

泊発電所 3 号炉 耐津波設計方針について

津波波圧の検討方針

令和 6 年 10 月 17 日
北海道電力株式会社

本日の説明事項	P. 3
1. 検討方針	P. 4
2. 防潮堤等に作用する津波波圧評価に係る条件整理	
2.1 津波波圧の評価における前提条件	
(1) 砕波段波の発生の有無	P. 9
(2) 波状段波の発生の有無	P.10
(3) 通過波のフルード数 (Fr) 等	P.11
2.2 津波波圧の算定式	
(1) 砕波段波波圧及び持続波圧の算定式	P.12
(2) 波状段波波圧の算定式	P.13
2.3 津波波圧の評価に用いるパラメータの設定	P.14
3. まとめ	P.19

本日の説明事項

【はじめに】

- 「耐津波設計に係る設工認審査ガイド（令和5年1月改正）」における「津波波圧評価に係る確認事項（別添）」（以下、「設工認審査ガイド別添」という。）では、外郭防護に係る施設及び設備のうち、津波波圧の影響を直接受ける構築物等の設計に当たり、段波波圧と持続波圧を個別に評価することが要求されている。
- 泊発電所における津波波圧の影響を直接受ける構築物等として、防潮堤及び貯留堰が該当するため、防潮堤及び貯留堰に作用する津波波圧を設工認審査ガイド別添に基づき評価する。
- 津波波圧の評価は、設工認段階で行うものの、設置変更許可段階では、津波波圧の評価に用いる入力津波を設定するため、設工認審査ガイド別添に基づき津波波圧の検討を行う。

【説明内容】

- 設置変更許可段階と設工認段階の評価範囲を整理した上で、段波波圧及び持続波圧の評価に用いるパラメータの設定及びパラメータの設定プロセスを説明する。
- 津波波圧の評価に当たっては、設工認審査ガイド別添に基づくことを基本とし、前記ガイド別添に記載のない評価方針として、以下を説明する。
 - 波状段波波圧は、既往知見で提案されている手法として、適用性及び保守性の観点から、陸上構造物を対象に波状段波波圧を検討した知見である朝倉ら（2000）に基づく算定式を用いて評価する（P13参照）。
 - 防潮堤及び貯留堰の波圧評価に用いる浸水深は、津波波圧が保守的な評価となるよう、入力津波水深（入力津波高さ－敷地標高※）の1/2として設定する（P14～18参照）。

※貯留堰においては設置面高さとする。

1. 検討方針（1 / 5） 評価対象

- 設工認審査ガイド別添を踏まえ、下表のとおり防潮堤及び貯留堰を評価対象とする。

設工認審査ガイド別添の記載内容

【適用対象】

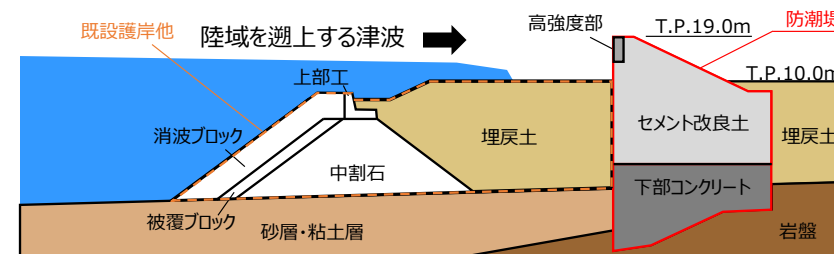
- ・ 外郭防護に係る施設及び設備のうち、以下の構築物等（これらを総称して「防潮堤等」という。）。

① 津波波圧の影響を直接受ける陸域の構築物

② 海域にあり引き波時に設置面が露出する構築物

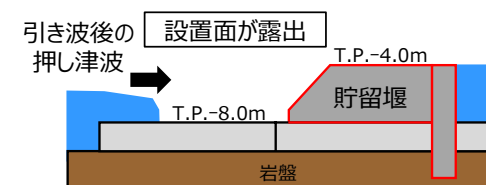
評価方針

① 津波波圧の影響を直接受ける陸域の構築物：防潮堤



【イメージ図】

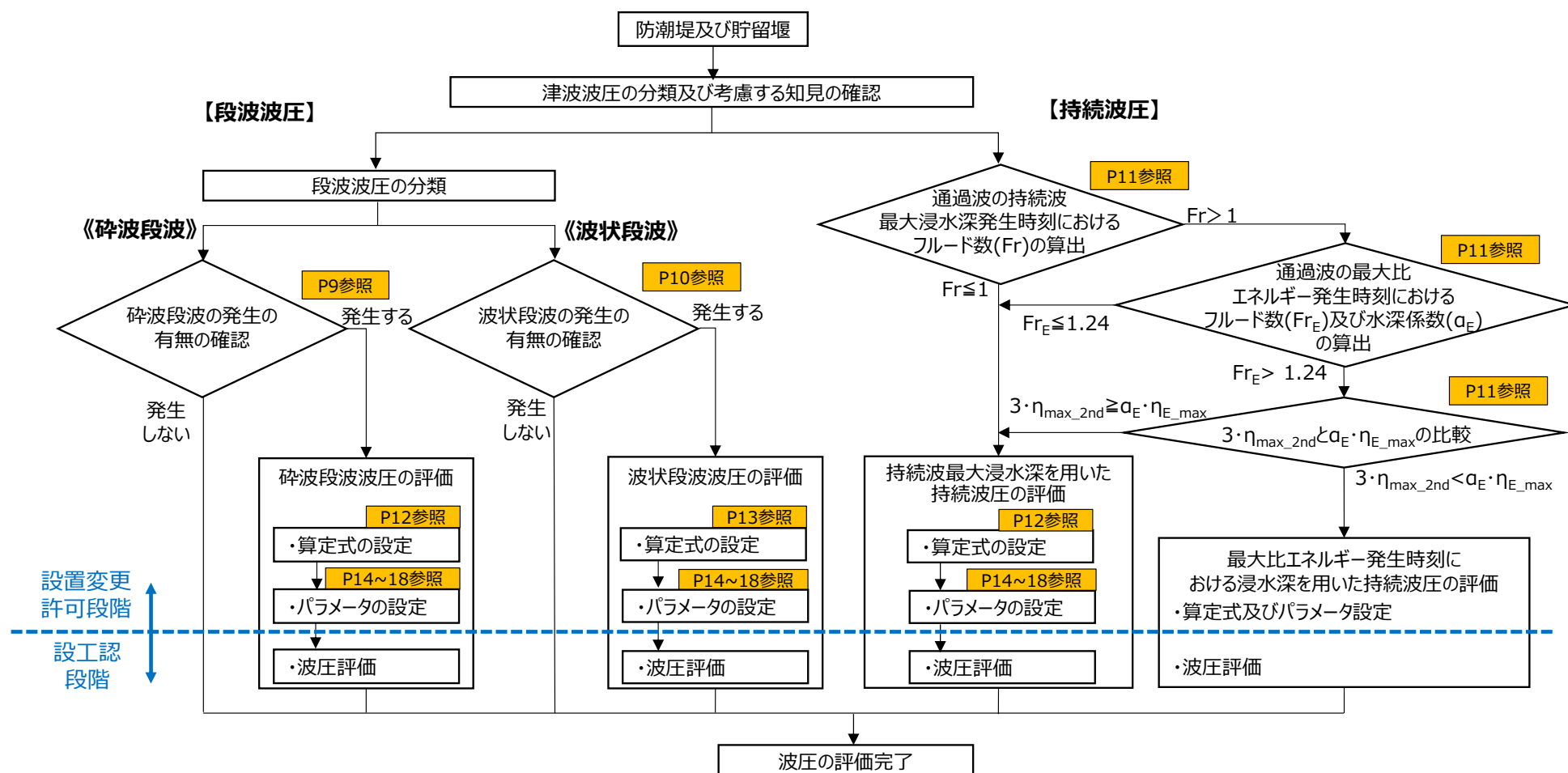
② 海域にあり引き波時に設置面が露出する構築物：貯留堰



【イメージ図】

1. 検討方針（2/5） 評価フロー

- 設工認審査ガイド別添に基づき、以下のフローに沿って津波波圧を評価する。
➤ 「津波波圧の評価に用いるパラメータの設定」までを設置変更許可段階で実施し、「津波波圧の評価」を設工認段階で実施する。



