

原子力施設の安全目標について (残余のリスク)

平成22年年7月15日

東京都市大学 平野光將 (JNES技術顧問)
原子力安全基盤機構 蛭沢勝三

1

発表内容

1. 改定耐震設計審査指針の特徴と意義
2. 基準地震動策定における確率論的取り扱い
3. 残余のリスクの取り扱い
4. 残余のリスクと基準地震動の超過確率との関係
5. 耐震バックチェックと残余のリスクの評価

2

1. 改定耐震設計審査指針の特徴と意義

改定耐震設計審査指針（新指針）は、5年数ヶ月の検討・審議を経て平成18年9月19日に策定されたが、

- ① 信頼性の高い地質・地盤調査を前提とし、**不確実さを適切に考慮**した基準地震動 S_s の策定方法の高度化
- ② S_s を超える地震動による「**残余のリスク**」の認識とそれを可能な限り小さくすること

の明記が新指針の大きな特徴といえる。

3

(1) 地震を起因とする事象の特徴

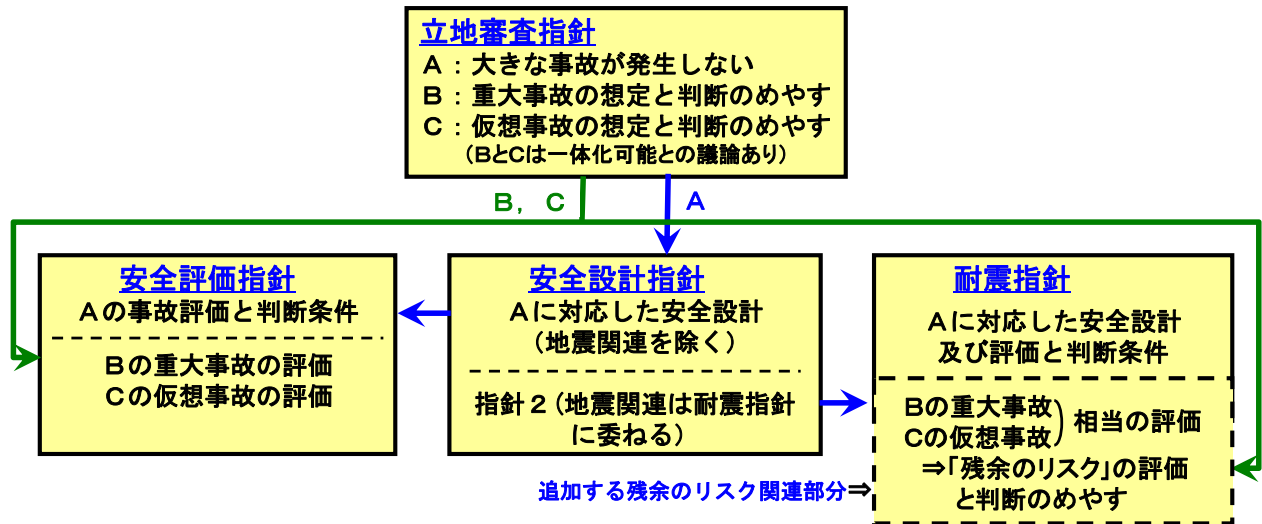
一般に原子力施設の安全性は深層防護の原則に基づく**確定論的な対策・評価によって達成されているが**、地震を起因とする事象は、以下のような要因から機器故障や人的過誤等に基づく内的事象と異なる特徴を持つ。

- a) 地震・地震動は**自然現象で人間が制御できないこと**
- b) 兵庫県南部地震以降著しい進歩を遂げた最新技術でも地震・地震動の規模、頻度、特性を**精度良く推定することは難しいこと**
- c) 大きな地震動に対し重要な系統・機器・構造物が**同時多発的に損傷し、多重防護が有効に機能しない可能性**があること

4

(2)原子力施設の安全機能維持の考え方-1

- (i) 新指針では、適切なSsを想定し、Ssに対して重要な系統・機器・構造物が安全機能を維持するよう設計することで、原子炉等規制法にある災害を起こさないことを求めている。安全規制は、対象施設が公衆や従業員の安全及び周辺環境の保全に過度のリスクを与えないために行うものである。
⇒「残余のリスク」を小さくすることが求められる。



