

耐津波設計の概念構築

ー津波防御に関する工学の体系化

- 6章 津波の外力（東北大学・越村）
- 7章 津波防御に関する工学的体系
- 8章 フラジリティー解析（防衛大・香月）
- 7章 メンバー

今村文彦	東北大学	津波工学	7.1 津波防御に関する技術のレビュー（多重防災機能） 7.2体系化の考え 7.5津波関連情報システムの活用
有賀義明	弘前大学	地震工学	7.2体系化の考え 7.3構造工学、機器工学の検討および提案
飯田晋	東北電力	プラント運転管理	7.1 津波防御に関する技術のレビュー（アンケート） 7.2体系化の考え
石黒幸文	中部電力	電力土木	7.1 津波防御に関する技術のレビュー（アンケート） 7.2体系化の考え
庄司学	筑波大学	ライフライン防災	7.3構造工学、機器工学の検討および提案 7.4回復力（Resilience）の維持
高橋郁夫	清水建設	耐震工学	7.3構造工学、機器工学の検討および提案 7.4回復力（Resilience）の維持

検討事項

- 7.1 津波防御に関する技術のレビュー
 - 既存の技術, 施設やシステムなどのレビュー(アンケート調査など)
 - 多重防御の機能を有する技術の体系化に向けた機能(防水, 耐水, 避水など)
- 7.2 体系化の考え
 - 対象エリア・構造物に対する多重性・多機能を持つ減災・防御の体系化に向けて
 - 多重防御, 深層防御, フェールセーフなどの構造工学等の検討や回復力について考えの整理
- 7.3 構造工学、機器工学の検討および提案(事前対応, 予防)
 - 多重防御の機能を持つ構造, 機器の検討
 - 防水工法、耐水工法、避水工法
 - 浸水からの設備の遮蔽vs設備側で対応
- 7.4 回復力(Resilience)の維持(事後対応, 危機管理)
 - 津波からの影響を受けた後のいち早い復旧・復興について
 - いち早い復旧を目指した対応(排水, がれき処理, 体制など)
- 7.5 津波関連情報システムの活用
 - 津波警報などの利用
 - リアルタイム情報の活用リアルタイム情報の活用による低減効果
- 7.6 海外での事例
- 7.7 提案事例

7.1 津波防御の体系化：目的

- 目的；耐津波性向上のため，津波への**防御施設，対策・対応を相互に関連性**させ、発生時から来襲・浸入，収束，さらに回復までの間，津波の**外力・影響を最小化**させる．多重防御（多重性，多様性，独立性），深層防御（多相性）の視点での体系化を図る．
- 対象エリアに応じた津波来襲・外力の特性を踏まえて，**構造工学等の検討や対策・対応の考えの整理**し，必要な**工法やシステムを提案**する．