1. 検討方針（3/5）解析手法の選定

- 津波波圧の評価に用いる解析手法を下表のとおり整理した。
- 波圧評価に用いる浸水深については，入力津波（津波高さ）に基づき設定することで，津波波圧を保守的に評価できる（P15～18参照）ため，「①平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）」を用いることを基本とする。
- 「①平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）」では適切に評価することが困難な項目については，各解析手法の特徴を踏まえ，それぞれに適した手法として下表②～④を用いる。

【津波波圧の評価に用いる解析手法の特徴及び特徴を踏まえた検討内容】

津波評価に用いられる理論及びその特徴	解析手法及びその特徴	防潮堤のモデル化の有無※1により検討可能な内容		津波波圧の評価に係る検討内容
○非線形長波理論（浅水理論） ・浅海域の波の非線形性（波高の増幅及び波形の前傾化）が表現可能である。 ・津波の水位を表現可能である。	○平面二次元津波シミュレーション ・複雑な不規則波形及び平面的な流況（泊発電所特有の様々な方向から伝播する津波）が表現可能である。	① 防潮堤あり	・防潮堤による反射波の影響を考慮した津波遡上水位が算出可能である（入力津波（津波高さ）の設定に用いている）。	・段波波圧及び持続波圧の評価に用いる浸水深の設定（P15～18参照） ・「防波堤の耐津波設計ガイドライン（2015）」に基づく，波状段波の発生の有無の確認（P10参照） ・持続波圧の検討に用いる貯留堰位置の通過波のフルード数等の算出（P11参照）
		② 防潮堤なし	・防潮堤設置位置の通過波のフルード数等が算出可能である。	・持続波圧の検討に用いる防潮堤位置の通過波のフルード数等の算出（P11参照）
○非線形分散波理論 ・非線形性及び分散性（分裂波の発生及び発達）が表現可能である。 ・砕波発生による波高の減衰が表現可能である。	○断面二次元津波シミュレーション ・鉛直方向の波圧分布を表現可能である。	③ 防潮堤あり	・防潮堤をモデル化することで，防潮堤に作用する波圧分布が確認可能である。	・波圧算定式の妥当性確認※2
		④ 防潮堤なし	・防潮堤による反射波の影響を受けないため，防潮堤位置での段波の発生が精度よく確認可能である。	・砕波段波の発生の有無の確認※3（P9参照）

※1：防潮堤前面の既設護岸他は，防潮堤の設計においては役割を期待しないものの，津波波圧の評価においては入力津波（津波高さ）の検討条件と合わせてモデル化することを基本とする（5条-別添1-添付22-3参照）。

※2：設工認段階で実施する。

※3：波状段波の発生有無は，設工認審査ガイド別添で示されている「防波堤の耐津波設計ガイドライン（2015）」に基づき確認する。

1. 検討方針（4 / 5） 段波波圧の評価方針

- 設工認審査ガイド別添に基づき、下表のとおり評価を実施する（**朱書き**:設工認審査ガイド別添に記載されていない評価方針）。
- 砕波段波波圧の評価に当たり、設工認審査ガイド別添では「防潮堤等がない場合の津波（以下、「通過波」という。）の浸水深」を用いることとなっているが、通過波浸水深は、先行炉と同様に平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）から得られた「入力津波水深（入力津波高さ－敷地標高）の1/2の値」を用いることで、保守的に段波波圧を評価する（詳細はP15～17にて示す）。
- 波状段波波圧の評価に当たり、設工認審査ガイド別添では「既往知見で提案されている評価手法等を用いる」ことが要求されているため、先行炉と同様に、陸上構造物を対象に波状段波波圧を検討した知見である朝倉ら（2000）に基づく算定式を用いる（詳細はP13にて示す）。

【砕波段波波圧】

【波状段波波圧】

項 目	設工認審査ガイド別添の確認事項	評価方針	項 目	設工認審査ガイド別添の確認事項	評価方針
砕波段波の発生の有無の確認	津波の影響評価の前提となる、砕波発生の有無及び発生位置については、適切な条件による水理試験及び解析あるいはそれらのいずれかにより推定していること。	左記に示すとおり。	波状段波の発生の有無の確認	波状段波波圧の影響がないと推定する場合、その根拠が明確になっていること。その際、既往知見を根拠とする場合は、適切な条件による水理試験及び解析※あるいはそれらのいずれかにより、適用性に係る評価が示されていること。	左記に示すとおり。
砕波段波波圧の評価	防潮堤等設置位置において防潮堤等がない場合の津波の砕波直前の最大浸水深の3倍の高さに相当する静水圧分布を用いて、砕波段波波圧の影響を評価していること。	- 左記に示すとおり。 - ただし、砕波段波波圧が保守的な設定となるよう、通過波浸水深は、先行炉と同様に、平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）から得られた「入力津波水深（入力津波高さ－敷地標高）の1/2の値」を設定する。	波状段波波圧の評価	既往知見で提案されている評価手法等を用いて波状段波波圧の影響を評価していること。また、評価に用いた知見の適用性に関する文献等の根拠が示されていること。	- 左記に示すとおり。 - ただし、先行炉と同様に、既往知見で提案されている朝倉ら（2000）に基づく算定式を用い、波状段波波圧が保守的な設定となるよう、通過波浸水深は、平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）から得られた「入力津波水深（入力津波高さ－敷地標高）の1/2の値」を設定する。

※：設工認審査ガイド別添において、「適切な条件による水理試験及び解析」については、「根拠とする既往知見（例えば、防波堤の耐津波設計ガイドライン（2015）との整合性を確認すること。」と示されている。

1. 検討方針（5 / 5） 持続波圧の評価方針

- 設工認審査ガイド別添に基づき、下表のとおり評価を実施する（**朱書き**:設工認審査ガイド別添に記載されていない評価方針）。
- 持続波圧の評価に当たり、設工認審査ガイド別添では「通過波の浸水深」を用いることとなっているが、先行炉と同様に、平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）から得られた「入力津波水深（入力津波高さ－敷地標高）の1/2の値」を用いることで、保守的に持続波圧を評価する（詳細はP16～17にて示す）。

【持続波圧】

項 目	設工認審査ガイド別添の確認事項	評価方針
通過波の持続波最大浸水深発生時刻におけるフルード数（Fr）の算出	通過波の持続波領域における防潮堤等設置位置での最大浸水深を設計用浸水深として用いていること及び持続波最大浸水深発生時刻における浸水深及び流速からフルード数（Fr）を適切に算出していること。	左記に示すとおり。
通過波の最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数（Fr _E ）等の算出	- フルード数（Fr）が1を超える場合、防潮堤等設置位置での通過波の最大比エネルギー発生時刻における浸水深を設計用浸水深として用いていること。 - 最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数（Fr_E）を適切に算出していること。 - 最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数（Fr_E）から最大比エネルギー発生時刻における水深係数（a_E）を算出していること。	
3・η _{max_2nd} とa _E ・η _{E_max} の比較	持続波最大浸水深の3倍の高さと最大比エネルギー発生時刻における浸水深の水深係数（a_E）倍の高さを比較し、値が大きくなる方を用いて持続波圧を設定していること。	

