

東海第二発電所

格納容器内の冷却・閉じ込め設備への対応について

平成30年6月18日

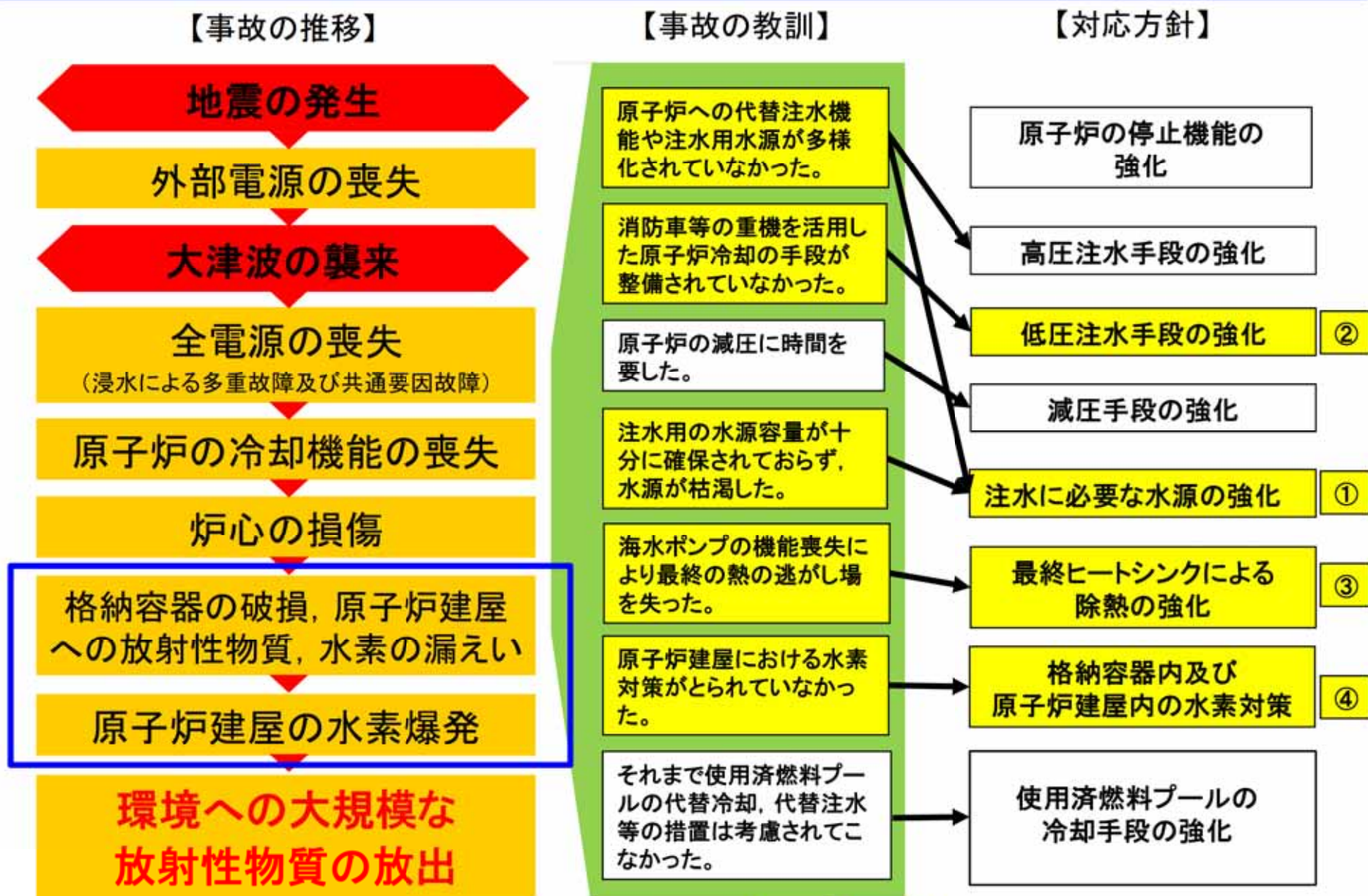
日本原子力発電株式会社

本資料のうち、 は営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

目 次

1. 福島第一原子力発電所事故の教訓 3-2-3
2. 格納容器内の冷却・閉じ込め設備の主要な変更 ... 3-2-4
3. 格納容器内の冷却・閉じ込め設備の概要 3-2-5
4. 事故の教訓に基づく安全対策 3-2-6
5. まとめ 3-2-17

1. 福島第一原子力発電所事故の教訓



2. 格納容器内の冷却・閉じ込め設備の主要な変更



対策の目的	対策の方向性	従来から備えていた対策	事故の教訓に基づく新たな安全対策	備考
(止める) ・原子炉緊急停止	原子炉の停止機能の強化	・代替制御棒挿入機能 ・ほう酸注入系 ・代替再循環ポンプトリップ機能 (低速度運転有)	・代替再循環ポンプ停止機能 (低速度運転電源停止)	強化
(冷やす) ・炉心損傷防止 ・使用済燃料プール冷却 ・格納容器内の冷却・除熱	① 注水に必要な水源の強化	・復水貯蔵タンク ・サブプレッション・プール	・代替淡水貯槽 ・西側淡水貯水設備 ・SA用海水ピット	新規
	高圧注水手段の強化	・高圧炉心スプレイ系ポンプ ・原子炉隔離時冷却系ポンプ	・高圧代替注水系	新規
	減圧手段の強化	・逃がし安全弁 ・過渡時自動減圧機能	・逃がし安全弁用可搬型蓄電池 ・非常用窒素供給系高圧窒素ポンプ	強化
	② 低圧注水手段の強化	・残留熱除去系ポンプ (格納容器スプレイ冷却系) ・格納容器下部注水(消火系)	・代替格納容器スプレイ系(常設, 可搬型) ・格納容器下部注水系(常設, 可搬型)	新規
	③ 最終ヒートシンクによる除熱の強化	・復水器 ・残留熱除去系 ・原子炉冷却材浄化系 ・耐圧強化ベント系	・緊急用海水系 ・代替循環冷却系 ・フィルタベント設備	新規
	使用済燃料プールの冷却手段の強化	・燃料プール冷却浄化系 ・残留熱除去系(プール冷却モード) ・燃料プール水位計	・常設低圧代替注水系 ・代替燃料プール冷却系 ・燃料プール監視強化	新規
(閉じ込める) ・格納容器破損防止 ・水素低減対策 ・原子炉建屋の閉じ込め機能	(冷やす)①～③と同様	・(冷やす)①～③の対策と同様	・(冷やす)①～③の対策と同様	新規
	④ 格納容器内及び原子炉建屋内の水素対策	・格納容器内の不活性化 ・可燃性ガス濃度制御系 (格納容器内の水素濃度の低減)	・可搬型窒素供給装置 (格納容器内の水素濃度の抑制) ・静的触媒式水素再結合器 (原子炉建屋内の水素濃度の低減) ・ブローアウトパネル閉止装置	新規

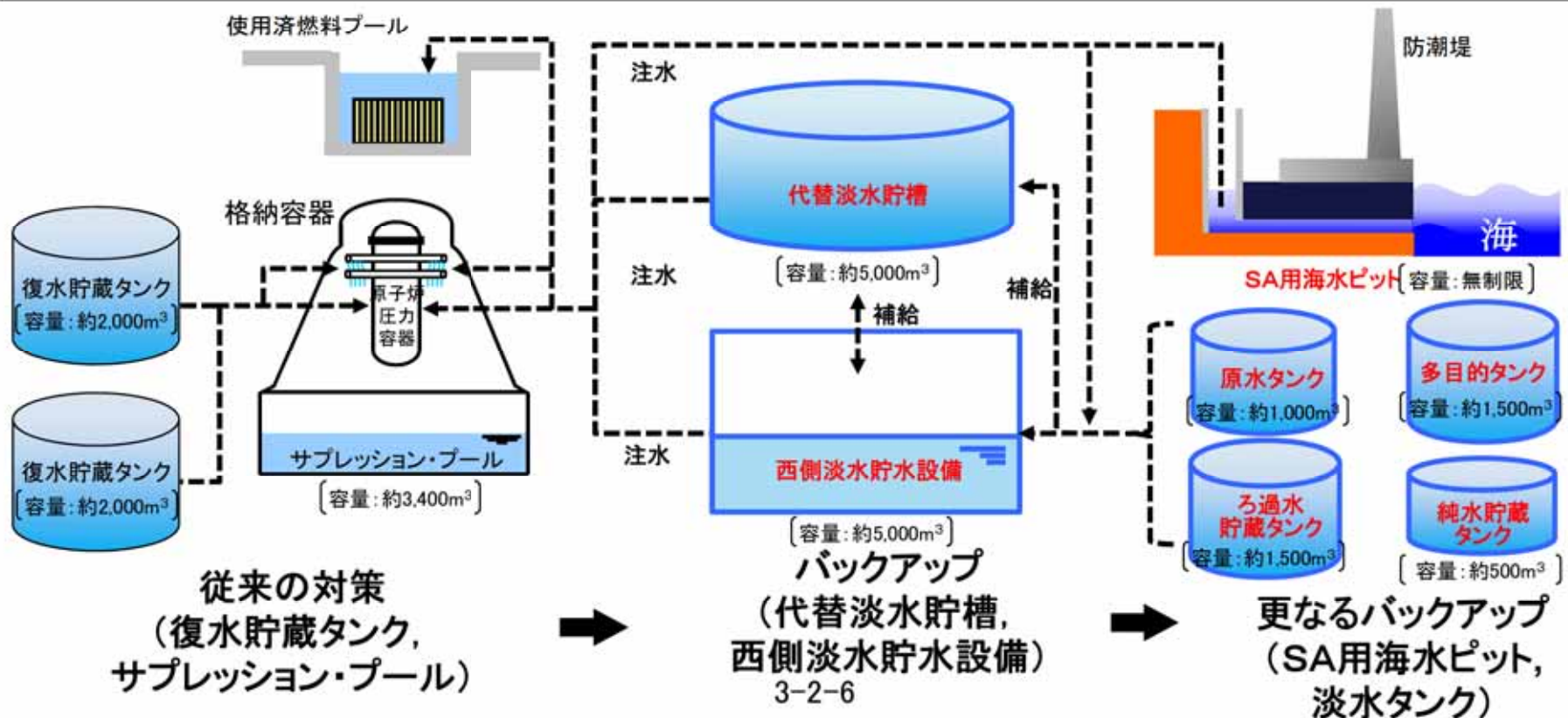
4. 事故の教訓に基づく安全対策

① 注水に必要な水源の強化



【代替淡水貯槽, 西側淡水貯水設備, SA用海水ピットの新設】

- 格納容器内を冷却し, 破損を防ぐためには, 原子炉や格納容器への注水により, 原子炉や格納容器内の圧力・温度の低下を継続的に図ることが重要。このため注水用の水源を増強する。
- 地下式の堅牢な代替淡水貯槽, 西側淡水貯水設備, SA用海水ピットを設置することで, 地震・竜巻や, 敷地に遡上する津波等の外部事象に対しても, 確実に水源を確保可能。また, 既設の各種淡水タンクも利用可能な場合には活用
- 代替淡水貯槽, 西側淡水貯水設備には, 原子炉, 格納容器及び使用済燃料プールへ7日間の注水が可能なる量を確保する。