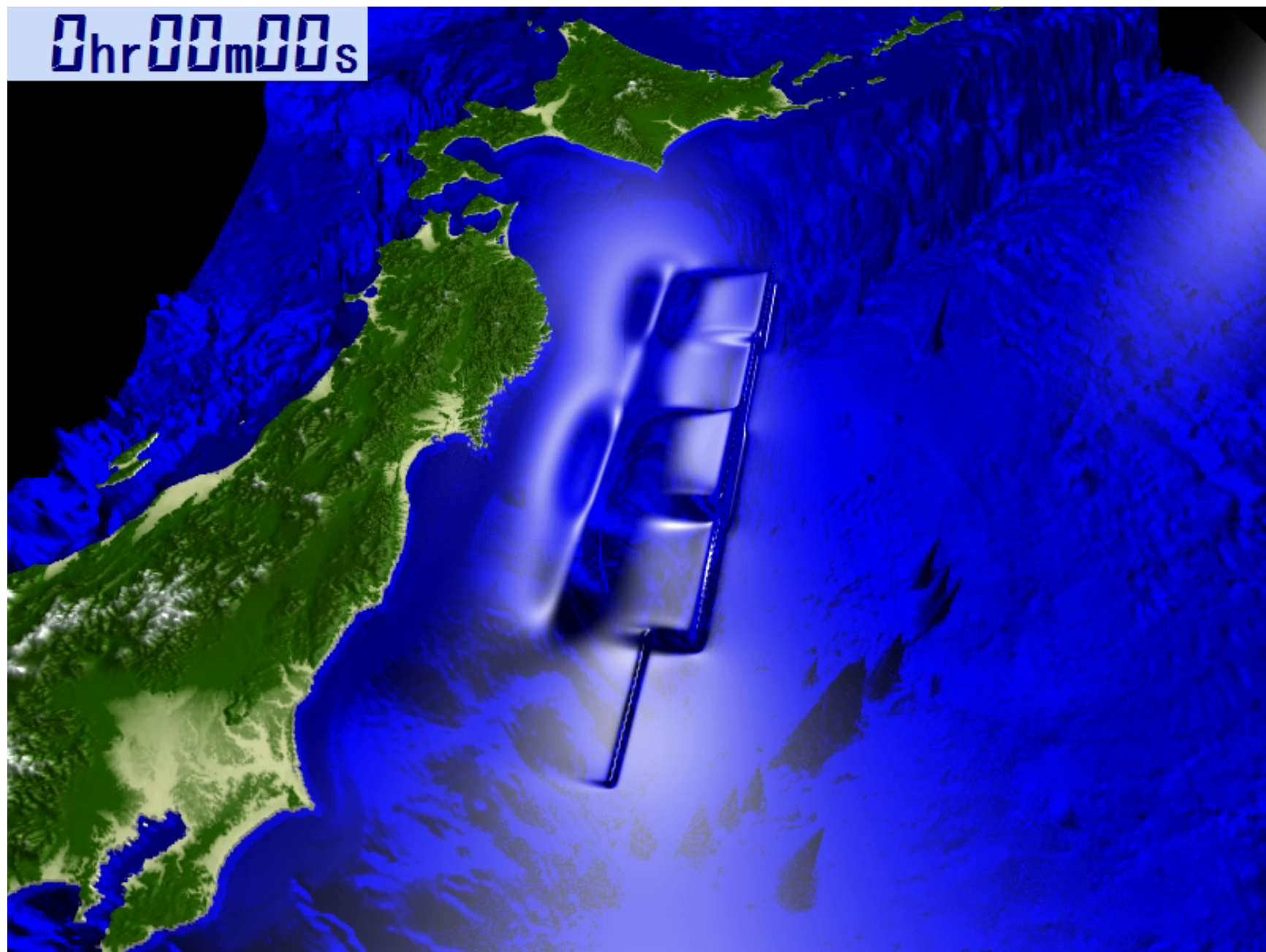
7.2 3.11で何が起こったのか？

- 巨大津波の来襲，敷地内への遡上，浸水，施設内への浸水

○ 15時37分頃、津波がプラントに到達

○ 非常用電源設備等、安全上重要な設備が津波で同時多発的に機能喪失

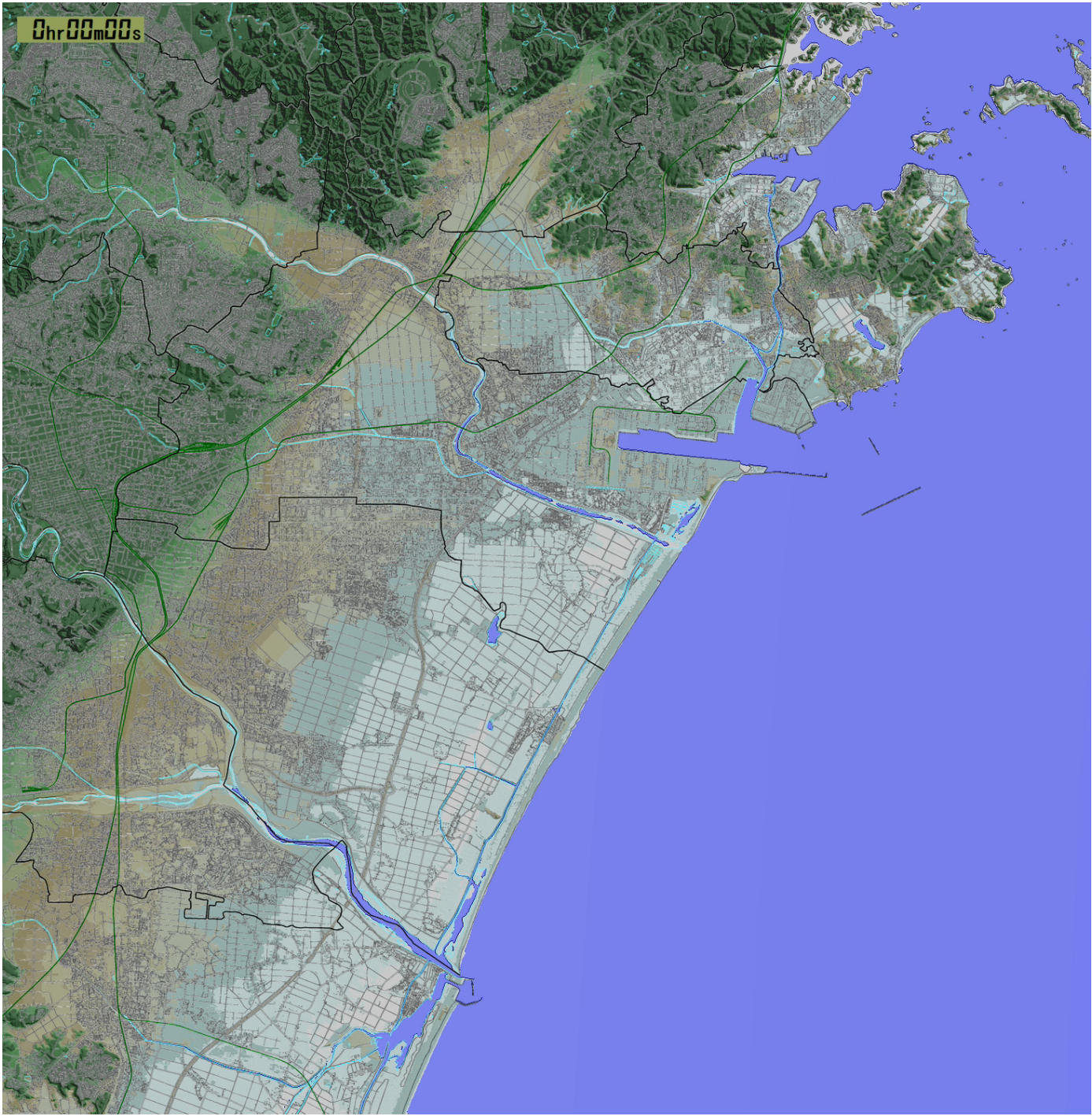




2011年東北地方太平洋沖地震津波

福島県沿岸北部



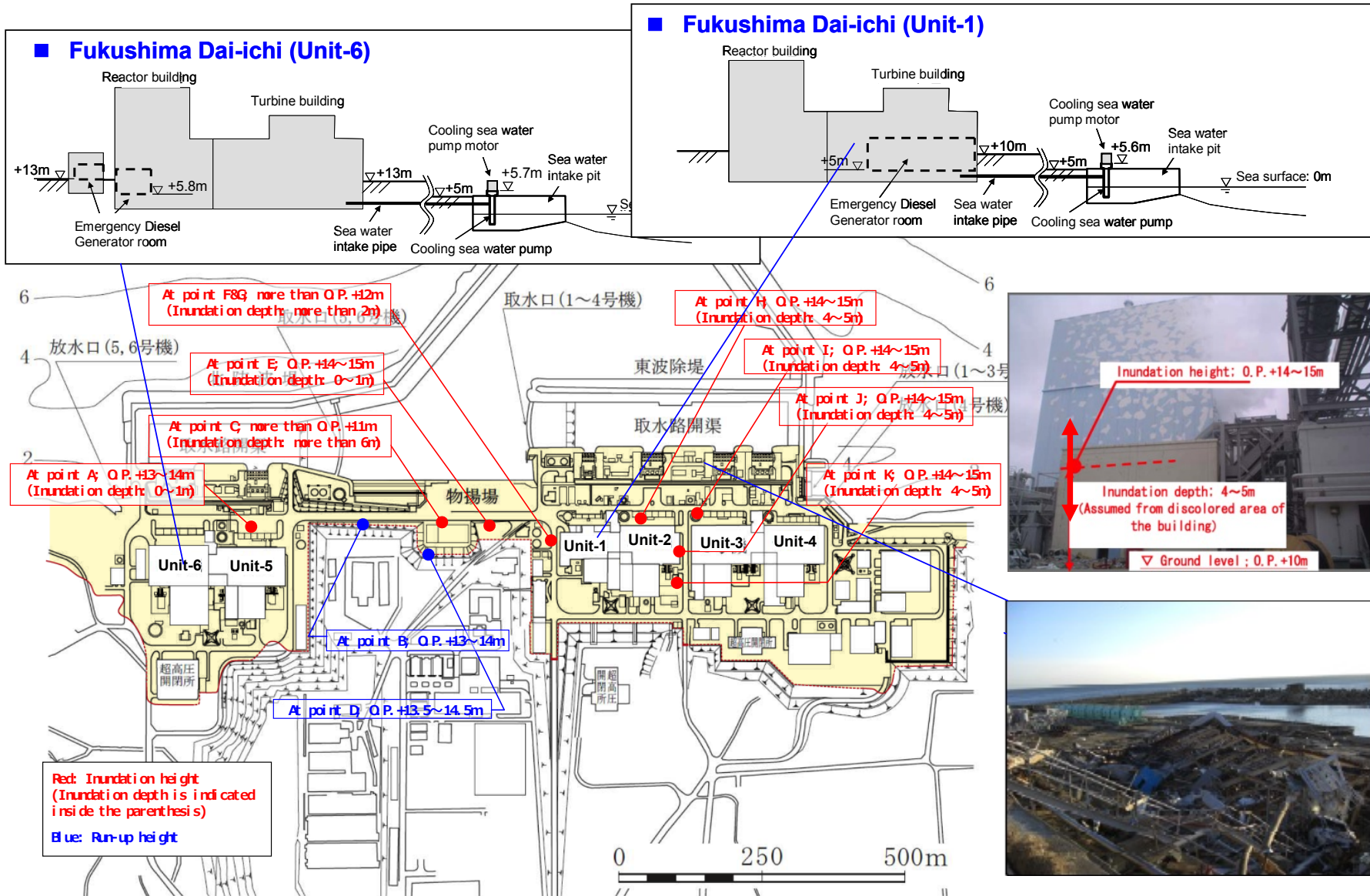


当時の映像（東北整備局）



陸上への遡上

=> 浸水(静水压+動圧), 没水(静水压), 冠水, 被水 (after Ebisawa)



7.3 津波の水理

- **浸水**: 津波(水塊)などが陸上域に浸入している状態. 水が入り込む状況. ここでは, 静水圧に加えて動水圧もある.
- **没水**: 水塊が浸入し水位が上昇し, 施設や構造物が完全に没して, 水面下になる状況(水中に隠れてしまう). ここでは静水圧が支配的になる.
- **冠水**: 没水まではいかないが, 少しでも水につかる状況. ここでは静水圧が支配的になる.
- **被水**: 水塊により少しでも機能を喪失した状態

来襲する津波(仙台平野)

11日午後3時56分



(毎日新聞) http://www.boston.com/bigpicture/2011/03/massive_earthquake_hits_japan.html

ポテンシャルエネルギー=>運動エネルギー

来襲する津波(仙台平野)

11日午後3時56分



(毎日新聞) http://www.boston.com/bigpicture/2011/03/massive_earthquake_hits_japan.html

