

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-40-44_改3
提出年月日	2021年10月5日

補足-600-40-44 原子炉格納容器ベント系設備の
地震応答解析モデルの精緻化等に関する補足説明資料

目 次

1. はじめに	1
2. 原子炉格納容器ベント系設備等.....	3
2.1 原子炉格納容器ベント系設備等の構造.....	3
2.2 原子炉格納容器ベント系設備等の耐震補強対策.....	5
2.2.1 耐震補強対策の目的.....	5
2.2.2 耐震補強対策の内容.....	5
3. 耐震評価に係る原子炉格納容器ベント系設備等の既工認からの相違点の詳細.....	10
4. 地震応答解析及び応力解析モデルの詳細.....	15
5. 既工認からの相違点に関する女川2号機への適用性のまとめ.....	22

1. はじめに

本書は、女川原子力発電所第2号機（以下、女川2号機という。）の添付書類「VI-2-9-4-1 ダウンカマの耐震性についての計算書」、「VI-2-9-4-2 ベント管の耐震性についての計算書」及び「VI-2-9-2-1-4 ドライウェルベント開口部の耐震性についての計算書」における既工認からの相違点を説明する資料である。ここでは、ベント管、ベントヘッド、ダウンカマ及びその付属構造物を原子炉格納容器ベント系設備という。

女川2号機の既工認及び今回工認における原子炉格納容器ベント系設備等に係る耐震評価フローを図1に示す。耐震評価フローの比較結果から、①地震応答解析モデルの設定、②地震応答解析手法、③解析手法に応じた設計用地震力、④応力解析モデルの設定及び⑤耐震補強対策の観点で既工認からの相違点が整理される。また、ベント管等は、既工認において3次元シェルモデルを用いた応力解析で応力を算定しているが、今回工認において3次元シェルはりモデルを用いた地震応答解析で当該部位のシェル要素に発生する応力を算定している。

なお、原子炉格納容器ベント系設備のうち原子炉格納容器バウンダリを構成するベント管を除くベントヘッド及びダウンカマの耐震重要度分類が耐震AクラスからSクラスに見直されたため、今回工認の耐震評価としては、弾性設計用地震動 S_d による評価（許容応力Ⅲ_AS）に加え、基準地震動 S_s による評価（許容応力Ⅳ_AS）が求められる。また、重大事故等対処設備であるため、重大事故等時の耐震評価が求められることも既工認からの相違点となる。

