

# 断層変位による 建物・構築物(原子炉建屋)の試解析 について

一般社団法人 原子力安全推進協会  
辻 弘一

平成26年7月18日

# 目次

---



- 前回 (H25年12月) の講演概要
- 試解析の目的
- コンクリートの破壊性状
- BWR原子炉建屋の試解析
- PWR原子炉建屋の試解析
- 今後の課題

## 前回 (H25年12月) の講演概要

### 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「实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

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

## 前回 (H25年12月) の講演概要

(H25.12.17) 断層変位評価小委員講演会資料  
-敷地内断層の変位に対する評価手法について-

### 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

## 前回 (H25年12月) の講演概要

(H25.12.17) 断層変位評価小委員講演会資料  
-敷地内断層の変位に対する評価手法について-

### 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>

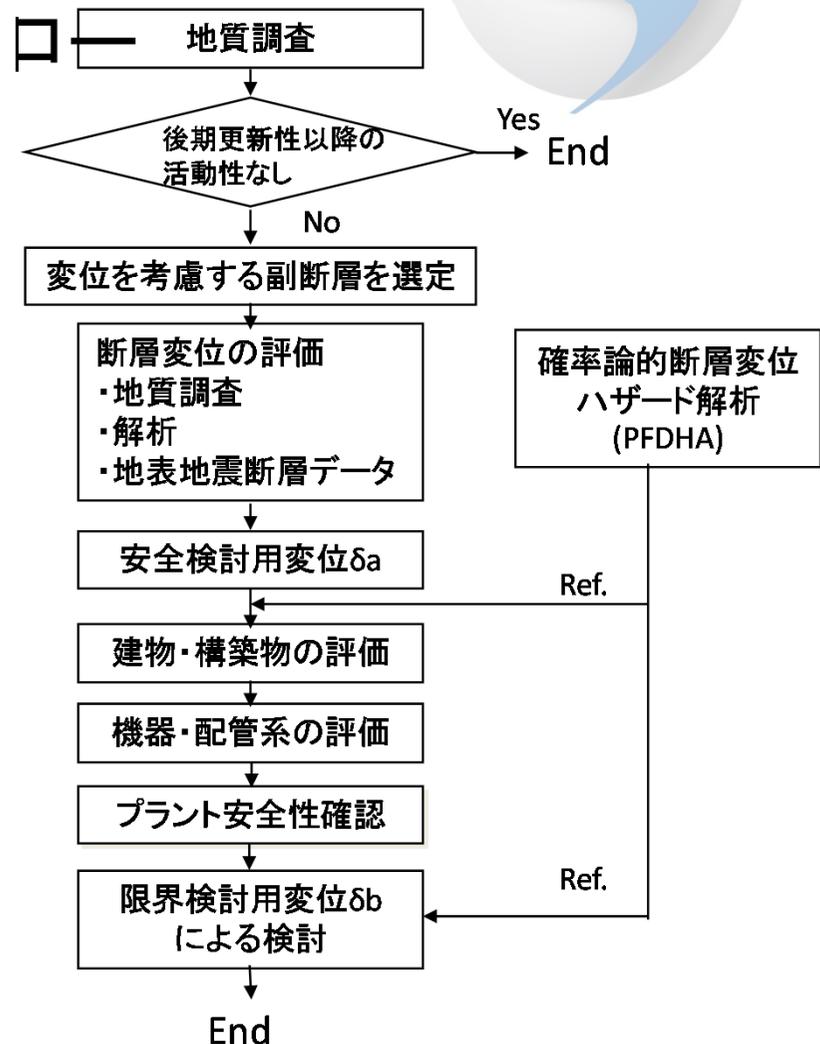
# 前回 (H25年12月) の講演概要

(H25.12.17) 断層変位評価小委員講演会資料  
-敷地内断層の変位に対する評価手法について-

## 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



## 試解析の目的

---

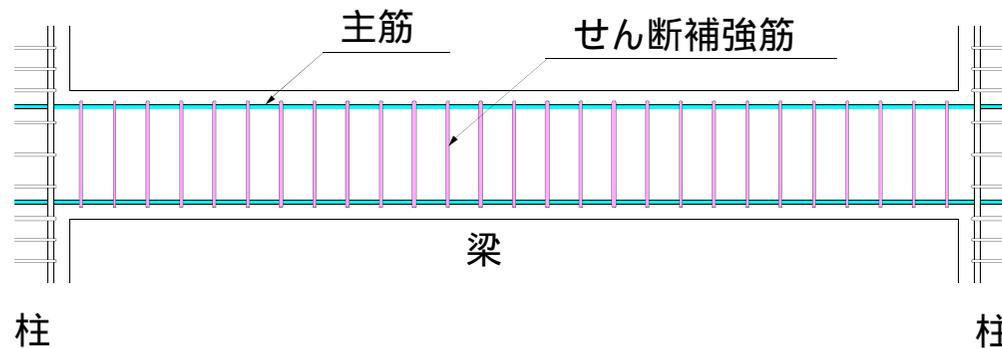


- これまで原子力施設では、断層変位が建物・構築物の基礎下に生じた場合の安全性評価はほとんど行われていない。
- FEM 3次元弾塑性解析など、従来の手法を組合わせた手法を用いて、断層変位による建屋の解析が可能か、安全性評価が可能か、を知る
- 断層変位が何cmまでなら安全か、を知るためではない

# コンクリートの破壊性状 鉄筋コンクリート構造



- コンクリート: 圧縮力を負担
- 鉄筋 : 引張力を負担



鉄筋コンクリート梁の配筋例

# コンクリートの破壊性状

## 鉄筋コンクリート部材の破壊性状



- 曲げ破壊 : 急激な破壊は生じない
- せん断破壊 : 急激な荷重低下が生じる脆性的な破壊  
好ましくない

	終局状態	荷重 - 変形関係
曲げ破壊		
せん断破壊		

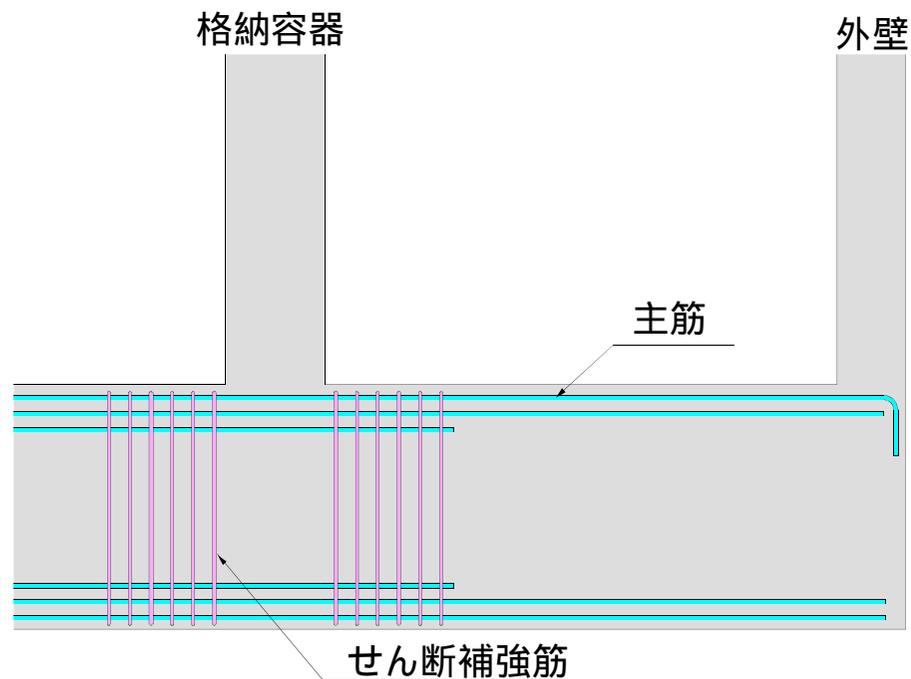
終局状態と荷重 - 変形関係

コンクリートの破壊性状

## 原子炉建屋基礎スラブの配筋例



- 主筋 : 上端、下端
- せん断補強筋 : 地震時の面外せん断力が大きい部分に配筋 (例えば格納容器の下部)

