

平成30年3月1日  
日本原子力発電㈱

## 漂流物に係る検討について

### 1. 検討方針について

東海第二発電所における漂流物荷重に係る検討は、図-1に示す「漂流物評価フローにより評価する対象の施設・設備の配置」を考慮し、図-2に漂流物に係る全体的な検討フローを示す。

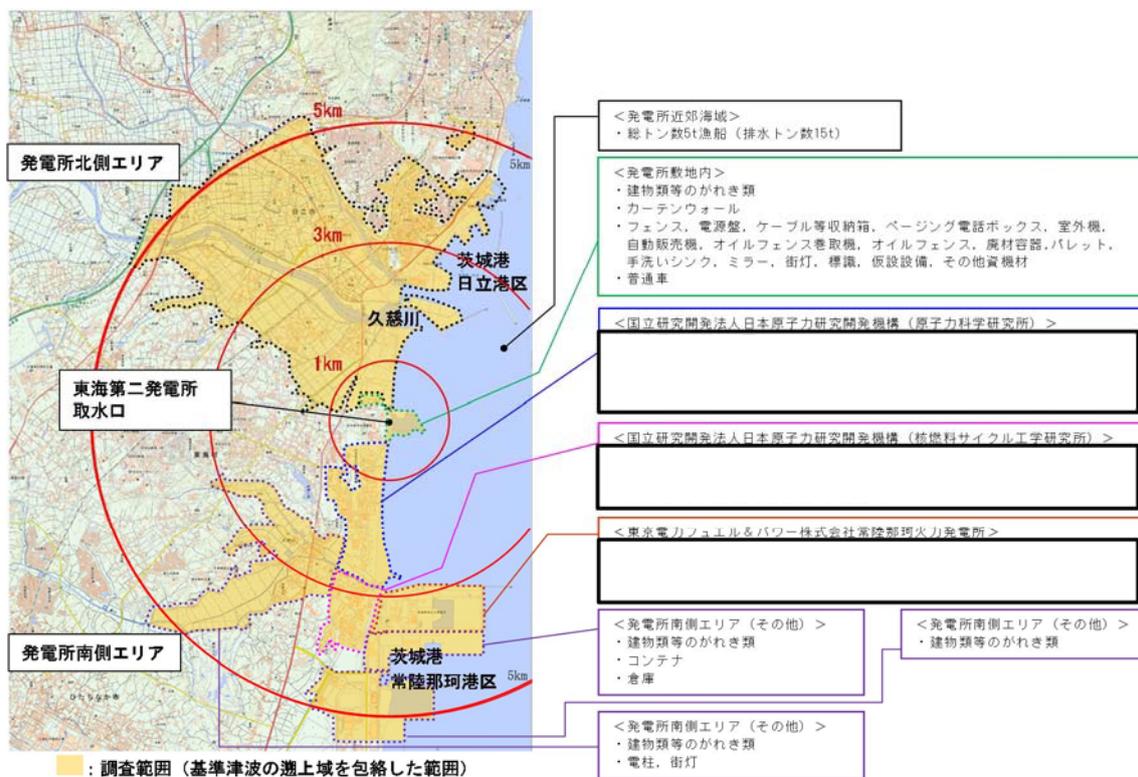
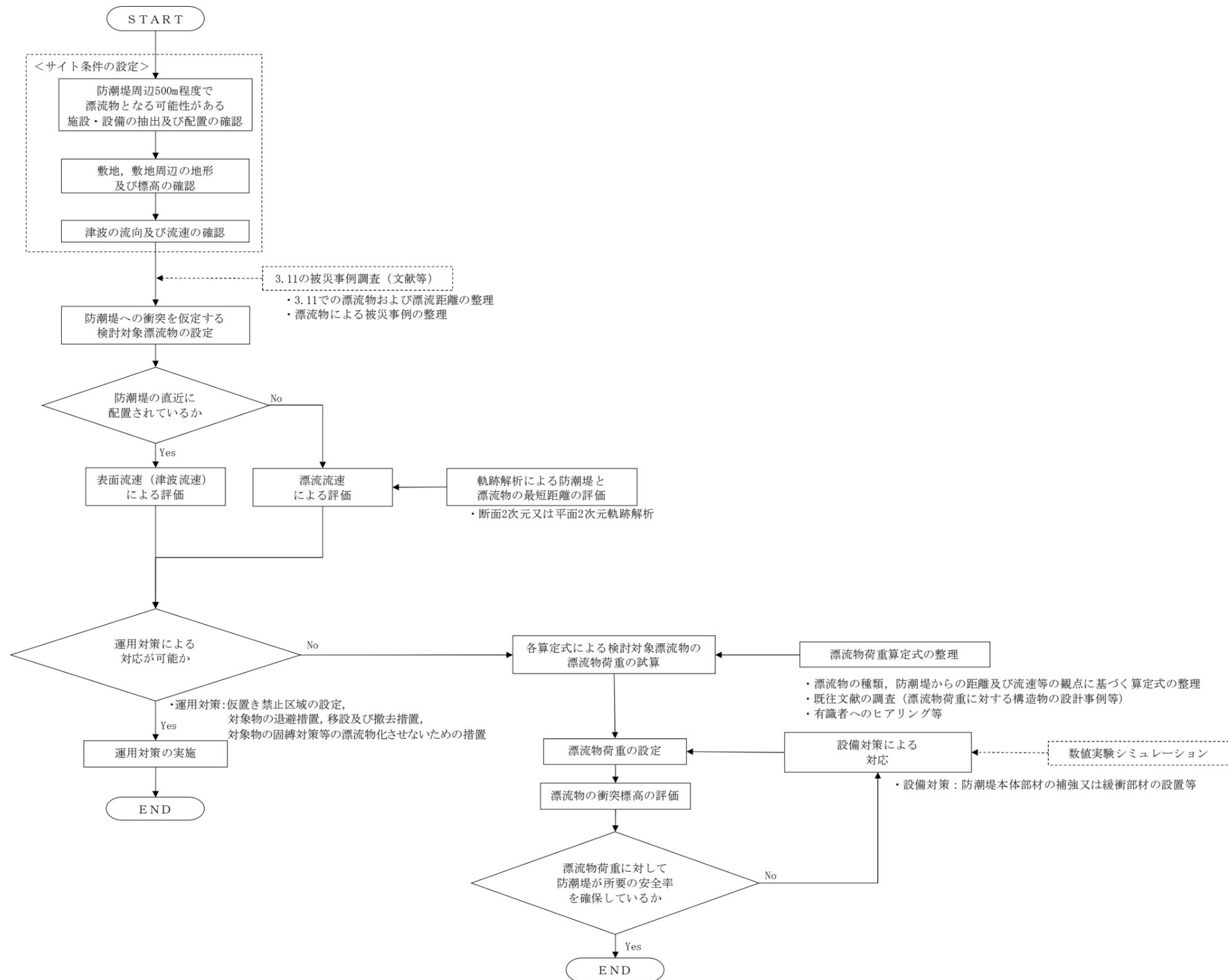


