

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  
(概要版)

平成25年9月

一般社団法人 原子力安全推進協会

敷地内断層評価手法検討委員会

## 1. はじめに

2011.3.11に発生した福島第一原子力発電所事故の大きな反省点のひとつは「地震評価」「津波評価」「土木建築設計」「機器設計」「安全設計」等の津波対策に係る各分野の連携が脆弱で、知の統合が図れなかったところにある。この点の深い反省に立ち、今後の原子力の安全を高める各種活動においては、関係する各分野に横串を入れ、知の統合を図り、全体像を把握した上で総合的な対策を検討することが極めて重要である。

敷地内断層評価に関しても、理学と工学の叡智を結集し、施設の安全性を総合的に検討する観点が必要である。地震国であるわが国においては、理学分野、工学分野ともに地震に関する数多くの調査・研究が長年積み重ねられ、世界をリードする最高水準の知見が蓄積されている。原子力の安全性の向上には、このような知的資源を総動員し十分活用することが肝要と考える。

本報告は、上記の観点から「地形学」「地質学」「地球物理学」「地震学」「地盤工学」「耐震工学」「構造工学」「原子力安全工学」等の知見を総動員した、敷地内断層に対する総合的なプラント耐変位安全性評価を行う道筋を示すものである。すなわち、本報告では、敷地内断層が単に活断層の可能性があるかどうかのみに焦点を当てた検討を行うのではなく、設置する地盤に断層運動による地盤変状が存在する場合に、「原子力発電所の重要施設の安全機能に重大な影響があるかどうか」等を検討するための科学的かつ工学的な枠組みを示すことを考えた。

