

# 美浜・大飯・高浜発電所の 安全性向上対策の実施状況について

平成29年6月7日

○各発電所の状況について .....	1		
○高浜3,4号機の運転再開状況について .....	2	～	4
○大飯3,4号機の安全性向上対策工事の実施状況等について…	5	～	12
○高浜1,2号機の安全性向上対策工事の実施状況等について…	13	～	16
○中長期対策の実施状況について（美浜・高浜・大飯発電所）	17	～	20
○前回の委員会(2/13)における委員からの質問に 対する回答について .....	21	～	26

# 各発電所の状況について

		平成29年度	平成30年度～
美浜	1,2号機 廃止措置計画認可 (H29.4.19)	<p><b>現時点(6/7)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃止措置中 (系統除染のための準備作業(1号機:4月25日～、2号機:5月9日～))</li> </ul>	
	3号機 設置許可(H28.10.5) 運転延長認可(H28.11.16)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工事工程検討中 (使用済燃料ピットラック取替工事等)</li> </ul>	(～H32.3頃竣工)
高浜	1,2号機 設置許可(H28.4.20) 運転延長認可(H28.6.20)	<p>格納容器上部遮蔽設置工事等</p> <p>.....</p> <p>(～H32.5頃竣工)</p>	
	3,4号機 設置許可(H27.2.12)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・3号機：発電機並列に向けた各種試験実施中。7/上旬本格運転予定。</li> <li>・4号機：定格熱出力一定運転中(調整運転)。6/16本格運転予定。</li> </ul>	
大飯 ※	3,4号機 設置許可(H29.5.24)	<p>海水ポンプ室周辺浸水防護対策工事等</p> <p>.....</p> <p>(～H29.11竣工)</p>	

➡ 13

➡ 2

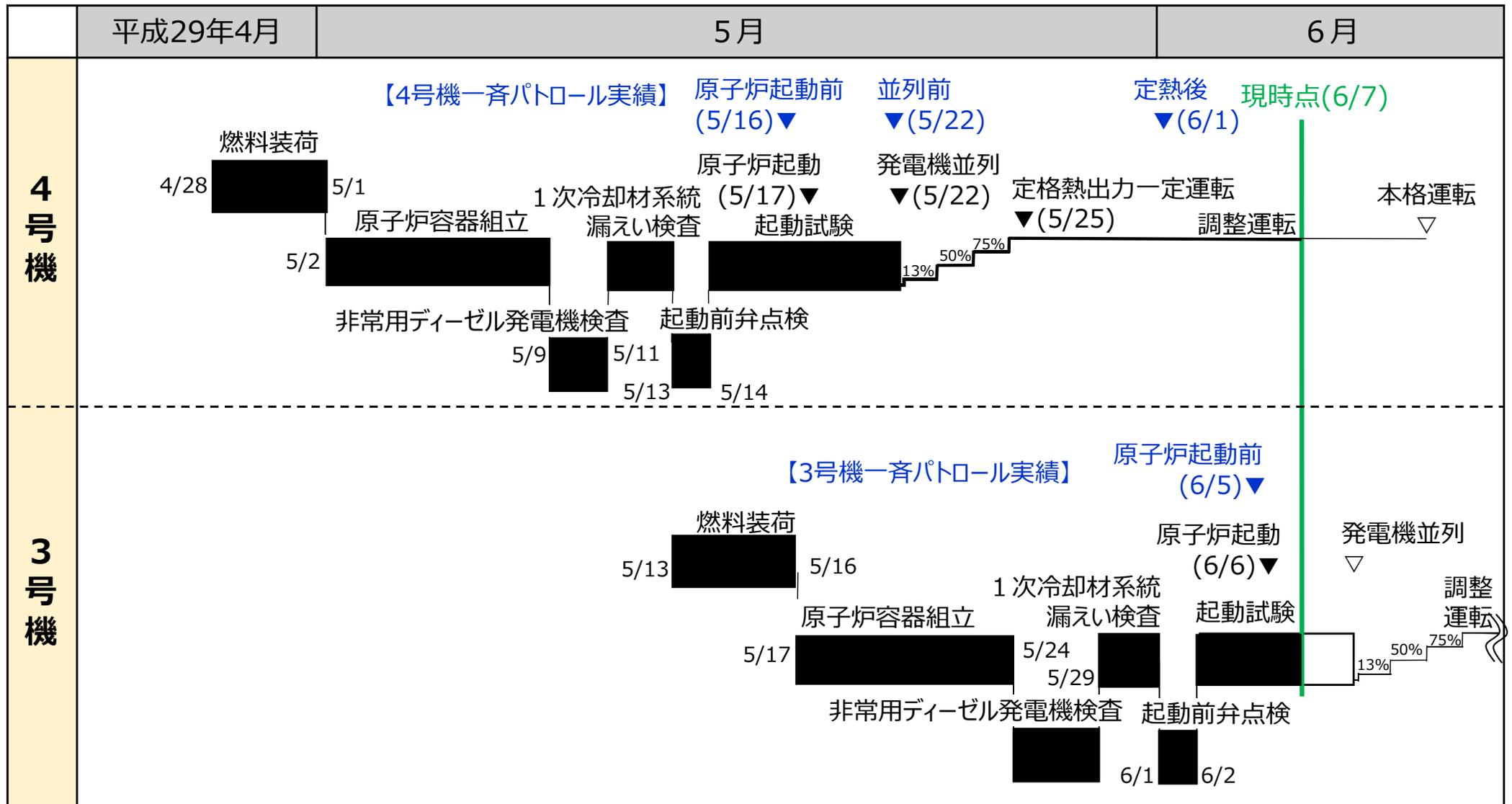
➡ 5

※：大飯1,2号機は、設置変更許可申請の準備中

# 高浜3,4号機の 運転再開状況について

# 高浜3,4号機運転再開状況について

- 高浜4号機は、5月17日に原子炉を起動、5月22日に発電機並列し、現在、定格熱出力一定運転中。(調整運転)
- 高浜3号機は、6月6日に原子炉を起動し、発電機並列に向けた各種試験実施中。
- 今回の運転再開にあたり、当社社員、協力会社社員が一体となり、1チーム10名以上の13チーム程度を構成し、原子炉起動前、発電機並列前、定格熱出力一定運転到達後において、新たに一齐パトロールを実施。 ➡ **4**

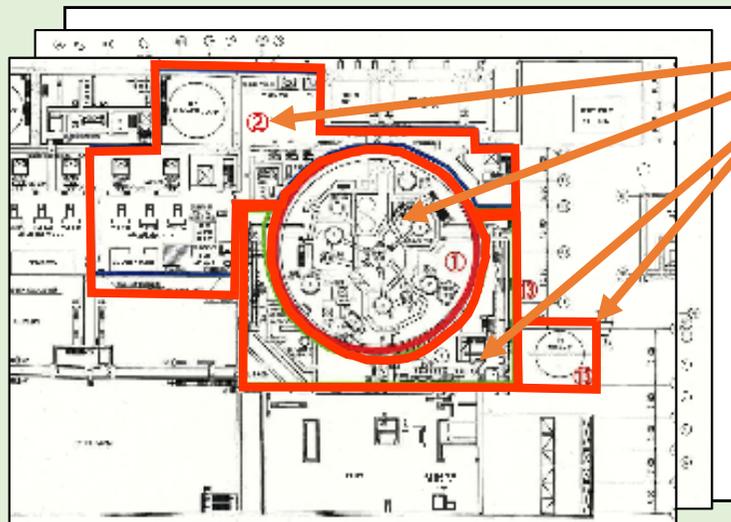


## ○目的（ねらい）

- ・当社社員、メーカ、協力会社、当社OBがチームを組み、チーム毎にエリアを決め、原子炉起動前、発電機並列前、定格熱出力一定運転到達後において、集中的に現場パトロールを実施。
- ・チームとして、異なる視点から現場を一緒にパトロールし、部品・機器だけでなく、設備全体の健全性も含め確認することで、トラブルの未然防止につなげる。

## ○一斉パトロールの実施方法

13チーム程度が各エリアに分かれてパトロール。



原子炉格納容器内、原子炉補助建屋、タービン建屋、海水ポンプエリア等をエリアに区切り、エリア単位でチームを編成しパトロールを実施。

特に以下の点を重点的に実施

- ・改造箇所の工事図面・記録を用いた現場確認
- ・狭隘部にある弁・フランジの再点検
- ・蒸気ラインの弁フランジ面の再点検
- ・起動に伴う切り替え箇所の健全性事前確認

## ○一斉パトロールの状況例（5月16日）



ツールボックスミーティング



改造箇所の図面確認



狭隘部の弁の点検

## ○点検結果例

（5/16:4号機原子炉起動前の結果）

189名が13エリアに分かれて実施。

原子炉起動までに処置を要する不具合等のないことを確認。

ポンプグランド部から出る水の量がやや多い、保温材の復旧が不十分等の軽微な気がかり事項について、速やかに処置を実施。

## ○4号機一斉パトロール総括

- ・保守課員、発電室員、メーカ、協力会社、OBなど、さまざまな経験や知識を持った者がチームとなり、多角的な視点での現場確認ができた。
- ・停止中に多数実施した工事の改造箇所の確認、復旧や、運転状態に移行する上での現場資機材の管理状況の確認などに加え、動いているプラントのパトロールの勘所を取り戻したり、自分の専門外の視点を養うことができたりといった副次的効果もあり、とりわけ、長期停止後の最終確認として非常に意義があった。

# 大飯3,4号機の安全性向上対策工事 の実施状況等について

# 大飯3,4号機 安全性向上対策工事の概要

## 地震



○発電所周辺の断層の連動性等について、詳細な調査を実施。  
 保守的に連動性等を評価し、地震想定を引上げ。(基準地震動 $S_e$ :856ガル)  
 必要箇所には、耐震補強等を実施。

1

重大事故が発生させないために

## 電源設備

○外部電源の強化や、所内電源を多重化・多様化

6 外部電源 (既設5回線) ※1 使用できない場合に備え

7 非常用ディーゼル発電機 (既設) [4台/2ユニット]

8 空冷式非常用発電装置 [4台/2ユニット]

9 電源車 [5台/2ユニット]

## 冷却機能の強化

10 海水取水手段の多様化  
 海水ポンプモーター予備品 [2台/2ユニット]  
 海水ポンプ (既設)  
 使用できない場合に備え

11 大容量ポンプ [3台/2ユニット] ※2

12 蒸気発生機の冷却手段の多様化  
 電動補助給水ポンプ (既設)  
 タービン動補助給水ポンプ (既設)  
 使用中に使用できない場合に備え

13 中圧ポンプ [2台/2ユニット] (当社の自主的な安全対策)

14 送水車 [5台/2ユニット] ※3

15 可搬式代替低圧注水ポンプ [5台/2ユニット]  
 恒設代替低圧注水ポンプ [2台/2ユニット] (既設)  
 使用中に使用できない場合に備え

万一、重大事故が発生した場合に備え

## 放射性物質の放出抑制対策

A 放水砲 (大気拡散抑制) [3台/2ユニット]

B 大容量ポンプ (放水砲専用) [2台/2ユニット]

C シルトフェンス (海洋拡散抑制)

## アクセスルート確保

※4 〇がれき撤去用重機を配備



【図はイメージ】

## 竜巻

○飛来物から機器を守るために竜巻対策設備を設置※

※:過去の日本最大竜巻(92m/秒)を上回る、風速100m/秒の竜巻が発生した場合に、鋼製材が飛来すると想定。

5 鋼鉄製の金網で飛来物のエネルギーを吸収  
 鋼板で貫通を阻止

## 格納容器の水素爆発防止対策

16 静的触媒式水素再結合装置 (PAR) [5台/ユニット]

17 原子炉格納容器水素燃焼装置 (イグナイタ) [14台/ユニット]

## 津波

○3,4号機海水ポンプ室及びその周辺にT.P.+8.0mの防護壁を設置し、敷地への津波の浸水を防止。また、3,4号機海水ポンプの引き津波対策として、天端高さT.P.-2.35mの貯水堰を設置。

2

- <入力津波高さ(水位上昇側)>  
3,4号機海水ポンプ室前面:T.P.+6.3m (基準津波高さ:T.P.+5.9m)
- <入力津波高さ(水位下降側)>  
3,4号機海水ポンプ室前面:T.P.-4.8m (基準津波高さ:T.P.-3.4m)

## 外部火災

○森林火災の延焼を防ぐため、発電所施設周辺の樹木を伐採し、幅18mの防火帯を確保。

4



## 内部火災

○火災の影響軽減の各防護対策を追加実施。

- ケーブル等に耐火シートを巻き付け。
- 異なる種類の火災検知器やハロン消火設備に加え、スプリンクラー等を追加設置。

3

ハロン消火剤ノズル  
 スプリンクラー  
 耐火シート  
 火災検知器

ハロン消火設備の設置  
 スプリンクラーの設置  
 ケーブルトレイへの耐火シートの設置

: 前回再稼動(H24.7)後に実施、配備、増台等

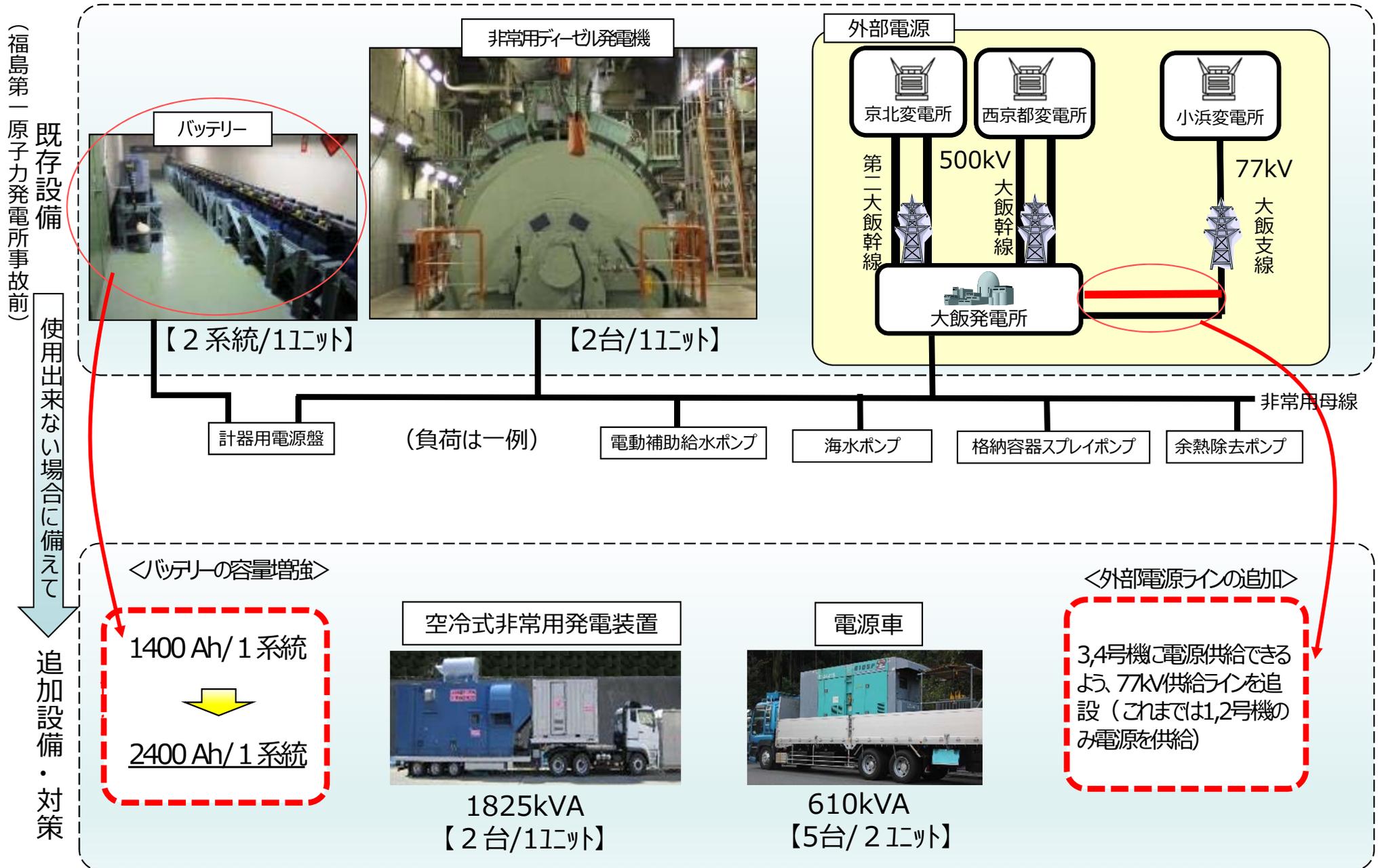
※1: 大飯支線(77kV)接続

※2: 増台(2台)

