

第Ⅱ編 各論

(空き頁)

Ⅱ.1 用語の定義

本報告書で使用する主な用語の定義について、表Ⅱ.1-1 に示す。

なお、用語の定義については、本報告書で使用されている用語のうち、次の事項に該当する用語について抽出した。

- ・本調査専門委員会が扱った検討範囲を明確にする用語
- ・学術分野間で共通認識を持つために定義が必要な用語
- ・一般の方の理解を深めるための用語

また、本用語の定義は、日本原子力学会標準のほか、別添資料Ⅲ.1 に示す地形・地質関連の用語の定義に係る参考資料、日本地震工学会「原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会報告書」等を参考にした。

表Ⅱ.1-1 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
地すべり	斜面物質が重力により滑動する現象
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
一次応力	外力、内力及びモーメントに対して平衡の法則を満足する直接応力又はせん断応力
二次応力	隣接部分の拘束、自己拘束により生じる直接応力又はせん断応力
動的機能	安全上要求される機能を果たすため可動部が動くことを要求される機器に対する機能

用語	定義
間接支持構造物	直接支持構造物から伝達される荷重を受ける鉄筋コンクリート及び鉄骨等の支持構造物
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。
安全確保活動	原子力施設の立地、建設、運転及び廃止の各段階において、異常の発生防止、異常の拡大防止及び影響の低減の措置を的確に実施するなど、原子力発電所の安全に寄与する活動
イベントツリー	構築物、系統及び機器の損傷、並びに故障及び事故等の起因事象を出発点に、事象がどのように進展して最終状態に至るかを、関連する緩和設備の作動の成否等を分岐として樹形状に展開した図式
内的事象	原子力施設の機器のランダム故障又は人的過誤等の内部の原因によって引き起こされる起因事象 注) 外部電源の喪失はその原因が原子力施設外部にある場合も含めて内的事象として扱われる。また、原子力施設の内部における火災又は溢水によって発生する起因事象は外的事象に分類している。
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
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

用語	定義
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、土木構築物、機器・配管系、運転員又はそれらによって構成されるもの
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。
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かさの組合せ
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
現実的応答	断層変位、物性値等の不確か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。
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。

用語	定義
機能損傷	断層変位が作用することによって、ポンプ類等の動作に関する機能（機械的動的機能）又は電気盤類等の電氣的なシステムの機能（電氣的動的機能）等が所定の機能を果たすことができない状態
構造損傷	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・配管系の構成部材・部品が大変形・破断等を生じ、構造体としての支持機能に関する機能の喪失した状態
損傷モード	その部位での損傷を起こす様態
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
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
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
偶然的な不確実さ	材料特性等に見られるように対象物が本来持っているばらつく特性による不確実さ
認識論的な不確実さ	知識及び認識の不足に係る不確実さ
脆弱性	与えられた作用レベルに対して、建屋・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条件付損傷確率を連ねたものを脆弱性曲線という。

<参考>

本報告書では使用していないが、断層変位に係る規制等で用いられている用語類について、参考として記載する。

参考1 将来活動する可能性のある断層等について

「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」（平成25年6月19日）において『耐震重要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。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。』とされ、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。』とされている。

「震源として考慮する活断層」が本報告書で定義する震源断層の地表延長部の断層である主断層及び主断層から分岐した断層である分岐断層に、「地震活動に伴って永久変位が生じる断層」が副断層に相当すると考えられる。

参考2 震源として考慮する活断層、耐震設計上考慮する活断層について

現行の規制基準では「耐震設計上考慮する活断層」の表現は用いられていないが、旧原子力安全委員会「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（平成18年9月19日）（以下「耐震設計審査指針」という。）において、『耐震設計上考慮する活断層としては、後期更新世以降の活動が否定できないものとする。なお、その認定に際しては最終間氷期の地層又は地形面に断層による変位・変形が認められるか否かによることできる。』とされており、基準地震動 S_s を策定する際に「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の検討に用いられる。

前述の「将来活動する可能性のある断層等」のうちの「震源として考慮する活断層」が規則の解釈において「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の検討事項に挙げられていることから、耐震設計審査指針の「耐震設計上考慮する活断層」に相当すると考えられる。

参考3 capable fault について

IAEAでは断層変位 (fault displacement) を生じさせる可能性がある断層を“capable fault”としている。

(IAEA Safety Requirements No. NS-R-3 (Rev.1) Site Evaluation for Nuclear Installations (原子炉等施設の立地評価) 3. SPECIFIC REQUIREMENTS FOR EVALUATION OF EXTERNAL EVENTS (外的事象に対する要求事項) に EARTHQUAKES AND SURFACE FAULTING の章があり、また、その下位文書に

当たる Specific Safety Guide No.SSG-9 Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations（原子炉等施設の立地評価における地震ハザード）に 8. POTENTIAL FOR FAULT DISPLACEMENT AT THE SITE の章があり、“capable fault” が定義されている。）

capable fault が問題となる既設発電所では、決定論的手法に基づいて当該断層の活動の可能性（capable）を否定できない場合には、確率論的手法によって断層変位の年超過頻度を評価することを推奨している。確率論的断層変位ハザード解析（Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis : PFDHA）では主断層によるずれ（primary displacement）と、副断層によるずれ（secondary displacement）を考慮することとされている。

米国カリフォルニア州の Diablo Canyon 発電所においては、敷地前面海域に新たに評価された Shoreline Fault による影響評価が事業者（PG&E）と米国原子力規制委員会（USNRC）によって行われている。Shoreline Fault を活断層（capable fault）と想定して、Shoreline Fault の活動に伴い生じる副断層（secondary fault）の断層変位の年超過頻度を PFDHA によって評価した結果、断層変位によるリスクは無視し得るとしている。（別添資料Ⅲ.4-2 参照）

Ⅱ.2 変位・変形の現象

Ⅱ.2.1 地盤の変位・変形

地盤には、断層面に沿ってずれ（断層変位）や、傾斜・撓み等の変形を生じる場合がある（以下「地盤の変位・変形」という。）。これら地盤の変位・変形は、震源断層の活動に伴い発生するものと、それ以外を成因とするものに分けられる。震源断層の活動に伴い発生するものについては次節で詳述する。

震源断層の活動以外を成因とする地盤の変位・変形としては、主に地すべり・斜面崩壊や火山活動による隆起等を成因とするものが挙げられる。これらは、地表付近に現れるのが特徴で、斜面や山稜部、火山活動域や軟質な表層堆積物の分布域、侵食・削剥の激しい地域等に現れる傾向がある。

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

地殻内には、プレート運動を原動力とする広域的な応力が長期にわたって蓄積しているため、地殻内に一旦形成された震源断層は、繰り返し同じ向きに動いて地震を発生させる。震源断層面上のすべりが大きい場合には、地表地震断層として地表に断層変位が出現する。特に同様な活動が繰り返し起きた結果、主要な地表の痕跡（変位・変形）は断層崖等の変動地形を形成して、活断層として認識されている。

地殻内のある断層で地震が発生してから次の地震が発生するまで、すなわち震源断層をせん断破壊させるまでに応力やひずみが蓄積するためには、かなりの長期間を要することが、多くの活断層に関する活動履歴調査から明らかになっている。国内の活断層の場合、平均活動間隔は数千年、短いものでは数百年、長いものでは数万年である。また、地表における1回当たりの変位量は数十 cm～数 m～10m 程度である（図Ⅱ.2.1-1）。

断層のずれの向きは、断層を挟んだ地盤の相対的な動きから縦ずれ断層と横ずれ断層に分類される。縦ずれ断層は、上盤側（断層面の上側の地盤）が相対的に沈下する正断層と、上盤側が相対的に隆起する逆断層に区分され、横ずれ断層は、地盤の相対的な運動方向から左横ずれ断層と右横ずれ断層に区分される（図Ⅱ.2.1-2）。また、地表地震断層の位置やずれの向き・大きさは、地下深部の震源断層面上のすべりを主因とするものの、地下浅部の応力状態、断層の摩擦特性、地質・地質構造、岩盤や表層地盤の力学特性等にも左右される。

断層の幾何学的形状は、断層面の走向、傾斜として表現され、走向は断層面と水平面とが交わる方向、傾斜角は断層面と水平面とがなす角を指す。また、断層面のすべる方向をすべり角として表現し、断層面の下盤側に対する上盤側のすべりの角度を指す（図Ⅱ.2.1-3）。

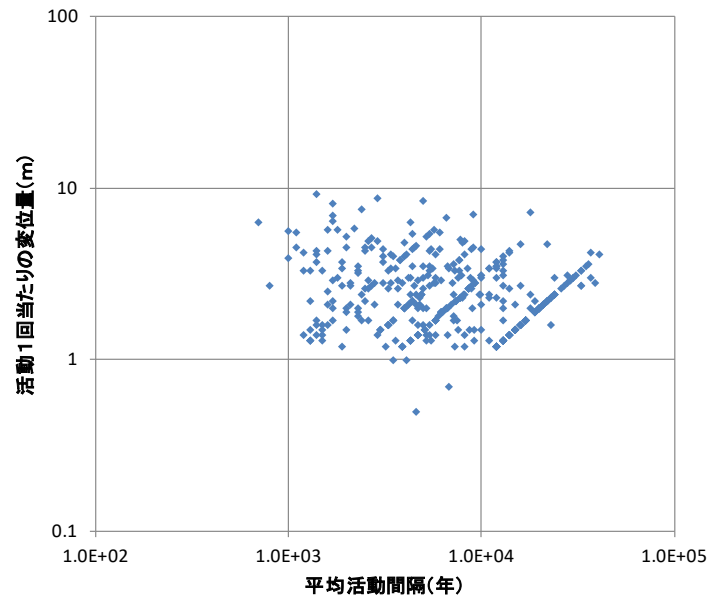


図 II.2.1-1 活断層の平均活動間隔と活動 1 回当たりの変位量
(産総研活断層データベース¹⁾ のデータに基づき作成)

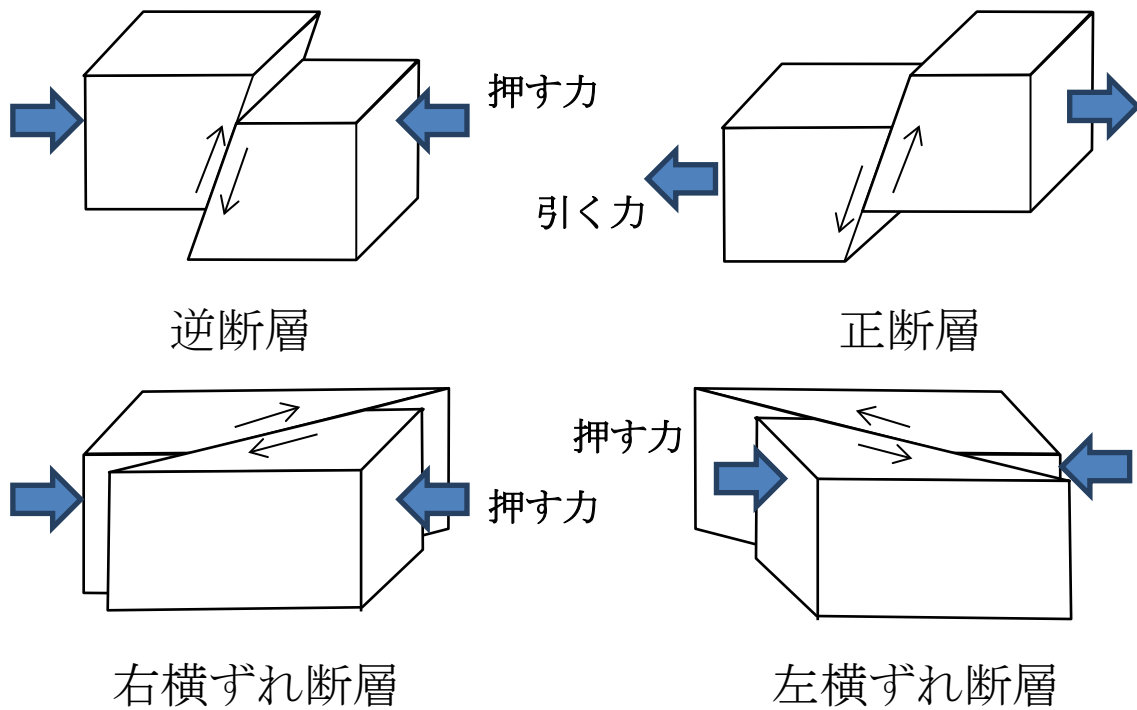
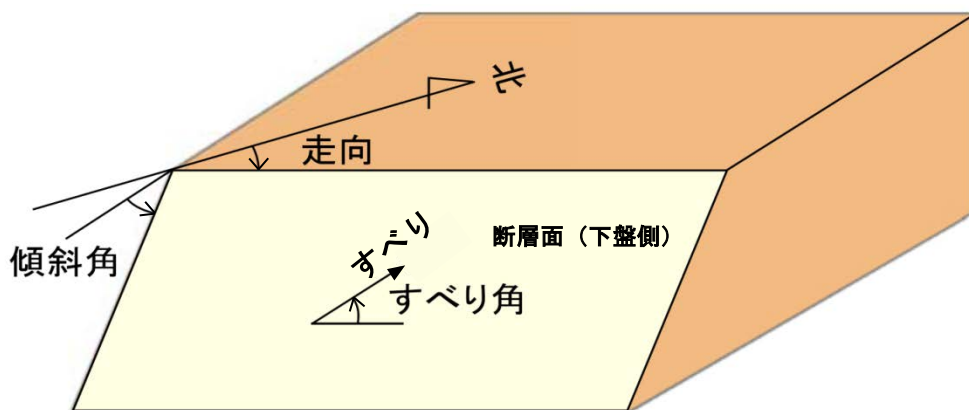


図 II.2.1-2 ずれの向きによる断層の種類

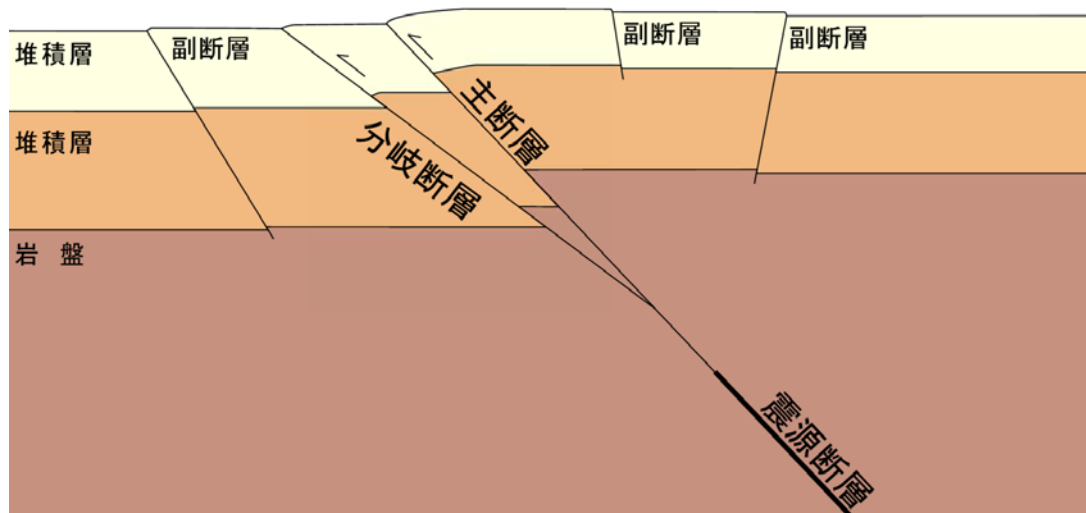


図Ⅱ.2.1-3 断層の走向・傾斜角・すべり角

Ⅱ.2.2.2 地表地震断層の変位

地表地震断層には、震源断層の地表延長部である主断層及び主断層から派生した分岐断層と、それらの周辺に副次的に生じた副断層がある（図Ⅱ.2.2-1）。

主断層及び分岐断層並びに副断層の区別の考え方を別紙Ⅱ.2-1 に示す。



図Ⅱ.2.2-1 断層の形態

国内で発生した地震のデータを基に、地表地震断層の変位量については、活動1回当たりの変位量と断層長との関係について整理した例として、松田（1975）²⁾、松田ほか（1980）³⁾、武村（1998）⁴⁾ 等がある。代表例として松田ほか（1980）を図Ⅱ.2.2-2 に示す。なお、地表地震断層の変位量は、既往調査の実績において1回の活動当たり数十 cm から数 m であり、最大規模で 10m 程度である（図Ⅱ.2.1-1）。

地表地震断層の中で主要な変位は主断層として認識されるものであり、前述の活動1回当たりの変位量は、主断層を捉えたものであると考えられる。

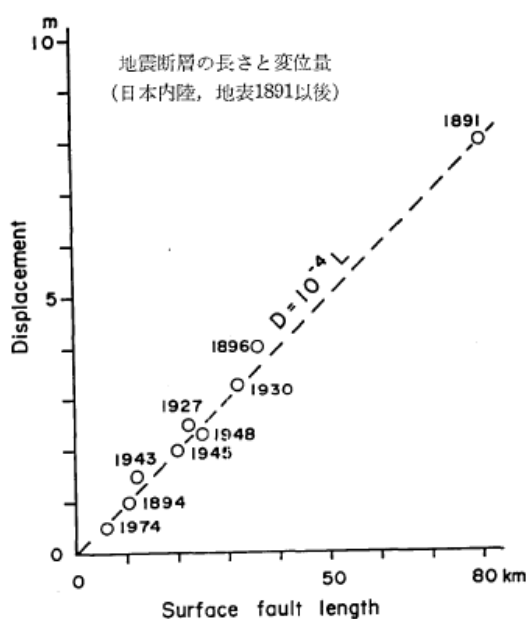


Fig. 10. Relationship between surface fault lengths and amounts of displacement accompanied by large inland earthquakes.

図Ⅱ.2.2-2 地表地震断層長さ活動1回当たりの変位量の例³⁾

副断層の変位量等については、Youngs et al. (2003)⁵⁾や高尾ほか（2013）⁶⁾、原子力安全推進協会（2013）⁷⁾ 等で整理されている。高尾ほか（2013）は、国内の気象庁マグニチュード (Mj) 5.8 以上の 107 地震を調査し、副断層が発生した 19 地震について整理し、主断層の変位量で基準化した副断層の変位量（副断層の変位量÷主断層の変位量）と主断層からの距離を整理している。副断層の変位量は主断層の変位量に比べ小さく、主断層からの距離が離れるに従い変位量は減少する傾向にある（図Ⅱ.2.2-3）。また、原子力安全推進協会（2013）は、明治以降の約 120 年間に国内で発生した Mj6.5 以上の地震について、地表地震断層の調査記録から変動地形に対応しない箇所に出現した副断層の変位量を抽出し、整理している（図Ⅱ.2.2-4）。

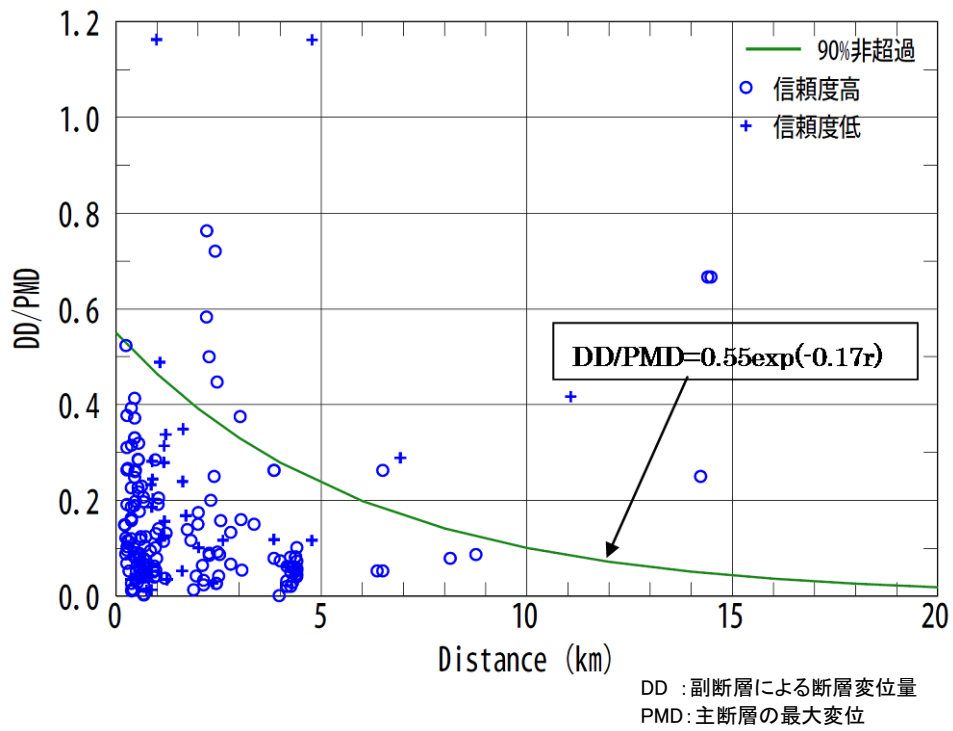


図 II.2.2-3 主断層からの距離と基準化した副断層の変位量⁶⁾

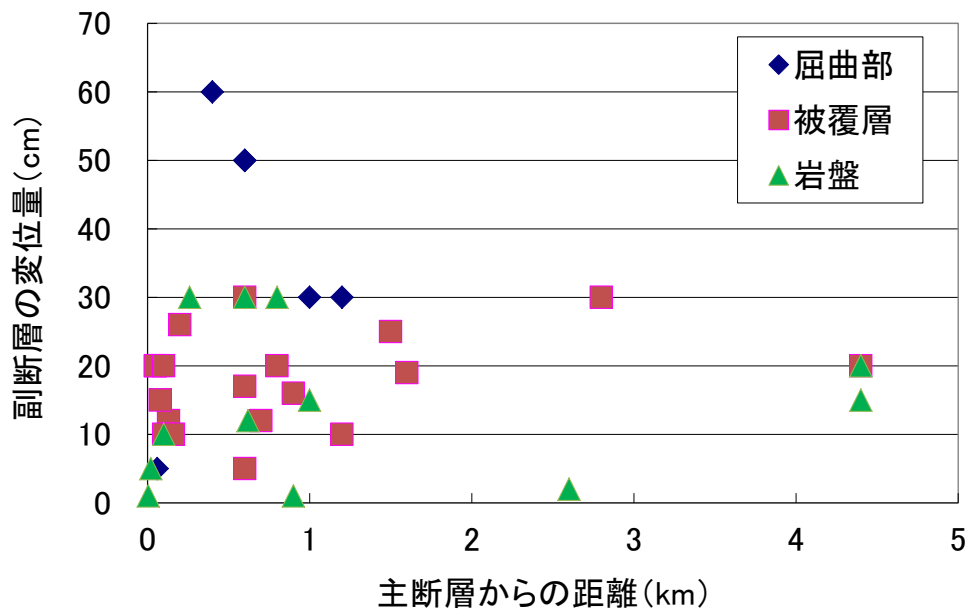


図 II.2.2-4 主断層からの距離と副断層の変位量^{7)一部加筆}

近年では、地表地震断層の調査において、リモートセンシングが積極的に活用されている。例えば航空レーザー測量（Airborne LIDAR）で取得された地震前後の数値標高モデル（DEM）を用いて、その差分解析から断層周辺の3次元的な変位分布が把握できる（品川ほか（2013）¹¹⁾）。また、合成開口レーダー（SAR）による地震前後の画像の差分干渉処理（InSAR）に基づき、衛星からの視線方向の距離変化をcmオーダーで面的に把握できる（例えば、国土地理院（2016）¹²⁾）。これに伴い、地表踏査では判別し難い20～30cm程度以下の微小な断層変位や、主断層から離れた位置に生じた副断層等も見つかるようになっている。

最近の事例として、2014年長野県北部の地震（神城断層地震）（Mj 6.7）と2016年熊本地震（以下「熊本地震」という。）（Mj 7.3）で地表地震断層が観察された。これらの地震では、概ね既知の活断層に沿って主断層と判断される地表地震断層が出現した。また、分岐断層や副断層に該当する地表地震断層が生じている。それらの概要を別添資料Ⅲ.2に示す。

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

地盤の変位・変形が建物等の一般構造物に及ぼした影響、特に断層の動きに起因した地盤の変位・変形の程度と構造物の損傷の関係を把握することは、その影響を工学的に評価する上で重要である。

地盤の変位・変形による建物・構築物の被災については、各々の地震について調査報告がなされているが、特に断層変位に着目して国内外の事例を取り纏めたものとして、地盤工学会による「地震時の断層変位に伴う地震災害に関する調査報告書（2002年3月）」⁸⁾や土木学会原子力土木委員会による「断層変位評価小委員会研究報告書（2015年7月）」⁹⁾がある。

熊本地震では、国の地震調査研究推進本部による長期評価で想定されていた位置（既知の布田川断層帯）に沿って、想定されていた断層変位量と同程度の最大変位量が記録された。また、震度7を含む強い揺れ（強震動）が生じたことに伴い、甚大な被害が生じた。主たる被災要因としては強震動が挙げられるが、断層変位や地盤変状等による影響も指摘されており、調査・分析が各方面で実施されている¹⁰⁾。

一般的に地震被害に係る調査報告では、被災を受けた建物等に対する調査・検討がなされているが、断層変位が生じた近傍あるいは直上に位置する建物等であっても、影響が軽微であった事例があることにも留意が必要である。熊本地震においても断層変位の直上に位置する建物等の被害が軽微であった事例があり、これらから得られる知見も施設の影響評価においては重要な知見となる。そのような観点から、熊本地震で生じた地表地震断層による建物等の影響について、これまでに得られている情報を別添資料Ⅲ.7に整理した。

II. 2.3 参考文献

- 1) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：活断層データベース（2017年3月13日確認）
https://gbank.gsj.jp/activefault/index_cyber.html?search_no=j001&version_no=1&search_mode=1
- 2) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，地震第2輯第28巻，pp.269-283，1975年.
- 3) 松田時彦，山崎晴雄，中田高，今泉俊文：1896年陸羽地震の地震断層，地震研究所彙報，Vol.55，pp.795-855，1980年.
- 4) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響及び地震被害との関連—，地震第2輯第51巻，pp.211-228，1998年.
- 5) Robert R. Youngs, Walter J. Arabasz, R. Ernest Anderson, Alan R. Ramelli, Jon P. Ake, David B. Slemmons, James P. McCalpin, Diane I. Doser, Christopher J. Fridrich, Frank H. Swan III, Albert M. Rogers, James C. Yount, Laurence W. Anderson, Kenneth D. Smith, Ronald L. Bruhn, Peter L.K. Knuepfer, Robert B. Smith, Craig M. dePolo, Dennis W. O’Leary, Kevin J. Coppersmith, Silvio K. Pezzopane, David P. Schwartz, John W. Whitney, Susan S. Olig, and Gabriel R. Toro : A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), Earthquake Spectra, Vol.19, No.1, pp.191-219, 2003.
- 6) 高尾誠，土山滋郎，安中正，栗田哲史：確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用，日本地震工学会論文集，第13巻，第1号，pp.17-36，2013年.
- 7) 原子力安全推進協会敷地内断層評価手法検討委員会：原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書，2013年9月.
- 8) 地盤工学会地震時の断層変位に伴う地盤災害に関する調査委員会：地震時の断層変位に伴う地震災害に関する調査報告書，地盤工学会2001年度調査委員会報告書，2002年3月.
- 9) 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.
- 10) 例えば防災学術連携体 平成28年（2016年）熊本地震に関する情報（2017年3月13日確認）
http://janet-dr.com/11_saigaiji/20160414kyushu.html から各学会・研究機関へリンク可能
防災学術連携体 熊本地震・緊急報告会
http://janet-dr.com/11_saigaiji/houkokukai/kyushu_160502.html
同 熊本地震・三ヶ月報告会
http://janet-dr.com/11_saigaiji/160716kyushu_houkokukai/kyushu_160716.html
- 11) 品川俊介，阿南修司，佐々木靖人，向山栄，本間信一，小林容子：2時期の航空レーザー測量による地表地震断層周辺の変動量分布の推定 2011年4月11日福島県浜通りの地震に伴う事例，応用地質，第53巻，第6号，pp.271-281，2013年.
- 12) 国土地理院：だいち2号干渉 SAR による変動の検出について（2017年3月13日確認）

<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html#3>

別紙Ⅱ.2 変位・変形の現象に関する参考資料

別紙Ⅱ.2-1 現地調査における断層の区別の考え方

・主断層

断層崖等の変動地形に沿って連続的に認められる断層（帯）で、既知の活断層と同様の変位センスを有するもの。

一般的には、km オーダー以上の長さを有し、断層破碎帯が発達する。

・分岐断層

主断層に接して、あるいは近傍に分布する主断層より小規模な断層で、周辺の地形・地質構造から、主断層と一体的に活動していることが合理的であると判断されるもの。

断層面が傾斜した縦ずれ断層の場合には、地表では主断層に並走する断層として認められる。両者を横断する反射法地震探査や群列ボーリング等により、地下での分岐が確認できる場合がある。一般的には、主断層との離隔及び構造的な関係から、分岐断層と推定される場合が多い。その際には、主断層と地下浅部で交わるような傾斜であること等が判断根拠となる。

・副断層

主断層から離れたところに出現する、主断層よりも小規模な断層。

一般に、その長さは主断層よりも圧倒的に短く、破碎帯の幅も小さい。地表付近のみに生じた「根なし断層」はその典型である。分岐断層との識別は厳密には困難であるが、主断層との一体的な活動が合理的に説明できないような離隔、走向、傾斜の場合には、副断層と判断される。

Ⅱ.3 変位・変形の評価

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

(1) 断層調査の流れ^{1),2)}

原子力発電所の施設の設置地盤に存在する断層による変位・変形が、安全上重要な機能を有する施設（以下「SSCs」という。）に及ぼす影響について検討するため、地形・地質・地盤調査により敷地内で確認される断層の分布・性状及び後期更新世以降の活動を評価する必要がある。

原子力発電所を対象とした調査は、断層の分布、規模、性状、活動性等を把握し、震源として考慮する活断層を特定して、耐震設計における基準地震動の策定において必要な震源断層モデルの評価に資するために従来から綿密な調査が実施されてきている。これらの調査は、建物・構築物や土木構造物の直下の断層の活動により、SSCsに与える影響について検討するための指標、すなわち、安全性評価の入力条件となる断層の変位量を推定することにも活用できるものである。

断層調査の基本的な流れを図Ⅱ.3.1-1に示す。

文献調査、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査等を適宜組み合わせ、敷地及び敷地近傍の地質・地質構造を把握し、断層の分布、規模、性状、活動性等を把握する。

施設直下の断層の調査に当たっては、ボーリング調査、トレンチ調査に加え原子炉建屋に関しては試掘坑調査が実施される。構造物と断層との位置関係、その活動履歴や幾何学的形状等を慎重に調査する。

調査で得られたデータを基に、調査対象の断層を網羅的に抽出し、後期更新世以降の活動を否定できるかどうかを判定した上で、断層の分布・規模・活動1回当たりの断層変位量等を評価する（図Ⅱ.3.1-2）。

なお、調査は、日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015」⁴⁾（以下「JEAG4601-2015」という。）等を踏まえ、地点の状況を十分勘案して実施するものとする。

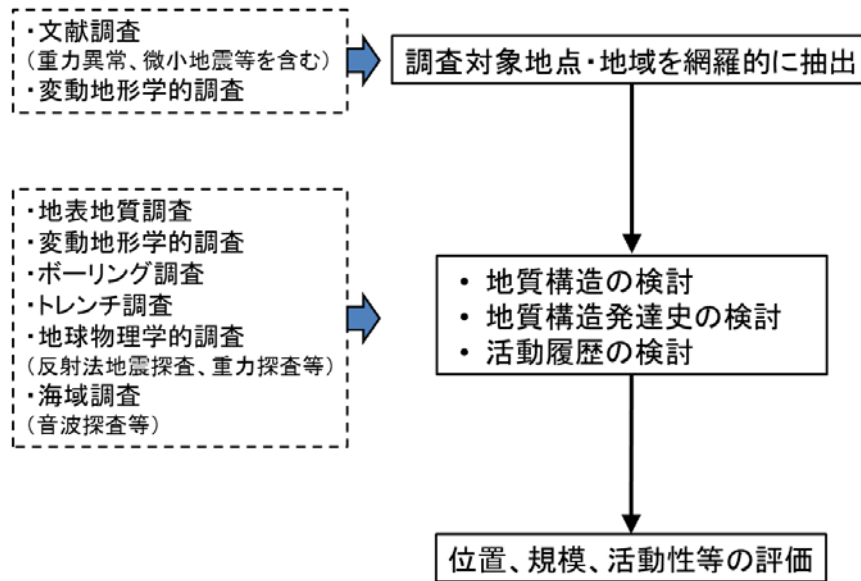


図 II.3.1-1 断層調査の流れ

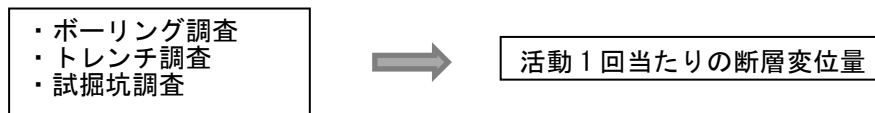


図 II.3.1-2 活動 1 回当たりの断層変位量の調査

(2) 断層の活動性評価

断層には、震源断層の活動に伴い形成されるもののほか、重力の関与によるもの、地震動によるもの、火山活動によるもの、岩石の風化・劣化に起因するもの等様々な形成要因があるため、施設への影響を評価するためには、形成の機構や過程の面からの検討が必要である。

基本的には、確認された変位・変形が後期更新世以降の断層活動によるものかどうか判断するための調査が必要であるが、例えば岩石の風化・劣化に起因するものであれば、鉱物組成や風化・劣化のメカニズム等を把握するための調査が必要となる。

断層の活動性評価については、地形・地質と断層の形成順序から活動年代を決める手法(上載地層法)は広く採用されており、信頼性も高いことから、本手法を基本とすることができる。後期更新世の地形面や地層が欠如するなど本手法の適用が困難な場合には、鉱物脈等との接触関係(鉱物脈法)、断層の変位センスと広域応力場との関係、断層内物質性状(例えば最新活動面の粘土鉱物の形状)等の観点から総合的に判断することができる。断層の活動性評価に係る主な評価法を表 II.3.1-1 に示す。

表 II.3.1-1 断層の活動性評価に係る主な評価法 ³⁾一部加筆・修正

	評価法	評価対象	内容	分析手法	備考
地形・地質と断層の形成順序から活動年代を決める手法	上載地層法	上載地層	断層を覆う地層や段丘における変位・変形と地層や段丘の形成年代から断層の活動年代を評価	C ¹⁴ 年代 テフラ層序等	上載地層が分布する場合に適用(信頼性高い)
断層内物質の構造と断層の形成順序から活動年代を決める手法	鉱物脈法	鉱物脈等 断層面	断層を横断する鉱物脈等の形成年代を基に、最新活動面の活動時期を推定	研磨片・薄片 観察 X線CT等	上載地層が分布しない場合に有効(複数の評価法の組合せによる信頼性向上が重要)
	断層の変位センスと広域応力場の変遷による推定	断層内物質 断層面	条線や複合面構造による変位センスで復元した断層運動が生じうる応力状態と、地史(応力場変遷)により推定	研磨片・薄片 観察 X線CT等	
	岩石・断層内物質の変形構造による温度・圧力場の推定	岩石 断層内物質	形成深度と隆起・沈降史を組み合わせることで形成年代を推定	研磨片・薄片 観察 X線CT等	
	断層内物質の生成鉱物による化学的環境や温度条件の推定	断層内物質 岩石	隆起速度と地温勾配の関係により続成作用の年代を大まかに指定、絶対年代測定や地史により熱水変質作用の年代を推定	薄片観察 X線回折 絶対年代特定等	
	最新活動面の鉱物の形状や成長程度による推定	断層内物質 (粘土鉱物等)	断層の最新活動面上の鉱物の形状や成長度合い、変形・破壊の有無により推定	走査型電子顕微鏡等	
	石英粒子表面構造解析法	断層内物質 (石英粒子)	断層内物質の石英粒子表面の構造が溶食により形態変化することを利用して推定	走査型電子顕微鏡等	約 90 万年以前に活動した断層が対象(精度・信頼性向上の課題あり)
断層内物質を用いた絶対(数値)年代測定手法	電子スピン共鳴(ESR)法 熱ルミネッセンス(TL)法 光ルミネッセンス(OSL)法	断層内物質 (石英粒子)	断層内物質中の石英粒子に蓄積された格子欠陥量から見積もられる被ばく線量により、最新活動年代を推定		今後の進展に期待
	フィッシュトラック(FT)法 カリウム-アルゴン(K-Ar)法 ウラン系列(U-Pb)法	断層内物質	断層内物質中の黒雲母、角閃石、イライト、ジルコン等を用いて、絶対年代を測定		今後の進展に期待

上載地層法における地層の堆積年代の認定では、C¹⁴年代測定法、テフラ層序等から具体的な数値が得られることが多い^{4),5)}。

また、断層内物質から読み取った構造(変形・変質)を地史に位置づけることにより断層の形成年代を推定することができる。

鉱物脈との接触関係から断層の活動性評価を行う場合には、断層の最新活動面の認定を慎重に行い、その最新活動面が鉱物脈等に切られていることが確認できれば、鉱物脈等の形成年代から断層の活動時期を判断することができる。

断層内物質の中に発達した条線の向きや複合面の構造等を読み取ることにより、断層の変位センスが分かることがある。調査地域を含む広域的な応力場の変遷が既知であれば、復元された断層運動が生じ得る応力状態がどの時期にあったかを検討することにより、活動時期を推定できる。

さらには、断層の最新活動面を電子顕微鏡等で観察すると、粘土鉱物の形状や成長程度等

の観点から最新活動時期の差別化が行える場合がある。

これらの手法により断層の最新活動年代を評価する場合には、地表付近に存在する活断層に関する詳細な調査はもとより、周辺の地質構造発達史等を踏まえた総合的な評価を行うことが重要であり、後述するような応力場の観点を加えることも考慮して調査結果が整合的であることを慎重に検証する必要がある。

II.3.1.2 断層変位量評価のための調査³⁾

(1) 地形・地質調査

後期更新世以降の活動を否定できない断層については、変動地形学的調査、露頭観察、トレンチ調査、ボーリング調査等を適宜組み合わせることで断層の活動年代を確認し、そのイベント年代に対応する変位基準から1回当たりの断層変位量を推定する。具体的には、累積変位量と活動回数から算出される1回当たりの断層変位量を求める。

トレンチ調査は、対象となる断層の変位量を直接的に評価するのに有効である。断層両側に見られる地層境界やテフラ等の鍵層の高度差をその地層が形成されて以降の累積的な鉛直変位量として推定できる。さらに、複数のトレンチを隣接して掘削し、地層の水平方向の分布が確認できる場合には、断層の水平変位量を把握することが可能である。

ボーリング調査は、断層を挟む両側で2箇所以上のボーリング掘削を行うことにより、その両側に見られる地層境界やテフラ等の鍵層の高度差を求め、その地層が形成されて以降の累積的な断層変位の鉛直成分が推定できる。

断層変位の痕跡は時間経過に伴って侵食・堆積等の作用を受けて徐々に失われていくため、断層の分布や変位がその全長にわたって確認できることは期待できず、地層に被覆されて断層運動の痕跡が地層中に残っている地点のみで調査することになる。このような制約の中において、取得された変位データから活動1回当たりの変位量を評価する上では、そのデータの代表性や変位分布の固有性等を検討しておくことも重要である。

(2) 地盤調査

数値解析による設置地盤の変位・変形量を評価する際の基礎地盤モデルには、地盤の物性（物理特性、強度特性及び変形特性）を適切に反映する必要がある。

地盤の物性を把握するため、ボーリング調査、トレンチ調査、弾性波探査等を実施するとともに、原位置試験（岩盤せん断試験、原位置岩盤三軸試験等）及び室内試験（岩石試験、土質試験等）を実施する。この際、原則として地質要素に工学的な判断を加えた地盤の分類（硬岩、軟岩、土及び弱層）に応じ、適切な試験を実施する。

地盤の物性には主に次のようなものがある。

- ・物理特性
- ・力学特性（静的及び動的な変形・強度特性）

なお、調査は、JEAG4601-2015等を踏まえ実施するものとする。

II.3.1.3 断層変位量評価に係る応力場

断層変位を評価する上で応力場を把握しておくことは重要であり、例えば広域応力場を考慮して断層の変位センスを想定するのに用いる。また、後述する数値解析により断層変位量进行评估する場合において、詳細 FEM モデルによる有限要素解析（以下「詳細 FEM 解析」という。）における地盤の初期応力を設定する際にも用いる。

地表地震断層の位置やずれの向き・大きさは、地下深部の震源断層面上のすべりを主因とするものの、地下浅部の応力状態、断層の摩擦特性、地質・地質構造、岩盤強度分布等にも左右される。

応力場を把握するためには、地震時の断層の動きや断層面に残るずれの跡から推定する手法や誘発地震活動から推定する方法、さらに、初期地圧測定手法により地殻応力を測定する手法が挙げられるが、初期地圧は地形、岩盤の構造や不均質性等の影響を受けて局所的にも変化しているため、その点に留意した測定箇所の選定と、測定結果の評価が重要である。

手法の詳細は、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）」³⁾によるものとする。

II.3.2 検討用の断層変位量の評価

断層変位の SSCs に対する影響評価を実施するためには、まず検討用の断層変位量を設定する必要がある。本節では、そのような変位量を決定論的に設定するための評価手順及び具体的な方法について記述する。

II.3.2.1 評価手順

検討用の断層変位量の評価手順を図 II.3.2-1 に示す。まず本項で評価手順を概説した後、次項以降で検討用の断層変位量の具体的な設定方法について記述する。なお、説明文中の丸数字は、図 II.3.2-1 の丸数字に対応している。

(1) 後期更新世以降の活動を否定できない断層の有無の判断

後期更新世以降の活動を否定できない断層が施設基礎面にあるかどうかを判断する(②)。

その断層が震源断層の活動に伴って生じた断層(主断層及び分岐断層並びに副断層)である場合は、活動 1 回当たりの変位量を評価する。

後期更新世以降の活動を否定できない断層が震源断層の活動に伴って生じた断層ではない場合は、その断層の成因を検討し、断層変位を繰り返し発生させ得る成因であると判断される場合には、本評価手順を準用して検討用の断層変位量の設定を行い、施設の影響評価に繋げていくこととする。

(2) 各種変位量の検討

複数の異なるアプローチによる検討を踏まえて検討用の断層変位量(以下「 δ_s 」という。)を設定するために、敷地の地質調査結果に基づく変位量(以下「 δ_i 」という。)の検討(④)、数値解析に基づく変位量(以下「 δ_a 」という。)の検討(⑤)、地表地震断層データに基づく変位量(以下「 δ_d 」という。)の検討(⑥)の3種類の検討を並行して実施する。それぞれの具体的な検討内容や方法については、次項以降で述べる。

なお、 δ_s の検討に先立ち、日本で発生した地表地震断層のデータを収集し、断層変位量の設定や変位量の不確かさ(ばらつき)を考慮する際の直接的又は間接的な資料とする。

(3) 検討用の断層変位量 δ_s の設定

調査結果に基づく δ_i 、数値解析結果に基づく δ_a 、地表地震断層データに基づく δ_d を総合的に勘案して、構造物と地盤の境界に与える検討用の断層変位量 δ_s を設定する(⑨)。その際、敷地における当該断層の 1 回当たりの変位量のデータがあるか又は推定可能かどうか(⑦)、その変位の原因となった地震が敷地周辺にあるかどうか(⑧)の判断(条件 A, B, C)を踏まえ、 δ_i 、 δ_a 及び δ_d を十分に吟味した上で δ_s を設定する。

δ_i 、 δ_a 及び δ_d には不確かさを適切に考慮することとするが、不確かさの考慮方法については、次項以降で述べる。

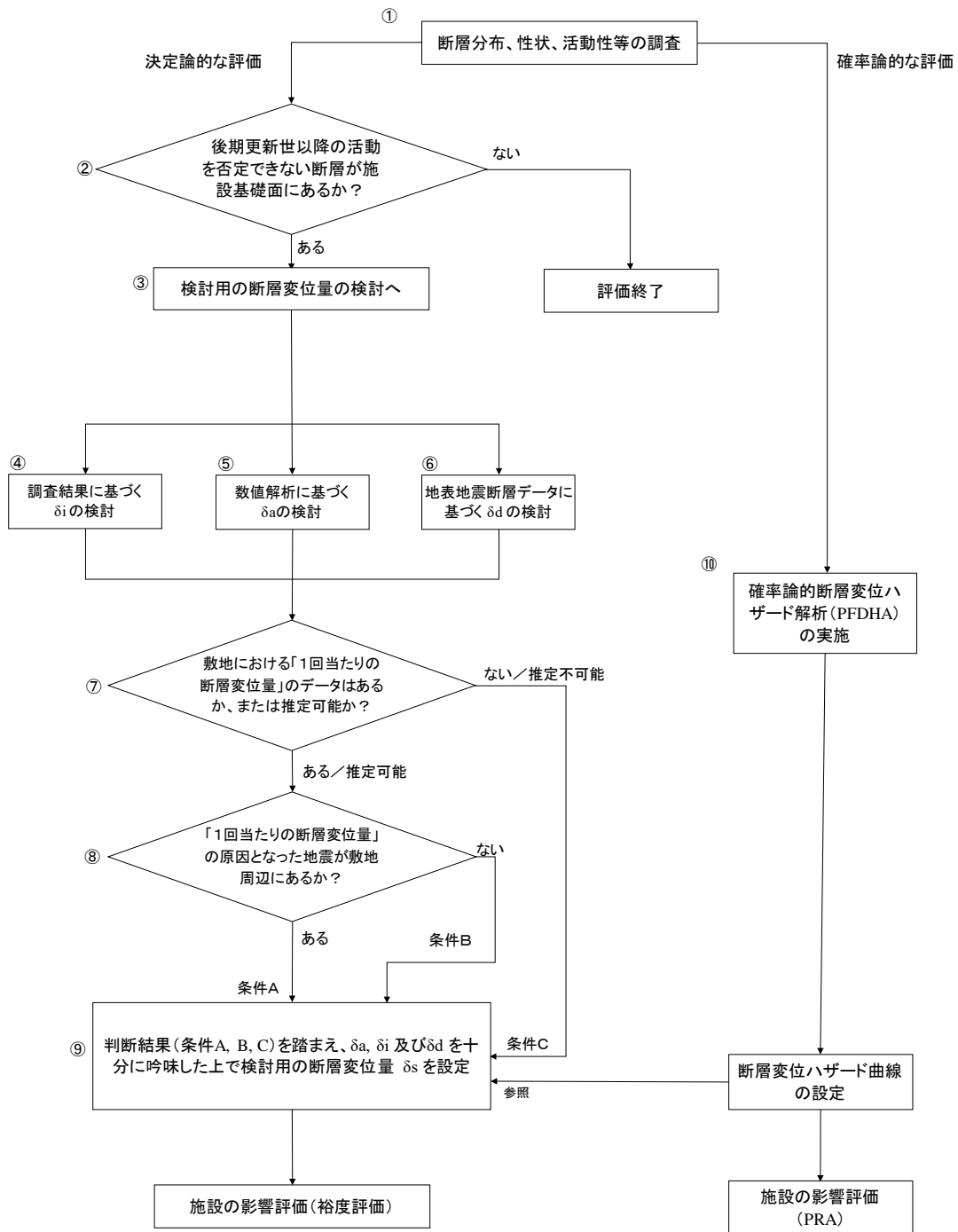


図 II .3.2-1 断層変位量評価手順

II.3.2.2 調査結果に基づく変位量 δ_i の検討 (④)

敷地におけるボーリング調査、トレンチ調査、試掘坑調査等の調査結果から得られた 1 回当たりの変位量がある場合は、最大限これを活用することとし、これに不確実さを適切に考慮して δ_i を設定する。

具体的には、敷地における 1 回当たりの変位量の分布状況から推定した施設位置での変位量を平均値として捉え、敷地の地質調査結果から不確実さの度合いが把握できる場合はそれを活用し、把握できない場合は後述する地表地震断層データの調査結果に基づく不確実さを考慮した上で δ_i を設定する。

不確実さの考慮方法に定まったものはないので、データの量や質を検討の上、適切な方法を選定する必要があるが、一つの方法として、平均値（この場合は調査結果）に適切なばらつきを反映する方法（例えば、平均値+標準偏差）が挙げられる。

II.3.2.3 数値解析に基づく変位量 δ_a の検討 (⑤)

数値解析による設置地盤の変位・変形量の評価に当たっては、敷地内で地質調査によって推定された変位の再現性を確認することにより、評価に用いる解析手法、解析モデルが適切かどうか確認する。その後、不確実さを考慮したパラメータスタディを実施した上で設置地盤の変位・変形量を評価する。

(1) 解析手法

数値解析手法は食い違い理論による弾性解を用いる手法（以下「食い違いの弾性論」という。）及び設置地盤の詳細 FEM 解析を基本とする。

食い違いの弾性論以外の手法として、波数積分を用いる方法や断層の動学的シミュレーションを必要に応じて検討に用いる。

有限要素法に代わり粒状体モデルを用いた解析手法を用いることも考えられる。個別要素法、粒子法等の粒状体解析手法では、多様な破壊形態を表現することが可能である。

a) 食い違いの弾性論と詳細 FEM 解析

食い違いの弾性論により、震源断層の破壊によるすべり量を断層面に静的な変位として与え、半無限地盤中の変位分布の弾性解を得ることができる。断層活動に伴う地殻変動による観測変位が弾性理論でもある程度説明できることから、この手法により広域的な地殻変動を求める。

施設の設置地盤の変位・変形量を求めるために、詳細 FEM モデルによる静的弾塑性解析を実施する。食い違いの弾性論により詳細 FEM モデル境界での変位量を算出し、それを変位あるいは換算した地殻応力として境界条件として与える（図 II.3.2-2）。

b) その他の手法

・波数積分を用いる方法

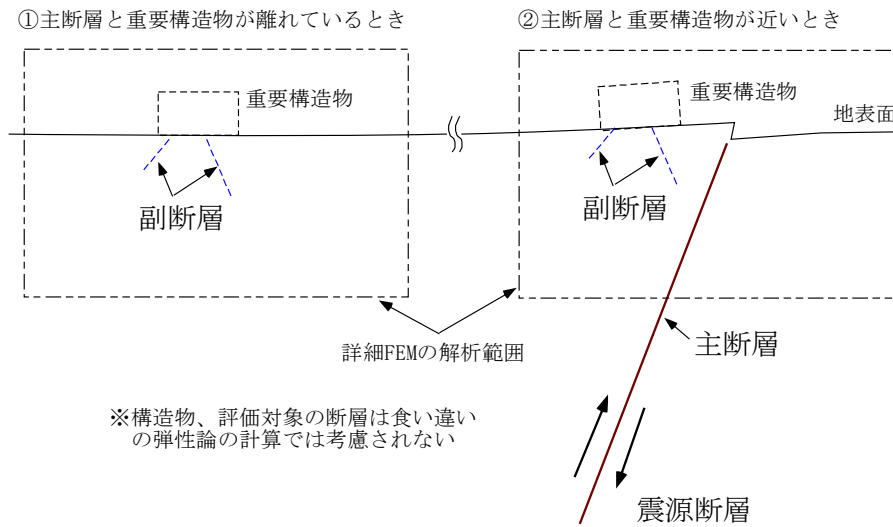
Hisada (1994)⁶⁾は粘弾性層状半無限地盤において静的・動的グリーン関数から変位及び応力を効率良く計算するための解析手法を提案している。水平成層構造のグリーン関数の計算に最もよく用いられている方法である。この方法では、静的変位(永久変位)に加えて地震動による変位履歴を求めることができる。

・動力的シミュレーション

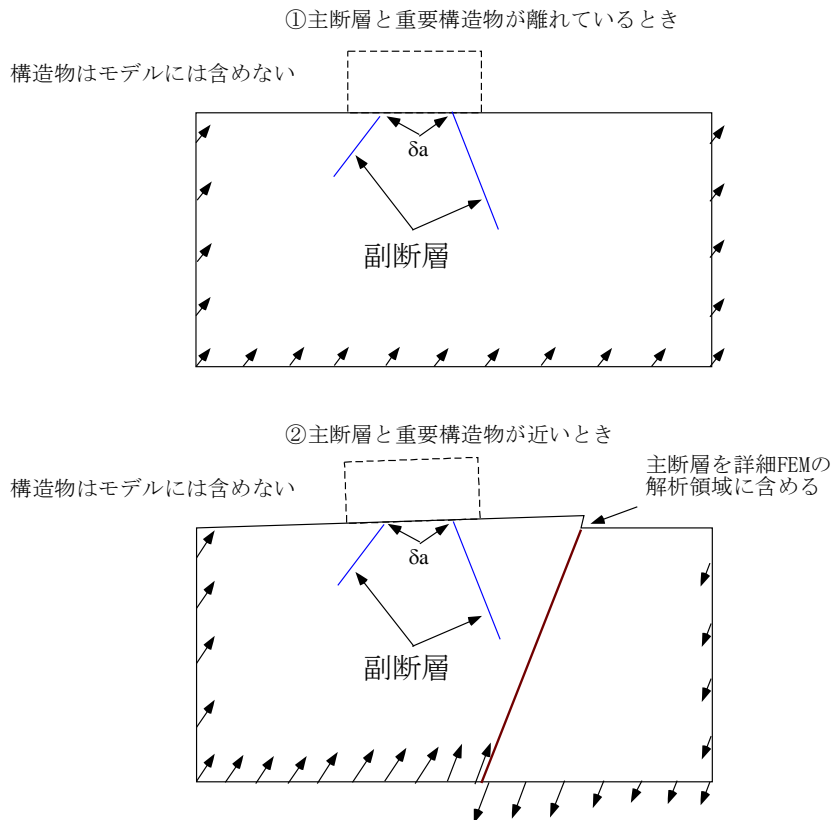
震源断層の破壊過程を動力的破壊進展モデルによりモデル化する手法である。この方法は主として強震動の予測・評価等の地震動シミュレーション手法として開発されてきた手法であり、震源断層の連動評価にも利用されている。食い違いの弾性論等の静的解析と比較して、破壊過程での周辺地盤の応力変化や地震動の影響を考慮できる。ただし、必ずしも地表・地盤内部の変位評価への適用性は検証されていないため、パラメータ設定には留意する必要がある。

・粒状体解析手法

地盤内の破壊の発生・進展を考慮する必要がある場合、基礎地盤モデルにこれらの粒状体解析手法を適用することが考えられる。粒子の大きさ・配置と入力パラメータが解析結果に与える影響や地盤の物性との対応に留意する必要がある。



a. 食い違いの弾性論により詳細 FEM モデルの境界変位（あるいは換算応力）を算定する



b. 食い違いの弾性論により算定した境界変位（あるいは換算応力）を詳細 FEM モデルの境界に作用させる。主断層と構造物が近い場合は主断層を詳細 FEM モデルに含め、その変位を考慮する

図 II.3.2-2 食い違いの弾性論及び詳細 FEM 解析による設置地盤の変位・変形評価のイメージ（評価対象の断層が副断層の例）

(2) 震源断層のモデル化

震源断層のモデル化に際しては、震源を特定した地震を想定した場合の地震動評価に用いるための特性化された震源モデルを作成するための手順を参照する。震源のモデル化における巨視的・微視的断層パラメータのうち、断層長さ、断層幅、傾斜角、すべり方向、平均すべり量、断層上端深さ、アスペリティ分布等が食い違いの弾性論での入力パラメータとなる。この設定に関しても地震動評価の手順と同様とする。これらのパラメータには不確かさが存在するため、断層調査結果から合理的に変動範囲を定め、パラメータスタディを行うことにより断層変位量への影響を検討する。

(3) 詳細 FEM 解析

詳細 FEM 解析による設置地盤の変位・変形量評価においては、地形・地質・地盤調査の結果に基づき、設置地盤のモデル化を行う。このとき、構造物はモデル化しない。また、主断層が構造物に近い場合は主断層が含まれるように解析領域を設定し、そのずれ変位を考慮するものとする。

数値解析において、敷地内の地質調査により推定された「1 回当たりの変位量」の再現性を確認する。なお、現時点では再現性を確認するための指標及び基準は確立されていないため、事案毎に再現性が十分か検討する必要がある。

a) 解析領域

解析領域は、これらが評価結果に影響を及ぼすことがないように適切に設定する。

b) 弱層のモデル化

断層を含む弱層のモデル化については、ジョイント要素やソリッド要素が用いられる。なお、ソリッド要素を用いる場合は、解析が不安定にならないように要素のアスペクト比に留意する。

c) 初期応力

自然地山もしくは切土、盛土により形成された状態の応力を初期状態とするが、その評価は、一般に地形や地質の状態、地下水位を考慮した自重解析により行われる。自重解析に用いる解析用物性値については、設置地盤が等方応力状態であると仮定し、適切に設定する。ただし、地形・地質・地盤調査結果から判断して等方応力状態ではないおそれがある場合には、初期地圧測定結果に基づき適切に設定する。

d) 物性値の設定

解析に使用する物性値は、解析手法及び解析条件に応じて、地盤調査に基づき定める。地盤物性値のばらつきが評価の結果に影響を及ぼすと考えられる場合には、適切な手法によってばらつきの影響を評価する。

