

活断層評価と重要構造物の耐震安全性

入倉孝次郎（愛知工業大学客員教授/京都大学名誉教授）

Evaluation of active faults and seismic safety for critical structures

Kojiro Irikura (Aichi Institute of Technology/Kyoto University)

1. はじめに

2007年7月16日の新潟県中越沖地震（気象庁マグニチュード6.8）は原子力発電所の極近傍に発生し、それにより発電所の建物・施設が極めて大きな強震動の直撃を受けた。このように大きな地震が原子力発電所の近くで起こったのは国内のみならず国際的にも初めてのケースで、日本の原子力発電所のみならず、地震国にある各国の原子力発電所の耐震安全性に大きな問題を投げかけた。

この地震により、東京電力株式会社の柏崎刈羽原子力発電所では、設計時の想定を大きく超える揺れが観測されたが、原子炉施設はこの揺れに対し「止める」「冷やす」「閉じ込める」という重要な安全機能が確保され、安全に止まった、と報告されている¹⁾。安全上重要な設備の損傷は免れたとはいえ、変圧器の火災、極微量の放射能漏えい、原子炉建屋クレーン軸の継手の破損など周辺設備に広範な影響が出ており、原子力発電所の耐震安全性のあり方に種々の検討すべき課題があることが露になった。活断層、地震動、耐震工学などの研究者には、「なぜ想定外の地震動が生じたのか」「今後、別の地震が起こったときに原子力施設の耐震安全性は確保されるのか」といった問題が突きつけられた。

原子力発電所の耐震安全性を審査するための「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」は4年に及ぶ議論を経て2006年9月19日に改訂された²⁾。改訂が必要となった背景には、活断層研究、地震学、地震工学などにおける新知見の蓄積や原子力発電所の耐震設計技術の進歩があるが、やはり、1995年に発生した兵庫県南部地震により大災害が引き起こされたことにある。

1995年の阪神・淡路大震災の経験が契機となり、地震調査研究推進本部が設置され、全国の基盤的観測網の構築とあわせて、活断層調査、地下構造調査などが行われ、また、工学分野では実大構造物の振動実験施設(E-Defense)の建設などがなされた。強震動観測網の充実で、大きな地震が起きると精度よい強震動が記録され、その解析により直ちに震源断層の破壊過程が計算されるなどにより、地震の震源像が明らかになってきた。地殻媒質の伝播特性、表層の地盤特性などの研究と結びつけることにより、強震動予測手法の研究が大きく進展した。これらの調査研究を総合化することで「全国を概観する強震動予測地図」が構築された。

これらの重要構造物の耐震安全性に関わる研究の発展が原子力発電所の耐震設計審査指針の改訂につながったといえる。改訂された耐震設計審査指針は中越沖地震のような地震の発生も想定して策定されたものであるが、新指針に従って原子力発電所の十分な耐震性が確保できるかどうか、検討が必要とされている。

2. 2007年7月16日中越沖地震がもたらした新たな衝撃

この地震の強震動は防災科学技術研究所のK-NETおよびKik-net強震観測網に加えて柏崎刈羽原子力発電所の地表および地中観測網など震源近傍域を含む多くの観測点で記録された。強震動の最大値と距離の関係から、この地震の強震動は全般的には既存の距離減衰式にほぼ一致しているが、最も震源断層に近いと考えられる柏崎刈羽原発サイトでの強震動記録は地表、地中岩盤とも既存の距離減衰式よりも顕著に大きい、ことがわかった³⁾。特に1号機の基礎版で観測された最大加速度680gal（EW成分）と5号機の基礎版で最大加速度442gal（EW成分）は設計用の地震動レベル273galと254galとともに設計時の加速度応答値を大きく上回った。

柏崎刈羽原発の強震動が大きい理由として以下があげられる。（1）震源特性については、強震動生成に寄与するアスペリティの応力降下はやや大きい程度（1.5倍程度）、これは観測された強震動と既存の距離減衰式の関係に対応。（2）伝播経路については、震源域からサイトに至る地下構造（地殻浅部構造）が褶曲構造になっていて、サイト付近で背斜構造となっていることおよび