※3: 消防ポンプから変更

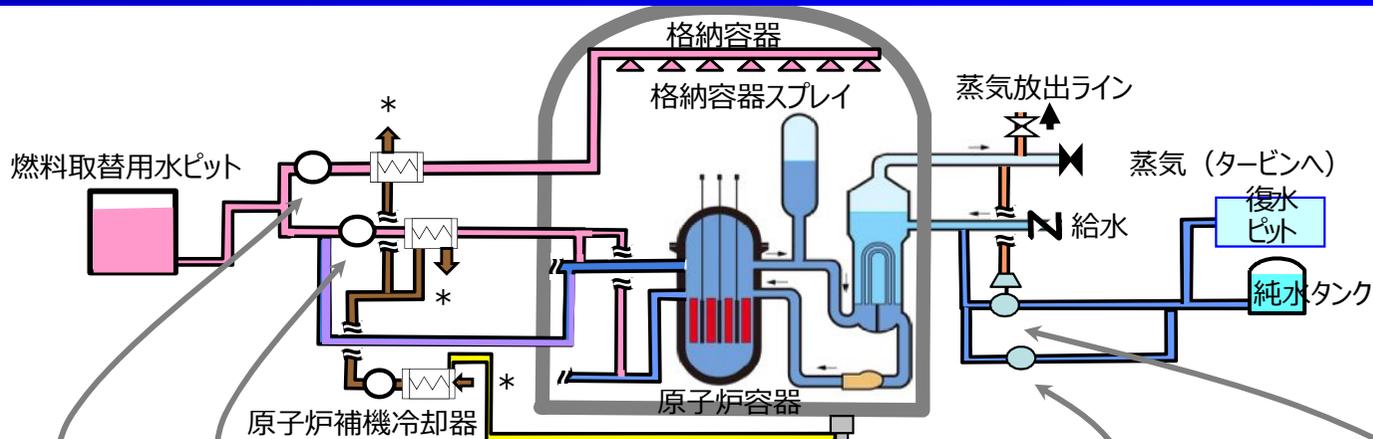
※4: 多種配備により瓦礫撤去機能強化

# 大飯3,4号機の安全対策設備（電源設備）



**：** 前回再稼動(H24.7)後に実施分

# 大飯3,4号機の安全対策設備（冷却設備）



（福島第一 原子力発電所事故前）

既存設備

<p>格納容器スプレイポンプ</p> <p>1200m<sup>3</sup>/h【2台/1ユニット】</p>	<p>余熱除去ポンプ</p> <p>1020m<sup>3</sup>/h【2台/1ユニット】</p>	<p>海水ポンプ</p> <p>5300m<sup>3</sup>/h【3台/1ユニット】</p>	<p>電動補助給水ポンプ</p> <p>140m<sup>3</sup>/h【2台/1ユニット】</p>	<p>タービン補助給水ポンプ</p> <p>250m<sup>3</sup>/h【1台/1ユニット】</p>
---	---	---	--	--

使用出来ない場合に備えて

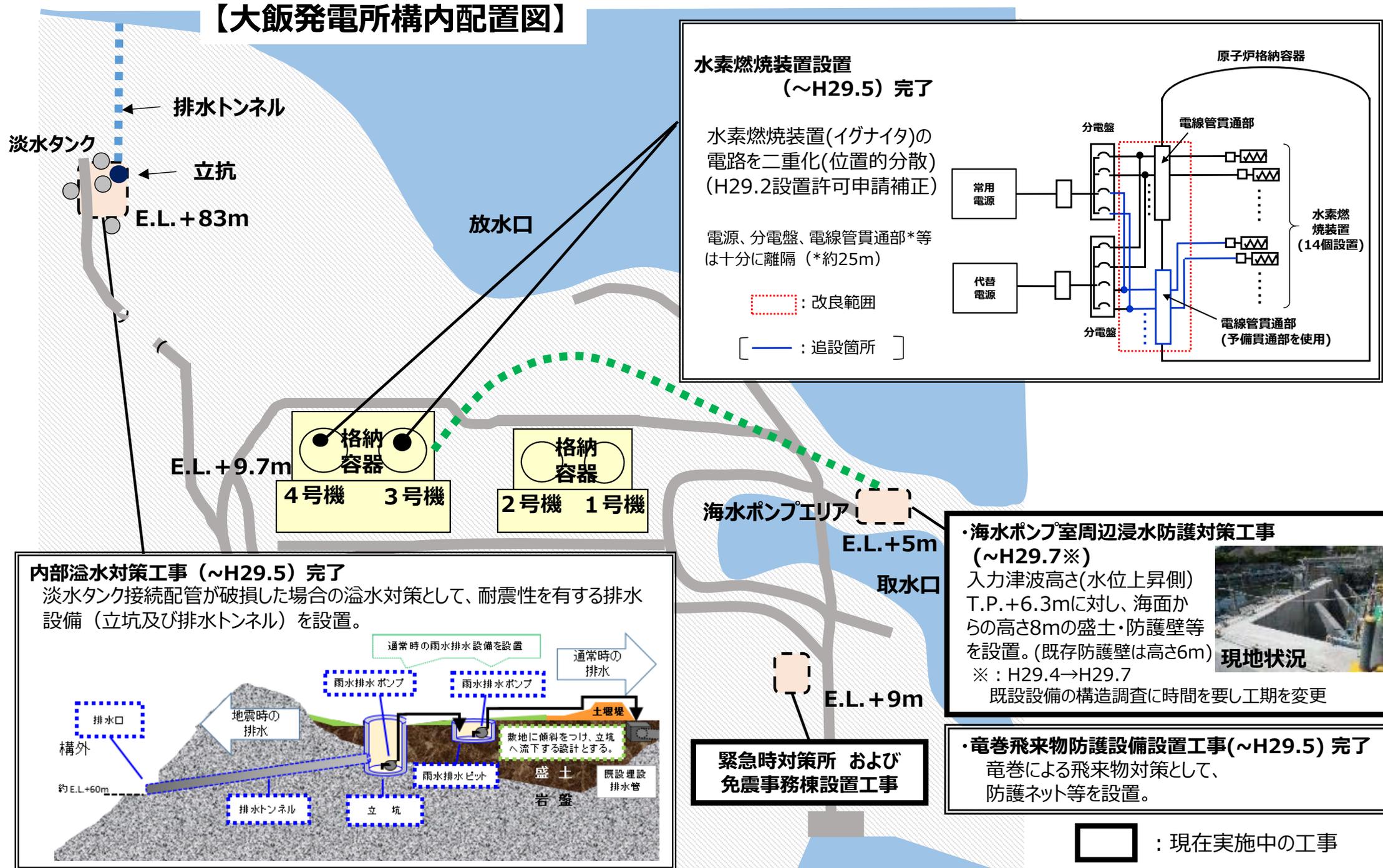
追加設備

<p>恒代替低圧注水ポンプ</p> <p>150m<sup>3</sup>/h【1台/1ユニット】</p>	<p>大容量ポンプ</p> <p>1800m<sup>3</sup>/h (3台) 【2台/2ユニット+予備1台】</p> <p>前回再稼動後に2台追加</p>	<p>送水車※</p> <p>300m<sup>3</sup>/h【5台/2ユニット】</p>
<p>可搬式代替低圧注水ポンプ</p> <p>150m<sup>3</sup>/h【4台/2ユニット+予備1台】</p>	<p>海水ポンプモータ予備</p> <p>【1台/1ユニット】</p>	<p>中圧ポンプ</p> <p>50m<sup>3</sup>/h【1台/1ユニット】</p>

：前回再稼動(H24.7)後に実施分

※：前回再稼動(H24.7)時には消防ポンプ(必要台数53台/総数87台)を配備していたが、事故対応時間を短縮するため、送水車(4台/2ユニット+予備1台)に変更し配備。

## 【大飯発電所構内配置図】



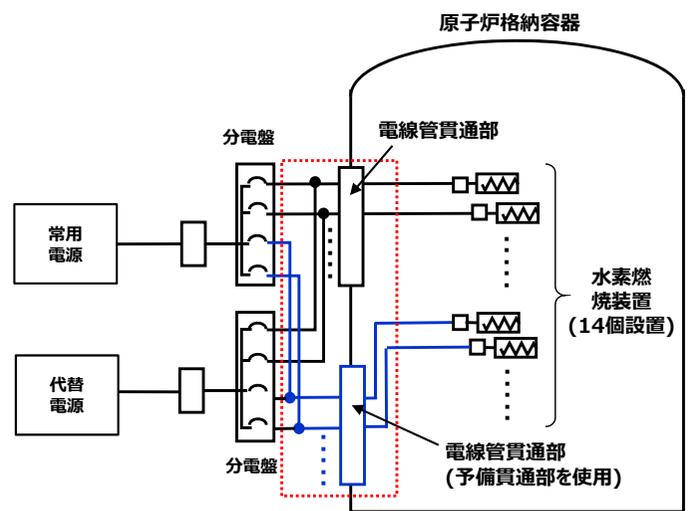
### 水素燃焼装置設置 (～H29.5) 完了

水素燃焼装置(イグナイタ)の電路を二重化(位置的分散)(H29.2設置許可申請補正)

電源、分電盤、電線管貫通部\*等は十分に離隔(\*約25m)

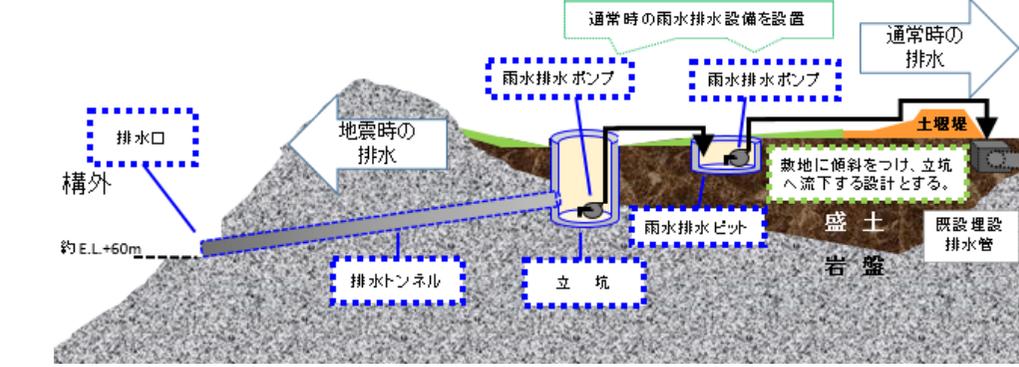
⬜ : 改良範囲

— : 追設箇所



### 内部溢水対策工事 (～H29.5) 完了

淡水タンク接続配管が破損した場合の溢水対策として、耐震性を有する排水設備(立坑及び排水トンネル)を設置。



### 海水ポンプ室周辺浸水防護対策工事 (～H29.7※)

入力津波高さ(水位上昇側) T.P.+6.3mに対し、海面からの高さ8mの盛土・防護壁等を設置。(既存防護壁は高さ6m)  
 ※ : H29.4→H29.7  
 既設設備の構造調査に時間を要し工期を変更



