

島根原子力発電所 2号炉

津波による損傷の防止

指摘 2 津波荷重の設定

(コメント回答)

令和 2 年 8 月
中国電力株式会社

審査会合における指摘事項

No.	審査会合日	指摘事項の内容	回答頁
9	H31.2.26	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 	P14～65
32	R元.6.27	<ul style="list-style-type: none"> ・ソリトン分裂波発生の有無について、防波壁及び防波扉設置位置全域を対象に、水深が10mよりも浅い地点における津波高さや島根サイトの陸海域の地形等の特性を踏まえた評価結果を説明すること。 	P14～48
33	R元.6.27	<ul style="list-style-type: none"> ・砕波段波発生の有無について、防波壁及び防波扉設置位置全域を対象に、入力津波又はフルード相似則に従った入力津波の特性を踏まえた仮想津波を用いて評価結果を説明すること。 	P49～54
34	R元.6.27	<ul style="list-style-type: none"> ・ソリトン分裂波及び砕波段波を示す波形がないと判断した根拠について、津波シミュレーション解析だけでなく水理試験の必要性も含めて説明すること。なお、水理試験の要否については、根拠を示して説明すること。 	P16～48
35	R元.6.27	<ul style="list-style-type: none"> ・三次元津波シミュレーション解析と平面二次元津波シミュレーション解析について、その目的と用途に応じて長所及び短所を整理し、評価したうえで先行審査において実績のない三次元津波シミュレーション解析を選択した理由及び三次元津波シミュレーション解析手法を選択することの妥当性を説明すること。 	P12

審査会合における指摘事項

No.	審査会合日	指摘事項の内容	回答頁
36	R元.6.27	・三次元津波シミュレーション解析について、モデル化領域、境界条件、格子間隔、解析時間情報等の解析条件を説明すること。また、三次元津波シミュレーション解析について、津波特性を踏まえた再現性、結果の妥当性及び保守性に対する考え方を水理試験等による検証を含めて説明すること。	P49,50, 59,60
37	R元.6.27	・三次元津波シミュレーション解析を用いてソリトン分裂波及び砕波段波の発生の可能性を検討・評価する考え方について、時刻歴波形等を算出する範囲の網羅性及び代表性を説明すること。	P49～54, 59～61
38	R元.6.27	・ソリトン分裂波及び砕波段波の発生有無並びに津波波圧評価について、平面二次元津波シミュレーション解析の波形、波高及び流速傾向等を踏まえて三次元津波シミュレーション解析の再現性を評価し、平面二次元、断面二次元及び三次元の各津波シミュレーション解析手法を総合的に勘案した上で、考察して説明すること。また、津波シミュレーション解析で考慮している海底地形や津波波形に対する解析上の不確かさについて、検討項目と不確かさの幅の考え方を津波のサイト特性（短周期型等）を踏まえて整理し説明すること。	P16～64
39	R元.6.27	・海中構造物を対象とする谷本式を背面に海域を有しない防波壁等に適用することの妥当性及び、防波壁に作用する荷重に加え浮力等の荷重の具体的な考え方について、国土交通省暫定指針評価式に対する保守性を踏まえ説明すること。	P63～65
40	R元.6.27	・設計用津波波圧について、谷本式が島根サイトの津波特性とその不確かさを踏まえても必ず保守的になる科学的根拠を揭示し、谷本式を適用することの妥当性を説明すること。	P16～48, P63～65
41	R元.6.27	・防波壁の安定性評価に用いる津波波圧について考え方を説明すること。	P64,65

審査会合における指摘事項

No.	審査会合日	指摘事項の内容	回答頁
42	R元.6.27	・ソリトン分裂や砕波による津波波圧への影響については、津波の実現象が必ずしも解析どおりにならない可能性があること及び砕波等が防波壁位置で発生することを前提とした安全側の設計の考え方があることを踏まえ、総合的に判断して説明すること。	P16～48, 59～61, 63～65
43	R元.6.27	・陸上の直立壁とした胸壁について、防波壁の構造上の範囲を図面上に示したうえで水際線から離れた位置であること、海中の直立壁に作用する波圧算定式を採用することが妥当であることを説明すること。	P55～65
44	R元.6.27	・防波壁等が指している具体的な設備をまとめ資料に整理すること。	P10

指摘事項に対する回答【No. 9】

■ 指摘事項（第686回会合 平成31年2月26日）

【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

- ・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（防波堤の有無、1,2号炉前面の地形等）を踏まえ、先行実績のある水理模型実験を実施した。併せてソリトン分裂波や砕波を表現可能なCADMAS-SURFを用いて断面二次元及び三次元津波シミュレーションを実施し、防波壁等に作用する津波波圧への影響を確認した。確認結果より、ソリトン分裂波及び砕波の発生及び津波波圧への有意な影響が無いことを確認した。（P14～P54）

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たが、防波壁等のうち敷地高以上の構造物（防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の被覆コンクリート壁等）については、護岸背後の陸上構造物に作用する津波波圧について実験水路を用いて検討している朝倉式により津波波圧を設定することに見直す。また、防波壁等のうち敷地高以深の構造物（防波壁（波返重力擁壁）のケーソン等）については、新たに水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションを実施した結果、実験や解析で求めた波圧よりも谷本式による波圧は大きく算定されるため、谷本式の採用が妥当であることを説明する。（P55～P65）

指摘事項に対する回答【No.32～34】

■ 指摘事項（第736回会合 令和元年6月27日）

【No.32～34 津波荷重の設定】

- ソリトン分裂波発生の有無について，防波壁及び防波扉設置位置全域を対象に，水深が10mよりも浅い地点における津波高さや島根サイトの陸海域の地形等の特性を踏まえた評価結果を説明すること。
- 砕波段波発生の有無について，防波壁及び防波扉設置位置全域を対象に，入力津波又はフルード相似則に従った入力津波の特性を踏まえた仮想津波を用いて評価結果を説明すること。
- ソリトン分裂波及び砕波段波を示す波形がないと判断した根拠について，津波シミュレーション解析だけでなく水理試験の必要性も含めて説明すること。なお，水理試験の要否については，根拠を示して説明すること。

■ 回答

- ・ソリトン分裂波発生の有無について，水深が10mよりも浅い地点における平面二次元津波シミュレーションの結果，津波高さが水深の60%程度以上となるため，科学的根拠に基づく水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションを実施した。水深が浅い地点について確認した結果，時刻歴波形及び水位分布にソリトン分裂波及び砕波は認められず，水面勾配も砕波限界 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ に比べて十分小さいことから，ソリトン分裂波及び砕波は発生しないことを確認した。（P14～P48）
- ・基準津波の特性を踏まえた波圧検討用津波を用いて三次元津波シミュレーションを行い，防波壁及び防波扉設置位置全域を対象とした最高水位分布及び最大波圧分布を示し，これらの波圧を確認した結果，直線型の波圧分布となることから，砕波段波の発生による波圧への影響はないことを確認した。（P49～P54）
- ・ソリトン分裂波及び砕波段波を示す波形がないと判断する根拠について，津波シミュレーション結果に加えて，ソリトン分裂波及び砕波を直接確認できる水理模型実験が必要と判断し，追加実施した。（P16～P48）

指摘事項に対する回答【No.35～36】

■ 指摘事項（第736回会合 令和元年6月27日）

【No.35～36 津波荷重の設定】

- 三次元津波シミュレーション解析と平面二次元津波シミュレーション解析について、その目的と用途に応じて長所及び短所を整理し、評価したうえで先行審査において実績のない三次元津波シミュレーション解析を選択した理由及び三次元津波シミュレーション解析手法を選択することの妥当性を説明すること。
- 三次元津波シミュレーション解析について、モデル化領域、境界条件、格子間隔、解析時間情報等の解析条件を説明すること。また、三次元津波シミュレーション解析について、津波特性を踏まえた再現性、結果の妥当性及び保守性に対する考え方を水理試験等による検証を含めて説明すること。

■ 回答

- ・平面二次元津波シミュレーション、水理模型実験、断面二次元津波シミュレーション及び三次元津波シミュレーションについて、それぞれの長所及び短所を整理した結果、島根サイトの地形特性（防波堤の有無、1,2号炉前面の地形等）及び津波特性（短周期等）を踏まえ、ソリトン分裂波及び砕波を再現でき、かつ、三次元的な流況を精緻に評価できる三次元津波シミュレーションを選択した。また、水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーション結果と比較することにより、三次元津波シミュレーションを選択したことの妥当性を確認した。（P12）
- ・三次元津波シミュレーションについて、モデル化領域、境界条件、格子間隔、解析時間情報等の解析条件を説明する。三次元津波シミュレーション結果について、津波特性を踏まえた再現性及び結果の妥当性を水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーション結果と比較・検証した。また、設計用津波波圧については、実験や解析で求めた波圧を包絡している既往の津波波圧算定式を用いた津波波圧を保守的に設定する。（P49,P50,P59,P60）

指摘事項に対する回答【No.37～38】

■ 指摘事項（第736回会合 令和元年6月27日）

【No.37～38 津波荷重の設定】

- 三次元津波シミュレーション解析を用いてソリトン分裂波及び砕波段波の発生の可能性を検討・評価する考え方について、時刻歴波形等を算出する範囲の網羅性及び代表性を説明すること。
- ソリトン分裂波及び砕波段波の発生有無並びに津波波圧評価について、平面二次元津波シミュレーション解析の波形、波高及び流速傾向等を踏まえて三次元津波シミュレーション解析の再現性を評価し、平面二次元、断面二次元及び三次元の各津波シミュレーション解析手法を総合的に勘案した上で、考察して説明すること。また、津波シミュレーション解析で考慮している海底地形や津波波形に対する解析上の不確かさについて、検討項目と不確かさの幅の考え方を津波のサイト特性（短周期型等）を踏まえて整理し説明すること。

■ 回答

- ・三次元津波シミュレーションを用いて、1,2号炉北側、3号炉東側、3号炉北側のそれぞれの防波壁において、防波壁前面の最高津波水位及び最大波圧を網羅的に示し、**防波壁の最大波圧発生箇所を含む各地点における最大波圧分布からソリトン分裂波及び砕波段波の発生の可能性について検討した。**（P49～P54, P59～P61）
- ・三次元津波シミュレーションについては、平面二次元津波シミュレーションによる流況（波高・流向）を概ね再現できている。ソリトン分裂波及び砕波段波発生の有無については、新たに水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションを実施し、地形特性（防波堤の有無）及び津波特性（波高、周期）による不確かさを考慮した**実験・解析を行い、時刻歴波形、水位分布及び水面勾配からソリトン分裂波及び砕波発生の有無を確認した。**また、津波波圧評価については、三次元津波シミュレーションを実施し、水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションとの比較により、**波圧分布からソリトン分裂波及び砕波段波発生の有無を確認した。**（P16～P64）

指摘事項に対する回答【No.39～41】

■ 指摘事項（第736回会合 令和元年6月27日）

【No.39～41 津波荷重の設定】

- 海中構造物を対象とする谷本式を背面に海域を有しない防波壁等に適用することの妥当性及び、防波壁に作用する荷重に加え浮力等の荷重の具体的な考え方について、国土交通省暫定指針評価式に対する保守性を踏まえ説明すること。
- 設計用津波波圧について、谷本式が島根サイトの津波特性とその不確かさを踏まえても必ず保守的になる科学的根拠を掲示し、谷本式を適用することの妥当性を説明すること。
- 防波壁の安定性評価に用いる津波波圧について考え方を説明すること。

■ 回答

- ・防波壁等のうち敷地高以上の構造物については、護岸背後の陸上構造物に作用する津波波圧について実験水路を用いて検討している朝倉式により津波波圧を設定することに見直す。また、防波壁等のうち敷地高以深の構造物については、新たに水理模型実験、断面二次元津波シミュレーション及び三次元津波シミュレーションを実施し、これにより算出される波圧を谷本式により算出される波圧が包絡していることを確認した。また、谷本式では基礎捨石上の防波堤を対象としているが、防波壁は岩盤又は改良地盤により支持されていることから揚圧力は考慮しないこと等、荷重の考え方を整理した。（P63～P65）
- ・島根サイトのサイト特性（地形、周期等）とその不確かさを踏まえて、科学的根拠に基づく水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションを実施し、時刻歴波形、水位分布及び水面勾配からソリトン分裂波及び碎波は発生していないことを確認した。また、実験や解析で求めた波圧を既往の津波波圧算定式で求めた波圧が包絡していることから、設計用津波波圧は防波壁等のうち敷地高以上の構造物では朝倉式による波圧を、防波壁等のうち敷地高以深の構造物では谷本式による波圧を設定する。（P16～P48, P63～65）
- ・防波壁の安定性評価に用いる津波波圧については、防波壁等のうち敷地高以深の構造物にも津波波圧を設定して検討する。（P64,65）

指摘事項に対する回答【No.42～44】

■ 指摘事項（第736回会合 令和元年6月27日）

【No.42～44 津波荷重の設定】

- ソリトン分裂や砕波による津波波圧への影響については、津波の実現象が必ずしも解析どおりにならない可能性があること及び砕波等が防波壁位置で発生することを前提とした安全側の設計の考え方があることを踏まえ、総合的に判断して説明すること。
- 陸上の直立壁とした胸壁について、防波壁の構造上の範囲を図面上に示したうえで水際線から離れた位置であること、海中の直立壁に作用する波圧算定式を採用することが妥当であることを説明すること。
- 防波壁等が指している具体的な設備をまとめ資料に整理すること。

■ 回答

- ・ソリトン分裂波や砕波による津波波圧への影響について、新たに水理模型実験、断面二次元津波シミュレーション及び三次元津波シミュレーションを実施し、防波壁に作用する津波波圧を算出した。津波の実現象が必ずしも解析通りにならない可能性があること及び砕波等が防波壁位置で発生することを前提とした安全側の設計の考え方があることを踏まえ、設計用津波波圧については、実験や解析で求めた波圧よりも大きく算定される既往の津波波圧算定式に基づいて設定する。(P16～P48, P59～P61, P63～P65)
- ・防波壁等のうち敷地高以上の構造物については、海中の直立壁に作用する谷本式による津波波圧から、護岸背後の陸上構造物に作用する津波波圧について実験水路を用いて検討している朝倉式による津波波圧へ見直す。また、防波壁等のうち敷地高以深の構造物については、新たに水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションを実施し、これらにより算定される波圧よりも、谷本式による波圧が包絡していることから、谷本式による津波波圧算定式を採用する。(P55～P65)
- ・防波壁、防波壁通路防波扉及び1号放水連絡通路防波扉を、「防波壁等」と表記し、津波波圧を考慮する津波防護施設とする。(P10)

検討フロー

- 島根原子力発電所におけるソリトン分裂波・砕波の発生確認及び防波壁等※の設計で考慮する津波波圧を設定するため、科学的根拠に基づく水理模型実験及び数値シミュレーションを実施する。以下に検討フローを示す。

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1. 1 平面二次元津波シミュレーションによる検討

目的：「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に基づくソリトン分裂波の発生確認

1. 2 水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションの条件整理

目的：地形特性及び津波特性の観点から津波波圧に影響するサイト特性を整理し，不確かさを考慮した検討条件を整理

1. 3 水理模型実験による検討

目的：津波波形の検証によるソリトン分裂波・砕波の発生確認及び津波波圧の確認

1. 4 断面二次元津波シミュレーションによる検討

目的：水理模型実験の再現性の確認，津波波形の検証によるソリトン分裂波・砕波の発生確認及び津波波圧の確認

2. 三次元津波シミュレーションによる検討

目的：地形特性及び津波特性を考慮した津波波圧の確認

3. 既往の津波波圧算定式との比較

目的：津波シミュレーションと既往の津波波圧算定式の津波波圧を比較

4. 設計で考慮する津波波圧の設定

※ 防波壁，防波壁通路防波扉及び1号放水連絡通路防波扉を「防波壁等」という。

検討方針

- 各検討項目及び検討内容を以下に示す。 検討項目及び検討内容

検討項目	検討内容
1. ソリトン分裂波及び砕波の発生, 並びに津波波圧への影響	
1. 1 平面二次元津波シミュレーション	平面二次元津波シミュレーション結果及び海底勾配を用いて, 「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に基づき, ソリトン分裂波の発生有無を確認する。
1. 2 水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションの条件整理	水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションの実施に当たって, 地形特性及び津波特性の観点から津波波圧に影響するサイト特性を整理し, 不確かさを考慮した検討条件を設定する。
1. 3 水理模型実験	流体の挙動を直接確認でき, サイト特性に応じた評価が可能となる水理模型実験を実施し, 水位の時刻歴波形からソリトン分裂波及び砕波の発生有無を確認するとともに, 防波壁位置における津波波圧を確認する。
1. 4 断面二次元津波シミュレーション	水理模型実験結果について, 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 (CADMAS-SURF (Ver.5.1)) を実施し, 再現性を確認するとともに, 防波壁位置における津波波圧を確認する。
2. 三次元津波シミュレーションによる検討	複雑な地形特性及び津波特性に応じた評価が可能である三次元津波シミュレーションCADMAS-SURF/3D (Ver.1.5) を実施し, 防波壁位置における津波波圧を確認する。
3. 既往の津波波圧算定式との比較	敷地高以上の構造物については, 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, 陸上構造物に作用する津波波圧算定式 (朝倉式) により算出した津波波圧と比較する。 敷地高以深の構造物については, 津波シミュレーションにより敷地高以深の構造物に作用する波圧を直接算出し, 海中構造物に作用する津波波圧算定式 (谷本式) により算出した津波波圧と比較する。
4. 設計で考慮する津波波圧の設定	防波壁等について保守的な設計を行う観点から, 上記の検討結果を踏まえた設計用津波波圧を設定する。

津波シミュレーション及び水理模型実験の長所・短所

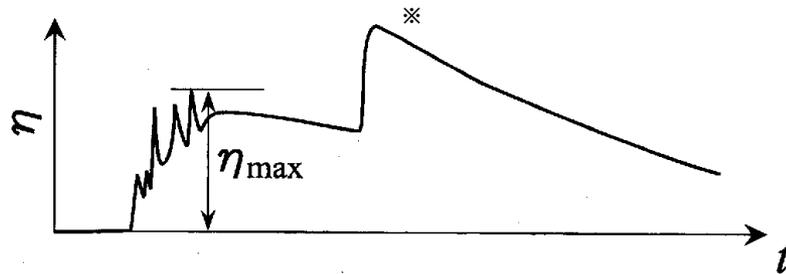
- 津波シミュレーション及び水理模型実験の長所・短所を整理した上で、島根原子力発電所におけるソリトン分裂波及び砕波の発生確認、津波波圧の確認に係る検討内容を以下に示す。

津波シミュレーション解析及び水理模型実験の長所・短所

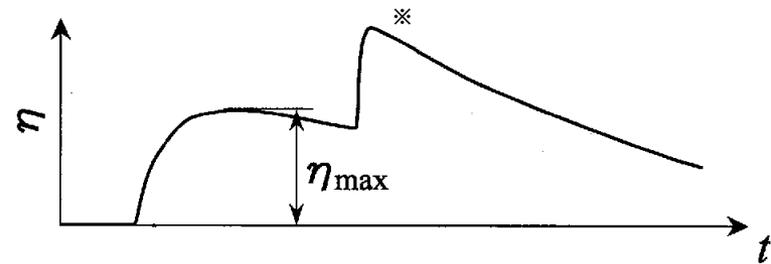
解析手法	長所	短所	長所・短所を踏まえた検討内容
平面二次元 津波シミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・広範囲にわたる地形のモデル化が可能 ・複雑な不規則波形及び平面的な流況の再現が可能 ・解析時間が短い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ソリトン分裂波及び砕波の発生有無の確認が困難 ・津波波圧の直接評価が不可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・基準津波の策定（入力津波高さ・流速） ・「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に基づくソリトン分裂波の発生確認
水理模型実験	<ul style="list-style-type: none"> ・ソリトン分裂波及び砕波の発生有無の確認が可能 ・津波波圧を直接評価可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・複雑な地形や構造物のモデル化が困難 ・複雑な不規則波形の再現が困難 ・三次元的な流況の再現が不可能 ・実験に時間を要する 	<ul style="list-style-type: none"> ・科学的根拠に基づくソリトン分裂波及び砕波の発生確認 ・津波波圧の確認
断面二次元 津波シミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・複雑な不規則波形の再現が可能 ・ソリトン分裂波及び砕波の発生有無の確認が可能 ・津波波圧を直接評価可能 ・解析時間が短い 	<ul style="list-style-type: none"> ・複雑な地形や構造物のモデル化が困難 ・三次元的な流況の再現が不可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・水理模型実験の再現性確認 ・科学的根拠に基づくソリトン分裂波及び砕波の発生確認 ・津波波圧の確認
三次元 津波シミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・複雑な地形や構造物のモデル化が可能 ・複雑な不規則波形及び三次元的な流況の再現が可能 ・複雑な地形及び三次元的な流況等を踏まえた津波波圧を直接評価可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・解析に時間を要する ・計算機能力を踏まえて解析範囲に限界がある ・審査における採用実績がない 	<ul style="list-style-type: none"> ・複雑な地形特性及び津波特性を踏まえた津波波圧の確認

(参考) ソリトン分裂について

- 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。



ソリトン分裂波の最大遡上水深



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
※ η_{\max} 後の水位の上昇は反射波を示す

1.1 平面二次元津波シミュレーションによる検討 (1/2)

- 沖合から伝播してくる津波が、サイト前面においてソリトン分裂波を伴うか否かの判定に当たっては、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」において、以下に示す①かつ②の条件に合致する場合、ソリトン分裂波が発生するとされている。

条件①：津波高さが水深の60%程度以上 条件②：海底勾配1/100程度以下

- 条件①について検討した結果を以下に示す。

地点1～3では津波高さは水深の60%以下となるが、水深が10mよりも浅い地点1'～3'では護岸の反射波の影響により津波高さが水深の60%以上となる。

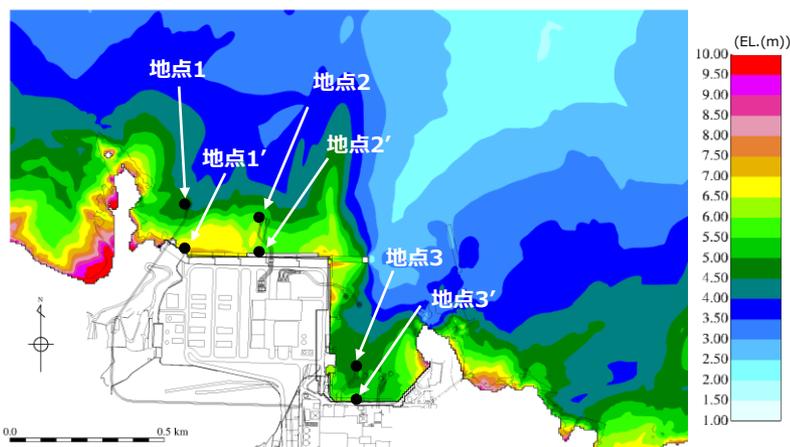
条件①：津波高さと水深の割合

地点	(1)水深	(2)津波高さ※1		(2)/(1)	
		防波堤有	防波堤無	防波堤有	防波堤無
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%

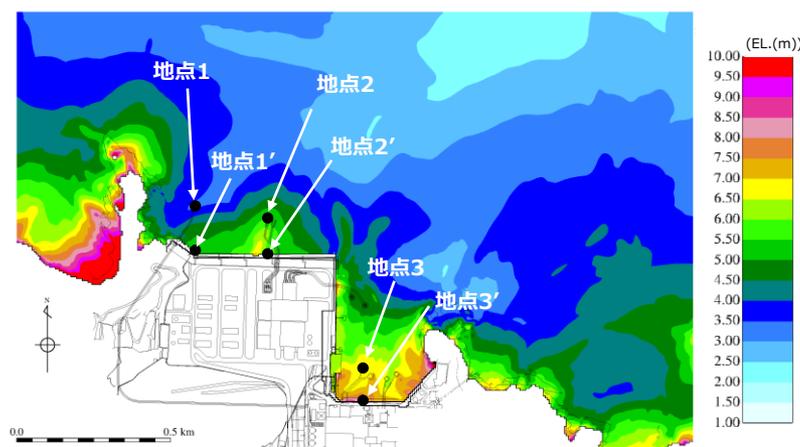
※1 平面二次元津波シミュレーションによる津波高さを保守的に評価した値

地点※2	(1)水深	(2)津波高さ※1		(2)/(1)	
		防波堤有	防波堤無	防波堤有	防波堤無
地点1'	4.0m	7.5m	6.0m	187.5%	150.0%
地点2'	6.0m	6.0m	6.0m	100.0%	100.0%
地点3'	5.0m	6.0m	8.0m	120.0%	160.0%

※2 地点1～3の南方向における護岸前面位置



【基準津波による最高水位分布（基準津波1：防波堤有）】



【基準津波による最高水位分布（基準津波1：防波堤無）】

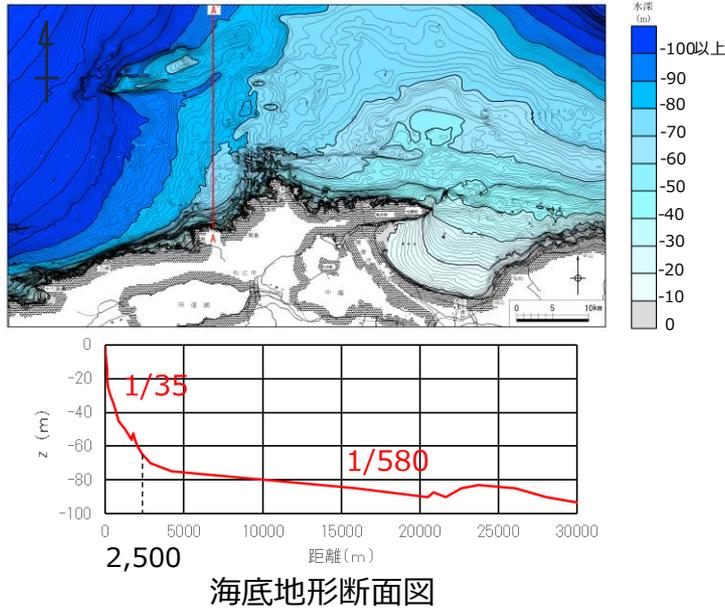
1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.1 平面二次元津波シミュレーションによる検討 (2/2)

- 条件②について検討した結果を以下に示す。
- 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EL.+11.13m (基準津波1) であり，朔望平均満潮位 (EL.+0.58m) と潮位のばらつき (0.14m) を考慮した入力津波EL.+11.9m(≒11.85m)に高潮ハザードの裕度 (0.64 m) を考慮しても，防波壁の天端高さはEL.+15.0mであるため津波は越流しない。

