解説

原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿 土木工学からの視点

電力中央研究所 当麻 純一

福島第一原子力発電所の事故を受け、原子力事故により社会が危機的な状況になることを防ぐには、設計で基準とする事象を超えても炉心の著しい損傷に至らないよう冷却機能を確保することが強く認識された。これを設計およびリスク管理の体系に組み入れることが必要である。本稿では、土木学会委員会での検討に基づき、深層防護の第4層、第5層の目的に貢献する技術的方策として、原子力発電所の敷地内外における「危機耐性」を高める設計法と継続的リスク管理の体系化を土木工学の視点から提案する。

I. はじめに—問題の所在—

福島第一原子力発電所の事故を踏まえると、放射性物質の大量放出により社会が危機的な状況になることを防ぐには、設計で基準とする事象を超えても炉心の著しい損傷に至らないよう冷却機能を確保することが設計およびリスク管理上の要求として明らかになった。土木学会では震災後に「原子力安全土木技術特定テーマ委員会」を組織し、この論点の議論を深め、このたび提言を取りまとめた。この提言は、原子力発電において土木工学が係わる安全規制行政、電気事業、国、自治体、建設業、学協会などで活動する技術者を主な対象としている。

原子力安全の確保は深層防護の考え方が基本とされている。国際原子力機関(IAEA)によれば防護層は、異常運転および故障の防止(第1層)、異常運転の制御及び故障の検出(第2層)、設計基準内への事故の制御(第3層)、事故の進展防止及びシビアアクシデントの影響緩和(第4層)、放射性物質の放出による放射線影響の緩和(第5層)により構築される¹⁾。

本稿では、この考え方に照らし、深層防護の第3層までの土木工学的課題に関しては基準とする地震動や津波に対する設計・施工技術で対応するものと捉え、主には深層防護の第4層に貢献すべき新たな土木工学的課題に注目した。さらには、第5層の目的を達成すべき課題の一部を検討した。

まず、議論の前提として今般の事故を土木工学から省みると、以下の問題が所在していることを委員の共通認識とした。

Performance-Based Design and Risk Management of Nuclear Power Plant for Earthquake and Tsunami: Junichi TOHMA.

(2013年 5月17日 受理)

1. 自然現象は設計で基準とする値を上回ることがあるという認識の欠如

設計地震動、設計津波を上回る事象に対して、どのような対策が現実的に適切であるかという認識が社会で共有されていなかった。

原子力発電所の設計では「極めてまれな地震、津波」を想定する。これらを科学合理的に設定する努力はこれまでもなされてきた。土木分野においても、断層の活動性研究や設計津波の研究に取り組んできた²⁾。しかし、新潟県中越沖地震では設計地震動を大きく上回る地震動が発生し、その後、東日本大震災では設計津波を大きく上回る津波が発生した。その結果、設計で基準とする値の決め方への疑念が社会に広がるとともに、設計で基準とする値を上回る事態への対応が大きな問題となった。

「極めてまれな地震、津波」に対応して設計地震動や設計津波を定めるということは、それがゆえに、その後の新知見への対応が容易ではないという問題を内包してきた。場合によっては、それ以前の意思決定根拠の否定につながり、原子力安全の説明性に一貫性を欠くからである。このことはまた、設計で基準とする値を上回る可能性への継続的なリスク管理を妨げてきた原因にもなった。

「極めてまれな地震、津波」を科学合理的に設定することの努力と同程度以上に、設計で基準とする値を上回る事態に備えての事前・事後の対策を広く検討することが原子力に関わる各分野で必要であったのではないか。

2. 発電所周辺地域の視野からの安全技術の欠如

設計地震動、設計津波を上回る事象に対して、発電所敷地内だけでなく、敷地外との関わりを含めての対策の整備が不足していた。

東日本大震災で送電線やオフサイトセンターが機能喪

失したことに象徴されたように、発電所の安全で問題となるような地震や津波が発生すれば、敷地外においても相当の被害を生じている可能性があることを筆者は震災以前から次のように指摘していた。「地震にせよ、津波にせよ、自然現象は特定の施設を選択的に襲う訳ではない。したがって、これからは、「ある原子力発電所で設定している設計地震動や設計津波がもし発生したら、敷地内外全体はどうなるのか、地域はどうなるのか。近隣諸国はどうなるのか。」というイメージ力を持ち、それを国内外の多くの関係者と共有することが大事であるように思う。これは、原子力に携わる者だけでなく、原子力以外の社会インフラの設計・施工に携わる側に対しても裏返しに言えることである。それぞれの分野の技術基準によって設計された施設が、大自然災害時にどのような機能が果たせるか。緊急時の道路、港湾の機能はどうか。この社会的なやりとりこそが、常識的で適正な安全レベルを保つ手段となる。」³⁾

