

# 島根原子力発電所 2号炉 津波による損傷の防止

コメントNo.9「津波荷重の設定」  
コメントNo.13「漂流物衝突荷重の設定方針」

---

(コメント回答)

令和元年 6月  
中国電力株式会社

No.	審査会合日	コメント要旨	回答頁
1	H31.2.26	<p>[論点1]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・防波堤が地震により損傷した場合の運用方針で津波防護を達成した審査実績がないことから、防波堤が地震により損傷した場合の運用方針の妥当性、有効性について説明すること。</li> <li>・この運用方針の妥当性、有効性については、検討プロセスや他の方針と比較した場合のメリット・デメリットを含めて整理して提示すること。</li> </ul>	R元.5.21 説明
2	H31.2.26	<p>[論点2]</p> <p>地山を津波防護上の障壁として活用した審査実績が無いことから、地山の耐震、耐津波設計上の位置付け、基準地震動及び基準津波に対する健全性の確保について説明すること。</p>	後日回答
3	H31.2.26	<p>[論点3]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・防波壁の構造及び支持地盤周辺地盤を含めた設置状況を把握するとともに、先行炉の審査実績を踏まえ、島根原子力発電所の特性を考慮した上で防波壁の構造成立性について整理して説明すること。</li> <li>・なお、この整理にあたって、類似する先行炉の津波防護施設の構造、地盤などの周辺環境を含む設計条件・評価手法等との相違の有無を整理すると共に、島根原子力発電所の特有の技術的課題を抽出して提示すること。</li> </ul>	後日回答
4	H31.2.26	<p>[論点4]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・敷地における地下水位が建設工認時から変わり得る可能性について説明すること。</li> <li>・敷地地盤は岩の掘削ズリ等による埋戻土や旧表土で構成されており、これらの液状化強度特性の設定の代表性、網羅性を説明するとともに、液状化による影響を考慮すべき施設とその設計方針についても説明すること。</li> <li>・液状化及び地下水位について、先行炉との類似性があれば、その審査状況を踏まえて、液状化と地下水位の関係性及びそれらが及ぼす施設等への影響についても整理すること。</li> </ul>	R元.6.18 説明 (4条で説明)

No.	審査会合日	コメント要旨	回答頁
5	H31.2.26	[論点5] ・タービン建物を通過する配管・電路について、地震・津波時の浸水状況を踏まえ、その構造・仕様が浸水の影響を受けないものであることを説明すること。	後日回答
6	H31.2.26	[論点6] ・漂流物調査の調査範囲の設定方法が取水性への影響の観点から適切であるか説明すること。 ・漂流物調査の範囲の設定にあたり、流向・流速分布を抽出した時間及び地点・範囲が限定的であるため、これらの選定プロセス、その代表性及び網羅性を説明するとともに、主要な時間帯と留意すべき地点が含まれる領域について流向・流速分布を提示すること。	R元.5.21 説明
7	H31.2.26	[論点7] ・入力津波の設定についてのプロセスを網羅的に整理し、不確かさの考慮及び入力津波の設定結果の妥当性を丁寧に説明すること。	R元.5.21 説明

No.	審査会合日	コメント要旨	回答頁
8	H31.2.26	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ベルマウス下端と取水槽下端のクリアランス (500mm) が、ベルマウス径 (750mm) に対して十分なクリアランスであることを標準的な設計の考え方も踏まえて説明すること。</li> <li>・ベルマウス下端と取水槽下端のクリアランスは、累積運転時間を考慮した保守的な砂堆積量を考慮しても、取水性能への影響はないことを説明すること。</li> </ul>	R元.5.21 説明
9	H31.2.26	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ソリトン分裂波及び砕波発生の可能性について、島根サイトにおける基準津波の特性（短周期）、沿岸の陸海域の地形及び先行実績を踏まえ明示的に示すとともに、それらによる防波壁及び防波扉に対する波圧荷重評価への影響について水理試験等の科学的根拠に基づいて説明すること。</li> <li>・水際線近傍の陸上部に設置された防波壁及び防波扉に対して、海上構造物を対象とした谷本式を適用することの妥当性を説明すること。説明に当たっては、防潮堤設置位置におけるフルード数等の指標を考慮のうえ、国交省暫定指針等の既往評価式との比較を示すこと。</li> </ul>	P8～39
10	H31.2.26	<ul style="list-style-type: none"> <li>・入力津波の設定において、日本海東縁部を波源域とする基準津波については、地震による影響の考慮についての統一的な考え方と方針について詳細に説明すること。</li> </ul>	R元.5.21 説明

No.	審査会合日	コメント要旨	回答頁
11	H 31 . 2 . 26	<ul style="list-style-type: none"> <li>・漂流物調査の範囲の設定にあたっては、データ抽出地点は 1km だけではなく、より遠くの沖合 (3km、5km) でのデータの必要性についても検討すること。</li> <li>・漂流物調査について、平成25～26年に実施した結果に基づいて判断していることが問題ないことを説明すること。</li> <li>・漂流物影響確認フローについて、「基礎に設置されている」場合に漂流物とならないとする根拠を資料に基づき説明すること。</li> <li>・漂流物調査範囲と漂流物到達範囲を用語として使い分けているが、その考え方を説明すること。</li> <li>・発電所前面海域を航行する可能性のある船舶の航路を調査し、漂流物評価及び漂流物による影響評価に反映すること。</li> </ul>	R 元 . 5 . 21 説明
12	H 31 . 2 . 26	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本日の指摘事項を踏まえ、「審査ガイドとの整合性」の資料をベースに、サイト特性及びユニットの構造・仕様の特徴を踏まえ基準適合のための課題及びその対応状況について追記及び整理した資料を、別途提示すること。</li> <li>・耐津波設計方針の全般について、設定根拠及びその妥当性に関する説明が不足しているため、先行炉の審査実績を踏まえ、事業者自ら不足情報を抽出し、それぞれの資料の中で整理して提示すること。</li> </ul>	後日回答
13	H 31 . 2 . 26	<ul style="list-style-type: none"> <li>・道路橋示方書による漂流物衝突荷重の算定の妥当性について、工学的な判断に基づいた根拠を提示して説明すること。</li> </ul>	P40～42
14	H 31 . 2 . 26	<ul style="list-style-type: none"> <li>・津波防護の障壁となる地山の地質調査結果を掲示すること。</li> </ul>	後日回答

No.	審査会合日	コメント要旨	回答頁
15	R元.5.21	・入力津波の設定において、1号放水連絡通路防波扉は基準津波の策定の評価地点として設定されていないため、当該地点での基準津波の波源の選定結果を地震・津波の審査会合において説明すること。	後日回答
16	R元.5.21	・入力津波高さを港湾外、港湾内の各施設において個別に設定しているが、他サイトが領域で設定しているのに対して、近接した複数の箇所において異なる設定高さとしている理由とその妥当性を説明すること。	後日回答
17	R元.5.21	・入力津波の設定に影響する地形変化を生じさせる斜面については、敷地周辺斜面を含めて網羅的に根拠を説明すること。	後日回答
18	R元.5.21	・施設護岸の漂流物評価における遡上域の範囲及び流速の根拠をシミュレーション解析の最大水位上昇量分布と流速の評価を踏まえて説明すること。また、流速等の遡上波の特性を考慮して、施設護岸上の漂流物を再評価すること。	後日回答
19	R元.5.21	・地震による地盤変状が入力津波に対する影響要因にならないとする評価については、基準津波1（防波堤無し）以外のケースの検討結果を加えて、評価の妥当性を説明すること。	後日回答
20	R元.5.21	・地震による地盤変状の評価について、内容の考え方や根拠を説明すること。また、確認資料が不足しているものについては追加提示すること。	後日回答
21	R元.5.21	・入力津波の設定における朔望平均潮位の評価について、1995年9月から1996年8月までの1年間の潮位観測記録を用いて評価できる根拠及びこの評価が10年間の潮位観測記録を用いた評価に比べて保守的と判断した根拠を2011年以降のデータを含めた分析を行い説明すること。	後日回答

No.	審査会合日	コメント要旨	回答頁
22	R元.5.21	・入力津波の設定における高潮の評価について、再現期間100年に対する期待値の見直しを行わないとした根拠及び見直しの要否を、至近データを含めた最高潮位の超過確率を踏まえて説明すること。	後日回答
23	R元.5.21	・海域活断層から想定される地震による下降側評価の津波（基準津波4）に対して、上昇側の評価を行うための津波（海域活断層上昇側ケースの津波）を新たに設定しているが、この津波の位置付けとこの津波による評価の意味合いを踏まえて入力津波高さの評価結果を再整理すること。また、津波荷重と余震の組合せを踏まえて、海域活断層の上昇側ケースの入力津波としての取り扱いを整理して説明すること。	後日回答
24	R元.5.21	・日本海東縁部を波源域とする津波による評価について、基準地震動 $S_s$ による被害を想定しない評価があれば、評価項目と被害想定しなくて良いとする根拠を説明すること。また、地震による損傷後の津波の流入について、津波が襲来するまでの余裕時間で浸水防止をする対応方針を検討しているのであれば、浸水防止の実現性について説明すること。	後日回答
25	R元.5.21	・防波堤の有無による影響を考慮した対応策の選定の考え方について、運用対応策のメリット及び設備対応策のデメリットが記載されていないため、提案する際に考えたメリット・デメリットを網羅的に提示した上で、対応策の選定の評価プロセスを説明すること。	後日回答
26	R元.5.21	・設備対応として1号炉取水槽の流路縮小工、2号炉取水槽の防水壁改造（嵩上げ）を選定していることについて、具体的な設置位置や構造仕様等の設計条件、構造成立性が見通し及び対応策の効果と悪影響を整理した上で、選定した対応策の妥当性を説明すること。	後日回答

No.	審査会合日	コメント要旨	回答頁
27	R元.5.21	・敷地および敷地周辺海域の津波の高さ，流向及び流速の時系列変化についてさらに詳細な情報を提示した上で，敷地および敷地周辺に襲来する津波の特性を考察し，漂流物評価範囲の保守性，妥当性を説明すること。	後日回答
28	R元.5.21	・基礎に設置された対象物が漂流物とならない根拠は，3.11地震で基礎に設置された漂流物が漂流した実績や先行サイトで基礎に設置された対象物が漂流物となる可能性を評価している実績を踏まえて整理し，漂流物評価フローに反映して説明すること。また，重量と浮力の観点から漂流物の判断を行う評価フロー箇所において，気密性に関する評価の考え方とその妥当性を整理し，漂流物評価フローに反映して説明すること。	後日回答
29	R元.5.21	・漂流する可能性がある対象物（プレジャーボート，消波ブロック，捨石マウンド，護岸構成材，荷揚場の退避できない車両，東防潮堤の衝突船舶等）について，海水ポンプの取水性に影響を与えないとする評価の考え方と根拠を説明すること。また，敷地の3～5kmの範囲を航行する船舶の種類及びその船舶がサイトに与える影響について説明すること。	後日回答
30	R元.5.21	・軌跡シミュレーションについては，水分子の移動解析か津波の海面に浮遊する物体（漂流物）の移動解析かを確認した上で，浮遊物体の移動解析であれば，解析手法の妥当性（新しい解析手法なのかを含む），漂流物の到達範囲の適用性について説明すること。特に，解析手法の妥当性においては，漂流物の特性（重量，慣性力，流水抵抗形状等）や移動継続時間に関する考え方を説明すること。なお，解析手法の妥当性の確認は，先行審査の適用実績及び適用範囲を踏まえて行うこと。	後日回答
31	R元.5.21	・海水ポンプの長尺化によって，ベルマウス下端が取水槽底面に近接しているポンプを継続運転した場合の砂の移動及び堆積による影響について，設置位置の異なる循環水ポンプの運転実績から影響がないことを確認できるとしていることの根拠を説明すること。	後日回答

## 指摘事項に対する回答【No.9】

### ■ 指摘事項

#### 【No.9 津波荷重の設定】

1. ソリトン分裂波及び砕波発生の可能性について、島根サイトにおける基準津波の特性（短周期）、沿岸の陸海域の地形及び先行実績を踏まえ明示的に示すとともに、それらによる防波壁及び防波扉に対する波圧荷重評価への影響について水理試験等の科学的根拠に基づいて説明すること。
2. また、これらに加え、水際線近傍の陸上部に設置された防波壁及び防波扉に対して、海上構造物を対象とした谷本式を適用することの妥当性を説明すること。説明に当たっては、防波壁設置位置におけるフルード数等の指標を考慮のうえ、国交省暫定指針等の既往評価式との比較を示すこと。

### ■ 回答

#### 1. ソリトン分裂波及び砕波発生の可能性について

- ・津波波圧算定式は平面二次元津波シミュレーションによる津波水位を用いて「防波堤の耐津波設計ガイドライン」による波圧算定式選定フローに基づき、ソリトン分裂波や越流の発生の有無を考慮し選定する。
- ・科学的根拠に基づきソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響を確認するため、ソリトン分裂波や砕波を表現可能なCADMAS-SURF/3D (Ver.1.5)を用いて断面二次元及び三次元津波シミュレーションによる検討を実施する。

#### 2. 谷本式を適用することの妥当性について

- ・陸上部に設置された防波壁等の津波波圧の算定方法として、海中の直立壁に作用する場合の津波波圧算定方法を用いているが、国交省暫定指針等の既往評価式による津波波圧と比較すること等により、谷本式を適用することの妥当性を説明する。

# 検討方針（1 / 2）

## **1. 「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に基づく津波波圧算定式の選定**

津波波圧算定式は平面二次元津波シミュレーションによる津波水位を用いて「防波堤の耐津波設計ガイドライン」による波圧算定式選定フローに基づき、ソリトン分裂波や越流の発生の有無を考慮し選定する。

## **2. ソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響検討**

科学的根拠に基づきソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響を確認するため、ソリトン分裂波や砕波を表現可能なCADMAS-SURF/3D (Ver.1.5)を用いて断面二次元及び三次元津波シミュレーションによる検討を実施する。影響検討に当たっては、次頁に示す考え方により行う。

## **3. 谷本式を適用することの妥当性検討**

陸上部に設置された防波壁等の津波波圧の算定方法として、海中の直立壁に作用する場合の津波波圧算定方法を用いているが、国交省暫定指針等の既往評価式による津波波圧と比較すること等により、谷本式を適用することの妥当性を説明する。

## 検討方針 (2 / 2)

- ソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響検討に当たっては、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に示される波圧算定式選定フローに基づき、平面二次元津波シミュレーションによる津波水位を用いて行う。
- また、科学的根拠に基づきソリトン分裂波及び砕波の発生の有無を確認するため、サイト近傍の地形特性を再現した上で、断面二次元及び三次元津波シミュレーションを行い、防波壁位置における水位の時刻歴波形からソリトン分裂波及び砕波の発生と敷地への浸水の有無の確認を行う。
- 平面二次元津波シミュレーション結果を踏まえ、南北方向の断面を選定し、屈折や回折の影響がない断面二次元モデルによる津波シミュレーションを実施する。また、平面二次元津波シミュレーションにおいて最高水位を示す防波壁端部近傍におけるソリトン分裂や砕波の発生有無を確認するため、三次元津波シミュレーションを実施する。
- ソリトン分裂波は津波の伝播過程で複数の波に分裂し、波高が増幅する現象である。また、砕波は波が浅海域を進行する際に、波高が高くなると波が砕け、波高が急激に小さくなる現象である。いずれも構造物へ衝撃的な波圧を作用させる可能性がある現象である。
- ソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響について、水位の時刻歴波形を確認するとともに、防波壁有りモデルによる三次元津波シミュレーションにより防波壁に作用する波圧を直接算出し、その影響を確認する。