### 緊急時対策所 および 免震事務棟設置工事

### 竜巻飛来物防護設備設置工事(～H29.5) 完了

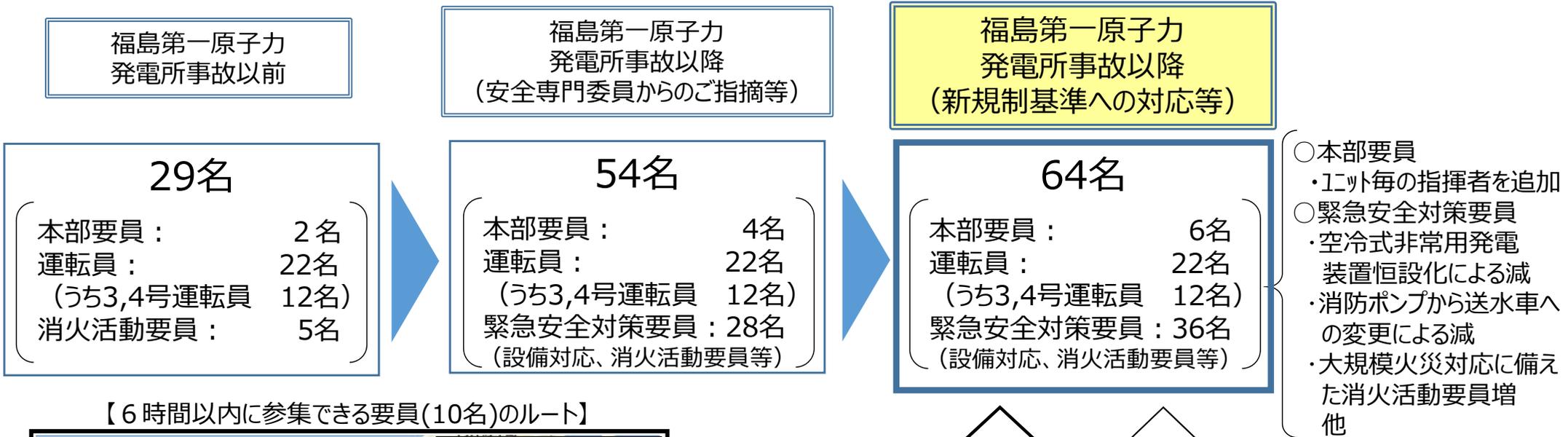
竜巻による飛来物対策として、防護ネット等を設置。

⬜ : 現在実施中の工事

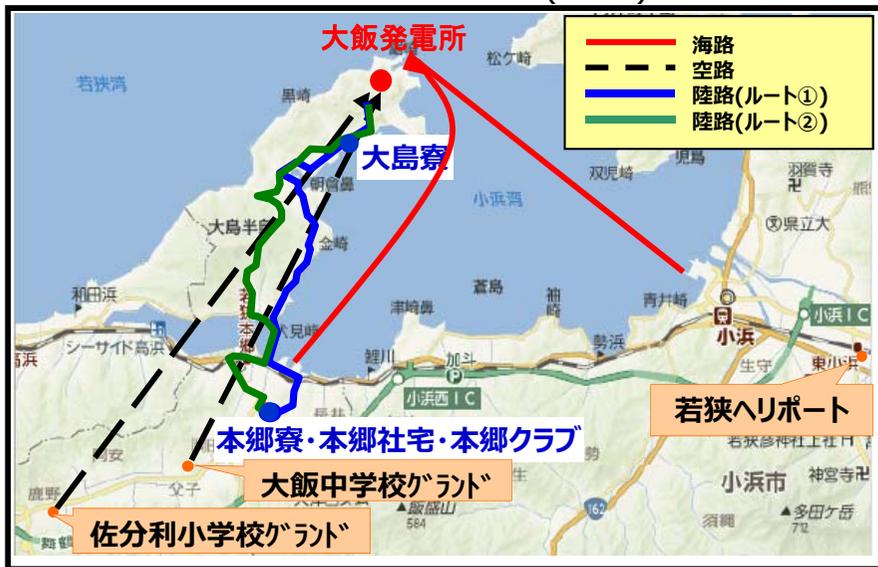
# 組織・体制の充実 ～初動および召集体制の強化～

福島第一原子力発電所事故の知見等を踏まえ、大飯3,4号機の初動・召集体制を強化。

- ・万が一に備え、発電所構内に初動対応要員として64名が24時間常駐。
- ・また、本部要員として10名が事故発生から6時間以内に召集できる体制。



【6時間以内に参集できる要員(10名)のルート】



自然災害等による交通手段の途絶を想定した場合でも、本部要員として10名が、6時間以内に徒歩で参集できるエリア(大島寮、本郷寮等)にいる体制を構築

発電所員： 約380名  
協力会社： 約150名

プラントメーカーによる技術支援  
若狭地区： 11名  
神戸地区： 約400～500名

## ○想定外の事象への対応能力向上を図るための教育、訓練の充実

平成23年に発生した福島第一原子力発電所事故を教訓として、事故対応能力の向上を目的とした教育・訓練を計画・実施。その後、平成25年の新規制基準施行に鑑み、重大事故等発生時の対応能力向上のための教育・訓練を充実。原子力事業本部と発電所が連携して、教育・訓練のPDCAを回し、現場の意見を反映しながら継続的に改善。

## ○大飯発電所における重大事故時対応能力向上に向けた教育・訓練の実施状況

事故発生時の体制・手順の充実・強化を進めるとともに、それに応じて、必要な教育や各種訓練を繰り返し行い、所員および協力会社の重大事故時対応能力の向上を推進。

### 【教育・訓練実績】

大飯発電所	H25年度	H26年度	H27年度	H28年度
教育受講者人数 (延べ人数)	約1,100人	約1,400人	約1,300人	約1,600人
訓練回数	約1,100回	約1,000回	約1,100回	約1,000回

電源車による給電訓練  
(H23年より実施)



重機による瓦礫除去訓練  
(H23年より実施)



可搬式代替低圧注水ポンプによる給水訓練(H25年より実施)



送水車による給水訓練  
(H28年より実施)



## ○現場の意見を踏まえた教育、訓練の改善

【訓練時の体験を踏まえた事故対応資機材の改善例（大飯発電所）】

訓練項目	気づき・指摘事項	改善案
<p>可搬式代替低圧注水ポンプによる給水訓練 可搬式代替低圧注水ポンプ取水用の仮設水槽を組立て、海水を水張りする訓練</p>	<p>仮設組立水槽のホース外れ防止 ・仮設組立水槽へ給水時の水の勢いによって、ホースが外れる可能性があった。</p>	<p>・ホース外れ防止のための固定架台を配備。（H28）</p>

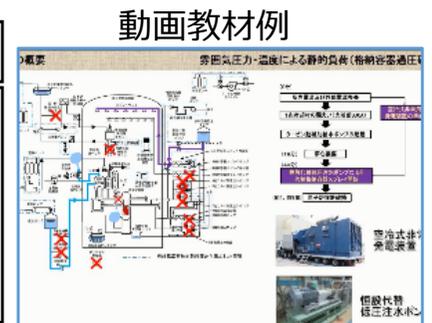


## ○緊急時対策本部の指揮者クラスに対する事故時対応能力向上教育の改善

緊急時対策本部の指揮者クラスに対して、事故収束手段を判断するために必要な技術的能力、意思決定能力、緊急安全対策要員等を的確に統率するために必要な緊急時のリーダーシップ能力を向上させるための教育の実施、継続的に改善。

【指揮者クラスに対する事故時対応能力向上教育の改善例】

教育項目	気づき・指摘事項	改善案
<p>シビアアクシデント対応教育(講義) プラント挙動可視化ツールを用い、シビアアクシデント時の社内規定に基づく対応に係る知識を習得。</p>	<p>受講者感想による気づき ・いつでも自己学習できるような教材が良い ・基礎的な内容の反復教育は、集合講義ではなく、自己学習で各自のペースで実施した方が学習効果が高い</p>	<p>・事故時の物理現象や、事故対応の基本についての反復教育には、解説動画を用いた自己学習教材を活用。 ・集合講義は定期的実施。</p>



平成29年度においても、重大事故時対応能力向上に向けた教育・訓練等を、継続して計画的に実施している。

# 高浜1,2号機の安全性向上対策工事 の実施状況等について

# 高浜1,2号機 主な安全性向上対策工事の実施状況

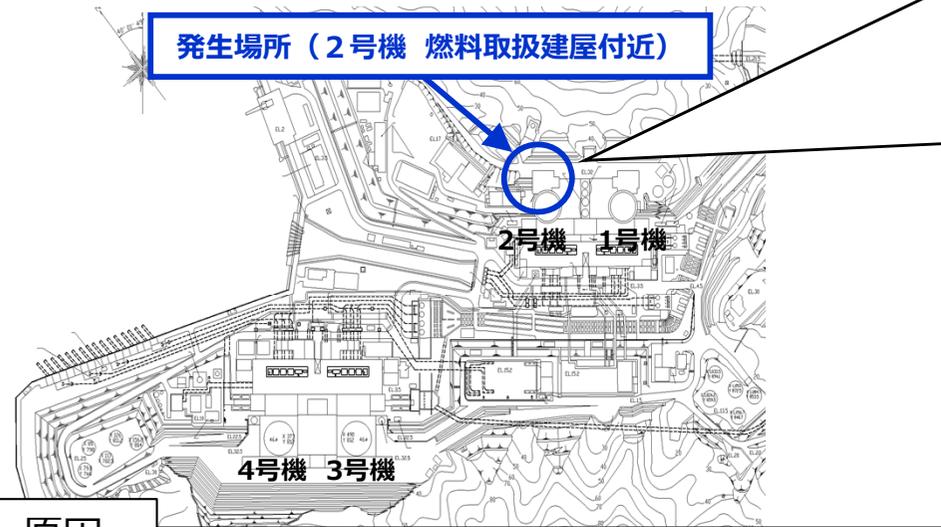
工事件名	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	H32年度
格納容器上部遮蔽設置工事	H29.2 (※1)	現時点(6/7) 既設コンクリート壁の補強、トップドームの設置など		H31.8 (1号機) (2号機はH31.11)	
	(※1) 2号機クレーン倒壊により準備作業(足場組立)を中断(1/20~4/12)安全管理の総点検結果を踏まえた再発防止対策を実施し、4/13より準備作業を再開				
燃料取替用水タンク取替工事	H28.9 既設タンクの撤去	タンクの製作、基礎コンクリート補強など		新タンクの設置 H31.8	
	タンク廻り竜巻防護壁設置など				
火災防護対策工事	H28.9	難燃ケーブルへの引替、防火シート施工、火災感知設備など		H31.8	
	中央制御室下ケーブル引替				
海水取水設備移設工事 (2号機のみ)		H29.6(※2) 岩盤内トンネル掘削、配管設置など		H32.3	
	(※2) 準備作業である作業エリアの埋設干渉物調査・移設に時間を要し、着手時期を変更 H29.5→H29.6				
中央制御盤取替工事			H30.4	H31.8	
	既設制御盤撤去、新制御盤設置など				

■ 実績

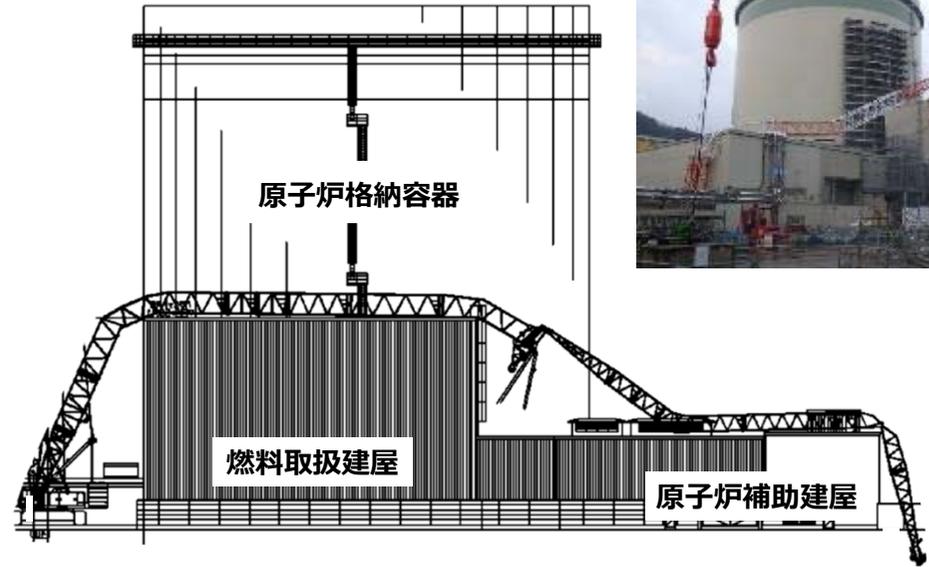
# 高浜2号機クレーン倒壊事故の原因と対策

平成29年1月20日、高浜1,2号機格納容器上部遮蔽設置工事用の大型クレーン1台が倒壊。

発生場所（2号機 燃料取扱建屋付近）



原子炉補助建屋および燃料取扱建屋



## 原因

- 発電所構内で、瞬間風速 40 m/秒以上の風が吹いたものと推定。
- 当社
  - ・事前に元請会社のクレーン転倒防止対策を確認しておらず、当日の暴風警報発令を認識していたものの、社内関係者との協議や元請会社への連絡を行わなかった。
  - ・暴風が予想される状況において、機材の転倒や落下等による安全上重要な設備等への影響を議論していなかった。
- 元請会社
  - ・風速変化や暴風警報発令に気付かず、必要な対応をとっていなかった。

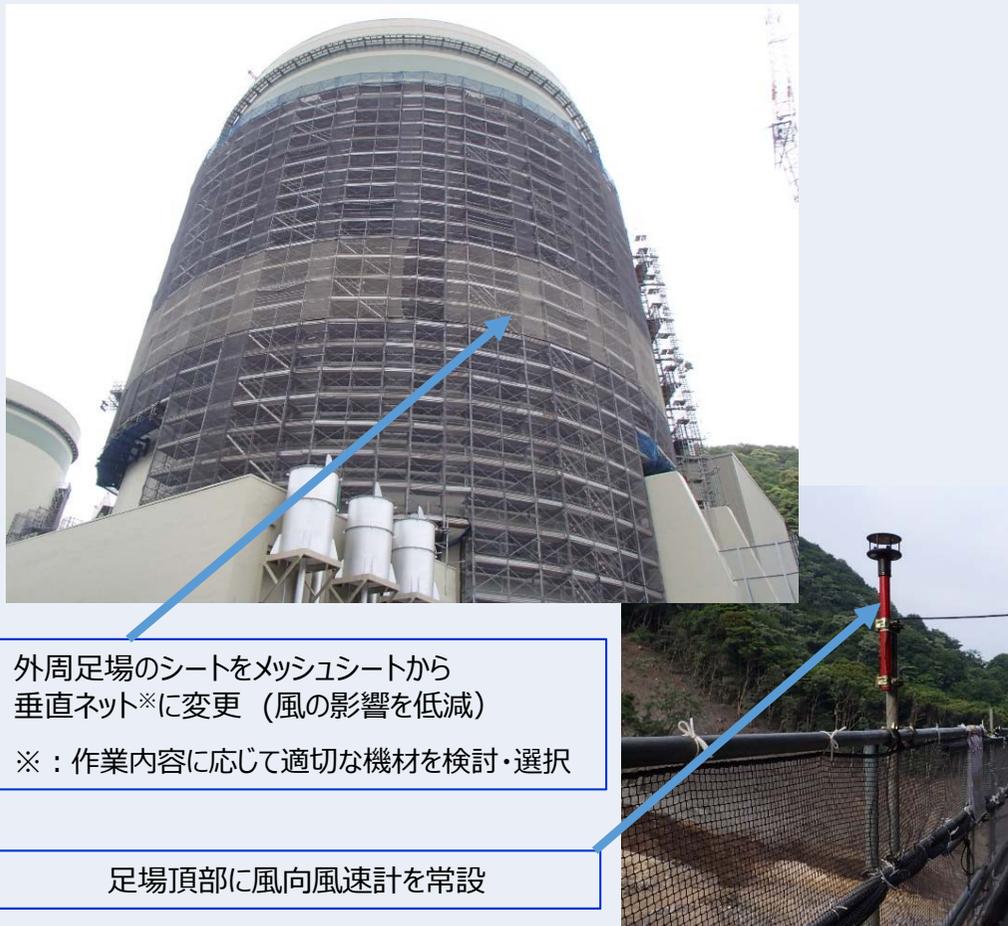
## 対策

- クレーン作業終了時は、風速に関わらずクレーンジブをたたむ等の対策を実施。  
また、最大瞬間風速が 30 m/秒を超えると予想される場合、クレーンジブを接地する対策を実施。
- 当社は、自然環境の悪化により想定されるリスクを事前に検討するとともに、請負会社に対して適切な処置を計画するよう要求し、満足していることを確認。  
また、自然環境の悪化に関する情報を積極的に入手、関係者に情報共有し、事前に定めた適切な処置を計画どおりしていることを確認。
- 上記対策をルール化し、元請会社に確実に実施させるとともに、必要に応じて指導を行い、当社が最終的な確認を実施。

## ○再発防止対策の実施状況（事例）

### 自然環境の悪化等を想定した安全対策

- 強風などによる安全上重要な機器等へのリスクを検討し、適切な安全対策を実施（高浜1,2号機格納容器上部遮蔽設置工事）



外周足場のシートをメッシュシートから垂直ネット※に変更（風の影響を低減）

※：作業内容に応じて適切な機材を検討・選択

足場頂部に風向風速計を常設

### 土木建築工事の現場体制強化

- 発電所の工事管理体制の強化を図るため、土木建築の工事量に応じた要員の再配置、土木建築工事を統括的に管理する副所長を新たに設置。

### 自然環境情報の積極的な入手

- 自然環境の悪化に関する情報を積極的に入手する方策として、各発電所に民間会社の気象予報システムを導入
  - ・24時間後までの気象予測、気象台発表の注意報、警報の表示、注意アナウンス
  - ・気象情報が急変する恐れがあれば、すみやかに協力会社と情報を共有
  - ・気象が悪化した場合にアラートメールを配信

