

耐震設計分科会 「原子力発電所耐津波設計技術規定」 (JEAC4629)活動報告

日本電気協会原子力規格委員会シンポジウム

日本電気協会耐震設計分科会津波検討会(幹事)

(東京電力株式会社)

長澤 和幸

平成26年5月16日

1. 経緯

- 東日本大震災後、各原子力発電所において、津波による万一の全交流電源喪失等においても放射性物質の放出を抑制しつつ原子炉施設の冷却機能の回復が可能となるよう、緊急安全対策を実施
 - 一方、原子炉施設システムの設計の観点から、津波に対する安全性確保を定めた規格・基準の制定に対する要望の高まり
 - 平成24年度、日本電気協会において原子力規格委員会の耐震設計分科会の下に津波検討会を組織し、約2年間にわたり耐津波設計技術規程の検討を実施
- ➔現在、原子力規格委員会に規程案を上程中

2. 耐津波設計技術規程の全体構成

構 成	概 要
1章 基本事項	<ul style="list-style-type: none"> ● 耐津波設計の基本方針(適用範囲、基本的考え方等)
2章 耐津波設計の手順	<ul style="list-style-type: none"> ● 耐津波設計の全体フロー
3章 津波による影響	<ul style="list-style-type: none"> ● 4、5章の設計インプットとなる津波による影響の評価手法を規定(津波遡上解析、津波波力、漂流物衝突力等)
4章 津波防護施設・浸水防止設備の耐津波設計	<ul style="list-style-type: none"> ● 各個別施設・設備の耐津波設計手法として以下を規定 <ul style="list-style-type: none"> ・各設備の性能目標 ・各設備に作用する津波外力の評価手法 ・考慮すべき荷重の組合せ ・各設備の設計基準
5章 機器・電気設備の耐津波設計	
6章 津波による個別の事象に対する耐津波設計	<ul style="list-style-type: none"> ● 4、5章で取り扱う以外の個別の津波外乱(砂移動、潮位低下、津波随伴火災)に対する設計手法を規定
7章 原子炉施設の耐津波性能評価	<ul style="list-style-type: none"> ● 個別設計完了後に原子炉施設全体としてバランスの取れた耐津波性能が達成されていることの確認を目的とした性能評価の手法を規定
8章 津波検知と運転管理	<ul style="list-style-type: none"> ● 耐津波に関する施策のうち、運用が介在する項目に関し、運用上の配慮(通常運転時の運転管理、津波検知時の運転管理)を規定
参考資料 津波被害事例集	<ul style="list-style-type: none"> ● 津波被害の実例集

3. 耐津波設計の基本方針(1/2)

■ 福島第一原子力発電所事故における教訓

- ① 防潮堤等の高さのみに対する津波対策には、想定した高さを乗り越えると重要な施設が複数同時に機能を喪失する**クリフエッジ効果**が存在すること
- ② 津波の外乱としては、波力、浸水、浮力、水位変動、砂移動、洗掘等の直接的な外乱に加え、水位の低下、漂流物の衝突や火災等、間接的な外乱が想定され、**外乱の影響は多様**であること
- ③ 多様な施設に対する多様な外乱による影響を考慮したとき、
 - － 単一の設備を許容基準に適合するよう設計するだけでなく、脆弱性を有する部分を見極め**システム全体として安全性を確保**すること
 - － あるいは、**頑健性の特に高い特定のセーフティパス**を設けて、原子炉施設全体として実効的な耐津波対策が施されているか確認すること

が重要であること

3. 耐津波設計の基本方針(2/2)

■ 耐津波設計の基本的な考え方

□ 教訓①を踏まえ

- 原子炉施設は、次のいずれかまたはその組合せにより津波による影響を排除する
 - ✓ 津波による影響が到達しない標高に設置する
 - ✓ 津波による影響から障壁により隔離する
 - ✓ 津波による影響に対して機能維持できるように個別設備を設計する
- また、津波防護対策については、**深層防護の観点から、多重化、多様化**を考慮する

□ 教訓②を踏まえ

- 津波の波力、浸水による静水圧、漂流物の衝突等による構造強度への影響、洗掘による基礎構造物への影響の他、水位低下による海水取水性への影響、砂移動による海水取水路の閉塞ならびに海水ポンプ軸受への影響等、**設備への多様な影響を網羅的に想定**する

□ 教訓③を踏まえ

- 原子炉施設全体としてバランスの取れた耐津波性能が達成されていることを確認するため、マージンアナリシスの手法により**耐津波性能を検証し、個別設備の設計にフィードバック**を行う
- また、重大事故発生防止の観点から有効な防護対策を抽出し、当該施設については**個別に耐津波性を強化**する

4. 耐津波重要度分類

- 耐津波設計の目的を合理的に達成するため、各施設を津波により発生するおそれがある**安全機能の喪失に起因する公衆への影響の観点から分類**することが重要
- 防護対象設備(守られる設備)が総じて地震荷重を受ける耐震設計と異なり、耐津波設計では防護設備(守るための設備)により防護対象設備に対する津波の影響の排除が可能
 - 耐津波設計では、**防護対象設備よりもむしろ防護設備の設計**が主流