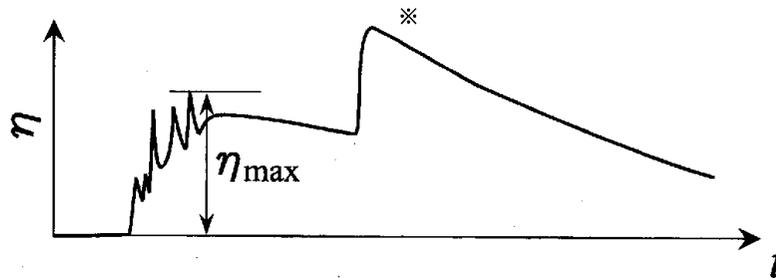


図-10 ソリトン分裂波の最大遡上水深

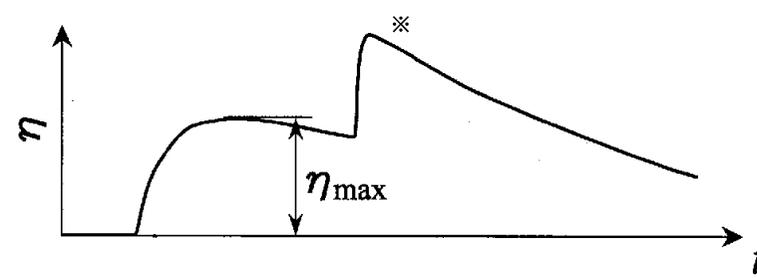


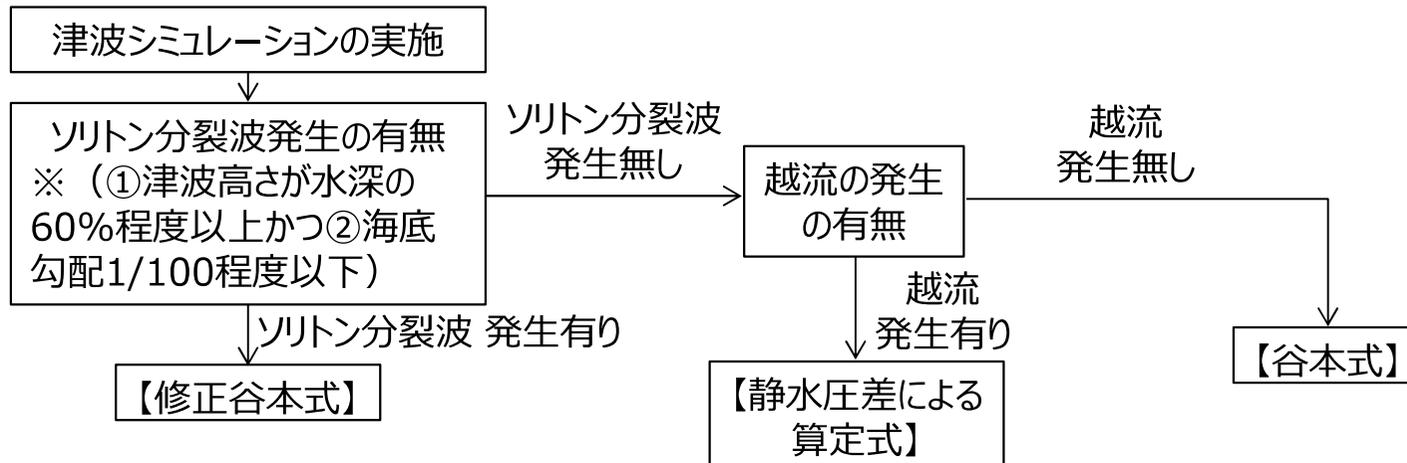
図-9 非分裂波の最大遡上水深

### ソリトン分裂波及び非分裂波のイメージ

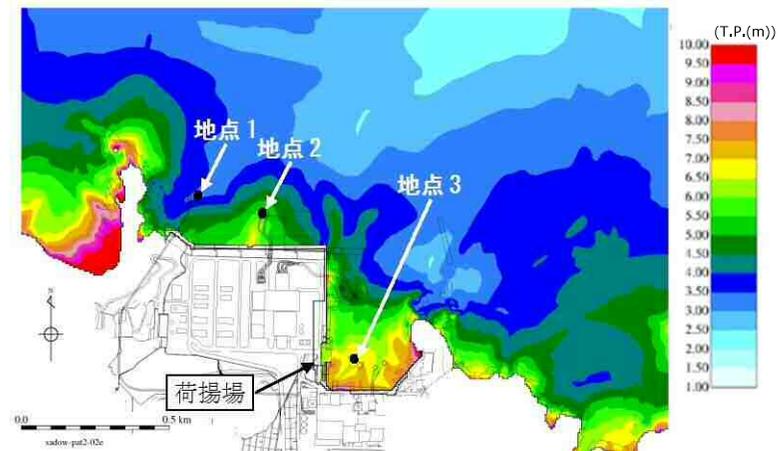
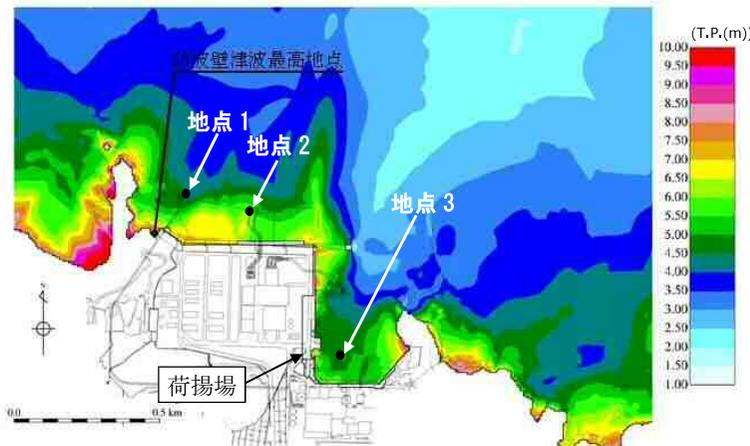
護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，朝倉ほか(2000)より引用  
 ※ $\eta_{max}$ 後の水位の上昇は反射波を示す

# 1. 防波堤の耐津波設計ガイドラインによる検討

- 防波壁及び防波扉は、直立護岸上あるいは水際線近傍に設置しており、到達した津波による波力は、当該施設に直接作用するため、「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）」に基づき、平面二次元津波シミュレーション結果を用いてソリトン分裂波や越流の発生の有無を考慮し、谷本式、修正谷本式及び静水圧差による算定式のいずれかを用いて算定する。



【防波堤の耐津波設計ガイドラインによる波圧算定式選定フロー】



【基準津波による最高水位分布（基準津波 1：防波堤有り）】 【基準津波による最高水位分布（基準津波 1：防波堤無し）】

# 1. 防波堤の耐津波設計ガイドラインによる検討（まとめ）

- ①及び②の検討により、ソリトン分裂波は発生していないと判断した。
- また、平面二次元津波シミュレーションの結果より、津波高さの最大値はT.P.+11.6mであり、朔望平均満潮位（T.P.+0.46m）及び潮位のばらつき（0.16m）を考慮しても、防波壁の天端高さはT.P.+15.0mであるため津波は越流しないことから、波圧算定式として谷本式を選定した。

## ①津波高さ和水深の割合

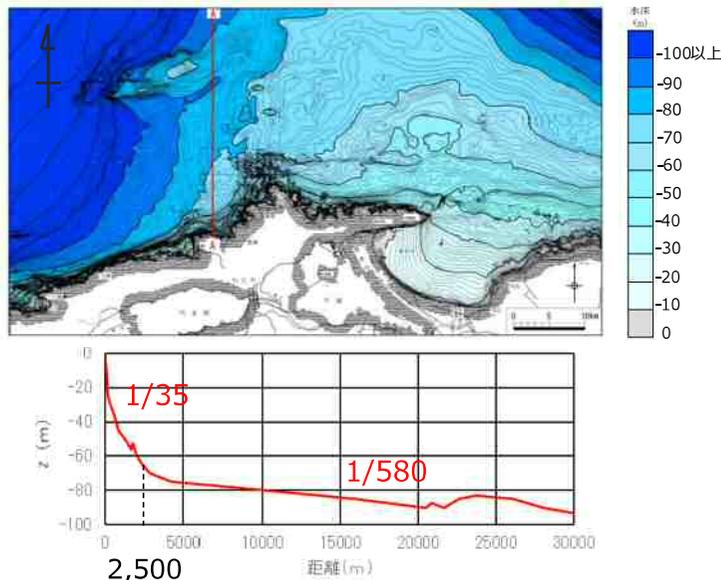
- 津波高さは水深の60%未満となった。

地点	(1)水深	(2)津波高さ※		(2)/(1)	
		防波堤有り	防波堤無し	防波堤有り	防波堤無し
地点1	16m	5.0m	4.0m	31.3%	25.0%
地点2	16m	6.0m	6.0m	37.5%	37.5%
地点3	17m	5.0m	7.0m	29.4%	41.2%

※ 平面二次元津波シミュレーションによる津波高さを保守的に評価した値

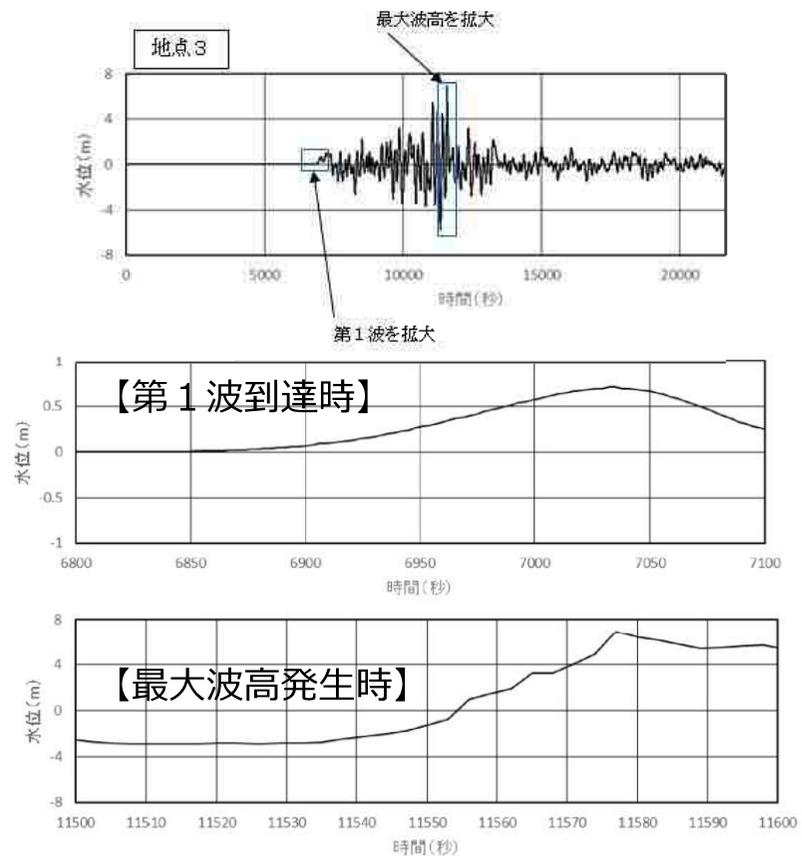
## ②海底の勾配

- 発電所前面の海底地形は約2,500mから施設近傍までの平均勾配は約1/35 (> 1/100) となった。



海底地形断面図

## 【参考】津波高さの時刻歴波形の確認



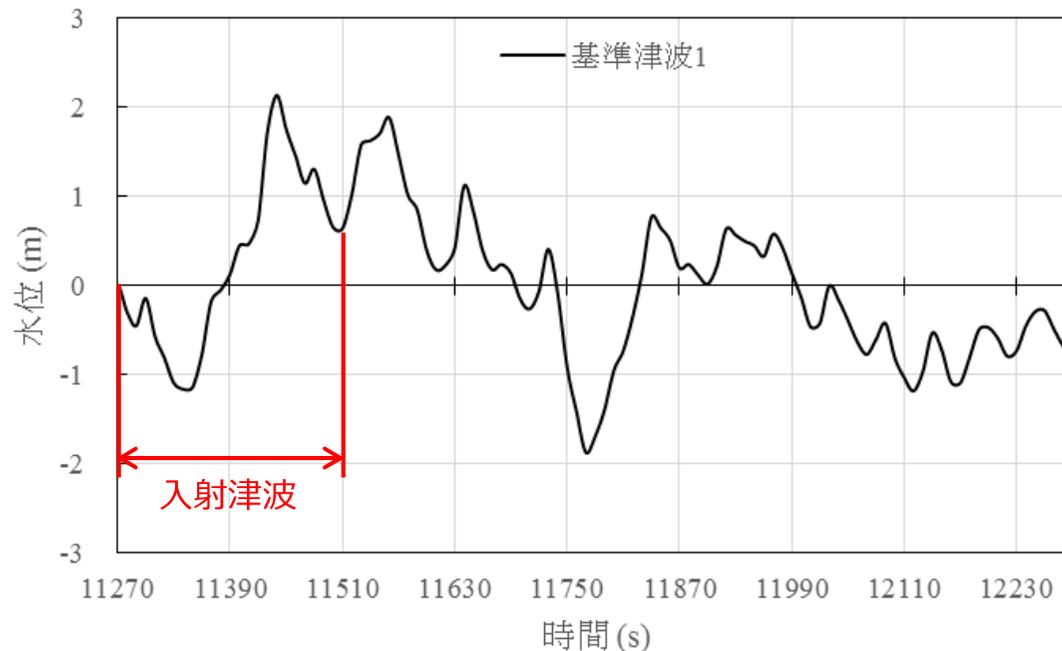
津波高さの時刻歴波形図  
(地点3, 基準津波1: 防波堤無し)

## 2. ソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響

### 2.1 断面二次元津波シミュレーションによる検討

- 科学的根拠に基づきソリトン分裂波及び砕波の発生の有無を確認するためソリトン分裂波及び砕波を表現可能な断面二次元津波シミュレーションを行う。
- 断面二次元津波シミュレーションには、Navier-Stokes方程式と連続の式に基づいた解析手法であり、ソリトン分裂波及び砕波を表現可能な数値波動水槽\*<sup>1</sup>CADMAS-SURF/3D (Ver.1.5)を用いる。
- 断面二次元津波シミュレーションでは、屈折や回折の影響がないため、一般的には最大波を入射すれば最も安全側（最も入射津波が高い状態）の検討となる。したがって、入射津波は、平面二次元津波シミュレーションによる基準津波1の出力波形から最大波（押し波1波）を抽出して基準津波策定位置に入力した。

