解説

地震 PRA 実施基準の改定—3.11 の教訓の反映

第 3 回 フラジリティ評価改訂の要点

標準委員会・リスク専門部会・地震 PRA 分科会,

建屋・機器フラジリティ作業会 山口 彰, 中村 晋, 美原 義徳

東北地方太平洋沖地震の教訓をはじめとして、建屋・機器フラジリティの評価について多くの新しい知見が獲得された。また、近年の解析評価技術の進歩とともに新しい解析評価手法が提案された。これらを反映するとともに、フラジリティ評価の範囲を、敷地内のあらゆる設備、可搬型設備を含む重大事故対策設備、地震の従属事象である津波対策設備をも含むよう拡大した。本稿では、地震 PRA 実施基準のフラジリティ評価改訂の要点を解説する。

I. まえがき

日本原子力学会は、2007 年に地震起因の確率論的安全評価実施基準(2007 年版)を発刊した¹⁾。その発刊と時期を前後して 2007 年 7 月 17 日に発生した新潟県中越沖地震では、柏崎刈羽原子力発電所にて設計基準地震動を大きく上回る地震動を経験した。発電所では全ての安全上重要な設備はその機能を失うことなく、健全性を維持し、外部電源も失われることはなかった。しかし、設計基準を上回る地震動を経験した構造物の健全性判断の基準をどうするのかという課題を提起した²⁾。

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震時には、太平洋沿岸の東通原子力発電所から東海第二原子力発電所までの 5 発電所のうち、女川原子力発電所ならびに福島第一原子力発電所では一部で基準地震動 S_s を上回った。しかし、いずれの原子力発電所においても地震によって安全機能が損なわれることはなかった。

原子力安全・保安院は、福島第一発電所及び福島第二発電所全号機の原子炉建屋及び原子炉建屋に設置される主要な耐震安全上重要な 7 設備が地震により受けた影響について、地震応答解析により検討した。いずれの設備も評価基準値を満足していることから、地震時及び地震直後において安全機能を保持できる状態にあったと推定

した。さらに、7 設備以外の耐震 S クラスの機器・配管が地震により受けた影響について、現場確認が可能な福島第一発電所 5 号機で代表して地震応答解析により検討した。その結果、一部の配管本体及び配管サポートを除き、評価基準値を満足していた。評価基準値を上回った配管本体及び配管サポートについては、目視による調査を行い、有意な損傷がないことを確認した。これらの分析から、地震時及び地震直後において安全機能を保持できる状態にあったと推定した³⁾。

外部電源については太平洋沿岸の 5 発電所の合計 22 回線のうち、地震後に電力供給できたのは女川発電所及び福島第二発電所の 3 回線に過ぎず、工事中または作業中で停止していた 2 回線も含め 19 回線は系統中の電気設備のどこかに地震による損傷等が生じ電力供給が停止した。

その後、地震随伴事象である津波により、福島第一原子力発電所では 1 号機から 3 号機で炉心溶融事故が発生、4 号機でも使用済み燃料プールの水位を確認できない状況に至った。そのほかの発電所においては、除熱源喪失などの事態が発生したが、アクシデントマネジメント(AM)が功を奏し冷温停止に至った。

これらの分析は地震 PRA に対しても多くの教訓をもたらした。地震により引き起こされる事象、特に津波の影響を地震 PRA ではどのように考慮するべきか、AM 特にシビアアクシデント発生後の AM によるリスク抑制対策は地震に影響されないか、AM 策の実効性を評価するためにフラジリティ評価の対象や損傷モードをどう定めるべきか、地震により他の外的事象が誘発される可能性はないか。2007 年版発刊から 6 年余りが経過し、この間のフラジリティ評価に関連する技術の進歩や知見の蓄積を反映することはもちろんであるが、前述した福

Revision of the AESJ Standard for Seismic Probabilistic Risk Assessment (PRA) – Updating requirements based on the lessons learned from the Fukushima Dai-ichi NPP Accidents (3) ; Fragility Evaluation and Outline of the Updated Points
: Akira YAMAGUCHI, Susumu NAKAMURA, Yoshinori MIHARA.

