

女川原子力発電所 2 号炉

重大事故等対策の有効性評価について

令和元年 6 月

東北電力株式会社

目 次

1. 重大事故等への対処に係る措置の有効性評価の基本的考え方

- 1.1 概要
- 1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定
- 1.3 評価に当たって考慮する事項
- 1.4 有効性評価に使用する計算プログラム
- 1.5 有効性評価における解析の条件設定の方針
- 1.6 解析の実施
- 1.7 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価方針
- 1.8 必要な要員及び資源の評価方針

本日まで提出範囲

付録1 事故シーケンスグループ及び重要事故シーケンス等の選定について

付録2 原子炉格納容器の限界温度・圧力

付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて

2. 運転中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故

- 2.1 高圧・低圧注水機能喪失
- 2.2 高圧注水・減圧機能喪失
- 2.3 全交流動力電源喪失
 - 2.3.1 全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋DG失敗）＋HPCS失敗
 - 2.3.2 全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋DG失敗）＋高圧注水失敗
 - 2.3.3 全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋DG失敗）＋直流電源喪失
 - 2.3.4 全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋DG失敗）＋SRV再閉失敗＋HPCS失敗
- 2.4 崩壊熱除去機能喪失
 - 2.4.1 取水機能が喪失した場合
 - 2.4.2 残留熱除去系が故障した場合
- 2.5 原子炉停止機能喪失
- 2.6 LOCA時注水機能喪失
- 2.7 格納容器バイパス（インターフェイスシステムLOCA）

3. 運転中の原子炉における重大事故

- 3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）
 - 3.1.1 格納容器破損モードの特徴，格納容器破損防止対策
 - 3.1.2 代替循環冷却系を使用する場合
 - 3.1.3 代替循環冷却系を使用できない場合
- 3.2 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱
- 3.3 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用

- 3.4 水素燃焼
- 3.5 溶融炉心・コンクリート相互作用

- 4. 使用済燃料プールにおける重大事故に至るおそれがある事故
 - 4.1 想定事故 1
 - 4.2 想定事故 2

- 5. 運転停止中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故
 - 5.1 崩壊熱除去機能喪失
 - 5.2 全交流動力電源喪失
 - 5.3 原子炉冷却材の流出
 - 5.4 反応度の誤投入

- 6. 必要な要員及び資源の評価
 - 6.1 必要な要員及び資源の評価条件
 - 6.2 重大事故等対策時に必要な要員の評価結果
 - 6.3 重大事故等対策時に必要な水源，燃料及び電源の評価結果

添付資料 目次

- 添付資料 1.2.1 定期検査工程の概要
- 添付資料 1.3.1 重大事故等対策の有効性評価における作業毎の成立性確認結果について
- 添付資料 1.4.1 有効性評価に使用している解析コード／評価手法の開発に係る当社の関与について
- 添付資料 1.5.1 女川原子力発電所 2 号炉の重大事故等対策の有効性評価の一般データ
- 添付資料 1.5.2 有効性評価における LOCA 時の破断位置及び口径設定の考え方について
- 添付資料 1.5.3 使用済燃料プールにおける重大事故に至るおそれがある事故（想定事故 1 及び 2）の有効性評価における共通評価条件について
- 添付資料 1.7.1 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価フロー

- 添付資料 2.1.1 安定状態について
- 添付資料 2.1.2 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（高圧・低圧注水機能喪失）
- 添付資料 2.1.3 減圧・注水操作が遅れる場合の影響について
- 添付資料 2.1.4 7 日間における水源、燃料評価結果について（高圧・低圧注水機能喪失）

- 添付資料 2.2.1 残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）の運転実績について
- 添付資料 2.2.2 安定状態について
- 添付資料 2.2.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（高圧注水・減圧機能喪失）
- 添付資料 2.2.4 高圧注水・減圧機能喪失時における低圧非常用炉心冷却系作動台数の考え方について
- 添付資料 2.2.5 7 日間における燃料評価結果について（高圧注水・減圧機能喪失）

- 添付資料 2.3.1.1 蓄電池による給電時間評価結果について
- 添付資料 2.3.1.2 全交流動力電源喪失時における原子炉隔離時冷却系の 24 時間継続運転が可能であることの妥当性について
- 添付資料 2.3.1.3 逃がし安全弁に係る解析と実態の違い及びその影響について
- 添付資料 2.3.1.4 安定状態について
- 添付資料 2.3.1.5 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋DG 失敗）＋HPCS 失敗）
- 添付資料 2.3.1.6 7 日間における水源、燃料、電源負荷評価結果について（全交流

動力電源喪失（外部電源喪失＋D G 失敗）＋H P C S 失敗）

- 添付資料 2.3.2.1 全交流動力電源喪失時における高圧代替注水系の24時間継続運転が可能であることの妥当性について
- 添付資料 2.3.2.2 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋D G 失敗）＋高圧注水失敗）
- 添付資料 2.3.3.1 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋D G 失敗）＋直流電源喪失）
- 添付資料 2.3.3.2 7日間における燃料，電源負荷評価結果について（全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋D G 失敗）＋直流電源喪失）
- 添付資料 2.3.4.1 安定状態について
- 添付資料 2.3.4.2 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋D G 失敗）＋S R V 再閉失敗＋H P C S 失敗）
- 添付資料 2.3.4.3 減圧・注水開始時間の時間余裕について
- 添付資料 2.3.4.4 7日間における水源，燃料，電源負荷評価結果について（全交流動力電源喪失（外部電源喪失＋D G 失敗）＋S R V 再閉失敗＋H P C S 失敗）
- 添付資料 2.4.1.1 安定状態について
- 添付資料 2.4.1.2 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（崩壊熱除去機能喪失（取水機能が喪失した場合））
- 添付資料 2.4.1.3 7日間における水源，燃料，電源負荷評価結果について（崩壊熱除去機能喪失（取水機能が喪失した場合））
- 添付資料 2.4.2.1 安定状態について
- 添付資料 2.4.2.2 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系が故障した場合））
- 添付資料 2.4.2.3 7日間における水源，燃料評価結果について（崩壊熱除去機能喪失（残留熱除去系が故障した場合））
- 添付資料 2.5.1 評価対象の炉心を平衡炉心のサイクル末期とすることの妥当性
- 添付資料 2.5.2 安定状態について
- 添付資料 2.5.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（原子炉停止機能喪失）
- 添付資料 2.5.4 リウエットを考慮しない場合の燃料被覆管温度への影響

- 添付資料 2.5.5 外部電源喪失を想定した場合の感度解析
- 添付資料 2.5.6 注水温度に関する感度解析
- 添付資料 2.5.7 ほう酸水注入系のほう酸水濃度に関する感度解析
- 添付資料 2.5.8 SLC 起動を手動起動としていることについての整理
- 添付資料 2.5.9 7 日間における水源, 燃料評価結果について (原子炉停止機能喪失)
- 添付資料 2.5.10 格納容器除熱に関する感度解析

- 添付資料 2.6.1 中小破断 L O C A の事象想定について
- 添付資料 2.6.2 敷地境界の実効線量評価について
- 添付資料 2.6.3 安定状態について
- 添付資料 2.6.4 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について (L O C A 時注水機能喪失)
- 添付資料 2.6.5 7 日間における水源, 燃料, 電源負荷評価結果について (L O C A 時注水機能喪失)

- 添付資料 2.7.1 インターフェイスシステム L O C A 発生時の破断面積及び現場環境について
- 添付資料 2.7.2 安定状態について
- 添付資料 2.7.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について (格納容器バイパス (インターフェイスシステム L O C A))
- 添付資料 2.7.4 7 日間における燃料評価結果について (格納容器バイパス (インターフェイスシステム L O C A))

- 添付資料 3.1.2.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損) における炉心の損傷状態及び損傷炉心の位置について
- 添付資料 3.1.2.2 安定状態について (代替循環冷却系を使用する場合)
- 添付資料 3.1.2.3 格納容器内に存在する亜鉛及びアルミニウムの反応により発生する水素ガスの影響について
- 添付資料 3.1.2.4 原子炉建屋から大気中への放射性物質の漏えい量について
- 添付資料 3.1.2.5 格納容器漏えい率の設定について
- 添付資料 3.1.2.6 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について (雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損) (代替循環冷却系を使用する場合))
- 添付資料 3.1.2.7 大破断 L O C A を上回る規模の L O C A に対する格納容器破損防止対策の有効性について
- 添付資料 3.1.2.8 7 日間における水源, 燃料, 電源負荷評価結果について (雰囲気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損) (代替循環冷却系を使用する場合))

- 添付資料 3.1.3.1 炉心損傷の判断基準及び炉心損傷判断前後の運転操作の差異について
- 添付資料 3.1.3.2 非凝縮性ガスの影響について
- 添付資料 3.1.3.3 雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)時において代替循環冷却系を使用できない場合における原子炉格納容器フィルタベント系からのCs-137放出量評価について
- 添付資料 3.1.3.4 原子炉建屋から大気中への放射性物質の漏えい量について
- 添付資料 3.1.3.5 安定状態について(代替循環冷却系を使用できない場合)
- 添付資料 3.1.3.6 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について(雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)(代替循環冷却系を使用できない場合))
- 添付資料 3.1.3.7 注水操作が遅れる場合の影響について
- 添付資料 3.1.3.8 7日間における水源, 燃料, 電源負荷評価結果について(雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)(代替循環冷却系を使用できない場合))

- 添付資料 3.2.1 高温環境下での逃がし安全弁の開保持機能維持について
- 添付資料 3.2.2 格納容器破損モード「DCH」, 「FCI」及び「MCCI」の評価事故シーケンスの位置付け
- 添付資料 3.2.3 原子炉建屋から大気中への放射性物質の漏えい量について
- 添付資料 3.2.4 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について(高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱)
- 添付資料 3.2.5 7日間における水源, 燃料, 電源負荷評価結果について(高圧熔融物放出/格納容器雰囲気直接加熱)

- 添付資料 3.3.1 原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用に関する知見の整理
- 添付資料 3.3.2 水蒸気爆発の発生を仮定した場合の格納容器の健全性への影響評価
- 添付資料 3.3.3 格納容器下部への水張り実施の適切性
- 添付資料 3.3.4 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について(原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用)
- 添付資料 3.3.5 プラント損傷状態をLOCAとした場合の圧力スパイクへの影響

- 添付資料 3.4.1 G値を設計基準事故ベースとした場合の評価結果への影響
- 添付資料 3.4.2 水の放射線分解の評価について
- 添付資料 3.4.3 安定状態について
- 添付資料 3.4.4 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について(水素燃焼)

- 添付資料 3.5.1 安定状態について

- 添付資料 3.5.2 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について(溶融炉心・コンクリート相互作用)
- 添付資料 3.5.3 溶融炉心の崩壊熱及び溶融炉心からプール水への熱流束を保守的に考慮する場合並びに格納容器下部床面での溶融炉心の拡がりを抑制した場合のコンクリート侵食量及び溶融炉心・コンクリート相互作用によって発生する非凝縮性ガスの影響評価
- 添付資料 4.1.1 燃料プールの水位低下と遮蔽水位に関する評価について
- 添付資料 4.1.2 「水遮蔽厚に対する貯蔵中の使用済燃料からの線量率」の評価について
- 添付資料 4.1.3 安定状態について
- 添付資料 4.1.4 燃料プール水沸騰・喪失時の未臨界性評価
- 添付資料 4.1.5 評価条件の不確かさの影響評価について(想定事故1)
- 添付資料 4.1.6 7日間における水源, 燃料評価結果について(想定事故1)
- 添付資料 4.2.1 燃料プールの水位低下と遮蔽水位に関する評価について
- 添付資料 4.2.2 想定事故2における破断の想定について
- 添付資料 4.2.3 使用済燃料プールサイフォンブレイク孔について
- 添付資料 4.2.4 安定状態について
- 添付資料 4.2.5 評価条件の不確かさの影響評価について(想定事故2)
- 添付資料 4.2.6 7日間における水源, 燃料評価結果について(想定事故2)
- 添付資料 5.1.1 運転停止中の崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失における燃料有効長頂部又は放射線の遮蔽が維持される目安の水位到達までの時間余裕と必要な注水量の計算方法について
- 添付資料 5.1.2 重要事故シーケンスの選定結果を踏まえた有効性評価の条件設定
- 添付資料 5.1.3 崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失評価における崩壊熱設定の考え方
- 添付資料 5.1.4 安定状態について
- 添付資料 5.1.5 原子炉停止中における崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失時の格納容器の影響について
- 添付資料 5.1.6 原子炉停止中 崩壊熱除去機能喪失及び全交流動力電源喪失時における放射線の遮蔽維持について
- 添付資料 5.1.7 評価条件の不確かさの影響評価について(運転停止中 崩壊熱除去機能喪失)
- 添付資料 5.1.8 7日間における燃料評価結果について(運転停止中 崩壊熱除去機能喪失)

- 添付資料 5.2.1 安定状態について
- 添付資料 5.2.2 評価条件の不確かさの影響評価について（運転停止中 全交流動力電源喪失）
- 添付資料 5.2.3 7日間における水源，燃料，電源負荷評価結果について（運転停止中 全交流動力電源喪失）

- 添付資料 5.3.1 原子炉冷却材の流出における運転停止中の線量率評価について
- 添付資料 5.3.2 原子炉冷却材流出評価におけるPOS選定の考え方
- 添付資料 5.3.3 安定状態について
- 添付資料 5.3.4 評価条件の不確かさの影響評価について（運転停止中 原子炉冷却材の流出）
- 添付資料 5.3.5 7日間における燃料評価結果について（運転停止中 原子炉冷却材の流出）

- 添付資料 5.4.1 反応度誤投入事象の代表性について
- 添付資料 5.4.2 安定状態について
- 添付資料 5.4.3 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価について（運転停止中 反応度誤投入）
- 添付資料 5.4.4 反応度誤投入における炉心の状態等の不確かさについて

- 添付資料 6.1.1 他号炉との同時被災時における必要な要員及び資源について
- 添付資料 6.2.1 重大事故等対策の要員の確保について
- 添付資料 6.2.2 重要事故シーケンス等以外の事故シーケンスの要員の評価について
- 添付資料 6.3.1 水源，燃料，電源負荷評価結果について

事故シーケンスグループ及び
重要事故シーケンス等の選定について

目 次

はじめに

- 1 炉心損傷防止対策の有効性評価の事故シーケンスグループ抽出及び重要事故シーケンス選定について
 - 1.1 事故シーケンスグループの分析について
 - 1.1.1 炉心損傷に至る事故シーケンスの抽出, 整理
 - 1.1.2 抽出した事故シーケンスの整理
 - 1.1.2.1 必ず想定する事故シーケンスグループとの対応
 - 1.1.2.2 追加すべき事故シーケンスグループの検討
 - 1.1.2.3 炉心損傷後の格納容器の機能への期待可否に基づく整理
 - 1.2 有効性評価の対象となる事故シーケンスについて
 - 1.3 重要事故シーケンスの選定について
 - 1.3.1 重要事故シーケンス選定の考え方
 - 1.3.2 重要事故シーケンスの選定結果
- 2 格納容器破損防止対策の有効性評価の格納容器破損モード及び評価事故シーケンスの選定について
 - 2.1 格納容器破損モードの分析について
 - 2.1.1 格納容器破損モードの抽出, 整理
 - 2.1.2 内部事象レベル1.5 PRAの定量化結果及び影響度を踏まえた格納容器破損モードの検討
 - 2.2 評価事故シーケンスの選定について
 - 2.2.1 評価対象とするPDSの選定
 - 2.2.2 評価事故シーケンス選定の考え方及び選定結果
 - 2.2.3 炉心損傷防止が困難な事故シーケンス等に対する格納容器破損防止対策の有効性
 - 2.2.4 直接的に炉心損傷に至る事故シーケンスに対する対策
- 3 運転停止中原子炉における燃料損傷防止対策の有効性評価の運転停止中事故シーケンスグループ抽出及び重要事故シーケンスの選定について
 - 3.1 運転停止中事故シーケンスグループの分析について
 - 3.1.1 燃料損傷に至る運転停止中事故シーケンスグループの抽出, 整理
 - 3.1.2 抽出した事故シーケンスの整理
 - 3.1.2.1 必ず想定する事故シーケンスグループとの対応
 - 3.1.2.2 追加すべき事故シーケンスグループの検討
 - 3.2 重要事故シーケンスの選定について

- 3.2.1 重要事故シーケンスの選定の考え方
- 3.2.2 重要事故シーケンスの選定結果
- 4 事故シーケンスグループ及び重要事故シーケンス等の選定に活用したPRAの実施プロセスについて

表

- 第1-1表 PRAの対象とした主な設備・系統
- 第1-2表 内部事象運転時レベル1PRAにおける起因事象と発生頻度
- 第1-3表 地震レベル1PRAにおける起因事象と発生頻度
- 第1-4表 津波高さ別の発生頻度
- 第1-5表 イベントツリーにより抽出される事故シーケンス
- 第1-6表 PRA結果に基づく新たな事故シーケンスグループの検討
- 第1-7表 事故シーケンスグループ別炉心損傷頻度（内部事象，地震，津波PRA）
- 第1-8表 重要事故シーケンス等の選定について

- 第2-1表 格納容器破損モード別格納容器破損頻度
- 第2-2表 プラント損傷状態（PDS）の定義
- 第2-3表 評価対象とするプラント損傷状態（PDS）の選定について
- 第2-4表 格納容器破損防止対策の評価事故シーケンスの選定について

- 第3-1表 内部事象停止時レベル1PRAにおける起因事象と発生頻度
- 第3-2表 運転停止中事故シーケンスグループ別炉心損傷頻度
- 第3-3表 重要事故シーケンス（運転停止中）の選定について
- 第3-4表 炉心損傷までの余裕時間について

図

- 第1-1図 事故シーケンスグループ抽出及び重要事故シーケンス選定の全体プロセス
- 第1-2図 内部事象運転時レベル1PRAイベントツリー
- 第1-3図 地震レベル1PRA階層イベントツリー
- 第1-4図(1) 地震レベル1PRAイベントツリー（外部電源喪失）
- 第1-4図(2) 地震レベル1PRAイベントツリー（全交流動力電源喪失）
- 第1-5図 津波レベル1PRAイベントツリー
- 第1-6図 プラント全体の炉心損傷頻度
- 第1-7図 事故シーケンスグループ別の寄与割合

- 第 2-1 図 格納容器破損モード及び評価事故シーケンス選定の全体プロセス
- 第 2-2 図 シビアアクシデントで想定される事象進展と格納容器破損モード
- 第 2-3 図 格納容器イベントツリー
- 第 2-4 図 内部事象運転時レベル 1. 5 P R A の定量化結果（格納容器破損モード別の寄与割合）

- 第 3-1 図 運転停止中原子炉における事故シーケンスグループ及び重要事故シーケンス選定の全体プロセス
- 第 3-2 図 定期検査時のプラント状態と主要パラメータの推移
- 第 3-3 図 P O S の分類及び定期検査工程
- 第 3-4 図 内部事象停止時レベル 1 P R A イベントツリー
- 第 3-5 図 起因事象別の寄与割合
- 第 3-6 図 事故シーケンスグループ別の寄与割合

別紙

- 1 有効性評価の事故シーケンスグループ等の選定における外部事象の考慮について
- 2 外部事象に特有の事故シーケンスについて
- 3 諸外国の重大事故対策に係る設備例について
- 4 T B W シーケンスを重要事故シーケンスに選定しない考え方について
- 5 女川 2 号炉 P R A における主要なカットセットと F V 重要度に照らした重大事故防止対策の対応状況
- 6 地震 P R A , 津波 P R A における主要な事故シーケンスの対策等について
- 7 水素燃焼および格納容器直接接触（シェルアタック）の除外理由について
- 8 格納容器隔離の想定について
- 9 F C I の知見について
- 10 溶融炉心・コンクリート相互作用の評価対象プラント損傷状態について
- 11 女川 2 号炉 P R A ピアレビュー実施結果について
- 12 「P R A の説明における参照事項（平成 25 年 9 月 原子力規制庁）」への女川原子力発電所 2 号炉 P R A の対応状況

別添

女川原子力発電所 2 号炉 確率論的リスク評価（P R A）について

別添

女川原子力発電所 2 号炉
確率論的リスク評価（P R A）について

目次

1. PRA 実施の目的
2. 事故シーケンスグループ等の選定に係る PRA の実施範囲・評価対象・実施手法
3. レベル 1PRA
 - 3.1 内部事象 PRA
 - 3.1.1 出力運転時 PRA
 - 3.1.1.a 対象プラント
 - 3.1.1.b 起因事象
 - 3.1.1.c 成功基準
 - 3.1.1.d 事故シーケンス
 - 3.1.1.e システム信頼性
 - 3.1.1.f 信頼性パラメータ
 - 3.1.1.g 人的過誤
 - 3.1.1.h 炉心損傷頻度
 - 3.1.2 停止時 PRA
 - 3.1.2.a 対象プラント
 - 3.1.2.b 起因事象
 - 3.1.2.c 成功基準
 - 3.1.2.d 事故シーケンス
 - 3.1.2.e システム信頼性
 - 3.1.2.f 信頼性パラメータ
 - 3.1.2.g 人的過誤
 - 3.1.2.h 炉心損傷頻度
 - 3.2 外部事象
 - 3.2.1 地震 PRA
 - 3.2.1.a 対象プラントと対象シナリオ
 - 3.2.1.b 確率論的地震ハザード
 - 3.2.1.c 建屋・機器のフラジリティ
 - 3.2.1.d 事故シーケンス
 - 3.2.2 津波 PRA
 - 3.2.2.a 対象プラントと対象シナリオ
 - 3.2.2.b 確率論的津波ハザード
 - 3.2.2.c 建屋・機器のフラジリティ
 - 3.2.2.d 事故シーケンス

本日まで提出範囲

4. レベル 1.5PRA

4.1 内部事象 PRA

4.1.1 出力運転時 PRA

4.1.1.a プラントの構成・特性

4.1.1.b プラント損傷状態の分類及び発生頻度

4.1.1.c 格納容器破損モード

4.1.1.d 事故シーケンス

4.1.1.e 事故進展解析

4.1.1.f 格納容器破損頻度

4.1.1.g 不確かさ解析及び感度解析

別紙 目次

3. レベル1PRA

3.1 内部事象PRA

3.1.1 出力運転時PRA

- 別紙3.1.1.b-1 起回事象から除外している事象について
- 別紙3.1.1.b-2 主蒸気管破断の分類の考え方について
- 別紙3.1.1.b-3 従属性を有する起回事象の抽出について
- 別紙3.1.1.b-4 運転時PRAで通常停止を起回事象として取扱う考え方について
- 別紙3.1.1.b-5 「起動操作」を起回事象に含めないことの考え方
- 別紙3.1.1.b-6 「主蒸気隔離弁の部分閉鎖」を隔離事象に分類する考え方について
- 別紙3.1.1.b-7 起回事象の発生頻度におけるEFの設定の妥当性について
- 別紙3.1.1.b-8 起回事象発生頻度の評価の考え方の優先順位について
- 別紙3.1.1.b-9 起回事象の発生頻度評価に用いるデータベースの適用性について
- 別紙3.1.1.b-10 起回事象外部電源喪失における炉型の違いに対する考え方について
- 別紙3.1.1.b-11 起回事象のLOCAの発生頻度算定の考え方
- 別紙3.1.1.b-12 ECCS配管破断の考え方について
- 別紙3.1.1.b-13 インターフェイスシステムLOCAの発生頻度の算出方法について
- 別紙3.1.1.b-14 ISLOCA発生頻度の海外との差について
- 別紙3.1.1.c-1 対処設備作動までの余裕時間の考え方
- 別紙3.1.1.c-2 成功基準の設定時の解析例について
- 別紙3.1.1.d-1 女川原子力発電所2号機 内部事象運転時レベル1PRAイベントツリー
- 別紙3.1.1.d-2 サプレッションプール水温が上昇した場合のHPCSの機能維持の考え方について
- 別紙3.1.1.d-3 逃がし安全(S/R)弁の開固着を想定する考え方
- 別紙3.1.1.d-4 常用系と非常用系で共用しているサポート系において、常用系機能喪失と常用系隔離失敗(隔離弁故障等)が重畳する場合の取扱い
- 別紙3.1.1.d-5 事故シーケンスの最終状態の分類の考え方
- 別紙3.1.1.e-1 スクラム系(機械系)における原子炉停止失敗の定義
- 別紙3.1.1.f-1 故障確率データがない機器について既存データを代用する場合の妥当性について
- 別紙3.1.1.f-2 中性子束検出器のモデル化について

- 別紙3. 1. 1. f-3 外部電源復旧の考え方について
- 別紙3. 1. 1. f-4 保守頻度の設定と実績との比較について
- 別紙3. 1. 1. f-5 共通要因故障の除外例について
- 別紙3. 1. 1. f-6 共通要因故障を考慮した場合の感度解析について
- 別紙3. 1. 1. f-7 共通要因故障パラメータの設定方法について
- 別紙3. 1. 1. f-8 共通要因故障を考慮している機器について、メーカーが相違している場合の考え方
- 別紙3. 1. 1. f-9 故障モード毎の共通要因故障の評価に使用しているパラメータについて
- 別紙3. 1. 1. g-1 人的過誤操作失敗に係る詳細設定について
- 別紙3. 1. 1. g-2 起因事象発生前の人的過誤として評価した事例の抽出過程について
- 別紙3. 1. 1. g-3 起因事象発生前の人的過誤を除外する妥当性について
- 別紙3. 1. 1. g-4 計器の校正ミスの取り扱いについて
- 別紙3. 1. 1. g-5 人的過誤として考慮する評価項目と結果について
- 別紙3. 1. 1. h-1 PRAの使用コードの検証について
- 別紙3. 1. 1. h-2 RCIC運転継続8時間の妥当性について
- 別紙3. 1. 1. h-3 イベントツリーにおけるドミナントシーケンスについて
- 別紙3. 1. 1. h-4 不確実さ解析における計算回数について

3. 1. 2 停止時PRA

- 別紙3. 1. 2. a-1 期待する影響緩和設備におけるタイライン等による他系統からのサポート系の融通について
- 別紙3. 1. 2. a-2 評価対象とした定期検査工程の代表性について
- 別紙3. 1. 2. a-3 プラント状態の分類の考え方について
- 別紙3. 1. 2. b-1 起因事象からCR引抜事象を除外している理由について
- 別紙3. 1. 2. b-2 RHR運転中のLOCAを起因事象から除外する考え方について
- 別紙3. 1. 2. b-3 RHR切替時のLOCAをPOS-B2のみで考慮している理由について
- 別紙3. 1. 2. b-4 停止時のLOCAの発生頻度算出のモデル化及び仮定条件について
- 別紙3. 1. 2. c-1 炉心損傷条件について
- 別紙3. 1. 2. c-2 燃料損傷防止の成功に必要な安全機能について
- 別紙3. 1. 2. c-3 緩和操作に必要な余裕時間等の算定根拠について
- 別紙3. 1. 2. c-4 停止時のLOCAにおける余裕時間の考え方について
- 別紙3. 1. 2. d-1 女川原子力発電所2号機 内部事象停止時レベル1PRAイベントツリー

- 別紙3. 1. 2. g-1 起因事象発生前の操作に係わる人的過誤の選定の考え方について
- 別紙3. 1. 2. g-2 人的過誤に係わる診断失敗確率の考え方について
- 別紙3. 1. 2. g-3 人的過誤に係わるストレスファクタの考え方について
- 別紙3. 1. 2. h-1 POS別の炉心損傷頻度（日当たり）について
- 別紙3. 1. 2. h-2 システム信頼性解析の結果について

3.2 外部事象

3.2.1 地震PRA

- 別紙3. 2. 1. a-1 プラントウォークダウンの対象設備の選定について
- 別紙3. 2. 1. a-2 地震PRAにおけるプラントウォークダウンの点検項目について
- 別紙3. 2. 1. a-3 フラジリティ評価における余震の考え方について
- 別紙3. 2. 1. a-4 起因事象の抽出に対する網羅性について
- 別紙3. 2. 1. a-5 制御建屋空調系喪失事象の扱いについて
- 別紙3. 2. 1. d-1 ELOCAの評価方法について
- 別紙3. 2. 1. d-2 階層イベントツリーのヘディング設定の考え方及び定量化について
- 別紙3. 2. 1. d-3 使命時間に関する感度解析について
- 別紙3. 2. 1. d-4 炉心損傷頻度の計算に用いた計算コードの特徴（検証結果）

本日ご提出範囲

3.2.2 津波PRA

- 別紙3. 2. 2. a-1 引き波による取水位の低下に伴う非常用海水ポンプの取水性について
- 別紙3. 2. 2. a-2 事故シナリオの分析において引き波を除外する考え方について
- 別紙3. 2. 2. a-3 津波発生時における原子炉停止の手順について
- 別紙3. 2. 2. b-1 確率論的津波ハザード評価に関する検討
- 別紙3. 2. 2. c-1 津波PRAにおける漂流物の取り扱いについて
- 別紙3. 2. 2. c-2 防潮堤の耐力について
- 別紙3. 2. 2. d-1 津波による敷地浸水解析について
- 別紙3. 2. 2. d-2 津波高さが0. P. 33. 9mを超過した場合の事故シナリオについて

4. レベル1. 5PRA

4.1 内部事象PRA

4.1.1 出力運転時PRA

- 別紙4. 1. 1. b-1 TBPシーケンス, S1EおよびS2Eシーケンスの原子炉圧力挙動

- について
- 別紙4.1.1.b-2 炉心損傷時期を分類する基準について
- 別紙4.1.1.c-1 評価から除外したPCV破損モードについて
- 別紙4.1.1.d-1 女川原子力発電所2号機内部事象運転時レベル1.5PRAイベントツリー
- 別紙4.1.1.e-1 格納容器破損限界への福島第一原子力発電所における知見の整理について
- 別紙4.1.1.e-2 事故進展解析における炉心溶融・炉心支持板破損・原子炉圧力容器破損の判断基準について
- 別紙4.1.1.e-3 炉心注水によるRPV破損回避の不確かさについて
- 別紙4.1.1.e-4 LOCA時に破断口から流出した冷却材の流入先
- 別紙4.1.1.f-1 格納容器破損モードにおける物理化学現象の詳細について
- 別紙4.1.1.f-2 炉外FCIにおけるペDESTALフラジリティの作成方法について
- 別紙4.1.1.f-3 炉外FCIにおける [] との因果関係作成方法について
- 別紙4.1.1.f-4 DCHによる格納容器フラジリティ評価における温度負荷の扱いについて
- 別紙4.1.1.f-5 PCV隔離の分岐確率の妥当性と格納容器隔離失敗事象への対応

[] 枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

3.2.2 津波PRA

外部事象津波レベル 1PRA は、一般社団法人日本原子力学会発行の「原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2011」（以下、「津波 PRA 学会標準」という。）を参考に評価を実施し、各実施項目については「PRA の説明における参照事項」（原子力規制庁 平成 25 年 9 月）の記載事項への適合性を確認した。評価フローを第 3.2.2-1 図に示す。なお、本評価では津波単独の影響のみを評価しており、地震に伴う津波（重畳事象）等は対象としていない。

3.2.2.a 対象プラントと事故シナリオ

① 対象とするプラントの説明

(1) 機器・システムの配置及び形状・設備容量

津波 PRA の実施にあたり収集した情報及び情報源を第 3.2.2.a-1 表に示す。内部事象出力運転時レベル 1PRA（以下、「内部事象 PRA」という。）において収集した情報の他、配置関連設計図書等により情報を収集・整理した。

収集したサイト・プラント情報に基づき、津波 PRA の評価対象設備として、内部事象 PRA の評価対象とした設備の他、防潮堤、防潮壁等の止水対策を選定した。プラントの設備配置の概略図を第 3.2.2.a-1 図に示す。また、津波防護施設の概要を以下に示す。

- ・基準津波による遡上波が設計基準対象施設に到達及び流入することを防止するために、防潮堤（O.P. 約 29m¹）を設置。
- ・海と接続する取水路等からの建屋への流入を防止するために防潮壁を設置。
- ・建屋への浸水の可能性がある経路、浸水口（扉、開口部及び貫通孔等）に対して、水密扉の設置、貫通部の止水処理等の浸水対策を実施。

(2) ウォークダウン実施の有無とウォークダウンの結果

a. プラントウォークダウンの実施手順

本津波 PRA では第 3.2.2.a-1 表に示したプラント設計図書等の情報を基にシナリオを想定しているが、机上検討では確認が難しいプラント情報の取得及び検討したシナリオの妥当性確認をするために、以下の観点でプラントウォークダウン実施要領書及びチェックシートを作成し、プラントウォークダウンを行った。

- ・津波影響の確認
- ・間接的被害の可能性の確認
- ・津波伝播経路及び建屋開口部（貫通部）

b. プラントウォークダウン対象機器の選定

¹ 防潮堤の高さは平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動による影響を考慮した値とした。

プラントウォークダウン対象機器の選定フローを第 3.2.2. a-2 図に示す。津波 PRA で考慮する建屋・機器のうち、屋内に設置された機器の配置及び建屋に浸水した津波の伝搬経路は内部溢水評価のプラントウォークダウンで調査されているため、本プラントウォークダウンでは建屋・機器リストに記載されている機器のうち屋外に設置されている機器を調査対象とした。

また、建屋内の重要設備を津波の影響から防護するために地上の建屋外壁部及び地下トレンチ取合部は建屋バウンダリとしての機能が要求されることから、重要設備が設置される原子炉建屋及び制御建屋に存在する外壁開口部及び建屋間、地下部を調査対象とした。

さらに、間接的な被害として、津波来襲時に建屋外部にある設備の津波による離脱、移動等に起因して生じる干渉及び衝突等の可能性を確認するため、漂流物となる可能性のある屋外機器・設備についても調査対象とした。第 3.2.2. a-2 図のフローに基づき選定した結果、プラントウォークダウンの対象として以下の機器及び建屋開口部が選定された。

- ・後述する津波 PRA 用の建屋・機器リストに記載の機器のうち、屋外に設置される機器
- ・原子炉建屋及び制御建屋外壁開口部（建屋間及び地下部も含む）
- ・漂流物となる可能性のある屋外機器・設備

c. プラントウォークダウン結果

プラントウォークダウン用チェックシートに基づき対象機器をチェックした。チェックシートの例を第 3.2.2. a-3 図に示す。プラントウォークダウンの結果、第 3.2.2. a-2 表に示すように津波 PRA 上問題となる箇所は特に見当たらなかった。

② 津波により炉心損傷に至る事故シナリオと分析

評価においては、以下を前提条件とした。

- ・地震発生前は出力運転状態とする。
- ・地震によって安全上重要な建屋、系統（システム）、機器の機能喪失につながる損傷はない、即ち、地震によるプラントへの直接的影響は無いものとする。
- ・地震後に津波が襲来するものとする。
- ・各建屋地下開口部における止水対策は健全であり、当該部からの浸水は無いものとする。
- ・建屋外壁扉は誤開放しているものとし、建屋内の止水対策は考慮しない。したがって、津波が建屋の敷地レベルから建屋外壁扉の下端レベルの高さ（以下、「カーブ高さ」という。）を越え、建屋内に流入した場合は、建屋の同一フロア及び下階全体が同時に浸水するものとする。
- ・機器の設置高さまで浸水することにより、当該機器が機能喪失するものとする。

- ・全交流動力電源喪失の発生防止を目的とした補機ポンプエリアの浸水防止壁について、その機能に期待するものとする。

(1) 事故シナリオの概括的な分析・選定

a. 機器の損傷・機能喪失原因となる津波の影響

津波 PRA 学会標準では、事故シナリオを広範に分析・抽出する際に考慮すべき影響として以下に示す直接的影響及び間接的影響が挙げられている。

(a) 直接的影響

- ・浸水による設備の没水，被水
- ・津波波力，流体力，浮力
- ・海底砂移動
- ・引き波による水位低下

(b) 間接的影響

- ・洗掘
- ・漂流物の衝突
- ・津波による高ストレス
- ・作業環境の悪化

本評価では、収集したサイト・プラント情報から上記の影響を受ける設備を具体化し、その設備が損傷した際のプラントへの影響を考慮して事故シナリオを抽出した。この結果を第 3.2.2. a-3 表に示す。

抽出した事故シナリオについて、炉心損傷に繋がる可能性を定性的に判断して以下 3 つの事故シナリオを除外した。

1) 海底砂移動の影響

津波による海底砂移動の影響の定量的な評価は、現時点では評価技術が十分ではないため、津波 PRA 学会標準の記載²に従い対象外とした。

なお、基準津波による影響評価の結果、2号取水口前面における砂の堆積は最大でも 0.3m 程度、堆積後の地盤高さは O.P. 約-7.9m（基準津波による地殻変動量を考慮した値）であり、2号取水口下端の高さ O.P. 約-7.1m（基準津波による地殻変動量を考慮した値）に対して十分余裕があることから、砂の堆積が取水口及び取水路の通水性に与える影響は小さいと考えられる。

2) 引き波による水位低下の影響

「引き波による水位低下」では、海水の潮位が低下して、海水ポンプの取水障害が発生して、キャビテーションでポンプが機能喪失することとなり、対象となる機器は海水ポンプ及び循環水ポンプのみである。これは押し波が

² 「炉心損傷に至るまでの事象進展が不明確、あるいは評価技術が十分でない判断される事故シナリオについては、定性的なスクリーニングに比重をおいて判断せざるを得ないことに留意する。スクリーニングで除外されない事故シナリオを、事故シークエンス評価の対象とするか、または、留意事項として報告書等に記載する等、評価技術の成熟度を考慮した取扱いとする。」（津波 PRA 学会標準 6.2 項より抜粋）

発生した場合に海水ポンプ又は循環水ポンプが浸水により損傷するシナリオと同じであり、その後の炉心損傷に至るプロセスも同じとなる。したがって、炉心損傷頻度の定量化は変化するものの、新たな事故シーケンスを発生させるものではないため、対象外とする。

なお、本プラントにおいては、引き波により貯留堰が露出し、取水不能となっても、RSW ポンプの取水に必要な海水を取水口、取水路及び海水ポンプ室に確保可能な構造としている。また、ポンプがキャビテーションで機能喪失する前にポンプ停止、潮位回復後に再起動することが可能であるため、事象発生後のシナリオは押し波によりポンプが損傷した場合に比べ、炉心損傷に至る可能性は小さいと考えられる（別紙 3.2.2.a-1, 別紙 3.2.2.a-2, 別紙 3.2.2.a-3）。

3) 作業環境の悪化

事象発生後の作業環境悪化を考慮しなければならない設備（可搬式設備等）には期待していないため、対象外とした。

b. 起回事象の選定

津波により誘発される起回事象を選定するため、抽出した事故シナリオを分析した（第 3.2.2.a-4 図）。この結果、スクリーニングで除外されずに残った事故シナリオに含まれる起回事象として、「外部電源喪失」、「原子炉補機冷却海水系機能喪失」及び「敷地及び建屋内浸水」の 3 事象を選定された。更に、これら起回事象と内部事象 PRA でグループ化した起回事象の関係を整理し、「敷地及び建屋内浸水」が津波特有の起回事象として分類されることを確認した（第 3.2.2.a-4 表）。各起回事象の説明を以下に示す。

(a) 外部電源喪失

津波の敷地内浸水により起動変圧器等が没水し、外部電源喪失が発生する。敷地内浸水又はタービン建屋内への浸水による他の過渡事象の発生も予想されるが、外部電源喪失は他の過渡事象と比較すると広範囲な緩和系の機能喪失となるため、他の過渡事象を代表する起回事象として選定した。

(b) 原子炉補機冷却海水系機能喪失

敷地内に浸水した津波が補機ポンプエリアの浸水防止壁を越えることで、RSW/HPSW ポンプが没水して原子炉補機冷却海水系が機能喪失する。

(c) 敷地及び建屋内浸水

敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への浸水が発生し、炉心損傷に係る何らかの外乱が発生する。

c. 建屋・機器リストの作成

津波 PRA の評価対象設備を明確にするため、起回事象を引き起こす設備、津波防護施設／浸水防止設備及び起回事象を緩和する設備を選定して建屋・機器リストを作成した（第 3.2.2.a-5 表）。

3.2.2.b 確率論的津波ハザード

① 確率論的津波ハザード評価方針

津波 PRA 学会標準，公益社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会「原子力発電所の津波評価技術 2016」，社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価部会「確率論的津波ハザード解析の方法 (2011)」及び 2011 年東北地方太平洋沖地震から得られた知見等を踏まえて，確率論的津波ハザード解析を実施した。

津波ハザード評価における検討対象領域を第 3.2.2.b-1 図に，ハザード曲線への寄与度が大きい津波地震及び海洋プレート内正断層型地震の発生モデルに関するロジックツリーを第 3.2.2.b-2 図に示す。(別紙 3.2.2.b-1)

② 津波発生領域の設定

津波発生領域は，2011 年東北地方太平洋沖地震から得られた知見等を踏まえ，津波 PRA 学会標準に示される領域に加え，プレート間地震と津波地震の連動型地震を考慮した。

なお，地震以外に起因する津波については，敷地周辺に地すべり地形や火山等が無く，地震に起因する津波と比較して，発電所に与える影響は極めて小さいと考えられることから，検討対象外とした。

③ 確率論的津波ハザード評価結果

本評価で使用する敷地前面における津波ハザード曲線を第 3.2.2.b-3 図に示す。敷地前面における最高水位に地盤沈下量を考慮した相対的な津波水位 O.P. 23.8m の 1 年あたりの超過確率は 10^{-4} ~ 10^{-5} 程度である。

3.2.2.c 建屋・機器のフラジリティ

① 評価対象と損傷モードの決定

3.2.2.a.②(1)c. で作成した建屋・機器リストに記載の設備に対して津波損傷モードを検討し，建屋・機器のフラジリティを評価した(第 3.2.2.c-1 表)。ただし，スクリーニングで除外した海底砂移動及び引き波の影響はフラジリティ評価の対象外とした(別紙 3.2.2.c-1)。

② フラジリティの検討結果について

フラジリティ検討結果の概要を以下に示す。没水及び波力に対する機器のフラジリティ曲線は，第 3.2.2.c-1 図に示すようにステップ状となる。

- (1) 起動変圧器は敷地内浸水深が起動変圧器の基礎高さを越えた場合に機能喪失する。
- (2) RSW/HPSW ポンプは敷地内浸水深が補機ポンプエリアの浸水防止壁の高さを越えた場合に機能喪失する。

- (3) 燃料移送ポンプは地下化し、水密構造であるため、敷地内浸水深がその止水性能を越える高さの場合に機能喪失する。
- (4) 建屋内の起因事象を緩和する設備は、建屋内浸水に伴う没水により機能喪失する。

3.2.2.d 事故シーケンス

① 起因事象

(1) 津波高さ毎のシナリオ分類

津波高さに応じたプラントへの影響を識別するため、津波高さと敷地内浸水深の関係及び建屋・機器フラジリティを考慮し、プラントへの影響が同等となる津波高さを分類した。第 3.2.2.d-1 表に津波分類を示すとともに、以下に各分類の特徴を示す。

なお、津波高さ 0.P. 29m 以下では 2 号炉主要建屋周辺への浸水が発生せず津波によるプラントへの影響がないため、津波を起因として炉心損傷に至る事故シーケンスはない。このため、津波高さ 0.P. 29m 以下の事故シーケンス評価は内部事象 PRA に包絡されるものとした。(別紙 3.2.2.d-1)

(a) 津波分類 A (津波高さ 0.P. 29m～33.9m)

津波高さ 0.P. 29m を超えた場合、敷地内浸水が開始する。起動変圧器、RSW/HPSW ポンプ及び燃料移送ポンプは敷地内浸水の影響を受けないが、タービン建屋内への浸水によって種々の過渡事象が発生することから、広範囲な緩和系の機能喪失となる過渡事象を代表する事象である「外部電源喪失」が発生するものとする。原子炉建屋及び制御建屋内への浸水はないため、緩和設備は健全である。

(b) 津波分類 B (津波高さ 0.P. 33.9m～)

敷地内浸水深が原子炉建屋又は制御建屋のカーブ高さを越えて、建屋内への大量浸水が発生することから、複数の緩和設備が機能喪失して炉心損傷に至る。(別紙 3.2.2.d-2)

② 起因事象発生頻度

(1) 評価対象とした起因事象の発生頻度

津波分類 A (0.P. 29m～33.9m) では、タービン建屋内への浸水により外部電源喪失が発生する。また、津波分類 B (0.P. 33.9m～) では、原子炉建屋又は制御建屋のカーブ高さを越えて、建屋内への大量浸水が発生し、敷地及び建屋内浸水が発生する。これらの発生頻度は各分類の津波発生頻度に等しく、次表のとおりである。

津波分類	津波高さ	津波発生頻度 (/年)
A	O. P. 29m～33. 9m	$3. 8 \times 10^{-6}$
B	O. P. 33. 9m～	$7. 3 \times 10^{-7}$

(2) 階層イベントツリーとその説明

津波分類 A (O. P. 29m～33. 9m) は、外部電源喪失が発生するが緩和設備は全て健全であるため、地震による外部電源喪失と緩和設備のランダム故障の組合せによる炉心損傷シーケンスと同等であることから、地震 PRA に包含される。また、津波分類 B (O. P. 33. 9m～) では、敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水が発生する起因事象のみを想定したため、起因事象階層化は必要ない。

② 成功基準

(1) 成功基準の一覧

本評価で考慮している設備の範囲（設計基準対象施設（操作も含む）は考慮するが、AM 要請以前から整備している AM 策には期待しない）では、津波によって発生する「敷地及び建屋内浸水」を緩和させる有効な緩和設備がなくイベントツリーを展開できないため、緩和設備の機能及び系統数に関する成功基準は設定していない。

③ 事故シーケンス

(1) イベントツリー

本評価で用いたイベントツリーを第 3. 2. 2. d-1 図に示す。津波高さ O. P. 33. 9m 以下では、起因事象を引き起こす設備、津波防護施設/浸水防止設備及び起因事象を緩和する設備に影響はないことから、本評価では、原子炉建屋、制御建屋及びタービン建屋への浸水状態を考慮してイベントツリーを作成し、敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への浸水が発生した場合は複数の緩和機能が喪失し、炉心損傷に至ると想定した。

④ システム信頼性

本評価では起因事象「敷地及び建屋内浸水」の緩和は期待しないため、注水や除熱に係る緩和設備のシステム信頼性評価は実施していない。

⑤ 人的過誤

津波発生後の高ストレスによる人的過誤が考えられるが、本評価では起因事象「敷地及び建屋内浸水」の緩和は期待しないため、人的過誤を考慮していない。

⑥ 炉心損傷頻度

(1) 炉心損傷頻度の算出に用いた方法

第3.2.2.d-1図のイベントツリーを用いて、炉心損傷頻度を評価した。

津波分類A (O.P. 29m～33.9m) は、外部電源喪失が発生するが緩和設備は全て健全であるため、地震による外部電源喪失と緩和設備のランダム故障の組合せによる炉心損傷シーケンスと同等であり、地震PRAに包含されることから、津波PRAの評価対象外とした。津波分類B (O.P. 33.9m～) は緩和設備に期待できないため、必ず炉心損傷に至ることから、発生頻度がそのまま炉心損傷頻度になる

津波PRAで想定したシーケンスグループ一覧を第3.2.2.d-2表に示す。起こり得るシーケンスについて、以下にその考え方を示す。

a. 複数の緩和機能喪失

防潮堤を越える津波による浸水が、原子炉建屋又は制御建屋のカーブ高さを越えた場合、建屋内に浸水し炉心損傷に至る可能性があることから、事故シーケンスグループとして分類した。(複数の緩和機能喪失)

(2) 炉心損傷頻度結果

a. 評価結果及び事故シナリオの説明

(a) 津波高さ毎の評価結果

全炉心損傷頻度は 7.3×10^{-7} (／炉年) となった。津波高さ毎の炉心損傷頻度及び全炉心損傷頻度への寄与割合を第3.2.2.d-3表及び第3.2.2.d-2図に示す。また、起因事象毎の炉心損傷頻度を第3.2.2.d-4表に示す。津波高さ毎の評価結果及びシナリオの概要を以下に示す。

1) 津波分類 A (津波高さ O.P. 29m～33.9m)

本分類は、外部電源喪失が発生するが緩和設備は全て健全であるため、地震による外部電源喪失と緩和設備のランダム故障の組合せによる炉心損傷シーケンスと同等であり、地震 PRA に包含されることから、津波 PRA の評価対象外とした。

2) 津波分類 B (津波高さ O.P. 33.9m～)

本分類の炉心損傷頻度は 7.3×10^{-7} (／炉年) であり、全炉心損傷頻度の100%を占める。本分類では敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により、複数の緩和機能が喪失し炉心損傷に至る。

(b) 事故シーケンスグループ毎の評価結果

本津波 PRA では、津波特有のシーケンスグループとして「複数の緩和機能喪失」を考慮した。事故シーケンスグループ毎の炉心損傷頻度及び全炉心損傷頻度への寄与割合を第3.2.2.d-5表及び第3.2.2.d-3図に示す。複数の緩和機能喪失が全炉心損傷頻度の100%を占める結果となったが、これは津波分類Bの津波の場合には必ず複数の緩和機能喪失が発生することを表している。本事故シーケンスグループの概要を以下に示す。