\* 1 : 数値流体力学的手法に基づく海岸波動シミュレータの呼称。

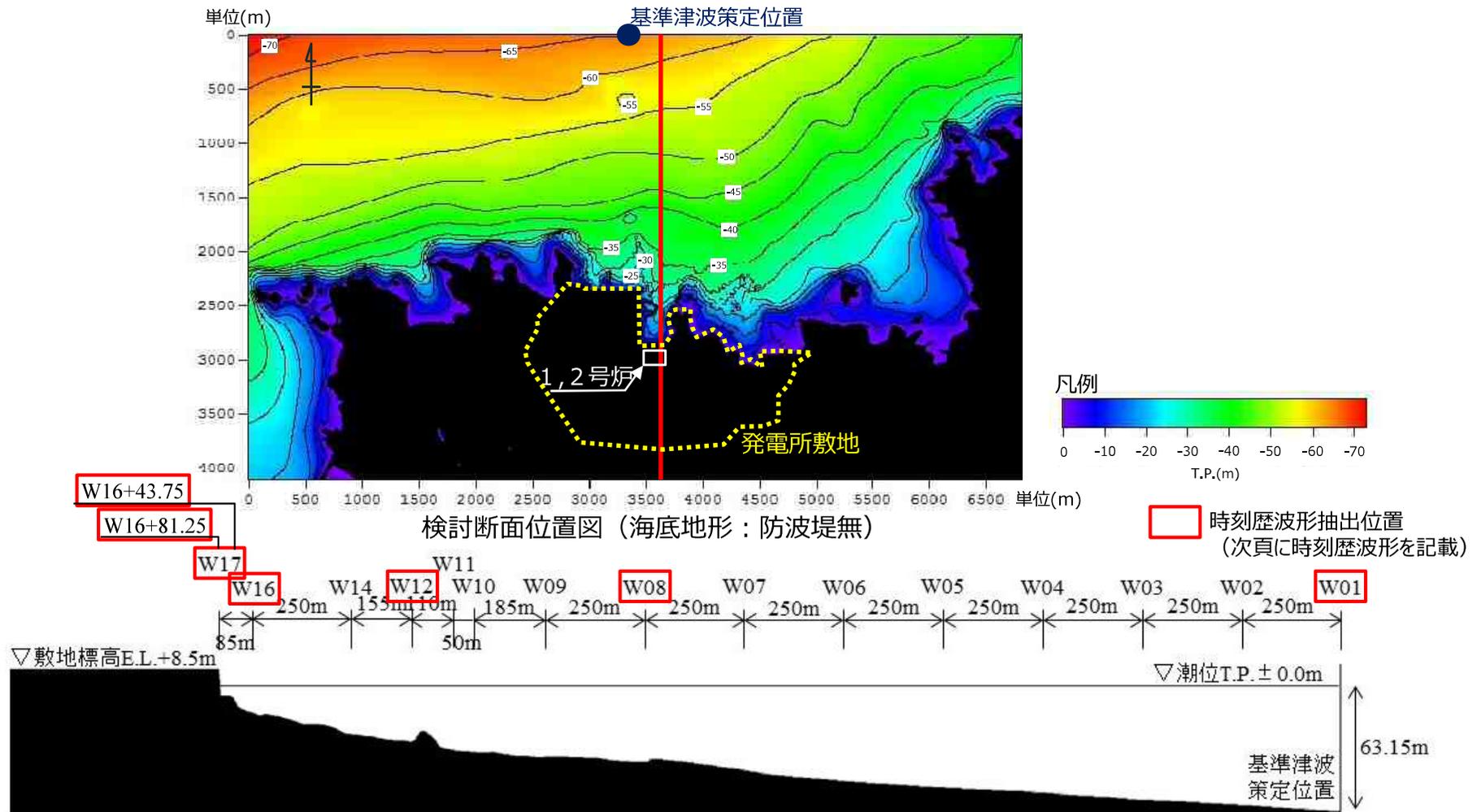


基準津波1の時刻歴波形図（基準津波策定位置）

## 2. ソリトン分裂波及び碎波の発生による津波波圧への影響

### 2.1 断面二次元津波シミュレーションによる検討（検討断面位置）

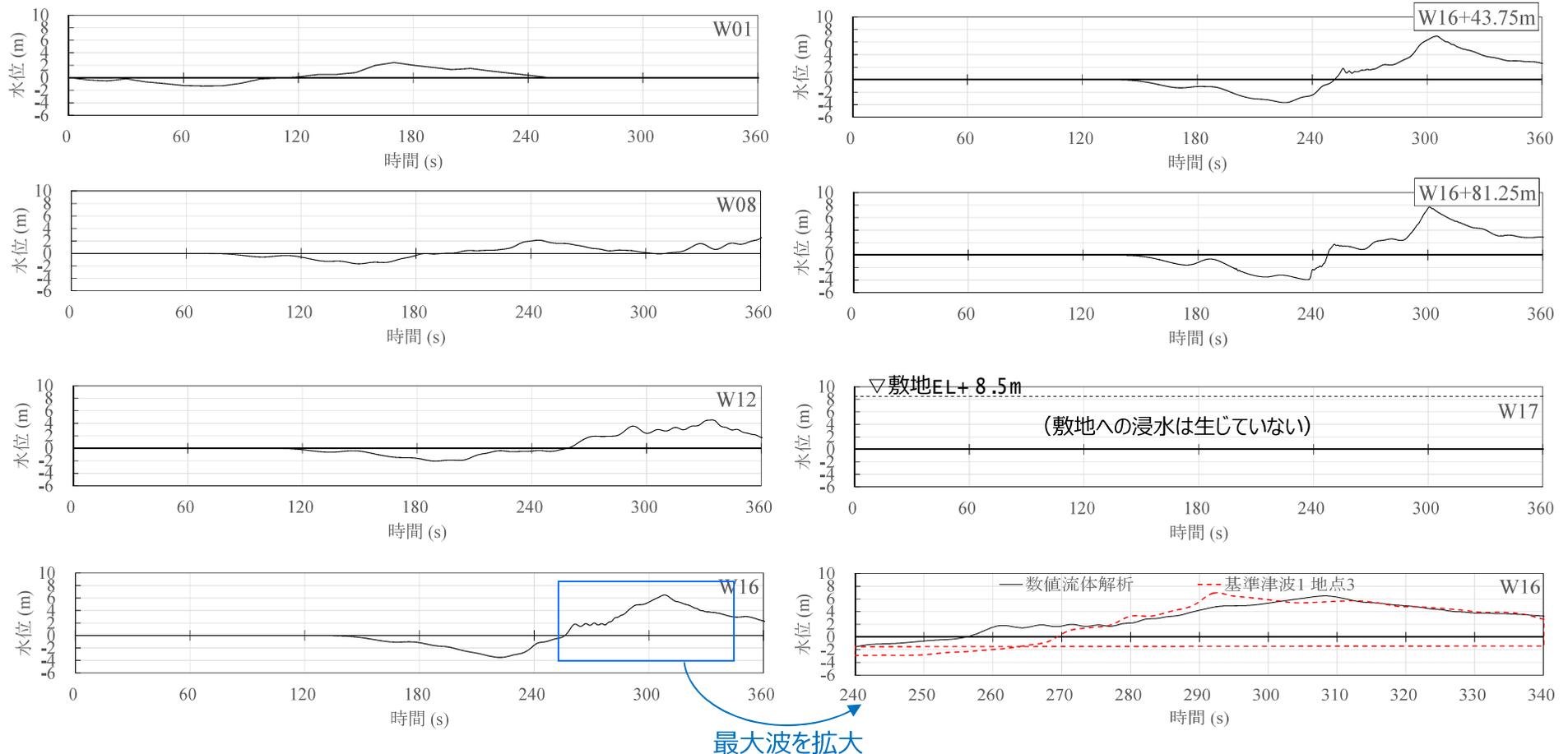
- 断面二次元津波シミュレーションにおける検討断面位置を以下に示す。
- 検討断面は、平面二次元津波シミュレーションにおいて基準津波 1（防波堤無）の入力津波高さが最も高くなる 1, 2号炉前面とする（P11最高水位分布 参照）。断面方向は、防波壁の延長方向に直交し、海底地形を示す等水深線ともほぼ直交する南北方向とする。



## 2. ソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響

### 2.1 断面二次元津波シミュレーションによる検討（まとめ）

- 発電所沖合から防波壁の近傍において、ソリトン分裂波を示す波形がなく、水位は緩やかに上昇していることを確認した（W 01, W 08, W 12, W 16, W 16+ 43.75m）。また、断面二次元津波シミュレーションの結果は、平面二次元津波シミュレーションと同等の津波を再現できていることを確認した（W 16）。
- 断面二次元津波シミュレーションにおいては、敷地（EL+ 8.5m）への浸水は生じないことを確認した（W 17）。
- W 16+ 81.25m においては、防波壁近傍位置で水位が最大となる時刻にソリトン分裂波及び砕波は発生しないことを確認した。しかしながら、250秒付近において波形の乱れが確認できることから、次章において津波波圧への影響を確認する。



断面二次元津波シミュレーションにおける水位の時刻歴波形（1，2号炉検討断面）

## 2.2 三次元津波シミュレーションによる検討

- 前項(2.1)で行った断面二次元津波シミュレーションでは、島根原子力発電所の代表断面について検討したため、ここでは平面地形を反映した三次元津波シミュレーションを行い、水位の時刻歴波形によりソリトン分裂波及び砕波の発生の有無を確認する。
- 入射津波については、前項(2.1)の断面二次元津波シミュレーション結果によると、検討断面(1, 2号炉前面)の防波壁位置において津波が到達しないことから、防波壁に作用する津波波圧を検討するため、仮想的な津波(波圧検討用津波)を設定する。
- 解析モデルについては、防波壁位置におけるソリトン分裂波や砕波の発生有無を確認するため、施設護岸や防波壁による反射波が発生しないよう、敷地高さを一様に前面の海底面標高と設定した地形モデルとする。
- また、ソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響について、水位の時刻歴波形を確認するとともに、防波壁有りモデルによる三次元津波シミュレーションにより防波壁に作用する波圧を直接算出し、その影響を確認する。

## 2. ソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響

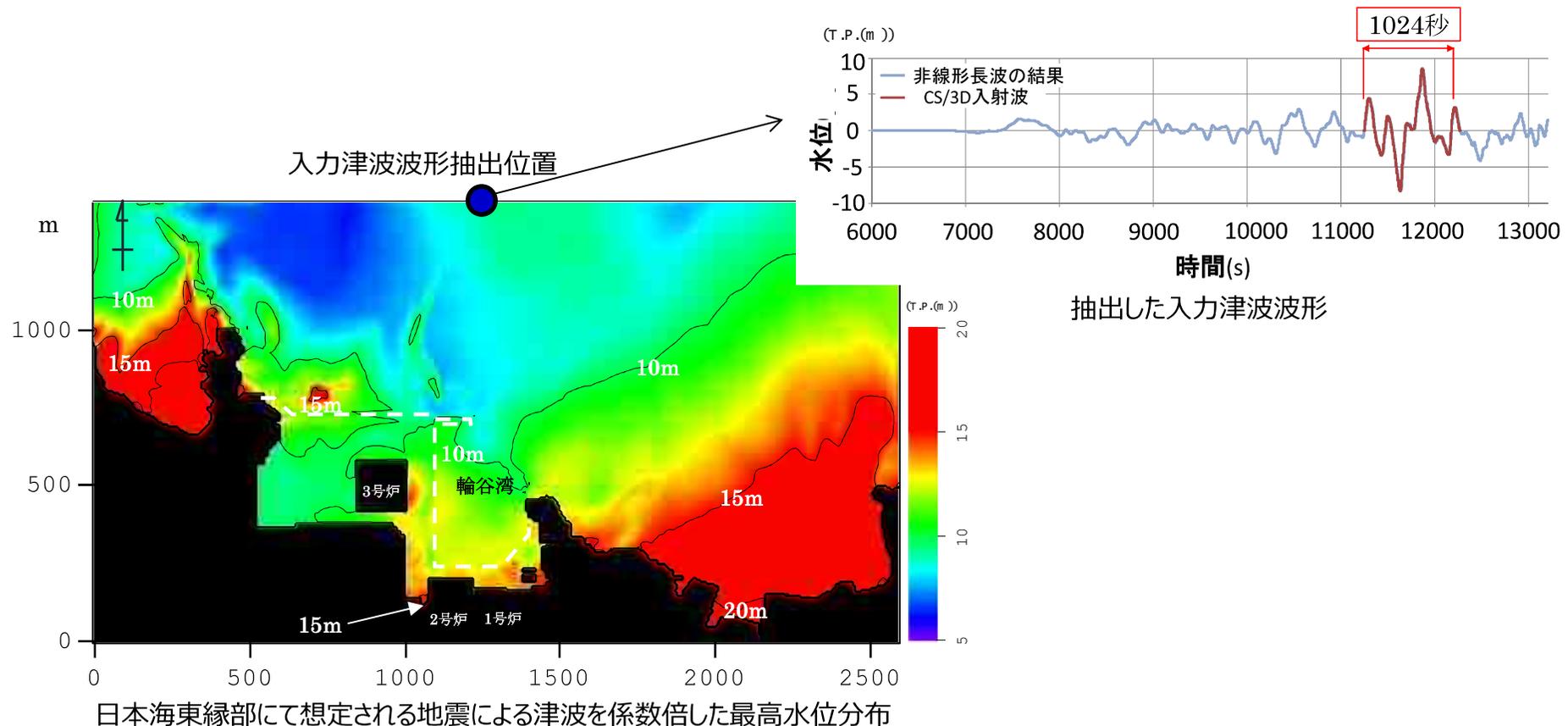
### 2.2 三次元津波シミュレーションによる検討(波圧検討用津波設定)

#### ■ 波圧検討用津波の設定

『波圧検討用津波』として日本海東縁部にて想定される地震による津波を基に入射水位及び流量を係数倍して、防波壁設置位置において津波波圧が生じるように、防波壁無し敷地において遡上高がT.P.+ 15mとなる仮想的な津波を設定する。波圧検討用津波による最高水位分布を以下に示す。なお、本波圧検討用津波は、防波壁等の設計用津波波圧として用いるものではない。

#### ■ 入力津波波形の抽出

三次元津波シミュレーションによる検討を行うため、波圧検討用津波の沖合いにおける進行波津波波形を抽出した。入力する津波波形は最大波を含む赤線で示した1024秒区間とする。

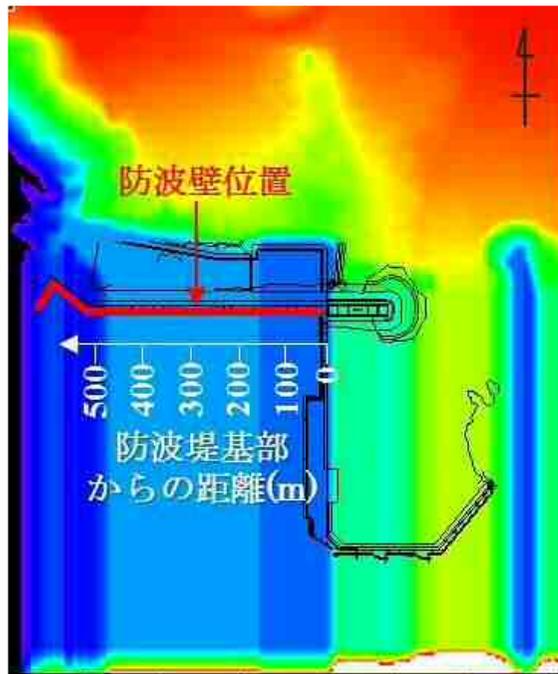


## 2. ソリトン分裂波及び碎波の発生による津波波圧への影響

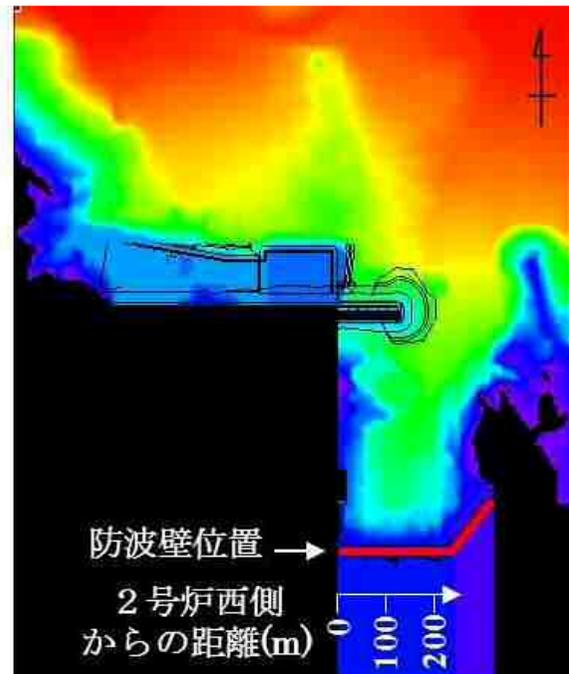
### 2.2 三次元津波シミュレーションによる検討（解析モデル他）

- 防波壁位置での進行波成分の津波の波形を抽出し、ソリトン分裂波や碎波の発生を確認する。
- 敷地をモデル化しない解析モデルによる数値解析

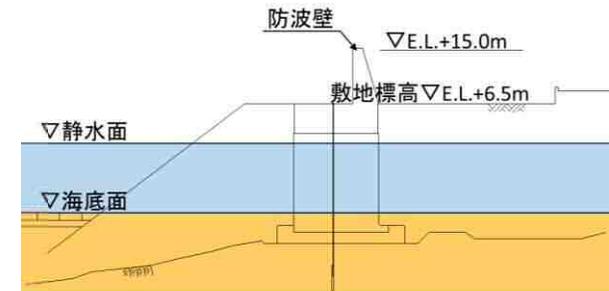
進行波成分の津波の波形を確認するため、3号炉前面の検討では、3号炉北側防波壁前面の海底面を起点として敷地側へ一様な地形とする。1, 2号炉前面の検討では、3号炉前面及び側面の地形が進行波波形に影響するため、3号炉周辺の敷地高さは現況通りとし、1, 2号炉北側防波壁前面の海底面を起点として敷地側へ一様な地形とする。



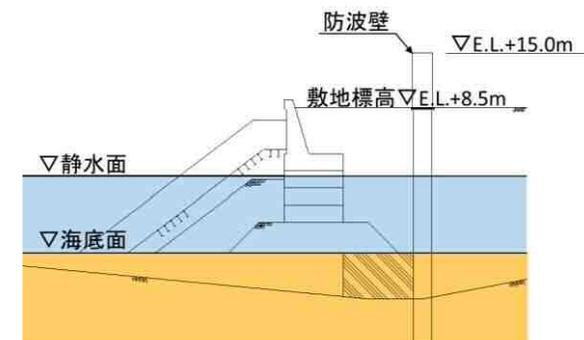
3号炉前面  
津波高の進行波成分を抽出した際の計算地形



1, 2号炉前面



3号炉前面計算地形（イメージ断面）



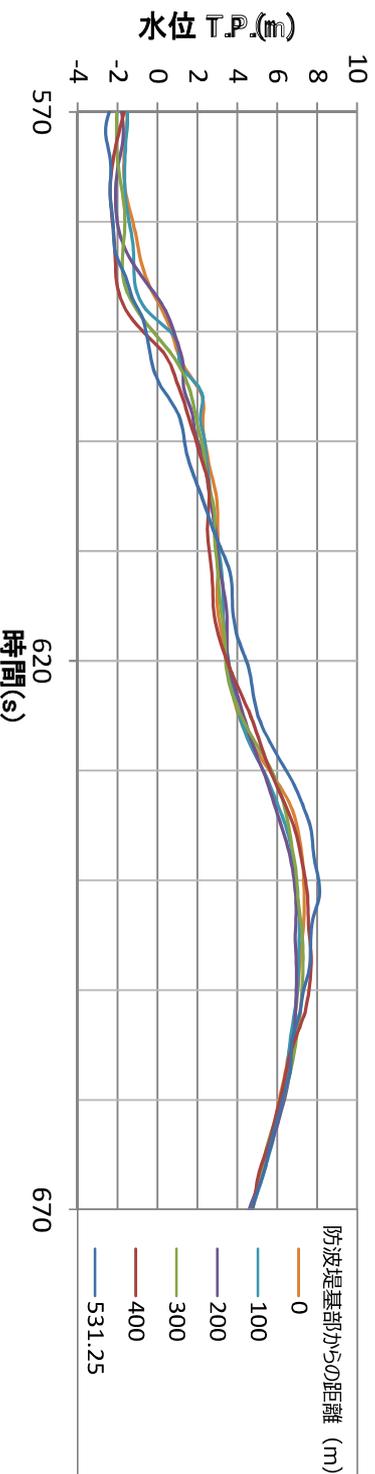
1, 2号炉前面計算地形（イメージ断面）

津波高の進行波成分を抽出した際の計算地形

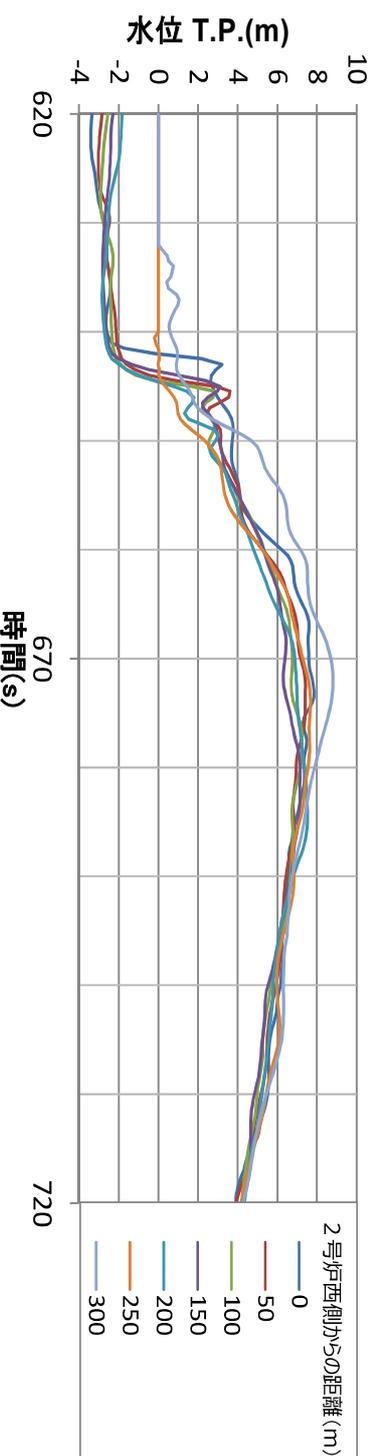
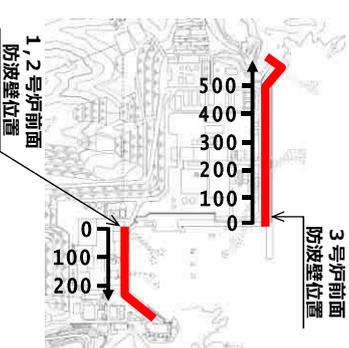
## 2. ソリトン分裂波及び砕波の発生による津波波圧への影響