図-1 漂流物評価フローにより評価する対象の施設・設備の配置

□ は、商業機密又は防護上の観点から公開できません。

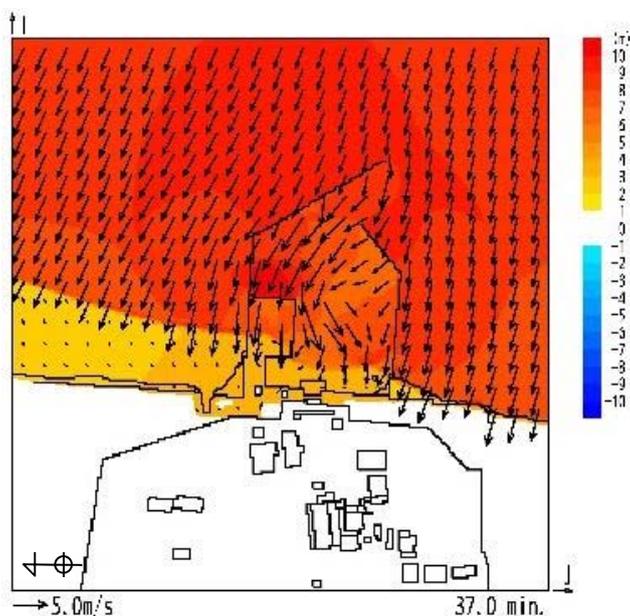


図一2 漂流物に係る全体的な検討フロー

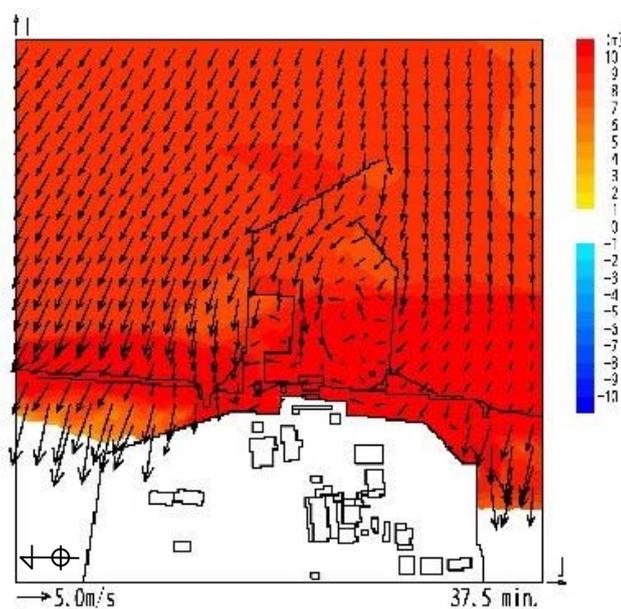
## 2. 漂流物位置と地形と流況の整理

### (1) 流況の整理

東海第二発電所での基準津波による発電所敷地前面海域の流向ベクトルを図-3 に示す。津波は、防潮堤東側の法線方向から遡上し、北側及び南側では防潮堤に沿うような流れとなっている。



(37.0 分※)



(37.5 分※)

※：津波の原因となる地震発生後の経過時間

図-3 発電所敷地前面海域の流向ベクトル（防波堤あり（既往モデル）の場合）

(2) 検討対象漂流物の選定

東海第二発電所の防潮堤周辺 500m 範囲において漂流物となる可能性が否定できない施設・設備の配置を図-4 に示す。防潮堤東側エリアについては、津波が法線方向に遡上することから、津波による漂流物の衝突を仮定するために、代表エリアとして検討対象漂流物の選定を行った。

図-5, 写真-1 及び表-1 に防潮堤東側エリアに設置されている構築物を示す。防潮堤東側エリアの構築物は、撤去又は移設することを基本とし、撤去又は移設ができない場合については、耐震性等を評価した上で、必要に応じ補強対策を検討する。

検討対象漂流物は、漂流物となる可能性が否定できない施設・設備のうち、防潮堤の前面に仮置きや残置の可能性があるものを選定した。表-2 に仮置きや残置の可能性があるものの一覧を示す。仮置きや残置の可能性があるものは、運用での対応が可能であるかを検討した上で、検討対象漂流物を選定する。

