

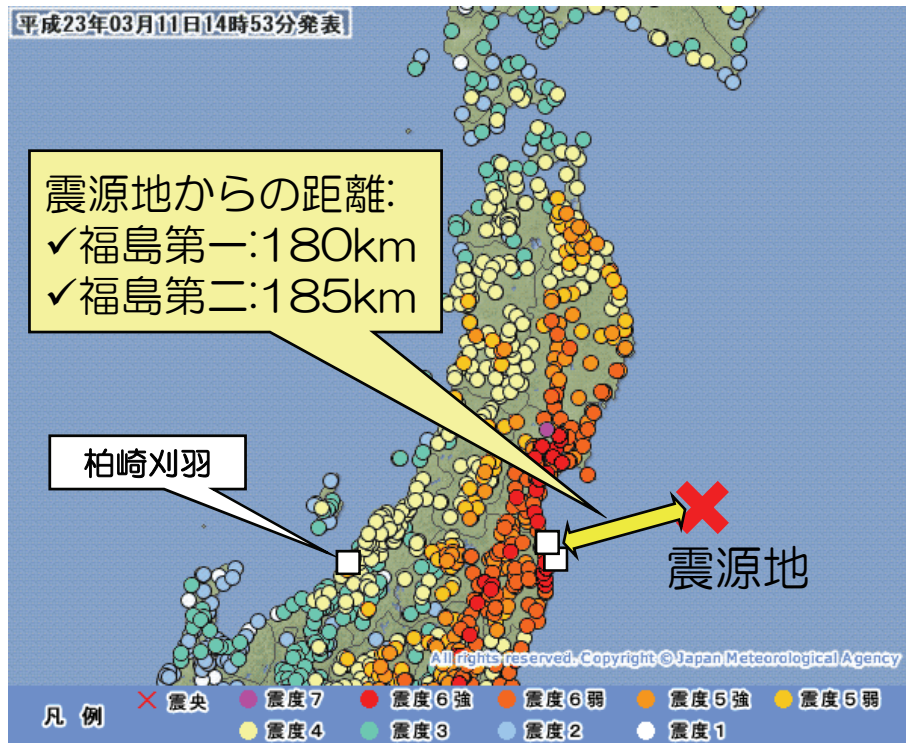
# 福島原子力事故の概要と安全対策強化の取り組み

平成25年6月20日

東京電力 原子力設備管理部 川村 慎一

# 東北地方太平洋沖地震と福島第一原子力発電所の状況

[発生日時] 平成23年3月11日 14時46分  
[震源地] 宮城県三陸沖  
[地震の規模] マグニチュード9.0



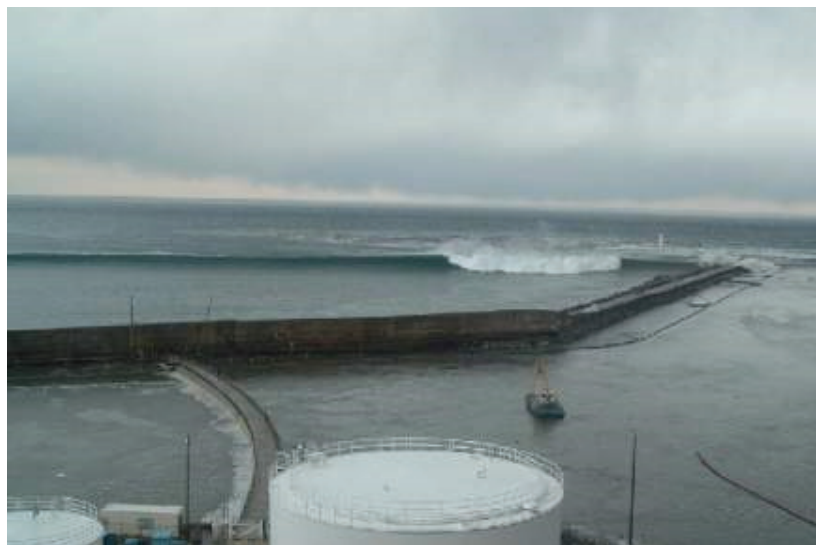
[地震から津波までの状況]

- 運転中の原子炉は全て自動停止
- 地震で外部電源が喪失  
→設計通り非常用電源設備が動作
- 安全上重要な設備に損傷は認められず



# 福島第一原子力発電所の浸水状況

- 15時37分頃、津波がプラントに到達
- 非常用電源設備等、安全上重要な設備が津波で同時多発的に機能喪失

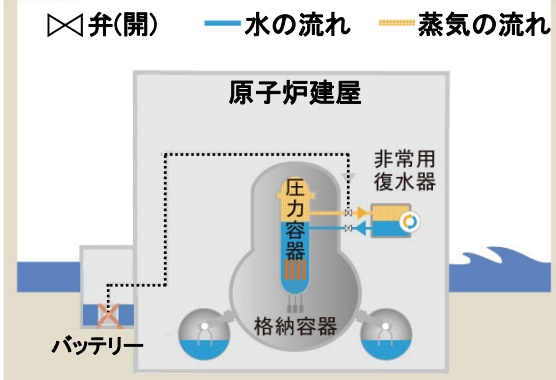


タンクの高さ:5.5m  
(基礎の位置は海拔10m)



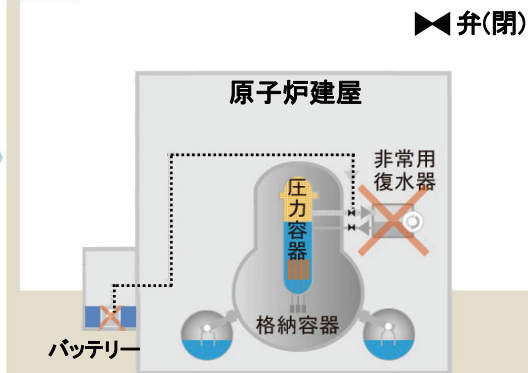
# 福島第一原子力発電所1～3号機の事故の経過 (図は1号機をイメージ)

