

土木学会平成29年度全国大会
研究討論会 研-12 資料

原子力土木委員会での危機耐性 への取り組み

座長	中村 晋	日本大学・教授
話題提供者	近藤駿介	東京大学・名誉教授, 原子力発電環境整備機構・理事長
	高田毅士	東京大学大学院・教授
	本田利器	東京大学大学院・教授
	松山昌史	電力中央研究所
	大友敬三	電力中央研究所

日	時	平成29年9月11日(月) 13:00~15:00
場	所	九州大学伊都キャンパス
教	室	西講義棟第3講義室

原子力土木委員会

目 次

【趣旨説明】

中村 晋（日本大学・教授）

別紙

【話題提供】

Part.1 <Post 3.11：原子力発電所・社会基盤施設の安全への取り組み>

リスク情報を活用した原子力安全への取り組み

近藤駿介（東京大学・名誉教授,

原子力発電環境整備機構・理事長）

別紙

原子力発電所の地震安全に関する基本原則構築の試み

高田毅士（東京大学大学院・教授）

1

危機耐性を考慮した耐震設計体系の構築への取り組み

本田利器（東京大学大学院・教授）

7

Part2:<原子力土木委員会の取り組み>

津波に対する対策への取り組み

松山昌史（電力中央研究所）

13

屋外重要土木構造物の取組み

大友敬三（電力中央研究所）

20



原子力発電所の地震安全に関する 基本原則構築の試み

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
日本地震工学会「原子力発電所の地震安全に
関する基本原則構築に関する研究会」主査
高田 毅士



1



話題提供

1. 日本地震工学会の新しい研究会活動
2. 基本原則構築に関する重要ポイント
3. 様々な基本概念
4. 今後の課題



2



日本地震工学会研究委員会(敬称略)

委員会名：原子力発電所の地震安全の基本原則に関する研究委員会

設置期間：2016年4月1日～2018年3月31日(2年間予定)

委員長：高田毅士(東京大学)

副委員長：成宮祥介(関西電力)

幹事：産業界(4)、事業者(4)、アカデミア(6)

委員：産業界(12)、事業者(11)、アカデミア(9)

顧問：蛭沢勝三、亀田弘行、宮野廣

WG1：高田孝 (JAEA)：地震安全基本原則WG

WG2：藤本滋 (神奈川大)：発電所システム性能WG

WG3：糸井達哉 (東大)：地震ハザードWG

分野別：建築系(12)、機械系(11)、安全系(13)、土木系(10)



3



「2011年福島事故の教訓と展望」PDのまとめ

PDで指摘された事項(2016.9.26)

- 1) 想定外事象への対応、想定外(シナリオ)の想定をどのように?
- 2) プラント全体(周辺も含めて)トータルシステムとして扱う
- 3) 揺れ、変位、地震起因・随件事象(斜面、津波、火災…)
- 4) 深層防護概念の実装の方法は
- 5) BDBE(Beyond Design Basis Events, 設計外事象)
- 6) 不確実性の評価と低減
- 7) リスク概念の有効性と、その有効活用法?
- 8) 緊急時対応(情報の不確実さの時間依存性)
- 9) 分野横断、異分野連携
- 10) 多関係者間の双方向コミュニケーション、情報システムの活用できる領域



4



活動のねらい

我が国においては、地震は避けることのできない自然ハザードであり、原子力発電所の地震安全確保は最重要課題である。原子力発電所の持続的安全性確保のためには、福島事故の経験等や新たな知見を踏まえ、様々な安全性向上活動をトータルに扱って相互に整合性のとれるような体系を目指した、リスクと深層防護の概念を根幹に置いた新しい安全性確保の基本原則が必要である。

本研究委員会においては、地震安全に関わる広範な分野の密接な連携の下、多様で深い議論を通して、地震安全に関わる基本原則を明らかにし、それを共有化した上で原子力発電所の安全確保の実践的研究を行う。具体的には、原子力発電所を対象にリスクと深層防護の概念に基づく地震安全確保の基本原則の構築と、その実践である。



5



基本原則構築に関する重要ポイント

- 徹底的に性能論に基づく
安全性、供用性、性能目標水準
- 対象部位の明確化
個材（設備単体）→ システム（設備集合）全体→周辺も含む
- 事前と事後
事前対応VS事後対応（時間軸を意識）
PSとMS（被害防止と被害軽減）
- 不確実性に対する決定論と確率論
Graded Approach（等級別アプローチ）
- 時間的破綻と空間的破綻
セイフティーバーストの概念→連鎖的破綻と同時多発的破綻
- 深層防護概念の実装



6



重要な概念

地震安全性:

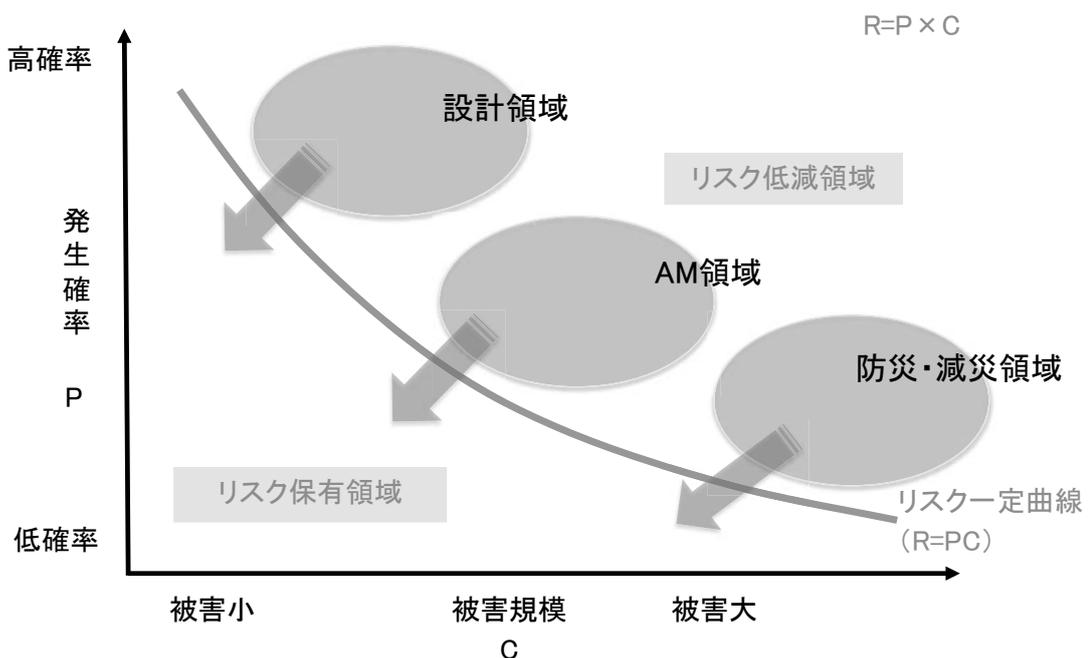
安全は、「受容できないリスクが無いこと」であり、地震安全とは、地震および地震随伴事象が発生した場合においても、人と環境に対し、原子力発電所の施設とその活動に起因する受容できない放射線リスク(放射線の有害な影響に対するリスク)が無い状態にすることにある。