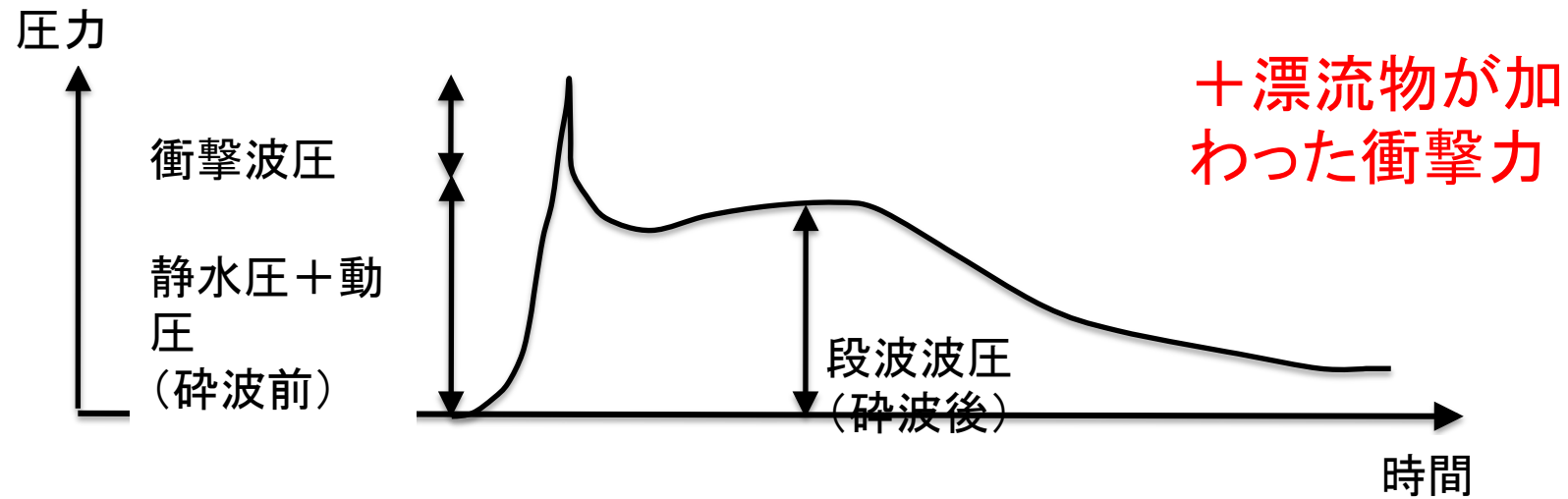
再加速度化 と 土砂移動(泥水)

来襲する津波(仙台平野)



(毎日新聞) http://www.boston.com/bigpicture/2011/03/massive_earthquake_hits_japan.html

浸水（静水压＋動圧）



①沖合域

沖 合

微小振幅波圧
(合田式)

②浅海域

浅 海

非碎波

有限振幅波圧

③碎波域

碎 波

段波波圧 (福井ら, 1962)