(2014 年 7 月 15 日受理)

■前回のタイトル

第 2 回 地震ハザード評価改定の要点

第1図 建屋・機器 fragility 評価手順

島第一発電所事故の教訓等を踏まえ、改めて地震 PRA における fragility 評価の範囲や考え方から改訂することとした。

fragility 評価の実施手順とフローを第1図に示す。評価対象と損傷モードの設定について多くの改訂がなされた。また、津波の影響緩和設備や AM のための設備、免震重要棟など、評価対象を大幅に拡大したことに伴い、それら設備に関する耐力や応答の評価手法の整備、解析評価事例を充実させた。

fragility 評価では膨大な作業が必要であり、また地震随伴事象に対処するために、多くの分野の専門家が関与する必要がある。また具体的な適用例を学ぶことにより、多くの洞察が得られる。今般発行された2014年版の標準⁴⁾について講習会を開催する予定であり、併せて参考にしていただきたい。

II. fragility 評価におけるポイント

建屋・機器 fragility 評価において、対象とすべき建物、設備・機器の選定はきわめて大切なプロセスである。本標準では、建屋・機器リストの作成にあたり、建屋・機器 fragility 評価と事故シーケンス評価の間で相互に調整を実施し、必要に応じて建屋・機器リストの見直しを実施することを求めている。特に地震随伴事象(火災、溢水及び津波)を評価する場合は、必要な機器などをリストに追加すること、防潮堤のような津波特有の対策設備は、地震 PRA の建屋・機器リストとしては抽出されないことから、地震 PRA の観点からだけではなく、地震随伴事象を含めた観点から建屋・機器リストの

作成を行うことを要求している。

fragility とは、第1図に示すとおり、建物や機器の各損傷モードと損傷部位毎に、耐力と応答を評価し、応答が耐力を上回る確率を不確かさとともに表現するものである。fragility の評価は損傷確率の数学的モデル化であり、耐力は損傷限界を記述する材料力学あるいは機能限界に関する知見による。応答は、建屋・機器を数学的・工学的にモデル化して入力荷重に対する挙動を解析することにより得られる。近年の技術進歩の著しい分野は、計算機技術とあいまって応答評価の精度向上と不確かさ低減である。

PRA 分野において、福島第一原子力発電所の事故の重要な教訓は、シビアアクシデントの発生及びその影響を含めたりスクこそ安全の目的の観点から重視すべきということである。すなわち、シビアアクシデントマネジメント (SAM) 並びに緊急時対応という深層防護の後段部分を踏まえた PRA が不可欠であるということである。SAM を行う上で改訂標準は地震に起因して炉心損傷を防止する観点からのみに留まらず、炉心損傷の影響緩和や AM 策を念頭に建屋・機器リストの作成を求めている。

SAM のための設備や地震随伴事象に関連する設備を含めることが肝要であり、考慮すべき建屋・機器が網羅されていることを確実にするために、反復的に建屋・機器リストを見直して完成度を高めることが重要である。

炉心損傷後の SAM の適切な考慮と関連して提起される問題は余震と断層変位である。福島第一原子力発電所事故では、安全機能喪失後の危機管理に対して、余震ならびにそれに伴う津波警報が大きな影響を及ぼした。また、アクセス道路の陥没などの敷地の変形が SAM の活動を阻害することの重要性を再認識する必要がある。また、断層変位による影響の不確かさについては現実的な分析により、リスクに及ぼす影響と適切な緩和方策を定量化する努力が重要であり、本標準では事故シナリオの選定・分析・評価を求めている。

以上に論じた通り、今般の地震 PRA 標準の改訂の fragility 評価に係る部分として、(1) 地震随伴事象に対する考慮、(2) 最新知見に基づくシミュレーション技術、(3) SAM に係る設備を含めさまざまな設備の多様な損傷モードの考慮、(4) 余震と断層変位の考慮が重要なポイントである。以下では、これらについて、改訂標準の建屋・機器 fragility 評価での特徴について順次、概説する。

