東海第二発電所　審査資料	
資 料 番 号	PS－5－8－2　改 1
提出年月日	平成 29 年 9 月 8 日

東海第二発電所

防潮堤の耐力について

平成 29 年 9 月

日本原子力発電株式会社

基準津波を超え敷地に遡上する津波に対する防潮堤耐力の考え方について

１．はじめに

東海第二発電所の津波ＰＲＡに基づく事故シーケンス選定において，基準津波を超え敷地に遡上する津波（以下「敷地に遡上する津波」という。）を起因した事故シーケンスグループ「津波浸水による注水機能喪失」を抽出し，津波防護対策を実施することとしている。

この際，敷地に遡上する津波高さは，防潮堤の耐力であるT.P.＋24mに基づき設定している。このため，防潮堤耐力T.P.＋24mの設定の考え方について整理した。

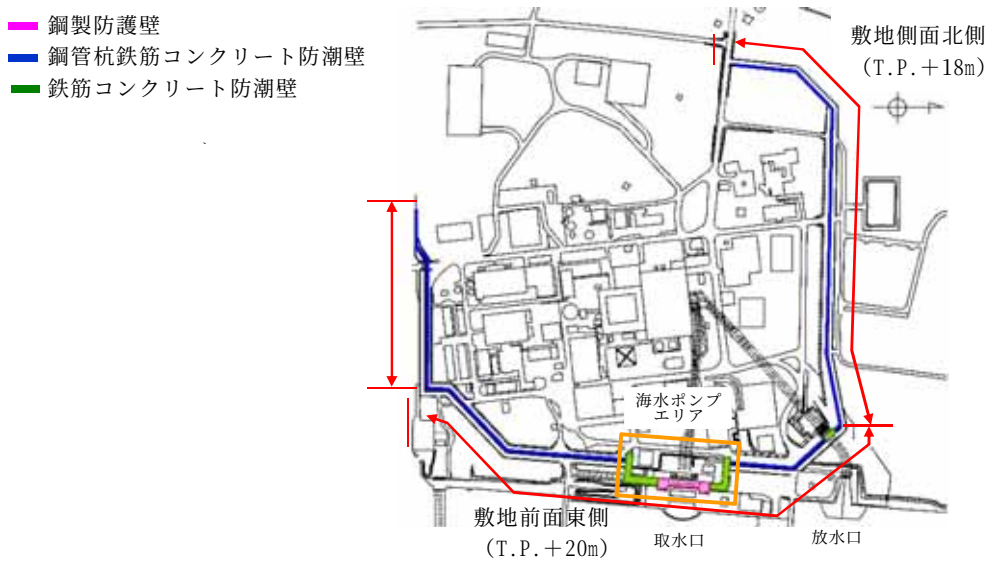
２．基準津波に対する防潮堤の設計概要

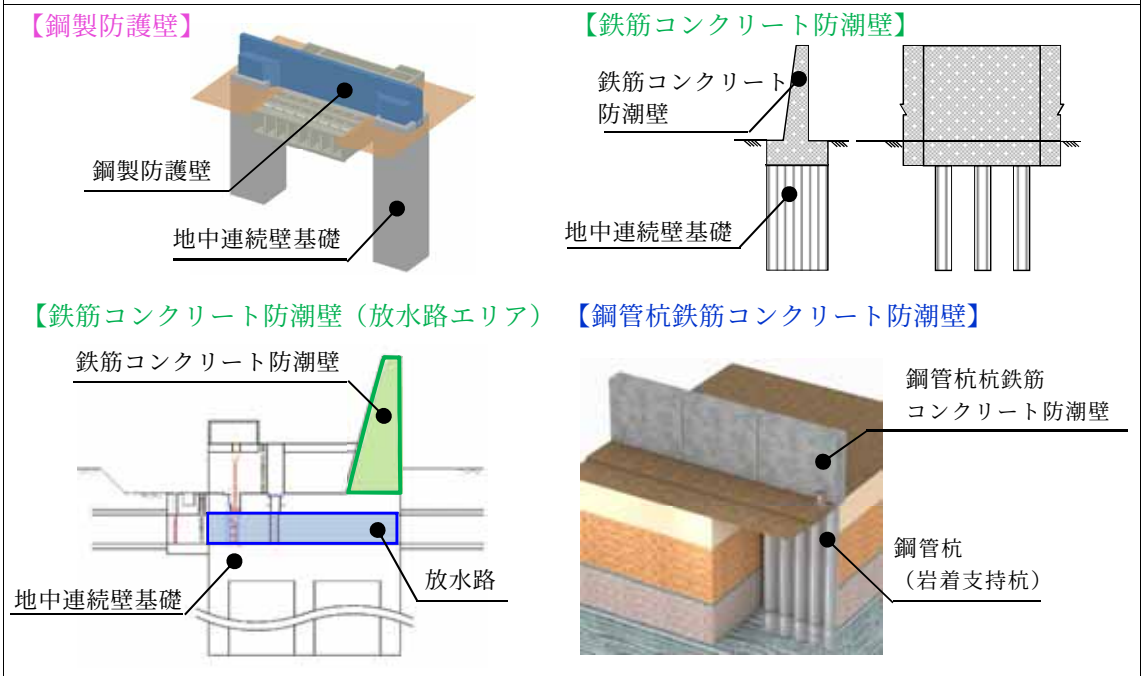
防潮堤の設置計画を第１表に示す。防潮堤は，基準津波の遡上波の地上部からの敷地への到達，流入を防止するため，敷地を取り囲むように設置することとしている。防潮堤の構造形式は，鋼製防護壁，鉄筋コンクリート防潮壁及び鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁からなる。また，敷地南側の敷地境界及び海水ポンプ室に設置する鉄筋コンクリート防潮壁には，それぞれのアクセスのために防潮扉を設置することとしている。

