

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉審査資料	
資料番号	KK67-0101
提出年月日	平成28年5月20日

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉 建屋および原子炉の地震応答解析モデルの 高度化の目的

平成28年5月
東京電力ホールディングス株式会社

目次

1. はじめに
2. 今回設計における動解モデル検討方針
3. 動解モデル高度化の必要性検討
4. 動解モデル高度化検討
 - (1) 民間規格や既往の知見に基づくものの採用
 - (2) 現実に存在するものの設計への採用
 - (3) 試験等により技術開発したものの採用
5. 高度化項目の妥当性確認方針
 - (1) 原子炉本体基礎の復元力特性
 - (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性
 - (3) 補助壁の考慮
 - (4) 側面回転地盤ばねの考慮
 - (5) 高度化した動解モデルの妥当性・保守性
6. まとめ
 - (参考) 高度化項目の定量的な効果

1. はじめに

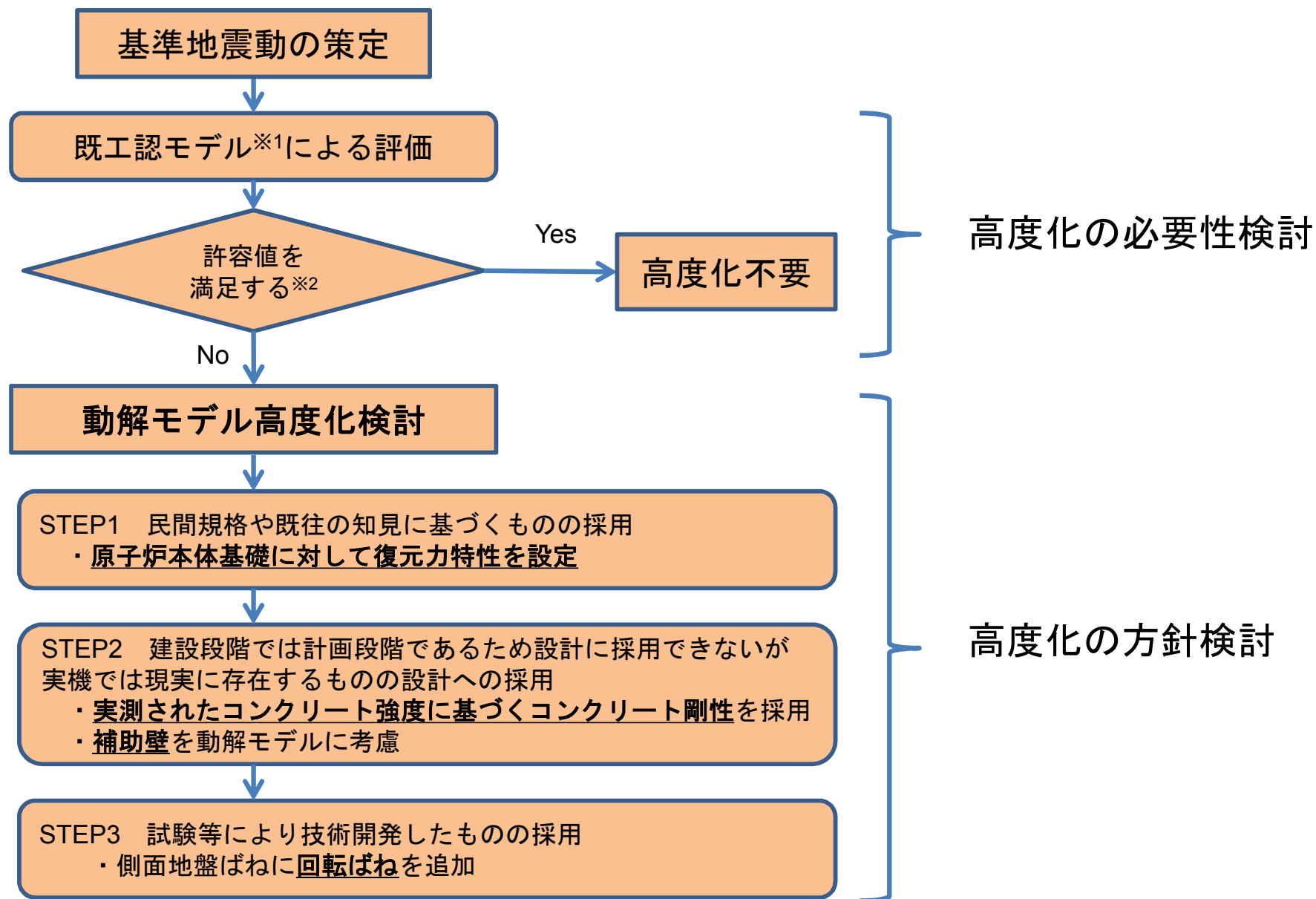
- 柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の工事計画認可申請書（以下、「今回工認」という）では、耐震設計に用いる建屋および原子炉の地震応答解析モデル（以下、「動解モデル」という）の高度化を予定している。
- 動解モデル高度化の考え方及び目的について、以降で説明する。

動解モデルの高度化項目

項目	既工認の動解モデル	今回工認の動解モデル
コンクリート剛性	設計基準強度を使用	コンクリート強度データに基づく剛性を使用
耐震要素（建屋壁）のモデル化	外壁などの主要な壁のみモデル化	左記に加え、考慮可能な壁（補助壁）を追加でモデル化
建屋側面地盤の摩擦による拘束効果（側面地盤回転ばね）	考慮せず	考慮する
原子炉本体基礎のモデル化	線形仮定とした弾性解析モデル	復元力特性を考慮した弾塑性解析モデル

なお、当初は「地表面近くの地盤はモデル化しないこと（表層地盤ばね無視）」についても高度化検討対象に含めていたが、地震応答へ与える効果が軽微であることから、今回工認での採用は見送ることとした。

2. 今回設計における動解モデル検討方針



※1：建屋の弾塑性解析は、建設段階では採用していないが、エンドースされている規格基準上に規定されており、かつ、先行審査で許認可実績があり、全プラント共通で適用が可能と判断できるものと考え、既工認モデルに組み込んで検討することとした。

※2：現場対応（耐震強化）の可能性も含めて検討する。

3. 動解モデル高度化の必要性検討

- 耐震強化が困難な原子炉本体の設備に着目し，既工認モデルを動解モデルとして採用した場合の地震荷重を確認した。

設備名	原子炉本体 基礎	原子炉 圧力容器 (基礎ボルト)	炉心支持 構造物 (シュラウド サポート)	気水分離器	制御棒 駆動機構 ハウジング 貫通孔※1	原子炉 圧力容器 スタビライザ	ダイヤフラム フロア	原子炉冷却材 再循環ポンプ 付け根部
荷重 (単位)	モーメント (kN・m)	モーメント (kN・m)	モーメント (kN・m)	モーメント (kN・m)	モーメント (kN・m)	反力 (kN)	反力 (kN)	モーメント (kN・m)
地震荷重 ※2	2000000	146000	38700	2660	5.6	2900	66100	1720
許容値を満足する 地震荷重の目安値※2	1200000	461000	171500	4800	9.2	12000	53000	2310
判定	目安値を 超える	目安値 以下	目安値 以下	目安値 以下	目安値 以下	目安値 以下	目安値を 超える	目安値 以下

※1：1本あたりの地震荷重

※2：7号炉を例とした概算値（地震荷重はSs-1およびSs-2包絡値）

- 既工認モデルを動解モデルとした地震応答解析で得られた地震荷重を用いて各部の評価を行っても，許容値を満足しないと考えられる部位があった。



動解モデルの高度化が必要と判断

4. 動解モデル高度化検討

- 動解モデルの高度化に当たっては、以下のSTEPで検討することとした。

STEP 1：民間規格や既往の知見に基づくものの採用
(考え方)

現時点で一般的な技術・知見は採用する。

STEP 2：現実に存在するものの設計への採用
(考え方)

建設時設計の段階では設計に採用できないものの、実機においては、現実の条件として設計に採用し得るものは採用する。

STEP 3：試験等により技術開発したものの採用
(考え方)

STEP 1, 2 以外でも、試験等により技術的な妥当性が確認できたものは採用する。

4. (1) 民間規格や既往の知見に基づくものの採用

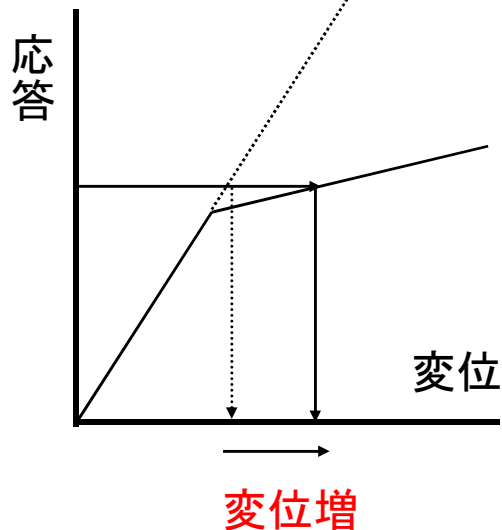
<高度化項目>

■ 原子炉本体基礎に対して復元力特性を設定

既工認モデル	今回設計の動解モデル	主な目的
剛性を線形仮定とした弾性解析モデル	復元力特性を考慮した弾塑性解析モデル	<p>建設時の動解モデルでは、建屋・原子炉本体基礎ともに剛性を線形仮定とした弾性解析を採用していた。地震力の増大に伴い、先行既工認では建屋モデルを復元力特性を考慮した弾塑性解析とすることが一般化している。弾塑性化した建屋と並列ばねを形成する原子炉本体基礎の剛性を線形仮定のままとすると、剛性低下する建屋に比して原子炉本体基礎の剛性が維持されたままとなることから、計算上、過剰な地震力が原子炉本体基礎に発生することになる。今回設計では、<u>建屋に合わせて原子炉本体基礎も弾塑性解析とすることとし、地震荷重の適正化を図るとともに、原子炉本体基礎の変形量も適切に評価する。</u></p> <p>※第1折点（コンクリートのひび割れにより剛性が変化する点）までの剛性は建設時と同じ。</p>