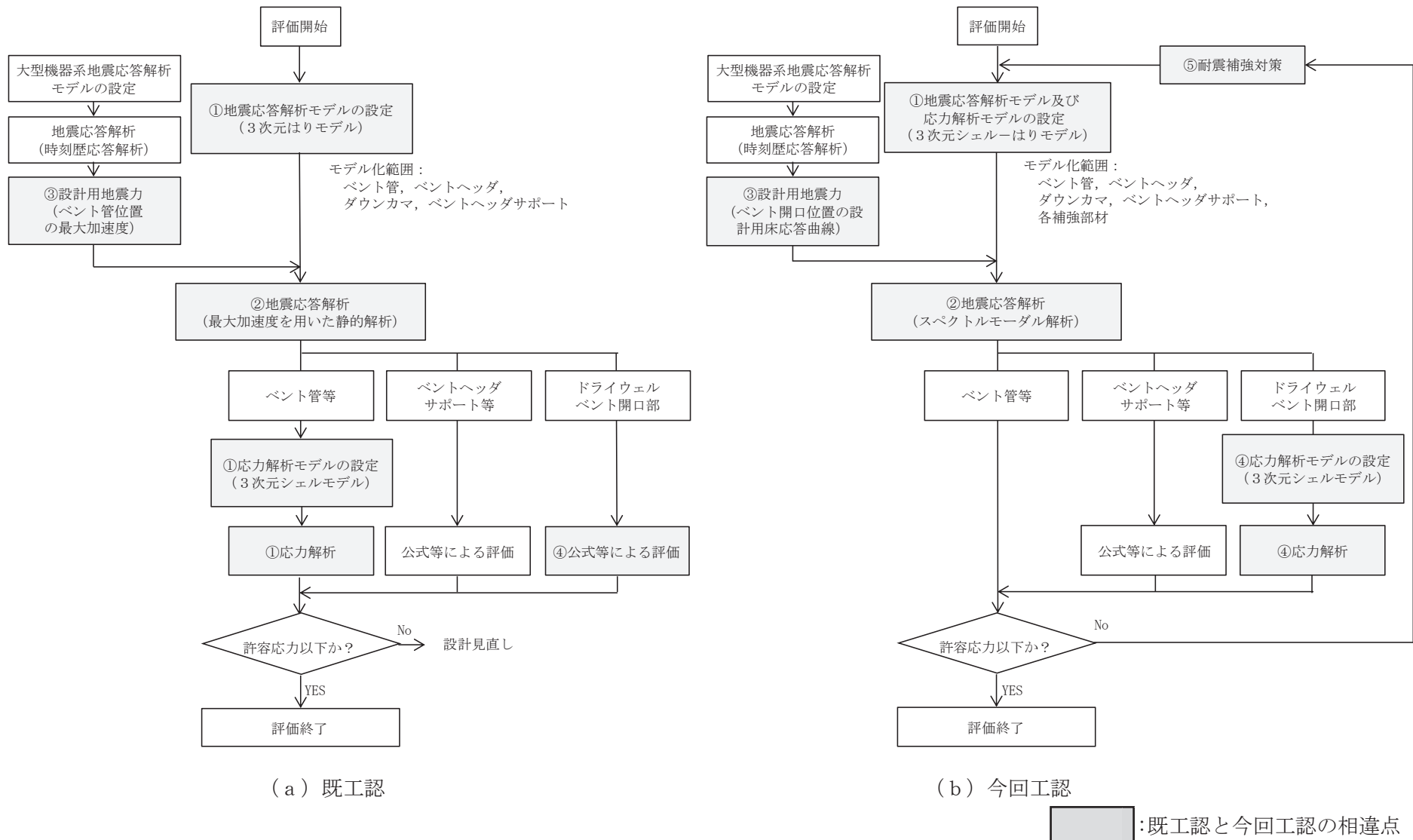


図1 原子炉格納容器ベント系設備等に係る耐震評価フロー

2. 原子炉格納容器ベント系設備等

2.1 原子炉格納容器ベント系設備等の構造

原子炉格納容器ベント系設備は、ドライウエル空間とサプレッションチェンバ水中部とを接続し、ベント管、ベントヘッドより分岐してサプレッションチェンバ内の水中に開口する一連のダウンコマにより構成される。また、原子炉格納容器ベント系設備は、ドライウエルに設けられたドライウエルベント開口部で支持される。

ベント管はドライウエルとサプレッションチェンバの間に等間隔に 8 本設けられた内径 mm、板厚 mm 及び mm の鋼製円筒構造物である。ベントヘッドは 16 本の内径 mm、板厚 mm の鋼製円筒構造物を円環状に接合した構造物でベント管に接続する。