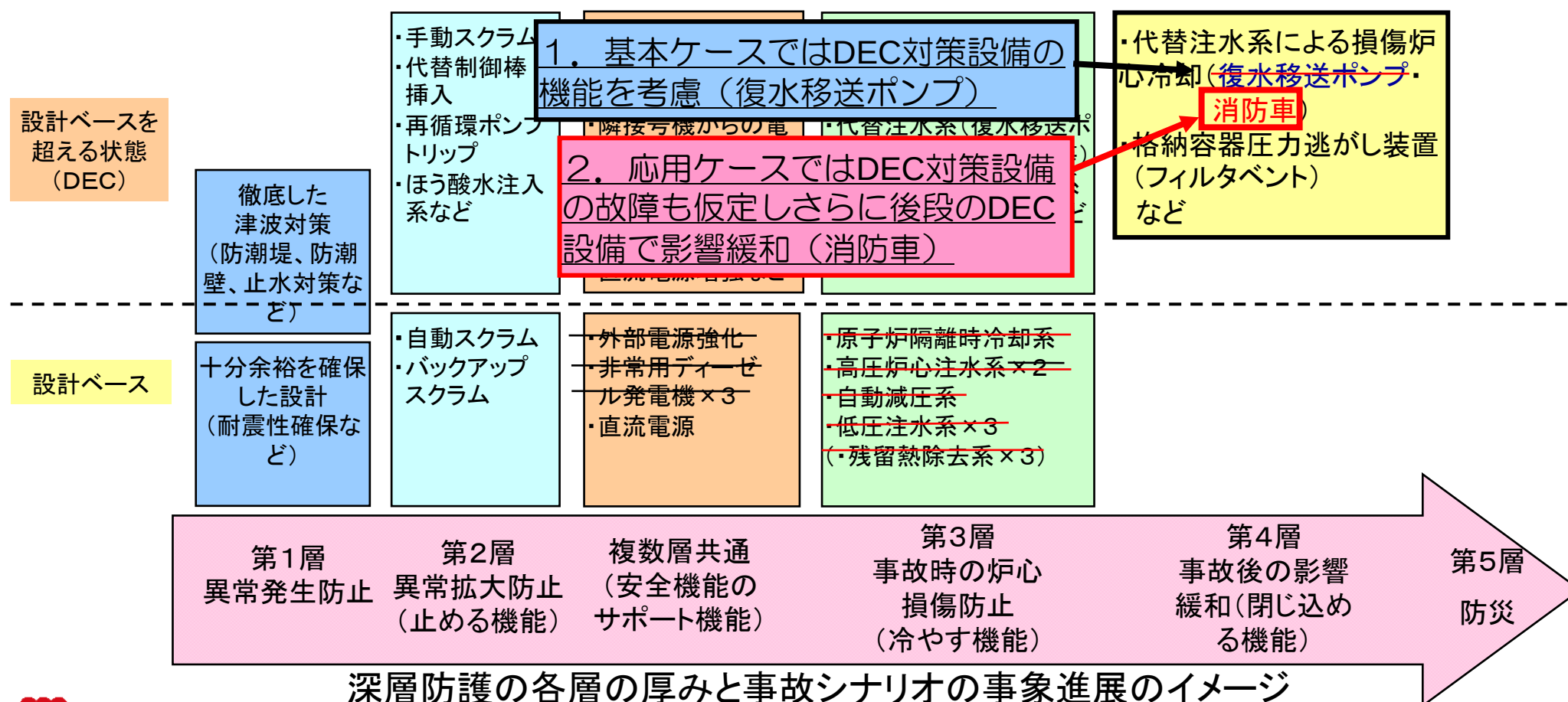
1.③「大LOCA+全ECCS機能喪失+SBO」シナリオ（基本ケース）の事象進展(4/4)

「大LOCA+全ECCS機能喪失+SBO」シナリオ（基本ケース）における事象進展のイメージ



2. 追加シナリオ（１）（基本ケースを超える応用ケースについて）

- 以上の防災シナリオの基本ケースに対して、DEC対策設備も単一故障し、さらに後段のDEC対策設備により事故の影響緩和を行うケースを【応用ケース】とする
（基本ケースでの復水移送ポンプが機能せず後段のDEC対策設備である消防車で注水）
- 応用ケースについては、後段のDEC対策設備については実力ベースでの機能を考慮
（消防車の注水開始時間は実力ベースの時間を適用）



2. 追加シナリオ（1）（応用ケース 新潟県からのご要望事項）

DEC対策設備の機能喪失も仮定した追加シナリオ（その1）

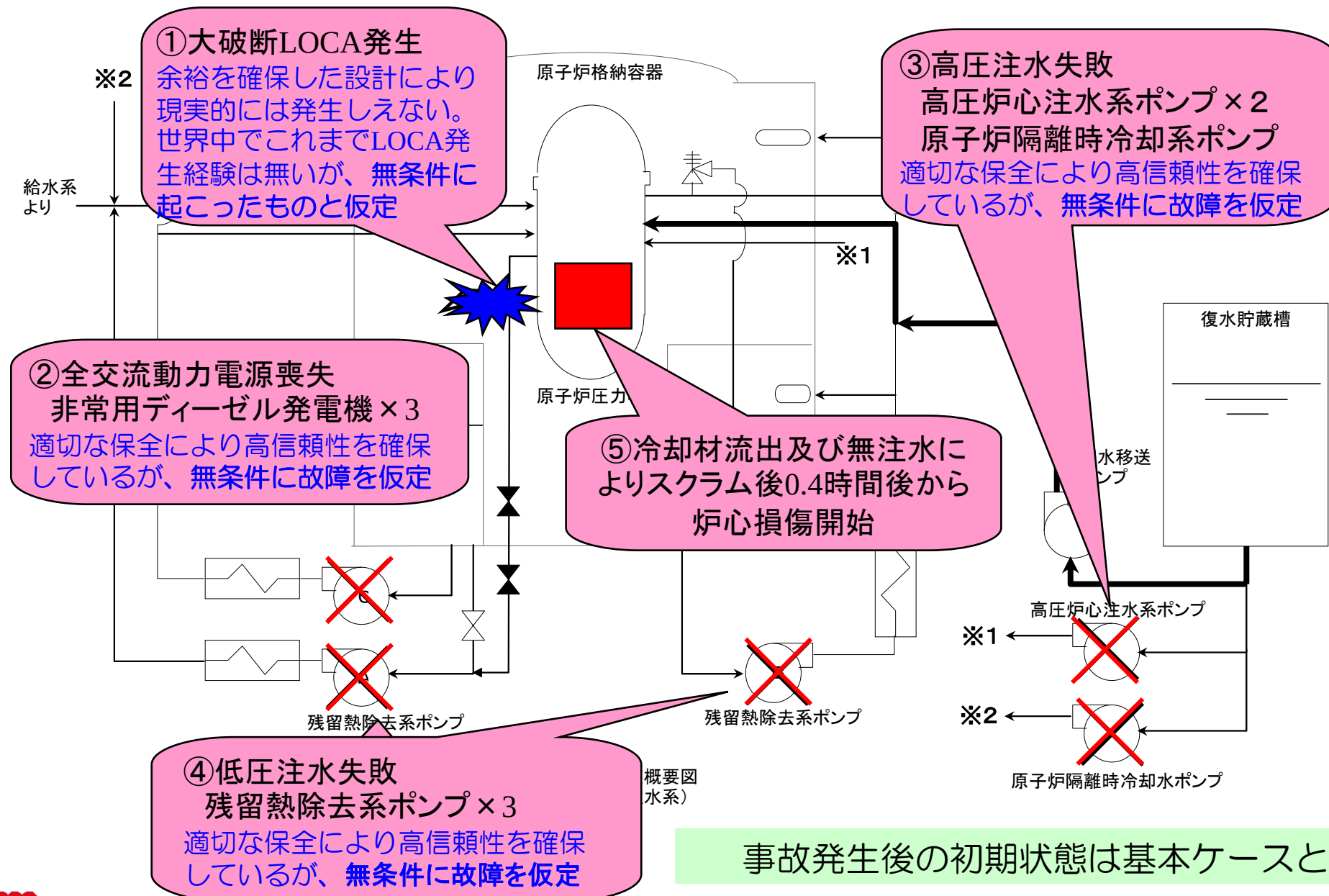
「大LOCA＋全ECCS機能喪失＋SBO＋消防車注水」シナリオ

- 「大LOCA＋全ECCS機能喪失＋SBO」シナリオ（基本ケース）の事象進展に加えて、DEC対策設備であるガスタービン発電機及び代替注水系（復水移送ポンプ）等の機能喪失も無条件に仮定する
 - 消防車による注水は、事象発生から約4時間後に成功するものと仮定する
- 「防潮堤が無いという前提で津波にて発生する瓦礫が全てアクセスルート上に集積する」という保守的な条件でも、最大4時間程度で消防車注水が可能

