

原子力発電所の耐震安全性に係る信頼性の一層の向上を図るための
今後の取組みについて

平成 21 年 1 月
原子力安全・保安院

原子力安全・保安院（以下、「保安院」という。）は、平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震（以下、「中越沖地震」という。）を踏まえた柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性に関し、中越沖地震による原子炉建屋基礎版上の最大加速度が設計時に想定された最大加速度を上回った要因、敷地・敷地周辺の地質・地質構造、柏崎刈羽原子力発電所の今後の耐震安全性を評価するための基準地震動等について、最新の科学的・技術的知見に基づき様々な角度から徹底した検討を行った。その過程で、今後の原子力発電所の耐震安全性に係る信頼性の一層の向上を図る観点から、更なる科学的・技術的知見の蓄積の重要性など、今後取り組むべき課題も明らかになった。総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震構造設計小委員会 地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ（以下、「合同 WG」という。）及び構造ワーキンググループ（以下、「構造 WG」という。）における議論を踏まえ、今後の取組みとして以下の通り整理した。

1. 新たな知見の反映の仕組みについて

中越沖地震の震源断層面の浅部延長部において、柏崎刈羽原子力発電所に係る安全審査時には、「日本の活断層」等における海底活断層の認定基準等を踏まえ、F-B断層の一部に当たる長さ最大約 8 kmの断層を確認していたが活断層ではないと評価した。その後、断層関連褶曲の知見を踏まえ、平成 15 年にF-B断層について長さ約 20 km、M7.0 の活断層と評価したが、敷地の地震動は基準地震動 S_2 を上回るものではないと評価していた。また、平成 15 年の見直しについては、これを公表していなかった。

原子力施設の安全審査においては申請時における最新の科学的・技術的知見に基づく厳正な判断に基づき審査を行っている。また、安全審査後は常に最新の科学的・技術的知見に照らしあわせて、更なる安全性の向上に努めており、平成 7 年には、耐震設計審査指針が制定される前に安全審査を行ったプラントについて、耐震設計審査指針に基づく耐震安全性の確認を実施した。

しかしながら、既設の原子力発電所について、定期的に新知見を反映する具体的な仕組みを設けていたわけではなく、また、知見の反映に係る情報公開についてもルールが明確でなかった。

地震関連分野は兵庫県南部地震以降、急速に新知見が得られてきている。原子力施設の安全性については、常に最新の科学的・技術的知見に照らし合わせて、さらなる安全性の向上に努めていくことが重要であり、耐震安全性については、地震学、地震工学等の最新の知見に基づき改訂された新耐震指針に基づき、耐震安全性の確認（耐震バックチェック）を行っているところであるが、耐震バックチェックにとどまらず、今後も、耐震安全性に係る信頼性の一層の向上の観点から、継続的に新たな知見を反映していくことが重要であり、保安院としてそのための仕組みを整備していく。また、原子力発電所の耐震安全性に対する信頼性を高める観点からも、新知見の反映がどのようなプロセスで行われているのか及びその結果について透明性の確保を図る。

具体的には、地震、耐震に関する知見の情報収集を継続的に行い、そのうち、原子力発電所の耐震安全性評価に反映すべきものの選定等について、定期的に公開の場で検討することが必要である。情報収集は、保安院に対する技術的支援機関である独立行政法人原子力安全基盤機構（以下、「JNES」という。）が中心的な役割を担い、原子力発電所の耐震安全性の観点からの的確にスクリーニングを行った上で、保安院として、個別の発電所固有のものか、他の発電所へも反映可能なものかを判断整理した上で、それらの新知見に基づく既設原子力発電所に対する耐震安全性の確認や将来の耐震設計への反映の必要性等について考え方を整理し、耐震・構造設計小委員会において専門的な検討を行うことが考えられる。その際、地震調査研究推進本部、日本地震学会、日本建築学会、土木学会、日本機械学会、日本原子力学会等の関係機関や関係学会等、さらには国際原子力機関（以下、「IAEA」という。）等の諸外国の関係機関とのネットワークの構築・連携に努め、関連する知見の的確な把握に努めることが重要である。このような点を基本とし、詳細については今年度末を目途に検討を進めることとする。