ベントヘッドの各接合部近傍にはベントヘッドサポートを備える。ダウンコマはサプレッションチェンバ全周にわたって出来るだけ一様に分布するよう 64 本配置した外径 mm、板厚 mm の鋼製管状構造物であり、ベントヘッドに接続する。

ドライウエルベント開口部を構成するベントノズルは内径 mm 及び板厚 mm の円筒に内径 mm 及び板厚 mm の円すいを接続した構造物である。

各ベント管のドライウエル開口部には、ジェット力等がベント系設備に直接作用するのを防ぐためにジェットデフレクタを設ける。

原子炉格納容器ベント系設備及びドライウエルベント開口部の構造を図 2、3 に示す。

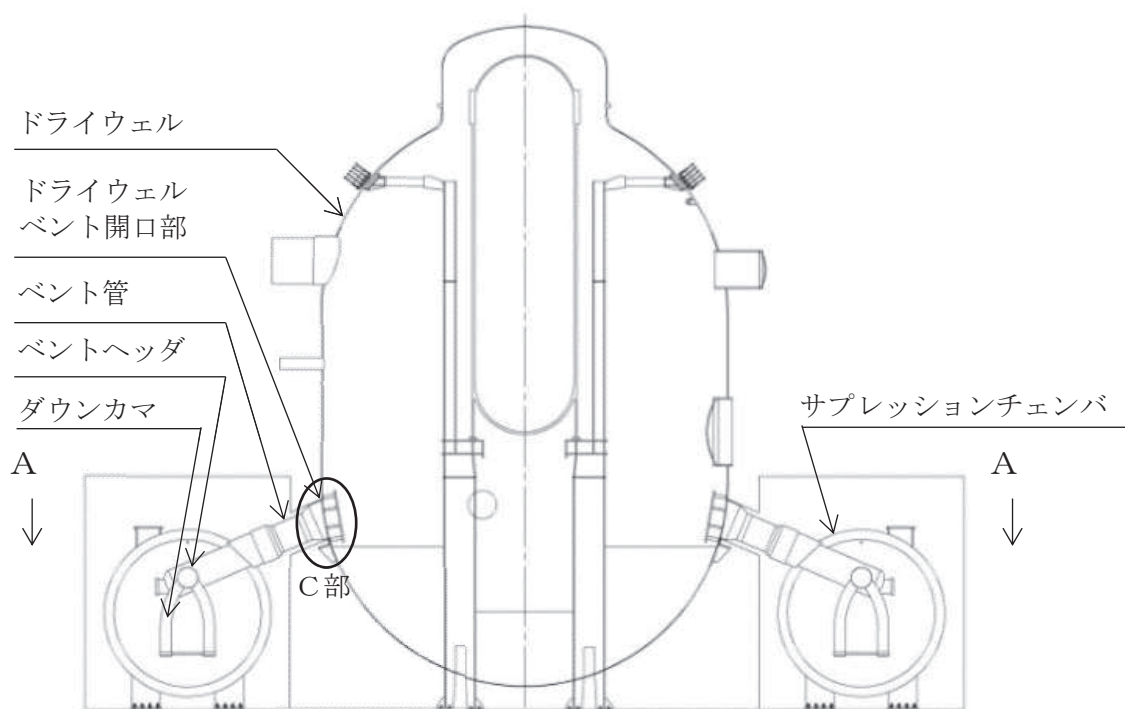
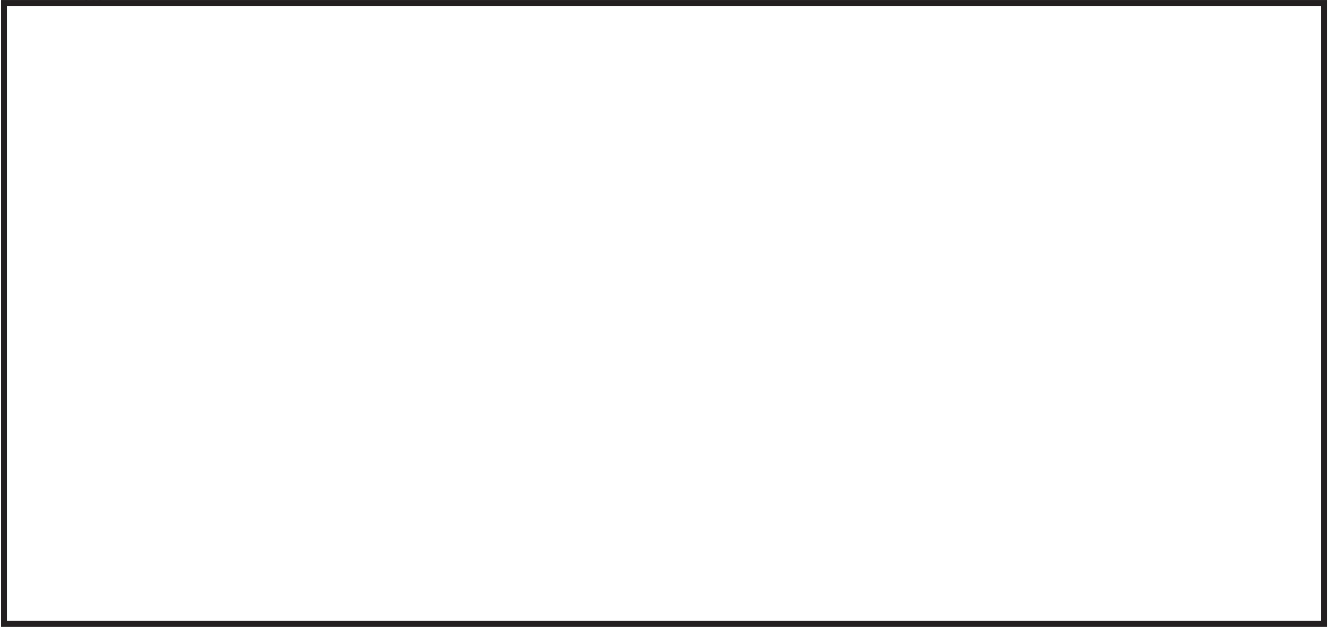