条件②：海底の勾配

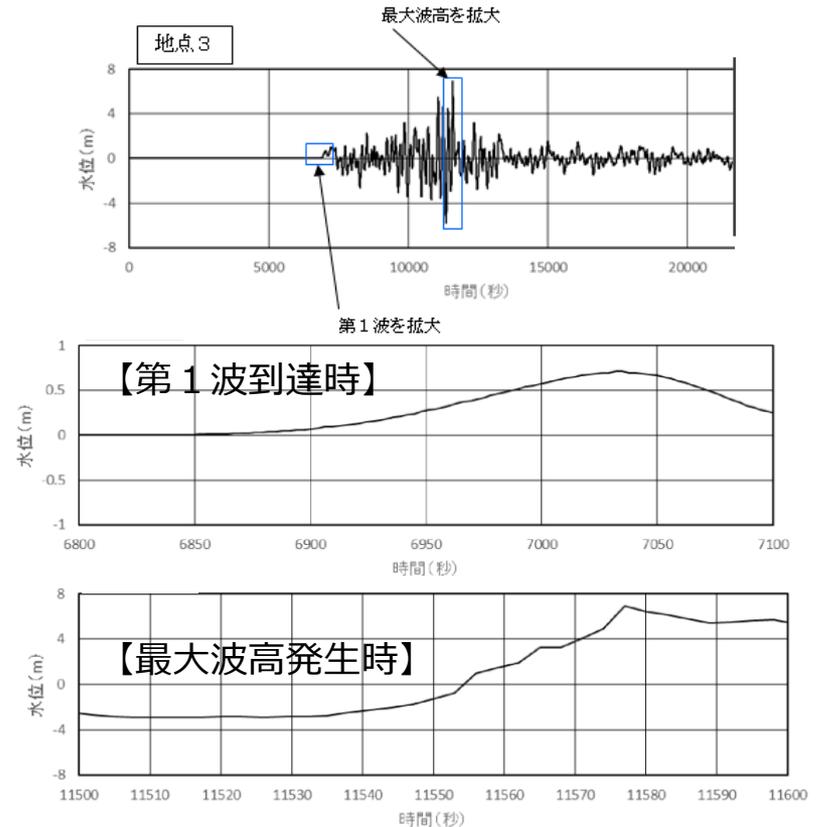
- 発電所前面の海底地形として，沖合2,500mから施設近傍までの平均勾配(A-A断面)が約1/35(> 1/100)となった。



- また，前項の発電所前面地点1'~3'から沖合200mまでの海底勾配は最小で約1/20(> 1/100)となった。

- 「防波堤の耐津波設計ガイドライン」の条件①かつ条件②の条件に合致しないため，ソリトン分裂波が発生しないと考えられるが，砕波発生有無の確認を含めて，科学的根拠に基づいた確認を行うために，水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションを実施する。

【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)

1. ソリトン分裂波及び碎波の発生，並びに津波波圧への影響

1.2 水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーション解析の条件整理（1 / 5）

- 地形特性及び津波特性の観点から津波波圧に影響するサイト特性を整理し，不確かさを含めて実験条件及び解析条件を設定する。
- 津波波形は基準津波のうち，3号炉と1,2号炉の各防波壁前面において津波高さ及び流速が最大となる基準津波 1 (3号炉：防波堤有，1,2号炉：防波堤無)を選定する。
- 基準津波 1 (防波堤有，防波堤無) による津波高さを防波壁全域において評価するため，水理模型実験及び断面二次元シミュレーションにおける津波高さについては，基準津波 1 よりも大きいケースとして，津波高さが防波壁天端高さであるEL. + 15.0mとなる波圧検討用津波(15m津波)を設定した。
- また，水理模型実験では，防波壁前面での浸水深及びフルード数算定を目的に，防波壁が無い状態での津波遡上状況を確認するケースも併せて実施した。

1. ソリトン分裂波及び碎波の発生，並びに津波波圧への影響

1.2 水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーション解析の条件整理 (2/5)

【3号炉】

不確かさの考慮内容一覧表(3号炉)

分類	項目	サイト特性	不確かさの考慮内容	比較する 検討ケース
地形	周辺地形	防波堤の有無	防波壁周辺の地形変状の不確かさを考慮 ⇒基準津波1(防波堤有)及び基準津波1(防波堤無)	①, ②
津波	波形	振幅 (津波高さ)	津波高さの不確かさを考慮 ⇒基準津波1(防波堤有) 及び波圧検討用津波(1.5m津波)	①, ③
		短周期	津波周期の不確かさを考慮 ⇒基準津波1(防波堤有) 及び基準津波1(防波堤有)の半周期	③, ⑥

検討ケース一覧表(3号炉)

検討 ケース	津波	波形 (周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁	水理模型 実験	断面二次元津波 シミュレーション
ケース①	基準津波1	基準津波1	有	有	有	○	○
ケース②			無	有	有	○	—
ケース③	有		有	有	○	○	
ケース④*	有		有	無	○	—	
ケース⑤*	有		無	無	○	—	
ケース⑥	波圧検討用津波 (1.5m津波)	基準津波1 の半周期	有	有	有	○	—

*通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び碎波の発生，並びに津波波圧への影響

1.2 水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーション解析の条件整理（3/5）

【1,2号炉】

不確かさの考慮内容一覧表(1, 2号炉)

分類	項目	サイト特性	不確かさの考慮内容	比較する検討ケース
地形	周辺地形	防波堤の有無	1, 2号炉前面は防波堤無の方が津波高さが高くなるため、 地形変状の不確かさは考慮しない	—
津波	波形	振幅 (津波高さ)	津波高さの不確かさを考慮 ⇒基準津波 1 (防波堤無) 及び波圧検討用津波(1.5m津波)	⑦, ⑧
		短周期	津波周期の不確かさを考慮 ⇒基準津波 1 (防波堤無) 及び基準津波 1 (防波堤無)の半周期	⑧, ⑪

検討ケース一覧表(1, 2号炉)

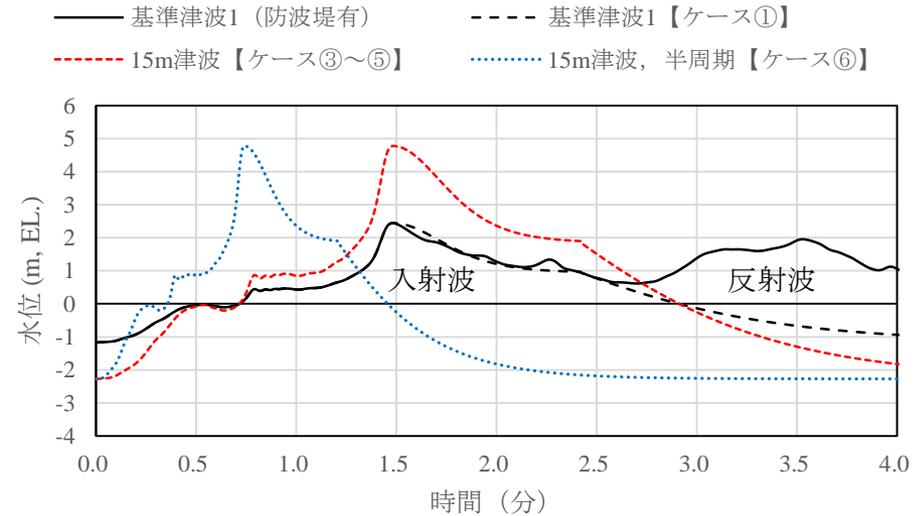
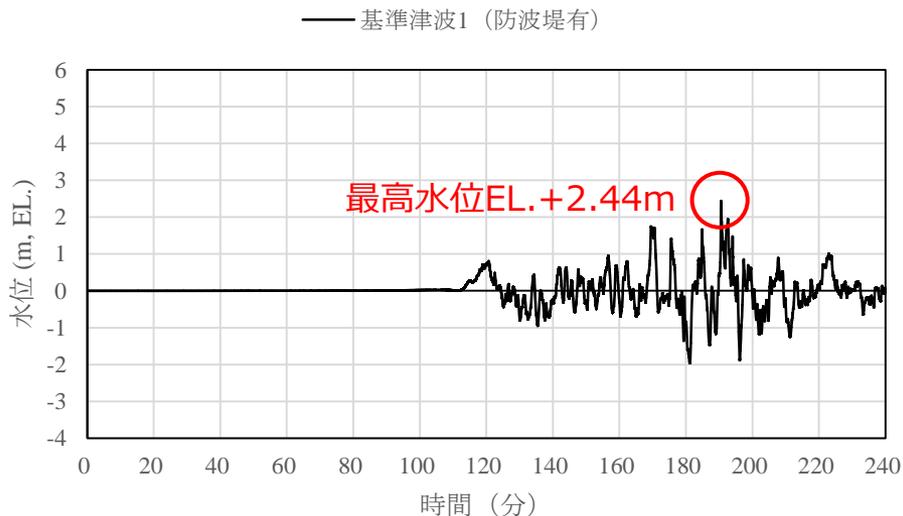
検討ケース	津波高さ	波形 (周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁	水理模型 実験	断面二次元津波 シミュレーション
ケース⑦	基準津波 1	基準津波 1	無	有	有	○	○
ケース⑧	波圧検討用津波 (1.5m津波)		無	有	有	○	○
ケース⑨ [※]			無	有	無	○	—
ケース⑩ [※]			無	無	無	○	—
ケース⑪		基準津波 1 の半周期	無	有	有	○	—

※通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.2 水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーション解析の条件整理 (4/5)

- 水理模型実験は，ソリトン分裂波や砕波の発生の有無及び防波壁が受ける津波波圧への有意な影響の有無，並びにフルード数の把握を目的に実施する。
- 水理模型実験における再現範囲は**施設護岸から離れた**沖合約2.5kmの位置とし，入力津波高さが最大となる基準津波1 (**防波堤有・無**)の平面二次元津波シミュレーションから求めた同地点における津波波形（最大押し波1波）を入力する。
- 実験における入射津波は，同地点の水位と流速を用いて入射波成分と反射波成分に分離し，入射波成分を造波する。
- 入射津波高さについては，基準津波1 (**防波堤有・無**)と，不確かさを考慮した波圧検討用津波(1.5 m津波)を設定する。波圧検討用津波(1.5 m津波)は，基準津波1 (**防波堤有・無**)と同周期として防波壁前面における反射波を含む遡上高がEL.+15mとなるように振幅を調整する。なお，本波圧検討用津波(1.5 m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。
- 周期については，基準津波1 (**防波堤有・無**)の周期と，不確かさを考慮した基準津波1 (**防波堤有・無**)の半周期を設定する。

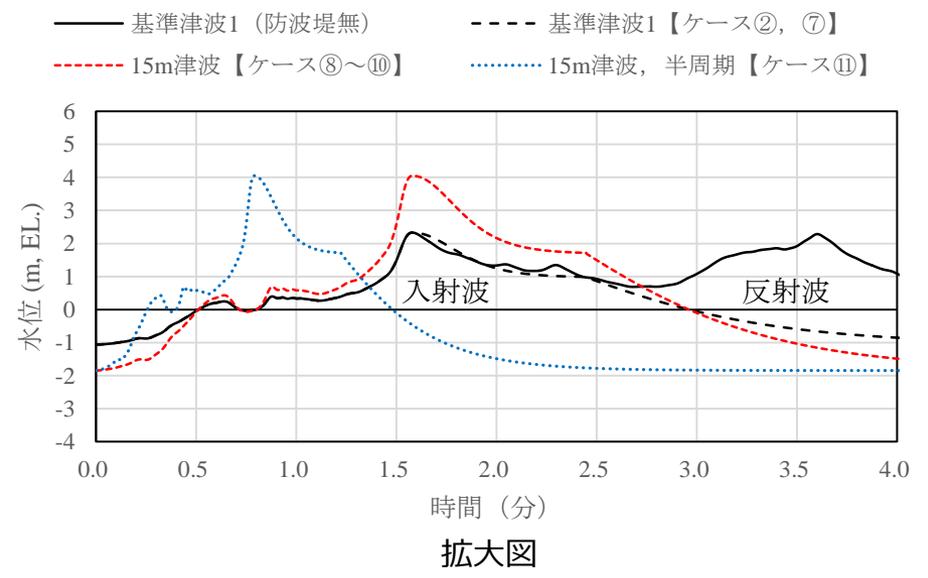
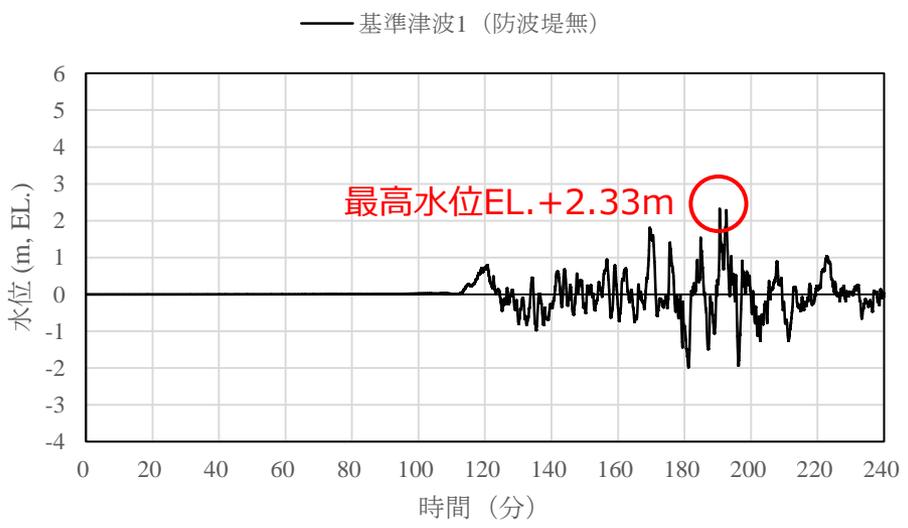


拡大図

入射津波の造波波形図 (防波堤有)

1. ソリトン分裂波及び碎波の発生，並びに津波波圧への影響

1.2 水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーション解析の条件整理 (5 / 5)

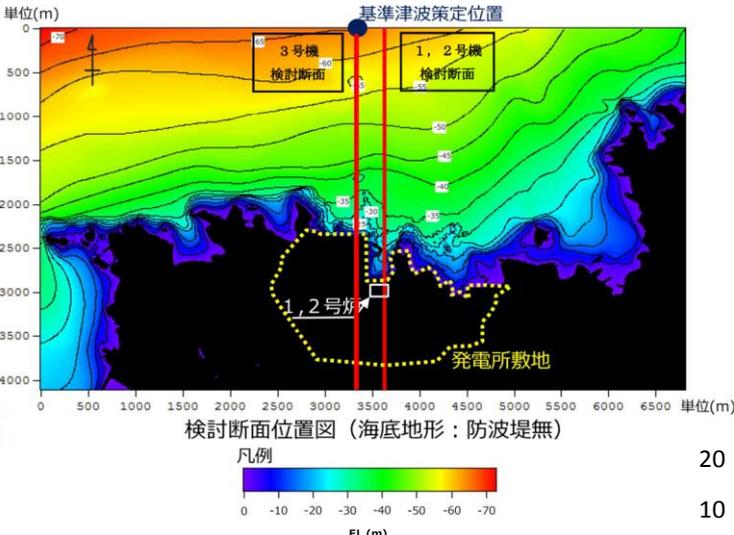


入射津波の造波波形図 (防波堤無)

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

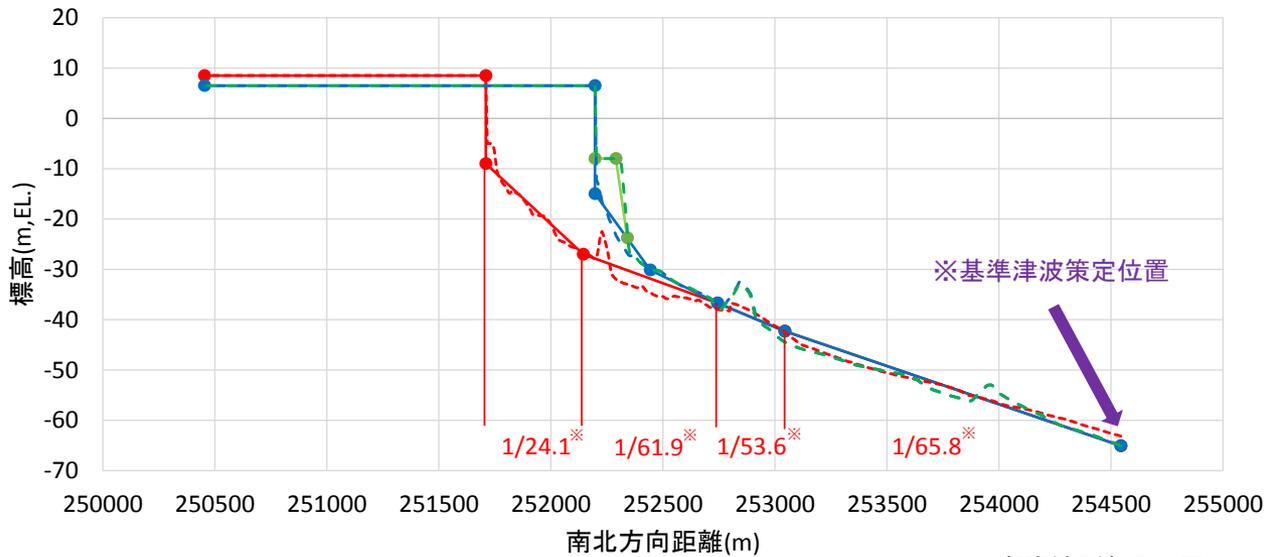
1.3 水理模型実験による検討 検討断面位置

- 水理模型実験における検討断面位置を以下に示す。
- 島根原子力発電所前面の海底地形及び津波の伝播特性を踏まえ，本実験の検討断面は，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。



検討断面位置図 (海底地形：防波堤無)

- 実験断面_1,2号炉
- 実験断面_3号炉_防波堤無
- 実験断面_3号炉_防波堤有
- 現地地形_1,2号炉
- 現地地形_3号炉_防波堤無
- 現地地形_3号炉_防波堤有



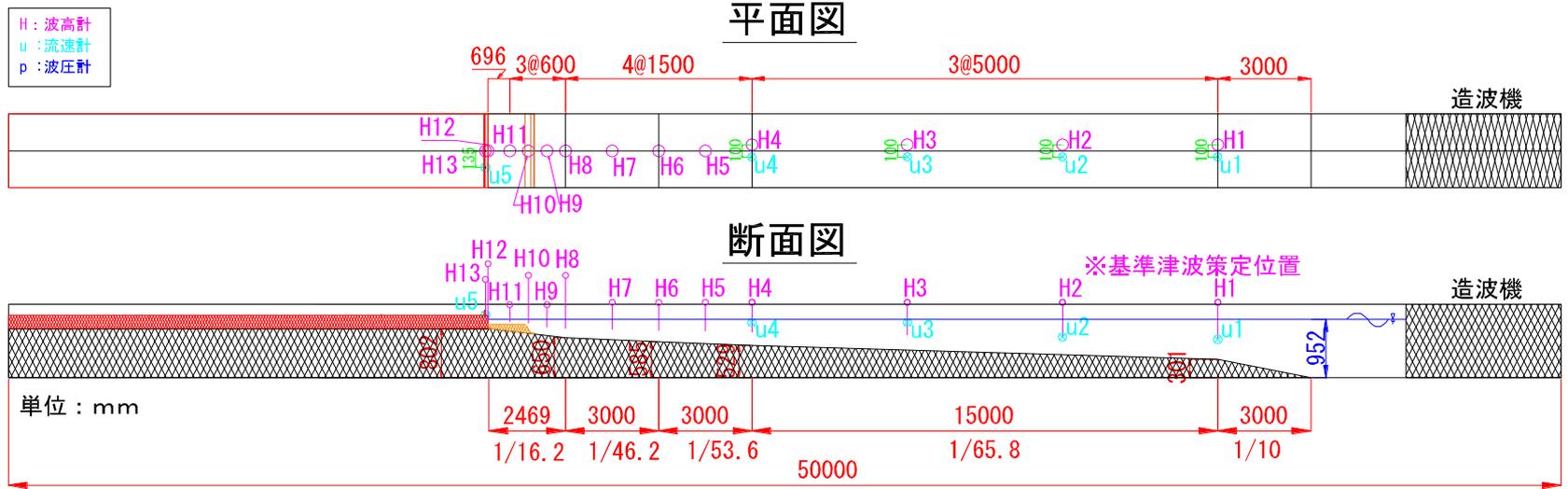
検討断面図

※海底地形勾配を示す。

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

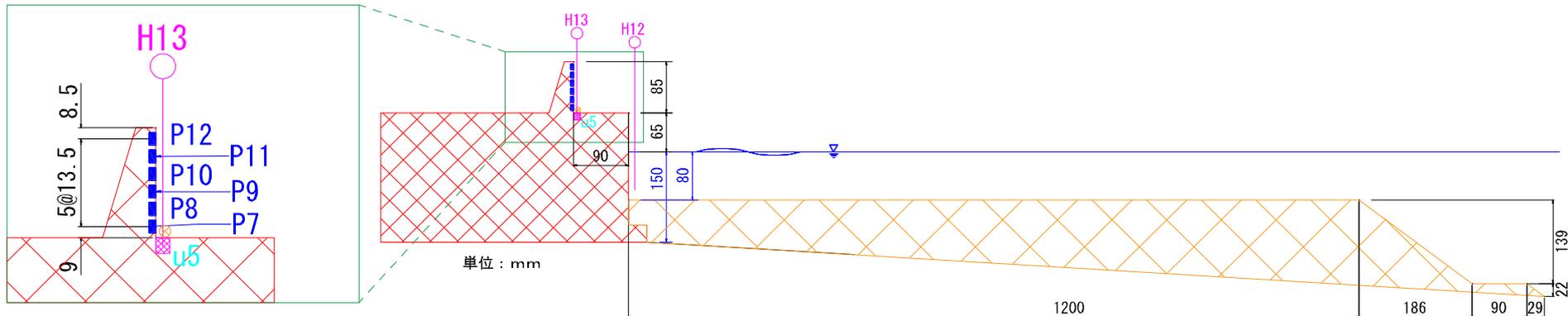
1.3 水理模型実験による検討 実験条件 (1 / 4)

- 実験施設の水路は，長さ50m×幅0.6m×高さ1.2mとし，沖合約2.5kmから陸側の範囲を再現するために，実験縮尺（幾何縮尺）は1/100とする。以下に3号炉側の実験モデルを示す。



計測位置図 (3号炉前面, 防波堤有)

断面図 防波壁詳細

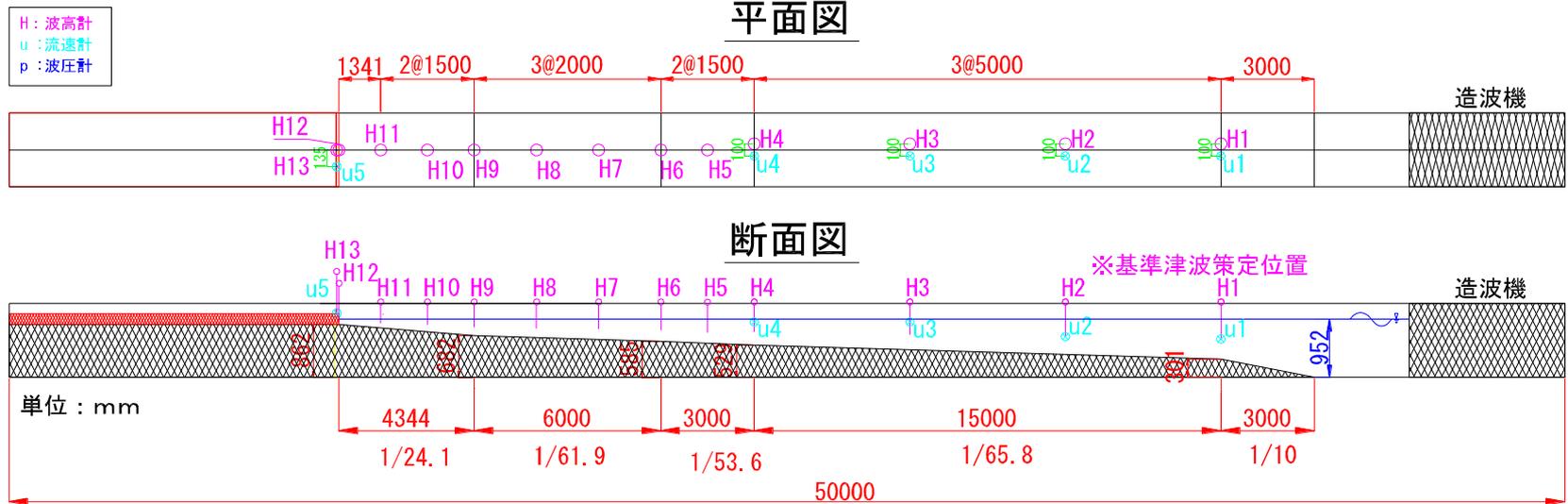


防波壁位置拡大図 (3号炉, 防波堤有)

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

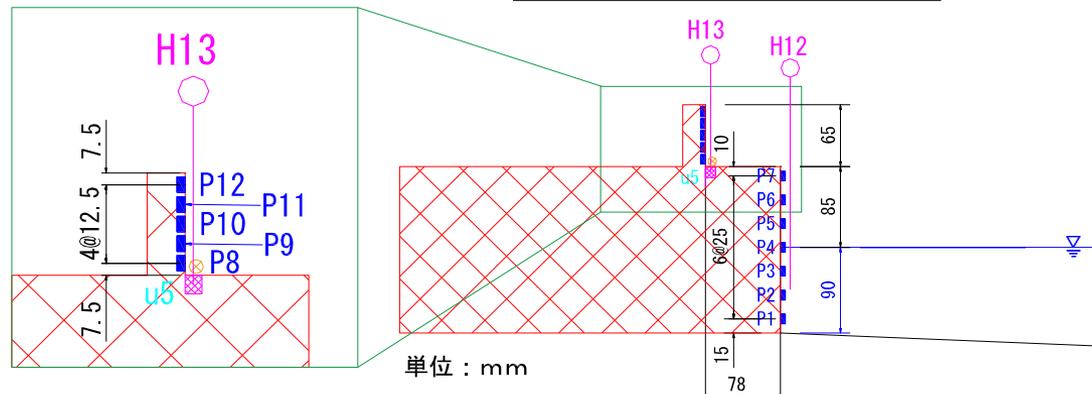
1.3 水理模型実験による検討 実験条件（2/4）

- 実験施設の水路は，長さ50m×幅0.6m×高さ1.2mとし，沖合約2.5kmから陸側の範囲を再現するために，実験縮尺（幾何縮尺）は1/100とする。以下に1，2号炉側の実験モデルを示す。