III. 地震随伴事象に対する考慮

地震によって発生しうる随伴事象としてさまざまなシナリオが想定される。東北地方太平洋沖地震では津波が重畳し、新潟県中越沖地震においては変圧器の火災が発生した。地震起因の内部溢水の PRA 標準策定も原子力学会にて検討しているところである。改訂標準では、そ

第2図 津波対策設備の一例

の適用範囲を，“地震により発生する火災、溢水及び津波に起因する事象の PRA を実施する際に必要な地震ハザード評価は本標準の方法を用いるよう規定し，また，それらの PRA で対象とする建屋・機器 fragility 評価に係わる規定も含んでいる”と定めている。

福島第一事故の教訓を踏まえての津波対策の一例を第2図に示す。これら設備の情報収集，損傷部位と損傷モードの評価，fragility の評価を求めている。附属書(参考)にはこれら設備の fragility 評価事例を多数掲載している。2007 年版地震 PRA 標準では，地震に因る直接的な炉心損傷を対象としているため，防潮堤や水密扉などの設備は評価対象外であった。地震随件事象に備える設備の地震後の健全性を評価することは地震 fragility 評価の役割であり，地震起因の津波，溢水，火災などの評価に必要なあらゆる設備を評価対象として加えた。

今後，地震に起因する他の随件事象が摘出されれば，その対策設備の地震 fragility は本標準の評価対象となる。ハードウェア設備のみならず，可搬設備やオフサイトからの支援活動に係る要素も含まれることとなる。

IV. 最新知見に基づくシミュレーション技術

2007 年版の地震 PRA 標準の発刊以来，fragility 評価において大きな進歩をとげた分野はシミュレーション技術である。地震応答に関するデータの充実と計算機の高速化により地盤と建物を含む弾塑性を考慮した 3 次元有限要素モデルが適用可能となってきた。

新潟県中越沖地震での原子炉基礎版で測定された地震波 (Obs)，質点系モデルによる解析結果 (SLM)，3 次元有限要素法による解析結果 (3DFEM) を比較して第3図に示す。質点系モデルでは，周期 0.1 秒近傍の周期帯での NS 方向の解析結果が一致していない。これを改善するには，3 次元特性を考慮した建屋や地盤の剛性を質点

第3図 3次元有限要素モデルによる応答シミュレーションと実測値との比較

系モデルに含める必要がある。一方，3 次元有限要素法モデルは，すべての周波数域にわたり実測値を良好に再現する⁵⁾。後述するように，本標準では建物損傷モードを建物の崩壊のみでなく，部分的な損傷による支持機能喪失などに詳細化することを求めている。そのために解析モデルを精緻化することになるが，その一方で詳細な材料構成則の選択や計算リソースの増大などが課題となる。質点系モデルと 3 次元有限要素モデルを適切に使い分ける知恵が求められよう。

V. さまざまな設備の多様な損傷モード

1. シビアアクシデントマネジメント (SAM) に係る設備

SAM は，恒設設備，代替恒設設備，可搬設備の特徴を踏まえ，それらを適切に組み合わせて有効に実施されなければならない。可搬設備については，本改訂において，“電源車，消防車などの可搬設備は，地震時には保管状態であり，地震後の復旧作業において使用されるため，地震に対する転倒評価などにより構造的損傷モードについて確認すること”を求めている。成功基準の評価においても可搬設備が利用できるまでの時間を考慮する。後述するように，可搬設備を利用するための搬入路などの評価も地盤の fragility 評価で要求している。

第4図には，電源車と消防車の質点系応答解析モデルを示す。損傷モードを加振による転倒とした。これらの設備は電源や冷却性能の多重性と多様性を確保する上で重要なものであり，多様性の定量化がポイントの一つである。

2. 建屋・構築物のきめ細かな損傷モード

2007 年版標準では，建屋・構築物の損傷モードとし

第4図 消防車と電源車の応答解析モデル

て直接に炉心損傷に至る崩壊シーケンスに着目していた。一方、安全系やSAMのための設備により炉心損傷への進展防止と炉心損傷後の影響緩和対策を強靱化したこと、地震随件事象の評価の必要性から、それらが部分損傷した状況での機能維持性能を評価する必要性が生じた。建物崩壊シーケンスに加え、建物が支持する設備の健全性や水密性、アクセス性、作業性などをよりきめ細かく評価するための損傷モードを選定する必要がある。

