

# 女川原子力発電所2号炉 原子炉本体の基礎の 復元力特性について(コメント回答)

---

設計基準対象施設について（第4条 地震による損傷の防止）

平成31年2月7日  
東北電力株式会社

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。

# 1. 審査会合での指摘事項一覧

No	項目	審査会合日	対応状況	回答
1	RPV(原子炉圧力容器)ペDESTALの下部と原子炉圧力容器底部のコンクリートの一体化について、FEM解析等により妥当性を提示すること。	H30.6.28	本日回答	3次元FEM解析によって、地震荷重が作用した場合のRPVペDESTAL下部の変形が、RPVペDESTAL上部の変形と比較して十分小さいことを確認したことから、RPVペDESTAL下部と原子炉圧力容器底部のコンクリートを一体として扱うことは妥当である(P2~P8)。
2	復元力特性評価式による荷重-変位特性と既往の加力試験結果のせん断変形の比較について、第1折点で差異が生じた理由を提示すること。	H30.6.28	本日回答	試験結果に基づく曲げ変形の荷重-変位特性は、せん断成分も含まれる鉛直変位を曲げ成分のみによるものと仮定していることから、曲げ変形による曲率が小さくなり、見かけ上、曲げ剛性が大きくなることにより、その分だけせん断剛性が低く算出されたものと考えられる。
3	せん断変形のスケルトンカーブの直線近似の影響検討について、振動特性を踏まえ提示すること。	H30.6.28	本日回答	全体変形としては、試験結果に基づく荷重-変位特性と評価式による荷重-変位特性はよく一致していることから、せん断変形に対する評価式による荷重-変位特性(直線近似)の第1折点付近の差異の影響は少ない(P9~P11)。
4	今後の追加検討について、評価方針だけでなく、構造成立性の見通しについても提示すること。	H30.6.28	本日回答	RPVペDESTALの剛性を低下させた場合の地震応答解析を行い、原子炉格納容器、原子炉圧力容器、原子炉しゃへい壁、RPVペDESTAL、PCVスタビライザ、RPVスタビライザ及びシヤラグの地震応答の変動が、構造成立性に影響を及ぼすものではないことを確認した(P12~P14)。

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 1】

### (1) 指摘事項

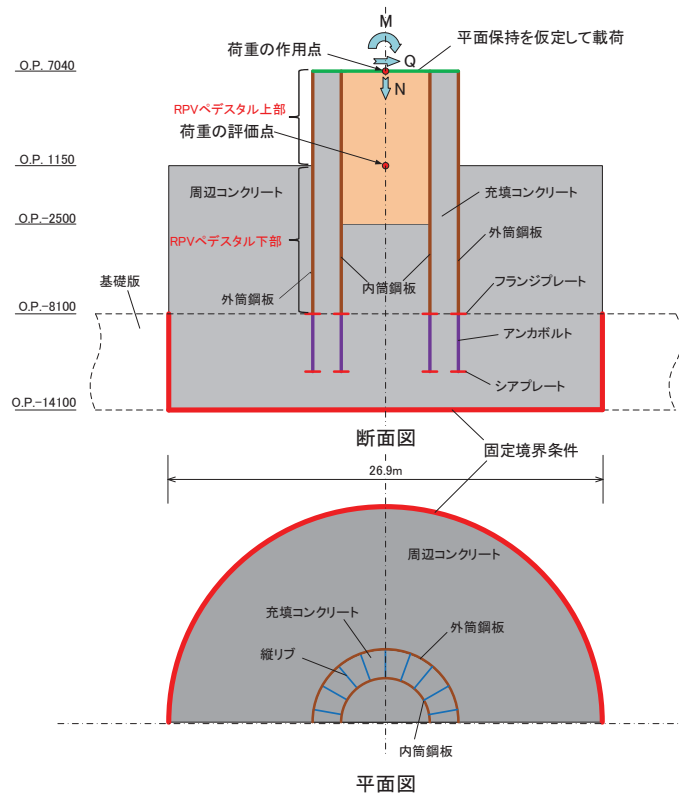
RPV(原子炉圧力容器)ペDESTAL下部と原子炉圧力容器底部のコンクリートの一体化について、FEM解析等により妥当性を提示すること。

### (2) 回答

- 地震応答解析のモデル化において、RPVペDESTAL下部を原子炉圧力容器底部のコンクリートと一体として扱うことの妥当性については、RPVペDESTALから負荷されるせん断荷重に対するRPVペDESTAL下部の周辺コンクリートの健全性及びRPVペDESTALから負荷される曲げモーメントに対するRPVペDESTAL下部のスタッドの健全性を評価し、基準地震動 $S_s-D2$ に対して、それぞれ発生荷重が許容荷重を十分満足することを確認した。
- さらに、その妥当性を検証するため、3D-FEMモデルを用いた静的弾性解析を実施する。
- 基準地震動 $S_s-D2$ の荷重に対する静的弾性解析の結果から、RPVペDESTALの下部は、RPVペDESTALの上部と比較して地震時の変位が小さく、また、RPVペDESTALと周辺コンクリートの接続部に発生する主応力は設計基準強度に対して十分に余裕があることから、RPVペDESTALの下部と原子炉圧力容器底部のコンクリートを一体として扱うことは妥当である。

# モデル化方針

- アンカボルトに発生する応力が保守的に算出されるように、RPVペDESTAL下部と周辺コンクリートの固定のためにRPVペDESTALの鋼板(外側, 内側)に設置されるスタッドの機能には期待しないものとして、外筒鋼板外側及び内筒鋼板内側と周辺コンクリートの間の摩擦係数は0とする。
- 外筒鋼板及び内筒鋼板それぞれの内外に設置したアンカボルトを、断面積及び本数を考慮し、等価な円筒としてモデル化する。



モデル化範囲

## モデル化方針

モデル化範囲	(シェル要素) 外筒鋼板, 内筒鋼板, 縦リブ, フランジプレート, アンカボルト, シアプレート (ソリッド要素) 充填コンクリート, 周辺コンクリート, 原子炉建屋基礎版
境界条件	原子炉建屋基礎版下部及び周辺: 固定条件 外筒鋼板外側及び内筒鋼板内側と周辺コンクリートの摩擦係数: 0 (上下方向の拘束なし)
その他の条件	外筒鋼板及び内筒鋼板それぞれの内外に設置したアンカボルトを、等価な円筒でモデル化

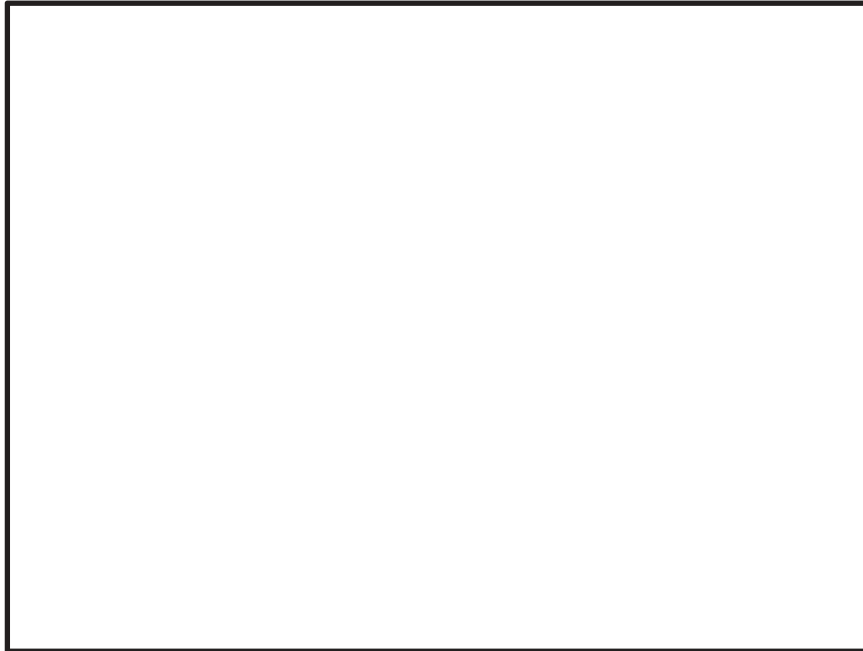
## 解析条件

解析コード	MSC NASTRAN ver. 2013.1.1
せん断荷重 Q	$3.4 \times 10^4$ kN*
曲げモーメント M	$3.79 \times 10^8$ kN・mm*
軸力 N	$3.744 \times 10^4$ kN
荷重の作用位置	評価点(O.P. 1,150)の荷重が基準地震動Ss-D2による地震荷重となるように作用点(O.P. 7,040)に荷重を入力

\* : 基準地震動Ss-D2による発生荷重(O.P.1,150)

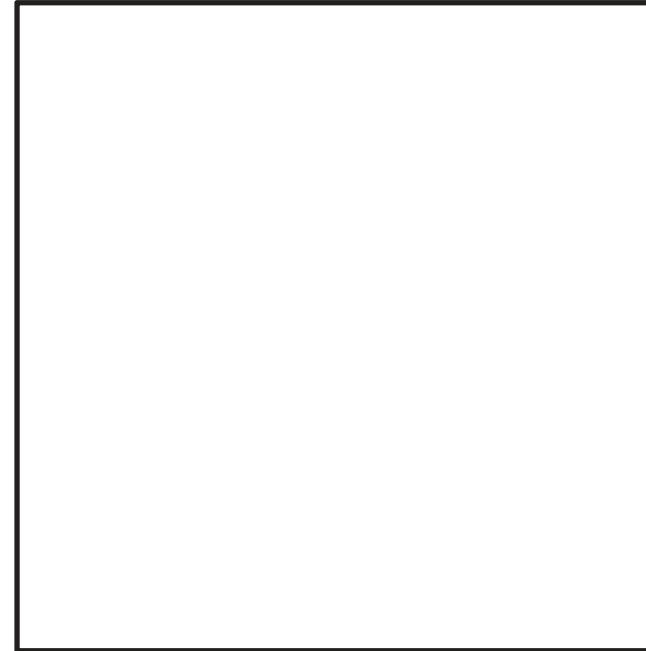
## 解析モデル図

---



シェル要素

(外筒鋼板, 内筒鋼板, 縦リブ, フランジプレート, アンカボルト, シアプレート)



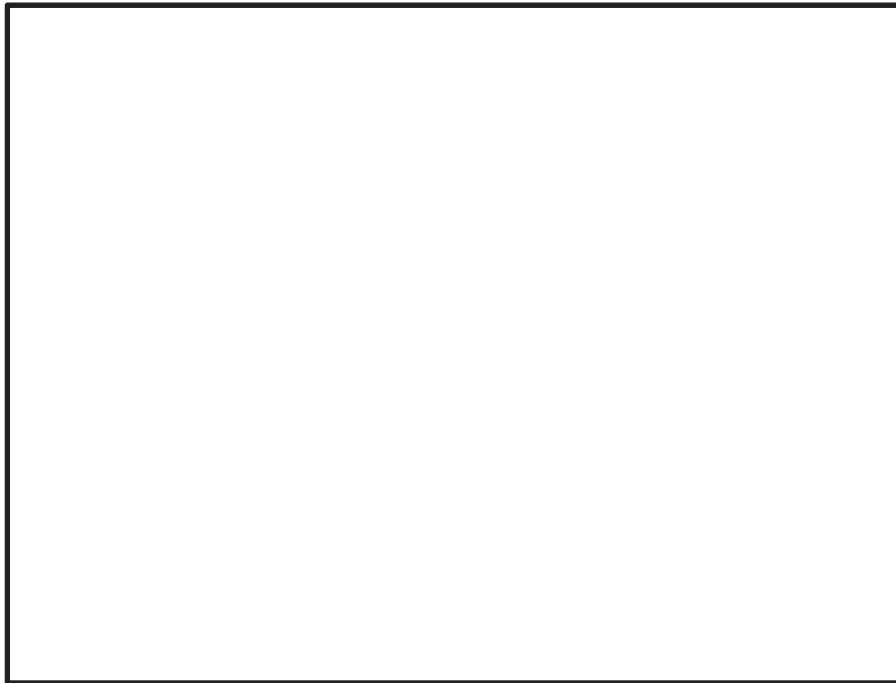
ソリッド要素

(充填コンクリート, 周辺コンクリート, 原子炉建屋基礎版)

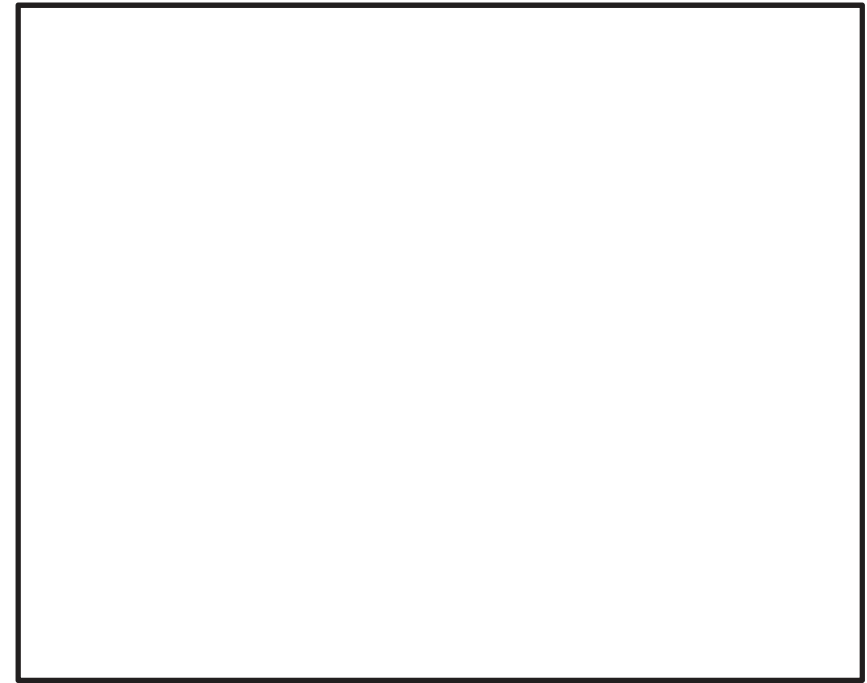
枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。

## 3次元FEM解析結果(変形・変位)

- RPVペDESTAL下部の変形は、周辺コンクリートの拘束効果によって極めて小さく抑えられ、RPVペDESTAL上部が変形している。
- 変形量は、ペDESTAL頂部(O.P.7,040)で約4mm、周辺コンクリートの上端位置(O.P.1,150)では1mm以下であり、RPVペDESTAL下部の変形量は非常に小さい。
- なお、RPVペDESTAL下部のスタッドと周辺コンクリートとの定着を考慮した場合には、さらにRPVペDESTAL下部の変位が小さくなると考えられる。



RPVペDESTALの変形図(表示倍率:100倍)

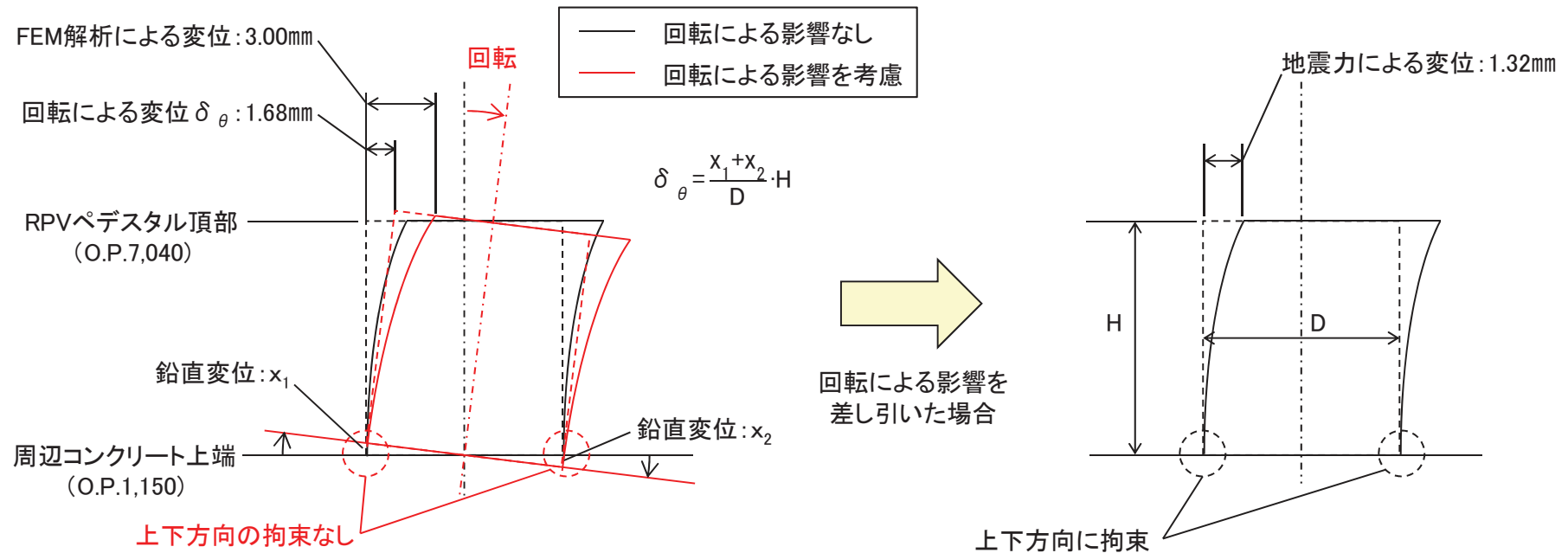


RPVペDESTALの変位コンター図

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。

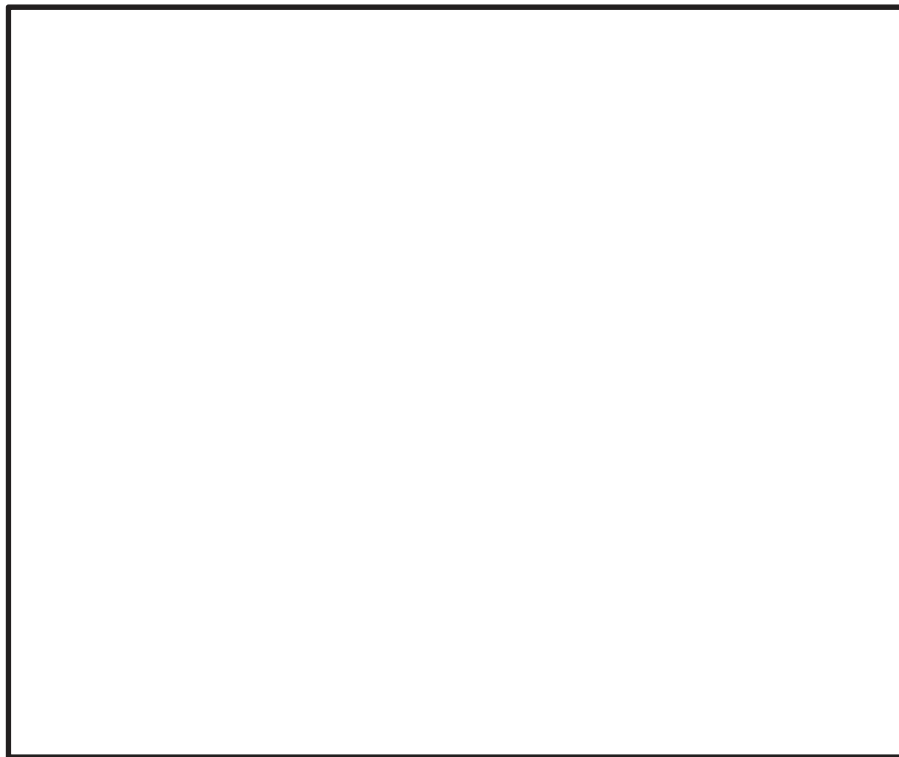
## 3次元FEM解析結果と評価式の比較

- 解析においては、スタッドをモデル化していないことから、上下方向が拘束されず、周辺コンクリート上端位置に鉛直方向の変位が生じ、回転することによってRPVペDESTAL頂部に水平変位が生じている。
- FEM解析による、周辺コンクリート上端位置(O.P.1,150)に対するRPVペDESTAL頂部(O.P.7,040)の相対変位3.00mmから、回転による変位 $\delta_{\theta}$ (=1.68mm)を引くと、1.32mmであり、評価式から算出した変形量1.56mm(NS方向), 1.54mm(EW方向)とおおむね整合している。
- 解析による変位の方がわずかに小さくなったのは、モデル化の際に開口部による断面欠損を考慮していないためと考えられる。