計測位置図（1，2号炉前面）

断面図 防波壁詳細

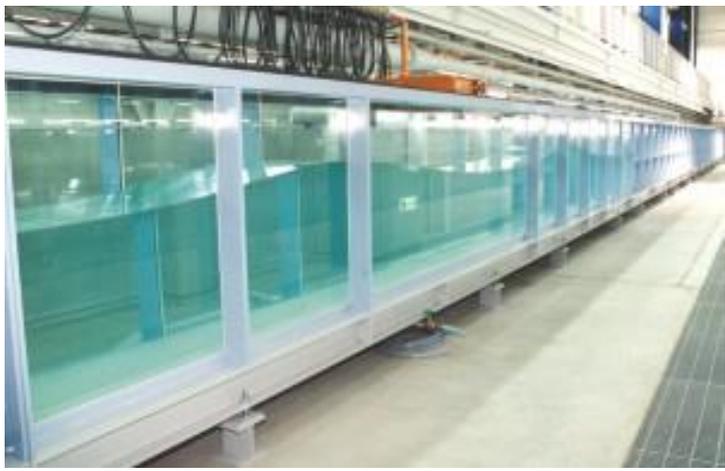


防波壁位置拡大図（1，2号炉）

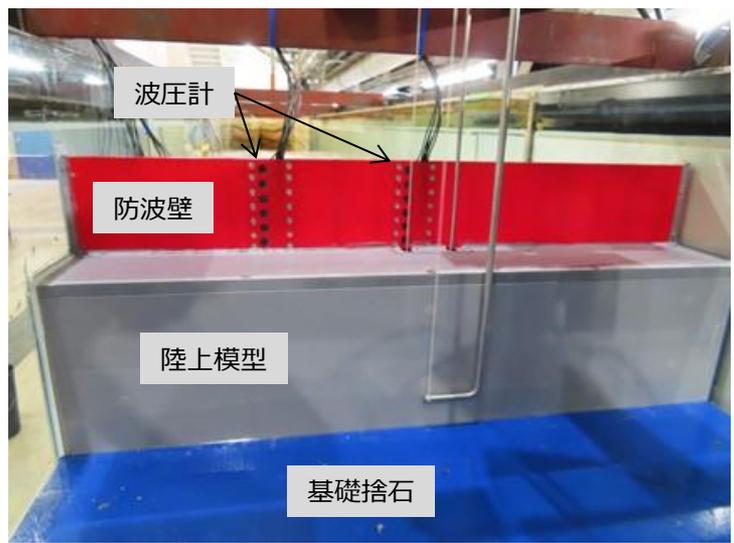
1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 実験条件 (3 / 4)

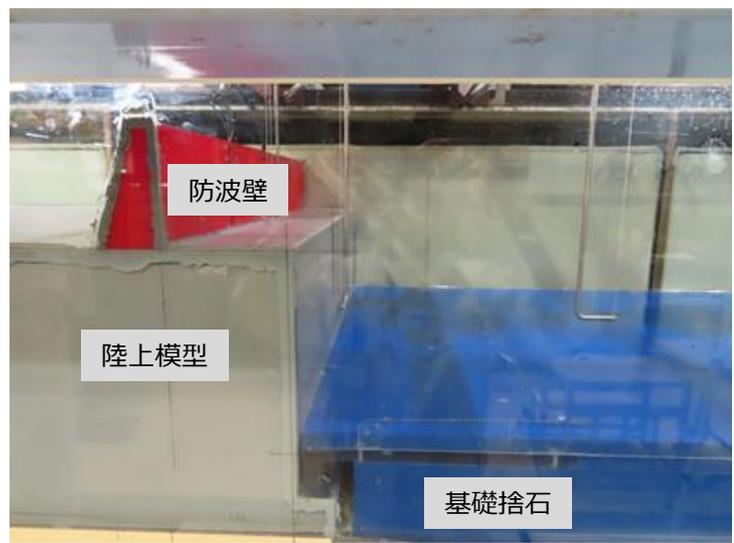
- 水理模型実験の実験装置 (3号炉側の例) の写真を以下に示す。



実験施設写真



正面



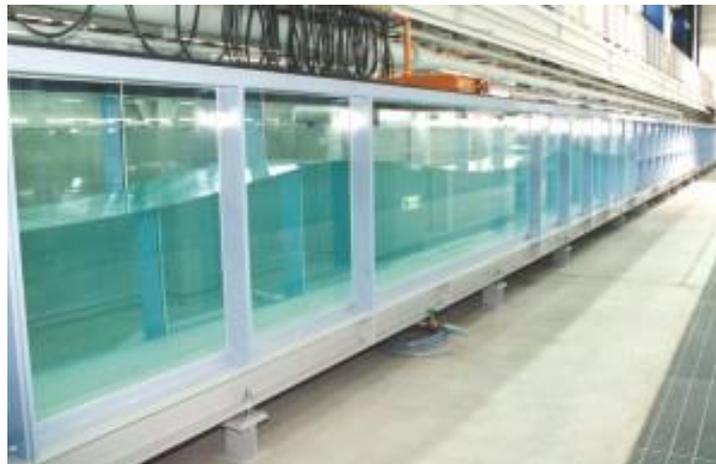
側面

実験装置 (3号炉)

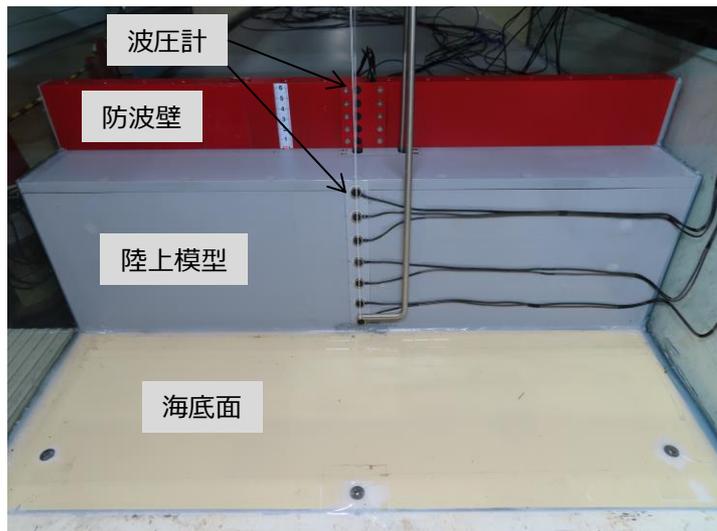
1. ソリトン分裂波及び碎波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 実験条件（4 / 4）

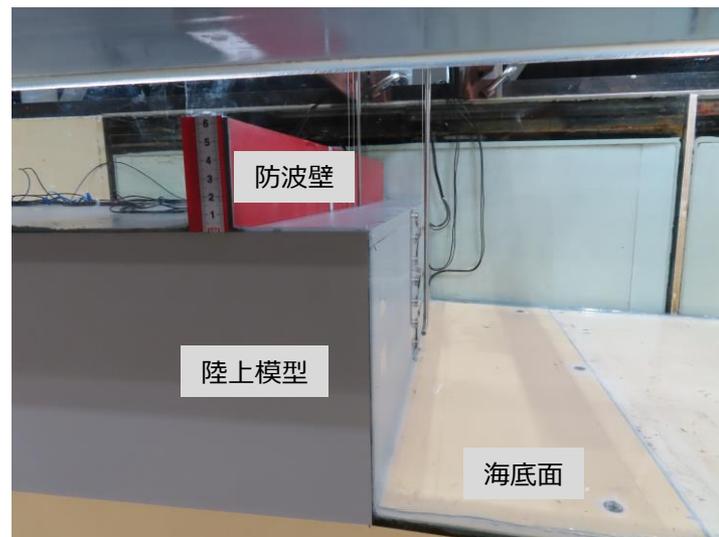
- 水理模型実験の実験装置（1, 2号炉側の例）の写真を以下に示す。



実験施設写真



正面



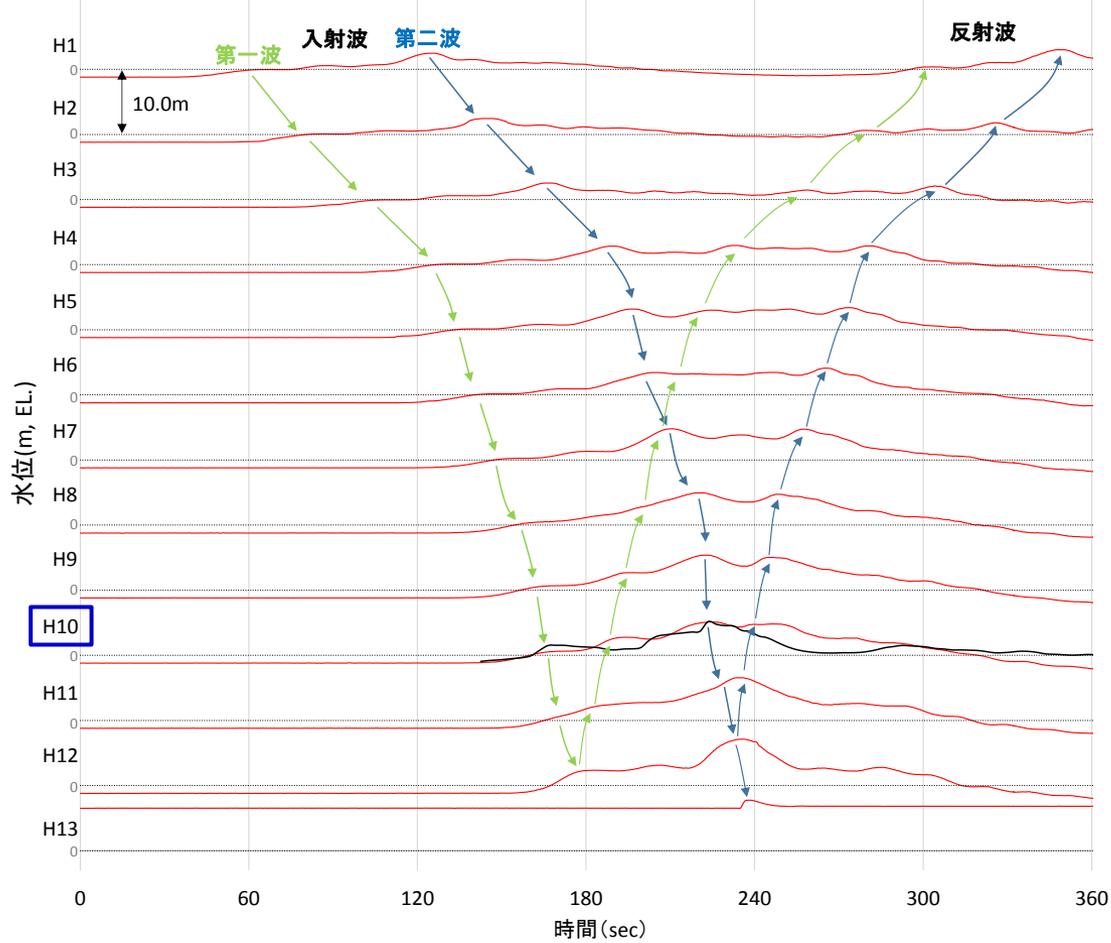
側面

実験装置（1,2号炉）

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 3号炉結果 (ケース①)

- 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕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（H1～H12地点）。また，水理模型実験（H10地点）と同等な水深における平面二次元津波シミュレーション（地点1：14頁参照）の時刻歴波形を比較した結果，同等の津波を再現できていることを確認した。
- 防波壁前面のH13地点においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しないことを確認した。
- また，第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について，緩やかに上昇していることを確認した。



水理模型実験における水位の時刻歴波形 (ケース①)

検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース①	基準津波 1	基準津波 1	有	有	有
ケース②			無	有	有
ケース③	有		有	有	
ケース④*	有		有	無	
ケース⑤*	有		無	無	
ケース⑥	基準津波 1の半周期		有	有	有

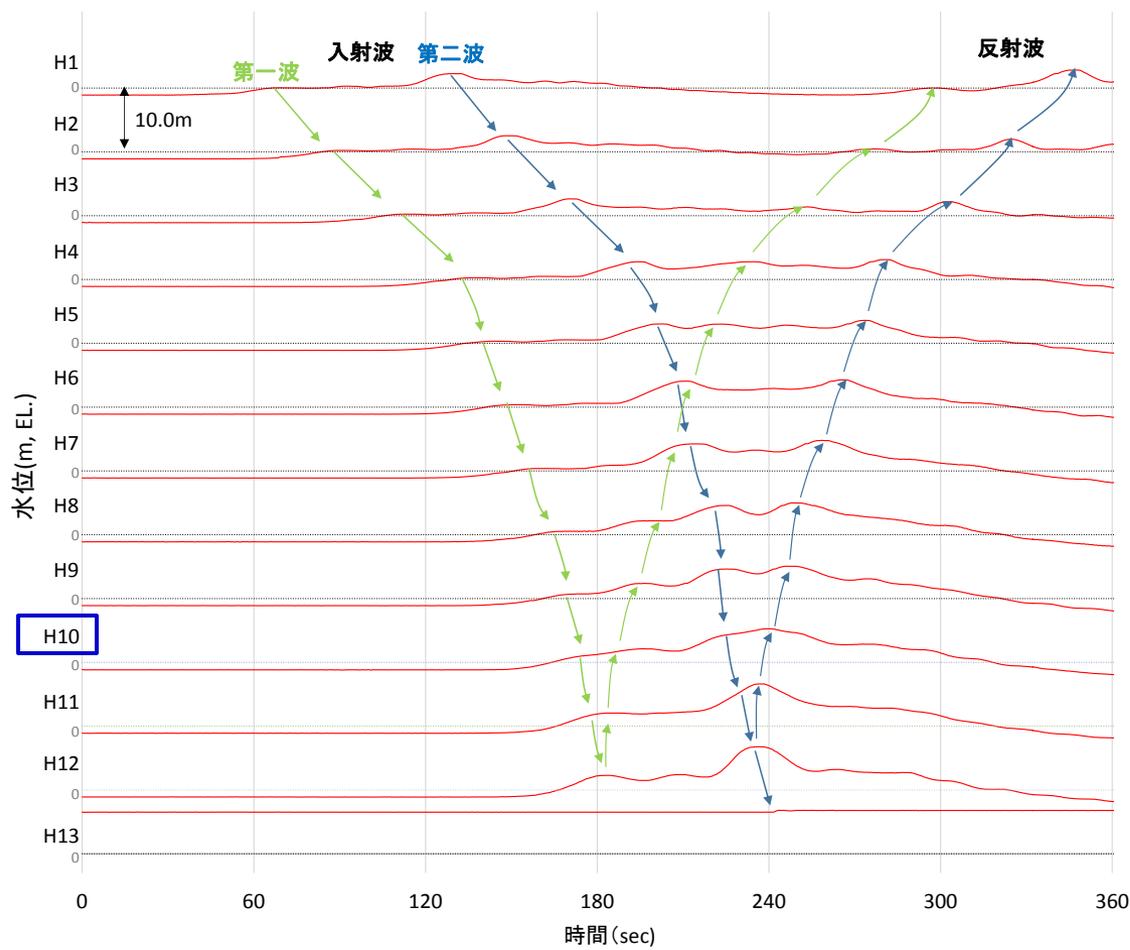
※通過波計測ケース

— : 水理模型実験結果
 — : 平面二次元津波シミュレーション解析結果 (地点1)

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 3号炉結果 (ケース②)

- 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕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 (H1~H12地点)。
- 防波壁前面のH13地点においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しないことを確認した。
- また，第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について，緩やかに上昇していることを確認した。



水理模型実験における水位の時刻歴波形 (ケース②)

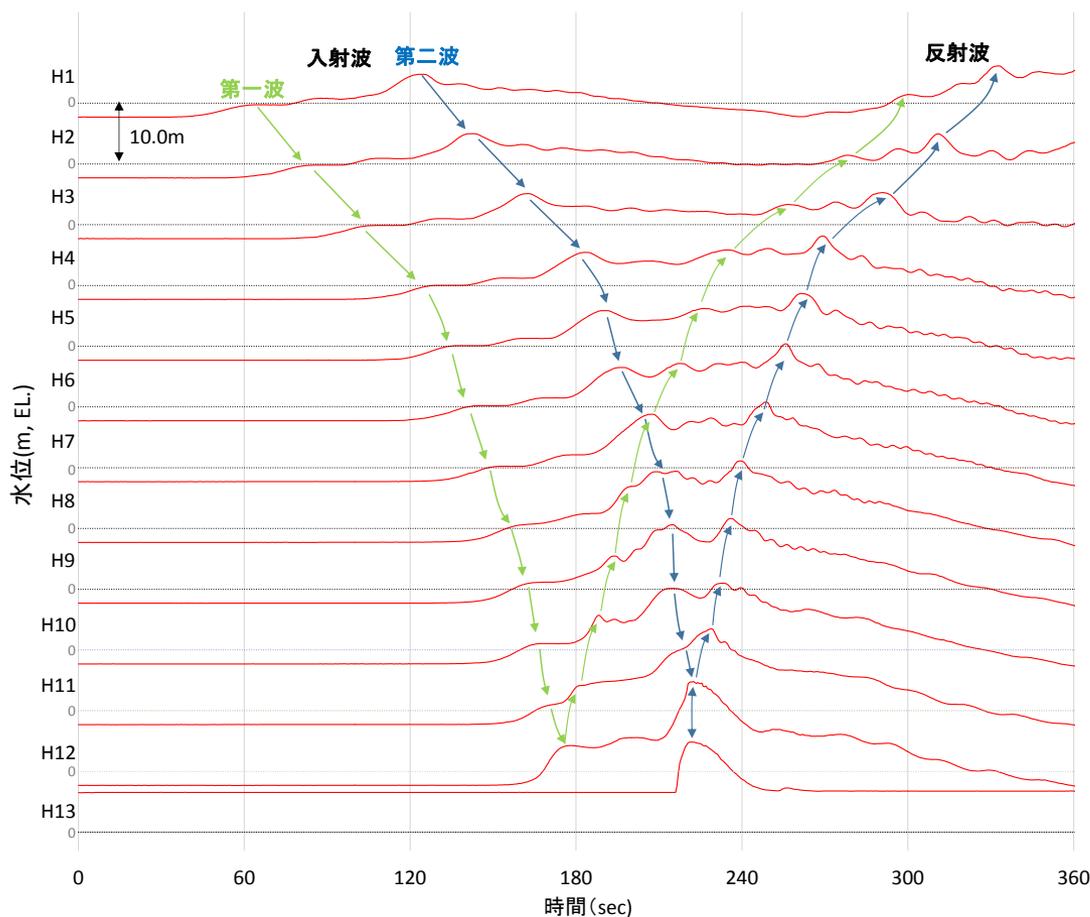
検討ケース	津波	波形 (周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース①	基準津波 1		有	有	有
ケース②			無	有	有
ケース③	波圧 検討用津波 (1.5m津波)	基準津波 1	有	有	有
ケース④*			有	有	無
ケース⑤*			有	無	無
ケース⑥			基準津波 1 の半周期	有	有

※通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 3号炉結果（ケース③）

- 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕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（H1～H12地点）。
- 防波壁前面のH13地点においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しないことを確認した。
- また，第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について乱れを確認したことから，波圧を算定して影響を確認する。



水理模型実験における水位の時刻歴波形（ケース③）

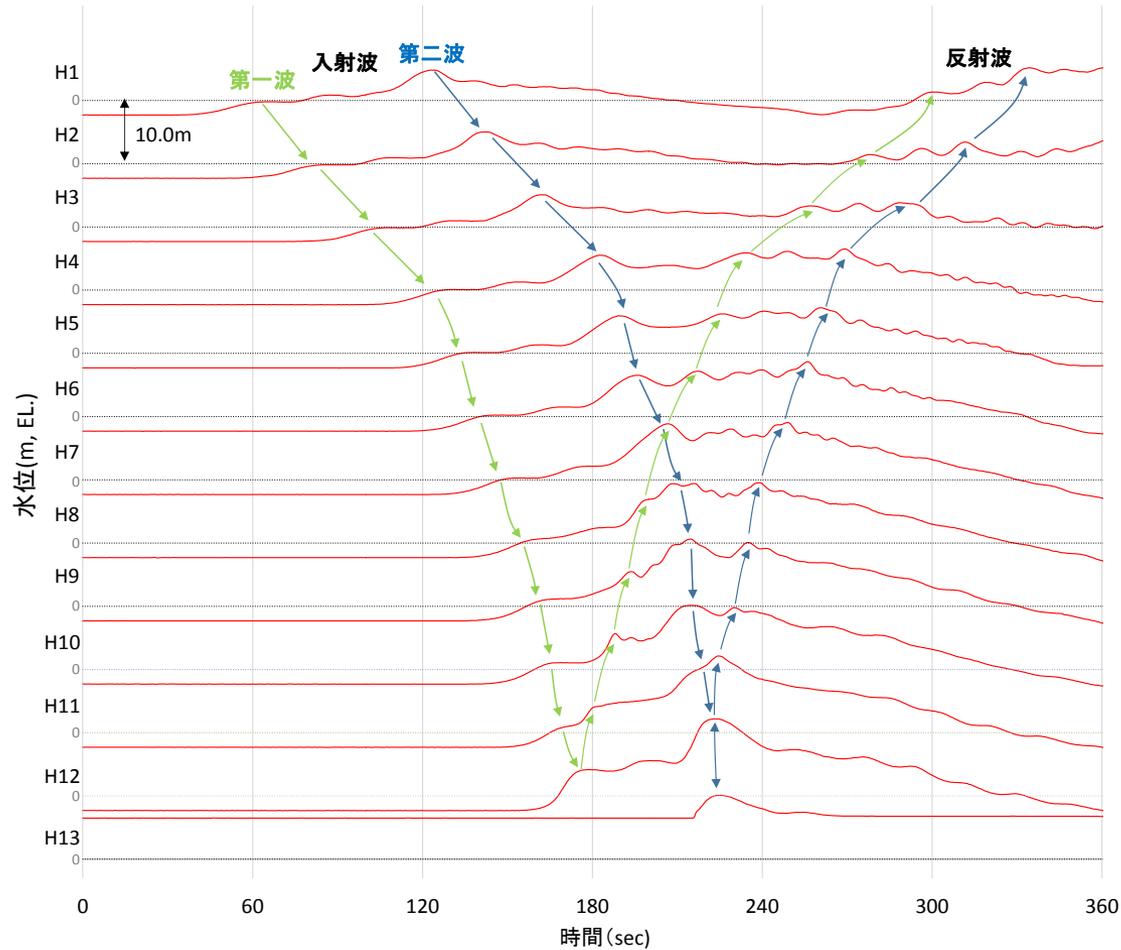
検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース①	基準津波 1		有	有	有
ケース②			無	有	有
ケース③		基準津波 1	有	有	有
ケース④*	波圧 検討用津波 (1.5m津波)		有	有	無
ケース⑤*			有	無	無
ケース⑥		基準津波 1 の半周期	有	有	有

※通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 3号炉結果 (ケース④) (1/2)

- 防波壁が無い状態での津波遡上状況の把握を目的に，通過波実験を行い，水位・フルード数の確認を行った。
- 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕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 (H1~H12地点)。
- 防波壁前面のH13地点においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しないことを確認した。
- また，第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について乱れを確認した。



検討ケース	津波	波形 (周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース①	基準津波 1	基準津波 1	有	有	有
ケース②			無	有	有
ケース③	有		有	有	
ケース④*	波圧		有	有	無
ケース⑤*	検討用津波 (1.5m津波)		有	無	無
ケース⑥	基準津波 1 の半周期		有	有	有

※通過波計測ケース

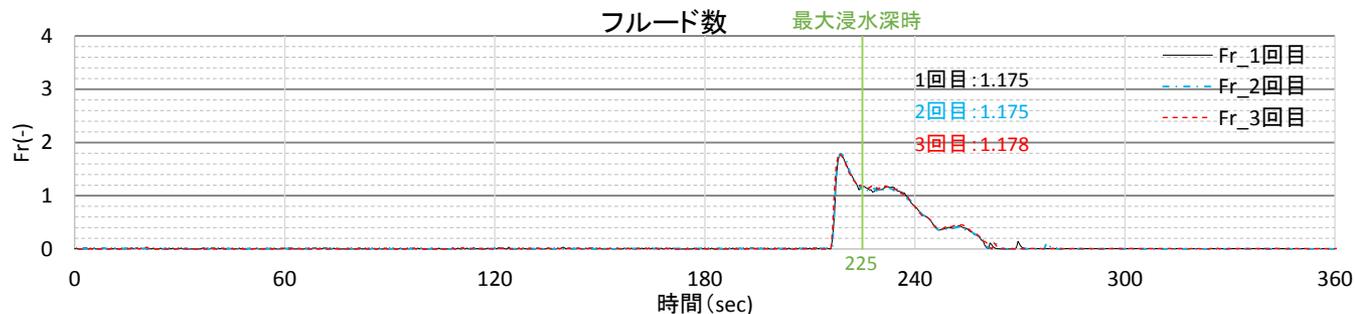
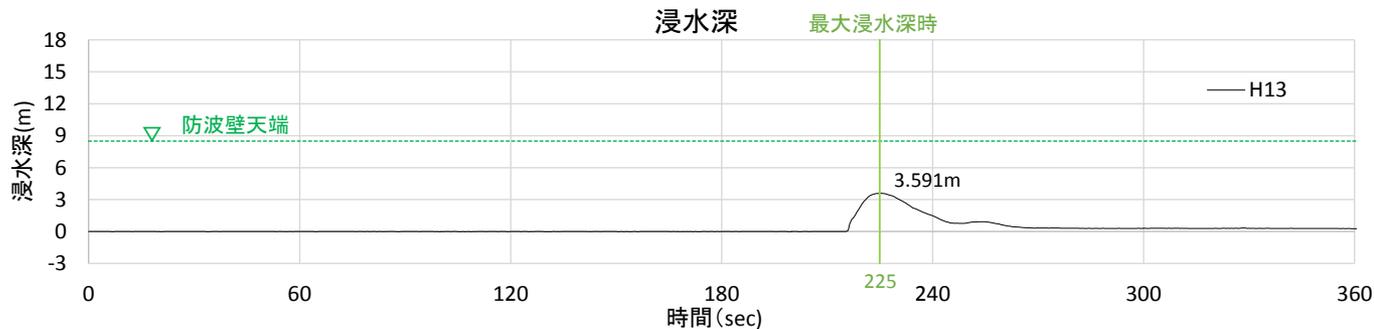
水理模型実験における水位の時刻歴波形 (ケース④)

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 3号炉結果（ケース④）（2/2）

- 防波壁位置における浸水深及び同時刻におけるフルード数の時刻歴波形を確認した。その結果，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い，最大浸水深と同時刻のフルード数は**1以上**となることを確認した。
- 朝倉らの研究※によると，津波波圧算定で使用する水深係数（水平波圧指標）について，以下のとおり記載されている。
 - ・非分裂波の場合，フルード数が1.5以上では陸上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圧分布の倍率）は最大で3.0となる。
- 今回，最大浸水深と同時刻のフルード数は**1以上**であることから，津波波圧算定で使用する水深係数を3.0とする。

※朝倉ら（2000）：護岸を越流した津波による波圧に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，土木学会，PP.911-915



