

津波フラジリティ解析

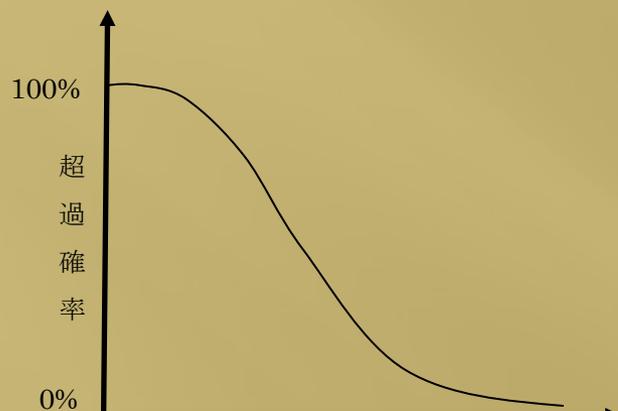
防衛大学校
港湾空港技術研究所
電力中央研究所
筑波大学
鹿島建設
東芝
原子力安全基盤機構

香月 智
有川 太郎
桐本 順広
庄司 学
美原 義徳
奈良 博
日高 慎士郎

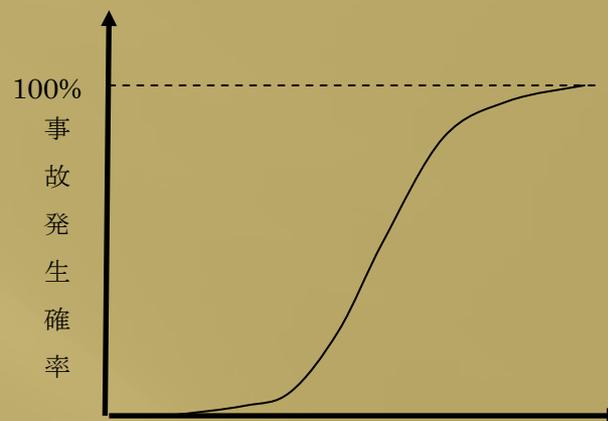
発表内容

- フラジリティ解析の定義
- 地震→津波：与条件区分
- 防護域（対象）による施設・機器・構造の区分
- ハザードレベル区分
- 要素のフラジリティを支配する地点津波解析
- シナリオ分岐
- 地点津波から作用の確率分布および条件付き作用ハザード曲線への変換
- 要素の基本フラジリティ
- 事故シーケンスに基づくシステムのフラジリティ解析
- 主要要素の役割と評価
- 実行可能性向上に関する補足事項
- 地震フラジリティと津波フラジリティ

津波フラジリティ解析の定義



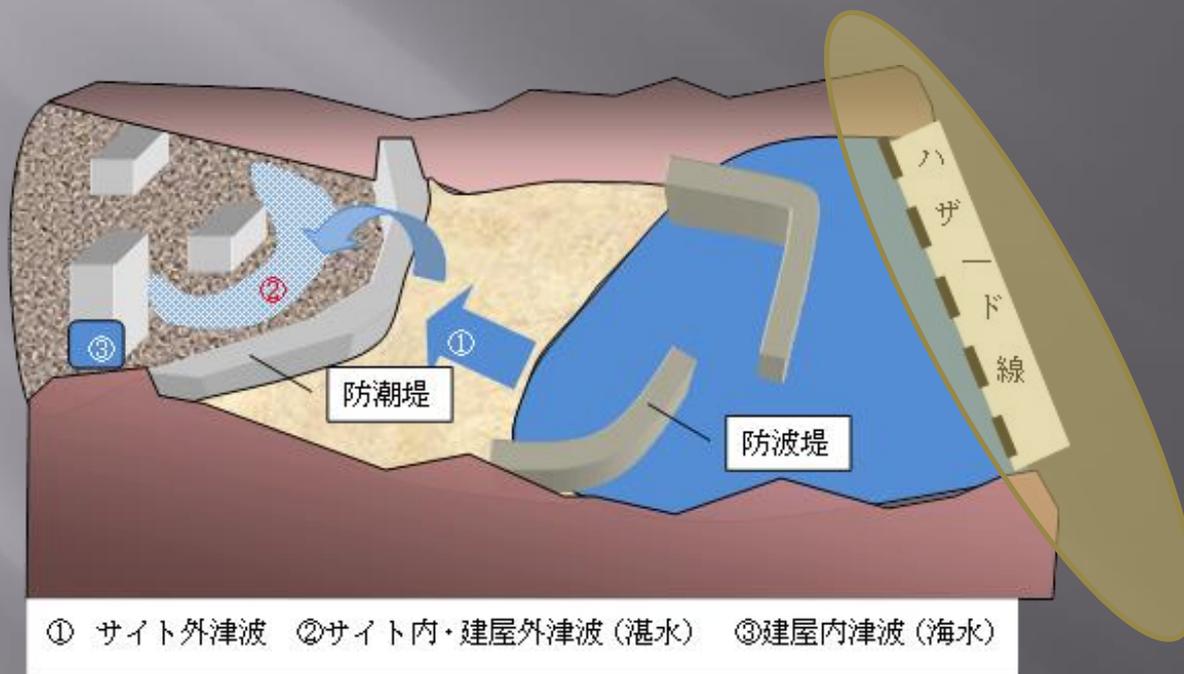
津波強度の代表値, H
津波ハザード (与条件)