基準津波の遡上波の防潮堤前面における最高水位は，敷地前面東側でT.P.＋17.1m，敷地側面北側でT.P.＋15.2m，敷地側面南側でT.P.＋15.4mである。これに対し，人工構造物である防波堤の有無による津波高さへの影響，潮位のばらつき，高潮の重畳等を考慮し，敷地前面東側の防潮堤高さはT.P.＋20m，敷地側面北側及び南側の防潮堤はT.P.＋18mとしている。

第１表　防潮堤の設置計画

敷地区分	エリア区分	構造形式		天端高さ（T.P.＋m）
		上部工	下部工	
敷地前面東側	a.海水ポンプエリア	鋼製防護壁	地中連続壁基礎	20.0
		鉄筋コンクリート防潮壁		
	b.敷地周辺エリア	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	鋼管杭	
敷地側面北側				18.0
敷地側面南側				





防潮堤の設計に当たっては，設置許可基準規則第５条（津波による損傷の防止）及び別記３並びに基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイドの要求に従い，第２表のとおり荷重の組合せ，荷重の設定，許容限界を定めている。特に防潮堤に期待される津波防護機能を保持するため，機能保持限界として，地震後，津波後の再使用性及び津波の繰返し作用を考慮し構成する部材が弾性域に収まる設計としている。具体的には短期許容応力度以下とすることにより，津波防護機能を保持する設計としている。

第２表　防潮堤の設計方針

項目	設計方針
荷重の組合せ	常時荷重，地震荷重，津波荷重及び余震荷重を適切に組み合わせた条件とする。 ・常時荷重＋地震荷重 ・常時荷重＋津波荷重 ・常時荷重＋津波荷重＋余震荷重 ・常時荷重＋津波荷重＋漂流物衝突荷重 また，設計に当たっては，風荷重及びその他自然現象に伴う荷重については，施設の設置状況，構造（形状）等の条件を含めて適切に組合せを考慮する。
荷重	設計に考慮する荷重は以下のとおり。 ・常時荷重：自重等を考慮 ・地震荷重：基準地震動S_Sを考慮 ・津波荷重：潮位のばらつき等を考慮した防潮堤前面における入力津波高さに十分な余裕をもった津波荷重水位を考慮 ・余震荷重：余震による地震動を検討し，余震荷重を設定（弾性設計用地震動S_d－Ｄ１を設定） ・漂流物荷重：敷地周辺の調査結果を踏まえ，漂流物となる可能性のある施設・設備として抽出された最大荷重 44ton の浚渫用作業台船の衝突荷重を設定
許容限界	津波防護機能に対する機能保持限界として，地震後，津波後の再使用性及び津波の繰返し作用を想定し，構成する部材が弾性域（短期許容応力度以下）に収まる設計とする。

３．津波ＰＲＡの概要

津波ＰＲＡにおいては，防潮堤高さ（T.P.＋20m）を超える津波高さを評価対象とした上で，第３表に示す敷地に遡上する津波区分（津波高さ）毎の津波を想定し，運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故に対して原子炉の安全性を損なうことがないよう設計することを求められる構築物，系統及び機器が，安全機能を喪失した場合に炉心損傷に至る可能性について確率論的に評価するとともに，評価結果に応じて，炉心損傷を防止するために必要な対策を検討している。

評価の結果，津波特有の事象である事故シーケンスグループ「津波による注水機能喪失」による炉心損傷頻度は 4.0×10^{-6}／炉年となっている。この炉心損傷頻度は，内部事象ＰＲＡ及び地震ＰＲＡの炉心損傷頻度を含めた全炉心損傷頻度 7.5×10^{-5}／炉年に対して 5.3%と有意な値であること，敷地内への津波浸水によりプラントへの影響が内部事象に係る事故シーケンスとは異なり，炉心損傷防止のために必要な対応が異なることから，設置許可基準規則 37 条に基づき，必ず想定する事故シーケンスグループに追加する事故シーケンスグループとして抽出している。また，想定する津波高さがT.P.＋24m と最も高い「原子炉建屋内浸水により複数の緩和機能喪失」を重要事故シーケンスとして選定し，有効性評価において炉心損傷防止対策の有効性を確認している。

なお，抽出された事故シーケンスのうち，津波区分３に分類される「防潮堤損傷」の事故シーケンスの炉心損傷頻度は 3.3×10^{-7}／炉年であり，内部事象ＰＲＡ及び地震ＰＲＡの評価結果を含めた全炉心損傷頻度（7.5×10^{-5}／炉年）に対する寄与割合が 0.4%と小さいこと及び防潮堤の損傷による津波の影響の程度を特定することが困難であることから，新たな事故シーケンスグループとしての追加は不要と判断し，大規模損壊対策による対応に含ま

