

「外的事象に対する包括的な安全確保の体系の現状と課題」フォローアップセミナー
講演議事録

※敬称略

開会挨拶と趣旨説明：関村直人（部会長、東京大学）

安全部会は今年度で設立 10 周年を迎えた。本部会は、特に福島第一原子力発電所事故（以下、1F 事故）後に連続セミナーを開催し、1F 事故に対する議論の場を提供してきた。外的事象についても、2015 年秋の大会にて「外的事象対策の原則と具体化」に対する議論を行った。さらに、今年 2018 年春の年会では、外的事象に対する包括的な安全確保のための基本的な枠組みが重要と考え、そのための事業者の取り組み、規格基準の策定、及びこれらを支える新しい考え方や研究開発について議論の場を提供した。

今回は、2018 年春の年会のフォローアップとして、外的事象に対する包括的な安全確保の原則等について東京大学 糸井先生から説明頂いた後、原子力規制庁 櫻田技監に現行の規制基準と安全性向上評価を含めた対応、特に外的事象に対する包括的な安全確保に関する進め方についてご講演いただく予定である。更に、事業者（東京電力）、原子力学会標準委員会、及び研究者（電力中央研究所）の立場からご講演頂く。その後、総合討論の場を設ける。

外的事象に対する原子力安全の枠組み：糸井達哉（東京大学）

安全性向上評価制度の継続的な運用の根幹は外的事象の網羅的な再評価、或いは対策の検討である旨言及し、引き続き外的事象に対する原子力の安全性向上に関する講演がなされた。

<講演概要>

・まず、外的事象に対する議論を行う上で前提となる考え方が述べられた。

－原子力安全に影響を与え得る外的事象とそれに対する効果的な対策は、プラントが設置される地域によって異なるため、地域ごとに支配的な外的事象も異なる可能性があり、プラントの敷地の大きさ等の特徴によっても、効果的な対策が異なり得る。

－外的事象を議論するとき、外的事象に対する対処の一般論について議論する事が大事である一方で、具体的なそれぞれの外的事象への対策を考えていくことも同様に重要である。

－我が国では、諸外国と比較して、外的事象のリスクが大きいので、外的事象に対する安全対策は、諸外国の知見を導入する事よりも、我が国が主導して国際的な知見を作っていく部分が多い。

－地震や津波といった既に認識されているリスク評価だけでは不十分な可能性があるため、現状の評価に欠けている外的事象のリスクを見つけ、評価し、必要に応じて対策を検

討する事が重要である。

- ・以上を踏まえ、我が国の原子力施設は外的事象が主な要因になり得る事を大前提とし、1F事故以降の議論も踏まえ、外的事象に対する安全確保の枠組みについて検討したことを述べられた。

- －外的事象の安全を考える際に、基本的なスタート地点は深層防護であるが、最近のIAEAでは、多重故障を含めた事故状態について、従来の保守的な設計基準とは異なる設計拡張状態として考え、この状態に対応したプラントの設計を行う事で、プラント外に影響を及ぼす事故を事実上除外する設計の考え方が、特に新設炉の設計においては提唱されるようになっている。但し、この考え方をどのように外的事象に適用すべきかという議論については進展中。

- ・以上を踏まえ深層防護をどのように考えていけば良いかについて述べた。

- －外的事象に対する立地について、大きな事故の原因となる様な設計ができない外的事象のない場所に設置し、更に、適切に設計基準となる様な外的事象を設定する事。

- －外的事象に対する設計基準の設定として、従来の決定論的に概ね最大となる様な敷地において最大と考えられる外的事象を設定することが本質的に困難であるという前提に立ち、設定した設計基準を超える事象が発生する頻度を参照する事で、その大きさの妥当性を判断する事。

