

標準委員会セッション3(リスク専門部会)
『PRA の活用にかかる課題とその解決への取り組み』

地震PRA実施基準改定について



2013年3月28日

リスク専門部会 地震PRA分科会

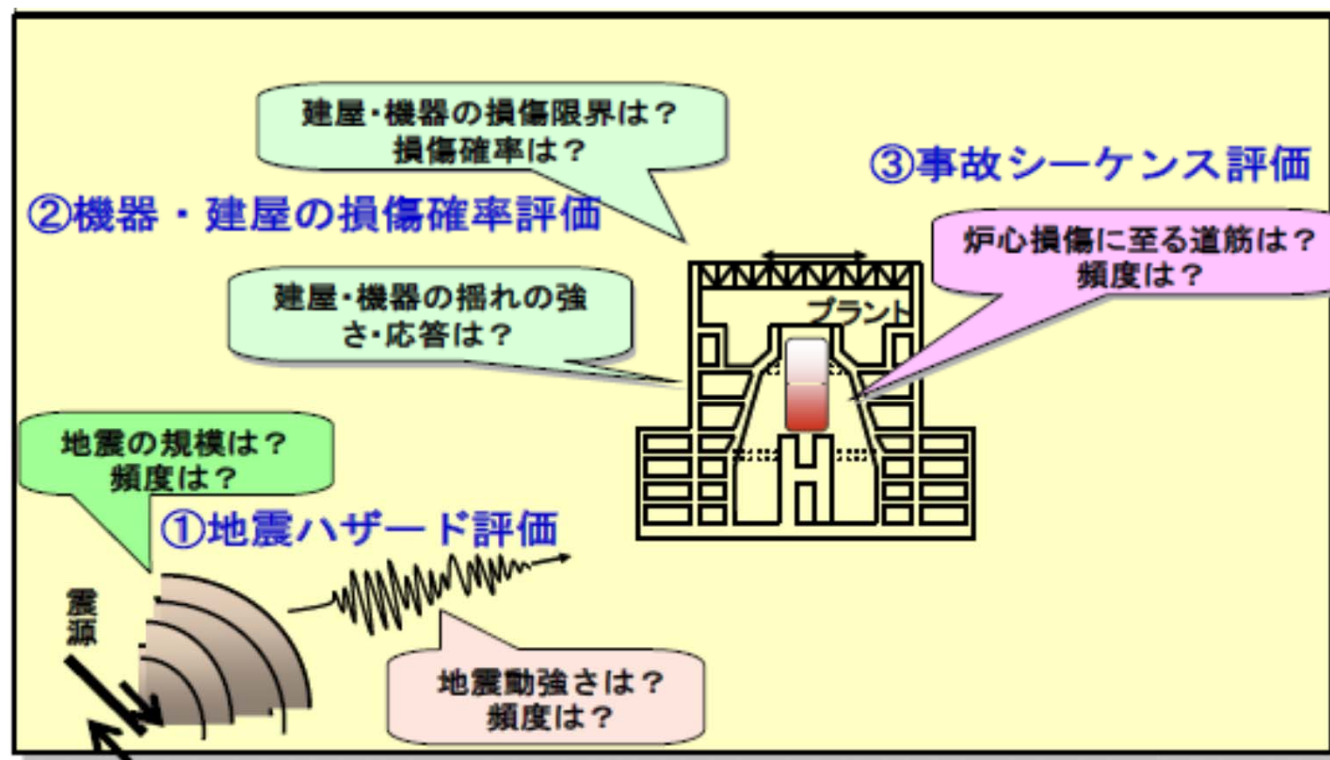
主査 平野光將(東京都市大学)

目次

- 地震PRAの概要について
- 地震PRA分科会の再開
- 地震PRA実施基準の改定の方方向性
- 分野共通の課題
- 専門課題（地震PRA実施基準の構成に準じて）
- 今後の予定

