

原子力発電所の新しい耐震指針の改訂と中越沖地震の教訓

入倉孝次郎（愛知工業大学）

1. はじめに

「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。改訂が必要となった背景には、地震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の経験が契機となっている。この地震による大震災の前には、日本は国際的に地震学、地震工学で最先端の国の1つで、1923年の関東大震災や1948年福井地震のような大災害は2度と起こらないと考えられていた。しかし、実体は、地震学と地震工学の連携した研究がほとんどないなど耐震安全性の研究で多くの問題があった。端的な例をあげると、大地震の時の建造物の被害の研究に不可欠な強震動（地震時の大きな揺れ—建造物に被害をもたらす）の記録はそれまで日本では1つも得られてなかった。この地震で日本では初めて震源近傍での強震動が取れた。被害を受けた建造物の近傍で強震動記録がとれたのも初めてであった。それまでは、強震動の大きさは、建造物の被害度から推定されていた。すなわち、被害から推定された地震動レベルで建造物の被害の研究がなされるという奇妙なことが行われていた。

この地震を契機に設置された地震調査推進本部が主導して、全国の基盤的観測網（高感度地震計 Hinet、GPS、強震動観測網 K-NET、KiK-net など）の構築、活断層調査、地下構造調査など、また、工学分野では実大建造物の振動実験施設（E-Defense）の建設などがなされた。全国を対象とした活断層調査や海溝型地震の調査の実施により、地震の確率論的発生予測研究が発展した。強震動観測網の充実で、大きな地震が起きると強震動が記録され、その解析により直ちに震源断層の破壊過程が計算され、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。また、緊急地震速報も基盤的観測網の整備によりはじめて可能となった。これらの地震学・地震工学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。

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。改訂された耐震設計審査指針はこのような地震の発生も想定して策定されている。

2. 原発の耐震設計審査指針の改訂の経緯

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の見直しが行われた。その後2006年の9月まで25年間指針は改訂されなかった。

旧指針の果たした役割と問題点

電気事業者に建設予定の原発の敷地周辺域における活断層調査が義務付けられ、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關係式（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評

価された。

地震動に関する経験的關係式(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關係式が作られた。この關係式で策定し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た。このことは、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するなど、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によく表れている。

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大きく上回った。

指針改訂の背景

指針改訂の背景としては、次の4つの点をあげられる。

- (1)地震学および地震工学に関する新たな知見の蓄積。
- (2)原子炉施設の耐震設計技術の改良および進歩。
- (3)1995年兵庫県南部地震の経験。原子力施設に特段の影響を及ぼしたものはなかったが、断層の活動様式、震源破壊過程と地震動特性、構造物の耐震性、等に係わる貴重な知見が得られた。
- (4)海外、とくに米国で原子力耐震設計にPSA(確率論的安全評価)評価を導入。海外の動きに合わせて、日本でも一部の研究者からPSAを導入すべきとの強い意見が出されるようになった。

上記のような社会的背景の中で、原子力施設の耐震安全性に対する信頼性の向上に上記の新たな知見の反映させる必要があるとの認識が高まった。また、原子力発電所の耐震安全性について社会的説明責任の声も強くなってきた。

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極めて難航し、改訂案のコンセンサスを得るまで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(5月24日-6月22日)、意見公募に対して680件にのぼる意見が寄せられた。個別提出意見に1つ1つ指針を修正するか否かの検討と回答を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⁾。

改訂のポイント

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もの(地形・地質学者から根拠が薄いと批判が出されていた)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すること。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、地震動を評価すること。
- (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すること。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、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. 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、中越沖地震は起こった。

2008年4月末に12電力事業者から20発電所についてバックチェックの中間報告(1部最終報告も含む)が1次審査の経産省原子力安全・保安院および2次審査の内閣府原子力安全委員会に提出され、現在両機関で審査がなされている。中間報告の中には、2007年中越沖地震による東電柏崎刈羽原子力発電所への影響を踏まえて各発電所における対応が含まれている。

4. 2007年7月16日中越沖地震がもたらした新たな衝撃

この地震を引き起こした断層はどこか?

