

## 総合講演・報告 1 「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会活動報告

## 断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策

Risk evaluation method and countermeasures for fault displacements by engineering approach

## (4) 今後の課題等について

## (4) Contents of further advance

\*神谷 昌伸<sup>1</sup><sup>1</sup> 日本原電、調査専門委員会委員

## 1. はじめに

断層変位の影響評価に関しては、断層変位が発生する可能性の有無のみの判断にとどまることなく、断層変位が生じた場合の施設に対する影響を評価していくことが原子力安全の立場からとるべきアプローチであり、そのことによって、想定を超えた領域も含めてリスクを評価していくことができる。

関連学協会等による検討（土木学会原子力土木委員会断層変位評価小委員会、原子力安全推進協会等）の成果も踏まえた上で、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「調査専門委員会」という）は、2017年3月、「断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策」と題する報告書を取りまとめ、公表した（[http://www.aesj.net/sp\\_committee/com\\_dansou](http://www.aesj.net/sp_committee/com_dansou)）。この報告書により、断層変位に対するリスク評価、工学的対処の基本方針や考え方等が明確となり、これまでに得られている知見により、断層変位に対するリスクを評価していくことが可能であることが体系的な技術レポートとして示された。

本稿では、調査専門委員会において策定された断層変位に対するリスク評価の全体像の概要と、評価をより一層高度化していくための課題等について報告する。

## 2. 断層変位に対するリスク評価の全体像

調査専門委員会が策定した、原子力安全のための断層変位に対する全体評価手順を図1に示す。これが、断層変位に対する「リスク評価」の全体像を示すものである。

本手順は、既設の原子力施設への適用を念頭においているが、新設の原子力施設の場合でも適用できる。

全体評価手順においては、決定論的な評価と確率論的な評価の両者を並列する形で示している。この二つの評価は対立する概念ではなく、多面的なリスク評価のために相互補完の関係になっているということを理解する必要がある<sup>[1][2]</sup>。いずれの評価によってもリスク情報を得ていくことができるが、対象としている施設の状況や、全体評価手順の各評価プロセスの技術情報の蓄積状況等に応じて、適切な評価を実施することが必要である。全体評価手順中の各評価プロセスの概要を以下に記す。

## 2-1. 断層変位のハザード評価

## (1) 断層の活動性評価

詳細な地形・地質調査結果に基づき、施設直下での断層変位の考慮の必要性を検討する。上載地層法、鉱物脈法等の手法を用いて施設直下の断層や破碎部（それらの延長部を含む）に後期更新世以降に変位を生じたことを示す根拠、あるいは示唆する情報がある場合は、決定論的な評価に用いる施設直下での「検討用の断層変位」の設定を行う。

なお、原子力施設の設置位置では、施設の設置に先立って詳細な地形・地質・地盤調査を実施するので、変動地形が認められる典型的な活断層のように、1回当たりに1m前後～メートルオーダーの変位量を考慮する必要がある断層は事前に把握され、そのような痕跡のある地盤を避けて重要施設は設置されていると考えられる。

---

\*Masanobu Kamiya<sup>1</sup><sup>1</sup>The Japan Atomic Power Company, Member of the Committee

## (2) 検討用の断層変位の設定

決定論的な評価に用いる検討用の断層変位は、詳細な地形・地質調査から得られる変位量等の情報を活用して、成因の推定に基づく数値解析による再現性の検討結果や、当該サイトと類似する他の国内地点で生じた断層変位の出現事例も参考に、不確実さを考慮して設定する。また、検討用の断層変位の設定に当たっては、後述する確率論的断層変位ハザード解析から得られた断層変位ハザードカーブを参照して、使用している情報の信頼度等を踏まえて、設定の妥当性について検討する。

### (3) 確率論的な手法に基づく断層変位ハザードカーブの設定

確率論的な評価に用いるために、確率論的断層変位ハザード解析 (PFDHA) の手法を用いて、断層変位ハザードカーブの設定を行う。この際、得られている地形・地質調査の結果を最大限活用することになる。