発電所の供用性:

供用性 (serviceability) とは、そのシステムが持つ社会的役割であり、「社会性」、「使用性」とも言われる。原子力発電所における社会的役割は、我が国におけるエネルギー安全保障の確保のための電力の供給である。

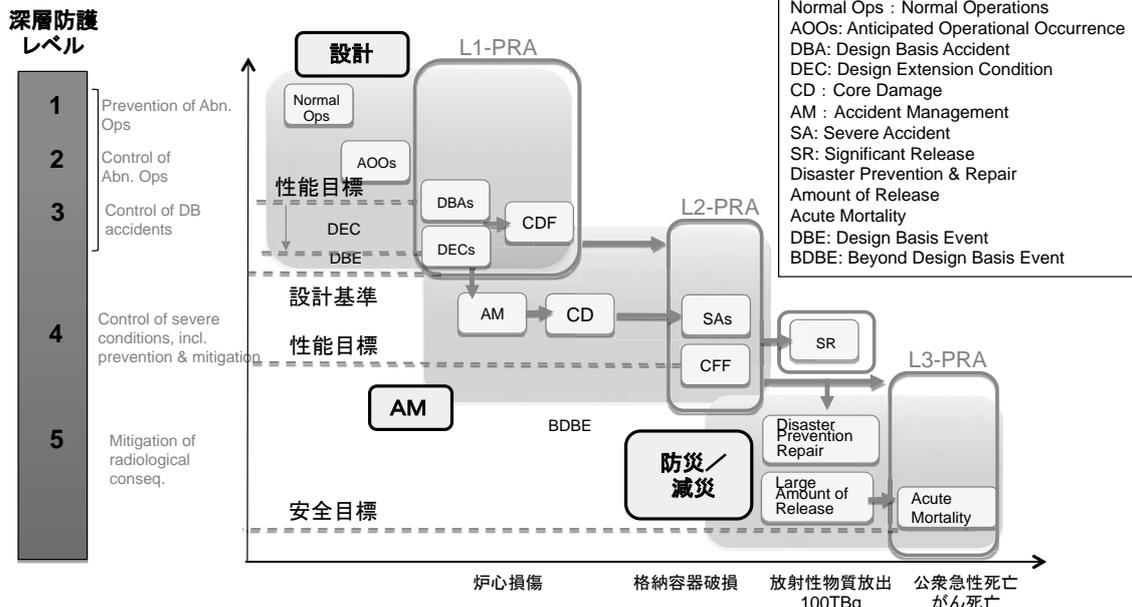


多段階のリスクマネジメントのスキーム





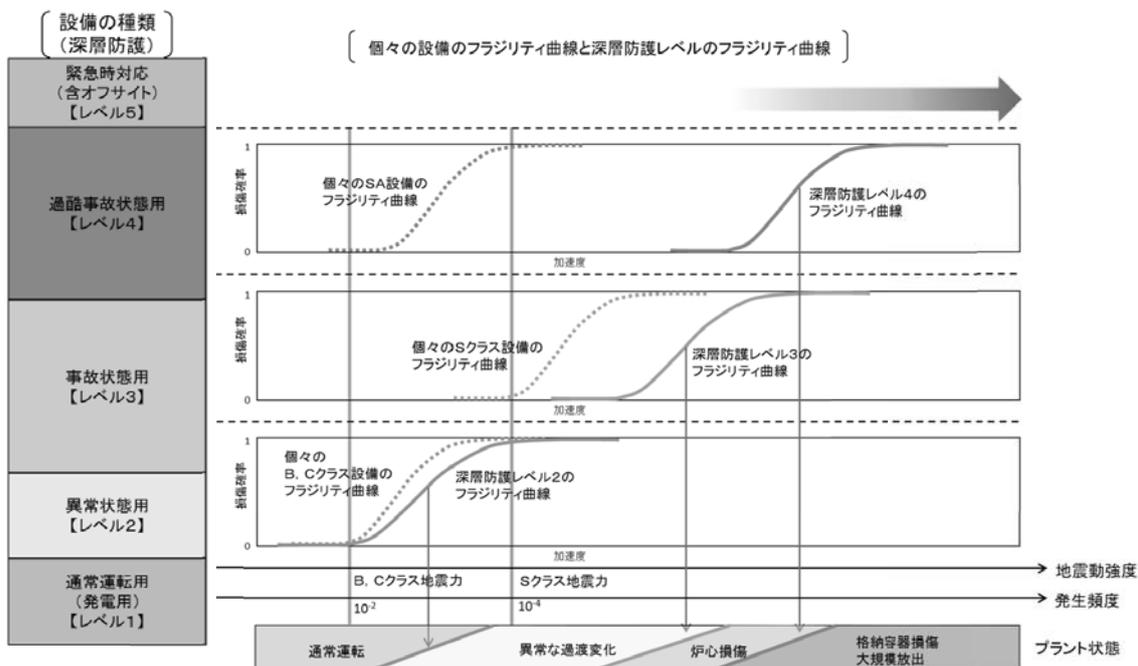
設計—AM対策—防災—リスク評価の領域



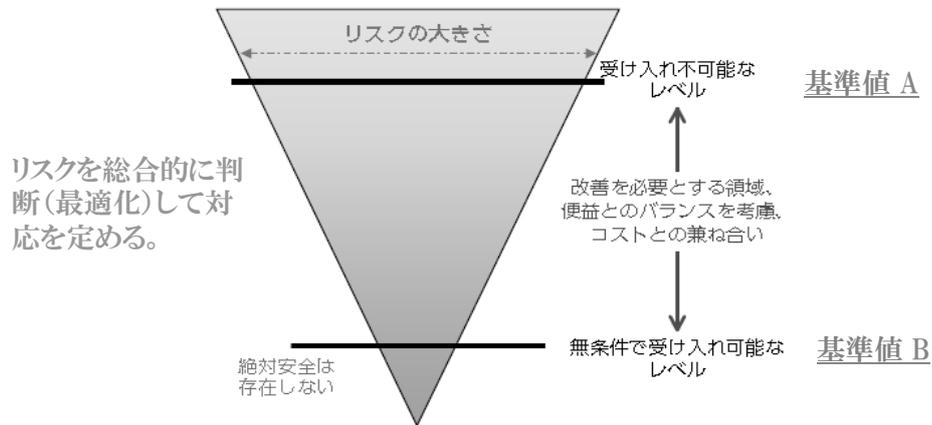
日本地震工学会(2015)、「原子力安全のための耐津波工学」報告書より



深層防護に基づく地震安全性確保の考え方



二種類の基準値(日本学術会議、2014)



