断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策

「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会

報告書

2017 年 3 月

一般社団法人　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

報告書の発刊に当たって

「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会は、半年ほどの準備期間ののち、2014 年 10 月 1 日付で設置され、調査専門委員会を 17 回、傘下の原子力分科会を 7 回開催し、このたび報告書の刊行に至った。本調査専門委員会は、日本原子力学会のみならず、土木学会原子力土木委員会と連携し、さらに、断層変位に関連する地質、土木、建築、機械、防災、保全等の多くの学協会に所属する専門家の参画を得て活動を行った。この間に、活断層に起因する 2014 年長野県北部地震（神城断層地震）や 2016 年熊本地震が発生し、活動期間を半年延長して、これらの知見も含め、断層変位と原子力施設に対する影響評価やリスク低減策について検討を行った。

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に変位（ずれ、食い違い）が生じる現象である。変位としては、いわゆる活断層（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、液状化に伴う地盤の沈降等によって生じる変位が知られている。

過去に生じた断層変位のデータを蓄積する努力がなされており、これまでの知見、経験を踏まえて、どのようなことが起こり得るかはある程度説明することができ、既往知見を活用する姿勢は重要である。

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故の起因事象は、地震による外部電源喪失と津波による非常用炉心冷却系（ECCS）の共倒れである。また、福島第二原子力発電所では、非常用ディーゼル発電機や ECCS のポンプが健全であっても、海水ポンプの被水によりヒートシンクの喪失が発生し、非常用ディーゼル発電機の冷却水を失い、同様に ECCS の共倒れを起こしている。しかし、福島第二では、海水ポンプのモータを交換することによりヒートシンクを回復し、炉心と格納容器の冷却を回復し、冷温停止を達成した。これらの教訓を踏まえると、単に津波の高さを議論するだけでなく、海水が原子力施設に流入した場合に、その後に発生する安全上重要な設備の機能不全について着目し、発生事象の深刻さと対策の重要さ気づいておくべきであった。ヒートシンク喪失や全交流電源喪失に備えて、冷却水、直流電源、弁操作用の空気源などのサポート系の機能確保も重要で、これらを失っても可搬型設備を使った過酷事故緩和活動（アクシデントマネジメント）で対応が可能であるように準備をしておくことが必要であった。

断層変位の問題も基本的に津波と同様に、断層変位の可能性の有無の議論に終始するのではなく、震源となる震源断層と地表まで貫く主断層が動いたとき、原子力施設近傍の副断層や破砕帯などへの影響とそれを前提とした原子炉建屋や内部の機器・配管系への影響を前もって検討し、想定し得る事象とそのリスクに対する工学的対応策をたてておくこと

が必要である。想定を超える場合であっても過酷事故緩和対策を策定して、万一に備えることが重要である。

これまでの断層変位に対する地形・地質分野の知見からは、我が国の主断層の 1 回当たりの変位量は、数十 cm～10m 程度で、その活動間隔は、短いもので数百年、平均的には数千年、長いもので数万年である。主断層の活動に伴ってその周囲に副次的に生じる副断層の変位量は、当該副断層の起因となった主断層の変位量以下と考えることが適当である。原子力施設を建設する際には、事前に詳細な地形・地質調査が実施され、特に重要施設の設置地盤（岩盤）における断層などの弱面の存在、活動性等が精度の高い情報によって把握される。主断層のような 1 回当たり数十 cm 以上の変位は、過去の変位の痕跡を、詳細な地形・地質調査により施設建設前に把握することが十分にできると考えられる。また、断層変位による影響は、断層直上の極狭い帯状の部分に限定されていることが十分に認識される。

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ことである。本調査専門委員会では、深層防護の概念の適用とリスク評価の活用により、原子力施設のリスクを低減していくことが原子力安全の最重要なアプローチであると考えた。

事故シーケンスとしての評価により、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評価することができる。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。このような評価を進めていくことでプラントの弱点を把握することができ、想定を超える領域も含めたリスク評価と対処も可能となる。また、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。

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、アクシデントマネジメントの有効性の検証、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。

本報告書で対象としている断層変位に限らず、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。

本報告書が、このように原子力発電所の安全性を高める不断の努力の一助となれば幸いである。

2017 年 3 月

「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　奈良林　直

目　次

第Ⅰ編　総論 …… 1

Ⅰ.1　本調査専門委員会について 3
Ⅰ.1.1　活動の概要
Ⅰ.1.2　報告書の構成

Ⅰ.2　調査・検討に当たっての基本事項 6
Ⅰ.2.1　調査・検討の対象、前提等
Ⅰ.2.2　用語の定義

Ⅰ.3　調査・検討の背景、問題認識 11

Ⅰ.4　断層変位について 16
Ⅰ.4.1　断層変位という自然現象の理解
Ⅰ.4.2　施設に対する影響評価の対象となり得る断層変位

Ⅰ.5　断層変位に対する原子力安全の基本的考え方 20
Ⅰ.5.1　原子力安全の考え方
Ⅰ.5.2　断層変位に対する考え方

Ⅰ.6　断層変位に対する評価 27
Ⅰ.6.1　全体評価手順
Ⅰ.6.2　断層変位のハザード評価
Ⅰ.6.3　施設の影響評価

Ⅰ.7　まとめ 39

Ⅰ.8　参考文献 42

第Ⅱ編　各論 …… 45

Ⅱ.1　用語の定義 47

Ⅱ.2　変位・変形の現象 53
Ⅱ.2.1　地盤の変位・変形
Ⅱ.2.2　震源断層の活動に伴う変位・変形
Ⅱ.2.2.1　活断層の特徴
Ⅱ.2.2.2　地表地震断層の変位
Ⅱ.2.2.3　断層活動に伴う変位・変形による構造物等への影響事例

Ⅱ.2.3　参考文献
別紙Ⅱ.2　変位・変形の現象に関する参考資料

Ⅱ.3　変位・変形の評価　63
Ⅱ.3.1　地形・地質･地盤調査
Ⅱ.3.1.1　断層評価のための調査
Ⅱ.3.1.2　断層変位量評価のための調査
Ⅱ.3.1.3　断層変位量評価に係る応力場
Ⅱ.3.2　検討用の断層変位量の評価
Ⅱ.3.2.1　評価手順
Ⅱ.3.2.2　調査結果に基づく変位量δｉの検討
Ⅱ.3.2.3　数値解析に基づく変位量δａの検討
Ⅱ.3.2.4　地表地震断層データに基づく変位量δｄの検討
Ⅱ.3.2.5　検討用の断層変位量δｓの評価
Ⅱ.3.2.6　想定を超える断層変位量の評価
Ⅱ.3.3　確率論的断層変位ハザード解析
Ⅱ.3.4　今後の課題
Ⅱ.3.5　参考文献
別紙Ⅱ.3　変位・変形の評価に関する参考資料

Ⅱ.4　建物・構築物に対する影響評価　83
Ⅱ.4.1　対象構造物及び評価方針
Ⅱ.4.2　入力条件
Ⅱ.4.3　解析手法
Ⅱ.4.3.1　解析モデル
Ⅱ.4.3.2　解析手順
Ⅱ.4.3.3　解析結果の出力
Ⅱ.4.3.4　解析コードの検証
Ⅱ.4.4　許容限界
Ⅱ.4.4.1　損傷モード
Ⅱ.4.4.2　許容限界の目安値
Ⅱ.4.4.3　損傷範囲と損傷モードの関係
Ⅱ.4.5　不確実さの取扱い
Ⅱ.4.6　耐変位裕度評価
Ⅱ.4.6.1　建物・構築物の耐変位安全性評価
Ⅱ.4.6.2　建屋フラジリティ評価
Ⅱ.4.7　今後の課題

Ⅱ.4.8　参考文献

Ⅱ.5　土木構造物に対する影響評価　115

Ⅱ.5.1　対象構造物及び評価方針

Ⅱ.5.2　入力条件

Ⅱ.5.3　解析手法

Ⅱ.5.3.1　解析モデルと解析手法

Ⅱ.5.3.2　解析手順

Ⅱ.5.3.3　解析結果（応答値）の出力

Ⅱ.5.4　許容限界

Ⅱ.5.4.1　許容限界の目安

Ⅱ.5.4.2　断層変位と構造物の損傷との関係

Ⅱ.5.5　不確実さの取扱い

Ⅱ.5.6　耐変位裕度評価

Ⅱ.5.6.1　土木構造物の耐変位安全性評価

Ⅱ.5.6.2　土木構造物フラジリティ評価

Ⅱ.5.7　今後の課題

Ⅱ.5.8　参考文献

別紙Ⅱ.5　土木構造物に対する影響評価に関する参考資料

Ⅱ.6　機器・配管系に対する影響評価　139

Ⅱ.6.1　対象設備及び評価方針

Ⅱ.6.2　入力条件

Ⅱ.6.3　荷重の組合せ

Ⅱ.6.4　許容限界

Ⅱ.6.5　解析・評価手法

Ⅱ.6.5.1　機器評価の基本的な考え方

Ⅱ.6.5.2　評価項目

Ⅱ.6.5.3　評価事例

Ⅱ.6.6　機器フラジリティ評価

Ⅱ.6.6.1　機器フラジリティ評価の流れ

Ⅱ.6.6.2　リスク評価への出力

Ⅱ.6.7　今後の課題

Ⅱ.6.8　参考文献

別紙Ⅱ.6　断層変位に対する機器評価の参考文献

Ⅱ.7　事故シナリオ・リスク評価　173

Ⅱ.7.1　事故シナリオと対処方策

Ⅱ.7.1.1　事故シナリオの整理
Ⅱ.7.1.2　起因事象の考え方
Ⅱ.7.1.3　対処方策の考え方
Ⅱ.7.2　リスク評価
Ⅱ.7.2.1　リスク評価手法の調査
Ⅱ.7.2.2　リスク評価手法の適用性
Ⅱ.7.2.3　裕度評価手法の適用
Ⅱ.7.2.4　今後の課題
Ⅱ.7.3　参考文献
別紙Ⅱ.7　事故シナリオ・リスク評価に関する参考資料

第Ⅲ編　別添資料 …… 225

Ⅲ.1　地形・地質関連の用語の定義に係る参考資料　227
(1) 活断層の定義と認定基準
(2) 断層
(3) 主断層、分岐断層、副断層

Ⅲ.2　最近の地震で観察された地表地震断層の特徴　231
(1) 2014 年長野県北部の地震（神城断層地震）
(2) 2016 年熊本地震
(3) 参考文献

Ⅲ.3　変位・変形に係る数値解析事例　235
(1) 解析手法の分類
(2) 静力学的な解析の事例
(3) 動力学的な解析の事例
(4) 参考文献

Ⅲ.4　確率論的断層変位ハザード解析　241
Ⅲ.4-1　確率論的断層変位ハザード解析（PFDHA）について
(1) 概要
(2) 頻度の計算方法
(3) 参考文献
Ⅲ.4-2　確率論的断層変位ハザード解析の適用事例

Ⅲ.5　2007 年新潟県中越沖地震を踏まえた地盤変位に対する設備の設計対策　247
(1) はじめに
(2) 中越沖地震と柏崎刈羽原子力発電所の被災状況の概要

(3) 地震による損傷事例
(4) 中越沖地震を踏まえた設計上の工夫
(5) まとめ
(6) 参考文献

Ⅲ.6 断層変位に対する対策事例 257
(1) 国内外の対策事例
(2) 参考文献

Ⅲ.7 2016 年熊本地震で生じた地表地震断層による影響 259
(1) 建物等への影響
(2) 現地調査結果
(3) 参考文献

Ⅲ.8 地表地震断層や地表付近のすべりと地震動との関連 263
(1) 概要
(2) 参考文献

付録 …… 265

付録 1 委員名簿 267
付録 2 活動実績 269

（空き頁）

第Ⅰ編　総論

（空き頁）

Ⅰ.1　本調査専門委員会について

Ⅰ.1.1　活動の概要

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他の自然現象と同様に外部ハザードの一つと捉え、原子力施設に与える影響に関するリスク評価手法と工学的な対応策について、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。