越流なし

遡上波圧, 重複衝突波圧

構造物前面勾配

90度付近

衝撃段波波圧

33度付近

衝撃重複
衝突波圧

④越流域

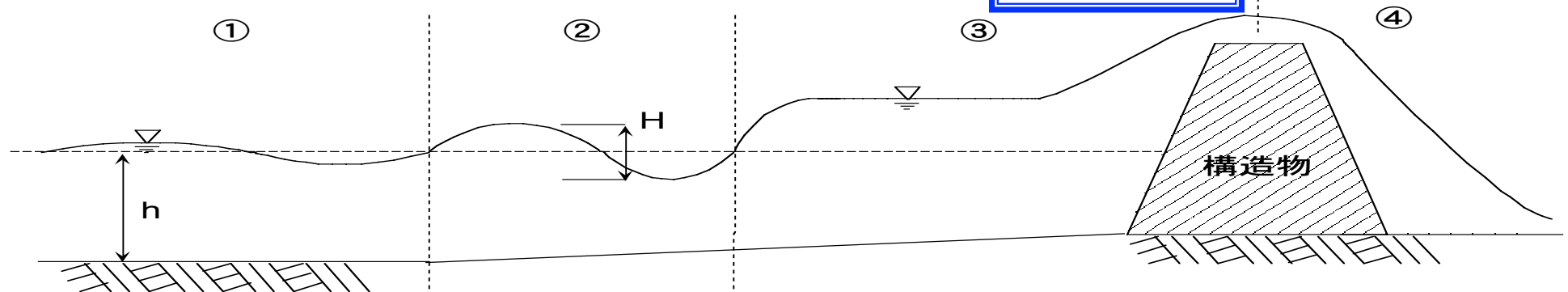
越流あり

越流波圧

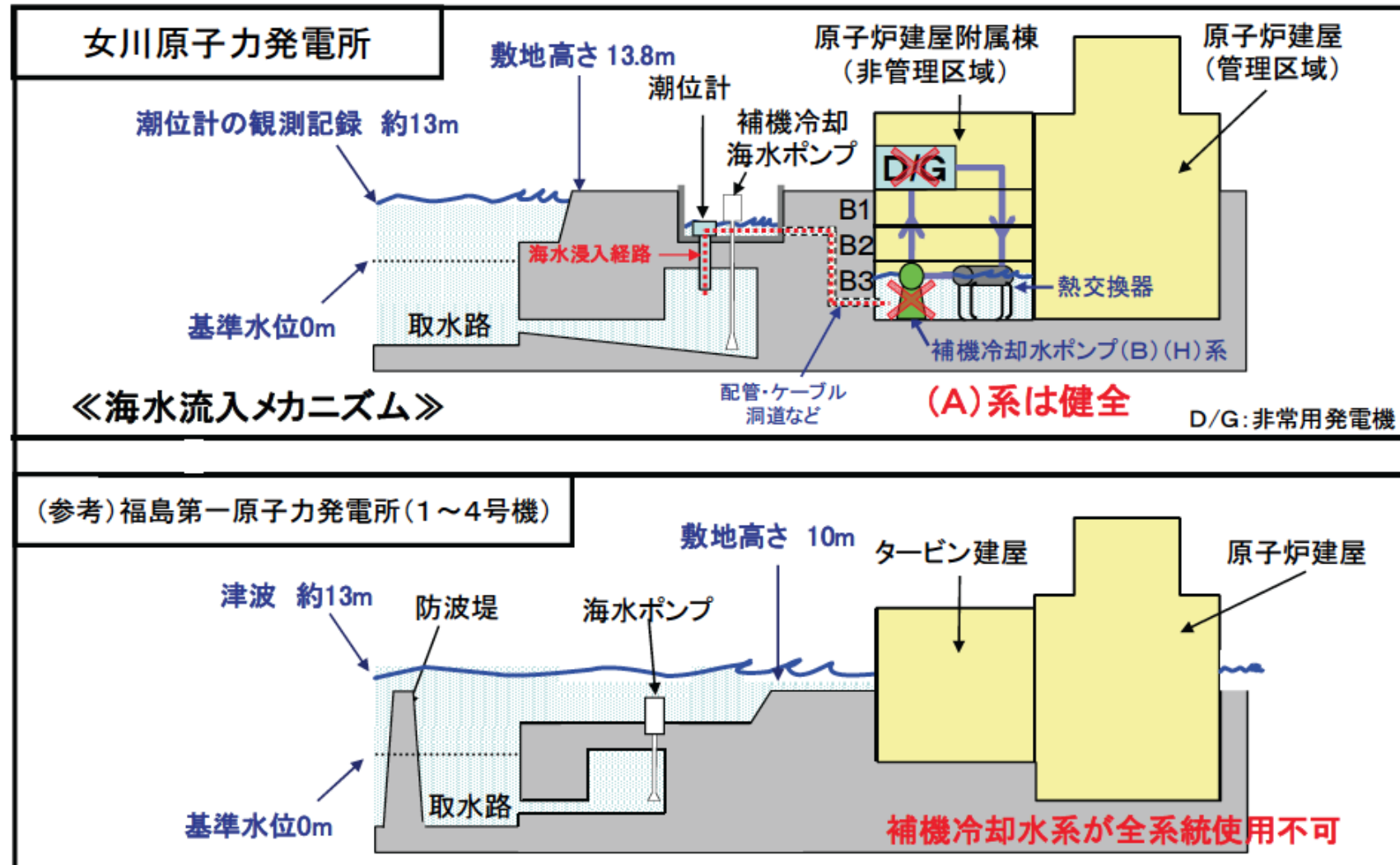
構造物裏面
急勾配

衝撃越流波圧

水谷・今村, 海岸工学講演会



2系統の浸水経路



7.4 沿岸での建物への影響

- 壁・開口部周り等の損傷・破壊(開口部の破壊) $\Rightarrow$ 1階等の崩壊
- 建物の転倒, 残留変形(倒壊の手前)
- 洗掘による傾斜
- 漂流物の衝突
- 移動・流出(露出型柱脚の破壊, 柱頭接合部の破壊, $\Rightarrow$ 流体力(水平) + 浮力)

浮力の作用



女川原子力発電所



女川町市内

外力の複合化と基礎の重要性

漂流物

津波先端への集中



船舶, 車両などの漂流

素因	誘因	影響(拡大要因)	被害
浸水(泥水)	海水(塩分), 土砂移動, 火災発生	溺死(呼吸困難, 津波肺), 延焼, 海水植物枯	地域崩壊, 火災, 農業被害
流れ	漂流物・船舶, 土砂, 可燃物	破壊, 浸食堆積, 火災延焼, 土砂移動	家屋・施設被害, インフラ被害, 環境破壊
波力	浸水×流れ ²	破壊力(破壊増)	家屋・施設被害, インフラ被害



7.4 津波による影響と損傷モード

荷重因子	津波の高さ(浮力), 浸水時間, 津波の流速 衝撃波力, 水平力, 転倒モーメント
各施設・設備 の構造・機能 損傷モード	漏電(浸水・漏水), 破壊・亀裂, 滑動, 転倒, 建物の傾斜・倒壊(洗掘), 取水困難(漂流物・土砂の堆積)
工学的な対応	防水(超えない), 耐水(水に耐える), 避水(とどかない)

外力と脆弱性

7.4 耐津波性の機能(案)

防水	重要な安全機能を有する施設等の設置された敷地において、基準津波による遡上波を直接到達、流入させないこと。また、取水路、排水路等の経路から直接流入させないこと	
耐水 水密 性の 維持	あらゆる経路から取水・放水施設、地下部等へ漏水する可能性を考慮の上、 漏水による浸水範囲を限定 して、重要な安全機能への影響を防止すること。 また、津波の波力・モーメントを評価し、 施設・設備に損傷 が生じないようにする	
避水	重要な安全機能を有する施設等については、浸水防護をすることにより津波による 影響等から隔離 すること	
	水位下降に伴う取水性低下による重要な安全機能への影響を防止すること	