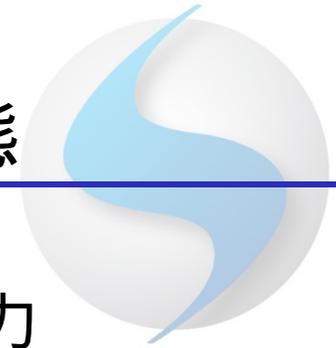


### 原子炉建屋基礎スラブの配筋例

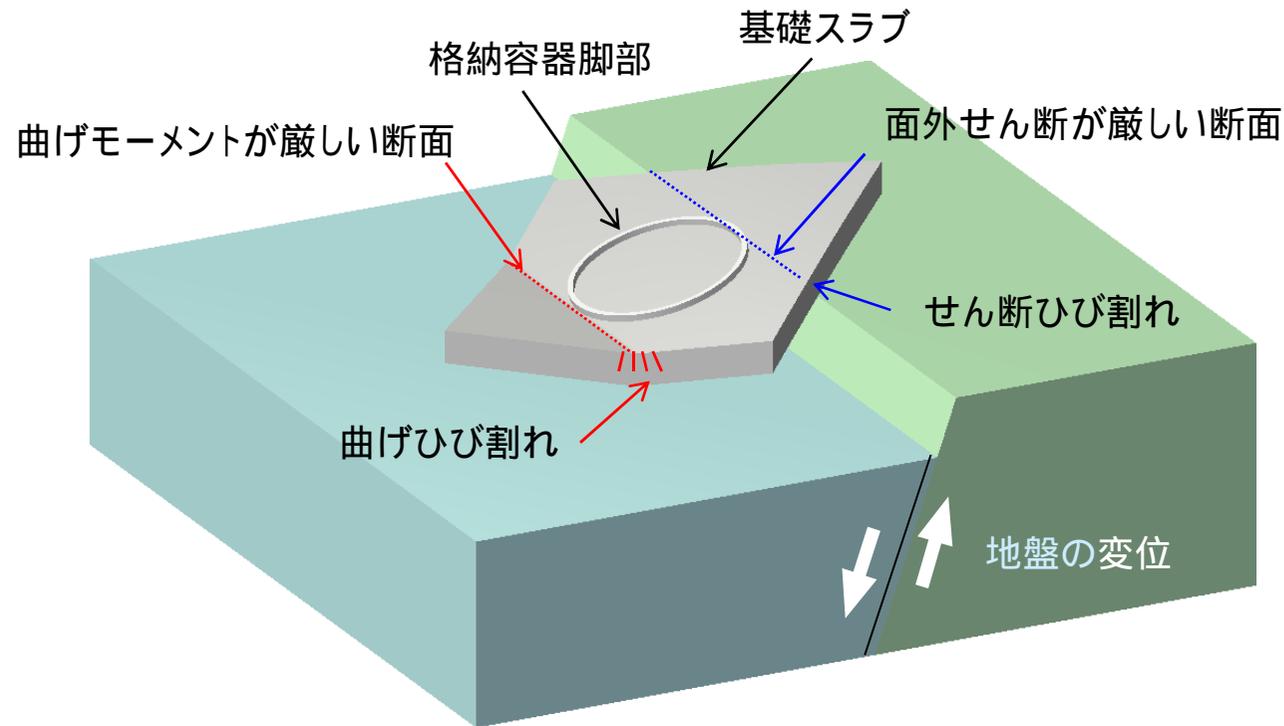
世界最高水準の安全性の追求  
~たゆまぬExcellenceをめざして~

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

# コンクリートの破壊性状 地盤変位が作用した基礎スラブの応力状態



- 地盤変位が生じた部分に大きな面外せん断力



地盤変位が作用する基礎スラブの応力状態例

# BWR原子炉建屋の試解析 試解析の概要

---

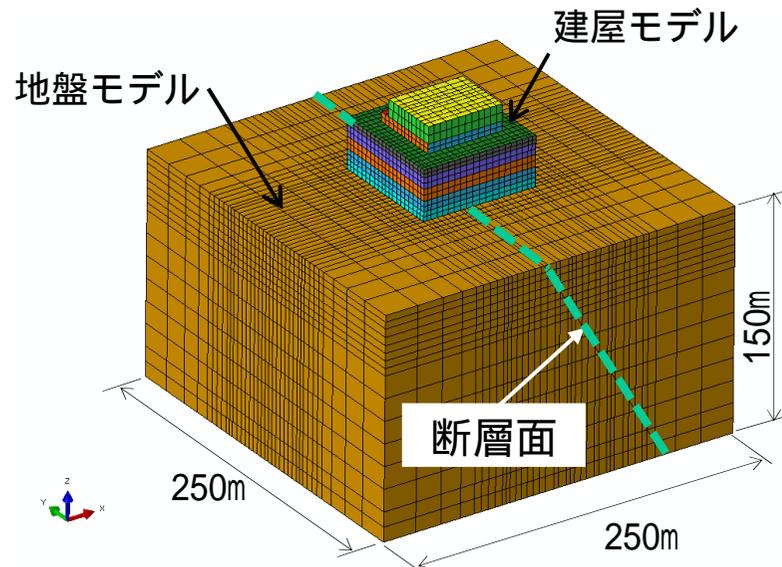


- 仮想のBWR型原子力発電所
- 原子炉建屋 基礎スラブ中心部に縦ずれ30cm(逆断層)
- 解析プログラム：Abaqus Standard Ver6.12-3
- 地盤と建屋をモデル化
- 鉄筋コンクリート部材の弾塑性を考慮
- 地盤  $V_s=500\text{m/s}$ (軟岩)、  $V_s=1500\text{m/s}$ (硬岩)

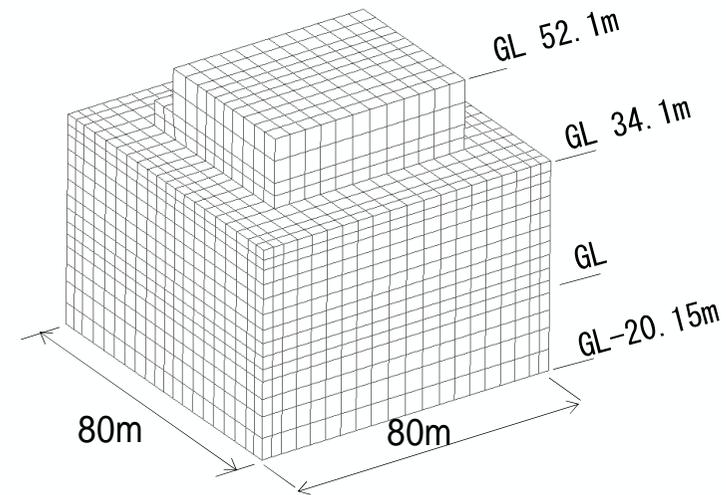
# BWR原子炉建屋の試解析 解析モデル



- 建屋サイズ80 × 80m、基礎スラブ厚さ5.5m、建屋2層埋込
- 地盤モデル250m × 250m × (深さ)150m
- 建屋：3次元シェル要素、3次元はり要素（節点数 6,572、要素数 7,824）
- 地盤：3次元ソリッド要素（節点数 23,565、要素数 20,424）
- 建屋と地盤の間及び地盤の断層面：地盤変位作用前は固着条件、地盤変位作用後は摩擦と付着を考慮しない接触条件



建屋-地盤モデル



建屋モデル

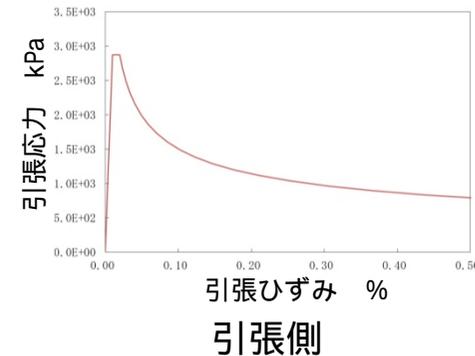
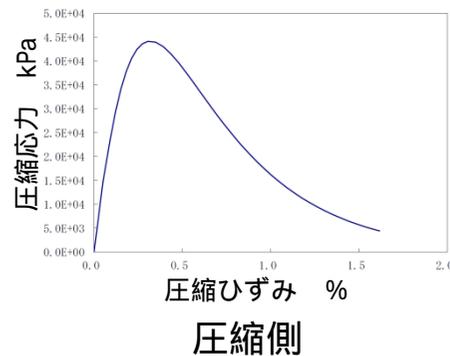
世界最高水準の安全性の追求  
～たゆまぬExcellenceをめざして～

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

# BWR原子炉建屋の試解析 材料条件



- コンクリート
  - $F_c=30\text{N}/\text{mm}^2$
  - 圧縮側構成側：コンクリート標準示方書による
  - 引張側構成側：岡村、出雲の式に準拠

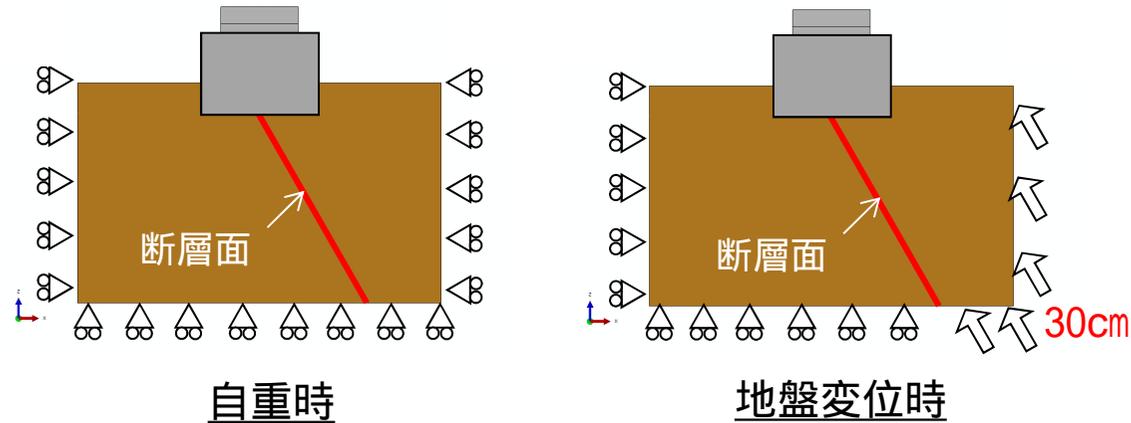


- 鉄筋
  - SD345
  - 降伏後完全弾塑性
- 地盤
  - Case1 :  $V_s=500\text{m}/\text{s}$     ヤング係数  $1.43 \times 10^6\text{kN}/\text{m}^2$
  - Case2 :  $V_s=1500\text{m}/\text{s}$     ヤング係数  $1.28 \times 10^7\text{kN}/\text{m}^2$

