

原子力安全・保安院による これまでの検討

平成24年3月
原子力安全・保安院

検討内容・経緯

1. 東電福島第一原発事故の技術的知見に関する検討

平成23年10月24日から意見聴取会を8回開催

2. 東北太平洋沖地震の知見を考慮した原子力発電所の地震・津波の評価

平成23年9月30日から意見聴取会を12回開催

3. 東北地方太平洋沖地震に伴う地震・津波による原子力施設への影響評価

平成23年9月29日から意見聴取会を8回開催

4. 福島第一原発事故における経年劣化の影響に関する検討

平成23年11月29日から意見聴取会を6回開催

5. 原子炉施設の安全性に関する総合評価一次評価

〈関西電力大飯発電所3/4号機〉

平成23年11月14日から意見聴取会を8回開催

1. 事故の発生・拡大

① 地震動・津波に関する評価

- 地震動に関し、海溝型地震について、強震動生成域の大きさや位置の設定などに問題があり、地震の揺れを事前に想定することは難しい部分があった
- 津波の発生頻度や高さの想定が不十分であり、大規模な津波の襲来に対する対応が十分なされていなかった

② 設備・手順

i. <外部電源の喪失>

- 外部電源(所外の変電所設備・送電線設備、所内の開閉所設備)系統中の電気設備のどこかに地震による損傷等が生じ電力供給が停止した

ii. <全交流電源・直流電源の喪失>

- 発電所内電気設備について、海に近いタービン建屋及びコントロール建屋の地下階に設置されたほとんどの電気設備が被水・水没(非常用直流電源、海水ポンプ、高圧配電盤など)

1. 事故の発生・拡大

iii. <冷却機能の喪失>

□冷却設備について、津波の影響により全交流電源が喪失(1、2、4号機にあっては直流電源を含め全電源喪失)し、原子炉冷却系や余熱除去系が使用不能となり、海水系も機能喪失、一時的に作動した非電源駆動の高圧注水系も停止し、最終的に原子炉及び使用済燃料プールの冷却機能喪失に至った

iv. <閉込め機能の不全>

□格納容器ベント操作を行う前に格納容器の破損等により放射性物質が漏えい

□4号機については、3号機で発生した水素が4号機の非常用ガス処理系(SGTS)・建屋換気系に流入し、水素爆発を起こしたと考えられる

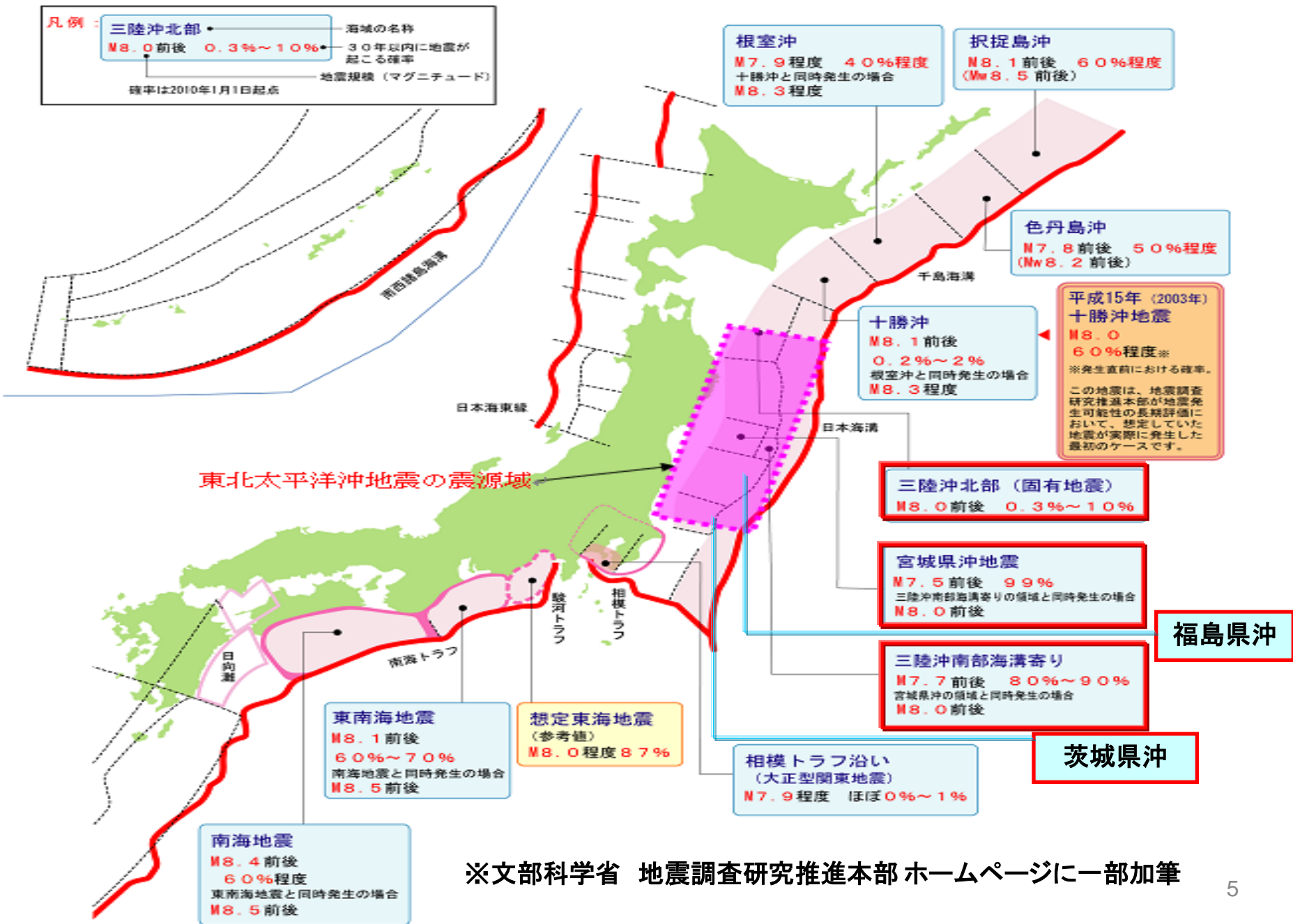
1. 事故の発生・拡大

v. <指揮監督施設・計装設備等の不全>

- 通信設備の殆どが電源喪失等により使用できなくなったため、中央制御室と現場との連絡に支障が生じ、通常は短時間で済む作業に多大な時間を要した
- 中央操作室等の作業環境についても、事故の進展に伴い放射性物質が流入し、事故時対応に支障が生じた
- 津波による電源喪失によりプラント状態を把握する計器が使用できなかった
- 原子炉格納容器内が高温、高圧の水蒸気雰囲気となり、測定できない計器が出た
- モニタリングポストは、津波により非常用電源も喪失したため使用できなくなった

主な海溝型地震の評価結果


<参考>



※文部科学省 地震調査研究推進本部 ホームページに一部加筆

福島第一原子力発電所2号機、3号機、5号機のEW方向で原子炉建屋基礎版上の最大加速度は、基準地震動Ssの最大応答加速度値を上回った。

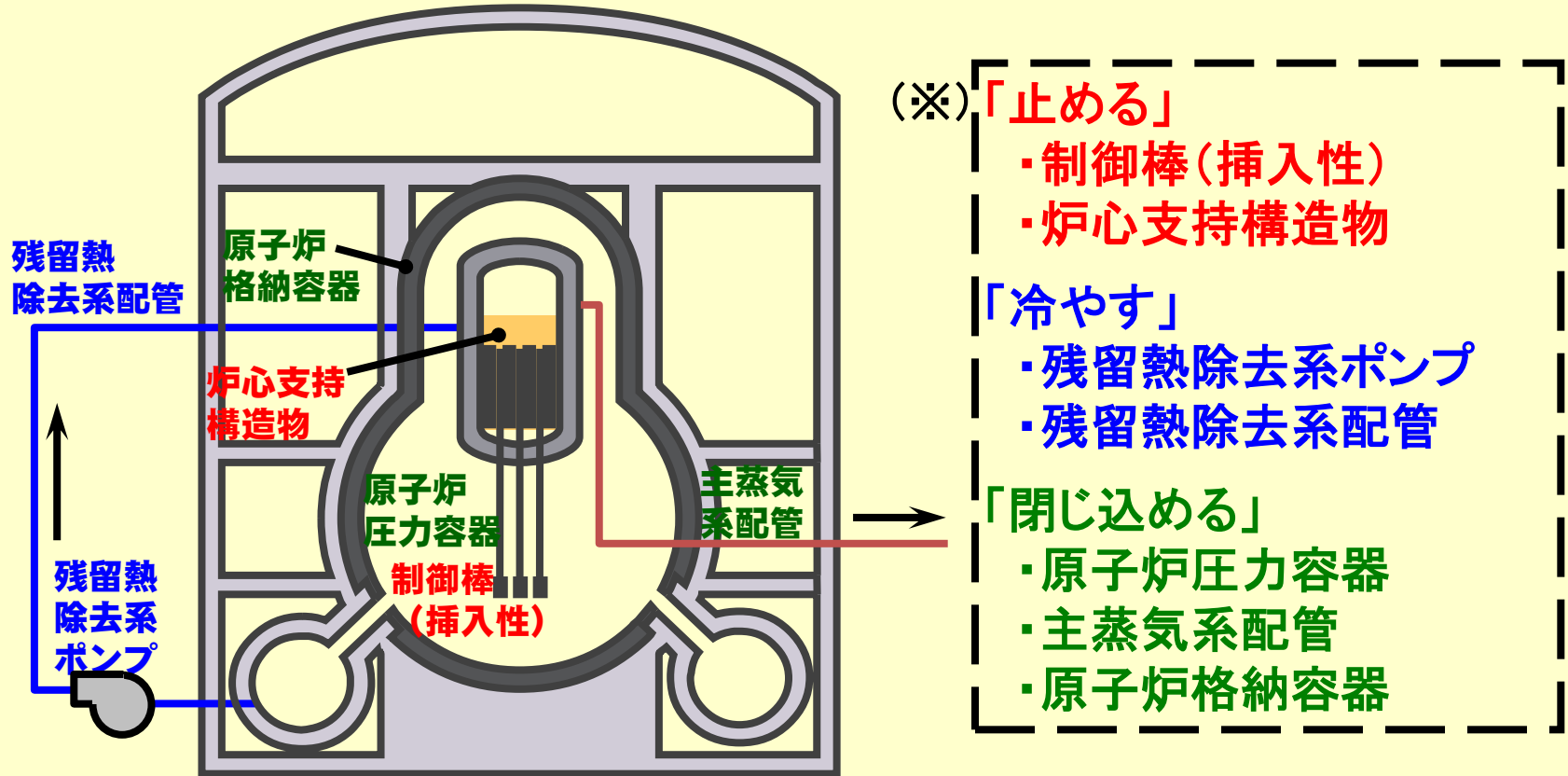
	観測記録の最大加速度値 (Gal)			基準地震動Ssに対する 最大応答加速度値(Gal)		
	NS	EW	UD	NS	EW	UD
1号機	460	447	258	487	489	412
2号機	348	550	302	441	438	420
3号機	322	507	231	449	441	429
4号機	281	319	200	447	445	422
5号機	311	548	256	452	452	427
6号機	298	444	244	445	448	415

 : 観測記録の最大加速度が基準地震動Ssによる最大応答加速度を上回った部分

※福島第二原子力発電所全号機の原子炉建屋基礎版上における観測記録は、基準地震動Ssに対する最大応答加速度値を下回った。

2. 今回の地震による福島第一、福島第二原発の原子炉建屋等への影響評価

□ 福島第一、福島第二全号機の「原子炉建屋」及び「タービン建屋」、これら建屋に設置される「耐震安全上重要な機器・配管系」(※)について、今回の地震の地震動を入力した地震応答解析により検討したところ、評価基準値を満足しており、地震時及び地震直後において安全機能を保持できる状態にあったと推定