厚い堆積層（西山層、 $V_s = 0.7 \text{ km/s}$ ）のため、震源から出た波がサイト付近でフォーカシング効果により振幅が増大した可能性が高い。標準的な地下構造の地域に比べて5号機側（北側）は1.5倍程度、1号機側（南側）は2.0~3.0倍程度大きい。このことは本震のみならず余震の観測データおよびシミュレーションで確かめられている⁴⁾。

この地震について、余震分布に基づき震源断層面（南東傾斜の逆断層）を設定し、震源近傍域の強震動記録を用いて断層破壊過程の推定が多くの研究者により行われている。それによると、この地震の震源モデルは強い揺れを生成するアスペリティが3つあったことがわかってきた。経験的グリーン関数法を用いると、3つのアスペリティからなる断層モデルで広帯域の強震動の再現が可能である³⁾。

原子力発電所のような重要構造物の耐震安全性を確保するためには、活断層調査に基づいて敷地に影響のある地震を想定し、適切な断層パラメータを設定し、精度の高い強震動予測を行い、それに耐え得る構造物を設計する必要がある。中越沖地震を引き起こした震源断層は東京電力が審査時点で提出したF-B断層に対応することがほぼ明らかになった。このF-B断層は、建設時点で海域に断層として存在することは東京電力により確認されていたが、5万年以降の活動がないということで評価対象となる活断層ではないと判断されていた。その後、褶曲の形態に関する新知見が得られ⁵⁾、活断層として認定すべきとの見解が出され、その考えに基づいて東京電力は基準地震動の再評価を行ったが、この活断層に対する地震動は旧指針のS2を上回らないとの結論を出した。これは、地表で活断層情報が得られたとしても、震源断層に関するモデル化が適切に設定できなければ、地震動が評価できないことを如実に示している。

3. 原発の耐震設計審査指針および活断層の手引きの改訂

3.1 原発の耐震設計審査指針の改訂

原発の耐震設計審査指針は1978年に当時の地震学、地震工学の知見を結集して原子力委員会が定めた。1981年7月に静的地震力の算定法等について一部見直しが行われた。その指針の策定により、建設予定の原発の敷地周辺域における活断層調査がはじめて義務付けられ、活断層の長さに基づいて将来発生する地震規模の評価、震源距離、地盤特性等を考慮して、応答スペクトルの経験的関係式（大崎スペクトル）を用いて設計用の基準地震動が策定され、原子力施設の耐震設計がなされるようになった。敷地周辺に活断層がない場合にも、直下にM6.5の地震が発生すると考えて基準地震動が策定され、耐震安全性の評価がなされた。

地震動に関する経験的関係式（大崎スペクトル）の元となったデータは極めて限られていたが、専門家の工学的判断により一定の裕度をもって関係式が作られた。この関係式で策定された基準地震動を超える地震動は2005年の宮城沖地震（M7.2）まで日本の原子力発電所では記録されなかった。そのため、電気事業者や一部専門家に原発は大崎スペクトルで設計していれば大丈夫という神話が生まれてしまった、ように思える。1995年兵庫県南部地震のときに、通産省資源エネルギー庁が「今回のような地震に対して日本の原発は安全」という安全宣言を地震後約1カ月という短期間で発表したことは、大崎スペクトルによる地震動予測に対して過度の信頼感を持っていたことを物語っている。

しかしながら、2005年の宮城沖地震（M7.2）につづいて、2007年能登半島地震および2007年中越沖地震が原子力発電所の近傍で発生し、観測された地震動は大崎スペクトルのレベルを上回った。これらのことは、活断層や海溝型地震に関する最新の知見を取り入れて基準地震動を評価するなど、耐震設計審査指針の改訂が必要不可欠であった端的な例といえる。

原子力施設の耐震安全性に対する信頼性の向上に1995年以降の活断層研究、地震学、地震工学の新たな知見の反映させる必要があるとの認識が高まり、原子力安全委員会は、2001年（平成13年）6月同原子力安全基準専門部会に「耐震設計審査指針」に関する調査審議を指示、その下に設置された耐震設計審査指針分科会で同年7月に指針の検討が始まった。

