

JASMiRT 第1回ワークショップ

—設計基準を超える地震・津波等自然外的ハザードに対する安全性—

原子力発電所の耐津波設計

平成28年10月21日

東京電力ホールディングス株式会社

長澤 和幸

- 東日本大震災に伴う津波による福島第一原子力発電所の事故を契機として、**原子力発電所の耐津波設計に係わる様々な取り組みが活発化**している
- 原子力発電所の耐津波設計は、**津波による影響が多岐に渡る**こと、**多種多様な施設・設備**を対象とする必要があること、また、これらを組み合わせた設計を考える必要があるため関連する分野が広範に及ぶことなどの特徴を有している
- **日本電気協会**で策定した「**原子力発電所耐津波設計技術規程 (JEAC4629)**」は、この広範に及ぶ分野を取り纏めて、一つの設計体系として構築することを目的としたものである
- ここではJEAC4629に沿って、原子力発電所の**耐津波設計の基本的な考え方から各種津波影響の評価方法、影響に対する施設・設備の設計・評価方法**までの耐津波設計の一連の流れを、関連する技術情報、設計・評価实例を含めて紹介する

1. 原子力発電所の耐津波設計に係わる取り組み
2. 津波による被害の特徴と耐津波設計の基本的な方針
3. 耐津波設計技術規程 (JEAC4629) の概要
4. 耐津波設計の高度化に向けた課題

1. 原子力発電所の耐津波設計に係わる取り組み
2. 津波による被害の特徴と耐津波設計の基本的な方針
3. 耐津波設計技術規程 (JEAC4629) の概要
4. 耐津波設計の高度化に向けた課題

耐津波設計に係わる各種の取り組み

※原子力発電所の規格・基準に関連する活動のうち主なものを記載しており他にも多数の研究・開発等がある

H23.3.11:東日本大震災に伴う津波による福島第一原子力発電所事故

国(原子力規制委員会)

- 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則及び同解釈
- 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則及び同解釈
 - ※ 原子力発電所の「津波による損傷の防止」に係わる要求として、基準津波の策定に係わる要求、施設の防護に係わる要求を規定
- 基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド
- 耐津波設計に係る工認審査ガイド
 - ※ 上記要求への適合性審査で審査官が用いるガイド
 - ※ 実質的に詳細要求を規定

↓
H25.6.19:新規性基準の制定(H25.7.8施行)

海外:IAEA国際地震安全センター

- Integrated Tsunami Design and PSA Procedures for Nuclear Safety (Tentative)
 - ※ 耐津波設計および津波PSA、さらに両者のインタラクション(PSAの設計へのフィードバック)に関するガイドライン
 - H25.5活動開始、H28.10現在、作成中
- Safety Report on Tsunami and Seiche Hazard Assessment
 - ※ 津波評価に係わるガイドライン
 - H23.6活動開始、H28.10現在、発刊準備中

学協会

日本電気協会 原子力規格委員会

- 原子力発電所耐津波設計技術規程(JEAC4629)
 - H24.6活動開始、H27.5発刊
 - H28.10現在、次期改訂に向けた検討を実施中
- 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601)
 - ※ 津波ハザード評価に係わる指針
 - H27.5東日本大震災の知見等を反映し改訂

土木学会 原子力土木委員会

- 原子力発電所の津波評価技術
 - H28.9東日本大震災の知見等を反映し改訂

日本原子力学会

- 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
 - H28.10現在、改訂作業中

日本地震工学会 原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会

- 報告書
 - ※ 津波防御の個別要素技術とそれを統合するシステム評価技術が融合する総合的技術体系構築が目的
 - H24.9活動開始、H27.3報告書発刊

仕様規定を志向

仕様規定を志向

情報共有

インプット

インプット

インプット

意見交換等

1. 原子力発電所の耐津波設計に係わる取り組み
2. 津波による被害の特徴と耐津波設計の方針
 - 2.1 被害の実例【3.11の経験】
 - 2.2 経験を踏まえた被害の特徴
 - 2.3 特徴を踏まえた耐津波設計の方針
3. 耐津波設計技術規程 (JEAC4629) の概要
4. 耐津波設計の高度化に向けた課題

2.1 被害の実例【3.11の経験】(1/3)

■ 津波の襲来状況(福島第一原子力発電所)

5号機の近傍(南側)から東側を撮影



廃棄物処理建屋4階北側から撮影



O.P.: 小名浜港工事基準面

【参考】 T.P.: 東京湾平均海面 O.P.±0.0m=T.P.-0.727m

2.1 被害の実例【3.11の経験】(2/3)

■ 津波の襲来の状況(福島第二原子力発電所)

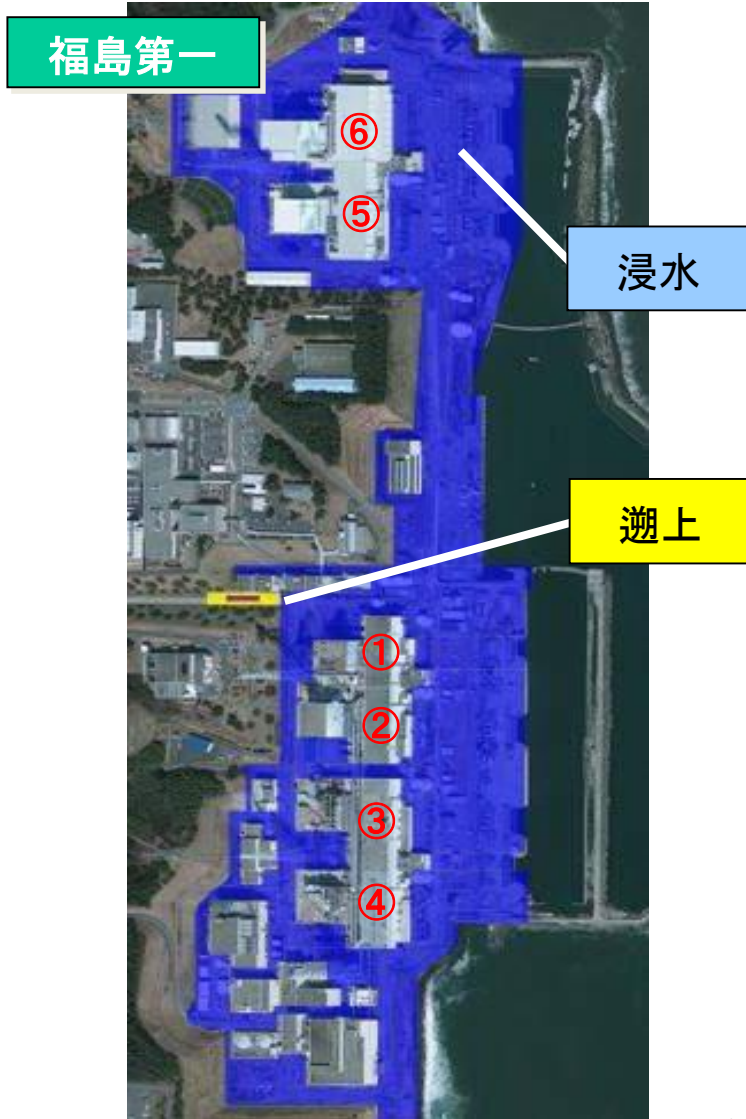
緊急時対策所付近から1号機タービン建屋東側を撮影



※核物質防護の観点より写真を一部加工

2.1 被害の実例【3.11の経験】

■ 津波の浸水、遡上の領域



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.



無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

2.1 被害の実例【3.11の経験】

■ 設備・機器の被害

波力



波力によるクレーンの転倒
※転倒したクレーンによる
海水ポンプの損傷



波力・静水圧による扉の損傷



波力・静水圧によるタンク
の座屈

2.1 被害の実例【3.11の経験】

■ 設備・機器の被害

浮力



浮力と波力によるタンクの転倒



浮力と波力によるタンクの移動

2.1 被害の実例【3.11の経験】

■ 設備・機器の被害

漂流物



漂流物による建屋の損傷

引き波



引き波によるスクリーンカバーの移動

洗掘



護岸背後の洗掘

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

2.1 被害の実例【3.11の経験】

■ 設備・機器の被害

浸水



建屋内浸水による扉の損傷



建屋内浸水による電気設備の機能喪失

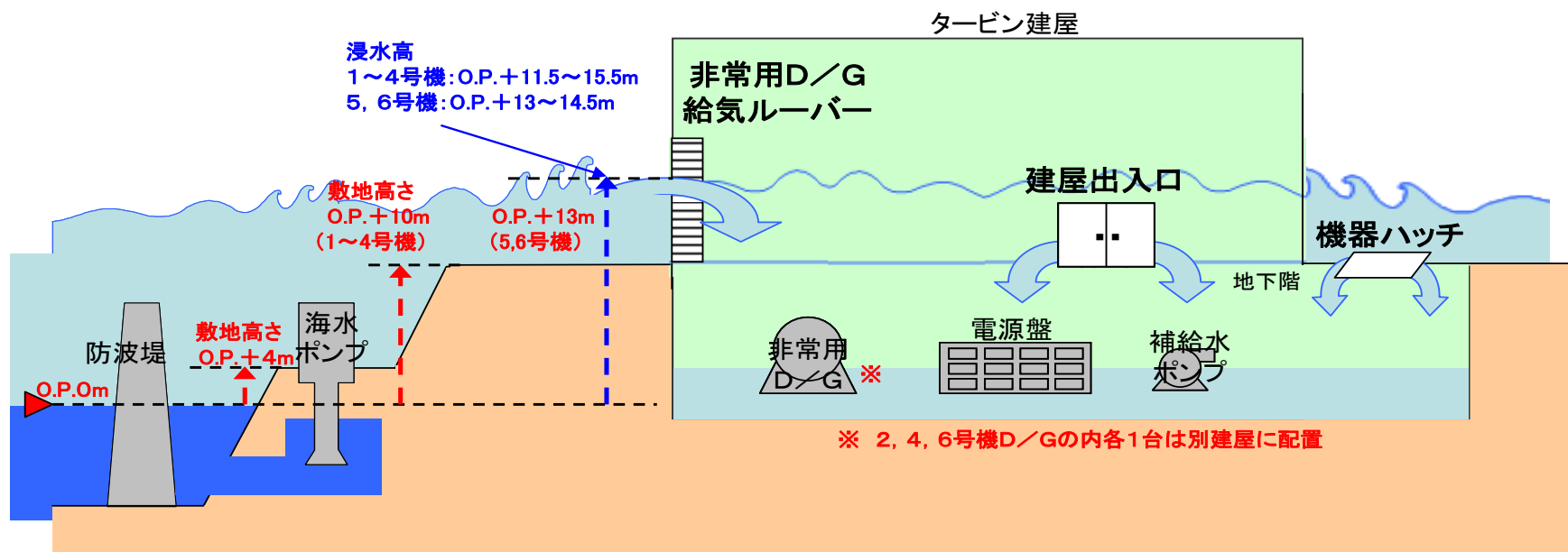
2.1 被害の実例【3.11の経験】

■ システムの被害：福島第一原子力発電所1～4号機の状況

外部電源に加え、津波により非常用D/G、電源盤、直流電源、海水ポンプがすべて機能喪失

建屋周囲の現地調査により確認された 主な浸水経路

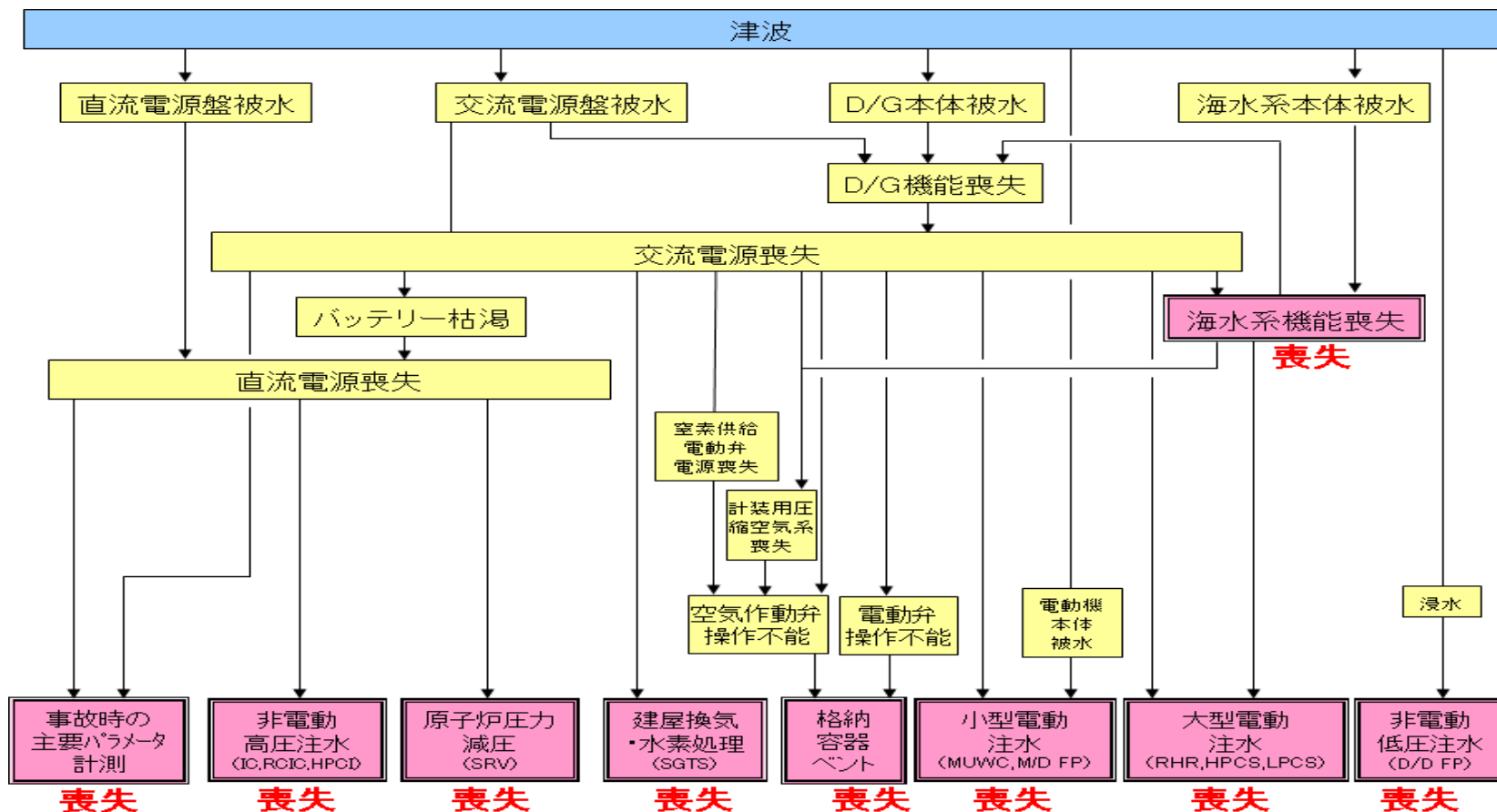
- ① 建屋への出入口
- ② 機器ハッチ
- ③ 非常用 D/G 給気ルーバー
- ④ トレンチ、ダクト（ケーブル等貫通部）等
⇒これらを通じD/G、電気品室等へ浸水