本報告は、従来は明確にされてはいなかった、断層の変位評価からプラントの変位に対する安全性評価に至る道筋をまとめたものである。

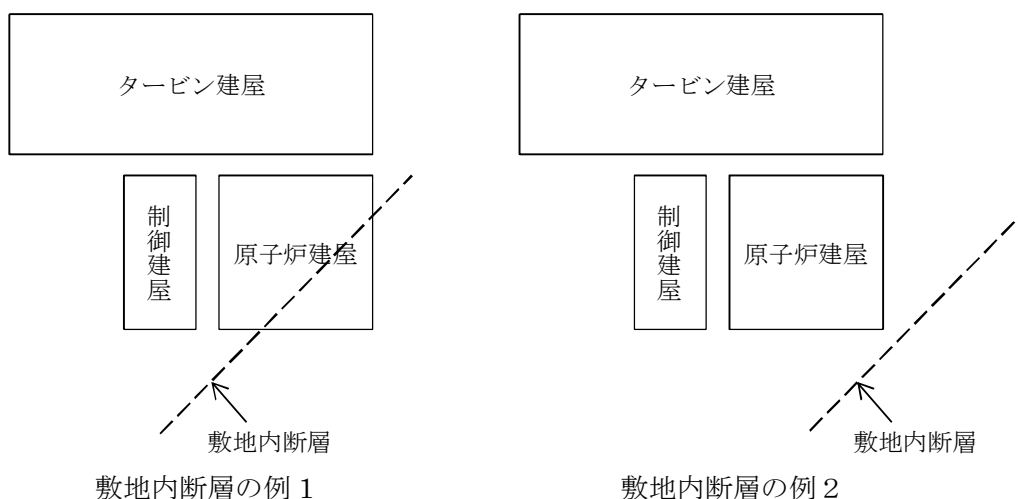
本報告が、今後の原子力の安全性向上に少しでも資することができれば幸いである。

## 2. 敷地内断層に対する耐変位安全性評価の手順

本検討は敷地内断層の変位に対する原子力発電プラントの安全性評価の枠組みを示すものである。以下にその手順を示す。

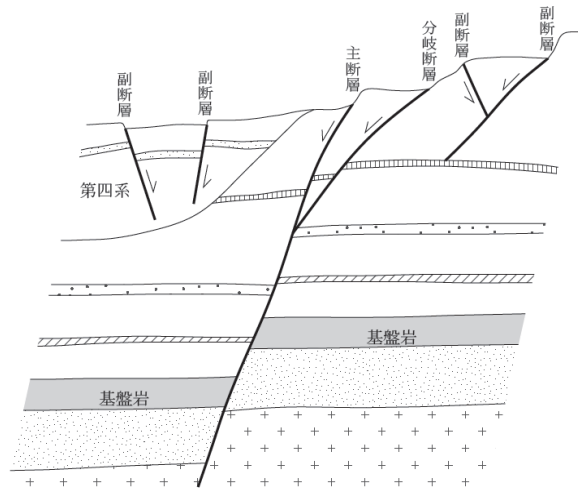
### (1) 敷地内断層について

敷地内断層とは断層の露頭が原子力発電所の敷地内に存在するもの、あるいは、ボーリング等によって存在が確認されたものを指す。この断層が将来動く可能性が否定できない場合、施設に影響を及ぼす可能性がある。施設への影響としては、地震動（ゆれ）と地盤変状があり、地盤変状には断層面を境とする地盤の不連続なくいちがい変位（以下「変位」あるいは「断層変位」）と地盤の傾斜等の連続的な変形（以下「変形」）が挙げられる。本検討の主な検討対象は地盤変状であり、これに対する原子力発電プラントの安全性評価を「耐変位安全性評価」と称することとする。概要図 1 に敷地内断層の分布例を概念図で示す。



概要図 1 敷地内断層の例

将来変位する可能性がある断層には、震源として考慮する活断層（主断層、分岐断層）のほか、活断層の活動に伴って二次的に変位することが否定できない断層（副断層）がある。概要図 2 に地震時に地表に現れる断層（地表地震断層）の概念図を示す。