個人の死亡リスクで表現すると、

- A: 10^{-3} /年 $\sim 10^{-4}$ /年
- B: 10^{-5} /生涯 $\sim 10^{-6}$ /生涯



今後の課題

1. 「地震安全の基本原則」策定
2. 安全性と供用性
3. 要求性能と深層防護レベルの関係
4. 要求性能のブレークダウン
5. 地震時の深層防護概念の有効性確保
6. プラント状態とプラント周辺
7. 確率論的アプローチと決定論的アプローチのバランス
8. リスク情報を活用したクライテリアの設定、安全目標の考え方
9. 深層防護の実装方法



危機耐性を考慮した耐震設計体系 構築への取り組み

本田利器

(東京大学)

地震工学委員会・耐震基準小委員会
危機耐性WG

背景

- 東日本大震災以降、極大事故に対する考慮という視点の重要性が認識されている
 - 「くしの歯作戦」等の成功例～レジリエンスへの要求
- 「危機耐性」概念
 - 土木学会原子力安全土木技術特定テーマ委員会「原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言(土木工学からの視点)」の提案
 - 一部は既に鉄道構造物の耐震設計にも導入
- 地震工学委員会・耐震基準小委員会「危機耐性WG」でも議論
 - ただし、原子力関係施設の設計は対象としない

「危機耐性」 定義(案)

- 狭義の設計段階*で想定していなかった事象においても、構造物が、単体またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないような性質
 - *狭義の設計:規定された外力への照査に基づく設計
 - (危機耐性WG)
- 崩壊へ至るプロセスを考慮し、社会への影響がより小さくなるように配慮すること
 - (性能設計WG)
- 要は:
(万が一)壊れた場合に、なにが起こり、なにができるかを考えた構造物のあり方

3

課題設定

- 概念としては古典的
 - 落橋防止, 曲げ先行破壊, 等, 優れた技術者であれば当然考えること
 - しかし, ある程度以上の実装は, 技術者の判断(≡責任)で実施する必要がある, 負担やリスクは大きい
- 実装に向けた議論が必要
 - 理論枠組み:「思考停止」を回避し, 適切な判断を促すための根拠となる論理を構築
 - 社会とインフラ: インフラは単体では無く, 社会との相互依存の中で機能する事を前提とした議論
 - 次世代の技術開発: イノベーションの受け皿となる制度設計

4

概念領域の拡張

- 従来の耐震性能では明示的に扱ってこなかった事象を考慮に入れる際に拡張する軸
- 事象(局面)の拡張～信頼性
 - 従来の設計では考慮していなかった局面を考慮
 - 様々な不確実要素が存在する環境においても、性能が保証されること
- 時間の拡張～レジリエンス
 - 「被災後」という時間を考慮
 - 社会のレジリエンスの実現に資すること
- 空間(システム領域)の拡張～社会との相互依存性
 - 地域や他のインフラとのネットワーク性の考慮
 - 複数のスケールでシステムとしての性能を満たすこと

5

基本的な考え方

- 「構造物の損傷」を中心に
 - 設計の前提は、設計地震動ではなく、構造物の被災・復旧シナリオ。いかに壊し、復旧させるか。(耐震性能WG曰く「コラプスコントロール」)
- 低確率では無く、次局面
 - 設計で想定する状態とは支配的な力学メカニズムが異なる事象を考慮
 - 従来の延長上でパラメタ値を変える(外力が20%増, 発生確率が1/10, 等)という観点ではない。
- 社会との関係性を考慮
 - インフラシステムにおける位置づけに加え、社会システムにおける位置づけを考える。
 - 地域防災計画, 周辺環境(建物種類, 作業空間), 建設業の状況(業者数, 重機数), 維持管理体制, 等を考慮し, その整備を要請する。
- 選択的に適用
 - 危機耐性能は、当該構造物の社会的な重要性や耐震性能等に応じて定められる。全ての構造物に適用する必要は無い。

6

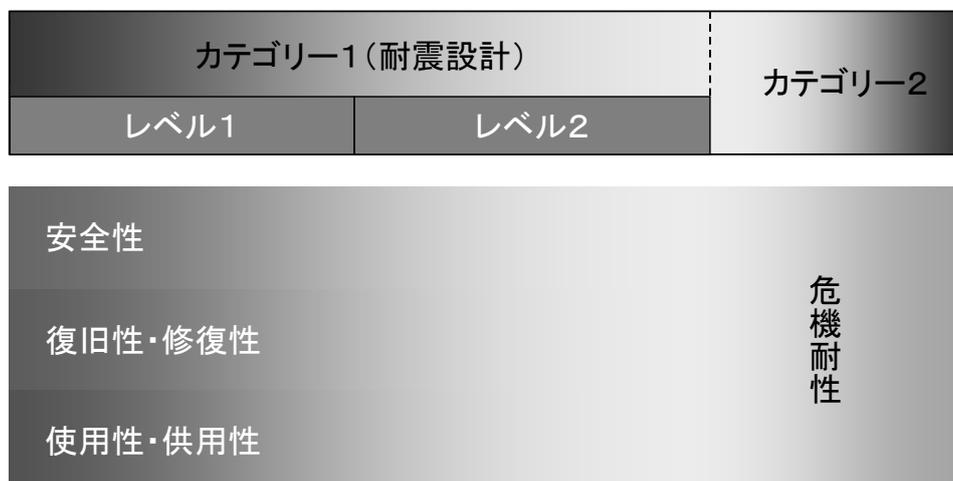
社会実装の要件

- 性能設計
 - その性質上, 仕様規定ではあり得ない
- 定性的評価
 - 定量的評価手法の有無は本質では無い
 - 低頻度な事象の「確率」の議論も要しない
- 整合性
 - 既存の耐震設計と両立可能であること
 - 既存の耐震設計を退化させるべきではない
- 客観性
 - 自由度の高い概念なので, 説明責任を果たせる仕組みが必要

7

既往の耐震設計との関係性

- 「実装の要件」を踏まえて位置づけを議論
- 危機耐性は「レベル3」ではない
- 「カテゴリー2」の位置づけは, 「品質」・「認証」・「配慮」?