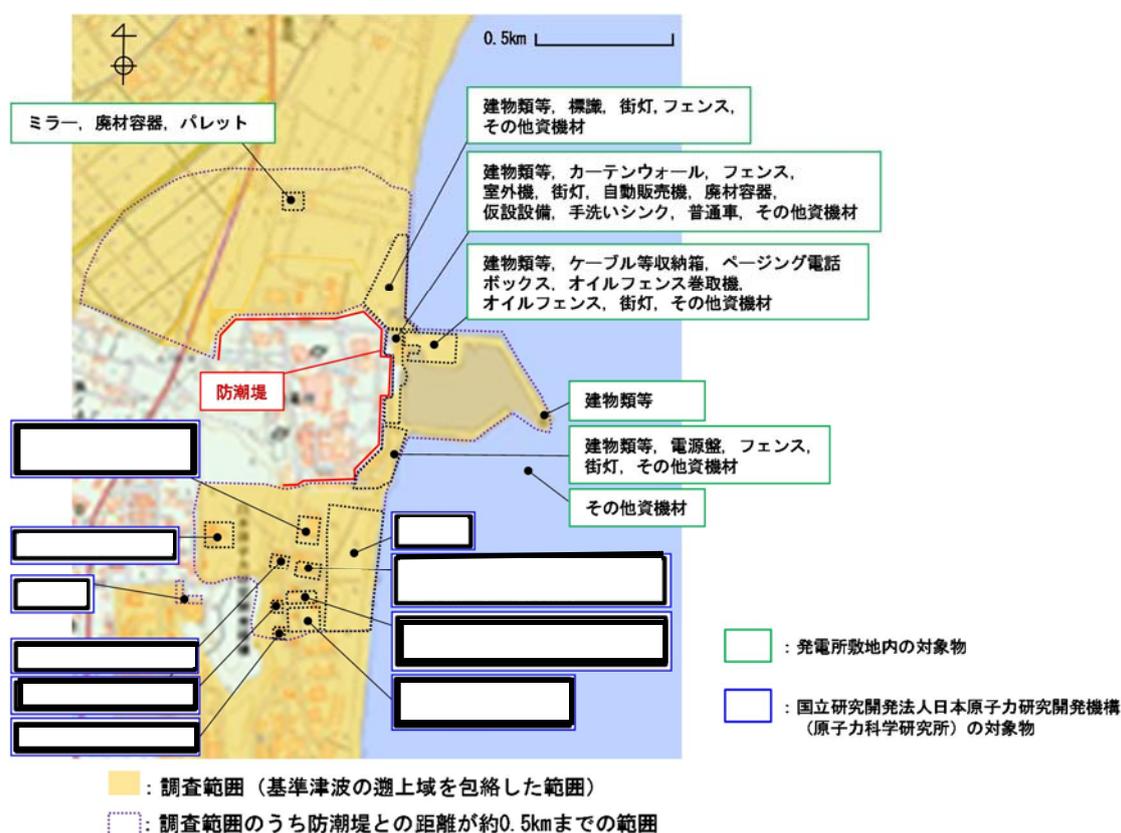
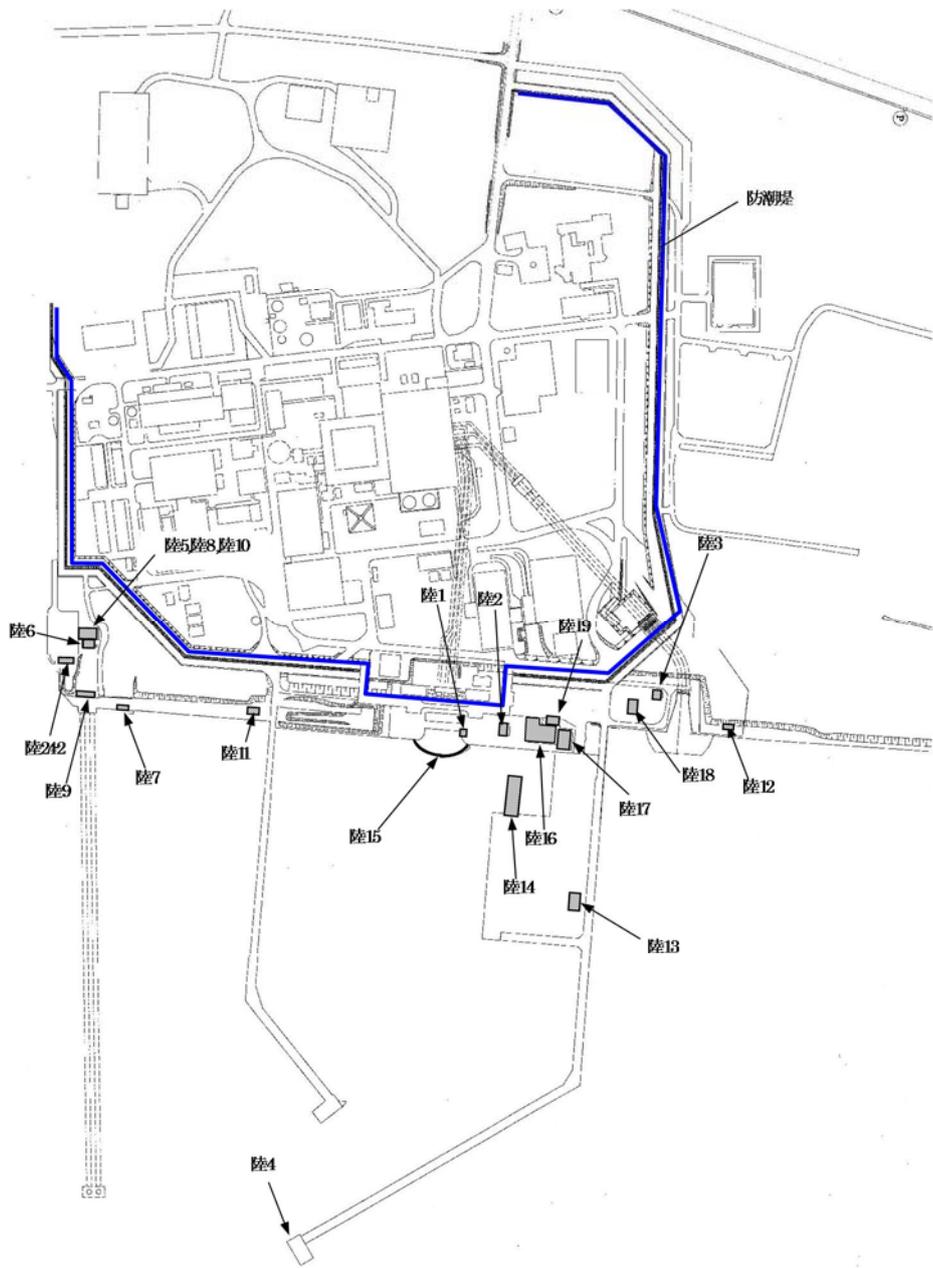


図-4 漂流物となる可能性が否定できない施設・設備の配置 (防潮堤から 500m の範囲)

□ は、商業機密又は防護上の観点から公開できません。



図一五 防潮堤東側に設置されている構築物位置図

			
陸 1 検潮小屋	陸 2 海水電解装置建屋	陸 3 放水口モニター小屋	陸 4 北防波堤灯台
			
陸 5 復水冷却用水路スクリーン室	陸 6 塩素処理室	陸 7 放水口放射能測定機器上屋	陸 8 ロータリースクリーン室
			
陸 9 主ゲート	陸 10 次亜塩素酸ソーダ注入室	陸 11 合併処理浄化槽設備	陸 12 海上レーダー
			
陸 13 物揚場倉庫	陸 14 栈橋	陸 15 カーテンウォール	陸 16 メンテナンスセンター
			
陸 17 輸送本部建屋	陸 18 輸送本部倉庫	陸 24 再利用物品置場テント	

写真-1 防潮堤東側に設置されている構築物

 は、商業機密又は防護上の観点から公開できません。

表-1 防潮堤東側に設置されている構築物一覧表

番号	名称	主要構造（形状）	寸法	対策
陸1	検潮小屋	鉄筋 コンクリート造	2.9m×2.9m×2.3m	撤去又は移設することを基本とし、撤去又は移設が出来ない場合は、耐震性等を評価した上で、必要に応じ漂流化しないための補強対策を検討する。
陸2	海水電解装置建屋	鉄筋 コンクリート造	8m×11m×3.7m	
陸3	放水口モニター小屋	鉄筋 コンクリート造	4m×5m×3m	
陸4	北防波堤灯台	鉄筋 コンクリート造	Φ3m×9m	
陸5	復水冷却用水路 スクリーン室	鉄筋 コンクリート造	—	
陸6	塩素処理室	鉄筋 コンクリート造	10m×13m×10m	
陸7	放水口放射能 測定機器上屋	鉄筋 コンクリート造	3m×5m×3m	
陸8	ロータリースクリーン室	鉄筋 コンクリート造	13m×21m×11m	
陸9	主ゲート	鉄筋 コンクリート造	4m×18m×10m	
陸10	次亜塩素酸ソーダ注入室	鉄筋 コンクリート造	—	
陸11	合併処理浄化槽設備	鉄筋 コンクリート造	10m×15m×10m	
陸12	海上レーダー	鋼製支柱	—	
陸13	物揚場倉庫	コンクリート製ブ ロック	7m×12m×3m	
陸14	栈橋	鋼製コンクリート造	1.2m×40m×4m	
陸15	カーテンウォール	鉄筋 コンクリート造 (鋼材支柱)	—	
陸16	メンテナンスセンター	鉄骨造	34m×19m×11m	
陸17	輸送本部建屋	鉄骨造	22m×13m×7m	
陸18	輸送本部倉庫	鉄骨造	12m×8m×4m	
陸24 -2	再利用物品置場テント	—	—	

表-2 漂流物となる可能性が否定できない仮置きや残置の可能性のあるもの (1/2)