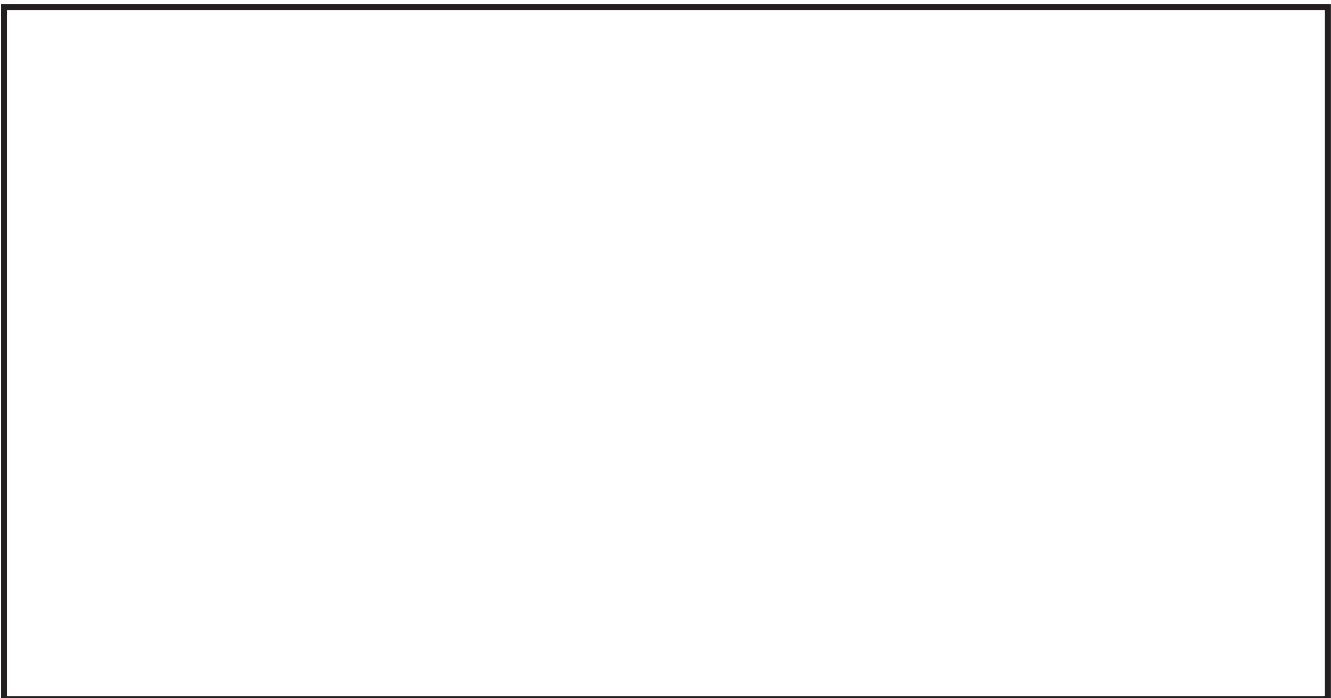
図 2 原子炉格納容器ベント系設備及びドライウエルベント開口部構造図 (その 1)

B部



A-Aから見る

B部詳細



C部詳細

D-Dから見る

E-Eから見る

図3 原子炉格納容器ベント系設備及びドライウェルベント開口部構造図（その2）

2.2 原子炉格納容器ベント系設備等の耐震補強対策

2.2.1 耐震補強対策の目的

原子炉格納容器バウンダリを構成するベント管を除く原子炉格納容器ベント系設備の耐震重要度分類の変更（AクラスからSクラス）、重大事故等時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う付加質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、原子炉格納容器ベント系設備の耐震性を向上させるための耐震補強対策を実施し、必要な強度を確保することを目的としている。また、原子炉格納容器ベント系設備からの反力も増大することを踏まえ、ドライウェルベント開口部の耐震性を向上させるための補強対策も実施し、必要な強度を確保することを目的としている。

2.2.2 耐震補強対策の内容

(1) 原子炉格納容器ベント系設備

耐震評価の結果を踏まえた耐震性を向上させるための補強対策について、補強の目的とその内容について、表1に示し、ベント管の補強構造及びベントヘッド及びダウンカマの補強構造を図4及び図9に示す。