この分科会の審議は考慮すべき活断層の認定方法、確率論的評価手法の是非、過去の安全審査のあり方などの問題点などをめぐって難航し、改訂案のコンセンサスを獲得まで5年以

上かかった。2006年5月同分科会が指針案を安全委員会に報告、それを受け行政手続き法の規定に基づく意見公募を実施した。意見公募に対して680件にのぼる意見が寄せられた。個別提出意見の1つ1つに指針を修正するか否かの検討と回答の作成を行い、2カ月間に5回の審議の末、2006年8月ようやく改訂指針がまとまった。その後、原子力安全基準・指針専門部会で審議し1部修正し、原子力安全委員会は2006年9月11日に改訂を決定した¹⁾。

改訂された耐震設計審査指針のポイントとして以下の点があげられる²⁾。(1) 変動地形学に重点に置いた新しい活断層調査手法の導入。設計上考慮すべき活断層をこれまで5万年前以降に活動したのから後期更新世以降(約13万年前)に拡張。(2) 地震動の評価方法として、経験的応答スペクトルに基づく方法と断層モデルに基づく方法の両方で評価。これにより、活断層調査・海溝型地震調査に基づいて震源断層モデルの推定が必要となり、より高い精度の調査自体が必要とされる。(3) 断層モデルはばらつきを考慮してパラメータを推定し、地震動を評価。(4) 震源を特定できない地震動の評価およびその妥当性を個別に検証。十分な調査を行っても地表に見えないが地下に存在する活断層をすべてを見つけることは困難なことから、この規定が盛り込まれている。

上記のように、新指針には兵庫県南部地震以降の地震学・地震工学のみならず地形・地質学の最新の知見が取り入れられた。

3.2 活断層の手引きの改訂

指針の改訂を受けて原子力安全委員会の指示で既設の原発の耐震安全性についてバックチェックが行われることになった。しかしながら、耐震安全上考慮すべき活断層についての安全審査のあり方を定めた「原子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引き」は1978年に定められたままになっていた。新指針に基づいて安全性の評価を行うには活断層の調査・認定に関してより詳細な下部規定が必要との認識で、原子力安全委員会の耐震安全性評価特別委員会の基に設置された小委員会で手引きの改訂の審議が行われた。

その手引き委員会の審議の過程で、いくつかの原発の安全審査において、耐震設計上考慮すべき活断層の見落としにより、検討用地震や基準地震動の想定が過小評価となっていたことが指摘された。柏崎刈羽原子力発電所において、2007年新潟県中越沖地震により、当初設計時の想定を大きく上回る地震動が観測されたのはその端的な例の1つである。2007年能登半島地震でも、志賀原子力発電所で想定を一部上回る地震動が観測された。原発の耐震安全性のバックチェックの早急な実施の世論に押され、小委員会で5ヶ月間にわたる真摯でかつ精力的な集中審議により改訂案がまとめられ、パブリック・コメントを受けて修正が行われ、2008年6月に手引きの改訂がようやく実現した⁶⁾。

新手引きのポイントは、敷地中心から概ね100km以内を対象に既存文献や観測・調査資料の収集により、広域の地震テクトニクスを把握して、当該地域に発生する可能性のある地震を洗い出し、つぎに敷地中心から少なくとも30kmの範囲について、検討すべき活断層の三次元形状の把握し、地域特性を考慮した基準地震動を評価するための震源断層モデルの構築を行う、ことにある。

新手引きの特徴としては、次の点が挙げられる。(1) リニアメント重視から地形発達過程(地形の成因を含む)重視への移行：成因を重視した変動地形学的調査、地表地質調査及び地球物理学的調査を総合的に行い、活断層に加え、活撓曲や活褶曲等についても十分に調査する。(2) 各手法による調査結果の総合的な検討の重要性：各手法で調査結果が異なる場合はそれらの結果を相互比較して妥当性を検証し、総合的に判断する。(3) 断層の三次元的形状の把握の重要性：三次元弾性波探査等を使用し、活断層の三次元構造を可能な限り把握する。(4) 活断層の認定については、一貫した認定の考え方により判断する。

