

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

(2) アクシデントマネジメント等による断層変位に対するリスク低減効果

(2) Measures for risk reduction by accident management

*黒岩 克也¹、*四十田 俊裕²¹MHI NS エンジ、調査専門委員会委員、²北陸電力、調査専門委員会委員

1. はじめに

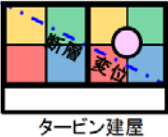
本稿では、日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会における検討成果^[1]のうち、断層変位が起因となって原子力発電所の安全性を損なう可能性のある事故シナリオに対するアクシデントマネジメント等の対処方策によるリスクの低減効果を定量的に評価するための、裕度評価手法を用いたリスク評価の適用例とその拡張イメージについて示す。

2. 断層変位に対する裕度評価手法の適用性

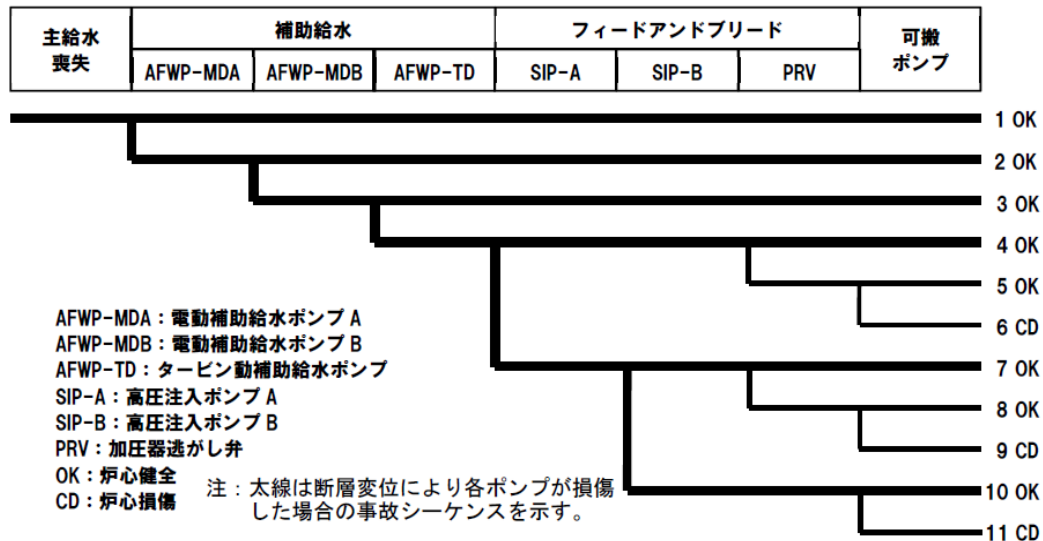
断層変位の施設に対する影響評価手法として、裕度評価手法を適用することにより、評価に用いる断層変位量が増大した場合においても、断層変位による影響が局所的なことを適切に評価して得られたリスク情報に基づき、恒久設備の設置やアクシデントマネジメントを講じることにより、例えば炉心損傷に至るパスを回避できることを示した。

裕度評価のフローを表1、イベントツリーを図1、評価結果を表2に示す。ここでは、加圧水型軽水炉(PWR)の原子炉建屋と補助建屋に影響するような断層変位(縦ずれ)を想定したケース、及び沸騰水型軽水炉(BWR)の海水取水路に影響するような断層変位を想定したケースに基づき検討している。

表1 断層変位に対する裕度評価のフロー^[1]

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 (○) 基礎・壁・床の 局所損傷 (△, ×)	床の傾斜 建屋間の相対変位 支持機能の低下 床の傾斜 床の変形 建屋間の相対変位	機器の機能損傷 渡り配管等の構造損傷 機器定着部の構造損傷 機器の機能損傷 機器の構造損傷 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

*Katsuya Kuroiwa¹ and *Toshihiro Aida²¹MHI Nuclear Systems and Solution Engineering, Member of the Committee²Hokuriku Electric Power, Member of the Committee

図1 原子炉建屋等の直下に断層変位を仮定したイベントツリーの例^[1]表2 原子炉建屋等の直下に断層変位を仮定した裕度評価結果例^[1]

	断層変位量（縦ずれ）※1							
	10cm		20cm		30cm		50cm	
代替手段なし	躯体 損傷有	炉心 損傷無	躯体 損傷有	炉心 損傷無	躯体 損傷有	炉心 損傷の 可能性有	躯体 損傷有	炉心 損傷の 可能性有
	機器 損傷無		機器 損傷無		機器 損傷有		機器 損傷有	
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 （可搬型設備の 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）上表は整理のイメージを示すものである。

