

原子力学会地震 PSA 実施基準と新原子力耐震指針への活用

Seismic PSA Implementation Standards by AESJ and the Utilization of the Advanced Safety Examination Guideline for Seismic Design for Nuclear Power Plant

蛸 沢 勝 三 (えびさわ かつみ)

(独)原子力安全基盤機構 耐震安全部 部長

日比野 憲 太 (ひびの けんた)

(独)原子力安全基盤機構 耐震安全部 主任研究員

1. はじめに

原子力における新耐震設計審査指針（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¹⁾。大きな特徴は次のとおりである²⁾。

- ① 信頼性の高い地質・地盤調査を前提とした不確実さを適切に考慮した地震による地振動（Ss）の策定方法の高度化
- ② Ss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

原子力施設の安全性は、深層防護の原則に基づく確定的な対策・評価によって達成されているが、機器故障等に基づく内的事象と異なる特徴は次のとおりである。

- a) 地震・地震動は自然現象で人間が制御できない
- 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
- c) 大きな地震動に対しては、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

新指針は、(i)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により「残余のリスク」を小さくすることを求めている。「残余のリスク」が小さいことを確実なものとするために、(ii)「残余のリスク」を確率論的地震安全評価（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の Ss 策定方法と地震 PSA とは整合することが求められる。(iv)地震 PSA を構成する要素技術はすべて決定論的耐震設計法および地震安全評価法と同一である。

本報ではまず、新指針中の確率論的方法の要点を論ずる。ついで、日本原子力学会で策定の地震 PSA 実施基準³⁾の概要を紹介し、これに基づき、確率論的取り扱いへの具体的な方法について述べると共に、平成19年7月16日の中越沖地震以降、にわかに着目されている耐震裕度の定量的取り扱いへの活用についても言及する。

2. 新指針における確率論的方法の位置づけ

新指針中の確率論的方法の取り扱いの内容は、基準地震動策定と「残余のリスク」に係るものに大別される。

(1) 基準地震動策定における確率論的取り扱い

基準地震動 Ss は、震源を特定して策定する地震動と、特定せず策定する地震動からなり、共に水平および鉛直地震動成分からなる。前者の評価では、特に考慮すべき活断層を後期更新世の最終間氷期までとし、審議の過程ではおよそ8万年前以降から最長13万年前以降に活動した断層の調査が必要との議論がなされ、これらを対象とした地震動評価手法としては、応答スペクトル距離減衰式を用いた手法と、断層モデルを用いた手法が併記されている。

Ss 策定での確率論的取り扱いについて、次の4事項が求められている。これらを満足するためには、地震 PSA 手法の活用が考えられ、耐震分科会においても何度か紹介されると共に、原子力学会の状況の報告が求められた。

- ① 震源を特定して策定する地震動評価において、不確かさ要因と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評価において、決定論的方法と、確率論的手法も言及されていること
- ③ Ss の応答スペクトルの超過確率を申請書に明記し、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

(2) 残余のリスクの取り扱い

新指針では、「基準地震動 Ss 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。Ss を上回る地震動によるリスクを「残余のリスク」とし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べき」ことが記述されている。

一方、耐震指針検討分科会（耐震分科会）見解¹⁾には、「客観性・信頼性を備えたリスクの定量的評価手法の確立、リスクに対する明確な定量的目標値（安全目標また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。」等が明記されている。

3. 地震 PSA 実施基準の概要

3.1 実施基準の構成

実施基準は次の8章から構成される。1.適用範囲 2.

専門用語の定義 3.評価の流れ 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の流れ 5.地震ハザード評価 6.建屋・機器フラジリティ評価 7.事故シーケンス評価 8.報告書のとりまとめ

実施基準の詳細は関連文献⁴⁾を参照されたい。ここでは4章以降の実施基準の概要について述べる。まず、図—1に示すように、地震PSAに必要な関連情報の収集・分析、プラントウォークダウンを実施すると共に、原子力プラントで最も過酷な事故の炉心損傷（燃料被覆管最高温度が1200度に達する状態で定義）に関する定量的評価の準備として、地震時特有の広範な事故シナリオの設定、炉心損傷事故の引き金となる起因事象の分析、機器リストの作成を行う（4章 プラント情報の収集・分析と事故シナリオの概括的分析）。

