

東北地方太平洋沖地震発生後の 東海第二発電所の状況について

平成24年10月22日

日本原子力発電株式会社

発電管理室 設備耐震グループマネージャー

戸村 典章

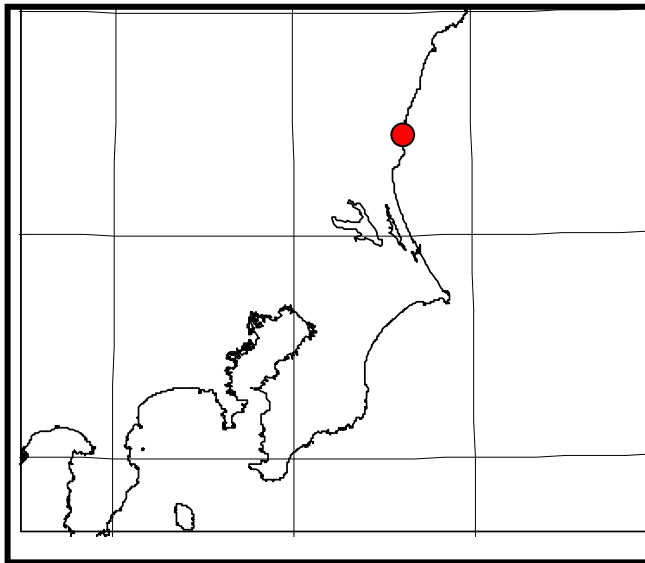
目次

1. 地震発生後の東海第二発電所の状況
2. 地震の観測記録と地震による影響
3. 津波の観測記録と東海第二発電所における
津波対策
4. まとめ

1. 地震発生後の東海第二発電所の状況

東海第二発電所の所在地

【東海発電所 所在地】 茨城県那珂郡東海村白方1-1



原子炉型式：沸騰水型軽水炉（GE-BWR 5）
格納容器型式：Mark-
電気出力：110万kW
着工：昭和48年6月1日
運転開始：昭和53年11月28日

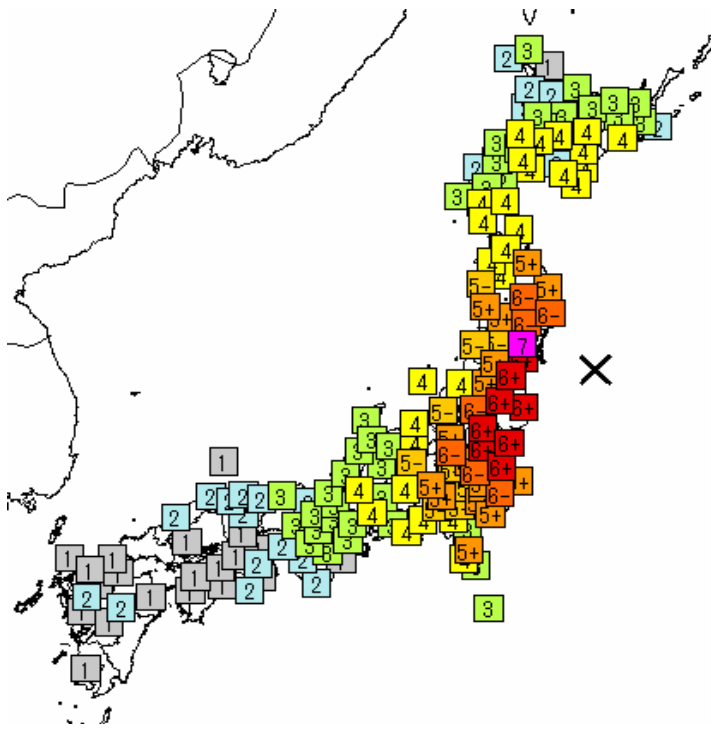
東海第二発電所は，日本初の大型原子力発電所として昭和48年6月に着工，昭和53年11月に営業運転を開始。

原子炉建屋の位置（構内配置図）

東北地方太平洋沖地震の概要と東海第二の状況

地震の概要

- ・発生日時：平成23年3月11日14時46分
- ・場 所：三陸沖（牡鹿半島の東南東、約130km付近）
- ・深 さ：約24km
- ・規 模：Mw9.0
- ・主な震度：最大震度7 宮城県栗原市
震度6弱 東海村



東海第二発電所の状況

3月11日14時46分の本震により「タービン振動大」により原子炉停止。

原子炉建屋地下2階基礎版上端(EL-4m)では、NS方向 214ガル、EW方向 225ガル（水平方向ベクトル合成値：262ガル）、UD方向 189ガルの最大加速度を記録

同日15時15分に発生した余震については、原子炉建屋基礎版上端では、NS方向 64ガル、EW方向 76ガル、UD方向 91ガルの最大加速度を記録

<参考>

スクラム地震計設置値

- ・水平 基礎版上端：250ガル、EL14m：300ガル
- ・上下 基礎版上端：120ガル

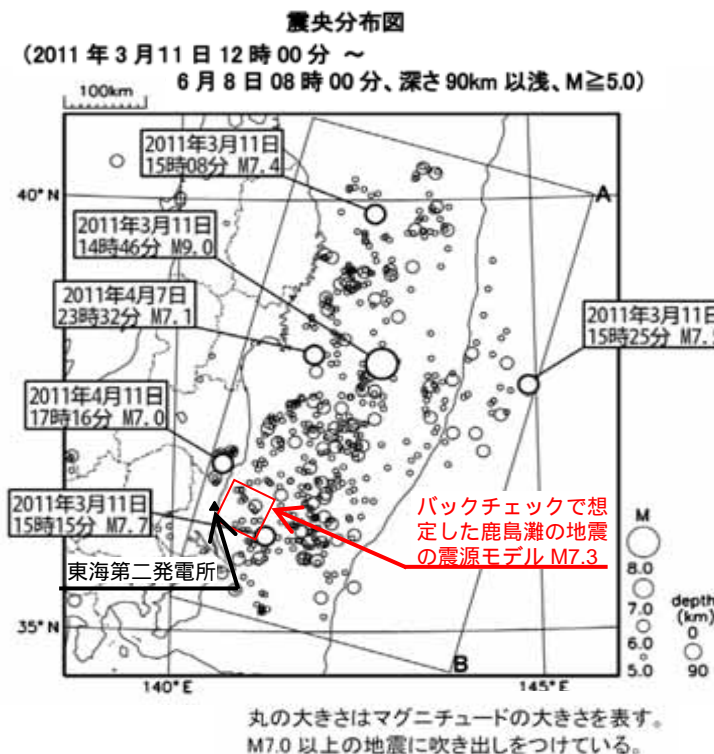
・20世紀以降の主な大地震

<世界>

- 1.1960年チリ地震(Mw9.5)
- 2.1964年アラスカ地震(Mw9.2)
- 3.2004年スマトラ沖地震(Mw9.1)

<日本>

- 1.1933年三陸沖地震(Mw8.4)
- 2.1994年北海道東方沖地震(Mw8.3)
- 3.1958年択捉島沖地震(Mw8.3)



(出典：東京大学地震研究所)

地震発生後の状況(その1:地震直後)

平成23年3月11日14時46分



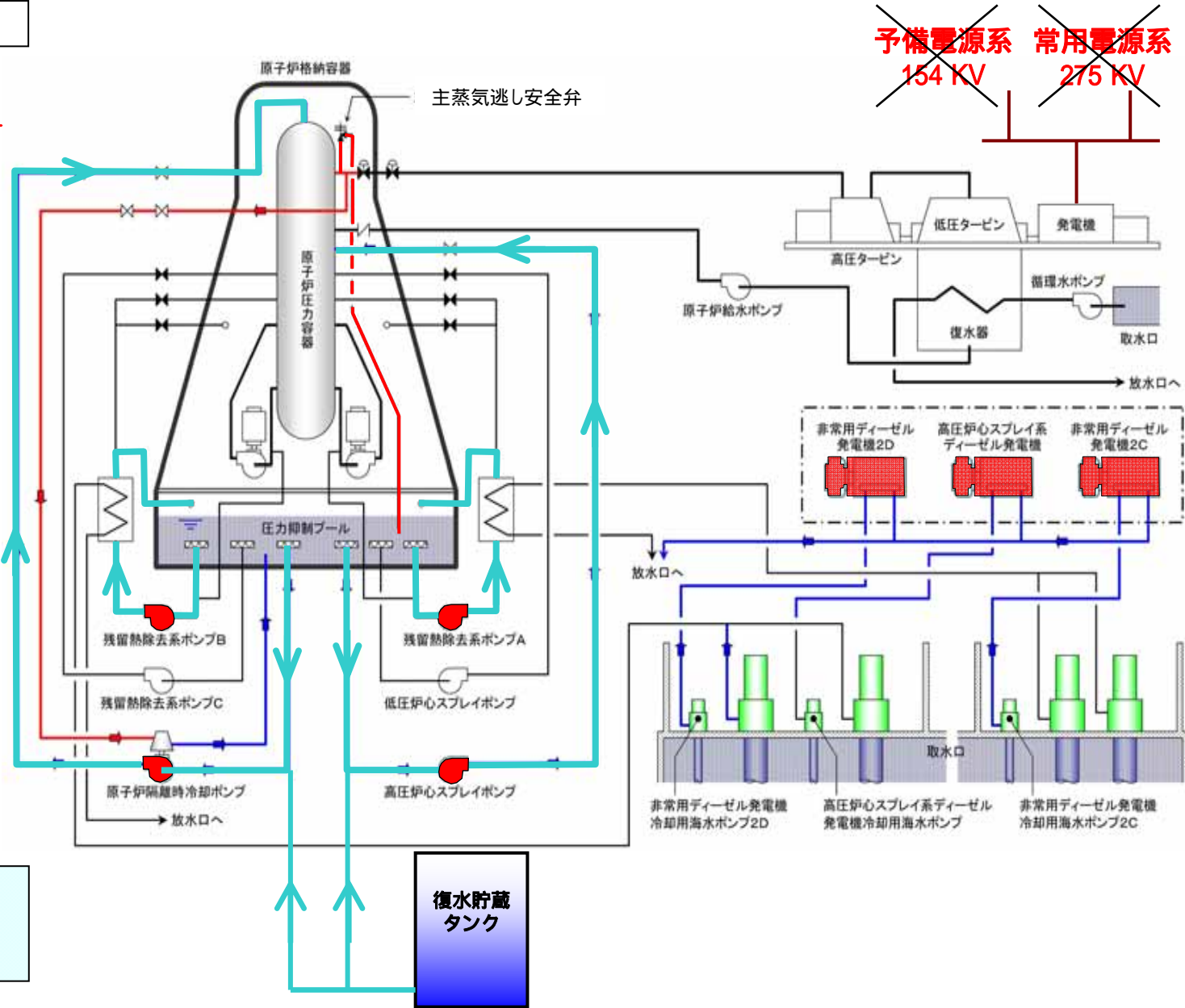
原子炉自動停止

外部電源喪失

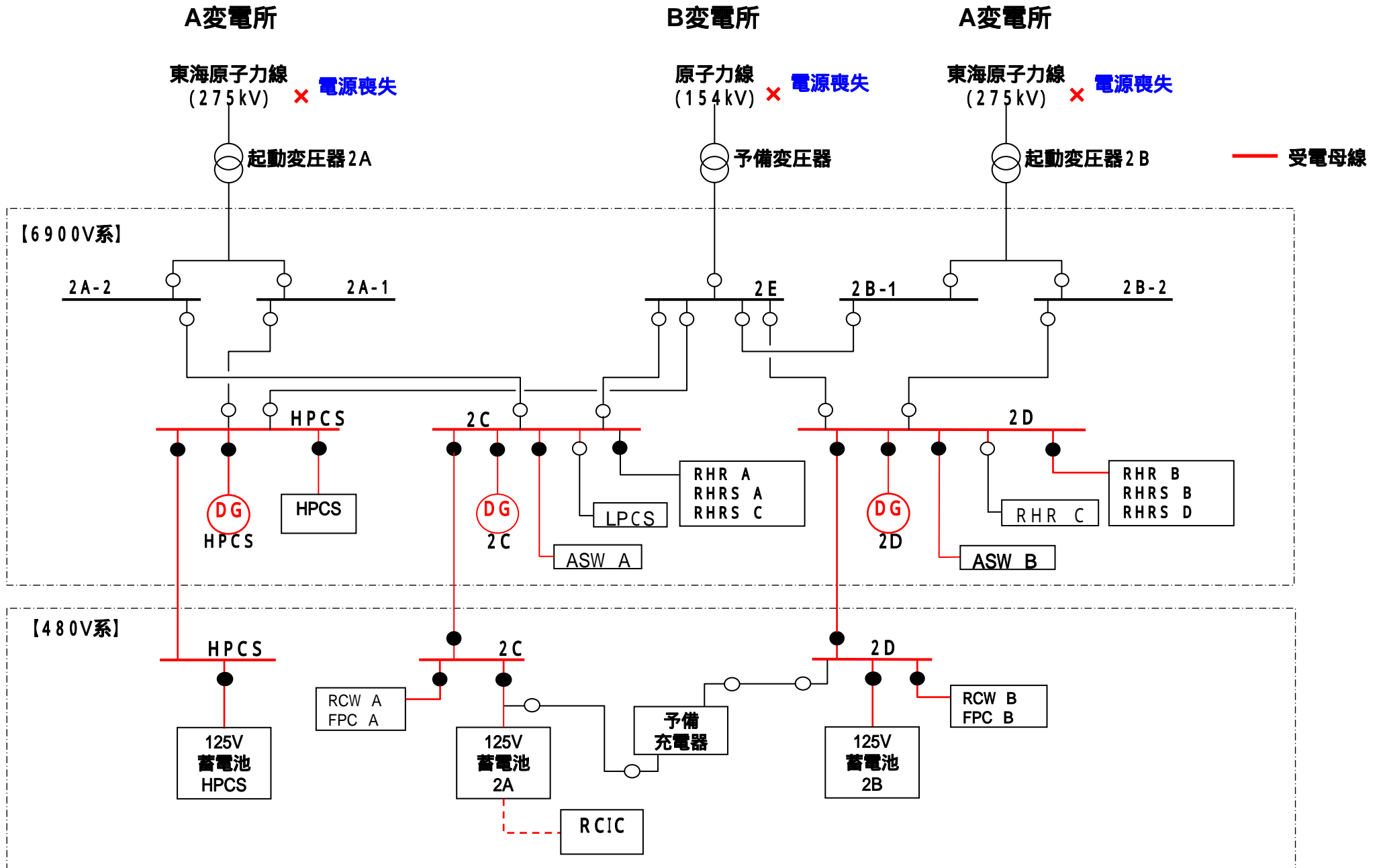
非常用ディーゼル発電機にて安全停止に必要な電力を確保

原子炉隔離時冷却ポンプ及び高圧炉心スプレイポンプにて原子炉水位を確保

残留熱除去系による圧力抑制プールの冷却開始



東海第二発電所 所内電源系概略図 (非常用ディーゼル発電機2C停止前の電源状況)



地震発生後の状況(その2:津波来襲)