(※)非常用ディーゼル発電機、同燃料タンク等

2. 今回の地震による福島第一、福島第二原発の原子炉建屋等への影響評価

- 全ての耐震Sクラスの機器・配管について、福島第一5号機で代表して地震応答解析により検討したところ、一部の配管本体及び配管サポートを除き、評価基準値を満足しており、地震時及び地震直後において安全機能を保持できる状態にあったと推定
 - 評価基準値を上回った箇所については、現地調査を行い有意な損傷がないことを確認
- 福島第一5号機と同様に、福島第一6号機及び福島第二(1～4号機)は、今後とも冷温停止機能を維持する必要があることから、今後、基準地震動 S_s 又は今回の地震による影響を評価し、その結果を踏まえ、必要に応じ耐震補強を求める。
 - 現場確認が困難な福島第一(1～4号機)は、プラントパラメータ等の分析によると、基本的な安全機能を損なうような損傷等の情報は得られていないが、更にデータを補充する観点から、今後、地震応答解析により、今回の地震による影響を評価する。
 - 女川原子力発電所において、ウォークダウン調査を実施したが、調査の範囲内では原子炉建屋及び機器・配管系に有意な損傷は確認されなかった

2. 今回の地震による福島第一、福島第二原発の原子炉建屋等への影響評価

□ 福島第一1号機の非常用復水器系配管や福島第一3号機の高圧注水系配管等、今回の事故発生当初から地震により被害等が生じていたのではないかとの指摘を受けた設備についても、地震応答解析を実施した結果、計算値は評価基準値を下回っており、地震時及び地震直後の安全機能を保持できる状態にあったと推定

プラント名	設備名	①地震応答解析結果 (MPa)	②評価基準値 (MPa)	裕度 (②/①) ※1
福島第一1号機	原子炉再循環系配管	160	262	1.63 ※1
	非常用復水器系配管	106	414	3.90
	ベント管	75	411	5.48
	ダウンカマ	120	346	2.88
	リングヘッド	122	432	3.54 ※1
福島第一2号機	ベント管	91	418	4.59 ※1
	ダウンカマ	12	236	19.66
	リングヘッド	181	288	1.59
	炉心スプレイ系配管	200	364	1.82
福島第一3号機	高圧注水系配管	113	335	2.96

※1 裕度が最も小さい箇所の解析結果を記載

3. 福島第一原発事故における経年劣化の影響

I. 目的

東京電力福島第一原子力発電所は、運転開始から1号機は約40年、2号機及び3号機は30年以上が経過しており、設備の経年劣化が事故の発生又は拡大に影響したのではないかとの懸念が惹起されていることから、経年劣化が福島第一事故の発生・拡大に影響を及ぼしたか検討を実施

II. 検討の範囲

○検討対象

炉心損傷に至った福島第一1号機、2号機、3号機

○検討の範囲

地震発生時、地震発生直後から事故が進展し、高温高圧になる等設計上で考慮している条件を超えるまでの間

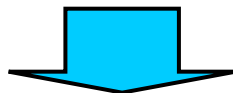
3. 福島第一原発事故における経年劣化の影響

Ⅲ. 検討の進め方

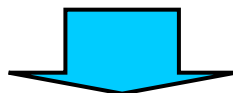
経年劣化の影響について検討する最も確かな方法は、現場で実際の設備の状況を確認することであるが、現時点においては、1～3号機の現場の線量が高く、設備の状況を確認することが困難



これまでの高経年化対策の情報と知見から可能な範囲で分析を加える



発生・進展が否定できない経年劣化事象を抽出し、運転開始後60年までの経年劣化を考慮して、今回の地震動に対する設備の健全性を確認



1～3号機の安全上重要な設備(※)が地震により機能を失うような影響があったかどうか評価を行い、許容値との比較を行う

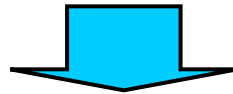
(※)原子炉圧力容器、原子炉格納容器、原子炉再循環系ポンプ、原子炉建屋等

3. 福島第一原発事故における経年劣化の影響

IV. 経年劣化の影響評価

□ 地震発生時における経年劣化による影響の可能性が否定できないとして抽出された劣化事象

- ①低サイクル疲労割れ
- ②原子炉圧力容器の中性子照射脆化
- ③上部格子板の照射誘起型応力腐食割れ



□①②③について、今回の地震動を用いた評価において、許容値に対する裕度への影響が小さいこと、許容値が実際の損傷限界に対する余裕を持っていることから、今回の地震動によって機能を失うような影響があったとは考え難い

耐震安全上重要な主要設備への地震影響評価の例

<参考>

低サイクル疲労割れに関する評価例

- ・過去の高経年化評価書の評価値(S2地震動による疲れ累積係数)は十分小さい。
- ・1号機の主蒸気系配管の低サイクル疲労について、今回の地震動を用いて評価を行った結果は、S2地震動、Ss地震動による結果とほぼ同等であり、今回の地震においても許容値を超えず、裕度への影響は十分小さい。

低サイクル疲労割れの評価結果（高経年化技術評価値）

1号機主蒸気系配管の低サイクル疲労評価結果

	評価対象	60年の供用を仮定した疲れ累積係数	地震動による疲れ累積係数 (S ₂ 地震動)	合計 (許容値 1以下)
1号機	原子炉再循環系ポンプ出口弁 (弁箱)	0.824	0.000	0.824
2号機	原子炉圧力容器給水ノズル	0.434	0.010	0.444
3号機	原子炉格納容器給水ライン貫通部ベローズ	0.611	0.020	0.631

評価対象	60年の供用を仮定した疲れ累積係数	地震を考慮した解析値		
		地震動による疲れ累積係数		合計 (許容値 1以下)
主蒸気系配管	0.064 ^{*1}	S ₂ 地震動	0.252 ^{*2}	0.316
		S _s 地震動	0.269 ^{*2}	0.333
		今回地震動	0.264 ^{*3}	0.328

※1:通常運転時の疲れ累積係数は運転60年目の過渡回数を想定

※2:地震荷重による等価繰り返し回数を保守的に100回と設定して実施した解析値

※3:今回の地震動を用いて実施した解析値(実際の等価繰り返し回数は12回程度と見積もられているが、保守的に100回と設定)

<低サイクル疲労割れ>

温度・圧力の変化及び地震動によって、大きな繰り返し応力がかかる部位に割れが発生する事象

3. 福島第一原発事故における経年劣化の影響

VI. 保安院の評価

- 耐震安全上重要な主要設備を含めて、今回の地震動によって機能を失うような影響があったとは考え難く、また地震発生から事故が進展し設計上で考慮している条件を超えるまでの間は、経年劣化事象が事故の発生・拡大の要因になったとは考え難い
- 今後、現地確認が実施される等により、新たな知見が得られた場合には、経年劣化の影響について追加的な検討を行うことが必要
- 現行の高経年化技術評価の対象とされていないがアクシデントマネジメントに活用されるノンクラス設備に対する経年劣化をどのように評価・管理していくのか検討が必要

4. 今回の事故から得た技術的知見と対策

□津波の評価

- 今回の地震により発生した津波について、福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所及び東海第二発電所並びに女川原子力発電所それぞれにおける津波波形、浸水範囲、敷地内の痕跡高等を再現することができ、かつ広域の観測記録とも整合している「波源モデル」を構築することができた。
- 今後、この「波源モデル」による解析結果の検証を継続し、全国の原子力発電所の津波水位等評価の検証に用いる。

4. 今回の事故から得た技術的知見と対策

□ 想定津波高さの考え方

今回の東北地方太平洋沖地震に係る津波

- ①海溝型地震について大きなすべり量や地震セグメントの連動等により、大きな地震動や津波を生じた
 - ②今回の津波は、やや長周期の波と短周期の波が重畳することにより津波の波高が高くなった
- 施設の安全機能への重大な影響を防止する観点から、再来周期を考慮した適切な発生頻度の津波を想定する(「設計基準津波」)
 - 「設計基準津波」による浸水で安全機能を有する設備に影響が発生することを防止する構築物等(防潮堤、防潮壁、水密扉等)の安全設計を、津波の破壊力、浸水高さ、浸水域、浸水時間等を考慮に入れて行う。
 - 深層防護の観点から、「設計基準津波」を上回る規模の津波が施設に及ぶことによるリスクの存在を十分認識して、敷地の冠水や遡上波の大きさを考慮しても炉心及び燃料プールの燃料の重大な損傷が防止できる対策を講じる。等

4. 今回の事故から得た技術的知見と対策

□ 想定津波高さの考え方

①古文書、伝承の調査

古文書等の史料や伝承等について詳細な調査・分析を行い、敷地周辺に襲来した可能性のある津波の年代、規模等について、可能な限り古い時代まで遡って把握する

②津波堆積物の調査

津波堆積物の調査においては、津波堆積物が残る地形である等の以下の条件が揃っている場所であることを示す

- ・津波シミュレーション等によって、津波が浸水しやすい場所
- ・津波堆積物が削剥されない安定した堆積環境
- ・津波堆積物の供給源である砂等が前面の海岸又は海域に存在

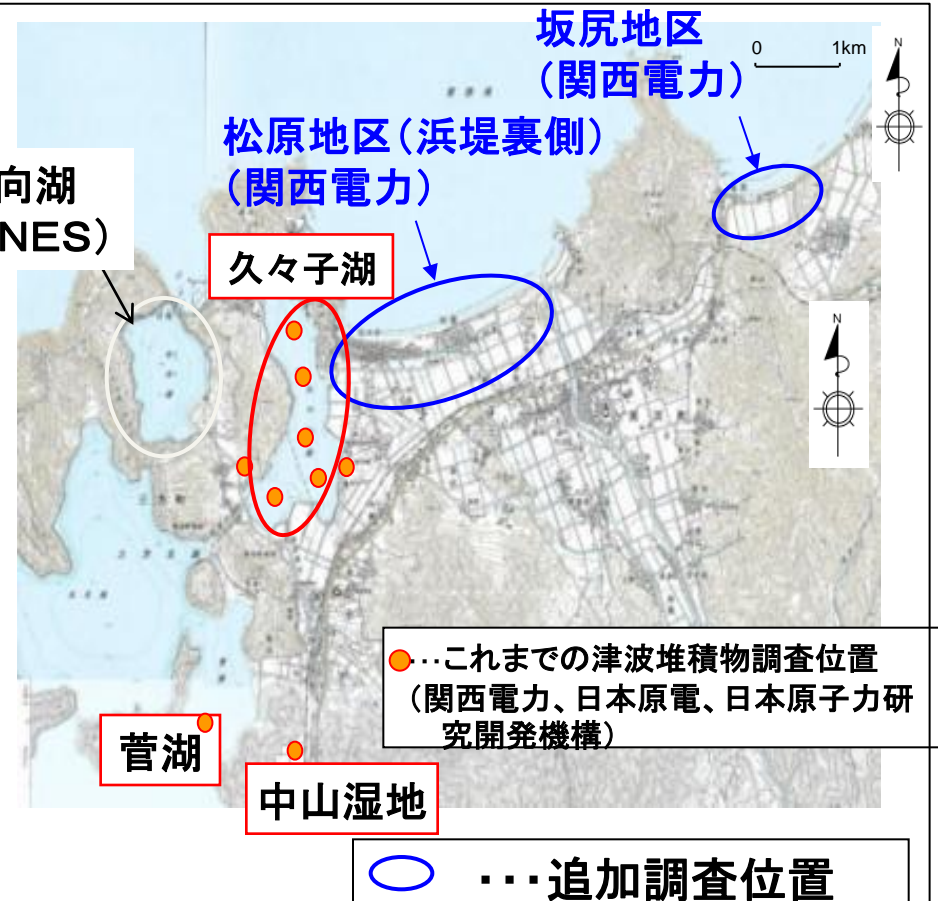
③海底地形図の作成

津波波源から敷地周辺までの海域の地形に関して十分な調査をもとに海底地形図を作成する。この場合、浅い海域の地形は、津波高さへの影響が大きいため、特に詳細な調査を行う 等