## 1 津波による浸水と全電源喪失



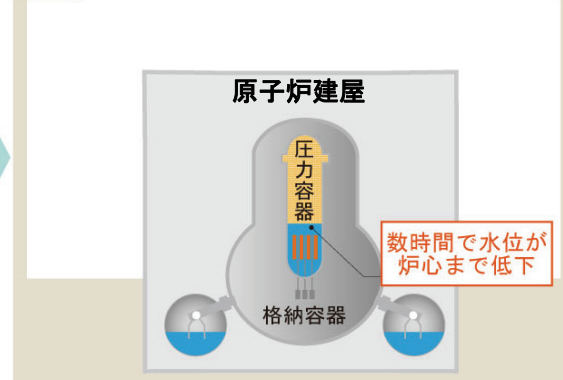
建屋内に浸水《第1層の喪失》、  
多重化された非常用電源が全喪失

## 2 「冷やす」機能の喪失



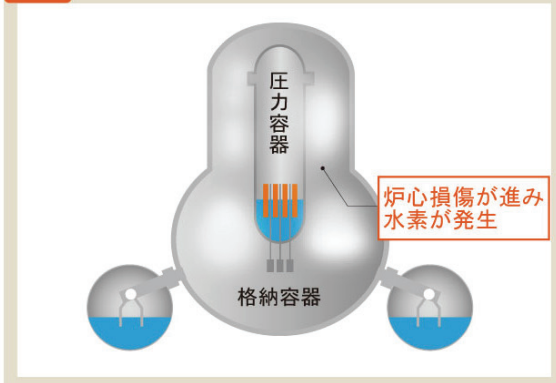
全電源喪失に伴い、多重化された  
冷却機能が全喪失《第3層の喪失》

## 3 水位低下



冷却できないため、  
原子炉の水位が低下

## 4 炉心損傷・水素発生



炉心が露出し損傷、  
水-ジルカロイ反応により  
水素が大量に発生

## 5 水素・放射性物質漏洩



压力容器、格納容器が損傷し、  
水素や放射性物質が  
建屋内外に漏洩《第4層の喪失》



1、3、4号機で水素爆発、  
2号機もベントが期待通りに  
できず、多量の放射性物質を放出

# 事故対応からの教訓ならびに対策の基本方針

---

## ① 外的事象に対する深層防護の強化

### 【事実】

- 津波に対する防護設計の不備（深層防護第1層が不十分）
- 第1層が破られた後、後段（第3層、第4層）が広範囲に機能喪失
- 臨機応変な対応における、手段と時間余裕の確保の困難さ

### 【教訓】

- 外的事象に対して深層防護の各層を充実  
→設計ベースの想定を超えても、容易に後段へ移行させないことが重要
- 時間余裕を考慮した対応手段の設計が重要

### 【対策の基本方針】

- 設計拡張状態(Design Extension Condition ; DEC) を深層防護の各層に設定し、多重故障等も考慮した多様性重視の対策を実施
- フェーズドアプローチを適用し、時間余裕や代替可能性を考慮して対応手段を決定

## 事故対応からの教訓ならびに対策の基本方針

---

### ② 全交流電源喪失（SBO）を前提とした高圧注水機能、減圧機能の強化

#### 【事実】

- 1号機は非常用復水器がほとんど機能せず、高圧注水系も機能喪失
- 2、3号機は一つの高圧注水系に長時間依存、その後の原子炉減圧も困難

#### 【教訓】

- 事故後直ちに必要となる高圧注水機能について、SBOを前提とした強化が重要
- 原子炉減圧機能の長期間維持は、従来の設計基準事象では十分に想定しておらず、これに対応できる強化が重要

#### 【対策の基本方針】

- 長期間のSBO時にも、高圧注水機能・減圧機能を高い信頼度で確保

# 事故対応からの教訓ならびに対策の基本方針

---

## ③ 深層防護第4層としての閉じ込め機能の強化

### 【事実】

- 格納容器が破損し、放射性物質を環境に放出
- 格納容器は冷却材喪失事故に基づく要件で設計
- 炉心損傷後の閉じ込め機能に対して、具体的な設計要求が存在せず
- 過去のアクシデントマネジメント整備は現有設備の有効活用によるもので、設備としては強化せず

### 【教訓】

- 炉心損傷後の影響緩和と放射性物質の放出抑制について、マネジメントだけでなく、設備強化も必要

### 【対策の基本方針】

- 第4層の閉じ込め機能に関する設計要件を明確化し、設備を強化

# 補足：外的事象に対する深層防護各層の対応能力の厚みの向上

○設計ベース：高圧注水と減圧機能強化の観点から、従来の設計基準にSBOを追加

- ・《高圧注水》動的機器の単一故障 → RCICのバックアップが必要
- ・《減 圧》使命時間の長期化 → 必要とされる期間にSRVの継続的な機能維持が必要

○設計拡張状態(Design Extension Condition)：設計ベースを超える領域として設定

- ・多重(共通要因)故障が発生しても、各層の重要な機能を一定程度維持させる
- ・多重性よりも、多様性、位置的分散を重視した対策が必要

《深層防護各層の設計要件（津波等の外的事象中心）》

新たにDECとして追加した領域  
 欧州では従来からDECとしていた領域

層	目的	設計ベース	機能強化の方向	設計ベースを超える状態（DEC）
第1層	異常発生防止	津波の例：設計津波に対する多重の防護で、異常の発生を防止し、後段各層の安全機能の喪失を防ぐ		津波の例：多重防護の同時喪失により、ある程度の建屋内浸水があっても、重要区画内の設備の機能喪失を防ぐ、重要区画からの排水を行う
第2層	事故への拡大防止	従来の設計ベース		従来のアクシデントマネジメントで整備済み
第3層	炉心損傷防止	冷却： } 全交流電源喪失+動的機器 減圧： } の単一故障		冷却： } 長期全交流電源喪失に対し、 減圧： } 多様又は多重の設備で対応
第4層	炉心損傷後の影響緩和、放出抑制	格納容器と格納容器を防護する設備の機能とを併せて、長期にわたる土地汚染及び制御できない放射性物質放出を防ぐ		