### 2.2 三次元津波シミュレーションによる検討 (まとめ)

- 波圧検討用津波による水位の時刻歴波形から、3号炉前面においては水位が緩やかに上昇していることを確認し、ソリトン分裂波及び砕波を示す波形がないことを確認した。
- 1, 2号炉前面においては645秒付近で波形の立ち上がりが確認できるものの、防波壁位置において水位が最大となる時刻では明確なソリトン分裂波及び砕波は発生していないことを確認したが、三次元津波シミュレーションにより防波壁に作用する波圧を直接算出し、波圧分布を確認することとした。



三次元津波シミュレーションによる水位の時刻歴波形 (進行波成分, 3号炉前面)



三次元津波シミュレーションによる水位の時刻歴波形 (進行波成分, 1, 2号炉前面)

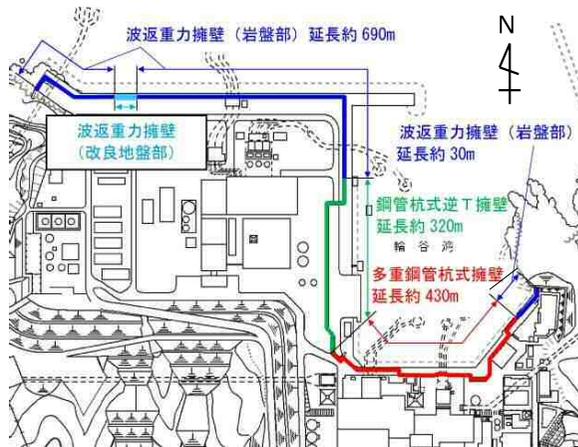
## 検討概要

- 陸上部に設置された防波壁等の津波波圧の算定方法として、海中の直立壁に作用する場合の津波波圧算定方法である谷本式を適用することについて確認する。
- 防波壁等の設計で考慮する津波波圧について、サイト特性（海底地形、敷地標高）を反映した三次元津波シミュレーションを行い、既往の津波波圧算定式との比較結果を踏まえて谷本式を適用することの妥当性について確認する。
- 防波壁有りモデルによる三次元津波シミュレーションにより防波壁に作用する波圧を直接算出し、波圧分布を確認する。
- 防波壁等への津波波圧の影響について詳細に把握するため、CADMAS-SURF/3D (Ver.1.5)を用いる。
- なお、入射津波については、「2.2 三次元津波シミュレーションによる検討」において使用する仮想的な津波（波圧検討用津波）を用いる。

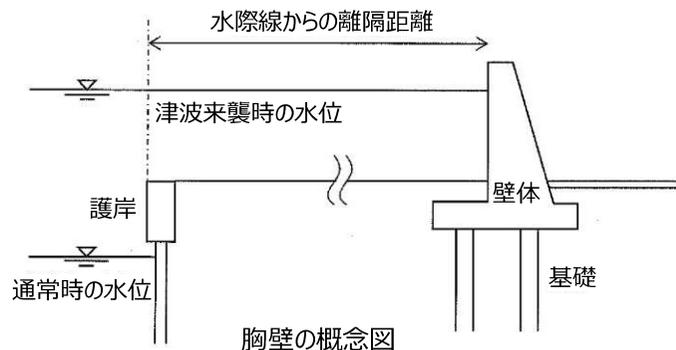
### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.1 島根原子力発電所における津波荷重設定の考え方

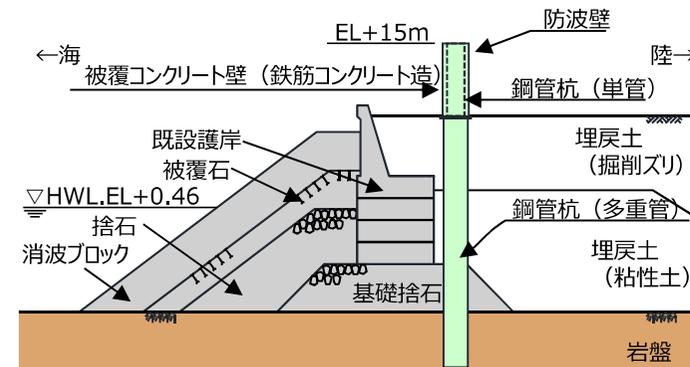
- 島根原子力発電所の防波壁は護岸直上あるいは水際に設置されているため、護岸の一部を構成する構造物とみなせることから、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月）（以下、港湾基準と示す）」における護岸の技術基準に準拠する。港湾基準においては、護岸に作用する津波波力の算定方法は、海中の直立壁に作用する津波波力と陸上の直立壁に作用する津波波力の2種類の算定方法が示されている。
- 陸上の直立壁としては胸壁が挙げられており、胸壁は水際線から離れた施設であるため、護岸に作用する津波波圧は海中の直立壁に作用する津波波力の算定式を採用する。海中の直立壁に作用する津波波力は、港湾基準において「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に基づき、谷本式、修正谷本式及び静水圧差による算定式のいずれかを選定する。
- 防波壁等への津波波力については、護岸に準拠して設定する。（P11, 12参照）



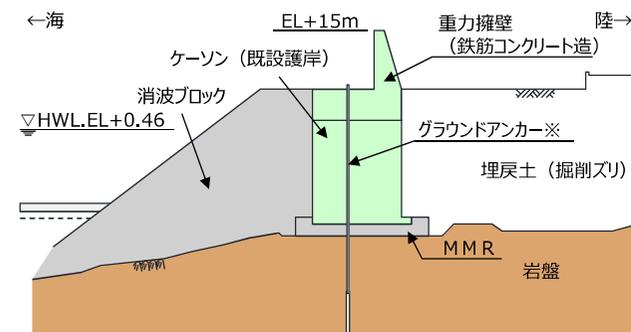
防波壁平面図



胸壁の概念図



防波壁 (多重鋼管杭式擁壁) 断面図



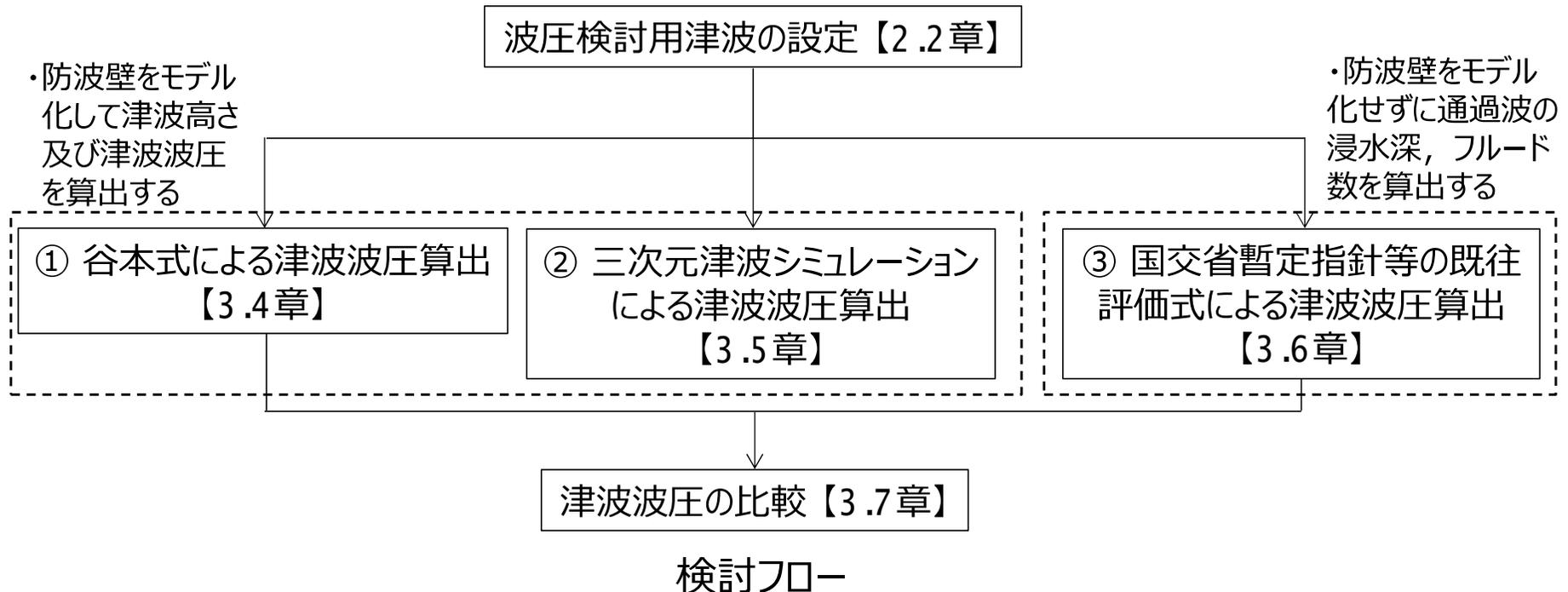
※グラウンドアンカーの効果を期待しなくても、耐震・耐津波安全性を担保している。

防波壁 (波返重力擁壁 (岩盤部)) 断面図

### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.2 津波波圧検討フロー

- 谷本式と国交省暫定指針等の既往評価式による津波波圧を比較するため、仮想的な津波（波圧検討用津波）を用いて、三次元津波シミュレーションにより実施する。また、三次元津波シミュレーションにより直接算出される津波波圧との比較、波圧分布状況を確認する。
  - ① 三次元津波シミュレーションにより、防波壁前面の津波高さを求め、谷本式による津波波圧を算出する。
  - ② 三次元津波シミュレーションより直接算出される津波波圧を抽出する。
  - ③ 浸水深及びフルード数を確認し、国交省暫定指針等の既往評価式による津波波圧を算出する。



### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.3 三次元津波シミュレーションにおける解析モデル

■ 三次元津波シミュレーションによる検討は、以下に示す解析モデルを用いて実施する。

#### ① 谷本式による津波波圧算出

防波壁へ衝突した反射の影響を考慮したシミュレーション結果による津波高さを用いて波圧を算定するため、海底地形及び敷地をモデル化するとともに、防波壁等の形状及び高さを再現した解析モデルとする。  
(P25参照)

#### ② 三次元津波シミュレーションによる津波波圧算出

防波壁に作用する波圧を算定するため、「① 谷本式による津波波圧算出」と同じ解析モデルにより行う。

#### ③ 国交省暫定指針等の既往評価式による津波波圧算出

敷地へ遡上するシミュレーション結果による、敷地への津波浸水深を用いて波圧を算定するため、海底地形は現況通りとし、敷地高さについては防波壁をモデル化せず護岸高さを起点として敷地側へ一様な解析モデルとする。(P33参照)

## 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.4 谷本式による津波波圧算出（算定式）

■ 三次元津波シミュレーションより、津波高さ（ $2 a_I$ ）を抽出し、津波波圧を算出する。

■ 防波壁に作用する津波波圧を谷本式より算出する。谷本式を以下に示す。

■ 谷本式

$$\eta^* = 3.0 a_I$$

$$P_1 = 2.2 \rho_0 g a_I$$

$$P_u = P_1$$

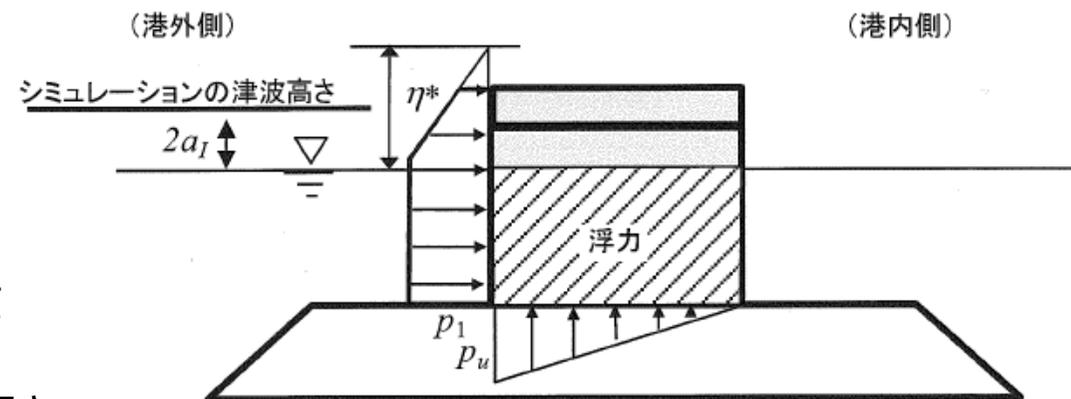
ここに、

$\eta^*$  : 静水面上の波圧作用高さ  
(m)

$a_I$  : 入射津波の静水面上の高さ  
(振幅) (m)

$\rho_0 g$  : 海水の単位体積重量  
( $\text{kN}/\text{m}^3$ )

$P_u$  : 直立壁前面下端における  
揚圧力 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )



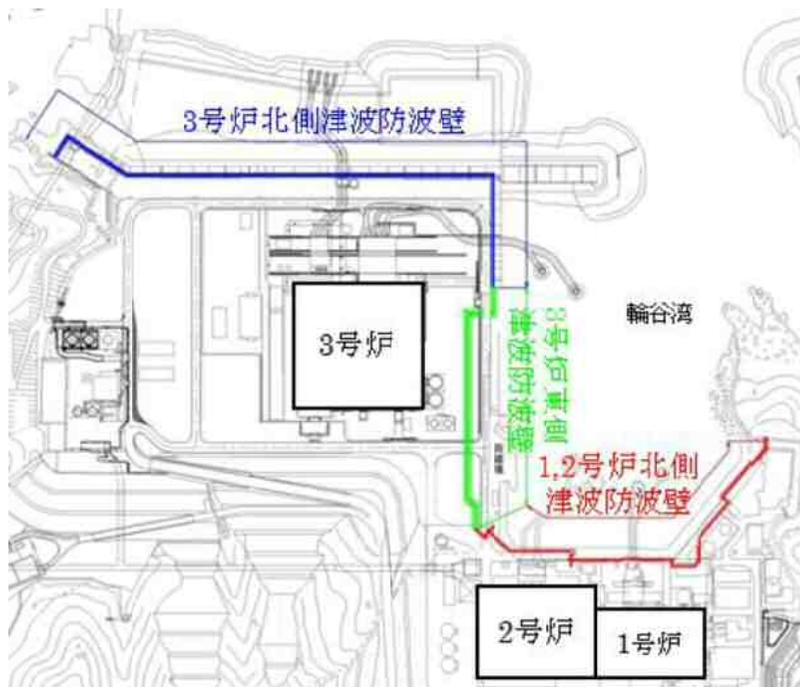
谷本式による波圧分布  
(背面水位が押し波時に静水面より下がらない場合)

- ・島根原子力発電所の防波壁背後は敷地であるため、港湾外の波圧を算定した図を引用した。
- ・なお、「背面水位が押し波時に静水面より下がる場合」でも港外側に作用する津波波圧は同じである。

