

耐震設計評価

1. 既設の耐震補強工事	.....	169
2. 東海第二発電所における主な耐震設計の特徴	.....	170
3. 耐震安全性を確認する基準地震動 S_s	.....	171
4. 主な耐震評価結果	.....	174
5. まとめ	.....	198

1. 既設の耐震補強工事



○ 新たな基準地震動 S_s の策定を踏まえて、耐震性を向上させる観点から実施する**既設設備に対する耐震補強**を以下に示す。

	施設・設備名称	目的	耐震補強内容
機器・配管系	格納容器スタビライザ	フランジボルトの許容限界値の向上	高強度材料適用
	原子炉建屋クレーン	地震時落下防止による波及的影響防止	落下防止対策の追設
	燃料取替機	地震時落下防止による波及的影響防止	ガーダ等の部材強化
	配管系	配管系の支持機能強化	サポートの追加及び補強
	残留熱除去系熱交換器	残留熱除去系熱交換器の支持機能強化	架台部への耐震補強サポート追設
	水圧制御ユニット	水圧制御ユニットの支持機能強化	架構部への補強梁追加
	格納容器シアラグ部	格納容器とシアラグ取付け部の応力低減対策	シアラグ部への補強材追加
	使用済燃料乾式貯蔵容器(資料1-2参照)	支持構造物の応力低減対策	支持構造物の部材のサイズ変更及び高強度材料適用
建物・構築物	主排気筒	主排気筒の支持機能強化	鉄塔部への支持部材の追加及び地盤改良
	地下排水設備	地盤の変位の抑制	地盤改良
土木構造物	貯留堰取付護岸	地震時の護岸構造健全性維持による貯留堰への波及的影響防止	地盤改良
	屋外二重管基礎構造	屋外二重管の支持機能強化	屋外二重管を支持する基礎構造の追設
	取水構造物	地震時の取水構造物の健全性維持	地盤改良

2. 東海第二発電所における主な耐震設計の特徴

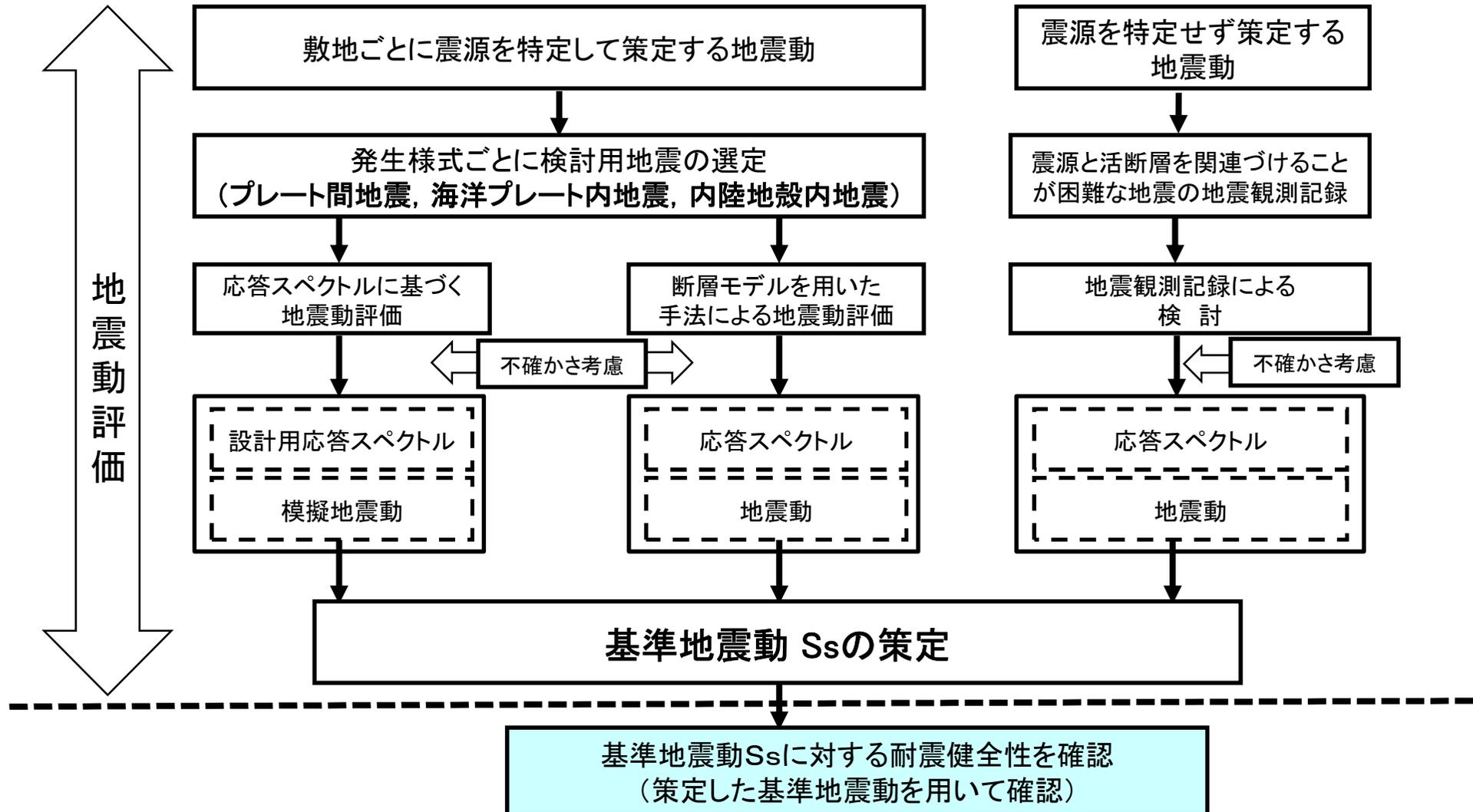


- 先行プラントで実績を有する耐震設計に対して、BWRプラントにおける固有設備(項目1)、敷地の地盤特性(項目2及び3)を踏まえた**東海第二発電所における主な耐震設計の特徴**を示す。

	項目	内容
1	ブローアウトパネル閉止装置の地震時健全性 (7. 主な耐震評価結果 ① 機器・配管系を参照)	<ul style="list-style-type: none"> ブローアウトパネル閉止装置は、ブローアウトパネル開放後の原子炉建屋原子炉棟の気密性確保の観点から設置している。 パネル閉止装置について加振試験により地震時においても健全(動作要求を満たしている)であることを確認した。 (参考)ブローアウトパネル: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
2	原子炉建屋の耐震設計における地下水位 (7. 主な耐震評価結果 ② 建物・構築物を参照)	<ul style="list-style-type: none"> 耐震評価における地下水位条件は、保守的に地表面としている。 地下排水設備を設置している原子炉建屋は、地下水位を建屋基礎底面レベル以深に維持できることから、地下水位条件は建屋基礎底面レベル以深としている。 地下排水設備について、集水ピットの周囲をセメント系固化により地盤改良を条件に基準地震動S_{sl}による評価を行い、発生応力が許容限界を超えないことを確認した。
3	土木構造物の耐震設計における地盤物性の扱い (7. 主な耐震評価結果 ③ 土木構築物を参照)	<ul style="list-style-type: none"> 土木構造物が設置される地盤は、解析により液状化の発生が認められないことを確認している。 しかし、保守的な配慮から地震時に地盤を強制的に液状化させることを仮定した評価条件により土木構造物の健全性を確認した。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div data-bbox="985 1129 1411 1404" style="width: 45%;"> <p>敷地に存在しない豊浦標準砂の液状化強度特性により強制的に液状化させることを仮定</p> </div> <div data-bbox="1500 973 2016 1404" style="width: 45%;"> <p>敷地に存在しない豊浦標準砂の液状化強度特性により強制的に液状化させることを仮定(④)</p> <p>原地盤において非液状化の条件を仮定(⑤、⑥)</p> <p>原地盤に基づく液状化強度特性(-1σ)(①、②、③)</p> </div> </div>

3. 耐震安全性を確認する基準地震動 S_s (1/3)

- 東海第二発電所の基準地震動 S_s は、応答スペクトル法による S_s-D1 に加え、一部周期帯で S_s-D1 を上回る断層モデル手法による6波(内陸地殻内地震4波, プレート間地震2波)及び震源を特定せず策定する地震動1波の合計8波とした。断層モデル手法による S_s 及び「特定せず」の S_s は、 S_s-D1 を上回る周期帯が異なるため、それぞれの基準地震動 S_s による地震力を用いた耐震健全性評価を行う。

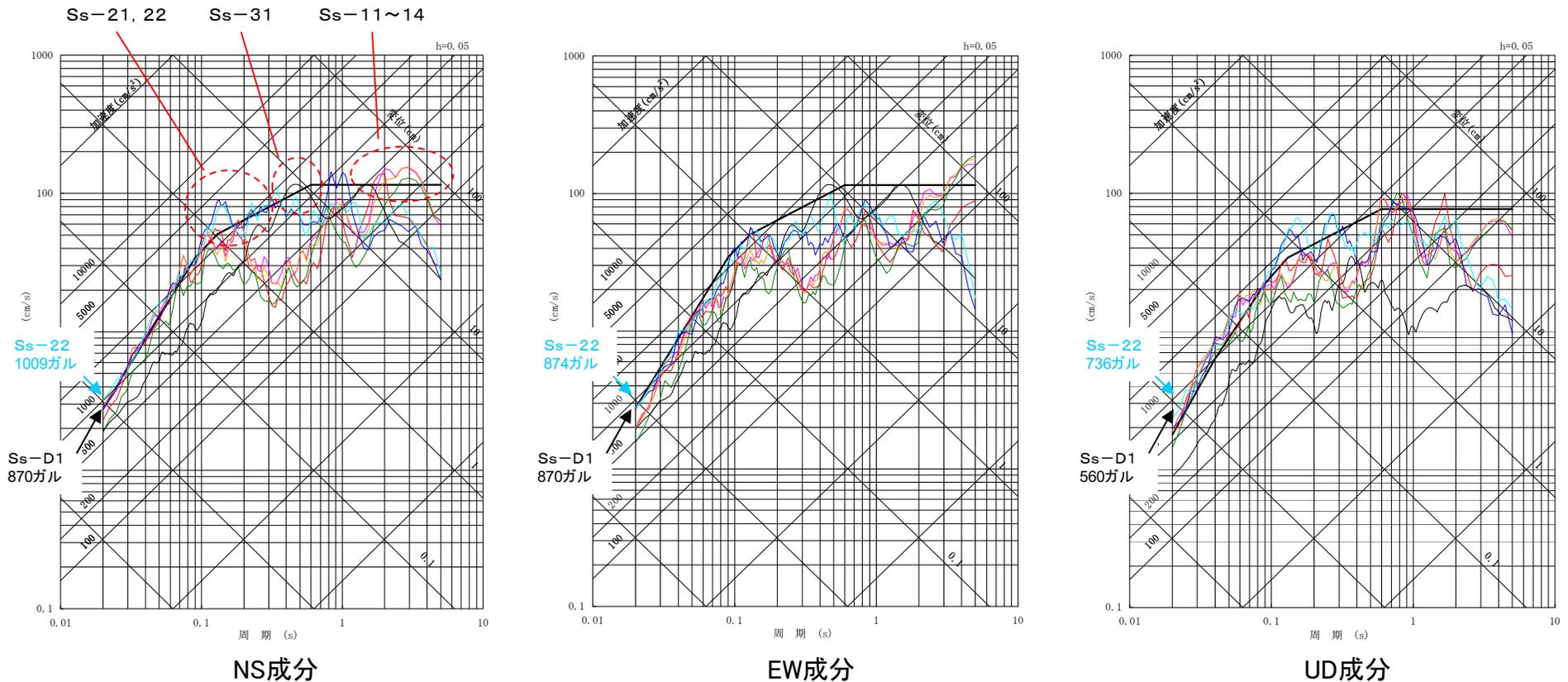


3. 耐震安全性を確認する基準地震動Ss (2/3)