津波の影響

↓

**非常用ディーゼル発電機
冷却用海水ポンプ2C
自動停止**

3月11日19時20分

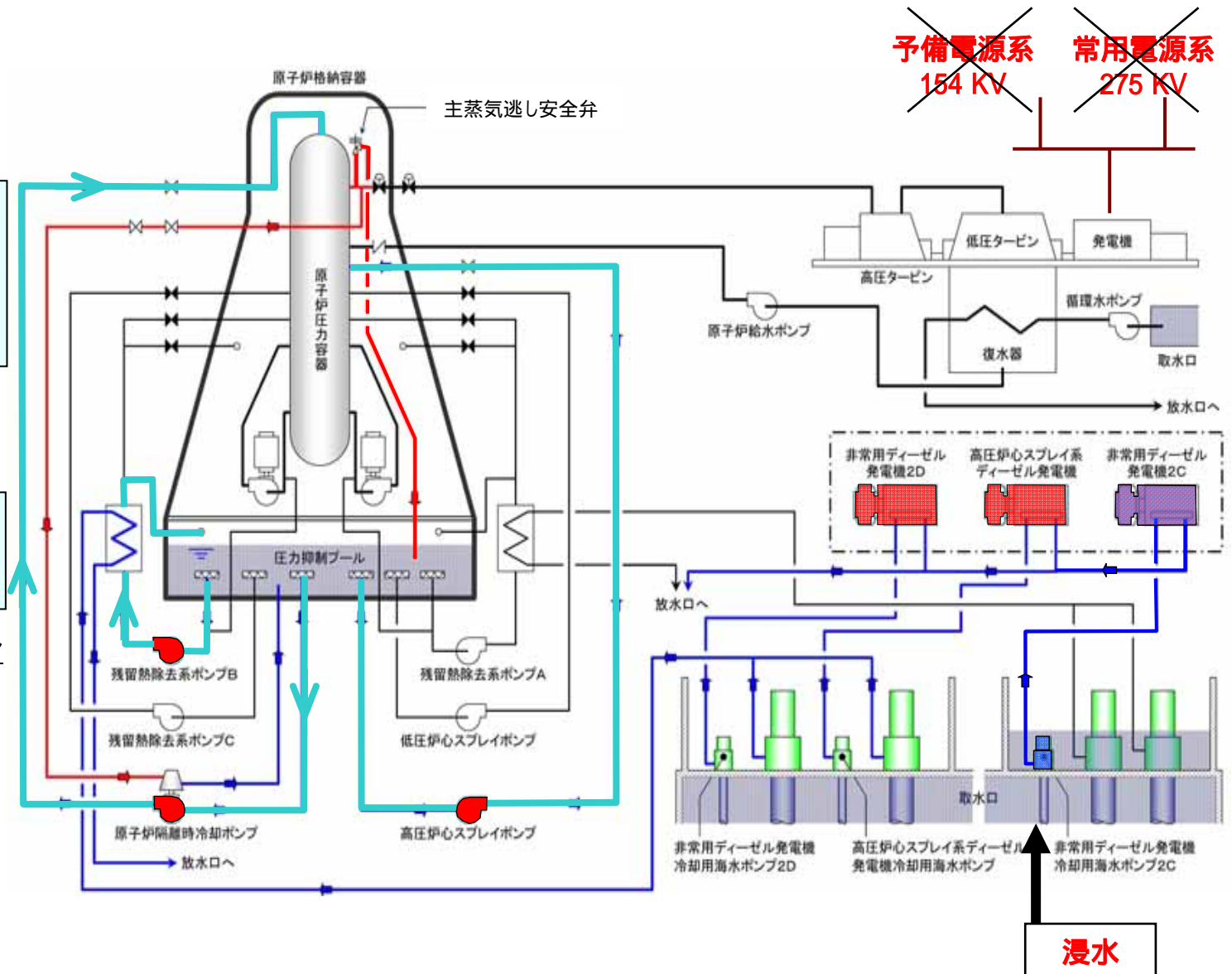
↓

**非常用ディーゼル発電機2C
手動停止**

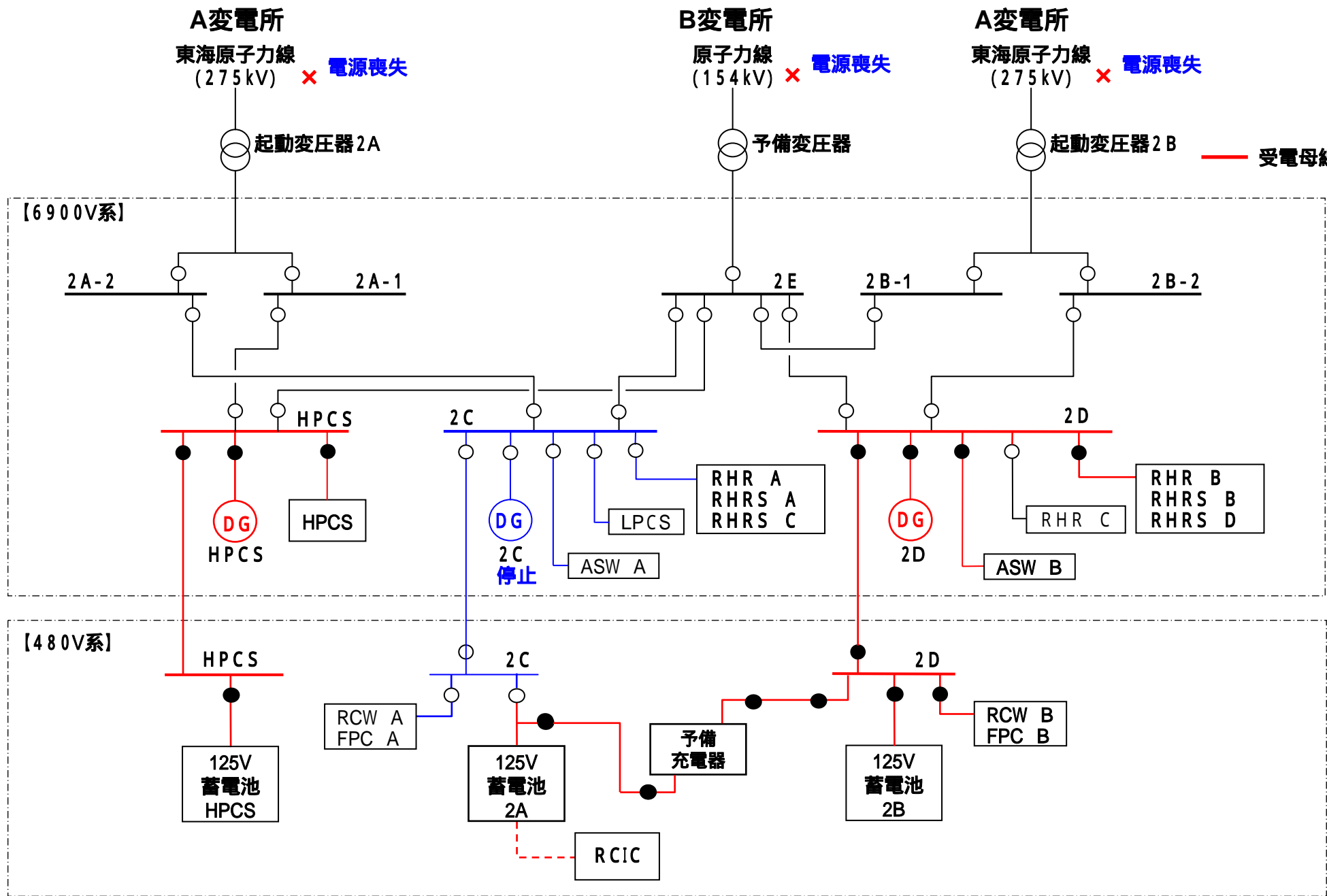
3月11日19時25分

↓

**原子炉の冷却(継続)
減圧・減温**

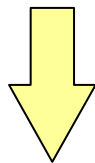


東海第二発電所 所内電源系概略図 (非常用ディーゼル発電機2C停止後の電源状況)



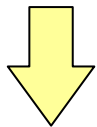
地震発生後の状況(その3:電源復旧)