ついで、対象原子力サイトに将来襲来する可能性のある地震動の強さとその発生頻度の関係を示す地震ハザード曲線を求める（5章 地震ハザード評価）。

また、地震動によって、原子力プラント内の個々の建屋・機器がどのように揺れるか、この揺れとそれらの機能限界との関係で、どのように機能喪失するかを評価し、地震動の強さと機能喪失の確率の関係を示すフラジリティ曲線を求める（6章 建屋・機器フラジリティ評価）。

そして、これらの機器から構成される事故進展緩和のための各種緩和系がどのように機能喪失するか、これらの機能喪失に伴い多重防護の観点で設置されている各種安全系の機能がどのように破られ、炉心損傷に至るかの可能性を分析し、地震動の強さと炉心損傷の確率の関係を炉心損傷確率曲線として求める。この曲線と上記地震ハザード曲線から求まる図中上の凸の炉心損傷頻度曲線内の面積、すなわち、炉心損傷頻度を求める（7章 事故シーケンス評価）。

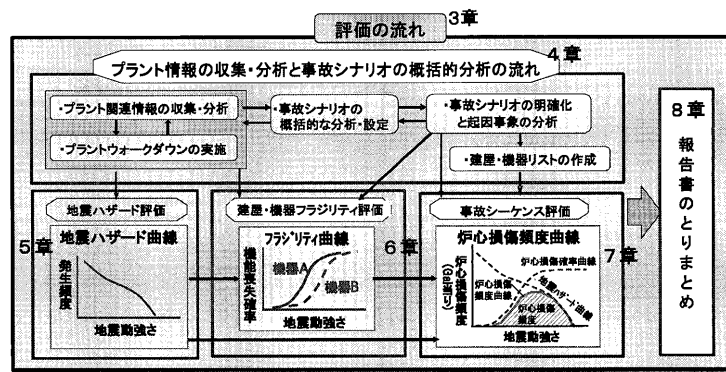
地震PSAも含めたPSAでは、最終評価結果の炉心損傷頻度に着目しがちであるが、PSAからの最も重要なメッセージは、評価の過程におけるモデルやデータをどのような根拠・判断で用いたか、その結果として、炉心損傷に大きく寄与する不確実さの要因、事故シナリオ、緩和系、機器等を同定し、明示することである。説明性の確保の観点から、これらを報告書に取りまとめる（8章 報告書のとりまとめ）。

3.2 地震ハザード評価

4章において基準地震動策定における確率論的取り扱いを論ずるので、上記地震ハザード評価関連を述べる。

地震ハザード評価ではサイト周辺で将来発生する地震の位置・規模・頻度の震源モデル化を活断層や歴史地震データを用いて行い、これらの震源による地震動伝播モデルを距離減衰式や断層モデルで評価し、地震動強さとその超過頻度率の関係を求める。モデル化の不確実さはロジックツリー（LT: Logic Tree）を用いて取り扱う。主な特徴を示す。

① 震源モデルを特定震源と領域震源モデルに分ける。



図—1 地震PSA実施基準における評価手順

- ② 地震動伝播モデルとして、距離減衰式または断層モデルによる方法のいずれを用いてもよい。水平および鉛直地震動の両方を設定する。地震動のばらつきを表す対数標準偏差と地震動の上限値を設定する。
- ③ 震源モデル、地震動伝播モデルに係る不確実さ要因を自然現象に係わる偶然的要因と知識・データ不足に係わる認識論的要因に大別し、後者の要因を対象としLTを用いた不確実さ評価手法を導入する。

3.3 フラジリティ評価

5章において耐震設計と耐震裕度について論ずるので、上記実施基準でのフラジリティ評価関連事項を述べる。

フラジリティ評価では、まず、耐震設計、振動台試験、震害等の情報を用いて、個々の建屋・機器毎に損傷の部位・モードを同定し、機能喪失限界の耐力を設定する。ついで、同定部位での揺れの保守性を除いた現実的値として地震動強さ毎に設定する。そして、現実的揺れと耐力を比較し確率を評価し、地震動強さと機能喪失の確率の関係を求める。機能限界耐力、現実的揺れ共に、中央値と対数標準偏差で表す対数正規分布に従うと仮定する。