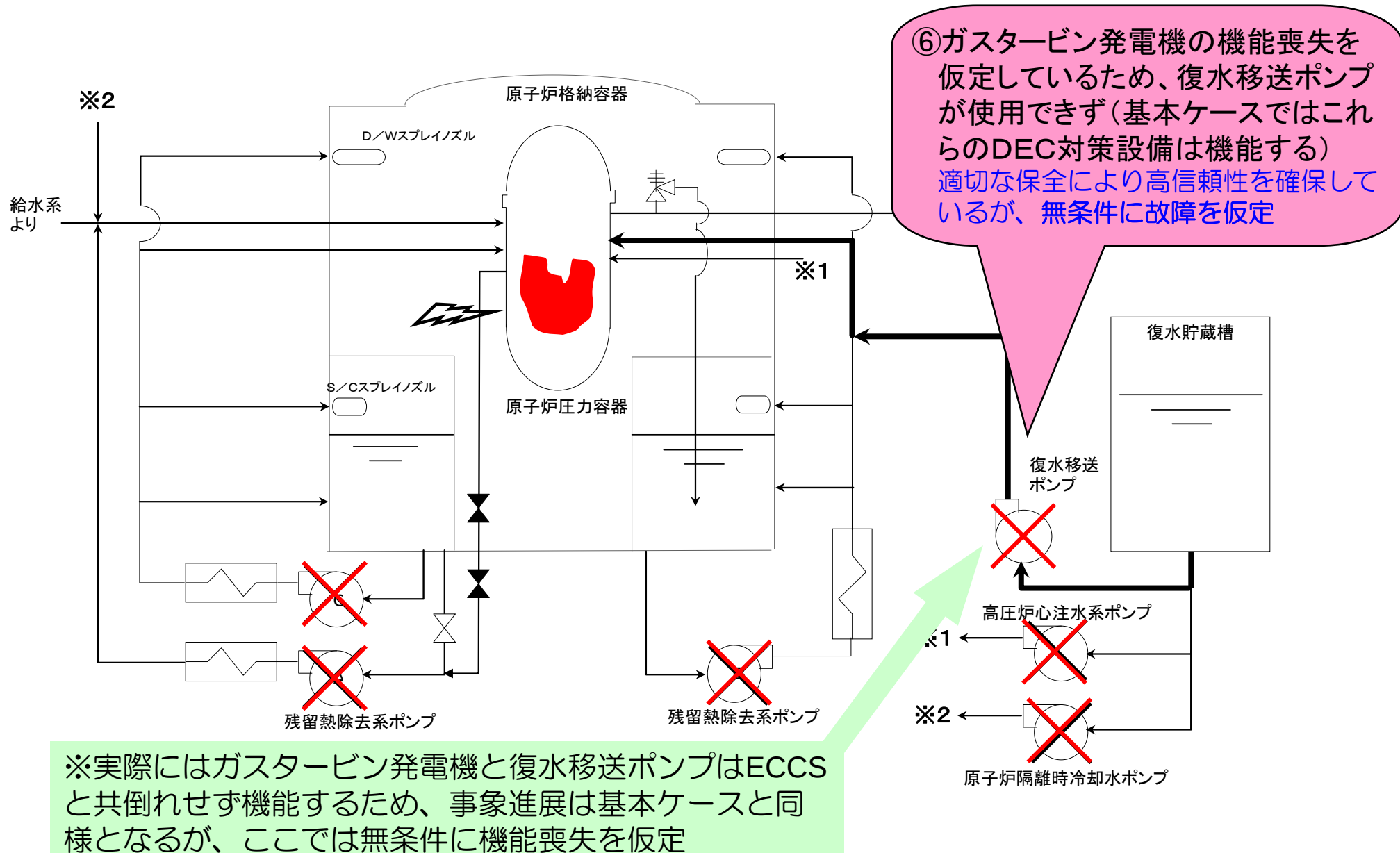
事象進展の概要

- 大破断LOCA＋全ECCS機能喪失＋全交流動力電源喪失により、原子炉が無注水となり、炉心損傷開始
- 事象発生後、約4時間後に消防車による原子炉注水を開始
- 原子炉注水を継続するが、事象発生から約20時間後に格納容器圧力が限界圧力に到達し、フィルタベントによるベントを実施