8

設計手続き

1. 危機耐性能の規定：
 - 前提とする社会的条件も明記し，被災シナリオが満たすべき条件を，社会や施工者と共有できるようにわかりやすく記述する。
2. 状況設定：
 - 損傷シナリオの想定と対策。基本的には入力地震動を求めない。使う場合も，検証用の仮想的な外力と位置づける。
3. 構造計画：
 - 広域的・長期的な視野で方針を設定する。
4. 詳細設計：
 - 指針ではなく現象の適切な理解に基づき，先端技術を活用する。
5. 検証と妥当性確認(V&V)：
 - 危機耐性能が担保されることを確認する。

9

リスクガバナンス

- 社会的合意の形成と維持に不可欠
 - 「損傷を前提」は「不十分な安全性」を意味しない。
 - インフラのレジリエンスは、「ハコ物」ではなく，社会のリスクを減じる要素である。
- 社会がどう認知するかを分析して情報発信
 - 例：International Risk Governance Council の枠組では分析に大きいウェイト
 - Pre-assessment (リスクと社会環境の事前調査)
 - Appraisal (リスクの評価)
 - Characterisation and evaluation (リスクの性質の理解)
 - Management (リスクマネジメント)
 - Communication (リスクコミュニケーション)

10

戦略

- 実効性の確保
 - 巨大災害へのハードウェアの検証と備え
- 技術開発
 - 新たな研究分野としての確立
 - 分野横断的研究開発(水災害, 維持管理, 等)
- 制度
 - 発注制度: PPP, 総合評価方式
 - 認証制度: 産(学)主導もありうる選択肢
- 国際化
 - 世界的なレジリエンス研究の中でも卓越できる好機
 - ISO等を活用し, 海外展開への取り組みとして利用可能

津波に対する対策への取り組み

研究討論会：原子力土木委員会での危機耐性への取り組み

原子力土木委員会 津波評価小委員会

松山昌史(幹事長：電力中央研究所)

高橋智幸(委員長：関西大学)

構成

- 東日本大震災における原子力発電所に与えた津波の影響
- 津波評価小委員会活動の紹介
- 津波評価技術改訂版と危機耐性

2011年東北地方太平洋沖地震津波 原子力発電所における教訓

- 福島第一原子力発電所
 - ✓敷地内や原子炉建屋に津波が浸水。津波の規模の想定が不適切×
 - ✓浸水により冷却水ポンプ等の安全設備が被害×
 - ✓地下の設備は浸水に対して脆弱×
- 福島第二原子力発電所
 - ✓非常用電源の確保などにより冷却に成功○
- 女川原子力発電所
 - ✓敷地高が15mと津波高より高く、敷地内に浸水しなかった。○
 - ✓取水路から建屋の地下に浸水した。×
- 東海第二発電所
 - ✓ポンプ施設の防潮堤天端高が津波高より高く、ポンプ全体は浸水しなかった。○
 - ✓工事により防潮堤下のダクトなどから浸水して、ポンプの一部が浸水した。×
- 原町火力発電所
 - ✓敷地高よりはるかに大きな津波高により大きな被害を受けた。
 - ✓発電所の港湾の防波機能はほぼ維持された。(他の原子力発電所も)

近隣住民の緊急的な避難

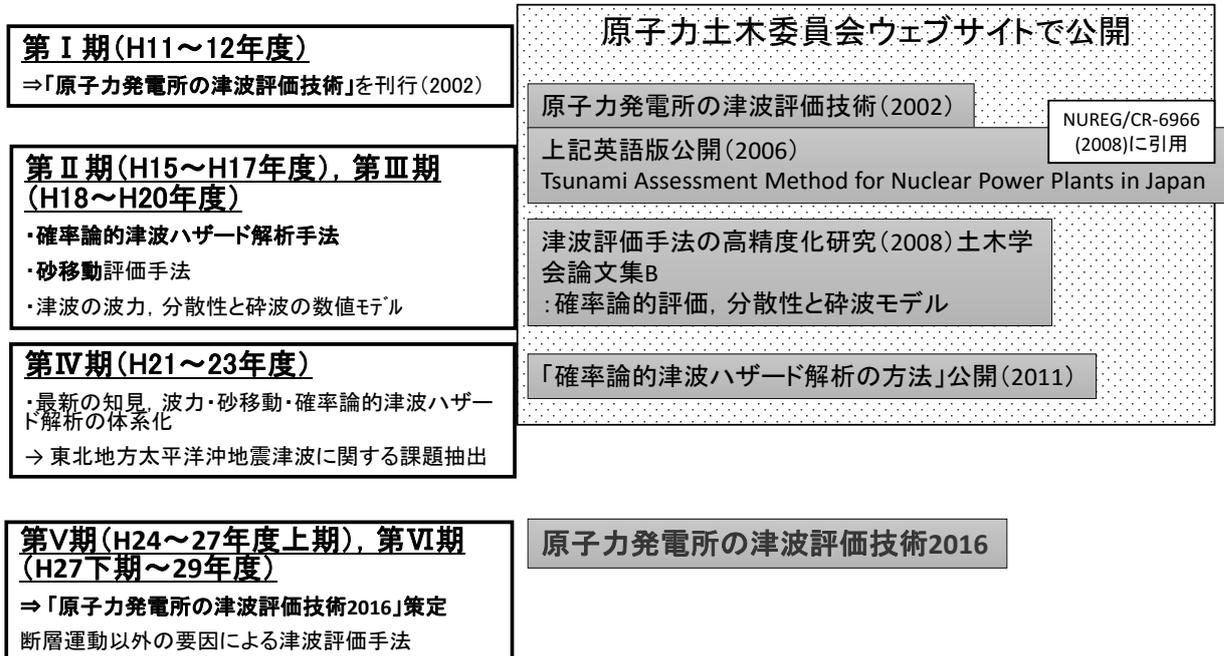
- ✓ 海水の浸水影響設備・機器に大きな影響
- ✓ 複数の経路から浸水

津波対策例：川内原子力発電所



<https://www.nsr.go.jp/data/000035556.pdf>

津波評価小委員会の活動



2. 東北地方太平洋沖地震津波の教訓

東北地方太平洋沖地震津波の教訓

福島第一原子力発電所事故

- IAEA²⁾
 - 自然ハザードの予測における十分な不確定性の考慮
 - 知見の進歩 → 定期的な再評価、是正措置の速やかな実施
 - 設計基準 or それを越える状態に対する備え