### リスクに対する注意、意識の向上

- 大規模な屋外工事において、大型モニターを設置し、風速の表示をすることで、作業に従事する人が確認でき安全管理の向上に役立つよう計画（美浜発電所 防潮堤工事ほか）

## ○再発防止対策の実施状況については、適宜、原子力安全検証委員会※でご意見を賜り、改善を図る。

※：美浜3号機二次系配管破損事故を踏まえた再発防止対策について、社外有識者を主体に独立的な立場からその有効性を検証するとともに、安全文化醸成活動、福島第一原子力発電所事故を踏まえた原子力発電の自主的・継続的な安全への取組みについても助言等を頂き、継続的な改善に支えられた安全の確保をより確実なものとするために設置。

# 中長期対策の実施状況について (美浜・高浜・大飯発電所)

## ○緊急時対策所設置工事

プラントに緊急事態が発生した場合に、事故の制圧・拡大防止を図るための対策本部となる緊急時対策所を設置。

【高浜発電所の緊急時対策所外観イメージ】



【例：高浜発電所の設置工程（大飯発電所もほぼ同様）】

	H26年度	H27年度	H28年度	H29年度	H30年度
工 程		設計・調査	▼開始 (H28.3) 敷地造成等	▼開始 (H29.1) 建物工事	機電工事等※
				▼現在	運用開始

・美浜発電所緊急時対策所は、設計検討および干渉物撤去中。

※：機械設備、電気設備等の配置

## ○免震事務棟設置工事

事故対応が膨大かつ長期化した場合の支援を目的に、主に、初動要員の宿直場所、要員待機場所、資機材受入れ及び保管場所として、自主的な位置付けで免震事務棟を設置。

高浜発電所現地状況（建屋基礎工事）



【例：高浜発電所の設置工程（大飯発電所もほぼ同様）】

	H26年度	H27年度	H28年度	H29年度	H30年度
工 程		設計・調査等		▼工事再開(H29.2) 建物工事	機電工事等※
				▼現在	運用開始

・美浜発電所免震事務棟は、仕様等について設計検討中。

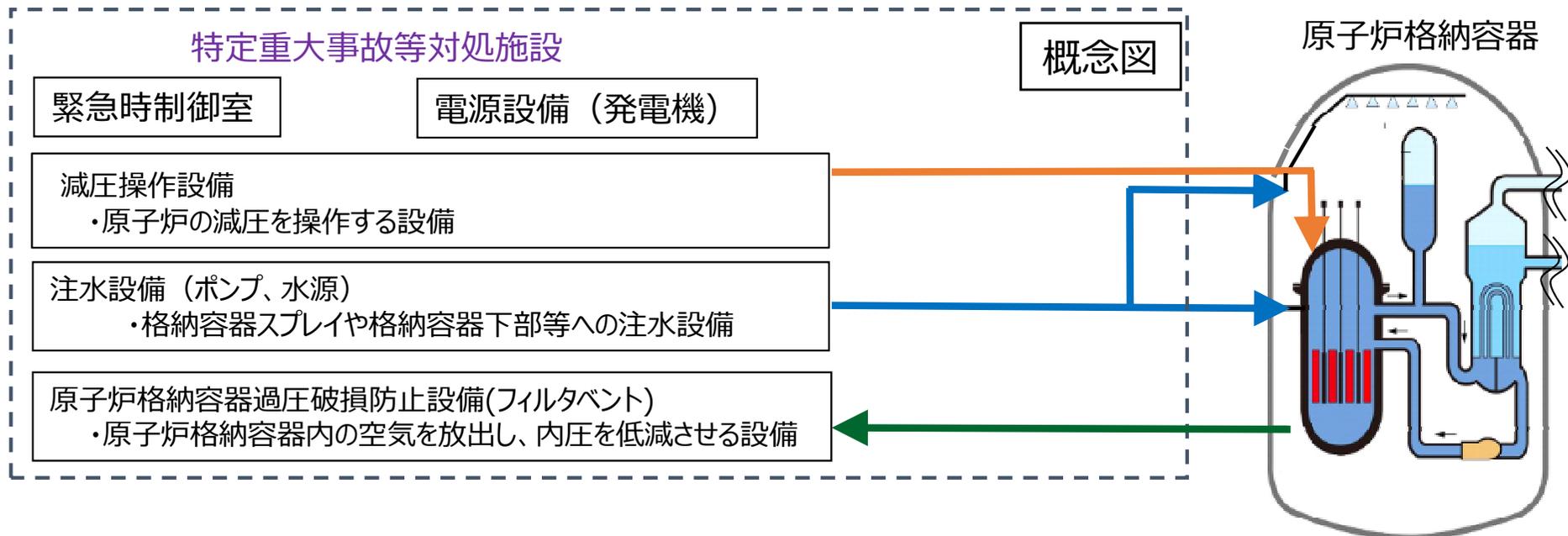
※：機械設備、電気設備等の配置

# 特定重大事故等対処施設設置

原子炉建屋への故意による大型航空機の衝突やその他のテロリズム等により、原子炉を冷却する機能が喪失し、炉心が著しく損傷した場合に備えて、格納容器の破損を防止するための機能を有する施設を設置。

規則※の一部改正により特定重大事故等対処施設は、本体施設の工事計画認可から5年までに設置することを要求。

(※：実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則)

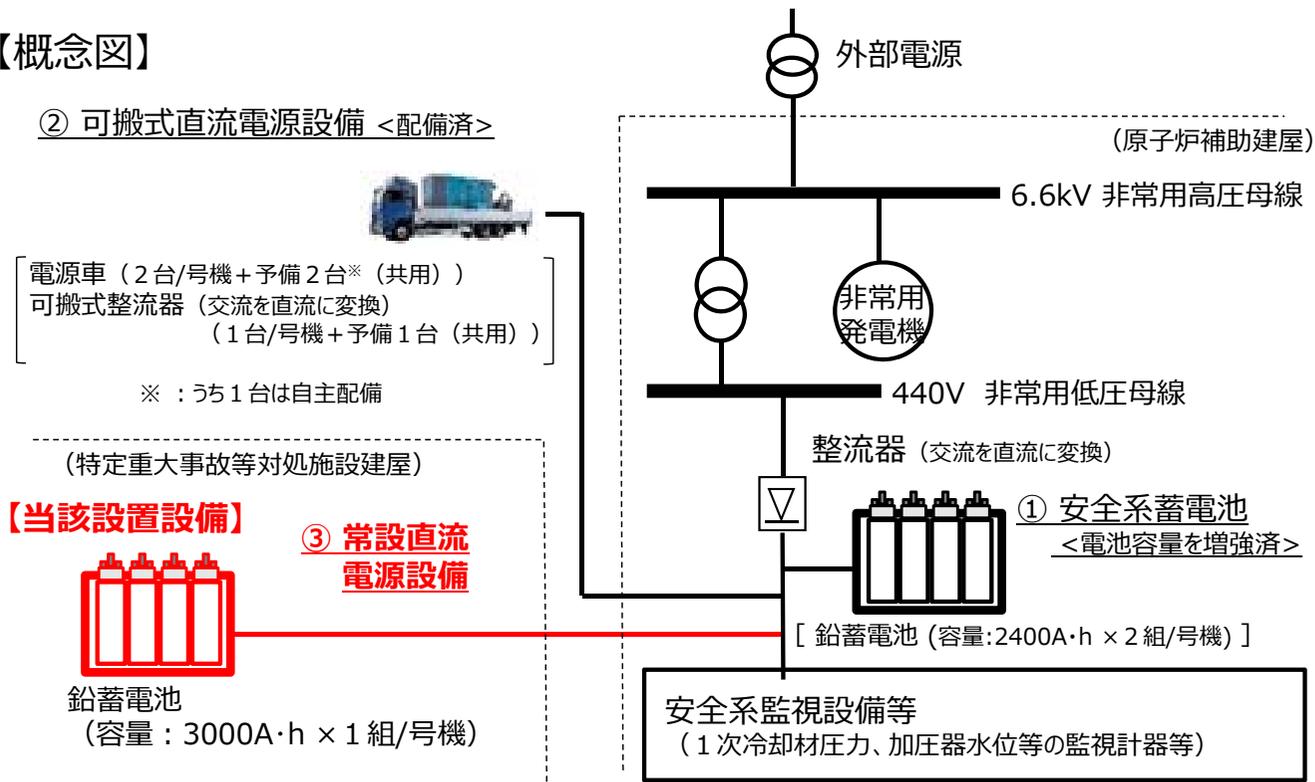


	本体施設の 工事計画認可	設置期限	手続き・審査状況
美浜3号機	H28.10.26	H33.10.25	・原子炉設置変更許可申請準備中。
高浜1,2号機	H28.6.10	H33.6.9	・H28.12.22に原子炉設置変更許可申請を行い、審査中。
高浜3,4号機	3号機：H27. 8.4 4号機：H27.10.9	3号機：H32. 8.3 4号機：H32.10.8	・H28.9.21に原子炉設置変更許可。 ・H29.4.26に工事計画認可申請を行い、審査中。 ・敷地造成、水源トンネル、配管トンネル掘削中。
大飯3,4号機	審査中	[本体施設の工事計画 認可から5年まで]	・原子炉設置変更許可申請準備中。

# 常設直流電源設備設置

重大事故等の対応に必要な設備に電気の供給を行うための、特に高い信頼性を有する常設直流電源設備(3系統目)を設置。

## 【概念図】



	本体施設の 工事計画認可	設置期限	手続き・審査状況
美浜3号機	H28.10.26	H33.10.25	・原子炉設置変更許可申請準備中。
高浜1,2号機	H28.6.10	H33.6.9	・原子炉設置変更許可申請準備中。
高浜3,4号機	3号機 : H27. 8.4 4号機 : H27.10.9	3号機 : H32. 8.3 4号機 : H32.10.8	・H29.3.17に原子炉設置変更許可申請を行い、審査中。
大飯3,4号機	審査中	[ 本体施設の工事計画 認可から5年まで ]	・原子炉設置変更許可申請準備中。

# 前回の委員会(2/13)における委員 からの質問に対する回答について

○格納容器内で水素が滞留する可能性のある箇所における水素爆轟の  
可能性について

# 水素燃焼に係る判断基準

## ○新規制基準

(実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則)

第37条 2 発電用原子炉施設は、重大事故が発生した場合において、原子炉格納容器の破損及び工場等外への放射性物質の異常な水準の放出を防止するために必要な措置を講じたものでなければならない。

(上記基準の解釈)

第37条 2-2 上記「原子炉格納容器の破損及び工場等外への放射性物質の異常な水準の放出を防止するために必要な措置を講じたもの」とは次に掲げる要件を満たすものであること。

(a) 想定する格納容器破損モードに対して、原子炉格納容器の破損を防止し、かつ、放射性物質が異常な水準で敷地外へ放出されることを防止する対策に有効性があることを確認する。

2-3 上記「有効性があることを確認する」とは、以下の評価項目を概ね満足することを確認することをいう。

(f) 原子炉格納容器が破損する可能性のある水素の爆轟を防止すること。

(g) 可燃性ガスの蓄積、燃焼が生じた場合においても、「原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力が最高使用圧力又は限界圧力を下回ること」の要件を満足すること

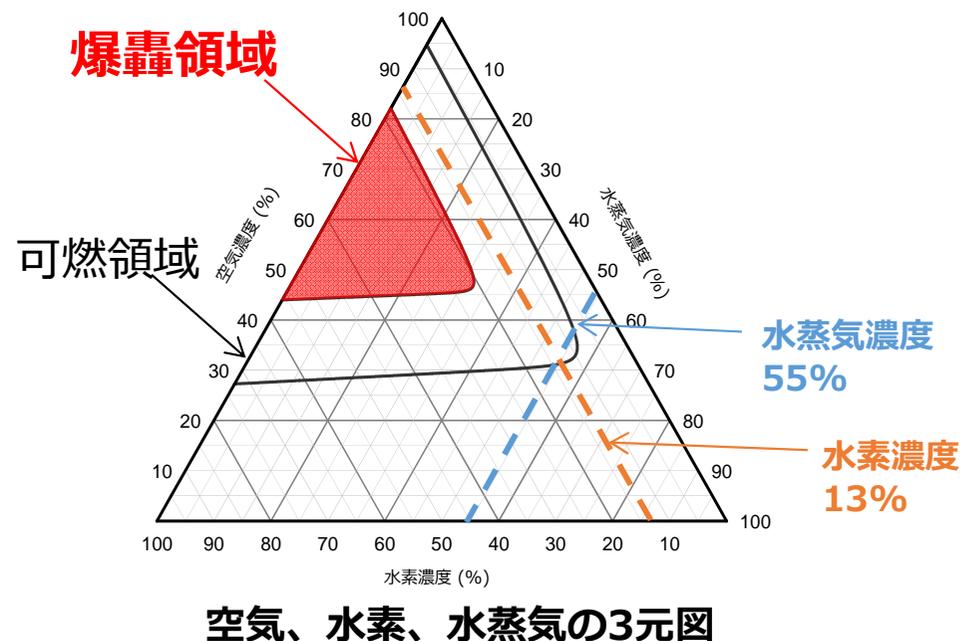
2-4 上記「原子炉格納容器が破損する可能性のある水素の爆轟を防止すること」とは、以下の要件を満たすこと。

(a) 原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件に換算して13vol%以下又は酸素濃度が5vol%以下であること

## ○事業者の自主基準

格納容器内局所水素濃度が13%以下、  
もしくは水蒸気濃度が55%以上

出典：Z.M. Shapiro, T.R. Moffette, "HYDROGEN FLAMMABILITY DATA AND APPLICATION TO PWR LOSS-OF-COOLANT ACCIDENT", WAPD-SC-545, U.S. Atomic Energy Commission, Pittsburgh, PA, 1957, 13 pp.



