

総合講演・報告 4 「『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」

断層変位に対する工学的なリスク評価 (3)断層変位の施設への影響評価

Risk evaluation method for fault displacements by engineering approach

(3) Risk evaluation method to the nuclear facilities by fault displacements

*岡本 孝司¹¹ 東京大学、調査専門委員会委員**1. はじめに**

本稿では、報告(1)の図 4 で提示した断層変位に対する全体評価手順のうち、施設の影響評価手法の適用性、評価において事故シーケンスを活用する裕度評価手法の適用概念について記す。

2. 施設の影響評価手法**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において、「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」（以下「外部ハザード選定標準」という）が制定されている。外部ハザード選定標準では、すべ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 など、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を提示している。

本調査専門委員会として、外部ハザード選定標準の考え方と定量的リスク評価方法を参考に、報告(1)の図 1 に示す断層変位に対する施設影響評価手法（裕度評価、PRA）を位置づけた。

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、評価が安全側となるような工学的な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。

＜裕度評価＞

・裕度評価は、各設備に対して機能維持の観点から実力としての評価を行い、プラントシステム全体としての状態を把握していく手法である。したがって、一部の設備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、例えば断層変位の発生位置が局所的であるという特徴を踏まえれば、安全上重要な設備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、評価が安全側となるような工学的な条件を適切に付し、プラントシステム全体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など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など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。

炉心損傷までの余裕といった影響の評価に加え、ハザードの発生頻度と組み合わせることによって、その事故シーケンスの頻度も推定できる。

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。

*Koji Okamoto¹¹The University of Tokyo, Member of the Committee

- ・報告(1)の図4の注釈※1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などのリスク情報を得ていく。

＜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）など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、安全側の条件を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（報告(1)の図4中の注釈※2）。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、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」にとりまとめられている。

3. 裕度評価手法の適用概念

3-1. 建屋直下の断層変位への適用概念

(1) 評価手順

原子炉建屋等の直下に断層変位を仮定した場合の裕度評価のフローを表1に示す。ここではPWRの例としている。

ア. 断層変位による影響を直接受けるのは岩盤に支持されている建屋であり、断層変位を強制変位として建屋基礎版下端に入力し、3次元の非線形FEM解析によって、断層変位による建屋の損傷状態を評価する（図1）。

断層変位による建屋の構造健全性は、床面・壁に発生するひずみのほか、基礎の傾斜や層間変形に基づき評価する。これらは、建屋内に設置されている機器・配管系の評価に必要な情報でもある。

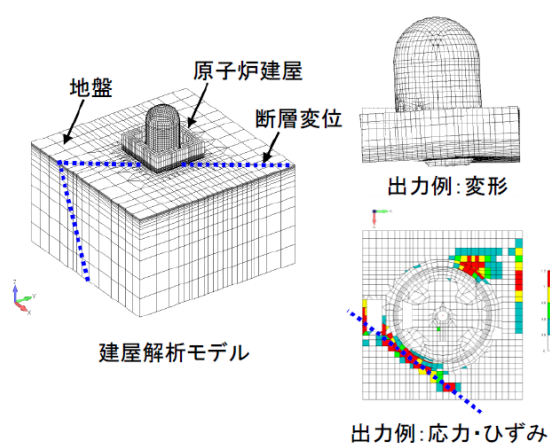


図1 建屋解析モデル、出力例

表1 断層変位に対する裕度評価のフロー

断層変位の位置	建物・構築物の損傷状態	機器・配管系で考慮する変位影響	機器・配管系で防止する損傷形態	リスク評価
建屋直下の場合 補助建屋 原子炉建屋  タービン建屋	有意な損傷無し (○)	建屋の傾斜 建屋間の相対変位	動的機器の機能損傷 渡り配管等の構造損傷	プラントシステム 全体としての 裕度に基づく リスク評価
	基礎・壁・床の 局部損傷 (△, ×)	建屋支持機能の低下 建屋の傾斜 建屋の変形 建屋間の相対変位	機器定着部の構造損傷 動的機器の機能損傷 大型機器の構造損傷 渡り配管等の構造損傷	

表 2 建屋の評価結果例

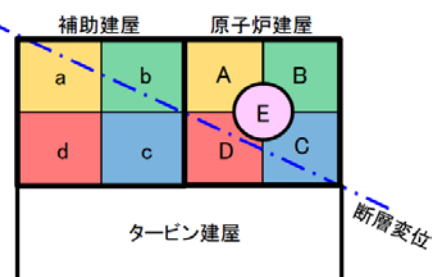
断層変位※1 (縦ずれ)	評価エリア	原子炉建屋※2					補助建屋※2			
		A	B	C	D	E	a	b	c	d
10cm	地下1階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
	地下2階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
20cm	地下1階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
	地下2階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
30cm	地下1階	○	△	×	×	○	×	×	○	○
	地下2階	○	△	×	×	○	×	×	○	○
50cm	地下1階	△	△	×	×	△	×	×	△	△
	地下2階	△	△	×	×	△	×	×	△	△