- －設計基準を超える外的事象に対する備えとして、例えば、位置的分離、機能的隔離、及び多様性を導入する事により、地震や津波等の共通原因でそれぞれの設備が同時に損傷する事を回避し、いずれかの設備が機能し効果を発揮する様な備えが必要である。またそれが有効かどうかも含めて、リスク評価を含めた多面的かつ相補的な評価で確認をする事。

- －設計基準を大きく超え、設備のみでの対応が難しい事態に対する対処を考えるときに重要な事として、例えば、地震の場合、地震動単独の作用だけでなく、津波あるいは斜面崩壊などの同時作用や、それに起因した施設内での火災や浸水の発生も含めた状況に対する備えも大切になる事。

- ・次に、決定論的に評価が難しい外的事象に対してどうすれば良いのかについて述べられた。

- －外的事象は一般的に低頻度な事象であり、我々の知識が完全でないため不確かさが大きい。

- －この不確かさを現時点でどの様に対処するかも重要な一方で、不確かさにより運転期間中において将来に対する現状の予測が変わり得る事態に対する考え方も合わせて準備をしていく必要がある。別の説明をすれば、設計時の問題でなく運用や保全において外的事象をどの様に考えるのかも重要となり、安全規制においてもこの様な議論を前提に基本的な考え方を持たなければならぬという事。

- －不確かさは簡単に、定量的に評価できない場合があり、評価する視点によっては変わ

り得るといふ可能性を持つため、ごく一部の意見に対してどのように対処するのかという点も重要。

ーまた、不確かさも大きいリスクも大きい可能性がある場合、意思決定が適切に迅速に行われるように、例えば、暫定的な実績措置を実施した上で再評価を行い、必要に応じてより具体的な詳細評価を行う事を許す、或いは積極的に実施する仕組みも必要。

・外的事象評価における不確かさの要因とその取扱いについて、以下のようにまとめた。

ー外的事象に対して不確かさで対処は、自然現象あるいは人為事象について科学的に分析可能なものではなく、関係する人あるいは組織も含めて、様々な要素が複雑に関係している問題であるということ的前提にする必要があるという事。

ー安全性向上を実施していくために、事業者、規制機関だけではなく、学会等が適切に役割を担う事が重要でなる。この際、複雑な状況に対する対処としてのマネジメントと、変化を起こすリーダーシップ、この2つの枠組みをどういう形で実現するかが課題となる。

ーまた、不確かさがある様な状況下で外的事象の安全を判断するためには、予め決められた外的事象に対する評価だけでは十分でなく、重要な外的事象を適切に把握して、その重要度に応じた精度でそのリスクを評価する事が重要になる。具体的には、一地震・津波が日本全国一律で支配的な外的事象だと基本的に想定する事は間違いであるかも知れず、強風あるいは台風、竜巻、火山の噴火も含めて、サイトに応じた支配的な外的事象を見つける必要があり、そのためにリスクの評価を行う事が重要。

ーリスク評価の手法として、確率論的リスク評価（PRA）が最も用いられるが、その際、不完全性と不確かさが問題とされることがある。

ーただし、不完全性と不確かさがあるから、PRA を行ってはならないという訳でなく、どの様なスコープで、どのくらいの事が言える様な PRA を行っているのかを認識した上で、その認識に応じた活用をすべきであると考え事が重要である。

ー一方、すべてを PRA だけで行うのが適切という訳でなく、それ以外の様々なリスク評価を活用する事も重要になる。

・安全に対する考え方が変わりつつある。従来は、安全とは許容できないリスクが無い事だと言われてきたが、研究や経験による学習により発展するもう少し長期的なプロセスとして安全が語られることが増えてきた。つまり、安全研究を含めて今後どの様に知見を収集して安全性を向上していくのか、という観点が重要になると考えられる。

自然現象に対する原子力規制のアプローチ：櫻田道夫（原子力規制庁）

規制基準の策定経緯と、自然事象に対する規制の考え方について講演があった。（なお、講演に先立ち、講演内容は規制庁としてではなく個人的見解に基づく、との説明があった。）