5

(2)原子力施設の安全機能維持の考え方-2

「残余のリスク」が小さいことを確実にするため、

- (ii) 「残余のリスク」を確率論的耐震安全評価（地震PSA：Probabilistic Safety Assessment）により把握することを推奨している。

そのために、

- (iii) 様々な不確実さを考慮して策定するSsの策定方法と地震PSAとは整合することが求められる。

実際、

- (iv) 地震PSAを構成する要素技術は全て決定論的耐震設計法及び耐震安全評価法と同一である。また、評価や設計に用いるデータも共通である。

6

2. 基準地震動Ss策定における確率論的取り扱い

新指針では、Ss策定における確率論的取り扱いについて、次の4つの事項が求められている。

- (1) 震源を特定して策定する地震動の評価において、**不確かさの要因及びその大きさの程度**を十分踏まえること
- (2) 震源を特定せず策定する地震動の評価において、決定論的方法とともに、必要に応じて**確率論的手法を参考にすると**言及されていること
- (3) 策定された**Ssの応答スペクトルの超過確率を把握し、安全審査時に参考情報**として活用すべきこと
- (4) 事故時荷重と地震荷重を組み合わせる場合、**超過確率を用いてスクリーニング**すること

7

(1) 震源を特定して策定する地震動評価における不確かさの考慮

「震源を特定して策定する地震動」は、応答スペクトルに基づく手法と断層モデルによる手法を用い、不確かさを考慮して決定論的に評価することが記載されている。

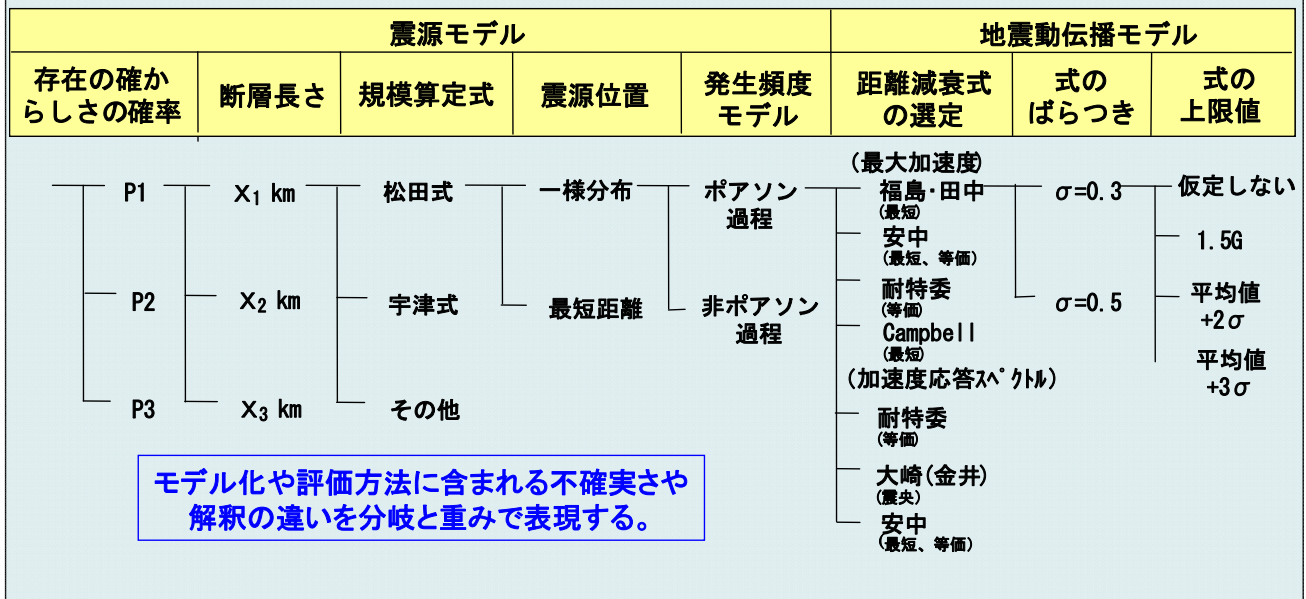
決定論的手法では、震源や地震動伝播モデルに係るパラメータを設定する際、不確かさを考慮して**何度かの試行を行った上で、最終パラメータを決定している**。透明性、説明性を確保するために、そのような**試行のプロセスを明示すること**が必要と考える。