本調査専門委員会の調査・検討の背景、問題認識についてはⅠ.3 で詳述するが、主には以下の点が挙げられる。

- 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故（以下「福島第一事故」という。）は、社会が“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。この事故から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が、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なお一層注意深く考え、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原子力施設に対して、施設直下で断層変位が生じる可能性の有無のみに着目して原子力安全を判断する状況になっている。このような状況に至った背景として、断層変位が生じた場合の原子力施設に対する影響に関して、原子力安全の観点からの多面的な研究や議論が不足しており、また、科学的な見地から体系的にとりまとめた技術情報がなかったこと等が考えられる。このため、断層変位の原子力施設に対する影響までを含めて評価する手法を体系的にとりまとめ、評価により得られたリスク情報に基づきリスク低減のための対応策を講じることもできるようにする原子力安全の取組みを進めていくことが喫緊の課題である。

本調査専門委員会の、関連する多分野の専門家の協働により調査・検討を行うためのスキームを図Ⅰ.1.1 に示す。

他学会との組織的な協力としては、先行して断層変位の原子力施設に対する影響に関して検討を進めていた土木学会原子力土木委員会[1]と連携した。

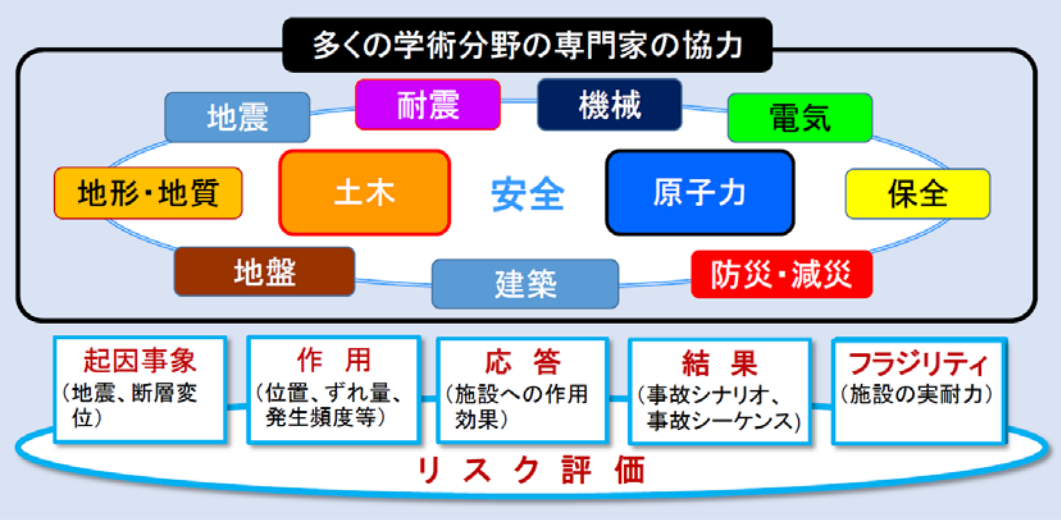
調査・検討の成果に基づき、原子力施設に対する不確実さを踏まえたプラントシステムのトータルなリスク評価手法、リスクを低減するためのアクシデントマネジメント等の工学

[1] 土木学会原子力土木委員会断層変位評価小委員会（活動期間：2013 年 10 月～2015 年 5 月）では、2015 年 7 月 3 日に研究報告書 [1)]を公表している。

的な対応策をまとめ、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た。

本調査専門委員会の設置期間は、2014 年 10 月～2017 年 3 月 [2]で、調査専門委員会を 17 回、傘下の原子力分科会を 7 回開催した。この間に、日本原子力学会大会（春の年会、秋の大会）での企画セッションでの総合討論、本調査専門委員会主催の特別講演会の開催等により、外部との意見交換にも努めた。

活動実績の詳細等について、巻末の付録に掲げる。



図Ⅰ.1.1　学術分野横断の検討スキームの構築

Ⅰ.1.2　報告書の構成

本報告書は、「Ⅰ　総論」、「Ⅱ　各論」、「Ⅲ 別添資料」の 3 部構成としている。

「Ⅰ　総論」は、本報告書全体の概要としての位置づけも兼ねている。まず、本報告書で扱う対象や前提としている考え方等（Ⅰ.2）と本調査専門委員会の検討の背景や問題認識（Ⅰ.3）について述べ、断層変位という自然現象に対する理解を整理（Ⅰ.4）した上で、断層変位に対する原子力安全の基本的考え方をとりまとめている（Ⅰ.5）。これに基づき、断層変位に対する全体評価手順を提示し、評価手法の適用例を示している（Ⅰ.6）。

本報告書で使用している用語の定義は、「Ⅱ　各論」の冒頭（Ⅱ.1）にまとめて記載しているが、「Ⅰ　総論」にも主要なものを掲げている（Ⅰ.2）。

「Ⅱ　各論」では、「Ⅰ　総論」で示す全体評価手順に沿った流れで、評価の各プロセスの詳細について体系的に取りまとめている。

[2] 設置当初から半年間延長。

本報告書のハザードとしての対象である断層変位について、現象に対する理解を詳述し（Ⅱ.2)、施設評価のための入力となる断層変位ハザードの評価手法をとりまとめている（Ⅱ.3)。さらに、施設に対する影響評価手法は、断層変位の影響を直接受ける「建物・構築物」（Ⅱ.4）と「土木構造物」（Ⅱ.5)、それらを介して影響を受ける「機器・配管系」（Ⅱ.6）に分けてとりまとめている。最後に、原子力施設のプラントシステムのトータルなリスクを考える上で重要となる事故シナリオや関連するリスク評価手法、評価手法の適用例等をとりまとめている（Ⅱ.7)。

なお、ハザード評価と施設に対する影響評価との相互のインターフェース、各施設間の相互のインターフェースに齟齬のないように、深掘りした横断的な検討に留意して取りまとめている。評価手法の充実、高度化に向けた今後の課題は、Ⅱ.3～Ⅱ.7 のそれぞれの各章にまとめている。

「Ⅲ 別添資料」では、「Ⅰ 総論」と「Ⅱ 各論」との関連で、併せて提示しておくことが特に重要と考えられる技術情報等を整理して付している。

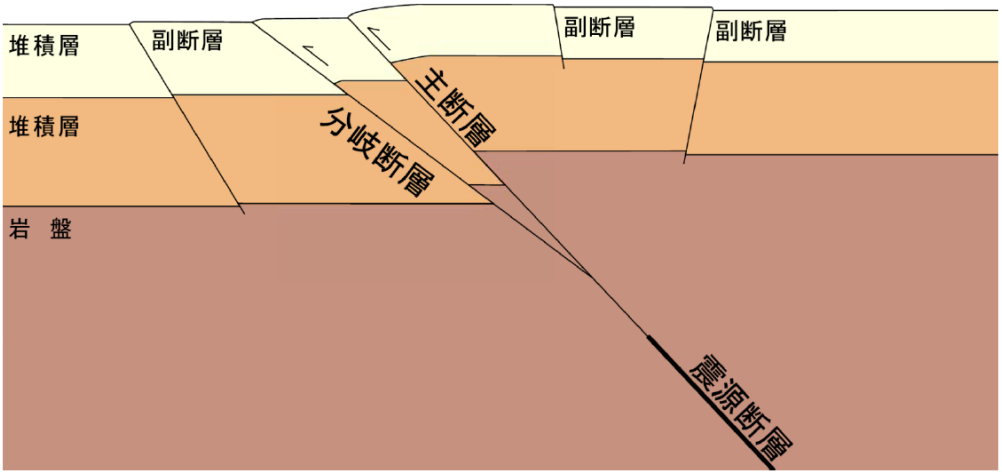
Ⅰ.2　調査・検討に当たっての基本事項

Ⅰ.2.1　調査・検討の対象、前提等

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の一部にせん断変位（ずれ、食い違い）が生じる現象である。

変位としては、震源断層の地表延長部として認識される主断層及び主断層から派生した分岐断層や、それらの周囲に副次的に生じた副断層による断層変位が知られており、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、更には地盤の変状によって生じる相対変位等がある。

図Ⅰ.2.1 に主な断層変位について示す。



図Ⅰ.2.1　主な断層変位

ここで、本調査専門委員会における調査・検討に当たっての基本的な考え方について記す。

①評価対象としての断層変位は、主として震源断層の活動に伴って生じるものを中心に論じる。過去に断層変位が生じた際の知見を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 年長野県北部の地震（神城断層地震）と 2016 年熊本地震から得られる情報も収集して、調査・検討を進めた。

②本報告書では、特に断りのない限り、国内の既設の原子力施設に対する断層変位の影響評価を対象にしている。

ただし、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。また、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。

③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[3]は設置されていると考えられる。

一方、既設の原子力施設においては、最新知見を反映していく取組みにおいて、新たな情報等[4]によって施設に対する追加の影響評価が必要になる場合があり、断層変位に関しても例外ではない。

④断層変位が生じる現象は、地震動に比較すると低頻度で局所的に生じる現象のため、地震動に対する評価と比較すると知見の蓄積や経験が不足しており、評価に際しての不確実さが大きい。一方で、関連する分野でこれまでに得られている知見を活用して、対象となる変位の性状やその不確実さに応じて、施設に与える影響を評価していくことは現段階でも可能である。

⑤評価に用いる断層変位は、評価対象となる施設が設置あるいは支持される設置地盤（岩盤）の上面で定義する。

⑥原子力安全の確保において、不確実さに対処するために有効なのが深層防護の概念の適用とリスク評価の活用である。これらにより、多様なシナリオを検討するアプローチ、想定を超える領域[5]まで含めたシームレスな評価、リスク情報を活用した意思決定等が可能となる。その上で、本調査専門委員会の名称にもある「リスク評価」としては、決定論的な裕度評価等も含めた広義の概念でリスクに関する情報を扱うことが重要であるとの立場に立脚し、そのための評価手法を扱うこととする。

⑦本調査専門委員会で扱う個々の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て的確に利用することが前提となるが、必要な情報が不足する場合でも、適切な条件を付すことや不確実さを適切に取り扱う評価プロセスによること等により、リスク評価のための情報を得ていくことができる。

⑧仮に、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、施設に対する影響評価のための変位量を段階的に複数設定し（後述する「想定を超える断層変位」も含む。）、施設側の耐力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十分可能である。

⑨断層変位による施設影響を評価する際には、地震動による影響も含めたそれぞれの動的な作用との重畳を考慮する必要があるが、断層変位による影響は施設に対して局所的な作用をもたらすことが考えられることから、まずは断層変位による影響に着目して、変位を静的な外的作用として扱い、体系的に評価する手法についてとりまとめた。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適切に評価を行うことが求められる。

---

[3] 重要施設とは、原子力規制委員会の基準でいえば「耐震重要施設」及び「重大事故等対処施設」を指す。

[4] Ⅰ.5.2 の脚注 17 参照。

[5] 「想定を超える領域」には“unknown unknowns”（未知の未知）まで含まれていることに留意した上で、原子力安全の確保のためには、Ⅰ.3 及びⅠ.5 で述べるように、「利用可能な最善の知識」をすべて活用し、深層防護の概念の適用とリスク評価の活用によって事前に対応策を講じて、「想定を超える領域」を小さくしていく取組みが必要となる。

Ⅰ.2.2　用語の定義

「Ⅰ　総論」で使用する主な用語の定義について表Ⅰ.2.1 示す

本報告書全体として使用する用語の定義についてはⅡ.1 にとりまとめている。

表Ⅰ.2.1　用語の定義

用語	定義
断層	地盤に生じた破断面で、その面（断層面）に沿ってずれ（相対的なせん断変位）のあるもの
断層変位	断層面に沿って生じた両側の地盤のずれ（相対的なせん断変位）
（地盤の）変形	地盤に生じた傾斜、撓み
活断層	最近の地質時代に繰り返し活動し、将来も活動する可能性のある断層
震源断層	地震を発生させた地下の断層
地表地震断層	地震時に地表に現れた断層
主断層	震源断層の地表延長部の断層
分岐断層	主断層から分岐した断層
副断層	主断層及び分岐断層の周辺に副次的に生じた断層
後期更新世	地質時代の区分において約 13 万年前から約 1 万年前までの期間
安全機能	原子力施設の安全性を確保するために必要な各種の機能
分散配置	同じ機能を有する安全上重要な設備が、多重性に対する信頼度を向上させるため、異なる区画あるいは一定の離隔を確保して配置されること
炉心損傷	炉心の露出又は過熱によって生ずる燃料の重大な損傷
格納容器機能喪失	格納容器バイパス及び/又は格納容器破損によって、原子炉施設の放射性物質の閉じ込め機能が喪失すること
シビアアクシデント	炉心又は使用済燃料の重大な損傷に至る事象。 重大事故、あるいは過酷事故と呼称する場合もある。
アクシデントマネジメント	炉心又は使用済燃料プール内の燃料が大きく損傷するおそれのある事態に対し、設計に含まれる安全余裕や設計上想定した本来の機能以外にも期待し得る機能又はそうした事態に備えて新規に設置した機器等を有効に活用して講ずる一連の措置をいい、 (a)　シビアアクシデントの発生防止措置 (b)　シビアアクシデントに拡大した場合の影響緩和措置 (c)　安全状態の安定的かつ長期的な確保のための措置 からなる。