○ 基準地震動Ssの応答スペクトル図を示す。

- Ss-D1 応答スペクトル手法による基準地震動
- Ss-11 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- Ss-12 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- Ss-13 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- Ss-14 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- Ss-21 2011年東北地方太平洋沖型地震(短周期レベルの不確かさ)
- Ss-22 2011年東北地方太平洋沖型地震(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- Ss-31 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動



3. 耐震安全性を確認する基準地震動S_s (3/3)



○ 基準地震動S_sの最大加速度の一覧を示す。

基準地震動		最大加速度 (cm/s ²)		
		NS成分	EW成分	UD成分
Ss-D1	応答スペクトル手法による基準地震動	<p>870</p>		<p>560</p>
Ss-11	F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)	<p>717</p>	<p>619</p>	<p>579</p>
Ss-12	F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)	<p>871</p>	<p>626</p>	<p>602</p>
Ss-13	F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)	<p>903</p>	<p>617</p>	<p>599</p>
Ss-14	F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)	<p>586</p>	<p>482</p>	<p>451</p>
Ss-21	2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)	<p>901</p>	<p>887</p>	<p>620</p>
Ss-22	2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)	<p>1009</p>	<p>874</p>	<p>736</p>
Ss-31	2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動	<p>610</p>		<p>280</p>

4. 主な耐震評価結果 ① 機器・配管系 (1/7)



○耐震評価の手法

機器・配管系の耐震評価は、基準地震動 S_s に対して、**構造強度評価により強度的に問題がないことを確認**するとともに、地震時に動的機能が求められる設備(表1)については、**動的機能が維持できることを確認**する。

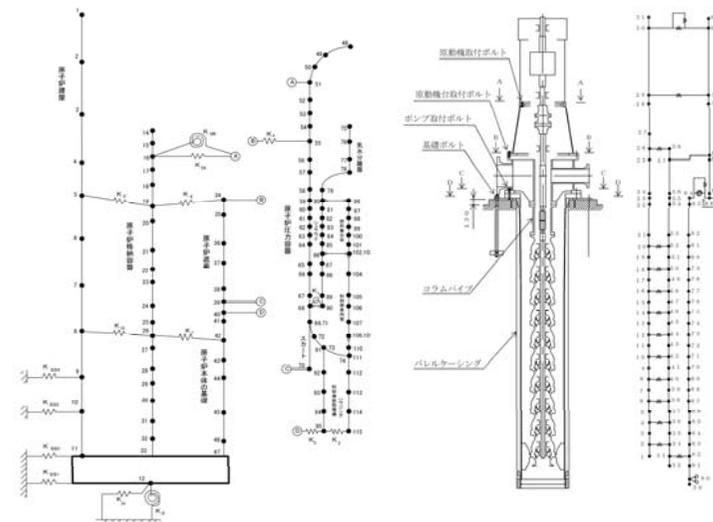
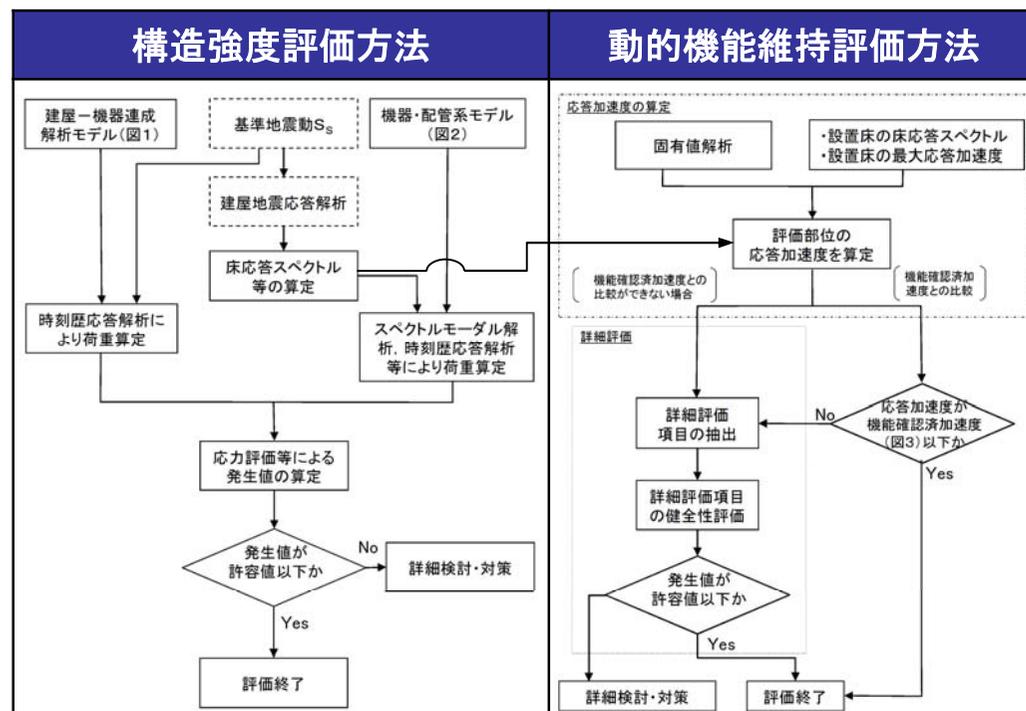


図1 建屋-機器連成解析モデル

図2 機器・配管系モデル (立型ポンプの例)



(a) 機能確認済加速度確認のための加振試験状況



(b) 応答加速度(黒線)と機能確認済加速度(赤線)との比較状況

表1 動的機能要求設備

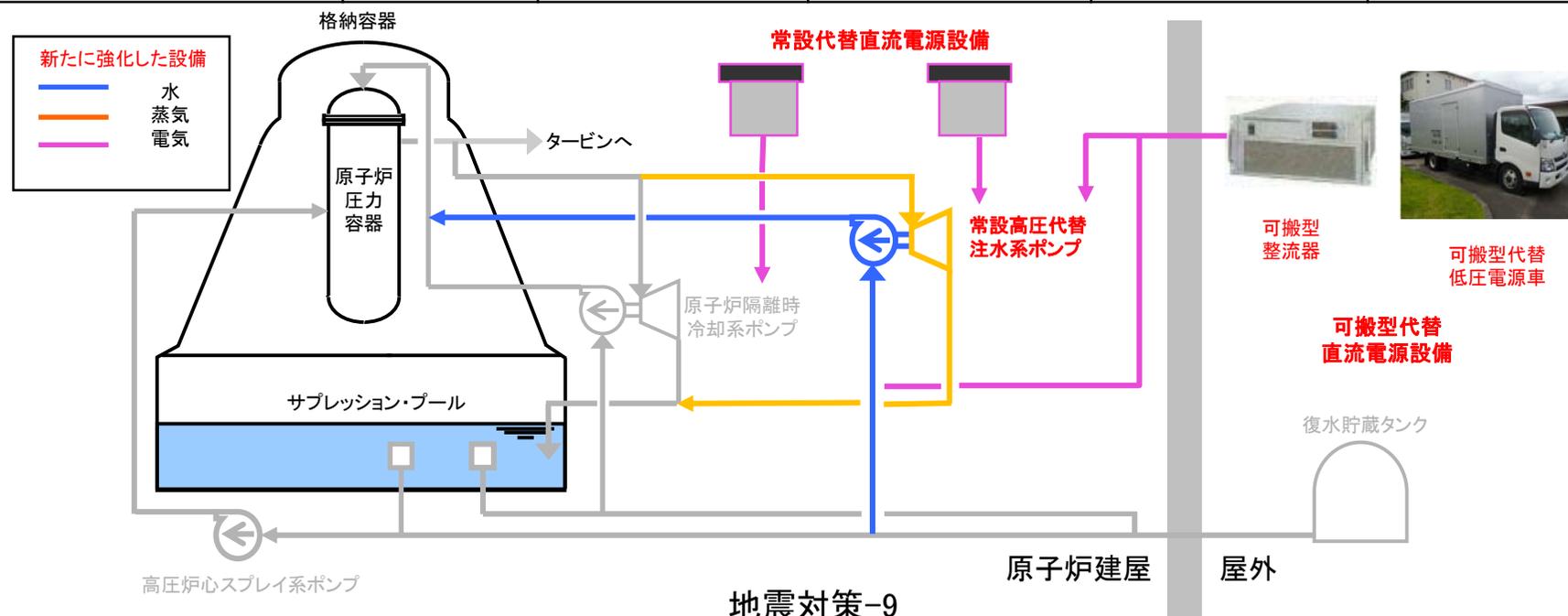
ポンプ	非常用ディーゼル発電機
ポンプ駆動用タービン	弁
電動機	制御棒
ファン	電気盤
ダンパ	可搬型設備(ポンプ, 電源装置)

4. 主な耐震評価結果 ① 機器・配管系 (2/7)

○ 福島第一原子力発電所事故で得られた教訓を踏まえ新たに設置する設備の耐震評価結果の例

高圧注水手段の強化(高圧代替注水系の新設) ⇒ 応力・加速度の発生値が許容値を下回ることを確認

評価対象設備	評価項目	評価部位	応力分類	発生値	許容値
常設高圧代替注水系 ポンプ	構造強度	取付ボルト	引張応力	64 MPa	398 MPa
	機能維持	ポンプ	応答加速度(水平)	0.72 G	3 G
常設代替直流電源設備 (緊急用直流125V蓄電池)	構造強度	基礎ボルト	引張応力	42 MPa	165 MPa
可搬型代替直流電源設備 (可搬型代替低圧電源車)	構造強度	取付ボルト	引張応力	146 MPa	210 MPa
	機能維持	可搬型代替低圧電源車	応答加速度(水平)	1.08 G	1.52 G



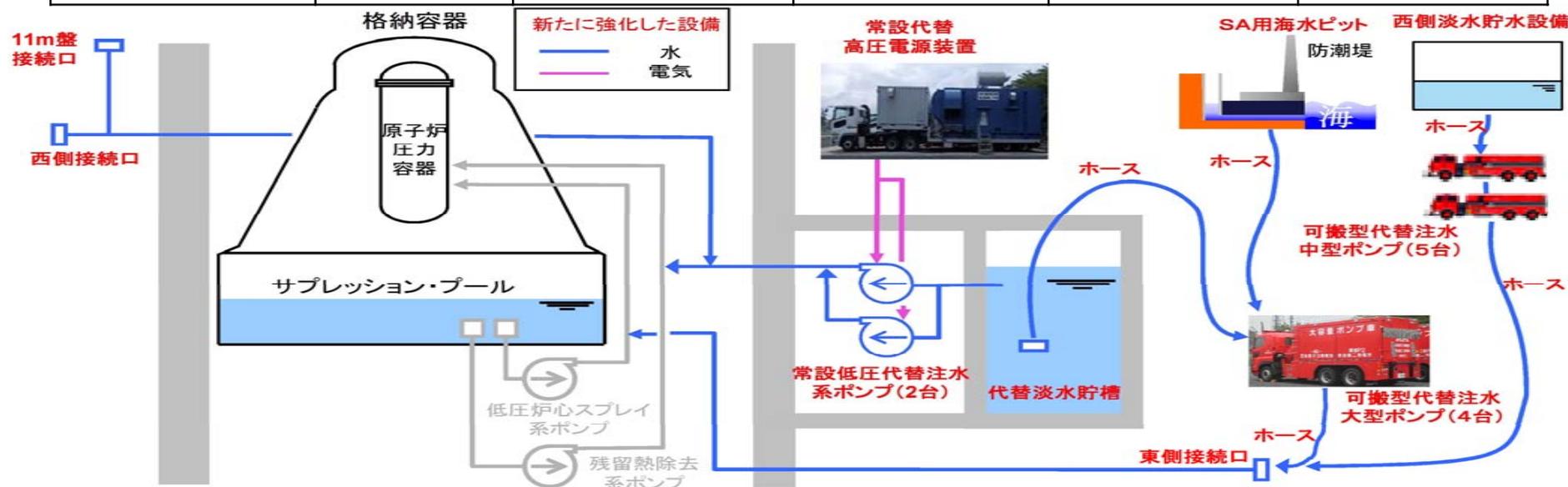
地震対策-9

4. 主な耐震評価結果 ① 機器・配管系 (3/7)



