



土木学会・原子力土木委員会  
断層変位評価小委員会講演会

# 敷地内断層の変位に対する評価手法について - JANSI委員会報告の概要 -

---

一般社団法人 原子力安全推進協会  
技術支援部  
鈴木義和

平成25年12月17日

---

世界最高水準の安全性の追求  
～たゆまぬExcellenceをめざして～

一般社団法人 原子力安全推進協会  
Japan Nuclear Safety Institute



# 1. 背景

---

- 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(規則第二章第三条第3項)
  - ・「将来活動する可能性のある断層」が活動することによって地盤にずれが生じ、安全機能に重大な影響を与える恐れがあるため(同規則の解釈、別記1)
  - ・規制委員会による再評価で、地点によっては敷地内断層が「将来活動する可能性が否定できない」断層とされている。
- 他の自然現象(例えば地震、津波、地盤変形)に対しては作用する外力に対して「その安全機能に大きな影響を及ぼすおそれがないものでなければならない」とされている。
- ✓ 断層変位が安全機能に重大な影響を与えるかどうかを科学的・合理的に評価した上で当該支持地盤の上に重要施設を設置できるかどうかを判断すべき
- ✓ 断層変位に対する評価手法の枠組みを構築する必要性が高い

注)規則とは「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を定める規則」を指す

## 2. 委員会設置の目的

---



- 敷地内断層に関する総合的なプラント安全評価を行う手法の枠組みを示すことを目的とする
  - 地震国である日本では、地震に関する数多くの研究の蓄積がある。原子力の安全性の向上には、この知的資源を活用することが肝要
  - このため、地形学、地質学、地盤工学、耐震工学、原子力安全工学等の6名の専門家による議論



### 3. 敷地内断層評価手法検討委員会

#### ➤ 委員構成

主査 山崎晴雄 首都大学東京 大学院教授  
副主査 佃栄吉 産総研 理事  
委員 武村雅之 名古屋大学 教授  
岡本孝司 東京大学 大学院 教授  
井上大栄 電中研 名誉研究アドバイザー  
伊藤洋 電中研 研究アドバイザー

➤ 委員会 平成25年3月~8月 計6回開催

➤ 報告書をJANSI HPで公開

「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」

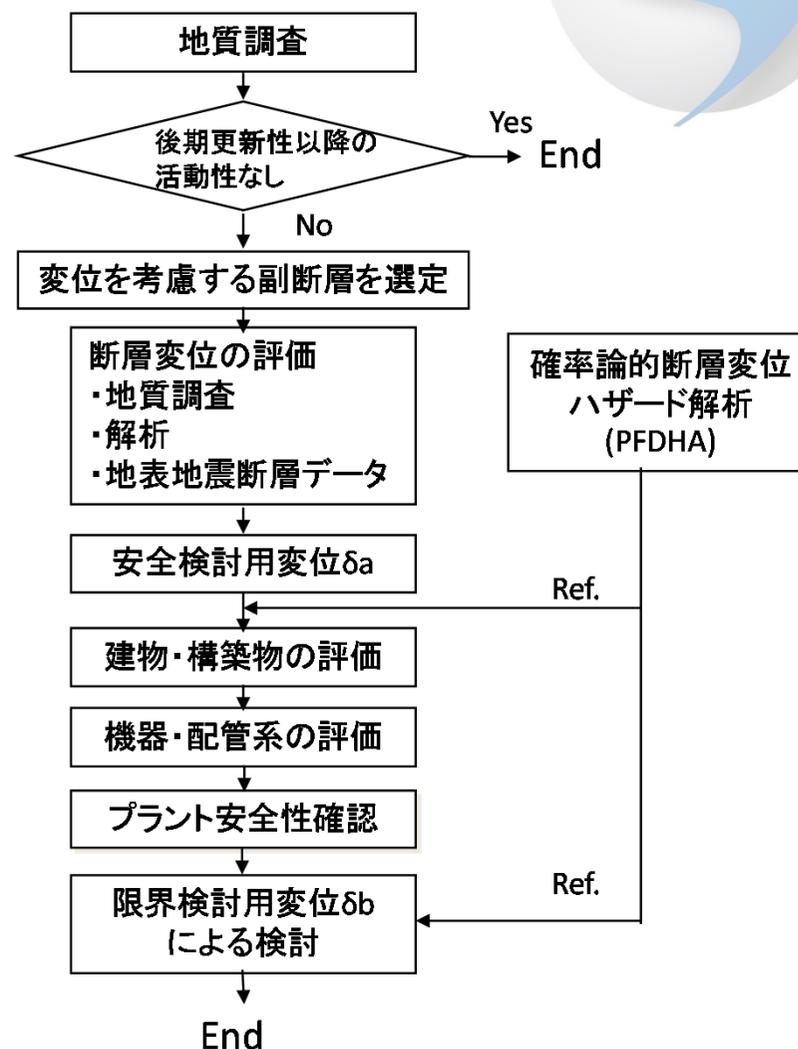
<http://www.genanshin.jp/archive/sitefault/index.html>

## 4.敷地内断層評価手法の検討フロー



### ◆ 評価手法の検討項目

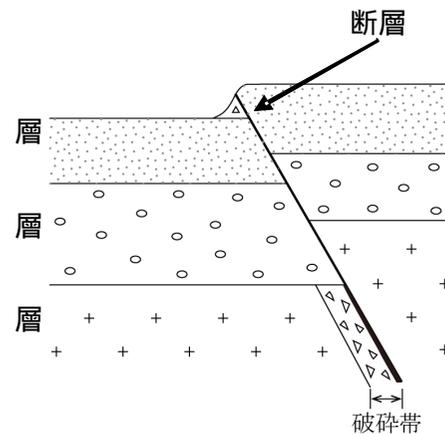
- (1) 断層の調査と区分
- (2) 断層変位の評価方法
- (3) 荷重の組合せと許容限界
- (4) 建物・構築物の耐変位安全性評価
- (5) 機器・配管系の耐変位安全性評価





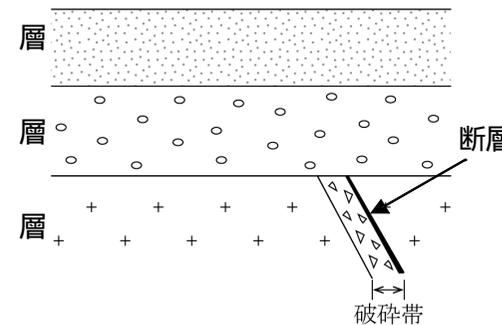
## 5. 断層の調査と区分(1/3)