4. 事故の教訓に基づく安全対策

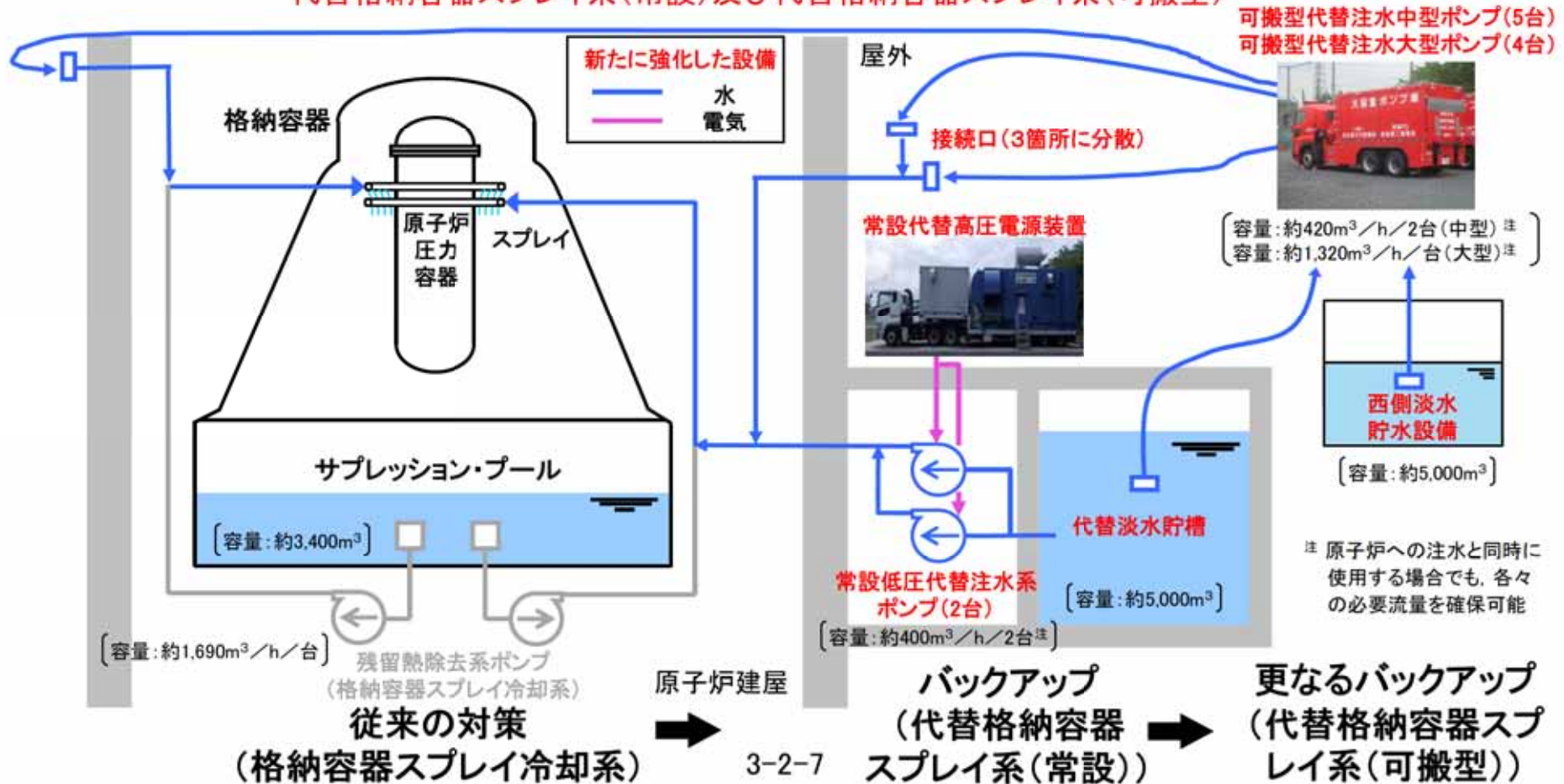
② 低圧注水手段の強化(1/4)



【代替格納容器スプレイ系の設置】

- 格納容器内の温度及び圧力を低下させる手段を増強する。
- 全交流動力電源が喪失した場合や、既存の残留熱除去系ポンプ（格納容器スプレイ冷却系）が機能喪失した場合でも、**代替格納容器スプレイ系（常設）**及び**代替格納容器スプレイ系（可搬型）**により、**代替淡水貯槽等**から格納容器内へスプレイ水の供給を継続し、格納容器内の蒸気凝縮を図ることで、**格納容器内の圧力・温度の上昇抑制を行うことが可能**

代替格納容器スプレイ系（常設）及び代替格納容器スプレイ系（可搬型）



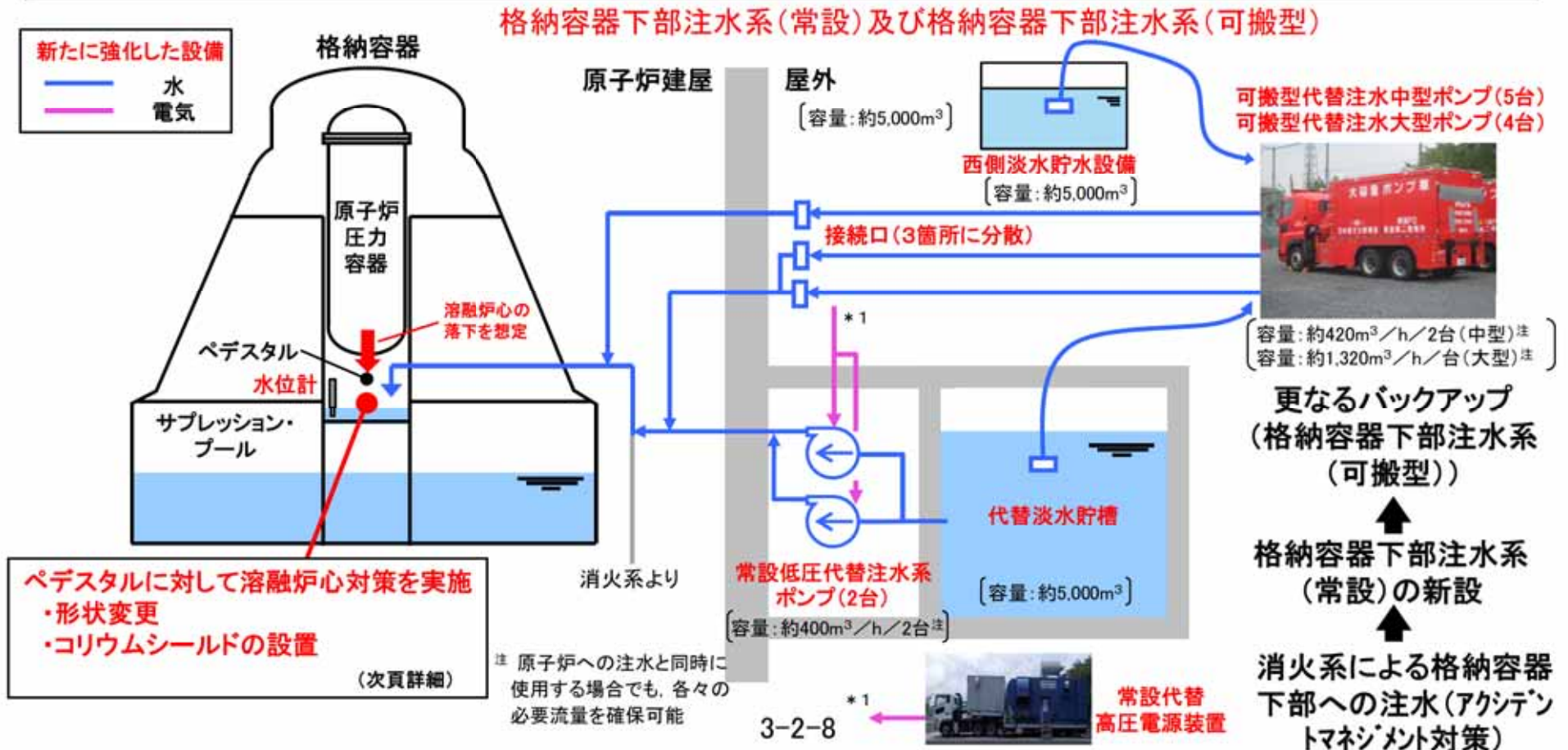
4. 事故の教訓に基づく安全対策

② 低圧注水手段の強化(2/4)



【溶融炉心を冷却する設備の設置】

- 炉心損傷が発生し、原子炉圧力容器を貫通して格納容器下部に落下した溶融炉心を冷却する設備を新設する。
- 常設低圧代替注水系ポンプを使用し、代替淡水貯槽の水を格納容器下部に注水する格納容器下部注水系(常設)を設置する。本設備は常設代替高圧電源装置からの給電が可能である。
- 更に可搬型代替注水大型ポンプを使用し、代替淡水貯槽等の水を格納容器下部に注水する格納容器下部注水系(可搬型)も設置する。
- 落下した溶融炉心を保持するため、原子炉圧力容器直下のペDESTAL形状を変更しコリウムシールドを設置