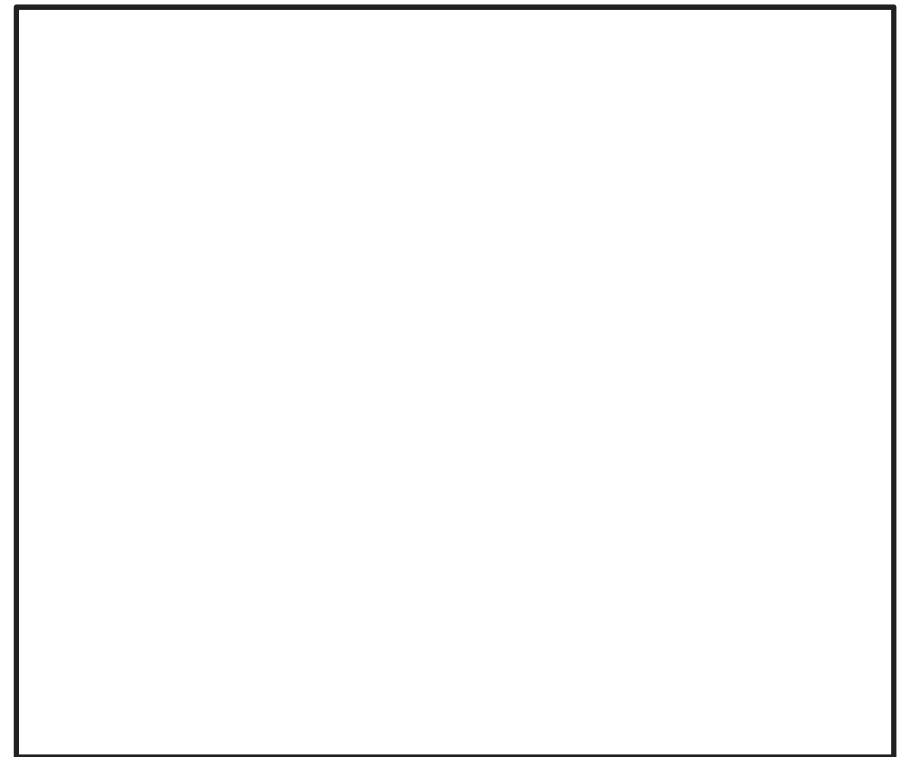


## 3次元FEM解析結果(円筒鋼板とコンクリートの主応力)

- RPVペデスタルと周辺コンクリートの接続部に発生する主応力は、最大で約 $6\text{N/mm}^2$  (圧縮)とコンクリートの設計基準強度 $32.3\text{N/mm}^2$ に対して十分に余裕があり、その負荷範囲も限定的である。
- なお、RPVペデスタル下部のスタッドと周辺コンクリートの定着を考慮した場合には、さらにコンクリートに作用する荷重が小さくなると考えられる。



断面図



平面図

主応力コンター図

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。



## 3次元FEM解析結果(アンカボルトの荷重)

- せん断荷重, 引張荷重ともに許容荷重に対して小さく, それぞれの荷重によって発生するアンカボルトのせん断応力は, 許容せん断応力396MPaに対して4MPa, 引張応力は, 許容引張応力686MPaに対して6MPaと小さく, RPVペデスタルから伝達する荷重は周辺コンクリートに分散している。

解析モデルにおけるアンカボルトの範囲

アンカボルトの荷重コンター図

枠囲みの内容は, 商業機密の観点から公開できません。

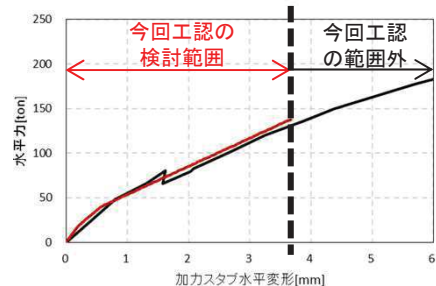
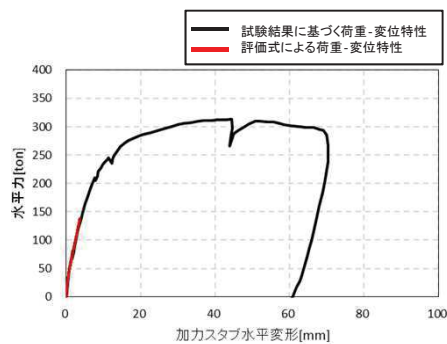
## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 2, 3】

### (1) 指摘事項

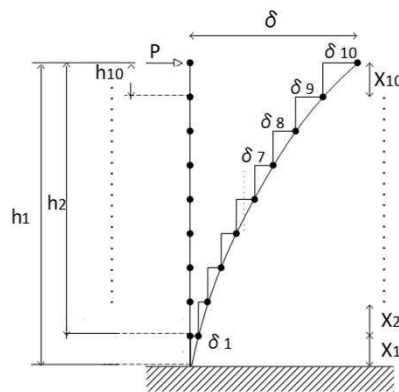
- ・復元力特性評価式による荷重-変位特性と既往の加力試験結果のせん断変形の比較について、第1折点で差異が生じた理由を提示すること。
- ・せん断変形のスケルトンカーブの直線近似の影響検討について、振動特性を踏まえ提示すること。

### (2) 回答

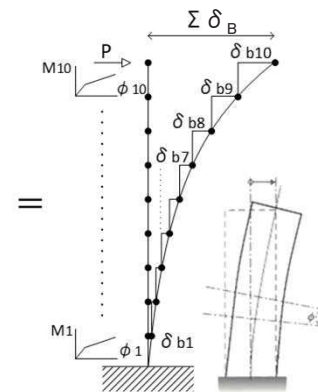
- 既往の加力試験で得られた水平力に対する加力スタブの水平変形(全体)との関係について、試験結果に基づく荷重-変位特性と評価式による荷重-変位特性はよく一致している。
- 加力スタブの水平変形(全体)は、曲げ及びせん断による変形の合成であるため、せん断変形のスケルトンカーブの作成に当たっては、試験結果から得られる全体変形(曲げ+せん断)と曲げ変形の関係から算出している。



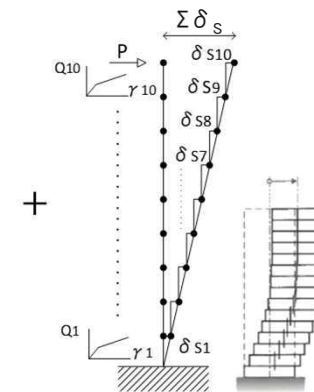
荷重-変形関係(全体)



全体変形  $\delta$   
(実測値)



曲げによる変形  $\delta_B$   
(実測値+計算)

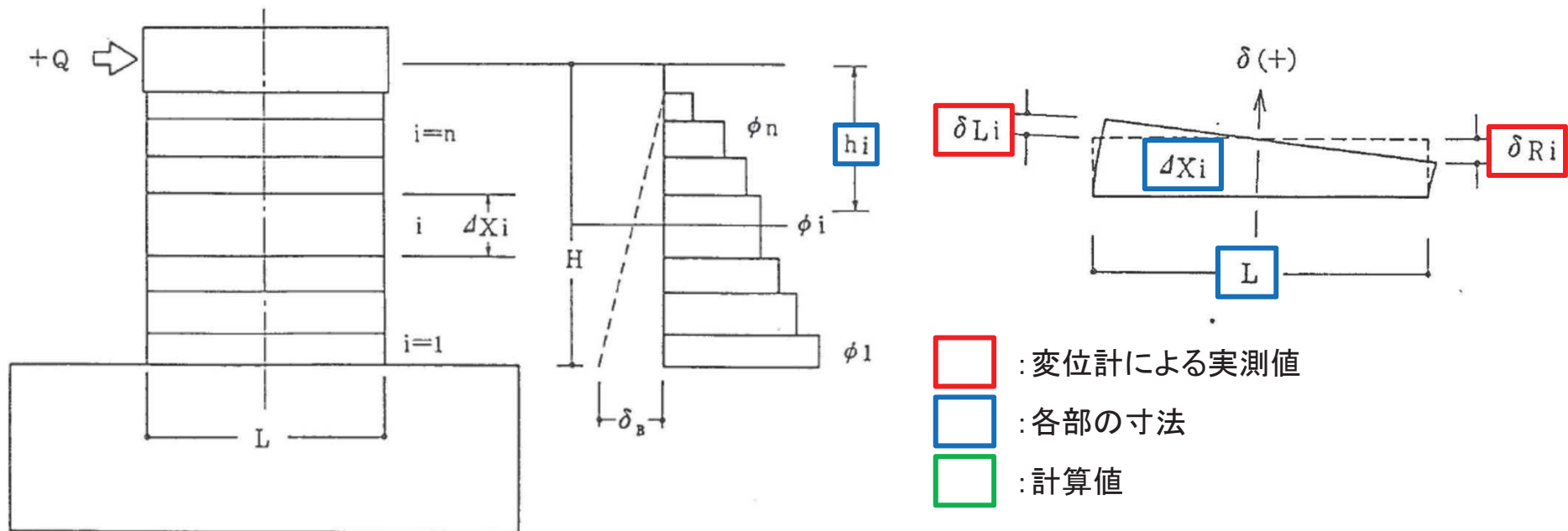


せん断による変形  $\delta_S$   
(計算)

算出方法のイメージ

## 曲げ変形及びせん断変形の算出方法

- 試験体頂部に取り付けた水平変位計によって全体変形  $\delta$  を計測する。
- 試験体側面に取り付けた鉛直変位計によって計測した変位 ( $\delta_{Li}$ ,  $\delta_{Ri}$ ) を用いて曲率  $\phi_i$  及び曲げ変形  $\delta_B$  を算出する。なお、変位 ( $\delta_{Li}$ ,  $\delta_{Ri}$ ) は、曲げのみによる変形と仮定している。
- 全体変形  $\delta$  から曲げ変形  $\delta_B$  を引くことでせん断変形  $\delta_S$  を算出する。



$$\phi_i = \frac{\delta_{Li} - \delta_{Ri}}{L} \cdot \frac{1}{\Delta X_i}$$

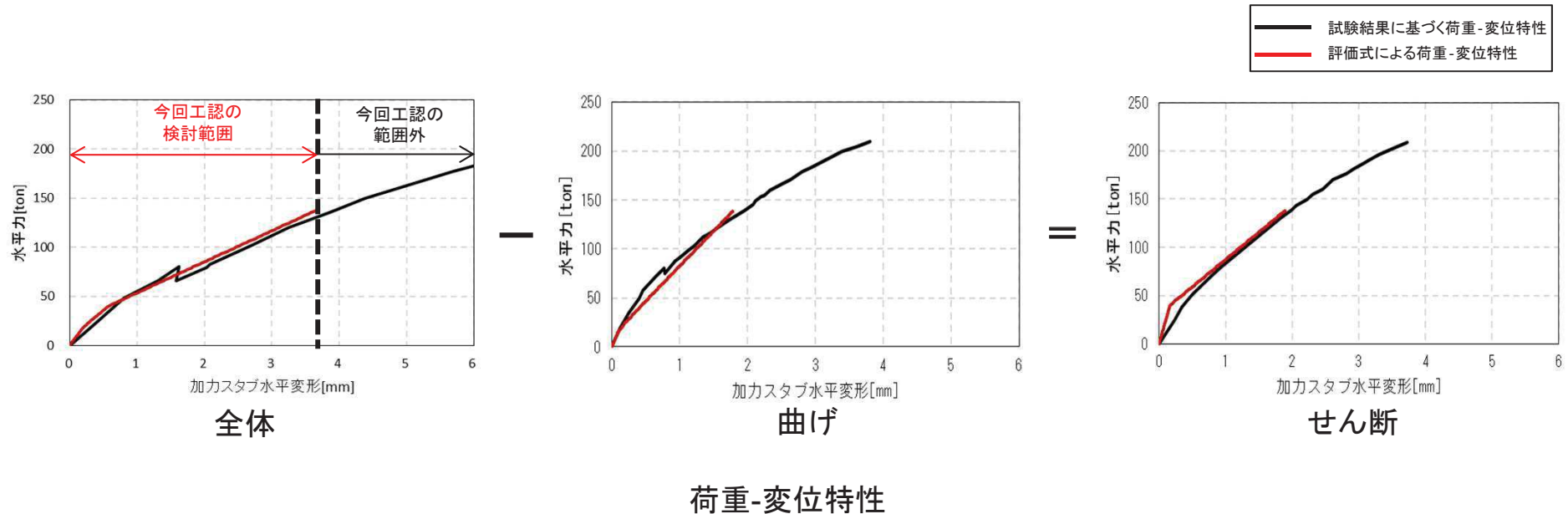
$$\delta_B = \sum_{i=1}^n h_i (\phi_i \cdot \Delta X_i)$$

$$\delta_S = \delta - \delta_B$$

曲げ変形及びせん断変形の算出の考え方

## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 2, 3】

- 試験結果に基づくせん断変形の荷重-変位特性は、評価式による荷重-変位特性と第1折点付近で差異が生じている。
- この理由として、試験結果に基づく曲げ変形の荷重-変位特性は、せん断成分も含まれる鉛直変位を曲げ成分のみによるものと仮定していることから、曲げ変形による曲率が小さくなり(変形の特性上、せん断変形は、曲げ変形による曲率を小さくする方向に働く)、見かけ上、曲げ剛性が大きくなることにより、その分だけせん断剛性が低く算出されたものと考えられる。全体変形としては、試験結果に基づく荷重-変位特性と評価式による荷重-変位特性はよく一致していることから、せん断変形に対する評価式による荷重-変位特性(直線近似)の第1折点付近の差異の影響は少ない。



## 2. 審査会合での指摘事項に対する回答【No. 4】

### (1) 指摘事項

今後の追加検討について、評価方針だけでなく、構造成立性の見通しについても提示すること。

### (2) 回答

女川2号炉のRPVペDESTALの評価における今後の追加検討事項として、以下の2点を挙げている。

#### ① 原子炉建屋の初期剛性低下を踏まえた評価方針

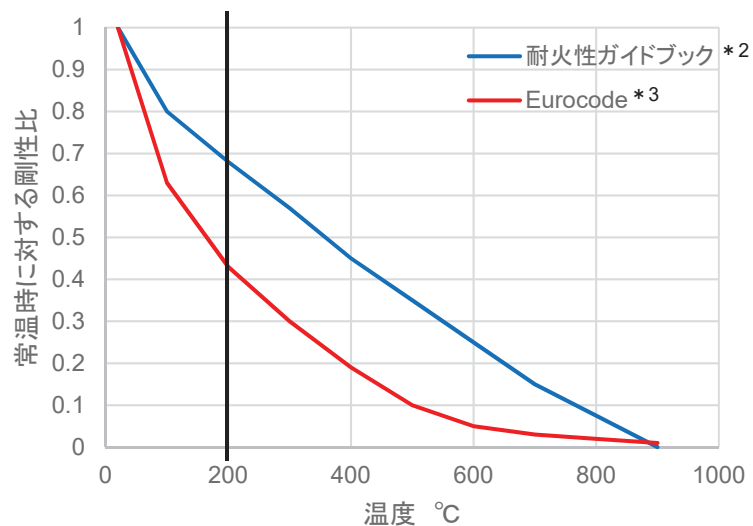
- 女川2号炉原子炉建屋は、乾燥収縮及び地震の影響に伴うひびによって初期剛性低下が確認されており、オペフロ下部の剛性低下は、0.75～0.80倍となっている。
- RPVペDESTALは、コンクリートが鋼板で覆われているため、乾燥収縮の影響は小さいと考えられるが、念のため、RPVペDESTALの剛性について、建屋側と同様に剛性低下を考慮した評価を行う。