耐津波重要度分類を次の方針により定め、設計対象を明確化

1. 防護対象設備を公衆への影響の観点から**耐津波Sクラス、Bクラス**に分類
2. 防護対象設備に紐付けされる防護設備のうち**津波防護施設(外部障壁)**を耐津波Seクラス、Beクラスに分類:防潮堤、防潮壁等
3. 防護対象設備に紐付けされる防護設備のうち**浸水防止設備(複合障壁)**を耐津波Siクラス、Biクラスに分類:水密扉、閉止板、止水剤充填等
4. 防護対象設備のうち津波による影響から**自らの機能を維持すべき設備**を耐津波Stクラス、Btクラスに分類:屋外重要タンク、配管、ポンプ等

参考:耐津波重要度分類(機能上の分類)

	定義	補足
耐津波 Sクラス	<p>津波により発生するおそれがある事象に対して、</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 原子炉を停止し、炉心を冷却するために必要な機能を持つ施設 ✓ 自ら放射性物質を内蔵している施設 ✓ 当該施設に直接関係しておりその機能喪失により放射性物質を外部に拡散する可能性のある施設 ✓ これらの施設の機能喪失により事故に至った場合の影響を緩和し、放射線による公衆への影響を軽減するために必要な機能を持つ施設 ✓ これらの重要な安全機能を支援するために必要となる施設であって、その影響が大きいもの 	<p>外的事象に対して維持すべき安全機能の共通性を踏まえ、耐震重要度分類と同等の定義</p> <p>ただし、具体的な施設は必ずしも耐震重要度分類と同一である必要はなく、津波時のみに利用する緩和系を現行の耐震Sクラス施設に追加して設置することも許容されるべき</p>
耐津波 Bクラス	<p>上記において、その影響が比較的小さいもの</p>	

参考：耐津波設計における防護の方策と設計対象

①津波による影響が到達しない標高に設置する場合

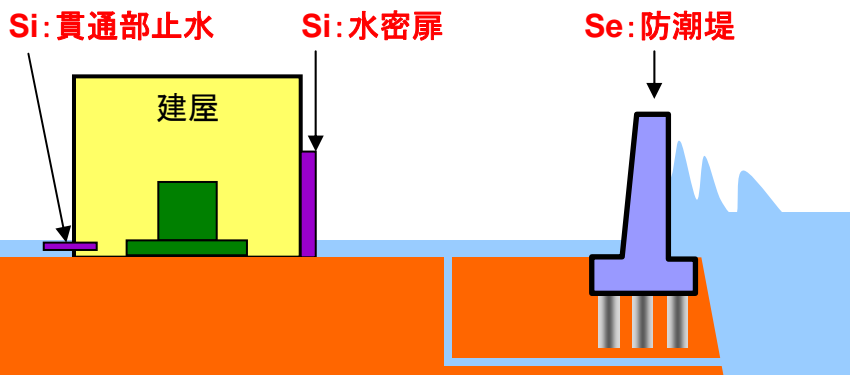
⇒設計対象：なし

耐津波Sクラス施設



②津波による影響から障壁により隔離する場合

⇒設計対象：防ぐための津波防護施設・浸水防止設備
→それぞれSe、Siと呼称し設計対象として明確化



○津波防護施設[外部障壁(External Barrier)]: Se

護岸、防潮堤、防潮壁等、敷地への津波による遡上波の浸入を防止するか、又は津波による影響を軽減するための構築物

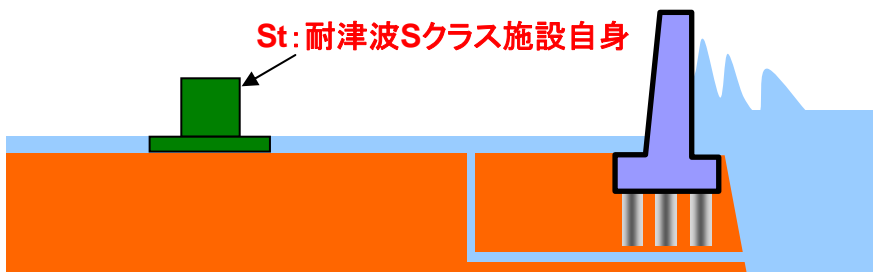
○浸水防止設備[複合障壁(Incorporated Barrier)]: Si

津波に対する障壁を形成する建物・構築物の構造壁と一体となって浸水を防止する水密扉、配管・電路の貫通部の止水構造等

③津波による影響に対して機能維持できるように設計する場合

⇒設計対象：耐津波Sクラス施設自身 (機能維持設計設備)
→Stと呼称し設計対象として明確化

St: 耐津波Sクラス施設自身



5. 津波の到達、流入に対する防護の基本方針(Sクラス)

