



日本原子力学会標準

「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」

標準概要及び 地震重畳等を考慮した改定

2016年10月21日

日本原子力学会 標準委員会 津波PRA作業会

電力中央研究所 NRRC 桐本 順広

津波PRA標準策定の背景

◆2011年3月11日の意味

- 14時46分に東北地方太平洋沖地震が発生
 - 福島第一原子力発電所で外部電源喪失
- その40分後から津波が相次いで襲来
 - 福島第一原子力発電所で全交流電源喪失と最終ヒートシンクの喪失
 - 炉心損傷, 燃料溶融, 放射性物質の放出
 - 原子炉建屋での水素爆発
 - 原子炉建屋内の燃料プールも冷却が不十分

◆日本原子力学会、標準委員会、リスク専門部会

- 津波PRA分科会を設置して津波PRA実施基準を作成
- 津波リスクを評価することが喫緊の課題であるとの判断
- 外的事象, 特に地震とそれに随伴する事象のリスクに起因する包括的なリスク評価を求める標準

各原子力発電所への津波浸水範囲

- 福島第一原子力発電所ではタービン建屋, コントロール建屋等の主要な建物まで浸水。
- 他の発電所では福島第二1号機のみ津波遡上により原子炉複合建屋に被害があったが, 海沿いの施設のみ浸水であった。

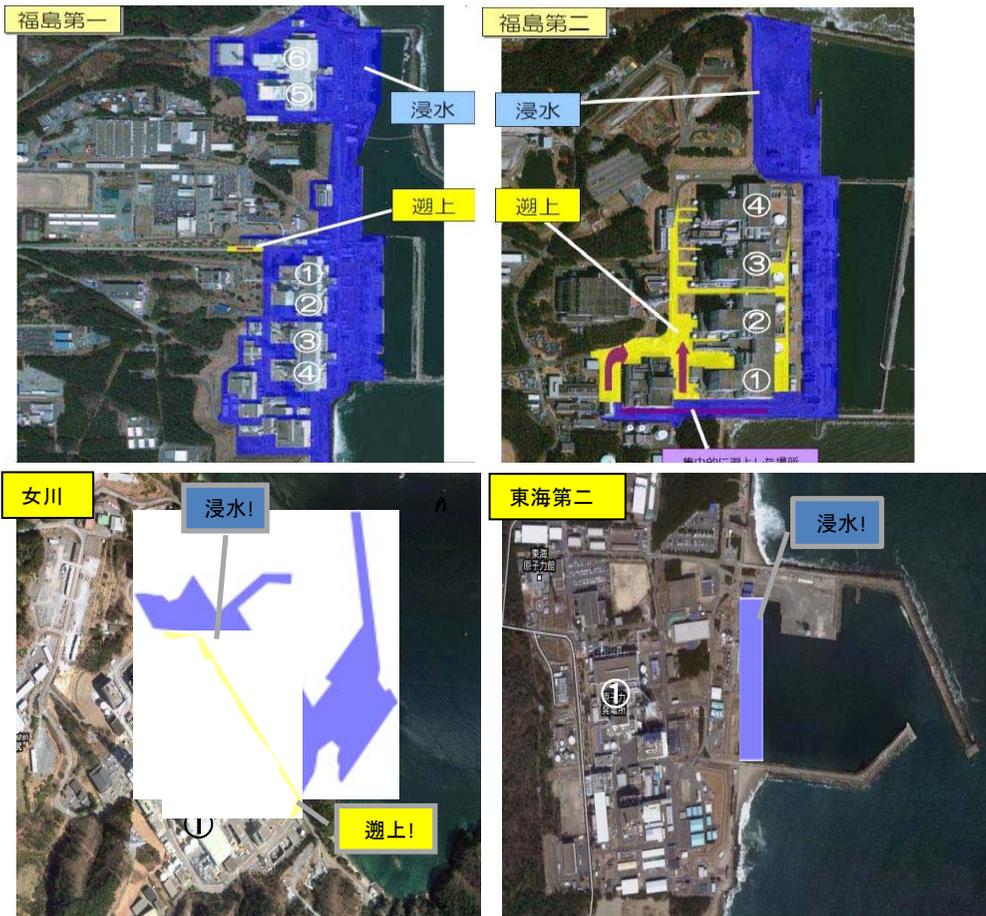


表. 津波の被害を受けた4発電所の比較

	福島第一!	福島第二!	女川!	東海第二!
敷地! 高さ!	1~4号機:! 10m! 5~6号機:! 13m!	12m!	14.8m!	8m!
想定津波高さ※!	5.4~! 5.7m!	5.1~! 5.2m!	9.1m!	4.9m!
津波遡上高さ!	14~! 15m!	6.5~! 7m! (1号機建屋南側のみ! 14~! 15m)!	13m!	5.4m!

