断層変位に対する工学的なリスク評価 (その1)断層変位に対する原子力安全の考え方

「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会主査 北海道大学 奈良林 直

日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会のこれまでの検討成果のうち、総論的な内容を今号と次号の2回に分けて解説する。本稿では、本調査専門委員会の検討の背景・問題認識や、断層変位に対する原子力安全の考え方を中心に紹介する。

KEYWORDS: *fault displacement, nuclear safety, engineering approach, risk evaluation, defense in depth, accident sequences, accident management*

I. はじめに

1. 調査専門委員会について

日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会(以下「本調査専門委員会」という)は、活断層の活動等に伴って生じる断層変位も外部ハザードの一つと捉え、断層変位の施設に与える影響に関する工学的な評価手法について、既往の研究成果を活用しながら、関連する多分野の専門家の協働により調査・検討を行うことを目的に設置された。

他学会との組織的な協力としては、先行して検討を進めていた土木学会原子力土木委員会¹⁾と連携している。構築した調査・検討のスキームを図1に示す。

活動期間中に発生した2014年長野県北部地震(神城断層地震)や2016年熊本地震から得られる知見も含め、断層変位が原子力発電所に与える工学的な影響評価を行い、不確実性を踏まえたトータルリスク評価手法、リスクを低減するための方策等についてまとめ、報告書として国内外に発信するとともに、今後の標準化の活動等に供していくことを目指している。

2. 調査・検討の対象等について

本調査専門委員会が対象としている断層変位という自然現象は、活断層の活動等に伴って地盤や地層に変位(ずれ)が生じる現象である。変位としては、いわゆる活

図1 学術分野横断の検討スキームの構築

図2 主な断層変位

断層(主断層及び分岐断層)や活断層の周辺に副次的に生じる変位(副断層)が知られており、それ以外にも、重力性の地すべり、岩盤の膨潤に伴う地層の変位、更には地盤の沈降等によって生じる施設設置地盤の相対変位などがある。図2に主な断層変位について示す。

本調査専門委員会における主な検討の前提、検討に当たっての姿勢等について以下に記す。

①本調査専門委員会の名称にもある「工学的なリスク評価」は、確率論的リスク評価(PRA)のみに限定せず、確定論的な裕度評価なども含めた広義の概念でリス

Risk evaluation method for fault displacements by engineering approach (1) Main concept of nuclear safety evaluation and measures for fault displacements : Tadashi Narabayashi.

(2016年5月31日 受理)

クに関する情報を扱い、そのための評価手法を扱うこととする。

- ②主として既設の原子力施設に対する断層変位の影響について論じるが、得られた知見やリスク低減策は、諸外国も含む新設の施設にも活用できると考える。対象となる施設としては主に原子力発電所を念頭においているが、評価のための考え方は再処理施設等にも適用できるので、本稿では「原子力施設」との呼称を使用している。
- ③評価対象としての変位は、主として活断層の活動に伴って生じるものを中心に論じる。なお、過去に断層変位が生じた際の知見について踏まえることはもとより、本調査専門委員会の活動期間中に地表地震断層が出現した2014年長野県北部地震(神城断層地震)と2016年熊本地震から得られる知見も最大限取り入れて、調査・検討を進めている。
- ④本調査専門委員会で扱う個々の工学的な評価手法に関しては、それぞれの手法の適用性や関連する技術データの蓄積度合い等に応じた的確に利用することが前提となるが、工学的に適切で安全側となる条件を付すこと等によりリスク評価のための情報を得ていくことができる。
- ⑤断層変位による施設への影響を評価する際には、地震動等による影響との重畳を考慮する必要があるが、まずは変位による影響を区別して評価することが重要との立場に立って論じる。実際に個別施設の評価をする際には、必要に応じて地震動との重畳や地盤の沈下について、静的もしくは動的な作用の組み合わせや時刻歴も考慮して検討することとなる。

Ⅱ. 調査・検討の背景、問題認識

1. 断層変位への取組みの必要性

我が国は地震国であることから、原子力施設の立地・設計・建設・運転においては、その都度、最新の知見を踏まえて地震動や津波を考慮した取組みが行われてきた。

しかし、2011年3月11日に発生した東日本大震災において、東京電力福島第一原子力発電所では安全上重要な機能を有する施設は地震動に対して機能を維持したが、想定を上回る高さの津波の来襲を受け、全電源喪失とそれに伴う過酷事故が誘起された(以下「福島第一事故」という)。事故の要因として、各事故調査報告書では、津波の想定において最新知見の反映ができていなかったことや、想定を超える事象に対する備え(過酷事故対策)ができていなかったことなどが指摘されている²⁾。

この事故により、社会は、“原子力が持つリスクがどのように顕在化するのか”を経験し、また、不確実さの大きい自然現象に対する原子力施設のリスク管理への取組み

をあらためて考える重大な契機となった。

導き出された重要な教訓の一つは、関連する分野の専門家は、お互いに協力して、どのように原子力安全の確保に取り組むべきかをもっと注意深く考え、施設の安全性向上・リスク低減に向けた弛まぬ取組みを進めていかねばならないということである。