不確かさ(認識論的不確かさ・現象論的不確かさ)の評価手法として、特定震源の地震ハザード評価におけるロジックツリー(LT: Logic Tree)解析手法の活用が挙げられる。

8

■ 基準地震動策定における不確実さの評価手法 — ロジックツリー解析手法の例 —

〔活断層データを用いた場合 のロジックツリーの例〕



9

(2) 震源を特定せず策定する地震動の確率論的評価

震源を特性せず策定する地震動の評価における不確実さの考慮についても、**確率論的手法の活用が言及**されている。

そこで、地震ハザード評価における領域震源を対象としたLTを用いた不確実さ評価手法の活用が挙げられる。

また、この手法をより詳細化した**(独)原子力安全基盤機構における断層モデルを用いた確率論的評価手法の活用**も挙げられる。この手法は、**分科会で審議され、論文が公開**されている。

- ・ 原安委：震源を特定しにくい地震による地震動の確率論的評価，震分第17-5号，成17年4月22日。
- ・ S.Motohashi, et al.: Probabilistic evaluation of near-field ground motion due to buried-rupture earthquakes caused by undefined faults, SMiRT18, KM01-3, 2005.

(4) 運転荷重と地震荷重の組み合わせ

事故時荷重と地震荷重の組み合わせに関しては、両荷重を組み合わせる場合に、**超過確率の使用が明示**されているものの、超過確率の評価手法や具体的値が示されていない。そこで、地震荷重の超過確率に地震ハザード評価結果を活用することが挙げられる。

両荷重の組み合わせにおける超過確率の取り扱いは、旧指針においても導入されており、旧指針に対応しているJAEGに**考慮しなくて良い組み合わせとして 10^{-7} 以下**とすることが明示されており、この値を参照できる。

13

3. 残余のリスクの取り扱い

新指針では、基準地震動 S_s を上回る強さの地震動が生起する可能性は否定できないとし、 S_s を上回る地震動によるリスクを「残余のリスク」と定義し、**「残余のリスク」を合理的に実行可能な限り小さくするための努力が払われることを求めている。**

一方、原子力安全基準・指針専門部会報告書には、

- 「①客観性・信頼性を備えたリスクの定量的評価手法の確立、
②リスクに対する明確な定量的目標値（安全目標又は安全目標から導出される定量的性能目標等）の設定

が不可欠であり、関連する技術開発、総合的な検討の促進、**決定論的手法と確率論的手法の融合等**について、一層の精力的な取組みが必要と考えられる。**残余のリスクに対する定量的な評価の試行的実施を進め、設計段階以降における活用を図ることが有効である。**今後共、評価手法の精度向上、**リスク情報活用のための一層の取組み**が積極的に実施されることを期待するものである」