7.5 基準津波の考えの整理

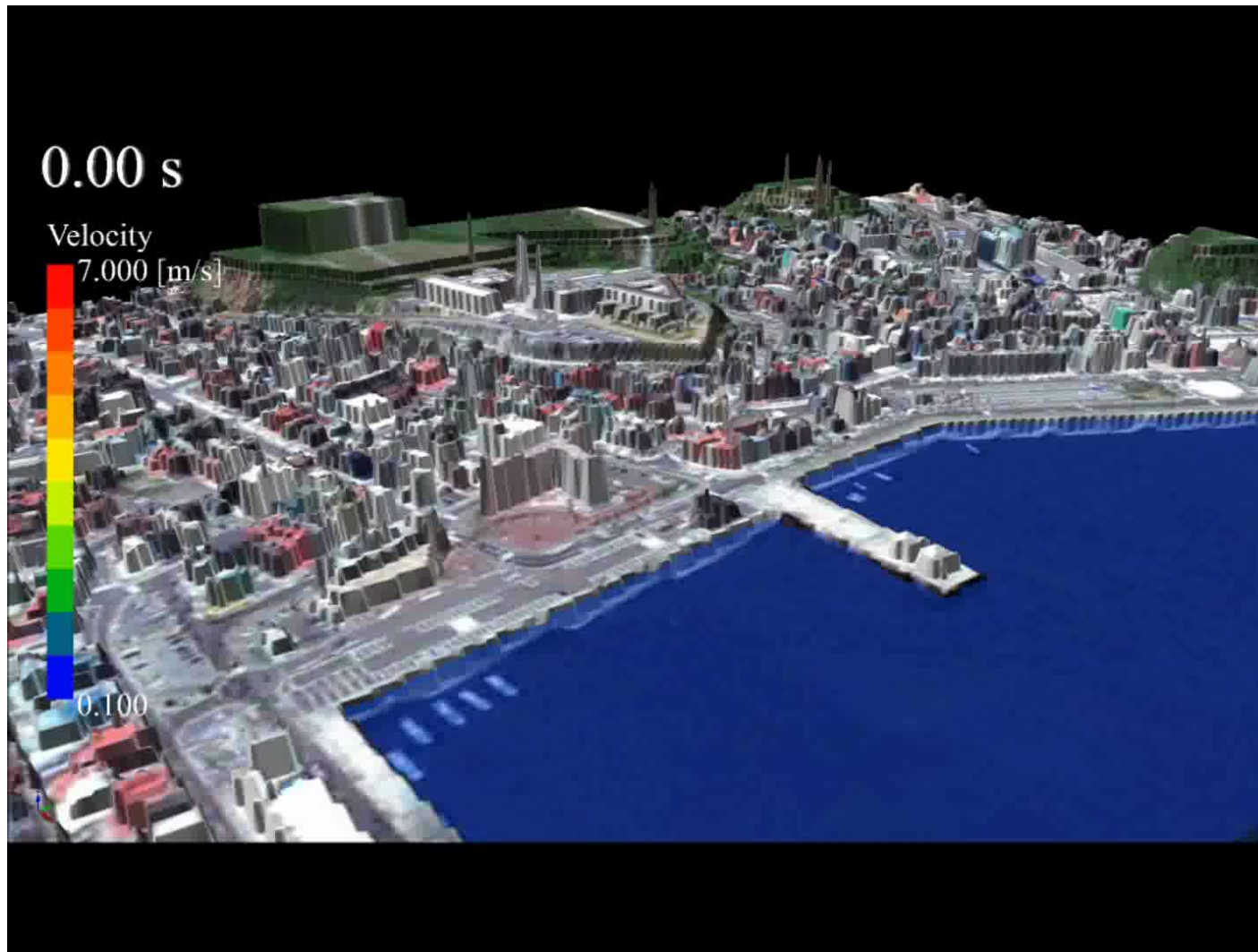
- 原子力安全のための基準津波は、施設の安全性を確保するための津波対策の前提となる津波であり、**想定される津波の中で施設に最も大きな影響を与えるものを複数選定することが必要**
- 想定される地震による波源から数値解析によって**入力波形**を求める
- 数値解析は波源からの入射波の**伝播域とサイト周辺部（ここでは、入射反射の複雑な挙動）の2段階**としたい。
- さらに、サイトおよびその近傍での複雑な沿岸域での地形やサイトの建物・施設の影響を十分取り入られる詳細なデータが不可欠である。基準津波の時刻歴波形を示す場合は、サイト周辺部領域で出力したい。

想定津波の影響

- サイトおよびサイト近傍における想定津波の「影響」とは、津波による浸水(高さ・深さと時間)、津波による波力、津波に伴う現象(漂流物の移動、堆積や浸食などの地形変化)など総合的な津波による挙動を示す。
- 耐津波設計上の十分な裕度を含めるため、各施設・設備の機能損傷モードに対応した荷重(浸水高、波力・波圧、洗掘力、浮力等)について、設計用津波から十分な余裕を考慮して設定することが求められる。

津波数値解析—現状

- 2Dから3Dへ,
- 女川町への適用 港湾空港研 有川・富田(2013)



7.6 (1) 体系化のための考える視点

- 津波および災害の特殊性
 - 地震発生後に伝播し、サイトや周辺施設に作用する
 - 来襲までに猶予時間がある。来襲の継続時間が長い、影響範囲もサイト周辺も含めて広い。サイト周辺の相互影響が大きい。波源位置とサイトの位置関係により影響が異なる
 - 津波来襲による随伴事象（土砂移動、漂流物、火災など）がある。
- 津波の作用・影響の過程の整理
 - 発生、伝播、陸上遡上、建屋への浸入・移動、漂流物移動、複数の来襲、収束・排水