1) 複数の緩和機能喪失(津波分類 B)

本シーケンスの炉心損傷頻度は 7.3×10^{-7} (／炉年) であり、全炉心損傷頻度の 100% を占める。津波分類 B (津波高さ 0. P. 33. 9m～) において、敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により、複数の緩和機能喪失となり炉心損傷に至る事故シーケンスである。

(c) 評価結果の分析

本津波 PRA において、全炉心損傷頻度は 7.3×10^{-7} (／炉年) となった。本評価で対象としている津波高さ (0. P. 33. 9m～) においては、津波が発生した場合には敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への浸水により最終的には炉心損傷に至るため、津波発生頻度と炉心損傷頻度は等しくなる。そのため、津波分類毎の炉心損傷頻度では、津波分類 B の炉心損傷頻度が全炉心損傷頻度の 100% を占める結果となった。

また、事故シーケンスグループ毎の炉心損傷頻度では、複数の緩和機能喪失(津波分類 B) が全炉心損傷頻度の 100% を占める結果となった。これは、津波分類 B では敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により、複数の緩和機能喪失となり炉心損傷に至る割合が占めていることを表している。

b. 重要度解析, 不確実さ解析及び感度解析

(a) 重要度解析

本津波 PRA 評価では、敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への浸水が発生する津波高さ以上 (0. P. 33. 9m～) では緩和手段が無くなり必ず炉心損傷に至るため、重要度解析を実施しても有益な結果が得られない。このため、内部事象 PRA や地震 PRA のように重要度評価は実施していない。

(b) 不確実さ解析

全炉心損傷頻度の不確実さ解析結果を第 3. 2. 2. d-4 図に示す。

本評価では、津波高さ 0. P. 33. 9m を越える津波では、敷地内浸水深が原子炉建屋又は制御建屋のカーブ高さを越えた場合に建屋内への大量浸水が発生して必ず炉心損傷に至る。したがって、全炉心損傷頻度の平均値及び不確実さ幅は 0. P. 33. 9m における確率論的津波ハザードの平均値及び不確実さ幅と等しくなる。

なお、本評価で使用している確率論的津波ハザードは、第 3. 2. 2. b-3 図及び第 3. 2. 2. d-6 表に示すように、0. P. 33. 9m の 0. 50 信頼度以下の年超過確率値が非常に小さいため、不確実さ解析結果には記載していない。

(c) 感度解析

・事故シナリオ

引き波発生後において、炉心損傷に至るシナリオとしては、以下の 2 つが考えられる。

- ① 「循環水ポンプ(A)停止失敗」 + 「循環水ポンプ(B)停止失敗」
- ② 「循環水ポンプ停止成功」 + 「安全停止失敗※」

※ECCS 等による原子炉注水，崩壊熱除去に失敗すること

①の場合，循環水ポンプが海水を吸い続けてしまうため，海水ポンプ室内の水位が急激に低下し，引き波の水位が回復する前に RSW/HPSW ポンプが露出して機能喪失する可能性がある。このため，最終ヒートシンク喪失により炉心損傷に至る。

②の場合，RSW/HPSW ポンプは露出することなく継続運転が可能であり，ECCS 等による事象緩和に期待できるが，事象緩和に失敗した場合には，炉心損傷に至る。（内部事象 PRA の過渡事象と同様）

事故シーケンスのイベントツリーを第 3.2.2. d-5 図に示す。

・評価における主な仮定

①津波発生頻度

循環水ポンプを停止する必要があるのは，少なくとも取水口敷（O.P. -6.3m）が露出し，その後も水位が低下し続けた場合であることから，保守的に津波水位が O.P. -6.2m 未満となる年超過確率（ 7.9×10^{-4} ）とした。

②循環水ポンプ停止

循環水ポンプの取水槽は，A 系/B 系に区分されていることから，循環水ポンプ A 又は循環水ポンプ B のいずれかの停止に成功した場合には，炉心損傷回避が可能である。

循環水ポンプ停止については，引き波により海水ポンプ室水位低警報が表示されてから，取水口下端までの時間が比較的短いと考えられることから，保守的に「手動停止」には期待せず，インターロックによる「自動停止」のみを考慮した。

・炉心損傷頻度評価結果

引き波による全炉心損傷頻度は，約 1.6×10^{-7} （/炉年）となり，押し波による全炉心損傷頻度（約 7.3×10^{-7} （/炉年））の約 22%であった。なお，引き波による全炉心損傷頻度のうち，事故シナリオ①については約 0.2×10^{-7} （/炉年），事故シナリオ②については約 1.4×10^{-7} （/炉年）となった。引き波では，押し波と異なり，起因事象発生後も緩和策に期待できることから，押し波に比べ炉心損傷頻度は小さい値となった。

第3.2.2.a-1表 津波レベルIPRAを実施するために収集した情報及びその主な情報源

PRAの作業	収集すべき情報	主な情報源
1. プラント構成・特性及びサイト状況の調査	<ul style="list-style-type: none"> ・PRAの実施にあたり必要とされる設計・運転管理に関する基本的な情報 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 内部事象出力運転時レベルIPRAで使った設計図書(原子炉設置許可申請書, 工事計画認可申請書, 保安規定等) (2) 全体配置図, 機器配置図, プラントワークダウン報告書 (3) 発電用原子炉設置変更許可申請書(平成25年12月)
2. 確率論的津波ハザード評価	<ul style="list-style-type: none"> ・敷地周辺に影響を与え得る津波を発生させる地震発生様式に関する情報 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 海底地形パラメータ (2) 断層パラメータ (3) 女川原子力発電所における平成23年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の調査結果に係る報告書
3. 建屋・機器フラジリティ評価	<ul style="list-style-type: none"> ・プラント固有の建屋・機器の耐力評価及び応答評価に関する情報 ・浸水解析結果 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 上記1.の情報源 (2) 浸水解析結果
4. 事故シナリオ及び起因事象の評価	a. 事故シナリオ及び起因事象の同定	(1) 上記1.の情報源
	b. 事故シナリオの分析 ・成功基準の設定 ・イベントツリーの作成	(1) 上記1.の情報源 (2) 既往のPRA情報
	c. システムのモデル化	(1) 上記1.の情報源 (2) 既往のPRA情報
	d. 事故シナリオの定量化	<ul style="list-style-type: none"> ・評価結果の妥当性を確認できる情報

第3.2.2.a-2表 プラントウォークダウン結果

No.	チェック項目 機器名称	津波影響の確認		間接的な被害の 可能性の確認	総合評価
		建屋の開口部の高さ・大 きさ、対象設備の高さな どについて、本評価で想 定したシナリオへの影 響はないか	屋外の構築物・機器につい ては、その周辺環境も含 め、潜在的に波力に対する 耐力を大きく低減させる ような問題点はないか		
1	外壁扉 (地上部)	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
2	外壁貫通孔 (地上部)	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
3	配管 (地上部)	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
4	空調ルーバ (地上部)	問題なし	—※1	問題なし	問題なし
5	外壁 (ブロックアウト)	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
6	貫通孔 (地下トレンチ取合部)	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
7	扉 (建屋間, トレンチ取合部)	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
8	燃料移送ポンプ	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
9	変圧器	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
10	防潮堤	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
11	防潮壁	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし
12	CST	問題なし	問題なし	問題なし	問題なし

※1 当該機器・設備は開口部であるため、本確認項目は対象外。

第 3.2.2.a-3 表 津波による事故シナリオの分析 (1/2)

津波 PRA 学会標準の記載*		影響を受ける可能性のある設備	考えられる事故シナリオ
津波の影響	津波 PRA 学会標準の記載*		
	影響の種類 建屋・構築物、機器・配管系への影響	起動変圧器の没水による機能喪失 燃料移送ポンプの没水による機能喪失 海水取水ポンプの没水による機能喪失 屋内設備の没水による機能喪失	起動変圧器の機能喪失により外部電源喪失が発生する。 燃料移送ポンプの機能喪失により、事故発生 8 時間以降の非常用 D/G 運転が不可能となる。 海水取水ポンプの機能喪失により、原子炉補機冷却海水系が機能喪失する。 建屋内への浸水に伴い、屋内設備が没水で機能喪失する可能性がある。
	浸水による設備の没水・被水	防潮堤の波力による損傷 防潮壁の波力による損傷	発電所敷地及び建屋内への浸水が発生し、設備の機能喪失による原子炉への外乱が発生する／発生した外乱に対する緩和設備が機能喪失する可能性がある。
直接的	津波波力・流体力・浮力	原子炉建屋（外壁扉）の波力による損傷 制御建屋（外壁扉）の波力による損傷 タービン建屋（外壁扉）の波力による損傷 建屋止水対策の波力による損傷	同上 設備の機能喪失による原子炉への外乱が発生する／発生した外乱に対する緩和設備が機能喪失する可能性がある。
	海底砂移動	海水取水設備の機能喪失	同上
	引き波による水位低下	引き波による海水取水機能障害の発生	同上
		引き波による海水取水機能障害の発生	原子炉補機冷却海水系の機能喪失、又は、循環水ポンプ等の機能喪失による過渡事象が発生する可能性がある。
		引き波による海水取水機能障害の発生	同上

※ 津波 PRA 学会標準 6.1 「事故シナリオの広範な分析・選定」より引用

第 3.2.2.a-3 表 津波による事故シナリオの分析 (2/2)

津波 PRA 学会標準の記載※		影響の種類	建屋・構築物、機器・配管系への影響	影響を受ける可能性のある設備	考えられる事故シナリオ					
津波の影響	洗掘									
間接的	洗掘	建屋・構築物、機器・配管系の構造的損傷	建屋・構築物、機器・配管系への影響	防潮堤の洗掘による損傷	発電所敷地及び建屋内への浸水が発生し、設備の機能喪失による原子炉への外乱が発生する／発生した外乱に対する緩和設備が機能喪失する可能性がある。					
				防潮壁の洗掘による損傷		発電所敷地及び建屋内への浸水が発生し、設備の機能喪失による過渡現象の発生及び、緩和設備が機能喪失する可能性がある。				
				原子炉建屋の洗掘による損傷			設備の機能喪失による過渡現象の発生及び、炉心損傷緩和設備が機能喪失する可能性がある。			
				制御建屋の洗掘による損傷				同上		
				タービン建屋の洗掘による損傷				同上		
				防潮堤の漂流物衝突による損傷				発電所敷地及び建屋内への浸水が発生し、設備の機能喪失による過渡現象の発生及び、緩和設備が機能喪失する可能性がある。		
				防潮壁の漂流物衝突による損傷					同上	
				原子炉建屋（外壁扉）の漂流物衝突による損傷					設備の機能喪失による原子炉への外乱が発生する／発生した外乱に対する緩和設備が機能喪失する可能性がある。	
				制御建屋（外壁扉）の漂流物衝突による損傷						同上
				タービン建屋（外壁扉）の漂流物衝突による損傷						同上
作業員退避時の原子炉建屋外壁扉閉め忘れ	本評価では、建屋外壁扉の誤開放を考慮しているため、本項目は該当しない。									
—		本評価では、可搬式設備等の事象発生後の作業環境悪化を考慮しなければならぬ設備には期待していないため、本項目は該当しない。								

※ 津波 PRA 学会標準 6.1 「事故シナリオの広範な分析・選定」より引用

第 3.2.2.a-4 表 津波により発生する起因事象の検討結果 (1/2)

区分	起因事象グループ	津波 PRA における検討結果	評価対象※ ○：対象 ×：対象外	
内部事象 PRA で グループ化した 起因事象	過渡事象	非隔離事象	津波により本事象の発生は考えられるが、同時に発生し、より広範囲に影響する外部電源喪失に包絡される。	(○)
		隔離事象	同上	(○)
		全給水喪失	同上	(○)
		水位低下事象	同上	(○)
	外部電源喪失	RPS 誤作動等	津波による本事象単独の発生は考えにくいため、津波特有の起因事象としては抽出しない。	×
		外部電源喪失	津波による敷地内浸水に伴い、屋外に設置された起動変圧器が没水することとで外部電源喪失が発生する。	○
		S/R 弁誤開放	津波による本事象単独の発生は考えにくいため、津波特有の起因事象としては抽出しない。	×
		小破断 LOCA	同上	×
		中破断 LOCA	同上	×
	冷却材喪失	大破断 LOCA	同上	×

※ (○)：他の起因事象グループに包絡される事象

第3.2.2.a-4表 津波により発生する起回事象の検討結果 (2/2)

区分	起回事象グループ	津波 PRA における検討結果	評価対象※ ○：対象 ×：対象外	
内部事象 PRA で グループ化した 起回事象	従属性を有する起回事象	原子炉補機冷却海水系機能喪失	敷地内に浸水した津波が補機ポンプエリアの浸水防止壁を越えることで、RSW/HPSW ポンプが没水し原子炉補機冷却海水系が機能喪失する。	○
		交流電源故障	津波による敷地内浸水に伴い外部電源喪失及び原子炉補機冷却海水系喪失が発生する。原子炉補機冷却海水系の喪失により、非常用 D/G も機能喪失するため全交流動力電源喪失となる。このため、交流電源故障は外部電源喪失及び原子炉補機冷却海水系喪失に包絡されるので、新たな起回事象としては抽出しない。	(○)
津波 PRA 特有の 起回事象	直流電源故障		津波による本事象単独の発生は考えにくいため、津波特有の起回事象としては抽出しない。	×
	タービン・サポート系故障		津波により本事象の発生は考えられるが、同時に発生するより広範囲に影響する外部電源喪失に包絡される。	(○)
	通常停止		本評価対象外	×
	ISLOCA		津波による本事象単独の発生は考えにくいため、津波特有の起回事象としては抽出しない。	×
	敷地及び建屋内浸水		敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への多量の浸水が発生し、原子炉への外乱が発生する可能性が有る。本評価では、これを津波特有の起回事象として抽出した。	○

※ (○)：他の起回事象グループに包絡される事象

第 3. 2. 2. a-5 表 建屋・機器リスト

	No.	設備名称	設置場所	設置フロア高さ (O. P.)
起因事象を引き起こす設備	1	起動変圧器	屋外	14. 0m*
	2	RSW ポンプ (補機ポンプエリア内の関連機器を含む)	補機ポンプエリア	14. 4m*
津波防護施設／浸水防止設備	3	防潮堤 (O. P. 約 29m)	屋外	—
	4	防潮壁 (スクリーンエリア, 放水立坑エリア)	屋外	—
	5	浸水防止壁 (補機ポンプエリア)	屋外	—
	6	建屋止水対策	屋外	—
	7	原子炉建屋	—	—
	8	原子炉建屋外壁扉	R/B	—
	9	制御建屋	—	—
	10	制御建屋外壁扉	C/B	—
起因事象を緩和する設備	フロントライン系			
	11	スクラム系	R/B	5. 0m
	12	HPCS	R/B	-9. 1m
	13	RCIC	R/B	-9. 1m
	14	LPCS	R/B	-9. 1m
	15	LPCI (RHR)	R/B	-9. 1m
	サポート系			
	16	CST	屋外	—
	17	直流電源系統	C/B	7. 0m
	18	燃料移送ポンプ (屋外の燃料移送系関連機器を含む)	屋外	16. 0m*
	19	非常用交流電源系統 (燃料移送ポンプを除く)	R/B	14. 0m
	20	RSW/HPSW (RSW/HPSW ポンプを除く)	R/B	-9. 1m
21	HPSW ポンプ (補機ポンプエリア内の関連機器を含む)	補機ポンプエリア	14. 4m*	
22	RCW/HPCW	R/B	-9. 1m	

*機能喪失高さを示す

第3.2.2.c-1表 建屋・機器フラジリティ評価結果(1/2)

No.	設備名称	津波損傷モード				津波フラジリティ
		没水/被水	波力	洗掘	漂流物	
起因事象を 引き起こす 設備	1	○	*1	*1	*1	津波水位 0.P.33.9m 以下では、没水しないことを確認しており、津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、没水により機能喪失すると想定した。
	2	○	*1	*1	*1	津波水位 0.P.33.9m 以下では、補機ポンプエリア内へ浸水しないことを確認しており、津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、補機ポンプエリア内へ浸水し、没水により機能喪失すると想定した。
	3	—	*2	*2	*2	津波水位 0.P.33.9m 以下では、波力等による機能喪失の可能性は小さいとして無視した。一方、津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により複数の緩和機能喪失となり炉心損傷に至るため、フラジリティは考慮しない。(別紙 3.2.2.c-2)
	4	—	*2	*2	*2	津波水位 0.P.33.9m 以下では、波力等による機能喪失の可能性は小さいとして無視した。一方、津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により複数の緩和機能喪失となり炉心損傷に至るため、フラジリティは考慮しない。
	5	—	*2	*2	*2	同上
	6	—	*2	*2	*2	同上
	7	—	*2	*2	*2	同上
	8	—	*2	*2	*2	同上
	9	—	*2	*2	*2	同上
	10	—	*2	*2	*2	同上
津波防護施設/浸水防止設備						

・「○」：当該損傷モードが設備の機能喪失要因となることを想定した。

・「—」：当該損傷モードにより設備は機能喪失しない。

・「*1」：当該損傷モードが設備の機能喪失要因となる可能性はあるが、この影響は没水/被水による機能喪失に包絡されるとした。

・「*2」：当該損傷モードが設備の機能喪失要因となる可能性はあるが、この影響は小さいとし、この影響は考えないこととした。

第3.2.2.c-1表 建屋・機器フラジリティ評価結果 (2/2)

No.	設備名称	津波損傷モード			漂流物	津波フラジリティ
		没水/被水	波力	洗掘		
フロントライン系						
11	スクラム系	○	—	—	—	津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、原子炉建屋又は制御建屋内へ浸水し、没水により機能喪失すると想定した。
12	HPCS	○	—	—	—	同上
13	RCIC	○	—	—	—	同上
14	LPCS	○	—	—	—	同上
15	LPCI (RHR)	○	—	—	—	同上
サポート系						
16	CST	—	*2	*2	*2	津波水位 0.P.33.9m 以下では、波力等による機能喪失の可能性は小さいとして無視した。一方、津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により複数の緩和機能喪失となり炉心損傷に至るため、フラジリティは考慮しない。
17	直流電源系統	○	—	—	—	津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、原子炉建屋又は制御建屋内へ浸水し、没水により機能喪失すると想定した。
18	燃料移送ポンプ	○	*1	*1	*1	津波水位 0.P.33.9m 以下では、没水しないことを確認しており、津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、没水により機能喪失すると想定した。
19	非常用交流電源系統 (燃料移送ポンプ除く)	○	—	—	—	津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、原子炉建屋又は制御建屋内へ浸水し、没水により機能喪失すると想定した。
20	RSW/HPSW (RSW/HPSW ポンプ除く)	○	—	—	—	同上
21	HPSW ポンプ	○	*1	*1	*1	津波水位 0.P.33.9m 以下では、補機ポンプエリア内へ浸水しないことを確認しており、津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、補機ポンプエリア内へ浸水し、没水により機能喪失すると想定した。
22	RCW/HPCW	○	—	—	—	津波水位 0.P.33.9m を超えた場合、原子炉建屋又は制御建屋内へ浸水し、没水により機能喪失すると想定した。

・「○」：当該損傷モードが設備の機能喪失要因となることを想定した。

・「—」：当該損傷モードにより設備は機能喪失しない。

・「*1」：当該損傷モードが設備の機能喪失要因となる可能性はあるが、この影響は没水/被水による機能喪失に包絡されるとした。

・「*2」：当該損傷モードが設備の機能喪失要因となる可能性は小さいとし、この影響は考えないこととした。

第3.2.2.d-1表 津波高さによるシナリオ分類

津波分類	津波高さ	津波により損傷する主な機器	起因事象
A	0.P.29m～33.9m	<ul style="list-style-type: none"> タービン建屋内機器 	<ul style="list-style-type: none"> 外部電源喪失
B	0.P.33.9m～	<ul style="list-style-type: none"> 敷地及び原子炉建屋又は制御屋内浸水により、複数の緩和機能喪失 	

第 3. 2. 2. d-2 表 事故シーケンスグループ

炉心損傷シーケンスの特徴		事故シーケンスグループ	本評価の対象 ○：起こり得る ×：起こり得ない	備考		
内部事象出力運転レベル PRA	LOCA 時注水機能喪失 詳細には、 ・ 大破断 LOCA 後の炉心冷却失敗 ・ 中破断 LOCA 後の炉心冷却失敗 ・ 小破断 LOCA 後の炉心冷却失敗	LOCA 後の注水失敗 AE S1E S2E	LOCA 後の注水失敗 × × ×	津波による発生は考えにくいため×とした		
	高圧・低圧注水機能喪失	TQUV	×	津波水位 O.P. 33.9m 以下では、外部電源喪失が発生するが緩和設備は全て健全であり、地震による外部電源喪失と緩和設備のランダム故障の組合せによる炉心損傷シーケンスと同等であることから、地震 PRA に包含されるため×とした		
	高圧注水・減圧機能喪失	TQUX	×			
	全交流動力電源喪失 ・ 非常用 D/G2 台・HPCS 機能喪失及びバッテリー枯渇に伴う RCIC 機能喪失 ・ バッテリーの故障により非常用 D/G2 台の起動に失敗し、HPCS も機能喪失 ・ 非常用 D/G2 台が機能喪失し、さらに HPCS 及び RCIC も機能喪失 ・ 非常用 D/G2 台が機能喪失し、さらに HPCS 及び S/R 弁再閉失敗による RCIC 機能喪失	TB 長期 TB TBD TBU TBP	× × × ×			
	崩壊熱除去機能喪失	TW	×			
	原子炉停止機能喪失	TC	×			
	格納容器バイパス (インターフェイスシステム LOCA)	ISLOCA	×		津波による発生は考えにくいため×とした	
	津波 PRA	敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への浸水により炉心損傷に至る	複数の緩和機能喪失		○	—

第3.2.2.2.d-3表 津波高さ毎の炉心損傷頻度

津波分類	津波高さ	津波発生頻度 (/年)	炉心損傷頻度 (/炉年)	寄与割合 (%)
A	0. P. 29m～33. 9m	3.8×10^{-6}	—※	—
B	0. P. 33. 9m～	7.3×10^{-7}	7.3×10^{-7}	100
全炉心損傷頻度			7.3×10^{-7}	100

※ 外部電源喪失が発生するが緩和設備は全て健全であるため、地震による外部電源喪失と緩和設備のランダム故障の組合せによる炉心損傷シナケンスと同等であることから、地震 PRA に含まれる。

第3.2.2.d-4表 起因事象毎の炉心損傷頻度

起因事象	事故シナリオ	事故シナリオ別 炉心損傷頻度 (／炉年)	起因事象別 炉心損傷頻度 (／炉年)	寄与割合 (%)
外部電源喪失	—※	—※	—※	—
敷地及び建屋内浸水	複数の緩和機能喪失	7.3×10^{-7}	7.3×10^{-7}	100
	全炉心損傷頻度		7.3×10^{-7}	100

※ 外部電源喪失が発生するが緩和設備は全て健全であるため、地震による外部電源喪失と緩和設備のランダム故障の組合せによる炉心損傷シナリオと同等であることから、地震PRAに包含される。

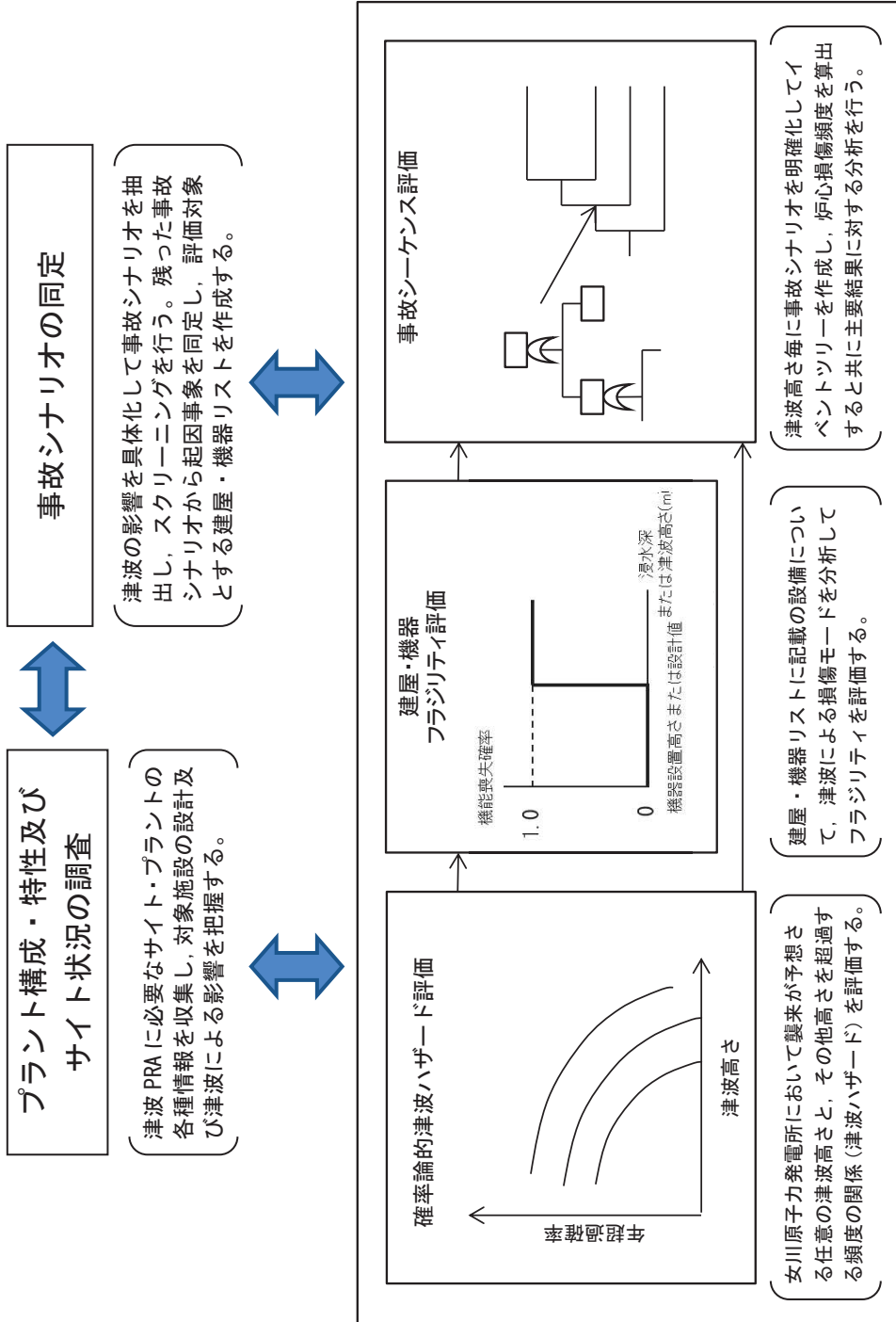
第3.2.2.d-5表 事故シナケンスグループ毎の炉心損傷頻度

津波分類	シナケンスグループ	概要	炉心損傷頻度 (/炉年)	寄与割合 (%)
B	複数の緩和機能喪失	0. P. 33. 9m を超える津波により，敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内に浸水することで，緩和設備が機能喪失し，炉心損傷に至る。	7.3×10^{-7}	100
全炉心損傷頻度				
			7.3×10^{-7}	100

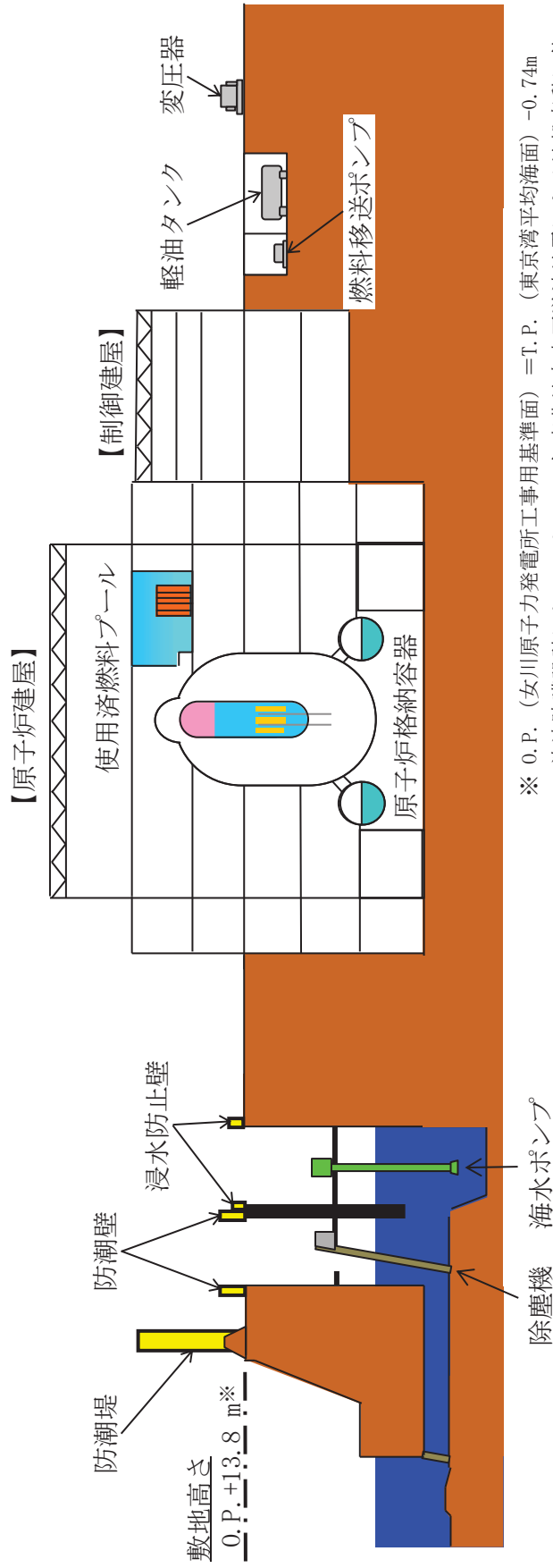
第3.2.2.d-6表 評価対象とする津波高さにおける年超過確率

津波高さ	各信頼度における年超過確率			年超過確率の 平均値	
	0.95	0.84	0.50	0.16	0.05
0. P. 33. 9m	2.51×10^{-6}	7.75×10^{-9}			7.25×10^{-7}

(※網掛け部は年超過確率値が得られていない)

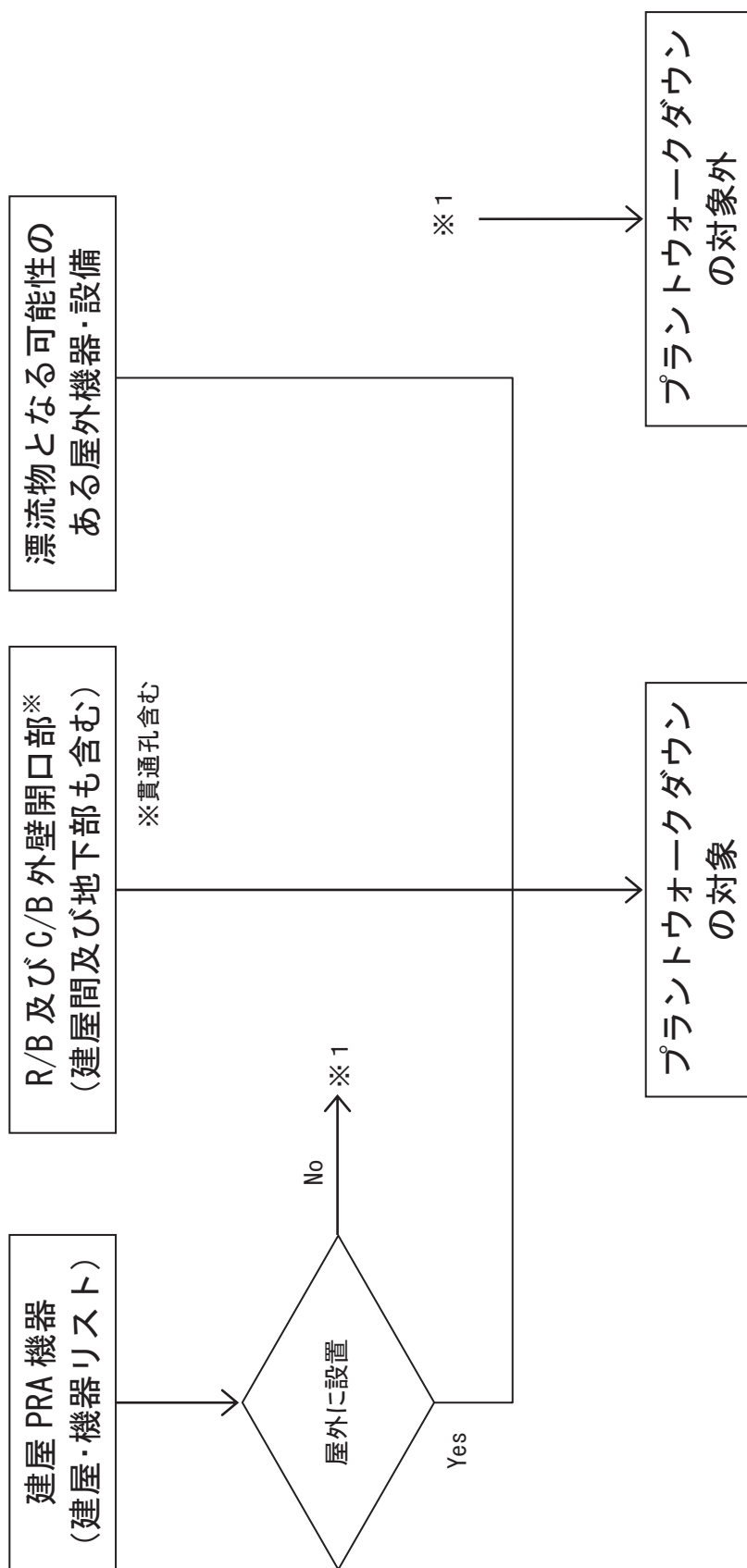


第 3.2.2-1 図 津波 PRA 評価フロー



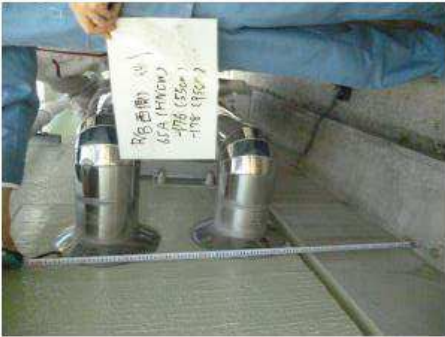
※ 0. P. (女川原子力発電所工事用基準面) = T. P. (東京湾平均海面) -0.74m
 津波防護設計においては、2011年東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、
 一様に約1mの沈降が発生したことを考慮した値を用いる。

第3.2.2.a-1 図 プラント設備配置の概略図



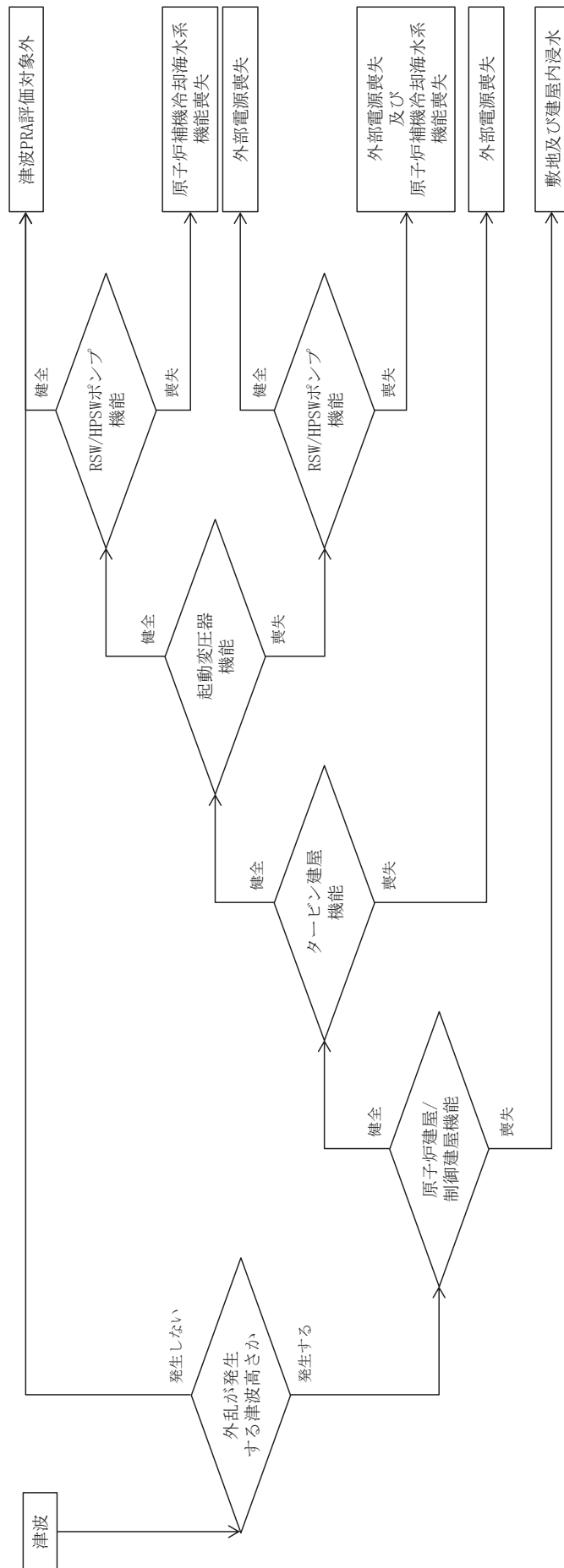
第3.2.2.a-2 図 プラントワークダウン対象機器の選定フロー

現場調査票 (調査日 2014. 4. 8)

【女川原子力発電所 2号機 原子炉建屋 地上1階】外壁貫通部		No. 4	
防護対象区画番号:			
現場写真			
壁貫通部	用途	水密化処理の有無*1	高さ*2
	配管	有・無	550 950
	ダクト	有・無	
	トレイ	有・無	
	電線管(P.B)	有・無	
考察		ストレステスト対応時に止水処理を実施済み。	
評価		A・B・C 備考	

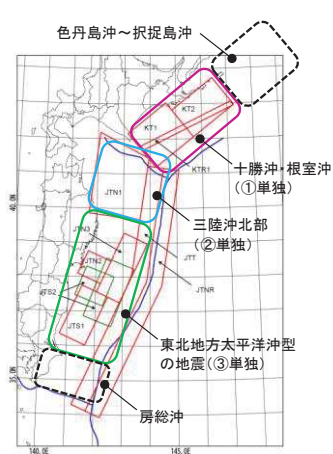
*1: 不明な場合は「無」とする。*2: 流出経路となる貫通孔の中心レベルを記載する。

第3.2.2.a-3 図 プラントウオークダウン用チェックシート (例)



注) 起因事象は、津波の影響範囲により、単独もしくはそれらの組合せで発生する。

第 3.2.2.a-4 図 起因事象の選定フロー

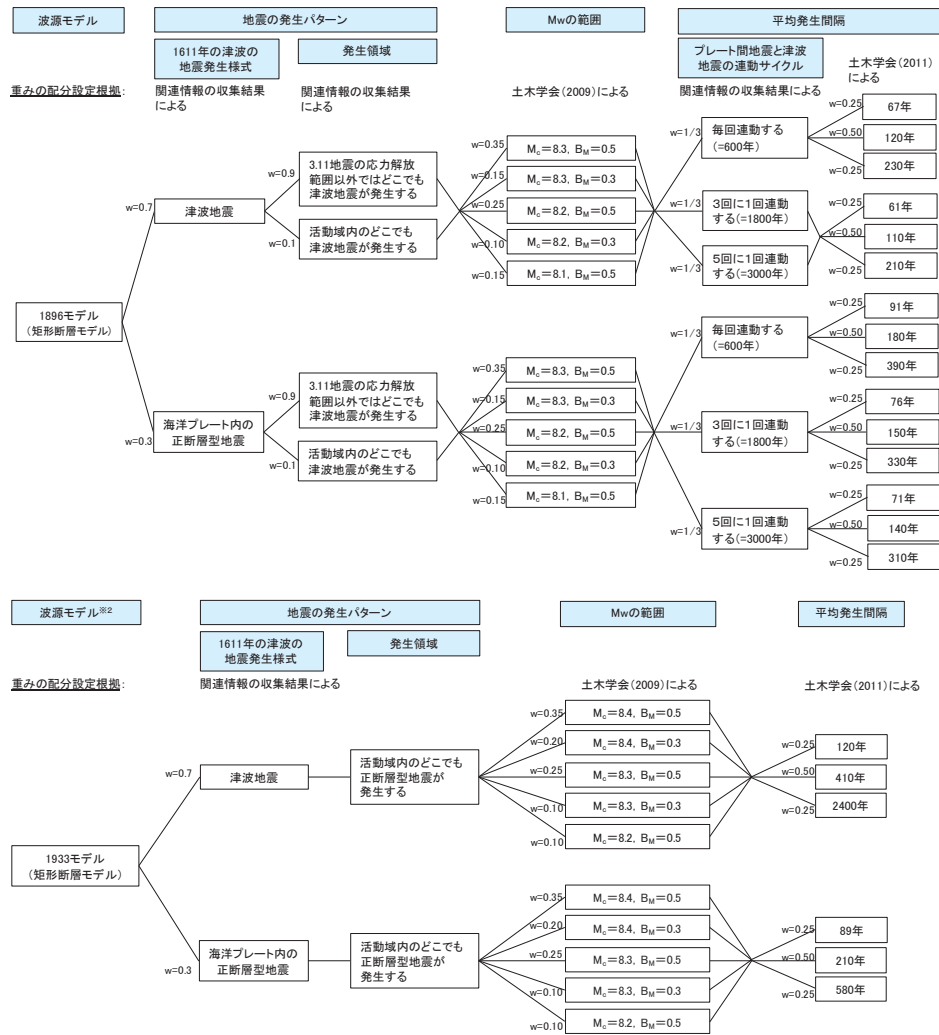


■検討対象領域
 : 検討対象とした領域
 (概略検討により、ハザード曲線に与える影響の大きい地震を抽出)

コード	名称
JTN2	宮城県沖
JTN3	三陸沖南部海溝寄り
JTN2+JTN3	宮城県沖＋三陸沖南部海溝寄り(連動)
JTS1	福島県沖プレート間
JTT	津波地震
JTNR	海洋プレート内の正断層型地震
①単独	十勝沖・根室沖の連動地震
②単独	三陸沖北部の連動地震
③単独	東北地方太平洋沖型の地震
①＋②	十勝沖・根室沖から三陸沖北部の連動地震
択捉島沖～房総沖	択捉島沖から房総沖の連動地震

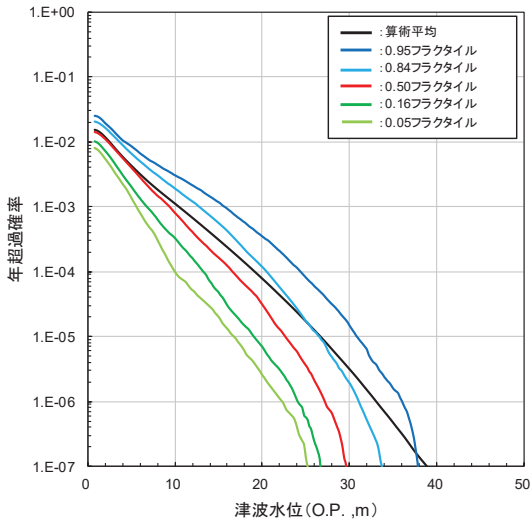
(津波 PRA 学会標準に一部加筆)

第 3.2.2. b-1 図 確率論的津波ハザード評価における検討対象領域

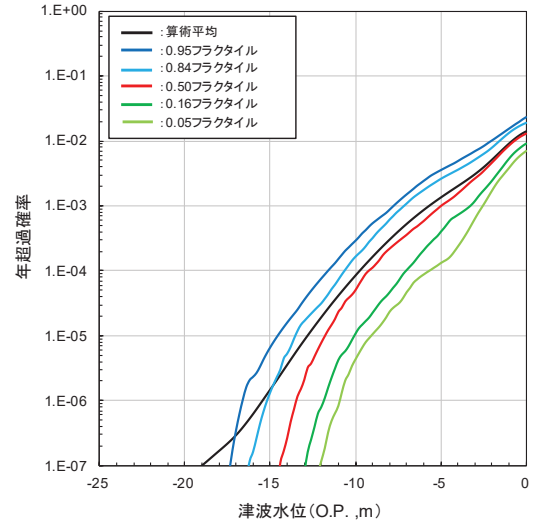


第 3.2.2. b-2 図 津波地震 (上) 及び海洋プレート内正断層型地震 (下) の津波発生モデルに関するロジックツリー

■敷地前面(水位上昇側)

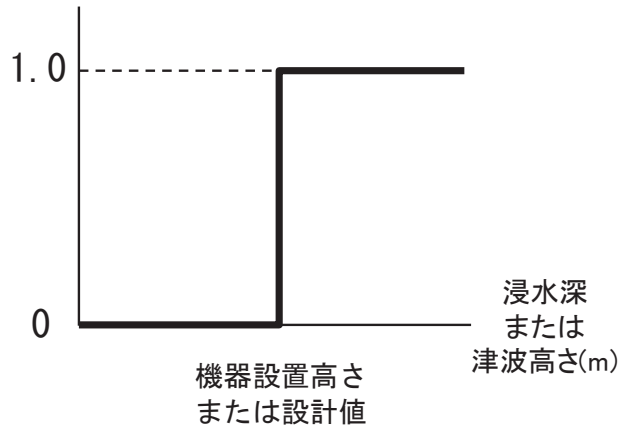


■2号取水口前面(水位下降側)



第 3. 2. 2. b-3 図 信頼度別ハザード曲線及び平均津波ハザード曲線

機能喪失確率

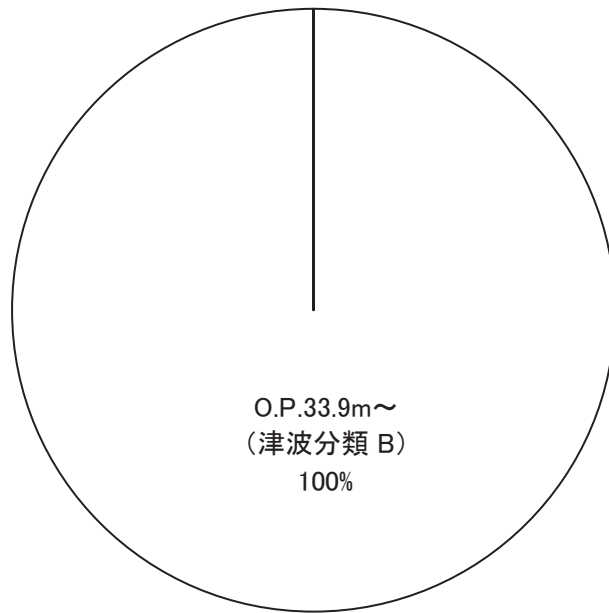


第 3. 2. 2. c-1 図 没水及び波力に対する機器のフラジリティ曲線

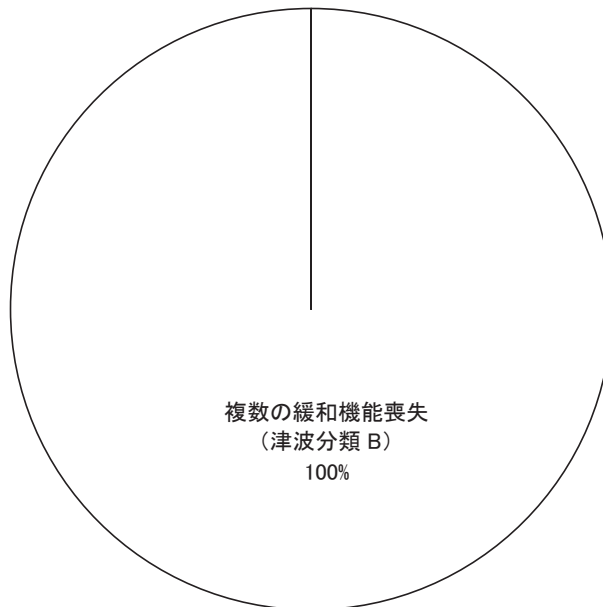
津波	原子炉建屋又は制御 建屋内への浸水 (0. P. 33. 9m～)	タービン建屋内への浸水 (0. P. 29m～0. P. 33. 9m)	発生する起因事象	事故 シナケンス グループ
	なし	なし	—	内部事象 PRAの範疇
	なし	あり	外部電源喪失	—※
	あり		敷地及び建屋内浸水	複数の緩和機能喪失