場所	種類	想定質量 (t)	防潮堤との距離	対策の要否	対策不要である根拠	対策	検討対象
東側	船舶	15 (排水トン数)	500m (海域)	否	—	—	○
	流木	0.08※1	500m 以内 (海域)	否	—	定期的な撤去運用	△
	流木 (丸太)	—	100m 以内 (陸域)	要	—	仮置禁止又は固縛	—
	フェンス	0.9	100m 以内 (陸域)	否	受圧面積が小さく、津波が透過することから、漂流には至らないと考えられるため。	—	—
	電源盤	0.6	100m 以内 (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—
	ケーブル等収納箱	0.04	100～300m (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—
	ページング電話ボックス	0.02	100～300m (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—
	室外機	0.3	100m 以内 (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—
	自動販売機	0.5	100m 以内 (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—
	オイルフェンス巻取機	1.5	100～300m (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—
	オイルフェンス	0.07	100～300m (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—

※1：流木の想定質量 (t) は、敷地周辺の植生調査結果のうち汀線沿いの海岸植生の樹木 (平均直径 12 cm, 平均樹高 8m) を選定し、建築空間の緑化手法 (1988) の算定式により設定した。

表-2 漂流物となる可能性が否定できない仮置きや残置の可能性のあるもの (2/2)

場所	種類	想定質量 (t)	防潮堤との距離	対策の要否	対策不要である根拠	対策	検討対象
東側	廃材容器	0.04	100m 以内 (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—
	手洗いシンク	0.02	100m 以内 (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—
	仮設設備	0.2	100m 以内 (陸域)	要	—	移設・撤去又は固縛	—
	普通車	1.4	100m 以内 (陸域)	要	—	退避措置又は固縛を基本	△

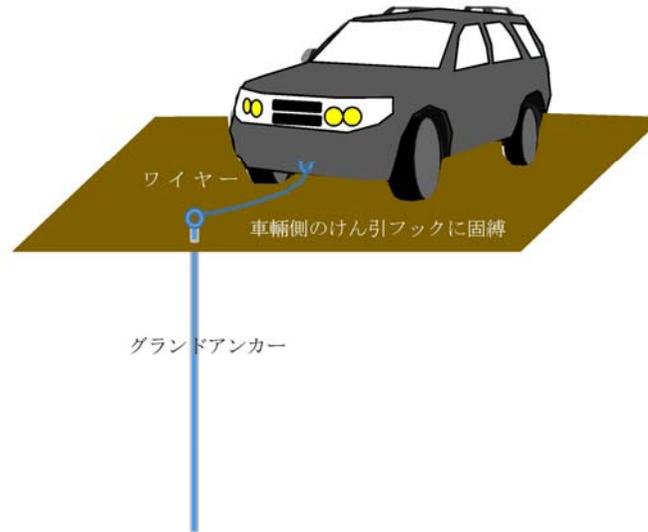


図-6 車両固縛イメージ図

(3) 検討対象漂流物の選定結果

検討対象漂流物の選定結果を表-3に示す。検討の結果、船舶、流木、普通車を検討対象漂流物として選定する。

表-3 検討対象漂流物の選定結果

場所	種類	想定質量 (t)	防潮堤との距離
東側	船舶	15 (排水トン数)	500m (海域)
	流木	0.08	500m 以内 (海域)
	普通車	1.4	100m 以内 (陸域)

### 3. 東海第二発電所のサイト特性を反映したソリトン分裂波発生位置の確認

漂流物は津波の襲来により発生するが、漂流物の移動は津波の砕波位置に漂流物が存在する場合に大きな移動距離となることが知られている。そこで、東海第二発電所のサイト特性を踏まえた、津波による分裂波や砕波の発生位置を確認するために、水理模型実験及び数値解析シミュレーションを実施した。

#### (1) 分裂波発生に関する検討

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」において以下の2つ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。

- ① 概ね入射津波高さが水深の30%以上（津波数値解析等による津波高さが水深の60%以上）
- ② 海底勾配が1/100以下程度の遠浅

東海第二発電所前面の海底地形は約1/200勾配で遠浅であり、入射波津波高さとの関係も入射津波高さが水深の30%以上であることから、両方の条件に合致する（図-7及び表-4）。そこで、沖合におけるソリトン分裂波及び砕波の発生の有無や陸上へ遡上する過程での減衰の状況を定量的に確認するため、東海第二発電所のサイト特性を考慮した水理模型実験を行った。

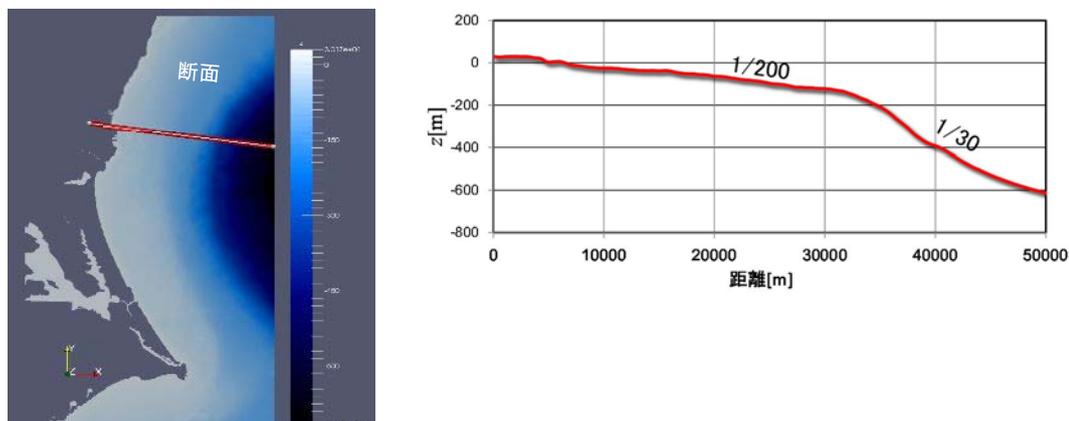


図-7 海底地形断面位置図及び海底地形断面図

表-4 津波高さと水深の関係

地点	(1)水深	(2)入射津波高さ*	(2)/(1)
東海第二発電所前面	7.5m	4.7m	62%

※津波数値解析による津波高さの1/2を入射津波高さとして定義（防潮堤の耐津波ガイドライン）

## (2) 水理模型実験

### 1) 目的

基準津波の策定に用いた波源については、2011年東北地方太平洋沖地震で得られた知見を踏まえて設定した波源のすべり領域を拡大したり、すべり量の割増しを行うなどの保守的な設定を複数加えた波源である。

水理模型実験は、ソリトン分裂波が生じない沖合5.0kmにおける津波波形を入力し、ソリトン分裂波や砕波の発生の有無及び陸上へ遡上する過程での減衰状況の把握を目的に実施した。

### 2) 検討断面

東海第二発電所前面の海底地形は概ね一様の地形となっていることから、本実験では、津波水位が最大となる地点を基に、津波の伝播特性を踏まえ、等深線図に直交する断面を選定した(図-8)。