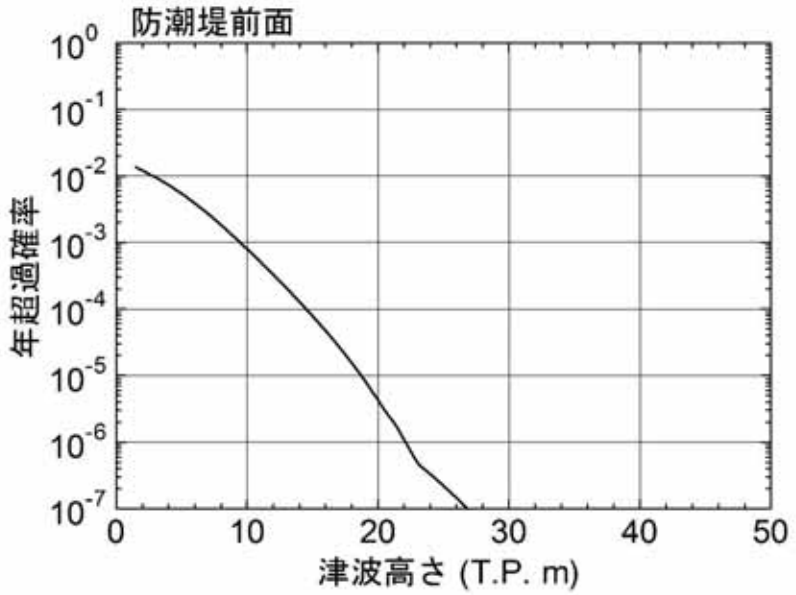
れるものとして整理している。

第３表　津波ＰＲＡにおける評価結果

津波区分（津波高さ）	事故シーケンス	ＣＤＦ（／炉年）	寄与割合※1	事故シーケンスの取扱い	
津波区分１（T.P.＋20m～T.P.＋22m）	最終ヒートシンク喪失（ＲＣＩＣ成功）	3.2E-06	4.2%	事故シーケンスグループ「津波浸水による注水機能喪失」	「全交流動力電源喪失（長期ＴＢ）」との従属性を考慮※2
	最終ヒートシンク喪失＋高圧注水機能喪失	1.1E-08	<0.1%		「全交流動力電源喪失（ＴＢＤ，ＴＢＵ）」との従属性を考慮※2
	最終ヒートシンク喪失＋逃がし安全弁再閉鎖失敗	1.7E-08	<0.1%		「全交流動力電源喪失（ＴＢＰ）」との従属性を考慮※2
津波区分２（T.P.＋22m～T.P.＋24m）	原子炉建屋内浸水による複数の緩和機能喪失	7.6E-07	1.0%		重要事故シーケンス「全交流動力電源喪失（長期ＴＢ）」との従属性を考慮※2
津波区分３（T.P.＋24m～）	防潮堤損傷	3.3E-07	0.4%	大規模損壊対策による対応に含まれる	
合計		4.3E-06	5.7%		

※1：津波ＰＲＡの炉心損傷頻度（ＣＤＦ）に加えて，内部事象ＰＲＡのＣＤＦ，地震ＰＲＡのＣＤＦを含めた全ＣＤＦ（7.5E-05／炉年）に対する寄与割合

※2：津波ＰＲＡより抽出される事故シーケンスに対して，「全交流動力電源喪失」との従属性を考慮し，外部電源喪失の重畳を想定



津波ハザード曲線（防潮堤前面）

４．防潮堤耐力の設定の考え方

防潮堤は，設計基準事象である基準津波に対して津波防護機能を保持するため，２．項に記載したとおり，想定する荷重に対して弾性域に収まることを基本とし，実設計においては，短期許容応力度に対して一定の余裕を持った設計としている。

一方，津波ＰＲＡにおいては，３．項に記載したとおり，防潮堤高さ（T.P.＋20m）を超える津波高さを評価対象とした上で，津波による事故シーケンスを抽出するとともに炉心損傷防止対策を検討している。また，有効性評価においては，重要事故シーケンスとして選定した「原子炉建屋内浸水により複数の緩和機能喪失」に対する対策の有効性について確認している。

このため，防潮堤の有する実力耐力を前提に，敷地に遡上する津波による現実的な対策を検討し，その有効性を確認する必要があると考えるが，この際，津波特有の考慮事項として，繰返し襲来する津波に対して防潮堤はその機能を保持し，敷地への津波の流入を防止する必要があることから，想定するT.P.＋24mの第１波の津波に対して，防潮堤は概ね弾性範囲（曲げ応力に対しては降伏応力度以下，せん断応力に対してはせん断強度以下）を許容限界値として設計を行うこととした。