4. 事故の教訓に基づく安全対策

② 低圧注水手段の強化(3/4)

【溶融炉心対策のためのペDESTALの形状変更(コリウムシールドの設置等)】

① コリウムシールド設置

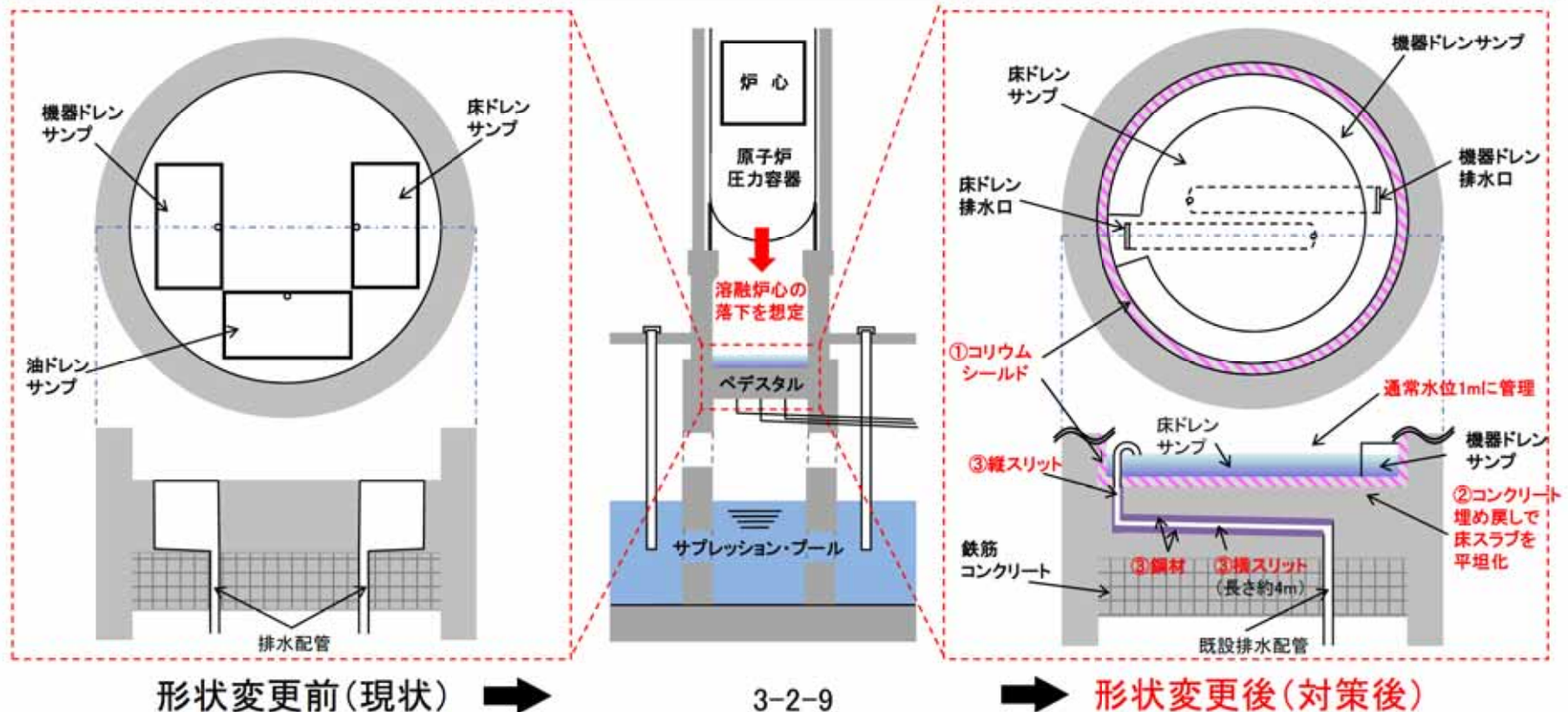
溶融炉心によるペDESTAL床侵食防止のため、耐侵食性に優れたジルコニア(ZrO_2)製コリウムシールドを設置

② 床スラブ平坦化

溶融炉心の熱負荷を平準化させるため、すべてのサンプをコンクリートで埋め戻して床スラブを平坦化し、その上部に鋼製の床・機器ドレンサンプを設置

③ 溶融炉心凝固のための排水流路形状変更

溶融炉心のサプレッション・プールへの流下防止のため、サンプの排水流路を熱容量の大きい鋼材でスリット形状に変更し、溶融炉心を流路の途中で冷却・凝固させる。



4. 事故の教訓に基づく安全対策

② 低圧注水手段の強化(4/4)

【水蒸気爆発影響抑制のためのペDESTAL水位管理対策】

① スワンネックの設置

熔融炉心落下時の水蒸気爆発の抑制及び熔融炉心冷却性確保のため、ペDESTALからの排水経路に高さ1mの**スワンネック**を設置し、**通常時のペDESTAL水位を1mで管理**

* ペDESTAL水位がより高いと水蒸気爆発の影響が増大し、水位がより低いと熔融炉心の冷却性が低下することから、両者が成立する水位1mに設定

② 異物防止柵の設置、スワンネックの多重化

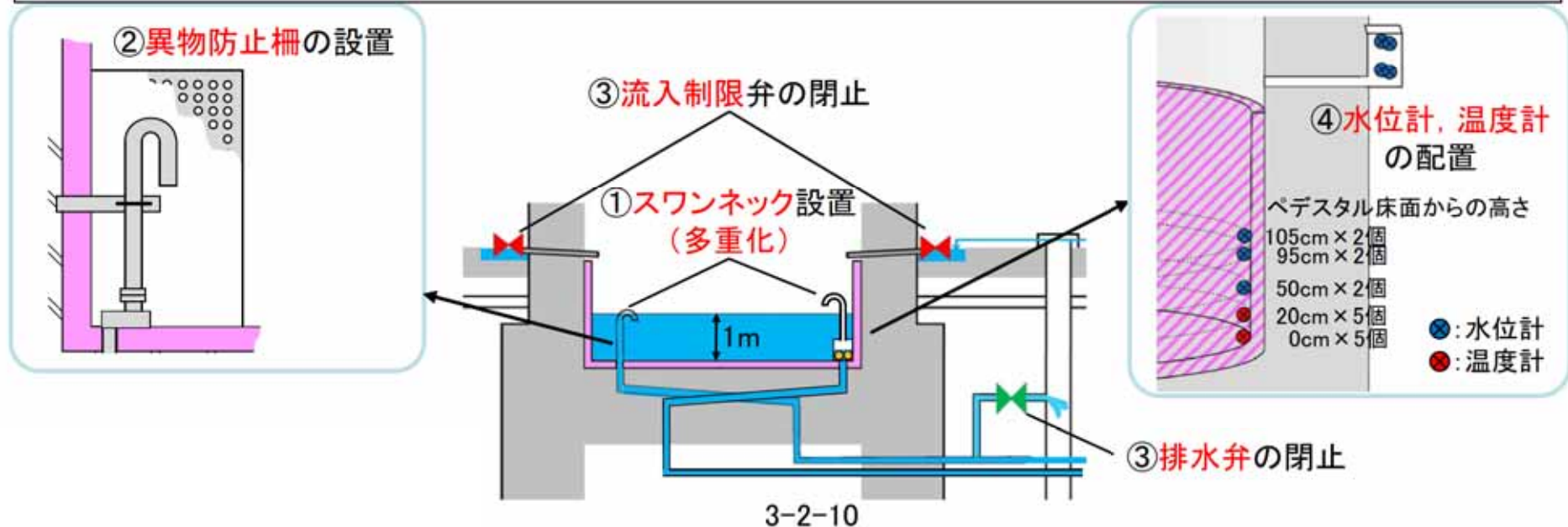
スワンネック周囲に**異物防止柵**を設置するとともに、**スワンネックを多重化**し、排水機能の信頼性を向上

③ ペDESTALへの流入制限弁、ペDESTALからの排水弁の設置

- ・事故発生時、早期に**流入制限弁**を閉止し、**意図せぬペDESTAL水位上昇を防止**
- ・ペDESTAL水位を1mに調整後、**排水弁**を閉止し、熔融炉心落下時には**確実に1mの水位を確保**

④ 水位計、温度計を設置

- ・ペDESTAL内に複数の**水位計**を設置し、ペDESTALの**水位監視**や**水位調整**に利用
- ・ペDESTAL内に複数の**温度計**を設置し、熔融炉心落下後、**速やかにペDESTAL注水開始を判断**