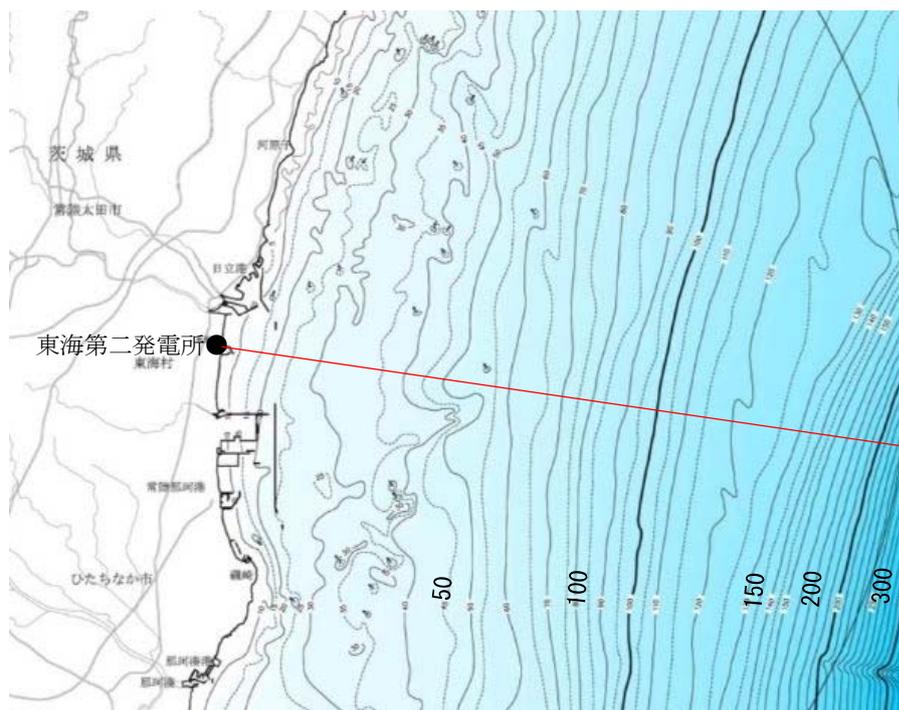


図-8 検討断面位置図

### 3) 実験条件

断面二次元実験施設の水路は、長さ 60m×幅 1.2m (貯水部は 1.8m) ×高さ 1.5m とし、沖合 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  $\lambda=1/200$  とした (図-9)。

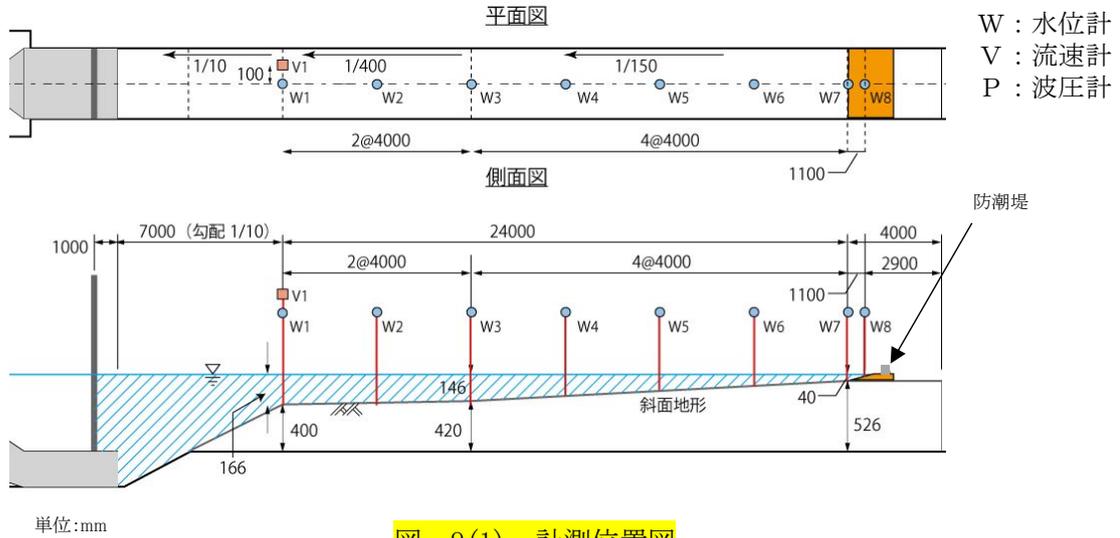


図-9(1) 計測位置図

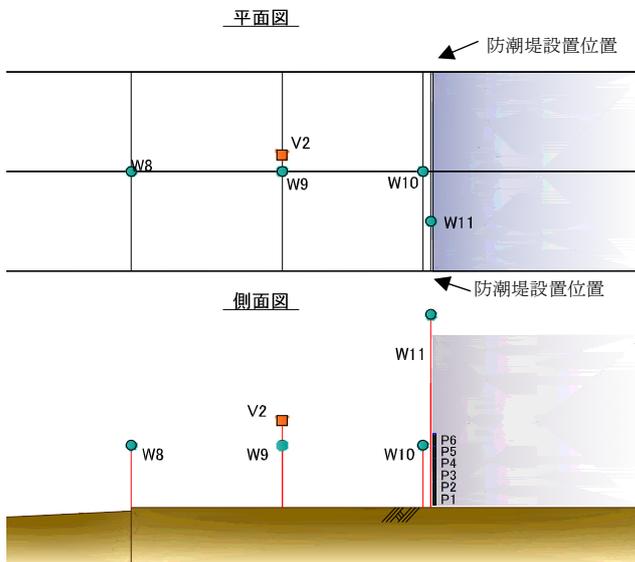


図-9(2) 防潮堤位置拡大図



図-10 実験施設写真

#### 4) 入射津波の造波

水理模型実験における再現範囲の最沖地点はソリトン分裂波が発生しない沖合 5.0km の位置とし、基準津波の波源モデルを用いた数値解析から求めた同地点における津波波形を入力した。また、この津波波形を防潮堤位置で平面二次元津波シミュレーション解析結果と同様の高さになるよう振幅を調整した (図-11)。

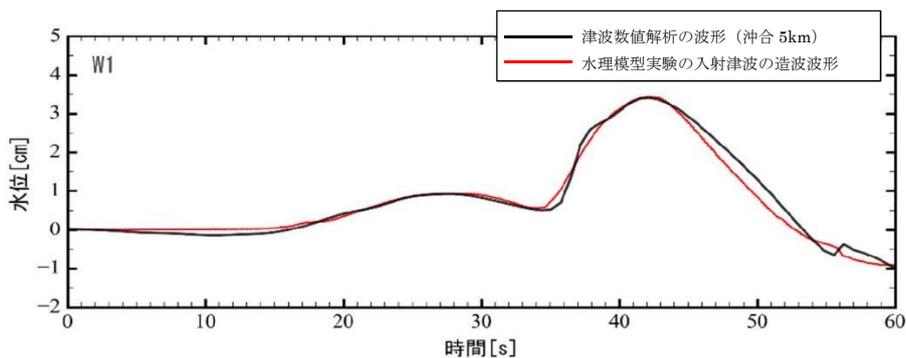


図-11 入射津波の造波波形図 (沖合 5km 地点)