福島第一事故後の原子力安全規制体制や基準が見直される中で、既に設置されている(既設)原子力施設において、敷地内の断層変位の可能性の有無のみの判断ⁱ⁾で、立地の可否に遡上しての廃炉の議論が生じており、断層変位の施設への影響評価の検討が喫緊の課題となっている^{3,4)}。

2. 理学と工学の知の統合とリスク論に基づく工学的対応の重要性

断層変位は低頻度の事象で、不確実さが大きい現象であり、専門家でも様々な見解が存在し得る。また、実験による模擬も難しい。

安全の確保を旨として原子力施設の利用を進めていくに際して、福島第一事故の反省の上に立てば、原子力施設に対して脅威を与え得る現象がどれだけ分かっているものなのか、不確実さを含めて専門的な知見を総動員してリスクを検討することが求められている。施設に対する影響評価の観点から幅広い意見を集約し、科学的に多面的に検討を行い、必要ならば想定を超える事象についても対応策を策定して訓練をしておくことが必要である^{5,6)}。このことこそ、我が国において福島第一事故以前には欠けていた点である。

科学的想像力を持ち、理学と工学の知の統合により、多様な手法で断層変位に備えるという発想の下に、本調査専門委員会では鋭意取り組んでいる。

想定を超えた領域も含めた総合的な対処では、リスク評価結果から得られる情報を活用して施設の有するリスクを把握し、安全性向上等のための意思決定を行うことが重要となる。

リスク評価の特徴⁷⁾は、不確実さを不確実なままに扱おうとすること、不確実さを定量的な確率分布として扱おうとすること、多様なシナリオを検討すること、シナリオの発生確率を定量的に扱おうとすること等にある。リスク評価は、特に想定を超える事象に無防備になるのを防ぐために意義がある⁸⁾。また、リスク評価は、原子力安全の基本概念である深層防護⁹⁾の有効性を確認することにもなる。これは、深層防護の概念が、原子力施設で生じる事象が、内的事象、外的事象のいずれの場合で

ⁱ⁾ 原子力規制委員会の基準「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」においては、断層変位に対する要求は、「耐震重要施設は、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。」(第3条第3項)となっている。

も不確実さがあるために実装が求められている概念だからである。すなわち、深層防護の概念とリスク評価を適用し、各段階の防護レベルをシームレスに繋いでいくことが、原子力安全に関わる取組みにおいて最も重要で、かつ今後ともその取組みの深化が求められている。このような科学的、技術的に合理的な考え方に基づいた取組みによりリスクを低減していく努力によって、「人と環境を守る」という原子力安全の目的⁵⁾を達成していかなければならない。

本調査専門委員会を対象とする断層変位も、地震動や津波などと同様に外部ハザードとして原子力施設に脅威を与え得る自然現象の一つと捉え、上述の認識に則って、その影響の程度を評価し、施設に如何なる影響をもたらすかをシナリオとともに評価することが原子力安全の考え方に沿った対応となる。その評価のための技術は、各学術分野においてすでに蓄積されてきている。断層変位の施設にもたらす影響を評価して、得られたリスクに関する情報を基にして対応策などの意思決定に繋げ、その結果を社会に提示していくことが、原子力安全に関わる者の責務と言える。断層変位の可能性の有無のみの判断(いわば“ゼロ変位要求”)をしても、原子力安全に関わるリスクを評価したことにはならない。福島第一事故以前は、津波の高さのみの議論に終始し、津波が敷地高さを超えた場合の影響評価とその対策が欠けていた。その結果、津波の来襲に対して無防備であった。

したがって、断層変位の性状(発生頻度、変位量等)の不確実さも踏まえて、科学的に分析されたシナリオとともに断層変位の施設への影響を評価することが、原子力安全に関わるリスク評価となる。リスクを評価し、リスクを可能な限り低減させる努力を促す首尾一貫した考え方が重要である。リスクの性質やレベルを適正に評価し、リスクに正面から向き合う姿勢が求められている。リスク抑制のための施策は、原子力施設の利用又は活動を、科学的根拠に基づく合理的な理由なく制限するものであってはならない⁵⁾。

福島第一事故の教訓を踏まえて原子力利用について社会の信頼を獲得していくために、リスクの再認識、原子力安全を確保するための一貫した取組み、安全性を継続的に改善する姿勢、それらに関する国内外への説明責任が重要であるということをも、本調査専門委員会としても強く認識するものである。原子力に関わる関係者がリスクに関心を持ち、謙虚かつ真摯な取組みを続けることが極めて重要である⁷⁾。

Ⅲ. 断層変位に対する原子力安全の基本的考え方

1. 原子力安全の考え方と実践

原子力安全の目的は、人と環境を、原子力の施設と活動に起因する放射線の有害な影響から防護することであ

図3 海水ポンプの被水による安全系の共倒れ

り、原子力施設の安全確保の目標は、人や環境に放射線の有害な影響を与えるような事故の可能性を確実に極めて低いものとするところである^{5),9)}。

これらの達成のため、国際的にも有効であると考えられているのが、深層防護の概念の適用である。深層防護の概念とは、原子力安全の目的の達成のために、ある目標をもった幾つかの障壁(防護レベル)を用意して、あるレベルの防護に失敗したら、次のレベルで防護するという概念である。不確実さの影響を考慮して、別の対応策、次の防護レベルの対応策を繰り返すことにより、一連の防護策全体の実効性を高めるという考え方である。