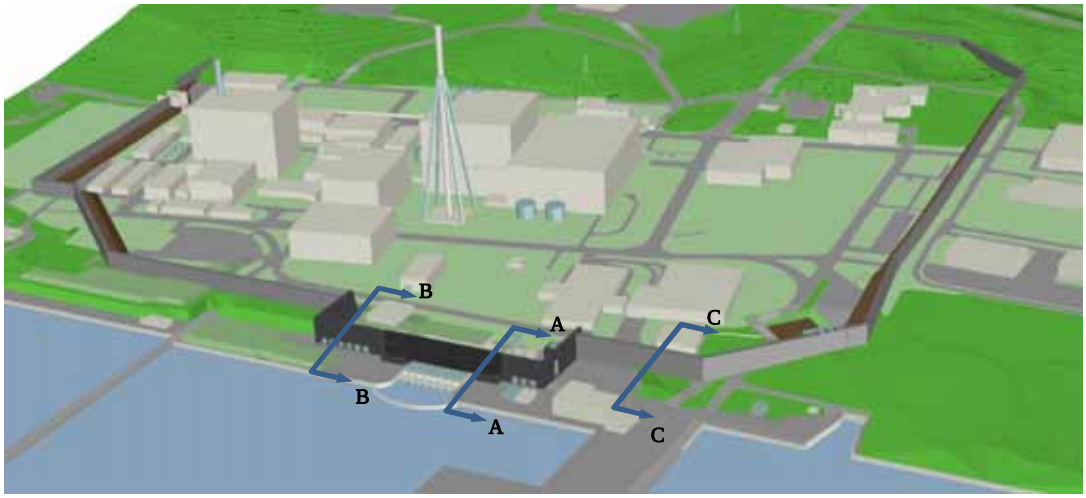
５．防潮堤の耐力評価

(１)検討条件

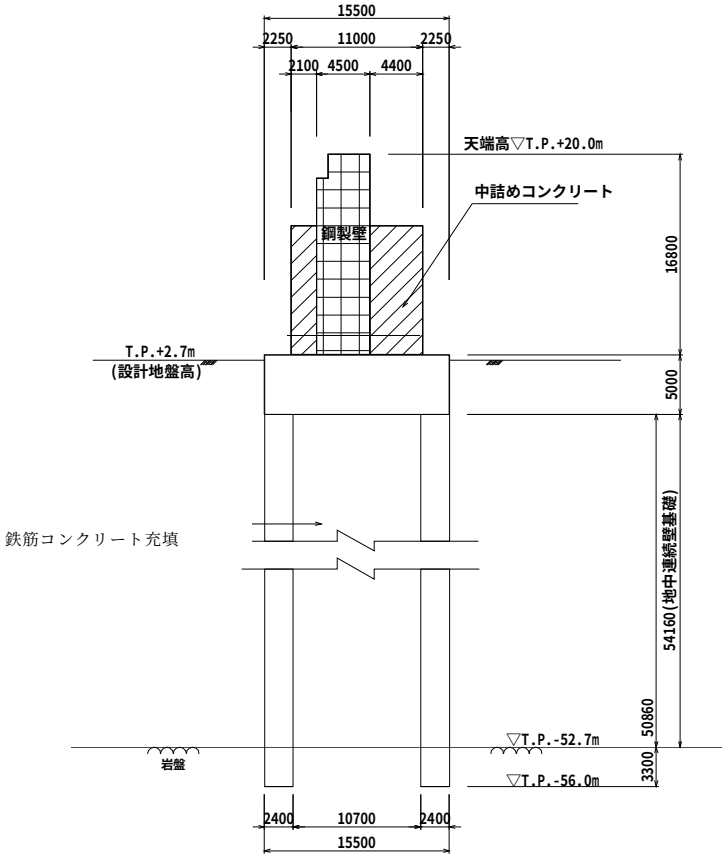
防潮堤の耐力評価に当たっては，基準津波による津波シミュレーションにおいて，津波高さが最も高くかつ敷地高さの低い，防潮堤への津波波力が最も大きくなる海水ポンプエリア周辺を選定した上で，防潮堤の構造形式別に評価した。

鋼製防護壁は，取水口を跨いで北側と南側に地中連続壁基礎を設置するため両断面を対象に検討を行った。鉄筋コンクリート防潮壁は，取水口の北側と南側に設置されるが，防潮堤の天端高さ及び地表の設置標高は同様であるため，基礎全体の根入れ深さに比較して岩盤への根入れ長が大きく，水平荷重に対して曲げモーメントが大きくなる取水口南側を検討断面とした。また，鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は，設置標高が低く壁高が高い（津波荷重が大きくなる）断面を検討断面とした。

防潮堤の耐力評価は，基準津波及び T.P.＋24m 津波について実施した。評価を行った海水ポンプエリア周辺の防潮堤配置図及び断面図を第 1 図～第 4 図に示す。