※設備の設計条件なので第1層～第4層を記載



## 補足：フェーズドアプローチによる対策の実効性向上

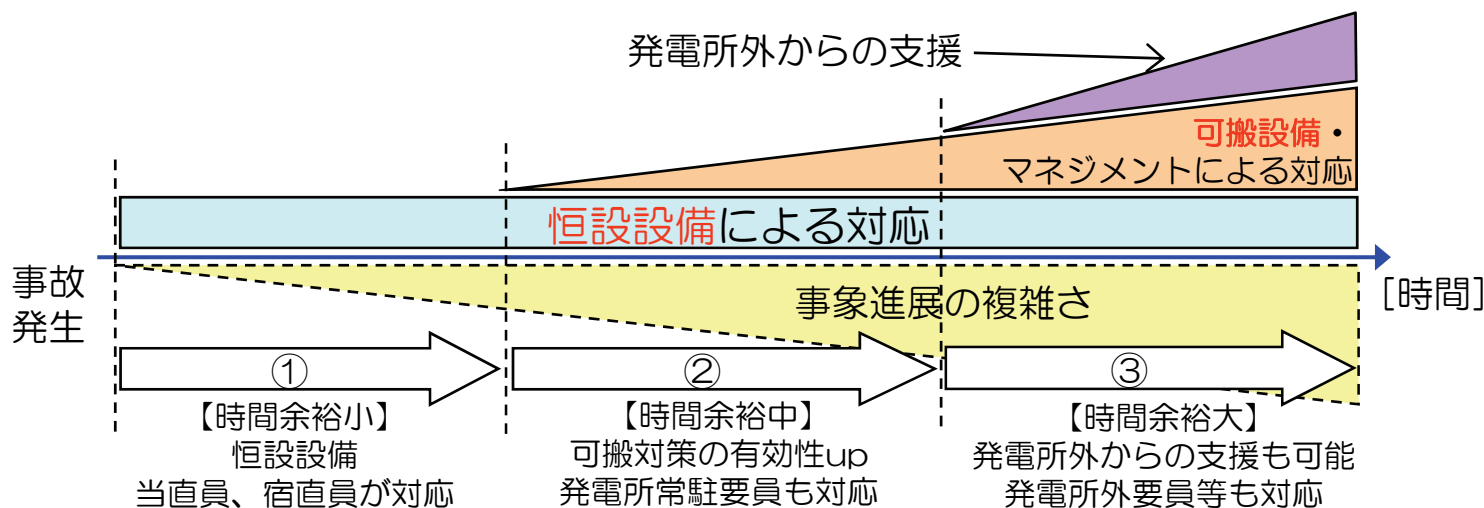
○対策は時間余裕に応じて適切に選定しなければ、安全上有効に機能せず

○対策に課す設計要件は、**時間余裕や代替可能性の観点から適切に設定**することが必要

- ・ **事故初期**：人的リソースが限定・現場アクセス困難の可能性  
→ **恒設設備**だけでも初期対応ができるように設計することが適切
- ・ **事故後期**：状況が輻輳・特定の条件で設計した恒設設備では対応できなくなるおそれ  
→ **可搬設備**も選択肢に加え、対応の多様性や代替可能性を高めることが重要

○時間余裕に応じた段階毎に対策を設定する(**フェーズドアプローチ**)

→ 深層防護に基づき対策を充実する際の考え方としてフェーズドアプローチを適用



《**フェーズドアプローチ**による対応のイメージ》

# 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策（津波に対する深層防護第1層）

## 第1層 異常の発生防止（津波の例）

- 設計津波に対して余裕のある多重防護で、建屋内浸水を防止
- 建屋浸水が生じて、重要機器室の浸水を防止、排水
- 事故最初期であり、基本的に恒設設備で対策

- 可搬設備
- 現有設備に対し位置的分散を図った恒設設備
- 恒設設備
- 手順等の対応

**赤太枠** 福島事故以降に設置または設置に向けて詳細検討中の設備

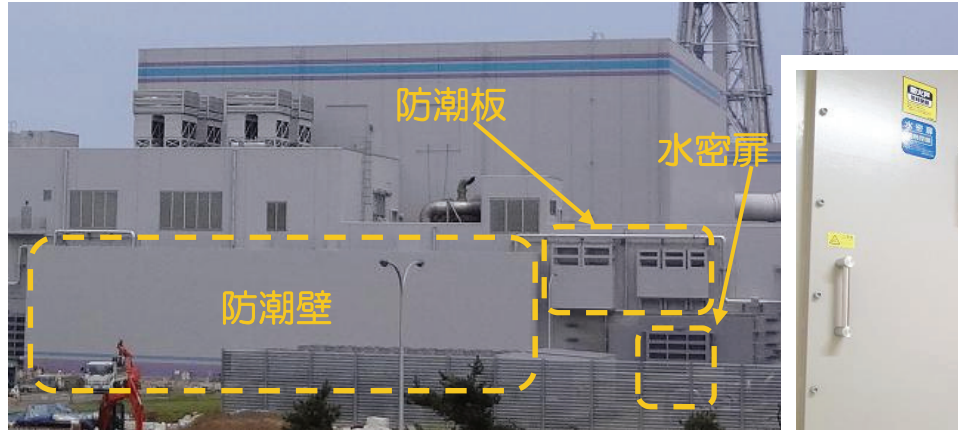
設計ベース：設計基準の一部に追加的な要件を課した領域  
DEC：設計ベースを超える領域

対策の厚みの向上

(可搬) DEC			建屋内排水(K1)						
(恒設) DEC	重要区画からの排水								
	重要区画の浸水対策							津波警告システム	
設計ベース	水密扉、防潮壁等による建屋浸水対策				変圧器廻り浸水対策		開閉所防潮壁		
	防潮堤								
	各設備、機器の設置高さ							潮位計	
	R/B	T/B	Hx/B (K1)	水処理建屋(K1) 給水建屋(K7)	免震重要棟	変圧器	開閉所	津波監視	