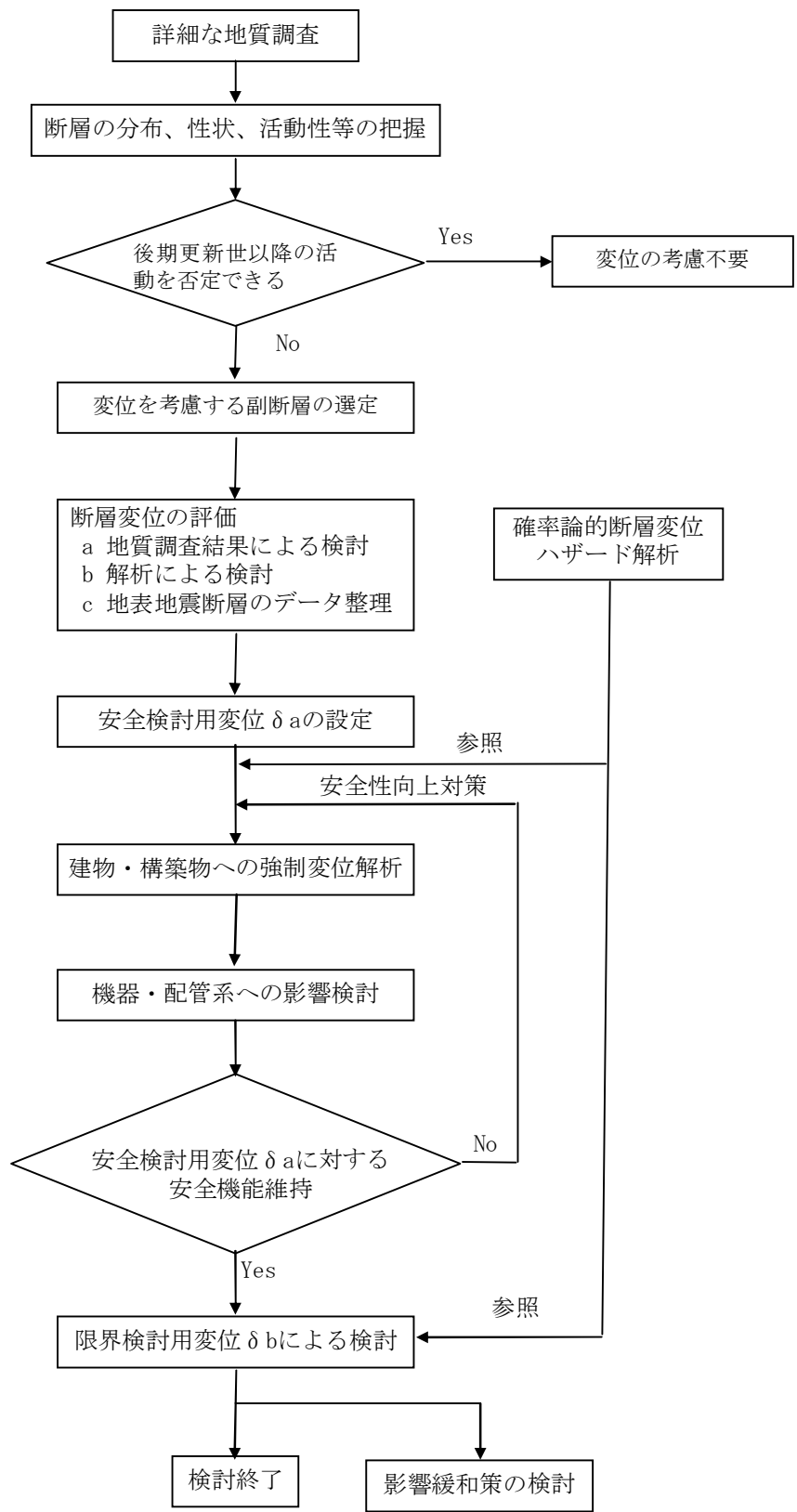


概要図 2 地表地震断層概念図

## (2) 耐変位安全性評価の手順

- ① 原子力発電所では、詳細な地質調査によって敷地内断層及び敷地内外の活断層に関する詳細な情報が得られているので、これに基づき将来変位する可能性がある副断層を選定する。なお、後期更新世以降の活動を否定できる断層に関しては将来変位する可能性はないものとする。
- ② 選定した副断層の地質調査結果の評価、敷地内外の活断層の活動に伴う敷地内断層の変位に関する解析的評価等、あるいはそれらを踏まえた工学的判断によって敷地内断層の変位を評価する。
- ③ 地震、津波、竜巻などの自然現象の設計基準に相当する変位を考え、これを安全検討用変位 $\delta a$ と称することとする。検討にあたっては確率論的断層変位ハザード解析を参照する。
- ④ 安全検討用変位 $\delta a$ に対して、基礎地盤の安定解析を行い、基礎地盤が建物・構築物の支持機能を保持することを確認する。また、求められた変位を建物・構築物の解析モデルへの入力条件として強制変位解析を行う。別途、地震動による建物・構築物への影響を求め、変位と地震動両者による建物・構築物への影響を把握し、許容限界と比較して安全機能に大きな影響を及ぼす恐れがないことを確認する。解析によって求められる建屋基礎スラブ等の変形、傾斜、建屋間の相対変位を機器・配管系の検討の入力条件とする。
- ⑤ 建物・構築物の検討において求めた建屋基礎スラブ等の変形、傾斜、建屋間の相対変位が、機器・配管系へ及ぼす影響を評価する。 $\delta a$ に対して原子力発電所の「止める」「冷やす」「閉じ込める」の安全機能が確保されることを確認し、安全機能に支障が生じることが想定される場合には安全性向上対策を実施する。
- ⑥ 断層変位の不確かさが他の自然現象より大きいことから、安全検討用変位 $\delta a$ を超える変位が施設に及ぼす影響をリスク評価の観点から検討する。この変位を限界検討用変位 $\delta b$ と称することとする。 $\delta b$ による検討は設計基準を超えた場合のリスク評価の観点であることから、この場合には各々の設備における実耐力に基づき、施設の安全機能に及ぼす影響を評価する。施設の安全機能への影響が考えられる場合には、影響緩和策による対応も考えることが出来る。