#### ② 重大事故時の環境条件を踏まえた評価方針

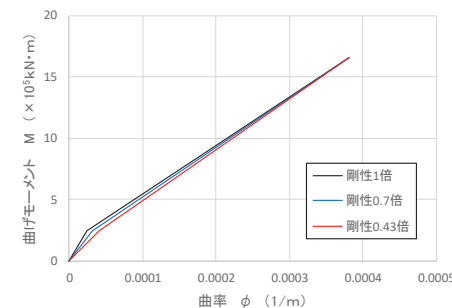
- 重大事故時の原子炉格納容器内の環境条件は、格納容器の限界温度(200℃)以下に制御されるものの、コンクリート温度が100℃を超える高温環境になった場合、コンクリート中の水分逸散による剛性低下が考えられる。
- RPVペDESTALは、コンクリートが鋼板で覆われているため、コンクリート中の水分逸散の影響は小さいと考えられるが、念のため、RPVペDESTALの剛性について、温度上昇に伴う剛性低下を考慮した評価を行う。

## 構造成立性に係る概略検討

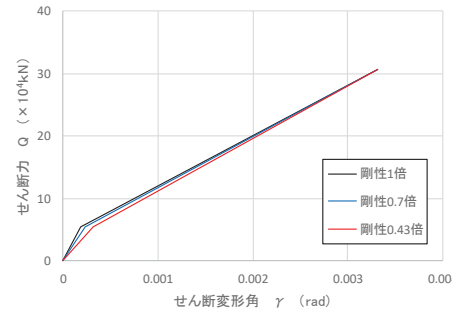
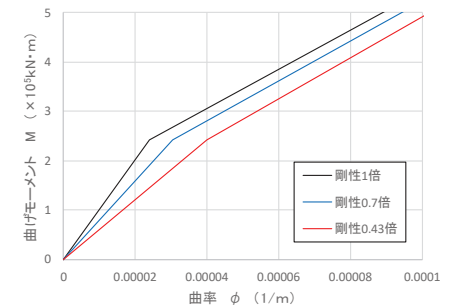
- 評価方針を踏まえ、RPVペDESTALのコンクリートの剛性を0.7倍及び0.43倍に低下させた場合の構造成立性に係る概略検討として、基準地震動 $S_s$ (暫定値\*<sup>1</sup>)に対する、原子炉格納容器、原子炉圧力容器、原子炉しゃへい壁及びRPVペDESTALの曲げモーメント及びせん断力を確認した。
- 高温環境下におけるコンクリートの剛性低下については、格納容器限界温度(200°C)に対して、耐火性ガイドブック\*<sup>2</sup>を参考に0.7倍、Eurocode\*<sup>3</sup>を参考に0.43倍と設定した。なお、建屋の初期剛性低下は0.75~0.8倍であることから、概略検討としては、剛性低下が大きい高温環境の影響を確認する。
- 検討の結果、各部の曲げモーメント及びせん断力は、RPVペDESTALの剛性を0.7倍及び0.43倍に低下させた場合においても、その変動は小さく、各部の構造成立性に影響を及ぼすものではないことを確認した。
- なお、詳細な評価については、工認段階で実施する。



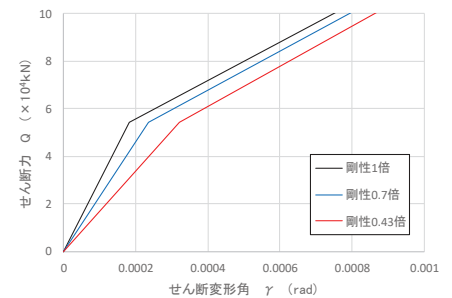
高温環境下におけるコンクリートの剛性低下率



第1折点付近を拡大



第1折点付近を拡大



評価に用いたスケルトンカーブ

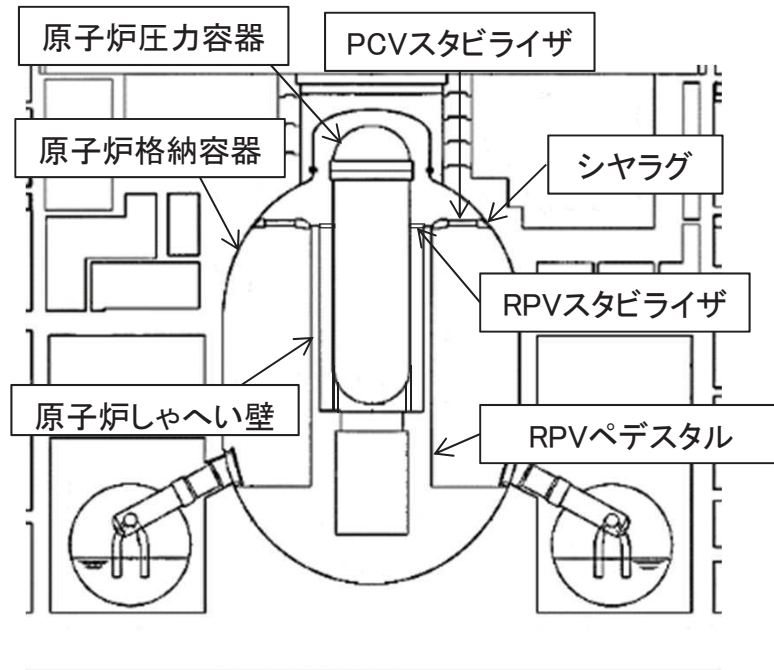
\* 1: 平成25年12月27日工事計画認可申請時の基準地震動 $S_s$ -2

\* 2: 日本建築学会 構造材料の耐火性ガイドブック, 2版 2009

\* 3: European Committee for Standardization : Eurocode 2 : Design of concrete structures, 2004

## 検討結果(基準地震動S<sub>s</sub>-2に対する各部位の地震応答の比較)

- 剛性0.7倍及び剛性0.43倍の結果を剛性1倍の結果と比較すると、RPVスタビライザのばね反力で最大2割程度の増加がみられるが構造成立性に影響を及ぼすものではない。今後、工認段階にて詳細を評価を実施する。



評価部位

評価部位	曲げモーメント(kN/m)			剛性1倍に対する比率(%)	
	①剛性1倍	②剛性0.7倍	③剛性0.43倍	②/①	③/①
原子炉格納容器	619,000	624,000	628,000	100.8	101.5
原子炉圧力容器	82,400	84,400	78,500	102.4	95.3
原子炉しゃへい壁	133,000	123,000	115,000	92.5	86.5
RPVペDESTAL	421,000	436,000	398,000	103.6	94.5

評価部位	せん断力(kN)			剛性1倍に対する比率(%)	
	①剛性1倍	②剛性0.7倍	③剛性0.43倍	②/①	③/①
原子炉格納容器	33,200	33,200	33,300	100.0	100.3
原子炉圧力容器	12,300	14,300	13,300	116.3	108.1
原子炉しゃへい壁	18,600	19,000	17,600	102.2	94.6
RPVペDESTAL	42,200	44,200	41,100	104.7	97.4

評価部位	評価用ばね反力(kN)			剛性1倍に対する比率(%)	
	①剛性1倍	②剛性0.7倍	③剛性0.43倍	②/①	③/①
PCVスタビライザ	16,300	16,800	17,000	103.1	104.3
RPVスタビライザ	8,480	10,400	10,500	122.6	123.8
シヤラグ	25,800	26,500	25,800	102.7	100.0

〈参考〉第593回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合  
平成30年6月28日 資料3-3-1再掲

資料3-3-1

# 女川原子力発電所2号炉 原子炉本体の基礎（RPVペデスタル） の復元力特性について

---

設計基準対象施設について（第4条 地震による損傷の防止）

平成30年6月28日  
東北電力株式会社



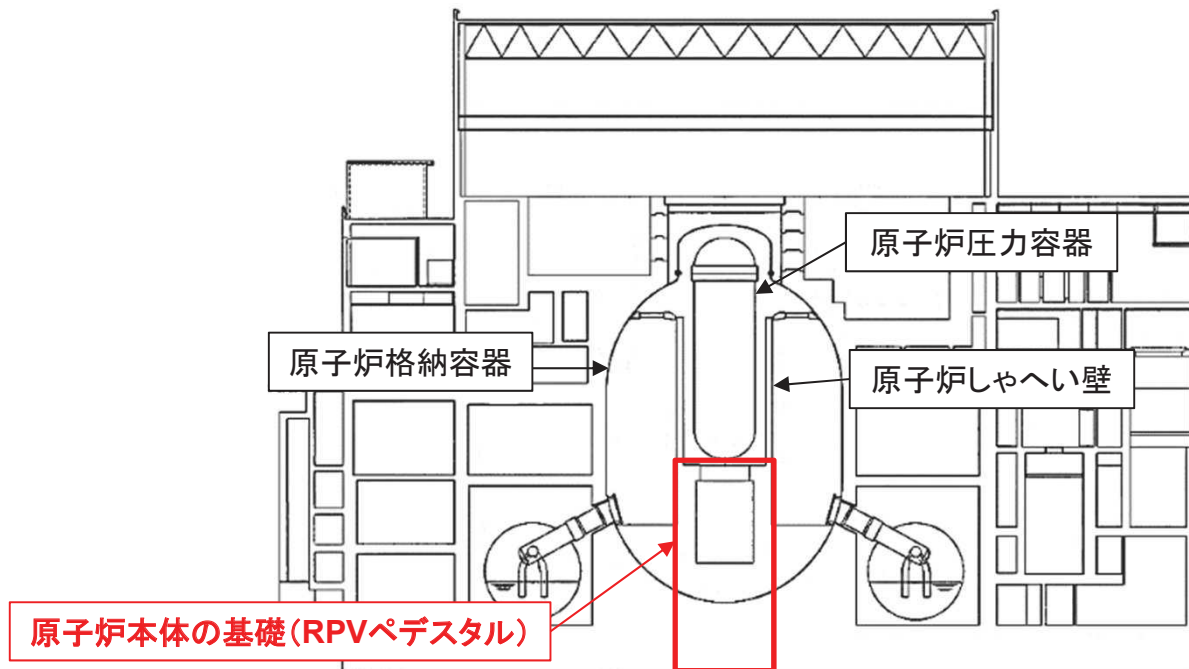
# 目次

---

1. はじめに
2. RPVペDESTALの設計概要
  - 2.1 RPVペDESTALの構造
  - 2.2 RPVペDESTALの設計の流れ
  - 2.3 先行機との構造の差異
  - 2.4 今回工認の変更点
3. 詳細化の目的と効果
4. 今回工認の検討範囲
5. RPVペDESTALの復元力特性の設定フロー
  - 5.1 復元力特性評価式の設定方針
  - 5.2 RPVペDESTALの構造特徴を踏まえた考慮事項の検討
  - 5.3 復元力特性評価式の設定
  - 5.4 復元力特性評価式の妥当性確認
  - 5.5 女川2号炉RPVペDESTALの復元力特性の設定
6. まとめ
7. 今後の追加検討

# 1. はじめに

- 女川2号炉の原子炉本体の基礎(RPVペDESTAL)は、原子炉建屋との連成モデルを用いて地震応答解析を行っており、既工認においては、RPVペDESTALの地震応答が概ね線形領域に収まっていたことからRPVペDESTALの剛性を一定として線形解析を実施
- 今回工認においては、地震動レベルの増大により、RPVペDESTALの地震応答が線形領域を超えることから、コンクリートの剛性変化を考慮した復元力特性を設定し、非線形解析を実施
- 本資料では、女川2号炉の今回工認におけるRPVペDESTALの復元力特性の設定方法の考え方及びその妥当性について、実績のある手法や既往の知見、実機を模擬した加力試験の結果に基づき説明
- なお、本手法は東京電力ホールディングス(株)柏崎刈羽原子力発電所6,7号炉にて実績があるため、柏崎刈羽6,7号炉と女川2号炉のRPVペDESTALの構造を比較し、女川2号炉への適用性を検討

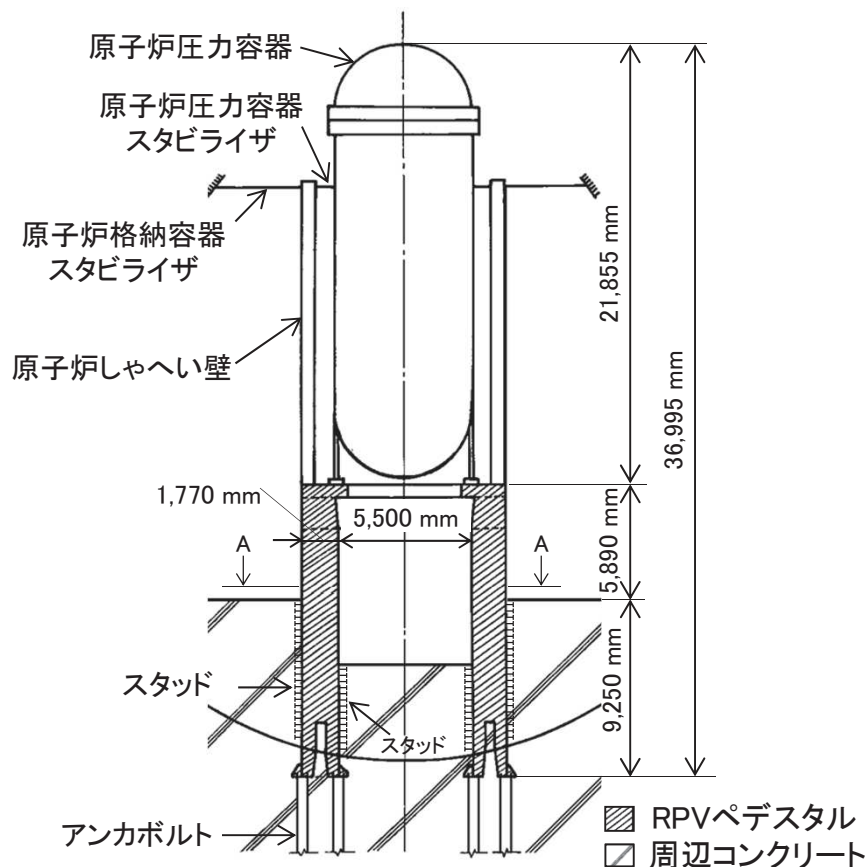


女川2号炉原子炉建屋断面図(EW方向)

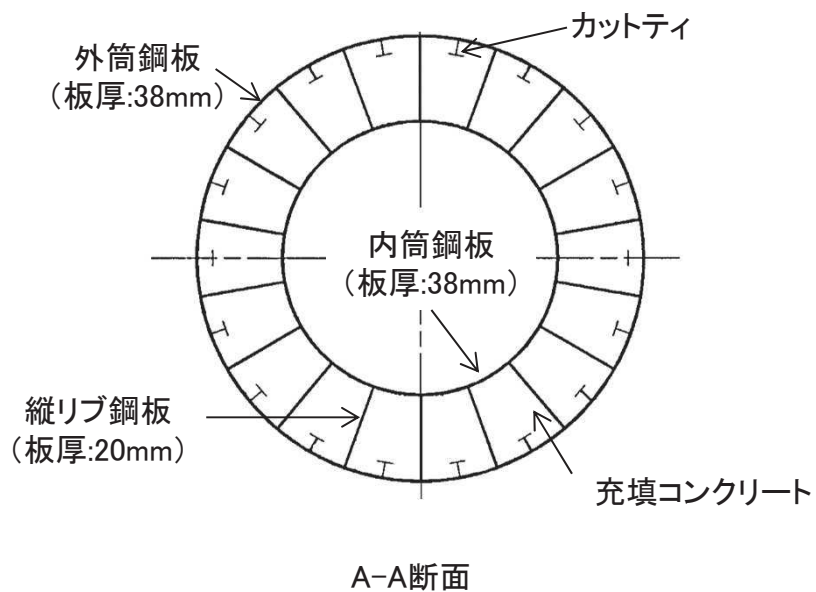
## 2. RPVペDESTALの設計概要

### 2.1 RPVペDESTALの構造

- RPVペDESTALは、原子炉圧力容器及び原子炉しゃへい壁を支持する**円筒状の構造物**
- **内筒鋼板、外筒鋼板及びそれらを一体化するための縦リブ鋼板等から構成され、内部には終局耐力向上のためコンクリートを充填**
- アンカボルトで**原子炉建屋基礎版に固定**されるとともに、外筒鋼板に取り付けたスタッドにより**周辺コンクリートと強固に固定**