(4) 設置地盤における変位量の検討

設置地盤における変位・変形量は、構造物と地盤との境界で評価する。変位・変形量の評価には種々の不確実さが存在するため、詳細 FEM 解析で用いる断層の強度・変形特性、岩盤の変形特性等について合理的に変動範囲を定め（例えば、平均値＋標準偏差）、それぞれの因子を組み合わせるパラメータスタディを行うことにより考慮する。

II.3.2.4 地表地震断層データに基づく変位量 δd の検討 (⑥)

既に構築されている主断層及び分岐断層並びに副断層の変位量に関するデータベースや、独自に構築又は追加したデータベースに基づき、敷地内における評価すべき断層とデータベースにおける断層を比較し、活動履歴・規模、地形条件、地質条件等の類似性から、 δd を設定する。

δd の設定に当たって、松田 (1975)⁸⁾及び松田ほか (1980)⁹⁾、Wells and Coppersmith (1994)¹⁰⁾等、断層長さ（又は地震規模）と断層変位量との関係式を主断層の変位量の推定に活用できる。また、原子力安全推進協会の「原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書」¹¹⁾のデータベース等を副断層の変位量の推定に活用できる。

さらに、 δd の設定に当たっては、 δa や δi と同様に、地表地震断層データの調査結果を踏まえて不確実さを適切に考慮する。これについても不確実さの考慮方法に定まったものはないので、データの量や質を検討の上、適切な方法を選定する必要があるが、一つの方法として、構築したデータベースを有効活用して変位量に関する統計処理を行い、平均値に適切なばらつきを反映する方法（例えば、平均値＋標準偏差）が挙げられる。

II.3.2.5 検討用の断層変位量 δs の評価 (⑦、⑧、⑨)

数値解析結果に基づく δa 、調査結果に基づく δi 、地表地震断層データに基づく δd を総合的に勘案して、構造物と地盤の境界に与える検討用の断層変位量 δs を設定する。その際、敷地における当該断層の 1 回当たりの変位量のデータがあるか又は推定可能かどうか(⑦)、その変位の原因となった地震が敷地周辺にあるかどうか(⑧)の判断(条件 A, B, C)を踏まえ、 δi 、 δa 及び δd を十分に吟味した上で δs を設定する。図 II.3.2-1 に示す断層変位量の評価手順には、⑦及び⑧の判断に応じた考え方を示している。

δs の設定に当たっては、確率論的断層変位ハザード解析（以下「PFDHA」という。）の結果を参照する。参照に当たっては、例えば、基準地震動 S_s や基準津波 T_s の策定において地震動や津波の確率論的ハザード評価を参照しており、 δs の年超過頻度が S_s や T_s の年超過頻

度（ 10^{-4} ～ 10^{-6} 程度）と同程度あるいはそれ以下であることを確認する方法が挙げられる。
（別紙Ⅱ.3-1 参照）

ここで、 δ_i 、 δ_a 及び δ_d 並びに δ_s の設定方法例を表Ⅱ.3.2-1 に示す。

表Ⅱ.3.2-1 検討用の断層変位量 δ_s の設定方法例

項目	地質調査結果に基づく δ_i	数値解析結果に基づく δ_a	地表地震断層データベースに基づく δ_d
不確かさを考慮した設定値	敷地内の1回当たりの変位量 + 敷地内外のデータから求めたばらつき（例えば、標準偏差）	パラメータスタディ結果 （例えば、断層形状等の震源に係る条件、断層及び地盤の強度・変形特性、初期地圧等）	データベースから求めた平均値 + データベースから求めたばらつき（例えば、標準偏差）
δ_s	<ul style="list-style-type: none"> ・ δ_i、δ_a 及び δ_d を総合的に勘案して、構造物と地盤との境界に与える変位量を設定 ・ 1回当たりの変位量のデータがあるか又は推定可能かどうか、変位の原因となった地震が敷地周辺にあるかどうかの判断を踏まえ、δ_i、δ_a 及び δ_d を十分に吟味した上で δ_s を設定 ・ δ_s の設定に当たっては、PFDHA の結果を参照する。 		

施設基礎面に後期更新世以降の活動を否定できない断層が複数分布する場合は、活動性、断層のずれの方向、断層破碎部の幅、硬さ及び固結の度合い、断層条線等から得た断層運動像、断層の空間的な広がり、施設に与える影響等を考慮して、必要に応じて複数の断層を選定し、断層毎に δ_s を設定する。

Ⅱ.3.2.6 想定を超える断層変位量の評価

後段の施設の影響評価において、検討用の断層変位量 δ_s を超える変位量（以下「想定を超える断層変位量」という。）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量を設定することができる。

その場合、想定を超える領域におけるリスク情報を得るための手法として、 δ_s を割り増しして設定する方法等が考えられる。例えば、 δ_s を係数倍して設定する方法や、 δ_s を設定する際に参照した年超過頻度を更に下回るレベル毎に設定する方法等が挙げられる。想定を超える断層変位は、このように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。（別紙Ⅱ.3-2 参照）

II.3.3 確率論的断層変位ハザード解析 (10)

前節までに示した決定論に基づく δ_s の評価と並行して、 δ_s 設定時の参照用及びその後の確率論的なリスク評価に供する目的で、PFDHA を実施する。

PFDHA の実施に際しては、正断層に対しては Youngs et al. (2003)¹²⁾、横ずれ断層に対しては高尾ほか (2013、2014、2016)^{13)~15)} 又は Petersen et al. (2011)¹⁶⁾、逆断層に対しては高尾ほか (2013、2014、2016)^{13)~15)} に示された方法及び評価式 (経験式) を用いて評価地点における 1 年当たりの変位-超過頻度関係を算出することができる (図 II.3.3-1)。

なお、ここで述べる検討では既存の断層を対象とし、断層の新生はその確率が無視できるほど小さいと考えられることから対象としない。ちなみに、PFDHA で用いる各種評価式も、既存の断層が活動した結果として地表地震断層が出現したという認識の下で統計・確率評価を行っているので、PFDHA においても断層の新たな発生を対象とするものではない。

また、経験式ではなく数値解析結果から断層発生確率、断層変位量、断層変位量のばらつきを求めて PFDHA を実施することも可能であるが、その場合は、数値解析の妥当性等、適用する手法の合理性の説明が必要である。

PFDHA の実施に当たっては、決定論的な評価と確率論的な評価が相互補完の関係にあることを踏まえ、認識論的な不確実さをロジックツリーに反映する。認識論的な不確実さの例としては、施設の周辺に分布する断層が主断層であるかどうか、主断層の平均活動間隔、主断層が引き起こす地震の規模、評価式の種類、偶然的な不確実さとして考慮するために導入している各種確率密度関数のパラメータの値等が挙げられる。

PFDHA で得られる変位量は、前節で述べた δ_s と同様に、構造物と地盤の境界位置において定義されるものであり、当該構造物が設置されていない状態での変位量である。施設の影響評価に当たっては、構造物が設置されていない状態での変位量を再現できるように FEM 等の解析モデルの境界条件を設定した上で、構造物が設置されている状態での変位量を計算する必要がある。

一方、確率論的リスク評価の観点からは、PFDHA はサイトで共通化されていることが望ましく、検討対象設備が複数ありこれらを含めた評価を実施する場合は、代表構造物に対する PFDHA 結果に基づき PRA を実施する等の手法を用いることが考えられる。

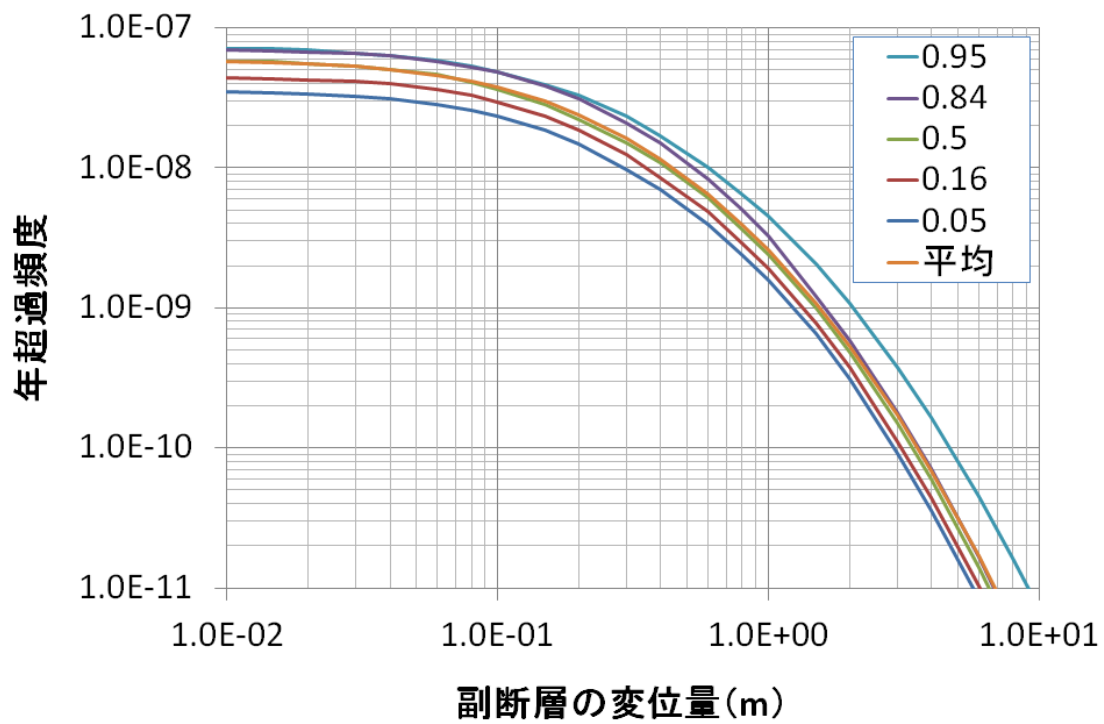


図 II.3.3-1 副断層の断層変位ハザード曲線の例¹⁴⁾

(図中凡例の数値はフラクタルの値)

II.3.4 今後の課題

(1) 地形・地質・地盤調査に関する課題

地形・地質・地盤調査に関する課題を以下に示す。

- ・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が必要である。
- ・局所応力場と広域応力場が必ずしも一致しないため、断層変位を評価する上では両者が異なる可能性についても検討する必要がある。

(2) 変位・変形量の評価に関する課題

数値解析及び PFDHA に関する課題を以下に示す。

- ・FEM を用いた地盤の変形解析は広く実施されているが、これまで断層変位への適用は必ずしも多くない。実地震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り解析手法の妥当性を更に確認していくことや、再現性に係る指標及び基準が策定されることが望まれる。動的な応力変化の影響（地震動、断層破壊進展過程等）は静的な解析で考慮することが難しい事項なので、動的な解析との比較等によりその影響について予め把握しておくことが望ましい。
- ・PFDHA については、手法としては既に確立していると言える。今後とも新たに得られた情報を断層変位量の評価式に反映させるとともに、実務への適用を通して、ロジックツリーに考慮すべき認識論的不確実さとして何が重要であるか、どの不確実さが結果に与える影響が大きいかなどの分析を実施していくことが望ましい。

II. 3.5 参考文献

- 1) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告 土木編 5 原子力施設の被害とその影響, pp.81, 2013 年.
- 2) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所の立地多様化技術 付属編-1 断層活動性評価技術, pp.110, 1996 年.
- 3) 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.
- 4) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-2015), pp.143-170, 2015 年.
- 5) 土木学会原子力土木委員会活断層評価部会：原子力発電所の耐震設計における最近の検討事例に見る活断層調査・評価技術, 2012 年
http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/system/files/JSCE_AFreview2012.pdf
- 6) 町田洋, 新井房夫：新編火山灰アトラス [日本列島とその周辺], pp.336, 2011 年.
- 7) Hisada, Y. : An efficient method for computing Green's Functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.84, pp.1456-1472, 1994.
- 8) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震第 2 輯, 第 28 巻, pp.269-283, 1975 年
- 9) 松田時彦, 山崎晴雄, 中田高, 今泉俊文：1896 年陸羽地震の地震断層, 地震研究所彙報, Vol.55, pp.795-855, 1980 年.
- 10) Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith : New empirical relationships among magnitude, rupture, length, rupture width, rupture area, and surface displacement, BSSA, 84, pp.974-1002. 1994.
- 11) 原子力安全推進協会敷地内断層評価手法委員会：原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書, 2013 年 9 月.
<http://www.genanshin.jp/archive/sitefault/>
- 12) Robert R. Youngs, Walter J. Arabasz, R. Ernest Anderson, Alan R. Ramelli, Jon P. Ake, David B. Slemmons, James P. McCalpin, Diane I. Doser, Christopher J. Fridrich, Frank H. Swan III, Albert M. Rogers, James C. Yount, Laurence W. Anderson, Kenneth D. Smith, Ronald L. Bruhn, Peter L.K. Knuepfer, Robert B. Smith, Craig M. dePolo, Dennis W. O'Leary, Kevin J. Coppersmith, Silvio K. Pezzopane, David P. Schwartz, John W. Whitney, Susan S. Olig, and Gabriel R. Toro : A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), Earthquake Spectra, Vol.19, No.1, pp.191-219, 2003.
- 13) 高尾誠, 土山滋郎, 安中正, 栗田哲史：確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用, 日本地震工学会論文集, 第 13 巻, pp.17-36, 2013 年.
- 14) 高尾誠, 上田圭一, 安中正, 栗田哲史, 中瀬仁, 京谷孝史, 加藤準治：確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上, 日本地震工学会論文集, 第 14 巻, 第 2 号, pp.16-36, 2014 年.
- 15) 高尾誠, 谷智之, 大島貴充, 安中正, 栗田哲史：確率論的断層変位ハザード解析における副断層の変位量評価に関するパラメータの最尤推定, 日本地震工学会論文集, 第 16 巻,

第 2 号, pp.96-101, 2016 年.

- 16) Mark D. Petersen, Timothy E. Dawson, Rui Chen, Tianqing Cao, Christopher J. Wills, David P. Schwartz, and Arthur D. Frankel : Fault displacement hazard for strike-slip faults, Bull. Seismol. Soc. Am. 101, pp.805-825, 2011.

別紙Ⅱ.3 変位・変形の評価に関する参考資料

別紙Ⅱ.3-1 参照する年超過頻度について

検討用の断層変位量 δ_s の設定に当たっては、基準地震動 S_s や基準津波 T_s の年超過頻度と同程度あるいはそれ以下であることを確認するとした。

- S_s 又は T_s の年超過頻度と比較することによって、 δ_s の発生頻度が他の自然外部事象の発生頻度に比べて過大でないこと、すなわち断層変位量が過小に評価されていないことを確認することができる。
- 米国カリフォルニア州の **Diablo Canyon** 発電所の安全性評価において、米国原子力規制委員会は、PFDHA 結果に基づき、副断層の断層変位の年超過頻度が地震起因の炉心損傷頻度（CDF）と比較して十分小さいことから副断層の変位によるリスクは無視し得るとしている。（別添資料Ⅲ.4-2 参照）

別紙Ⅱ.3-2 想定を超える断層変位量の評価について

想定を超える断層変位量の評価に当たり、 δ_s を係数倍して設定する方法と、 δ_s を設定する際に参照した年超過頻度を更に下回るレベルで設定する方法を挙げた。PFDHA 結果を利用する方法の例として下図に示すように δ_s を設定したハザード曲線を使って、 δ_s より小さな年超過頻度の領域の切りの良い値を使う方法が考えられる。

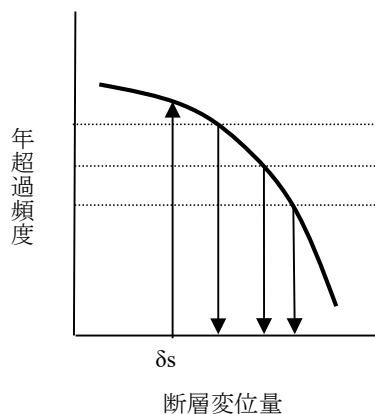


図-別紙Ⅱ.3-2-1 想定を超える断層変位量の設定例（PFDHA 結果を利用する場合）

なお、係数倍して設定した断層変位の年超過頻度を求めることができるが、その年超過頻度は δ_s の設定方法に依存することに注意する必要がある。

Ⅱ.4 建物・構築物に対する影響評価

Ⅱ.4.1 対象構造物及び評価方針

ここで取り扱う建物・構築物とは、発電用原子炉施設のうち、原子炉建屋等の建物と排気筒等の構築物を総称したものをいう。また、評価対象とする建物・構築物は、耐震及び耐津波安全上重要な設備（例えば、コンクリート製原子炉格納容器や使用済燃料プール壁）、もしくは、耐震及び耐津波安全上重要な機器・配管系等に対する間接支持構造物（例えば、原子炉建屋）である。

評価は、常時又は運転時に作用する荷重と検討用の断層変位、さらに、必要に応じて地震時荷重に対して、安全上重要な機能を有する施設として要求される機能を保持すること、機器・配管系に対する間接支持構造物として要求される機能を保持すること、及び、構造物全体としての限界状態（変形能力、終局耐力）に対して余裕を有していることを確認することをもって行う。

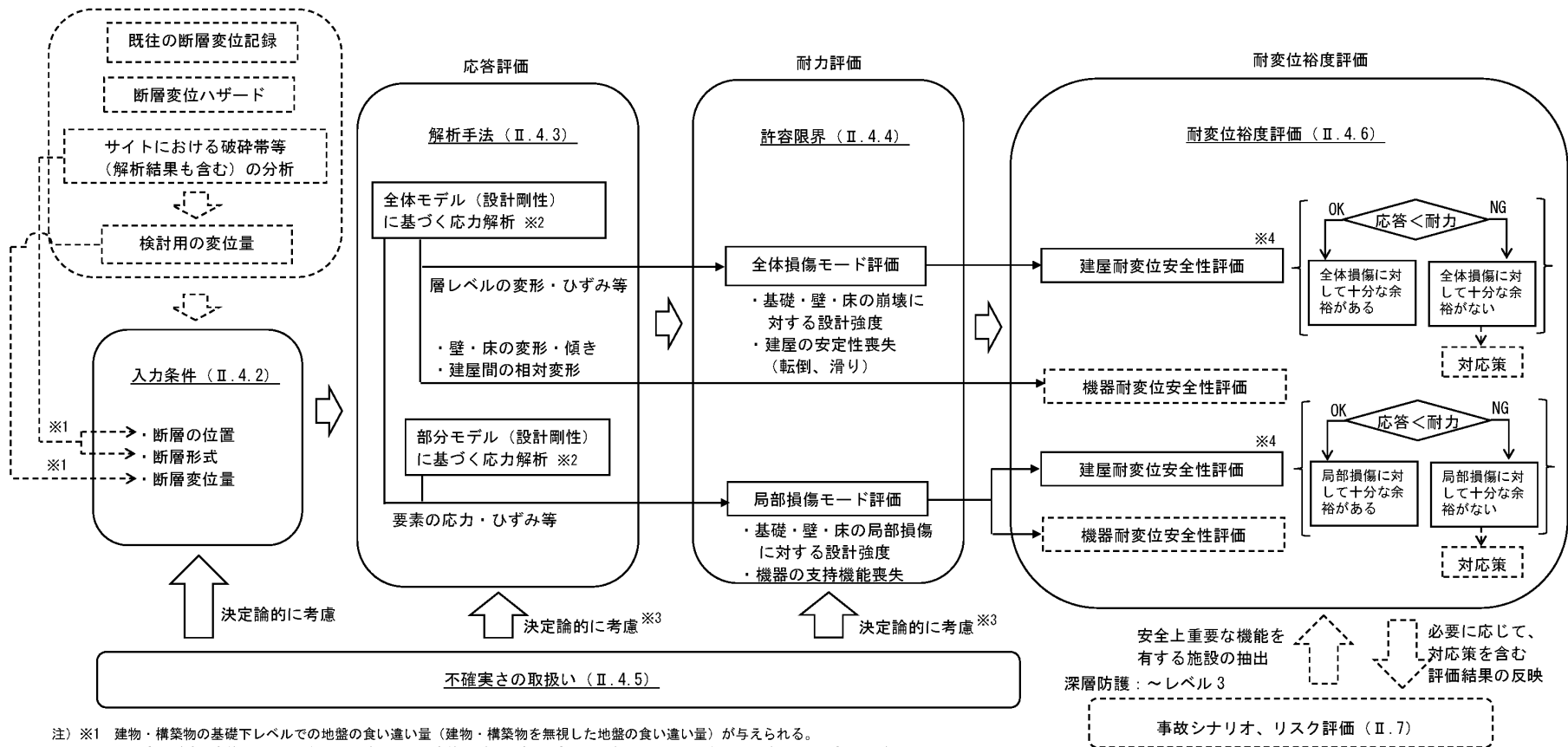
具体的には、対象とする構造物と周辺地盤を適切にモデル化した解析モデルに、断層変位やその他の荷重を与え、その結果、構造物に生じる変位、応力・ひずみ等を算出して、構造物が受ける損傷と有すべき性能・機能を考慮することにより断層変位に対する安全性を評価する。

以上をまとめて、Ⅰ.6.3 で示されたリスク評価方法（裕度評価及び確率論的リスク評価（PRA））に対する建物・構築物の影響評価フローを図Ⅱ.4.1-1～図Ⅱ.4.1-3に示す。

「①設計上の許容限界に対する裕度評価」では、検討用の断層変位に対して、確立された構造強度の評価体系の中で、評価対象である構造物の応答評価及び耐力評価を行う。したがって、応答が耐力を上回る場合には、当該構造物は要求性能を満足していないため、必要に応じて対応策を講じ、その有効性を確認することとなる。

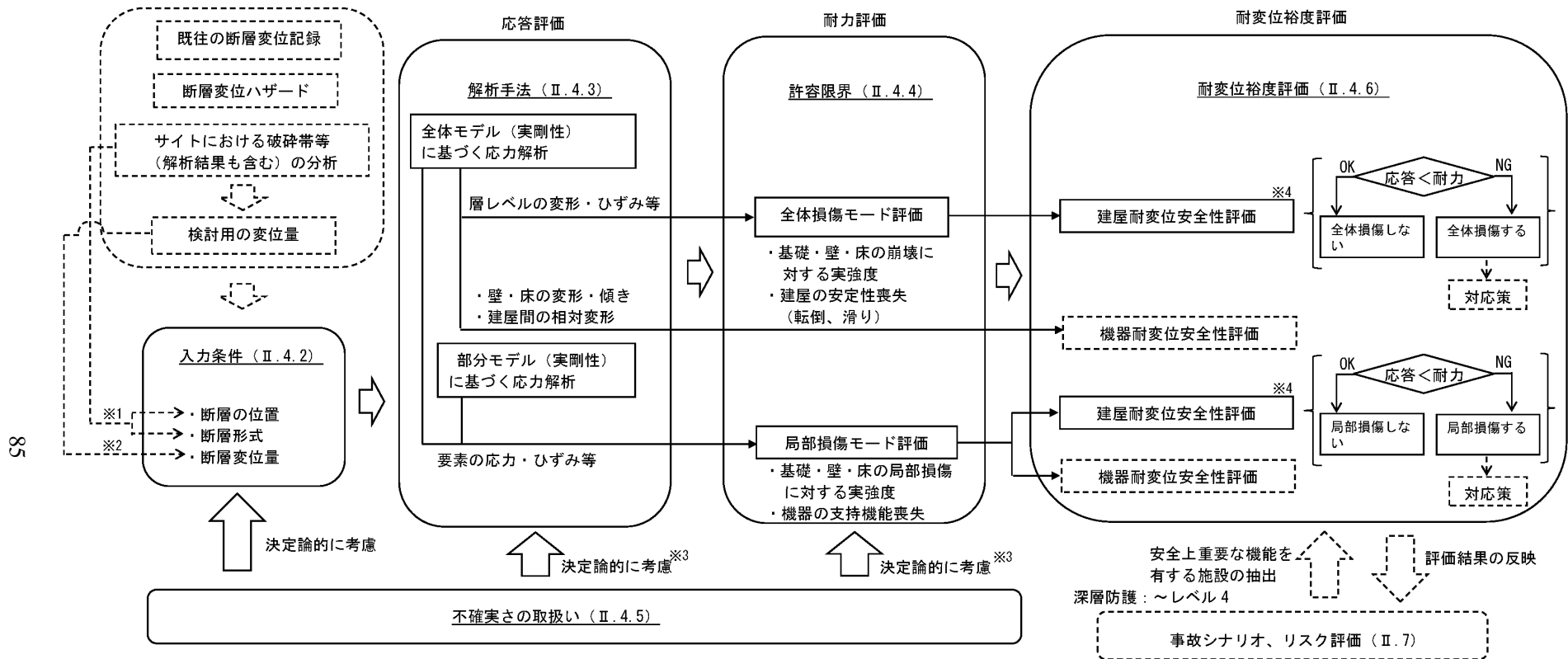
「②終局限界に対する裕度評価」では、検討用の断層変位もしくは想定を超える断層変位に対して、最新知見を反映した決定論的な評価体系の中で、評価対象である構造物の実剛性に基づく応答評価及び実耐力に基づく耐力評価を行う。したがって、応答が耐力を上回る場合には、当該構造物は要求性能を満足していないため、その評価結果を用いた事故シナリオ及び事故シーケンス評価を行い、必要に応じて対応策を講じ、その有効性を確認することとなる。

「③確率論的リスク評価（PRA）」では、断層変位ハザードに対して、最新知見を反映した確率論的な評価体系の中で、評価対象である構造物の現実的応答評価及び現実的耐力評価を行う。ここでは、現実的応答が現実的耐力を上回る確率を脆弱性曲線として評価し、これを入力として事故シナリオ及び事故シーケンス評価を行う。



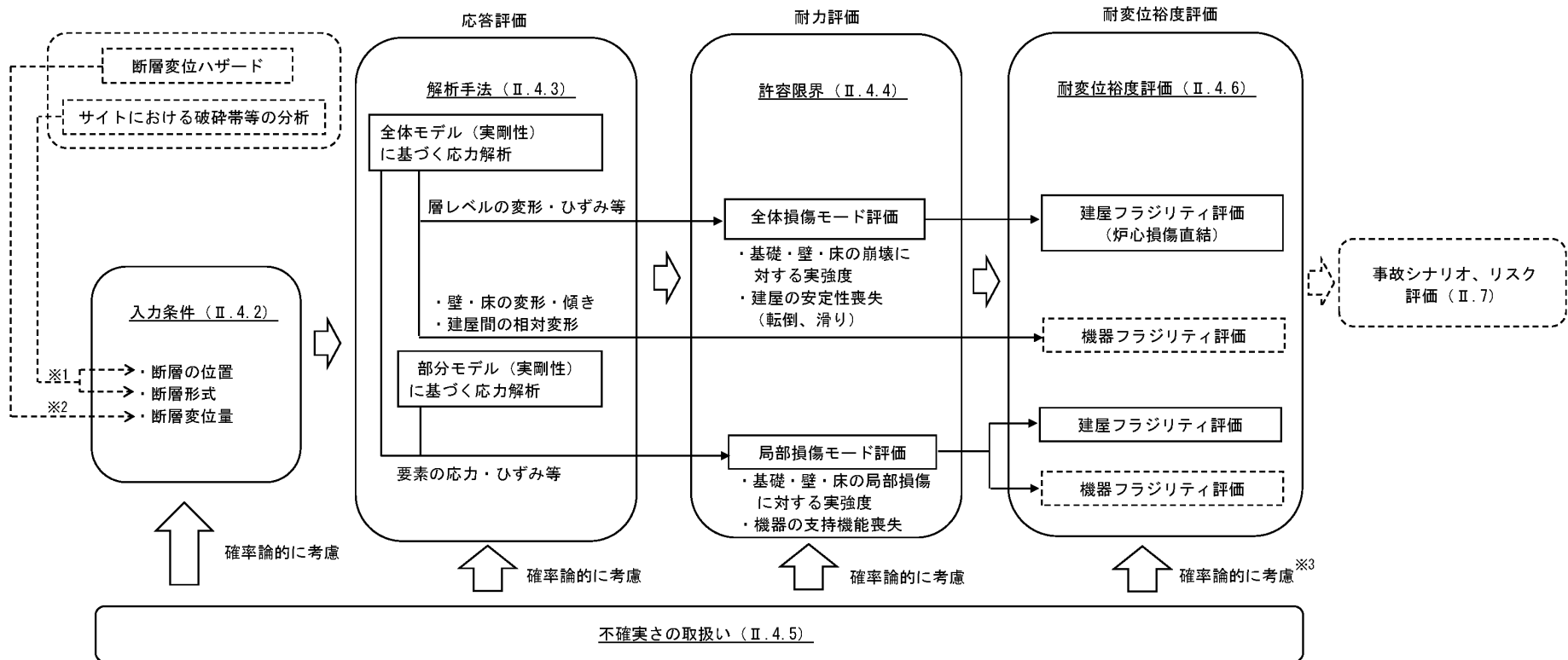
注) ※1 建物・構築物の基礎下レベルでの地盤の食い違い量 (建物・構築物を無視した地盤の食い違い量) が与えられる。
 ※2 断層変位が建屋全体に与える影響を評価する場合は全体モデル、建屋局部の重要機器に与える影響を評価する場合は部分モデルを用いる。
 ※3 保守性に配慮して、応答評価では設計応答値とし、耐力評価では設計許容値とする。
 ※4 設計応答値が設計許容値を下回っていることを確認する。

図 II.4.1-1 建物・構築物に対する影響評価フローその1 (①設計上の許容限界に対する裕度評価)



注) ※1 建物・構築物の基礎下レベルでの地盤の食い違い量 (建物・構築物を無視した地盤の食い違い量) が与えられる。
 ※2 既往の断層変位記録もしくは断層変位ハザード評価結果等を参照し、想定を超える断層変位としての断層変位量の範囲を設定する。
 ※3 確率的に適切な信頼度を考慮して、実剛性による応答値及び実耐力値を設定する。
 ※4 決定論的な応答値が決定論的な耐力値を下回っている場合には当該対象は損傷していないとみなす。決定論的な応答値が決定論的な耐力値を上回っている場合には当該対象は損傷しているとみなす。

図 II.4.1-2 建物・構築物に対する影響評価フローその 2 (②終局限界に対する裕度評価)



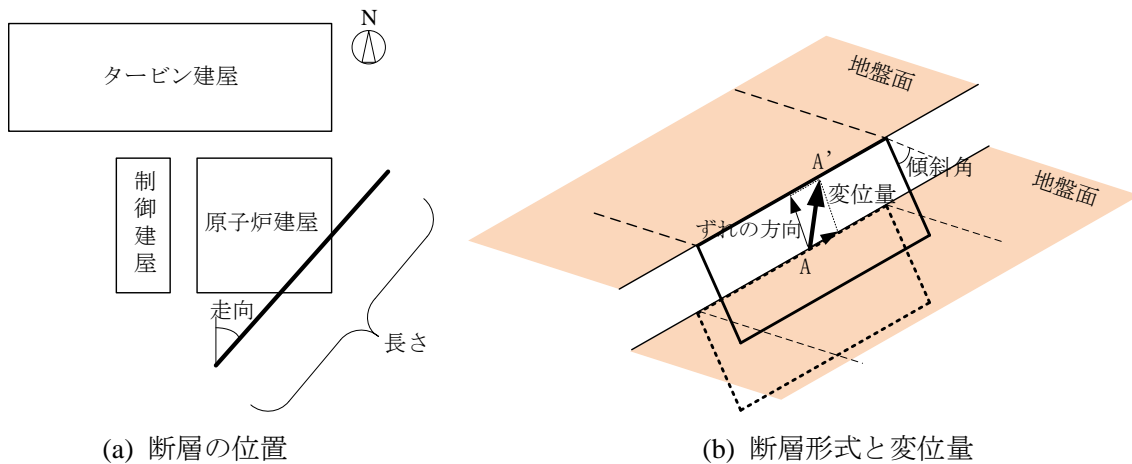
注) ※1 建物・構築物の基礎下レベルでの地盤の食い違い量（建物・構築物を無視した地盤の食い違い量）が与えられる。ただし、断層の位置及び断層形式の設定に際して不確かさが伴う場合は、建物・構築物に与える影響を考慮して、仮想の断層の位置及び断層形式を複数重み付けして評価する。
 ※2 断層変位ハザード評価結果に基づく。
 ※3 入力条件、応答評価及び耐力評価に係る偶発的不確かさは fragility 曲線の β_r として考慮し、認識論的不確かさは fragility 曲線の β_u として考慮することを基本とする。ただし、条件付きの ODF 評価においては、適切な信頼度を考慮した決定論的な fragility 評価（HCLPF 等でのクリフエッジ評価）で代替してもよい。

図 II.4.1-3 建物・構築物に対する影響評価フローその3 (③確率論的リスク評価 (PRA))

II.4.2 入力条件

構造物に対する断層変位の入力は、構造物直下に断層変位が生じる場合は、断層の変位量を対象構造物に作用させる。さらに、断層変位が構造物近傍で発生した場合でも、地盤全体の傾斜により構造物に影響を与える可能性があるため、構造物近傍で発生する断層変位も対象となる。いずれの場合も、II.3で想定された変位量が、構造物がない状態での構造物直下レベルで再現できるようにしたものを用いる。

想定された構造物直下の断層変位量を再現する方法は、II.4.3で詳述するが、一般的には、モデル化した地盤の境界に、対象とする断層のずれの向き（変位量の向き）に様な強制変位を与えることで、想定された構造物直下での断層変位が再現されるようにする。このとき、評価に必要な断層変位のパラメータは、①断層の位置（長さ、走向）、②断層形式（断層の傾斜角とずれの方向）、③変位量となる（図II.4.2-1参照）。



図II.4.2-1 入力として断層変位を考慮する場合に必要なパラメータ

断層の平面的な位置は、対象として特定された断層位置に設定することを基本とするが、確率論的なリスク評価において、断層変位量が確率量として与えられる場合は、モンテカルロシミュレーション等のサンプリング手法を用いて、与えられた確率量と同等な決定論的な代表変位（と重み）を評価して用いることが考えられる。他の走向、傾斜角等の場合も、確率量として与えられた場合は、同様に取り扱うことができる。

なお、断層の位置及び断層形式の設定に際して不確かさが伴う場合は、その範囲をできるだけカバーするように、仮想の断層の位置及び断層形式（と重み）を複数設定する。

さらに、地震動と断層変位の重畳を考慮する場合には、構造物に静的もしくは動的に地震動による慣性力を作用させることに加え、上記の考え方に従い断層変位を作用させる。

Ⅱ.4.3 解析手法

Ⅱ.4.3.1 解析モデル

(1) 解析モデルの種類

入力条件に対する建屋の損傷状況及び機器・配管系へ与える検討条件を算定するための建屋－地盤系の解析モデルは、次の2種類のモデルが考えられる。

- ①建屋－地盤全体モデル
- ②部分モデル

(2) 建屋－地盤全体モデル

炉心損傷頻度の評価を念頭においた建屋全体の損傷状況及び機器・配管系への検討条件を算定するために、「建屋－地盤全体モデル」を用いることが考えられる。「建屋－地盤全体モデル」は、建屋各部位をシェル要素又はソリッド要素によりモデル化し、地盤をソリッド要素等によりモデル化する。建屋－地盤間は、ジョイント要素等の剥離及び滑りが考慮できる要素でモデル化する。断層面はジョイント要素等によりモデル化する。ここで、ジョイント要素のパラメータ（付着力、摩擦係数等）は、試験結果や既往知見に基づき適切に設定する。地盤の領域は建屋の影響がない範囲で設定する。建屋－地盤全体モデルの例を図Ⅱ.4.3-1に示す。なお、建屋各部位のモデル化に際しては、耐震部材に加えて、間仕切壁等の非耐震部材による影響にも留意する。

断層変位は、Ⅱ.4.2に基づき、建屋との相互作用の影響が小さいと考えられる位置（建屋基礎底面位置）における水平方向及び鉛直方向の境界変位として与える。

解析においては、必要に応じて、建屋の弾塑性、地盤の弾塑性、建屋－地盤間の剥離及び滑りを考慮する。

参考に、原子炉建屋を対象として断層変位に対する損傷評価を実施した建屋－地盤全体モデルにおける解析手法とモデル化の概要を表Ⅱ.4.3-1に示す。

(3) 部分モデル

格納容器損傷を詳細に評価することを念頭においた建屋各部の損傷状況及び機器・配管系への詳細検討条件を算定するために、並びに、大型機器の支持部等の建屋や機器・配管系との連成効果が無視できない場合には、「部分モデル」を用いることが考えられる。部分モデルの境界条件として、建屋－地盤全体モデルの解析結果を用いることも考えられる。部分モデルの例を図Ⅱ.4.3-2に示す。

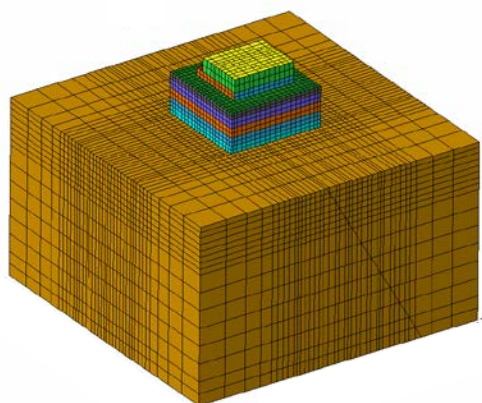


図 II.4.3-1 建屋－地盤全体モデルの例

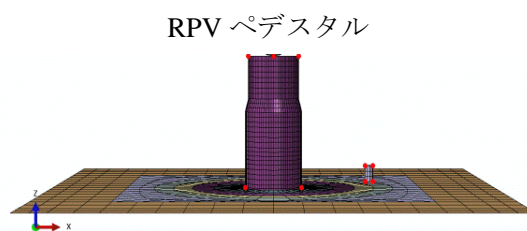


図 II.4.3-2 部分モデルの例

表 II.4.3-1 建屋－地盤全体モデルにおける解析手法とモデル化の例

項目	概要
解析手法	3次元非線形有限要素法による建屋－地盤連成解析
使用要素	建屋：シェル要素又はソリッド要素、ビーム要素、ばね要素 地盤：ソリッド要素 建屋－地盤間：ジョイント要素 断層面：ジョイント要素
材料境界面	建屋と地盤間及び断層面にはジョイント要素を用いて、接触・剥離・摩擦を考慮している。ただし、摩擦係数に関しては、既往知見が極めて少ないため、保守的にゼロと設定している。
モデル化範囲	平面方向には基礎幅の3倍程度、深さ方向には基礎幅の1.5倍程度をモデル化範囲としている。なお、モデル境界には、半無限遠の地盤剛性を反映した無限要素を設けている。
構成則（地盤）	軟岩地盤の構成則は弾塑性（2折れ線）モデルとし、Mohr-Coulombの破壊条件 ¹⁾ を適用。
構成則（鉄筋コンクリート）	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの構成則は、等方性塑性損傷モデル²⁾を適用。 ・鉄筋の構成則はバイリニアモデルとし、von Misesの降伏条件³⁾を適用。 ・コンクリートと鉄筋間は完全付着を仮定。

II.4.3.2 解析手順

常時応力（地盤応力及び建屋自重）を考慮し、自重解析と地震時解析を実施する。必要に応じて、地震時解析においては、地震時の断層変位に加えて、地震時の揺れによる影響を考慮する。なお、地震時（本震及び余震）の揺れによる影響は、断層変位発生時刻を考慮して、静的もしくは動的に組み合わせるものとする。

Ⅱ.4.3.3 解析結果の出力

(1) 建物・構築物の耐変位安全性評価のための出力項目

基礎・壁・床の崩壊及び局部損傷に係る耐変位安全性を評価するために、各節点の変位及び各要素の発生応力もしくは発生ひずみを出力する。

(2) 機器・配管系の耐変位安全性評価のための出力項目

動的機器の機能損傷及び渡り配管等の構造損傷に係る機器・配管系の耐変位安全性評価に資するために、当該箇所での変位及び回転角を出力し、建屋の傾斜及び建屋間の相対変位を評価する。さらに、基礎・壁・床の局部損傷に起因する機器・配管系の耐変位安全性評価に資するために、前述の当該箇所での変位及び回転角に加えて、当該箇所での発生応力もしくは発生ひずみを出力し、評価エリアにおける損傷状況を評価する。

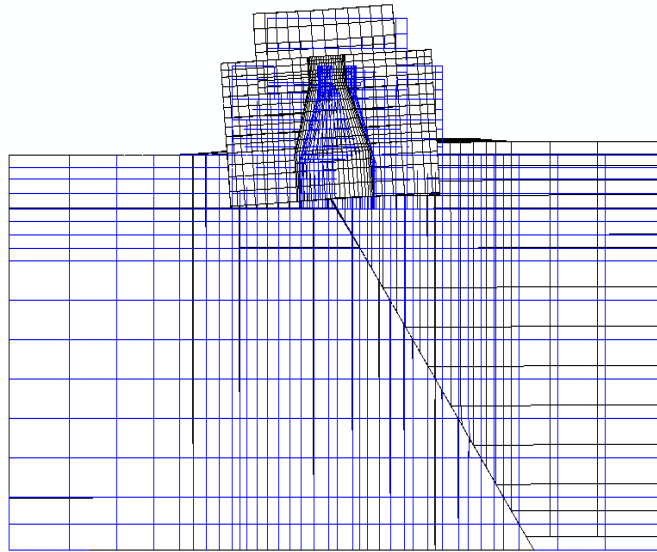
以上をまとめて、構造物の損傷状態に応じた機器・配管系の耐変位安全性評価のための解析結果の出力項目の例を表Ⅱ.4.3-2に示す。

表Ⅱ.4.3-2 機器・配管系の耐変位安全性評価のための解析結果の出力項目の例

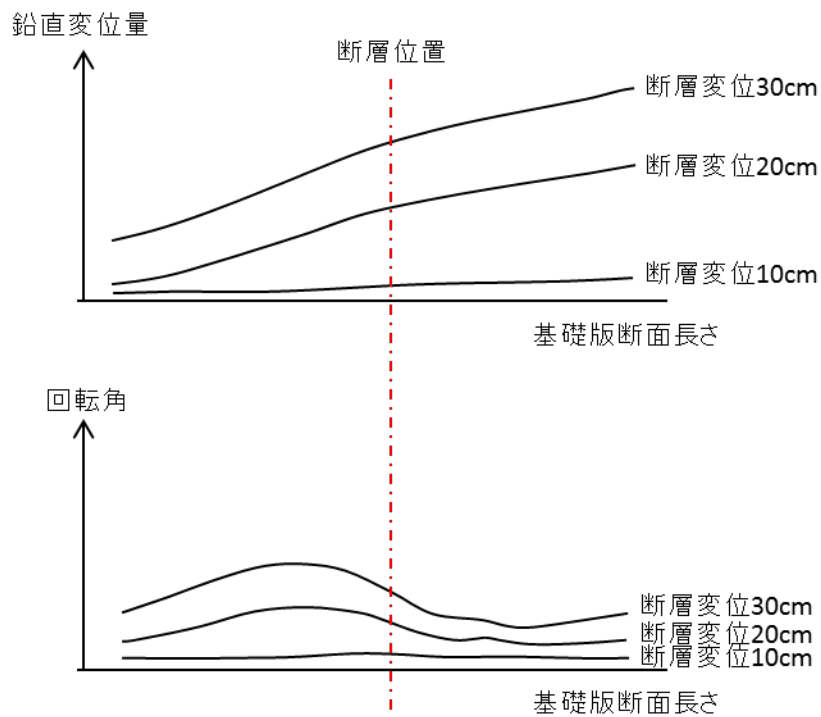
構造物の損傷状態	出力項目
有意な損傷なし	・当該箇所での変位 ・当該箇所での回転角
基礎・壁・床の局部損傷あり	・当該箇所での変位 ・当該箇所での回転角 ・当該箇所での発生応力もしくは発生ひずみ
基礎・壁・床の崩壊 (全体損傷)	不要※

※：機器・配管系に対する支持機能を維持できていない状態と判断

解析結果の出力イメージとして、断層変位を受ける建屋の変位量のイメージを図Ⅱ.4.3-3に、断層変位を受ける基礎版の鉛直変位量と回転角のイメージを図Ⅱ.4.3-4に示す。



図Ⅱ.4.3-3 断層変位を受ける建屋の変位量のイメージ



図Ⅱ.4.3-4 断層変位を受ける基礎版の鉛直変位量と回転角の出力イメージ

なお、機器・配管系の地震時の揺れの影響を評価するために、必要に応じて、当該箇所の加速度を出力する。ただし、加速度の出力に際しては、Ⅱ.4.3.1で示す建屋—地盤全体モデルに加えて、質点系モデルを用いてもよい。

II.4.3.4 解析コードの検証

II.4.3.1～II.4.3.3 に示された解析手法に適用する解析コードに関しては、断層変位時に支配的な損傷モードに対して、実際の被害事例や実験結果と比較を行って解析手法の妥当性の検証が必要である。

しかし、実際に観測された断層変位による建造物の被害事例を対象としたシミュレーション解析を実施した事例は極めて少ない。妥当性が検証された数少ない事例の一つとして E. Faccioli et al. (2008) ⁴⁾ が挙げられる。

E. Faccioli et al. (2008) ⁴⁾ では、1999 年 Kocaeli 地震（モーメントマグニチュード (Mw) 7.4)、1999 年 Duzce-Bolu 地震 (Mw7.1)、1999 年 Chi-Chi 地震 (Mw7.6) 及び Mount Etna の断層を対象とし、地表地震断層が建物基礎直下に現れた事例を調査している。幾つかの事例については、数値解析的検討を実施しており、解析コードの妥当性が検証されている。なお、主断層もしくは分岐断層を対象としているため、断層変位としては比較的大きな値に対する検証例となっている。したがって、断層変位として比較的小さな値となる副断層に対する解析コードの妥当性の検証も含まれているものと考えられる。

1999 年 Chi-Chi 地震の際に Fung-Yan City の Chung-Chung Park の下に逆断層が現れ、幾つかの建造物は崩壊に至っている。しかしながら、剛基礎支持の 4 階建ての RC 造（図 II.4.3-5 で円で囲った建物）は 4m に及ぶ地盤隆起を経験したが、 10° ($\approx 1/5.7$) 傾いたのみで構造的被害は生じていない。

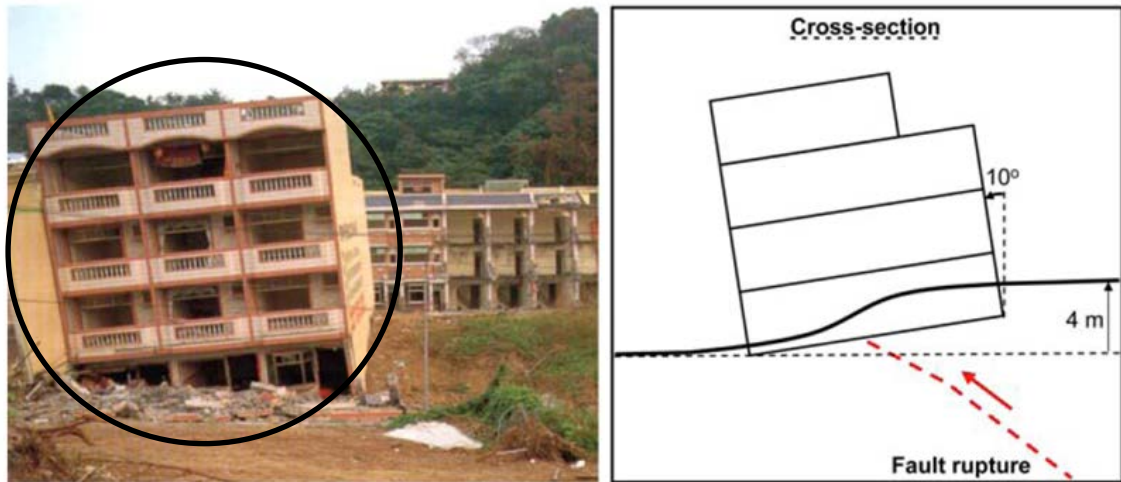
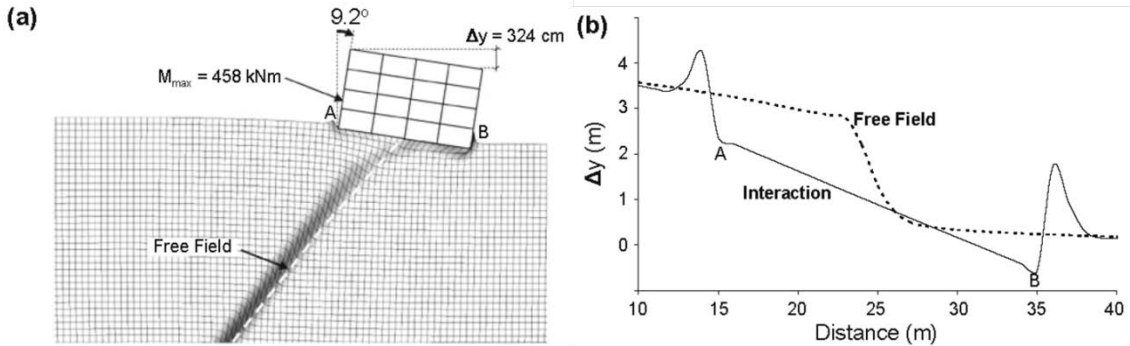


図 II.4.3-5 断層変位に対する建物の被害事例 ⁴⁾

前述の建物について、汎用の有限要素法解析ソフトウェア ABAQUS を用いて 2 次元の FEM 解析が行われている。地盤と基礎の間はギャップ要素（接触及び剥離のみを考慮し、付着及び摩擦は無視したジョイント要素）でモデル化し、基礎面に 4m の強制変位を与えている。計算結果によれば、この建物は 9.2° 剛体回転をしており、実際に経験した 10° の傾斜

と良く対応している（図Ⅱ.4.3-6）。



図Ⅱ.4.3-6 断層変位に対する建物の数値解析事例⁴⁾

次に、実際に観測された断層変位に対する建屋全体の实被害事例とそのシミュレーション解析ではないものの、断層変位に対する支配的な損傷モードの一つである基礎版の面外せん断破壊実験とそのシミュレーション解析による解析コードの妥当性の検証例を示す。例えば、熊谷ほか（2011）⁵⁾は、原子力発電所建屋の基礎版を対象にした面外せん断終局強度に関する実験とそのシミュレーション解析を実施している。せん断補強筋を有していない試験体のひび割れ状況を図Ⅱ.4.3-7に、そのシミュレーション解析モデルを図Ⅱ.4.3-8に、実験とシミュレーション解析による荷重-変形関係の比較を図Ⅱ.4.3-9に示す。これより、断層変位に対する支配的な損傷モードの一つである基礎版の面外せん断破壊に対しては、ここで示された解析手法を用いることによって、終局状態に至るまでの挙動を精度よく捉えられることが示された。

以上に示す解析手法を用いて、構造物の損傷が比較的軽微であれば、断層変位に対する建物・構築物の現実的応答評価が可能であると考えられる。

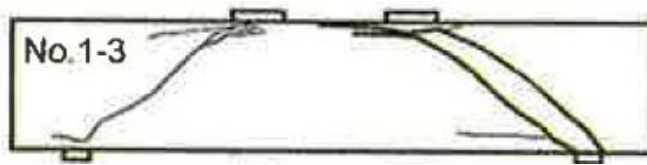


図 II.4.3-7 試験体のひび割れ状況⁵⁾

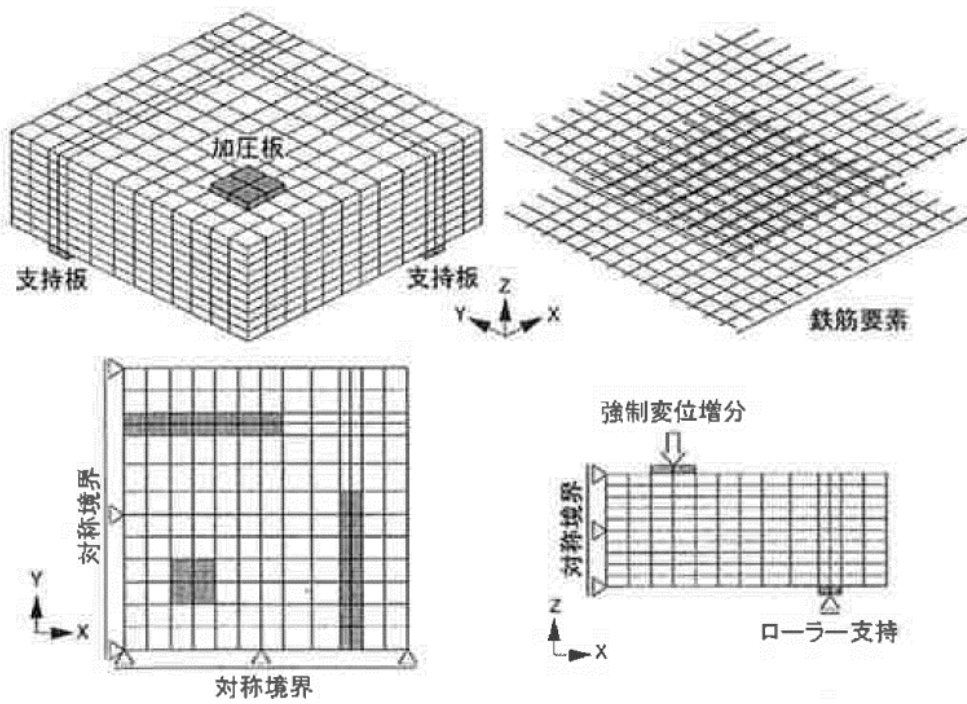


図 II.4.3-8 シミュレーション解析モデル⁵⁾

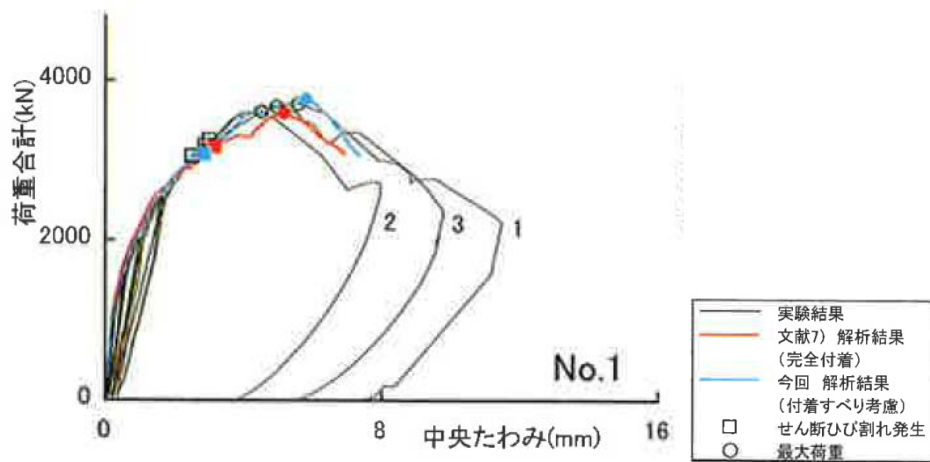


図 II.4.3-9 荷重－変形関係の比較⁵⁾

Ⅱ.4.4 許容限界

Ⅱ.4.4.1 損傷モード

断層変位に伴う建屋の損傷モードの特徴としては、地震応答に伴う建屋の損傷モードと比較して、建屋下部における損傷が支配的なことにある。

断層変位に伴って考慮すべき建屋の損傷モードは、基礎版及び耐震壁の曲げ破壊あるいはせん断破壊であると考えられる。これらの設計レベルから終局に至るまでの過程として、次のとおり整理できる。

①曲げ破壊

- ・面外曲げ

引張側鉄筋降伏 → コンクリートクラックによる支持機能限界

→ 引張側鉄筋の塑性変形増大／破断 あるいは 圧縮側コンクリート圧壊

②せん断破壊

- ・面外せん断

コンクリートひび割れ → コンクリートせん断破壊

- ・面内せん断

コンクリートひび割れ → 鉄筋コンクリート支持機能限界 → せん断破壊

表Ⅱ.4.4-1には、断層の種類とこれらの損傷モードの関係を示す。

表Ⅱ.4.4-1 断層の種類による損傷モードの関係

断層形式	建屋への作用	耐震壁の 損傷モード	床・基礎版の 損傷モード
正断層	縦ずれ変位	面内せん断破壊	面外曲げ破壊 面外せん断破壊
逆断層	縦ずれ変位	面内せん断破壊	面外曲げ破壊 面外せん断破壊
	断層走向直交方向 の圧縮 (図Ⅱ.4.4-1 参照)	面外曲げ破壊 面外せん断破壊 (地下部)	—※
横ずれ断層	横ずれ変位	面外曲げ破壊 面外せん断破壊 (地下部)	—※