4. (1) 民間規格や既往の知見に基づくものの採用

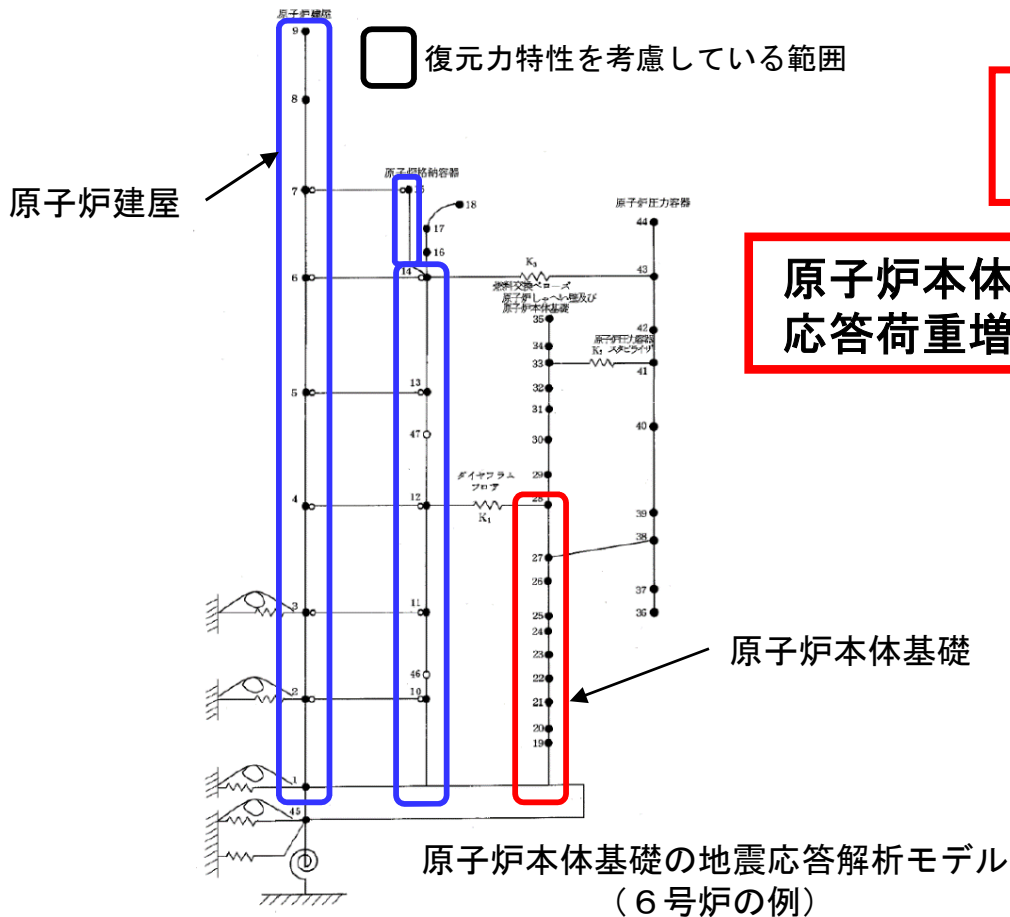
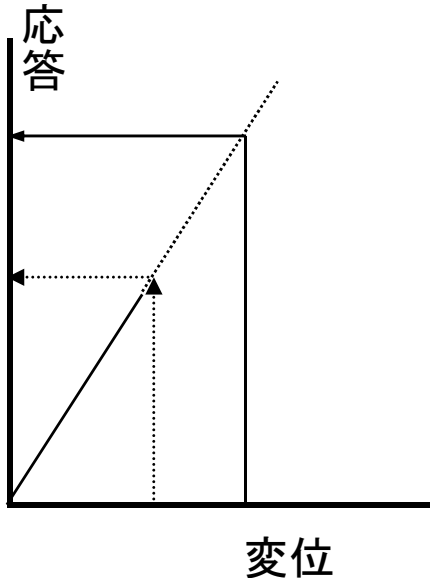
建屋：非線形化により変位が従来より増大



原子炉本体：従来は線形モデル

原子炉本体の応答荷重増大

応答増



<原子炉建屋と原子炉本体基礎の荷重分担比（概算）>

ケース	建屋系	原子炉本体基礎
建屋：線形，原子炉本体基礎：線形	99.3	0.7
建屋：非線形，原子炉本体基礎：線形	96.2	3.8

約5倍

※建屋系（原子炉建屋+格納容器）と原子炉本体基礎の曲げ剛性の比より推定

概念図 建屋と原子炉本体の相互作用

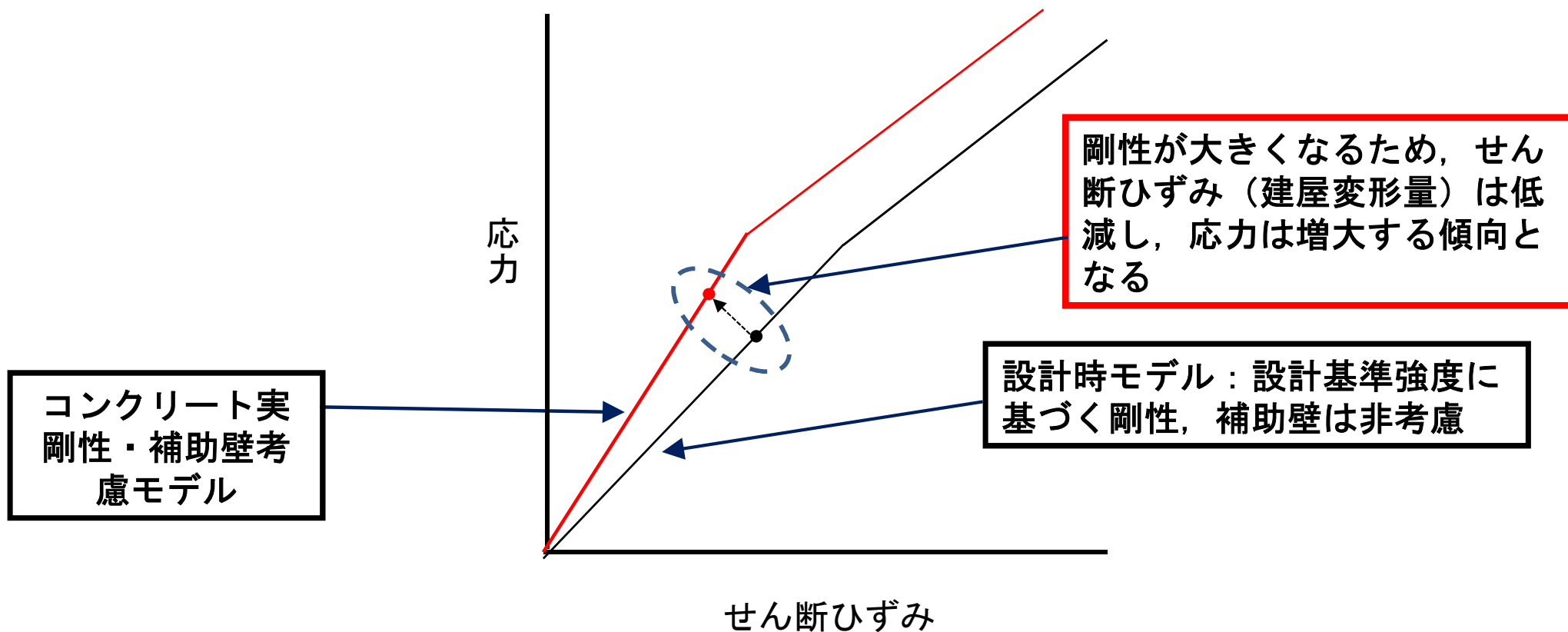
4. (2) 現実に存在するものの設計への採用

<高度化項目>

- 実測されたコンクリート強度に基づくコンクリート剛性を採用
- 補助壁を動解モデルに考慮

既工認モデル	今回工認の動解モデル	主な目的
コンクリート剛性に設計基準強度を使用	コンクリート剛性にコンクリート強度データに基づく剛性を使用	建屋全体の剛性を設計時の条件に基づくものから <u>現実のデータに基づくものに変更</u> することで、建屋の振動性状や変形を精緻化
耐震要素として外壁などの主要な壁のみモデル化	設計時には耐震要素として考慮していなかったが耐震要素として考慮可能な壁（補助壁）を追加でモデル化	建屋全体の剛性を、実態に合わない条件に基づくものから、 <u>実態に整合した条件に基づくものに変更</u> することで、建屋の振動性状や変形を精緻化

4. (2) 現実に存在するものの設計への採用



概念図 コンクリート実剛性・補助壁の採用

4. (3) 試験等により技術開発したものの採用

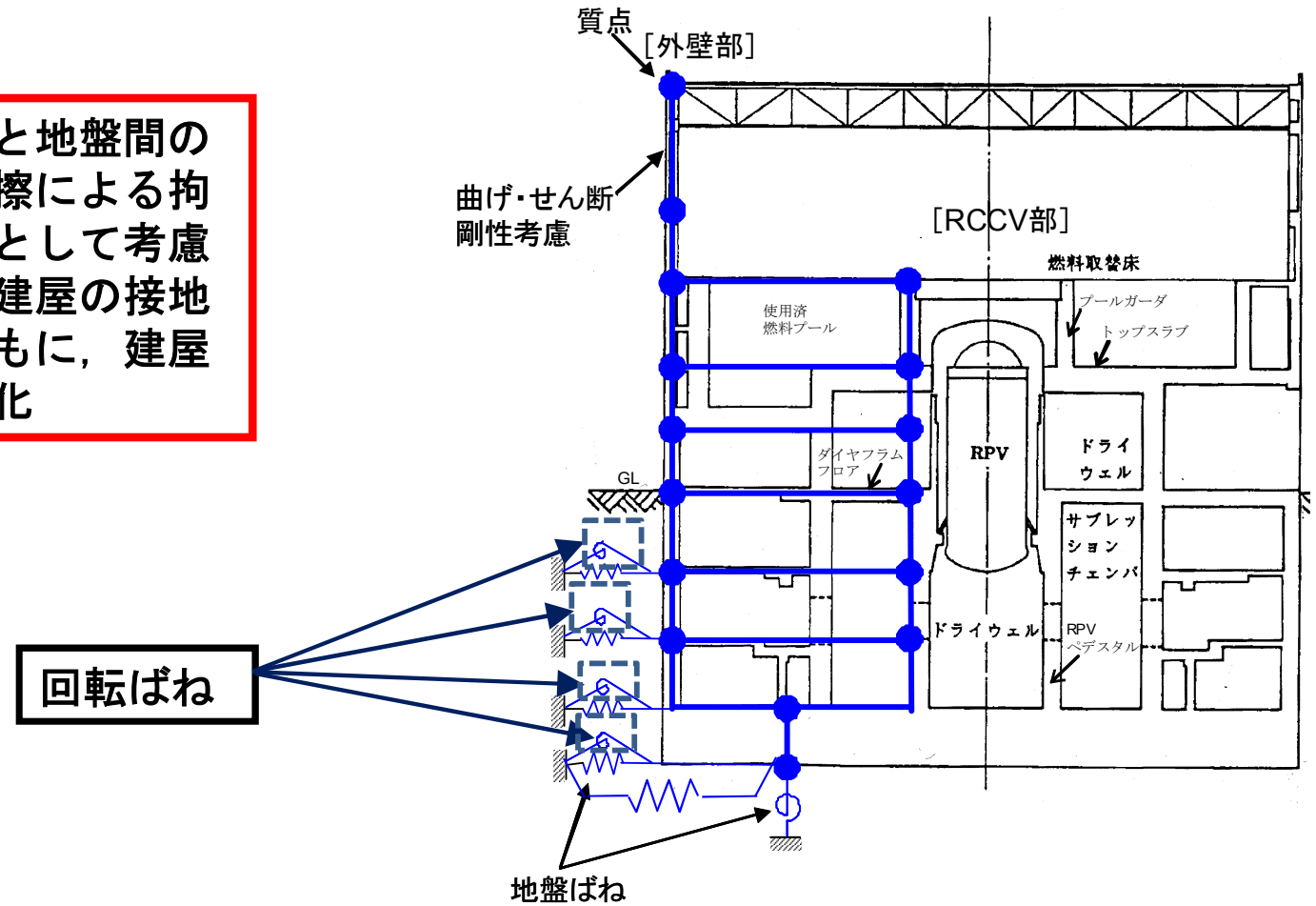
<高度化項目>

■ 建屋側面の地盤ばねに回転ばねを追加

既工認モデル	今回工認の動解モデル	主な目的
地盤が建屋の回転を抑制する効果を考慮せず	地盤が建屋の回転を抑える効果をモデル化	建屋地下躯体部分と地盤間の接触部に生じる摩擦による拘束効果を回転ばねとして考慮することにより、建屋の接地率を改善するとともに、建屋の振動性状を精緻化