津波強度の代表値, H
津波フラジリティ

- ハザード曲線は、別途与えられる。
- 縦軸の「事故」は、炉心損傷や格納容器機能喪失など個別の事象をいう。

津波強度の代表値：H



地震→津波：与条件区分

フラジリティ解析の開始条件

地震動強さのレベルの与条件

A. 制御棒を正常に挿入し，施設全体も健全なレベル

B. 炉心損傷につながる安全上重要なSSCの機能損失を起こすレベル

C. 地震動により直接炉心損傷および格納容器損傷を起こすレベル

津波フラジリティ解析の区分

I. 津波高さを条件とした炉心損傷挙動の解析
(炉心損傷フラジリティ解析)

地震動による損傷を考えず，津波単独の影響を考慮して炉心の挙動を解析する

安全上重要なSSCが地震動により損傷していることを前提にさらに津波による損傷の可能性を考慮して，炉心の挙動を解析する

安全上重要なSSC，炉心および格納容器が地震動により損傷していることを前提に，炉心の損傷が更にどの程度進展するかを解析する

II. 津波高さを条件とした格納容器損傷挙動の解析
(格納容器損傷フラジリティ解析)

地震動による損傷を考えず，津波単独の影響を考慮して，炉心損傷後の格納容器の挙動を解析する

安全上重要なSSCが地震動により損傷していることを前提にさらに津波による損傷の可能性を考慮して，炉心損傷後の格納容器の挙動を解析する

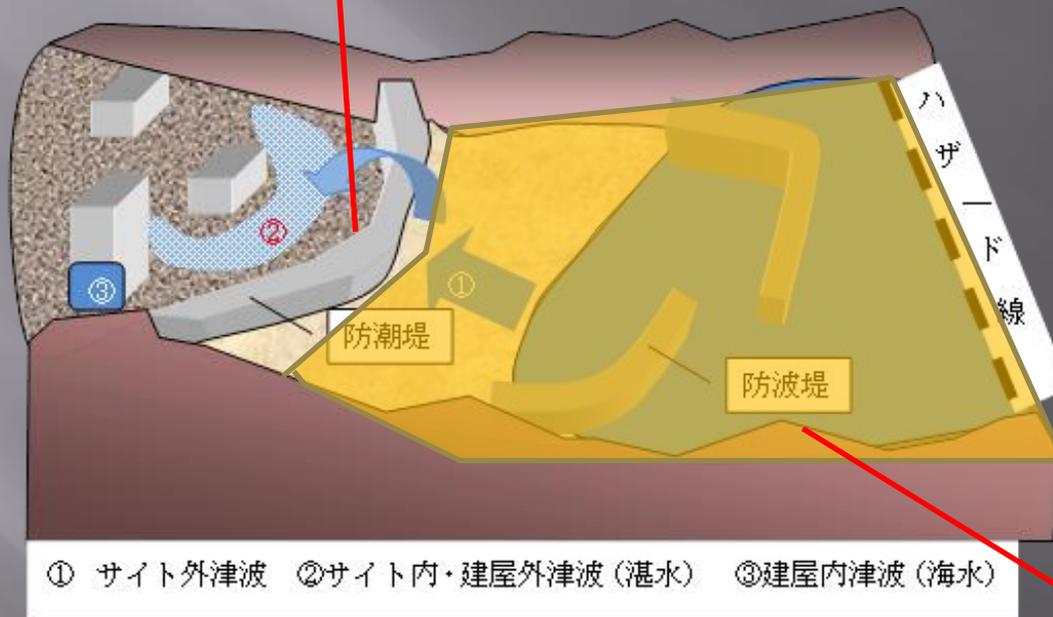
安全上重要なSSC，炉心および格納容器が地震動により損傷していることを前提に，格納容器の損傷が更にどの程度進展するかを解析する

防護域（対象）による 施設・機器・構造の区分

施設・機器等の呼称	防護域（対象）	代表的該当施設・機器・構造等	フラジリティ解析上の留意点
前面海域内施設・構造	サイト前面海域を含む広域（取水，排水施設）	防波堤（津波監視施設）	防波堤は，津波のエネルギーを減衰させる効果がある。
サイト外郭施設・構造	サイト内全域	防潮堤 防潮壁 防水壁 漂流物止	原子炉施設の津波対策の中核となる構造物である。その目的は，出来る限りサイトへの海水侵入を阻止することであり，一般用語として，ドライサイトを保持するためのものである。
建造物外郭施設・構造	特定建造物内	防水壁 水密扉 漂流物止	サイト内に海水が浸入したのちに，重要機器が設置されているビルなどへ海水が浸入することを防止する施設であり，サイト外郭施設の補完施設であり，もしくは代替施設ともいえる。
建造物内領域水密化施設・機器	建造物内特定領域	水密扉 排水ポンプなど	構造物外郭施設を超えたり，地下からの不測の海水が浸入したりする事象に対して，重要機器のある部屋への海水（水）の侵入を阻止する。
防水材・防水機器	機器	防水材 防水被覆など	機器をゴムや樹脂などで防水処置すること，もしくはその材料をいう。この効果によって，機器の有する抵抗力特性を変えることができる。
基礎・支保構造等	構造（例えば鉄塔）	緩衝材	これらの構造物の損傷は，炉心機能の低下には直接影響しないが，無視しえないものである。例えば，送電鉄塔の損傷は，送電線の送電能力の喪失に影響しない限り，フラジリティには影響しない。
当該機器	機器・構造自体	表8-2中のⅠ～Ⅲの機器等	これらの機器や構造の故障もしくは機能喪失は，炉心フラジリティの増大に直接寄与する。