※1:断層変位量は、裕度評価のイメージを表現するために任意に設定したもの。
 ※2:本表は評価結果を簡略化して整理しているが、実プラントの評価では建屋のエリアを更に細かく区分するなどして評価する。

【凡例】 ○:有意な損傷無し

△:基礎・壁・床に局部損傷があるが、機器の支持性能が可能と判断できる状態

×:基礎・壁・床の損傷によって機器の支持性能が困難な状態



なお、機器の設置位置での局所的な詳細モデルを採用することで、個々の機器に対する一層精緻な評価が可能となる。

建屋側の簡略評価例を表2に示す。

イ. 機器・配管系は、建屋側からのアウトプットである床面・壁のひずみに基づき支持機能の有無を評価する。支持機能が確保されている機器については、床面の傾き・変形、建屋間相対変位に基づき、構造損傷及び機能維持評価を行う。

機器・配管系の評価は、原則として原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）に基づくが、建屋の損傷状態に応じて3次元非線形FEM解析等による弾塑性評価を実施し、実耐力を評価する。

建屋側からのアウトプットを引き継いだ機器・配管系の簡略評価例を図2及び表3に示す。

ウ. 機器・配管系の評価を受けて、事故シーケンスを活用した評価を行う。

評価に当たっては、地震動に対するPRAなどの既存のモデルを利用して、断層変位の影響を考慮できる事故シーケンス評価モデルを構築し、ある断層変位量を想定したときの機器の損傷状態をインプットとして事故シーケンス評価モデルに基づくシステム評価を実施する。

断層変位量をパラメトリックに振ったときの炉心損傷シーケンスの有無により、断層変位に対する裕度を評価する（必要に応じて格納容器機能喪失シーケンスの有無を評価）。

これにより、炉心損傷に支配的な事故シーケンスを分析し、重要な安全機能の喪失、機器の損傷等を抽出すること等により、炉心損傷に対する裕度を評価する。

事故シーケンス評価（イベントツリー）の例を図3に示す。この例においては、以下のように記述することができる。

・主給水機能が喪失する場合、原子炉建屋内の補助給水系により安全機能が維持される。

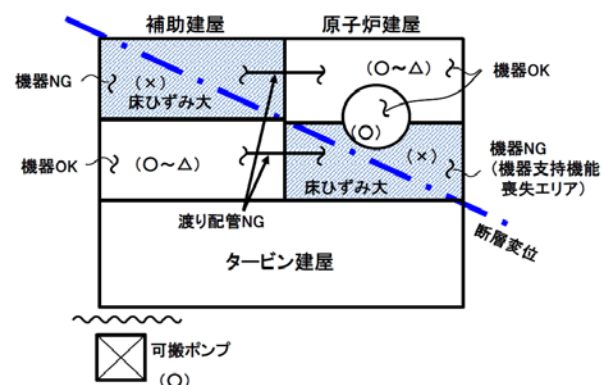


図 2 エリア毎の機器・配管系への影響例

- ・3 台の補助給水ポンプがすべて機能喪失する場合は、補助建屋にある高圧注入ポンプを用いたフィードアンドブリードを活用する。
- ・2 台の高圧注水ポンプがすべて機能喪失する場合は、代替手段として有効な可搬ポンプ等を活用する。

表 3 機器・配管系の評価結果例

断層変位※ (縦ずれ)	原子炉建屋				補助建屋			
	躯体の損傷エリアに 設置の機器		躯体の健全エリアに 設置の機器		躯体の損傷エリアに 設置の機器		躯体の健全エリアに 設置の機器	
10cm	—	—	PRV PMP1 SFP1 AFWP-TD AFWP-MDA/B CSP2A/B	○	—	—	CPP1A/B RHP1A/B CSP1A/B/C SIP1A/B	○
20cm	—	—	PRV PMP1 SFP1 AFWP-TD AFWP-MDA/B CSP2A/B	○	—	—	CPP1A/B RHP1A/B CSP1A/B/C SIP1A/B	○
30cm	AFWP-TD AFWP-MDA/B CSP2A/B	×	PRV PMP1 SFP1	○	CPP1B RHP1B CSP1B SIP1B	×	CPP1A RHP1A CSP1A/C SIP1A	○
50cm	AFWP-TD AFWP-MDA/B CSP2A/B	×	PRV PMP1 SFP1	○	CPP1B RHP1B CSP1B SIP1B	×	CPP1A RHP1A CSP1A/C SIP1A	○

