

日本原子力学会 2016 年 秋の大会

総合講演・報告 4 「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会 活動報告

日 時：平成 28 年 9 月 8 日（木）13:00～14:30

場 所：久留米シティプラザ C ボックス（F 会場）

参加者：約 40 名

内 容：◆特別講演「熊本地震の概要」 奥村 晃史氏（広島大、調査専門委員会委員）

◆活動報告「断層変位に対する工学的なリスク評価」

I 断層変位に対する原子力安全の考え方 奈良林 直氏（北大、調査専門委員会主査）

II 断層変位のハザード評価 谷 和夫氏（東京海洋大、調査専門委員会委員）

III 断層変位の施設への影響評価 岡本 孝司氏（東大、調査専門委員会委員）

座 長：岡本 孝司氏（東大）

## 断層変位に対する工学的なリスク評価

### I 断層変位に対する原子力安全の考え方

#### I-1. はじめに

##### I-1-1. 調査専門委員会について

2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一事故後の原子力規制体制や基準が見直される中で、既設の原子力発電所において、敷地内の断層変位の可能性の有無のみに着目して原子力安全を判断しようとする議論が生じており、断層変位の施設への影響評価の検討が喫緊の課題となっている。

日本原子力学会「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会（以下「本調査専門委員会」という）は、活断層の活動等に伴って生じる断層変位も外部ハザードの一つと捉え、断層変位の施設に与える影響に関する工学的な評価手法について、既往の研究成果を活用しながら、関連する多分野の専門家の協働により調査・検討を行うことを目的に設置された。他学会との組織的な協力としては、先行して検討を進めていた土木学会原子力土木委員会と連携している。構築した調査・検討のスキームを図 1 に示す。

活動期間中に発生した 2014 年長野県北部地震（神城断層地震）や 2016 年熊本地震から得られる知見も含め、断層変位が原子力発電所に与える工学的な影響評価を行い、不確実性を踏まえたトータルリスク評価手法、リスクを低減するための方策等についてまとめ、報告書として国内外に発信するとともに、今後の標準化の活動等に供していくことを目指している。

日本原子力学会 2016 年春の年会では中間的な成果報告を行ったが、2016 年秋の大会では、現在とりまとめの段階に至っている報告書の基本事項について報告する。

なお、本調査専門委員会の調査・検討の背景、問題認識等については、2016 年春の年会での報告を参照されたい。

##### I-1-2. 調査・検討の対象等

本調査専門委員会が対象としている断層変位という自然現象は、活断層の活動等に伴って地盤や地層に変位（ずれ）が生じる現象である。変位としては、いわゆる活断層（主断層及び分岐断層）や活断層の周辺に副次的に生じる変位（副断層）が知られており、それ以外にも、重力性の地すべり、岩盤の膨潤に伴う地層の変位、更には地盤の沈降等によって生じる地盤の相対変位などがある。図 2 に主な断層変位について示す。

本調査専門委員会における主な検討の前提、検討に当たっての姿勢等について以下に記す。

①評価対象としての変位は、主として地震活動に伴って生じるものを中心に論じる。

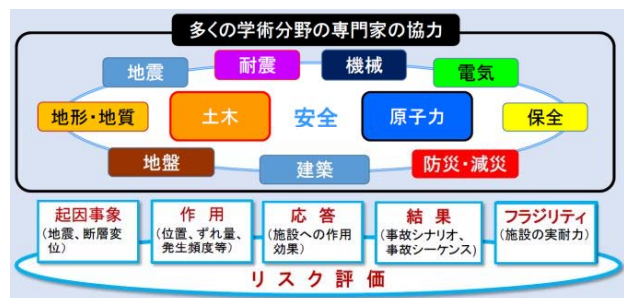


図 1 学術分野横断の検討スキームの構築

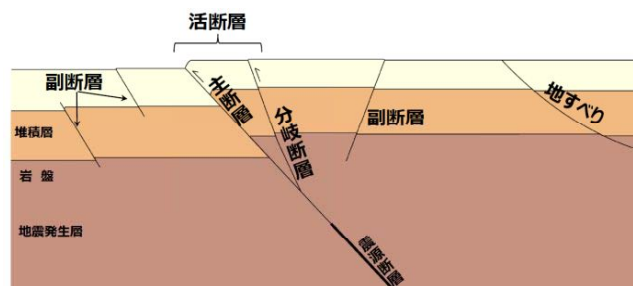


図 2 主な断層変位

- ②原子力施設の重要施設に対する影響を論じるため、評価に用いる断層変位の定義位置は、重要施設が設置あるいは支持される設置地盤（岩盤）上面とする。
- ③断層変位が生じる現象は、地震動と比較すると低頻度で局所的に生じる現象のため、地震動に対する評価と比較すると知見の蓄積や経験が不足しており、したがって、評価に際しての不確かさが大きい。一方で、これまでに得られている各分野の知見を活用して、対象となる断層変位の性状に応じて、施設に与える影響を工学的に評価していくことは現段階でも可能である。
- ④不確かさに対処するために有効なのが深層防護の概念の適用とリスク評価の活用である。これらの活用により、多様なシナリオを検討するアプローチ、想定を超えた領域まで含めたシームレスな評価、リスク情報を活用した意思決定等が重要であるとの立場に立脚する。なお、本調査専門委員会の名称にもある「工学的なリスク評価」は、確率論的リスク評価（PRA）のみに限定せず、確定論的な裕度評価なども含めた広義の概念でリスクに関する情報を扱い、そのための評価手法を扱うこととする。
- ⑤主として既設の原子力発電所に対する断層変位の影響について論じるが、得られた知見やリスク低減策は、諸外国も含む新設の施設や再処理施設等にもその考え方は活用できると考える。
- ⑥個々の工学的な評価手法は、それぞれの手法の適用性や関連する技術データの蓄積度合い等に応じた的確に利用することが前提となる。必要に応じて、工学的に適切な条件を付すこと等によりリスク評価のための情報を得ていく。
- ⑦断層変位による施設への影響を評価する際には、地震動等による影響との重畳も考慮する必要があるが、地震動による影響と変位による影響は施設に対しては異なる作用をもたらすことから、本調査専門委員会としては、変位による影響を区別して体系的に評価する手法について取りまとめることとしている。実際に個別施設の評価をする際には、地震動との重畳について、静的もしくは動的な作用の組み合わせや時刻歴も考慮して適切に評価を行う。

## 1-2. 断層変位に対する原子力安全の基本的考え方

### 1-2-1. 原子力安全の考え方

原子力安全の目的は、人と環境を、原子力の施設と活動に起因する放射線の有害な影響から防護することであり、原子力施設の安全確保の目標は、人や環境に放射線の有害な影響を与えるような事故の可能性を確実に極めて低いものとするところである。

これらの達成のため、国際的にも有効であると考えられているのが、深層防護の概念の適用である。

深層防護とは、原子力安全の目的の達成のために、ある目標をもった幾つかの障壁（防護レベル）を用意して、あるレベルの防護に失敗したら、次のレベルで防護するという概念である。これは、人と環境に影響を与えるまでの種々の現象には人知が及ばない振る舞いが存在し得ることから、事前に十分と思われた対策でも思いがけない理由で失敗するかも知れないという不確かさの影響を考慮して、別の対応策、次の防護レベルの対応策を繰り返すことにより、一連の防護策全体の実効性を高めるという考え方である。

これら防護レベルの手段には、物理的な障壁のほか、例えば制御・管理や緊急時における対応手段も含まれる（ハード対策、ソフト対策）。具体的な対応策においては、防護レベルを多層とすることを基本的な考え方として、想定する事象に対して複数の防護レベルで様々な手段を用意する。また、特に自然現象のように不確かさが大きいものに対しては、事前の想定を逸脱したシナリオとなる場合もあり得るとして、不確かさに対する備えを多層とすることで、防護策全体の効果を高めることができる。さらに、低頻度の事象や経験のない事象に関しては知識の不完全性による限界があることから、想定を超える領域の存在が否定できないとして、当該ハザードの特徴を踏まえた異なる質（工学的に違った切り口）の防護策を講じ

ておくことが有効となる。

すなわち、不確実さに対処しつつリスクの顕在化を防ぐために深層防護の概念を適用することが有効であり、その的確な適用により、事象の早期の収束や機能の復旧などのレジリエンス活動を可能とし、全体として質の高いロバストな対処が可能となる。深層防護の考え方は、原子力安全を確保するための普遍的な考え方であり、それを積極的に講じることが重要な戦略となっている。

この深層防護の考え方を的確に適用し、効果的にリスクの低減を図るためには、リスク評価を実施することが有効である。また、潜在的なリスクを管理するためには、リスクの三重項（リスクトリプレット）に答えることが必要であることが提唱されている。

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

②その発生可能性は如何ほどか？ How likely is it?（頻度）

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

これは、言い換えれば、原子力施設の事故によるリスクは事故シーケンスによって大きく変わるので、事故が発生する事象の繋がりである事故シーケンス、その発生可能性（発生頻度）及びその結果（影響の程度）の三つの要素を的確に考慮した評価が重要ということである。この評価のためにはリスク評価の特徴を活かした取組みが最も有効なのである。

福島第一事故を踏まえると、リスク評価の重要性が一層高まっている。リスク評価によって、リスクの程度や弱点の把握ができ、また、多くのシナリオを取り込むことで想定外を少なくすることができる。さらに、原子力施設の敷地外における対策（原子力防災）まで含めたリスク評価を活用した取組みの必要性も提起されている。

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

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

原子力安全の考え方からは、リスクへの寄与が小さいことが明らかでない限り放置してはならず、リスクの定量化の努力を行い、定量化が不完全にしかできない場合であっても、合理的に実行可能な評価・対応策を検討して、社会に提示していくことが必要である。

## 1-2-2. 断層変位に対する考え方

原子力施設を設置する際には、事前の詳細な地形・地質調査によって重要施設の設置地盤（岩盤）に断層変位を想定する必要があることを確認し、特に原子炉建屋に関しては設置地盤の検査（岩盤検査）を実施し、施設の支持性能に問題が生じるものではないことを確認してきた。これは、施設を設置する際には、断層変位を「避ける」という考え方によって、断層変位の想定を検討を不要としていたということである。

一方、もとより施設の設置地盤（岩盤）には破碎帯などの弱面が存在しているので、地震動の影響に対する設置地盤の安定性評価等の検討はこれまでもなされている。

福島第一事故の教訓を踏まえると、可能な限り想定外をなくすことが必要で、その上で、想定を超えた領域に対しても対処を行い、リスクをできる限り低減することが求められる。

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

既設の原子力施設においては、常に最新知見を反映していく取組みにおいて、新たな情報等によって断



層変位の考慮の必要性が生じる場合があり得る。その際には、あらためて地形・地質調査などから得られる情報に基づき、まずは考慮が必要な断層変位という事象の性状（発生位置、頻度、ずれ量と方向など）を想定し、次のステップとして施設に対する影響の検討を行うことが基本的な評価手順となる。これら評価においては、それぞれの段階で不確かさが適切に考慮されねばならない。その上で、事象の不確かさが大きいことから、想定を超える場合も考慮してリスク評価を行うことが必要である。

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

既設の原子力施設においては、福島第一事故の経験を踏まえ、深層防護の考え方も適用しながら、施設設置当初の設計・評価の範囲の拡張・強化や追加の影響緩和策（アクシデントマネジメント）など、様々な対応策が講じられている。これらは断層変位を想定して講じられてきているものではないが、福島第一事故以前よりもロバストな防護策が講じられていると考えられることから、これらも含めて、断層変位に対する評価をしていくことが技術的に理に適っている。

具体的には、例えばすでに地震動などに対してなされていた設計あるいはその設計裕度の範囲において、想定する断層変位に対しても安全上重要な機能を有する施設（SSCs）の要求性能が満足されるかを確認する。変位量の程度によっては、施設の有する安全機能に支障を与えない場合が考えられる。また、必要に応じて、福島第一事故後に拡張・強化された対策（アクシデントマネジメントも含む）の有効性についても検討を行う。さらに、想定を超えた断層変位に対してもリスク評価を行う。

断層変位に対する原子力安全の考え方を図3に示す<sup>1</sup>。これは、断層変位以外の自然現象に対する考え方と同様である。

ここで、断層変位に対する評価・検討においては、断層変位の性状を踏まえた考慮が重要となる。例えば、想定する断層変位の位置は、調査により施設直下の設置地盤の断層位置（弱面の位置）に設定することができる。このことは、断層変位により施設に発生するせん断力、曲げ力等の伝搬が施設内において空間的に限定されるので、これを事故シナリオの中に考慮することができる。つまり、多様性と分散配置により、共通要因故障の回避が可能となる。

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

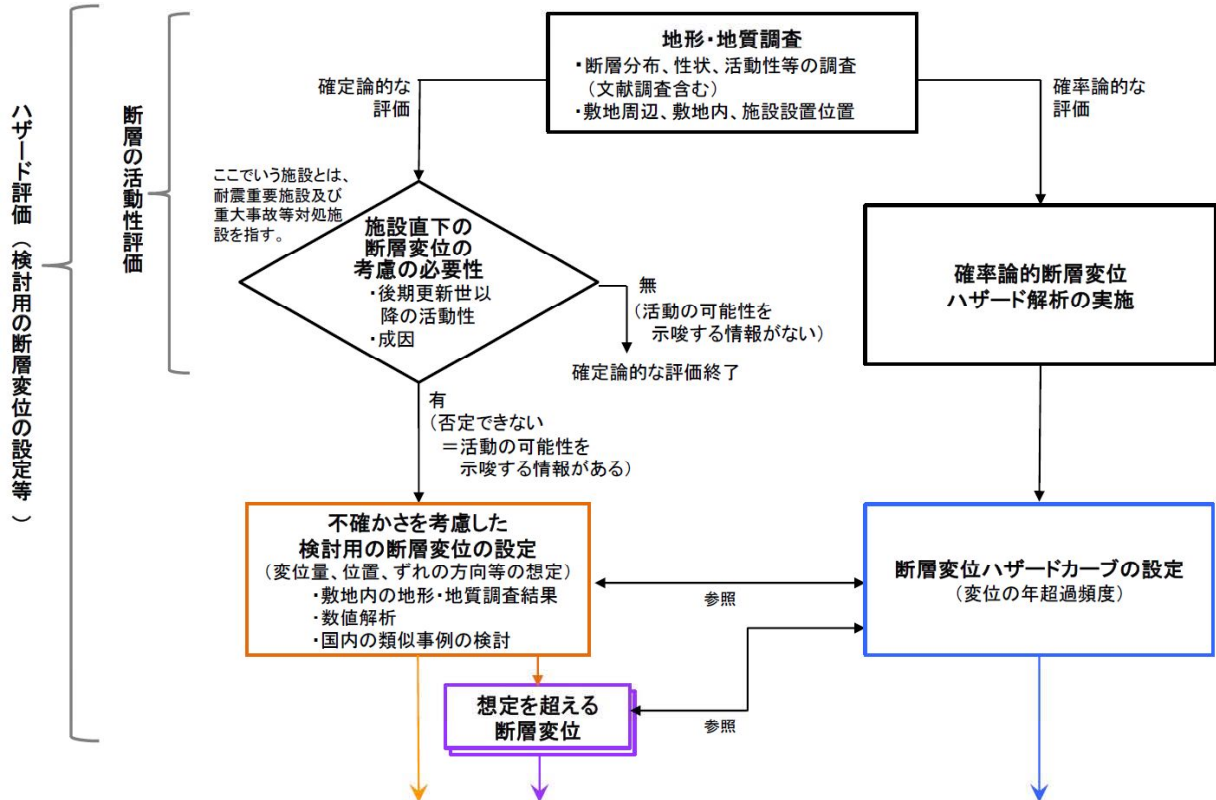
### I-3. 断層変位に対する全体評価手順

本調査専門委員会で検討を進めている断層変位に対する全体評価手順を図4に示す。



図3 断層変位に対する原子力安全の考え方

<sup>1</sup> 図3において「検討用の断層変位」と「想定を超える断層変位」の境界を斜線で表現しているのは、個別の原子力施設の評価の際には、「検討用の断層変位」の施設に対する影響の程度が、従来の設計・評価の想定範囲内の場合や拡張・強化された設計・評価の範囲内の場合など状況によって異なることが考えられるため、そのことを包括的・概念的に表現しようとしていることによる。



施設の 影響評価	評価手法	裕度評価	確率論的リスク評価 (PRA)
	評価への入力情報	変位量等	ハザードカーブ
	設備の評価 (建屋・構築物、土木構造物、機器・配管系)	実施	実施 (フラジリティカーブ※2)
	事故シナリオ・事故シーケンス評価	実施※1	実施
	アクシデントマネジメントの検討	可能	可能
	得られるリスク情報	設備の耐力維持・機能維持、炉心損傷までには余裕がある等	炉心損傷確率等

※1: 事故シナリオ・事故シーケンスを活用した評価をしないで、設備の評価だけでリスク情報を得ていく場合もある【影響度分析】。  
 ※2: フラジリティカーブを使わずに、安全側の条件を付した設備の状態を事故シーケンス評価に反映し、簡易な評価としてリスク情報を得ていく方法もある【簡易なPRA】。

図4 断層変位に対する全体評価手順

## II 断層変位のハザード評価

断層変位のハザード評価に関して、これまでに関連分野で得られている知見を最大限活用し、不確実性も考慮した適用可能な方法として取りまとめた。

### II-1. 検討対象とする断層変位について

検討対象とする断層変位は、震源断層の活動に伴って生じるものと、震源断層の活動以外を成因とするものに大別される。前者の断層変位は震源断層のずれの規模が大きい場合は、地表地震断層として地表に出現し、主要な地表の痕跡（変位・変形）は、活断層として認識される。地表地震断層には、震源断層の地表延長部と認識される「主断層」および「分岐断層」と、その周辺で地盤の応力場の変化等により副次的に形成される「副断層」がある。

活断層（主断層および分岐断層）は、構造運動に伴い繰り返し活動しており、国内の活断層について、その活動間隔を調査した結果によれば、平均活動間隔は平均的には数千年、短いものでは数百年、長いものでは数万年である。よって、最近の地質年代である後期更新世以降（約 12 万～13 万年前以降）に最低でも 1 回は活動していると考えられる。

一方、後者すなわち震源断層の活動以外を成因とする断層については様々なものがあるが、その成因が将来起こり得るものについては、検討対象としている。

本稿では前者を対象に述べる。

### II-2. 断層変位ハザードの評価手順

断層変位ハザードの評価手順の概要を図 5 に示す。まず、施設が立地する位置を含む敷地周辺の地形・地質・地盤調査を実施し、断層の分布や活動性等に関する評価を行う。

次に、断層変位ハザードの検討に進むことになるが、確定論的な検討に用いる断層変位量（以下「検討用の断層変位量」と、確率論的な検討で用いる断層変位ハザード曲線の双方を扱う。

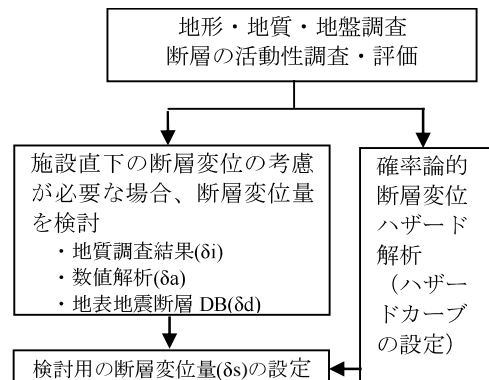


図 5 評価フロー

### II-3. 地形・地質・地盤調査

施設の設置地盤に存在する断層が施設に及ぼす影響について検討するため、地形・地質・地盤調査により断層の分布・性状並びに後期更新世以降の活動を評価する必要がある。

図 6 に断層調査の基本的な流れを示す。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、施設設置位置、敷地および敷地周辺の地質・地質構造を把握し、断層の分布、規模、性状、活動時期等を明らかにする。

#### II-3-1. 断層の活動性の調査・評価

断層の活動性評価にあたっては、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）の適用を基本とするが、後期更新世以降の地層が欠如するなど適用が困難な場合には、12 万～13 万年以前の岩脈・鉱脈等との接触関係（切断脈法）、接触変成との関係、断層破碎物質の性状等の観点から総合的に判断する。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、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、断層の連続性や変位・変形の分布や性状、応力場の観点を考慮して、調査結果が整合的であることを慎重に検討することが必要である。

### II-3-2. 断層変位量の調査・評価

後期更新世以降の活動を否定できない断層等については、断層変位地形の調査、断層露頭の観察、トレンチ調査、ボーリング調査を適宜組み合わせることで断層の活動年代を把握し、そのイベント年代に対応する変位基準から1回あたりの変位量を推定する。例えば、累積変位と活動回数から1回あたりの平均変位量を求めたり、各回のイベントに対する変位量が分かる場合にはばらつきも含めて評価する。

断層変位の痕跡は、時間経過に伴って侵食・堆積など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変位量を評価する上では、そのサンプルの代表性や変位分布の固有性などを検討しておくことも重要である。

### II-3-3. 断層変位量を評価するための地盤調査

後述する数値解析による設置地盤の変位・変形量を評価する際の地盤モデルには、地盤の構造や力学特性を適切に反映する必要があるため、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、原位置試験および室内試験を適切に選択して実施する。

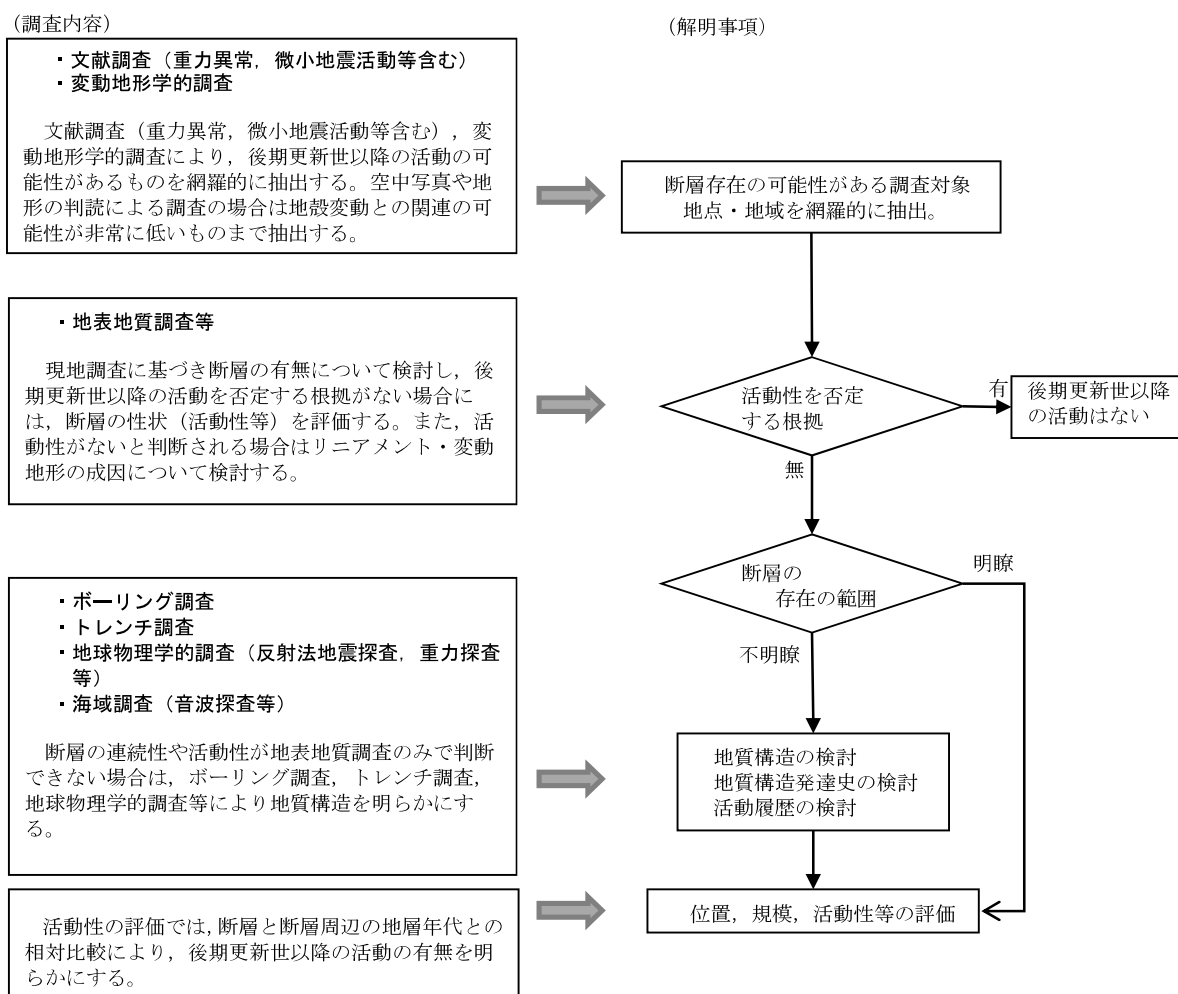


図6 断層調査の基本的流れ

## II-4. 断層変位ハザードの評価

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と判断された場合、当該断層の変位量を評価する。検討用の断層変位量は、地質調査結果、数値解析および地表地震断層データベースに基づいて設定するものであり、具体的な検討方法について、以下に順に述べる。