サイト前面海域

サイト外郭施設



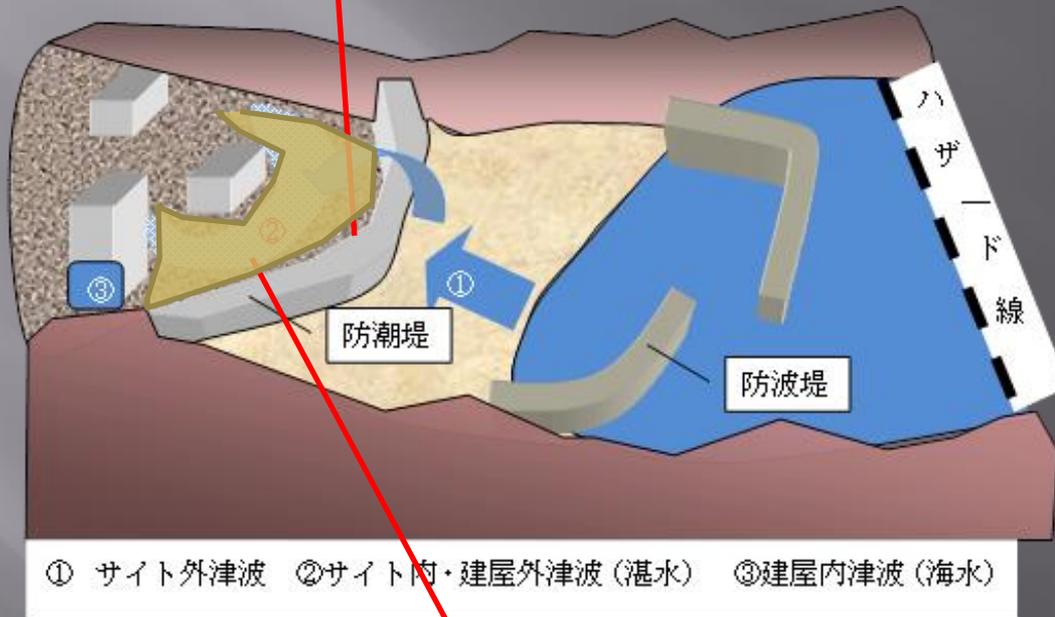
サイト前面海域

防護域（対象）による 施設・機器・構造の区分

施設・機器等の呼称	防護域（対象）	代表的該当施設・機器・構造等	フラジリティ解析上の留意点
前面海域内施設・構造	サイト前面海域を含む広域（取水，排水施設）	防波堤（津波監視施設）	防波堤は，津波のエネルギーを減衰させる効果がある。
サイト外郭施設・構造	サイト内全域	防潮堤 防潮壁 防水壁 漂流物止	原子炉施設の津波対策の中核となる構造物である。その目的は，出来る限りサイトへの海水侵入を阻止することであり，一般用語として，ドライサイトを保持するためのものである。
建造物外郭施設・構造	特定建造物内	防水壁 水密扉 漂流物止	サイト内に海水が浸入したのちに，重要機器が設置されているビルなどへ海水が浸入することを防止する施設であり，サイト外郭施設の補完施設であり，もしくは代替施設ともいえる。
建造物内領域水密化施設・機器	建造物内特定領域	水密扉 排水ポンプなど	構造物外郭施設を超えたり，地下からの不測の海水が浸入したりする事象に対して，重要機器のある部屋への海水（水）の侵入を阻止する。
防水材・防水機器	機器	防水材 防水被覆など	機器をゴムや樹脂などで防水処置すること，もしくはその材料をいう。この効果によって，機器の有する抵抗力特性を変えることができる。
基礎・支保構造等	構造（例えば鉄塔）	緩衝材	これらの構造物の損傷は，炉心機能の低下には直接影響しないが，無視しえないものである。例えば，送電鉄塔の損傷は，送電線の送電能力の喪失に影響しない限り，フラジリティには影響しない。
当該機器	機器・構造自体	表8-2中のⅠ～Ⅲの機器等	これらの機器や構造の故障もしくは機能喪失は，炉心フラジリティの増大に直接寄与する。

サイト外郭施設

防潮堤・防潮壁・自然の山etc.



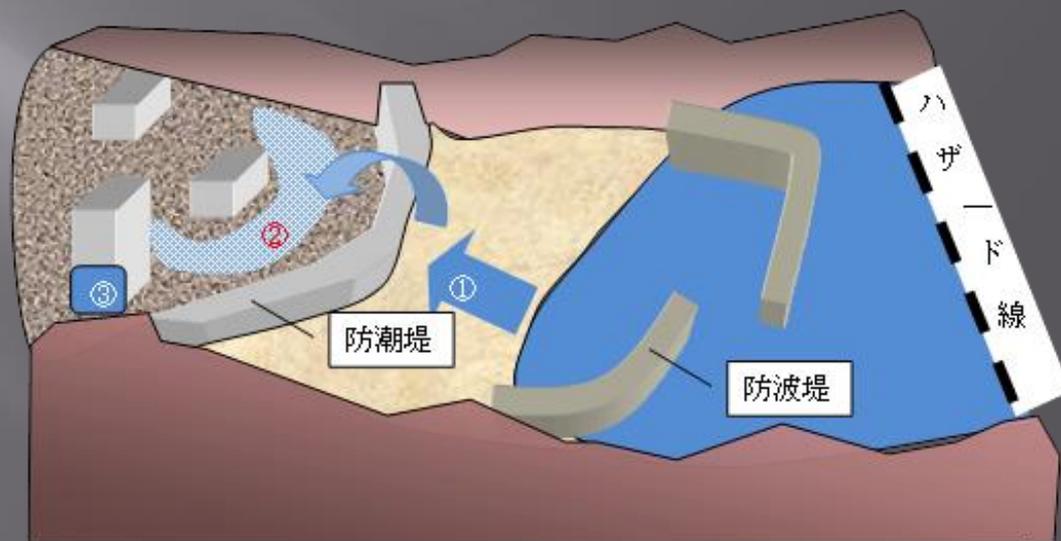
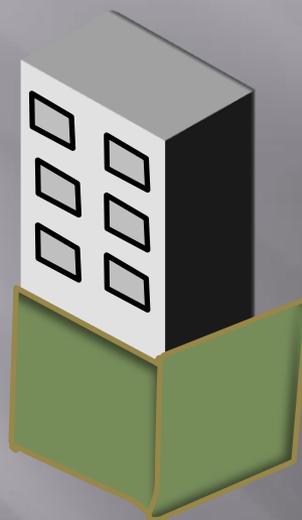
建造物内を除くサイト内

防護域（対象）による 施設・機器・構造の区分

施設・機器等の呼称	防護域（対象）	代表的該当施設・機器・構造等	フラジリティ解析上の留意点
前面海域内施設・構造	サイト前面海域を含む広域（取水，排水施設）	防波堤（津波監視施設）	防波堤は，津波のエネルギーを減衰させる効果がある。
サイト外郭施設・構造	サイト内全域	防潮堤 防潮壁 防水壁 漂流物止	原子炉施設の津波対策の中核となる構造物である。その目的は，出来る限りサイトへの海水侵入を阻止することであり，一般用語として，ドライサイトを保持するためのものである。
建造物外郭施設・構造	特定建造物内	防水壁 水密扉 漂流物止	サイト内に海水が浸入したのちに，重要機器が設置されているビルなどへ海水が浸入することを防止する施設であり，サイト外郭施設の補完施設であり，もしくは代替施設ともいえる。
建造物内領域水密化施設・機器	建造物内特定領域	水密扉 排水ポンプなど	構造物外郭施設を超えたり，地下からの不測の海水が浸入したりする事象に対して，重要機器のある部屋への海水（水）の侵入を阻止する。
防水材・防水機器	機器	防水材 防水被覆など	機器をゴムや樹脂などで防水処置すること，もしくはその材料をいう。この効果によって，機器の有する抵抗力特性を変えることができる。
基礎・支保構造等	構造（例えば鉄塔）	緩衝材	これらの構造物の損傷は，炉心機能の低下には直接影響しないが，無視しえないものである。例えば，送電鉄塔の損傷は，送電線の送電能力の喪失に影響しない限り，フラジリティには影響しない。
当該機器	機器・構造自体	表8-2中のⅠ～Ⅲの機器等	これらの機器や構造の故障もしくは機能喪失は，炉心フラジリティの増大に直接寄与する。

建造物外郭施設・構造

防水壁



① サイト外津波 ② サイト内・建屋外津波 (湛水) ③ 建屋内津波 (海水)