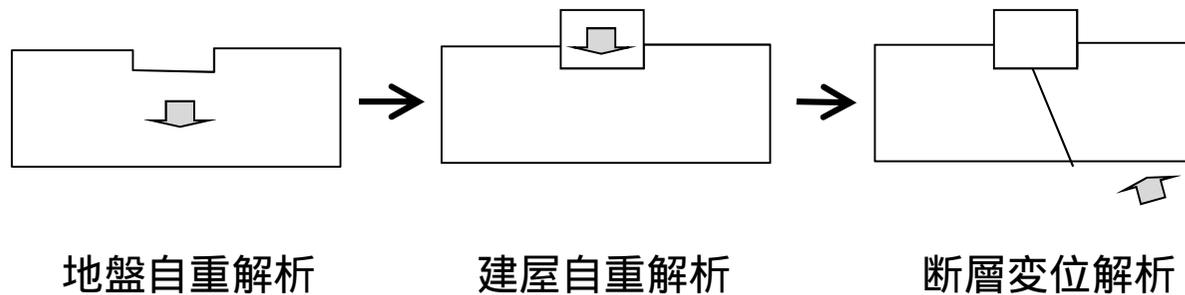
# BWR原子炉建屋の試解析 境界条件と荷重ステップ



## ● 境界条件

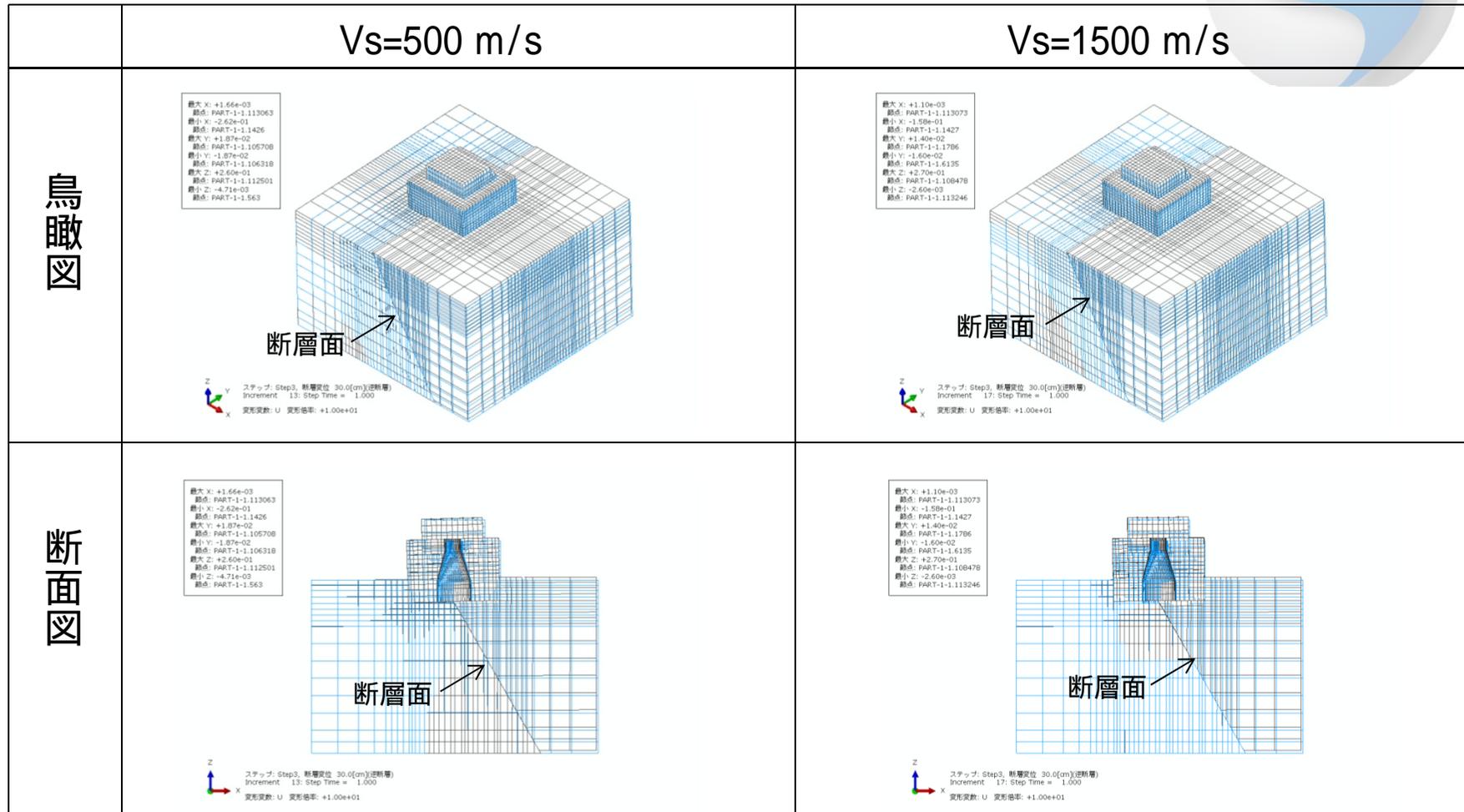


## ● 荷重ステップ



# BWR原子炉建屋の試解析 解析結果

・変形倍率10倍：地盤変位量30cm 3m



変形図 (変形倍率10倍)

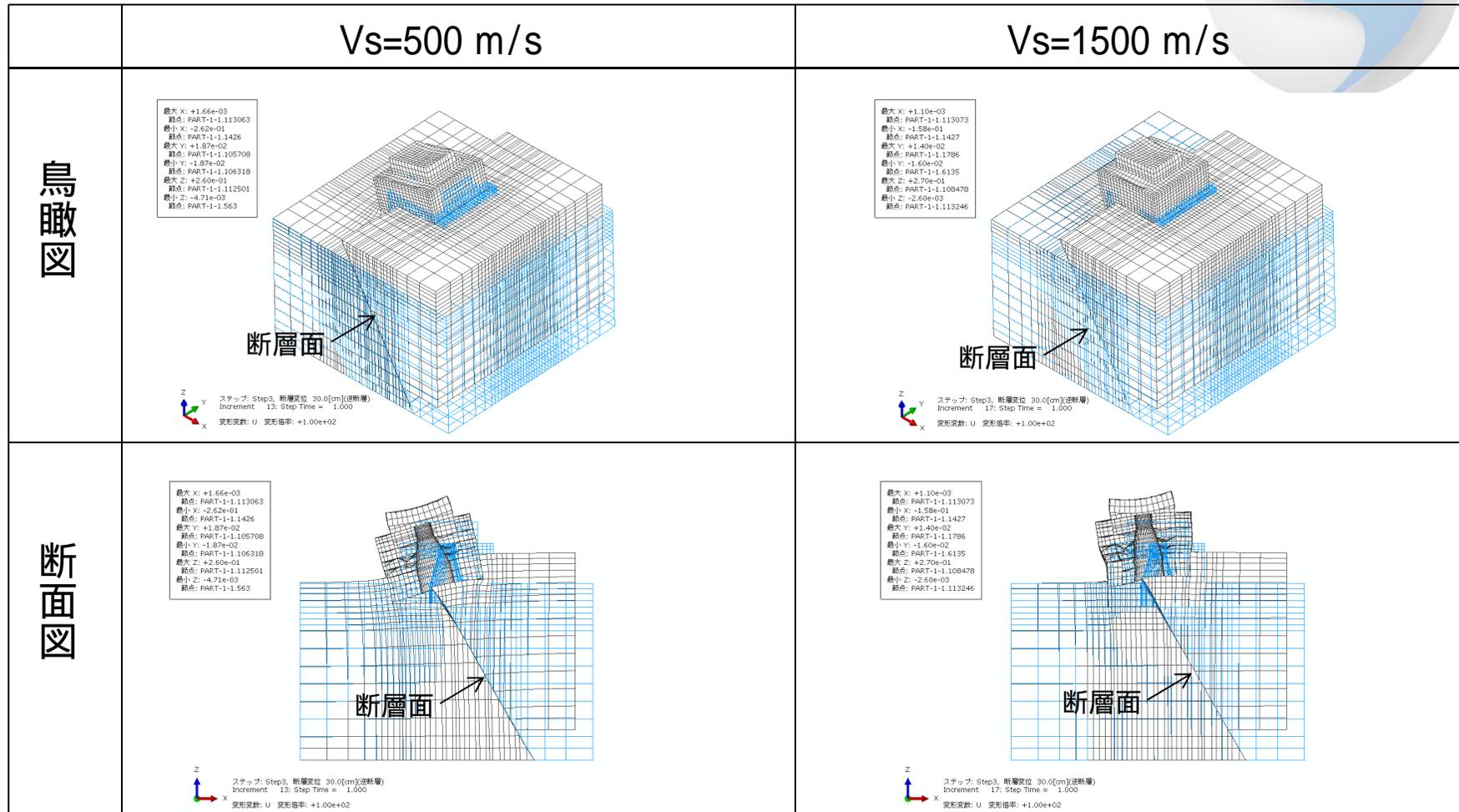
地盤変位量 30cm

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

# BWR原子炉建屋の試解析 解析結果

- 変形倍率100倍：地盤変位量30cm 30m
- 硬岩( $V_s=1500$ )の方が建屋変形大



変形図 (変形倍率100倍)