### II-4-1. 地質調査結果に基づく変位量 $\delta_i$ の検討

敷地におけるボーリング調査、トレンチ調査、試掘坑調査などの調査結果から得られた1回あ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、これに不確かさを適切に考慮して  $\delta_i$  を設定する。

具体的には、敷地における1回あ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そのまま  $\delta_i$  とするのではなく、敷地の地質調査結果から不確か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ベースに基づく不確かさを考慮した上で  $\delta_i$  を設定する。

### II-4-2. 数値解析に基づく変位量 $\delta_a$ の検討

数値解析による設置地盤の変位・変形量の評価にあたっては、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、計算方法等）が適切かどうかを確認する。その後、不確か性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

数値解析手法は地殻の半無限地盤モデルの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）および設置地盤の詳細モデルの有限要素法解析（以下「詳細 FEM モデル」という）を基本とする。

食い違いの弾性論により、評価対象となる断層変位に関連する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（図7のa）。

次に、評価対象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7のb）。有限要素法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適切に行う。このとき、構造物はモデル化しない。また、評価対象となる断層変位に関連する震源断層の延長部である主断層が構造物に近い場合、主断層が含まれるように解析領域を設定し、そのずれを考慮する。

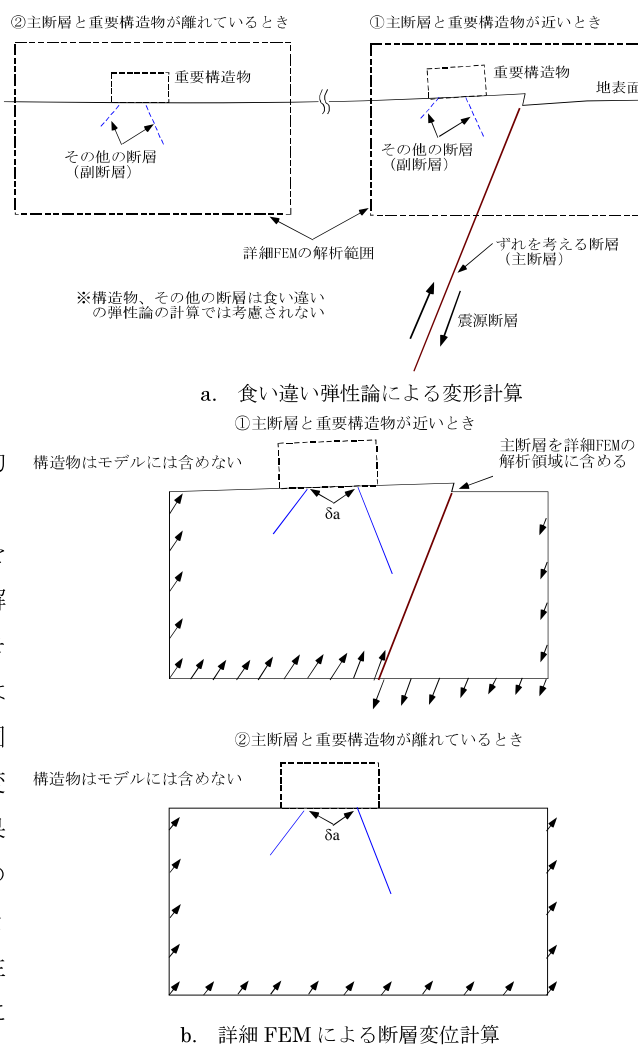


図7 数値解析による変位・変形量の評価

横ずれや斜めずれ断層の場合や、分岐断層や副断層が存在する場合には、必要に応じて詳細 FEM モデルを 3 次元とすることが望ましい。

食い違いの弾性論や静的 FEM 解析以外の手法として、様々な計算手法を利用した動力的シミュレーションを必要に応じて検討に用いる。また、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。

## (2)設置地盤における変位量の検討

設置地盤における変位量  $\delta a$  は構造物と地盤との境界で評価して設定する。検討用の変位量の評価に当たっては不確かさを適切に考慮する必要があるため、詳細 FEM モデルの断層や岩盤の構造や力学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-4-3. 地表地震断層データベースに基づく変位量 $\delta d$ の検討

既に構築された主断層および副断層の変位量に関するデータベースや、独自に構築または追加したデータベースに基づき、評価対象断層とデータベースにおける断層を比較し、断層のタイプ・規模・活動履歴、周辺の地形・地質・地盤等の類似性から、 $\delta d$  を設定する。

$\delta d$  の設定にあたっては、断層長さ（または地震規模）と断層変位量との関係式や、副断層についての原子力安全推進協会(2013)のデータベース等が活用できる。 $\delta d$  の設定にあたっては、地表地震断層データベースを踏まえて不確かさを適切に考慮する。

### II-4-4. 検討用の断層変位量 $\delta s$ の設定

地質調査結果に基づく  $\delta i$ 、数値解析に基づく  $\delta a$ 、地表地震断層データベースに基づく  $\delta d$  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  $\delta s$  を設定する。その際、評価対象断層の 1 回あたりの変位量のデータがあるか、または推定可能かどうか、その変位の原因となった地震に関するデータがあるかどうか踏まえて十分に吟味した上で  $\delta s$  を設定する。 $\delta s$  の設定にあたっては、確率論的断層変位ハザード解析 (PFDHA) の結果を参照することができる。参照にあたっては、 $\delta s$  の年超過頻度が地震動や津波の確率論的ハザード評価において適用されている目安値と同程度あるいはそれ以下であることを確認することなどが考えられる。

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、施設に与えるリスクを考慮して選定した断層に  $\delta s$  を与えることが必要になる。選定にあたっては、活動の可能性、断層のずれの方向、断層破碎部の幅、硬さおよび固結の度合い、断層条線等から得た断層運動像、断層の空間的な広がり等を考慮することが重要であり、必要に応じて複数の断層を選定する。

表 1 検討用の断層変位量  $\delta s$  の設定方法例

項目	地質調査結果に基づく $\delta i$	数値解析結果に基づく $\delta a$	地表地震断層データベースに基づく $\delta d$
平均値	敷地内の 1 回あたりの変位量	数値解析（この場合、再現計算は平均値という位置づけ）	データベースから求めた平均値
不確かさ	方法 1：敷地内のデータから求めたばらつき（例えば、標準偏差） 方法 2：地表地震断層データベースから求めたばらつき（例えば、標準偏差）	数値解析によるパラメータスタディ	データベースから求めたばらつき（例えば、標準偏差）
設定値	敷地内の 1 回あたりの変位量 + ばらつき（方法 1 または 2）	パラメータスタディ結果	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
$\delta s$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\delta i</math>、<math>\delta a</math> および <math>\delta d</math> を総合的に勘案して、構造物と地盤の境界に与える変位量を設定</li> <li>• 1 回あたりの変位量のデータがあるか、または推定可能かどうか、変位の原因となった地震に関するデータがあるかどうかの判断結果を踏まえ、<math>\delta i</math>、<math>\delta a</math> および <math>\delta d</math> を十分に吟味した上で <math>\delta s</math> を設定</li> <li>• <math>\delta s</math> の設定にあたっては、PFDHA の結果を参照する</li> </ul>		

#### II-4-5. 確率論的断層変位ハザード解析

前節までに示した確定論的な評価に用いる  $\delta_s$  の評価と並行して、 $\delta_s$  設定時の参照用および確率論的な評価に用いるため、PFDHA を実施する。PFDHA の実施に際しては、Youngs et al. (2003)、Petersen et al. (2011)、高尾ら(2013、2014) などに示された方法および評価式（経験式）を用い、考えられる認識論的な不確かさを可能な限りロジックツリーに反映して評価地点における 1 年あたりの変位一超過頻度関係を算出する。実施例を図 8 に示す。

PFDHA で得られる変位量は、 $\delta_s$  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。施設の影響評価にあたっては、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。

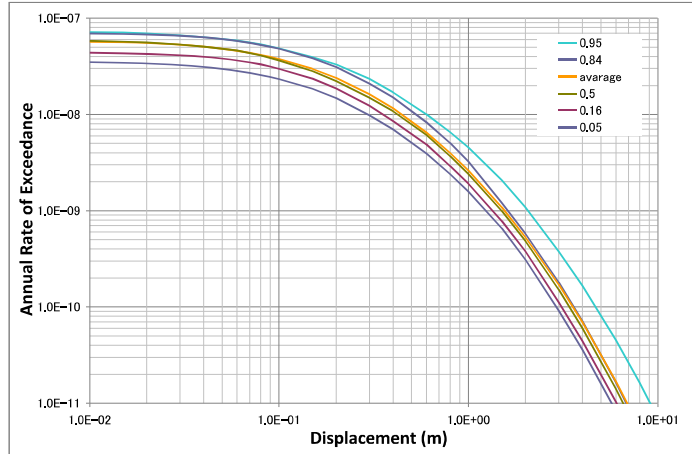


図 8 PFDHA の実施例



### III 断層変位の施設への影響評価

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

#### III-1. 施設の影響評価手法

##### III-1-1. 影響評価手法の選定・位置づけ

日本原子力学会標準委員会において、「外部ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準：2014」（以下「外部ハザード選定標準」という）が制定されている。外部ハザード選定標準では、すべての外部ハザードに対して確率論的リスク評価（PRA）等の詳細なリスク評価が必要ではなく、リスク評価方法としては、定性的な評価、ハザード分析（発生頻度又は影響）、裕度評価、簡易な PRA など、様々な方法が考えられるとし、具体的な定量的リスク評価方法を提示している。

本調査専門委員会として、外部ハザード選定標準の考え方と定量的リスク評価方法を参考に、図 4 に示す断層変位に対する施設影響評価手法（裕度評価、PRA）を位置づけた。

##### III-1-2. 評価手法の適用性

断層変位に対する施設影響評価手法を適用する際には、それぞれの手法の特徴、適用限界等を踏まえることが必要であり、また、活用できる技術情報が限定される場合は、評価が安全側となるような工学的な条件を適切に付して評価結果（リスク分析結果）を得ていくことになる。

<裕度評価>

- ・裕度評価は、各設備に対して機能維持の観点から実力としての評価を行い、プラントシステム全体としての状態を把握していく手法である。したがって、一部の設備が機能を維持できていない状態も含めて評価することができ、例えば断層変位の発生位置が局所的であるという特徴を踏まえれば、安全上重要な設備の分散配置の効果を把握することもできる。

評価のための技術情報が不足する場合は、評価が安全側となるような工学的な条件を適切に付し、プラントシステム全体の状態を事故シーケンスとして評価することにより、例えば炉心損傷までの余裕などのリスク情報を得ることができる。

事故シーケンスとして評価できるので、必要に応じて事故に備えて用意している可搬型設備などの活用によるアクシデントマネジメントの有効性も含めて評価することができる。

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

評価に用いる変位量を漸増させることによりプラントの弱点を把握することができ、したがって、想定を超える断層変位に対する評価にも適している。

- ・図 4 の注釈※1 で示すように、ここでは裕度評価の中に外部ハザード選定標準における影響度分析も含めて整理している。

影響度分析は、断層変位の変位量が小さい場合において、確立された構造強度の評価体系の中で、施設設置時における設計情報の範囲内で評価ができる。

この場合は、事故シナリオ・事故シーケンス評価を活用するまでもなく、設備の評価までで安全機能が維持できることなどのリスク情報を得ていく。

<確率論的リスク評価（PRA）>

- ・PRA は、確率論的なハザード評価を入力情報として炉心損傷頻度（CDF）などのリスク情報を評価でき



る手法である。

断層変位に対する PRA は、断層変位に対する施設のフラジリティ評価等に係るデータ拡充の段階にあるが、簡易な PRA として、安全側の条件を付して事故シーケンスを整理することにより、感度解析としてのリスク情報を得ていくこともできる（図 4 中の注釈※2）。これにより、例えば他の内部事象や外部事象による CDF と比較することにより、リスクの程度を把握することができる。

断層変位に関する PRA の適用の考え方と課題については、原子力学会標準「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015」にとりまとめられている。

### III-2. 裕度評価手法の適用概念

#### III-2-1. 建屋直下の断層変位への適用概念

##### (1) 評価手順

原子炉建屋等の直下に断層変位を仮定した場合の裕度評価のフローを表 2 に示す。ここでは PWR の例としている。

ア. 断層変位による影響を直接受けるのは岩盤に支持されている建屋であり、断層変位を強制変位として建屋基礎版下端に入力し、3次元の非線形 FEM 解析によって、断層変位による建屋の損傷状態を評価する（図 9）。

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。

建屋側の簡略評価例を表 3 に示す。

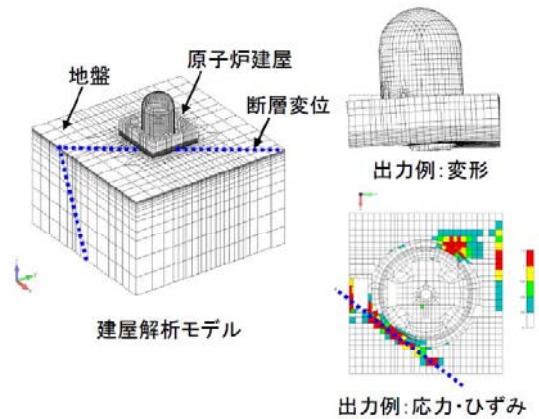


図 9 建屋解析モデル、出力例

表 2 断層変位に対する裕度評価のフロー

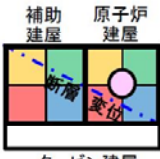
断層変位の位置	建物・構築物の損傷状態	機器・配管系で考慮する変位影響	機器・配管系で防止する損傷形態	リスク評価
建屋直下の場合 補助建屋 原子炉建屋  タービン建屋	有意な損傷無し (○)  基礎・壁・床の 局部損傷 (△, ×)	建屋の傾斜 建屋間の相対変位  建屋支持機能の低下 建屋の傾斜 建屋の変形 建屋間の相対変位	動的機器の機能損傷 渡り配管等の構造損傷  機器定着部の構造損傷 動的機器の機能損傷 大型機器の構造損傷 渡り配管等の構造損傷	プラントシステム 全体としての 裕度に基づく リスク評価

表3 建屋の評価結果例

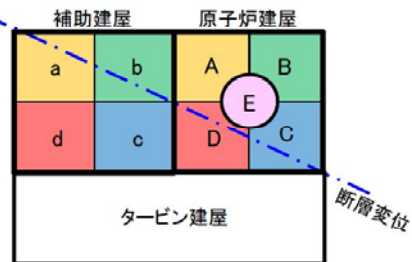
断層変位※1 (縦ずれ)	評価エリア	原子炉建屋※2					補助建屋※2			
		A	B	C	D	E	a	b	c	d
10cm	地下1階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
	地下2階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
20cm	地下1階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
	地下2階	○	○	△	△	○	△	△	○	○
30cm	地下1階	○	△	×	×	○	×	×	○	○
	地下2階	○	△	×	×	○	×	×	○	○
50cm	地下1階	△	△	×	×	△	×	×	△	△
	地下2階	△	△	×	×	△	×	×	△	△

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

【凡例】 ○:有意な損傷無し

△:基礎・壁・床に局部損傷があるが、  
機器の支持性能が可能と判断できる状態

×:基礎・壁・床の損傷によって  
機器の支持性能が困難な状態



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

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

建屋側からのアウトプットを引き継いだ機器・配管系の簡略評価例を図10及び表4に示す。

ウ. 機器・配管系の評価を受けて、事故シーケンスを活用した評価を行う。

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

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

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

事故シーケンス評価 (イベントツリー) の例を図11に示す。この例においては、以下のように記述することができる。

- ・主給水機能が喪失する場合、原子炉建屋内の補助給水系により安全機能が維持される。
- ・3台の補助給水ポンプがすべて機能喪失する場合は、補助建屋にある高圧注入ポンプを用いたフィードアンドブリードを活用する。
- ・2台の高圧注水ポンプがすべて機能喪失する場合は、代替手段として有効な可搬ポンプ等を活用する。

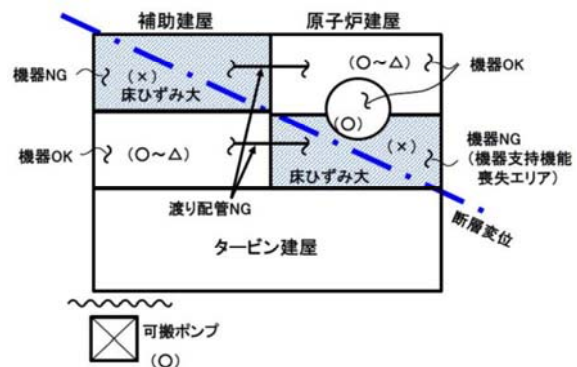


図10 エリア毎の機器・配管系への影響例

表 4 機器・配管系の評価結果例

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

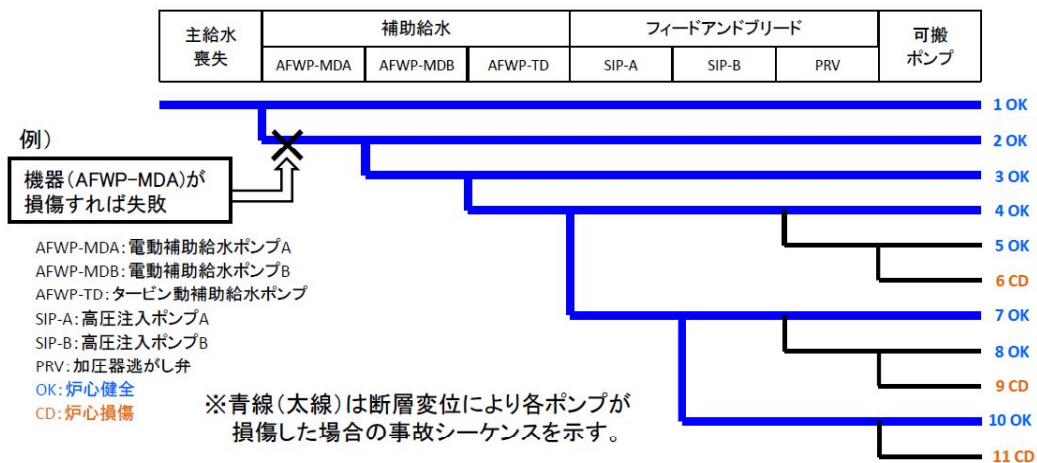
※断層変位量は、裕度評価のイメージを表現するために任意に設定したもの。

【凡例】 ○：機器の機能維持  
×：機器の機能喪失

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

図 11 断層変位に対するイベントツリーの例



## (2) 評価結果の整理と考察

裕度評価手法の適用により得られた結果を整理すると、例えば表 5 のように示すことができ、変位量に応じて以下のように考察することができる。

- ・断層変位を想定した裕度評価の結果、深層防護の考え方に従った多様な設備の分散配置の効果等により、炉心損傷には至らない（炉心損傷に対して余裕がある）。
- ・代替手段（代替の注水ポンプ、アクシデントマネジメント）はリスク低減に有効である。
- ・評価結果は、リスクの更なる低減のための追加の対応策を講じる意思決定に活用できる。

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

表 5 断層変位に対する裕度評価結果例

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

※1:断層変位量は、裕度評価のイメージを表現するために任意に設定したもの。  
 ※2:代替の注水ポンプや、可搬ポンプ等のアクシデントマネジメント

(注)本表の例は、前出の図表にある評価結果例と対応しているものではない。

響の範囲や損傷シナリオを適切に考慮して評価していくことになる。

### III-2-2. 非常用海水系直下の断層変位への適用概念

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

(講演では、BWRの原子炉建屋直下に断層変位を想定したケースと、上記の非常用海水系直下に断層変位を想定したケースについて報告する。)

### III-3. まとめ

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

この手法の適用により、断層変位に対する原子力安全のための評価をすることができ、想定を超える事象も含めて、設備や安全機能の状態(維持あるいは喪失)、炉心損傷に対する裕度などをリスク情報として得て、得られたリスク情報を活用して、代替手段の有効性の検証、リスク低減のための更なる対応策のための意思決定をすることができる。また、I-2-2.で記したように、大規模損壊に対して用意される対応策も有効に活用できる。

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

そして、それを促すための取組みが、引き続き求められている。

## IV 全体まとめ

本稿では、断層変位という自然現象についても、他の自然現象と同様に外部ハザードの一つと捉えて、想定を超えた領域への対処も含めて、深層防護の概念の適用と工学的なリスク評価の活用により、多様なシナリオを考慮した原子力安全のための評価が重要であることを提示した。