○ 福島第一原子力発電所事故で得られた教訓を踏まえ新たに設置する設備の耐震評価結果の例
 低圧注水手段の強化(低圧代替注水系の設置) ⇒ 応力・加速度の発生値が許容値を下回ることを確認

評価対象設備	評価項目	評価部位	応力分類	発生値	許容値
常設低圧代替注水系ポンプ	構造強度	取付ボルト	引張応力	64 MPa	398 MPa
	機能維持	ポンプ	応答加速度(水平)	0.72 G	3 G
常設代替高圧電源装置	構造強度	フレーム	組合せ応力	367 MPa	399 MPa
	機能維持	常設代替高圧電源装置内燃機関(No.6)	応答加速度(鉛直)	0.42 G	1.14 G
可搬型代替注水大型ポンプ	構造強度	取付ボルト	引張応力	115 MPa	451 MPa
	機能維持	可搬型代替注水大型ポンプ	応答加速度(水平)	1.08 G	1.52 G
可搬型代替注水中型ポンプ	構造強度	取付ボルト	引張応力	141 MPa	178 MPa
	機能維持	可搬型代替注水大型ポンプ	応答加速度(鉛直)	0.58 G	0.89 G



地震対策-10

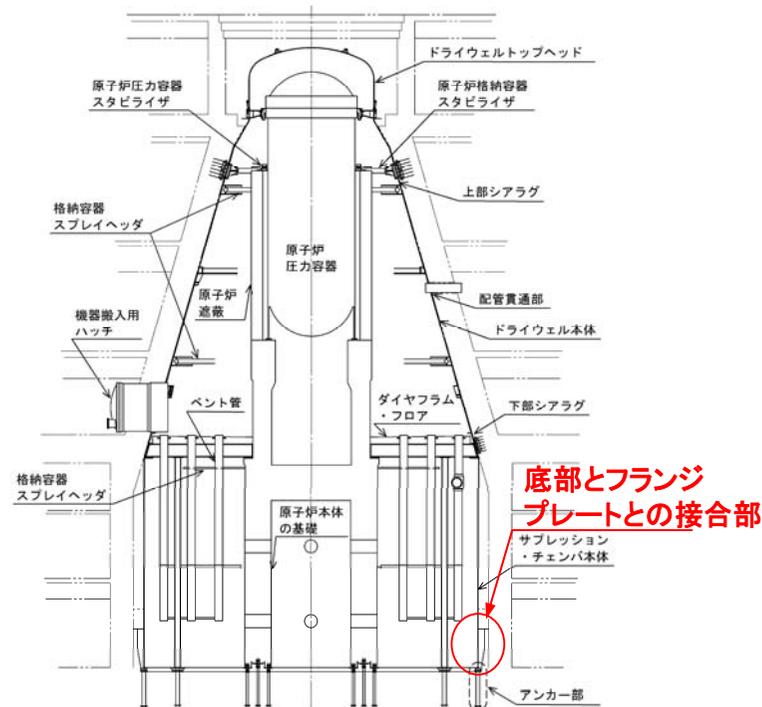
4. 主な耐震評価結果 ① 機器・配管系 (4/7)



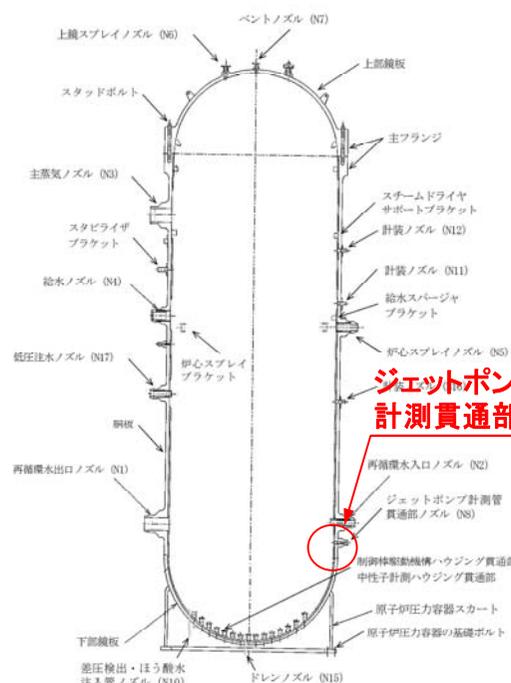
○ 既設設備 (代表設備) の耐震評価結果の例

原子炉圧力容器, 原子炉格納容器 ⇒ 発生応力が許容値を下回ることを確認

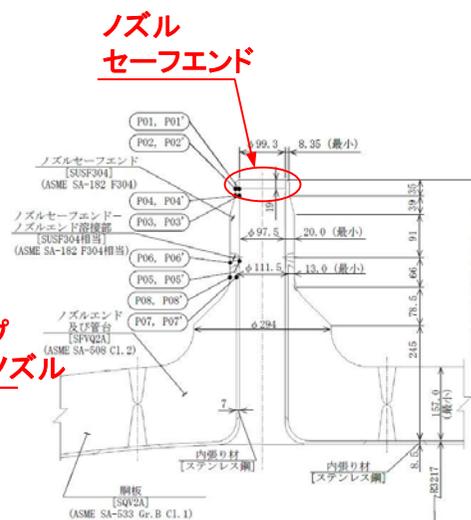
評価対象設備	評価項目	評価部位	応力分類	発生値	許容値
原子炉 圧力容器	構造強度	ノズルセーフエンド (ジェットポンプ計 測貫通部ノズル)	一次膜十 一次曲げ応力	237 MPa	338 MPa
原子炉 格納容器	構造強度	底部とフランジ プレートとの接合部	座屈	0.98	1



原子炉格納容器構造概要図



原子炉圧力容器構造概要図



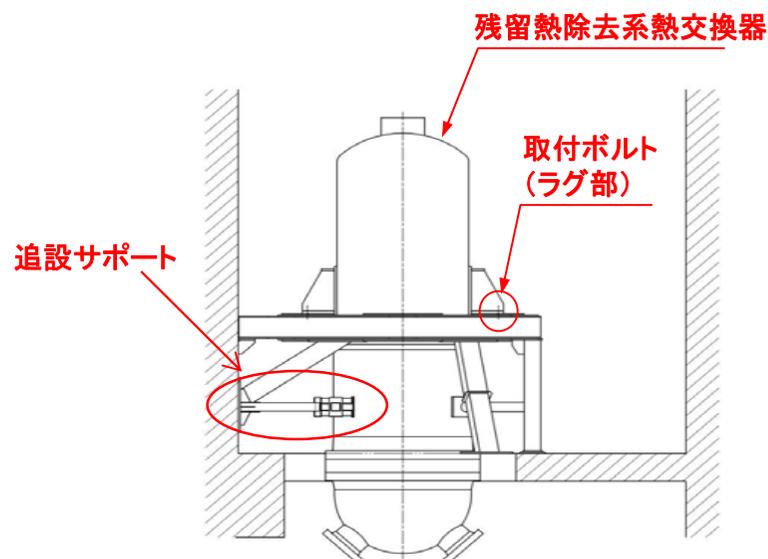
ジェットポンプ計測貫通部ノズル拡大図

4. 主な耐震評価結果 ① 機器・配管系 (5/7)

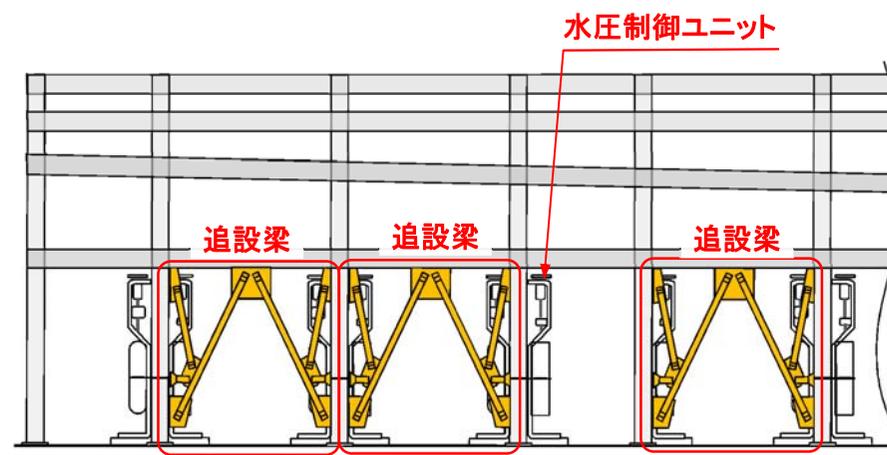
○ 既設設備(耐震補強設備)の耐震評価結果の例

残留熱除去系熱交換器, 水圧制御ユニット ⇒ 発生応力が許容値を下回ることを確認

評価対象設備	評価項目	評価部位	応力分類	発生値	許容値
残留熱除去系熱交換器	構造強度	取付ボルト(ラグ部)	引張応力	405 MPa	444 MPa
水圧制御ユニット	構造強度	フレーム	組合応力	74 MPa	270 MPa
	機能維持	CRDスクラム弁	応答加速度(水平)	1.29 G	6 G



残留熱除去系熱交換器耐震補強概要図

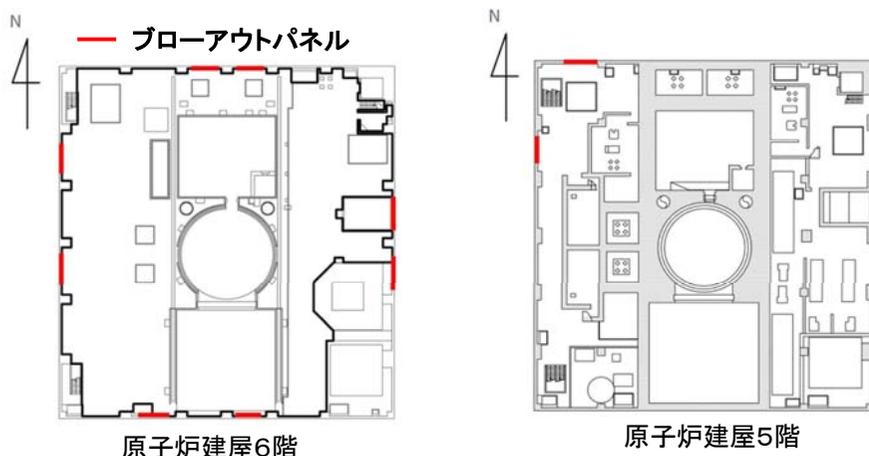


水圧制御ユニット支持構造の耐震補強概要図

4. 主な耐震評価結果 ① 機器・配管系 (6/7)

○ 東海第二発電所における主な耐震設計の特徴(ブローアウトパネル閉止装置の地震時健全性)