4. (3) 試験等により技術開発したものの採用

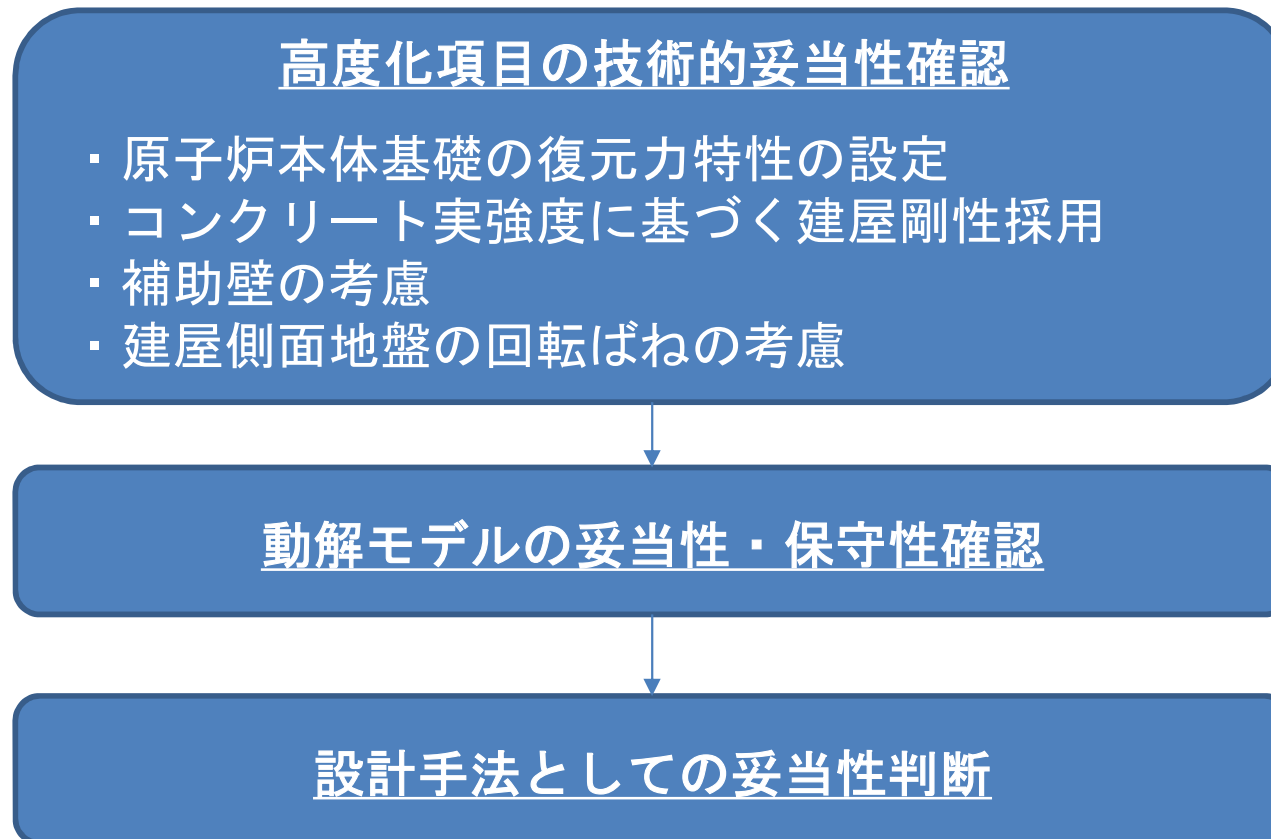
建屋地下躯体部分と地盤間の接触部に生じる摩擦による拘束効果を回転ばねとして考慮することにより、建屋の接地率を改善するとともに、建屋の振動性状を精緻化



概念図 側面回転地盤ばねによる拘束効果

5. 高度化項目の妥当性確認方針

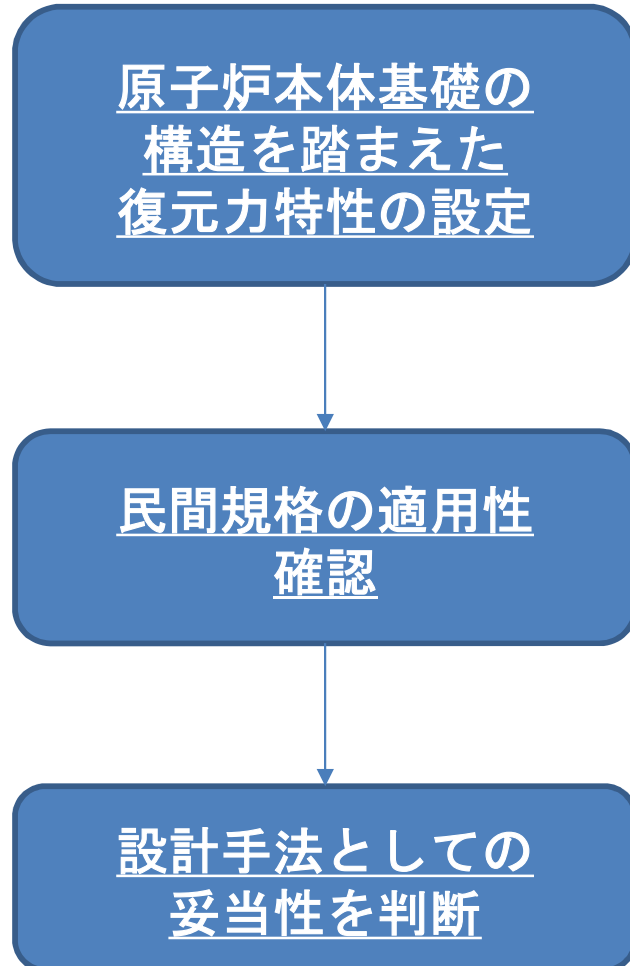
- 高度化の項目毎に技術的妥当性を確認する。
- 高度化した動解モデル全体の妥当性・保守性を確認する。
- 以上を踏まえ、設計手法としての動解モデルの妥当性を判断する。



高度化項目の妥当性確認フロー

5. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

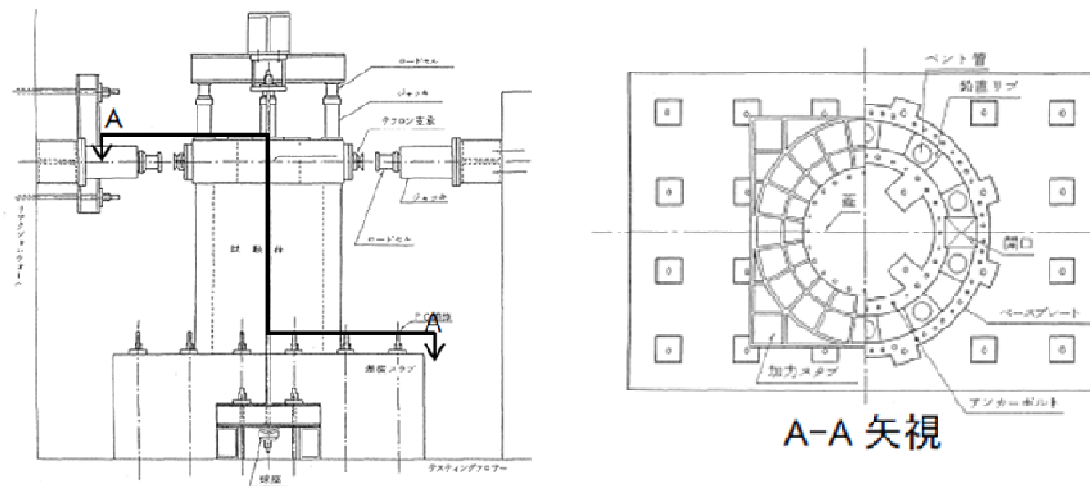
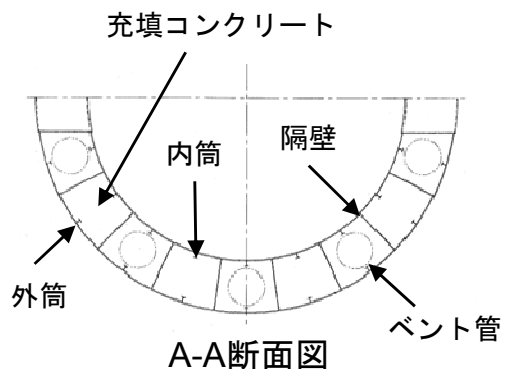
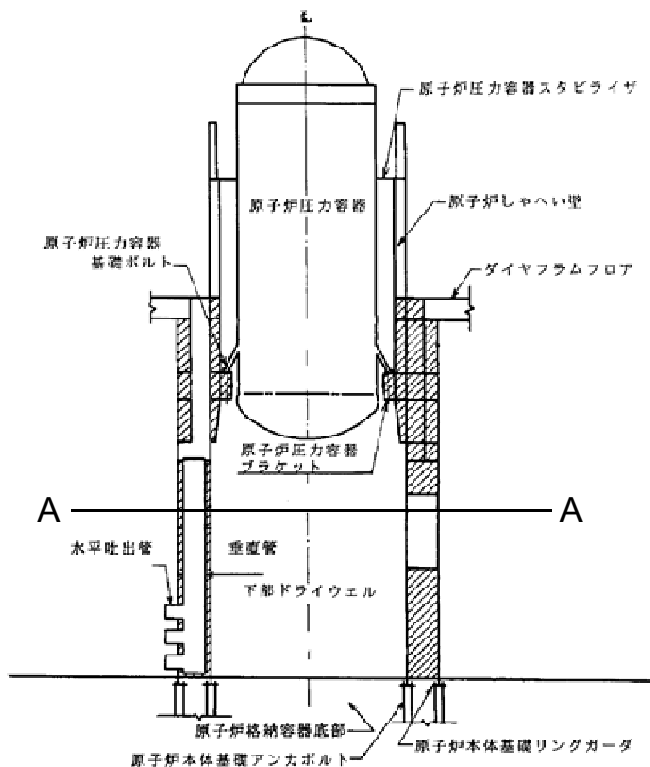
■ 技術的妥当性確認方針



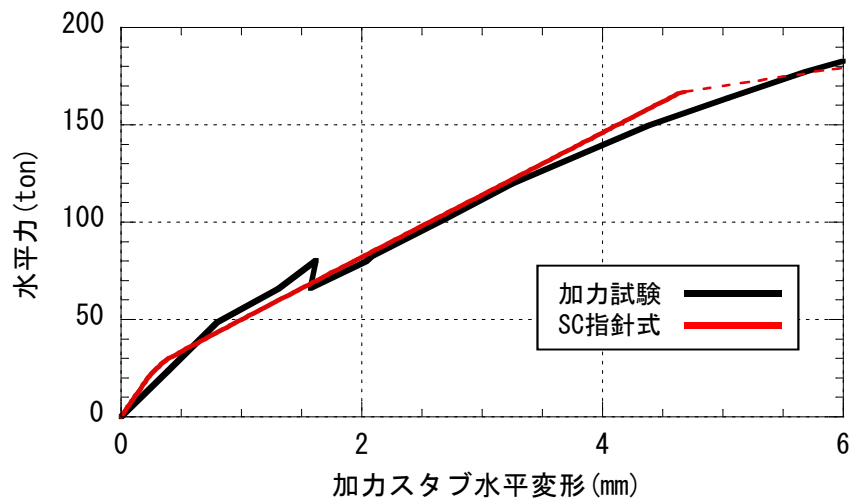
- 原子炉本体基礎は鋼板コンクリート構造物であることから、民間規格である「鋼板コンクリート構造耐震設計技術規程（JEAC4618-2009）」を適用し、復元力特性を設定。
- ABWR固有の構造（ベント管内蔵）の影響について、既往の加力試験で得られた荷重－変位特性と比較し、その適用性を確認。

5. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

■ 技術的妥当性確認方針



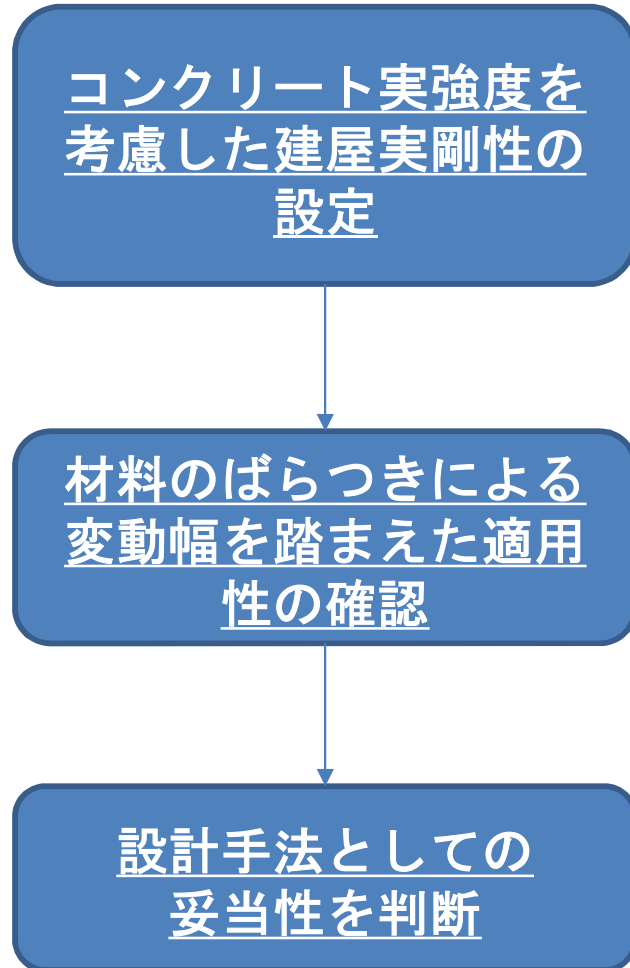
既往の加力試験装置の概要



荷重-変位特性の比較

5. (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性

■ 技術的妥当性確認方針



- サイト内で取得された試験データ（建設時のコンクリート強度試験結果等）に基づきコンクリートの実強度を評価し、実強度に基づいた建屋の剛性を設定する。
- 建設時のコンクリート強度試験結果を整理し、統計処理をして平均値とばらつきを評価する。さらに、一般的な文献を調査し、およそ建設時から10年及び20年程度経過した場合のコンクリートの強度の伸びを推定するような評価式を引用して、実際にサイト内で取得したボーリングデータとの関係を確認し、採用した数値の適用性を確認する。

5. (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性

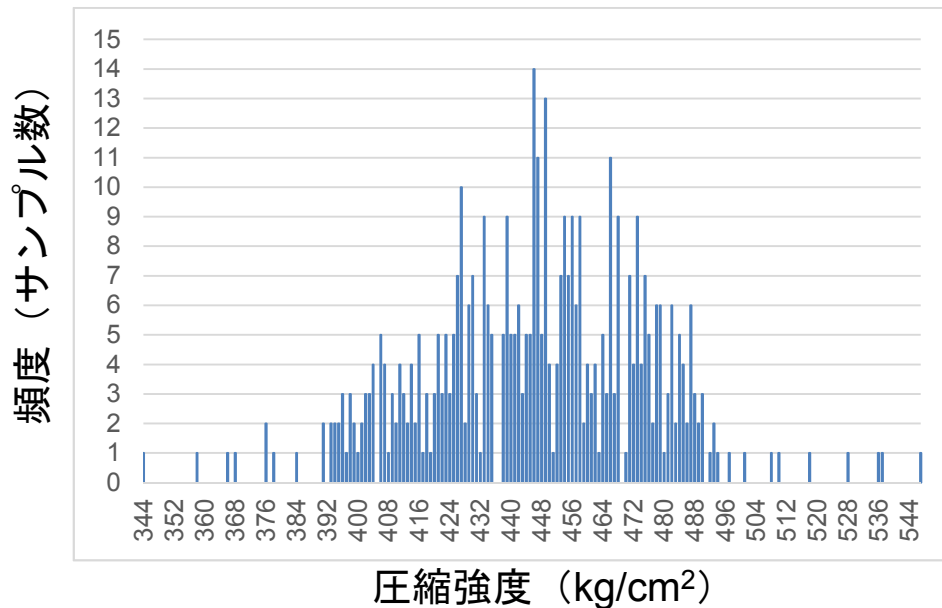
■ 技術的妥当性確認方針

・建設時のコンクリート強度試験データ※を統計処理し、平均値とばらつき(標準偏差)を評価し、設定した数値の妥当性を確認する。

※13週強度, サンプル数:K6R/B:450程度, K7R/B:400程度

・打設後10~20年程度経過したコンクリートの強度に関する評価式について、文献調査を実施し、設定した数値の妥当性について検討する。

・実機の設備点検時に採取した圧縮強度試験のデータを用いて設定した数値の妥当性を検討する。



建設時コンクリート強度試験データの分布状況

(6号炉原子炉建屋, 13週強度)

<13週強度の整理結果>

建屋名称	平均値 kg/cm ² (N/mm ²)	標準偏差 kg/cm ² (N/mm ²)
6号炉原子炉建屋	446 (43.7)	29.0 (2.84)
7号炉原子炉建屋	443 (43.4)	31.7 (3.11)

5. (3) 補助壁の考慮

■ 技術的妥当性確認方針

設計時に耐震要素として考慮していなかったが、耐震要素として考慮可能な壁をモデル化

規格基準の記載を踏まえた適用性の確認

設計手法としての妥当性を判断

- 設計時に耐震要素として考慮していなかったが耐震要素として考慮可能な壁（補助壁）を耐震要素として解析モデルの中で考慮する。
- 耐震要素として考慮可能かについては、既工認で適用実績のある規準である日本建築学会「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」における耐震壁の規定（算定外の規定）に適合しているかを確認することにより判断する。

5. (3) 補助壁の考慮

■ 技術的妥当性確認方針

- ・原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(RC-N規準)における耐震壁の規定(算定外の規定)に適合している壁から補助壁を選定。

算定外の規定(RC-N規準)

- ・壁厚200mm以上、かつ、壁板の内法寸法の1/30以上
- ・せん断補強筋は、0.25%以上(直交する2方向それぞれ)(付帯ラーメンのない場合のせん断補強筋比は、壁筋の許容引張応力度に対するコンクリートの許容せん断応力度との比以上を確保)
- ・壁筋は複筋配置とする
- ・壁筋はD13以上の異形鉄筋を用いる
(壁の見付け面に対する間隔は300mm以下)
- ・開口補強筋はD13以上、かつ、壁筋と同径以上の異形鉄筋を用いる
- ・付帯ラーメンがある場合には、その柱・梁に適切な靱性を確保させる



PN



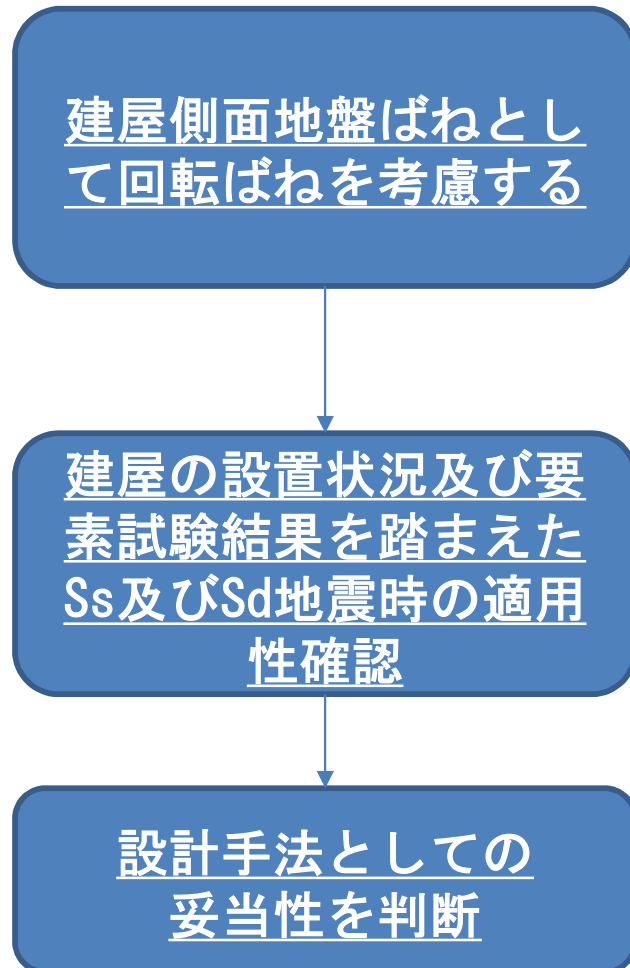
 : 耐震壁として剛性を評価する範囲
(設計時と同じ)

 : 補助壁として剛性を評価する範囲

補助壁の選定結果例(7号炉原子炉建屋・地下3階)

5. (4) 側面回転地盤ばねの考慮

■ 技術的妥当性確認方針



- 建屋側面地盤ばねとして、設計時には考慮していなかった回転ばねを考慮する
- 原子炉建屋周辺の地盤や隣接建物との関係を整理した上で、要素試験（地中外壁摩擦試験）結果を踏まえ、実機のSs及びSd地震時における回転ばねの適用性を確認する。適用性の確認にあたっては、地盤等の材料非線形及び幾何学的非線形を考慮した詳細な解析による検証を行う。

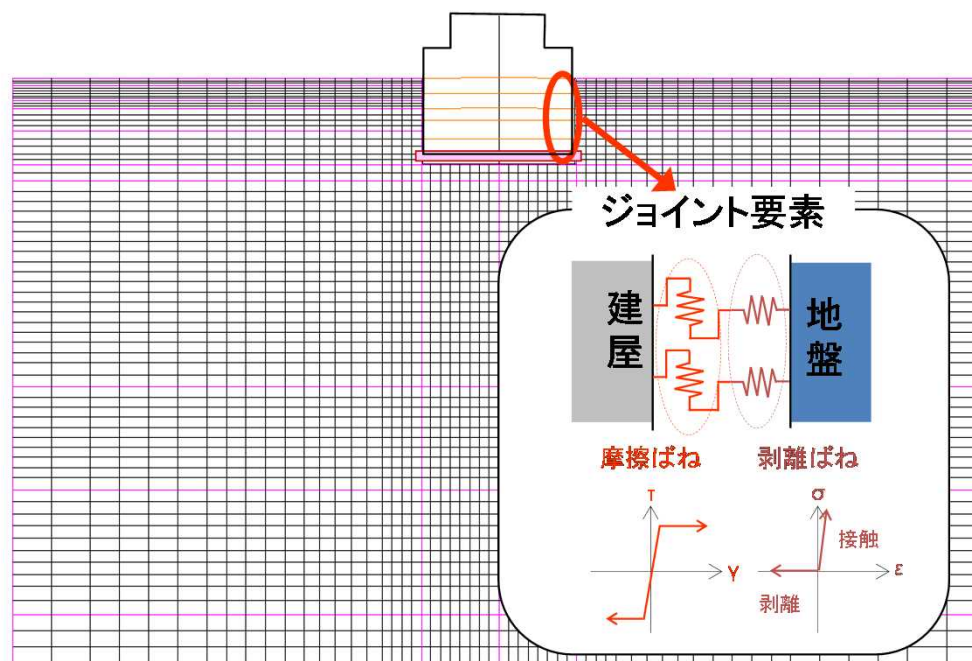
5. (4) 側面回転地盤ばねの考慮

■ 技術的妥当性確認方針

- ・原子炉建屋と周辺の地盤や隣接建物との関係を整理する。
- ・原子炉建屋を模擬した要素試験(地中外壁摩擦試験)結果に基づき, 建屋地中外壁側面に防水層が存在する場合の側面の摩擦力を評価する。
- ・Ss, Sd地震時の適用性については, 地盤・遮水材等の材料非線形及び幾何学的非線形を考慮した詳細評価モデルを用いて確認する。