上記の検討フローを概要図 3 に示す。



概要図3 検討フロー

### 3. 断層変位の評価

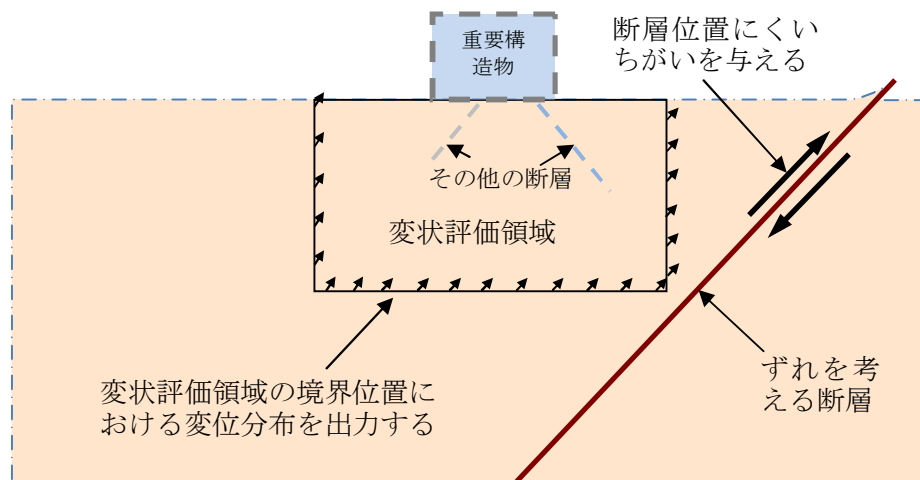
#### (1) 安全検討用変位 $\delta a$ の評価

$\delta a$  は次のいずれかの方法により、あるいは各方法を適切に組合わせて総合的に評価する。

- ・地質調査結果によって、将来変位する可能性がある断層の断層活動 1 回当りの変位を評価する。
- ・敷地内外の活断層が活動することによって敷地内の副断層が変位する場合には、解析によって変位を評価する。なお、活断層の 1 回の変位は地質調査結果や地表地震断層における主断層の変位と地震規模との関係式から適切に評価することができる。
- ・上記評価等を踏まえ、確率論的断層変位ハザード解析を参照して工学的判断によって適切な変位を評価する。 $\delta a$  の年超過頻度の目安値は、他の自然現象の年超過頻度を参考にして  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  ( /年) とする。

活断層の活動に伴う敷地内断層の変位を評価する解析手法には、先進的手法を含め種々の方法があるが、本検討では実績がある FEM 解析を主体とする方法を例示した。施設への影響を評価する対象領域（変状評価領域）の境界に断層のずれに起因する量の強制変位を静的に作用させ、変状評価領域の変位・変形を計算する。変状評価領域の境界に作用させる強制変位の計算は概要図 4 に示すようなイメージで、くいちがいの弾性論等を用いて行われる。

具体的な適用にあたっては複数の手法によって検討することが望ましい。

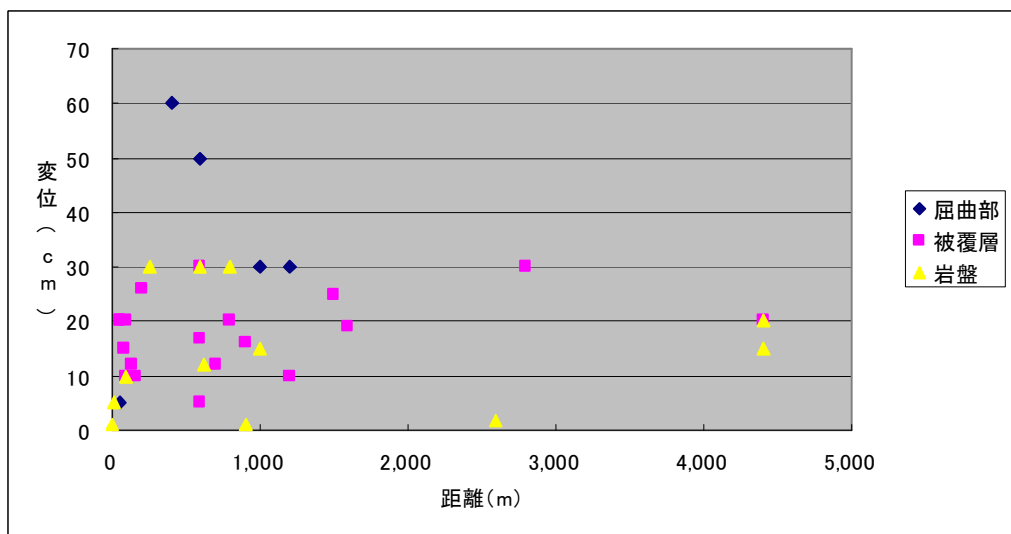


概要図 4 くいちがいの弾性論による変状評価領域の境界変位の算定  
(変状評価領域内のその他の断層や建屋はモデル化しない)

#### (2) 限界検討用変位 $\delta b$ の評価

$\delta b$  は、設計基準事象を超えた状態のリスクを評価する観点から、影響緩和策も視野に入れた変位として想定する。

本検討では過去の地震に伴う地表地震断層の副断層の変位を整理した。その結果を概要図 5 に示す。隣り合う震源断層セグメントの接続部に位置し、「屈曲部」と呼ぶ条件の箇所では断層変位が大きくなる可能性があるが、それ以外では概ね 30cm 以下となっている。日本国内の約 120 年間の記録であるが、確率論的断層変位ハザード解析を参照して、限界検討用変位 $\delta b$  の参考とすることができる。