また、原子力施設の耐震安全性の評価においては、平成 18 年 9 月 19 日に原子力安全委員会により改訂された発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針等の耐震安全性に係る安全審査指針類（以下「新耐震指針」という。）や、活断層等に関する安全審査の手引き（平成 20 年 6 月 20 日原子力安全委員会了承）（以下、「手引き」という。）等に基づき、敷地及び敷地周辺において、詳細な地質・地盤調査等が行われている。これらの調査から得られる情報は膨大なものであり、地震学や地質学等の発展に寄与出来るものもあると考えられる。したがって、原子力施設の耐震安全性評価において得られた知見についても、地震防災に関する共有財産として活用できるよう、積極的に情報を整備し公開していくことが重要である。

さらに、事業者においても、申請時のみならず、許可後においても、敷地・

敷地周辺の地質・地盤調査や地震観測の継続を含め、知見の収集・蓄積を図り、自らの施設の耐震安全性に係る信頼性の向上を図ることが重要である。

2. 確率論的安全評価について

新耐震指針においては、基準地震動を上回る地震動が生起する可能性は否定できないことから、「残余のリスク」の存在と、それ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べきであることが示されている。ただし、「残余のリスク」の評価方法として確率論的手法を導入することについては、原子力安全委員会原子力安全基準・指針専門部会の見解（平成 18 年 5 月 19 日原子力安全基準・指針専門部会了承）においても述べられているように、なお今後の検討に委ねるべき事項があるとの理由により、新耐震指針において全面的採用には至らなかったが、新耐震指針において、基準地震動 S_s については、その超過確率を参照することが求められている。また、同見解においては、今後の課題として「残余のリスク」の存在を客観的に認識し、合理的に実行可能な方策により耐震安全性向上を目指す観点から、「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つつ、リスク評価上重要な事象のシナリオ及びリスク評価上重要な設備に関する知見の取得に努め、設計体系の高度化や設計段階以降における活用を図ることが有効である」としている。

合同 WG では、特に不確かさの考慮における審議において、確率論的安全評価について、「超過確率を参照するに当たって目安となる数値を示すべきではないか」、「地震動だけでなく施設の耐力等をあわせて総合的に判断すべきではないか」「基準地震動の超過確率が一定レベルを上回っているところについては基準地震動を引き上げる等の対応が必要ではないか」、「今回は指針に示されているとおり参照にとどめるべきではないか」等の様々な意見が出された。このような議論を経て、保安院としては新耐震指針を踏まえ、基準地震動策定に係る不確かさの考慮に当たって、超過確率を参照することとし、東京電力による算定結果に加え JNES による算定結果も参照したところであるが、今後は、確率論的ハザード評価結果のレビューの方法についても検討する必要がある。なお、今後の課題として個別地点の評価を行いやすくするためにも、全国の発電所敷地ごとに地震ハザード評価を実施すべきではないかとの指摘もあった。

保安院は、確率論的安全評価は安全性の相対的尺度に基づいて客観的な議論を行うことができるため、耐震安全性の一層の向上を図る観点から、有効な手法であると考えており、原子力安全委員会原子力安全基準・指針部会の見解にもあるように試行的実施を進めつつ、規制においてどのように位置づけていくのか、事業者としてどのように活用していくのか、地震動レベルに基準や目安を設けるのか、施設のフラジリティも含めて炉心損傷頻度のような指標で評価

していくのか、既設の原子力発電所と新設の原子力発電所の違いをどのように取り扱うのか、また、数値で評価するのではなく例えば炉心損傷頻度をより合理的に小さくするための有効な対策の選択に用いるのかなど、合同WGにおける議論も踏まえ、様々な観点から検討を深めていくことが必要と考える。

保安院は既に、新耐震指針の策定を受け、平成18年9月20日に、電気事業者に対し、耐震バックチェックの報告に加えて、将来の確率論的安全評価の安全規制への導入の検討に資する情報として、耐震バックチェックの報告以降、速やかに「残余のリスク」の定量的な評価を行い、報告するよう求めている。

また、サイクル施設関係の事業者に対しては、同様の主旨で「残余のリスク」に関する定量的な評価手法の確立に向けた取組（ロードマップの作成）について、報告するよう求めている。