a. 基準津波の遡上の防止

耐津波Sクラス施設を設置する敷地において、以下の方針により遡上波の到達及び流入を防止する
また、海と接続する取水路及び排水路等からの流入を防止する

- ① 基準津波による遡上波が到達しない位置に設置するか、当該の敷地に流入することを防止する津波防護施設(耐津波Seクラス)、浸水防止設備(耐津波Siクラス)を設置する
- ② 海と接続する取水路又は排水路等から、流入の可能性のある経路を特定し、それらに対して浸水対策を実施する

b. 漏水による浸水範囲の限定

取水・放水施設及び地下部等において、以下の方針により漏水による浸水範囲を限定する

- ① 漏水が継続することによる浸水範囲を想定(以下「浸水想定範囲」という)するとともに、耐津波Sクラス施設を内包する建屋及び区画への浸水の可能性のある経路及び浸水口を特定し、それらに対して浸水対策を施すことにより浸水範囲を限定する
- ② 浸水想定範囲及び周辺に耐津波Sクラス施設がある場合は、防水区画化するとともに、必要に応じて浸水量評価を実施し、安全機能への影響がないことを確認する
- ③ 浸水想定範囲における長期間の冠水が想定される場合は、排水設備を設置する

c. 防護の多重化・多様化

- ① 津波による影響からの隔離

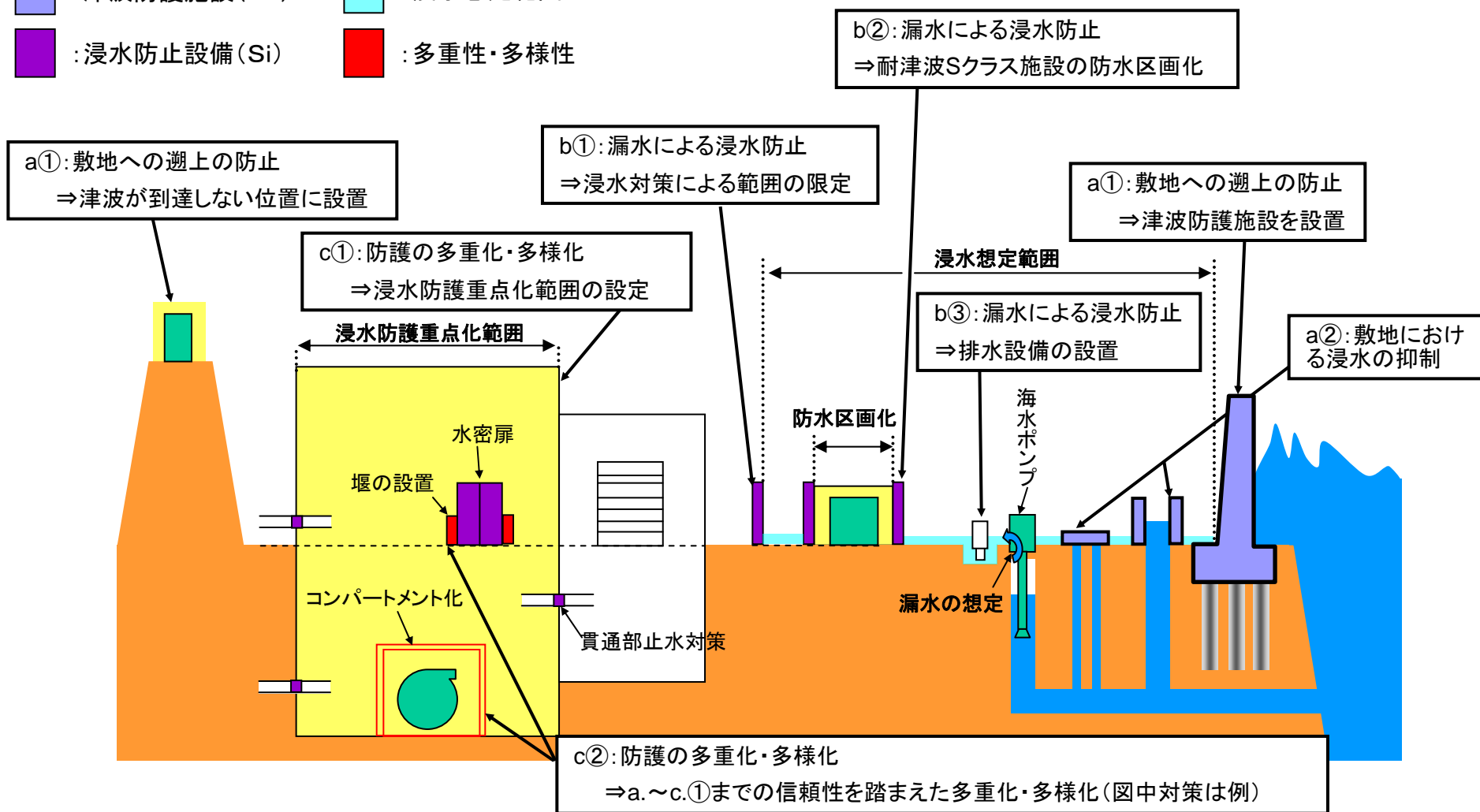
以上に加えて、耐津波Sクラス施設を内包する建屋又は区画を浸水防護重点化範囲として明確化するとともに、浸水範囲、浸水量を保守的に想定した上で、同範囲への浸水に対する対策を施すことにより、津波による影響等から隔離する