土木学会³⁾

「危機耐性」という新たな性能

日本原子力学会⁴⁾

「自然災害への対応不備」、「過酷事故対策への不足」 深層防護

日本機械学会⁵⁾

「大規模システムのシステム・インテグレーション」
 「デザインベースの考え方、“Beyond”への対応」

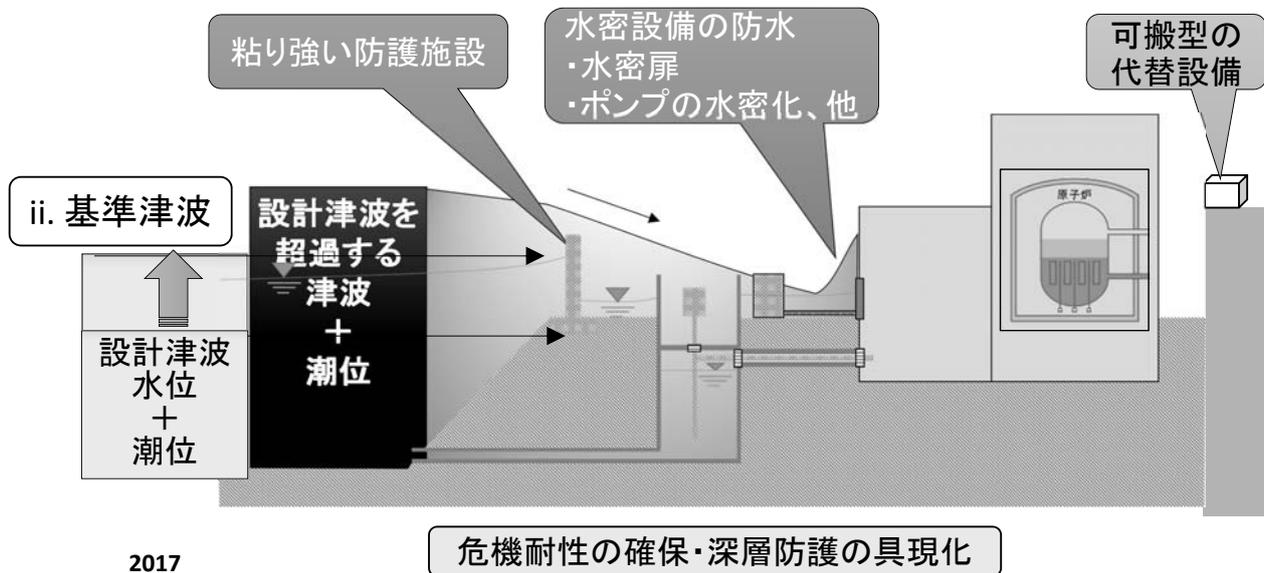
PRAなどのリスクマネジメントを必須知識に

- 設計基準の津波水位を超える津波に対する備え
- 設計基準の津波水位設定に不確かさを適切に考慮

新規制基準と津波防護：2011年以後

- i. 設計基準の津波水位を超える津波に対する備え
- ii. 設計基準の津波水位設定に不確かさを適切に考慮

i. 津波防護の多重化：重要な設備や建屋への影響を低減



耐津波工学報告書：日本地震工学会

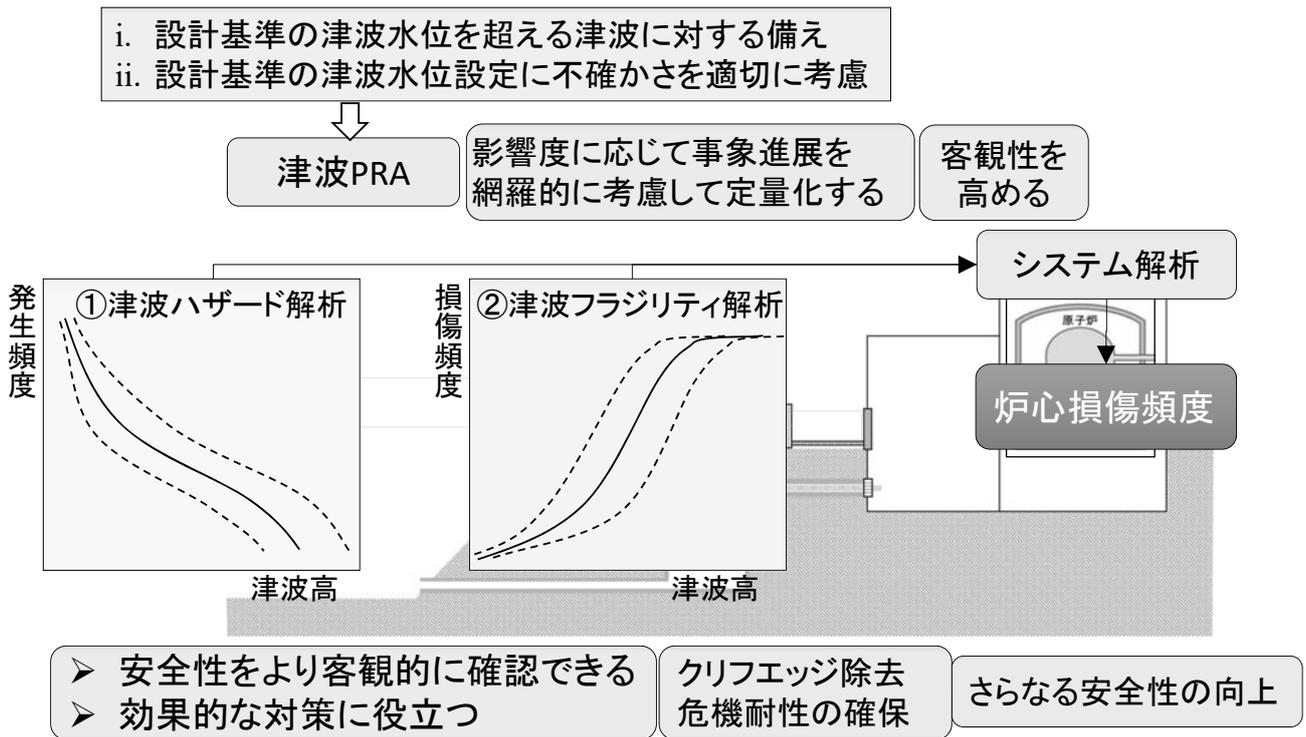
- ・「原子力安全のための耐津波工学—地震・津波防御の総合技術体系を目指して—」(協力機関：日本原子力学会標準委員会)

- ① 工学技術の把握
 - ・ 事故シナリオ+要求性能+作用・影響・工学的方法+社会との関わり
- ② 深層防護とリスク論の位置づけの明確化
 - ・ バランスある深層防護の全体像
- ③ リスク論に基づく地震・津波安全評価体系の明確化
 - ・ 設計とリスク評価の連携、リスク(連続系)と深層防護(離散系)の相互連関
- ④ 分野横断的討議をふまえた総合的視野の構築
 - ・ 各章関連図(図1-2)、コラム
- ⑤ 総合工学的枠組みを「原子力安全の耐津波工学」として体系化

- リスク論に基づく深層防護の具現化
- 上記に必要な技術の整理



津波PRAの必要性



原子力発電所の津波評価技術2016(2016年版)