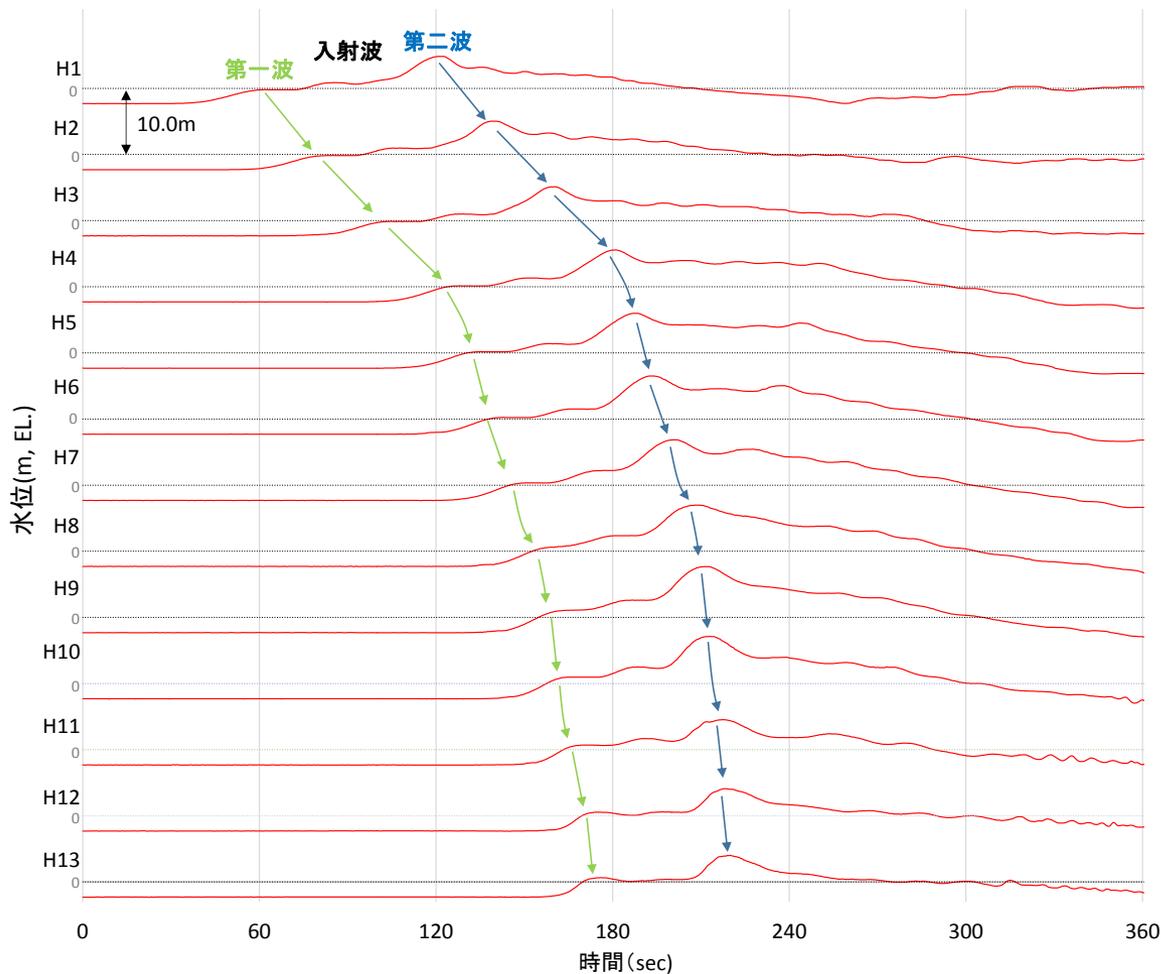
	フルード数 (最大浸水深時)
1回目	1.175
2回目	1.175
3回目	1.178

最大浸水深及び同時刻のフルード数（進行波成分）の時刻歴波形

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 3号炉結果（ケース⑤）

- 反射波の影響を受けない状態でのソリトン分裂波及び砕波の発生有無の確認のため，敷地護岸及び防波壁無による通過波実験を行い，発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕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（H1～H12地点）。



水理模型実験における水位の時刻歴波形（ケース⑤）

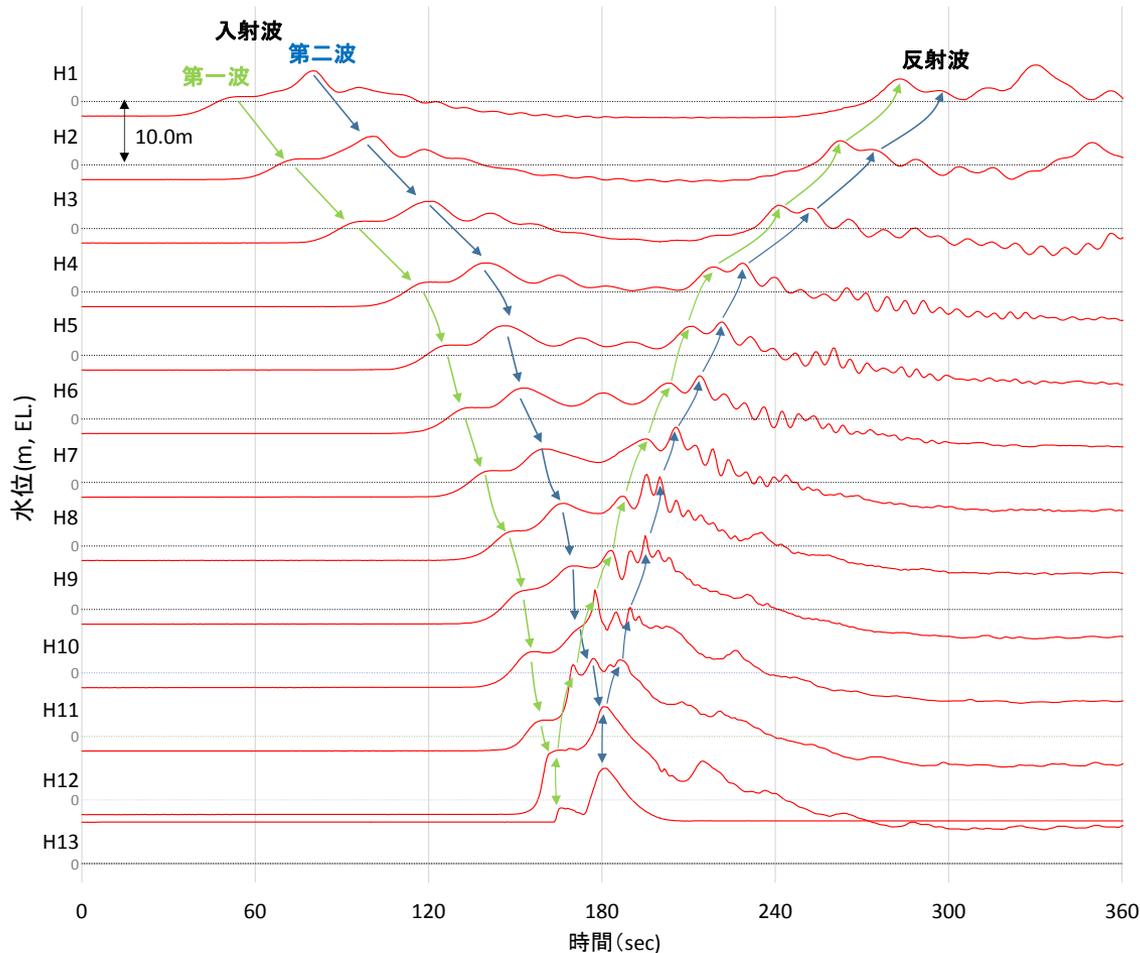
検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース①	基準津波 1	基準津波 1	有	有	有
ケース②			無	有	有
ケース③	有		有	有	
ケース④*	有		有	無	
ケース⑤*	検討用津波 (1.5m津波)		有	無	無
ケース⑥	基準津波 1 の半周期		有	有	有

※通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び碎波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 3号炉結果（ケース⑥）

- 不確かさケースとして，極端に周期を短くした場合の検討（基準津波1の半周期）を実施した。
- 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（H1～H12）。
- また，第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について乱れを確認したことから，波圧を算定して影響を確認する。



水理模型実験における水位の時刻歴波形（ケース⑥）

検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース①	基準津波1	基準津波1	有	有	有
ケース②			無	有	有
ケース③	有		有	有	
ケース④*	有		有	無	
ケース⑤*	有		無	無	
ケース⑥	波圧 検討用津波 (1.5m津波)		基準津波1 の半周期	有	有

※通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

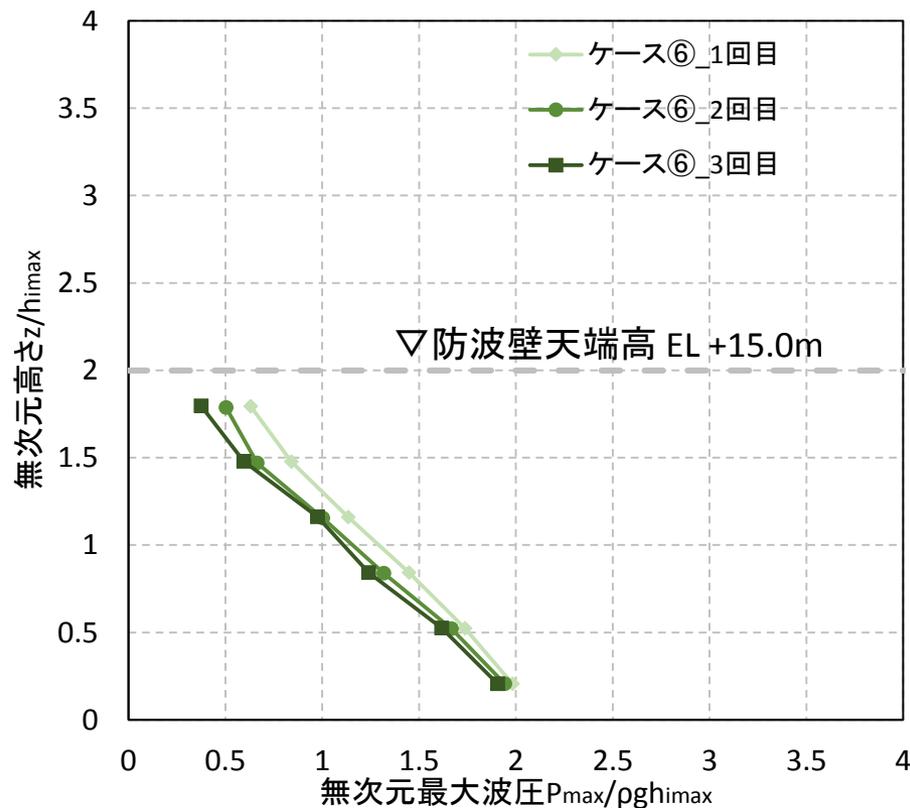
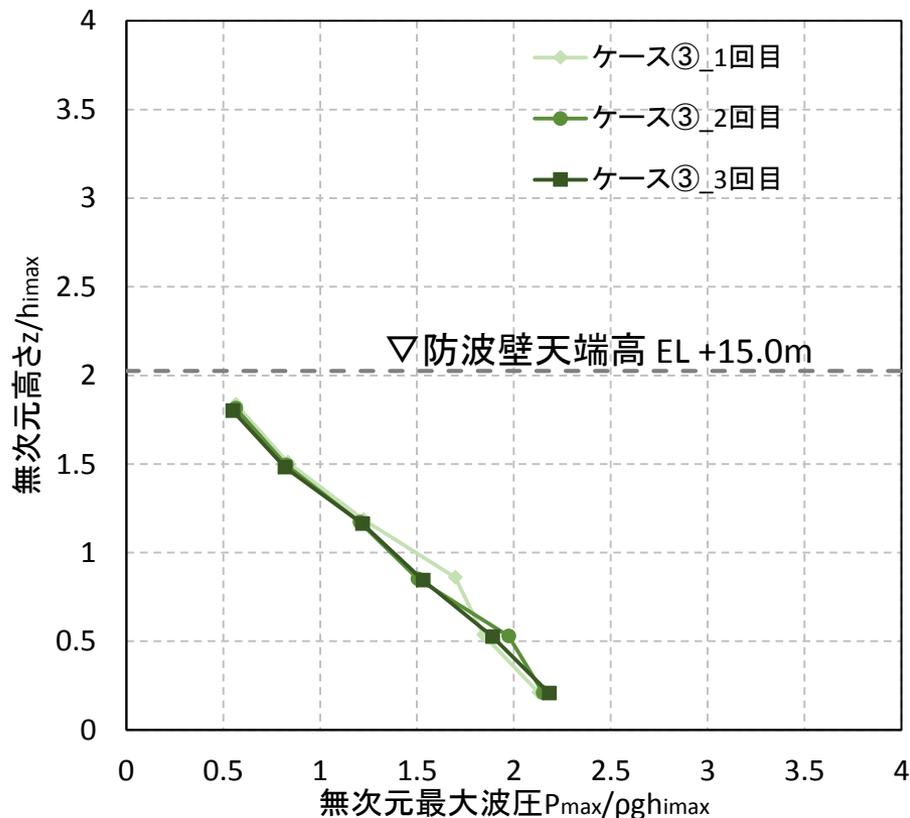
1.3 水理模型実験による検討 波圧算定 (3号炉)

- 水理模型実験において計測した防波壁に作用する波圧分布を下図に示す。
- 水理模型実験により算出した波圧分布は，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。

ケース③ (周期：基準津波1(防波堤有))

← 周期の不確かさ →

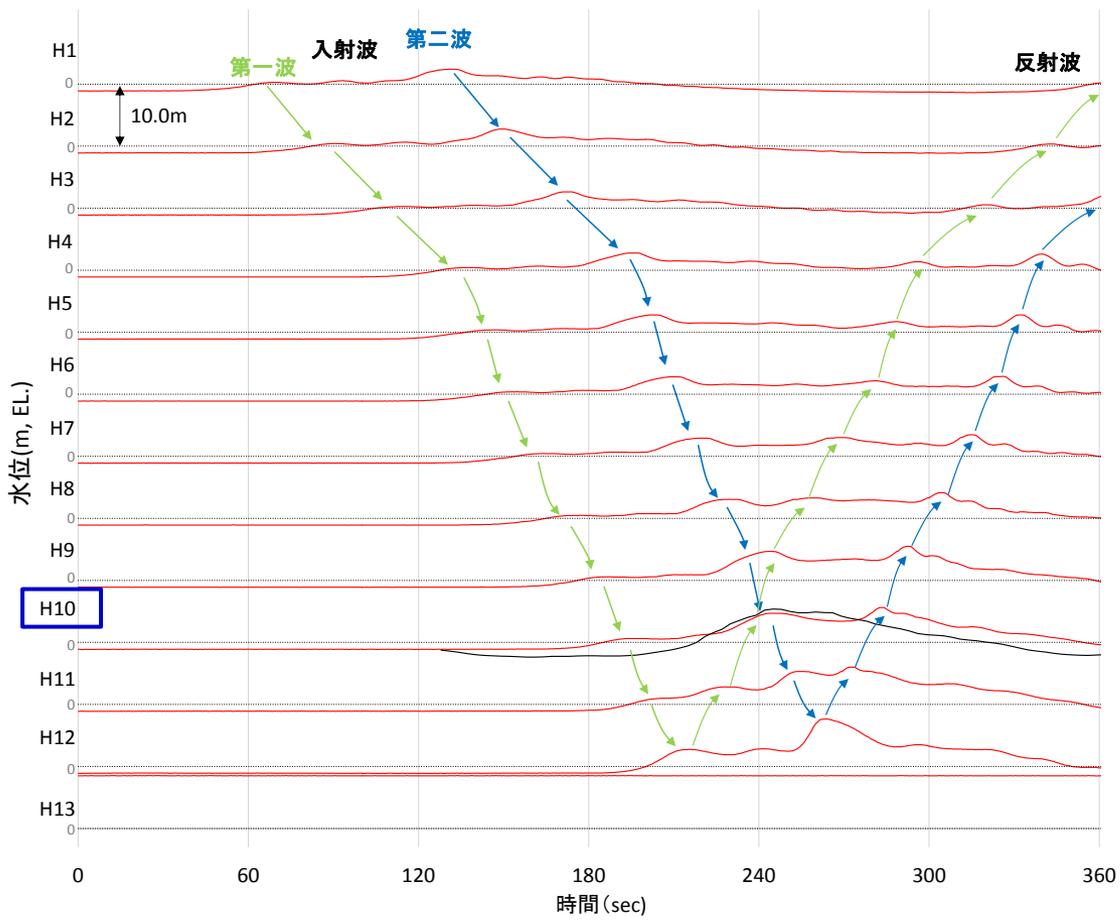
ケース⑥ (周期：基準津波1(防波堤有)の半周期)



1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 1,2号炉結果 (ケース⑦)

- 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕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（H1～H12地点）。また，水理模型実験（H10地点）と同等な水深における平面二次元津波シミュレーション（地点3：14頁参照）の時刻歴波形を比較した結果，同等の津波を再現できていることを確認した。
- 防波壁前面のH13地点においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しないことを確認した。
- また，第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について，緩やかに上昇していることを確認した。



水理模型実験における水位の時刻歴波形 (ケース⑦)

検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース⑦	基準津波 1		無	有	有
ケース⑧	波圧 検討用津波 (1.5m津波)	基準津波 1	無	有	有
ケース⑨*			無	有	無
ケース⑩*			無	無	無
ケース⑪		基準津波 1 の半周期	無	有	有

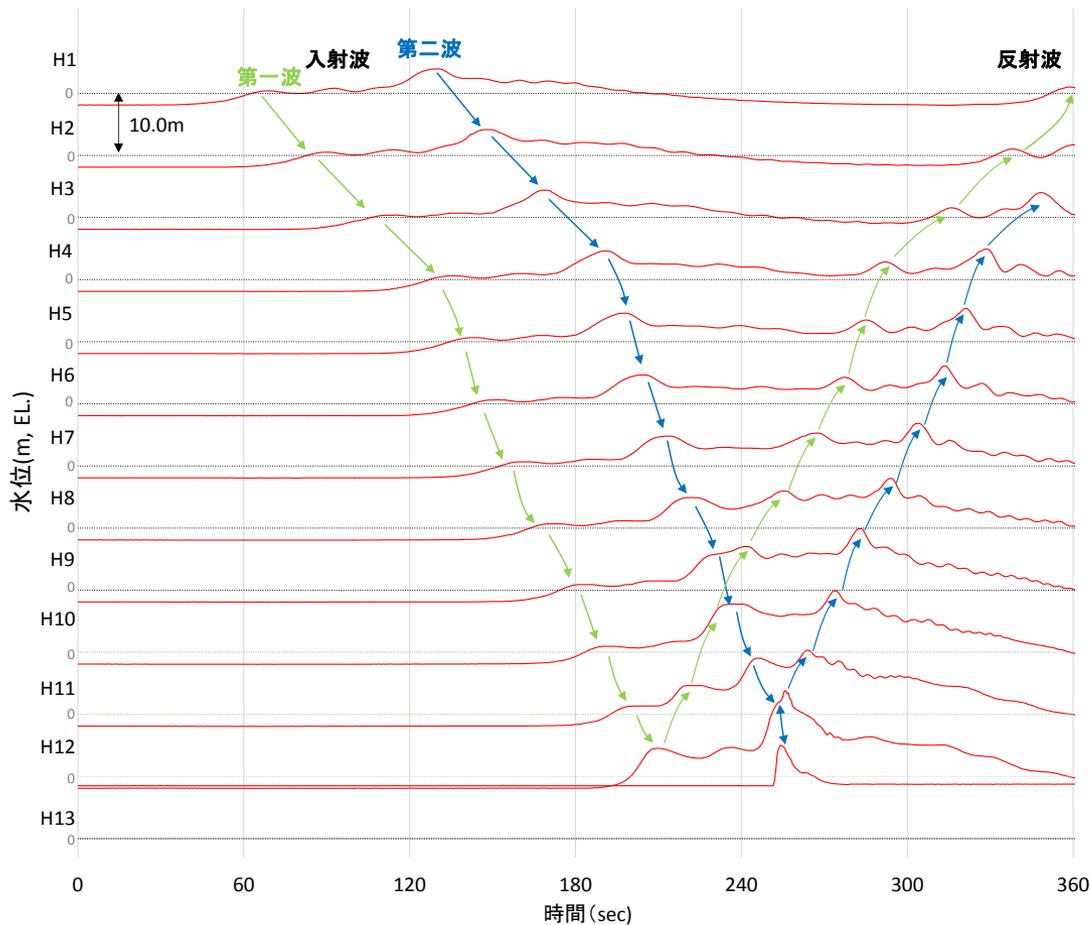
※通過波計測ケース

— : 水理模型実験結果
 — : 平面二次元津波シミュレーション解析結果 (地点3)

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 1,2号炉結果 (ケース⑧)

- 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕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 (H1～H12地点)。
- 防波壁前面のH13地点においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しないことを確認した。
- また，第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について乱れを確認したことから，波圧を算定して影響を確認する。



水理模型実験における水位の時刻歴波形 (ケース⑧)

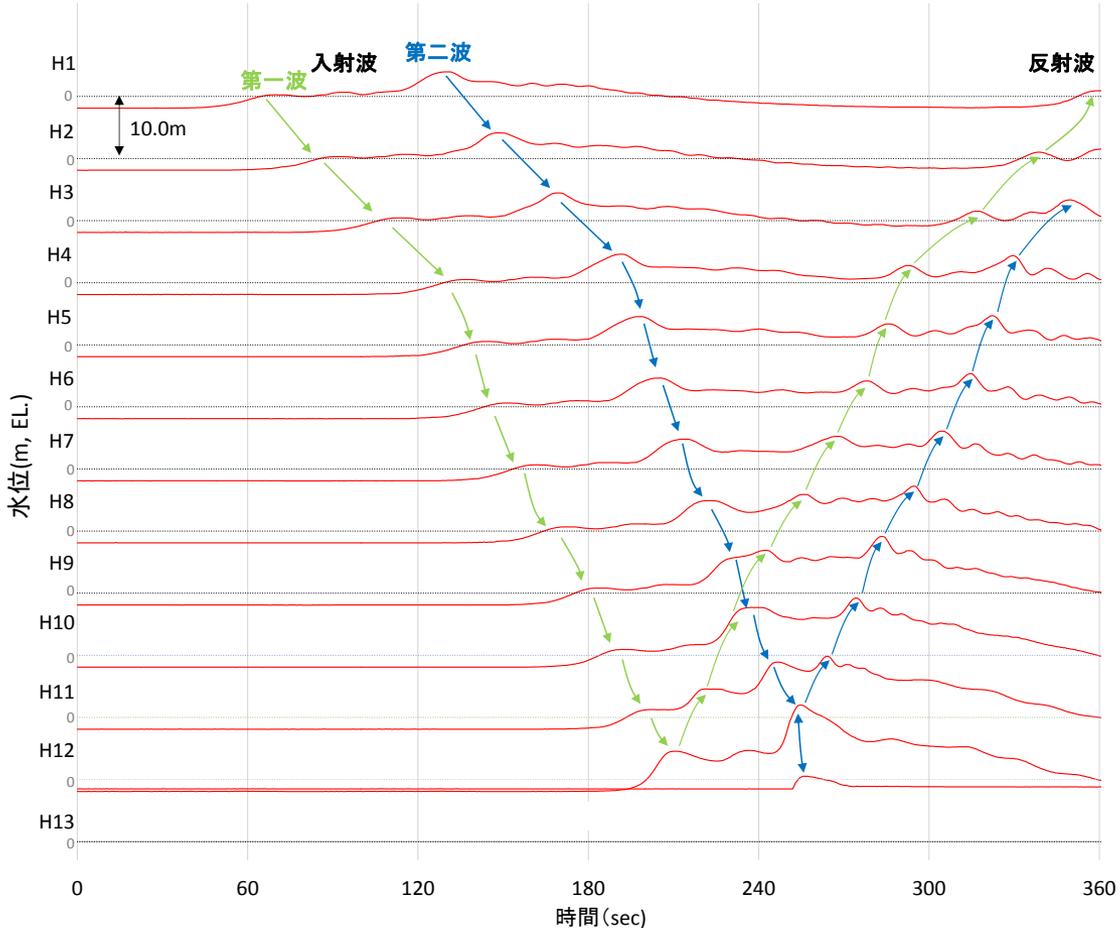
検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース⑦	基準津波 1		無	有	有
ケース⑧		基準津波 1	無	有	有
ケース⑨*	波圧 検討用津波 (1.5m津波)		無	有	無
ケース⑩*			無	無	無
ケース⑪		基準津波 1 の半周期	無	有	有

※通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 1,2号炉結果 (ケース⑨) (1/2)

- 防波壁が無い状態での津波遡上状況の把握を目的に，通過波実験を行い，水位・フルード数の確認を行った。
- 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波を及び砕波示す波形がなく，水位は緩やかに上昇していることを確認した (H1~H12地点)。
- 防波壁前面のH13地点においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しないことを確認した。
- また，第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について乱れを確認した。



水理模型実験における水位の時刻歴波形 (ケース⑨)

検討ケース	津波	波形 (周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース⑦	基準津波 1	基準津波 1	無	有	有
ケース⑧			無	有	有
ケース⑨*	波圧		無	有	無
ケース⑩*	検討用津波 (1.5m津波)		無	無	無
ケース⑪		基準津波 1 の半周期	無	有	有

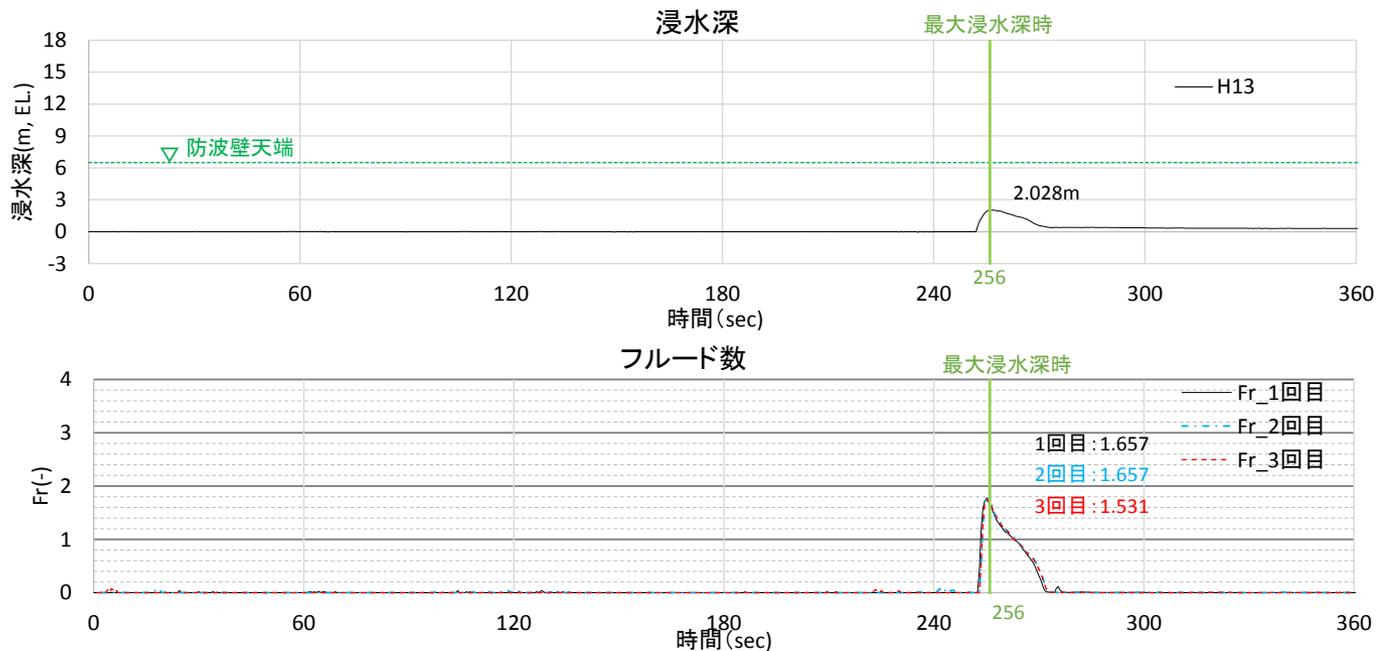
※通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 1,2号炉結果（ケース⑨）（2/2）