- ② 信頼性向上のための考慮

上記a. ~c.①の防護の信頼性を総合的に勘案した上で、必要に応じて多重化・多様化を図る

参考：防護の例示

- : 耐津波Sクラス施設
- : 浸水防護重点化範囲
- : 津波防護施設 (Se)
- : 浸水想定範囲
- : 浸水防止設備 (Si)
- : 多重性・多様性



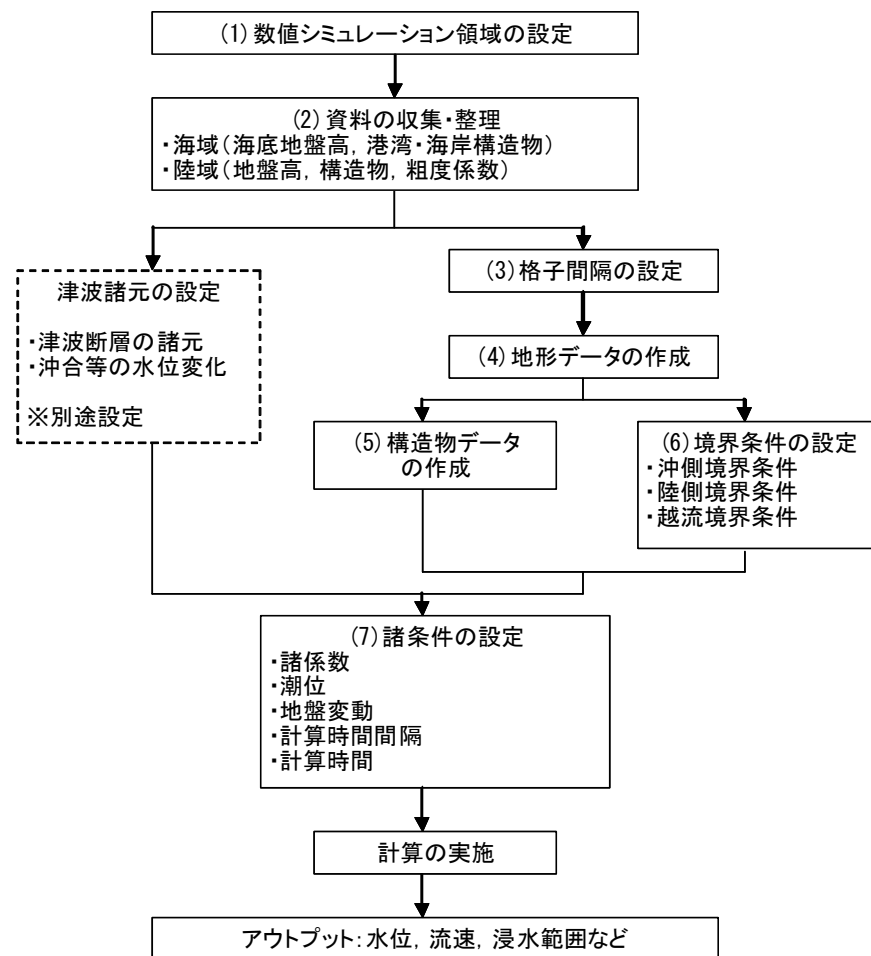
6. 津波による影響の評価

- 耐津波設計で考慮する津波(基準津波 T_s)は、規制基準の要求等に基づき別に策定され、これにより津波断層モデルや沖合等での水位変化を設定

→ 耐津波設計技術規程では、この津波が沖合から襲来し原子力発電所の海岸付近に伝播する現象および陸上に遡上する現象に対し、海岸付近もしくは陸上にある建物・構築物や機器、電気設備の耐津波設計の基礎となる水位、流速、浸水範囲などの基本的諸量を、適切な数値シミュレーションあるいは水理模型実験により求めるよう規定

- 津波による影響として以下も取り扱うが、現状では、定量的評価手法が体系化されていないものもあるため、既存の評価式や実験等を組み合わせて評価を行うこととしており、評価体系の構築は今後の課題