※ 外部電源喪失が発生するが緩和設備は全て健全であるため、地震による外部電源喪失と緩和設備のランダム故障の組合せによる炉心損傷シナケンスと同等であることから、地震PRAに包含される。

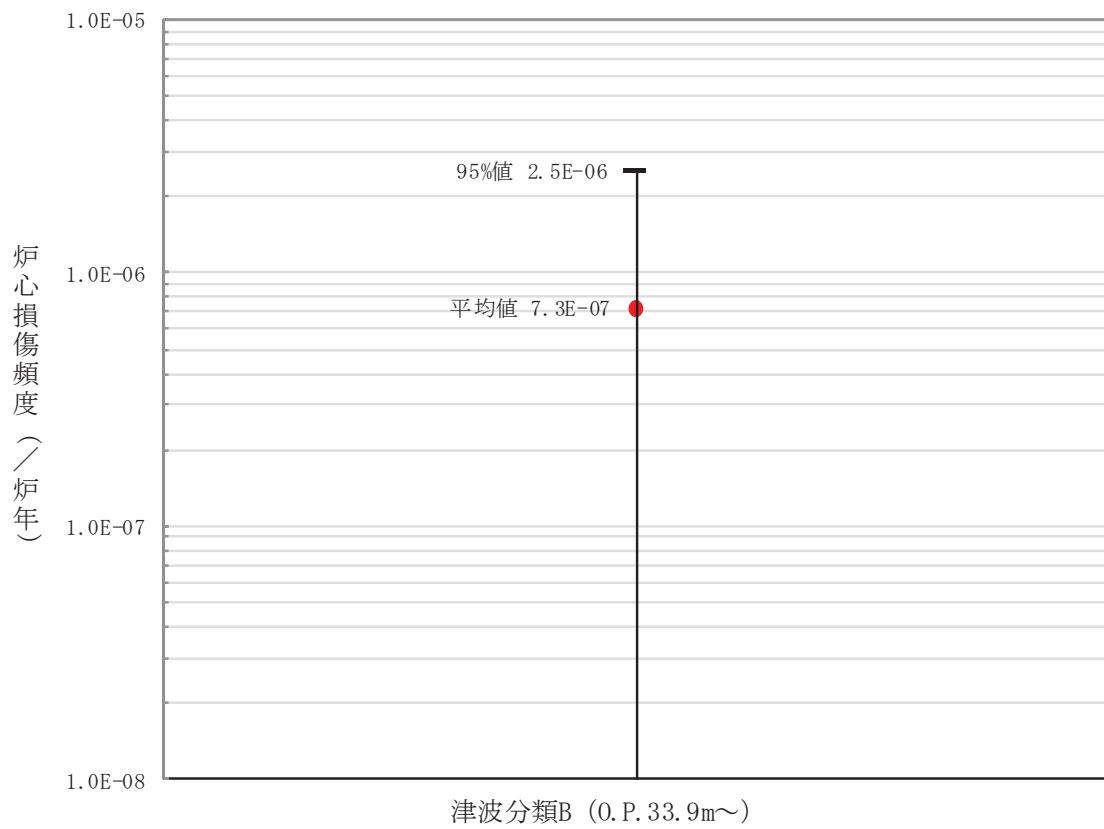
第 3. 2. 2. d-1 図 津波 PRA イベントツリー



第 3. 2. 2. d-2 図 津波高さ毎の全炉心損傷頻度への寄与割合



第 3. 2. 2. d-3 図 事故シーケンスグループ毎の全炉心損傷頻度への寄与割合



第 3. 2. 2. d-4 図 不確実さ解析結果

津波事象	循環水ポンプ停止		安全停止	損傷クラス
	循環水ポンプ(A)	循環水ポンプ(B)		
	[]	[]	[]	CD
		[]	[]	CD
	[]	[]	[]	CD
		[]	[]	CD

第3.2.2.2.d-5 図 引き波時のイベントツリー

引き波による取水位の低下に伴う非常用海水ポンプの取水性について

1. 規制基準における要求事項

非常用海水ポンプの取水性については、基準津波による水位の低下に対して、海水ポンプが機能保持できる設計であること。また、基準津波による水位の低下に対して、冷却に必要な海水が確保できる設計であることを確認する。

2. 確認内容

水位低下に対して海水ポンプが機能保持できる設計となっていることを確認する。また、引き波時の水位が実際の取水可能水位を下回る場合には、下回る時間内で海水ポンプの継続運転が可能な貯水量を十分確保できる取水路の構造仕様であることを確認する。

なお、取水槽が循環水系と非常用系で併用されていることから、循環水系運転継続等による取水量の喪失が防止できることを確認する。

3. 評価条件

(1) 取水路の構造

女川 2 号炉の取水設備の構造（概略図）を図 1 に、海水ポンプの設置位置図を図 2 に示す。

図に示すとおり、女川 2 号炉の取水口には、貯留堰を設置しており、貯留堰高さを下回る引き波が発生した場合でも、取水槽内に冷却水が貯留される構造となっている。



図1 取水設備の構造（概略図）



図2 海水ポンプの設置位置図（a部詳細）

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

別紙 3.2.2. a-1-2

(2) 津波高さと水位低下時間

基準津波は、最新の科学的・技術的知見を踏まえ、波源海域から敷地周辺までの海底地形、地質構造及び地震活動性等の地震学的見地から想定することが適切なものとして、地震による津波の他、地すべりによる津波等、地震以外の要因及びこれらの組合せによるものを複数選定し、不確かさを考慮して数値解析を実施し策定した。

基準津波による2号炉取水口前面における水位下降側の水位時刻歴波形から、貯留堰高さ O.P. -6.3m を下回る時間は、183 秒である。図3に取水口前面における基準津波到達時水位の時刻歴波形を示す。

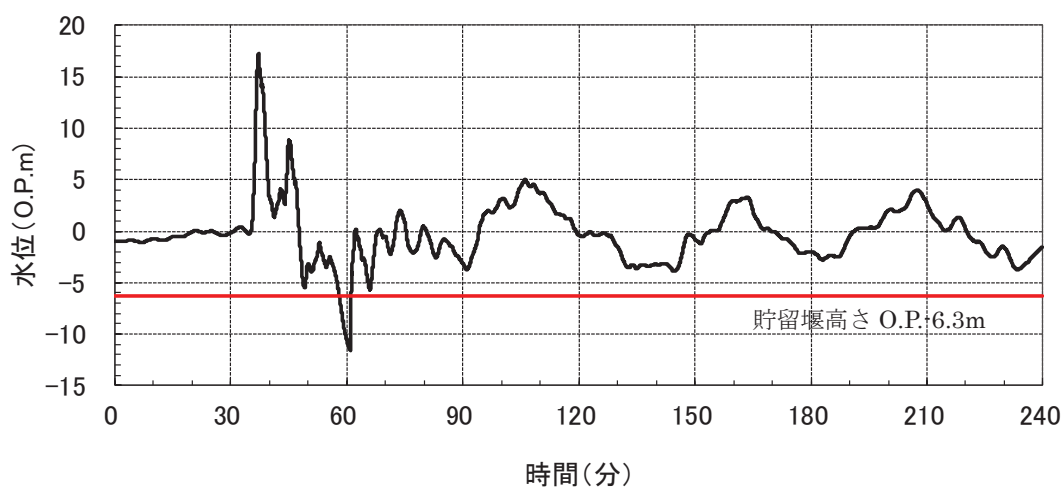


図3 取水口前面における基準津波到達時水位の時刻歴波形

(3) 海水ポンプの定格流量と取水可能水位

常用及び非常用海水ポンプの定格流量と取水可能水位を表1に、非常用海水ポンプの取水量を表2に示す。

表1 常用及び非常用海水ポンプの定格流量と取水可能水位

	区分	定格流量 (m ³ /h/台)	取水可能水位 ^{※3} (m)
原子炉補機冷却海水ポンプ	非常用	1,900	0. P. -8.95 ^{※1}
高圧炉心スプレィ補機冷却海水ポンプ	非常用	250	0. P. -8.95 ^{※1}
循環水ポンプ	常用	99,720	0. P. -5.95 ^{※2}
タービン補機冷却海水ポンプ	常用	2,250	0. P. -2.98 ^{※1}

※1：日本機械学会基準「ポンプの吸込水槽の模型試験法」(JSME S 004-1984)に基づく取水可能水位に余裕をみた値

※2：ポンプトリップインターロックによる停止レベル

※3：0. P. 表記は地盤沈下を考慮した値

表2 非常用海水ポンプの取水量

	運転台数	流 量 (m ³ /h)	必要取水量 (m ³ /h)
原子炉補機冷却海水ポンプ	2台×2系統 [※]	7,600	7,850
高圧炉心スプレィ補機冷却海水ポンプ	1台×1系統	250	

※ 非常用海水ポンプの最大運転台数を考慮

4. 評価

(1) 評価方法

貯留堰高さを下回る引き波が発生した場合、常用海水ポンプの内、タービン補機冷却海水ポンプについては、取水可能水位を下回っているため、貯留水量に影響はない。循環水ポンプについては、既にポンプトリップインターロックが動作しているが、遊転時間分（トリップからポンプ停止までの時間）、循環水ポンプ2台が定格流量で取水するものと仮定した上で、非常用海水ポンプが継続して取水可能かを評価する。

(2) 評価条件

- a. 取水槽内に貯留される水量：約 5,100m³・・・①

貯留堰高さ 0. P. -6.3m から非常用海水ポンプの取水可能水位 0. P. -8.95m までの空間容量

- b. 循環水ポンプが停止するまでに取水する水量：1,662m³・・・②

$99,720\text{m}^3/\text{h} \div 3,600 \times 30 \text{秒} \times 2 \text{台} = 1,662\text{m}^3$

- c. 非常用海水ポンプの取水に使用可能な水量：3,438m³・・・③

① - ② = 5,100m³ - 1,662m³ = 3,438m³

d. 非常用海水ポンプの取水容量：7,850m³/h・・・④

原子炉補機冷却海水ポンプ：1,900m³/h×4台=7,600m³/h

高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ：250m³/h×1台=250m³/h

e. 非常用海水ポンプ運転可能時間：約26分

③÷④=3,438m³÷7,850m³/h=0.437h ⇒ 26.2分

(3) 評価結果

非常用海水ポンプの取水量は、表2から7,850m³/hである。一方、取水槽内に貯留される冷却水のうち、非常用海水ポンプの運転に使用可能な水量は3,438m³であるため、貯留堰を下回る引き波が発生した場合でも、約26分の間、非常用海水ポンプの運転継続が可能である。

以上から、非常用海水ポンプの運転継続時間約26分に対して、基準津波時に貯留堰高さを下回る時間は4分以下であることから、基準津波による水位低下によっても非常用海水ポンプが機能保持できることを確認した。

以上

事故シナリオの分析において引き波を除外する考え方について

本プラントにおいては、引き波により取水口敷が露出し、取水不能となっても、RSWポンプの取水に必要な海水を取水口、取水路及び海水ポンプ室に確保可能な構造としている。また、循環水ポンプの手動による停止が遅れた場合においては、「循環水ポンプ海水ポンプ室水位極低」警報により、循環水ポンプが自動停止するインターロックとなっており、押し波によりポンプが損傷する場合に比べ、炉心損傷に至る可能性は小さいと考えられることから、事故シナリオの分析において引き波を除外している。

以下に、引き波が発生した場合の炉心損傷頻度の評価結果とその考え方について示す。

1. 事故シナリオ

事故シナリオについては、図1のイベントツリーに示すとおり。

引き波発生後において、炉心損傷に至るシナリオとしては、以下の2つが考えられる。

- ① 「循環水ポンプ(A)停止失敗」 + 「循環水ポンプ(B)停止失敗」
- ② 「循環水ポンプ停止成功」 + 「安全停止失敗※」

※ECCS等による原子炉注水，崩壊熱除去に失敗すること

①の場合、循環水ポンプが海水を吸い続けてしまうため、海水ポンプ室内の水位が急激に低下し、引き波の水位が回復する前にRSW/HPSWポンプが露出して機能喪失する可能性がある。このため、最終ヒートシンク喪失により炉心損傷に至る。

②の場合、RSW/HPSWポンプは露出することなく継続運転が可能であり、ECCS等による事象緩和に期待できるが、事象緩和に失敗した場合には、炉心損傷に至る。(内部事象PRAの過渡事象と同様)

2. 評価における主な仮定

(1) 津波発生頻度

循環水ポンプを停止する必要があるのは、少なくとも取水口敷(0. P. -6. 3m)が露出し、その後も水位が低下し続けた場合であることから、保守的に津波水位が0. P. -6. 2m未満となる年超過確率(7.9×10^{-4})とした。

(2) 循環水ポンプ停止

循環水ポンプの取水槽は、A系/B系に区分されていることから、循環水ポンプA又は循環水ポンプBのいずれかの停止に成功した場合には、炉心損傷回避が可能である。

循環水ポンプ停止については、引き波により海水ポンプ室水位低警報が表示されてから、取水口下端までの時間が比較的短いと考えられることから、保守的に「手動停止」には期待せず、インターロックによる「自動停止」のみを考慮した。

3. 炉心損傷頻度評価結果

引き波による全炉心損傷頻度は、約 1.6×10^{-7} (/炉年) となり、押し波による全炉心損傷頻度 (約 7.3×10^{-7} (/炉年)) に比べて小さい結果となった。なお、全炉心損傷頻度のうち、事故シナリオ①については約 0.2×10^{-7} (/炉年)、事故シナリオ②については約 1.4×10^{-7} (/炉年) となった。

4. 結論

以上の評価を含む下記の検討結果により、事故シナリオの分析において引き波を除外した。

- ・引き波による全炉心損傷頻度は、押し波による全炉心損傷頻度の 1/5 程度と小さい。
- ・引き波による全炉心損傷頻度については、確率論的津波ハザードをより精緻化することで、低下する可能性がある。
- ・引き波により炉心損傷に至るシナリオは、押し波が発生した場合に、海水ポンプが浸水により損傷するシナリオと同様であり、その後の炉心損傷に至るプロセスも同じである。

以上

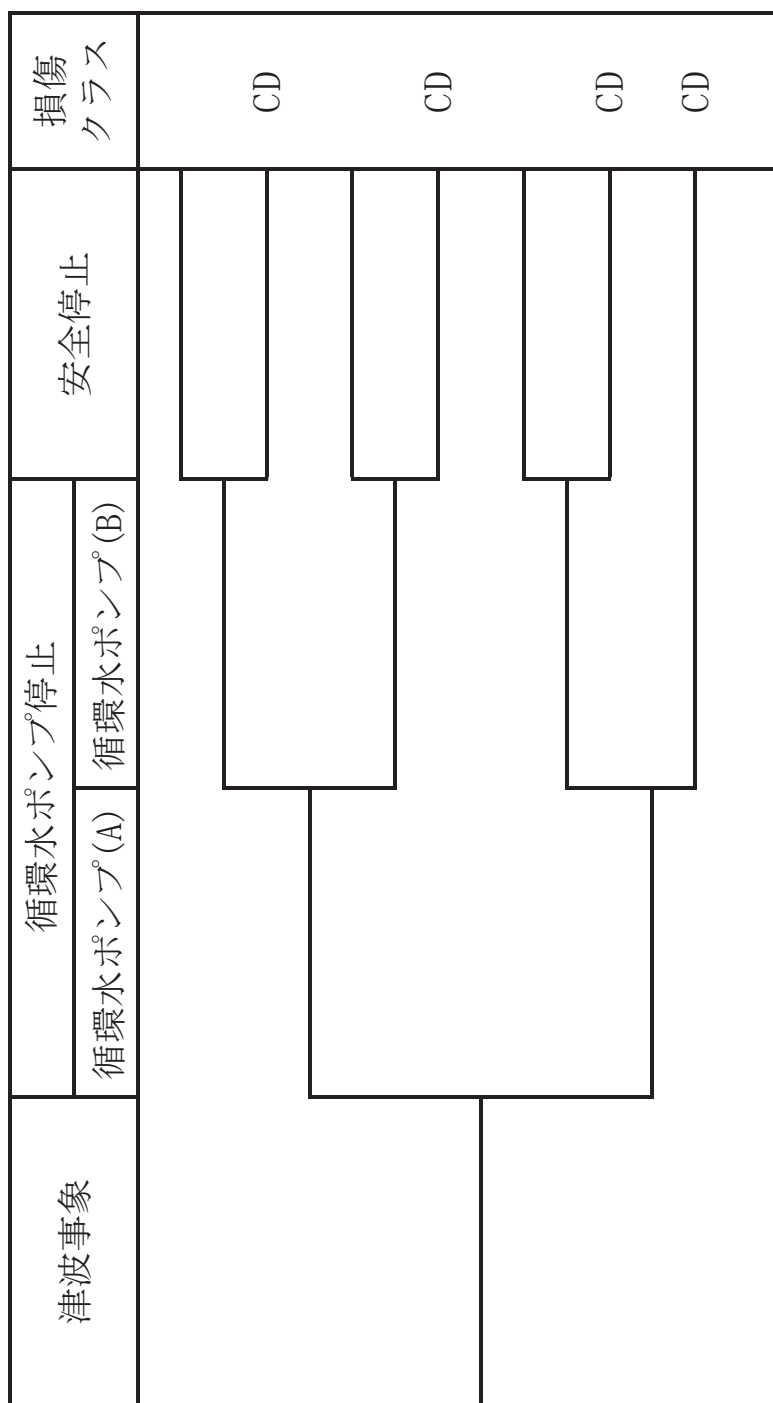


図1 引き波時のイベントツリー

津波発生時における原子炉停止の手順について

1. 大津波警報発令時の対応方針

大津波警報が発令された場合の対応として以下の対応を実施する。

- ・発電所構内に避難指示を行う。
- ・原子炉停止操作を開始する。

ただし、以下の場合は除く。

- a. 大津波警報が誤報であった場合。
- b. 発電所から遠方で発生した地震に伴う津波であって、津波が到達するまでの間に大津波警報が解除又は見直された場合。

なお、津波注意報及び、津波警報発表時は、津波に関する情報収集並びに津波監視カメラ及び取水ピット水位計による監視を行い、引き波により取水ピット水位が海水ポンプの安全運転限界水位 (0. P. m) まで低下した場合等、原子炉の運転継続に支障がある場合に、原子炉を手動停止する。

2. 引き波発生時の運転操作手順

津波発生時においては、最終ヒートシンクの確保及び ECCS の機能維持を目的に、原子炉補機冷却海水系及び高圧炉心スプレイ系補機冷却海水系の水源（以下、「非常用水源」という。）を確保する観点から、異常な潮位の低下時には、海水ポンプ室水位を監視しながら、原子炉をスクラムし循環水ポンプ全台を停止させる運転操作手順としている。

以下に手順の概要について記載する。

- ・ 海水ポンプ室水位の低下により「循環水ポンプ海水ポンプ室水位低」警報 (0. P. m) が発信した以降、海水ポンプ室水位低下が継続すれば、循環水ポンプによる海水の取水量を調整することにより海水ポンプ室水位の維持に努める。(図 1 参照)
- ・ 更に海水ポンプ室水位低下が継続し「循環水ポンプ海水ポンプ室水位低低」警報 (0. P. m) が発信すれば原子炉を手動スクラムし循環水ポンプ全台を停止する。
- ・ なお、非常用水源の確保を確実にするため、万一、循環水ポンプの手動による停止が遅れた場合においても、「循環水ポンプ海水ポンプ室水位極低」警報 (0. P. m) により循環水ポンプが自動停止するインターロックとなっている。

以上

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

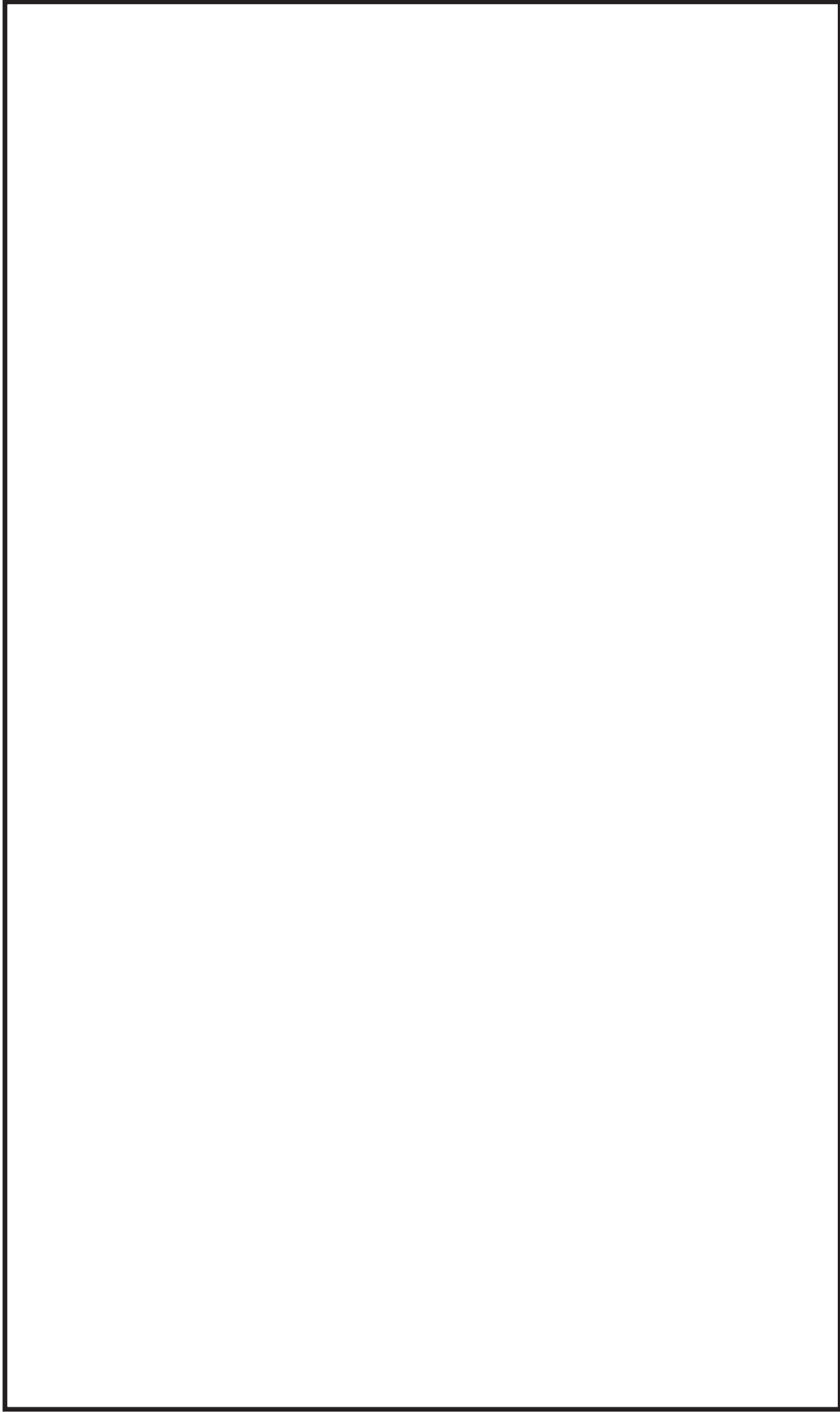


図 1 海水ポンプ室概要図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

確率論的津波ハザード評価に関する検討

1. 評価概要	p1
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)	p5
3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的な不確実さの考慮)	p29
4. 評価結果	p40

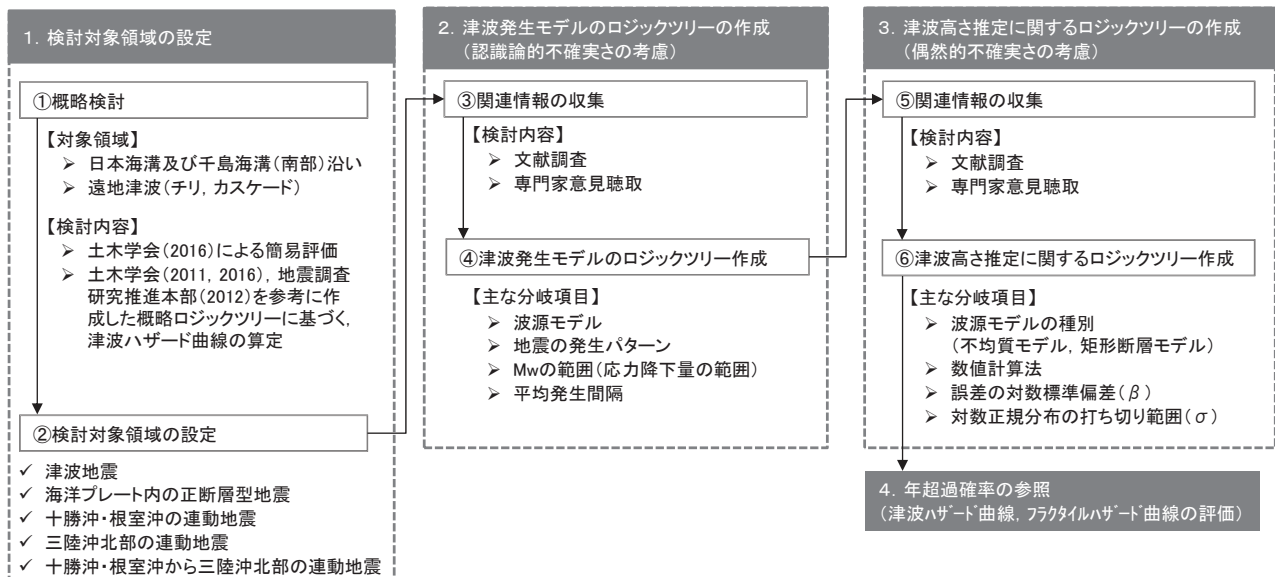
1. 評価概要

1

1.1 評価方針

確率論的津波ハザード評価は、日本原子力学会(2012)、土木学会(2011)、土木学会(2016)及び3.11地震から得られた知見等を踏まえて実施した。

- 検討対象領域(詳細検討を実施する領域)設定にあたっての概略検討(事前検討)として、各津波波源が年超過確率に与える影響を定量的に確認するため、土木学会(2011,2016)、地震調査研究推進本部(2012)を参考に概略ロジックツリーを作成し、津波ハザード曲線を算定。
- 海洋プレート内の正断層型地震の津波発生モデルのロジックツリーのうちMwの範囲について、新たに地震規模、各機関の評価事例に係る関連情報を収集するとともに、専門家意見聴取を実施し、中央マグニチュード(Mc)を1611年の津波の地震規模(Mw8.6)から1933年昭和三陸地震津波の地震規模(Mw8.4)に変更。
- 津波高さ推定に関するロジックツリーのうち一様すべりの矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差(β)等について、新たに波源特性のばらつき($\beta_{波源}$)に係る関連情報を収集するとともに、専門家意見聴取を実施し、不均質モデルと同じロジックツリーを適用できることを確認。



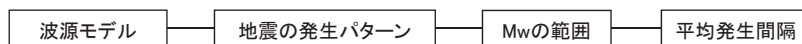
1. 評価概要

1.2 ロジックツリーの作成:概要

- ・ 認識論的不確実さは、波源モデル、地震の発生パターン、Mwの範囲及び平均発生間隔等を考慮した津波発生モデルのロジックツリーとして表現した。
- ・ 偶然的不確実さは、数値計算法、誤差の対数標準偏差(β)及び対数正規分布の打ち切り範囲(σ)を考慮した津波高さ推定に関するロジックツリーとして表現した。

■認識論的不確実さの考慮:津波発生モデルのロジックツリー

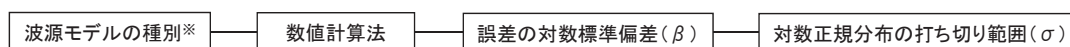
(1)各津波発生領域のロジックツリー



(2)津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

- ・ 3.11地震から得られた知見を踏まえ、これまで発生した記録、知見がない津波発生領域(セグメント)の連動を考慮した地震を評価することから、各連動地震の発生確率に関する重み付けを行うため、地震の組合せに関するロジックツリーを追加した。

■偶然的不確実さの考慮:津波高さ推定に関するロジックツリー



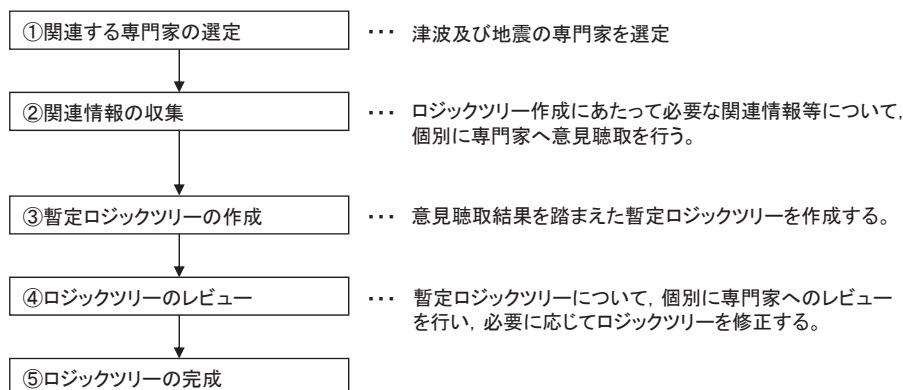
※:不均質モデル、もしくは一様すべりの矩形断層モデル(以下、「矩形断層モデル」という。)

1. 評価概要

1.2 ロジックツリーの作成:専門家活用水準

- ・ 3.11地震の発生に伴い分岐の項目、重み配分等について専門家意見が分かれることが想定されるため、日本原子力学会(2012)に示される専門家活用水準のうち専門家活用水準2を採用した。
- ・ ロジックツリーの作成フローを以下に示す。

■ロジックツリーの作成フロー



1. 評価概要

1.3 分岐の重み配分設定

- 日本原子力学会(2012), 土木学会(2011)の分岐を流用するものについては, 土木学会(2009)によるアンケート結果を踏まえた重みや, 土木学会(2011)による正規分布に対する分岐設定方法の重みを用いた。
- 新たに追加した分岐や修正した分岐の重みについては, 関連する情報を収集のうえ, 下表に示す考え方に基づき設定した。

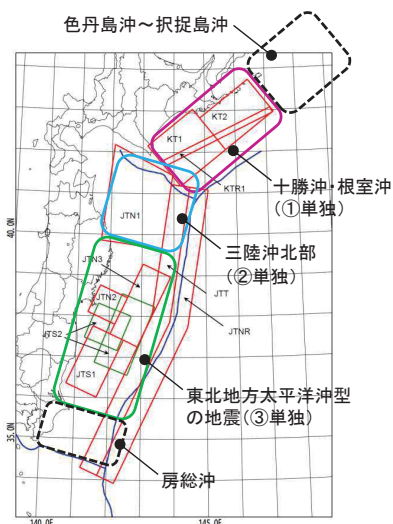
重みの配分設定方法

重みの配分 (分岐が2つの場合)	設定方法
0.5:0.5	現時点の知見で重み付けの判断が困難な場合は, 日本原子力学会(2012)に基づき, 均等配分とする。
0.3:0.7	地震調査研究推進本部, 土木学会等の評価や関連情報の収集結果から, 重みが大きいと考えられる分岐については, その重みを0.7とする。
0.1:0.9	関連情報の収集結果から, 基本的に分岐を設ける必要が無いと考えられるものの, 分岐として成立する可能性が残される分岐については, その重みを0.1とする。

2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.1 検討対象領域の設定:基本方針

- 3.11地震から得られた知見を踏まえ, 日本原子力学会(2012)に示される日本海溝及び千島海溝(南部)沿いの津波発生領域に, プレート間地震と津波地震の連動地震を追加設定した。
- 検討対象領域(詳細検討を実施する領域)は, 概略検討により各津波波源が年超過確率に与える影響を把握し, 年超過確率に与える影響が大きいと考えられる津波波源に該当する領域とした。
- 概略検討の詳細を次頁以降に示す。



日本海溝及び千島海溝(南部)沿い海域の津波発生領域区分
(日本原子力学会(2012)に一部加筆)

■検討対象領域の設定

■ : 検討対象とした領域

コード	名称	備考
JTN2	宮城県沖	概略検討:p6~8
JTN3	三陸沖南部海溝寄り	概略検討:p6~8
JTN2+JTN3	宮城県沖+三陸沖南部海溝寄り(連動)	概略検討:p6~8
JTS1	福島県沖プレート間	概略検討:p6~8
JTT	津波地震	概略検討:p6~8
JTNR	海洋プレート内の正断層型地震	
①単独	十勝沖・根室沖の連動地震	
②単独	三陸沖北部の連動地震	
③単独	東北地方太平洋沖型の地震	概略検討:p9,10
①+②	十勝沖・根室沖から三陸沖北部の連動地震	
択捉島沖～房総沖	択捉島沖から房総沖の連動地震	概略検討:p11,12

2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.1 検討対象領域の設定: 3.11地震の応力解放範囲におけるM8クラスの地震, 津波地震及び遠地津波

- 3.11地震の応力解放範囲におけるM8クラスの地震に伴う津波, 津波地震に伴う津波及び遠地津波が年超過確率に与える影響について, 土木学会(2016)を参考に検討した結果を以下に示す。
- 本検討から, 津波地震は年超過確率に与える影響は大きいと考えられる。

■土木学会(2016)

評価対象となる水位(X)の年超過確率に有意な影響を与える波源を評価対象とすればよく, 評価対象水位(X)と活動域による評価地点の最大水位上昇(下降)量(H)が, 以下の関係となる活動域は, 最終的な年超過確率に与える影響は微小であるとしている。

$$|X| > |H| \cdot \kappa^{2.3}$$

ここで, X: 評価対象となる水位(敷地高や取水可能レベル), H: 評価地点前面の最大水位上昇(下降)量, κ : 津波高さに含まれるばらつき

- Hを既往津波高, 津波高さに含まれるばらつき κ を1.4とすると, $H \times \kappa^{2.3} = H \times 1.4^{2.3} \approx 2H$ となり, 評価対象水位(X)に対し, 既往津波高(H)が約1/2以下であれば, 年超過確率に与える影響は小さいと考えられる。
- 各津波の既往津波高(H)は下表のとおりであり, 評価対象水位(X)を基準津波に伴う敷地前面における最大水位上昇量21.58mとすると, 津波地震を除いて^{※1}, 評価対象水位(X)の約1/2以下(21.58m/2=10.8m以下)である。

※1: 津波地震は日本海溝沿いのどこでも発生すると評価することから, 1896年明治三陸地震津波の波源域に正対する岩手県の既往最大津波高を採用。

種別	津波発生領域(コード)	既往津波(Mw) ^{※2}	既往津波高:H	備考(既往津波高の参考文献)
3.11地震の応力解放範囲におけるM8クラスの地震に伴う津波	宮城県沖(JTN2)	1978年(Mw7.7)	1.1m(宮城県女川町) ^{※3}	渡辺(1998)(全振幅)
	三陸沖南部海溝寄り(JTN3)	1897年(Mw7.8)	3.0m(宮城県女川町) ^{※3}	今村(1899)
	宮城県沖+三陸沖南部海溝寄り(連動)(JTN2+JTN3)	1793年(Mw8.2)	2m(宮城県女川町) ^{※3}	羽鳥(2000)
	福島県沖プレート間(JTS1)	1938年(Mw7.9)	0.55m(宮城県女川町) ^{※3}	渡辺(1998)(全振幅)
津波地震に伴う津波	三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート間地震(JTT)	1896年(Mw8.3)	3.5m(宮城県女川町) ^{※3} 26.2m(岩手県大船渡市) ^{※4}	中央気象台(1933), 伊木(1897), 松尾(1933)
遠地津波	チリ	1960年(Mw9.5)	3.3m(宮城県女川町鳴浜(敷地)) 6.1m(宮城県南三陸町) ^{※5}	チリ津波合同調査班(1961)
	カスケード	1700年(Mw9.1)	5m(岩手県大槌町) ^{※5}	Satake et al.(2003)

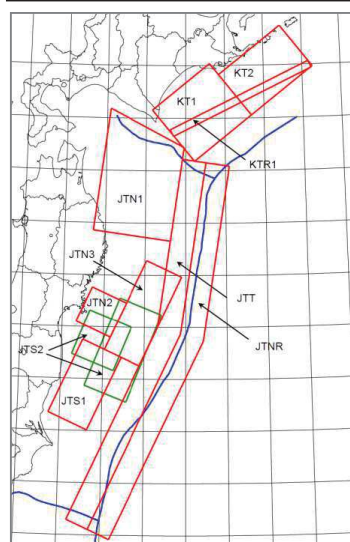
※2: 土木学会(2011)を引用, ※3: 発電所周辺における既往最大津波高, ※4: 1896年明治三陸地震津波の波源域に正対する岩手県における既往最大津波高
※5: 東日本太平洋沿岸における既往最大津波高

2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.1 検討対象領域の設定: 3.11地震の応力解放範囲におけるM8クラスの地震, 津波地震①

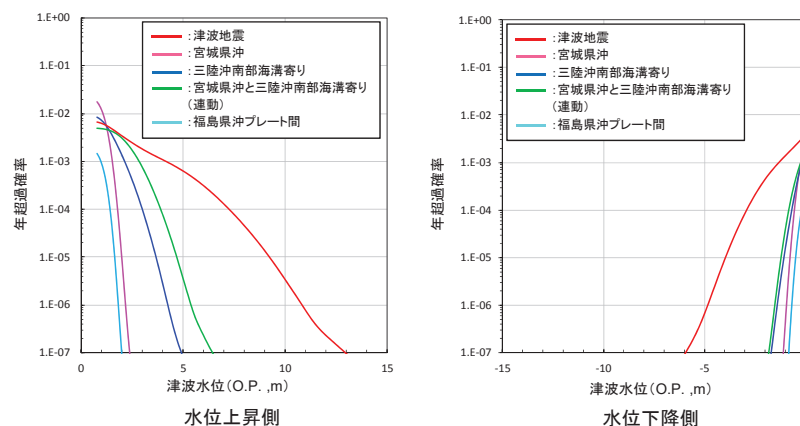
- 3.11地震の応力解放範囲におけるM8クラスの地震に伴う津波, 津波地震に伴う津波を対象に, 土木学会(2011)を参考に設定した概略ロジックツリー(詳細は次頁に示す)を用いて算定した津波ハザード曲線を以下に示す。
- 本検討から, 津波地震に伴う津波は, 3.11地震の応力解放範囲におけるM8クラスの地震に伴う津波と比較して年超過確率に与える影響は大きいことを確認した。

JTN2: 宮城県沖
JTN3: 三陸沖南部海溝寄り
JTN2+JTN3: 宮城県沖と三陸沖南部海溝寄り(連動)
JTS1: 福島県沖プレート間
JTT: 津波地震



日本海溝及び千島海溝(南部)沿い海域の津波発生領域区分(日本原子力学会(2012))

■基準津波策定位置における津波ハザード曲線の比較



2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.1 検討対象領域の設定: 3.11地震の応力解放範囲におけるM8クラスの地震, 津波地震②

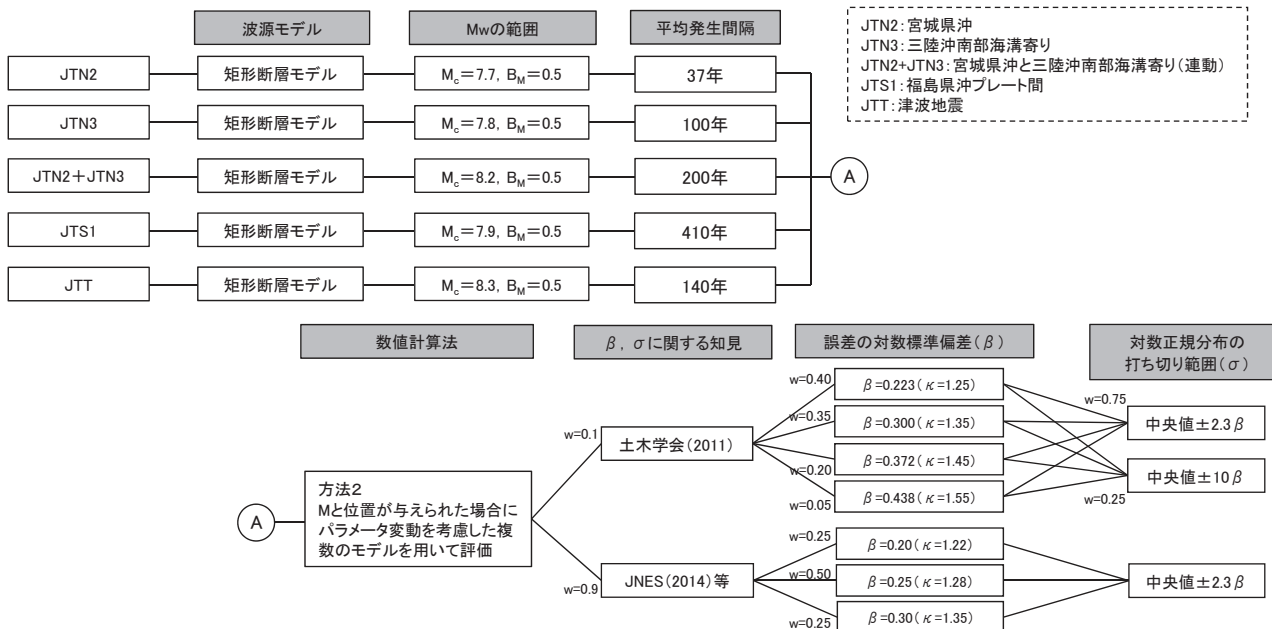
【概略ロジックツリー】

■津波発生モデルのロジックツリー

✓ 土木学会(2011)に示される各津波波源領域のロジックツリーを参考に作成した。平均発生間隔, Mwの範囲については, 各分岐のうち平均的な設定値を示す分岐を選定した。

■津波高さ推定に関するロジックツリー

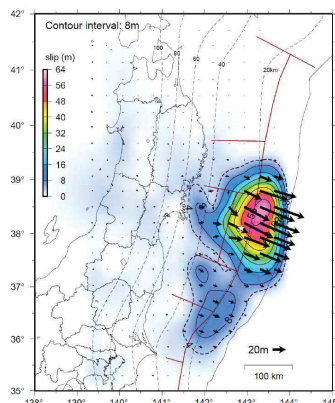
✓ 詳細検討に用いるロジックツリーと同じロジックツリーを用いた(ロジックツリーの詳細は, p29に記載)。



2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.1 検討対象領域の設定: 東北地方太平洋沖型の地震①

・ 地震調査研究推進本部(2012)では, 次の東北地方太平洋沖型の地震の発生確率について, 今後100年以内の発生確率をほぼ0%と評価している。



東北地方太平洋沖型地震の震源域 (地震調査研究推進本部(2012))

次の東北地方太平洋沖型地震の発生確率等 (地震調査研究推進本部(2012))

項目	将来の地震発生確率等 ^{注1}	備考	評価の信頼度 ^{注4}
今後10年以内の発生確率 今後20年以内の発生確率 今後30年以内の発生確率 今後40年以内の発生確率 今後50年以内の発生確率 今後100年以内の発生確率 今後300年以内の発生確率	ほぼ0% ほぼ0% ほぼ0% ほぼ0% ほぼ0% ほぼ0% 0.2%程度	津波堆積物調査で判明した過去3000年で4回の津波をもたらした地震及び2011年東北地方太平洋沖地震より, BPT分布モデルに平均発生間隔600年及び発生間隔のばらつき $\alpha = 0.24$ (データから最尤法により求めた値) を適用して算出した。	C
集積確率	ほぼ0%		
地震後経過率	0.00	経過時間0.8年を発生間隔600年で除した値。	
次の地震の規模	Mw8.4 ~ 9.0	過去に発生した地震のM, Mt, Mwを参考にし, 総合的に判断した。	C

注1 評価時点は全て2012年1月1日現在。

注4 評価の信頼度

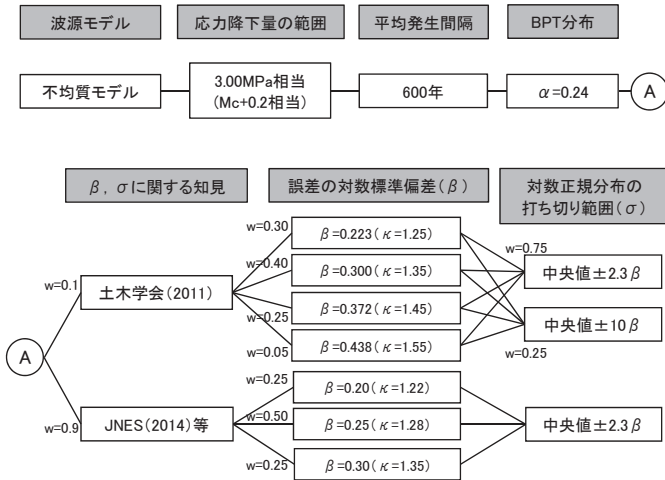
■発生確率の評価の信頼度:C

想定地震と同様な過去の地震データが少なく, 必要に応じ地震学的知見を用いて発生確率を求めたため, 発生確率の信頼性はやや低い。今後の新しい知見により値が大きく変わり得る。

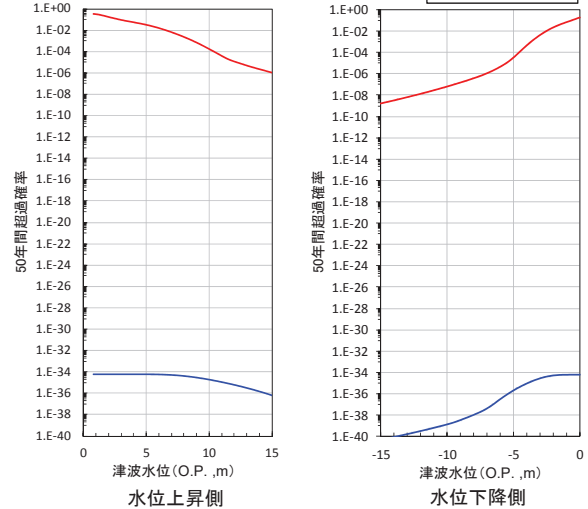
2.1 検討対象領域の設定: 東北地方太平洋沖型の地震②

- 土木学会(2016), 地震調査研究推進本部(2012)を参考に設定した概略ロジックツリーを用いて(各項目の詳細は次頁に記載), 評価基準日を2017年3月11日として算定した今後50年間の津波ハザード曲線を以下に示す。
- 本検討から, 東北地方太平洋沖型の地震に伴う津波が年超過確率に与える影響は十分に小さいことを確認した。

■概略ロジックツリー



■基準津波策定位置における津波ハザード曲線



(参考) 評価基準日(時間軸原点)の違いによる今後50年の地震発生確率

	評価基準日	今後50年の地震発生確率
東北地方太平洋沖型の地震	2011年3月11日	20~30%※1
	2017年3月11日	ほぼ0% (10 ⁻³⁵ ※2)

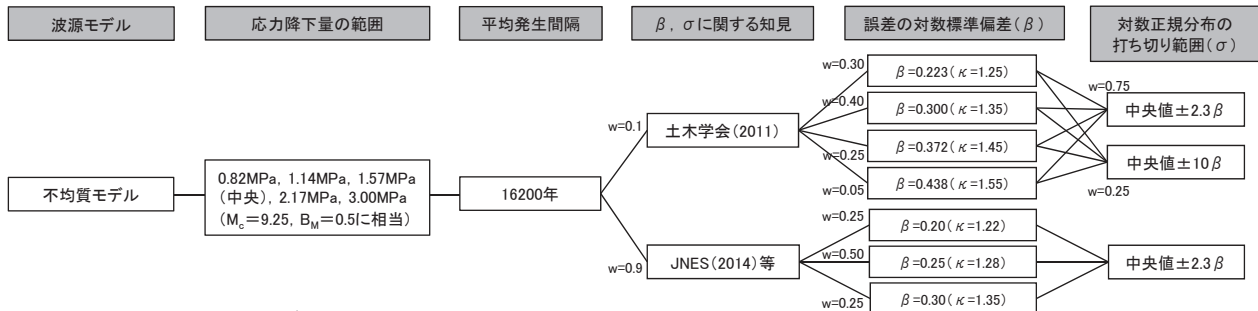
※1: 地震調査研究推進本部(2012)による評価

※2: 平均発生間隔600年, 最新活動時期2011年3月11日, α=0.24で算定

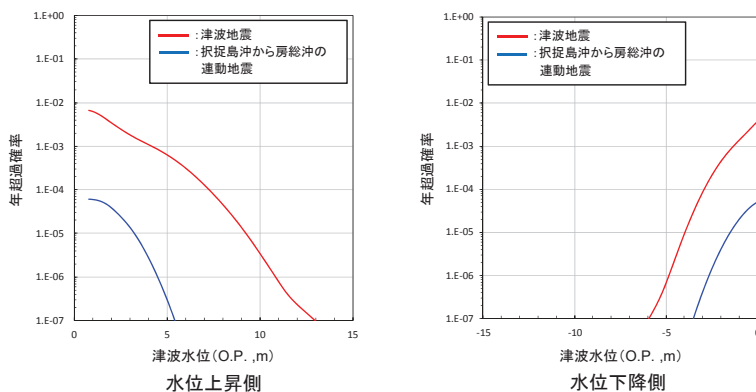
2.1 検討対象領域の設定: 択捉島沖から房総沖の連動地震①

- 土木学会(2016)等を参考に設定した概略ロジックツリーを用いて算定した津波ハザード曲線を以下に示す(各項目の詳細は次頁に記載)。
- 本検討から, 択捉島沖から房総沖の連動地震に伴う津波は, 津波地震に伴う津波と比較して年超過確率に与える影響は小さいことを確認した。