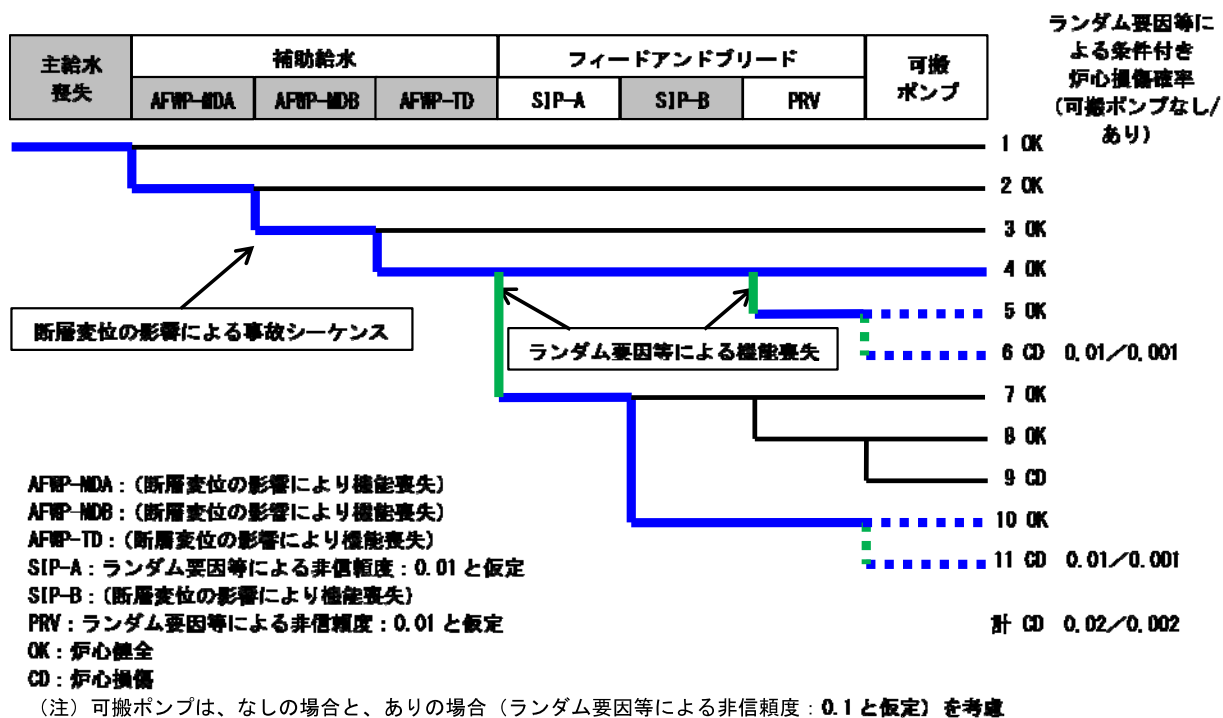
3. 断層変位のリスク評価によるリスク低減効果の推定の考え方

3-1. 原子炉建屋直下の断層変位への適用例

上述の裕度評価手法の拡張の例として、ランダムな要因等による条件付き炉心損傷確率の評価例及び確率論的なフラジリティ曲線を用いた条件付き炉心損傷確率について、定量的なリスクの低減効果を検討した PWR の評価例を示す。

(1) ランダムな要因等による条件付き炉心損傷確率の評価例

断層変位の影響だけでは炉心損傷に至らない場合に対して、断層変位の影響に対して機能を維持できている機器、配管等が、内的事象によるランダムな要因等によって機能喪失して炉心損傷に至る条件付き確率を評価することが有効と考えられる。ランダム要因等による非信頼度は内的事象 PRA の結果が利用可能である。

図2 原子炉建屋等の直下に断層変位を仮定したリスク評価の拡張例(1)^[1]

例えば、断層変位が 50cm の場合に、機能喪失するとしている機器 (AFWP-MDA/B、AFWP-TD、SIP-B: 図2の網掛けの機器)、機能を維持できる機器 (SIP-A、PRV) をイベントツリーに反映すると、図2のように表される。

ここで、機能を維持できている機器に対して、ランダム要因等による非信頼度を図中に示すように想定すると、50cm の断層変位が発生した場合の条件付き炉心損傷確率は、可搬ポンプがない場合でも 0.02 と評価でき、更に可搬ポンプがあれば、条件付き炉心損傷確率は 0.002 となる、といった評価が可能である。