RPVペDESTALの構造概要図

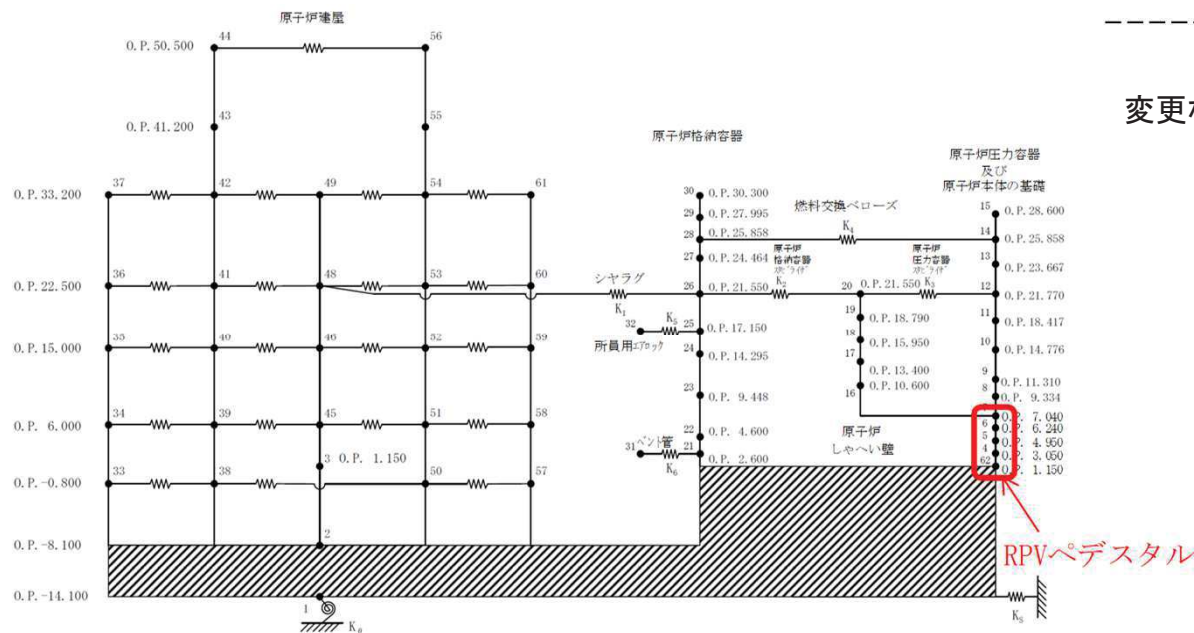


RPVペDESTALの断面図

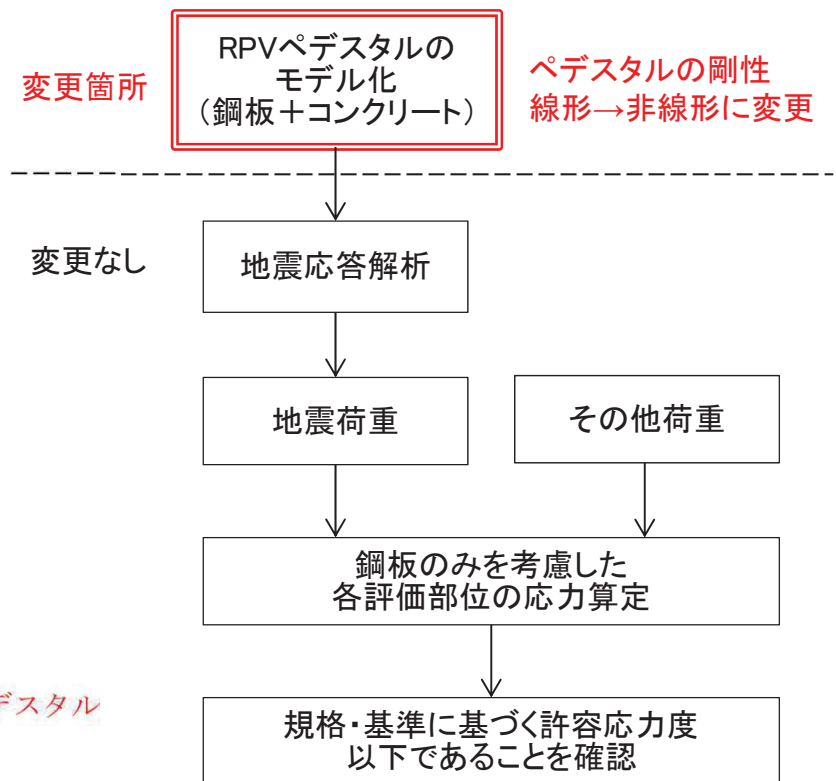
## 2. RPVペDESTALの設計概要

### 2.2 RPVペDESTALの設計の流れ

- RPVペDESTALの地震応答解析モデルは、原子炉建屋、原子炉格納容器、原子炉しゃへい壁、原子炉圧力容器と連成
- RPVペDESTALは、構造強度評価上、コンクリートの強度には期待せず、鋼板のみで耐える設計
- 振動特性を考慮するとコンクリートの影響は無視できないため、地震応答解析モデルとしては、コンクリートの剛性及び重量を考慮
- RPVペDESTALは、構造特徴を踏まえ、曲げ及びせん断を考慮した4要素(5質点)でモデル化



地震応答解析モデル図

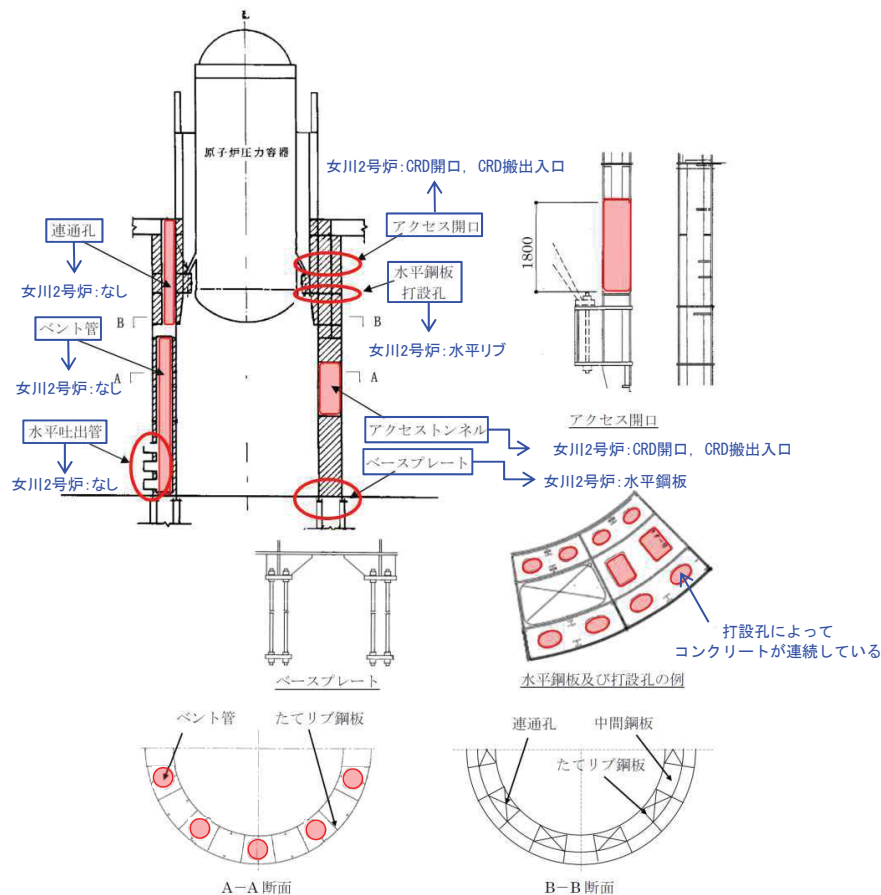


RPVペDESTALの設計フロー

# 2. RPVペDESTALの設計概要

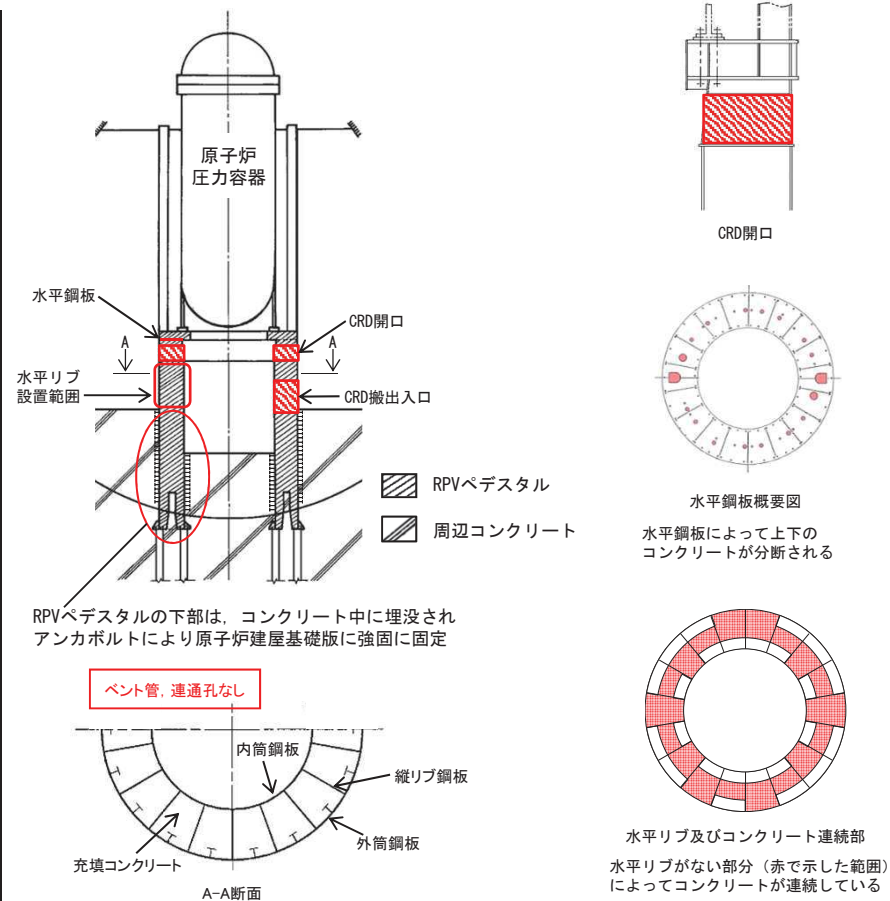
## 2.3 先行機との構造の差異

- 柏崎刈羽6, 7号炉の連通孔, ベント管及び水平吐出管に該当する部位は女川2号炉にはない
- 柏崎刈羽6, 7号炉のアクセス開口・アクセストンネルは女川2号炉のCRD開口・CRD搬出入口, 水平鋼板・打設孔は水平リブ, ベースプレートは水平鋼板とそれぞれ類似した構造
- 女川2号炉はRPVペDESTALの下部がコンクリート中に埋没され, アンカボルトにより原子炉建屋基礎版に強固に固定

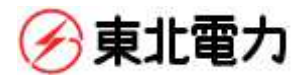


柏崎刈羽6号及び7号炉(改良型沸騰水型原子炉:ABWR) \*

\* 第442回原子力発電所の新規規制基準に係る審査会合資料1-1-3(H29.2.14)より引用, 一部加筆



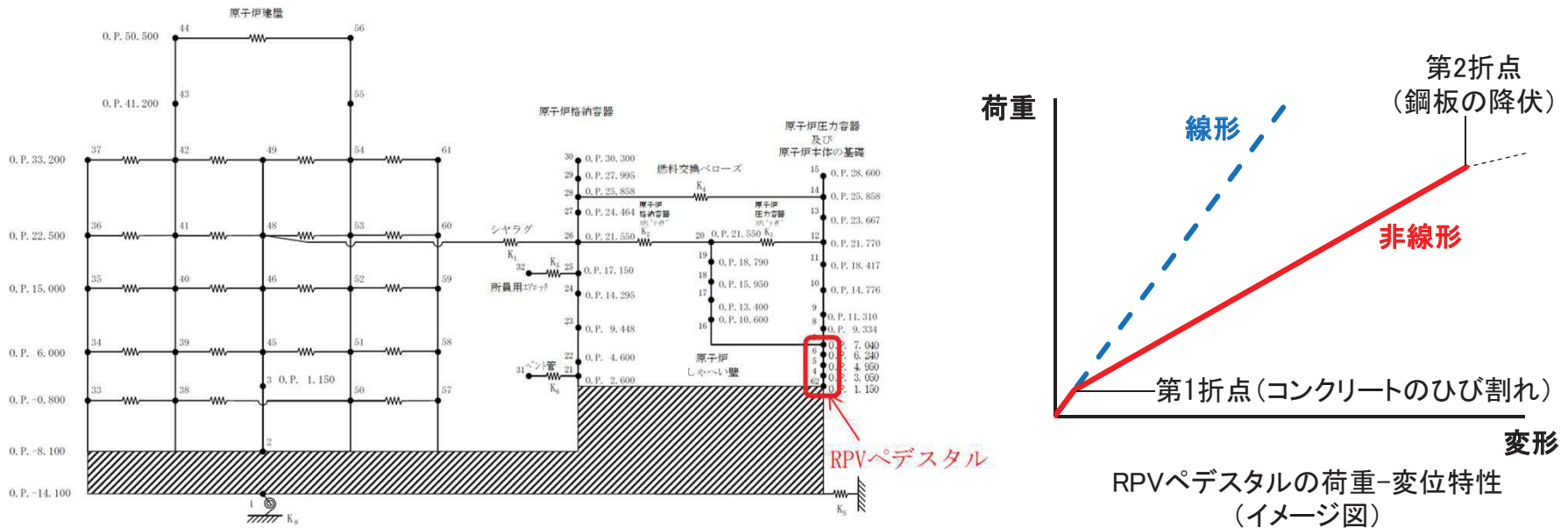
女川2号炉(沸騰水型原子炉:BWR-5)



# 2. RPVペDESTALの設計概要

## 2.4 今回工認の変更点

- 既工認では、RPVペDESTALの剛性を一定として線形解析していたが、今回工認では、鋼板が降伏に至らない範囲でコンクリートのひび割れ後の剛性変化を考慮し、地震応答解析を詳細化(非線形解析)
- 構造強度評価は、既工認同様、鋼板のみで耐える設計

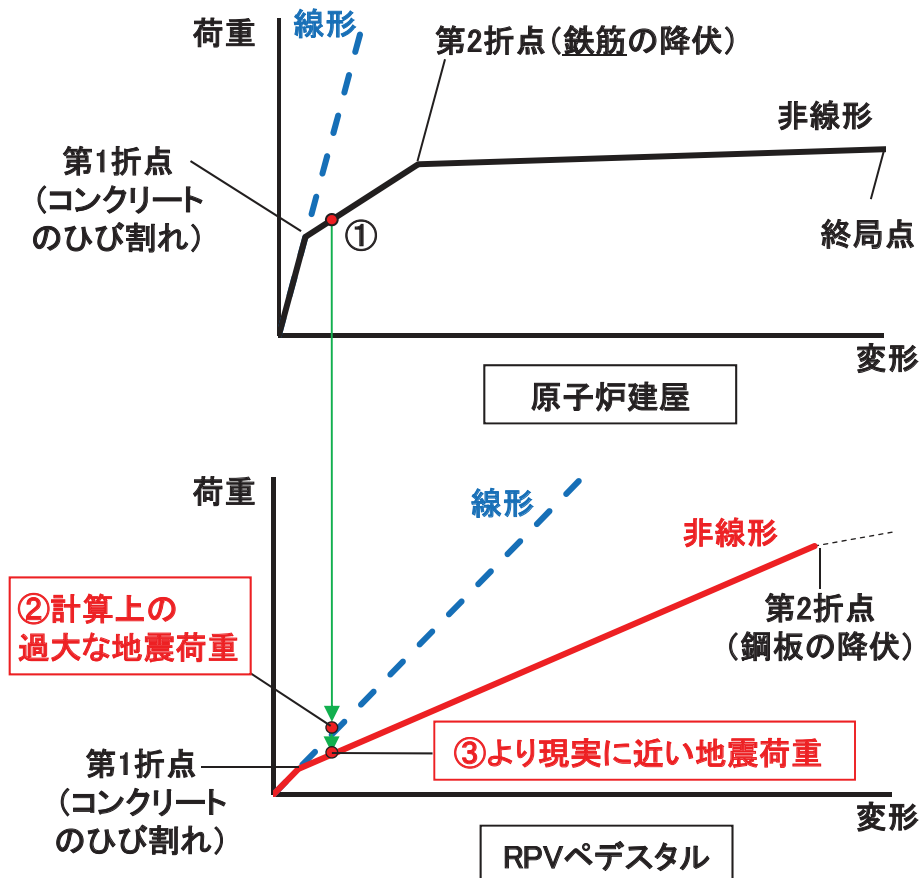


RPVペDESTALの耐震評価条件に関する比較

	既工認	今回工認
地震応答解析	原子炉建屋と連成してモデル化	同左
	剛性は鋼板及びコンクリートをとともに考慮	同左
	線形解析	非線形解析 (鋼板が降伏に至らない範囲で コンクリートひび割れ後の剛性変化を考慮)
構造強度評価	鋼構造として、鋼板のみで耐えるよう設計	同左

### 3. 詳細化の目的と効果(1)

- 今回工認では、既工認と比較して地震動レベルが増大したことにより、第1折点(コンクリートのひび割れ)以降の領域で**原子炉建屋とRPVペDESTALの荷重分担のバランスが異なる**(①, ②)
- RPVペDESTALの剛性として、コンクリートのひび割れ及び鋼板の降伏を考慮し、**非線形**とすることで、**より現実に近い地震荷重が算出可能**となり、**RPVペDESTALの分担荷重が減少**する見込み(③)