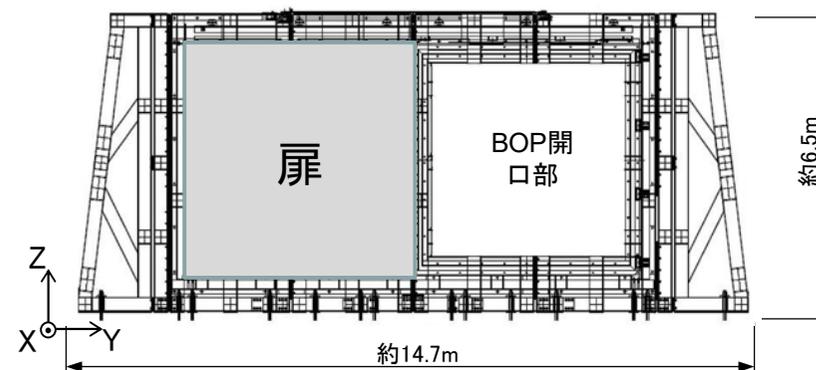
・ブローアウトパネル閉止装置は、ブローアウトパネル開放後に原子炉建屋原子炉棟の機能確保の観点から設置する。当該設備は、地震後において動作要求を要することから加振試験を用いて健全性を確認した。



原子炉建屋6階

原子炉建屋5階

ブローアウトパネル配置図



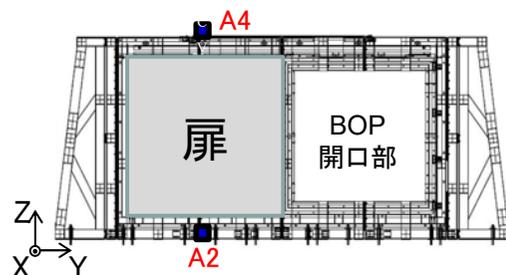
ブローアウトパネル閉止装置加振試験装置

4. 主な耐震評価結果 ① 機器・配管系 (7/7)



○ 加振試験の妥当性

ブローアウトパネル(BOP)閉止装置の固有周期範囲において、加振試験により得られたBOP閉止装置位置の応答スペクトル(赤線)は、建屋の応答スペクトル(黒線)を超える加振がされていることを確認した。



○ 加振試験結果

- 各部に破損等の異常は確認されず、ブローアウトパネル閉止装置の耐震健全性が確認された。加振試験後においても、気密性が確保でき、原子炉建屋原子炉棟の気密性能も確保できることを確認した。
- また当該装置の各部位に発生する地震時の応力等は、許容値を下回ることを確認した。

BOP閉止装置加振試験結果

区分 (扉状態)	試験項目	結果
加振試験 (扉開状態)	作動確認 ・扉閉操作 ・電動での扉開閉確認 ・手動での扉開閉確認	良好
	気密性能試験	良好
加振試験 (扉開状態)	作動確認 ・電動での扉開閉確認 ・手動での扉開閉確認	良好
	気密性能試験	良好

BOP閉止装置の構造強度評価結果(裕度最小の評価部位)

評価対象設備	評価項目	評価部位	応力分類	発生値	許容値
ブローアウトパネル閉止装置	構造強度	チェーン	引張荷重	43800 N	43830 N

Ssによる加振試験結果とSs包絡条件との比較(扉開時)

4. 主な耐震評価結果 ② 建物・構築物 (1/6)



○ 建物・構築物の一覧表と配置図

既設	
建物・構築物	原子炉建屋
	主排気筒
	使用済燃料乾式貯蔵建屋 (資料1-2参照)

新設	
建物・構築物	緊急時対策所建屋
	格納容器圧力逃がし装置格納槽

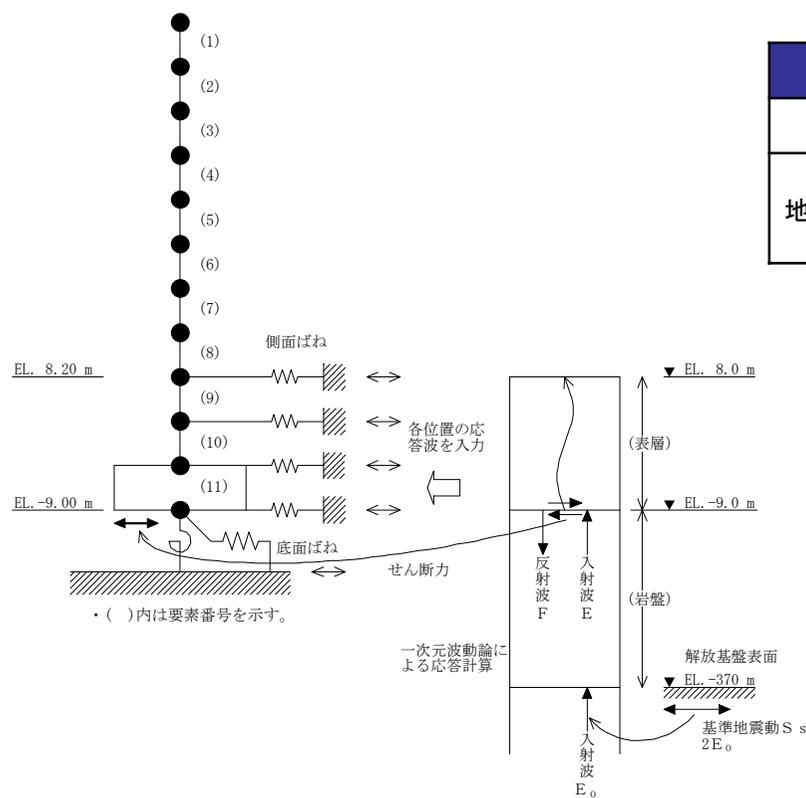


4. 主な耐震評価結果 ② 建物・構築物 (2/6)



○ 原子炉建屋

- ・解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を用いて一次元波動論により算定した建屋基礎底面及び側面地盤ばね位置での応答波を入力とした地震応答解析を実施した。
- ・地盤物性のばらつきを考慮した原子炉建屋の耐震壁のせん断ひずみを算出し、最大せん断ひずみと許容限界を比較した結果、耐震壁の最大せん断ひずみは 0.60×10^{-3} であり、許容限界(2.0×10^{-3})を超えないことを確認した。

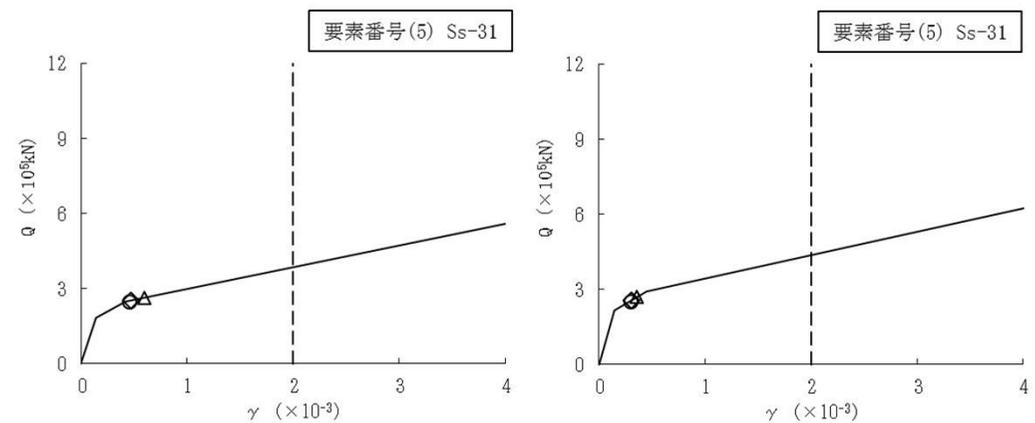


地震応答解析モデル及び入力地震動の概念図(水平方向)

地盤物性のばらつきを考慮した地震応答解析ケース

	地盤物性	モデル名称
基本ケース	標準地盤	基本モデル
地盤物性の変動による影響	標準地盤 + σ 相当	地盤物性のばらつきを考慮(+ σ)
	標準地盤 - σ 相当	地盤物性のばらつきを考慮(- σ)

○: 基本モデル
 △: 地盤物性のばらつきを考慮(+ σ)
 ◇: 地盤物性のばらつきを考慮(- σ)



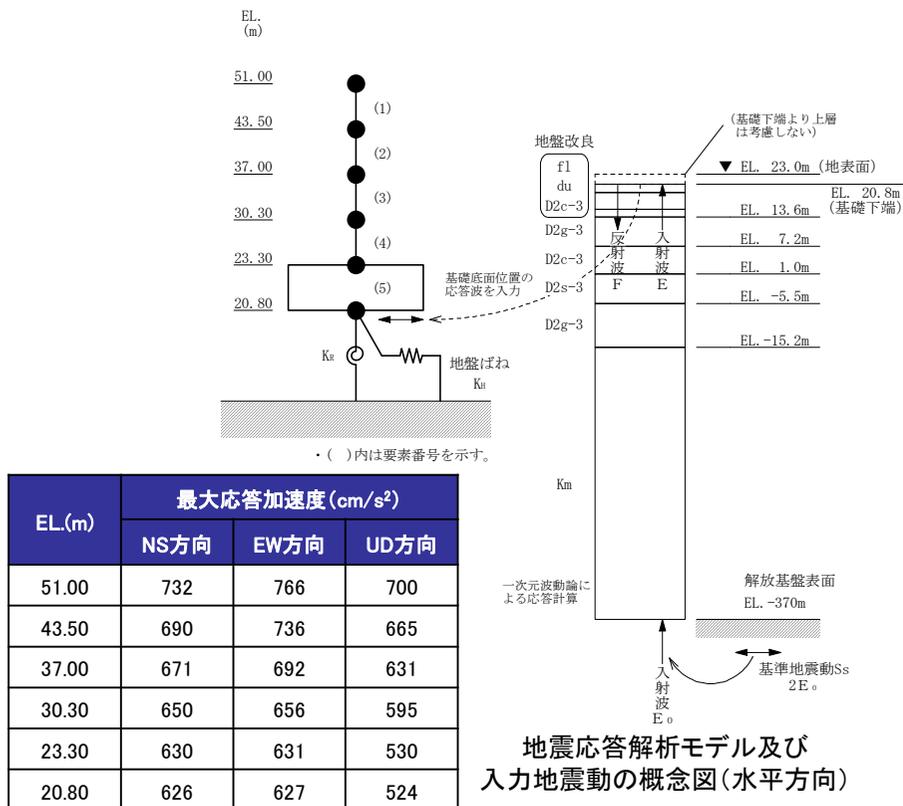
(NS方向) (EW方向)
 せん断スケルトン曲線上の最大応答値(Ss-31, 要素番号(5))

4. 主な耐震評価結果 ② 建物・構築物 (3/6)



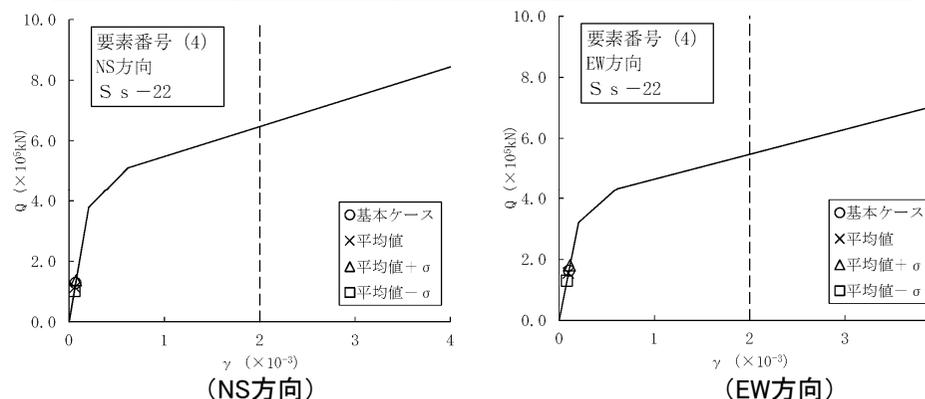
○ 緊急時対策所建屋

・地盤物性のばらつきを考慮した緊急時対策所建屋の耐震壁のせん断ひずみを算出し、最大せん断ひずみと許容限界を比較した結果、耐震壁の最大せん断ひずみは 0.115×10^{-3} であり、許容限界(2.0×10^{-3})を超えないことを確認した。