今後、各原子力発電所において評価される超過確率等について、確率論的安全評価に知見を有しているJNESの協力を得て、その内容を整理し、課題の抽出等を行っていくこととする。

3. 地震動の観測について

1) 建物・構築物及び機器・配管の地震観測

中越沖地震の際、柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋において基礎版上及び中間階において本震の観測記録が得られた。柏崎原子力発電所では中越沖地震による原子炉建屋の健全性を評価するため、原子炉建屋の応答についてシミュレーション解析が行われたが、その際には建屋の実際の剛性や補助壁等を考慮することにより観測記録とほぼ整合する応答解析結果を得られることが確認された。また、4号機原子炉建屋の中間階で得られた観測記録のNS方向の応答スペクトルには二つのピークが認められたが、4号機原子炉建屋の床の柔性を考慮することによりNS方向の観測記録の応答スペクトルとほぼ整合した結果が得られることが確認できた。このように、原子炉建屋において基礎版上及び中間階における観測結果から、地震時の原子炉建屋の応答特性に係る貴重な知見が得られたが、基礎版及び中間階だけではなく各階において地震計が設置されていれば、さらに、原子炉建屋以外の建物・構築物や機器・配管などにも地震計が設置されていれば、構造物のより詳細な実際の振動特性をより速やかに把握することができたと考えられ、構造物の地震応答解析技術の向上に寄与する貴重なデータが得られたものと考えられる。

このような観点から、事業者において設備の地震観測の一層の充実を図るため、具体的な方策を講じることが重要である。

2) 地盤の地震観測

中越沖地震において柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋基礎版上で大きな加

速度が観測された要因の一つとして、地震基盤が深くその表面が不整形であったこと及び比較的浅部の地層が褶曲構造を呈していたことが確認された。その結果、中越沖地震による解放基盤表面の地震動の推定結果は Noda et al (2002) による距離減衰式（以下「耐専式」という。）により算定された地震動の 2 倍～4 倍に相当するものであった。前述したとおりその要因は柏崎刈羽原子力発電所の敷地の地下構造の特殊性によるものである。したがって、地震観測により当該原子力発電所固有の地下の地盤の地震動増幅特性を調査することが重要であり、断層モデルによる地震動評価のための地盤構造モデルの高度化や、敷地の地下構造として地震基盤が深く不整形な構造を呈している場合や地盤が褶曲構造を呈している場合など様々な条件下においても適用可能となるような高度な距離減衰式の開発が望まれる。その点では、今回の柏崎刈羽原子力発電所においては貴重な地震観測データが得られたこととなり、これを契機に今後とも地盤の水平方向及び鉛直方向の地震観測を充実させることが重要である。また、他機関の地震観測データも有効活用しながら、地震動の設定位置の考え方の整理も含め距離減衰式を用いた地震動のスペクトル特性の予測手法の一層の高度化を図ることが重要である。ただし、これらから得られる知見は、その敷地固有の特性と、他の敷地へも適用可能な特性に分けて整理しておく必要がある。

このため、事業者において、地震調査研究推進本部のイニシアチブの下で整備が進められている地震観測網から得られるデータの活用も含め、地盤の地震観測の一層の充実を図ることが重要であり、保安院としても、JNES を通じ、関係する学会や研究機関との連携を密にしながら、敷地における補正方法も含めて、距離減衰式を用いた地震動のスペクトル特性の予測手法等の地震動評価手法の高度化についての調査・研究を進めることとする。

なお、今般の中越沖地震の際、柏崎刈羽原子力発電所では地震観測が行われ本震の観測記録が収録されたが、本震後に頻発した余震により一部の本震記録が上書きされ貴重な記録が消失した。各電気事業者においては、既に地震観測装置の更新等の措置が講じられているが、事業者においては地震観測システムの定期的な点検や更新等に努めることが必要である。

4. 調査・研究について

中越沖地震により観測された最大加速度が設計時において算定された最大加速度を上回った要因の分析を通じ、地震動評価における震源特性や断層の三次元形状、地下構造特性等の評価の重要性が一層明確に再認識された。また、前述のとおり、地震観測の一層の充実の必要性も認識された。活断層評価においては、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査等の広範な調査結