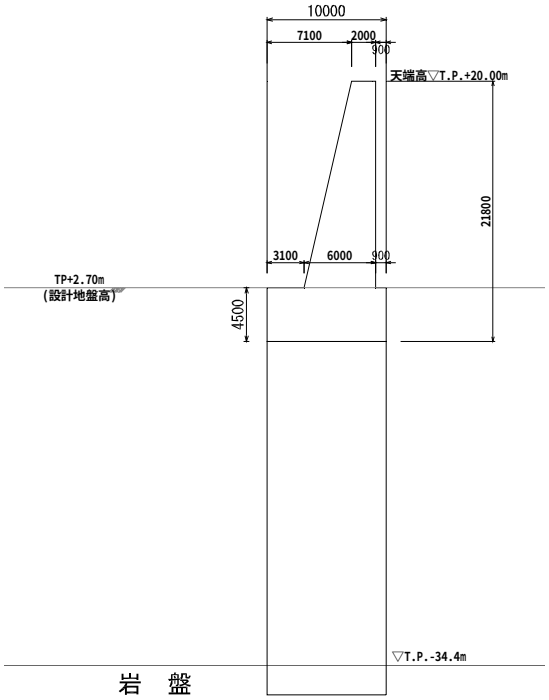


第１図　海水ポンプエリア周辺防潮堤配置図



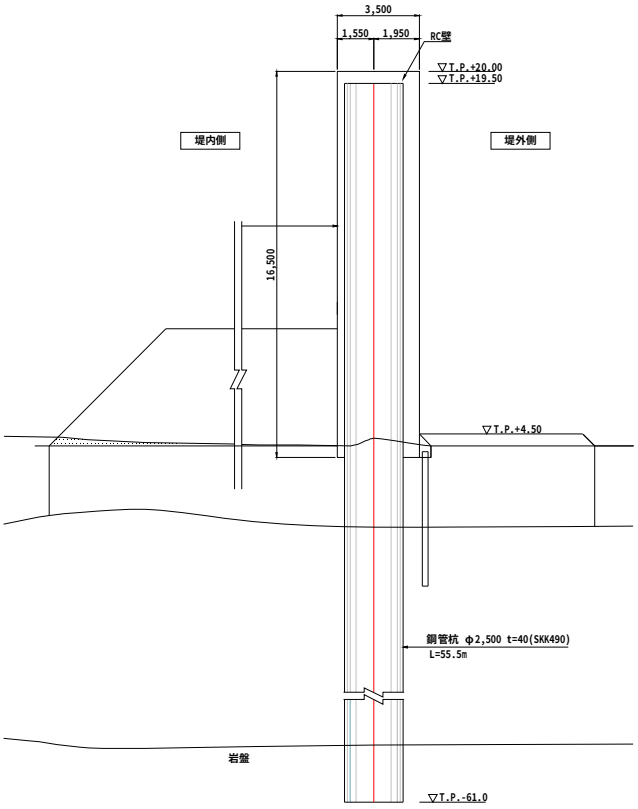
注）今後の詳細設計により，仕様について変更の可能性はある。

第 2 図　鋼製防護壁断面図（Ａ－Ａ断面）



注）今後の詳細設計により，仕様について変更の可能性はある。

第３図　鉄筋コンクリート防潮壁断面図（Ｂ－Ｂ断面）



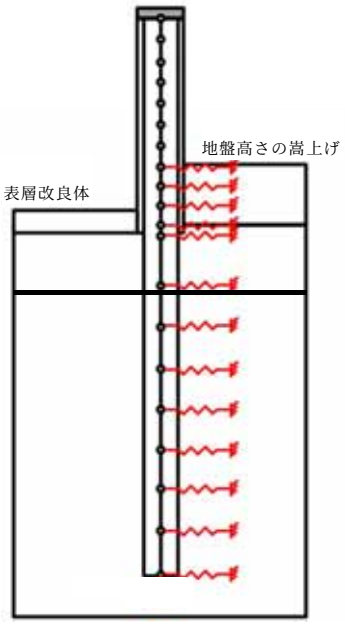
注）今後の詳細設計により，仕様について変更の可能性はある。

第４図　鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁断面図（Ｃ－Ｃ断面）

（２）検討内容

１）解析モデル

鋼管杭を二次元梁要素とし，地盤バネを接続した解析モデルで静的フレーム解析を行う。死荷重及び積雪の長期荷重，津波による波力と漂流物衝突荷重，余震荷重等を外力として入力する。二次元静的フレーム解析に用いる地盤バネは，道路橋示方書Ⅳ下部構造編に従い水平方向地盤反力係数を求め，上限値を設定するバイリニア型とする。第５図に解析モデル概念図を示す。