- 防波壁位置における浸水深及び同時刻におけるフルード数の時刻歴波形を確認した。その結果，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い，最大浸水深と同時刻のフルード数は1.5以上となることを確認した。
- 朝倉らの研究※によると，津波波圧算定で使用する水深係数（水平波圧指標）について，以下のとおり記載されている。
 - ・非分裂波の場合，フルード数が1.5以上では陸上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圧分布の倍率）は最大で3.0となる。
- 今回，最大浸水深と同時刻のフルード数は1以上であることから，津波波圧算定で使用する水深係数を3.0とする。

※朝倉ら（2000）：護岸を越流した津波による波圧に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，土木学会，PP.911-915

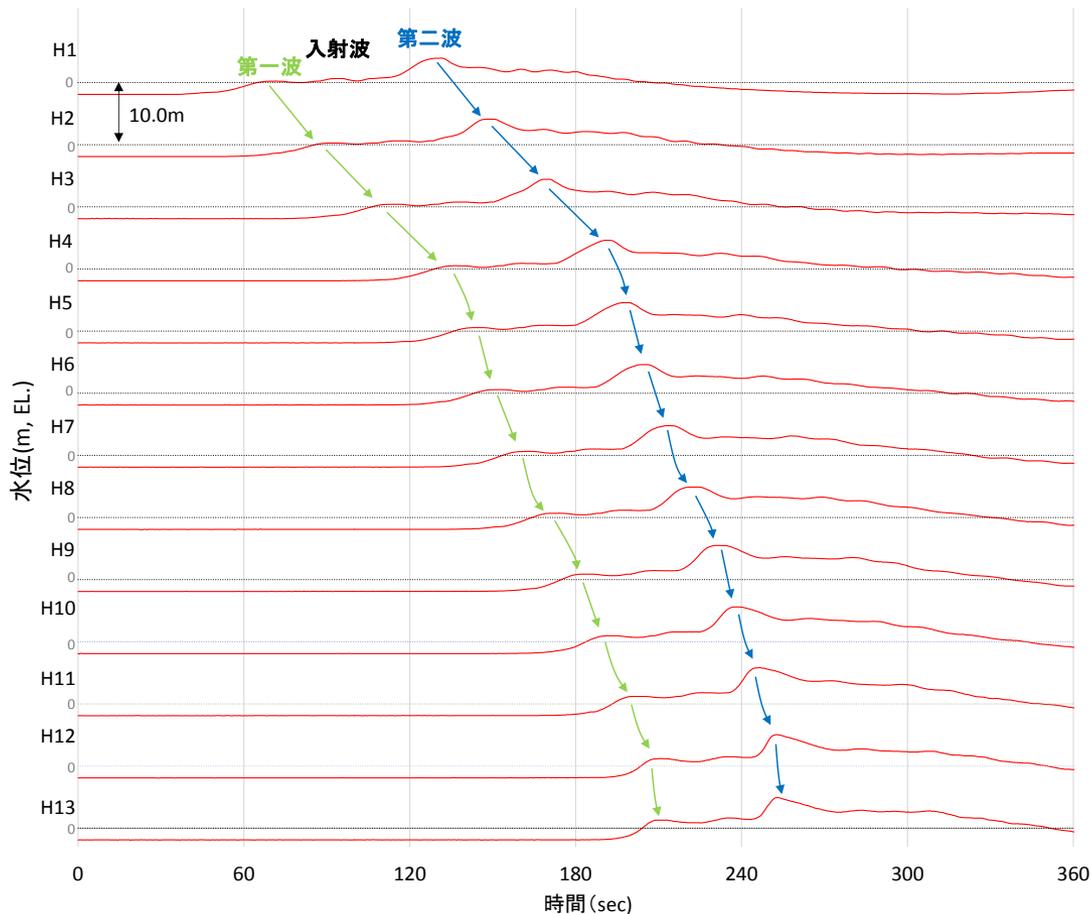


最大浸水深及び同時刻のフルード数（進行波成分）の時刻歴波形

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 1,2号炉結果 (ケース⑩)

- 反射波の影響を受けない状態でのソリトン分裂波及び砕波の発生有無の確認のため，敷地護岸及び防波壁無による通過波実験を行い，発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕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 (H1～H12地点)。



水理模型実験における水位の時刻歴波形 (ケース⑩)

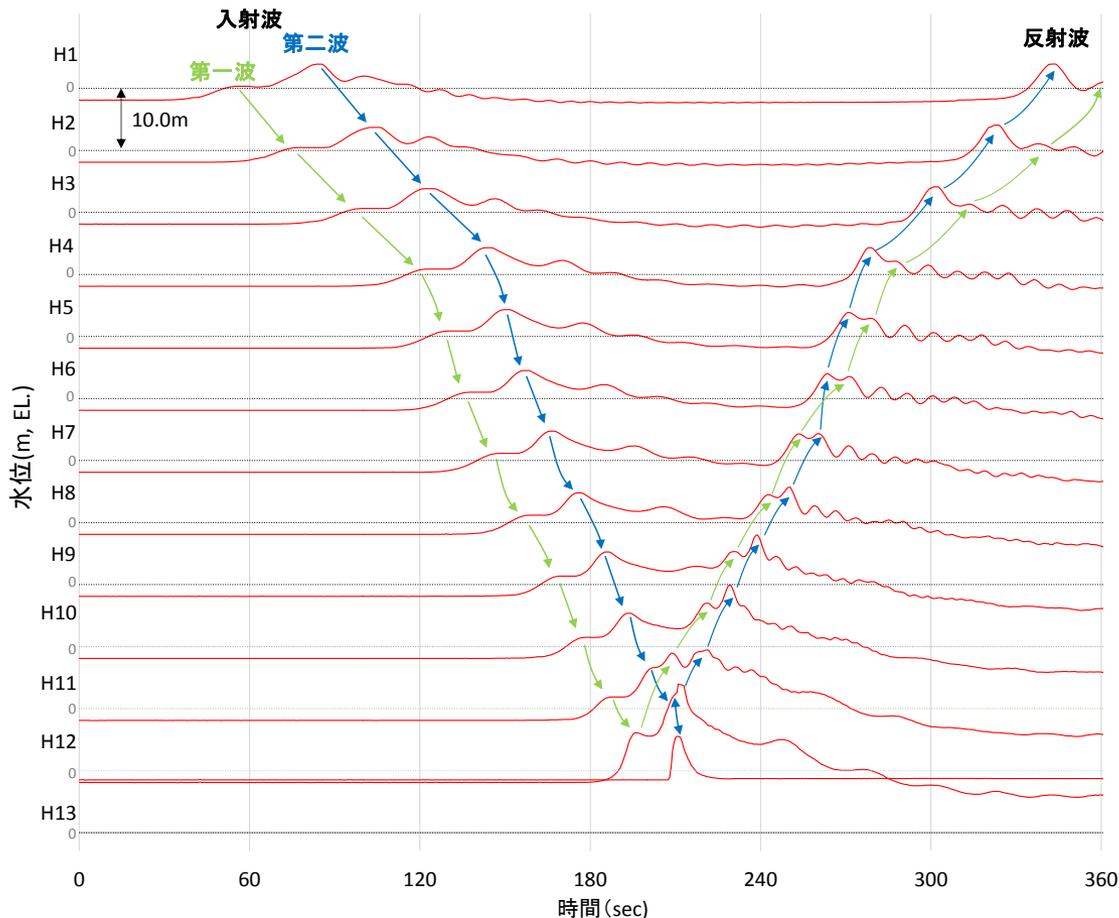
検討ケース	津波	波形 (周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース⑦	基準津波 1	基準津波 1	無	有	有
ケース⑧	波圧 検討用津波 (1.5m津波)		無	有	有
ケース⑨*			無	有	無
ケース⑩*			無	無	無
ケース⑪		基準津波 1 の半周期	無	有	有

※通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 1,2号炉結果 (ケース⑪)

- 不確かさケースとして，極端に周期を短くした場合の検討（基準津波 1 の半周期）を実施した。
- 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（H1～H12）。
- また，第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について乱れを確認したことから，波圧を算定して影響を確認する。



水理模型実験における水位の時刻歴波形 (ケース⑪)

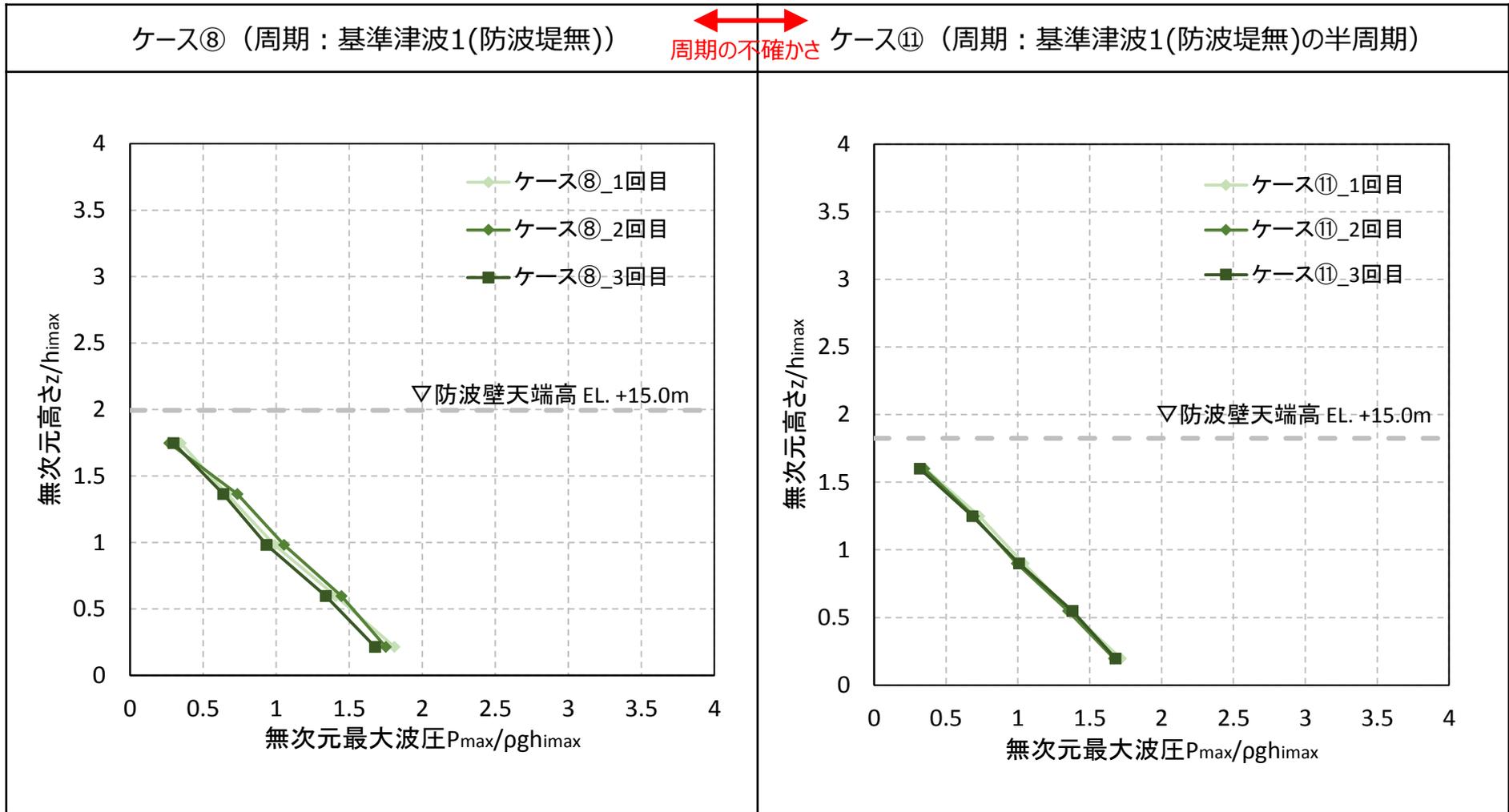
検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース⑦	基準津波 1	基準津波 1	無	有	有
ケース⑧	波圧 検討用津波 (1.5m津波)		無	有	有
ケース⑨※			無	有	無
ケース⑩※			無	無	無
ケース⑪		基準津波 1 の半周期	無	有	有

※通過波計測ケース

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.3 水理模型実験による検討 波圧算定（1, 2号炉）

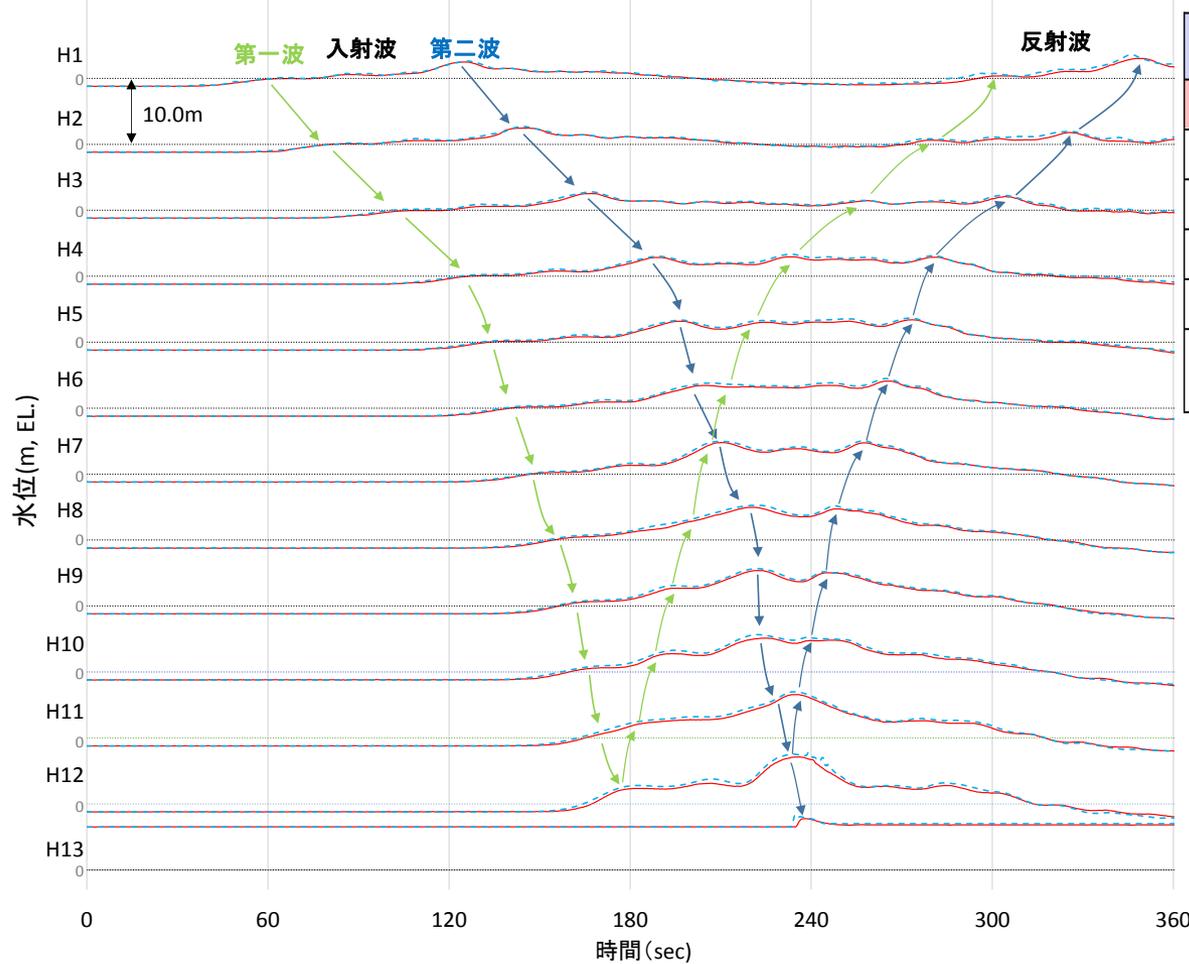
- 水理模型実験において計測した防波壁に作用する波圧分布を下図に示す。
- 水理模型実験により算出した波圧分布は，1,2号炉前面の防波壁において直線型の波圧分布となることから，ソリトン分裂波や砕波による津波波圧への有意な影響はないことを確認した。



1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.4 断面二次元津波シミュレーションによる検討 3号炉結果（ケース①）

- 水理模型実験と同じ条件（ケース①及び③）について，断面二次元津波シミュレーションを実施した。
- ケース①の解析結果は，以下のとおり，水理模型実験と同等の津波を再現できていることを確認した（H1～H13地点）。
 - 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕波を示す波形がなく，水位は緩やかに上昇している（H1～H12地点）。
 - 防波壁前面のH13地点においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しない。
 - 第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について，緩やかに上昇している。



検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース①	基準津波 1	基準津波 1	有	有	有
ケース②			無	有	有
ケース③	有		有	有	
ケース④*	有		有	無	
ケース⑤*	有		無	無	
ケース⑥	基準津波 1の半周期		有	有	有

※通過波計測ケース

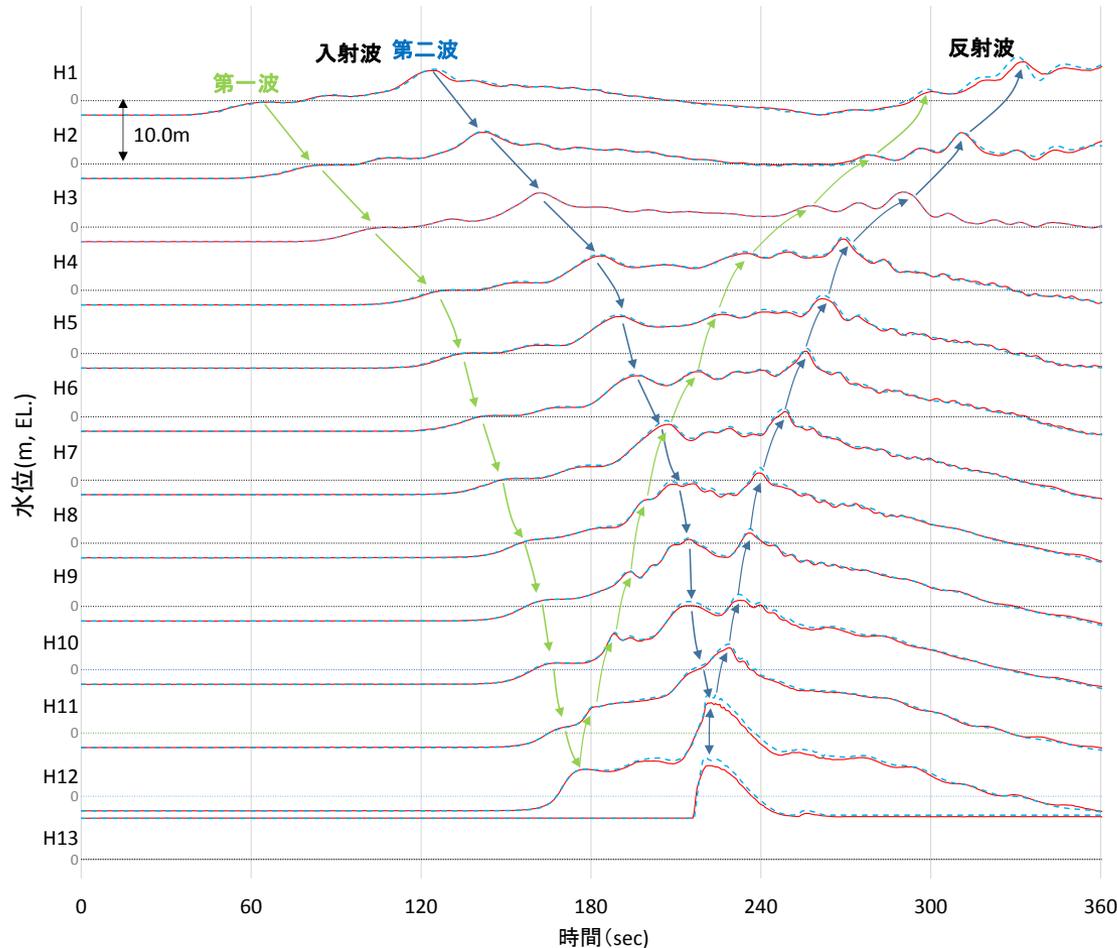
— 赤線: 実験結果
 - - - 青線: 解析結果

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（ケース①）

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.4 断面二次元津波シミュレーションによる検討 3号炉結果（ケース③）

- ケース③の解析結果は，以下のとおり，水理模型実験と同等の津波を再現できていることを確認した（H1～H13地点）。
 - 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕波を示す波形がなく，水位は緩やかに上昇している（H1～H12）。
 - 防波壁前面のH13においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しない。
 - 第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について乱れが確認できる。



検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース①	基準津波 1		有	有	有
ケース②			無	有	有
ケース③		基準津波 1	有	有	有
ケース④*	波圧 検討用津波 (1.5m津波)		有	有	無
ケース⑤*			有	無	無
ケース⑥		基準津波 1 の半周期	有	有	有

※通過波計測ケース

— 赤線: 実験結果
- - - 青線: 解析結果

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（ケース③）

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.4 断面二次元津波シミュレーションによる検討 3号炉結果（水面勾配）

- 3号炉の防波壁を対象として，ケース①(基準津波1(防波堤有))の断面二次元シミュレーション結果を基に波形の水面勾配を確認する。
- 津波の水位時刻歴波形から水位上昇量が大きくなる時刻に着目し，水位分布を確認した結果，水面勾配は最大で 1.40° であり，松山ら(2005)における水面勾配の砕波限界 $30^\circ \sim 40^\circ$ に比べて十分に小さい。
- 基準津波の時刻歴波形や水位分布からソリトン分裂波や砕波と考えられる挙動は認められない。
- 以上より，3号炉護岸前面ではソリトン分裂波及び砕波は発生しない。

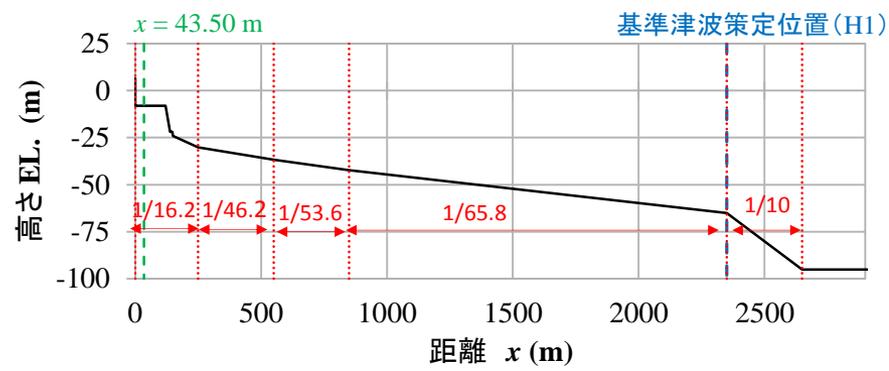


図1 護岸法線部を原点とした海底地形

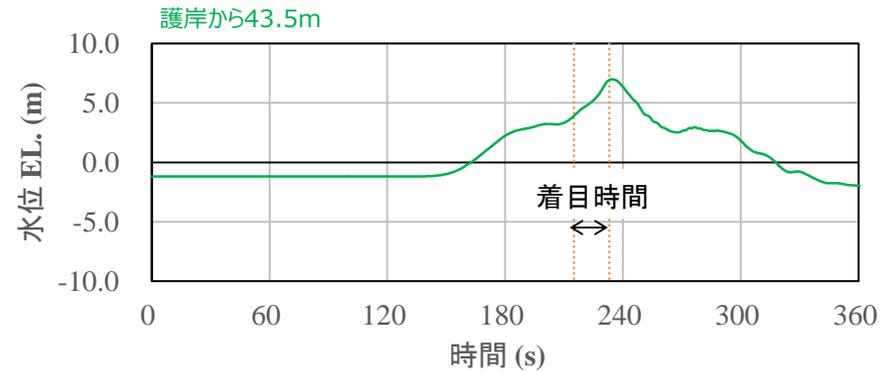


図2 最大水面勾配が確認された時刻

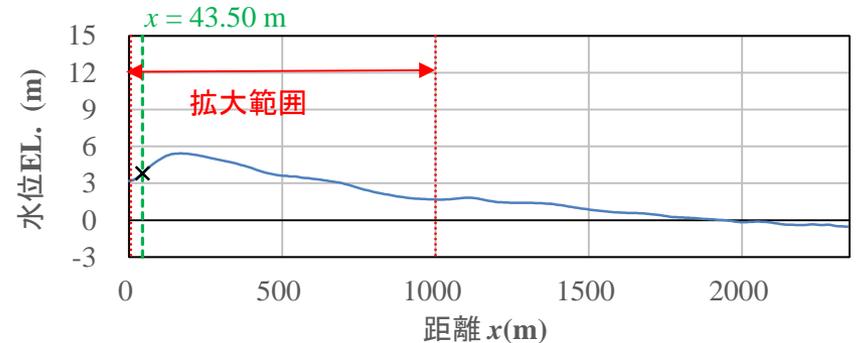


図3 最大水面勾配が確認された時刻 (t=218.1s) の水位分布

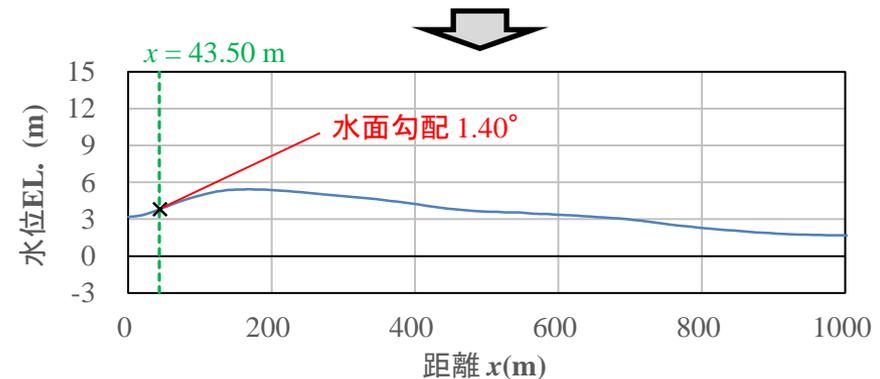
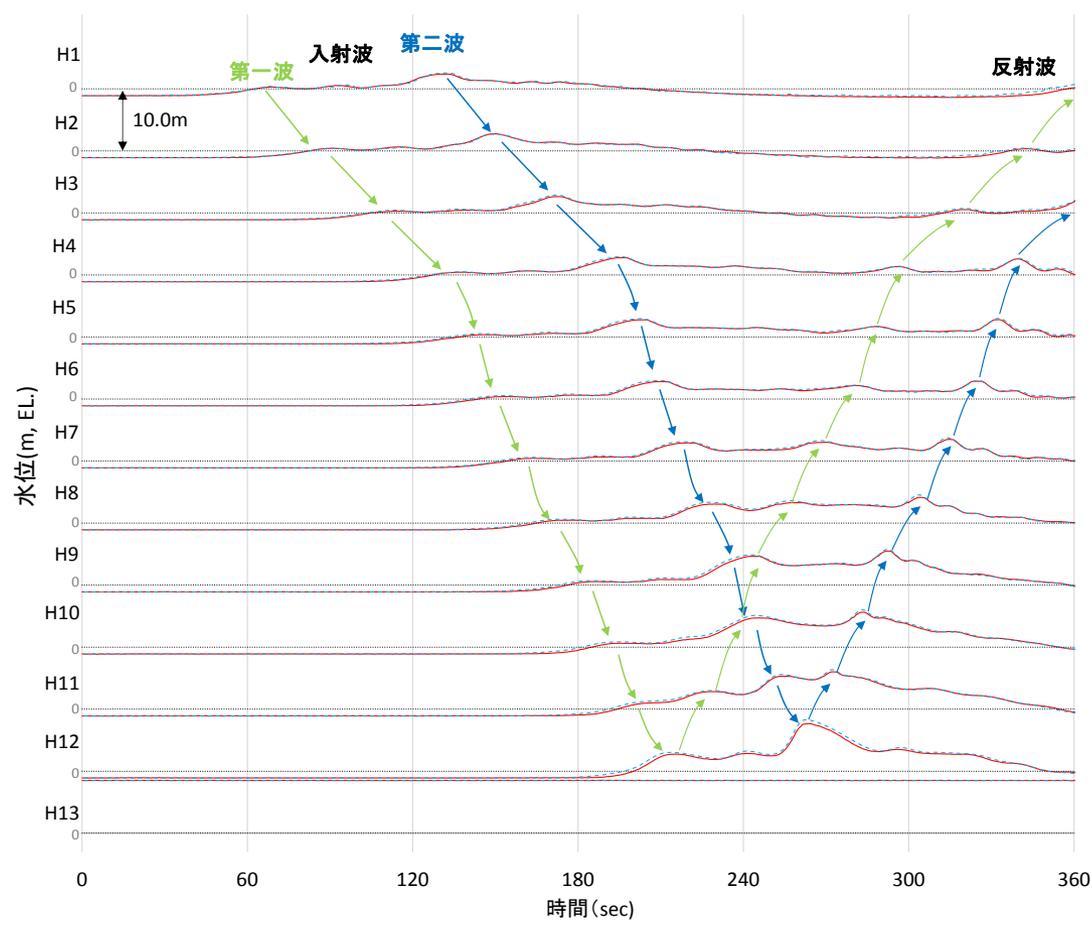