新潟県技術委員会、Google等の公開資料に保安院が加筆

※: 土木学会の手法による平成14年評価値

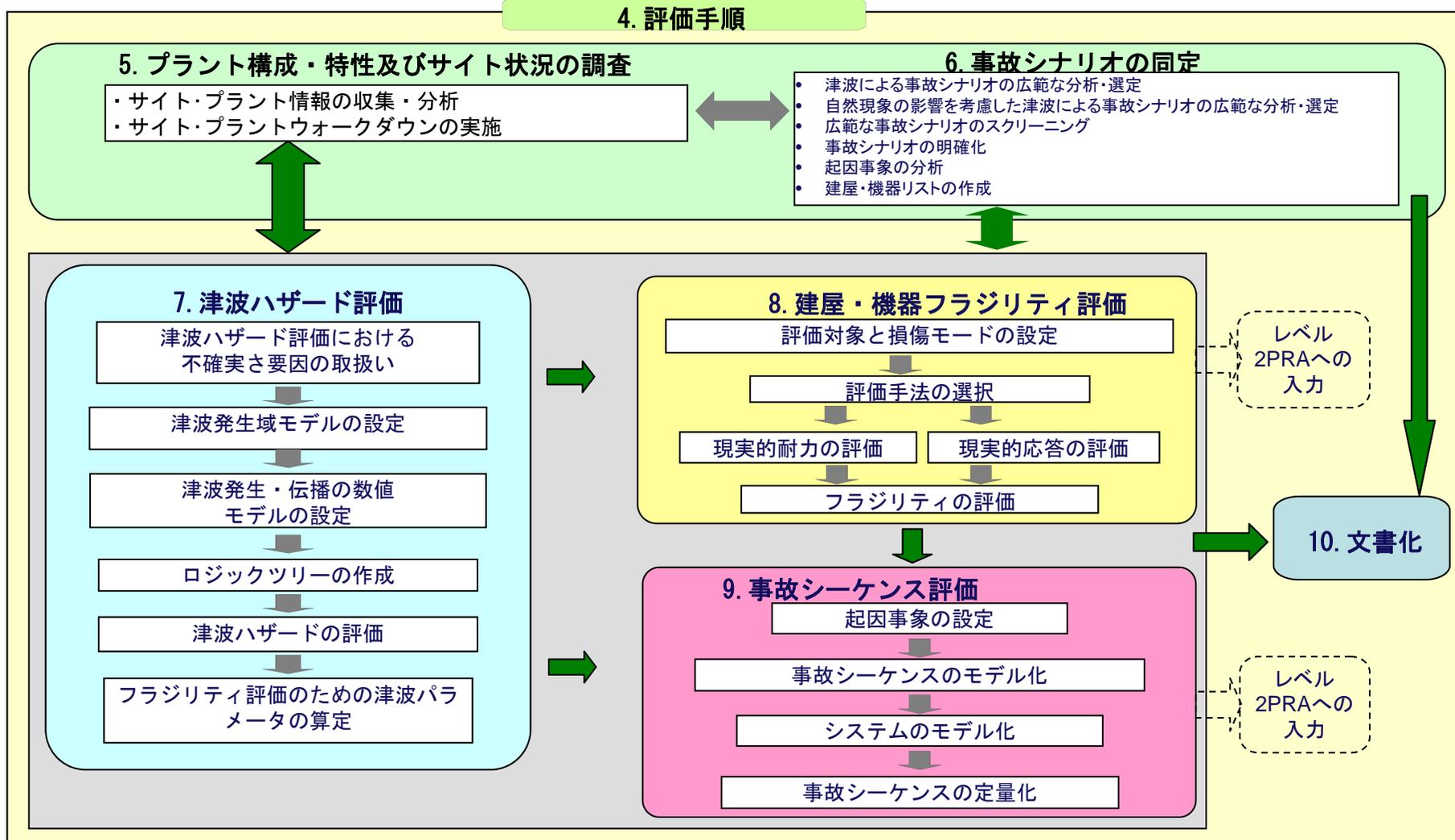
津波PRA並びに外部事象PRAへのアプローチ

- 外部事象PRA標準に対する**段階的アプローチ**
 - 第1ステップ: 津波単独のリスクを評価⇒**策定済**
 - 第2ステップ: 地震と津波の重畳, 地震以外の要因による津波の評価 ⇒**今回の改訂作業**
 - 第3ステップ: 他の外部事象(火災、内部溢水)のリスク評価 ⇒ **火災PRA分科会, 内部溢水PRA分科会 等**
 - 第4ステップ: 地震起因の火災、溢水のリスクを評価
- 津波PRA標準は, 最新知見及び評価事例の取り込みを行うため, 標準とは**別冊**となる「**適用事例集**」を作成し、**随時反映・更新を可能**とすることした。