<講演概要>

・1F 事故以降、原子力規制委員会として短期間で規制基準を策定する必要があり、規制庁は何者でどこに向かうのかを常に念頭に、二度と 1F のような事故を起こさないと検討し、世界最高水準の安全を目指し、心がけた。1F 事故の教訓は、自然事象、津波に端を発した共通要因による安全機能の喪失であり、地盤・地震・津波については条文として特出しをし、他はその他自然事象とした経緯があるが、まとめてもよかったかもしれない。

・最新知見を踏まえた規制の継続的改善の例として研究成果（津波波圧評価、高エネルギーアーク損傷対策等）やトラブル（SFP スロッシング、内部溢水等）を踏まえた事例、降下火砕物（火山灰）対策、基準適用後運用を積み重ねた中で得られた対応例（断層の連動他）、また、基準地震動を例に不確かさの考慮が重要であること、PRA の活用について説明された。

・最後に、原子力を進めてきた技術者は各々の立場での社会への責任、社会から信頼を得ることが必要であるが、まだそのようになっていると思えない、何が足りないかに対して内輪の議論はしても社会との、特に自然事象なら自然科学分野との意見交換が不足しているのではないかと、一人ひとり胸をはって最善を尽くしているといえることが必要、として締めくくられた。

・以下の点について問題提起がなされた。

－「基準地震動」は他の工学分野における設計用地震動と同じ意味合いなのか？

－事業者は、地震 PRA や津波 PRA を用いた RIDM によって、何を、どのように、判断（decide）しようとしているのか？

－1F 事故の発生を防止できなかったことに関し、事業者、規制者、学界のそれぞれが、それぞれの立場で、社会に対する責任を負っているのではないかと？

－それぞれの社会に対する責任を果たすためには、社会から信頼される存在になることが必要なのではないかと？

－社会からの信頼は回復できたか？何が足りないのか？社会（他の人文科学・自然科学の専門家を含む）と向き合っているか？

－社会に対して、「1F 事故のような事故を 2 度と起こさないために最善を尽くしている」と一人一人が胸を張って言えるか？

柏崎刈羽原子力発電所における外的事象に対する取り組み：石崎泰央（東京電力）

1F 事故を踏まえた柏崎刈羽発電所における事故直後からの対策、新規規制基準適合性審査を通じての外的事象防護を含む安全対策の改善について説明があった。

<講演概要>

- ・従来の安全確保体系からみた 1F 事故の原因分析として、設計基準を超える深層防護第 4 層のうち、第 4 層のなかでも想定内の外的事象についてのリスク要因分析・改善努力と、内的・外的ともに第 4 層のなかでも想定外の事象については現実的に発生しないものとして検討・対処への取り組みが不足していた、と説明があった。
- ・一方、新規制基準を踏まえた安全対策の全体像を踏まえ、外的事象に対する設計基準の想定についての現象・事象の抽出や重畳の考え方等、重大事故等対処設備に対する設計上の考慮と具体的事例の紹介があり、また、訓練について復旧作業にはリアリティが必要等の説明があった。
- ・継続的な安全性向上の取り組みの一環として、RIDM 導入に向けた取り組みが紹介され、PRA はオンゴーイング、完成系でなく大きな保守性をもった評価だが、現実的にどう壊れるか等モデルに組みこまないと改善につながらないとして試評価の結果が示された。
- ・最後に、これら取組みを通じて安全意識の高まりを認識しているとして締めくくられた。

外的事象にかかるリスク活用の意義と標準化の必要性：成宮祥介（JANSI/標準委員会）

「外的ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準：2014」の紹介として、外的事象の分類・特性について講演された。また、外的事象にかかる IRIDM プロセスとその具体例が紹介された。