■概略ロジックツリー



■基準津波策定位置における津波ハザード曲線

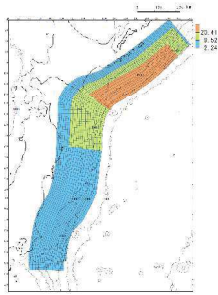


2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.1 検討対象領域の設定: 択捉島沖から房総沖の連動地震②

■波源モデル

- ・ 広域の津波特性(痕跡高)を考慮できる杉野ほか(2014)の方法を用いて設定した。



特性化モデル
(Mw(Mc)=9.25)

主な断層諸元		
断層パラメータ	設定値	備考
モーメントマグニチュード(Mw)	9.25	
断層面積(S)	278,498(km ²)	
平均応力降下量(Δσ)	1.57MPa	Murotani et al.(2013)で示される平均値
地震モーメント(Mo)	9.47 × 10 ²² (Nm)	
すべり量	平均すべり量(D)	6.80(m)
	大すべり域(1.4D)	9.52(m)
	超大すべり域(3D)	20.41(m)
	背景領域(0.33D)	2.24(m)

■応力降下量の範囲

- ・ 土木学会(2016)を参考に設定した(詳細は, p23に記載)。

■平均発生間隔

- ・ 土木学会(2016)に示される十勝沖・根室沖から茨城県沖の連動地震の平均発生間隔の平均的な設定値を示す分岐を選定した。

■津波高さ推定に関するロジックツリー

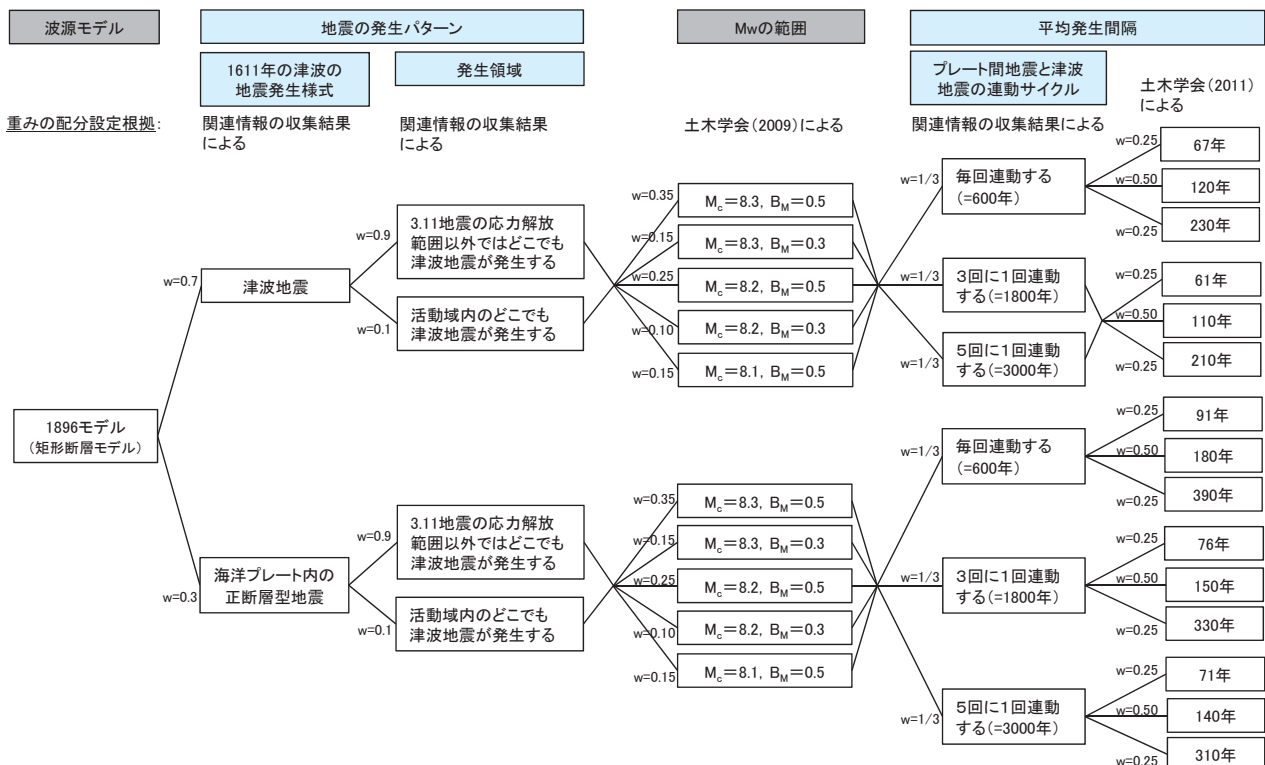
- ・ 詳細検討に用いるロジックツリーと同じロジックツリーを用いた(ロジックツリーの詳細は, p29に記載)。

2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 津波地震のロジックツリー

- ・ 土木学会(2011)のロジックツリーを基本に, 3.11地震から得られた知見等を踏まえてロジックツリーを作成した。
- ・ なお, Mwの範囲と平均発生間隔の組み合わせ(ロジックツリー)は, 土木学会(2011)と同様に, 各項目の分岐を一律に組み合わせた。

■ : 土木学会(2011)からの変更箇所

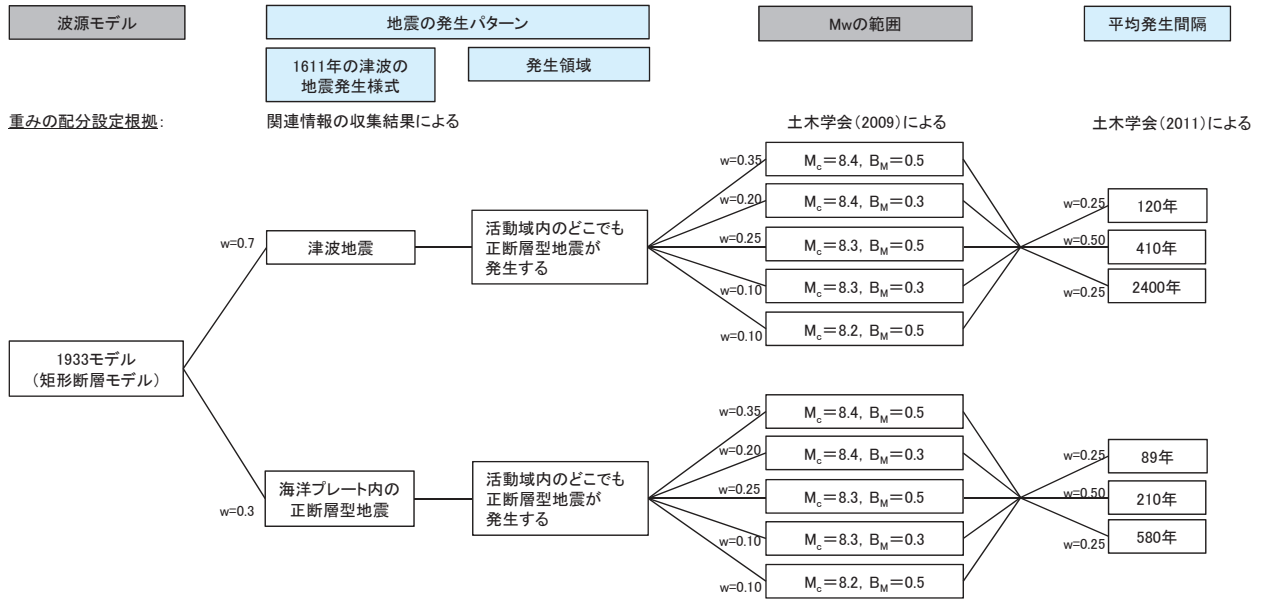


2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 海洋プレート内の正断層型地震のロジックツリー

- 土木学会(2011)のロジックツリーを基本に, 3.11地震から得られた知見等を踏まえてロジックツリーを作成した。
- なお, Mwの範囲と平均発生間隔の組み合わせ(ロジックツリー)は, 土木学会(2011)と同様に, 各項目の分岐を一律に組み合わせた。

■: 土木学会(2011)からの変更箇所



2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 1611年の津波の地震発生様式

- 土木学会(2011), 地震調査研究推進本部(2012)等では1611年の津波を津波地震と評価しているが, 土木学会(2002)では海洋プレート内の正断層型地震であった場合, その地震規模をMw8.6と評価している。
 - 今井ほか(2012)は, 1611年の津波痕跡に基づく数値シミュレーション, 並びに史料記述の再解釈から, 1611年の津波が海洋プレート内の正断層型地震であった可能性を指摘している。
 - 以上を踏まえ, 1611年の津波の地震発生様式に関する分岐(=津波地震/海洋プレート内の正断層型地震)を追加設定した。
 - 上記分岐のうち海洋プレート内地震のMc(中央マグニチュード)は, 地震規模, 並びに各機関の評価事例に係る関連情報の収集結果を踏まえ8.4とした*1。
 - 重み配分については, 1611年の津波の発生様式に係る知見の収集結果から, 津波地震の重みを0.7, 海洋プレート内の正断層型地震の重みを0.3とした。
- ※1: 専門家意見聴取結果を踏まえて設定した。

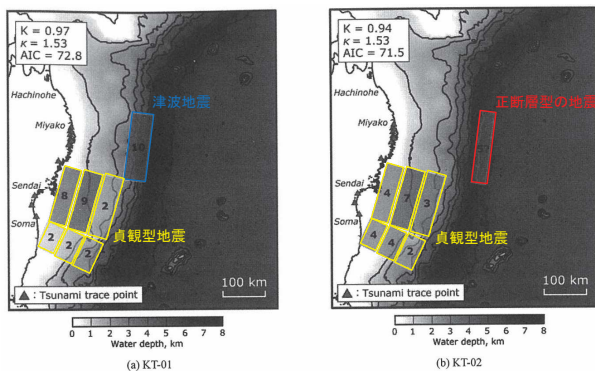
【今井ほか(2012)】

- プレート境界地震の断層面に加え, アウターライズ領域の正断層型地震の断層面を考慮して痕跡高の逆解析を実施した結果, 以下の2つの地震モデル(KT-01, KT-02)が得られた*2。
- 宮古由来記には, 津波来襲前に轟音が鳴り響いたといった宏観現象の記述が残されている。
- アウターライズ領域で発生する正断層型地震はプレート境界地震と密接に関係することも踏まえると, 正断層型地震の方がより矛盾なく解釈できるが, 津波地震を完全に否定することはできない。

※2: 逆断層地震と正断層地震の発生時間差は考慮していないが, 沿岸の津波高さに与える影響は小さいことを確認。

【1611年の津波の発生様式に係る知見の収集結果】

関連情報	1611年の津波の発生様式
相田(1977)	海洋プレート内の正断層型地震
土木学会(2002)	津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震
地震調査研究推進本部(2002)	津波地震
中央防災会議(2005)	津波地震
土木学会(2009)	津波地震
地震調査研究推進本部(2012)	津波地震
今井ほか(2012)	海洋プレート内の正断層型地震
岩淵(2013)	津波地震

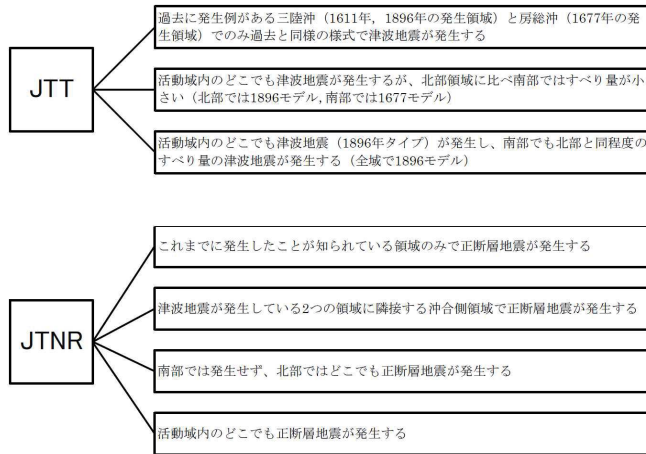


津波痕跡高から得られた1611年の津波のすべり量分布
(断層面内の数字はすべり量(m))
(今井ほか(2012)に一部加筆)

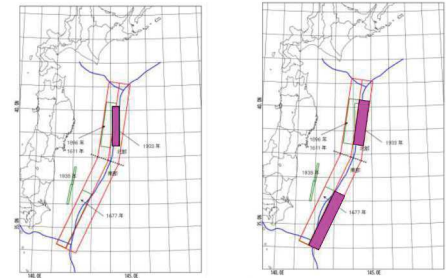
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 地震の発生パターン

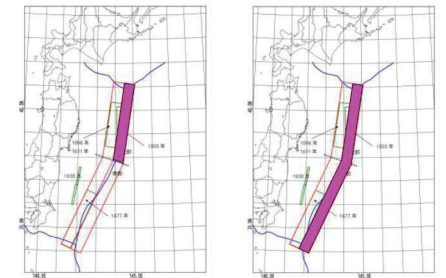
- 土木学会(2011)では、地震の発生パターンに分岐を設定しているが、地震調査研究推進本部(2012)の評価、3.11地震で得られた知見を踏まえ、日本海溝沿いのどこでも地震が発生する分岐のみとした。
- なお、津波地震については、M9クラスの巨大地震と同様に、3.11地震の応力解放範囲で発電所供用期間中に地震が発生する可能性は小さいと考えられるものの、津波地震単独で活動する際に必要な歪みは、M9クラスの巨大地震と比較して小さいことを踏まえ、応力解放範囲で津波地震が発生する場合の分岐を設定した。重み配分については、重みの配分設定方法に基づき設定した。



地震の発生パターンに関する分岐
(JTT:津波地震, JTNR:海洋プレート内の正断層型地震)
(土木学会(2011))



①これまでに発生したことが知られている領域のみで発生する
②津波地震が発生している2つの領域に隣接する沖合側領域で発生する



③南部では発生せず、北部ではどこでも発生する
④活動領域のどこでも発生する
海洋プレート内の正断層型地震の発生位置
(土木学会(2009))

2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 平均発生間隔①

■基本方針

- 土木学会(2011), 土木学会(2016)と同様に固有地震モデルに基づく方法を用いて、以下の考え方に基づき、平均発生間隔を設定した。

津波発生領域	1611年の津波は津波地震			1611年の津波は正断層型地震		
	既往地震	中央マグニチュード* (Mc)	発生間隔等	既往地震	中央マグニチュード* (Mc)	発生間隔等
津波地震 (JTT)	1611年 1677年 1896年	8.3 (1896年)	1600年以降 約400年間において 発生は4回 (3.11地震を含む)。	1677年 1896年	8.3 (1896年)	1600年以降 約400年間において 発生は3回 (3.11地震を含む)。
海洋プレート内の 正断層型地震 (JTNR)	1933年	8.4 (1933年)	1600年以降 約400年間において 発生は1回。	1611年 1933年	8.4 (1933年)	1600年以降 約400年間において 発生は2回。

2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 平均発生間隔②

■津波地震の平均発生間隔の設定

- ・プレート間地震と津波地震の連動地震である東北地方太平洋沖型の地震, 三陸沖北部の連動地震の平均発生間隔と重複しないように(=連動サイクルを考慮して)設定した。
- ・東北地方太平洋沖型の地震, 三陸沖北部の連動地震の平均発生間隔の設定方法を以下に示す。
- ・重み配分については, 現時点の知見で判断するのは困難であることから, 均等配分とした。

【東北地方太平洋沖型の地震の平均発生間隔の設定】

- ① 600年間隔で, 毎回プレート間地震と津波地震が連動する。
- ② 15世紀の津波と869年の津波はプレート間地震単独であったとの前提に立ち, 3回に1回のサイクルで津波地震と連動する。
- ③ 3.11地震より前の4回の地震は全てプレート間地震単独であったとの前提に立ち, 5回に1回のサイクルで津波地震と連動する。

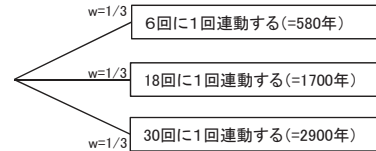
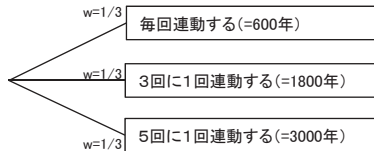
【三陸沖北部の連動地震の平均発生間隔の設定】

- ✓ プレート間地震と津波地震の連動地震が発生した記録が無いことを踏まえ, 東北地方太平洋沖型の地震(③単独)の平均発生間隔(600年)を参考に, プレート間地震(1677年, 1763年, 1856年, 1968年)の平均発生間隔(97年)の6回に1回(600年間隔に相当), 18回に1回(1800年間隔に相当), 30回に1回(3000年間隔に相当)のサイクルで津波地震と連動するとした。

地震調査研究推進本部(2012)による東北地方太平洋沖型の地震の評価

地震発生領域	地震発生年月日	地震の平均的発生頻度等 注1	地震規模			死傷者数 ^{※5}	
			M 注2	Mt 注3	MW 注4	死者	負傷者
東北地方太平洋沖型の地震	2011/ 3/11 14:46	平均発生間隔は600年程度	9.0 注2	9.1 ~ 9.4	9.0	16,019 行方不明 3,805	6,121
	15世紀 869/ 7/13 4-5世紀 紀元前3-4世紀		8.3		8.4~ 注4	多数	—

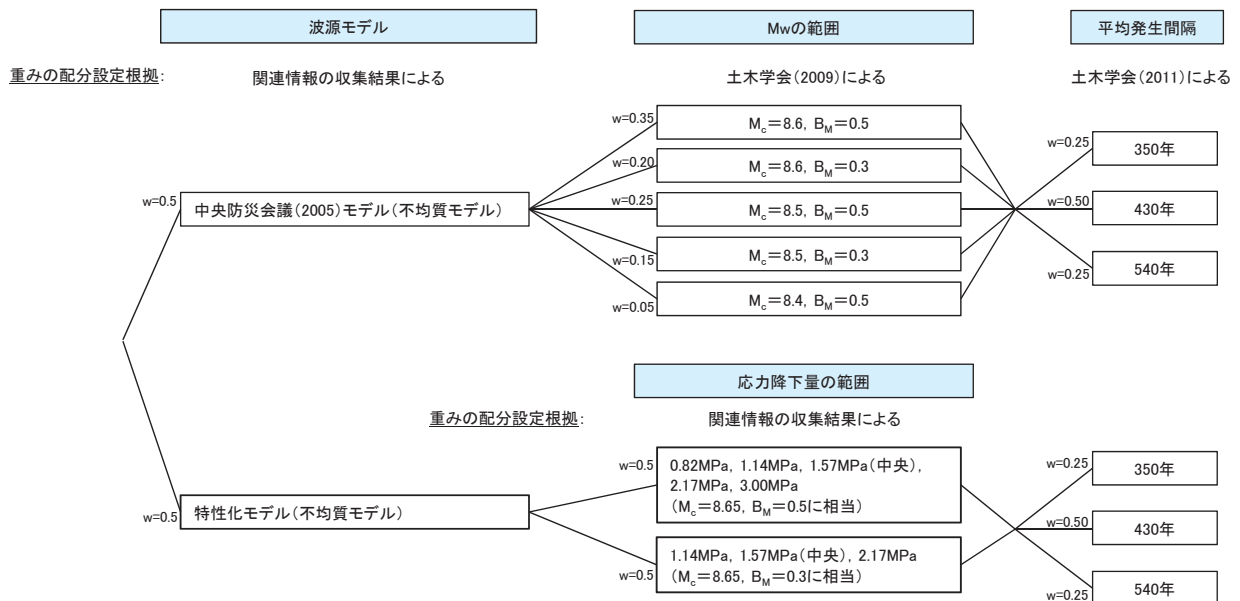
※:注1~注5の解説については省略



2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.3 十勝沖・根室沖の連動地震: ロジックツリー

□ : 土木学会(2011)からの変更箇所



2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.3 十勝沖・根室沖の連動地震:波源モデル, 平均発生間隔

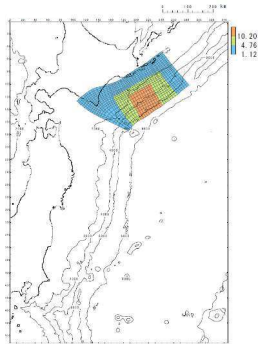
■波源モデル

【中央防災会議(2005)モデル】

- 北海道太平洋岸で確認された津波堆積物から推定される津波高を用いたインバージョンモデル(Mw8.6)。

【特性化モデル】

- 広域の津波特性を考慮した特性化モデルの設定方法(以下、「杉野ほか(2014)の設定方法」という。)を用いた。



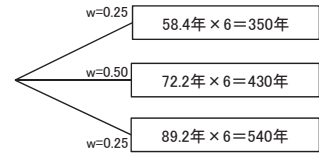
特性化モデル
(今回設定, Mw(Mc)=8.65)

主な断層諸元

断層パラメータ	設定値	備考
モーメントマグニチュード (Mw)	8.65	
断層面積 (S)	69,513 (km ²)	
平均応力降下量 ($\Delta\sigma$)	1.57MPa	Murotani et al.(2013)で示される平均値
地震モーメント (Mo)	1.18×10^{22} (Nm)	
すべり量	平均すべり量 (D)	3.40 (m)
	大すべり域 (1.4D)	4.76 (m)
	超大すべり域 (3D)	10.20 (m)
	背景領域 (0.33D)	1.12 (m)

■平均発生間隔

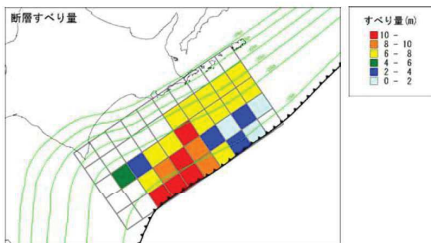
- 十勝沖, 根室沖, 色丹島沖, 択捉島沖で発生している各地震の平均発生間隔(72.2年)(地震調査研究推進本部(2004)), 並びに十勝沖の地震と根室沖の地震の連動サイクル(6回に1回連動)(土木学会(2011))を基に, 土木学会(2011)に示される固有地震の平均発生間隔の誤差を考慮して設定した。
- 重み配分については, 土木学会(2011)の正規分布に対する分岐設定方法を用いて設定した。



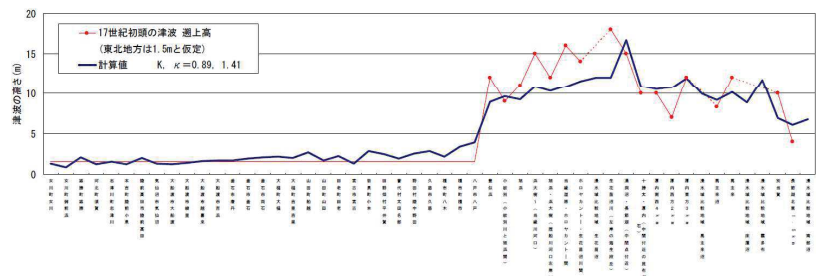
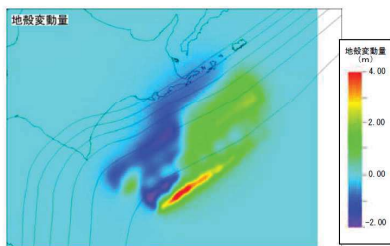
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.3 十勝沖・根室沖の連動地震:中央防災会議(2005)モデル

- 津波堆積物から推定された北海道沿岸の津波高さ及び浸水域の広がり参照して, インバージョン手法により, 500年間隔地震の想定断層を推定したモデルである。



Mw=8.6		各セグメントのすべり量分布(m)									
深度	走向方向										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0.0	1.2	3.6	6.7	9.8	12.9	17.2	12.8	0.0	0.0	
2	0.5	2.3	1.7	3.9	8.7	12.6	9.1	6.1	0.0	0.0	
3	7.0	7.0	7.0	7.0	10.1	7.3	6.1	3.0	5.8	0.0	
4	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

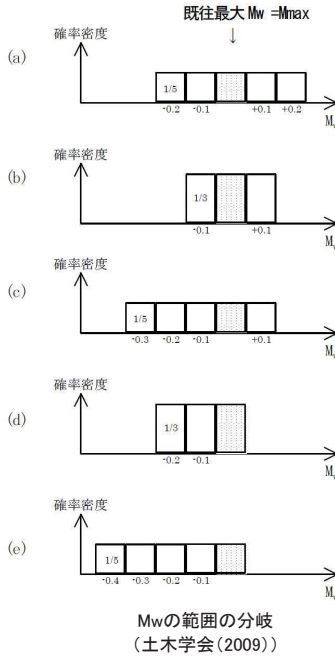


断層モデル及び17世紀初頭の津波の遡上高と計算値の比較等
(中央防災会議(2005))

2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)
 2.3 十勝沖・根室沖の連動地震:Mwの範囲①

■中央防災会議(2005)モデル

- ・ 土木学会(2011)を参考に、中央防災会議(2005)モデルの地震規模(Mw8.6)をMc(中央マグニチュード)とし、Mwの範囲は0.3, 0.5とした。
- ・ 重み配分については、土木学会(2009)による十勝沖と根室沖の連動地震の重みを準用した。



十勝沖(KT1)と根室沖(KT2)の連動地震のMwの範囲の重みに関するアンケート結果
(土木学会(2009))

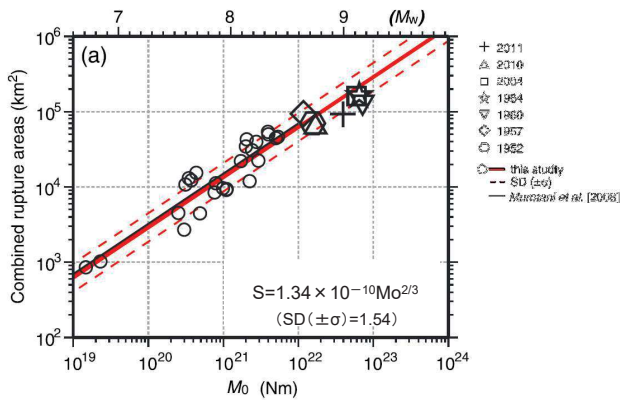
パターン	既往最大との関係	Mwの幅	Mwの範囲 (Mmax=8.6) 下段: ずべり量(m)						重み【ご記入ください】
			8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	
a.	既往最大を上回る地震が発生する	0.5							0.35[0.40]
b.	既往最大を上回る地震が発生する	0.3							0.20[0.15]
c.		0.5							0.25[0.20]
d.	既往最大を上回る地震は発生しない	0.3							0.15[0.20]
e.	既往最大を上回る地震は発生しない	0.5							0.06[0.06]
		0.3							
特記事項【できるだけご記入ください】								重みの合計	1.0

[]内の値はH16年度に実施した同じ設問に対する回答の平均

2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)
 2.3 十勝沖・根室沖の連動地震:Mwの範囲②

■特性化モデル

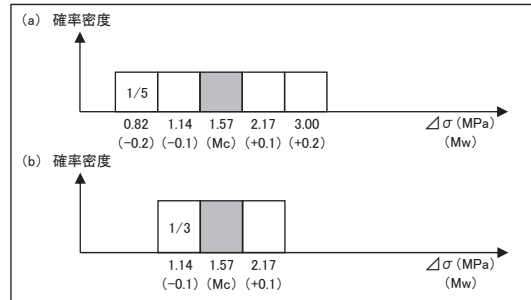
- ・ 土木学会(2016)は、Murotani et al.(2013)のスケーリング則による応力降下量の平均値1.57MPaに、ばらつきとして±1σを考慮した場合の応力降下量の範囲は0.82~3.00MPa、±0.5σを考慮した場合は1.14~2.17MPaであり、Mwの範囲としてそれぞれMw±0.2、Mw±0.1となるが、これは土木学会(2011)で採用しているMwの範囲にほぼ相当するため、ロジックツリーの分岐として考えることができるとしている。また、Murotani et al.(2013)の関係から応力降下量3.0MPaは、パラメータの標準偏差の範囲で上限的な応力降下量であるとしている。
- ・ 以上から、応力降下量の範囲(Mwの範囲)の分岐を以下のとおり設定し、重み配分については均等配分とした。



平均応力降下量 $\Delta\sigma = 1.57\text{MPa}$
 $S + 1\sigma$ 時の平均応力降下量 $\Delta\sigma = 0.82\text{MPa}$
 $S - 1\sigma$ 時の平均応力降下量 $\Delta\sigma = 3.00\text{MPa}$
 $S + 0.5\sigma$ 時の平均応力降下量 $\Delta\sigma = 1.14\text{MPa}$
 $S - 0.5\sigma$ 時の平均応力降下量 $\Delta\sigma = 2.17\text{MPa}$

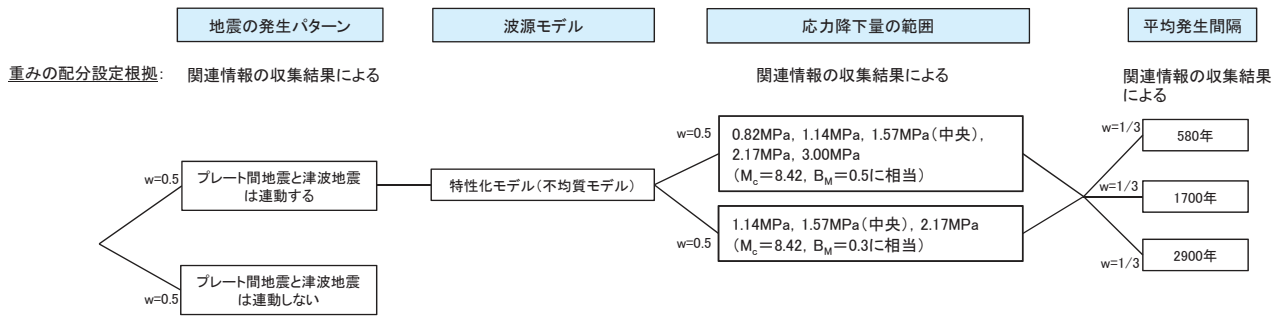
破壊領域(S)とMoの関係
(Murotani et al.(2013))

【応力降下量の範囲】



2.4 三陸沖北部の連動地震:ロジックツリー

□:土木学会(2011)からの変更箇所



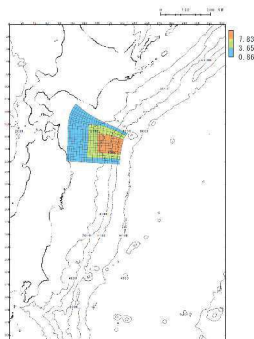
2.4 三陸沖北部の連動地震:地震の発生パターン, 波源モデル, 応力降下量の範囲, 平均発生間隔

■地震の発生パターン

- 本領域では、プレート間地震と津波地震の連動地震が発生した記録が無いことを踏まえ、地震発生様式に関する分岐(=プレート間地震と津波地震は連動する/連動しない)を追加設定した。
- 重み配分については、現時点の知見で判断するのは困難であることから、均等配分とした。

■波源モデル

- 十勝沖・根室沖の連動地震と同様に、杉野ほか(2014)の設定方法を用いた。



主な断層諸元

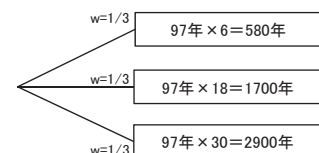
断層パラメータ	設定値	備考
モーメントマグニチュード (Mw)	8.42	
断層面積 (S)	40,959 (km ²)	
平均応力降下量 ($\Delta\sigma$)	1.57MPa	Murotani et al.(2013)で示される平均値
地震モーメント (Mo)	5.43×10^{21} (Nm)	
すべり量	平均すべり量 (D)	2.61 (m)
	大すべり域 (1.4D)	3.65 (m)
	超大すべり域 (3D)	7.83 (m)
	背景領域 (0.33D)	0.86 (m)

■応力降下量の範囲

- 十勝沖・根室沖の連動地震と同様の考え方で分岐・重みを設定した。

■平均発生間隔

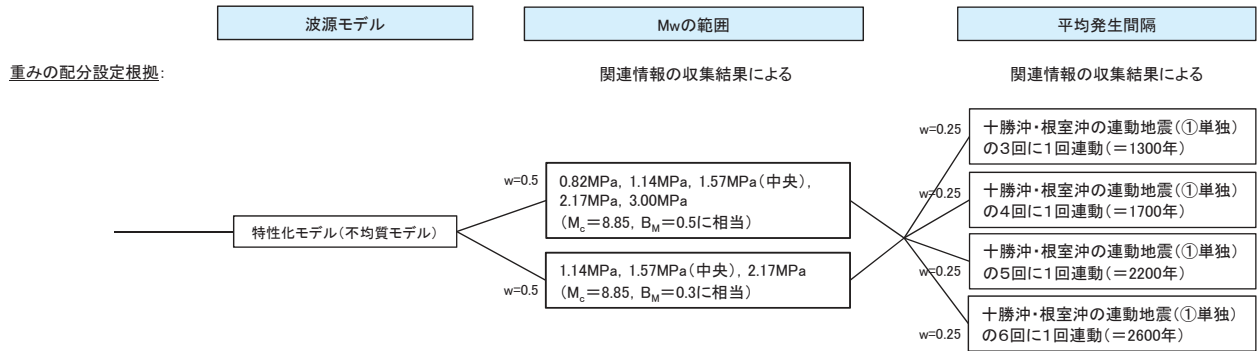
- 本領域では、プレート間地震と津波地震の連動地震が発生した記録がないことを踏まえ、東北地方太平洋沖型の地震の平均発生間隔(600年)を参考として、プレート間地震(1677年, 1763年, 1856年, 1968年)の平均発生間隔(97年)の6回(600年間隔に相当), 18回に1回(1800年間隔に相当), 30回に1回(3000年間隔に相当)発生するとした。



- 重み配分については、現時点の知見で判断するのは困難であることから、均等配分とした。

2.5 十勝沖・根室沖から三陸沖北部の連動地震:ロジックツリー

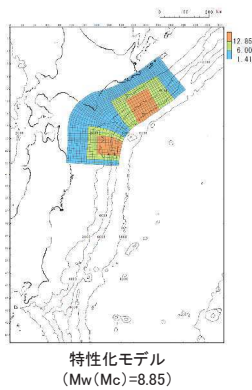
□ : 土木学会(2011)からの変更箇所



2.5 十勝沖・根室沖から三陸沖北部の連動地震:波源モデル, 応力降下量の範囲, 平均発生間隔

■波源モデル

- 十勝沖・根室沖の連動地震と同様に, 杉野ほか(2014)の設定方法を用いた。



主な断層諸元

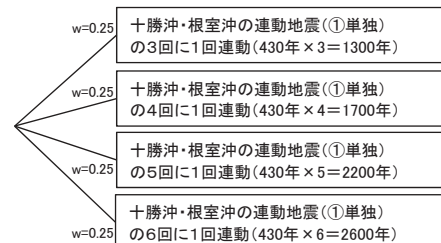
断層パラメータ	設定値	備考
モーメントマグニチュード (Mw)	8.85	
断層面積 (S)	110,472 (km ²)	
平均応力降下量 ($\Delta\sigma$)	1.57MPa	Murotani et al. (2013) で示される平均値
地震モーメント (Mo)	2.37×10^{22} (Nm)	
すべり量	平均すべり量 (D)	4.28 (m)
	大すべり域 (1.4D)	6.00 (m)
	超大すべり域 (3D)	12.85 (m)
	背景領域 (0.33D)	1.41 (m)

■応力降下量の範囲

- 十勝沖・根室沖の連動地震と同様の考え方で分岐・重みを設定した。

■平均発生間隔

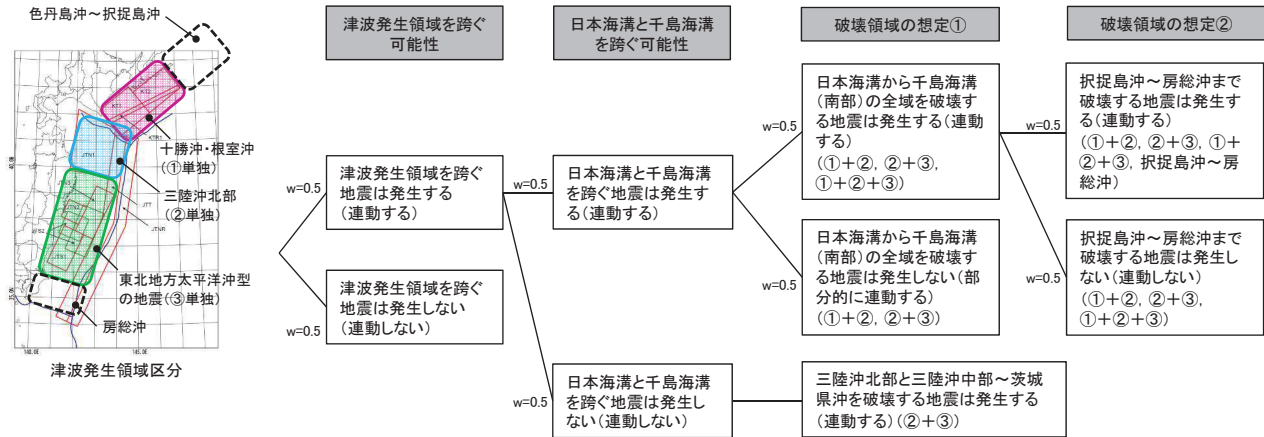
- 領域を跨ぐ連動地震が発生した記録・知見がないことを踏まえ, 以下の国内外の地震の連動サイクルを踏まえ, 十勝沖・根室沖の連動地震の平均発生間隔を基に設定した。
 - ✓ 南米チリの地震: 3回に1回連動
 - ✓ 十勝沖・根室沖の連動地震: 6回に1回連動
 - ✓ 宮城県沖と三陸沖南部海溝寄りの連動地震(1793年の地震): 5回に1回連動
- 重み配分については, 現時点の知見で判断するのは困難であることから, 均等配分とした。



2.6 地震の組合せに関するロジックツリー

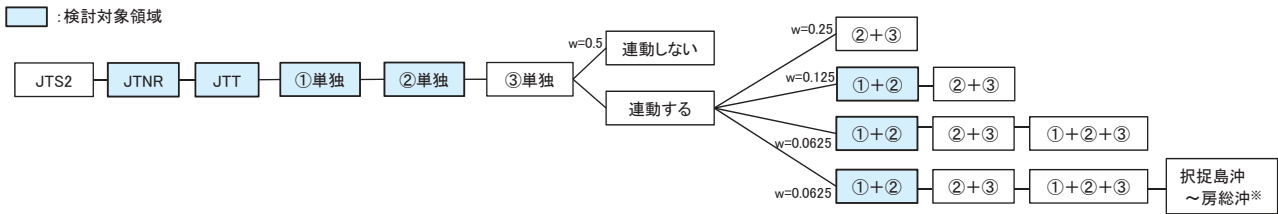
津波発生領域の連動パターン

- 3.11地震から得られた知見を踏まえ、これまで発生した記録、知見がない津波発生領域(セグメント)の連動を考慮した地震を評価することから、各連動地震の発生確率に関する重み付けを行うため、以下のとおり、連動パターンを考慮した。
- 各分岐の重み配分については、現時点の知見で判断するのは困難であることから、均等配分とした。



地震の組合せに関するロジックツリー

- 上記に基づき設定したロジックツリーを以下に示す。



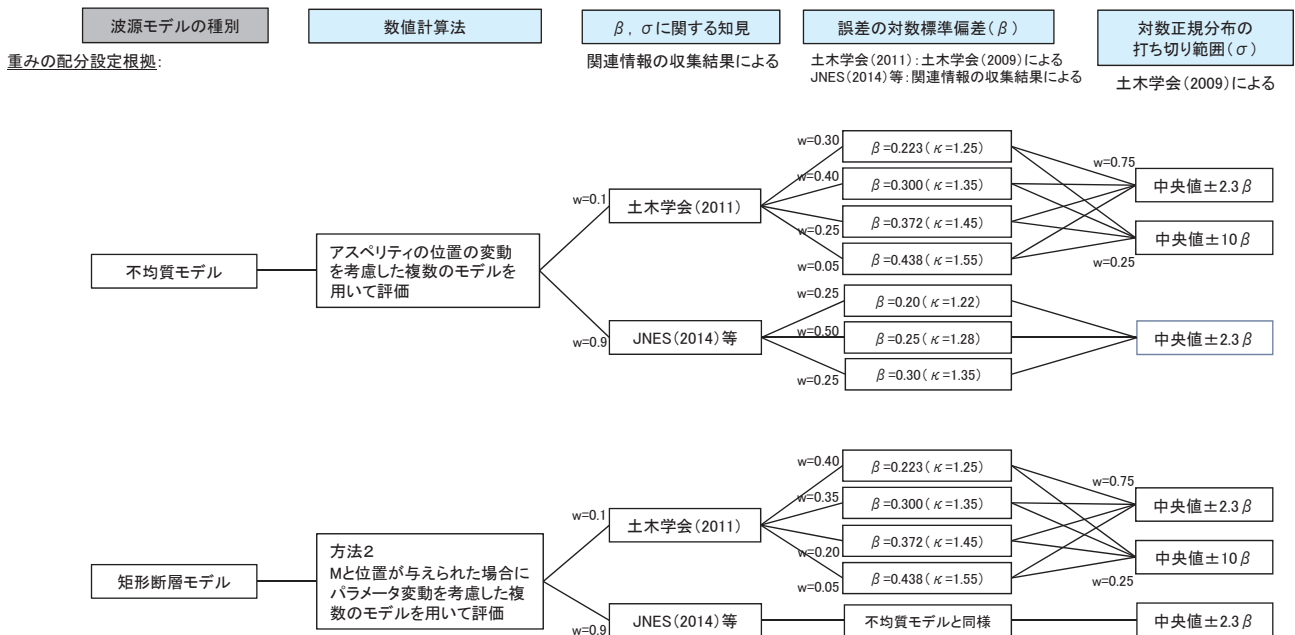
※: 択捉島沖から房総沖の連動地震は、津波地震(JTT)と比較して年超過確率に与える影響は小さいことを確認。

3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的な不確実さの考慮)

3.1 津波高さ推定に関するロジックツリー

- 偶然的な不確実さ要因は、日本原子力学会(2012)、土木学会(2011)及び土木学会(2016)を踏まえて、津波高さ推定に関するロジックツリーとして設定した。

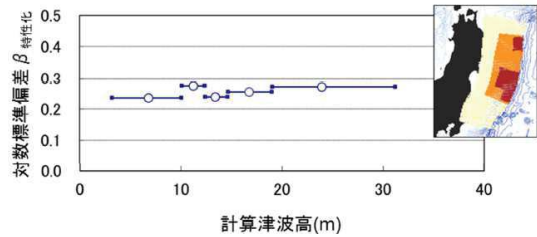
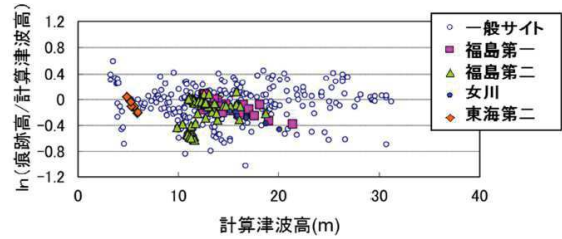
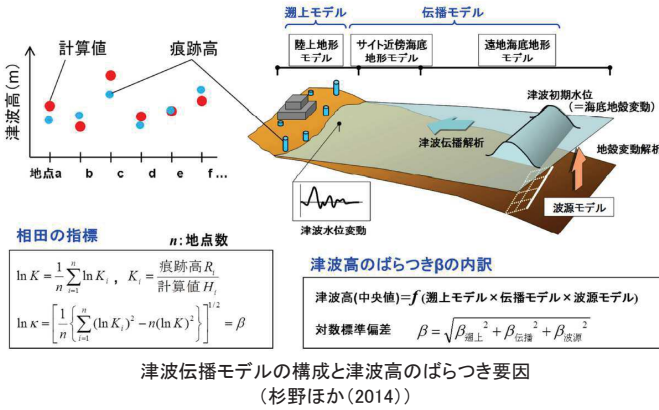
土木学会(2011)からの変更箇所



3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.2 誤差の対数標準偏差(β)に関する3.11地震から得られた知見

- 津波高さのばらつき(β)は、津波波源モデル($\beta_{波源}$)、海底地形を含めた海上伝播($\beta_{伝播}$)、陸上地形を含めた陸上遡上($\beta_{遡上}$)のモデル化上のばらつきが混在する。さらには、痕跡情報である津波高さや位置情報の不確かさも含まれる(杉野ほか(2014))。
- 杉野ほか(2014)は、3.11地震に伴う津波を再現する特性化波源モデル(杉野ほか(2013))による痕跡高と計算値の関係から、津波高さのばらつき($\beta_{特性化}$)を整理し、土木学会(2011)のばらつき β (およそ0.28~0.47)に対して、 $\beta_{特性化}$ は0.24~0.27と大きく低減したとしている。



特性化波源モデルの $\beta_{特性化}$ と計算津波高の関係 (杉野ほか(2014))

3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.2 誤差の対数標準偏差(β)に関する3.11地震から得られた知見

- 杉野ほか(2014)は、土木学会(2011)のばらつきよりも小さくなった理由について、以下のとおり種々の要因が重なった結果によるものとしている。

■要因

- ✓ 波源特性において特性化波源モデルとして不均一なすべり分布を取り入れたこと。
- ✓ 遡上特性では航空レーザー測量による標高データに基づいて陸上地形モデルの空間格子間隔を詳細化したこと。
- ✓ 痕跡情報では土木学会(2011)の痕跡情報は歴史記録に基づいているのに対し、今回対象とした3.11地震津波の痕跡情報はGPS測量に基づいた詳細な情報を有していること。

これらの各種モデル化や痕跡情報の精度向上が、ばらつきの低減に寄与した。

津波伝播によるばらつき β に関する土木学会(2011)との比較 (杉野ほか(2014))

	1) 波源特性	2) 伝播特性	3) 遡上特性	4) 痕跡情報	津波高さのばらつき β (κ)
土木学会 2011.9	• 一様すべりモデル	• 海底地形	• 地形格子 100~200m • 遡上なしの全反射	• 痕跡点の位置情報 の精度:小	日本海溝: 0.34~0.37 (1.40~1.45) 南海トラフ: 0.30~0.47 (1.35~1.60)
	• 不均一モデル	• 海底地形	• 地形格子 50m • 遡上なしの全反射	• 痕跡点の位置情報 の精度:小	日本海溝: 0.31~0.37 (1.37~1.45) 南海トラフ: 0.28~0.39 (1.32~1.48)
東北地震 津波	• 特性化波源モデル (不均一モデル)	• 海底地形	• 地形格子 5.6m • 遡上あり • 建屋あり	• 痕跡点の位置情報 の精度:高	日本海溝: 0.24~0.27 (1.27~1.31)

各種モデル化精度の向上

3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.2 誤差の対数標準偏差(β)に関する3.11地震から得られた知見

JNES(2014)及び杉野ほか(2015)では、杉野ほか(2014)の知見を踏まえたハザード評価への適用方法、適用事例を以下のとおり示している。

JNES(2014)

不確かさ要因の設定方法(JNES(2014)に一部加筆)

- (1) ばらつき β について
 - 津波伝播モデルのばらつきは、計算水位を中央値とする確率分布(対数正規分布)を仮定したときの対数標準偏差 β で定義する。
 - 津波伝播モデルのばらつき β の値は、津波ハザード評価の結果に大きく影響することに留意し、用いる津波解析手法、解析モデルに対して、最新知見を反映して適切に設定する。
- (2) 打ち切りについて
 - 推定値の不確定性は、打ち切りのある対数正規分布で表現するため、パラメータとして対数標準偏差 β と打ち切り範囲を設定する。

(解説)

(1) ばらつき β について

- 津波伝播モデルによる津波高さに関する評価結果と痕跡高は完全に一致することは少なく、ばらつきが存在する。
- 「6.6.3.1 津波評価手法の選択」で選択された津波伝播モデルによって推定された津波高さに含まれるばらつきの大きさを対数標準偏差で定義し、ロジックツリーの分岐として考量する。
- 評価サイトの地形モデルの格子サイズが5m程度の場合、津波伝播モデルのばらつき β は0.20~0.30の範囲で設定する。