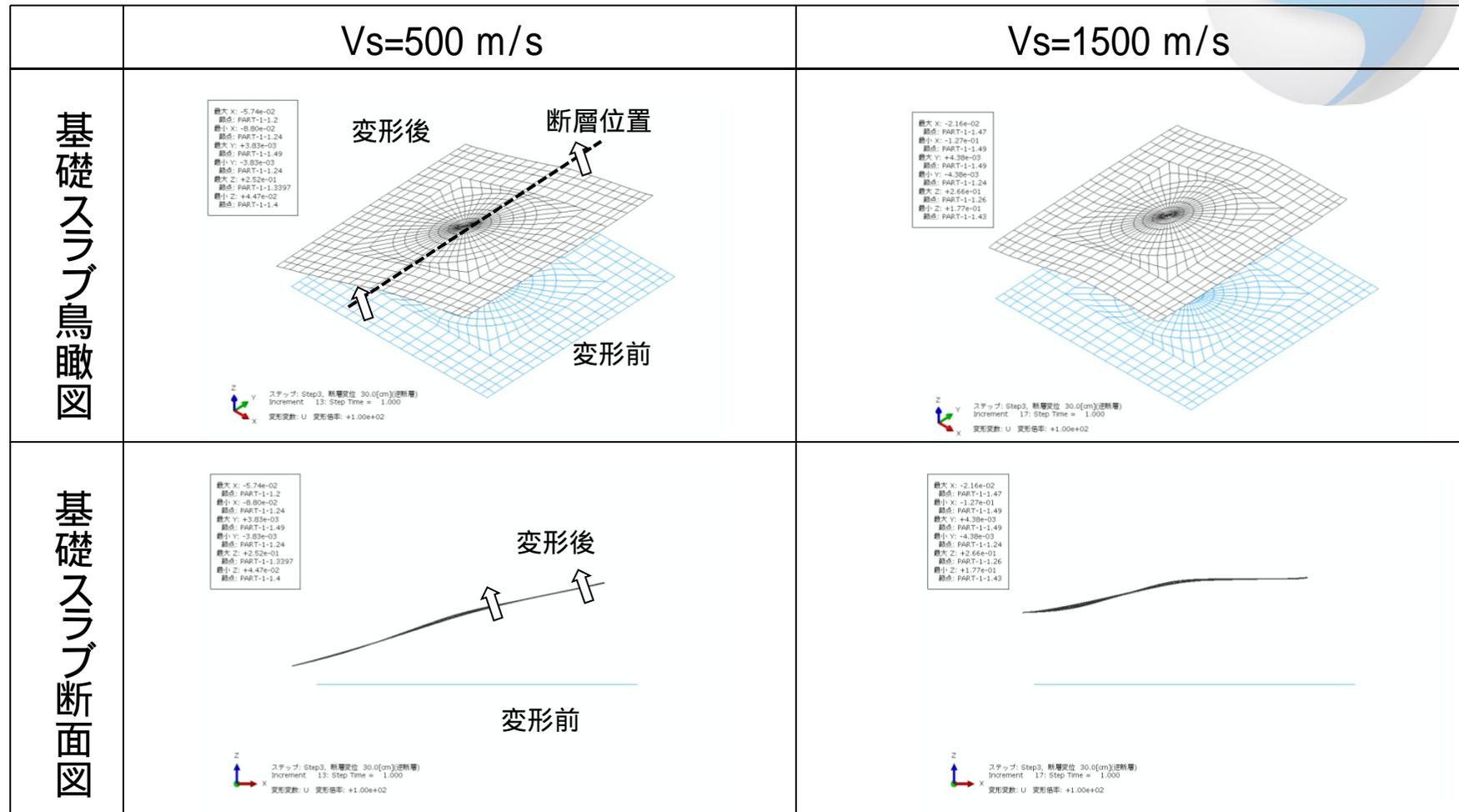
地盤変位量 30cm

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

# BWR原子炉建屋の試解析 解析結果

- 変形倍率100倍：地盤変位量30cm 30m
- 軟岩( $V_s=500$ )の方が基礎スラブの回転大

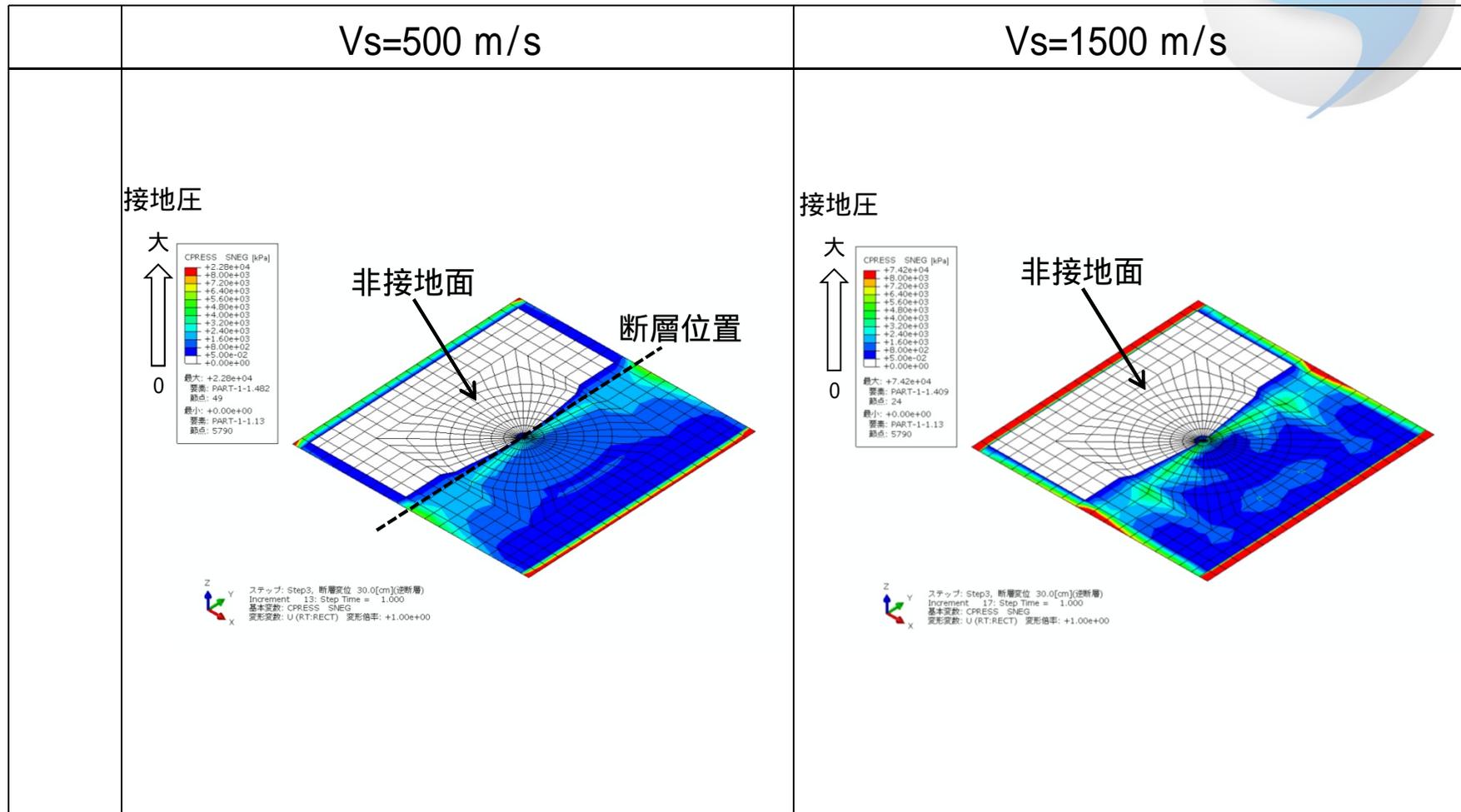


変形図 (変形倍率100倍)