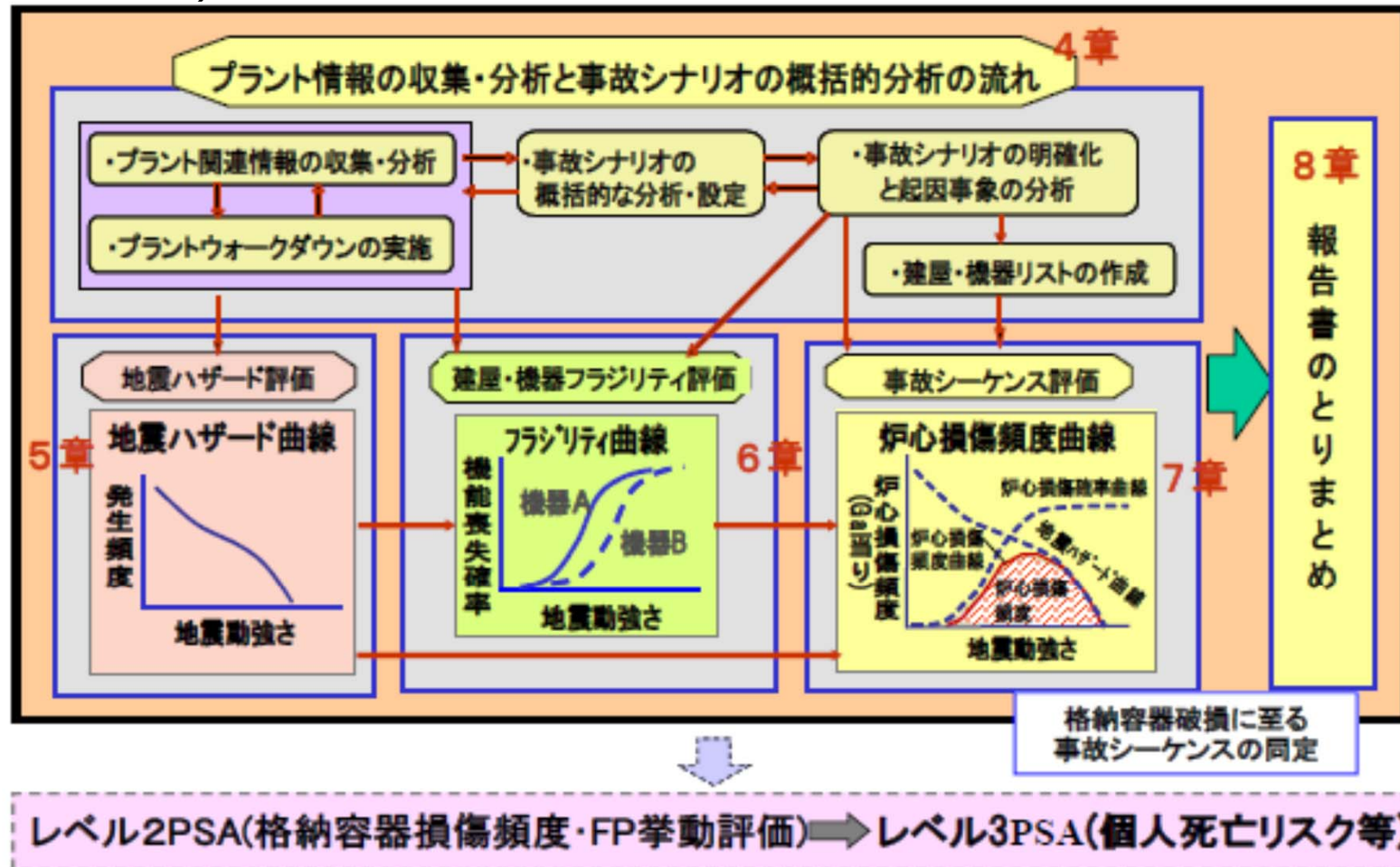
地震PRAの概要について(#1)

発生の可能性が極めて小さな地震に起因する地震動も含めて、原子力発電所に影響を及ぼすと想定される地震動を対象に、地震動のばらつきや建屋・機器の応答挙動のばらつき、耐力のばらつき等を考慮に入れて建屋・機器の損傷確率を評価し、事故シーケンスの発生確率/頻度とその影響の大きさを分析し、原子力発電所の耐震安全性を定量評価する。



地震PRAの概要について(#2)

原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準:2007(AESJ-SC-P006:2007)の概要



地震PRA分科会の再開

□ 再開時点の改定の方針

- 発行以来、今までの地震にかかる知見など、特に東北地方太平洋沖地震(3.11)とそれに伴う原子力発電所の過酷事故を踏まえて改定する。
- 2012年12月にリスク専門部会への中間報告(技術的な内容)を目指す。(結果的に2月1日部会に中間報告)
- 改定課題を短期(12月まで)、中長期に分類することで重要かつ迅速な標準整備が必要な事項に注力する。
- 挙げた改定課題を3作業会に分割し短期・中長期の仕分け、及び対応方針の検討を作業会で行うこととなった。

- 第9回分科会を2012年7月27日、第10回を9月27日、幹事会(公開)を2013年1月11日、第11回を1月18日に開催し、主として複数の作業会にまたがる課題について検討した。

地震PRA実施基準の改定の方角性(#1)

- 改定において3分野(地震ハザード、建屋・機器フラジリティ、事故シーケンス)から挙げた課題は100以上。
- 「1)他の分科会と調整すべき課題」、「2)分野共通の課題」、「3)専門課題」に大きく仕分けた。

1)「他の分科会と調整すべき課題」:これには、**随伴事象PRA**にかかる課題と、停止時やL2などの運転状態と影響レベルの拡張にかかる課題が含まれる。地震起因の随伴事象は地震PRA分科会と関連PRA分科会との協働で検討する。それ以外の自然現象及びL2,3、停止時との組み合わせは、リスク専門部会タスクにて検討する予定。

- **随伴事象**については、起因となる事象の特性により、プラント・サイトにて発生する事態の大きさが決まる。例えば次のような事故シナリオ。同時多発の機能喪失がどの程度有るかがポイント。
 - 地震と津波のような広範囲に影響を及ぼす事象→内部溢水、内部火災→プラント設備機能喪失
 - 内部火災→消火系作動→内部溢水発生→プラント設備機能喪失

地震PRA実施基準の改定の方方向性(#2)