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

本調査専門委員会はそれを実践する学術的な活動として、断層変位に対する影響評価手法を体系的にとりまとめていく。

以上

日本原子力学会2016年秋の年会@久留米シティプラザ

総合講演・報告4

「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会活動報告

断層変位に対する工学的なリスク評価

(1)断層変位に対する原子力安全の考え方

**2016年9月8日13:00～14:30**



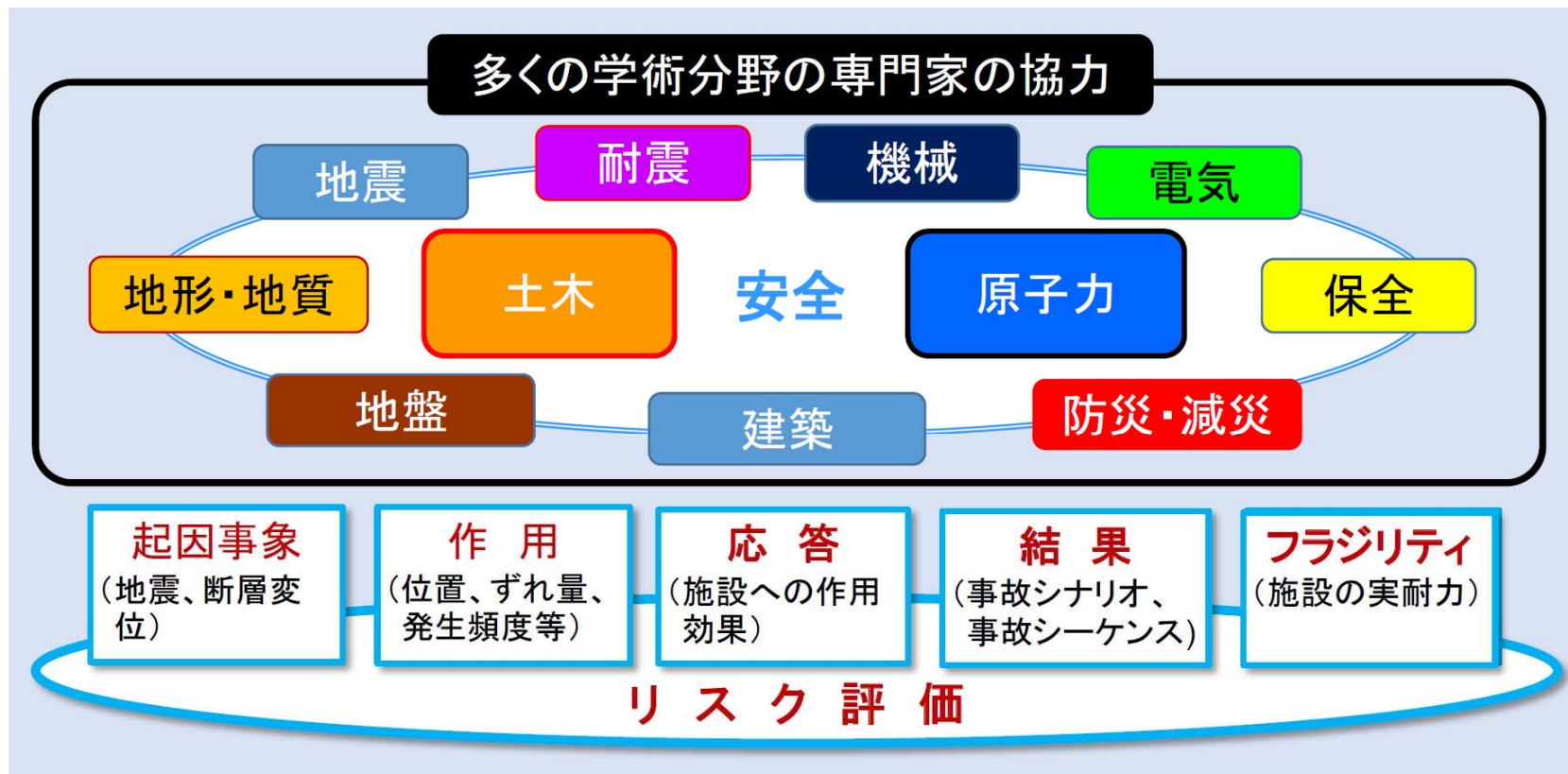
Atomic Energy Society of Japan

調査専門委員会 主査 奈良林 直(北大)



# 調査専門委員会 ①活動目的

- 活断層の活動等に伴って生じる断層変位も外部ハザードの一つと捉え、施設に与える影響に関する工学的な評価手法について、既往の研究成果も活用しながら、関連する多分野の専門家の協働により体系的にとりまとめる（不確実さも考慮したトータルのリスク評価、リスク低減のためのアクシデントマネジメントの方策等）。これにより、原子力施設の安全性向上に資していく。
- 成果は報告書にまとめて国内外に発信するとともに、標準化の活動等に供していく。



# 調査専門委員会 ②活動状況

■設置期間 2014年10月～2017年3月の2年半(半年間延長)

■活動実績 (2016年8月末時点)

調査専門委員会 11回、傘下の原子力分科会 7回

そのほか、特別講演会、原子力学会年会・大会での企画セッション等

■検討状況は、原子力学会ホームページで適宜公開

[http://www.aesj.net/sp\\_committee/com\\_dansou](http://www.aesj.net/sp_committee/com_dansou)

■報告書としてのとりまとめ完了後、シンポジウムを開催して報告予定。  
 本秋の大会で、成果の主要部分について報告。

	2014(平成26)年			2015(平成27)年												2016(平成28)年												
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
▼委員会設置																												
調査専門委員会		1回		2回			3回		4回			5回		6回		7回		8回		9回	10回	11回						
原子力分科会		1回		2回								3回		4回		5回		6回		7回								
報告会等							▼AESJ春の年会 企画セッション											▼AESJ春の年会 企画セッション									▼AESJ秋の大会 企画セッション	
						▼特別講演会				▼土木学会 断層変位評価シンポ											▼土木学会 公開講演会					▼土木学会全国大会 断層変位討論会		
		★長野県北部地震 (神城断層地震)																			★熊本地震							

# 調査専門委員会 ③検討成果(報告書の骨格)

<総論> →報告(1)奈良林[全体概要、基本的考え方]

## ■問題認識、検討の背景

- ・リスクに向き合い、必要なら対策を取り、リスクを下げることの重要性
- ・様々なシナリオを考慮することの必要性、想定を超えた領域への対処
- ・工学の責任、理学と工学の知の統合と協調
- ・社会への説明責任 等

## ■断層変位に対する原子力安全の考え方を提示

- ・深層防護の概念の適用と、リスク評価の活用必要性  
(アクシデントマネジメントも考慮した評価)

## ■断層変位に対する全体評価手順の構築

<各論>

## ■断層変位という自然現象の理解

## ■断層変位のハザード評価手法(確定論、確率論) →報告(2)谷委員

## ■断層変位の施設への影響評価手法(確定論、確率論)

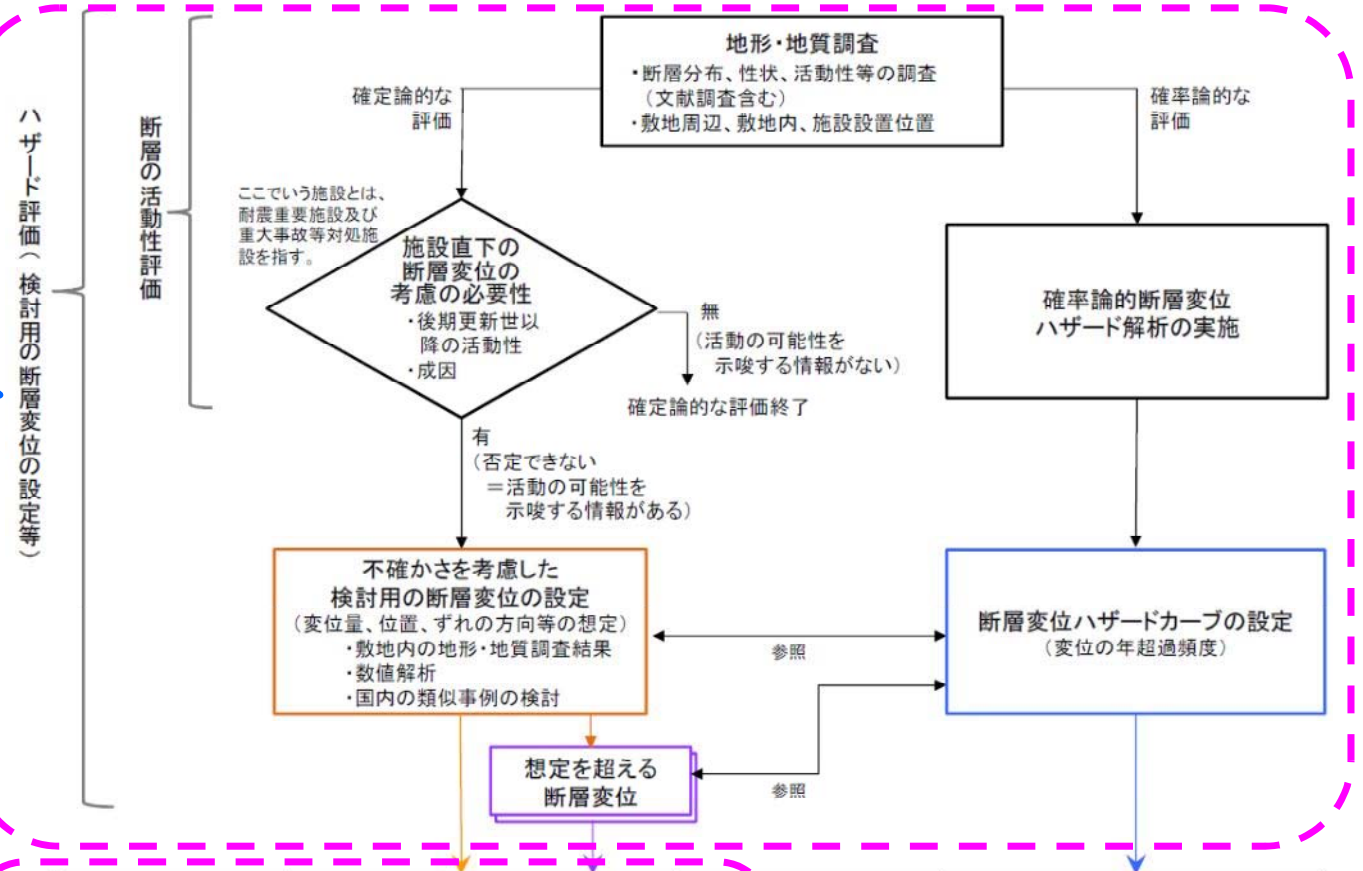
- ・建物・構築物、土木構造物、機器・配管系、事故シナリオとリスク評価
- ・裕度評価手法の適用例 →報告(3)岡本委員



# 断層変位に対する全体評価手順

報告(2) 谷委員  
断層変位の  
ハザード評価

報告(3) 岡本委員  
断層変位の施設へ  
の影響評価  
(裕度評価手法の  
適用例)

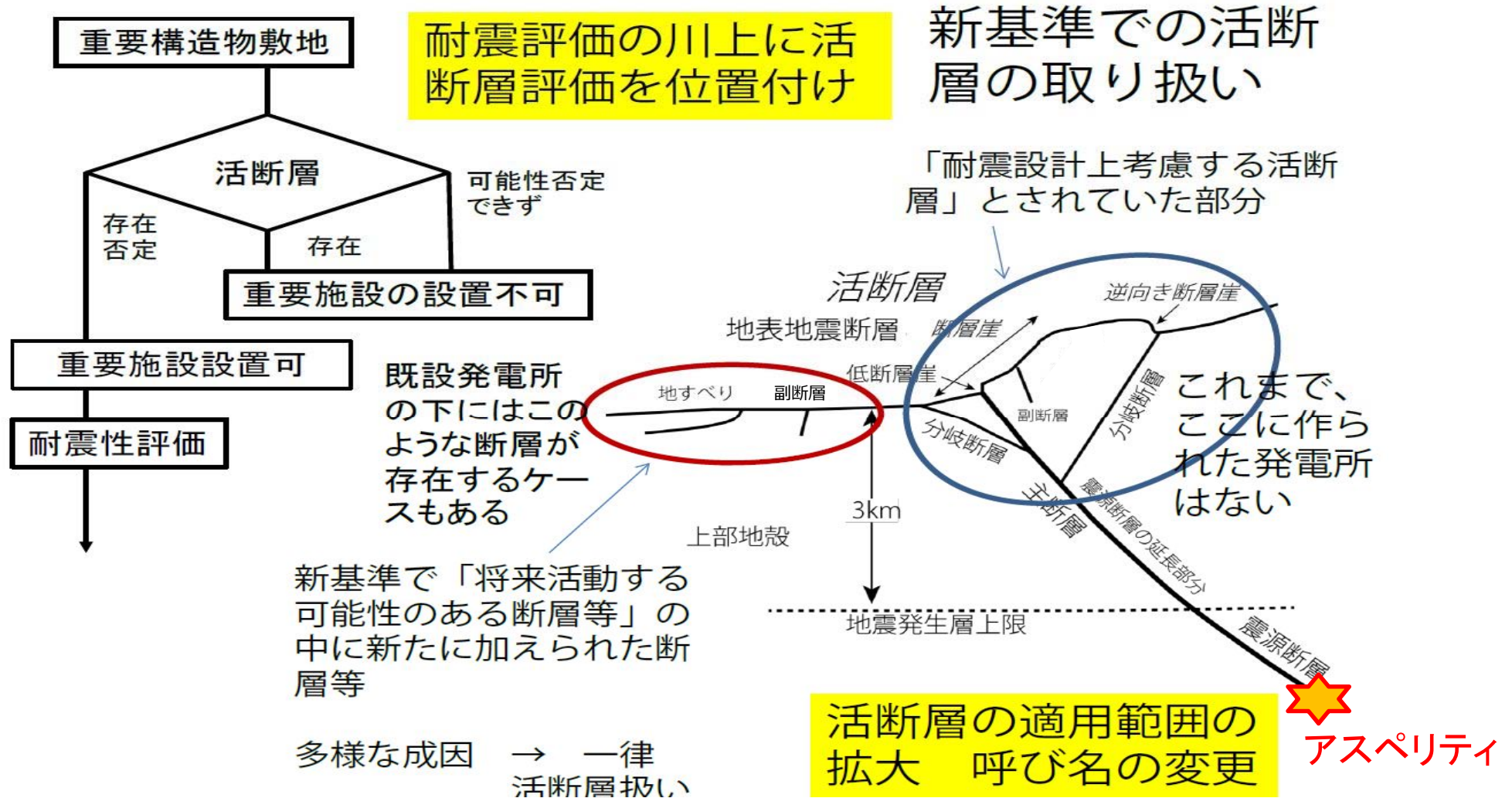


評価手法	施設の影響評価		確率論的リスク評価(PRA)
	裕度評価		
評価への入力情報	変位量等		ハザードカーブ
設備の評価 (建屋・構築物、土木構造物、機器・配管系)	実施		実施 (フラジリティカーブ※2)
事故シナリオ・事故シーケンス評価	実施※1		実施
アクシデントマネジメントの検討	可能		可能
得られるリスク情報	設備の耐力維持・機能維持、炉心損傷までには余裕がある等		炉心損傷確率等

※1: 事故シナリオ・事故シーケンスを活用した評価をしないで、設備の評価だけでリスク情報を得ていく場合もある【影響度分析】。

※2: フラジリティカーブを使わずに、安全側の条件を付した設備の状態を事故シーケンス評価に反映し、簡易な評価としてリスク情報を得ていく方法もある【簡易なPRA】。

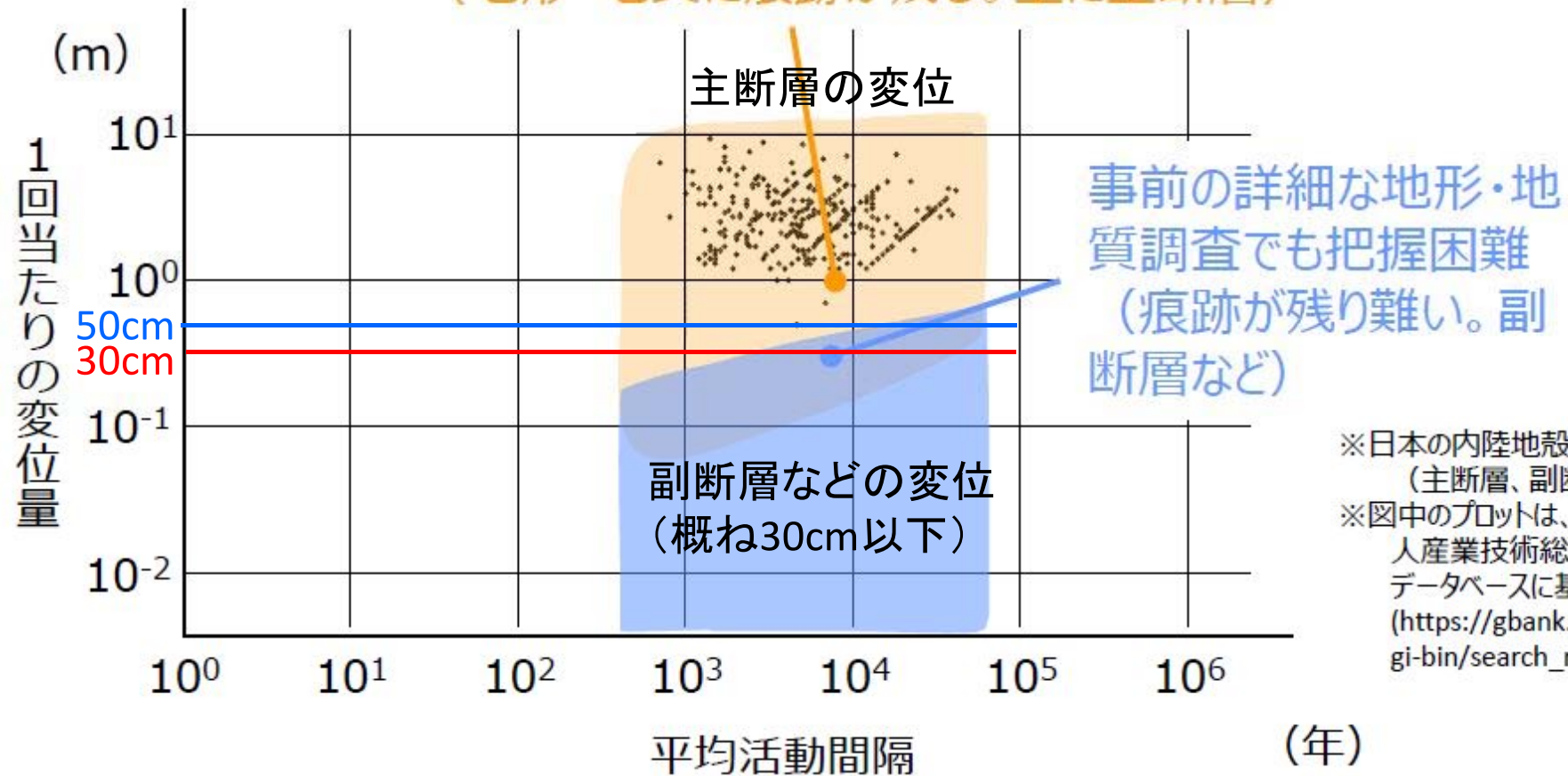
# 新基準での取り扱い



断層の活動性の有無のみの判断で止まるのではなく、断層変位に対するリスクを評価・低減していくことが重要

# 評価対象となり得る断層変位

事前の詳細な地形・地質調査で把握可能  
(地形・地質に痕跡が残る。主に主断層)

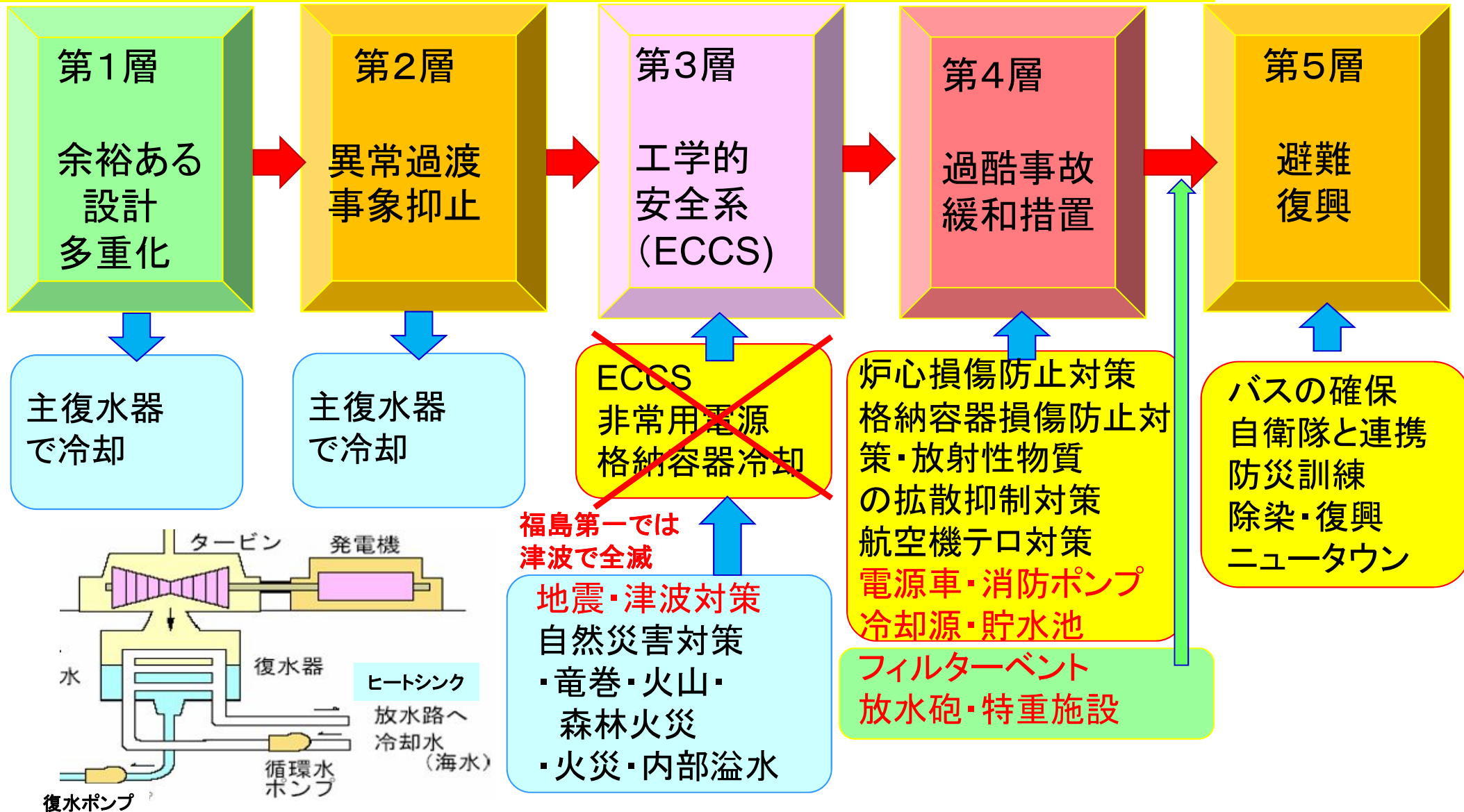


地形・地質分野の知見を最大限活かす姿勢が重要。  
一方、専門家でも判断が分かれる場合があり、また、数十cm以下の  
変位は痕跡が残り難い場合がある。



# 深層防護 (Defense in Depth)

## 第3層の断層変位に対する耐性向上、第4層の資機材の活用



# 新規制基準による規制強化

シビアアクシデント(過酷事故)を防止するため基準(第3層)を強化すると共に、シビアアクシデント)の緩和対策や航空機テロへの対処の基準(第4層)を新設

## <従来の規制基準>

断層変位も自然災害の1つとして考え、必要に応じて対策をとる。(事業者の自主的取り組み)

シビアアクシデントを防止するための基準(いわゆる設計基準)  
(単一の機器の故障を想定しても炉心損傷に至らないことを確認)

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

第4層

第3層

## <新規制基準>

テロ・過酷事故対策	意図的な航空機衝突への対応
	放射性物質の拡散抑制対策
	格納容器破損防止対策
	炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)
安全上重要な施設への対策強化	内部溢水に対する考慮(新設)
	自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)
	火災に対する考慮
	電源の信頼性
	その他の設備の性能
	耐震・耐津波性能