予備の外部電源154KV復旧
非常用母線2C受電



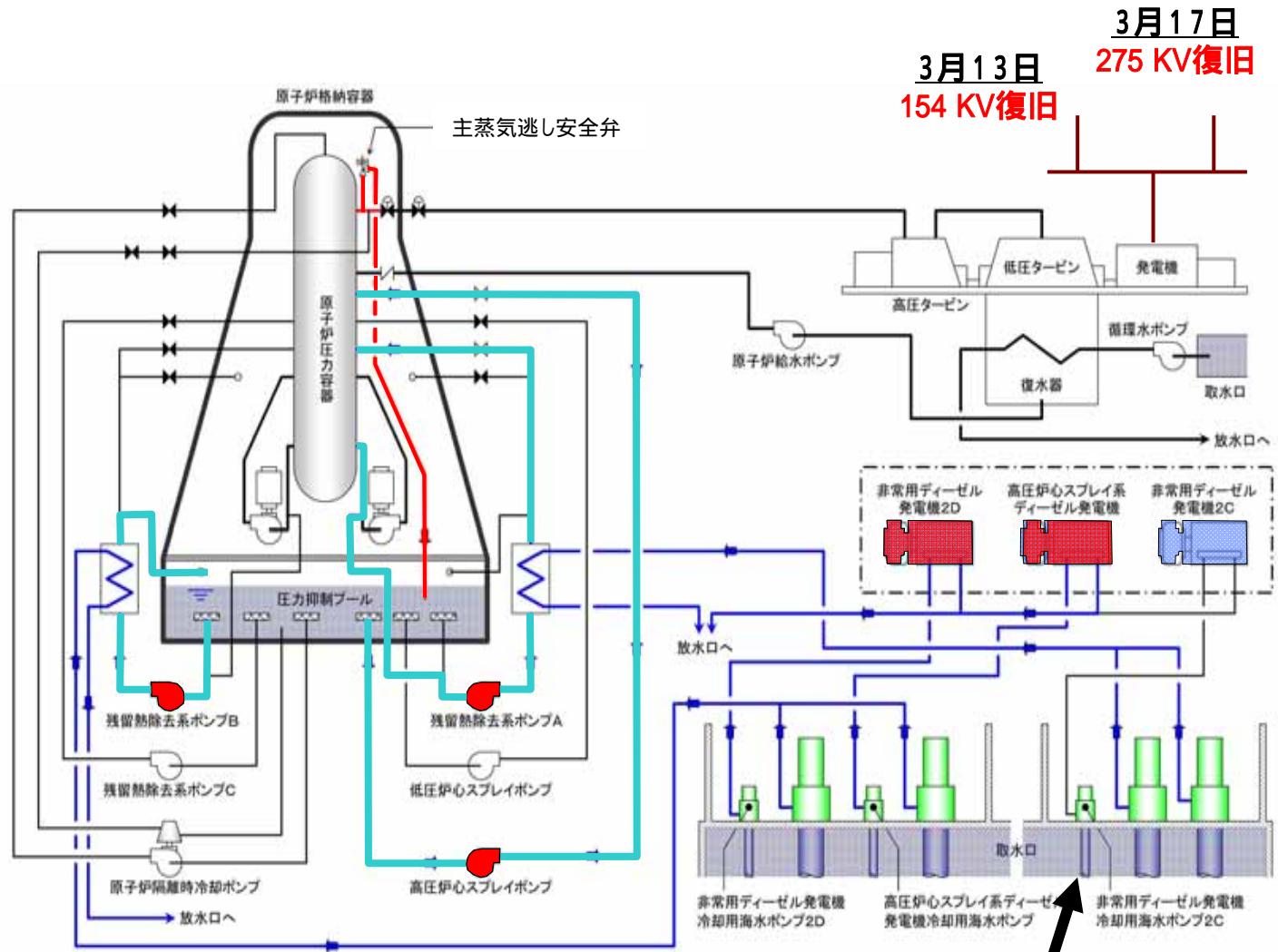
3月13日19時41分~

残留熱除去系A系手動起動
原子炉冷却操作開始



原子炉冷温停止

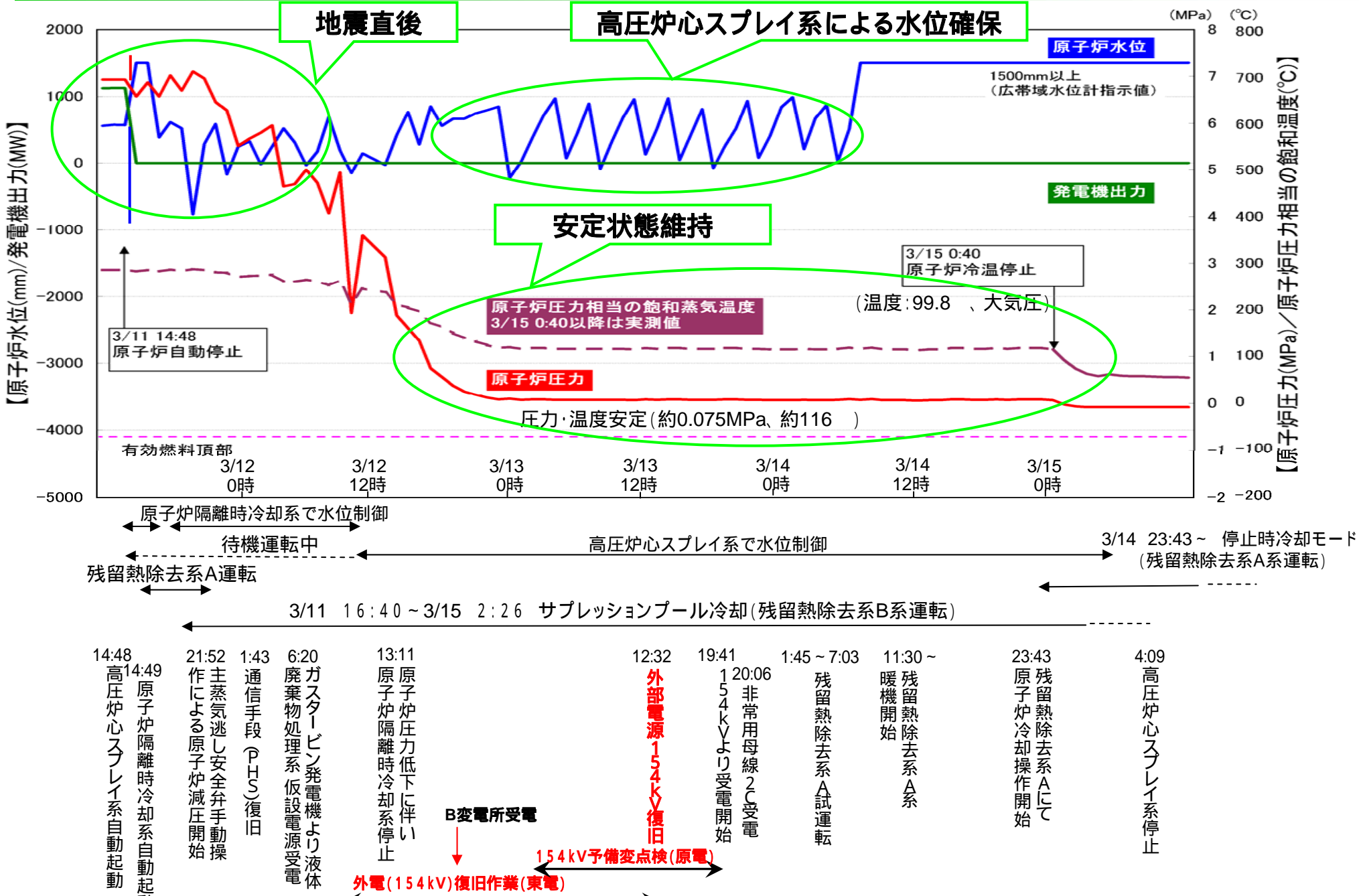
3月15日0時40分
原子炉水温度：99.8
原子炉圧力：大気圧



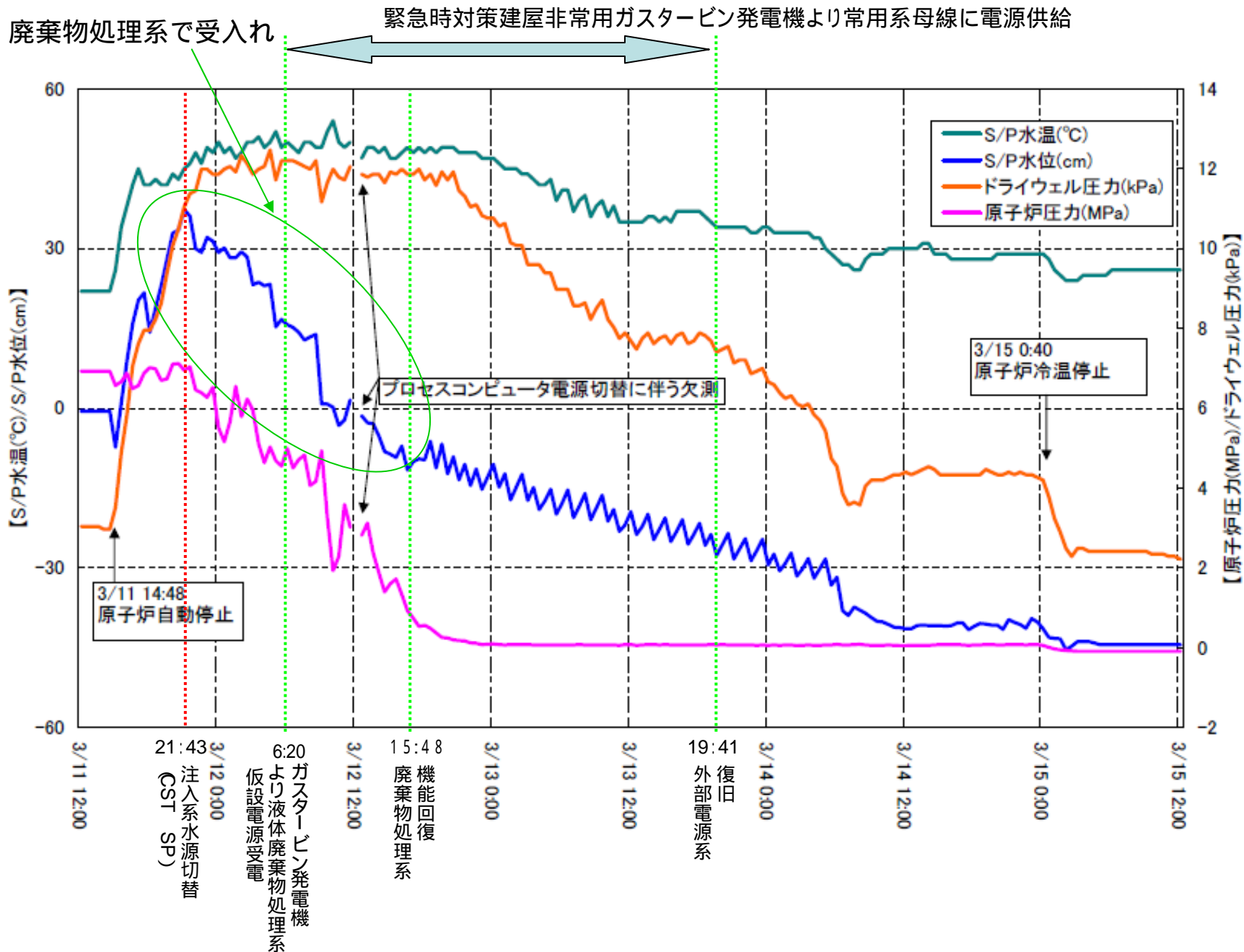
3月13日 154 KV復旧
3月17日 275 KV復旧

3月22日 海水ポンプ復旧

地震発生後のプラントパラメータ(その1:原子炉関係)

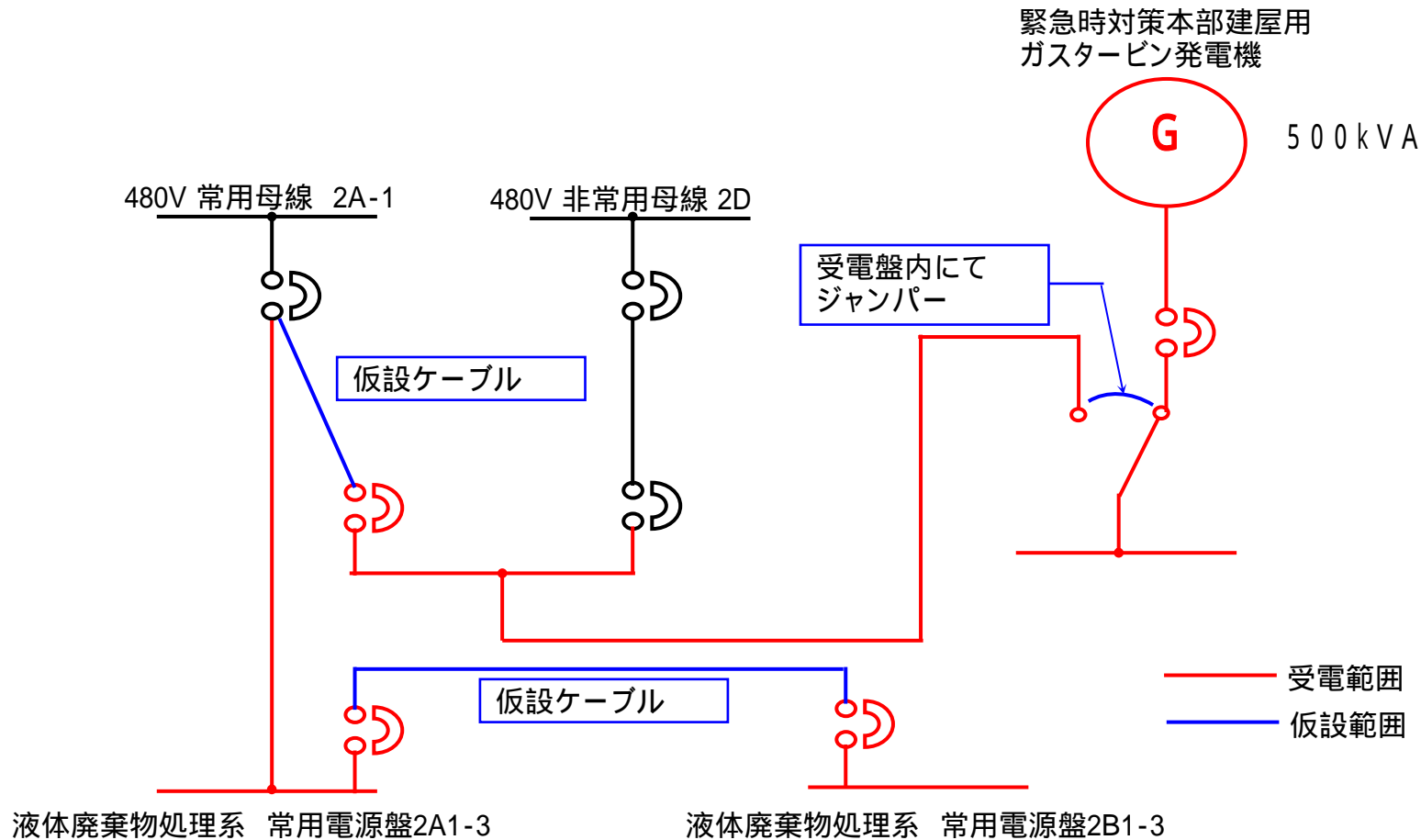


地震発生後のプラントパラメータ(その2:格納容器関係)



緊急時対策建屋のガスタービン発電機の活用

初期の原子炉注水は復水貯蔵タンク(CST)を水源としたため、S/P水位が上昇
 余剰S/P水の回収と、万一の代替原子炉注水のための水源(CST)確保を目的
 として、液体廃棄物処理系の常用電源を緊急時対策建屋ガスタービン発電機か
 ら確保(処理用機器：廃液収集タンク移送ポンプ及びCSTへの回収用ポンプ)



地震発生直後から冷温停止までの経緯

その時、何を判断(優先)したか？

地震直後(高圧, 高温状態)
 原子炉注水(高圧)の確保 (HPCS, RCIC)
 原子炉の減圧 (SRV)
 格納容器の冷却の確保 (RHR: 2系統)

非常用DG 2C停止後の対応

他の海水ポンプの状況は
 交流電源喪失のリスク

津波に注意し確認(異状なし)
 電源車手配, 電源融通検討

急速減圧, 冷温停止か
 (格納容器冷却停止, HPCS系から電源融通)
 安定状態(減圧, 注水)維持か

格納容器冷却,
 高圧注水系確保
 (安定状態維持)

給電指令所より, 154kV復旧作業着手の連絡有り(3/12 AM)
 原子炉減圧中, 残留熱除去系停止によるSP温度, 圧力の上昇のリスクの回避
 電源系統切替による二次的トラブル発生リスクの回避

福島第一原子力発電所との被害状況の比較

発電所		東海第二発電所			福島第一発電所					
号機等		地震直後	津波影響	復旧日時	1	2	3	4	5	6
外部電源	275kV	× (0 / 2)	-	6日後 (3/17 15:47)	×					
	154kV	×	-	2日後 (3/13 19:41)						
非常用 ディーゼル 発電機	2C			10日後 (点検:5日)	×	×	×	×		
	2D				×		×			
	HPCS				-	-	-	-	-	
非常用高圧電源盤(M / C)					×	×	×	×	×	
常用高圧電源盤(M / C)					×	×	×	×	×	×
非常用低圧電源盤(P / C)					×	2 / 3	×	1 / 2	×	
常用低圧電源盤(P / C)					×	2 / 4	×	1 / 1	2 / 7	×
直流電源					×	×	×	×		
海水ポンプ	D / G海水系	(3 / 3)	2 / 3	10日後 (点検:5日)	×	×	×	×	×	×
	RHR海水系	(4 / 4)	(4 / 4)							

○:使用可(分数は、使用可能な系統数を示す。)

○:D / G本体は被水していないが、関連機器の水没により使用不可

×:使用不可

-:設備なし, 該当なし

発電所外の利用可能設備、支援等

[発電所外の利用可能な電源の確保]

緊急時安全対策建屋非常用ガスタービン発電機

500kVA × 1台(廃棄物処理系の電源として利用)

高圧電源所による電源確保

300kVA × 3台(常用系(ユーティリティー)使用)

(12日に発電所到着、15時55分使用開始)

低圧電源車による予備電源確保

700kVA × 3台(使用せず。予備として確保)

(11日23時頃発電所到着(プラントメーカー手配))

東海発電所(廃止措置中)非常用ディーゼル発電機
(空冷式ディーゼル発電機)

500kVA × 1台(使用せず。予備として確保)

[その他]

電気系スタッフの派遣

- ・本店設計部門より、電気関係者2名を電源融通検討要員として派遣
(レンタカーにより、12日朝東京出発:首都高,常磐高速パトカー先導)

燃料(軽油、ガソリン)

- ・地元GSの営業休止,再開後も長蛇の列(~3時間待ち)
- ・ディーゼル発電機等の燃料(軽油)は近隣製油所等から輸送
(サイト通常契約ルートで手配:3月11日~14日,10回受入れ,合計約109kL)
- ・ガソリンは輸送手段の制限が多く多量の搬入が出来なかった。
(貯蔵所、製造所等の制限がありタンクローリーによる搬送不可。)

インフラ関係

- ・生活用水の断水により、仮設トイレを搬送(協力会社を通じて本店で手配)
- ・工業用水の早期復旧(プラント内の淡水としては未使用)
(発電所向けに県より優先的に復旧していただいた。)
- ・通信関係不具合(TV会議システムの停止:基地局の電源枯渇),電話会議で対応
- ・一般道の被害はあったものの,輸送に問題は生じていない

2. 地震の観測記録と地震による影響

【原子炉建屋の最大加速度】 単位:ガル(加速度)

	地震観測記録			基準地震動		
	南北	東西	鉛直	南北	東西	鉛直
6階	492	481	358	799	789	575
4階	301	361	259	658	672	528
2階	225	306	212	544	546	478
地下2階	214	225	189	393	400	456

各階の基準地震動:

解放基盤表面[標高(E.L.)-370m]で設定された基準地震動Ss(600ガル)による、建屋の各階の最大応答加速度値。

耐震設計上重要な建物・構築物の評価結果

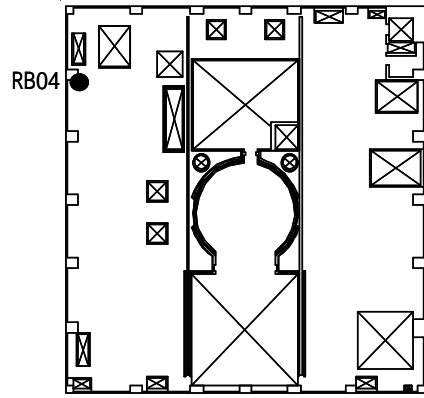
地震計が設置されている原子炉建屋の地震観測記録における最大加速度は、工認設計波及び基準地震動による最大応答加速度を下回っていることを確認した。

耐震設計上重要な機器・配管系の評価結果

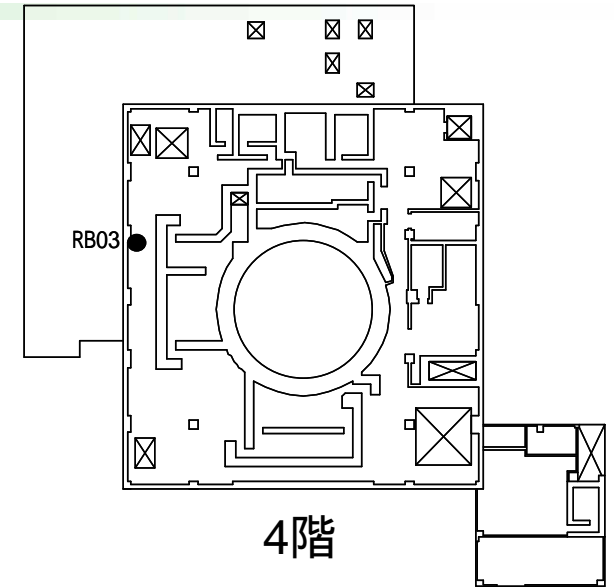
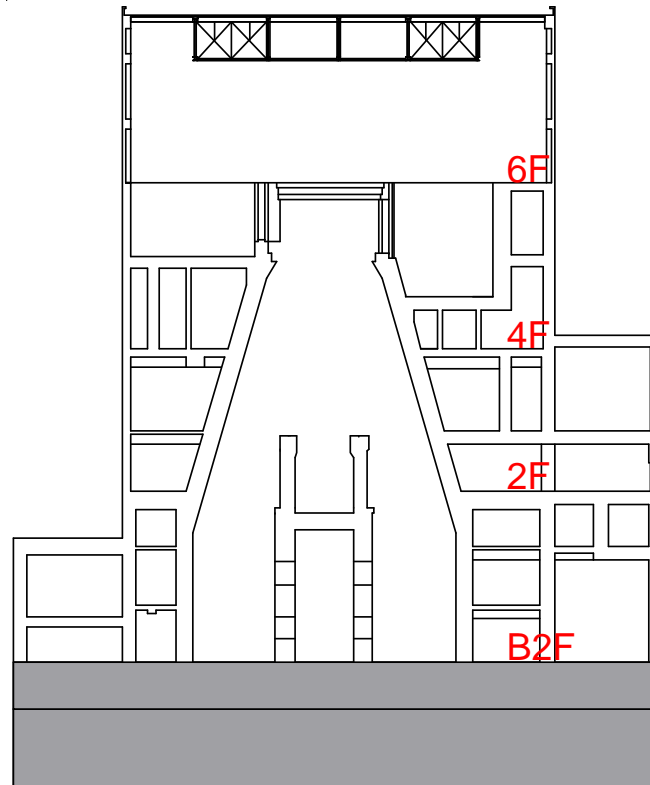
耐震設計上重要な機器・配管系のうち主要設備は、地震観測記録が設計入力を下回っていることを確認した。