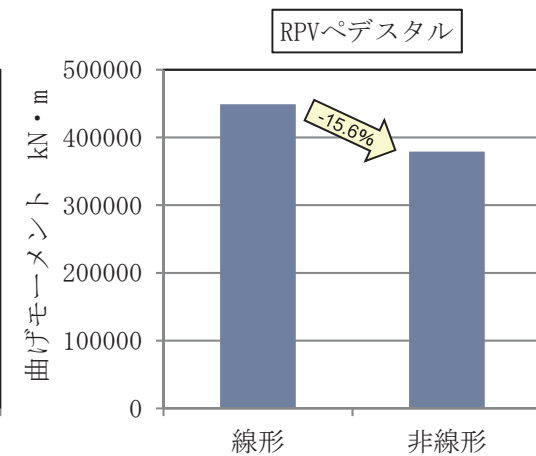
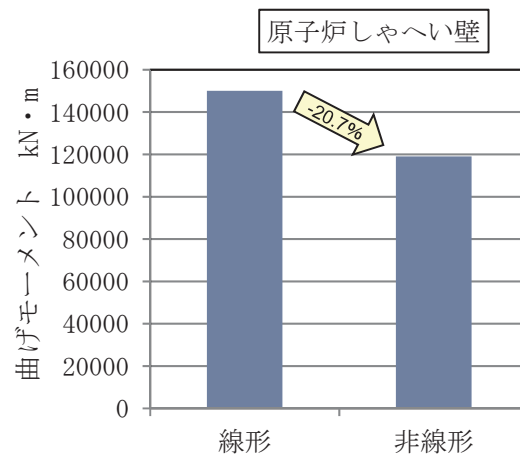
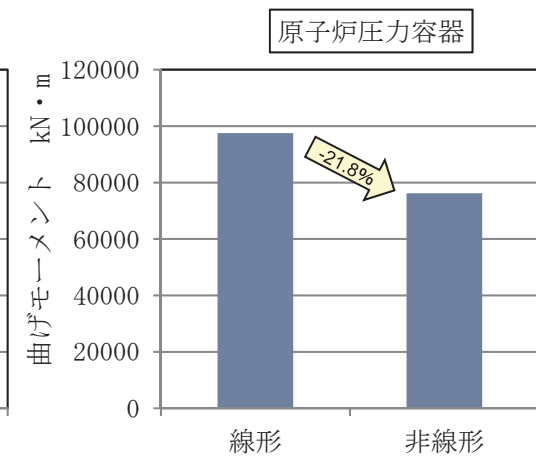
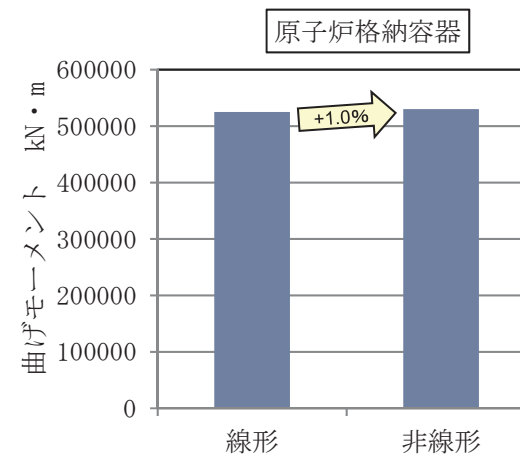
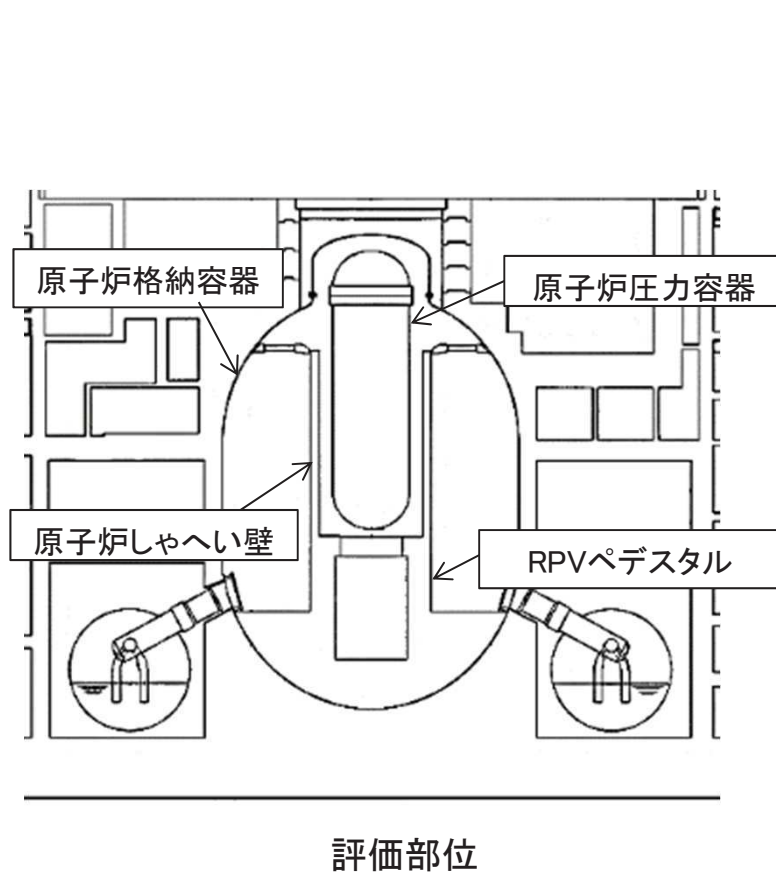
原子炉建屋とRPVペDESTALの荷重分担

モデル化方法	既工認		今回工認	
	原子炉建屋: 非線形	RPVペDESTAL: 線形	原子炉建屋: 非線形	RPVペDESTAL: 非線形
地震動	基準地震動Ss-D2		基準地震動Ss-D2	
部位	原子炉建屋	RPVペDESTAL	原子炉建屋	RPVペDESTAL
曲げモーメント [ $\times 10^3$ kN·m]	58,840	460	58,940	380
曲げモーメントの 分担割合[%]*	99.2	0.8	99.4	0.6
せん断力 [ $\times 10^3$ kN]	1,853	37	1,847	34
せん断力の 分担割合[%]*	98.0	2.0	98.2	1.8

\* : 原子炉建屋とRPVペDESTALの合計を100%とした場合の荷重の割合

### 3. 詳細化の目的と効果(2)

- RPVペダスタルの剛性を非線形にした場合、基準地震動Ssに対する原子炉圧力容器、原子炉しゃへい壁及びRPVペダスタルの曲げモーメント及びせん断力は低減する見込み



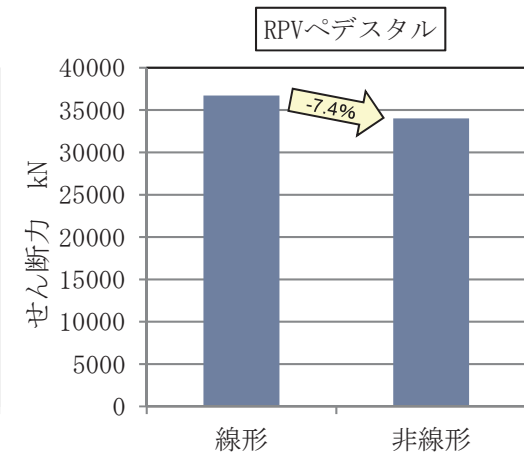
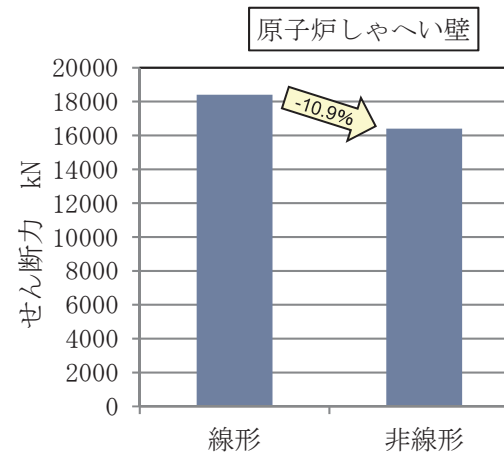
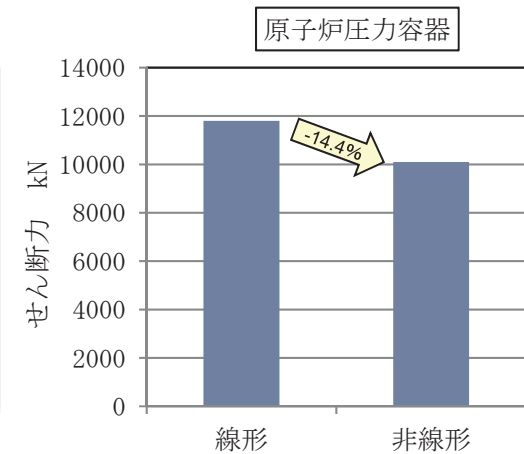
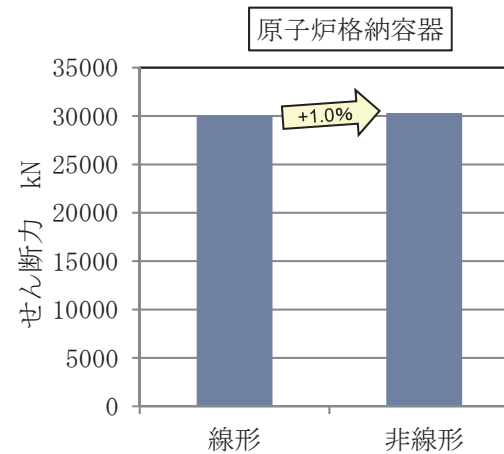
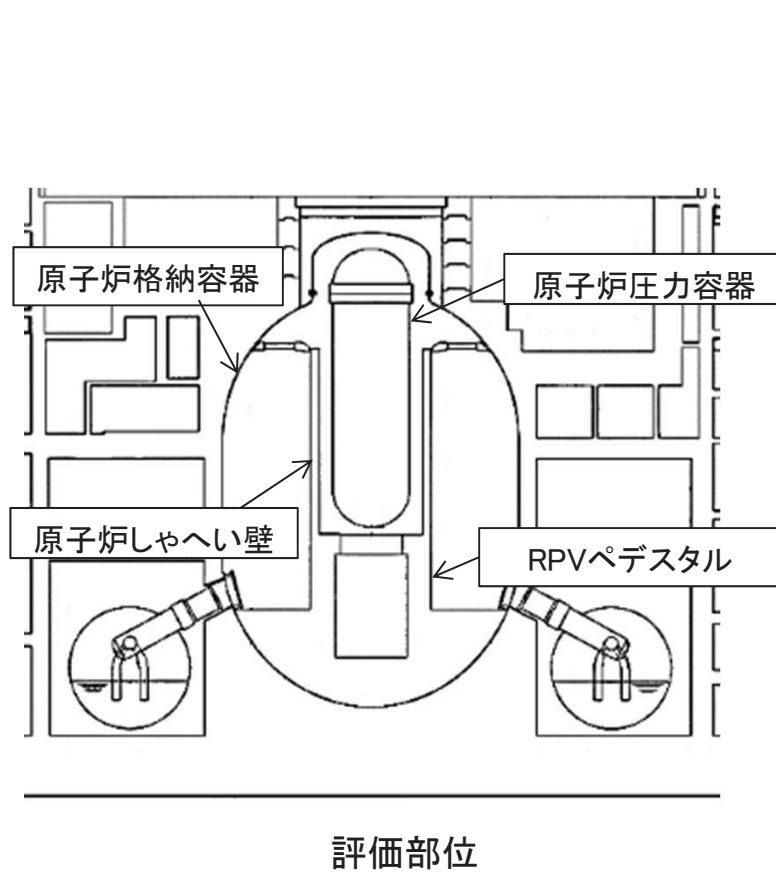
基準地震動Ss-D2による暫定値

基準地震動Ssに対する応答(曲げモーメント)



### 3. 詳細化の目的と効果(3)

- RPVペダスタルの剛性を非線形にした場合、基準地震動Ssに対する原子炉圧力容器、原子炉しゃへい壁及びRPVペダスタルの曲げモーメント及びせん断力は低減する見込み

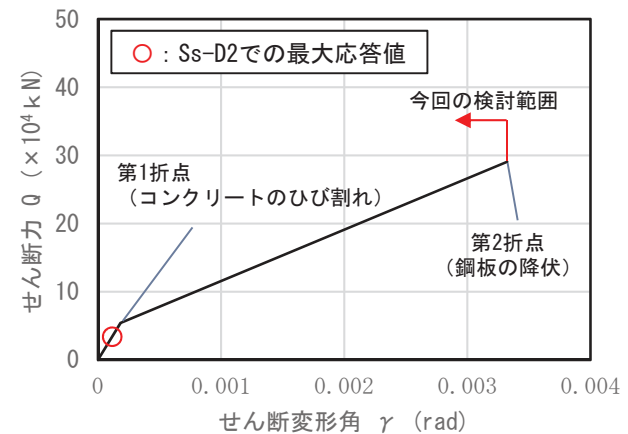
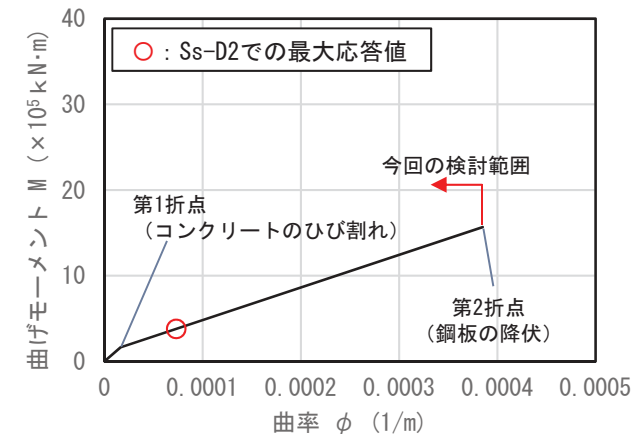
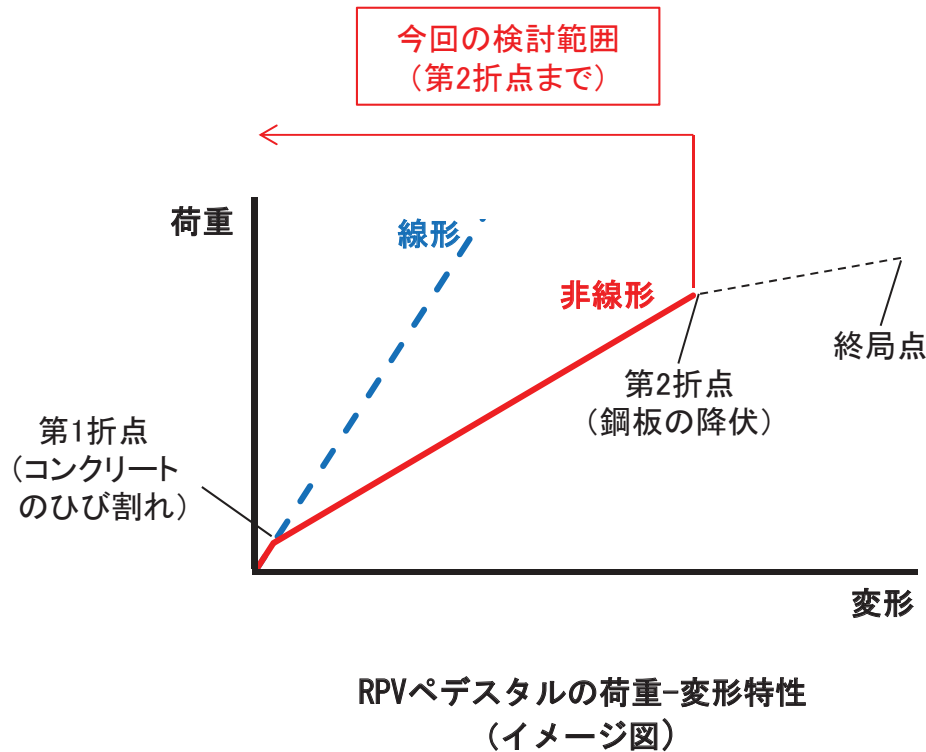


基準地震動Ss-D2による暫定値

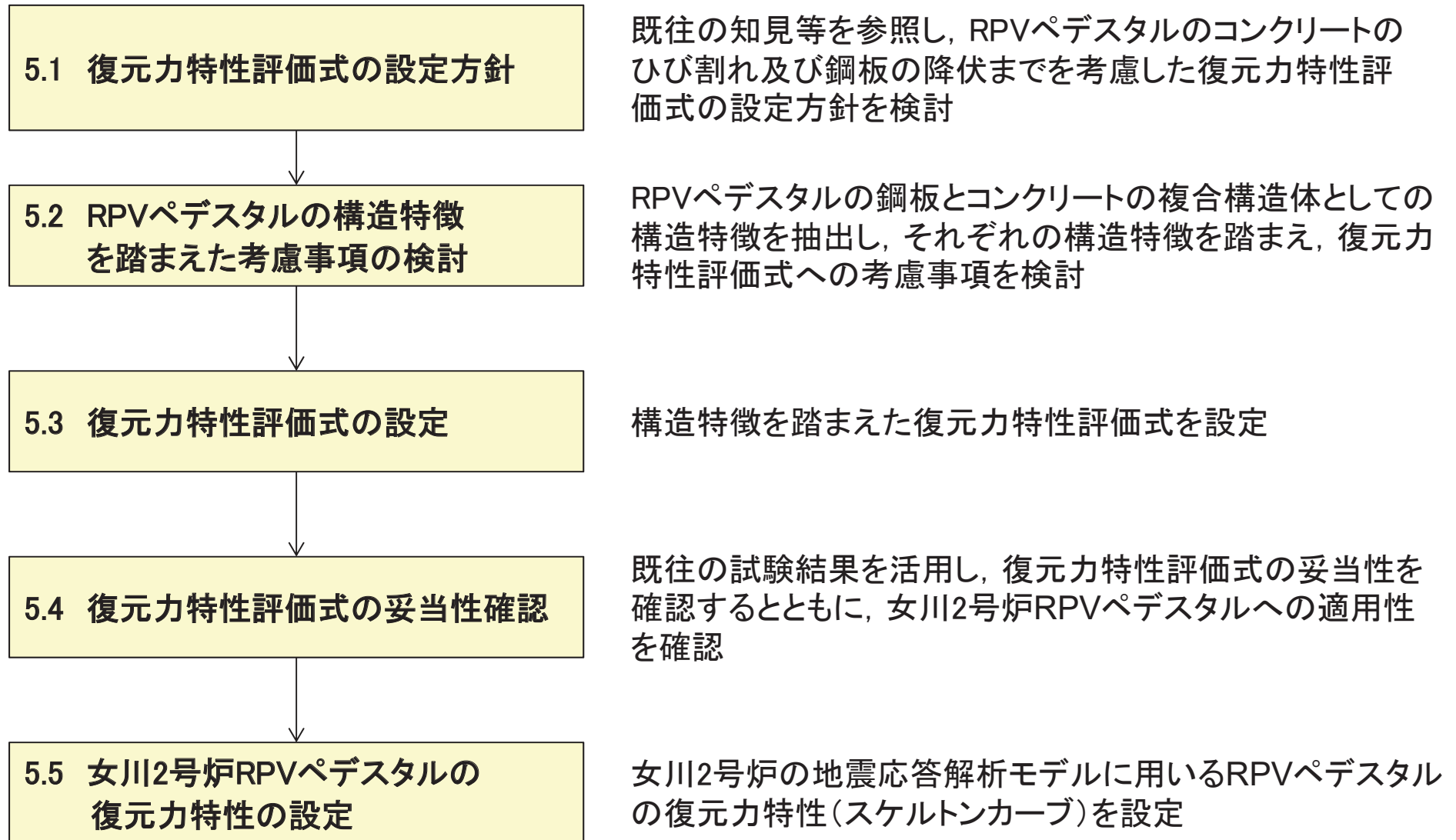
基準地震動Ssに対する応答(せん断力)