要素試験 (地中外壁摩擦試験)

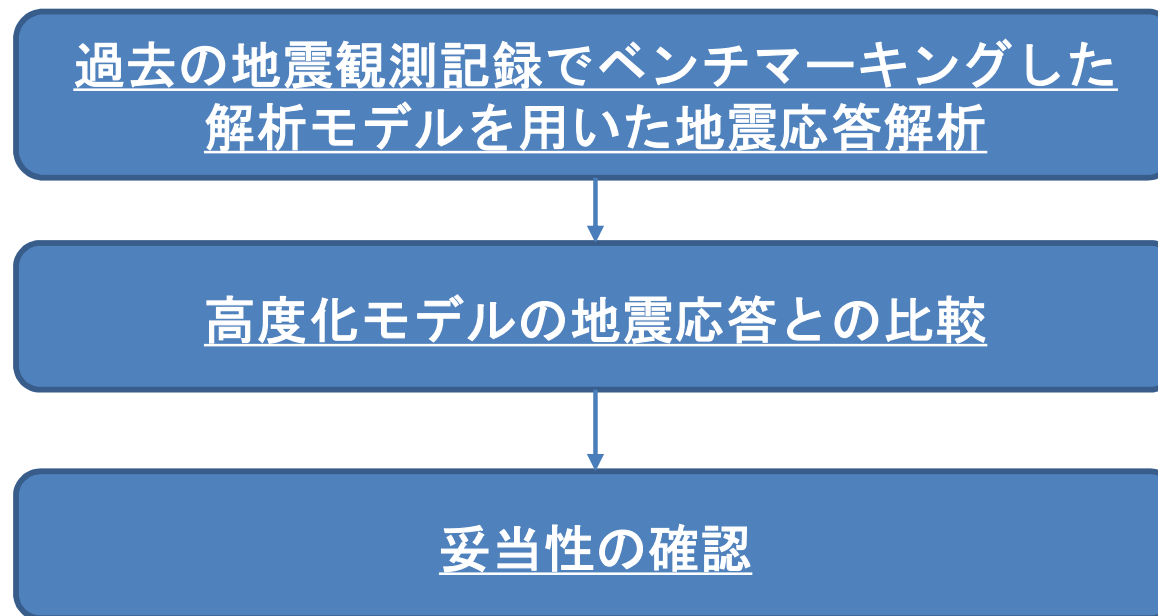


詳細評価モデルによるSs・Sd地震時の適用性の検証(概念図)

5. (5) 高度化した動解モデルの妥当性・保守性

■ 妥当性の確認方針

- 過去の地震観測記録（新潟県中越沖地震）でベンチマーキングした解析モデルを用いた地震応答解析を実施。
- ベンチマーキングした解析モデルによる地震応答解析結果と、高度化した動解モデルによる地震応答解析結果とを比較することにより、動解モデルの妥当性を確認する。



動解モデルの妥当性確認フロー

5. (5) 高度化した動解モデルの妥当性・保守性

■ 保守性確保の方針

- 建屋剛性及び地盤剛性の不確かさに加えて、高度化手法で不確かさが考えられるものについては、不確かさを考慮した場合の応答への影響を確認し、建設時と同等の保守性を確保する。

<検討ケース案>

	建屋剛性	補助壁	回転ばね	原子炉本体 基礎	地盤剛性
基本ケース (高度化モデル)	実強度	考慮	考慮	非線形	標準地盤
建屋剛性による 影響検討ケース	強度のばらつき を考慮	考慮	考慮	非線形	標準地盤
回転ばねによる 影響検討ケース	実強度	考慮	剛性の不確かさ を考慮	非線形	標準地盤
地盤剛性による 影響検討ケース	実強度	考慮	考慮	非線形	標準地盤±標準 偏差

6. まとめ

- 今回の設計では、動解モデルを高度化し、設備等への耐震設計に用いる評価条件の適正化を図ることとする。
- 高度化した動解モデルの妥当性・保守性について、検討を実施する。

今回工認の動解モデル	高度化の目的	論点・保守性
原子炉本体基礎に復元力特性を設定	建屋の弾塑性化に合わせて、民間規格等に基づき復元力特性を設定することで、応答を適正化	<u>民間規格の適用性</u>
コンクリートの実剛性を使用	新規建設時の設計段階では実測値がなく、設計値を使用せざるを得ないが、実機では実測したコンクリート強度に基づく剛性の設定により建屋の振動性状や変形を精緻化	<u>実測値に基づく、剛性設定の妥当性</u>
補助壁をモデル化	実際に存在する壁をモデルに組み込むことにより建屋の振動性状や変形を精緻化	—
側面回転ばね追加	側面回転ばねそのものは新しい評価技術ではなく、要素試験等により技術的妥当性を確認した上で動解モデルへ取り込むことにより、接地率を改善するとともに、建屋の振動性状を精緻化	<u>要素試験や解析に基づく、ばね剛性設定の妥当性</u>

(参考) 高度化項目の定量的な効果 (7号炉の例)

注：以降の検討結果は暫定条件に基づく概算値である。

1. 高度化の定量的効果を測る指標

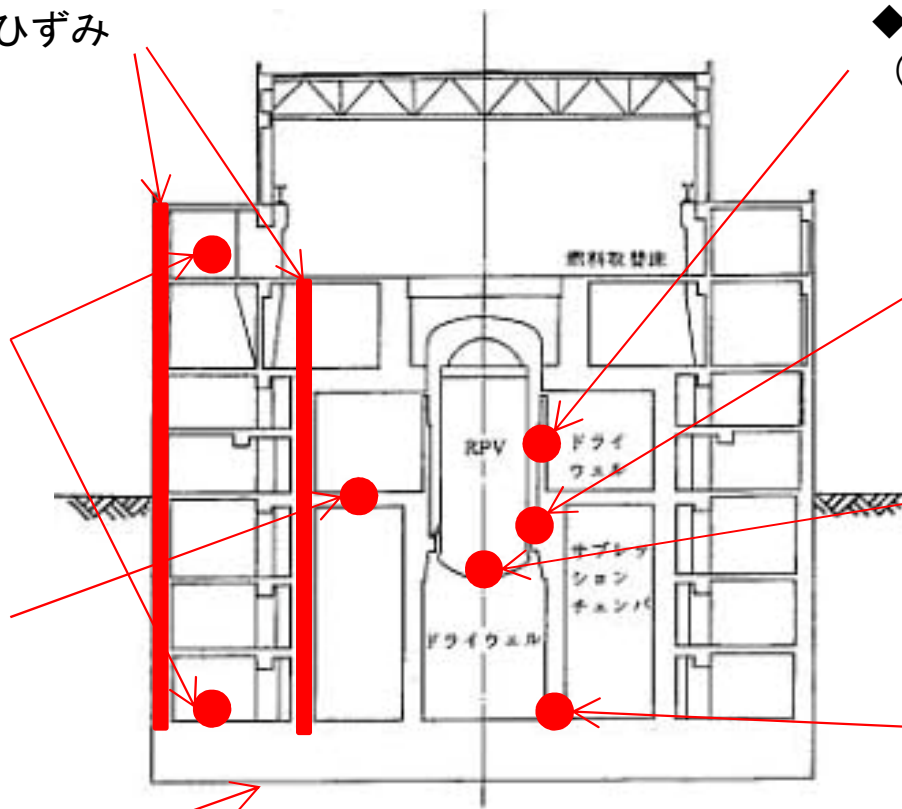
- 動解モデルの高度化による効果が現れるのは主に水平方向であることから、水平方向の地震荷重等（加速度，せん断力，モーメント等）の変化に着目した。
- 下図の部位等における地震荷重等の比較をおこない、高度化の効果を網羅的に確認した。

◆建屋壁のせん断応力-せん断ひずみ
⇒建屋壁の設計に用いる

◆建屋床面の応答加速度
(床応答スペクトル)
⇒床置機器や配管の設計に用いる

◆ダイヤフラムフロアの地震荷重（ばね反力）
⇒ダイヤフラムフロアの設計に用いる

◆建屋接地率
⇒動的解析モデル（埋込みSRモデル）の適用範囲判断の目安として用いる



<原子炉建屋模式図>

◆原子炉遮蔽壁部の地震荷重
(床応答スペクトル，相対変位)
⇒主蒸気系配管等の設計に用いる

◆原子炉压力容器部の地震荷重
(せん断力，モーメント)
⇒原子炉压力容器の設計に用いる

◆炉内構造物の地震荷重
(せん断力，モーメント)
⇒炉内構造物の設計に用いる

◆原子炉本体基礎部の地震荷重
(せん断力，モーメント)
⇒原子炉本体基礎の設計に用いる

2. 効果の定量的把握

- 個々の変更点が地震応答へ与える効果を定量的に把握するため、既工認モデルに変更点を1項目のみ加えた動解モデルで地震応答解析をおこない、地震荷重等（加速度、せん断力、モーメント等）を比較した。

＜比較ケース＞

ケース名	①コンクリート剛性	②補助壁	③回転ばね	④原子炉本体基礎
既工認モデル	設計基準強度	無	無	線形
ケース1 (コンクリート実強度)	実強度	無	無	線形
ケース2 (補助壁考慮)	設計基準強度	有	無	線形
ケース3 (回転ばね考慮)	設計基準強度	無	有	線形
ケース4 (原子炉本体基礎)	設計基準強度	無	無	非線形