7.6 (2) 津波防御の考え方

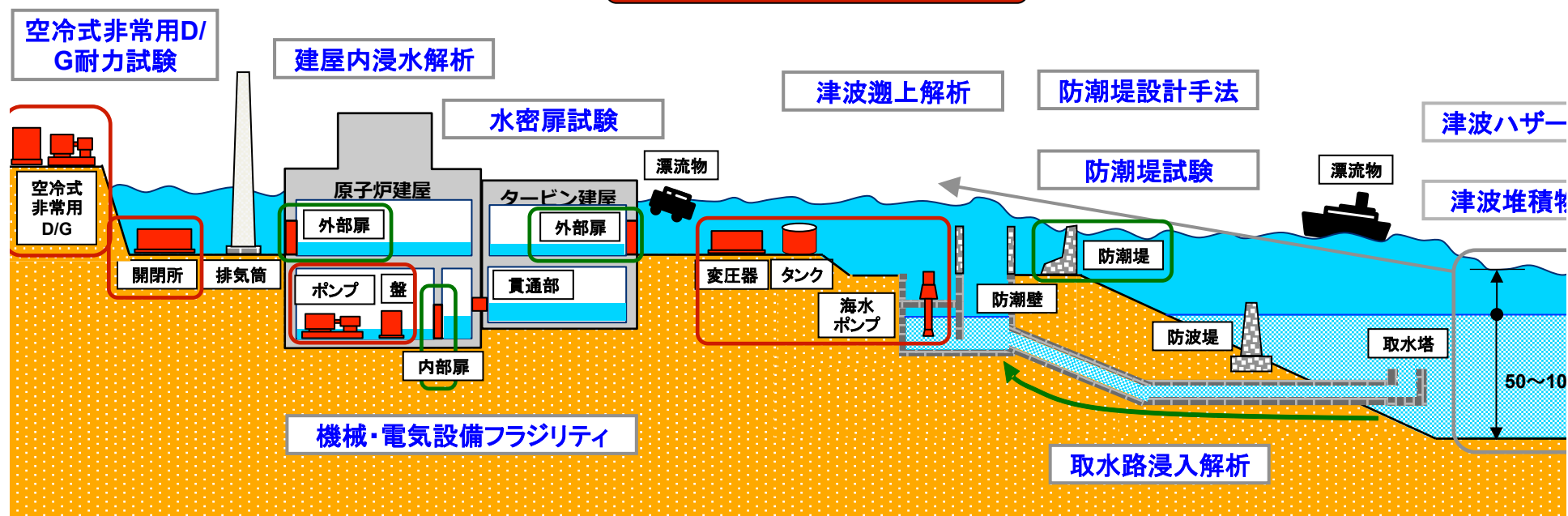
- 津波の回避(抜本的な対策技術): **防水, 浸入防止**
 - 適地選定(津波の影響が及ばない場所⇒選定条件)
 - 防災性の高い立地技術(将来に向けた技術⇒地下立地等)
- 津波からの隔離・排除: **避水・排水**
 - 構造体(防波堤等)を用いた隔離
 - 建屋内設置による隔離(レイアウトの工夫)
 - 施設全体を覆う構造形式による隔離・排除(排水)
- 津波に対する個別的防御技術: **耐水生, 水密性**
 - 構造力学的な耐津波技術(耐水・波力性等)
 - 水理学的な耐津波技術(経路, 流速, 水密性等)

7.6 (3) 各地域・段階での防御機能例

- 海域において
 - 波高減衰・到達時間遅延(防波堤など)
- 沿岸において
 - 防水, エネルギー減衰(防潮堤など)
- サイト内(陸上)において
 - 浸食防止(アスファルト, コンクリート), 漂流物抑止(フェンス), 波高減衰・到達時間遅延(堤防, フェンス), レイアウト, 構造形式による隔離
 - 排水, 土砂・瓦礫排除
 - 冷却機能(取水排水ポンプ), 防火, 漏電防止, 電源の確保
- 建屋内(浸入経路の特定出来る場合と出来ない場合)において
 - 重要な機器等
 - 防水(防潮壁、水密扉の多重化、開口部閉止・嵩上げ、貫通部閉塞)

対象エリア（第3章Gより）

プラント敷地内の施設

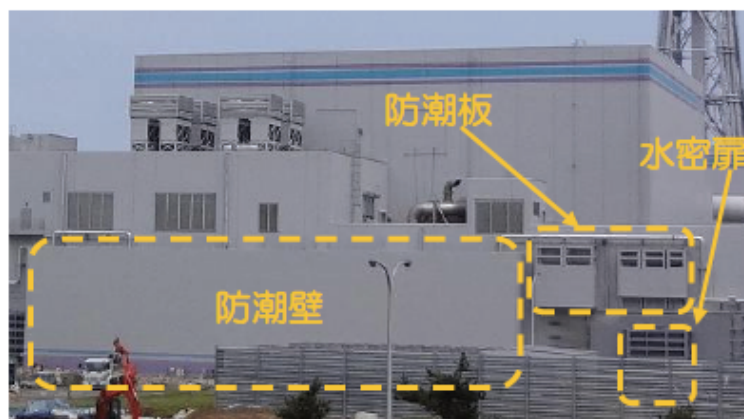


まず、理想像を描くこととする
これ、各サイトの現状を比較する

柏崎刈羽原子力発電所の安全対策（津波に対する深層防護第1層）



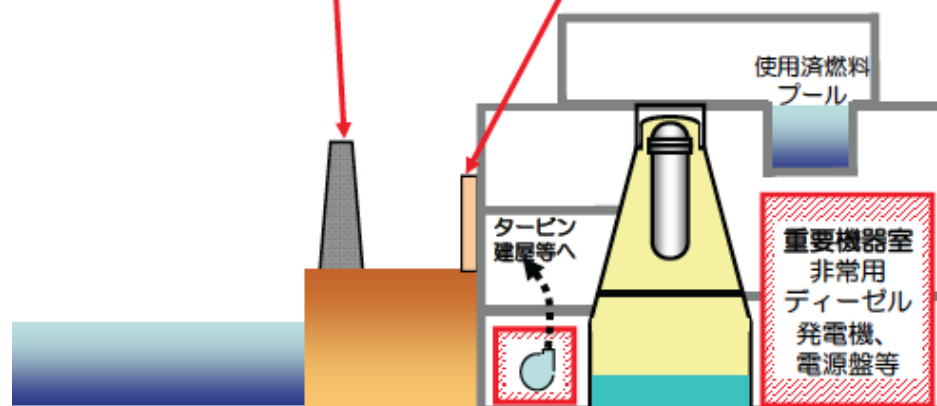
防潮堤：敷地内への浸水を防止



防潮壁：建屋内への浸水を防止



水密扉：重要機器室への浸水を防止（約60箇所）



止水処理：重要機器室への浸水防止（約300箇所）

7.7 施設種別の耐津波性整理シート (案)