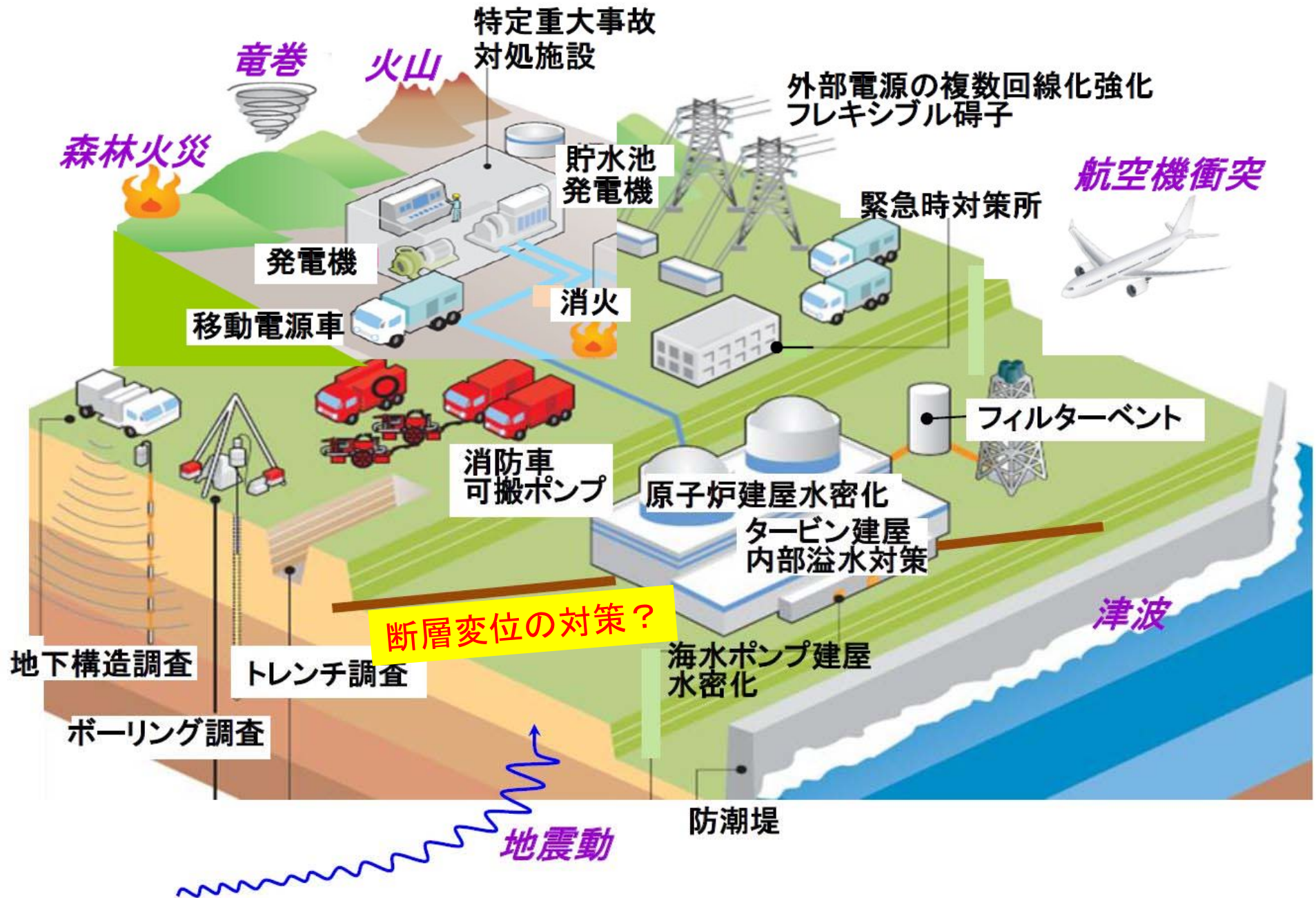
(テロ対策) (シビアアクシデント対策)  
新設 新設

強化又は新設

断層変位の対策?



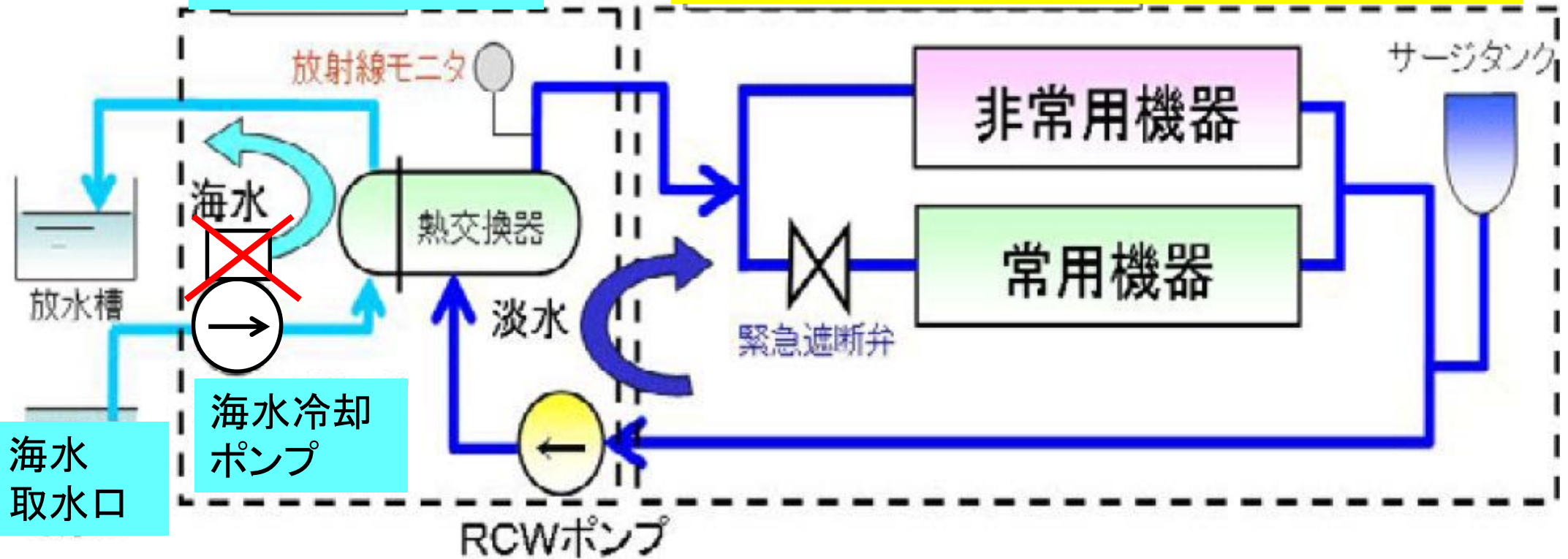
# 新規制基準への対応策の概要



# 補機冷却系の重要性（共倒れ）

海水冷却系

タービン建屋・原子炉建屋



非常用機器

RHR熱交換器、RHRポンプ、非常用DG、燃料プール冷却系ポンプなど

常用補器

CRDポンプ、再循環ポンプ、タービン補機など

# 断層変位大による影響予想

断層変位が原子炉建屋や安全上重要な施設に与える影響

(1) 原子炉建屋の真下の断層が変位した場合

- ・格納容器の塑性変形や閉じ込め機能の喪失△
- ・高圧1次系配管破断→LOCA(冷却材喪失事故)△
- ・ヒートシンク系配管の損傷→格納容器や炉心の除熱不能△

(2) 原子炉建屋とタービン建屋間の相対変位が生じた場合

- ・主蒸気管の損傷(BWRはMSIV閉、PWRはSG2次系冷却材喪失)  
→隔離または細管の隔壁により、影響は限定的○

(3) タービン建屋の下の断層が変位した場合

- ・給復水系の損傷による給水喪失→ECCSが作動するので○
- ・復水器や空気抽出器、海水冷却系循環の機能喪失△  
→タービン止弁閉、原子炉側はホットスタンバイ、RHRで冷却

(4) タービン建屋～海水循環系配管・海水熱交換器建屋の間

- ・補機冷却系の機能喪失△

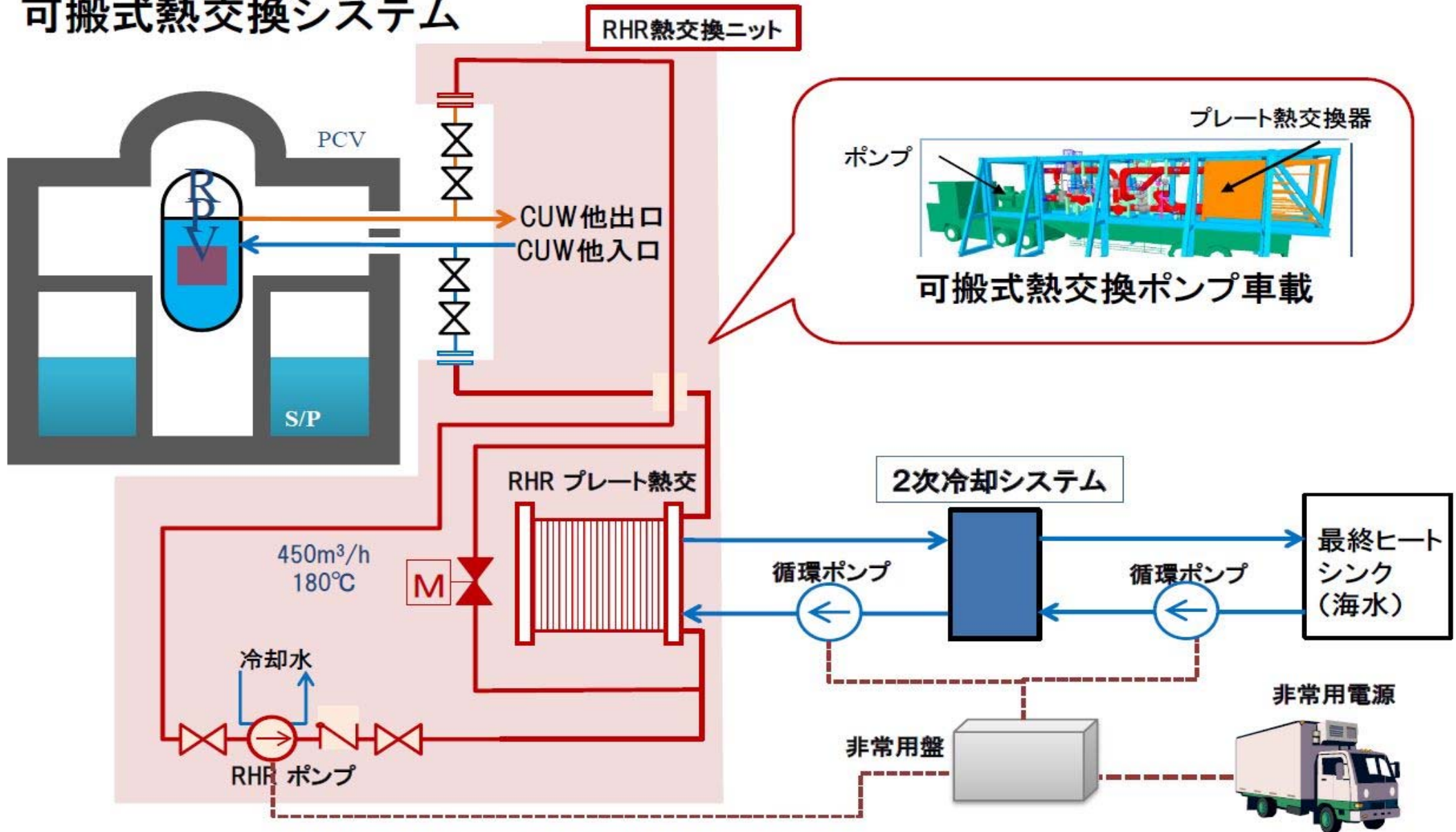
(5) 受電設備、スイッチヤードの断層変位

- ・外部電源喪失→非常用DGの自動起動で○



# 移動式熱交換器車による冷却源回復

## 可搬式熱交換システム



# アクシデントマネジメントによるリスク低減

断層変位が原子炉建屋や安全上重要な施設に与える影響

(1) 原子炉建屋の真下の断層が変位した場合

- ・格納容器の塑性変形や閉じ込め機能の喪失⇒燃料を冷やす○
- ・高圧1次系配管破断→LOCA(冷却材喪失事故) ⇒燃料を冷やす○
- ・ヒートシンク系配管の損傷→格納容器や炉心の除熱不能  
⇒移動冷却車○

(2) 原子炉建屋とタービン建屋間の相対変位が生じた場合

- ・主蒸気管の損傷(BWRはMSIV閉、PWRはSG2次系冷却材喪失)  
→隔離または細管の隔壁があるので、影響は限定的○

(3) タービン建屋の下の断層が変位した場合

- ・給復水系の損傷による給水喪失→ECCS作動するので○
- ・復水器や空気抽出器、海水冷却系循環の機能喪失⇒移動冷却車○  
→タービン止弁閉、原子炉側はホットスタンバイ、RHRで冷却

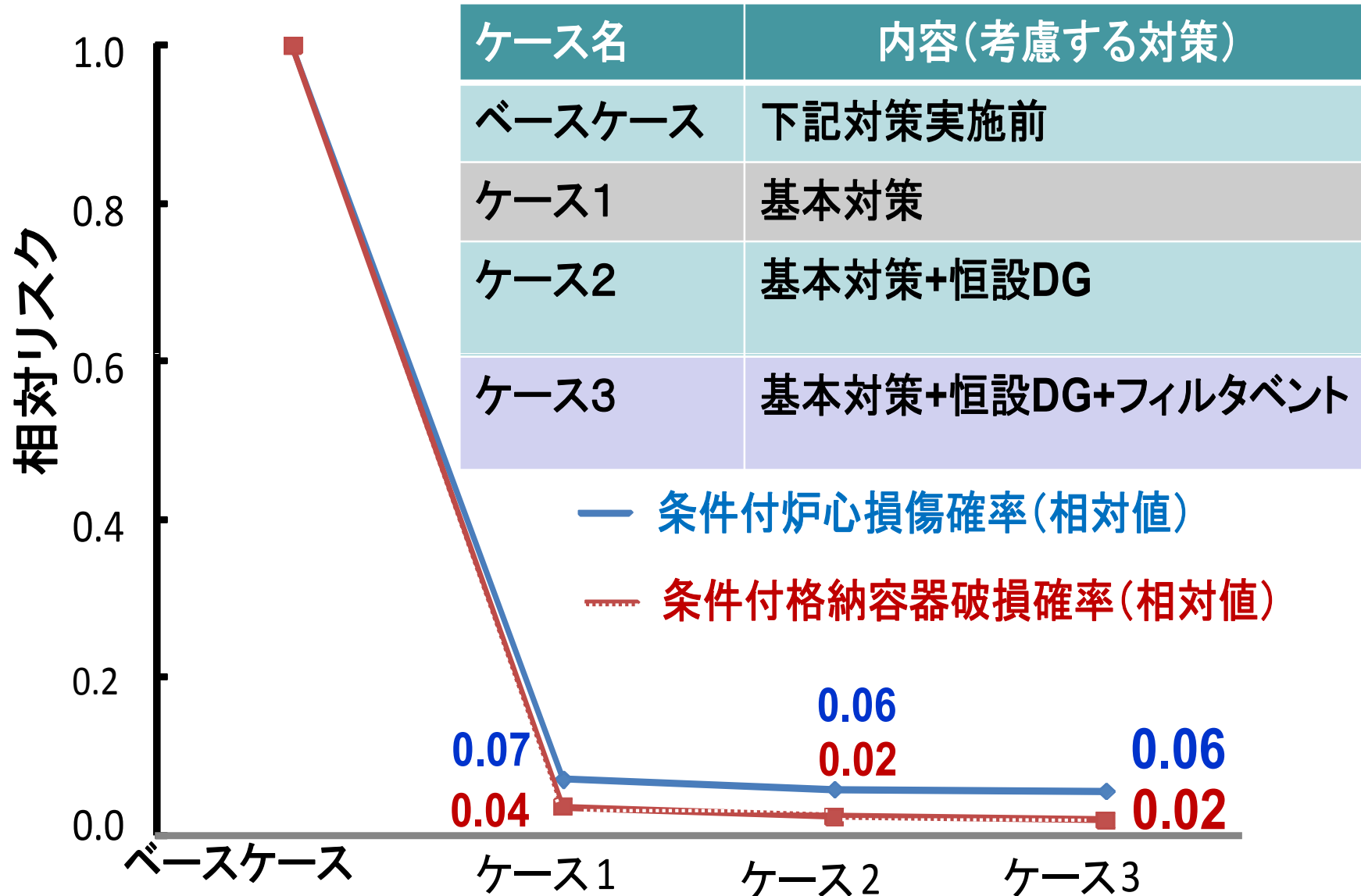
(4) タービン建屋～海水循環系配管・海水熱交換器建屋の間

- ・補機冷却系の機能喪失⇒移動冷却車○

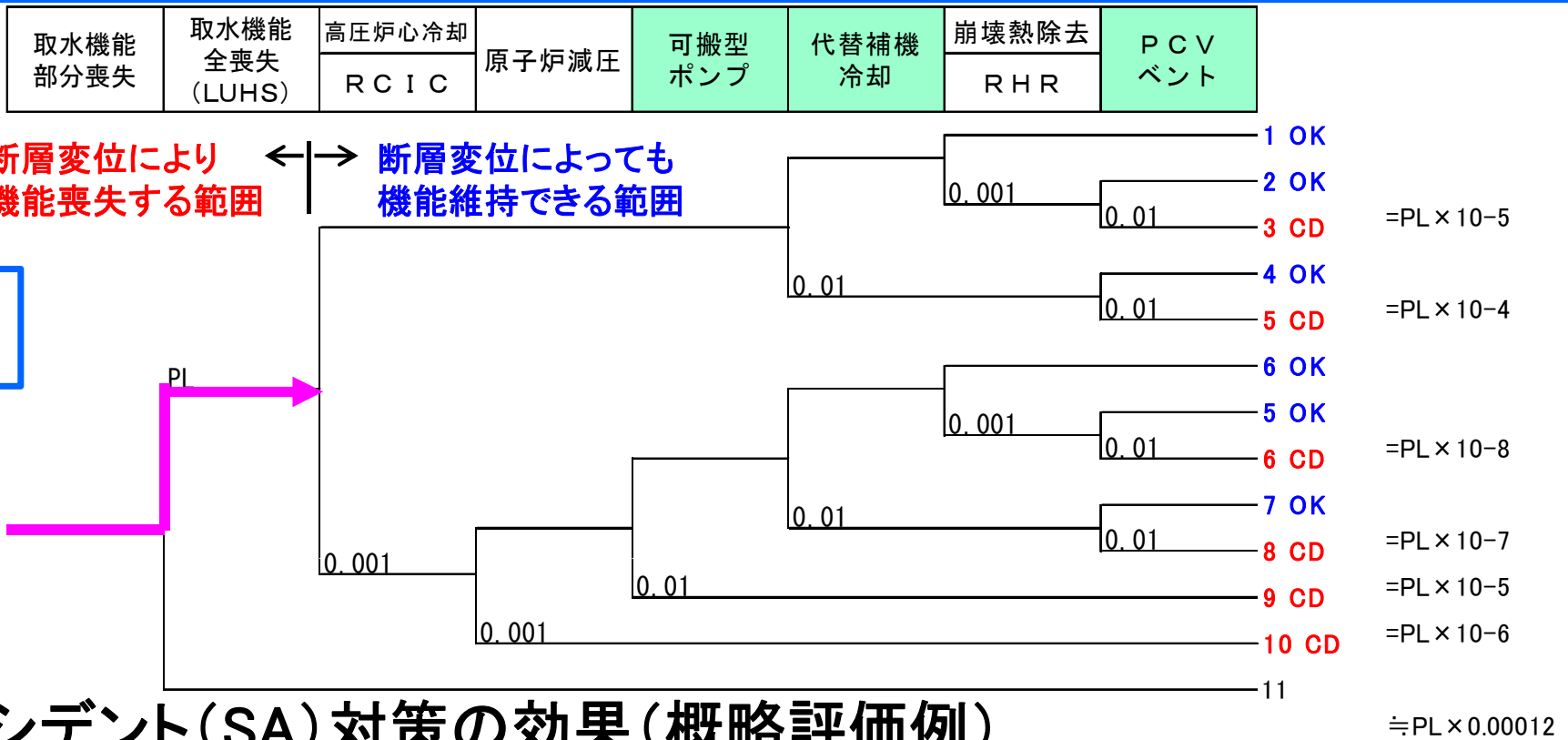
(5) 受電設備、スイッチヤードの断層変位

- ・外部電源喪失→非常用DGの自動起動で ○

# リスク低減効果の評価例(1)



# リスク低減効果の評価例(2)



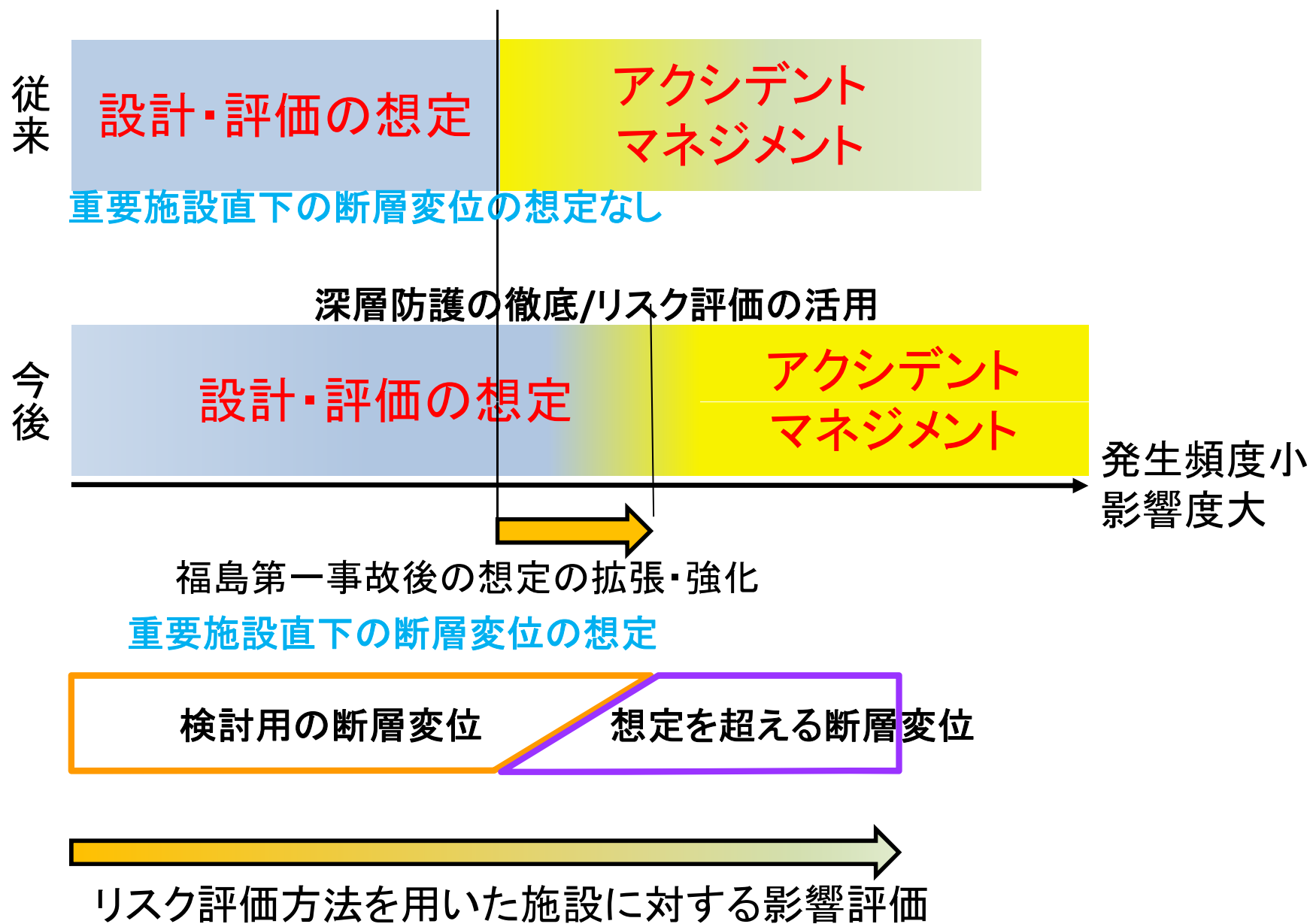
## シビアアクシデント(SA)対策の効果(概略評価例)