※黄色は、既工認モデルからの変更箇所を示す。

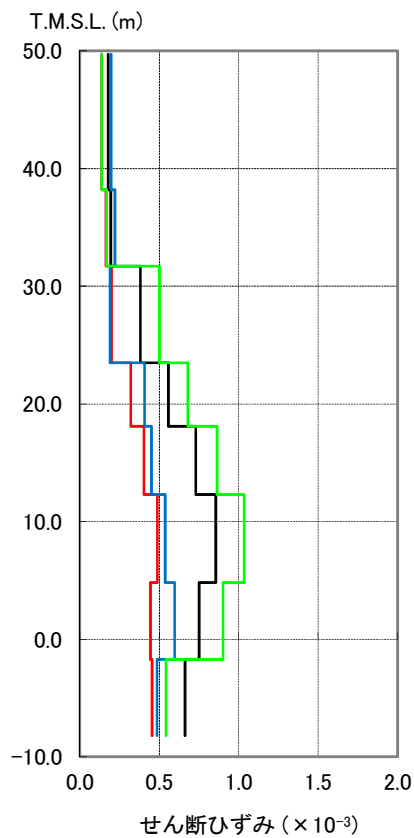
3. 地震荷重等の比較（建屋）

※暫定条件に基づく概算値

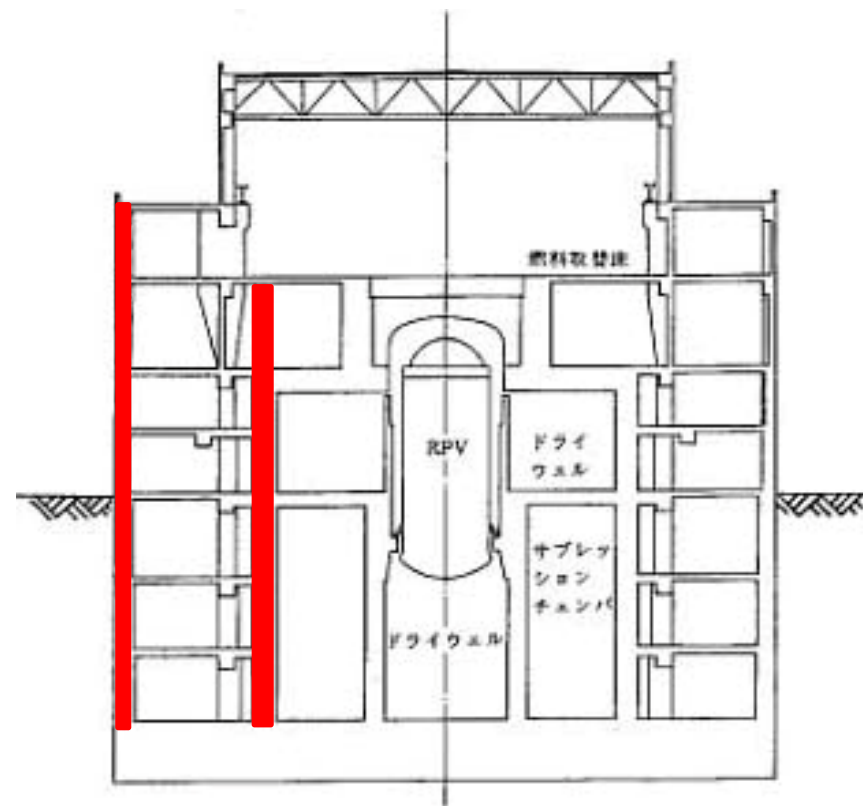
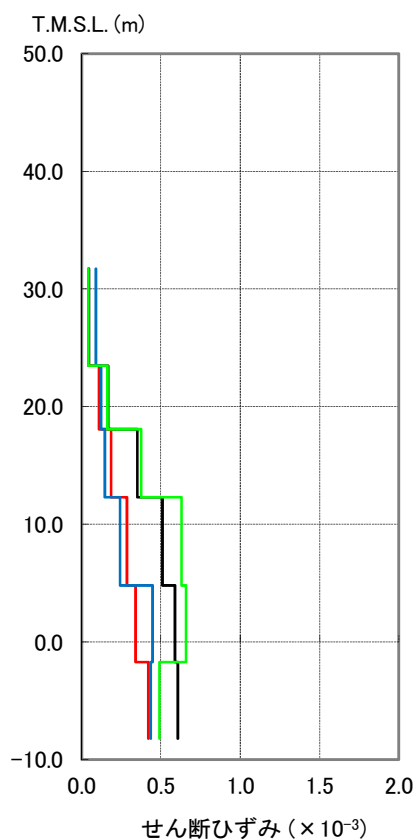
➤ せん断ひずみの比較

- 既工認モデル
- ケース1(コンクリート実強度)
- ケース2(補助壁考慮)
- ケース3(回転ばね考慮)

外壁部(NS方向)



RCCV部(NS方向)



<原子炉建屋模式図>

建屋のせん断ひずみの比較（Ss-1,NS方向）

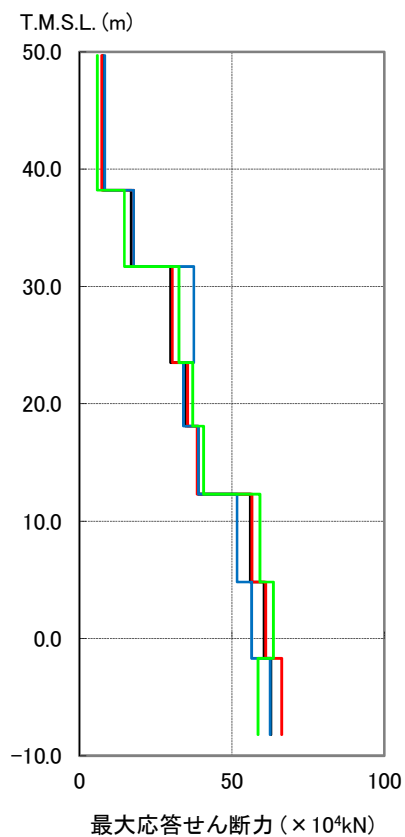
3. 地震荷重等の比較（建屋）

※暫定条件に基づく概算値

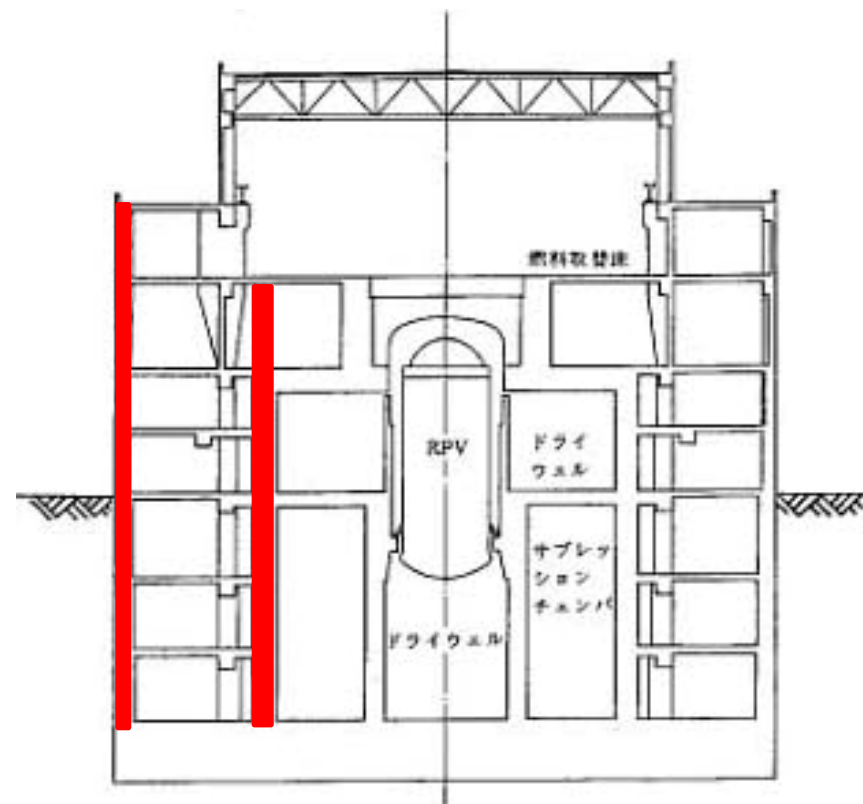
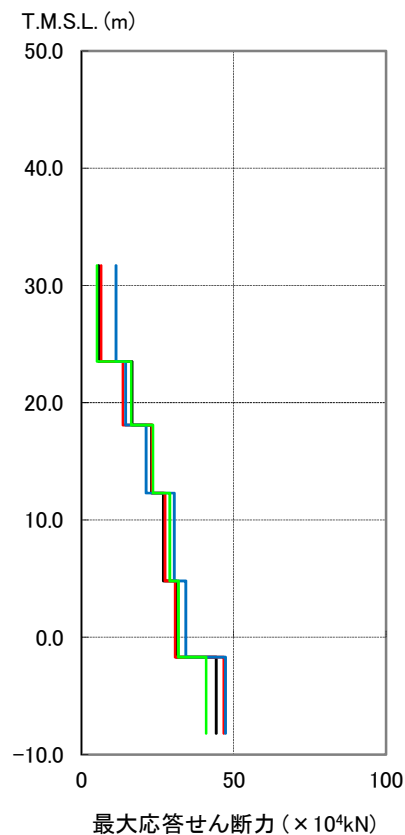
➤ せん断力の比較

- 既工認モデル
- ケース1(コンクリート実強度)
- ケース2(補助壁考慮)
- ケース3(回転ばね考慮)

外壁部(NS方向)



RCCV部(NS方向)



<原子炉建屋模式図>

建屋のせん断力の比較 (Ss-1,NS方向)

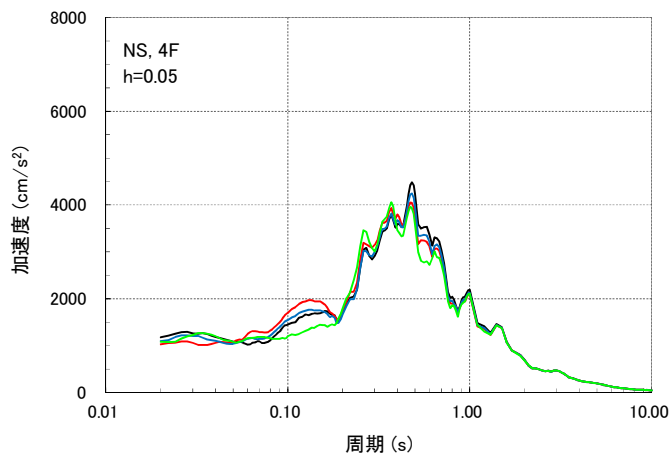
3. 地震荷重等の比較 (建屋)

※暫定条件に基づく概算値

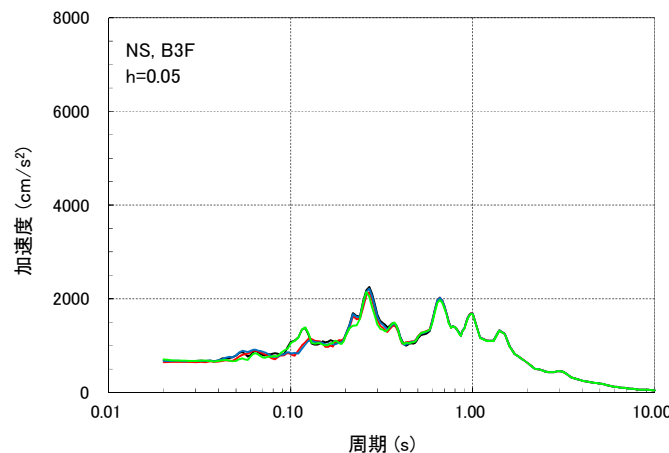
➤ 接地率, 応答スペクトルの比較

接地率の比較

解析ケース	接地率	
	NS方向	EW方向
既工認モデル	51.5% (Ss-1)	49.9% (Ss-2)
ケース1 (コンクリート実強度)	50.3% (Ss-1)	47.3% (Ss-2)
ケース2 (補助壁考慮)	51.0% (Ss-1)	47.4% (Ss-2)
ケース3 (回転ばね考慮)	70.1% (Ss-1)	67.0% (Ss-2)



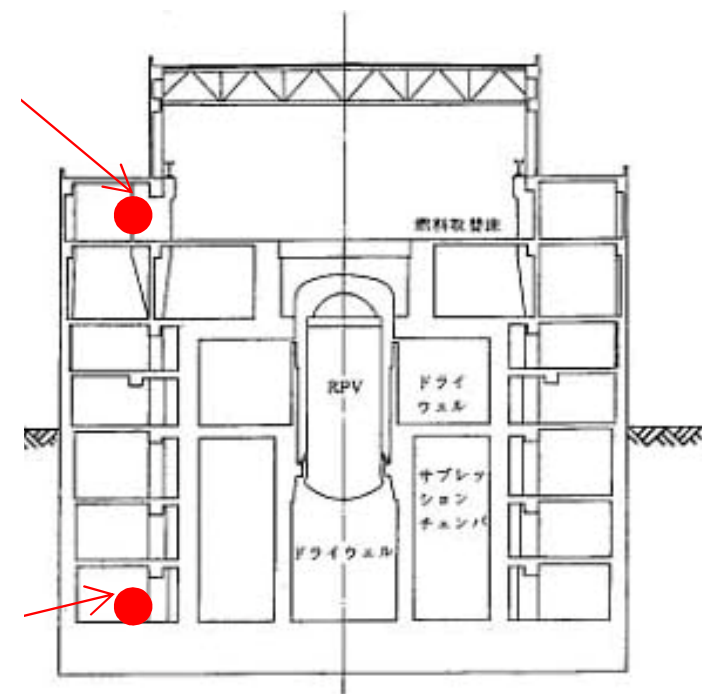
オペフロ階



基礎版上

基礎版上とオペフロレベル
における応答スペクトル比較 (Ss-1、NS方向、減衰5.0%)