地盤変位量 30cm

# BWR原子炉建屋の試解析 解析結果

- ・ 下盤側はほとんど非接地。外壁部のみ接地
- ・ 硬岩 ( $V_s=1500$ ) の方が接地圧大

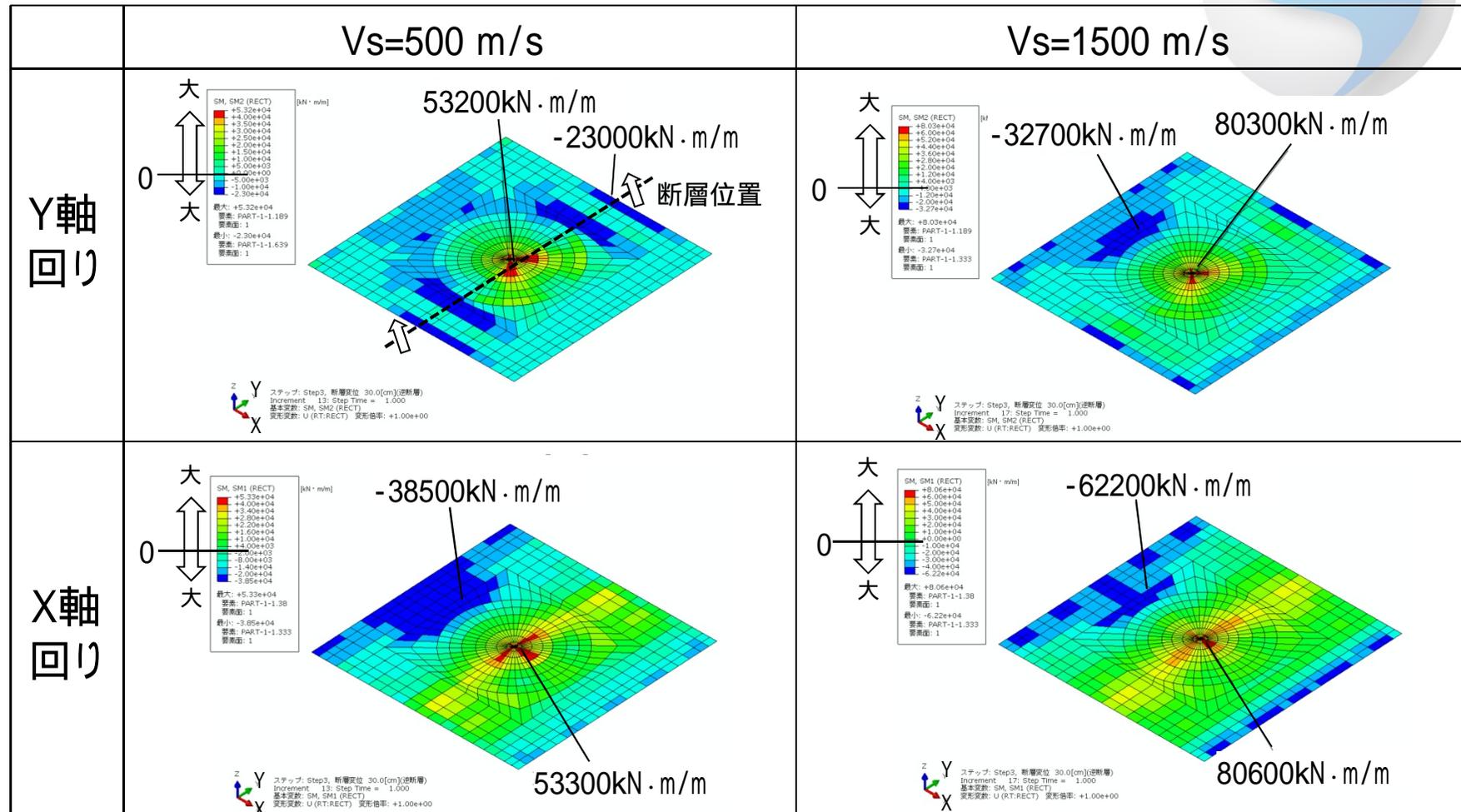


接地圧コンター図

地盤変位量 30cm

# BWR原子炉建屋の試解析 解析結果

- ・断層位置及び下盤CCV下部で曲げモーメント大
- ・硬岩( $V_s=1500$ )の方が曲げモーメント大



基礎スラブ曲げモーメント

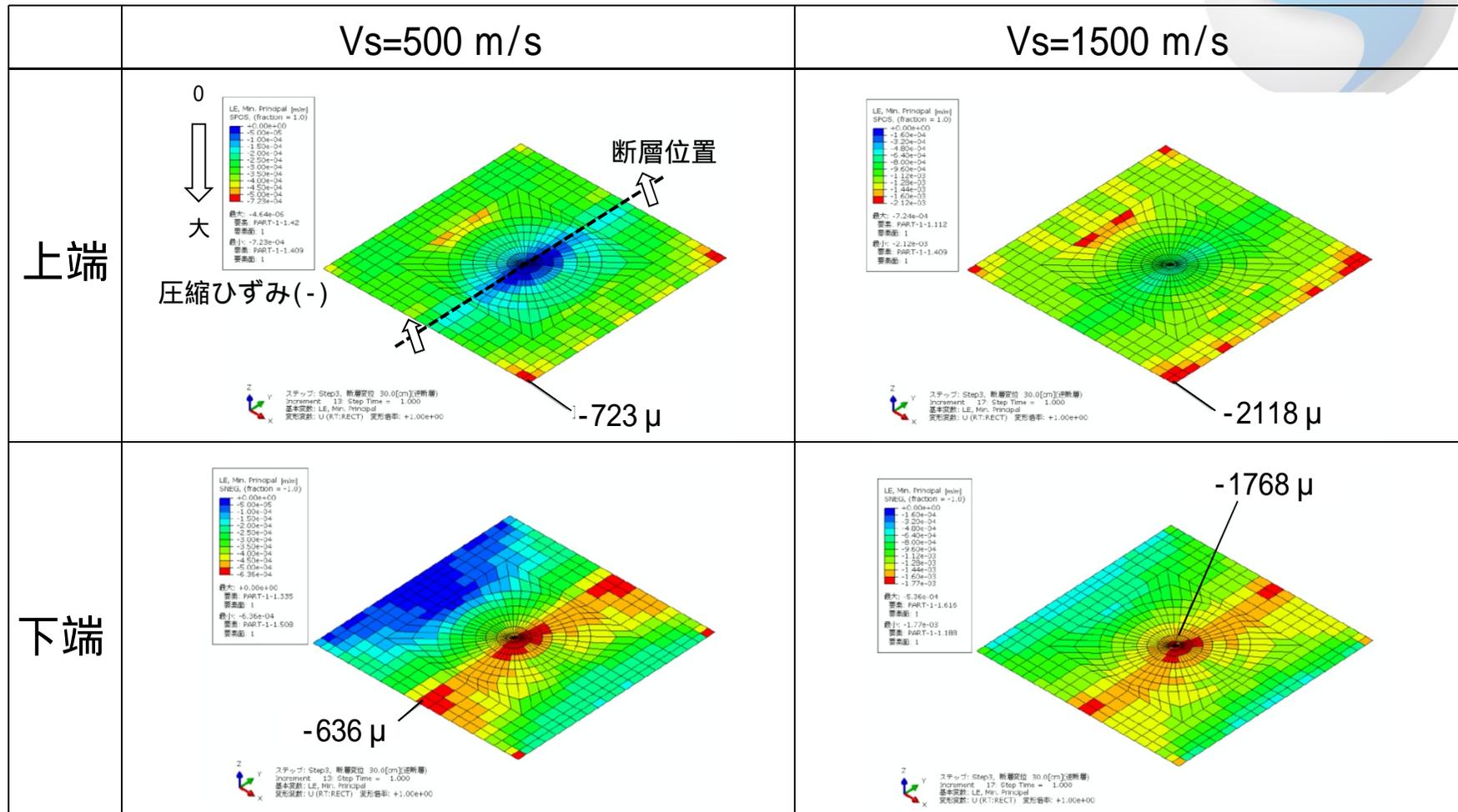
地盤変位量 30cm

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

# BWR原子炉建屋の試解析 解析結果

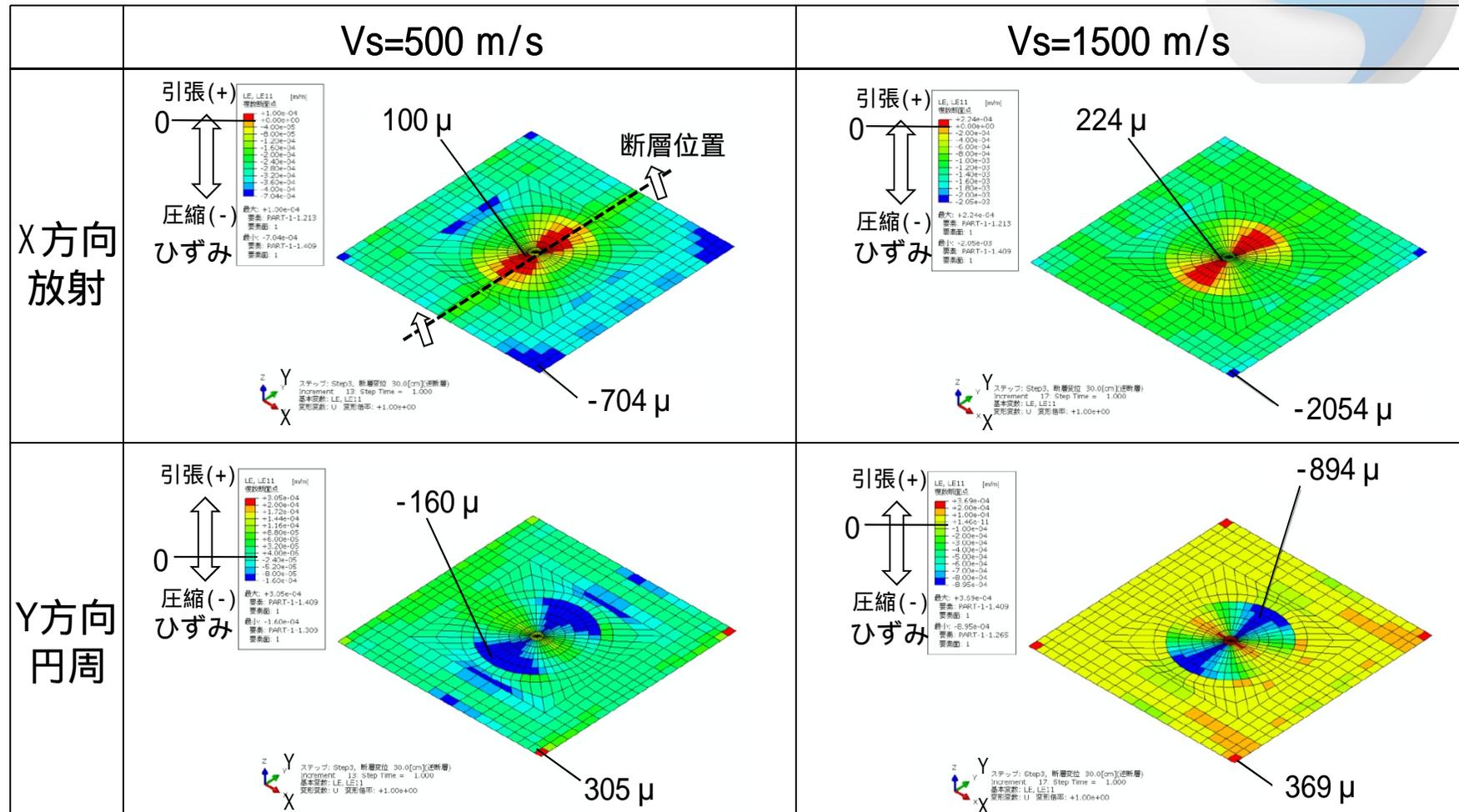
- ・コンクリートひずみ < 3000  $\mu$
- ・硬岩 ( $V_s=1500$ ) の方がコンクリートのひずみ大



