解説シリーズ

原子力災害の再発を防ぐ(その1)

地震安全ロードマップ策定の意義と重要性

法政大学 宮野 廣, 大阪大学 中村隆夫, 関西電力(株) 成宮祥介

2007年7月に中越沖地震が発生し、更にその3年半後に東日本大震災が日本を襲った。いずれの場合にも震源近傍の原子力発電所は大きな地震動に見舞われたが、その後に大津波が発生したかどうかにより事故の明暗が大きく分かれることとなった。今、私達は今回の福島第一原子力発電所事故の未曾有の過酷さの前に、4年半前に起きた中越沖地震のことをとすると忘れがちになるが、2つの地震の共通点は、原子力発電所が設計の想定を大きく超えた地震動に見舞われたことにある。日本原子力学会は、中越沖地震の後、「原子力発電所地震安全特別専門委員会」を設置し、設計想定を超える地震に対してどのように安全を確保すべきかを検討してきた。そして東日本大震災が発生した昨年初めには、ほぼその検討結果が報告書としてまとまりつつある状況にあった。福島第一原子力発電所事故後の緊急事態からようやく立ち直りつつある現在、今回取りまとめた地震安全ロードマップに関する報告書の意味するところ、すなわち「原子力発電所の安全をいかに確保すべきか」を改めて問い直してみることが重要である。日本原子力学会は、この報告書の提言しているところを原点とし、引き続き「原子力安全」の確保のあり方について検討していくことが求められている。

今回、4回のシリーズで、本委員会の活動に参加した日本原子力学会の委員、及びその検討に協力した日本地震工学会、日本機械学会の委員により、本委員会が取りまとめた地震安全ロードマップ報告書の内容と、中越沖地震及び東日本大震災を踏まえた原子力安全確保のあるべき方向について解説する。

I. 地震安全ロードマップの目的と意義

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震(M=6.8)は、震源に程近い位置(震央距離=1.6 km)にある東京電力柏崎刈羽原子力発電所に大きな影響を与えた。同発電所の7基の原子炉のうち、3, 4, 7号機が運転中、1, 2, 5, 6号機が定期点検中であった。この地震のもとで、運転中の原子炉はすべてスクラム機能が作動して自動停止し、その後の炉心冷却も安全機能に支障を来すことなく実行され、全号機の冷温停止状態が達成された。原子炉建屋基礎版上で観測された地震動の最大加速度(東西水平成分で比較)は設計値の1.2~3.6倍であり、稼働中の号機に限っても2.5倍に達した。この大きな地震動のもとで、原子力発電所の緊急時の安全確保機能である「止める」、「冷やす」、「閉じこめる」が正常に作動したことは国際的にも高く評価された。中越沖地震は柏崎刈羽原子力発電所に設計想定を超える大きな地震動

をもたらしたが、地震による原子力発電所の被害は軽微なものであり、原子力発電所の安全性は確保された。

1. 活動の目的

日本原子力学会では、中越沖地震での柏崎刈羽原子力発電所の被災を契機に、地震に対する原子力発電所の安全性を更に確実なものとするべく、2007年12月に「原子力発電所地震安全特別専門委員会(以下、本委員会という)」を設置し、地震発生時の原子力発電所の安全性の確保に必要な、地震動の大きさの想定の考え方、建物・機器の構造強度・安全機能の確保、また不確定要素やシステムとしての安全評価の考え方などの論点に対して、関連する様々な分野の技術者、研究者により包括的に技術・研究課題を抽出、整理して取りまとめた¹⁾。

本委員会の活動の目的は、以下の通りである。

- (1) 地震時の安全確保の基本的考え方を明らかにする。
- (2) 必要な技術・研究課題を整理するとともに、その解決のための研究開発と方策の検討を行い整理し、解決のスケジュール、成果目標などをロードマップとしてまとめる。

Prevent Recurrence of Nuclear Disaster⁽¹⁾; *Purpose and Significance of Road-map towards Seismic Safety*: Hiroshi MIYANO, Takao NAKAMURA, Yoshiyuki NARUMIYA.