第５図　解析モデル概念図

2）検討ケース

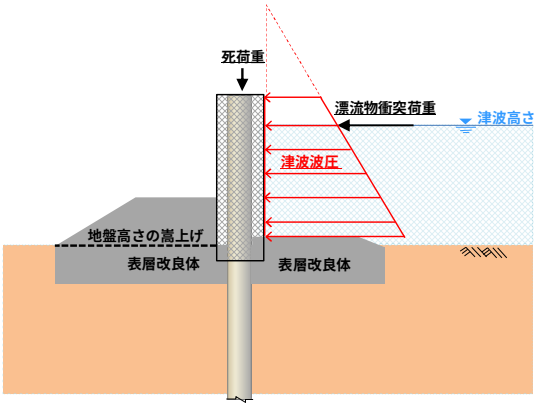
検討ケースは，荷重の組合せを考慮した以下のケースを実施した。

①常時荷重＋基準津波荷重＋漂流物衝突荷重

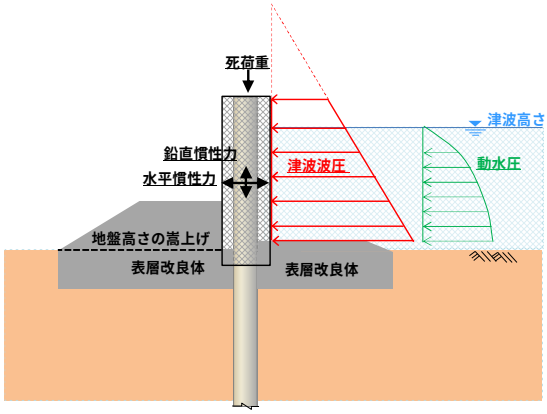
②常時荷重＋基準津波荷重＋余震荷重

③常時荷重＋T.P.+24m 津波荷重＋漂流物衝突荷重

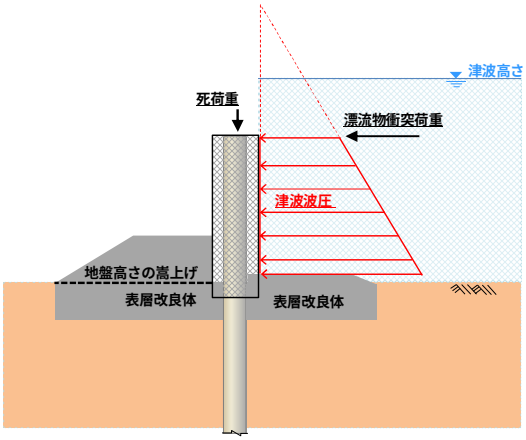
④常時荷重＋T.P.+24m 津波荷重＋余震荷重



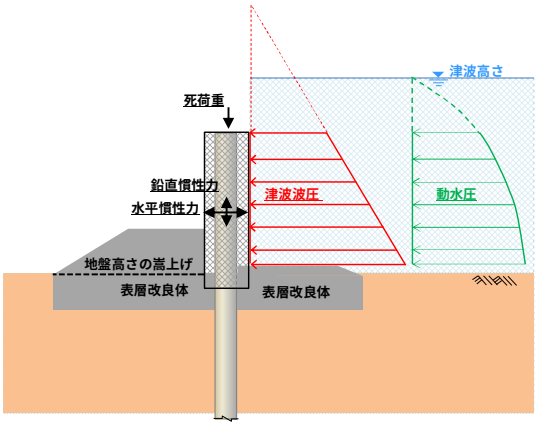
①基準津波＋漂流物衝突荷重



②基準津波＋余震荷重



③T.P.+24m 津波＋漂流物衝突荷重



④T.P.+24m 津波＋余震荷重

図 6 図　荷重作用概要

3）検討用荷重

検討に用いた防潮堤に作用する主な荷重について，第 4 表に示す。

第 4 表　検討用荷重

荷重	内容
常時荷重	構造物の自重及び積雪荷重（堆積量 30cm，単位荷重 20N/cm/m^2）
津波荷重	遡上高さ T.P.+24m と防潮堤前面の地盤高さの差の 1/2 を津波浸水深とし，朝倉式より津波波力を算定し，防潮堤天端高さ T.P.+20m までに作用する波力を作用させる。 （津波防護施設の津波荷重の算定式は，朝倉ら（2000）の研究を元にした「港湾の津波避難施設の設計ガイドライン（国土交通省港湾局，平成 25 年 10 月）」や「防波堤の耐津波設計ガイドライン（平成 27 年 12 月一部改訂）等を参考に設定した。）
漂流物衝突荷重	浚渫用作業台船重量 50tf，津波流速 15m/s※を用いて道路橋示方書式により衝突荷重を算定し，防潮堤天端に集中荷重として作用させる。 （※T.P.+24m 津波時の流速は，取水口前面における基準津波の流速との比率 1.51 を用いて設定（基準津波時の最大流速 7.1m/s×1.51＝10.7m/s を保守的に 15m/s とした）
余震荷重	弾性設計用地震動Ｓｄ－D1 波を用いて，一次元波動論に基づき地表面加速度を算定し，構造物の慣性力として作用させる。
動水圧荷重	遡上高さ T.P.+24m を水面として動水圧を Westergaard 式にて算定し，防潮堤天端から荷重を作用させる。

４）許容限界値

鉄筋コンクリートや鋼材の照査に用いる許容限界値は，概ね弾性状態とし，曲げは降伏応力度，せん断はせん断強度とする。また，照査値は耐力作用比（発生応力／許容値）で表現し，1.0 以下であれば弾性状態と判断する。

５）検討結果（鋼製防護壁）

現時点における鋼製防護壁，鉄筋コンクリート防潮壁及び鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の耐力の評価状況を第 5 表～第 7 表に示す。

第 5 表　鋼製防護壁の評価結果（照査値：耐力作用比）

	（上部工）鋼製壁		（下部工）地中連続壁	
	曲げ	せん断	曲げ	せん断
①	0.50	0.52	0.23	0.07
②	評価中	評価中	評価中	評価中
③	0.88	0.83	0.40	0.18
④	評価中	評価中	評価中	評価中

注）今後の詳細設計により，照査値については変更となる可能性がある。

第 6 表　鉄筋コンクリート防潮壁の評価結果（照査値：耐力作用比）

	（上部工）鉄筋コンクリート壁			（下部工）地中連続壁	
	曲げ		せん断	曲げ	せん断
	ｺﾝｸﾘｰﾄ	鉄筋			
①	0.30	0.40	0.40	0.18	0.02
②	評価中	評価中	評価中	評価中	評価中
③	0.40	0.71	0.70	0.32	0.15
④	評価中	評価中	評価中	評価中	評価中

注）今後の詳細設計により，照査値については変更となる可能性がある。

第７表　鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の評価結果（照査値：耐力作用比）

	（上部工）鉄筋コンクリート壁			（下部工）地中連続壁	
	曲げ		せん断	曲げ	せん断
	ｺﾝｸﾘｰﾄ	鉄筋			
①	0.37	0.57	0.37	0.47	0.12
②	評価中	評価中	評価中	評価中	評価中
③	0.86	0.91	0.62	0.95	0.18
④	評価中	評価中	評価中	評価中	評価中

注）今後の詳細設計により，照査値については変更となる可能性がある。

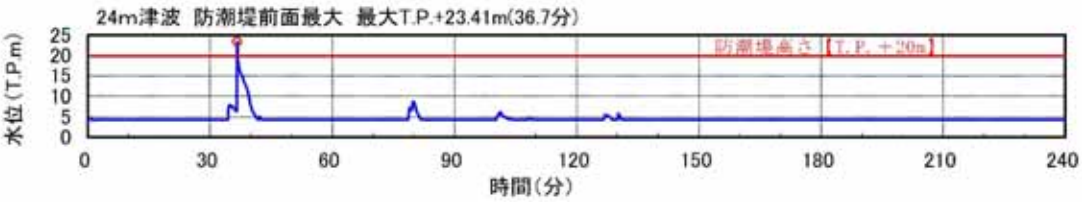
(３)繰返し襲来する津波に対する防潮堤の機能保持

①　T.P.＋24m 津波の時刻歴波形

５．(２)項に示したとおり，敷地に遡上する津波（第１波として想定するT.P.＋24m 津波）に対して，防潮堤は損傷することはないが，津波特有の考慮事項として，繰返し襲来する津波に対しても防潮堤は損傷することなく，津波の敷地への流入を防止・抑制する必要がある。