施設種別	施設A	エリアA・フェイズ	耐津波性
		海域, 沿岸域, サイト内, 建屋内	防水, 耐水, 避水
		事前, 事中, 回復・復旧	冷却水維持機能, 揚水・排水機能

津波防護の対策の分類(例)その1

2013.08.28 高橋

フェーズ	エリア	対象となる地形・施設	防護の方法	施設用途 (日常・非常)	求める機能・仕様	備考 (参考事例など)
【1】 津波からサイトを 護る	サイト境界 (沿岸)	防潮堤	外洋から襲来する津波の流入を防ぐ	非常	・遮断性(堤の高さや広がり) ・耐波力性(衝撃力・水圧) ・耐波力性(支持力:耐洗掘)	・福島第一原子力発電所では、津波が防潮堤を乗り越えてサイトに大量に流入した。 ・また、防潮堤が洗掘により転倒した。
		立地場所	遡上する津波に洗われないようにする	日常	遮断性(敷地高さ)	・福島第一原子力発電所では、……
		取水口	津波襲来時に取水路を通してのサイト内への津波の流入を防ぐ	日常	・非常時の遮断性	・
【2】 津波から施設を 護る	サイト内 (陸地)	防潮壁	開口部から施設内への津波の流入を防ぐ	非常	・耐波力性(衝撃力・水圧) ・水密性	
		防潮扉	出入り口(搬出入口)から施設内への津波の流入を防ぐ	日常・非常	・耐波力性(衝撃力・水圧) ・水密性 ・操作性(自動・手動)	
		立地場所	遡上する津波に洗われないようにする	日常	遮断性(敷地高さ)	※サイト内の施設に関して高所立地の重要度を表に整理して示す

7.8 津波関連情報システムの活用

- 地震発生後から得られる様々な津波に関する情報を利用し、サイトでの津波影響の低減や早い回復・復旧への活用を検討する。気象庁などの津波情報(警報, 注意報), 量的予報, 各地での観測データなどがその対象となる。
- 以下が本節での内容となる
 - 津波警報などの利用
 - リアルタイム情報の活用と低減効果
 - 地震発生後來襲間でのフェーズ, 来襲後から収束までのフェーズ, 収束後のフェーズ

リアルタイム情報の活用・低減効果

- 地震発生から、僅かながら、到達まで時間があるので、そこでの対応が可能
- システム停止、水門などの閉鎖、担当者の避難など、レベルに応じて
- 船舶の退避も可能
- リアルタイム情報
 - 気象庁津波情報(予測値)
 - 沖合津波観測(GPS波浪計, 海底津波計)
 - 沿岸津波観測(潮位計, 波浪計)
 - 陸上遡上感知システム

津波防護の対策の分類(例)その2

2013.08.28 高橋

フェーズ	エリア	対象となる地形・施設	防護の方法	施設用途 (日常・非常)	求める機能・仕様	備考 (参考事例など)
【3】 早期復旧を行う	サイト境界 (沿岸)	防潮堤	サイト内に流入した海水を早急に外洋に排出する	非常	・耐波力性(水圧) ・引き波に対する透水性	
		オイルフェンス	サイト内で漏洩したオイルなどの化学物質の外洋への拡散を防ぐ	非常	・耐波力性(後発の津波など)	
	サイト境界 (陸地)	道路・橋梁	排水後の外部との交通機能確保する(人・物資の移動)	日常	・耐波力性(水圧)	
	サイト内 (陸地)	取水口	引き波になった時に取水槽の枯渇を防ぐ	日常	・非常時の遮断性	
		道路	排水後のサイト内の交通機能確保する	日常	・耐波力性(洗掘)	

漂流物に対する防護

2013.08.28 高橋

フェーズ	エリア	対象となる地形・施設	防護の方法	施設用途 (日常・非常)	求める機能・仕様	備考 (参考事例など)
【1】 漂流物からサイトを護る	サイト境界 (沿岸)	防潮堤	外洋から襲来する大型漂流物の流入を防ぐ	非常	・遮断性(高さ) ・耐衝撃性	
		取水口	取水路内への漂流物の流入を防ぐ	日常	・非常時の遮断性	
【2】 漂流物から施設を護る	サイト内 (陸地)	防潮壁	防潮壁としての機能(津波流入の防護)を損なわないように自身の損傷を防ぐ	非常	・耐衝撃性	
		防潮扉	防潮扉としての機能(津波流入の防護)を損なわないように自身の損傷を防ぐ	日常・非常	・耐衝撃性	
【3】 早期復旧を行う	サイト内 (陸地)	立地場所	施設や自動車などが漂流物・がれきとならないようにする	日常	・遮断性(敷地高さ) ・埋設	・福島第一原子力発電所では、自動車が建屋周辺に押し寄せた。
		オイルタンク	オイルタンクは漂流しないよう、またオイルが流出しないようにする	日常	・固定化 ・埋設	・女川原子力発電所では防潮堤外のオイルタンクを漂流した

防護の段階

- ー ドライサイトコンセプト又は外郭防護
 - ・ 外郭防護1 : 津波防護施設
- ー さらに漏水の可能性を検討し浸水想定範囲を定める
 - ・ 外郭防護2 : 防水区画、排水設備
- ー 重要安全機能を有する区域 : 浸水防護重点化範囲を定める
 - ・ 内郭防護 : 経路の特定、浸水対策
- ー 非常用海水冷却系の取水性、漂流物影響

津波警報などの利用

- 気象庁の津波警報は60年以上の実績
- 全日本対象＝＞詳細性は問題
- 地震規模に依存（津波地震や非地震性津波には過小評価）
- データベースに基づく，量的予報（津波到達時間や高さ）を予測，浸水域はまだ