## ○概要

水素爆轟の観点で最も厳しい事象である、格納容器内への水素の放出速度が大きい「大LOCA+ECCS注入失敗」を選定し、解析コードGOTHICを用いて水素濃度分布推移を評価する。

## ○計算手法

格納容器をノード分割し、区画内で発生する水素分布・水蒸気分布の推移を計算する。

### ◆ 上部区画

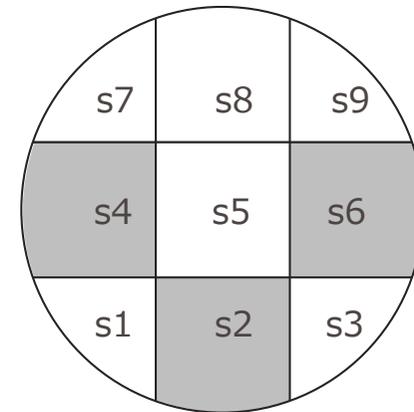
垂直方向に3Levelにノード分割、各Levelは9区画にノード分割（s2,s4,s6はP A R※1設置ノード）

### ◆ 下部区画

原子炉キャビティ、各ループ室※2外周等各区画ごとに分割

※1：静的触媒式水素再結合装置

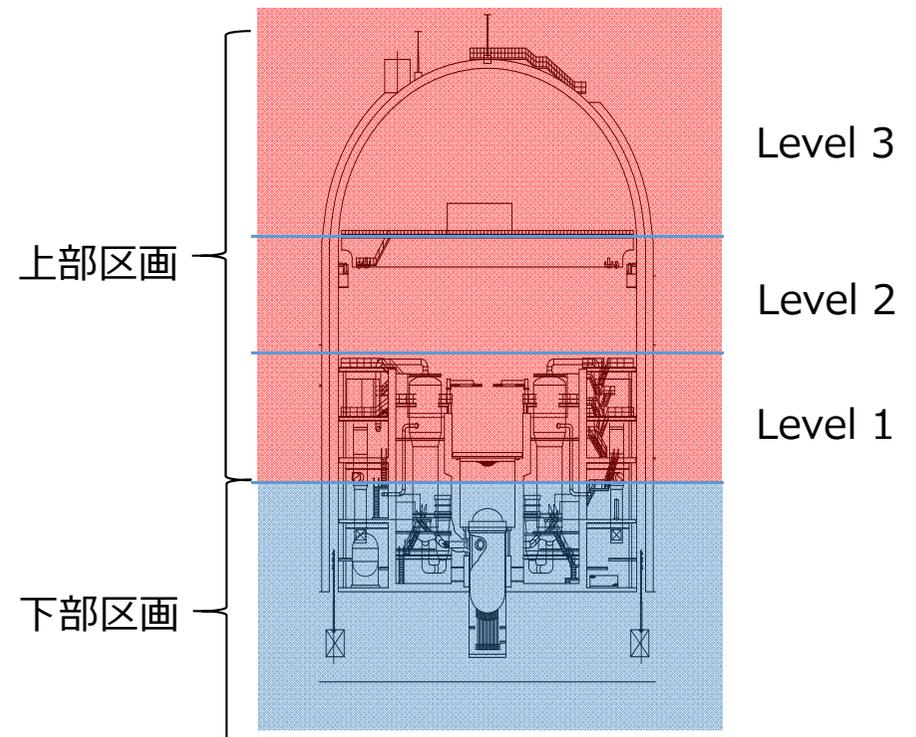
※2：1次冷却材配管等が敷設されている部屋



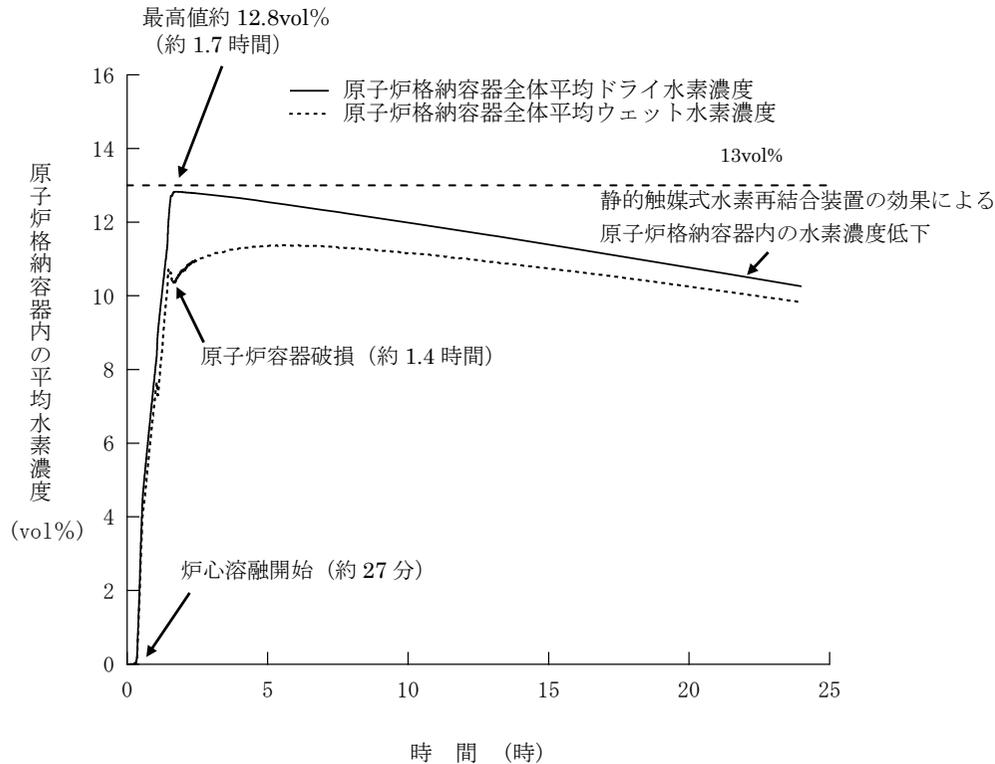
上部区画9分割イメージ（Level1）

Level2 : s10~s18

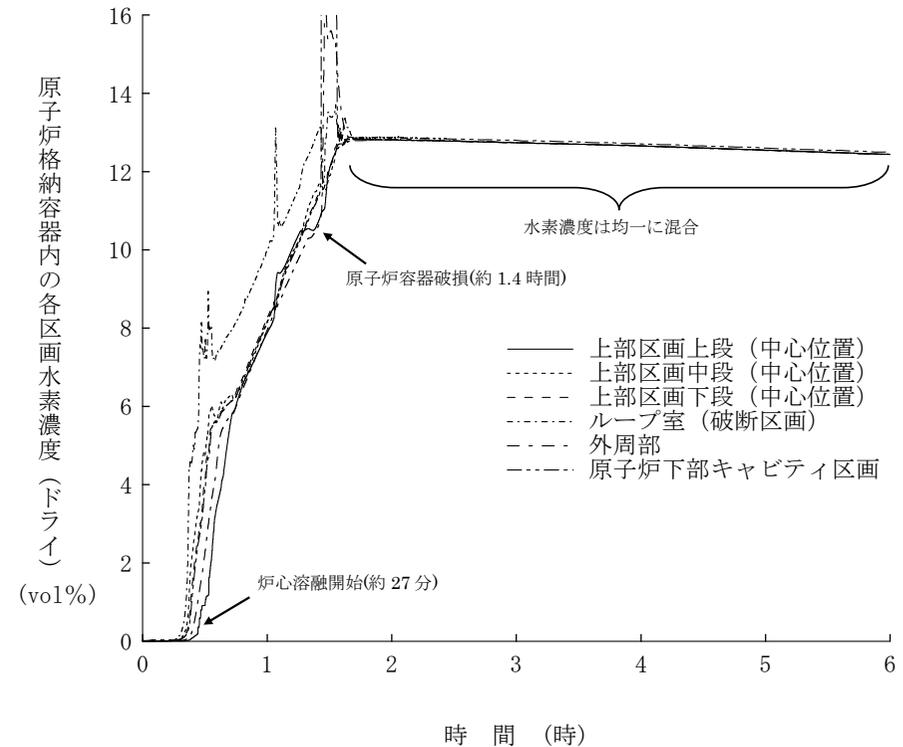
Level3 : s19~s27



上部・下部垂直方向分割イメージ



原子炉格納容器内平均水素濃度の推移



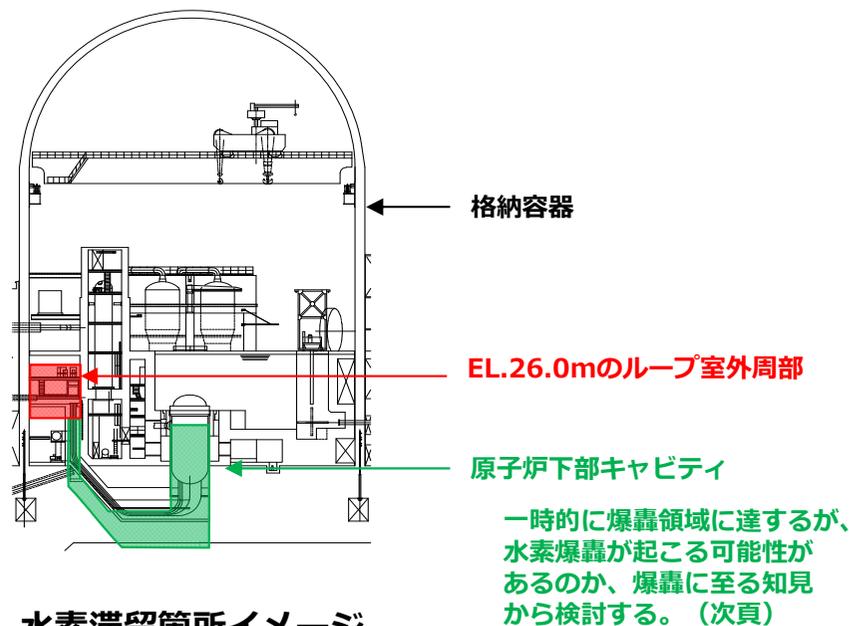
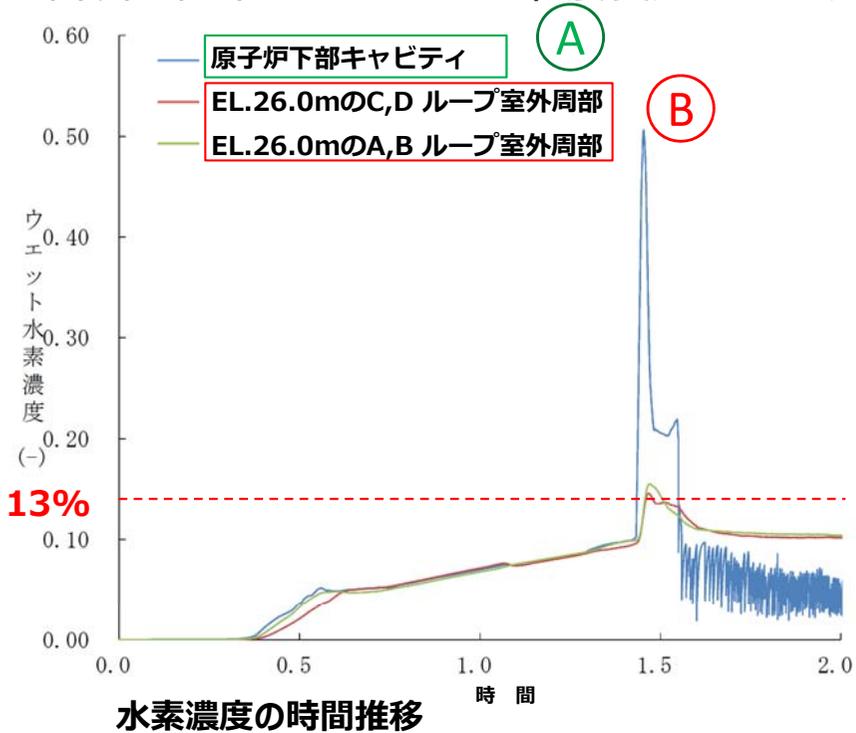
代表的な区画の水素濃度の推移

炉心溶融開始後から原子炉格納容器内の水素濃度は上昇するが、平均水素濃度（ドライ換算）は最大約12.8%であり、判断基準13vol%を下回る。発生した水素が全て燃焼に寄与することを想定した場合の圧力は約0.50MPaであり、最高使用圧力の2倍(0.78MPa)を下回る。

また、各区画の挙動では、炉心溶融後は破断口からの水素放出により破断区画での水素濃度が比較的高く推移するが、他区画の水素濃度も同程度の傾きで上昇している。さらに、原子炉容器破損直後は、原子炉下部キャビティに落下した溶融炉心と水との反応により、一時的に原子炉下部キャビティ区画及び外周部区画での水素濃度が高くなるが、速やかに混合し、原子炉格納容器内全体がほぼ均一な水素濃度挙動となっている。

# 格納容器内で水素が発生した場合に滞留する可能性のある箇所

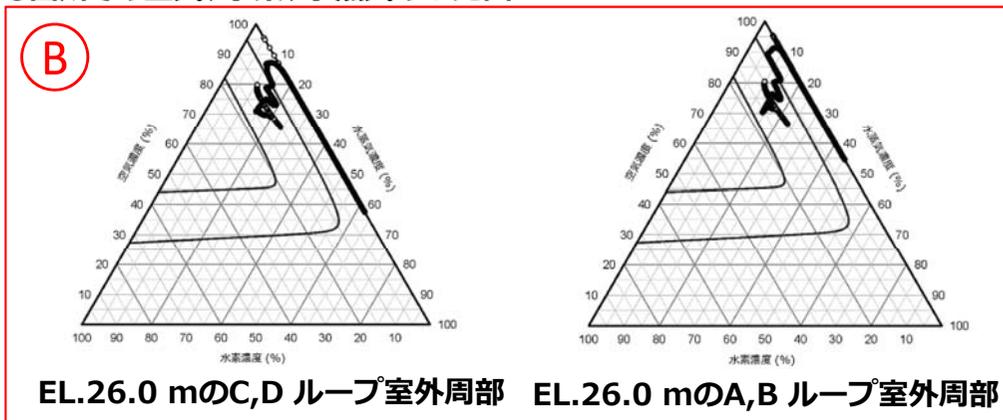
水素爆轟の観点で最も厳しい事象である「大LOCA+ECCS注入失敗」のケースを選定し、発生する水素濃度推移を計算。結果、一時的に水素濃度が13%に達する箇所は3箇所あった。



水素濃度が13%に達する箇所での空気、水素、水蒸気の3元図



水素濃度が13%を超えて爆轟領域に達する (炉内計装管部も含めた空間気相部の平均濃度)



水素濃度が13%を超えるが、爆轟領域に達しない

原子炉容器(RV)破損直後の水素生成に対して、最も通過しやすいと考えられるRVフランジ鉛直パスについて考察。

## ① 高濃度水素の存在

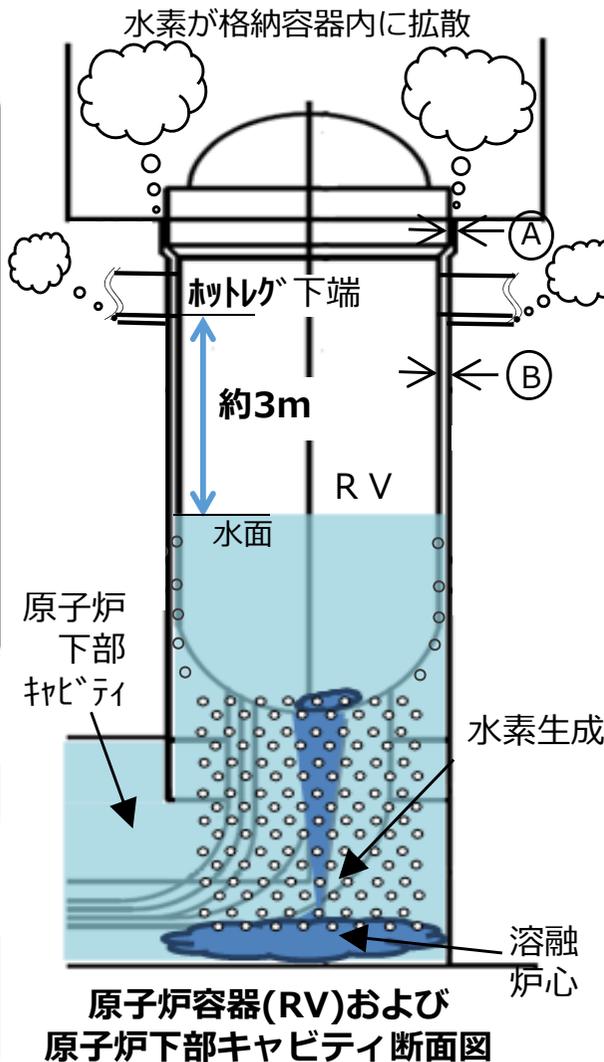
- 原子炉下部キャビティで放出された水素は、RVフランジ鉛直パスを通過するが、狭い空間であるため、短時間に水素で満たされる
- 鉛直パスでは大量に発生した水素が空気を上部へ押し出す状態となり、水素と空気が混合状態となる前に水素で満たされる(①-1「空気と水素が分離」に近い状態)
- 仮に燃焼したとしてもキャビティ内圧は約0.5MPaであり、原子炉下部キャビティの健全性に影響しない