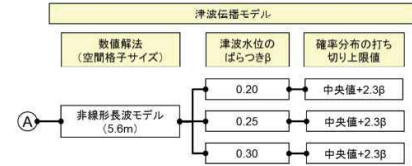
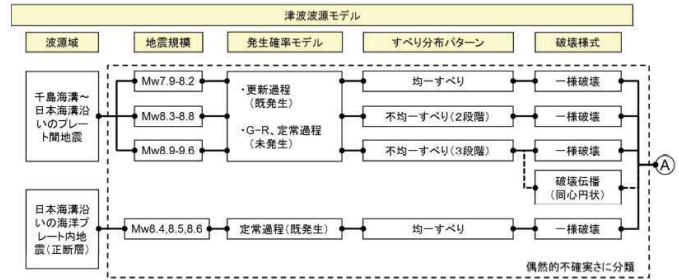
(2) 津波伝播モデルにおける対数正規分布の打ち切りの設定

「6.6.3.1 津波評価手法の選択」で選択された津波伝播モデルによって推定された津波高さに含まれるばらつきが対数正規分布に従うとした場合に、正規分布の打ち切りについて、ロジックツリーの分岐として考量する。

例えば、「分布の両側の各1%に入る現象は実際には起こらない」とする場合、表6.11のように分布の両側1%を打ち切る。

表 6.11 打ち切りの設定パターン(例)

ばらつきの考慮範囲	打ち切り	打ち切り範囲
正規分布の99%まで	1%	$\pm 2.3\sigma$



ロジックツリーの概要(JNES(2014))

3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.2 誤差の対数標準偏差(β)に関する3.11地震から得られた知見

杉野ほか(2015):千島海溝から日本海溝沿いにおけるロジックツリー

津波伝播モデルに係るロジックツリーの設定方法(杉野ほか(2015)に一部加筆)

図9は津波伝播モデルに係るロジックツリーである。同図中の左端のA及びBは、図7及び図8から繋がる記号であり、Aは新津波想定モデルの場合を、Bは旧津波想定モデルの場合を表す。いずれも認識論的不確かさ要因として津波伝播モデルに係る津波高のばらつき β の値を分岐として設定する。Aの場合には杉野ほか(2015)の特性化波源モデルの検証結果を踏まえて、0.20、0.25、0.30の3つの値を分岐とする。Bの場合には東北地震津波の発生前までの知見として土木学会の報告書³⁾に示される、0.223、0.300、0.372、0.438の4つの値を分岐とする。また、確率分布の打ち切り上限値については、東北地震発生後も更新された知見は知られていないため、A,Bいずれの場合も土木学会の報告書³⁾を参考とする。

※杉野ほか⁴⁾:杉野ほか(2014) 土木学会の報告書³⁾:土木学会(2011)

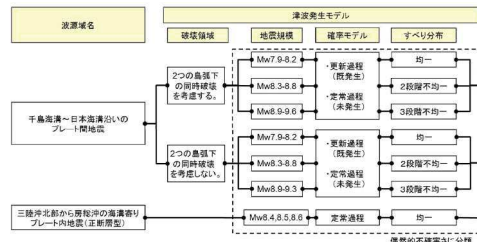


図7 新津波想定モデルを適用する場合の津波発生モデルのロジックツリー



図8 旧津波想定モデルを適用する場合の津波発生モデルのロジックツリー

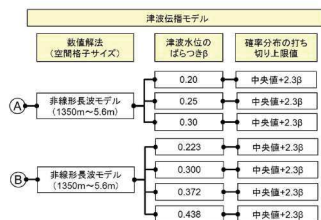


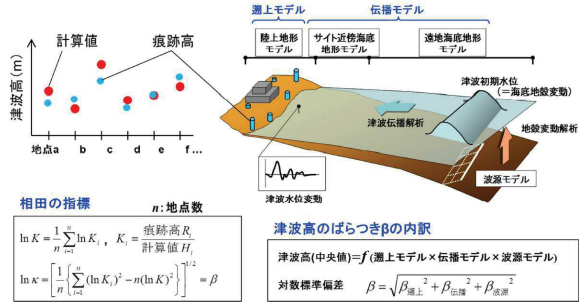
図9 津波伝播モデルのロジックツリー

3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差(β)等の分岐設定

■ 検討概要

- ・ 杉野ほか(2014)は不均質モデルを対象とした検討であるとともに、杉野ほか(2015)に示される矩形断層モデルのロジックツリーは、土木学会(2011)の設定方法を引用し、3.11地震から得られた知見は反映されていない。
 - ・ 以上を踏まえ、矩形断層モデルに、不均質モデルと同じロジックツリーを適用できるかを確認するため、既往津波の再現解析、並びに土木学会(2009)の評価から、モデルの違いが波源特性のばらつき(β_{波源})に与える影響について考察した*。
- ※: 伝播特性、遡上特性のばらつき(β_{伝播}、β_{遡上})は、解析に用いる地形データ等が同一であることから、モデルの違いが各ばらつきに与える影響は無いと考えられる(下表)。



津波伝播モデルの構成と津波高のばらつき要因(杉野ほか(2014))

津波伝播によるばらつきβに関する土木学会(2011)との比較(杉野ほか(2014))

	1) 波源特性	2) 伝播特性	3) 遡上特性	4) 痕跡情報	津波高のばらつきβ(κ)
土木学会 2011.9	・ 一律すべりモデル	・ 海底地形	・ 地形格子 100~200m ・ 遡上なしの全反射	・ 痕跡点の位置情報 の精度・小	日本海溝: 0.34~0.37 (1.40~1.45) 南海トラフ: 0.30~0.47 (1.35~1.60)
	・ 不均一モデル	・ 海底地形	・ 地形格子 50m ・ 遡上なしの全反射	・ 痕跡点の位置情報 の精度・小	日本海溝: 0.31~0.37 (1.37~1.45) 南海トラフ: 0.28~0.39 (1.32~1.48)
東北地震 津波	・ 特性化波源モデル (不均一モデル)	・ 海底地形	・ 地形格子: 5.6m ・ 遡上あり ・ 建屋あり	・ 痕跡点の位置情報 の精度・高	日本海溝: 0.24~0.27 (1.27~1.31)

各種モデル化精度の向上

モデルの違いが伝播特性・遡上特性のばらつきに与える影響に関する考察

津波高さのばらつき要因	内容
伝播特性(β _{伝播})	解析に用いる海底地形等は同一であることから、モデルの違いによる影響は無い。
遡上特性(β _{遡上})	解析に用いる地形データ、空間格子間隔等は同一であることから、モデルの違いによる影響は無い。

3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

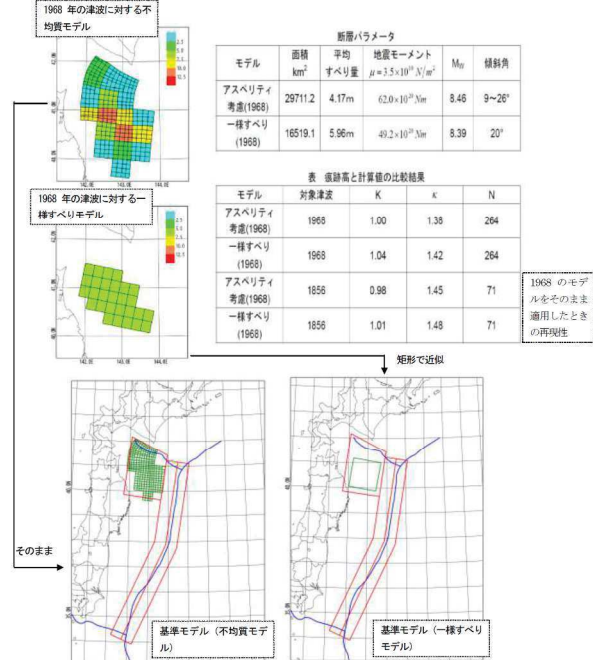
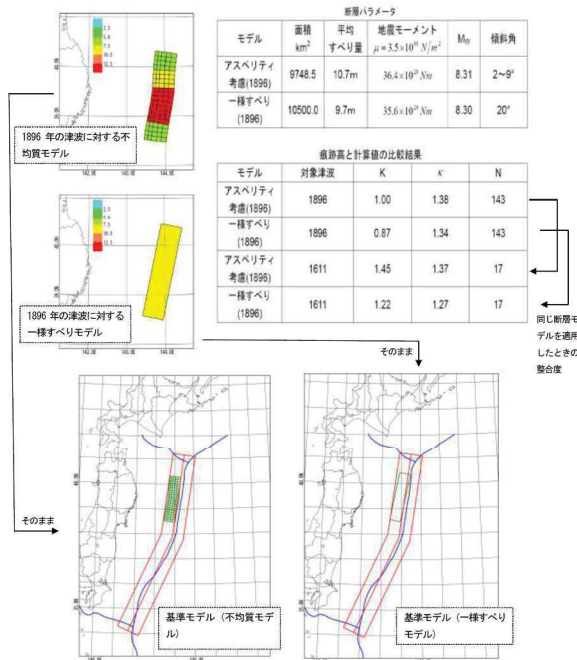
3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差(β)等の分岐設定

■ 既往津波の再現解析: 1896年明治三陸地震津波, 1968年十勝沖地震に伴う津波

- ・ 土木学会(2009)では、1896年明治三陸地震津波、1968年十勝沖地震に伴う津波の痕跡高を用いたインバージョンモデルと矩形断層モデルを用いて再現解析を実施し、両モデルのばらつき(κ)は同程度であることを示している。
- ・ 以上から、波源特性のばらつき(β_{波源})は、矩形断層モデルと不均質モデルで有意な差は無いと考えられる。

【1896年明治三陸地震津波(土木学会(2009))】

【1968年十勝沖地震に伴う津波(土木学会(2009))】

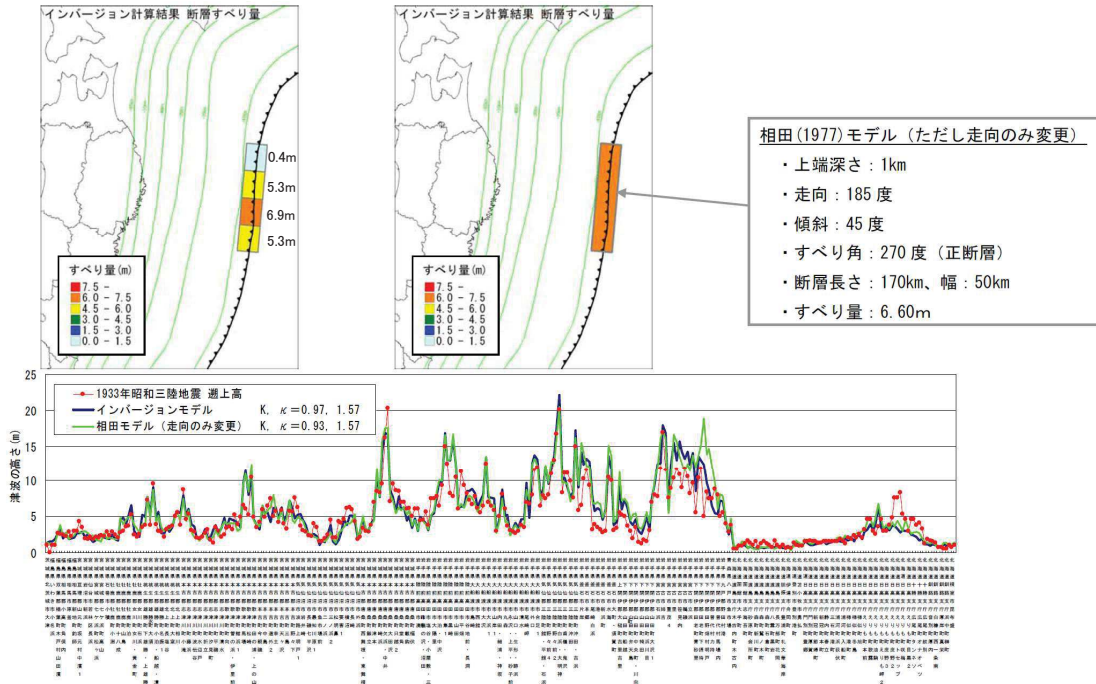


3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差(β)等の分岐設定

■既往津波の再現解析:1933年昭和三陸地震津波

- 中央防災会議(2005)では、1933年昭和三陸地震津波の痕跡を用いたインバージョンモデルと矩形断層モデルを用いて再現解析を実施し、両モデルのばらつき(κ)は同程度であることを示している。
- 以上から、波源特性のばらつき(β 波源)は、矩形断層モデルと不均質モデルで有意な差は無いと考えられる。

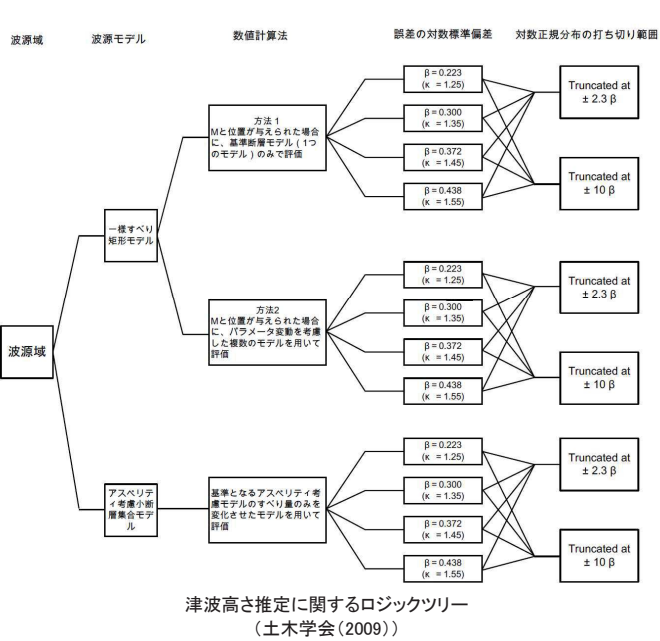


3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差(β)等の分岐設定

■土木学会(2009)の評価

- 土木学会(2009)では、矩形断層モデル、並びに不均質モデルで得られた計算水位に含まれるばらつきに関するアンケート結果を踏まえロジックツリーを作成しており、矩形断層モデルの不確かさを考慮した分岐(方法2)と不均質モデルの分岐で、ほぼ同程度の重みを設定している。



■アンケート結果(土木学会(2009))

【矩形断層モデル(一樣すべり矩形モデル):方法1】

分岐	考え方	重み【ご記入ください】
①	$\kappa=1.25$ に相当する断層を含む	0.10(0.10)
②	$\kappa=1.35$ に相当する断層を含む	0.30(0.35)
③	$\kappa=1.45$ に相当する断層を含む	0.45(0.40)
④	$\kappa=1.55$ に相当する断層を含む	0.15(0.15)
特記事項【できるだけご記入ください】		重みの合計 1.0

[]内の値はH16年度に実施した同じ設問に対する回答の平均

【矩形断層モデル(一樣すべり矩形モデル):方法2】

分岐	考え方	重み【ご記入ください】
①	$\kappa=1.25$ に相当する断層を含む	0.40(0.40)
②	$\kappa=1.35$ に相当する断層を含む	0.35(0.35)
③	$\kappa=1.45$ に相当する断層を含む	0.20(0.20)
④	$\kappa=1.55$ に相当する断層を含む	0.05(0.05)
特記事項【できるだけご記入ください】		重みの合計 1.0

[]内の値はH16年度に実施した同じ設問に対する回答の平均

【不均質モデル(アスペリティ考慮断層集合モデル)】

分岐	考え方	重み【ご記入ください】
①	$\kappa=1.25$ に相当する断層を含む	0.30
②	$\kappa=1.35$ に相当する断層を含む	0.40
③	$\kappa=1.45$ に相当する断層を含む	0.25
④	$\kappa=1.55$ に相当する断層を含む	0.00
特記事項【できるだけご記入ください】		重みの合計 1.0

3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差(β)等の分岐設定

■まとめ

- ・ 既往津波の再現解析から、波源特性のばらつき($\beta_{波源}$)は、矩形断層モデルと不均質モデルで有意な差は無いと考えられる。
- ・ また、土木学会(2009)では、アンケート結果を踏まえ、矩形断層モデルの不確かさを考慮した分岐(方法2)と不均質モデルの分岐で同程度の重みを設定している。
- ・ 以上から、矩形断層モデルに、不均質モデルと同じロジックツリーを適用できることを確認した。

3.4 津波高さ推定に関するロジックツリーの設定

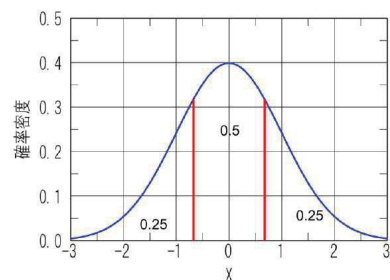
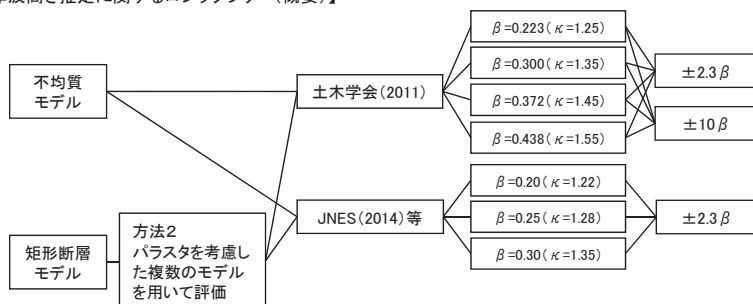
- ・ 誤差の対数標準偏差(β)に関する3.11地震から得られた知見の評価への反映について、評価に用いる解析条件等は、下表のとおり、JNES(2014)等に表示される設定方法を反映する条件を満足すると考えられることから、同知見を評価に反映した。なお、杉野ほか(2014)の検討は、Mw8.9以上の巨大地震に分類される3.11地震の1ケースのみであり、これ以外の地震規模についても同様の検証が必要と考えられることから、土木学会(2011)の設定方法も分岐として考慮した^{*}。
- ・ β 、 σ に関する知見に関する分岐の重み配分については、重み配分設定方法に基づき、土木学会(2011)の重みを0.1、JNES(2014)等の重みを0.9とした。また、JNES(2014)等の β に関する分岐の重み配分については、土木学会(2011)の正規分布に対する分岐設定方法を用いた^{*}。

^{*}: 専門家意見聴取結果を踏まえてロジックツリー、重み配分を設定した。

【津波ハザード評価の解析条件等】

項目		設定内容
最小空間格子間隔		・ 5m(2500/486)。 ・ 発電所周辺及び津波の周期特性に関する検討から、計算水位に複雑な地形の影響が適切に考慮されていることを確認。
計算条件		各津波の再現解析により妥当性を確認。
津波波源モデル	特性化モデル	広域の津波特性を考慮できる杉野ほか(2014)を踏まえて設定。
	矩形断層モデル	既往津波の再現解析、土木学会(2009)の評価内容から、波源特性のばらつき($\beta_{波源}$)は、矩形断層モデルと不均質モデルで有意な差は無いことを確認。

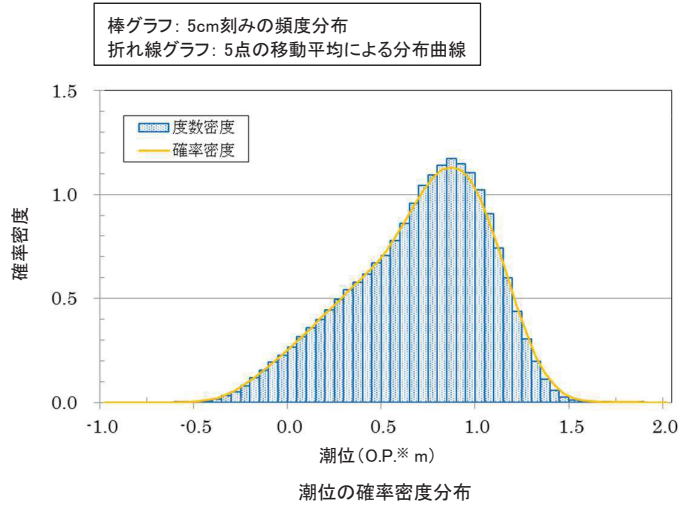
【津波高さ推定に関するロジックツリー(概要)】



正規分布に対する分岐設定方法(土木学会(2011))

4.1 津波ハザード曲線の評価概要

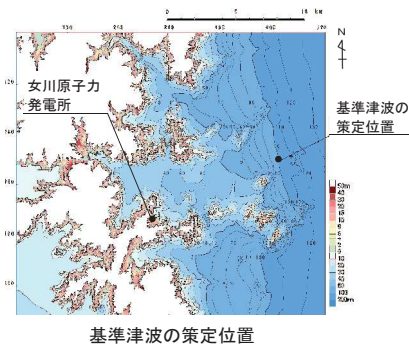
- 津波ハザード曲線は、津波発生領域毎に計算した全分岐に対するハザード曲線を組合せる際、モンテカルロ手法により5,000本のサンプルを抽出して算定した。
- 潮位の確率密度分布については、敷地南方約11kmに位置する気象庁鮎川検潮所における1970年～2010年の観測記録を用いて算定した。



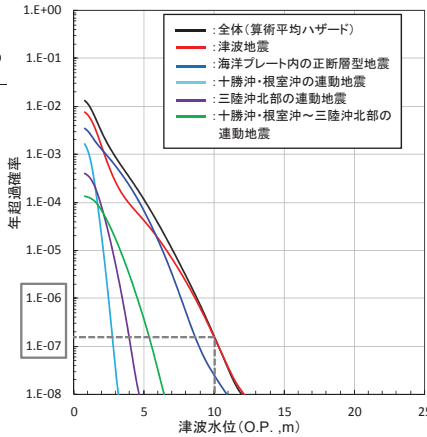
※:O.P.は女川原子力発電所工事用基準面であり、東京湾平均海面(T.P.)-0.74m

4.2 年超過確率の参照

- 基準津波の年超過確率は、水位上昇側で $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 程度、水位下降側で $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度である。

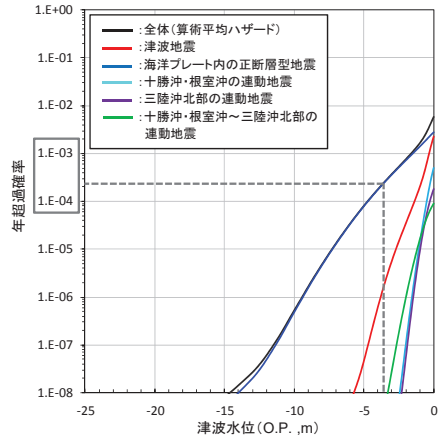


■水位上昇側



	津波水位
基準津波 (水位上昇側)	O.P.+10.1m

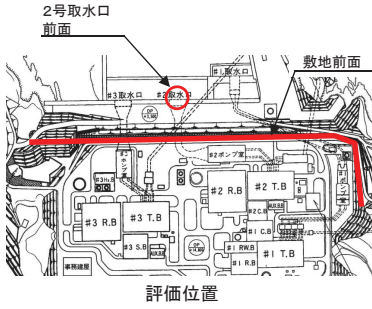
■水位下降側



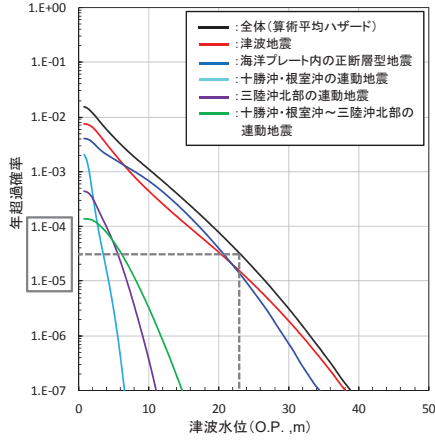
	津波水位
基準津波 (水位下降側)	O.P.-3.5m

4.2 年超過確率の参照

- 基準津波による各評価位置の津波水位に対する年超過確率は、敷地前面(水位上昇側)で $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度、2号取水口前面(水位下降側)で $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度である。

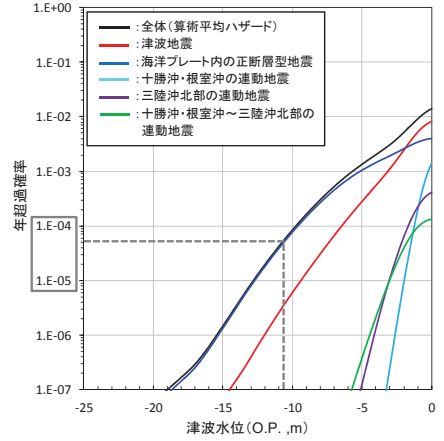


■敷地前面(水位上昇側)



	津波水位
基準津波 (水位上昇側)	O.P.+23.1m

■2号取水口前面(水位下降側)

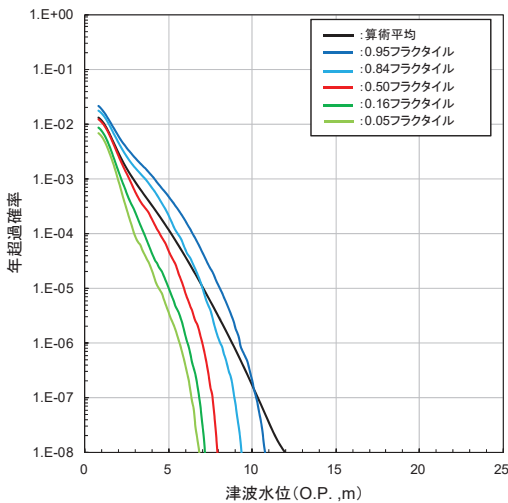


	津波水位
基準津波 (水位下降側)	O.P.-10.6m

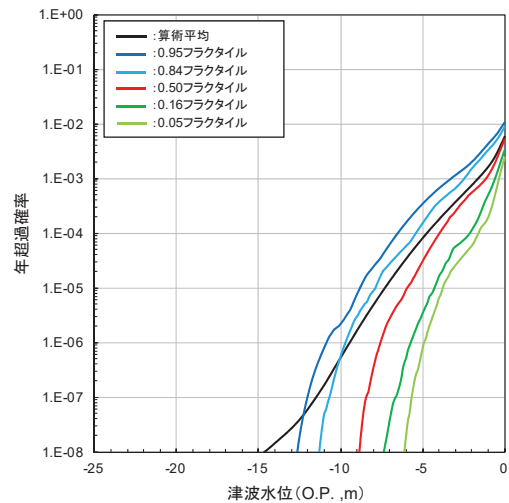
4.2 年超過確率の参照:フラクタイルハザード曲線

- 水位上昇側, 水位下降側のフラクタイルハザード曲線を以下に示す。

■水位上昇側



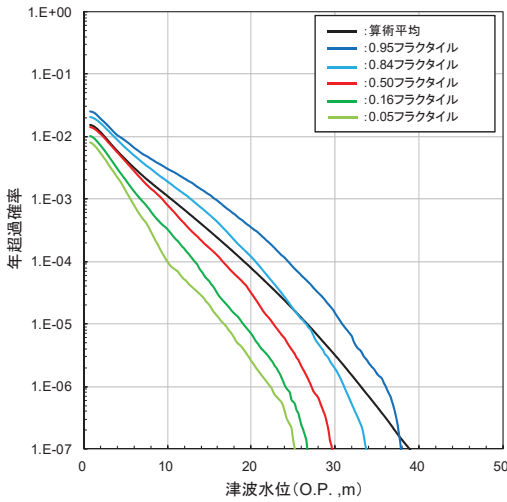
■水位下降側



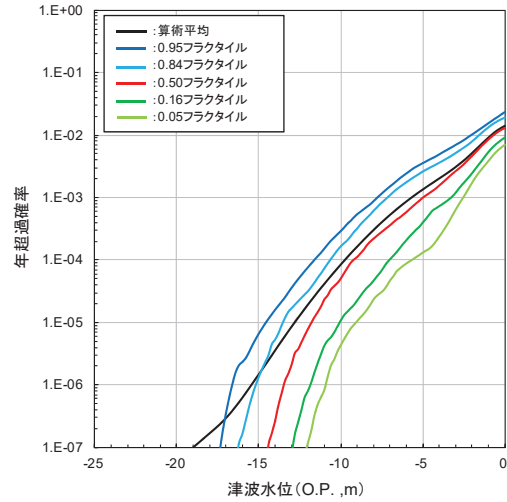
4.2 年超過確率の参照:フラクタルハザード曲線

- 敷地前面(水位上昇側), 2号取水口前面(水位下降側)のフラクタルハザード曲線を以下に示す。

■敷地前面(水位上昇側)



■2号取水口前面(水位下降側)



参考文献

- 一般社団法人日本原子力学会(2012):日本原子力学会標準 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2011
- 社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2011):確率論的津波ハザード解析の方法
- 公益社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(2016):原子力発電所の津波評価技術2016
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2012):三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(第二版)について
- 社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2009):確率論的津波ハザード解析の方法(案)
- 渡辺偉夫(1998):日本被害津波総覧[第2版], 東京大学出版会
- 今村明恒(1899):三陸津浪取調報告, 震災予防調査会報告, vol.29, pp.17-32
- 羽鳥徳太郎(2000):三陸沖歴史津波の規模の再検討, 津波工学研究報告17, pp.39-48
- 中央气象台(1933):昭和八年三月三日三陸沖強震及津波報告, 験震時報, Vol.7, No.2別刷
- 伊木常誠(1897):三陸地方津浪実況取調報告, 震災予防調査会報告, 第11号, pp.5-34
- 松尾春雄(1933):三陸津浪調査報告, 内務省土木試験所報告, 第24号, pp.83-112
- チリ津波合同調査班(1961):1960年5月24日チリ地震津波に関する論文及び報告, 丸善
- Kenji Satake, Kelin Wang, Brian F. Atwater(2003):Fault slip and seismic moment of the 1700 Cascadia earthquake inferred from Japanese tsunami descriptions, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,VOL.108, NO.B11,2535
- 独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES)(2014):確率論的手法に基づく基準津波策定手引き, 2014年2月
- 杉野英治・岩淵洋子・橋本紀彦・松末和之・蛭澤勝三・亀田弘行・今村文彦(2014):プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案, 日本地震工学会論文集, 第14巻, 第5号
- 社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002):原子力発電所の津波評価技術
- 今井健太郎・菅原大助・今村文彦(2012):津波痕跡と史料から解釈した1611年慶長地震, 第31回日本自然災害学会学術講演会, III-2-2
- 相田勇(1977):三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東京大学地震研究所彙報, Vol.52, pp.71-101
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2002):三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について
- 内閣府中央防災会議事務局(2005):資料1 中央防災会議 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会(第10回)強震動及び津波高さの推計について
- 岩淵洋(2013):日本海溝海側斜面における地殻伸張速度及びそこで発生する正断層地震について, 海洋情報部研究報告第50号
- Satoko Murotani, Kenji Satake, Yushiro Fujii(2013):Scaling relations of seismic moment,rupture area,average slip,and asperity size for M~9 subduction zone earthquakes, Geophysical Research Letters,Vol.40,pp.5070-5074
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2004):千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第二版)について
- 杉野英治・呉長江・是永眞理子・根本信・岩淵洋子・蛭沢勝三(2013):原子力サイトにおける2011東北地震津波の検証, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第2号(特集号)
- 杉野英治・岩淵洋子・阿部雄太・今村文彦(2015):確率論的津波ハザード評価における津波想定の影響, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第4号
- 菅野剛・大内一男・平田一穂(2012):女川原子力発電所における津波の評価および対策, 電力土木, No.362

津波 PRA における漂流物の取り扱いについて

建屋・機器のフラジリティを評価する際の漂流物の取扱いに関して、日本原子力学会発行の「原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2011」（以下、「津波 PRA 学会標準」という。）では以下のように記されている。

- ① 評価対象物に応じて複数の損傷モード・部位が存在し得るが、これらの中から支配的な損傷モード及び部位のみ評価対象として選定してもよい。

（津波 PRA 学会標準「8. 2. 3 損傷モード及び部位の抽出」より抜粋）

- ② 津波による対象漂流物の選定に際しては、～（省略）～当該サイトに影響を与える可能性のある漂流物の諸元（位置・種類・頻度）に留意し、支配的な津波波源から当該サイトまでに存在する漂流物の発生頻度が炉心損傷頻度に比べて小さい場合、もしくは、当該サイトに接岸していない船舶に対しては対象から除外してもよい。

（津波 PRA 学会標準「8. 2. 3 損傷モード及び部位の抽出」より抜粋）

この2つの記載を参考にして、建屋・機器リスト中の各設備に対して漂流物の衝突に関するフラジリティを検討した。検討内容を以下に示す。

- (1) 起動変圧器、RSW/HPSW ポンプ及び燃料移送ポンプについて

設置高さが敷地面とほぼ同じであるため、漂流物の衝突で機能喪失する以前に敷地内浸水での没水／被水により機能喪失すると想定される。このため、これらの設備については上記①を適用し、没水／被水を支配的な損傷モードとして選定した。

- (2) 津波防護施設及び浸水防止設備について

- a. 津波防護施設

- (a) 防潮堤

防潮堤に対する漂流物の影響を評価し、漂流物荷重により防潮堤の健全性に影響を及ぼすことのないことを確認した（添付資料参照）。

そのため、防潮堤の耐力評価として、漂流物荷重は考慮せず、支配的な荷重として津波荷重（波力）により検討する。

O.P. 33.9m を超える津波では、敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により複数の緩和機能喪失となり炉心損傷に至るため、フラジリティ評価は考慮しない。

- (b) 防潮壁

O.P. 33.9m を超える津波では、敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により複数の緩和機能喪失となり炉心損傷に至るため、フラジリティ評価は考慮しない。

- b. 浸水防止設備（浸水防止壁，建屋止水対策，原子炉建屋，原子炉建屋外壁扉，制御建屋，制御建屋外壁扉）

プラントウォークダウンおよび浸水解析を実施し，浸水防止設備に対する波力，漂流物等による機能喪失の可能性は小さいと判断した。

0. P. 33. 9m を超える津波では，敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により複数の緩和機能喪失となり炉心損傷に至るため，当該設備の機能喪失の有無は評価に影響しないことから，フラジリティ評価は実施していない。

- (3) 起因事象を緩和する設備について（HPSW ポンプ及び燃料移送ポンプを除く）

建屋内に設置されている緩和設備は，漂流物の衝突の影響を受ける可能性は小さいと判断した。このため，これらの設備については上記②を適用し，漂流物の衝突による影響はないと判断した。

屋外に設置されている CST は，浸水解析を実施し，CST に対する波力による機能喪失の可能性は小さいと判断した。また，CST 周辺の浸水深は低く重量物が漂流物化しないことから，CST に影響を与えることはないと判断した。

0. P. 33. 9m を超える津波では，敷地及び原子炉建屋又は制御建屋内への大量浸水により複数の緩和機能喪失となり炉心損傷に至るため，フラジリティ評価は考慮しない。

以上

防潮堤に対する漂流物の影響評価

1. 漂流物の調査範囲の設定

基準津波のうち敷地前面において最高水位となる津波(以下、「基準津波」という。)の波源特性及び発電所周辺の流況分析に基づき図 1-1 に示す調査範囲を設定して、防潮堤に影響を与える可能性がある漂流物を抽出した。

調査範囲設定に当たり考慮した事項を以下に示す。

① 漂流物の移動量に基づく調査範囲の設定

以下のとおり、基準津波の波源特性から防潮堤に到達する可能性がある漂流物の移動量を算定し、調査範囲を発電所中心から半径 5km に設定した。

i. 基準津波の波源特性

- ・ 基準津波(=東北地方太平洋沖型の地震(プレート間地震))の発生形態及び2号取水口前における水位時刻歴波形から、防潮堤に津波が到達する可能性があるのは第1波(図 1-2)。
- ・ 発電所敷地における第1波の水位上昇発生時から最高水位到達までに要する時間は約 15 分(図 1-2)。
- ・ 発電所周辺における流況分析から、基準津波の流速は概ね 5m/s 以下(図 1-3)。

ii. 漂流物の移動量の算定

- ・ 漂流物は、各地点における津波の第1波水位上昇時のいずれかで発生するものとし、発電所敷地における基準津波の波源特性を踏まえ以下のとおり算定した。

【漂流物の移動量】

$$\begin{aligned} &= \text{第1波水位上昇に要する時間 (15分)} \times \text{津波の流速 (5m/s)} \\ &= 4.5\text{km} \end{aligned}$$

② 発電所周辺の津波流向に基づく調査範囲の設定

図 1-3 に示す発電所周辺の津波流向から、防潮堤に漂流物が襲来する可能性がある影響範囲として、調査範囲の南端を寄磯崎付近に、北端を大貝崎付近に設定した。

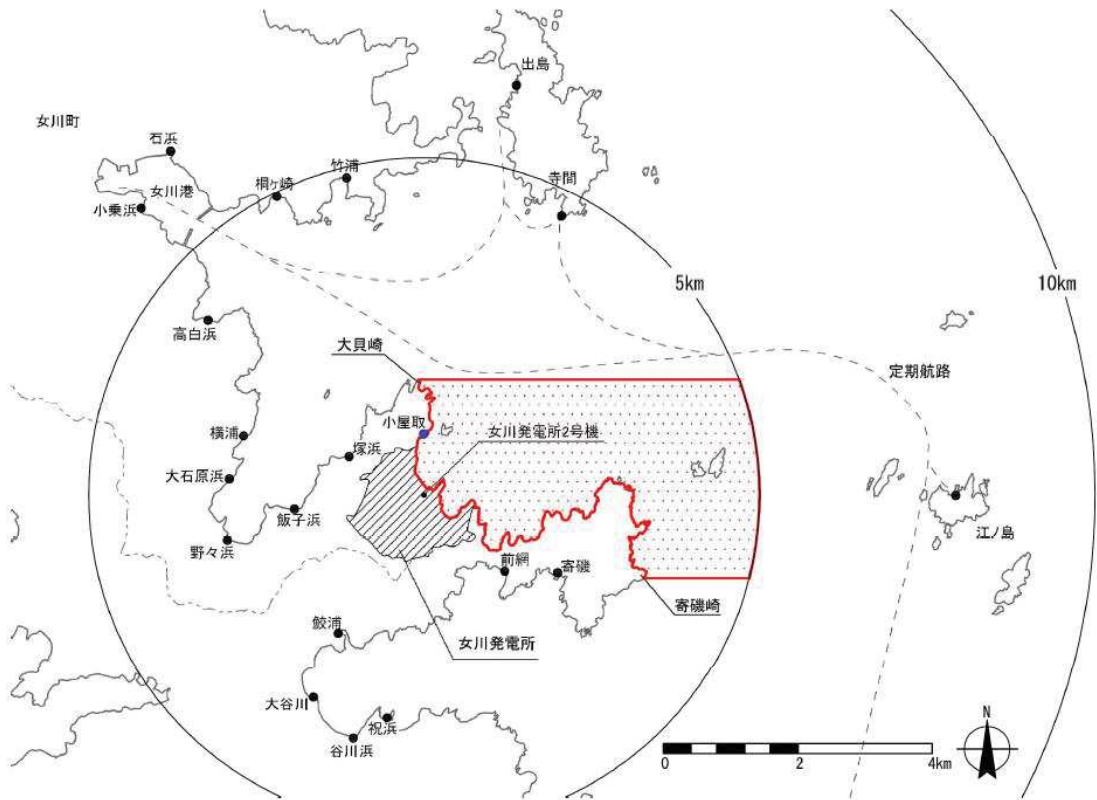


図 1-1 漂流物調査範囲

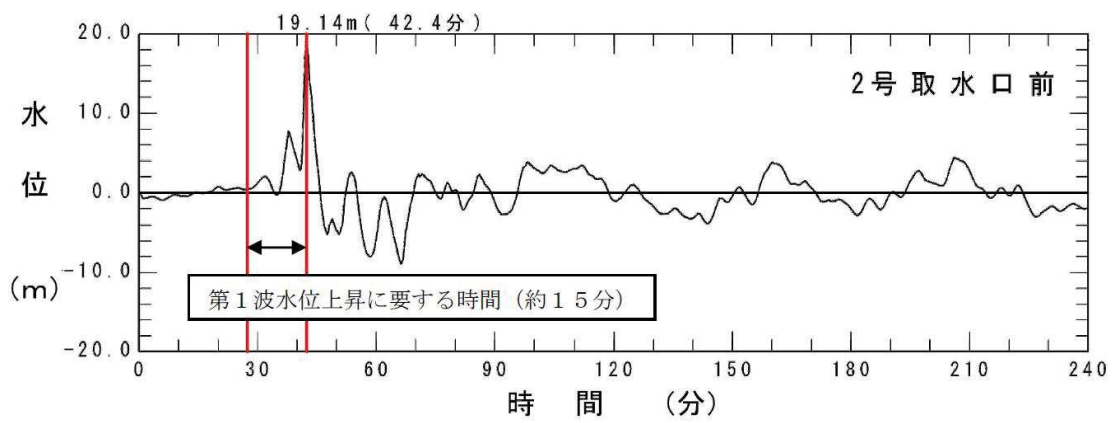


図 1-2 2号取水口前の水位時刻歴波形

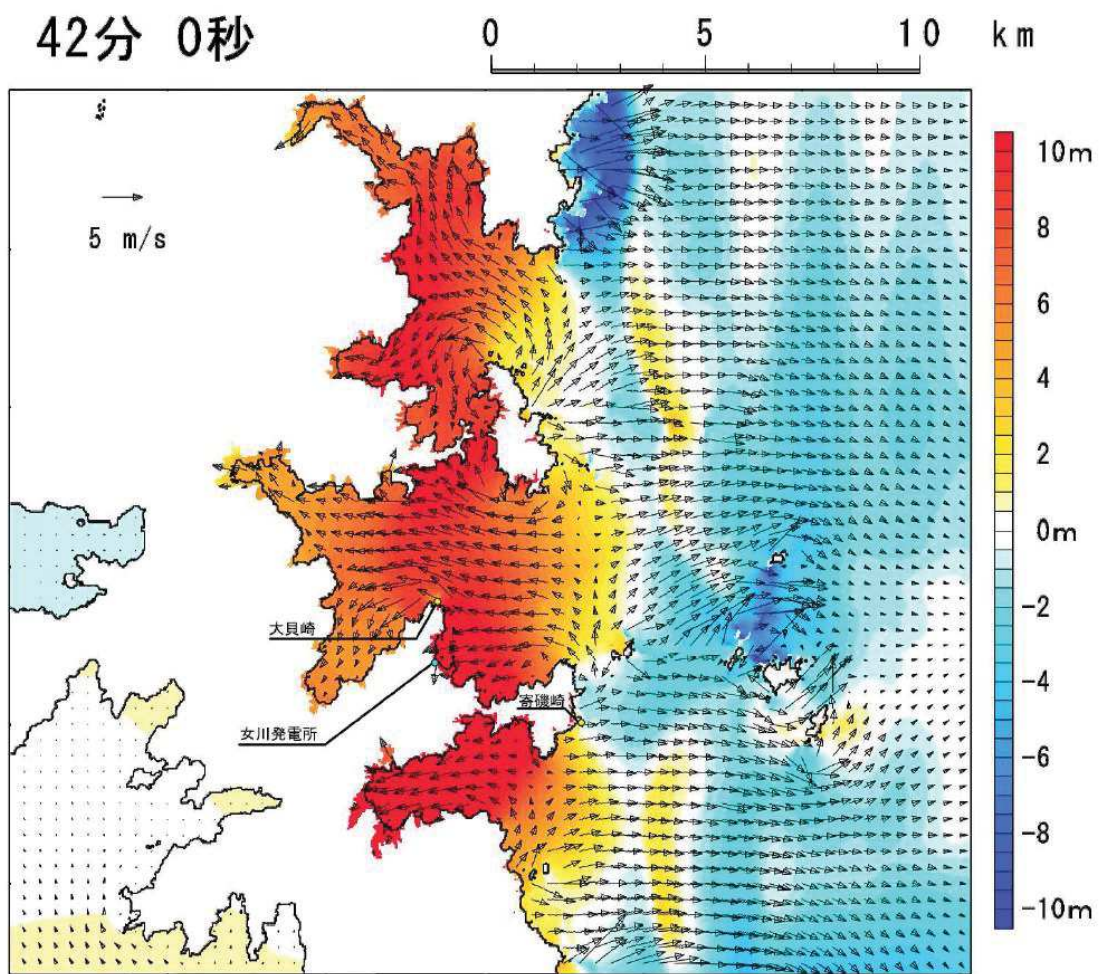


図 1-3 女川発電所周辺の津波流向ベクトル（地震発生後 42 分 0 秒）

2. 漂流物の調査方法及び調査結果

(1) 調査方法

調査範囲内の人工構造物，海上設置物，船舶について，机上調査，プラントウォークダウン，聞き取り調査により抽出した(表 2-1)。

なお，今回調査範囲として設定した領域は，2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波により，家屋・海上設置物の流出等の被害が発生しているが，現在復旧途上であることを考慮し，地震発生前の状況を考慮し漂流物を抽出した。

表 2-1 漂流物の調査方法

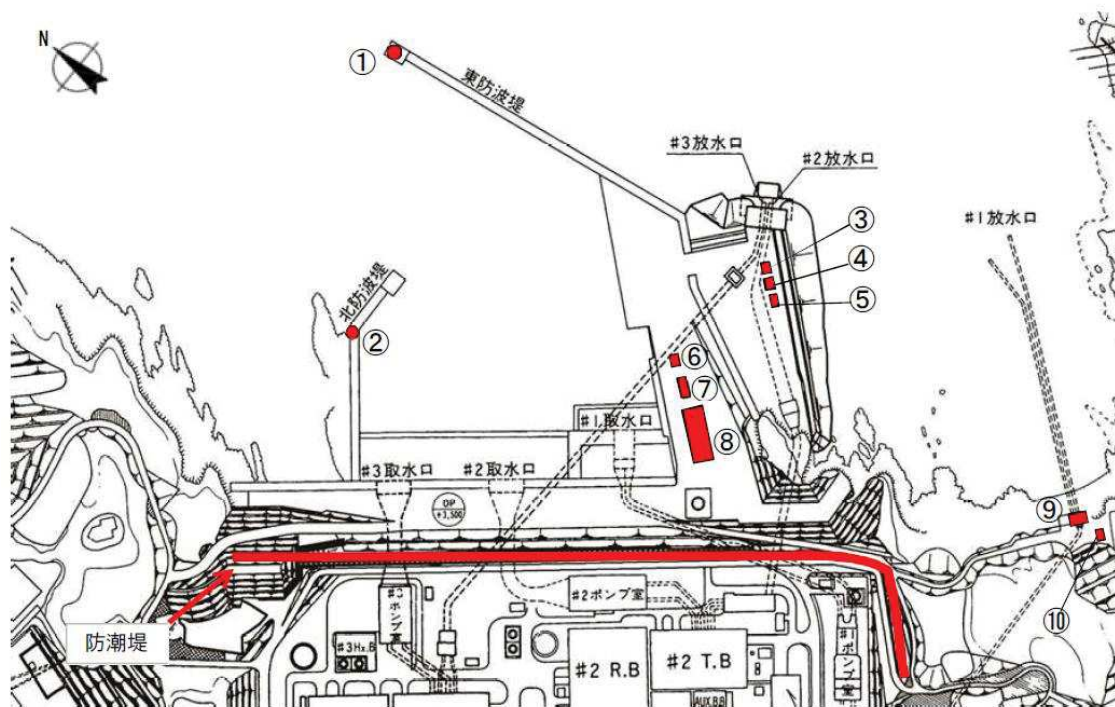
	調査分類	調査方法	対象例
A	発電所敷地内における人工構造物	プラントウォークダウン 机上調査	港湾施設 建屋等
B	漁港・集落・海岸線の人工構造物	プラントウォークダウン 机上調査	港湾施設 家屋等
C	海上設置物	聞き取り調査 机上調査	係留漁船 養殖漁業施設 標識ブイ等
D	船舶	聞き取り調査 机上調査	燃料等輸送船 定期航路船舶