2.1 被害の実例【3.11の経験】

■ システムの被害: 福島第一原子力発電所1~4号機の状況

津波による浸水を起因とした炉心損傷の防止・影響緩和に必要な機能の喪失



① 多様な防護方策が存在する

- ✓ 津波による影響に対する防護は、地震とは異なり「耐える」だけでなく「避ける」または「防ぐ」ことが可能

【経験から得られた教訓】

② 影響が多様／影響を受ける設備も多様

- ✓ 津波による影響には、波力、浮力、浸水、洗掘、水位変動、砂移動等の直接的な影響に加えて、水位の低下、漂流物の衝突や火災等、間接的な影響も存在し、影響が多様、また影響を受ける設備も多様

③ クリフエッジ効果が存在する

- ✓ 高さのみに依存する防護に対しては、想定した高さを僅かでも超えると直ちに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

④ 共通要因故障のリスクが高い

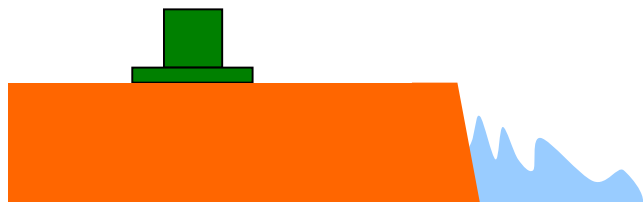
- ✓ 電気設備は水に対して脆弱性があり、水と接触すると即時に機能喪失する
 - 一つの水密バウンダリで複数の設備を防護する場合、バウンダリを構成する一つの障壁の機能喪失であっても複数システムの同時機能喪失につながり得る

2.3 特徴を踏まえた耐津波設計の方針

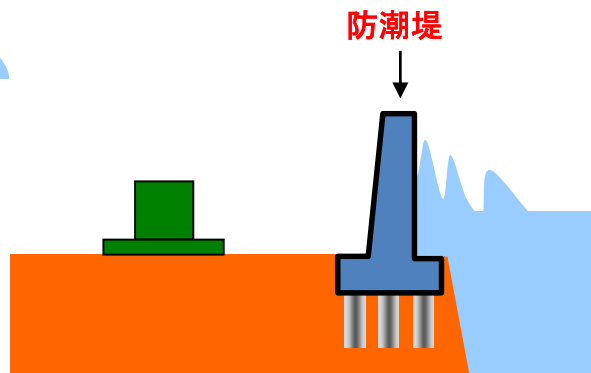
特徴①: 多様な防護方策が存在する

□ 方針1: 防護の基本方針

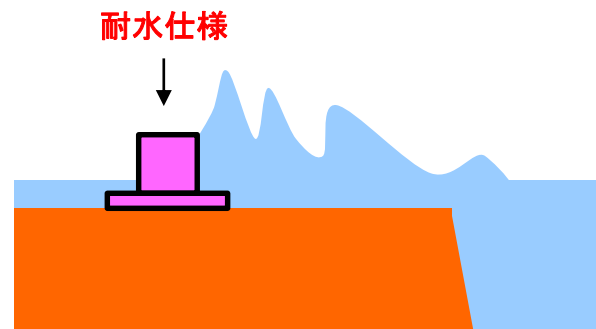
原子炉施設は、次のいずれかまたはその組合せにより津波による影響を排除する



①: 津波による影響が到達しない
標高に設置する



②: 津波による影響から
障壁により隔離する



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

2.3 特徴を踏まえた耐津波設計の方針

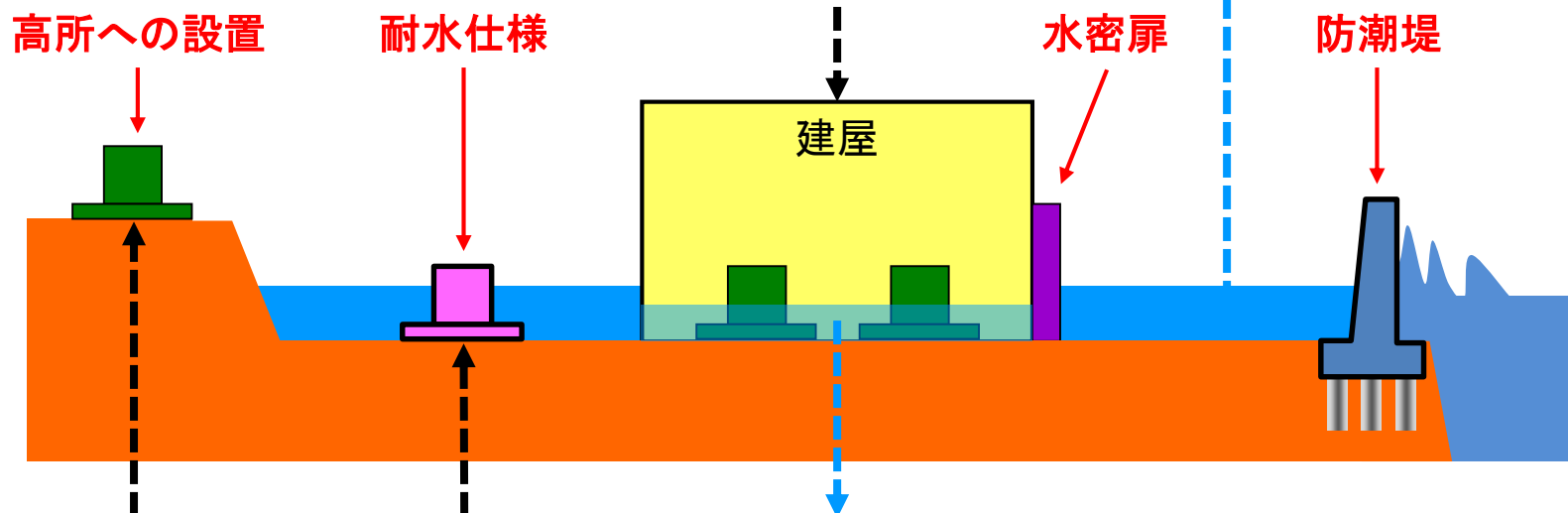
特徴③: クリフエッジ効果が存在する

特徴④: 共通要因故障のリスクが高い

□ 方針2: 防護の冗長性

津波に対する防護の構築において深層防護の観点から、多重化、多様化を考慮する

津波が防潮堤を僅かでも超えた場合に、直ちに複数の設備が同時に機能喪失すること(クリフエッジ効果)がないよう、後段に「高さ」とは異なり「強さ」による防護(水密扉)を設ける



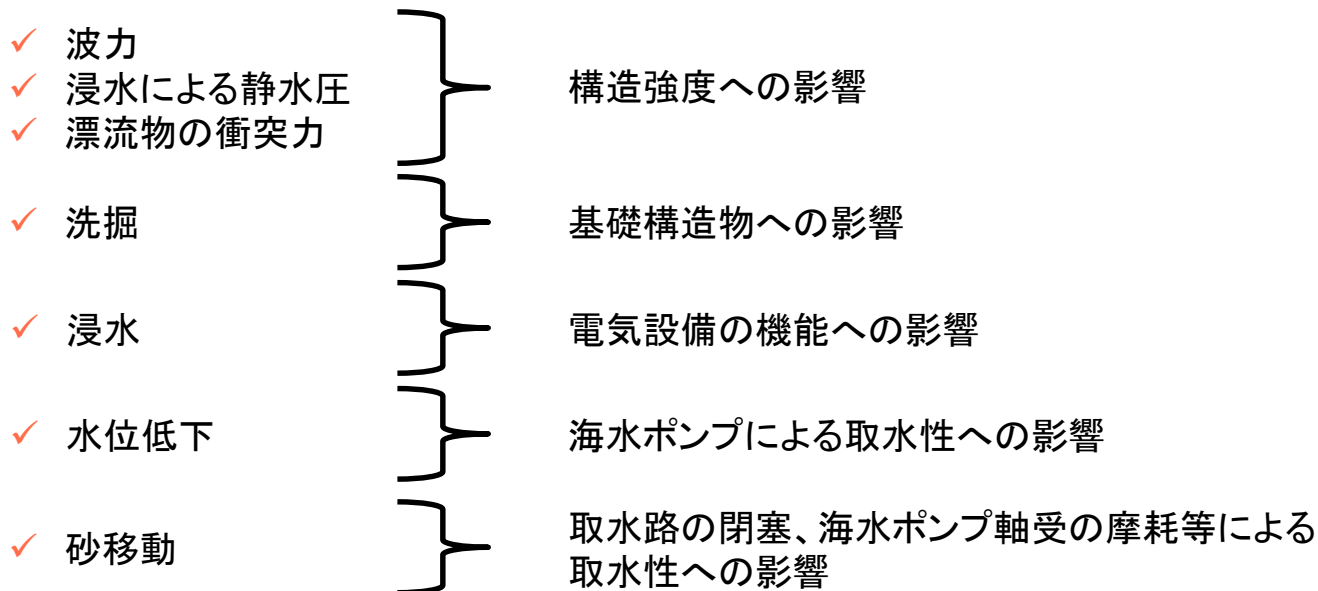
万一、水密扉に漏えいがあった場合に、複数の設備が同時に機能喪失すること(共通要因故障)がないよう、異なる性質により防護された設備を準備する

2.3 特徴を踏まえた耐津波設計の方針

特徴②: 影響、影響を受ける設備が多様

□ 方針3: 対策の網羅性

津波による設備への影響を網羅的に想定する



□ 方針4: システム全体評価

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、以下の取り組みにより原子炉施設全体として実効的な耐津波安全を達成する

- ◆ 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 and/or
- ◆ 頑健性の特に高い特定のセーフティパスを設ける

1. 原子力発電所の耐津波設計に係わる取り組み
2. 津波による被害の特徴と耐津波設計の基本的な方針
- 3. 耐津波設計技術規程 (JEAC4629) の概要**
4. 耐津波設計の高度化に向けた課題

目次	概要
1章 基本事項	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	耐津波設計の全体フロー
3章 津波による影響	4～6章の設計インプットとなる項目の評価手法を規定(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	各個別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と評価手法 ・考慮すべき荷重の組合せ ・各設備の設計基準 等
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	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	個別設備の設計完了後に原子炉施設全体として均衡(設計のバランス)が取れた耐津波性能が達成していることを確認すること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	耐津波に関する施策のうち、運用が介在する項目に関して、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 津波被害実例集	津波被害の実例集

目次(抜粋)

1.1 適用

1.2 耐津波設計の基本方針

1.2.1 耐津波設計の目的

1.2.2 基本的考え方

1.2.3 耐津波設計に適用する津波

1.2.4 耐津波設計上の重要度分類

1.2.5 施設の耐津波設計

1.2.5.1 津波の到達、流入に対する防護の基本方針

1.2.5.2 津波に対する取水性の維持に係わる基本方針

1.2.5.3 津波随件事象に対する設計方針

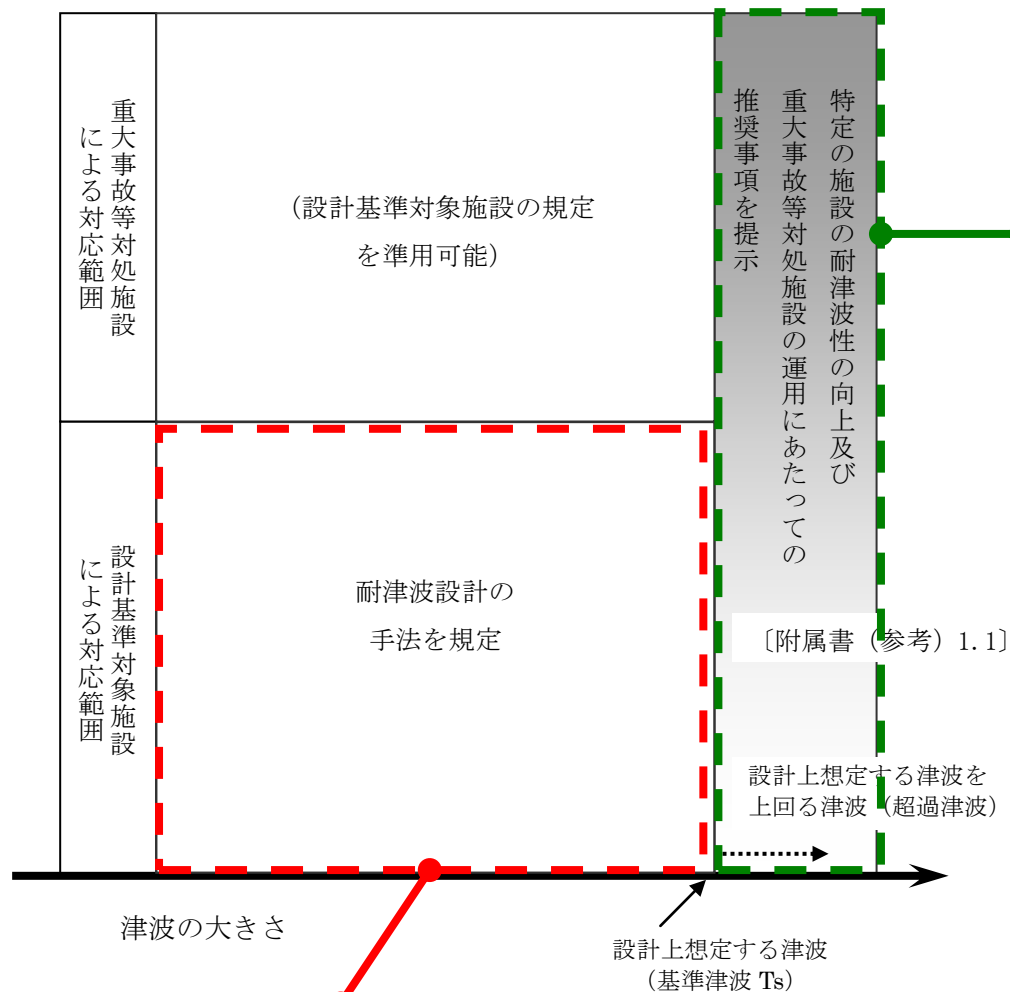
1.2.5.4 耐津波設計で考慮する事象及び運転状態

1.2.5.5 クラス別施設の許容状態

1.3 用語

附属書(参考)1.1 超過津波対策への推奨事項

附属書(参考)1.2 各設備の具体的な耐津波重要度分類



設計上想定する津波を上回る津波(超過津波)に対する対策の**推奨事項**を提示

- ✓ 確率論的リスク評価や余裕度評価の手法を用いた分析に基づく、有効な防護対策の特定と強化の手法
- ✓ アクシデントマネジメントの計画に際しての津波の観点からの留意点