確率論的な評価は、決定論的な評価において施設直下の断層変位の考慮をする必要がないと判断される場合においても、変位が生じる年超過頻度の情報を得ていくものである。

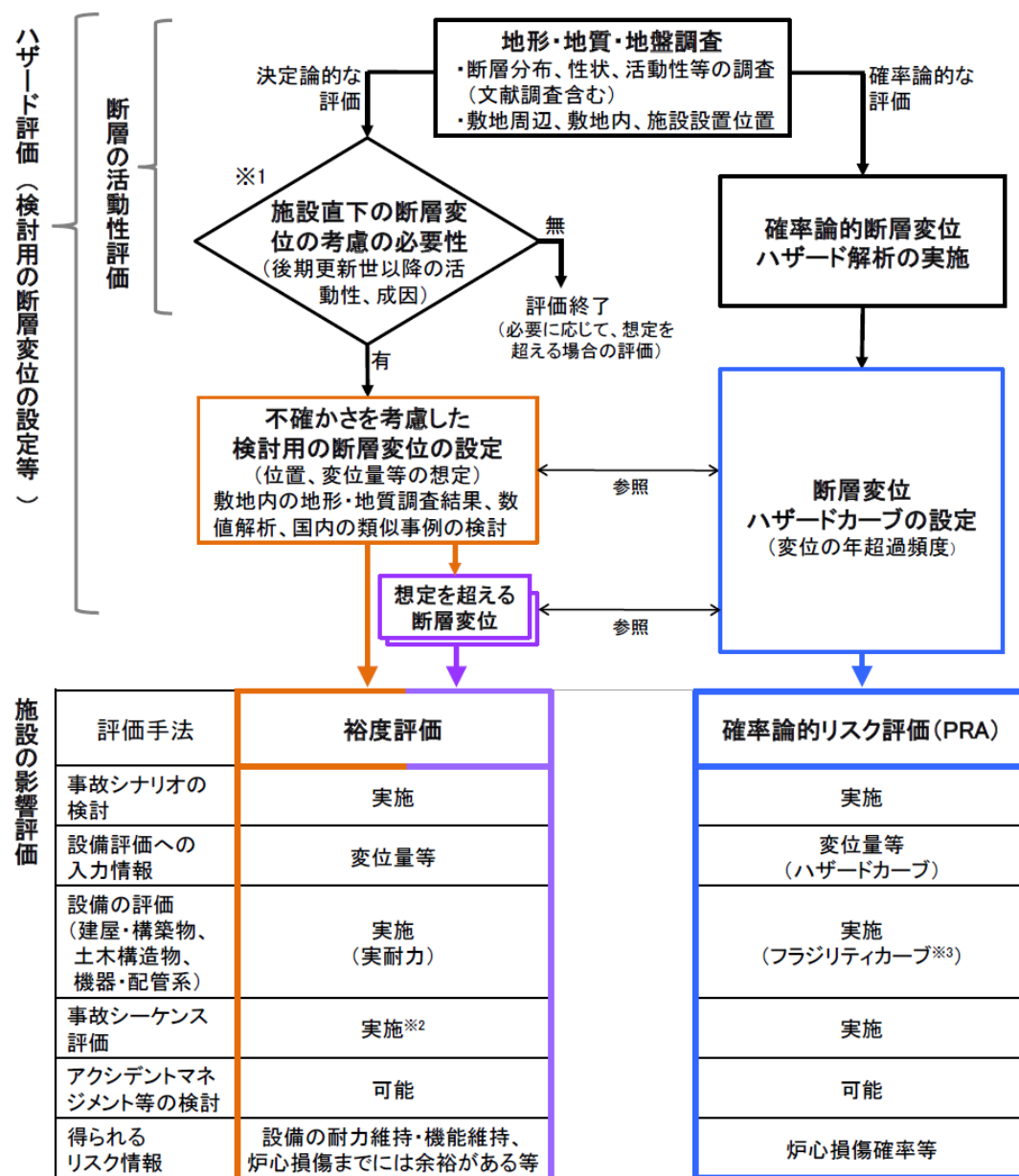


図1 断層変位に対する全体評価手順

#### (4) 想定を超える断層変位

後段の施設の影響評価の決定論的な評価において、想定を超える断層変位に対してリスク情報を得ていくために、想定を超える断層変位を設定することができる。

想定を超えるものを決定論的に決めることは本来できないが、想定を超える領域に対してリスク評価を行うためのものとして、例えば、検討用の断層変位量を係数倍して設定する方法や、検討用の断層変位を設定する際に参照した年超過頻度を更に 1 桁下回るレベルで設定する方法等が挙げられる。想定を超える断層変位は、必要に応じて複数設定して、リスク情報を得ていくことができる。

### 2-2. 施設の影響評価

#### 2-2-1. 影響評価手法の選定・位置づけ

日本原子力学会標準委員会「リスク評価の理解のために」<sup>[3]</sup>によれば、「リスク分析には、発生確率や影響の大きさを数値で評価する定量的評価手法の他にも、半定量的評価手法や定性的評価手法がある。定性的手法で分析を行っても、そのシナリオ構造等から事故進展の重要な分岐点を把握する等の有意な結果を得ることができる」とされている。

また、同標準委員会「外部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」<sup>[4]</sup>（以下「外部ハザード選定標準」という）によれば、全ての外部ハザードに対して確率論的リスク評価（PRA）等の詳細なリスク評価が必要ではなく、リスク評価方法としては、定性的な評価、ハザード分析（発生頻度又は影響）、裕度評価、簡易な PRA 等、様々な方法が考えられるとし、具体的な定量的リスク評価方法として、ハザード発生頻度分析若しくは影響度分析によるリスク判断、裕度評価、簡易な PRA 及び PRA の四つの方法を挙げている。

調査専門委員会として、これらの実施基準等にある考え方等を参考に、断層変位に対する施設影響評価手法として、裕度評価と PRA を全体評価手順の中に位置づけることとした。