地盤物性のばらつきを考慮した地震応答解析ケース

	地盤物性		モデル名称
	支持地盤 表層地盤	地盤改良土	
基本ケース	平均値	改良目標値	基本ケース
地盤物性の変動 による影響	平均値	平均値	試験施工の平均値を考慮
	+σ相当	+σ相当	試験施工のばらつきを考慮(+σ)
	-σ相当	-σ相当	試験施工のばらつきを考慮(-σ)



せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (Ss-22, 要素番号(4))

緊急時対策所建屋に設置される代表機器の耐震評価結果

- ・福島第一原子力発電所の免震重要棟は、2011年の事故時にその機能を維持し、事象収束へ向けた対策検討、指揮命令を発する場所として機能したことから、免震構造には一定の効果があるといえる。一方、東海第二発電所の緊急時対策所建屋では、先行プラントの状況等を勘案し、耐震構造とすることとした。
- ・右表に緊急時対策所建屋に設置される代表機器の評価結果を示す。全ての評価対象設備について、応力・加速度の発生値が許容値を下回ることを確認した。

評価対象設備	評価項目	評価部位	応力分類	発生値	許容値
緊急時対策所用発電機	構造強度	取付ボルト	引張応力	81 (MPa)	210 (MPa)
	機能維持	緊急時対策所用発電機	応答加速度 (鉛直)	0.55 (G)	1 (G)
緊急時対策所用制御盤	構造強度	取付ボルト	引張応力	147 (MPa)	385 (MPa)
	機能維持	緊急時対策所用制御盤	応答加速度 (水平)	0.65 (G)	1.3 (G)

4. 主な耐震評価結果 ② 建物・構築物 (4/6)



○ 応力解析による評価

- ・使用済燃料プール, 原子炉格納容器底部コンクリートマット, 原子炉建屋基礎盤, 主排気筒, 緊急時対策所建屋及び格納容器圧力逃がし装置格納槽について, 基準地震動 S_s による評価結果のうち, 検定比が最も厳しい結果を下表に示す。

基準地震動 S_s による地震力に対する応力解析による評価結果

評価対象		評価項目	発生値	許容値	検定比	判定	耐震補強の 必要性
既設	原子炉建屋	使用済燃料プール 底版	面外せん断応力度 2.15 (N/mm ²)	3.01 (N/mm ²)	0.71	可	否
		原子炉格納容器 底部コンクリートマット 底部	面外せん断応力度 1.01 * ¹ (N/mm ²)	1.06 (N/mm ²)	0.95 * ¹	可	否
		原子炉建屋基礎盤 基礎スラブ	引張応力度 242 (N/mm ²)	345 (N/mm ²)	0.70	可	否
		主排気筒 杭	鉛直支持力 8641 (kN)	13193 (kN)	0.65 * ²	可	要
新設		緊急時対策所建屋 杭	鉛直支持力 10819 (kN)	17224 (kN)	0.63	可	—
		格納容器圧力逃がし装置 格納槽 基礎スラブ	面外せん断応力度 0.992 (N/mm ²)	2.84 (N/mm ²)	0.35	可	—

* 1 : 応力の再配分等を考慮して, 応力の平均化を行った結果

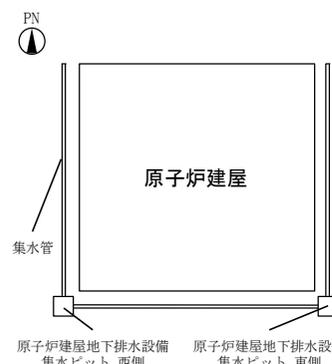
* 2 : 支持機能強化を目的とした鉄塔部への支持部材の追加及び地盤改良による耐震補強を実施した場合の結果

- ・評価した結果, 検定比(発生値/許容値)が1を下回っており, **発生応力が許容限界を超えないことを確認した。**
- ・**主排気筒は, 耐震補強(支持機能強化を目的とした鉄塔部への支持部材の追加及び地盤改良)を実施する。**

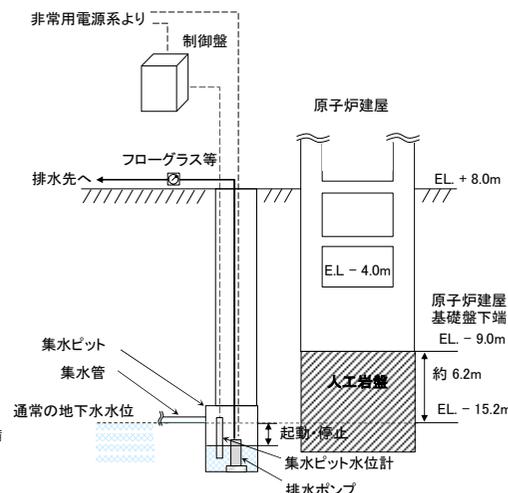
4. 主な耐震評価結果 ② 建物・構築物 (5/6)

○ 東海第二発電所における主な耐震設計の特徴 (原子炉建屋の耐震設計における地下水位)

- 地下排水設備は、原子炉建屋に対し、その耐震性を確保するため地下水位を原子炉建屋基礎底面レベル以深に維持する機能を有するため、基準地震動 S_s に対する機能維持を確認する。
- 原子炉建屋の南東角部及び南西角部付近の2箇所に地下排水設備集水ピットに配置し、地下排水設備排水ポンプを設置している。また、地下排水設備集水管を原子炉建屋の東面、西面及び南面に配置している。
- 地下排水設備集水ピットの周囲は、地盤の変位を抑制することを目的として、**支持岩盤である砂質泥岩の上部をセメント系固化により地盤改良を行う。**
- 地下排水設備について、基準地震動 S_s による評価結果のうち、検定比が最も厳しい結果を下表に示す。
- いずれの評価結果も検定比(発生値/許容値)が1を下回っており、**発生応力が許容限界を超えないことを確認した。**



原子炉建屋地下排水設備の概略平面図



原子炉建屋地下排水設備の概略断面図

基準地震動 S_s による地震力に対する応力解析による評価結果

地下排水設備 評価対象		評価項目	発生値	許容値	検定比	判定
排水ポンプ	基礎ボルト	引張応力	9 (MPa)	147 (MPa)	0.062	可
	地下排水設備排水ポンプ	応答加速度(鉛直)	0.51 (G)	2 (G)	0.255	可
排水配管	IW-001YD	一次応力	27 (MPa)	369 (MPa)	0.074	可
集水ピット水位	基礎ボルト (集水ピット水位監視盤)	引張応力	26 (MPa)	168 (MPa)	0.155	可
	集水ピット水位監視盤	応答加速度(鉛直)	0.91 (G)	1.5 (G)	0.607	可
排水ポンプ制御盤	基礎ボルト	引張応力	33 (MPa)	168 (MPa)	0.197	可
	排水ポンプ制御盤	応答加速度(鉛直)	0.91 (G)	2 (G)	0.455	可
地下排水上屋	屋根スラブ	曲げモーメント	2.43 (kN・m/m)	5.88 (kN・m/m)	0.414	可
排水シャフト	管軸方向断面	せん断力	17.92 (kN)	52 (kN)	0.345	可
集水ピット	底板	せん断力	127 (kN)	222 (kN)	0.573	可
集水管	横断方向断面	曲げモーメント	0.67 (kN・m/m)	0.74 (kN・m/m)	0.906	可

4. 主な耐震評価結果 ② 建物・構築物 (6/6)



○ 原子炉建屋地下排水設備の評価について

地下排水設備	評価対象部位	解析モデル	解析手法	地震荷重	評価項目	許容限界
排水シャフト	管軸方向断面 (鉛直断面)	<p>線形はり-非線形地盤ばねモデル</p>	応答変位法	地盤改良体を考慮した一次元波動論による地震応答解析で得られた地盤変位	曲げ圧縮応力度 引張応力度 せん断力	短期許容応力度
	横断方向断面 (水平断面)	<p>線形はりモデル</p>	フレーム解析	管軸方向断面の応力解析で得られた地盤ばね反力の最大値を地震時土圧として設定	曲げモーメント	ひび割れ保証モーメント
集水管	横断方向断面	<p>線形はりモデル</p>	フレーム解析	基準地震動Ssに対する原子炉建屋の基礎地盤安定解析で得られた集水管位置の最大地盤応力を地震時土圧として設定	曲げモーメント	ひび割れ保証モーメント

4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (1/11)



○ 東海第二発電所における主な耐震設計の特徴(土木構造物の耐震評価における地盤物性の扱い)

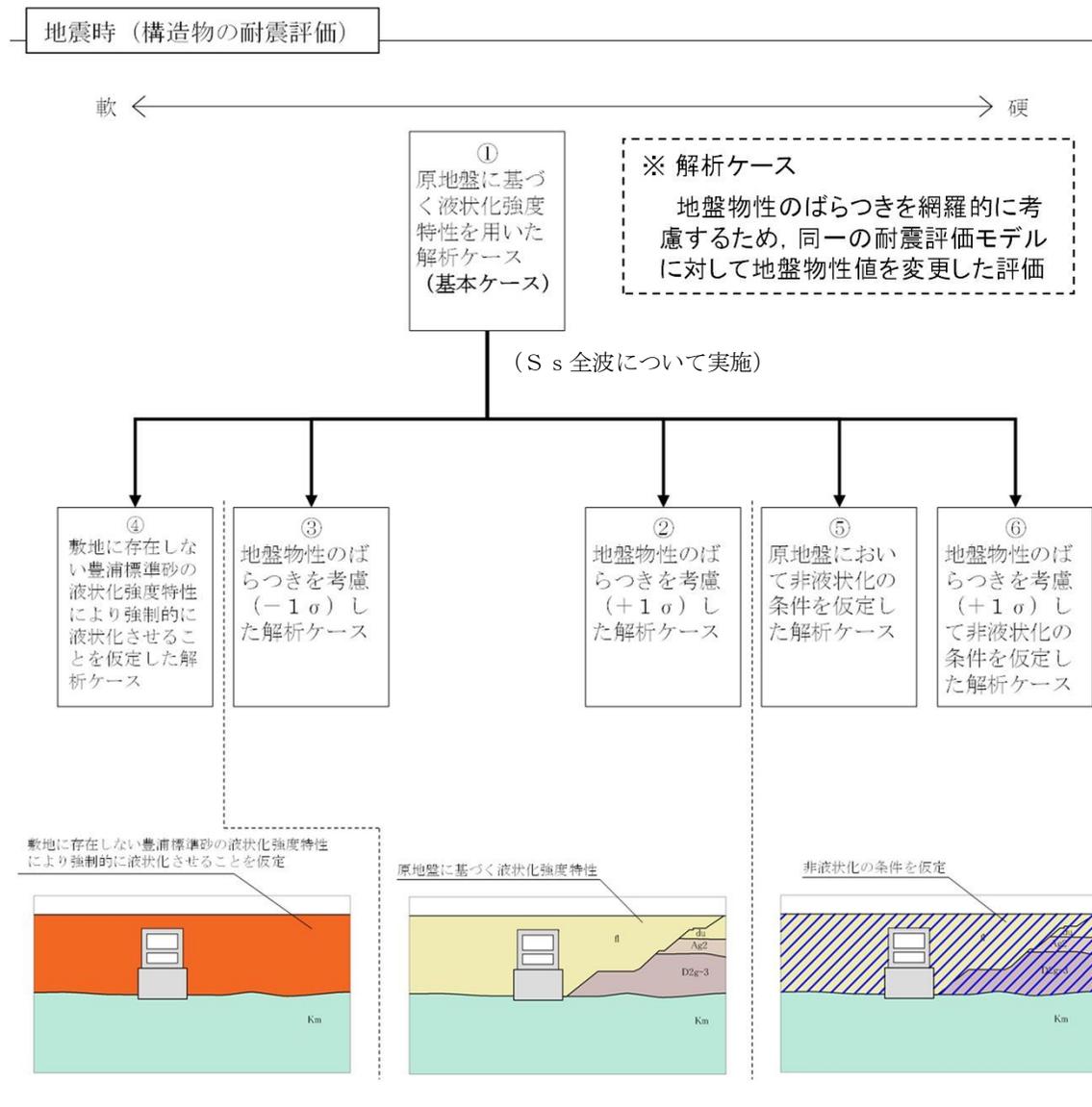
【強制的な液状化を仮定した評価】

地中土木構造物への**保守的な配慮として**、敷地に存在しない豊浦標準砂に基づく液状化強度特性により地震時に**地盤を強制的に液状化させることを仮定した評価を実施し、耐震性を確認している。**