敷地に遡上する津波の時刻歴波形は第７図に示すとおり，第１波は地震発生後約 37 分で到達する。第２波は地震発生後約 80 分に襲来し，その高さはT.P.約＋9m である。このため，第１波の襲来を受けた防潮堤が第２波の襲来により損傷することがないことを確認する。

なお，第３波以降の津波高さは，原子炉建屋等が設置されている敷地高さであるT.P.＋8m 以下であるため，評価対象外とした。

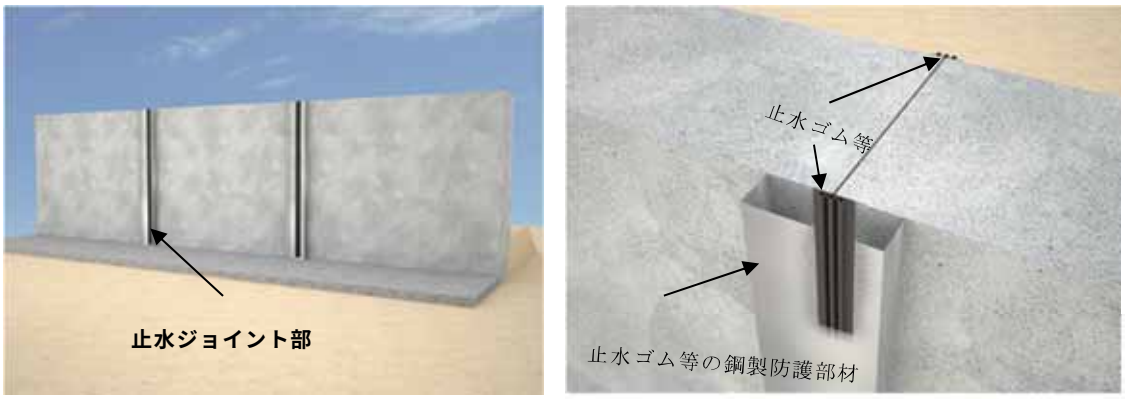


第７図　T.P.＋24m 津波の時刻歴波形

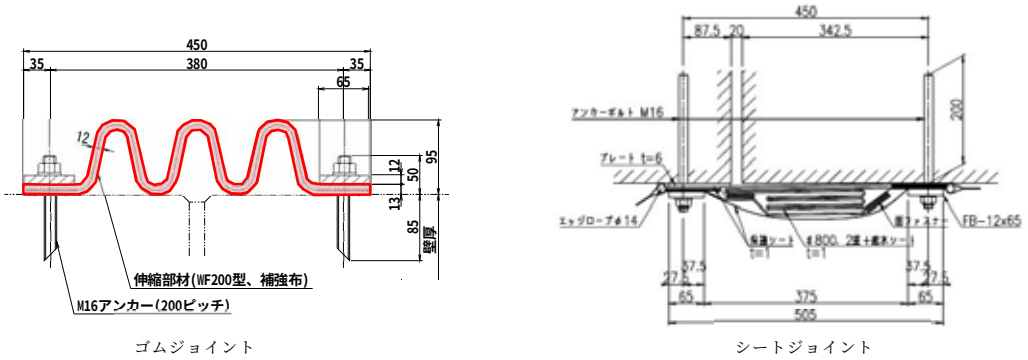
② 繰返し襲来する津波に対する防潮堤の機能保持確認結果

防潮堤の部材は，５．(２)項に示したように，T.P.＋24m 津波の津波荷重に対して，おおむね弾性状態に留まる設計とすることから，健全性が確保されているものと判断する。

また，防潮堤の境界には止水ジョイントを設置し，止水ゴム等の材料を用いることにより止水性能を保持する計画である。止水ジョイント部の計画図を第８図に，止水ジョイント部の概念図を第９図に示す。



第８図　止水ジョイント部計画図



第９図　止水ジョイント部の概念図

止水ジョイント部は，地震時に構造物間に生じる相対変位と，その後の津波や余震により構造物間に生じる相対変位に対して止水性を確保するため，伸縮性を有するものとし，堤内側及び堤外側の両面に止水ゴム等を設置する。

これを踏まえ，止水ゴム等の性能を確認するために耐圧試験等を実施する。

ゴムジョイントの試験は，所定の変位を与えた上で津波波圧相当の荷重での耐圧試験を実施する。

ゴムジョイントの耐候性については，メーカーによる試験結果を確認した結果，ゴムジョイントに使用されるゴムの伸びが半減する期間が約 38 年（気温条件：30℃）で，ゴムの伸びが半減しても有意な硬化はなく，十分な変形性能（伸び率 225%）を有している。

シートジョイントの試験は，継続載荷試験，津波波圧相当の荷重での耐圧試験及び母材の耐候性試験（紫外線を照射し，初期値と照射後の引張強度の確認）を実施する。

止水ゴム等の耐圧試験例を第 10 図に示す。止水性能試験のうち耐圧試験については，第 8 表に示すとおり最大水圧 0.55MPa までの健全性を確認する予定であり（一部，確認済み），T.P.＋24m 津波の津波荷重は，0.3MPa 程度であることから，第 1 波の津波以降も防潮堤間の止水性に問題はないものと判断される。