### ➤ 断層の活動性の認定・上載地層法



活動性あり

繰り返し活動し今  
後も活動する。  
変動地形あり



活動性なし

層堆積以降活  
動していない

層の堆積年代： 後期更新世(十二、三万年前)

## 5. 断層の調査と区分(2/3)



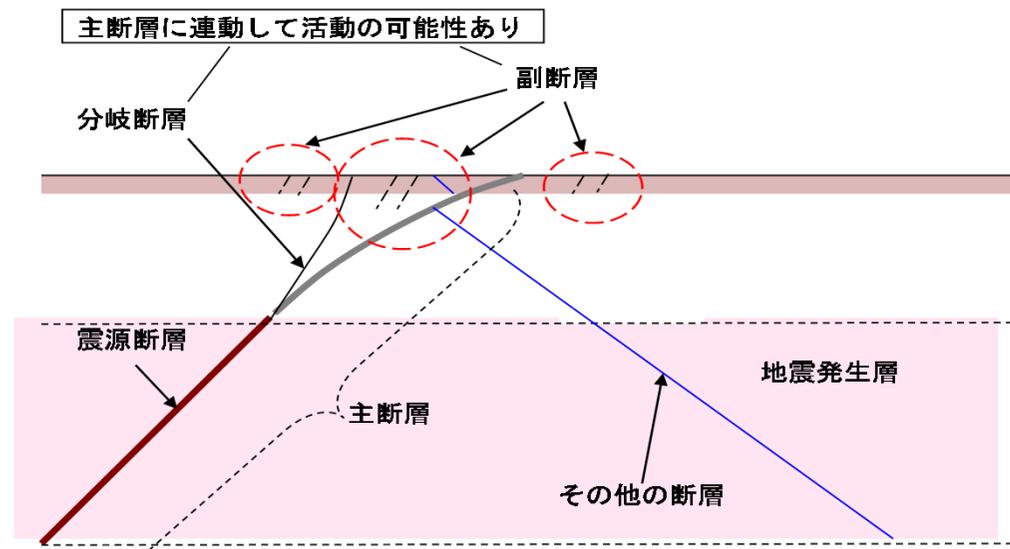
### ➤ 断層の区分・・・主断層、分岐断層、副断層

- 震源断層と関係する活断層

・・・主断層、分岐断層

- 震源断層とは直接は関係しないが地震時に動く可能性がある

・・・副断層



地震時に活動する可能性がある断層の模式図

(規則の解釈、別記1)「将来活動する可能性のある断層等」と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、支持地盤を切る地すべり面を含む

## 5. 断層の調査と区分(3/3)



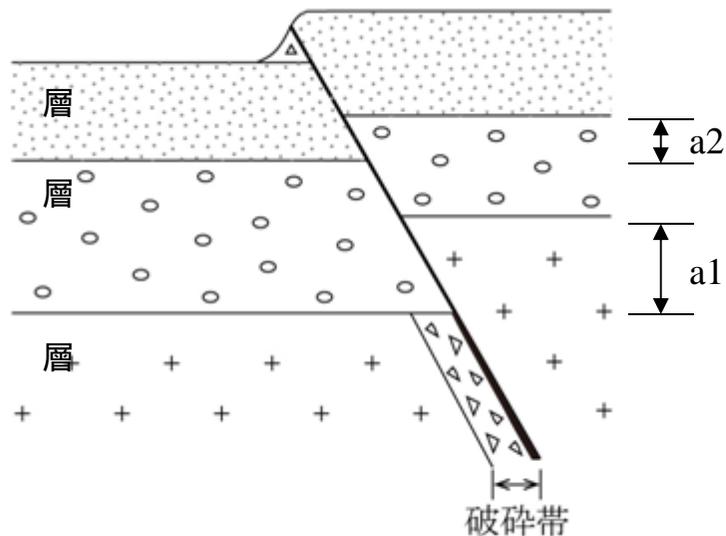
- 日本国内の原子力発電所では、耐震重要施設は岩盤上に設置され、かつ詳細な地質調査によって断層の分布・性状・活動性が把握されている。
    - ・耐震重要施設と断層との位置関係は把握されている。
    - ・耐震重要施設の設置場所に断層変位地形は認められない。
  
  - (1) 活断層(主断層、分岐断層)・・・繰り返し活動するので断層変位地形と対応する。
  - (2) 副断層・・・活断層の活動に伴って動くかもしれない。必ずしも繰り返し動かないことから断層変位地形と対応しない。
- 
- 断層の活動性・成因に関して「異見」が生じ、将来の活動性が否定できない場合には、活動した場合の断層の変位量を評価し、施設に対する影響を工学的に検討・評価する。



## 6. 断層変位の評価方法(1/9)

### ➤ 現地調査による検討

- ・トレンチ調査結果から活動1回当りの変位量を推定  
…… 累積変位量 / 活動回数



### 変位の累積性

古い地層ほど繰り返  
し動いたので、変位  
量が多い ( $a1 > a2$ )

## 6. 断層変位の評価方法(2/9)

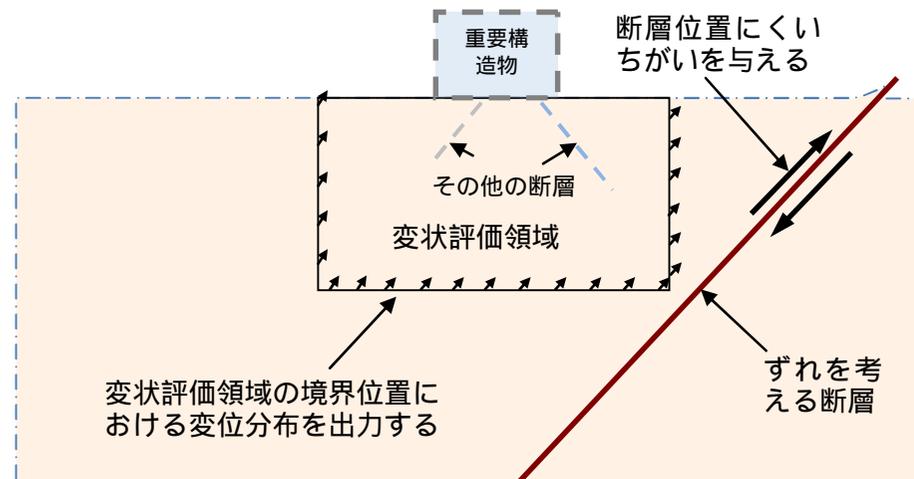


- 解析による方法 …… 種々の手法が開発
  - ・動力学的アプローチ
    - ……断層破壊現象を断層面上に応力-すべり関係を設定。地震波と断層変位を動的に解析(断層がずれながら地震波を発生する)
  - ・静力学的アプローチ
    - ……評価領域の境界に強制変位(or 応力)を与え領域内の変状(変位、変形)を評価
  - ・粒状体モデルによるアプローチ
    - ……破壊現象の再現に優れている(個別要素法など)