#### 2-2-2. 評価手法の適用性

断層変位に対する施設影響評価手法を適用する際には、それぞれの手法の特徴、適用限界等を踏まえることが必要であり、また、活用できる技術情報が限定される場合は、条件を適切に付して評価結果（リスク分析結果）を得ていくことになる。なお、建物・構築物、土木構造物、機器・配管系、事故シナリオの選定等、それぞれの評価の詳細は報告書の各論を参照されたい。

##### (1) 裕度評価

- ・裕度評価は、一部の施設が機能を維持できていない状態も含めて評価することができ、安全上重要な施設（SSCs）の分散配置の効果を把握することもできる。
- ・評価のための技術情報が不足する場合は、条件を適切に付し、プラントシステムのトータルの状態を事故シーケンスとして評価することにより、例えば炉心損傷までの余裕等のリスク情報を得ることができる。
- ・事故シーケンスとして評価できるので、必要に応じて事故に備えて用意している可搬型設備等の活用によるアクシデントマネジメントの有効性も含めて評価することができる。
- ・評価に用いる変位量を漸増させることによりプラントの弱点を把握することができ、したがって、想定を超える断層変位に対する評価にも適している。
- ・図 1 の注釈※2 で示すように、ここでは裕度評価の中に外部ハザード選定標準における「影響度分析」も含めて整理している。「影響度分析」は、断層変位の変位量が小さい場合において、確立された構造強度の評価体系の中で、施設設置時における設計情報の範囲内でも評価ができる。この場合は、事故シナリオ・事故シーケンス評価を活用するまでもなく、設備の評価までで安全機能が維持できること等のリスク情報を得ていくことになる。

##### (2) 確率論的リスク評価（PRA）

- ・PRA は、確率論的なハザード評価を入力情報として炉心損傷頻度（CDF）等のリスク情報を評価できる手法である。
- ・断層変位に対する PRA は、断層変位に対する施設の脆弱性評価等に係るデータ拡充の段階にあるが、簡易な PRA として、条件を適切に付して事故シーケンスを整理することにより、感度解析としての

リスク情報を得ていくこともできる（図1の注釈※3）。これにより、例えば他の内部事象や外部事象によるCDFと比較することにより、リスクの程度を把握することができる。