天正地震による津波の調査

これまで得られている文献調査、関西電力、日本原電、日本原子力研究開発機構が実施した津波堆積物調査等の結果を踏まえると、古文書に記載されているような天正地震による大規模な津波を示唆するものは無いと考えられる。

天正年間も含めてデータを拡充するために、津波堆積物について、事業者及び原子力安全基盤機構(JNES)によりさらなる追加調査を行う。



4. 今回の事故から得た技術的知見と対策

□ 波力の考え方

- 福島第一及び福島第二原子発電所の主要建屋外壁に作用した波力から、想定する津波高さに対して「3倍の静水圧分布」を与えて設計を行うことは基本的には安全側
- 沿岸地形の状況等によっては、過小評価になる場合もあることから、個別に評価することが必要

□ 耐震安全性評価への反映

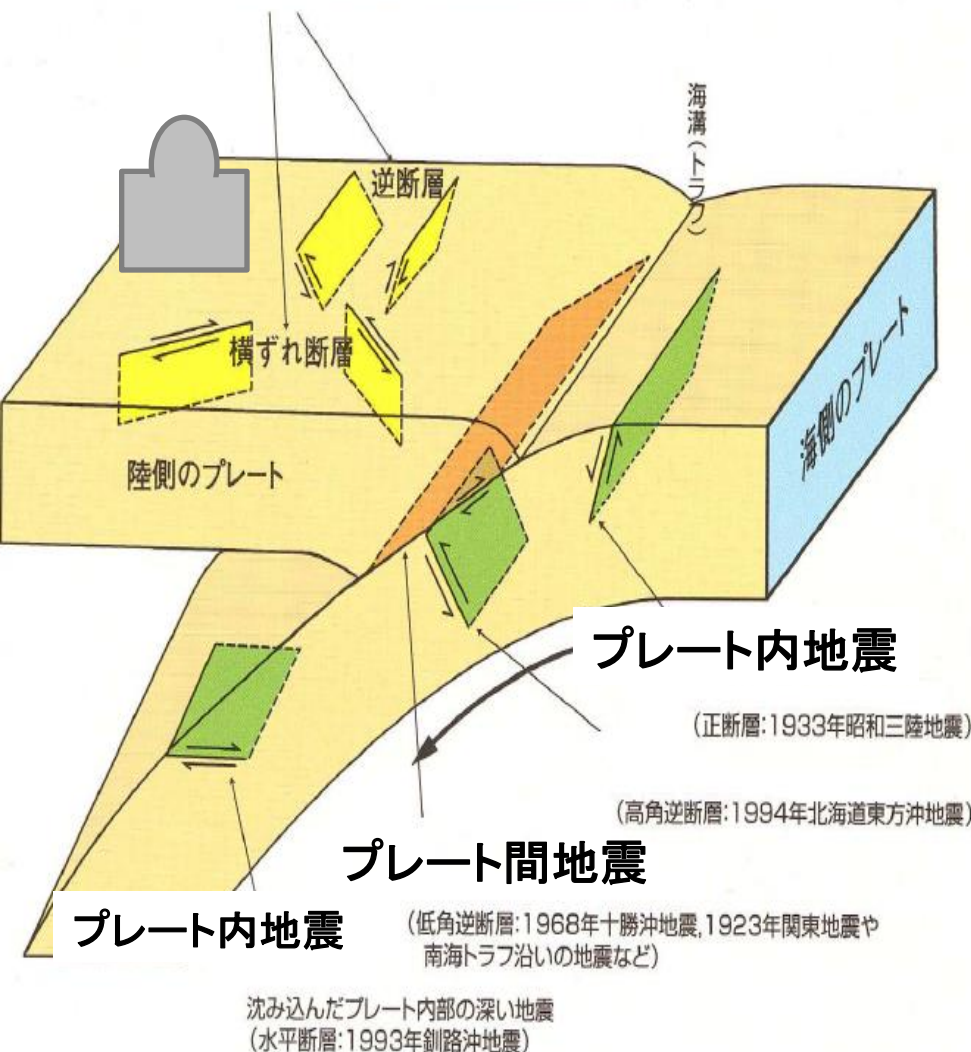
- 今回の新知見について、今後の耐震バックチェック及び安全審査に反映させる、反映のプロセス等については、透明性の確保を図り、また、これを継続的に反映していくことによって、原子力施設の耐震安全性の信頼性の一層の向上を図る

4. 今回の事故から得た技術的知見と対策

内陸地殻内地震に関わる活断層の連動の見直し

内陸地殻内地震

(1891年の濃尾地震や1995年兵庫県南部地震など)



- 内陸地殻内地震については、原子力発電所の耐震設計における基準地震動の策定に際し、十分な不確かさを考慮している。しかしながら、意見聴取会委員から、内陸地殻内地震についても、活断層の連動という観点からの見直しが必要との指摘を受け、基準地震動に対する影響を確認することが必要。
- 海溝型(プレート間及びプレート内)地震について、昨年11月に震源の連動を考慮して評価するよう関係する事業者に指示。今後、基準地震動の設定の方法や不確かさの考え方について、検討を進め、耐震安全性評価に反映すべき事項をまとめる。

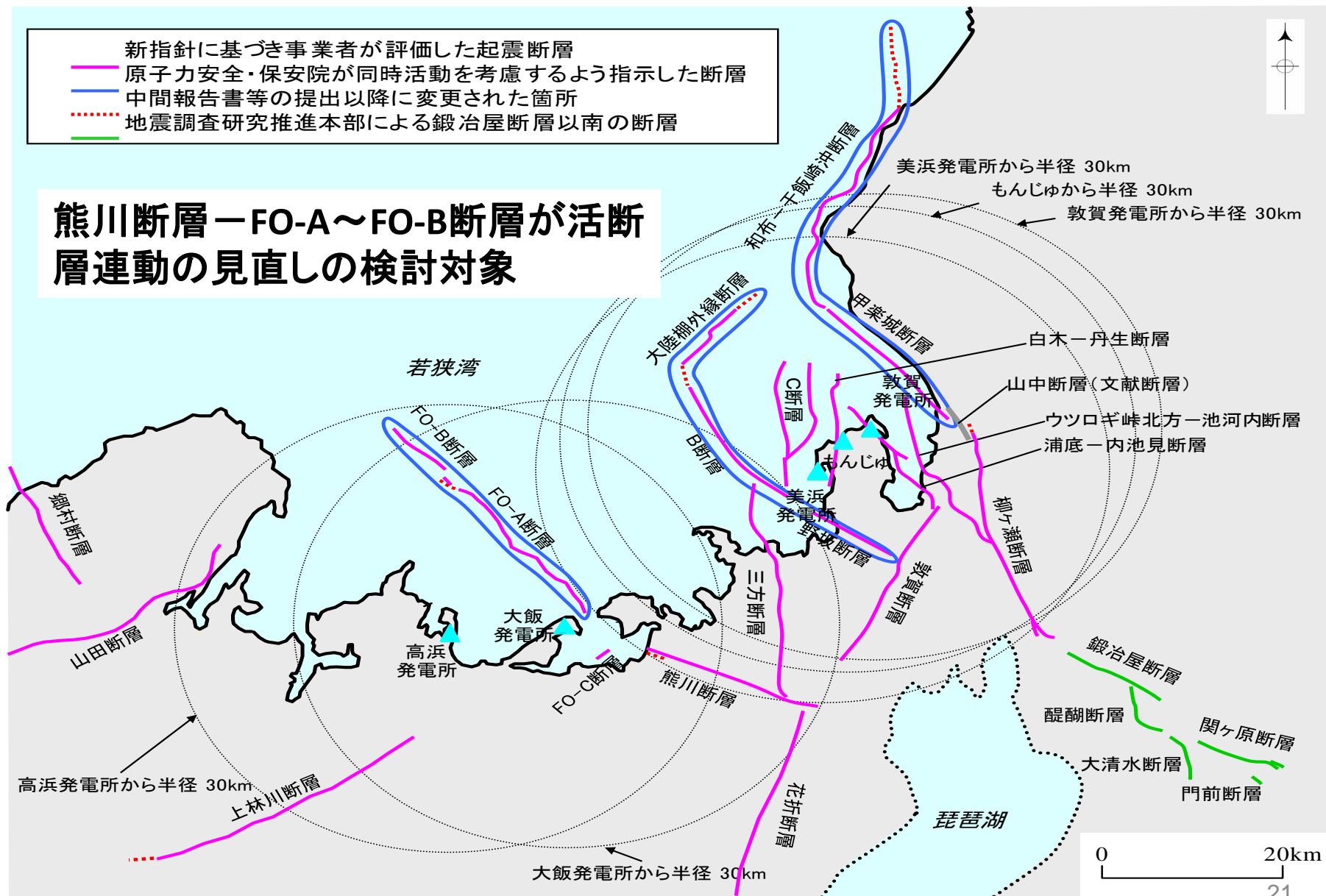
若狭地域の活断層の評価

<参考>

平成20年3月～22年11月の約2年間半にわたり慎重に審議

- 新指針に基づき事業者が評価した起震断層
- 原子力安全・保安院が同時活動を考慮するよう指示した断層
- 中間報告書等の提出以降に変更された箇所
- 地震調査研究推進本部による鍛冶屋断層以南の断層

熊川断層—FO-A～FO-B断層が活断層連動の見直しの検討対象



(注)敷地から半径約30kmの範囲の主な断層について図示している。

(例)もんじゅの耐震安全性評価における検討用地震

	選定した検討用地震	断層の長さ	地震規模※1
1	C断層	18km	M6. 9
2	白木－丹生断層	15km	M6. 8(6. 9)※2
3	浦底－内池見断層	18km	M6. 9
4	和布－干飯崎沖～甲楽城断層	60km	M7. 8
5	大陸棚外縁～B～野坂断層	49km	M7. 7

※1:地震規模は松田式により算出

※2:白木－丹生断層については、長さが断層幅を下回らないように設定した
16. 2km(17. 3km)から地震規模を評価

◆変更された基準地震動◆ ※カッコ内は旧値

敦賀原発 800ガル(650ガル) もんじゅ 760ガル(600ガル)
 美浜原発 750ガル(600ガル) 大飯原発 700ガル(600ガル)
 高浜原発 変更なし(550ガル)

「個別サイトの課題・調査方針一覧と今後の進め方」

(昨年11月16日地震・津波の解析結果の評価に関する意見聴取会)

耐震バックチェックで未解決とされる事象

サイト	検討課題	調査方針	今後の進め方
敦賀、大飯 美浜、高浜 もんじゅ	「天正年間に若狭地域が大きな津波に飲み込まれた」旨の古文書の存在が明らかになり、若狭地域における過去の津波について検討が必要。	「津波堆積物」の掘削調査結果を踏まえた影響評価を実施する。	【1月から検討再開】 ・津波堆積物の再調査結果を踏まえ、想定津波高さを再評価
敦賀	敷地内を通る「浦底断層」は、4000年前以降に活動している断層であることが判明。当該断層は、1号機及び2号機から200m程度しか離れておらず、当該断層以外に、原子炉建屋直下の破碎帯がある。今回の地震の知見を踏まえ、浦底断層の活動に伴う破碎帯も含めた地盤の変位について原子炉建屋等への影響を評価することが必要。	活断層の近接箇所の地層変位の評価手法を明らかにし、当該手法に基づき原子炉建屋等への影響評価を実施する。	【1月から検討再開】 ・「破碎帯」が地質構造的に浦底断層の副断層に該当するかを明らかにする。浦底断層の動きにより「破碎帯」が変位するかを解析等で確認。
敦賀、大飯 美浜、高浜	基準地震動の変更に伴い、周辺斜面の安定性について確認が必要。	周辺斜面の安定性について、安全上重要な施設等への影響評価を実施する。	【昨年12月から検討再開】 ・サイト毎に順次評価