(2012年 5月15日 受理)

- (3) 地震安全が全体として進むべき方向に関してコンセンサスを形成し、それを社会に発信、実行する。

2. 活動の意義

原子力発電所の地震安全を議論する上で必要な関連分野として、原子力施設の安全に係わるシステム安全工学、地震工学、地震学、構造工学などの多分野があり、それらの専門家が共同して検討することが不可欠である。そこで、原子力安全分野、地震工学分野、機械構造分野の3つの分科会及びロードマップワーキンググループを設置した。これは、原子力発電所の地震安全確保に関わる立地・設計段階から、運転段階までの活動における広い技術分野を全てカバーできるようにしたものである。また、原子力安全分野と地盤、土木、建築などの地震工学分野、および機械構造分野の検討では、それぞれ安全分科会、地震工学分科会、構造分科会が分担して専門家による深い議論を進めることを狙ったものではあるが、お互いに密接な関係があるものであり、お互いの理解を行うと同時に、ロードマップの構築の共同作業により、垣根を越えた連携を行うことで地震分野の体系化を図った。

安全分科会は、日本原子力学会の特別専門委員会傘下に設置した。地震に関する各専門分野を束ねるメカニズムのひとつは、横串となる原子力の安全確保に関する基本的考え方であり、安全分科会は、これを「原子力発電所の設計と評価における地震安全の論理」(以下、「地震安全の論理」という)としてまとめた。これを基にこの考え方を各分野に展開し、それぞれの取り組むべき課題の議論に供した。

地震工学分科会は、入力地震動、構造系の応答、耐震設計などの地震工学的課題の検討を行い、日本地震工学会(以下、「地震工学会」と称する)に協力を要請して検討を進めた。

構造分科会は、日本機械学会の動力エネルギーシステム部門と連携して検討を進めた。

このように、本活動は、日本原子力学会が中心となり、関連する他学会に協力を呼び掛け、原子力発電所の「地震安全」はいかにあるべきかについて、広範囲の専門分野にまたがる深い議論を行ってきたことに大きな意義があると言える。

Ⅱ. 原子力安全の基本的考え方と深層防護の思想

1. 原子力安全の基本的考え方

ここで改めて原子力発電所の安全とは何か、何を目的にどのような対応がなされているのか、を基本から見直してみる。原子力発電所の炉心には多くの放射性物質が内包されている。そのほとんどは原子燃料ペレット内に留められているが、燃料の核反応による核分裂生成物の

形でも存在している。炉心以外にも、取替え用の燃料等を保存している使用済み燃料プール(ピット)にも多くの燃料がある。原子力発電所の「原子力安全」の目的は、これらに起因する放射能により人や周辺環境に対する影響を顕在化させないことにある。この目的は福島第一原子力発電所事故の前には「災害防止上支障のないこと」と法令で記載されてきたことであった。今回、原子力基本法の改正法案において、第二条に「放射線による有害な影響から人の健康及び環境を保護する」と明記されたのは、その目的を明確に表現したものであると考える。

この目的は、原子力発電所の全ての運転状態において、供用期間中を通じて確保されていなければならない。炉心に燃料を装荷し炉出力を上昇させていく過程においても、100%の出力で維持する通常運転中においても、放射能を限定した系統の中に閉じ込めている。また、設備は故障することは否めない。時として人的過誤による誤操作なども発生することが考えられる。そういう異常な状態を超える冷却材喪失事故などの設計想定事故も考えられる。そのような状態においても、周辺環境へ放射能による著しい影響を与えないことが原子力発電所には求められる。これらの事態の起因となる外的事象、たとえば地震、津波、火災などの事態が発生してもその目的は変わらない。

この目的を厳格に達成するため、原子力発電所においてはその立地から設計、建設、運転に至る全ての過程で、様々な工夫と策がなされている。それらを支える基本的な考え方として、深層防護の概念がある。