【持続波最大浸水深を用いた持続波圧】

項 目	設工認審査ガイド別添の確認事項	評価方針
持続波最大浸水深を用いた持続波圧の評価	フルード数（Fr）が1以下の場合、持続波最大浸水深の3倍の高さに相当する静水圧分布を用いて持続波圧を評価していること。	- 左記に示すとおり。 - ただし、持続波圧が保守的な設定となるよう、通過波浸水深は、先行炉と同様に、平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）から得られた「入力津波水深（入力津波高さ－敷地標高）の1/2の値」を設定する。

【最大比エネルギー発生時刻における浸水深を用いた持続波圧】

項 目	設工認審査ガイド別添の確認事項	評価方針
最大比エネルギー発生時刻における浸水深を用いた持続波圧の評価	最大比エネルギー発生時刻における浸水深の水深係数（a_E）倍に相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力を持続波圧として評価していること。	左記に示すとおり。

2.1 津波波圧の評価における前提条件

(1) 砕波段波の発生の有無

9

ともに 輝く 明日のために。
Light up your future.

ほくてん

- 砕波段波の発生の有無を確認するため、非線形分散波理論に基づき砕波段波の発生及び砕波発生による波高の減衰を表現可能な解析コードであるCADMAS-SURF/3D (Ver.1.5) を用いて、断面二次元津波シミュレーション（防潮堤なし）を実施した。

➤ 確認対象：基準津波の12波源に対して防波堤の損傷状態を考慮した18ケース及び防波堤の損傷状態ごとに流速が最大となる2ケース（計20ケース）※1・2の第1波～第3波

➤ 判断基準：以下①及び②の両方に合致する場合、砕波段波発生と判断

① 護岸直前の水面勾配が、松山ら（2005）における砕波限界（30～40°）を上回る※3。

② スナップショットから、砕波段波の特徴※4が確認される。

※1：入力津波（砂堆積高さ、砂濃度、流況（流向・流速）、流速及びフルード数）の検討対象ケースと同様。

※2：地形変化による影響は5条-別添1-添付22-25に示すフローに従い検討した。

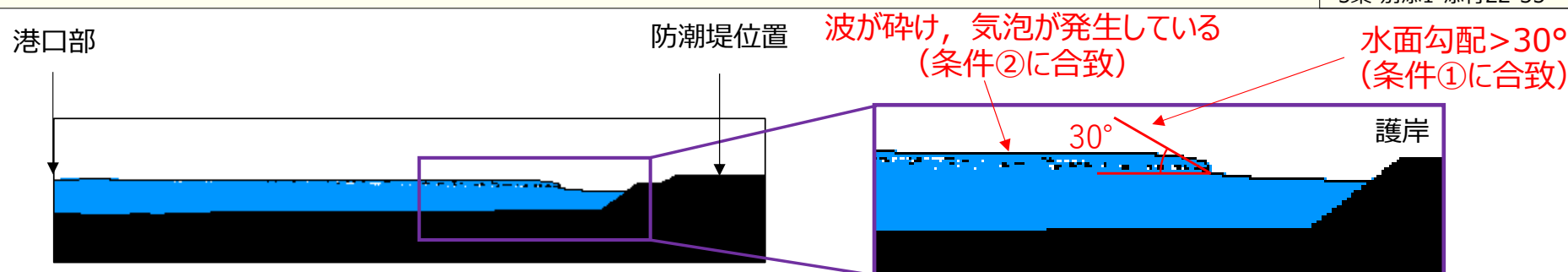
※3：スナップショットによる確認に加え、護岸直前の水位時刻歴波形から水面勾配を算出している。

※4：津波の先端部が急峻な壁状になった後に波が砕ける。

5条-別添1-添付22-28～34参照

- ①及び②に合致することから、砕波段波が発生すると判断した。

5条-別添1-添付22-35～40参照



断面二次元津波シミュレーションによるスナップショット※5（基準津波 F（北防波堤損傷）※6の第2波）

※5：護岸直前の状況を確認するため、発電所港口部から敷地護岸までのスナップショットを示す。

※6：防潮堤前面における水位上昇量が最大となるケースを例で示す。

2.1 津波波圧の評価における前提条件

(2) 波状段波の発生の有無

- 波状段波の発生の有無を確認するため、平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）を実施した。

➤ 確認対象：基準津波の12波源に対して防波堤の損傷状態を考慮した18ケース及び防波堤の損傷状態ごとに流速が最大となる2ケース（計20ケース）※1

※1：入力津波（砂堆積高さ、砂濃度、流況（流向・流速）、流速及びフルード数）の検討対象ケースと同様。

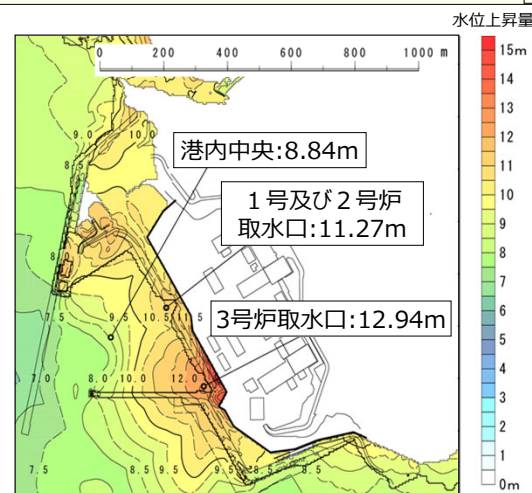
➤ 判断基準：以下①及び②の両方に合致する場合、波状段波発生と判断
（「防波堤の耐津波設計ガイドライン（2015）」参照）

- ① 津波高さが水深の60%以上
- ② 海底勾配が1/100以下程度の遠浅

- ①及び②に合致することから、波状段波が発生すると判断した。

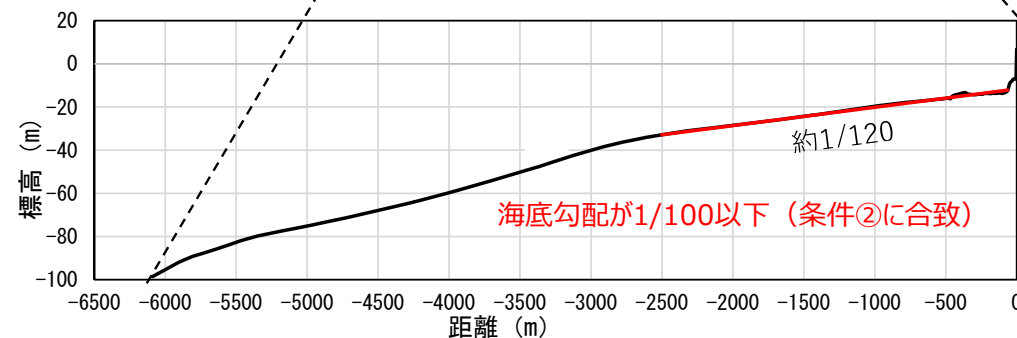
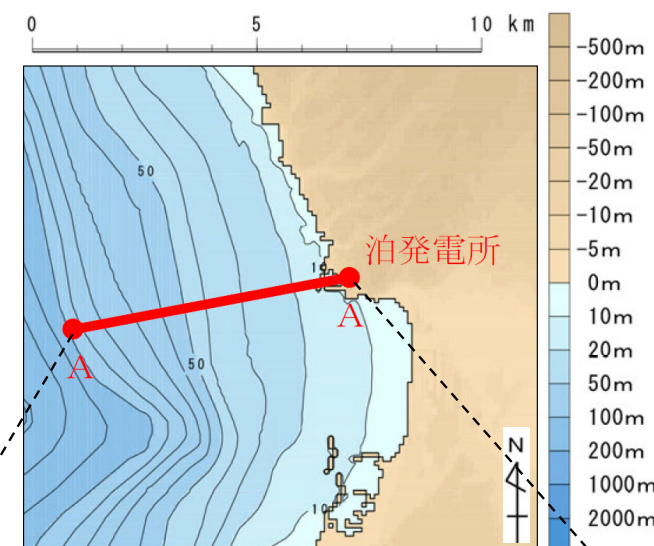
5条-別添1-添付22-44～46参照