## 4. 今回工認の検討範囲

- RPVペDESTALは、構造強度設計上、鋼構造として鋼板のみで弾性状態で耐える設計思想であるため、**今回工認の検討範囲は、鋼板の降伏を表す第2折点までとし、第2折点から終局点までの領域はスケルトンカーブを設定しない**
- RPVペDESTALの剛性を非線形とした場合の基準地震動 $S_s$ に対する最大応答値は、コンクリートのひび割れを表す第1折点を少し超える程度であり、鋼板の降伏を表す第2折点に対しては大きな余裕



## 5. RPVペDESTALの復元力特性の設定フロー



## 5.1 復元力特性評価式の設定方針

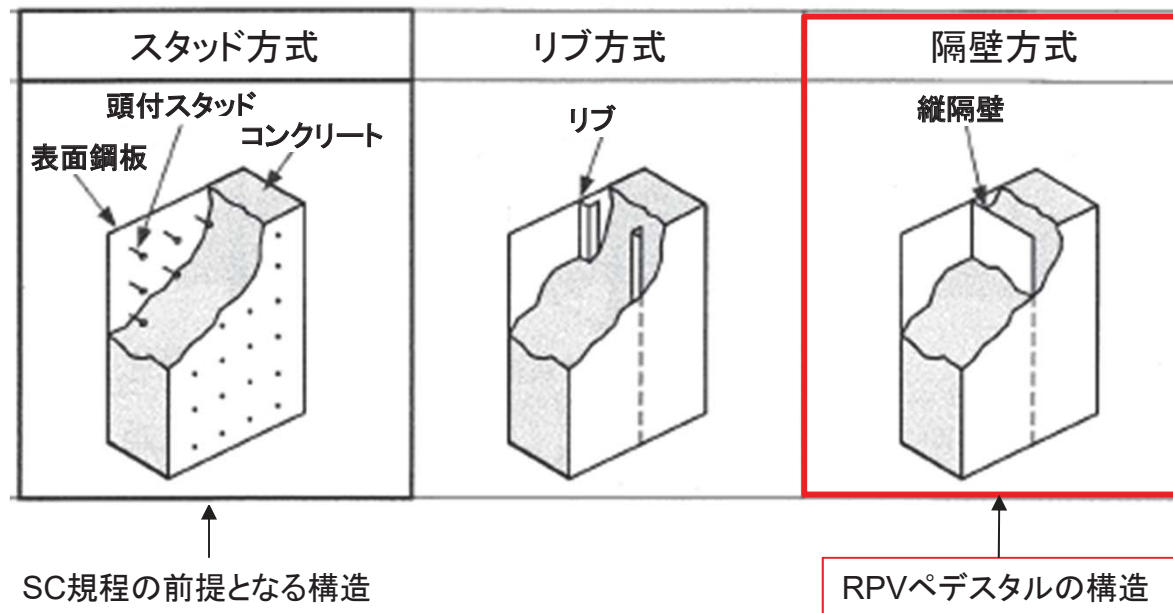
- RPVペダスタルの地震応答解析に用いる曲げ及びせん断のスケルトンカーブについて、**コンクリートのひび割れを表す第1折点と鋼板の降伏を表す第2折点を設定**
- 曲げの第1折点、第2折点及びせん断の第1折点は、鉄筋コンクリート構造(RC構造)の考え方「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEAG4601-1991 追補版)と同様
- **せん断の第2折点は、コンクリートひび割れ後のコンクリートと鋼板の抵抗機構がRC構造とは異なることから、鋼板とコンクリートの複合構造としての特徴に留意した既往知見\*等を参考に設定**

	曲げ変形		せん断変形	
	RC構造	RPVペダスタル	RC構造	RPVペダスタル
構造				
第1折点 (コンクリートのひび割れ)	<p>RC構造と同様の考え方</p>	<p>RC構造と同様の考え方</p>		
第2折点 (鋼板の降伏)				<p>RC構造と考え方が異なる</p>

\* 松尾 他 : 鋼板コンクリート耐震壁に関する研究 その3 せん断荷重-変形関係の解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 平成4年8月

## 5.2 RPVペDESTALの構造特徴を踏まえた考慮事項の検討

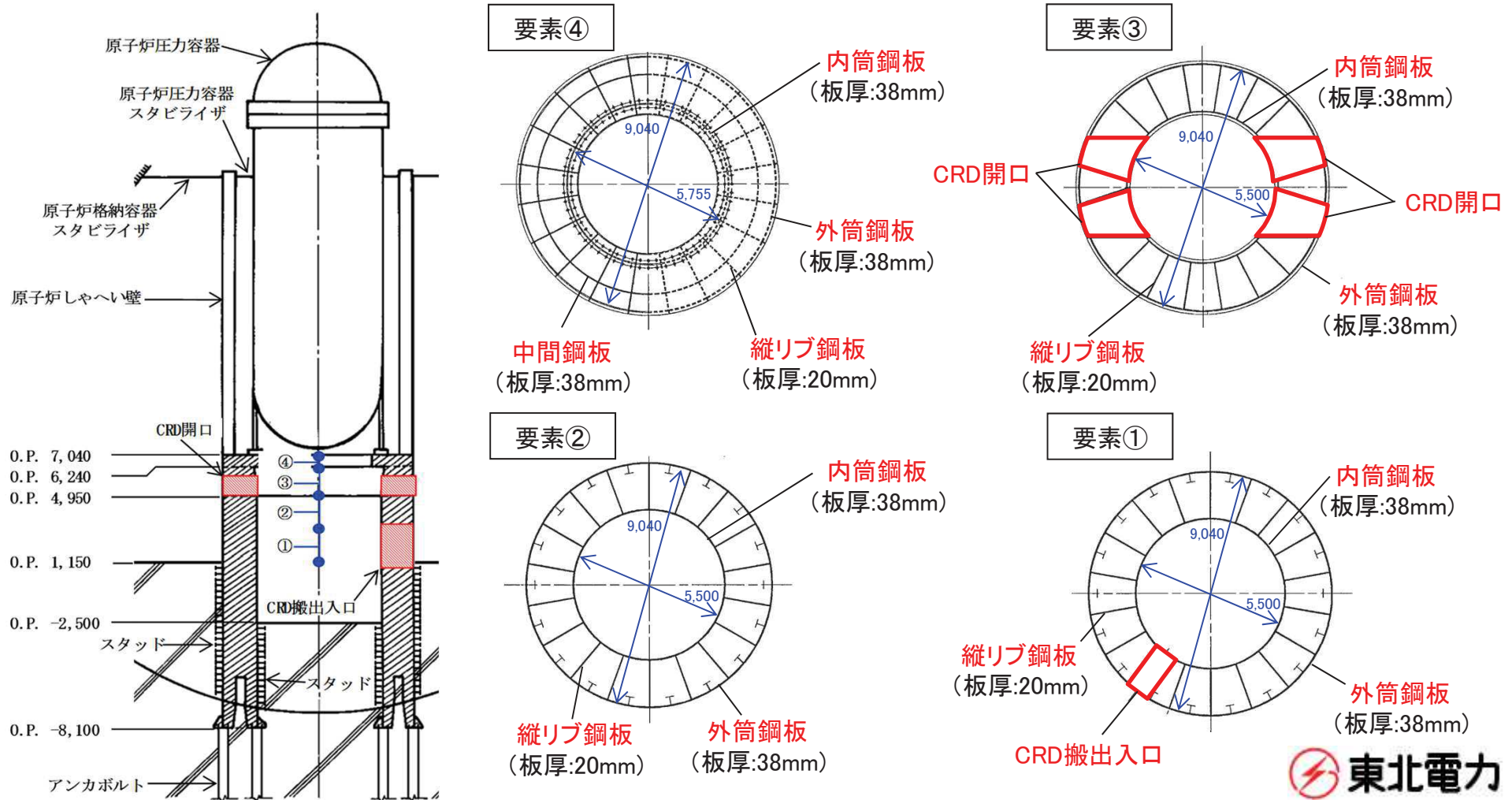
- 鋼板及びコンクリートで構成された複合構造物に関するスケルトンカーブの評価方法が、鋼板コンクリート構造耐震設計技術規程(JEAC4618-2009(SC規程))にまとめられていることから、RPVペDESTALは、便宜上SC規程を参考に評価を実施
- SC規程は、スタッド方式を前提としているため、RPVペDESTALの構造特徴を抽出し、それぞれの構造特徴を踏まえ、復元力特性評価式への考慮事項を検討
- RPVペDESTALは鋼板円筒殻の内部にコンクリートを充填しており、隔壁方式の鋼板コンクリート構造(SC構造)に近い構造物



SC構造の各種構造型式(例)

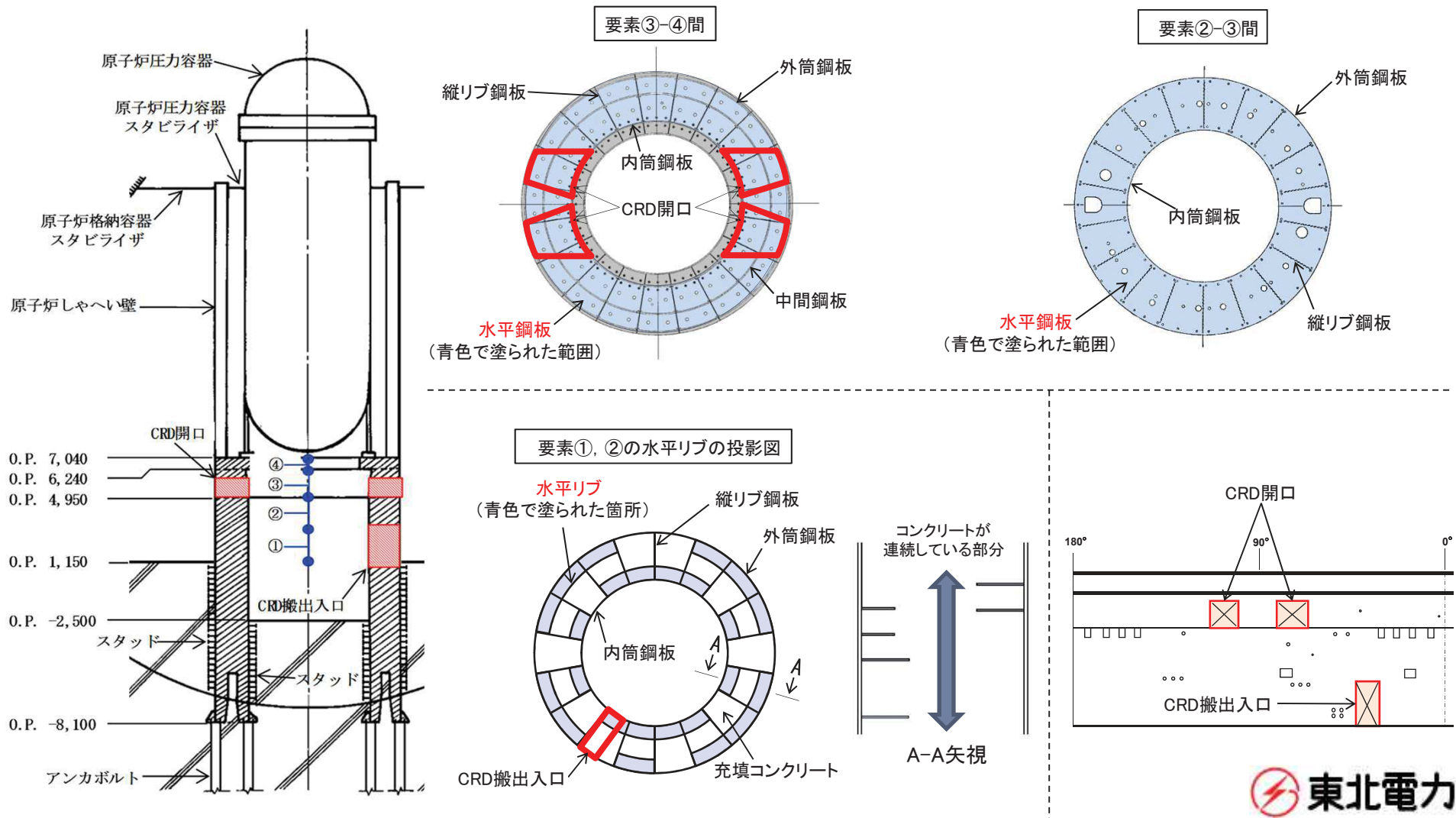
## 5.2.1 RPVペダスタルの構造特徴の抽出(1)

- RPVペダスタルは、内外の円筒鋼板を縦リブ鋼板及び中間鋼板によって一体化(隔壁方式)し、鋼板の間にコンクリートを充填した円筒型の構造(要素①~④)
- RPVペダスタルには、制御棒駆動水圧系配管の貫通部(CRD開口)及び制御棒駆動機構の搬出入のための開口(CRD搬出入口)がある(要素①, ③)



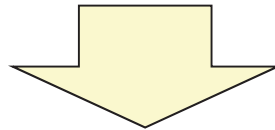
## 5.2.1 RPVペDESTALの構造特徴の抽出(2)

- CRD開口の上下にある水平鋼板により、**コンクリートが上下に分断**(要素②-③間, 要素③-④間)
- 水平リブにより、**コンクリートが上下に部分的に分断**(要素①, ②)



## 5.2.2 RPVペDESTALの構造特徴に応じた追加検討の要否

RPVペDESTALの構造特徴		構造特徴に応じた追加検討の要否			
		○:要 ×:否	理由	備考	
構造方式	隔壁方式	○	SC規程(スタッド方式)とは一体化方式が異なる	b	
形状	円筒型	○	SC規程は円筒型への適用を排除するものではないが、規程の根拠となっているデータが矩形断面であることから、念のため追加検討を行う	b	
RPVペDESTAL	要素③, ④	水平鋼板	○	水平鋼板によって、コンクリートが上下に分断される	a
		中間鋼板	○	中間鋼板によって、隔壁が分割される	b
		CRD開口	×	SC規程の開口の取扱いに関する規定に準じることで追加の検討は不要	-
	要素①, ②	水平リブ	○	水平リブによって、部分的にコンクリートが上下に分断される	a
		CRD搬出入口	×	SC規程の開口の取扱いに関する規定に準じることで追加の検討は不要	-



RPVペDESTALの構造特徴を踏まえ、復元力特性評価式へ反映

a.コンクリートの引張強度に係る考慮

b.コンクリートの圧縮ストラット角度及びせん断に対して有効とみなす範囲に係る考慮



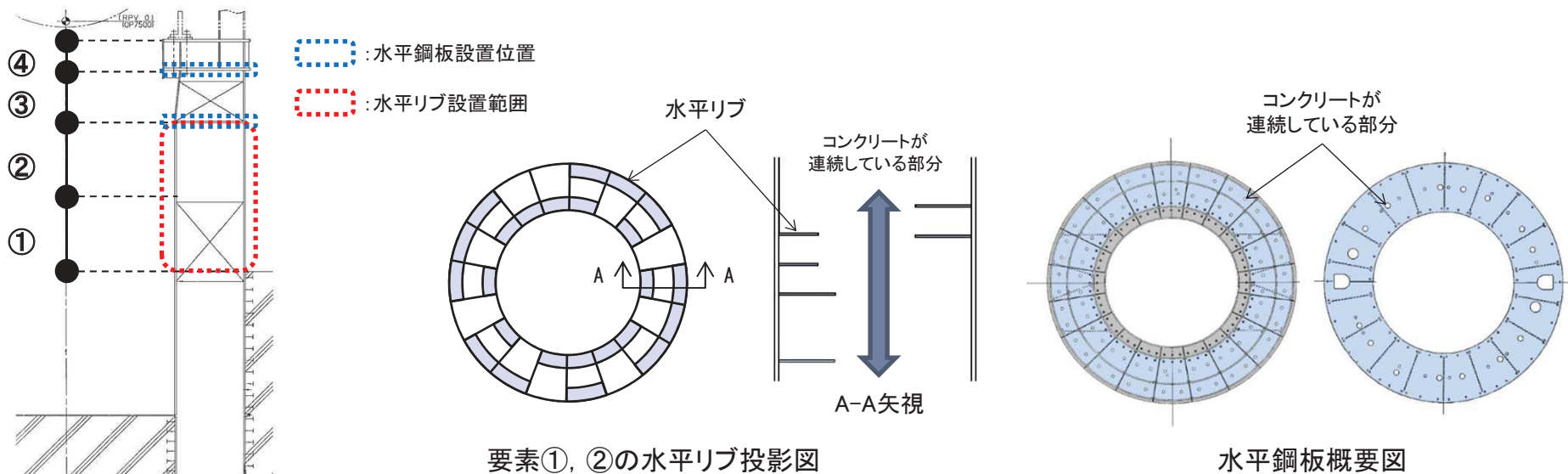
## 5.3 復元力特性評価式の設定(コンクリートの引張強度に係る考慮)

- 曲げの第1折点の設定にあたり、水平鋼板及び水平リブによってコンクリートが分断されることから、コンクリートの引張強度に開口率  $\alpha$  \* を乗じる

\* 開口率  $\alpha$  とは、RPVペDESTALの全断面積(水平方向)に対するコンクリートの連続部(開口部)の面積の比率

	復元力特性評価式 (曲げ) *	要素①, ②(水平リブ)	要素③, ④(水平鋼板)
第1折点 (コンクリートのひび割れ)	$M_1 = Z_e(\alpha \cdot f_t + \sigma_v)$ $\phi_1 = \frac{M_1}{E_c \cdot I_e}$	$\alpha = 0.6$ 水平リブを上下方向に投影し コンクリートの連続部を考慮	$\alpha = 0$ コンクリートが完全に分断 されているものとする
第2折点 (鋼板が降伏)	$M_2 = M_y$ $\phi_2 = \phi_y$	コンクリートのひび割れ発生後は コンクリートの引張強度には期待 しないため、反映点無し	同左