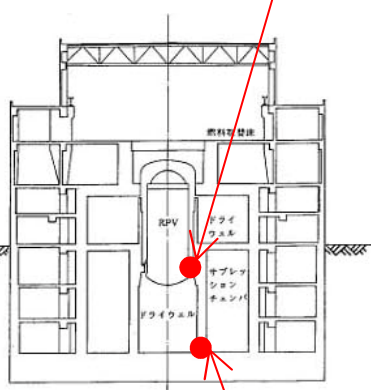
- 既工認モデル
- ケース1(コンクリート実強度)
- ケース2(補助壁考慮)
- ケース3(回転ばね考慮)



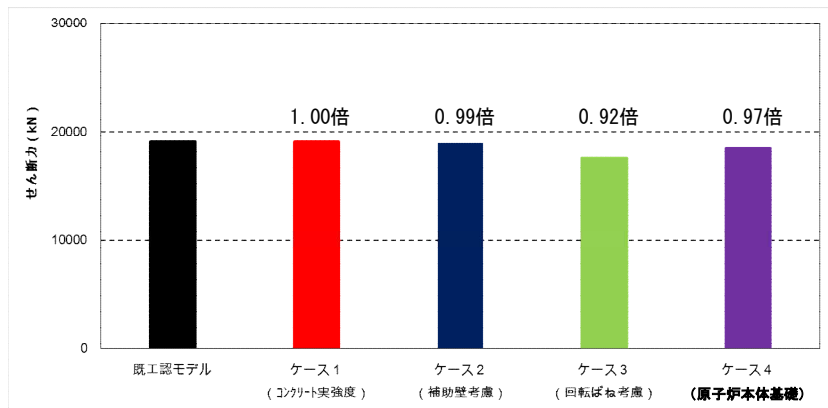
3. 地震荷重等の比較（機器）

※暫定条件に基づく概算値

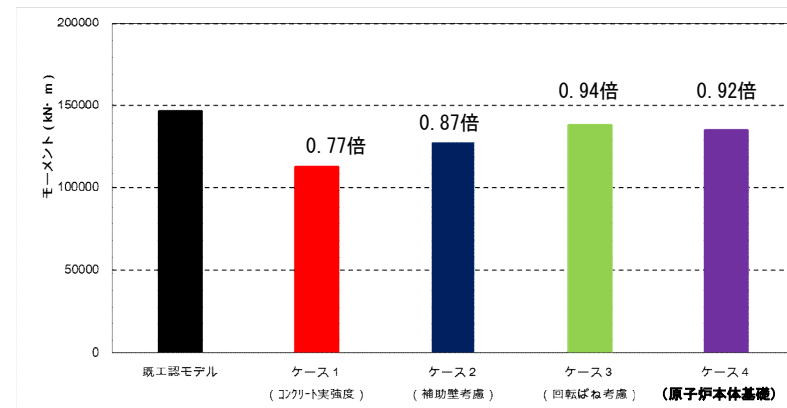
◆原子炉压力容器



◆原子炉本体基礎

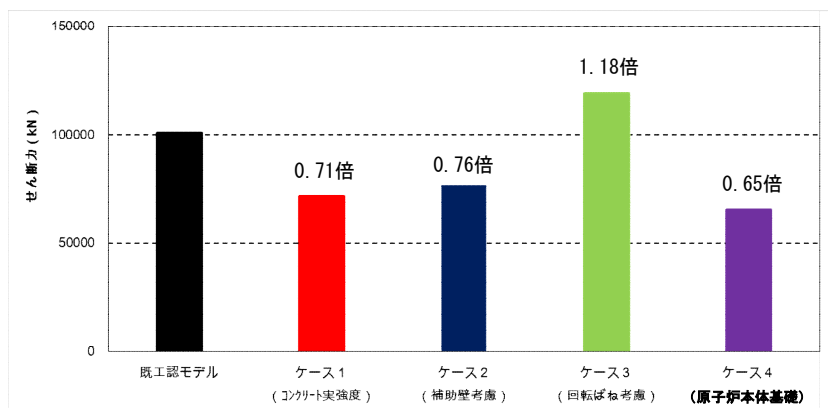


(a) せん断力比較

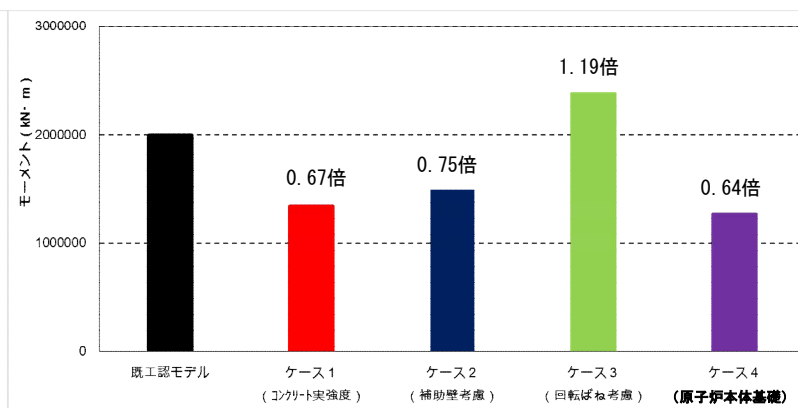


(b) モーメント比較

原子炉压力容器支持スカートにおける地震荷重比較 (Ss-1およびSs-2包絡値)



(a) せん断力比較



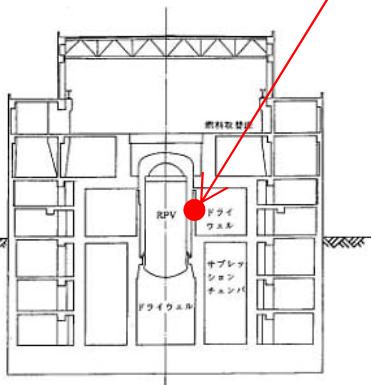
(b) モーメント比較

原子炉本体の基礎基部における地震荷重比較 (Ss-1およびSs-2包絡値)

3. 地震荷重等の比較 (機器)

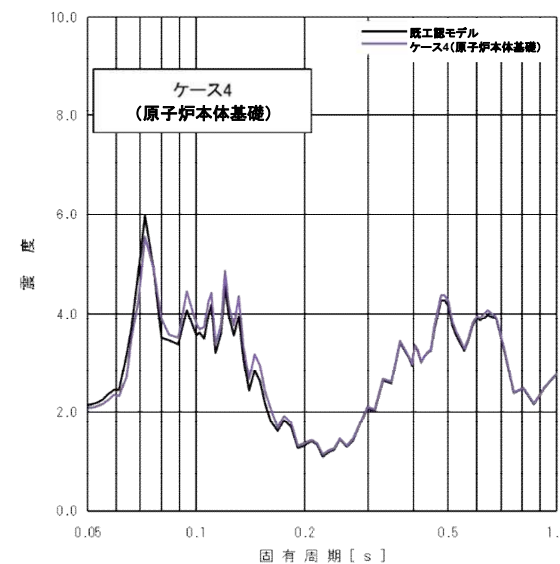
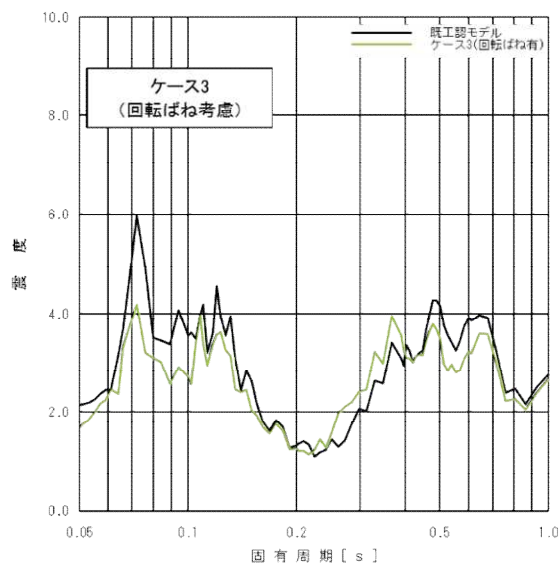
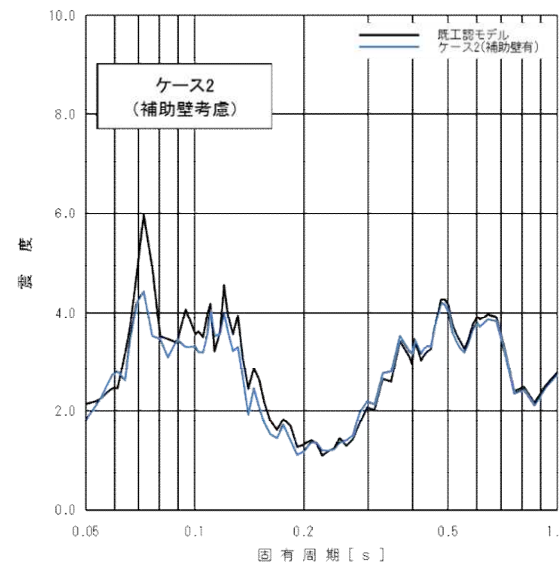
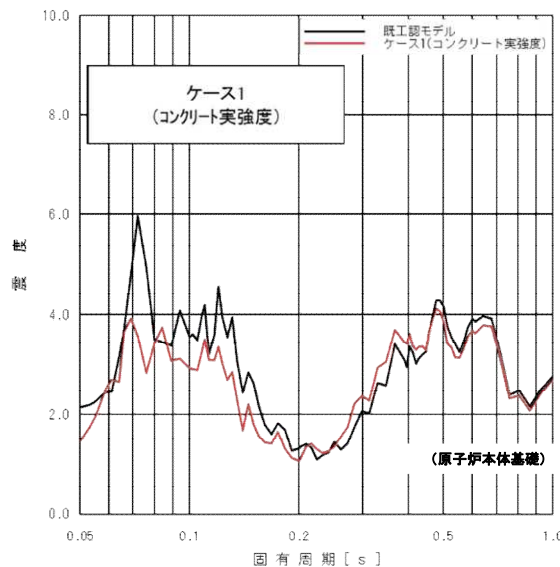
※暫定条件に基づく概算値

◆原子炉遮蔽壁



主蒸気系配管評価用
構築物間相対変位 (水平方向)

	相対変位 (mm)
既工認モデル	2.6
ケース1 (コンクリート実強度)	1.5
ケース2 (補助壁考慮)	1.8
ケース3 (回転ばね考慮)	2.7
ケース4 (原子炉本体基礎)	2.4