## 6. 断層変位の評価方法(3/9)

- 解析による方法 …… 静力学的アプローチの例  
くいちがいの弾性論により評価領域の変位分布を求め、評価領域境界に強制変位として与えて、領域内の変状(変位、変形)を評価する。

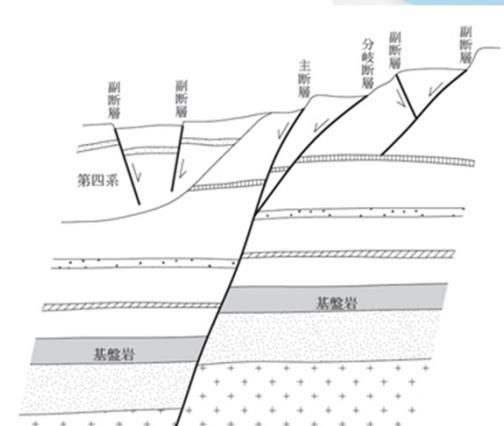


- 複数の解析手法を用い、総合的に検討して変位量を評価する。

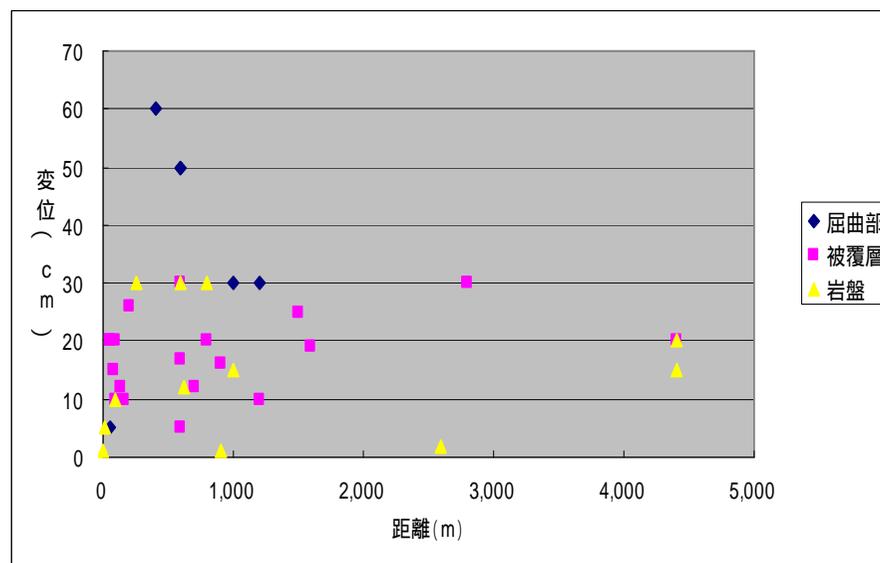
## 6. 断層変位の評価方法(4/9)

### ▶ 地表地震断層調査－副断層の変位－

- ・明治以降日本国内のMj6.5以上の地震から地表地震断層が生じた地震を対象に断層変位地形に対応しない副断層の変位量を整理
- ・原子力発電所の基礎は岩盤であるので岩盤における変位に着目

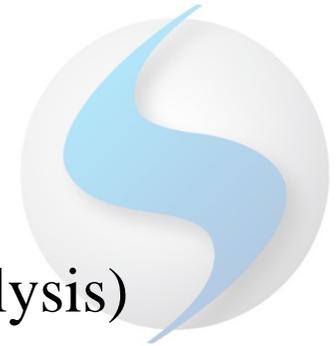


- ・岩盤と被覆層とで大きな差はなく凡そ30cm以下
- ・複数の震源断層が接続する「屈曲部」では変位が大きくなる可能性があること、および日本国内の約120年間のデータであることに留意する必要がある



世界最高水準の安全性の追求  
～たゆまぬExcellenceをめざして～

一般社団法人 原子力安全推進協会  
Japan Nuclear Safety Institute



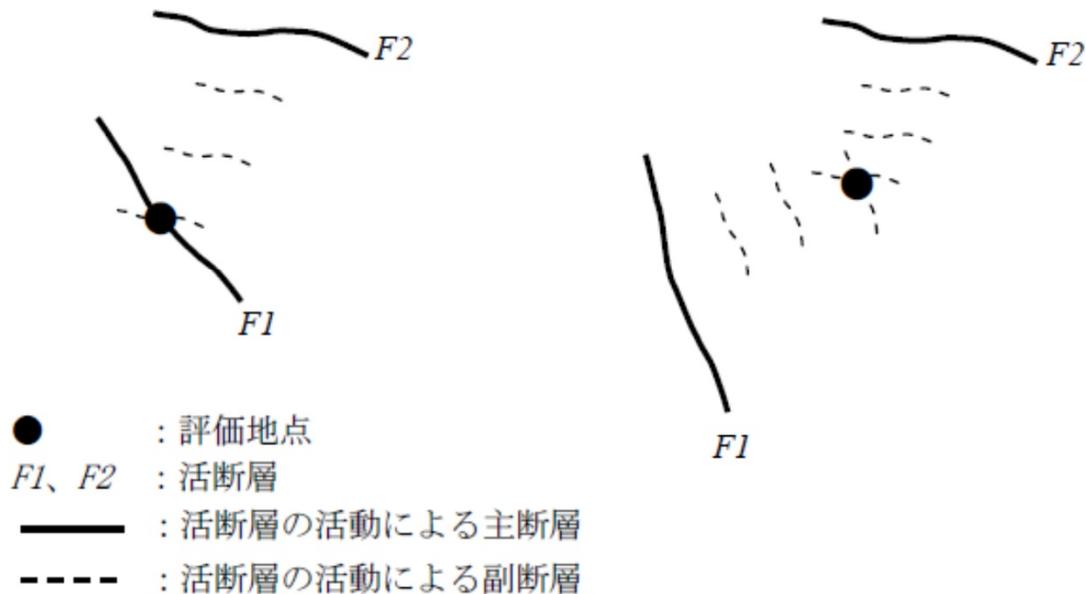
## 7. 断層変位の評価方法(5/9)－PFDHA－

### 確率論的断層変位ハザード評価

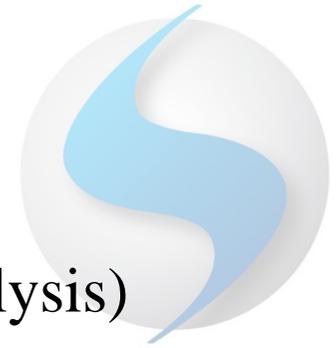
(Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)