例えば、福島第一原子力発電所、同第二原子力発電所(以下、それぞれ「福島第一」、「福島第二」という)では、津波で沿岸の海水ポンプモータが被水することにより冷却源の喪失が発生し、非常用ディーゼル発電機が停止し、非常用炉心冷却系の共倒れを引き起こした(図3)。深層防護の第3層が全滅したのである。このとき、福島第一5号機は6号機の空冷ディーゼル発電機からの給電を受けて冷却を回復し、福島第二では、1号機が同様に他号機から給電を受けるとともに、海水ポンプのモータを空輸と陸送により確保して交換し、冷却源を回復することにより最終的な冷温停止を達成している。このハードと人的アクションによって最終ヒートシンク(UHS)を回復する行為こそが、深層防護の第4層に相当するレジリエンス活動である。

このように、不確実さに対処しつつリスクの顕在化を防ぐために深層防護の概念を適用することが有効であり、その適用により、事象の収束・レジリエンスⁱⁱ活動を可能とし、全体としてロバストⁱⁱⁱな対処が可能となる。

図4は、新規規制基準に基づく可搬式熱交換ポンプ車によるUHSの回復アクションを示す。このような資機材の準備と訓練があれば、事故収束も迅速かつ確実になる。

ⁱⁱ レジリエンス：外部からの環境の変化(外力など)に対して、跳ね返す力。回復力、しなやかさ、防護力などの意で使用されることが多い。

ⁱⁱⁱ ロバスト：外乱の影響によって変化することを阻止する仕組みを備えていること。頑健であること、強靱であること。

図4 可搬式熱交換ポンプ車による UHS の回復

図5 新規基準の導入によるリスク低減¹⁰⁾

図5は、新規基準の導入により、対策後のリスクが相対的にどのくらい低下したかを、事故対応の成否に依って簡易手法によって評価した一例である。事故が発生する事象の繋がりである事故シーケンス、その発生可能性(発生頻度)及びその結果(影響の程度)の三つの要素を的確に考慮した評価が重要となるが、このような簡易評価でも、リスクの低減効果を把握できる。原子力安全の考え方からは、リスクの定量化の努力を行い、合理的に実行可能な評価・対応策を検討して、社会に提示していくことが必要である。

2. 断層変位に対する考え方

原子力施設を設置する際には、事前の詳細な地形・地質調査によって重要施設の設置地盤(岩盤)に断層変位を想定する必要があることを確認し、特に原子炉建屋に関しては設置地盤の検査(岩盤検査)を実施し、施設の支持性能に問題が生じるものではないことを確認してきた。これは、施設を設置する際には、断層変位を「避ける」という考え方によって、断層変位の想定を検討を不要としていたということである。

一方、もとより施設の設置地盤(岩盤)には破碎帯などの弱面が存在しているので、地震動の影響に対する設置地盤の安定性評価等の検討はこれまででもなされている。しかし、既設の原子力施設において、常に最新知見を反映していく取組みの際に、新たな情報等^{iv)}によって断層変位の考慮の必要性が生じる場合があり得る。その際に

図6 既設の原子力施設に対する基本的な評価手順

図7 中越沖地震の際の損傷事例(加速度と相対変位)

は、あらためて地形・地質調査などから得られる情報に基づき、考慮が必要な断層変位という事象の性状(発生位置、ずれ量、方向、頻度など)を想定し、次のステップとして施設に対する影響の検討を行うことが基本的な評価手順となる。既設の原子力施設に対する基本的な評価手順を図6に示す。

図7は2007年新潟県中越沖地震の際の柏崎刈羽原子力発電所の損傷事例である。活断層は沖合の海底下にあり、原子力発電所の敷地内には無かったが、強い加速度によって敷地地盤の液状化と沈降が生じて、堅牢な原子炉建屋との相対変位が生じた。このため、屋外の消火用の埋設配管の損傷が多数発生した。液状化は東日本大震災や熊本地震でも見られた。これらは断層変位そのものではないが、その後、埋設配管や不同沈下を想定して対策が講じられてきている。このように、福島第一事故以前からもロバストな防護策が講じられていると考えられることから、これらの知見や対策も含めて断層変位に対する評価をしていくことが技術的に理に適っている。

したがって、すでに地震動などに対してなされていた設計あるいはその設計裕度の範囲において、想定する断層変位や屋外施設と原子炉建屋の相対変位に対しても安全上重要な機能を有する施設の要求性能が満足されるか

^{iv)} 「新たな情報等」としては、調査・評価技術の進展や断層変位の出現事例の蓄積、また、それらを踏まえた専門的知見の蓄積・高度化などが考えられる。