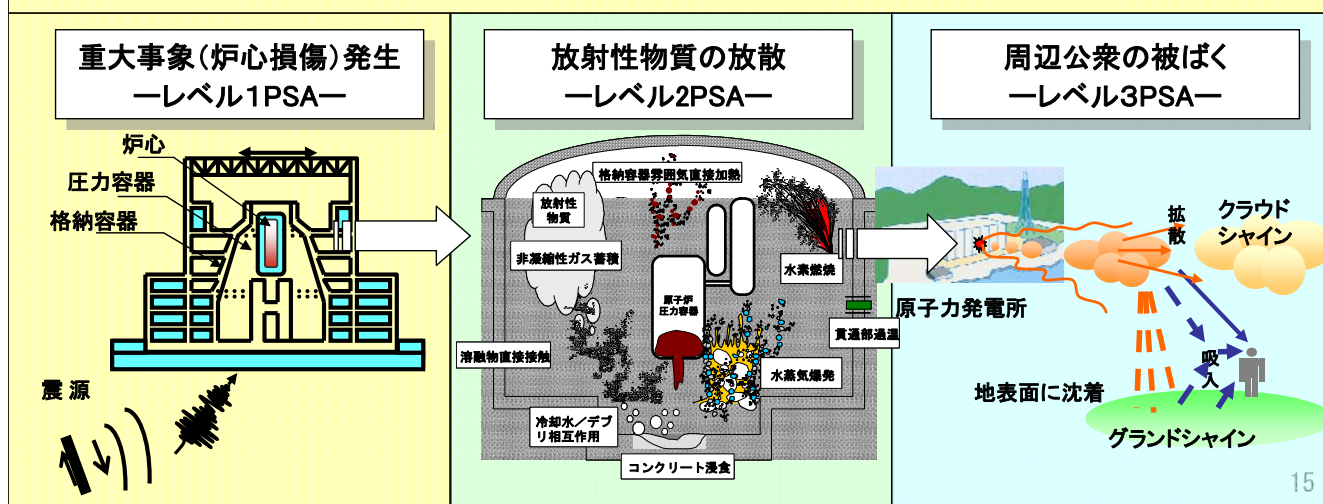
ことが明記されている。

14

(1) 「残余のリスク」の定義

基準地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、

- ・ 施設の重大損傷事象が発生すること
- ・ 大量の放射性物質が放散する事象が発生すること
- ・ それらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすこと



(2) 「残余のリスク」の評価手法・判断指標

評価手法

「残余のリスク」の最も現実的な評価手法として、確率論的安全評価 (PSA: Probabilistic Safety Assessment) 手法が提案されている。

- ・ 施設の重大損傷事象評価 : レベル1PSA手法 (20年3月制定、21年3月発行)
- ・ 放射性物質の放散事象評価 : レベル2PSA手法 (同上)
- ・ 周辺公衆の放射線被ばく評価: レベル3PSA手法 (同上)

原子力学会地震PSA実施基準の策定

(平成19年3月制定、同9月発行)

判断指標

- ・ **安全目標(案):**
敷地境界付近の公衆の個人平均急性死亡リスクと敷地周辺の公衆の個人平均がん死亡リスクが 10^{-6} /年・サイト程度以下
- ・ **性能目標:**
炉心損傷頻度が 10^{-4} /炉・年、且つ、格納容器機能損傷頻度が 10^{-5} /炉・年以下

(3)「残余のリスク」の評価による有用情報とリスク低減策

■有用情報の例

- ・評価に用いたデータ・手法、判断根拠等の評価プロセスに関する情報
- ・得られた炉心損傷頻度(CDF)及び格納容器機能喪失頻度(CFF)が「性能目標」とどの程度対応しているか判断
- ・CDF、CFFに大きく寄与する安全上重要な事故シーケンス、緩和系、機器等を把握

■リスク低減策と効果の評価の例

- ・性能目標と適合していない場合、重要な事故シーケンス、緩和系、機器に着目し、各種の改良・改善を実施。また、その低減効果の確認
- ・構造強化の観点では、安全上重要な機器がタンクや配管のような静的機器の場合、それらの支持構造物(基礎アンカーボルトや配管サポート等)の強化
- ・安全上重要な機器がポンプや電気盤のような動的な機器の場合、制震、免震構造化による応答の低減