表1 補強の目的とその内容

補強の目的	内容
①ベント管，ベントヘッド及びダウンカマの応力を抑制	<ul style="list-style-type: none">・ベント管とベントヘッドの接続部へのベント管ガセットの追加・ベントヘッドとダウンカマの接続部へのベントヘッドリングの追加・ベントヘッドエビ継手部へのエビ接ぎ部リング及びエビ接ぎ部ガセットの追加・ダウンカマへの下部支持サポート及び筋交いの追加 なお、下部支持サポート、筋交いはベントヘッドサポートとの干渉を避ける構造とし、ベント系設備全体として対称な構造としている。
②ベント管，ベントヘッド一般部に発生する局所的な応力を抑制	<ul style="list-style-type: none">・ベント管とベントヘッドの接続部への補強パッドの追加・ベントヘッドとダウンカマの接続部への補強パッドの追加
③ベントヘッドサポート（下側）の応力を抑制	<ul style="list-style-type: none">・ベントヘッドサポート（上側）を追加・ベントヘッドサポート（下側）を取替

A部

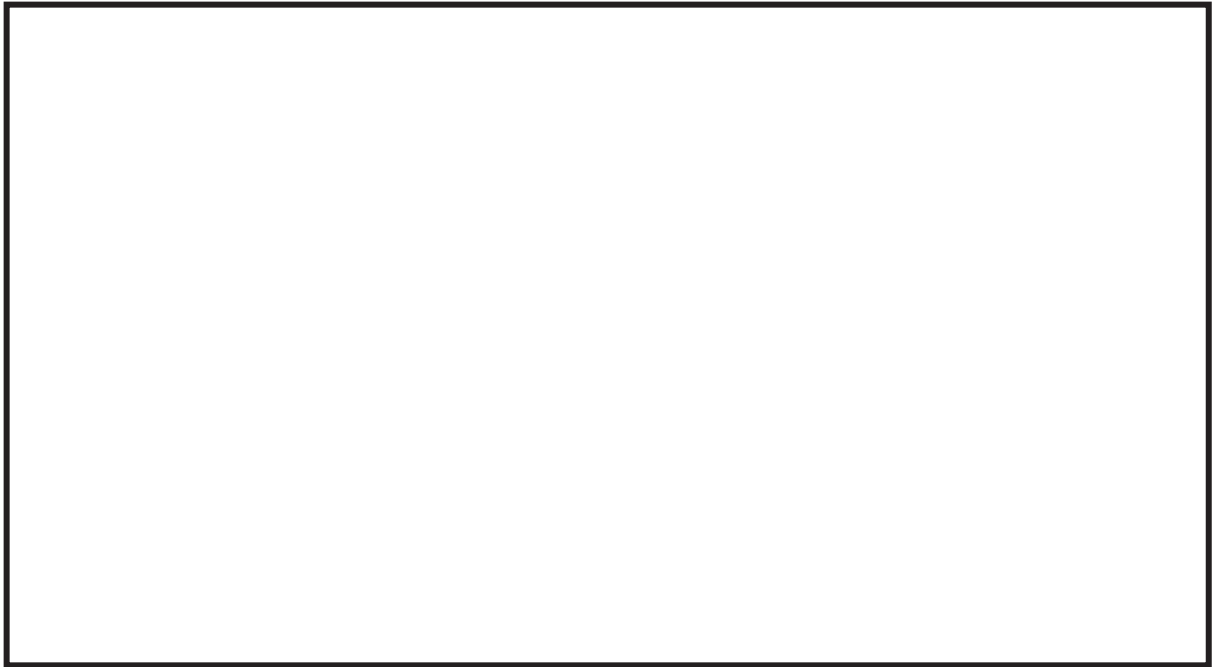


図4 ベント系設備平面図

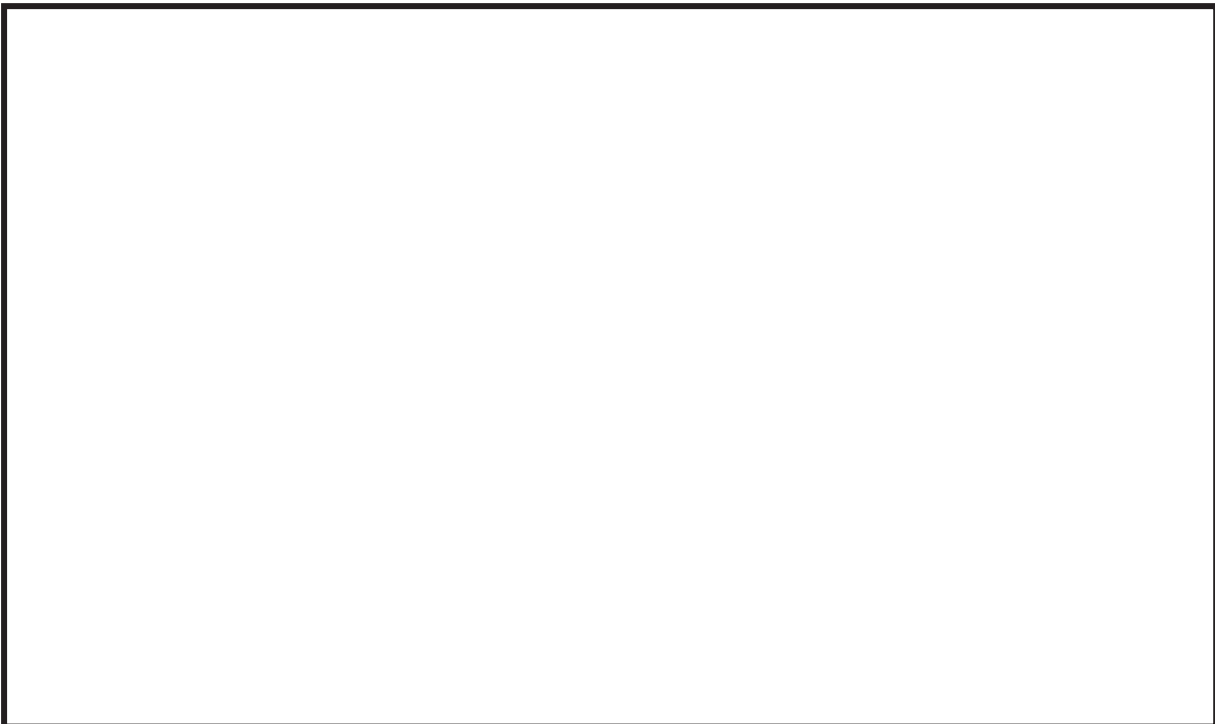


図5 ベント管の補強構造
【図4のB部（ベント管部分を拡大）】

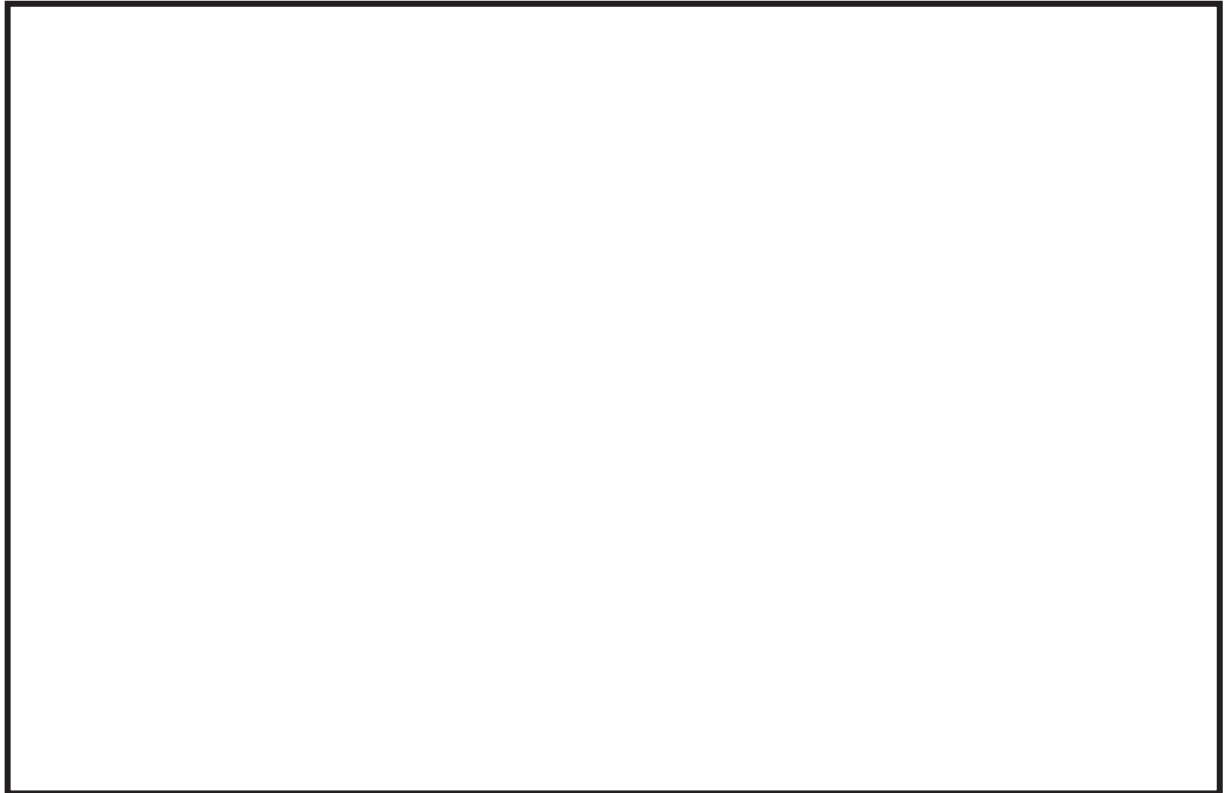


図6 ベントヘッダ及びダウンカマの補強構造
【図4のC-C矢視（ベント系設備を外側から見た構造）】



図7 ベントヘッダ及びダウンカマの補強構造
【図4のD-D矢視（ベント系設備を内側から見た構造）】



図8 ベントヘッド及びダウンカマの補強構造
【図7のF-F矢視（ベント系設備を上側から見た構造）】



図9 ベントヘッド及びダウンカマの補強構造
【図7のG-G矢視（ベント系設備を下側から見た構造）】

(2) ドライウェルベント開口部

耐震評価結果を踏まえ、ドライウェルベント開口部の応力を抑制するため、ドライウェルベント開口部に補強リブ及び補強パッドを追加する。ドライウェルベント開口部の補強構造を図 10 に示す。