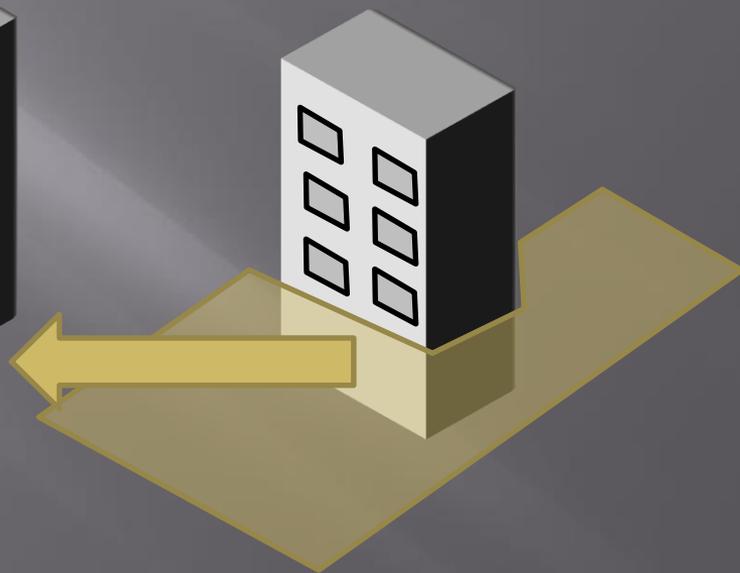
防護域（対象）による 施設・機器・構造の区分

施設・機器等の呼称	防護域（対象）	代表的該当施設・機器・構造等	フラジリティ解析上の留意点
前面海域内施設・構造	サイト前面海域を含む広域（取水，排水施設）	防波堤（津波監視施設）	防波堤は，津波のエネルギーを減衰させる効果がある。
サイト外郭施設・構造	サイト内全域	防潮堤 防潮壁 防水壁 漂流物止	原子炉施設の津波対策の中核となる構造物である。その目的は，出来る限りサイトへの海水侵入を阻止することであり，一般用語として，ドライサイトを保持するためのものである。
建造物外郭施設・構造	特定建造物内	防水壁 水密扉 漂流物止	サイト内に海水が浸入したのちに，重要機器が設置されているビルなどへ海水が浸入することを防止する施設であり，サイト外郭施設の補完施設であり，もしくは代替施設ともいえる。
建造物内領域水密化施設・機器	建造物内特定領域	水密扉 排水ポンプなど	構造物外郭施設を超えたり，地下からの不測の海水が浸入したりする事象に対して，重要機器のある部屋への海水（水）の侵入を阻止する。
防水材・防水機器	機器	防水材 防水被覆など	機器をゴムや樹脂などで防水処置すること，もしくはその材料をいう。この効果によって，機器の有する抵抗力特性を変えることができる。
基礎・支保構造等	構造（例えば鉄塔）	緩衝材	これらの構造物の損傷は，炉心機能の低下には直接影響しないが，無視しえないものである。例えば，送電鉄塔の損傷は，送電線の送電能力の喪失に影響しない限り，フラジリティには影響しない。
当該機器	機器・構造自体	表8-2中のⅠ～Ⅲの機器等	これらの機器や構造の故障もしくは機能喪失は，炉心フラジリティの増大に直接寄与する。

建造物内領域水密化施設・機器

水密扉

発電機



防護域（対象）による 施設・機器・構造の区分

施設・機器等の呼称	防護域（対象）	代表的該当施設・機器・構造等	フラジリティ解析上の留意点
前面海域内施設・構造	サイト前面海域を含む広域（取水，排水施設）	防波堤（津波監視施設）	防波堤は，津波のエネルギーを減衰させる効果がある。
サイト外郭施設・構造	サイト内全域	防潮堤 防潮壁 防水壁 漂流物止	原子炉施設の津波対策の中核となる構造物である。その目的は，出来る限りサイトへの海水侵入を阻止することであり，一般用語として，ドライサイトを保持するためのものである。
建造物外郭施設・構造	特定建造物内	防水壁 水密扉 漂流物止	サイト内に海水が浸入したのちに，重要機器が設置されているビルなどへ海水が浸入することを防止する施設であり，サイト外郭施設の補完施設であり，もしくは代替施設ともいえる。
建造物内領域水密化施設・機器	建造物内特定領域	水密扉 排水ポンプなど	構造物外郭施設を超えたり，地下からの不測の海水が浸入したりする事象に対して，重要機器のある部屋への海水（水）の侵入を阻止する。
防水材・防水機器	機器	防水材 防水被覆など	機器をゴムや樹脂などで防水処置すること，もしくはその材料をいう。この効果によって，機器の有する抵抗力特性を変えることができる。
基礎・支保構造等	構造（例えば鉄塔）	緩衝材	これらの構造物の損傷は，炉心機能の低下には直接影響しないが，無視しえないものである。例えば，送電鉄塔の損傷は，送電線の送電能力の喪失に影響しない限り，フラジリティには影響しない。
当該機器	機器・構造自体	表8-2中のⅠ～Ⅲの機器等	これらの機器や構造の故障もしくは機能喪失は，炉心フラジリティの増大に直接寄与する。

基礎・支保構造等



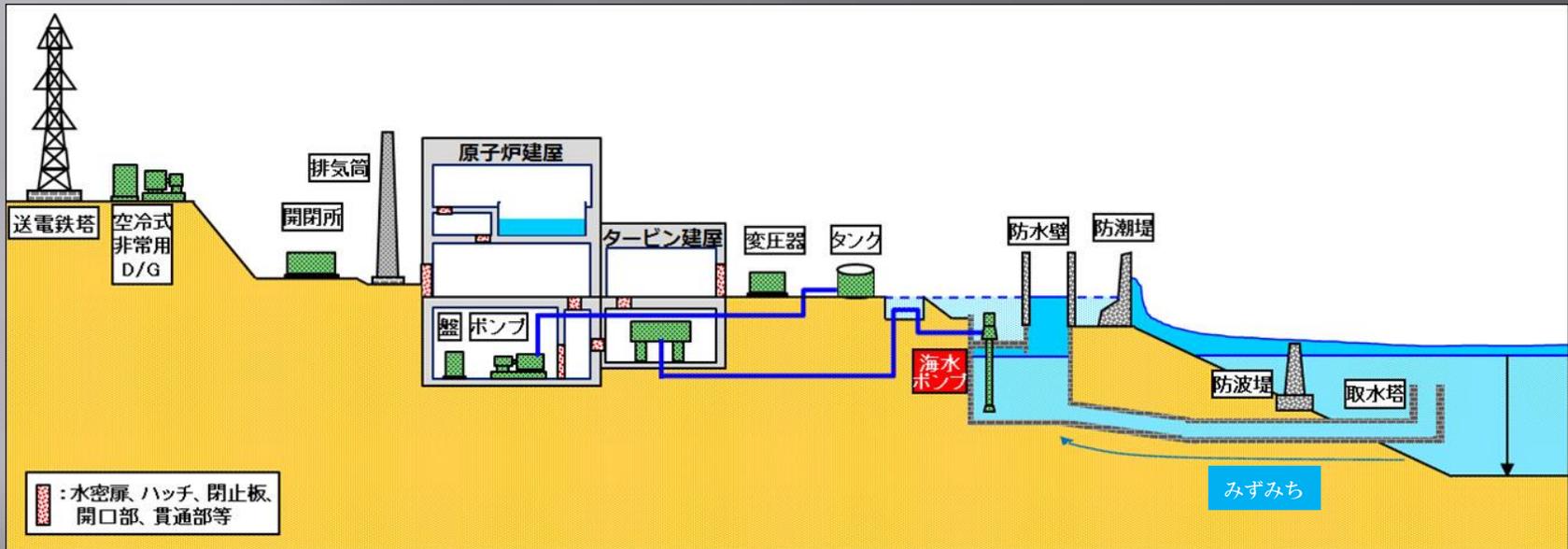
これらの構造物の損傷は、炉心機能の低下には直接影響しないが、無視しえないものである。例えば、送電鉄塔の損傷は、送電線の送電能力の喪失に影響しない限り、 fragility には影響しない。