津波対策

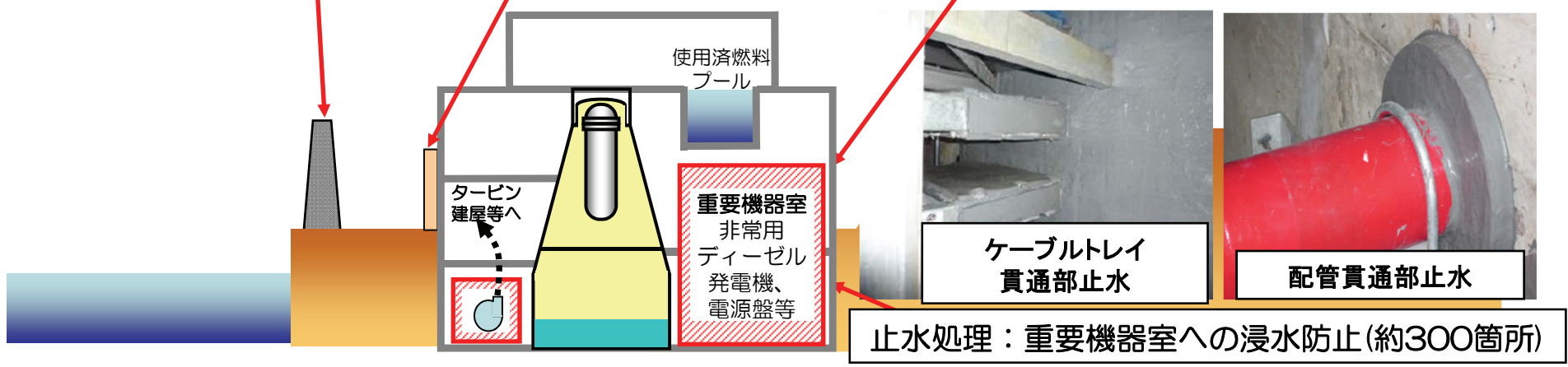
# 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策（津波に対する深層防護第1層）



防潮堤：敷地内への浸水を防止

防潮壁：建屋内への浸水を防止

水密扉：重要機器室への浸水を防止(約60箇所)



# 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策（深層防護第3層）

## 第3層 炉心損傷防止（注水、減圧、循環冷却）

- SBOを設計ベースに位置づけ、設計ベース、DECそれぞれで高圧注水機能を強化
- 減圧機能の強化を検討中
- 低圧注水以降は可搬設備も含めた多様性のある対策実施

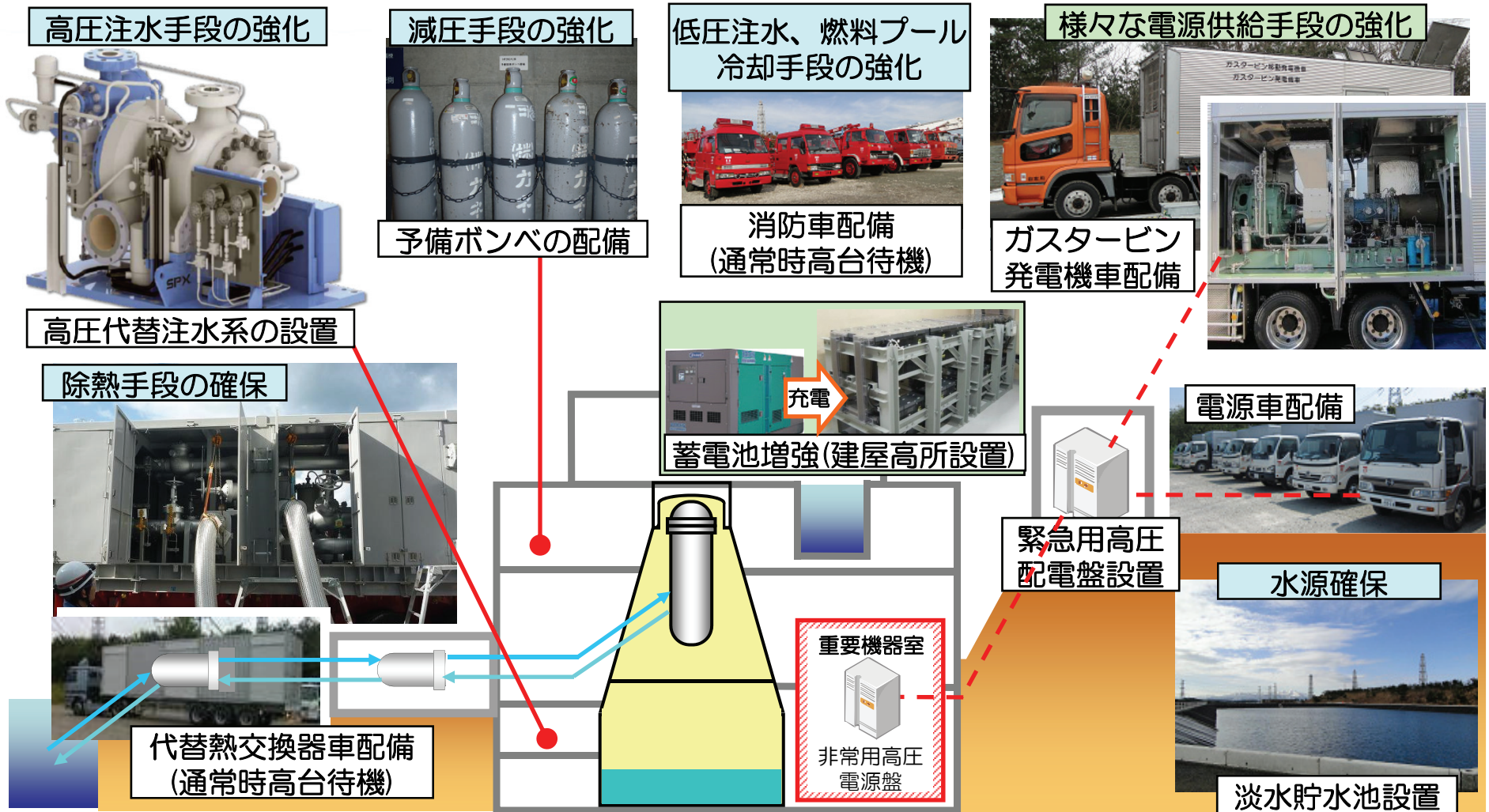
■ 可搬設備  
■ 現有設備に対し位置的分散を図った恒設設備  
■ 恒設設備  
□ 手順等の対応  
■ 赤太枠 福島事故以降に設置または設置に向けて詳細検討中の設備