東日本大震災で、敷地外における道路交通や供給インフラの確保や、必要資材の備蓄も不可欠であり、関連行政や他事業者との連携が重要であることが強く認識された。

東日本大震災以前は、敷地外での実質的な防護措置が必要となるような事故の事態を想定してこなかった。その裏返しとして、事故を想定した議論がタブー視され、敷地内と敷地外とのかかわりが真剣に議論されることがなかった。設計で基準とする値以下の事象においての発電所(あるいはその所有会社)で完結した事態収束が前提となっていた。

原子力安全の目標を達成するためには、こうした「発電所周辺地域の視野からの安全技術」の整備も十分になされていることが必要であったのではないかな。

Ⅱ. 新たな耐震・耐津波設計とリスク管理への提案

1. 新たな耐震・耐津波設計とリスク管理の枠組み

従来考慮されていた、基準地震動・津波に対する性能である「安全性」に加え、基準地震動・津波を超えるなどにより「安全性」が損なわれた場合の「危機耐性」を新たに性能として考慮することを提案する。

原子力発電所に限らず、設計基準のレベルを高くすればするほど安全性は高まるが、それでも設計基準を超える事象に対しての危険は残っている(第1図)。ここでの「安全性」の定義は一般に「重大な損傷が発生しない」であり、原子力発電所施設では「緊急手段を必要とせずに放射性物質の大量放出という危機的な状況に至る可能性を十分に小さくする性能」と捉える。この「安全性」が損なわれたとしても直ちに危機的な状況に陥ることは避けなくてはならない。安全性能を超えることは構造物に重大な損傷が発生することを意味するが、そのような場合で

「安全」と「危険」は連続的、絶対安全はない

「安全性」：緊急手段を必要とせずに危機的な状況を回避
(構造物に重大な損傷を生じさせない)

「安全性」に関する設計 ⇄ 基準地震動、基準津波

それでも残っている「危険」への対処 → 「危機耐性」

第1図 安全性のレベルと設計基準(吉田, 土木学会主催シンポジウム「東日本大震災から2年」2013.3.13より)

も緊急手段の実行を可能とし、原子力発電所のシステム全体として危機的な状況に至る可能性を十分に小さくする性能を定義すべきである。この性能の名称として、「危機耐性(anti-catastrophe)」を用いる。

基準地震動・津波以下に対しては「安全性」、それ以上に対しては「危機耐性」が保たなくてはならない。なお、これらの性能を確保する上で構造物の劣化が「危機耐性」などの性能に大きな影響を与えないように適切な維持管理を行わなくてはならない。

2. 新たな性能「危機耐性」

「危機耐性」を考える場合、原子力発電所内の個々の施設や構造物の損傷による波及効果を十分に理解し、原子力発電所を一つのシステムとしてモデル化する必要がある。システムのモデル化は、原子力発電所内で生じる個々の施設や構造物の地震や津波による損傷・被害の影響範囲を明らかにすることに直結している。モデル化されたシステムに基づき被災シナリオが構築されるため、システムさらにはその中のサブシステム、さらにはその中の個々の要素の相互の関係を明確にしなければならない。原子力、土木、建築、機械、電気などの技術分野の垣根を越えた工学連携により各分野が係わるサブシステムで構成されるシステム全体について総合的に検討することが重要である。

例えば、屋外重要土木構造物や周辺斜面が被害を受けたとしても、それが原子力発電所の危機的な状況をもたらすような被害であってはならない。新潟県中越沖地震(柏崎刈羽原子力発電所)、さらには東日本大震災(福島第一、第二原子力発電所ほか)でも、これら自体が地震動で壊れることなく耐震性の高さを実証した形になったが、耐震重要度のより低い構造物との取り付け部に被害が集中するなどして、システム全体の修復・復旧を困難にした事例もみられた。また、水位計の止水部が津波の押し波で壊れたために、取水設備から原子炉建屋附属棟への海水流入により冷却系の重要機器が浸水し、冷却機能の一部喪失の危機につながる状況もみられた(女川原