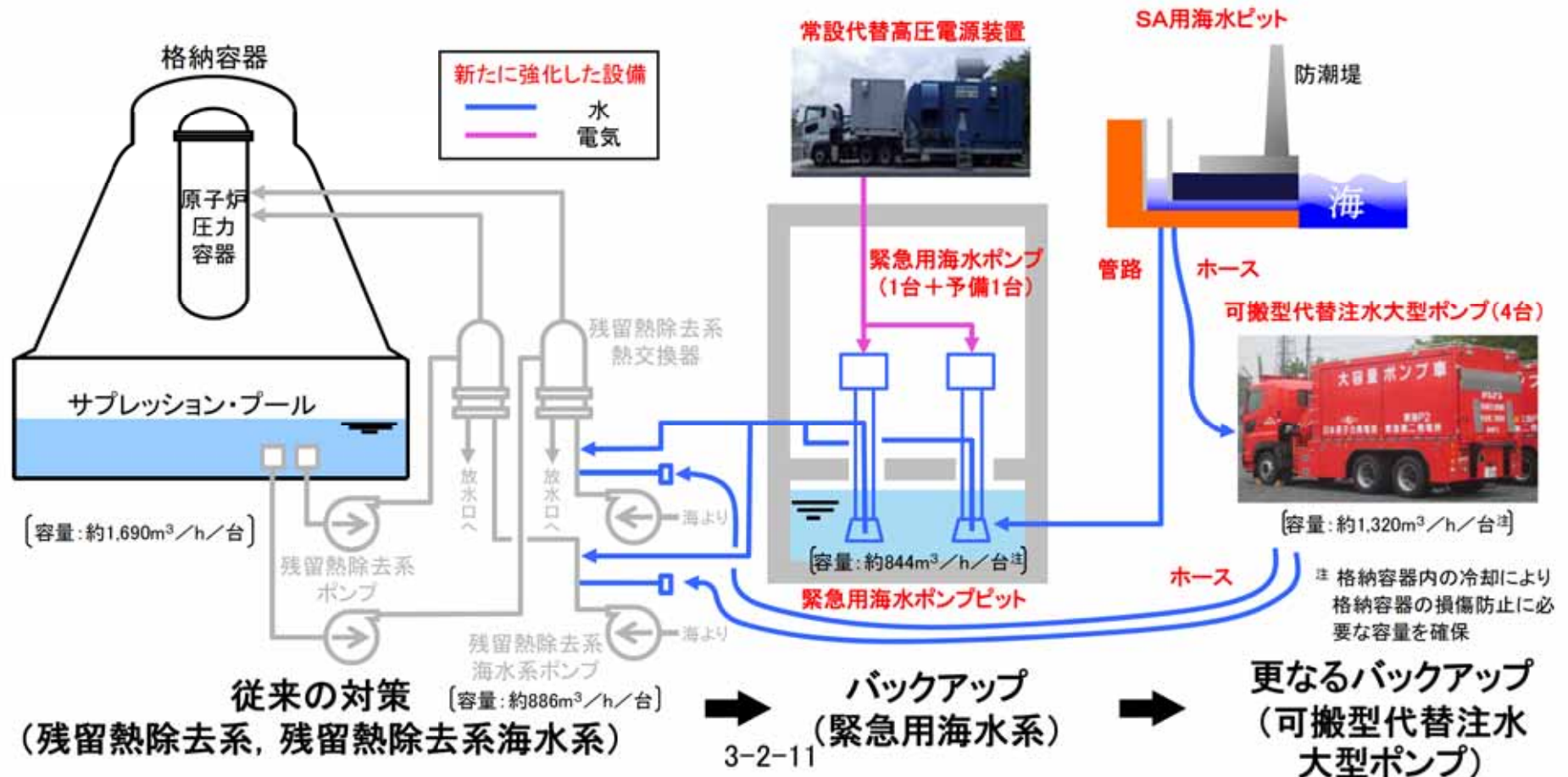
4. 事故の教訓に基づく安全対策

③ 最終ヒートシンクによる除熱の強化(1/4)



【緊急用海水系の設置】

- 炉心から発生し、圧力容器や格納容器内に溜まっていく熱を最終的に外部(海)に逃がすための手段を増強する。
- 全交流動力電源が喪失した場合や、津波により残留熱除去系の海水ポンプが機能喪失した場合でも、**緊急用海水系**により熱交換器に海水を送水し、原子炉圧力容器や格納容器内に蓄積していく熱の除去を行うことが可能
- 緊急用海水系は、**常設代替高圧電源装置**からの給電により、7日間の運転が可能
- 更に、**可搬型代替注水大型ポンプ**を使用し、熱交換器に海水を送水して熱の除去を行うことも可能



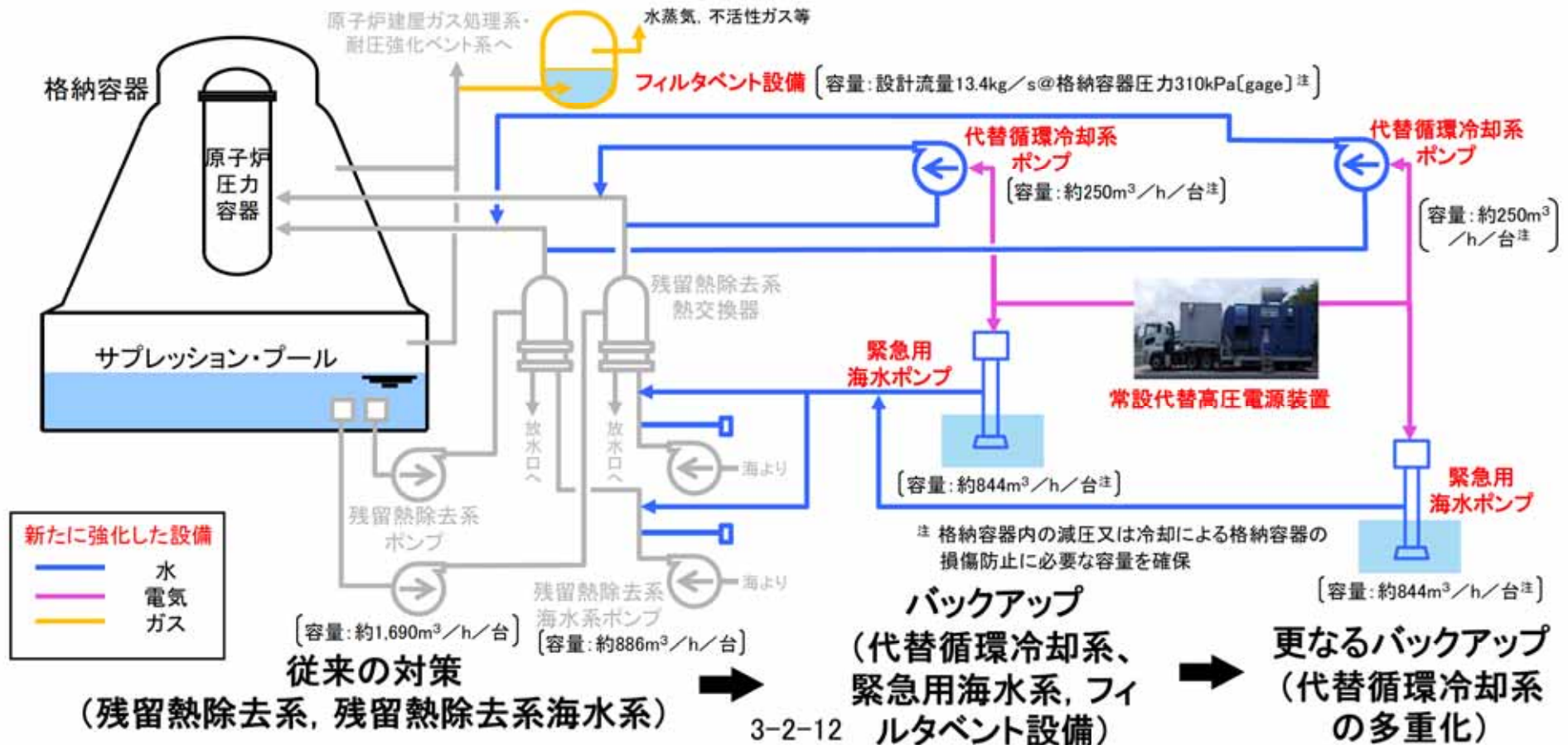
4. 事故の教訓に基づく安全対策

③ 最終ヒートシンクによる除熱の強化(2/4)



【代替循環冷却系及びフィルタベント設備の設置】

- 緊急用海水系に加え、**フィルタベント設備**及び**代替循環冷却系**を新設し、最終ヒートシンク(大気又は海)による除熱機能を強化する。
- **フィルタベント設備**を新設し、最終ヒートシンク(大気)による除熱機能を強化する。
- **代替循環冷却系**は、システムを**多重化**することで高い信頼性を有しており、**格納容器ベントまでの時間をできる限り延ばすことが可能**



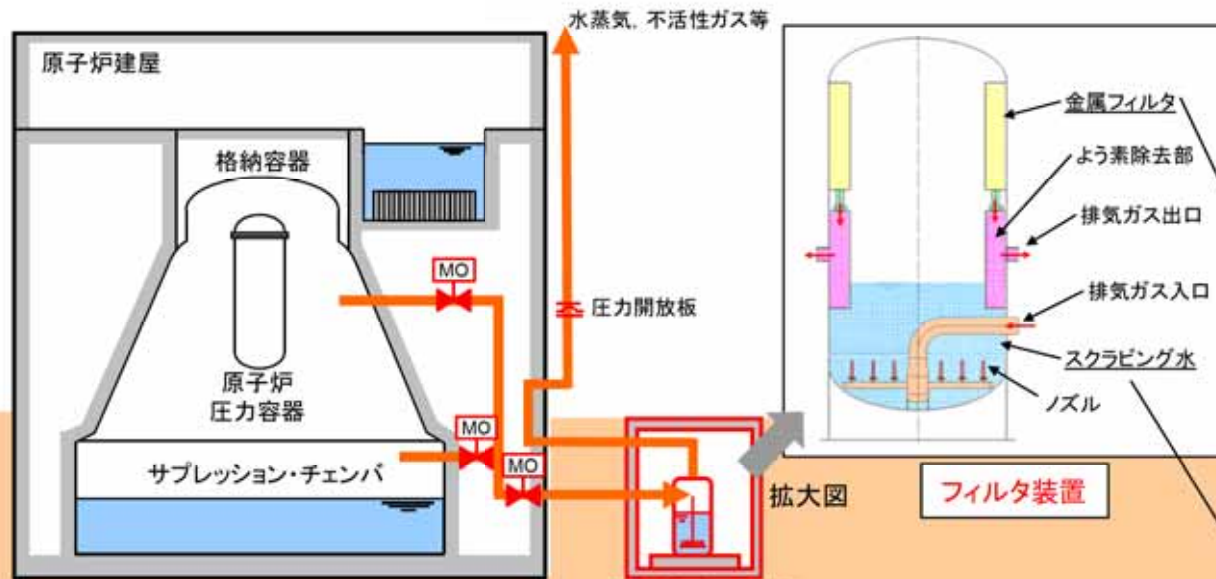
4. 事故の教訓に基づく安全対策

③ 最終ヒートシンクによる除熱の強化(3/4)