設計ベース：設計基準の一部に追加的な要件を課した領域  
 DEC：設計ベースを超える領域

対策の厚みの向上

手順等	※1：原子炉停止直後の崩壊熱相当量の注水はできないものの、補助的な高圧注水手段として手順を整備 ※2：原子炉水位を正確に計測できない状況であっても、原子炉水位が有効燃料域以下であることを確認するため、基準面器に温度計を設置 ※3：HPAC設置まではこの対策も含めたDEC対策により、設計ベースの対策と位置づける									
DEC (可搬)	RCIC手動 起動手順		SRV用 コンプレッサ	SRV用 予備ポンペ	SRV用 予備蓄電池	消防車 高台配備	MUWCへの 外部接続口	海水ポンプ 予備モータ	代替水中 ポンプ	代替 熱交換器
DEC (恒設)	SLCによる 注水手順※1					火災の観点で強化した 消火系による注水		消火ポンプ (ディーゼル駆動)		
	CRDによる 注水手順※1					消火ポンプ (電動駆動)				
	【RCIC喪失時】 ・急速減圧+ LPCS注水(K1) ・+HPCE注水(K7)					MUWC		CUW		原子炉水位 監視機能強化※2
設計 ベース	HPAC※3									
	RCIC (蒸気駆動)	ADS	SRV用 ポンペ	既設蓄電池の 容量増加	蓄電池					
	HPCS(K1) HPCF(K7) (電動駆動)	SRV	液体窒素 設備			LPCS(K1) LPFL(K7)		RHR		既存の 計装設備
	高圧注水	信号	窒素	電源		低圧注水		原子炉 循環冷却		計装
		減圧								

# 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策（深層防護第3層）

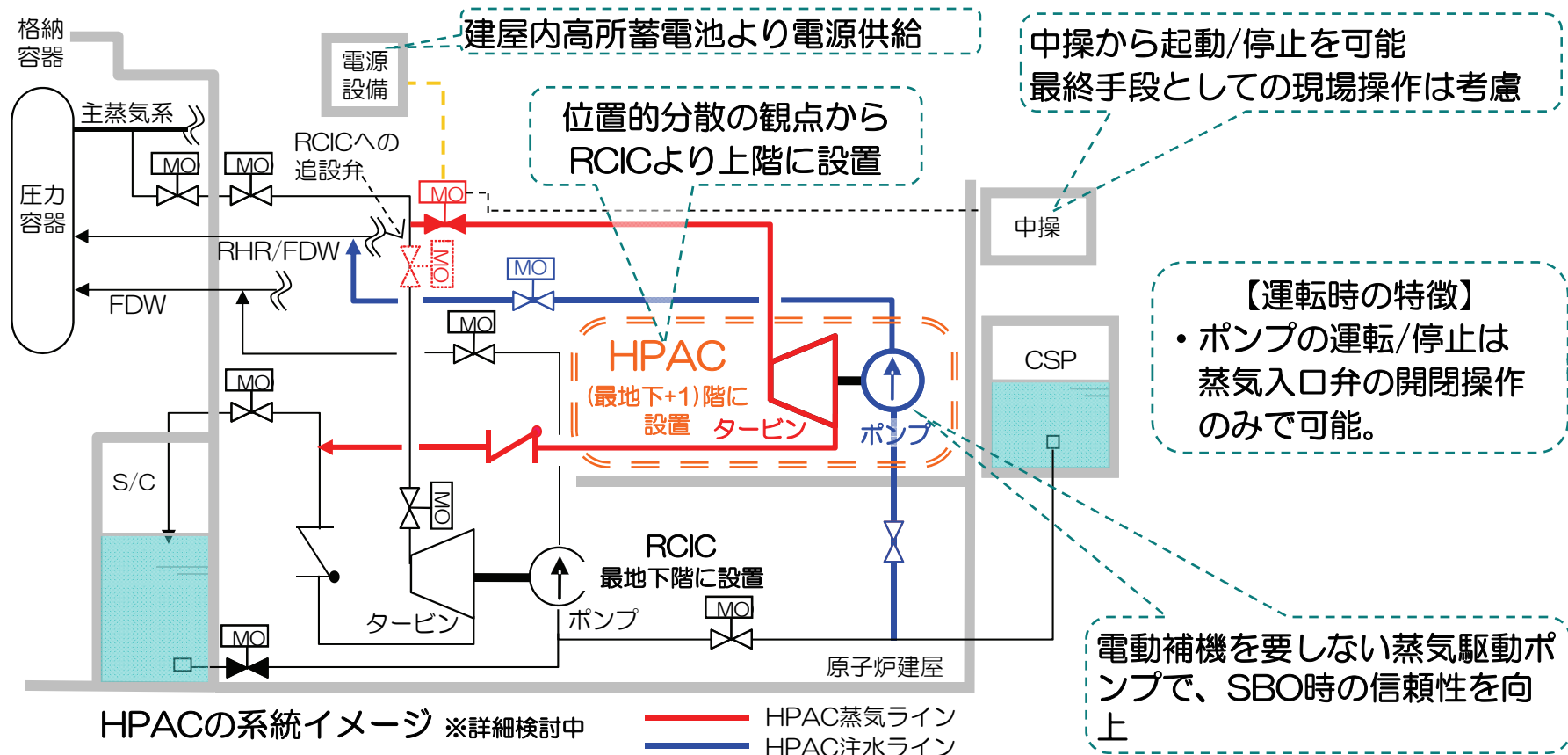


# 《第3層》 高压代替注水系(HPAC) (高压注水対策)

## ○ 設置の背景

- 事故後直ちに必要となる高压注水機能について、SBOを前提とした強化が重要
  - SBOを設計ベースの事故に位置付け、動的機器の単一故障も考慮した設計とする
  - 従来のRCICのバックアップ設備として、**高压代替注水系(HPAC※)を設置** (※ High Pressure Alternate Cooling System)