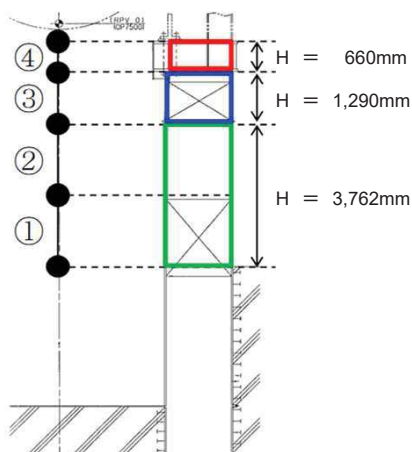
\* : 数式中の記号の定義をP28に示す



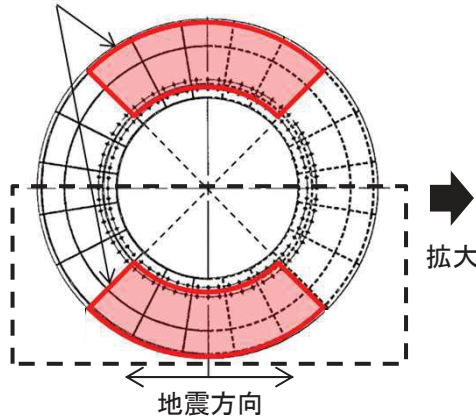
### 5.3 復元力特性評価式の設定 (コンクリートの圧縮ストラット角度及びせん断に対して有効とみなす範囲に係る考慮)

- せん断の第2折点の設定にあたり、縦リブ鋼板及び円筒鋼板並びにそれらに囲まれたコンクリートを一つの構造体とし、その対角線にコンクリートのひび割れが発生すると仮定し、圧縮ストラット角度を設定
- また、既往知見を参考に、地震方向に対して有効とみなす範囲を設定

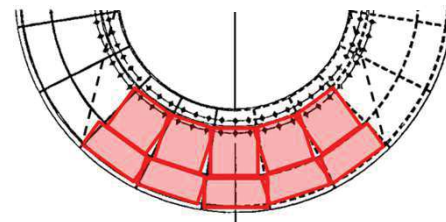
	復元力特性評価式(せん断)*	要素①, ②, ③, ④
第1折点 (コンクリートのひび割れ)	$Q_1 = \left( A_c + \frac{G_s}{G_c} \cdot A_s \right) \cdot \tau_{cr}$ $\gamma_1 = \frac{\tau_{cr}}{G_c}$ $\tau_{cr} = \sqrt{0.31\sqrt{\sigma_B} \cdot (0.31\sqrt{\sigma_B} + \sigma_v)}$	構造特徴の反映点無し
第2折点 (鋼板が降伏)	$Q_2 = \frac{K_\alpha + K_\beta}{\sqrt{3K_\alpha^2 + K_\beta^2}} \cdot A_s \cdot \sigma_y$ $\gamma_2 = \frac{Q_2}{K_\alpha + K_\beta}$ $K_\alpha = A_s \cdot G_s$ $K_\beta = \frac{(\cos\theta)^2 \cdot H}{2 \left( \frac{1 - \nu_c^2}{E_c' t_c \cdot \sin 2\theta} + \frac{C_1 + C_2}{2 \cdot E_s} \right)}$	構造特徴を踏まえ、既往知見を参考に設定



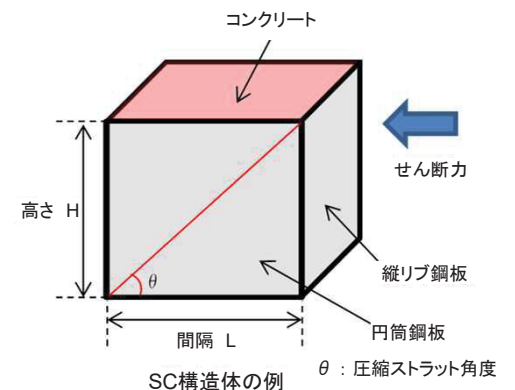
地震方向に対して有効とみなす範囲



\* : 数式中の記号の定義をP29に示す



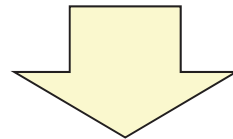
隔壁及び隔壁に囲まれたコンクリートで1つのSC構造体を構成する



## 5.4 復元力特性評価式の妥当性確認

- 妥当性確認が必要となる構造特徴は、隔壁方式であること、円筒型であること、水平鋼板によってコンクリートが分断されていること
- RPVペDESTALの構造特徴を踏まえた復元力特性評価式の妥当性確認として、既往の試験結果を活用

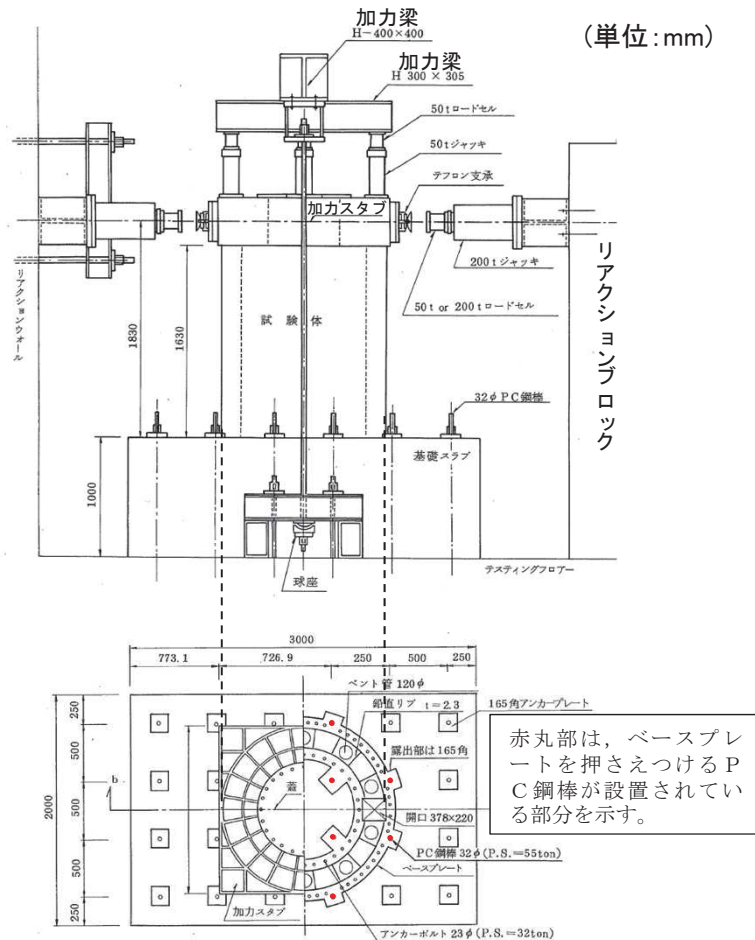
RPVペDESTALの 構造特徴		妥当性確認	
		○:要 ×:不要	内容
共通	隔壁方式	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・せん断の第2折点を求める際の構造に応じた圧縮ストラット角度(隔壁方式, 円筒型)</li> <li>・せん断力に対して有効とみなす範囲を全断面の半分(隔壁方式, 円筒型)</li> <li>・曲げの第1折点を求める際, コンクリートの引張に対する抵抗を無視(水平鋼板)</li> </ul>
	円筒型	○	
要素③, ④	水平鋼板	○	
	中間鋼板	×	・隔壁方式の構造の一部を成すものであるため, 隔壁方式の妥当性確認に包含される
要素①, ②	水平リブ	×	・単純にコンクリート断面積の減少を考慮すればよいため, 妥当性確認は不要



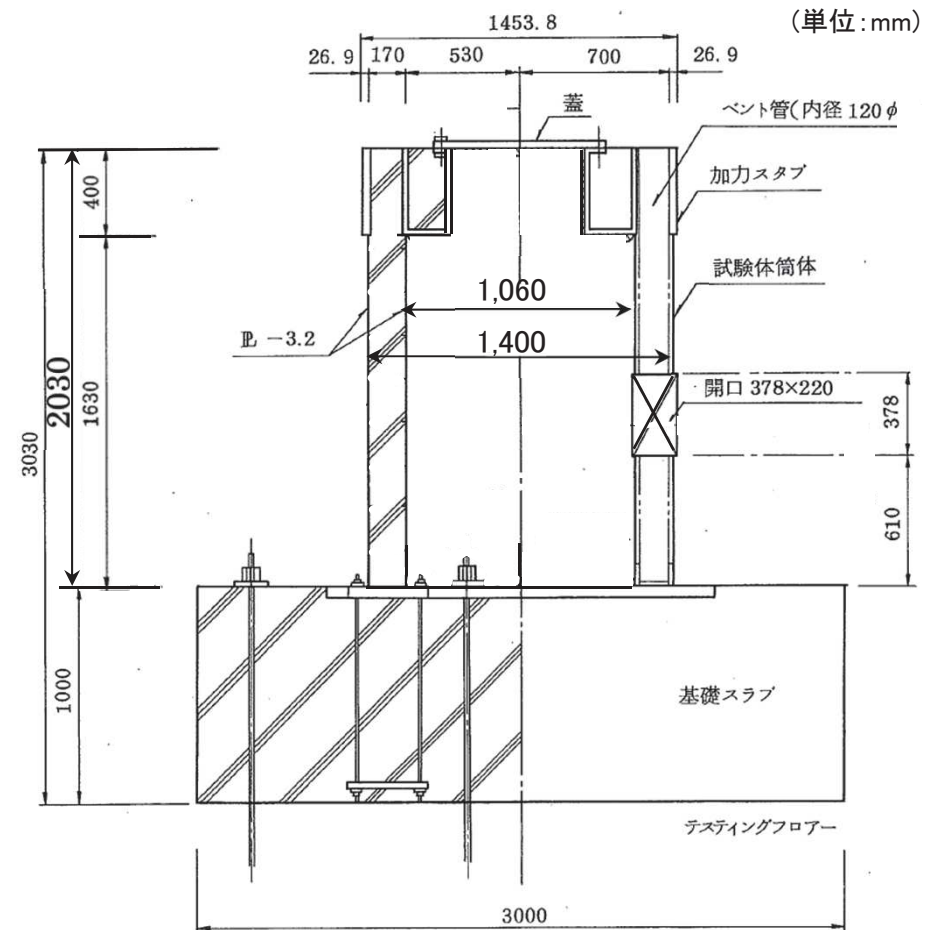
既往の加力試験結果の活用し, 妥当性を確認する

## 5.4.1 既往試験(RPVペDESTALを模擬した加力試験)の概要

- 既往の加力試験は、改良型沸騰水型軽水炉(ABWR)の水平荷重に対する終局状態での荷重-変形特性を把握するため、電力共通研究として実施
- 試験体は、**実機の構造特徴を縮小模擬した鋼板及びコンクリートからなる隔壁方式、円筒型の複合構造物**



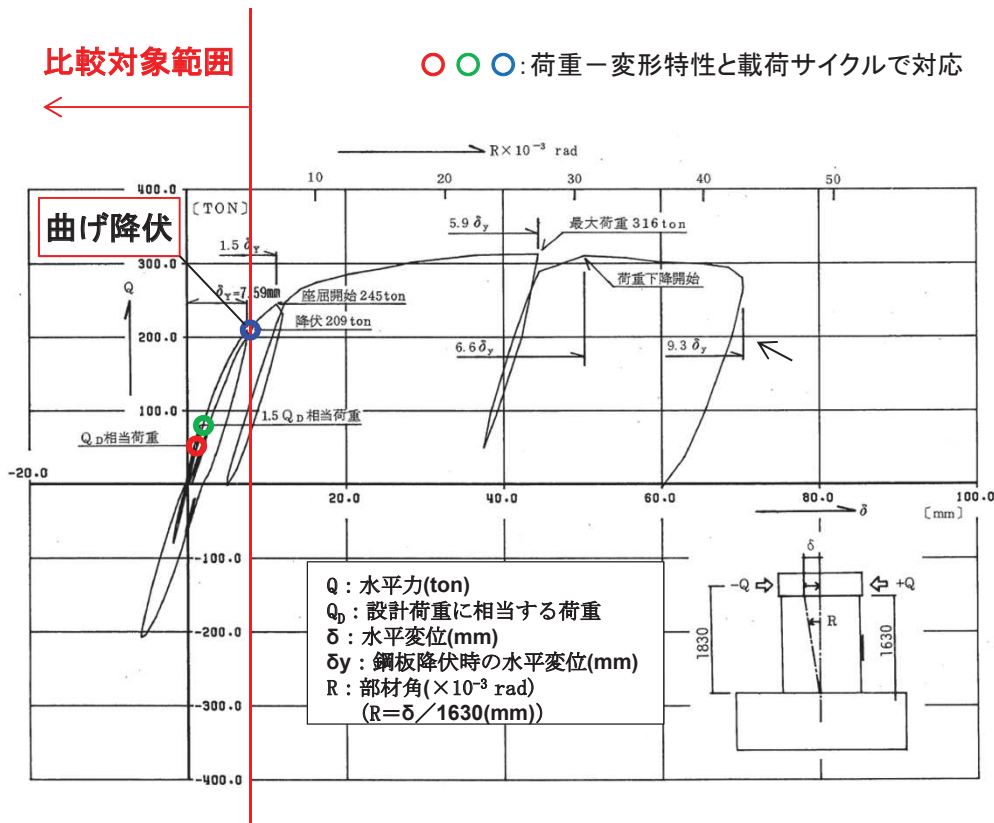
試験装置の概要図



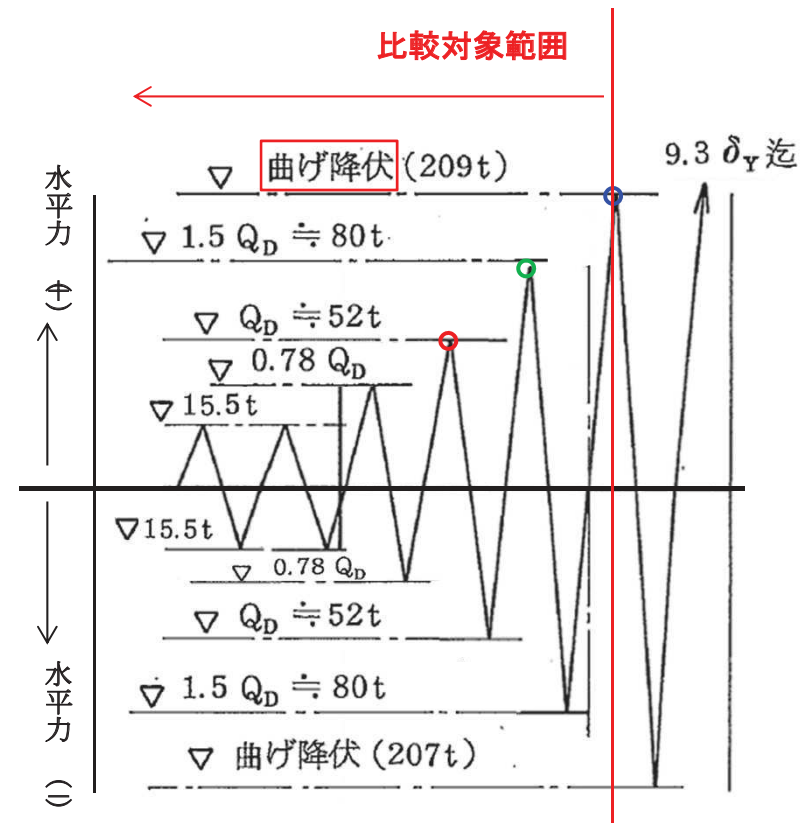
試験体の断面図

## 5.4.2 既往試験結果との比較対象範囲

- 载荷サイクルは、コンクリートにひび割れが生じない範囲(弾性範囲)で繰返し载荷を行った後、荷重を増加させながら载荷、除荷を繰返し、鋼板の曲げ降伏、荷重低下に至るまでの荷重-変形特性を取得
- 今回工認の検討範囲は、鋼板の降伏を表す第2折点までであることから、既往試験結果との比較対象範囲は、鋼板が降伏するまでの範囲とする



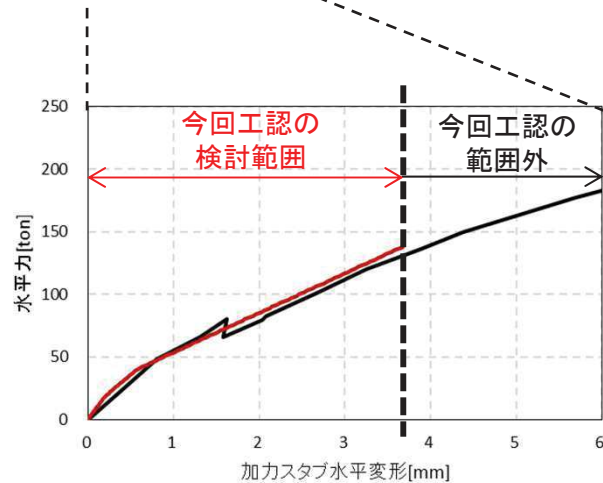
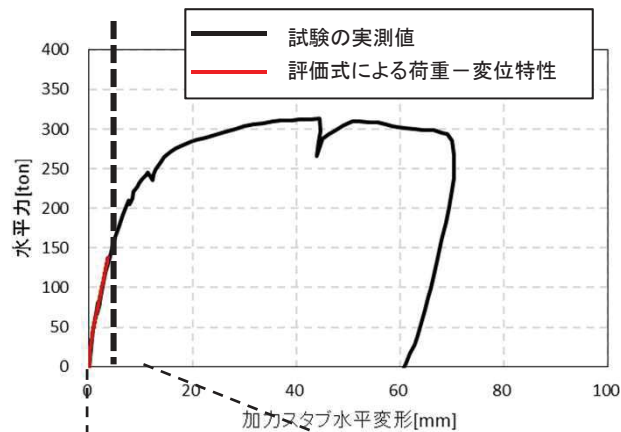
荷重-変形特性