設計上想定する津波(基準津波Ts)に対する設計基準対象施設の設計要求事項を規定

※基準津波Tsは規制基準とその解釈の要求に基づき別に策定される

- ◆ 仕様規定に相当する「津波水位評価」(JEAG4601-2008第4章)は現在改定作業中

① 原子炉施設のうち耐津波設計上重要な施設は、施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、それら施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な津波に対して、その安全機能が損なわれないように設計する

設計にあたっては、津波の発生要因となる地震等による影響や津波の繰り返しによる影響並びにその継続時間を考慮する

② 原子炉施設は、津波により発生する可能性のある公衆及び従事者並びに環境への放射線影響の観点から耐津波設計上の重要度を定義し、その区分ごとに適切に設定される津波に対して、区分ごとに要求される機能が維持できるように設計する

③ 原子炉施設は、想定される津波による影響に対して、次のいずれかの施策あるいはその組合せにより防護することを基本とする

- ✓ 津波による影響が到達しない標高に設置
- ✓ 津波による影響から障壁により隔離
- ✓ 津波による影響に対して機能維持できるように設計

また、これらの施策に関わる設備の信頼性を踏まえ、津波による影響からの防護が確実なものとなるよう、必要に応じて施策の多重化・多様化を考慮する

重要度の
考え方

防護の基本方針
(方針1)

防護の冗長性
(方針2)

【2】耐津波設計の基本方針(2/2)

対策の網羅性
(方針3)

④ 前項の他、原子炉施設は、津波に随伴して発生すると想定し得る、漂流物の衝突、火災等によっても、その安全機能が重大な影響を受けるおそれがないように設計する

システム全体評価
(方針4)

⑤ 原子炉施設の耐津波設計では、上記による施設毎の設計に加え、施設全体としての耐津波性が網羅性並びに均衡性を欠くことがないよう配慮する

【3】耐津波重要度分類の考え方(1/3)

- 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は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体

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機能維持設計設備を耐津波Stクラス、Btクラスに分類 :【屋外重要タンク、配管、ポンプ 等】

【3】耐津波重要度分類の考え方(2/3)

■ 耐津波設計重要度分類(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 <p>であって、その影響が大きいもの</p>	<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い</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>	

【3】耐津波重要度分類の考え方(3/3)

■ 耐津波設計における防護の方策と設計対象

耐津波Sクラス施設



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

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

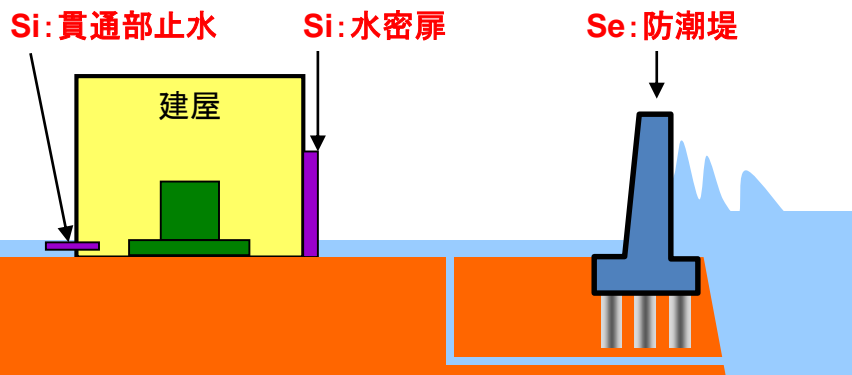
→それぞれSe、Siと呼称し設計対象として明確化

○津波防護施設[外部障壁(External Barrier)]: Se

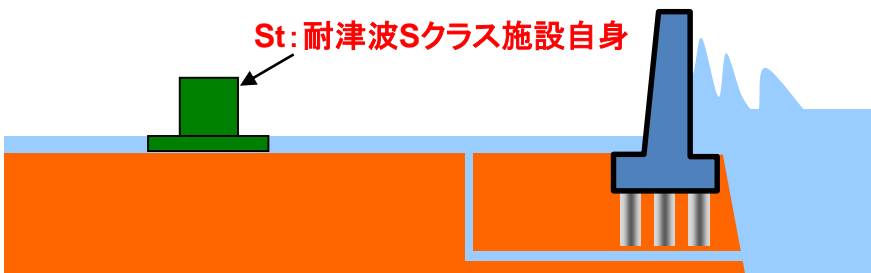
護岸、防潮堤、防潮壁等、敷地への津波による遡上波の浸入を防止するか、又は津波による影響を軽減するための構築物

○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



St: 耐津波Sクラス施設自身



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

① 基準津波の遡上の防止

- Sクラス施設を設置する敷地において、次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
 - a. 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(Seクラス)、浸水防止設備(Siクラス)を設置する
 - b. 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

② 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、次の方針により漏水による浸水範囲を限定する
 - a. 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
 - b. 浸水想定範囲及び周辺に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
 - c. 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

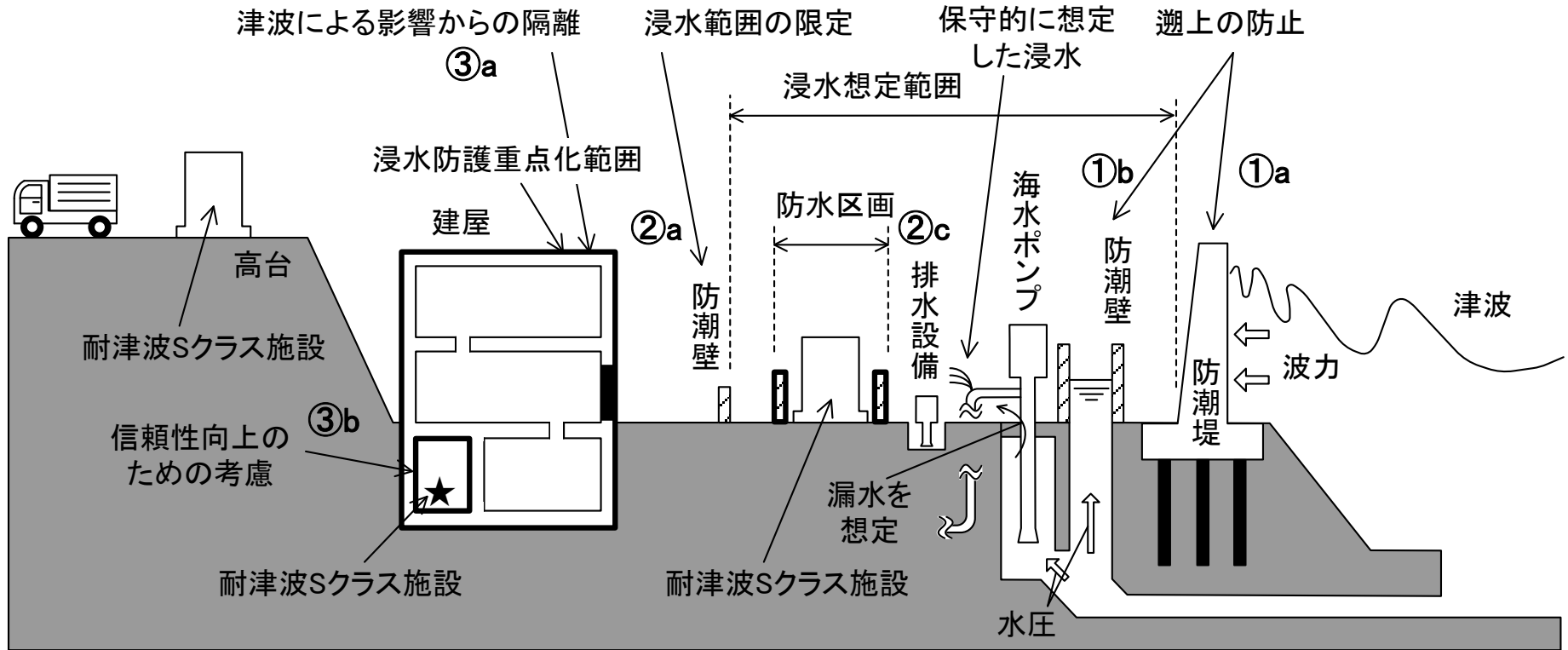
③ 防護の多重化・多様化

a. 津波による影響からの隔離

以上に加えて、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

b. 信頼性向上のための考慮

上記①～③ a.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



■ 津波の継続

- 耐津波Sクラス施設の耐津波設計においては、基準津波Tsの時刻歴波形を適切に想定し、水位上昇・下降の繰り返しによる影響、その継続時間を考慮する

■ 地震

- 耐津波Sクラス施設の耐津波設計では、基準津波Tsの発生要因である地震動を考慮し、当該の地震動を経験した後に基準津波Tsによる影響を受けるものとして設計を行う。このとき、当該の地震による敷地の隆起・沈降を考慮する
- 基準津波Tsの襲来時に余震が発生する可能性を検討した上で、必要に応じて余震による影響とその際に想定される基準津波Tsによる影響との組合せを考慮する

余震の設定方法については現時点では十分な知見の蓄積がなく今後の課題

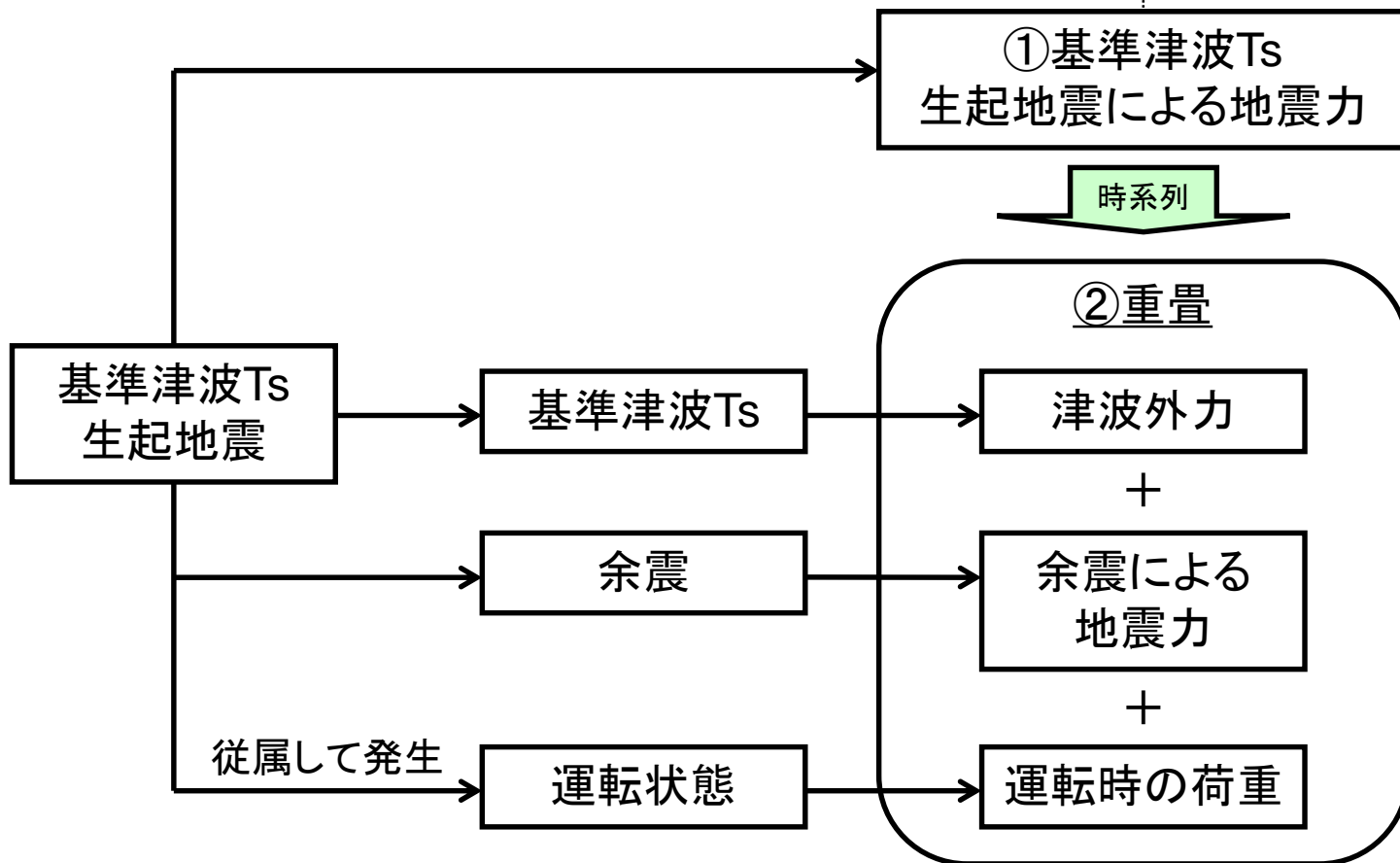
■ 運転状態

- 耐津波Sクラス施設の耐津波設計においては、基準津波Tsの発生要因である地震動を受けた後の運転状態と基準津波Tsによる影響との組合せを考慮する

【5】耐津波設計で考慮する事象および運転状態(2/2)