(2) 調査結果

調査分類 A～D のうち，防潮堤への漂流可能性のある人工構造物が確認された調査分類 A 及び C の調査結果を図 2-1 及び図 2-2 に示す。

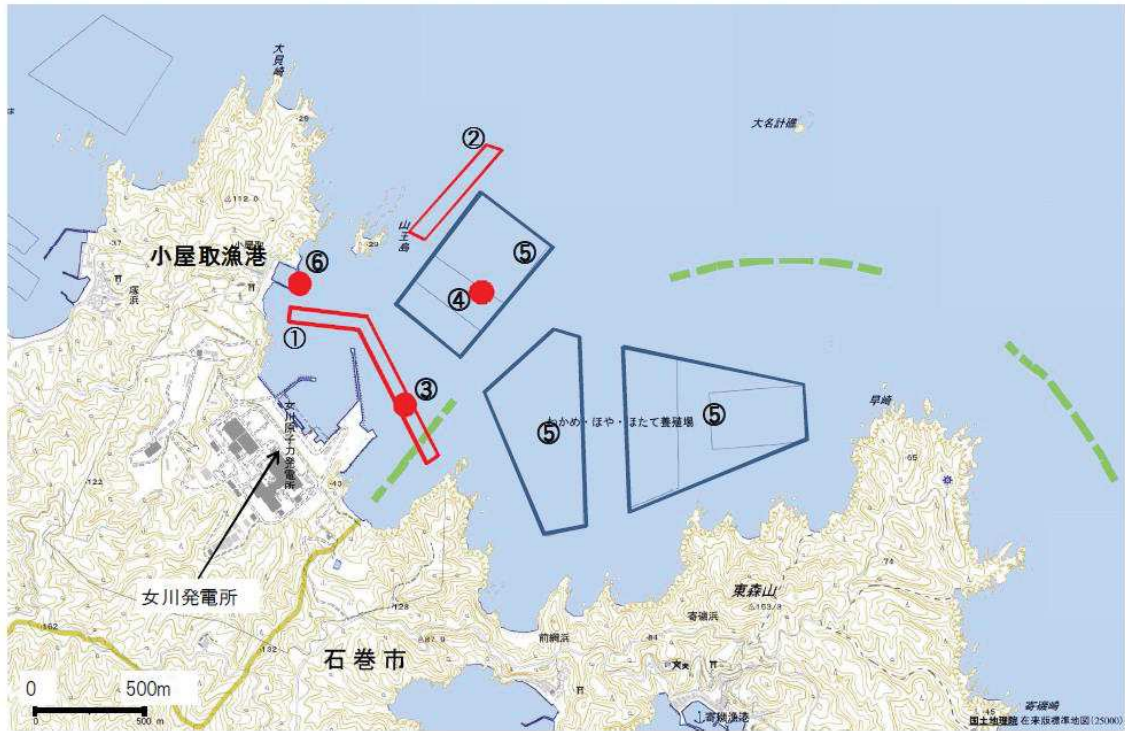
調査分類 B については，漁港・集落・海岸線の人工構造物として小屋取地区が該当し，津波に伴い漂流物となる可能性があるものとして，家屋，一般車両，タンクが抽出された。ただし，同地区は発電所近傍(発電所から 700m 程度)に位置しており，同地区を遡上する津波と発電所防潮堤へ遡上する津波の第 1 波到達時間と最高水位到達時間に大きな差は無いことから，同地区で発生した漂流物が防潮堤に影響を及ぼすことはない。

また，調査分類 D の船舶については，女川発電所沖合約 2 km を航行する定期航路船舶及び女川発電所へ寄港する燃料等輸送船が抽出されたが，いずれも津波警報等発令時には適切な退避行動をとるため漂流物とならない。



種類	主材料	漂流可能性	評価
灯台 (①)	鋼材	なし	重量物であるため漂流しない
導標 (②)	鋼材	なし	
3号機放水路サンプリング建屋 (③)	R C	なし	
2号機放水口モニター建屋 (④)	R C	なし	
2号機放流管真空ポンプ室 (⑤)	R C	なし	
港湾作業管理詰所 (⑥)	鋼材	有り	漂流物として防潮堤へ到達する可能性がある (津波波力により壁材等が構造体から分離する可能性を考慮, 重量 5t 未満)
資機材格納倉庫 (⑦)	鋼材	有り	
屋外電動機等点検建屋 (⑧)	鋼材	有り	
1号機放水路サンプリング室 (⑨)	R C	なし	重量物であるため漂流しない
1号機放水口モニター建屋 (⑩)	R C	なし	
配電柱	R C	なし	
一般車両	—	有り	漂流物として防潮堤へ到達する可能性がある (重量 5t 未満)

図 2-1 調査分類 A (発電所敷地内における人工構造物) の調査結果



種類	主材料	漂流可能性	評価
消滅範囲標識ブイ (①)	F R P	有り	漂流物として防潮堤へ到達する可能性がある (重量 1t 未満)
航路標識ブイ (②)	鋼材	なし	重量物であるため漂流しない
海水温度観測鉄塔 (③)	鋼材	なし	
海水温度観測用浮標 (④)	鋼材	なし	
養殖漁業施設 (⑤)	ロープ等	有り	漂流物として防潮堤へ到達する可能性がある (重量 1t 未満)
係留漁船 (⑥)	F R P	有り	漂流物として防潮堤へ到達する可能性がある (最大重量 15t*)

※津波漂流物対策施設設計ガイドライン(案)(平成 21 年 5 月, 沿岸技術研究センター, 寒地港湾技術研究センター)に準拠し, 総トン数の 3 倍を重量として考慮した(係留漁船の最大総トン数約 5t)

図 2-2 調査分類 C (海上設置物) の調査結果

3. 防潮堤に対する漂流物の影響

(1) 漂流物による衝突力

調査の結果、漂流物として係留漁船(最大重量 15t)を抽出し、「道路橋示方書(I 共通編・IV下部構造編)・同解説」に準拠し、以下の式により衝突力を算定した。係留漁船による衝突力は $P=73.6\text{kN}$ となり、防潮堤を片持ち梁でモデル化した場合、防潮堤の天端(0. P. +29. 0m)に漂流物が衝突した場合の最大曲げモーメントは $772.8\text{kN}\cdot\text{m/本}$ となる。

$$P=0.1 \cdot W \cdot v$$

ここに、P:衝突力(kN)

W:流送物の重量(15.0t=147.1kN)

v:表面流速(5.0m/s)

(2) 防潮堤の耐力

防潮堤の耐力については別紙 3.2.2. c-2 に示しており、HCLPF 値が 41.7m となっている。また、防潮堤の現実的耐力(全塑性モーメント)の平均値は $114,255\text{kN}\cdot\text{m/本}$ となっており、係留漁船による衝突力($772.8\text{kN}\cdot\text{m/本}$)に対して十分大きい。

したがって、表 3-1 に示すとおり、防潮堤に対する漂流物の影響は軽微であり、防潮堤の健全性に影響を及ぼすおそれはない。

表 3-1 防潮堤に対する漂流物の影響評価

調査分類	漂流物	評価結果
A 発電所敷地内における人工構造物	壁材等 (5 t 未満) 一般車両 (5 t 未満)	調査分類 C の最大重量物の係留漁船以下である
B 漁港・集落・海岸線の人工構造物	該当なし	—
C 海上設置物	係留漁船 (15 t) 消滅範囲標識ブイ (1 t 未満) 養殖漁業施設 (1 t 未満)	最大重量物の係留漁船による衝突力は防潮堤の耐力に対して十分小さいことから、防潮堤の健全性に影響を及ぼすおそれはない
D 船舶	該当なし	—

防潮堤の耐力について

1. 評価手順

防潮堤の機能が喪失する津波高さの限界を評価するため、「日本原子力学会標準：原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準（2011年，日本原子力学会）」等を参照し，防潮堤のフラジリティ評価を行った。評価手順を図1に示す。

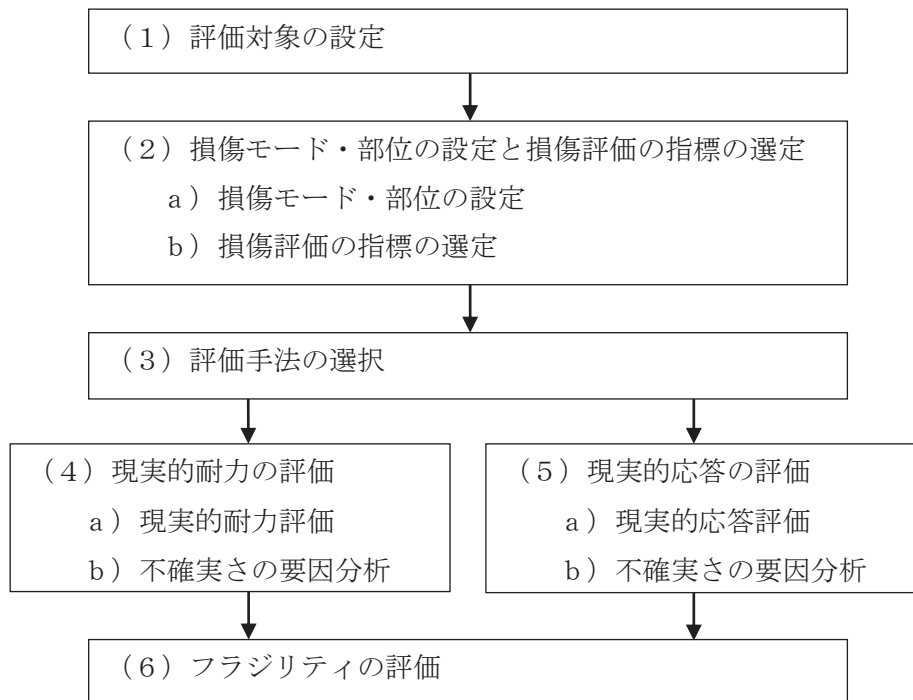


図1 フラジリティ評価手順

2. 評価条件

防潮堤の津波に対する耐性については、設置許可基準規則第5条（津波による損傷の防止）に対する適合性に関する評価において確認している（別添資料1「耐津波設計方針について」添付資料24「防潮堤の設計方針及び構造成立性評価結果について」）。

上記評価において、保守的に設定した津波高さ O.P. +29.0m による津波波力に対して最も裕度が小さい断面と支配的な損傷部位・損傷モードを抽出した結果、鋼管式鉛直壁（一般部：長杭）の背面補強工上面位置（O.P. +18.5m）での曲げ圧縮損傷が支配的となった。これに着目し、片持ち梁モデルによる発生曲げモーメント（現実的応答）と全塑性モーメント（現実的耐力）を算定することで、フラジリティ評価を行った（図2）。

現実的応答と現実的耐力の評価において考慮した不確かさ要因を表1に、津波波圧の算定方法を図3に示す。

なお、本評価においては、押し波（海側から防潮堤に津波が作用する場合）を対象に津波波圧を算定しており、浸水深の基準面を O.P. +2.5m としている。引き波（陸側から防潮堤に津波が作用する場合）の場合には、浸水深の基準面が O.P. +13.8m と高くなり、津波波圧が押し波よりも小さくなることから、引き波の影響も包含した評価条件となっている。

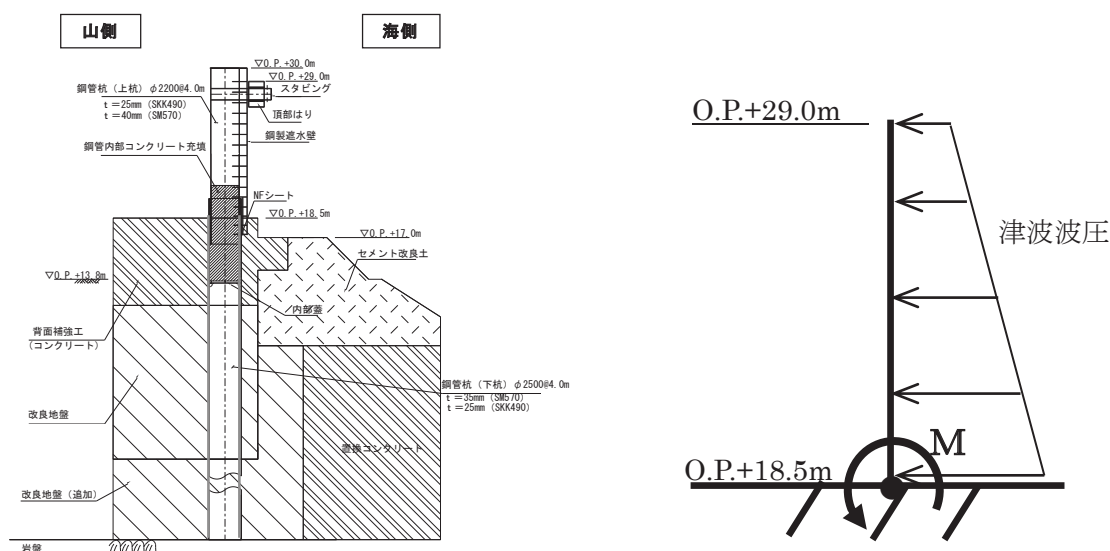


図2 評価断面図と評価モデル（鋼管式鉛直壁（一般部：長杭））

表 1 考慮する不確かさ要因

損傷モード	評価項目	一般的な不確かさ要因	
		偶然的な不確かさ	認識論的不確かさ
波力	耐力評価	鋼管杭の全塑性モーメント算定時の降伏強度 ^{※1} 平均値/基準値=1.23 標準偏差=0.10	$c\beta^e = 0.15^{※3}$
	応答評価	津波波圧算定時の水深係数 α ^{※2} 平均値=1.15 標準偏差=0.10	

※1 独立行政法人土木研究所（2009）：鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討

※2 大村英昭，尾崎充弘，平田一穂，秋山義信，岩前伸幸，池谷毅（2014）：波形特性を再現した防潮堤に作用する津波波力実験，土木学会論文集 B3（海洋開発）Vol. 70, No. 2, I_432-I_437

※3 R. P. Kennedy and M. K. Ravindra（1984）：Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies, Nuclear Engineering and Design, Vol. 79, pp. 47-68

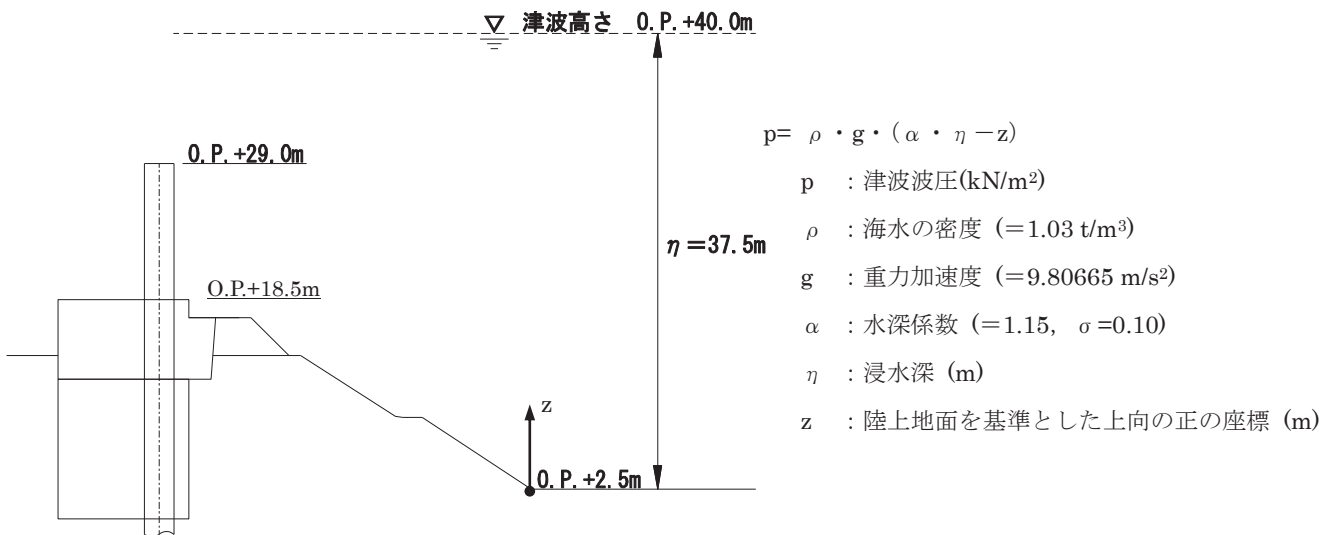


図 3 津波波圧の算定方法（津波高さ O.P. +40m の場合）

3. 評価結果

4種類の津波高さ（O.P.+40m, 45m, 50m, 60m）に対する現実的応答（発生曲げモーメント）と現実的耐力（全塑性モーメント）の算定結果を図4に示す。

ここで、現実的応答については、各津波高さによる津波波圧（表1及び図3に基づき水深係数 α （平均値=1.15, 標準偏差=0.10）より設定）が作用した場合の鋼管杭（評価部位）の発生曲げモーメントの確率密度を対数正規分布により近似した。また、現実的耐力については、鋼管杭（評価部位）の降伏強度の不確かさ（表1より設定）を考慮し、「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（日本道路協会）」に基づく全塑性モーメントの確率密度を対数正規分布により近似した。

上記により離散的に求めた防潮堤の損傷確率（現実的応答が現実的耐力を超過する確率）について、津波高さと損傷確率の関係として対数正規分布により近似したフラジリティ曲線の算定結果を図5に示す。

評価の結果、50%信頼度フラジリティ曲線の損傷確率の中央値の津波高さは67.9mとなり、HCLPF値は41.7mとなった。

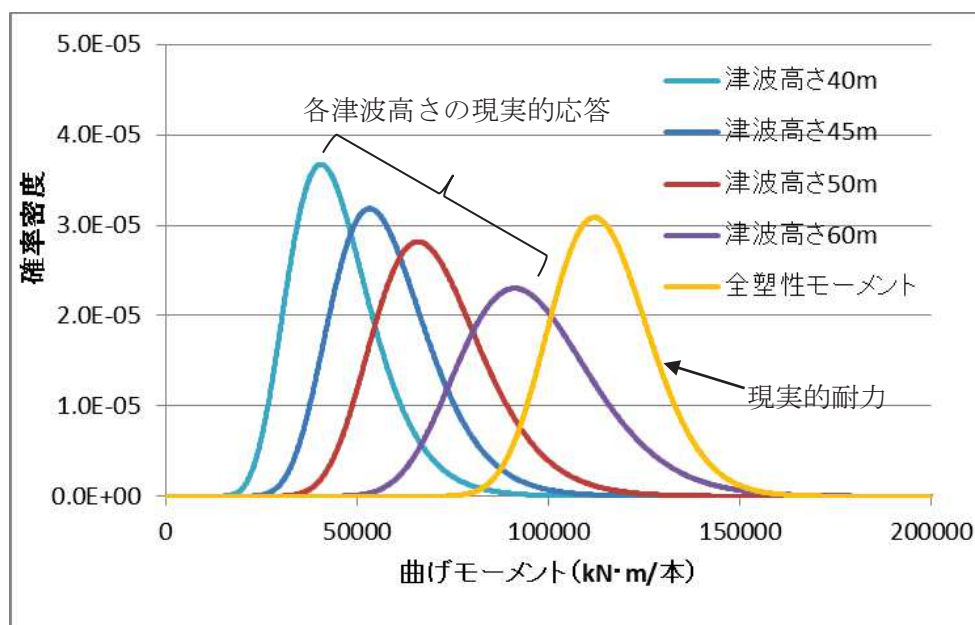
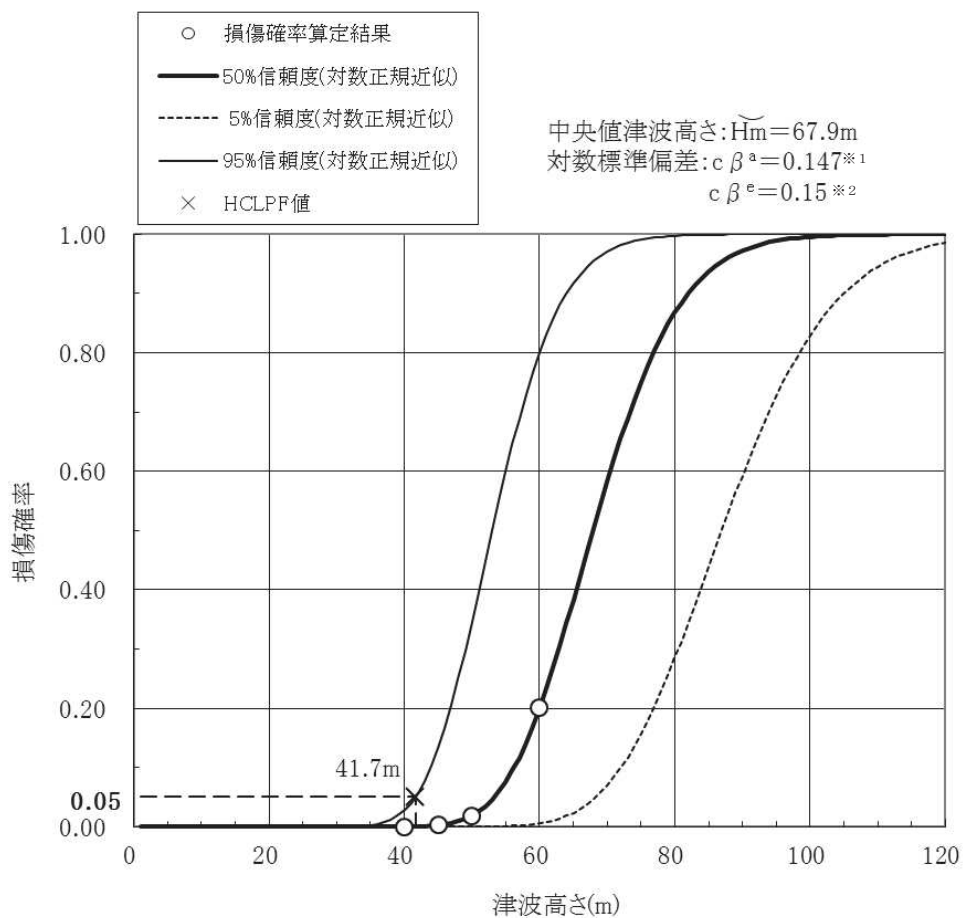


図4 現実的応答と現実的耐力の算定結果



津波高さ(m)	40	45	50	60
損傷確率	3.4E-04	3.0E-03	1.8E-02	2.0E-01

※1 $c\beta^a$ は近似した fragility 曲線から得られる偶然的な不確かさ要因の対数標準偏差を示したものである(fragility 曲線の傾きが緩やかな場合に $c\beta^a$ が大きくなる)。

※2 $c\beta^e$ は表 1-1 に示した認識論的不確かさ要因の対数標準偏差 ($c\beta^e$ が大きくなると fragility 曲線の信頼度の幅 (5%信頼度曲線と 95%信頼度曲線の離隔) が大きくなる)。

図5 近似した fragility 曲線の算定結果

以上

津波による敷地浸水解析について

1. はじめに

本資料では、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動^{※1}による影響を考慮する。

※1 敷地が一様に約 1m 沈下（その後継続的に隆起）

2. 敷地への浸水経路について

設計基準対象施設に対して、基準津波による遡上波が直接到達、流入することを防止できるように、敷地前面に 0. P. +29m の防潮堤を設置する。また、海と接続する取水路、放水路、排水路等からの敷地への流入を防止するため、流入経路となる可能性のある開口部に対して、防潮壁の設置、閉止板の設置等の浸水対策を実施する。

上記の浸水対策により、基準津波による浸水経路はなくなるが、津波の高さに応じ防潮壁が機能喪失することを想定して、浸水解析条件を設定する。

3. 0. P. +29m 津波時の浸水解析について

敷地前面には津波防護施設として、天端高さ 0. P. +29m の防潮堤を設置する。このため、0. P. +29m の津波による遡上波は敷地に到達することはないが、取水路及び放水路の開口部（0. P. +14m）より、津波が敷地に流入することが考えられることから、0. P. +29m の津波による取水路及び放水路を浸水経路とした浸水解析を実施した。

a. 浸水解析条件

浸水解析条件は以下のとおりとした。

(a) 0. P. +29m 津波の作成

- ・ 確率論的津波ハザード評価から得られる津波ハザード曲線のうち、津波水位 0. P. +29m（年超過確率： 4.49×10^{-6} ）に最も寄与度が大きい津波地震（Mw8.3）を、敷地前面位置（＝防潮堤位置）で最高水位が 0. P. +29m 程度となるように、断層モデルのすべり量を調整したものを 0. P. +29m 津波とした。敷地前面の最高水位地点及び敷地前面の最高水位地点で抽出した水位時刻歴波形を補図 1-1 及び補図 1-2 に示す。

(b) 浸水の検討

- ・ 開口部からの浸水については、女川 1～3 号炉の取水口及び放水口前面における 0. P. +29m 津波の水位時刻歴波形を用いて、1～2 号炉については、取水口～海水ポンプ室に至る経路、3 号炉については取水口～海水熱交換器建屋に至る経路及び各号炉の放水口～放水立坑に至る経路からの溢水を考慮した数値シミュレーションを実施した^{※2}。取水・放水施設の一例として、女川 2 号炉の取水施設を補図 1-3 に示す。

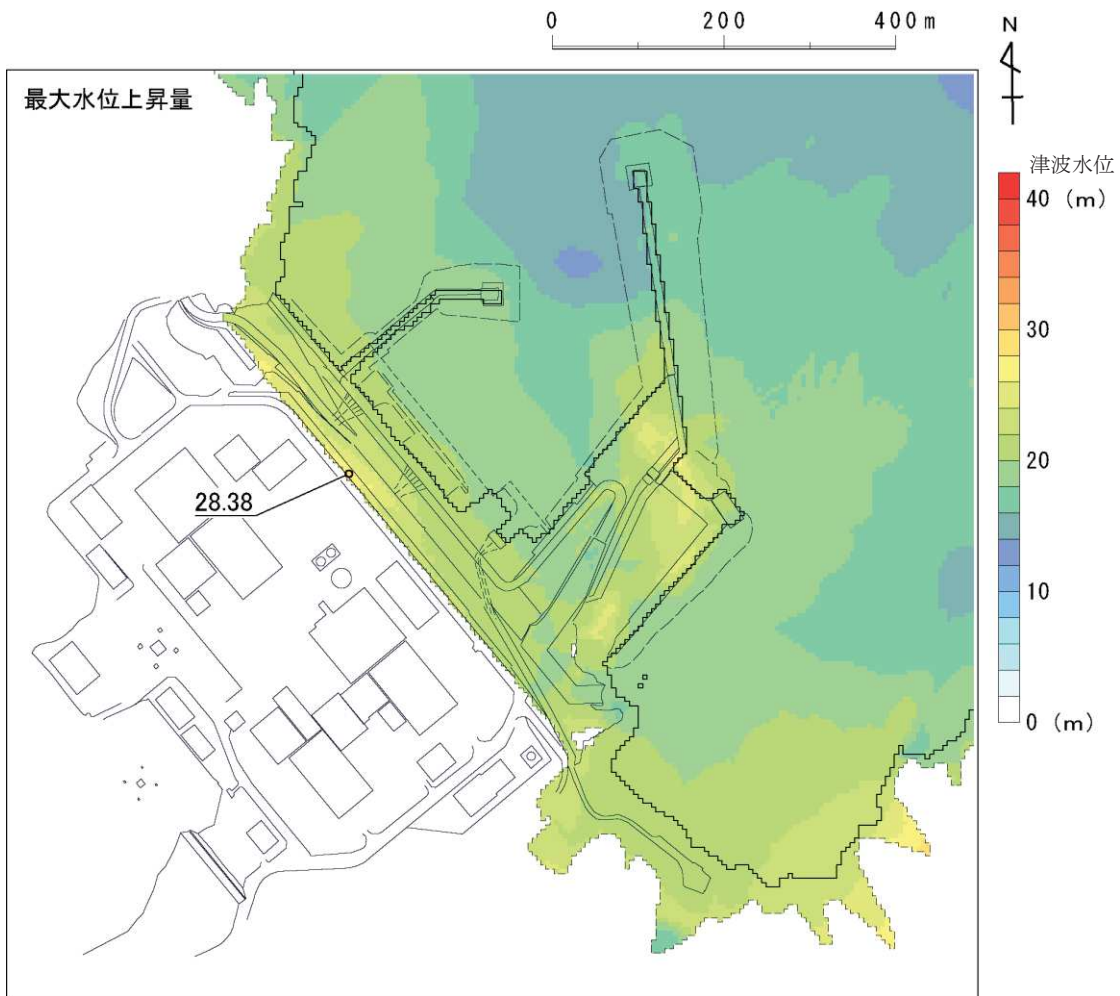
※2 高橋俊彦・福山貴子・新保裕美・秋山義信・田中昌宏・池谷毅：津波氾濫シミュレーションの水理模型実験による検証，土木学会論文集 B3（海洋開発），
Vol. 69, No. 3. 2. 2-32, 2013

- ・ 浸水量の算定にあたっては，取水路及び放水路の開口部周りに設置する防潮壁から越流した津波は全量敷地内に留まるものとし，排水施設からの排水は考慮していない。

b. 浸水解析結果

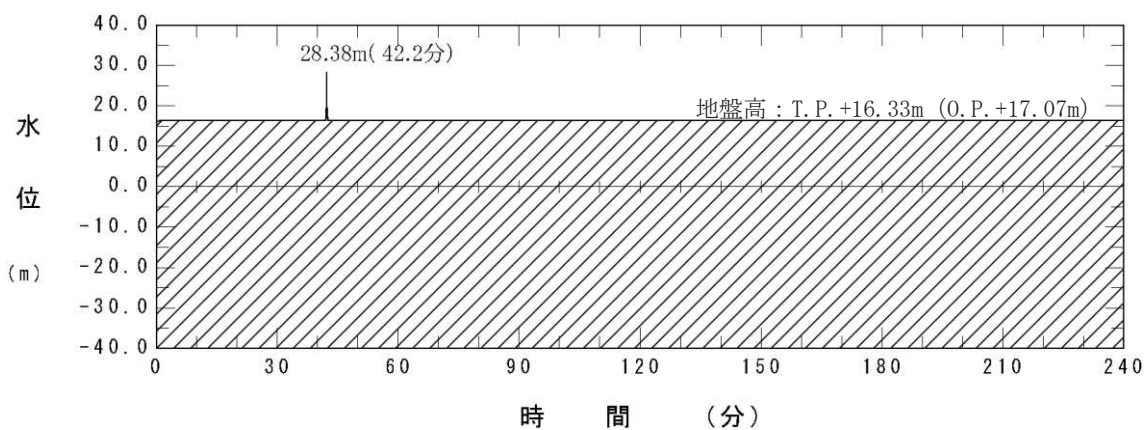
敷地内最大浸水深分布を補図 1-4 に示す。

津波高さ 0.P. +29m 未満においては，発電所敷地内への浸水がほぼ発生せず，津波によるプラントへの影響がないため，津波を起因として炉心損傷に至る事故シナリオはない。



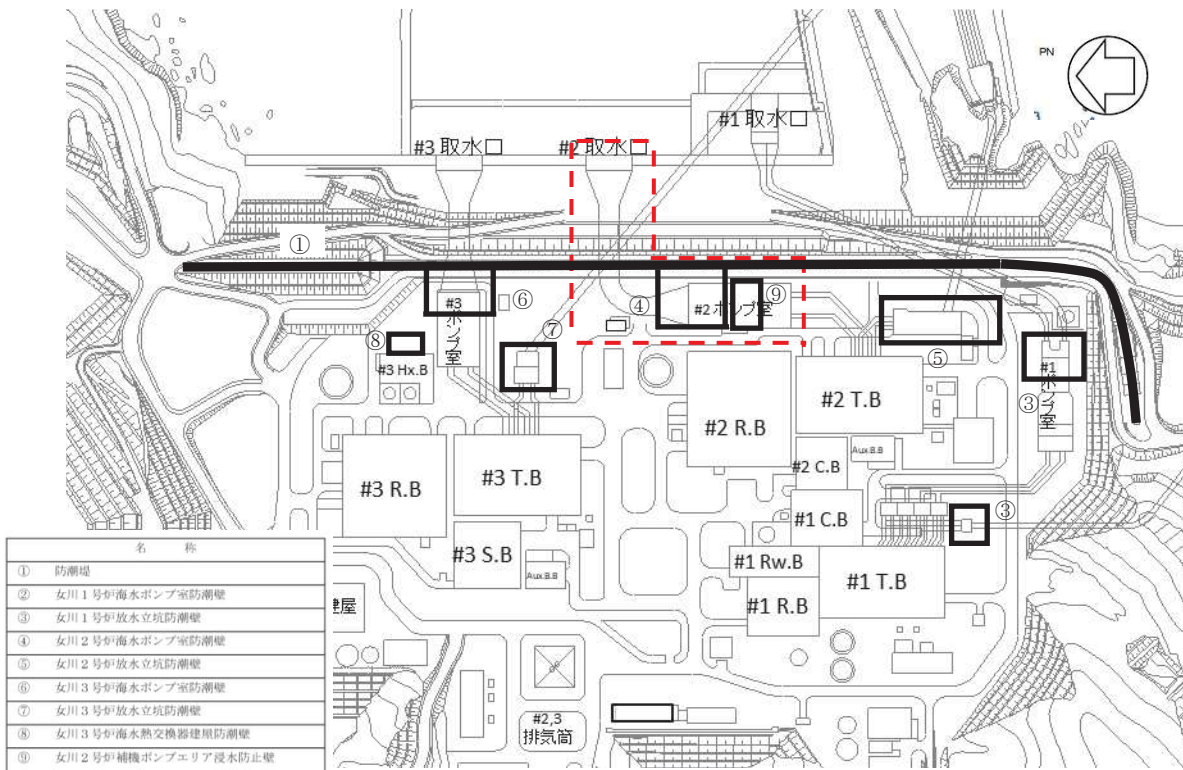
注) 図上の津波水位は、T.P. 表示。
 T.P. +28.38m=O.P. +29.12m (O.P. ±0.0m=T.P. -0.74m)
 なお、同地震に伴い発電所敷地は7cm隆起している。

補図 1-1 敷地前面 (防潮堤前面) 最高水位地点 (最大水位上昇量分布)

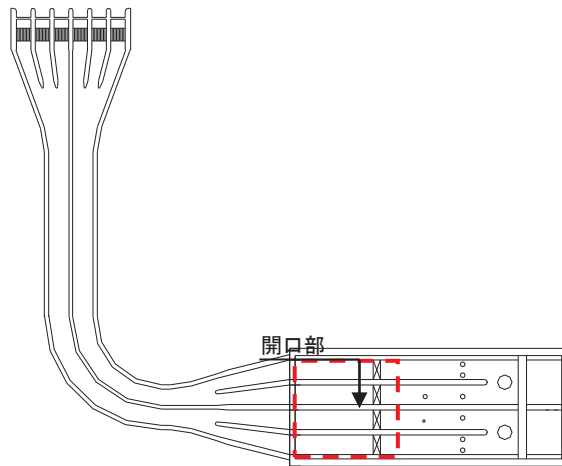


注) 図上の津波水位は、T.P. 表示。
 T.P. +28.38m=O.P. +29.12m (O.P. ±0.0m=T.P. -0.74m)
 なお、同地震に伴い発電所敷地は7cm隆起している。

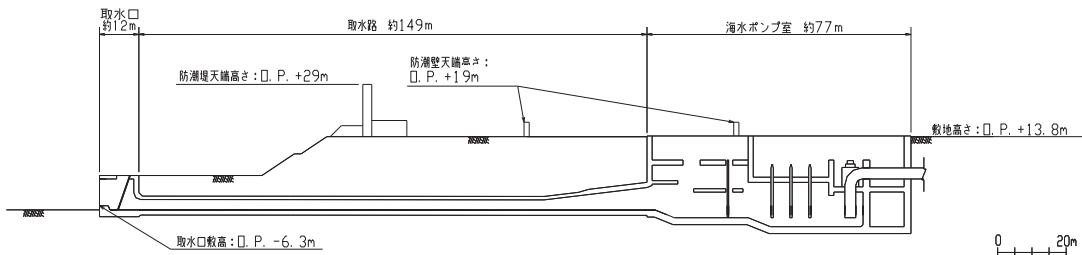
補図 1-2 敷地前面 (防潮堤前面) 最高水位地点 (水位時刻歴波形)



敷地全体平面図（浸水防護施設の配置を明示）



取水施設（平面図）



取水施設（断面図）

補図 1-3 女川2号炉取水施設

□ : 解析対象範囲



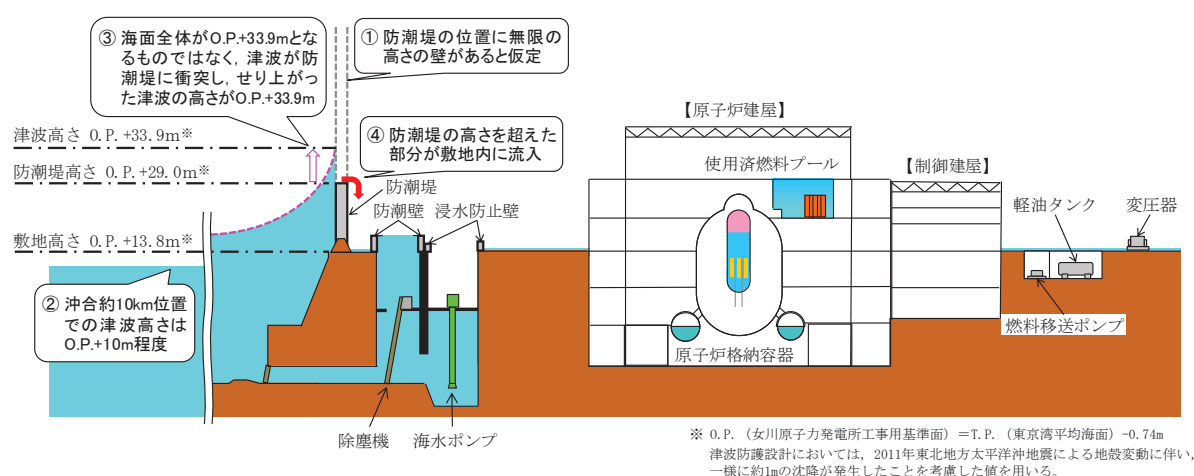
補図 1-4 O.P. +29m 津波による敷地内最大浸水深分布

4. O. P. +29m を超える津波による事故シナリオについて

(1) O. P. +33.9m 津波

O. P. +33.9m 津波時^{※1} の浸水解析を行い、O. P. +29m を超える津波による事故シナリオを分析した。

※1 防潮堤の位置に無限の高さの壁があると仮定した条件での津波水位。沖合約10km の位置（基準津波の策定位置）で O. P. +10m 程度の津波が、防潮堤前面で O. P. +33.9m となる。この津波における防潮堤の高さ（防潮堤前面で O. P. +29m）を超えた部分の海水が、防潮堤の内側に流入することを仮定し敷地内への浸水の評価している（補図 2-1 参照）。なお、防潮堤を O. P. +29m とした場合の津波水位は O. P. +33.0m となる（補図 2-2 参照）。



補図 2-1 O. P. 33.9m 津波が敷地内に流入するイメージ

a. 浸水解析条件

浸水解析条件は以下のとおりとした。

(a) O. P. +33.9m 津波の作成

- 確率論的津波ハザード評価から得られる津波ハザード曲線のうち、津波水位 O. P. +33.9m (年超過確率: 7.25×10^{-7}) に最も寄与度が大きい津波地震 (Mw8.3) を、敷地前面位置 (=防潮堤位置) で最高水位が O. P. +33.9m 程度となるように、断層モデルのすべり量を調整したものを O. P. +33.9m 津波とした。敷地前面の最高水位地点及び敷地前面の最高水位地点で抽出した水位時刻歴波形を補図 2-2 及び補図 2-3 に示す。

(b) 浸水の検討

- O. P. +33.9m の津波では、津波が天端高さ O. P. +29m の防潮堤を越流して敷地に到達することから、防潮堤を越流した津波による浸水及び開口部からの浸水について検討を実施した。
- 開口部からの浸水については、女川 1～3 号炉の取水口及び放水口前面にお

ける O. P. +33.9m 津波の水位時刻歴波形を用いて、1～2号炉については、取水口～海水ポンプ室に至る経路、3号炉については取水口～海水熱交換器建屋に至る経路及び各号炉の放水口～放水立坑に至る経路からの溢水を考慮した数値シミュレーションを実施した^{※2}。

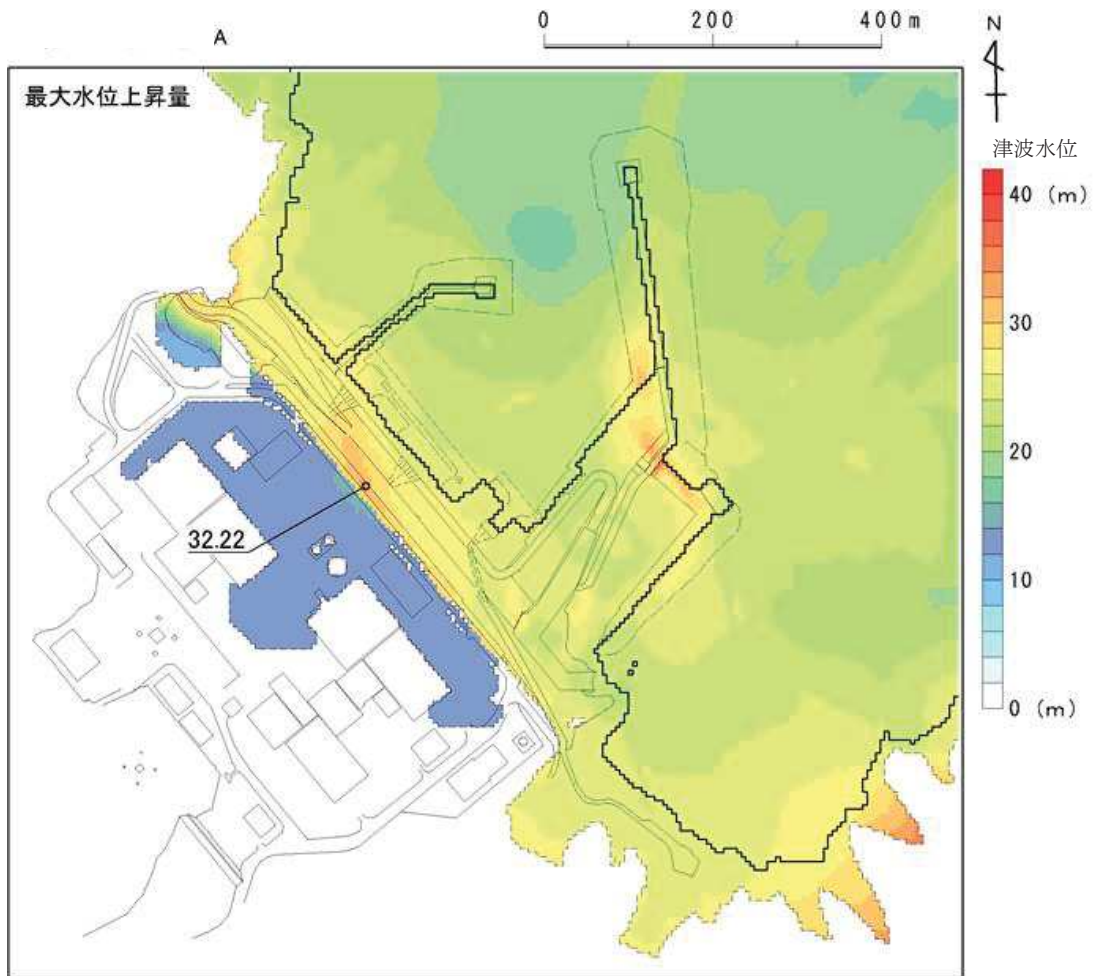
※2 高橋俊彦・福山貴子・新保裕美・秋山義信・田中昌宏・池谷毅：津波氾濫シミュレーションの水理模型実験による検証，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 69, No. 3. 2. 2-32, 2013

- ・ 浸水量の算定にあたって考慮した浸水経路は各開口部のみとし、排水施設は考慮していない。

b. 浸水解析結果

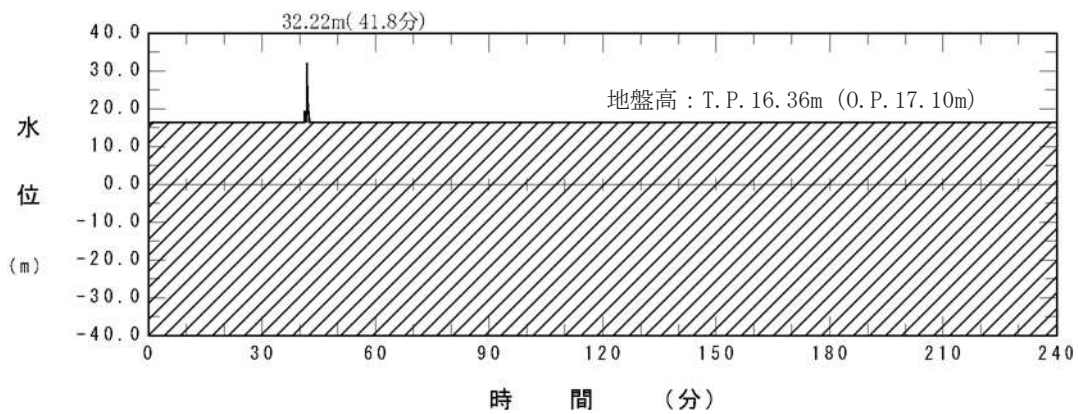
敷地内最大浸水深分布を補図 2-4 に示す。O. P. +33.9m 津波により建屋まわりでの浸水深は、原子炉建屋で最大約 0.1m、制御建屋で最大約 0.2m、タービン建屋で最大約 0.5m となる。原子炉建屋及び制御建屋のカーブ高さ（建屋外壁扉の下端レベルから敷地レベルの高さ）を越えないが、タービン建屋のカーブ高さを越えてタービン建屋内への浸水が発生する。なお、敷地内浸水により、起動変圧器、RSW/HPSW ポンプ、燃料移送ポンプは機能喪失しないことを確認している。

以上より、「O. P. +29m～O. P. +33.9m」では、原子炉建屋、制御建屋への浸水がないため緩和設備は健全であるが、タービン建屋内への浸水により種々の過渡事象が発生する可能性がある。



注) 図上の津波水位は、T.P. 表示。
 $T.P. +32.22m = O.P. +32.96m$ ($O.P. \pm 0.0m = T.P. -0.74m$)
 なお、同地震に伴い発電所敷地は 10cm 隆起している。

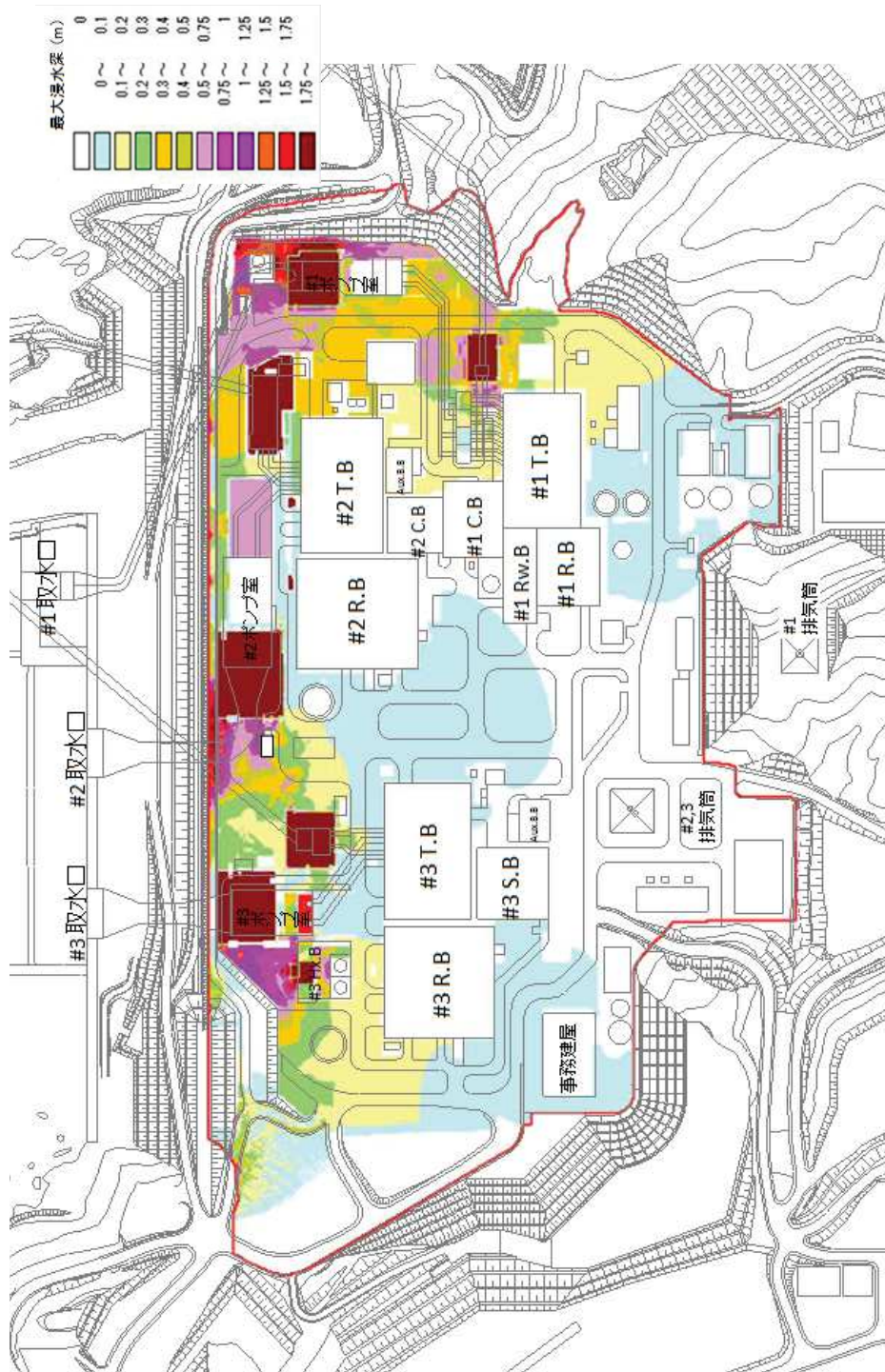
補図 2-2 敷地前面 (防潮堤前面) 最高水位地点 (最大水位上昇量分布)