2. 深層防護の概念

第1図に深層防護の概念を示す。これは国際原子力機関(IAEA)のINSAG-12²⁾に示されている図であるが、各防護層の目的と達成手段、そして各層に共通理念が示されている。5つの防護層は、通常運転からの逸脱防止(第1層)、異常状態の制御(第2層)、事故状態の制御による設計基準事象からの逸脱防止(第3層)、アクシデントマネジメントと影響の格納(第4層)、サイトの外の緊急対処(第5層)により構築されている。図に少し細い幅の囲いが描かれているが、これは物理障壁である。第3層までの物理障壁として、燃料ペレット、燃料被覆管、冷却材バウンダリーが描かれている。また、複数の層をまたいで貢献する設備が描かれている。第1層と第2層は常用設備で、第3層から第5層には安全系と工学的安全設備で達成されている。さらに全ての層に共通する理念として、保守的な設計、品質保証、安全文化が挙げられている。

本学会誌解説記事「原子炉施設の確率論的リスク評価の動向と今後への期待」第3回³⁾にて山口が述べているように、深層防護の重要な目的は、①防止、②影響緩和、③緊急対処の3つに尽きる。「①防止」は、安全設計で対

第1図 深層防護の概念

処すべき領域である。適切な安全余裕を持たせた安全設計、設計・建設・運転の高い品質、異常検知と安全系作動による異常拡大防止、多重性・多様性を持たせた工学的安全設備による設計基準状態からの逸脱防止により、構成される。「②影響緩和」は、特定の事故シナリオを限定せず、考えうる様々なシナリオに対して、アクシデントマネジメント策を用意し、それらが有効に機能しないことを想定して格納機能により放射性物質を過大に放出しないことである。「③緊急対処」も、②と同様、特定シナリオに限定せずに、総合的な緊急時計画を作り訓練を行うことである。これらは基本的に必要なことである。

深層防護の概念に則して設計された原子力発電所は、様々な事象が起こることを想定し、燃料に大きな損傷がなく、周辺の公衆の安全と健康に影響をもたらないことを安全評価で確認することとしている。起こり得る事象として、2つのカテゴリーを考える。1つは運転時の異常な過渡変化(異常過渡)で、原子力発電所の寿命中に発生が予想される機器の故障や運転員の誤操作により引き起こされる外乱で原子力発電所が異常な状態に至る事象である。簡単に言えば軽い異常で、タービンが停止してしまうような事象、外部電源が喪失してしまうような事象などである。この異常な過渡変化事象に対して、事象が終息し、燃料と原子炉の1次系がすべて健全で、原子力発電所を通常の運転状態に復帰できることが確認される。もう1つのカテゴリーが事故である。異常な過渡変化事象を超える状態で、発生する頻度はまれであるが、原子炉施設からの放射能放出の可能性がある、安全性を評価する観点から考えておくべき事象である。具体的には、冷却材喪失事故や反応度事故が対象となる。こ

れらの様々な事故に対してそれぞれ評価を行い、燃料の冷却が維持されて放射能放出の恐れがないことを確認する。

これらの異常な過渡変化事象や事故を設計基準事象という。解析評価においては、結果が最も厳しくなるような機器が1つ機能しないこと、すなわち単一故障を想定する。他にも、様々なパラメータや特性に保守的な仮定を置き、参照する測定データなども保守側に参照するようにして、全体の包括性が確保されるような枠組みとしている。

Ⅲ. 地震安全の論理

上述のようにして確立した安全確保の考え方を地震安全の論理に取りまとめた。地震時安全確保のためには、設計上考慮すべき地震動、すなわち基準地震動を定め、その地震動以下の地震動において、安全機能が確実に遂行されることを担保するように適切な余裕を持たせた耐震設計を行い、諸所に存在する不確実さを考慮し安全評価により確認する、というプロセスが必要となる。

まず、基準地震動の策定については、原子炉の運転期間を考慮し、原子炉のリスクを十分に低く抑えるような発生頻度と大きさの地震動を設定する。地震時の安全確保の観点から適切な基準地震動を設定するには、知識および認識の不足に係わる不確実さを低減させる努力を継続するとともに、確率論的概念を導入することが必要である。

次に、耐震設計では、基準地震動以下の地震動に対して事故の発生防止に重点を置くことが重要であるが、拡大防止および影響緩和についても異常過渡が事故へ拡大するのを防止するという観点から、事故の発生防止と同様に高い耐震重要度分類に位置付け、基準地震動以下の地震動に対して原子炉の安全を確保するように設計することが適切である。