原子炉建屋の地震計設置位置

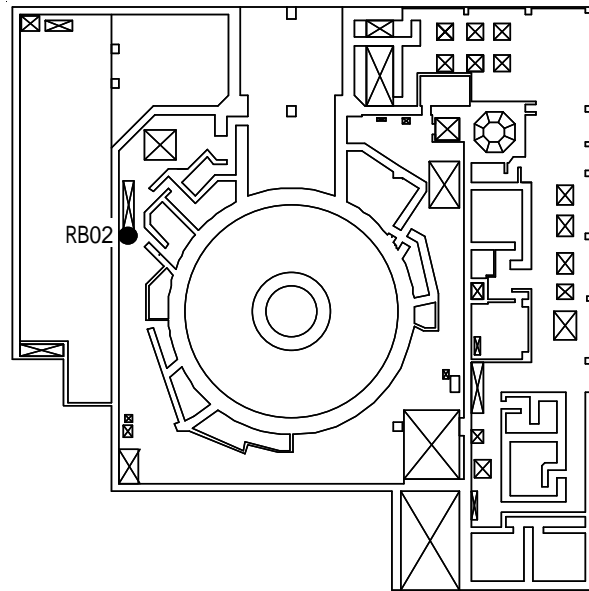
：地震観測階



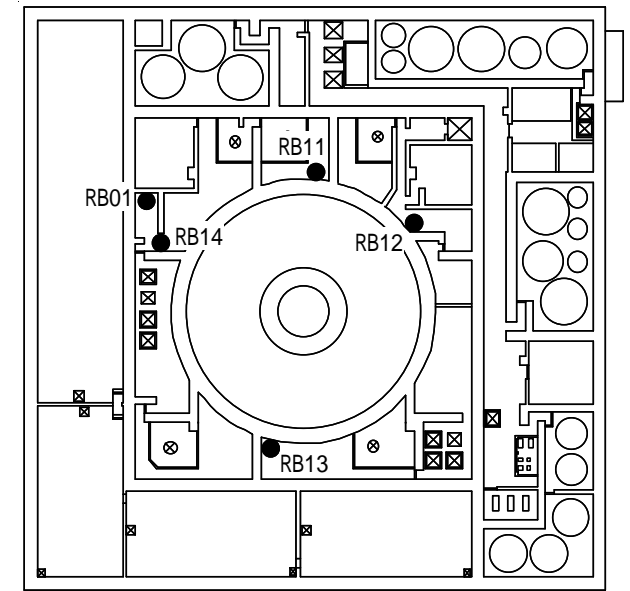
6階



4階



2階

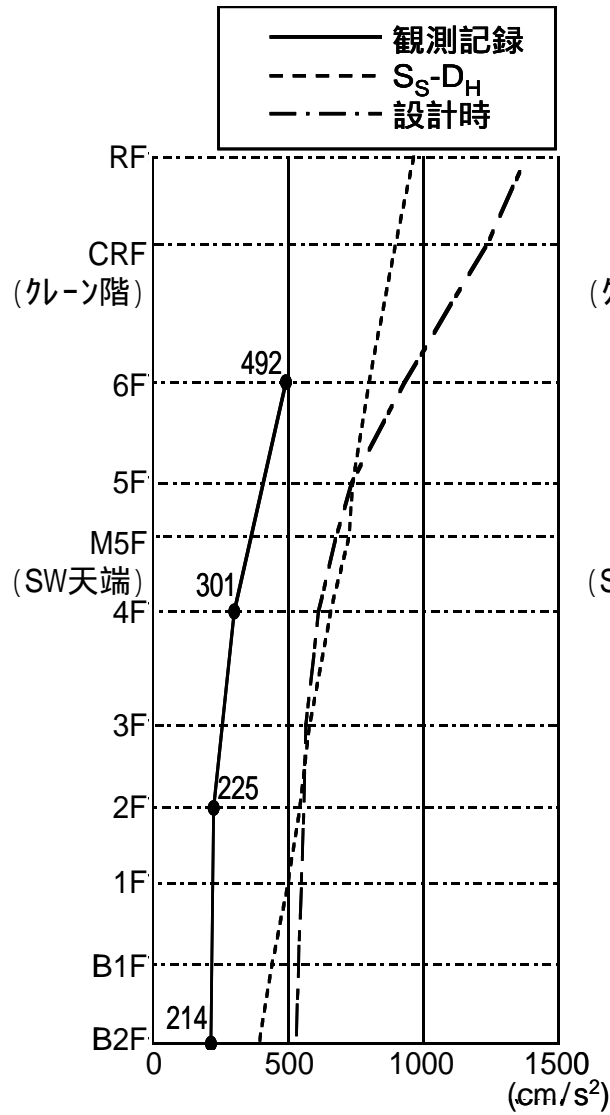


地下2階

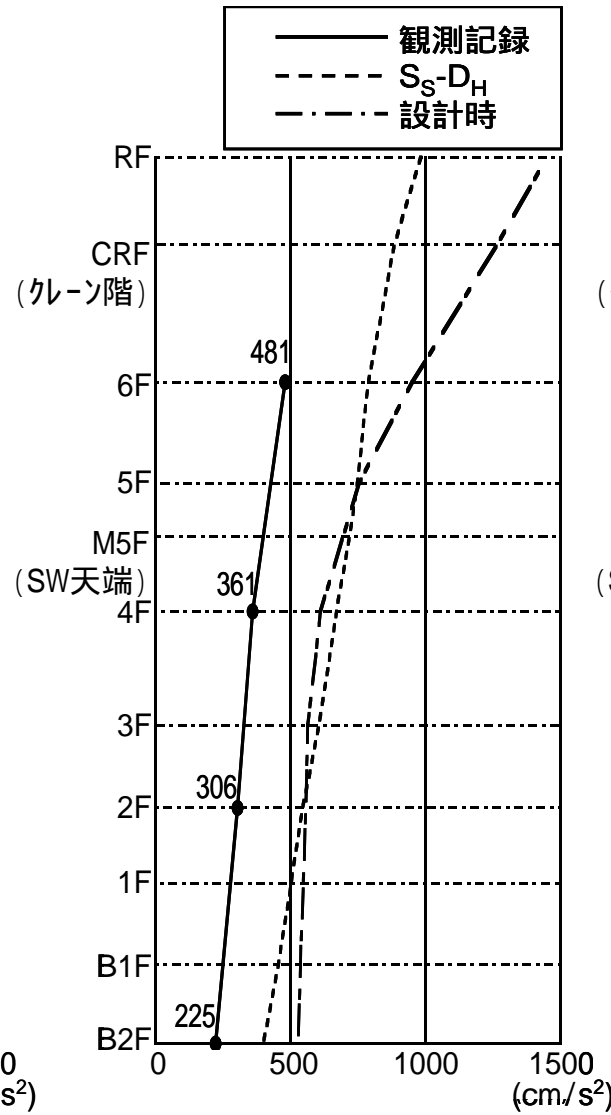
- 建屋観測用地震計を8箇所を設置。
- 偶数階に地震時の基本的な振動性状を把握する目的で各1台設置。
- その他、基礎版の部分的振動特性を解明し、設計の高度化に資する目的で地下2階に4台設置。

原子炉建屋の最大加速度分布

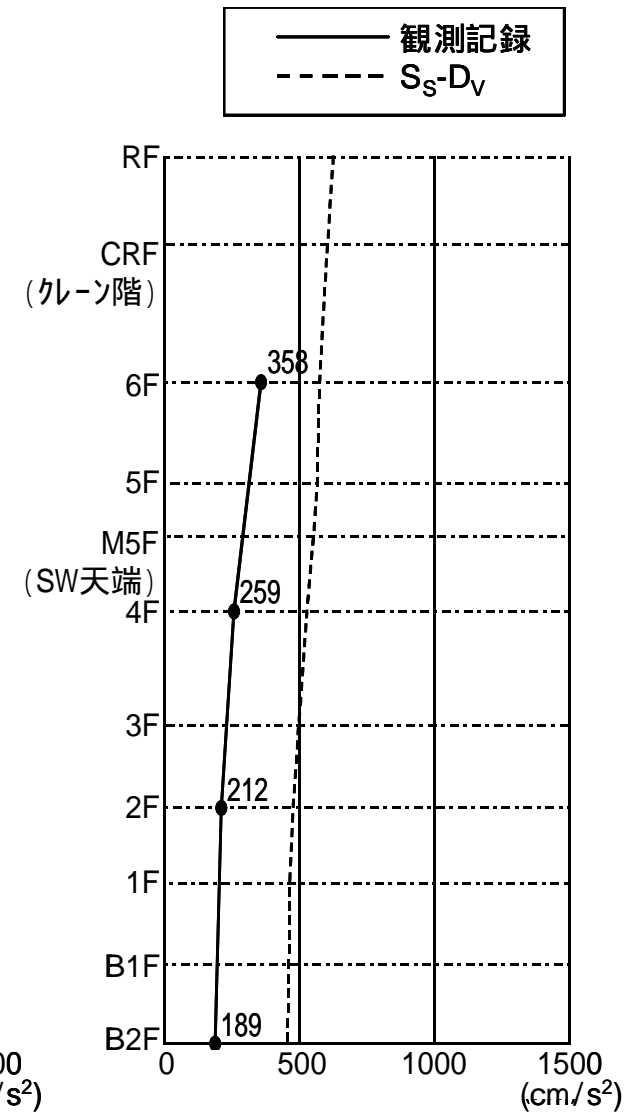
- 1 : エルセントロ波やタフト波を180cm/s²に基準化した地震波で設計
- 2 : 新耐震指針の耐震バックチェックで策定 (600cm/s²)



【NS】



【EW】



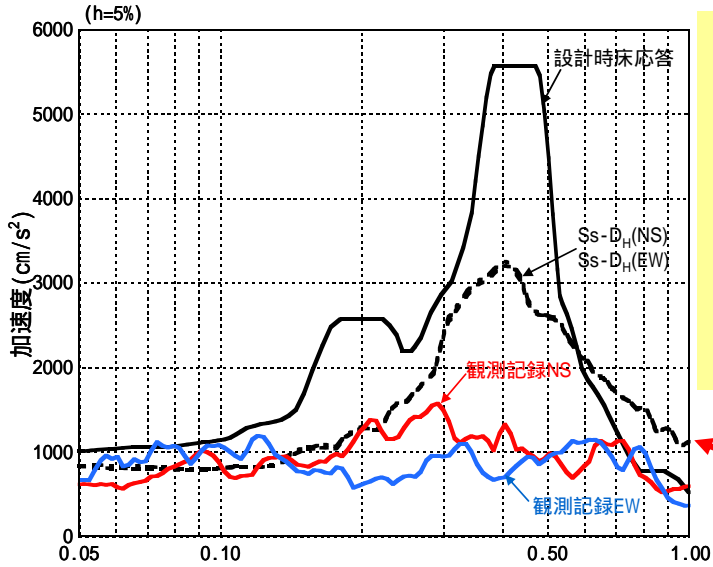
【UD】

工認設計波¹及び基準地震動 $S_S - D$ ²による最大応答加速度を下回っていることを確認した。

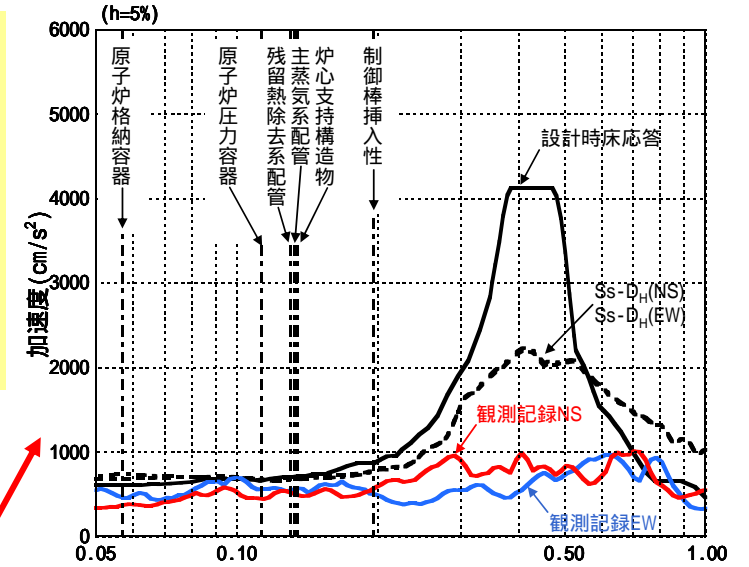


水平方向加速度応答スペクトルの比較

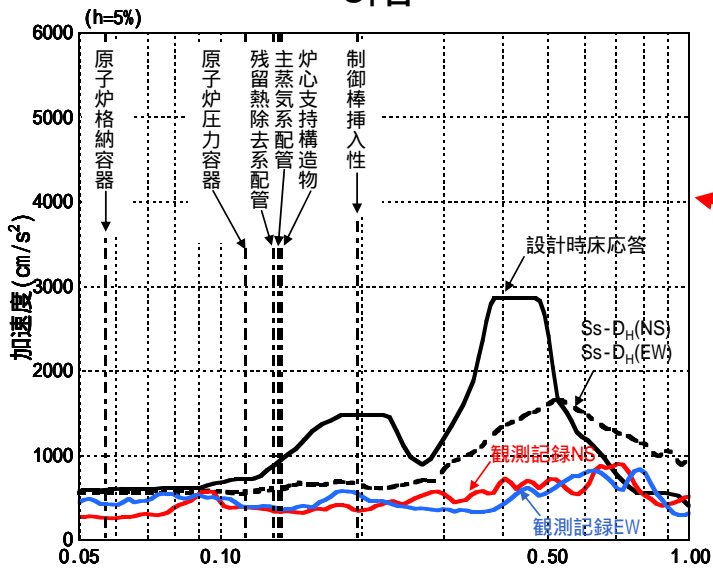
一部の周期帯(約0.65秒~約0.9秒)で工認設計波による床応答スペクトルを上回っているが、耐震設計上重要な機器・配管系のうち主要な設備の固有周期では、地震観測記録が工認設計波による床応答スペクトル以下であることを確認した。