基礎スラブコンクリート圧縮ひずみ(主応力方向) 地盤変位量 30cm

# BWR原子炉建屋の試解析 解析結果

- 鉄筋引張ひずみは弾性範囲
- 硬岩( $V_s=1500$ )の方が鉄筋のひずみ大

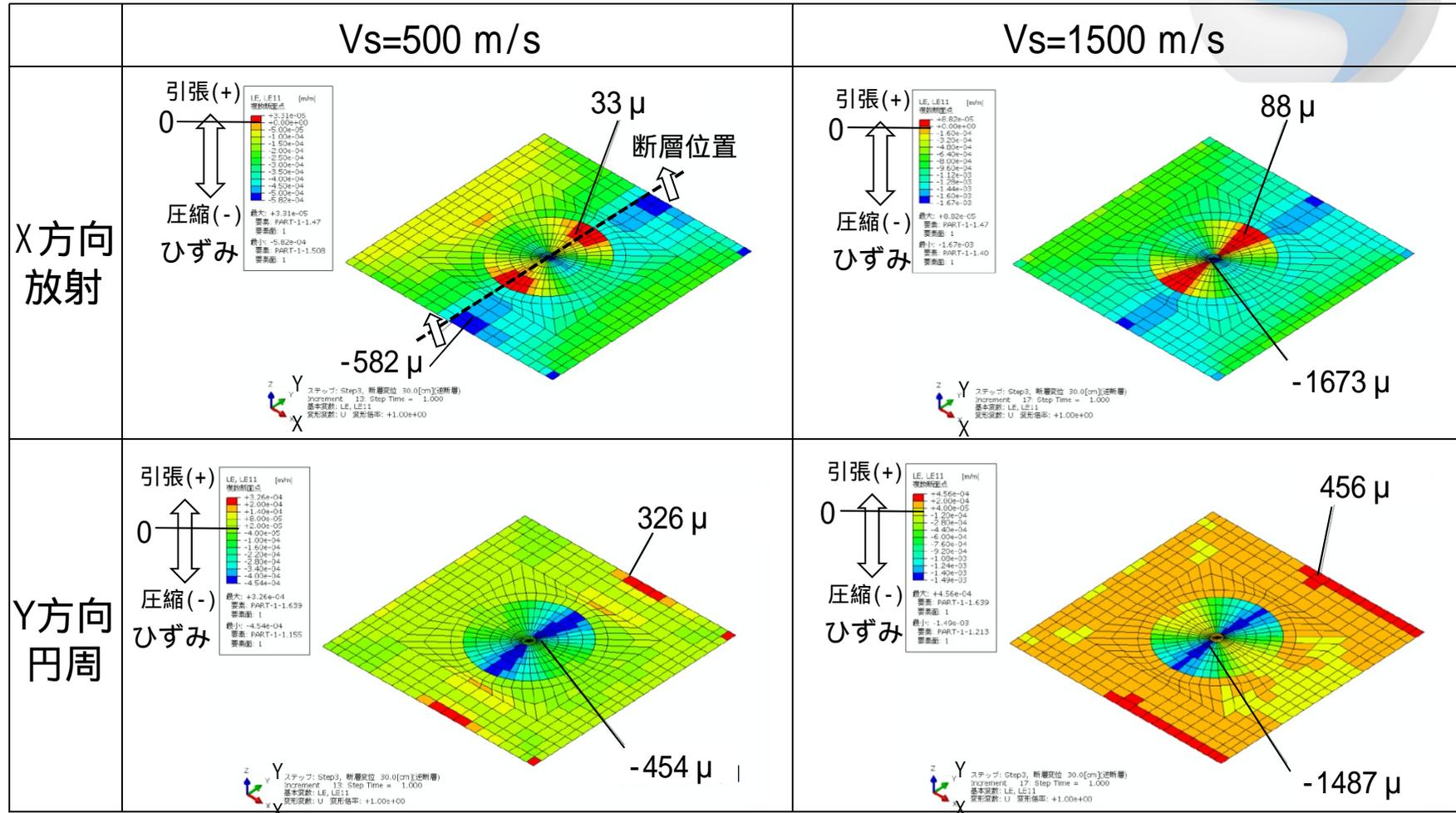


## 基礎スラブ上端筋のひずみ

地盤変位量 30cm

# 解析結果

- 鉄筋引張ひずみは弾性範囲
- 硬岩 ( $V_s=1500$ )の方が鉄筋のひずみ大

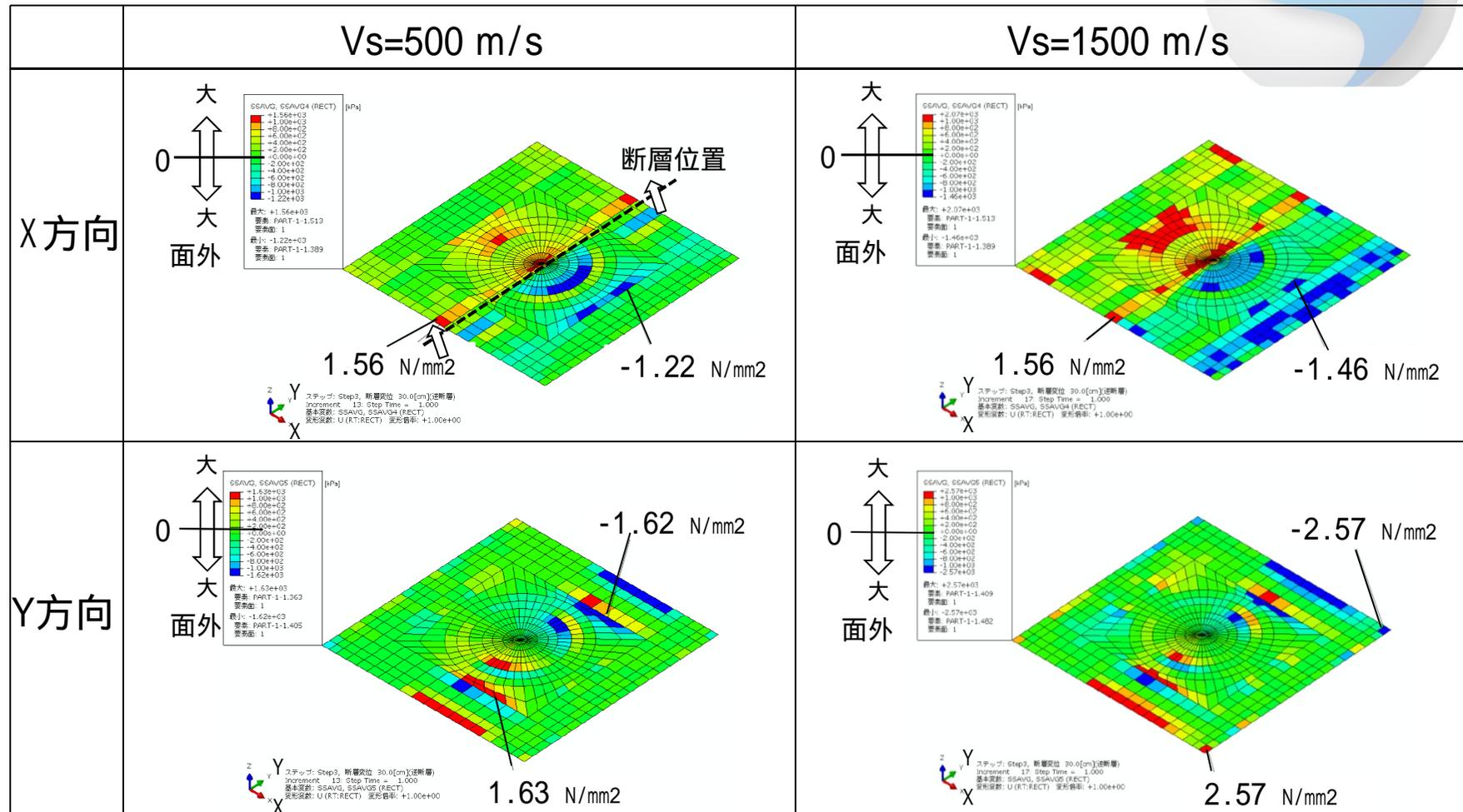


## 基礎スラブ下端鉄筋のひずみ

地盤変位量 30cm

# BWR原子炉建屋の試解析 解析結果

- ・面外せん断終局強度(2 ~ 3N/mm<sup>2</sup>)程度になる箇所あり
- ・Vs=1500の方が面外せん断応力大



平均面外せん断応力

地盤変位量 30cm

## 試解析結果のまとめ (今回の解析条件の範囲内で言えること)

---



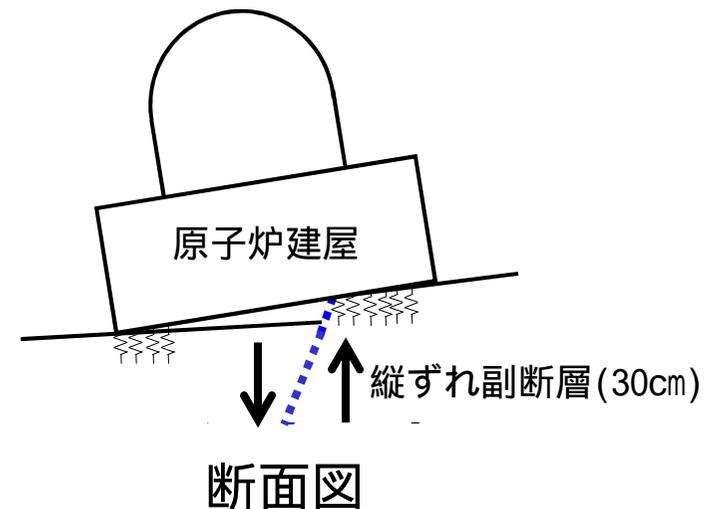
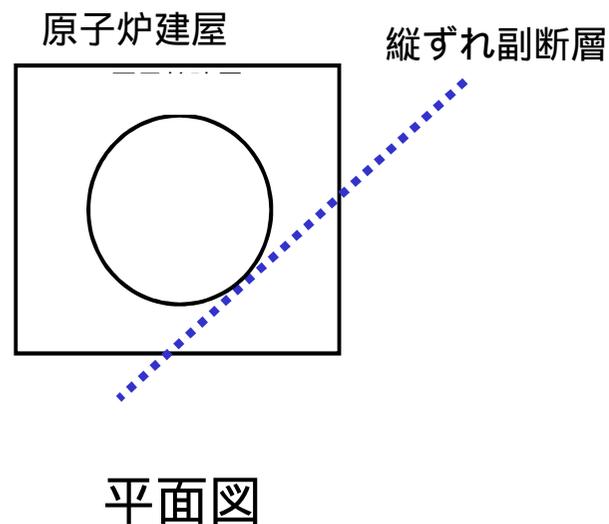
- 断層変位が30cm程度なら、解析可能、評価可能
- 基礎スラブは、面外曲げより面外せん断のほうが厳しい
- 地盤が固いほうが応答が厳しい
  
- ただし、解析条件次第で応答が大きく異なることが予想される
  - 断層変位の大きさ、方向(正断層、逆断層、横ずれ)
  - 断層変位の作用位置
  - 地盤条件
  - 建屋構造(基礎スラブ厚さ・形状・配筋、耐震壁配置等)

# PWR原子炉建屋の試解析

## 試解析の概要



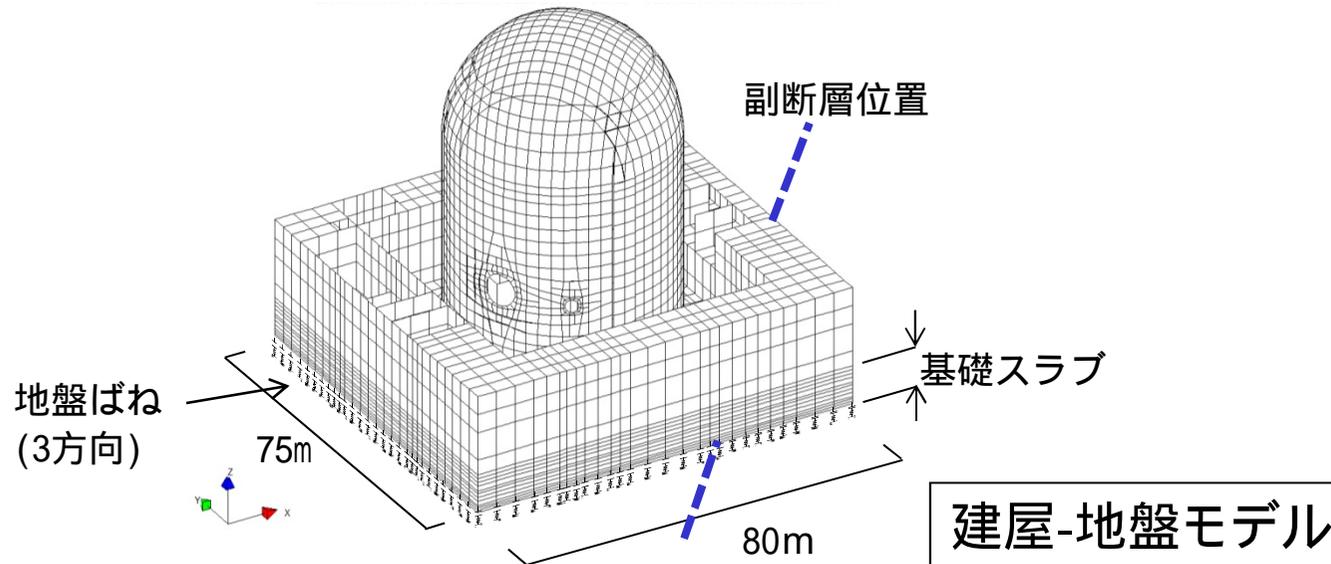
- 仮想のPWR型原子力発電所
- 原子炉建屋 基礎スラブ位置に縦ずれ副断層30cm
- 解析プログラム・・・FINAL
- 地盤と建屋をモデル化
- 鉄筋コンクリート部材の弾塑性を考慮
- 地盤 $V_s=1600\text{m/s}$



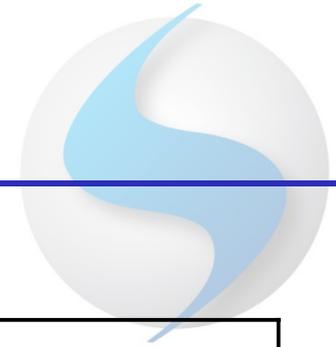
# PWR原子炉建屋の試解析 解析建屋とFEMモデル



- 解析建屋
  - 建屋サイズ80 × 75m、基礎スラブ厚さ8m
- FEMモデル
  - 建屋：基礎スラブをソリッド要素、
  - 上部建屋(RE/B・PCCV・I/C)を積層シェル要素
  - 地盤：ウィンクラーばね要素(3方向離散化ばね)
  - 基礎スラブと地盤の間：圧縮時のみ剛性を有するジョイント要素



# PWR原子炉建屋の試解析 基礎スラブ・耐震壁の健全性評価指標



部位	判断の指標	
基礎版	曲げ	鉄筋の引張ひずみ : 5,000 $\mu$ コンクリートの圧縮ひずみ : 3,000 $\mu$
	面外せん断	荒川(mean)式によるせん断耐力との比較
耐震壁	面内せん断	耐震壁の面内せん断ひずみ : 4,000 $\mu$

# PWR原子炉建屋の試解析 材料条件



## ● コンクリート物性値

部位	弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
PCCV	$2.83 \times 10^7$	0.2	41.2	2.01
一般部	$2.26 \times 10^7$	0.2	23.5	1.52

## ● コンクリートの非線形特性

非線形特性	PCCV	一般部
テンションスティフニング特性	長沼・山口のモデル	出雲らのモデル
圧縮応力 - ひずみ曲線	修正Ahmadモデル	修正Ahmadモデル
圧縮軟化域特性	修正Ahmadモデル	修正Ahmadモデル
ひび割れ後のせん断伝達特性	長沼の提案モデル	Al-Mahaidiモデル

# PWR原子炉建屋の試解析 材料条件



## ● 鋼材の物性値

部位		弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	降伏点応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
PCCVテンドン		1.96 × 10 <sup>8</sup>	0.3	1,420	1,420
鉄筋	PCCV	2.05 × 10 <sup>8</sup>	0.3	390	390
	一般部	2.05 × 10 <sup>8</sup>	0.3	390	390

## ● 鋼材の非線形特性

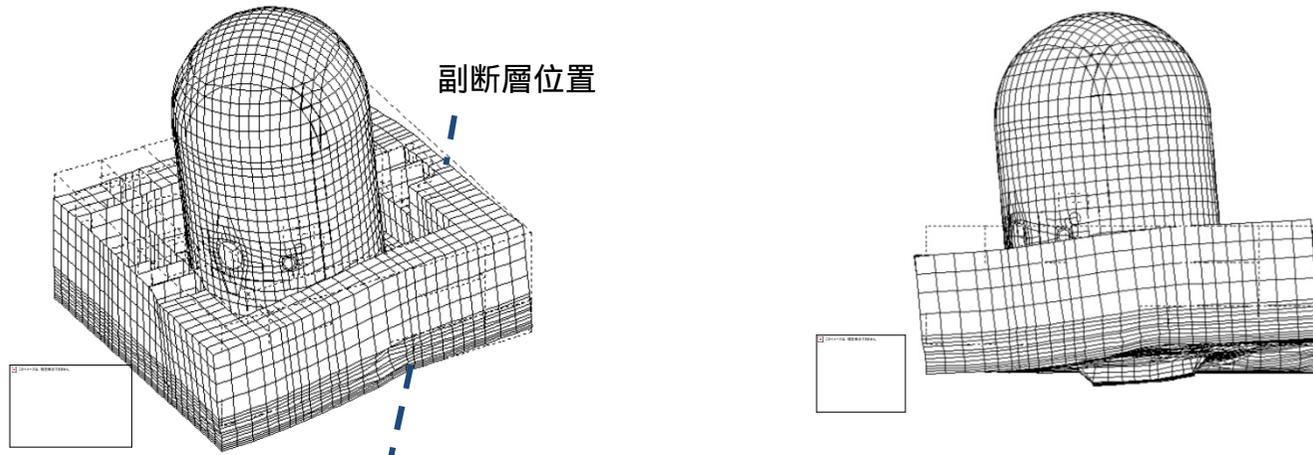
- 完全弾塑性

## ● 地盤の物性値

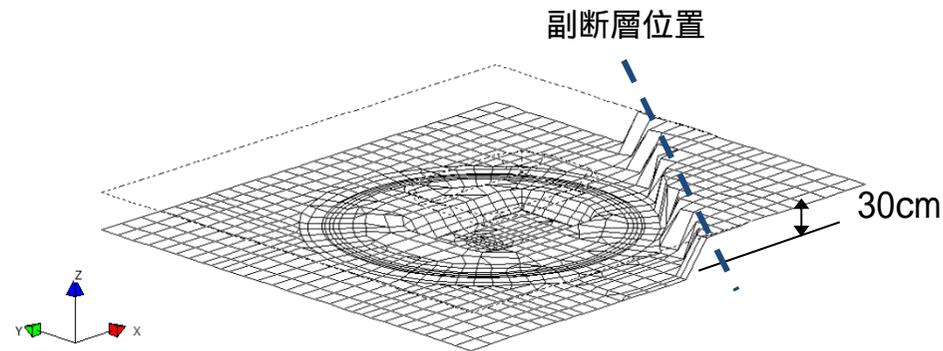
部位	Vs (m/s)	弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比
支持岩盤	1,600	1.70 × 10 <sup>7</sup>	0.38