➤ 主断層と副断層、両者を考慮して評価

(a)活断層が評価地点を通る場合 (b)活断層が評価地点を通らない場合



(高尾・他:「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、2013、pp17-36)



# 7. 断層変位の評価方法(6/9)－PFDHA－ 確率論的断層変位ハザード評価

(Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)

- ・敷地内断層を副断層として評価(ケースbの例)
- ・副断層の変位がある値(d)以上となる1年あたりの頻度

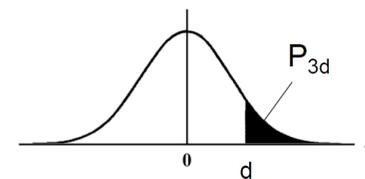
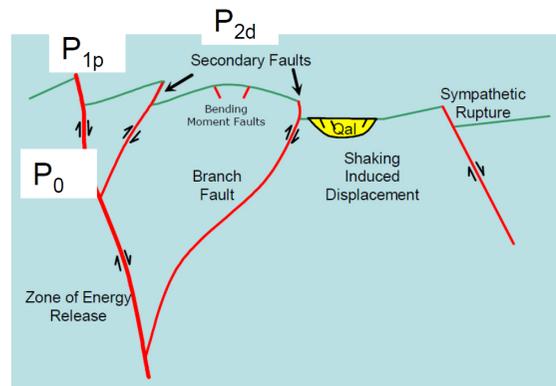
$$v(d)_{d1} = P_0 \times P_{1p} \times P_{2d} \times P_{3d}$$

$P_0$  : 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



断層変位の確率密度分布

(高尾・他(2013), Treiman(2009)加筆)



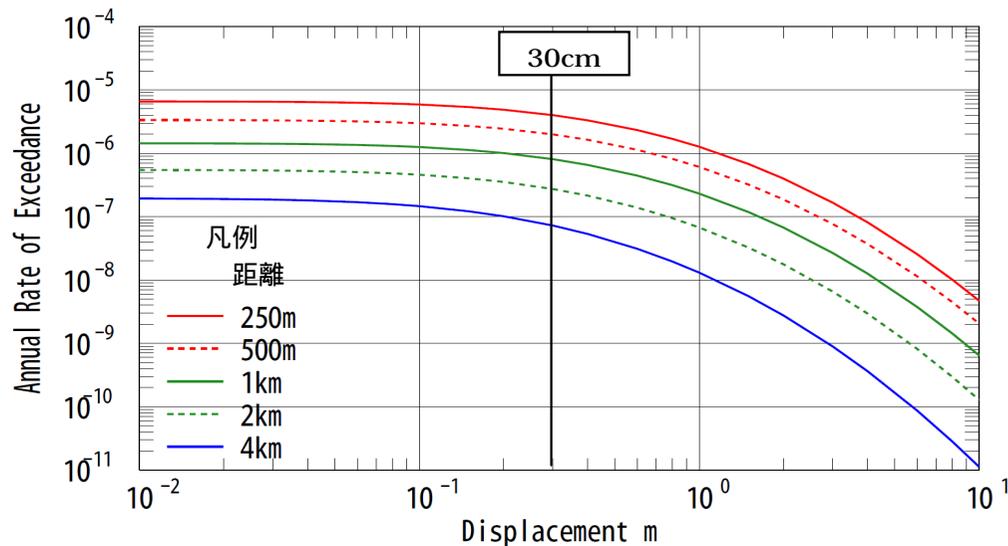
## 7. 断層変位の評価方法(7/9)－PFDHA－

PFDHAの試計算例 – 高尾、他 (2013)の方法に基づく –

……断層長さ 20km、平均活動間隔 5000年

( $M_w=6.5$ )

活断層からの距離に関わらず、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



注) 凡例の距離とは活断層と評価地点との距離を表す。

計算格子が $500\text{m} \times 500\text{m}$  であり、格子を小さくすると頻度が小さくなることが知られている

## 7. 断層変位の評価方法(8/9)－PFDHA－



### ◆ PFDHAの活用例

- IAEA Specific Safety Guide No.9 “Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations”
  - ・Capable Fault -地表にずれを生じさせかねない断層- の評価
  - ・活動的な地域では数万年オーダー(後期更新世～完新世)で評価
  - ・既設サイトを決定論的手法と確率論的手法(PFDHA)で検討
  - ・PFDHAでは主変位と副変位を考慮
    - 主変位(primary displacement)・・・震源断層に直接関係
    - 副変位(secondary displacement)
      - ・・・地震性のずれ(pre-existing seismogenic slip planes)
      - 非地震性のずれ(non-seismogenic slip planes) の両者
- 米国 Diablo Canyon PP・Shoreline 断層の活動による DCPDにおける断層変位の影響評価(NRC, 2011)

## 7. 断層変位の評価方法(9/9) - 検討用変位 -



- 安全検討用変位  $\delta_a$  …… 基準地震動 $S_s$  などに対応
  - ・地質調査結果 / 解析による検討に基づき工学的な判断を踏まえて、決定する。
  - ・PFDHAに基づき、年超過頻度 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ を満足することを確認する。
  
- 限界検討用変位  $\delta_b$  …… 基準超えの検討
  - ・断層変位の想定の不確かさが他の自然事象より大きい。
  - ・設計基準を超えた状態のリスクを評価する観点から影響緩和策を視野に入れた変位を設定して、具体的な検討を行う。