ハザードレベル区分

- ▣ ハザード曲線は、滑らかな連続性を有するが、フラジリティ曲線は、
 - サイト外郭施設を津波が乗り越えない状態
 - サイト外郭施設を津波が乗り越えた状態
 - サイト外郭施設を津波が乗り越え、かつ建造物外郭施設をも津波が乗り越えた状態

の3段階に分けられ、フラジリティ曲線は、段階に応じて急上昇する可能性が高い。

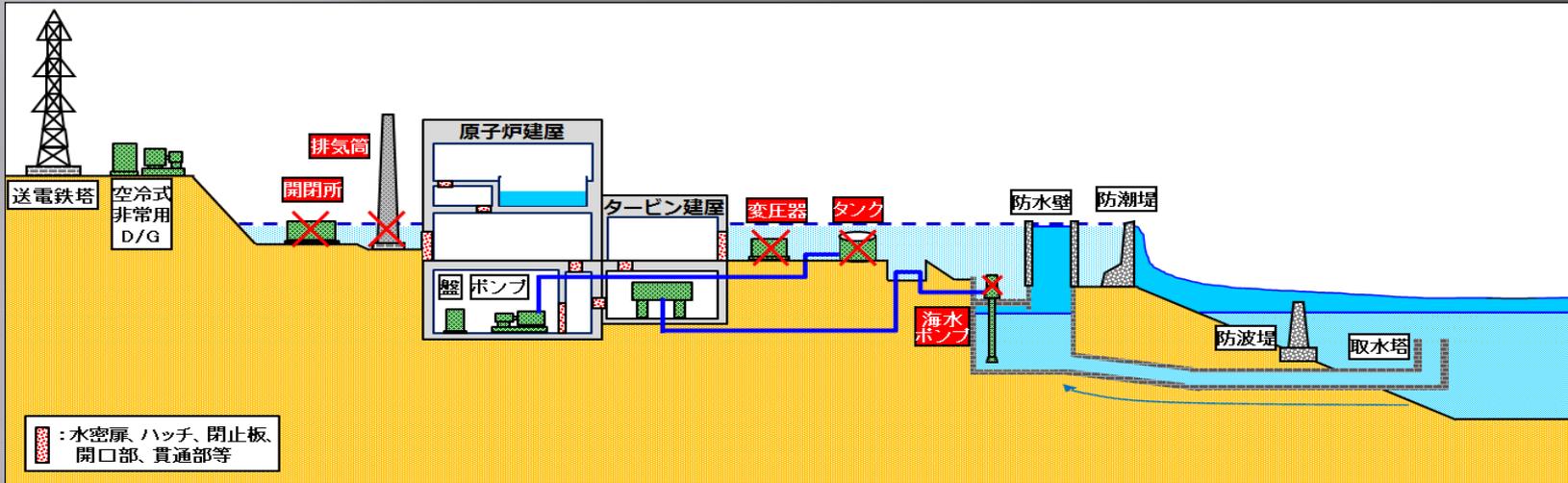
ハザードレベルⅠ サイト外郭施設（防潮堤等）を乗り越えない状態



- 取水施設には、反射した津波が作用
- 水頭差により管路等から逆流
- 地盤内の通常では認識できない「みずみち」考慮
- 防波堤は、越波されても津波エネルギーを減殺

ハザードレベルⅡ

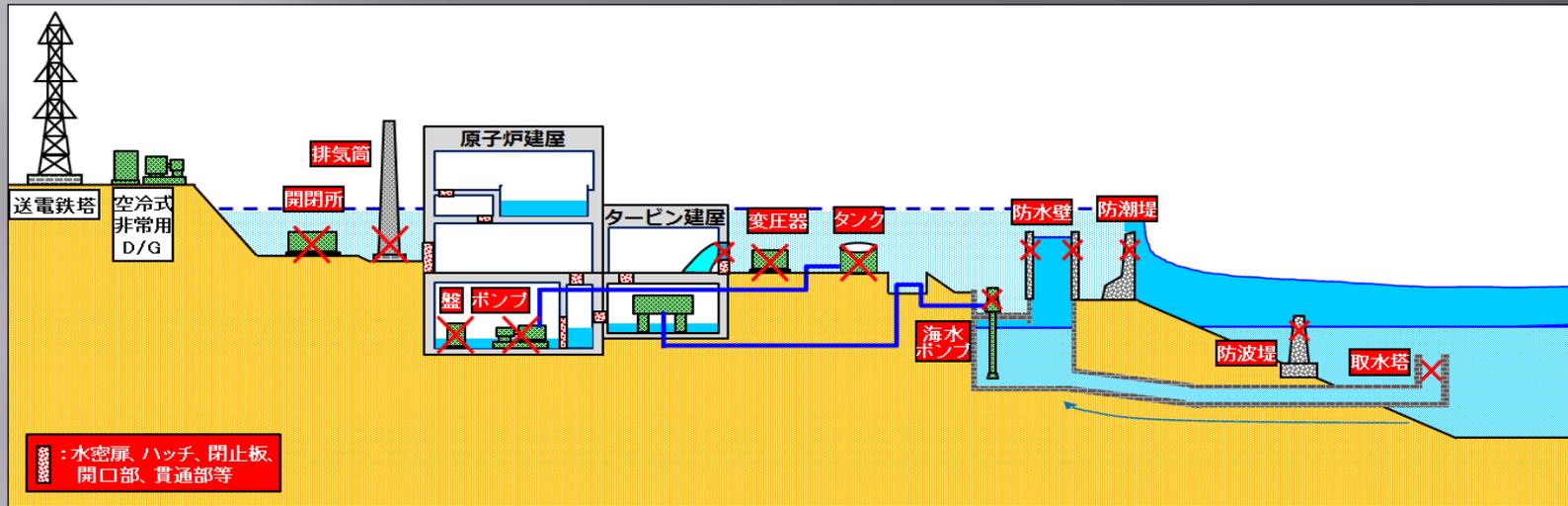
サイト外郭施設（防潮堤等）を乗り越えた状態
建造物外郭施設（防水壁等）は乗り越えない状態