用語	定義
起因事象	確率論的リスク評価（PRA）等のリスク評価における事故シナリオの分析では、「通常の運転状態を妨げる事象であって、炉心損傷及び/又は格納容器機能喪失へ波及する可能性のあるもの」と定義される。
事故シーケンス	起因事象の発生から緩和機能及び人的操作の成功又は失敗の組合せを経て望ましくない最終状態（炉心損傷、放射性物質放出、公衆被ばく等）に至る経路
事故シナリオ	事故に至るまでの事象連鎖の因果関係を表したもの
システム	特定の機能又はその一部を達成するための建物・構築物、土木構造物、機器・配管系、運転員又はそれらによって構成されるもの
深層防護	原子力施設の安全性確保の基本的考え方の一つで、原子力施設の安全対策が多段階にわたって設けられていること。 例えば、IAEA の SSR-2/1“Safety of Nuclear Power Plants: Design”によると、5 段階に深層防護のレベルが分けられており、各レベルの目的は以下のとおりとされている。 (a) 第１の防護レベル：通常運転からの逸脱と安全上重要なシステムの故障防止 (b) 第２の防護レベル：プラント運転時に予想される事象が事故の状態に拡大するのを防止 (c) 第３の防護レベル：炉心の損傷や重大な所外放出を防止 (d) 第４の防護レベル：深層防護の第３の防護レベルが失敗した結果の事故の影響を緩和 (e) 第５の防護レベル：放射性物質の放出による放射線の影響を緩和
リスク	事象の発生による影響と発生する可能性の不確実さの組合せ
不確実さ	評価の過程に含まれる物理量、モデル、専門家判断等における確実さの度合いの裏返し・ばらつき
ハザード	原子力施設の安全性に脅威を与える可能性のある事象。 なお、ある任意地点において将来の一定期間中に襲来するであろうハザードの強さと、その強さを超過する頻度又は確率との関係を連ねたものをハザード曲線という。
外部ハザード	原子力施設の安全性に脅威を与える可能性のある発電所外部からの事象。自然ハザードと人為ハザードに分類される。
応答	断層変位が作用することによって建物・構築物、土木構造物及び機器・配管系に生じる加速度、変位、応力、ひずみ等

用語	定義
現実的応答	断層変位、物性値等の不確実さを考慮して求められた、確率量で表される建物・構築物、土木構造物及び機器・配管系の断層変位時の応答
作用	構造物の信頼性に関する一般原則を定める国際規格 ISO2394 では、構造物に作用する力、変位、温度影響、拘束による影響、環境影響等の材料特性や構造物の形状を変化させるものを総称して作用（action）としている。
耐力	断層変位が作用したときの、建物・構築物、土木構造物及び機器・配管系が耐え得る応力、変形の限界、又は所定の機能が保持される限界
現実的耐力	不確実さを考慮した耐力で、確率量で表される建物・構築物、土木構造物及び機器・配管系の耐力
フラジリティ	与えられた作用レベルに対して、建物・構築物、土木構造物及び機器・配管系が損傷する度合い。 なお、作用レベル毎に計算される損傷確率を連ねたものをフラジリティ曲線という。
損傷確率	作動要求があったときや定められた基準期間内に、建物・構築物、土木構造物及び機器・配管系が所定の機能を果たせない確率

Ⅰ.3　調査・検討の背景、問題認識

○福島第一事故の教訓

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 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって、東京電力福島第一原子力発電所は安全上重要な機能を有する施設（以下「SSCs」という。）は地震動に対して機能を維持したが、東京電力の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シビアアクシデントが誘起された。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（シビアアクシデント対策）ができていなかったこと等が指摘されている[2),3)]。

この事故は、社会が“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が、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なお一層注意深く考え、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。

○断層変位を検討対象にする理由

本調査専門委員会は、断層変位という自然現象を対象としている。

断層変位とは、活断層の活動等に伴って地盤の一部にせん断変位（ずれ、食いちがい）が生じる現象である。断層変位という自然現象については、Ⅰ.4 及びⅡ.2 で詳述する。

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原子力施設に対して、施設直下で断層変位が生じる可能性の有無のみに着目して原子力安全を判断する状況になっている[6、4)~6)]。

---

[6]原子力規制委員会の現在の基準等は、以下のようになっている。

「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」（抜粋）

第 3 条 第 3 項　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 38 条 第 3 項　重大事故等対処施設は、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。

「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の解釈」別記 1（抜粋）

第 3 条第 3 項に規定する「変位」とは、将来活動する可能性のある断層等が活動することにより、地盤に与えるずれをいう。また、同項に規定する「変位が生ずるおそれがない地盤に設け」るとは、耐震重要施設が将来活動する可能性のある断層等の露頭がある地盤に設置された場合、その断層等の活動によって安全機能に重大な影響を与えるおそれがあるため、当該施設を将来活動する可能性のある断層等の露頭が無いことを確認した地盤に設置することをいう。なお、上記の「将来活動する可能性のある断層等」とは、後期更新世以降（約 12～13 万年前以降）の活動が否定できない断層等とする。その認定に当たって、後期更新世（約 12～13 万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降（約 40 万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること。なお、活動性の評価に当たって、設置面での確認が困難な場合には、当該断層の延長部で確認される断層等の性状等により、安全側に判断すること。また、「将来活動する可能性のある断層等」には、震源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面を含む。

このような状況に至った背景として、断層変位が生じた場合の原子力施設に対する影響に関して、原子力安全の観点からの多面的な研究や議論が不足しており、また、科学的見地から体系的にとりまとめた技術情報がなかったこと等が考えられる。

このため、断層変位の原子力施設に対する影響までを含めて評価する手法を体系的にとりまとめ、評価により得られたリスク情報に基づきリスク低減のための対応策を講じることもできるようにする原子力安全の取組みを進めていくことが喫緊の課題である。

○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あるだけでなく、不確実さが大きい現象であり、実験による模擬も難しい。このような情報量が少なく、不確実さが大きく、再現が難しい事象の理解においてはその分野の専門家の意見が重要となるが、特に自然科学の分野においては、専門家でも様々な見解が存在し得る場合がある。

原子力基本法にある「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[7]、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について、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。そのためには、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うことが必要となる。いわば、「利用可能な最善の知識」[7)]をすべて活用するという真摯な姿勢が求められている。

そして、最新の知見を反映した想定を行ったとしても、特に自然現象は不確実さが大きく、想定を超えることが起こり得るものとして備えをしておかねばならない。このことは、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。科学的な想像力を持ち、理学と工学の知の統合により、あらゆる対応策を使って自然災害に備えるという発想が求められている。想定を超える領域に対処するためには、多面的に多くの想定を行うしかない[8),9)]。

想定を超える領域も含めた総合的な対処では、リスクを評価するための手法によって検討を行い、その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

---

[7]原子力基本法（抜粋）

（目的）

第 1 条　この法律は、原子力の研究、開発及び利用（以下「原子力利用」という。）を推進することによって、将来におけるエネルギー資源を確保し、学術の進歩と産業の振興とを図り、もつて人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与することを目的とする。

（基本方針）

第 2 条　原子力利用は、平和の目的に限り、安全の確保を旨として、民主的な運営の下に、自主的にこれを行うものとし、その成果を公開し、進んで国際協力に資するものとする。

2　前項の安全確保については、確立された国際的な基準を踏まえ、国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資することを目的として、行うものとする。

定量的に扱おうとすること等にある[10]。リスク評価は、特に想定を超える外力に無防備になるのを防ぐために意義がある[11]。

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[12]の有効性を確認することにもなる。これは、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の起因事象もその発生には不確実さがあり、さらに、それによる事象進展のシナリオについても不確実さがあるために、深層防護の概念の実装が求められているのである。深層防護の概念についてはⅠ.5.1 で記す。

すなわち、深層防護の概念の適用とリスク評価を活用し、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、「人と環境を防護する」という原子力安全の目的[8]を達成していかねばならない。

原子力施設という総合システムの安全確保は、幅広い分野の知の統合により成り立つものである。自然科学分野の知見を最大限活用し、原子力施設の安全確保を確実なものとするために、工学の果たす責任は極めて大きい。工学の責任は将来予測ではなく、想定を超える事象まで含めてプラントシステムのトータルのパフォーマンスを明確化し、原子力安全のため、更にどのような対処をすべきかを提示していくことである。

〇理学と工学との協調的な対話の重要性

福島第一事故を踏まえ、原子力安全のため、専門分野間の横断的な取組みによる理学と工学の知の統合の重要性と工学の果たす責任について指摘したが、特に、断層変位のように不確実性の大きい自然現象に関しては、理学と工学の「協調的な対話」の重要性が指摘できる[13]。

本調査専門委員会で対象としている断層変位について考えると、評価の対象となる断層露頭を前にして、地形・地質分野の専門家でも見解が分かれて、過去の断層活動の可能性が“否定できない”や“分からない”という見解が示される場合がある。しかし、ここで指摘したいのは、そのように専門家でも判断が難しく見解が分かれる場合には、そこで原子力安全のためのアプローチを停止するのではなく、断層変位が生じることを想定した評価を行うというステップに進んで、ハザード評価に知見を有する理学の専門家と、施設影響評価や原子力安全に知見を有する工学の専門家が、相互の情報を共有して、信頼関係の下での対話を行い、知見・技術が不十分であればそれを相互に補いながら、総合的な原子力安全のための作業を協働で実施していくことの重要性である。

単に理学と工学の連携ということではなく、“ハザード（断層変位）を理学側が決めたら、あとは工学の側で施設への影響を評価する”という評価の流れを、“不確実さが大きく、ハザードの大きさを厳密に決めることは難しいことを前提に、理学と工学の専門家が

協調的な対話を通じて、施設の安全性を総合的に評価する”という枠組みで原子力安全のためのアプローチを進めていくことが肝要である。そのことが、すでに述べた理学と工学の知の統合の実践となる。

専門家は、孤立することなく連携し、知見や技術情報を共有して、相互の考え方について意見交換をしていくことが重要である。原子力安全のため、公正に真摯に取り組むことは、いかなる立場も超えた変わらない姿勢のはずである[9)]。

〇断層変位に対する原子力安全のアプローチ

本調査専門委員会で対象とする断層変位も、地震動や津波等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、関連する各分野においてすでに蓄積されてきている。

断層変位が施設にもたらす影響を評価して、得られたリスク情報を基にして対応策等の意思決定に繋げ、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”）では、これは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。本質的に重要なことは、原子力安全が脅かされるかどうかであり[4),5),14),15)]、そのためには、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する努力を促すことができる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[8]。ハザードが生じる“可能性が否定できない”との判断で根本原因を排除してゼロリスクを目指すことは、その工学システムの社会に対する有益な機能も享受しないという選択となってしまう。しかし、リスクとは不確実さをもった可能性であり、その影響はポジティブな側面とネガティブな側面の双方をもつので、リスクのもつ双方の影響を考え合わせての対応判断が必要である[10)]。

---

[8] 日本原子力学会「原子力安全の基本的考え方について 第Ⅰ編 原子力安全の目的と基本原則」[8)]（抜粋）

原則７：人及び環境へのリスク抑制とその継続的取り組み

原子力施設と活動に起因するリスクを社会から受容される範囲に制限するとともに、リスク抑制の取り組みが継続的になされなければならない。

7.8　施設と活動のリスク抑制のための施策は、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。

〇本調査専門委員会の取組み姿勢

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、原子力安全について社会と対話し、共に考え取り組むことが重要であるということを、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[10)]。