## ② 体系

細長い閉空間ではない

## ③ 助走距離

キャビティ水面から高温側配管(ホットレグ)までは約3mであり助走距離としては不十分である



キャビティ気相部

- (A) RVフランジ鉛直パス (約5.1cmの隙間が円周に亘っており)
- (B) RV胴部はキャビティ壁との隙間が約3~6cm

## ④ 環境

RV破損後に発生する水蒸気により、速やかにウェットな環境となる

## ⑤ 障害物の有無

障害物がない

原子炉下部キャビティ気相部では一時的に爆轟領域になる期間はあるものの、水素爆轟が起きにくい体系・状況であり、爆轟に至る可能性は非常に低いと考える。  
なお、水素燃焼挙動に関する知見については国の技術開発委託事業等で研究が進められている。

# 参 考

○高浜1,2号機における主な安全性向上対策工事 .....	1	~	7
○大飯3,4号機重大事故発生時の初動対応体制 .....	8	~	9
○水素爆轟に至る条件 .....	10	~	16
○水素燃焼挙動に係る国の技術開発委託事業の概要 .....	17	~	19

# 高浜1,2号機における 主な安全性向上対策工事

# 高浜1,2号機主な安全性向上対策工事の工事場所

参考

2

## 内部火災防護対策工事

- ・ 防火シート施工
- ・ 火災感知設備、消火設備設置等

⇒ 5

## 燃料取替用水タンク取替工事

- ・ 既設タンクの撤去
- ・ 新設タンクの設置

⇒ 4

## 格納容器上部遮蔽設置工事

- ・ 既設外部遮蔽壁頂部の撤去
- ・ トップドームの設置

⇒ 3

## 中央制御盤取替工事

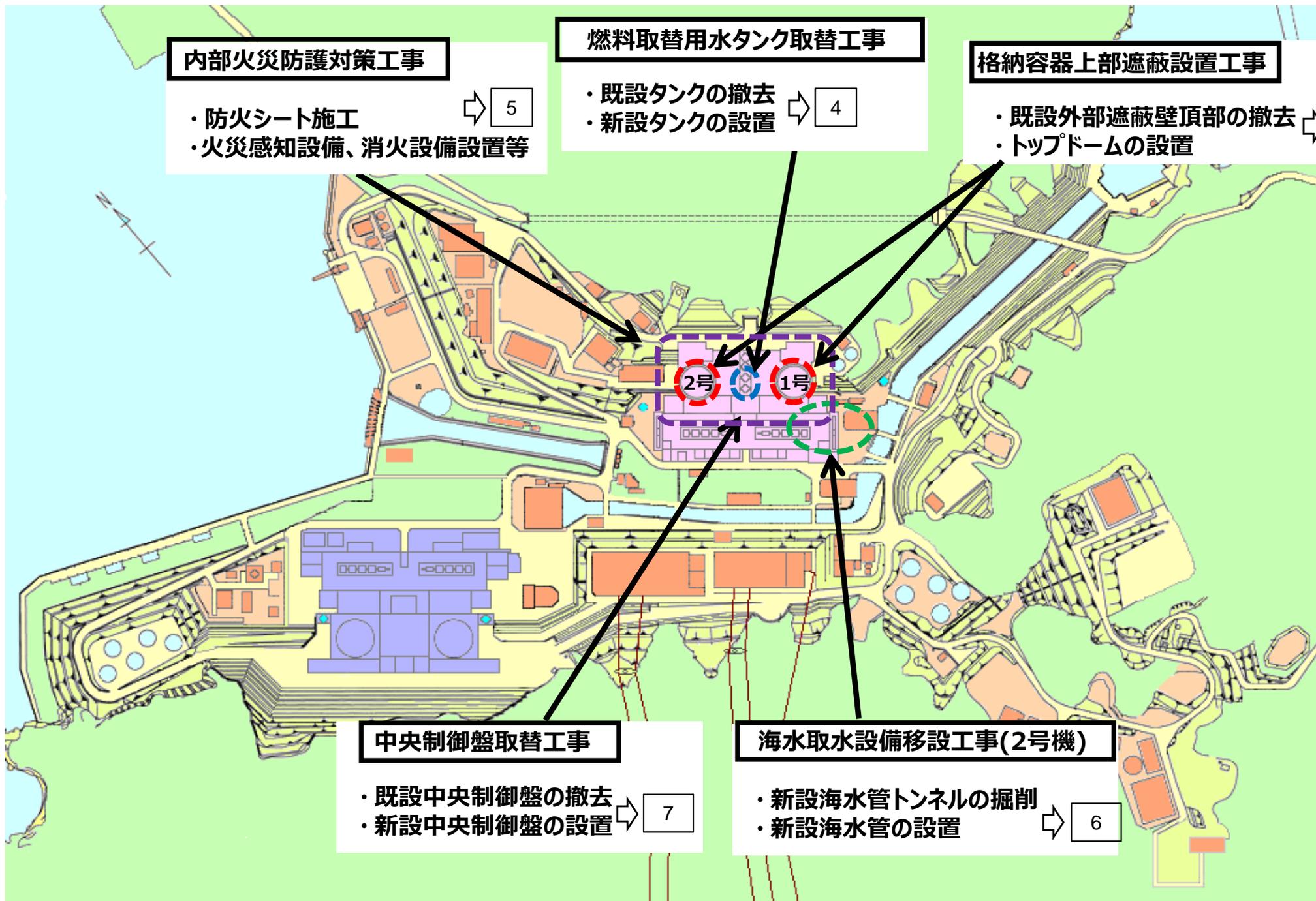
- ・ 既設中央制御盤の撤去
- ・ 新設中央制御盤の設置

⇒ 7

## 海水取水設備移設工事(2号機)

- ・ 新設海水管トンネルの掘削
- ・ 新設海水管の設置

⇒ 6



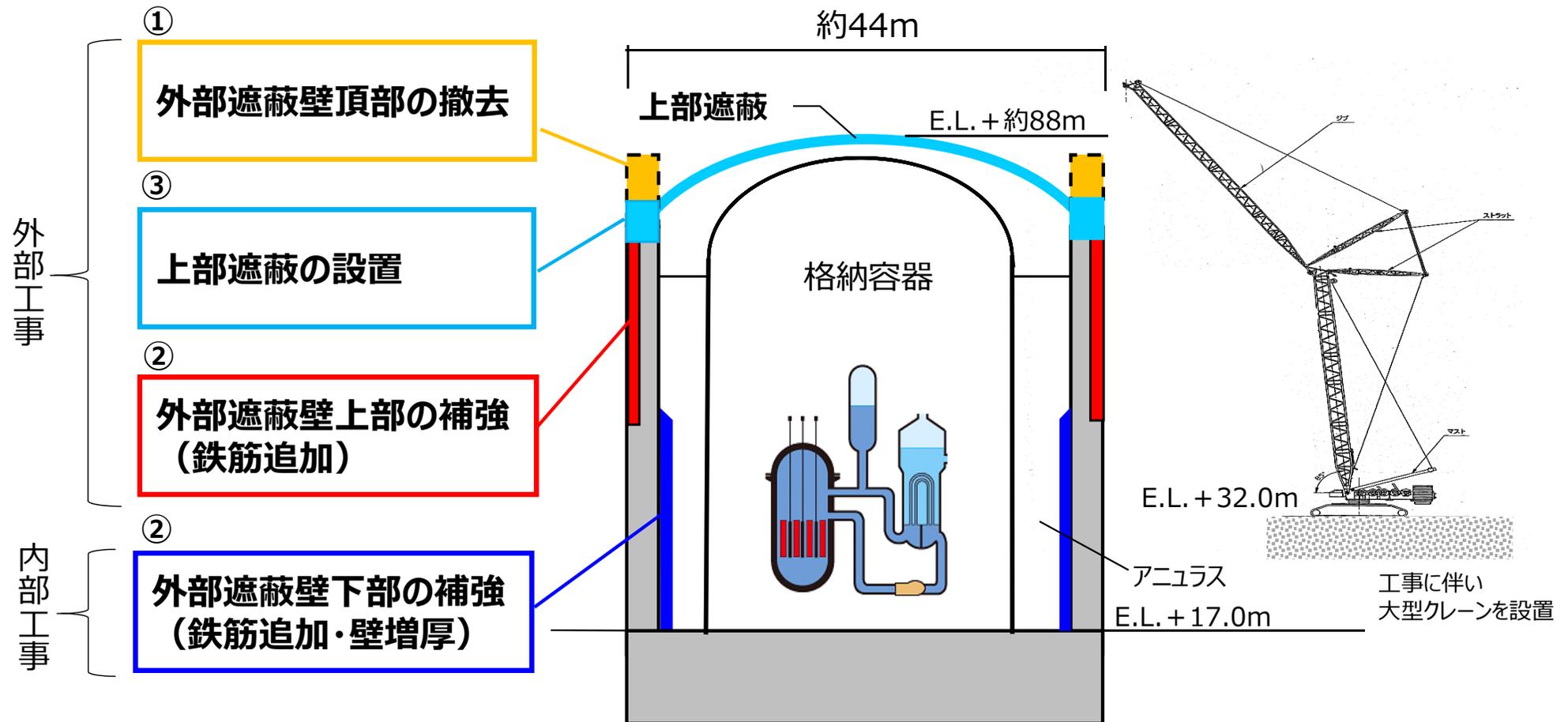
# 高浜1,2号機格納容器上部遮蔽設置工事

参考

3

- 格納容器上部にドーム状の鉄筋コンクリート造の遮蔽を設置。
- 外部遮蔽壁の増厚ならびに補強を実施。

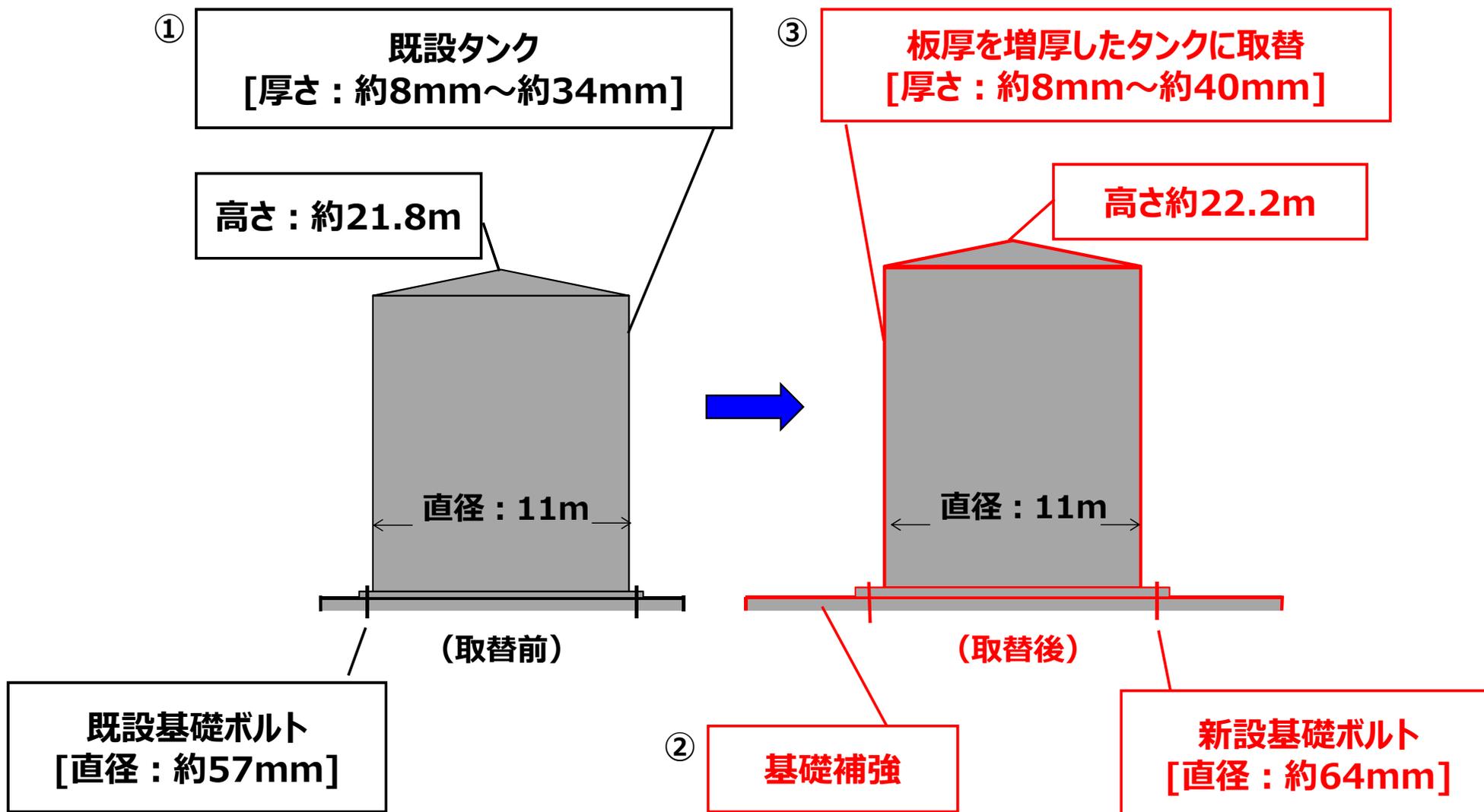
①外部遮蔽壁頂部の撤去 → ②外部遮蔽壁の補強 → ③上部遮蔽の設置



# 高浜1,2号機燃料取替用水タンク取替工事

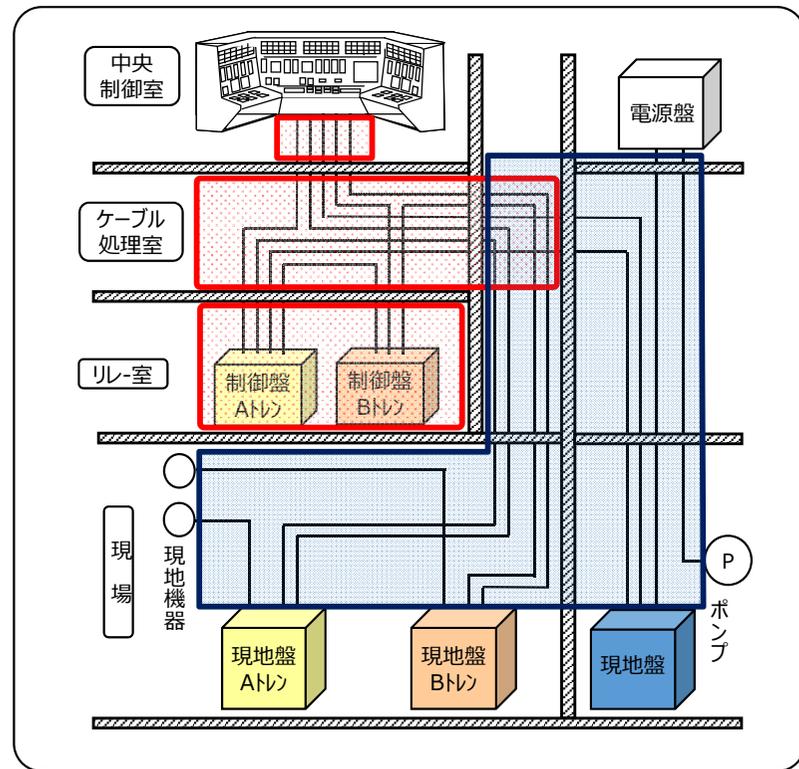
○板厚を増厚した燃料取替用水タンクを新規製作し取り替える。タンク取替に合わせて、基礎コンクリートを補強するとともに直径を太くした基礎ボルトに取替え。