【フィルタベント設備の設置効果】

- 原子炉・格納容器への注水・除熱機能は強化されるが、万が一それらの機能が十分発揮できない場合でも、放射性物質放出を可能な限り低減させ、セシウム等による**大規模な土壤汚染を防止**する。
- ベント操作を行い水蒸気を格納容器外へ放出することで、**格納容器の過圧破損を防止**でき、**原子炉への注水の信頼性を高める**ことができる。(ベント操作は中央制御室から遠隔操作可能。また現場で人力でも操作が可能)
- 炉心から放出されるよう素を除去しつつベントを実施することで、**公衆被ばくを抑制**できる。また、セシウム除去効率の高いフィルタ装置を介しベントすることで、**発電所敷地外の土壤汚染を抑制**できる。
- フィルタ装置は地下の格納槽に設置する。(遮蔽効果, 航空機衝突時の使用可能性を考慮)



フィルタベント設備(格納容器圧力逃がし装置)

- ・ 基数: 1
- ・ 放射性物質除去効率
 - ・ 粒子状物質(セシウム等) : 99.9%以上
 - ・ 無機よう素 : 99%以上
 - ・ 有機よう素 : 98%以上
- ・ 国外で多くの導入実績があるフィルタ装置を採用

金属フィルタ

- ・ 放射性微粒子を含むガスが金属フィルタを通過する過程で、その微粒子を捕捉

スクラビング水

- ・ 放射性微粒子を含むガスが水中を通過する過程で、その微粒子を捕捉
- ・ ノズル部から排気ガスを水中に勢よく噴射することで捕捉効率を上げる

MO : フィルタベント装置作動用の電動駆動弁

- ・ 中央制御室から遠隔操作が可能
- ・ 現場で人力でも操作が可能(遮蔽等の被ばく低減対策実施)

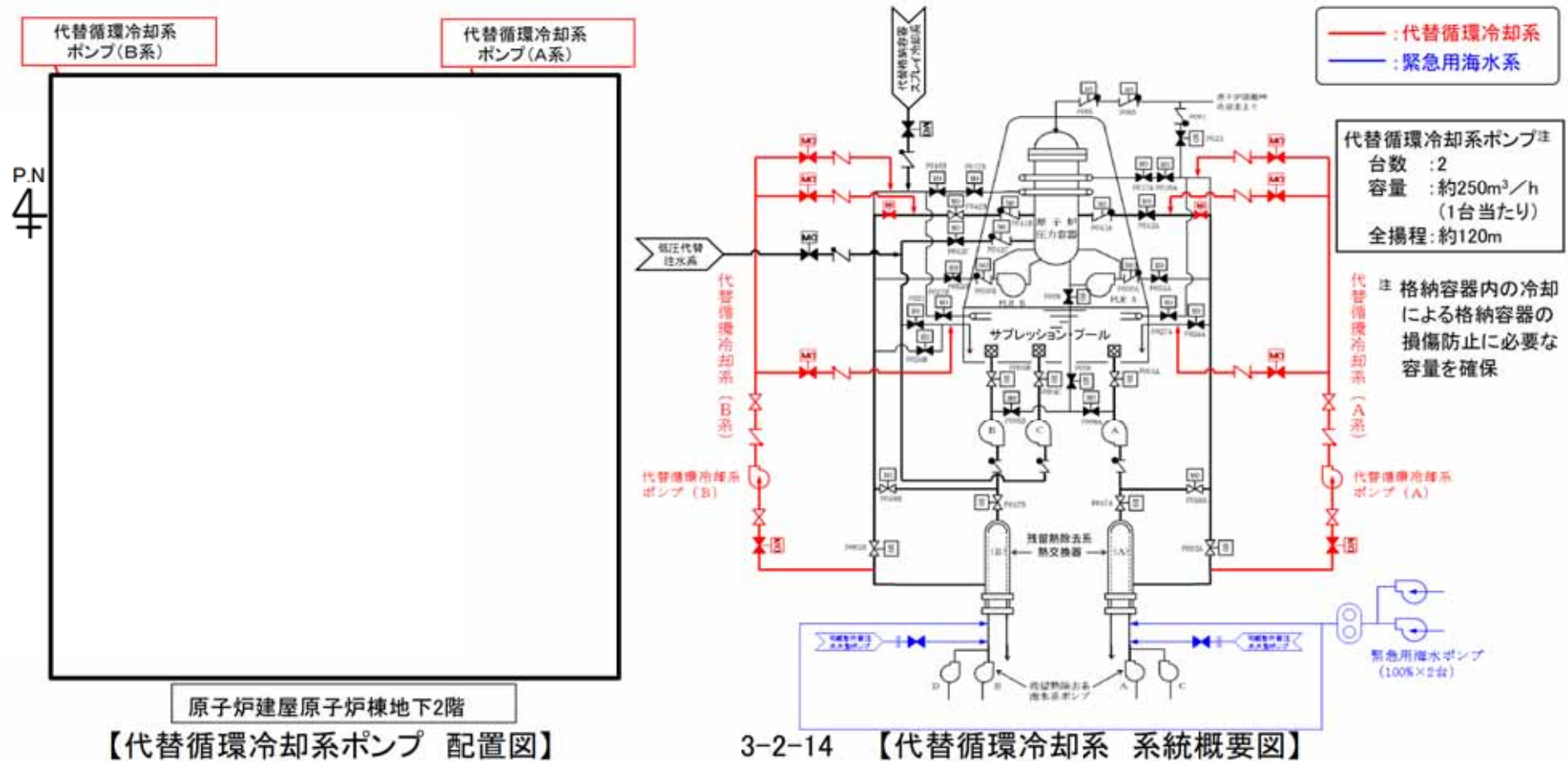
4. 事故の教訓に基づく安全対策

③ 最終ヒートシンクによる除熱の強化(4/4)



【代替循環冷却系による格納容器からの除熱】

- **代替循環冷却系**はサブプレッション・プールを水源として、残留熱除去系(A)及び(B)の一部を流路として活用
- **代替循環冷却系ポンプ**により送水されたサブプレッション・プール水は、残留熱除去系熱交換器(A)及び(B)で海水との熱交換により冷却され、原子炉圧力容器への注水や格納容器内にスプレイし、格納容器からの除熱を行う。
- **代替循環冷却系の作動により格納容器内の温度及び圧力を低下させ、また格納容器ベントに至るまでの時間を遅延させることで、放射性物質放出開始の遅延・放出量の低減を図る。また、代替循環冷却系はシステムを多重化して離隔して設置することで高い信頼性を確保する。**



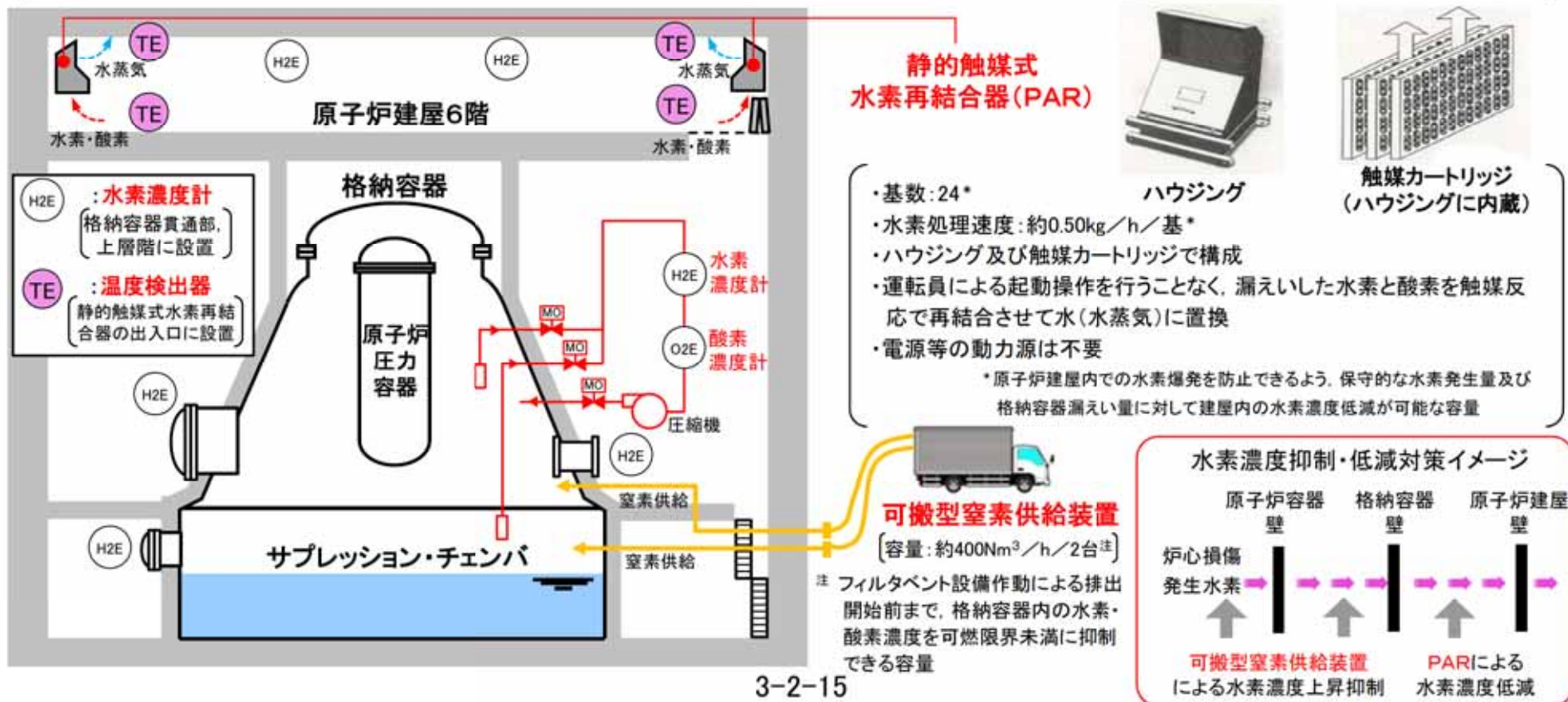
4. 事故の教訓に基づく安全対策

④ 格納容器内及び原子炉建屋内の水素対策(1/2)



