

断層変位に対する重要施設の影響評価手法 ～裕度評価手法の適用概念～

Risk Evaluation Method for Fault Displacement ～Application Concept of Margin Analysis Utilizing Accident Sequences～

日本原子力発電(株) 神谷 昌伸 Masanobu KAMIYA

The influence of the fault displacement on the facility should be evaluated not only by the activity of the fault but also by obtaining risk information by considering scenarios including such as the degree and the frequency of the hazard, which should be an appropriate approach for nuclear safety. An applicable concept of margin analysis utilizing accident sequences for evaluating the influence of the fault displacement is proposed. By use of this analysis, we can evaluate of the safety functions and margin for core damage, verify the efficiency of equipment of portable type and make a decision to take additional measures to reduce the risk by using obtained risk information.

Keywords: nuclear safety, fault displacement, margin analysis, accident sequences

1. はじめに

最新の知見に照らした安全性向上の取組みを進めている中で、既設の原子力発電所において、新たな情報等¹によって重要施設直下に断層変位を想定した評価をする必要が生じる場合もあり得る。

その際の施設の影響評価の手法としては、断層変位に対する建物・構築物、機器・配管系等の施設側のフラジリティデータの蓄積が今後本格的に進められようとしている状況からは、現状では確定論的な裕度評価手法を用いることが有効と考えられる。

本稿では、断層変位に対する施設影響評価を行う際の裕度評価手法の適用概念について提示する。

2. 裕度評価手法の位置づけ

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」¹⁾（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評価など、様々な方法が考えられるとし、定量的リスク評価方法として、①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、②裕度評価、③簡易なPRA、④PRAの四つの方法を挙げている²⁾。

本稿の対象である断層変位に対するリスク評価を考えた場合、以下の観点から、②裕度評価手法の適用概念を構築することが有用であると判断した。

裕度評価手法は、

- i 評価対象の断層変位量が数十 cm 程度となる場合、また、断層変位が生じる位置を限定できる場合において、断層変位の施設に対する影響の空間的な分布を把握し、安全上重要な設備の分散配置の効果を把握することができる。
- ii 一部の施設が機能喪失に至っている状態も含めて、プラントシステム全体の機能を評価することができる。
- iii 個々の設備の機能喪失状態を十分に模擬できない場合や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付して評価することができる。

連絡先:神谷昌伸、〒101-0053 千代田区神田美土代町
1-1 美土代ビル、日本原子力発電(株)開発計画室
E-mail: masanobu-kamiya@japc.co.jp

¹ 「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。

² 本稿では、外部ハザード選定標準にある「決定論的なCDF評価」を「簡易なPRA」、「PRA等の詳細なリスク評価」を単に「PRA」と呼称している。

³ 本稿では、「リスク評価」を、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使用している。

- iv 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。
- v 事故シーケンスとして評価できることは、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。
- vi 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。

このような裕度評価手法の特長によりリスクを評価することができ、断層変位のような外部事象に対するプラントの弱点を把握し、必要に応じて改善策を検討するのに有効である。また、裕度評価は、入力を暫時増加させていくことによって、想定を超える断層変位に対する評価にも適している。

3. 裕度評価手法の適用概念

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手法の適用概念を検討した。

なお、地震起因の断層変位を評価する場合は、地震動との重畳も考慮に入れる必要があるが、本稿では、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ち、変位に対する評価に焦点を当てて記述する。

3.1 評価手順

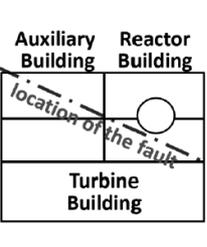
評価手順を Table 1 に示す。

- ① 断層変位による直接のコンタクトを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できる。なお、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、建屋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あり、また、必要に応じて機器の設置位置での局所的な建屋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。すなわち、断層変位に対する建屋側の評価は、機器・配管系側の評価をフィードバックしてより詳細な評価を行うプロセスをとることにより、評価全体を高度化したものにすることができる。

- ② 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。なお、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。

Table 1 Procedure of margin analysis utilizing accident sequences.

Location of the fault	Building and structures	Equipment and piping system		Risk analysis
	Damage state	Displacement influence to be considered	Damage modes to be prevented	
	No significant damage (Safety function ensured)	<ul style="list-style-type: none"> Inclination of the building Relative displacement between the building 	<ul style="list-style-type: none"> Function damage of dynamic component Structural damage of crossover pipes 	Margin analysis utilizing accident sequences
	Local damage at foundation, walls and floors	<ul style="list-style-type: none"> Decline of the support function of the building Inclination of the building Deformation of the building Relative displacement between the building 	<ul style="list-style-type: none"> Structural damage of equipment adhesive key Function damage of dynamic component Structural damage of large equipment Structural damage of crossover pipes 	

建屋側からのアウトプットを引き継いだ機器・配管系の簡略評価イメージを Fig.1 及び Table 2 に示す。

③ 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 などにおける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。

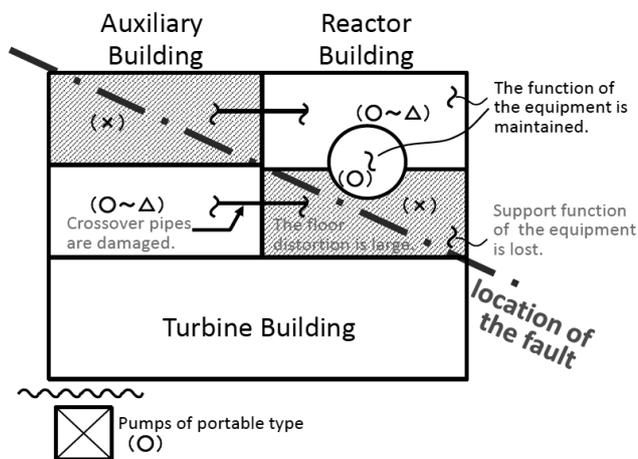


Fig.1 Determination concept of damage area.