2)「分野共通の課題」: 2つ以上の作業会にまたがる課題。分科会、幹事会に加えて作業会間でも意見交換を行っている。

- ① 津波との重畳: 津波PRAは本実施基準では取り扱わないが、津波影響に関与する建屋・機器の地震フラジリティは、フラジリティ作業会にて担当。
- ② AM設備、緊急安全対策設備の考慮: 事故シーケンスにおけるモデル化、設備の地震フラジリティが課題になる。特にこれらの設備はSA時に操作や運搬などの人的措置を必要とするものがあることから、アクセス通路も含めた成功基準を考える。
- ③ 使用済み燃料プール: 従来は炉心の損傷でプラントのリスクを代表させていたが、SFPにおける事故シナリオの想定を行い、関連する設備の地震フラジリティを求めることを検討する。
- ④ 複数基立地の影響: サイト内隣接号機の正負の影響をどう考慮するか、を事故シーケンスにおいてモデル化。その際、設備面だけでなく、人的資源、組織因子を考慮。サイト内マルチハザードを想定。
- ⑤ 余震の考慮: 地震ハザード解析では余震の大きさ・頻度、フラジリティ解析では本震でのダメージに加えての損傷評価、事故シーケンス解析では時間依存の解析、と分担・協業で検討中。

3)「専門課題」: 本資料では実施基準の章立てに、重要な課題を紹介。

分野共通の課題(①津波との重畳)

① 津波との重畳:

- 地震と津波が原子力サイトを襲った際のリスク評価
- 津波PRA実施基準で地震の影響＋津波の影響を考慮する。
- 地震PRA実施基準では、津波PRAで対象とする建屋、設備の地震フラジリティ解析を担当。結果を津波PRA実施側が利用する形になる。
地震フラジリティ解析の対象機器の拡大。
- 防潮堤、防波堤、水密扉などの津波対策の設備等の地震フラジリティ解析を求める規定とする。機能喪失モードの検討。さらに、地震による固定がとけ、津波により漂流物となる設備の地震フラジリティ解析。
- 本震により劣化したSSCの地震耐力評価。

分野共通の課題(② AM設備、緊急安全対策設備の考慮)

② AM設備、緊急安全対策設備の考慮

- 事故シーケンス評価では「安全機能の設定」、「成功基準の設定」及び「人的過誤のモデル化」の項にAM策、緊急安全対策などに期待する場合の要求事項を整理し改定した。
- 「安全機能の設定」では、本文の補足的事項として、「アクシデントマネジメント策として整備した設備(東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえ配備した設備等を含む)、「運転員操作を考慮する場合は、フラジリティ評価又は成立性を確認した上で安全機能を維持するための緩和設備などとして同定してもよい」旨を追記した。また、附属書(規定)において緊急安全対策などに期待する場合の前提条件を追記した。
- 「成功基準の設定」では、本文の要求事項として、「手動起動する機器の許容時間(用語を“時間余裕”から“許容時間”に見直し)を設定するよう記載ぶりを適正化した。また、「代替手段による機能回復を含めた地震時特有の復旧操作の要件」を明記した。
- 「人的過誤のモデル化」では、附属書(参考)として地震後の復旧操作における考え方を追記した。また、緊急時安全対策などのモバイル機器の接続の人的過誤の設定についての評価手法を検討した。

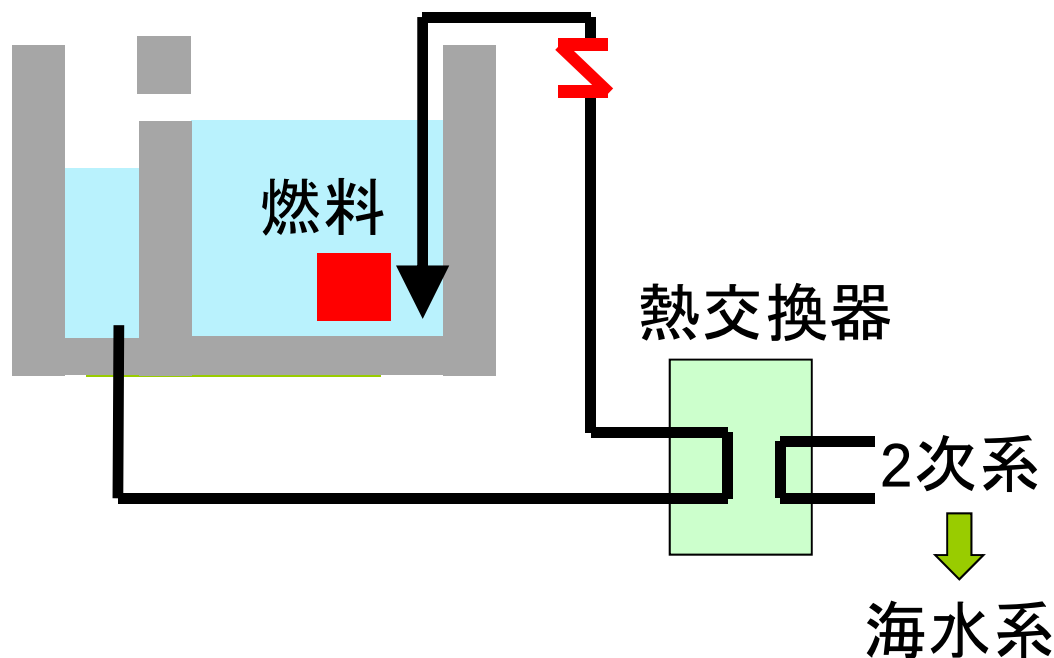
分野共通の課題(③ 使用済み燃料プール(SFP))#1

③ 使用済み燃料プール(SFP):