## ○ 系統イメージと系統設計のポイント



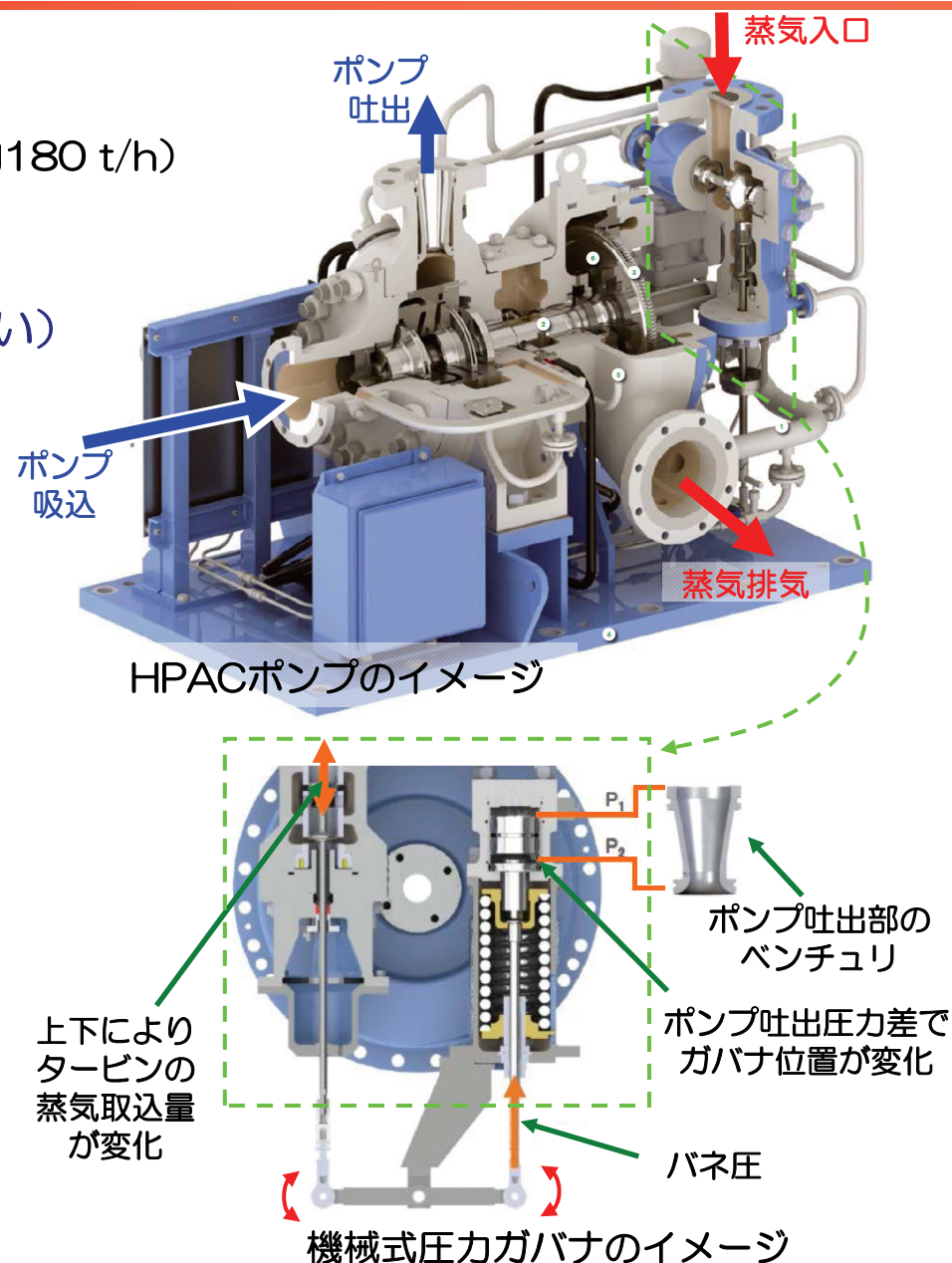
## 《第3層》 高压代替注水系(HPAC) (高压注水対策)

### ○ポンプ容量

RCICと同等 (BWR5 : 約140 t/h, ABWR : 約180 t/h)

### ○HPACポンプの構造的特徴 (RCICとの違い)






- タービンとポンプが一体のケーシングに納められているため、軸封部がなく、**グランドシール装置が不要**
- 自滑水潤滑であり、**潤滑油装置が不要**
- タービン蒸気加減弁の駆動機構が機械式で、弁制御のための**制御用電気設備が不要**
- 上記の付属機器が不要なため、**必要電容量 (蓄電池容量) が少ない**
- ポンプサイズがRCICよりも小さく、付属機器が不要なため、**省スペースへの設置に適している**



# 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策（深層防護第4層）

## 第4層 炉心損傷後の影響緩和、放出抑制

• DECとして恒設設備中心に対策を実施

	可搬設備
	現有設備に対し位置的分散を図った恒設設備
	恒設設備
	手順等の対応
	赤太枠 福島事故以降に設置または設置に向けて詳細検討中の設備

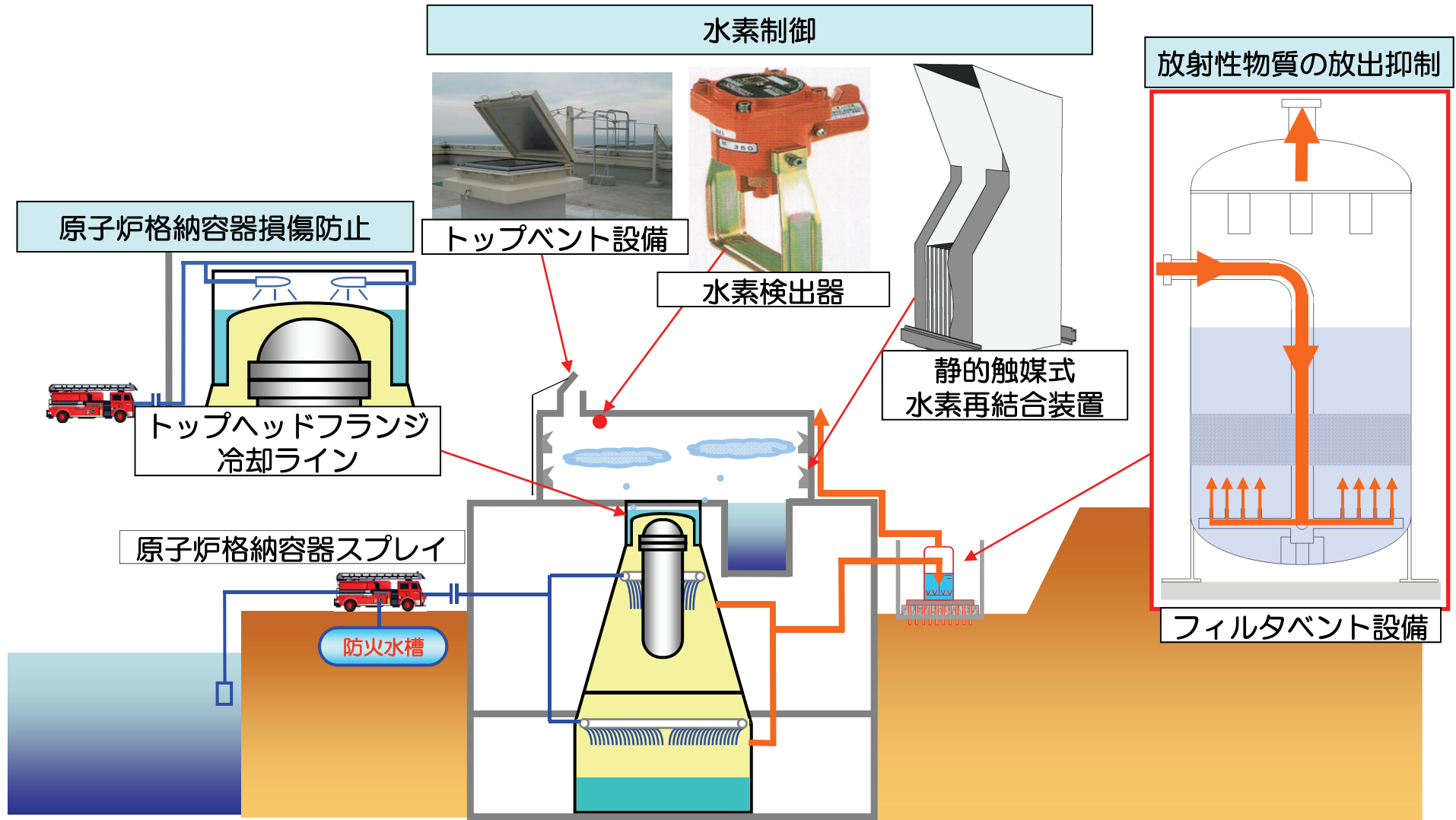
設計ベース：設計基準の一部に追加的な要件を課した領域  
 DEC：設計ベースを超える領域