【水素爆発防止設備の設置】

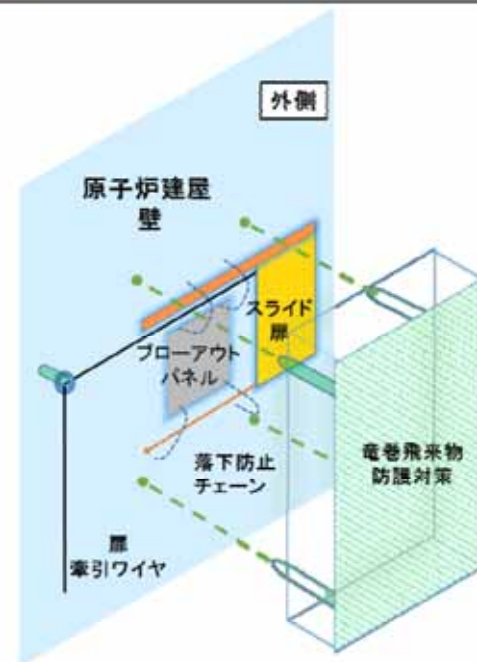
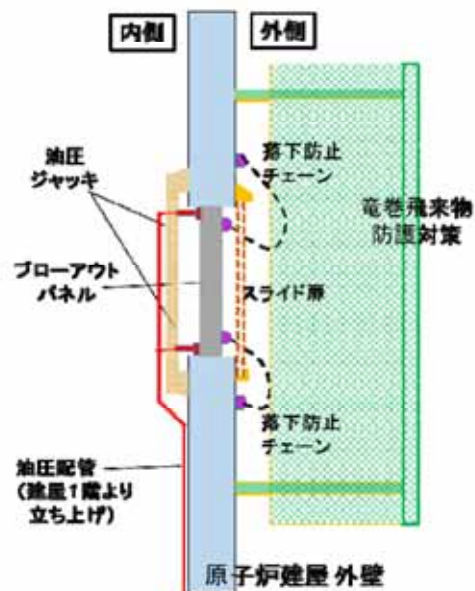
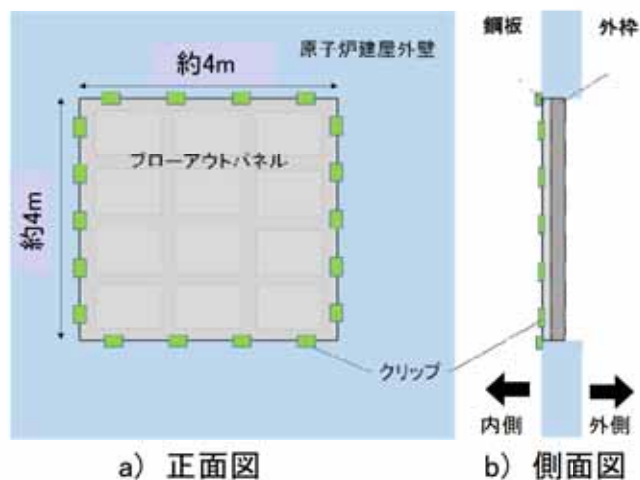
- 炉心に著しい損傷が発生した場合、燃料被覆管(ジルコニウム合金)と水蒸気の化学反応で水素が発生する。
格納容器内での水素爆発、格納容器から漏れいして原子炉建屋内での水素爆発の恐れがある。
- 可搬型窒素供給装置より格納容器内に窒素を供給し、窒素分圧を高めて水素・酸素濃度の上昇を抑制する。
- 格納容器内の水素・酸素濃度を計測する水素濃度計及び酸素濃度計を設置(代替電源設備から給電可能)
- 静的触媒式水素再結合器(PAR)を原子炉建屋6階に設置し、原子炉建屋内の水素濃度の低減を図る。
- 原子炉建屋内の水素の濃度を計測する水素濃度計を設置(代替電源設備から給電可能)
- 静的触媒式水素再結合器の動作確認を行う監視設備として温度検出器を設置(代替電源設備から給電可能)



4. 事故の教訓に基づく安全対策

④ 格納容器内及び原子炉建屋内の水素対策(2/2)

- 原子炉建屋5階及び6階の壁面に設置されたブローアウトパネルは、主蒸気配管の破断の放出蒸気による圧力等から原子炉建屋や原子炉格納容器等を防護するため、放出蒸気を建屋外に放出することを目的として、従来より設置されている。
- 原子炉建屋内の水素濃度の上昇が継続する場合や、原子炉建屋外部から使用済燃料プール(6階)への放水を想定し、ブローアウトパネルを開放できるよう、①ブローアウトパネル手動開放装置を設ける。
- ブローアウトパネルが開放状態で炉心損傷が発生した場合に、速やかにブローアウトパネルを閉止して原子炉建屋の閉じ込め機能を復旧できるよう、②ブローアウトパネル閉止装置を設置する。



①ブローアウトパネル
手動開放装置

②ブローアウトパネル閉止装置
(遠隔操作及び現場で手動操作可能)

ブローアウトパネル(現状)



重大事故等に備えて新たに設置する対策

○格納容器内の冷却・除熱，破損防止の信頼性向上

- ・格納容器注水に必要な水源の強化として，代替淡水貯槽，西側淡水貯水設備及びSA用海水ピットを設置。また，既設の各種淡水タンクを利用
- ・格納容器への低圧の注水手段の強化として，常設低圧代替注水系を設置。
- ・格納容器の下部に落下した溶融炉心を冷却するため，代替淡水貯槽の水を格納容器下部に注水する格納容器下部注水系を設置
- ・溶融炉心落下時の格納容器健全性維持のため，原子炉圧力容器の直下のペDESTALを形状変更し，溶融炉心を保持できるコリウムシールドを設置
- ・格納容器内の冷却及び破損防止の更なる信頼性向上対策として，常設の代替設備に加えて，可搬型の代替設備（可搬型代替注水中型ポンプ，可搬型代替注水大型ポンプ）を配備
- ・最終ヒートシンクによる格納容器からの除熱手段の強化として，緊急用海水系，フィルタベント設備及び代替循環冷却系を設置

○水素対策の信頼性向上

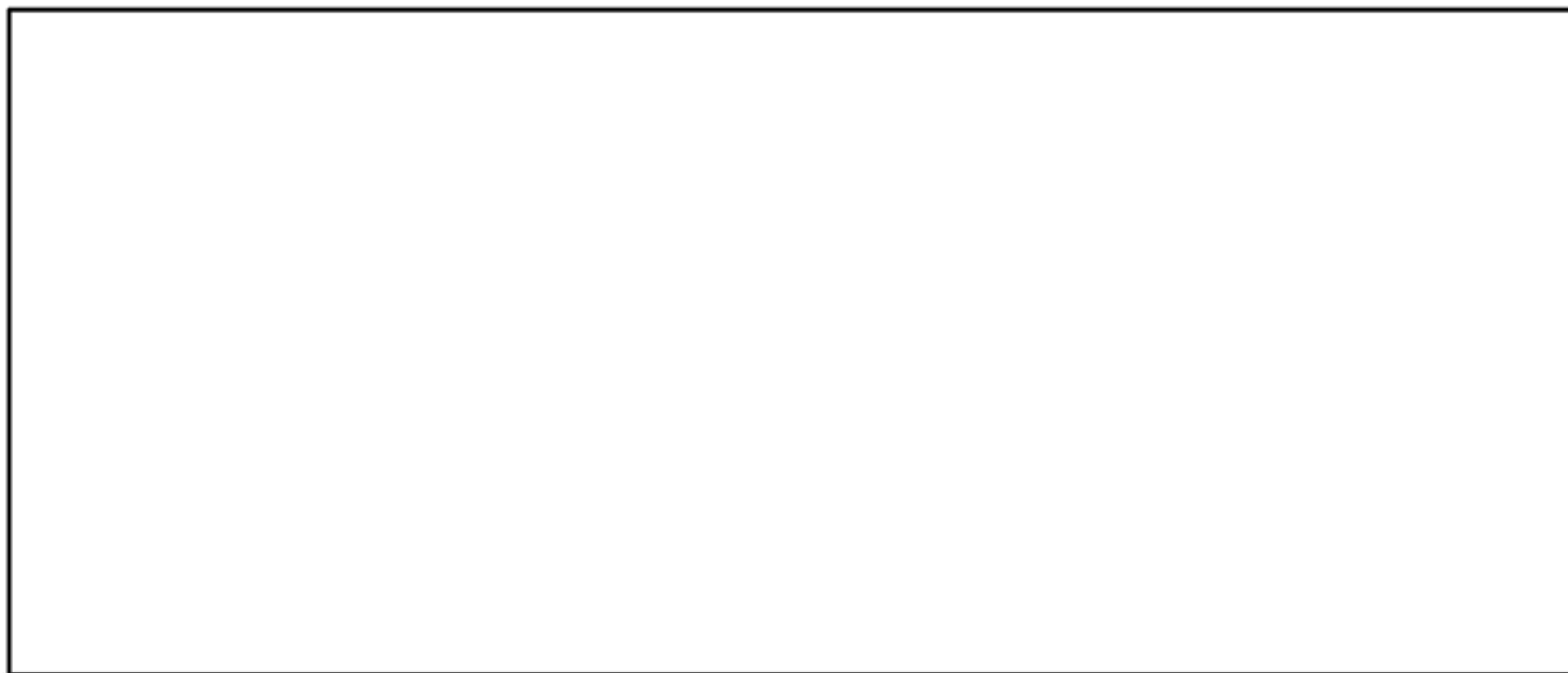
- ・炉心損傷時の格納容器内の水素濃度上昇を抑制するため，可搬型窒素供給装置を配備。また，格納容器から漏れ出した場合の原子炉建屋内の水素濃度を低減するため，静的触媒式水素再結合器を設置
- ・原子炉建屋水素濃度の上昇が継続する場合等を想定し，ブローアウトパネル手動開放装置を設ける。また，ブローアウトパネル開放状態で炉心損傷が発生した場合に速やかに閉止できるように，ブローアウトパネル閉止装置を設置