- サイト内にある機器の要素フラジリティは、防水・耐水性に依存して増加
- サイト外からの漂流物（流木など）の流入やサイト内の漂流物（車両）の衝突や油脂の漏洩・引火などはシナリオ排除できる環境整備
- 対策人員車両の移動能力確保
- 侵入水の排水機能→繰り返し津波襲来への耐性

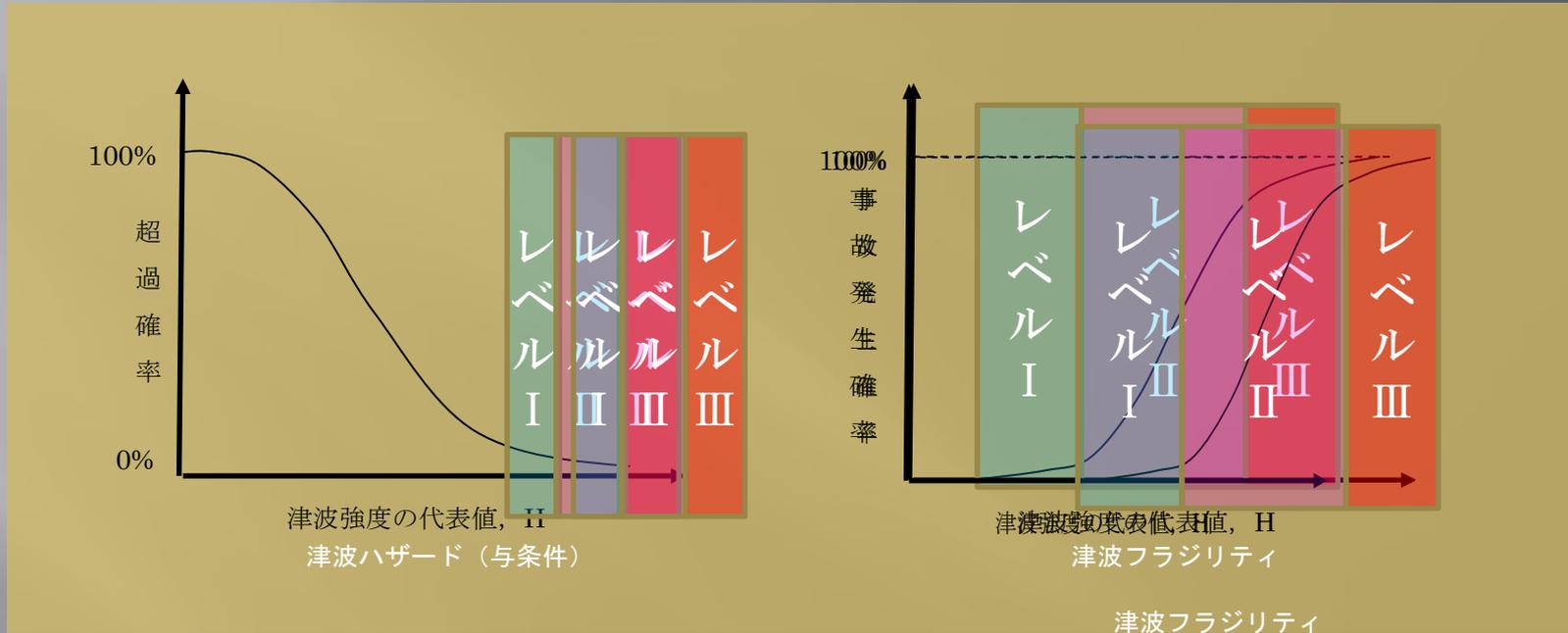
緑字は、プラントウォークダウン対象

ハザードレベルⅢ 建造物外郭施設（防水壁等）も乗り越えた状態



- 建屋内の水密化による耐性のある機器のみによる機能維持能力に依存する状態

ハザードレベル区分

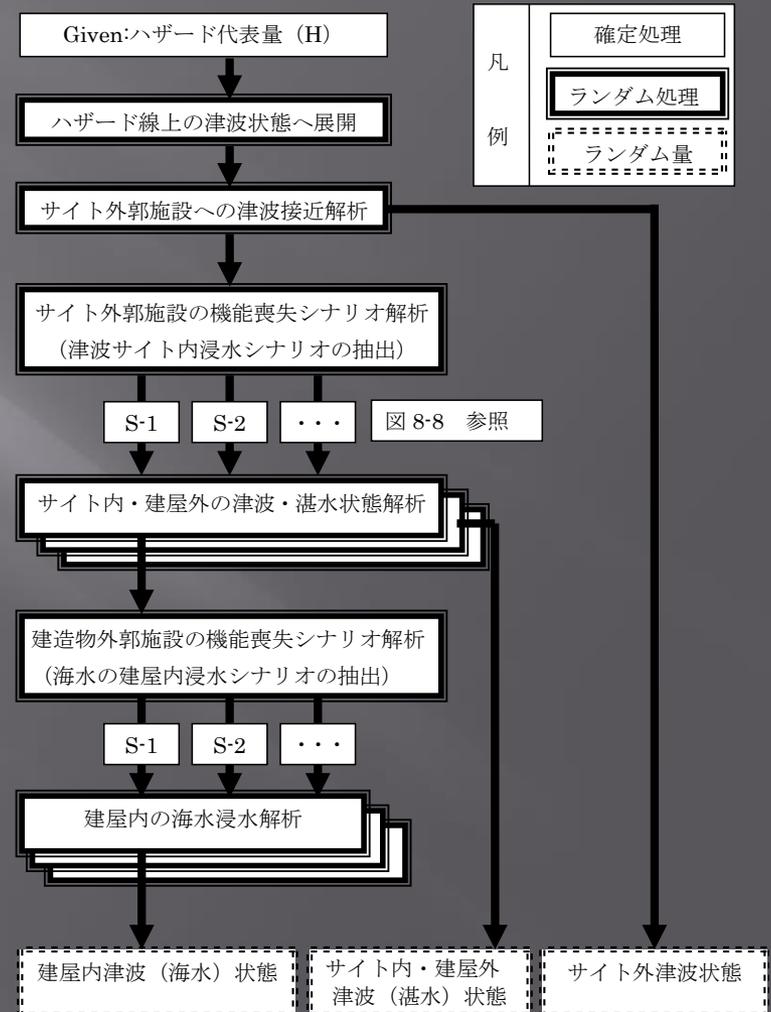


- フラジリティー特性を、安全化するには、フラジリティー曲線を右にスライドさせること