津波PRA標準策定及び改定の経緯

- ◆ 津波単独のリスクを評価する、津波PRA標準(SC-RK004:2011) (2012年2月)発行
- ◆ 更に最新知見の事例等を含む「津波PRA適用事例集(SC-TR006:2012)(2013年4月)発行
- ◆ 津波PRA標準英訳版(SC-RK004E:2011) 発行
- ◆ 地震PRA改定状況、土木学会の検討状況等を把握しながら、第18回分科会(2013年5月)より、地震随伴津波に対する改訂作業の検討を開始。
- ◆ 第24回後に、外的事象PRA分科会下の津波PRA作業会に移行。第6回作業会で津波PRA標準改定案を作成
- ◆ 第4回外的事象PRA分科会でリスク専門部会への最終報告承認+コメント
- ◆ 第37回リスク専門部会で本報告及び投票移行への承認→可決
- ◆ 第7回作業会にて投票コメントへの対応/修正を実施
- ◆ 第5回外部事象PRA分科会/第38回リスク専門部会にコメント対応結果報告
- ◆ 第65回標準委員会(6/15)本報告/決議投票に移行 賛成20 意見保留1
- ◆ 第67回標準委員会(12/7)で意見/コメント対応報告**予定**

津波PRA標準 評価手順(改定版)



品質保証活動, 専門家判断の活用, 及び, ピアレビュー

津波PRA標準改定の方針(1)

◆ 地震によって発生する津波、及び地震以外の要因による津波に起因して炉心損傷に至る事故シーケンスを適用範囲とする津波PRA標準への改訂

- **地震によって発生する津波**に対する標準改定作業を進め、地震により設備の一部が損傷した状態での津波リスクの定量化手法を標準化する。また地震以外の要因による津波にも適用可能とし、地震影響がない津波のみの**従来の評価も本標準に含む**。

◆ 最新規格及びその記載事項の反映

- 近年改定された標準規格を**策定状況を判断しながら可能なかぎり取り込む**。また、記載内容についても最新の他規格の状況を反映し、「**レベル2PRAとの関係**」、「**文書化項目の例に関する附属書**」等の追加を行った。

津波PRA標準改定の方針(2)

◆ 津波ハザード曲線の定義位置の選定手順

津波遡上評価における構造・機能的損傷の反映

- 津波ハザード曲線の定義位置(コントロールポイント)の選定手順, 津波高さから fragility 評価に必要な建屋・機器設置地点での津波パラメータ(浸水深, 流速等)の不確かさの評価手順, 遡上評価 等

◆ 地震PRA標準:2015等の記載に連携した各実施項目への影響評価の追加/改定

- 情報収集項目の追加、事故シナリオの自然現象の考慮による分析、ハザード評価の地震動と津波の結合確率評価等の追記、建屋・機器 fragility における地震影響、起因事象及び炉心損傷評価における地震影響を追加。土木学会原子力土木委員会津波評価部会の最新報告内容等を反映。