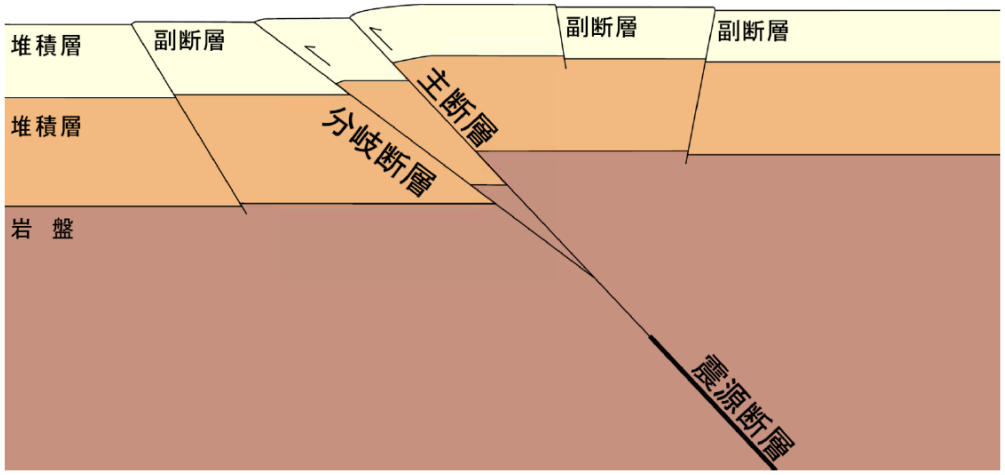
Ⅰ.4　断層変位について

Ⅰ.4.1　断層変位という自然現象の理解

本調査専門委員会では、施設の設置地盤に生じ得る断層変位を対象としている。

変位としては、震源断層の地表延長部として認識される主断層及び主断層から派生した分岐断層や、それらの周囲に副次的に生じた副断層が知られており、それ以外にも、重力性の地すべり等、地震とは関係のない成因によって生じる変位も知られている。

図Ⅰ.4.1（図Ⅰ.2.1 の再掲）に、震源断層の活動に伴って生じる断層変位について示す。



図Ⅰ.4.1　主な断層変位

断層変位が確認された自然露頭や調査のために掘削された露頭において、それが主断層による変位なのか副断層による変位なのかの認定が困難な場合もあるが、施設への影響評価の観点からは、その他の成因も含めて、確認された断層変位の成因の検討は重要である。

すなわち、変位は様々な成因によって生じるので、成因によって、変位の発生する位置、変位量、繰り返し発生したか否か、現象の進展速度（瞬時なのか緩慢か）等が異なる。原子力安全の観点から施設への影響を検討する際には、単に変位の有無に着目するのではなく、その成因の考察も重要な意味をもつ。

原子力安全の観点からの、主な断層変位等の施設評価へのアプローチについて、表Ⅰ.4.1 に整理した。

なお、本来、活断層等の活動に伴い、変位という現象と変形という現象が地盤の状況等に応じて合わせて生じるので、施設への影響を考える際に両者を区別する必然性はないと考

えられるが[9]、本報告書では、既設の原子力施設において課題となっている変位を中心に論じている。

表Ⅰ.4.1　主な断層変位等の施設評価へのアプローチ

種類	成因等	施設評価へのアプローチ
主断層、 分岐断層	地下深部の震源断層の延長が地表付近まで連続して形成されたと考えられる断層	発生頻度、1 回当たりの変位量等に基づき評価
副断層	主断層等の周囲で、局所的な応力変化等によって副次的に生じた地表付近の断層	同上
地すべり	斜面の一部が重力や地震動を誘因としてすべることにより形成された断層	事象を生じさせた要因が存在しているか否かを考慮した上での評価
火山活動に関連した断層	火山近傍で、マグマの隆起に伴う隆起・沈降等により形成された断層	火山噴出物等、他の火山活動に伴う施設への影響と合わせて評価
圧密、膨潤等	岩盤や堆積層の体積変化等により形成された断層	進展速度（瞬時か緩慢か）等を考慮した評価

以降、本報告書では、Ⅰ.2.1 で述べたとおり、特に断りのない限り、主として震源断層の活動に伴って生じる断層変位を対象として論じる。

断層変位という現象を理解した上で、その特徴を、変位の想定や施設への影響評価のプロセスの中に的確に考慮していくことが必要である。

震源断層の活動に伴って生じる断層変位の特徴として、表Ⅰ.4.2 のような点が挙げられる。

表Ⅰ.4.2　断層変位の主な特徴

頻度	低頻度。活動履歴の情報が少ない。
場所	震源断層の地表延長部やその周囲で、岩盤中の既存の弱面（断層）に沿って発達しやすい。
性状	局所的なせん断変形。ランダム性があり、複雑。
タイミング	主に地震時（我が国ではクリープ性の活断層の存在は知られていない）。

[9] 原子力規制委員会の現在の基準においては、以下のとおり、変位に対する要求と変形に対する要求を区別している。

「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」第 3 条（抜粋）

第 2 項 耐震重要施設は、変形した場合においてもその安全機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならない。

第 3 項 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。

断層の活動性や連続性を評価するため、自然に残された痕跡を対象に地形・地質の調査が行われるが、得られたデータに対する評価は専門家の間でも異なる場合があり、自然現象の解釈には幅があるという認識に立つ必要がある。

一方で、断層変位は、自然に残された痕跡から推定できる自然現象でもあり、過去に生じた断層変位のデータを蓄積する努力がなされている。これまでの知見、経験を踏まえて、どのようなことが起こり得るかはある程度説明することができ、既往知見を活用する姿勢が重要である。

Ⅰ.4.2　施設に対する影響評価の対象となり得る断層変位

過去の断層変位の痕跡が地盤中に残っている場合があり、その情報を知見として最大限活用して考えることが理に適っている。それに基づき、施設の設置位置で考慮が必要になる場合の変位ハザードについて整理する。

主断層は1回の変位量が大きく、過去に繰り返し動いた痕跡を地形・地質に残している。ただし、1回当たりの変位量が小さい場合は、地形・地質への痕跡が残り難い場合があり得る。

これまでの地形・地質分野の知見からは、我が国の主断層の1回当たりの変位量は、数十cm～10m 程度で、その活動間隔は、短いもので数百年、平均的には数千年、長いもので数万年である。

主断層の活動に伴ってその周囲に副次的に生じる副断層の変位量は、当該副断層の起因となった主断層の変位量を超えないと考えることが適当である[10]。

原子力施設を設置する際には、事前に詳細な地形・地質調査が実施され、特に重要施設の設置地盤における断層等の弱面の存在、活動性等が精度の高い情報によって把握される。

主断層のような1回当たり数十 cm 以上の変位は、数百年～数万年前の変位の痕跡を、詳細な地形・地質調査により施設設置前に把握することが十分にできると考えられる。

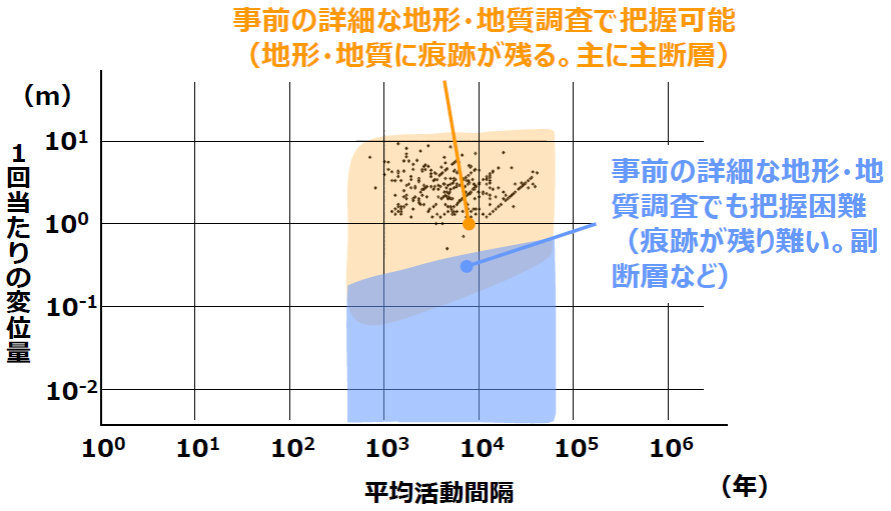
一方、1回当たり数十 cm 以下の変位は、過去の侵食等の影響により痕跡が消失し、詳細な調査によっても把握することが困難な場合があり得る。変位が最後に生じた時期（最新活動時期）が古いほど、その痕跡が把握し難くなる。

上述した断層ハザード（変位量、活動間隔）のイメージを図Ⅰ.4.2 に示す。

これらの知見等も踏まえた上で、個々の敷地条件に応じて慎重な評価を行うことが必要であるが、本調査専門委員会としては、重要施設の設置位置において評価が必要となる断層変位は、1回当たりの変位量が少なくとも数十 cm 以下[11]のものは想定する場合があり得るとして、施設の影響評価手法の検討に取り込んでいくことが合理的であると考える。後述す

[10] 主断層の変位量と副断層の変位量の関係等については、図Ⅱ.2.2-3 及び図Ⅱ.2.2-4 に示している。
[11] ここでの「数十 cm 以下」は、概ね 1m を下回る、やや幅広い範囲の意味合いで使用している。

る施設の影響評価における裕度評価手法の適用においても、このようなことを念頭に適用例を提示している。



図Ⅰ.4.2　評価対象となり得る断層変位ハザードのイメージ

断層変位による施設影響を評価する際には、地震動による影響も含めたそれぞれの動的な作用との重畳を考慮する必要があるが、断層変位による影響は施設に対して局所的な作用をもたらすことが考えられることから、本調査専門委員会では、まずは断層変位による影響に着目して評価手法をとりまとめることが非常に重要との立場に立脚して、本報告書をとりまとめている。

なお、地震動については、原子力施設に対する影響評価では、特に短周期成分（周期１秒より短い領域）の地震動が重要となるが、

・短周期成分を含んだ地震動は主に地下深部の震源断層面（特にアスペリティ領域）から発生すること
・地表付近のすべりに起因する地震動の短周期成分への寄与は小さいこと
・震源が極近傍にある場合の地震動評価に必要なパラメータ設定に関すること

等の知見[12]が得られてきている。

[12] 地表地震断層や地表付近のすべりと地震動との関連については、別添資料Ⅲ.8 に参考文献も含めて概要を示している。

Ⅰ.5　断層変位に対する原子力安全の基本的考え方

Ⅰ.5.1　原子力安全の考え方 [8),12)]

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ことである。

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。

これは、人と環境に影響を与えるまでの種々の現象には人知が及ばない振る舞いが存在し得ることから、事前に十分と思われた対策でも思いがけない理由で失敗するかも知れないという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用意することにより、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。

これら防護レベルの手段には、物理的な障壁のほか、例えば制御・管理や緊急時における対応手段（ハード対策、ソフト対策）も含まれる。

具体的な対応策においては、防護レベルを多層とすることを基本的な考え方として、想定する事象に対して複数の防護レベルで様々な手段を用意する。

特に自然現象のように不確実さが大きいものに対しては、事前の想定を逸脱したシナリオとなる場合もあり得るとして、不確実さに対する備えを多層とすることで、防護策全体の効果を高めることができる。

また、低頻度の事象や経験のない事象に関しては知識の不完全性による限界があることから、想定を超える領域の存在が否定できないとして、当該ハザードの特徴を踏まえた異なる質（工学的に違った切り口）の防護策を講じておくことが有効となる。

すなわち、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、その的確な適用（深層防護の実装）により、事象の早期の収束や機能の復旧等のレジリエンス [13]活動を可能とし、全体として質の高いロバスト [14]な対処が可能となる [15]。

---

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

[14] 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、強靭であること。

[15] 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の際に、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、沿岸部に設置されていた海水ポンプモータが津波で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。このとき、福島第一では、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。このようなハード対策とソフト対策（人的アクション）によって最終ヒートシンクを回復する行為こそがレジリエンス活動である。

深層防護の考え方は、原子力安全を確保するための普遍的な考え方であり、それを積極的に講じることが重要な戦略となっている。

この深層防護の考え方を的確に適用し、効果的にリスクの低減を図るためには、リスク評価を実施することが有効である。

潜在的なリスクを管理するためには、リスクの三重項（リスクトリプレット）に答えることが必要であることが提唱されている[例えば 8),16)]。

リスクトリプレット：

①どのような望ましくないことが起こるか？What can go wrong?（事故シーケンス）

②その発生可能性は如何ほどか？How likely is it?（頻度）

③その影響はどのくらいか？What its consequences might be?（影響）

これは、言い換えれば、原子力施設の事故によるリスクは事故シーケンスによって大きく変わるので、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いうことである[10)]。この評価のためにはリスク評価の特徴を活かした取組みが最も有効なのである。