※：応力は発生するものの、損傷を与えるレベルには至らないと判断

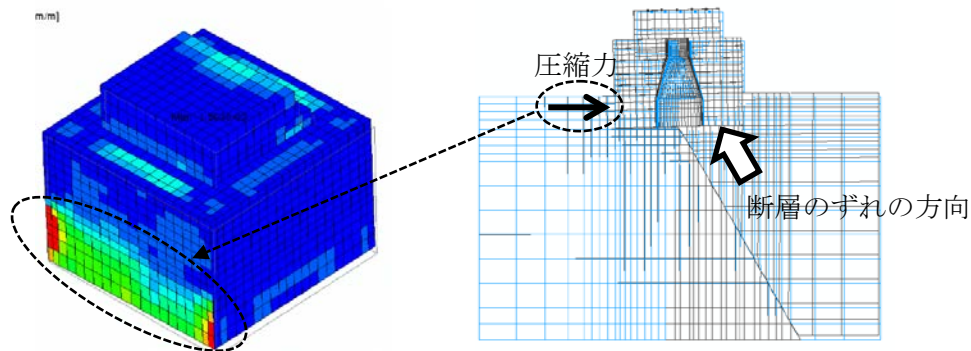


図 II.4.4-1 逆断層による断層走向直交方向の圧縮力が建屋に作用するイメージ

II.4.4.2 許容限界の目安値

(1) 基礎底面の傾斜に係る許容限界

断層変位に伴う基礎底面の傾斜による影響については、基本的には、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」の解説に記載されている「建物に生じる沈下量を目安の数値を用いて評価することはあくまでも便宜的な手法であり、原則は沈下によって建物の構造部材に生じる応力を照査することによって評価すべきことを忘れてはならない」に従って、II.4.3 に示した解析モデルに基づいて詳細な部材応力解析を行った上で、後述する II.4.4.2(2) に示された目安値を適用することで評価することが望ましいと考えられる。

以降においては、上記検討結果を比較・分析するための参照値としての意味合いも含め、既往の規格・基準等で設定されている基礎底面の傾斜に係る許容限界について調査し、基礎底面の傾斜に係る許容限界の目安値を整理した。

日本建築学会「建築基礎構造設計指針」では、基礎沈下に伴う、壁式鉄筋コンクリート構造を含めた構造物のひび割れに対する調査結果がまとめられ、それに基づき建物の沈下に対する許容変形角として、圧密沈下に対して $1/1000 \sim 2/1000$ 、即時沈下に対して $1/2000 \sim 1/1000$ の目安値が示されている。これらの目安値は、構造物のひび割れの有無の観点に基づく数値であり、構造物の強度もしくは破壊の観点から整理されたものではなく、使用限界状態における目安値と言える。

原子力規制委員会「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」では、上記の一般建築物の構造的な障害が発生する限界としての建物の変形角を、施設の傾斜に対する評価の目安とし、最も保守的である $1/2000$ 以下となることを確認する旨の記載がある。なお、これは、基本設計段階での目安値であり、機器、設備等の仕様が明らかになる詳細設計段階においては別途詳細に評価することとなる。

日本建築学会「小規模建築物基礎設計指針」では、不同沈下の評価においては、単に計算結果だけの評価だけではなく、現状の状況や過去の障害事例を参考にするなどして総合的に判断することが大切としながらも、障害が発生する傾斜角の概ね $1/2$ を不同沈下の設計目標値の参考値とし、変形角で $2.5/1000$ 以下、傾斜角で $3/1000$ 以下として示している。

地盤工学会「浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究」では、傾斜角の許容値に関する居住者の意識調査に関して整理している。不同沈下量が 60～100mm で傾斜を意識しており、健康障害の面では、6/1000 で意識し始め、8/1000 で強く意識し、10/1000 ではめまいや頭痛により水平修復を余儀なくされている。この結果を裏付けるように、水平修復工事を実施した建物の調査結果は、不同沈下量で 80mm 程度、平均傾斜角で 6～10/1000 であったと報告している。さらに、同報告書では、罹災証明上の被災度判定及び地震保険における損壊基準においては、いずれも 10/1000 程度を超えると半壊もしくは半損として認定し、16.7/1000 程度を超えると大規模半壊もしくは全損と判断され、部分的な補修では対応が困難になることを踏まえて、戸建て住宅の液状化対策のクライテリアとして、中地震動に対しては有害な沈下変形を許容しない基礎構造とし、最大傾斜角では 10/1000 を超えないこと、大地震動に対してはある程度の損傷は許容し修復を容易にする基礎構造とし、最大傾斜角は 16.7/1000 を超えないことを提言している。

以上を踏まえて、一般建物と比べて、硬い岩盤上に設置された厚い基礎版を有する原子炉建屋における基礎底面の傾斜に係る許容限界に関して、現時点で整理した結果を表 II.4.4-2 に示す。

ここで、II.4.1 で示されるリスク評価方法のうち「①設計上の許容限界に対する裕度評価」における基礎底面の傾斜に係る許容限界の目安値としては、調査結果の不確実さを考慮して、保守的な目安と一般的な目安の二つを記載している。保守的な目安としては、調査結果で最も保守的な値を採用している原子力規制委員会「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に示される施設の傾斜に対する目安値 1/2000 とした。一般的な目安としては、日本建築学会「小規模建築物基礎設計指針」に示された不同沈下の設計目標値の参考値に多少の保守性を配慮して、2/1000 とした。なお、ここで示す許容限界は、扉の開閉が困難になる、クレーン等の移動に不具合が生じる、床の排水等に支障が生じる等の一般建築物の使用上の障害が発生する可能性のある使用限界状態のことを指している。

また、「②終局限界に対する裕度評価」における基礎底面の傾斜に係る許容限界の目安値としては、地盤工学会「浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究」に示される、有害な沈下変形を許容しない最大傾斜角 10/1000 とした。なお、「②裕度評価」はアクシデントマネジメントを含むリスク評価であることを考慮すると、ある程度の損傷を許容してより大きな傾斜角を目安値とすることも考えられるが、ここでは修復及び復旧作業を前提としない傾斜角とし、修復限界状態での許容限界を示している。

最後に、「③確率論的リスク評価 (PRA) / フラジリティ評価」における基礎底面の傾斜に係る許容限界の目安値に関しては、参考とすべき既往知見が存在しないため、ここでは記載していないが、例えば、地盤工学会「浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究」に示される、ある程度の損傷は許容し修復が容易な最大傾斜角 16.7/1000 に、適切な不確実さを考慮して目安値とする等の方法が考えられる。

なお、基礎底面の傾斜に伴う安全上重要な機器・配管系等に対する許容限界に関しては、

II.6.4 を参照されたい。

表 II.4.4-2 基礎底面の傾斜に係る許容限界の一般的な目安値に関する調査結果

	①設計上の許容限界 (使用限界)		②終局限界 (修復限界)	③確率論的リスク 評価 (PRA) /フラジリティ評価
	保守的な目安	一般的な目安		
傾斜角	0.5/1000	2/1000 程度	10/1000 程度	※

※：参考とすべき既往知見が存在しないため、ここでは記載していないが、例えば、地盤工学会「浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究」に示される、ある程度の損傷は許容し修復が容易な最大傾斜角 16.7/1000 に、適切な不確実さを考慮して目安値とする等の方法が考えられる。

(2) RC 部材の構造的あるいは機能維持上の許容限界

既往の規格・基準において設定されている、鉄筋コンクリート部材の構造的あるいは機能維持上の許容限界について調査した。

裕度評価に用いる柱・梁の曲げ終局強度については、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説にまとめられている。

次に、裕度評価に用いる耐震壁のせん断限界・曲げ限界については、原子力施設の耐震壁のスペックを模擬した既往の I 型壁、H 型壁、ボックス壁、円筒壁あるいはコンクリート製格納容器の縮小模型を用いた静的加力試験あるいは振動台試験が、電力共通研究あるいは旧原子力発電技術機構により精力的に実施され、その結果は日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601)」あるいは日本機械学会「発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格 (JSME S NE1-2014)」にまとめられている。

さらに、裕度評価に用いる主として梁のせん断性能については、荒川卓博士による研究成果が荒川式又は修正荒川式 (Mean 式、Minimum 式) としてまとめられており、日本建築学会「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (RC-N)」にも掲載されている。荒川式の基礎版等の面材に対する適用性を試験的に確認した事例としては、熊谷ほか (2011)⁵⁾が挙げられる。

また、確率論的リスク評価 (PRA) /フラジリティ評価に用いる許容限界等としては、日本原子力学会標準として「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2015」(以下「地震 PRA 標準」という。)にまとめられている。

一方、耐震壁の支持機能を確認する目的で、面内せん断ひずみ下におけるアンカー引抜試験が実施されており、日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術規程」にて、機能維持上の許容限界として、せん断ひずみ $\gamma=2/1000$ が設定されている。

これらの調査結果のうち、断層変位に伴って生じると考えられる面外曲げ、面外せん断、面内せん断の損傷モードに対応するものを、表 II.4.4-3～表 II.4.4-4 に示す。

表Ⅱ.4.4-3 建屋の損傷モードと構造上の許容限界等の目安値に関する調査結果(1)

損傷モード	状態	①設計上の許容限界	②終局限界
面外 曲げ	曲げ終局	梁式・柱式に対して適切な余裕	梁式・柱式 ^{※1}
	引張側鉄筋 塑性変形	—	$\varepsilon = 5/1000$ ^{※2} 破断ひずみとし $\varepsilon = 2 \sim 10\%$ 程度 の設定例あり
	圧縮側コンク リート圧壊	—	$\varepsilon = 3/1000$ ^{※3}
面外 せん断	コンクリート せん断破壊	荒川 Mean 式によるせん断耐力 に対して適切な余裕	荒川 Mean 式によるせん断耐力 ^{※4}
面内 せん断	コンクリート せん断破壊	機能維持上の許容限界せん断 ひずみ $\gamma = 2/1000$ ^{※5} ($=4/1000/2$)	構造性能上の限界せん断ひずみ $\gamma = 3/1000$ ^{※5} (ボックス壁で 95%超過) 終局せん断ひずみ $\gamma = 4/1000$ ^{※5} (ボックス壁で平均値 -1σ)

ここで、 ε : 軸ひずみ γ : せん断ひずみ

※1 : 日本建築学会「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」

$$\text{梁式} : \quad Mu = 0.9a_t\sigma_y d$$

$$\text{柱式} : \quad Mu = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bDFc}\right)$$

ここで、 Mu : 終局曲げモーメント

a_t : 引張鉄筋の断面積

σ_y : 鉄筋の降伏強度

d : 梁及び柱の有効せい

D : 梁及び柱のせい

N : 軸方向力

b : 梁及び柱の幅

Fc : コンクリートの圧縮強度

※2 : 日本機械学会「発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格」

降伏ひずみの 2~3 倍として設定 (米国基準の流れを汲む)

※3 : 日本機械学会「発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格」

コンクリートの圧壊最大強度時のひずみとして設定

※4 : 日本建築学会「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」

荒川 Mean 式：
$$Q_{mean} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{M/Q \cdot D^{0.12}} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} t_e \cdot j$$

ここで、 Q_{mean} ：せん断耐力の平均値 (kgf)

p_{te} ：有効幅を考慮した引張鉄筋比

M/Q ：シアスパン (cm)

D ：梁及び柱のせい (cm)

F_c ：コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

σ_{wh} ：せん断補強筋の降伏強度 (kgf/cm²)

p_{wh} ：せん断補強筋比

σ_0 ：軸応力度 (kgf/cm²)

t_e ：有効幅 (cm)

j ：応力中心間距離 (cm)

※5：日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術規程」

表Ⅱ.4.4-4 建屋の損傷モードと構造上の許容限界等の目安値に関する調査結果(2)

損傷モード	状態	③確率論的リスク評価（PRA）/フラジリティ評価
面外曲げ	曲げ終局	梁式・柱式 ^{※1}
	引張側鉄筋 塑性変形	$\varepsilon = 5/1000$ ^{※2} 破断ひずみとし $\varepsilon = 2 \sim 10\%$ 程度の設定例あり
	圧縮側コンクリート 圧壊	$\varepsilon = 3/1000$ ^{※3}
面外せん断	コンクリート せん断破壊	中央値及び偶然的不確実さ：荒川 Mean 式 ^{※4} のパラメータに偶然的不確実さを考慮して評価 認識論的不確実さ：荒川 Minimum 式 ^{※4} （95%超過）
面内せん断	コンクリート せん断破壊	【ボックス壁】 ^{※5} 中央値：平均値 $\gamma = 5.36/1000$ 及び以下の変動係数を考慮して評価 偶然的及び認識論的不確実さに係る変動係数：0.24 【円筒壁】 ^{※5} 中央値：平均値 $\gamma = 9.77/1000$ 及び以下の変動係数を考慮して評価 偶然的及び認識論的不確実さに係る変動係数：0.33

ここで、 ε ：軸ひずみ γ ：せん断ひずみ

※1：日本建築学会「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」

$$\text{梁式} : \quad \text{Mu} = 0.9a_t\sigma_y d$$

$$\text{柱式} : \quad \text{Mu} = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bDF_c}\right)$$

ここで、Mu：終局曲げモーメント

a_t ：引張鉄筋の断面積

σ_y ：鉄筋の降伏強度

d ：梁及び柱の有効せい

D ：梁及び柱のせい

N ：軸方向力

b ：梁及び柱の幅

F_c ：コンクリートの圧縮強度

※2：日本機械学会「発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格」

降伏ひずみの2~3倍として設定（米国基準の流れを汲む）

※3：日本機械学会「発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格」

コンクリートの圧壊最大強度時のひずみとして設定

※4：日本建築学会 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説

$$\text{荒川 Mean 式： } Q_{mean} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{M/Q \cdot D^{0.12}} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} t_e \cdot j$$

$$\text{荒川 Minimum 式： } Q_{min} = \left\{ \frac{0.053 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{M/Q \cdot D^{0.12}} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} t_e \cdot j$$

ここで、 Q_{mean} ：せん断耐力の平均値 (kgf)

Q_{min} ：せん断耐力の下限值 (kgf)

p_{te} ：有効幅を考慮した引張鉄筋比

M/Q ：シアスパン (cm)

D ：梁及び柱のせい (cm)

F_c ：コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

σ_{wh} ：せん断補強筋の降伏強度 (kgf/cm²)

p_{wh} ：せん断補強筋比

σ_0 ：軸応力度 (kgf/cm²)

t_e ：有効幅 (cm)

j ：応力中心間距離 (cm)

※5：地震 PRA 標準

Ⅱ.4.4.3 損傷範囲と損傷モードの関係

Ⅱ.4.4.2 でまとめられた許容限界の目安値については、引張側鉄筋の塑性変形を除いて、構造試験結果に基づいた、耐震壁の全体ひずみあるいは梁の平均的な応力を整理したものである。

このため、Ⅱ.4.4.1 で設定した損傷モードに対して適用する場合には、損傷範囲を考慮して適用する必要がある。具体的には、面内せん断あるいは面外せん断に関しては、耐震壁あるいは基礎版全体の損傷について適用する場合は問題ないが、局所的な損傷に適用する場合には注意が必要となる。

例えば、基礎版あるいは床の損傷については、次のように考えられる。

- ・局所的な損傷

機器アンカー等の支持機能喪失 ← 局所部位における許容限界の超過

特定の部屋の機能損傷 ← 部屋の床を横断するような許容限界の超過

- ・建屋全体の損傷

基礎版を横断するような連続した許容限界の超過 (図Ⅱ.4.4-2(a))

また、耐震壁の損傷については、次のように考えられる。

- ・局所的な損傷

配管サポート等の支持機能喪失 ← 一部の壁における平均的な許容限界の超過

(図Ⅱ.4.4-2(b))

部屋の崩壊 ← 特定の部屋を囲む耐震壁における平均的な許容限界の超過

(面内せん断、面外せん断、面外曲げ)

- ・建屋の層崩壊

建屋を縦断するような連続した許容限界の超過 (質点系モデルと等価な層全体としての評価)

以上のとおり、損傷を評価する場合には、その対象範囲と損傷の拡がりについて十分に留意する必要がある。

これらの建屋の損傷については、機器・配管系の評価で必要となるゾーニング等、要求される領域に応じて評価することになるものと考えられる。

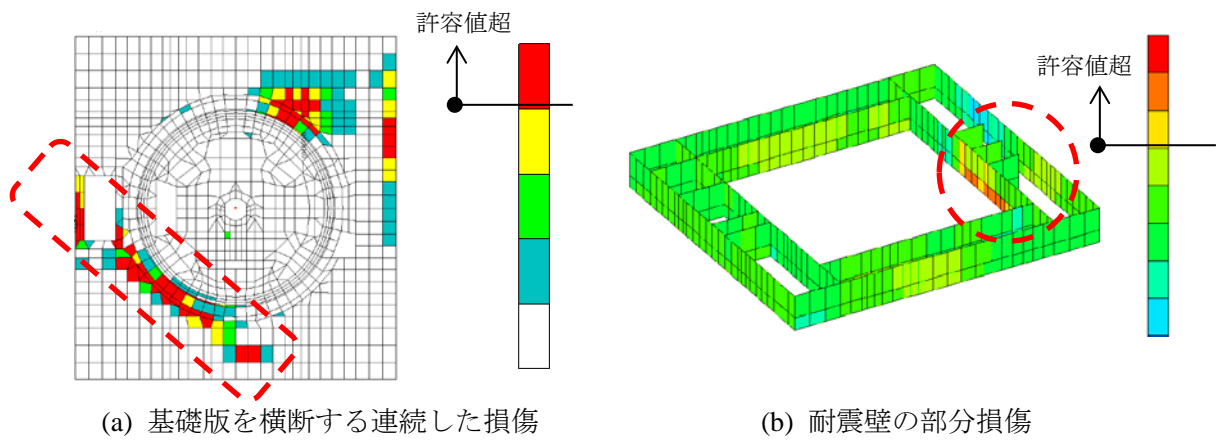


図 II.4.4-2 FEM モデルによる損傷範囲のイメージ

II.4.5 不確実さの取扱い

確率論に基づくリスク評価においては、評価対象とする事象や評価プロセスに含まれる様々な不確実さを考慮する必要がある。この不確実さをもたらす要因は、一般に物理現象のランダム性に係る偶然的な不確実さ (aleatory uncertainty) と知識及び認識の不足に係る認識論的不確実さ (epistemic uncertainty) に区別されるが、地震 PRA 標準においては、地震ハザード評価及びフラジリティ評価に含まれるこれらの不確実さ要因を整理し、リスク評価に考慮する方法が提示されている。

一方、断層変位に対するリスク評価は、地震 PRA と同様に地震が起因事象となるものの、ハザード評価の対象は地震動ではなく断層変位であり、動力学的破壊進展解析を用いて地表断層変位を予測する先駆的な試みがなされている研究事例^{6),7)}はあるが、現状はフラジリティ評価においても動的問題ではなく静的問題として取り扱うこと等が地震 PRA とは異なっている。したがって、断層変位に対するフラジリティ評価で考慮すべき不確実さ要因は、地震動に対するものとは異なる観点で設定する必要がある。

特に、断層変位に対するリスク評価において、最も大きな不確実さの一つとして断層変位の位置が挙げられる。断層変位が施設に与える影響は、断層変位の位置で大きく異なるが、対象となる全ての位置を考慮すると解析規模が膨大となることから、実際に断層変位の位置に係る不確実さを直接評価に考慮することは難しい。したがって、断層変位に対するリスク評価では、断層変位の位置や断層形式を選定し、選定した位置で変位が発生した場合の条件付き損傷確率として評価することが現実的であり、評価結果の解釈においては留意すべき点である。

なお、建物・構築物に対する影響評価に係る不確実さの考慮方法等については、地震 PRA 標準における考え方が参考となる。

参考として、表 II.4.5-1 に建物・構築物に対する影響評価における不確実さ要因の例を示す。

表 II.4.5-1 建物・構築物に対する影響評価における不確実さ要因の例

不確実さ要因		備考
断層変位に係る 不確実さ要因 (入力条件)	断層の位置	断層変位ハザード評価側から与えられる入力条件（ただし、影響評価に不確実さを考慮することは難しい。）
	断層形式	
	断層変位量	
応答評価に係る 不確実さ要因	地盤の材料特性	構造物直下における不連続面の分布や岩盤及び不連続面の材料特性の不確実さの影響が大きい。
	構造物の材料特性	荷重－変形関係の不確実さ
	応答評価手法	解析モデル、解析コードの評価精度
耐力評価に係る 不確実さ要因	構造物材料特性	材料強度、限界ひずみの不確実さ
	耐力評価式	評価精度（評価式設定時のデータベースに基づき評価）

Ⅱ.4.6 耐変位裕度評価

Ⅱ.4.6.1 では検討用の断層変位に対する決定論ベースの建物・構築物の耐変位安全性評価（建物・構築物に対するリスク評価方法としては、Ⅰ.6.3 で示された裕度評価に対応している。）を、Ⅱ.4.6.2 では断層変位ハザード評価に基づく建屋フラジリティ評価（建物・構築物に対するリスク評価方法としては、Ⅰ.6.3 で示された確率論的リスク評価（PRA））に対応している。）を記載する。ここで、Ⅱ.4.6.2 においては、基本的な節構成は地震 PRA 標準に基づくものとし、断層変位単独のフラジリティ評価を当面の目標とし、地震時の揺れとの重量フラジリティは、今後の課題とする。

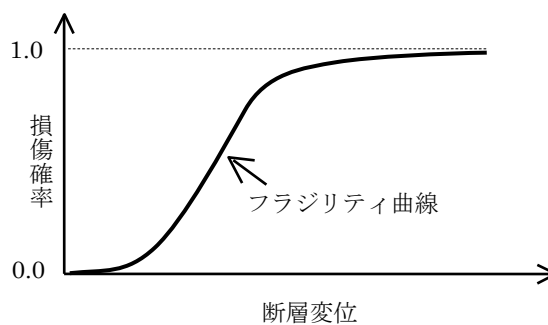
Ⅱ.4.6.1 建物・構築物の耐変位安全性評価

検討用の断層変位に対して、崩壊（全体損傷）及び局部損傷の観点から、Ⅱ.4.3 で得られる構造物の応答とⅡ.4.4 から得られる構造物の許容限界を比較することで、構造物の全体及び各部材の耐変位安全性が確保されているかを判断する。なお、地震時の揺れによる建物・構築物の耐震安全性評価は、基本的には JEAC4601 等の規格・基準に従うものとする。

Ⅱ.4.6.2 建屋フラジリティ評価

(1) 建屋フラジリティ評価の流れ

基本的には地震 PRA 標準と同様な流れであり、(2)項以降はその流れに従って展開している。建屋フラジリティ評価の流れの詳細は、地震 PRA 標準を参照されたい。ここで、フラジリティ曲線を評価するための断層変位（図Ⅱ.4.6-1 の横軸）は、断層変位ハザード評価で定義された位置での値とする。また、断層変位に対する建屋フラジリティ評価フローの例を図Ⅱ.4.6-2 に示す。



図Ⅱ.4.6-1 フラジリティ曲線の模式図

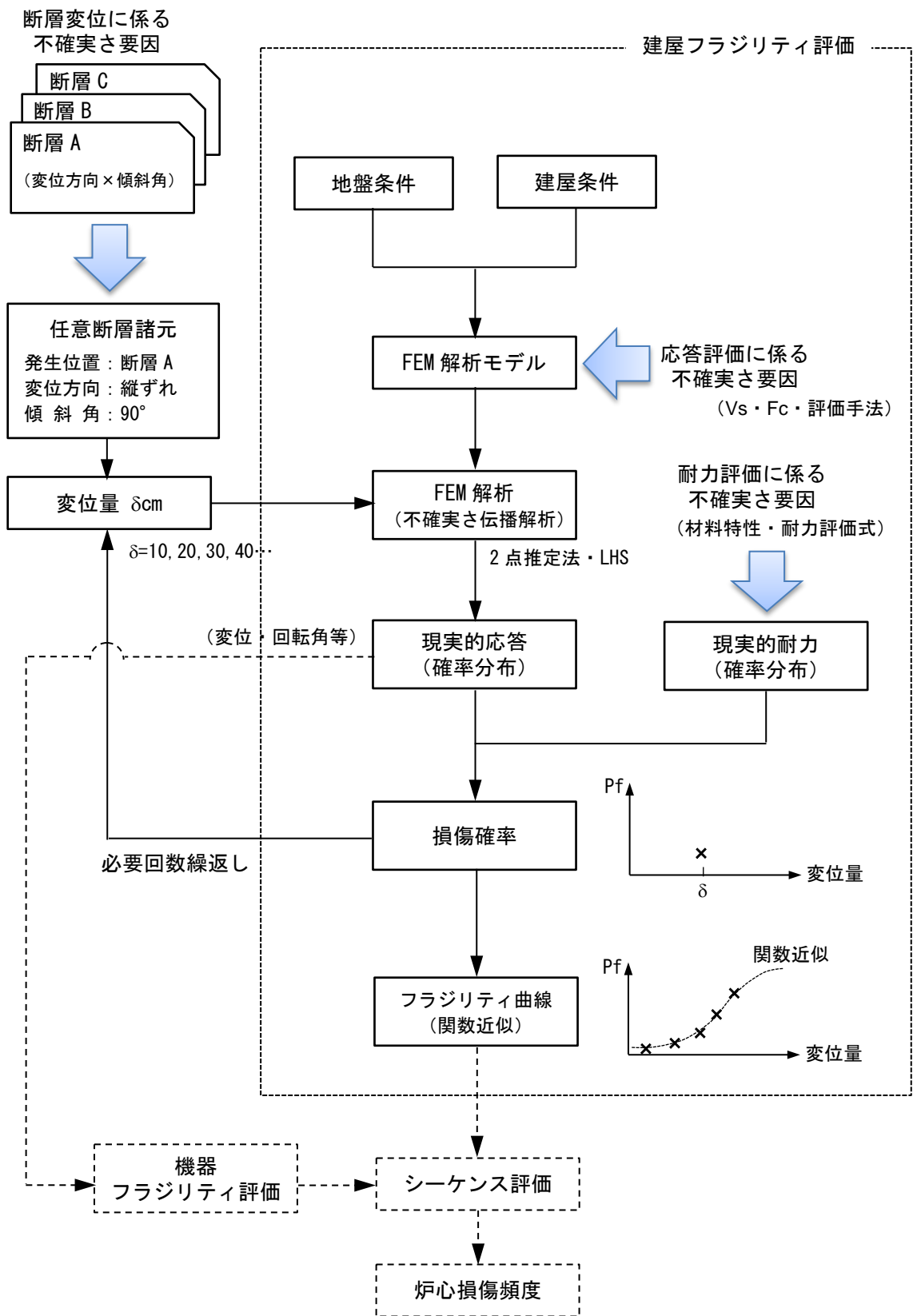


図 II.4.6-2 断層変位に対する建屋フラジリティ評価フローの例

(2) 評価対象と損傷モードの設定

a) 一般事項

評価対象と損傷モードの設定に関しては基本的には地震 PRA 標準と同じ、評価対象物の選定、損傷モード及び部位の抽出、損傷評価の指標の選定及び不確実さ要因の分析からなる。ただし、損傷モード及び部位の抽出に関しては II.4.4 の記載内容に、不確実さ要因の分析に関しては II.4.5 の記載内容に留意する。

b) 評価対象物の選定

基本的には地震 PRA 標準と同様に、地震 PRA 標準における評価対象建屋・機器リストに記載されたものをフラジリティ評価の対象とする。

c) 損傷モード及び部位の抽出

基本的には地震 PRA 標準と同じであるが、損傷モード及び部位の抽出に際しては、断層形式（正断層、逆断層及び横ずれ断層）に留意する。また、参考として、建屋の崩壊（全体損傷）及び要素レベルの局部損傷を含む損傷シナリオの例を図 II.4.6-3 に示す。

d) 損傷評価の指標の選定

基本的には地震 PRA 標準と同様に、対象とする損傷モードにおける損傷の程度を表すことができる応答量を損傷評価の指標とする。

e) 不確実さ要因の分析

地震 PRA 標準に加えて、II.4.5 の記載内容を踏まえる。

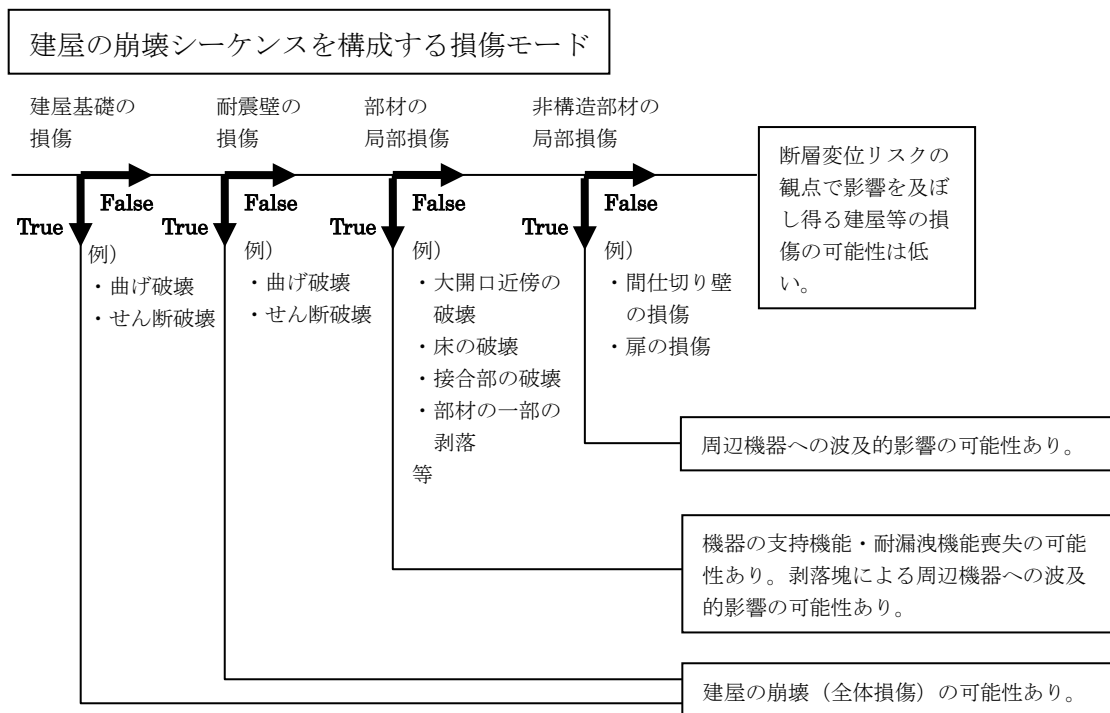


図 II.4.6-3 断層変位に対する建物・構築物の損傷シナリオの例

(3) 評価手法の選択

地震 PRA 標準では詳細法と簡易法の 2 種類があるが、断層変位に対しては知見が不足しているために、詳細法で評価することを基本とする。ただし、感度解析等の必要性に応じて、簡易法で評価せざるを得ない場合には、詳細法の評価手順との比較・分析を踏まえて、認識論的不確実さを相対的に大きくするなどの配慮が必要である。

(4) 現実的耐力の評価

a) 一般事項

II.4.6.1 では、検討用の断層変位に対応した決定論的な耐力を使用する。これに対して、フラジリティ評価では、検討用の断層変位を超える領域を含む断層変位量に対応した現実的耐力の確率分布を評価して、フラジリティ曲線の算定を行う。ここでは、偶然的な不確実さ及び認識論的不確実さを考慮した現実的耐力評価に関する基本的な考え方を示す。

b) 現実的耐力の評価方法

地震 PRA 標準（耐震壁の面内せん断破壊）に加えて、II.4.4 及び II.4.5 の記載内容並びに日本建築学会「限界状態設計指針・同解説」の各部材で整理された耐力データも参考にする。

(5) 現実的応答の評価

a) 一般事項

II.4.6.1 では、検討用の断層変位に対応した決定論的な応答を使用する。これに対して、フラジリティ評価では、検討用の断層変位を超える領域を含む断層変位量に対応した現実的応答の確率分布を評価して、フラジリティ曲線の算定を行う。ここでは、偶然的な不確実さ及び認識論的不確実さを考慮した現実的応答評価に関する基本的な考え方を示す。

b) 現実的応答の評価方法

現実的応答は、II.4.6.2 に記載された入力条件に従い、II.4.5 及び II.4.6.2(2)e)に記載された不確実さを考慮して、II.4.3 に記載された解析手法を用いて評価する。なお、辻ら (2015)⁸⁾によると、現実的応答の不確実さは、地震時の揺れの場合と同程度であり、コンクリートの最大圧縮ひずみ及び鉄筋の最大引張ひずみの対数標準偏差は概ね 0.2 程度であり、基礎版に生じるコンクリートの最大面外せん断力の対数標準偏差は概ね 0.1 程度であることが示されている。

(6) フラジリティの評価

a) 一般事項

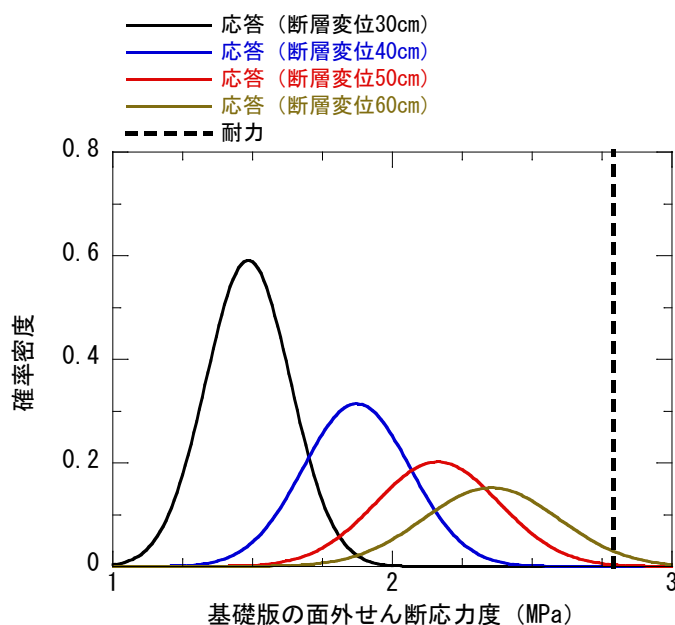
ここでは、II.4.6.2(4)より得られる現実的耐力及び II.4.6.2(5)より得られる現実的応答を用いてフラジリティ曲線を算定する方法を示す。

b) 現実的耐力と現実的応答による方法（詳細法）

基本的には地震 PRA 標準と同じであるが、最新知見として、辻ら (2015) の試算例⁸⁾の

うち、断層変位に対する原子炉建屋基礎版の応答と耐力の関係を図Ⅱ.4.6-4に、断層変位に対する原子炉建屋基礎版のフラジリティ曲線を図Ⅱ.4.6-5に示す。ここで示す応答とは、図Ⅱ.4.4-1に示すような基礎版 FEM モデルの最も厳しい1要素の面外せん断応力度の最大値を示し、耐力とは、表Ⅱ.4.4-4に示す面外せん断耐力の下限値である荒川 Minimum 式による算定値を示している。したがって、ここで示す原子炉建屋基礎版のフラジリティ曲線とは、基礎版 FEM モデルの最も厳しい1要素の面外せん断力が面外せん断耐力の下限値を上回る原子炉建屋基礎版の局所的な破壊確率を示したものであり、全体的に損傷している複数の要素を平均化する等によって原子炉建屋基礎版全体の破壊を評価したものではないことに注意されたい。さらに、この評価例では原子炉建屋基礎版のフラジリティ評価を実施しているが、軟岩サイトを対象とした偶然的不確実さ β_r の一例に対する試算であって、図Ⅱ.4.6-5で設定した認識論的不確実さ β_u は、地震 PRA 標準に記載された建屋フラジリティ評価における $\beta_u=0.15$ よりも若干大きく、 $\beta_u=0.2$ と暫定的に仮定したものである。したがって、以下の認識論的不確実さ β_u に係る検討事例が不足しているために、ロジックツリー等の認識論的不確実さ評価法の適用性の検討と併せて、定量的な検討が今後望まれる。

- ・断層形式（逆断層以外の正断層及び横ずれタイプ）
- ・断層傾斜角
- ・断層位置 等



図Ⅱ.4.6-4 断層変位に対する基礎版の応答と耐力の関係の試算例

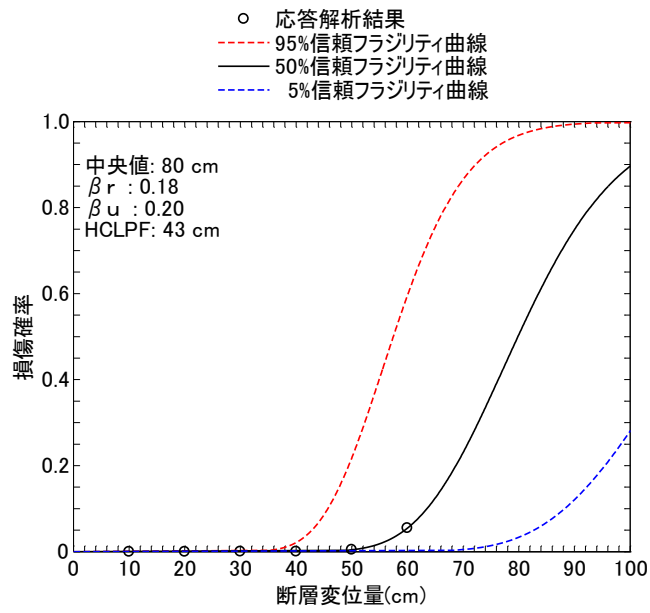


図 II.4.6-5 断層変位に対する基礎版の fragility 曲線の試算例⁸⁾

Ⅱ.4.7 今後の課題

断層変位に対する建物・構築物の影響評価のより一層の高度化に向けては、以下の課題を挙げることができる。

- ・断層変位と地震動の重畳による建物・構築物への影響を合理的に精度よく評価するための手法を構築する必要がある。
- ・断層変位による被害事例のシミュレーション解析は、構造物が剛体回転するような比較的被害が軽微であったものを対象としており、実際に観測された断層変位に対して全体及び部分的に崩壊したような構造物を対象としていないことから、解析コードの妥当性検証については更なる取組みが望まれる。
- ・断層変位が作用した場合の地盤－建屋間の非線形相互作用効果及び地盤の進展性破壊を精度よく評価するための応答解析手法の構築及び検証事例を蓄積していく必要がある。
- ・断層変位や地殻変動に起因した地盤変状が作用した場合の基礎底面の傾斜に係る損傷限界の不確かさ、RC 部材（基礎版及び地下外壁）の面外曲げもしくはせん断耐力の不確かさに関しては、実験による検証も含めて、部材全体及び部材局所の損傷評価のためのデータの更なる蓄積が望まれる。
- ・断層変位が作用した場合の機器アンカーや配管サポート等のコンクリート部の支持機能喪失に係る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及び検証事例を建物・構築物及び機器・配管系で連携して蓄積していく必要がある。
- ・断層変位に対する建屋フラジリティ評価に関しては、偶然的・認識論的不確かさに係る標準データの整理・分析・定量化、更なる試算例の蓄積及び簡易評価手法の構築が必要である。
- ・2016 年熊本地震において、建物直下での断層変位を含む地盤変状が顕著であった RC 造建物において、地震動による影響の検討に加えて、断層変位による定量的な影響の検討が望まれる。

II. 4.8 参考文献

- 1) 石原研而：土質力学，丸善，2001年.
- 2) Lee, J., G. L. Fenves : A Plastic-Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 27, pp. 937-956, 1998.
- 3) von Mises, R. : *Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand*. Göttin. Nachr. Math. Phys, vol. 1, pp. 582-592, 1913.
- 4) E. Faccioli, I. Anastasopoulos, G. Gazetas, A. Callerio, R. Paolucci : Fault rupture–foundation interaction: selected case histories, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, Issue 4, pp.557-583, 2008.
- 5) 熊谷仁志, 貫井泰, 今村晃, 寺山武志, 萩原哲也, 小島功：RC基礎スラブの面外せん断終局強度に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第76巻，第659号，pp.131-140, 2011年1月.
- 6) 澤田昌孝：動力学的破壊進展解析による地表断層変位予測手法の提案，土木学会第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，講演番号41, pp.233-238, 2015年1月.
- 7) 澤田昌孝：動力学的破壊進展解析による地表断層変位予測に関する基礎検討，土木学会第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，講演番号12, pp.62-67, 2016年1月.
- 8) 辻弘一, 兼近稔, 美原義徳, 二階堂雄司：断層変位に対する原子力発電所建屋のフラジリティ評価に関する解析的検討，土木学会原子力土木委員会 断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集，III-2, pp.81-86, 2015年7月.

Ⅱ.5 土木構造物に対する影響評価

Ⅱ.5.1 対象構造物及び評価方針

ここで取り扱う土木構造物とは、発電用原子炉施設のうち、屋外重要土木構造物をいう。屋外重要土木構造物とは、安全上重要な機能を有する機器・配管系の間接支持機能もしくは非常時における海水の通水機能を求められる土木構造物であり、非常用取水設備に関連する海水ポンプ基礎、海水管ダクト等をいう。なお、防潮堤等の津波防護施設についても本章を参照することができる。

評価は、常時又は運転時に作用する荷重と断層変位、さらに、必要に応じて地震時に対して、安全上重要な設備として要求される機能を保持すること、安全上重要な機器・配管系に対する間接支持構造物として要求される機能を保持すること、及び、構造物全体としての限界状態（変形能力、終局耐力）に対して余裕を有していることを確認することをもって行う。

具体的には、対象とする土木構造物と周辺地盤を適切にモデル化した解析モデルに、断層変位やその他の荷重を与え、その結果構造物に生じる変位、応力・ひずみ等を算出して安全性を評価するが、評価する際には土木構造物と地盤の挙動を考察し、土木構造物の損傷過程及び破壊モードを把握しておくことに加え、断層変位の発生確率が非常に低いことや構造物に与える影響（構造物や部材にとって厳しい作用であること）を踏まえることも重要である。

以上をまとめて、I.6.3 で示されたリスク評価方法（裕度評価及び確率論的リスク評価（PRA））に対する土木構造物の影響評価フローを図Ⅱ.5.1-1～図Ⅱ.5.1-3に示す。

「①設計上の許容限界に対する裕度評価」では、検討用の断層変位に対して、確立された構造強度の評価体系を踏まえて、評価対象である構造物の応答評価及び耐力評価を行う。したがって、応答が耐力を上回る場合には、当該構造物は要求機能に対して十分な余裕を有していないため、必要に応じて対応策を講じ、その有効性を確認することとなる。

「②終局限界に対する裕度評価」では、検討用の断層変位に対して、最新知見を反映した決定論的な評価体系の中で、評価対象である構造物の実剛性に基づく応答評価及び実耐力に基づく耐力評価を行う。したがって、応答が耐力を上回る場合には、当該構造物は要求機能を満足していないため、その評価結果を用いた事故シナリオ及び事故シーケンス評価を行い、必要に応じて対応策を講じ、その有効性を確認することとなる。

「③確率論的リスク評価（PRA）」では、検討用の断層変位に対して、最新知見を反映した確率論的な評価体系の中で、評価対象である構造物の現実的応答評価及び現実的耐力評価を行う。ここでは、現実的応答が現実的耐力を上回る確率をフラジリティ曲線として評価し、これを入力として事故シナリオ及び事故シーケンス評価を行う。

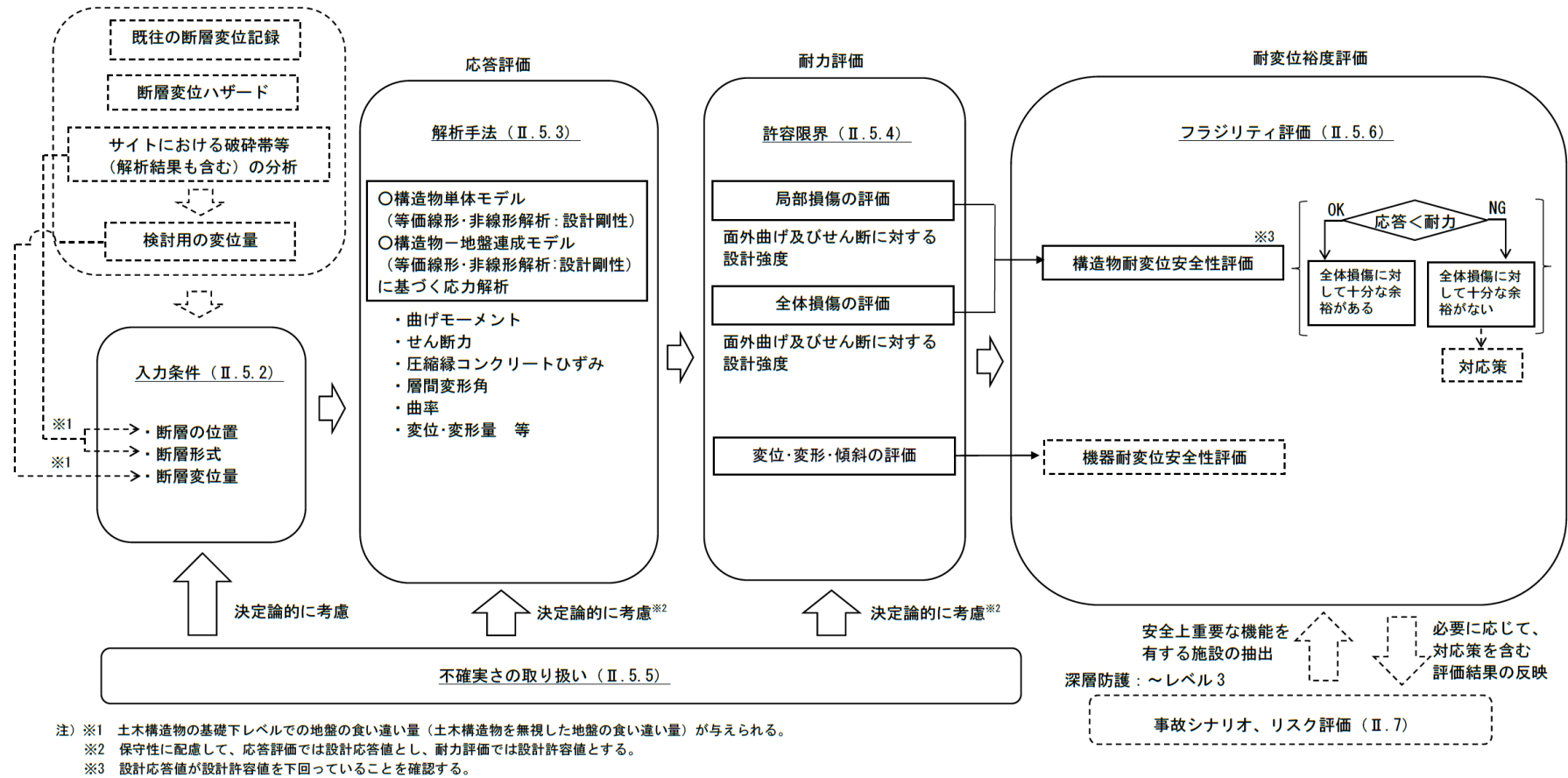
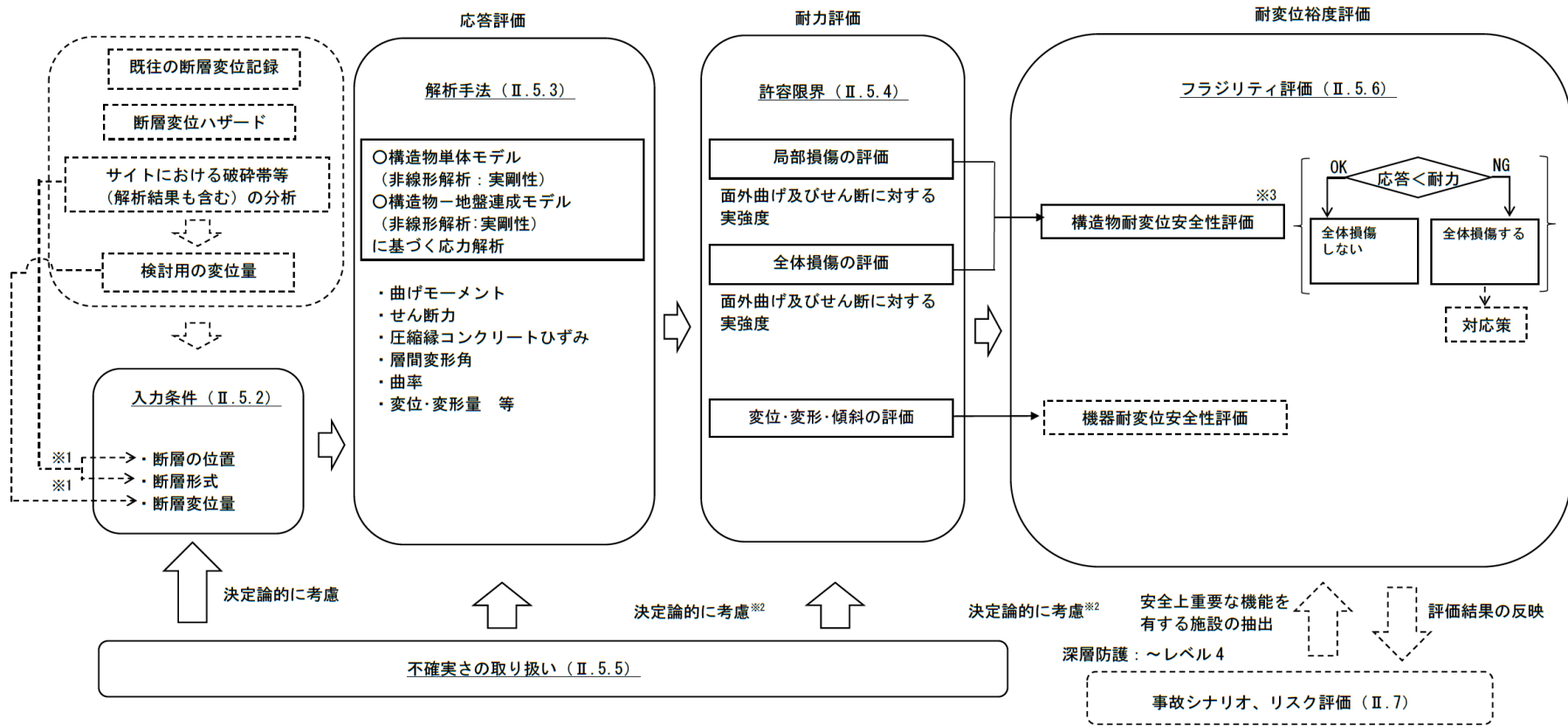
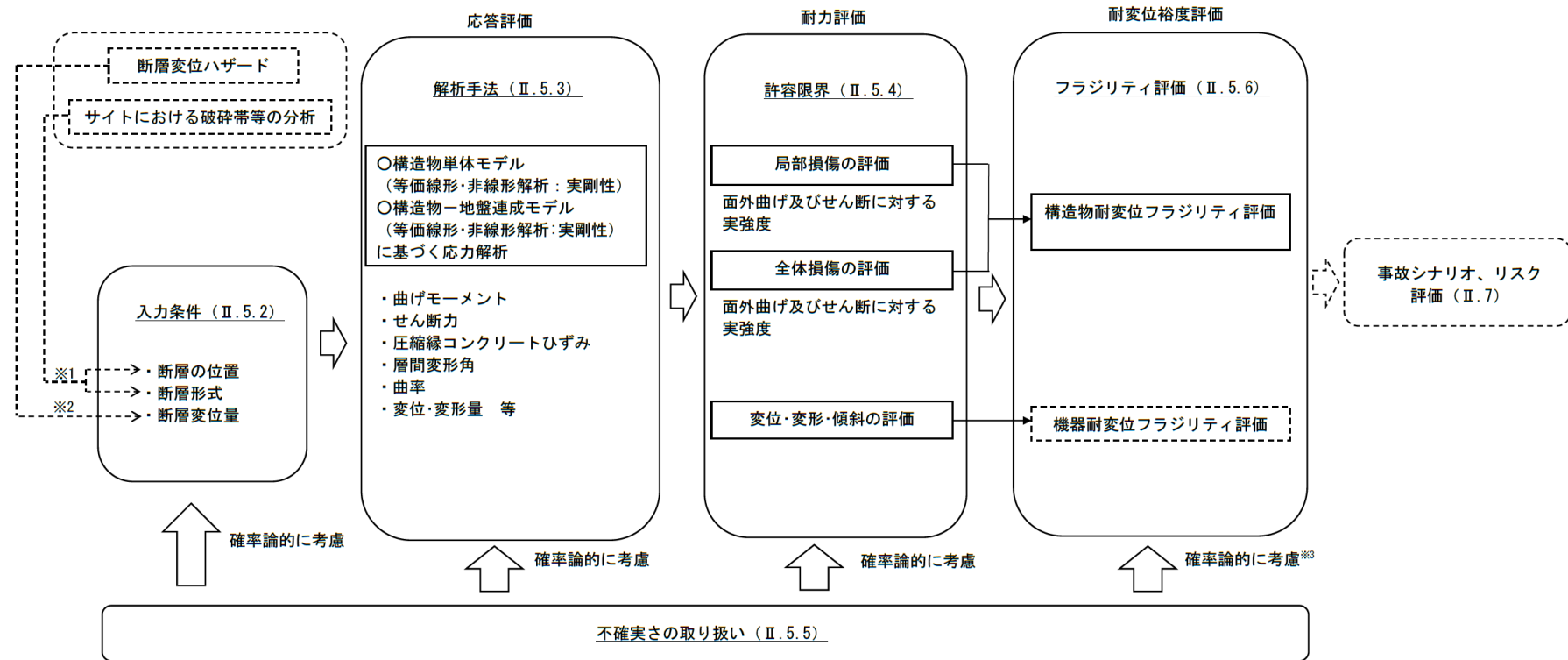


図 II.5.1-1 土木構造物に対する影響評価フローその 1 (①設計上の許容限界に対する余裕度評価)



注) ※1 土木構造物の基礎下レベルでの地盤の食い違い量 (土木構造物を無視した地盤の食い違い量) が与えられる。
 ※2 確率的に適切な信頼度を考慮して、実剛性による応答値及び実耐力値を設定する。
 ※3 決定論的な応答値が決定論的な耐力値を下回っている場合には当該対象は損傷していないとみなす。決定論的な応答値が決定論的な耐力値を上回っている場合には当該対象は損傷しているとみなす。

図 II.5.1-2 土木構造物影響評価フローその2 (②終局限界に対する裕度評価)



注) ※1 土木構造物の基礎下レベルでの地盤の食い違い量 (土木構造物を無視した地盤の食い違い量) が与えられる。ただし、断層の位置および断層形式の設定に際して不確かさが伴う場合は、土木構造物に与える影響を考慮して、仮定の断層の位置及び断層形式を複数重み付けして評価する。

※2 断層変位ハザード評価結果に基づく。

※3 入力条件、応答評価及び耐力評価に係る偶然的不確かさはフラジリティ曲線の β_r として考慮し、認識論的不確かさはフラジリティ曲線の β_u として考慮することを基本とする。ただし、条件付きの CDF 評価においては、適切な信頼度を考慮した決定論的なフラジリティ評価 (HCLPF 等でのクリフエッジ評価) で代替してもよい。

図 II.5.1-3 土木構造物に対する影響評価フローその 3 (③確率論的リスク評価 (PRA))

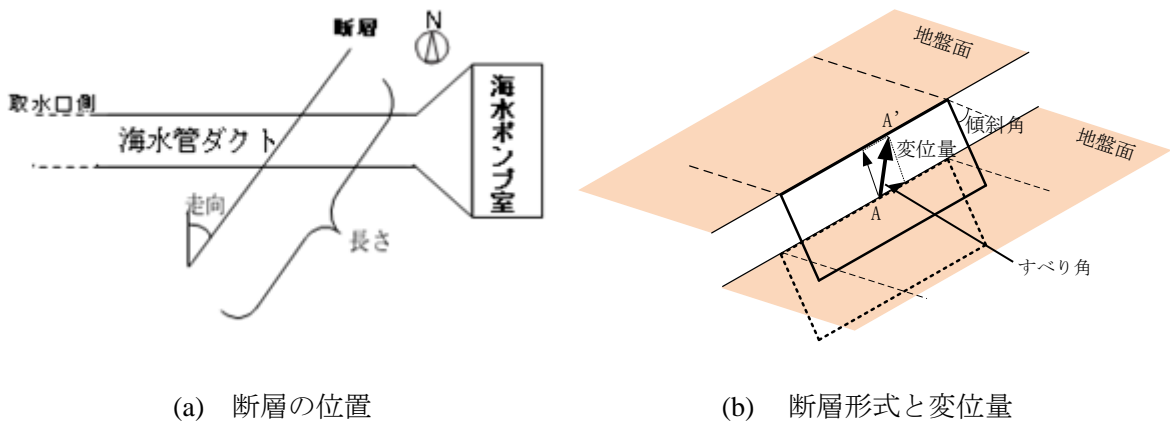
II.5.2 入力条件

土木構造物に対する影響を評価する際の断層変位は、解析モデルに入力する断層変位量として適切な入力位置や大きさを検討したものとし、土木構造物と周辺地盤の相互作用を考慮してモデルに入力される。すなわち、解析モデルに入力する断層変位量は、構造物がない状態での解析モデルにおいて、検討用の断層変位量を概ね再現できるものとする。