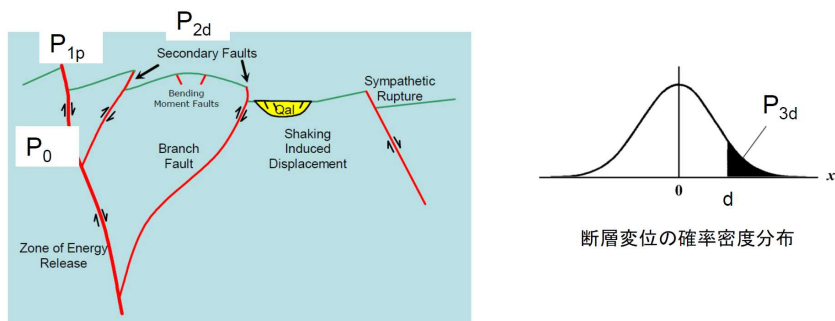
概要図 5 主断層からの距離と副断層の変位

(3) 確率論的断層変位ハザード解析

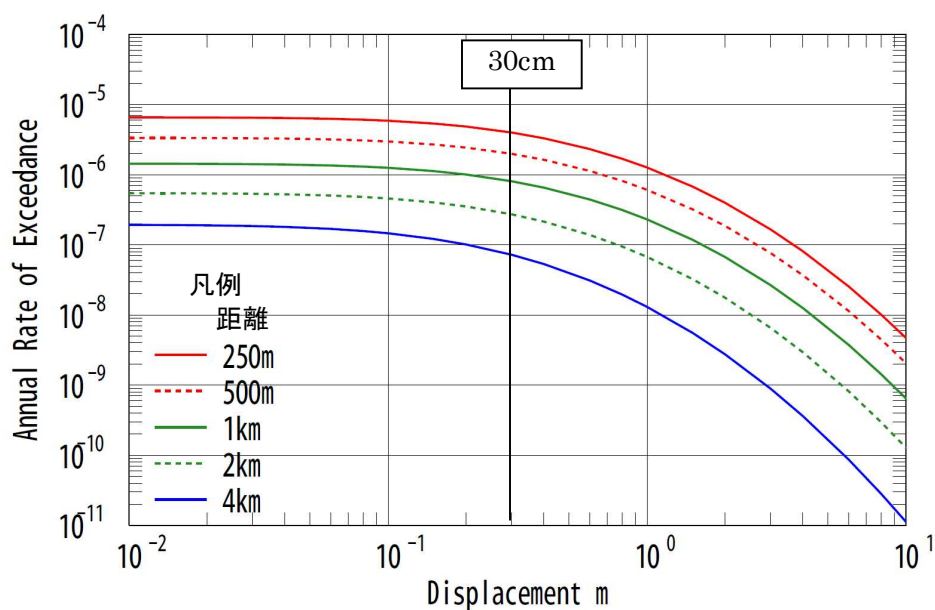
確率論的断層変位ハザード解析に関する国内外の知見を調査した。概要図 6 に確率論的断層変位ハザード解析の概要を示す。本検討では高尾・他の手法に基づき、2つのケース（断層長さ 20km、平均活動間隔 5000 年および断層長さ 80km、平均活動間隔 1000 年）の計算を行った。概要図 7 に断層長さ 20km、平均活動間隔 5000 年（モーメントマグニチュード  $M_w=6.5$ ）の活断層が活動した場合の副断層の断層変位ハザード曲線の計算例を示す。この例では活断層からの距離によらず小さな断層変位であってもその年超過頻度は  $10^{-5}$  以下であること、また、断層変位 30cm の年超過頻度は  $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$  程度であることが分かる。

$$v(d)_{d1} = P_0 \times P_{1p} \times P_{2d} \times P_{3d}$$

- $P_0$  : 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
- $P_{2d}$  : 活断層が活動したとき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



概要図 6 高尾・他(2013)による副断層による断層変位の年超過頻度  $v(d)$  算定の概要 (左図は, J.A.Treiman(2009) に加筆)