4. 新指針における確率論的取り扱いへの活用

4.1 基準地震動策定における確率論的取り扱い

(1) 震源を特定して策定する地震動の不確実さの考慮
不確実さの考慮に関しては、新指針に震源を特定して策定する地震動評価を、距離減衰式または断層モデルによる手法を用いて、不確実さを考慮し決定論的に行うと記載されている。耐震分科会においても、不確実さを考慮すべき要因、因子の提案、議論はなされたが、定量的取り扱いについては具体的な議論はなされていない。そこで、地震ハザード評価における特定震源を対象としたLTを用いた不確実さ評価手法の活用⁴⁾が挙げられる。

LTを用いた確率論的扱いは、不確実さを考慮して決定論的に行うことと、一見相容れないもののように見えるが、基本的考え方は同一である。決定論では、震源や地震動伝播モデルに係るパラメータを設定する場合、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と想定されるので、全パラメータは一見確定値に見える。そこで、決定論的何度かの試行プロセスを、LTとして陽に明示することで、認識論的不確実さと現象論的不確実さ^{3),4)}を確率論の共通土俵で扱うことができる。

論 説

(2) 震源を特定せず策定する地震動の確率論的取り扱い

震源を特定せず策定する地震動評価における確率論的手法の活用が言及されているので、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。あるいは、同手法を一層詳細化した原子力安全基盤機構の断層モデルを用いた確率論的評価手法が分科会で審議され認知されると共に、論文が公開されている⁵⁾ので、活用が挙げられる。

(3) 超過確率の参照

超過確率の明記に関しては、新指針に超過確率の評価手法やその大きさが示されていない。そこで、地震ハザード評価結果の超過確率の活用が挙げられる。どの程度の値にするかは、耐震分科会の審議において我が国の性能目標の検討状況、国際的にも認知度の高い IAEA/INSAG5 の性能目標を念頭に、少なくとも超過確率 10^{-4} 以下とすることが例示されている⁶⁾ので、参考値としての活用が挙げられる。

(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を組み合わせる場合には、超過確率の使用が明示されている。そこで、地震荷重の超過確率に地震ハザード評価結果の活用が挙げられる。両荷重の組み合わせにおける超過確率の取り扱いは、昭和 56 年制定の耐震設計審査指針（旧指針）⁷⁾において導入されている。同指針に対応している JEAG (Japan Electric Association Guide) には、 10^{-7} の参照が明示されている⁸⁾ので、この値を参照できる。

4.2 残余のリスクの取り扱い

(1) 残余のリスクの定義および判断指標

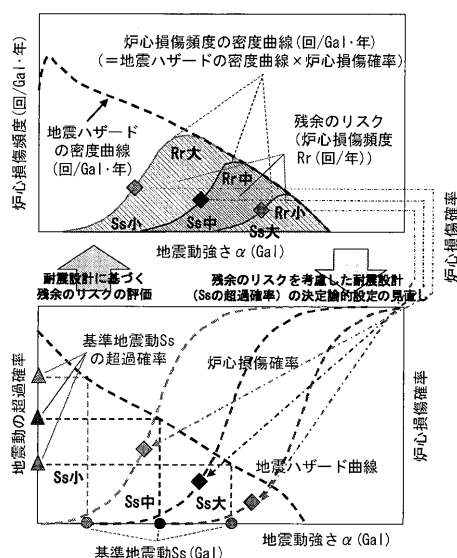
残余のリスクの定義は、基準地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぼすことにより施設の重大損傷事象が発生すること、大量の放射性物質が放散する事象が発生すること、あるいはそれらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすこととされている。

残余のリスクの判断指標には、原子力安全委員会が公開の安全目標（施設敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡確率およびがん死亡確率が 10^{-6} /年・サイト以下）や性能目標（炉心損傷頻度が 10^{-4} /炉・年以下で、かつ格納容器機能喪失頻度が 10^{-5} /炉・年以下）が挙げられる^{9),10)}。