■ SFPの地震PRAの特徴

- 大きい時間的余裕がある(集合体あたり崩壊熱小、保有水量大)
- 一方で、深層防護の層は厚くない(格納容器外に設置。緩和系の多重性・多様性低。)

使用済み燃料プールの一般的な構造



- 極めて頑丈なコンクリート壁
- スチールの内張
- 配管からの漏洩による冷却水喪失を防ぐ構造(貫通する配管がなく、サイフォン現象防止のための逆止弁を設置など)
- 大量の冷却水保持

分野共通の課題(③ 使用済み燃料プール(SFP))#2

- 運転中の燃料プール内燃料の損傷シナリオの明確化については、次のシナリオを考慮するように要求した。
 - 燃料プール自体の損傷
 - 燃料プールの冷却機能喪失
 - 燃料プール内燃料が直接損傷する事故シナリオ
- 広範囲な事故シナリオについては、炉心損傷の場合と同様に、定量的判断あるいは工学的判断によりスクリーニングすることを規定することとした。具体的な工学的判断については、附属書(参考)としてスクリーニングの考え方を例示することとした。

分野共通の課題(④ 複数基立地の影響)

④ 複数基立地の影響

- 複数基立地に伴う自プラント及びサイト単位の評価については、近年、JNES、JAEAなどで多数基立地の評価を試みた事例があるので、これらの知見を取りまとめたうえで、改定の方方向性を検討する。
- 考慮に含めるべき事項として次を検討中。
 - i)融通AM
 - ii)共有設備の悪影響
 - iii)共有による多重性低下
 - iv)事故(炉心、格納容器損傷、水素爆発など)影響
- 事業者による緊急安全対策、サイト内で複数基が炉心損傷している状態での人的資源の適切な配置の可能性などSA対策を考慮した評価方法についても検討する。
- 同一サイト内で地盤特性の違いにより各プラントへの入力地震動が異なる経験をしており(例えば中越沖地震、駿河湾地震の経験)、入力地震動の相関係数の適切な設定など検討が必要となってくるものも挙げられる。
- 同一サイト内で複数の炉心損傷発生の場合に、人的リソース(組織因子を含む)の可能性。

分野共通の課題(⑤) 余震及び誘発地震の考慮

⑤ 余震の考慮

- 本震により原子炉が停止し、安全機能を有する機器等にある程度影響を受けた状態で、最大余震に襲われた場合の時間依存性の事故シナリオの検討が必要となってくる。例えば、
 - 本震後に生き残った安全機能を有する機器等が余震による繰り返し応力に対して安全機能の維持が可能か？
 - 余震襲来までの時間に安全機能を有する機器等の修復、或いはその代替設備の整備、強化が出来るか？
 - したがって、時間依存性の事故シナリオの検討に当たっては、地震ハザード評価による余震の大きさ・頻度の検討、建屋・機器フラジリティ評価による余震に対する壊れやすさの検討が重要である。
- 事故シーケンス評価作業会としては、本震により原子炉が停止し、安全機能にある程度影響を受けた状態で、最大余震に襲われた場合の時間依存性の事故シナリオ、復旧・修復時間、人的過誤の設定などを検討し、全CDFへの影響度合い(感度)を確認し、余震によるスクリーニング基準を附属書(参考)として作成することを検討している。

⑥ 誘発地震の考慮

- 地震ハザード評価での発生頻度評価に誘発地震の発生頻度を考慮する。

専門課題 1章 2章 3章

1. 適用範囲:

- 地震に起因するPRAを対象。
- 津波PRA実施基準、内部溢水PRA実施基準があり、火災PRA実施基準も検討中であることから、地震起因の津波、内部溢水、火災のPRAに関する技術的課題（ fragility、シーケンス）も幅広く検討対象とする。津波、内部溢水、火災の事故シナリオに寄与する建屋・設備の地震時 fragilityは、地震PRA実施基準で規程する。
- 地震起因のL2PRAや停止時地震PRAなどの技術的課題は、別途調整することとする。

2. 専門用語の定義:

- 全てのPRA実施基準に共通する用語は、「共通用語集」にまとめている。相互の比較を行い、地震PRA特有の用語を中心に残す。

3. 評価の流れ:

- 流れは大きな改定は無い。しかし、この章に「PRA品質確保にかかる規定」が含まれているが、これは「PRA品質確保実施基準(仮称)」を引用することになる。ただし、地震PRAに特有な、あるいは特に強調することを付加する必要がないかを吟味する。

専門課題 4章(#1)

4. プラント情報の収集・分析と事故シナリオの概括的分析

□プラントウォークダウン範囲の見直し・追加

- 津波PRA標準を参考としながら、地震PRA標準におけるプラントウォークダウンの本文構成を見直した。
- 具体的には、SA対策など地震PRAで考慮する安全機能は対象範囲に含めることを追記した。また、ストレステストにおけるプラントウォークダウン実施事例やアクセス性の成立性に関する現場確認の例を附属書(参考)として追記した。
- さらに、IAEA基準(NS-G-2.13)やEPRI2012のウォークダウンガイド(Seismic Walkdown Guidance)を参考に標準案改定を検討している。
- 事故シナリオについては、地震随伴事象の考慮、使用済み燃料プールの評価、余震の考慮などの新たな課題を積極的に記載。