- ✓ 津波漂流物衝突力
- ✓ 砂移動
- ✓ 洗掘 等



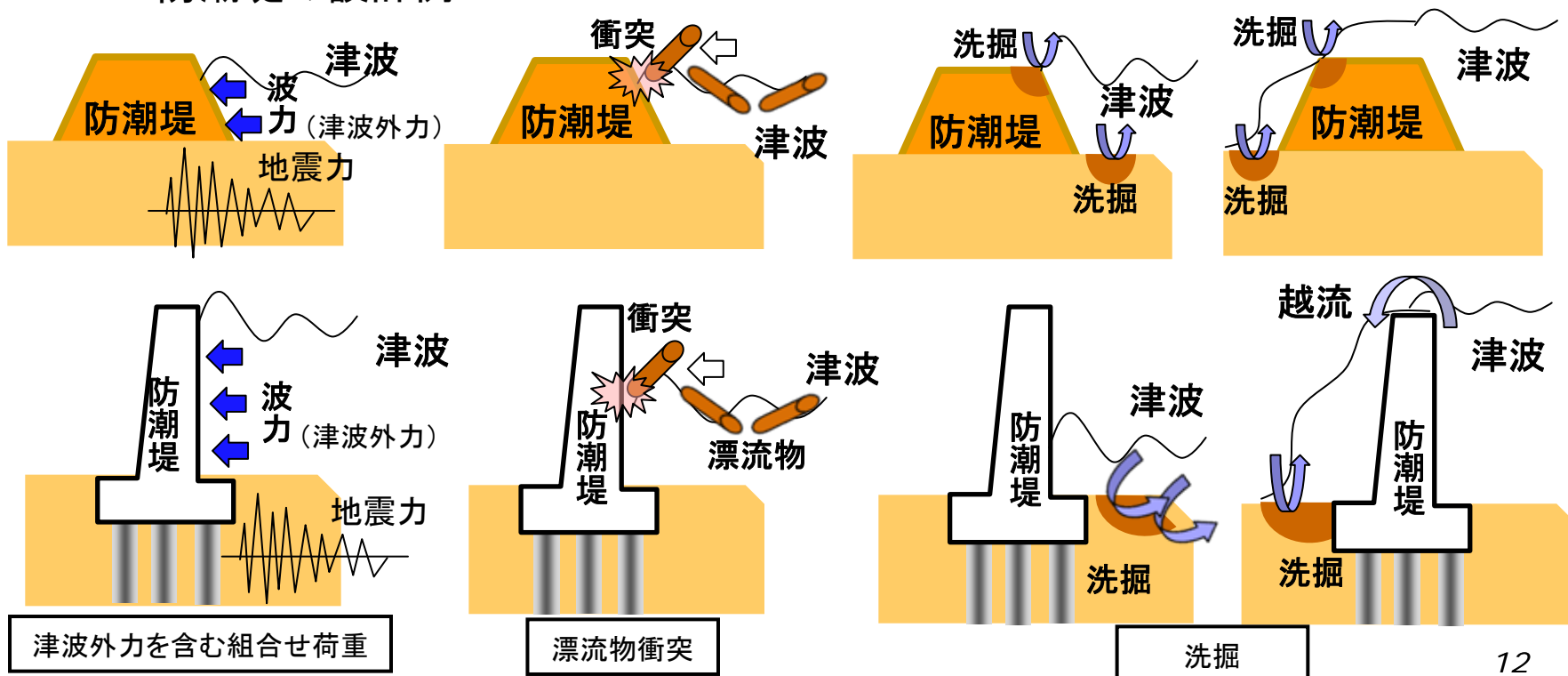
7. 津波防護施設・浸水防止設備の設計(1/2)

■ 津波防護施設の設計

津波防護機能を維持する設計として以下を要求

- ✓ 津波外力を含む組合せ荷重に対する機能維持
- ✓ 漂流物衝突に対する機能維持
- ✓ 洗掘に対する機能維持

□ 防潮堤の設計例



7. 津波防護施設・浸水防止設備の設計(2/2)

■ その他設備の設計

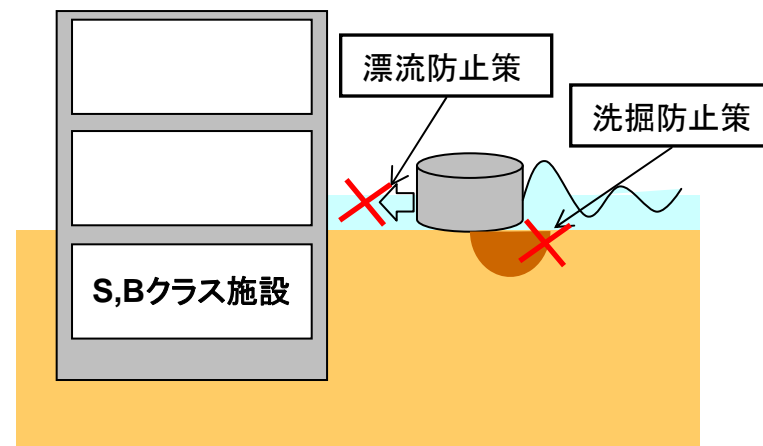
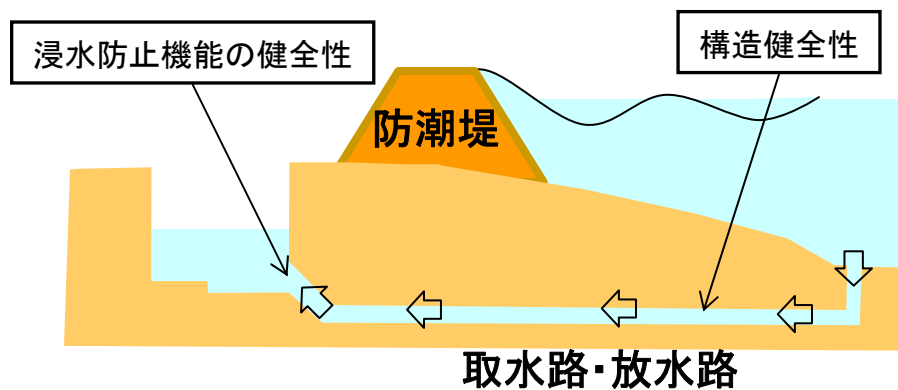
□ 取放水路等の設計