図4 水位分布の拡大図 (t=218.1s)

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.4 断面二次元津波シミュレーションによる検討 1, 2号炉結果 (ケース⑦)

- 水理模型実験と同じ条件 (ケース⑦及び⑧) について，断面二次元津波シミュレーションを実施した。
- ケース⑦の解析結果は，以下のとおり，水理模型実験と同等の津波を再現できていることを確認した (H1~H13地点)。
 - 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕波を示す波形がなく，水位は緩やかに上昇している (H1~H12地点)。
 - 防波壁前面のH13地点においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しない。
 - 第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について，緩やかに上昇している。



検討ケース	津波	波形(周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース⑦	基準津波 1		無	有	有
ケース⑧	波圧 検討用津波 (1.5m津波)	基準津波 1	無	有	有
ケース⑨*			無	有	無
ケース⑩*			無	無	無
ケース⑪		基準津波 1 の半周期	無	有	有

※通過波計測ケース

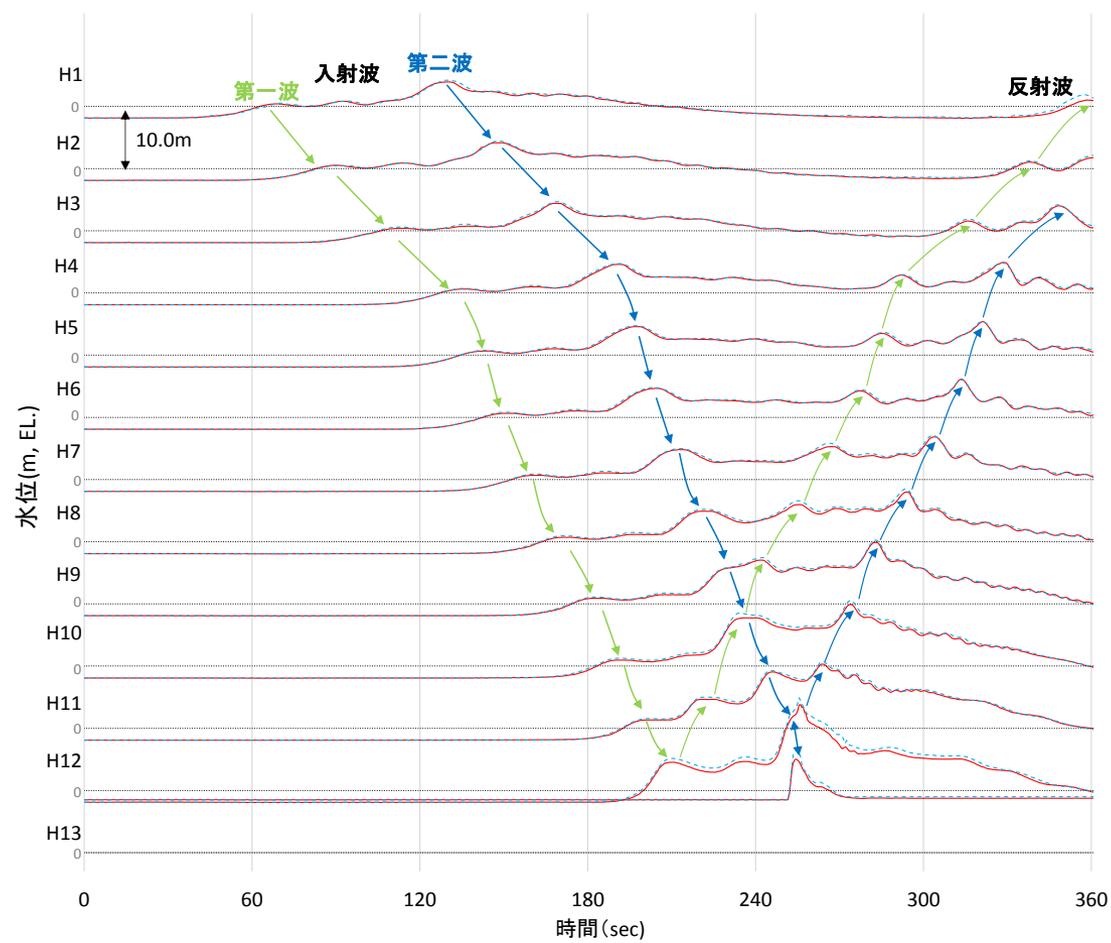
— 赤線: 実験結果
- - 青線: 解析結果

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 (ケース⑦)

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.4 断面二次元津波シミュレーションによる検討 1, 2号炉結果 (ケース⑧)

- ケース⑧の解析結果は，以下のとおり，水理模型実験と同等の津波を再現できていることを確認した (H1~H13地点)。
 - 発電所沖合から防波壁の近傍において，ソリトン分裂波及び砕波を示す波形がなく，水位は緩やかに上昇している (H1~H12)。
 - 防波壁前面のH13においても，ソリトン分裂波及び砕波は発生しない。
 - 第一波の反射波と第二波の入射波がぶつかった後の波形について乱れが確認できる。



検討ケース	津波	波形 (周期)	防波堤	敷地護岸	防波壁
ケース⑦	基準津波 1		無	有	有
ケース⑧		基準津波 1	無	有	有
ケース⑨*	波圧 検討用津波 (1.5m津波)		無	有	無
ケース⑩*			無	無	無
ケース⑪		基準津波 1 の半周期	無	有	有

※通過波計測ケース

— 赤線: 実験結果
- - 青線: 解析結果

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 (ケース⑧)

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.4 断面二次元津波シミュレーションによる検討 1, 2号炉結果（水面勾配）

- 1, 2号炉を対象として，ケース⑦(基準津波1(防波堤無))の断面二次元シミュレーション結果を基に波形の水面勾配を確認する。
- 津波の水位時刻歴波形から水位上昇量が大きくなる時刻に着目し，水位分布を確認した結果，水面勾配は最大で 1.83° であり，松山ら(2005)における水面勾配の砕波限界 $30^\circ \sim 40^\circ$ に比べて十分に小さい。
- 基準津波の時刻歴波形や水位分布からソリトン分裂波や砕波現象と考えられる挙動は認められない。
- 以上より，1, 2号炉護岸前面ではソリトン分裂波及び砕波は発生しない。

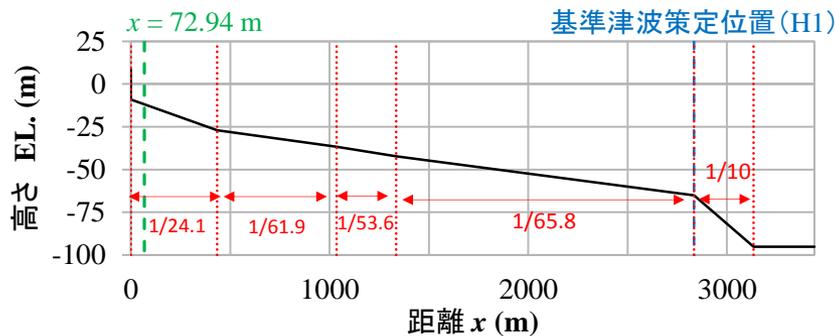


図1 護岸法線部を原点とした海底地形

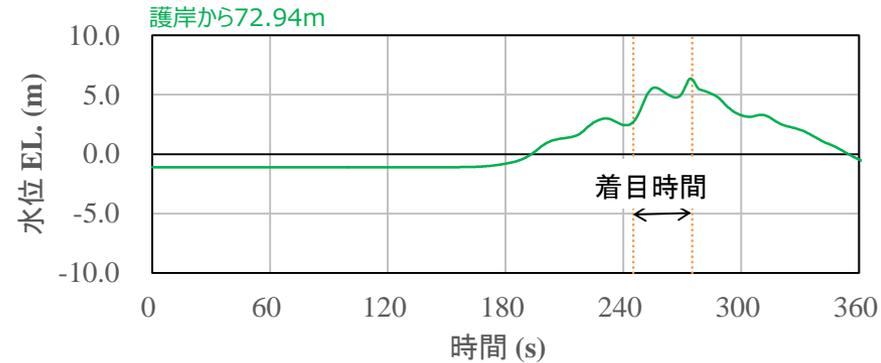


図2 最大水面勾配が確認された時刻

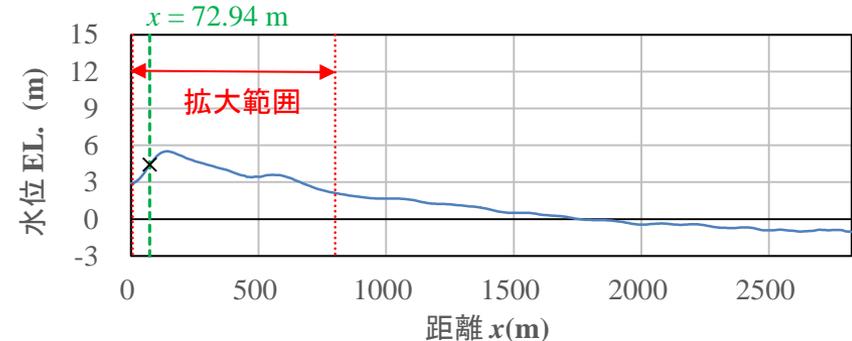


図3 最大水面勾配が確認された時刻 ($t = 254.4s$) の水位分布

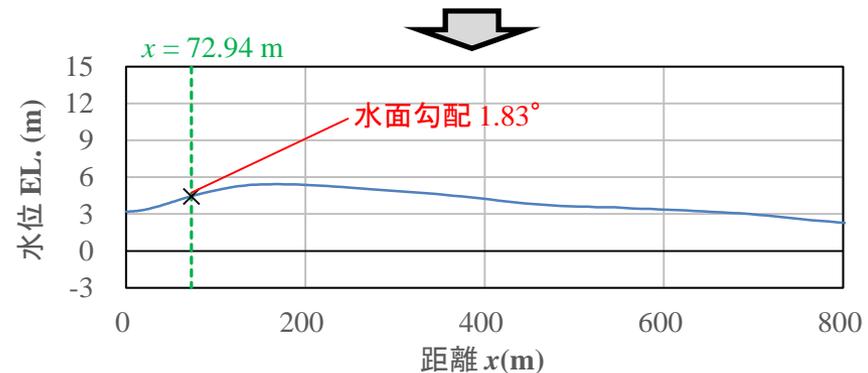


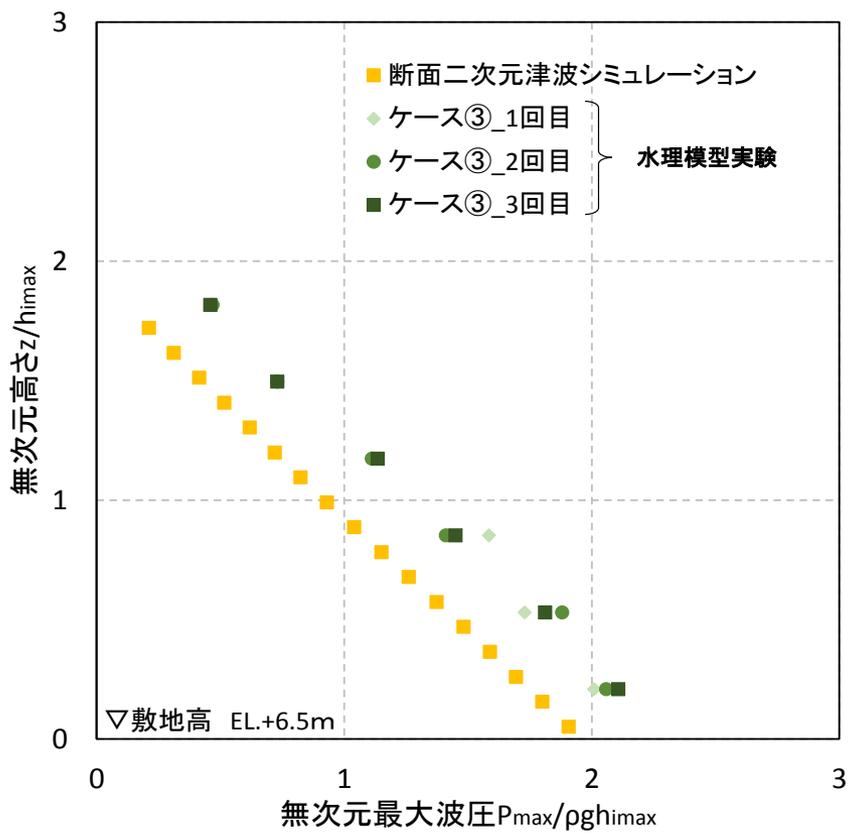
図3 水位分布の拡大図 ($t = 254.4s$)

1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

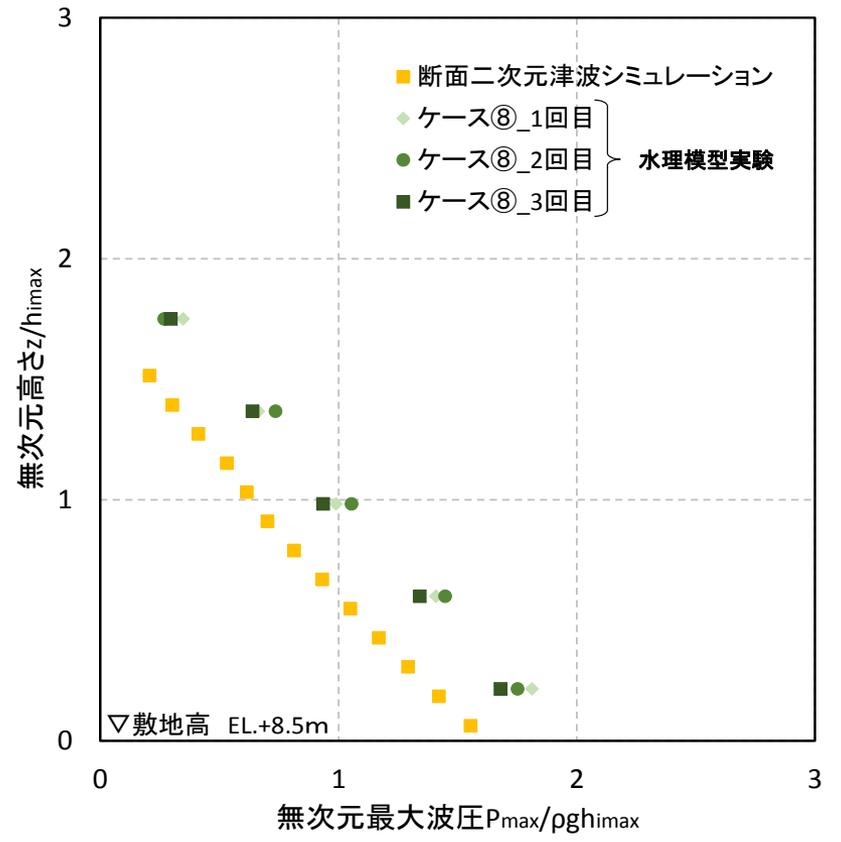
1.4 断面二次元津波シミュレーションによる検討 波圧算定 (1/2)

- 断面二次元津波シミュレーションにより算定した防波壁（敷地高以上）に作用する波圧分布を下図に示す。また，比較対象として同じ条件による水理模型実験結果による波圧分布（3号炉：33頁参照，1,2号炉：40項参照）も示す。
- 断面二次元津波シミュレーションにより算出した波圧分布は，水理模型実験と同等の波圧分布であり，再現性があることを確認した。
- 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。

3号炉(ケース③_防波壁(敷地高以上))



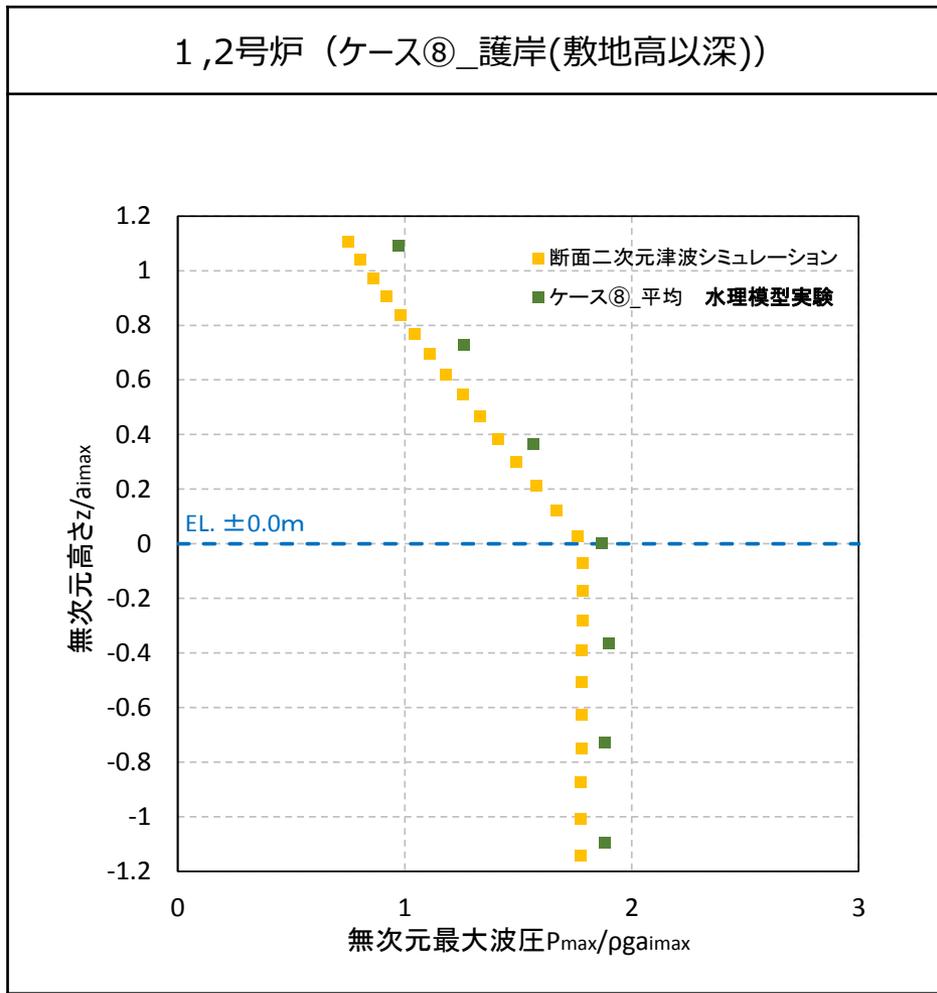
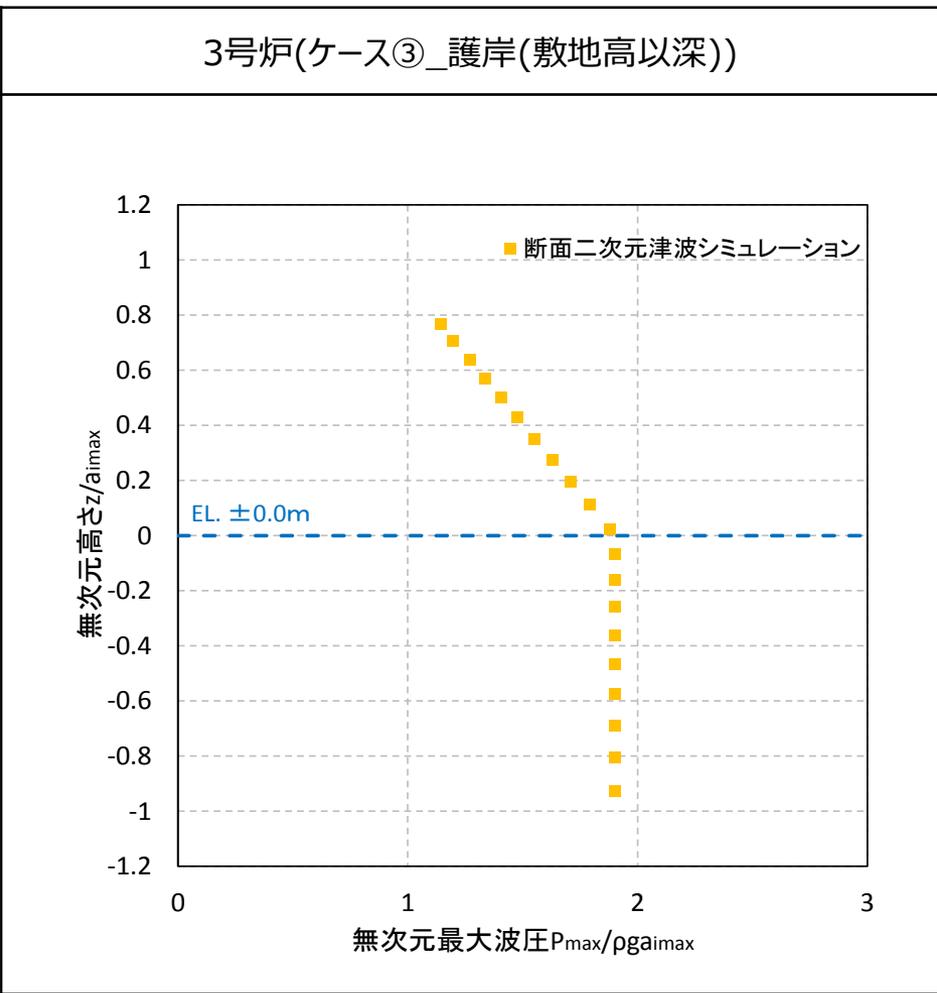
1,2号炉 (ケース⑧_防波壁(敷地高以上))



1. ソリトン分裂波及び砕波の発生，並びに津波波圧への影響

1.4 断面二次元津波シミュレーションによる検討 波圧算定 (2/2)

- 断面二次元津波シミュレーションにより算定した護岸（敷地高以深）に作用する波圧分布を下図に示す。また，1,2号炉においては比較対象として，同じ条件による水理模型実験結果による波圧分布も示す。
- 断面二次元津波シミュレーションにより算出した波圧分布は，水理模型実験と同等の波圧分布であり，再現性があることを確認した。
- 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。



2.1 検討概要

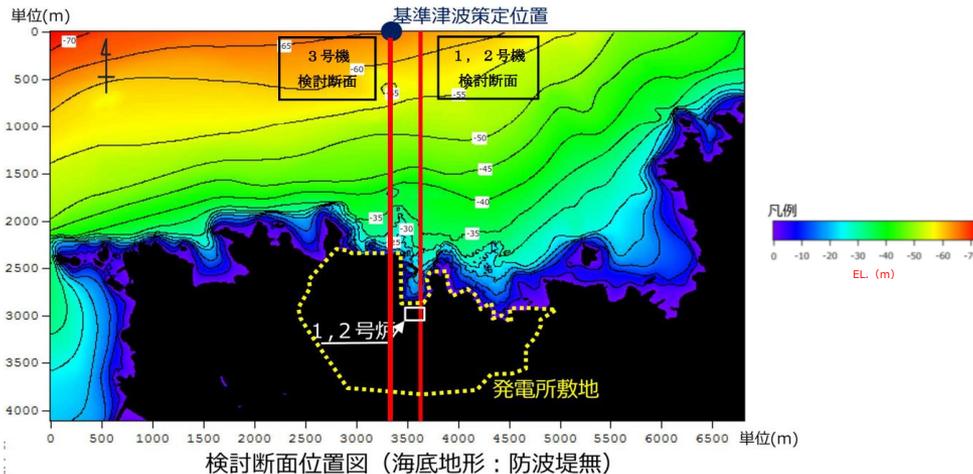
- 前項(1.3及び1.4)で行った水理模型実験及び断面二次元津波シミュレーションでは、島根原子力発電所の代表断面について検討したため、ここでは複雑な地形特性及び津波特性に応じた評価が可能である三次元津波シミュレーションを行い、防波壁に作用する波圧を直接算定し、その影響を確認する。
- 入射津波については、基準津波1(防波堤有, 防波堤無)の場合、敷地への浸水が局所的であり、防波壁等への津波波圧の影響の確認ができないことから、前項(1.4)で用いた波圧検討用津波(1.5m津波)を設定する。なお、波圧検討用津波により算定した波圧は、防波壁等の設計用津波波圧として用いるものではない。
- 解析モデルについては、島根原子力発電所の陸海域の地形特性を再現したモデルとする。

2.2 解析条件等

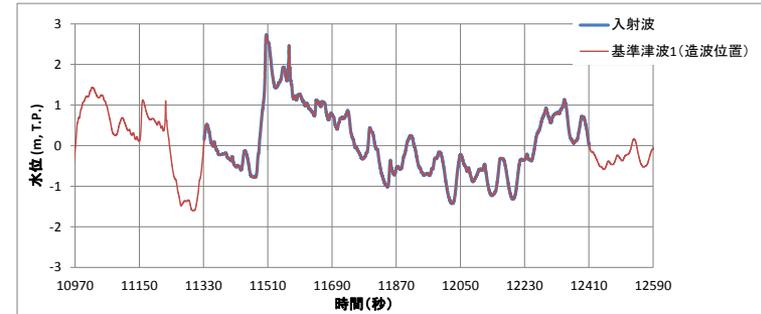
- 防波壁位置での津波の波形を抽出し、ソリトン分裂波や碎波の発生を確認する。
- 解析モデルについては、防波壁位置における津波高さ及び津波波圧を算定するため、陸海域の地形等の特性（1,2号炉前面が入り組んだ複雑な地形）を再現して海底地形及び敷地をモデル化するとともに、防波壁等の形状及び高さを再現した地形とする。
- 入射津波については、前項(1.4)で用いた波圧検討用津波（1.5 m津波）を設定する。
- 解析条件を下表に示す。