専門課題 4章(#2)

4. プラント情報の収集・分析と事故シナリオの概括的分析

□経験した地震(中越沖地震、駿河湾地震、東北地方太平洋沖地震)の被害状況と対応策のまとめ

- 経験した地震の被害状況を調査し、以下の項目を視点に整理した。
 - 施設に影響した地震規模(地震観測記録と基準地震動の関係)
 - 安全機能の耐震安全性(モデル化しているAM策や緊急安全対策を含む)
 - 安全機能への波及影響(システム間・機器間の相互干渉、システムの従属性)
 - 外部電源喪失の有無、D/G・補機冷却系への影響、電源融通の可能性
 - 復旧操作へのアクセス性
 - その他(気がかり事項:水漏れ、被水、リレーチャタ、有毒物質タンクの倒壊、高圧電源盤の火災、安全上重要な機器周辺に固縛されない重量物の確認など)。

専門課題 5章

5. 地震ハザード解析

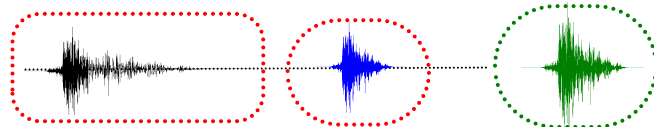
- 巨大余震及び誘発地震の考慮の考慮（別図参照）
 - 巨大本震・余震、巨大津波による構造物損傷の影響評価の考え方の明示
 - 巨大余震を考慮したハザード評価
- 地盤沈下（地殻変動）、**サイト内断層変位**の考慮
 - 敷地、敷地近傍に活断層あるいは破碎帯が存在し、サイト内の地表に永久変位が生じる可能性がある場合。周辺地域の地震による地盤変位の可能性。
 - **断層変位ハザードは、断層変位を評価パラメータとし、横軸が変位の大きさ、縦軸が超過確率とする。**
- 地震発生頻度、地震発生時期、地震発生モデルにおける情報の質・量が乏しい場合のロジックツリー(LT)
 - 震源調査→各震源の情報量の多寡・質→モデル作成方法・評価方法の選択（仕分け）→LTへの反映
 - **LTの実効的運用の仕方の詳細化と例示**
- 地震と津波を考慮したハザード評価（別図参照）

(1) 巨大地震・津波ハザードに伴う構造物損傷

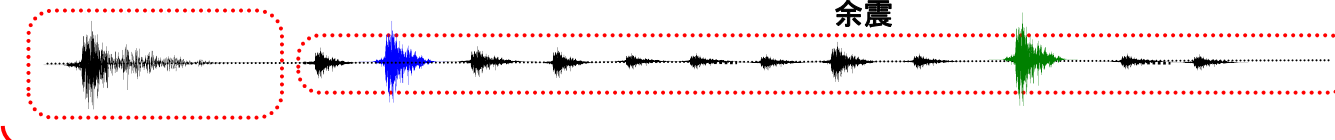
■ 海溝型巨大本震

【同一損傷モード】

巨大本震 敷地近傍大規模余震・誘発地震



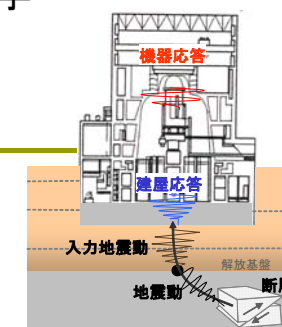
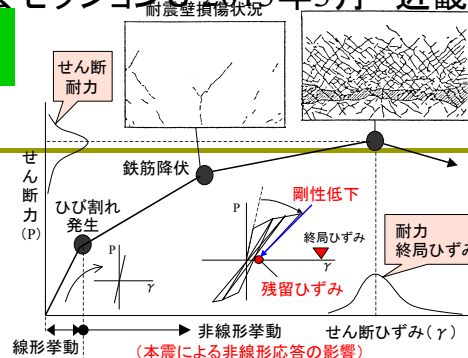
余震