対策の厚みの向上	DEC (可搬)	消防車高台配備				消防車高台配備	
		MUWCへの外部接続口				MUWCへの外部接続口	
	DEC (恒設)		フィルタバント				溶融炉心落下対策
		代替スプレイ(消火系)	バント弁駆動用空気ポンプ				ペDESTAL注水(消火系)
ベース設計	代替スプレイ(MUWC)	バント弁操作用ハンドル	原子炉建屋トップバント設備 ブローアウトパネル開放	建屋水素濃度計		ペDESTAL注水(MUWC)	
	格納容器スプレイ	耐圧強化バント	フィルタバント	格納容器頂部水張り設備	原子炉建屋内の水素処理設備		
		S/P冷却	FCS				
		格納容器スプレイ	格納容器冷却	水素制御、濃度監視		コア・コンクリート反応抑制	

炉心損傷後の影響緩和



# 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策（深層防護第4層）

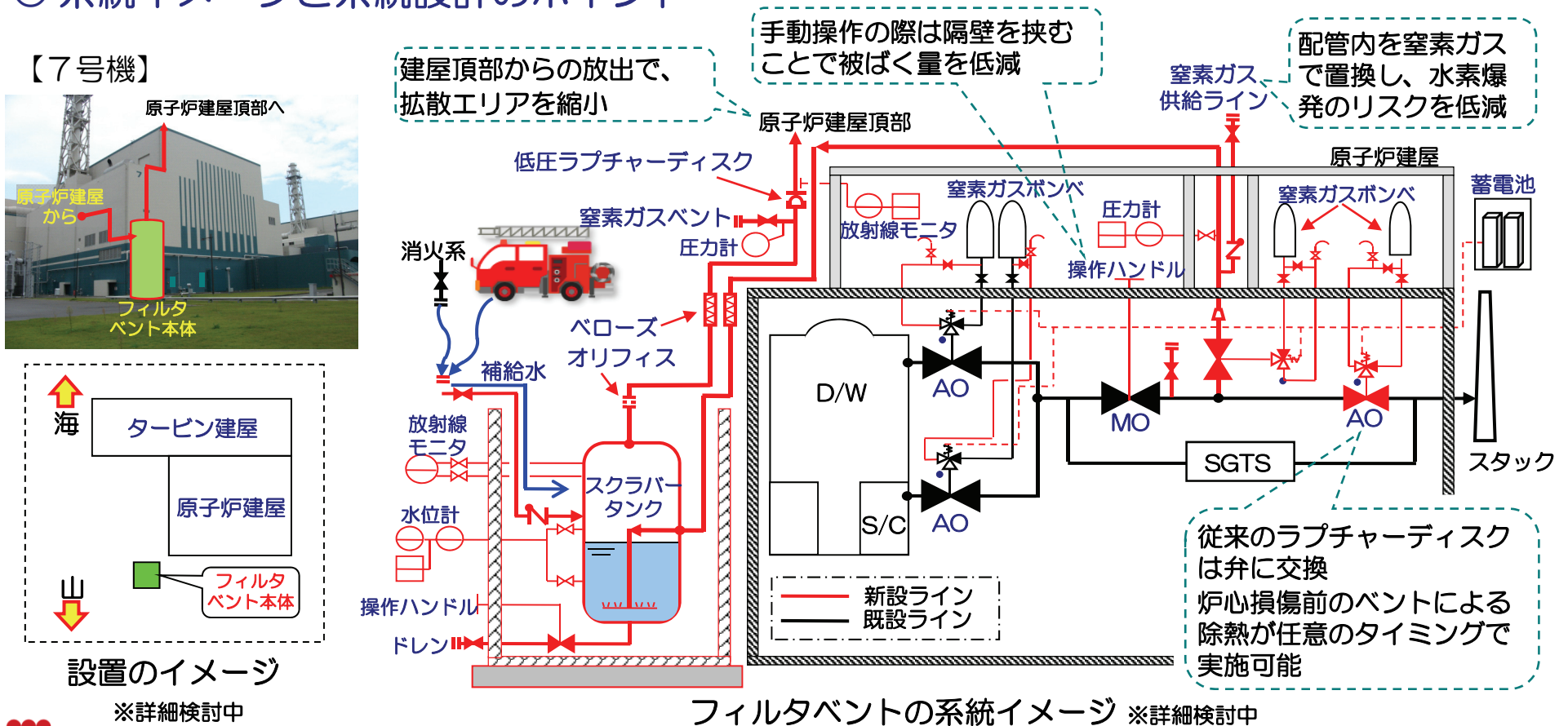


# 《第4層》フィルタベント設備（炉心損傷後の影響緩和策）

## ○ 設置の背景

- 炉心損傷後に格納容器の過温・過圧が進行し、格納容器が損傷
- 主として放射性セシウムの影響により、長期におよぶ広範囲な汚染が発生
  - 格納容器内スプレーとフィルタベントを組み合わせ、格納容器の損傷を防止
  - ベントラインに設けるフィルタ（スクラバー）で、セシウム等の粒子状放射性物質を除去