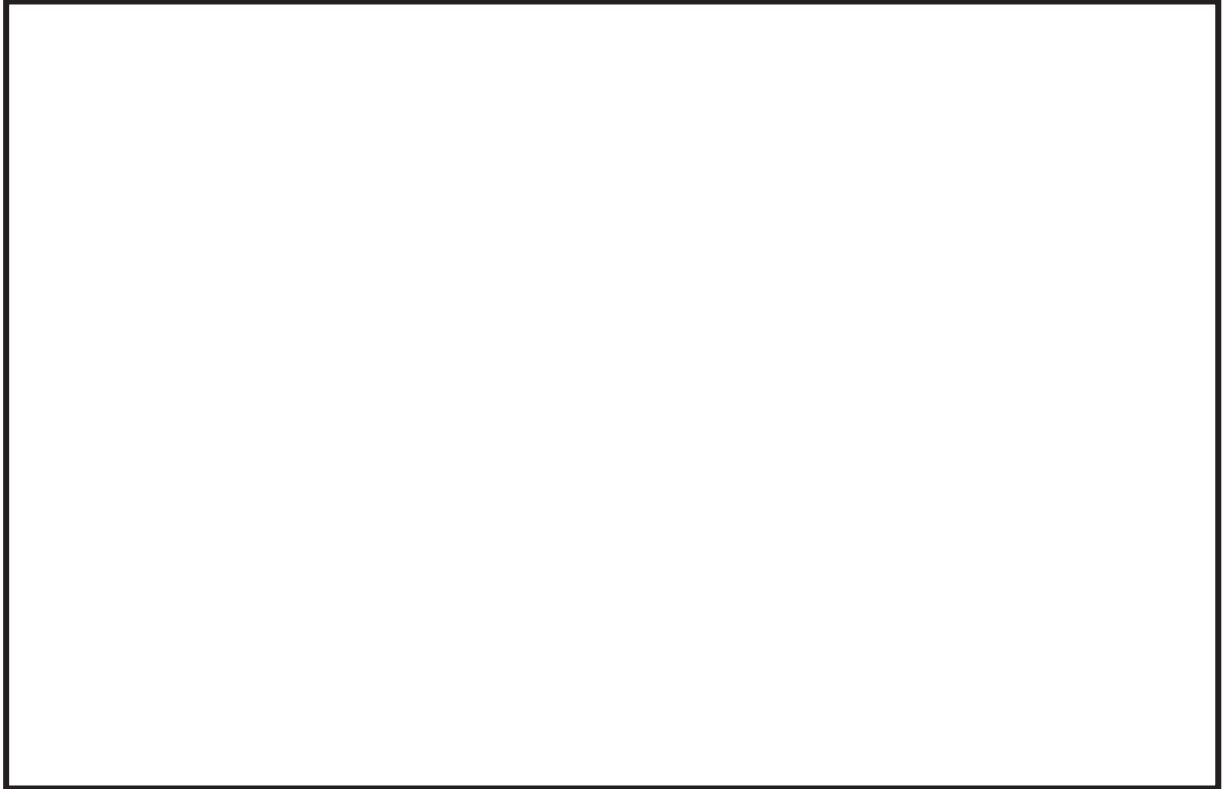


図 10 ドライウェルベント開口部の補強構造

3. 耐震評価に係る原子炉格納容器ベント系設備等の既工認からの相違点の詳細

今回工認では、重大事故等時のサプレッションチェンバの水位上昇に伴う付加質量の増加、基準地震動の増大等を踏まえ、耐震補強対策を実施し、その効果を考慮した精緻な耐震評価を実施するため、地震応答解析モデル及び応力解析モデルの精緻化、それを踏まえた解析手法の精緻化等を実施する。

(1) 原子炉格納容器ベント系設備

表2に原子炉格納容器ベント系設備の既工認及び今回工認における地震応答解析及び応力解析の比較結果を示す。

既工認における原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析は、ベント系設備をモデル化した大型機器系地震応答解析モデルを用いて時刻歴応答解析を実施し、ベント系設備に加わる最大加速度をベント管、ベントヘッド及びダウンカマ等をはり要素でモデル化した地震応答解析モデル（3次元はりモデル）の各要素に考慮した静的解析を行っている。

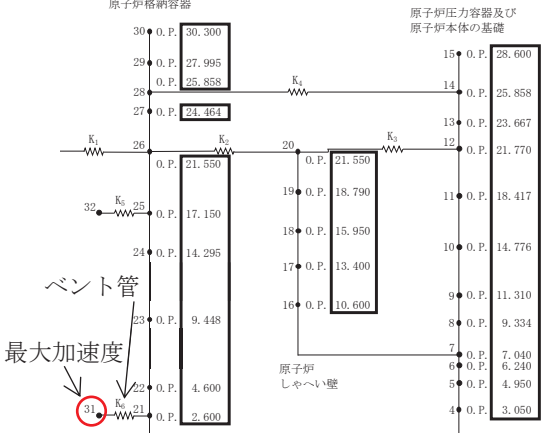
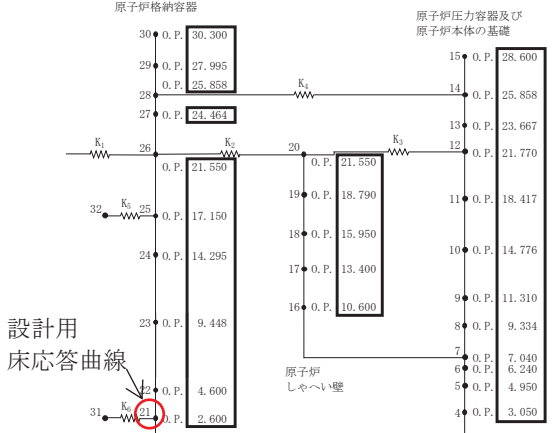
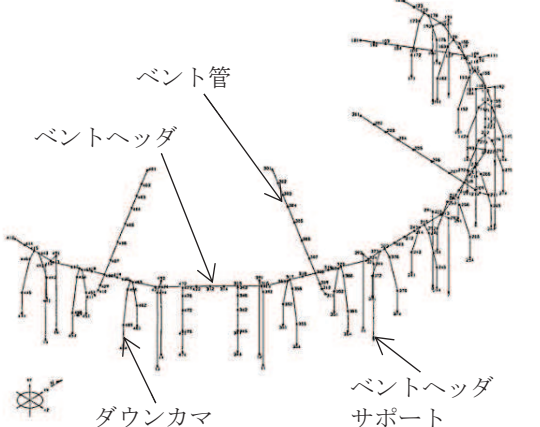
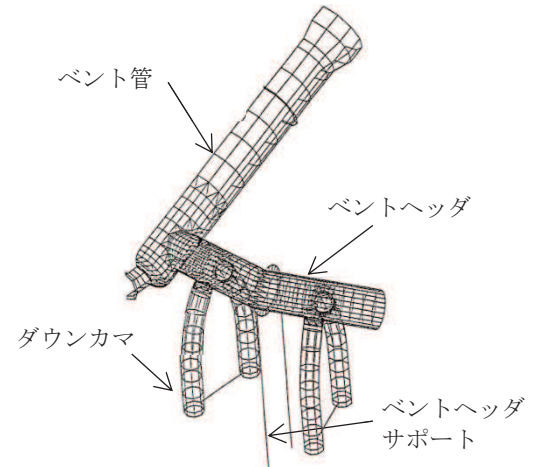
応力解析は、ベント管、ベントヘッド、ダウンカマ等をシェル要素等でモデル化した応力解析モデル（3次元部分シェルモデル）を作成し、その解析モデルと地震応答解析により算定した地震荷重を用いて応力を算定していた。また、ベントヘッドサポートは、はり要素の地震荷重から公式等による評価で応力を算定していた。