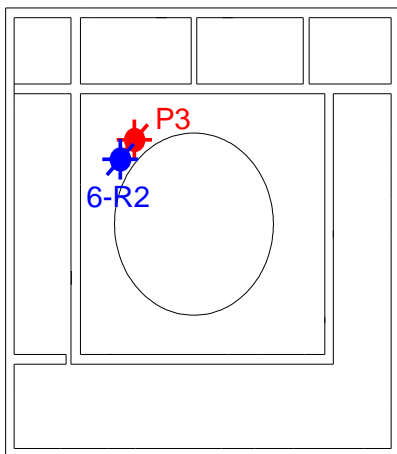
【地震観測記録の一時中断による影響】

<参考>

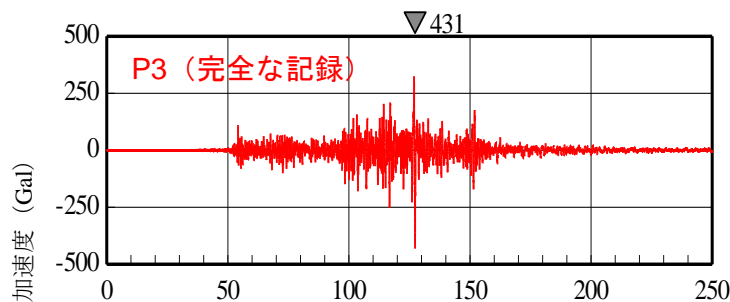
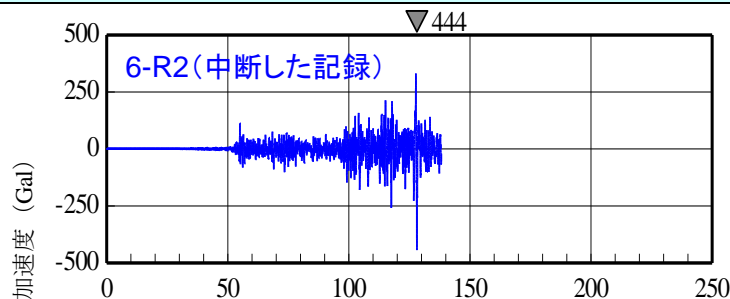
○今回、福島第一では、53箇所の地震計のうち29箇所で、福島第二では、43箇所の地震計の全てで地震観測記録が得られているが、地震計の不具合により、福島第一では7箇所、福島第二では、11箇所の観測点において130秒～150秒程度で観測記録が中断

○中断した記録(6R-2)と完全な記録(P3)の最大加速度値及び床応答スペクトルを比較すると顕著な差はないことから、中断記録を入力地震動とすることは妥当と評価。

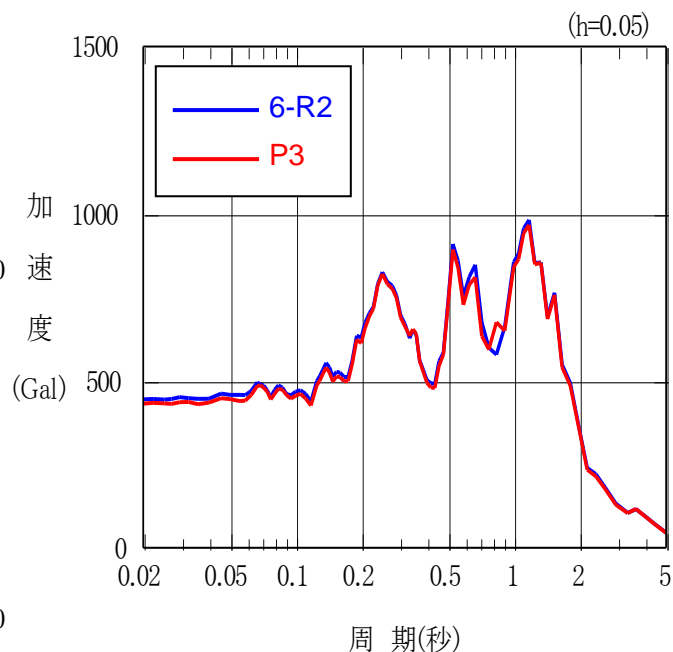
P. N



福島第一原子力発電所
6号機原子炉建屋
地下2階(基礎版上)
地震観測点配置図



加速度時刻歴波形 (EW方向)



加速度応答スペクトル (EW方向)

4. 今回の事故から得た技術的知見と対策 (設備・手順に係る対策の方向性) (30項目の安全対策)

(要件1 ; 原子力発電所の外部電源の信頼性向上)

□ 対策1 外部電源システムの信頼性向上

- 原子力発電所に直接繋がる変電所まで規制の視野に
- 異なるルート(送電線及び変電所)からの給電の確保

□ 対策2 変電所設備の耐震性向上

- 原子力発電所に接続される変電所の断路器について、高強度がいし及びガス絶縁機器の採用を行うなどにより耐震性の強化

(要件2 ; 原子力発電所の開閉所設備の信頼性向上)

□ 対策3 開閉所設備の耐震性向上

- 開閉所の電気設備(遮断器、断路器等)の耐震性の強化及び設備の多重化

(要件3 ; 外部電源の復旧の迅速化)

□ 対策4 外部電源設備の迅速な復旧

- 外部電源設備の予備、復旧作業のための資機材の確保、対応マニュアルの整備

(1号機の被害状況)

原子炉建屋



D/G (非常用ディーゼル発電機)、M/C (高压配電盤)、P/C (パワーセンター)、MCC (モーターコントロールセンター)、D/C (直流電源)

- ↑ ポンプ
- 使用可能
- × 使用不可
- △ 単独では使用可能であるが、他設備の影響で使用不可
- ? 使用可否不明

直流電源喪失時に隔離弁閉信号発信により閉動作した。

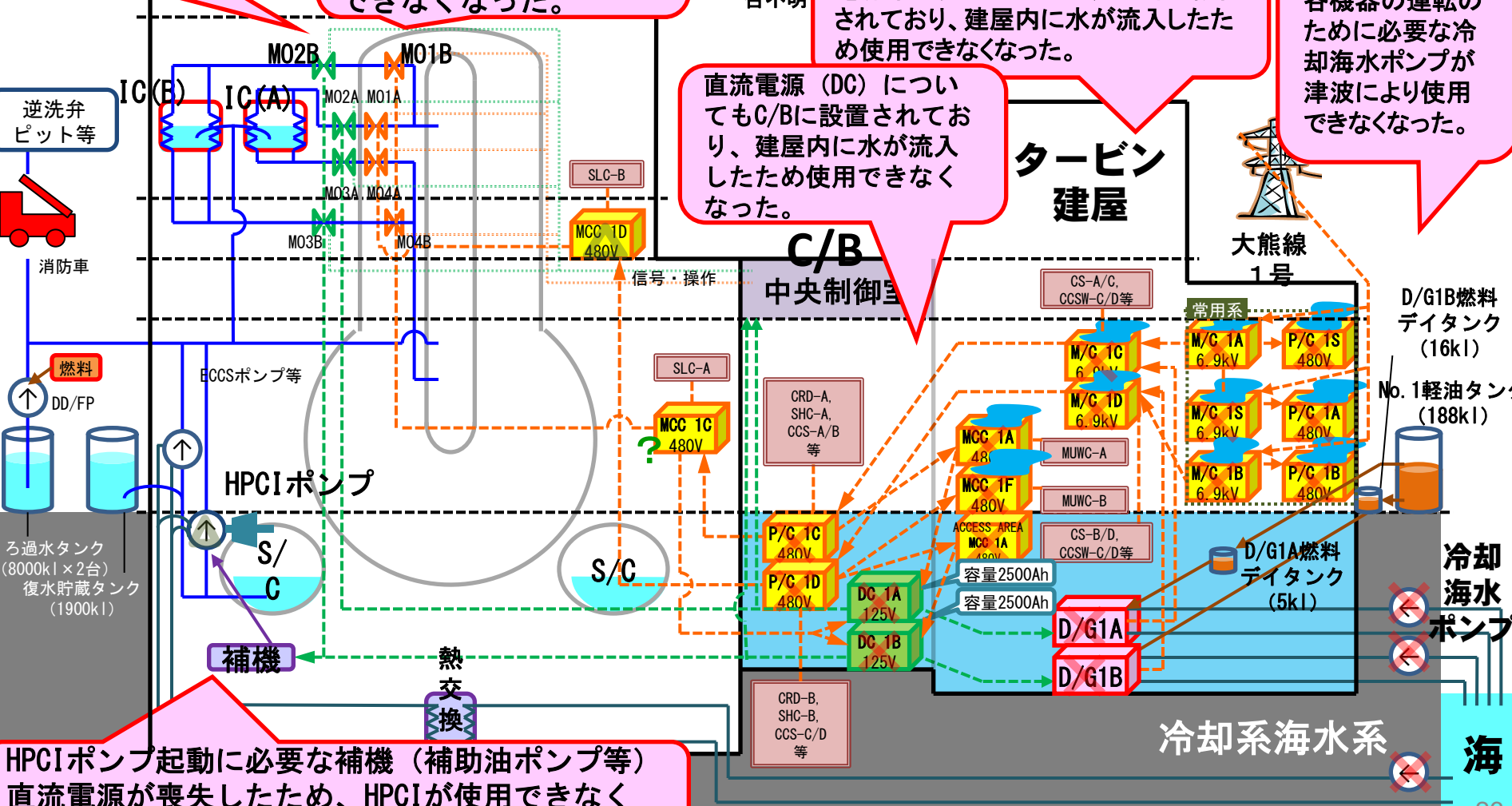
ICのPCV内側弁については、交流電源駆動で、全交流電源喪失で操作できなくなった。

非常用ディーゼル発電機についても冷却用の海水ポンプが使用できなくなるとともに自らも水没した。

電源系の多くがタービン建屋等に設置されており、建屋内に水が流入したため使用できなくなった。

各機器の運転のために必要な冷却海水ポンプが津波により使用できなくなった。

直流電源 (DC) についてもC/Bに設置されており、建屋内に水が流入したため使用できなくなった。



HPCIポンプ起動に必要な補機 (補助油ポンプ等) 直流電源が喪失したため、HPCIが使用できなくなった。

4. 設備・手順に係る対策の方向性

(要件4 ; 所内電気設備の共通要因故障による機能喪失防止)

□ 対策5 所内電気設備の位置的な分散

- 電気設備一式の多重性を強化するとともに、配置場所について、位置的な分散(配置建屋、建屋内の位置(海側/陸側、高所/低所等)を確保

□ 対策6 浸水対策の強化

- 「想定津波高さ」に備えた防潮壁等の設置、多重防護の観点から建屋の水密化、非常用電気設備を地下階など浸水の可能性がある場所に設置している場合には部屋単位での水密化、浸水時に備えた排水機能の用意

(要件5 ; 非常用交流電源の強化)

□ 対策7 非常用交流電源の多重性と多様性の強化

- 点検保守による待機除外、自然災害等による機能喪失や故障を考慮した多重性の強化
- 空冷及び水冷等による冷却方式の多様性の強化、外部電源の復旧期間を見込んだ十分な燃料の確保

4. 設備・手順に係る対策の方向性

(要件6 ; 非常用直流電源の強化)

□ 対策8 非常用直流電源の強化

- 蓄電池が枯渇する前の充電などにより長期間の機能維持を可能とする
- 一系統の蓄電池の蓄電容量のみで負荷の切り離しを行わず少なくとも8時間、不必要な負荷の切り離しを実施した上で少なくとも24時間、蓄電容量の確保