地点	(1)水深	(2)津波高さ	(2)/(1)
3号炉取水口	8.0m	12.94m	161.8%
1号及び2号炉取水口	7.0m	11.27m	161.0%
港内中央	13.6m	8.84m	65.0%



平面二次元津波シミュレーションによる津波高さ
（基準津波 F（北防波堤損傷）※2）

津波高さが水深の60%以上（条件①に合致）※2：防潮堤前面における水位上昇量が最大となるケースを例で示す。



海底地形断面図（A-A断面）

2.1 津波波圧の評価における前提条件

(3) 通過波のフルード数 (Fr) 等

- 持続波圧の評価に当たって、設工認審査ガイド別添（右記のフロー参照）に基づき、ステップ1～ステップ3のとおりフルード数等を算出する。
- 防潮堤等設置位置での通過波からフルード数等を算出するため、平面二次元津波シミュレーション（防潮堤なし・防潮堤あり）をそれぞれ用いた。
- また、地形変化（組合せも含む）を考慮した上で、フルード数等を算出した。

【ステップ1の検討結果】

5条-別添1-添付22-67～108参照

- 通過波の持続波最大浸水深発生時刻におけるフルード数 (Fr) を算出し、 $Fr > 1$ となったケースは以下のとおりである。
 - 防潮堤：83ケース/180ケース
 - 貯留堰：0ケース/180ケース

【ステップ2の検討結果】

- 通過波の最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数 (Fr_E) を算出し、 $Fr_E > 1.24$ となったケースは以下のとおりである。
 - 防潮堤：10ケース/83ケース
 - 貯留堰：0ケース/180ケース

【ステップ3の検討結果】

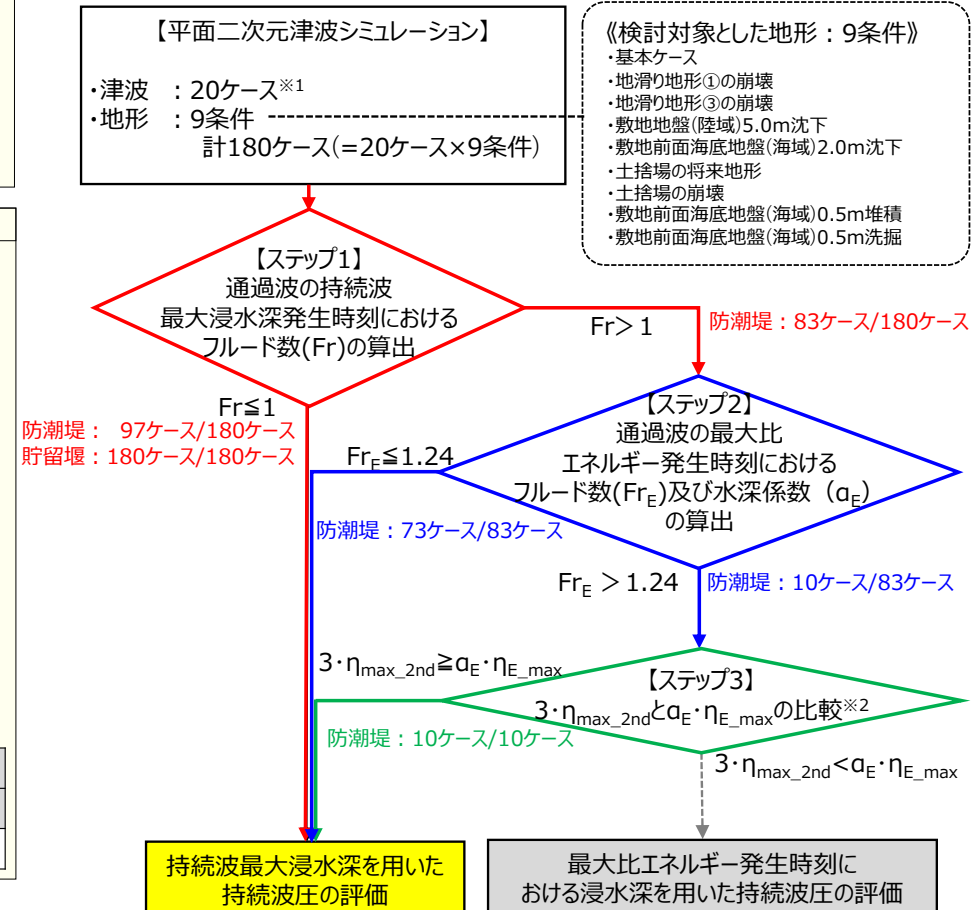
- いずれも $3 \cdot \eta_{\max_2nd} \geq \alpha_E \cdot \eta_{E_max}$ に該当する（下表に、 $\alpha_E \cdot \eta_{E_max}$ が最大となったケースを例示する）。

波源	防波堤損傷状態	地形	検討結果		
			$3 \cdot \eta_{\max_2nd}$	$\alpha_E \cdot \eta_{E_max}$	判定
基準津波B	防波堤損傷なし	敷地地盤（陸域）5.0m沈下	12.26m	12.26m	$3 \cdot \eta_{\max_2nd} \geq \alpha_E \cdot \eta_{E_max}$

- ステップ1～ステップ3の検討結果から、持続波圧は、持続波最大浸水深を用いて評価することとし、最大比エネルギー発生時刻における浸水深を用いた持続波圧は評価しない（P14参照）。

5条-別添1-添付22-112～113参照

【持続波圧に関する検討フロー】



※1：入力津波（砂堆積高さ、砂濃度、流況（流向・流速）及び流速）の検討対象ケースと同様。

※2：地形変化の組合せを考慮したケースにおいても、 $3 \cdot \eta_{\max_2nd} \geq \alpha_E \cdot \eta_{E_max}$ となった（5条-別添1-添付22-107参照）。

2.2 津波波圧の算定式

(1) 砕波段波波圧及び持続波圧の算定式

- 砕波段波波圧及び持続波圧は、設工認審査ガイド別添に基づく算定式を用いて評価する。

【設工認審査ガイド別添に基づく算定式】

a. 砕波段波波圧

防潮堤等設置位置における段波領域での通過波の最大浸水深 ($\eta_{\max_1st}$) の3倍の高さに相当する静水圧分布として、下式を用いて評価する。構造物最下部の作用波圧を以下に例示する。

$$P_{1st} = 3 \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\max_1st}$$

P_{1st} : 砕波段波波圧 [Pa]
 $\eta_{\max_1st}$: 段波最大浸水深[m]
 ρ : 海水密度 [kg/m³]
 g : 重力加速度 [m/s²]

b. 持続波最大浸水深を用いた持続波圧

フルード数 (Fr) が1以下の場合、持続波最大浸水深 ($\eta_{\max_2nd}$) の3倍の高さに相当する静水圧分布として、下式を用いて評価する。構造物最下部の作用波圧を以下に例示する。

$$P_{2nd} = 3 \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\max_2nd}$$

P_{2nd} : 持続波圧 [Pa]
 $\eta_{\max_2nd}$: 持続波最大浸水深[m]
 ρ : 海水密度 [kg/m³]
 g : 重力加速度 [m/s²]