概要図 7 断層変位ハザード曲線（副断層）（ $M_w=6.50$  の場合）の例  
（凡例の距離とは活断層と評価地点との距離を表す）

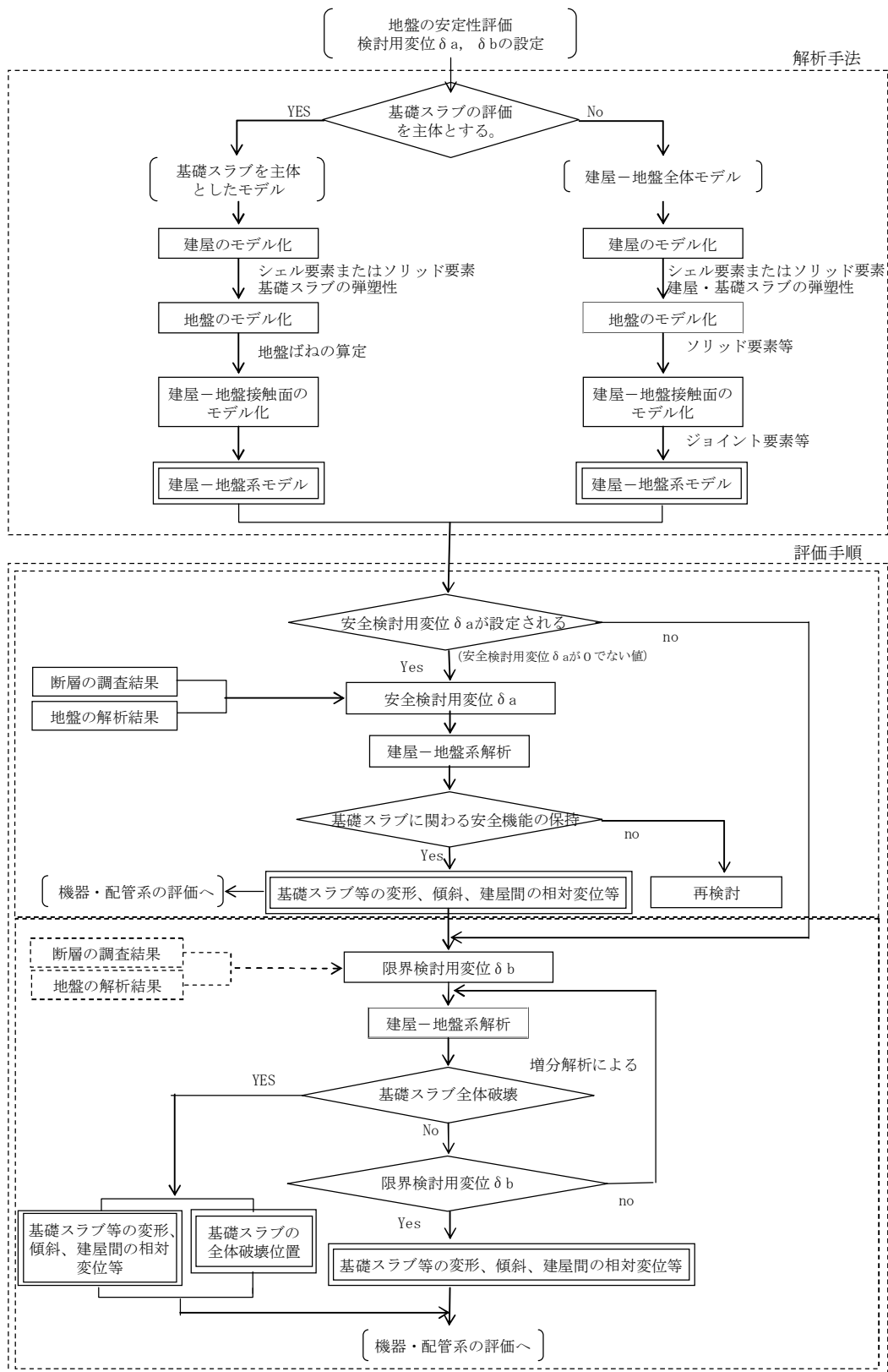
#### 4. 建物・構築物の耐変位安全性評価

##### (1) 耐変位安全性評価の手順

建物・構築物の支持地盤に変状（変位、変形）が生じた場合の建物・構築物の耐変位安全性評価について、解析モデル、荷重の組合せ及び許容限界、機器・配管系への応答の出力等、一連の評価手順を提示した。概要図 8 に建屋の耐変位安全性評価フローを示す。評価手順の概要は以下のとおりである。