□ 対策9 個別専用電源の設置

- シビアアクシデント時に特に重要な計装専用の電源の確保

(要件7 ; 事故時・事故後の対応・復旧の迅速化)

□ 対策10 外部からの給電の容易化

- 電源車などのバックアップ設備による給電を確実に容易化
- 困難な状況を想定しマニュアルを整備

□ 対策11 電気設備関係予備品の備蓄

- ケーブルなど電気設備関係の予備品について、緊急用資機材倉庫等を確保し備蓄、予備設備の設置
- 可搬型の照明設備を用意するなど復旧作業環境の確保、事故時用の資機材が即時に利用できるよう普段から訓練
- 普段から保守点検活動を行い実務経験を積む

4. 設備・手順に係る対策の方向性

(要件 8 ; 初期対応における的確な判断)

□ 対策 1 2 事故時の判断能力の向上

- 炉心冷却等を最優先すべき状況の判断基準を予め明確化
- 前兆事象を確認した時点での事前の対応(例. 大津波警報発令時の原子炉停止・冷却操作)ができる手順の整備
- 電源、計装系、状況を確認に行くための装備(線量計、マスク等)、操作マニュアルや関連機器の設計図書等の整備
- 確実にプラント状況を把握できる通信設備を含めた関係施設の整備・改善

(要件 9 ; 冷却設備の共通要因故障による機能喪失の防止)

□ 対策 1 3 冷却設備の耐浸水性・位置的分散

- 冷却設備(原子炉注水設備、原子炉減圧設備等)に関連する設備・機器が設置されている建屋、ポンプ室等の水密化、排水設備の設置
- 代替設備を含め、各設備の位置的分散

□ 対策 1 4 事故後の最終ヒートシンクの多様性

- 防潮壁やスクリーンなどにより、最終ヒートシンクを確保する海水冷却・固定式機器の津波への耐性の強化
- 可搬型代替海水系(RHRS)の導入、空冷機器の設置

4. 設備・手順に係る対策の方向性

(要件10；注水機能の強化)

□ 対策15 隔離弁の動作確実性の向上

- 隔離弁の駆動源が喪失していても、強制的に確実に動作させることができるメカニズム(外部から個別に電動弁に給電するなど)の導入
- 事故時に迅速、安全かつ確実に操作ができるよう、アクセス容易な場所で簡易にできる対策

□ 対策16 代替注水機能の強化

- 代替注水設備の駆動源は、蒸気駆動、ディーゼル駆動等とし、地震時やシビアアクシデント時の環境にも耐えられるものとする、水源も多重性・多様性を持たせる
- 原子炉の減圧を確実に実施できるようにする、吐出圧力の高いポンプ、建屋外の注水口を整備し、注水手順を定め日常的に訓練
- 消火系を原子炉冷却に使用する場合には、通常のライン構成から原子炉注水ラインに簡易に切り替えられるよう設備面及び運用面の改善、バックアップポンプの用意

(要件11；使用済燃料貯蔵における異常時の除熱性能の確保)

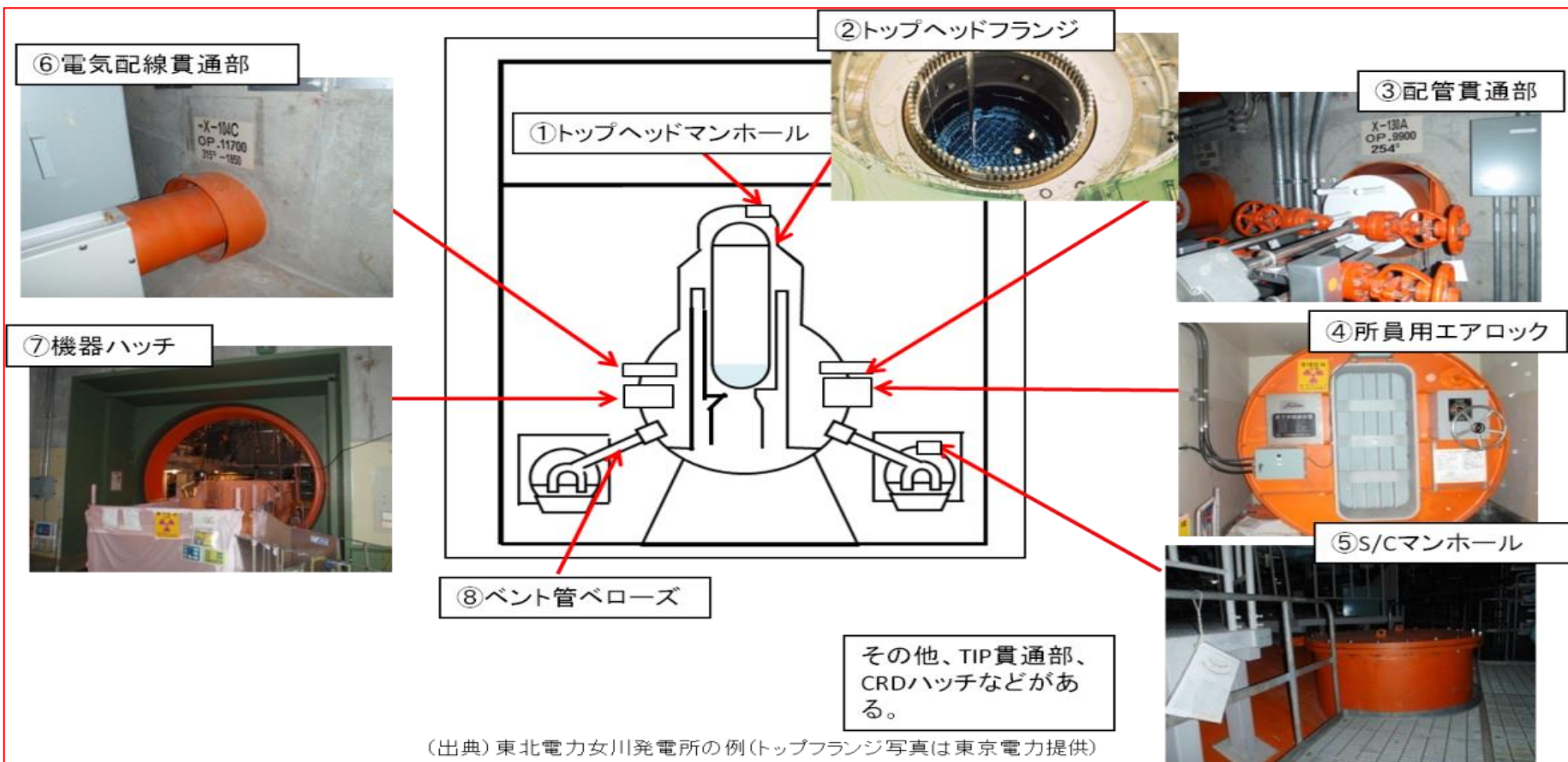
□ 対策17 使用済燃料プール冷却・給水機能の信頼性向上

- 使用済燃料プールの冷却・給水機能の多重性、多様性の確保、冷却水量の確保、貯蔵の分散化、空冷設備の設置、乾式貯蔵の採用など

閉込機能に関する設備（被害の状況）

○1-3号機では、格納容器ベント操作を行う前に、格納容器から漏えいが生じた可能性が高い。

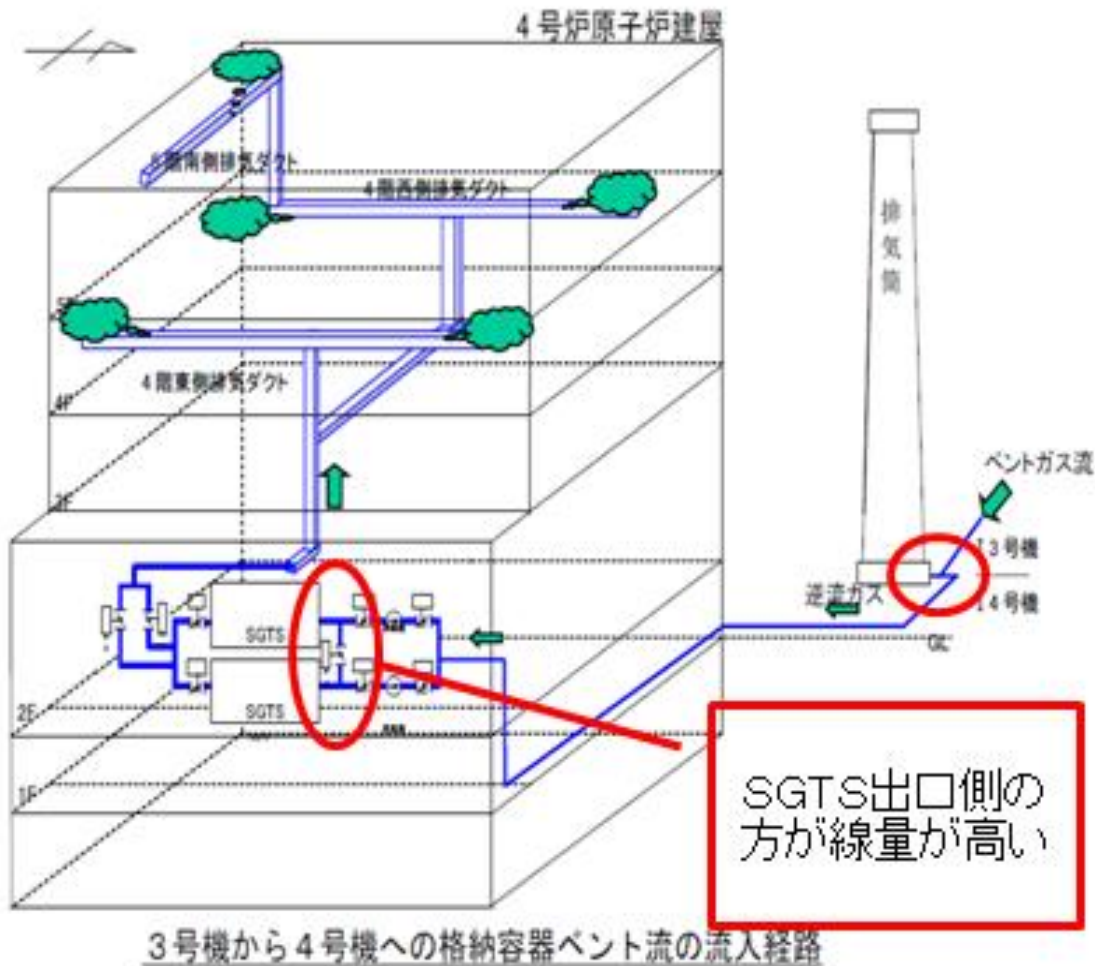
○漏えいのメカニズムとしては、過圧のみによる破損の可能性は考えにくい。過圧に加えて、トップフランジ、格納容器貫通部、機器ハッチ等に使用されている有機シール材（シリコンゴム、エポキシ樹脂等）が、圧力容器からの熱輻射等による高温（250℃以上）下において劣化して漏えいが生じた可能性が高い。



閉込機能に関する設備（被害の状況）

＜ベントによる建屋への水素の逆流＞

○4号機については、3号機で発生した水素が、4号機の非常用ガス処理系（SGTS）・建屋換気系に流入し、水素爆発を起こしたと考えられる。



閉込機能に関する設備（被害の状況）

＜ベント操作の実際の流れと問題点＞

- 完全電源喪失と最終ヒートシンク（海水による冷却系）機能喪失により、原子炉格納容器（PCV）からの除熱機能としては「PCVベント」のみが実施可能だった。しかしながら、ベント弁操作において、電源喪失により照明が無くなったこと、事故により現場環境が悪化したこと、圧縮空気の系統での漏えいが原因と思われるポンペ内圧縮空気の枯渇などにより円滑に作業を行うことが困難であった。
- 2号機において水素爆発が発生しなかった理由は、1号機の水素爆発の影響により、偶然ブローアウトパネルが解放され、滞留していた水素が建屋外に放出され、水素爆発を免れたものと推測。