## 8. 荷重の組合せと許容限界

---

### ◆ 安全検討用変位 $\delta_a$ に対して

#### ➤ 建物・構築物

- ・常時及び運転時に作用する荷重と地震時荷重に加え断層変位による影響を考慮
- ・構造物全体として終局状態(変形能力、終局耐力)について余裕を有する

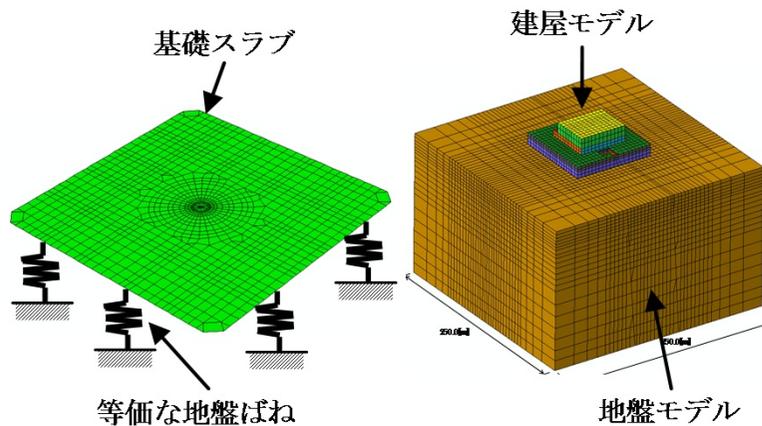
#### ➤ 機器・配管系

- ・運転時と地震時荷重に加え断層変位による影響(基礎スラブの変形・傾斜および建屋間相対変位)を考慮
- ・その施設に要求される機能を保持する

# 9. 建物・構築物の耐変位安全性評価(1/6)

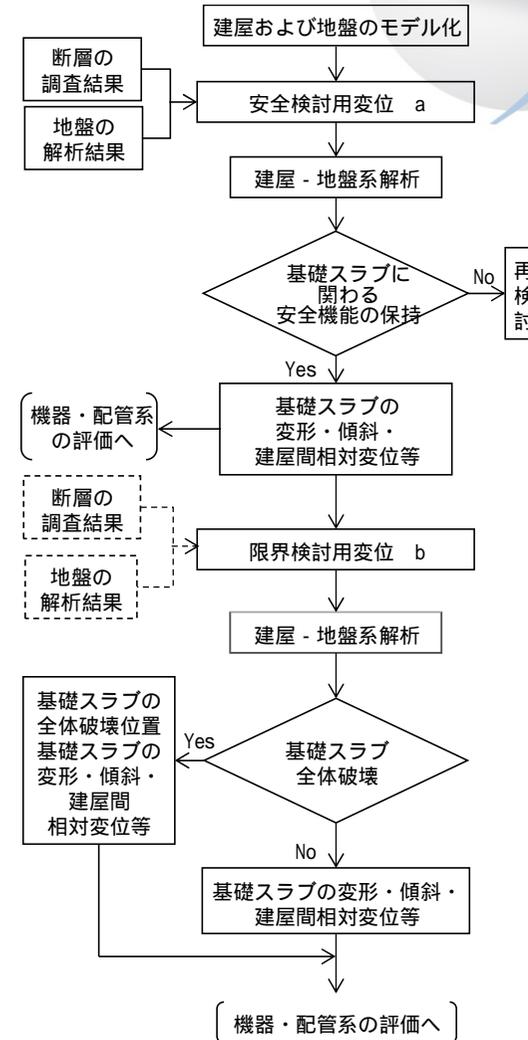


- 解析モデル・・・建屋～地盤系解析
  - ・基礎スラブを主体とするモデル
  - ・建屋～地盤全体モデル



基礎スラブを主体としたモデル 建屋～地盤全体モデル

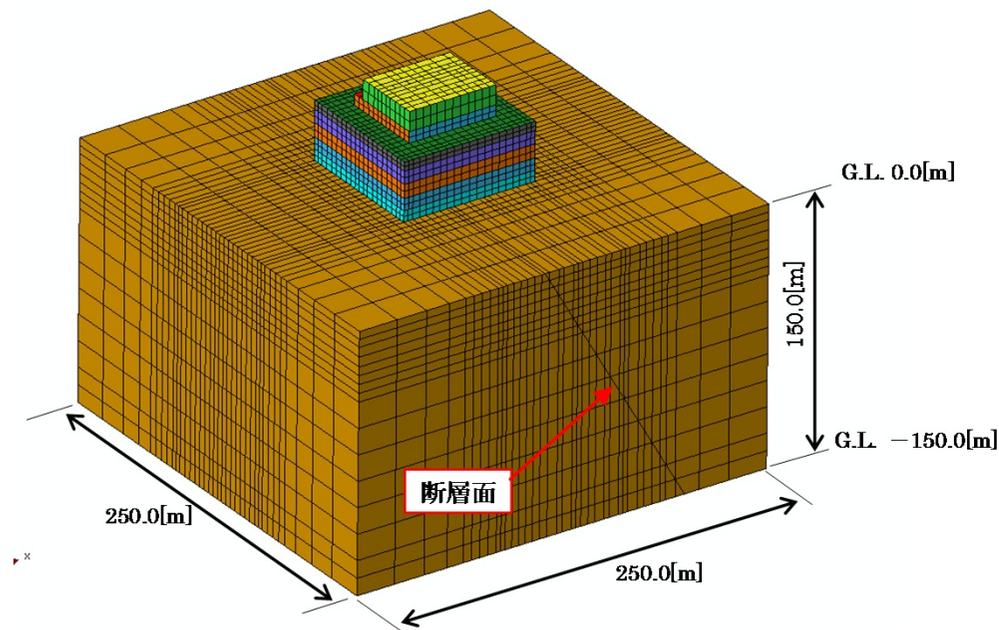
- 機器・配管系の評価へのOUTPUT
  - ・基礎スラブの変形・傾斜および建屋間相対変位など