- ✓ 津波外力に対する構造健全性, 開口部の浸水防止機能の維持を要求

□ その他の建物・構築物の設計

耐津波S、Bクラス施設の間接支持構造物に対し、

- ✓ 屋外設備の基礎等: 洗掘防止策を要求
- ✓ 漂流物となる可能性のある施設: 漂流を防ぐ対策を要求



8. 機器・電気設備の耐津波設計

- 深層防護策の一つとして、津波が直接作用してもそれに耐えるように機器、電気設備を設計する場合を想定し、その設計手法を規定

□ 屋外タンク

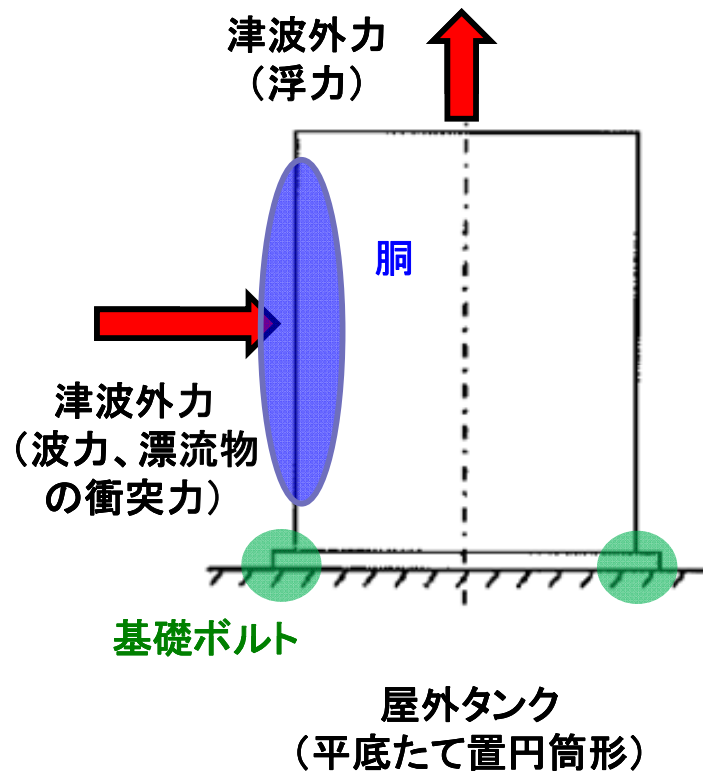
- ✓ 津波外力の特性を踏まえ以下を評価
 - － 胴の一次応力
 - － 胴の座屈
 - － 基礎ボルトの引張, せん断