子力発電所)。

これまで、壊れ方、壊れた後の影響の検討はあまり行っていないが、もし壊れるとしても危機的な状況を迎えるような壊れ方を検討することが今後重要である。そのためには部材レベルの照査だけではなく、構造物全体として、あるいはシステム全体として危機的な状況を迎えるための方策を考える必要がある。取水施設であれば基準地震動・津波を超えたとしても直ちに冷却水確保のための通水性が損なわれるような破壊形態は避けなくてはならない、通水性が損なわれたとしても緊急手段による対処を阻害するような被害形態は避けなくてはならない。このようにシステム全体として粘り強いものとすることが重要である。「危機耐性」の確保は、所定の設計外力に対して照査を行う従来の設計の方法とは異なり、ある施設の損傷がどのような波及効果を及ぼすかを考え、過酷事故に至るような状況を回避するための対策を講じることによって達成される。その具体的方法は今後議論を重ねる必要があるが、ストレステストと確率的リスク評価とを相互補完的に合わせて用いることはその一つの方法と解釈できる。

また、緊急手段により「危機耐性」を保つことも大変重要であり、その際、モニタリングの果たす役割は大きい。津波の到達前での建屋等の開口部の閉鎖および作業員の避難等の緊急手段は、原子力発電施設における津波の影響を低減し、危機的な状況から遠ざける効果がある。これらの方策を適切に実施するためには、津波の到達時刻や水位変動量の予測が必要である。沖合における水位モニタリングはその精度を高める有効な手段の一つであり、GPS 波浪計データや海洋レーダの活用が期待される。また、津波到達後に、危機的な状況を迎えるために、浸水した機器の代替機器の設置などの緊急手段を行う可能性がある。しかし、巨大津波が発生すると、その水位変動は数時間から最大で1日程度継続する場合があります、作業の実施の可否判断には津波に関する情報が必要である。この情報を得る主要な手段の一つが、原子力発電所敷地内と周辺のモニタリングであり、例えば水位等の観測や映像によるモニタリングにより現場の状況を把握することができる。また、モニタリング結果を記録することにより、津波が発電所に与えた影響を直後に確認することは、緊急手段の選択に有効である。こうした情報を有効に活用した適切な緊急手段によって「危機耐性」を高めることが期待できる。

なお、新たな性能である「危機耐性」を導入したとしても、原子力発電所が地震や津波により危機的な状況に至る可能性を完全にはゼロにできないことを十分に認識し、継続的にリスク管理の改善を図っていかなくてはならない。

Ⅲ. 原子力安全確保に向けた発電所敷地外の周辺地域との関わり

1. 発電所周辺地域の視野からの修復・復旧

原子力安全土木技術の根幹は、地震・津波ハザードの評価技術や耐震設計及び耐津波設計に関わる技術であるが、一方で、原子力発電所の物理的・機能的な被害の可能性を想定すれば、危機的な状況を迎えるための修復・復旧に係わる活動やそれらを支える周辺地域からの応援・支援は不可欠となる。そのためには、設計とする地震動や津波を超える自然現象を想定した場合に、原子力発電所の立地する地域全体の社会インフラがどのような地震・津波被害を受ける可能性があるのかが、危機回避の与条件として必要になる。たとえば、土木工学の視点からは、建物の倒壊、地域の浸水、橋の崩壊やトンネルの崩落、液状化による交通阻害などがある。これらのインフラが被災原子力発電所の復旧にどのような影響を及ぼすか、どの程度の事前・事後対策を用意すればよいかを、関係する機関が相互調整する必要がある。

電気事業者、国の関係機関および立地自治体を含めて、我が国の社会全体で原子力発電所の物理的・機能的な被害の可能性をこれまで暗黙裡に前提としてこなかった。それゆえ、被害収束に向けた原子力発電所の修復・復旧という考え方が原子力安全土木技術の枠組みの中で十二分に制度化されていなかった点が大きな問題の一つであった。その結果、危機的な状況での、時間的・空間的に極めて強い制約下において原子力発電所を修復・復旧させるためのアクションプランや具体的な方策が欠落していたと考えられる。

危機耐性の考え方を国際原子力機関(IAEA)による深層防護の考え方に対応づけると、第4層で必須となるアクシデントマネジメント、第5層で必須となる敷地外緊急対応に関与する性能であり、このような性能を確保するためには、周辺地域との関わりの中での修復・復旧という考え方が前提として求められることになる。

2. 修復・復旧を前提とした社会制度の枠組み

原子力安全土木技術に係わる修復・復旧の考え方を、社会制度の枠組みの中でどのように位置づけ、共有・運用・管理・維持していくかが、極めて大きな課題である。その課題解決には、様々な分野との協働・連携作業が不可欠である。