①既設タンクの撤去 → ②タンク基礎の補強 → ③新設タンクの製作、海上輸送、設置



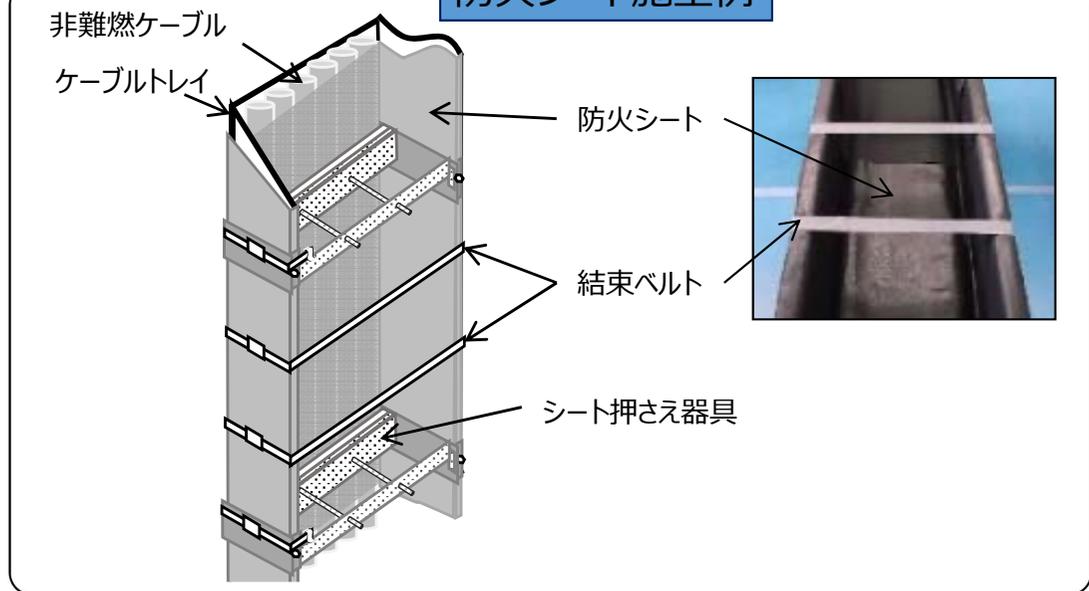
- 安全機能を有する機器に使用されている非難燃ケーブルについては、難燃ケーブルへの引替えや不燃材の防火シート施工による防火措置を実施。
- 火災の影響軽減のため、異なる種類の火災感知器やハロン消火設備、スプリンクラー等を追加設置。

## ケーブルの防火措置範囲

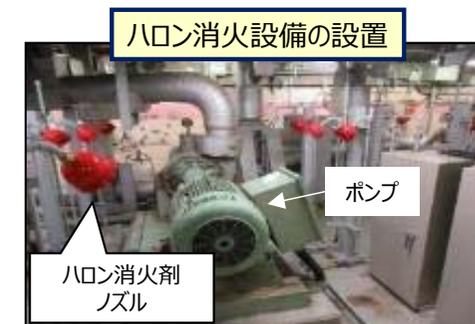


- 難燃ケーブルに引替え
- 非難燃ケーブル使用箇所について防火シートを施工

## 防火シート施工例



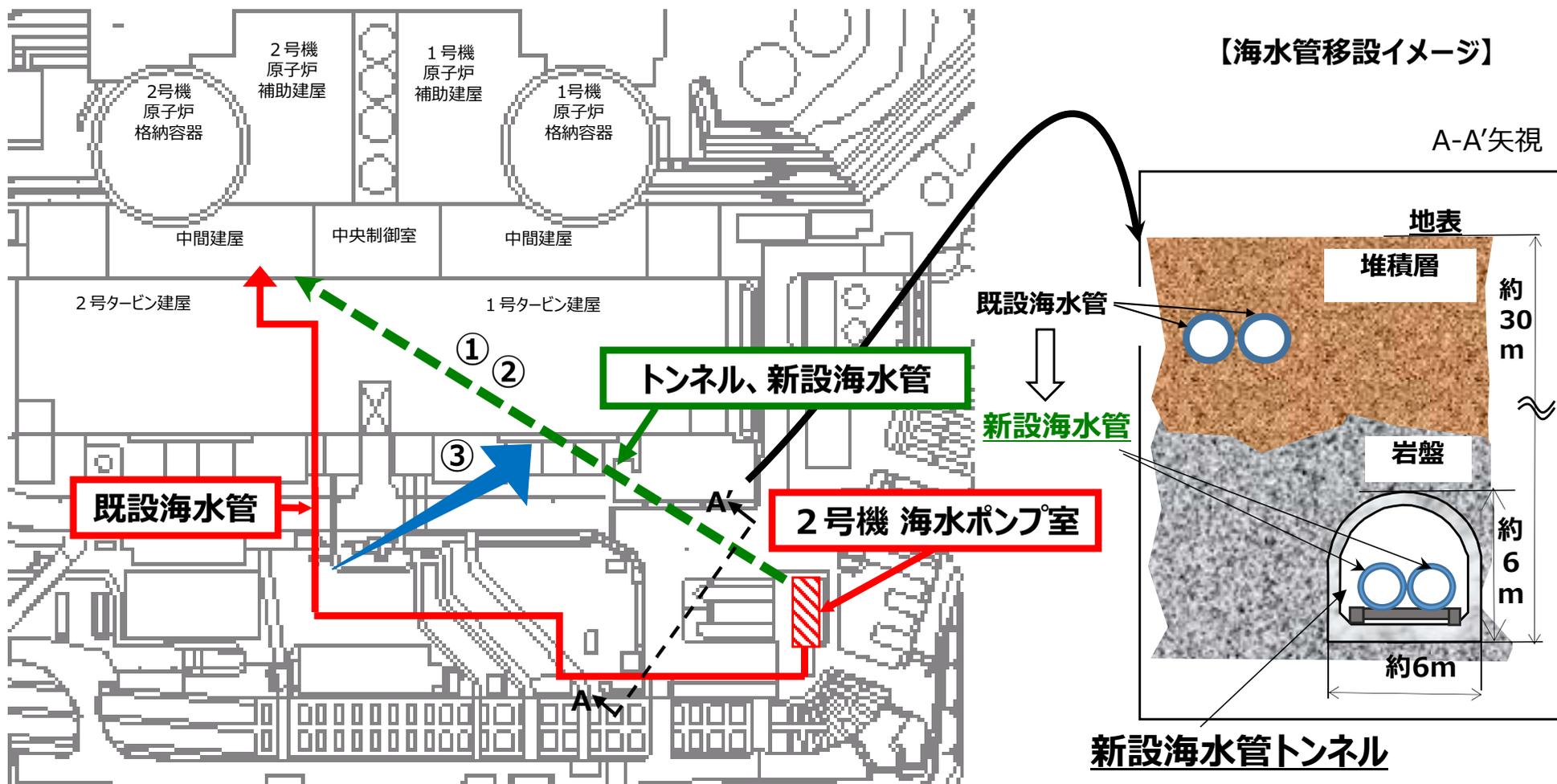
## 火災感知器、消火設備設置例



# 高浜2号機海水取水設備移設工事

○強固な地盤内に海水管敷設用のトンネルを掘削し、新たな海水管を設置。（2号機のみ）

- ①新設海水管トンネルの掘削 → ②新設海水管の設置 → ③新設海水管へ切替え



—— : 既設海水管ルート    - - - : 新設海水管ルート案（海水管トンネル）    ▨ : 海水ポンプ室

- 中央制御盤をアナログ式から最新のデジタル式の操作・監視盤に取替えを行い、大型表示装置やディスプレイ（タッチパネル）での操作や監視をできるように変更。
- 操作指令や監視データの信号を伝送する非難燃ケーブルを難燃ケーブルに引替え。

①既設中央制御盤の撤去等 ➡ ②新設中央制御盤の設置 ➡ ③ケーブルの敷設、接続

## 中央制御盤更新の概要（イメージ）

### ① 既設中央制御盤（アナログ式）



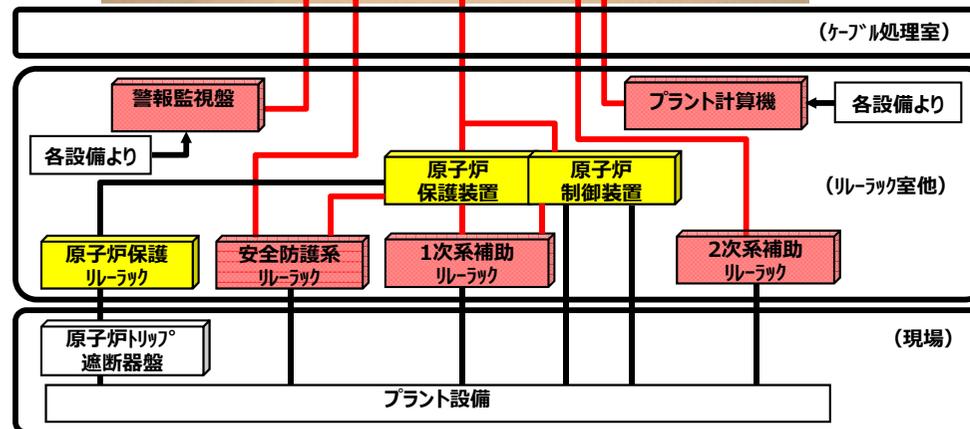
### ② デジタル式中央制御盤



③

 } 今回の工事範囲  


中央制御盤更新時に引替える信号  
ケーブル長さ：約660km



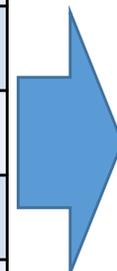
# 大飯3,4号機重大事故発生時の 初動対応体制

# 大飯3,4号機重大事故発生時の初動対応体制

発電所常駐社員を増強し、発電所への外部からのアクセスが制限される場合であっても、当面の間、事故対応が行えるよう体制を整備。

申請中の保安規定の記載人数

要員		1F事故前	前回再稼時(H24)
中央制御室	運転員	22名	22名
本部要員	本部指揮	1名	1名
	通報連絡	1名	2名
	工口指揮		
	現場調整		1名
緊急安全対策要員	電源要員		6名
	運転支援要員		2名
	消火活動要員	5名	5名
	ガレキ除去要員		1名
	給水要員		14名
	設備要員		
合計		29名	54名



現在(H29)	高浜3,4号機の要員
22名	24名
1名	1名
2名	2名
2名	2名
1名	1名
2名	4名
6名	2名
7名	7名
2名	4名
10名	13名
9名	10名
64名	70名

系統構成の差異等による作業内容・ボリュームの違い

※

※

アクセスルートでの作業内容の違い

※

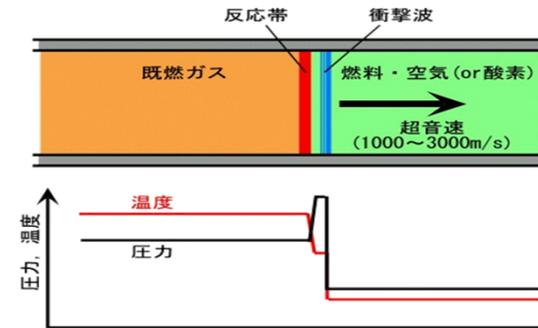
※

※：緊急安全対策の各要員は、複数の作業を実施し、高浜と大飯で個々の作業分類が異なる。総数としては送水車を使用する分、大飯が2名少なくなっている。

# 水素爆轟に至る条件

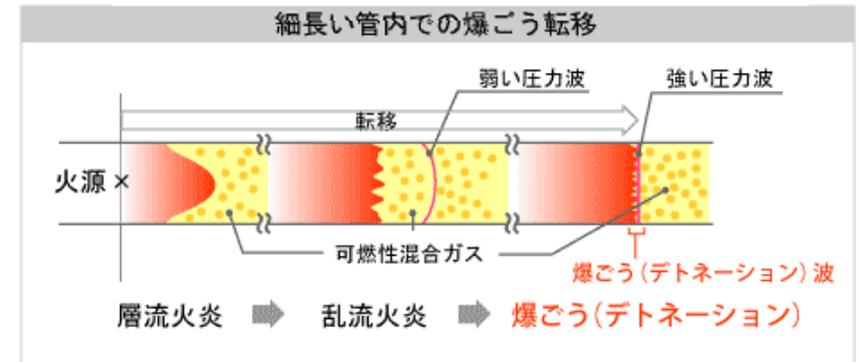
## ○水素爆轟とは？

燃烧による気体の急速な熱膨張の速度が音速を超え衝撃波を伴いながら燃烧が伝播する現象



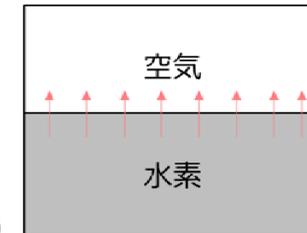
## ○爆轟に至るメカニズム

火源で着火した可燃性ガスが燃烧とともに燃烧伝播方向に加速され、火炎速度が音速を超えることにより爆轟へと転移し、火炎の前面に衝撃波が発生する。



## ○燃烧(乱流火炎) から爆轟への遷移 (DDT) が起こりやすくなる要因

- ① 高濃度水素が空間内に大量にある。  
(①-2の場合にDDTが発生が起こりやすい)
- ② 細長い閉空間である。(配管/ダクトでの水素燃烧時)
- ③ 火炎が加速する方向(助走距離)が長い体系である。
- ④ 水蒸気が少ない雰囲気である。
- ⑤ 火炎が加速する方向に障害物がある。