#### 5) 水理模型実験の結果 (水理模型実験におけるソリトン分裂波の確認)

平面二次元津波シミュレーション解析に即した津波波形を造波し、水理模型実験を行った。水理模型実験における時刻歴図を図-12 に示す。その結果、目視観察と波高計による計測により、沖合約 220m 地点 (W7) においてソリトン分裂波が生じることを確認したが、陸上に遡上する過程で分裂波は減衰している。

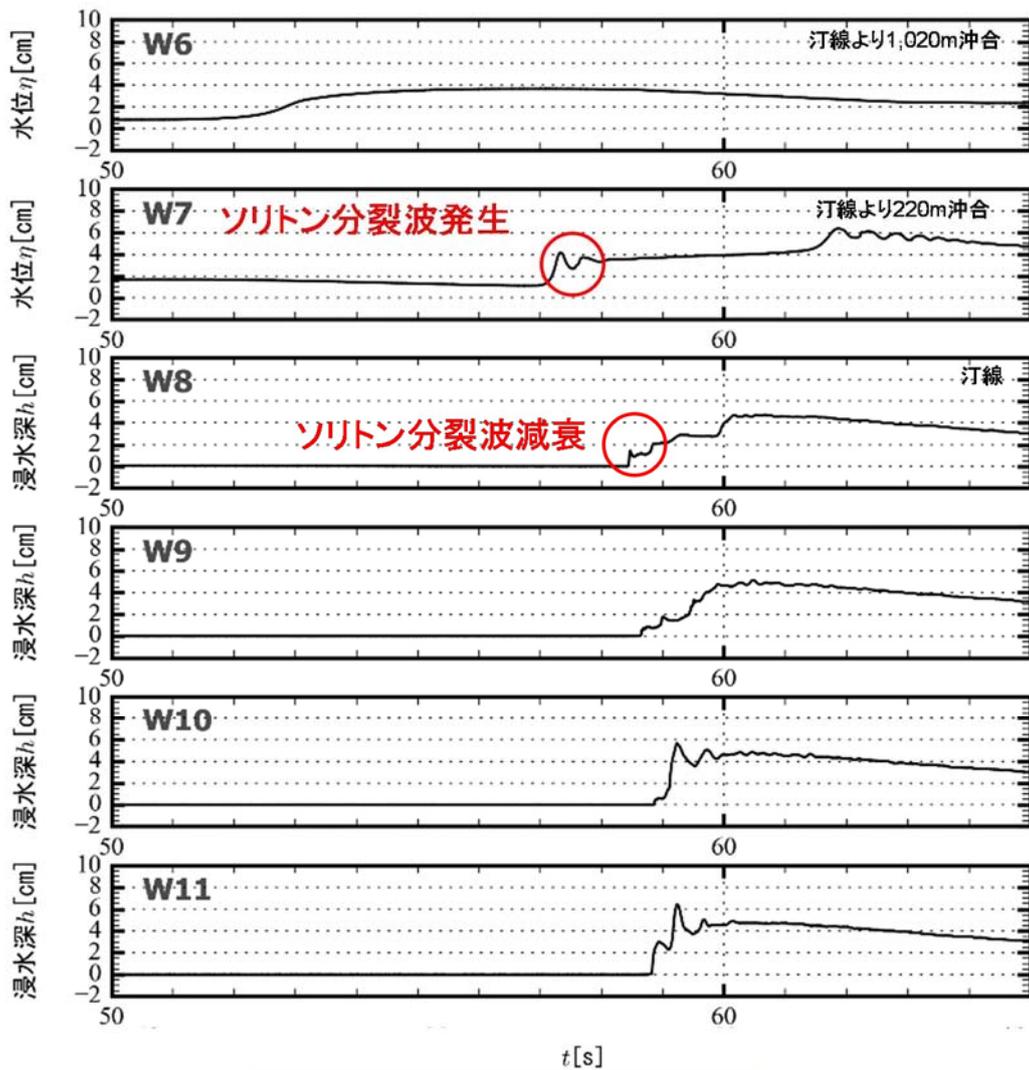


図-12 水理模型実験における時刻歴図

### (3) 水理模型実験結果の検証（再現性検討）

水理模型実験結果について、断面二次元津波シミュレーション解析を実施した。断面二次元津波シミュレーション解析は、分散波理論に基づいた解析手法であり、ソリトン分裂波を表現可能な数値波動水路 CADMAS-SURF/2D (Ver. 5.1) を用いた。

#### 1) 水理模型実験結果の再現性

水理模型実験でモデル化した区間と同じ区間を解析領域としてモデル化した（図-13）。また、入射波は水理模型実験の入力波形に合わせて作成した。

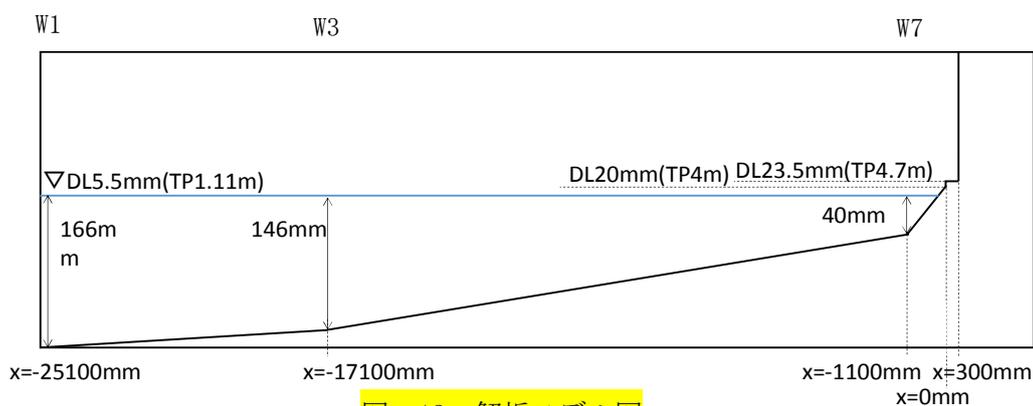


図-13 解析モデル図

断面二次元津波シミュレーション解析の結果を図-14に示す。水理模型実験結果と同様、沖合約220m地点（W7）においてソリトン分裂波を確認したが、陸上に遡上する過程で分裂波は減衰している。