# PWR原子炉建屋の試解析 解析結果

・変形倍率20倍：地盤変位量30cm 6m



全体モデル変形図(変形倍率20倍)

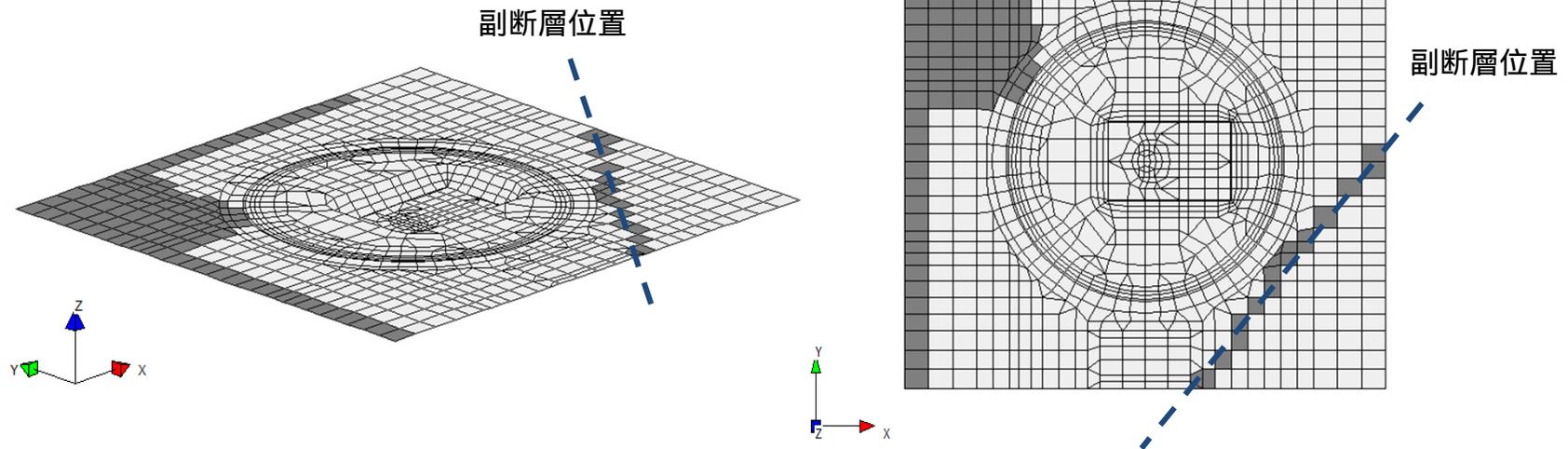


基礎スラブ地盤側変形図(変形倍率20倍)

地盤変位量 30cm

# PWR原子炉建屋の試解析 解析結果

- 接地率17.7%。
- 副断層位置及び対角線側外壁位置のみ接地



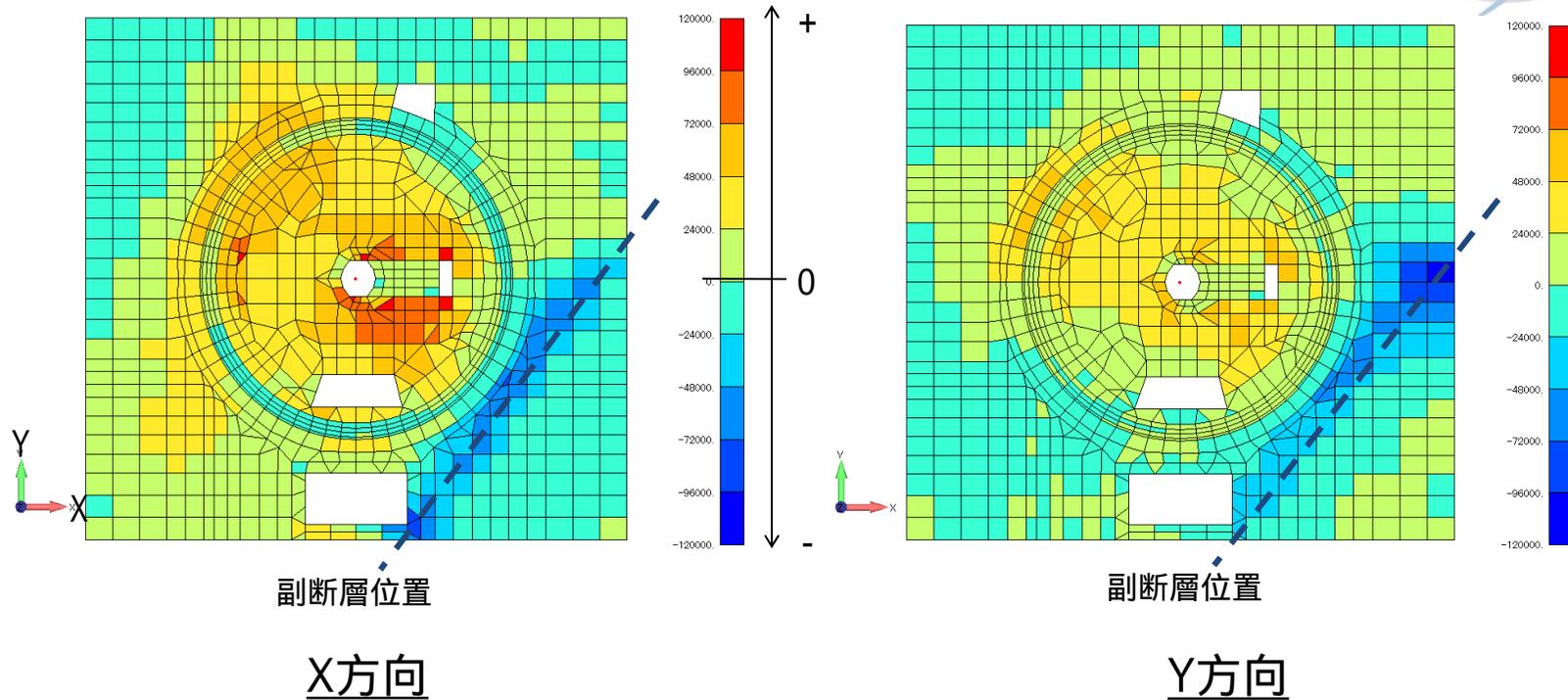
■ : 接地している領域を示す(接地率17.7%)

## 基礎スラブ接地図

地盤変位量 30cm

# PWR原子炉建屋の試解析 解析結果

・副断層位置及び対角線上PCCV付近で大きな曲げモーメント

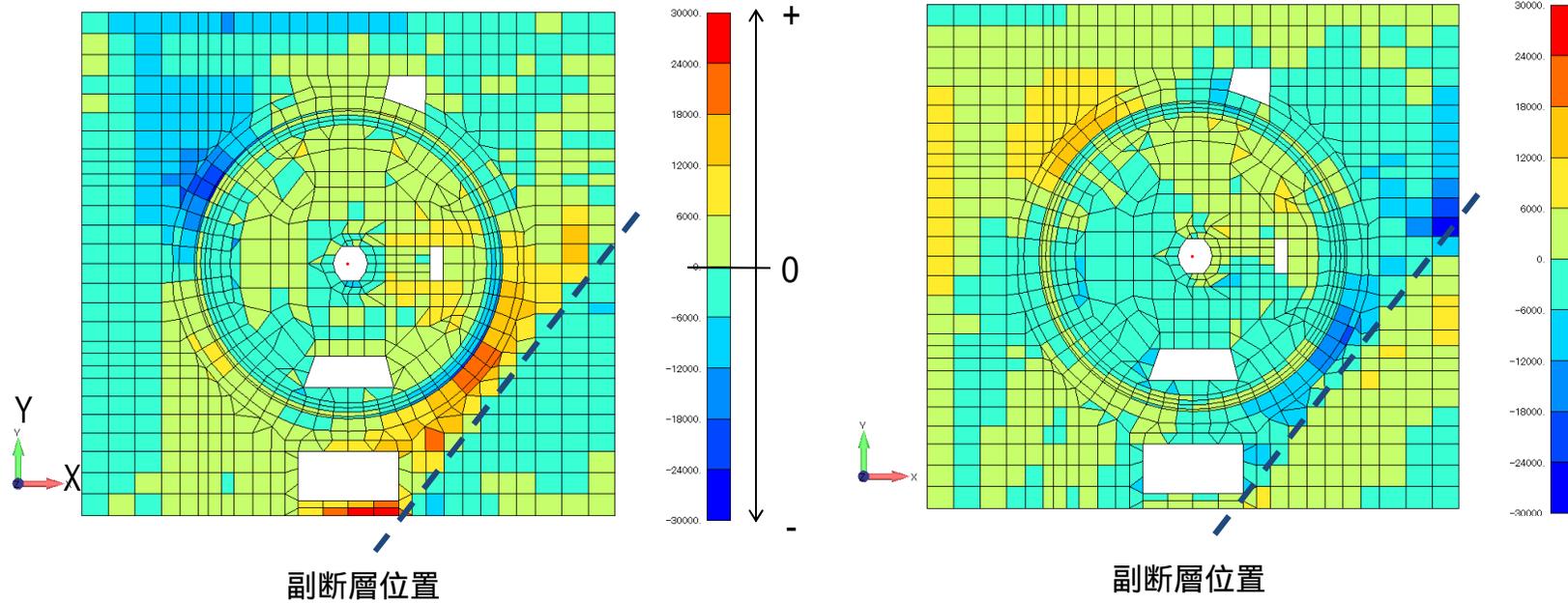


基礎スラブの曲げモーメント図 (kNm/m)