第 10 図　止水ゴム等の耐圧試験例

第 8 表　止水性能試験結果表

止水ゴム等	試験内容	試験結果
シートジョイント	耐圧試験（0.26MPa，1hr）	良
	耐圧試験（0.55MPa，1hr）	良
	継続載荷試験（56.45KN/30cm，10 分）	良
	繰返載荷試験（56.45KN/30cm，10 回）	良
	継続載荷試験（56.45KN/30cm，10 分，取付角 45°）	良
	繰返載荷試験（56.45KN/30cm，10 回，取付角 45°）	良
	耐候性試験	計画中
ゴムジョイント	耐圧試験（0.26MPa，1hr，伸び 250mm）	良
	耐圧試験（0.26MPa，1hr，剪断 300mm）	良
	耐圧試験（0.26MPa，1hr，伸び 125mm，剪断 150mm）	良
	耐圧試験（0.55MPa，1hr，伸び 250mm）	計画中
	耐圧試験（0.55MPa，1hr，剪断 300mm）	計画中
	耐圧試験（0.55MPa，1hr，伸び 125mm，剪断 150mm）	計画中

取付角：シートジョイントの載荷試験においては，地震時の防潮堤の残留変形を想定し厳しい変形 45°による材料試験を実施した。

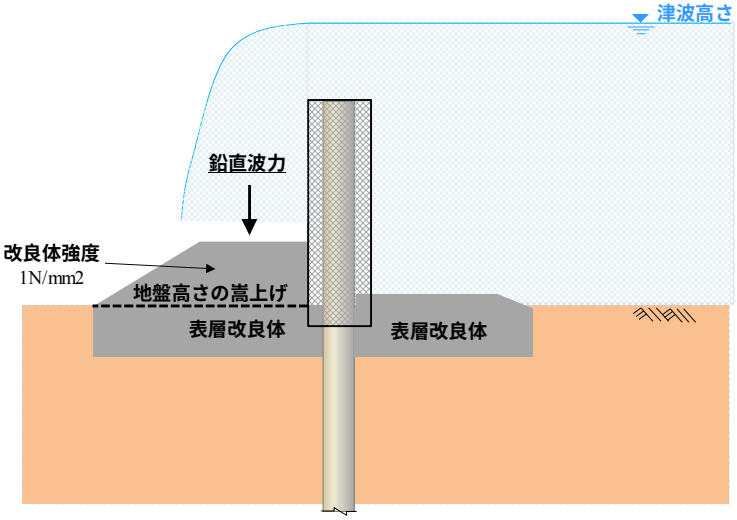
伸び，せん断：ゴムジョイントの津波を想定した耐圧試験時に，予め地震時の残留変形等を想定した。

(４)津波越流時の堤内側の対策について

防潮堤の堤内側には，津波等の水平荷重に対して防潮堤へ受働抵抗を与えるために地盤高さの嵩上げ（改良体）を設置すると共に，地盤高さの嵩上げの支持性能を保持するため地盤改良を実施する。

防潮堤を越流した津波が及ぼす影響については，それ以降に繰返し襲来する津波も想定し，地盤高さの嵩上げ（改良体）及び表層改良体の健全性を評価する必要がある。このため，地盤高さの嵩上げ（改良体）及び表層改良体に対して，越流津波の水塊が自由落下した場合の衝突力を算定し，設計強度が衝突力を上回ることを確認した。

津波越流時の概念図を第 11 図に示す。



第 11 図　検討概要図

ここで，水塊の衝突力Ｆは，Ｆ＝mvより算出した。

Ｆ＝ρ*Q*V＝ρ*A*V^2＝ρ*A*（2*g*h）およびｐ＝F/A より

ｐ＝2*ρ*g*h（kN/m2）

ｐ：鉛直圧力（kN/m2），　ρ：密度（=1.03t/m3）

ｈ：水位高さ（=19.5m），　ｇ：重力加速度（=9.80665m/s2）

評価の結果，地盤高さの嵩上げや表層改良体の設計強度は 1N/mm^2（1MPa）であることから，水塊の衝突力に対して十分な強度を有しており，繰返し襲来する津波に対してもその機能を十分維持できることを確認した。第 9 表に評価結果を示す。

表 9 表　津波越流時の評価結果

	水塊の鉛直波圧	設計強度	判定
地盤高さの嵩上げ（改良体）	0.39MPa	1.0MPa	O.K
表層改良体	0.39MPa	1.0MPa	O.K

なお，海水ポンプ室周りの防潮堤のうち，鉄筋コンクリート防潮壁の堤内側については，コンクリート等で舗装を行うことから，越流津波による洗掘の問題はなく，防潮堤の安定性に影響を及ぼすことはない。

（５）まとめ

T.P.+24m 津波荷重やこれと重畳を考慮した各種荷重に対して，防潮堤の主要部材は概ね弾性状態を維持していることを確認した。　また，防潮堤間に設置する止水ジョイント部の部材については，止水性能試験結果により，その水圧に対して十分な抵抗力を有することを確認した（一部継続中）。

さらに，津波越流時の防潮堤の健全性を考慮し，堤内側に設置する地盤高さの嵩上げ部及び表層改良体の設計強度が，越流する水塊による衝突荷重を上回るものであることを確認した。

以上のことから，T.P.+24m 津波に対して防潮堤は，その止水機能を保持しているものと判断される。