- 海水取水機能の全喪失(LUHS)を引き起こす断層変位が発生した場合(発生頻度:PL)、SA対策がなければ、炉心損傷頻度はPLとなる。
- 一方、断層変位の同時影響を避けるよう配慮したSA対策(可搬型ポンプ、代替補機冷却、PCVベント)を整備した場合のLUHS時の炉心損傷頻度は、SA対策を実施しない場合と比べて、**リスクは約1万分の1に低減**する。

【断層変位以外の原因による非信頼度】

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

# まとめ：断層変位 対 原子力安全 考 方(1)



# まとめ：断層変位 対 原子力安全 考 方(2)

## 新基準での取扱い

- 「耐震重要施設は、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない」
- 「その断層等の活動によって安全機能に重大な影響を与えるおそれがあるため…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」



断層の活動性の有無のみの判断  
“リスク・ゼロ”の要求だけで、技術的な知見と対策を否定



- ・福島事故の教訓の反映 → “リスクを評価し、必要に応じて対策を取り、リスクを下げるのが重要であった”
- ・不確実さへの対処 → “深層防護の適用” “SA対策によるリスク低減”



これまでに得られている科学的・技術的な知見を活用し(理学、工学)、断層変位に対するプラントシステムのリスクを評価した上で、リスク評価結果(リスク情報)に基づく意思決定を促す原子力安全のアプローチが重要。

日本原子力学会2016秋の大会@久留米シティプラザ

総合講演・報告4

「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会活動報告

断層変位に対する工学的なリスク評価

(2) 断層変位のハザード評価

2016年9月8日 13:00～



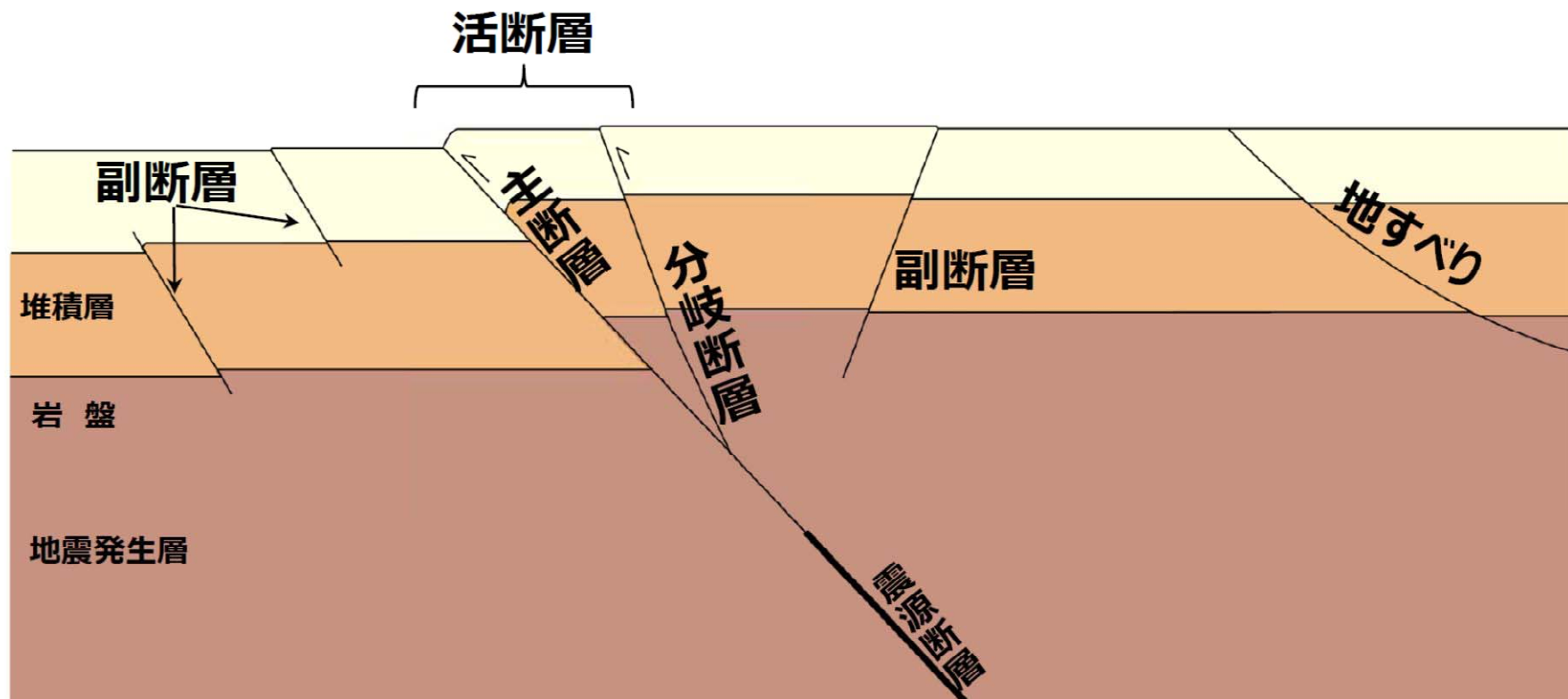
Atomic Energy Society of Japan

調査専門委員会委員 谷 和夫(東京海洋大学)

# 検討対象とする断層変位

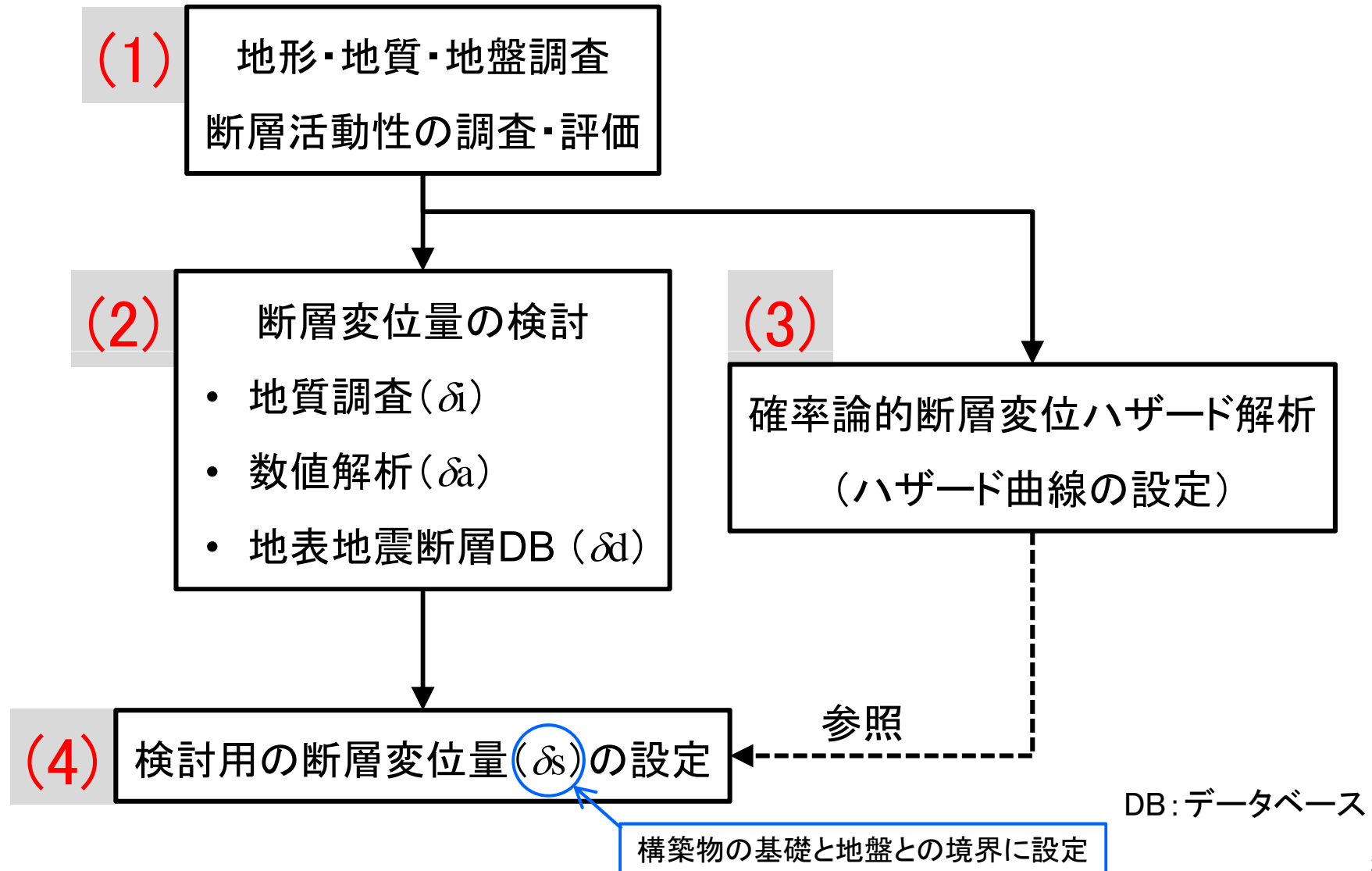
## 本発表の対象

- ① 震源断層の活動に伴って生じる地表地震断層（主断層、分岐断層、副断層）
- ② 震源断層の活動以外を成因とし、その成因が将来も起こりうるもの

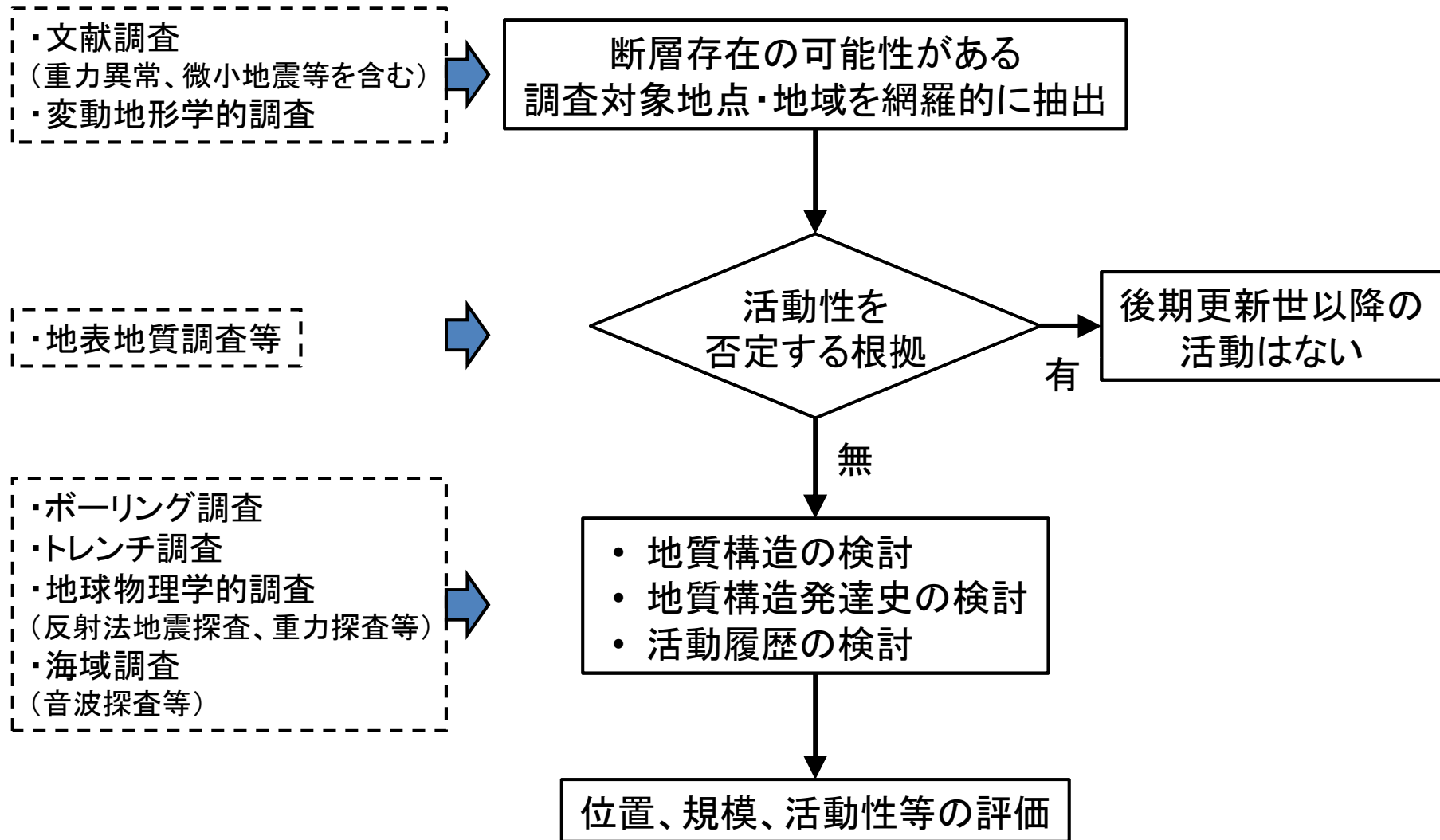




# 断層変位ハザード評価のフロー



# (1)-1 地形・地質・地盤調査



## (1)-2 断層の活動性調査・評価

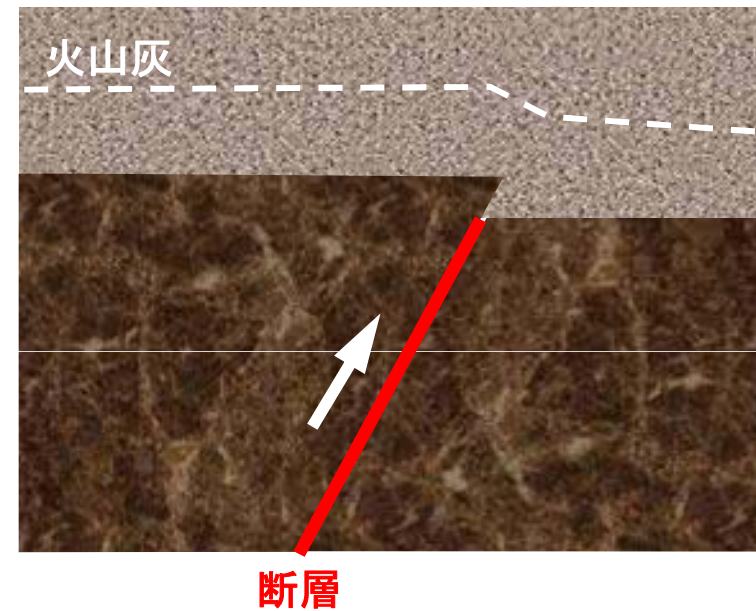
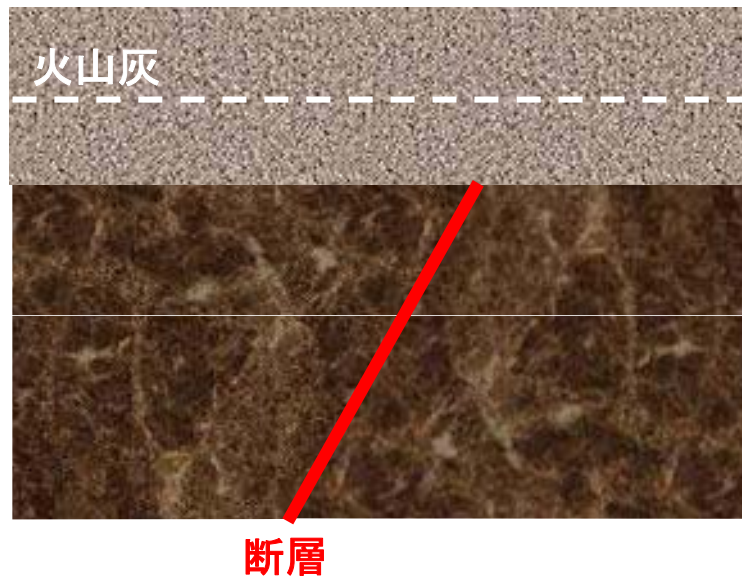
- 後期更新世以降の活動性の調査は、**変動地形学的調査、露頭観察、トレンチ調査、ボーリング調査**の組み合わせ
- 活動性の評価では、地形・地質と断層の形成順序から活動年代を決める手法（**上載地層法**）の適用を基本
- 後期更新世以降の地層が欠如するなどにより適用が困難な場合には、12万～13万年以前の岩脈・鉱脈等との接触関係（切断脈法）、接触変成との関係、断層破碎物質の性状等の観点から総合的に判断



断層の活動年代および1回あたりの変位量を推定

## (1)-3 断層の活動性調査・評価

### 上載地層法による評価



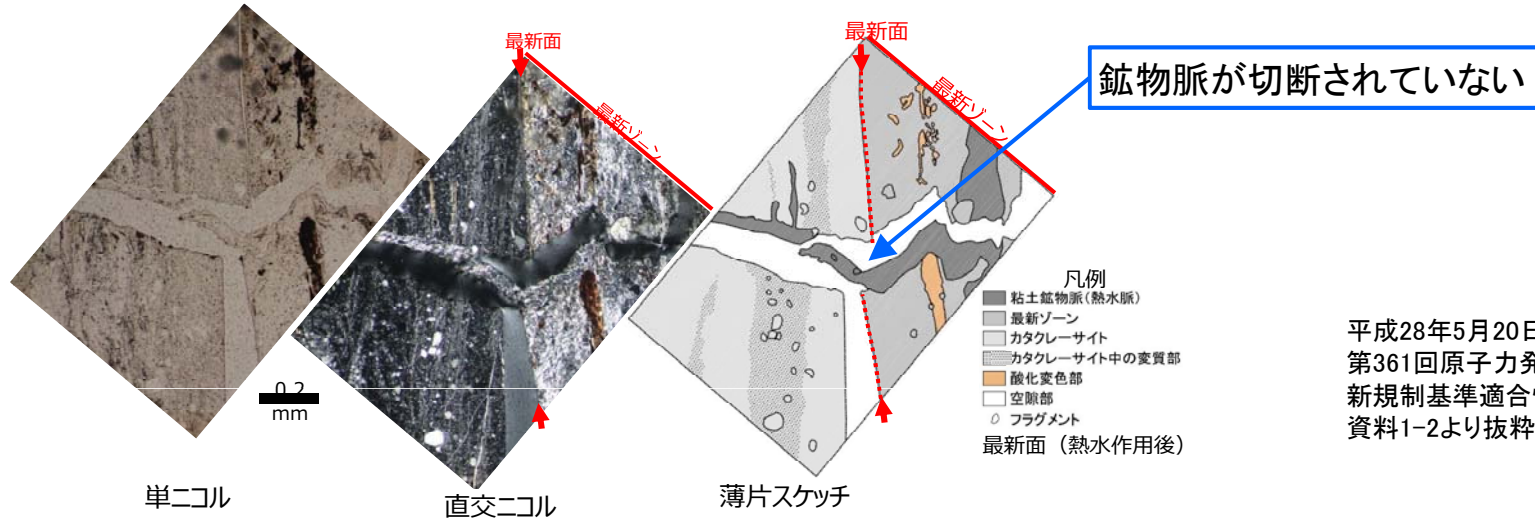
上載地層に変位がある／ない

➡ 上載地層の堆積以降に活動があった／なかった

上載地層の年代は、火山灰や微化石の分析などにより推定

# (1)-4 断層の活動性調査・評価

## 切断脈法による評価

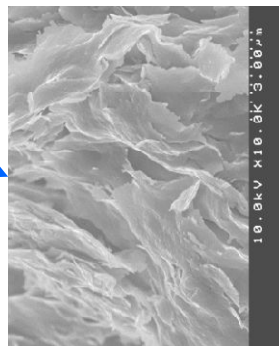


平成28年5月20日  
第361回原子力発電所の  
新規制基準適合性に係る審査会合  
資料1-2より抜粋・編集

## 断層破碎物質性状による評価

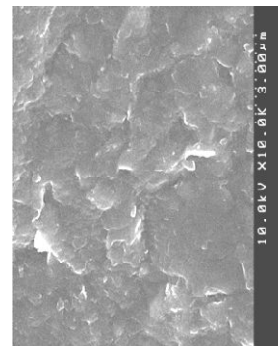
走査型電子顕微鏡 (SEM) による粘土鉱物の観察

粘土鉱物が破碎されていない



評価対象破碎帯 (×1万倍)

粘土鉱物が破碎されている



野島断層 (×1万倍)  
(1995年兵庫県南部地震)