□ 電気設備

- ✓ 浸水そのものが機能喪失の要因となる構造を有している場合が多いことを踏まえ、水密構造化による機能維持等の対応策規定

□ 津波により漂流物となり他の機器に衝突する可能性のある設備

- ✓ 津波外力によって漂流物にならないことを確認する

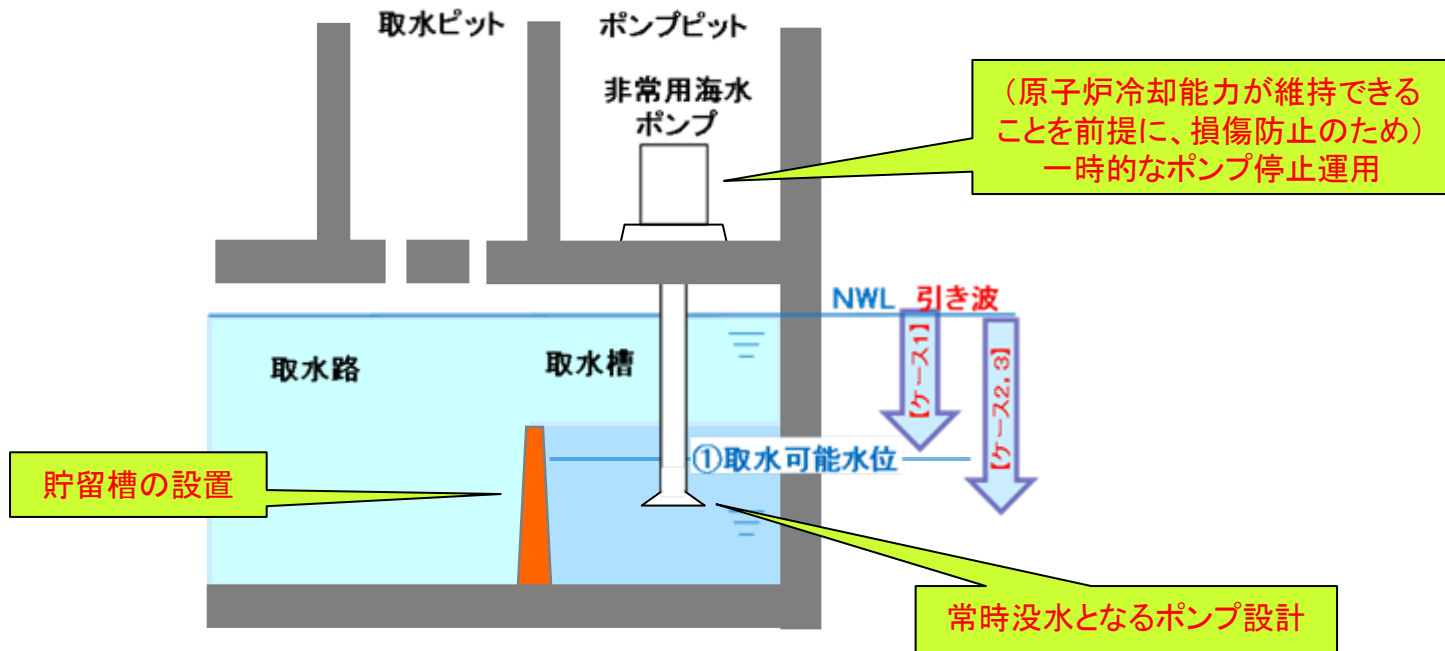


9. 津波による個別の事象に対する耐津波設計(1/2)

■ 取水性の維持に係わる設計

□ 津波時の水位低下に対する非常用海水系の機能維持

- ✓ 引き波に対して非常用海水系の取水が維持できるように取水施設、海水ポンプ等を設計



□ 津波時の砂移動に対する非常用海水ポンプの機能維持

- ✓ 通常よりも高い砂濃度の海水を連続的に吸い込むことに対して、海水ポンプが損傷せず、取水機能が確保できるように設計

9. 津波による個別の事象に対する耐津波設計(2/2)

■ 津波随伴火災に対する設計

- 原子炉施設の津波を起因とする火災に対して、次のそれぞれを考慮した火災防護設計を実施
 - ✓ 火災発生防止
 - ✓ 火災感知及び消火
 - ✓ 火災の影響軽減

また、火災防護設計の実効性を高めるために、運用面の対策を適切に組み合わせを考慮

(例)福島第一原子力発電所事故における重油タンクの流出

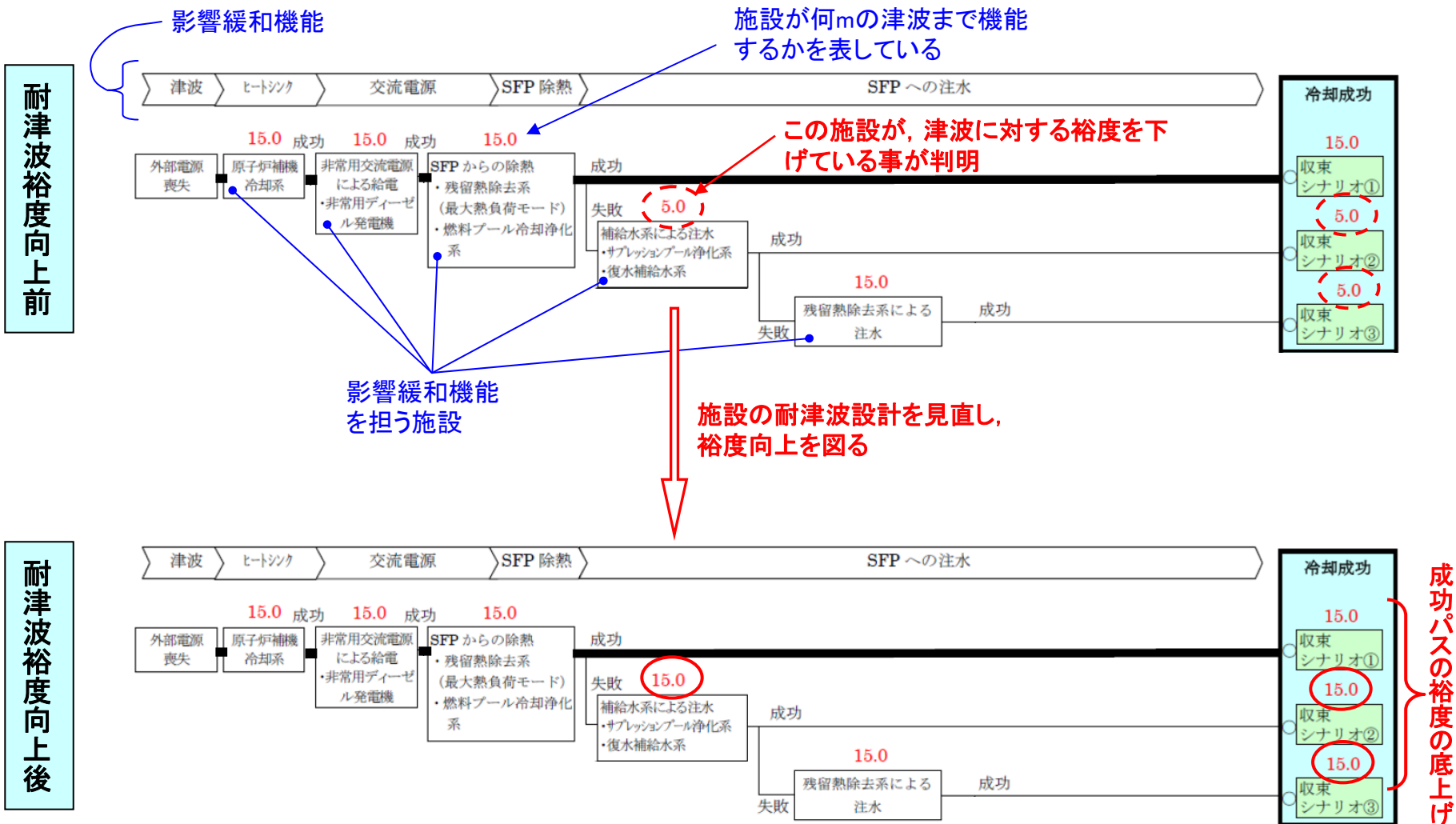
- 重油タンクの流出防止対策／重油漏えい防止対策
- 重要建屋における火災防護対策