1号機(23.3.12撮影)



2号機(23.3.20撮影)



3号機(23.3.16撮影)



4号機(23.3.15撮影)

ブローアウトパネルが開放

4. 設備・手順に係る対策の方向性

(要件1 2 ; 格納容器の過圧・過温破損防止)

□ 対策1 8 格納容器の除熱機能の多様化

- 交流電源に頼らない原子炉格納容器(PCV)スプレイ及び残留熱除去系(RHR)等による除熱機能の確保
- 海水冷却以外又は津波により同時に損壊しない位置的な分散を確保できる格納容器代替除熱機能の確保

□ 対策1 9 格納容器トップヘッドフランジの過温破損防止対策

- PCVスプレイの効果が期待しがたい場合には、PCVトップヘッドフランジなどの過温破損対策

(要件1 3 ; 着実なベント操作の実施による低圧注水への移行)

□ 対策2 0 低圧代替注水への確実な移行

- 低圧代替注水への移行を確実にを行うための基本的な手順の明確化、完全電源喪失など幅広い状況に対応したマニュアルの整備

□ 対策2 1 ベントの確実性・操作性の向上

- ベント設備の多重性及び耐震性の向上、コンプレッサー・バッテリーの配備や手動開を可能とする設備対応
- ラプチャーディスク弁付きバイパスラインの整備
- 原子炉建屋外からの操作が可能とする弁の設置位置や操作場所の再検討

4. 設備・手順に係る対策の方向性

(要件 1 3 ; 着実なベント操作の実施による低圧注水への移行)

□ 対策 2 2 ベントによる外部環境への影響の低減

- ベントへの放射性物質除去(フィルタ)効果のある設備の設置

(要件 1 4 ; ベントによる建屋の水素逆流防止)

□ 対策 2 3 ベントの配管の独立性確保

- ベントを実施した際、原子炉格納容器内に滞留していた水素が非常用ガス処理系(SGTS)や他号機のベント配管を逆流して原子炉建屋内に流入しないよう、ベント配管をSGTSから独立させる、号機間でベント配管の独立性を確保

(要件 1 5 ; 水素爆発の防止)

□ 対策 2 4 水素爆発の防止 (濃度管理及び適切な放出)

- 建屋側に漏えいした水素について、非常用ガス処理系の活用や水素再結合装置等の処理装置の設置
- 建屋に、プラント毎に定量的な評価を行った上で十分な大きさの開口部を設ける、防爆仕様の換気装置及び放射性物質除去機能を持った装置による水素爆発の防止及び放射性物質の放出抑制、水素濃度検出装置の設置

4. 設備・手順に係る対策の方向性

(要件16；指揮・通信設備の信頼性向上)

□ 対策25 事故時の指揮所の確保・整備

- 地震等の自然災害などによっても機能喪失しない緊急時の指揮所を確保・整備、中央操作室や指揮所が十分に機能を発揮できる必要な電源の確保、放射性物質の流入防止(換気空調系機器の機能確保)、カメラ等による周辺状況の監視機能及び通信機能の確保

□ 対策26 事故時の通信機能確保

- 通信設備の非常時における電源の確保、主要通信基地等の機能維持が可能となるよう耐震性を考慮した機器の設置や浸水対策
- 緊急時対応情報システムやテレビ会議システム等の設置

(要件17；計装設備の信頼性向上について)

□ 対策27 事故時における計装設備の信頼性確保

- 計装専用の蓄電池、予備計測器の設置や予備品の確保等

□ 対策28 プラント状態の監視機能の強化

- 原子炉格納容器内も含めた監視カメラの活用、炉心損傷時にもプラント状態を確実に把握できるよう、計器仕様の範囲を拡大するための研究開発

4. 設備・手順に係る対策の方向性

(要件17；計装設備の信頼性向上について)

□対策29 事故時モニタリング機能の強化

- 発電所敷地境界等のモニタリングポストについて、非常用電源からの供給や専用電源の設置等

(要件18；非常事態への対応整備)

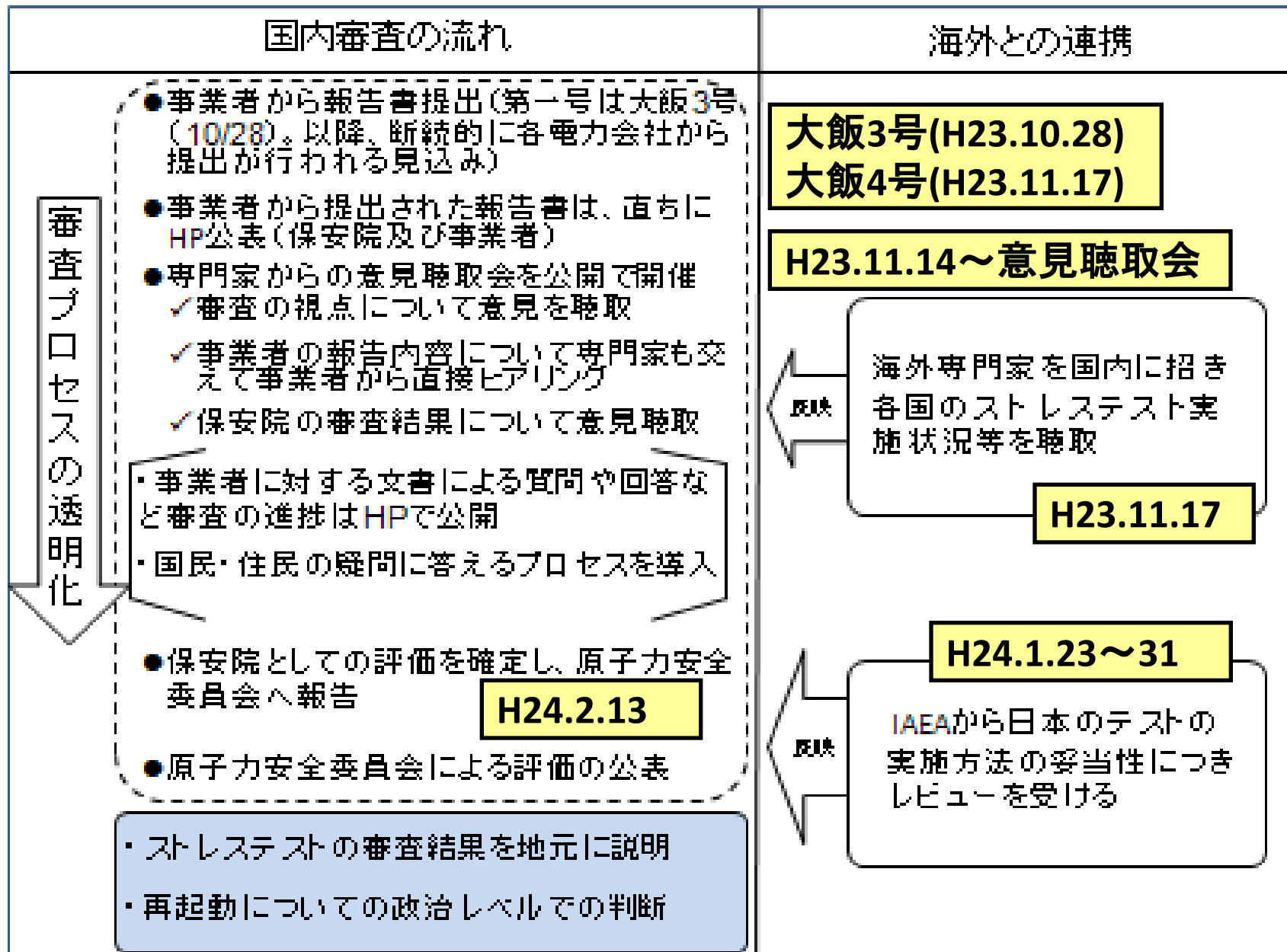
□ 対策30 非常事態への対応体制の構築・訓練の実施

- ポンプ等の適切な予備品の確保、各地域の気象条件等を考慮した設備対応、照明機器等の配備
- あらゆる状況を想定した幅広い事態に対応したマニュアル、設計図面等の整備、関連資料の保管、緊急時に必要となる人員の確保・招集体制の構築、夜間や悪天候下等も含めた事故時対応訓練
- プラント及び予備品等の日常の保守

ストレステスト (一次評価)

<関西電力大飯発電所3/4
号機の審査結果>

ストレステスト(一次評価)の審査の進め方



保安院の評価手法に対する IAEA の評価

- 保安院の手法はIAEAの安全基準に整合していると結論
- 良好事例として、事故直後の緊急安全対策の実施、独自の現地調査、審査の透明性を指摘
- テストの有効性を向上させるための課題として、事業者への期待事項の明確化、原子力施設近隣の利害関係者との会合の実施などを指摘。



保安院の評価（地震・津波への耐性）

- 発電所内の4機全てが被災することを前提として、関西電力が行った「地震」、「津波」及び「地震・津波の重畳」時における「原子炉」及び「使用済燃料貯蔵プール(SFP)」の冷却継続時間の評価、事故シナリオ、緊急安全対策に係る運転操作、作業の成立性に係る評価について確認

地震に関する評価（津波との重畳の場合も同様）

□ 原子炉

- 「 S_s (700ガル) の 1.80倍 (1260ガル) において、メタクラ、パワーセンターの損傷のため、空冷式非常用発電装置による給電に失敗し、炉心の重大な損傷を防止するための措置が講じられなくなる可能性がある」

□ 使用済燃料貯蔵プール(SFP)

- 「 S_s の 2倍 (1400ガル) において、SFPの構造損傷のため、SFPにある水が大量に失われ、燃料の重大な損傷を防止するための措置が講じられなくなる可能性がある」

保安院の評価（地震・津波への耐性）

津波に関する評価（地震との重畳の場合も同様）

□ 原子炉

- 「設計津波高さ2.85mを約8.5m上回る津波高さ（ストレステスト実施前の設計津波高さ1.9mを9.5m上回る）T.P.11.4mにおいて、タービン動補助給水ポンプ等の浸水のため、2次系による冷却に失敗し、炉心の重大な損傷を防止するための措置が講じられなくなる可能性がある」

□ 使用済燃料貯蔵プール（SFP）

- 「設計津波高さ2.85mを約30.4m上回る津波高さ（ストレステスト実施前の設計津波高さ1.9mを31.4m上回る）T.P.33.3mにおいて、可搬式消防ポンプ用燃料の浸水のため、海水のSFPへの供給に失敗し、SFPにある燃料の重大な損傷を防止するための措置が講じられなくなる可能性がある」