果に基づき、最新の科学的・技術的知見、評価の考え方に照らし信頼性の高い震源モデルの検討に多くの時間を割いたが、最先端の科学的・技術的知見や詳細な調査によっても特定可能な震源パラメータは限られ、専門家による見解が異なることもあることなどから、不確かさについても慎重に検討を行った。

また、中越沖地震による 7 号機原子炉建屋の健全性評価において、中越沖地震による揺れが基準地震動による揺れを大きく上回ったが原子炉建屋にはほとんど損傷が認められなかったことから、設計時に考慮した地震力と中越沖地震により作用した地震力の比較によりその要因の検討を行った。その結果、原子炉建屋の耐震設計においては、基準地震動 S_1 によるせん断力と、建築基準法に基づくせん断力の 3 倍に相当するせん断力とを包絡するように設計用せん断力を設定するなどにより、余裕のある設計がなされていることが確認された。これまでも振動試験などにより原子力発電所の代表的な施設については基準地震動に対し相当程度の余裕があることが確認されてきているが、各原子力発電所の敷地地下構造はそれぞれに固有の特徴があり、また、原子力発電施設全体としてどの程度の耐震裕度があるのか定量的な説明が必要である。さらに、地震による施設への影響評価においては、加速度に基づく評価に加え、施設に与えられるエネルギー量等の指標による検討の必要性も指摘されている。また、地震ハザードと施設の脆弱性を総合的に評価する手法としての確率論的安全評価手法の重要性も指摘されている。前述の通り、実際の地震による構造物・設備の振動特性を詳細に把握すること等により、既往の一連の地震応答解析技術の有する余裕を定量的に評価するとともに、将来に向けた解析技術の一層の向上を図ることも重要である。また、施設に対する地盤の支持力の評価については今後とも地盤の動的特性の評価技術の一層の向上を図る必要がある。

近年の地震学、地質学、変動地形学、地震工学、地盤工学、耐震工学等における知見の蓄積や技術の改良、進歩は著しいが、原子力施設の耐震安全性の向上を図るためには、耐震安全性に関する知見の一層の蓄積を図るための調査・研究をこれまで以上に積極的に推進することの必要性が強く認識されたことが、中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性に関する検討を通じての教訓の一つである。

耐震安全性に関する調査・研究分野は、極めて広範であり、多くの学会、研究機関等の協力が必要である。また、地震による影響は、規制者及び被規制者を含めた関係者が協力して立ち向かうべき共通の外部事象であることから、産学官が緊密に協力して調査・研究を推進する体制を構築することが重要である。

日本原子力学会においては、中越沖地震を受け、平成 19 年 12 月に原子力地震安全特別専門委員会が設置され、日本機械学会動力エネルギーシステム部門及び日本地震工学会とも連携し、今後の研究開発等に関するロードマップにつ

いての検討が開始されている。また、IAEA においても、原子力発電所の耐震安全性を一層高めるため、国際共同体の中で知識の共有の推進等を活動内容とする「国際地震安全センター」が平成 20 年 10 月に設立された。さらに、IAEA においては、IAEA の耐震関連の技術基準について見直し作業が行われており、中越沖地震から得られた知見なども反映していきたいとしている。

当院においては、これまで、特に、耐震安全に関する規制基準や評価手法の高度化の観点から、安全上重要な機器・設備の振動試験、震源断層の評価に関する調査、確率論的安全評価等について、主に JNES を通じ調査・研究を実施してきた。平成 21 年度からは、原子力発電所の耐震裕度を定量的に評価する手法やサイト近傍で常時地震観測を行う等の調査・研究を拡充することとしている。当院としては、今後、中越沖地震による耐震安全性の検討の中で明らかになった課題も含め、関係機関との連携を密にするとともに、IAEA を通じた国際協力を強化し、耐震安全性に関する研究をより積極的に推進する。その際、研究成果については、広く国際的に情報発信を行い、世界共通の課題である耐震安全性の向上に積極的に貢献していく。

具体的な研究課題や研究体制等については、当院における検討状況を適宜、耐震・構造設計小委員会に報告し専門家による助言を得つつ、効果的な調査・研究の実施に努める。