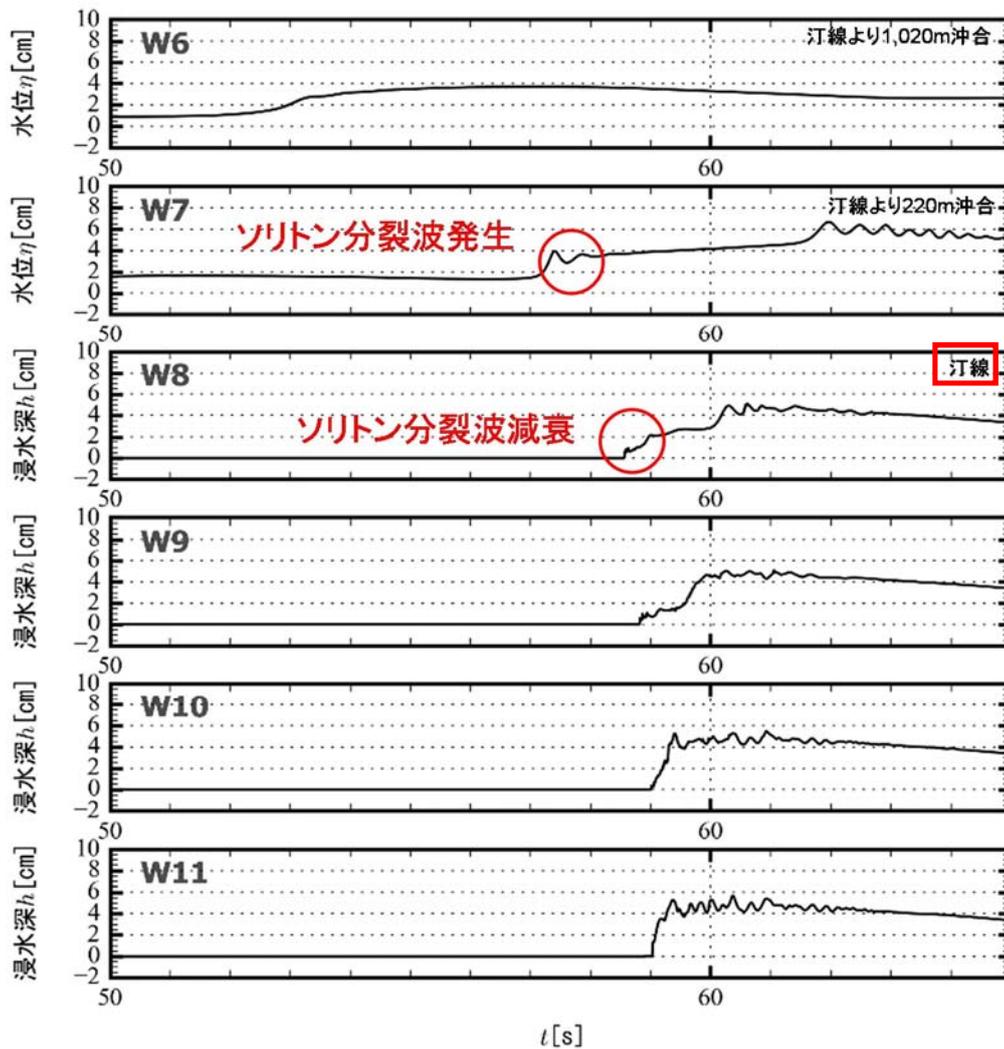


図-14 断面二次元津波シミュレーション解析における時刻歴図

(4) 敷地前面の流況について

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結果、沖合約220m地点において、ソリトン分裂波を確認したが、汀線位置では分裂波は減衰している。

これらの結果から、漂流物の検討においては、ソリトン分裂波の減衰状況を考慮し、被衝突体からの距離を、汀線より陸側を直近、汀線より海側を前面海域と定義する。

4. 漂流物荷重の試算

(1) 各種基準類の漂流物荷重算定式の整理

漂流物の位置と地形及び流況の整理で抽出された漂流物となる可能性が否定できない施設・設備のうち、仮置きや残置の可能性のあるものについて、被衝突体への衝突を仮定した場合の漂流物荷重の試算を行う。各種基準類の漂流物荷重算定式を表-5に示す。漂流物荷重の試算は、漂流物の種類や想定質量等、漂流物荷重算定式の適用性考慮する。

表-5 各種基準類の漂流物荷重算定式の整理

出典	種類	概要及び算定式	算定式の適用性が確認された範囲（実験条件等）
① 松富ほか（1999）	流木	津波による流木の漂流荷重を提案している。本式は円柱形状の流木が縦向きに衝突する場合の漂流荷重算定式である。 $F_m / (\gamma D^2 L) = (1.2 \sim 1.5) C_{MA} \{v_{A0} / (gD)^{0.5}\}^{1.2} (\sigma_v / \gamma L)^{0.4}$ $F_m$ ：衝突力， $\gamma$ ：流木の単位体積重量， $D$ ：木材の直径， $L$ ：木材の長さ， $g$ ：重力加速度， $C_{MA}$ ：見かけの質量係数（水の緩衝機能も加味）， $v_{A0}$ ：衝突速度， $\sigma_v$ ：木材の降伏応力	「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（実験：高さ 0.5m, 幅 0.3m, 長さ 11.0m） 流木（丸太）の直径：4.8cm～12cm, 流木の重量：305～8615gf ・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。東海第二のサイト条件を踏まえると、被衝突体の直近に衝突体があることを仮定する場合に適用性がある可能性がある。個別の流木（丸太）の種類等に応じて、実現象を再現するようなパラメータを適切に定めることに難がある。
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漂流荷重を提案している。 $F_H / (gM) = S \cdot C_{MA} \cdot \{V_H / (g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})\}^{2.5}$ $F_H$ ：衝突力， $g$ ：重力加速度， $M$ ：漂流物の質量， $S$ ：係数（=5.0）， $C_{MA}$ ：付加質量係数， $V_H$ ：漂流物移動速度， $D$ ：漂流物の直径（角柱の場合は正方形断面辺長）， $L$ ：漂流物の長さ	「実験に基づく推定式」（縮尺 1/100 の模型実験） 漂流物の形状：円柱，角柱，球 漂流物重量：0.588N～29.792N 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 の仮定となり，東海第二のサイト条件を考慮すると適用性が無いものと判断する。
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による漂流荷重を定めている。 $P = 0.1WU$ $P$ ：衝突力， $W$ ：流送物の重量， $U$ ：表面流速	新規基準に基づく審査において適用された実績がある。 漂流物が流下（漂流）して来た場合に，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ことから，被衝突体の前面海域からの漂流物を想定する場合に適用性があると判断する。
④ FEMA（2012）	流木 コンテナ	漂流物による漂流荷重を正確に評価するのは困難としながら，一例として算定式を示している。 $F_i = 1.3u_{max} \sqrt{km_d(1+c)}$ $F_i$ ：衝突力， $c$ ：付加質量係数， $u_{max}$ ：漂流物を運ぶ流体の最大流速， $m_d$ ， $k$ ：漂流物の質量と有効軸剛性	「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で，かつ衝突時のエネルギー減衰が一切考慮されていない前提条件での算定式であることから，漁船等のように衝突時に塑性変形を伴う漂流物の荷重算定には適さない。 FEMA の原形式は， $F = v\sqrt{km}$ （Haehnel and Daly <sup>**2</sup> ）であり，表面流速（津波流速）ではなく漂流流速を用いて漂流物荷重を算定する式となっている。漂流物が地表面を転がるような場合は，衝突流速を 50%として良い可能性があるとの記載がある。 個別の漂流物に対して，実現象を再現するような軸剛性を適切に定めることに難がある。
⑤ 水谷ほか（2005）	コンテナ	漂流するコンテナの漂流荷重を提案している。 $F_m = 2\rho_w \eta_m B_c V_x^2 + \left(\frac{WV_x}{gdt}\right), V_x \cong C_x = 2\sqrt{g\eta_m}$ $F_m$ ：衝突力， $g$ ：重力加速度， $W$ ：コンテナの重量， $B_c$ ：コンテナ幅， $\rho_w$ ：遡上波の最大水位， $dt$ ：衝突時間， $\rho_w$ ：水の密度， $V_x$ ：コンテナの漂流速度， $C_x$ ：津波の遡上流速	「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 被衝突体の直近のエプロン上にコンテナを設置して衝突力を求めた算定式である。
⑥ 有川ほか（2007, 2010）	流木 コンテナ	鋼製構造物（コンテナ等）による漂流荷重を提案している。 $F = \gamma_p x^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4} \tilde{m}\right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}}, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1+k_2}, k = \frac{(1-v^2)}{\pi E}, \tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}$ $a$ ：衝突面半径の 1/2（ここではコンテナ衝突面の縦横長さの平均の 1/4）， $E$ ：ヤング係数， $v$ ：ポアソン比， $m$ ：質量， $v$ ：衝突速度， $\gamma_p$ ：塑性によるエネルギー減衰効果，添字 1,2 は衝突体と被衝突体を表す	「実験に基づく推定式」（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 水理模型実験では，コンテナを被衝突体の前面 1.21m（現地換算 6.05m）に設置して衝突力を求めた算定式である。 個別の漂流物に対して，実現象を再現するような剛性に係る $k$ 値を適切に定めることに難がある。