2. 追加シナリオ（１）（応用ケース）の事象進展（１／４）



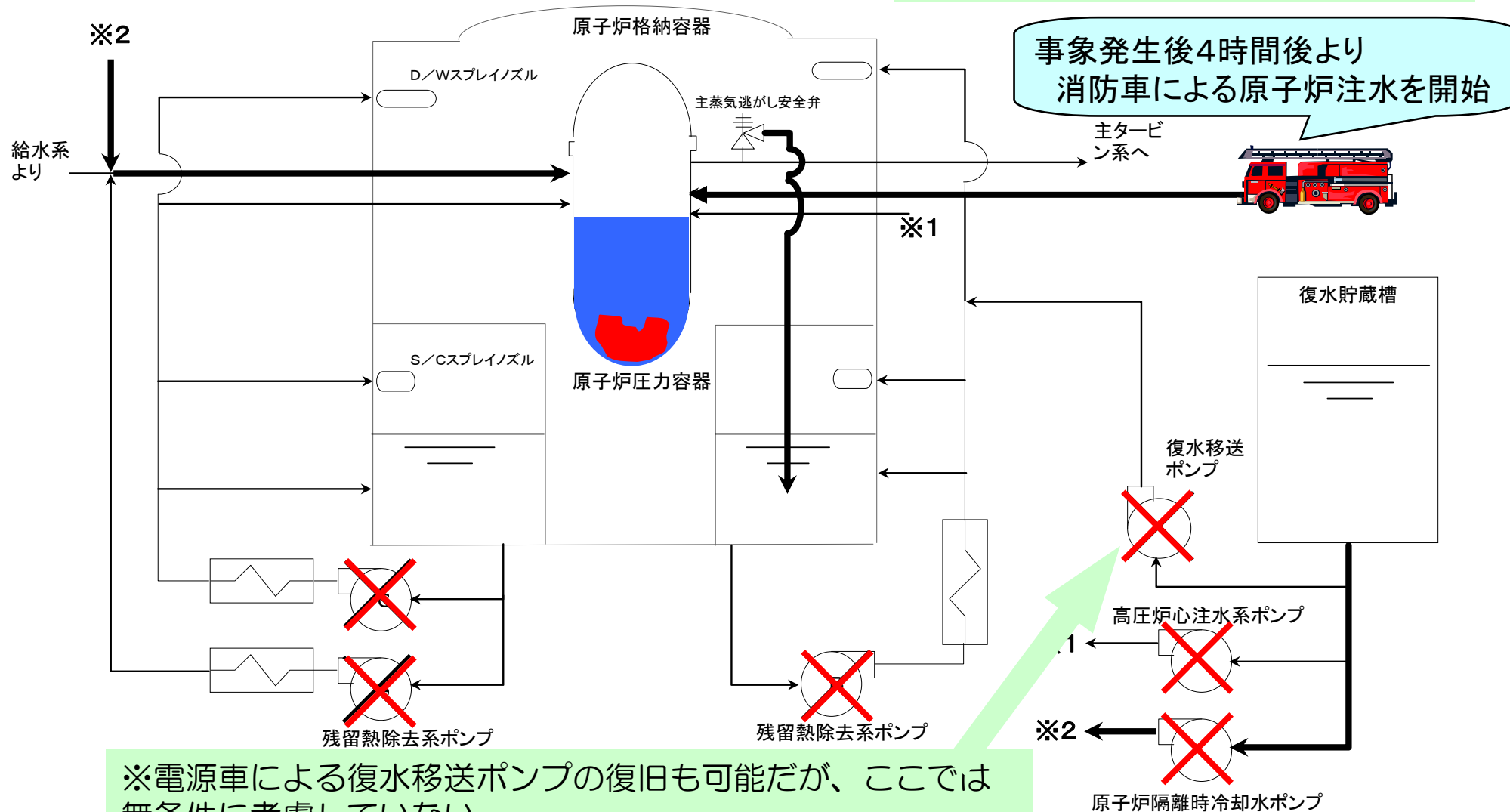
2. 追加シナリオ（1）（応用ケース）の事象進展（2／4）



2. 追加シナリオ（１）（応用ケース）の事象進展（３／４）

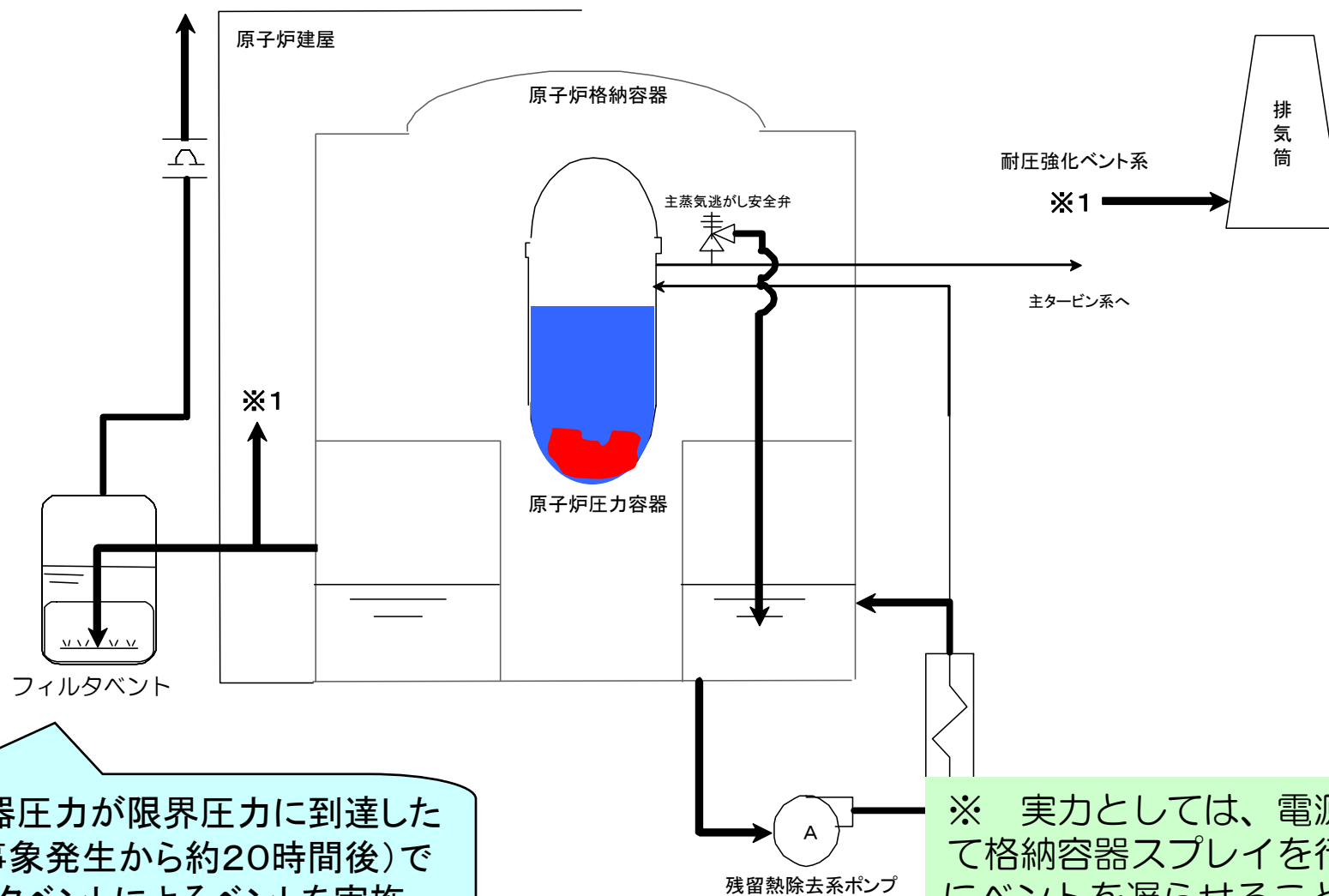
※ 実力として、保守的に評価しても
最大４時間程度で注水が可能

事象発生後４時間後より
消防車による原子炉注水を開始



※電源車による復水移送ポンプの復旧も可能だが、ここでは
無条件に考慮していない

2. 追加シナリオ（１）（応用ケース）の事象進展（４／４）



格納容器圧力が限界圧力に到達した
時点(事象発生から約20時間後)で
フィルタベントによるベントを実施

重大事故防止設備概要図
(フィルタベント&格納容器冷却系&代替原子炉補機冷却)

※ 実力としては、電源車を接続して格納容器スプレイを行うことで更にベントを遅らせることが可能だが、ここでは無条件に考慮していない

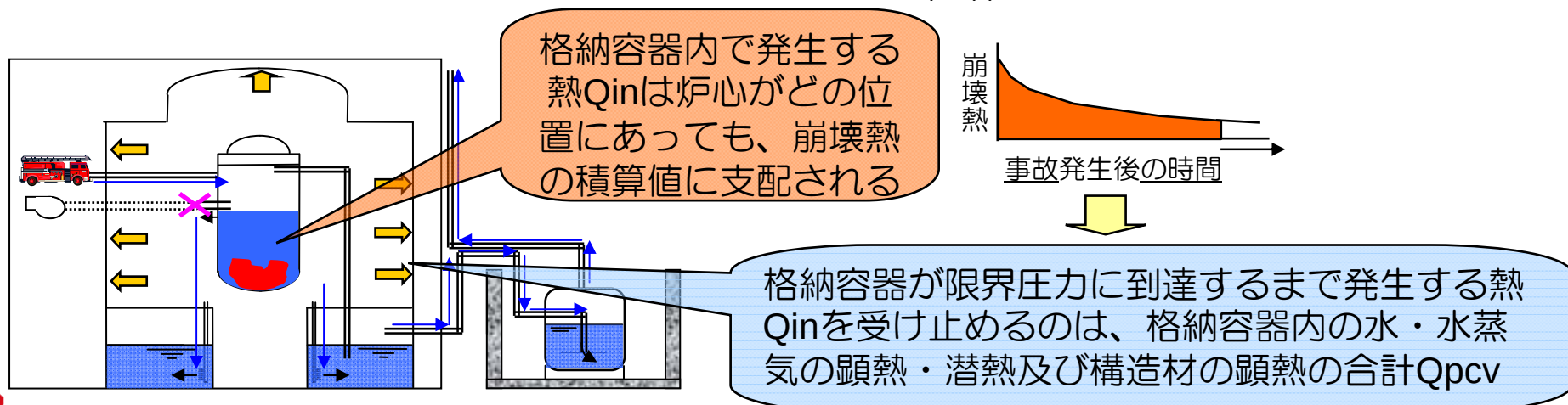
(参考) 熱バランスに基づくフィルタベント実施時間について

- 損傷した炉心や格納容器内への注水を実施した後にフィルタベントを実施する場合、ベント実施までの時間は、炉心がどの位置にあっても、結局、格納容器内で発生する熱 Q_{in} と、それを格納容器内で受け止める熱 Q_{pcv} で決まる
- Q_{in} が Q_{pcv} を上回るタイミングがフィルタベントを実施する時間であり、炉心や格納容器内への注水があれば、消防車注水の場合、事象発生後約20時間前後となる
(基本ケース25時間との差は消防車と復水移送ポンプの注水量の違いによる)

$$\overbrace{Q_{in(c)} + Q_{in(r0)} + Q_{in(h)}}^{Q_{in}} = \overbrace{Q_{pcv(w0)} + Q_{pcv(w)} + Q_{pcv(v)} + Q_{pcv(s)}}^{Q_{pcv}}$$