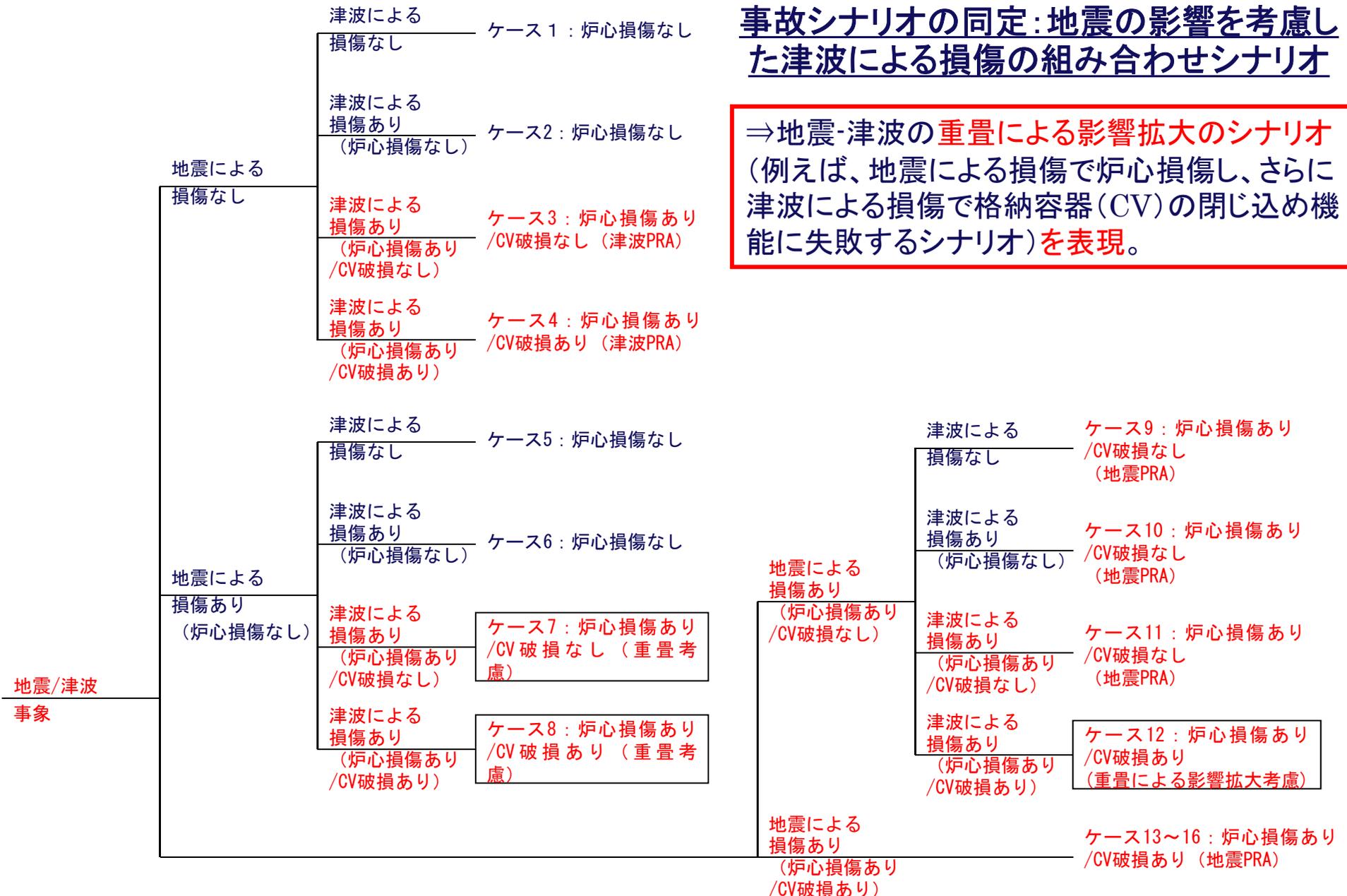
改定時に新知見を反映した主な附属書

- ◆ 附属書A(規定)事故シナリオの同定における実施手順
- ◆ 附属書G(参考)津波ハザード評価
- ◆ 附属書H(参考)地震動と津波の結合確率評価方法
- ◆ 附属書J(参考)評価対象物と配置状況の例
- ◆ 附属書K(参考)津波による被害事例
- ◆ 附属書L(参考)損傷モード及び部位の抽出例
- ◆ 附属書P(参考)漂流物衝突及び洗掘に対する現実的応答の評価方
- ◆ 附属書Q(参考)洗掘解析例
- ◆ 附属書R(参考)建屋の浸水解析例
- ◆ 附属書S(参考)屋外重要土木構築物の溢水・浸水解析例



事故シナリオの同定:地震の影響を考慮した津波による損傷の組み合わせシナリオ

⇒地震-津波の重畳による影響拡大のシナリオ (例えば、地震による損傷で炉心損傷し、さらに津波による損傷で格納容器(CV)の閉じ込め機能に失敗するシナリオ)を表現。





まとめと今後のスケジュール

まとめ

- ◆津波単独のPRA標準から、地震を起因とする津波及び地震以外の要因による津波のPRA標準への改定
- ◆改訂版地震PRA標準:2015と連携した各実施項目への記載の改定を多岐に実施
- ◆新知見を反映した附属書を多数追加、一方で最新論文や最新知見の取り込みは標準本体の改定に依存せずに適宜、適用事例集に反映