- ① 安全検討用変位 $\delta_a$  に対して建物・構築物が構造物全体としての変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し、建物・構築物の終局耐力に対して妥当な安全余裕を有していることを評価する。具体的には、基礎スラブ及び耐震壁の応力やひずみが、許容限界以下に収まっていることを確認する。
- ② 限界検討用変位 $\delta_b$  に対して建物・構築物が構造物全体としての形状を保持し、全体破壊に至らないことを評価する。具体的には、基礎スラブ及び耐震壁を対象とし、局所的な塑性化ではなく、耐震壁の 1 スパンや基礎スラブを切る任意の断面の応力やひずみに基づき全体破壊に至っていないことを確認する。
- ③ 解析結果の基礎スラブ等の変形、傾斜、建屋間の相対変形等を、機器・配管系への耐変位安全性評価への出力とする。



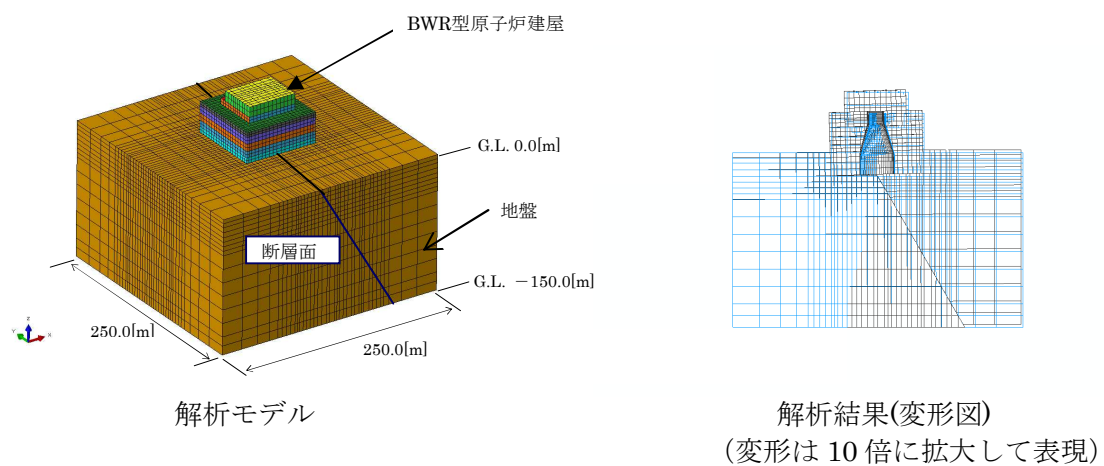


概要図 8 建屋の耐変位安全性評価フロー

## (2) 断層変位に対する原子炉建屋の試解析

BWR 型原子炉建屋及び PWR 型原子炉建屋について建屋直下の断層変位に対する影響評価試解析を実施した。概要図 9 に BWR 型原子炉建屋の試解析概要を示す。

今回は、ある限られたケースでの試解析ではあるが、想定した 30cm の断層変位に対して原子炉建屋の基礎スラブや耐震壁等に生じる応力・変形の傾向を把握することができた。ここでの結果によれば、同一変位を想定した場合は硬い地盤の方が建屋に生じる応力は大きくなる傾向がみられた。また、断層変位の影響は基礎スラブにおいては曲げモーメントより面外せん断力が厳しくなる傾向が見られた。ただし、断層変位の大きさ、方向(正断層、逆断層、横ずれ)及び位置、地盤条件ならびに建屋の違い(炉型、基礎スラブの厚さ・形状等、耐震壁の配置等)により建屋に生じる応力・変形が異なることが想定される。