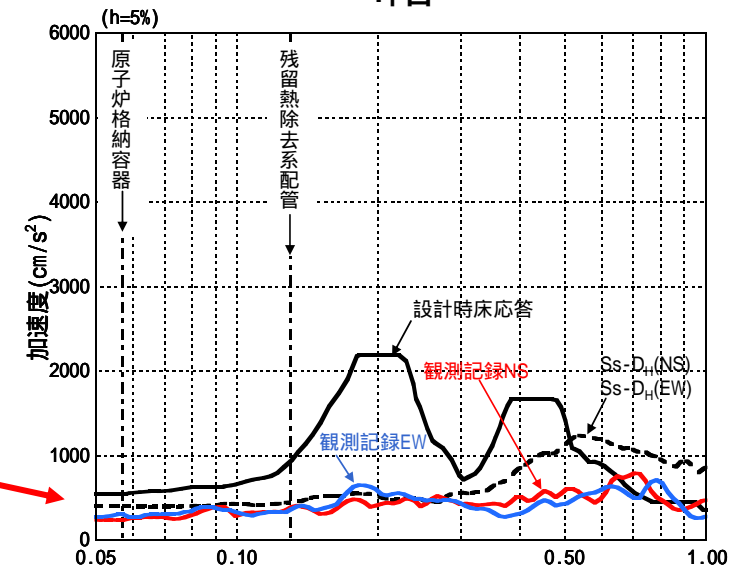
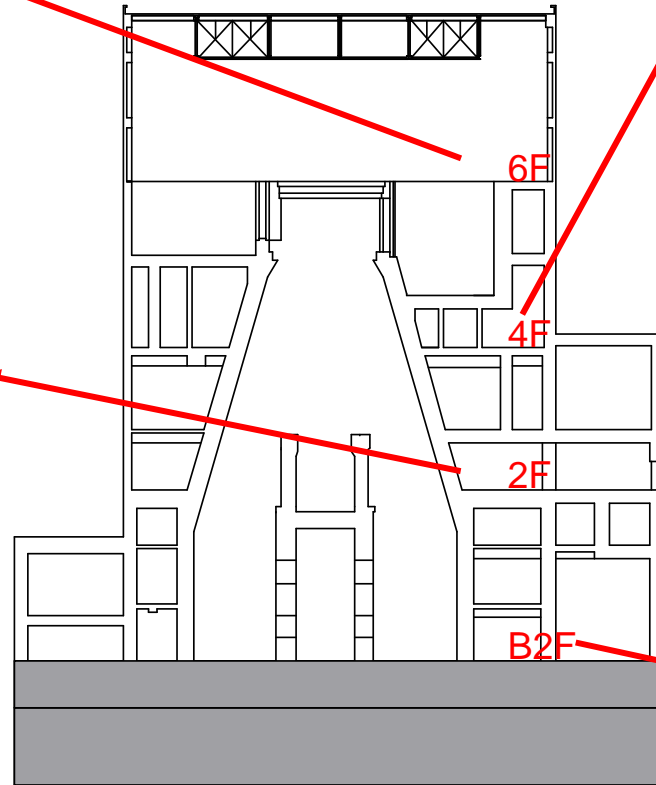
6階



4階



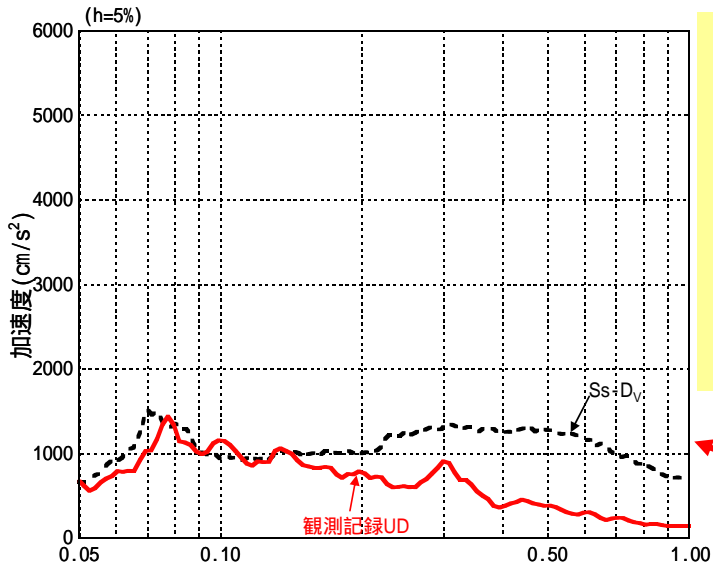
2階



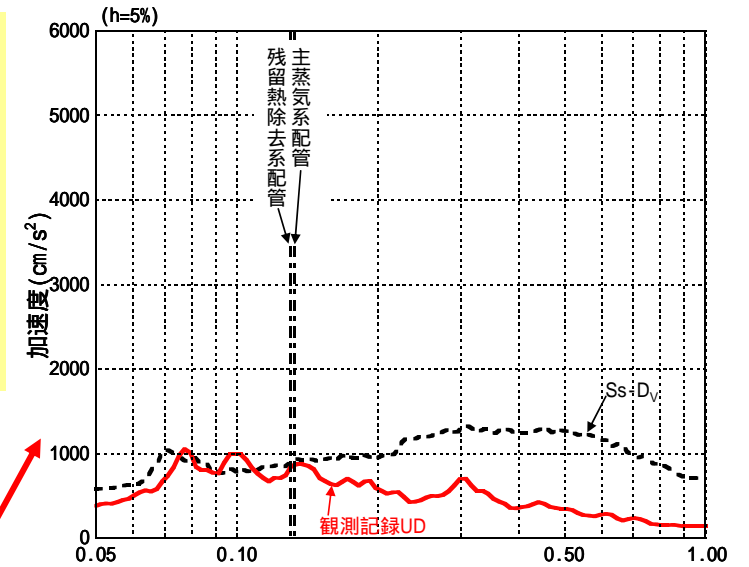
地下2階

鉛直方向加速度応答スペクトルの比較

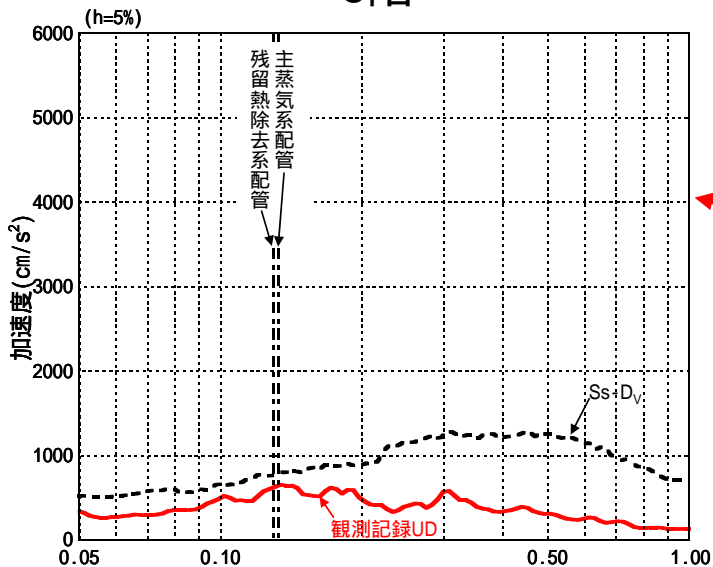
一部の周期帯(0.08秒及び0.1秒付近)でSs-Dv入力による床応答スペクトルを上回っているが、耐震設計上重要な機器・配管系のうち主要な設備の固有周期では、地震観測記録がSs-Dv入力による床応答スペクトル以下であることを確認した。



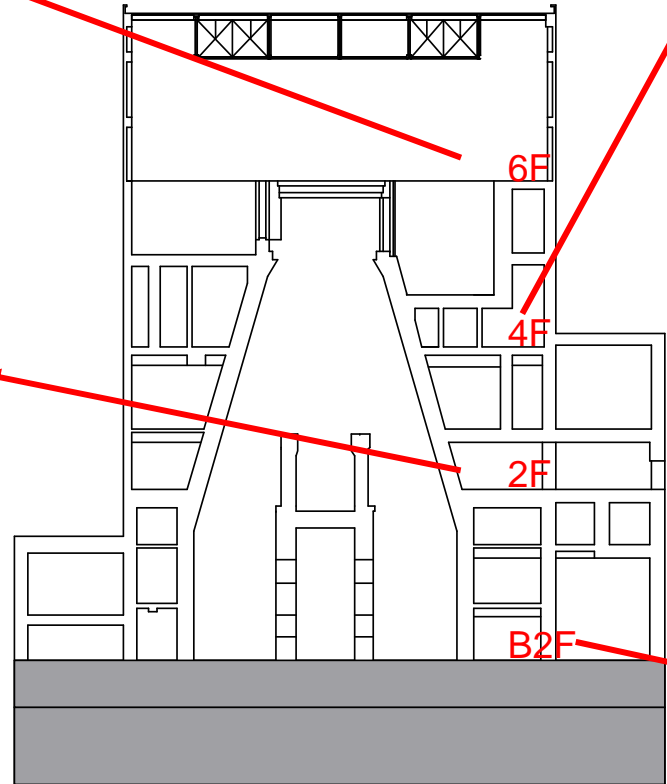
周期(s)
6階



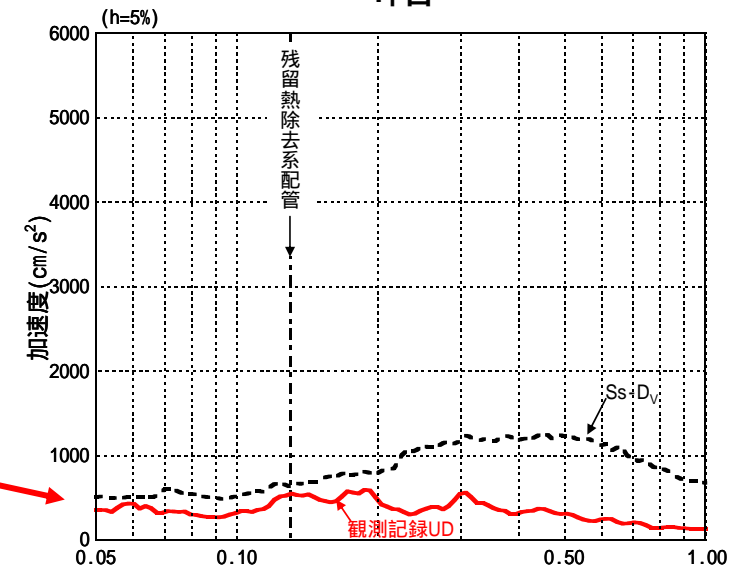
周期(s)
4階



周期(s)
2階

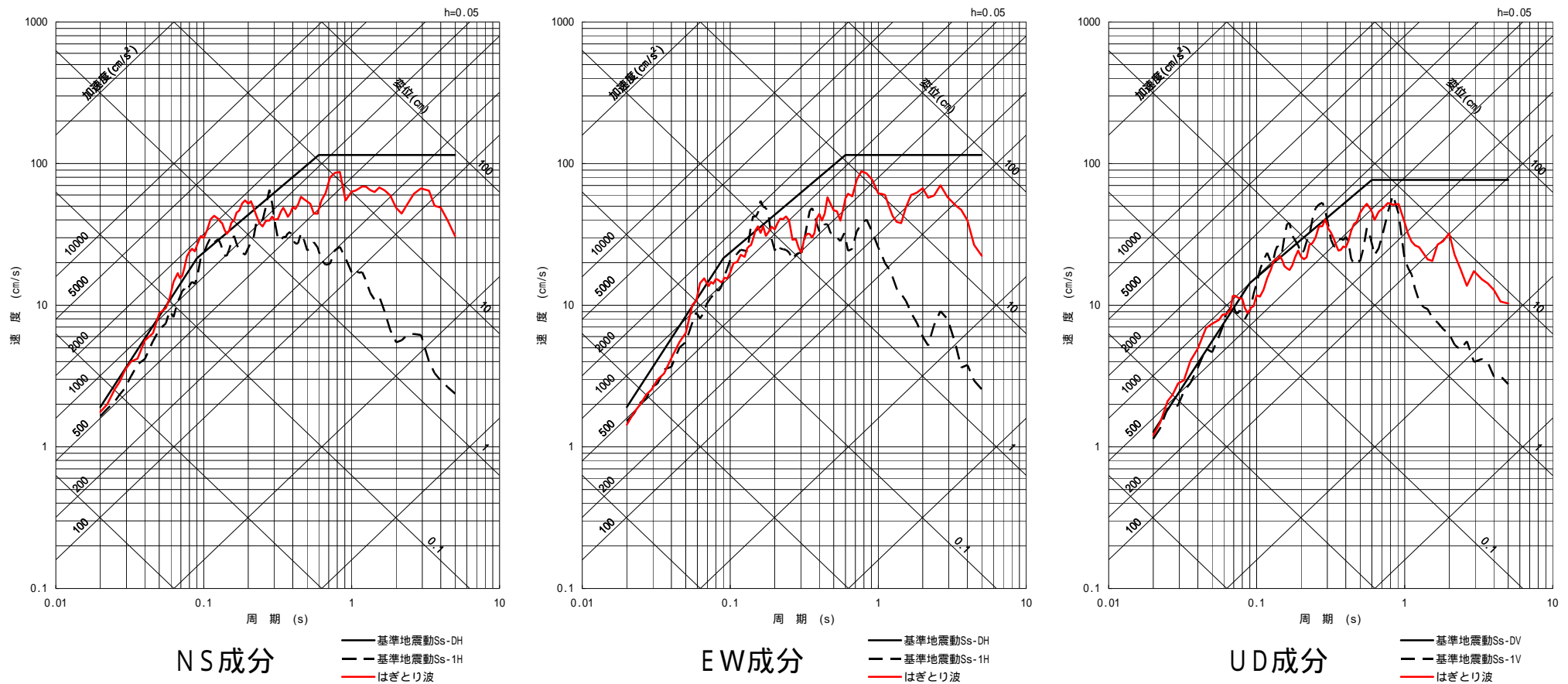


設計時は、鉛直震度0.24を考慮



周期(s)
地下2階

解放基盤表面におけるはぎとり結果(擬似速度応答スペクトル)



本震時に取得した地盤系の地震観測記録を用いて、地盤構造モデルを同定し、はぎとり解析を実施した。その結果、はぎとり波は一部の周期帯で基準地震動Ssを超えているものの、大きく上回るものではないことを確認した。

地震による影響

安全上重要な設備(耐震クラスSクラス)の地震による損傷は認められていない。
地震による損傷が認められた設備は、タービン設備等の一部で、耐震クラスB、Cクラスの設備が損傷を受けている。

【蒸気タービン等の損傷状況】

低圧タービン及び高圧タービンの動翼と隔板の一部に接触による摺動痕が確認されている。

高圧タービンと低圧タービンの中間軸受け基礎グラウト部の割れ、基礎ボルトの緩み(10本中3本)が確認されている。

部位	損傷状況
低圧A	9～11段全数に摺動傷、変色 12～14段全数に摺動傷
低圧B	9～11段全数に軽微な摺動傷
低圧C	摺動傷なし
高圧	軽微な摺動傷
軸受	中間軸受台基礎部損傷

【主発電機関係の損傷状況】

主発電機軸受及び主励磁機・副励磁機廻りに地震の影響による接触痕や間隙拡大等の損傷が認められた。

部 位	事 象
主発電機軸受廻り	シールケース油切りの接触痕 回転子主軸の接触痕
主励磁機・副励磁機廻り	副励磁機と13番軸受けの接触 カップリングボルトと励磁機の接触
	発電機 - 励磁機間カップリングの接触

地震の影響と考えられる主な不具合

機器名	事象
タービン中間軸受台	傾き、基礎等損傷
高圧・低圧タービン翼	擦れ痕
湿分分離器油圧防振器	折損・変形
起動変圧器及び主変圧器	絶縁油放圧板動作
取水口エリア	地盤沈下等
排気筒サポート	変形(想定内)
PLR - Bモータ	油切り擦れ痕