平成26年1月10日  
第66回原子力発電所の  
新規制基準適合性に係る審査会合  
資料2より抜粋



## (2)-1 地質調査結果による $\delta i$

敷地におけるボーリング調査、  
トレンチ調査、試掘坑調査などの  
調査結果



不確かさを適切に考慮して  
1回あたりの変位量  $\delta i$  を設定

トレンチ調査の例



産総研HPより引用

<https://unit.aist.go.jp/ievg/group/actfault/index.html#mem>

## (2)-2 数値解析による $\delta a$

食い違いの弾性論



詳細FEM解析



パラメータスタディ

不確実さの考慮

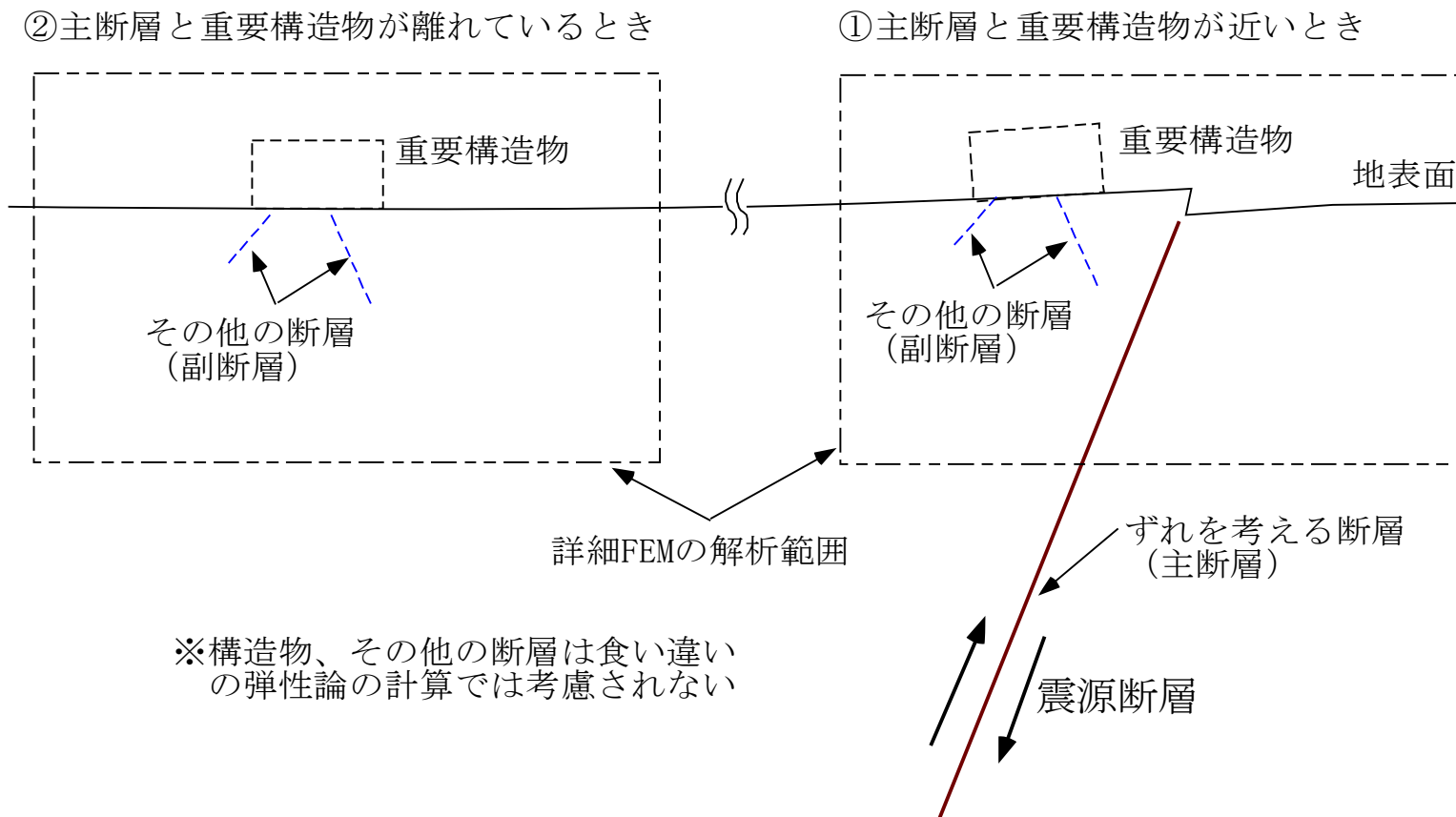


$\delta a$ の検討



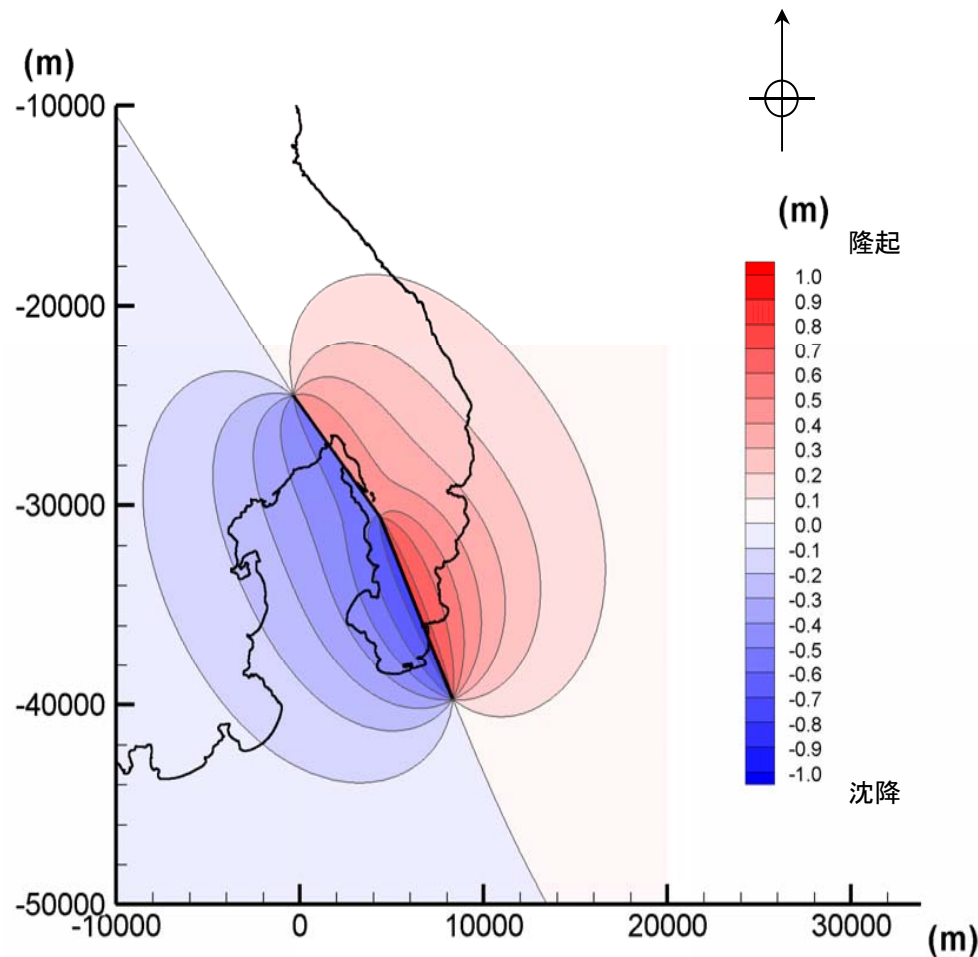
## (2)-3 数値解析による $\delta a$

### 食い違い弾性論による変形計算



## (2)-4 数値解析による $\delta a$

### 食い違い弾性論による変形計算の例



地殻: 半無限・連続・一様・線形弾性  
主断層・分岐断層: 不連続面にずれ

境界変位 or 換算応力



詳細FEM解析の境界条件

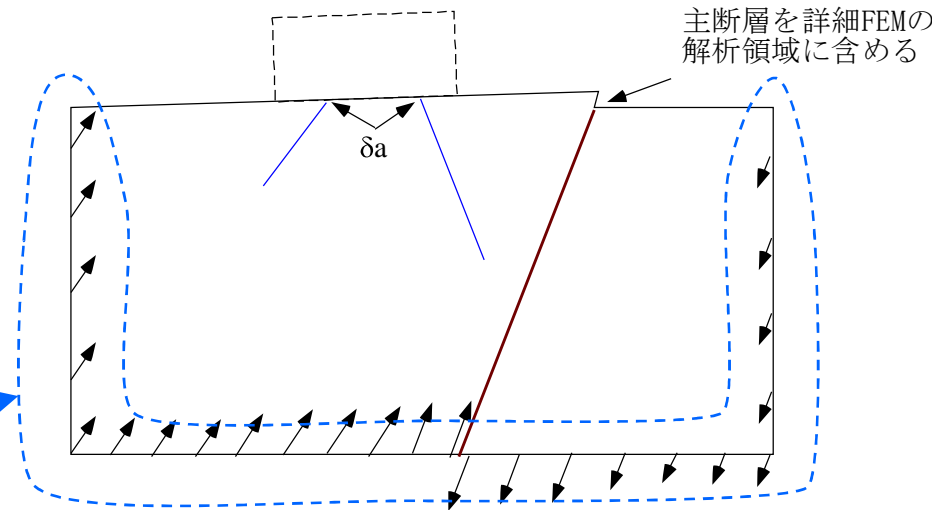
旧原子力安全委員会  
地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会  
第70回ワーキング・グループ2  
資料WG2第70-3-2号より抜粋・編集

## (2)-5 数値解析による $\delta a$

### 詳細FEMによる断層変位計算

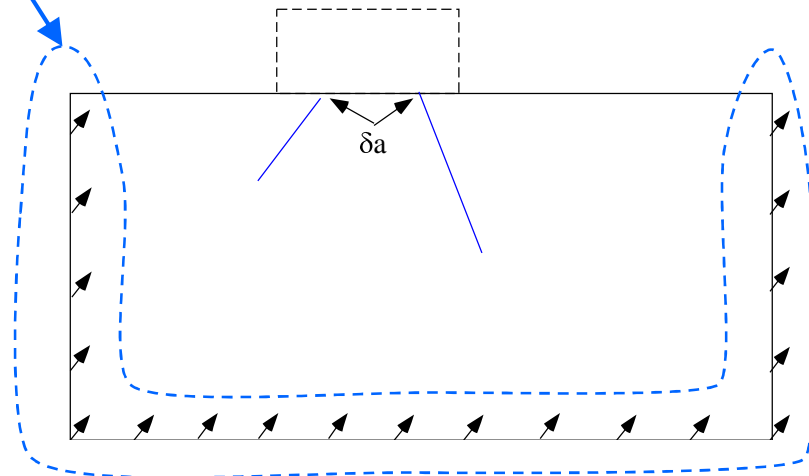
- ① 主断層と重要構造物が近いとき

食い違いの弾性論により算定した  
境界変位 or 換算応力



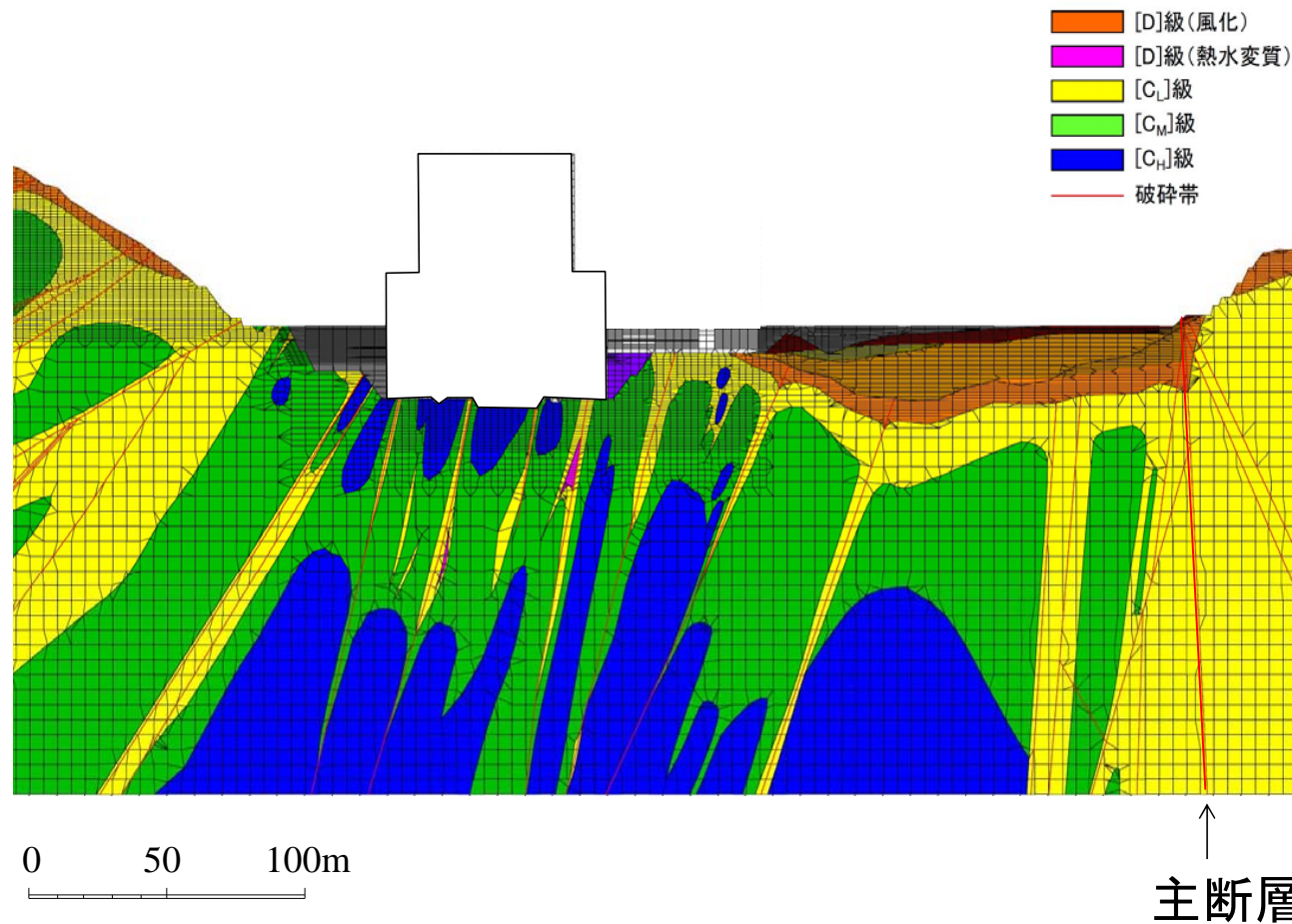
(注) 構造物はモデルには含めない

- ② 主断層と重要構造物が離れているとき



## (2)-6 数値解析による $\delta a$

### 詳細FEMによる断層変位計算の例(要素分割図)



旧原子力安全委員会  
地震・地震動評価委員会  
及び施設健全性評価委員会  
第70回ワーキング・グループ2  
資料WG2第70-3-2号より抜粋・編集

## (2)-7 地表地震断層データベースによる $\delta d$

- ・主断層および副断層の変位量に関する既存のDB (例: JANSIのDB)
- ・独自に構築または追加したDB

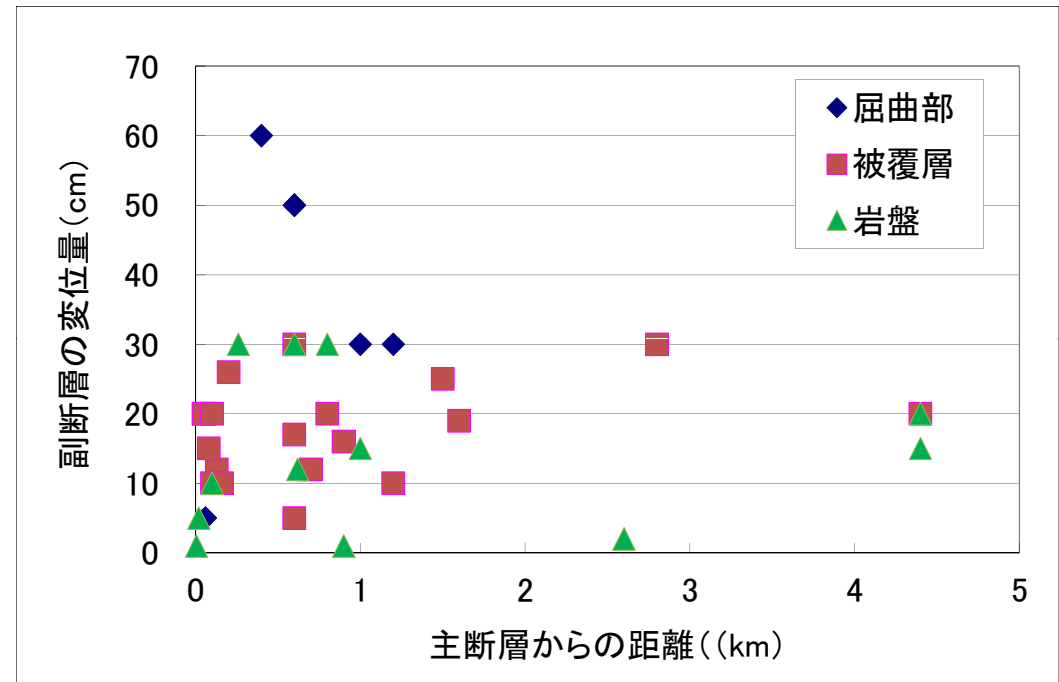


評価対象断層とDBにおける断層を比較し、活動履歴・規模、地形条件、地質条件等を検討



不確かさを適切に考慮して  $\delta d$  を設定

DB: データベース



原子力安全推進協会(2013)より引用・編集

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

<http://www.genanshin.jp/archive/sitefault/>

# (3)-1 確率論的断層変位ハザード解析

Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA)

副断層による断層変位の年超過頻度を計算する場合のPFDHA

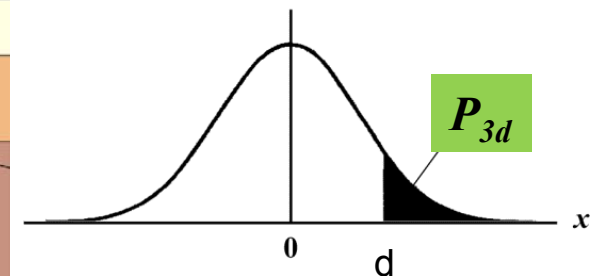
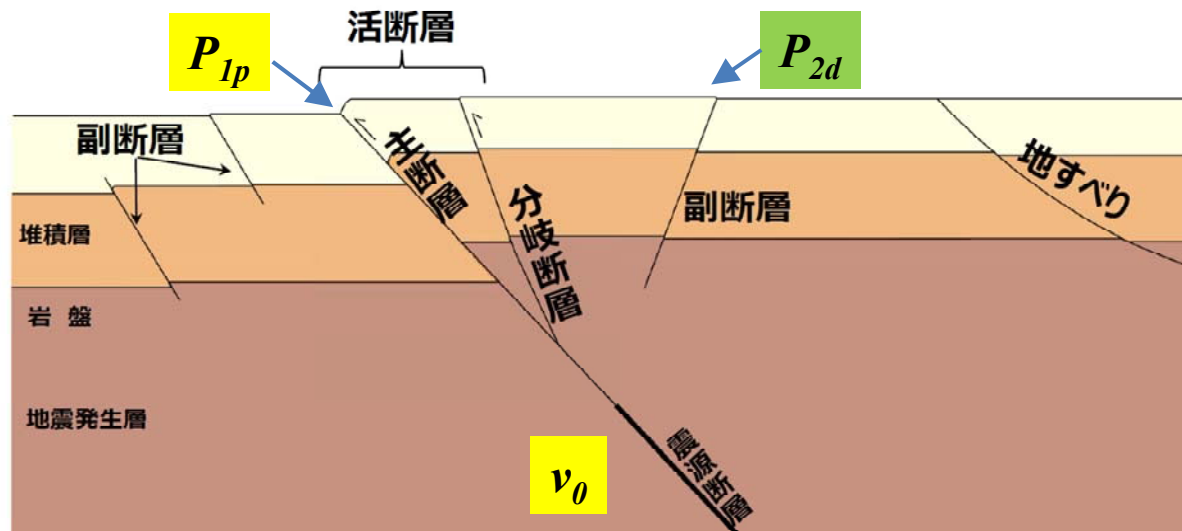
$$v(d)_d = v_0 \times P_{1p} \times P_{2d} \times P_{3d}$$

$v_0$  : 活断層が活動する1年あたりの頻度

$P_{1p}$  : 活断層が活動したときに、主断層の断層変位が地表で発生する確率

$P_{2d}$  : 主断層による断層変位が地表で発生した場合に、活断層から離れた場所で副断層の断層変位が地表で発生する確率

$P_{3d}$  : 副断層の断層変位が評価地点で発生した場合にその断層変位がある値を超過する確率

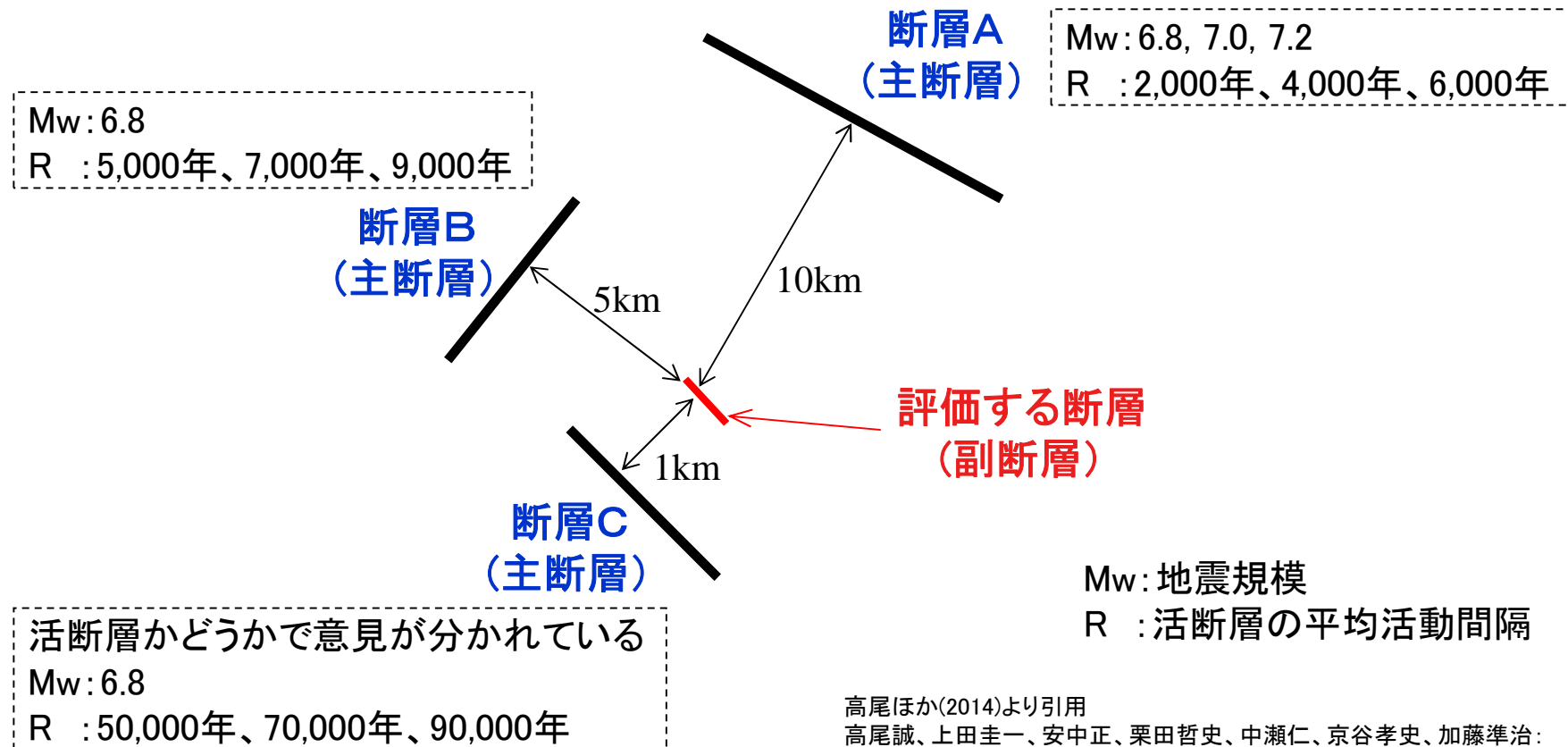


副断層の変位量の確率密度分布

## (3)-2 確率論的断層変位ハザード解析

Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA)

【例題】断層A, BまたはCが活動した場合に,  
評価地点で副断層の変位量がある値を超過する頻度？



高尾ほか(2014)より引用

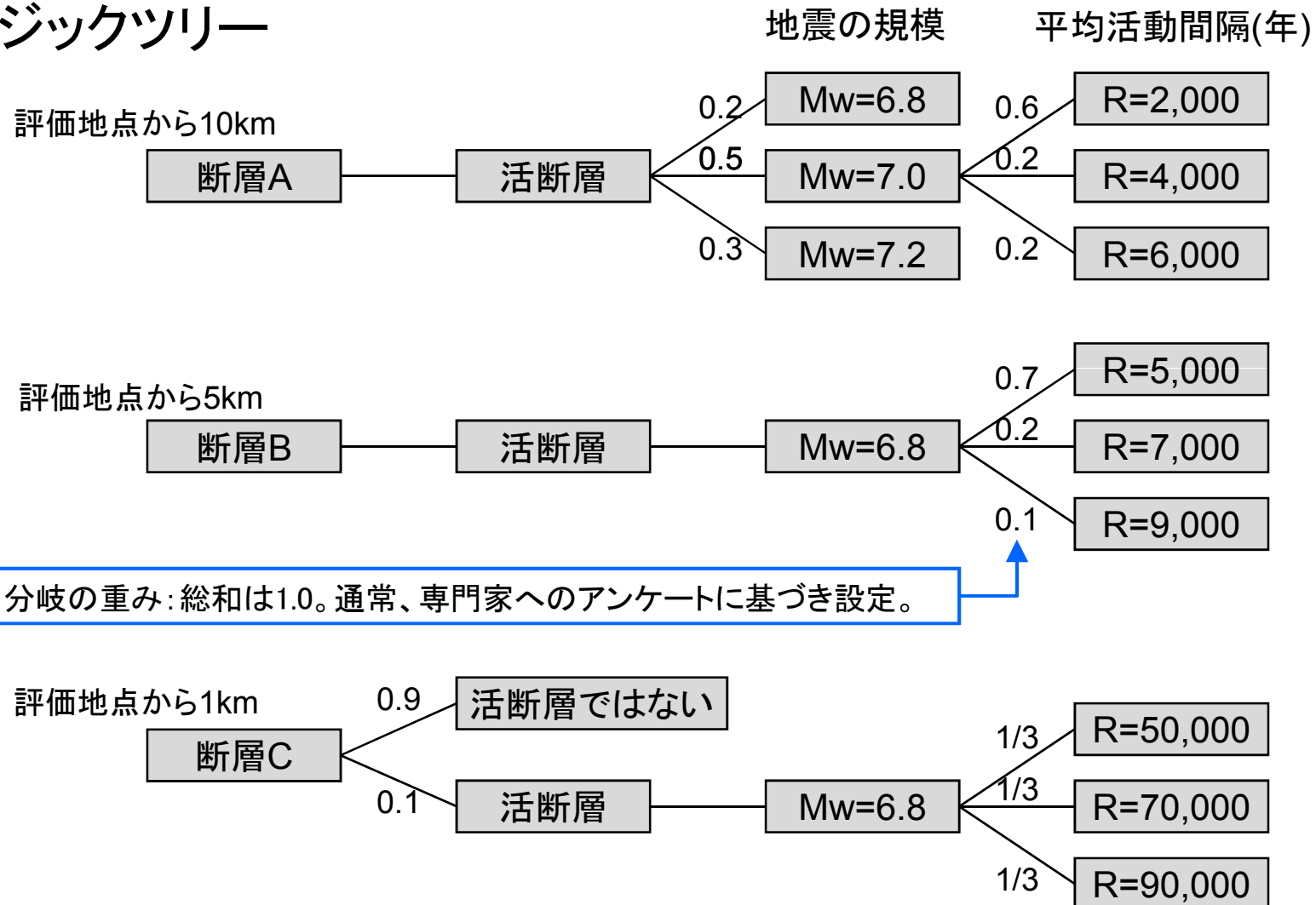
高尾誠、上田圭一、安中正、栗田哲史、中瀬仁、京谷孝史、加藤準治：  
確率論的断層変位ハザード解析の信頼性向上、  
日本地震工学会論文集、第14巻、第2号、2014年、pp.16-36.