基準地震動以下の地震動に対して、安全機能を担う機器の機能が設計により担保されていれば、内的事象に対する安全評価により確認された機能と同等の働きを各防護レベルの機器が果たすことから、機器の構造設計評価を行って地震時に所定の機能が確保されることを確認することで、基本的には内的事象と同様の安全評価は不要と考えられる。ただし、地震時には耐震重要度の低い機器のいくつかと同時に損傷して機能を果たすことができないという事態も想定すべきであり、こうした状況を踏まえて、地震時における原子炉の挙動が内的事象に対する安全評価で対象としている事象により包絡されるか否かについて十分な検討を行うことが必要である。

基準地震動を超える地震動は、発生頻度は極めて小さいものの、その発生を完全には否定できないため、こうした地震発生時の原子炉の安全性を確認することが必要である。基準地震動を超える場合には、耐震重要度が高

い機器であっても同時に、複数の機器の機能に期待できなくなる場合も想定されることから、地震時確率論的リスク評価(地震PRA[PSAと同じ])を導入することが合理的である。地震PRAを行うことにより、発生頻度と影響の両方を定量的に把握して、基準地震動を超えるような地震動に対して発電所の有する潜在的なリスクが十分に小さいことを確認することが可能となる。

Ⅳ. 地震安全確保の課題

1. 地震安全確保のプロセス

前章で述べた地震安全の論理を基に、地震安全確保のプロセスを再構成すると第2図のような論理体系となる。このプロセスは図中の1)～9)の項目で構成されているが、「耐震設計」のプロセスだけでなく、内的事象を対象とした、安全設計、安全評価との関係も含めている点が新しい。すなわち、図の各技術的要素の中で、「2)基準地震動の設定」における確率論的手法による発生頻度の評価、「5)決定論的安全評価」における耐震設計への評価、「8)構造/耐震上の余裕の把握」、「9)地震時確率論的安全評価」の4つについては、地震安全の論理を構成する要素として従来の原子力発電所の安全確保のプ

ロセスに、新たに付加したものである。

これら4つの技術要素は、中越沖地震において設計で想定していた基準地震動をはるかに超える地震動を受けても、なぜ発電所の被害は軽微であったかを明らかにする上で重要であり、地震時の安全を確保する上で必要な事項を示しており、福島第一原子力発電所事故の場合にもその重要性は変わらないと考える。

2. 技術課題の抽出

前述の地震安全確保のプロセスの中の4つの項目について、これまでの取組みで不足している事項に着目し、研究課題としての緊急性や重要性について検討した。

地震安全ロードマップを策定する視点から、技術課題等の現状を把握した上で、地震安全に係わる地震・地震動、構造設計、安全評価の分野を俯瞰し、地震安全の論理を具現化するための手法整備やデータ収集などの個別技術要素について検討した。それらの分野に関わる日本機械学会の機械構造分野の専門家や、日本地震工学会の地震工学分野の専門家との議論を重ねることを通じて、地震安全に関する各技術分野の考え方や扱いについての過去の論点や課題などを調査し、地震安全の論理との関係を整理した。その上で、より堅固な地震時安全確保に向けた体系を確立するために、今後取り組むべき技術課題を抽出した。

地震安全の論理を基に抽出した技術課題は次の通りである。

まず、地震安全の論理については、今までの耐震設計を離れ、リスクの考え方を基本としてプラント全体の受容可能なリスクから地震時の安全確保体系を再構築することが考えられる。また、地震に伴う火災や溢水、津波に関する安全確保の論理についても今後検討する必要がある。

次に、地震・地震動であるが、従来の地震発生メカニズムに関する科学的調査の結果に加えて、地震によるハザードを適切に評価する方法を検討し、更にリスクの観点から、基準地震動とすべき地震の発生頻度がどの程度であるべきかを検討することが重要である。具体的には、基準地震動の発生頻度をどの程度に設定し、その基準地震動に対して、どのような耐震設計をすることで炉心損傷頻度や周辺公衆の健康影響リスクを、性能目標や安全目標を満足するものとするかというようリスク論に基づく検討を行うことが必要である。