(2) 確率論的なフラジリティ曲線を用いた条件付き炉心損傷確率の評価例

ここで適用した裕度評価の方法は、確率論的なフラジリティ曲線を用いた評価に拡張することもできる。

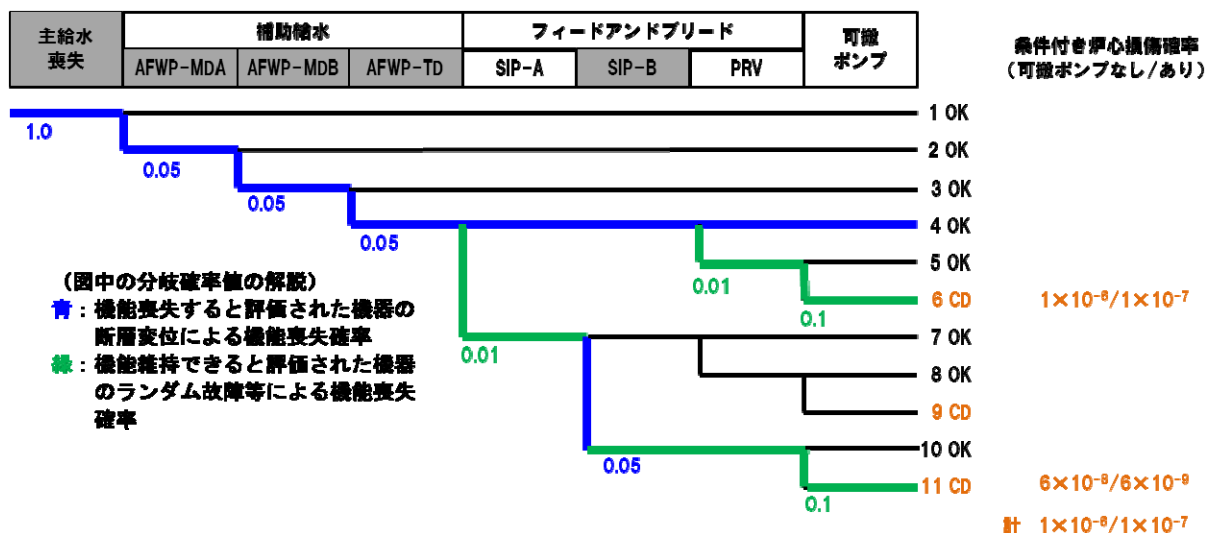
例えば、フラジリティ評価結果に基づき、起因事象である主給水喪失を除き、図2において損傷を想定した機器の損傷確率の平均値 (平均フラジリティ曲線上の断層変位量 50cm における損傷確率として求める) を 0.05 と仮定し^[注]、損傷に対する機器間の相関性は考慮しないものとする、図2のシーケンス6、シーケンス11の断層変位量 50cm の発生を想定した条件付き炉心損傷確率は、図3のように評価される。

例えば、可搬ポンプありの場合のシーケンス6の条件付き炉心損傷確率 (可搬ポンプありの場合) は以下のように概略評価される。

$$1.0 \times 0.05 \times 0.05 \times 0.05 \times 0.01 \times 0.1 = \text{約 } 1 \times 10^{-7}$$

また、これらの確率値は、確率分布の代表値 (一般的には平均値) を用いた評価であるが、確率分布を直接用いて評価することにより、不確かさの影響をより直接的に取り扱う定量評価も可能となる。

注) ここでの「0.05」の仮定に絶対値としての物理的な意味はないが、フラジリティ評価結果を裕度評価に適用する場合には、例えば 0.01 以上は機能喪失と評価するといった適用が考えられる。

図3 原子炉建屋等の直下に断層変位を仮定したリスク評価の拡張例(2)^[1]

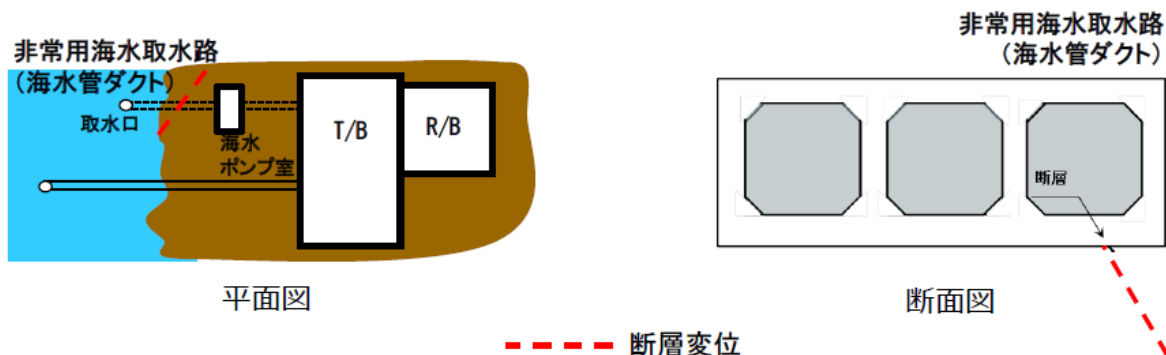
3-2. 非常用海水取水路直下の断層変位への適用例

図4に示すように、非常用の海水取水路の直下に断層変位を仮定し、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に、断層変位に対する施設影響を評価することができる。