# (3)-3 確率論的断層変位ハザード解析

Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA)

## ロジックツリー

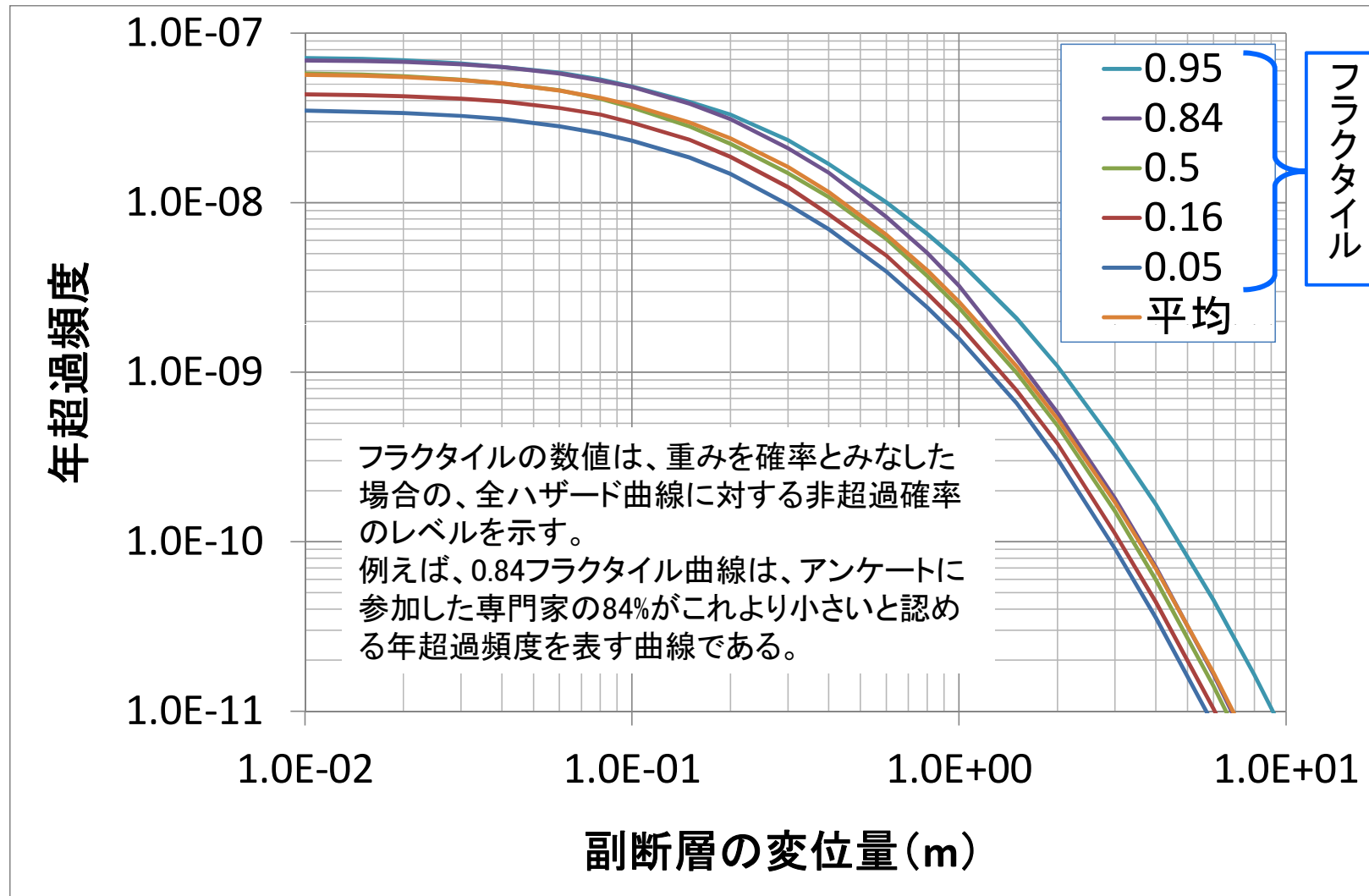


# (3)-4 確率論的断層変位ハザード解析

Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA)

## フラクタイルハザード曲線の例

高尾ほか(2014)より引用



## (4) 検討用の断層変位量 $\delta_s$ の設定

項目	地質調査結果に基づく $\delta_i$	数値解析結果に基づく $\delta_a$	地表地震断層DBに基づく $\delta_d$
不確かさを考慮した設定値	1回あたりの変位量 + ばらつき (例えば、標準偏差)	パラメータスタディの結果	DBから求めた 平均値 + DBから求めた ばらつき (例えば、標準偏差)
$\delta_s$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\delta_i</math>、<math>\delta_a</math>および<math>\delta_d</math>を総合的に勘案</li> <li>• PFDHAの結果を参照</li> <li>• 構築物の基礎と地盤との境界に設定</li> </ul>		

# まとめ

- 断層変位のハザード評価に関して、これまでに関連分野で得られている知見を最大限活用し、不確実さも考慮した適用可能な方法として取りまとめた。
- 今後とも知見の蓄積を継続し、関連する学術分野間での連携・協調を深化させながら、より一層信頼性の高いものにしていく努力が必要である。

日本原子力学会2016年秋の年会@久留米シティプラザ

総合講演・報告4

「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会活動報告

## 断層変位に対する工学的なリスク評価 (3)断層変位の施設への影響評価

2016年9月8日

調査専門委員会 委員 岡本孝司(東大)

### 1. はじめに

### 2. 裕度評価手法の特長

### 3. 裕度評価の適用例～原子炉建屋～

- (1) 評価の考え方、手順
- (2) 建物・構築物に対する影響評価
- (3) 機器・配管系に対する影響評価
- (4) 機器・配管系の評価結果を受けたリスク評価

### 4. 裕度評価の適用例～非常用海水取水路～

- (1) 土木構造物に対する影響評価
- (2) 機器・配管系に対する影響評価
- (3) 機器・配管系の評価結果を受けたリスク評価

### 5. まとめ

## 1. はじめに

- 理学と工学の知見を動員して、**断層変位に対するリスクを評価**することが原子力安全のアプローチとして首尾一貫した対応となる。



- 自然現象に対するリスクを評価する方法としては、確率論的リスク評価(PRA)だけでなく、様々な方法が考えられる。
- 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」も踏まえ、断層変位に対する評価手法として、**裕度評価手法**は十分に活用できると判断し、**適用概念を検討**。

- 2016年春の年会では、**原子炉建屋(PWR)直下の断層変位に関する適用事例を報告した**[予稿に記載]。
- 本報告では、**原子炉建屋(BWR)および非常用海水取水路直下の断層変位に関する適用事例を報告する**。



## 2. 裕度評価手法の特長

- 裕度評価は、各設備に対して機能維持の観点から実力としての評価を行い、プラントシステム全体としての状態を把握していく手法。したがって、一部設備が機能を維持できていない状態も含めて、プラントシステム全体の状態を事故シーケンスとして評価できる。
- 評価のための技術情報が不足する場合は、評価が安全側となるような工学的な条件を付すことにより評価できる。
- 安全上重要な設備の分散配置の効果を把握することや、必要に応じて可搬型設備などの活用によるアクシデントマネジメントの有効性も含めて評価することができる。
- 評価により、例えば炉心損傷までの余裕などのリスク情報を得ることができる。
- 評価に用いる変位量を漸増させることによりプラントの弱点を把握することができる。
- 想定を超える断層変位に対する評価にも適している。

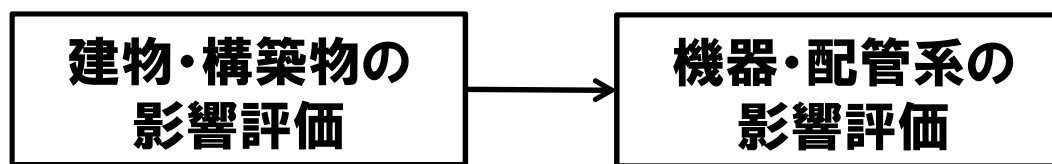
(1) 評価の考え方、手順

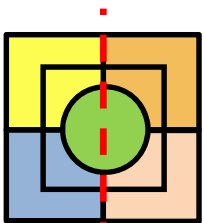
- ・ 既設炉に対して、建屋直下の断層変位（副断層など）を仮定し、施設の安全機能維持の確認を行う。
- ・ 影響評価では、ハザードとして与えられる断層位置とその変位量に基づく建物・構築物の影響評価を行い、その評価結果を機器・配管系の影響評価へと受け渡す。

●ハザード評価

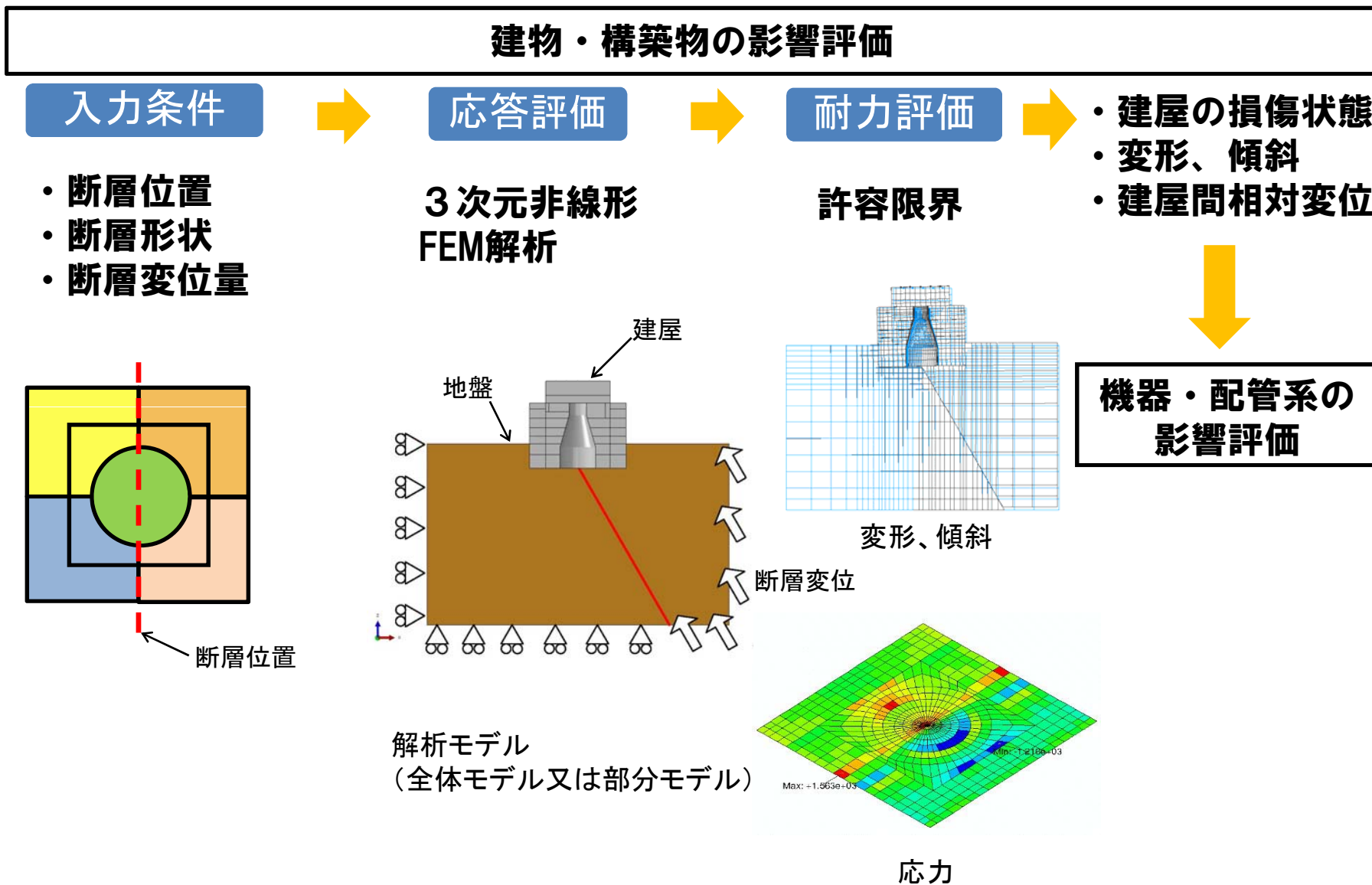
断層変位の位置、  
変位量等の評価

●施設影響評価(事故シーケンスを活用した裕度評価)



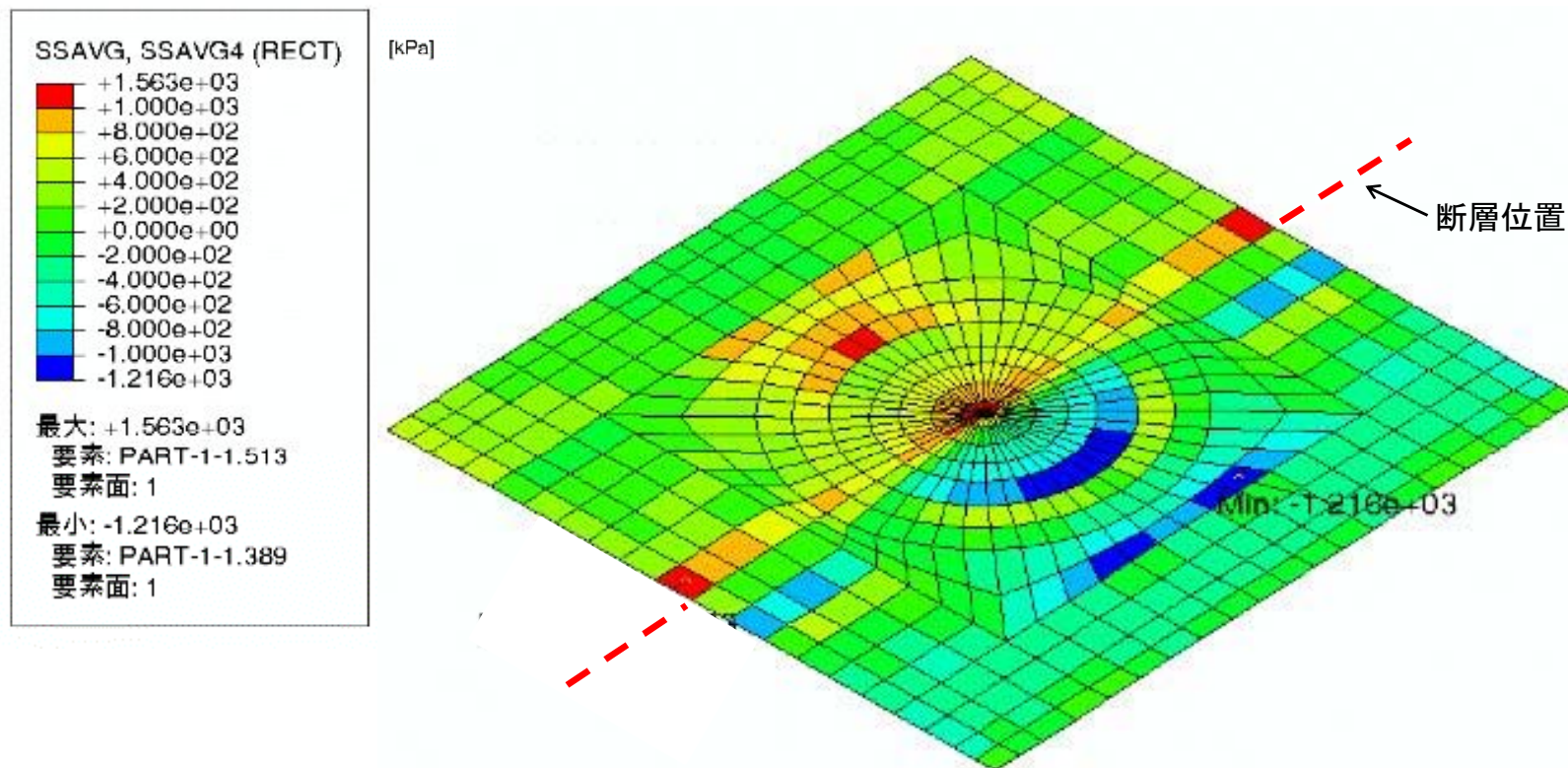
断層位置	建物・構築物の損傷状態	機器・配管系で考慮する変位影響	機器・配管系で防止する損傷形態	リスク評価
原子炉建屋直下の場合 	有意な損傷無し (○)	建屋の傾斜 建屋間の相対変位	動的機器の機能損傷 渡り配管等の構造損傷	プラントシステム 全体としての 裕度に基づく リスク評価
	基礎・壁・床の 局部損傷 (△, ×)	建屋支持機能の低下 建屋の傾斜 建屋の変形 建屋間の相対変位	機器定着部の構造損傷 動的機器の機能損傷 大型機器の構造損傷 渡り配管等の構造損傷	

## (2) 建物・構築物に対する影響評価 ① 評価手順

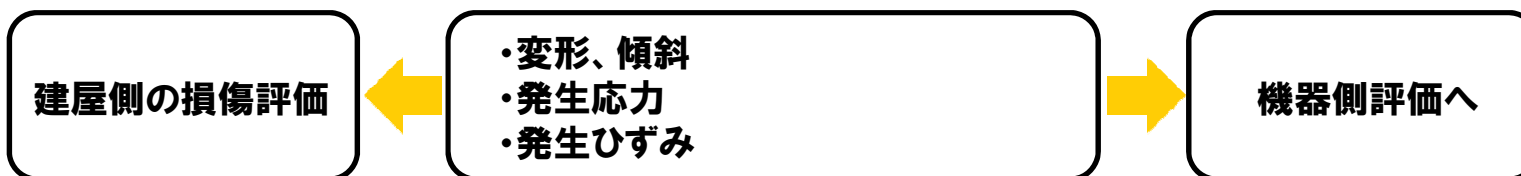


## (2) 建物・構築物に対する影響評価 ②解析例

解析結果（応力・ひずみ）：出力例 縦ずれ 30cm



面外せん断応力度



## (2) 建物・構築物に対する影響評価 ③ 評価例

### 原子炉建屋(BWR5)にかかる断層変位(縦ずれ)を想定

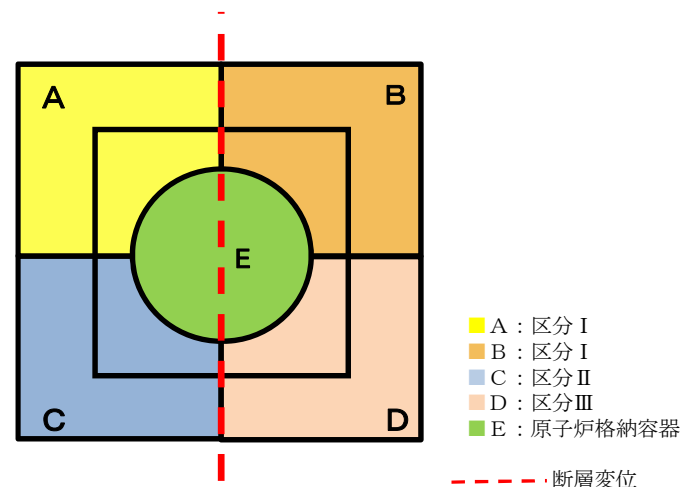
原子炉建屋には原子力発電所の安全性を確保するために重要な設備が設置されており、断層変位により影響を及ぼす事故シナリオが想定される。

断層変位* (縦ずれ)	評価エリア	原子炉建屋				
		A	B	C	D	E
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	×	×	×	×	×

※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。  
 (注)個別サイトの評価では、建屋のエリアを更に細かく区分して評価する。

**【凡例】**

- : 有意な損傷無し
- △: 基礎・壁・床に局部損傷があるが、  
機器の支持性能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