10. 耐津波性能評価

- 個々の施設の耐津波設計により原子炉施設全体として所要の耐津波性を有すること及び均衡の取れた耐津波性能が達成されていることを確認するため、原子炉施設全体としての耐津波性能の検証を行うとともに、耐津波性能評価を実施
 - 原子炉施設全体としての耐津波性の検証
 - ✓ 各施設の耐津波性、施設間の取り合い等を考慮した浸水経路の網羅性等の確認による原子炉施設全体としての耐津波性能の検証を行い、必要に応じて各施設の耐津波設計に反映
 - 耐津波性能評価
 - ◆ 評価手法
 1. イベントツリーの作成
 - 津波による影響及び津波随件事象、並びに事故進展の形態などの主要因を分析し、事象がどのように進展するかを、関連する影響緩和機能の動作の成否などを分岐としたイベントツリーを作成して表現
 2. 影響緩和機能の耐津波性能分析
 - イベントツリーで事象収束に必要な機能として選定された影響緩和機能について設計余裕を分析し、原子炉施設全体の耐津波性能において脆弱な影響緩和機能を特定
 - 設計余裕の分析のため、当該の影響緩和機能を形成する各施設のフォールトツリー分析を耐津波性能に着目して実施し、当該施設の脆弱部位を特定
 3. 原子炉施設全体としての耐津波性能の確認
 - 特定の施設が支配的となり原子炉施設全体としての耐津波性能を決定づけていないことを確認
 - ◆ 耐津波設計への反映

原子炉施設全体の耐津波性能を合理的に改善させるため、原子炉施設全体の耐津波性能において脆弱な影響緩和機能については、特定された施設の脆弱部位の性能を向上させる施策を行うか、または当該施設の多様性を追求するなどの設計の再検討を実施

参考:耐津波性能評価例



11. 津波の検知と運転管理

■ 津波の検知

□ 津波監視設備の整備

- 耐津波Sクラス施設の機能への影響が想定されるような津波が襲来する場合に備え、津波監視設備予め備える。

□ 津波監視設備の設計方針

- 津波監視設備は、耐津波Sクラス施設の機能への影響が想定されるような津波及びその発生要因となる地震動に対して、その機能が維持できるように設計する。

■ 運転管理

□ 津波防護施設及び浸水防止設備の機能維持

- 耐津波設計に関わる施設のうち、津波防護機能または浸水防止機能が運用に依存する施設・設備に関しては、津波襲来時にその機能が十分発揮できる状態に保持されるよう、適切な措置を講じる。また、浸水想定範囲内の恒設設備以外のもの（工事用資機材、車両等）について、津波襲来時に耐津波重要度が上位の施設に波及的影響を及ぼすことがないように、適切な措置を講じる。

12. まとめ

- 耐津波設計技術程では津波による影響の特徴を踏まえ、安全上重要な施設を津波の影響から防護し、その機能が信頼性をもって維持できるよう耐津波設計を体系的にまとめた
- 本規程の策定にあたっては、東日本大震災における実際の発電所での経験をよく反映しており、早期の発電所への適用が期待されるとともに、国内に限らず、津波の他、高潮や河川氾濫等の蓋然性を有する事象に対し、海外の発電所でも適用が期待される
- ただし、洗掘の現象、流砂による設備への影響等、個別の技術要素に関しては今後の体系的な評価手法の構築が望まれるものも多く、継続的な研究開発が期待される