4. 新指針に基づく既存原子炉施設のバックチェック

耐震設計審査指針の改訂（2006年9月）を受けて、原子力安全委員会は、行政庁に原子力事業者に対して既設も含めて原子力施設の耐震安全性の評価の実施と、その結果の速やかな報告を指示した。原子力安全・保安院は、原子力施設について新耐震指針に照らした耐震安全性の評価（バックチェック）を原子力事業者に要請した。それを受けて原子力事業者は、耐震安全性の評価の実施計画書を行政庁に提出し、既設原発の耐震安全性の評価のために地形・地質調査を実施するとともに、基準地震動の評価を準備している最中に、新潟県中越沖地震は起こった。

柏崎刈羽原子力発電所では、中越沖地震による影響評価とともに、新指針に基づき、耐震安全性の評価が行われた。耐震設計上考慮すべき断層については、旧指針で5万年前以降に活動したものを新指針で後期更新世以降の活動が否定できないものを対象となったため、手引きに基づいた詳細な調査が事業者により実施されるとともに、原子力安全・保安院による海上音波探査や専門家を交えた現地調査が行われた。これらの調査結果に基づき、原子力安全・保安院は、柏崎刈羽原子力発電所に影響の大きい活断層は、海域ではF-B断層（長さ約36km）、陸域では長岡平野西縁断層帯（長さ約91km）と評価した。

それらの活断層が震源となって発生する地震を検討用地震として、発電所敷地にもたらす地震動が経験式を用いた応答スペクトル手法および断層形状から震源断層を設定して断層モデルの手法で基準地震動評価がなされた。断層モデルによる評価では、新潟県中越沖地震の観測データの分析に基づき、その特徴を踏まえた震源のモデル化と地震波の伝播経路特性を考慮した地震動の計算がなされた。

東京電力による基準地震動の評価結果について、原子力安全・保安院の審議で、活断層の諸元の妥当性および中越沖地震の分析結果の反映などの評価の見直しが行われた。見直しの結果、基準地震動は1～4号機側で2,300ガル、5～7号機側1,209ガルとして策定された。なお、柏崎刈羽原子力発電所の設置時の基準地震動（S2）は450ガルだったので、今回の評価はその2.7～5.1倍となった。原子力安全委員会は、柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動の評価等に関する原子力安全・保安院の見解に関して、原子力安全性評価特別委員会で独自の検討を行い、いくつかの留意点を指摘した。F-B断層に対する震源断層のモデル化に関して地震調査委員会における検討を参考に異なった視点からの確認用地震動地震動の評価を行い、基準地震動のレベルが適切であることを確認している。

5. まとめ

原子力施設の耐震安全性を確保するためには、新耐震に基づく詳細な地形・地質構造調査の徹底、調査結果に基づく震源断層モデルの構築、断層パラメータの不確かさを考慮することにより安全側の基準地震動の評価が必要とされる。今回の地震から得られる知見を整理し、他の原子力発電所に反映すべき事項を明確にする必要がある。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会：第1章新潟県中越沖地震による影響，平成19・20年版原子力安全白書。
- 2) 原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針，<http://www.nsc.go.jp/shinsashishin/pdf/1/si004.pdf>, 2006.
- 3) 入倉孝次郎・他：2007年新潟県中越沖地震の強震動—なぜ柏崎刈羽原子力発電所は想定以上の破壊的強震動に襲われたのか？—，http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/cyuetsu_080319.pdf.
- 4) 釜江克宏・川辺秀憲：中越沖地震と強震動，安全工学シンポジウム講演予稿集，137-140，2008.
- 5) 岡村行信：日本海東縁のインバ-ジョンテクトニクス，石油技術協会誌，65，140-147，2000.
- 6) 原子力安全委員会：活断層等に関する安全審査の手引き，<http://www.nsc.go.jp/shinsashishin/pdf/1/ho023-1.pdf>, 2008.