①-1: 空気と水素が分離されている



①-2: 空気と水素が予め混合されている

過去の実証試験から、これらの要因が全て満たされているとき、DDTが発生しやすいことが知見として得られている。

## ○過去試験

### 爆轟が発生しなかった試験一覧

試験	試験体系	障害物の有無	水素濃度等	配管の長さ(L)と径(D)の比(L/D)	爆轟の発生の有無	備考	知見との整合
NUPEC 大規模試験	内径8mの球体系(270m <sup>3</sup> ) 特徴： <b>多区画</b> (11区画)	手すり状の細長いものがある	5~15vol% (ドライ) 5.6~12.7vol% (ウイト)	該当なし	なし		①-2 ④
	円周約16m、 <b>口径1mのドーナツ状8角形空間</b>	オリフィス4箇所	8~15 vol%(ドライ)	約16	なし	2箇所の上部区画への開口部あり	①-2 ② ④
NTS試験(米) EPRI	閉空間(半径16mの <b>球体系</b> (2100m <sup>3</sup> )) 特徴：広い自由空間	なし	5~13vol% (水蒸気濃度4~40vol%)	該当なし	なし		①-2 ④
BMC(独)	640m <sup>3</sup> 特徴： <b>多区画</b>	なし	5.5~14vol% (水蒸気濃度0~60vol%)	該当なし	なし		①-2 ④
NUPEC 小規模試験	閉空間(高さ3.5m× <b>直径1.5mの円筒形</b> 、5m <sup>3</sup> )	なし	6,8,10 vol% (ドライ) 5,50vol% (ウイト20%) 30vol% (ウイト40%)	約2.3	なし		①-2 ④
NEDO試験	100%水素高圧(40MPa~)貯蔵タンクに漏えい孔を設置し、 <b>大気への放出後に着火</b>	なし		該当なし	なし	100%水素高圧(40MPa~)貯蔵タンクに漏えい孔を設置し、大気への放出後に着火。	①-1 ④

## ○過去試験

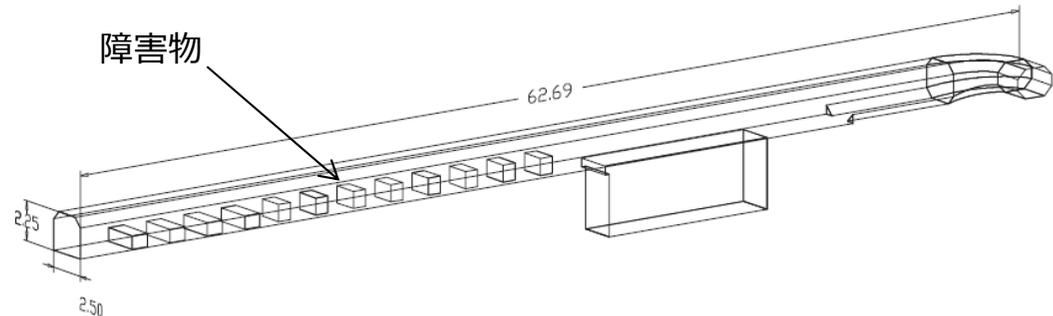
### 爆轟が発生した試験一覧

試験、他	試験体系	障害物の有無	水素濃度等	配管の長さ(L)と径(D)の比(L/D)	爆轟発生時の条件等	爆轟が発生しなかった条件等	知見との整合
NUPEC(&米NRC) 高温燃焼試験	爆轟管：2体系。 両端部とも閉端構造。 ・10cm内径×6.1m (SSDA試験) ・27cm内径 ×21.3m (HTCF試験)	障害物(リファイ) を多数設置。	約5～約50vol% (水素-空気系、水 蒸気-水素-空気系)	SSDA試験： 約60 HTCF試験： 約78	あり 300K条件では 15%(ドライ)から、 650K条件では 11%(ドライ)から、 それぞれ爆轟発 生。	<a href="#">「ベントによる開放のパスを追加した試験」、「水蒸気10vol%のウェット条件(水素濃度17vol%)」では爆轟は発生せず。</a>	①-2 ② ③ ④ ⑤
RUT試験(露) OECD/EU	70mの閉鎖空間 (480m <sup>3</sup> ) (2.3mH×2.5mW× 70m)	12ヶ設置	～60vol%(ドライ) (ウェット条件でも実 施)	約28	水素濃度 18.5vol%(ドライ)、 水蒸気濃度 15.5vol%のウェッ ト条件で爆轟発 生。	<a href="#">水素濃度が28.8vol%(ドライ)、水蒸気40.6vol%のウェット条件では、同一体系でも爆轟は発生せず。</a>	①-2 ② ③ ④ ⑤
SRI (NEDO We-Net)	約10mの爆轟管。一 端は開構造。	障害物有 (7,13,25個) ・無の両ヶ-ス	20～57vol%	約26	あり 障害物設置時に 爆轟発生。	<a href="#">障害物無しでは爆轟発生せず。</a>	①-2 ② ③ ④ ⑤
労働省 産業安全研究所 試験	爆轟管： ・28mm内径×管全 長2.1m～9.1m 特徴：端部の開/閉 組み合わせ	障害物(スパイラル 線)の有無	30vol%(ドライ)	約75～325	あり	<a href="#">管の両端部とも開の場合は爆轟は発生せず。(障害物設置の場合も)</a>	①-2 ② ③ ④ ⑤

## ○過去試験例（R U T 試験） クルチャトフ研究所（ロシア）

### 目的

- ◆細長い燃焼装置中に障害物を配置した予混合状態での爆轟試験を実施
- ◆水蒸気を含まない（ドライ状態）シリーズの試験と水蒸気混合を含む（ウェット条件）シリーズの試験を実施



### 試験体系

- ◆回廊状の燃焼装置
  - 高さ2.3m（一部6.3m）、幅2.5m
  - 長さ約70m、体積約480m<sup>3</sup>
- ◆閉塞率30%~60%の障害物を12個配置

試験体系図

### 試験結果

試験体系	水素濃度等	配管の長さ(L)と径(D)の比(L/D)	爆轟発生時の条件等	爆轟が発生しなかった条件等	知見との整合
70mの閉鎖空間 (480m <sup>3</sup> ) 2.3m(H) × 2.5m(W) × 70m(L)	~60vol% (ドライ) (ウェット条件でも実施)	約28	水素濃度18.5vol%(ドライ)、 水蒸気濃度15.5vol%の ウェット条件で爆轟発生。	<u>水素濃度が28.8vol%(ドライ)、 水蒸気40.6vol%のウェット条件 では、同一体系でも爆轟は発生せず。</u>	① - 2 ② ③ ④ ⑤

## ○ R U T 試験での知見の補足

R U T 試験における試験ケース

ケース	燃焼時の平均水素濃度 (vol%(ドライ))	平均水蒸気濃度 (vol%)	爆轟発生の有無
①	28.8	40.6	無し (爆燃)
②	18.5	15.5	有り

下図は着火点からの各距離(R)における発生圧力について、同じ時間軸(T)で比較したグラフである。

### ○知見A：圧力波形の違いについて

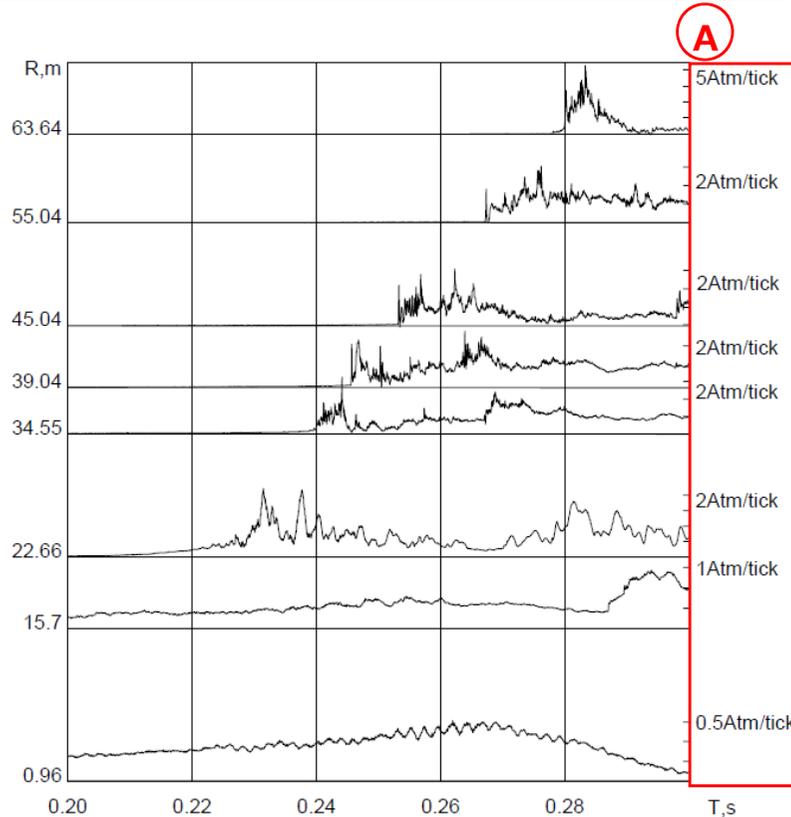
爆燃発生時は圧力上昇があった後にピークに達するのに対し、爆轟発生時は最初に圧力ピークが立っている。

### ○知見B：火炎加速速度について

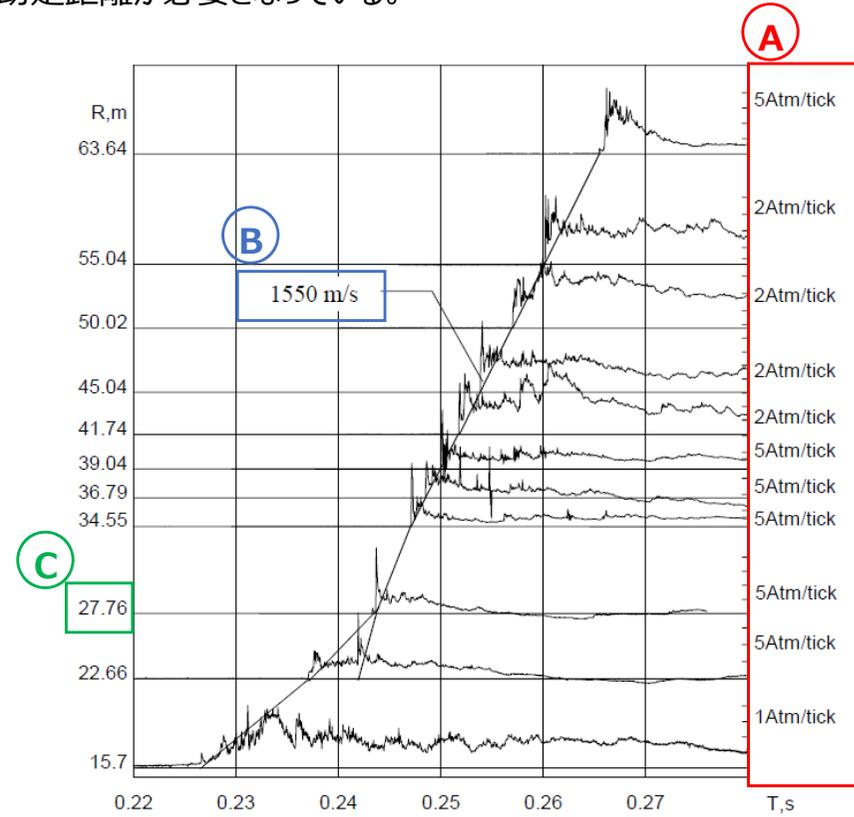
爆轟が発生している際の火炎の伝播速度は1550m/sに達している。

### ○知見C：助走距離について

爆轟発生時に火炎が急速に加速し始めるまでに27m程度の助走距離が必要となっている。



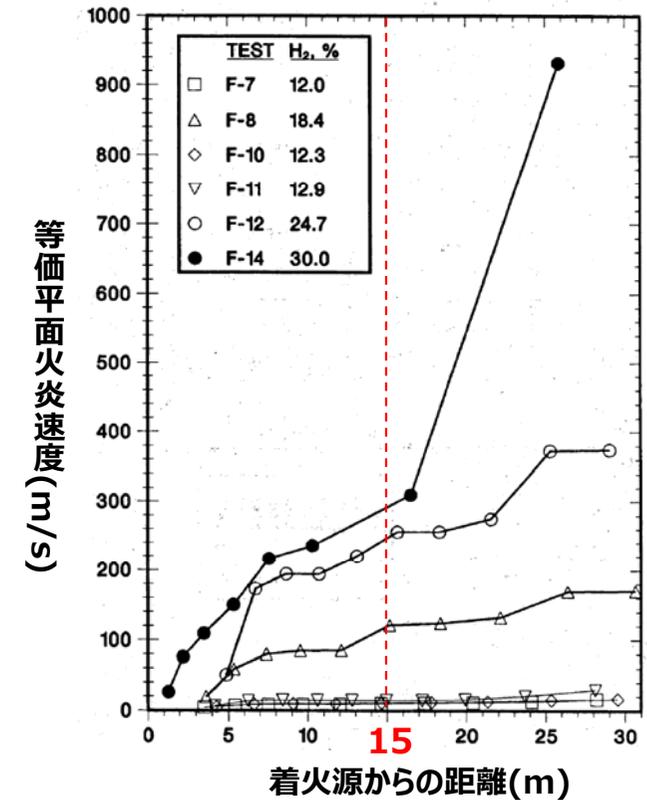
圧力履歴 (ケース①)



圧力履歴 (ケース②)

## ○その他の知見の補足

- ◆「助走距離」による制限  
爆燃から爆轟へ遷移するためには、火炎が加速するための助走距離が必要である。  
右図より、水素濃度が30%の時の爆轟遷移の必要条件（火炎速度が音速（約1000m/s）に到達すること）に必要な助走距離は、保守的に見積もって約15mと推定される。



FLAME Facilityでの  
爆轟遷移までの火炎助走距離

# 水素燃焼挙動に係る 国の技術開発委託事業の概要

## 1. プロジェクトの概要

<b>概 要</b>	シビアアクシデント（SA）後に放出される水素の拡散・混合・爆発燃焼、及びその影響を定量的に評価する数値流体解析（CFD）による水素挙動統合解析システムを完成し、電力事業者やメーカーに原子力施設の水素発生事故時の安全性向上対策・評価に利用できる形で公開する。
<b>実施期間</b>	平成28年度～平成32年度（5年間）
<b>実施者</b>	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
<b>プロジェクトリーダー</b>	日野竜太郎 原子力エネルギー基盤連携センター 水素安全技術特別グループリーダー

## 2. 実施内容

水素挙動統合解析システムに組込む、

### (1) 物理モデルの整備

- ① 爆発燃焼モデルの整備
- ② 爆発燃焼時の高浮力下での水素挙動モデルの整備

### (2) 機器モデルの整備 (平成28年度まで)

- ① 水素再結合触媒器 (PAR) モデルの整備
- ② イグナイタモデルの整備

を行うとともに、

### (3) 乱流燃焼による爆発燃焼解析コードの整備 -爆発燃焼状況のコード間検証によるモデルの妥当性検証等

を実施し、それらの成果を

### (4) 水素挙動統合解析システム整備

に反映する。

(4)で整備したシステムを用いて、代表的なPWRの格納容器 (CV) 内、CV局所のSA時水素挙動 (拡散、爆発燃焼、影響評価) を対象に数値流体力学 (CFD) による大規模解析 (FLUENT、AUTODYN) を実施し、マニュアル、ガイドライン等を纏め、システム整備を完了・公開する。これらの成果はハンドブックにまとめ、公開セミナー等で発信する。