## 9. 建物・構築物の耐変位安全性評価(2/6)

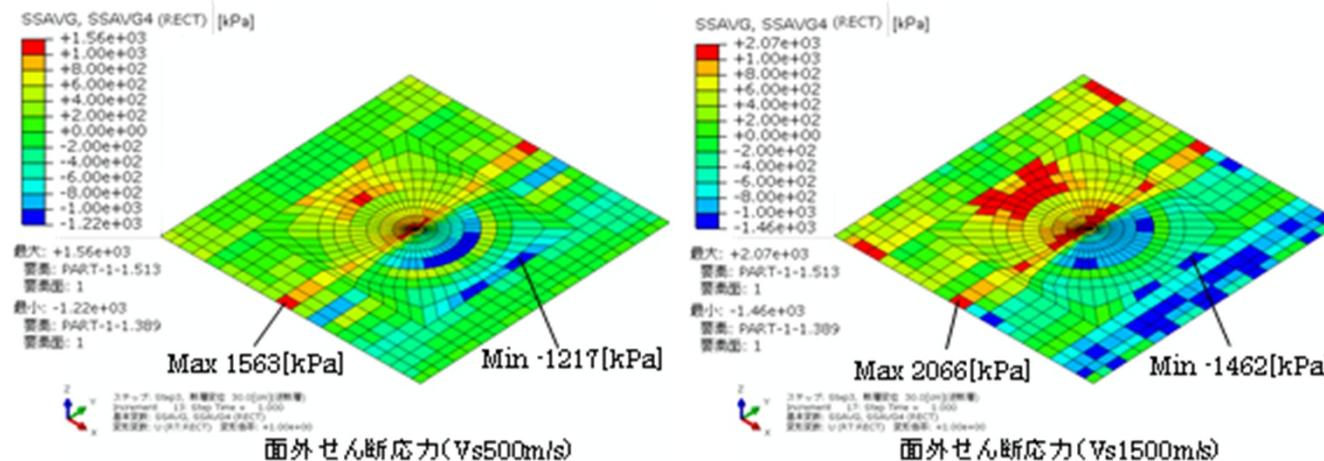
- 試解析例(1) BWR型原子炉建屋
  - ・三次元弾塑性解析(建屋～地盤全体モデル)
  - ・建屋ほぼ中央に逆断層変位(最大30cm、傾斜角 60 度)を作用
  - ・支持地盤の剛性を  $V_s = 500\text{m/s}$  (軟岩) と  $V_s = 1500\text{m/s}$  (硬岩)





## 9. 建物・構築物の耐変位安全性評価(3/6)

- 試解析例(1) BWR型原子炉建屋
  - ・地盤・建屋全体解析が可能である
  - ・建屋各部分は破壊に至らず、基礎スラブや耐震壁等に生じる応力・変形の傾向を把握できる
  - ・支持地盤の剛性が高い方が大きな応力が発生



BWR原子炉建屋の応力解析結果の例  
(基礎スラブ面外せん断応力の例、変位 30cm)

世界最高水準の安全性の追求  
～たゆまぬExcellenceをめざして～

一般社団法人 原子力安全推進協会  
Japan Nuclear Safety Institute

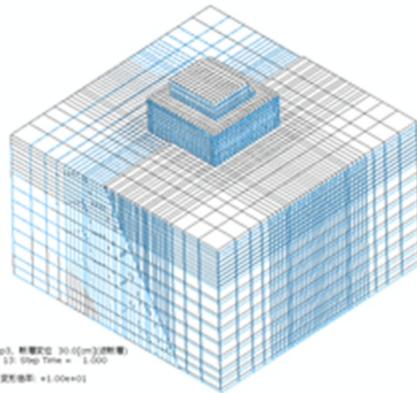


# 9. 建物・構築物の耐変位安全性評価(4/6)

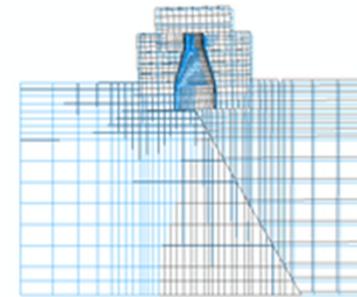
## ➤ 試解析例(1) BWR型原子炉建屋

変形図 鳥瞰図 < ケース1:  $V_s=500$  m/s >

最大 X: +1.66e-03  
最小 X: -2.42e-01  
最大 Y: +1.87e-02  
最小 Y: -1.87e-02  
最大 Z: +2.60e-01  
最小 Z: -4.71e-03  
節点: FAWT-0-1.113063  
節点: FAWT-0-1.1426  
節点: FAWT-0-1.105708  
節点: FAWT-0-1.106318  
節点: FAWT-0-1.112501  
節点: FAWT-0-1.1563

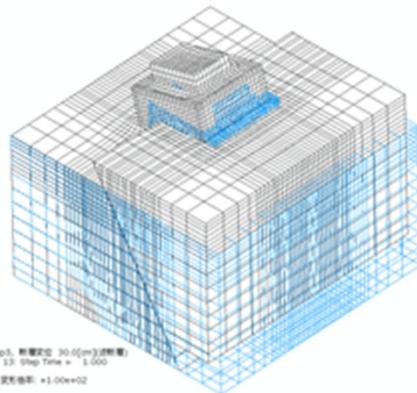


最大 X: +1.66e-03  
最小 X: -2.42e-01  
最大 Y: +1.87e-02  
最小 Y: -1.87e-02  
最大 Z: +2.60e-01  
最小 Z: -4.71e-03  
節点: FAWT-0-1.113063  
節点: FAWT-0-1.1426  
節点: FAWT-0-1.105708  
節点: FAWT-0-1.106318  
節点: FAWT-0-1.112501  
節点: FAWT-0-1.1563

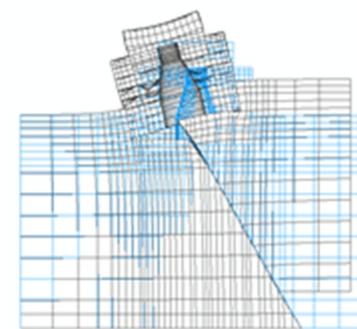


(変形倍率10倍)

最大 X: +1.66e-03  
最小 X: -2.42e-01  
最大 Y: +1.87e-02  
最小 Y: -1.87e-02  
最大 Z: +2.60e-01  
最小 Z: -4.71e-03  
節点: FAWT-0-1.113063  
節点: FAWT-0-1.1426  
節点: FAWT-0-1.105708  
節点: FAWT-0-1.106318  
節点: FAWT-0-1.112501  
節点: FAWT-0-1.1563



最大 X: +1.66e-03  
最小 X: -2.42e-01  
最大 Y: +1.87e-02  
最小 Y: -1.87e-02  
最大 Z: +2.60e-01  
最小 Z: -4.71e-03  
節点: FAWT-0-1.113063  
節点: FAWT-0-1.1426  
節点: FAWT-0-1.105708  
節点: FAWT-0-1.106318  
節点: FAWT-0-1.112501  
節点: FAWT-0-1.1563