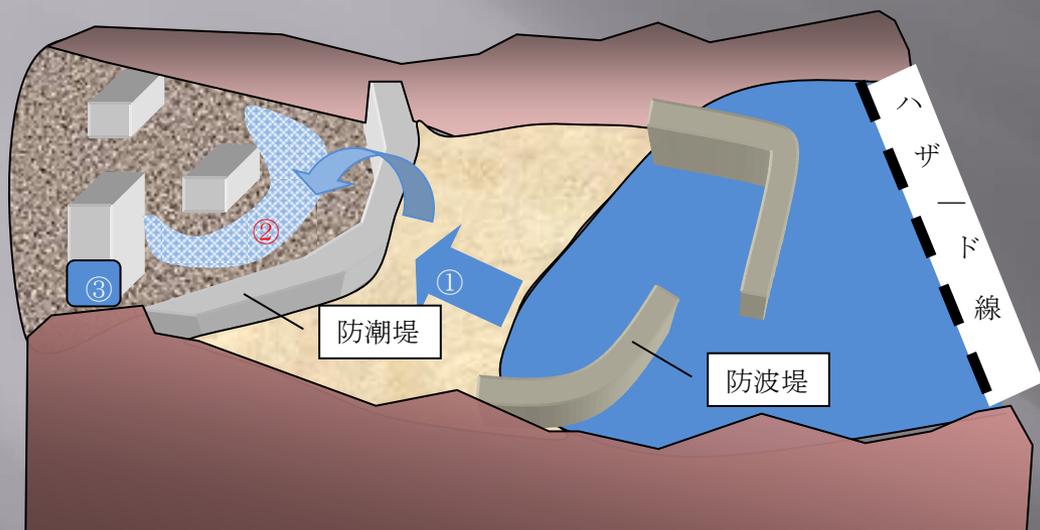
要素のフラジリティを支配する地点津波解析

地点：要素の存在する場所

- サイト外郭構造の破壊状態と建造物外郭構造の破壊状態の組み合わせに依存してシナリオ分岐



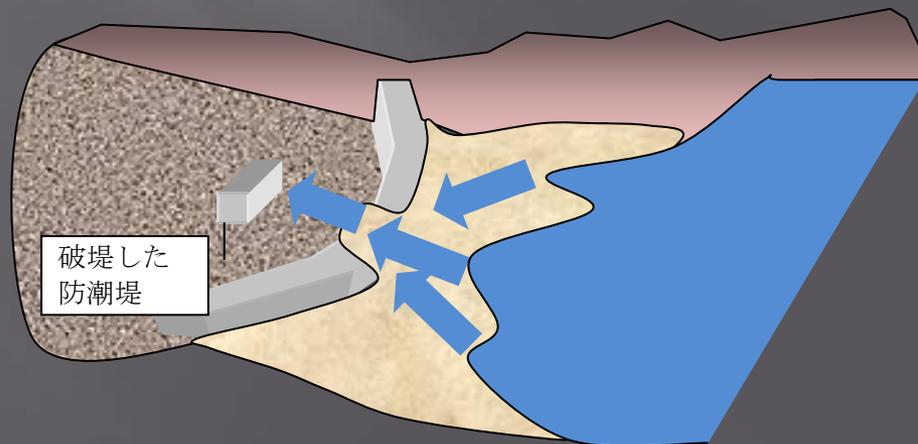
シナリオ分岐



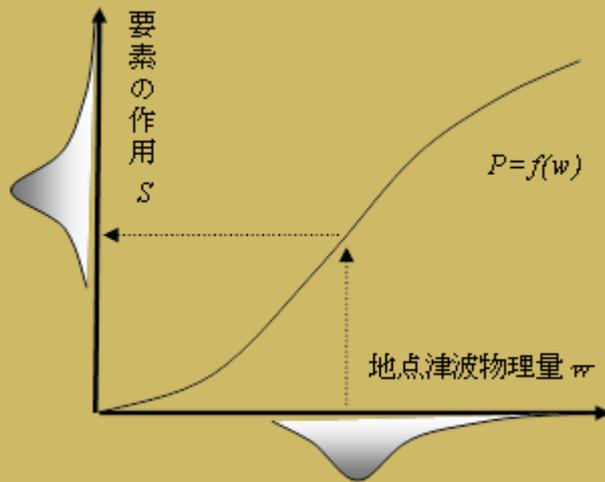
① サイト外津波 ② サイト内・建屋外津波（湛水） ③ 建屋内津波（海水）

□ 全防潮堤が健全である場合の津波の越流は、ある意味フラジリティの連続性が保たれる。しかし、

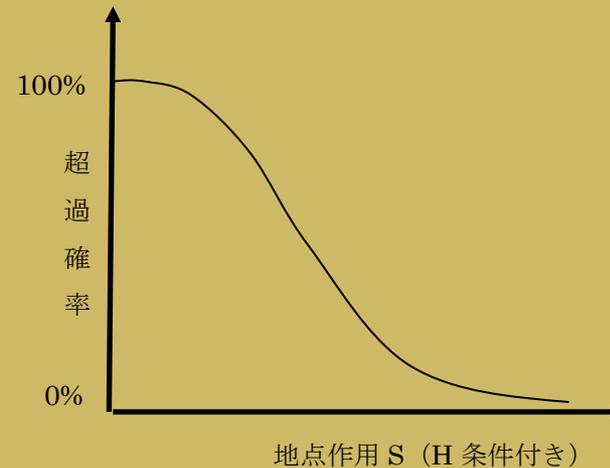
□ 防潮堤の一部決壊は、その場所によってサイト内建造物のフラジリティが極端に変わる。