以下参考

1. 東海第二発電所のブローアウトパネルについて



- ◆ 東海第二発電所では、原子炉建屋原子炉棟の外壁に合計12枚のブローアウトパネル（大きさ約4m×4m、重さ約1.5t）が設置されている。
 - ・原子炉建屋6階（オペレーティングフロアー）： 東西南北の壁面に各2か所の合計8か所
 - ・原子炉建屋5階： 東西南北の壁面に各1箇所の合計4か所
- ◆ ブローアウトパネルは、主蒸気配管破断を想定した場合の放出蒸気による圧力等から原子炉建屋や原子炉格納容器等を防護するため、放出蒸気を建屋外に放出することを目的に設置されている。

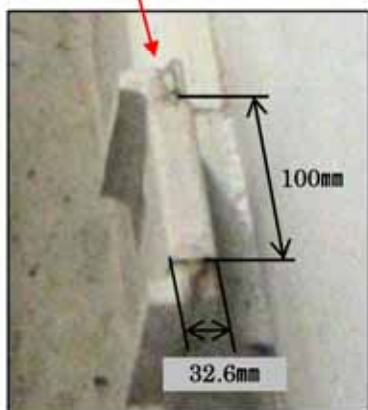


原子炉棟 6階
(— :パネル(全8枚))

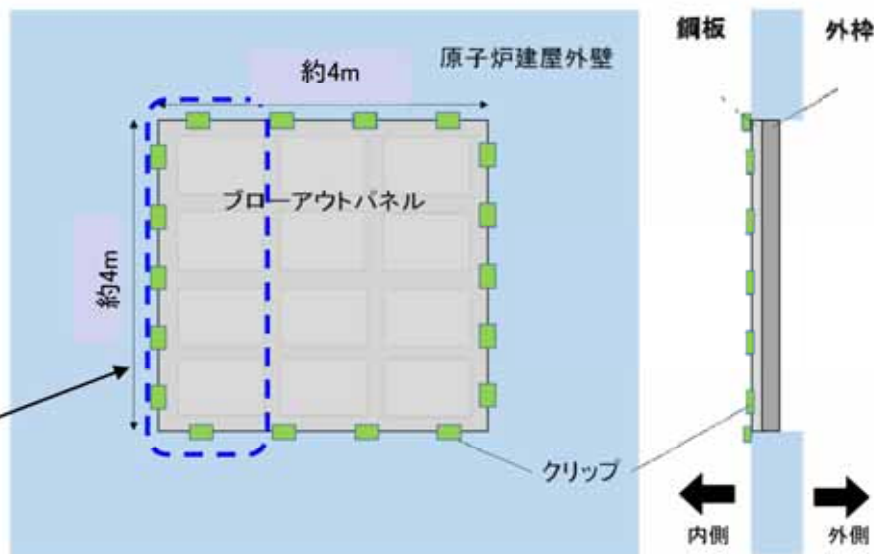
原子炉棟 5階
(— :パネル(全4枚))

2. 東海第二発電所のブローアウトパネルの構造について

- ◆ 東海第二のブローアウトパネルは、厚さ2.3mmのクリップと呼ばれる装置18個で原子炉建屋外壁に設置されており、格納容器の設計上の最高使用外圧2psiに対し、1psiで開放するように設計されている

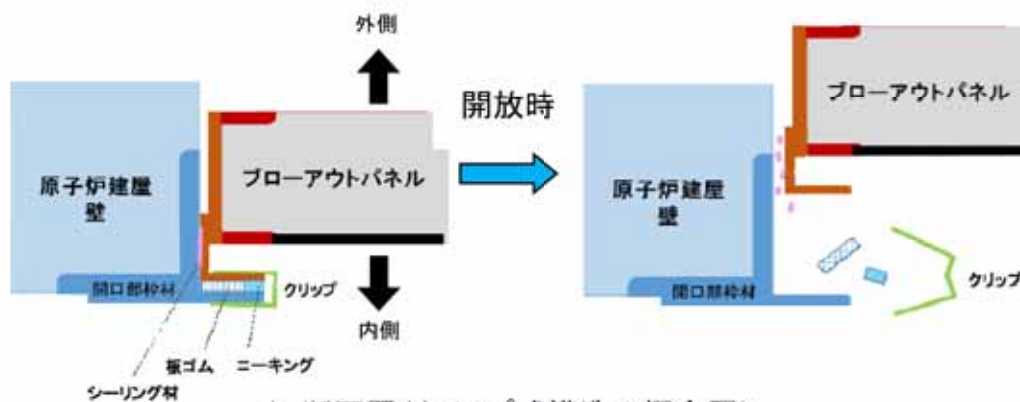


A-A' 矢視 (クリップ部拡大)



a) 正面図

b) 側面図



c) 断面図(クリップ式構造の概念図)

- ◆ 設計差圧1psi(6.9kPa)によりクリップが壊れ、差圧によりパネルが外側に押し出され外れる仕組み

3. ブローアウトパネルに対する要求事項



【要求事項】

- ◆ 設計基準事故対処設備及び重大事故等対処設備として、ブローアウトパネルに関連し要求される事項と対応方針を以下に整理した。

No	DB/SA	要求事項	具体的な検討内容
①	DB	主蒸気管破断事故(MSLBA)時には開放し、建屋内環境を維持すること	必要枚数が内圧により開くこと
②	DB	基準竜巻で開放した場合、建屋内防護対象設備を防護できること	設計竜巻の差圧で開かないこと、もしくは、建屋内機器を竜巻の風速等から防護できること
③	SA	開放状態で炉心損傷した場合には、速やかに閉止できること	開放した場合は、速やかに閉止(遠隔及び手動)できること
④	SA (大規模損壊)	放水砲による使用済燃料プールへの放水のため、必要な箇所を開放できること	必要箇所が手動で開放できること

【対応の基本方針】

- ◆ 建設時の設計※を極力踏襲し、可能な限りブローアウトパネル枚数を多く確保した上で、3次元流体解析により、主蒸気管破断事故(MSLBA)時の建屋内温度、圧力が設計条件内にあることを確認し、この結果を踏まえ、竜巻に対する対応、重大事故等発生時の要求を考慮し、ブローアウトパネル枚数の最適化を図る。
 - ◆ 上記対策を実施することで、従来の評価に影響を与える場合は、再評価を行い影響の無いことを確認するとともに、対策が必要な場合は、必要な対策を実施する。
 - ・添付十(安全解析)のMSLBA時の被ばく評価は、全量の地上放出を仮定しており、ブローアウトパネル枚数に影響しないため、ブローアウトパネル枚数変更の影響なし
 - ・内部溢水の蒸気影響評価(環境温度の影響確認と必要な場合の防護対策)
 - ・IS-LOCA時の環境条件(同上)
- ※ 建設時設計の12枚設置については、建屋内圧力の上限值に対して裕度を持った枚数としており、必要と評価された面積(約90m²)の約2倍(約185m²)の開口面積を有している。

4. ブローアウトパネルへの要求事項と対応方針



【原子炉棟 6階面 のブローアウトパネル 全8枚】

設置 エリア	要求事項				左記条件を 包絡する 対策案		
	①MSLBA	②竜巻		③再閉止		④放水砲	
		気圧低下	飛来物				
東面 (2枚)	全8枚中4枚 以上開放で、 MSLBA時の 設計条件(温 度、圧力)を 満足するため、 各壁面で1枚 以上を確保 根拠： GOTHICによ る解析結果 (内部火災で の隔壁等を反 映)	開放を許容	飛来物の衝突、 貫通によるパネ ルの損傷、建屋 内への飛来物 侵入の防止	開放を想定する パネルは、速や かに再閉止(遠 隔及び手動)	何れか1箇所は、 建屋外から強制 開放	・ブローアウト機能維持 +再閉止装置の設置 ・竜巻飛来物防止対策 ・強制開放装置の設置 (万一パネルが完全に開放せず、再 閉止できない状態の対応を含む)	
南面 (2枚)					何れか1箇所は、 建屋外から強制 開放		同上
西面 (2枚)					何れか1箇所は、 建屋外から強制 開放		同上
北面 (2枚)					— (放水砲の設置 が想定されない ため)		同上

4. ブローアウトパネルへの要求事項と対応方針



【原子炉棟 5階面 のブローアウトパネル 全4枚】

設置 エリア	要求事項				左記条件を 包絡する 対策案	
	①MSLBA	②竜巻		③再閉止		④放水砲
		気圧低下	飛来物			
東面 (1枚)	GOTHIC解析 結果によれば、 開放は必須で はない	5階東側には安全 機能を有する SGTS/FRVSが設置 されており、風荷重 から防護	飛来物の衝突、 貫通によるパネ ルの損傷、建屋 内への飛来物 侵入の防止	開放を想定す るパネルは、速 やかに再閉止 (遠隔及び手 動)	— (5階面への放水 の必要性なし)	・竜巻対策を優先し、 ブローアウトパネルは 閉鎖
南面 (1枚)						
西面 (1枚)		5階西側には安全 機能を有するほう酸 水注入ポンプ等が 設置されているが、 パネルの配置から 風の影響なし				・ブローアウト機能維持 +再閉止装置の設置 ・竜巻飛来物防止対策 ・強制開放装置の設置 (万ーパネルが完全に開放せず、 再閉止できない状態の対応)
北面 (1枚)						