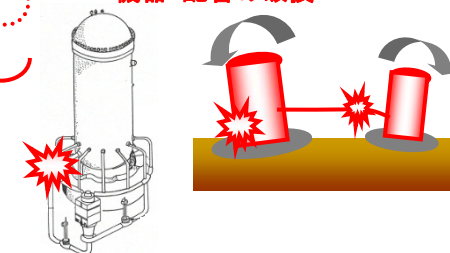
高経年化考慮

大振幅地震動の繰り返しによる
亀裂進展破壊

ある振幅以上の地震動の
繰り返しによる疲労破壊



本震余震による
機器・配管の破壊



【異なる損傷モード】

巨大本震

本震

大津波

余震・誘発地震

津波の越流・防潮堤
の転倒・変形による浸入

津波

本震による水密扉
の破壊+津波波力

本震・津波による
機器の破壊

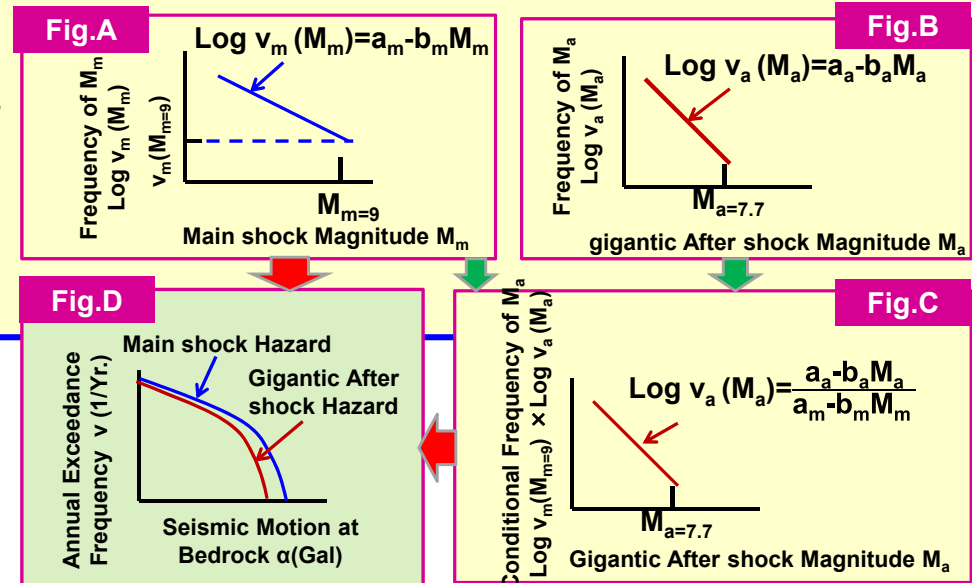
地殻変動・地盤変位

地盤
変位
状況

地殻変動・地盤変位による
屋外機器・配管の基礎沈下等

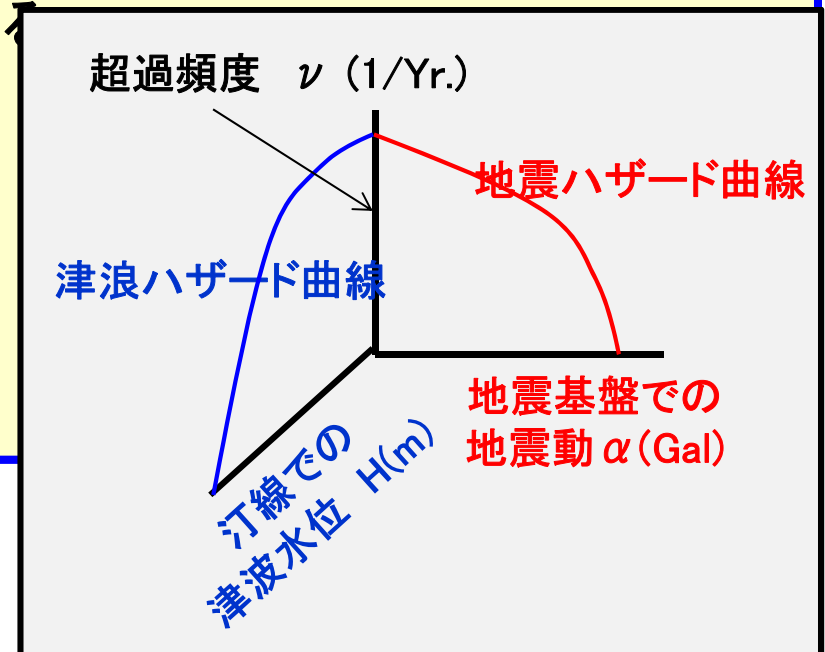
(2) 巨大余震による地震ハザード評価手法

- (1) M9級による巨大な余震による地震ハザードの評価では、まず、本震のM9が、従来のG-R式に従うかどうかを確認する。
- (2) もし従うならば、M9級の本震を含むG-R式を求める(Fig.A)。
- (3) (2)のG-R式を用いて、M9の発生頻度 $f(M9)$ を求める。
- (4) M9級の余震の回帰式を求める(Fig.B)。
- (5) (3)の $f(M9)$ 下での条件付き確率として(4)の回帰式を求める(Fig.C)。
- (6) (5)を用いて、余震の地震ハザードを求める(Fig.D)。



(3) 地震と津波の重畳を考慮したハザード評価手法

- ハザード評価: 複数炉を対象とする。
- 地震ハザード: 地震基盤における地震動の大きさとその超過頻度の関係を表す曲線として求める(下図)。
- 津波ハザード: 汀線における津波の水位とその超過頻度との関係を表す曲線として求める(下図)。
- 両者の超過頻度: 同等であるが、地震動の大きさと津波の水位の相関関係が明確でないので、相関関係の明確化が重要となる。
- 震源モデルと波源モデルの整合も重要とする。
- 複数炉の地震動の相関: 考慮する。
- 津波水位の相関の考慮: 広域の波源を対象とし、1つのモデルで評価するので、必要ない。



専門課題 6章 (#1)