福島第一事故を踏まえると、リスク評価の重要性が一層高まっている[10),17)]。

リスク評価によって、リスクの程度や弱点の把握ができ、また、多くのシナリオを取り込むことで想定を超える領域を小さくすることができる。さらに、原子力施設の敷地外における対策（原子力防災）まで含めたリスク評価を活用した取組みの必要性[16]も提起されている。

すなわち、「どのような望ましくないことが起こるか」というシナリオを幅広く考慮することが重要で、事象の進展についての検討を行うアプローチが必須の取組みとなる。その取組みこそが原子力安全において価値を生み出す。

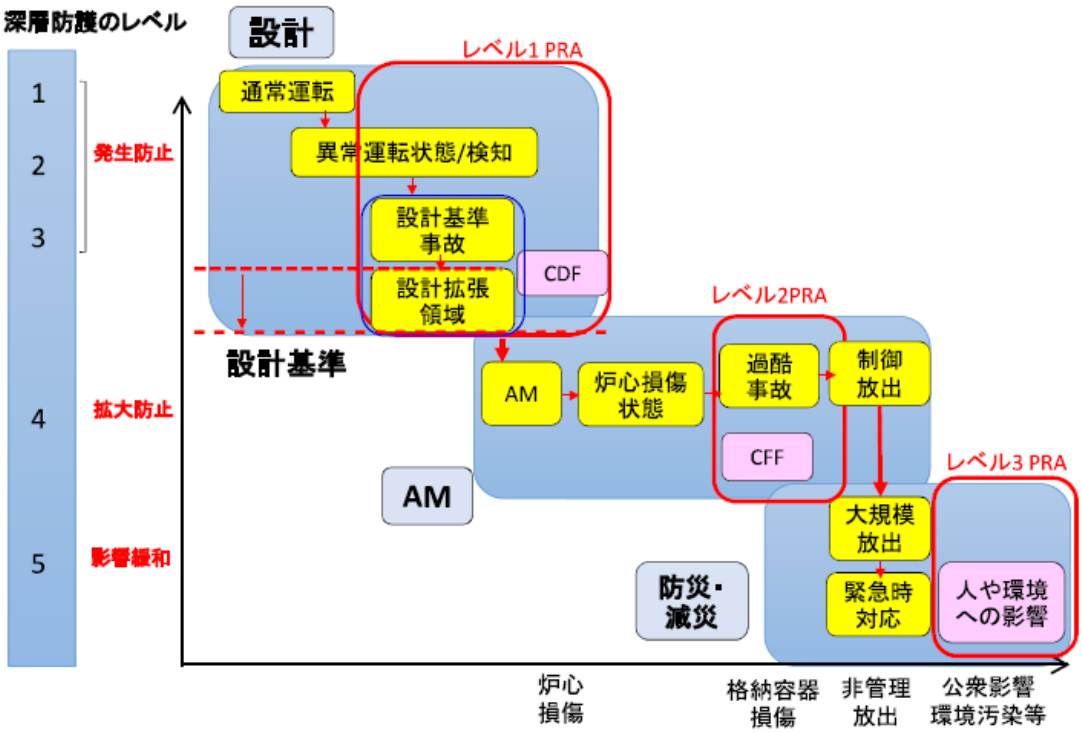
自然現象の一つである断層変位に対してもこの考え方を適用して原子力安全を考えること、すなわちリスクを評価するアプローチが必要であり、そのことにより、原子力安全の取組みが全体として首尾一貫した対応となる。

原子力安全の考え方からは、リスクへの寄与が小さいことが明らかでない限り放置してはならず、リスクの定量化の努力を行い、定量化が不完全にしかできない場合であっても、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。

原子力安全に関する深層防護と事態の進展シナリオの概念を、図Ⅰ.5.1 に示す。

---

[16] 原子力施設の事故によるリスクは、施設周辺の地域社会に広域にもたらされるおそれがある。したがって、事故の進展を原子力施設の側からだけの視点だけにとどめるのではなく、地域社会からの視点でのリスクとは何か、それがどの程度のものなのかなども含めて、施設側からのレベル３確率論的リスク評価（レベル３PRA）の情報とも接合しながら、防災まで（深層防護の第５レベル）を含めてリスク評価を行い、それを基盤とすることにより社会との対話も可能となる。リスク評価を介して、敷地内の各防護レベルと敷地外の対策の分担と効果を確認することが、トータルとしての対応策の実効性向上において重要である[18)]。



図Ⅰ.5.1　原子力安全に関する深層防護と事態の進展シナリオ [10)]

Ⅰ.5.2　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が支持される設置地盤に断層変位を想定する必要がないことを確認し、特に原子炉建屋に関しては設置地盤の調査と検査（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、断層変位の施設に対する影響評価の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には破砕帯等の弱面が存在しているので、地震動の影響に対する地盤の安定性評価等の検討はこれまでもなされている。

福島第一事故の教訓を踏まえると、想定を超える領域もあり得るとして検討を行い、リスクをできる限り低減することが求められる。

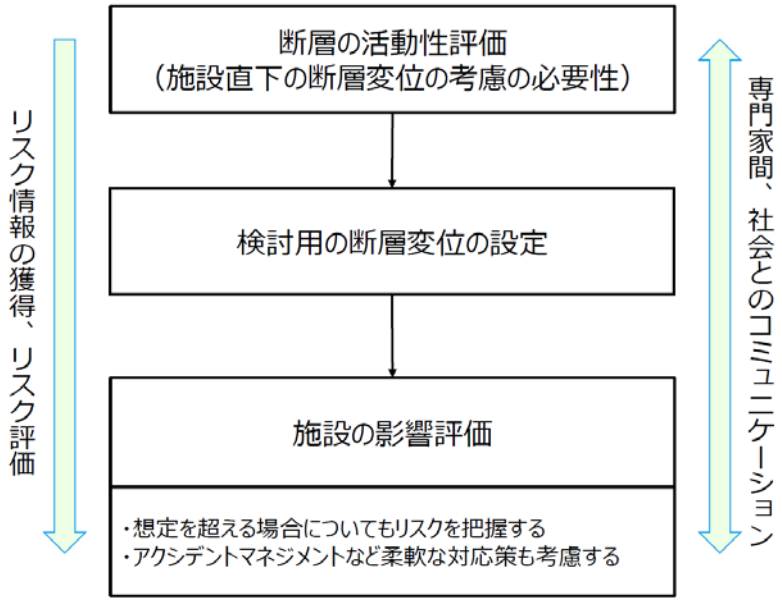
断層変位については、上述のとおり、施設設置時点の確認により施設への影響評価の検討に含めていなかったが、検討から排除せずにリスク評価を行うことが、隙間のない一貫した原子力安全の対応となる。

既設の原子力施設においては、常に最新知見を反映していく取組みにおいて、新たな情報等[17]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。その際には、あらためて地

[17] 「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・高度化等が考えられる。

形・地質調査等から得られる情報に基づき、まずは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、発生頻度等）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。これら評価においては、それぞれの段階で不確実さが適切に考慮されねばならない。その上で、事象の不確実さが大きいことから、想定を超える場合も考慮してリスク評価を行うことが必要である。

既設の原子力施設に対する基本的な評価手順を図Ⅰ.5.2 に示す。



図Ⅰ.5.2　既設の原子力施設に対する基本的な評価手順

ここで、断層変位により発生する事象に対しても、深層防護の概念を適用して対処することが基本であり、有効である。特に、知識やデータが限られている断層変位のような低頻度事象に対して、深層防護は一層重要な戦略となる。

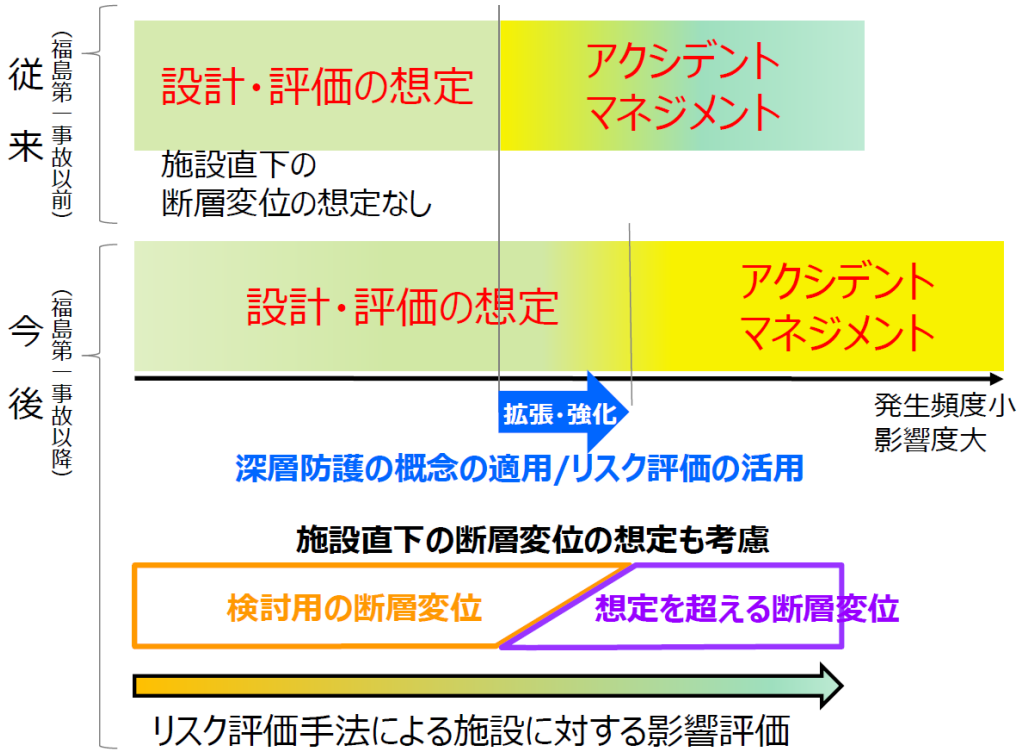
既設の原子力施設においては、福島第一事故の経験を踏まえ、深層防護の考え方を適用しながら、施設設置当初の設計・評価の範囲の拡張・強化や追加の影響緩和策（アクシデントマネジメント）等、様々な対応策が講じられている。

これらは断層変位を想定して講じられてきているものではないが、福島第一事故以前より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。

具体的には、例えばすでに地震動等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、想定する断層変位に対しても SSCs の要求性能が維持されるかを評価する。変位量の程度によっては、施設の有する安全機能に支障を与えない場合が考えられる。また、必要に応じて、福島第一事故後に拡張・強化された対策（アクシデントマネジメントも含む）

の有効性についても検討を行う。さらに、想定を超える断層変位に対してもリスク評価を行う。

断層変位に対する原子力安全の考え方を図Ⅰ.5.3 に示す。これは、断層変位以外の自然現象に対する考え方と同様である。



図Ⅰ.5.3　断層変位に対する原子力安全の考え方 [18]

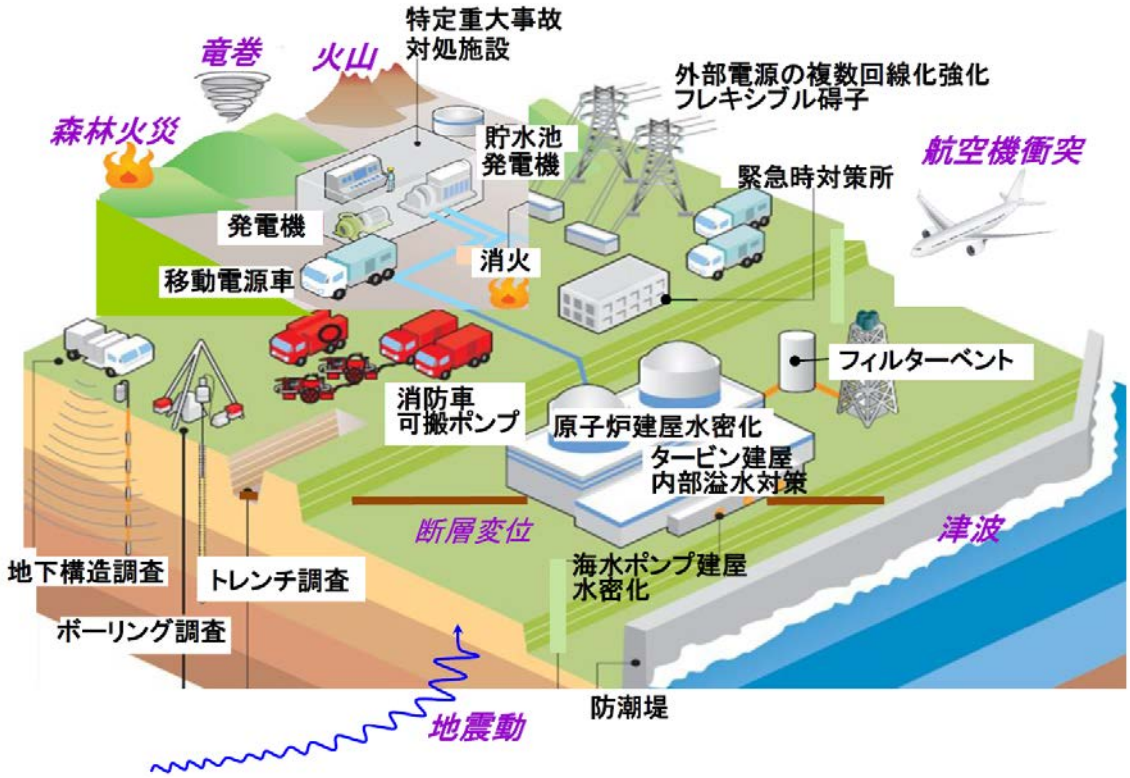
ここで、断層変位に対する評価・検討においては、断層変位の性状を踏まえた考慮が重要となる。