①を経験した後に②を経験することを考慮

- ・遠方を震源とする巨大地震 → 津波大でも地震力小
- ・日本近海の地震 → 津波小の場合でも地震力大
- ・陸域の地震 → 津波発生なし



<p>耐津波 Sクラス</p>	<ul style="list-style-type: none">● 耐津波Stクラスの施設は、基準津波Tsによる影響に対して、その施設の安全機能が維持できること● 耐津波Se及びSiクラスの施設は、基準津波Tsによる影響に対して津波防護機能又は浸水防止機能が維持できること
<p>耐津波 Bクラス</p>	<ul style="list-style-type: none">● 耐津波Btクラスの施設は、耐津波Bクラスの施設の設計に用いる津波による影響に対して、その施設の機能が維持できること● 耐津波Be及びBiクラスの施設は、耐津波Bクラスの施設の設計に用いる津波による影響に対して、津波防護機能又は浸水防止機能が維持できること

【7】超過津波対策への推奨事項

- 基準津波Tsを超える津波(超過津波)に対して、原子炉施設全体としての耐津波性、安全機能喪失のリスクを把握した上で、
 - ✓ 特定の施設の耐津波性の向上 及び
 - ✓ 重大事故等対処設備の運用にあたっての配慮

を行うことにより、合理的に実行可能な範囲で超過津波に起因する重大事故発生リスク低減を図ることが望ましい

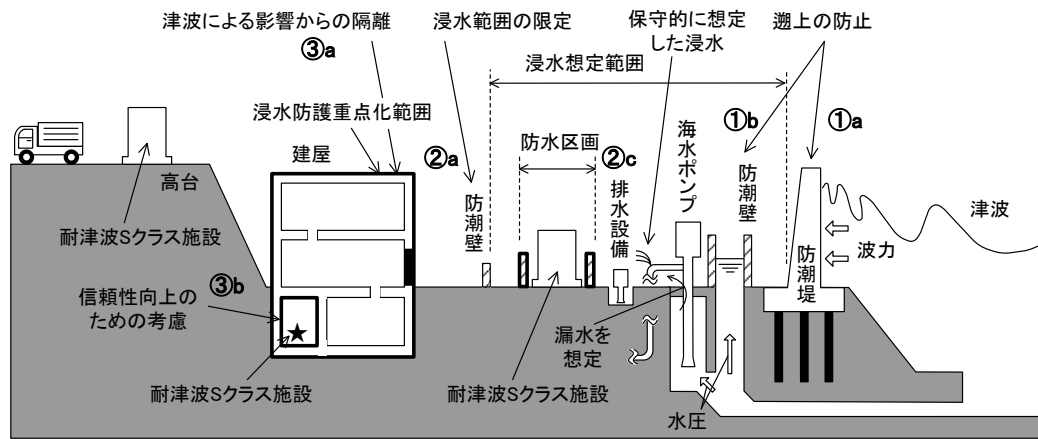
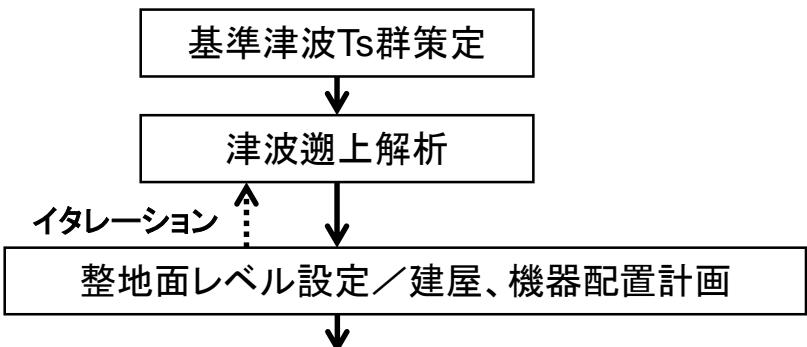
■ 特定の施設の耐津波性の向上

- ✓ 重大事故発生防止の観点から有効な耐津波Sクラス施設及び重大事故等対処施設を抽出し、当該施設について個別に耐津波性を強化する

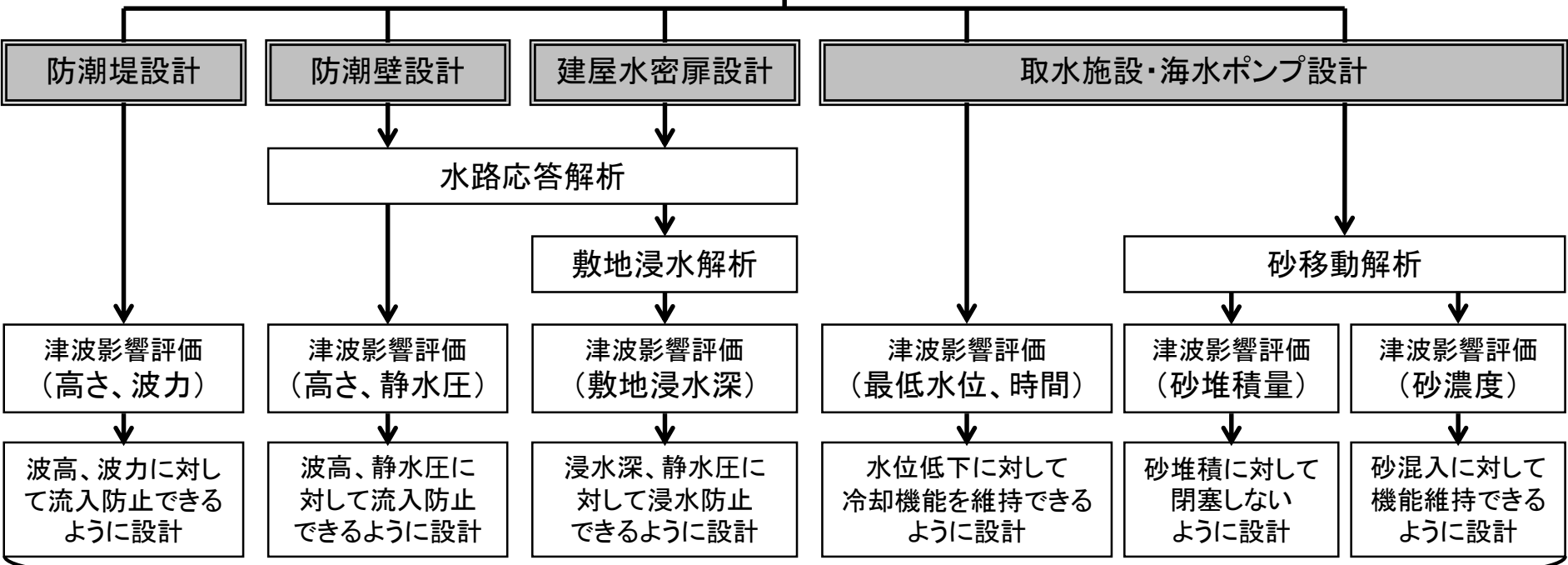
■ 重大事故等対処施設の運用における配慮

- ✓ 超過津波に対する原子炉施設の安全機能の維持の観点から設置される重大事故等対処施設の運用にあたり、超過津波により想定される敷地の状態を考慮し、関連する施設等へのアクセス性を早期に確保する手段等を予め準備する

2章 耐津波設計の手順



津波遡上解析(確定した建屋、機器配置を反映) ※Output: 各所における水位(時刻歴)、流速等の津波パラメータ



耐津波性能評価

※本手順は例示であり実際の手順は発電所ごとに状況により異なる

目次(抜粋)

3.1 基本事項

3.2 津波の伝播・遡上

- 3.2.1 津波の伝播・遡上の基本的考え方
- 3.2.2 基本方程式と計算スキーム
- 3.2.3 数値シミュレーションの実施

3.3 津波波力

- 3.3.1 津波波力の基本的考え方
- 3.3.2 防波堤等の海中構造物に作用する津波波力
- 3.3.3 陸上構造物・機器に作用する津波波力

3.4 津波漂流物

- 3.4.1 津波漂流物対応の基本的考え方
- 3.4.2 津波漂流物諸元の想定方法
- 3.4.3 津波漂流物衝突力の算定

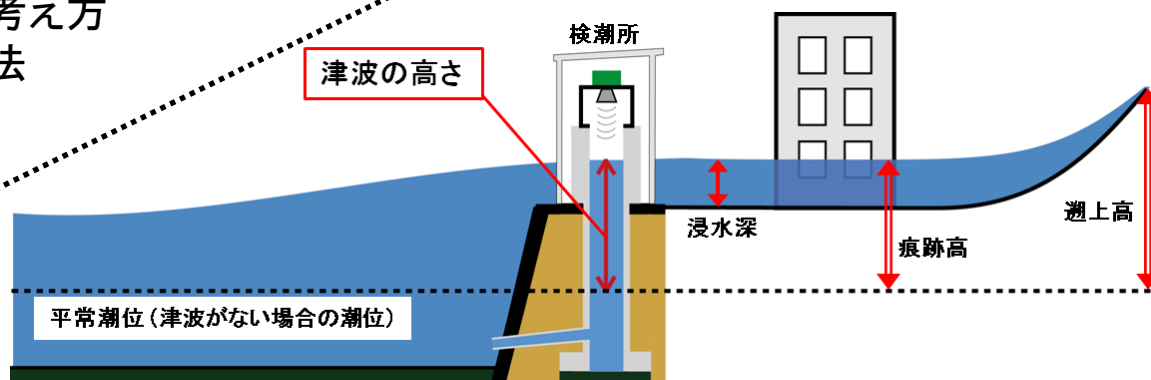
3.5 砂移動

- 3.5.1 津波による砂移動
- 3.5.2 津波による洗掘

Output = 津波パラメータ

- ✓ 流速
- ✓ 水位(津波高さ・浸水深)
時刻歴(高・低)
- ✓ 浸水範囲 等

津波パラメータを用いて
各種の津波影響を評価



津波パラメータ(出典:気象庁HP)

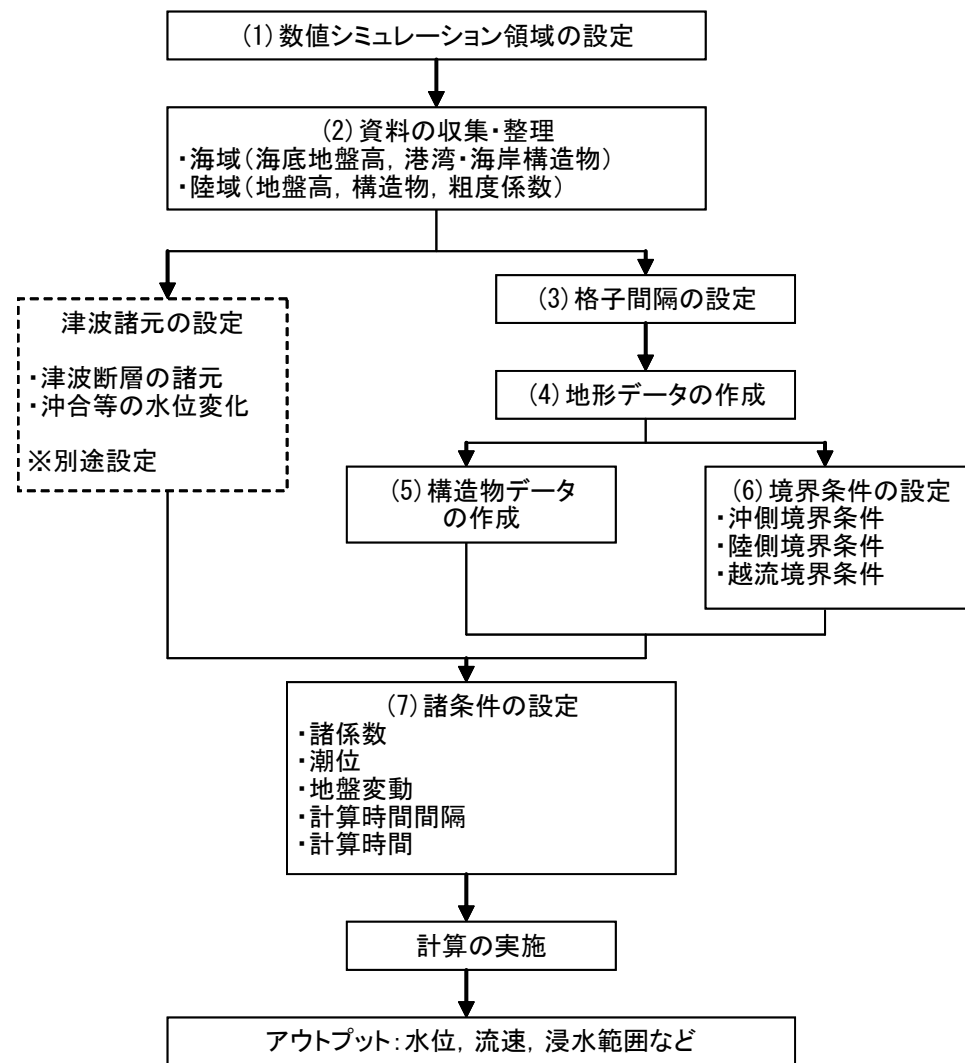
【1】津波の伝播・遡上の評価方法

■ 目的

- 耐津波設計で考慮する津波(基準津波 Ts)は、規制基準の要求、JEAG4601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における水位変化を設定
- この津波が沖合から襲来し発電所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て適用し、施設設計の基礎となる基本的諸量を評価