- 砕波段波波圧及び持続波最大浸水深を用いた持続波圧の評価に当たっては、それぞれ $\eta_{\max_1st}$ 及び $\eta_{\max_2nd}$ (算定式のうち 部) がパラメータとなることから、 $\eta_{\max_1st}$ 及び $\eta_{\max_2nd}$ を保守的に設定する (P15～18参照)。

2.2 津波波圧の算定式

(2) 波状段波波圧の算定式

- 波状段波波圧は、設工認審査ガイド別添で、「波状段波波圧の影響があると推定する場合、既往知見で提案されている評価手法等を用いて波状段波波圧の影響を評価していること」との記載があり、既往知見で提案されている評価手法として修正谷本式が例示されている。
- 以下に示す理由から、泊発電所においては、波状段波波圧は朝倉ら（2000）※¹に基づく算定式を用いて評価する方針とする。
 - 修正谷本式は海中構造物を対象に検討した知見であり、泊発電所の防潮堤及び引き波時に設置面が露出した状態の貯留堰は陸上構造物として波圧が作用するため、陸上構造物を対象に検討した知見である朝倉ら（2000）に基づく算定式を用いることが適用性の観点で妥当である。
 - 波状段波波圧は、修正谷本式よりも、朝倉ら（2000）に基づく算定式にて算出した方が大きく評価されることから、朝倉ら（2000）に基づく算定式を用いることが保守性の観点で妥当である（両算定式による波圧分布の比較結果は、5条-別添1-添付22-50～51参照）。

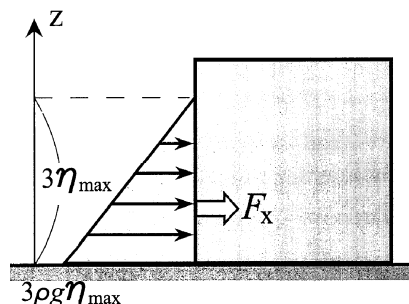
【朝倉ら（2000）に基づく算定式】

a. 防潮堤及び貯留堰の上方に作用する津波波圧

構造物がない状態での最大遡上水深（ $\eta_{\max_1st'}$ ）※²の3倍の高さに相当する静水圧分布として、下式を用いて評価する。

$$P_{1st'} = \rho \cdot g (\alpha \cdot \eta_{\max_1st'} - z)$$

- $P_{1st'}$: 波状段波波圧 [Pa]
 z : 当該部分の地盤面からの高さ [m]
 α : 水深係数。3とする。
 $\eta_{\max_1st'}$: 構造物がない状態での最大遡上水深 [m]
 ρ : 海水密度 [kg/m³]
 g : 重力加速度 [m/s²]

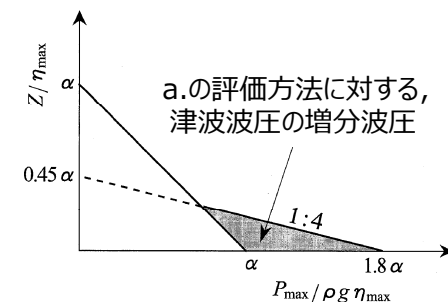


構造物に働く水平波圧※²

b. 防潮堤及び貯留堰の底面近傍に作用する津波波圧

構造物底面近傍に作用する津波波圧は、a.の評価方法に加えて、 α を1.8倍、作用高さを0.45倍とした波圧分布を用いて評価する。構造物最下部の作用波圧を以下に例示する。

$$P_{1st'} = 1.8\alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\max_1st'}$$



波状段波の無次元最大波圧分布※²

※¹ : 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷毅・高尾誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則（2000），護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，pp.911-915

※² : 朝倉ら（2000）に基づく算定式における $\eta_{\max}$ は $\eta_{\max_1st}$ と定義する。また、 F_x は $P_{1st'}$ による波力を意味する。

- 波状段波波圧の評価に当たっては、 $\eta_{\max_1st'}$ （算定式のうち□部）がパラメータとなることから、 $\eta_{\max_1st'}$ を保守的に設定する（P15～18参照）。

2.3 津波波圧の評価に用いるパラメータの設定 (1 / 5)

【算定式及びパラメータの整理】

- 2.1章及び2.2章の検討結果をまとめると下表のとおりである。
- いずれの算定式においても、通過波の浸水深で定義されるパラメータが大きいほど、津波波圧が大きくなることから、保守的に津波波圧を評価するため、通過波の浸水深で定義されるパラメータは想定し得る最大の値となるように設定する。
 - 通過波の浸水深で定義されるパラメータ： $\eta_{\max_1st}$ ・ $\eta_{\max_1st'}$ ・ $\eta_{\max_2nd}$ （同一の浸水深（ $\eta_{\max}$ ）に設定する。次頁参照）

2.1章の検討結果

砕波段波は発生する

波状段波は発生する

持続波圧は持続波最大浸水深を用いて評価する

2.2章の検討結果

設工認審査ガイド別添に基づく
算定式を用いる

朝倉ら（2000）に基づく
算定式を用いる

設工認審査ガイド別添に基づく
算定式を用いる

評価対象	防潮堤及び貯留堰			
津波波圧 の分類	段波波圧		持続波圧	
	砕波段波波圧	波状段波波圧※2	持続波最大浸水深を用いた 持続波圧	最大比エネルギー発生時刻における 浸水深を用いた持続波圧
波圧の算定式※1	$P_{1st} = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\max_1st}$	$P_{1st'} = 1.8\alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\max_1st'}$	$P_{2nd} = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\max_2nd}$	2.1(3)の結果より, 該当ケースなし。
津波解析より 設定するパラメータ	$\eta_{\max}$ (設計用浸水深 (= $\eta_{\max_1st} = \eta_{\max_1st'} = \eta_{\max_2nd}$)) (次頁参照)			

α ：水深係数（＝3）， ρ ：海水密度， g ：重力加速度， P_{1st} ：砕波段波波圧， $P_{1st'}$ ：波状段波波圧， P_{2nd} ：持続波圧

※1：構造物最下部の前面に作用する波圧を例示する。

※2：構造物上方に作用する波圧は $P_{1st'} = \rho \cdot g(\alpha \cdot \eta_{\max_1st'} - z)$ を用いて評価する。（P13参照）

2.3 津波波圧の評価に用いるパラメータの設定 (2 / 5)

【砕波段波波圧の評価に用いる浸水深の考え方】

- 非線形長波理論では、砕波段波の発生直前に生じる浅海域での波高の増幅及び前傾化（砕波直前の水位）が表現可能である（下図参照）。
- そのため、砕波段波波圧の評価に用いる浸水深（ $\eta_{\max_1st}$ ）は、平面二次元津波シミュレーション（非線形長波理論）より得られた水位を用いて設定する。