具体的な入力の手順例を以下に示す。

- ①土木構造物がない状態での構造物底面において設定された検討用の断層変位量 δs を概ね再現できる変位を解析モデルの境界に解析境界変位として与える。
- ②土木構造物を解析モデルに組み込み、①で設定した解析境界変位をモデル境界に与える。

ここで、断層変位のパラメータは、①断層位置（長さ、走向、傾斜角）、②すべり角、③変位量（大きさ）であり、適切に設定する必要がある。



図II.5.2 入力として断層変位を考慮する場合に必要なパラメータ

Ⅱ.5.3 解析手法

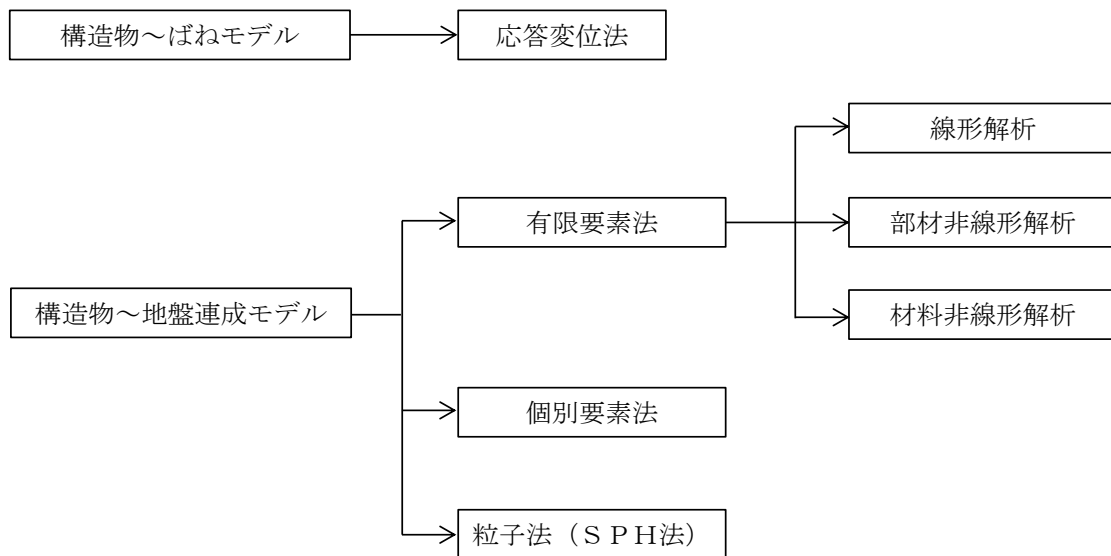
Ⅱ.5.3.1 解析モデルと解析手法

Ⅱ.5.3.1.1 解析モデル、解析手法の種類

断層変位に対する土木構造物の損傷状況及び機器・配管系に及ぼす影響は、Ⅱ.3.2 で設定された検討用の断層変位量 δs を、土木構造物と周辺地盤の相互作用を考慮して、地盤要素に直接又はばねを介して構造物に作用させる解析により評価することを基本とする。

解析モデルは、断層面や断層変位方向と対象構造物の位置関係、周辺地盤の不整形や不均質が対象構造物に及ぼす影響及び対象構造物に近接する構造物から受ける影響等に配慮して、2次元もしくは3次元のモデルを適用する。

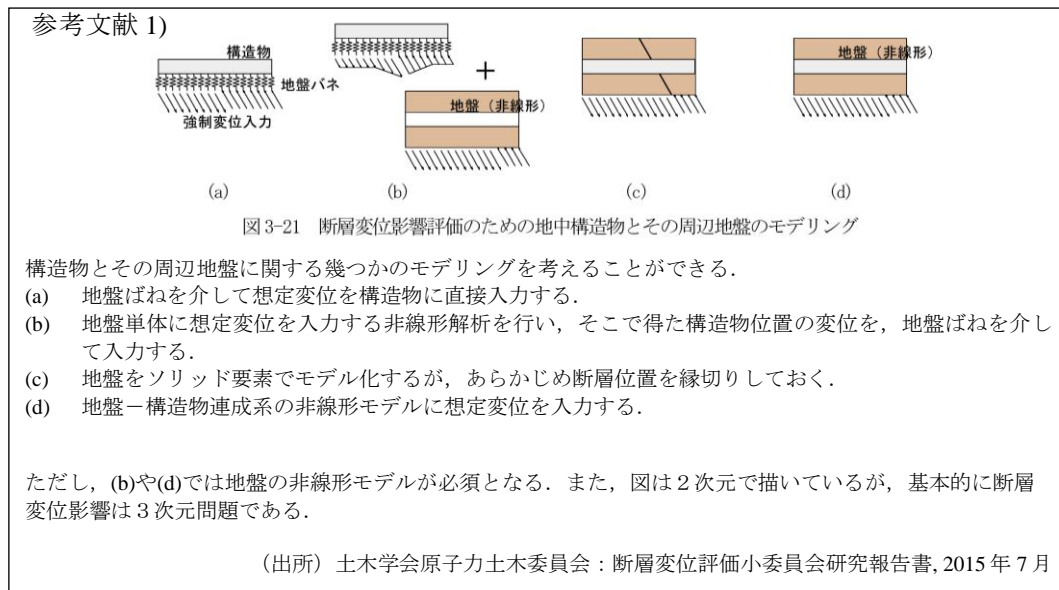
構造物及び周辺地盤の解析モデルと解析手法について、図Ⅱ.5.3-1 に分類例を示す。解析モデル、あるいは解析手法の分類は解析対象物と目的によって異なり、その種類は多岐にわたる。



図Ⅱ.5.3-1 解析モデルと解析手法の分類例

現在一般的に使用される解析モデル・手法は、構造物又は部材を構成要素又は梁要素でモデル化し、地盤と構造物の相互作用をばねで簡易にモデル化する方法（構造物－ばねモデル、図中の応答変位法）と、地盤、構造物も含め全体を構成要素でモデル化する方法（構造物－地盤連成モデル、図中の有限要素法、個別要素法、粒子法）の2種類に大別される。

参考文献 1)では断層変位影響評価のための地中構造物とその周辺地盤のモデリングとして以下のように整理している。これらのうち(a)及び(b)が構造物－ばねモデル、(c)及び(d)が構造物－地盤連成モデルに相当する。



モデル化については、対象構造物に及ぶ周辺地盤や土木構造物の影響、断層面のずれの性状、周辺地盤や隣接構造物と対象構造物間に生じるすべりや剥離の影響及び対象構造物の部材の変形特性や照査する損傷状態等を勘案し、以下の点について配慮する。

- ・モデル化範囲、モデル規模
 - ・構成則（地盤・コンクリート）、使用要素、要素分割
 - ・モデル外周及び地盤あるいは岩盤と土木構造物との境界における境界条件・境界要素解析手法については、信頼性と精度があらかじめ検証された手法を基本的に適用する。
- ただし、現時点で断層変位による局所的な損傷の全体系への影響等の未解明な部分も存在していると判断されるため、適用に際してはⅡ.5.4における許容限界の目安値を鑑みて解析手法を選定するとともに、その解析手法のもつ不確かさも適切に考慮するものとする。

なお、構造部材の最大耐力以降の領域から崩壊（全体損傷）に至る大変形、不連続性が顕著となる状態に着目する解析では、非格子法、離散体モデル解析手法の適用も考えられる。

Ⅱ.5.3.1.2 構造物－ばねモデル

断層変位発生時に対象構造物に接する地盤と土木構造物との相互作用が比較的単純で、地盤をばねに置換することが可能な場合には、断層変位を地盤あるいは岩盤と土木構造物との境界の地盤ばねを介して作用させる構造物－ばねモデルを適用できる。例えば、比較的平坦な成層地盤上あるいは地盤中に設置された、周辺構造物の影響をあまり受けない土木構造物が対象となる。

具体的には、土木構造物を主にシェル要素やソリッド要素又は梁要素等で、周辺地盤を地盤ばねでモデル化し、構造物モデルの節点に直接地盤ばねを接続して、構造物モデルを

支持するような解析モデルとする。また、土木構造物と地盤間の剥離やすべりは、地盤の非線形性と合わせて地盤ばねの非線形性で考慮する。

II.5.3.1.3 構造物－地盤連成モデル

対象構造物周辺地盤の不整形や不均質の影響、あるいは対象構造物に近接した周辺構造物の影響等を見逃すことのできない複雑な構造物－地盤の相互作用の影響がある場合は、構造物－地盤連成モデルを適用する。例えば、地盤が断層から3次元的に複雑な変形を受け、構造物に作用する各方向からの土圧がそれぞれで独立でないようなケースが対象となる。

具体的には、土木構造物を主にシェル要素やソリッド要素で、周辺地盤はソリッド要素でモデル化するとともに、構造物モデルと地盤モデルの境界面（不連続面）はジョイント要素等を用いてその挙動を適切に再現できるような解析モデルとする。同様に、地盤の断層面も必要に応じて不連続面としてモデル化する。

断層変位は解析モデルの外周部に解析境界変位として与え、解析対象領域となる周辺地盤の範囲は、構造物と断層の相互作用に境界部の影響が見逃すことのできる程度の大きさとし、地盤の剛性や断層変位量に応じて適切に設定する。

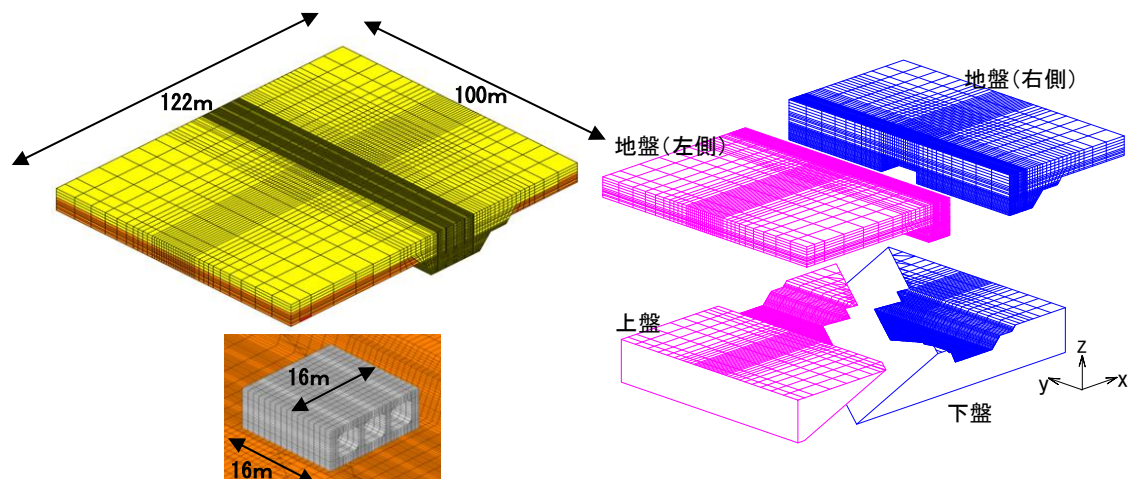
なお、このようなモデルは一般的には3次元有限要素モデルとなり、非常に大規模な解析が必要となることが多い。例えば、岩盤の剛性が構造物に比較して非常に大きく、構造物の変位・変形による影響が見逃すことができると判断できる場合には、岩盤を剛体と見なして構造物との間の接触要素を介して断層変位を与えることも考えられる。

表 II.5.3-1 に構造物－ばねモデルと構造物－地盤連成モデルの解析モデルと解析手法について整理した。

表 II.5.3-1 解析モデルと解析手法

	構造物－ばねモデル	構造物－地盤連成モデル
常時荷重の考慮	土被り重量及び構造物自重による断面力を考慮	常時応力解析 (地盤応力及び構造物自重)
構成要素	構造物／部材：シェル要素、ソリッド要素、梁要素等 地盤／岩盤：ばね要素	構造物：シェル要素、ソリッド要素 地盤／岩盤：ソリッド要素 構造物－地盤間：ジョイント要素等 断層面：ジョイント要素等
断層変位の入力	地盤ばね端部に変位入力	解析モデル外周部に変位入力

参考にカルバートを対象として断層変位に対する損傷評価を実施した構造物ー地盤連成モデルの例を図Ⅱ.5.3-2に、解析手法と解析モデルの概要を表Ⅱ.5.3-2に示す²⁾。



図Ⅱ.5.3-2 構造物ー地盤連成モデル

表Ⅱ.5.3-2 解析手法と解析モデルの概要（評価例）

項目	概要
解析手法	3次元非線形有限要素法による構造物ー地盤連成モデル
使用要素	<ul style="list-style-type: none"> ● 岩盤は剛体と見なし、その表面を節点変位境界とし、断層は岩盤表面の断層線を上盤側と下盤側の二重節点によってモデル化 ● RC 構造物と表土・埋戻土は非線形ソリッド要素でモデル
材料境界面	<ul style="list-style-type: none"> ● 表土・埋戻土、岩盤表面、RC 構造物のそれぞれの境界面には接合要素（面的なジョイント要素）を挿入し、相互のすべり・剥離を考慮
モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> ● 表土・埋戻土の領域は、RC 構造物の変形による周辺地盤への影響範囲がモデル底面から地表面まで 45°方向に拡がると仮定して遷移区間を確保
構成則（地盤）	<ul style="list-style-type: none"> ● 表土・埋戻土の構成則はバイリニアモデルとし、破壊条件は Drucker-Prager の条件を適用 ● 岩盤は剛体仮定
構成則（鉄筋コンクリート）	<ul style="list-style-type: none"> ● コンクリート引張側 <ul style="list-style-type: none"> ・ ひび割れ強度までは弾性、ひび割れ強度後はコンクリートの破壊エネルギーに基づく軟化特性 ● コンクリート圧縮側 <ul style="list-style-type: none"> ・ 圧縮強度に達するまでは修正 Ahmad モデルを適用し、圧縮強度後はコンクリートの破壊エネルギーに基づく軟化特性を適用 ● ひび割れ後コンクリート <ul style="list-style-type: none"> ・ せん断伝達特性及び圧縮強度低減特性は長沼モデルを適用 ● 鉄筋 <ul style="list-style-type: none"> ・ 鉄筋の構成則は降伏強度を折れ点とするバイリニアモデル

II.5.3.2 解析手順

解析は、常時荷重作用時の初期応力解析に続いて、断層変位をII.5.2で示した手順で解析境界変位を与えることにより、断層変位後に構造物に発生する応答値（応力、ひずみ等）から構造物の状況を把握して、安全性を評価する。

初期応力状態は、対象構造物、内包設備及び周辺地盤を考慮した自重解析により設定する方法が一般的である。その際、対象構造物周囲に作用する荷重が適切となるよう配慮する必要がある。例えば、ダクトのような線状の機器・配管系支持構造物の3次元モデルの場合は、ダクトへの上載荷重、側方土圧、躯体自重、底版反力及びダクト軸方向作用力が挙げられる。また、内包する設備の照査に必要な設備支持部位の応力・ひずみ状態が適切となるよう配慮する必要がある、さらに、土木構造物と地盤あるいは岩盤との境界における境界条件については、断層変位が土木構造物への影響を適切に評価できるよう配慮する必要がある。

断層変位の入力は、通常、地盤と構造物間の剥離やすべり等、非線形の応答を伴うため、一般的には増分法で行なう。変位の漸増に伴い、地盤の局部破壊、対象構造物と地盤や隣接構造物との接触や剥離・すべり等の相互作用、構造物の局部損傷やひずみ軟化等が生じるので、解析結果からそれらの状態を把握し、想定した挙動が適切に再現されていることを確認することが必要である。

II.5.3.3 解析結果（応答値）の出力

土木構造物の要求性能あるいは目標性能を満足することを確認するために必要な応答値を出力する。なお、土木構造物の要求性能及び目標性能については次節で述べる。

また、機器・配管系との接続部の評価のために必要な当該箇所の変位・変形量等についても出力する。参考として、表II.5.3-3に解析手法の区分と得られる応答値を示す。

表II.5.3-3 解析手法の区分と求められる応答値

解析手法	線形解析	非線形解析	
		部材非線形	材料非線形
解析により得られる応答値	応力 曲げモーメント せん断力 変位・変形量 相対変位	モーメント（曲げ、ねじり） 曲率 層間変形角 せん断力（面外、面内） 変位・変形量 相対変位	コンクリート圧縮ひずみ 鉄筋引張ひずみ 層間変形角 せん断応力 せん断ひずみ 変位・変形量 相対変位

II.5.4 許容限界

II.5.4.1 許容限界の目安

断層変位を受ける構造物では、断層上の局所的な損傷から全体的な損傷に至るまで数多くの段階が存在し、複雑な様相を呈する。これらのどのステップが許容限界となるかは、対象としている断層変位量の位置づけ、構造物と維持すべき機能によって異なる。したがって、設定する許容限界については、対象とする構造物の要求性能及び目標性能に応じたものとする必要がある。

土木構造物の要求性能及び目標性能の例を表II.5.4-1に示す。

表II.5.4-1 土木構造物の要求性能及び目標性能の例

	安全上重要な機器・配管系を間接的に支持する土木構造物	機器・配管系は支持しないが同等の安全性を要求される土木構造物
要求性能	ポンプの揚水機能や海水管の通水機能等、機器・配管系の各機能を維持するように支持する。	非常用の冷却水を取水・通水する機能を維持する。
目標性能	検討用の断層変位量 δ_s に対して、 ①主要な構造部材が局部損傷しない（あるいは全体損傷しない） ②「機器・配管系の機能維持のための与条件」を満足する	検討用の断層変位量 δ_s に対して、 ①主要な構造部材が局部損傷しない（あるいは全体損傷しない）

※日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）」を参考

安全上重要な機器・配管系の支持機能が要求される土木構造物においては、許容限界として部材の曲げ・せん断に対する終局耐力等が適用される。曲げについては、部材の終局耐力に代えて部材の曲げ終局曲率による規定方法があり、安全上重要な機能を有する機器・配管系に対する間接支持機能が確保されたレベルに損傷が抑えられていると考えられている。仮に既存の施設において検討用の断層変位量 δ_s に対して、この許容限界を満足しない場合には、対策工を施すこと等の対処が必要となる。

一方、取水機能が要求される取水構造物あるいは支持構造物であっても配管支持点以外の部位においては、このような損傷レベルを超えても直ちに構造物の機能が失われるわけではない。取水構造物では必要な水量が取水可能な内空を、支持構造物では配管スペースとして構造物の内空を保持できる機能が求められるため、この構造支持性能レベルまでの損傷は更に許容される。取水構造物に断層変位が作用し機能維持を維持できない状態とは、例えば断層変位により構造物の鉛直部材がせん断破壊し、自重に耐えられず崩壊（全体損傷）したことにより水路の通水断面が減少した結果、取水ポンプにおける水位が低下し、取水が困難となるケース等が挙げられる。

許容限界の設定は、土木学会「コンクリート標準示方書 構造性能照査編」、土木学会「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル」、日本電気協会「原

子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）」（以下「JEAC4601-2008」という。）等を参照することを基本とする。また、断層変位に伴って生じると考えられる面外曲げ、せん断、変位・変形・傾斜の損傷モードに対応する目安値に関する調査結果を表Ⅱ.5.4-2 に示す。

また、PRA に用いる損傷限界としては、「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2015」（以下「地震 PRA 標準」という。）として、日本原子力学会標準としてまとめられている。

表Ⅱ.5.4-2 土木構造物の損傷モードと構造上の許容限界等の目安値に関する調査結果

損傷モード	状態	①設計上の許容限界	②終局限界
面外曲げ	曲げ終局	限界層間変形角評価式による限界層間変形角に対して適切な安全係数を考慮 ただし、 各種強度：設計用値	限界層間変形角評価式による限界層間変形角 ただし、 各種強度：実力値
せん断	せん断破壊	腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力及び棒部材式又はディープビーム式によるせん断耐力に対して適切な安全係数を考慮 ただし、 各種強度：設計用値	腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力及び棒部材式又はディープビーム式によるせん断耐力 ただし、 各種強度：実力値

損傷モード	状態	③確率論的リスク評価（PRA）／フラジリティ評価
面外曲げ	曲げ終局	平均値：各目安値に対する評価式 不確かさ：偶然的及び認識論的不確かさを適切に考慮
せん断	せん断破壊	

Ⅱ.5.4.2 断層変位と構造物の損傷との関係

許容限界を決定する上で断層変位が土木構造物に影響を及ぼした事象を把握することは重要である。(別紙Ⅱ.5-1 参照)

また、断層変位が構造物に及ぼす影響を解析的に評価した事例(岩盤の断層直上に設置し埋め戻した鉄筋コンクリート製ボックスカルバート構造物に対して、当該構造物と周辺地盤をモデル化した非線形有限要素解析を実施)²⁾より得られた知見を以下に示す。

- ・ 構造物破壊の観点からは、逆断層変位がより厳しい条件となる。正断層では変位の増大に伴い構造物に大きな剛体回転が生じるが、逆断層変位に比べると構造物の損傷は軽微である。
- ・ 逆断層変位の場合、断層線上の底版に作用する支圧力と構造物両側の岩盤のり面の接近による側方土圧の増大により、底版のせん断圧縮破壊が先行する。
- ・ 正断層変位の場合、岩盤のり面が離れて側方土圧が減少するため底版の圧縮破壊は生じ難いが、頂版の隅角部において配力筋の破断が生じる可能性がある。

II.5.5 不確実さの取扱い

確率論に基づくリスク評価においては、評価対象とする事象や評価プロセスに含まれる様々な不確実さを考慮する必要がある。この不確実さをもたらす要因は、一般に物理現象のランダム性に係る偶然的な不確実さ（aleatory uncertainty）と知識及び認識の不足に係る認識論的不確実さ（epistemic uncertainty）に区別されるが、地震 PRA においては、地震ハザード評価及びフラジリティ評価に含まれるこれらの不確実さ要因を整理し、リスク評価に考慮する方法が提示されている（地震 PRA 標準）。

一方、断層変位に対するリスク評価は、地震 PRA と同様に地震が起因となるものの、ハザード評価の対象は地震動でなく断層変位であり、動力学的破壊進展解析を用いて地表断層変位を予測する先駆的な試みがなされている研究事例^{3),4)}はあるが、現状はフラジリティ評価においても動的問題でなく静的問題を対象とすること等が地震 PRA と異なっている。したがって、断層変位に対するフラジリティ評価で考慮すべき不確実さ要因は、地震動に対するものとは異なる観点で設定する必要がある。しかし、土木構造物に対する影響評価に係る不確実さの考慮方法等については、地震 PRA における考え方が参考となる。

なお、断層変位に対するリスク評価において、最も大きな不確実さの一つとして断層変位の発生位置が挙げられる。断層変位が土木構造物に与える影響は、断層変位の発生位置で大きく異なるが、考え得る全ての位置を考慮すると解析規模が膨大となることから、実際に断層変位が発生する位置に係る不確実さを直接評価に考慮することは難しい。したがって、断層変位に対するリスク評価では、断層変位が発生する位置や断層形式を土木構造物への影響も考慮して想定し、想定した位置で変位が発生した場合の条件付き損傷確率として評価することが現実的であり、評価結果の解釈においては留意すべき点である。

表 II.5.5 に土木構造物に対する影響評価における不確実さ要因の例を示す。

表 II.5.5 土木構造物に対する影響評価における不確実さ要因の例

不確実さ要因		備考
断層変位に係る 不確実さ要因 (入力条件)	断層の位置	断層変位ハザード評価側から与えられる入力条件（ただし、影響評価に不確実さを考慮することは難しい。）
	断層形式	
	断層変位量	
応答評価に係る 不確実さ要因	地盤構造・力学特性	地質・地盤調査の結果やモデル化の不確実さ
	評価手法	解析モデル、解析コードの評価精度
耐力評価に係る 不確実さ要因	材料特性	材料強度、限界ひずみの不確実さ
	耐力評価式	評価精度

Ⅱ.5.6 耐変位裕度評価

Ⅱ.5.6.1 では検討用の断層変位に対する決定論ベースの土木構造物の耐変位安全性評価（土木構造物に対するリスク評価方法としては、Ⅰ.6.3 で示された裕度評価に対応している。）を、Ⅱ.5.6.2 では断層変位ハザード評価に基づく土木構造物フラジリティ評価（土木構造物に対するリスク評価方法としては、Ⅰ.6.3 で示された確率論的リスク評価（PRA）に対応している。）を記載する。ここで、Ⅱ.5.6.2 においては、基本的な節構成は地震 PRA 標準に基づくものとし、断層変位単独のフラジリティ評価を当面の目標とし、地震時の揺れとの重畳フラジリティは今後の課題とする。

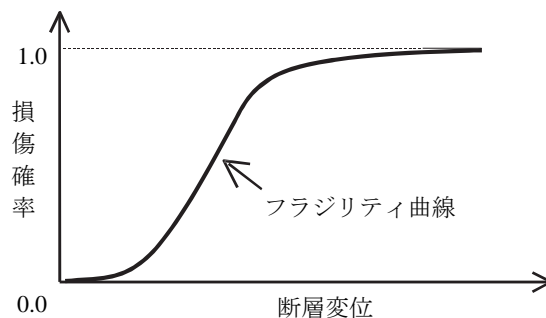
Ⅱ.5.6.1 土木構造物の耐変位安全性評価

検討用の断層変位に対して、崩壊（全体損傷）及び局部損傷の観点から、Ⅱ.5.3 で得られる土木構造物の応答とⅡ.5.4 から得られる許容限界を比較することで、土木構造物の全体及び各部材の耐変位安全性が確保されているかを判断する。なお、地震時の揺れによる土木構造物の耐震安全性評価は、基本的には JEAC4601-2008 等の規格・基準類に従うものとする。

Ⅱ.5.6.2 土木構造物フラジリティ評価

(1) 土木構造物フラジリティ評価の流れ

基本的には地震 PRA 標準と同様な流れであり、(2)項以降はその流れに従って展開している。土木構造物フラジリティ評価の流れの詳細は、地震 PRA 標準を参考されたい。ここで、フラジリティ曲線を評価するための断層変位（図Ⅱ.5.6-1 の横軸）は、断層変位ハザード評価で定義された位置での値とする。また、断層変位に対する土木構造物フラジリティ評価フローの例を図Ⅱ.5.6-2 に示す。



図Ⅱ.5.6-1 フラジリティ曲線の模式図

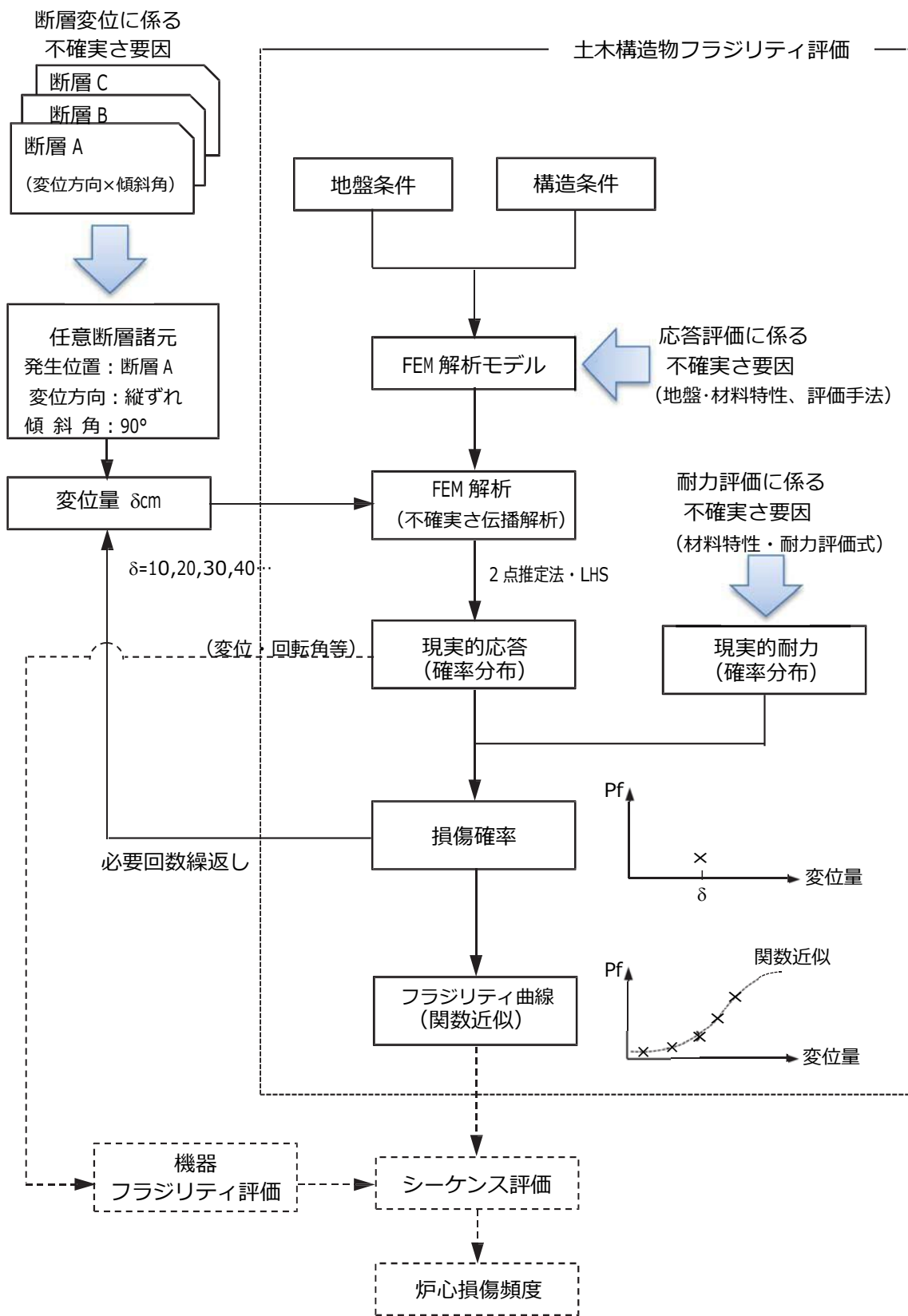


図 II.5.6-2 断層変位に対する土木構造物フラジリティ評価フローの例

(2) 評価対象と損傷モードの設定

a) 一般事項

評価対象と損傷モードの設定に関しては基本的には地震 PRA 標準と同じく、評価対象物の選定、損傷モード及び部位の抽出、損傷評価の指標の選定及び不確実さ要因の分析からなる。ただし、損傷モード及び部位の抽出に関しては II.5.4 の記載内容に、不確実さ要因の分析に関しては II.5.5 の記載内容に留意する。

b) 評価対象物の選定

基本的には地震 PRA 標準と同様に、地震 PRA における評価対象リストに記載されたものをフラジリティ評価の対象とする。

c) 損傷モード及び部位の抽出

基本的には地震 PRA 標準と同じであるが、損傷モード及び部位の抽出に際しては、断層形式（正断層、逆断層及び横ずれ断層）に留意する。また、参考として、構造物の崩壊（全体損傷）及び要素レベルの局部損傷を含む損傷シナリオの例を図 II.5.6-3 に示す。

d) 損傷評価の指標の選定

基本的には地震 PRA 標準と同様に、対象とする損傷モードにおける損傷の程度を表すことができる応答量を損傷評価の指標とする。

e) 不確実さ要因の分析

地震 PRA 標準に加えて、II.5.5 の記載内容を踏まえる。

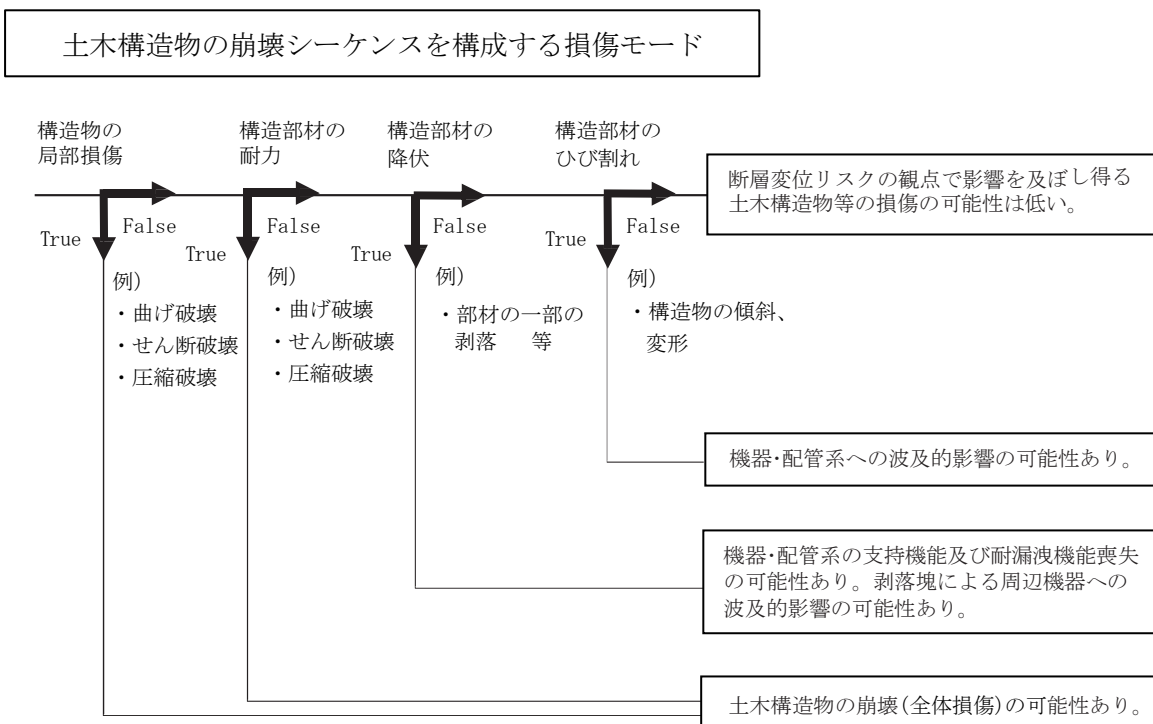


図 II.5.6-3 断層変位に対する土木構造物の損傷シナリオの例

(3) 評価手法の選択

地震 PRA 標準では詳細法と簡易法の 2 種類があるが、断層変位に対しては知見が不足しているために、詳細法で評価することを基本とする。ただし、感度分析等の必要性に応じて、簡易法で評価せざるを得ない場合には、詳細法の評価手順との比較・分析を踏まえて、認識論的不確実さを相対的に大きくするなどの配慮が必要である。

(4) 現実的耐力の評価

a) 一般事項

II.5.6.1 では、検討用の断層変位に対応した決定論的な耐力を使用する。これに対して、フラジリティ評価では、検討用の断層変位を超える領域を含む断層変位量に対応した現実的耐力の確率分布を評価して、フラジリティ曲線の算定を行う。ここでは、偶然的な不確実さ及び認識論的不確実さを考慮した現実的耐力評価に関する基本的な考え方を示す。

b) 現実的耐力の評価方法

地震 PRA 標準（主要部材の曲げ破壊，せん断破壊）に加えて、II.5.4 及び II.5.5 の記載内容も参考にする。

(5) 現実的応答の評価

a) 一般事項

II.5.6.1 では、検討用の断層変位に対応した決定論的な応答を使用する。これに対して、フラジリティ評価では、検討用の断層変位を超える領域を含む断層変位量に対応した現実的応答の確率分布を評価して、フラジリティ曲線の算定を行う。ここでは、偶然的な不確実さ及び認識論的不確実さを考慮した現実的応答評価に関する基本的な考え方を示す。

b) 現実的応答の評価方法

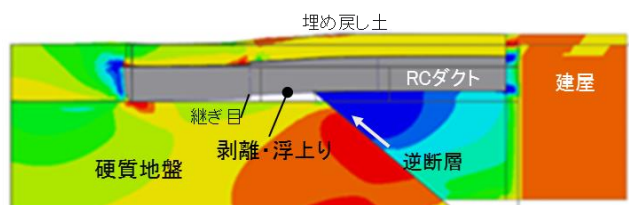
現実的応答は、II.5.6.2 に記載された入力条件に従い、II.5.5 及び II.5.6.2(2) e) に記載された不確実さを考慮して、II.5.3 に記載された解析手法を用いて評価する。

(6) フラジリティの評価

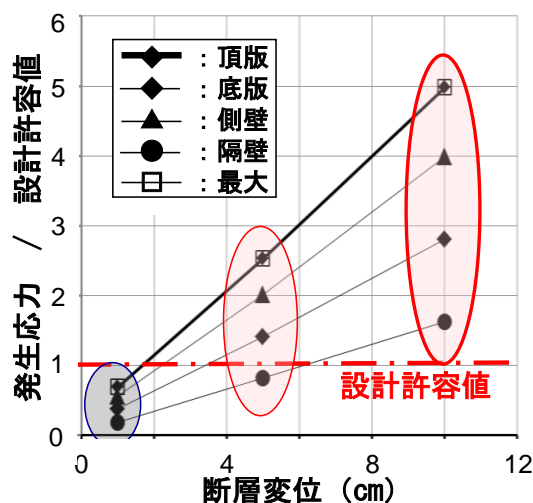
II.5.6.2(4) より得られる現実的耐力及び II.5.6.2(5) より得られる現実的応答を用い、基本的に地震 PRA 標準に基づきフラジリティ曲線を算定する。ただし、断層変位に対する本フラジリティ評価においては、II.5.4（許容限界）や II.5.5（不確実さの取扱い）の内容に十分留意する必要がある。

土木構造物の断層変位に対するフラジリティ評価例として、堤ほか（2017）の検討例がある（図 II.5.6-4）⁵⁾。地中に埋設された海水取水構造物（全長 48m、2 連構造×3 セグメント構成の RC 造ボックスカルバート）の直下に逆断層（傾斜角 40°、硬質地盤（ $V_s=700\text{m/s}$ ））を仮定し、1cm、5cm、10cm の断層変位を与えた場合の影響を 3 次元 FEM 解析にて検討しており、10cm の断層変位での当該セグメントの線形応答応力は許容

値を約 3 倍上回るが、RC ダクト本体等の変形状況から通水機能は保持される等の有用情報が把握されている。なお、本評価例では設計許容値として「許容応力度」を採用しており、発生応力度／許容応力度（下図の縦軸）が施設影響評価の目安として用いられている。



(断層変位による RC ダクトの挙動)



(RC ダクト損傷の試評価)

図 II.5.6-4 土木構造物（海水RCダクト）に対する検討例

fragility 評価では構造物の局部損傷あるいは全体損傷を考慮する必要があり、それらを検討するためには II.5.3.1 で示したような解析モデルが考えられる。II.7.2.3 の裕度評価手法の適用例④においては、この解析モデルによる 3 次元非線形有限要素法による構造物－地盤連成モデルを用いた解析例を示している。

II.5.7 今後の課題

断層変位は自然現象の一つであるが、活動履歴情報が少なく、断層変位に関する研究は他の自然現象と比較すると経験・実績が浅いため、今後、以下の課題に取り組み、土木構造物に対する影響評価方法のより一層の高度化に取り組む必要がある。

- ・地震動による動的な作用と断層変位による準静的な作用の重畳を考慮する際の土木構造物への影響を更に合理的で精度良く評価するための方法を構築する。
- ・断層変位によって構造物が局所的に材料の限界値に達していても、土木構造物の目標性能及び要求性能への寄与度が低く、要求性能に対して土木構造物が機能維持していることもあるため、保守的と考えられる現状の限界値よりも目標性能及び要求性能への寄与度が高い破壊モード及びそれに対する限界値を整備することが必要である。
- ・断層変位に対する土木構造物のフラジリティ曲線の評価を数値解析法によって実施する際、種々の不確定性を考慮することは多くの困難が伴うことから、断層変位に対するフラジリティ曲線を合理的で精度良く評価するための方法を構築する。
- ・数値解析手法の実験等による妥当性確認と、解析モデルに応じた解析結果の安定性を含む結果の検証と併せて、これらの体系を整備する。

II. 5.8 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) 樋口俊一, 渡辺伸和, 米澤健次, 穴吹拓也, 江尻讓嗣：三次元 FEM 解析による断層上の地中鉄筋コンクリート構造物の損傷評価, 土木学会原子力土木委員会 断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集, III-4, pp.91-98, 2015年7月.
- 3) 澤田昌孝：動力学的破壊進展解析による地表断層変位予測手法の提案, 土木学会第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号41, pp.233-238, 2015年1月.
- 4) 澤田昌孝：動力学的破壊進展解析による地表断層変位予測に関する基礎検討, 土木学会第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号12, pp.62-67, 2016年1月.
- 5) 堤英明, 蛭沢勝三, 浜田友康, 美原義徳：断層変位脆弱性評価手法の活用 (2)断層変位の重要土木構造物への影響評価例, 日本原子力学会 2017年春の年会, 講演番号3M05, 2017年3月.

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

別紙Ⅱ.5-1 断層変位と構造物の損傷事例について

以下に、主に数 m 規模の断層変位による構造物の損傷事例を示す。

表-別紙Ⅱ.5-1-1 断層変位による構造物の主な損傷事例

縦ずれ断層		横ずれ断層
地表付近が 軟らかい地盤	地表付近が固い地盤	
<ul style="list-style-type: none"> 断層の動きに起因した地盤変状に明瞭な段差は生じず、地盤の撓曲や傾きが生じる。 基礎が剛基礎の場合、地盤の隆起 2~4m、また地盤の傾斜 10~14°に対して、構造物に傾斜は生じるが、大きな損傷が発生しない場合もある。 基礎が柔構造の場合、地盤の隆起 3m 程度、また沈下 1.5m に対して、基礎が損傷する場合もある。 地盤の隆起 30cm 程度に対して、放水トンネルの側壁や底版に圧壊が生じた。 	<ul style="list-style-type: none"> 地盤の食い違いにより生じた段差により、剛性の大きな構造物である重力式ダムの崩壊（段差 8m）、橋台の転倒（段差 3~4m）が生じる。他、取水トンネルが切断された事例もある。 	<ul style="list-style-type: none"> 周辺が硬質な岩盤のトンネルは、地盤の食い違い 50cm により側壁の圧縮座屈、底版の浮き上がり、食い違い 2.1m 程度に対して覆工コンクリートの切断等が生じた。 4m 程度の地盤の横ずれに対して単純桁の床版は落下、免震支承を有する連続桁橋では橋台でのずれは生じたものの桁の落下は生じていない。

※参考文献 1)を参考

(空き頁)

II.6 機器・配管系に対する影響評価

機器・配管系に対する影響評価は、機器・配管系が設置されている建物・構築物や土木構造物（以下、特に断りのない限り、建物・構築物を代表として記述する。）の断層変位による応答（傾斜、変形及び相対変位）と耐力を比較することにより、安全上重要な機能を有する機器・配管系に要求される機能が保持されていることを確認する。また、想定を超える応答については、現実的応答と現実的耐力からフラジリティを算定し確率論的なリスク評価に繋げる。

II.6.1 対象設備及び評価方針

ここで取り扱う安全上重要な機能を有する設備とは、原子炉建屋等の主要建屋や屋外重要土木構造物に設置される機器・配管系のうち、原子炉施設の安全に係る重要な機能を有する設備、もしくは当該設備の損傷により安全に係る重要な機能を有する設備に波及的影響を及ぼす設備であり、重大事故等対処設備を含むものとする。

評価は、常時又は運転時に作用する荷重と、検討用の断層変位による建物・構築物の応答（短期荷重）を適切に組み合わせ、安全上重要な機器・配管系に要求される機能が保持されること、並びに、限界状態（構造損傷、機能損傷）に対して余裕を有していることを確認する。

機器・配管系の機能維持は、間接支持構造物としての建物・構築物の構造健全性が前提となる。評価に際しては、評価対象設備の配置と断層変位による建物・構築物の損傷エリア、損傷状態により影響評価の方法を選択することとし、また、断層変位発生後に継続運転が必要な設備の取扱いや重大事故等対処設備（可搬型設備を含む。）を用いた安全確保については事故シナリオの中で考慮する。

例えば、建物・構築物の支持機能が維持されている場合は、主に決定論での影響分析及び裕度評価にて安全上重要な設備のシステム全体が評価可能である。一方、建物・構築物が広域にわたり崩壊している場合等においては、支持機能の有無を確認した上で安全上重要な設備を機器毎に評価し、それを入力として事故シナリオを整理し確率論的なリスク評価に繋げることになる。また、建物・構築物への影響が局所的な範囲に限られる場合は、その範囲の支持機能は期待せずに評価することもできる。

対策工事（補強、移設他）を計画する場合には、評価結果を反映することになる。

機器・配管系に対する断層変位の影響評価フローを図II.6.1-1に示す。

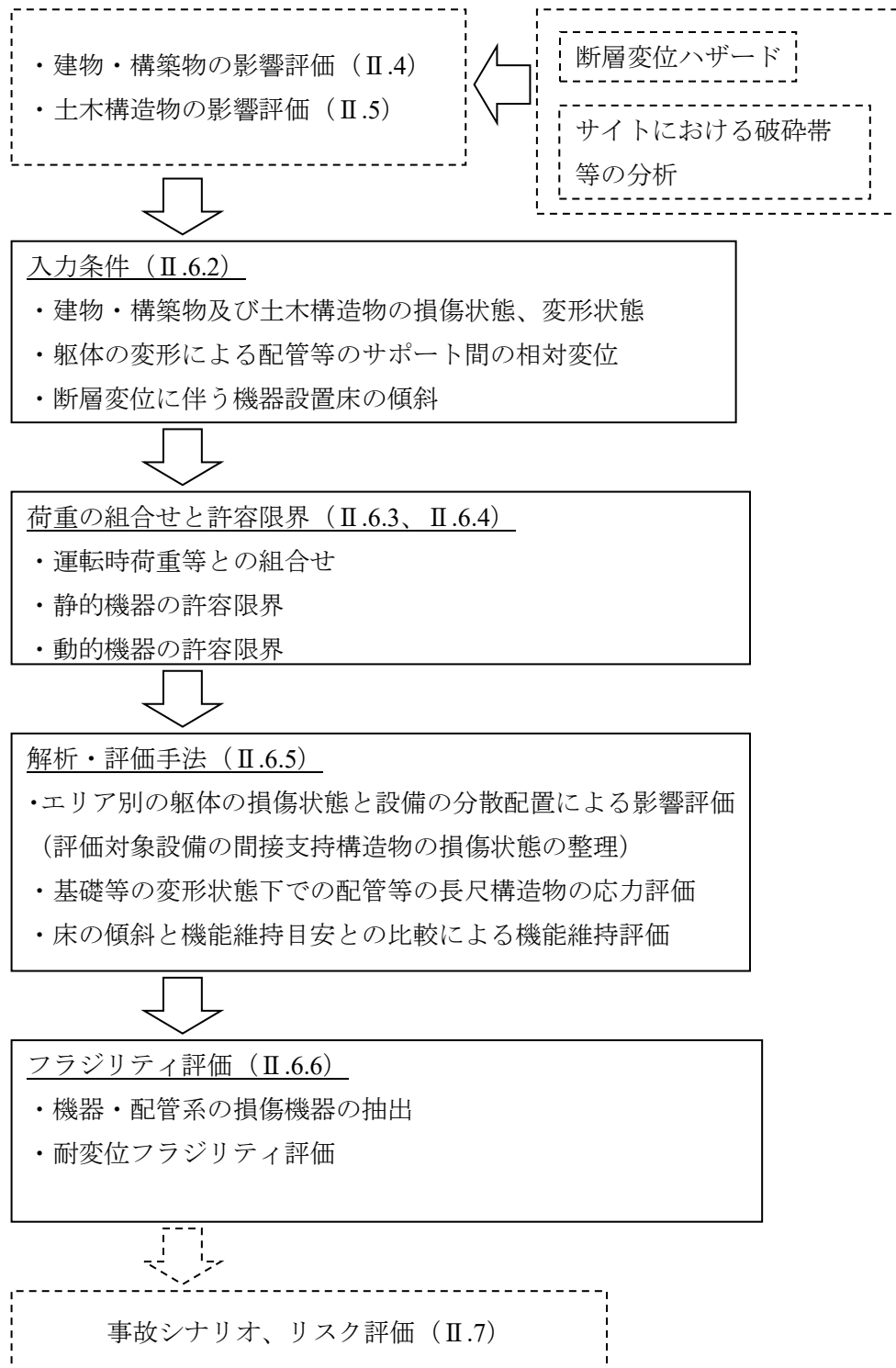


図 II.6.1-1 断層変位に対する機器・配管系の影響評価フロー

II.6.2 入力条件

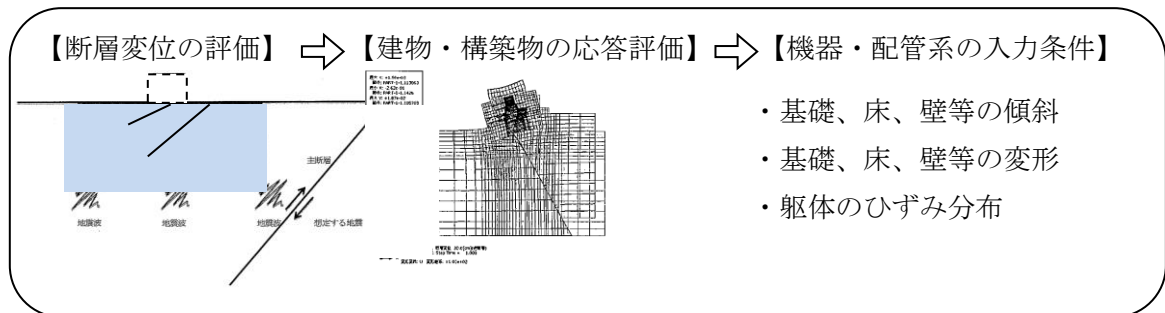
機器・配管系への断層変位の入力は、当該設備の支持構造物である建物・構築物の構造躯体を介して作用する。このため、断層変位により生じる建物・構築物の変形、傾斜が機器・配管系への入力条件となる。また、建物・構築物の損傷状態から設備の支持機能を有するエリアが特定可能である。すなわち、機器・配管系への断層変位の影響評価は、断層変位による建物・構築物の応答と損傷状態を入力条件として評価対象機器を選定し、構造健全性評価等を実施する。

断層変位による機器・配管系への入力条件を表II.6.2-1に示す。

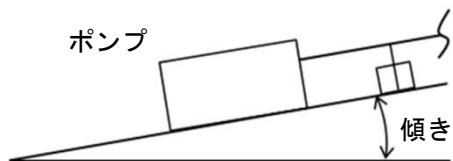
表II.6.2-1 断層変位による機器・配管系への入力条件

建物・構築物に対する影響評価	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	評価対象機器
躯体の損傷状態の評価	有意な損傷無し (安全機能維持)	建屋間の相対変位	渡り配管等の構造損傷	全システムの機器
		床の傾斜	機器の機能損傷	
	基礎・壁・床の 局部損傷	建屋間の相対変位	渡り配管等の構造損傷	建屋・構築物が 支持機能を有する エリアの機器
		床の傾斜	機器の機能損傷	
		床の変形	機器の構造損傷	
		支持機能の低下	機器定着部の構造損傷	
	基礎・壁・床の 広域損傷	同上	同上	

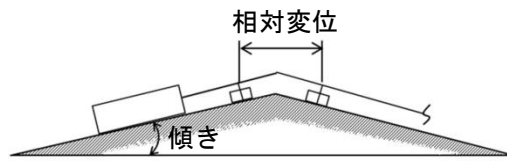
評価対象機器の構造健全性は、基礎スラブ等の変形により生じる変形、傾斜が残留するものとして、強制変位、傾斜角、回転角を与えて評価する。建物・構築物の断層変位の影響評価と機器・配管系への入力条件の関係を図II.6.2-1に、機器・配管系の支持機能が維持されている場合の影響評価における考慮事項を図II.6.2-2に示す。



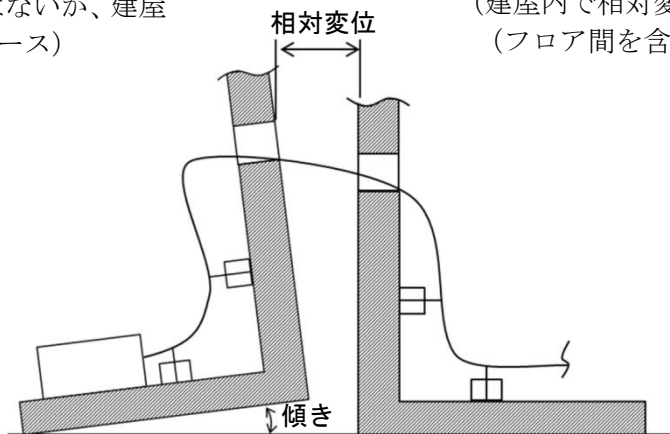
図II.6.2-1 機器・配管系への入力条件の関係



①床の傾斜を考慮した機器の評価
(建屋内に相対変位はないが、建屋
全体が傾いているケース)



②床の変形を考慮した機器、配管の評価
(建屋内で相対変位が生じているケース
(フロア間を含める))



③建屋間相対変位を考慮した渡り配管の評価
(一方の建屋が傾き、建屋間で相対変位が生
じているケース)

図 II.6.2-2 機器・配管系の影響評価における考慮事項

II.6.3 荷重の組合せ

機器・配管系の影響評価は、短期荷重である断層変位による傾斜、建屋内の変形、建屋間の相対変位を、運転時荷重と組み合わせる必要がある。また、地震動から求めた地震力（地震の揺れによる荷重）を同時に考慮する必要がある場合には、適切にそれらを組み合わせるものとする。

すなわち、①、②の荷重と必要に応じて③の荷重が同時に作用することを想定する。

- ① 断層変位による傾斜、建屋内の変形、建屋間の相対変位
- ② 運転時荷重^{※1}、死荷重
- ③ 地震の揺れによる荷重^{※2}

※1：日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）」¹⁾（以下「JEAC4601-2008」という。）、日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 第I編 軽水炉規格（JSME S NC1-2012）」²⁾（以下「JSME S NC1-2012」という。）で規定されるプラントの供用状態に基づき設定。変位が基準地震動 S_s と同等の発生頻度とすれば、事故時荷重との組合せは不要である。

※2：例えば、当該断層変位をもたらすと評価できる地震による地震動や、保守的に基準地震動 S_s による動的地震力を JEAC4601-2008 に基づいて設定する。

II.6.4 許容限界

(1) 構造損傷

損傷に寄与する応力の種類に関して、外力とつりあう応力としての一次応力評価に傾斜の影響を考慮する。また、隣接部分の拘束又は自己拘束により生ずる二次応力評価に、変形、建物・構築物間の相対変位による影響を考慮する。

a. 一次応力評価（傾斜に対する許容限界）

傾斜によって生じる自重の分力は、一次応力として考慮し、供用状態 Ds の許容応力を許容限界*として用いる。一般に傾斜により生じる一次応力は、耐震設計で対象とする地震力による応力に比べて小さいため、傾斜による影響が軽微と判断される場合は、傾斜による一次応力評価を省略できる。

ここで、供用状態 Ds の許容応力は、JSME S NC1-2012、JEAC4601-2008 に基づいて評価する。クラス 1 配管の許容応力の例を表 II.6.4-1 に示す。

※：断層変位発生後、長期間に渡り機能維持が必要な設備は、必要に応じて通常運転時の許容限界を適用する。なお、傾斜による一次応力が他の運転時荷重に対して十分に小さく、明らかに影響が軽微な場合は、通常運転時の許容限界に対する評価を省略できる。

表 II.6.4-1 クラス 1 配管の許容応力の例¹⁾

応力分類 供用状態	一次応力 (膜+曲げ)	一次応力 (ねじり、曲げ+ねじり)
Ds	地震以外の短期機械的荷重を含む場合 $\text{Min}[3S_m, 2S_y]$	ねじりによる応力 $0.73S_m$ 上式が満足されない場合 曲げ+ねじりによる応力 $2.4S_m$

Ds：「対象とする機器等が全断面にわたって大変形を生じてもいい」と設計仕様書等で規定された圧力及び機械的荷重が負荷された条件下にある状態に、更に地震荷重に対する特別の制限を加えた状態をいう。