(2) 残余のリスクの評価手法

残余のリスクの評価手法としては、PSA 手法だけが公開文献として提案されており、最も現実的手法と考える。残余のリスクにおける施設の重大損傷事象である炉心損傷の頻度をレベル 1、大量の放射性物質の放散事象をレベル 2、周辺公衆の放射線被ばくおよび死亡確率をレベル 3 として、それぞれ PSA 手法⁴⁾を用いて評価する。

本報で論じている地震 PSA 手法はレベル 1 PSA を指し、その結果と内的事象 PSA の手法を準用することで地震に対するレベル 2, 3 PSA へと進むことができる。これらの実施基準も原子力学会において近々に策定予定である。



図—2 残余のリスク（炉心損傷頻度）と基準地震動の超過確率との関係

(3) 残余のリスクの低減策

「残余のリスク」の低減については、地震 PSA で同定される重要な事故シーケンス、緩和系、機器に着目し、各種の改良・改善を行う。例えば、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）の構造強化等、ポンプや電気盤のような動的機器の場合、免震構造化等が挙げられる。

4.3 残余のリスクと基準地震動の超過確率との関係

残余のリスクの炉心損傷頻度は、図—2 の地震ハザード曲線と炉心損傷確率曲線とで囲まれる面積として求められる。そこで、基準地震動の超過確率が小さい程、それに対応した地震動 α が大きくなり、この α で設計された建屋・機器の耐力は大きくなるので、炉心損傷確率が小さくなり、炉心損傷頻度も小さくなる。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。

5. 耐震裕度とフラジリティ評価手法の活用

5.1 耐震設計の概要

耐震設計の概要について、旧指針に基づき述べる。耐震設計では、対象施設の耐震重要度に応じ、基準地震動による動的地震力と静的震度による静的地震力に対し設計する。地震力は、基準地震動作成、地盤伝播、建屋応答、機器・配管応答の各解析を行い求める。重要度（各施設を安全性の観点から分類したものであり、重要度の高いものから As, A, B, C の順である）As, A の施設は、設計用最強地震の地震動 (S1) に対して、線形応答となる弾性挙動の領域に納まるよう設計する。更に、As 施設については、設計用限界地震の地震動 (S2) に対して、弾塑性挙動の領域で非線形解析を行い機能を確認する。S2 に対して弾性領域で設計する場合もある。これらの地震力による荷重は、遮蔽・熱過渡等の荷重と組み合わせ、各部材力を算定し材料力学的手法によって応力を求め、これの応力をあらかじめ定められた許容応力と比較し耐震性を確認する。

5.2 耐震設計における耐震裕度の要因

上記耐震設計における耐震裕度の主な要因を例示する。

(1) 許容応力の取り扱い

5.1 での許容応力は、例えば、材料の引張り、圧縮、せん断試験データや、繰返し、クリープ試験データ等を用いて設定されているが、これらのデータはばらつので、平均値よりかなり小さな値として設定されている。すなわち、多くの設備の実際の限界は、上記許容応力よりもかなり大きく、この分耐震上の裕度が確保される。

(2) 応答挙動における粘りの取り扱い

強震動下での設備の応答挙動は一般的に、弾塑性挙動となり十分な粘りを示すが、耐震設計ではこの粘りを期待せずに弾性挙動として取り扱い、設備の断面等を設定するので、この取り扱いに耐震裕度が含まれている。このような耐震裕度は、延性破壊をする設備に当てはまるものの、脆性破壊するものには必ずしも当てはまらない。

(3) 応答解析における物理パラメータの取り扱い

上記各種応答解析では、原子炉建屋の振動モデル内における耐震壁の減衰定数等のパラメータを保守的に設定しており、この取り扱いにより耐震上の裕度が生じる。

(4) 基準地震動の取り扱い

耐震設計は S1 に対して行われるが、S2 を用いて弾性設計されている場合も多く、耐震上の裕度が確保される。

(5) 地震荷重と遮蔽・熱過渡等の荷重との組み合わせ

地震力による荷重は必要に応じ遮蔽・熱過渡等の荷重と組み合わせられ、地震動下での各部材の応力が決められ、同応力は遮蔽・熱過渡等様々な荷重で決まる場合も多い。建屋壁厚は遮蔽設計から配管肉厚は熱過渡挙動上の要求から決まり、耐震上十分な裕度を持つ場合がある。