【地盤のばらつきを考慮した解析ケース】

上記の解析(解析ケース④)を含めた、以下の解析ケースを実施することで**地盤の液状化強度特性及びせん断波速度Vs(地盤の剛性を示す指標)のばらつきを考慮した耐震評価を行っている。**

- ①原地盤に基づく液状化強度特性を用いた解析ケース(基本ケース)
- ②地盤物性のばらつきを考慮(+1σ)した解析ケース
- ③地盤物性のばらつきを考慮(-1σ)した解析ケース
- ④敷地に存在しない豊浦標準砂の液状化強度特性により強制的に液状化させることを仮定した解析ケース
- ⑤原地盤において非液状化の条件を仮定した解析ケース
- ⑥地盤物性のばらつきを考慮(+1σ)して非液状化の条件を仮定した解析ケース



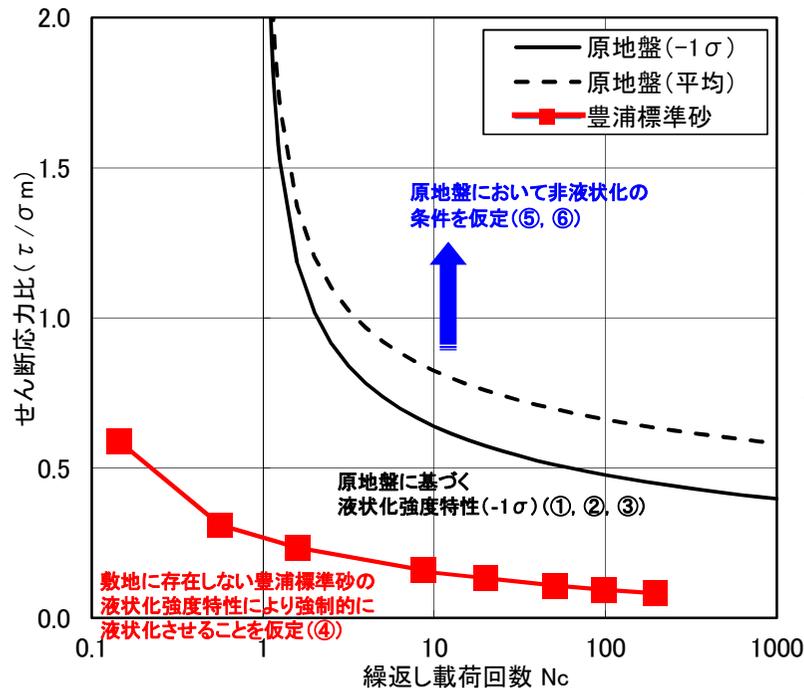
屋外重要土木構造物及び津波防護施設の耐震評価における検討ケース
地震対策-21

4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (2/11)

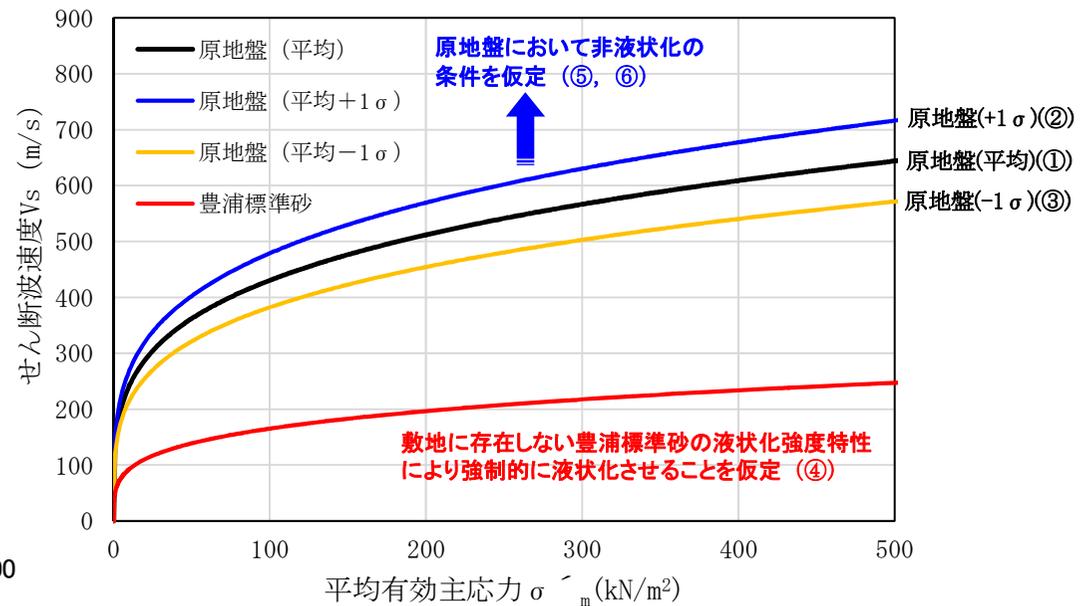


○ 東海第二発電所における主な耐震設計の特徴(土木構造物の耐震評価における地盤物性の扱い)(続き)

各解析ケースにおける地盤の液状化強度特性及びせん断波速度 V_s の概念を以下に示す。



各検討ケースにおける液状化強度の関係



各検討ケースにおけるせん断波速度 V_s の関係

4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (3/11)



○ 土木構造物の一覧表

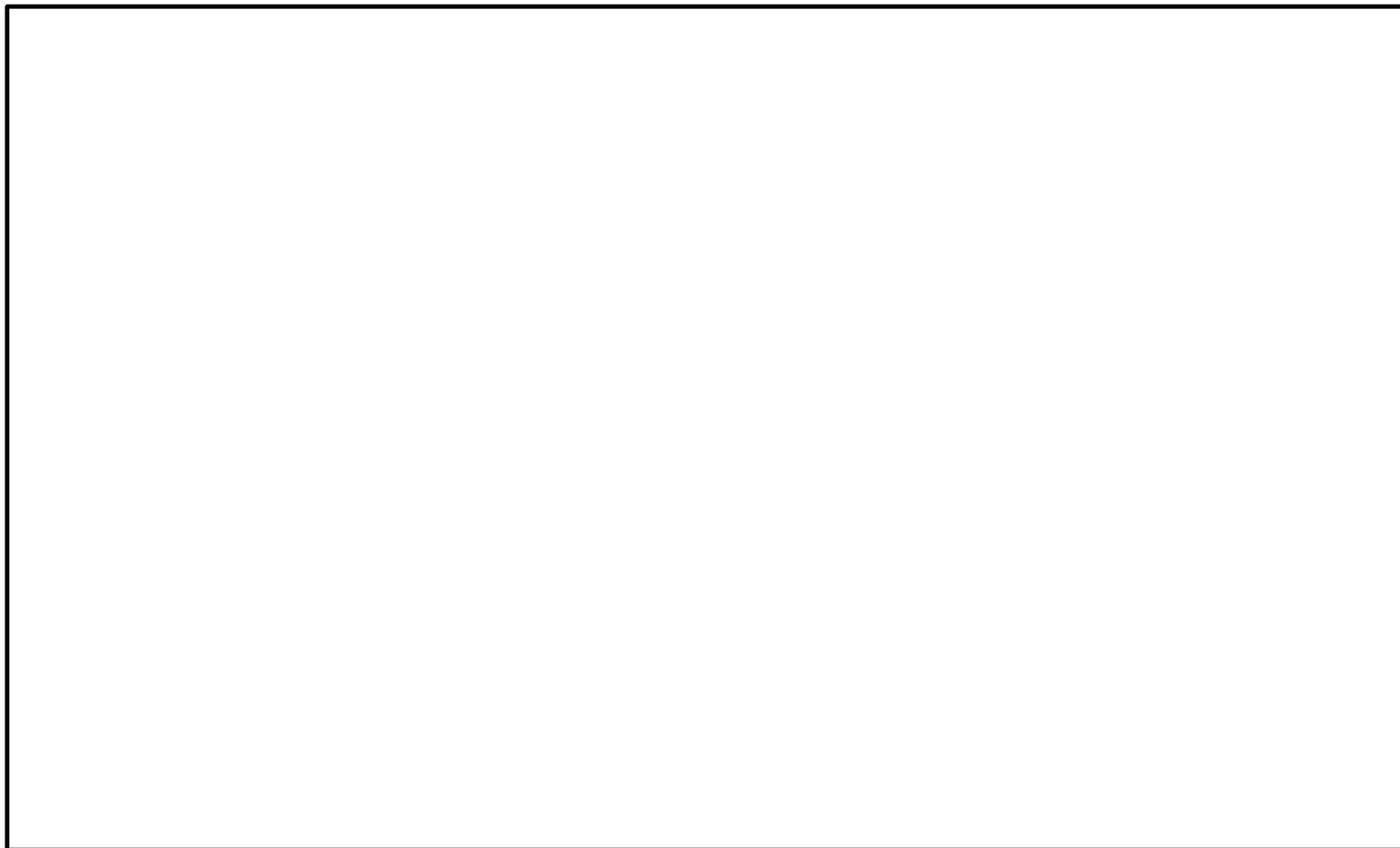
既設(耐震補強を今後実施)	
屋外重要 土木構造物	取水構造物 屋外二重管

新 設	
屋外重要 土木構造物	常設代替高圧電源装置置場
	常設代替高圧電源装置用カルバート (トンネル部) (立坑部) (カルバート部)
	代替淡水貯槽
	常設低圧代替注水系ポンプ室
	常設低圧代替注水系配管カルバート
	格納容器圧力逃がし装置用カルバート
	緊急用海水ポンプピット
	緊急用海水取水管
	SA用海水ピット
	海水引込み管
	SA用海水ピット取水塔
	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎
	可搬型設備用軽油タンク基礎
津波防護 施設	防潮堤 (鋼製防護壁) (鉄筋コンクリート防潮壁) (鉄筋コンクリート防潮壁(放水路エリア)) (鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁)
	貯留堰

4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (4/11)



○ 土木構造物の配置図



4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (5/11)

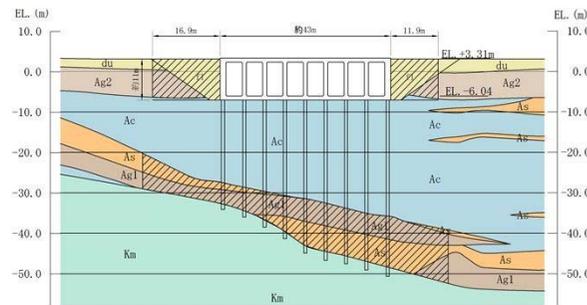


既設 土木構造物の耐震評価結果：取水構造物

○ 取水構造物に対する補強対策

【地盤改良体(薬液注入)】

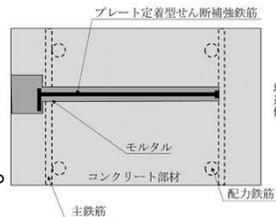
構造物の側方及び深部の地盤に対し、地盤改良(薬液注入)を実施することで、構造物及び鋼管杭に作用する地震時土圧を低減する。