S_m：設計応力強さ

S_y：設計降伏点

b. 二次応力評価（変形、相対変位に対する許容限界）

建物・構築物の変形及び建屋間の相対変位に対して、隣接部分の拘束又は自己拘束により生ずる応力を二次応力として考慮する。断層変位による建物・構築物の変形、相対変位は、一方向へ静的に作用する。この変形、相対変位の影響によって生じる二次応力は、変形に伴い応力が再分配されるため、延性破断に対する許容応力は把握できない。

このため、建物・構築物の変形、相対変位による延性破断の現実的な評価として弾塑性解

析を導入すれば、ひずみに対する許容限界を把握することができる。なお、弾塑性解析を導入する場合の許容ひずみは、既往のガイドライン^{3),4)}等を参考に適切に設定する。許容ひずみの例を表Ⅱ.6.4-2に示す。

表Ⅱ.6.4-2 弾塑性解析を導入する場合の許容ひずみの例

許容ひずみ	参照するガイドライン ^{3),4)}
8.0%	[出典] BWR 配管における混合ガス（水素・酸素）燃焼による配管破損防止に関するガイドライン（第3版） ³⁾
BSCV-3130.2 局部破損 (1) 局部相当塑性ひずみの限界値は (BSCV-2) 式から求まる限界3軸ひずみ ε_L とする。なお、信頼できる破断ひずみ ε_{Lu} が求まる場合は (BSCV-2) 式中においてその値を用いても良い。 <div style="text-align: right;">(BSCV-2)</div> $\varepsilon_L = \beta \cdot \varepsilon_{Lu} \cdot \exp \left[- \left(\frac{a_{sl}}{1+m_2} \right) \left(\left\{ \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_e} \right\} - \frac{1}{3} \right) \right]$ $\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0.5}$ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力 principal stress $\varepsilon_{Lu} = m_2 = 0.06 \cdot (1.00 - R), a_{sl} = 2.2 \dots$ for ferritic steel $\varepsilon_{Lu} = m_2 = 0.75 \cdot (1.00 - R), a_{sl} = 0.6 \dots$ for stainless steel R : BSCV-3123 参照 β : 補正係数=0.47	[出典] 発電用原子力設備規格 シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン (BWR 鋼製格納容器編) JSME S NX2-2014 ⁴⁾

また、断層変位による建物・構築物の変形、相対変位が、地震時相対変位と同程度と小さい場合は、表Ⅱ.6.4-3に示す耐震設計で用いる二次応力の許容限界を適用することで、簡便かつ保守的に評価が可能である。

表Ⅱ.6.4-3 クラス1配管の許容応力の例¹⁾

応力分類 供用状態	一次+二次 応力範囲	一次+二次+ ピーク応力 ^{注1)}
Ds	3S _m	疲労累積係数 ≤ 1.0

注1) 断層変位による建物・構築物の変形、相対変位が、一方向へ進行する静的なものとして想定できる場合は、評価不要。

疲労累積係数: 各応力サイクルにおいて設計で考慮する繰返し回数と繰返しピーク強度に対応する許容繰返し回数との比を全ての応力サイクルについて加えたもの。

<地震動との組合せを考慮する場合の留意事項>

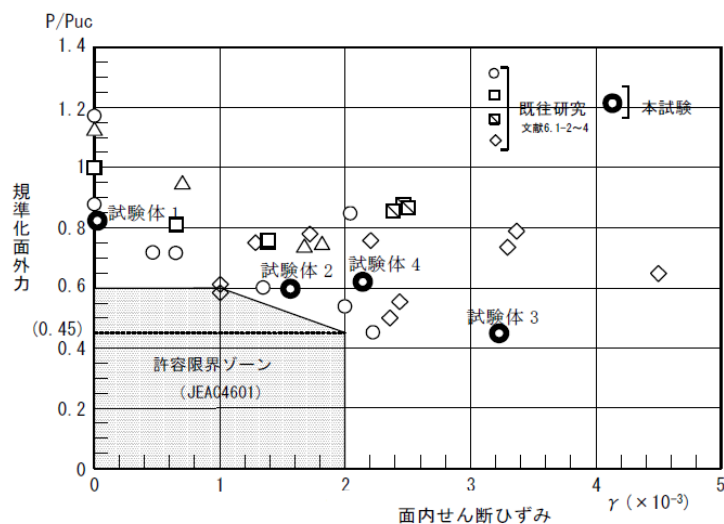
断層変位と地震による慣性力を同時に考慮する場合、建屋局部損傷時の機器定着部の損傷、断層変位による予ひずみを受けた際の地震動による疲労損傷に留意する必要がある。これら

の損傷に対する評価では、既往知見等^{5)~7)}を活用し、適切な評価法を用いる。

c. アンカー部の評価

引張、支圧、せん断力及びこれらの組合せにより生じるアンカー部の評価は、JEAC4601-2008に規定されている評価手法が参考となる。

ただし、実験又は詳細な解析的検討によりその妥当性が証明できる場合は、規定以外の許容限界を使用することが許容されており、図Ⅱ.6.4-1に示す既往試験⁵⁾ではコンクリート部の面内せん断ひずみが 2000μ を越えてもアンカー部は支持機能を有する可能性があるとのデータが得られている。なお、図の縦軸は、基礎ボルトに作用する面外の引張力 P を定着部のコーン状破壊耐力 P_{uc} で除した値である。



図Ⅱ.6.4-1 面内せん断ひずみ度と面外引張力に関する既往試験データ⁵⁾

(2) 機能損傷

断層変位による建屋の傾斜による影響のような長期間継続する可能性がある荷重に対しては、例えば建屋床の傾斜に応じた偏った荷重が機器に作用する。ポンプ等の回転機器であればラジアル荷重、アキシャル荷重及びその複合荷重は増加するおそれがある。断層変位発生後、長期間に渡り機能維持が必要な動的機器は、それらの荷重に対して軸受部、シール部等の構造強度を評価し、長期許容荷重（定格荷重）との比較により動作機能を確認することができる。

なお、非常用ディーゼル発電設備や立形ポンプ等の長尺回転機器は、建物・構築物の変形で生じた荷重による軸受の損傷に注意する必要がある。

<地震動との組合せを考慮する場合の留意事項>

断層変位と地震による慣性力を同時に考慮する場合、地震時の機能損傷は、JEAC4601-2008

の機能確認済加速度や既往の大型振動台での実証試験結果と比較することで、動的機能維持を確認することができる。

II.6.5 解析・評価手法

断層変位に対する機器・配管系の評価は、現時点では JEAC4601-2008、JSME S NC1-2012 等の国内基準に準じた構造健全性評価を行うこととし、設備の安全機能が確保されていることを確認する。

評価に当たっては、断層変位による影響として、建物・構築物に対する影響評価から整理した入力条件 (II.6.2) を基に、機器・配管系の各設備の構造面での特徴を踏まえて評価部位を抽出し、適切な評価法を適用する。例えば、配管系のような静的構造物については、建屋の傾斜のような入力条件に対しては比較的影響は受けにくいものの、変位によっては流路閉塞、破断等が発生し、安全機能が失われるおそれがある。また、ポンプのような動的機器については、傾斜の程度によっては動作機能が失われるおそれがあり、機器定着部を含めて評価し、運転性能を確認する必要がある。

II.6.5.1 機器評価の基本的な考え方

断層変位は、地震による揺れと異なり、建物・構築物のある一部分のみが損傷を受けることが想定される。

炉心冷却機能を有する安全上重要な設備は、その多重性に対する信頼度を向上させるために、安全分離区分に従って分散配置されている。原子炉建屋の安全分離区分の例を図 II.6.5.1-1 に示す。図 II.6.5.1-1 の例では、仮に断層変位により区分 I のエリアが部分的に損傷して設備が機能喪失したとしても、区分 II 及び区分 III のエリアに設置された設備を用いて、短期及び長期の炉心冷却機能を維持することができる。

このように、設備の配置と損傷状態を考慮して影響評価することを基本的な考え方とする。

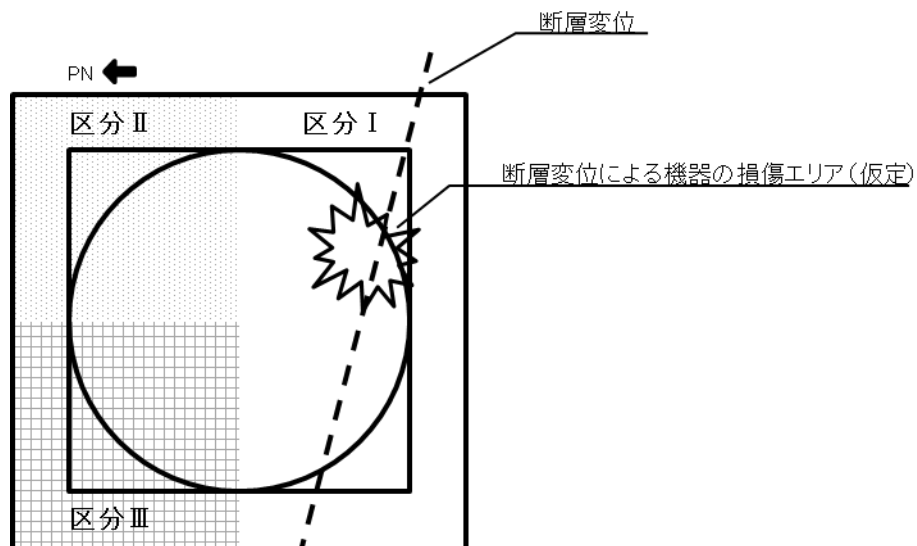


図 II.6.5.1-1 原子炉建屋の安全分離区分例

II.6.5.2 評価項目

(1) 構造健全性評価

構造健全性評価には、一般的に、解析モデルを用いた詳細評価による方法と、材料力学の基礎式等を用いて行う簡易評価とがある。

表 II.6.5.2-1 には、機器の評価手法の例を示す。断層変位による機器・配管系の評価は、設置床の傾斜及び変形、建屋間の相対変位による影響等を考慮する必要があり、損傷を精緻に評価する方法としては FEM 解析等による詳細評価が必要である。

ただし、横形ポンプの評価のように剛体として扱うことが可能な設備は断層変位に対する影響が比較的軽微と判断されるため、材料力学の基礎式等による方法でも評価が可能である。

なお、評価に際して、建屋・構築物が機器・配管系に対する支持機能を有していることを、II.4.4.2 の建屋の許容限界を参照して確認しておく必要がある。

表 II.6.5.2-1 機器の評価手法の例

代表的な解析モデル及び評価手法
a) 質点系梁モデルによる解析 <ul style="list-style-type: none">・ 配管系（相対変位又は設置床の傾斜と変形を考慮）・ 立形ポンプ（設置床の傾斜を考慮）・ タンク類（設置床の傾斜を考慮）
b) 3次元シェル要素による解析 <ul style="list-style-type: none">・ 配管系（相対変位又は設置床の傾斜と変形を考慮）・ タンク類（設置床の傾斜を考慮）・ 原子炉格納容器（設置床の傾斜と変形を考慮）
c) 材料力学の基礎式による評価 <ul style="list-style-type: none">・ 横形ポンプ（設置床の傾斜を考慮）・ 制御棒挿入性（設置床の傾斜を考慮）

以下に解析モデルを用いた詳細評価として多質点系モデルによる配管系の解析評価、簡易モデルによる評価として1質点系梁モデルによる剛設備の解析評価を代表として評価方法を述べる。

a. 配管系の解析評価

断層変位による影響が考えられるものとして、図 II.6.5.2-1 に示す建屋境界に渡って設置された配管系（以下「渡り配管」という。）が挙げられる。

断層変位による建屋の傾斜により建屋境界には相応の相対変位が生じるため、これら変位を入力とした応答を適切に評価するために配管系の評価に適用する解析モデルは、3次元の多質点系梁モデルが基本となる。また、建屋境界部の相対変位を受ける部位について、弾塑性挙動

等の詳細な検討を実施する場合については、シェル要素等により詳細なモデル化を行う。

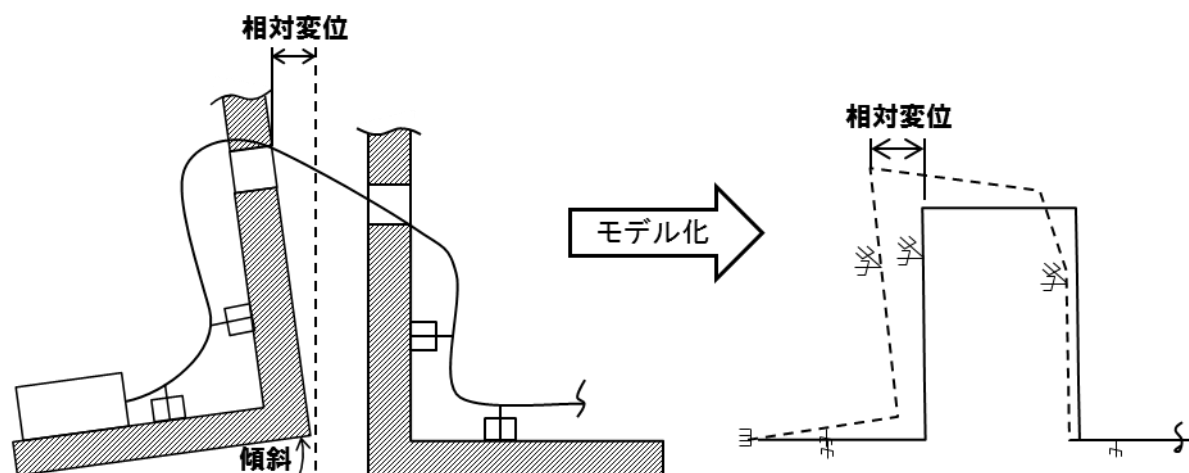


図 II.6.5.2-1 相対変位を受ける渡り配管の多質点梁モデルの例

渡り配管に対する評価手順を図 II.6.5.2-2 に示す。断層変位による傾斜、建屋間相対変位を入力とした構造損傷評価により要求仕様を確認し、配管系としての安全機能の維持を確認する。

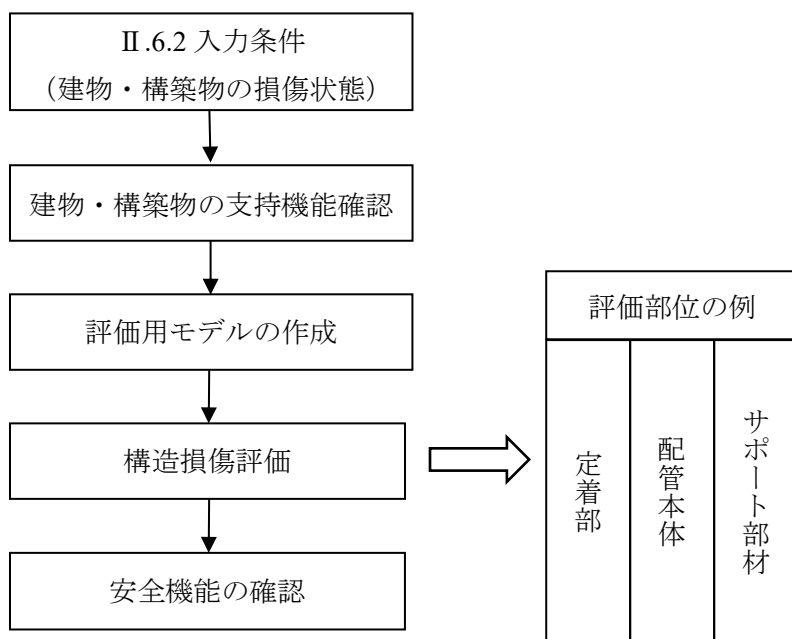


図 II.6.5.2-2 断層変位の影響を受ける渡り配管の評価手順

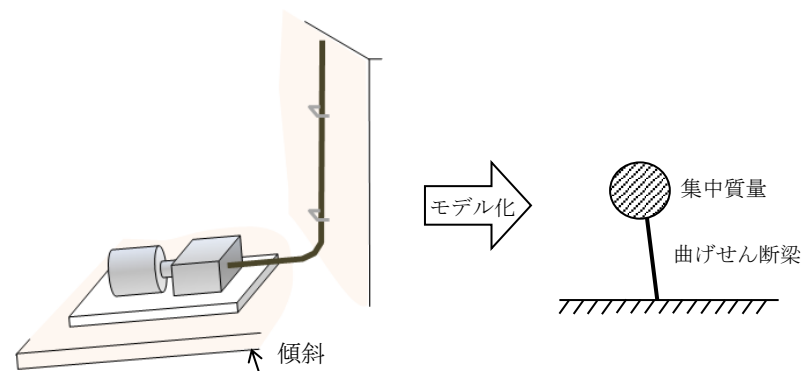
b. 横形ポンプの解析評価

建屋床面に設置されたポンプについては、断層変位に対する影響として設置床面の傾斜が考えられるため、図Ⅱ.6.5.2-3のような評価モデルを用いて傾斜による影響を考慮した構造損傷評価が必要となる。図Ⅱ.6.5.2-4にJEAC4601-2008を参照した横形ポンプの評価手順を示す。

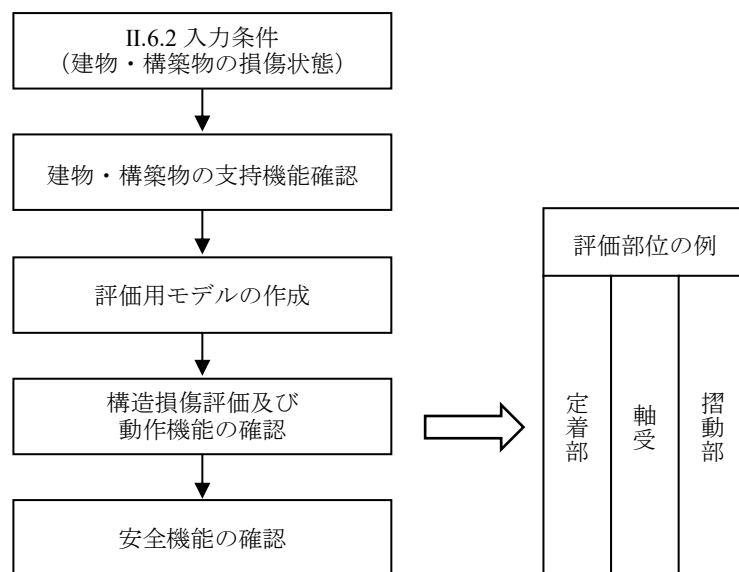
なお、ある程度の傾斜までは軸受に過大な荷重が作用することは考え難く、動作機能に与える影響が小さいことは、以下に示す船用設備設計における知見からも言える。

<船用設備設計における知見（設計技術者からの聴取結果）>

- ・設計クライテリアとして静的及び動的な傾斜角度の目安がある。
- ・一般的に傾斜による荷重を入力とした設計はしない。
- ・傾斜を原因として機器が損傷した実績はない。
- ・傾斜の持続により潤滑油の供給に問題が出る可能性はある。このため部分的な摩擦により摺動部の影響が考えられるが、傾斜後の稼働時間が7日程度では故障する可能性は低い。



図Ⅱ.6.5.2-3 横形ポンプの傾斜を考慮した評価モデルの例

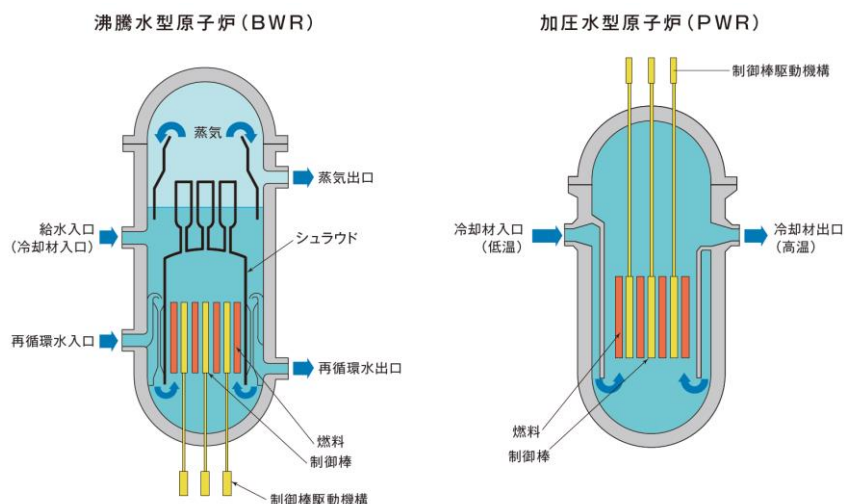


図Ⅱ.6.5.2-4 横形ポンプの評価

c. 制御棒挿入性の解析評価

PWR と BWR とでは原子炉容器の構造は異なっており、また、図Ⅱ.6.5.2-5 のとおり制御棒の挿入方法も PWR は落下方式であるのに対して BWR は押し上げ方式である。

このため、PWR と BWR とでは制御棒挿入性の評価内容に相違があるが、制御棒挿入性は挿入経路の抗力を算出することで評価できる。



図Ⅱ.6.5.2-5 原子炉容器概略図

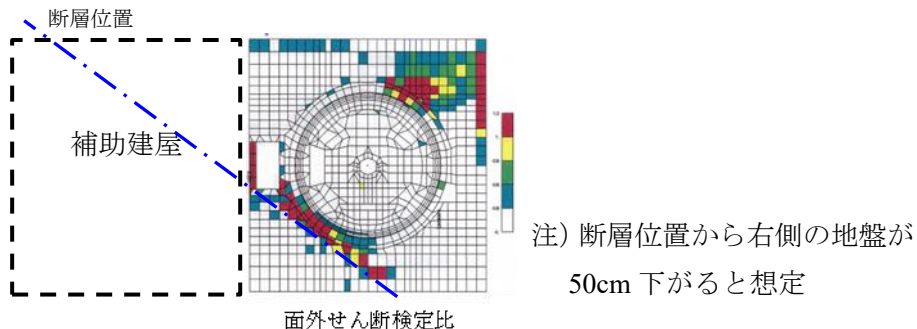
(出典：電気事業連合会「原子力・エネルギー」図面集 2015)

Ⅱ.6.5.3 評価事例

断層変位に対する評価事例として、既設の原子炉建屋等の直下に断層変位を想定し、建屋の3次元 FEM 解析を実施し、その結果に基づいて安全系ポンプ、配管及び制御棒挿入性に関する評価を実施した事例^{8),9)}を以下に示す。

(1) 評価条件

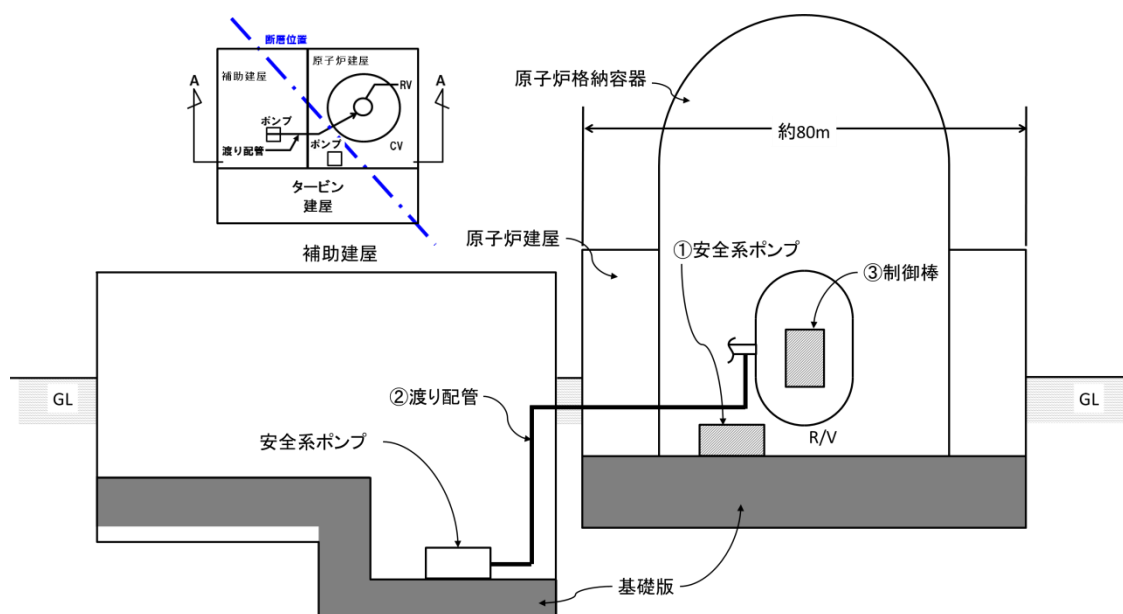
図Ⅱ.6.5.3-1 に想定した断層位置に 50cm の鉛直変位を与えた原子炉建屋の解析結果を示すが、原子炉建屋の基礎版は面外せん断検定比から局部的に損傷し、傾斜・変形していることが分かる。なお、隣接する補助建屋は、解析範囲に含めていないが、補助建屋は傾斜しないものと仮定し、補助建屋と原子炉建屋との間の渡り配管の相対変位を安全側の評価条件となるようにして評価している。



図Ⅱ.6.5.3-1 原子炉建屋の FEM 解析結果

下記①～③に評価機器の検討方針を示す。また、図Ⅱ.6.5.3-2に評価機器の設置場所を示すが、機器評価の入力条件は、図Ⅱ.6.5.3-1の原子炉建屋のFEM解析に基づき表Ⅱ.6.5.3-1のとおり設定している。

- ① 安全系ポンプ：安全側に、傾斜・変形した原子炉建屋の基礎版に設置されていると仮定
- ② 渡り配管：原子炉建屋の損傷部位を通過していない安全系配管を対象として、特に建屋間の貫通部廻りの渡り配管に着目して断層変位による建屋間相対変位を考慮して評価
- ③ 制御棒：原子炉格納容器内の基礎版は損傷していないため、原子炉容器は基礎版の傾斜・変形を考慮して評価



図Ⅱ.6.5.3-2 機器評価点（断面 A-A）

表Ⅱ.6.5.3-1 機器への影響評価のための入力条件

断層変位量	①安全系ポンプ	②渡り配管	③PWR 制御棒
	床傾斜角度	建屋間相対変位	床傾斜角度
50cm	12/1000 (0.67°)	X : -136.6 mm Y : 6.8mm Z : -212.9 mm	8/1000 (0.44°)

(2) 安全系ポンプの強度評価

断層変位 50cm によって原子炉建屋が傾斜した場合の安全系ポンプの構造損傷を評価している。評価部位は、傾斜に対してクリティカルと想定される基礎ボルトと軸受に着目して評価し、以下に示すとおり構造損傷には至らないことが確認できる。

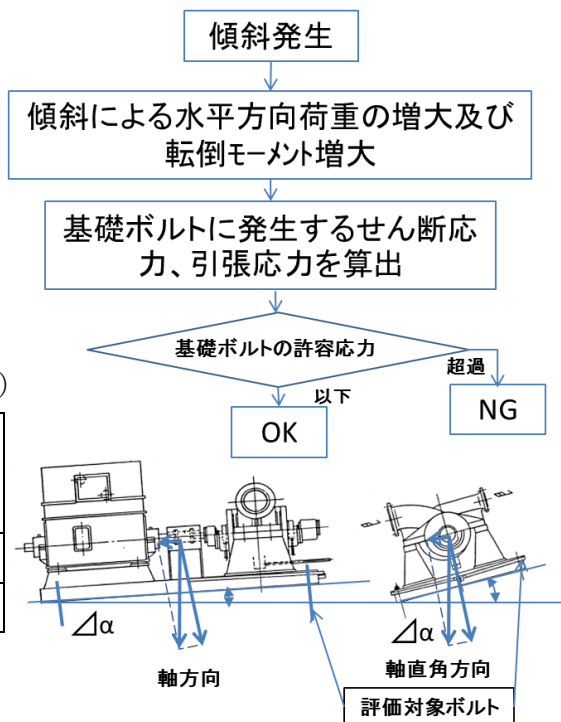
a. 基礎ボルトの評価結果

右図のフローに基づき評価した結果、表Ⅱ.6.5.3-2 のとおり断層変位 50cm は有意な応力は発生せず許容値を満足している。

表Ⅱ.6.5.3-2 傾斜時に基礎ボルトに発生する応力 (MPa)

断層変位 (cm)	傾斜角 (°)	引張応力		せん断 応力	許容 応力	評価	
		軸方向	軸直角 方向				
—	0	—	—	—	175	135	OK
50	0.67	—	—	—	175	135	OK

注) 断層変位 50cm 程度では、基礎ボルトに発生する応力は無視できる程度である。

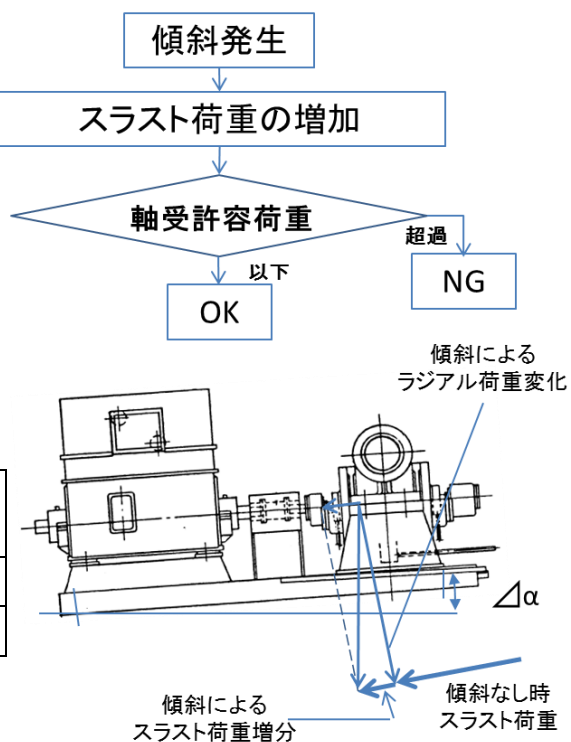


b. 軸受の評価結果

右図のフローに基づき評価した結果、表Ⅱ.6.5.3-3 のとおり断層変位 50cm では有意な荷重は発生せず許容値を満足している。

表Ⅱ.6.5.3-3 傾斜時に軸受に発生する荷重 (N)

断層変位 (cm)	傾斜角 (°)	スラスト 荷重	許容 荷重	ラジアル 荷重	許容 荷重	評価
—	0	12,000	355,000	4,452	16,200	OK
50	0.67	12,058	355,000	4,452	16,200	OK



(3) 配管の強度評価

原子炉建屋と補助建屋とを跨ぐ安全系の渡り配管（図 II.6.5.3-3 参照）について、建屋の 3 次元 FEM 解析によって求められた断層変位に対する建屋の応答に基づいて建屋間の相対変位を算出し、それを強制変位として渡り配管の弾塑性解析を実施し、影響を評価している。

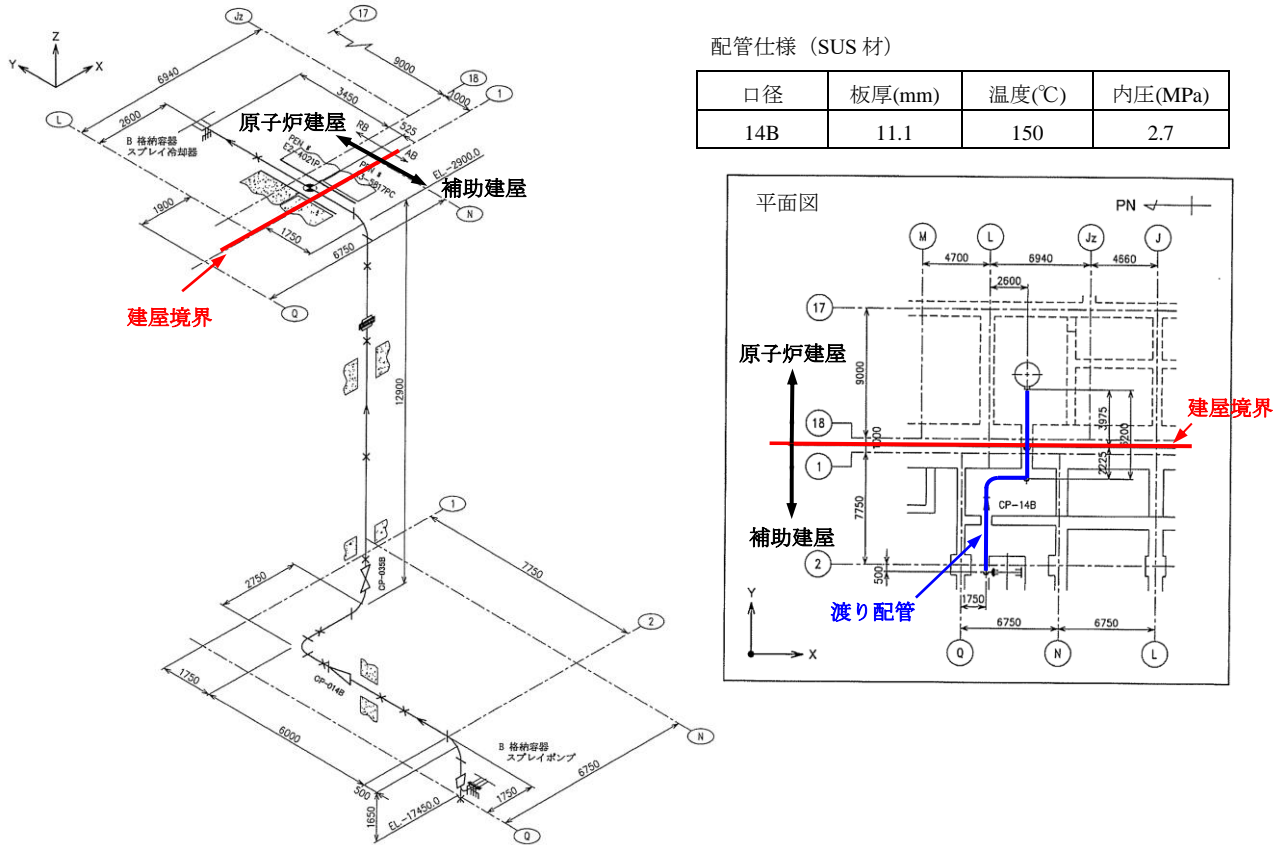


図 II.6.5.3-3 建屋配置と渡り配管ルート例

【解析条件】

- ① 建屋床のひずみは 2000 μ 以下であり、サポート定着部は固定とする。
- ② 建屋間相対変位は、原子炉建屋側の配管サポート点に強制変位として入力する。

【解析モデル】

配管応答の厳しい箇所をシェルモデル、その他を梁モデルで構成したハイブリッドモデル(図 II.6.5.3-5 参照)を採用。

- 使用コード : ANSYS
 主な使用要素 : SHELL181 (シェル要素部)
 PIPE288 (はり要素直管部)
 ELBOW290 (はり要素エルボ部)
 弾塑性モデル : 2 直線近似による移動硬化則モデル
 (図 II.6.5.3-4 参照)

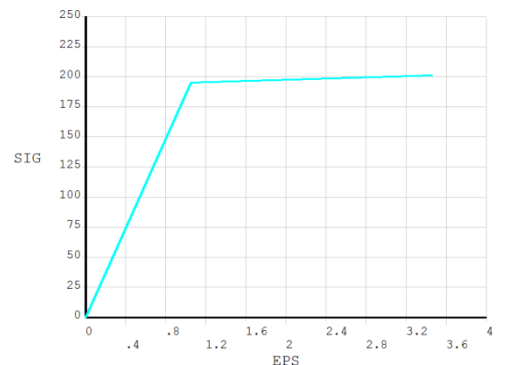


図 II.6.5.3-4 材料特性

【判定基準】

弾塑性解析結果により算定される最大ひずみにより、配管材料が延性破断を起こさないことを確認する。延性限界としては、JIS 上での材料の伸び (22%) を基準とする。

【解析結果】

図 II.6.5.3-6 に示すように、最大ひずみは 2% 程度であり、破断に至らないことが確認できる。

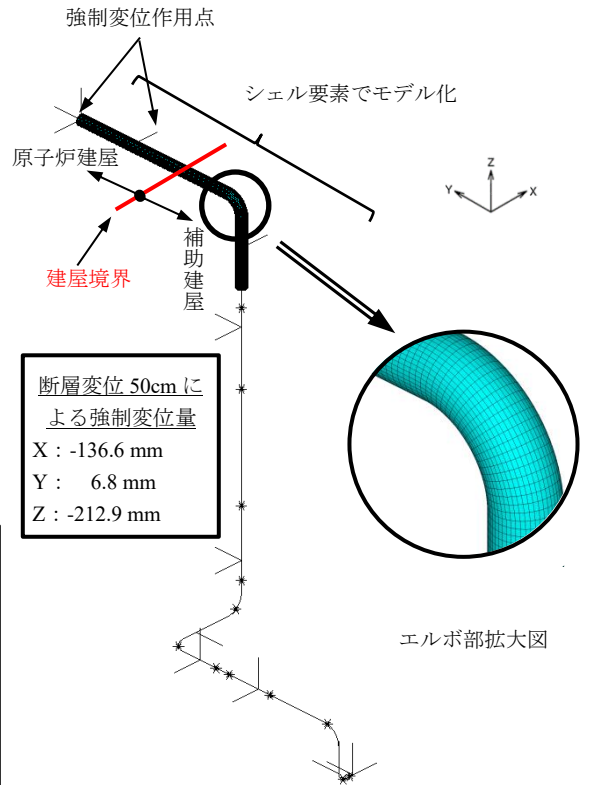


図 II.6.5.3-5 弾塑性解析モデル (ハイブリッドモデル)

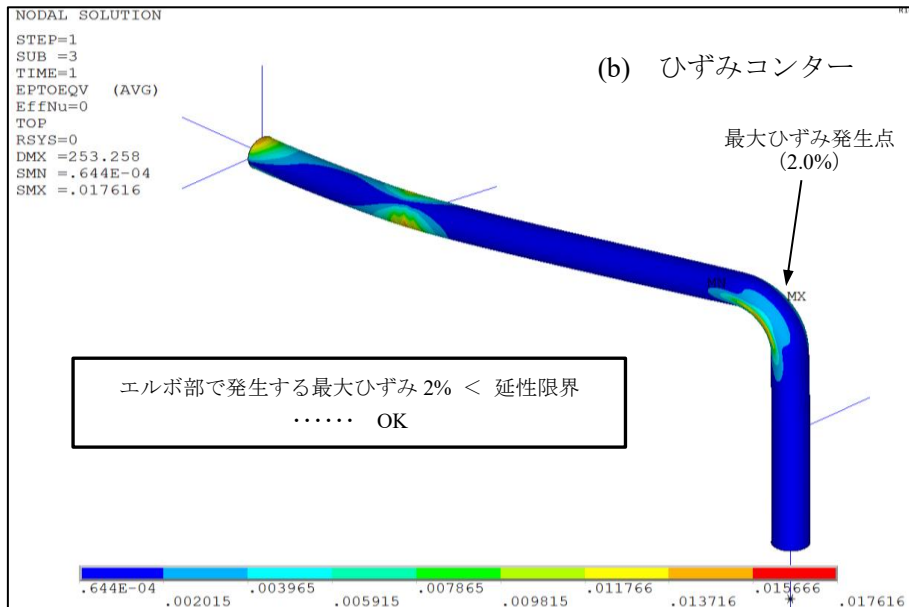
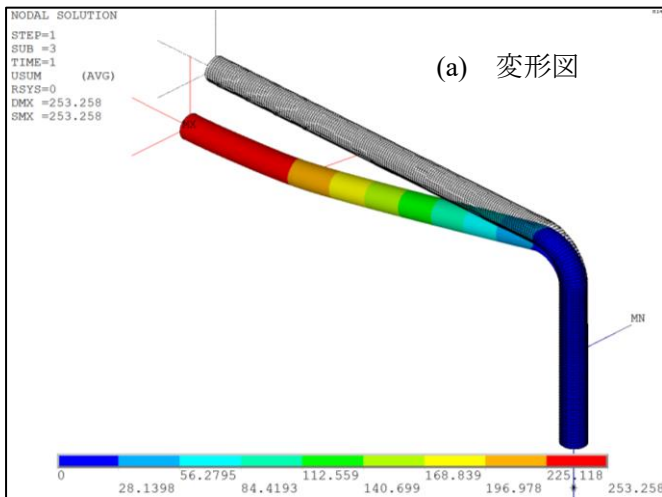


図 II.6.5.3-6(a),(b) 弾塑性解析結果の一例

(4) 制御棒挿入性の評価

1) PWR の制御棒挿入性評価

制御棒の挿入経路は、制御棒クラスタ及び駆動軸は自重によって円滑に挿入できる構造となっており、軽微な傾斜では制御棒の挿入を阻害するものではない。

なお、図Ⅱ.6.5.3-7に制御棒の挿入経路を示すが、断層変位によって制御棒の挿入経路が傾斜した場合は挿入経路との摩擦によって生じる抗力を評価することで挿入性について評価ができる。

仮に原子炉建屋に 8/1000 程度の傾斜を想定しても制御棒クラスタの抗力は下式によって自重の 1.0%程度となり、断層変位によって挿入性は阻害されない。

$$F = \mu \times M \cdot g \times \sin \theta$$

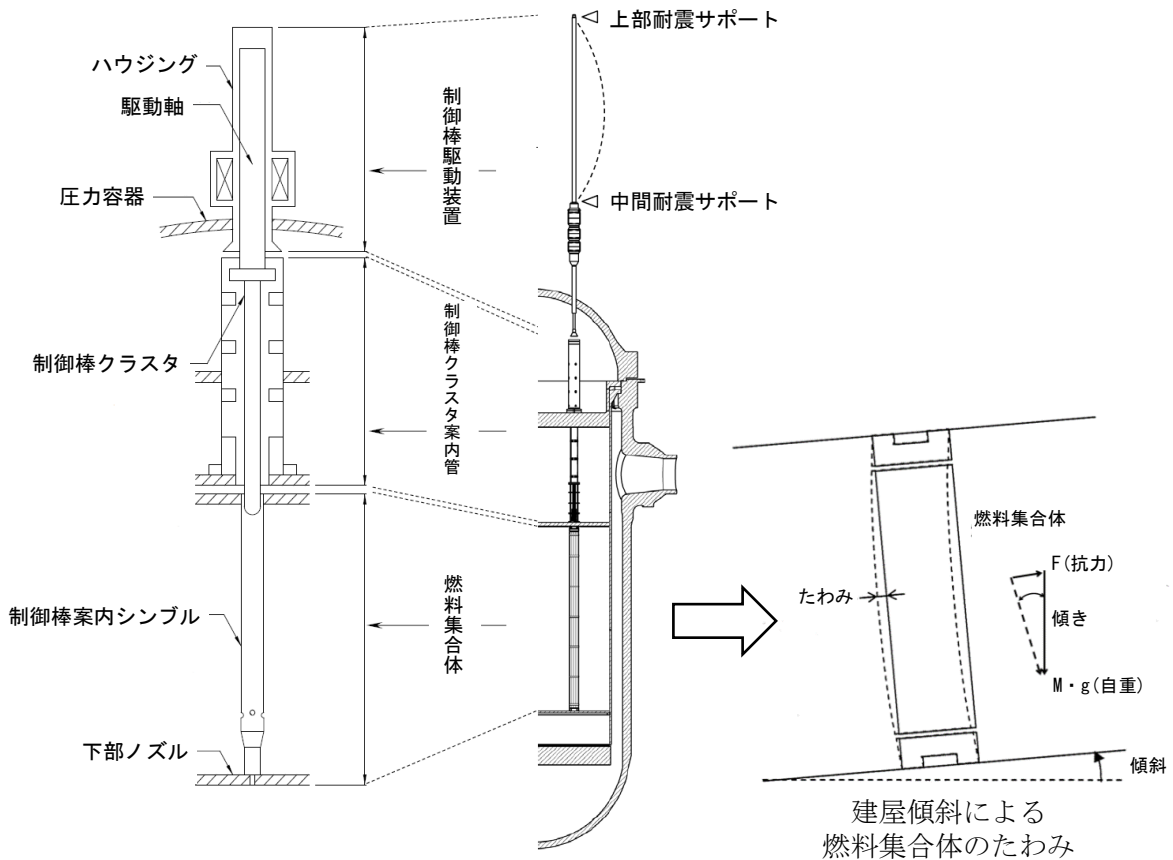
ここで、

F：上向きの抗力

μ ：摩擦係数

$M \cdot g$ ：自重

θ ：傾斜（=0.44°）



図Ⅱ.6.5.3-7 PWR 制御棒挿入経路概略図

なお、傾斜による制御棒の挿入遅れについては、旧原子力安全基盤機構が多度津の振動台で実施した耐震実証試験結果¹⁰⁾を参考に以下のとおり考察している。

- ・燃料集合体の地震時変位（最大約 15 mm, S₂(1)、最小約 5 mm, S₂(2)) に対して傾斜による変位は下図のとおり 1 mm 以下であり、制御棒挿入時間への影響は無視できるほど小さいと推測できる。

○燃料集合体のたわみ量

- ・傾斜による水平方向荷重：約 6 kg f
- ・燃料集合体のたわみ量：約 0.3 mm

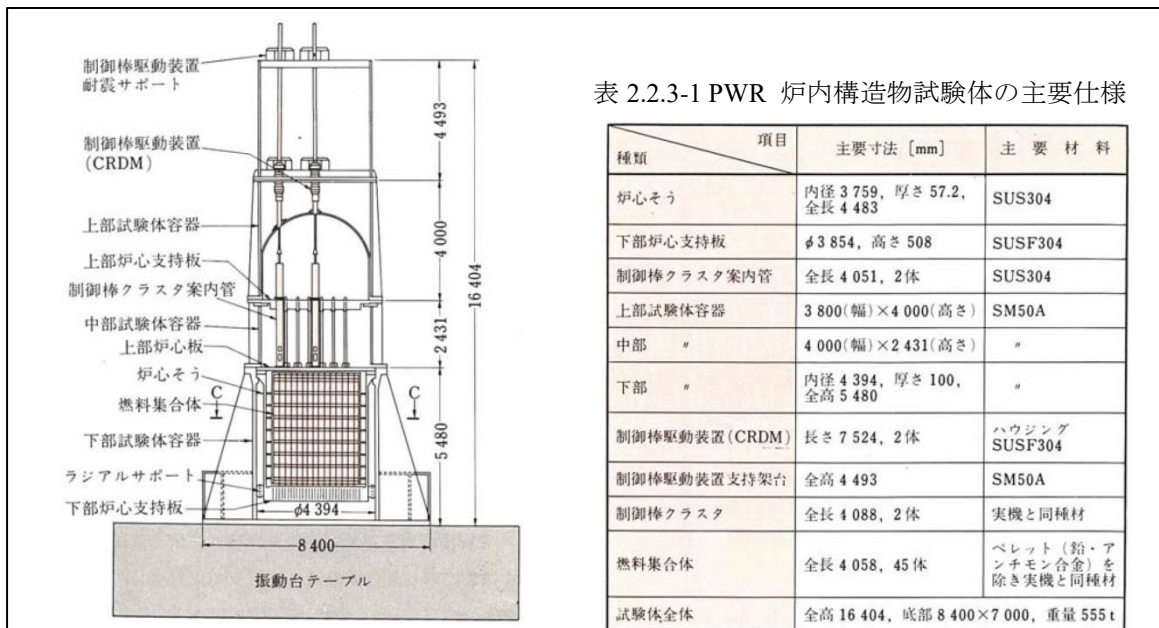


図 2.2.3-2 PWR 炉内構造物試験体概略図

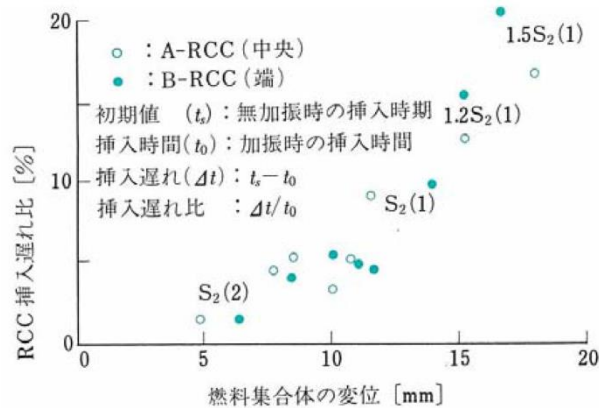


図 2.2.3-9 制御棒挿入遅れ比と試験対応答の関係

図 II .6.5.3-8 原子力発電施設耐震信頼性実証試験の概要 (JNES-SS-0617)¹⁰⁾

2) BWRの制御棒挿入性評価

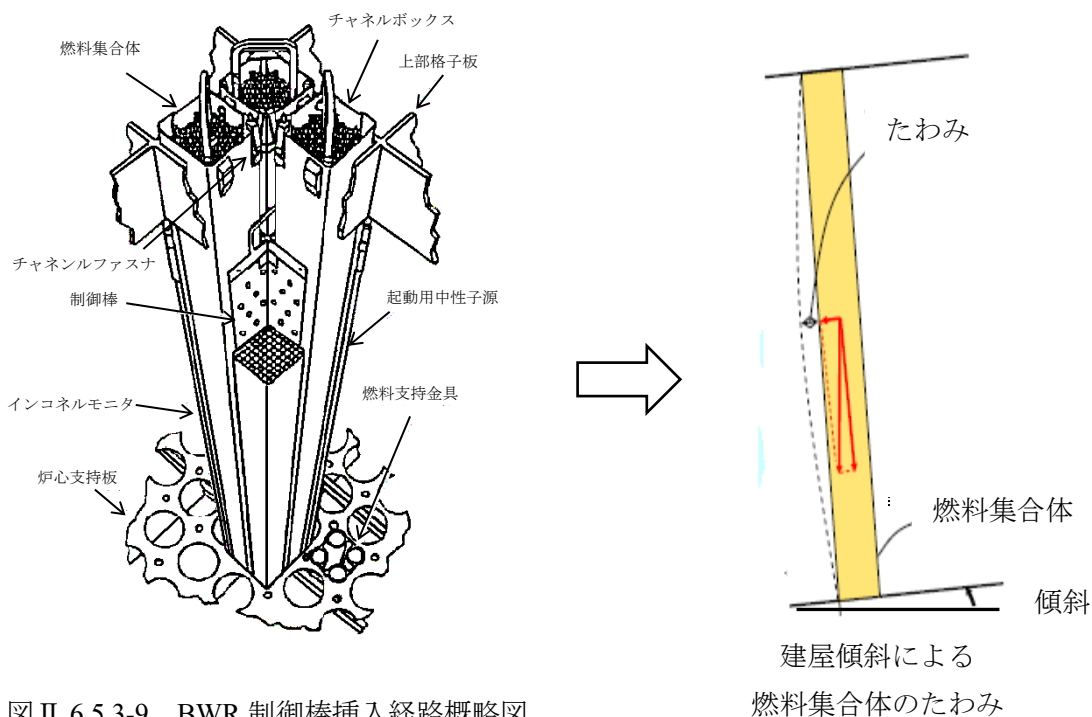
BWRの燃料集合体は図Ⅱ.6.5.3-9に示すようにチャンネルボックスを装着しており、下端を燃料支持金具、上部を上部格子板に支持されている。制御棒の挿入経路は、チャンネルボックス上部のチャンネルファスナにより確保される構造となっている。また、断層変位により建屋傾斜が生じた場合には、燃料集合体を両端支持の梁として、傾斜による燃料集合体の自重の分力によるたわみ量を評価することで、制御棒挿入性への影響が評価できる。

ここでは、建屋基礎底面の傾斜に係る使用限界の目安（表Ⅱ.4.4-2にある0.5/1000～2/1000程度）を参照して制御棒挿入性の検討を実施した。

検討の結果、1/1000程度の原子炉建屋の傾斜を想定しても燃料集合体の自重の分力による燃料集合体のたわみは0.01mmオーダーであり、断層変位による建屋傾斜によって制御棒挿入性が阻害されることはないと判断できる。

なお、傾斜による制御棒の挿入遅れについては、PWRの場合と同様に耐震実証試験結果¹⁰⁾を参考に以下のとおり考察できる。

- ・燃料集合体の S_1 、 S_2 地震時変位（最大約35mm、最小約8mm）に対する挿入時間は1.2sec程度であり、規定時間（1.62sec）に対して余裕がある。このような地震時変位と比較しても、上記検討のように傾斜による燃料集合体のたわみは極わずかであるため、制御棒挿入時間に影響を及ぼすおそれはないと考えられる。



図Ⅱ.6.5.3-9 BWR 制御棒挿入経路概略図

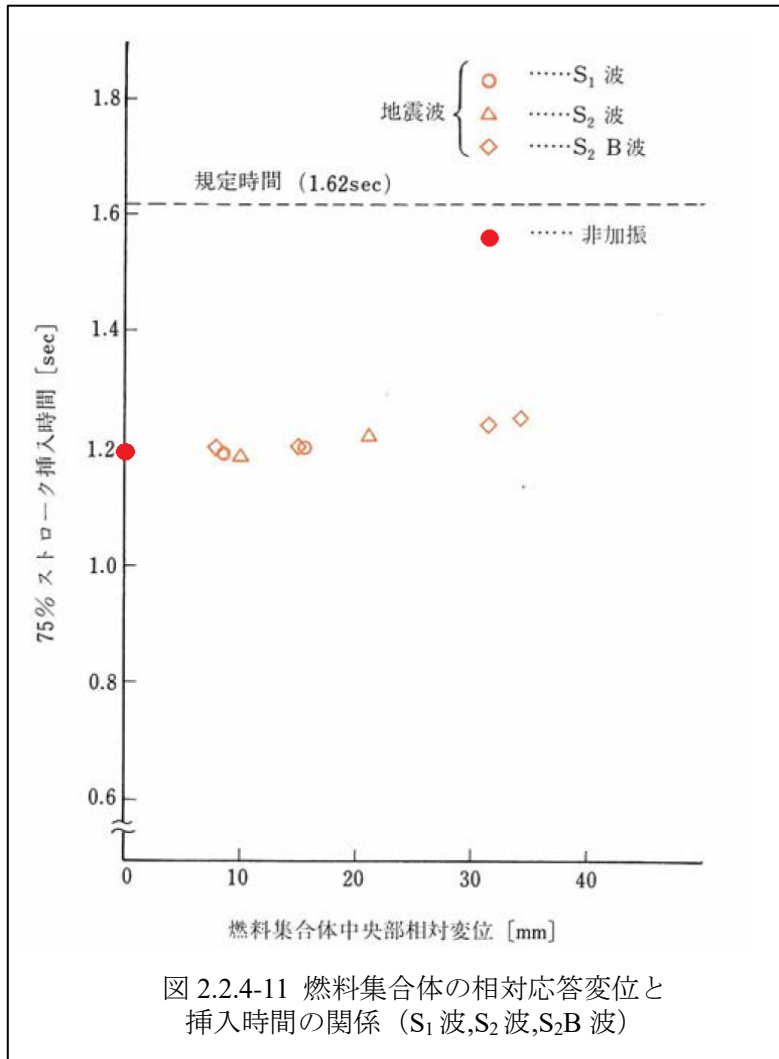


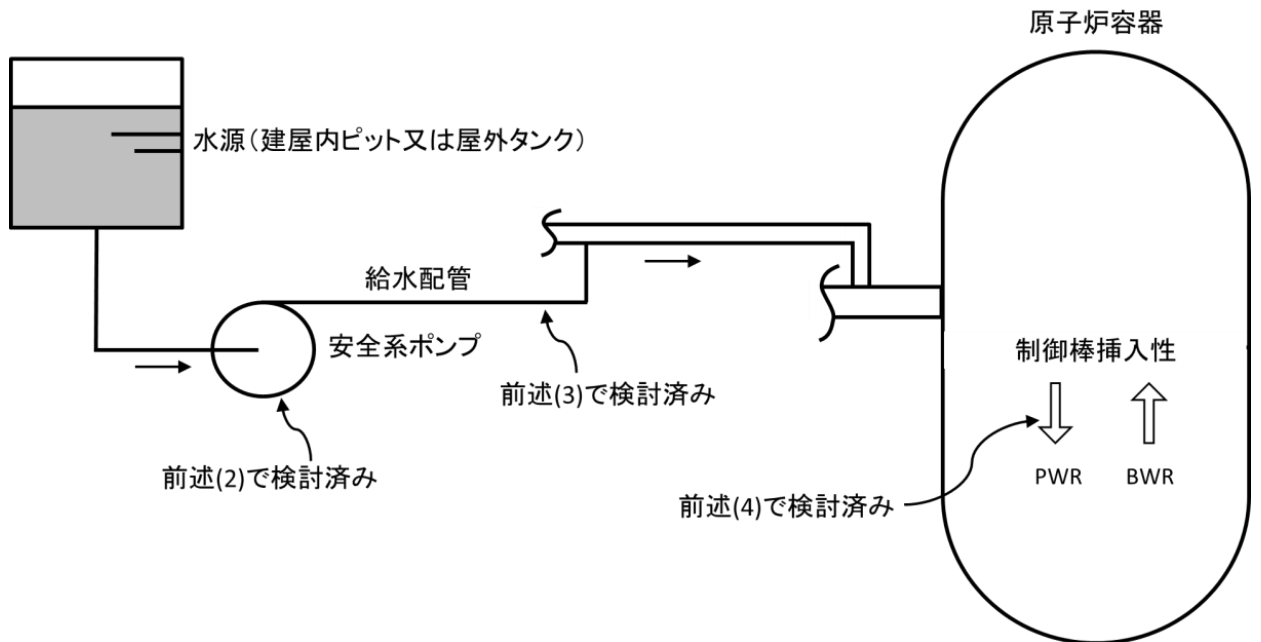
図 II.6.5.3-10 原子力発電施設耐震信頼性実証試験の概要 (JNES-SS-0617) ¹⁰⁾