上記(1)～(5)の決定論的定量評価は部分的に散見されるが、著者の知る範囲で体系的なものは見当たらない。

5.3 耐震裕度評価へのフラジリティ評価手法の活用

上記耐震裕度の要因のうち、(1)は3.3フラジリティ評価における機能限界に、(2)～(5)は揺れに係るものである。地震 PSA では、As, A クラスはもとより、安全に影響を及ぼす B, C クラスも対象とする。これら構造物・機器毎の(1)～(5)の要因は、機能限界と揺れに係るものに分けられ、保守性を取り除き対数正規分布に従う機能限界耐力と現実的揺れとして、それぞれの中央値と対数標準偏差が定量評価される。図-3 のように、設計での安全確保の基本的考え方は、「設計揺れは大きく、設計許容値は小さく設定し」、両者の隔たりを設計時安全率として表す。

設計許容値の保守性を除いた機能喪失限界耐力と、設計揺れの保守性を除いた現実的揺れそれぞれの中央値を比較することで、耐震裕度の平均像を把握できる。対数標準偏差を考慮することで、ばらつきも含めた耐震裕度を定量的に把握できる。横形ポンプが柏崎刈羽発電所 1 号機原子炉建屋基礎上に設置されていたと想定し、公開文献に基づき水平動に対する平均像を例示する。設計応答は 273 Gal¹¹⁾、中越沖地震での観測地震応答は約 680

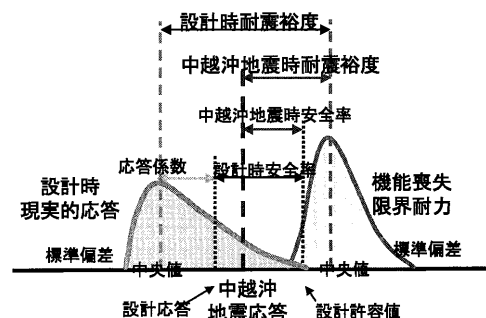


図-3 機器の耐震裕度の定量的取り扱いの観念

Gal¹¹⁾である。一方、設計許容値は 1 400 Gal⁸⁾、機能限界の中央値は 6 000 Gal¹²⁾である。設計時の安全率は約 5.1 となる。中越沖地震時の安全率、耐震裕度は約 2.1, 8.8 となり、機能喪失しなかったことが分かる。

耐震裕度を体系的に定量評価し得る手法としては、著者の知る範囲では地震 PSA 手法だけであり、地震 PSA 実施基準は有用手段となる。

6. あとがき

著者は、我が国の地震 PSA 技術が実用段階にあると考えている。地震 PSA に関する最新国際動向としては、平成 18 年 11 月に国際経済協力開発機構原子力機関主催の地震 PSA 専門家会議が韓国済州島で開催され、「地震 PSA 技術は成熟しており一層規制へ活用されるべき」ことが会議のまとめとして挙げられた¹³⁾。

参 考 文 献

- 1) 原子力安全委員会（原安委）：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改定，平成 18 年 9 月 19 日。
- 2) 平野光将：新しい耐震指針の考え方，エネルギーレビュー，12月号，2006。
- 3) 日本原子力学会：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-P006：2007，2007年。
- 4) 蛭沢勝三：軽水炉確率論的安全評価(PSA)入門 (6) 地震 PSA，日本原子力学会誌，Vol. 48，2006。
- 5) 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，平成 17 年 4 月 22 日。
- 6) 原安委：地震動評価における不確定性要因の取り扱い，震分第 21-6 号，平成 17 年 6 月 30 日。
- 7) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針，JEAG4601-1987。
- 8) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編，JEAG4601・補-1984。
- 9) 原安委：安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ，平成 15 年 12 月。
- 10) 原安委：発電用軽水型原子炉施設の性能目標，平成 18 年 3 月。
- 11) 東京電力：柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析に係わる報告（第一報），平成 19 年 7 月 30 日。
- 12) 原子力安全基盤機構：原子炉施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査機器耐力 その 2，06 基構報-0014，平成 18 年。
- 13) R. Budnitz: Summary of what was learned during the meeting, OECD/NEA, Specialist Meeting on Seismic PSA of Nuclear Facilities, 2006。

(原稿受理 2008.4.7)