17

4. 残余のリスクと基準地震動 S_s の超過確率との関係

残余のリスクの性能目標となる炉心損傷頻度は、次図に示すように地震ハザード曲線と炉心の損傷確率曲線とで囲まれた面積として求められる。

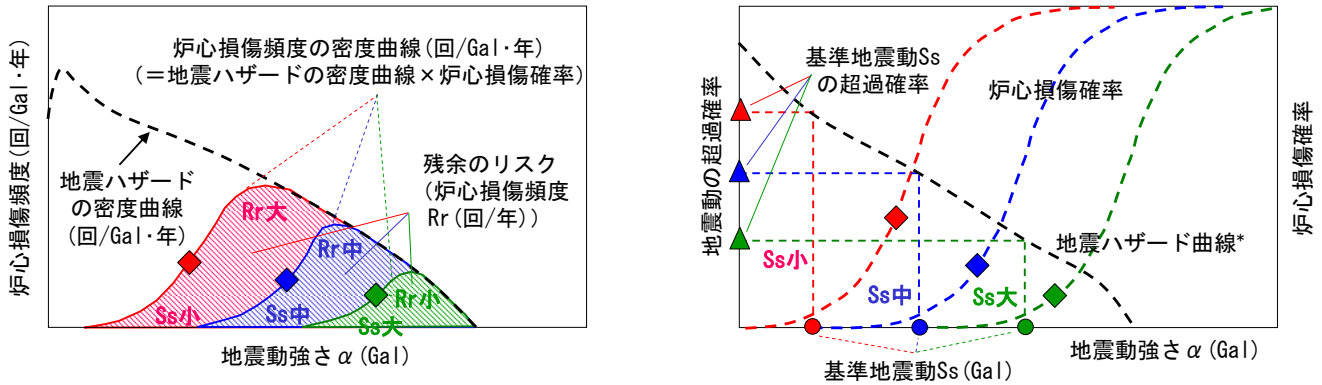
超過確率が小さい程、それに対応した地震動が大きくなり、大きな地震動で設計された建屋・機器の耐力は大きくなることから、炉心損傷確率さらには、炉心損傷頻度が小さくなる。

即ち、残余のリスクと地震動の超過確率とは、関数関係にあり、基準地震動の超過確率を低く設定する程、残余のリスクが小さくなる。

18

炉心損傷頻度からみた残余のリスクと 基準地震動の超過確率との関係

耐震設計に基づく残余のリスクの評価



残余のリスクを考慮した耐震設計(S_s の超過確率)の決定論的設定の見直し

*: 地震ハザード曲線は、地震動の超過確率 p と超過頻度 f (回/年)の2つで表示される。後者は残余のリスク評価の場合に用いる。超過確率が 2×10^{-3} 以下では、 $|p| = |f|$ となる。

19

5. 耐震バックチェックと残余のリスク評価

(1) 耐震バックチェック

① 原子力安全委員会/原子力安全・保安院の見解/指示

■原子力安全委員会

- 「耐震設計審査指針」(H18年9月改訂)
 - ・ 基準地震動 S_s を超えた場合の「残余のリスク」の認知

■原子力安全・保安院

- 耐震バックチェック: 改訂耐震指針を踏まえ事業者へ指示(H18年9月)
 - ・ 不確かさを考慮した S_s の評価、 S_s に対する建屋・機器の安全性評価
 - ・ 地震PSAを用いた残余のリスク評価
- 中越沖地震(H19年7月、マグニチュード6.8、東電柏崎刈羽発電所近傍)
 - ・ 旧耐震指針の設計応答の約2倍の加速度応答が観測
 - ・ 「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」機能が発揮、安全性が確保

不確かさを考慮の妥当性の確認

- ・ 地震動増幅や建屋床柔性等の原因究明

中越沖地震における最新知見の考慮を全事業者に指示(H20年9月)²⁰

②耐震バックチェックにおける確率論的取り扱いに係る動向

■ 基準地震動 S_s の審議

- ・ S_s 設定に係る不確実さの取り扱い
 - ⇒ 不確実さの取り扱いが議論され、定量的評価手法のロジックツリー法の重要性が認識される。同法の運用ルールの整備が必要。
- ・超過確率の参照
 - ⇒ S_s を超える地震動の発生確率を十分小さくする指標として、超過確率の重要性が認識される。同確率の判断基準の整備が必要。
- ・震源を特定せず策定する地震動の取り扱い
 - ⇒ 観測地震動を包絡する評価手法で検討されているが、確率論的手法は補助的検討に参照されている。