今回工認における原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析は、ベント管、ベントヘッド及びダウンカマをシェル要素で、ベントヘッドに取り付けられるベントヘッドサポート、ダウンカマ等に取り付けられる下部支持サポート及び筋交いをはり要素でモデル化した地震応答解析モデル及び応力解析モデル（3次元シェルはりモデル）を作成し、スペクトルモーダル解析を行っている。解析に用いた地震力は、大型機器系地震応答解析モデルのドライウエルベント開口部位置の設計用床応答曲線を用いた。

ベント管、ベントヘッド、ダウンカマ等のシェル要素でモデル化した部位の応力は、3次元シェルはりモデルを用いた地震応答解析からシェル要素に発生する応力を算定し、ベントヘッドサポート等のはり要素でモデル化した部位の応力は、地震応答解析からはり要素に発生する地震荷重を算定し、公式等による評価により応力を算定した。

今回工認におけるスペクトルモーダル解析に適用する減衰定数は、溶接構造物の1%とし、解析コードは既工認のI-SAPからシェル要素の解析が実施可能なANSYSに見直した。また、地震応答解析では、解析モデル全体に設計用床応答曲線を入力している。入力する設計用床応答曲線は、ベントヘッドサポートよりもベント管の剛性が大きいことから、ベントノズル部（ベント管開口部位置）のものを用いている。参考として、ベントノズル部とベントヘッドサポートの地震荷重比較を表3に、ベント系設備の地震荷重のイメージを図11に示す。荷重比較からベント管側の剛性が十分に高いことから、ベント系設備は、ベントノズル部からの地震荷重が支配的となる。

表2 原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析及び応力解析の比較結果

評価	既工認	今回工認
地震応答解析	 <p>原子炉格納容器</p> <p>原子炉圧力容器及び原子炉本体の基礎</p> <p>原子炉しゃへい壁</p> <p>ベント管</p> <p>最大加速度</p> <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分を抜粋】(時刻歴応答解析)</p>	 <p>原子炉格納容器</p> <p>原子炉圧力容器及び原子炉本体の基礎</p> <p>原子炉しゃへい壁</p> <p>設計用床応答曲線</p> <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分を抜粋】(時刻歴応答解析)</p>
	 <p>ベント管</p> <p>ベントヘッド</p> <p>ダウンカマ</p> <p>ベントヘッドサポート</p> <p>* : 解析モデル全体に最大加速度を入力 3次元はりモデル(静的解析)</p>	
応力解析	 <p>ベント管</p> <p>ベントヘッド</p> <p>ダウンカマ</p> <p>ベントヘッドサポート</p> <p>3次元部分シェルモデル (ベントヘッドサポート: 公式等による評価)</p>	

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表3 ベントノズル部とベントヘッドサポートの地震荷重比較

荷重条件	方向		地震荷重		
			ベントノズル部	ヘッドサポート(下側)	ヘッドサポート(上側)
運転状態 V (LL)	並進	半径方向(R)	($\times 10^5$ N)		
		周方向(θ)	($\times 10^5$ N)		
		上下/子午線方向(Z)	($\times 10^5$ N)		
基準 地震動 Ss	回転	半径方向(R)まわり	($\times 10^5$ N mm)		
		周方向(θ)まわり	($\times 10^5$ N mm)		
		上下/子午線方向(Z)まわり	($\times 10^5$ N mm)		