概要図 9 BWR 型原子炉建屋試解析概要

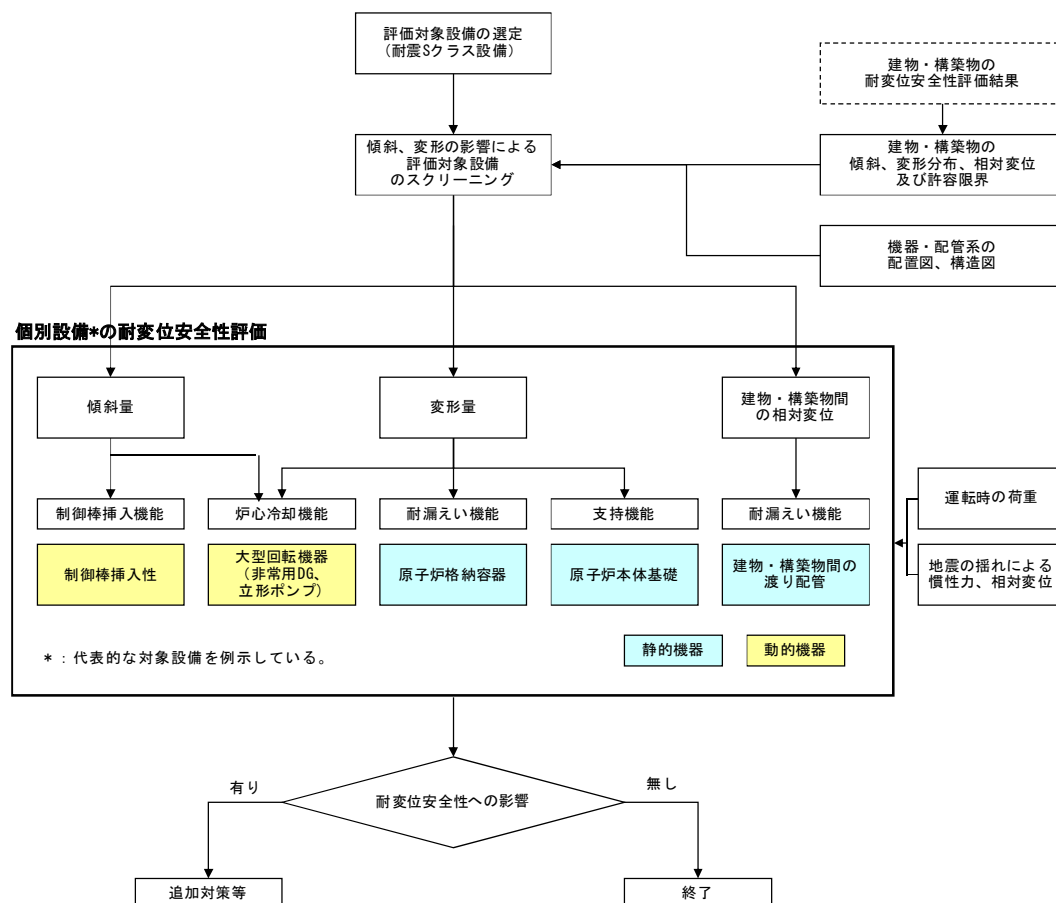
## 5. 機器・配管系の耐変位安全性評価

### (1) 耐変位安全性評価の手順

地盤の変状（変位、変形）による建物・構築物の傾斜、変形及びそれらに伴う建物・構築物間に生じる相対変位が生じた場合の機器・配管系の耐変位安全性評価について、断層変位による影響が想定される代表的な設備を抽出し、荷重の組合せ及び許容限界等、一連の評価手順を示した。概要図 10 に機器・配管系の耐変位安全性評価の検討フローを示す。

### (2) 機器・配管系への断層変位の影響

安全上の重要設備の多くは原子炉建屋内に設置されているため、断層変位が地盤・建屋を介して機器・配管系の傾斜・変形に及ぼす影響は小さいものと考えられる。変位に対する安全性への影響が比較的大きい建物・構築物間の渡り配管については、日本機械学会や日本電気協会の既存の規格基準を準用して相対変位の影響評価を行うことが可能であり、さらに詳細評価により弾塑性解析手法を用いることができる。



概要図 10 機器・配管系の耐変位安全性検討フロー

## 6. おわりに

本検討は敷地内断層の変位に対する原子力発電プラントの総合的な安全性評価の枠組みを示すものである。原子力発電所の設置地盤に変位が生じた場合においては、プラントの安全機能への影響の観点に立って安全性を評価することが適切であり、従来は明確でなかった断層の変位の評価からプラントの耐変位安全性の評価まで一連の道筋をまとめた。

断層変位が施設に及ぼす影響評価については試解析結果を例示したにとどまっております、より詳細な解析や具体的な検討例は示していないが、検討の過程で得られた課題を整理した。主な課題として、断層変位に関する調査・実験・解析の高度化などに係わるもの、確率論的断層変位ハザードの精度向上・適用拡大並びに断層変位 PRA への展開に係わるもの、施設に及ぼす影響評価解析手法の高度化に係わるものなどが挙げられる。

また、地盤変状（変位、変形）だけでなく、深層防護の観点から考えられるすべての事象を考慮した総合的なリスク評価を念頭にアクシデントマネジメントの維持向上を図ることが必要である。その際には原子力に携わる各分野の関係機関・関係者が十分な連携をとって対応する必要がある。

以上