建屋や機器においては設計上の余裕があるため、基準地震動を超える地震動が起こっても、必ずしも直ぐに安全機能が喪失するわけではない。そのため、安全機能を維持できる地震動の大きさを把握することが、諸対策を事前に講じておくことを可能とする観点から重要である。しかし、現状では、実際にどの程度の大きさの地震動まで安全機能が発揮できるのかは完全には把握できて

第2図 「地震安全の論理」で明確にした論理体系

いない。このため、安全機能を担う建屋や機器の耐力の余裕を定量的に把握しておくことが、安全確保の説明性や透明性を高めるのに有効であると共に、地震PRAの基となる機器耐力データを把握する上でも重要となる。

最後に、現在行われている基準地震動に対する耐震設計といった決定論的なアプローチと基準地震動を超える残余のリスクの評価という、基準地震動を境にした2つの評価体系の組合せではなく、将来は地震動全体に対する地震時の安全性を論理的に説明できるような一貫性を有した評価手法の確立が求められる。

以上の技術課題は、福島第一原子力発電所事故の場合の地震評価についても同じことが言える。福島第一原子力発電所事故の場合は、更に津波というより厳しい地震随伴事象が加わったわけであるが、この場合においても地震を津波に置き換えることにより、設計想定を超えた津波に対して同様の技術課題について、今後取り組んでいく必要がある。

V. ま と め

この解説シリーズは、福島第一原子力発電所事故の経験に基づき、原子力災害を二度と起こしてはならないとの強い思いから、今後いかにして原子力発電所の安全を確保すべきかについて考えることを目的としている。

その際、わが国で最も重要かつ注意すべき災害要因である地震への備えはどうあるべきかについて、中越沖地震を発端としてシステム安全、地震工学、機械構造の分野から設計想定を大幅に超えるような地震動に対し検討を行ってきた「原子力発電所地震安全特別専門委員会」での活動の視点に立ち、原子力発電所の安全確保のあるべき姿についてその要点を紹介するものである。

本稿では、関連複数分野での検討の基となるべき地震安全の論理を明示した。それを横串として安全分野はもちろん、機械構造や地震工学の分野にまたがる検討を行うことで、原子力安全と、地震工学および機械構造など複数分野間での議論が展開され、異分野間の考え方の交流が図られ、原子力に関連する学会間の交流が相互理解を深める上で大きな成果を生んだと考える。今後もこのような交流を継続していくことが、原子力の安全確保に大いに役立つものと期待される。

また、今回のアプローチは、今後、福島第一原子力発電所事故の対する安全性向上の検討を進める上で原点とすべきものであり、確率論をどこまで取り入れるのかは重要なポイントである。この経験を活かして福島第一原子力発電所事故以降の原子力安全確保の活動をいかに進めるべきかについては、第2回の解説の中で議論することにした。加えて、今回の検討に参加した地震工学分野および機械構造分野の専門家は福島第一原子力発電所事故をどう捉えているか、今後の活動をどう進めるべきと考えているかについては、第3回以降に解説する予定である。

— 参 考 文 献 —

- 1) 原子力発電所の“地震安全”に関する検討報告書—地震安全ロードマップ—, 日本原子力学会 原子力発電所地震安全特別専門委員会, 2012年3月.
- 2) INSAG-12, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3Rev.1, IAEA, 1999.
- 3) 山口彰, 原子炉施設の確率論的リスク評価の動向と今後への期待, 第3回「リスク評価を正しく活用することへの期待」, 日本原子力学会誌, 54〔3〕, 184~190(2012).

著 者 紹 介

宮野 廣(みやの・ひろし)
法政大学, 日本原子力学会標準委員会
(専門分野/関心分野)システム安全・設計, 流動・振動, 耐震, 規格基準

中村隆夫(なかむら・たかお)
大阪大学
(専門分野/関心分野)耐震設計, 高経年化評価, 環境疲労, 規格・基準

成宮祥介(なるみや・よしゆき)
関西電力㈱
(専門分野/関心分野)安全評価, 確率論的リスク評価, 規格・基準