(5) 炉心冷却機能についての考察

原子炉施設における炉心冷却システムの概略図を図Ⅱ.6.5.3-11に示す。

前述(2)～(4)の概略評価結果に示すとおり、仮に50cm程度の断層変位によって原子炉建屋の一部が損傷し、原子炉建屋が傾斜、変形及び隣接建屋間に相対変位が生じた場合でも炉心冷却システムの構成機器である安全系ポンプ、建屋間の渡り配管及び原子炉を安全停止するための制御棒挿入性は機能が確保されており、システムとしての機能は維持できていると考えられる。

なお、ここでは水源の評価事例は示していないが、代替設備として屋外に重大事故対処施設もあり、これら水源の配置が分散されている効果により、いずれかの水源が機能を維持しているとの評価ができることになる。



図Ⅱ.6.5.3-11 炉心冷却システムの概略図

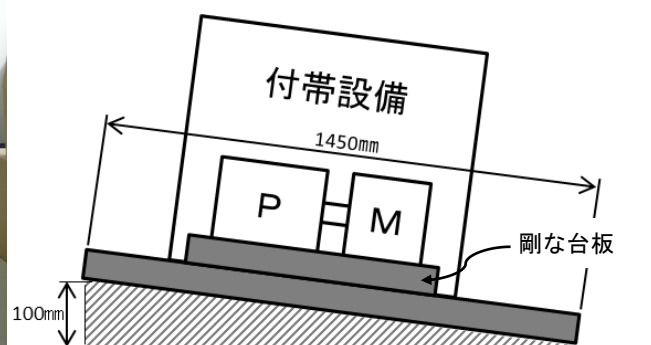
(6) ポンプを傾斜させた動作確認実験例

原子炉建屋等の直下又は近傍において断層変位が生じた場合、建屋基礎版の傾斜・変形に伴い、建屋内の動的機器も同様に傾斜する可能性があり、動的機能への影響を確認する必要がある。

試験事例¹¹⁾によれば、下図のように床を 10/145 (約 4°) 傾斜させた状態での多段横型ポンプの動作機能が確認されており、一定程度までの傾斜については機能喪失のおそれはないと考えられる。



ポンプ設置状況写真



横型ポンプの傾斜角 (約 4°)

<試験条件等>

a. ポンプの仕様

ポンプは、一般産業品の横型ポンプを用いている。ポンプの仕様は以下のとおり。

横型ポンプの仕様

ポンプ	種類	多段ポンプ
	揚程	160m
原動機	種類	3相誘導電動機
	出力	11kW

b. 試験条件

ポンプの傾斜方向：軸方向

ポンプの傾斜角度：10/145 (長さ 1450mm のポンプ台板に 100mm の枕木を入れて傾斜させた)

ポンプの状態：傾斜したままで起動、運転、停止操作を実施

II.6.6 機器フラジリティ評価

断層変位に対する耐変位安全性評価としては、決定論的評価と断層変位ハザードに基づく確率論的評価がある。ここでは、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」¹²⁾（以下「地震 PRA 標準」という。）に基づき確率論的評価の例を示すこととし、断層変位単独のフラジリティ評価を当面の目標とし、地震時の揺れとの重畳フラジリティは、今後の課題とする。

II.6.6.1 機器フラジリティ評価の流れ

基本的には地震 PRA 標準と同様な流れである。ここで、フラジリティ曲線を評価するための断層変位量（図 II.6.6.1-1 の横軸）は、断層変位ハザード評価で定義された位置での変位量とする。

なお、断層変位に対する機器フラジリティ評価フローの例を図 II.6.6.1-2 に示す。

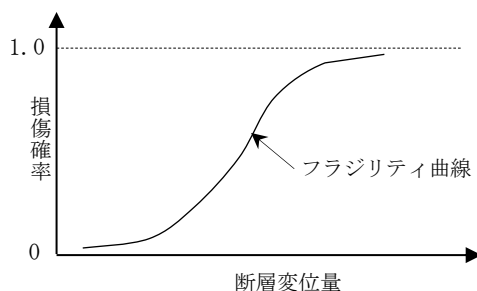
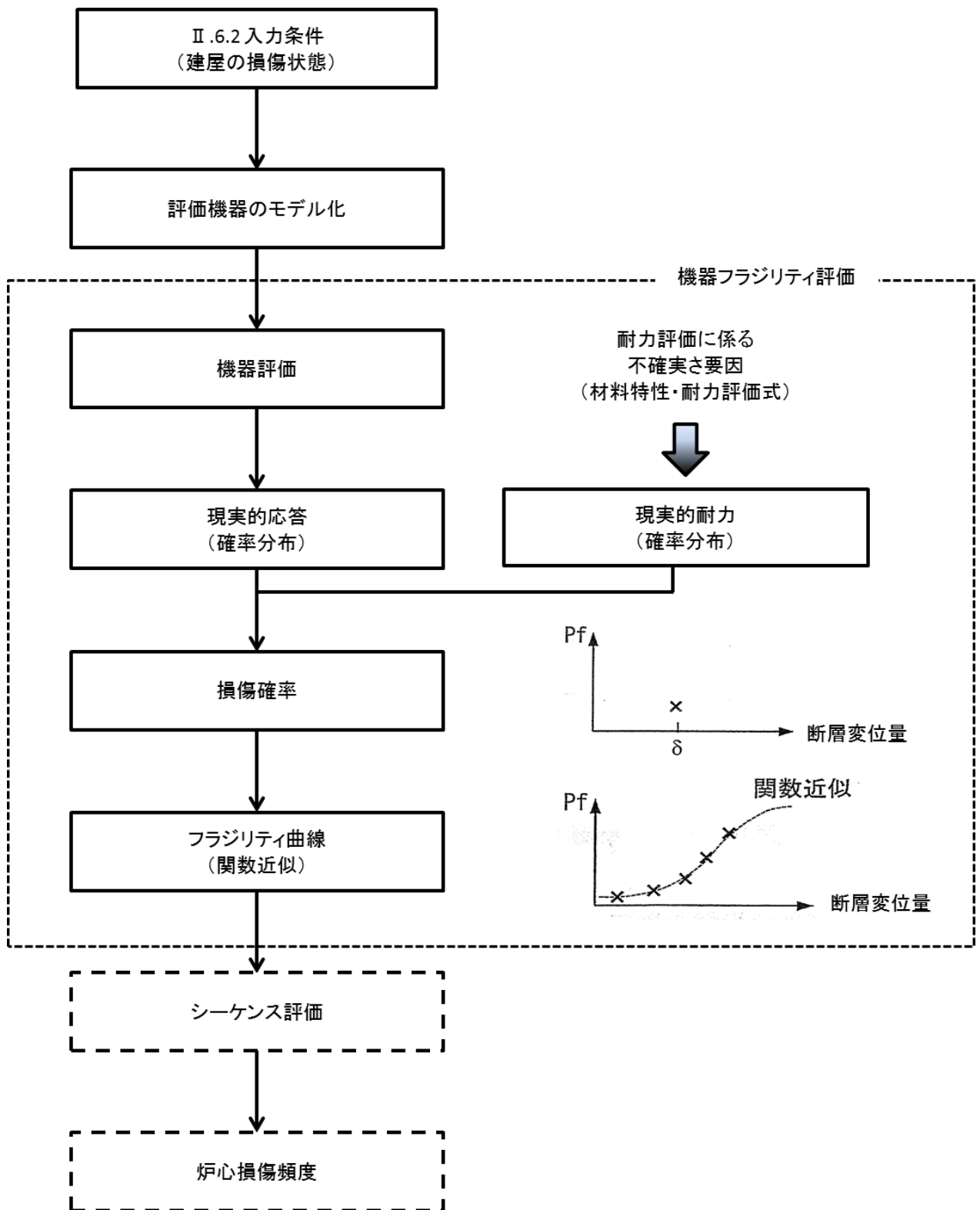


図 II.6.6.1-1 フラジリティ曲線の模式図



図Ⅱ.6.6.1-2 断層変位に対する機器 fragility 評価フローの例

(1) 評価対象と損傷モードの設定

基本的な考え方は地震 PRA 標準と同じであるため、本記載からは省略し、断層変位特有の考え方について以下に示す。

a) 一般事項

後述の II.7 の事故シナリオに基づき事故シーケンス評価に必要な機器を選定し、損傷モード及び損傷部位を抽出する。なお、ここでは損傷評価の指標は断層変位とする。

b) 損傷モード及び部位の抽出

断層変位に対する損傷モードは、構造的損傷モードと機能的損傷モードを考慮する。ここで、損傷モード及び部位の抽出に際しては、断層形式（正断層、逆断層及び横ずれ断層）に留意する。また、参考として、機器損傷シナリオの例を図 II.6.6.1-3 に示す。

c) 損傷評価の指標の選定

本評価においては、断層変位を評価指標とする。このため、地震応答に関する損傷評価の指標（応力、加速度）は取り扱わない。

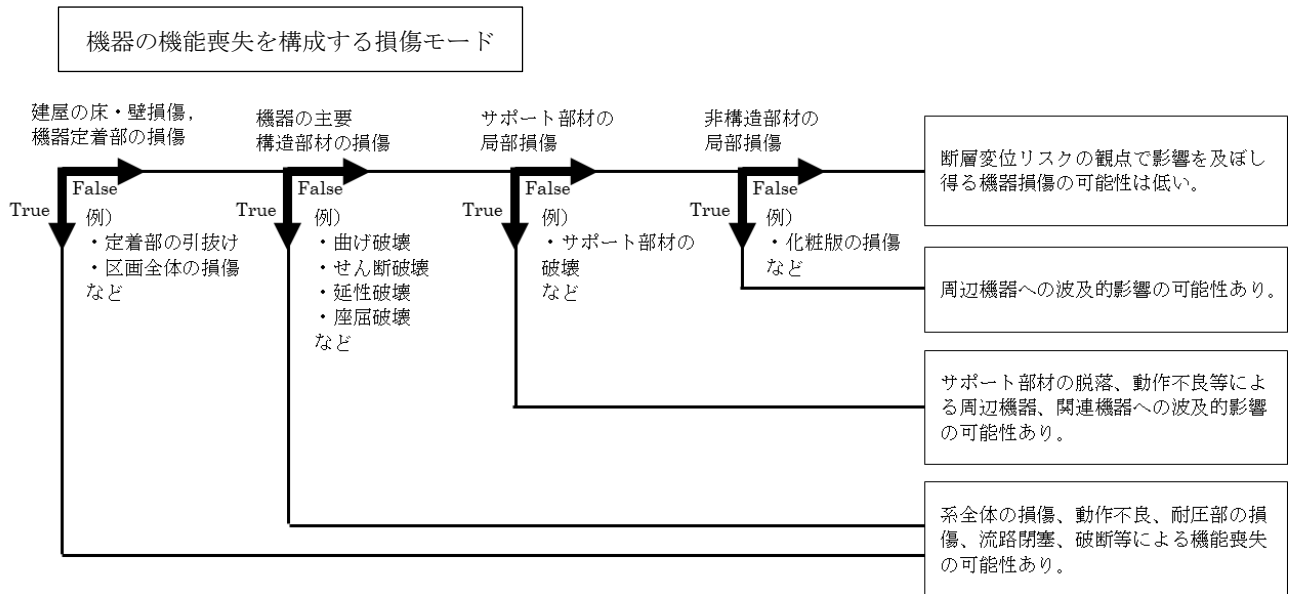


図 II.6.6.1-3 断層変位に対する機器の損傷シナリオの例

(2) 評価手法の選択

地震 PRA 標準では詳細法（現実的耐力と現実的応答による方法）と簡易法（現実的耐力と応答係数による方法、耐力係数と応答係数による方法）の 2 種類があるが、断層変位に対しては入力である断層変位量に対する応答の非線形性を適切に評価するために詳細法が好ましいと考える。

(3) 現実的耐力の評価

a) 一般事項

フラジリティ評価では、検討用の断層変位を超える領域を含む断層変位量に対応した現実的耐力の確率分布を評価して、フラジリティ曲線の算定を行う。ここでは、偶然的不確かさ及び認識論的不確かさを考慮した現実的耐力評価に関する基本的な考え方を示す。

b) 現実的耐力の評価方法

断層変位に対して構造的損傷と機能的損傷モードに分けて評価し、不確かさ要因を考慮する。

(4) 現実的応答の評価

a) 一般事項

フラジリティ評価では、検討用の断層変位を超える領域を含む断層変位量に対応した現実的応答の確率分布を評価して、フラジリティ曲線の算定を行う。ここでは、偶然的不確かさ及び認識論的不確かさを考慮した現実的応答評価に関する基本的な考え方を示す。

b) 現実的応答の評価方法

現実的応答は、II.6.2 に記載された入力条件に従い、不確かさを考慮して詳細解析手法を用いて評価する。

(5) フラジリティの評価

a) 一般事項

ここでは、現実的耐力及び現実的応答を用いてフラジリティ曲線を算定する方法を示す。

b) 現実的耐力と現実的応答による方法（詳細法）

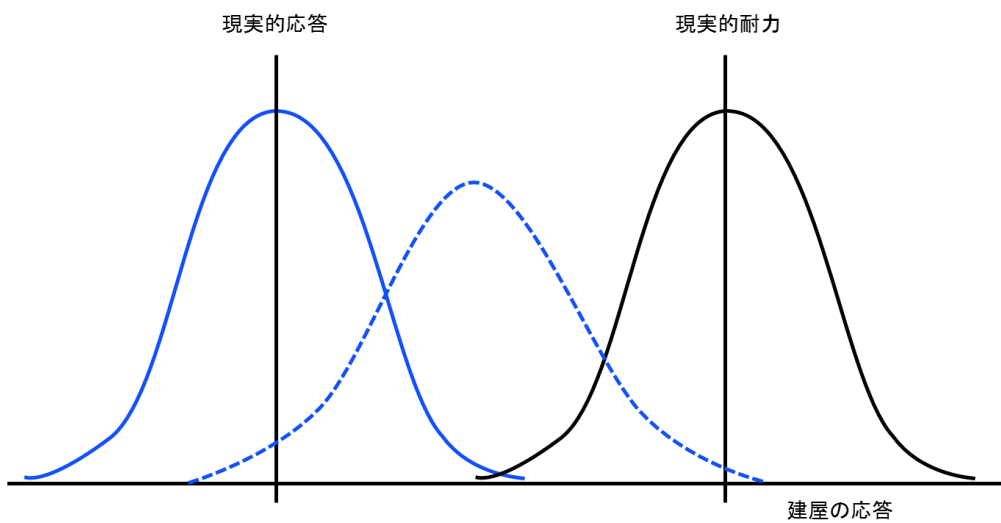
断層変位に対応した現実的応答を評価するためのクライテリア（機器の傾斜に対する許容範囲等）が明確ではないが、基本的な考え方は現在の設計手法でも対応と考えられる。今後、クライテリアに関するデータの蓄積が望まれる。

(6) 機器フラジリティの評価例

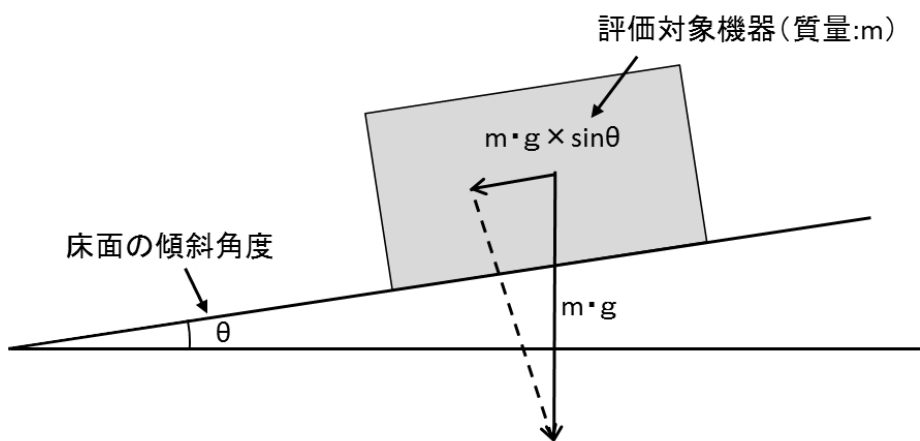
図Ⅱ.6.6.1-4 は現実的応答と現実的耐力の関係を示したものであるが、断層変位が増加するに従い建屋応答の認識的不確実さが大きくなるイメージを示したものである。

原子炉建屋等の床、壁の傾斜、変形等が生じた場合の機器耐力についてのデータが得られれば、図Ⅱ.6.6.1-4 に示す現実的応答と耐力の関係を示すことができ、このような関係に基づいてフラジリティ曲線を示すことができる。

なお、床の傾斜に対する機器耐力の評価は図Ⅱ.6.6.1-5 に示すように、斜面と平行に作用する荷重 ($m \cdot g \times \sin\theta$) に基づいて評価を行う。



図Ⅱ.6.6.1-4 建屋の応答を考慮した機器の現実的応答と現実的耐力の関係



図Ⅱ.6.6.1-5 フラジリティ算定荷重の考え方

参考ではあるが、表Ⅱ.6.6.1-1 のとおり、日本海事協会の鋼船規則¹³⁾では、原動機、補機、非常用発電機類について傾斜角度に対する許容目安値が示されている。ただし、その前提として傾斜角度を考慮した設計が必要とされている。

表Ⅱ.6.6.1-1 鋼船規則 D 編¹³⁾

[出典：(2015 鋼船規則 D 編 1 章) **ClassNK**]

機器の種類	左右方向 ⁽²⁾		前後方向 ⁽²⁾	
	静的傾斜 (横傾斜)	動的傾斜 (ローリング)	静的傾斜 (縦傾斜)	動的傾斜 (ピッチング)
主機、主ボイラ及び重要な補助ボイラ、発電機（非常用を除く）を駆動する原動機並びに補機（作業用補機等を除く）及びこれらを駆動する原動機	15°	22.5°	5° ⁽⁴⁾	7.5°
非常設備（非常用発電装置及び非常用消化ポンプ並びにそれらの駆動機）各種開閉装置 ⁽¹⁾ （遮断器等）自動及び遠隔制御を行うための設備	22.5° ⁽³⁾	22.5° ⁽³⁾	10°	10°

注

(1) 傾斜 45° までは、意図に反したスイッチの切換えや動作の変化が起こらないものであること。

(2) 左右方向と前後方向の傾斜は、同時に起こることを考慮すること。

(3) 液化ガスばら積船及び危険化学品ばら積船にあっては、船舶が浸水した状態で左右方向 30° の傾斜まで使用可能なように非常用電力を供給できるものであること。

(4) **A 編 2.1.2** にいう船の長さが 100m を超える船舶については、次式による値として差し支えない。

$$\theta = 500/L$$

θ : 傾斜角度 (°)

L : **A 編 2.1.2** にいう船の長さ (m)

II.6.6.2 リスク評価への出力

断層変位は、地震による揺れと異なり、建物・構築物のある一部分のみが損傷を受けることが想定される。このため、炉心冷却機能を期待する設備が、多重性を有し、安全区分分離に従い位置的に分散して配置されていることを考慮して、フラジリティ評価結果をまとめる。

建物・構築物の損傷状態に応じたフラジリティ評価結果は、安全上重要な設備の区分分離の考え方（単一故障を前提としていること、原子炉格納容器等は多重性を持たないこと等）を考慮して表II.6.6.2-1の例に従い出力し、確率論的なリスク評価に繋げる。

表II.6.6.2-1 フラジリティ評価結果の出力例

対象設備の多重性	設備の損傷範囲 (建屋損傷状態等から想定)	フラジリティ評価結果の出力	安全分離区分の例
有り (ECCS等)	単一区分内の損傷	● 損傷が想定される安全分離された区分を特定し、損傷機器及びフラジリティ評価結果を出力	
	複数区分内の損傷	● 安全分離された複数区分の損傷範囲を特定し、損傷機器及びフラジリティ評価結果を出力	
無し (PCV等)	詳細な構造強度評価に基づいて損傷範囲を想定	● 炉心損傷に直結する機器の詳細な評価結果	

ECCS：非常用炉心冷却系

PCV：原子炉格納容器

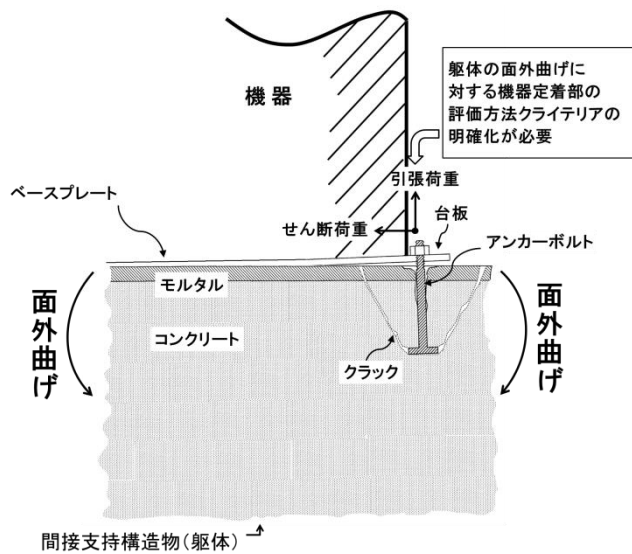
II.6.7 今後の課題

機器・配管系の決定論的評価は、基本的には既往の規格・基準¹⁾²⁾に準じて、解析モデルを用いた詳細評価による方法や材料力学の基礎式等を用いて行う簡易評価によって評価可能である。ただし、これらの規格・基準は、断層変位によってもたらされる影響を直接的に取り扱ったものではないので、関連する技術データの蓄積と併せて、整備が必要である。

また、本検討においては断層変位と地震動との重畳については検討対象としていないが、断層変位と地震動の重畳を考慮する場合の、荷重の組合せ方法から評価結果を導くための評価ロジックを構築する必要がある。

このような背景から、断層変位に対する機器・配管系の評価課題を以下に示す。

- ・断層変位による荷重は、短期荷重として取り扱い、国内の規格・基準にて影響評価は可能であるが、断層変位発生後に長期間継続運転が必要となる機器は傾斜による分力を長期荷重として評価するとともに、機器の長期運転継続性について確認する必要がある。
- ・建物の床や壁の面外曲げによる損傷状態に対応した機器定着部の引抜け、せん断耐力を明確にする必要がある（図II.6.7-1参照）。



図II.6.7-1 建屋床の面外曲げに対する機器定着部の評価上の課題

II. 6.8 参考文献

- 1) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008），2008年.
- 2) 日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格第I編 軽水炉規格（JSME S NC1-2012），2012年.
- 3) 原子力技術協会：BWR配管における混合ガス（水素・酸素）燃焼による配管破損防止に関するガイドライン（第3版），2010年3月.
- 4) 日本機械学会：発電用原子力設備規格 シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン（BWR鋼製格納容器編）JSME S NX2-2014, 2014年3月.
- 5) 原子力安全基盤機構：平成20年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験（JNES/SSD09-007 09 耐部報-0007），2009年11月.
- 6) 美原義徳, 小柳貴之, 清浦英明, 肱岡康雄：原子炉本体基礎の弾塑性モデル化手法に関する研究 その3 PRVペデスタル基部アンカー部の引抜き耐力及び変形能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010年9月.
- 7) 配管技術：低サイクル疲労寿命に及ぼす予ひずみの影響<中越沖地震後の柏崎刈羽原子力発電所の健全性評価>, 2011年2月.
- 8) 佐藤邦彦, 原口龍将, 神谷昌伸, 小川勤, 上屋浩一：断層変位に対する機器・配管系の解析評価事例 (1)機器の解析評価事例, 日本原子力学会 2017年春の大会, 講演番号 3M02, 2017年3月.
- 9) 新聞聡, 梅本貴広, 神谷昌伸, 小川勤, 上屋浩一：断層変位に対する機器・配管系の解析評価事例 (2)配管の解析評価事例, 日本原子力学会 2017年春の大会, 講演番号 3M03, 2017年3月.
- 10) 原子力安全基盤機構規格基準部：原子力発電施設耐震信頼性実証試験の概要（JNES - SS - 0617）, 2006年11月.
- 11) 奈良林直, 岡本孝司, 百々隆, 神谷昌伸：原子力安全規制関連検討会報告(5) 断層変位に対する工学的な対策とリスク評価, 保全学, Vol.15, No.4, pp.2-7, 2017年.
- 12) 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.
- 13) 日本海事協会：鋼船規則 D編 機関, 2015年.

上記以外に、断層変位に対する機器評価の参考となる文献を別紙II.6に示す。

2007年新潟県中越沖地震における東京電力柏崎刈羽原子力発電所の対策、BWR建屋を対象とした断層変位評価の例、埋設配管の設計法及び船用機器の傾斜に対する許容目安は参考となる。

別紙Ⅱ.6 断層変位に対する機器評価の参考文献

分野	著者名	表題	文献誌名	文献の要旨	備考
①原子力設備設計	長澤 和幸 古谷 賢	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	日本保全学会 第13回学術講演会	2007年新潟県中越沖地震で損傷が確認された耐震重要度Cクラスの機器に共通する点は、地震により機器が設置されている地表面に変位が発生したことである。地震の被災状況から、耐震重要度の低い設備であっても上位の耐震重要度機器への波及的影響防止等の観点から、設置状況に応じて地震による変位の発生防止対策又は変位の影響緩和対策を図ることが、設備保全上重要であるとの教訓が得られた。 ここでは、柏崎刈羽原子力発電所における対策の状況等について概要をまとめた。	別添資料Ⅲ.5参照
②原子力施設設計	堤 英明 美原 義徳 高橋 容之 蛭沢 勝三	断層変位の構造物フラジリティへの影響の検討	JOCSSAR 2015 論文集	Vs500m/sの地盤上に設置されたBWR型原子炉建屋を対象に直下に副断層を想定し、断層変位量を10cm、30cm、60cmとして3次元FEM解析によって原子炉容器(RPV)のペDESTALの支持機能及びRPVの回転角を確認したが、支持機能は喪失することなく、また60cmの断層変位量では1/200程度の回転角(静的水平震度で0.005Gに相当)が生じるがRPVに影響を与えるものではないことを確認した。	
③原子力機器定着部設計	長田 宗平 梅木 芳人 藪内 耕一 前中 敏伸 大河内 靖雄 川角 佳嗣	地震荷重を受けるRC壁に設置された機器アンカーの支持性能 その5 実験および解析検討のまとめ	日本建築学会大会 学術講演梗概集 (2015年9月)	RC壁に面内せん断力を作用させ、機器アンカーの引き抜けを確認した。 せん断ひずみ4000μ程度からは引き抜けが多いが、2000μ超程度であれば支持機能を保持していると言える。	
④埋設配管設計	清宮 理 菊池 俊則	断層による強制変位を受ける埋設パイプラインの解析	土木学会 地震工学研究発表会梗概集 Vol.27 (2003) P29	本研究では、断層による変形を受ける埋設パイプラインの耐震性能を整理し、埋設パイプラインを1次元梁要素とした簡易的な有限要素法解析により、断層による強制変位を受ける埋設パイプラインの安全性評価を検討した。断層面の角度、断層面の表層地盤での存在の有無などを要因に検討を行った。検討の結果、口径101.6cm、肉厚1.91cmのパイプライン(材質API5L X80)は50cmの軸直変位(縦ずれ)で終局限界ひずみに到達した。	
⑤船用設備設計	機関第三 研究委員会	主機潤滑油サンブタンク設計マニュアル	日本船用機関学会誌 第28巻 第12号 (1993-12)	油タンクの油面は、船が縦傾斜5° 横傾斜15°の状態を持続した場合でも、ポンプが空気を吸収するおそれのない油面であること。船の傾斜角度は船級によって異なっているが、適当な傾斜角度として縦傾斜5° 横傾斜15°とする。	
⑥船用設備設計	日本船用工業 会	SM標準ブック	日本船用工業会標準 (1997年度版)	船用電動遠心ポンプの軸受に潤滑油を用いる場合は、以下に規定した船体の傾斜及び動揺があっても性能に支障のない構造とする。 横に15°、縦に5°とし、ローリングは片側22.5°、ピッチングは7.5°とする。	

II.7 事故シナリオ・リスク評価

II.7では、断層変位が起因となってプラントの安全性を損なう可能性のある事故シナリオと、そのような事故シナリオの発生防止、影響緩和のための対処方策の考え方について記述するとともに、それらの事故シナリオを対象に、対処方策の効果を適切に考慮できるリスク評価の方法と、その適用例について記述する。

II.7.1 事故シナリオと対処方策

リスク評価の対象とすべき事故シナリオと、リスク評価結果を利用してリスクを抑制するための対処方策を検討するための考え方について整理した。

II.7.1.1 事故シナリオの整理

II.4からII.6における各施設に対する影響評価を基に、リスク評価、対処方策検討のための事故シナリオを以下の手順で整理した。

- ① 断層変位が単独で影響する場合と、地震の発生に伴う地震動等の影響と断層変位の影響が重畳する場合に分類する。地震の発生に伴う影響については、地震動による機器等の損傷以外にも、津波、火災、溢水といった随伴影響、波及影響が考えられるが、ここではそれらを含めて地震動等による影響として分類する。また、余震による地震動の影響等、時間遅れでの影響の可能性も考えられることから、余震等の影響として分類とする。
- ② 断層変位は地震動と異なりその影響が局所的であることを考慮し、断層変位が発生する位置関係による分類を考慮する。
- ③ 断層変位による建物・構築物及び土木構造物の損傷の状況、形態等に着目した影響シナリオ进行分类する。
- ④ 建物・構築物や土木構造物の影響に応じて機器・配管系への影響シナリオを分析する。
- ⑤ これらの分類項目毎に、断層変位の影響が局所的な場合を想定して、損傷の組合せ、ランダム故障等との重畳を考慮した重大事故（炉心損傷等）に至る事故シナリオを整理する。

整理結果を表II.7.1.1-1に示す。なお、これらの事故シナリオは、それぞれが単独で発生する場合だけでなく、組み合わせて発生する場合も考えられることに留意が必要である。

これらの事故シナリオについて、リスク評価の観点からの取扱い方針のパターンを以下に示す考え方で分類し、合わせて表II.7.1.1-1に整理した。リスク評価では必要に応じてこれらを組み合わせて実施する。

- A) 建物・構築物あるいは土木構造物への断層変位による影響に対して、建物・構築物あるいは土木構造物のフラジリティ評価結果を評価して事故シーケンス解析に反映

- B) 建物・構築物あるいは土木構造物への影響による機器・配管等への影響に対して、機器・配管等の脆弱性を評価して事故シーケンス解析に反映
- C) スクリーニングアウト対象
- D) 他のハザード評価、他のリスク評価等と結合させた総合的な評価が必要

なお、D)に分類された、余震を含む地震動の影響については、地震動に対するリスク評価の検討動向を踏まえて、Ⅱ.4 からⅡ.6 に示す評価方法を基に、適用可能な範囲でその影響を概括的に分析することが現実的である。

Ⅱ.7.1.2 起回事象の考え方

事故シナリオの分析では、事故シーケンスの起点となる起回事象の分析・選定も重要である。断層変位により発生する起回事象は、地震動の場合と同様、大規模、広範な影響を及ぼす可能性のある起回事象（全交流動力電源喪失、原子炉補機冷却機能喪失等）を適切に抽出、分類することが重要であり、その際には日本原子力学会標準「原子力発電所におけ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」¹⁾（以下「地震 PRA 標準」という。）に示される、地震動を対象にした、大規模、広範な影響を考慮した起回事象の分類の考え方を参考にすることができる。（別紙Ⅱ.7-1 参照）

表Ⅱ.7.1.1-1 断層変位による事故シナリオの分析・整理

ハザードの影響	断層変位の発生位置	建物・構築物、土木構造物への影響シナリオ	機器・配管への影響シナリオ	重大事故に至るシナリオ	取扱い方針
断層変位	プラントの安全性に直接影響する位置での断層変位	床、壁、構造物の全体損傷	当該建屋、構造物内の全ての機器・配管等の機能喪失	建物・構築物の大規模な損傷によりそのまま重大事故に至る。(炉心損傷直結)	A
		変形	当該建屋、構造物内の機器の損傷	機器の損傷の組合せあるいは他の機器の故障の重畳により重大事故に至る。	B
		傾斜	当該建屋、構造物内の機器の損傷	機器の損傷の組合せあるいは他の機器の故障の重畳により重大事故に至る。	B
		建屋、構造物内支持機能の低下	当該建屋、構造物内の機器定着部の構造損傷	機器の損傷の組合せあるいは他の機器の故障の重畳により重大事故に至る。	B
		建屋、構造物間の相対変位	当該建屋、構造物間の渡り配管等の構造損傷	渡り配管の損傷の組合せあるいは他の機器の故障の重畳により重大事故に至る。	B
	プラントの安全性に間接的に影響する位置での断層変位	床、壁、構造物の全体損傷	当該建屋、構造物内の全て/一部の機器・配管等の機能喪失	建物・構築物の損傷と他の機器の故障の重畳により重大事故に至る。	A
		変形	当該建屋、構造物内の機器の損傷	機器の損傷と他の機器の故障の重畳により重大事故に至る。	B
		傾斜	当該建屋、構造物内の機器の損傷	機器の損傷と他の機器の故障の重畳により重大事故に至る。	B
		建屋、構造物内支持機能の低下	当該建屋、構造物内の機器定着部の構造損傷	機器の損傷と他の機器の故障の重畳により重大事故に至る。	B
		建屋、構造物間の相対変位	当該建屋、構造物間の渡り配管等の構造損傷	渡り配管の損傷と他の機器の故障の重畳により重大事故に至る。	B
	プラントの安全性に有意に影響しない位置での断層変位	有意な影響なし	有意な影響なし	重大事故に至るシナリオは考え難い。	C
断層変位+地震動等	上記に同じ	上記に加え、建物・構築物、土木構造物の地震動等による損傷	上記に加え、機器・配管等の地震動等による損傷	上記に加え、地震動による建物・構築物及び機器・配管等の損傷の重畳により重大事故に至る。	D
断層変位+余震等	上記に同じ	断層変位の影響下での余震等による損傷	断層変位の影響下での余震等による損傷	上記に加え、断層変位の影響下での余震等による損傷との重畳により重大事故に至る。	D

II.7.1.3 対処方策の考え方

地震動等の他の自然現象による外部ハザードに対する議論と同様に、断層変位とそれに伴うリスクをどのように取り扱うか、深層防護に関する日本原子力学会の標準等に記載されている考え方を参考に整理した。その上で、断層変位に対して有効と考えられる対処方策を、方策の考え方と深層防護概念との関係を考慮して、整理した。

(1) 深層防護の考え方の調査

日本原子力学会の原子力安全分科会にて検討された「原子力安全の基本的考え方について 第1編 別冊 深層防護の考え方 2014年5月」²⁾では、深層防護の概念を理解するための論点として、設計基準を超える外部ハザードに対する取組みが検討されている。ここでは、設計要求範囲と必然的にそれを超える領域 (beyond design basis) を定義し、beyond design basis 事象について DEC (Design Extension Condition) として捉え直し設計する意義を検討している。さらに、設計基準を超える外部ハザードに対し、ハザードの影響を受けない設備の設置 (ハード面) もしくはアクシデントマネジメントによる柔軟な対応 (ソフト面) の設備・対策をどう組み合わせるかについて、ハザードの特性に応じて決定することが重要であると指摘している。

(2) リスク情報活用標準の調査

「原子力発電所の安全確保活動の変更へのリスク情報活用に関する実施基準：2010」³⁾では、PRA によって得られる情報を捉えて、原子力発電所の安全確保活動のうち事業者が実施する運転・保守管理の変更においてリスク情報を活用して意思決定する場合に、共通した要件を規定したものである。その中には、深層防護の堅持が求められており、防護レベル間のバランスと独立性の確保や、防護レベルの各対策を受け持つ系統、機器等の多重性又は多様性及び独立性の確保等が求められている。(別紙II.7-2 参照)

(3) シビアアクシデントマネジメント標準の調査

「原子力発電所におけるシビアアクシデントマネジメントの整備及び向上に関する実施基準：2014」⁴⁾では、解説にて深層防護との関連が記載されている。この中では、アクシデントマネジメントを改善する上で重要な視点は、第3層 (深層防護レベルのレベル3) までの設計の延長ではなく、深層防護思想の最も重要な視点である独立した効果を与えることである。第3層までのように基準シナリオや基準事象等を決めて対策をとることだけでは不十分であり、第3層 (安全設計) とは違う視点でのマネジメントをとらねばならないと記載されている。これは、ハード面の対策だけでなく、要員の対応能力の向上を目的とした教育・訓練、手順書の整備等のソフト面の対策を重視することを意味している。この考え方は、断層変位に対しても同様である。

(4) 対処方策の考え方

断層変位に対処する方策の事例や考え方の分類例については、「Ⅲ.6 断層変位に対する対策事例」に示すとおりである。ここでは、考え方の分類例のうち、最近の文献⁵⁾を参考に、事故シナリオとしての対処方策の考え方を整理した。具体的には、①断層のずれを分散させたり連続・平滑化させたりして影響を小さくする、地面の中でずれが伝わる方向を変えて影響の範囲から逸らせるなど、「免変位」によってリスクを低減する考え方、②施設の配置・向きや構造あるいは基礎の配置や固定方法を工夫して影響を受け難くする、構造を柔軟なものにしたり分節化したりして影響を受けたとしても大被害には至らないようにするなど、「制変位」によってリスクを低減する考え方、及び③被災後の早期の機能回復や復旧を容易にする手段を用意しておく、多重性を高めて災害時の復元性能（レジリエンス）を高めるなど、リスクを「移転」させるという保険の考え方に相当するもの、という分類である。それぞれの考え方のイメージ例を図Ⅱ.7.1.3-2に示す。

新設の施設であれば、断層変位の考慮が必要となる位置を避けて設置する対応を含め、種々の対応が考えられるが、既設の施設の場合には、深層防護の考え方（多重性、多様性、分離独立性といった安全確保の原則）に基づき、特に方策③の考え方が有効と考えられる。

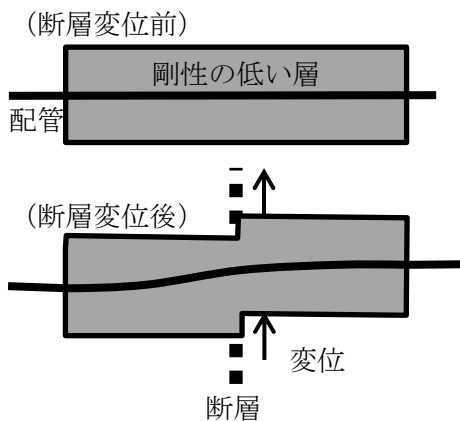
これらの方策の考え方を事故シナリオとして適切に考慮したリスク評価を行うことにより、既設の施設に対しては、断層変位に対する耐性を確認することができる。さらに、深層防護の考え方に基づき、リスクを低減するための更なる安全性向上策を合理的に検討することにも利用可能と考えられる。

同様に、新規に施設を設置する場合には、その設計段階から断層変位に対する合理的なリスク低減方策を考慮することが可能となる。

断層変位に対して有効と考えられる対処方策を、方策の考え方と、深層防護概念との関係を考慮して表Ⅱ.7.1.3-1に整理した。

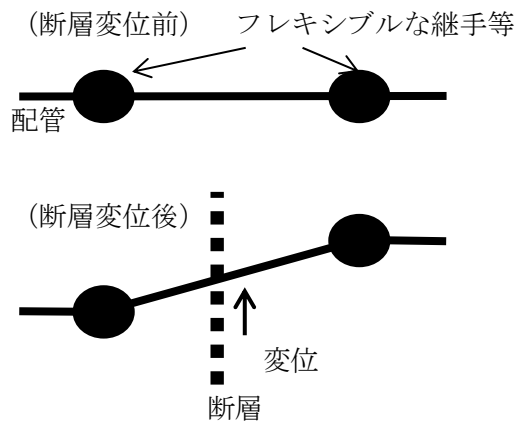
なお、深層防護の考え方としては、これらの対処方策が各レベルにおいてバランスよく対応されることが望ましいが、厳密に全ての層に対して均等な対応を求めるものではなく、リスクが適切に抑制されていることが確認できていれば、現実的に実施可能な範囲での対応策を講じることで原子力安全の目的は達成できると考えられる。

①免変位のイメージ例



埋設配管に対して剛性の低い層を設けることで変位の影響を受け難くする

②制変位のイメージ例



配管にフレキシブルな継手等を設けることで変位による被害を軽減する

③多重化により復元性能を高めるイメージ例

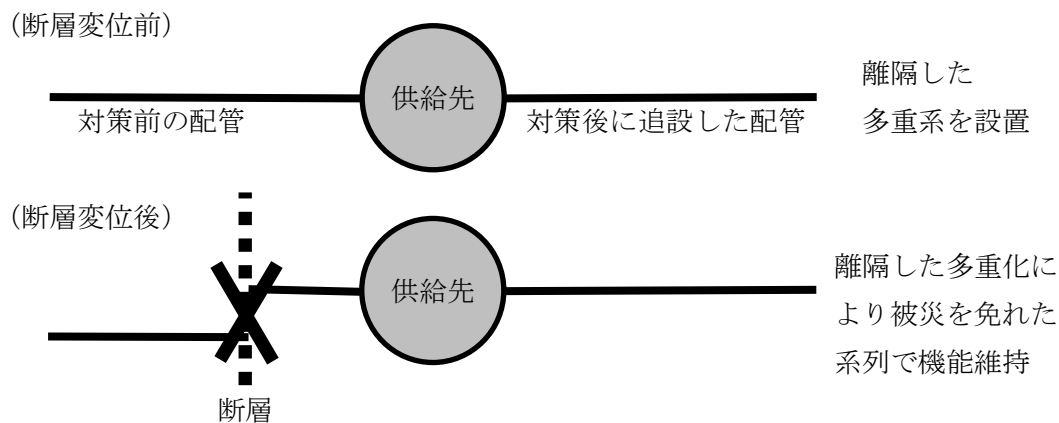


図 II.7.1.3-2 対処方策の考え方の例

表 II 7.1.3-1 対処方策の考え方

対処方法の考え方				リスクの低減		多重性、多様性による復元性能の向上
深層防護レベル ^{注1)}	目的	目的達成に不可欠な手段	関連するプラント状態	免変位	制変位	
レベル1	通常運転からの逸脱と安全上重要な設備の故障を防止	品質管理と工学的手法に従ってプラントを健全かつ保守的に立地、設計、建設、保守、運転。	通常運転	● PS 設備の免変位化	● PS 設備の制変位化	● PS 設備間の離隔 ● PS 設備の復旧準備
レベル2	プラントの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	設計段階において特定の系統・設備を設置。有効性を安全解析で確認。	運転時の異常な過渡変化	● MS 設備の免変位化	● MS 設備の制変位化	● PS 設備と MS 設備間の離隔 ● MS 設備間の離隔（多様性を有する場合） ● MS 設備内（冗長系列間、冗長機器間）の離隔 ● MS 設備の復旧準備
レベル3	炉心の損傷や重大な所外放出を防止	設計段階において事故の進展可能性を想定。固有の工学的安全施設、安全系、手順書を用意。	設計基準事故	同上	同上	同上
レベル4	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	閉じ込め機能を実際にし、放射性物質の放出を合理的に達成可能な限り低く抑制。	設計拡張状態（シビアアクシデント状態も含むこともある） ^{注2)}	● 重大事故対処設備の免変位化	● 重大事故対処設備の制変位化	● MS 設備と重大事故対処設備間の離隔 ● 重大事故対処設備の復旧準備 ● 可搬設備の利用 ● 外部支援の利用
レベル5	放射性物質の放出による所外の放射線の影響を緩和	緊急時管理センターの整備。緊急時対応に対する緊急時計画と緊急時要領の確立。	（本調査専門委員会では未検討）			

注 1) SAM 標準 解説 1 より抜粋。IAEA の SSR-2/1 (2012) の深層防護の考え方に基づく。

注 2) 旧原子力安全・保安院の解釈による「IAEA における深層防護の考え方」に基づく。

Ⅱ.7.2 リスク評価

Ⅱ.7.2.1 リスク評価手法の調査

(1) 外部ハザードに対するリスク評価手法の調査

外部ハザードに対するリスク評価手法について日本原子力学会標準委員会から発行されている「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。）⁶⁾で示されている四つの評価方法（別紙Ⅱ.7-3 参照）のうち、スクリーニングを目的とした概略評価である評価方法①は、重要施設直下での断層変位の発生頻度が極めて小さいと評価できる場合や変位量が微小であると評価できる場合に適用できる。

それ以外の場合や想定を超えた領域まで含めた評価を行う場合には、評価方法の②～④を適用することが有効となる。評価方法の②～④は、炉心損傷等に至る安全上重要な機能を有する施設（以下「SSCs」という。）の損傷の組合せを事故シーケンスとして評価することにより、プラントシステムトータルとしての断層変位への対処方策の考え方として特に重要な多重性、多様性の効果を考慮することができ、適用性がある。

評価方法②の裕度評価手法は、このうち最も簡易的な手法であるが、断層変位の発生を想定したときの重要施設の挙動を適切に評価することができ、また、現状の断層変位のハザード評価、フラジリティ評価に関する技術データの蓄積度合い等を考慮しても実効性のある評価方法である。

(2) 地震 PRA 標準の調査

地震動に対するリスク評価に関しては、前述の評価方法④に相当する PRA の実施基準（地震 PRA 標準）¹⁾が整備されており、基本的な評価の流れは断層変位に対しても参考とできる。（別紙Ⅱ.7-4 参照）

また、地震 PRA 標準では、地震による断層変位に関しても言及されており、附属書（参考）として以下のような記載がある。

（地震 PRA 標準より抜粋）

地盤変状を考慮した場合の感度解析を行うためには、地盤変状のハザード評価、地盤変状の影響を考慮した SSCs のフラジリティ評価及び事故シーケンス評価が必要となる。これらの評価技術は現時点で研究段階にあり、評価方法の詳細及び評価例等に関する情報は非常に少ないため、地盤変状を考慮した場合の感度解析の方法を、系統的に示すには至っていない。次は、現段階で得られている情報又は知見から、各評価過程における感度解析の基本的な考え方を纏めたものである。

断層変位の PRA は、まずは、感度解析のような位置づけでの簡易的、代表的な評価が現実的である。

II.7.2.2 リスク評価手法の適用性

II.7.2.1 に示すように、断層変位に対しては裕度評価手法が適していると考えられる。

また、裕度評価手法を適用する場合であっても、リスク評価の目的に応じて、例えば、断層変位の影響を概括的に考慮して、断層の想定、事故シーケンス、対象とする SSCs 等を代表的なものに絞り込むなど、リスク評価の適用を実施可能な範囲から段階的に拡張させていくことが合理的に実効性のあるアプローチと考えられる。これらの考え方にに基づき、プラントシステムトータルとしてのリスク情報の獲得と、それを活用した継続的な安全性向上活動に資することを目的とした評価・活用フローを図 II.7.2.2-1 に示す。

断層変位の評価結果に基づく、断層の位置、断層の形式、断層変位量等を入力条件として、建物・構築物への影響検討及び土木構造物への影響検討を行う。これらの影響検討の結果を基に、機器・配管系への影響検討を行い、事故シーケンス評価において、建物・構築物、土木構造物、機器・配管系への影響を、炉心損傷等のリスク指標に対する影響として評価する。断層変位の影響が複数想定される場合には、目的に応じて、図 II.7.2.2-1 に示す評価を対象とする断層毎に実施する。

事故シーケンス評価では、考慮する断層変位の性状に応じて、炉心損傷まで、格納容器機能の喪失まで等、事故シーケンスモデルの評価範囲を選択することができる。また、同様に目的に応じて、事故シーケンス評価モデルでは、整備済、あるいは整備を計画している重大事故対処設備や自主的なアクシデントマネジメント等に期待した評価も可能である。

このような評価により得られる結果である断層変位に対するプラントの裕度、断層変位に対する重要事故シーケンス、重要 SSCs 等の分析を行うことが、継続的な安全性向上活動への有益な情報となる。

ここで、外部ハザード選定標準に示されている裕度評価では、例えば炉心損傷をリスクの指標とする場合には、炉心損傷リスクが起これば評価されたハザードレベルを導出し、プラントに影響を与える可能性のあるハザードレベルとの比を当該ハザードの炉心損傷に対する裕度として求めるという手順を想定しているが、影響が局所的な断層変位に適用する場合には、II.3 に示すようにプラントに影響を与える可能性のあるハザードレベル（検討用の断層変位量に相当）を超える断層変位量を複数設定し、設定した断層変位量毎に、図 II.7.2.2-1 において一点鎖線で囲った範囲の評価ステップを実施するという手順が適している。

この手順は、建物・構築物、土木構造物及び機器・配管系のフラジリティカーブを用いて条件付き炉心損傷確率のカーブを求めるといった、より詳細な裕度評価へ拡張していく上でも適していると言える。フラジリティカーブを用いた裕度評価のイメージを図 II.7.2.2-2 に示す。

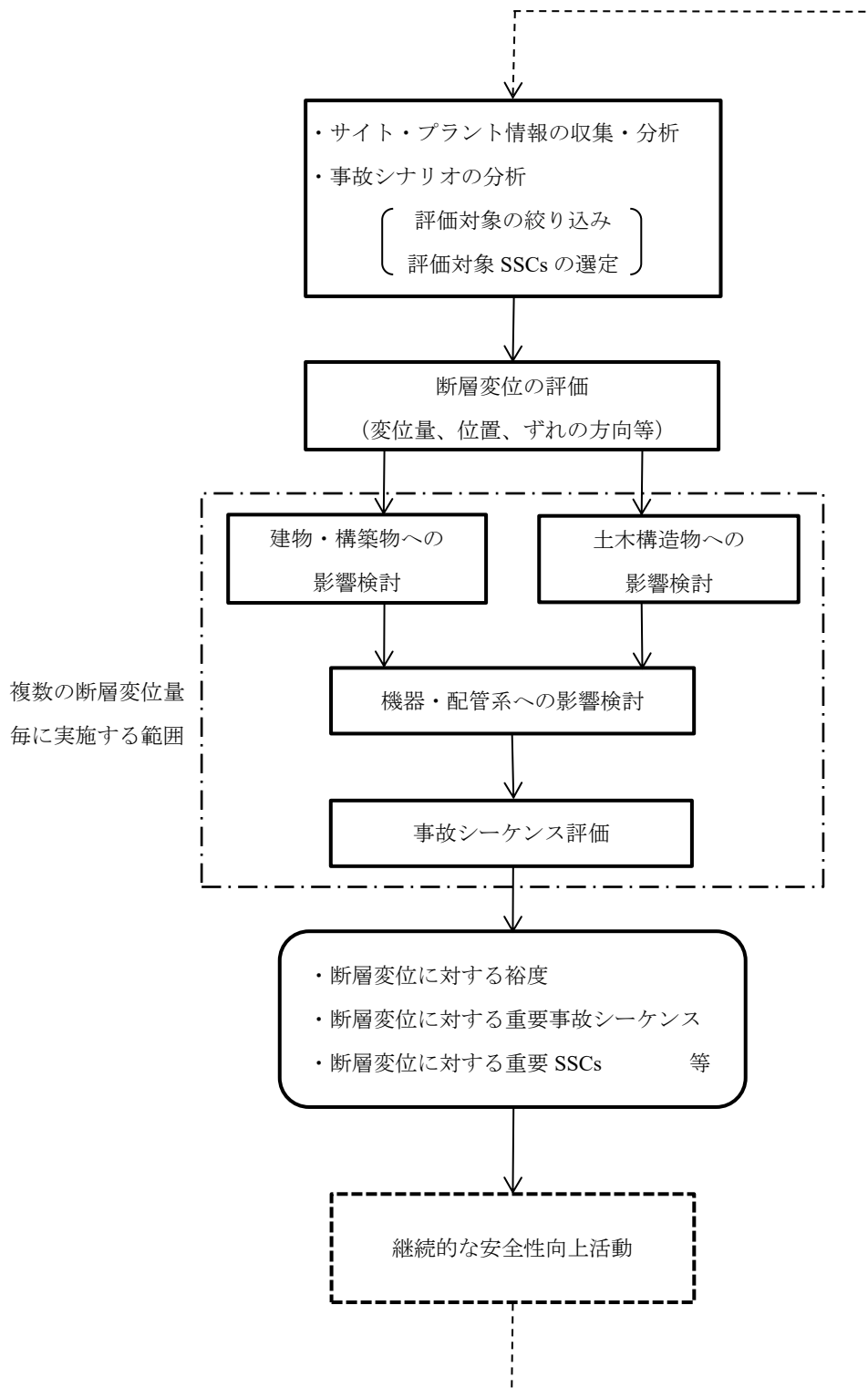
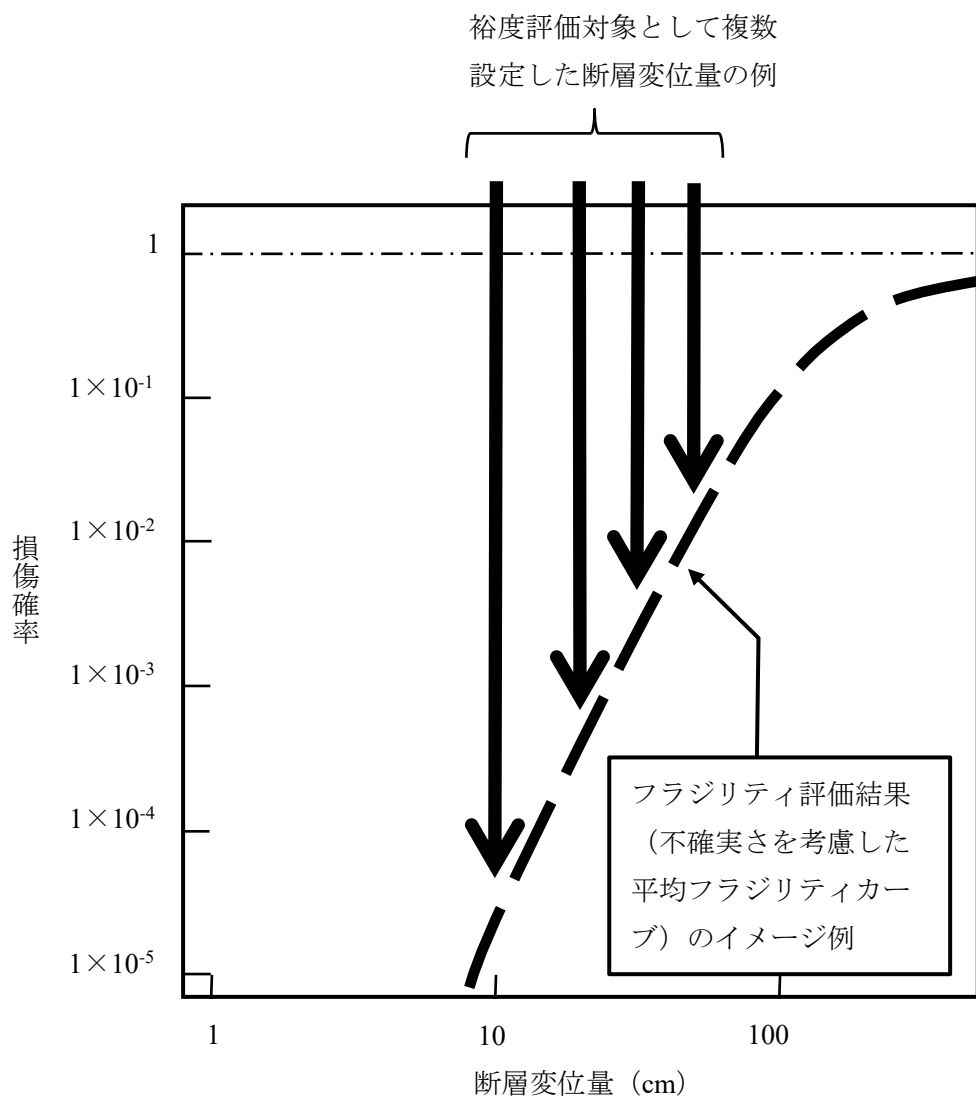