■ 留意事項

- 近海伝播・遡上を対象とする場合は、非線形長波理論を適用した基礎方程式の選定を基本とする
- 急激な地形変化など三次元的な流動が生じる可能性がある場合は三次元流体解析を実施することが望ましい
- 地形的な特異性を有するなど、十分な知見が得られていない場合には水理模型実験を行い数値シミュレーションの妥当性を検討することが望ましい



■ 津波影響の種類と関連する津波パラメータ

- 津波影響には多様な種類があるが、津波パラメータを用いて影響を評価する種々の手法が提案されている
- 主要な津波影響と代表的な手法における関連する津波パラメータの関係を示すと表のとおり

津波影響 \ 津波パラメータ	流速	水位	
		上昇側	下降側
波力(動水圧)	○	○	
浮力		○	
静水圧		○	
漂流物衝突力	○	○	
洗掘	○		
砂移動 (堆積・混入)	○	○	
引き波			○

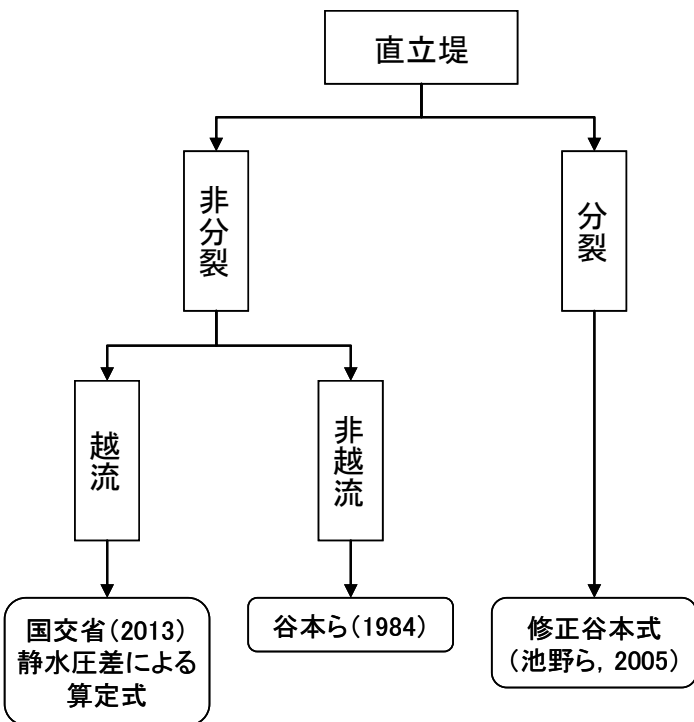
■ 波力評価の概要

- 津波波力の評価手法は大きく次の二つに大別して検討されている
 - ① 防波堤等の海中構造物に作用する津波波力
 - ② 陸上構造物・機器に作用する津波波力
- 十分な知見が得られていない場合や既往評価式の適用が困難な場合は、水理模型実験や三次元数値解析により評価することが望ましい

■ 他の影響評価

- 以下の影響は現状、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必要があり 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

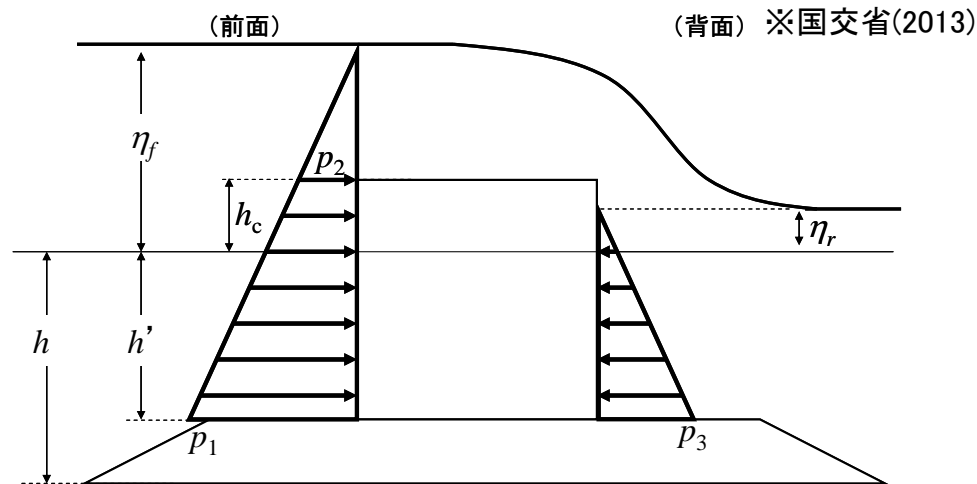
① 防波堤等の海中構造物に作用する津波波力



海中構造物(直立型)に作用する津波波力評価式の分類

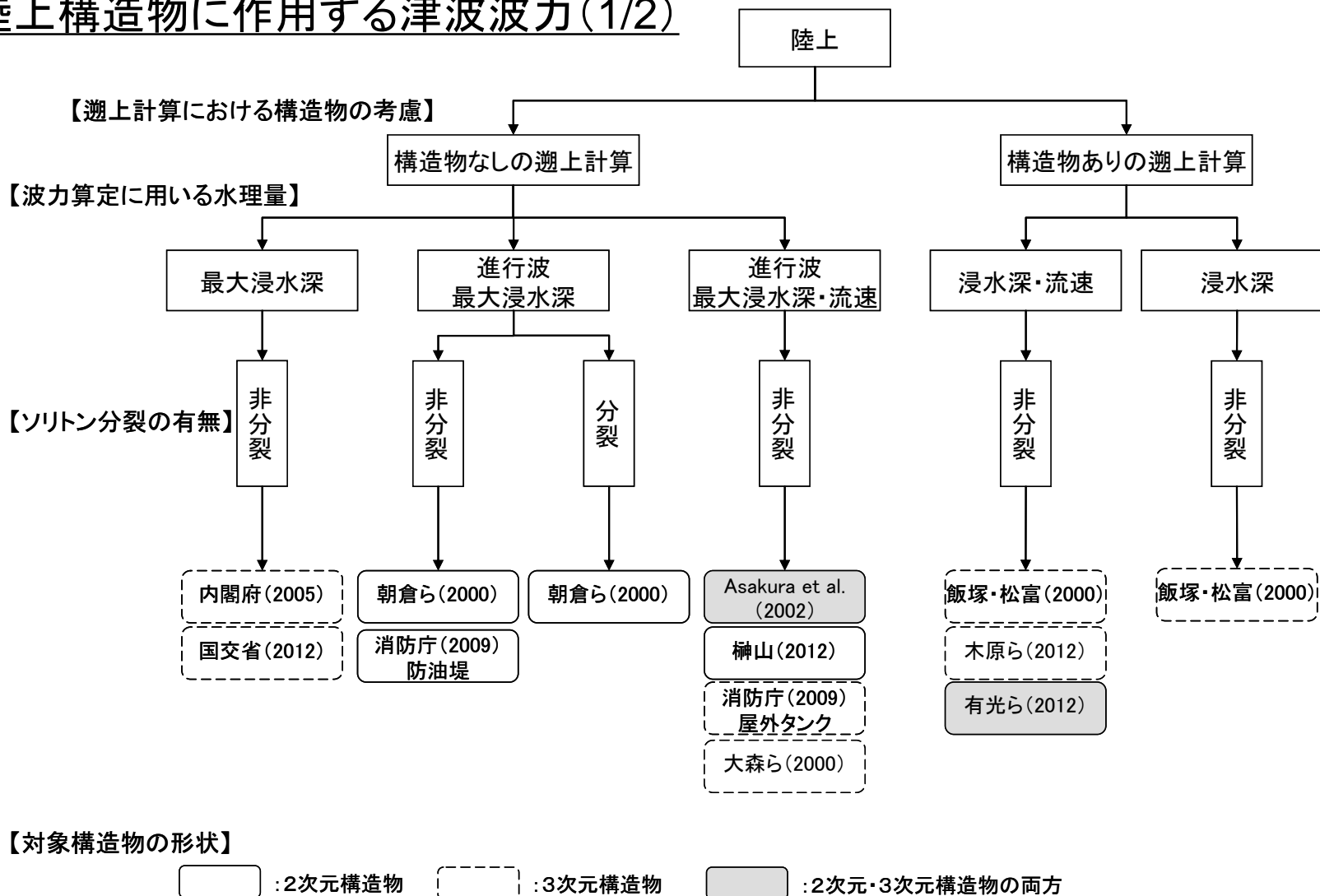
例示)ソリトン分裂が発生しない場合でかつ越流発生の場合

- p_1 : 直立壁前面の底面における波圧強度 (kN/m²)
 - p_2 : 直立壁前面の天端面における波圧強度 (kN/m²)
 - p_3 : 直立壁背面の底面における波圧強度 (kN/m²)
 - $\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)
 - h' : 直立壁の底面の水深 (m)
 - h_c : 静水面から直立壁天端までの高さ (m)
 - η_f : 直立壁前面の静水面からの津波高さ (m)
 - η_r : 直立壁背面の静水面からの津波高さ (m)
 - α_f : 直立壁前面の静水圧補正係数 (1.05)※
 - α_r : 直立壁背面の静水圧補正係数 (0.90)※
- $$p_1 = \alpha_f \rho_0 g (\eta_f + h')$$
- $$p_2 = \frac{\eta_f - h_c}{\eta_f + h'} p_1$$
- $$p_3 = \alpha_r \rho_0 g (\eta_r + h')$$



【3】津波波力の評価方法(2/3)

② 陸上構造物に作用する津波波力(1/2)



陸上構造物に作用する津波波力評価式の分類

② 陸上構造物に作用する津波波力(2/2)

■ 遡上計算における対象構造物の有無

- 津波遡上解析では主要な構造物は地形データとして考慮されるため、波力算定のために構造物無しの場合の遡上計算結果を用いる場合は対象構造物またはすべての構造物を取り除いた条件で再度計算を行う必要がある

例示)国土交通省(2012)

新ガイドライン図4-1 新ガイドライン(4.1)式による津波波圧

附属書(参考)

ρ : 流体密度 g : 重力加速度
 z : 作用位置 t : 時間
 a : 水深係数

①	堤防や前面の建築物等による 軽減効果が見込まれる場合	$a=2.0$
②	①のうち、海岸等からの距離が 500m以上離れている場合	$a=1.5$
③	①, ②に該当しない場合	$a=3.0$

- 構造物ありの遡上計算結果を用いる評価式は、構造物を考慮した津波遡上計算結果を用いる方法も提案されている

例示:有光ら(2012) 附属書(参考)

$$p(z,t) = \rho g \{h_f(t) - z\} + \rho u_f(t)^2$$

ρ : 流体密度 g : 重力加速度
 z : 作用位置 t : 時間
 h_f : 構造物が存在する場合の前面浸水深
 u_f : 水平方向流速

■ 漂流物諸元の想定方法

- 原子力発電所に来襲する可能性がある漂流物は地点ごとに異なるため、発電所構内とその周辺地域について踏査等による漂流物調査を行い、適切に対象漂流物の想定と漂流物諸元の設定を行う

□ 漂流物調査要領

■ 範囲:

基準津波が遡上する範囲

■ 対象:

- 発電所に漂着または発電所で発生する可能性がある漂流物
－船舶、車両、資機材、倒壊した植生 等
- 津波被害を受け、その結果として漂流するおそれがある対象物
－タンク類、簡易的な建物等、屋外に設置されている構造物
※ 波力、浮力等の津波影響に対して滑動、転倒、浮き上がりの評価を行い漂流物となる可能性を判断

■ 時期・回数:

時期や季節による変動要因を考慮し適切に設定

□ 漂流物諸元

- ✓ 質量および形状寸法(必須)
- ✓ 耐力や剛性(必要に応じ)

■ 漂流物衝突力の評価

- 津波漂流物の諸元と津波の遡上評価結果から、適切な算定式により評価する

例示)

No.	提案者 出典	対象		衝突力 F の評価式 (式中の g は重力加速度)	パラメータ	
		漂流物	被衝突物		衝突物、被衝突物	津波、流体条件、その他
1	松富他	流木	一般構造物	$\frac{F}{\gamma D^2 L} = 1.6 C_{MA} \left\{ \frac{v_{A0}}{(gD)^{0.5}} \right\}^{1.2} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma L} \right)^{0.4}$	D, L : 流木の直径、長さ σ_f : 流木の降伏応力 γ : 流木の単位体積重量	C_{MA} : 見かけの質量係数 v_{A0} : 衝突速度
2	池野他	流木等	一般構造物	$\frac{F}{gM} = S \cdot C_{MA} \left\{ \frac{V_H}{(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})} \right\}^{2.5}$	D, L : 漂流物の代表高さ、長さ	S : 係数 C_{MA} : 付加質量係数 V_H : 段波波速
3	水谷他	コンテナ	一般構造物	$F = 2\rho_w \eta_m B_c V_x^2 + \left(\frac{WV_x}{gdt} \right)$	B_c : コンテナ幅 W : コンテナ重量 dt : 衝突時間	η_m : 最大遡上水位 ρ_w : 水の密度 V_x : 漂流速度
4	有川他	流木 コンテナ	コンクリート	$F = \gamma_p x^{2/5} \left(\frac{5}{4} \tilde{m} \right)^{3/5} v^{6/5}$ $x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}, k = \frac{1-v^2}{\pi E}, \tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$	a : 衝突面半径の 1/2 E, ν : ヤング率、ポアソン比 m : 質量 γ_p : 塑性による減衰効果	ν : 衝突速度
5	FEMA	一般構造物 ^{注1)}	一般構造物	2008年版 : $F = C_m u_{max} \sqrt{km}$	k : 漂流物の有効剛性 m : 漂流物の質量	C_m : 付加質量係数 u_{max} : 最大流速
				2012年版 : $F = 1.3 u_{max} \sqrt{km(1+c)}$	k : 漂流物の有効剛性 m : 漂流物の質量	c : 水力学的質量係数 u_{max} : 最大流速