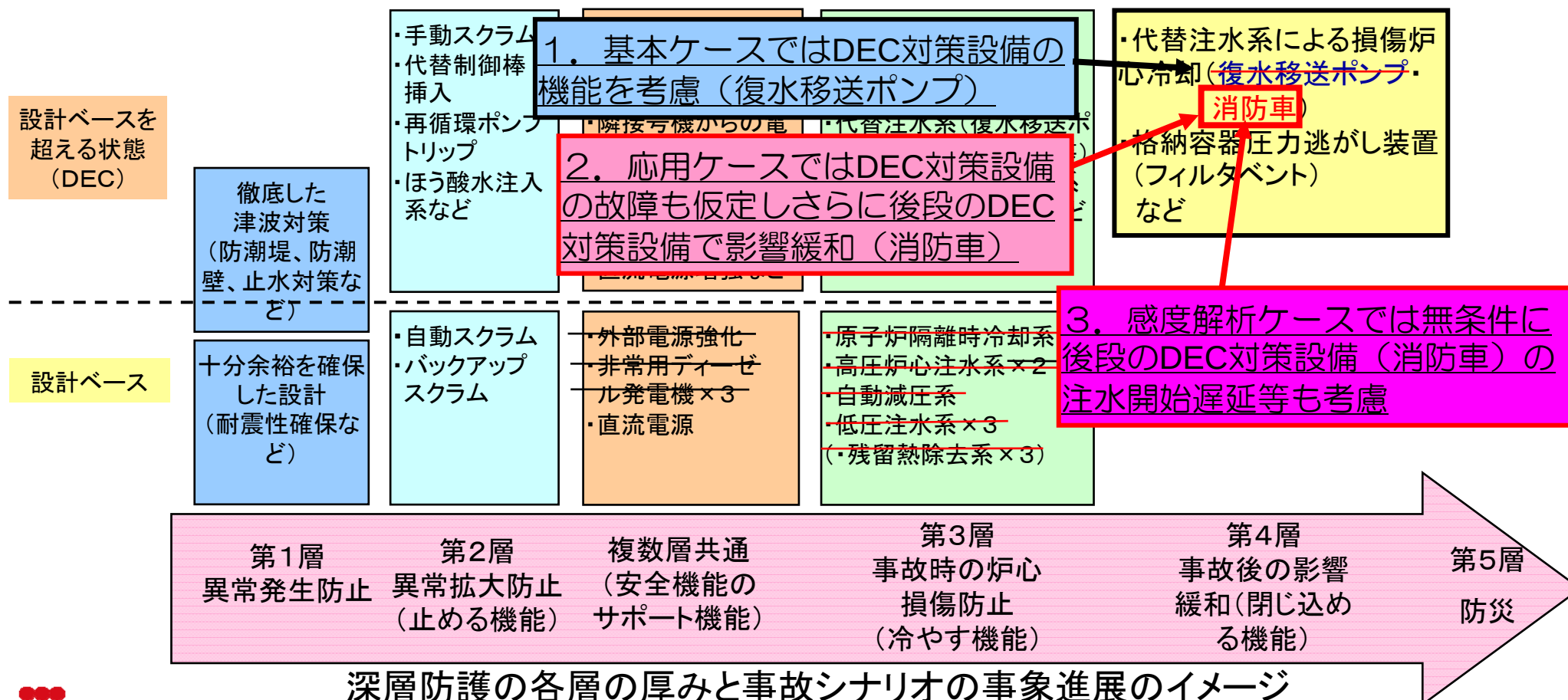
$Q_{in(c)}$: ベント実施までの崩壊熱積算値
 $Q_{in(r0)}$: 初期保有熱量
 $Q_{in(h)}$: 水-Zr反応熱

$Q_{pcv(w0)}$: 格納容器内初期水量の顕熱
 $Q_{pcv(w)}$: 累積外部注水量の顕熱
 $Q_{pcv(v)}$: 格納容器内蒸気の潜熱
 $Q_{pcv(s)}$: 格納容器内構造物の顕熱



3. 応用ケースを超える感度解析ケース

- 以上の応用ケースをさらに超過し、無条件にさらに後段のDEC対策設備の機能喪失や対応遅延等を仮定し、影響の感度を見るケースを【感度解析ケース】とする
(例：応用ケースでの消防車が実力通りの時間に注入を開始できず、注水開始遅延を考慮)
- 感度解析ケースについては、後段のDEC対策設備の機能に関する根拠は不在であるため、防災の事故シナリオではなく影響の感度を見ることに用いるのが適切と考えられる
- いずれのケースにおいても、フィルタベント実施は事象発生後約20時間前後となる



(参考) 追加シナリオ (2) (3) (参考ケース)

	1. 基本ケース (設計ベース対策設備多重故障)	2. 応用ケース (設計ベース対策設備多重故障+DEC対策設備単一故障)	3. 感度解析ケース (応用ケースを超過)	参考ケース (新潟県ご要望事項)
(a) T Q U V (冷やす(低圧)機能の失敗)	炉心損傷せず (復水移送ポンプ) ※ () 内は期待できる対策設備	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(4時間後)) (大LOCAに包含)	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(6時間後)) (大LOCAに包含)	炉心損傷+フィルタベント (消防車格納容器注水(4時間後)) 追加シナリオ(3) (29頁～33頁) ※炉心注水不能を仮定
(b) T Q U X (冷やす(高圧)機能の失敗)	炉心損傷せず (減圧強化対策)	炉心損傷 (フィルタベントなし) (現場での手動減圧)	—	—
(c) T B (SBO) (電源機能の失敗)	炉心損傷せず (増強された蓄電池で原子炉隔離時冷却系の運転継続)	炉心損傷せず (消防車炉注水(4時間後))	—	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(12時間後)) 追加シナリオ(2) (24頁～28頁) ※福島第一事故の類似ケース
(d) T W (除熱機能の失敗)	炉心損傷せず (原子炉隔離時冷却系+フィルタベント)	炉心損傷せず (原子炉隔離時冷却系+耐圧強化ベント)	—	—
(e) T C (止める機能の失敗)	炉心損傷せず (代替制御棒挿入+再循環ポンプトリップ)	炉心損傷せず (再循環ポンプトリップ+ほう酸水注入系)	—	—
(f) 大 L O C A (LOCA時の注水機能の失敗)	炉心損傷+フィルタベント (ガスタービン発電機+復水移送ポンプ) (10頁～14頁参照)	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(4時間後)) (追加シナリオ(1) 15頁～20頁参照)	炉心損傷+フィルタベント (消防車炉注水(6時間後)) (大LOCA応用ケースに包含)	—

※「2. 応用ケース」で炉心損傷後ベントに至るケースについて、「3. 感度解析ケース」として確認

DEC対策設備の機能喪失も仮定した追加シナリオ (その2)