□これまで実施されてきた緊急安全対策等により、地震・津波に対する裕度が向上

「空冷式非常用発電装置」による給電機能及び「消防ポンプ」による水源確保の多様化により向上

緊急安全対策における浸水防止措置の概要

<参考>

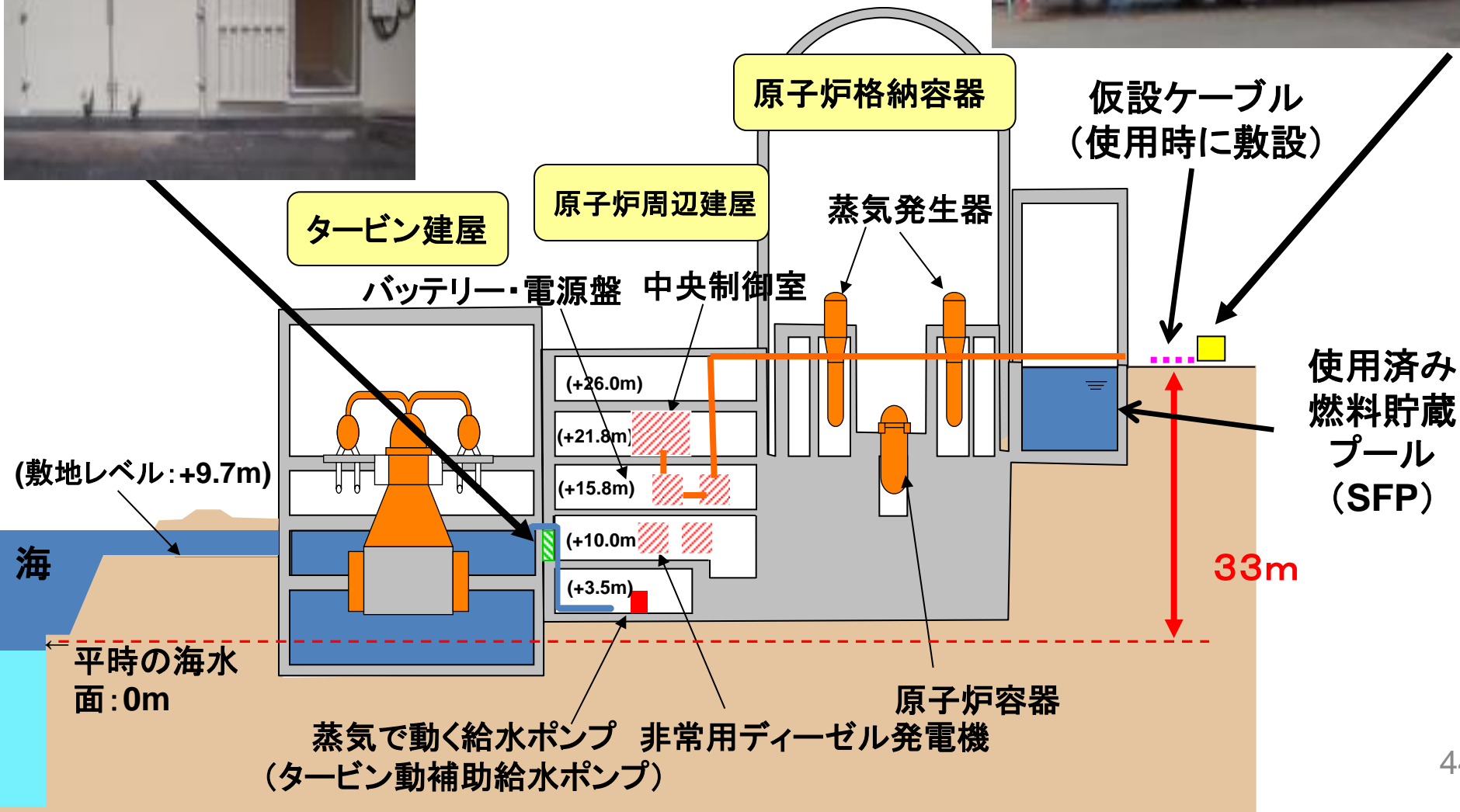
- 福島第一原発では、15mの津波が襲来、これは、同発電所における土木学会の津波高さの評価値5.5mを9.5m上回るものであった。
- このため、各電気事業者に対し、各発電所の土木学会による津波高さに9.5mを加えた津波高さ(上限15m)を考慮して止水防止措置を講じさせることとした。

プラント名	敷地高さ	土木学会手法による平成14年の津波評価	福島第一事故を踏まえ浸水防止措置を講ずべき高さ	今回の対策(短期対策)により防止できる浸水高さ	浸水防止対策
美浜1～3号機	+3.5m	+1.6m	+11.1m	+11.1m	緊急時に必要なポンプ、電源設備などを設置した区画の貫通部シール、扉シールなど
高浜1～4号機	+3.5m	+1.3m	+10.8m	+10.8m	
大飯1～4号機	+1.9m	+1.9m	+11.4m	+11.4m	
敦賀1号機	+3.0m	+2.1m	+11.6m	+11.6m (今回定検終了までに完了予定)	
敦賀2号機	+7.0m	+2.1m	+11.6m	+11.6m	
もんじゅ	+21.0m	+5.2m	+14.7m	+23.0m	—

大飯 3、4号の主な安全対策

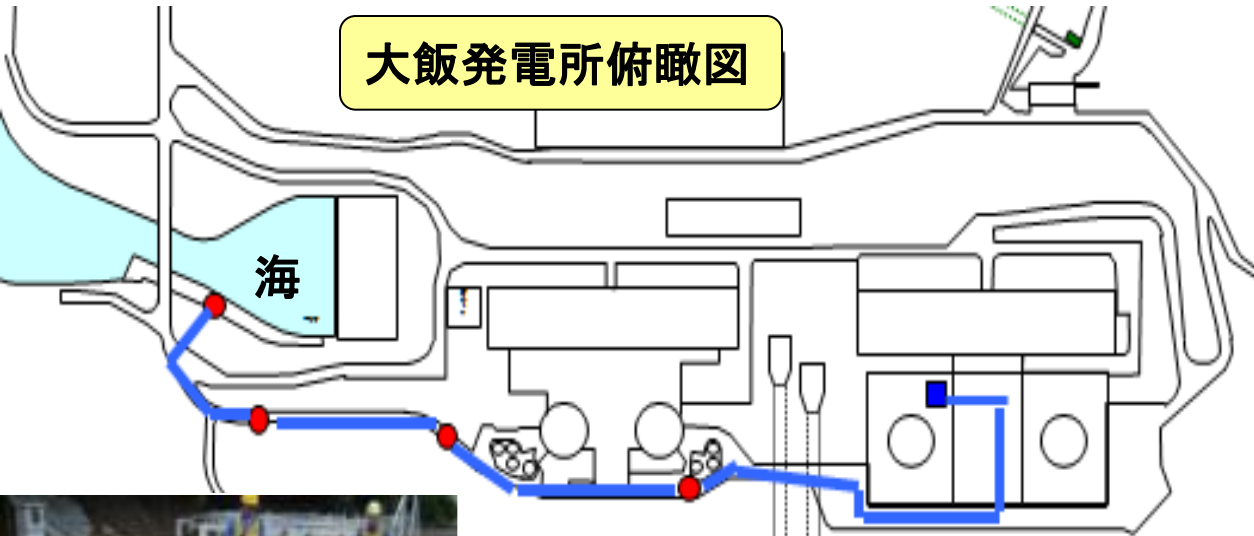


空冷式非常用発電装置
(1825kVA)
(各原子炉に2台配備)



大飯 3、4号の主な安全対策

大飯発電所俯瞰図



高台のトンネル内に消防ポンプを保管
(87台配備／予備率248%)



高台から
消防ポンプを
移動

復水ピット
(貯水槽)

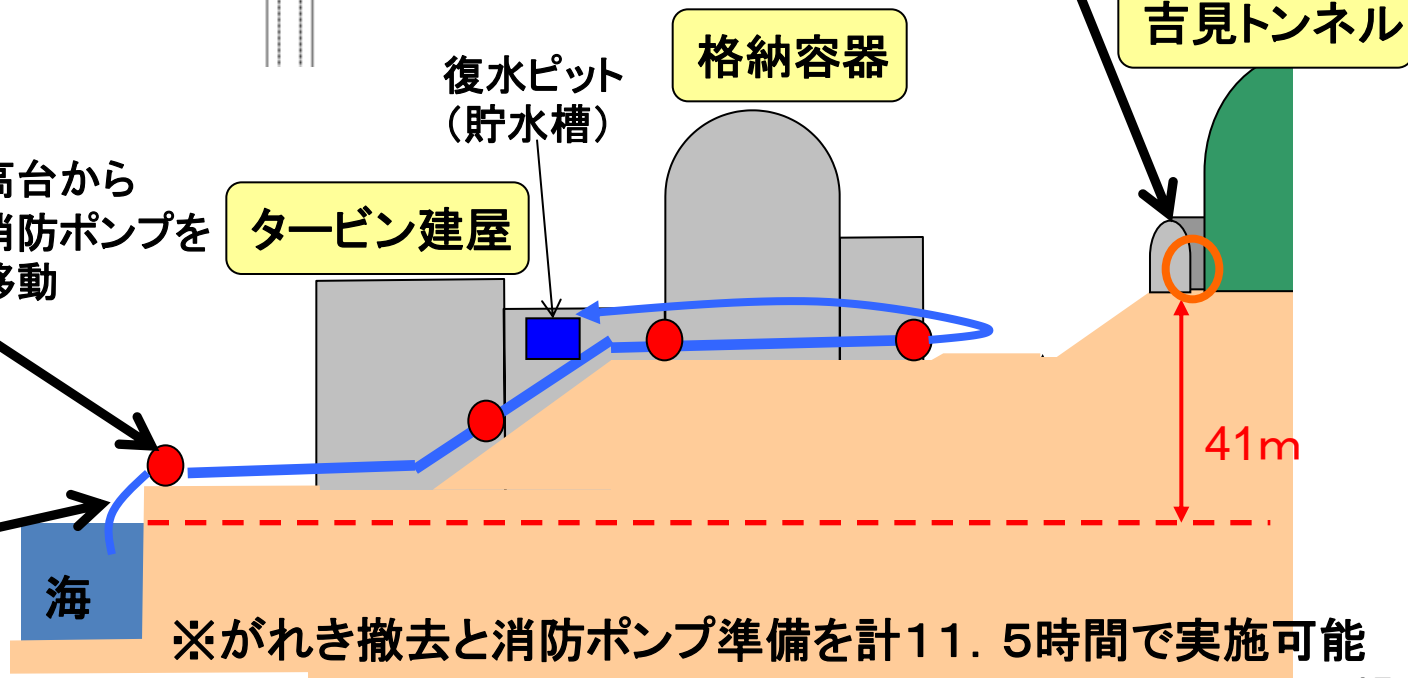
格納容器

タービン建屋

吉見トンネル



ホースを敷設



保安院の評価（緊急安全対策等の効果）

<緊急安全対策実施前>

□ 地震への耐性

- 炉心燃料 (対策前) 1.75Ss(1225ガル) → (対策後) 1.80Ss(1260ガル)

「原子炉補機冷却水ポンプが機能喪失」することにより、複数の補機の冷却不全により複数の機能が喪失し、海へ熱を逃がす機能が喪失する結果、燃料の重大な損傷に至る(クリフエッジ(限界値)は1.75Ss)

- 使用済燃料貯蔵プール (SFP) 1.75Ss → 2Ss(1400ガル)

SFP冷却系による冷却機能が喪失する結果、燃料の重大な損傷に至る(限界値は1.75Ss(原因は原子炉補機冷却水ポンプの機能損傷))

□ 津波への耐性

- 炉心燃料 (対策前) 4.65m → (対策後) 11.4m

「海水ポンプが機能喪失」することにより、複数の補機の冷却不全により複数の機能が喪失し、海へ熱を逃がす機能について喪失する結果、燃料の重大な損傷に至る(限界値はT.P.4.65m)

- 使用済燃料貯蔵プール (SFP) 13.5m → 33.3m

燃料取替用水ポンプを用いたSFPへの給水機能が喪失する結果、燃料の重大な損傷に至る(限界値はT.P.13.5m)(原因は440VAC電源の機能喪失)

保安院の評価（防護措置の成立性、信頼性）

＜現地調査等による確認＞

（平成23年12月26日 大飯発電所において現地調査実施）

□ 防護措置に係る設備の地震に対する耐性

○消防ポンプ及び消防ホースの保管場所であるトンネル（吉見トンネル及び陀羅山トンネル）

- 硬質岩盤内に設置されており耐震性は高い
- トンネル内面のコンクリート小片の剥落に対する鋼製ラック、フード等による防護対策の強化
- 閉止処理した未使用配管がトンネル内頂部に残存、地震時に落下し作業通路を塞ぐ可能性があるため撤去を検討するよう指摘 等