【波状段波波圧の評価に用いる浸水深の考え方】

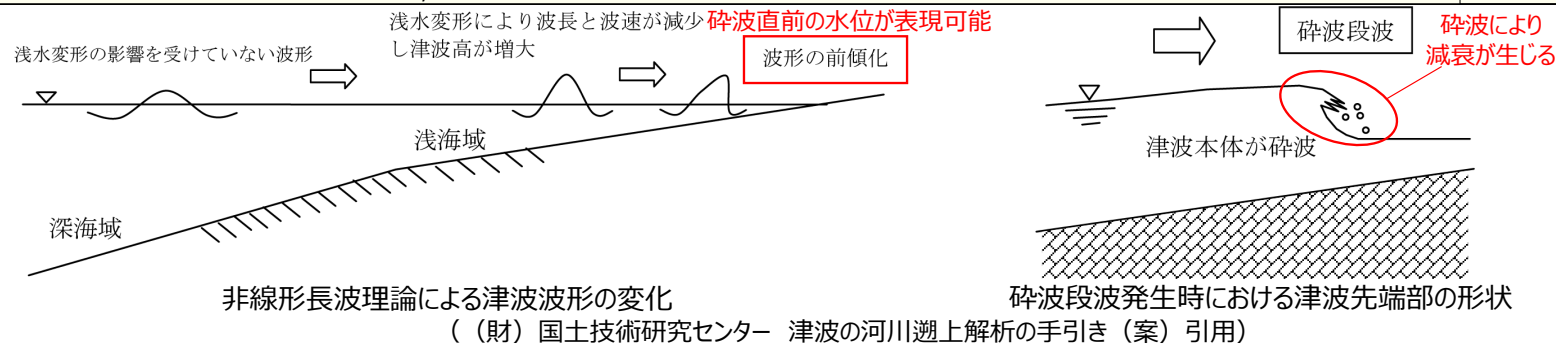
- 土木学会（2016）※¹では、以下の2点が示されている。
 - 波状段波を伴う津波が発生しても、遡上時には砕波減衰が生じること
 - 非線形長波理論及び非線形分散波理論による最大津波高さの解析結果を比較した結果、波状段波を考慮しても遡上域での津波高はほぼ変わらないこと
- そのため、波状段波波圧の評価に用いる浸水深（ $\eta_{\max_1st}$ ）は、平面二次元津波シミュレーション（非線形長波理論）より得られた水位を用いて設定する。

【設計用浸水深（ $\eta_{\max}$ ）の設定について】

- 以上より、 $\eta_{\max_1st} \cdot \eta_{\max_1st'} \cdot \eta_{\max_2nd}$ は、平面二次元津波シミュレーション（非線形長波理論）より得られた水位を用いて、同一の浸水深（ $\eta_{\max}$ ）に設定する。

※ 1：土木学会（2016）：原子力発電所の津波評価技術2016，公益社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価

5条-別添1-添付22-213～214参照



2.3 津波波圧の評価に用いるパラメータの設定 (3 / 5)

【防潮堤における設計用浸水深 ($\eta_{\max}$) の考え方】

- 波圧評価に用いる浸水深は通過波の浸水深で定義されているが、平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）で算出した「入力津波水深（右図参照）の1/2の値」を用いることで、防潮堤設置位置における設計用浸水深 ($\eta_{\max}$) を保守的に設定できていることを確認するため、以下を比較した。

- 通過波浸水深 ($=\eta_{\max_2nd}$)
- 平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）により算出した「入力津波水深の1/2の値」 ($=\eta_{\max}$)

- 下表のとおり、通過波浸水深よりも、「入力津波水深の1/2の値」の方が大きいことから、防潮堤における設計用浸水深 ($\eta_{\max}$) は「入力津波水深の1/2の値」を用いる。
- また、最大水位を示す地点における入力津波高さを、防潮堤全区間（茶津側端部～堀株側端部）の波圧評価に用いることで、保守的な評価となる。

5条-別添1-添付22-215～217参照

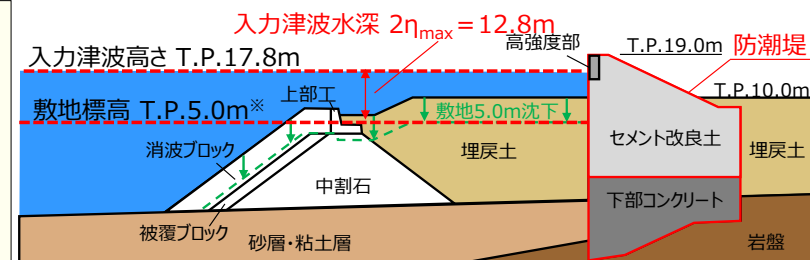
平面二次元津波シミュレーション（防潮堤なし）により算出した通過波浸水深			判定	平面二次元津波シミュレーション（防潮堤あり）により算出した入力津波水深の1/2の値 (m)
波源※1	防波堤の損傷状態※1	通過波浸水深 (m) ※2		
基準津波A	防波堤損傷なし	3.37	<	6.40 (=12.8×1/2)
基準津波E	北及び南防波堤損傷	3.96	<	
基準津波E	南防波堤損傷	3.93	<	
基準津波F	北防波堤損傷	4.09	<	

※1：検討ケースは、防潮堤前面における入力津波（最高水位）の検討対象ケース（全4ケース）とした。

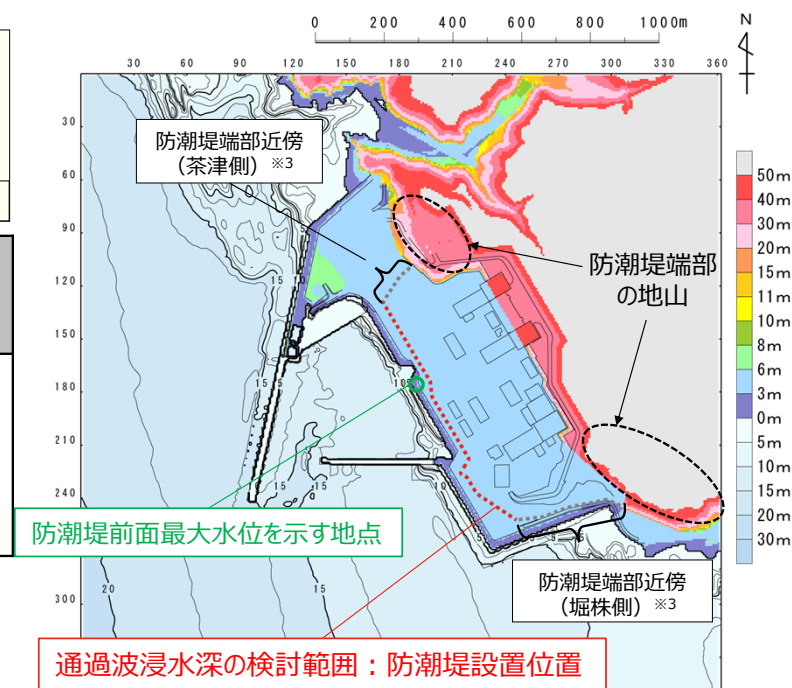
※2：持続波圧の評価に当たって算出した防潮堤設置位置の持続波最大浸水深と同様である。

※3：以下の2点の理由から、検討範囲は防潮堤海側に面する位置とする。

- ・防潮堤端部近傍を含む防潮堤全区間の中で、防潮堤前面最大水位を示す地点が防潮堤の海側に面する位置である。
- ・津波が敷地を遡上するにつれて水位は減衰していくため、仮に地山がない場合（地山標高が敷地標高と同様の状態）を想定すると、防潮堤端部近傍の通過波浸水深は、海側に面する位置の通過波浸水深を下回る。



※ 入力津波の地形変化（敷地地盤（陸域）沈下（5.0m））を考慮した敷地標高



通過波浸水深の検討範囲：防潮堤設置位置

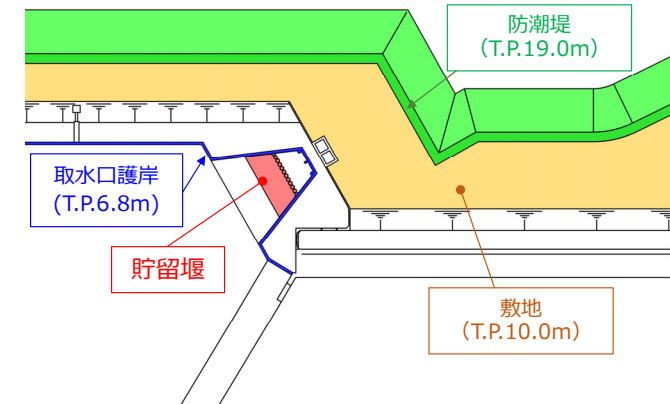
平面二次元津波シミュレーション（防潮堤なし）の地形モデル（敷地地盤（陸域）沈下（5.0m））