注1) FEMA の評価式では、漂流物が流木、コンテナの場合のみ、有効剛性の推奨値の提示あり

- 複数の式が提案されているが、原子力発電所への適用を考えたとき、適用範囲が限定的であり範囲拡大等の高度化が今後の課題

目次(抜粋)

4.1 基本事項

4.2 津波防護施設・浸水防止設備の耐津波設計の基本方針

4.2.1 津波時に確保すべき安全状態

4.2.2 津波により想定される事象

4.2.3 津波防護施設・浸水防止設備に対する機能要求

4.3 津波防護施設・浸水防止設備の荷重条件

4.3.1 津波に起因する荷重

4.3.2 荷重の組合せ

4.4 個別施設の設計基準

4.4.1 津波防護施設(防潮堤等)の耐津波設計

4.4.2 浸水防止設備(水密扉等)の耐津波設計

4.4.3 その他の施設の耐津波設計

4.4.4 使用材料及び材料定数

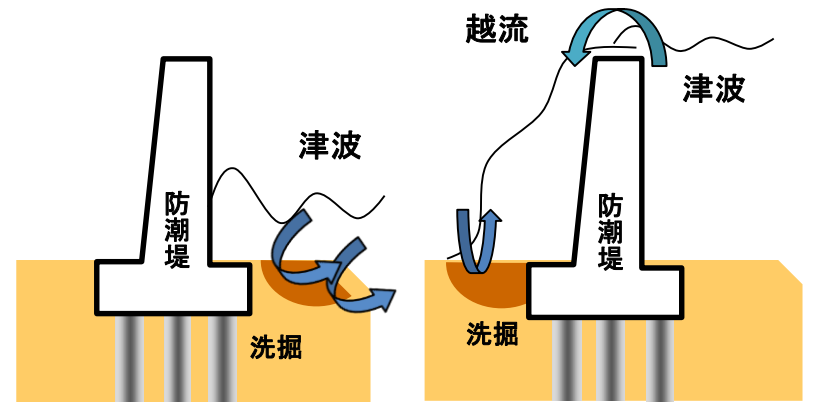
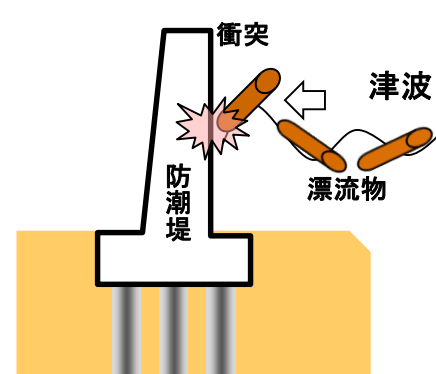
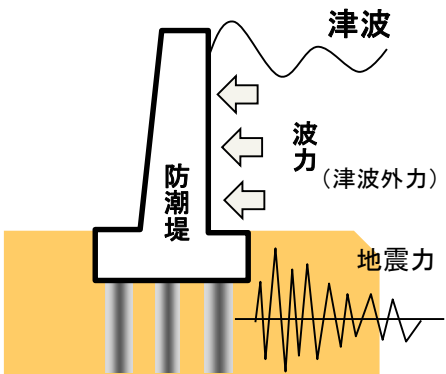
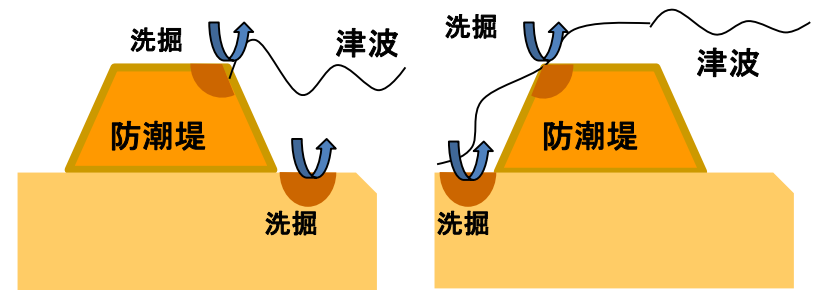
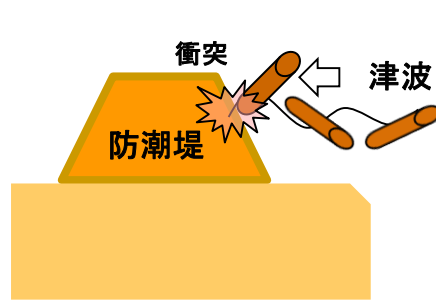
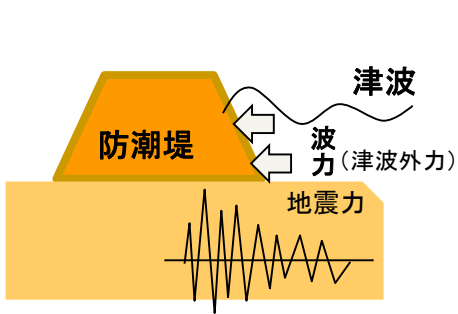
4.4.5 許容限界

個別の設計基準は、特に原子炉施設への適用の観点で実設計の経験が十分でなく、詳細仕様規定策定が今後の課題

附属書(参考)4.1 津波防護施設の設計方針

【1】津波防護施設の耐津波設計

- 津波防護機能を維持する設計として以下を要求
 - ① 津波外力を含む組合せ荷重に対する機能維持
 - ② 漂流物衝突に対する機能維持
 - ③ 洗掘に対する機能維持



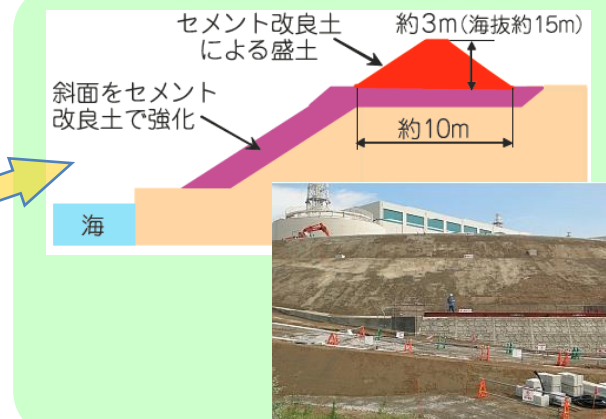
① 津波外力を含む組合せ荷重

② 漂流物衝突力

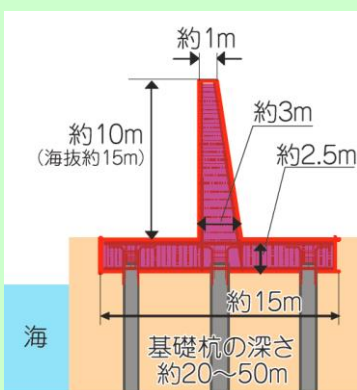
③ 洗掘

参考：防潮堤の実設計例（柏崎刈羽原子力発電所）

対象の事象	施設・対策名	概要
津波	津波防潮堤	荒浜側（1～4号機側）：杭基礎RC擁壁（H=10m, L=約1,000m） ＋土堰堤（H≤10m, L=約500m） 大湊側（5～7号機側）：土堰堤（H=3m, L=約1,000m）



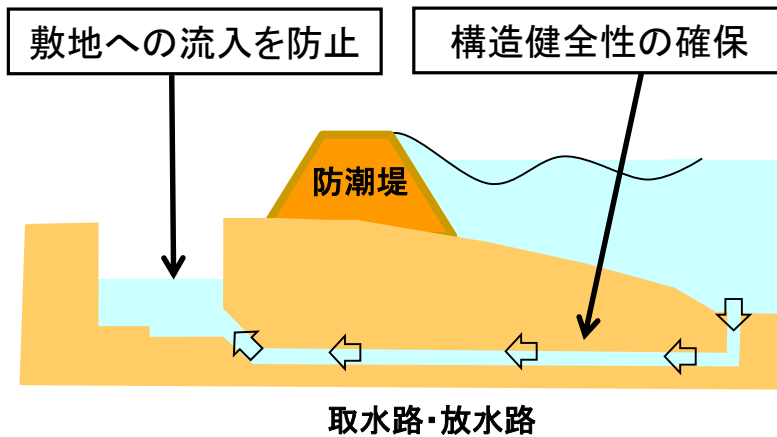
大湊側防潮堤（土堰堤）



荒浜側防潮堤（杭基礎RC擁壁）

【2】取放水路等の耐津波設計

- 取放水路には津波外力に対して構造健全性の確保を要求
- 取放水路等から敷地への流入の可能性がある場合は、浸水防止設備(閉止蓋、壁等)を設置し流入を防止
 - 浸水防止設備に対しては津波外力に対して浸水防止機能の維持を要求

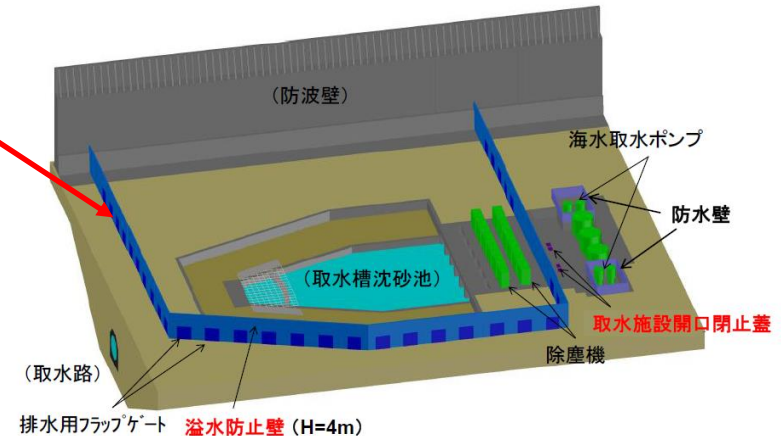
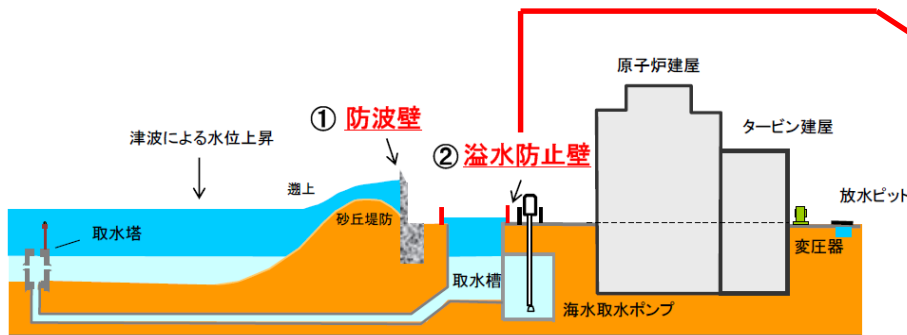


参考:敷地の浸水防止設備の実設計例 (浜岡原子力発電所)

2.1 基準津波に対する対策 取水槽の溢水対策(3~5号機の例)



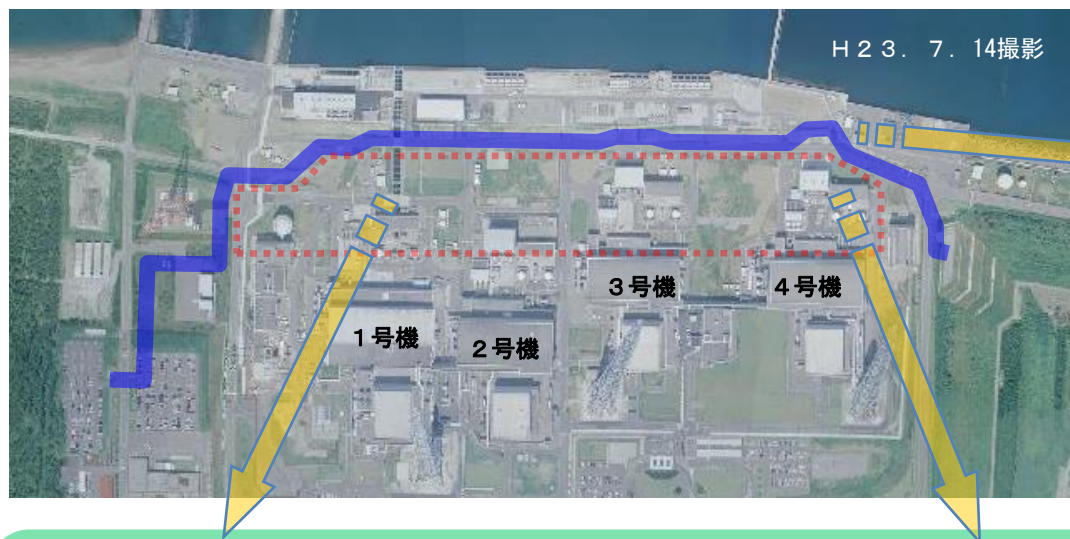
- ◆津波による取水槽から敷地への溢水を防ぐため、3~5号機の取水槽の周囲に溢水防止壁を設置する。また、取水・放水施設に接続する開口部の閉止を行う。
- ◆なお、海水取水ポンプの周囲に防水壁を設置し、同ポンプへの浸水防止を図っている。



©2014 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

参考：取水路蓋等の実設計例（柏崎刈羽原子力発電所）⁴⁹

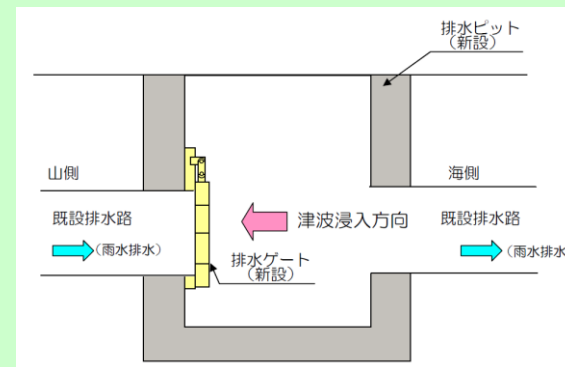
対象の事象	施設・対策名	概要
津波	ドライサイト対策工	取水路,放水路, 排水路等の開口部の浸水防止対策(蓋がけ, 嵩上げ, フラップゲート): 荒浜側全体