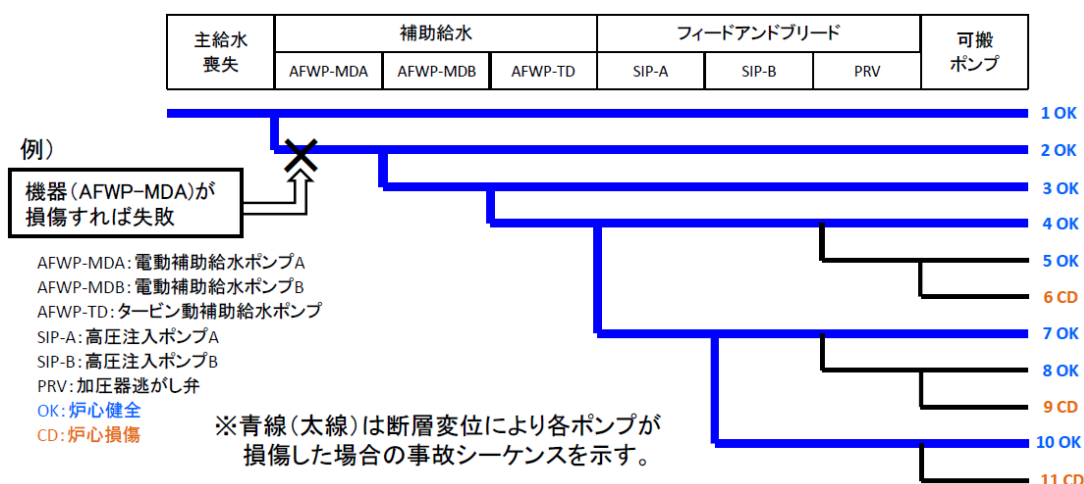
※断層変位量は、裕度評価のイメージを表現するために任意に設定したもの。

【凡例】 ○：機器の機能維持
×：機器の機能喪失

PRV：加圧器逃がし弁
PMP1：1次系補助給水ポンプ
SFP1：使用済燃料ピットポンプ
AFWP-TD：タービン動補助給水ポンプ
AFWP-MDA/B：電動補助給水ポンプA、B
CSP2A/B：ほう酸ポンプA、B

CPP1A/B：格納容器スプレイポンプA、B
RHP1A/B：余熱除去ポンプA、B
CSP1A/B/C：充てん／高圧注入ポンプA、B、C
SIP1A/B：高圧注入ポンプA、B

図 3 断層変位に対するイベントツリーの例



(2) 評価結果の整理と考察

裕度評価手法の適用により得られた結果を整理すると、例えば表 4 のように示すことができ、変位量に応じて以下のように考察することができる。

- ・断層変位を想定した裕度評価の結果、深層防護の考え方に従った多様な設備の分散配置の効果等により、炉心損傷には至らない（炉心損傷に対して余裕がある）。
- ・代替手段（代替の注水ポンプ、アクシデントマネジメント）はリスク低減に有効である。

・評価結果は、リスクの更なる低減のための追加の対応策を講じる意思決定に活用できる。

なお、以上の断層変位に対する裕度評価手法の適用概念は、裕度評価のイメージを示すことを目的とし、事故シーケンスや損傷を評価する安全上重要な設備等を単純化して示している。実プラントの評価に適用する場合には、配管、ケーブル、従属性のあるサポート系設備等の評価対象となる設備に対して、設備影響の範囲や損傷シナリオを適切に考慮して評価していくことになる。

表 4 断層変位に対する裕度評価結果例

	断層変位※1(縦ずれ)							
	10cm		20cm		30cm		50cm	
代替手段なし	躯体損傷有 機器損傷無	炉心損傷無	躯体損傷有 機器損傷無	炉心損傷無	躯体損傷有 機器損傷有	炉心損傷の 可能性有	躯体損傷有 機器損傷有	炉心損傷の 可能性有
代替手段あり※2	同上		同上		同上	炉心損傷無	同上	同上
追加の対応策 (可搬設備の更なる 多様化等)	同上		同上		同上		同上	炉心損傷無

※1:断層変位量は、裕度評価のイメージを表現するために任意に設定したもの。

※2:代替の注水ポンプや、可搬ポンプ等のアクシデントマネジメント

(注)本表の例は、前出の図表にある評価結果例と対応しているものではない。

3-2. 非常用海水系直下の断層変位への適用概念

非常用の海水取水系の直下に断層変位を仮定した場合で、海水ポンプによる取水機能や取水路の通水断面が確保できないような場合は、既に用意されている可搬型のポンプ、ヒートシンク車等のアクシデントマネジメントの有効性を確認することにより、建屋直下の場合と同様、断層変位に対する施設影響を評価することができる。

(講演では、本稿以外のケースもの適用概念も含めて検討状況を報告する。)

4. まとめ

断層変位が原子力施設に与える影響を評価するための手法のうち、裕度評価手法の適用概念等を示した。

この手法の適用により、断層変位に対する原子力安全のための評価をすることができ、想定を超える事象も含めて、設備や安全機能の状態（維持あるいは喪失）、炉心損傷に対する裕度などをリスク情報として得て、得られたリスク情報を活用して、代替手段の有効性の検証、リスク低減のための更なる対応策のための意思決定をすることができる。また、報告(1)で記したように、大規模損壊に対して用意される対応策も有効に活用できる。

本調査専門委員会で対象としている断層変位に限らず、裕度評価等によって得られたリスク評価の結果を、現場でのアクシデントマネジメントの改善や教育訓練、様々な事象の想定・机上訓練に反映し、弛まぬ安全性向上に繋げていくことが必要である。

そして、それを促すための取組みが、引き続き求められている。