・2016年版の趣旨

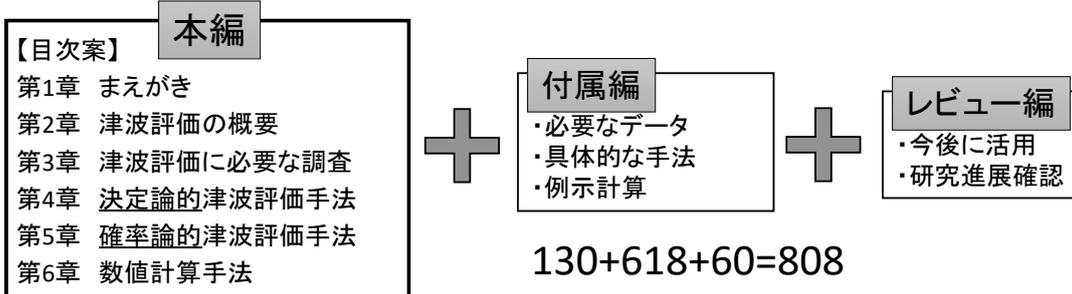
東北地方太平洋沖地震等の2002年以降の新たな知見

① 津波の想定に関連する要素技術を取りまとめる。

- ・ 他学協会等の安全性向上の考え方に従い、原子力発電所の安全性評価のための津波評価を行う際の最新の知見・要素技術を織込んだ技術参考書

② 敷地浸水も考慮し、波力等に関する各種評価手法についても取りまとめる。

- ・ 設備に対する津波の作用(浸水深や波力等)評価に有用な要素技術を記述
- ・ 原子力発電所全体の安全性を検討するには広範囲の専門家の知見が必要



2016年版での追加項目例(2002年版に無い)

本編 2.3 P.9

➤発生要因

- 地震
 - ✓プレート境界付近で発生する地震
 - ✓陸域の浅い地震
- 地震以外
 - ✓海底地すべり
 - ✓斜面崩壊
 - ✓火山現象(山体崩壊, カルデラ陥没等)
- 発生要因の組み合わせ
 - ✓因果関係を有する波源の組み合わせ



Wikipediaより

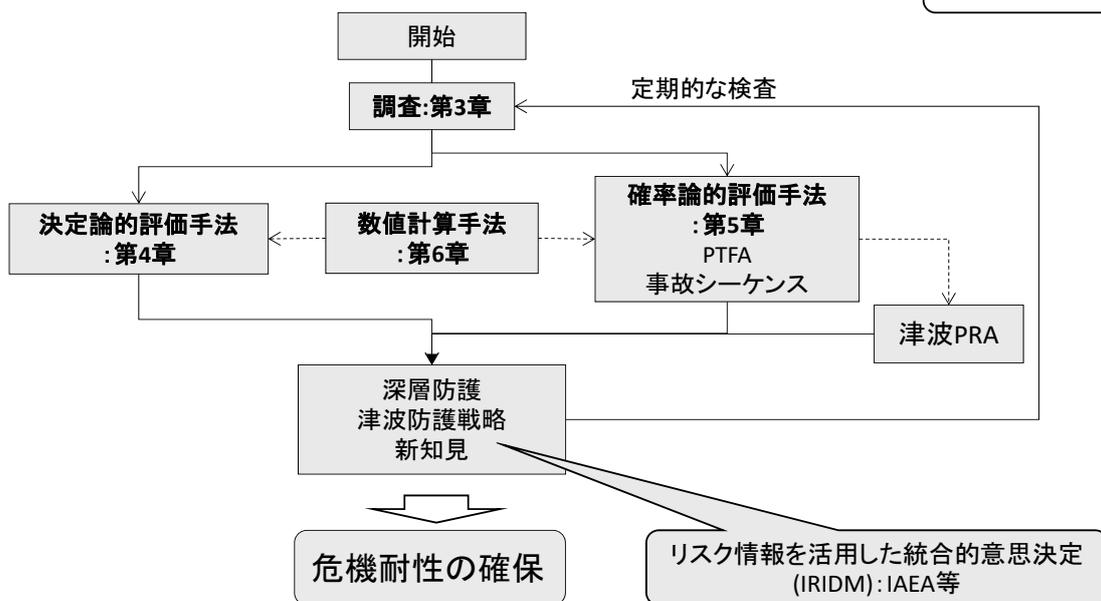
➤津波作用

- 水位上昇による浸水, 被水, 没水
- 取水に影響を及ぼす水位下降
- 津波による流体力(圧力, 波力, 浮力等)
- 砂移動による地形変化(侵食, 堆積, 洗掘)
- 漂流物発生と漂流, その衝突