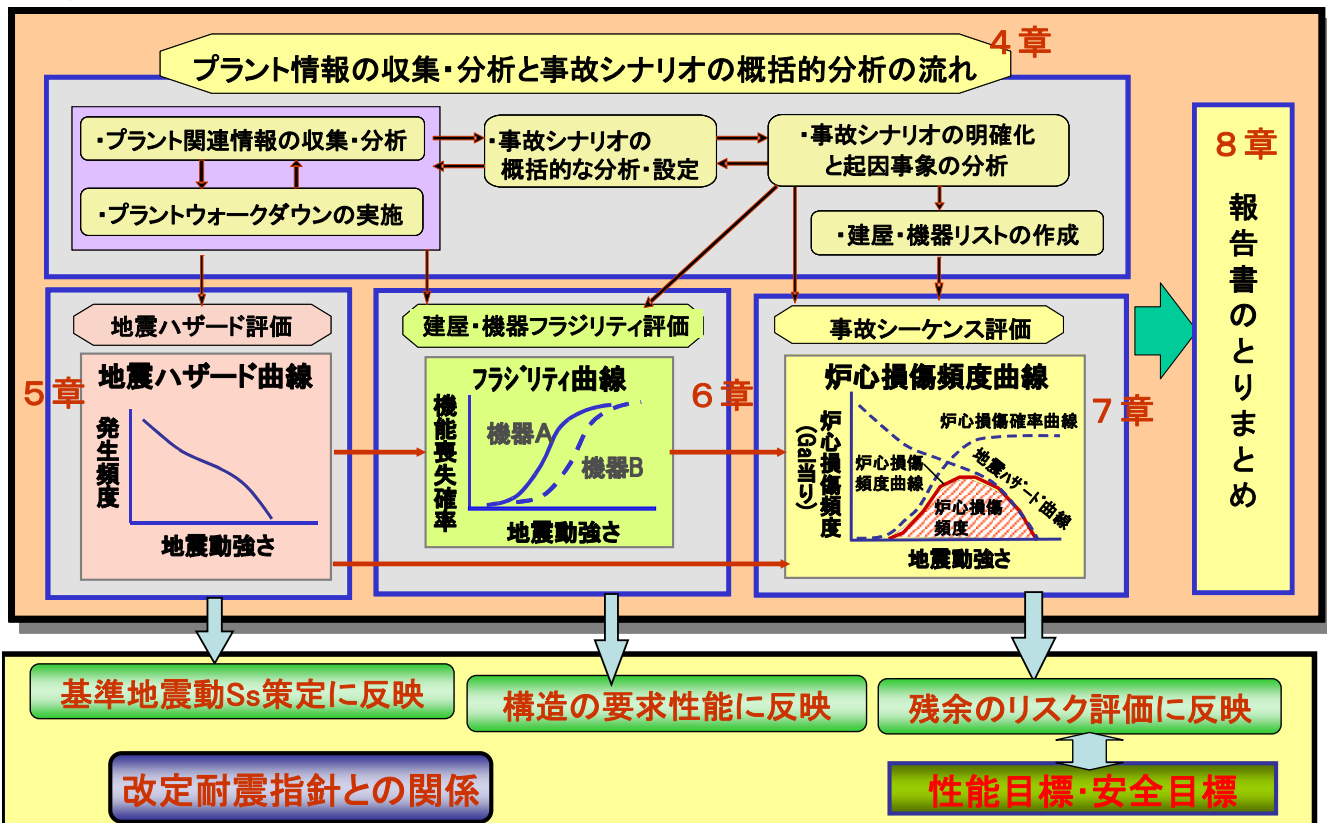
■ 構造物・機器の安全性評価の審議

- ・事故時荷重と地震荷重の組み合わせ
 - ⇒ 地震荷重として、弾性確認用地震動 S_d で検討される。 S_d の超過確率が重要である。
- ・旧耐震指針 S_2 を上回る地震動が観測されたが安全性は確保された。地震PSA用に実施されている限界試験データ等に基づく実力値での評価の重要性が認識される。耐震評価基準の整備が必要。