1号機補機取水路



4号機取水路シャフト部



取・放水路開口部蓋がけ

フラップゲート

目次(抜粋)

5.1 基本事項

5.2 機器・電気設備の耐津波設計の基本方針

- 5.2.1 津波時に確保すべき安全状態
- 5.2.2 津波により想定される事象
- 5.2.3 津波に対する機能要求

5.3 機器・電気設備の荷重条件

- 5.3.1 津波に起因する荷重
- 5.3.2 荷重の組合せと許容限界

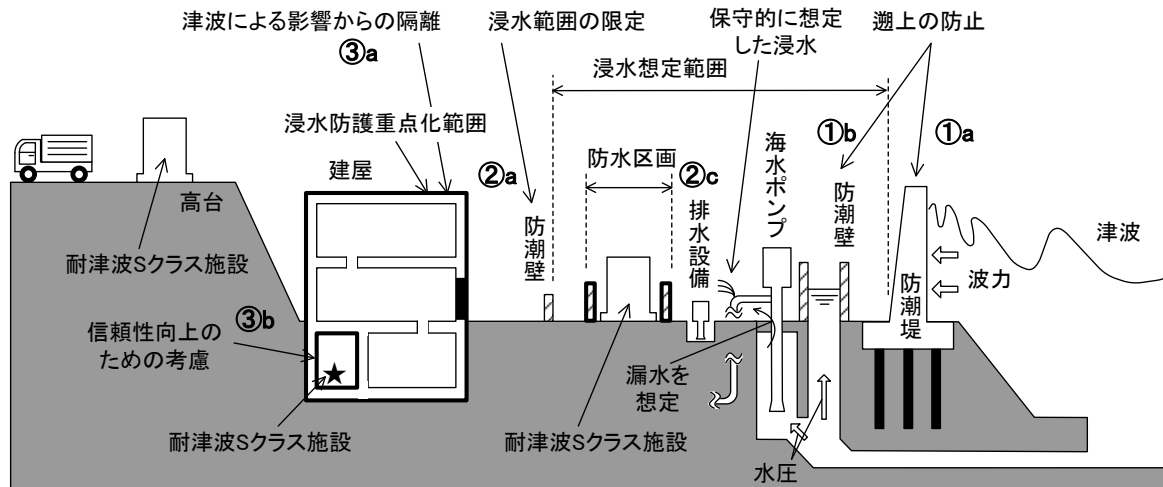
5.4 個別設備の設計基準

5.4.1 屋外設備

- 5.4.1.1 屋外タンクの耐津波設計
- 5.4.1.2 屋外配管の耐津波設計
- 5.4.1.3 動的機器・電気計装機器の耐津波設計

附属書(参考)5.1 個別設備の耐津波強度評価の考え方

機器・電気設備には水が到達しない防護を構築しているのに、なぜ耐津波設計が必要か？



- 「津波の到達、流入に対する防護の基本方針」では次を要求

③ 防護の多重化・多様化

b. 信頼性向上のための考慮

上記①～③a.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

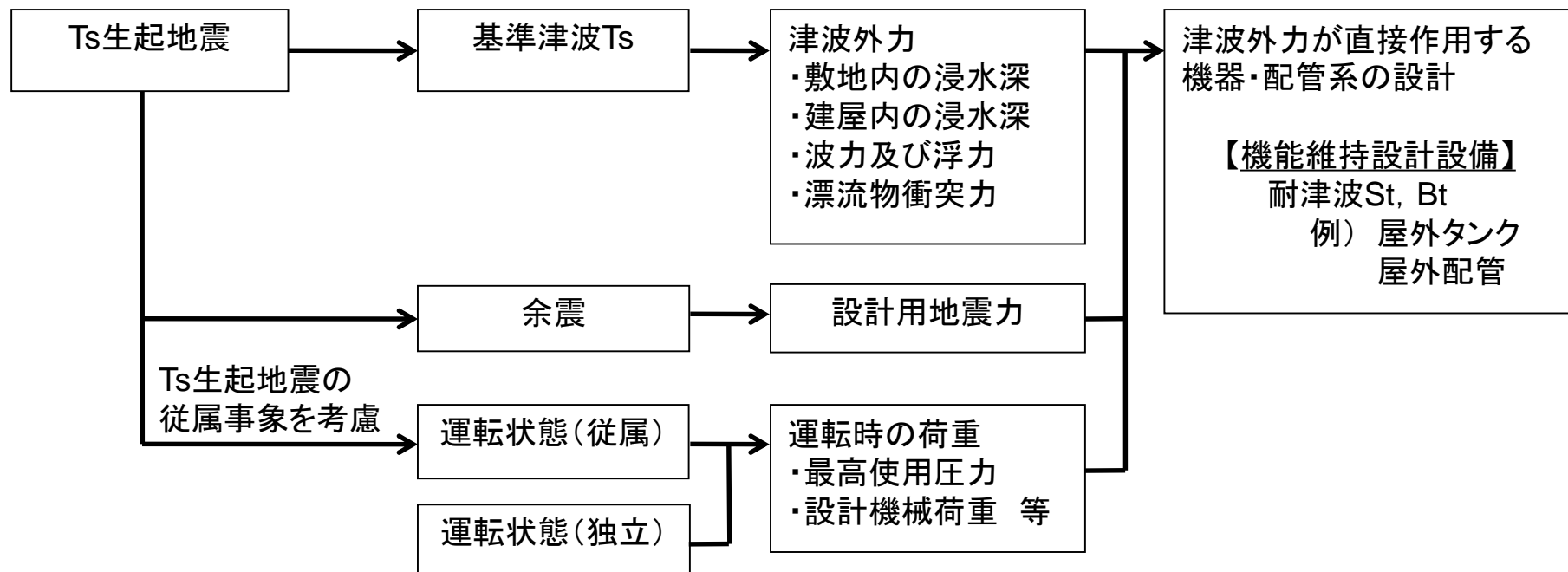
➔ 津波の影響を受けても機能維持できる機器・電気設備の設計(耐津波設計)は、防護の多重化・多様化の一方策として有効

- また、残余のリスクを考慮した、基準を超える津波に対する対策としても活用可能

【2】荷重の組合せと許容限界(1/2)

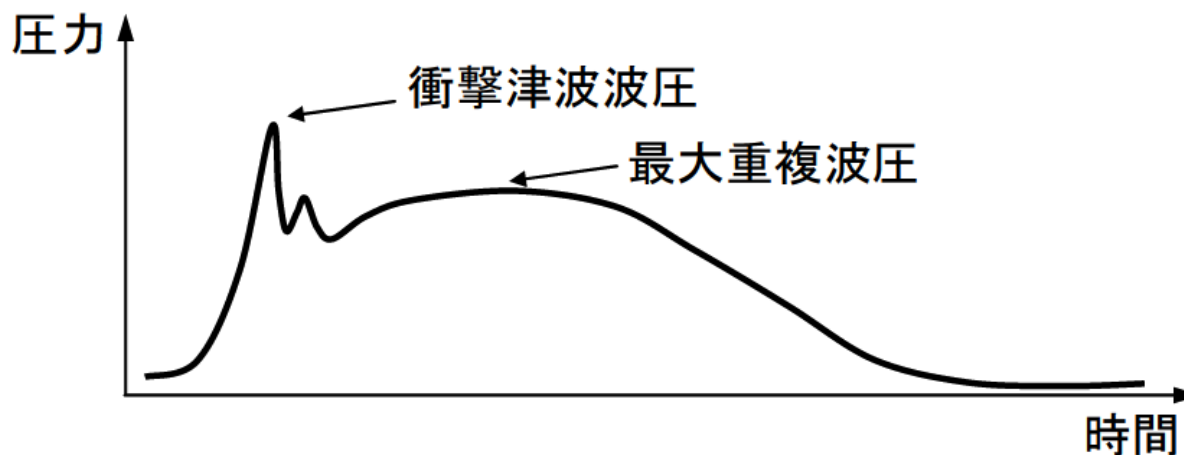
■ 荷重の組合せ

- 主たる設計対象は屋外タンク・屋外配管を想定しており、多くはクラス2、3機器に分類されると考えられるため、運転時荷重は設計・建設規格の「設計条件」である最高使用圧力、設計機械荷重としている
- 一般化にあたっては独立事象との組合せの考え方、余震の設定の考え方など、今後の高度化への検討課題と考えられる



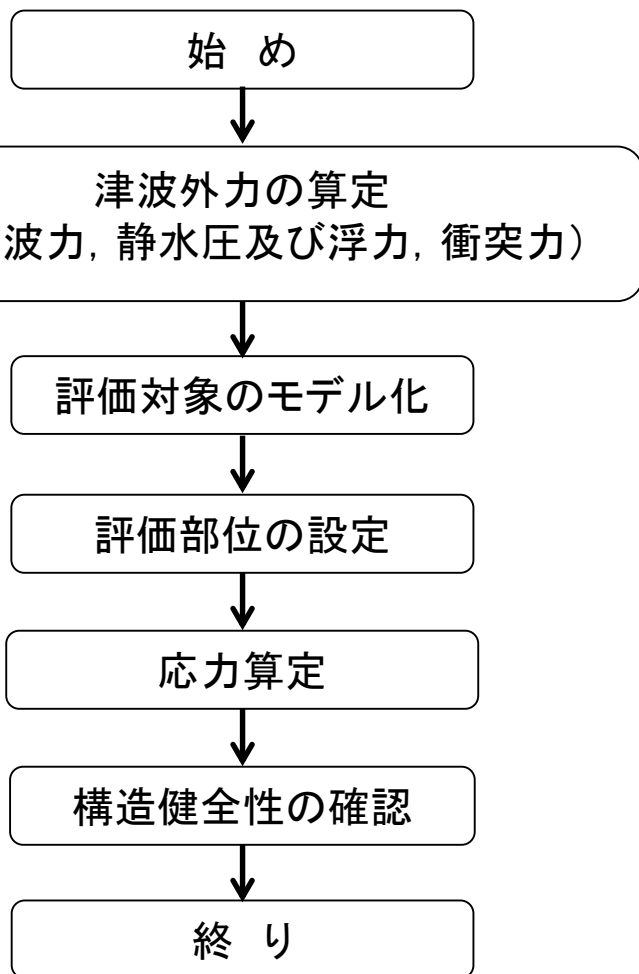
■ 波力の取り扱い

- 波力は3章の「陸上構造物・機器に作用する津波波力」の評価式を、設備形状等による適用範囲に留意して適切に用いることにより算定できる
- 算出された最大波力は、保守的に静的(一定)荷重として設計に用いる
 - ※ 保守的とは、下図に示すように最大波圧の作用時間は短時間と考えられるが、この最大波圧による波力を静的(一定)荷重として取り扱うこと
 - ※ ここでは、波力と機器・配管系の動的応答として考えられる共振現象は影響が小さいと想定しているが、その評価手法の開発は今後の課題

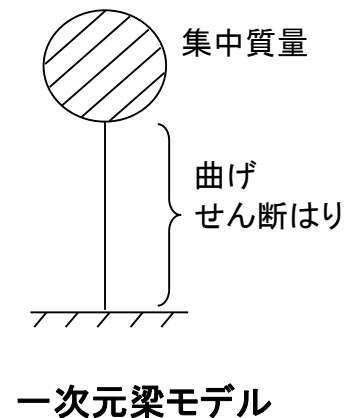
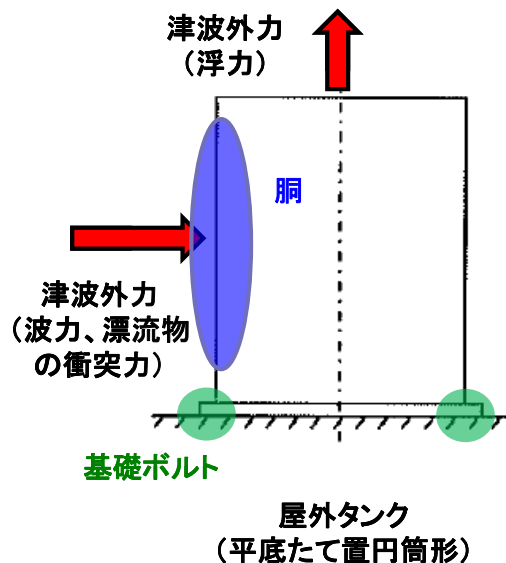


- 支配的な荷重である「波力」を静的(一定)荷重として取り扱うことから、構造健全性の確認は一次応力に許容限界を設けて実施する

【3】屋外タンクの耐津波設計



構造健全性確認の流れ



応力評価部位と応力分類

評価部位	応力分類
胴	一次応力
	座屈
	内外水位差による座屈
基礎ボルト	引張・せん断

目次(抜粋)