例えば、想定する断層変位の位置は、調査により施設直下の設置地盤の断層位置（弱面の位置）に設定することができる。このことは、断層変位により施設に発生するせん断力、曲げ等の作用の影響範囲が施設内において空間的に限定されるので、これを事故シナリオの中に考慮することができる。つまり、SSCs の分散配置等により、共通要因故障の回避が可能となる。

さらに、より一層の信頼性向上のために航空機衝突やテロ等への対処がされており、想定を超える断層変位の評価においては、このような大規模損壊に対する対応策も有効である。

様々な事象に対する、想定を超える領域への対応も含めた対応策の概要を図Ⅰ.5.4 に示す。

[18] 図Ⅰ.5.3 において「検討用の断層変位」と「想定を超える断層変位」の境界を斜線で表現しているのは、個別の原子力施設の評価の際には、「検討用の断層変位」の施設に対する影響の程度が、従来の設計・評価の想定の範囲内の場合や拡張・強化された設計・評価の範囲内の場合等、施設の状況によって異なることが考えられるため、そのことを包括な概念として表現しようとしていることによる。

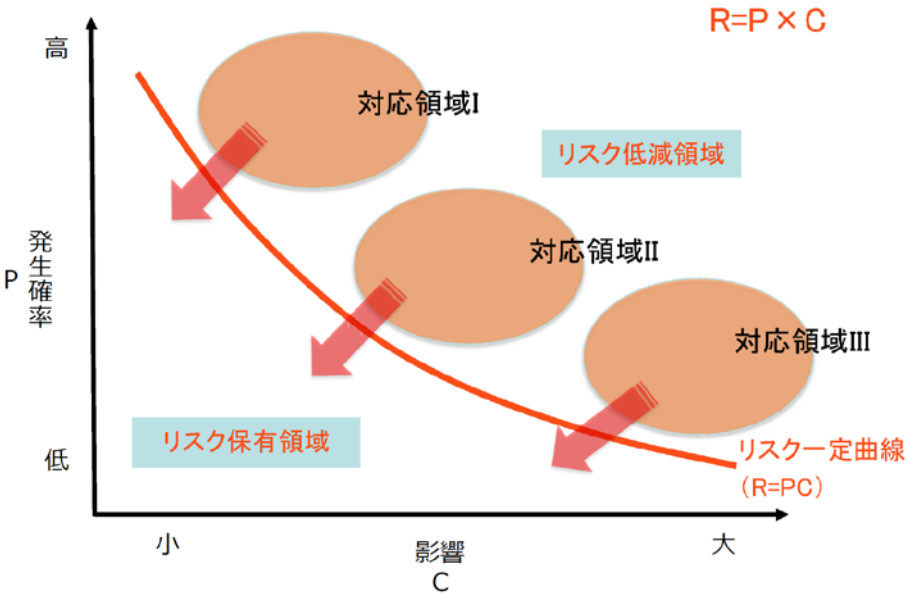


図Ⅰ.5.4　想定を超える領域も含めた対応策の概要

以上のように、断層変位に対しても深層防護の概念の適用とリスク評価の活用をするということは、多段階のリスクマネジメントの概念を適用していくことと言い換えることもできる。多段階のリスクマネジメントの概念とは、高頻度で影響が小さい事象に対する対象領域から、低頻度ではあるが影響が大きい対象領域まで、それぞれの領域に応じた考え方を適用して対応していくということで [19)]、ここで論じている原子力安全においては、例えばそれぞれの領域を工学的に質の異なる対応策で考えていくことが重要ということである。

図Ⅰ.5.5 に、多段階リスクマネジメントの概念を示す。

深層防護の概念の適用とリスク評価の活用に関してこれまで示してきた図Ⅰ.5.1、図Ⅰ.5.3 及び図Ⅰ.5.5 は、同様の考え方に基づいているものである。



図Ⅰ.5.5　多段階リスクマネジメントの概念

Ⅰ.6　断層変位に対する評価

Ⅰ.6.1　全体評価手順

図Ⅰ.5.2 で示した基本的な評価手順を具体化したものとして、本調査専門委員会は、図Ⅰ.6.1 に示す断層変位に対する全体評価手順を策定した。この全体評価手順が本調査専門委員会でいう「リスク評価」の全体像を示すものである。

全体評価手順は、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[19]になっているということを理解する必要がある[17,20]。いずれの手法によってもリスク情報を得ていくことができるが、評価対象となる原子力施設の個々の状況や、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、Ⅰ.6.2 及びⅠ.6.3 に記す。

---

[19] 設計行為は決定論的に実施することが基本となるが、設計に用いる設計応答値や設計許容値は、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。下図に示すように、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、設計では、設計応答値と設計許容値との離隔を余裕とし、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。

断層変位に対する設計体系は明確に確立されていないが、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の枠組みの確立が重要となる。

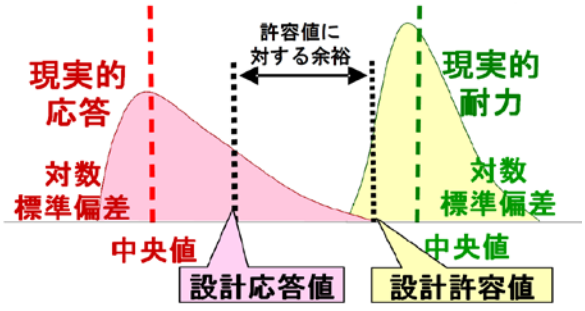
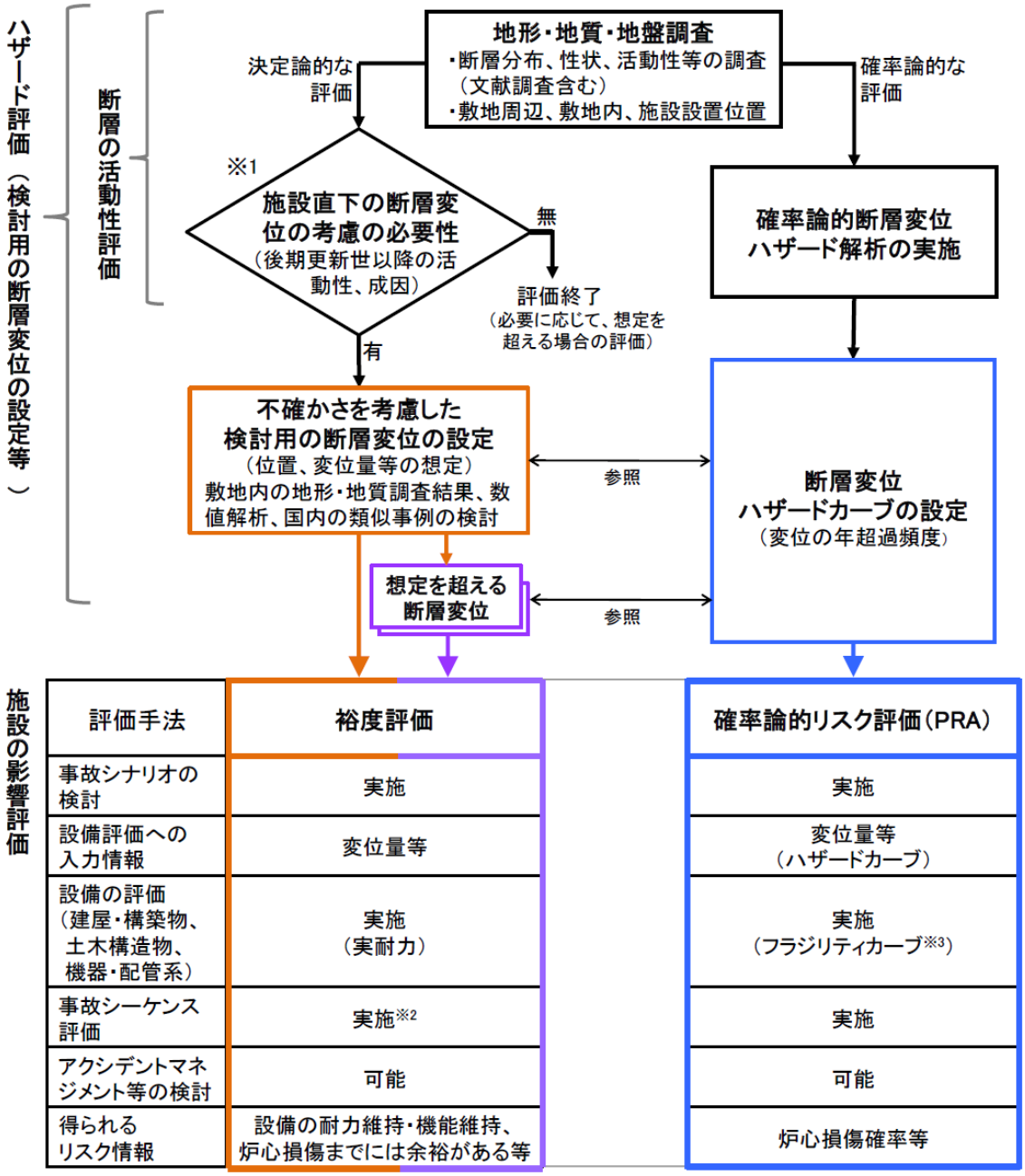


図　フラジリティ評価手法の決定論的評価への活用の概念[20]



※1：施設の設置に先立つ詳細な地形・地質・地盤調査により、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。
※2：事故シーケンスを活用した評価をしないで、設備の評価だけでリスク情報を得ていく場合もある【影響度分析】。
※3：フラジリティカーブを使わずに、適切な条件を付した設備の状態を事故シーケンス評価に反映し、簡易な評価としてリスク情報を得ていく方法もある【簡易なPRA】。

図Ⅰ.6.1　断層変位に対する全体評価手順

Ⅰ.6.2　断層変位のハザード評価

施設影響評価の入力となる断層変位のハザード評価手法の概要を示す。詳細はⅡ.3 にとりまとめている。

(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砕部（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[20]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。

施設直下での断層変位の考慮が必要になる場合、当該断層変位の変位・変形の痕跡が示唆される上載地層の堆積年代は、当該断層変位の出現頻度に関わる情報として、後段の評価や意思決定において重要な価値を有するものである[21]。

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。

(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。

---

[20] 「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」を決定論的な評価のための判断に用いる理由は、Ⅰ.4.2 で述べたように、我が国の主断層の活動間隔が長いものでも数万年であるという地形・地質の知見に基づき、施設に対する影響評価において排除すべきではないハザードであると考えることによる。なお、断層の活動性評価や検討用の断層変位の設定に際しては、Ⅰ.3 で述べたような「利用可能な最善の知識」をすべて活用する姿勢に基づき、関連する専門的知見を集約し、多面的な検討を行うことが重要である。以上の考えに立脚した上で、Ⅱ.3 にある「後期更新世以降の活動を否定できない断層」との表現は、ここでの「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」と同義として用いている。

[21] リスク論からは、当該断層変位が数千年間隔で累積性のあるものか、あるいは数万年間に 1 回の痕跡が示唆されるものか、あるいは 10 万年間程度でも痕跡が不明瞭なものかでは、それぞれでハザードとしての意味合いが異なってくる。