6. 建屋・機器フラジリティ解析

(1) 津波対策設備、SFP等に対するフラジリティ評価における改訂の方向性 【現状での改訂箇所の一例】

① 評価対象物の選定

- 建屋・機器リストに記載されたものに加えて、津波対策設備等、使用済み燃料プール、並びに、本震経験後の津波により漂流物となる可能性のある設備等も評価対象とする。

② 損傷モード及び部位の抽出

- 防潮堤及び防潮壁等の要求機能喪失に繋がる構造的損傷モードとしては、安定性に係わる損傷モード、全体崩壊に係わる損傷モード及び局部破壊に係わる損傷モードなどが想定され、それらの中から支配的な構造的損傷モード及び部位を選定する。
- 使用済み燃料プールの要求機能喪失に繋がる構造的損傷モードとしては、層崩壊に係わる損傷モード及び局部破壊(躯体及びライナの局部破損)に係わる損傷モードなどが想定され、それらの中から支配的な構造的損傷モード及び部位を選定する。ここで、支配的な損傷モード及び部位としては、使用済み燃料プールの崩壊シーケンスを踏まえて、当該層並びに当該層より下層の層崩壊を伴う曲げ及びせん断破壊を選定してもよい。

③ 現実的応答の評価

- 本震経験後の余震による現実的応答評価に資するために、本震による構造的損傷後の影響を評価する。さらに、必要に応じて、本震経験後の津波による現実的応答評価に資するために、本震による構造的損傷後の影響を評価してもよい。

専門課題 6章 (#2)

(2) 周辺斜面などの地盤損傷評価における改定の方角性

- 斜面、地盤などの「要求性能」を明らかにし、それに応じた構造性能(安定性、支持性など)を明記。さらにそれに応じた目標性能を決めることで照査方法の基準が明確になる。
- AM設備に影響を及ぼすアクセス路面、周辺斜面も対象。

① 斜面上のAM機器と搬入路の性能

対象	要求性能	構造性能	目標性能	
			想定される限界状態	評価指標に基づく限界状態
斜面上のAM機器	機器の機能確保	地盤の支持性能	機器の支持力確保	支持力の確保
			機器の損傷を損なう不同沈下がない	機器の機能喪失を伴う変形勾配の回避
搬入路	対象施設への安全走行の確保	斜面の安定性能	周辺斜面の崩壊による所用の走行空間の確保	安定性が確保される変形量
		地盤の支持性能	支持地盤の不同沈下がない	液状化による沈下や揺すり込み沈下の回避

② 機能限界の設定と評価方法

- AM機器を設置した斜面などの地盤にて、M機器の機能を損なわないよう、それに要求される機能である地盤の支持性能に関する限界状態を設定し、基礎地盤の変状がAM機器へ及ぼす影響の評価を行うものとする。AM対策を実施するための搬入路にて、緊急車両の走行安全性を損なわないよう、それに要求される周辺斜面の安定性および路面の走行性に関する限界状態を設定し、前者については斜面の限界状態を越える変状の搬入路への影響、後者については路面の沈下や段差などの変状について評価を行うものとする。

専門課題 6章 (#3)

(3) FEMモデルを用いた建屋フラジリティ評価における改訂の方向性

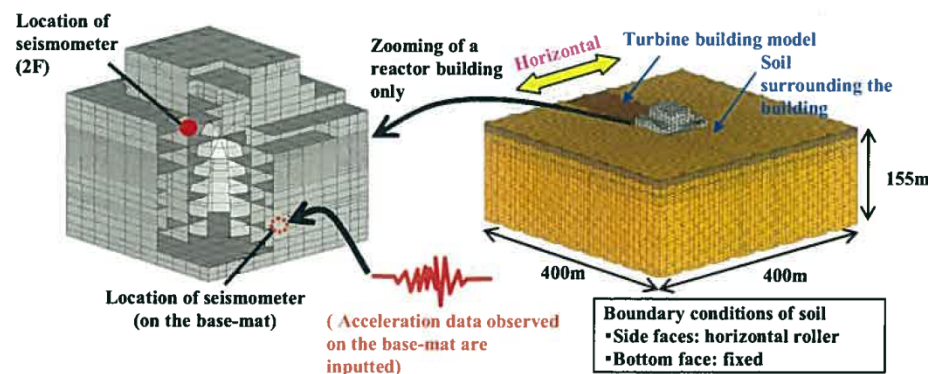
- 短期には床柔性考慮の評価で、中長期でFEM。

① 現実的応答の評価

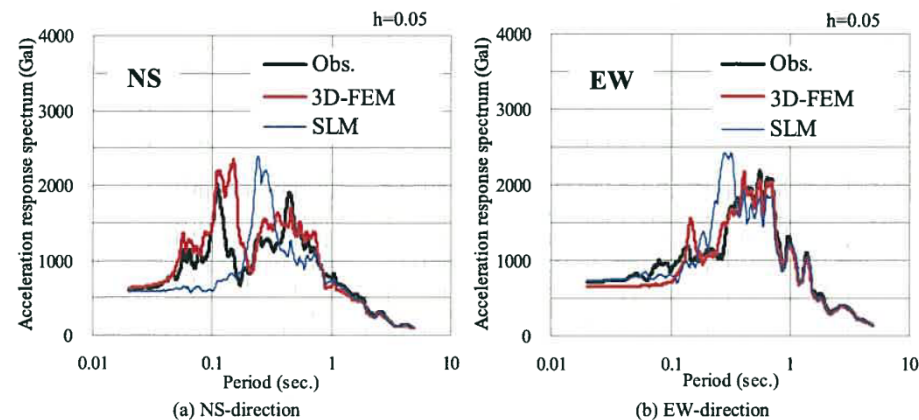
- 地震応答解析に用いる解析モデルは、地震観測記録のシミュレーション解析等に基づき、現実的な応答を評価できるものを用いる【解説 参照】。