「SBO＋原子炉隔離時冷却系注水(8時間後停止)＋消防車注水」
シナリオ (福島第一事故の類似ケース)※

- 全交流動力電源喪失 (SBO) が発生し、原子炉隔離時冷却系での注水に成功するが、約8時間後に機能喪失 (高所蓄電池への切替失敗を想定) すると仮定

実際にはDEC対策として蓄電池の増強により24時間以上注水可能であり、さらにガスタービン発電機や電源車を接続することで原子炉隔離時冷却系を長時間継続運転することは可能だが、これらのDEC対策は無条件に機能しないと仮定

- 消防車による注水は事象発生から約12時間後に開始するものと仮定

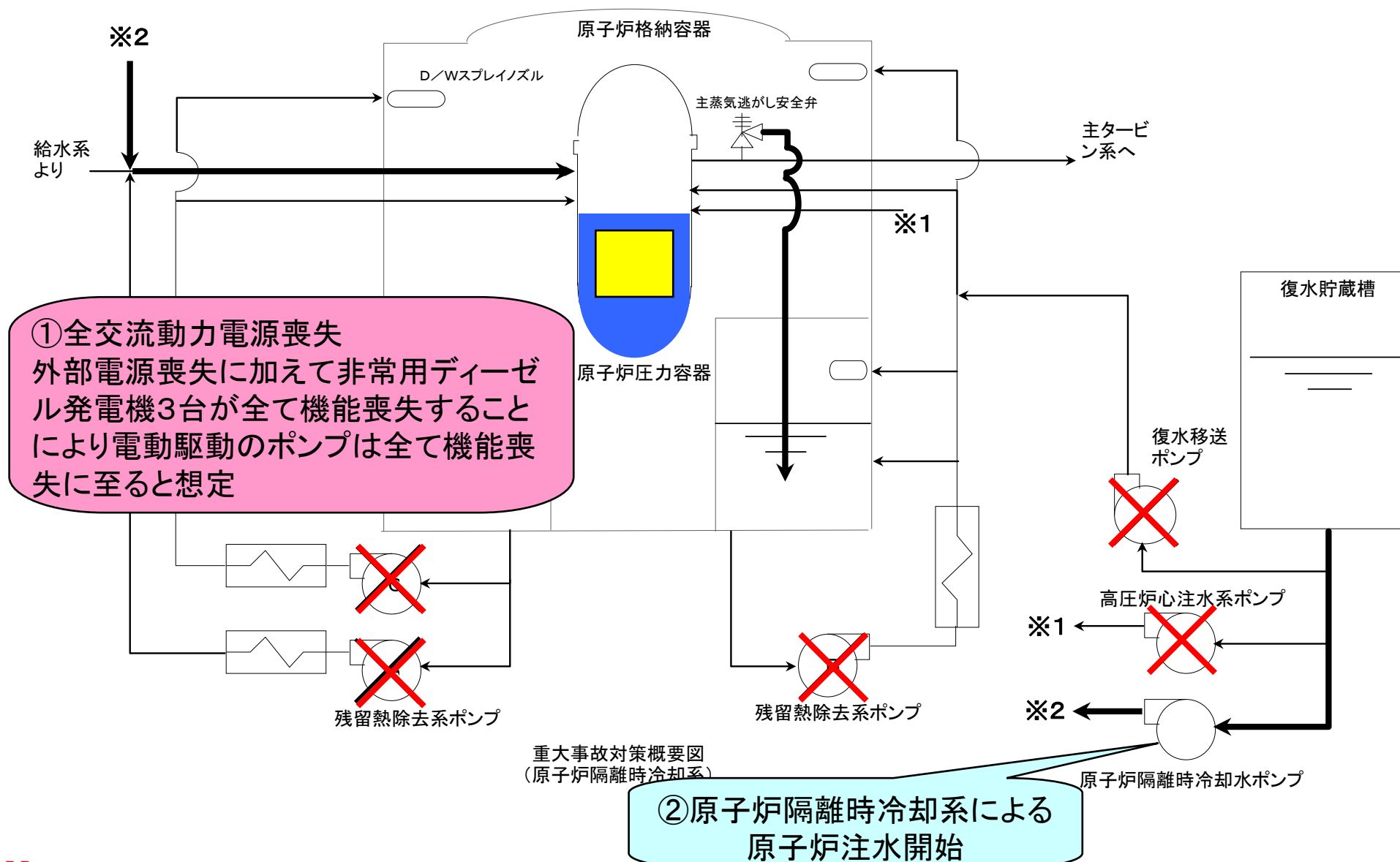
「防潮堤が無いという前提で津波にて発生する瓦礫が全てアクセスルート上に集積する」という保守的な条件でも、最大4時間程度で消防車注水が可能なため炉心損傷に至らないが、本シナリオでは炉心損傷に間に合わないタイミングを仮定

※ 本シナリオ (バト実施は事象発生から約22時間後) と福島第一事故進展の実績の相違点について

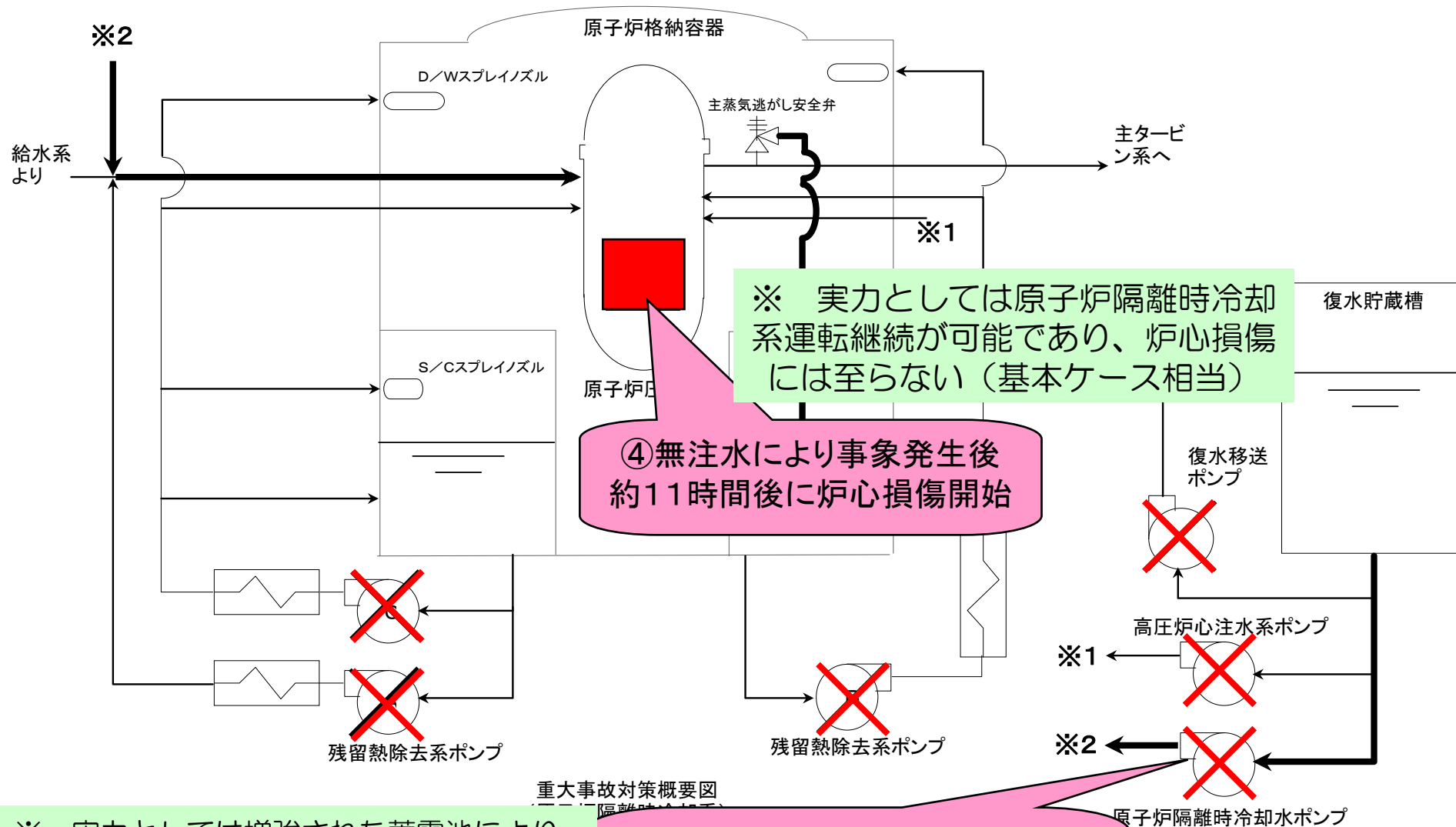
福島第一 3号機では蓄電池は喪失をまぬがれており、負荷切り離し対応により約20時間原子炉隔離時冷却系による注水を継続していた (その後高圧注水系に移行)。