地盤変位量 30cm

# PWR原子炉建屋の試解析 解析結果

・副断層位置及び対角線上PCCV・外壁付近で大きな面外せん断力



X方向

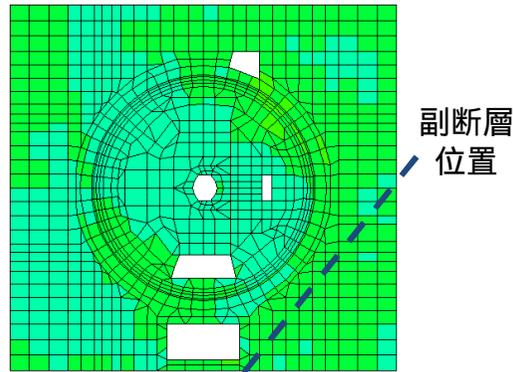
Y方向

基礎スラブの面外せん断力図 (kN/m)

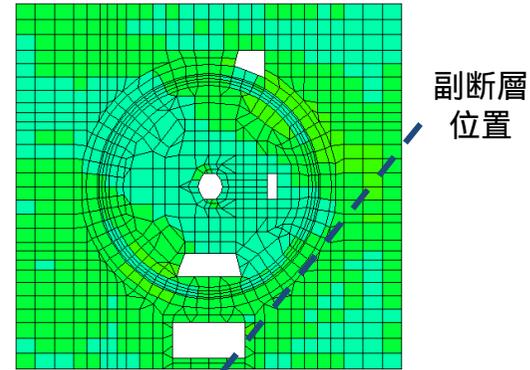
地盤変位量 30cm

# PWR原子炉建屋の試解析 解析結果

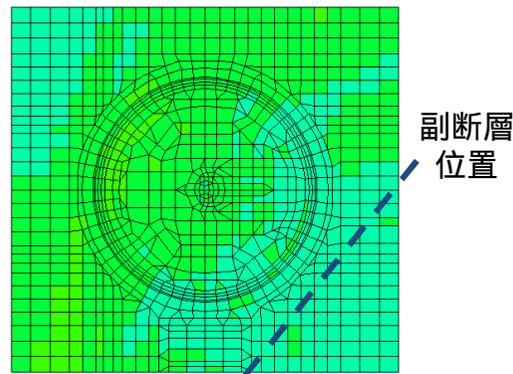
- ・ 軸ひずみは許容範囲内
- ・ 曲げモーメントに対して基礎スラブは健全



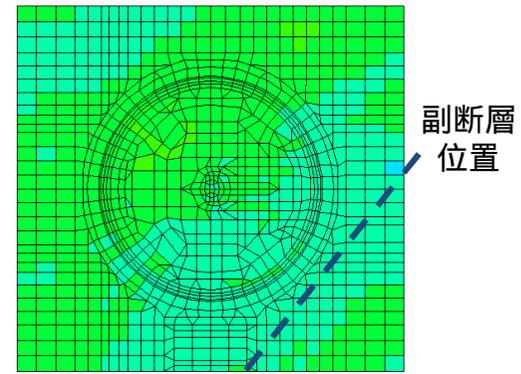
基礎スラブ上端(X方向)



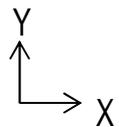
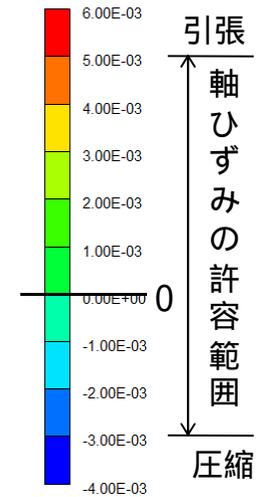
基礎スラブ上端(Y方向)



基礎スラブ下端(X方向)



基礎スラブ下端(Y方向)



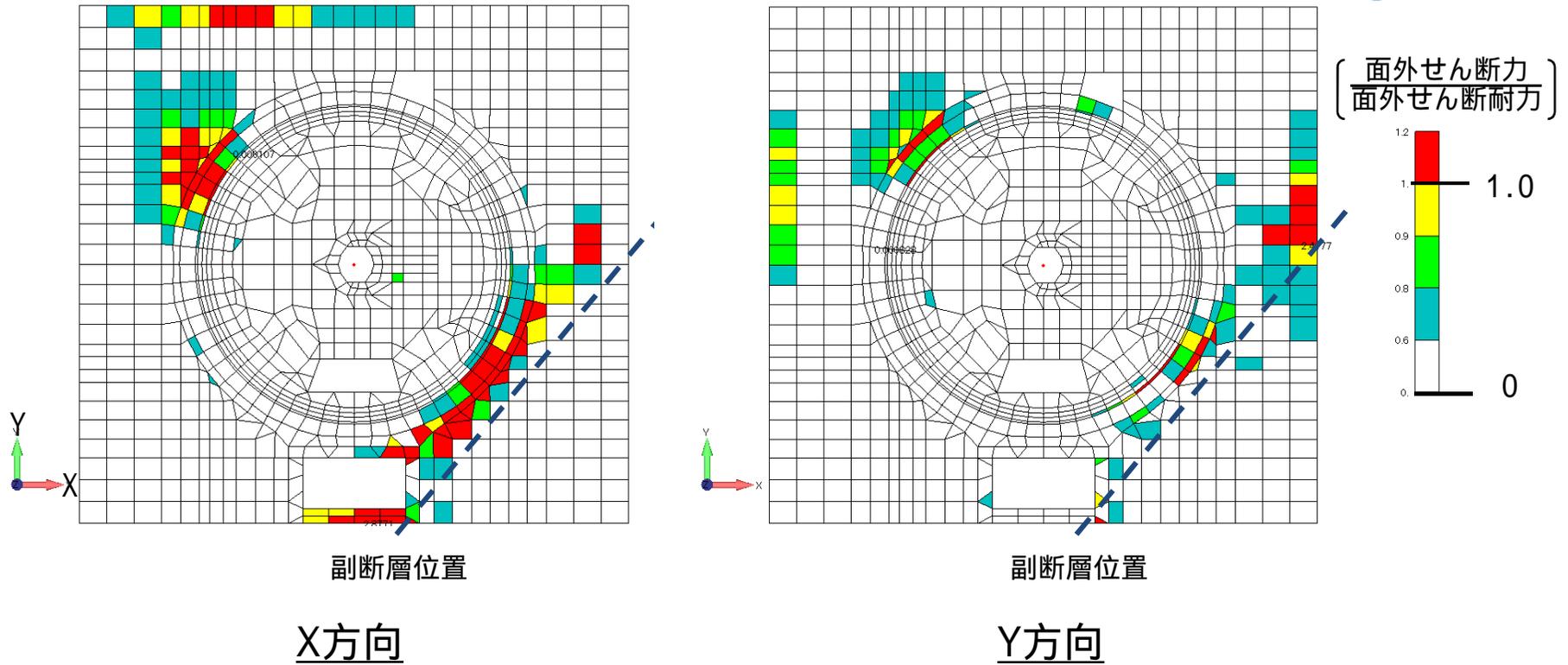
## 基礎スラブの軸ひずみコンター図

地盤変位量 30cm

# PWR原子炉建屋の試解析

## 解析結果

- ・副断層位置及び対角線上PCCV, 外壁付近で局所的に許容限界を超過
- ・基礎スラブ全体破壊には至っていない

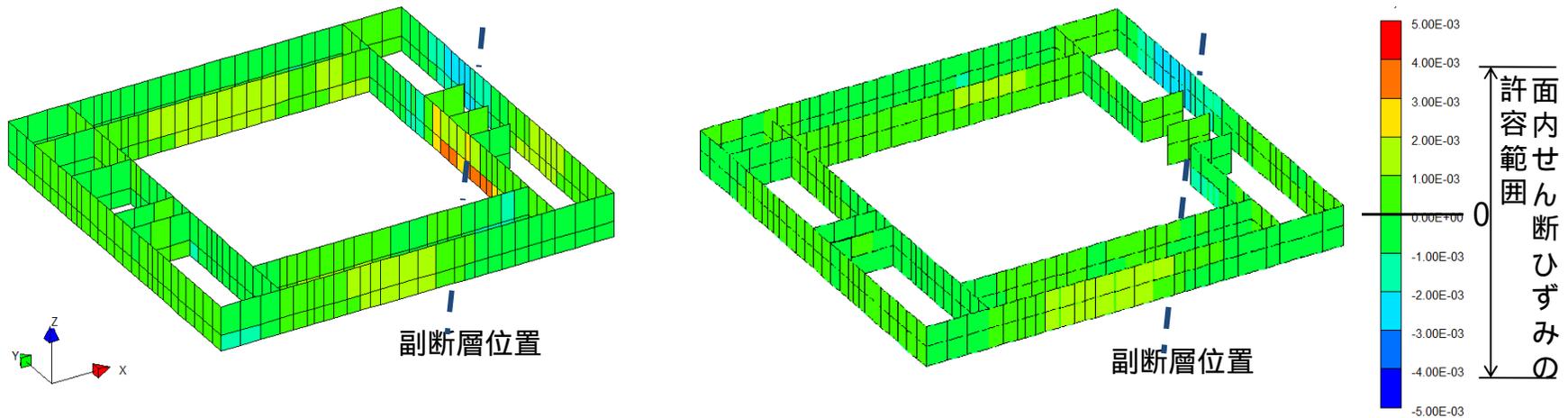


基礎スラブの面外せん断検定図

地盤変位量 30cm

# PWR原子炉建屋の試解析 解析結果

・ 副断層位置で一部ひずみの大きい部分があるが許容限界以下



下層 面内せん断ひずみ

上層 面内せん断ひずみ

耐震壁の面内せん断ひずみコンター図

地盤変位量 30cm

## 試解析結果のまとめ（今回の解析条件の範囲内で言えること）

---



- 断層変位が30cm程度なら、解析可能、評価可能
- 地盤ばねモデルでも評価は可能
- 基礎スラブは、面外曲げより面外せん断のほうが厳しい
- 面外せん断では局所的に許容限界を超えている箇所もあった
  
- ただし、解析条件次第で応答が大きく異なることが予想される
  - 断層変位の大きさ、方向(正断層、逆断層、横ずれ)
  - 断層変位の作用位置
  - 地盤条件
  - 建屋構造(基礎スラブ厚さ・形状・配筋、耐震壁配置等)



## 今後の課題

---

- 今回の試解析はほんの序の口。課題は多い
- 地震荷重・断層変位評価
  - 横ずれ、横ずれ+縦ずれ
  - ゆれ(地震力)の扱い。大きさ。ずれとの組合せ。載荷順序
  - 静的 or 動的
- 応力解析
  - 地盤の弾塑性解析
  - 面外せん断の弾塑性評価、構成則
  - 地下外壁に作用する土圧評価
- 安全性評価
  - コンクリート部の許容限界の評価(部分破壊、全体破壊)
  - 面外せん断の許容限界(応力、ひずみ)
  - 地盤の許容限界の評価
  - 断層変位ハザード
  - 建屋フラジリティ評価



---

ご清聴  
ありがとうございました