タービン中間軸受台
傾き、基礎等損傷

高圧・低圧タービン翼
擦れ痕

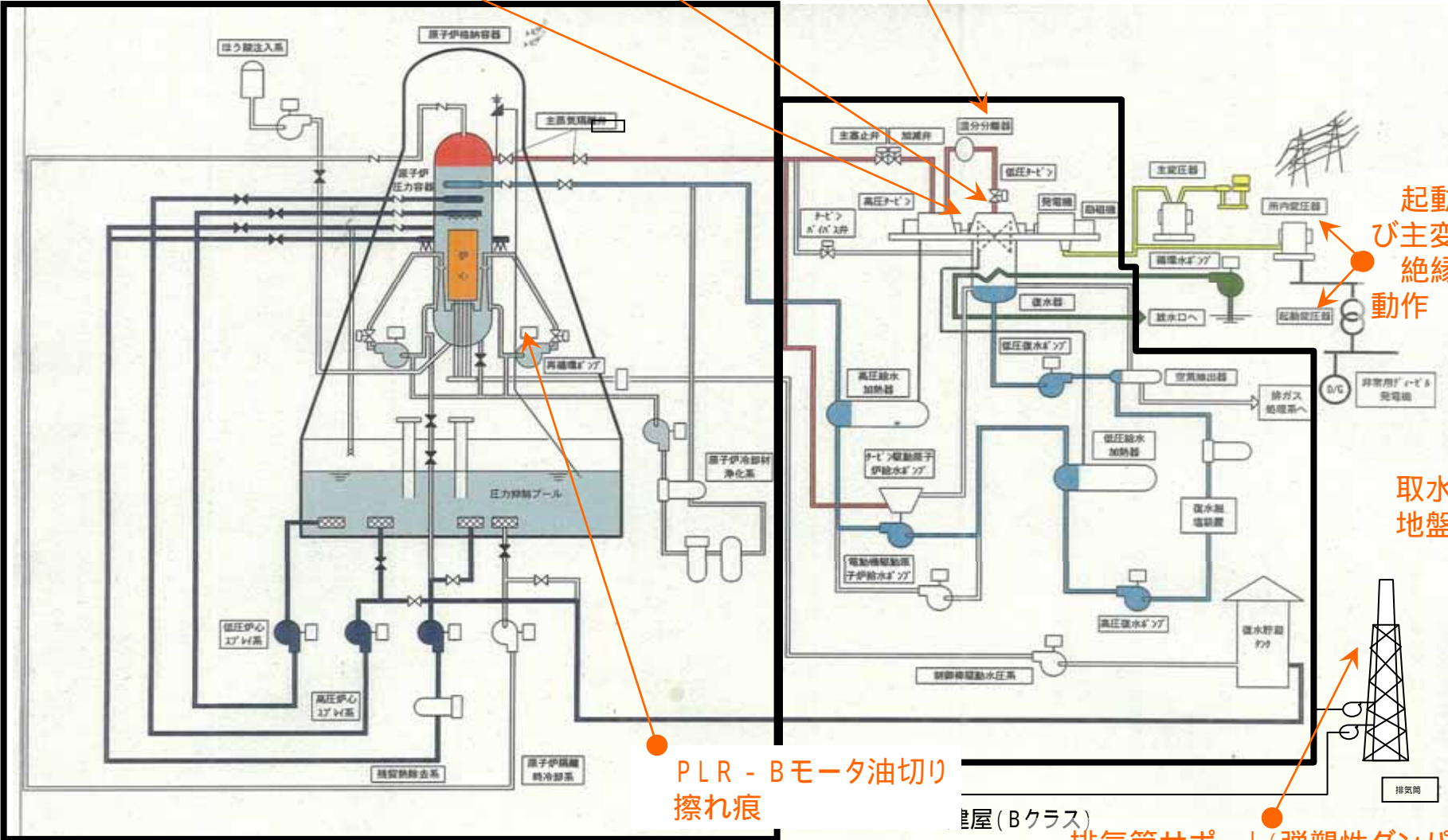
湿分分離器油圧防振器
折損・変形

起動変圧器及び主変圧器
絶縁油放圧板
動作

取水口エリア
地盤沈下等

PLR - Bモータ油切り
擦れ痕

排気筒サポート(弾塑性ダンパ)
変形(想定内)



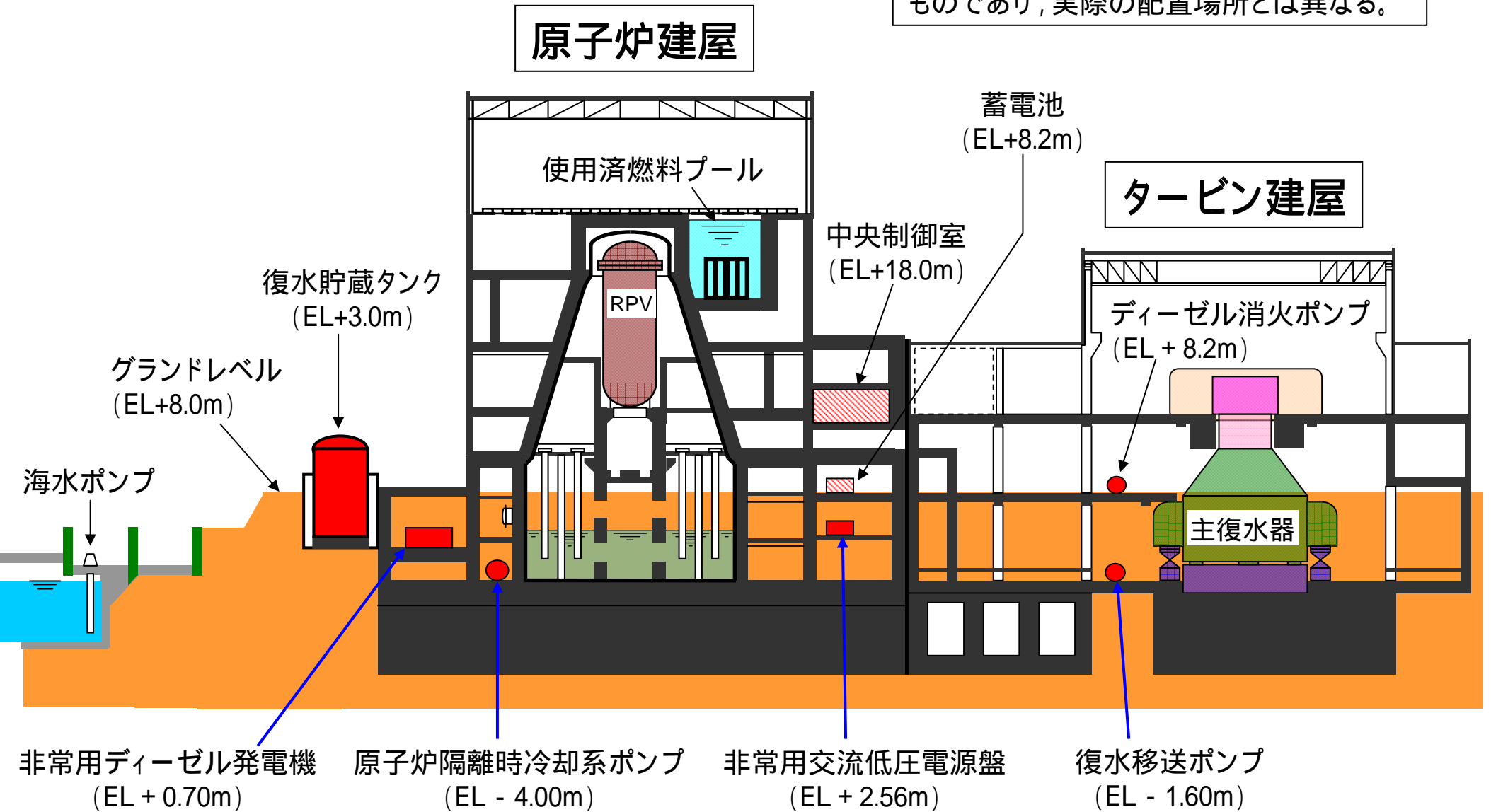
原子炉建屋(Sクラス)

配電室(Bクラス)



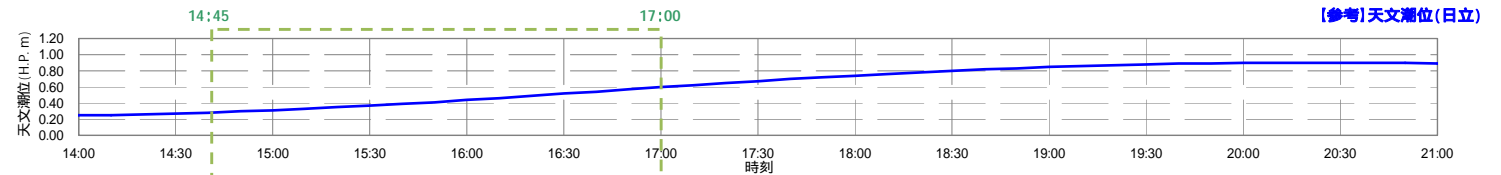
3. 津波の観測記録と 東海第二発電所における津波対策

【注記】
 主要機器の設置レベルを主として記載した
 ものであり、実際の配置場所とは異なる。

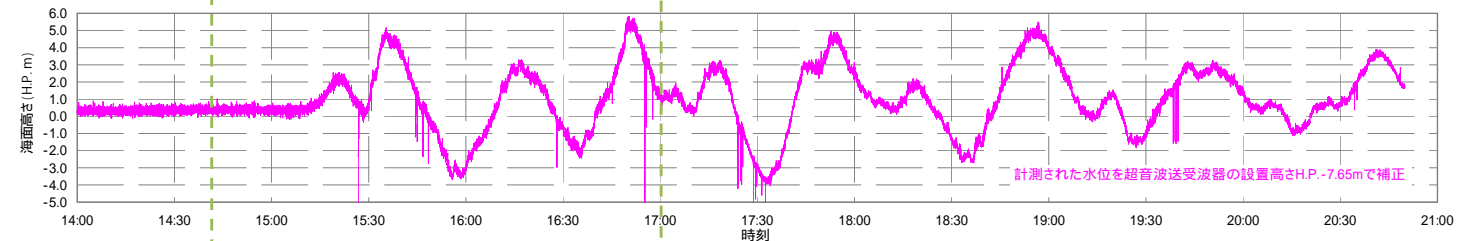




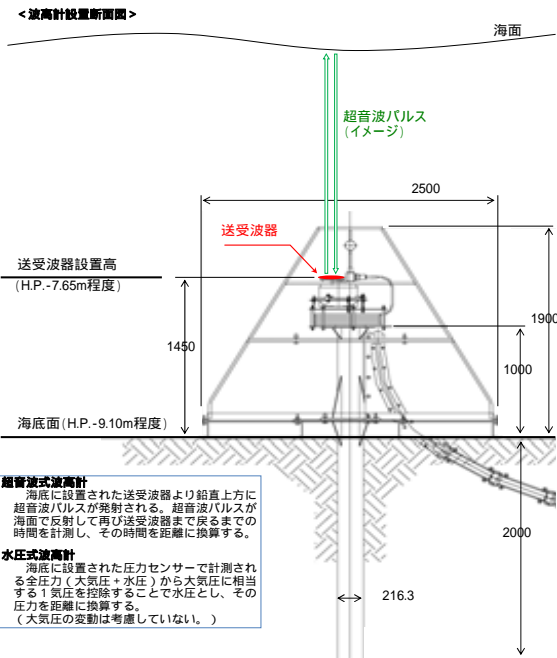
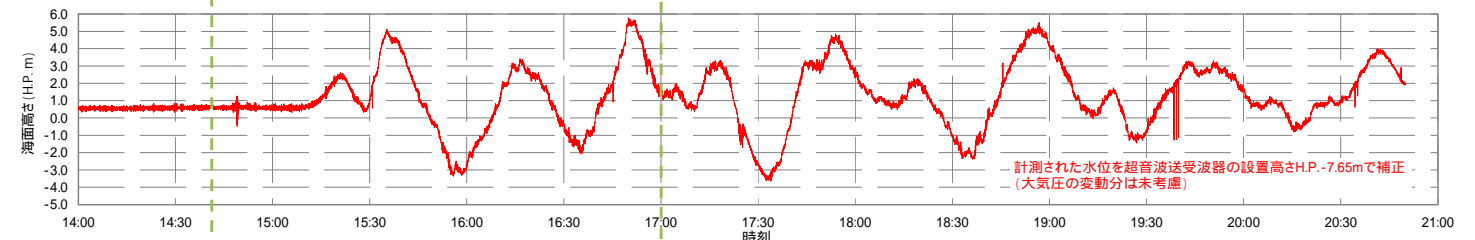
東海港沖合い(東側)約150mの位置の波高計では、3月11日16:50頃に最大水位約H.P.+5.5m(標高+4.6m)が確認されている。



水位変動(超音波式波高計より)

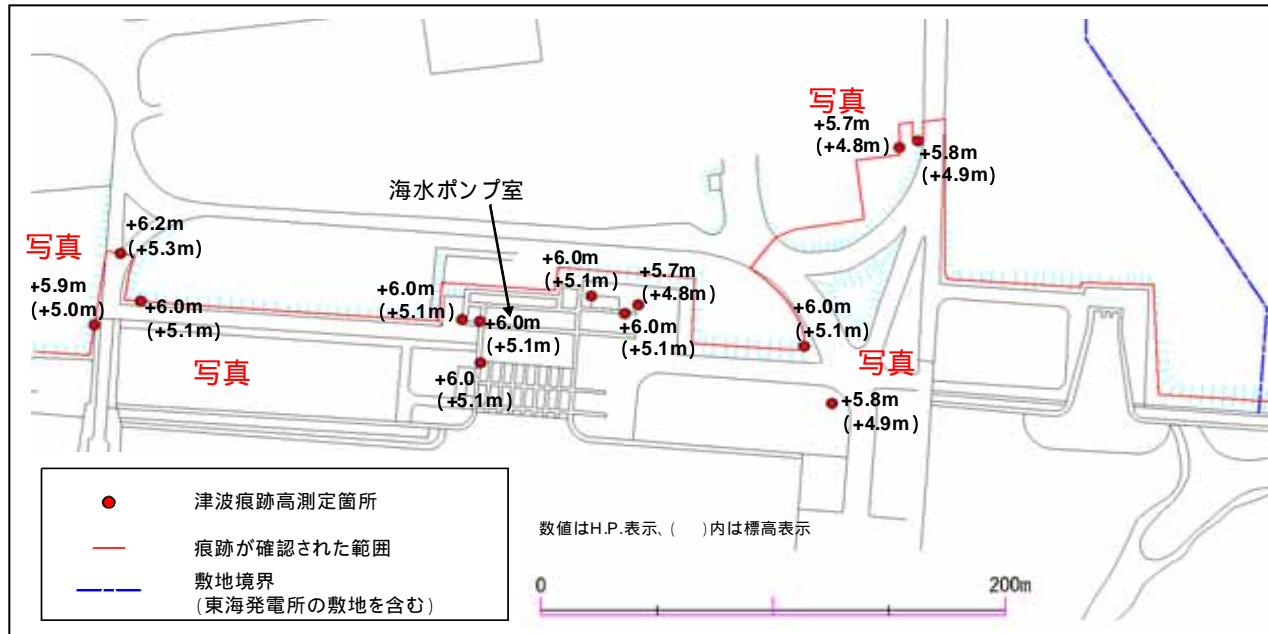


水位変動(水圧式波高計より)



津波の来襲状況(その1)