福島第一 2号機では、蓄電池喪失により原子炉隔離時冷却系は制御不能となったものの、同系統により約3日間原子炉注水は継続していた。

(参考) 追加シナリオ (2) (参考ケース) の事象進展 (1 / 4)



(参考) 追加シナリオ (2) (参考ケース) の事象進展 (2/4)

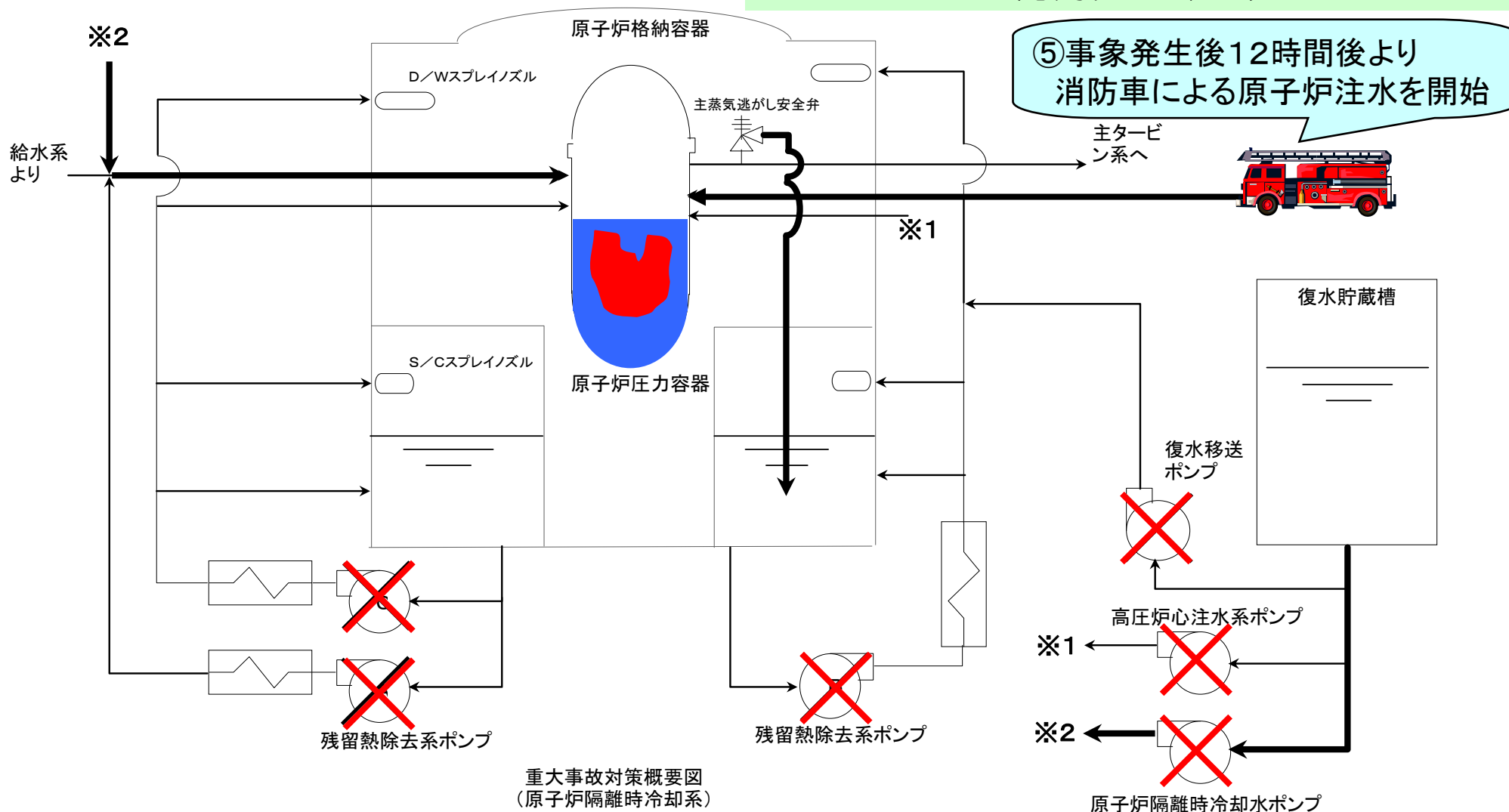


※ 実力としては増強された蓄電池により24時間まで注水継続可能であり、ガスタービン発電機や電源車により、さらに長時間運転することが可能（基本ケース相当）

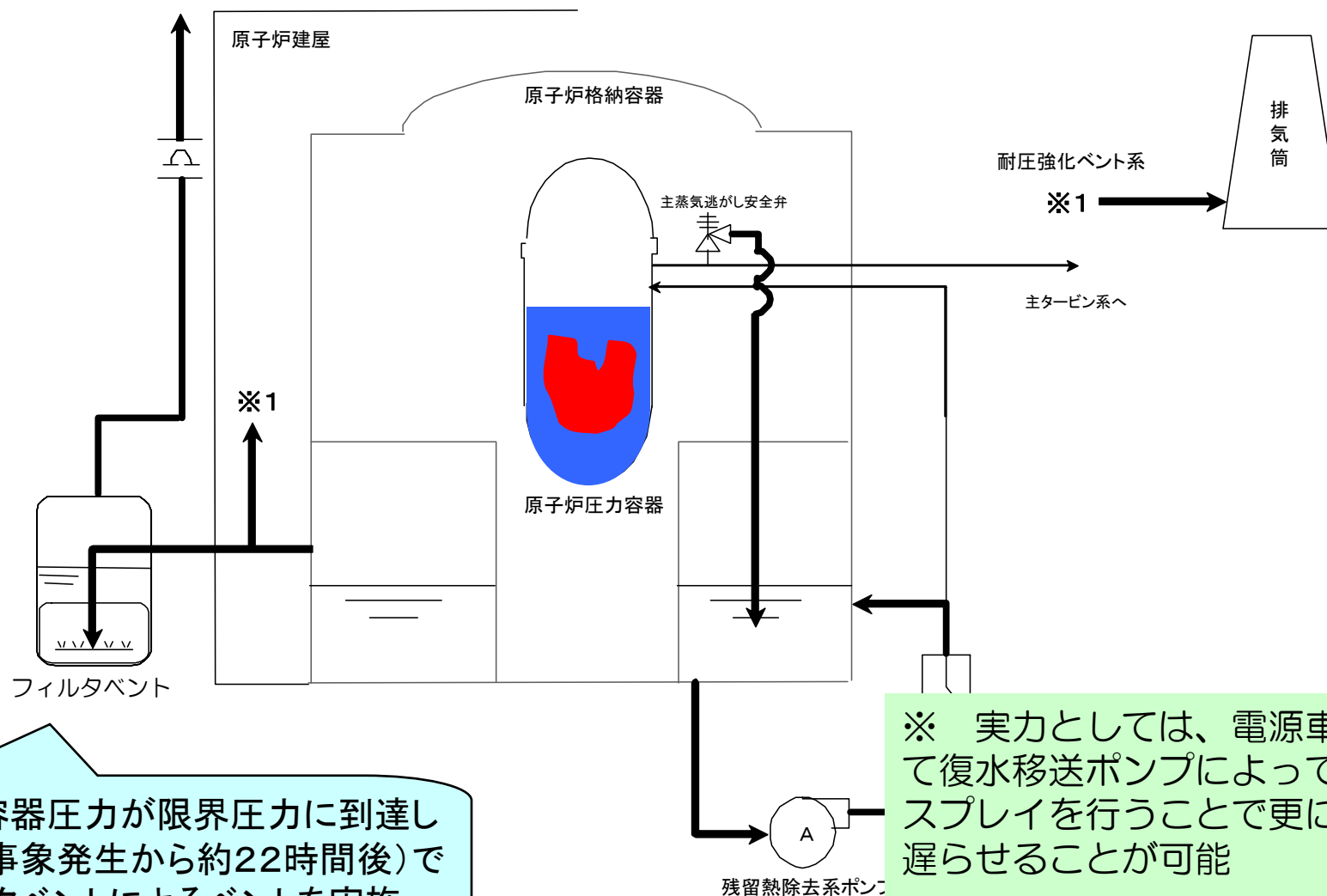
③事象発生後8時間後、原子炉隔離時冷却系が機能喪失（高所に新設した蓄電池への切替失敗を想定）