○空冷式非常用発電装置等の電源機能に係る設備の設置場所である原子炉建屋背面道路

- 盤面に相当の強度（ S_s に対して十分な余裕（2倍以上））を有しており支持性が確保されている
- 背後斜面の擁壁の上部の地山についても S_s に対して十分な余裕（2倍以上）を有し安定性は確保されている
- 落下物に対する防護対策の強化、将来的な設備の分散配置等を検討するよう指摘

保安院の評価（防護措置の成立性、信頼性）

<現地調査等による確認>

○消防ポンプ用燃料であるガソリンの保管庫

- 耐震性能が一般産業施設と同程度の壁式鉄筋コンクリート構造の保管庫から軽量鉄骨構造の保管庫への移設、保管庫をコンクリートブロックにアンカー止め、ドラム缶を固縛

○防護措置に係るアクセスルートの地震に対する耐性

- 地震による道路面の不等沈下、周辺の地山のすべりによる道路面への土砂等の流れ込み、地震による道路面へのがれきの散乱などの被害想定を行った上での復旧想定、余裕を持たせた復旧時間（水源及び電源に係る措置に必要なルートの復旧に対して7時間）の算定
- アクセスルートへ流入した土砂の撤去に係る訓練の実施状況として、人員の重機操作能力や目標時間内の撤去完了を確認

○消防ポンプへの給油時における火災対策

- 各消防ポンプに消火器を配備
- 消防ポンプを停止せず給油継続できる別置きタンク追加配備、タンクの周囲に監視員の配置及び消火器を配備、吸着マット上にタンクを配置し給油時のこぼれにも対応

保安院の評価（防護措置の成立性、信頼性）

<現地調査等による確認>

○防護措置に係る体制や役割分担、要員配置

- 空冷式非常用発電装置の起動・接続等の初動対応を行う要員は、発電所に常駐する30名（運転員22名（1、2号機12名、3、4号機10名）、緊急安全対策要員8名（社員2名、協力会社要員6名））で行う、炉心等の冷却の給水確保等は発電所外からの召集要員20名が加わり行なう、さらに、発電所外から、166名の要員を召集する計画（平成23年12月26日現在）

□防護措置に係る設備の津波に対する耐性

- 防護措置に係る屋外設備を、許容津波高さ（炉心燃料T.P.11.4m、SFP T.P.33.3m）よりも高い位置に設置、屋内設備・地下埋設物が津波の影響を受けない設置
- アクセスルートの津波に対する耐性について、地震による道路面へのがれきの散乱などの被害想定を基に、がれき等の撤去などの復旧を想定
- 消防ポンプによる取水地点が敷地への狭い浸水経路の入口、排水経路の出口付近にあり、波が引いた後、陸上からの漂流物が散乱し、防護措置の時間等に影響を及ぼす可能性があることから、漂流物除去箇所等の重点化、そのための能力向上への取組をより一層図ることの必要性について指摘

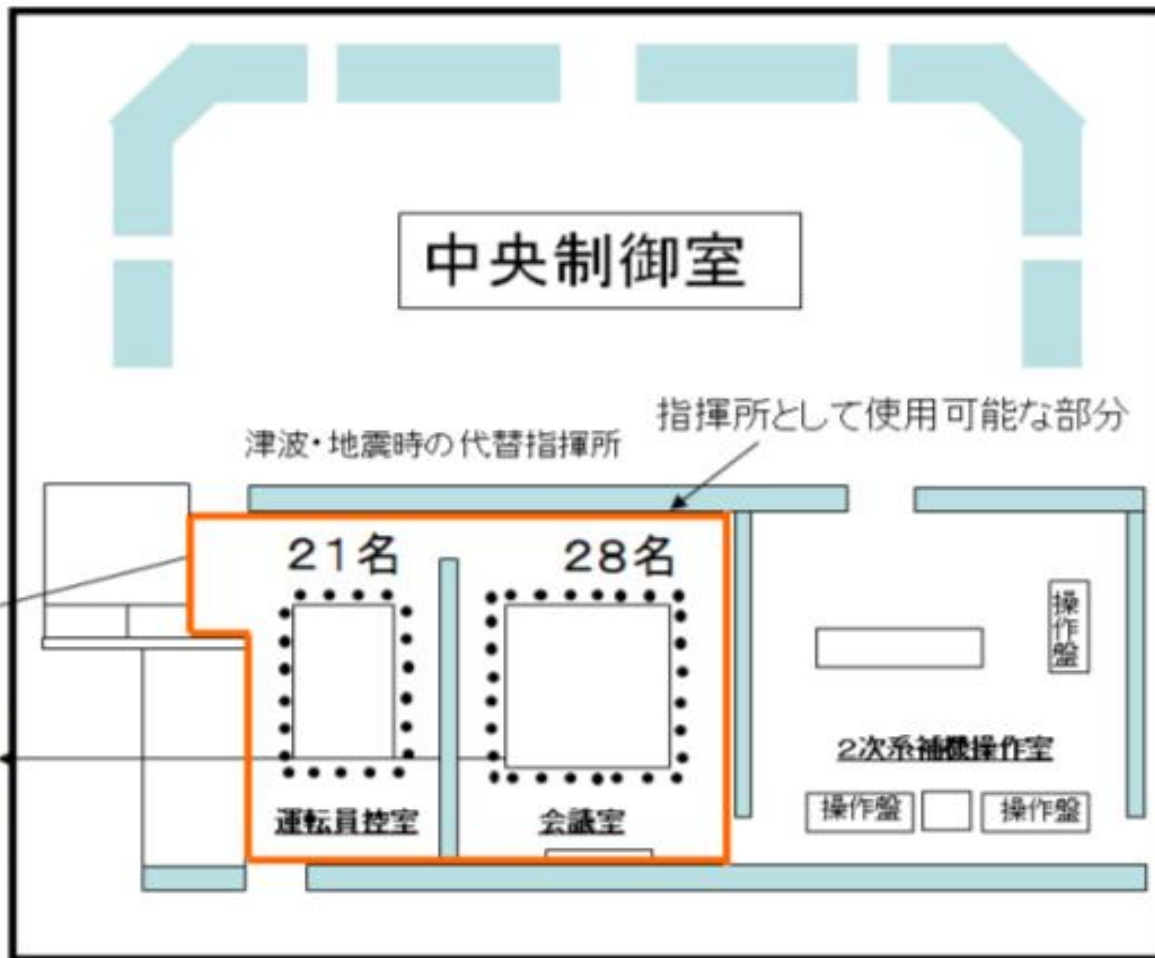
保安院の評価（防護措置の成立性、信頼性）

- ・指揮所のある建物は想定を超える大きな地震・津波に耐えられないため、関西電力は中央制御室裏の会議室を利用する計画。
- ・応急対策としては理解できるが、免震の緊急時指揮所の早期設置と、より確実な代替措置の構築を求める。

指揮所(地下)のある建物



指揮所
(第1ビル地下1F)



保安院の評価（経年劣化について）

大飯発電所3号機及び4号機については、ともに運転開始後約20年超であり、運転開始後30年を超える高経年プラントに対して実施される高経年化技術評価は未実施

美浜1～3号機、高浜1号機及び2号機、大飯1号機及び2号機に対する既往の高経年化技術評価実績を踏まえ、評価対象設備の主要な部位に想定される経年変件事象を網羅的に検討し、耐震安全性評価上着目すべき経年変件事象（応力腐食割れ、腐食、脆化、疲労割れ、摩耗）を抽出

評価対象機器・部位に対して想定される経年変件事象に当該プラントの保全実績及び耐震裕度への影響を考慮

＜対象外＞

- 事象の発生が認められていない（応力腐食割れ、脆化、摩耗）
- プラント運転と地震による影響を比較し耐震裕度の値に影響しにくい（疲労割れ）

ストレステストにおいて考慮すべき経年変件事象

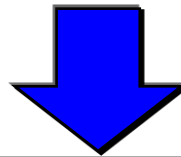
「流れ加速型腐食」(*)を抽出、当該事象を反映した耐震裕度評価

(*)流動している溶液中の金属材料の腐食速度が静止溶液中に比べて大きくなる現象。配管の曲がり(エルボ)部、バルブの下流、管径が減少する箇所など流れが局所的に乱れる箇所で生じることが多い。

保安院の評価（経年劣化について）

□ 経年変化事象を反映した耐震裕度評価

- 減肉想定部位（主給水系配管のエルボ部及びその下流部）について、通常の設計解析で用いる公称肉厚（21.4mm）ではなく、必要最小肉厚（13.5mm）まで一様に減肉させた状態で配管系をモデル化し、設計評価と同等の荷重条件、応答解析手法、許容値を用いて、応答解析及び評価を実施、これまでの高経年化技術評価の実績と整合
- 経年変化事象を反映して算定した主給水系配管の耐震裕度は S_s の2.13倍であり、クリフエッジとして特定した設備の耐震裕度である S_s の1.8倍に影響を与えるものではない



地震に係る経年変化の考慮は妥当

保安院の評価（原子炉及び使用済燃料ピットの冷却継続時間）

□ 原子炉及び使用済燃料ピット（SFP）の冷却継続時間の評価結果は、最も短くなる地震及び地震・津波の重畳時において、原子炉及びSFPの冷却について約7.2日間（原子炉運転中の評価結果、原子炉停止中は約8日間）となり、緊急安全対策等実施前の原子炉及びSFPの冷却継続時間である約5時間及び約12時間から延長

保安院の評価（総合的評価）

- 福島第一原子力発電所を襲ったような地震や津波と同程度に耐震・津波評価上の想定を上回る地震と津波が来襲した場合の耐性

＜福島第一原子力発電所を襲った地震・津波＞

- 地震：基準地震動を上回る地震動（最大加速度については基準地震動が600ガルのところ約75ガル超過）
- 津波：設計上の想定を約9.5m超え最大遡上高さ15mに至る津波

＜大飯発電所3、4号機に係る保安院の評価＞

- 基準地震動（700ガル）の1.8倍（1,260ガル）の地震と、当初の設計津波高さ1.9mを9.5m超過する津波（ストレステスト実施のために再評価された設計津波高さ2.85mを8.55m超過する津波）が来襲した場合でも、炉心やSFPの冷却を継続し、燃料の損傷を防止するための対策が講じられている
- 福島第一原子力発電所に来襲した地震が基準地震動を1割程度超えたものであったことを考えれば、大飯発電所において想定される1.8倍の地震動は十分に大きく、また、若狭湾近くに福島第一原子力発電所を来襲したような大規模な津波を引き起こすプレート境界はなく、11.4mの津波高さは、当該地域に関し歴史上記録のある津波を踏まえて検討された設計津波高さに対し十分余裕のある値

保安院の評価（総合的評価）

- 天正地震による津波について、関西電力は追加調査を行うとしており、今後の調査結果を厳正に確認
- 内陸地殻内の活断層に関し、連動性の可能性について検討するよう事業者に対し指示しており、関西電力から、今後報告がなされた段階で、厳正に確認（熊川断層及びFO-A～FO-B断層が主な検討対象）
- 今後、Ssの見直しが行われた場合は、本ストレステストで評価された裕度に変更される可能性がある

保安院の評価（一層の取組を求める事項）

- 緊急時の要員招集体制について、より厳しい状況を想定し、空路による要員召集体制の構築等一層の要員招集強化を図るべき
- 緊急時対策所については、現時点では耐震性と耐津波性の両方を満足する専用の施設はなく、緊急時における指揮系統の要としての対策所の重要性に鑑みれば、免震事務棟の前倒し設置を図るとともに、それまでの間についても、より確実な代替措置の構築を検討すべき
- 全交流電源喪失時における臨時措置による電源の確保は緊急時対策の要。空冷式非常用発電装置を各炉に2台設置し冗長性を有していることは評価できるが、これらが同一箇所に待機していることについては、共通要因故障を避ける観点から、1、2号機と同装置の配置も含めサイト全体で分散配置する等の可能性を検討すべき 等