- ・断層変位に関するPRAの適用の考え方と課題については、日本原子力学会標準「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015」<sup>[5]</sup>にとりまとめられている。

### 3. 今後の課題

断層変位に対する評価をより一層高度化し、技術情報を充実していくために、調査専門委員会では、表1に示すような今後の主な課題を整理した。

表1 今後の主な課題

|            | 課 題                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ハザード評価     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・断層の活動性の評価に当たり、上載地層法が採用できない場合の断層内物質を用いる方法等、その他の手法の適用性拡大及び精度の向上</li> <li>・実際の地表地震断層変位の再現解析や断層模型実験の再現解析による数値解析手法の高度化</li> <li>・PFDHAの更なる高度化に関して、今後とも新たに得られた情報を断層変位量の評価式へ反映等</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 施設に対する影響評価 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・断層変位による施設被害事例に基づく解析コードの更なる高度化</li> <li>・施設の機能や目標性能に応じた断層変位に対する施設の影響評価に係る更なるデータの蓄積（解析評価、実験検証、必要な基準類の整備）【補足1参照】</li> <li>・施設のフラジリティ評価に関連して、断層変位が作用した場合の現実的応答及び現実的耐力を合理的に精度よく評価するための手法の構築、偶然的不確実さ及び認識論的不確実さに係る標準データの整理・定量化等</li> <li>・フラジリティ評価手法を活用した断層変位設計・評価の枠組みの確立【補足2参照】</li> <li>・リスク情報の利用可能性の拡張に向けて、定量評価の対象とする事故シナリオ、事故シーケンスの範囲の拡大に係る検討</li> <li>・評価対象となる断層変位が副断層の場合、副断層の変位による影響が主断層からの距離に依存することに着目した施設フラジリティ評価まで含めたリスク評価手法の検討【補足3参照】</li> <li>・確率論的なハザード評価、フラジリティ評価を反映した、本格的なPRAへの拡張</li> <li>・断層変位と地震動の重量を合理的に精度よく評価するための手法の構築</li> <li>・既往の対応策（アクシデントマネジメント等）に加えて、断層変位に対するより効果的な対応策に係る検討・技術開発</li> </ul> |

#### 【補足1】施設の機能や目標性能に応じた断層変位に対する施設の影響評価に係る更なるデータの蓄積

断層変位のハザード評価において考慮が必要となる変位量を決め難い状況であっても、施設側の耐力（フラジリティ評価）と事故シーケンス評価により、プラントシステムのトータルなリスク情報を得ていくことが技術的には可能であり、そのための施設側の技術情報の蓄積は、後述する断層変位設計・評価の枠組みの確立やフラジリティ評価の充実のためにも重要である。

#### 【補足2】フラジリティ評価手法を活用した断層変位設計・評価の枠組みの確立

決定論的な設計や評価に用いる応答値や許容値は、確率論的な評価の際に用いるフラジリティ評価とシームレスに理解すべきものである。設備のフラジリティは、設備の現実的応答が現実的耐力を上回ったときの条件付き確率として評価される。図2に示すように、現実的応答・現実的耐力は共に対数正規分布に従うものとする。一方、決定論的な設計・評価では、応答値と許容値との離隔を余裕とし、

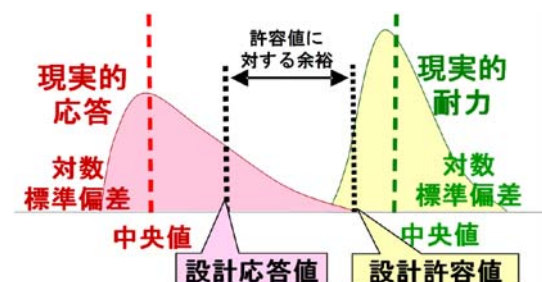


図2 フラジリティ評価手法の決定論的評価への活用概念<sup>[2]</sup>

前者は実応答値より大きめに、後者は実許容値より小さめに設定され、全体として保守的な取扱いとなっている。

今後の規格化・標準化に際しては、断層変位に対する実応答値・実許容値を合理的に設定することで、設計・評価の枠組みを確立し得る。合理的な設定手法として、フラジリティ評価での現実的応答・現実的耐力の中央値を活用し、設計応答値・設計許容値を設定することが挙げられる。このように、フラジリティ評価手法を活用した設計・評価の枠組みの確立が重要となる。