21

(2) 残余のリスク評価

③ 原子力学会地震PSA実施基準



■ 地震PSA/PRA技術の現状認識

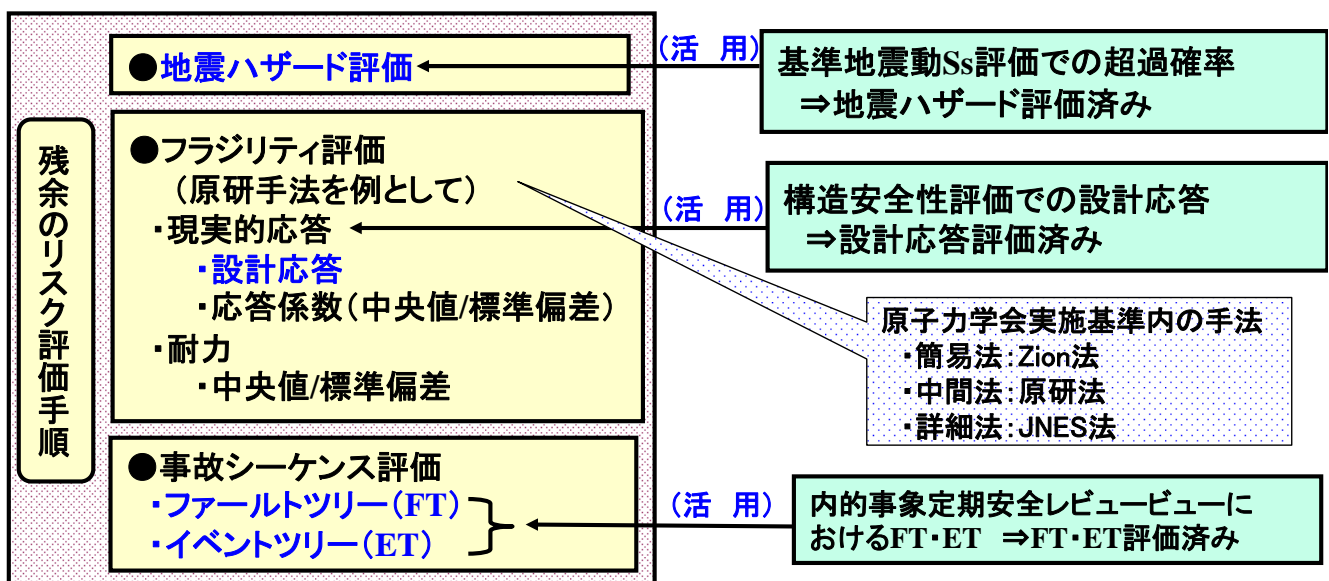
- ・ 米国では、U.S.NRCの指示により、1990年代に地震PRA手法（距離減衰式による地震ハザード評価、簡易法によるフラジリティ評価）を用いた個別プラント評価が実施された。
- ・ 日本原子力学会地震PSA実施基準は、OECD/NEA主催の地震PSA国際会議（2006年）において、U.S.NRCや他の多くの参加機関から極めて高い評価を受けた。
- ・ 同国際会議において、地震PRA/PSA技術は成熟しているとの決議がなされた。
- ・ 上記実施基準を英訳化したいとの申し入れが、U.S.NRCから原子力学会へある。

■ 残余のリスク評価の有用性

- 評価条件、評価モデル、使用データ、評価結果の陽な明示 ⇒ 透明性、説明性
- 耐震安全上重要な次の情報が得られる
 - i 炉心損傷頻度(CDF: Core Damage Frequency) に寄与する構造物・機器 ⇒ 耐震重要度分類の適正化
 - ii 地震動下で複数の機器が同時に損傷する可能性 ⇒ 共通原因損傷
 - iii CDFに寄与するシステム ⇒ システムの冗長性の有効性
 - iv CDFに寄与する事故シーケンス(各種安全系がどのように破られるか) ⇒ 多重防護の有効性
 - v CDFに寄与する地震動の大きさ及び超過頻度の範囲 ⇒ 地震動の品質範囲
 - vi CDFの把握 ⇒ 性能目標との対比から残余のリスクの程度
国際標準との比較
- どのような構造物・機器、安全系、事故シーケンスに着目し、耐震安全性の一層の向上を図るかの判断に活用可能