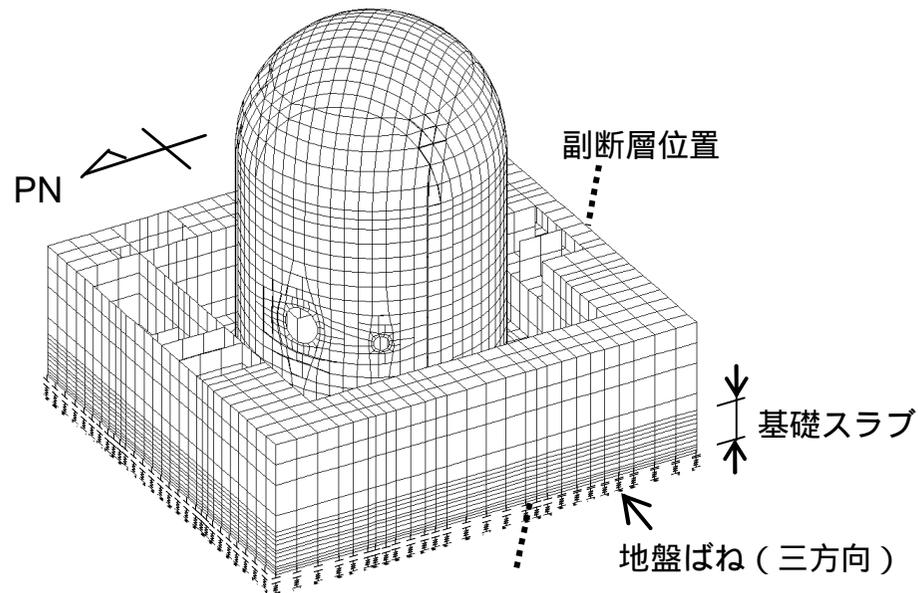


(変形倍率100倍)



## 9. 建物・構築物の耐変位安全性評価(5/6)

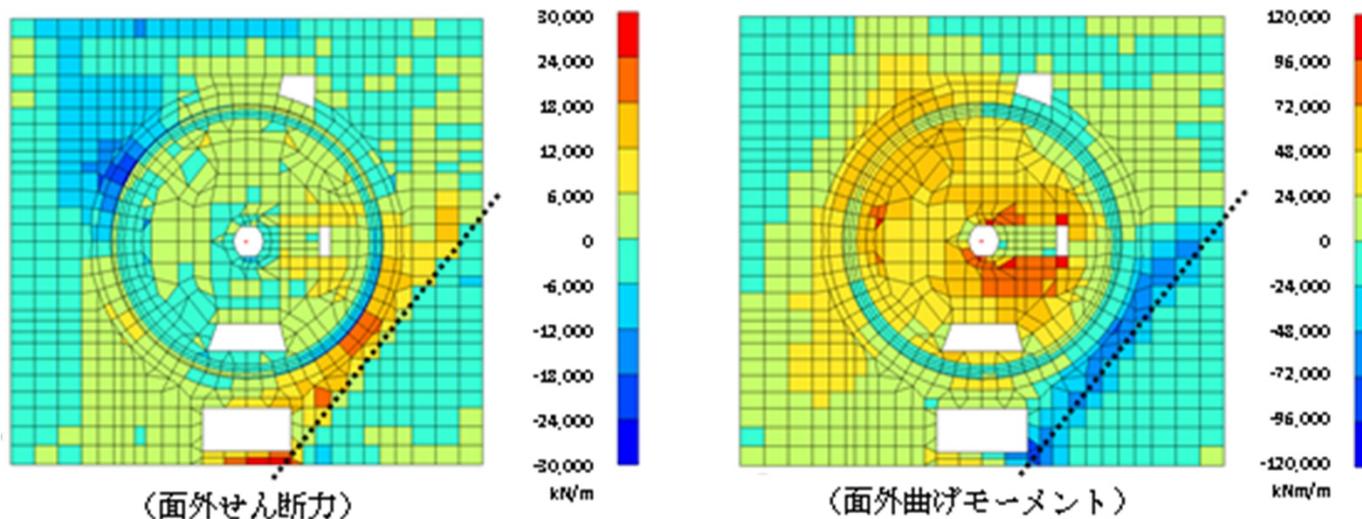
- 試解析例(2) PWR型原子炉建屋
  - ・三次元弾塑性解析(建屋～地盤ばねモデル)
  - ・建屋隅角部に正断層変位(最大30cm)を作用
  - ・支持地盤の剛性を  $V_s = 1600\text{m/s}$  (硬岩)



## 9. 建物・構築物の耐変位安全性評価(6/6)



- 試解析例(2) PWR型原子炉建屋
  - ・試解析例(1)と同様、建屋各部は破壊に至らず、基礎スラブや耐震壁等に生じる応力・変形の傾向を把握できる
  - ・地盤ばねモデルによっても解析可能