今後のスケジュール

- ◆最新知見を反映した適用事例集の追加・改定
- ◆英語版改定の検討



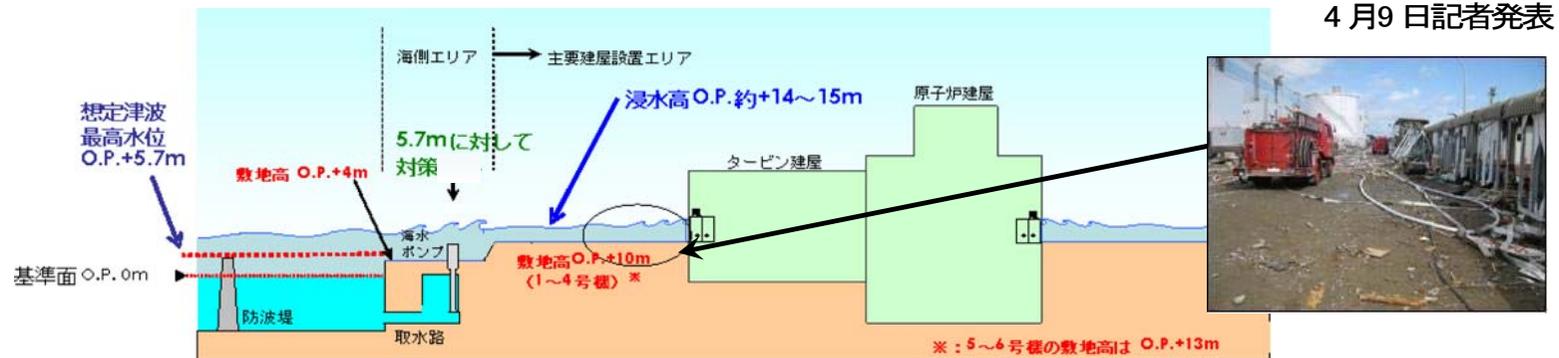
Backup Slide

各原子力発電所への津波来襲状況

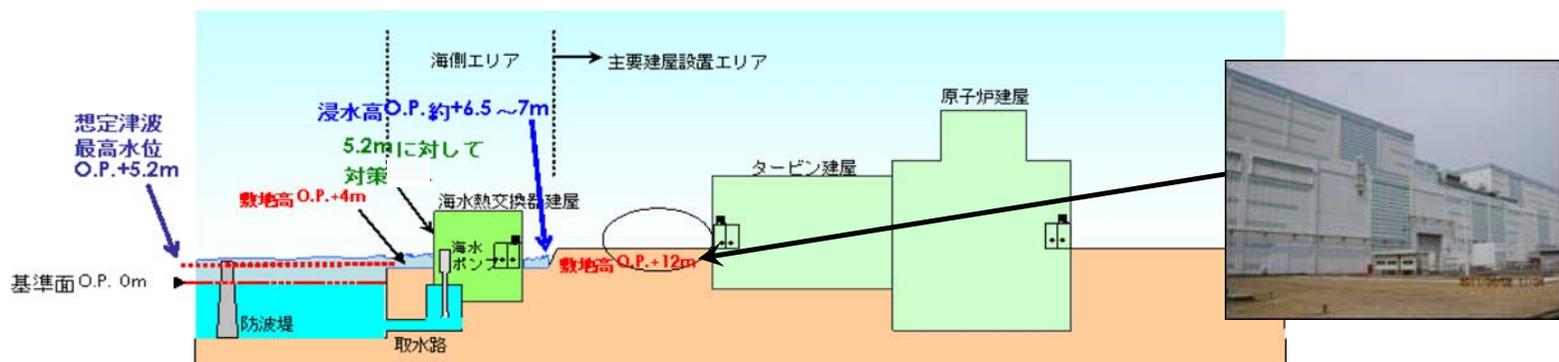
○福島第一原子力発電所では主要な建物(タービン建屋, コントロール建屋等)が浸水し, 建屋開口部から建屋内に海水が流入。特に海に近いタービン建屋では, 地下階が水没するなど被害が著しかった。また海沿いに設置された屋外設備(海水ポンプ等)が水没し, 機能喪失した。

○福島第二原子力発電所では海沿いの海水熱交換器建屋は開口部から海水が流入し, 一部水没したものの, 主要な建物は1号機原子炉複合建屋を除き, 海水流入はなかった。