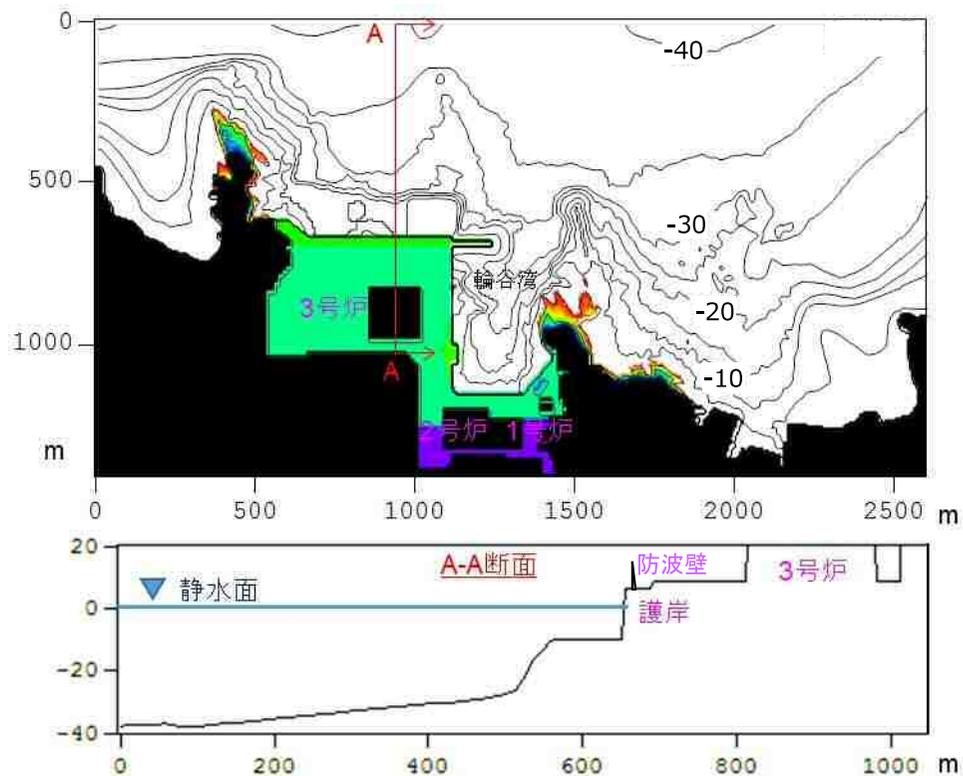
### 3.4 谷本式による津波波圧算出（解析モデル）

■ 防波壁をモデル化した解析モデルによる数値解析

防波壁位置における津波高さ及び津波波圧を算出するため、海底地形及び敷地をモデル化するとともに、防波壁等の形状及び高さを再現した地形とする。



平面図



3号炉前面地形

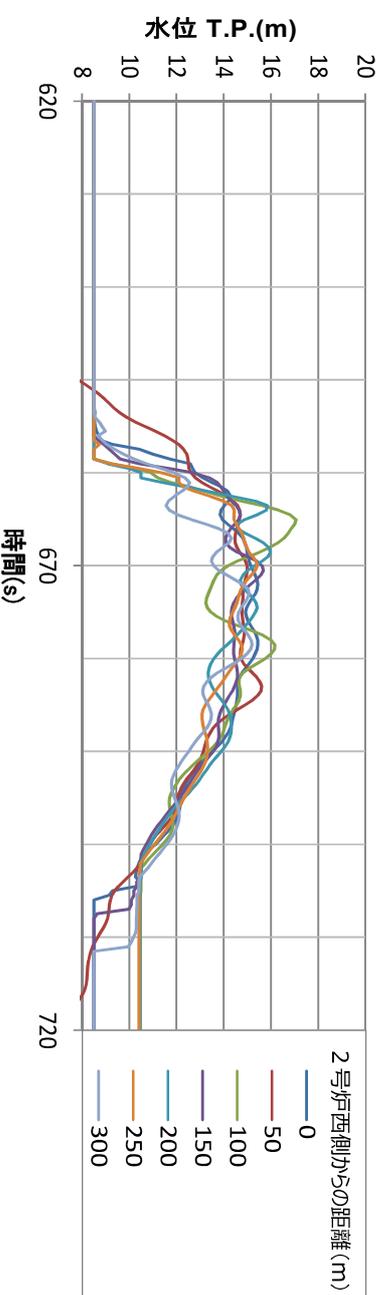
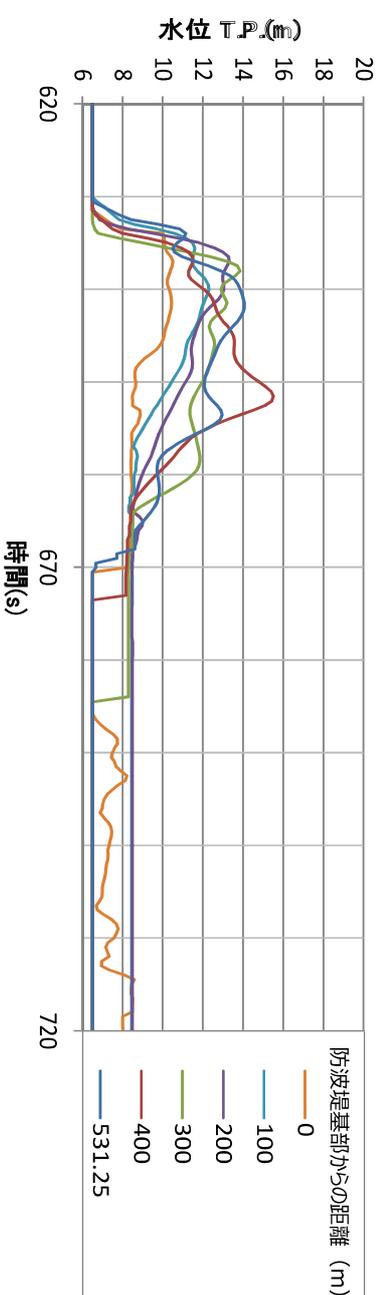
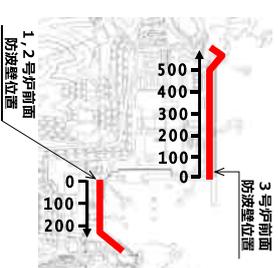
### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.4 谷本式による津波波圧算出 (解析結果)

#### ■ 防波壁前面における津波水位の波形

波圧検討用津波による防波壁前面における津波水位の波形を以下に示す。  
 3号炉前面では630秒付近から水位が上昇する。また、1, 2号炉前面では650秒付近から水位が上昇する。

— 防波壁



最大波到達時間帯の津波の作用状況 (防波壁有)

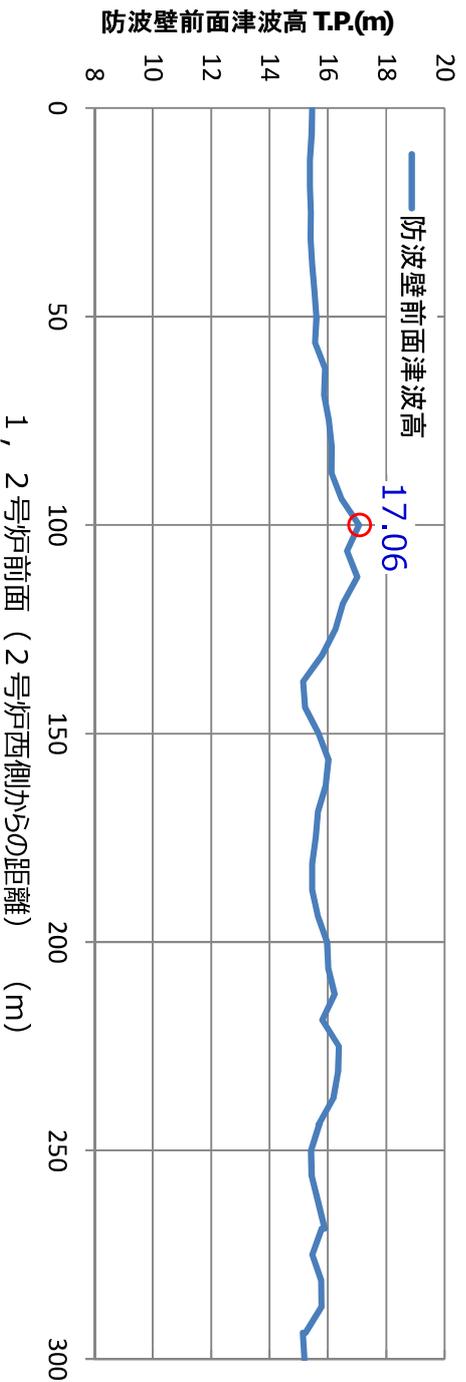
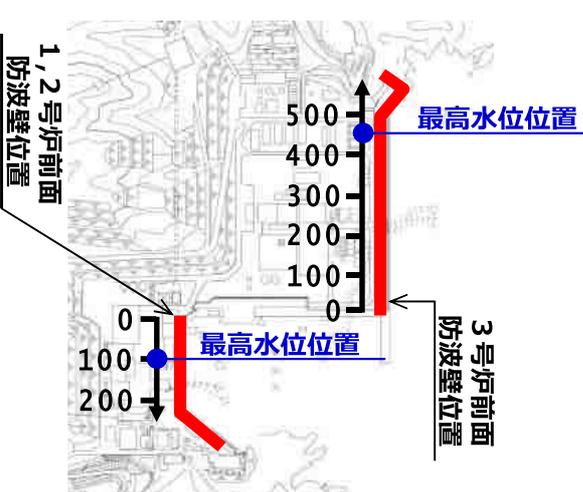
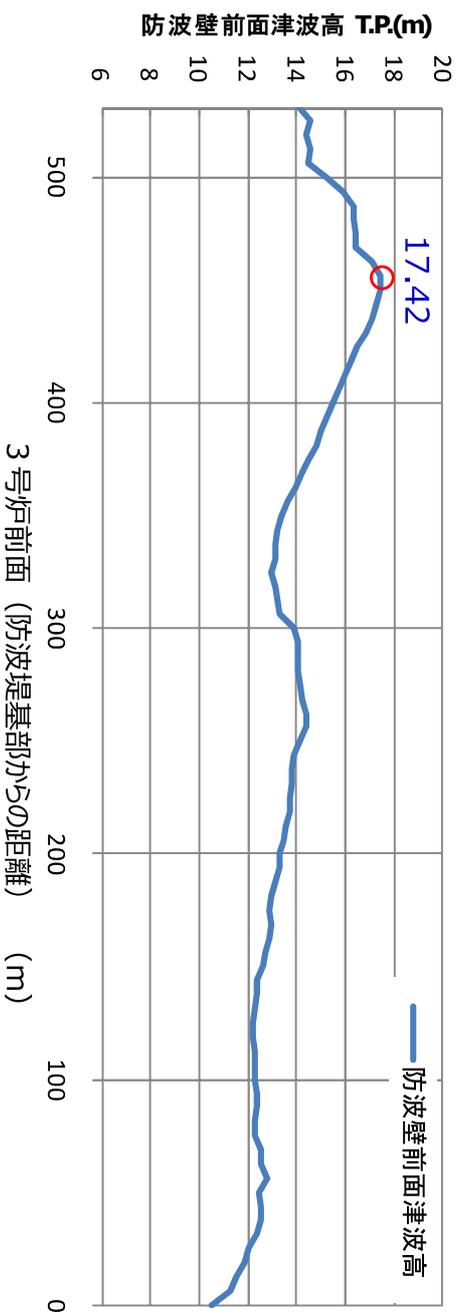
津波水位の波形

### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.4 谷本式による津波波圧算出 (解析結果)

#### ■ 防波壁前面における津波水位

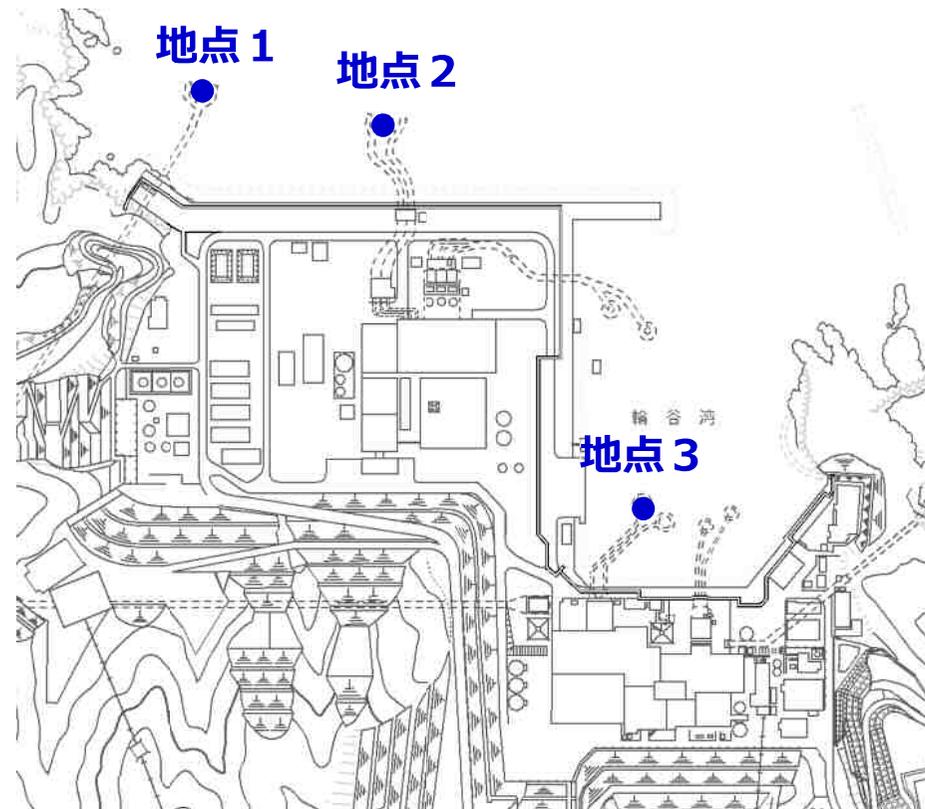
谷本式で使用する津波高さ (2 a<sub>T</sub>) は、波圧検討用津波を用いた三次元津波シミュレーションより抽出された防波壁前面における下図に示す最高水位を使用する。



三次元津波シミュレーションによる防波壁前面における最高水位分布

### 3. 谷本式を適用することの妥当性について (参考) 解析手法の検証 (1/2)

- ソリトン分裂波や碎波の発生確認及び谷本式を適用することの検討に用いる波圧検討用津波による三次元津波シミュレーションの結果が、平面二次元津波シミュレーションと同様の特性を有していることを確認する。
- 敷地周辺の3地点において、平面二次元及び三次元津波シミュレーションによる水位の時刻歴波形を確認する。