### 【補足 3】副断層の変位による影響が主断層からの距離に依存することに着目したリスク評価手法の検討

図 3 は、当該副断層の起因となる主断層からの距離をパラメータとする、副断層の変位による重要施設の機能喪失の可能性について定性的に検討するための概念図である。図中には、重要施設の設置範囲を主断層からの距離に応じて 3 段階（範囲 A～範囲 C）で大別して示している。個々の重要施設の設置位置はこの範囲内で、地震 PRA 等の評価結果を活用することにより、重要な事故シナリオに関連する重要施設を特定しておくこともできる。なお、重要施設を主断層直上には設置していないと考えられることから、範囲 A より主断層側は範囲に含まれていない。

それぞれの範囲と、副断層の変位による重要施設の機能喪失の可能性との関係について、定性的には、範囲 A：重要施設が機能喪失する可能性がある、範囲 B：重要施設が機能喪失する可能性は小さい、範囲 C：重要施設が機能喪失する可能性は極めて小さい、となる。

この定性的な考え方を定量的な評価に拡張させるためには、重要施設を対象とした断層変位に対するフラジリティ評価に係る技術情報を蓄積し、条件付き機能喪失確率に基づく基準類の整備が重要となる。特に、機能喪失の可能性が極めて小さくなる距離がどの程度かを定量的に把握できれば、副断層の変位と重要施設の機能喪失に係る判断のために大いに寄与すると考えられる。

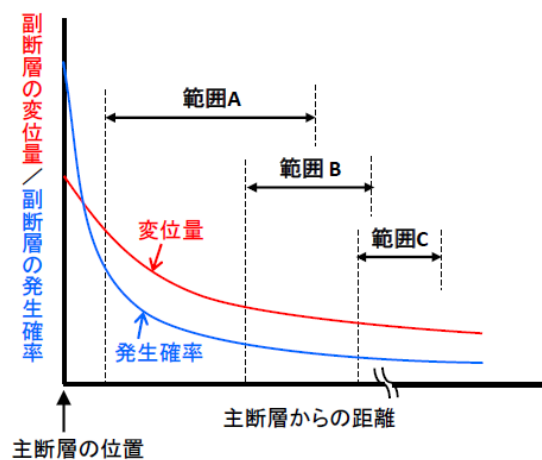


図 3 主断層からの距離をパラメータとした副断層の変位と発生確率の傾向

## 4. まとめ

本稿で論じた課題については、原子力安全の向上に向けた弛まぬ活動として、国（政府、研究機関等）、学協会、大学、産業界（事業者、メーカー、ゼネコン、研究機関等）等のそれぞれの役割に応じて、引き続き取り組んでいくことが期待される。

学協会レベルの次フェーズの取組みとしては、調査専門委員会の報告書にある体系的な技術情報を基にして、技術規程・標準（実施基準）として策定していく活動の準備が進められている。

## 参考文献

- [1] 亀田弘行, 高田毅士, 蛭沢勝三, 中村晋: 原子力災害の再発を防ぐ (その 3) 地震工学分野から原子力安全への提言, 日本原子力学会誌, Vol.54, No.9, pp.593-601, 2012 年.
- [2] 蛭沢勝三, 堤英明, 美原義徳: 断層変位フラジリティ評価手法の活用 (1)概念, 日本原子力学会 2017 年春の年会, 講演番号 3M04, 2017 年 3 月.
- [3] 日本原子力学会: リスク評価の理解のために 標準委員会 技術レポート, 2016 年 4 月.
- [4] 日本原子力学会: 日本原子力学会標準 外部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, 2014 年 12 月.
- [5] 日本原子力学会: 日本原子力学会標準 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準: 2015, 2015 年 12 月.