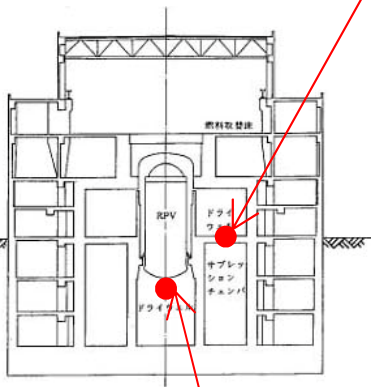
※: 評価に用いる値のうち最大値を記載

原子炉遮蔽壁(T.M.S.L.18.440m, Ss-1, NS方向, 減衰2.0%)
における応答スペクトル比較

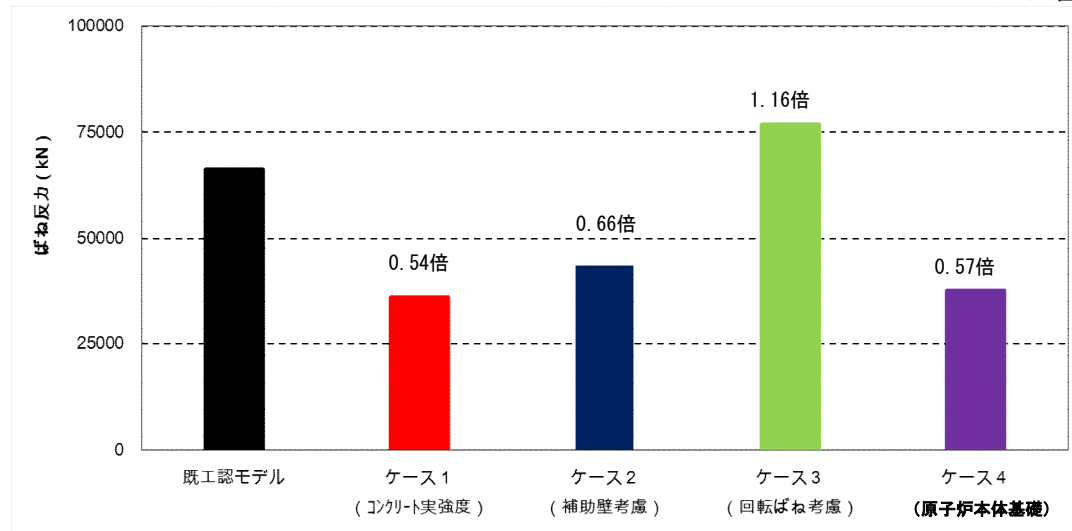
3. 地震荷重等の比較 (機器)

※暫定条件に基づく概算値

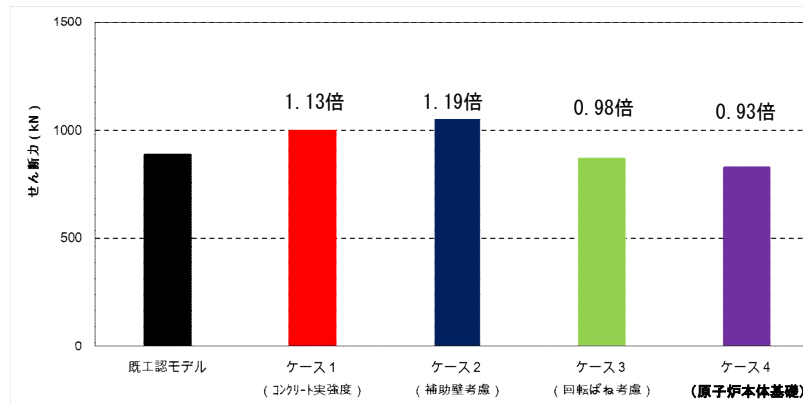
◆ダイヤフラムフロア



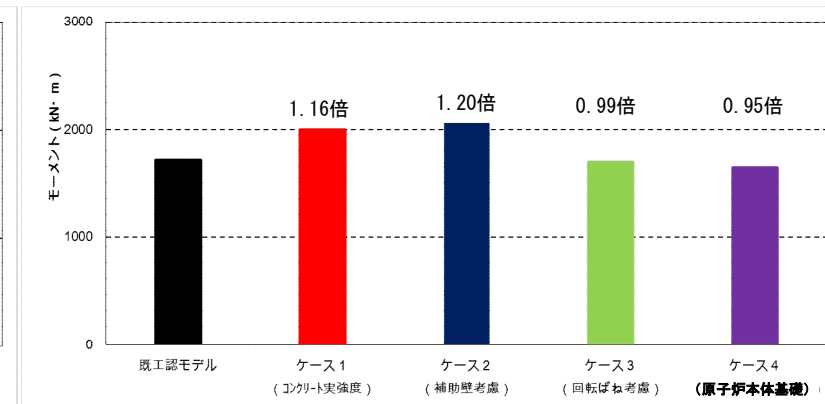
◆原子炉冷却材再循環ポンプ



ダイヤフラムフロアにおけるばね反力比較 (Ss-1およびSs-2包絡値)



(a) せん断力比較



(b) モーメント比較

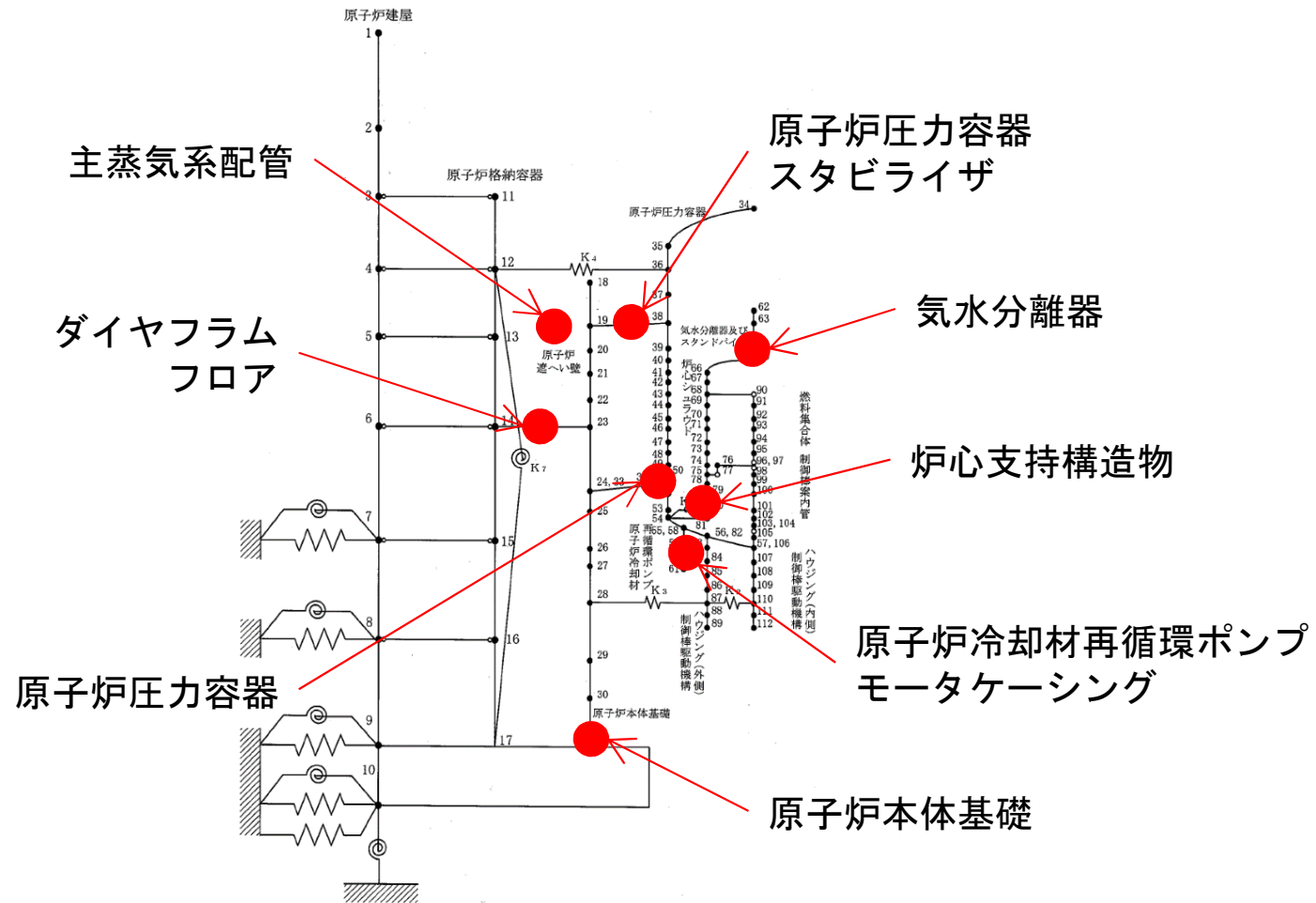
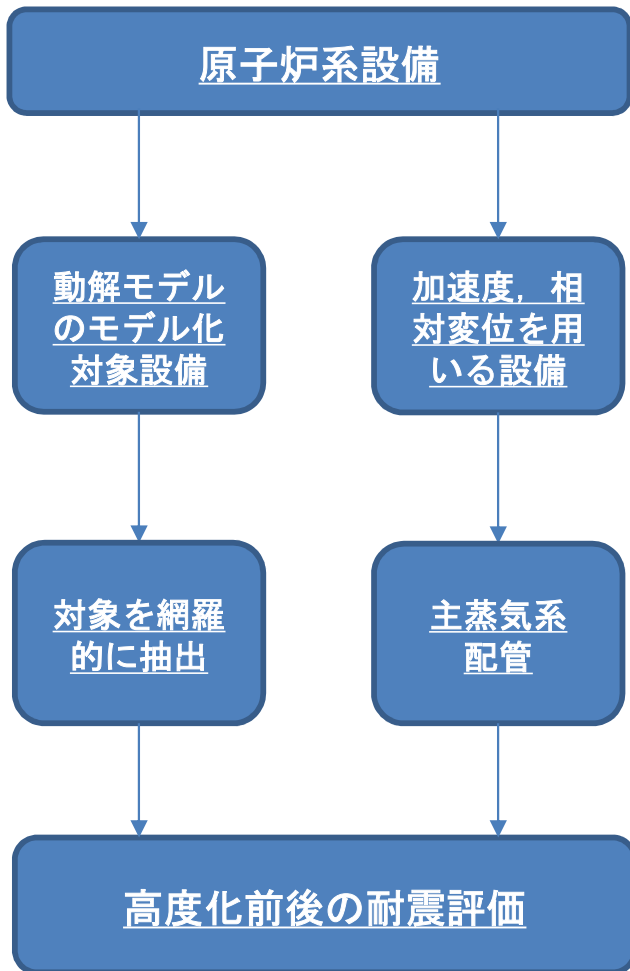
原子炉冷却材再循環ポンプ付け根部
における地震荷重比較部 (Ss-1およびSs-2包絡値)

4. 高度化の定量的効果のまとめ

変更点	応答への効果 (建物系)	応答への効果 (機器系)
①コンクリート剛性に実強度を使用 ②耐震要素に補助壁をモデル化	採用により、 S_s による建屋のせん断ひずみを小さくする効果があるが、原子炉建屋は評価基準値に対して十分余裕のある設計となっており、既工認モデルで評価した場合も、評価基準値を満足する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉系（特に、原子炉本体基礎とダイヤフラムフロア）の地震荷重を低減する効果がある。 ・ 配管系の設計条件（床応答スペクトル、相対変位）を低減する効果もある。
③側面地盤ばねに回転ばねを追加	回転ばねを採用することにより、接地率を大きく改善する効果がある。採用しない場合、接地率が小さくなり、浮き上がりの影響を考慮した検討が必要となる可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉系の地震荷重は、概ね既工認モデルと同等か若干増加する傾向。 ・ 配管系の設計条件（床応答スペクトル）を低減する効果がある。
④原子炉本体基礎に復元力特性を設定	—	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉系（特に、原子炉本体基礎とダイヤフラムフロア）の地震荷重を低減する効果がある。 ・ 配管系の設計条件（床応答スペクトル、相対変位）に与える影響は軽微。

5. 今後の高度化項目の定量的効果確認方針

- 改造困難な原子炉系設備に着目し、評価対象設備を網羅的に抽出する。
- 動解モデルの高度化前後で耐震評価をおこない、設備への効果を定量的に確認する。



定量的効果確認対象設備（案）