(参考) 追加シナリオ (2) (参考ケース) の事象進展 (3 / 4)

※ 実力としては保守的に評価しても最大4時間程度で注水が可能であるため、炉心損傷に至らない
(応用ケース相当)



(参考) 追加シナリオ (2) (参考ケース) の事象進展 (4 / 4)



⑥格納容器圧力が限界圧力に到達した時点(事象発生から約22時間後)でフィルタベントによるベントを実施

重大事故防止設備概要図
(フィルタベント&格納容器冷却系&代替原子炉補機冷却)

※ 実力としては、電源車を接続して復水移送ポンプによって格納容器スプレイを行うことで更にベントを遅らせることが可能

その間に設備復旧して除熱が可能になればベントを回避することも可能

(参考) 追加シナリオ (3) (参考ケース2 新潟県からのご要望事項)

DEC対策設備の機能喪失も仮定した追加シナリオ (その3)

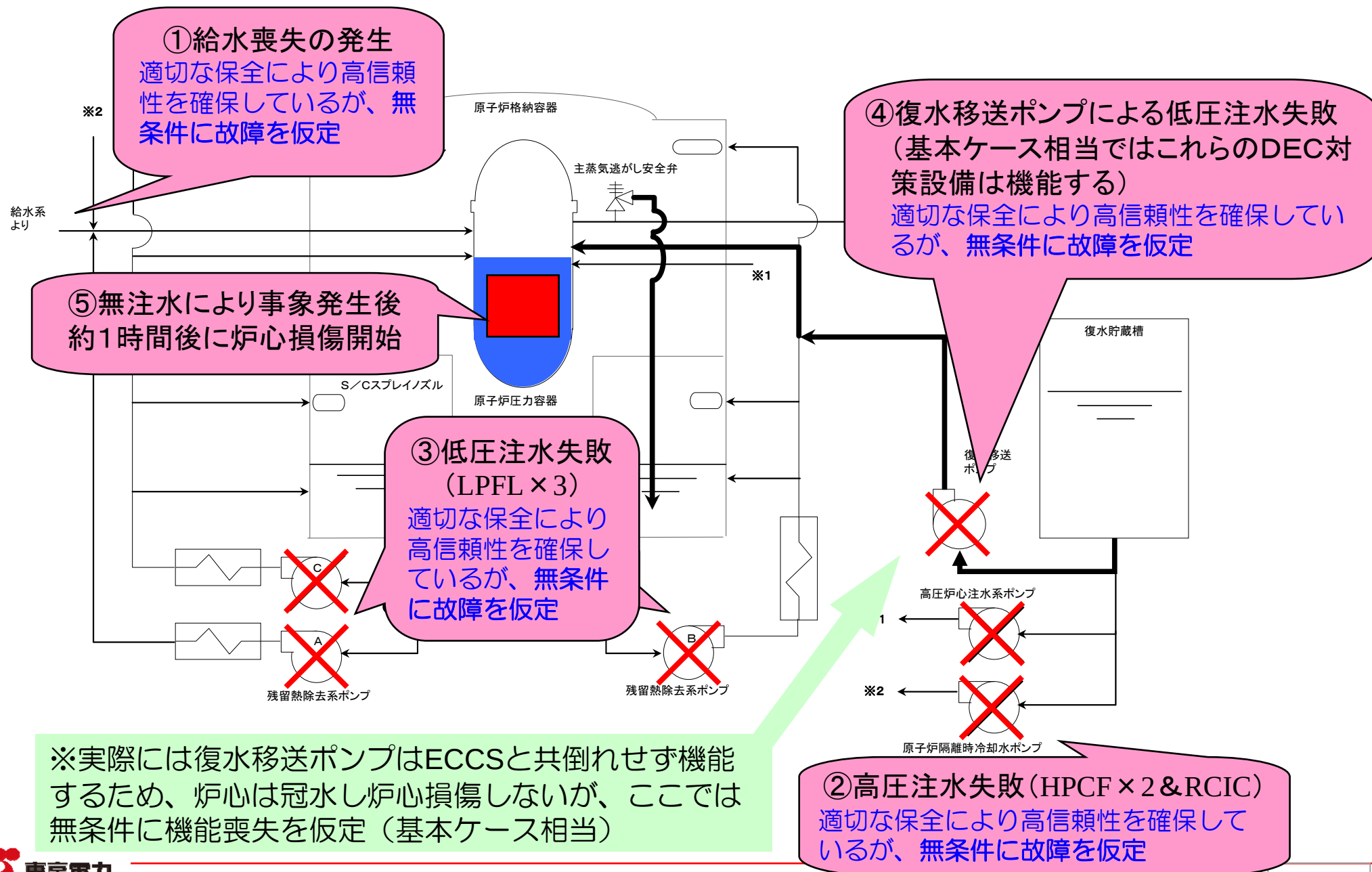
「高圧・低圧注水機能喪失＋炉心注水失敗＋消防車注水」シナリオ

- 高圧・低圧注水機能喪失 (TQUV) の事象進展において、DEC対策設備であるガスタービン発電機及び代替注水系 (復水移送ポンプ) 等の機能喪失も無条件に仮定する
- 事象発生から4時間後に消防車注水を開始するが、炉心注水に失敗すると仮定 (注入弁の開不可など) し、RPV破損に備えた下部D/W水張りを開始
電動弁であっても現場で開操作可能であるため、炉心注水することで炉心損傷に至らないが、本シナリオでは無条件に炉心注水に失敗すると仮定
- 事象発生から6時間後に消防車による下部D/W注水から上部D/Wスプレーに切り替える