【解説】質点系モデル
及びFEMモデルによる
シミュレーション解析例

(解析モデル)



(解析結果)



専門課題 7章 (#1)

7. 事故シーケンス解析

(1) 保守的な炉心損傷直結事象等の見直し検討

- 現行の建屋・構築物破損の場合は、保守的に炉心損傷や格納容器機能喪失に直結するものと仮定している。例えば、格納容器破損⇒大規模損傷⇒環境への大規模放出としている。
- 炉心損傷直結事象や格納容器機能喪失の直結事象をより現実的なシナリオに細分化することを検討しており、その場合に建屋や構築物の損傷部位毎に事故進展を考えてモデル化する必要があるため、建屋・機器フラジリティ評価との協働で具体的な検討を進めているところである。

(2) 全電源喪失で制御室内照明が無い中で緩和操作を行う場合のHRAの設定

- 地震時の人的過誤確率の評価については、中央制御室の環境において照明の有無など様々な状況が想定され、THERPの適用が難しく、現状では確立された手法がないため、THERPといった具体名は本文には記載せず、THERPなどを使用した評価例は附属書(参考)として記載した。
- 評価値として設定したHEPには大きな不確実さを含むため、重要度解析の結果を踏まえて感度解析を実施し、炉心損傷頻度に対する影響を確認することを規定することとした。

専門課題 7章 (#2)

(3) 使命時間の設定見直し

- レベル1PRA実施基準改定案と同様に、時間余裕設定の考え方を規定するとともに、時間余裕設定にあたり有益な地震特有の情報を附属書(参考)に記載した。
- 米国では72時間以上といった最新の事例があるが、具体例を規定として記載すべきかどうかについては引き続き検討する。

(4) 地震時の安全機能毎の機器の最小の組み合わせの整理

- 地震時のレベル1～3PRAで必要となる安全機能毎に機器の最小の組み合わせを整理し(緊急安全対策、SA対策(フィルターベントも含む)など追加設備も含む)、それらの結果は地震PRA標準又はレベル2、3標準への反映を検討している。
- 例えば、「原子炉停止機能」「原子炉冷却機能」「格納容器除熱機能」「放射性物質の環境への放出抑制機能」「水素爆発防止機能」「シビアアクシデント対策の各種機能」などの分類で整理することを考えている。

専門課題 8章

8. 報告書のとりまとめ

- 評価の透明性・説明性の観点から、評価条件、評価方法、使用データ等を明記すること

今後の予定

- 各作業会にて改定文案(本文＋附属書＋解説)の作業継続。
- 1章、2章、3章、4章、8章などの共通章については、分科会を中心に改定案を編集する。
- H25年度上期の予定
 - 4月の地震PRA分科会にて、**改定文案一式**をそろえる。
 - 地震PRA分科会(5月)にてを開き、改定文案の仕上がりを確認。
 - 6月上旬の**リスク専門部会**には、**地震PRA実施基準改定版の内容**を中間報告。
 - 専門部会中間報告の意見反映を作業会にて実施し、**7月の地震PRA分科会においては、最新知見に基づいた分科会として技術的に自信のある内容としてまとめることを目指す。**(7月にまとまる原子力規制委員会の新基準、新評価システムへの反映、その後の地震リスク評価への速やかな活用を目指す。)
- 部会、標準委員会での審議予定
 - 9月上旬のリスク専門部会に最終報告。書面投票。
 - 12月上旬のリスク専門部会で部会コメント反映を確認。
 - 12月の標準委員会に最終報告。書面投票(1ヶ月)。公衆審査(2ヶ月)。
 - 2014年度発行予定。

スケジュール

	2013年												2014年
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月～
年会・大会			▽3/28 リスク専門部会セッション										
標準委員会			▽3/8 活動状況報告			▽6/14 改定文案報告					▽ 12月上 (16)最終報告 +投票	(17)公衆審 査(2ヶ月)	
リスク専門部会		▽2/1 中間報告		▽4/3	▽ 6月上 (9)中間報告: 改定文案。意見集約。				▽ 9月上 (12)最終報告 +投票		▽ 11下～12上 (15)投票時コメント反映 確認(編集上か?)		▽ 必要に 応じて
地震PRA分科会	▽1/18 (1)課題への コメント			▽ 4中 (5)改定文案一 式を議論。	▽ 5月下 (8)改定文案 一式の確認。		▽ 7月上～中 (11)改定文案 修正確認。			▽ 11中 (14)部会コメント確認 (編集上か?)。			▽ 必要に 応じて
地震PRA幹事会 【分科会三役+3作 業会三役】	▽ 1/11			▽4上 (3)意見対応及び更なる 文案検討結果を持ち 寄り意見交換。	▽ 5月上 (7)改定文案一 式の確認。								
・地震ハザード作業会 ・建屋・機器脆弱性作業会 ・事故シーケンス作業会		↔ (2)課題の 修正等	↔ (4)改定文案(本文+附属書+ 解説)を出来るだけ揃える。	↔ (6)改定文案(本文+附属書+ 解説)を揃える。	↔	↔ (10)改定文案修正。				↔ (13)部会投票時コメント 反映。	↔ (18)図表の転載許 諾手続き		