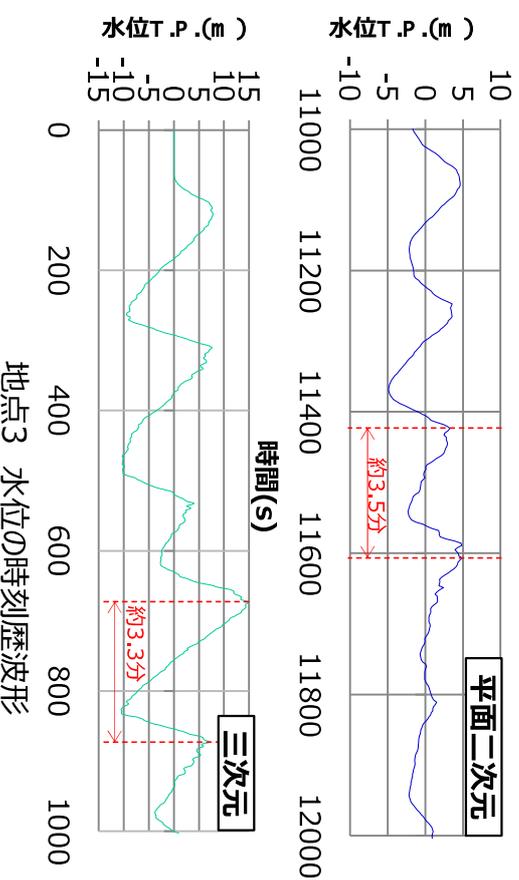
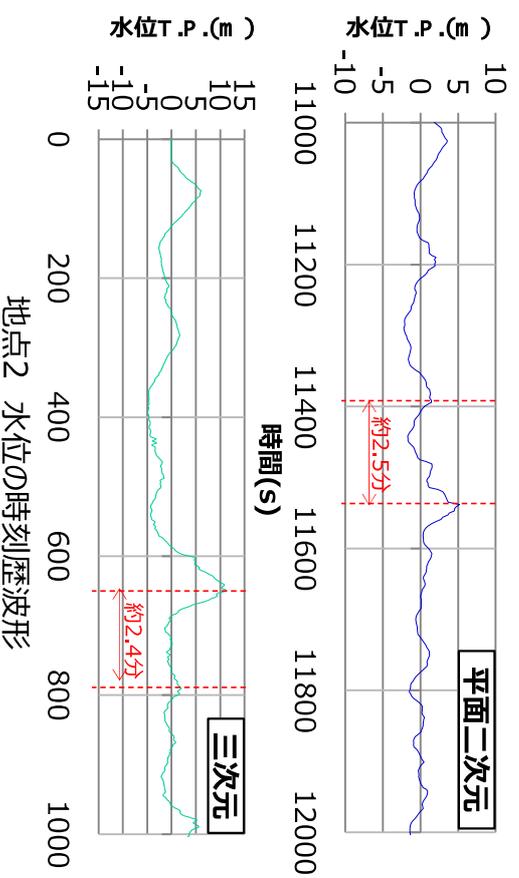
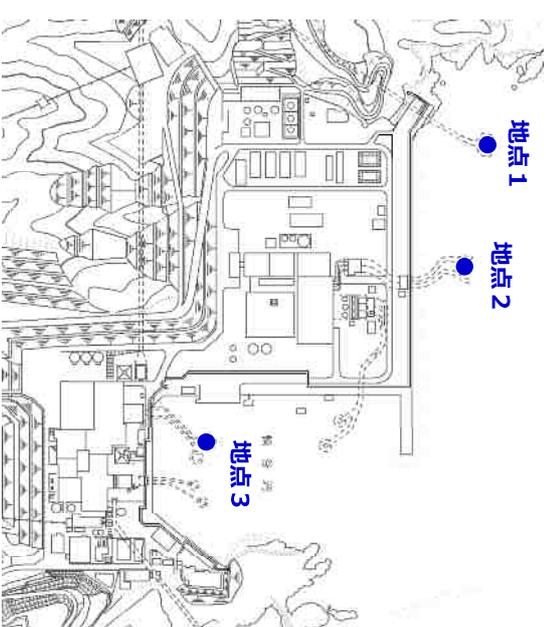
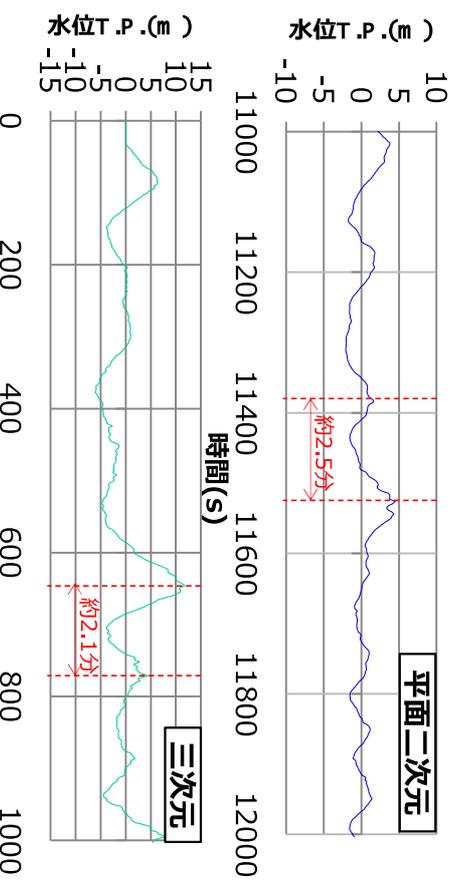


津波周期確認地点

### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## (参考) 解析手法の検証 (2/2)

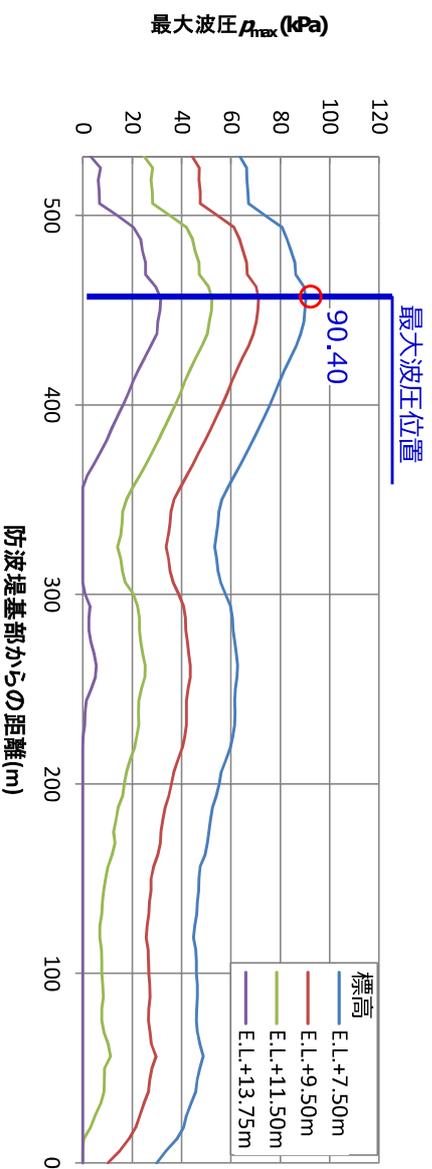
- 波圧検討用津波を用いた三次元津波シミュレーション及び平面二次元津波シミュレーションの水位の時刻歴波形を比較した結果、シミュレーションに用いる津波の違いによる水位の差はあるものの、同様の挙動を示していることを確認した。



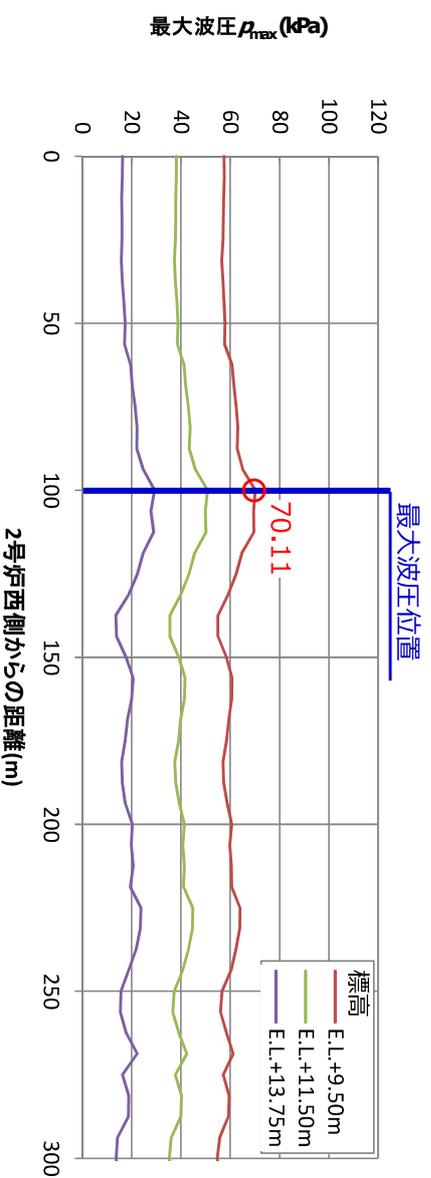
### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.5 三次元津波シミュレーションより直接算出される津波波圧

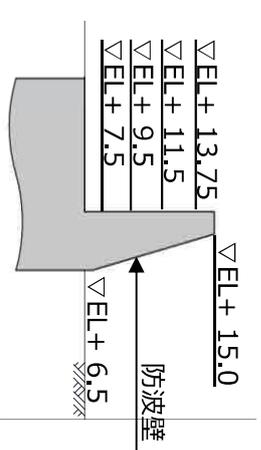
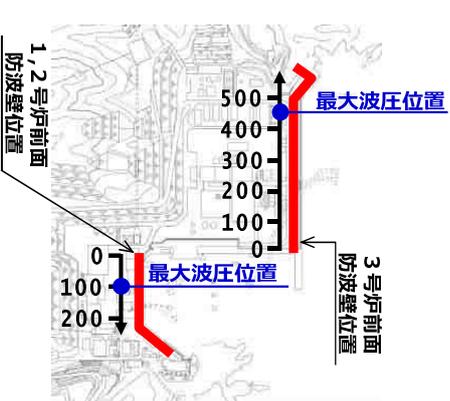
■ 波圧検討用津波を用いた三次元津波シミュレーションより直接算出される最大波圧分布及び最大波圧位置を以下に示す。



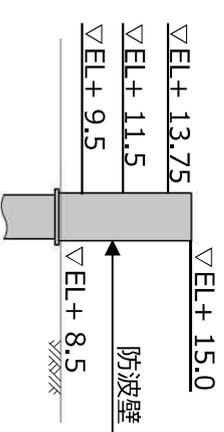
防波壁に作用する標高別の最大波圧分布 (3号炉前面)



防波壁に作用する標高別の最大波圧分布 (1, 2号炉前面)



(3号炉前面)

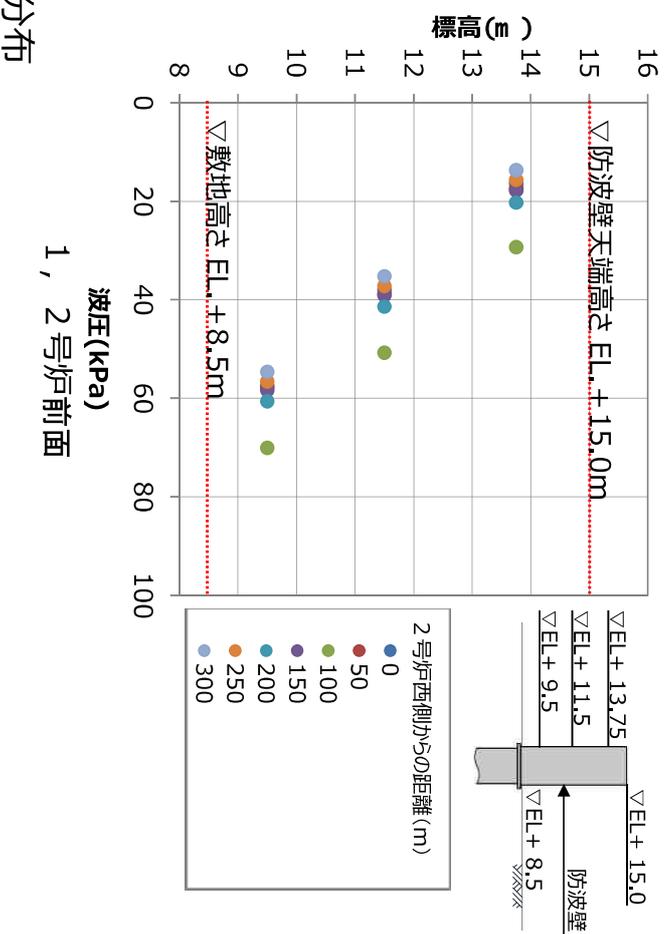
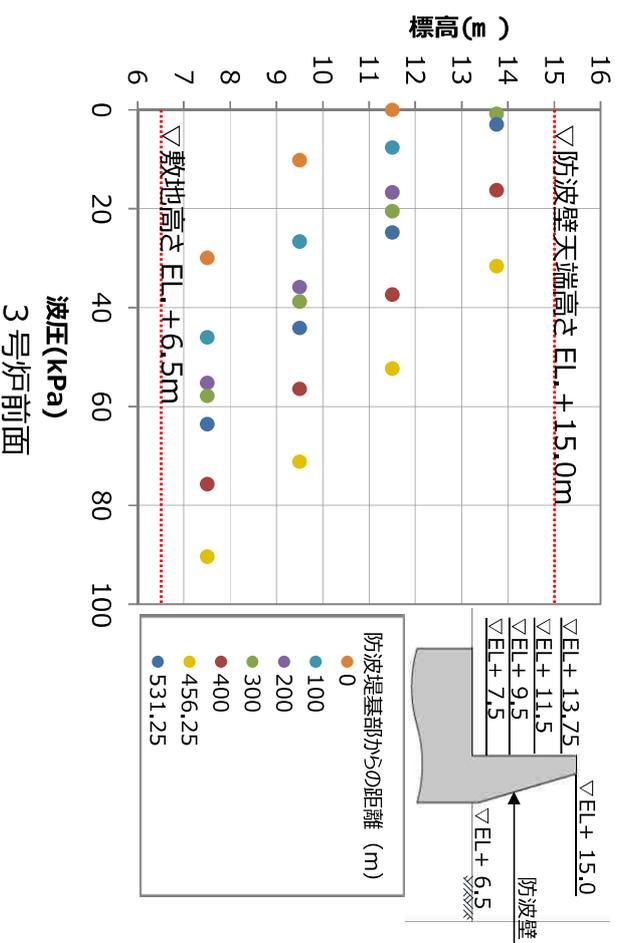
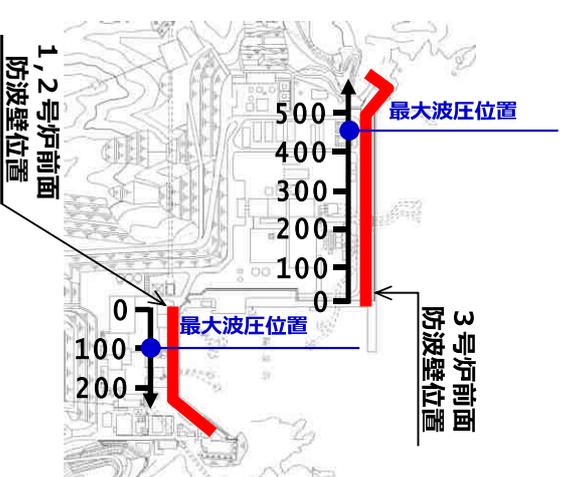


(1, 2号炉前面)

### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.5 三次元津波シミュレーションより直接算出される津波波圧

- 波圧検討用津波を用いた防波壁有りモデルによる三次元津波シミュレーションにより防波壁に作用する波圧を直接算出した結果を以下に示す。



### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

#### 3.6 国交省暫定指針等の既往評価式における津波波圧算出（算定式）

- 三次元津波シミュレーションより、浸水深及びフルード数を抽出し、津波波圧を算出する。
- 防波壁に作用する津波波圧を国交省暫定指針における評価式及び朝倉式により算出する。両式を以下に示す。

- 国交省暫定指針における評価式

$$q_z = \rho g (a h - z)$$

ここに、

$q_z$  : 構造設計用の進行方向の津波波圧 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$h$  : 設計用浸水深

$z$  : 当該部分の地盤面からの高さ ( $0 \leq z \leq a h$ )

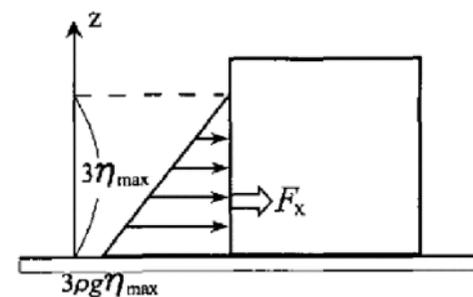
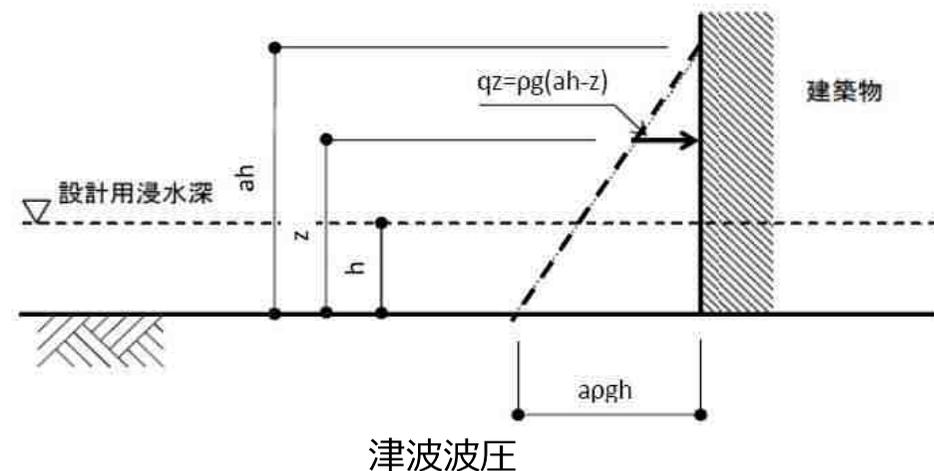
$a$  : 水深係数 (最大 : 3)

$\rho g$  : 海水の単位体積重量 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )

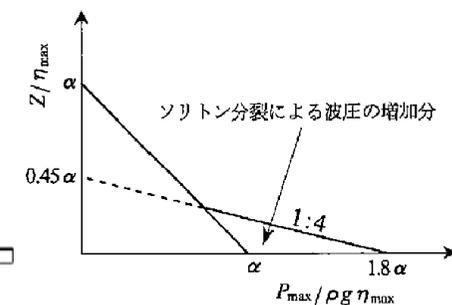
- 朝倉式

非分裂波の場合、フルード数が1.5以上では構造物前面に作用する津波波圧分布を規定する水平波圧指標（遡上水深に相当する静水压分布の倍率） $\alpha$ は最大で3.0となるとしている。