解析条件

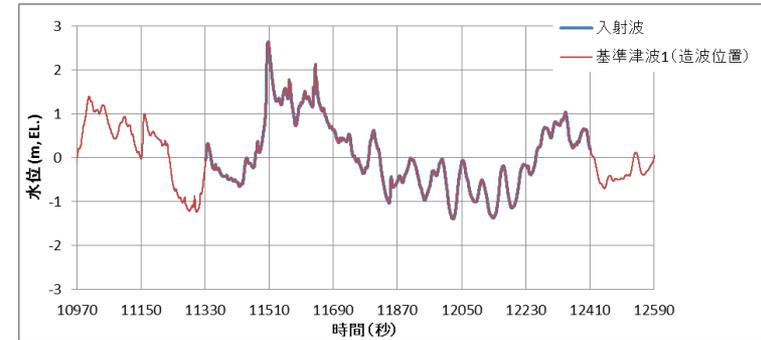
モデル化領域	南北方向：2,175m, 東西方向：1,125m
格子間隔	$\Delta x=6.25m$, $\Delta y=6.25m$, $\Delta z=1.0\sim 2.0m$
解析時間	1079秒（基準津波1の押し波最大波）



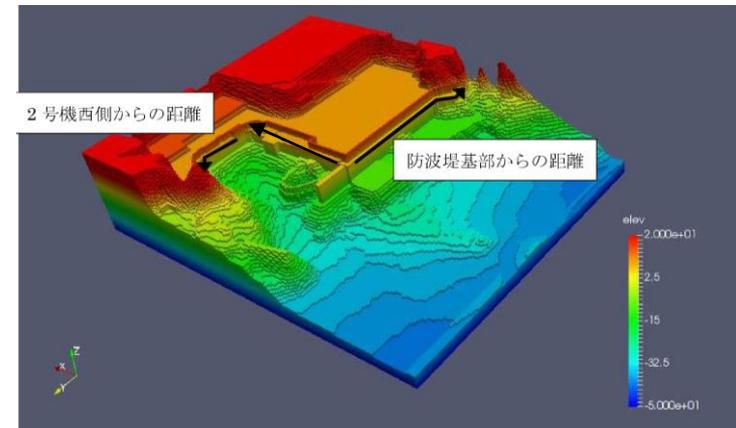
発電所前面の海底地形



入射津波の造波波形図（防波堤有）



入射津波の造波波形図（防波堤無）

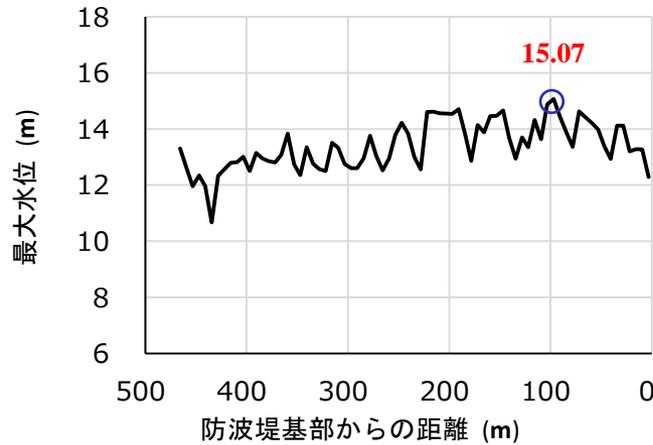


解析モデル図（防波堤有）の例

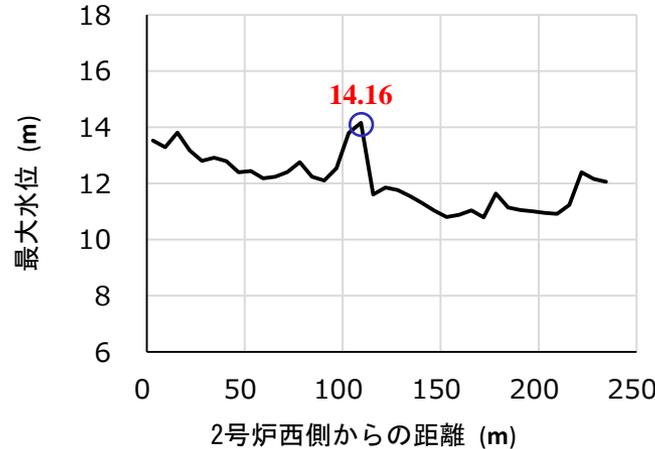
■ 防波壁前面における津波水位

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抽出された防波壁前面における最高水位を下図に示す。

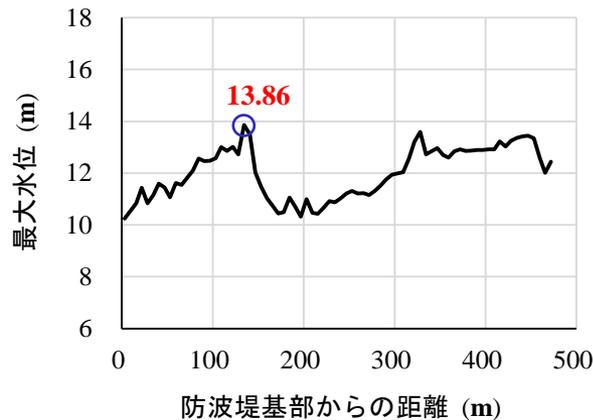
なお、代表として防波堤有の結果を示す。



3号炉北側前面

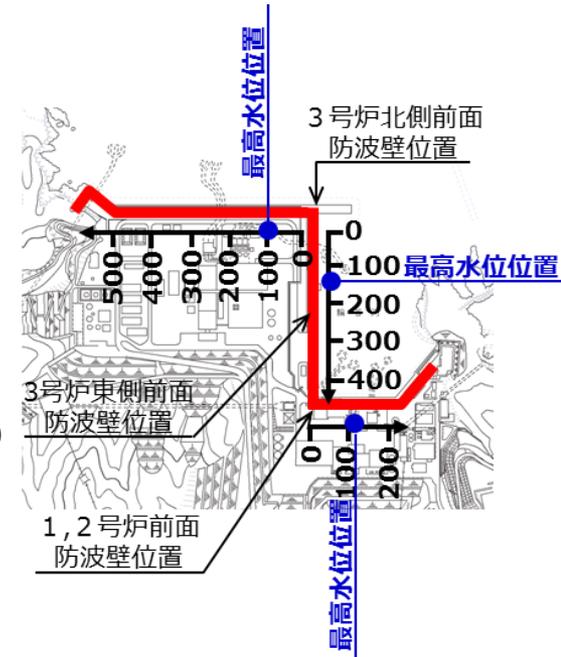


1, 2号炉前面



3号炉東側前面

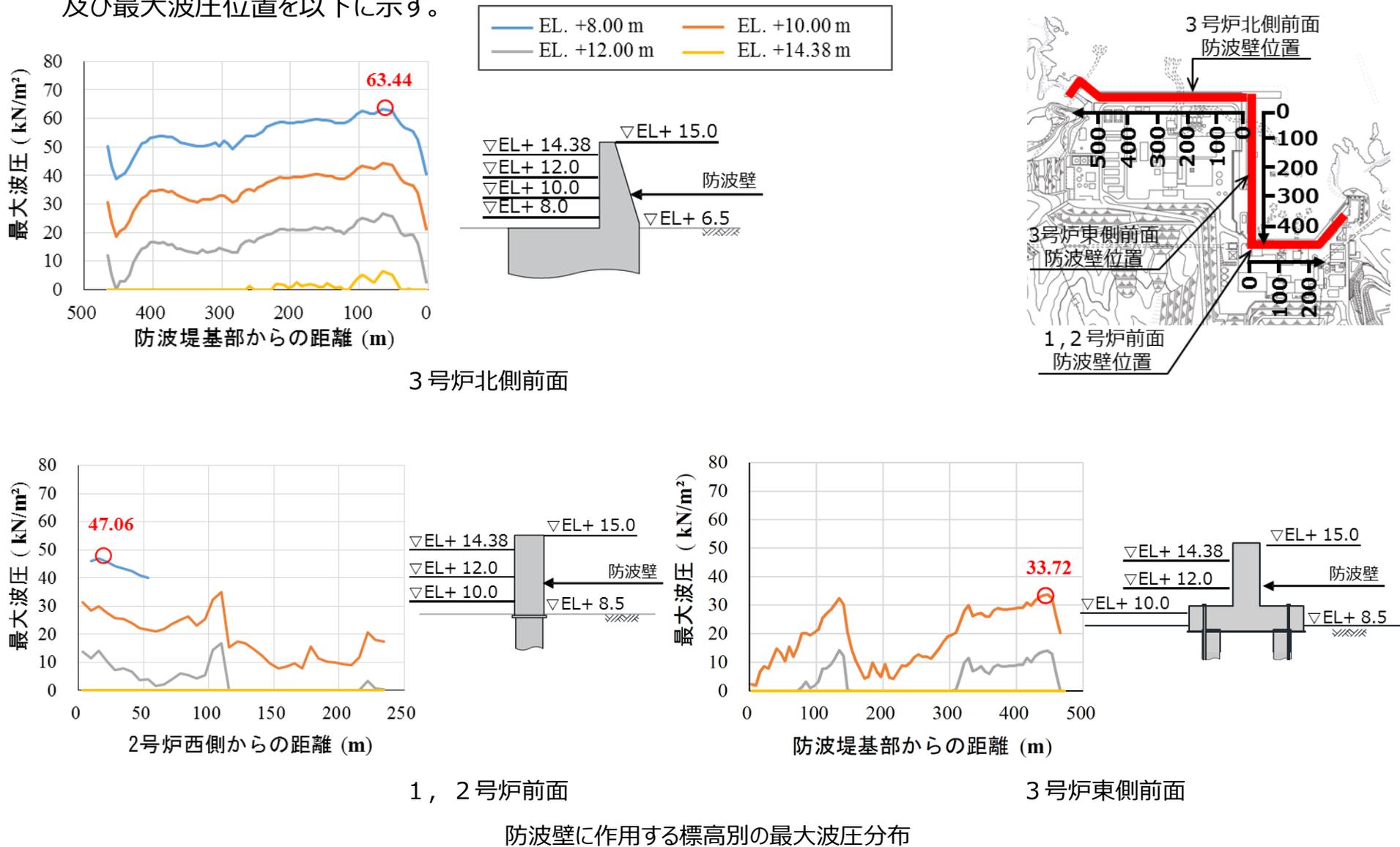
防波壁前面における最高水位分布



2. 三次元津波シミュレーションによる検討

2.4 三次元津波シミュレーションより直接算定される津波波圧

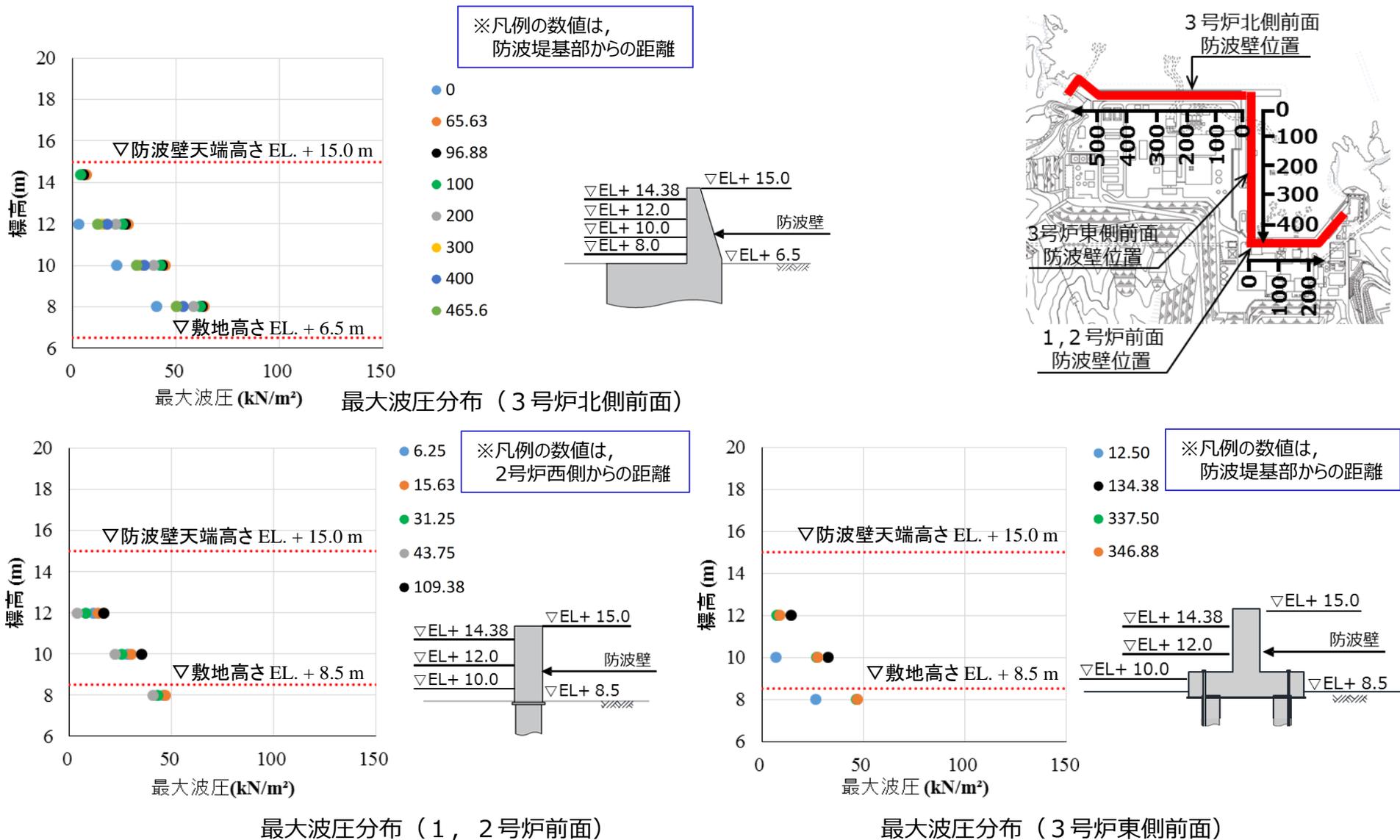
- 波圧検討用津波を用いた三次元津波シミュレーションにより直接算定された最大波圧分布及び最大波圧位置を以下に示す。



2. 三次元津波シミュレーションによる検討

2.4 三次元津波シミュレーションより直接算定される津波波圧（標高毎）

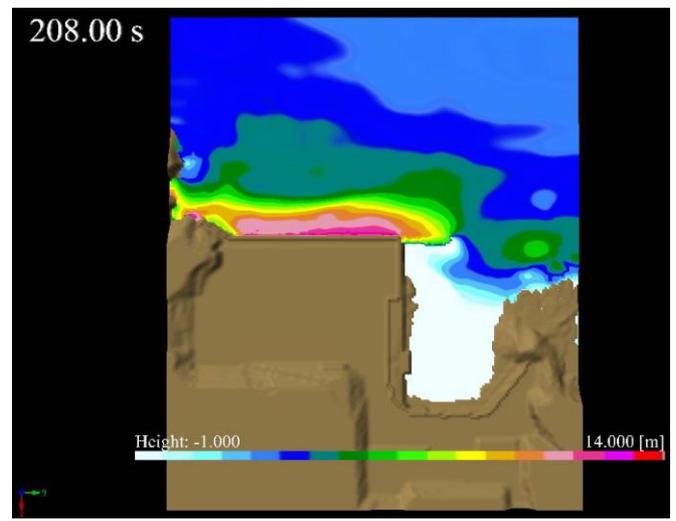
■ 波圧検討用津波を用いた三次元津波シミュレーションにより防波壁に作用する波圧を直接算定した結果を以下に示す。



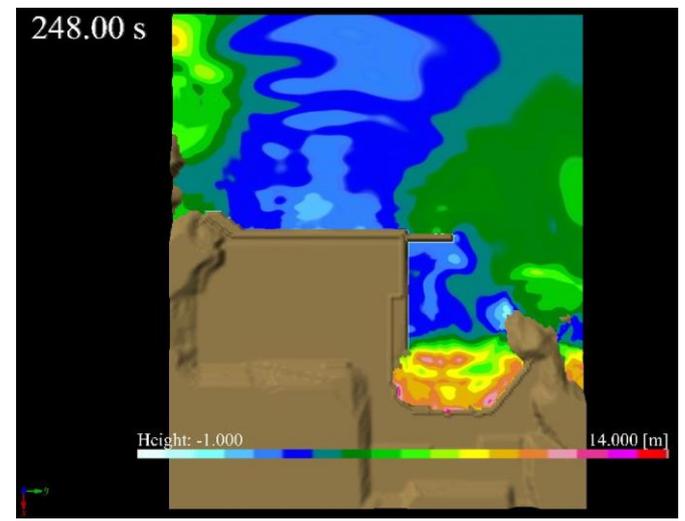
2. 三次元津波シミュレーションによる検討

(参考) 三次元津波シミュレーションによる津波の作用状況

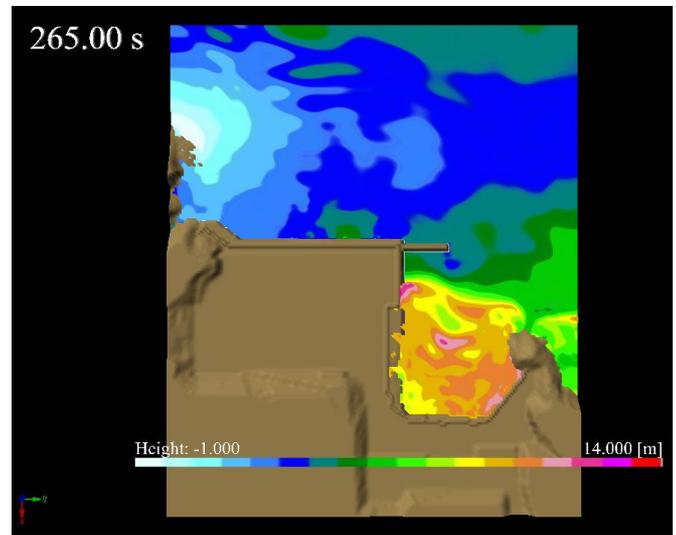
- 三次元津波シミュレーションによる最大波到達時刻の津波の作用状況を以下に示す。



津波の作用状況 (3号炉北側前面最大波到達時刻)



津波の作用状況 (1, 2号炉前面最大波到達時刻)

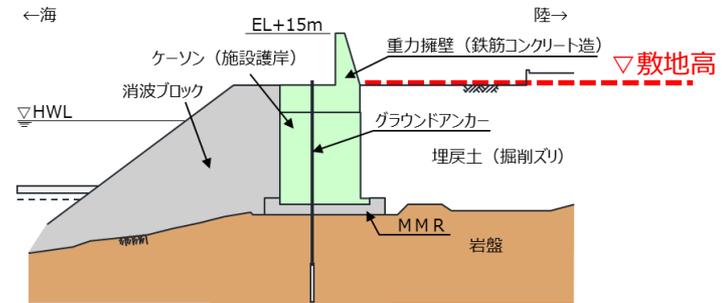
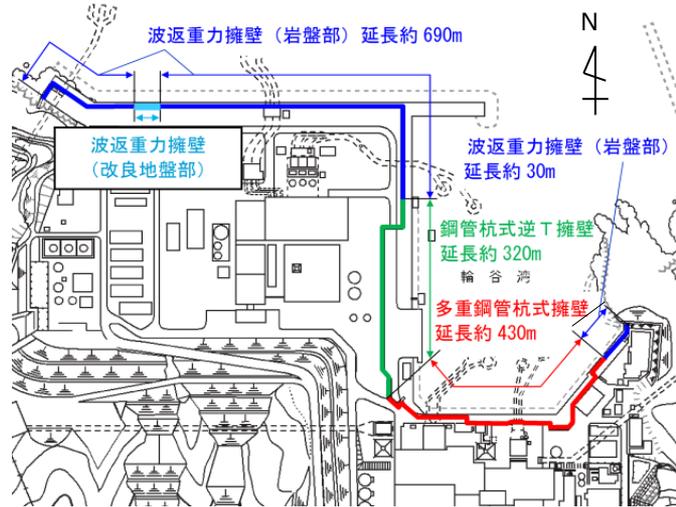


津波の作用状況 (3号炉東側前面最大波到達時刻)

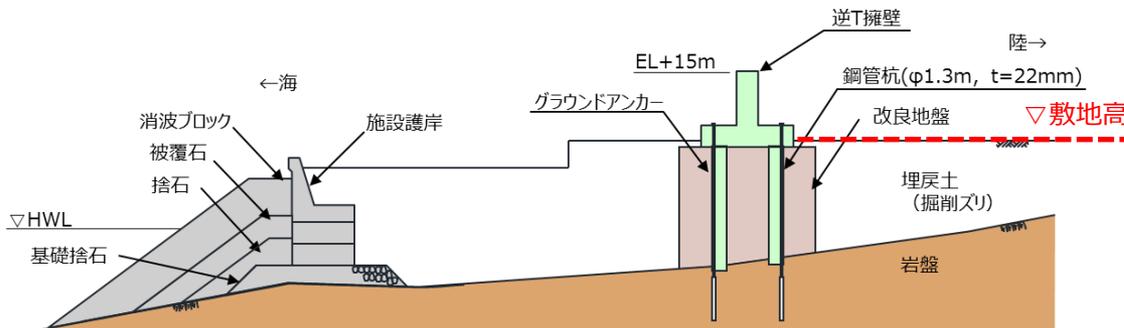
3. 既往の津波波圧算定式との比較

3.1 検討概要

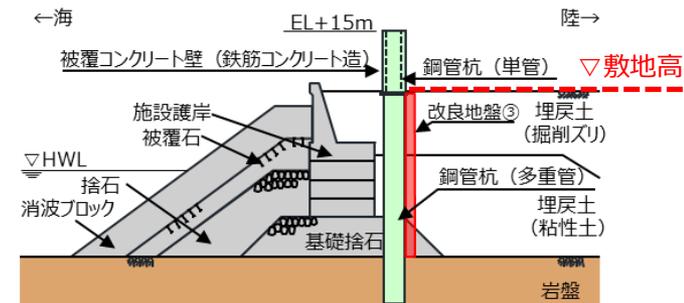
- 既往の津波波圧算定式の妥当性を確認するため、水理模型実験、断面二次元及び三次元津波シミュレーションによる波圧と比較検討する。なお、津波波圧の算定にあたっては、波圧検討用津波(15m津波)を用いる。



防波壁 (波返重力擁壁) 断面図



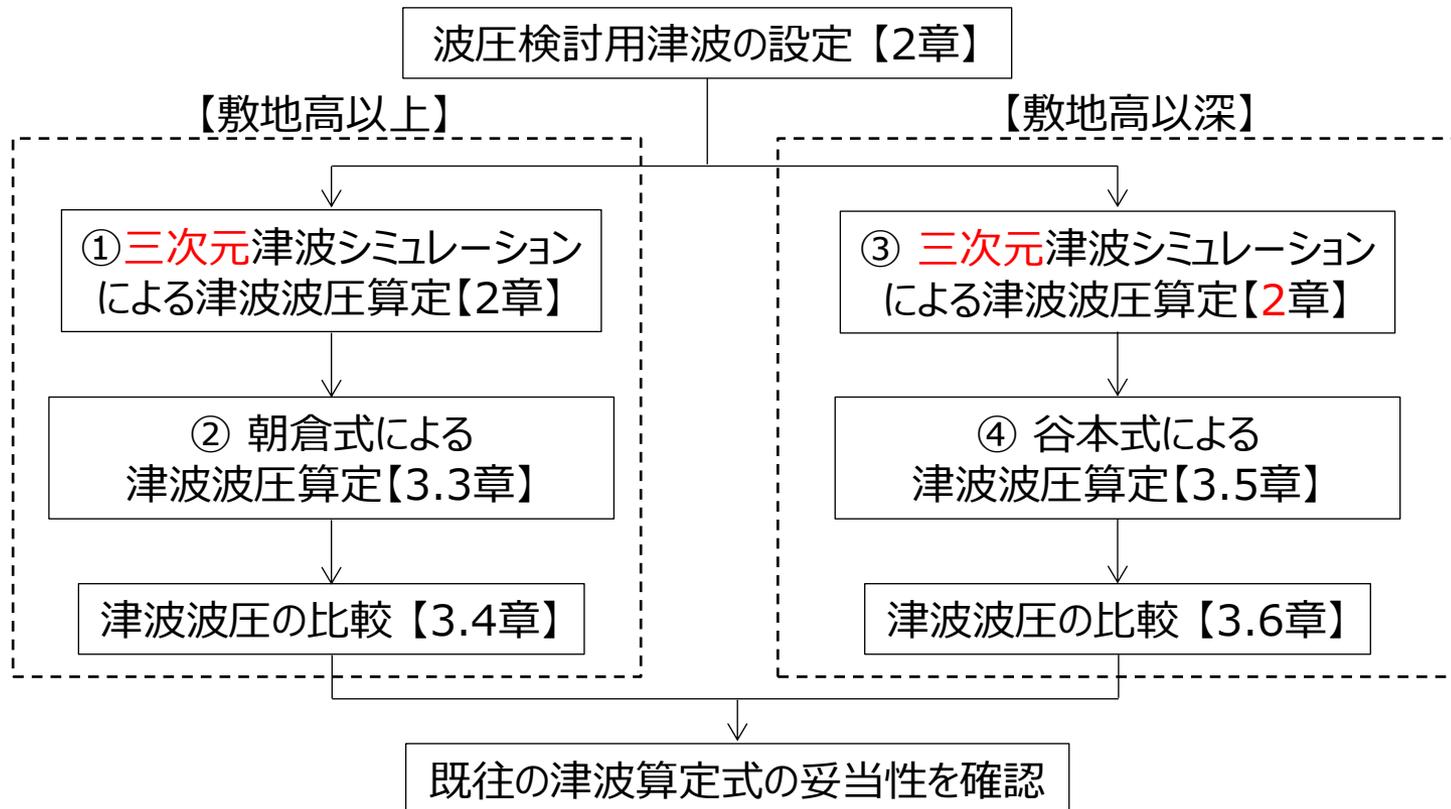
防波壁 (鋼管杭式逆T擁壁) 断面図



防波壁 (多重鋼管杭式擁壁) 断面図

3.2 津波波圧検討フロー

- 既往の津波波圧算定式は、以下のフローにて妥当性を確認する。
- 敷地高以上については、水理模型実験、断面二次元及び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、朝倉式により算出した津波波圧と比較する。
- 敷地高以深については、水理模型実験、断面二次元及び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、谷本式により算出した津波波圧と比較する。



3. 既往の津波波圧算定式との比較

3.3 朝倉式による津波波圧算定

- 朝倉式は、津波の通過波の浸水深に応じて波圧を算定する式であり、「通過波の浸水深」を**最大浸水深**（入力津波高さ－敷地標高）の1/2と**保守的に仮定**（次項参照）して津波波圧を算定する。朝倉式の考え方を以下に示す。