海水取水路（海水ダクト）に対する断層変位の影響は、土木構造物に対する影響として評価する。土木構造物への影響評価は3次元FEM解析の結果を許容限界と比較することにより行い、その結果から、局所的な損傷状態、全体系の崩壊の有無、変位・変形・傾斜などを評価して、機器・配管系への影響評価への情報とする。

この結果、断層変位量が50cmになると、底版、壁、頂版が損傷する可能性があり、取水機能の維持に影響を及ぼすと評価される。これにより、原子炉建屋内の非常用炉心冷却系、非常用ディーゼル発電機、燃料プール冷却浄化系及び熱交換器建屋内の原子炉補機冷却水系／原子炉補機冷却海水系の機器・配管系自体が損傷することはないものの、これらの設備への冷却水供給機能が低下し、機能喪失する可能性がある。

さらに、ランダムな要因等による条件付き炉心損傷確率を評価することにより、これらのアクシデントマネジメントによる定量的なリスク低減効果を検討することもできる。BWRに対するリスク評価の拡張例を図5に示す。

図4 非常用海水取水系の直下に断層変位を仮定した例^[1]

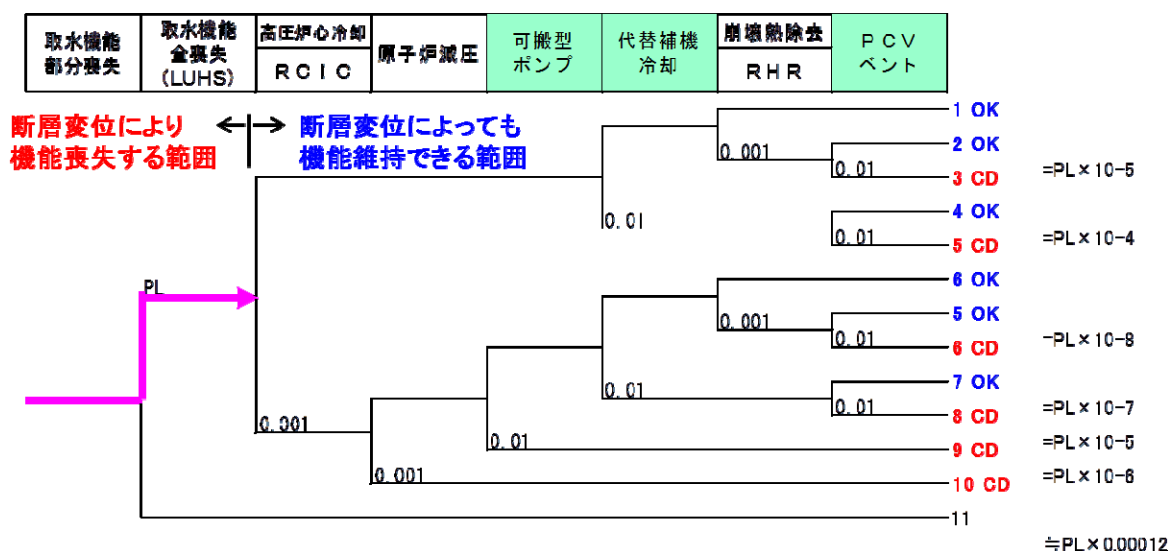


図5 非常用の海水取水系の直下に断層変位を仮定したリスク評価の拡張例^[1]

ここでは、ランダム要因による非信頼度をそれぞれ図5の分岐上に示すように工学的に概略推定している。この結果、人的過誤等の従属的影響が有意とならないよう適切に対応することにより、断層変位の影響によって発生した最終ヒートシンク喪失による炉心損傷頻度は、断層変位の直接的な影響が考え難いこれらの対策によって、約4桁の低減に期待できると概略評価される。

このように、広範な影響が想定される最終ヒートシンク喪失のような事象に対しても、影響が局所的な断層変位の特徴を踏まえた事故シナリオを基に、工学的なリスク評価を行うことにより、アクシデントマネジメント等の代替手段の検討・評価に有益なリスク情報を提供することができる。

4. まとめ

本稿においては、断層変位を起因とする事故シナリオを対象として、アクシデントマネジメント等の対処方策の効果を考慮できるリスク評価の方法として、裕度評価手法の適用例と、定量的なリスク低減効果を把握するための拡張例について示した。

このようなリスク評価の方法が、断層変位の影響範囲が限定的なことを考慮したアクシデントマネジメント等の対処方策のリスク低減効果を定量的に評価するツールとしても有効なことを確認した。

なお、本手法を実機の評価に適用する際には、対象とするプラントの設計・運転条件、想定する断層変位の特性、対象とする事故シーケンス等によって結果が異なることに留意する必要がある。

参考文献

- [1] 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：断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策 調査専門委員会報告書：2017年3月
(http://www.aesj.net/sp_committee/com_danso)