原子力発電所周辺の地域社会との関わりの中で、修復・復旧を前提とする原子力防災の基本的な枠組みを、災害対策基本法や原子力災害対策措置法といった上位法令の中で明文化し、それによって、各省庁の原子力災害対策マニュアル、関連自治体の総合計画・地域防災計画および電気事業者の防災業務計画の策定過程の俎上に載せ、アクションプラン等の具体的な施策立案の際に修

復・復旧の考え方を反映させる必要がある。

その際、学会や行政など中立な第三者機関の役割としては、アクションプラン策定のための指針や手引書の策定・公表・改定などの責任の立場が求められよう。さらに主体を広げると、政府機関には、住民を含めた、原子力安全に係わる個別分散的な主体間のリスクコミュニケーションを前進かつ効率化するために、原子力安全に係わるリスク情報を一元的に共有するプラットフォームを再構築した上で公開し、実質的にかつ効率的な運用・管理・維持に向けた迅速な行動が強く求められる。

3. 原子力発電所の危機耐性を確保するための敷地外システムの耐性の向上

「危機耐性」という性能を原子力発電所に求めるためには、原子力発電所の修復・復旧を周辺地域との関わりの中で具体化し、効率的に実現することが不可欠となる。このためには、原子力発電所の敷地外システムの耐性の向上方策を講じておく必要がある。対象とする原子力発電所の物理的・機能的な被害による影響波及をイベントツリー解析の方法論を援用するなどして事前検討し、帰結となる事態の事故シーケンスを遡って敷地外システムの耐性を向上させる必要がある。

原子力発電所の敷地外システムとして、具体的には、国・自治体等が関わるオフサイトセンター等の危機管理および応急復旧の基点となる公的施設や、電気事業者等が関わる復旧人員・復旧資機材の供給拠点となる後方支援拠点群、また、それらから原子力発電所までの交通インフラ・アクセスルート、及び、電力供給、情報通信、水供給・水処理等のライフラインシステムが挙げられる。

先に述べた深層防護の第5層(放射性物質の放出による放射線影響の緩和)が発動される事態において、これが確実に達成されるためには、それぞれの事故シーケンスを想定した上で、地震動、液化状等による地盤の変状、斜面崩壊、津波、さらには空間放射線による被曝などに対する原子力発電所の敷地外システムのリスク管理が必要不可欠である。たとえば、避難や応援に支障となる被害が発電所周辺の道路、河川、港湾などに生じていないかは重要であり、その事前・事後対策は土木工学が大きく貢献できる技術分野でもある。

また、危機的な状況に応じて空間的に対象領域を拡大して修復・復旧の効率化に係る方策を検討する必要がある。したがって、原子力災害対策の重点区域だけでなく、さらに広域からの応援・支援を念頭に上記のリスク管理と具体的な方策の検討が必要である。

なお、このようなリスク管理と具体的な方策の検討にあたっては、電気事業者と他の事業者が密接に関わる必要があるため、実効性を高めるための制度設計が喫緊の課題となろう。このような制度設計に際しては、上記の敷地外システムに関わる事業主体が具体的な方策を実施

する際のコストの負担について検討することも併せて必要である。

IV. 土木技術者の役割

一般の社会基盤施設では、地震、津波など自然外部事象への理解と対策において土木技術は大きく関与してきている。そうした総合的な防災技術力があるにもかかわらず、原子力安全においては土木分野からの情報発信や他の技術分野との連携が十分とはいえなかった。東日本大震災での原子力事故を機に、原子力、土木、建築、機械、電気の分野間での垣根を越えた協力関係が良好に構築されつつある。特に、次に示す課題について、分野間の協力関係を密にして対応していく必要がある。

1. 失敗・成功事例等の共有と活用

失敗事例から再発防止の教訓を得るとともに、東日本大震災で過酷事故に至らせなかった他のサイトでの経験を技術として体系化して今後に引き継いでいくべきである。

東日本大震災では過酷事故に至った失敗事例から、社会は多くの教訓を得た。これらを今後の安全に活かすことは当然として、過酷事故に至らせなかった成功体験もあり、これらを事例として共有して今後に活かすべきである。たとえば、東北電力女川原子力発電所では、基準地震動 S_s と同程度の地震動を経験したが、耐震安全上重要な土木構造物、基礎地盤、周辺斜面に顕著な被害はなかった。最高水位13mの巨大津波であったが主要設備を設置している敷地には津波は到達しなかった。過去から現在に至るまでの土木技術が有効に寄与しているものと考えられる。また、震災後に各原子力発電所で個別に実施されている緊急安全対策についても、その設計法、施工法、耐震性評価法、耐津波性評価法などを技術として体系化し将来に引き継いでいくことが重要である。