今回の津波来襲による発電所敷地内における津波の痕跡高は、H.P.+5.7m(標高+4.8m)からH.P.+6.2m(標高+5.3m)である。



写真



写真



写真

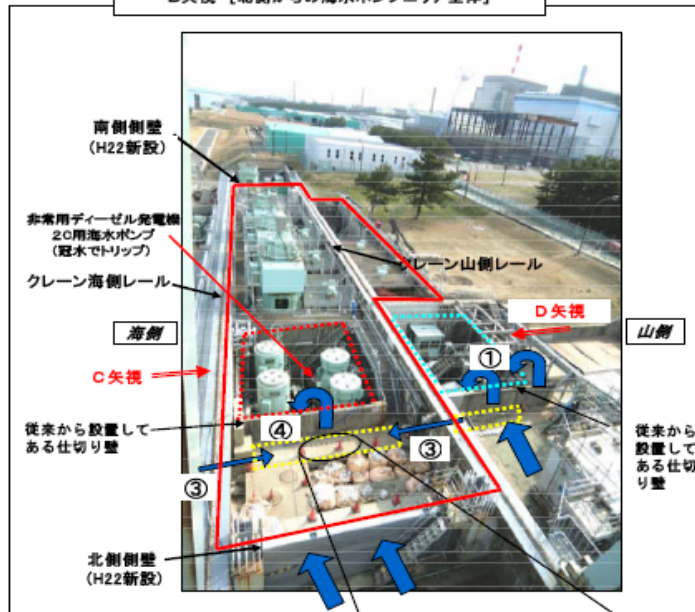
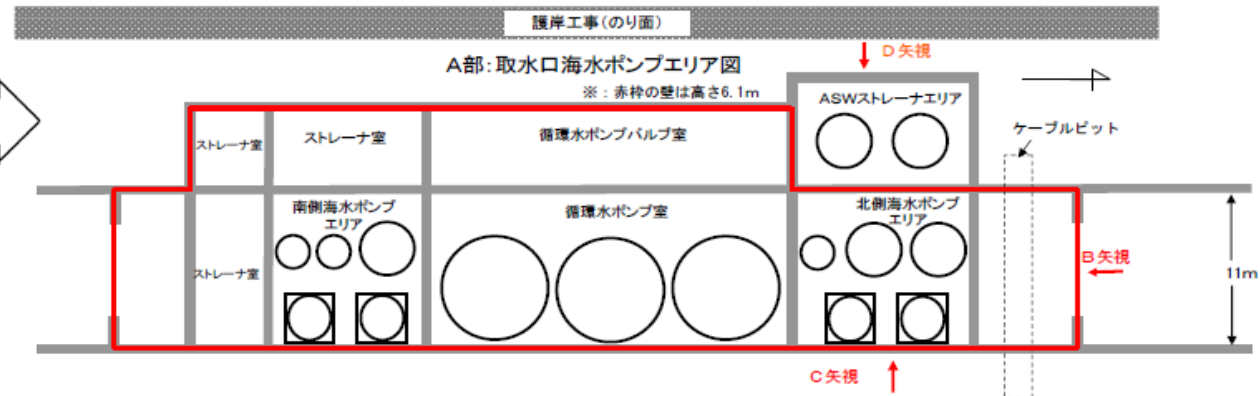


写真

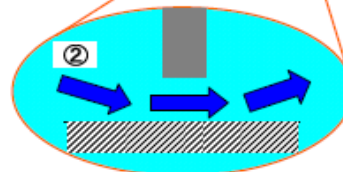
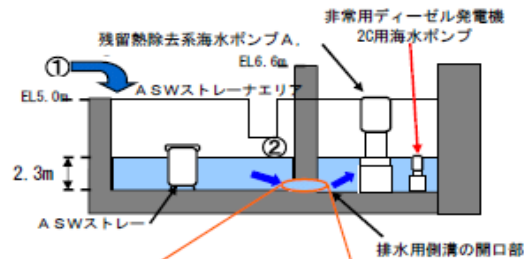
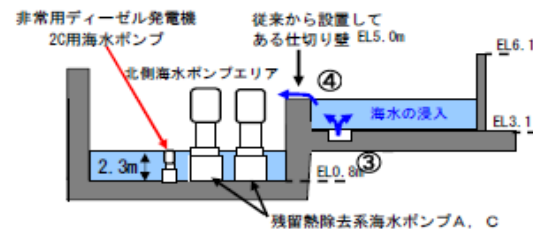
津波による海水ポンプ室の浸水状況



B矢視【北側からの海水ポンプエリア全体】



- : 高さ6.1mエリア
- : 北側海水ポンプエリア
- : ASWストレーナエリア
- : ケーブルピット



北側海水ポンプ室に海水が浸水し、3台ある非常用ディーゼル発電機用海水ポンプのうち1台が自動停止した。

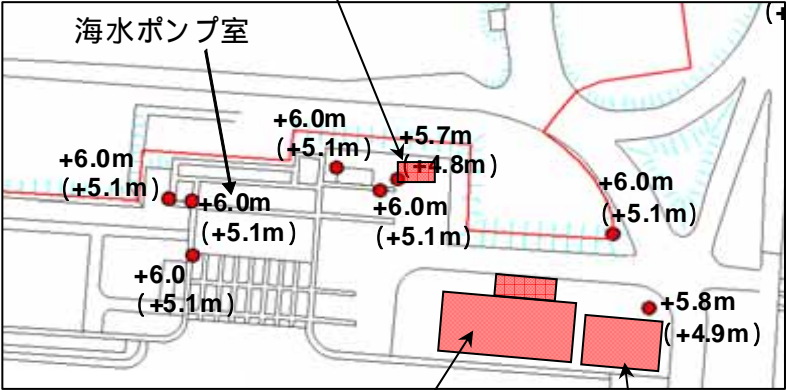
海水ポンプ室については、津波対策として側壁の嵩上げ工事を実施しており、標高+6.11mの側壁の新設が完了していた。

しかし、ポンプ室北側の壁貫通部の止水工事が一部未完となっていたことから貫通部を通して海水が海水ポンプ室へ流入した。

(: 地殻変動による地盤の沈下は考慮していない。)

東海第二発電所の地震・津波の影響(取水口電気室)

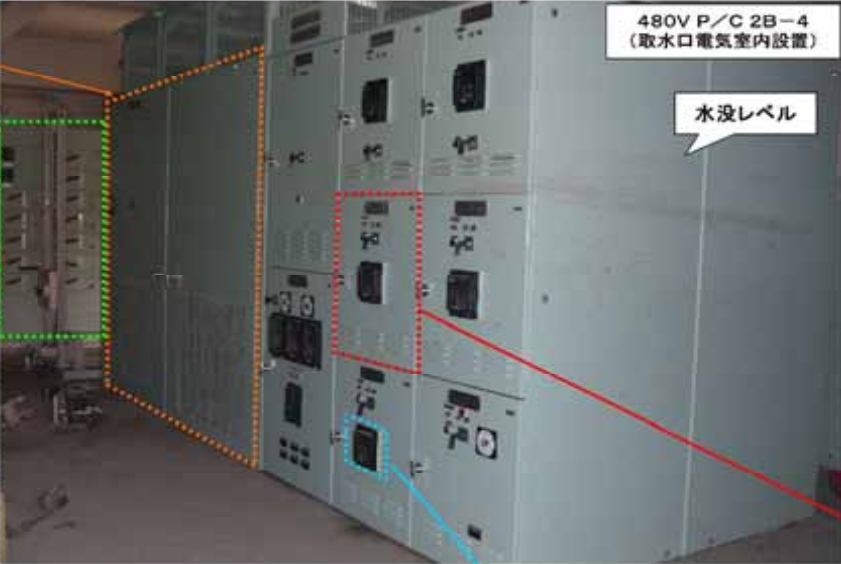
取水口電気室(EL+3.0m)



メンテナンスセンター(EL+3.0m)

輸送本部(EL+3.0m)

動力変圧器(6.9kV/480V)
絶縁抵抗:0MΩ
洗浄・乾燥により絶縁の回復は困難
(類似品で回復した実績なし)



480V MCC 2B4-1, 2, 3



- 【再起動に必須の取水口廻り機器】
(※:電源が被害を受けた機器)
- ・循環水ポンプ(CWP)A, B, C
 - ・CWP潤滑水ポンプA
 - ※CWP潤滑水ポンプB
 - ・CWP翼操作油ポンプA
 - ※CWP翼操作油ポンプB
 - ・CWP翼操作油ヒーター
 - ・CWP-A, B, C翼操作モータ
 - ・CWP-A, C出口弁(MO)
 - ※CWP-B出口弁(MO)
 - ※CWP A-B出口連絡弁(MO)
 - ※トラベリングスクリーン(全数)
 - ※レイキ付回転バースクリーン(全数)
 - ※スクリーン洗浄ポンプ(全数)
 - ※スクリーン制御電源
 - ※ろ過水ヘッドタンク定水位制御弁
 - ・上記設備制御用125V直流電源



輸送本部建屋(S造)津波による外装材破損



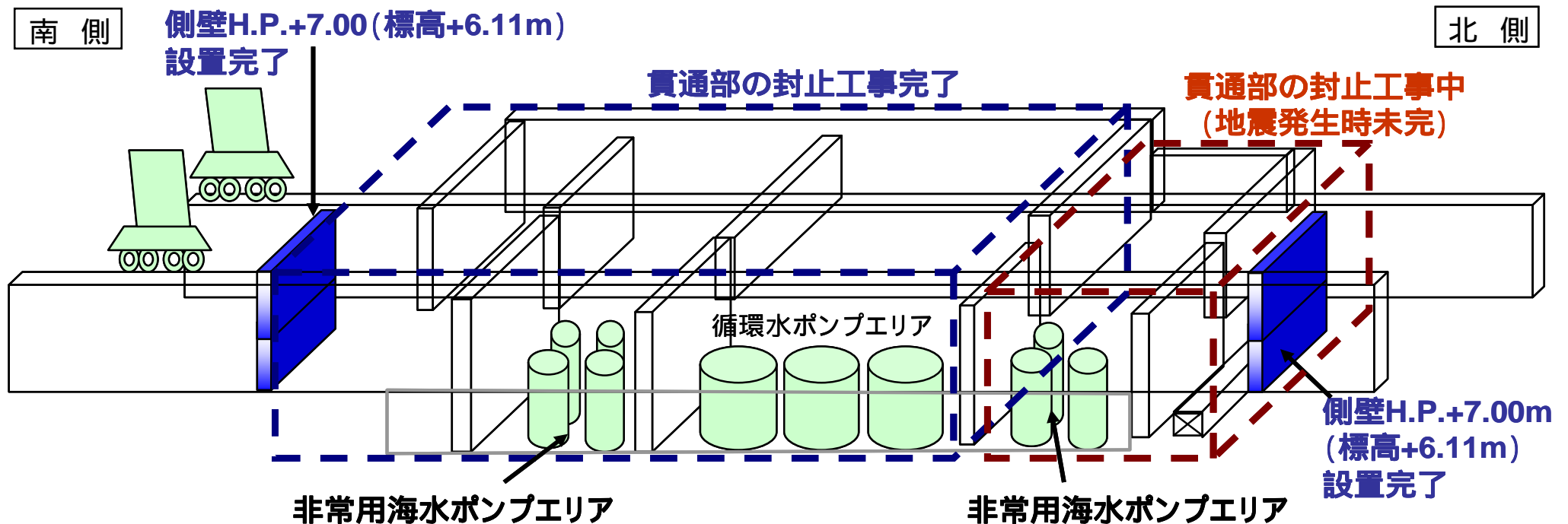
メンテナンスセンター(S造)シャッター変形



メンテナンスセンター(S造)自動販売機転倒

津波対策の実施状況

海水ポンプ室については、津波対策として側壁の嵩上げ工事(H.P.+5.80m(標高+4.91m)までであった側壁の外側にH.P.+7.00m(標高+6.11m)までの側壁を新たに設置)や、壁の貫通部(電気ケーブル等を通すための小さな穴)の封止(浸水を防ぐ)工事を実施してきており、側壁の嵩上げ工事は完了していたが、地震が発生した時点では壁の貫通部の封止工事については北側が完了していない状況であった。(:地殻変動による地盤の沈下は考慮していない。)