〔福島第一原子力発電所〕



〔福島第二原子力発電所〕

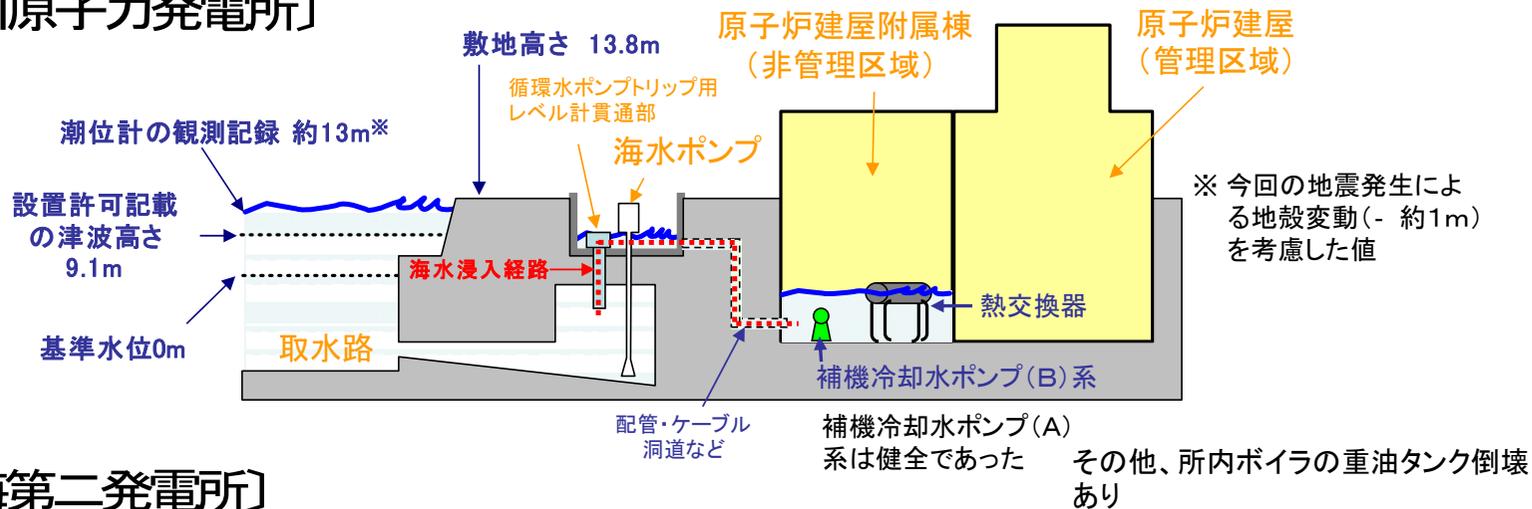


各原子力発電所への津波来襲状況

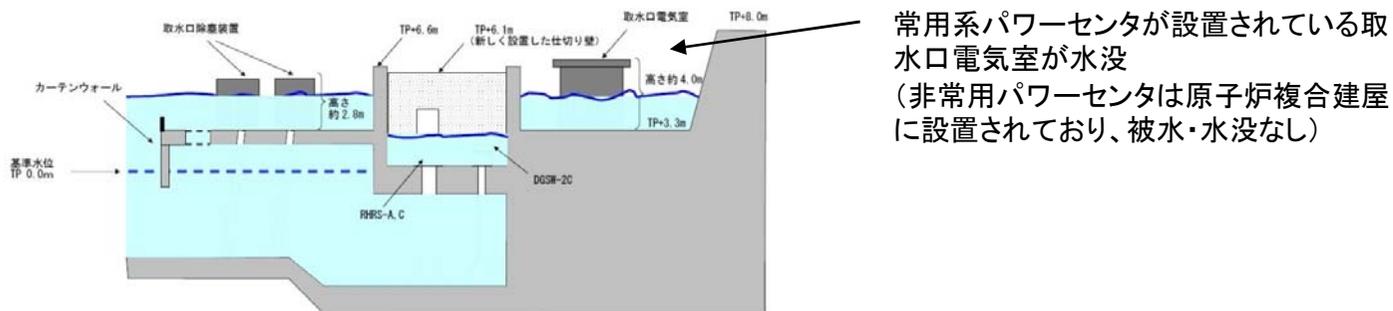
○女川原子力発電所では2号機で海蔵位の施設に流入した海水が原子炉建屋附属棟まで達し、補機冷却系熱交換器室の一部の機器が被水した。これ以外には他の号機を含めて主要な建物には海水の流入はなかった。

○東海第二発電所では津波対策を実施途中の一部の海水ポンプ等が被水したが、主要な建物には海水の流入はなかった。

〔女川原子力発電所〕



〔東海第二発電所〕



取水口周りの高さ関係を示した概略図

○ 津波PRAの評価手順

「5. プラント構成・特性及びサイト状況の調査」

- ・設計図面や運転マニュアルなどの書類
- ・サイト・プラントウォークダウン



- ・サイト(発電所)及びプラントの設計・運転・保守管理
- ・津波PRA特有の配置情報, 敷地高さ, 開口部など **情報収集**

「6. 事故シナリオの同定」

地震による津波, その他の自然現象による津波を考慮して被災を広く選定, 事故シナリオを明確化

「7. 津波ハザード評価」

- ・津波ハザード評価における不確実さの要因分析
- ・津波発生モデルの設定
- ・津波発生・伝播の数値モデルの設定



津波ハザードを求める

「8. 建屋・機器フラジリティ評価」

- ・建屋・機器と損傷モードを設定
- ・現実的な耐力・応答評価



建屋・機器のフラジリティ曲線を求める

「9. 事故シーケンス評価」

- ・起因事象の設定
- ・事故シーケンスのモデル化
- ・システムのモデル化



事故シーケンスを定量化

○ レベル2PRAとの関係 (レベル1PRAよりレベル2PRAに以下を引き継ぐ)