2.3 津波波圧の評価に用いるパラメータの設定 (4/5)

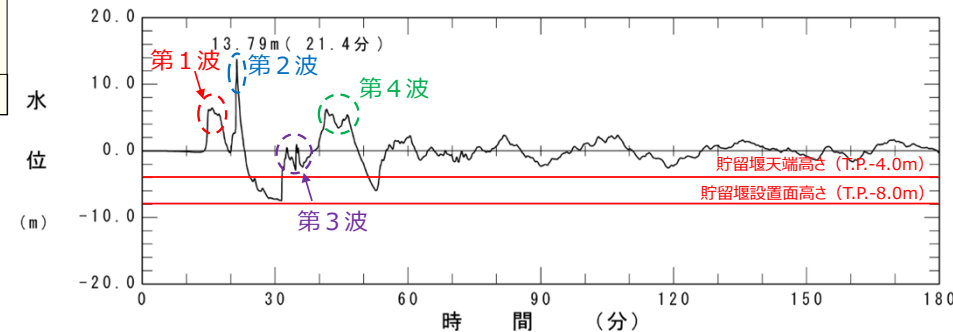
【貯留堰における設計用浸水深 ($\eta_{\max}$) の考え方】

- 貯留堰に対する津波波圧を保守的に評価するため、設計用浸水深 ($\eta_{\max}$) は防潮堤と同様に、「入力津波水深（入力津波高さ－設置面高さ）の1/2の値」を用いる。
- 貯留堰における設計用浸水深 ($\eta_{\max}$) の保守性を以下に示す。
 - 貯留堰は取水口護岸に囲まれており、更にその背後には敷地及び防潮堤が位置している（右上図参照）。そのため、貯留堰位置の通過波浸水深には反射波の影響が含まれているが、防潮堤の有無による浸水深の比較結果（P16参照）を踏まえると、仮に取水口護岸、敷地及び防潮堤がない場合を想定すると、通過波浸水深は「入力津波水深×1/2」の値を下回る。
 - 引き波により設置面が露出しないものの、保守的に浸水深が高くなる第2波（3号炉取水口の入力津波高さ）から設定する（右下図参照）。

5条-別添1-添付22-218～221参照



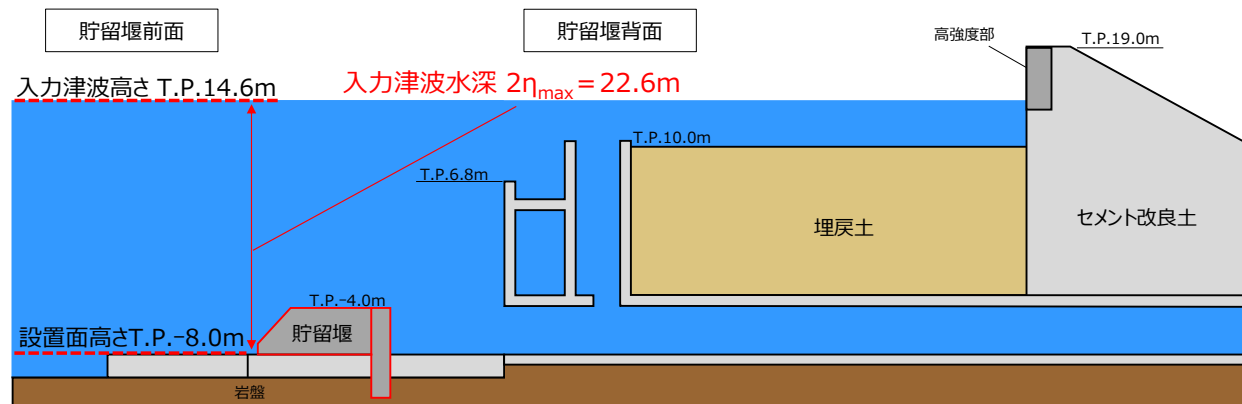
貯留堰の設置位置（3号炉取水口拡大図）



3号炉取水口（基準津波F（北及び南防波堤損傷、「敷地地盤（陸域）5.0m沈下」+「敷地前面海底地盤（海域）2.0m沈下」+「土捨場（将来地形を反映した地形の崩壊）」））

入力津波の水位時刻歴波形※1・2

- ※1：3号炉取水口最高地点T.P.13.79m+朔望平均満潮位0.26m+潮位のばらつき0.14m+観測位置の潮位差0.01m+地震による地殻変動量0.40m≒14.6m
- ※2：3号炉取水口の入力津波のうち、3号炉取水口で水位上昇量が最大となるケースを例で示す。



入力津波水深の概要図（貯留堰）

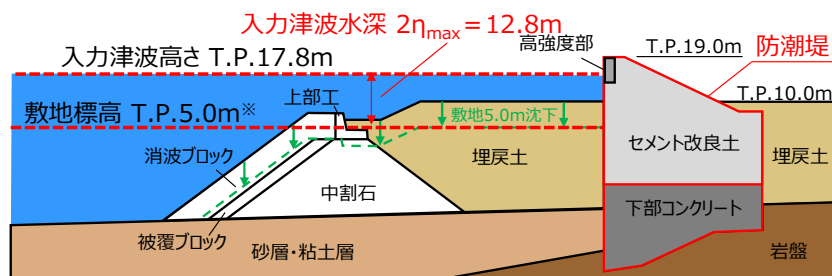
2.3 津波波圧の評価に用いるパラメータの設定 (5 / 5)

【津波波圧の評価に用いるパラメータ】

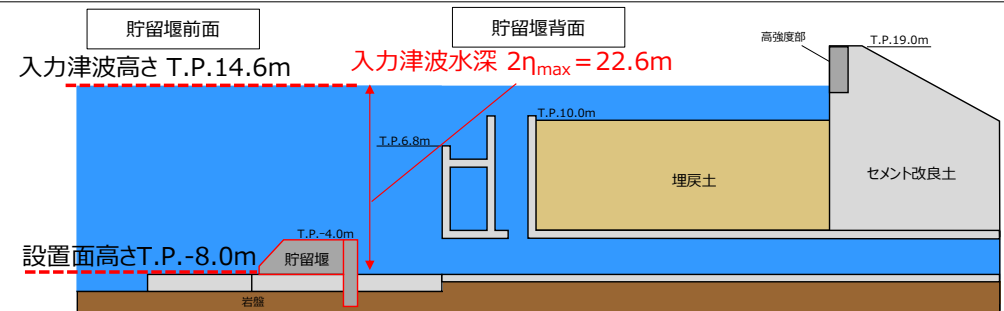
- 津波波圧の評価に用いるパラメータは以下のとおり設定する。
- 防潮堤における通過波の浸水深で定義されるパラメータ（設計用浸水深（ $\eta_{\max}$ ））は、入力津波高さ（防潮堤前面最高水位＝T.P.17.8m）を用い、入力津波水深（12.8m）を1/2した値「6.4m」を設定する。
- 貯留堰における通過波の浸水深で定義されるパラメータ（設計用浸水深（ $\eta_{\max}$ ））は、入力津波高さ（3号炉取水口最高水位＝T.P.14.6m）を用い、入力津波水深（22.6m）を1/2した値「11.3m」を設定する。

通過波の浸水深で定義されるパラメータ ($\eta_{\max}$)