建物の崩壊に至るまでのシーケンスに従い考慮すべき損傷モードと損傷事例、及び部分損傷が周辺設備や炉心損傷シナリオに及ぼす影響を整理した結果を第5図に示す。このフロー図に従い、建物の損傷モードごとにフラジリティを評価し、その2次の影響を評価することを求めている。

3. 地震随件事象に関連する設備の損傷

地震随件事象への対策設備の例として防潮堤や防潮壁がある。これら設備の機能維持がなされているかは津波リスクの評価において重要であり、それは地震による設備の損傷状態に大きく影響される。そこで、地震リスクに直接に影響する設備ではないが、地震PRAのフラジリティ評価において、防潮堤や防潮壁の損傷モード、耐力、応答を評価することを求めている。この結果を津波対策設備の津波フラジリティ評価に適切に反映させるため、必要な設備の選定や地震フラジリティ評価では、津波フラジリティ評価者との協力の下に実施する必要がある。

第6図に防潮堤及び防潮壁の損傷モードを示す。ここでは、機能喪失状態として安定性の喪失、全体崩壊、局部崩壊をあげ、損傷モードを例示している。プラント毎にとられている津波対策設備の特徴を踏まえ、適切な損傷モードを選定し、それぞれに対してフラジリティを評価することにより、地震・津波重畳リスクの評価につなげることが可能となる。

4. 使用済燃料プール(使用済燃料ピット)

改訂標準の適用範囲として、使用済燃料プール内の燃料の重大な損傷に至る事故シーケンスが追記された。そ

れを受けて、使用済燃料プールの要求機能喪失につながる構造的損傷モードとして、層崩壊及び局部破壊(躯体及びライナの局部破壊)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とを要求している

第7図に使用済燃料プール内の燃料の損傷に影響を及ぼし得る事故シナリオのうち、使用済燃料プール自体の損傷モード及び部位の例を示す。直接的な損傷モードとして使用済燃料プール全体の崩壊及び使用済燃料プール壁及び床の局部損傷にかかる損傷モードが想定される。当該層なら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によりプール全体が崩壊する場合には、プール内の燃料全てが直接的に損傷する可能性がある。使用済燃料プール壁及び床の局部損傷としては、鉄筋コンクリート躯体の局部的な曲げ及びせん断破壊が想定されるが、躯体表面に内張りされたライナの変形追従能力により冷却機能が維持され则认为られる。

間接的な損傷モードとして当該層より上層の部材の破壊に伴う波及的な影響にかかる損傷モードが想定される。福島第一原子力発電所4号機原子炉建屋の使用済燃料プールでの知見、すなわち水素爆発などによって上部架構が落下してもプール水位に有意な変化は見られなかった事例⁵⁾は間接的損傷モードの評価に有益な情報を与えるものであろう。

VI. 余震と断層変位の考慮

基礎地盤と周辺斜面のフラジリティ評価は2007年版標準においても求められていた。改訂された対象地盤毎の施設の損傷モードと性能への影響について、第1表に整理して示す。基礎地盤が津波防護施設に及ぼす影響の評価が追加されたほか、SAM設備については、特に可搬設備は保管場所が多様であることから、周辺斜面や搬入道路などのフラジリティ評価を求めている。また、断層変位に対応する損傷モードの選定・評価を行うこととした。これは、地殻変動及び断層変位に起因する地盤変位量評価に基づき、建屋間(建屋内も含む)にまたがる安全設備への影響を考慮して炉心損傷につながる可能性のある事故シナリオを分析及び選定することが求められたことに呼応している。附属書(参考)には、著しい断層変位をうけた場合でも、剛な構造物は傾斜などの変位を受けるのみで崩壊することなくその構造を維持している過去の地震経験事例を示している。

第8図には余震の影響を評価する考え方を示す。ハザード評価において余震による地震ハザードへの影響を考慮するよう要求された。フラジリティ評価においても、本震による構造的影響を評価し、それを考慮して余震により現実的応答評価を行うことを求めた。本震による損傷評価指標の地震応答が、弾性限界を超えた場合に損傷が発生する可能性があり、後続の余震による地震応