2. 継続的なリスク管理への関与

原子力発電所は、常に最新の地震・津波工学に関わる知見を取り入れ、「危機耐性」などの新たに定義される性能も考慮し、継続的にリスク管理を行うことが求められる。さらには、今後も原子力発電所近傍における地震や津波の情報が新たに提供されることが予想されるため、これらに対する原子力発電所のリスクを管理し、受容できるように補強を含めた対策を施す必要がある。

継続的なリスク管理を行っていく上で、モニタリング技術の積極的な活用も重要である。中小の地震も含めた地震動、各種構造物の応答、津波などの観測情報から設計やリスク評価に用いたモデルの妥当性を確認し、必要に応じて更新する耐震・耐津波設計、リスク管理の仕組みを構築していくことが好ましい。

さらには、構造物の耐震性・耐津波性に関するリスクとその対策に関わる情報を第三者の立場から公開するシステムを構築し、市民感覚を反映した意思決定の仕組みを持つべきである。

V. 提言のまとめと今後の取り組み

設計で基準とする地震動や津波を超える事象が発生した場合でも、深層防護の目的を達成することを可能とし、原子力発電所のシステム全体として危機的な状況に至る可能性を十分に小さくする性能を「危機耐性」と定義した。これを発電所敷地内外の関連施設の設計やリスク管理の枠組みに取り入れることが必要である。

震災を受け、土木分野では、津波が浸水した場合の構造物への波力、津波浮遊物の構造物への衝突力、海洋レーダによる津波の沖合検知、周辺斜面の地震時変形予測と崩壊対策、地表断層変位が構造物安定性に及ぼす影響などの調査研究に力を入れている。これらは危機耐性の向上に寄与するものと考えている。

VI. あとがき

本稿は、東日本大震災を受け土木学会が設置した「原子力安全土木技術特定テーマ委員会」による検討に基づいたものであり、委員会が作成中の提言案⁴⁾の基本部を

土木学会主催シンポジウム「東日本大震災2年」(平成25年3月13日)で討議した内容に基づき紹介した。提言は関係資料とともに2013年7月を目途に完成し公表する予定である。

—参考資料—

- 1) 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, 日本原子力学会誌, 54〔3〕, 184(2012).
- 2) たとえば, (社)土木学会 原子力土木委員会津波評価部会, 原子力発電所の津波評価技術, 2002.2.
- 3) 当麻純一, 耐震安全性の相場観の形成, 土木技術, 土木技術社, 2010.8.
- 4) 原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言(土木工学からの視点)(案), 土木学会 東日本大震災フォローアップ委員会 原子力安全土木技術特定テーマ委員会, 2013.2.

著者紹介

当麻純一(とうま・じゅんいち)
電力中央研究所
(関心分野/専門分野)土木工学, 地震工学,
原子力土木

日本原子力学会誌 ATOMOS 広告のご案内

一般社団法人 日本原子力学会

「日本原子力学会誌」は、特集・解説・講演等、広く原子力に関わる記事を掲載し、我が国の原子力研究、産業の発展に資するべく、努力しております。学会誌は毎月約8,000部が発行されており、電力、メーカー、大学、研究機関を中心とする会員および賛助会員の原子力関係者はもとより、広く原子力関係機関、市町村、マスコミ等にわたっております。本誌への広告掲載は、発展の一助になるものと信じておりますので、ぜひ、広告の掲載をお願い申し上げます。

■賛助会員料金(消費税別)

表2	150,000円	前付	110,000円
表3	140,000円	後付	100,000円
表4	190,000円	差し込み	230,000円

※差し込みは本誌に同封となります。

■一般料金(消費税別)

表2	160,000円	前付	120,000円
表3	150,000円	後付	110,000円
表4	200,000円	差し込み	240,000円

■上記の金額は、1ページあたりのモノクロの料金です。カラーの場合、1ページあたり120,000円追加となります。

また、版下・フィルム製作費は別途申し受けます。

■過去1年以上毎月出稿された機関につきましては10,000円引きとなります。

■連絡先 105-0004東京都港区新橋2-3-7新橋第二ビル3F, 一般社団法人日本原子力学会 学会誌編集担当 富田, 野口
TEL 03-3508-1262, FAX 03-3581-6128, E-Mail: hensyu@aesj.or.jp

■詳細 <http://www.aesj.or.jp/atomos/atomoskoukoku.html>