## ○ 系統イメージと系統設計のポイント



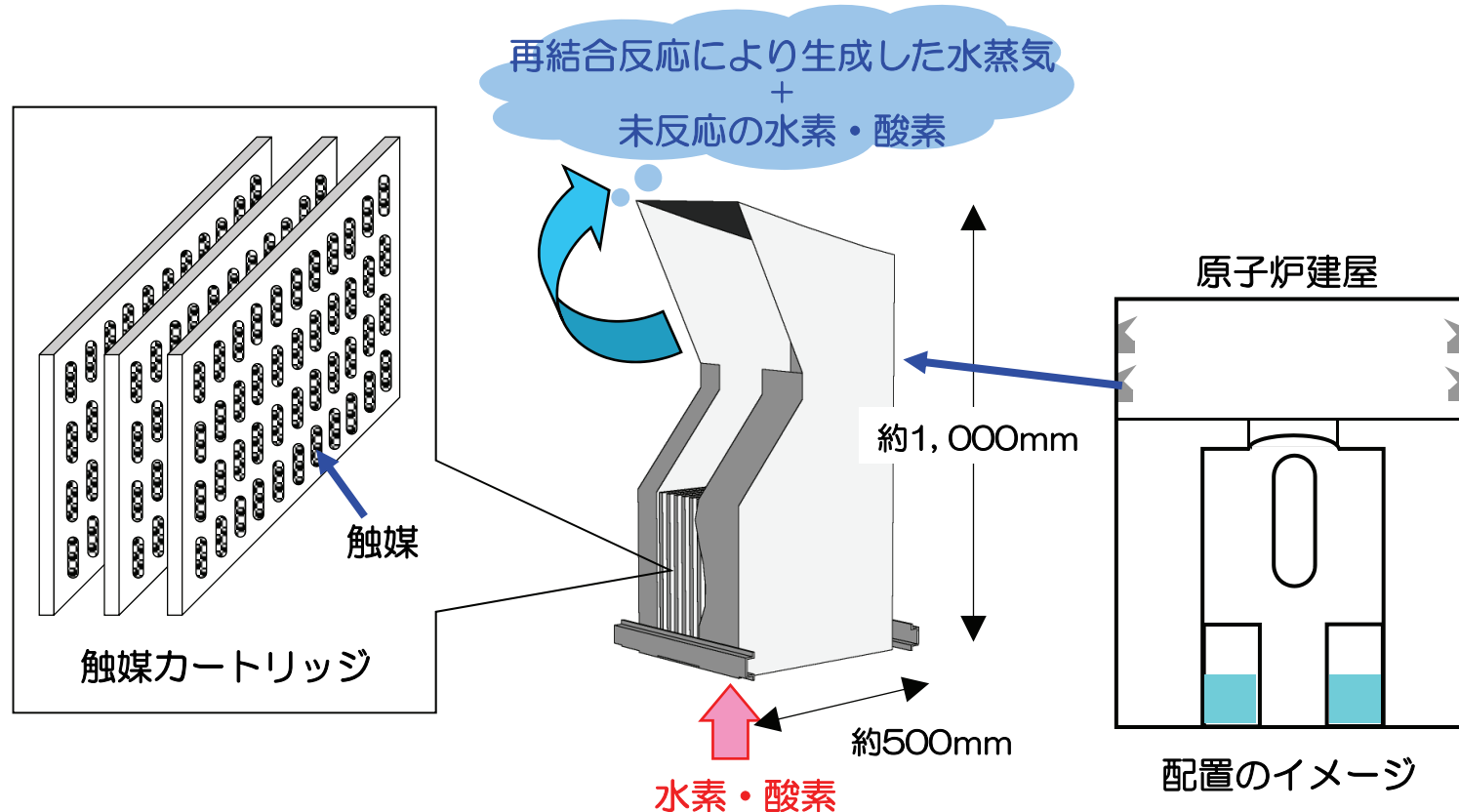
# 《第4層》 原子炉建屋水素処理設備（炉心損傷後の影響緩和策）

## ○ 設置の背景

- 炉心損傷後に、水素が格納容器から原子炉建屋に漏洩
- 1、3、4号機の原子炉建屋で水素爆発

→ **静的触媒式再結合装置(PAR※)を設置**（※ **P**assive **A**utocatalytic **R**ecombiner；**PAR**）


【処理能力】 0.338 kg/h  
大気圧，周辺温度50℃，水素濃度4%の場合  
【設置台数】 50台程度  
【設置場所】 原子炉建屋最上階



# 安全対策(設備面)の進捗と今後の予定(先行号機の例)

項目	全体スケジュール		
	平成23年度	平成24年度	平成25年度
①津波対策	重要エリア止水処理・防潮堤・防潮壁 等		津波監視システム等
②高圧注水対策	ホウ酸水注入系緊急活用手順、制御棒駆動水圧系緊急活用手順、RCIC手動起動手順整備		高圧代替注水設備設置等
③減圧対策	予備蓄電池、予備ポンペ、空気圧縮機配備 等		
④低圧注水対策	消防車配備 建屋外部接続口設置 等		
⑤原子炉、格納容器冷却(除熱)対策	代替海水熱交換器設備配備 等		
⑥炉心損傷後の影響緩和対策	フィルタベント、水素処理設備 等		
⑦電源対策	空冷式ガスタービン発電機車高台配備等		更なる高台電源増強等
⑧水源対策	貯水池、井戸、各種手順 等		
⑨燃料プール対策	消防車配備、燃料プール水位計設置、建屋外部接続口設置 等		
⑩地震対策	送電鉄塔基礎安定性評価、開閉所・変圧器耐震強化 等		更なる開閉所・変圧器耐震強化 等
⑪その他の視点対策	瓦礫撤去用重機配備 等		活動拠点の増強等

 福島第一事故を踏まえた対策[短期]

 福島第一事故を踏まえた対策[中長期]