図 II.7.2.2-1 リスク評価の実施／活用フロー（裕度評価手法の採用を想定）



図Ⅱ.7.2.2-2 フラジリティカーブを適用した裕度評価のイメージ例

II.7.2.3 裕度評価手法の適用

II.7.2.2 において有効であると整理した裕度評価手法を用いた評価手順の概念を示すために、重要施設直下に断層変位を想定した場合の適用例を以下に示す。

- 適用例① 加圧水型軽水炉（PWR）の建屋直下の断層変位（縦ずれ）
- 適用例② 加圧水型軽水炉（PWR）の建屋直下の断層変位（横ずれ）
- 適用例③ 沸騰水型軽水炉（BWR）の建屋直下の断層変位（縦ずれ）
- 適用例④ 非常用海水取水系直下の断層変位（縦ずれ）


なお、これらの適用例で行っている施設への影響評価では、任意の断層変位量に対する建物・構築物、土木構造物、機器・配管系への影響を評価するが、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) 適用例① 加圧水型軽水炉（PWR）の建屋直下の断層変位（縦ずれ）

本適用例⁷⁾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）を想定する。両建屋には安全上重要な設備が設置されており、断層変位により影響を及ぼす事故シナリオが想定される。

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II.7.2.3①-1に示す。

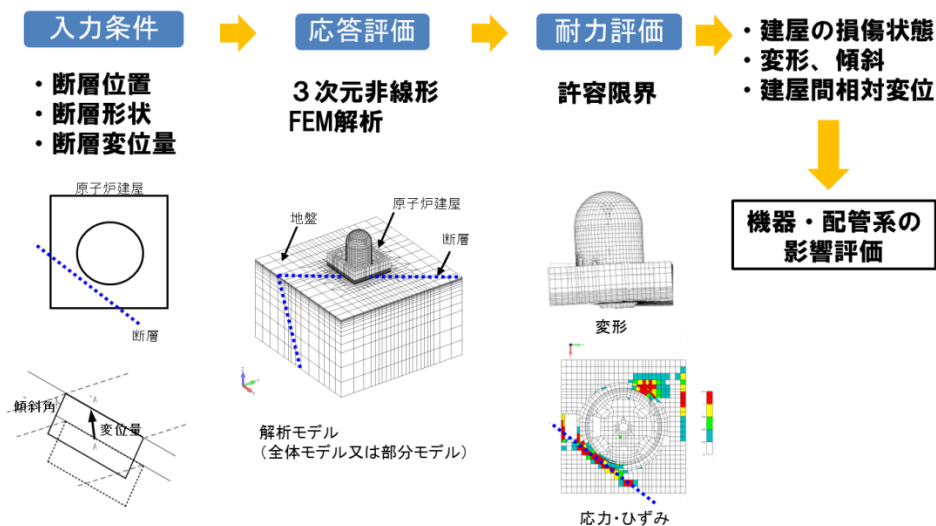
表II.7.2.3①-1 断層変位に対する裕度評価のフロー

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 	有意な損傷無し (○)	床の傾斜 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	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 (△, ×)	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	

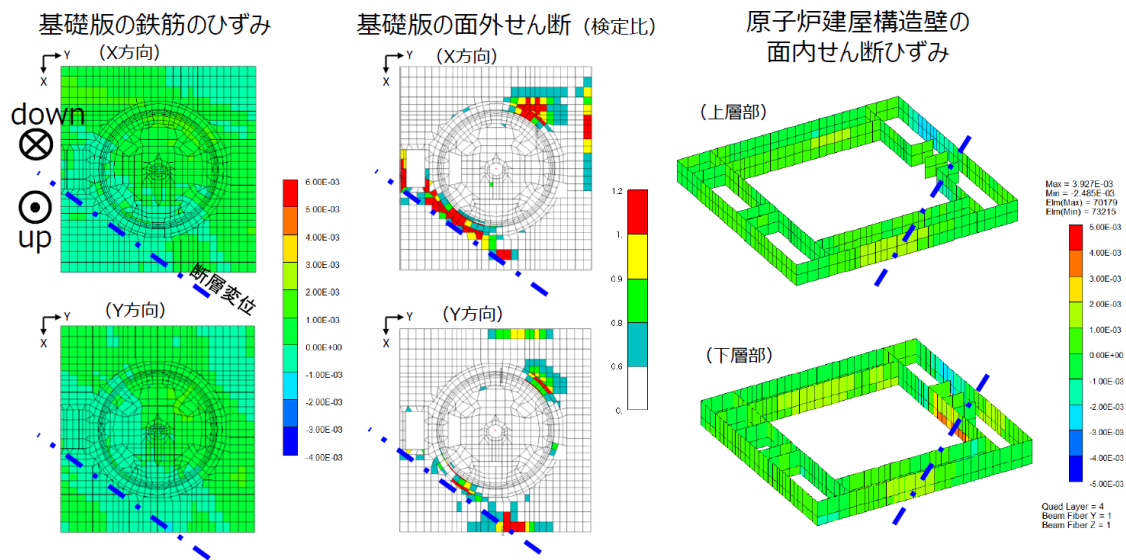
断層変位による影響を直接受けるのは岩盤に支持されている建屋であり、図II.7.2.3①-1に示すように、強制変位を建屋基礎版下端に入力し、3次元の非線形FEMによって、断層変位による建屋の損傷状態を評価する。原子炉建屋の解析結果の出力例を図II.7.2.3①-2に示す。

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。

建屋側の評価例を表Ⅱ.7.2.3①-2に示す。ここでは、図Ⅱ.7.2.3①-3に示すように、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と想定したときの、各建屋への影響を区画単位で評価したときの例として示している。



図Ⅱ.7.2.3①-1 建物・構築物の影響評価手順（適用例①）



図Ⅱ.7.2.3①-2 原子炉建屋の解析結果（出力例、変位量 縦ずれ 30cm）（適用例①）

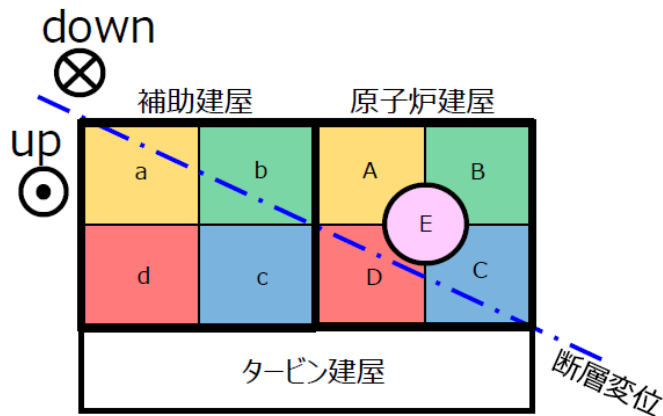


図 II.7.2.3①-3 断層変位の位置と建屋内区分 (適用例①)

表 II.7.2.3①-2 建物・構築物の影響評価適用例 (適用例①)

断層変位 (縦ずれ)	評価エリア	原子炉建屋					補助建屋			
		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	△	△	×	×	△	×	×	△	△

[凡例] ○ : 有意な損傷無し

△ : 基礎・壁・床に局部損傷があるが、機器の支持性能の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性能の維持が困難な状態

次に、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、機能維持の有無を評価する。建屋側からの支持機能が確保されている機器について、図 II.7.2.3 ①-4 に示すような断層変位の影響（床面の傾き・変形、建屋間相対変位）を考慮して、構造損傷及び機能維持評価を行う。

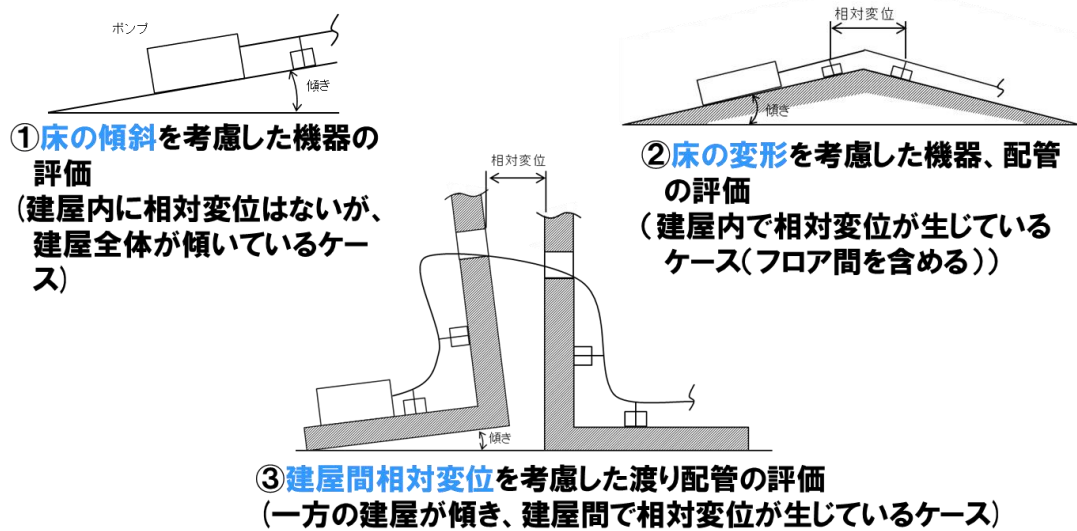


図 II.7.2.3①-4 機器・配管系の影響評価における考慮事項

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 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・配管系の評価例を図 II.7.2.3①-5 及び表 II.7.2.3①-3 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、例として示している。

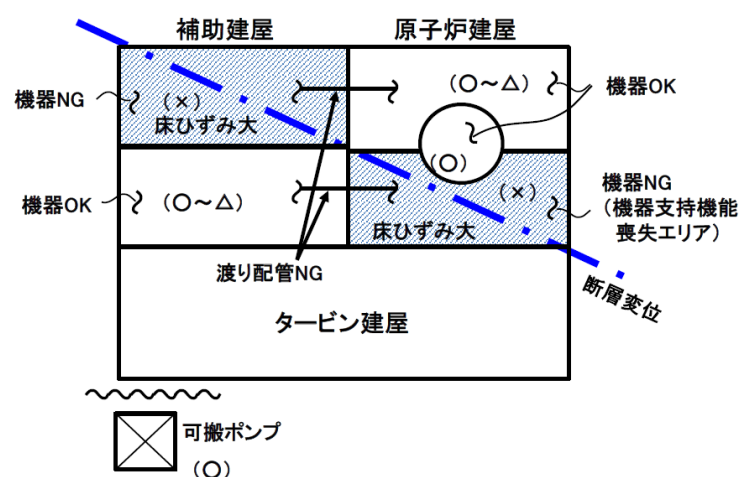


図 II.7.2.3①-5 建屋への影響による機器支持性能の評価例

表Ⅱ.7.2.3①-3 機器・配管系の影響評価適用例（適用例①）

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	○

〔凡例〕

○：機能維持
×：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

事故シーケンス評価モデルは、内的事象 PRA や地震 PRA の検討結果を利用することができる。炉心損傷を対象としたイベントツリーの評価例を図Ⅱ.7.2.3①-6 に示す。太線で示す事故シーケンスに、表Ⅱ.7.2.3①-3 に示す機器の影響評価結果が反映される。

なお、ここでは、適用例として分かりやすく示すために、起因事象や事故シーケンスの展開を代表させている。

図Ⅱ.7.2.3①-6 のイベントツリー評価例から、「冷やす」機能に関する深層防護の考え方に着目すると以下のように考察できる。

- ・地震との重畳を想定すると、主給水（深層防護レベル1）が機能喪失する可能性がある。その場合、原子炉建屋にある MS 設備である補助給水系（深層防護レベル2）により炉心冷却機能が確保できる。
- ・補助給水系の3台のポンプそれぞれの断層変位からの距離、変位量等に応じて、機能喪失

失する可能性がある。

その場合、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）に期待できる。

- ・高圧注入系の2台のポンプそれぞれの断層変位からの距離、変位量等に応じて、機能喪失する可能性がある。

その場合、代替手段として有効な可搬ポンプ等（深層防護レベル4）に期待できる。

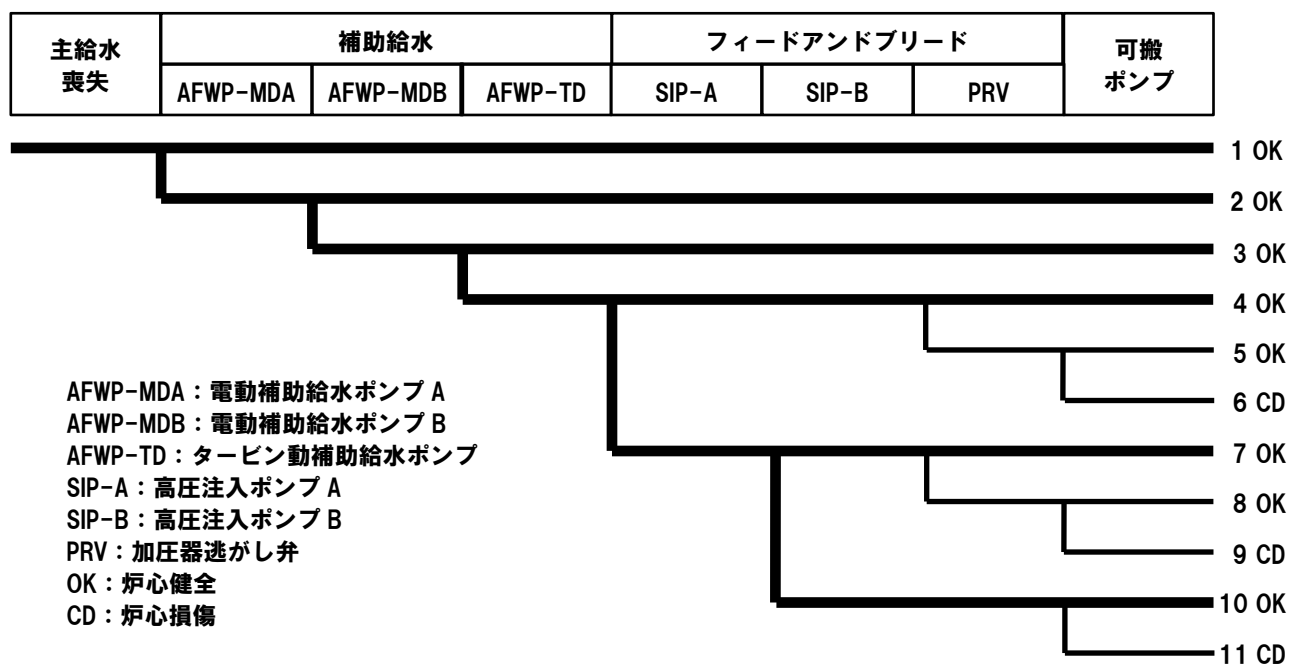


図 II.7.2.3①-6 イベントツリーの評価例（適用例①）

このような評価を体系的に実施することにより、表Ⅱ.7.2.3①-4 に示すような裕度評価結果をとりまとめることができ、断層変位に対する裕度、重要な事故シーケンス、更なる有効な対策の検討等の考察、分析が可能となる。また、断層変位ハザードの定量的な評価結果と組み合わせることにより、より定量的な分析も可能となる。

表Ⅱ.7.2.3①-4 裕度評価適用例（適用例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、前出の図表と対応したものではない。

以上、裕度評価手法の適用例①を示したが、これらを確率論的な定量評価までに拡張していくことも含めて、リスク評価の利用目的に応じて適用可能な評価手法を選択し適用していく考え方が重要である。参考として、以下に検討例を示す。

なお、実機に適用する際には、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1>

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、内の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の事象 PRA の結果が利用可能である。

例えば、表 II.7.2.3①-3 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 II.7.2.3①-7 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。

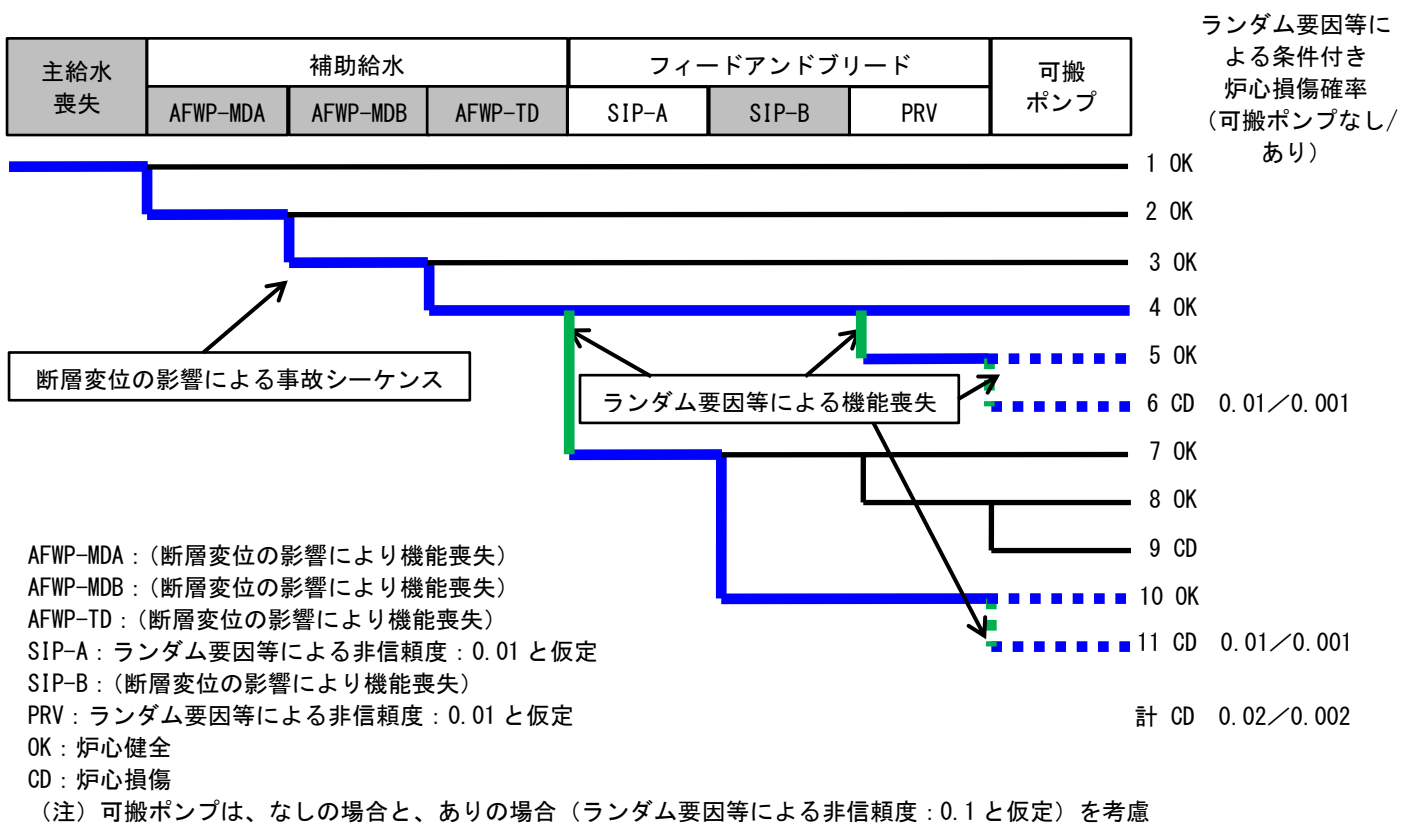


図 II.7.2.3①-7 条件付き炉心損傷確率の評価例 (適用例①)

＜参考 2＞

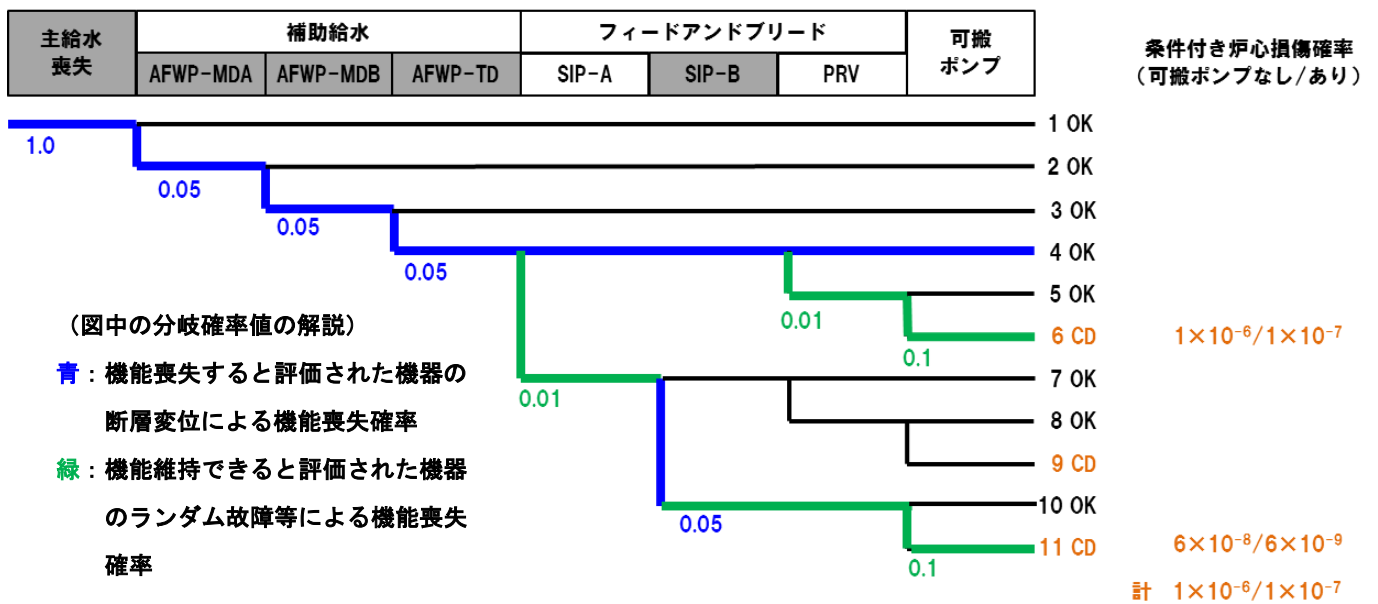
図Ⅱ.7.2.2-2 に示したように、ここで適用した裕度評価の方法は、確率論的なフラジリティ曲線を用いた評価に拡張することもできる。

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、＜参考 1＞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、＜参考 1＞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Ⅱ.7.2.3①-8 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、不確実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) 厳密にはシーケンス 9 の発生確率もゼロではなくなるが、シーケンス 6 に比べ 2 桁低いため、ここでは無視している。

図Ⅱ.7.2.3①-8 フラジリティ評価結果を適用した条件付き炉心損傷確率の評価イメージ

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。

<参考3>

さらに、確率論的な断層変位ハザード曲線を適用することで、より確率論的な定量評価に拡張して考えていくことができる。

断層変位による炉心損傷頻度 (CDF : Core Damage Frequency) は、一般に次式で求めることができる。

$$CDF = \int_0^{\infty} \left(-\frac{dH(D)}{dD} \times P(D) dD \right)$$

ここで、 $H(D)$ は断層変位ハザード曲線であり、断層変位 D (cm) と年超過頻度 v (回/年) との関係で定義される。 $dH(D)/dD$ は $H(D)$ を微分した値であり、断層変位 D (cm) の単位変位 cm 当たりの年超過頻度 v' (回/年・cm) との関係で定義される。 $P(D)$ はフラジリティ評価結果に依存した炉心損傷確率 (CDP : Core Damage Probability) 曲線であり、断層変位 D (cm) と条件付 CDP (-) との関係で定義される。

これらの関係を図 II.7.2.3①-9 に示す。図中には、断層変位量に応じて条件付き CDP が変わった場合 (例えば、可搬型 SA 設備を考慮しない場合と考慮する場合) の CDF への影響を示している。可搬型 SA 設備の有無の違いによって CDP がどの程度小さくなるかの効果を示すとともに、対策を講じることによって CDF がどの程度小さくなるかの効果も評価することができる。

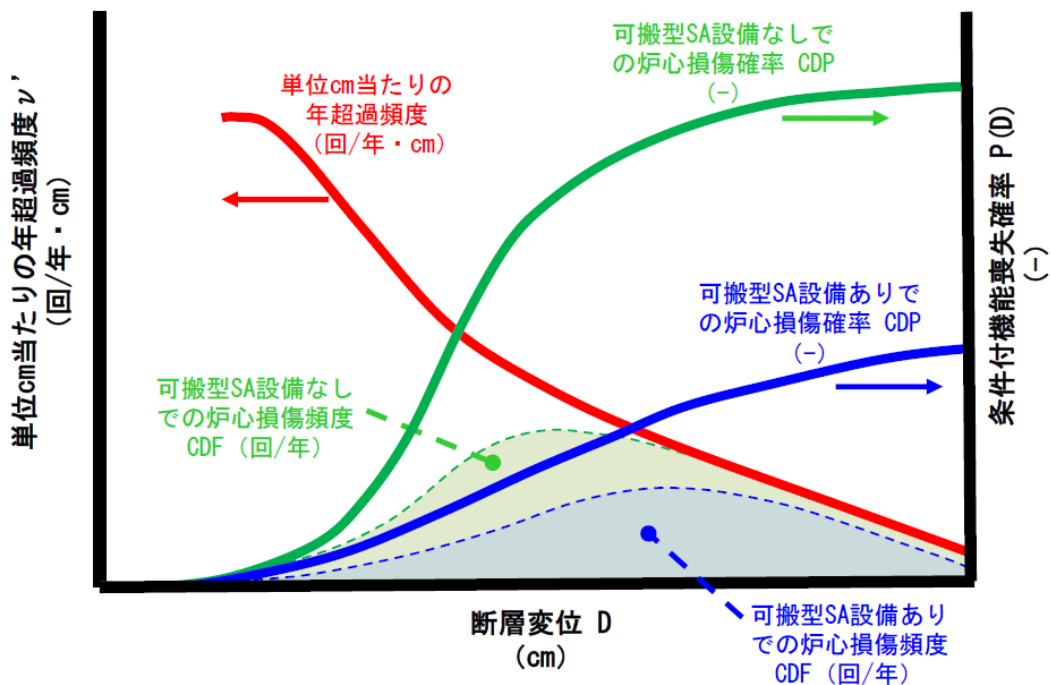


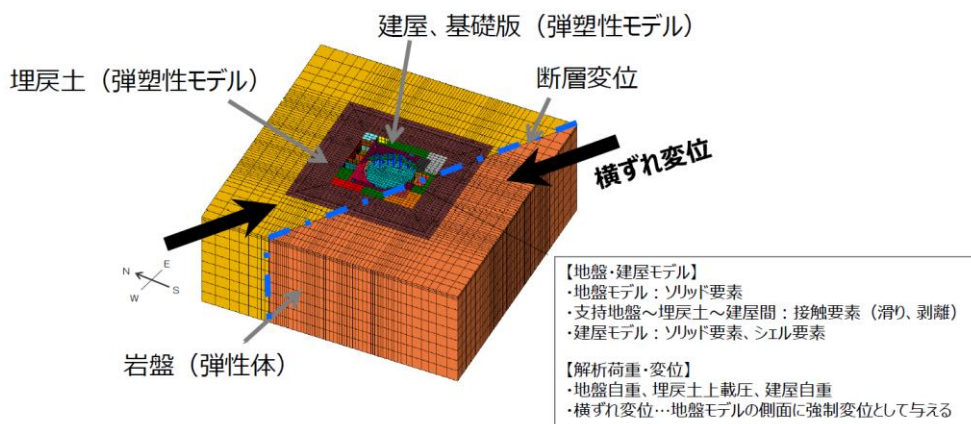
図 II.7.2.3①-9 断層変位ハザード、炉心損傷確率、炉心損傷頻度の関係イメージ

(2) 適用例② 加圧水型軽水炉 (PWR) の建屋直下の断層変位 (横ずれ)

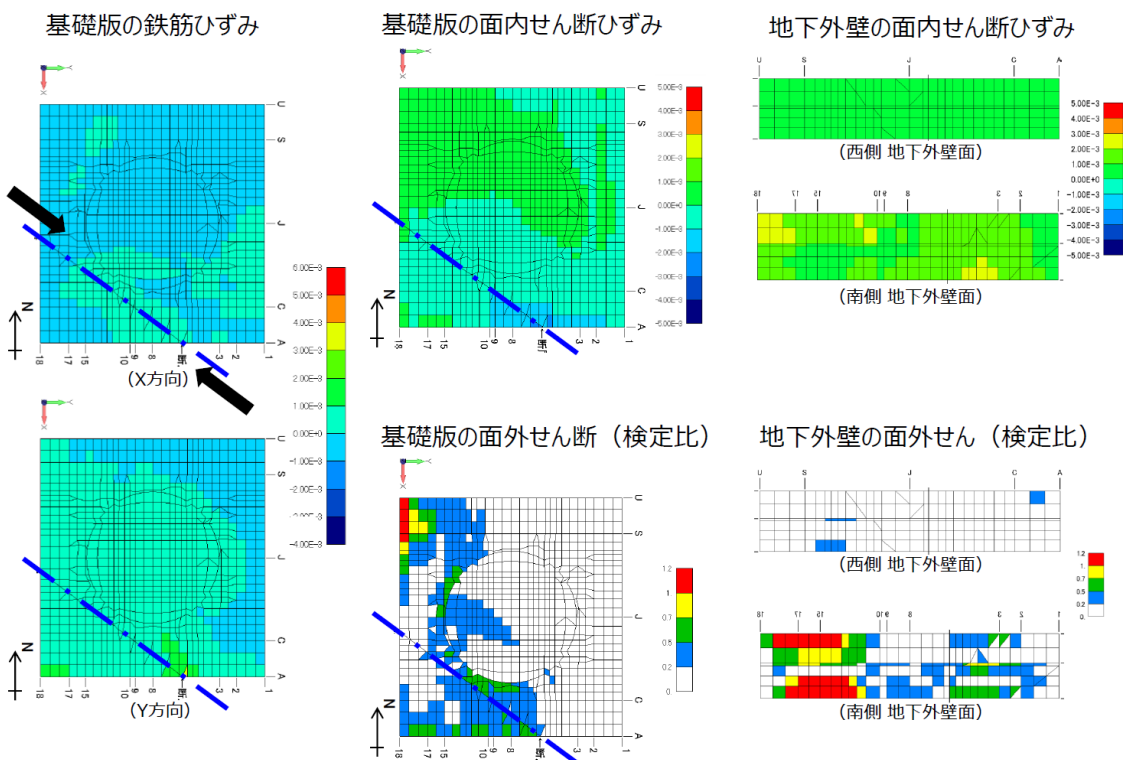
適用例①では、想定する断層変位を縦ずれとして想定したが、本適用例⁸⁾では、横ずれの場合について考察する。

断層変位が横ずれの場合は、地盤に埋め込まれている建屋の範囲が、周辺の埋戻土からの土圧の影響も適切に考慮することが必要となり、これも考慮することができる建屋解析モデルを構築して評価を行う。

横ずれの場合の建屋解析モデルの例を図Ⅱ.7.2.3②-1 に、原子炉建屋の解析結果の出力例を図Ⅱ.7.2.3②-2 に示す。



図Ⅱ.7.2.3②-1 原子炉建屋の解析モデルの例 (適用例②)

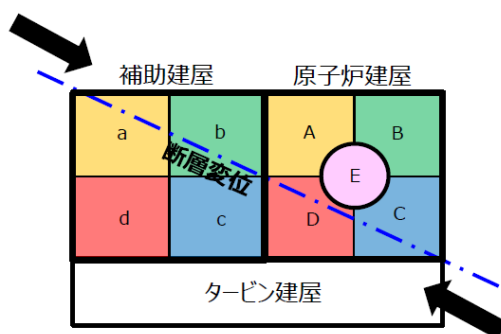


図Ⅱ.7.2.3②-2 原子炉建屋の解析結果 (出力例、変位量 横ずれ 30cm) (適用例②)

図Ⅱ.7.2.3②-2の解析結果からは、埋戻土に面している建屋外壁において、横ずれの断層変位に伴う土圧の影響により、局所的な応力の影響が把握できる。

このような傾向を踏まえて、建屋側の評価例を表Ⅱ.7.2.3②-1に示す。ここでは、図Ⅱ.7.2.3②-3に示すように、適用例①と同様に、断層変位の影響を受ける二つの建屋内を9区画に分け、断層変位を10cm、20cm、30cm、50cmと想定したときの、各建屋への影響を区画単位で評価したときの例として示している。

表Ⅱ.7.2.3②-1においては、横ずれの変位量を増加させていくと、埋戻土に面している区画から影響が拡大していく傾向が把握できる。



図Ⅱ.7.2.3②-3 断層変位の位置と建屋内区分（適用例②）

表Ⅱ.7.2.3②-1 建物・構築物の影響評価適用例（適用例②）

断層変位 (横ずれ)	評価エリア	原子炉建屋					補助建屋			
		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	×	×	×	△	○	×	×	○	×

〔凡例〕 ○：有意な損傷無し

△：基礎・壁・床に局部損傷があるが、機器の支持性能の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性能の維持が困難な状態

横ずれの場合の表Ⅱ.7.2.3②-1と、適用例①で示した縦ずれの場合の表Ⅱ.7.2.3①-2を比較すると、建屋の区画ごとの差異はあるが、建屋全体としてはおおむね同程度の影響となっている。

したがって、横ずれの場合でも、建屋側からのアウトプットを引き継いだ機器・配管系側の評価、機器・配管系の評価を踏まえた事故シーケンス評価を体系的に実施していくことができ、表Ⅱ.7.2.3①-4と同様の裕度評価結果をとりまとめていくことができる。

(3) 適用例③ 沸騰水型軽水炉 (BWR) の建屋直下の断層変位 (縦ずれ)

本適用例では、沸騰水型軽水炉 (BWR) の原子炉建屋に影響するような断層変位 (縦ずれ) を想定する。

裕度評価のフローは、適用例①と同様である (表 II.7.2.3①-1 参照)。

ここでは、原子炉建屋 (BWR5) 直下の、図 II.7.2.3③-1 に示すような断層変位を想定し、断層変位の影響を受ける原子炉建屋内を 5 区画 (建屋を 4 区分、更に原子炉格納容器内を 1 区分) に分け、建屋への影響を区画単位で評価したときの例として示している。

建物・構築物の影響評価手順を図 II.7.2.3③-2 に、原子炉建屋の解析結果の出力例を図 II.7.2.3③-3 に示す。

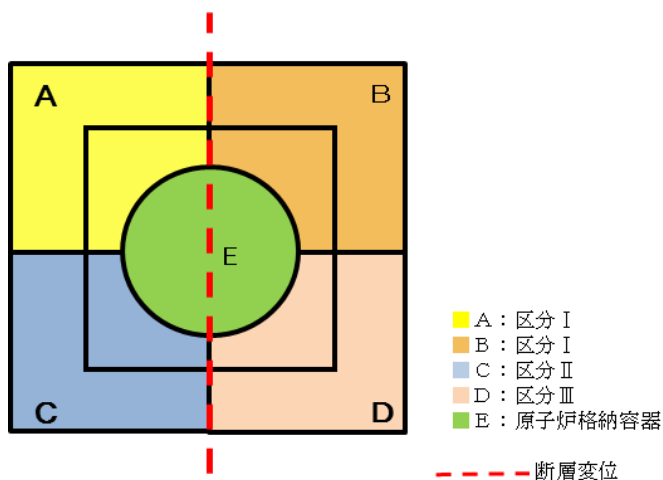


図 II.7.2.3③-1 断層変位の位置と建屋内区分 (適用例③)

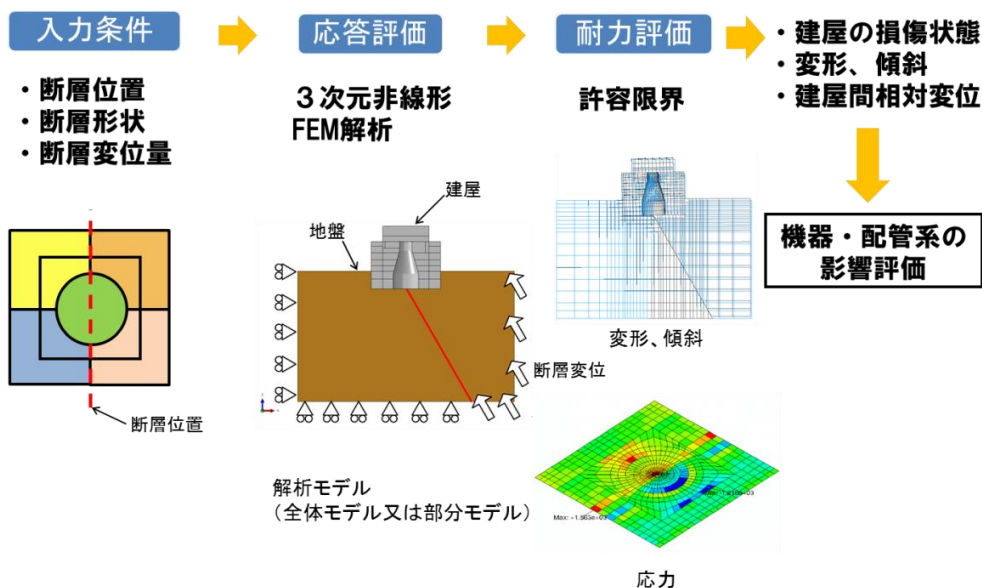
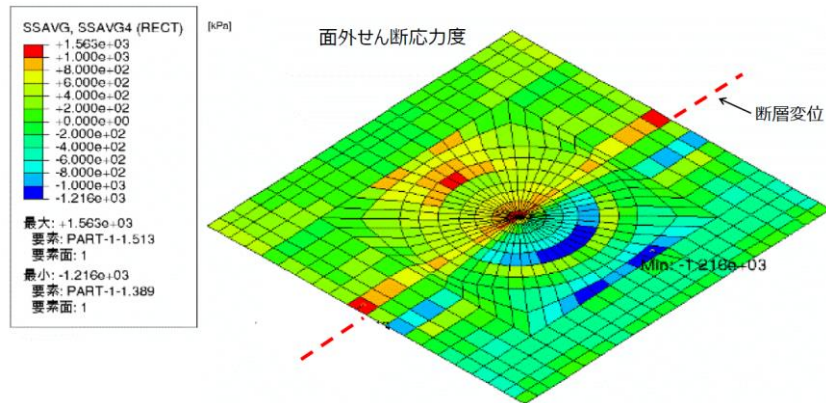


図 II.7.2.3③-2 建物・構築物の影響評価手順 (適用例③)



図Ⅱ.7.2.3③-3 原子炉建屋の解析結果（出力例、変位置量 縦ずれ 30cm）（適用例③）

断層変位を 10cm、20cm、30cm、50cm と想定したときの原子炉建屋への影響評価結果例は、表Ⅱ.7.2.3③-1 のように表すことができる。

表Ⅱ.7.2.3③-1 建物・構築物の影響評価適用例（適用例③）

断層変位 (縦ずれ)	原子炉建屋									
	A		B		C		D		E	
	地下 1階	地下 2階	地下 1階	地下 2階	地下 1階	地下 2階	地下 1階	地下 2階	地下 1階	地下 2階
10cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20cm	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
30cm	○	△	○	△	○	△	○	△	○	△
50cm	△	×	△	×	△	×	△	×	△	×

〔凡例〕 ○：有意な損傷無し

△：基礎・壁・床に局部損傷があるが、機器の支持性能の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性能の維持が困難な状態

建物・構築物の影響評価結果に基づき、原子炉建屋に設置される機器、配管等への影響を評価する。評価結果例を表Ⅱ.7.2.3③-2に示す。

表Ⅱ.7.2.3③-2 機器・配管系の影響評価適用例（適用例③）

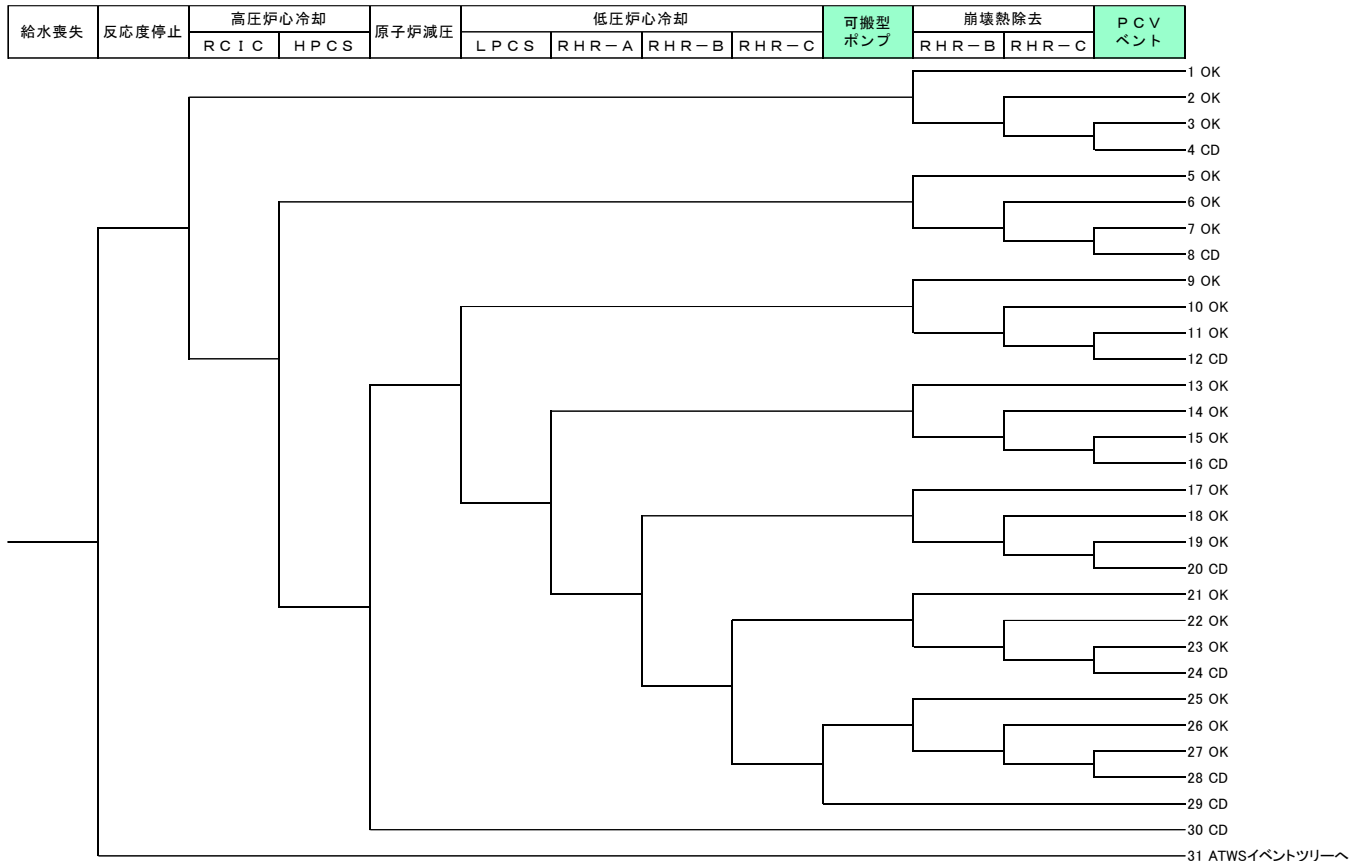
断層変位 (縦ずれ)	原子炉建屋			
	躯体の損傷エリアに 設置（隣接含む）の機器		躯体の健全エリアに 設置の機器	
10cm	—	—	RCIC（区分Ⅰ） HPCS（区分Ⅲ） LPCS（区分Ⅰ） RHR-A（区分Ⅰ） RHR-B,C（区分Ⅱ）	○
20cm	—	—	RCIC（区分Ⅰ） HPCS（区分Ⅲ） LPCS（区分Ⅰ） RHR-A（区分Ⅰ） RHR-B,C（区分Ⅱ）	○
30cm	RCIC（区分Ⅰ） HPCS（区分Ⅲ） LPCS（区分Ⅰ） RHR-A（区分Ⅰ） RHR-B,C（区分Ⅱ）	○	—	—
50cm	RCIC（区分Ⅰ） HPCS（区分Ⅲ） RHR-A（区分Ⅰ）	○	—	—
	LPCS（区分Ⅰ） RHR-B,C（区分Ⅱ）	×	—	—

RCIC:原子炉隔離時冷却系、HPCS:高圧炉心スプレイ系、LPCS:低圧炉心スプレイ系、RHR:残留熱除去系

〔凡例〕 ○：機能維持

×：機能喪失

事故シーケンス評価モデルは、内の事象 PRA や地震 PRA の検討結果を利用することができる。炉心損傷を対象としたイベントツリーの評価例を図 II.7.2.3③-4 に示す。



RCIC：原子炉隔離時冷却系、HPCS：高圧炉心スプレイ系
 LPCS：低圧炉心スプレイ系、RHR：残留熱除去系、PCV：原子炉格納容器
 OK：炉心健全、CD：炉心損傷、ATWS：原子炉停止機能喪失事象

図 II.7.2.3③-4 イベントツリーの評価例（適用例③）

図 II.7.2.3③-4 のイベントツリー評価例から、以下のように考察できる。

- ・地震と断層変位の重畳やタービン建屋への断層変位による影響を想定すると、外部電源喪失や給水配管の損傷に伴う給水喪失が発生する可能性がある。
 その場合、原子炉建屋に設置されている高圧炉心冷却（RCIC 又は HPCS）や減圧後の低圧炉心冷却により炉心は冷却されるとともに、最終的には RHR により崩壊熱除去が行われ、安定な状態に至る。
- ・断層変位の位置や変位量によっては、原子炉建屋内に分散配置されている ECCS ポンプ等が機能喪失する可能性がある。
 その場合、アクシデントマネジメントとして整備している可搬型ポンプによる原子炉

注水やPCVベント（耐圧強化ベント又はフィルターベント）による原子炉格納容器の熱除去により、原子炉を安定な状態に移行させることができる。

このような評価を体系的に実施することにより、表Ⅱ.7.2.3③-3に示すような裕度評価結果をとりまとめることができ、断層変位に対する裕度、重要な事故シーケンス、更なる有効な対策の検討等の考察、分析が可能となる。また、断層変位ハザードの定量的な評価結果と組み合わせることにより、より定量的な分析も可能となる。

表Ⅱ.7.2.3③-3 裕度評価適用例（適用例③）

	断層変位量（縦ずれ）※1							
	10cm		20cm		30cm		50cm	
代替手段なし	躯体 損傷無	炉心 損傷無	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
	機器 損傷無		機器 損傷無		機器 損傷無		一部 機器 損傷有	
代替手段あり※2	同上		同上		同上		同上	炉心 損傷無
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	

※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、前出の図表と対応したものではない。

<参考>

図Ⅱ.7.2.3③-4のイベントツリー評価例では、イベントツリー上のATWSシーケンスの展開を行っていないが、個別プラント評価を実施する場合には、別途ATWSシーケンスについても同様な方法で評価することができる。ATWSシーケンスを展開する際にも、深層防護の考え方にに基づき以下のようなシナリオを考慮する。

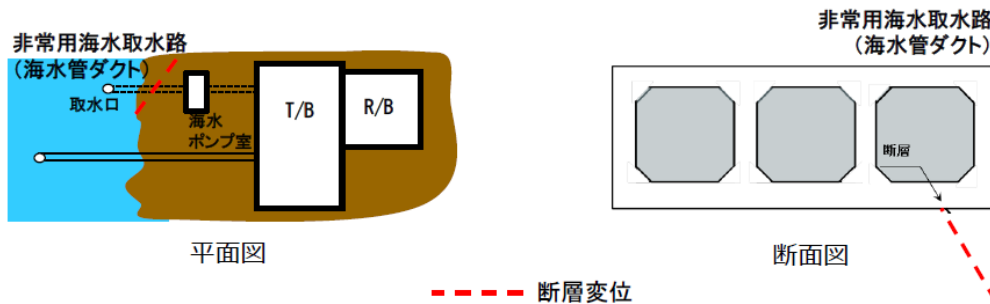
- ①まず、断層変位と地震動のいずれの影響が原子炉スクラムのトリガーとなり得るかのタイミングを考慮する。断層変位の発生よりも前に地震動の影響で原子炉がスクラムする場合には、原子炉スクラムの機能に対して断層変位は影響しないものとして取り扱うことができる。なお、地震動の影響によって原子炉スクラム機能を喪失するシーケンスは地震動に対するリスクとして別途評価される。
- ②一方、地震動の影響による原子炉スクラム信号が発信しない場合には、断層変位の影響によって事故シーケンスの起因となる事象が発生する。原子炉停止機能が必要となるような起因事象が発生した場合には、当該起因事象に対応した原子炉スクラム信号が発信する（事象進展が緩やかな場合等においては原子炉を手動でスクラムする場合も考えられる）ことにより原子炉停止機能が達成されるが、断層変位の影響によって原子炉スクラムに失敗するとATWSシーケンスに至る。このため、Ⅱ.6に示したような考え方をを用いて、断層変位による原子炉スクラム機能への影響を評価する。この結果、原子炉スクラム機能が維持されると評価された断層変位量に対しては、ATWSシーケンスは発生しないものとして取り扱うことができる。
- ③さらに、断層変位の影響により原子炉スクラム機能が喪失してATWSシーケンスが発生する可能性があるとして評価される場合には、原子炉再循環ポンプトリップ及びほう酸水注入系などの代替手段を考慮したイベントツリーを用いて裕度を評価する。

(4) 適用例④ 非常用海水取水系直下の断層変位（縦ずれ）

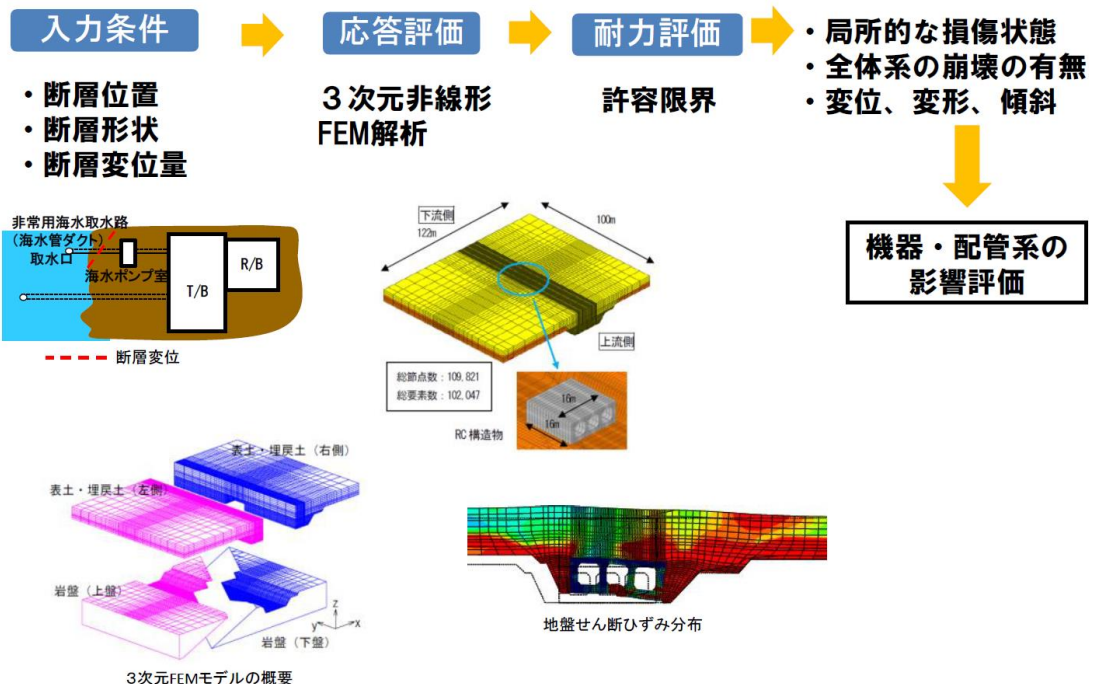
本適用例では、図Ⅱ.7.2.3④-1に示すような非常用の海水取水路（海水管ダクト）に影響するような断層変位（縦ずれ）を想定する。また、本適用例に対して有効と考えられるアクシデントマネジメントの概要を別紙Ⅱ.7-5に例示する。

原子力発電所内の機器や室内で発生する熱は、原子炉補機冷却系の冷却水で冷却された後、海水取水路を通じて取水した海水と原子炉補機冷却水系熱交換器において熱交換され、最終的に熱は海へ放出される。このため、非常用の海水取水路が断層変位により影響を受けた場合、冷却水からの熱除去ができなくなるため、原子炉に影響を及ぼす事故シナリオが想定される。

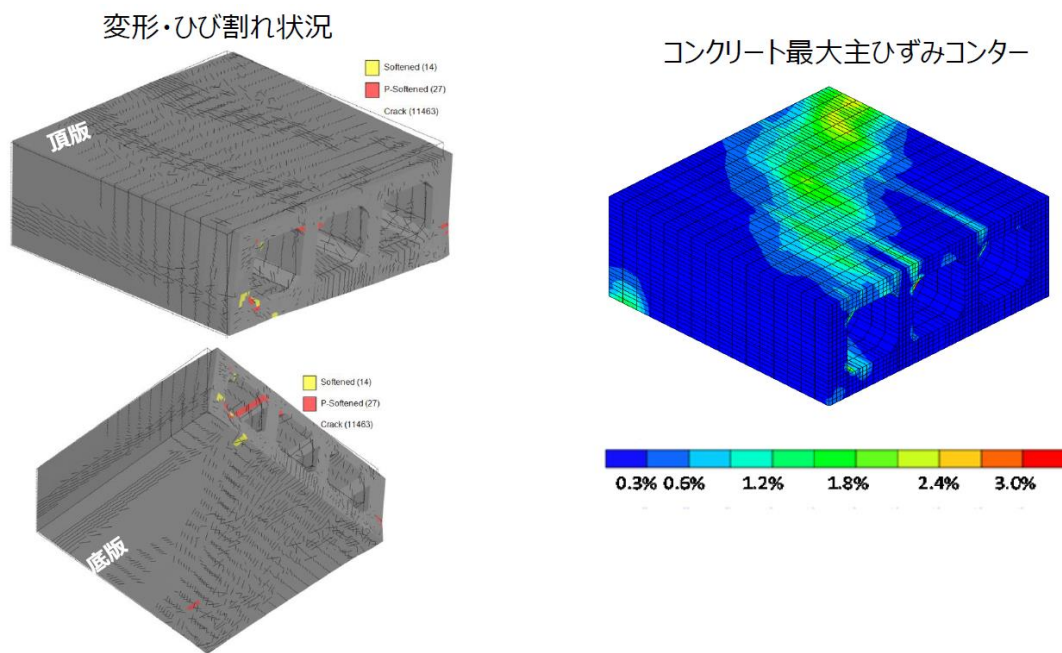
非常用の海水取水路（海水管ダクト）のような土木構造物に対する断層変位の影響評価手順を図Ⅱ.7.2.3④-2に、解析結果の出力例⁹⁾を図Ⅱ.7.2.3④-3に示す。



図Ⅱ.7.2.3④-1 断層変位の位置（適用例④）



図Ⅱ.7.2.3④-2 土木構造物の影響評価手順（適用例④）



図Ⅱ.7.2.3④-3 海水取水路（海水管ダクト）の解析結果
（出力例、変位量 縦ずれ 30cm）（適用例④）

断層変位を 10cm、20cm、30cm、50cm と想定したときの海水取水路への影響評価結果例は、表Ⅱ.7.2.3④-1 のように表すことができる。

表Ⅱ.7.2.3④-1 海水取水路（海水管ダクト）の影響評価適用例（適用例④）

海水取水路	断層変位（縦ずれ）			
	10cm	20cm	30cm	50cm
評価結果	○	△	△	×

〔凡例〕 ○：有意な損傷無し

△：底版・壁・頂版に局部損傷があるが、機能維持（取水）が可能と判断できる状態

×：底版・壁・頂版の損傷によって機能維持（取水）が困難な状態

海水取水路の影響評価結果に基づき、原子炉建屋に設置される機器・配管等への影響を評価する。

断層変位による直接の影響は海水取水路のみであるため、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等の機器・配管系には損傷等の影響はない。