第 5 図 原子炉建物の損傷モード

第 6 図 防潮堤及び防潮壁の損傷モード

第 7 図 使用済燃料プールの損傷モード

第1表 対象地盤に応じた施設の損傷モードと施設の性能への地盤の影響

対象地盤		施設の性能への影響			対象施設の損傷モード
		施設性能の見なし限界状態		施設の損傷を直接評価するために必要な作用	
		地盤の不安定限界	地盤の変位, 変形による限界		
基礎地盤	建屋などの基礎地盤	すべり安全率	基礎底面の傾斜角	土砂, 土塊や岩塊等の移動量	建屋, 開閉所などの構造的損傷または機能的損傷
	津波防護施設	すべりや施設転倒の安全率, 支持力	-	-	津波防護施設としての機能の損傷
周辺斜面		すべり安全率, 土砂, 土塊や岩塊等の変位量	土砂, 土塊や岩塊等の変位量	土砂, 土塊や岩塊等の移動距離量, 移動土塊量, 衝撃力	建屋, 開閉所などの構造的損傷または機能的損傷 取水トンネルへの崩壊土の侵入による閉塞に伴う取水機能の損傷 斜面や堤防の津波防護施設としての機能の損傷 貯水池堤防の損傷による貯水機能の損傷
シビアアクシデント対策設備に影響を及ぼす地盤	周辺斜面	支持力, すべり安全率, 土砂, 土塊や岩塊等の変位量	基礎底面の傾斜角, 土砂, 土塊や岩塊等の変位量	土砂, 土塊や岩塊等の移動量	シビアアクシデント対策設備の機能の損傷
	搬入路など	液状化などの安全率	沈下量, 段差, 斜面による土塊変位量	-	搬入路など路面の機能の損傷
地殻変動や断層変位に起因した地盤変状	地殻変動	周辺斜面のすべり安全率など	基礎底面の傾斜角, 土砂, 土塊や岩塊等の変位量	基礎地盤の変位量	建屋, 開閉所などの構造的損傷または機能的損傷
	断層変位に起因した地盤変状			基礎地盤の変位量, 土砂, 土塊や岩塊等の移動量	建屋, 開閉所, 地中配管など地中構造物などの構造的損傷または機能的損傷

第8図 本震の影響を考慮した余震による地震動のフラジリティ評価の概要

答が最大応答を上回ると損傷は進展して残留ひずみや変形が大きくなる。また、構造物や機器などの損傷の度合いが進むに連れて剛性低下が進み、履歴特性に応じて地震応答も大きくなる傾向を示す。なお、多くの場合は、本震の評価で代表できると考えられるが、最大余震による地震応答の評価事例を附属書(参考)に示している。

— 参考資料 —

- 1) 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: AESJ-SC-P006, 2007.
- 2) IAEA Mission Report, Preliminary Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP, The Niigataken Chuetsu-Oki earthquake, August, 2007.
- 3) 東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見

について, 平成 24 年 3 月 原子力安全・保安院, 平成 24 年 3 月.

- 4) 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リスク評価実施基準の改定: AESJ, 2014.
- 5) H.Inoue, *et al.*, Investigation on Causes of the Difference between Simulation Result by Using Simplified Lumped Mass Model and NCO-Earthquake Record Observed at BWR Reactor Building, SMiRT21, #885, November, 2011.
- 5) 福島第一原子力発電所 4 号機原子炉建屋の健全性確認のための定期点検結果(第 3 回目)について, 東京電力ホームページ, 平成 24 年 11 月 29 日.

著者紹介

山口 彰 (やまぐち・あきら)
大阪大学 大学院工学研究科
(専門分野) 原子炉工学, 伝熱流体力学,
確率論的リスク評価

中村 晋 (なかむら・すすむ)
日本大学 工学部土木工学科
(専門分野) 地震工学, 耐震工学, 動土質
力学, 確率論的リスク評価

美原義徳 (みはら・よしのり)
鹿島建設(株)原子力部原子力設計室
(専門分野) 構造力学, 耐震設計, 確率論
的リスク評価