南北方向断面力の例

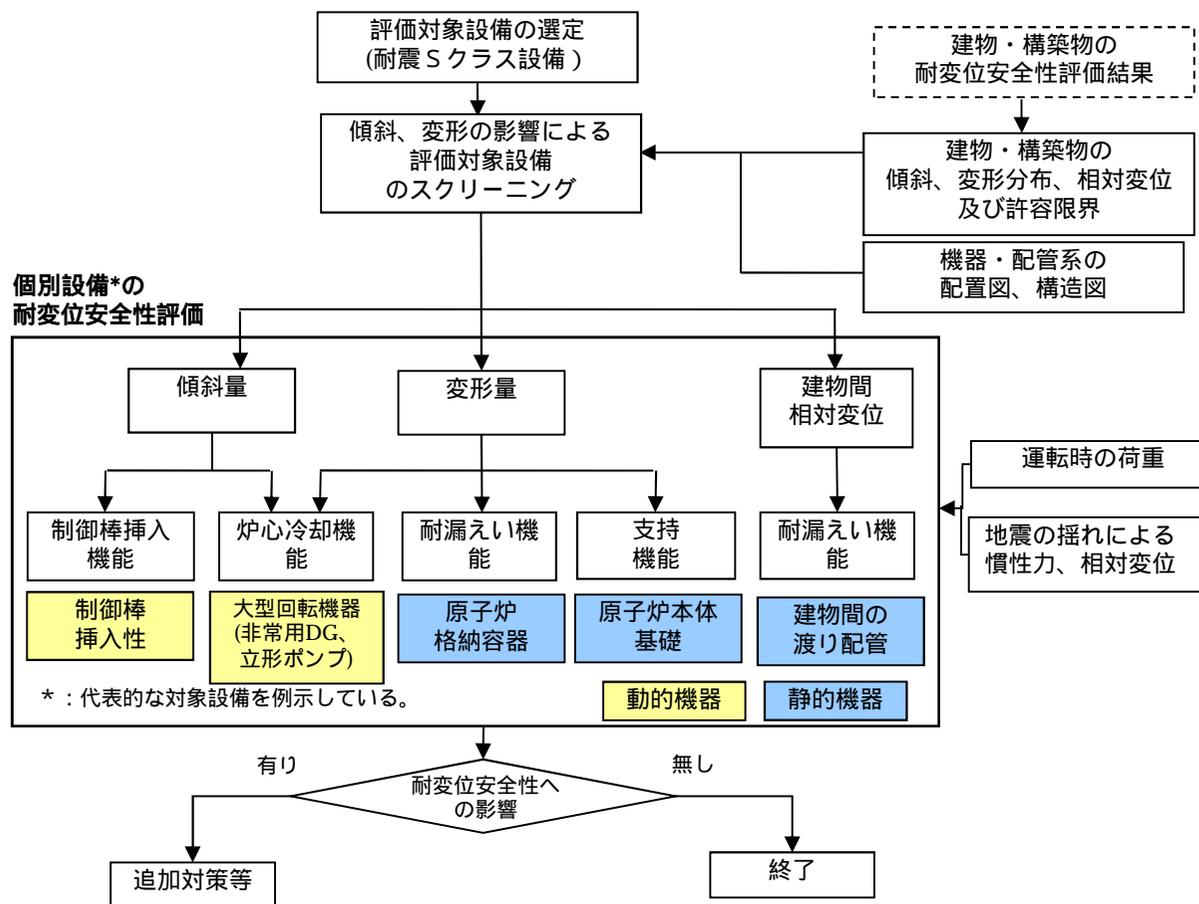
- 今回の検討はあくまでも試解析であることに留意すること

## 10. 機器・配管系の耐変位安全性評価(1/3)



- 安全上重要な施設は、原子炉建屋等に収納されている
- 断層変位は地盤～建物・構築物を介して機器・配管系に作用する
- 基礎スラブの変形、傾斜、建物・構築物間の相対変位に対する評価が必要
- 基礎が全体破壊しなければ、既往の耐震・構造評価手法によって機器・配管系の機能保持評価が可能
- 特に建物間の渡り配管に対して断層変位による相対変位に留意する必要がある
  - 地震時の相対変位に対する評価手法を準用可能

# 10. 機器・配管系の耐変位安全性評価(2/3)

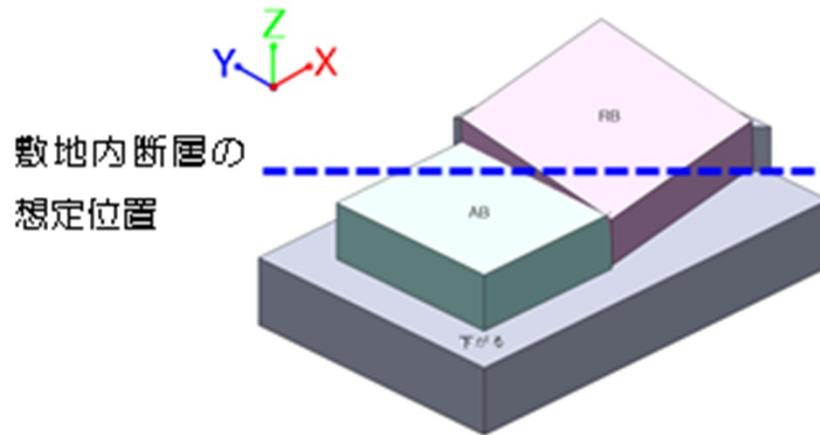


耐変位安全性評価の検討フロー

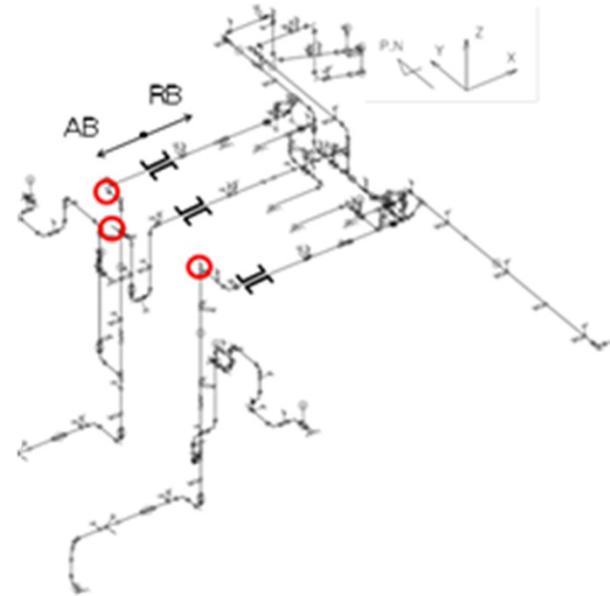
# 10. 機器・配管系の耐変位安全性評価(2/3)



## ➤ 渡り配管の検討イメージ



(敷地内断層の変位モード)  
※わかり易さのため変位量を拡大している。



敷地内断層変位: 300mm

建屋間相対変位: 約200mm

保守的に断層変位が一定の繰返し数を有すると想定

→ JEAG4601の例に基づき評価可能



## 11. まとめと今後の課題

---

- 断層変位に対する原子力発電所の安全性評価手法の枠組みを示した
  
- 主な課題は以下のとおり
  - ・断層変位に関する現地調査データの蓄積および室内実験・数値解析手法の高度化
  - ・確率論的断層変位ハザード解析手法 (PFDHA) の適応拡大および精度向上ならびに断層変位PRA (確率論的リスク評価) の開発 (フラジリティ解析、事故シーケンス解析を含む)
  - ・建物・構築物の耐変位解析手法の高度化
  - ・総合的なリスク評価に基づくアクシデントマネジメントの維持向上