一方、ソリトン分裂の場合は、構造物前面に働く津波波圧は、構造物底面近傍で非分裂波の $\alpha$ を1.8倍した値となるとしている。



非分裂波の場合の津波  
水平波圧

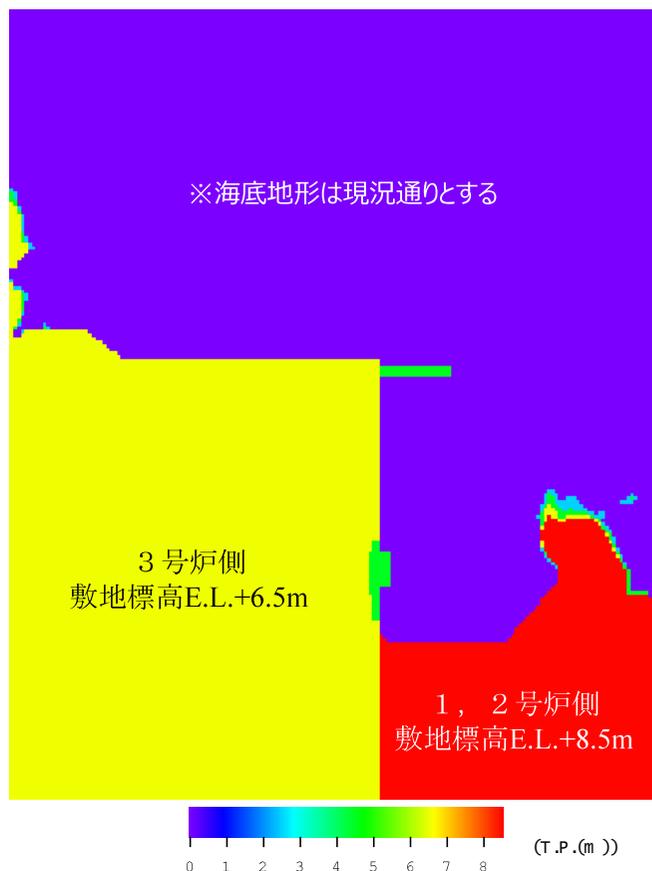


分裂波の無次元最大  
波圧分布

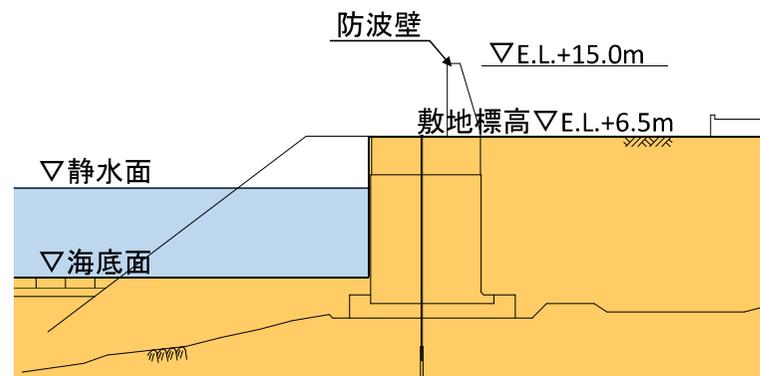
### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.6 国交省暫定指針等の既往評価式における津波波圧算出（解析モデル）

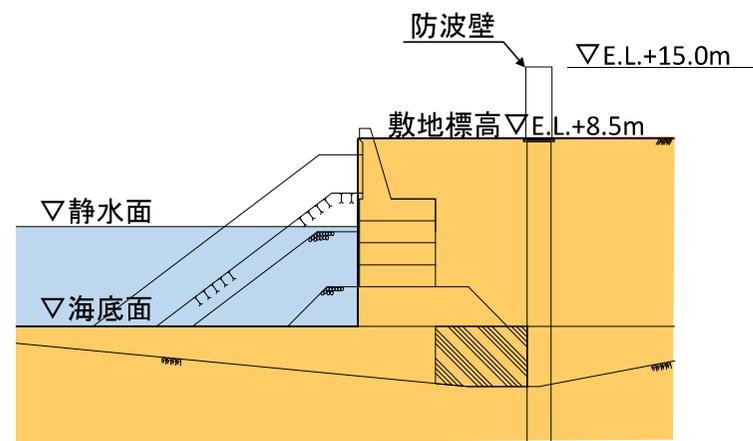
- 防波壁をモデル化しない解析モデルによる数値解析  
浸水深及びフルード数を確認するため、海底地形は現況通りとし、敷地高さについては、護岸高さを起点として敷地側へ一様な地形とする。



浸水深及びフルード数の進行波成分を抽出した際の計算地形



3号炉側計算地形（イメージ断面）



1, 2号炉側計算地形（イメージ断面）

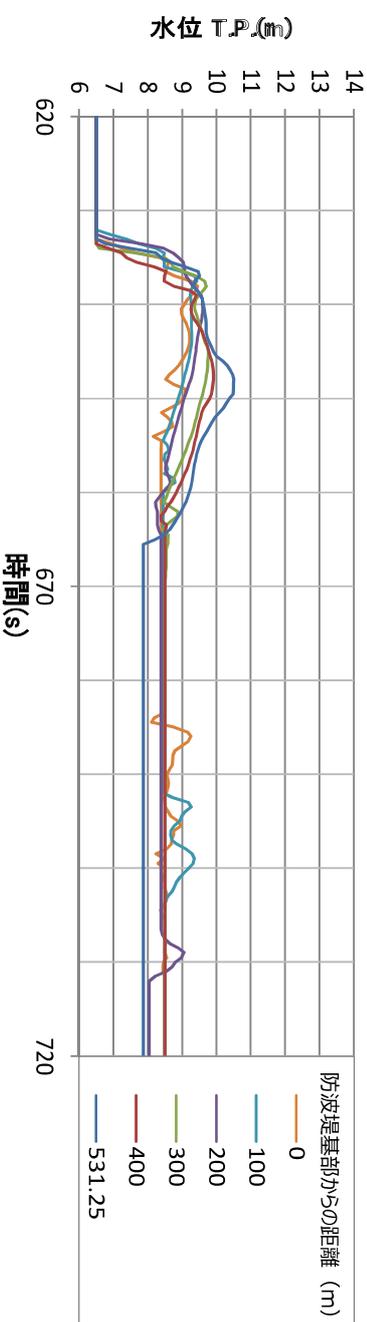
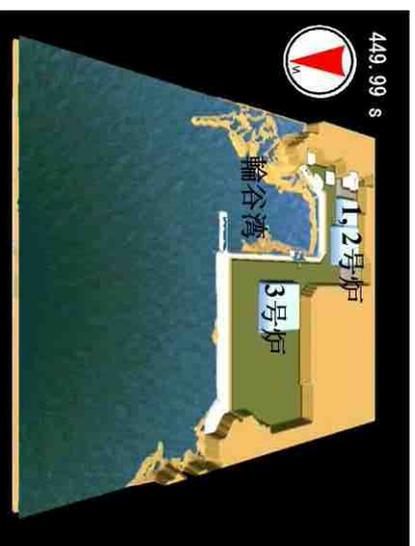
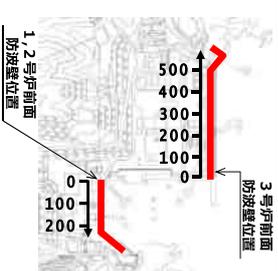
### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.6 国土省暫定指針等の既往評価式における津波波圧算出（解析結果）

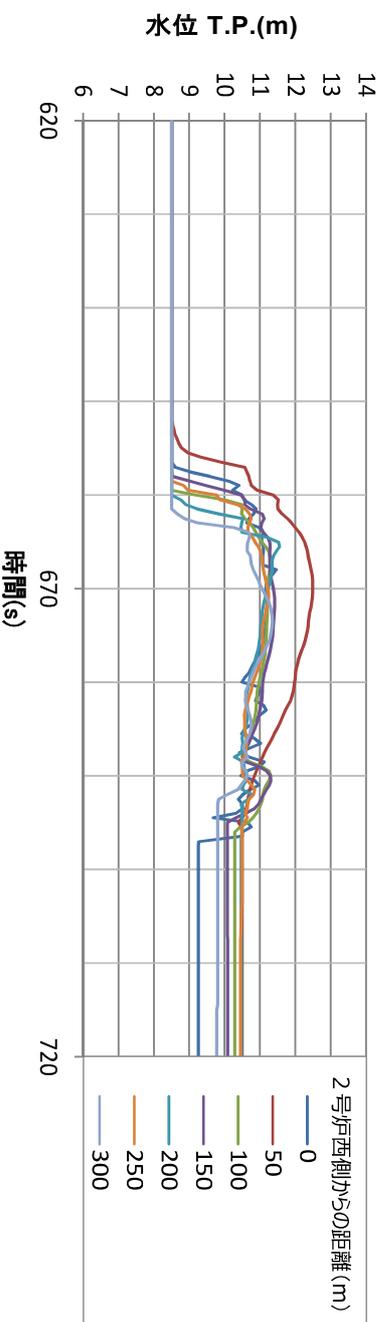
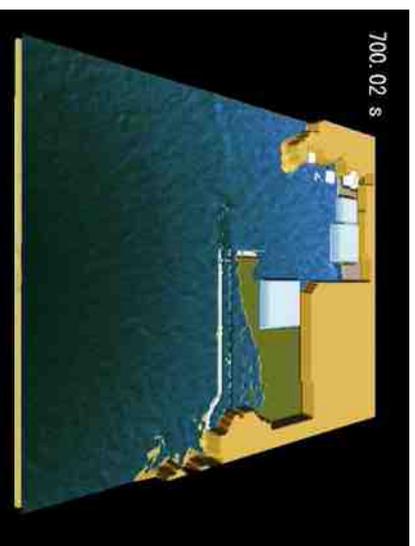
#### ■ 防波壁前面における津波水位の波形

波圧検討用津波による防波壁前面における最大波到達時間帯の津波の遡上状況及び津波水位の波形を以下に示す。

3号炉前面では630秒付近から水位が上昇する。また、1, 2号炉前面では650秒付近から水位が上昇する。



3号炉前面



1, 2号炉前面

津波水位の波形

最大波到達時間帯の津波の遡上状況 (防波壁無)

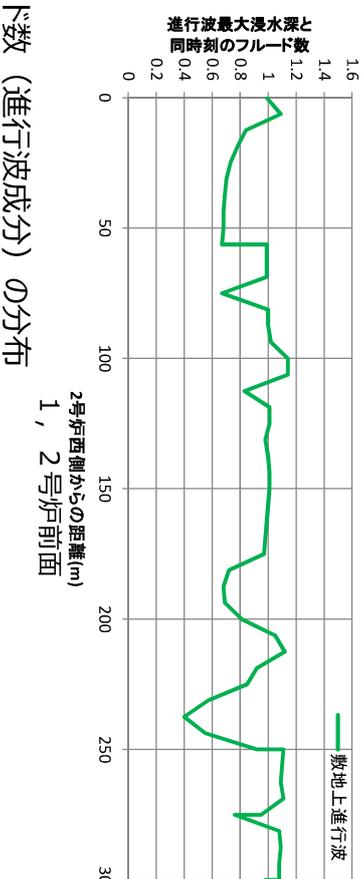
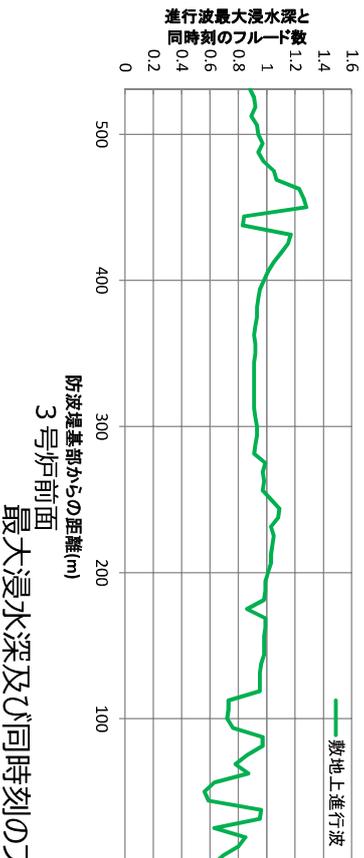
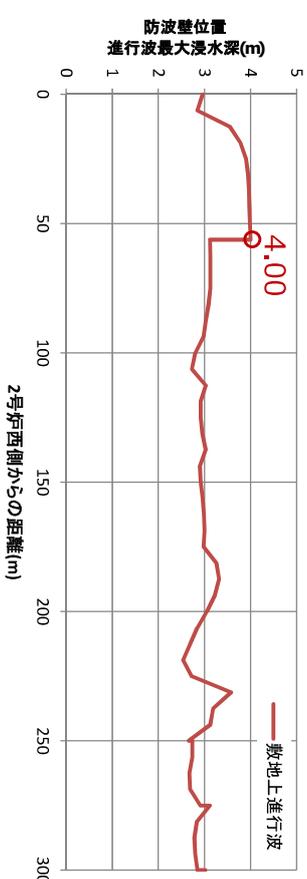
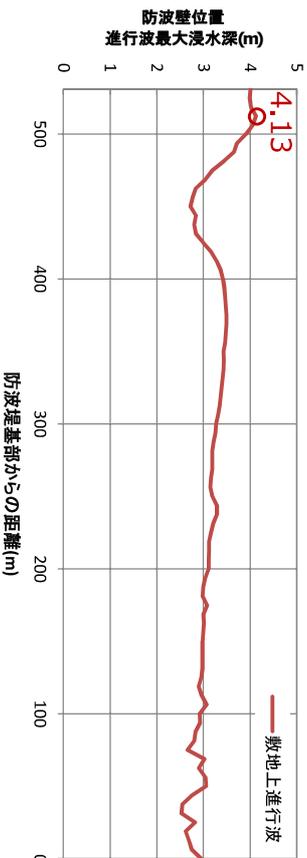
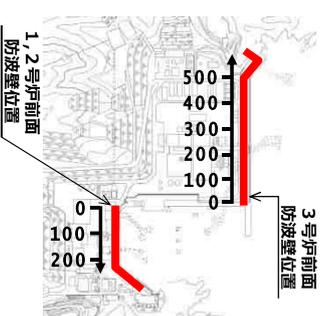
### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.6 国交省暫定指針等の既往評価式における津波波圧算出（解析結果）

- 浸水深及びフルード数（進行波成分）の確認  
波圧検討用津波を用いた三次元津波シミュレーションにより浸水深及びフルード数を確認した。越流開始直後の浸水深が浅い時間帯においてはフルード数が大きく計算されるが、最大浸水深と同時刻のフルード数は1前後であることを確認した。

- 津波波圧算定式  
最大浸水深と同時刻のフルード数は1前後であるため、水深係数は3とする。非分裂波の場合の朝倉式と水深係数が3の場合の国交省暫定指針における評価式は同じ式となり、この式を用いて津波波圧を算出する。

- 国交省暫定指針における評価式で使用する設計用浸水深（h）は下図に示す最大浸水深を使用する。



3号炉前面  
防波堤基部からの距離(m)  
最大浸水深及び同時刻のフルード数（進行波成分）の分布

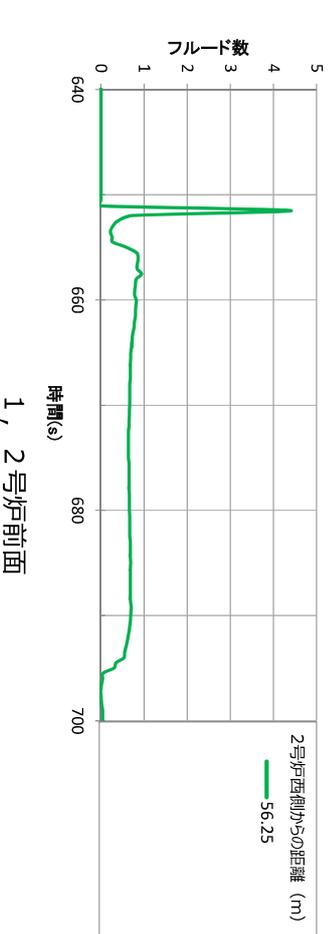
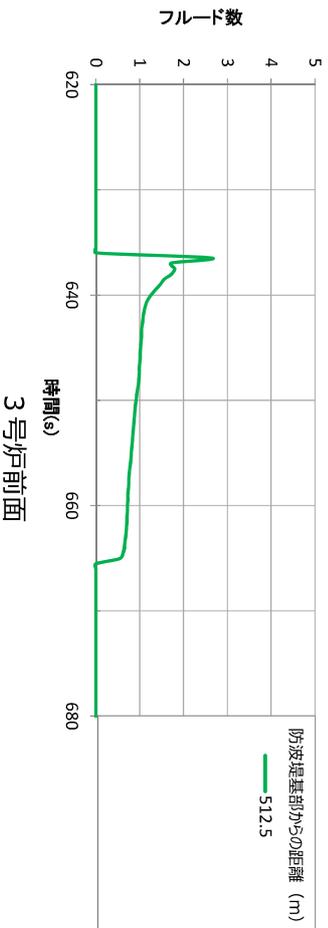
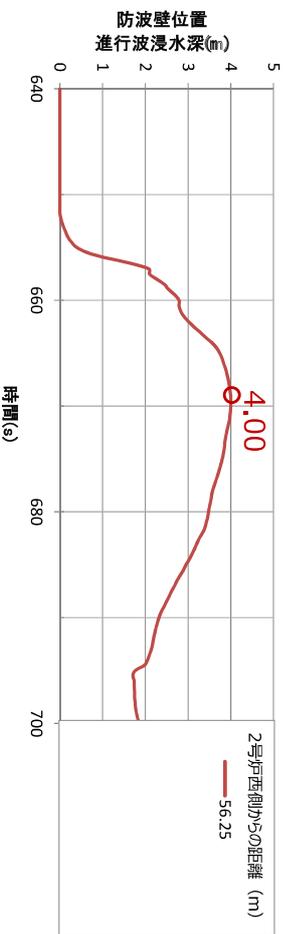
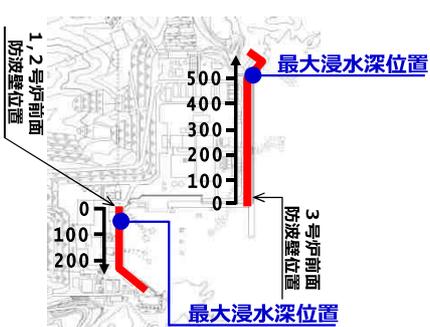
2号炉西側からの距離(m)  
1, 2号炉前面

### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## (参考) 最大フルード数の確認

#### ■ 最大フルード数の確認

波圧検討用津波による3号炉前面及び1, 2号炉前面における最大浸水深位置のフルード数の時刻歴分布を以下に示す。越流開始直後の浸水深が浅い時間帯においては、フルード数が大きく計算されるが、それ以降のフルード数は1前後となることを確認した。



フルード数 (進行波成分) の時刻歴分布

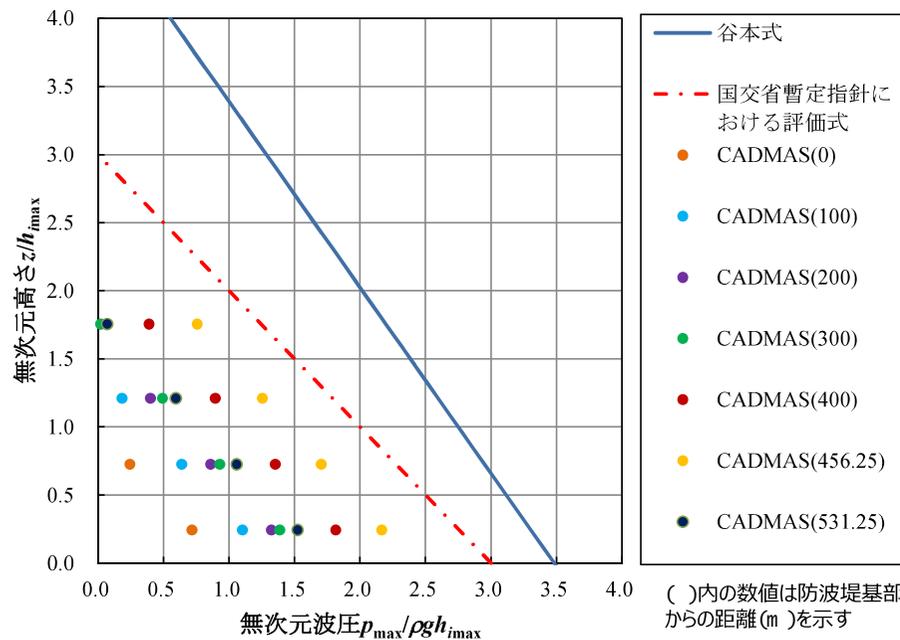
1, 2号炉前面

3号炉前面

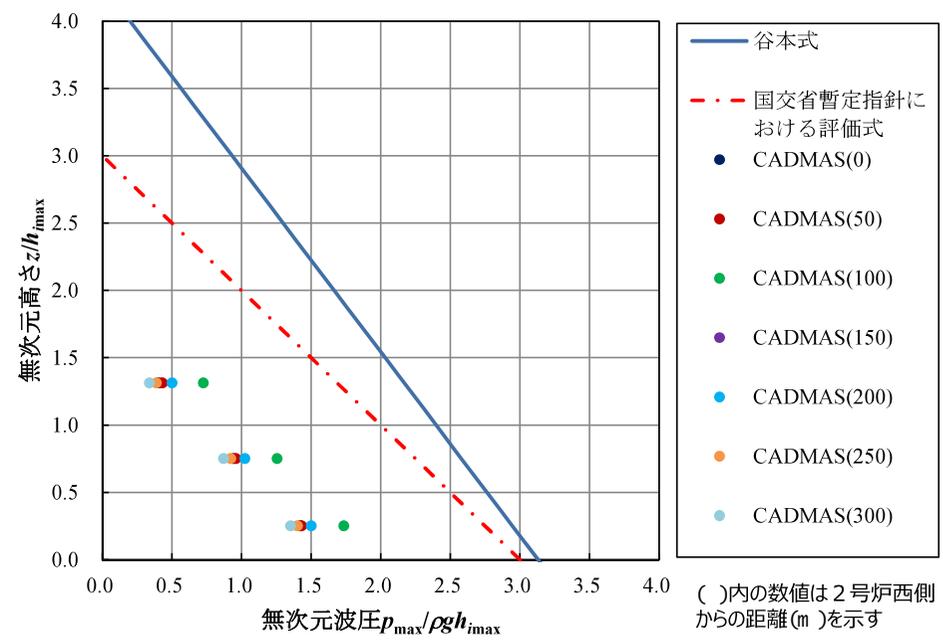
### 3. 谷本式を適用することの妥当性について

## 3.7 津波波圧の比較 (まとめ)

- 三次元津波シミュレーションにより直接算出した波圧分布は、1, 2号炉前面及び3号炉前面の防波壁において直線型の波圧分布となることから、ソリトン分裂波や砕波による津波波圧への有意な影響はないことを確認した。
- これらの直接算出した波圧は、谷本式及び国交省暫定指針における評価式による波圧に包絡されることを確認した。
- 島根原子力発電所において、波圧検討用津波を用いて、谷本式及び国交省暫定指針における評価式による波圧を比較した結果、谷本式に基づく波圧が上回ることを確認した。



3号炉前面



1, 2号炉前面

無次元波圧分布

### 3. 谷本式を適用することの妥当性について (参考) 津波波圧算定概念図

- 仮に設定した波圧検討用津波による谷本式及び国交省暫定指針における評価式を用いた津波波圧の算定概念図（3号炉前面）及び防波壁底部の津波波圧の計算例を以下に示す。
- なお、波圧検討用津波により算定した波圧は、防波壁等の設計用津波波圧として用いるものではない。

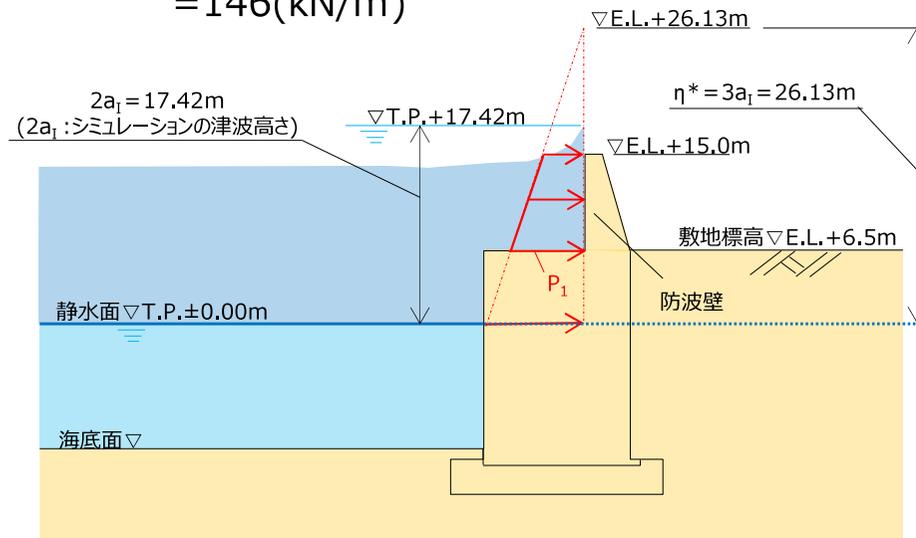
・谷本式による波圧の算定  
防波壁へ衝突した反射の影響を考慮したシミュレーション結果による津波高さをを用いて波圧を算定する。

静水面における波圧

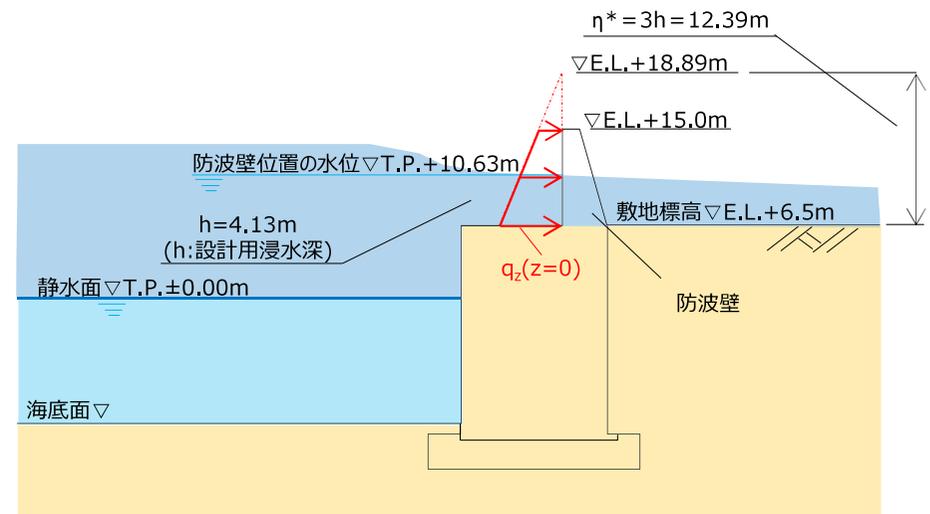
$$\begin{aligned}
 &= 2.2 \times \rho_0 g \times a_1 \\
 &= 2.2 \times 10.1 \times (17.42/2) \\
 &= 194(\text{kN/m}^2) \\
 P_1 &= 194 \times (26.13 - 6.5) / 26.13 \\
 &= 146(\text{kN/m}^2)
 \end{aligned}$$

・国交省暫定指針における評価式による波圧の算定  
防波壁をモデル化しないシミュレーション結果による敷地への津波浸水深を用いて波圧を算定する。

$$\begin{aligned}
 q_{z(z=0)} &= \rho g \times (ah - z) \\
 &= 10.1 \times ((3 \times (10.63 - 6.5)) - 0) \\
 &= 125(\text{kN/m}^2)
 \end{aligned}$$



谷本式



国交省暫定指針における評価式

波圧算定イメージ(3号炉前面)

## まとめ

- 島根原子力発電所の防波壁は護岸直上あるいは水際に設置されているため、港湾基準における護岸の津波波力の考え方に準拠し、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に基づき、平面二次元津波シミュレーション結果を用いて、波圧算定式として谷本式を選定している。
- ソリトン分裂波や砕波を表現可能なCADMAS-SURF/3D (Ver.1.5)を用いた断面二次元及び三次元津波シミュレーションにより、水位の時刻歴波形及び三次元津波シミュレーションにより直接算出される津波波圧分布を確認した結果、ソリトン分裂波及び砕波による津波波圧への有意な影響はないことを確認した。
- 島根原子力発電所において、波圧検討用津波を用いて谷本式と国交省暫定指針における評価式による津波波圧を比較した結果、谷本式に基づく津波波圧が上回るため、保守的な設計を行う観点から、谷本式を参照して防波壁等の設計波圧として設定する。

## 指摘事項に対する回答【No.13】

### ■ 指摘事項

#### 【No.13 漂流物衝突荷重の設計方針】

- 道路橋示方書による漂流物衝突荷重の算定の妥当性について、工学的な判断に基づいた根拠を提示して説明すること。

### ■ 回答

- ・島根原子力発電所の津波防護施設及び浸水防止設備に対する漂流物としては、漂流物調査結果を踏まえ、2号炉取水口へ到達し得ると評価されたもののうち、最も重量が大きい船舶を代表とし、その漂流物衝突荷重の算定については既往の研究等を参照して道路橋示方書に示される算定式を適用できると判断していた。(P41, 42)
- ・しかしながら、適切な衝突荷重算定式に基づき算定し、津波防護施設及び浸水防止設備の設計を行うため、島根原子力発電所付近の地形や基準津波等の特徴、漂流物の性状について、現在検討を実施している。
- ・以上のことから、設置変更許可の審査においては、上記の検討結果を説明するとともに、さまざまな衝突荷重算定式の適用性について説明し、工認段階において適切な衝突荷重算定式を選定し、詳細設計に反映する。(P42)

# 工学的判断に基づいた参考規格・基準類及び 既往の研究論文の適用性について

- 漂流物衝突荷重の算定については、「耐津波設計に係る工認審査ガイド」に記載されている参考規格・基準類や既往の研究論文等について調査を行っている。
- 漂流物荷重算定式は、対象となる漂流物の種類やその仕様が異なり、運動量理論に基づく推定式や実験に基づく推定式等がある。

	出典	種類	概要	評価式の根拠（実験条件）
①	松富ほか (1999)	流木	津波による流木の衝突力を提案している。本式は円柱形状の流木が縦向きに衝突する場合の衝突力評価式である。	「実験に基づく推定式」 ・見かけの質量係数に関する水路実験 ・衝突荷重に関する空中での実験 水理模型実験及び空中衝突実験において、流木(植生林ではない丸太)を被衝突体の前面(2.5m以内)に設置した状態で衝突させている。
②	池野・田中 (2003)	流木	円柱以外にも角柱、球の形状をした木材による衝突力を提案している。	「実験に基づく推定式」(縮尺1/100の模型実験)受圧板を陸上構造物と想定し、衝突体を受圧板前面80cm(現地換算80m)離れた位置に設置した状態で衝突させた実験である。模型縮尺(1/100)を考慮した場合、現地換算で直径2.6~8mの仮定となる。
③	道路橋示方書 (2002)	流木等	橋(橋脚)に自動車、流木あるいは船舶等が衝突する場合の衝突力を定めている。	漂流物が流下(漂流)してきた場合に、表面流速(津波流速)を与えることで漂流流速に対する荷重を算定できる。
④	津波漂流物対策施設設計ガイドライン (2014)	漁船等	漁船の仮想重量と漂流物流速から衝突エネルギーを提案している。	「漁港・漁場の施設の設計の手引」(2003)に記載されている、接岸エネルギーの算定式に対し、接岸速度を漂流物速度とすることで、衝突エネルギーを算定。
⑤	FEM A (2012)	流木・コンテナ	漂流物による衝突力を正確に評価するのは困難としながら、一例として評価式を示している。	「運動方程式に基づく衝突力方程式」非減衰系の振動方程式に基づいており、衝突体及び被衝突体の両方とも完全弾性体としている。
⑥	水谷ほか (2005)	コンテナ	津波により漂流するコンテナの衝突力を提案している。	「実験に基づく推定式」(縮尺1/75の模型実験)使用コンテナ:長さを20ftと40ft,コンテナ重量:0.2N~1.3N程度遡上流速:1.0m/s以下,材質:アクリル
⑦	有川ほか (2007)	流木・コンテナ	コンクリート構造物に鋼製構造物(コンテナ等)が漂流衝突する際の衝突力を提案している。	「接触理論に基づく推定式」(縮尺1/5の模型実験)使用コンテナ:長さ1.21m,高さ0.52m,幅0.49m 衝突速度:1.0~2.5m/s程度,材質:鋼製

## 漂流物の衝突荷重算定式の選定方針

- 島根原子力発電所の津波防護施設及び浸水防止設備に対する漂流物については、漂流物調査結果を踏まえ、2号炉取水口へ到達し得ると評価された漂流物のうち、最も重量が大きい船舶（総トン数10t）を代表としていた。
- 耐津波設計に係る工認審査ガイドにおいて挙げられている参考規格・基準類及び既往の研究論文の中で、船舶の衝突荷重又は衝突エネルギーについて記載されているものは、「道路橋示方書(2002)」及び「津波漂流物対策施設設計ガイドライン(2014)」である。
- 島根原子力発電所では、強固な防波壁に船舶等が衝突する場合の衝突力を算定することから、沿岸技術研究センター及び国土交通省による検討において算定式として採用されている道路橋示方書の衝突荷重算定式を適用できると判断していた。
- しかしながら、島根原子力発電所付近の地形や基準津波等の特徴、並びに漂流物の性状・漂流速度について、現在検討を実施している。
- 以上のことから、適切な衝突荷重算定式に基づき衝突荷重を算定し、津波防護施設及び浸水防止設備の設計を行うため、設置変更許可の審査においては、上記の検討結果を説明するとともに、さまざまな衝突荷重算定式の適用性について説明し、工認段階において適切な衝突荷重算定式を選定し、詳細設計に反映する。