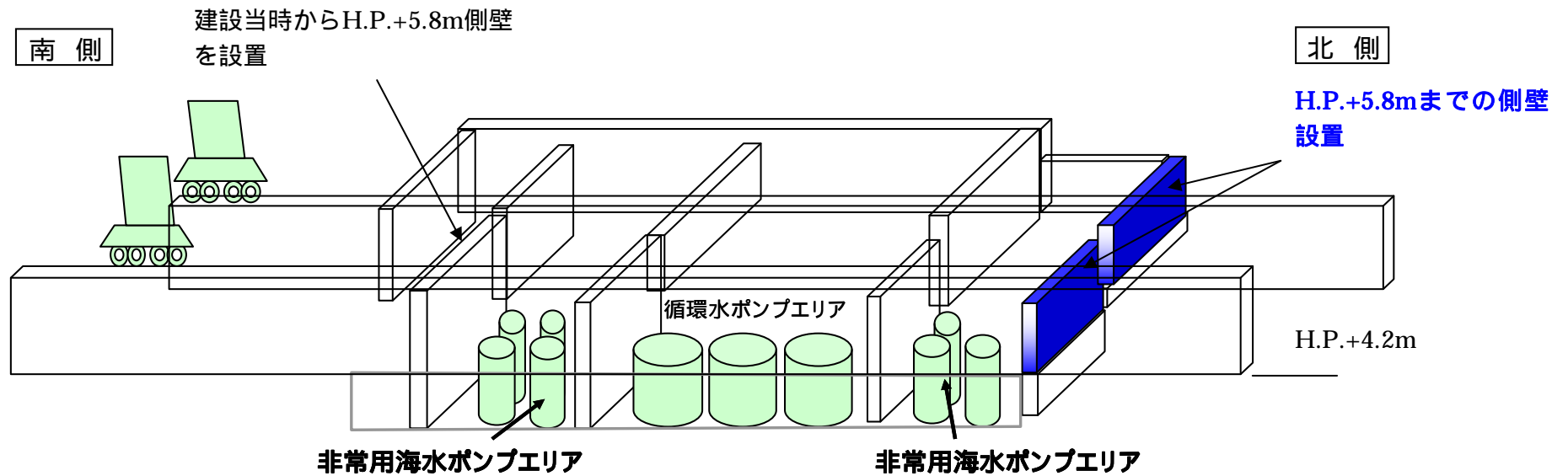


津波評価・対策の経緯

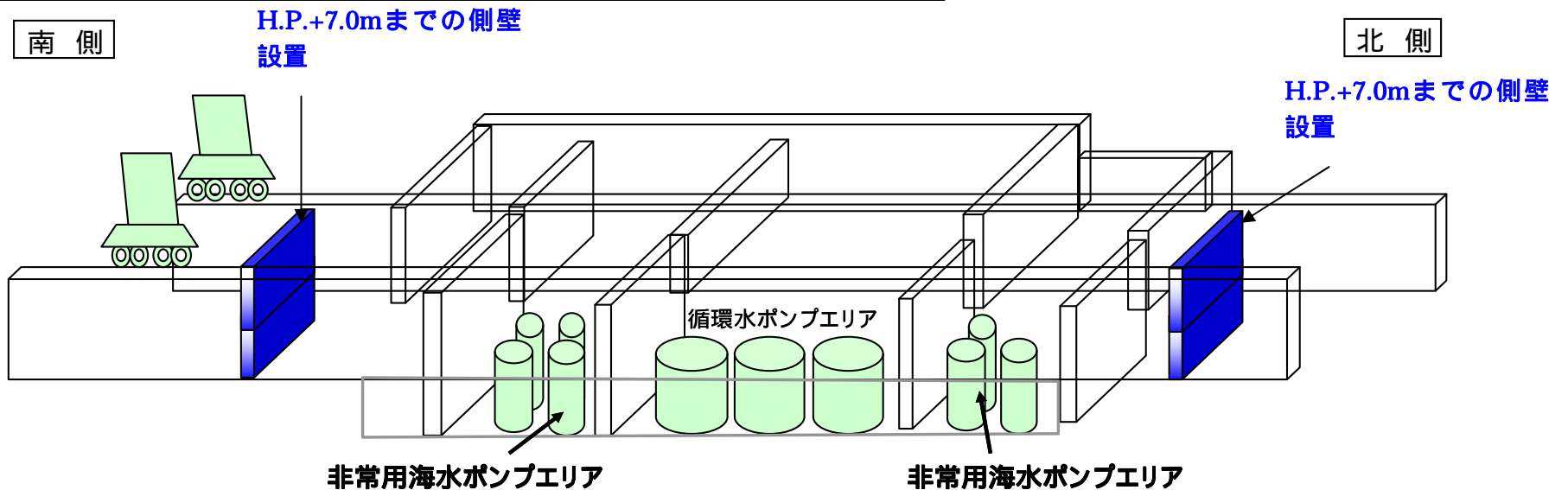
		津波評価・対策
昭和46年12月	東海第二発電所 原子炉設置許可申請	昭和31年7月以降の日立港の潮位記録を基に最高水位を評価し(最高潮位:H.P.+2.35m)、敷地レベルを設定(取水口機器設置レベル:H.P.+4.2m)。
平成5年7月	北海道南西沖地震発生(M7.8, 最大津波高さ16.8m)	
平成8年12月	4省庁(農水省, 水産庁, 運輸省, 建設省)が「太平洋沿岸部地震津波防災計画主要調査委員会」を設置	
平成9年	4省庁の検討状況を踏まえ、津波解析を実施。 1677年房総沖地震を波源とした解析結果(最高水位H.P.+5.3m)から、ポンプ室の壁がH.P.+5.8mまで必要と評価し、自主的に対策を実施	
平成10年3月	7省庁(4省庁+国土庁, 気象庁, 消防庁)が「津波防災計画における津波対策強化の手引き」を公表	
平成14年2月	土木学会が「原子力発電所の津波評価技術」を公表	左記評価技術に基づき、津波評価を実施した結果、最高水位がH.P.+5.75mであり、ポンプ室の安全性を確認。
平成18年9月	「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」改定	
平成19年10月	茨城県が「県沿岸における津波浸水想定区域図等」を公表	
平成20年12月	茨城県の津波評価を踏まえた津波解析を実施。最高水位がH.P.+6.61mであったことから、ポンプ室の対策を実施。	

津波対策の概要

平成9年：4省庁の検討状況を踏まえ、対策を実施。



平成20年12月：茨城県の津波評価を踏まえ、対策を実施。



茨城県の過去の津波被害

発生年	津波名	津波の高さ (地点, m)	死者 (人)	家屋流失 (棟)	その他被害	外カレベル
1677	延宝房総沖地震	那珂湊 4 大洗 5	36	水戸領 189	船破損流失 353 艘	外カレベル 2～3
1923	大正関東地震	祝町(検潮全振幅) 0.53 小川(検潮全振幅) 0.40				外カレベル 1
1933	昭和三陸地震	祝町(検潮全振幅) 0.64 小川(検潮全振幅) 0.41				外カレベル 1
1960	チリ地震	日立市会瀬港 3 日立市久慈港 3 大洗町夏海 3 大野村武井釜 2 鹿島町明石 2			定置網流失 漁船沈没、 破損等	外カレベル 1～2

参考文献：渡辺(1998)日本被害津波総覧【第2版】.

気象庁(1961)昭和35年5月24日チリ地震津波調査報告, 気象庁技術報告, vol18.

出典:「茨城県沿岸津波浸水想定区域調査 報告書」(平成19年3月、茨城県)

既往の津波評価と東北地方太平洋沖地震の津波規模

土木学会¹に基づく津波評価(ポンプ室前面位置)

解析実施者	想定地震	最高水位
日本原電	1677年 延宝房総沖地震 (M8.2)	HP + 5.75m

1:「原子力発電所の津波評価技術」(平成14年2月、土木学会)

茨城県波源²を用いた評価(ポンプ室前面位置)

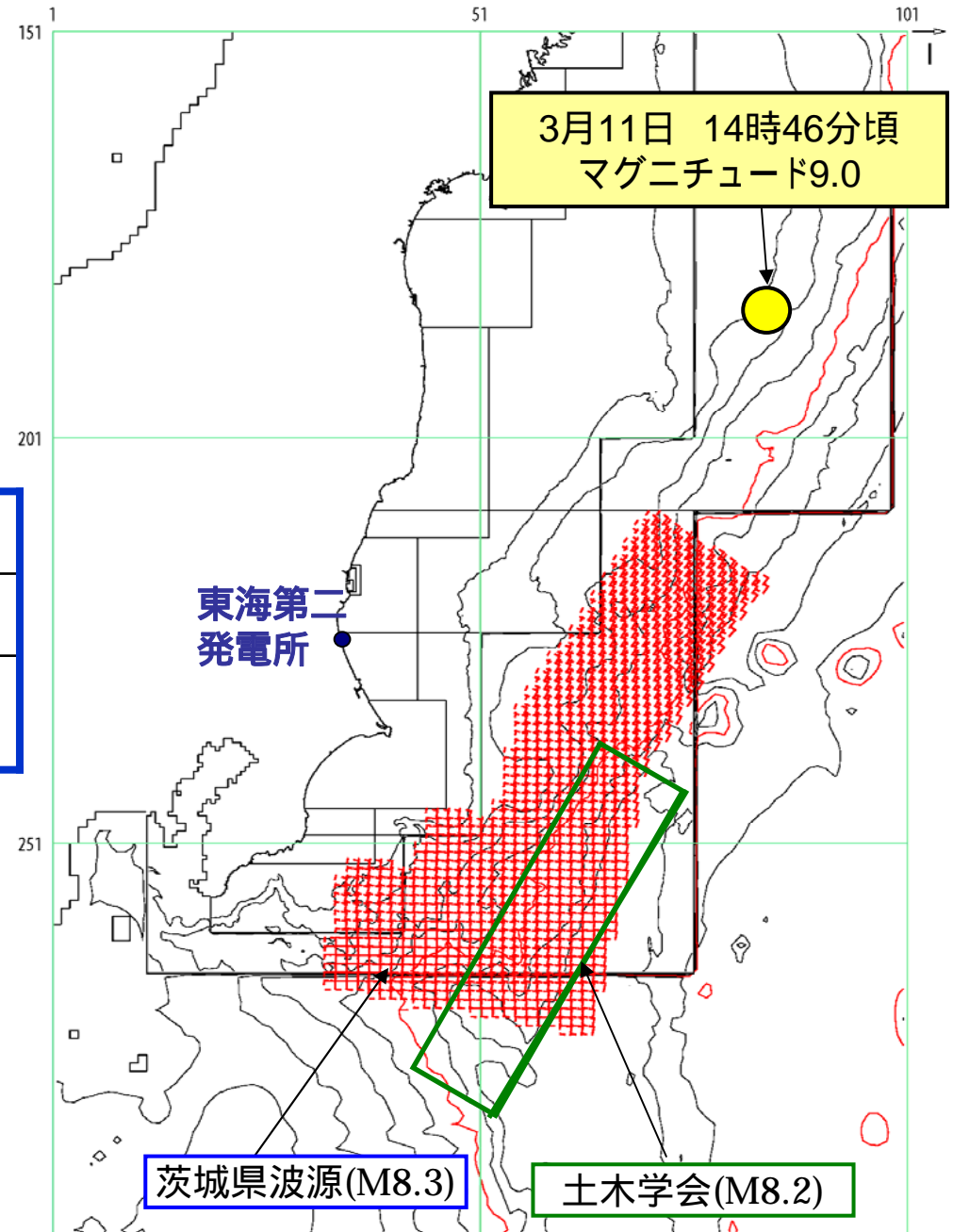
解析実施者	想定地震	津波水位
茨城県	1677年 延宝房総沖 地震(M8.3)	茨城県沿岸:2~7m
日本原電 ³		ポンプ室位置: HP+6.61m

2:「本県沿岸における津波浸水想定区域図等」(平成19年10月、茨城県)において設定された1677房総沖地震の波源モデル

3:茨城県が実施した解析に比べ、発電所付近のメッシュサイズを細かくし、地形データも自社の測量結果等を使用

東北地方太平洋沖地震で発生した津波の痕跡高

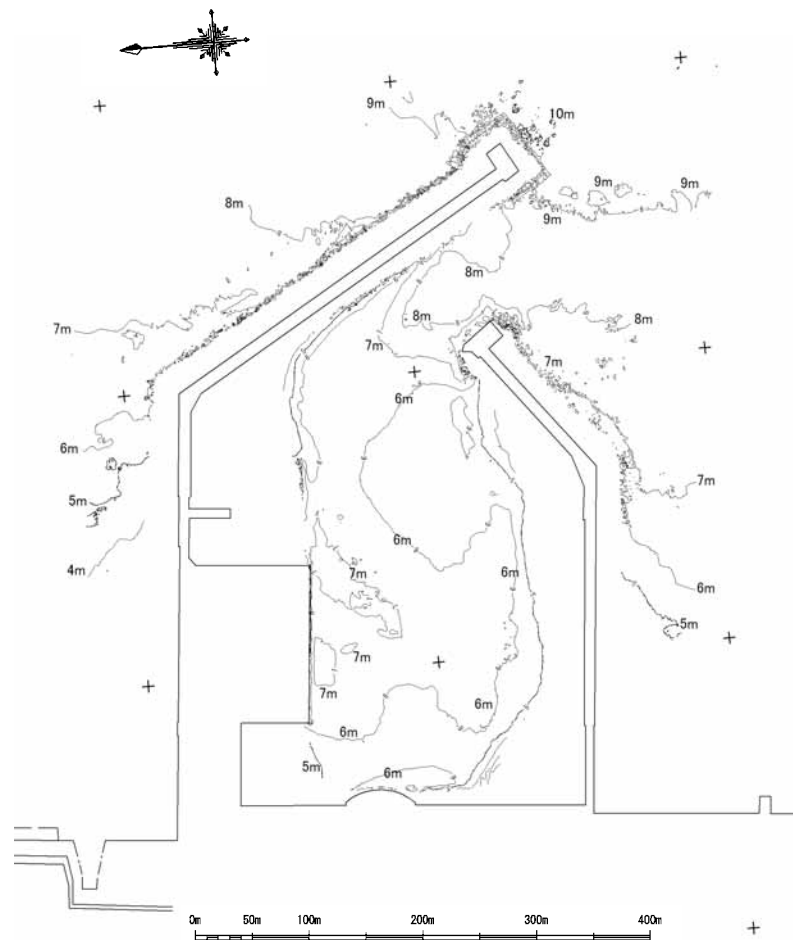
地震規模	痕跡高
M9.0	HP+5.7m ~ +6.2m



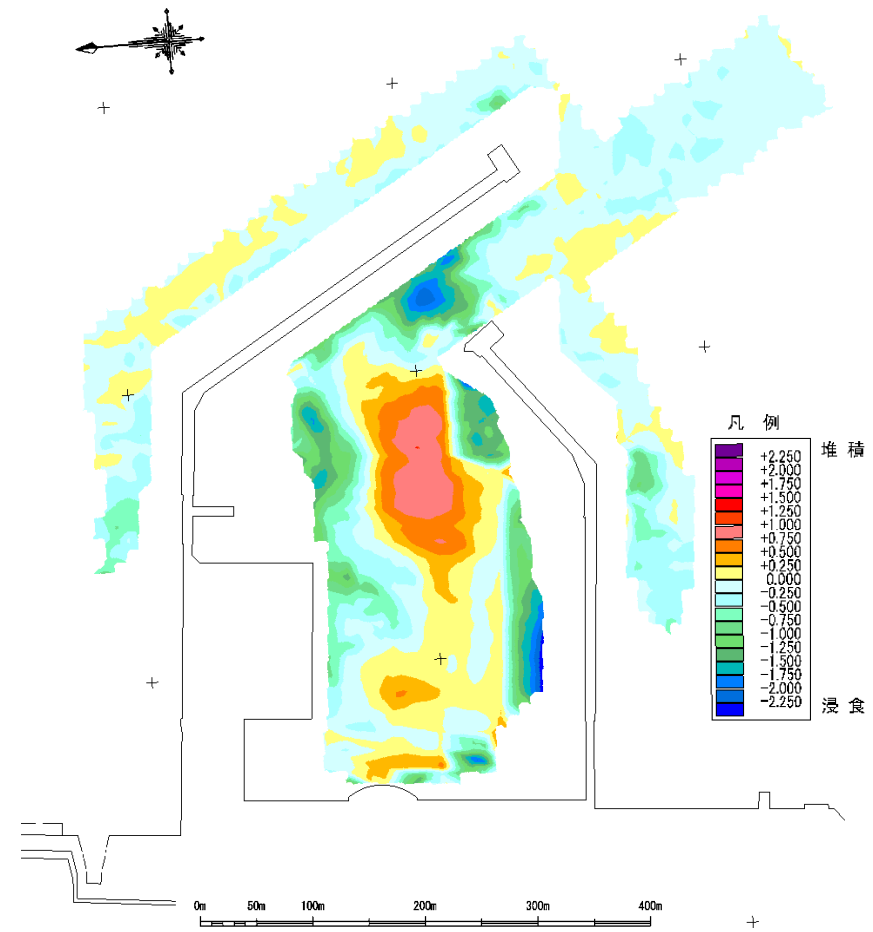
調査結果による東海第二発電所への影響分析

【津波による海底地形変化】

- ・東海港内について東北地方太平洋沖地震発生後に行った深浅測量の結果、港口部分で顕著な浸食が認められるとともに、港湾中央部で若干の堆積とその周辺で若干の浸食が認められる。
- ・取水口前面については、顕著な堆積は認められず、取水機能に影響はない。



地震後の深浅測量結果



地震前後の海底地形の変化

4. まとめ

- ✓ 平成23年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、地震の影響によって東京電力変電所内が損壊し、外部電源(275kV、154kV系)が喪失した。
- ✓ さらに、地震発生後、建設時の設計想定(H.P.+2.35m)を超えるH.P.+6.2mの津波が来襲した。
- ✓ 一方、当社では、津波高さに係る新たな知見や評価結果が得られる都度、対策の可否を検討の上、適宜対策を実施してきており、DG 2Cの海水ポンプは工事途中につき浸水したものの、DG 2D、HPCS DG冷却用の海水ポンプは浸水を免れた。
- ✓ その結果、DG 2D、HPCS DGの機能及び残留熱除去系(1系列)の機能は維持された。
- ✓ なお、地震発生から冷温停止まで時間を要したことについて、多方面から指摘を受けたが、これは外部電源復旧の見通しが得られていたため、当面はプラントの安定状態維持を優先し、外部電源復旧後に残留熱除去系停止時冷却モードに切り替え、冷温停止操作へ移行することを選択したためである。

ご静聴ありがとうございました。

日本原子力発電株式会社