(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。

(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。

Ⅰ.6.3　施設の影響評価

断層変位による施設への影響評価手法の詳細は、それぞれの専門分野の知見を集約して、Ⅱ.4 に建物・構築物、Ⅱ.5 に土木構造物、Ⅱ.6 に機器・配管系についてとりまとめている。

また、原子力施設のプラントシステムのトータルなリスクを考える上で重要となる事故シナリオや関連するリスク評価手法、評価手法の適用例等については、Ⅱ.7 にとりまとめている。

ここでは、施設の影響評価手法の概要と、プラントシステムのトータルなリスク評価となる裕度評価手法の適用例の一部を示す。

(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「リスク評価の理解のために」と題した技術レポート[10)]が発刊されており、「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。）[21)]が制定されており、この実施基準では、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[22]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[23]を挙げている。

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手法を参考に、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[24]を全体評価手順の中に位置づけることとした。

---

[22] 本報告書では、外部ハザード選定標準にある「決定論的な炉心損傷頻度（CDF）評価」を「簡易な PRA」、「PRA 等の詳細なリスク評価」を「PRA」と呼称している。

[23] それぞれの定量的リスク評価方法に対して、本報告書を通じて、①-1 ハザード発生頻度分析、①-2 影響度分析、②裕度評価、③簡易な PRA、④PRA のように便宜的な番号を付して使用する場合がある。

[24] ハザード評価まで含めて PRA と呼称することが正しいが、ここでは裕度評価との識別のため、便宜的に施設影響評価に対して PRA との呼称を用いている。

(2) 評価方法の適用性

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。

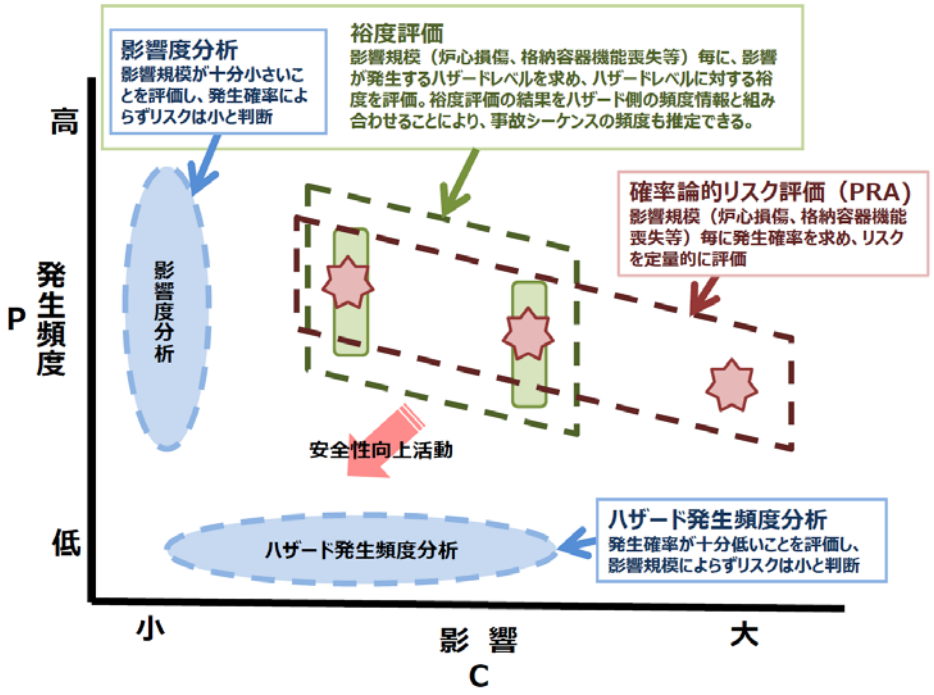
＜裕度評価＞

・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、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。
・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。
・図Ⅰ.6.1 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。

＜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フラジリティ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Ⅰ.6.1 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」[22)]にとりまとめられている。

それぞれの影響評価手法により評価されるリスクのイメージを図Ⅰ.6.2 に示す。



図Ⅰ.6.2　施設に対する影響評価手法により評価されるリスクのイメージ

(3)　評価方法の適用例

上記手法のうち、裕度評価の適用例についてⅡ.7.2.3 には複数ケースを示しているが、ここでは、原子炉建屋等の直下に断層変位を想定した場合の適用例を一例として示す。

なお、適用例では任意の断層変位量に対する施設の影響を評価しているが、ここではその結果を、可能性の程度に応じて○、△、×の 3 段階で表記している。

①評価手順

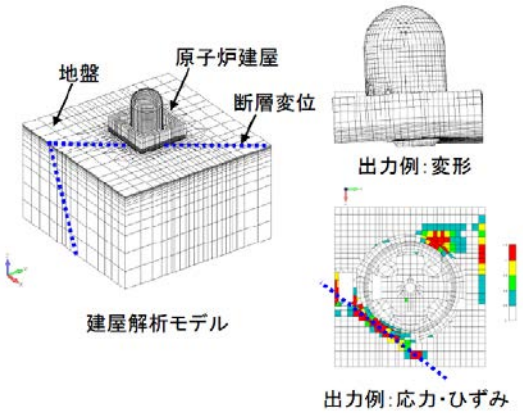
原子炉建屋等の直下に断層変位を想定した場合の裕度評価のフローを表Ⅰ.6.1 に示す。

表Ⅰ.6.1　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 断層　変位 タービン建屋	有意な損傷無し（○）	床の傾斜	機器の機能損傷	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
		建屋間の相対変位	渡り配管等の構造損傷	
	基礎・壁・床の局部損傷（△，×）	支持機能の低下	機器定着部の構造損傷	
		床の傾斜	機器の機能損傷	
		床の変形	機器の構造損傷	
		建屋間の相対変位	渡り配管等の構造損傷	

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の下面に入力し、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Ⅰ.6.3）。

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



図Ⅰ.6.3　建屋解析モデル、出力例

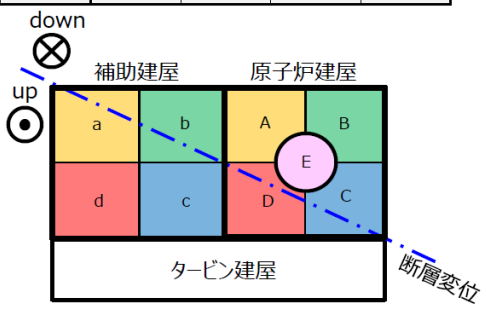
建屋側の簡略評価例を表Ⅰ.6.2 に示す。ここでは、断層変位の影響を受ける二つの建屋内を 9 区画（各建屋を 4 区分とし、更に原子炉格納容器内を 1 区分とした）に分け、断層変位を 10cm、20cm、30cm、50cm としたときの、各建屋への影響を区画単位で評価している。

表Ⅰ.6.2　建屋の評価（適用例）

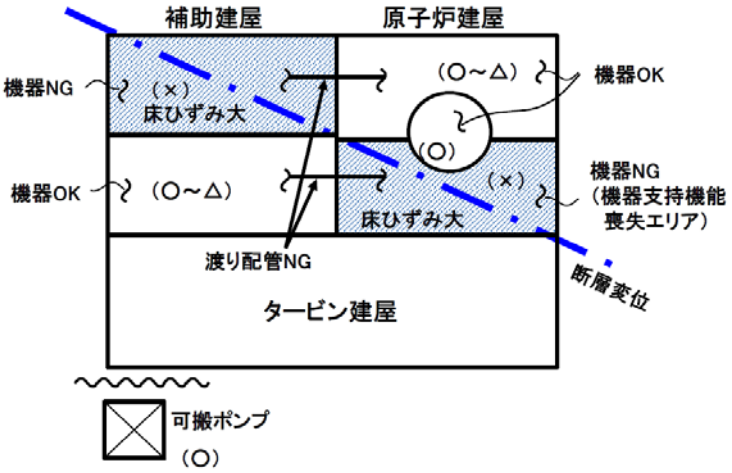
断層変位※1（縦ずれ）	評価エリア	原子炉建屋※2					補助建屋※2			
		A	B	C	D	E	a	b	c	d
10cm	地下1階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
	地下2階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
20cm	地下1階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
	地下2階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
30cm	地下1階	○	△	×	×	○	×	×	○	○
	地下2階	○	△	×	×	○	×	×	○	○
50cm	地下1階	△	△	×	×	△	×	×	△	△
	地下2階	△	△	×	×	△	×	×	△	△

※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、機器の支持機能維持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機能の維持が困難な状態



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、建屋間の相対変位に基づき、構造損傷及び機能維持評価を行う。



図Ⅰ.6.4　エリア毎の機器・配管系への影響例

機器・配管系の評価は、原則として日本電気協会「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次元非線形弾塑性 FEM 解析等を実施し、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Ⅰ.6.4 及び表Ⅰ.6.3 に示す。ここでは、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」という原子力発電所の基本的な安全機能のうち、原子炉の停止（「止める」）に成功した後の、「冷やす」機能に対応するポンプを、アクシデントマネジメントに用いる機器を含めて示している。

表Ⅰ.6.3　機器・配管系の評価（適用例）

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
RHR1A/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

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。

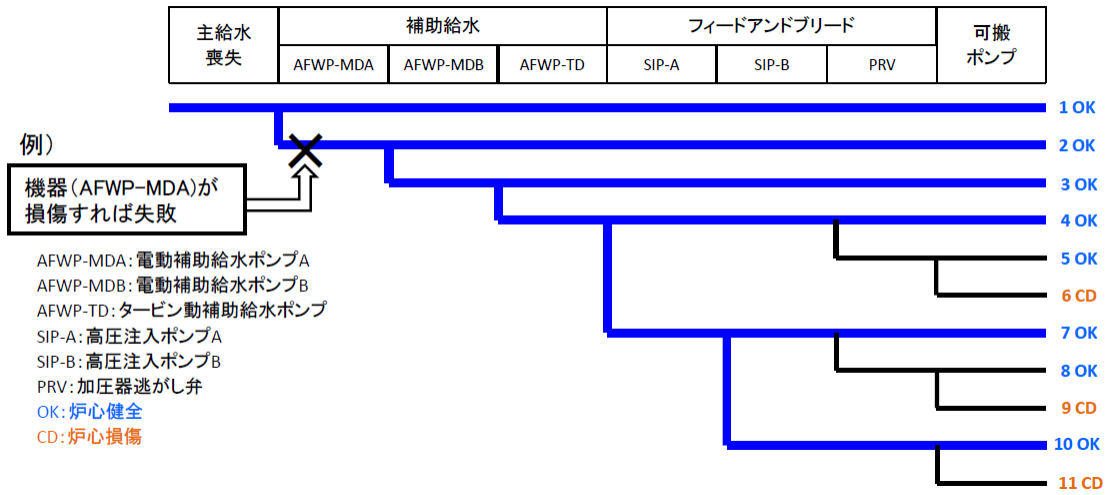
評価に当たっては、地震動に対する PRA 等の既存のモデルを利用して、断層変位の影響を考慮できる事故シーケンス評価モデルを構築し、想定した断層変位量に対する機器の損傷状態をインプットとして事故シーケンス評価モデルに基づくシステム評価を実施する。

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も評価）。

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Ⅰ.6.5 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。
・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。



図Ⅰ.6.5　断層変位に対するイベントツリー（適用例）

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Ⅰ.6.4 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では、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Ⅰ.6.4　断層変位に対する裕度評価（適用例）

<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td colspan="8">断層変位※1（縦ずれ）</td></tr>
<tr><td colspan="2">10cm</td><td colspan="2">20cm</td><td colspan="2">30cm</td><td colspan="2">50cm</td></tr>
<tr><td>躯体損傷有
機器損傷無</td><td>炉心損傷無</td><td>躯体損傷有
機器損傷無</td><td>炉心損傷無</td><td>躯体損傷有
機器損傷有</td><td>炉心損傷の可能性有</td><td>躯体損傷有
機器損傷有</td><td>炉心損傷の可能性有</td></tr>
<tr><td>代替手段なし</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>代替手段あり※2</td><td colspan="2">同上</td><td colspan="2">同上</td><td>同上</td><td>炉心損傷無</td><td>同上</td><td>同上</td></tr>
<tr><td>追加の対応策
（可搬設備の更なる多様化等）</td><td colspan="2">同上</td><td colspan="2">同上</td><td colspan="2">同上</td><td>同上</td><td>炉心損傷無</td></tr>
</table>