断層変位量をパラメトリックに増大させたときの炉心損傷シーケンスの有無を評価する（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、断層変位に対するプラントのリスク情報を得る。

事故シーケンス評価（イベントツリー）の簡略イメージを Fig.2 に示す。このイベントツリーの例においては、以下のように記述することができる。

- 地震との重量を想定すると、主給水（深層防護レベル1）が地震動の影響により機能喪失する可能性がある。
- その場合、原子炉建屋にある影響緩和設備である補助給水系（深層防護レベル2）により安全機能が維持される。
- 断層変位量の程度や分散配置されている3台のポンプがそれぞれの断層からの距離等に応じ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（深層防護レベル3、4）を活用する。
- 断層変位量の程度や分散配置されている2台のポンプがそれぞれの断層からの距離等に応じて機能喪失

Table 2 Determination concept of damaged equipment for variety of amount of the fault displacement.

Fault displacement* (Dip slip)	Reactor Building				Auxiliary Building			
	The equipment installed in area with damage of building flame		The equipment installed in area without damage of building flame		The equipment installed in area with damage of building flame		The equipment installed in area without damage of building flame	
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	x	PRV PMP1 SFP1	○	CPP1B RHP1B CSP1B SIP1B	x	CPP1A RHP1A CSP1A/C SIP1A	○
50cm	AFWP-TD AFWP-MDA/B CSP2A/B	x	PRV PMP1 SFP1	○	CPP1B RHP1B CSP1B SIP1B	x	CPP1A RHP1A CSP1A/C SIP1A	○

Note:
*The amount of fault displacement is given arbitrary to express an image of margin analysis.

PRV : Pressurizer relief valve
PMP1 : Primary makeup water pump
SFP1 : Spent fuel pit pump
AFWP-TD : Auxiliary feed water pump - turbine driven
AFWP-MDA/B : Auxiliary feed water pump - motor driven No.A,B

CPP1A/B : Containment spray pump No.A,B
RHP1A/B : Residual heat removal pump No.A,B
CSP1A/B/C : Charging/Safety injection pump No.A,B,C
CSP2A/B : Boric acid transfer pump No.A,B
SIP1A/B : Safety injection pump No.A,B

失する場合は、代替手段として有効な可搬ポンプ等（深層防護レベル4）を活用する。

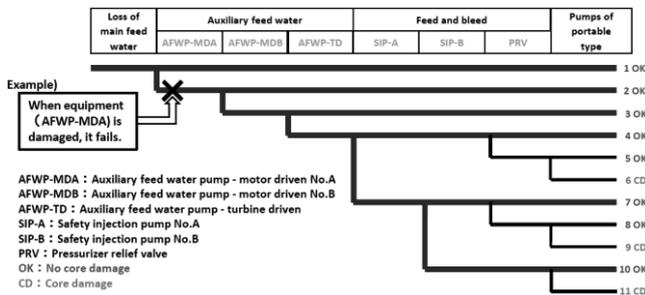


Fig.2 An example of evaluation utilizing accident sequences.

3.2 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 Table 3 のように示すことができる。

このようにして得られた結果の考察は、以下のように記述することができる。

- ・断層変位を想定した場合でも、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により、炉心損傷の観点からの裕度を有している。
- ・さらに、代替手段となりうる可搬ポンプはリスク低減に有効である。
- ・更なるリスクの抑制のために、追加の対応策を講じる意思決定にも活用できる。

3.3 留意事項

本稿で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、事故シーク

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。

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工学的なリスク評価手法のうち、裕度評価手法の適用概念を示した。

この手法の適用により、原子力安全のための評価をすることができ、安全機能の確認とともに、得られたリスク情報を活用して、炉心損傷に対する裕度や可搬設備の有効性の検証、リスク低減のための更なる対応策ための意思決定をすることができる。

なお、本稿の内容は三菱重工業(株)殿及び(株)大林組殿との共同研究の内容に基づき適用概念としての整理を行ったものであり、また、日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会における検討に供し、同調査専門委員会での議論も参考にしている。ここに記して謝辞とする。

参考文献

- [1] 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”、一般社団法人日本原子力学会、2014年。

Table 3 An example of obtained risk information.

	Fault displacement [※] (Dip slip)							
	10cm		20cm		30cm		50cm	
When there is no pump of portable type.	When there is damage of building flame.	There is no core damage.	When there is damage of building flame.	There is no core damage.	When there is damage of building flame.	There is a possibility of core damage.	When there is damage of building flame.	There is a possibility of core damage.
	When there is no damage of equipment.		When there is no damage of equipment.		When there is damage of equipment.		When there is damage of equipment.	
When there are pumps of portable type.	Same as above.		Same as above.		Same as above.	There is no core damage.	Same as above.	Same as above.
Additional countermeasure (Further diversification of portability type equipment)	Same as above.		Same as above.		Same as above.		Same as above.	There is no core damage.

Note:

※The amount of fault displacement is given arbitrary to express an image of margin analysis.

•This example indicates an image of arrangement of obtained risk information, and the above doesn't correspond to Table 2.