<講演概要>

- ・自然災害が起こることは日本の宿命である。これを踏まえて外的事象の標準を整備した。また、外的事象についても一度ちゃんと考えるために、事象の分類表をまとめ、掲載した。
- ・外的事象の特性として、まず発生場所で何らかのエネルギーが発生する。事象によっては、発生場所からの伝搬も考える（津波、火山など）。そしてこれらがプラントに到達して作用することで、影響が発生する。震災後、様々な自然災害・防災に関する文献を調べた結果、外的事象の対策を考えるためには、まずその特性を知る必要があると考えた。
- ・外的事象のリスク評価は、必ずしも全て PRA でなくてもよいと考えている。例えば、高潮を考えた場合には、影響を受ける海水システムに限定した評価をしてもよい。これは事象の特性による。この特性の指標として発生頻度、発生離隔距離、伝播時間、影響を分析し、必要であれば炉心損傷に繋がるかを判断する。この考え方は、ASME の PRA 標準のものと似ているが、外的事象の標準ではリスク評価として PRA 以外も考え得るため、スクリーニングアウトという言葉は用いず「分類」という表現にした。ここでは割愛したが、標準には複合事象に関する記載もある。
- ・ISO のリスクマネジメント図と同様に、IRIDM プロセスの中心にも「コミュニケーション」が置かれている。この例が「対話」であり、組織間の対話だけでなく、組織内の部署間の対話も重要だと考える。このプロセスで重要なのが、意思決定した後のモニタリン

グとメンテナンスであり、意思決定に用いた統合的分析の基になる情報（例えば、解析の前提条件など）に変更が無いか、確認が必要である。これは、ある意味では新知見の反映にも繋がると考える。

・ IRIDM プロセスは中々分かりにくいいため、以下のような架空の適用例を考えた。

- ある発電所で 10[m]の津波防潮堤を建てたが、海外の災害事例からこの対策を見直すことになった。

- 様々な分野の関係者とのコミュニケーション体制を構築して問題を設定し、対策案の候補について、防潮堤の高さ変更、水密扉増設、モバイル電源の組み合わせを、PRA だけではなく、工期、費用、強度（確定論）評価も実施し、その重みづけを分析した上で対策案を決定した。

- 対策結果をモニタリングし、マネジメントの改善に資する仕組みを作った。

・ 外的事象の IRIDM プロセスの留意点として強調したいのが、外的事象は不確かさが大きいいため、同時複数個所や広範囲の影響、あるいは更なる誘発事象を考えた上で、起こり得るシナリオを想定しなければいけない、という点である。数値だけではなくシナリオを分析するという点では、PRA の強みが発揮できると考える。

・ 外的事象にかかる規格類は設計やリスク評価などいくつかの分野で策定されているが、共通の考え方があり、その上で様々なアクティビティ・アクションに対する規定ができると、体系的で抜けが無く、横同士の議論（データのやり取りなど）ができる。

自然事象に対する研究開発と実務への適用：梅木芳人 (NRRC)

自然事象のリスクにかかる研究開発として、地震、津波、竜巻並びに火山について、NRRCが実施している要素技術開発・研究の内容が紹介された。

<講演概要>

・NRRCは2014年に設置され、PRA、リスク情報を活用した意思決定、リスクコミュニケーションの最新手法を開発し用いることで、原子力事業者及び産業界を支援し、原子力施設の安全性を向上させることをミッションとする。

・研究開発の大目標は、低頻度だが大きな被害をもたらし得る事象のさらなる解明と対策立案、従来の決定論的な手法に加えてリスク情報を活用する手法を適用すること、である。研究開発項目としては、事象評価技術、リスク評価技術、リスクコミュニケーションの3つがあり、互いに関係を持ちながら研究を進めている。これらの研究開発の内容を、再稼働のための新規制基準への適合、安定運転のためのリスク評価、安全性向上としてのリスク低減／深層防護・リスク情報活用に活用してもらう。