6.1 適用範囲

6.2 取水性の維持に係る設計

6.2.1 水位低下に対する設計

6.2.1.1 水位低下により想定される事象及び施設の機能要求

6.2.1.2 水位条件

6.2.1.3 設計基準

6.2.2 砂移動に対する設計

6.2.2.1 砂移動により想定される事象及び施設の機能要求

6.2.2.2 取水施設の設計基準

6.2.2.3 海水ポンプの設計基準

6.3 津波随伴火災に対する設計

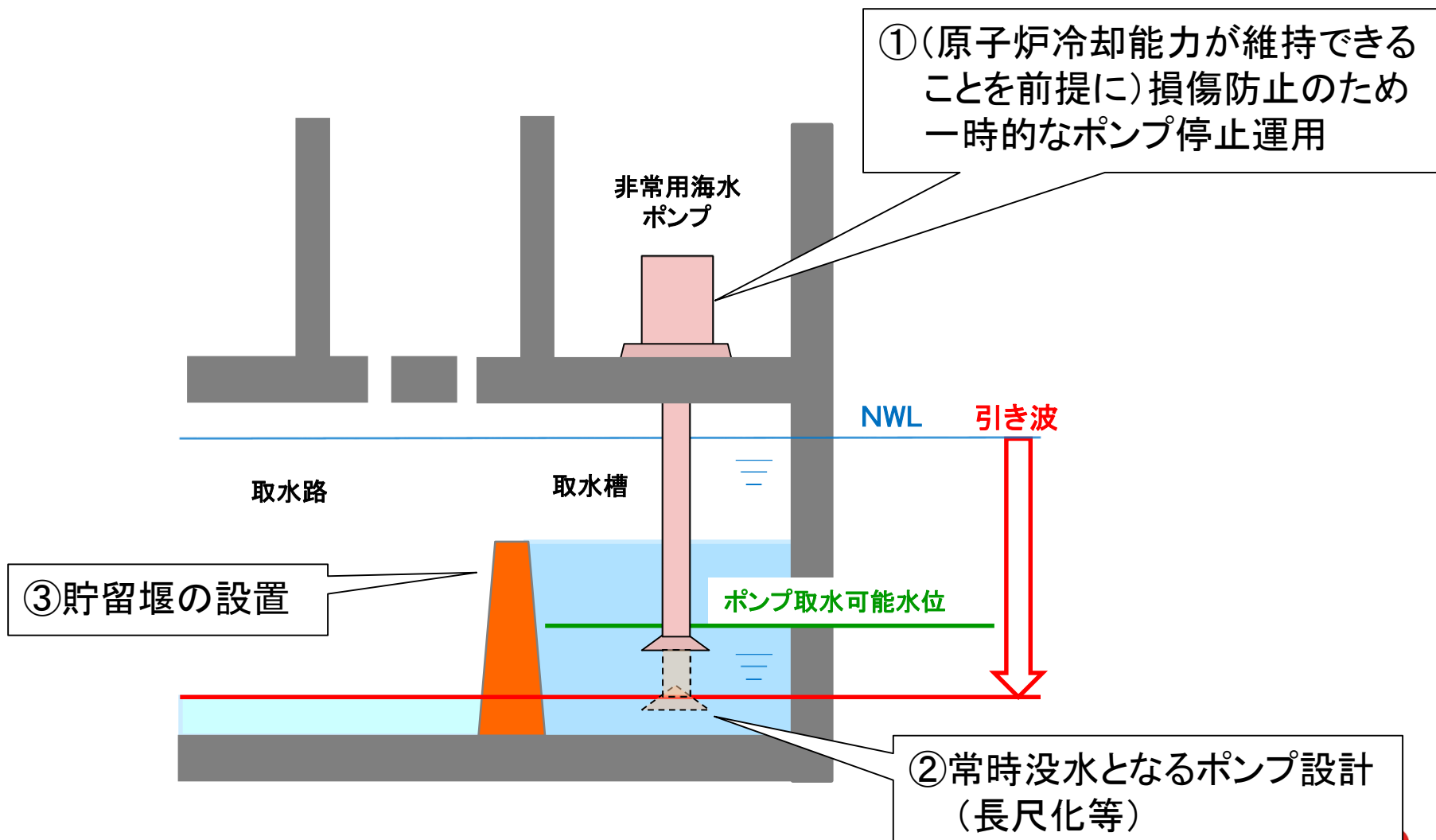
6.3.1 津波随伴火災に対する施設の機能要求

6.3.2 設計基準

附属書(参考)6.1 取水が継続的に維持できない場合の設計の考え方

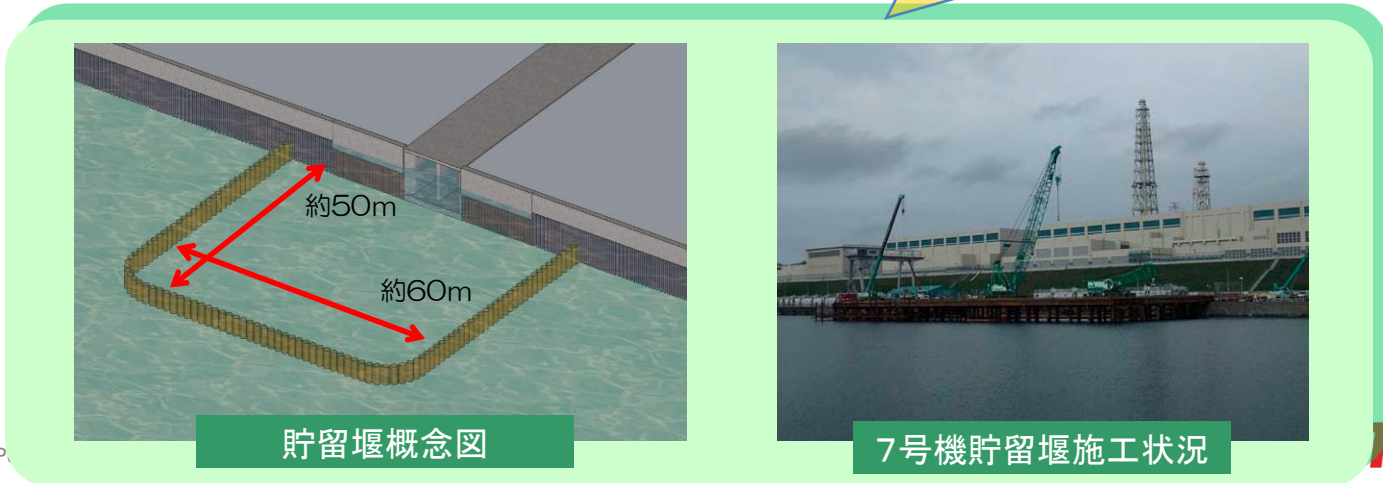
【1】水位低下に対する非常用海水系の機能維持

- 引き波による水位低下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



参考:貯留堰の実設計例(柏崎刈羽原子力発電所)

対象の事象	施設・対策名	概要
津波	取水口前面 貯留堰*	鋼管矢板製堰(φ=約1m, L=約10mの鋼管矢板約110本):7基 (既設取水口護岸の背後地盤改良を含む) *引波時に冷却水(海水)を確保する水中堰



貯留堰概念図

7号機貯留堰施工状況

【2】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
 - ✓ 要求されるポンプ機能に対して砂の混入による損傷モードと損傷部位を特定し、検討条件(粒径別砂濃度、津波の継続時間)をインプットとして必要な期間ポンプの運転継続が可能であることを確認
 - ※ 主要検討条件である砂濃度の精度の高い解析手法の確立が今後の課題

【要求されるポンプ機能】

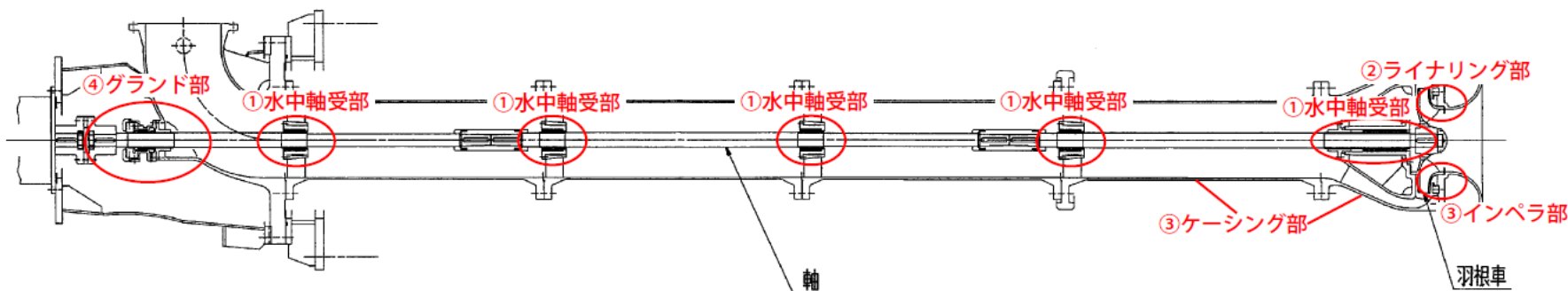
- A: 回転機能
- B: 取水機能
- C: 流体保持機能(耐圧機能含む)

【想定損傷モード部位と評価項目】

- ①ポンプ水中軸受 : 摩耗量等の評価
- ②ライナリング : 齧り等の評価
- ③ケーシング/インペラ : 摩耗量等の評価
- ④グランド部 : 摩耗量等の評価

【主要検討条件】

- ・砂濃度
- ・砂粒子径
- ・砂濃度上昇時間



海水ポンプの構造例(軸受保護管無し)

- ✓ 海水中の砂濃度が顕著に上昇することが想定される場合には、沈砂等の濃度低減対策を実施

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、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

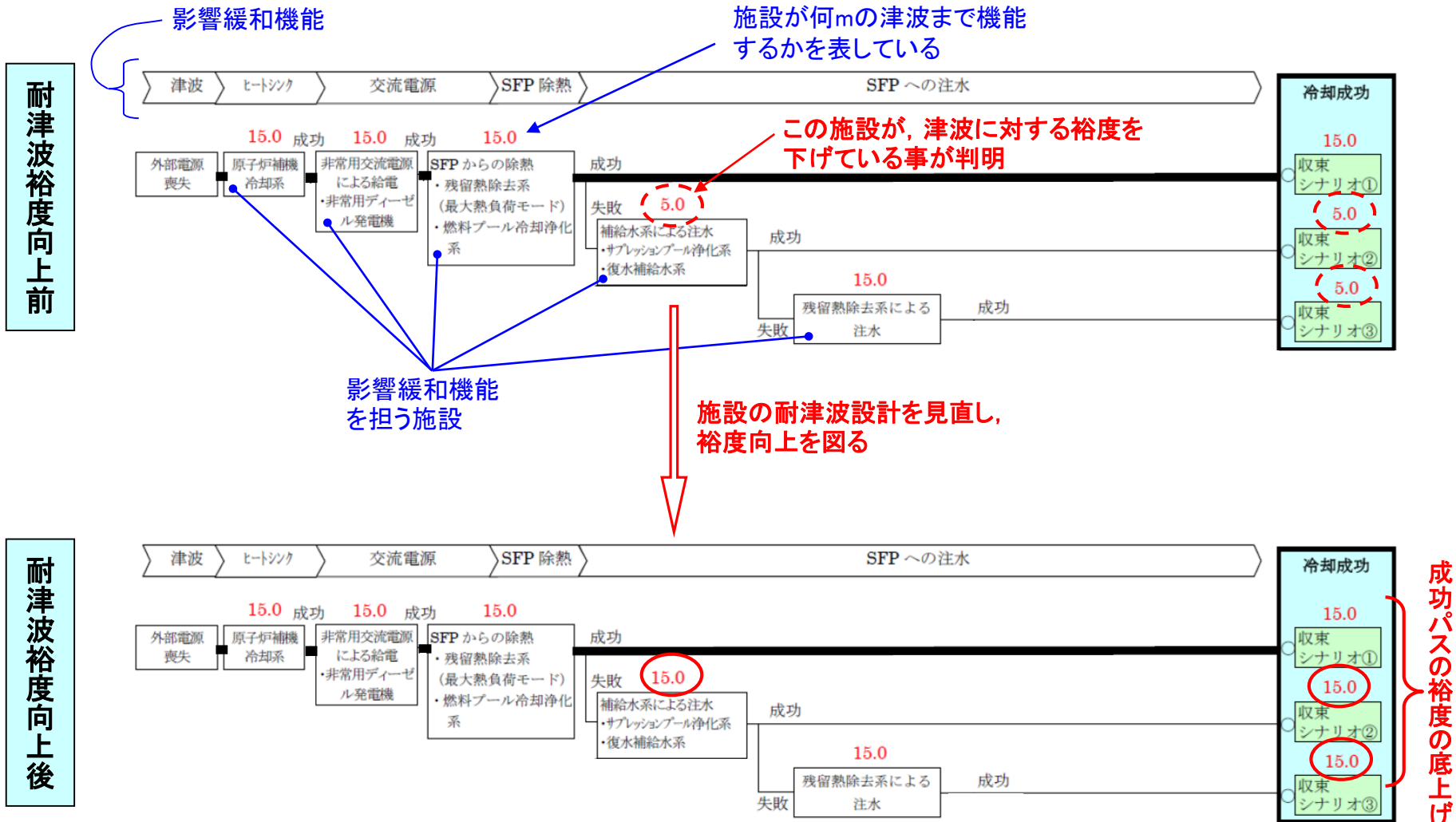
3. 原子炉施設全体としての耐津波性能の確認

- 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



1. 原子力発電所の耐津波設計に係わる取り組み
2. 津波による被害の特徴と耐津波設計の方針
3. 耐津波設計技術規程 (JEAC4629) の概要
4. 耐津波設計の高度化に向けた課題

■ 津波との組合せを考慮すべき余震の設定

- 津波が主として地震により引き起こされることを考えると耐津波設計では、津波と津波の原因となる地震との組み合わせ、また、その地震に従属して発生する余震との組み合わせの考慮は重要な要素であるが、ハザード評価方法等の余震荷重の設定方法については十分な知見の蓄積がなく、その整備が望まれる

■ 津波影響評価方法の高度化

- 津波影響のうち以下項目の評価は現状、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必要があり、評価体系の構築が求められる
 - ✓ 津波漂流物衝突力、砂移動、洗掘

■ 津波防護施設、浸水防止設備の詳細設計基準

- 個別の施設・設備の設計基準は、特に原子炉施設への適用の観点で実設計の経験が十分でなく、詳細仕様規定策定が必要

■ 機器・電気設備の耐津波設計の高度化

- 現時点では屋外のタンク・配管等を主たる設計対象と想定してるが、屋内の重要な安全設備等まで拡大する場合には、独立事象との組み合わせの考え方の構築などが望まれる