地震PSA/PRA技術は耐震安全性確保の確認に極めて有効な手段である

④ 残余のリスク評価手順とSs評価・構造安全性評価との位置づけ



・ Ss評価や構造安全性評価において確率論的取り扱いがなされている。
 ・ これらを継続し、残余のリスク評価に活用することで、効率的、実効的な評価が可能

⑤ 評価手法・関連データ整備等の一層の取り組み

●地震ハザード評価

- ・断層モデルを用いた手法の高度化と
ひずみ集中帯での発生頻度の考慮 等

●フラジリティ評価

i 自然地震動に対する、構造物の現実的耐力を用いた評価の重要性を再認識

- ・包絡応答スペクトルを満足するような模擬地震動を用いて、振動台試験を実施していたが、自然地震動に対する試験を重要視することが重要。
- ・構造物の耐力を一般的に最大加速度で表していたが、地震動特性(最大加速度、速度、ひずみ、CAV、エネルギー等)を考慮し、機能喪失モードを表す物理量に依存した耐力評価が重要。

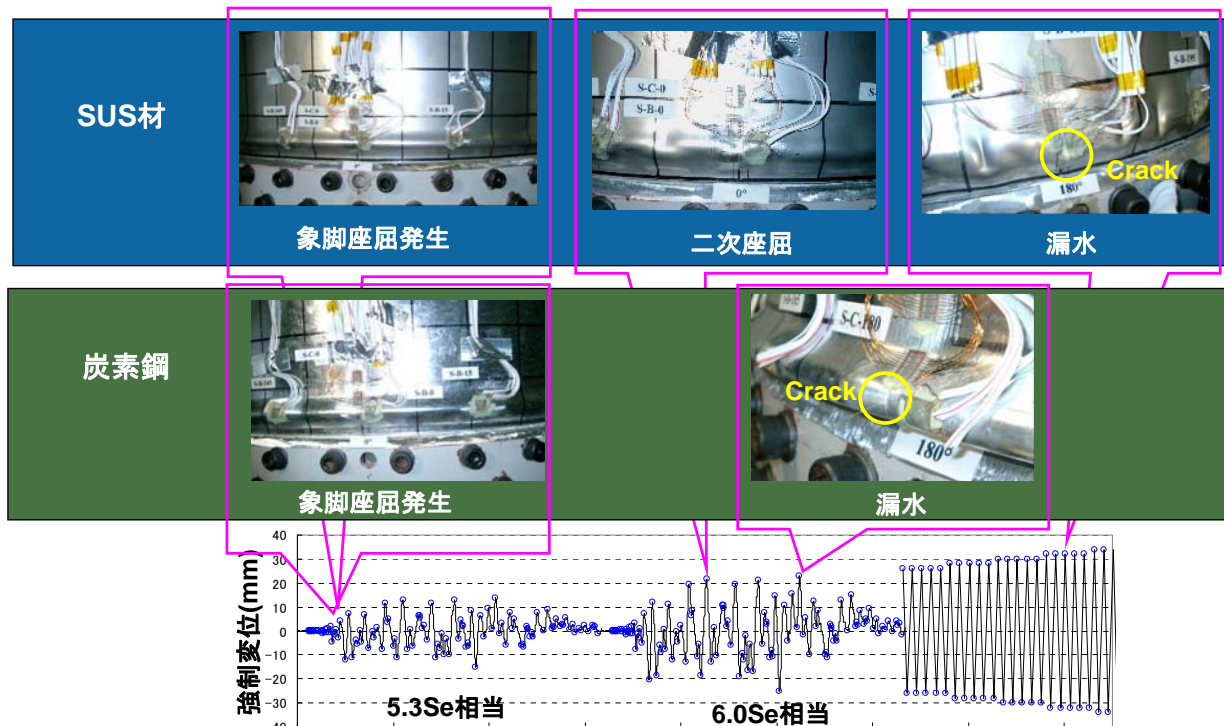
⇒ (参考:タンクを対象とした機能限界試験データを用いた評価例)

ii 配管等の耐震強化策内容のフラジリティ評価への反映 等

●実施基準を用いた残余のリスク評価の試行を進め、リスク評価の品質を確保しつつ、効率良く実施する。

25

参考：機能限界試験結果の例



象脚座屈を現行判断基準としているが、二次座屈が機能喪失(漏水)に至る支配的要因と明らかにした。機能喪失に至る限界をひずみ量を用いて定量的に明らかにした。

26