地盤改良範囲(斜線部)

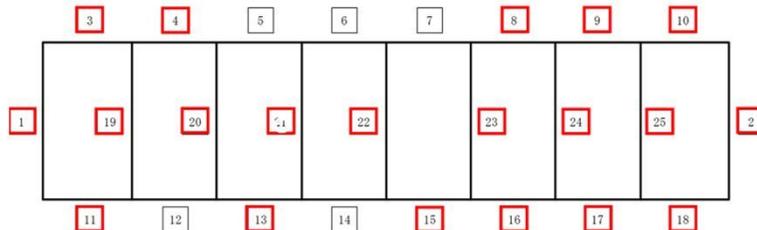
【後施工せん断補強筋(PHb工法)】

取水構造物の鉄筋コンクリート部材に対して、耐震性向上を目的として後施工せん断補強筋による耐震補強を行う。



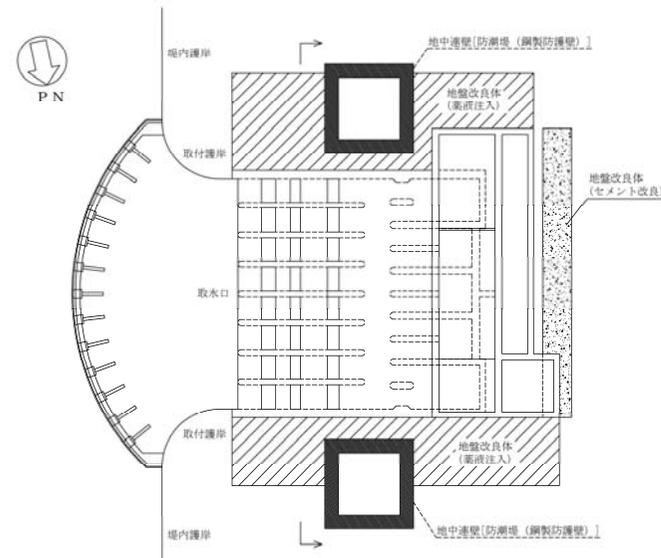
PHb工法の概要

□: 後施工せん断補強筋適用対象部材 (D22, SD345, 300mmピッチ)



後施工せん断補強筋の適用部材

○ 取水構造物の平面図



○ 左記補強結果を踏まえた評価結果

照査値は1を下回り、許容値を満足することを確認した。

鉄筋コンクリート部材における最大照査値(せん断)

評価位置	解析ケース	地震動	断面形状(mm)			鉄筋仕様 PHbせん断補強筋	照査用せん断力 Vd (kN)	せん断耐力 Vyd (kN)	照査値 $\gamma_i \cdot Vd/Vyd$
			部材幅	部材高	有効高				
			b (mm)	h (mm)	d (mm)				
中底版	④	S _s -D1	1000	1000	925	—	293	422	0.695

鋼管杭における最大照査値(せん断)

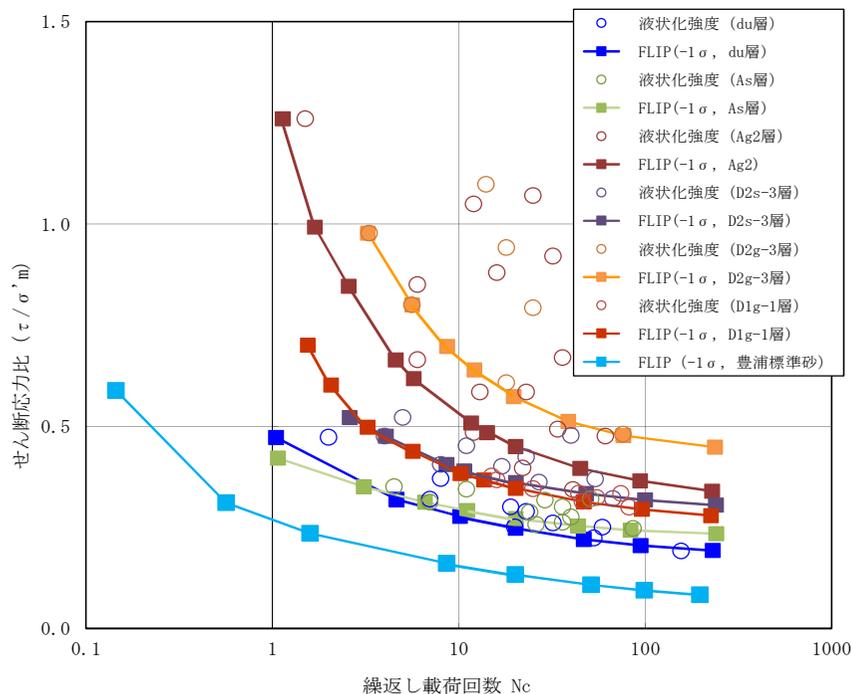
評価位置	解析ケース	地震動	照査用せん断力	終局せん断力	照査値 $\gamma_i \cdot Qd/Qu$
			Qd (kN)	Qu (kN)	
杭⑪	④	S _s -D1	1965	2904	0.677

4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (6/11)



東海第二発電所の原地盤の状態と保守的な解析条件について

- ① 原地盤の液状化強度試験データに基づき、液状化強度特性を適切に設定(平均値より標準偏差 -1σ 低減)した。
- ② 上記の液状化強度特性により液状化の影響を考慮した解析を実施することで、重要施設の周辺地盤に対し基準地震動 S_s を入力した場合の地震時応答(液状化の状況)を確認した。



【過剰間隙水圧比を指標とした液状化の評価】
 規格・基準における記載事例等に基づき、過剰間隙水圧比が95%に達した状態を液状化と判定する。

base: TK2-SCR_2D-DYNA_Ss-D1L++
 過剰間隙水圧比
 絶対値最大



液状化強度試験に基づく原地盤の液状化強度特性

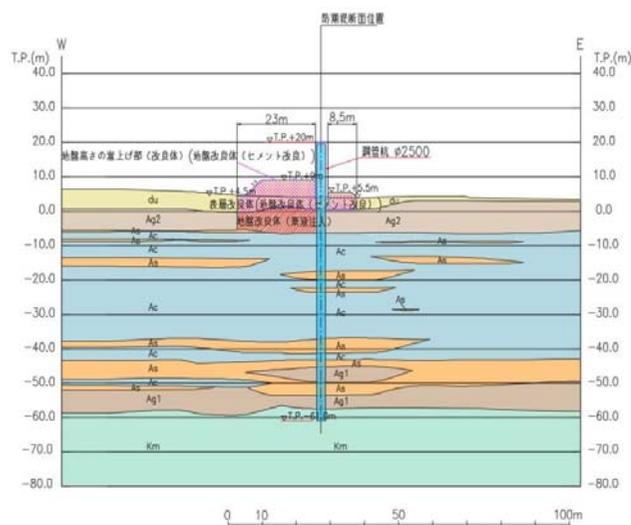
取水構造物周辺地盤の過剰間隙水圧比分布(S_s-D1)

⇒ 解析の結果、地盤の過剰間隙水圧比が95%を下回ることから、液状化の発生は認められない。

4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (7/11)

新設 津波防護施設の耐震評価結果：鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁

- 構造部材の健全性評価、構造物の変形性評価を実施することにより、構造強度を有すること及び止水性を損なわないことを確認する。
- 構造部材の健全性評価については、構造部材の発生応力が許容限界以下であることを確認する。
- 鋼管杭のせん断、曲げの照査値(応力度評価値/短期許容応力度)は1を下回り、**防潮壁が構造強度を有すること及び止水性を損なわないことを確認した。**



地震応答解析対象断面図

鋼管杭のせん断力照査における最大照査値

鋼管杭仕様			発生断面力 せん断力 (kN)	応力度 τ_s (N/mm ²)	短期許容 応力度 τ_{sa} (N/mm ²)	照査値 τ_s / τ_{sa}	解析ケース
杭径 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (m ²)					
2500	35	0.263	9265	71	217.5	0.33	④S _s -D1

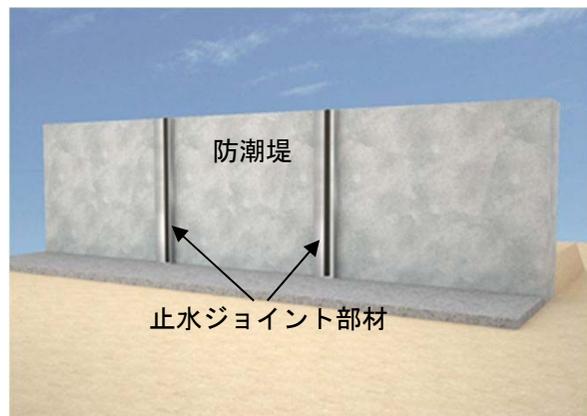
鋼管杭の曲げ軸力照査における最大照査値

鋼管杭仕様				発生断面力		応力度 σ_s (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ_{sa1} (N/mm ²)	照査値 σ_s / σ_{sa1}	解析ケース
杭径 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (m ²)	断面係数 (m ³)	曲げ モーメント (kN・m)	軸力 (kN)				
2500	35	0.263	0.15995	34955	9015	253	382.5	0.67	②S _s -D1

4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (8/11)

新設 津波防護施設の耐震評価結果：鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁

- 構造物の変形性評価については、止水ジョイント部材の変形量を算定し、有意な漏えいが生じないことを確認した許容限界以下であることを確認する。
- 止水ジョイントの最大合成変位量は許容限界を下回り、**止水ジョイント部から有意な漏えいを生じないことを確認した。**

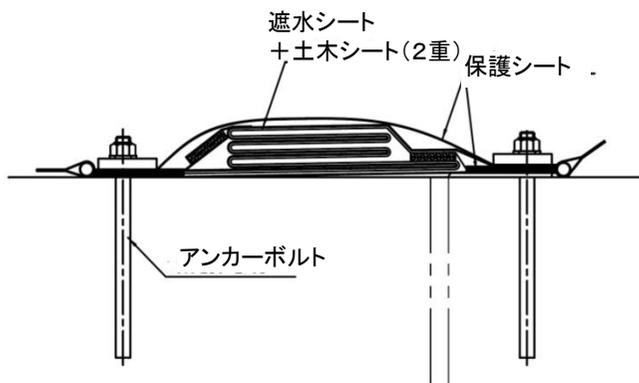


止水ジョイント部材設置位置図

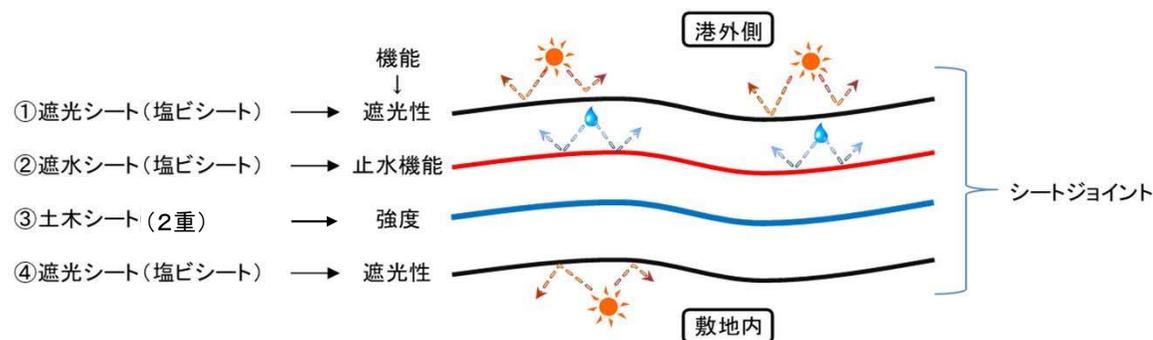
止水ジョイント部の地震時相対変位量

	δ_x (m)	δ_y (m)	δ_z (m)	最大合成変位量 (m) $\sqrt{(\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2)}$	許容限界(m)
一般部 地震時相対変位量	0.812	0.824	0.100	1.162	1.5