※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。

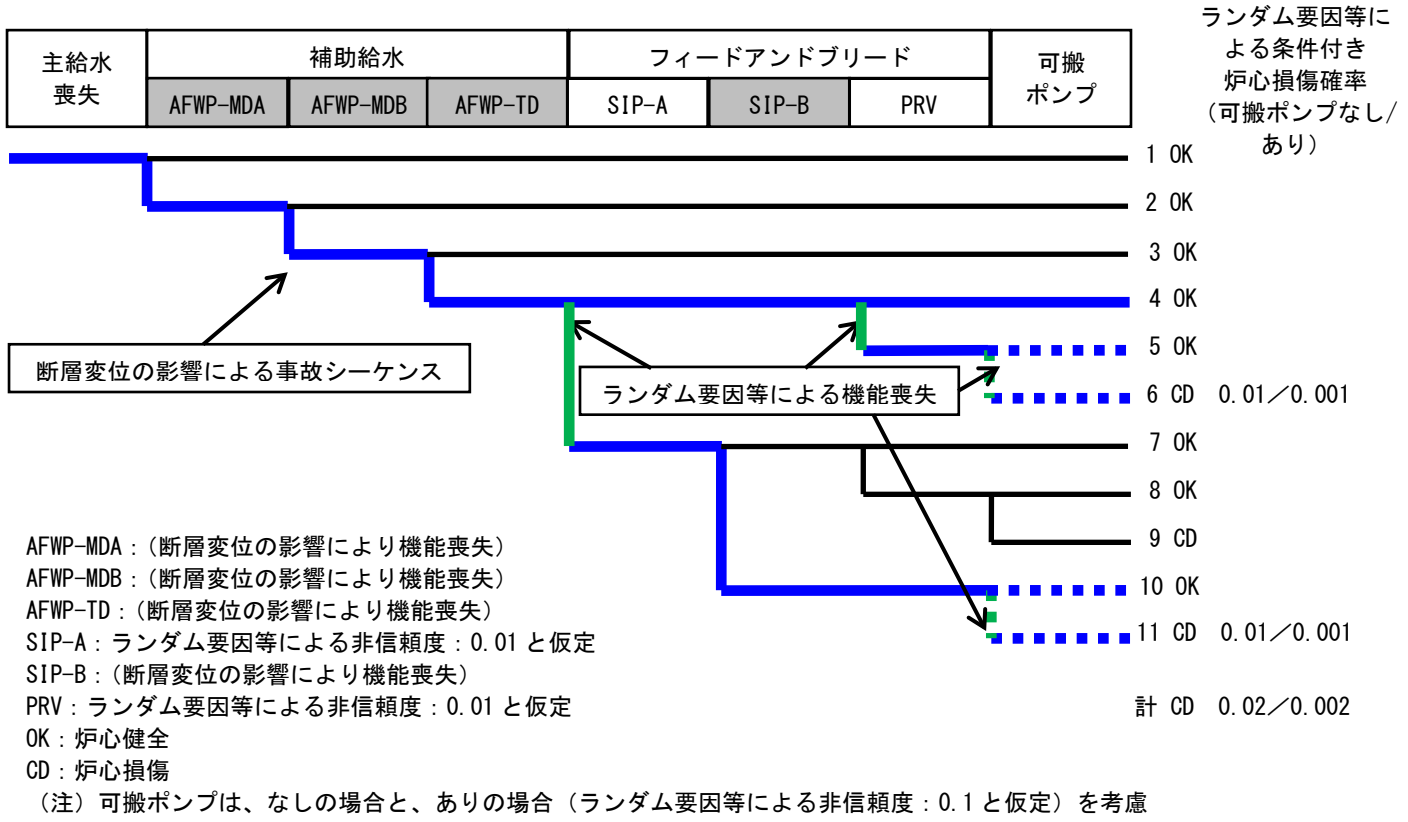
＜参考＞

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 SSCs が、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も有効と考えられる。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。

例えば、表Ⅰ.6.3 に基づき、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：図中網掛けの機器）、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Ⅰ.6.6 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、といった評価も可能である。

50cm の断層変位が生じる頻度が 10^{-4}～10^{-5}/年だと仮定すると、ハザード側も含めた条件付き炉心損傷頻度は、可搬ポンプがない場合は 10^{-6}～10^{-7}/年オーダー、可搬ポンプがある場合は 10^{-7}～10^{-8}/年オーダーという評価ができる。



図Ⅰ.6.6　条件付き炉心損傷確率の評価例

Ⅰ.7 まとめ

福島第一事故を踏まえれば、原子力施設の安全性向上・リスクの低減のために、理学と工学の知の統合と協調的な対話による取組みにより、専門分野を横断した知見の結集した取組みの深化が求められている。

本調査専門委員会は、それを実践する学術的な活動として、断層変位という自然現象を対象に、断層変位に対する原子力安全の考え方をとりまとめるとともに、ハザードの評価、施設への影響を評価する手法等について、現段階での知見、技術情報等に基づき、体系的な技術レポートとしてとりまとめた。

断層変位という自然現象についても、他の自然現象と同様に外部ハザードの一つと捉えて、自然に残された痕跡を詳細な地形・地質調査をすること等によってハザードの程度を把握し、想定を超える領域への対処も含めて、深層防護の概念の適用とリスク評価の活用により、多様なシナリオを考慮したリスク評価を行うことが原子力安全として価値のあるアプローチである。

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等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。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。

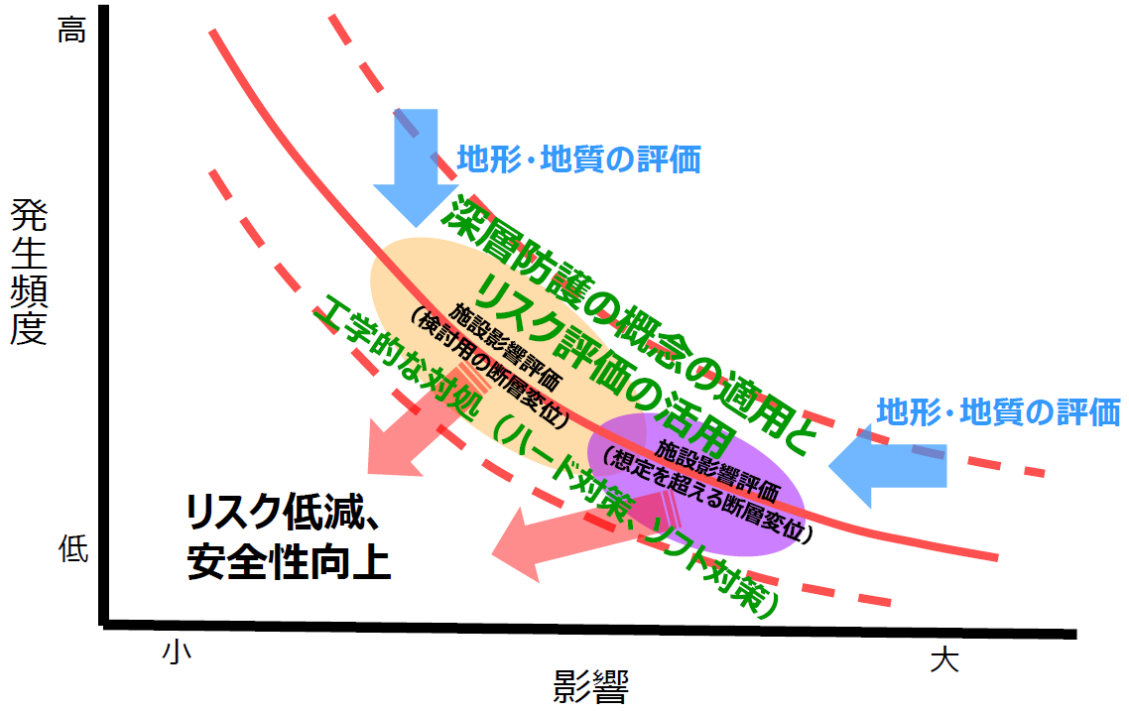
以上のような、本報告書でとりまとめた詳細な地形・地質の評価も含むハザード評価から施設への影響評価までの断層変位に対する原子力安全のアプローチの全体概念を図Ⅰ.7.1に示す。

本報告書では、国内の既設原子力施設を念頭に検討を行ったが、ここで示した考え方は、新設の施設や海外の施設に対しても適用できるものである。

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の今後の課題については、評価手法を詳述したⅡ.3～Ⅱ.7のそれぞれの章にとりまとめているが、主な課題を表Ⅰ.7.1に示す。国（政府、研究機関等)、学協会、大学、産業界（事業者、メーカ、ゼネコン、研究機関等）等においては、原子力安全の向上に向けた弛まぬ取組みとして、これらの課題に引き続き取り組んでいくことが必要であり、大いに期待されるところである。

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、原子力発電所等の現場でのアクシデントマネジメントの改善や教育訓練、様々な事象の想定や机上訓練に反映し、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、それを促進するための取組みが、国、学協会、産業界等において、引き続き求められている。



図Ⅰ.7.1　断層変位に対する原子力安全のアプローチの全体概念

表Ⅰ.7.1　今後の主な課題

項目	課題
断層変位ハザードの評価	・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 ・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 ・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
施設に対する影響評価	・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 ・施設の機能や目標性能に応じた断層変位に対する許容限界等の設定に係る実験による検証も含めた更なるデータの蓄積、必要な基準類の整備 ・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 ・フラジリティ評価手法を活用した断層変位設計の枠組みの確立 ・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 ・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 ・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 ・断層変位と地震動の重畳を合理的に精度よく評価するための手法の構築 ・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

Ⅰ.8 参考文献

1) 土木学会原子力土木委員会：断層変位評価小委員会 研究報告書, 2015 年 7 月.
2) 政府東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会：中間報告（本文編）, 2011 年 12 月.
3) 日本原子力学会東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会 : 福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言～学会事故調 最終報告書～, 丸善出版, 2014 年 3 月.
4) 奥村晃史：重要原子力施設直下・近傍の活断層, 日本原子力学会誌, Vol.55, No.6, pp.314-315, 2013 年.
5) 山崎晴雄：活断層評価の現状と課題, Bulletin of JAEE, No.24, pp.2-7, 2015 年.
6) 渡辺満久：原子力規制委員会の活断層評価 張り子の虎ではないのか？, 日本原子力学会誌, Vol.55, No.10, pp.577-581, 2013 年.
7) 澤昭裕：続・原子力安全規制の最適化に向けて～原子力安全への信頼回復の道とは～, ２１世紀政策研究所, 2015 年 4 月.
8) 日本原子力学会 : 原子力安全の基本的考え方について 第Ⅰ編 原子力安全の目的と基本原則 標準委員会 技術レポート, 2013 年 6 月.
9) 原子力発電所過酷事故防止検討会編集委員会 : 原子力発電所が二度と過酷事故を起こさないために～国､原子力界は何をなすべきか～, 科学技術国際交流センター, 2016 年 1 月.
10) 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.
11) 亀田弘行：原子力発電所の安全に対する地震工学の課題, Bulletin of JAEE, No.15, pp.97-102, 2011 年.
12) 日本原子力学会 : 原子力安全の基本的考え方について 第Ⅰ編 別冊 深層防護の考え方 標準委員会 技術レポート, 2014 年 5 月.
13) 谷和夫 : リスク管理に‘協調的な対話’の勧め, 日本原子力学会誌, Vol.58, No.7, pp.400-401, 2016 年.
14) 岡本孝司：安全規制の最適化とは, 日本原子力学会誌, Vol.55, No.4, pp.202-203, 2013 年.
15) 二ノ方寿：ミラノからみた福島原発事故その後 専門家の関わりと原子力安全規制, 日本原子力学会誌, Vol.56, No.3, pp.174-175, 2014 年.
16) 糸井達哉 : 原子力のリスクを考える(4) 安全性・説明性向上のツールとしての確率論的地震リスク評価, 保全学, Vol.14, No.2, pp.2-7, 2015 年.
17) 亀田弘行, 高田毅士, 蛯沢勝三, 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.
18) 宮野廣, 村松健：原子力発電所が二度と過酷事故を起こさないために～防災までを共に考える原子力安全～, 日本原子力学会誌, Vol.58, No.6, pp.356-361, 2016 年.
19) 高田毅士：想定すべき外力とは？, 建築雑誌, Vol.131, No.1681, pp.18-19, 2016 年.

20) 蛯沢勝三, 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.
21) 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.
22) 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.

（空き頁）