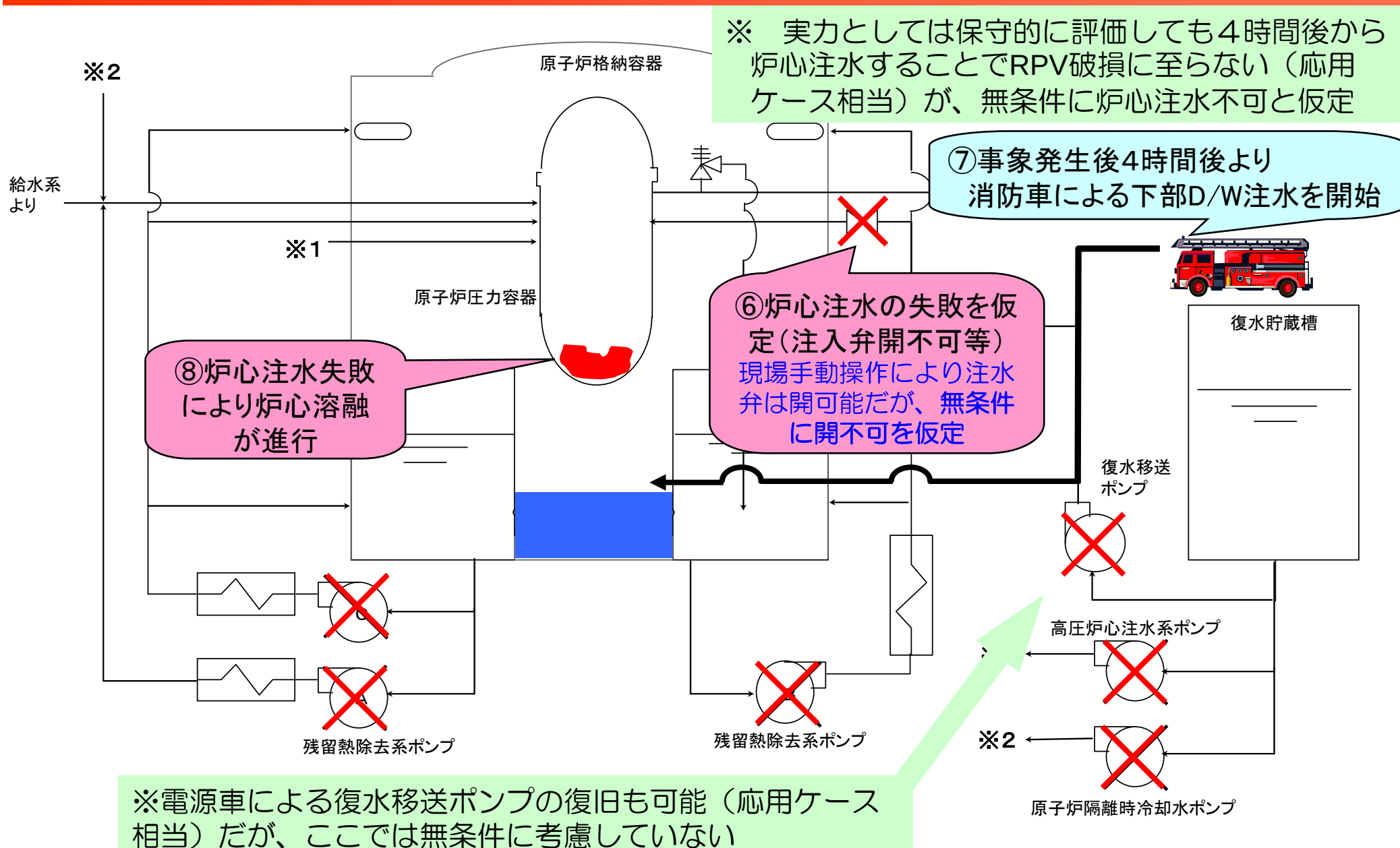
事象進展の概要

- 高圧・低圧注水機能喪失 (TQUV) ＋炉心注水失敗により、原子炉が無注水となり、炉心損傷開始
- 事象発生後、約4時間後に消防車による下部D/W注水を開始
- 事象発生後、約6時間後に消防車による上部D/Wスプレー注水を開始
- 事象発生後、約8時間後にRPV破損し、下部D/Wに熔融燃料が落下
- スプレー注水を継続するが、事象発生から約18時間後に格納容器圧力が限界圧力に到達し、フィルタベントによるベントを実施

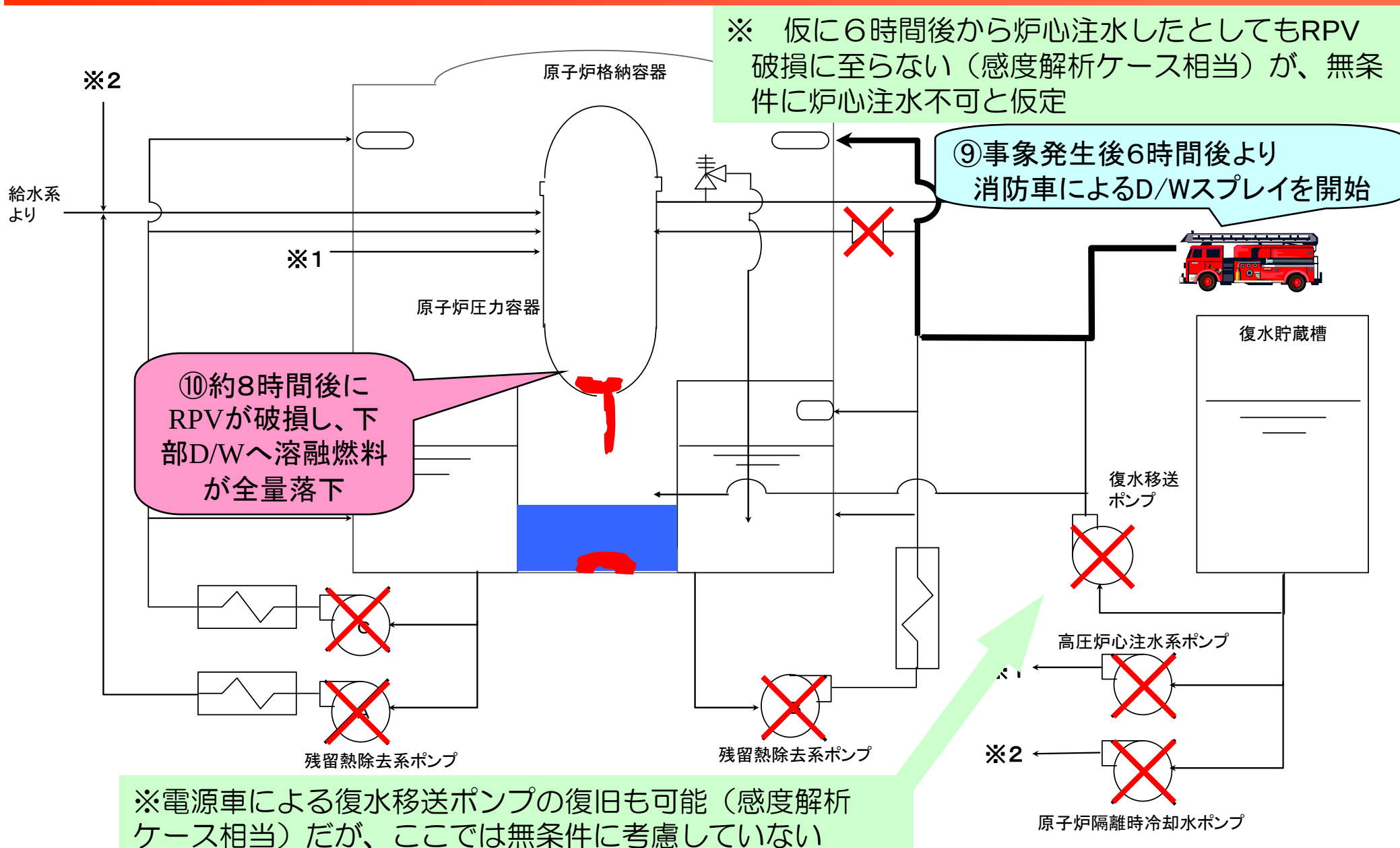
(参考) 追加シナリオ (3) (参考ケース2) の事象進展 (1 / 4)



(参考) 追加シナリオ (3) (参考ケース2) の事象進展 (2/4)



(参考) 追加シナリオ (3) (参考ケース2) の事象進展 (3/4)



(参考) 追加シナリオ (3) (参考ケース2) の事象進展 (4/4)