一方、海水取水路の損傷に伴い、各機器への冷却水供給能力が低下（又は喪失）するため、上記設備は冷却不足により、機能が劣化（又は喪失）する可能性がある。

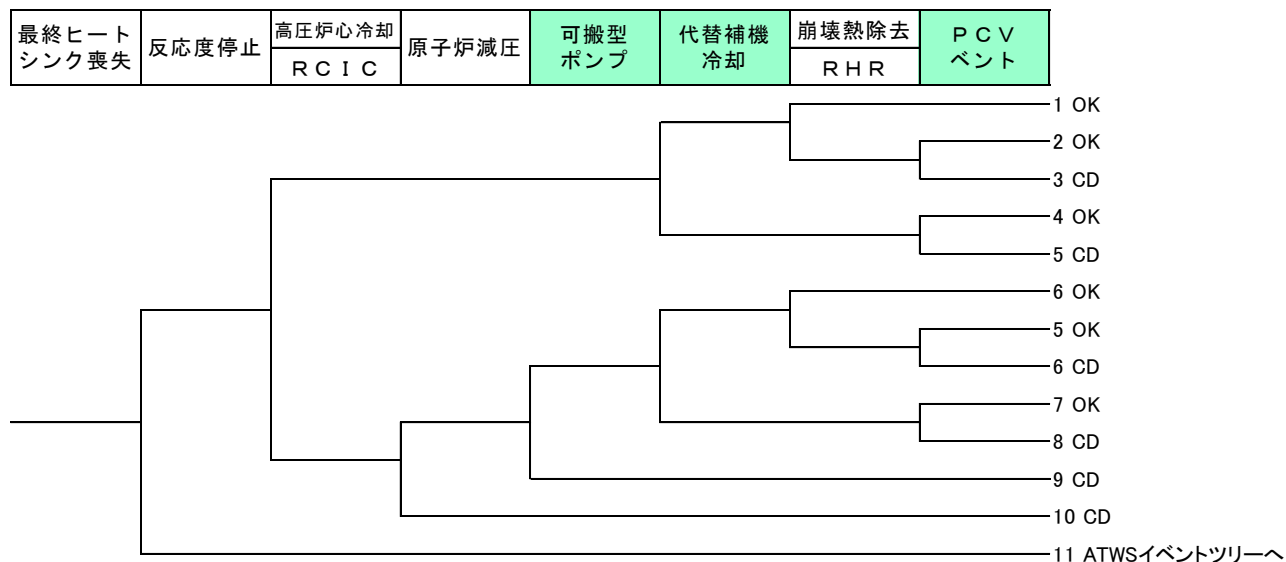
評価結果例（系統機能の有無）を表Ⅱ.7.2.3④-2 に示す。

表 II.7.2.3④-2 機器・配管系の影響評価適用例（適用例④）

系統	断層変位（縦ずれ）			
	10cm	20cm	30cm	50cm
原子炉補機冷却水系/ 原子炉補機冷却海水系	○	△	△	×
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	○	△	△	×

〔凡例〕 ○：機能維持、△：機能の劣化、×：機能喪失

事故シーケンス評価モデルは、内的事象 PRA や地震 PRA の検討結果を利用することができる。炉心損傷を対象としたイベントツリーの評価例を図 II.7.2.3④-4 に示す。



RCIC：原子炉隔離時冷却系、RHR：残留熱除去系、PCV：原子炉格納容器
OK：炉心健全、CD：炉心損傷、ATWS：原子炉停止機能喪失事象

図 II.7.2.3④-4 イベントツリーの評価例（適用例④）

図 II.7.2.3④-4 のイベントツリー評価例から、以下のように考察できる。

- ・海水取水路への断層変位による影響により原子炉補機冷却水系/原子炉補機冷却海水系が機能喪失した場合、最終ヒートシンク喪失となるため、運転時に冷却水が必要な非常用炉心冷却系、ディーゼル発電機や燃料プール冷却浄化系等の安全上重要な機器の機能喪失が発生する。

その場合、原子炉冷却については、機器の運転に冷却水が不要な原子炉隔離時冷却系

(RCIC) や原子炉減圧後、アクシデントマネジメントとして整備している可搬型ポンプによる原子炉注水により炉心は冷却できる。

- ・格納容器からの熱除去については、アクシデントマネジメントとして整備している代替機冷却（ハイドロサブ、可搬型熱交換器車）を用いた RHR 又は PCV ベント（耐圧強化ベント又はフィルターベント）による原子炉格納容器の熱除去により、原子炉を安定な状態に移行させることができる。

このような評価を体系的に実施することにより、表Ⅱ.7.2.3④-3 に示すような裕度評価結果をとりまとめることができ、断層変位に対する裕度、重要な事故シーケンス、更なる有効な対策の検討等の考察、分析が可能となる。また断層変位ハザードの定量的な評価結果と組み合わせることにより、より定量的な分析も可能となる。

表Ⅱ.7.2.3④-3 裕度評価適用例（適用例④）

	断層変位量（縦ずれ）※1							
	10cm		20cm		30cm		50cm	
代替手段なし	躯体 損傷無	炉心 損傷 無	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
	取水機 能維持		取水機 能劣化		取水機 能劣化		取水機 能喪失	
代替手段あり※2	同上		同上		同上		同上	炉心 損傷無
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	

※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、前出の図表と対応したものではない。

<参考 1>

図 II.7.2.3④-4 のイベントツリー評価例では、非常用ディーゼル発電機の機能喪失に伴う SBO シーケンスの展開を行っていないが、個別プラント評価を実施する場合には、別途 SBO シーケンスについても同様な方法で評価することができる。個別プラント評価時に SBO シーケンスを展開する際には、以下の項目について考慮する。

- ・代替非常用電源（ガスタービン発電機、空冷式ディーゼル発電機）による電源供給の可能性
- ・代替補機冷却（ハイドロサブ、可搬型熱交換機車）を用いた非常用ディーゼル発電機の機能回復による電源供給の可能性

<参考 2>

表 II.7.2.3④-3 にある代替手段による対策を整備した場合の炉心損傷頻度の低減効果（適用例①の図 II.7.2.3①-7 に示した条件付き確率に相当）を評価することもできる。

概略評価例を図 II.7.2.3④-5 に示す。ここでは、海水取水機能の全喪失（LUHS）を引き起こす断層変位の発生頻度を PL とし、これらの代替手段に対して断層変位による有意な影響はないものとしたときの断層変位以外の原因による非信頼度をそれぞれ、RCIC=0.001、原子炉減圧=0.001、可搬型ポンプ=0.01、代替補機冷却=0.01、PCV ベント=0.01、と工学的に概略推定している。このとき、対策による低減効果として、約 1 万分の 1 という概略評価となる。

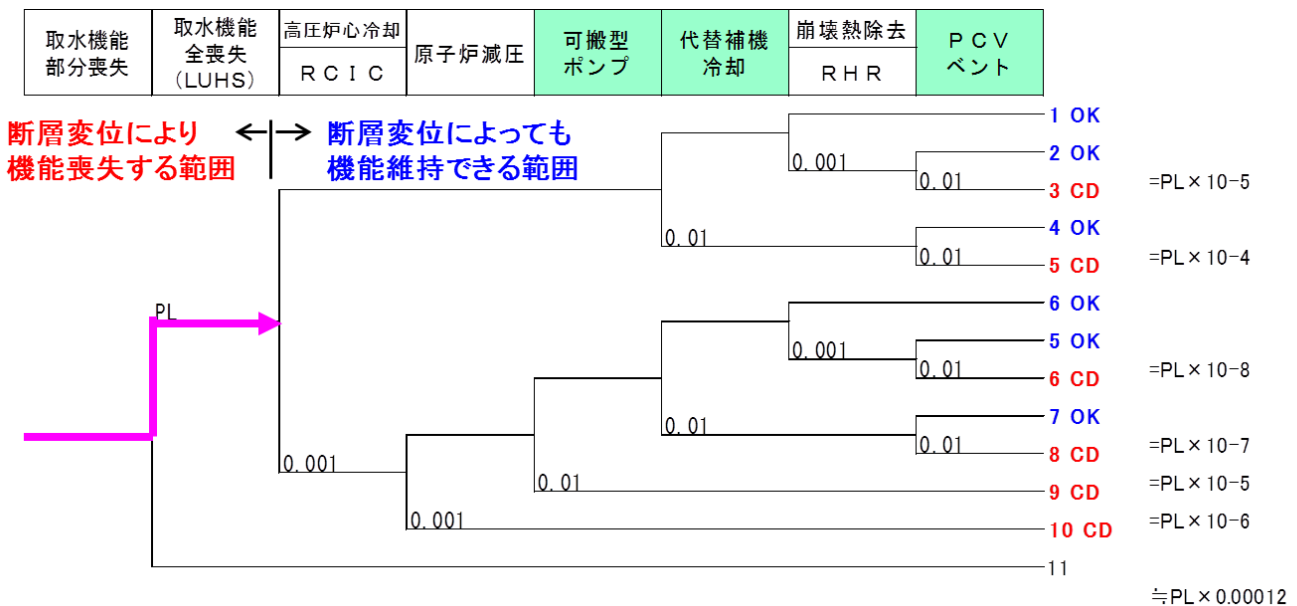


図 II.7.2.3④-5 対策による炉心損傷頻度の低減効果の概略評価例

II.7.2.4 今後の課題

断層変位に対するリスクを評価する一連の手法として、現時点でも適用可能と考えられる評価方法、評価手順を提示・構築した。

リスク評価を更に高度化していくために、II.3 から II.6 の評価技術を受けて実施する事故シナリオの分析とリスク評価に関する今後の主な課題を以下に示す。

- ・ 施設に対する影響が局所的となる断層変位の特徴を踏まえ、特定の断層を対象に、重要な事故シナリオに着目して絞り込む等の合理的に実施可能なリスク評価の具体化
- ・ 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（別紙II.7-6 参照）
- ・ 種々の不確実さの影響を把握し、不確実さを適切に評価する方法についての、より現実的な評価手法の検討
- ・ 建物・構築物、土木構造物、機器・配管系への断層変位の影響に関するフラジリティ評価による、より定量的な裕度評価への拡張
- ・ 地震動との重畳を取り込んだリスク評価手法の検討
- ・ 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
- ・ 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
- ・ 断層変位に対する総合的なプラントリスク、サイトリスクを評価するとともに、リスク情報を活用した継続的な安全性の維持向上のための対処方策を検討するなど、安全確保活動により効果的に利用していくための枠組みの構築

II. 7.3 参考文献

- 1) 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.
- 2) 日本原子力学会：原子力安全の基本的考え方について 第1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.
- 3) 日本原子力学会：日本原子力学会標準 原子力発電所の安全確保活動の変更へのリスク情報活用に関する実施基準：2010, 2010年10月.
- 4) 日本原子力学会：日本原子力学会標準 原子力発電所におけるシビアアクシデントマネジメントの整備及び向上に関する実施基準：2013, 2014年3月.
- 5) 谷和夫：断層変位のリスク対応および有効な対策技術の考え方, 岩の力学連合会第14回岩の力学国内シンポジウム講演集, 講演番号005, 2017年1月.
- 6) 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.
- 7) 神谷昌伸, 金居田秀二, 上屋浩一, 佐藤邦彦, 黒岩克也：断層変位に対する工学的なリスク評価 (2) 裕度評価手法の適用性について, 日本機械学会動力エネルギーシステム部門第21回動力・エネルギー技術シンポジウム, 講演番号B222, 2016年6月.
- 8) 神谷昌伸, 金居田秀二, 上屋浩一, 小川勤：断層変位に対する裕度評価手法の適用性検討, 日本原子力学会 2016年秋の大会, 講演番号3G13, 2016年9月.
- 9) 樋口俊一, 渡辺伸和, 米澤健次, 穴吹拓也, 江尻讓嗣：三次元 FEM 解析による断層上の地中鉄筋コンクリート構造物の損傷評価, 土木学会原子力土木委員会 断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集, III-4, pp.91-98, 2015年7月.

別紙Ⅱ.7 事故シナリオ・リスク評価に関する参考資料

別紙Ⅱ.7-1 地震 PRA 標準における起因事象分類の考え方

地震 PRA 標準¹⁾に示される起因事象分類例を図-別紙Ⅱ.7-1-1 及び図-別紙Ⅱ.7-1-2 に示す。断層変位に対してもまずこれらの起因事象を考慮し、断層変位による SSCs への影響規模が地震動の場合とは異なることや、地震動に比べれば影響範囲が局所的であること等の特性を踏まえて、重要な起因事象に注目してリスクを評価することが現実的と考えられる。

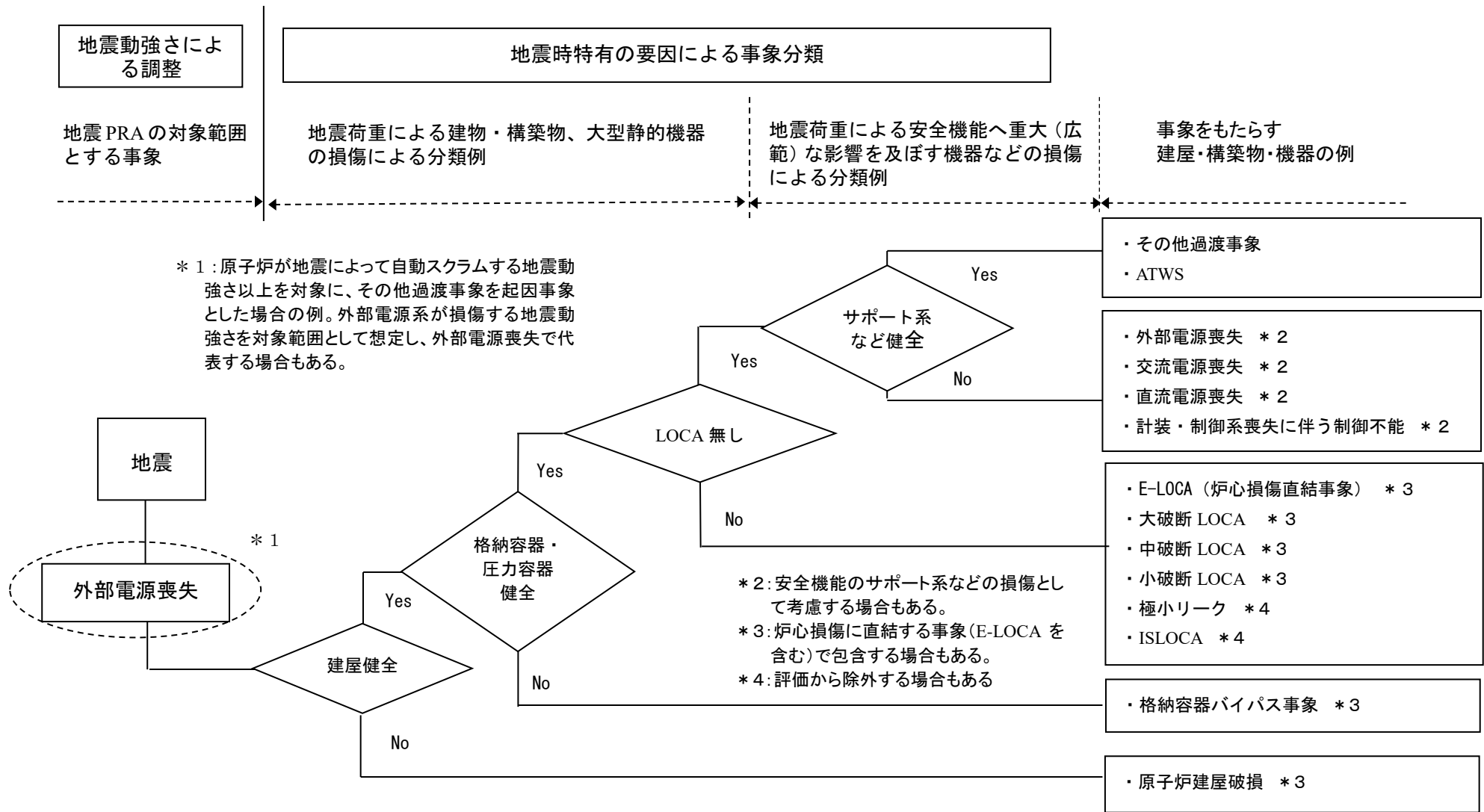


図-別紙Ⅱ.7-1-1 地震動に対する起因事象分類の例 (BWR)

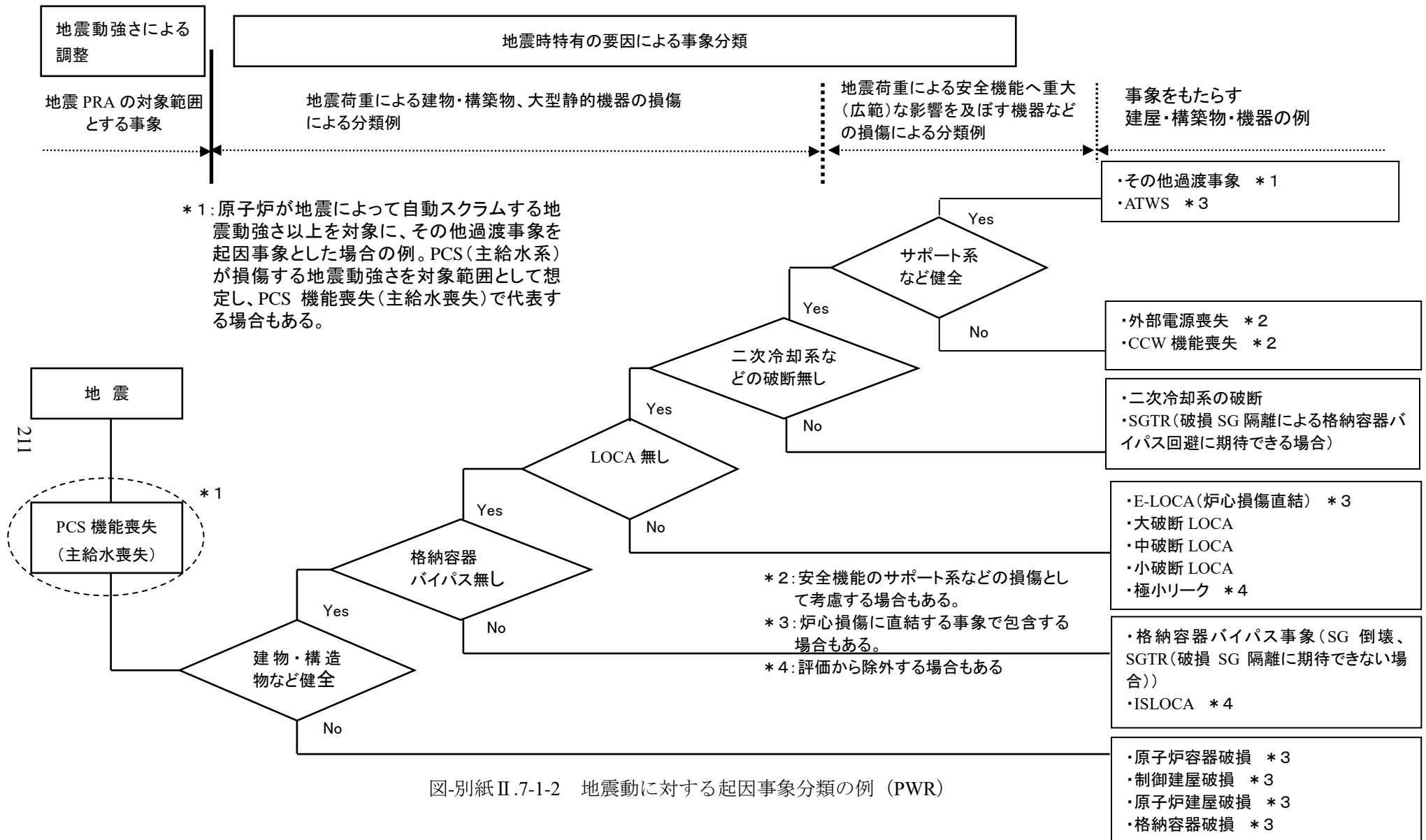


図-別紙Ⅱ.7-1-2 地震動に対する起因事象分類の例 (PWR)

別紙Ⅱ.7-2 リスク情報活用標準における深層防護の考え方

「原子力発電所の安全確保活動の変更へのリスク情報活用に関する実施基準：2010」³⁾は、海外の深層防護の考え方を参考に第4層、第5層まで考慮する以前の情報に基づくものであるが、深層防護の概念を図-別紙Ⅱ.7-2-1のようにイメージ化している。原子力発電所の安全確保活動の変更を実施しても、深層防護の防護レベルは維持されていなければならないという基本的な考え方である。

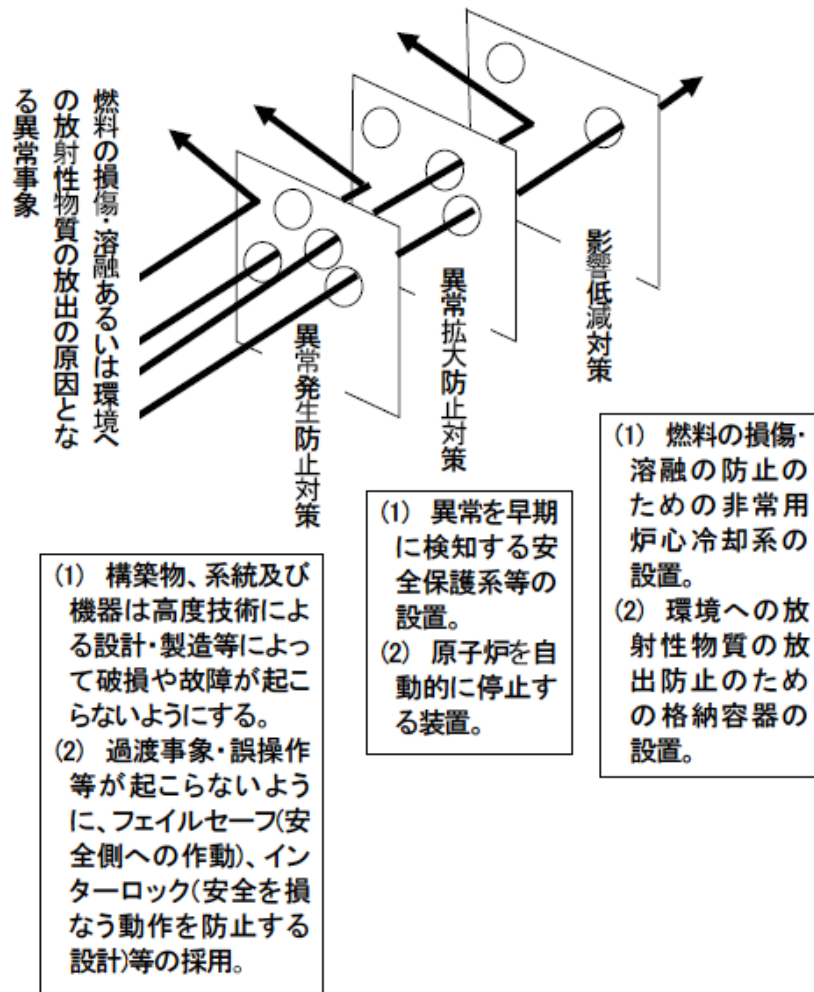


図-別紙Ⅱ.7-2-1 深層防護の概念と主要な対策

別紙Ⅱ.7-3 外部ハザードリスク評価標準における四つの評価方法

外部ハザード選定標準⁶⁾で示されている四つの評価方法について表-別紙Ⅱ.7-3-1に示す。

表-別紙Ⅱ.7-3-1 四つのリスク評価方法の整理 (1/2)

評価方法	評価方法の説明	得られる結果の特徴
①ハザード発生頻度分析もしくは影響度分析によるリスク判断	1.ハザード発生頻度分析： プラントに影響を与える可能性のあるハザードレベル（設計基準を有する外部ハザードにおいては設計基準が該当する）を設定し、それを超過する外部ハザード発生頻度を、保守的な解析により定量的に評価する。この結果、当該ハザード発生頻度が判断基準値を下回ると評価できる場合には、当該ハザードは有意な炉心損傷リスクを有しないものと判断する。	<ul style="list-style-type: none"> ● ハザード発生頻度が判断基準を十分下回ることが示せる場合にのみ適用可能な簡易的、保守的な方法 ● リスク上重要なシナリオ/シーケンス、SSCs等の詳細情報は示せない
	2.影響度分析： 当該外部ハザードのプラントへの影響を保守的に仮定したとしても、プラントにおける炉心損傷につながる起回事象の発生、及び、安全機能を有するSSCsが損なわれる事が無いことを、決定論的評価により確認する。この確認ができる場合には、当該ハザードは有意な炉心損傷リスクを有しないものと判断する。	<ul style="list-style-type: none"> ● 断層変位によるプラントへの影響が軽微であることが示せる場合にのみ適用可能な簡易的、保守的な方法 ● リスク上重要なシナリオ/シーケンス、SSCs等の詳細情報は示せない
②裕度評価	<p>多数の事故シナリオを対象として、炉心損傷につながる起回事象の発生や安全機能を有するSSCsの機能喪失に対するハザードの影響を決定論的に設定することにより、炉心損傷リスクが必ず起こるハザードレベル、及び、支配的な事故シナリオを導出する。ここで多数の事故シナリオとしては、内の事象を対象とした事故シナリオが使用可能である。</p> <p>ここで導出されるハザードレベルとプラントに影響を与える可能性のあるハザードレベルとの比を当該ハザードの炉心損傷に対する裕度として算出する。</p> <p>この結果、裕度が判断基準値を上回ると評価できる場合には、当該ハザードは有意な炉心損傷リスクを有しないものと判断する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● CDF等の絶対値は示せない（例えば安全目標との比較は不可） ● リスク上重要なシナリオ/シーケンス、SSCs等の相対的（あるいは判断基準に対する相対裕度の定量値）な詳細情報を現実的に示すことができる

表-別紙Ⅱ.7-3-1 四つのリスク評価方法の整理 (2/2)

評価方法	評価方法の説明	得られる結果の特徴
③ 簡易的な PRA	<p>炉心損傷につながる支配的な事故シナリオを対象として、炉心損傷につながる起因事象の発生や安全機能を有する SSCs の機能喪失に対するハザードの影響を簡易的に設定することにより、ハザードにより引き起こされるプラントの条件付き炉心損傷確率 (CCDP) を定量的に評価し、ここで算出された CCDP に、プラントに影響を与える可能性のあるハザードレベルを超過する外部ハザード発生頻度を乗じることにより CDF を評価する。ここでの CCDP 評価としては、内的事象を対象とした PRA モデルを使用して、バウンディング解析^{※1)}、もしくは、保守的な解析を実施することが可能である。</p> <p>この結果、CDF が判断基準値を下回ると評価できる場合には、当該ハザードは有意な炉心損傷リスクを有しないものと判断する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● CDF 等の絶対値が簡易的な結果として求まる ● リスク上重要なシナリオ/シーケンス、SSCs 等の情報も簡易的な絶対値及び相対的な詳細情報を示すことができる
④ PRA 等の詳細なリスク評価	<p>炉心損傷リスクを有すると判断される外部ハザードに対しては、確率論的リスク評価 (PRA) を適用する詳細なリスク評価を行う。ここでの全ての評価において、PRA を実施することが望ましいが、複雑な事故シナリオを考慮する場合や事象の重量を考慮する場合等により評価技術が未成熟な事象においては、決定論的評価及び工学的判断による評価を適用することも可能である。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 地震動に対する PRA と同等の詳細で現実的なアウトプットを示すことができる

(注) 以下に示す特性分析基準の一つ以上に合致する場合は、リスク評価するまでもなく有意な炉心損傷リスクはないと判断できるとしている。

【基準1】 ハザードの発生頻度が極めて小さいことが明確である。

【基準2】 ハザードがプラントに影響を与える程近傍で発生しない。

【基準3】 ハザードが進展するタイムスケールがプラントでの対処時間に比べて十分に長い。

【基準4】 ハザードがプラントに到達したとしても、炉心損傷につながる起因事象を引き起こさないことが明らかである。

※1) バウンディング解析：解析上の仮定や入力データに上下限の範囲を想定して結果を評価する解析

別紙Ⅱ.7-4 地震 PRA 標準の評価手順

地震 PRA 標準¹⁾で示されている地震動に対する PRA の評価手順を図-別紙Ⅱ.7-4-1 に示す。

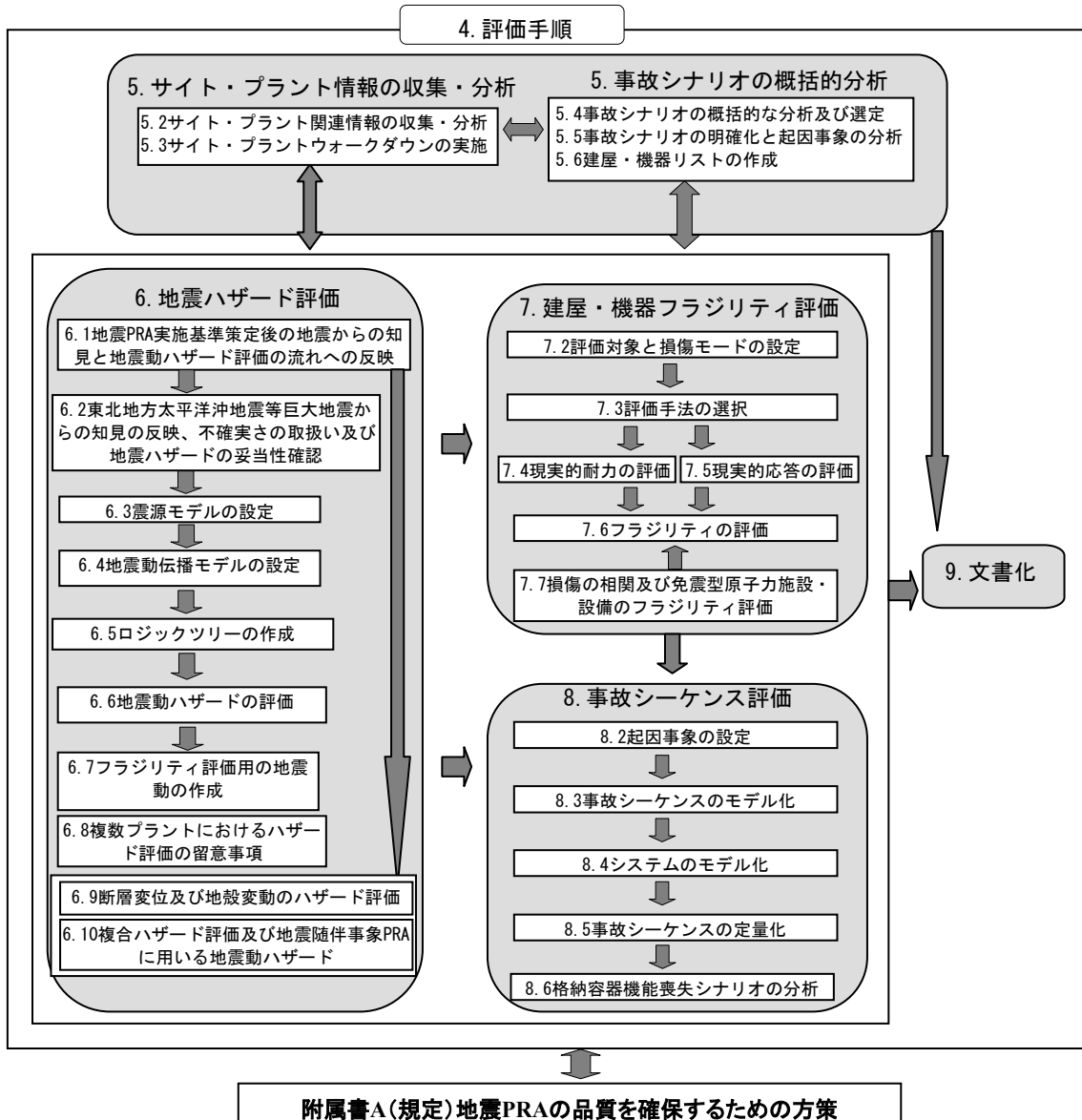


図-別紙Ⅱ.7-4-1 地震 PRA の評価手順

別紙Ⅱ.7-5 非常用海水取水系直下の断層変位に対するアクシデントマネジメントの例

Ⅱ.7.2.3「(4) 適用例④ 非常用海水取水系直下の断層変位（縦ずれ）」に基づき、想定される事故シナリオとアクシデントマネジメントの例を示す。

海水取水路直下において断層変位が生じた影響により、各種海水系への冷却水供給能力が低下する可能性があるが、海へのヒートシンクは、原子炉補機冷却海水系機能の維持により確保されることから、少なくとも当該系統への冷却水供給能力が確保されれば良い。

ここでは、取水機能がすべて喪失し、原子炉補機冷却海水系機能も喪失すると想定した場合における事故シナリオとアクシデントマネジメントについて示す。

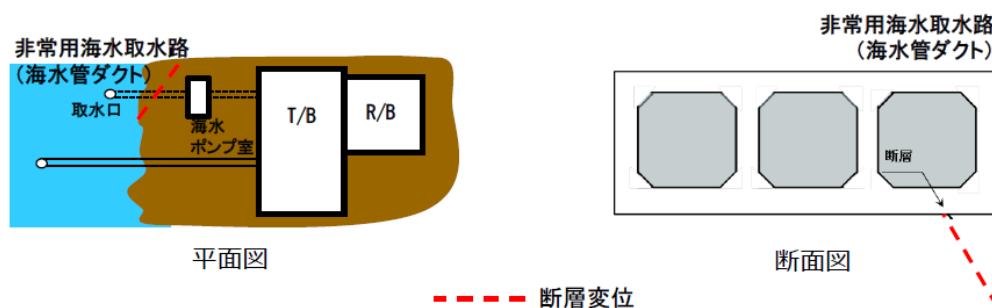
1. 沸騰水型原子力発電所（BWR）の例

(1) 事象の想定

断層変位が生じた際は、地震加速度大等の地震動の影響によるスクラム信号により原子炉は自動停止するものと想定される。ここでは起因事象として、給水流量の全喪失が発生するものとし、取水機能の喪失に伴い原子炉補機冷却海水系機能が喪失したことにより、崩壊熱除去機能が喪失することを想定する。

また、外部電源も喪失しているものとし、また、非常用ディーゼル発電機の機関冷却に必要な原子炉補機冷却海水系が喪失しているため、非常用ディーゼル発電機も使用できないものとして全交流電源喪失を想定する。

【図Ⅱ.7.2.3④-1 断層変位の位置（適用例④）より】



(2) 事象進展

取水機能喪失に伴う崩壊熱除去機能喪失時の対応手順の概要を図-別紙Ⅱ.7-5-1 に、対策の設備イメージを図-別紙Ⅱ.7-5-2 及び図-別紙Ⅱ.7-5-3 に示す。

給水流量の全喪失後、原子炉水位は急速に低下する。「原子炉水位低（レベル3）」信号が発生して原子炉はスクラムするが、原子炉水位低（レベル2）で原子炉隔離時冷却系が自動起動して、原子炉水位は適切に維持される。

なお、原子炉水位低（レベル2）により、再循環ポンプはトリップ、主蒸気隔離弁は全

閉する。

その後、シビアアクシデント対策で設置している常設代替交流電源設備から非常用交流母線に電源を供給し、常設の低压代替注水系を起動、逃がし安全弁により原子炉を減圧して低压代替注水系による原子炉注水を開始する。

なお、原子炉の減圧を開始すると、冷却材の流出により原子炉水位は低下するが、低压代替注水系による原子炉注水が開始すると回復し、原子炉水位は有効燃料棒頂部を下回ることなく炉心は冠水維持される。

また、崩壊熱除去機能が喪失しているため、原子炉内で崩壊熱により発生する蒸気が逃がし安全弁を経由して格納容器内に流入することによって格納容器の圧力及び温度は徐々に上昇するため、シビアアクシデント対策のため準備している可搬型の原子炉補機代替冷却水系を用いることにより、残留熱除去系による格納容器除熱を行う。

このように、取水機能の喪失に伴い崩壊熱除去機能が喪失したと想定しても、原子炉を安定した状態に維持することが可能である。

さらに、残留熱除去系機能が喪失することを想定しても、シビアアクシデント対策で設置している格納容器フィルタベント系による大気への除熱機能が確保される。

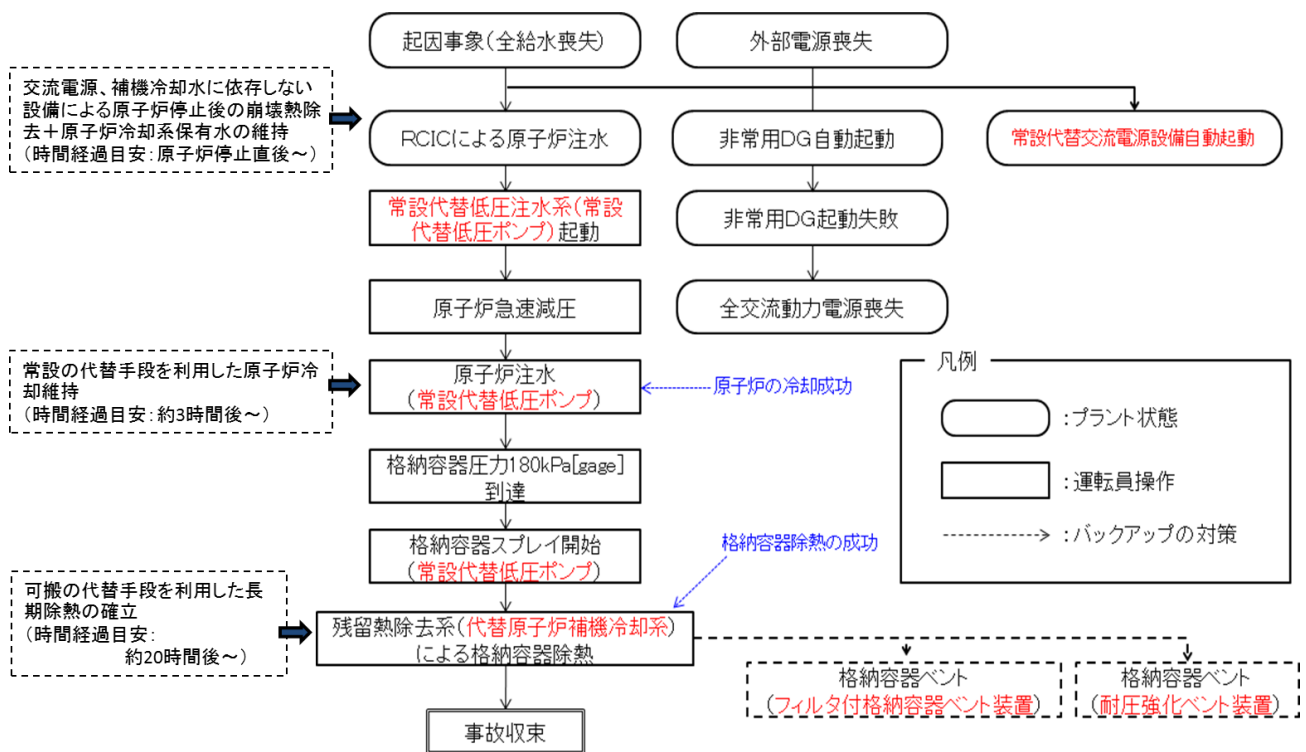


図-別紙Ⅱ.7-5-1 取水機能喪失に伴う原子炉崩壊熱除去機能喪失時の対応手順の概要

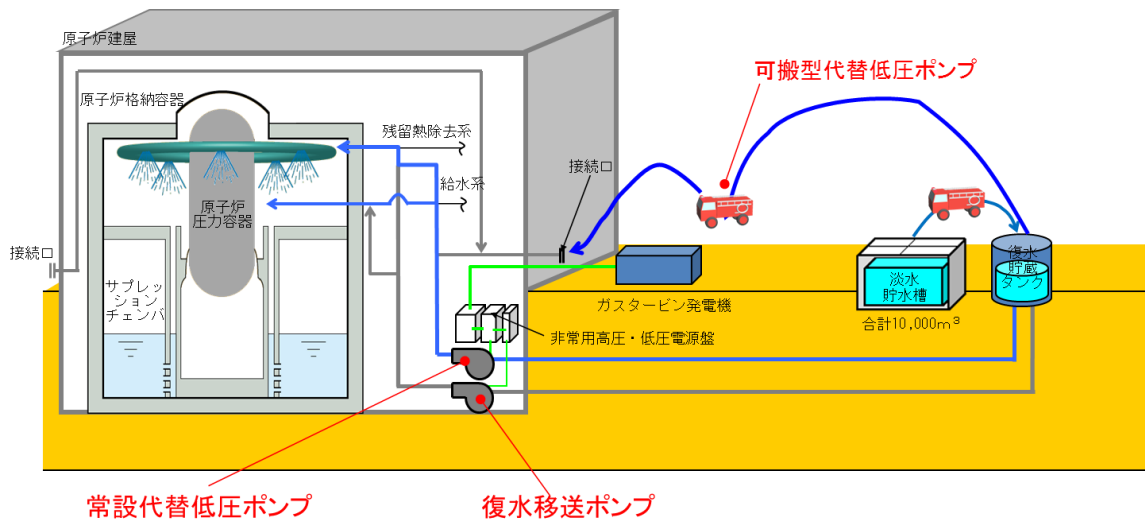


図-別紙Ⅱ.7-5-2 常設の代替低圧注水系による原子炉注水及び格納容器スプレイの例

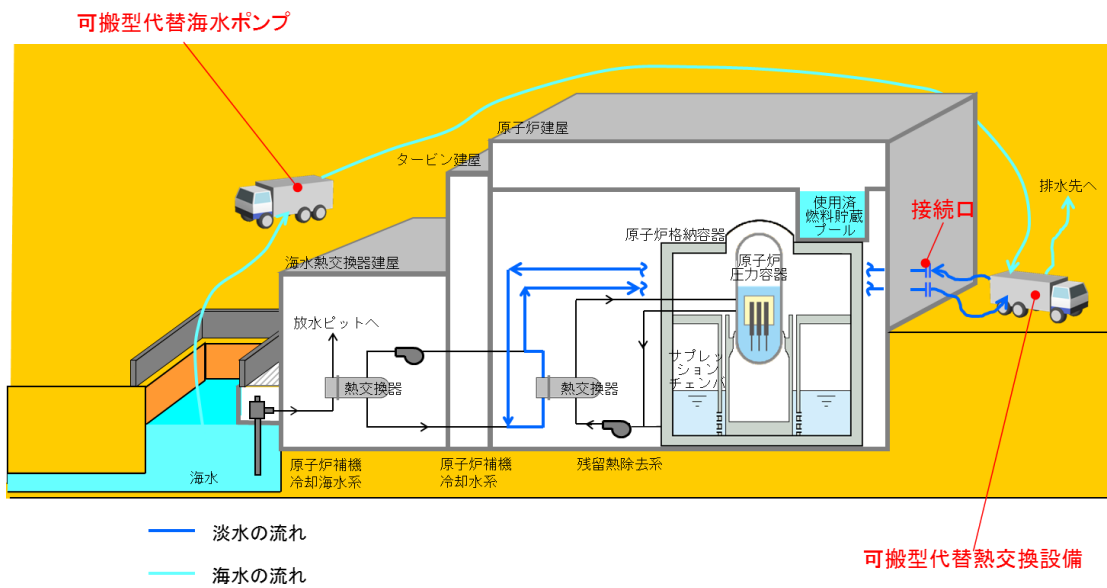


図-別紙Ⅱ.7-5-3 可搬型の代替原子炉補機冷却水系を用いた格納容器除熱の例

2. 加圧水型原子力発電所（PWR）の例

(1) 事象の想定

断層変位が生じた際は、地震加速度大等の地震動の影響によるトリップ信号により原子炉は自動停止するものと想定される。ここでは、非常用の海水取水路直下に生じた断層変位の影響により、原子炉補機冷却海水系及び原子炉補機冷却系の機能喪失を想定する。

また、外部電源も喪失しているものとし、また、非常用ディーゼル発電機の機関冷却に必要な原子炉補機冷却系が喪失しているため、非常用ディーゼル発電機も使用できないものとして、全交流動力電源喪失を起因事象として想定する。この事象の進展は、従属的に原子炉補機冷却機能喪失を包含するものとなる。

(2) 事象進展

全交流動力電源喪失時の対応手順の概要を図-別紙Ⅱ.7-5-4 に、対策の設備イメージを図-別紙Ⅱ.7-5-5 に示す。

全交流動力電源喪失に伴い、1次冷却材ポンプの母線電圧が低下することで、「1次冷却材ポンプ電源電圧低」信号のトリップ限界値に到達し、原子炉は自動停止する。また、全交流動力電源喪失と同時に原子炉補機冷却機能喪失及び1次冷却材ポンプ軸封部からの1次冷却材の流出（RCP シール LOCA）を想定し、1次冷却材圧力は徐々に低下する。

事象発生後早期に、タービン動補助給水ポンプが自動起動することで蒸気発生器の保有水量は回復する。主蒸気逃がし弁の開操作による2次冷却系強制冷却を開始し、1次冷却系を減温、減圧することで、蓄圧注入系が動作する。その後、蓄圧タンクの出口弁を閉止し、2次冷却系強制冷却を再開する。

原子炉への注水に関しては、シビアアクシデント対策で設置している空冷式非常用発電機から電源供給し、常設低圧代替注水ポンプによる炉心注水を開始することで、1次冷却系の保有水量は回復する。炉心は冠水状態を維持する。

原子炉格納容器圧力及び温度は1次冷却材ポンプ軸封部からの1次冷却材の漏えいにより上昇するが、蒸気発生器による炉心冷却、シビアアクシデント対策で準備している可搬型代替注水大型ポンプを用いた格納容器再循環ユニットへの海水通水による格納容器内自然対流冷却、同じく高圧注入ポンプ及び余熱除去ポンプへの海水通水による高圧代替再循環運転を行うことで、原子炉格納容器からの除熱を行う。

このように、全交流動力電源喪失及び原子炉補機冷却機能喪失を想定しても、原子炉を安定した状態に維持することができる。

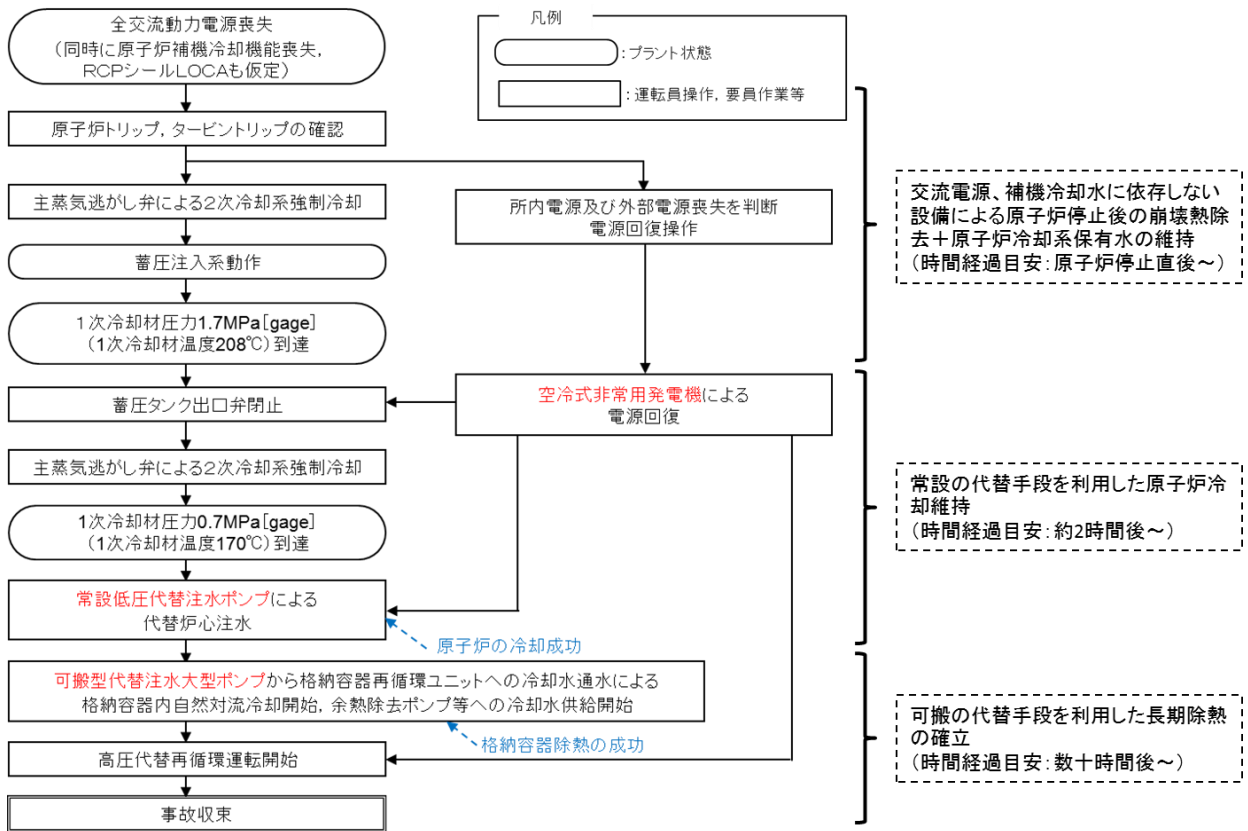


図-別紙Ⅱ.7-5-4 全交流動力電源喪失時の対応手順の概要

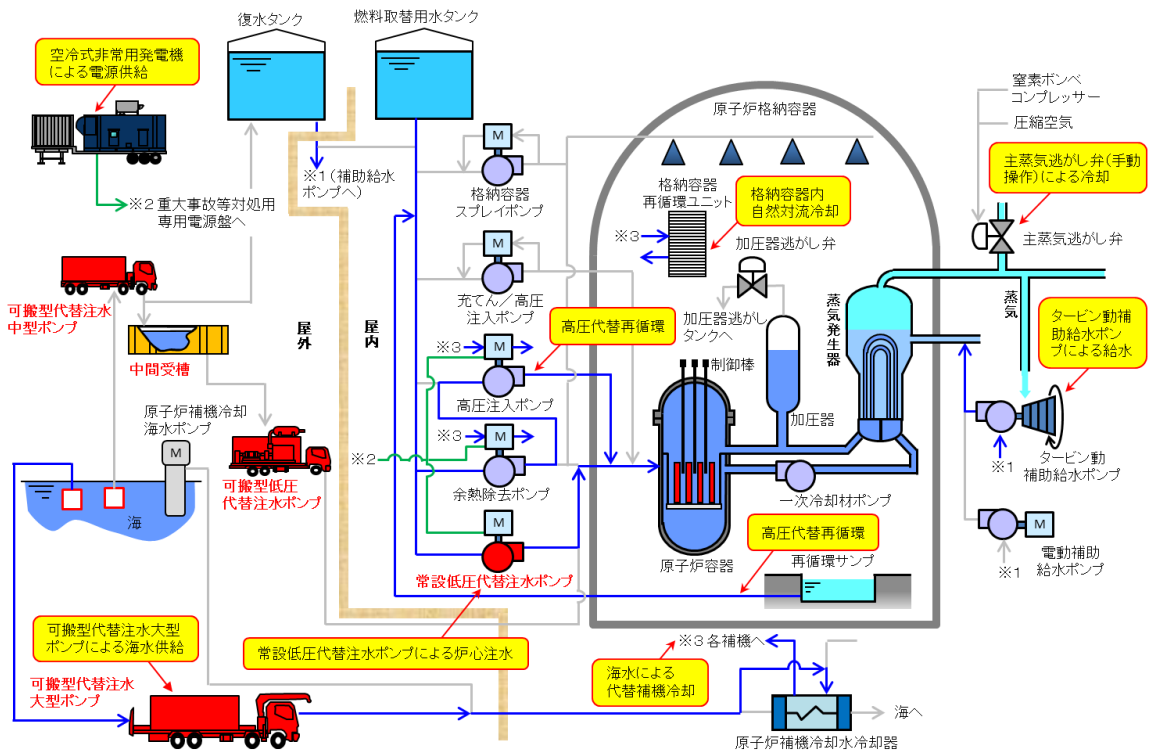


図-別紙Ⅱ.7-5-5 原子炉への注水機能・格納容器の除熱機能の例

別紙Ⅱ.7-6 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-別紙Ⅱ.7-6-1（図Ⅱ.2.2-3 の再掲）及び図-別紙Ⅱ.7-6-2（図Ⅱ.2.2-4 の再掲）のように、副断層による変位量は、主断層から離れるに伴い指数関数的に小さくなる傾向がある^{1)~3)}。また、副断層の発生確率は、主断層から離れるに従い急激に小さくなる^{1),4)}。

評価対象となる断層変位が副断層の場合、上記の傾向を活用して、当該副断層の起因となる主断層と重要施設が配置されている空間的位置関係を考慮に入れて検討することが重要と考えられる。ここでは、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て、副断層による重要施設の機能喪失の関係に係る考え方を整理した。

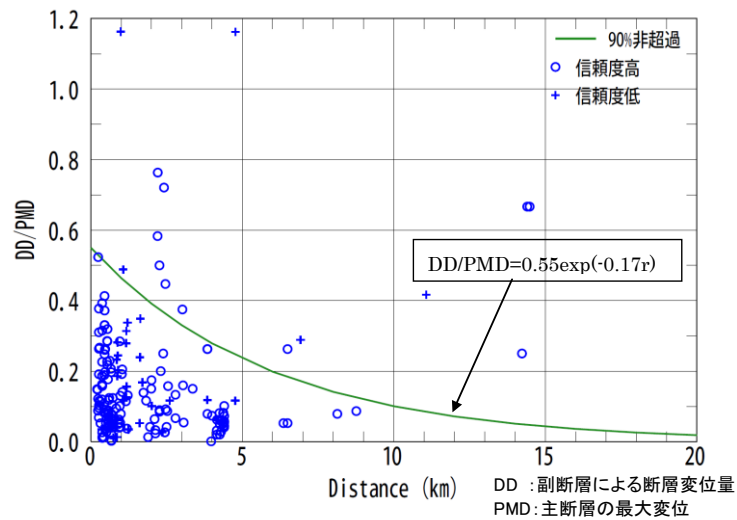


図-別紙Ⅱ.7-6-1 主断層からの距離と基準化した副断層の変位量¹⁾

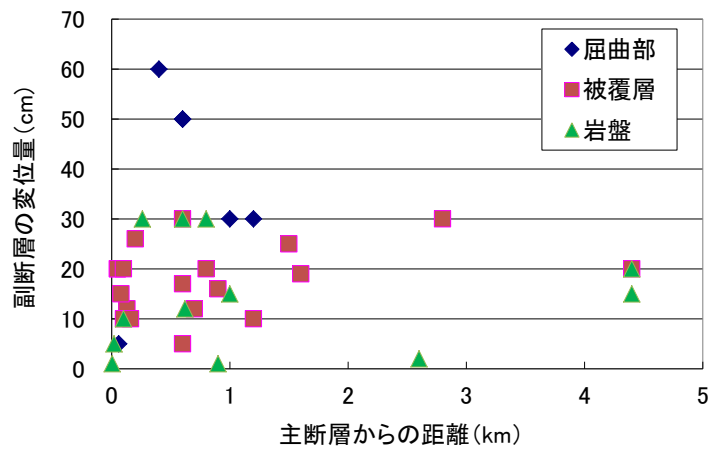


図-別紙Ⅱ.7-6-2 主断層からの距離と副断層の変位量^{3)一部加筆}

図-別紙Ⅱ.7-6-3 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、定性的な考え方を以下に示す。

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。

上記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脆弱性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の基準策定に大いに寄与すると考えられる。

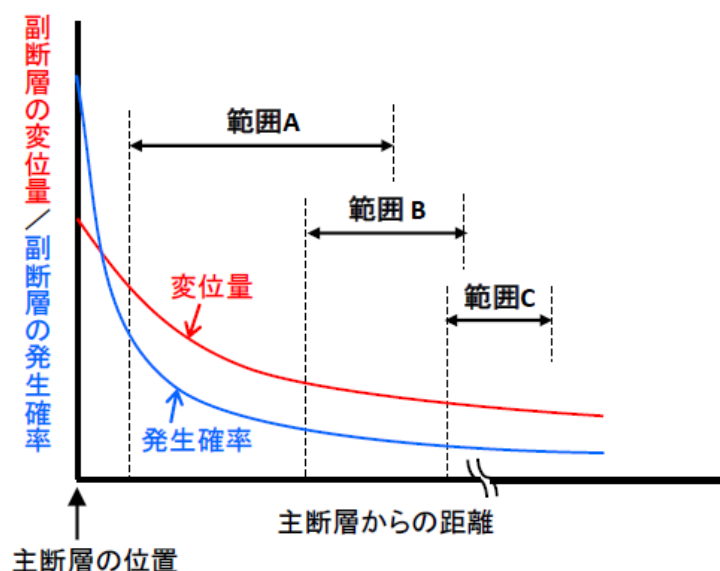


図-別紙Ⅱ.7-6-3 主断層からの距離をパラメータとした副断層の変位と発生確率の傾向

参考文献

- 1) 高尾誠, 土山滋郎, 安中正, 栗田哲史: 確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用, 日本地震工学会論文集, 第 13 卷, 第 1 号, pp.17-36, 2013 年.
- 2) 高尾誠, 谷智之, 大島貴充, 安中正, 栗田哲史: 確率論的断層変位ハザード解析における副断層の変位量評価に関するパラメータの最尤推定, 日本地震工学会論文集, 第 16 卷, 第 2 号, pp.96-101, 2016 年.
- 3) 原子力安全推進協会敷地内断層評価手法検討委員会: 原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書, 2013 年 9 月.
- 4) 高尾誠, 上田圭一, 安中正, 栗田哲史, 中瀬仁, 京谷孝史, 加藤準治: 確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上, 日本地震工学会論文集, 第 14 卷, 第 2 号, pp.16-36, 2014 年.

(空き頁)