- ・格納容器健全性又はソースターム評価に必要な建屋・機器フラジリティ評価結果
- ・レベル2PRAへのインターフェイスとなるプラント損傷状態ごとに事故シーケンスの最終状態を分類

○ 津波PRAの品質を確保するための方策

✓ 次の3項目をAESJ-SC-RK006:2013(PRA品質確保標準)により実施する。

- ・品質保証活動
- ・専門家判断の活用
- ・ピアレビューの実施

適用範囲

- ◆ この標準は、出力運転状態にある軽水型原子力発電所を対象とする確率論的リスク評価 (Probabilistic Risk Assessment: PRA) のうち、地震によって発生する津波に起因して炉心損傷に至る事故シーケンスに着目し、それらの発生頻度を求めるレベル1PRAの有すべき要件及びそれを満たす具体的方法を、実施基準として規定する。この標準は、地震以外の要因による津波に起因するPRAにも適用できる。【解説2.1適用範囲とする津波について 参照】【解説2.2地震による影響の考慮について 参照】【解説2.3レベル1PRAのみを対象としたことについて 参照】
 - ◆ なお、本標準は、高速増殖炉に対しても適用可能である。その場合には、高速増殖炉に固有の安全設計上の特徴、機器・システム及び建物・構築物の配置などを十分に考慮しなければならない。【解説2.4高速増殖炉への適用 参照】
- 本標準では、地震によって発生する津波、及び地震以外の要因(陸上の山体崩壊物(斜面崩壊含む)の海中突入、海底地すべり、火山現象(山体崩壊またはカルデラ陥没))に起因して発生する津波についても適用範囲とする。設定の取扱は「7.3.8地震以外の要因の津波」に規定する。

変更点のポイント

5.プラント構成・特性及びサイト状況の調査

◆地震による影響の考慮に地震PRA標準に準ずる実施を記載

6. 事故シナリオの同定

◆「6.2 自然現象の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定」を追加。地震及びその他の自然現象による津波による事故シナリオの考慮

◆「附属書A.3(規定) 地震の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定」において、地震及び津波の損傷の影響があるシナリオの組合せとスクリーニングについて記載

変更点のポイント

6. 事故シナリオの同定

◆「6.2 自然現象の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定」を追加。地震及びその他の自然現象による津波による事故シナリオの考慮を記載

◆「附属書A.3(規定) 地震の影響を考慮した津波による事故シナリオの広範な分析・選定」において、地震及び津波の損傷の影響があるシナリオの組合せとスクリーニングについて記載

変更点のポイント

7. 津波ハザード評価

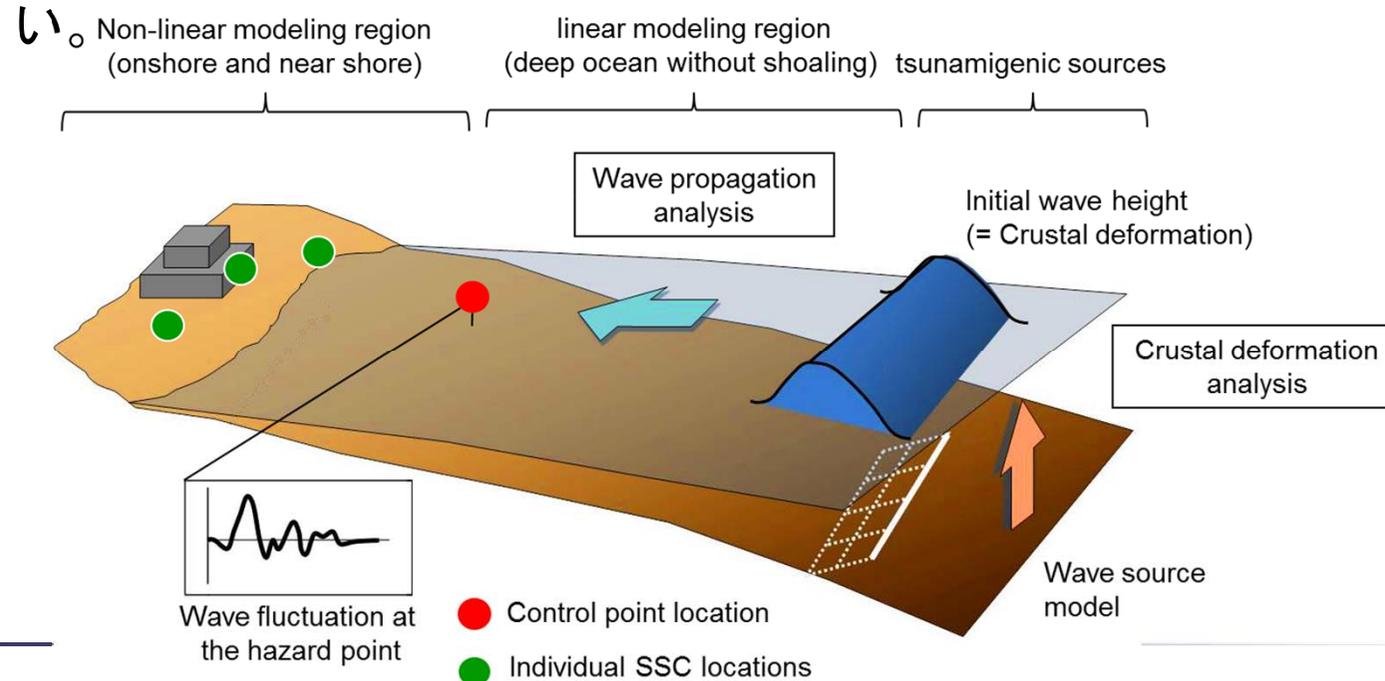
- ◆地震の発生モデル等における地震以外の要因の取扱を追記。
- ◆津波高さの定義点を、最新知見の結果より、海岸線からコントロールポイントに変更
- ◆「7.7.5 地震動と津波の結合確率の評価」を追加
- ◆附属書G等に最新知見である土木学会の「**原子力発電所の津波評価技術:2016(仮称)**」の議論内容を参考
- ◆フラジリティ評価用の津波諸元に必要な情報を「津波パラメータ」として整理し記載