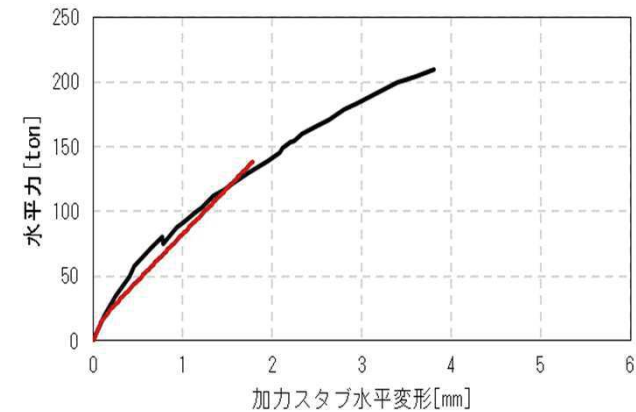
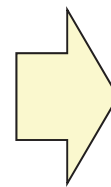
载荷サイクル

## 5.4.3 妥当性の確認結果

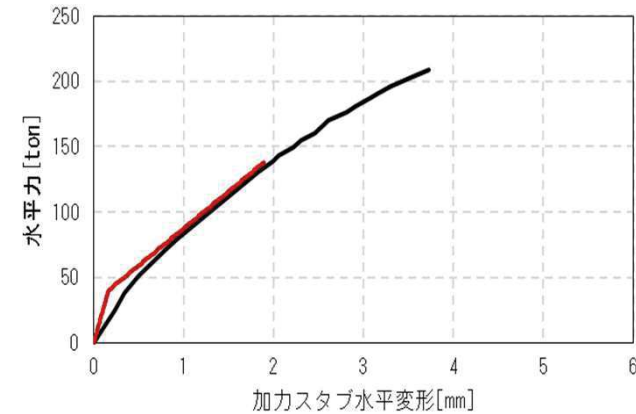
- RPVペDESTALの構造特徴を踏まえた復元力特性評価式から得られた試験体の荷重-変形特性と既往の加力試験結果を比較
- 今回工認の検討範囲である鋼板の降伏点までの範囲において、**復元力特性評価式による荷重-変形特性は、既往の加力試験結果とよく一致するため、RPVペDESTALの構造特徴を踏まえた復元力特性評価式は妥当**



全体変形



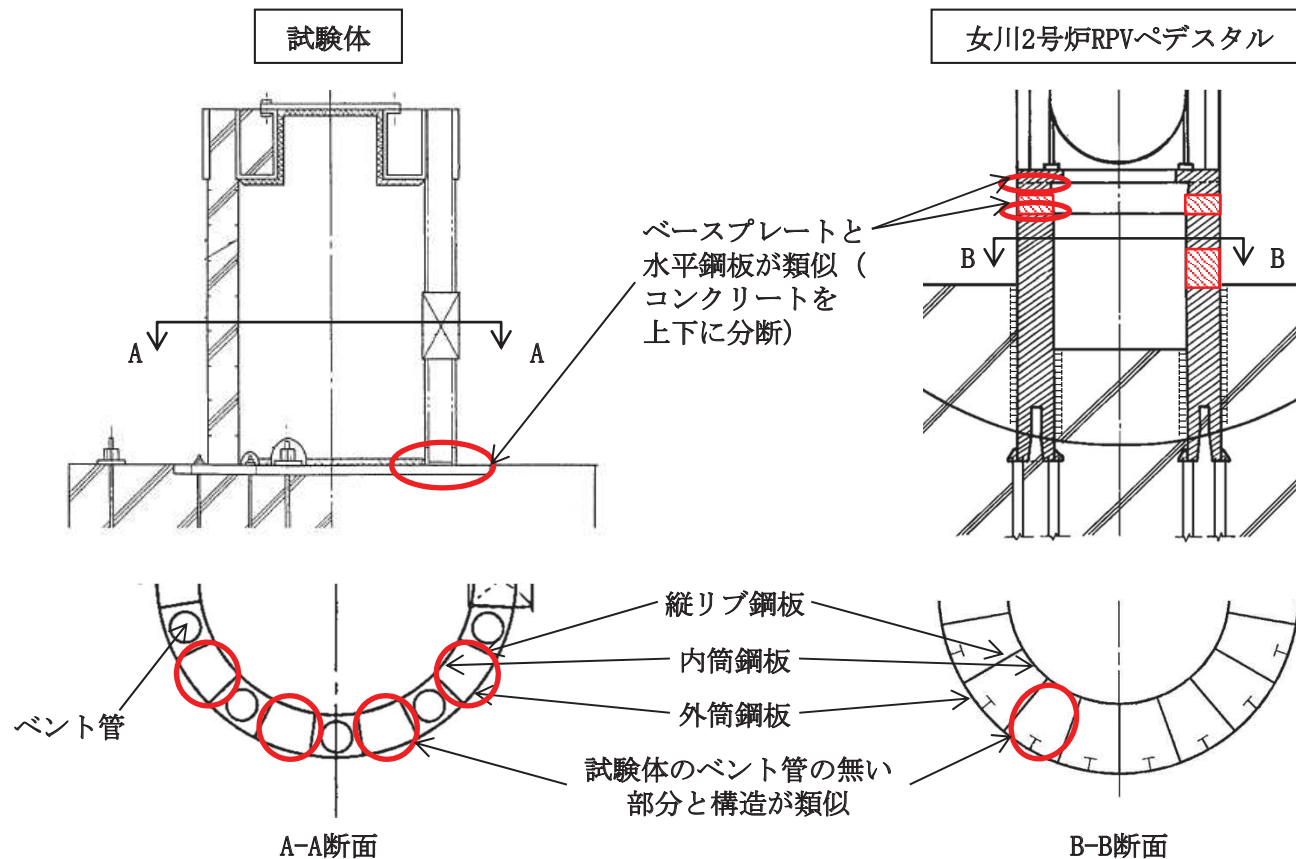
曲げ



せん断

## 5.4.4 女川2号炉RPVペダスタルへの適用性

- 既往試験の試験体(ABWRを縮小模擬)と女川2号炉のRPVペダスタルは、ともに鋼板及びコンクリートからなる隔壁方式、円筒型の複合構造物。なお、試験体はABWRの構造特徴として、ベント管を内蔵する部分と内蔵しない部分を模擬しており、女川2号炉の場合、ベント管を内蔵しない部分の構造と類似
- 既往試験の試験体にあるベースプレートがコンクリートを上下に分断しており、女川2号炉の水平鋼板と構造特徴が類似
- 以上のことから、女川2号炉のRPVペダスタルの材質、各部の寸法等を適切に反映することにより、復元力特性評価式が適用可能

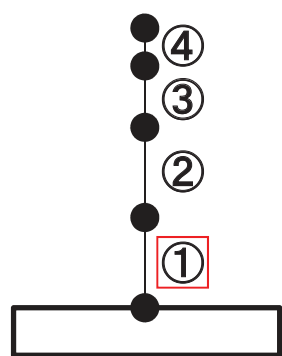


## 5.5 女川2号炉RPVペダスタルの復元力特性の設定(1)

- 今回工認に適用するRPVペダスタルの復元力特性評価式に基づき、女川2号炉のスケルトンカーブを設定
- なお、地震応答解析の履歴特性は、既往の試験結果や履歴減衰による消費エネルギーの観点を踏まえ、最大点指向型を適用

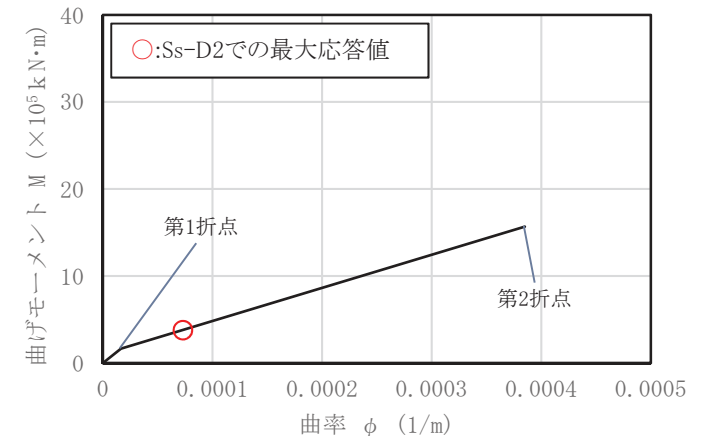
復元力特性評価式

	曲げ	せん断
第1折点 (コンクリートのひび割れ)	$M_1 = Z_e(\alpha \cdot f_t + \sigma_v)$ $\phi_1 = \frac{M_1}{E_c \cdot I_e}$	$Q_1 = \left( A_c + \frac{G_s}{G_c} \cdot A_s \right) \cdot \tau_{cr}$ $\gamma_1 = \frac{\tau_{cr}}{G_c}$ $\tau_{cr} = \sqrt{0.31\sqrt{\sigma_B} \cdot (0.31\sqrt{\sigma_B} + \sigma_v)}$
第2折点 (鋼板が降伏)	$M_2 = M_y$ $\phi_2 = \phi_y$	$Q_2 = \frac{K_\alpha + K_\beta}{\sqrt{3K_\alpha^2 + K_\beta^2}} \cdot A_s \cdot \sigma_y$ $\gamma_2 = \frac{Q_2}{K_\alpha + K_\beta}$ $K_\alpha = A_s \cdot G_s$ $K_\beta = \frac{(\cos\theta)^2 \cdot H}{2 \left( \frac{1 - \nu_c^2}{E_c' t_c \cdot \sin 2\theta} + \frac{C_1 + C_2}{2 \cdot E_s} \right)}$

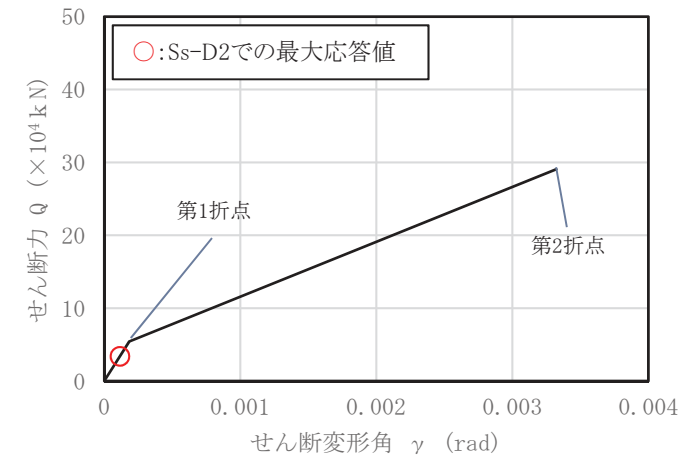


地震応答解析モデル

復元力特性評価式に基づいて  
女川2号炉RPVペダスタル(要素①)の  
スケルトンカーブを作成



(a) 曲げモーメント-曲率関係



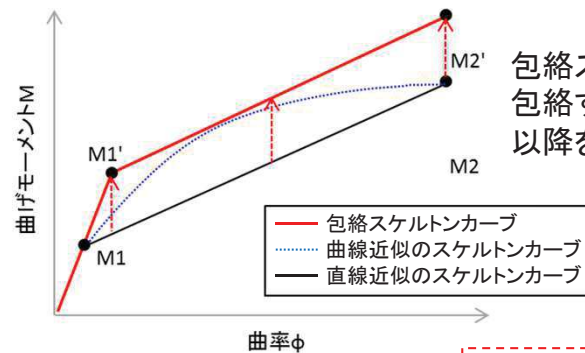
(b) せん断力-せん断変形角関係

女川2号炉 基準地震動Ssに対する応答  
(要素①の例)

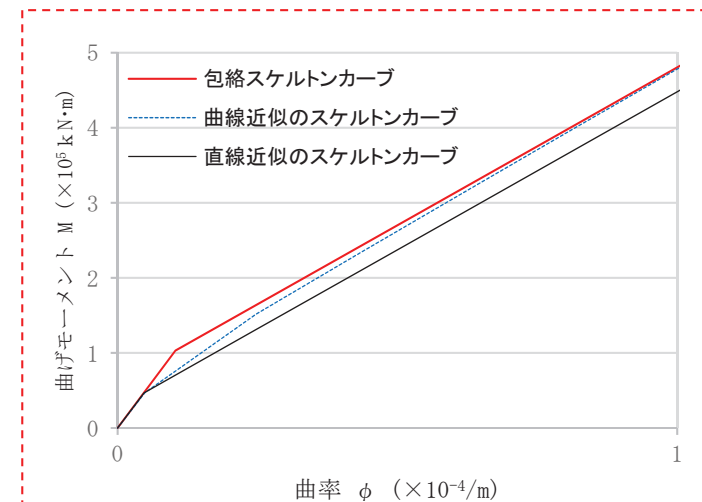
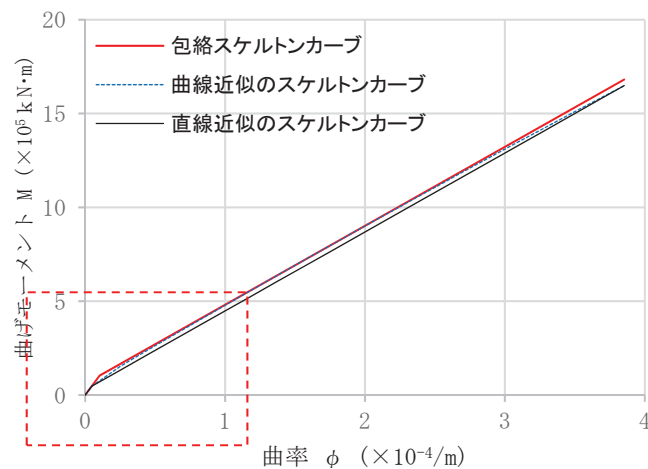


## 5.5 女川2号炉RPVペDESTALの復元力特性の設定(2)

- 実際には、第1折点でコンクリートにひび割れが生じた後もひび割れが徐々に増加して剛性が低下する(スケルトンカーブの傾きが緩やかになる)ため、第1折点から第2折点の間は直線近似ではなく曲線近似の方が実現象に近いと考えられる
- 直線近似による変形量を設計に用いる場合は、同じ荷重レベルに対して大きい変形量を与えることになり安全側の設計となり、一方、直線近似による荷重を設計に用いる場合は、同じ変形量に対して小さい荷重を与えることになる
- **今回工認においては、荷重を大きく与えるように曲線近似を包絡したスケルトンカーブの影響を検討**



包絡スケルトンカーブは、曲線近似のスケルトンカーブを包絡するように、直線近似のスケルトンカーブの第1折点以降を一律嵩上げすることにより作成する



## 6. まとめ

- 今回工認においては、基準地震動 $S_s$ の増大を踏まえ、RPVペデスタルについて、原子炉建屋と同様に非線形解析モデルとした復元力特性を適用し、より現実に近い地震応答解析を実施する
- 非線形解析モデルの復元力特性(スケルトンカーブ)の評価においては、既往のRC構造との類似性を検討し、同様の理論で評価可能であることを確認した上で、既往の知見を参考に、RPVペデスタルを模擬した試験結果を用いてその妥当性を確認した

## 7. 今後の追加検討

今後、RPVペデスタルについて以下の追加検討を行い、設置変更許可に対する適合性審査において説明

- ① 建屋の初期剛性低下を踏まえた検討
  - ・ 原子炉建屋の初期剛性低下に係る審査結果を踏まえた評価方針
- ② 重大事故時の環境条件を踏まえた検討
  - ・ 有効性評価の審査結果及び上記①を踏まえた重大事故時の評価方針

## 参考 本資料内で使用する記号の説明(曲げのスケルトンカーブ)

記号	単位	説明
$M_1$	N・mm	第1折点における曲げモーメント
$\phi_1$	1/m	第1折点における曲率
$M_2$	N・mm	第2折点における曲げモーメント
$\phi_2$	1/m	第2折点における曲率
$Z_e$	mm <sup>3</sup>	鋼材を考慮した断面係数
$f_t$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリートの引張強度
$\sigma_v$	N/mm <sup>2</sup>	鋼材を考慮した鉛直方向軸応力度
$\alpha$	-	開口率(RPVペDESTALの全断面積に対する開口部の面積の比率)
$E_c$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリートのヤング係数
$I_e$	mm <sup>4</sup>	鋼材を考慮した断面二次モーメント
$M_y$	N・mm	鋼材降伏時の曲げモーメント
$\phi_y$	1/m	鋼材降伏時の曲率

## 参考 本資料内で使用する記号の説明(せん断のスケルトンカーブ)

記号	単位	説明
$Q_1$	N・mm	第1折点におけるせん断力
$\gamma_1$	rad	第1折点におけるせん断変形角
$Q_2$	N・mm	第2折点におけるせん断力
$\gamma_2$	rad	第2折点におけるせん断変形角
$A_c$	mm <sup>2</sup>	コンクリートのせん断断面積
$A_s$	mm <sup>2</sup>	鋼板のせん断断面積
$G_c$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリートのせん断弾性係数
$G_s$	N/mm <sup>2</sup>	鋼板のせん断弾性係数
$E_c$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリートのヤング係数
$E_s$	N/mm <sup>2</sup>	鋼板のヤング係数
$\tau_{cr}$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリートのせん断ひび割れ強度
$\sigma_B$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリートの圧縮強度, 設計基準強度 $F_c$ を用いる
$\sigma_v$	N/mm <sup>2</sup>	鋼板を考慮したコンクリートの鉛直方向軸応力度

記号	単位	説明
$K_\alpha$	N	鋼板のせん断剛性
$K_\beta$	N	ひび割れ後の鋼板による拘束効果を考慮したコンクリートの有効せん断剛性
$\sigma_y$	N・mm	鋼板の降伏点強度
$\nu_c$	-	コンクリートのポアソン比
$\theta$	rad	圧縮ストラット角度
$E_c'$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリートのひび割れを考慮したヤング係数
H	mm	コンクリートの高さ
$t_c$	mm	コンクリート板厚