注) 図上の津波水位は、T.P. 表示。
 $T.P. +32.22m = O.P. +32.96m$ ($O.P. \pm 0.0m = T.P. -0.74m$)
 なお、同地震に伴い発電所敷地は 10cm 隆起している。

補図 2-3 敷地前面 (防潮堤前面) 最高水位地点 (水位時刻歴波形)

□ : 解析対象範囲



補図 2-4 O.P. +33.9m 津波による敷地内最大浸水深分布

5. 解析コードの妥当性について

解析コードには、鹿島建設（株）・中部大学が開発した「都市型水害予測解析システム（Ver1.2）」を使用している。本システムは、治水対策等への適用実績^{※1}がある都市部における内水氾濫解析コードに、取放水路等を介して海水が構内開口部から溢水する機構を組み込んだものである。

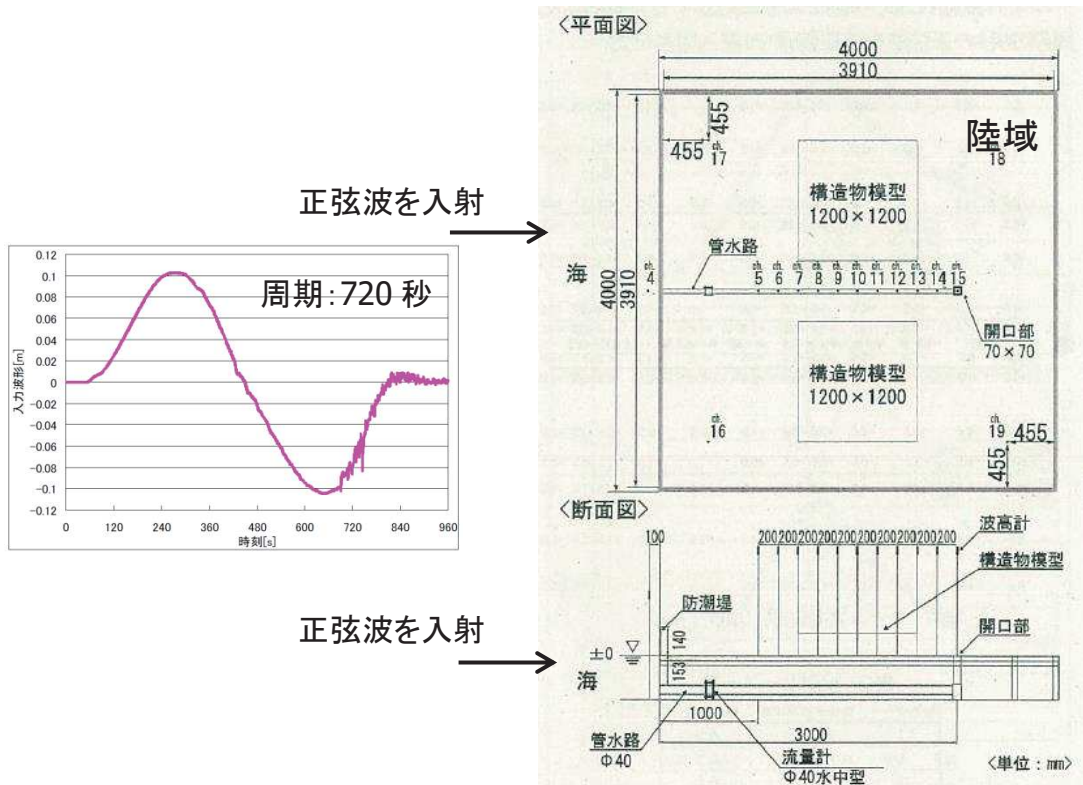
発電所構内を想定した模型に正弦波を入射させた（補図 3-1）水理模型実験による検証^{※2}がなされている。

補図 3-1 に示す陸域部を完全にドライとした実験の場合では、氾濫水の先端が底面の不陸及び表面張力の影響を強く受け、再現計算の精度を検証する上でその取り扱いが困難になる。不陸、表面張力の影響を最小限とするよう陸域部の初期状態をウエットとした場合の実験では、実験値と解析値の水位ピーク時の相対誤差は 4%であり、非常に精度よく再現されている。

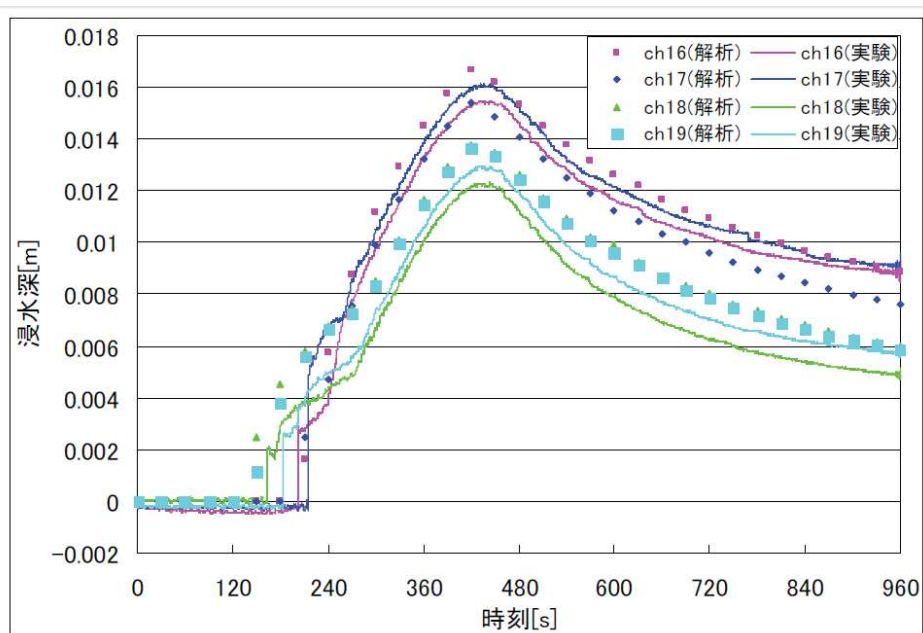
また、発電所構内の通常の状態である陸上部の初期状態をドライとした場合においては、底面の不陸等の影響が大きく計算精度はウエットの場合より多少落ちるが、時系列の全般的な傾向は良く再現されていることが確認された（補図 3-2）。

※1：武田 誠，森田 豊，松尾 直規：下水道システムを考慮した氾濫解析の治水対策への適用，水工学論文集，第 51 巻，pp.529-534，2007

※2：高橋俊彦，福山貴子，新保裕美，秋山義信，田中昌宏，池谷毅：津波氾濫シミュレーションの水理模型実験による検証，土木学会論文集 B3（海洋開発），69 巻，1 号，pp.22-32，2013（詳細は下図）



補図 3-1 水理模型実験概要
(高橋ほか (2013) に一部加筆)



(点が解析結果, 線が実験値を示す。)

補図 3-2 陸域部における水位時刻歴波形 (高橋ほか (2013))

以上

津波高さが O. P. 33. 9m を超過した場合の事故シナリオについて

本津波 PRA においては、O. P. 33. 9m を超過する津波が敷地及び建屋内に流入した場合に起因事象「敷地及び建屋内浸水」が発生し、炉心損傷に至ると想定している。ここでは、O. P. 33. 9m を超過する津波が敷地及び建屋内へ浸水が始まった以降の事故シナリオについて検討した。

1. 事故シナリオの分析

(1) 屋外設備の機能喪失による影響

O. P. 33. 9m を超過する津波が発生した場合、敷地内浸水により、起因事象対象設備（起動変圧器、RSW/HPSW ポンプ及び燃料移送ポンプ）は没水により機能喪失することとなる。このため、起動変圧器の機能喪失により外部電源が喪失するとともに、RSW/HPSW ポンプ及び燃料移送ポンプの機能喪失に伴い、非常用ディーゼル発電機及び HPCS 系ディーゼル発電機が機能喪失するため、全交流動力電源喪失となる。

(2) 原子炉建屋及び制御建屋内設備の機能喪失による影響

O. P. 33. 9m を超える津波による敷地内の浸水を想定すると屋外設備の機能喪失及び原子炉建屋への浸水による様々な緩和設備に対する影響が想定される。こうした O. P. 33. 9m を超える津波として申請時点の敷地状況及び津波防護設備の設計（現在よりも防潮壁が 1m 低く保守的な条件）を基とした敷地内氾濫解析を用い、津波の規模として、①O. P. 33. 9m～35. 2m（建屋内浸水による RCIC が機能喪失しない範囲）、②O. P. 35. 2m～38. 6m（空調ルーバからの浸水が限定される範囲）及び③O. P. 38. 6m～（空調ルーバからの大規模な浸水が想定される範囲）の 3 通りについて事故シナリオの分析を行った。

津波高さが O. P. 38. 6m 以下の場合、全ての建屋外壁扉を閉めた状態では、原子炉建屋付属棟への空調ルーバからの浸水のみとなることから、炉心損傷回避のために必要となる機器が機能喪失せず、事故シーケンスとしては長期 TB に整理されることから、外壁扉が誤開放している場合について検討した。

以下に、プラントの対応性について示す。

①津波高さ O. P. 33. 9m～35. 2m の場合

a. 浸水経路特定結果

【原子炉建屋】

大物搬入口脇の外壁扉からの浸水を想定した場合、RCIC 関連設備（全交流動力電源喪失時に期待できる緩和系）のあるエリアへは流入しない。

【原子炉建屋付属棟】

建屋北東側の外壁扉からの浸水を想定した場合、1F のほぼ全域が浸水し、貫通部、階段室、EV 室等から B1F、B2F、B3F に流下し各フロアの全域が浸

水するが、RCIC 関連設備の設置が無く、原子炉建屋への流入経路も存在しない。

【制御建屋】

建屋南側の外壁扉からの浸水を想定した場合、1F 共通エリアから階段室を經由して B2F の空調機械 (B) 室側が浸水するが、RCIC 関連設備は機能喪失しない。

b. 機器没水評価及び事故シーケンス評価結果

評価の結果、直流電源及び RCIC は建屋内浸水により機能喪失しないため、津波高さ O. P. 33. 9m～35. 2m における原子炉建屋への浸水が発生した場合の事故シーケンスは長期 TB に整理される。

②津波高さ O. P. 35. 2m～38. 6m の場合

a. 浸水経路特定結果

【原子炉建屋】

大物搬入口脇の外壁扉から浸水を想定した場合、浸水量が極めて多いため、原子炉水位計、RCIC ポンプ及びタービン、RCIC MCC 等が没水する。

【原子炉建屋付属棟】

建屋北東側の外壁扉と、M2F の空調ルーバからの浸水を想定した場合、浸水経路は津波高さ O. P. 33. 9m～35. 2m と同様となり、炉心損傷回避のために必要となる機器が機能喪失することはない。

【制御建屋】

建屋南側の外壁扉からの浸水を想定した場合、海水流入により 1F 共通エリア全域が浸水し、階段室からの流下によって B2F, B3F 全域が浸水するが、直流電源関連機器がある B1F は浸水しないため、機能喪失しない。

b. 機器没水評価及び事故シーケンス評価結果

評価の結果、直流電源の系統機能が維持される一方で、RCIC については主要な機器類が同時に没水するため機能喪失することとなった。よって、津波高さ O. P. 35. 2m～38. 6m については、RCIC が機能喪失することとなるため、事故シーケンスは TBU に整理される。

③津波高さ O. P. 38. 6m～の場合

津波高さが O. P. 38. 6m を越える場合、建屋外壁扉の開閉状態に因らず、「防潮堤機能喪失」により敷地及び建屋内へ津波が浸水し、外部電源、非常用電源、非常用炉心冷却系等、広範な緩和設備が喪失するため直接炉心損傷に至る。

2. 津波高さが O.P. 33.9m を超過した場合の事故シナリオの取り扱い

O.P. 33.9m を超える津波を詳細化することで抽出される事故シーケンスの炉心損傷頻度は、 10^{-7} オーダーであり、かつ、全炉心損傷頻度に占める割合は 1%未満となる。

O.P. 33.9m を超える津波で抽出される事故シーケンスは内部事象 PRA で抽出される事故シーケンス（長期 TB 及び TBU）であり、その影響は同等となる。

したがって、O.P. 33.9m を超える津波については、O.P. 38.6m を超える津波において発生が想定される「複数の緩和機能喪失」にて代表させている。（表 1 参照）

表 1 事故シーケンスの整理結果

津波高さ	建屋外壁扉/開	建屋外壁扉/閉	津波 PRA の整理
～O.P. 29m	(内部事象 PRA と同様)		内部事象 PRA
O.P. 29m～33.9m	(地震 PRA と同様) [※]		地震 PRA [※]
O.P. 33.9m～35.2m	長期 TB	長期 TB	複数の緩和機能喪失
O.P. 35.2m～38.6m	TBU	長期 TB	
O.P. 38.6m～	防潮堤機能喪失		

※ 外部電源喪失が発生するが緩和設備は全て健全（添付資料参照）であるため、地震による外部電源喪失と緩和設備のランダム故障の組合せによる炉心損傷シーケンスと同等であることから、地震 PRA に包含される。

以上

津波 PRA における評価対象設備の津波への耐性評価について

1. はじめに

津波 PRA の評価対象設備は内部事象 PRA の評価対象とした設備の他，防潮堤，防潮壁等の止水対策を選定している。その評価対象設備のうち，年超過確率が 10^{-7} オーダーである津波高さ O. P. 33. 9m の敷地内氾濫解析結果に基づき，津波の影響を直接受ける設備について，津波への耐性を確認する設備として抽出した（表 1 参照）。

津波 PRA の評価対象設備の津波に対する耐性評価結果は表 2 のとおりであり，津波 PRA の評価対象設備から抽出した全ての設備について津波高さ O. P. 33. 9m までは機能維持することを確認した。

設備毎の耐性評価の方法及びその結果については，「2. 耐性確認結果」に示す。

表 1 津波 PRA の評価対象設備のうち津波への耐性を確認する設備の抽出

No.	津波 PRA の評価対象設備			抽出結果
	設備名称	設置場所	設置高さ (O. P.)	
1	起動変圧器	屋外	14.0m [※]	対象外 (津波高さ O. P. 33.9m 以下では、敷地に浸水した津波が基礎高さを越えないため)
2	RSW ポンプ	屋外	14.4m [※]	対象外 (津波高さ O. P. 33.9m 以下では、敷地に浸水した津波が浸水防止壁を越えないため)
3	防潮堤	屋外	—	対象
4	防潮壁	屋外	—	対象
5	浸水防止壁	屋外	—	対象
6	建屋止水対策	屋外	—	対象
7	原子炉建屋	—	—	対象
8	原子炉建屋外壁扉	R/B	—	対象 (津波高さ O. P. 33.9m 以下では、敷地に浸水した津波が建屋のカーブ高さを越えないため津波の影響を直接受けないが、自主的な安全性向上の観点から水密扉を設置するため、津波への耐性を確認する)
9	制御建屋	—	—	対象
10	制御建屋外壁扉	C/B	—	対象 (津波高さ O. P. 33.9m 以下では、敷地に浸水した津波が建屋のカーブ高さを越えないため津波の影響を直接受けないが、自主的な安全性向上の観点から水密扉を設置するため、津波への耐性を確認する)
11	スクラム系	R/B	5.0m	対象外 (津波高さ O. P. 33.9m 以下では、敷地に浸水した津波が建屋のカーブ高さを越えないため)
12	HPCS	R/B	-9.1m	
13	RCIC	R/B	-9.1m	
14	LPCS	R/B	-9.1m	
15	RHR(LPCI)	R/B	-9.1m	
16	CST	屋外	—	対象
17	直流電源系統	C/B	7.0m	対象外 (津波高さ O. P. 33.9m 以下では、敷地に浸水した津波が建屋のカーブ高さを越えないため)
18	燃料移送ポンプ (軽油タンク設置エリア)	屋外	16.0m [※]	対象
19	非常用交流電源系統	R/B	14.0m	対象外 (津波高さ O. P. 33.9m 以下では、敷地に浸水した津波が建屋のカーブ高さを越えないため)
20	RSW/HPSW	R/B	-9.1m	
21	HPSW ポンプ	屋外	14.4m [※]	対象外 (津波高さ O. P. 33.9m 以下では、敷地に浸水した津波が浸水防止壁を越えないため)
22	RCW/HPCW	R/B	-9.1m	対象外 (津波高さ O. P. 33.9m 以下では、敷地に浸水した津波が建屋のカーブ高さを越えないため)

※機能喪失する高さ

表2 津波 PRA における評価対象設備の津波への耐性評価結果

設備名称	確認結果※
防潮堤	津波高さ : 0.P.41.7m (HCLPF 値)
防潮壁	津波高さ : 0.P.33.9m
浸水防止壁	津波高さ : 0.P.33.9m
建屋止水対策	津波高さ : 0.P.38.6m
原子炉建屋	津波高さ : 0.P.38.6m
制御建屋	津波高さ : 0.P.38.6m
建屋水密扉	津波高さ : 0.P.38.6m
CST	津波高さ : 0.P.38.6m
燃料移送ポンプ (軽油タンク設置エリア)	津波高さ : 0.P.33.9m

※ 敷地内氾濫解析結果で得られた最大浸水深は図1, 図2参照

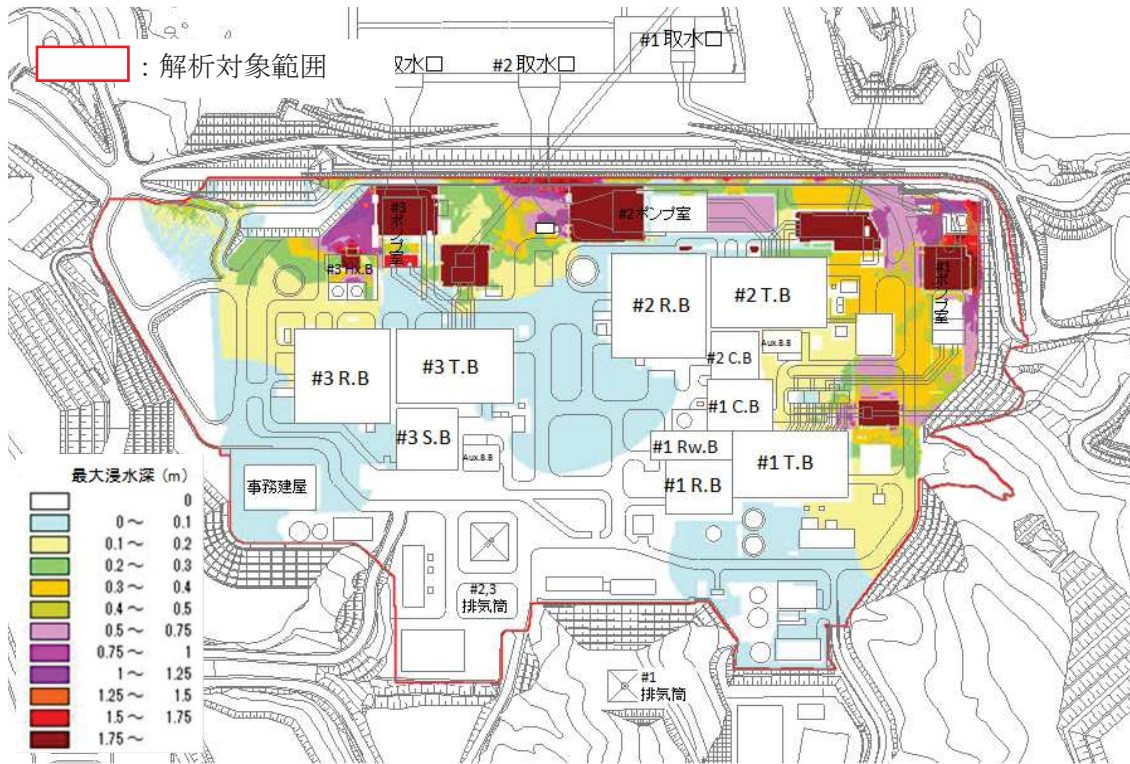


図1 0.P. 33.9m 津波による敷地内最大浸水深分布

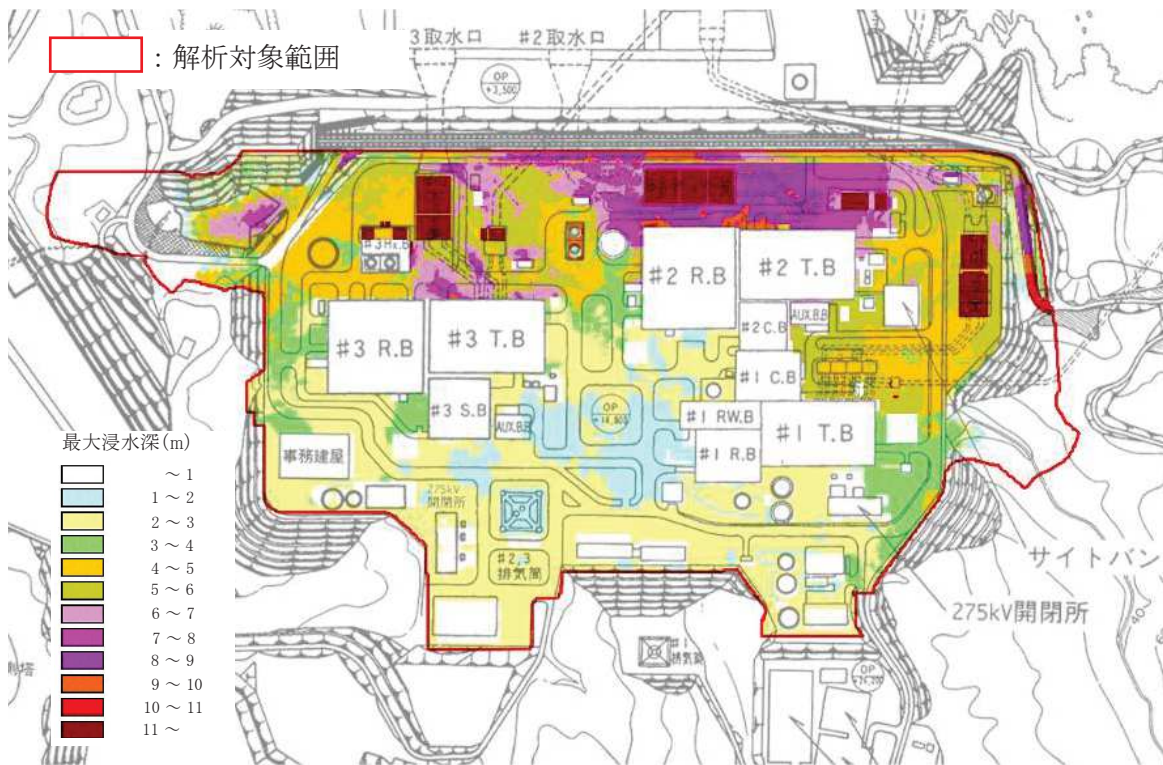


図2 0.P. 38.6m 津波による敷地内最大浸水深分布

2. 耐性確認結果

(1) 防潮堤

津波 PRA では、津波 PRA 標準に基づき、フラジリティ評価により防潮堤の耐性を確認している。

一方、有効性評価では、年超過確率 10^{-7} オーダーである津波高さ O.P. +33.9m に対する防潮堤の機能維持を前提として事故シーケンスの選定を行っていることから、決定論評価により防潮堤の耐性を確認した結果を補足説明資料に示す。

a. 評価方法

防潮堤の機能が喪失する津波高さの限界を評価するため、「日本原子力学会標準：原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準（2011 年，日本原子力学会）」等を参照し，防潮堤のフラジリティ評価を行った。評価手順を図 1-1 に示す。

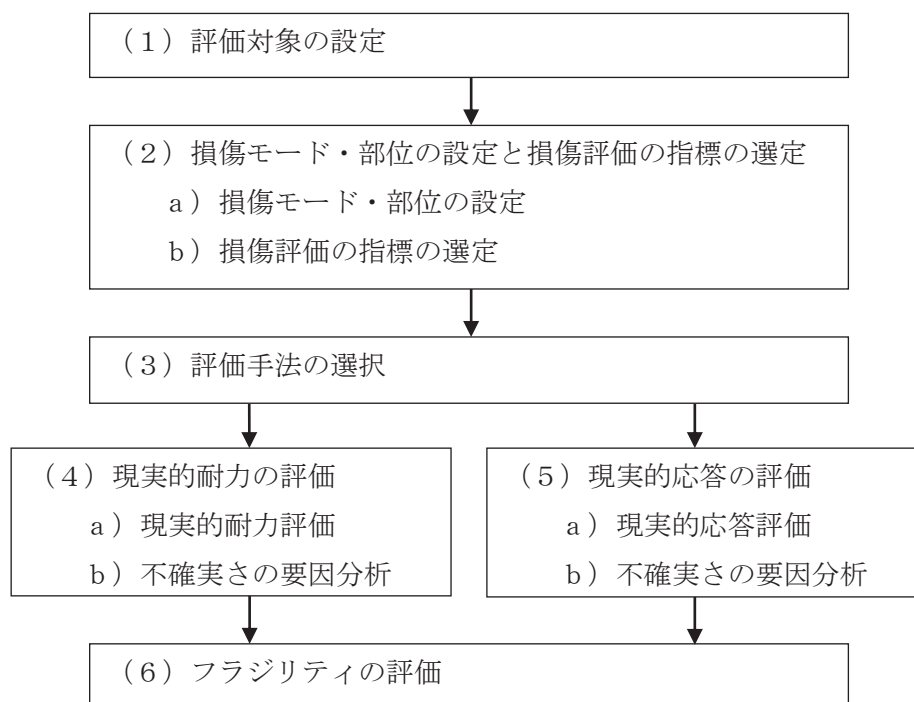


図 1-1 フラジリティ評価手順

b. 評価条件

防潮堤の津波に対する耐性については、設置許可基準規則第5条（津波による損傷の防止）に対する適合性に関する評価において確認している（別添資料1「耐津波設計方針について」添付資料24「防潮堤の設計方針及び構造成立性評価結果について」）。

上記評価において、保守的に設定した津波高さ O.P. +29.0m による津波波力に対して最も裕度が小さい断面と支配的な損傷部位・損傷モードを抽出した結果、鋼管式鉛直壁（一般部：長杭）の背面補強工上面位置（O.P. +18.5m）での曲げ圧縮損傷が支配的となった。これに着目し、片持ち梁モデルによる発生曲げモーメント（現実的応答）と全塑性モーメント（現実的耐力）を算定することで、フラジリティ評価を行った（図1-2）。

現実的応答と現実的耐力の評価において考慮した不確かさ要因を表1-1に、津波波圧の算定方法を図1-3に示す。

なお、本評価においては、押し波（海側から防潮堤に津波が作用する場合）を対象に津波波圧を算定しており、浸水深の基準面を O.P. +2.5m としている。引き波（陸側から防潮堤に津波が作用する場合）の場合には、浸水深の基準面が O.P. +13.8m と高くなり、津波波圧が押し波よりも小さくなることから、引き波の影響も包含した評価条件となっている。

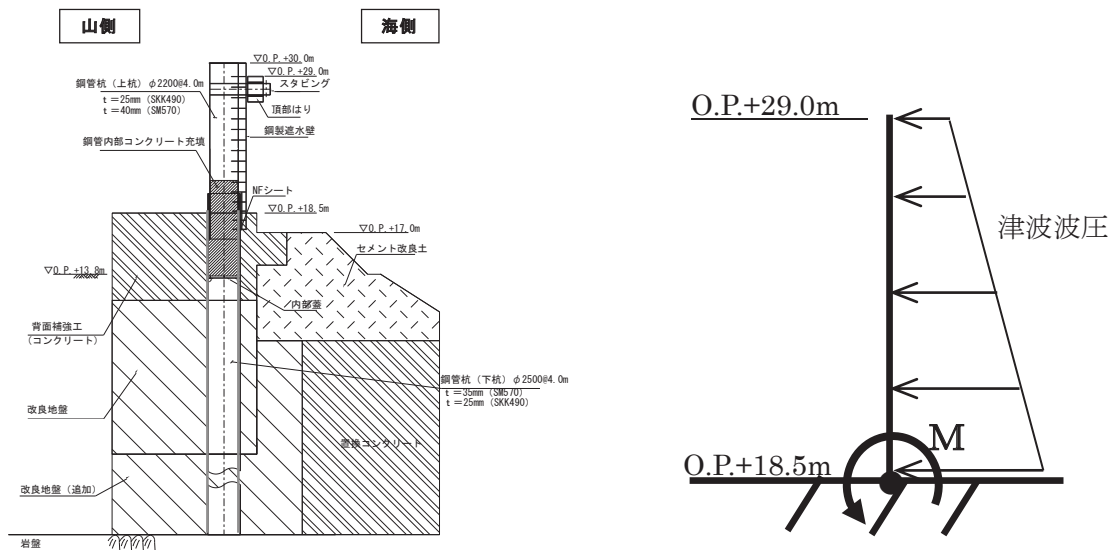


図1-2 評価断面図と評価モデル（鋼管式鉛直壁（一般部：長杭））

表 1-1 考慮する不確かさ要因

損傷モード	評価項目	一般的な不確かさ要因	
		偶然的な不確かさ	認識論的不確かさ
波力	耐力評価	鋼管杭の全塑性モーメント算定時の降伏強度 ^{※1} 平均値/基準値=1.23 標準偏差=0.10	$c\beta^e = 0.15^{※3}$
	応答評価	津波波圧算定時の水深係数 α ^{※2} 平均値=1.15 標準偏差=0.10	

※1 独立行政法人土木研究所（2009）：鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討

※2 大村英昭，尾崎充弘，平田一穂，秋山義信，岩前伸幸，池谷毅（2014）：波形特性を再現した防潮堤に作用する津波波力実験，土木学会論文集 B3（海洋開発）Vol. 70, No. 2, I_432-I_437

※3 R.P.Kennedy and M.K.Ravindra（1984）：Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies, Nuclear Engineering and Design, Vol. 79, pp. 47-68

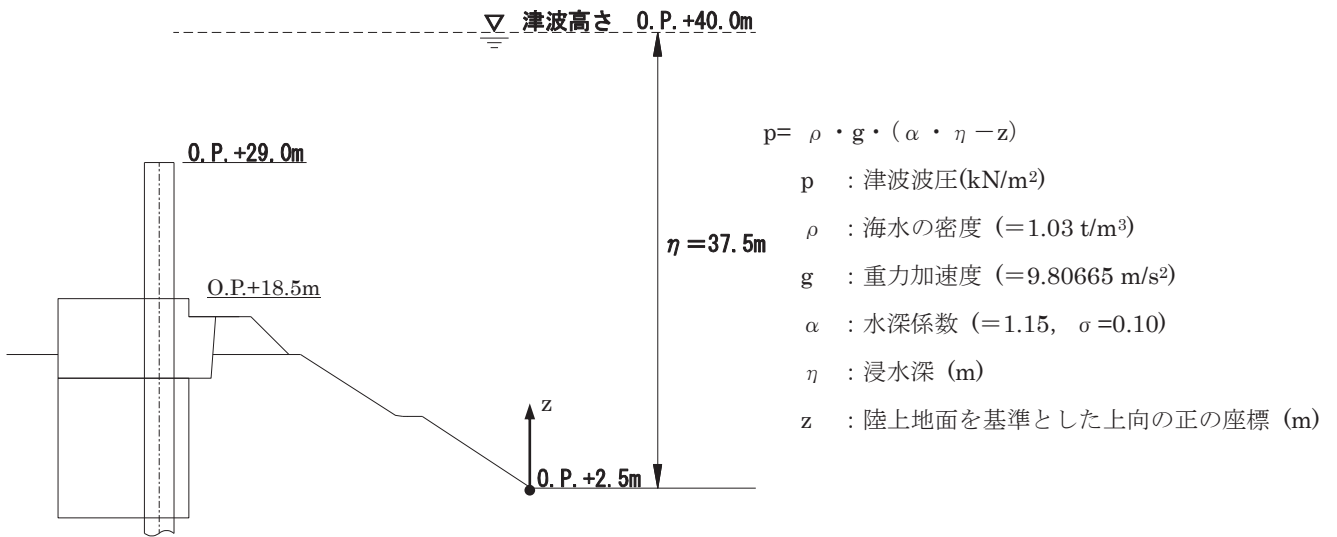


図 1-3 津波波圧の算定方法（津波高さ O.P.+40m の場合）

c. 評価結果

4 種類の津波高さ (O.P. 40m, 45m, 50m, 60m) に対する現実的応答 (発生曲げモーメント) と現実的耐力 (全塑性モーメント) の算定結果を図 1-4 に示す。

ここで、現実的応答については、各津波高さによる津波波圧 (表 1-1 及び図 1-3 に基づき水深係数 α (平均値=1.15, 標準偏差=0.10) より設定) が作用した場合の鋼管杭 (評価部位) の発生曲げモーメントの確率密度を対数正規分布により近似した。また、現実的耐力については、鋼管杭 (評価部位) の降伏強度の不確かさ (表 1-1 より設定) を考慮し、「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編 (日本道路協会)」に基づく全塑性モーメントの確率密度を対数正規分布により近似した。

上記により離散的に求めた防潮堤の損傷確率 (現実的応答が現実的耐力を超過する確率) について、津波高さと損傷確率の関係として対数正規分布により近似したフラジリティ曲線の算定結果を図 1-5 に示す。

評価の結果、50%信頼度フラジリティ曲線の損傷確率の中央値の津波高さは 67.9m となり、HCLPF 値は 41.7m となった。

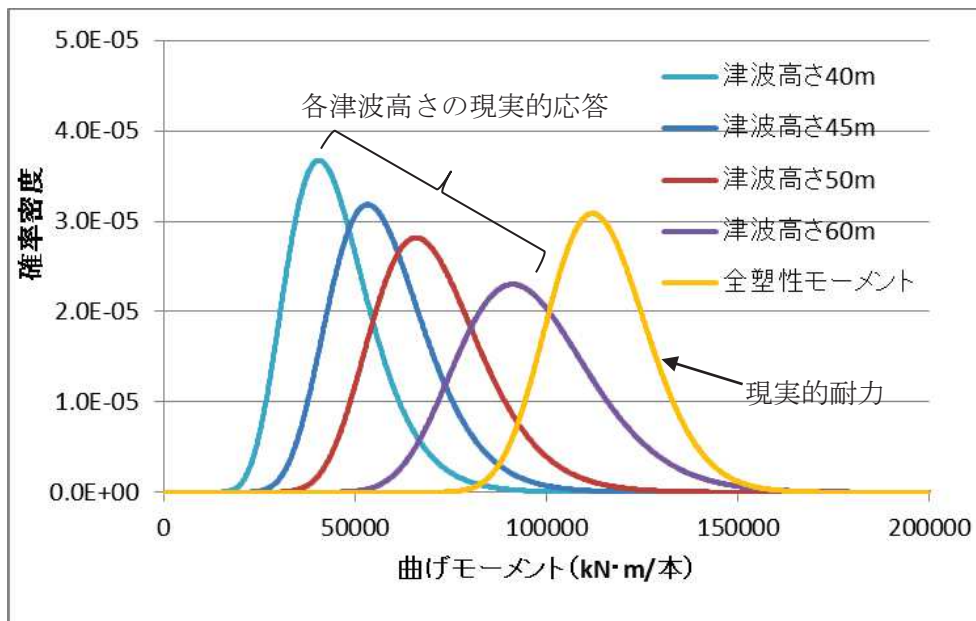
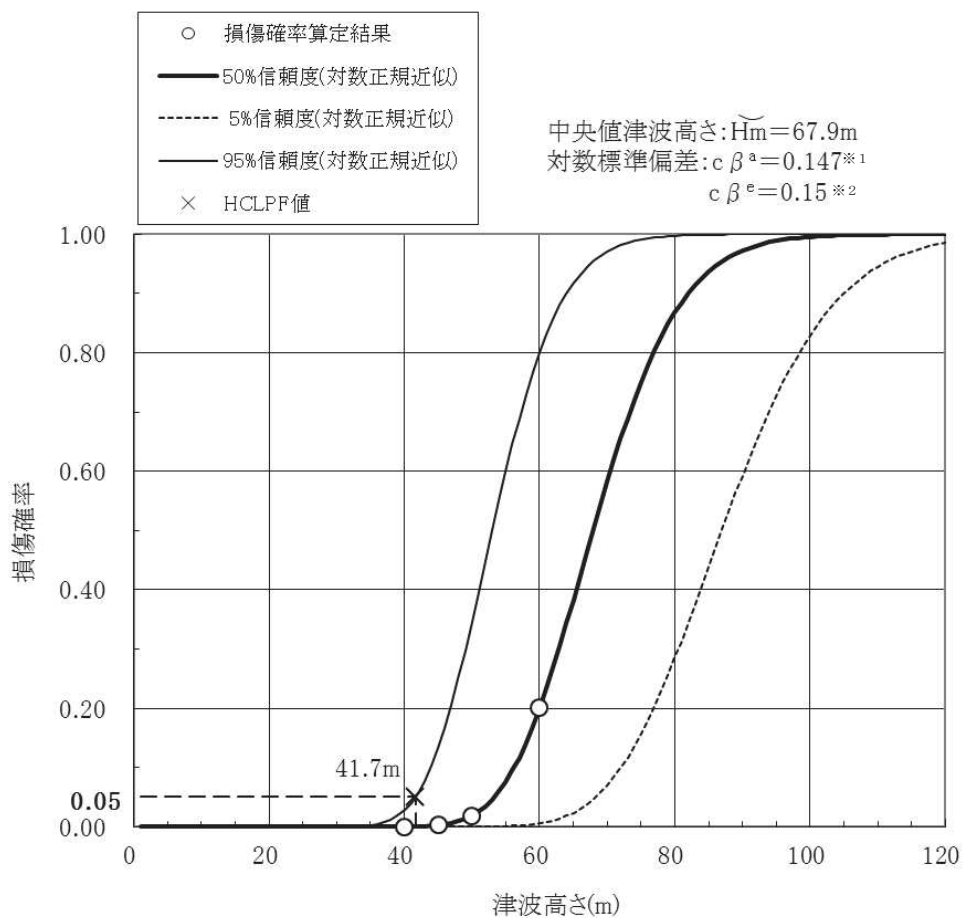


図 1-4 現実的応答と現実的耐力の算定結果



津波高さ(m)	40	45	50	60
損傷確率	3.4E-04	3.0E-03	1.8E-02	2.0E-01

※1 $c\beta^a$ は近似した fragility 曲線から得られる偶然的な不確かさ要因の対数標準偏差を示したものである(fragility 曲線の傾きが緩やかな場合に $c\beta^a$ が大きくなる)。

※2 $c\beta^e$ は表 1-1 に示した認識論的不確かさ要因の対数標準偏差 ($c\beta^e$ が大きくなると fragility 曲線の信頼度の幅 (5%信頼度曲線と 95%信頼度曲線の離隔) が大きくなる)。

図 1-5 近似した fragility 曲線の算定結果

決定論評価による防潮堤の耐性確認結果

有効性評価では、O. P. +33. 9m 津波に対する防潮堤の機能維持を前提として事故シナリオの選定を行っていることから、決定論評価により防潮堤の耐性を確認する。

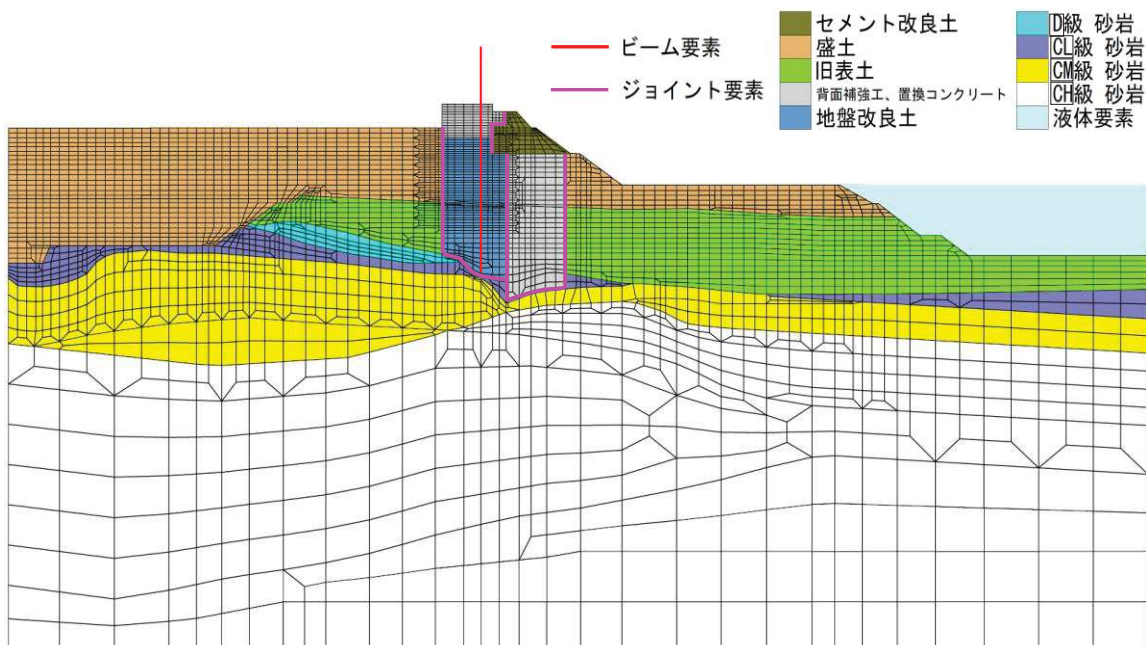
a. 評価方法

O. P. +33. 9m 津波時の防潮堤の耐性について、施設と地盤を連成した二次元動的 FEM 解析（有効応力解析）により、鋼管式鉛直壁（一般部）の評価を行う。

b. 評価条件

防潮堤のフラジリティ評価と同様に鋼管式鉛直壁（一般部：長杭）を評価断面とし、鋼管杭の全塑性モーメントによる評価を行う。

解析断面は、防潮堤の設置許可基準規則第 5 条（津波による損傷の防止）に対する適合性に関する評価（別添資料 1「耐津波設計方針について」添付資料 24「防潮堤の設計方針及び構造成立性評価結果について」）と同様に、岩盤が深部に存在し、周辺に液状化影響が大きい旧表土が最も厚く堆積する断面とする。解析モデル図を補図 1-1 に示す。



補図 1-1 解析モデル図（鋼管式鉛直壁（一般部：長杭））

津波荷重については、朝倉式により以下のとおり算定し、防潮堤の海側に作用させる。

$$p = \rho \cdot g \cdot (3.0 \cdot \eta - z)$$

ここで、 p : 津波波圧 (kN/m²)

ρ : 海水の密度 (=1.03t/m³)

g : 重力加速度 (9.80665m/s²)

η : 浸水深 (通過波の浸水深 = (33.9 - 2.5) / 2 = 15.7) (m)

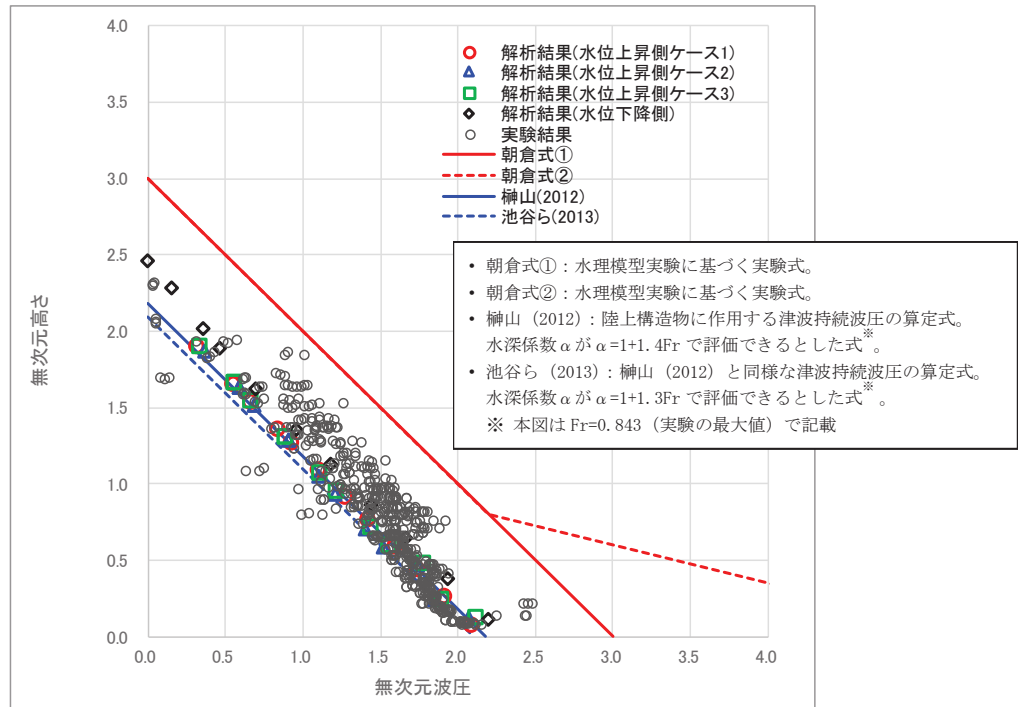
z : 陸上地面を基準とした上向の正の座標 (m)

なお、女川サイトにおける津波波圧算定式の適用性については、設置許可基準規則第5条（津波による損傷の防止）に対する適合性に関する評価（別添資料1「耐津波設計方針について」添付資料21「防潮堤における津波波力の設定方針について」）において確認している。津波の不確かさとして周期や波高の異なる津波（津波水位 O.P. +17.0m ~ O.P. +37.5m）を対象に水理模型実験により検討し、いずれのケースにおいてもフルード数が1以下（補表1-1）となり、水深係数が3以下（補表1-1及び補図1-2）となることを確認していることから、水深係数として $\alpha=3.0$ を考慮した朝倉式を O.P. +33.9m 津波に対して適用することは保守的と考えられる。

補表 1-1 フルード数及び水深係数の確認結果（水理模型実験）

目標津波水位	フルード数		水深係数 ^{※1}	
	二段型津波 (半周期 20 分)	単峰型津波 (半周期 5 分)	二段型津波 (半周期 20 分)	単峰型津波 (半周期 5 分)
O.P. +17.0m	0.071	0.839	2.85	2.44
O.P. +25.0m	0.704	0.843	2.68	2.34
O.P. +32.5m	0.450	0.826	2.67	2.57
O.P. +35.0m	0.623	0.780	2.78	2.54
O.P. +36.0m	0.738	0.612	2.62	2.46
O.P. +37.5m	0.603	0.726	2.60	2.62

※1 水深係数は各実験ケースの最大値で整理。



補図 1-2 水深係数の確認結果

(無次元最大津波波圧分布による既往の津波波圧算定式との比較)

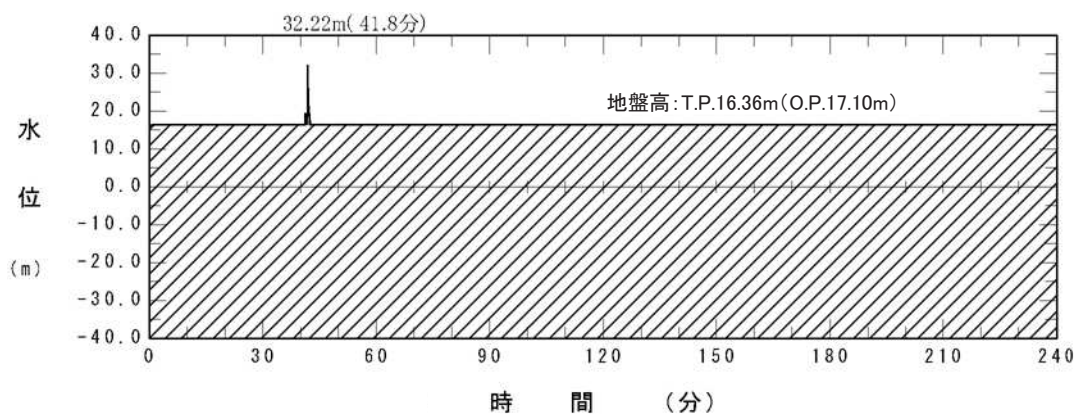
また、別紙 3.2.2. c-1 で示したとおり、防潮堤の耐力に対して漂流物荷重の影響は小さく、防潮堤の耐力評価における支配的な荷重は津波荷重（波力）となることを確認しているが、0.P.+33.9m 津波時の決定論評価においては、別紙 3.2.2. c-1 で抽出した漂流物のうち最大重量の総トン数 5t（排水トン数 15t）の係留漁船の衝突を念のため考慮し、「道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説」に準拠し、以下の式により漂流物衝突荷重（73.6kN）を算定し、防潮堤の天端（0.P.+29.0m）に作用させる。なお、表面流速については、0.P.+33.9m 津波時における流況分析（補図 1-3 及び補図 1-4）から、防潮堤前面位置での水位が最大となる時刻の流速として 5m/s を考慮する。

$$P=0.1 \cdot W \cdot v$$

ここで、P：衝突力(kN)