青字:改訂版で追加

本編各章の役割

本編 2.5 P.10-11



津波に関するリスク評価に必要と考えられる津波評価に関する技術

参考

2. 東北地方太平洋沖地震津波の教訓

新規制基準による安全性評価

- i. 設計基準の津波水位を超える津波に対する備え
- ii. 設計基準の津波水位設定に不確かさを適切に考慮

• 新規制基準⁶⁾⁷⁾

→ i. 耐津波設計方針

- 基準津波の敷地への流入防止
- 津波防護の多重化
 - 重要な安全機能を有する施設の浸水防護

ii. 基準津波

- 最新の科学的・技術的知見を踏まえて基準津波を設定
- 地震のほか、地すべり、斜面崩壊等地震以外の要因
- これらの組み合わせ

2つの教訓に対応：安全性が向上

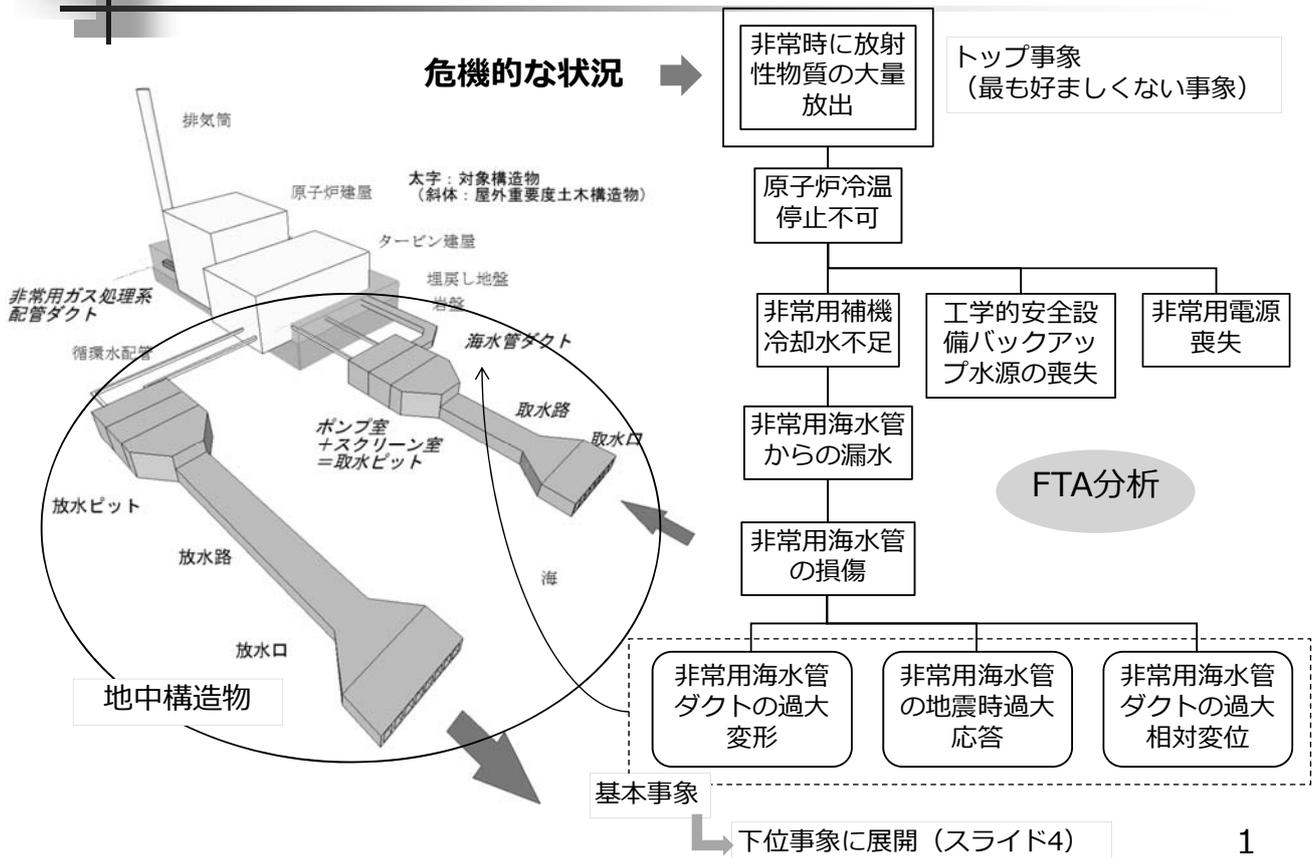
屋外重要土木構造物の取組み

(一財) 電力中央研究所 大友敬三

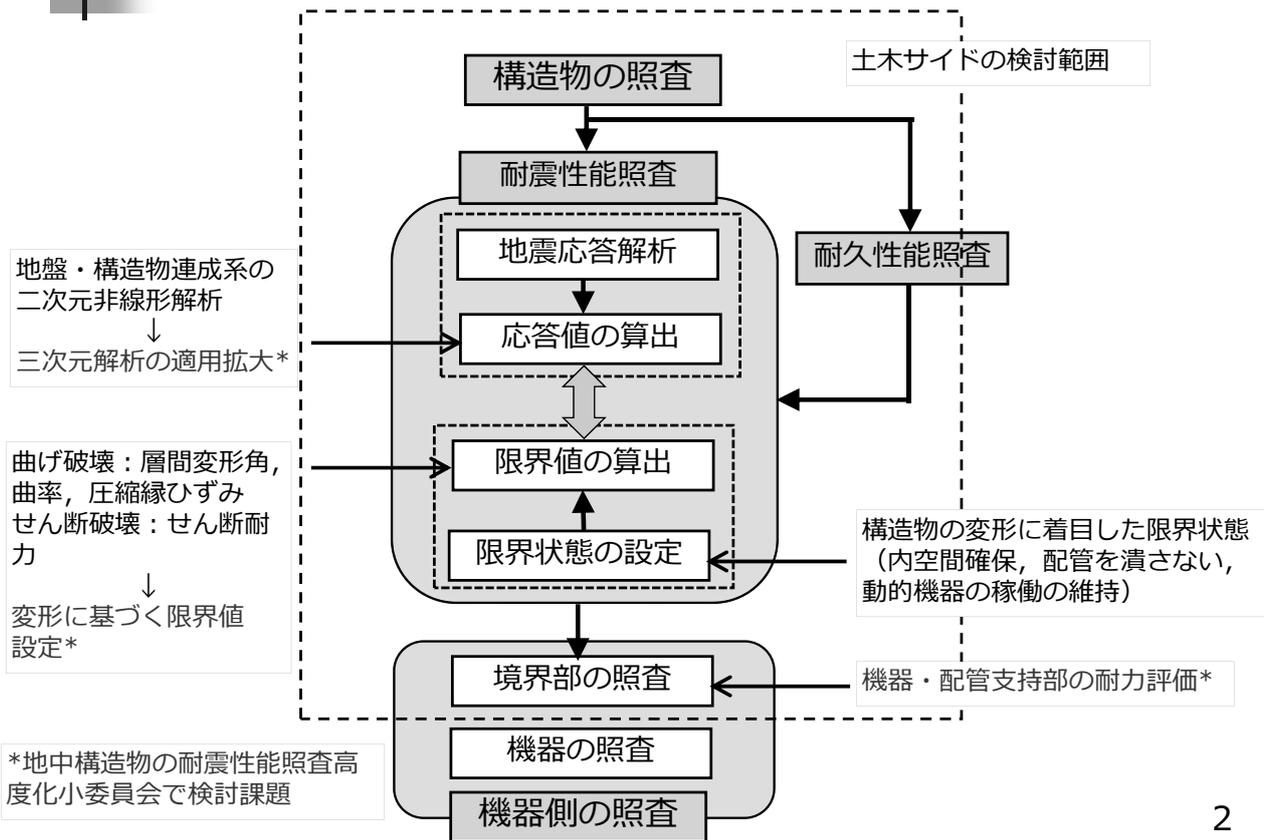
原子力土木委員会

地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会 委員

屋外重要土木構造物に求められる危機耐性とは



屋外重要土木構造物の耐震性能照査の現状



2

深層防護における危機耐性の位置づけ

原子力安全土木技術特定テーマ委員会
「原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言」(2013.7)

- ・深層防護の第4層（影響緩和）に貢献する土木工学的課題として「危機耐性」を提案。
- ・「危機耐性」の確保には個々の施設や構造物の壊れ方およびその波及効果を理解し、緊急手段を含めて総合的に「危機耐性」を確保する必要がある。

深層防護レベル	設計/対策	対象とする事象
第1層（異常防止）	安全性能（耐震性能）	設計基準内事象（既知）
第2層（発生防止）		
第3層（拡大防止）		
第4層（影響緩和）	シームレスな連携 (AMを阻害しない)	設計基準外事象（未知） ↓ 被災シナリオ
第5層（防災）		