- シートジョイントは、遮光シート、遮水シート、土木シートからなり、算定した止水ジョイント部の変形量以上の長さのシートを設置する(各シートを折りたたんで設置する)。
- 遮水シートの耐圧試験を実施し、敷地に遡上する津波の波圧に対しても問題ないことを確認した。
- 耐候性試験を実施し、紫外線に対しても15年以上の健全性を確認した。



シートジョイント設置図



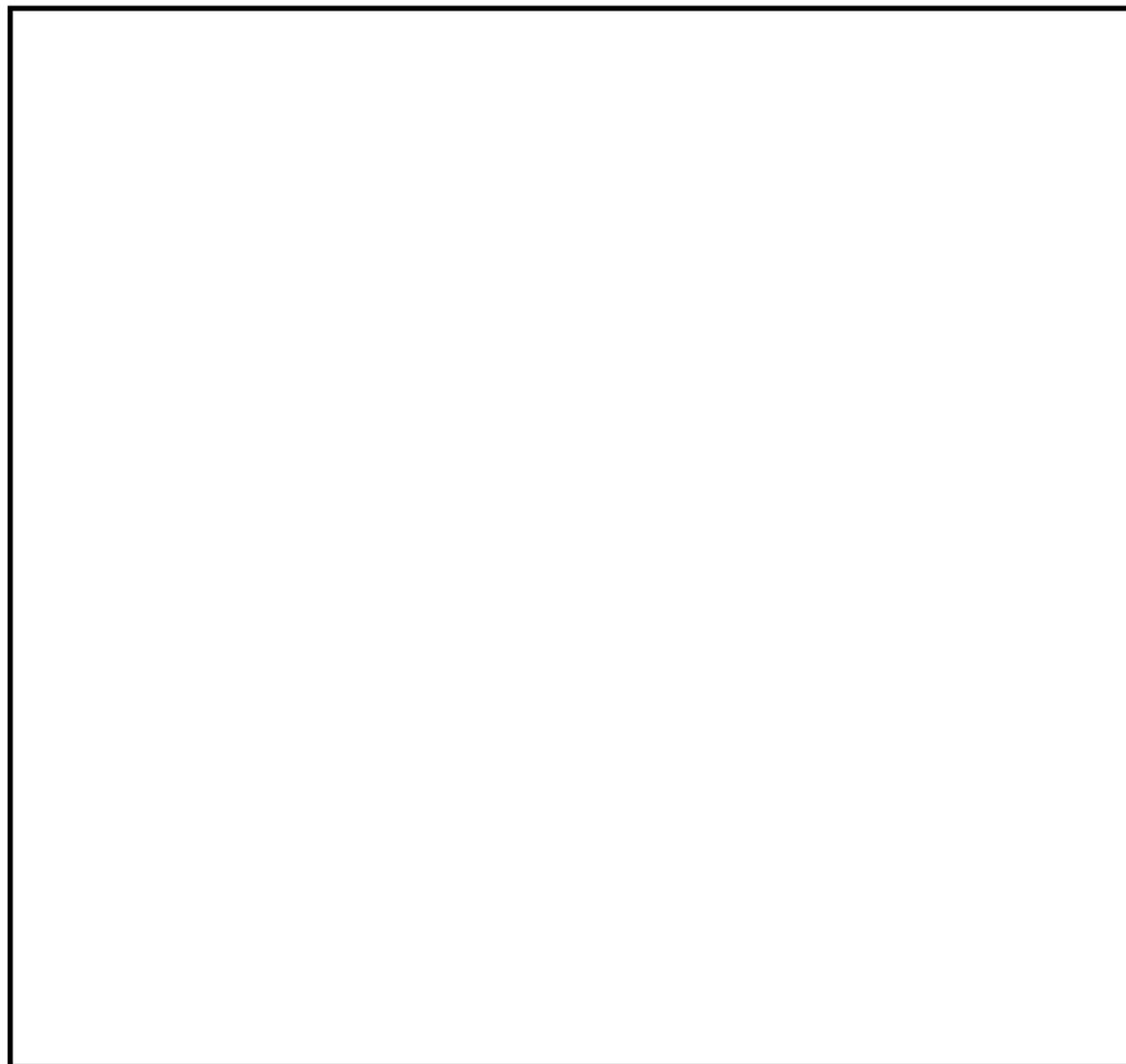
シートジョイント模式図

4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (9/11)



○ 可搬型重大事故等対処設備保管場所 及び 屋外アクセスルートの配置図

予備機置場	
可搬型代替注水大型ポンプ	: 1 台
可搬型代替注水中型ポンプ	: 1 台
可搬型代替低圧電源車	: 1 台
タンクローリ	: 1 台
ホイールローダ	: 1 台
西側保管場所	
可搬型代替注水大型ポンプ	: 1 台
可搬型代替注水中型ポンプ	: 2 台
可搬型代替低圧電源車	: 2 台
可搬型代替注水大型ポンプ (放水用)	: 1 台
タンクローリ	: 2 台
小型船舶	: 1 艇
ホイールローダ	: 2 台
窒素供給装置	: 2 台
南側保管場所	
可搬型代替注水大型ポンプ	: 1 台
可搬型代替注水中型ポンプ	: 2 台
可搬型代替低圧電源車	: 2 台
可搬型代替注水大型ポンプ (放水用)	: 1 台
タンクローリ	: 2 台
小型船舶	: 1 艇
ホイールローダ	: 2 台
窒素供給装置	: 2 台



4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (10/11)



○ 可搬型重大事故等対処設備保管場所及びアクセスルートに対する評価方法・結果

基準地震動Ssに対して地震時の被害要因及び懸念される被害事象を踏まえた影響評価を行い、可搬型重大事故等対処設備の保管及び通行に影響を与えないように、必要な箇所へ事前対策を実施する。

影響を与えるおそれのある被害要因	懸念される被害事象	評価方法及び評価結果 (可搬型重大事故等対処設備保管場所)	評価方法及び評価結果 (アクセスルート)
①周辺構造物倒壊 (建屋, 送電鉄塔等)	倒壊物による可搬型重大事故等対処設備の損壊, 通行不能	・保管場所周辺の構造物・タンクを対象とし, 基準地震動Ss作用時において, 保守的に倒壊するものと仮定し, 構造物の高さ相当を考慮した倒壊影響範囲を設定し影響評価を行った。 ・評価の結果, 保管場所が倒壊影響範囲に含まれていないことを確認した。	・保管場所と同様にアクセスルート周辺の構造物が基準地震動Ssにより損壊し, アクセスルート上にながれきが発生, 又は倒壊するものとしてアクセスルートへの影響評価を行った。 ・評価の結果, 構造物等の損壊によるがれきの影響は受けるものの, ホイールローダによる撤去又はがれき上へのホース, ケーブルの敷設によりアクセス性を確保できることを確認した。
②周辺タンク等の損壊	火災, 溢水による可搬型重大事故等対処設備の損壊, 通行不能		
③周辺斜面の崩壊	土砂流入による可搬型重大事故等対処設備の損壊, 通行不能	保管場所及びアクセスルート周辺における斜面の形状及び高さ等を考慮して評価対象斜面を抽出し, すべり安定性評価に基づき, 周辺斜面の崩壊により土砂流入の影響を受けないこと, また, 保管場所及びアクセスルートの敷地下斜面の安定性が確保されていることを確認した。	
④敷地下斜面のすべり	敷地下斜面のすべりによる可搬型重大事故等対処設備の損壊, 通行不能		
⑤液状化及び揺すり込みによる不等沈下・傾斜, 液状化に伴う浮き上がり	不等沈下・傾斜, 浮き上がりによる可搬型重大事故等対処設備の損壊, 通行不能	・地下水位以深の飽和砂質地盤が液状化すると想定し, 液状化及び揺すり込みにより算定した沈下量をもとに, 保管場所に発生する地表面の段差量及び傾斜量を算定する。また, 液状化による浮き上がり量を算定した。 ・算定された段差量が15 cm以上及び勾配が12 %以上 (緊急車両が徐行により走行可能及び登坂可能な値)となる箇所に, 対策として 路盤補強等の事前対策を実施することとし, 可搬型重大事故等対処設備の通行性に影響がないことを確認した。	
⑥地盤支持力の不足	可搬型重大事故等対処設備の転倒	基準地震動Ssによる保管場所の地震時接地圧を評価し, 地盤の最大地盤反力度を下回ることを確認した。	—
⑦地中埋設構造物の損壊	陥没による可搬型重大事故等対処設備の損壊, 通行不能	保管場所下部に地中埋設構造物がない事を確認した。 (基準地震動Ssにて耐震安全性を確認している設備を除く)	・アクセスルート下の地中埋設構造物のうち耐震性が十分ではないコンクリート構造物について保守的に損壊を想定し, その内空部の高さを損壊により道路に発生する段差量として算定した。 ・算定された段差量に基づき, ⑤と同様の対策を実施することとし, 可搬型重大事故等対処設備の通行に影響を与えないことを確認した。

4. 主な耐震評価結果 ③ 土木構造物 (11/11)



斜面の安定性評価結果

- 斜面の安定性評価は、急峻な斜面である使用済燃料乾式貯蔵建屋(以下「D/C」という。)の西側斜面を代表として実施し、下記のとおり、**基準地震動Ssに対して安定性に裕度があることを確認した。**
- 保管場所及びアクセスルート周辺の斜面について、D/C西側斜面と形状及び高さ等を比較することにより安定性を確認した。
- アクセスルート周辺の一部の斜面はD/C西側斜面より急斜面であるため**地震時に崩壊を想定し、ホイールローダによる復旧が可能なことを確認**すると共に、復旧に時間を要する箇所については地震時に使用しないこととした。



【D/C西側斜面のすべり安定性評価結果】

すべり面形状	安定性評価結果 (すべり安全率)
	5.1

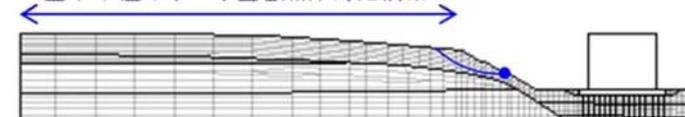
検索条件①(斜面法尻を起点としたすべり面)

法尻を起点にモデル範囲にて様々な曲率半径のすべり面を無作為に検索



検索条件②(斜面小段を起点としたすべり面)

小段を起点にモデル範囲にて様々な曲率半径のすべり面を無作為に検索



入力地震動毎に、すべり安全率が最小となるすべり面を抽出する。

すべり面の検索方針

最新の科学的・技術的知見を踏まえ、各種の不確かさを十分に考慮し基準地震動 S_s *¹ (8波)を策定した。

この基準地震動 S_s (8波)を耐震条件とした設計においても、福島第一原子力発電所事故で得られた教訓を踏まえて新たに設置する施設及び従来の発電所設備について、耐震健全性を確保した。

(*1 第5回 茨城県原子力安全対策委員会 東海第二発電所安全性検討ワーキングチームにてご説明)

- ◆ 耐震Sクラス施設について、基準地震動 S_s に対して健全性を有することを確認
- ◆ 耐震Sクラス施設が設置された敷地に、津波が遡上することを防止するために、新たに設置する防潮堤等について、基準地震動 S_s に対する健全性を有することを確認
- ◆ 重大事故等を想定し、新たに設置する重大事故等に対処するための設備について、基準地震動 S_s に対する健全性を有することを確認

これらにより、従来の発電所設備に加えて、福島第一原子力発電所事故で得られた教訓を踏まえ、新たに設置する施設についても、それぞれの基準地震動 S_s (8波)による地震力を用いた耐震健全性を確保した。