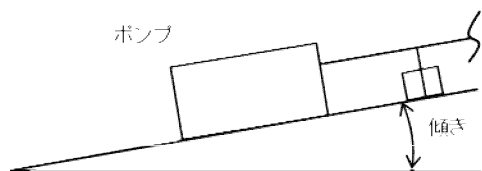
機器側の評価に必要な情報を、建物側から引き渡す。



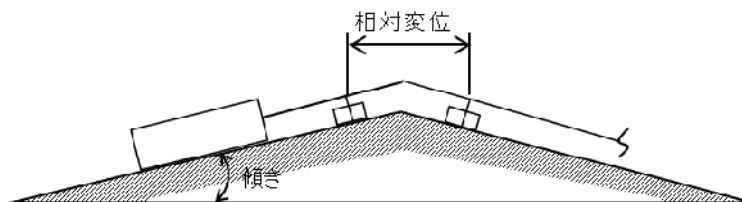
(3) 機器・配管系に対する影響評価 ①耐力評価における考慮事項

建物側の評価結果を踏まえて、重要機器は、下記の損傷状態を考慮して耐力評価を実施する。

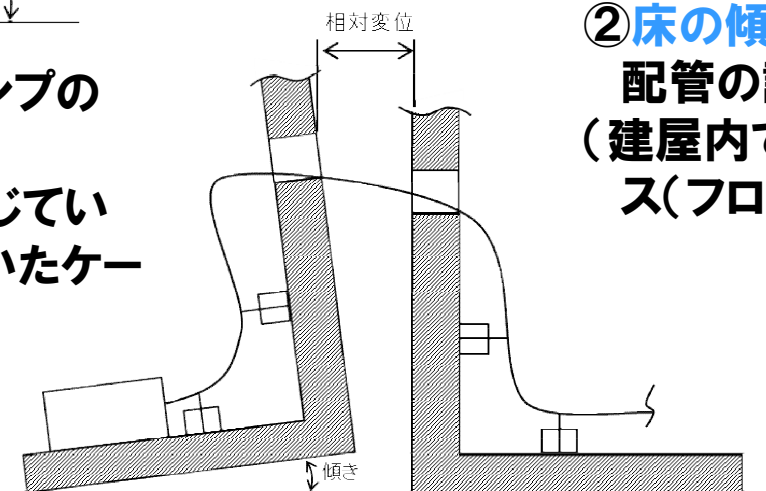
- ①床の傾きによる損傷評価
- ②床の傾きと変形による損傷評価
- ③建屋間渡り配管の損傷評価



①床の傾きを考慮したポンプの評価方法  
(建屋内は相対変位は生じていないが、建屋全体が傾いたケース)



②床の傾きと変形を考慮したポンプ、配管の評価方法  
(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方法  
(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)

(3) 機器・配管系に対する影響評価 ②評価例

リスク評価のインプットとなる機器・配管系の評価結果の整理

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)	△*1	-	-
	LPCS(区分Ⅰ) RHR-B,C(区分Ⅱ)	×	-	-

※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。

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

○健全 ×機能喪失 △機能喪失の可能性有り

\*1:エリア内全体に損傷が至らない場合、一部の機器・配管系の機能は維持されるものと整理した。  
個別サイトの評価では、エリアを細かく区分して評価する。

(4) 機器・配管系の評価結果を受けたリスク評価①

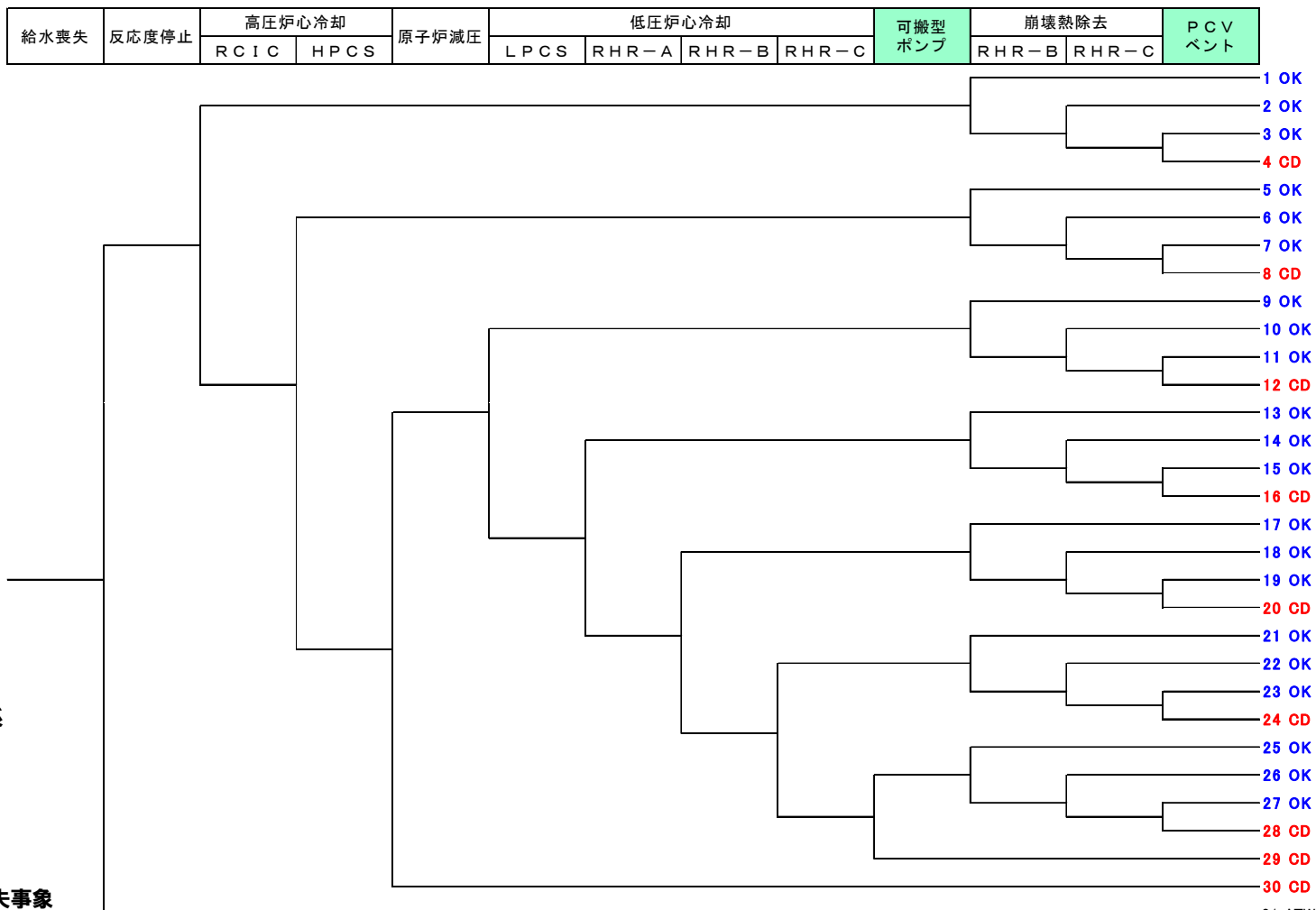
①断層変位による影響を考慮した  
事故シーケンスの評価（イベントツリー）の例（1/2）

- 地震動により、耐震クラスの低い設備は大きな影響を受け、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と想定。
- 原子炉建屋に配備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。
- 断層変位の発生箇所や変位量によっては、原子炉建屋内のECCSポンプ等が機能喪失する可能性が想定されるが、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できる。

3. 裕度評価の適用例～原子炉建屋～

(4) 機器・配管系の評価結果を受けたリスク評価①

①断層変位による影響を考慮した  
事故シーケンスの評価（イベントツリー）の例（2/2）



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

断層評価用イベントツリーの例

(4) 機器・配管系の評価結果を受けたリスク評価②

② 炉心損傷シーケンスの試算による裕度評価のイメージ

- 既存のPRAモデルを利用して、断層変位の影響を考慮できる事故シーケンス評価モデル（前述のイベントツリー）を構築



- 機器の損傷状態をインプットとして事故シーケンス評価モデルに基づくシステム評価を実施



- ある断層変位量を想定したときの炉心損傷シーケンスの有無により、断層変位に対する裕度を評価（必要に応じて格納容器機能喪失シーケンスの有無）



- 炉心損傷に支配的な（裕度が小さい）事故シーケンスを分析し、重要な安全機能（「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」）の喪失、機器の損傷等を抽出する等により、断層変位に対するプラントのリスクを評価

(4) 機器・配管系の評価結果を受けたリスク評価③、④

③ 裕度評価結果の整理例

機器・配管系の耐力評価と事故シーケンス評価結果を下表のように整理し、**プラントのリスク（断層変位に対する裕度）**を評価する。

	断層変位量※(縦ずれ)							
	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	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	

※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。

(注)上記は整理のイメージを示すもので、前ページまでの簡略評価イメージと対応しているものではない。

④ 裕度評価結果の分析・考察例

- ・ 代替手段（可搬ポンプ）なしの場合でも、**設備の分散配置の効果**により、炉心損傷の観点からの裕度を有している。
- ・ 代替手段となりうる**可搬ポンプはリスク低減に有効**と考えられる。
- ・ **リスク評価結果を踏まえて、追加の対応策を講じる意思決定**ができる。

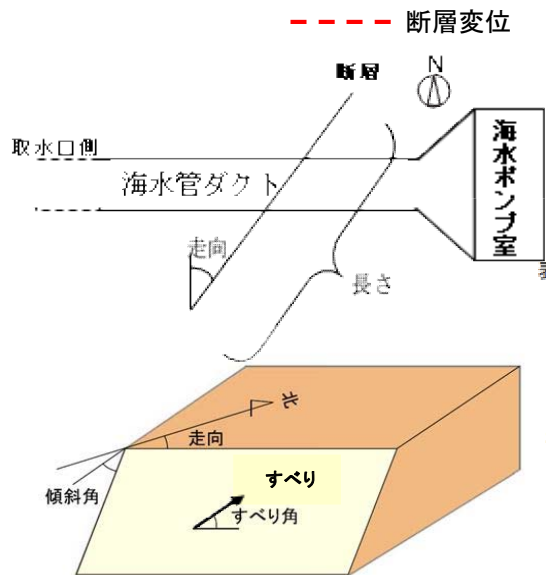
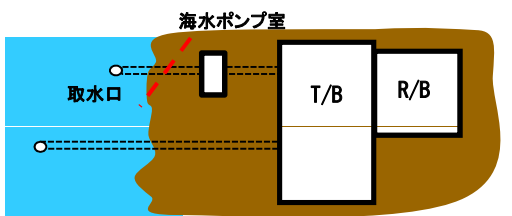


# (1) 土木構造物に対する影響評価 ① 評価手順

## 土木構造物の影響評価例※1

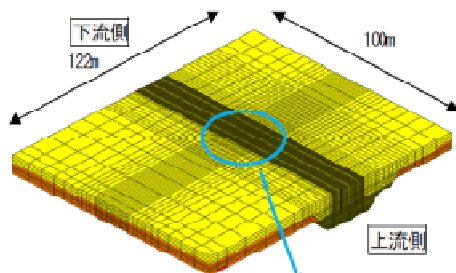
**入力条件**

- ・断層位置
- ・断層形状
- ・断層変位量

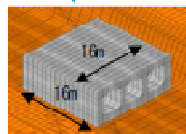


**応答評価**

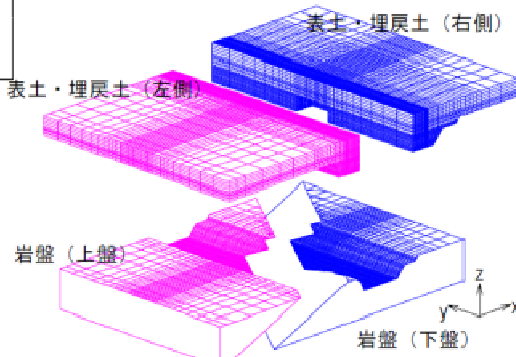
3次元非線形  
FEM解析



総節点数: 109,821  
総要素数: 102,047



RC構造物



3次元FEMモデルの概要

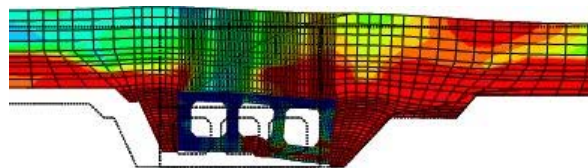
**耐力評価**

許容限界

- ・局所的な損傷状態
- ・全体系の崩壊の有無
- ・変位、変形、傾斜



**機器・配管系の  
影響評価**



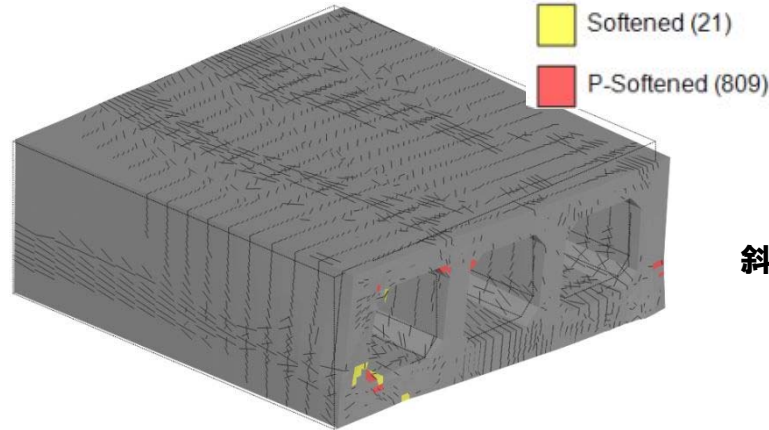
地盤せん断ひずみ分布

※1 樋口俊一・渡辺伸和・米澤健次・穴吹拓也・江尻謙嗣 (2015) : 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, 断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集

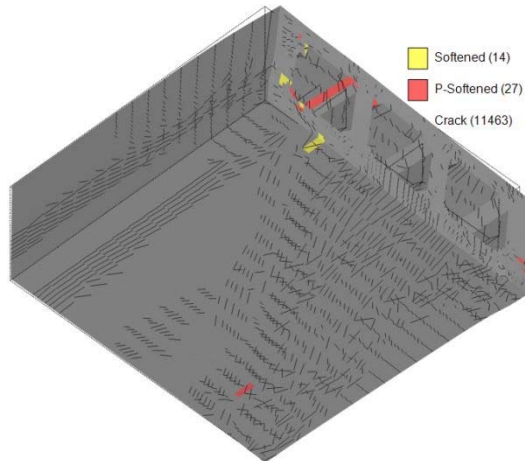
# (1) 土木構造物に対する影響評価 ②解析例

## 解析結果（変形・ひびわれ・ひずみ）※1：出力例 縦ずれ 断層変位30cm

変形・ひびわれ状況

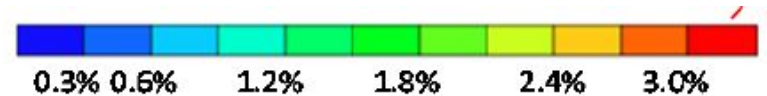
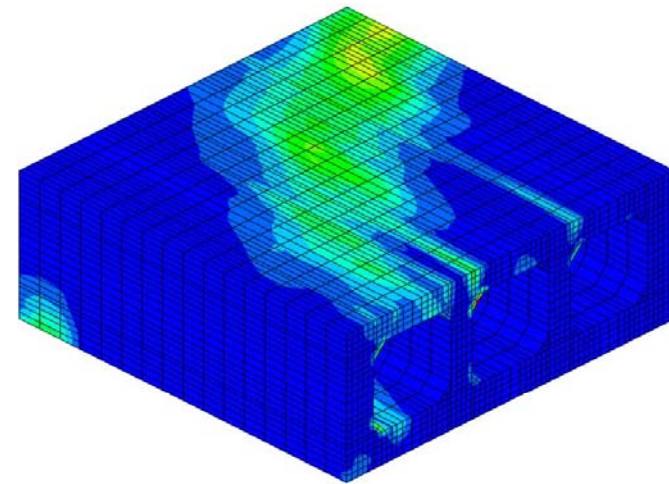


斜め上方から

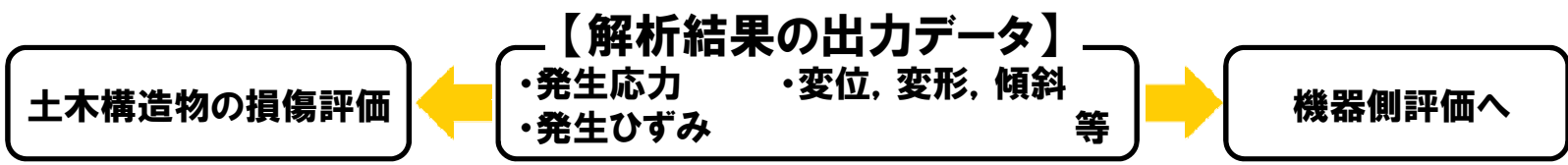


下方から

コンクリート最大主ひずみコンター



※1 樋口俊一・渡辺伸和・米澤健次・穴吹拓也・江尻譲嗣（2015）：  
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，断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集



## (1) 土木構造物に対する影響評価 ③評価例

### 海水取水路にかかる断層変位(縦ずれ)を想定

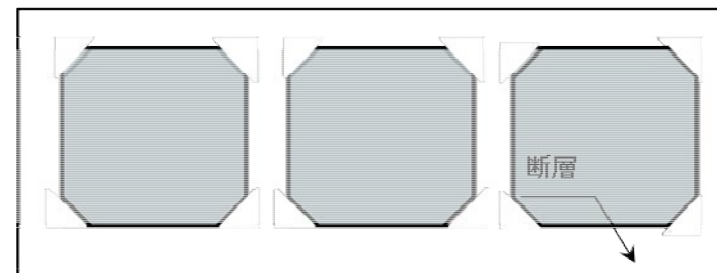
海水取水路が断層変位により影響が与えられた場合、冷却水からの熱除去ができなくなるため、原子炉に影響を及ぼす事故シナリオが想定される。

	断層変位※(縦ずれ)			
	10cm	20cm	30cm	50cm
評価結果	○	△	△	×

※断層変位量は、裕度評価のイメージを表現するために任意に設定したもの。

**【凡例】**

- : 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



海水取水路の断面図

**機器側の評価に必要な情報を、土木構造物側から引き渡す。**

## (2) 機器・配管系に対する影響評価 評価例

### リスク評価のインプットとなる機器・配管系の評価結果の整理

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およ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。

	断層変位			
	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	○	△	△	×

※断層変位量は、裕度評価のイメージを表現するために任意に設定したもの。

凡例 ○:機能維持  
 △:機能の劣化  
 ×:機能喪失

### (3) 機器・配管系の評価結果を受けたリスク評価

#### ① 断層変位による影響を考慮した事故シーケンスの評価の例（1/2）

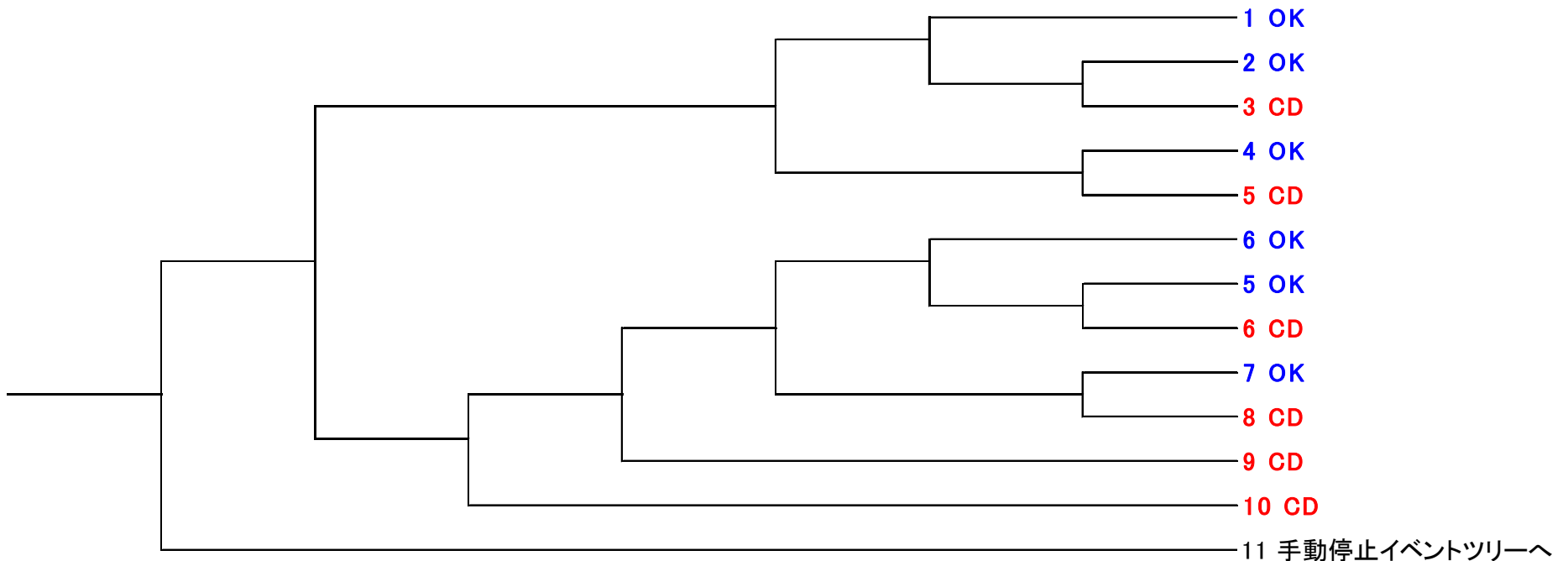
海水取水路への断層変位による影響の大きさにより以下の場合が想定される。

- 取水機能の劣化(原子炉補機冷却水系/原子炉補機冷却海水系の機能の1区分喪失)の場合、原子炉を手動停止し、健全な系統(1区分)により原子炉を安定的に冷却することができる。
- 取水機能の喪失の場合、最終ヒートシンク喪失(LUHS)に至り、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が、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、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。
- LUHS時、格納容器からの熱除去については、代替補機冷却(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できる。
- LUHS時、外電喪失が発生した場合、SBOとなるが、代替補機冷却(ハイドロサブ、可搬型熱交換器車)を用いてディーゼル発電機を再起動させることにより交流電源を回復させることができる。

(3) 機器・配管系の評価結果を受けたリスク評価

① 断層変位による影響を考慮した事故シーケンスの評価の例 (2/2)

取水機能 部分喪失	取水機能 全喪失 (LUHS)	高圧炉心冷却	原子炉減圧	可搬型 ポンプ	代替補機 冷却	崩壊熱除去	PCV ベント
		RCIC				RHR	



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



4. 裕度評価の適用例～非常用海水取水路～

(6) 機器・配管系の評価結果を受けたリスク評価のイメージ

② 裕度評価結果の整理イメージ

機器・配管系の耐力評価と事故シーケンス評価結果を下表のように整理し、**プラントのリスク（断層変位に対する裕度）**を評価する。

	断層変位量※(縦ずれ)							
	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	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	

※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。

(注)上記は整理のイメージを示すもので、前ページまでの簡略評価イメージと対応しているものではない。

③ 裕度評価結果の分析・考察のイメージ

- ・ 代替手段となりうる**可搬ポンプ**は**リスク低減に有効**と考えられる。
- ・ **リスク評価結果を踏まえて**、追加の**対応策**を講じる**意思決定**ができる。

## 5. まとめ

- ◆断層変位が原子力施設に与える影響を評価するための工学的なリスク評価手法のうち、**裕度評価手法の適用例を提示した**。その適用により、**原子力安全のための評価をすることができる**。
- ◆裕度評価のような工学的なリスク評価手法の適用により、**安全機能の確認**とともに、評価結果を活用した**代替設備の有効性の検証**やリスク低減のための**更なる対応策のための意思決定**をすることができる。  
また、大規模損壊に対して用意される対応策も有効に活用できる。
- ◆断層変位に限らず、裕度評価等によって得られたリスク評価の結果を、現場でのアクシデントマネジメントの改善や教育訓練、様々な事象の想定・机上訓練に反映し、弛まぬ安全性向上に繋げていくことが必要である。  
そして、それを促すための取組みが、引き続き求められている。