危機耐性

AM（アクシ
デントマネジ
メント）

危機耐性を高める示唆

3

危機耐性的な挙動の例 ～耐震裕度～



3号機取水路*



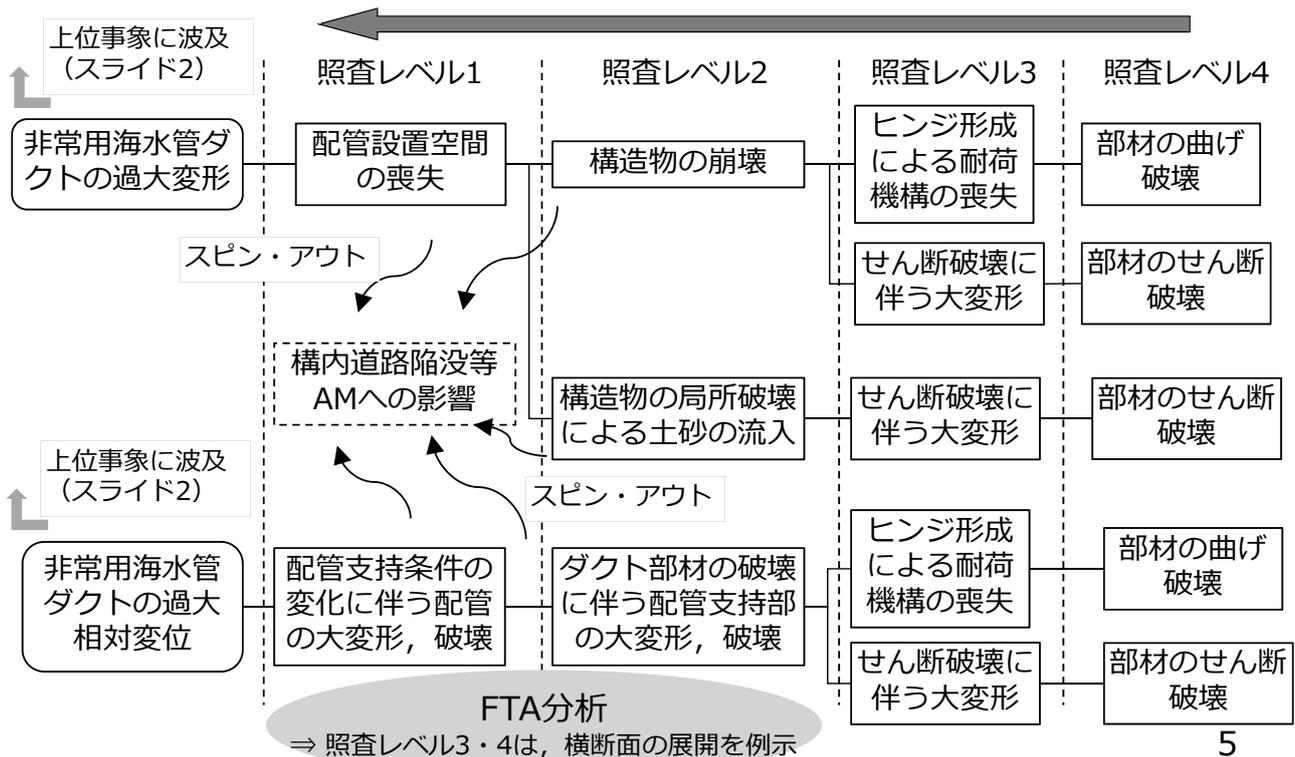
2号機海水ポンプ室（除塵機エリア）*

- ・東北電力（株）女川原子力発電所では、2011年東北地方太平洋沖地震により発電所敷地において一部の周期帯で基準地震動を超える地震動を経験。
- ・屋外重要土木構造物においては、耐震性に影響を及ぼすような変状は確認されていない。
- ・地震応答解析によっても、部材の曲げ破壊・せん断破壊に対する裕度を確認。

*東日本大震災合同調査報告土木編5「原子力施設の被害とその影響」より引用

海水管ダクトの被災シナリオ（限界状態）抽出

より上位レベルの限界状態の照査を指向することにより、危機耐性を担保



危機耐性を高めるための方策例

基本戦略

地中構造物の不静定構造のアドヴァンテージを活かした耐震構造計画の配慮・充実

脆性的破壊形態の回避

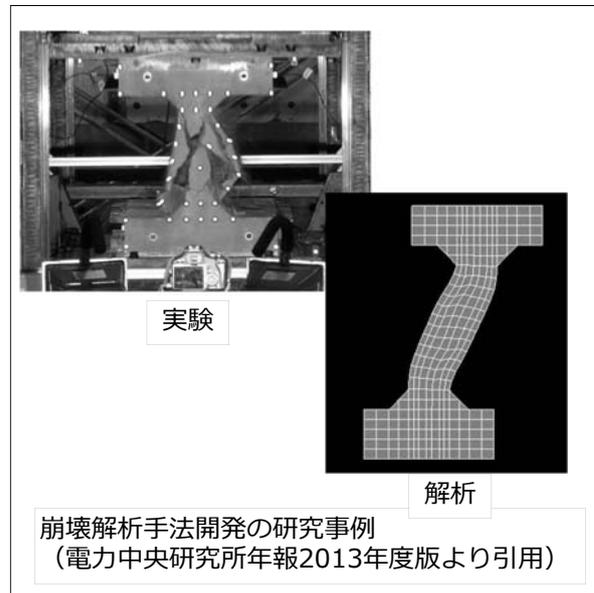
- ◆ プッシュオーバー解析
- ◆ 崩壊構造解析
- ◆ ...

復旧性・補修性の配慮

- ◆ 配管支持方式のリダンダンシー
- ◆ 部材の圧縮破壊領域を限定・局所化
- ◆ 復旧活動環境への影響軽減
- ◆ ...

損傷制御の導入

- ◆ 破壊順序の制御
(配管は保護；水平部材→鉛直部材)
- ◆ 添え柱（ヒンジ支承・すべり支承）
- ◆ ...



6

危機耐性確保に向けた課題

制度面

- ◆ 事業者のインセンティブはどのように得られるか？
- ◆ 安全性向上評価書（FSAR）へ反映されるか？

技術面

- ◆ 供用中の既設構造物に対して耐震構造計画をどのように配慮するか？
- ◆ 耐震裕度向上のための設備改造，材料強度や設計時の保守性を期待して良いか？
- ◆ 確率論的安全評価（PRA）によるリスク評価枠組みとの関係は？

人材面

- ◆ 危機耐性に向けたマインド醸成をどのように継続させるか？
- ◆ 原子力，機械，電気，建築，土木等の各分野の意識共有図れるか？

7