(2) 各種基準類の漂流物荷重算定式の整理結果

各種基準類の漂流物荷重算定式の整理結果を表-6に示す。

運用対策が不可能である場合において、漂流物荷重の試算を行う場合は、表-6に示す各算定式での適用条件（種類、被衝突体からの距離、適用流速、衝突標高）を踏まえた上で行うものとする。

表-6 各種基準類の漂流物荷重算定式の整理結果

出典	種類	適用流速	備考
① 松富ほか	流木	衝突速度	個別の流木（丸太）の種類等に応じて、実現象を再現するようなパラメータを適切に定めることに難がある。
② 池野・田中	流木	漂流物移動速度	模型縮尺（1/100）を考慮した場合、東海第二発電所への適用性が無いものと判断する。
③ 道路橋示方書	流木等	表面流速（津波流速）	
④ FEMA	流木 コンテナ	漂流物を運ぶ 流体の最大流速	衝突体及び被衝突体の両方とも完全弾性体で、かつ衝突時のエネルギー減衰が一切考慮されていない前提条件での算定式であり、漁船等のように衝突時に塑性変形を伴う漂流物の荷重算定には適さない。FEMAの原形式は、 $F=v\sqrt{km}$ (Haehnel and Daly※2) であり、表面流速（津波流速）ではなく漂流流速を用いて漂流物荷重を算定する式となっている。
⑤ 水谷ほか	コンテナ	津波の 遡上流速	東海第二発電所では、コンテナは検討対象ではないため、対象外。
⑥ 有川ほか	流木 コンテナ	衝突速度	個別の漂流物に対して、実現象を再現するような剛性に係るk値を適切に定めることに難がある。

(3) 検討対象漂流物の漂流物荷重の算定

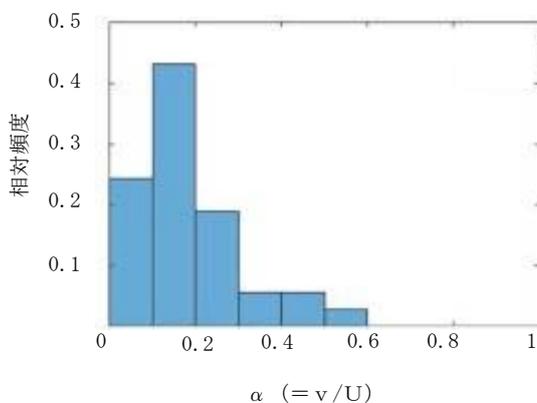
検討対象漂流物へ適用性を確認した各種基準類の漂流物荷重算定式による漂流物荷重の算定結果を表-7に示す。漂流物荷重の算定に用いた流速は、基準津波時の防潮堤近傍での法線方向の最大流速 6.91 m/s を保守側に切り上げた 7 m/s とした。

各算定式に基づく実荷重の算定結果の比較を行うため、実験における実現象を再現する軸剛性 k の同定にも用いられている FEMA の原形式  $F = v\sqrt{km}$  (Haehnel and Daly※2) を適

用した。

漂流物の衝突直前の漂流流速 $v$ (m/s)と水の表面流速 $U$ (m/s)の比率 $\alpha$ について、電力中央研究所(2017)<sup>※3</sup>及び甲斐田ほか(2016)<sup>※4</sup>によれば、漂流流速 $v$ は表面流速(津波流速) $U$ に対して0~60%に低下するとされている。甲斐田ほか(2016)で述べられている構造物模型に衝突する漂流物の衝突速度 $v$ の確率分布を図-14に示す。図-14の通り、 $\alpha = v/U = 0.1$ (10%)において相対頻度が最も高いことを示している。そのため、衝突速度には、前面海域から漂流する場合は相対頻度が最も高い $\alpha = v/U = 0.1$ (10%)を考慮し漂流物荷重を算定する。

また、道路橋示方書式を直近の漂流物に適用する場合には、衝突速度には $\alpha = v/U = 0.6$ (60%)を考慮し漂流物荷重を算定する。



甲斐田ほか(2016)より  
(比重0.6)

図-14 構造物模型に衝突する漂流物の速度比率 $\alpha$  ( $= v/U$ ) の確率分布

表-7 検討対象物の漂流物荷重の算定

種類	質量 (t)	適用式	流速 (m/s)	漂流物荷重 (kN)
船舶	15	道路橋示方書	7	103
流木	0.08	松富ほか	0.7	20
		Haehnel and Daly <sup>※5</sup> (FEMA)	0.7	10
		有川ほか	0.7	14
普通車	1.4	道路橋示方書 <sup>※6</sup>	7	54

※5: 実荷重での算定結果を比較するため、実験における実現象を再現する軸剛性 $k$ の同定にも用いられているFEMAの原形式 $F = v\sqrt{km}$ (Haehnel and Daly<sup>※2</sup>)を適用した。

※6: 道路橋示方書式は表面流速(津波流速)で評価する式となっているが、直近の漂流物に適用するため、衝突速度には $\alpha = v/U = 0.6$ (60%)を考慮し、 $P = 0.6WU$ として荷重を算定した。

#### (4) まとめ

検討対象漂流物として選定して、船舶、流木、普通車について、漂流物荷重を算定した。今後は、上記の荷重を考慮の上、適切な評価手法を用いるものとする。

※2 : Haehnel R.R and Daly F.D. Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures. Journal of Hydraulic Engineering, 130, No.2, 2004, pp.112-120.

※3 : 原子力発電所における津波漂流物の影響評価技術－現状調査とその適用に関する考察－研究報告：○16010, 電力中央研究所報告書 (2017)

※4 : 陸上遡上津波中の漂流物挙動に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) (2016)

以上