この地震が発生した地域は、プレート境界と考えられている日本海東縁部の延長部に位置し、これまでの地質構造調査により活褶曲の分布する歪み集中帯と呼ばれるところにあり、そこでは歴史的に繰り返し大地震が起こっている。地震を引き起こした断層は北東-南西方向に走向をもつ逆断層。しかし、断層面の傾斜が南東落ちか北西落ちか地震直後に決定できなかった。普通なら、断層面は(事前には特定は困難でも)余震分布から精

度よく推定可能なのに、この地震の場合、余震の震源の決定精度が悪くてすぐには断層面が特定できなかった。その理由は、海域なので観測データが片側(東側)しかないことと、震源決定に必要な海域の地下構造(複雑な褶曲構造)がわかってなかったことによる。同様の理由で、GPSによる地殻変動データや津波データからも断層面についてのユニークな解が得られなかった。海底地震計を設置して余震観測を行い、海域の地下構造を精度よく決定し、震源の再決定を行った結果、地震後約5カ月経った12月ごろになってようやく震源断層が南東落ちを主とするものであったことがわかった³⁾。

この地震の強震動は大きかったのか?

K-NETやKik-netなどの強震観測網で観測された強震動の最大値と距離の関係は全般的には既存の距離減衰式にほぼ一致。しかし、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。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。

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。極微量の放射能漏えいおよび原子炉建屋クレーン軸の継手の破損などの損傷はあったが、安全上重要な設備はこれまで目立った損傷は確認されていない。

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。

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。

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つつある⁴⁾。

この地震の強震動は数値的に再現可能か？

余震分布に基づき適切な震源断層面（南東傾斜の逆断層）を設定することで、震源近傍域の強震動記録を用いた波形逆解法（waveform inversion）から断層破壊過程の評価が可能。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が再現可能。この断層モデルは逆解放のすべり分布とほぼ一致している（釜江克宏氏の講演資料参照）。

柏崎刈羽の強震動は中越沖地震発生前に予測可能であったか？

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の存在することは東京電力により確認されていたが、50000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（岡村，2000）、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電が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評価できなければ、地震動が評価できないことを如実に示している。

5．新潟県中越沖地震を踏まえた原子力施設の耐震安全性の課題

中越沖地震を受けて行われた海域に構造調査等により、堆積層厚さやそのS波速度構造が分かれ

ば、「活褶曲」や「変動地形」の変形の特徴から、地下に潜む断層のタイプ、傾斜方向、さらに断層の3次元形状を推定できることが分かってきた（杉山雄一氏の講演資料参照）。上記の地形・地質調査および解析から得られる震源断層モデルと震源からサイトまでの3次元地下構造の情報により、耐震安全のための地震動評価は可能となる。

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、断層パラメーター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。

今回の地震は気象庁マグニチュード6.8で、この程度の規模の地震の震源断層が事前に特定できるかどうかについて地震に関わる構造帯の地域的特性と関連した検討が必要とされている。他の原子力施設の耐震安全性の評価においては、今回の地震と同規模の地震がそれぞれのサイトの直下に想定して設計用入力地震動を評価して、施設の耐震安全性を検討することがのぞましい。

参考文献

- 1) 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/anken/sonota/kettei/20060919-31.pdf>, 2006.
- 2) 入倉孝次郎：原子力発電所の耐震設計のための基準地震動，日本地震工学会会誌，第5号，pp.23-28.
- 3) 地震調査委員会：平成19年(2007)新潟県中越沖地震の評価(主に断層面に関する評価)，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08jan_chuetsu_oki/index.htm, 2008.
- 4) 原子力安全基盤機構：2007年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震動の分析，<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80522a21j.pdf>, 2008.