- 朝倉式

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

ここに、

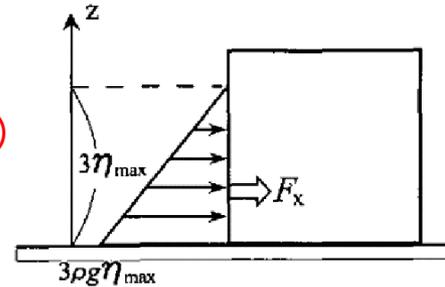
q_z : 津波波圧 (kN/m²)

η : 浸水深(通過波の浸水深 = 最大浸水深の1/2)(m)

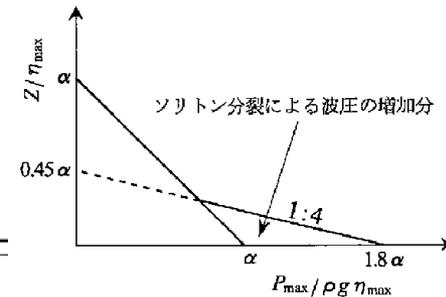
z : 当該部分の地盤面からの高さ(0 ≤ z ≤ a h)(m)

a : 水深係数 (最大: 3)

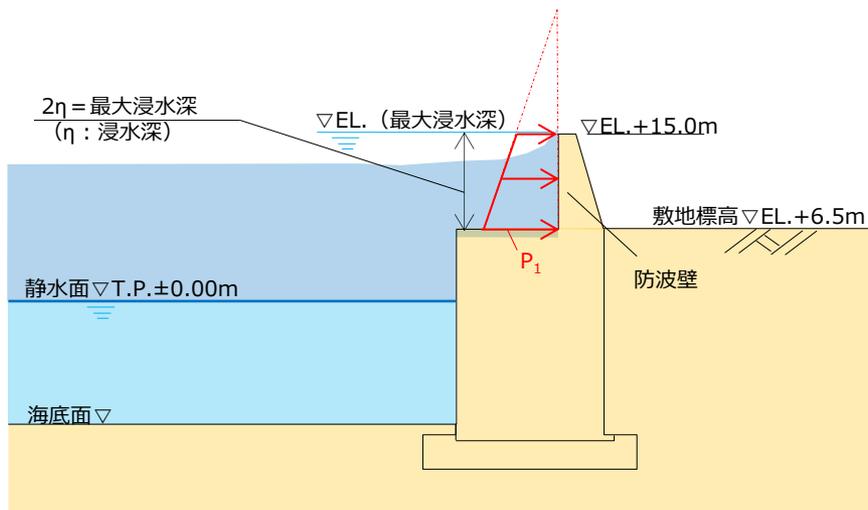
ρg : 海水の単位体積重量 (kN/m³)



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



津波波圧設定の考え方

3. 既往の津波波圧算定式との比較

3.3 朝倉式による津波波圧算定（参考）

- 朝倉式で用いる「通過波の浸水深」と、入力津波高さから敷地標高を引いた「最大浸水深の1/2」について、模型実験から比較した結果を以下に示す。

【3号炉の模型実験】

ケース③：防波壁がある場合の最大浸水深 h の1/2

ケース④：防波壁位置の通過波の浸水深

実験 ケース	最大 浸水深 h	$h/2$	浸水深 η
ケース③	8.397m	4.199m	4.199m (最大浸水深の1/2)
ケース④	—	—	3.643m (通過波の浸水深)

【1,2号炉の模型実験】

ケース⑧：防波壁がある場合の最大浸水深 h の1/2

ケース⑨：防波壁位置の通過波の浸水深

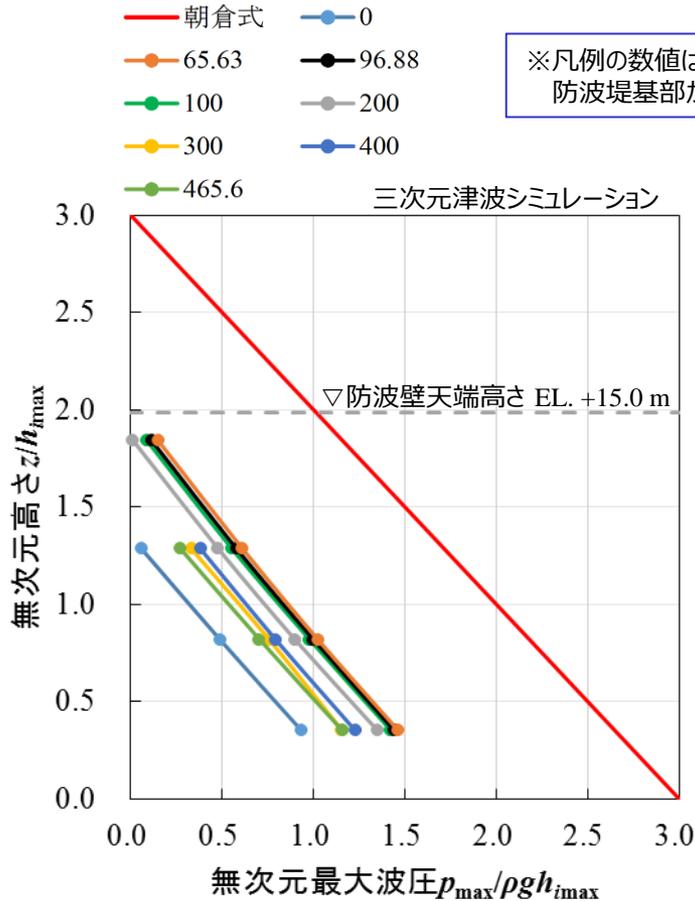
実験 ケース	最大 浸水深 h	$h/2$	浸水深 η
ケース⑧	6.511m	3.256m	3.256m (最大浸水深の1/2)
ケース⑨	—	—	2.015m (通過波の浸水深)

- 上記より、「最大浸水深の1/2」が「通過波の浸水深」より保守的な値となることを確認した。

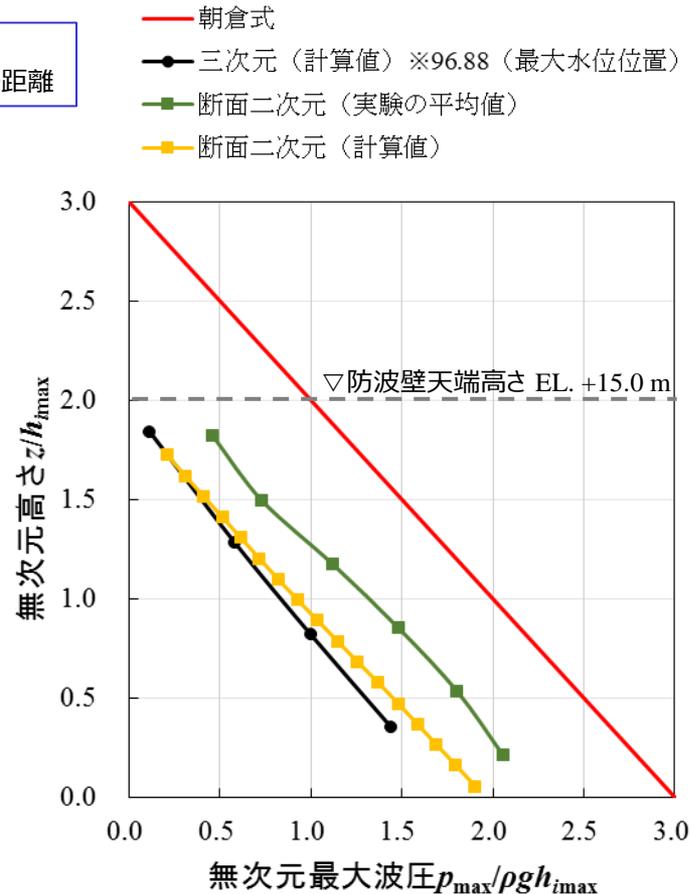
3. 既往の津波波圧算定式との比較

3.4 津波波圧の比較 朝倉式 (敷地高以上) (1/2)

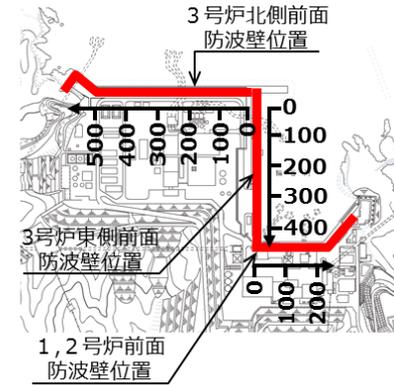
- 3号炉北側の防波壁のうち敷地高以上における三次元津波シミュレーションにより算定した波圧分布を下図に示す。また、比較対象として同じ条件による水理模型実験結果及び断面二次元津波シミュレーションによる波圧分布(47頁参照)も示す。
- 三次元津波シミュレーション、水理模型実験及び断面二次元シミュレーションにおいて直線型の波圧分布となることから、ソリトン分裂波や砕波による津波波圧への有意な影響はなく、朝倉式による波圧分布が全ての波圧を包絡することを確認した。



無次元最大波圧分布 (3号炉北側)
 三次元津波シミュレーションと朝倉式の比較



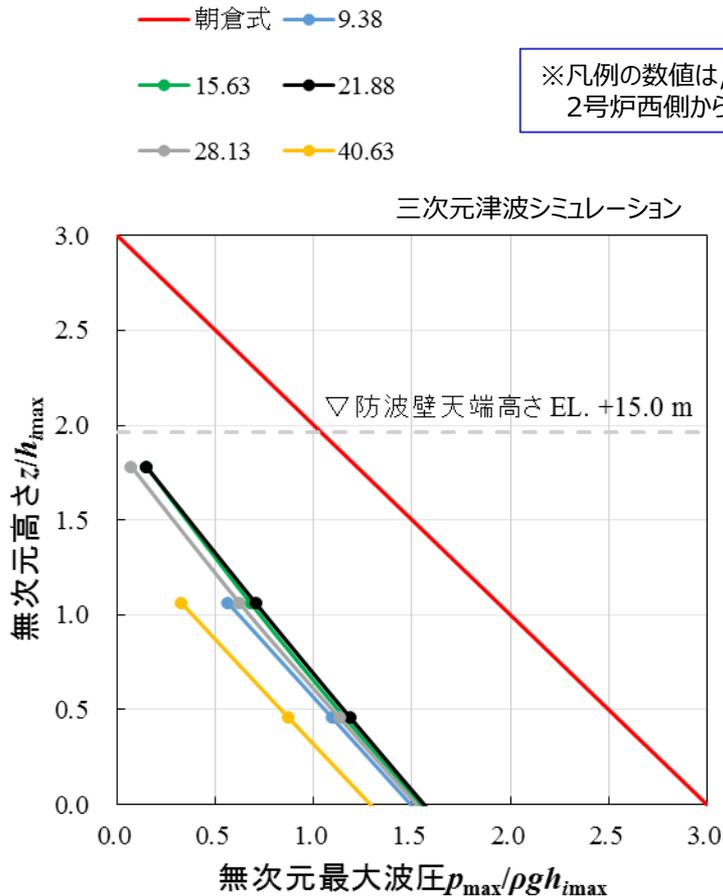
無次元最大波圧分布 (3号炉北側)
 実験及びシミュレーションと朝倉式の比較



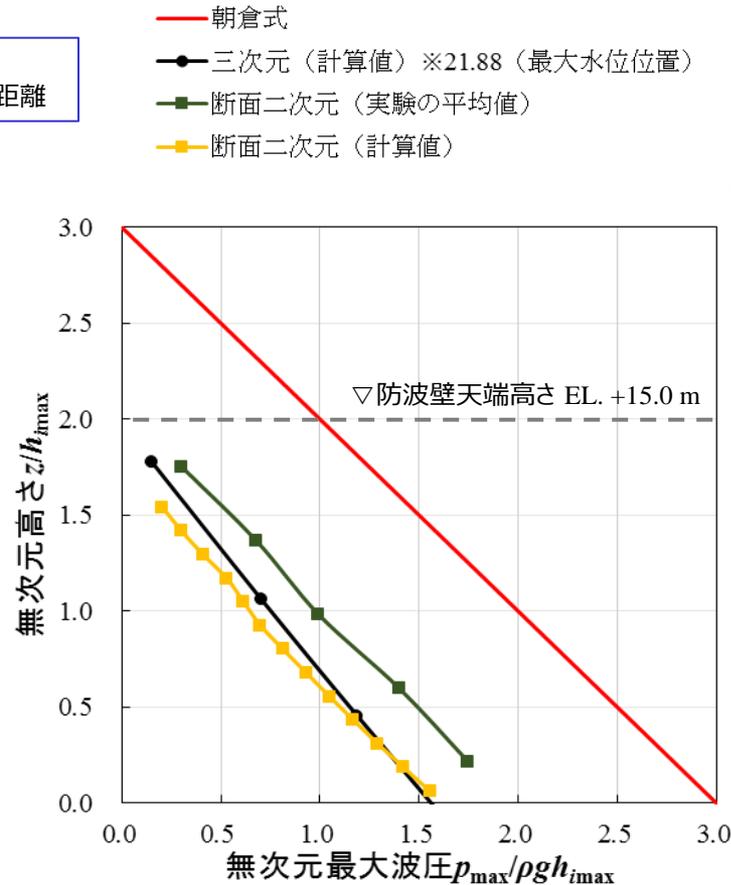
3. 既往の津波波圧算定式との比較

3.4 津波波圧の比較 朝倉式 (敷地高以上) (2/2)

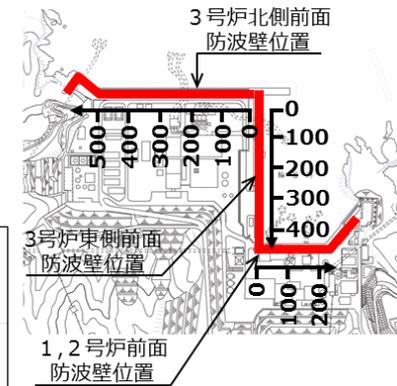
- 1,2号炉前面の防波壁のうち敷地高以上における三次元津波シミュレーションにより算定した波圧分布を下図に示す。また、比較対象として同じ条件による水理模型実験結果及び断面二次元津波シミュレーションによる波圧分布(47頁参照)も示す。
- 三次元津波シミュレーション、水理模型実験及び断面二次元シミュレーションにおいて直線型の波圧分布となることから、ソリトン分裂波や砕波による津波波圧への有意な影響はなく、朝倉式による波圧分布が全ての波圧を包絡することを確認した。



無次元最大波圧分布 (1, 2号炉)
三次元津波シミュレーションと朝倉式の比較



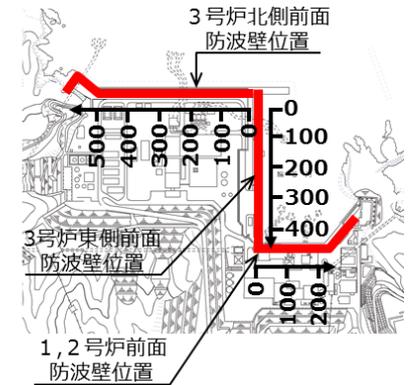
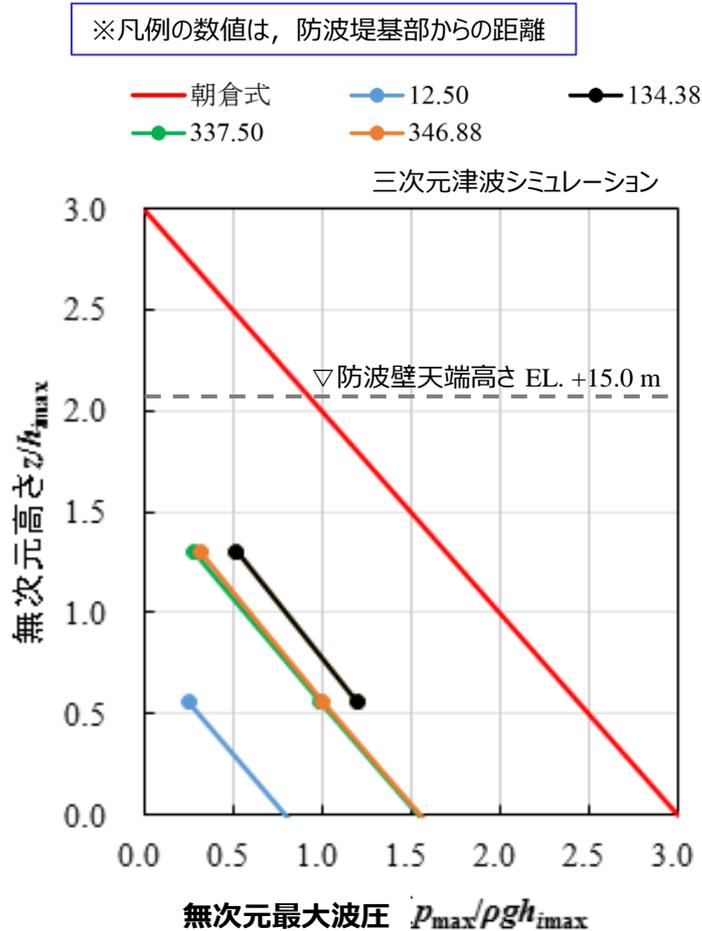
無次元最大波圧分布 (1, 2号炉)
実験及びシミュレーションと朝倉式の比較



3. 既往の津波波圧算定式との比較

3.4 津波波圧の比較 朝倉式（敷地高以上）（参考）

- 3号炉東側の防波壁における三次元津波シミュレーションにより算定した波圧分布を下図に示す。
- 三次元津波シミュレーションにおいて直線型の波圧分布となることから、ソリトン分裂波や碎波による津波波圧への有意な影響はなく、朝倉式による波圧分布に包絡されることを確認した。



無次元最大波圧分布（3号炉東側）

3. 既往の津波波圧算定式との比較

3.5 谷本式による津波波圧算定

- 谷本式は、構造物前面の津波高さ（津波シミュレーション）に応じて波圧を算定する式である。谷本式を以下に示す。
- なお、谷本式で使用する入射津波の静水面上の高さ（ $2a_I$ ）は、各津波シミュレーションにより抽出された護岸前面の最高水位を使用する。

■ 谷本式

$$\eta^* = 3.0 a_I$$

$$P_1 = 2.2 \rho_0 g a_I$$

$$P_u = P_1$$

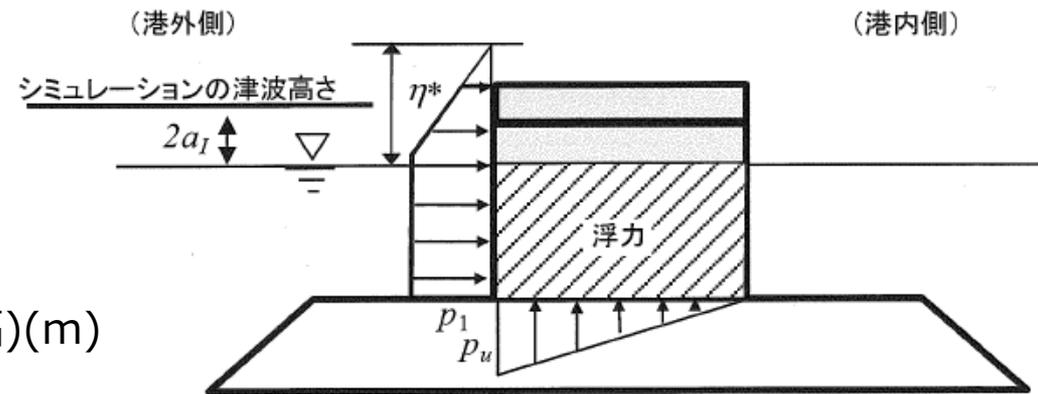
ここに、

η^* : 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(kN/m³)

P_u : 直立壁前面下端における揚圧力※(kN/m²)



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は、岩盤又は改良地盤により支持されており十分に止水性があるため揚圧力は考慮しない。

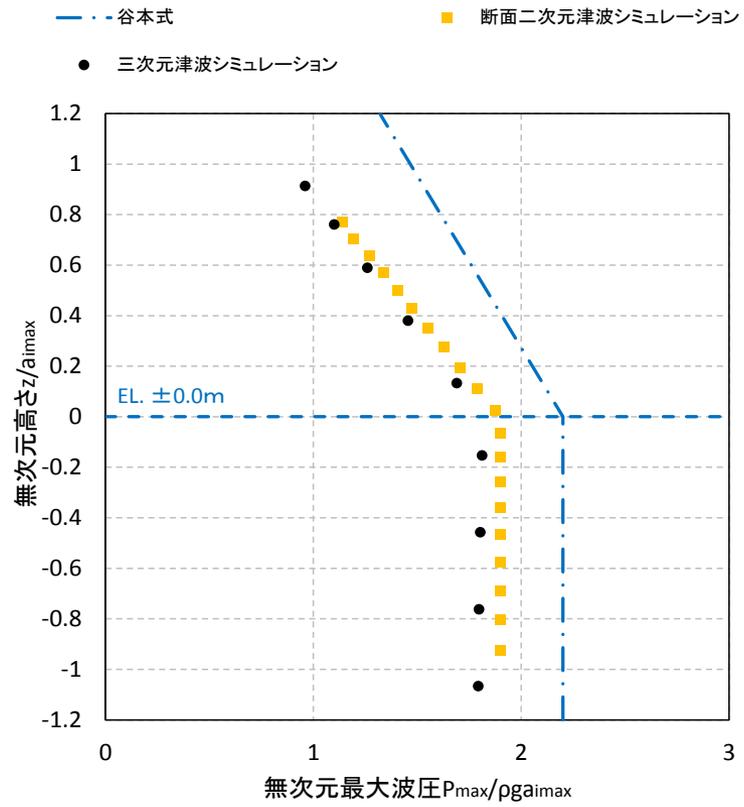
- ・島根原子力発電所の防波壁背後は敷地であるため、港湾外の波圧を算定した図を引用した。
- ・なお、「背面水位が押し波時に静水面より下がる場合」でも港外側に作用する津波波圧は同じである。

3. 既往の津波波圧算定式との比較

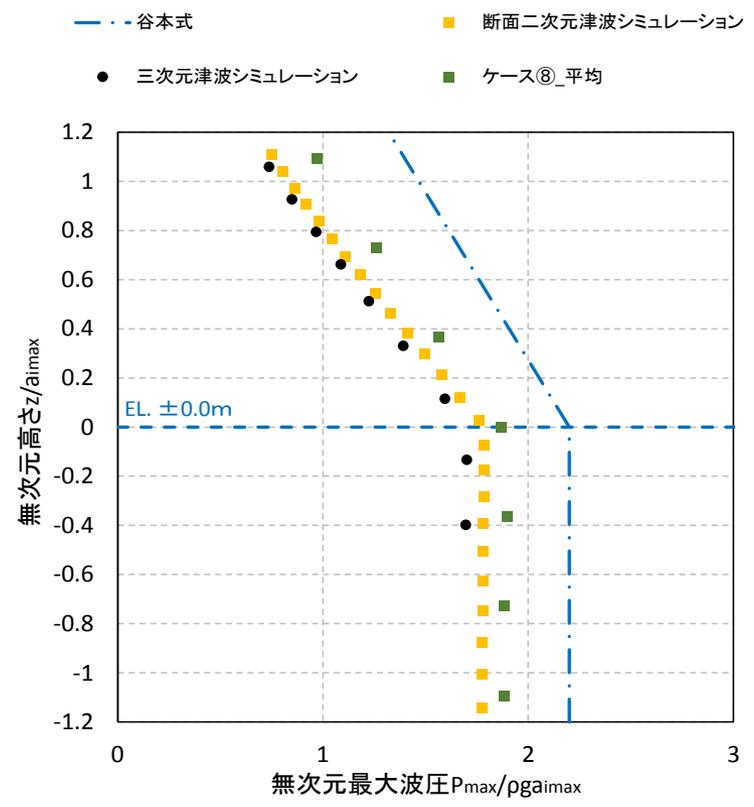
3.6 津波波圧の比較 谷本式（敷地高以深）

- 敷地高以深における断面二次元津波シミュレーション，三次元津波シミュレーション，水理模型実験（1, 2号炉），既往の算定式（谷本式）により算定した波圧分布を下図に示す。
- 3号炉及び1, 2号炉の波圧分布の比較結果より，谷本式による波圧分布が全ての波圧を包絡することを確認できたため，敷地高以深の津波波圧算定には谷本式を用いる。

3号炉波圧分布（ケース③）



1, 2号炉波圧分布（ケース⑧）



3.6 津波波圧の比較 まとめ

- 津波は波浪に比べて周期が長いことから、その波力は水位の上昇による静水圧として評価される場合が多い。しかし、実際には流れに伴う動的な影響や作用の継続時間による影響が考えられ、精度よく波力を評価するためには、水理模型実験等を行うことが望ましいため、水理模型実験、断面二次元津波シミュレーション及び三次元津波シミュレーションを実施した。
- 敷地高以上（防波壁前面）においては、敷地標高や遡上水深等により津波波圧への影響が大きいことから、朝倉式に用いる通過波の浸水深において、最大浸水深（津波高さ－敷地高さ） $\times 1/2$ を用いることで、水理模型実験、断面二次元津波シミュレーション及び三次元津波シミュレーションにより算定される波圧に対して保守性を確保している。
- 敷地高以深（護岸前面）においては、水理模型実験、断面二次元津波シミュレーション及び三次元津波シミュレーションの結果より、緩やかな水位上昇に伴う一様な波圧分布となるため、津波波圧への影響は軽微であることから、水理模型実験、断面二次元津波シミュレーション及び三次元津波シミュレーションの最大波圧を包絡する谷本式で評価することで保守性を確保している。

4. 設計で考慮する津波波圧の設定

- 水理模型実験の結果、科学的根拠に基づきソリトン分裂波や砕波が発生しないこと、敷地高以上の波圧分布は直線型となり、津波波圧への有意な影響はないことを確認した。
- 断面二次元津波シミュレーション解析の結果、水理模型実験を再現でき、時刻歴波形、水位分布及び水面勾配からソリトン分裂波や砕波が発生しないこと、敷地高以上の波圧分布は直線型となり、敷地高以深の波圧分布は海水位までは直線型、海水位以深では一定となり、津波波圧への有意な影響はないことを確認した。
- 三次元津波シミュレーション解析により地形特性や津波特性を反映し、1, 2号炉、3号炉北側及び3号炉東側における最高水位と最大波圧を算出した結果、敷地高以上の波圧分布は直線型となり、津波波圧への有意な影響はないことを確認した。
- 水理模型実験及び津波シミュレーション結果による津波波圧は、既往の津波波圧算定式による津波波圧に包絡されることを確認した。
- 上記検討結果を踏まえ、防波壁等の設計で考慮する津波波圧を以下のとおり設定する。
 - ・敷地高以上については、平面二次元津波シミュレーション解析で設定した入力津波高さに基づき、朝倉式により津波波圧を設定し、敷地高以深については、平面二次元津波シミュレーション解析で設定した入力津波高さに基づき、谷本式により津波波圧を設定する。
 - ・なお、防波壁等の設計に用いる入力津波高さは、平面二次元シミュレーション結果より「EL. + 12.6m」を使用する。