・地震ハザード評価（活断層、地震動）、地震脆弱性評価（機器、建物、地盤・斜面、地中構造物）を進めており、これらを統合した地震PRAプロジェクトを来年度に立ち上げ、個別の成果を取り入れた地震PRA評価手法の高度化を進める予定である。

・活断層の評価では、活断層が幾つあり、それが連動するのか、しないのか、また、活断層の端部をどう見分けるのか、といった個別の研究を進めている。地震動の評価についても、震源パラメータ、地下構造のモデル化等、様々な要素技術を研究している。また、これら要素技術が持つ不確かさを定量化するために、伊方SSHAC（Senior Seismic Hazard Analysis Committee）プロジェクトの技術支援に取り組んでいる。今年度成果が出る見込みであり、今後各電力に展開していく。

・SSHACは、確率論的地震ハザードの認識論的不確かさをより定量的に評価するための取り組みである。日本では2016年から四国電力の協力でSSHACの進め方を研究してきた。

・地震脆弱性評価（機器）は、加振試験と現実的耐力・応答評価の二つに大別される。加振試験では機器が「どの加速度まで本当に保つのか」について共振振動台を使って実験している。現実的耐力・応答評価のキーワードは「弾塑性」であり、この評価法をより高度的に整備している。

・共振振動台では、基準地震動増大のために、従来設備で10G程度だった加速度が20Gまで出せるようになっており、電動弁駆動部の加振試験を行い、この結果が動作機能確認加速度として色々なところに反映されている。同振動台は電中研・我孫子研究所にあり、要望があれば見学も可能である。

・地震脆弱性（建屋）も、キーワードは大入力に対する「弾塑性評価」であり、3次元モデル、地盤-建屋相互作用を取り入れる研究を進めている。また、免震関係の研究も進めている。

・地震フラジリティ（土木）は、地盤・斜面と屋外土木構造物に大別される。キーワードは「非線形」と「3次元」であり、解析的な手法を高度化し、より現実的な耐力を求める研究を進めている。

・ここまでに説明した要素技術手法を高度化し、PRAに統合していく。

・敷地直下の活断層評価については、破碎帯の調査をした上で、活断層／非活断層の比較調査・分析を進めている。例えば、活断層の評価基準となる上載層がない場合に、断層中の物質から活断層／非活断層を判断するための研究を進めている。

・敷地直下の断層変位評価については、最終的には断層変位に対するPRA手法を提案することを考えており、ハザード、土木構造物、建屋フラジリティ関係の研究を進めている。

・なお、これらの研究は電力事業者が実施しているものもあり、電中研は研究のとりまとめという立場であることをご留意頂きたい。

・津波もハザード、フラジリティなどの要素技術評価を進めており、これらを統合し、津波PRAの高度化を図るプロジェクトを2017年から進めている。ハザードについては、海底地すべり、火山現象等の非地震性津波ハザードの研究を主に進めている。フラジリティはハザードの程度により考え方も変化する、という前提で研究を進めている。ハザード・フラジリティに関する研究設備として、津波・氾濫流水路を2014年に導入した。この設備で波力実験を行い、その結果をフラジリティ評価へ反映する研究を進めている。

・竜巻は台風などの影響も含まれており、最近「強風ハザード」という言い方をしている。風圧・飛来物に関する解析コードを開発し、現在はここに台風の影響を取り込もうとしている。対策としては、飛来物対策としての高強度金網（ネット）の有効性を実験で確認し、事業者各社で採用されている。

・火山は、火山灰の検討が中心となる。火山灰のハザード策定は難しい。これまでの火山でどれくらいの灰が積もったか、という文献情報を統計的に処理したハザード曲線を考えている。フラジリティとしては「火山灰に対する脆弱性評価」になるが、現在想定される火山灰は量が多いため、多少現実的な量に対するフィルターを提案しようとしている。降灰装置を用いた設備により、フィルターの形状、置き方を実験的に確認している。