W：流送物の重量(15.0t=147.1kN)

v：表面流速(5.0m/s)

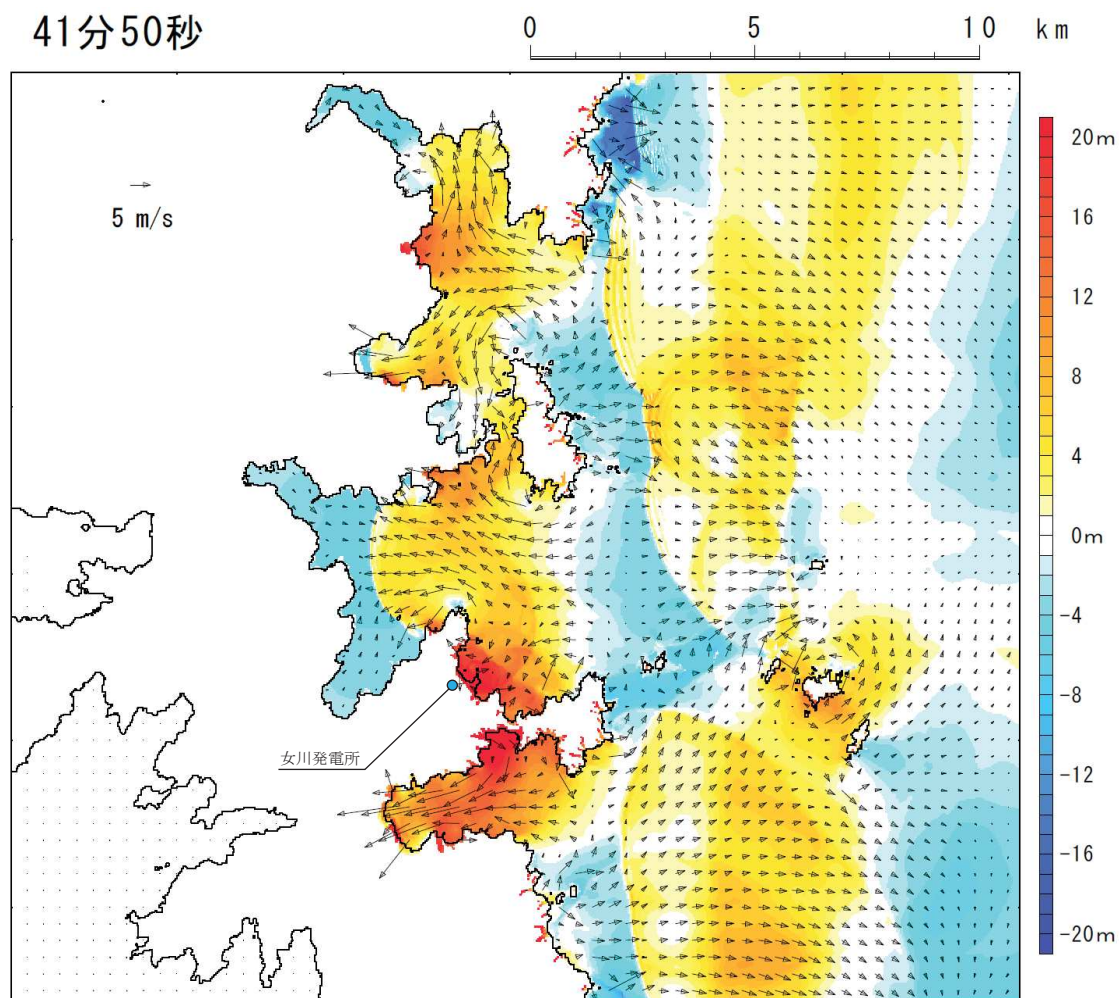


注) 本図の詳細は別紙 3. 2. 2. d-1 を参照。

防潮堤高さ (O.P. +29m) を考慮した場合の津波水位は T.P. +32. 22m=O.P. +32. 96m。

防潮堤を無限壁 (津波ハザード評価の条件) とした場合の津波水位は O.P. +33. 9m となる。

補図 1-3 O.P. +33. 9m 津波の水位時刻歴波形 (防潮堤前面)

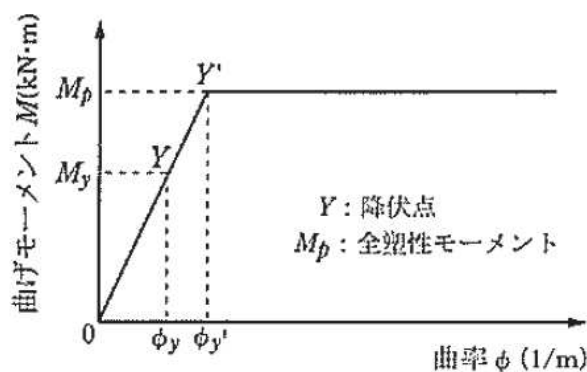


補図 1-4 O.P. +33. 9m 津波による女川発電所周辺の津波流向ベクトル (地震発生後 41 分 50 秒)

地下水位については、津波による地下水位の上昇を考慮し、改良地盤から海側の地下水位は防潮堤前面の地盤高さである O.P. +2.5m とし、改良地盤から山側の地下水位は朔望平均満潮位 O.P. +1.43m とする。

鋼管杭の評価については、津波荷重（波力）及び漂流物衝突荷重によって防潮堤が機能喪失して敷地内への津波の浸水量が急増しないように、鋼管杭が倒壊しないことを確認することとし、許容限界を「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編（日本道路協会）」に基づく全塑性モーメント^{*1}以下として設定する。また、岩盤の支持力の評価については、鋼管杭の最大接地圧が岩盤の支持力を超えないことを確認することとし、許容限界を C_M 級岩盤の極限支持力度以下として設定する。

- ※1 杭体の曲げモーメント-曲率関係（補図 1-5）における上限値として全塑性モーメントが規定されており、鋼管杭の一部は塑性化しているものの、顕著な剛性低下は見られず、おおむね線形領域に留まる状態となる。



補図 1-5 鋼管杭の杭体の曲げモーメント-曲率関係
（道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編（日本道路協会））

c. 評価結果

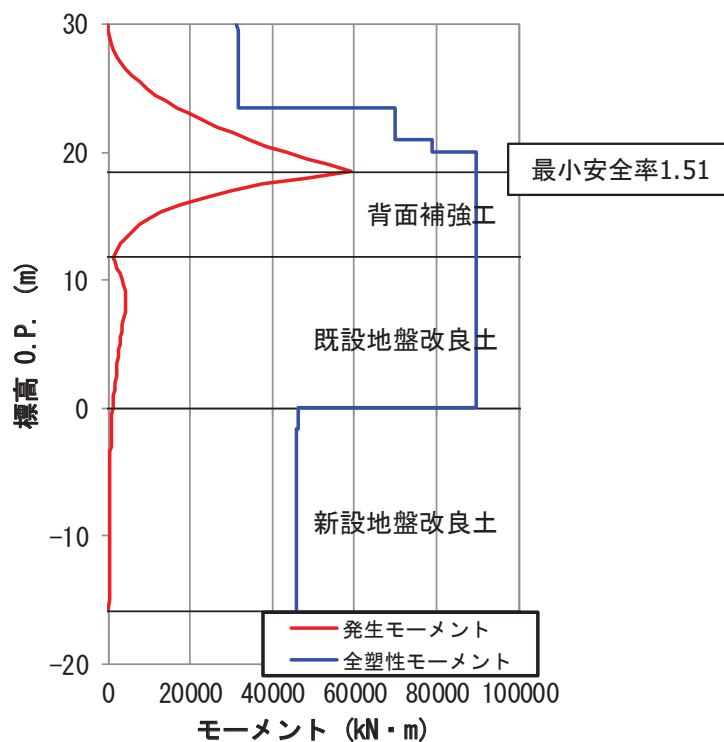
鋼管式鉛直壁（一般部：長杭）の O.P. +33.9m 津波に対する鋼管杭の評価結果を補表 1-2 に、鋼管杭の断面力分布図を補図 1-6 に、岩盤の支持力の評価結果を補表 1-3 に示す。

鋼管杭については、発生曲げモーメントが許容限界以下となることを確認した。また、岩盤の支持力については、鋼管杭の最大接地圧が許容限界以下となることを確認した。

以上の結果より、O.P. +33.9m の津波に対して防潮堤が機能喪失せずに耐性を確保できることを確認した。

補表 1-2 評価結果（鋼管杭：長杭）

	発生モーメント M (kN・m)	全塑性モーメント M _p (kN・m)	安全率 M _p /M	判定 (>1.0)
断面力	59,176	89,478	1.51	OK



補図 1-6 断面力分布図（鋼管杭：長杭）

補表 1-3 評価結果（岩盤）

	最大接地圧 σ_v (N/mm ²)	極限支持力 q _d (N/mm ²)	安全率 q _d / σ_v	判定 (>1.0)
支持力	0.8	11.4	14.2	OK

(2) 防潮壁

a. 評価方法

防潮壁は、平成 30 年 7 月 10 日の審査会合を踏まえ、構造形式を変更する方針としており、変更後の構造は、鋼製遮水壁（鋼桁）、鋼製遮水壁（鋼板）、鋼製扉及び RC 遮水壁の 4 種類に大別される。

解析は、上部工の形状や構成部材を考慮し、上部工—下部工（杭）—地盤を連成させてモデル化するとともに、上部工に津波荷重（静水圧）を載荷させ、津波時の応答を評価する方針である。解析モデルのイメージを図 2-1 に示す。

ここでは、O.P. +33.9m の津波に対する防潮壁の耐性を評価する。

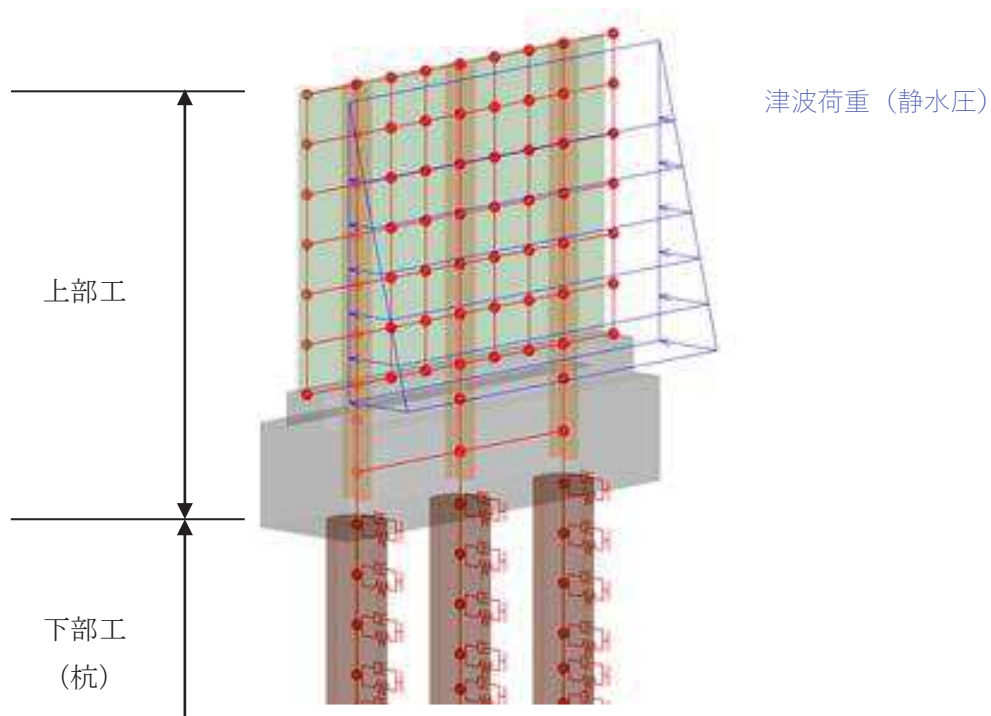


図 2-1 解析モデルのイメージ

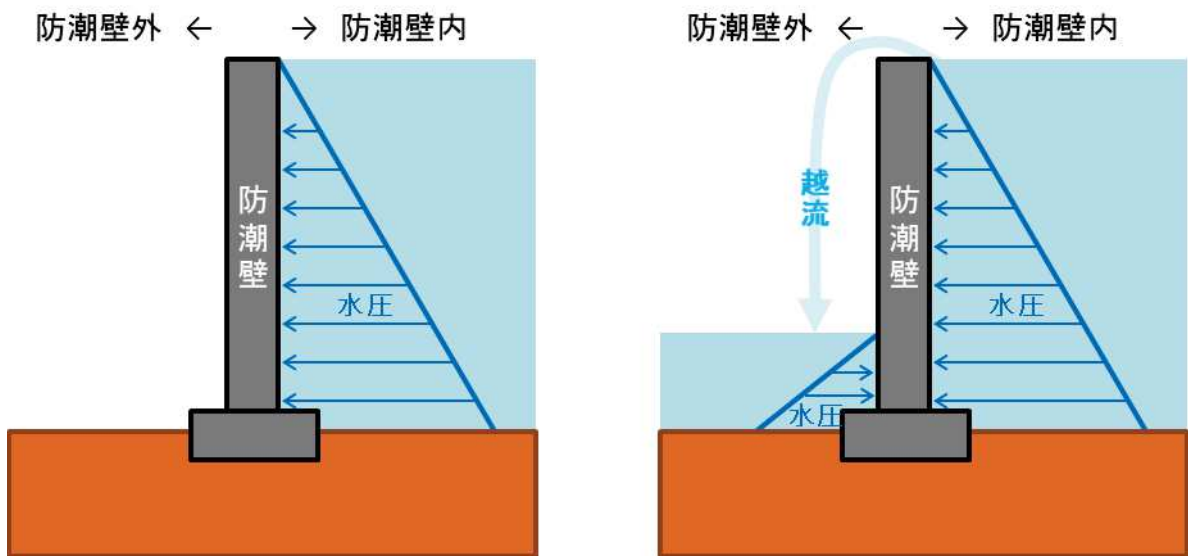
b. 評価結果

上記のとおり防潮壁は構造形式を変更する方針であり、現在設計中であるが、防潮壁天端までの静水圧に対し構造健全性及び止水性を保持する設計とする（図 2-2 ①に示す状態での耐性を確保する）。

防潮堤又は防潮壁を越流して敷地に浸水を考慮する場合、防潮壁の外側からの津波荷重は、防潮壁内側からの津波荷重を打ち消す方向に働く（図 2-2 ②に示す状態での耐性を確保する）。

よって、防潮壁天端（内側）までの津波荷重に対し耐性を保持する設計とすることにより、O.P. +33.9m の津波に対しても防潮壁の耐性を確保できる。

なお、設計変更前の評価方法および評価結果を、以下に参考として示す。



① 防潮壁内の水位が天端まで上がっても，水圧に対して防潮壁の耐性は確保される設計となっている。

② 防潮壁から越流したとしても，防潮壁外側の津波荷重は，防潮壁内側の津波荷重を打ち消す方向に働くため，防潮壁の耐性に問題はない。

図 2-2 越流津波に対する防潮壁の耐性のイメージ

設計変更前の防潮壁の耐性評価

a. 評価方法

防潮壁は、津波が取水路から浸入する海水が敷地内に溢水することを防止する施設であるため、当該施設の設置位置における津波高さでの波力に対して防潮壁を構成する各部材（遮水板、支柱、フーチング、杭基礎）が損傷しないように部材仕様を決定する。なお、津波の繰り返しの襲来に備え、併せて機能を保持する必要があることから、部材が弾性域を確保するように設計を実施する。

防潮壁の津波による荷重作用時の評価フローを図 2-3 に示す。

以下、一例として、2号炉海水ポンプ室遮水板の評価結果を示す。

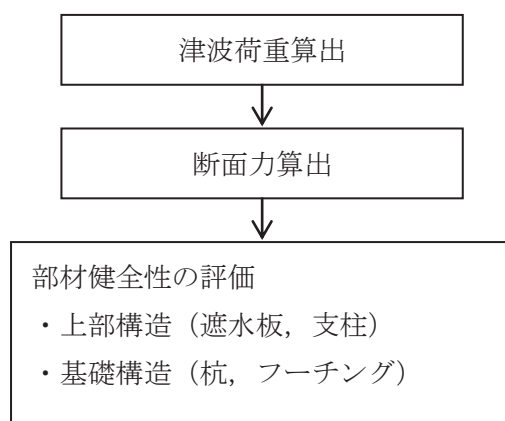


図 2-3 2号海水ポンプ室防潮壁の津波時評価フロー

b. 評価結果

(a) 遮水板

① 検討手順

遮水板のうち静水圧が最も大きくなる最下部を対象として、津波に対する部材検討性を確認する。健全性は許容応力度法により応力度の評価を行う。

② 設計で考慮する荷重

遮水板は両端を支柱で支持された単純梁として検討する。設計で考慮する静水圧の概要を図 2-4、表 2-1 に示す。

③ 照査

照査結果を表 2-2 に示す。遮水板について、全ての項目で許容値以下となることを確認した。

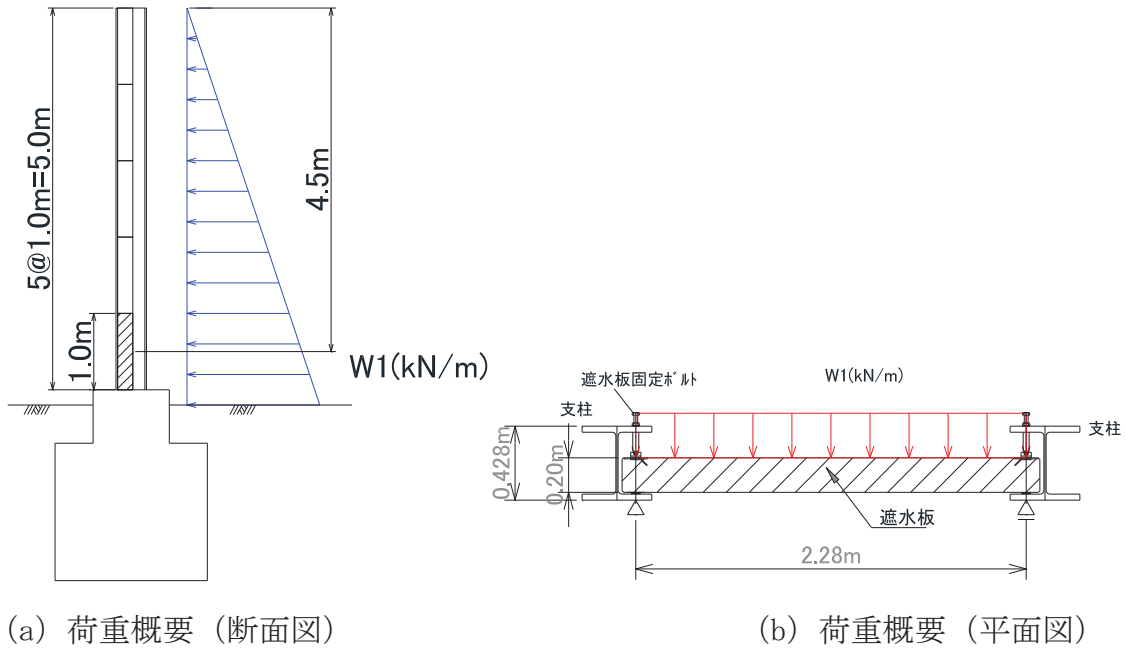


図 2-4 荷重概要図

表 2-1 遮水板に作用する静水圧

静水圧 W1 (kN/m)
45.45

表 2-2 遮水板の応力度照査結果

(単位 : N/mm²)

曲げモーメント				せん断力	
曲げ圧縮応力度		曲げ引張応力度		コンクリートのせん断応力度	
発生値	許容値	発生値	許容値	発生値	許容値
13.5	34.5	発生しない	3.0	0.26	1.0

(3) 浸水防止壁

浸水防止壁は、地震による屋外タンクの破損による溢水及び基準津波襲来時に伴う補機冷却海水系放水路からの一次的な溢水が補機ポンプエリアに侵入することを防止する施設である。設置概要を図 3-1 及び図 3-2 に示す。また、設計条件を表 3-1 に示す。

表 3-1 浸水防止壁 設計条件まとめ表

耐震設計	耐震 S クラス	
設置高さ	補機ポンプエリア基礎上端より浸水防止壁を 0.4m の高さで設置	
荷重条件	地震時	常時荷重 (自重) + 地震荷重 (基準地震動 S_s)
	津波時	常時荷重 (自重) + 津波荷重 (静水頭 0.4m)
	津波 + 余震重畳時	常時荷重 (自重) + 津波荷重 (静水頭 0.4m) + 余震荷重 S_d
	その他自然現象	風荷重及びその他自然現象に伴う荷重について、設備の設置状況、構造 (形状) 等の条件を含めて適切に組合せを考慮する



図 3-1 2号炉海水ポンプ室浸水防止壁の設置概要 (平面図)

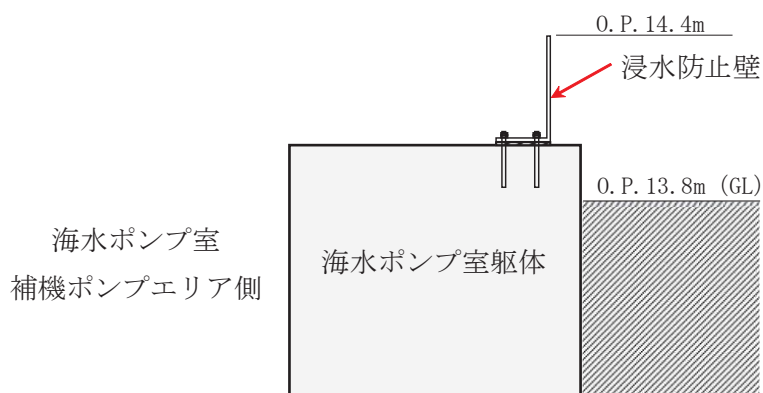


図 3-2 2号炉海水ポンプ室浸水防止壁の設置概要 (A-A 断面図)

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

a. 評価方法

耐水圧試験により確認した浸水防止壁の止水性能と、津波高さ0. P. 33. 9mによる敷地内氾濫解析に基づく補機ポンプエリアの最大浸水深を比較し、止水性能が最大浸水深を上回ることを確認する。

b. 評価結果

浸水防止壁は、高さ0. 4m（敷地高さ0. P. 13. 8mから高さ0. 6m）の静水圧、基準地震動 S_s による地震荷重及び静水圧＋余震荷重を考慮した設計としており、津波高さ0. P. 33. 9mの敷地内氾濫解析結果から得られる補機ポンプエリアの最大浸水深0. 34m（浸水防止壁への静水圧は0. 14m）が、浸水防止壁の止水性能（0. 4m）に包絡されていることを確認した。浸水防止壁の評価結果を表3-2に示す。

なお、浸水防止壁は、コンクリートに一定間隔でボルト支持される構造であるため、構造要素を模擬した試供体を代表として作成し、性能確認を実施した。浸水防止壁及びこれらを取り付けるコンクリートで構成される試供体に対し、津波時に想定される余震による荷重をジャッキで負荷した状態（最大変位を与えた状態を模擬）で0. 4mの静水圧に対し漏水しないことを確認した。耐水圧試験の概要を図3-3に示す。

表3-2 止水性能と最大浸水深の比較による評価結果

	止水性能	最大浸水深	評価
浸水防止壁	0. 4m	0. 14m	○

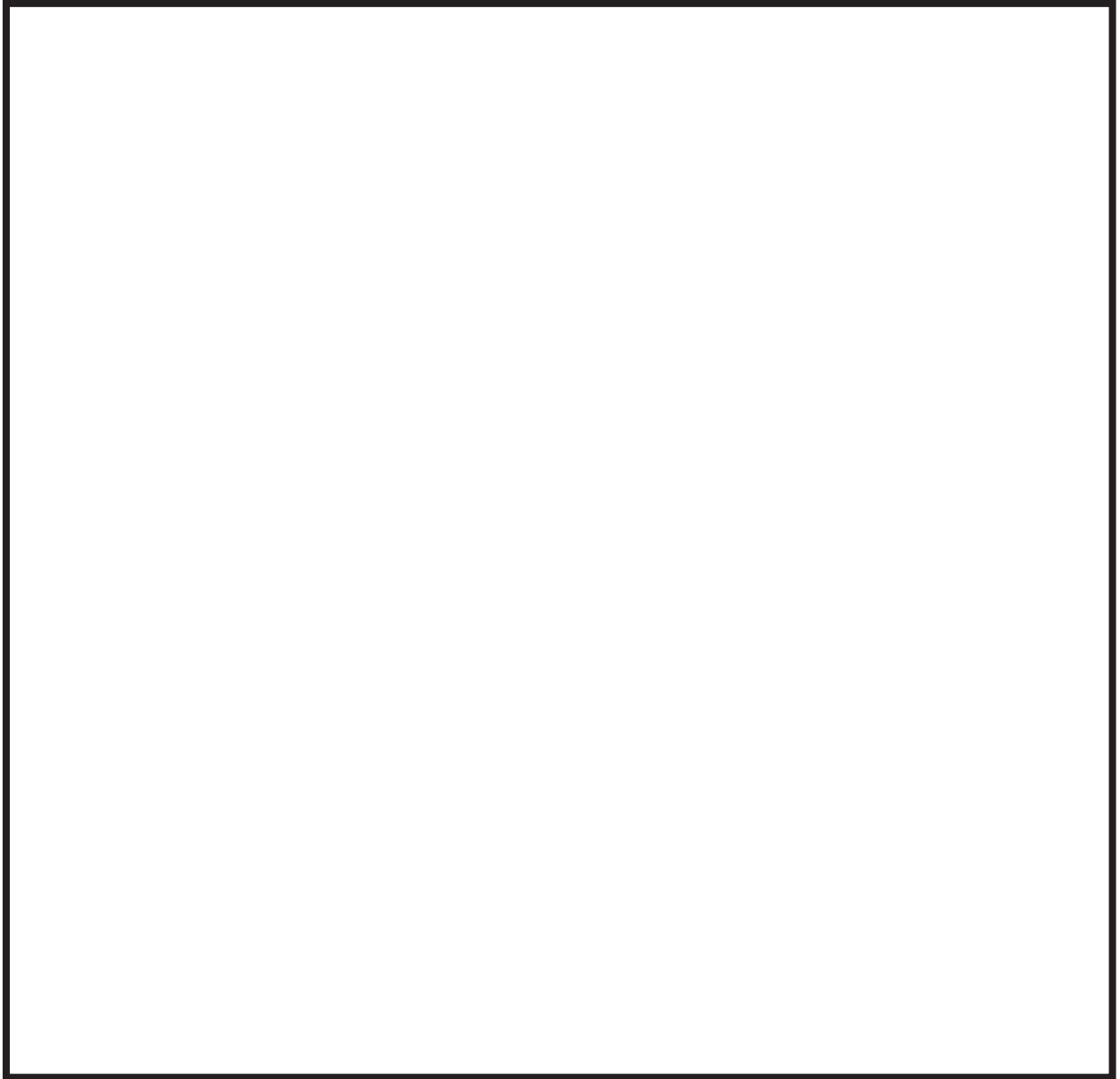


図 3-3 浸水防止壁止水性能試験概要図

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

別紙 3. 2. 2. d-2-25

(4) 建屋止水対策

a. 評価方法

建屋止水対策は、津波高さ 0. P. 38. 6mによる敷地内氾濫解析に基づく浸水深に応じ止水処置を行う方針であり、その止水性能を評価する。

b. 評価結果

耐水圧性能を表 4-1, 表 4-2, 構造例を図 4-1, 図 4-2 に示すとおりであり、建屋廻りの浸水深は 2m~13m 程度であることから、貫通孔に作用する水頭に応じた止水処置方法を選定することで、止水性能が維持されることを確認した。(耐水圧性能及び構造例については、設置許可基準規則第 9 条 (溢水による損傷の防止等) に対する適合性 (補足説明資料 16 「止水を期待する設備の止水性能等」) より転載)。

表 4-1 シリコンシールの耐水圧性能 (押え板有り)



図 4-1 シリコンシールの構造例 (押え板有り)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

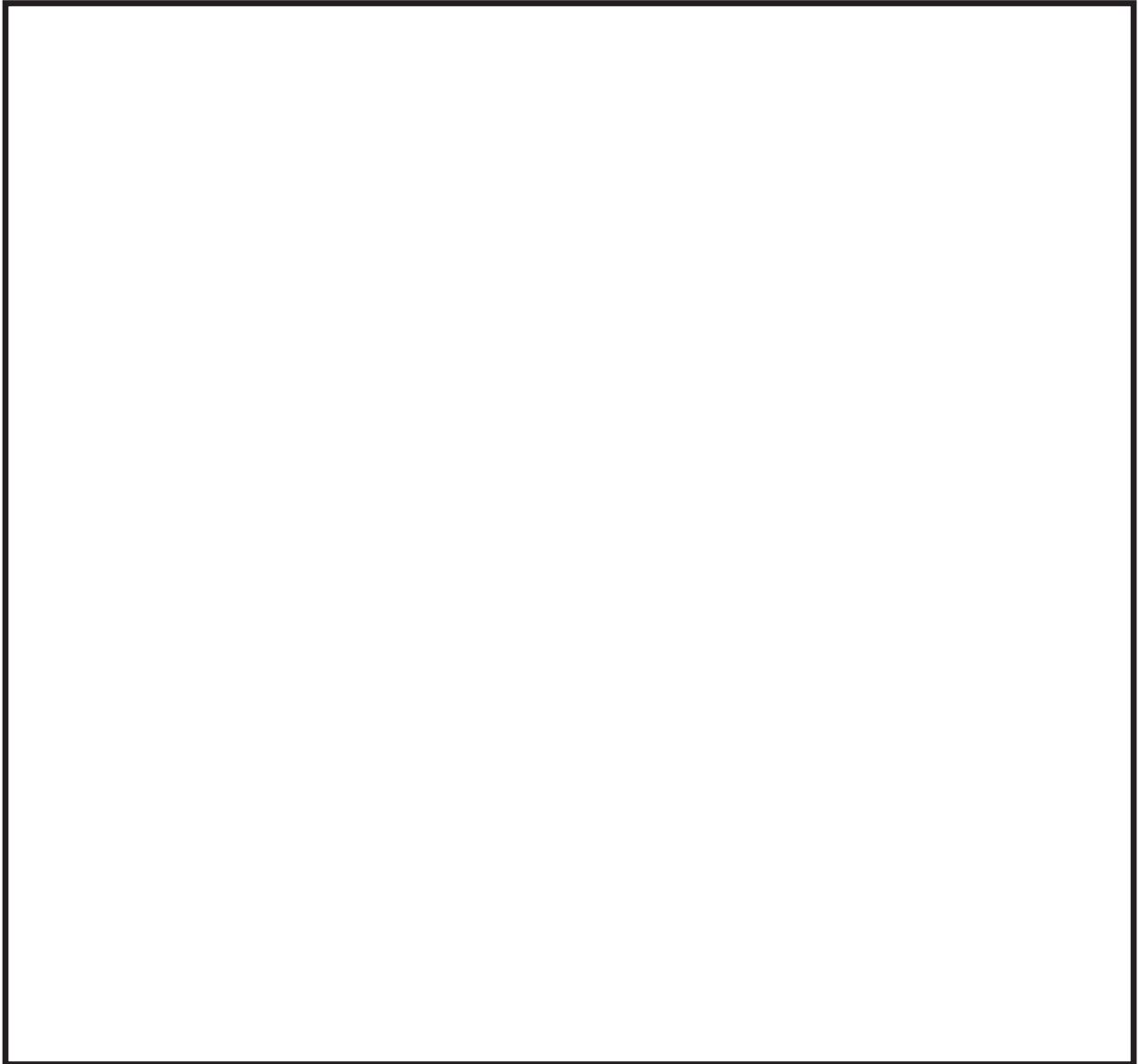
表 4-2 シリコンシールの耐水圧性能（押え板無し）



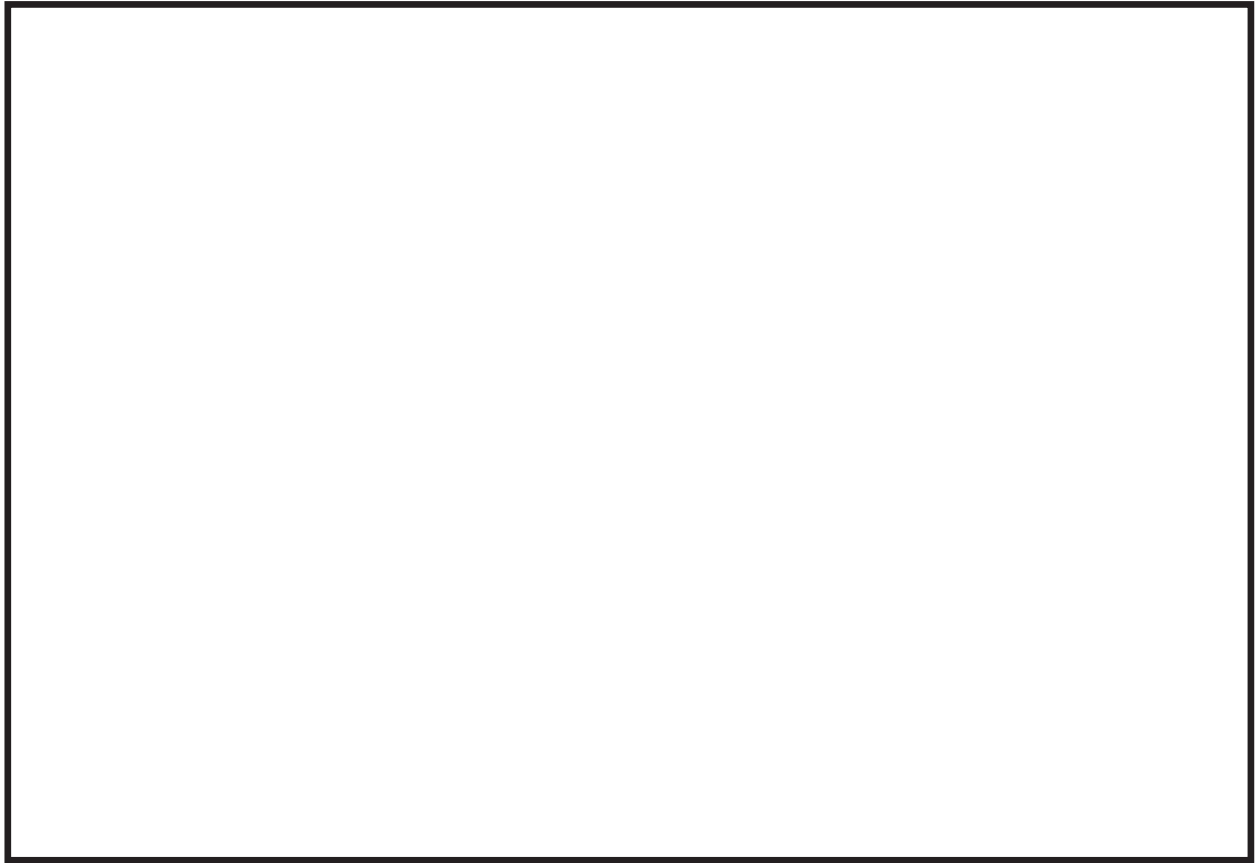
図 4-2 シリコンシールの構造例（押え板無し）

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

なお，耐水圧性能について，下記のとおり耐水圧性能試験を実施し，影響がないことを確認している。シリコンシールの耐水圧性能を表 4-3，表 4-4，試験概要図を図 4-3 に示す。



枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

別紙 3. 2. 2. d-2-29

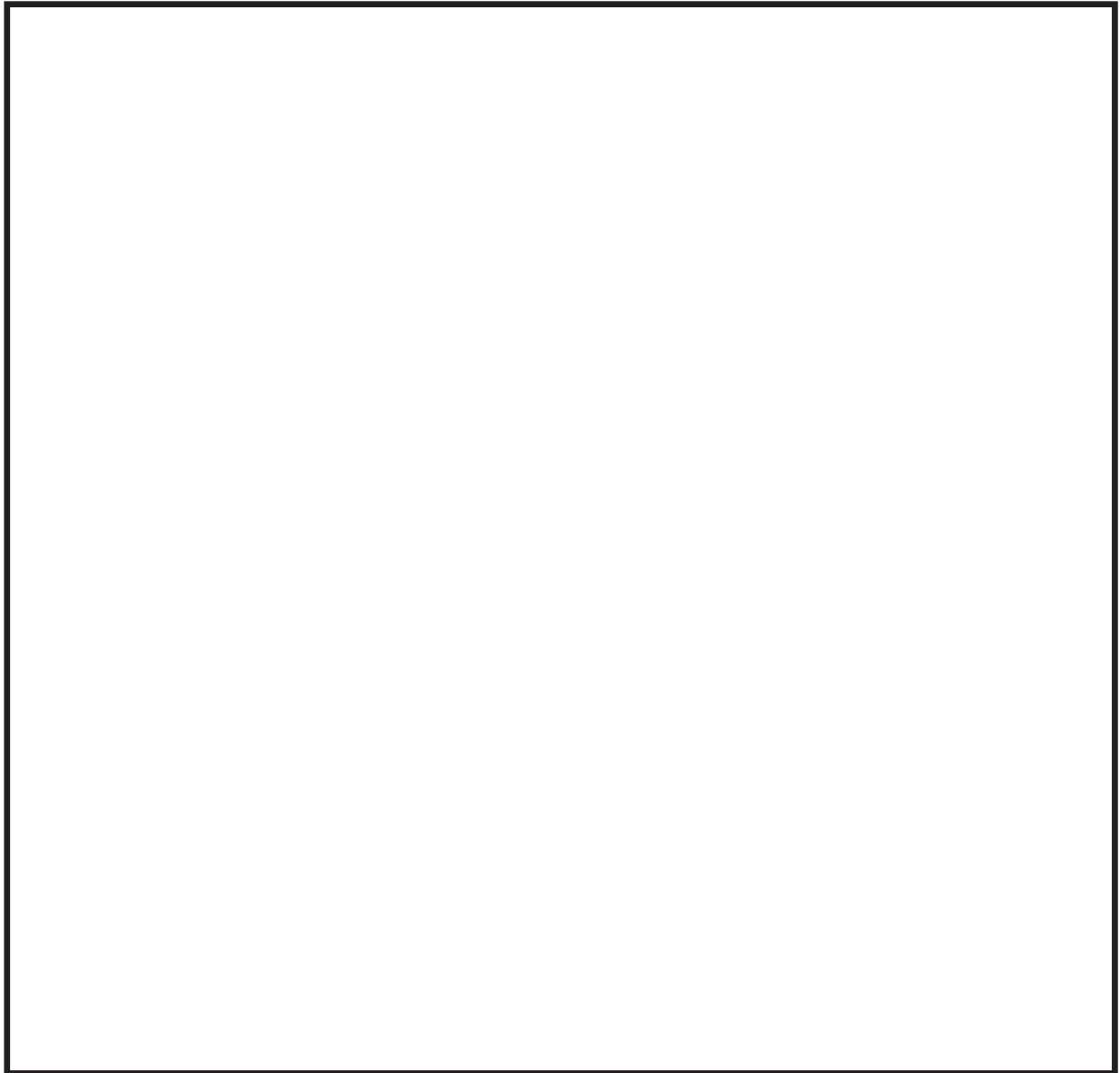


図 4-3 シリコンシールの耐水圧試験概要図

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

(5) 原子炉建屋，制御建屋

a. 評価方法

津波高さ 0. P. 38. 6m による敷地内氾濫解析に基づき算定された建屋周辺の最大浸水深および最大流速を用いて，建屋躯体に生じる応力が短期許容応力度以下であることを確認する。

(a) 津波による波圧

地上部の外壁に与える最大波圧 P_{max} の鉛直分布は，有光他（2012）の式を用いて算出する。

$$P_{max} = \rho g \{h_{fmax} - z\} \quad z > h_{ufmax} \quad (1)$$

$$P_{max} = \rho g \{h_{fmax} - z\} + \rho u_{fmax}^2 \quad z < h_{ufmax} \quad (2)$$

ここで，

- P_{max} : 最大波圧 (kN/m²)
- ρ : 流体密度 (t/m³)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- h_{fmax} : 最大浸水深 (m)
- z : 地盤面からの高さ (m)
- h_{ufmax} : 最大流速発生時の浸水深 (m)
- u_{fmax} : 最大流速 (m/s)

また，津波高さ 0. P. 38. 6m 時の建屋周辺の氾濫解析結果を表 5-1 に示す。

表 5-1 建屋周辺の氾濫解析結果

建屋	最大浸水深 h_{fmax} (m)	最大流速 u_{fmax} (m/s)	最大流速発生時の 浸水深 h_{ufmax} (m)
原子炉建屋	13. 14	2. 32	3. 21
制御建屋	6. 10	0. 78	5. 08

(b) 応力解析

外壁の応力解析モデルは，各階の外壁を単位幅の梁とみなした連梁モデルとし，(a) において算定した荷重を当該箇所作用させ発生応力を算定する。

連梁モデルの概念図を図 5-1 に示す。

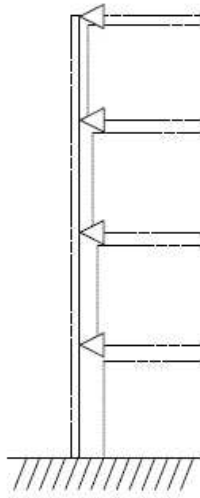


図 5-1 連梁モデルの概念図

(c) 許容応力度

材料の許容応力度は短期許容応力度を採用することとし，その値を表 5-2 に示す。コンクリート強度は，地震 PRA 等で用いている実強度とし，鉄筋は，F 値を 1.1 倍した値を用いている。

表 5-2 材料の許容応力度

種別	短期		
	圧縮	引張	せん断
コンクリート	35.0	-	1.52
鉄筋	379.5	379.5	345

b. 評価結果

評価結果を表 5-3 に示す。津波時に生じる建屋外壁の配筋検定比（必要鉄筋量／存在鉄筋量）および面外せん断力に対する検定比が 1.0 を下回ることを確認した。

表 5-3 評価結果（検定比）

建屋	配筋検定比	面外せん断力
原子炉建屋	0.97	0.81
制御建屋	0.68	0.51

(6) 建屋水密扉

a. 評価方法

建屋水密扉は、津波高さ O.P. 38.6m による敷地内氾濫解析結果に基づく、各建屋、壁の位置（または、それを包絡する近傍の位置）における最大浸水深に対する静水圧に耐える設計とする方針であり、その止水性能を評価する。

b. 評価結果

建屋水密扉の材料は鋼製とし、扉枠は建屋の床及び壁に支持する。また、扉締付装置で扉、パッキン、扉枠を密着させることにより水密性を確保する。津波高さ O.P. 38.6m による敷地内氾濫解析結果による浸水深から建屋水密扉に作用する設計用荷重（静水圧）の算出を行い、その荷重に応じた構造とし、止水性能はモックアップ試験により確認する。

(7) 復水貯蔵タンク

a. 評価方法

津波高さ 0. P. 38. 6mによる氾濫解析結果から、復水貯蔵タンク外周部に作用する津波荷重（静水圧）による発生応力が、タンク各部位の許容応力を下回ることを確認するため、解析コード（MSC Nastran）を使用し有限要素法（FEM）による静的解析を行う。解析モデルの概要図を図 7-1 に示す。

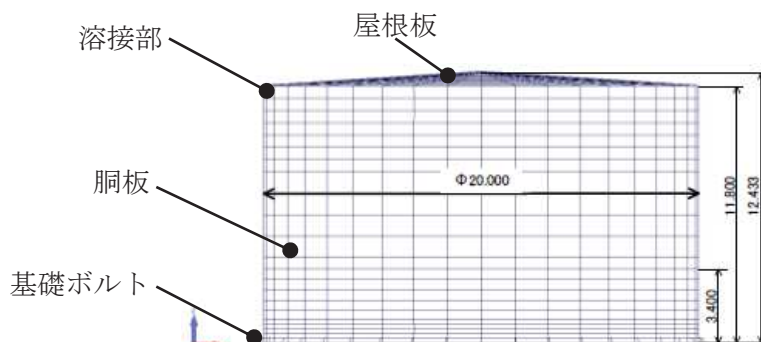


図 7-1 復水貯蔵タンク 解析モデル概要図（単位：m）

b. 評価結果

津波による発生応力に対して、各部位が耐性を有していることを確認した。

評価部位	応力分類	発生応力	許容応力	評価
屋根板	一次一般膜応力	39 (N/mm ²)	287 (N/mm ²)	○
胴板	一次一般膜応力	62 (N/mm ²)	287 (N/mm ²)	○
溶接部	一次膜＋一次曲げ応力	8 (N/mm ²)	193 (N/mm ²)	○
基礎ボルト	引張り	83 (N/mm ²)	421 (N/mm ²)	○
	せん断	33 (N/mm ²)	324 (N/mm ²)	○

評価部位	応力分類	算出値	許容値	評価
胴板（座屈）	圧縮と曲げの組合せ	0.45 [※]	1	○

※ JEAC4601-2008（式 4.2.3.1-1）座屈評価の不等式 $\frac{\alpha_B(P/A)}{f_c} + \frac{\alpha_B(M/Z)}{f_b} \leq 1$ から求める算出値

(8) 燃料移送ポンプ（軽油タンク設置エリア）

a. 評価方法

(a) 評価対象の選定

燃料移送ポンプは地下ピット内に設置されており，地上部との貫通部または開口部からの浸水により機能喪失が想定されるため，評価対象は軽油タンク地下ピットと地上部との貫通部および開口部，マンホール類とする。軽油タンク地下ピットの設置概要を図 8-1 に示す。

(b) 評価手順

耐水圧試験により確認した貫通部及びマンホール類の止水性能と，津波高さ O.P. 33.9m による敷地内氾濫解析に基づく軽油タンク設置エリアの最大浸水深 0.3m を比較し，止水性能が最大浸水深を上回ることを確認する。また，ダクト管には地上面に開口部があるため，開口部下端高さと最大浸水深を比較し，開口部下端高さが最大浸水深を上回ることを確認する。

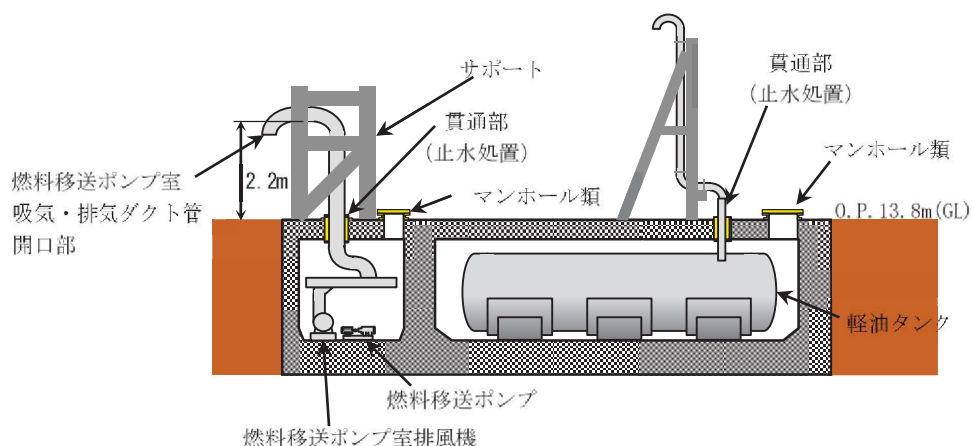


図 8-1 2号炉 軽油タンク地下ピット概略図（断面図）

b. 評価結果

評価結果を表 8-1 に示す。耐水圧試験により確認された貫通部ならびにマンホール類の止水性能と、敷地内氾濫解析結果から算出される軽油タンク設置エリアの最大浸水深を比較し、止水性能が最大浸水深を上回ることを確認した。マンホール類は実機による耐水圧試験を実施している。マンホール類の耐水圧試験概要を図 8-2 に示す。(貫通部の耐水性能について表 4-2 による)

また、ダクト管開口部下端高さと同最大浸水深を比較し、開口部下端高さが最大浸水深を上回ることを確認した。

表 8-1 止水性能と最大浸水深の比較による評価結果一覧

種別	設備名称	止水性能 (m)	最大浸水深 (m)	評価
貫通部	100A 以下	10.0	0.3	○
	125A～500A	5.0		○
ダクト管	燃料移送ポンプ室吸気・排気ダクト管 (300A)	2.2 [※]		○
マンホール類	燃料移送ポンプ室アクセス用マンホール等	3.0		○
	軽油タンクピット内アクセス用マンホール等			○

※ 開口部下端の高さを示す。



図 8-2 マンホール類の耐水圧試験概要図

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。