コントロールポイント及びSSCs評価地点の概念図

◆コントロールポイントの設定

➤ 評価される津波ハザード曲線の定義点(コントロールポイント)は、以下を満足するように設定する。

- 1) 線形長波理論で近似できる。
- 2) 代表的なシナリオにおいて、コントロールポイントにおける津波水位変化もしくは最大水位や最低水位が、施設の有無による差異が小さい。



変更点のポイント

8. 建屋・機器フラジリティ評価

- ◆地震による影響の考慮に地震PRA標準に準ずる実施を記載
- ◆地震による構造的損傷及び機能的損傷の影響による損傷モードの変化や部位の特定等を追加
- ◆現実的応答に対し、津波防護施設・浸水防止設備の評価、海底砂移動による閉塞等の機能的損傷モードの評価、屋外設置の機器配管系の津波の波力・浮力、漂流物衝突、被水・没水の累積効果について附属書の例とともに追記

変更点のポイント

9. 事故シーケンス評価

- ◆地震による影響の考慮に地震PRA標準に準ずる実施を記載
- ◆9.3.2 安全機能の設定」において「反応度制御機能」を追加。ただし、地震による影響を考慮する必要がない場合は、除外すると規定
- ◆津波による漂流物の影響や地震による構内通行道路の影響の他、可搬設備の繋ぎ込み先の耐震性などについての考慮を追記
- ◆「9.5.1 炉心損傷頻度の算出」において条件付発生確率に地震動強さ a の影響を追加



変更点のポイント

10. 文書化

◆地震PRA標準の記載事項を検討し、「10.3 規定への適合性の文書化」において、以下を追記

「また、その際にこの標準の具体的な規定で許容されている除外事項又は例外事項を適用した場合には、その妥当性を示す。利用目的などに応じて複数の選択肢を示すあるいは、利用に際しての留意事項を記載している項目については、それらの選択の理由や留意事項への対応を文書化する。」

変更点のポイント

解説

◆「5 建屋・機器フラジリティ評価における今後の課題」として以下の解説を記載

- 5.1 津波に関する現実的耐力評価及び現実的応答評価
- 5.2 火災に対する津波の影響評価

◆「6 複数の津波及び余震による影響の重ね合わせについての考え方」に、複数の津波及び余震による影響の重ね合わせについての考え方を議論結果を整理

- 複数の津波による影響は、第一波、第二波等の内、最大の津波で代表できる。ただし累積型損傷については各波の合算影響を考慮する必要がある。ただし、これは事象の重ね合わせであることから、地震と津波の相互作用を取り扱う今後のステップの中で検討する。
- また、累積型損傷は、損傷モードに応じて取扱いを変える必要がある。損傷モードとしては、構造的損傷、機能的損傷、累積的損傷の三つを考える。津波PRAでの具体的な例は、構造的損傷は波力、機能的損傷は被水、累積的損傷は没水とみなすことができる。