5. ブローアウトパネル対応方針 まとめ



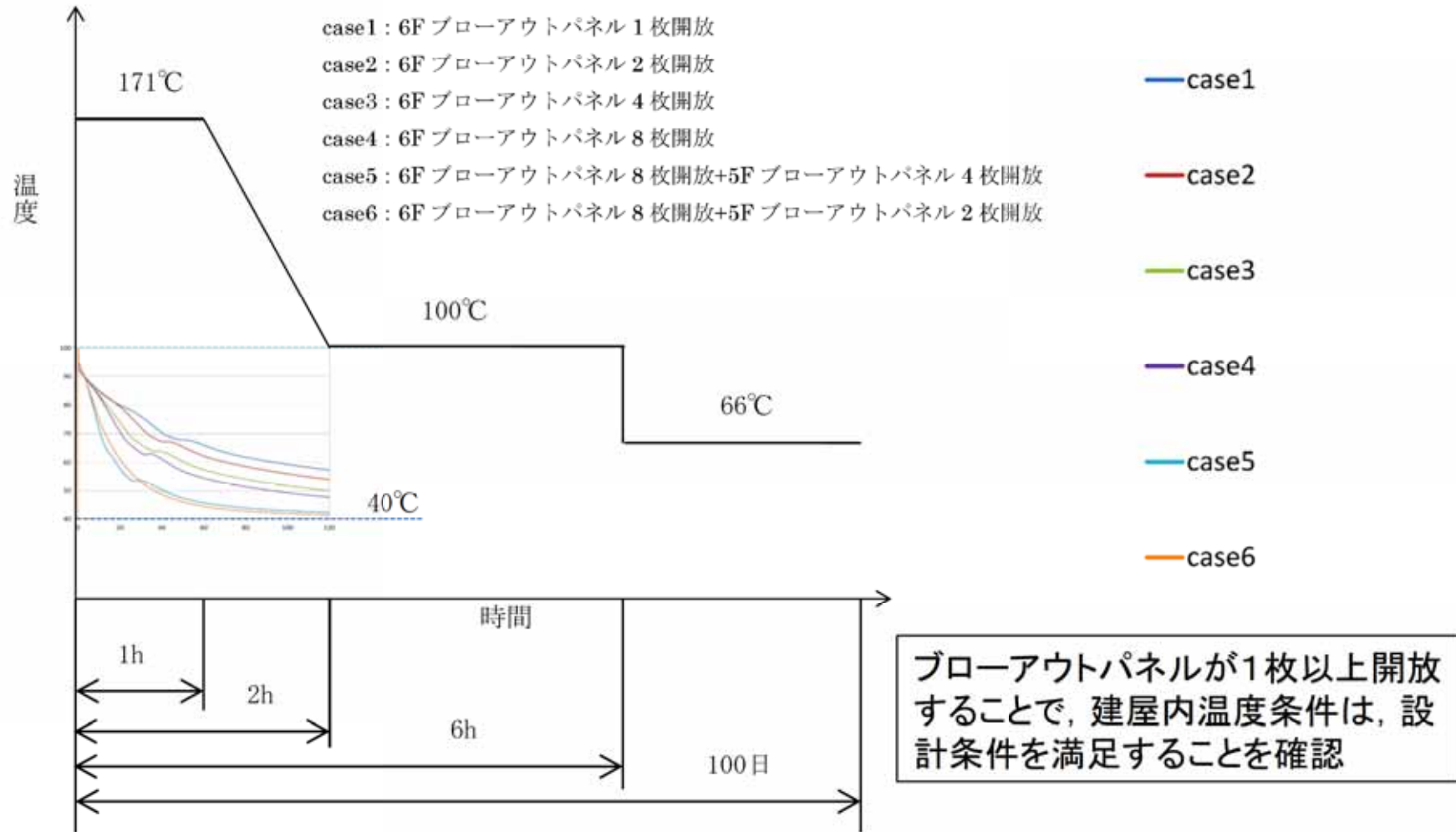
- ◆ ブローアウトパネル毎に要求事項を満足させるための対応方針を以下にまとめる。
 - ① ブローアウトパネルの機能(設計温度, 圧力)を確保するため, 4枚以上のブローアウトパネル機能を確保する
 - ② 竜巻対策として, 開放可能性があるブローアウトパネル部には, 竜巻防護対策(防護ネット)を設置する
 - ③ 開放状態で炉心損傷した場合を想定し, 速やかに閉止できる機能(遠隔及び手動)を設置する
 - ④ 開放させる全てのブローアウトパネルに, 万一パネルが完全に開放せず, 再閉止できない状態を考慮して, 強制開放装置を設置する
 - ⑤ 原子炉棟6階のブローアウトパネルのうち, 東西南の各1箇所(合計3か所)は, 放水砲による使用済燃料プールへの注水のため手動による開放機能を設置(④と兼用)を設置する

設置エリア		対策方針					備考
		①差圧開放機能	②竜巻飛来物防護機能	③閉止機能(SA時)	④強制開放機能	⑤手動開放機能(大規模損壊)	
6階	北1	開	有	閉	開	—	
	北2	開	有	閉	開	—	
	東1	開	有	閉	開	—	
	東2	開	有	閉	開	開(④と兼用)	
	西1	開	有	閉	開	—	
	西2	開	有	閉	開	開(④と兼用)	
	南1	開	有	閉	開	—	
	南2	開	有	閉	開	開(④と兼用)	
5階	東	閉止	—	—	—	—	竜巻による風荷重からのSGTS等の防護
	南	閉止	—	—	—	—	
	西	開	有	閉	開	—	
	北	開	有	閉	開	—	

6. 蒸気影響評価におけるブローアウトパネル必要枚数の検証



- ◆ 建設時設計で想定する主蒸気管破断事故時の原子炉棟内の環境条件に対し、3次元流体解析により検証を行い以下を確認



第1図 MSLBA時の原子炉棟内温度状態と解析結果の比較

6. 蒸気影響評価におけるブローアウトパネル必要枚数の検証

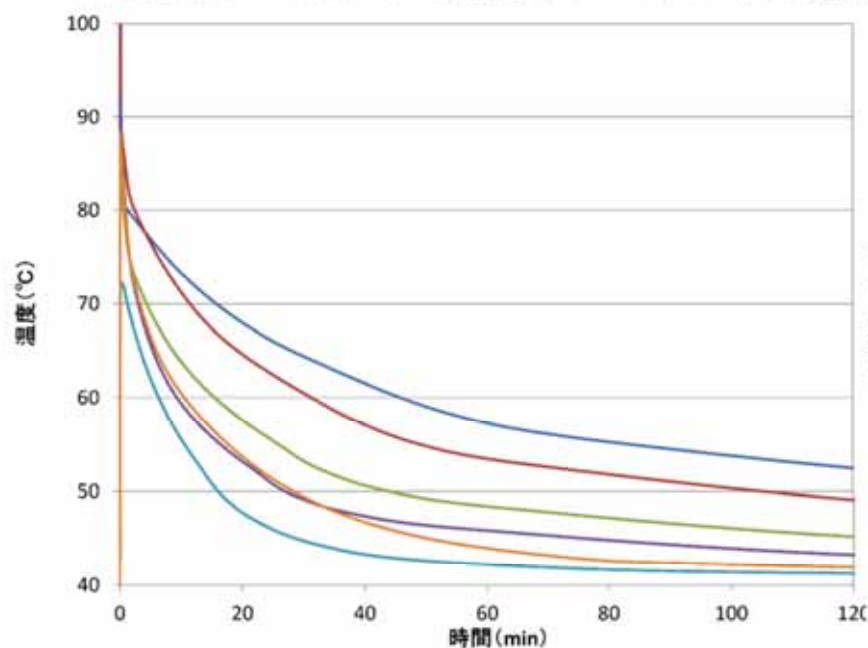


原子炉棟6階の温度及び圧力評価結果を示す。

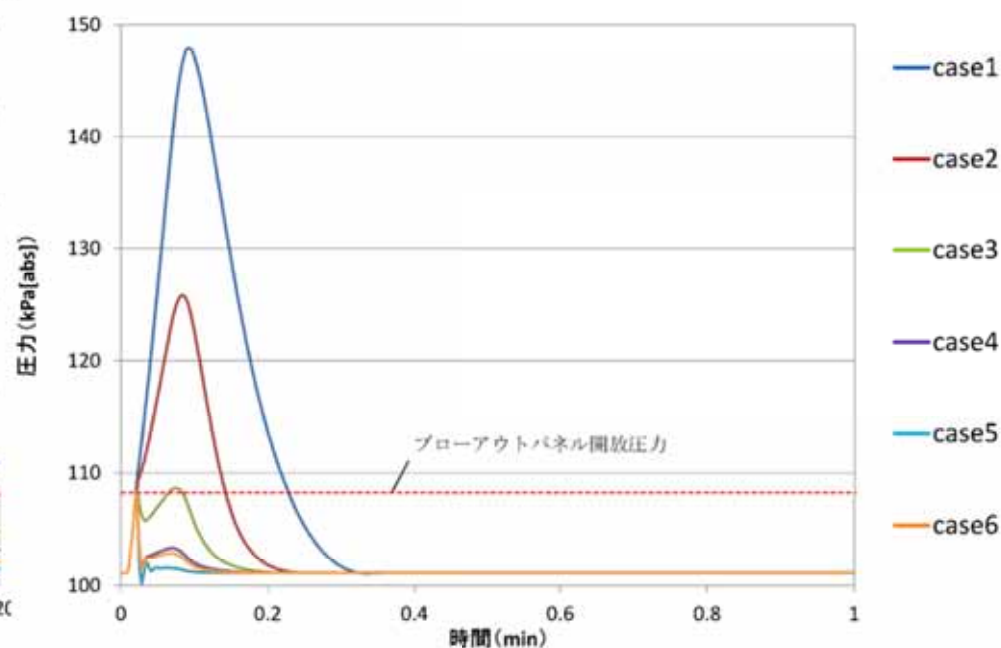
- case1 : 6F ブローアウトパネル 1 枚開放
- case2 : 6F ブローアウトパネル 2 枚開放
- case3 : 6F ブローアウトパネル 4 枚開放
- case4 : 6F ブローアウトパネル 8 枚開放
- case5 : 6F ブローアウトパネル 8 枚開放+5F ブローアウトパネル 4 枚開放
- case6 : 6F ブローアウトパネル 8 枚開放+5F ブローアウトパネル 2 枚開放

圧力解析結果より以下を確認した

- ・MSLBA時には、ブローアウトパネル開放に必要な設定圧力に達すること
- ・6階に設置された4枚が開放することで、格納容器の設計外圧を越えないこと



温度状況比較



圧力状況比較

(原子炉棟 6階)

第2図 ブローアウトパネル作動枚数による温度及び圧力状況比較