防潮堤	貯留堰
➤ 入力津波水深（12.8m）を1/2した値「6.4m」を，設計用浸水深として保守的に設定する（下図参照）。	➤ 入力津波水深（22.6m）を1/2した値「11.3m」を，設計用浸水深として保守的に設定する（下図参照）。



【イメージ図】



【イメージ図】※ ※貯留堰の背面水位は設工認段階で設定する。

評価因子	設定位置	波源	地形変化			潮位変動			地震による地殻変動 (m)	設定位置における評価値 (T.P. m)
			北防波堤	南防波堤	地形変化	朔望平均潮位 (m)	潮位のばらつき (m)	観測位置の潮位差 (m)		
最高水位	防潮堤前面	基準津波E	健全	損傷	敷地地盤（陸域）沈下（5.0m）	0.26	0.14	0.01	沈降0.40を考慮	17.8
	3号炉取水口	基準津波F	損傷	損傷	敷地地盤（陸域）沈下（5.0m）＋敷地前面海底地盤（海域）沈下（2.0m）＋土捨場（将来地形を反映した地形の崩壊）	0.26	0.14	0.01	沈降0.40を考慮	14.6
		基準津波B	損傷	健全						

3. まとめ

- 2.1章及び2.2章の検討結果を踏まえ、各津波波圧の算定式を整理した。
 - 砕波段波及び波状段波が発生する結果となったため、砕波段波波圧は設工認審査ガイド別添に基づく算定式を用いて評価し、波状段波波圧は朝倉ら（2000）に基づく算定式を用いて評価する。
 - 最大比エネルギー発生時刻における浸水深を用いた持続波圧を評価すべきケースはなかったため、持続波圧は設工認審査ガイド別添に基づき、持続波最大浸水深を用いた算定式のみを用いて評価する。
- 各津波波圧の算定式に用いるパラメータは津波高さに基づくため、入力津波高さ（水位上昇側）を用いることとした。
- 防潮堤及び貯留堰の波圧評価に用いる浸水深として、入力津波水深の1/2が保守的な設定であることを確認した。

5条-別添1-添付22-114～115参照

		段波波圧		持続波圧	
		砕波段波波圧	波状段波波圧※ ²	持続波最大浸水深を用いた持続波圧	最大比エネルギー発生時刻における浸水深を用いた持続波圧
波圧の算定式※ ¹		$P_{1st} = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\max_1st}$	$P_{1st'} = 1.8\alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\max_1st'}$	$P_{2nd} = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{\max_2nd}$	該当ケースなしのため、実施せず。
津波解析より 設定するパラメータ		$\eta_{\max}$ (設計用浸水深 ($=\eta_{\max_1st}=\eta_{\max_1st'}=\eta_{\max_2nd}$))			
パラメータの 設定値	防潮堤	6.4m※ ³			
	貯留堰	11.3m※ ⁴			

α ：水深係数（＝3）， ρ ：海水密度， g ：重力加速度， P_{1st} ：砕波段波波圧， $P_{1st'}$ ：波状段波波圧， P_{2nd} ：持続波圧

※1：構造物最下部の作用波圧を例示する。 ※2：構造物上方の作用波圧は $P_{1st'} = \rho \cdot g(\alpha \cdot \eta_{\max_1st'} - z)$ を用いて評価する。（P13参照） ※3：入力津波高さ（防潮堤前面最高水位）を用いて設定する。

※4：入力津波高さ（3号炉取水口最高水位）を用いて設定する。

入力津波高さ（水位上昇側）

評価因子	設定位置	波源	地形変化			潮位変動			地震による地殻変動(m)	設定位置における評価値(T.P. m)
			北防波堤	南防波堤	地形変化	朔望平均潮位(m)	潮位のばらつき(m)	観測位置の潮位差(m)		
最高水位	防潮堤前面	基準津波E	健全	損傷	敷地地盤（陸域）沈下（5.0m）	0.26	0.14	0.01	沈降0.40を考慮	17.8
	3号炉取水口	基準津波F	損傷	損傷	敷地地盤（陸域）沈下（5.0m）＋敷地前面海底地盤（海域）	0.26	0.14	0.01	沈降0.40を考慮	14.6
		基準津波B	損傷	健全	沈下（2.0m）＋土捨場（将来地形を反映した地形の崩壊）					

(参考) 波圧評価に関する先行炉との比較

- 波圧評価の確認項目の評価手法及びその目的並びに波圧評価に用いる算定式及びパラメータについて、先行炉との比較結果を下表に示す。

波圧評価の確認項目の評価手法及びその目的並びに波圧評価に用いる算定式及びパラメータに関する先行炉との比較結果※1

確認項目		女川原子力発電所2号炉	島根原子力発電所2号炉	泊発電所3号炉
段波の発生 の有無の確認		—	○平面二次元津波シミュレーション ・波状段波の発生の有無の確認	○平面二次元津波シミュレーション ・波状段波の発生有無の確認
	○水理模型実験 ・碎波段波及び波状段波の発生の有無の確認	○水理模型実験 ・碎波段波及び波状段波の発生の有無の確認	○水理模型実験 ・碎波段波及び波状段波の発生の有無の確認	—※2
	○断面二次元津波シミュレーション ・碎波段波及び波状段波の発生の有無の確認	○断面二次元津波シミュレーション ・碎波段波及び波状段波の発生の有無の確認	○断面二次元津波シミュレーション ・碎波段波及び波状段波の発生の有無の確認	○断面二次元津波シミュレーション ・碎波段波の発生の有無の確認
波圧算定式の 妥当性確認 (波圧分布の確認)	○水理模型実験 ・計測した波圧が既往の波圧算定式による津波波圧に包絡されることの確認	○水理模型実験 ・計測した波圧が既往の波圧算定式による津波波圧に包絡されることの確認	○水理模型実験 ・計測した波圧が既往の波圧算定式による津波波圧に包絡されることの確認	—※2
	○断面二次元津波シミュレーション ・評価された波圧が既往の波圧算定式による津波波圧に包絡されることの確認	○断面二次元津波シミュレーション※3 ・評価された波圧が既往の波圧算定式による津波波圧に包絡されることの確認	○断面二次元津波シミュレーション※3 ・評価された波圧が既往の波圧算定式による津波波圧に包絡されることの確認	○断面二次元津波シミュレーション※4 ・評価された波圧が既往の波圧算定式による津波波圧に包絡されることの確認
波圧 算定式※5	持続波圧	○朝倉らに基づく算定式 $P = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta$	○朝倉らに基づく算定式※6 $P = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta$	○設工認審査ガイド別添に基づく算定式 $P = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta$
	碎波段波 波圧	—	—	○設工認審査ガイド別添に基づく算定式 $P = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta$
	波状段波 波圧	—	—	○朝倉らに基づく算定式※7 $P = 1.8 \cdot \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \eta$
評価に用いる浸水深 (η)		○入力津波水深（入力津波高さ－敷地標高） ×1/2	○入力津波水深（入力津波高さ－敷地標高） ×1/2	○入力津波水深（入力津波高さ－敷地標高） ×1/2

※1：先行炉の情報に係る記載内容については、会合資料等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものである。

α ：水深係数（＝3）， ρ ：海水密度， g ：重力加速度

※2：断面二次元津波シミュレーションに用いるCADMAS－SURF/3D（Ver.1.5）の妥当性検証のために、水理模型実験を実施した（5条-別添1-添付22-124～140参照）。

※3：三次元津波シミュレーションも併せて実施している。 ※4：設工認段階で結果を示す。 ※5：構造物最下部の作用波圧を例示する。 ※6：敷地標高以上に用いる波圧算定式を示す。

※7：構造物上方の作用波圧は $P = \rho \cdot g (\alpha \cdot \eta - z)$ を用いて評価する。（P13参照）