地点津波から作用の確率分布および条件付き作用ハザード曲線への変換



地点津波から要素に対する作用への変換

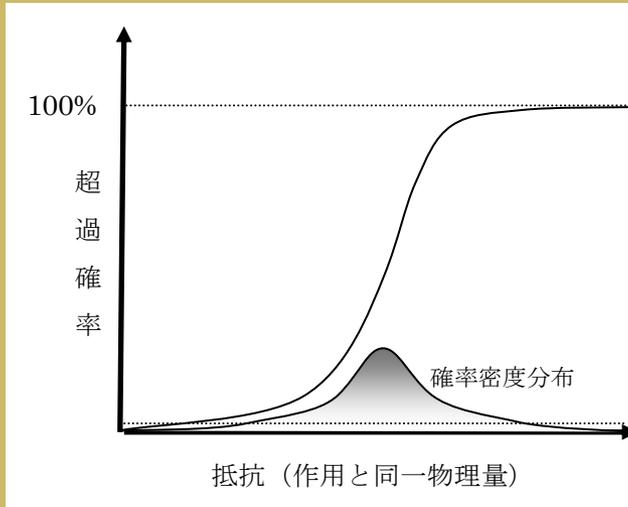


H条件付き要素のハザード曲線図

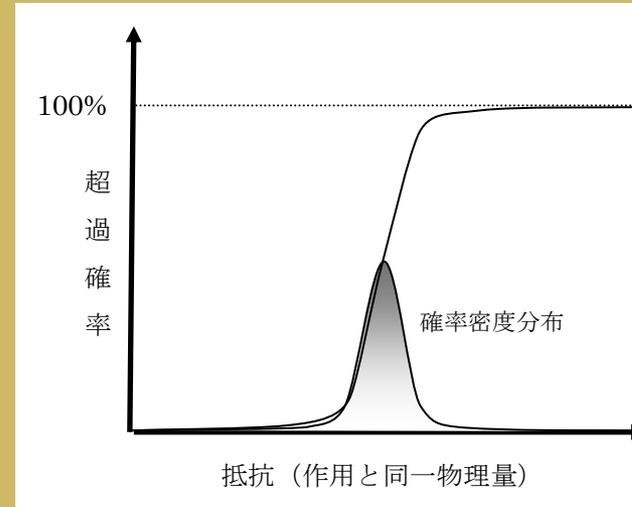
要素を故障や破壊・機能喪失させる物理量は要素によって異なる。 圧力？流速？濁り？...

5・6章 参照

要素の基本フラジリティ



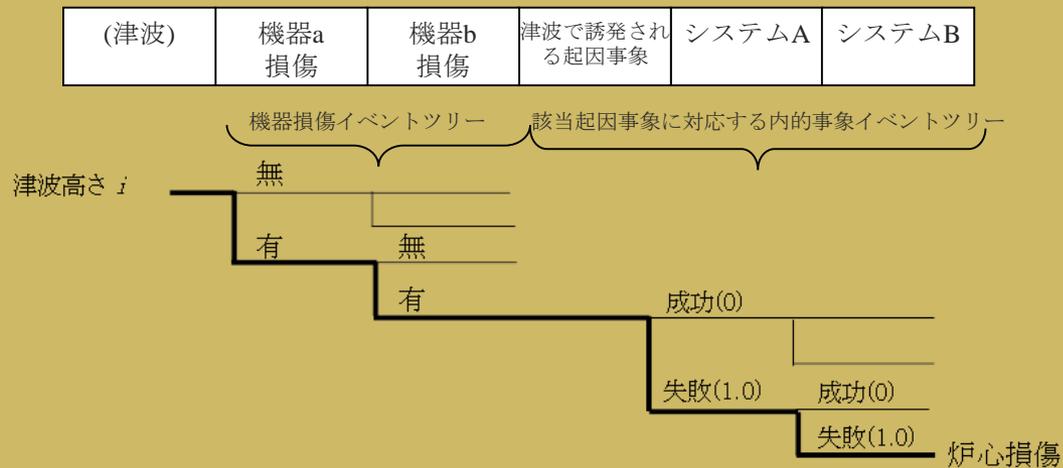
延性型



脆性型

- 要素によって、脆性的破壊特性を有するものがある。
- ただし、地点津波のハザードカーブの特徴との組み合わせで、脆性型でなくなることもある。
- → 地点を変える（避水）、防水する、etc.

事故シーケンスに基づくシステムの フラジリティ解析



□ 基本的に、地震時の解析と同じ。5章参照

8.6 主要要素の役割と評価

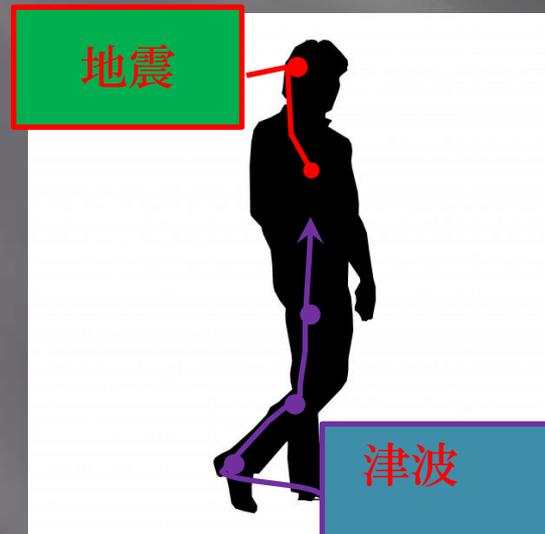
- ▣ 防潮堤の役割・評価
- ▣ 防波堤の役割・評価
- ▣ 防水壁，水密扉等（内郭防護設備）の役割・評価
- ▣ 電源・冷却・信号等のシステム構成機器の機能喪失と機能喪失確率分布特性
- ▣ 建屋等の材料・部材・構造全体の機能喪失確率分布特性

実行可能性向上に関する補足事項

- ▣ 津波フラジリティ解析の実行可能性と対策
- ▣ 共通事象による機能喪失特性の考慮
- ▣ 地震との重畳
- ▣ 漂流物
- ▣ 油脂漏出・火災
- ▣ 人員・車両の移動阻害事象
- ▣ 数値計算の工夫
- ▣ プラントウォークダウン

地震フラジリティと津波フラジリティ

- 地震： 10秒
炉心に直撃
人の判断処置を待てない。
→止める、冷やす、閉じ込める。
- 津波： ひと波＝小一時間
取水口、冷却管路網、電源、制御：末端から徐々に
代替要素・機器・システムの投入：人の判断と手段の可能性
→冷やし続ける、閉じ込め続ける。



まとめ

- ▣ 8章では、多様な自然現象に起因する津波の中で最もリスクの高まる、近傍地震に伴う津波フラジリティ解析を対象として、稼働中の原子力発電施設のフラジリティ解析法について、基本的な手順や考え方、および現状の問題点について記した。