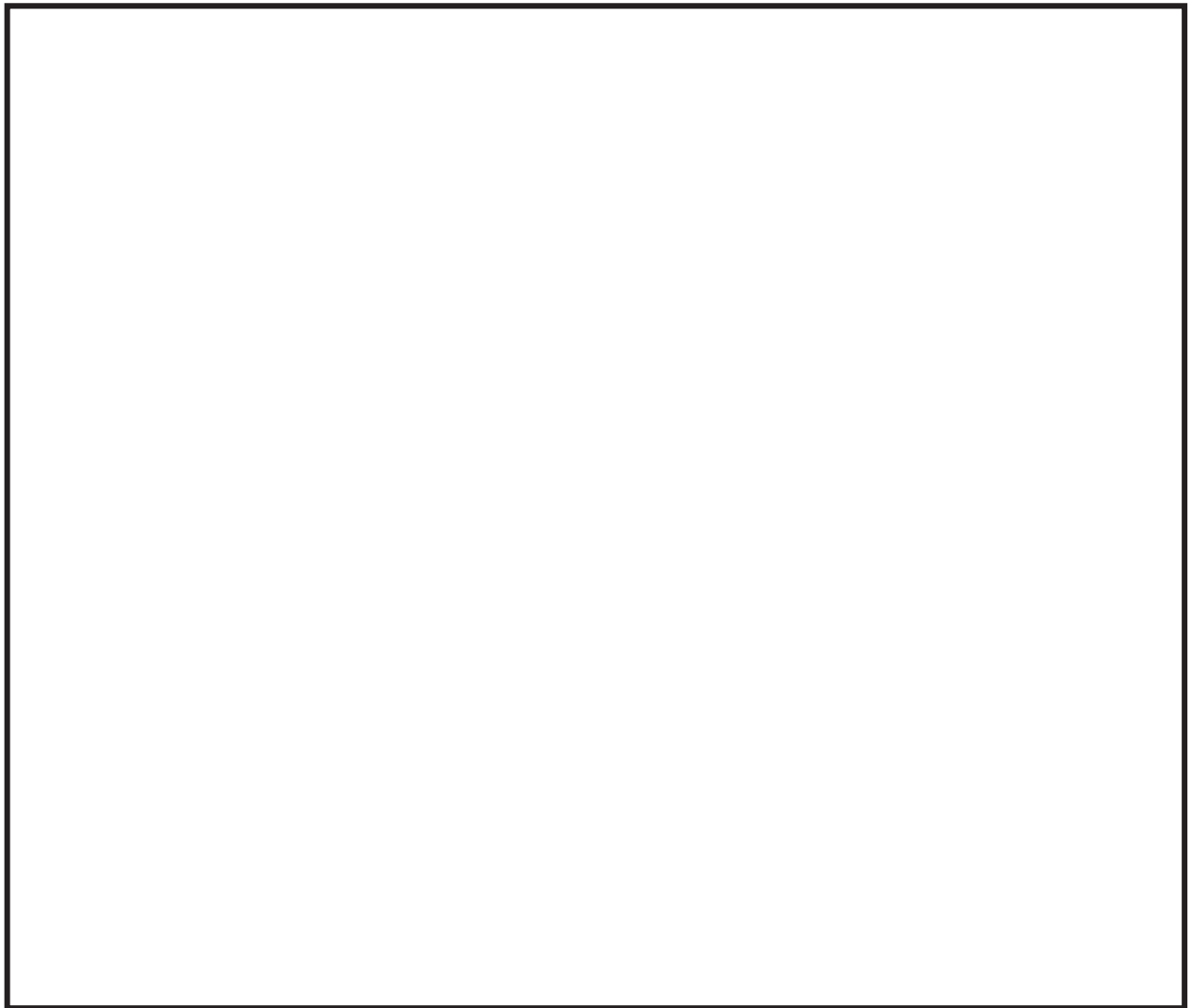


図11 ベント系設備の地震荷重のイメージ

(2) ドライウェルベント開口部

表4にドライウェルベント開口部の既工認及び今回工認における地震応答解析及び応力解析の比較結果を示す。

既工認では、原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析（詳細は3.(1)を参照）からドライウェルベント開口部に作用するベント管反力を算出し、その反力を用いてBijlaardの方法で応力を算出した。

今回工認では、原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析（詳細は3.(1)を参照）からドライウェルベント開口部に作用するベント管反力を算出し、その反力をドライウェルベント開口部についてシェル要素でモデル化した3次元シェルモデルに入力し、応力解析により応力を算出した。応力解析モデルは、基準地震動の増大等によるベント管反力の増大を踏まえた耐震補強対策の効果も考慮した精緻な耐震評価を行うため、ドライウェル、ベント管、ジェットデフレクタ、補強リブ及び補強パッドをモデル化している。

表4 ドライウェルベント開口部の地震応答解析及び応力解析の比較結果

評価	既工認	今回工認
地震応答解析	<p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分を抜粋】(時刻歴応答解析)</p>	<p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分を抜粋】(時刻歴応答解析)</p>
	<p>* : 解析モデル全体に最大加速度を入力 3次元はりモデル(静的解析)</p>	
応力解析	<p>地震応答解析で算出したベント管反力を用いてドライウェルベント開口部に対してBijlaardの方法により応力を算出(公式等による評価)</p>	

4. 地震応答解析及び応力解析モデルの詳細

(1) 原子炉格納容器ベント系設備

ベント管、ベントヘッド及びダウンカマは、その径に対して板厚が比較的薄く、また、ダウンカマ取付部等の補強によって構造が複雑となったことを考慮し、各部位の地震応答及び発生応力を詳細にみるため、ベント管、ベントヘッド、ダウンカマをシェル要素でモデル化し、構造が単純なサポート類は、はり要素でモデル化した。

ベント系設備のモデル化詳細を表5に、原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析モデル図を図12に、地震応答解析モデルの拘束条件を図13に、ベント管とドライウェルのばね剛性算定方法を表6に示す。ここで、ベントヘッドサポート（上側）とサプレッションチェンバ強め輪の結合部については、熱膨張を吸収する構造としているため、地震応答解析モデルとしては、熱膨張する方向に自由となる拘束条件を与えている（図14参照）。

表5 ベント系設備のモデル化詳細

モデル化項目		内容	備考
シェル要素			
はり要素			
拘束条件	①ベントヘッドサポートとサプレッションチェンバ強め輪の結合部		
	②ベント管とドライウェル		
水の付加質量		付加質量算定に用いた水位条件： ・ダウンカマ外側 DB条件：O.P. -3, 800mm SA条件：O.P. -1, 514mm ・ダウンカマ内側 DB条件：O.P. -3, 800mm SA条件：O.P. -1, 514mm	・ダウンカマ外側 機械工学便覧に示される付加質量算定方法（無限水中の円柱構造物と見なして算出した付加質量）により算出 ・ダウンカマ内側 ダウンカマに内包する水の重量を考慮
減衰定数		・JEAG4601-1991における溶接構造物に対する減衰1%を準用	

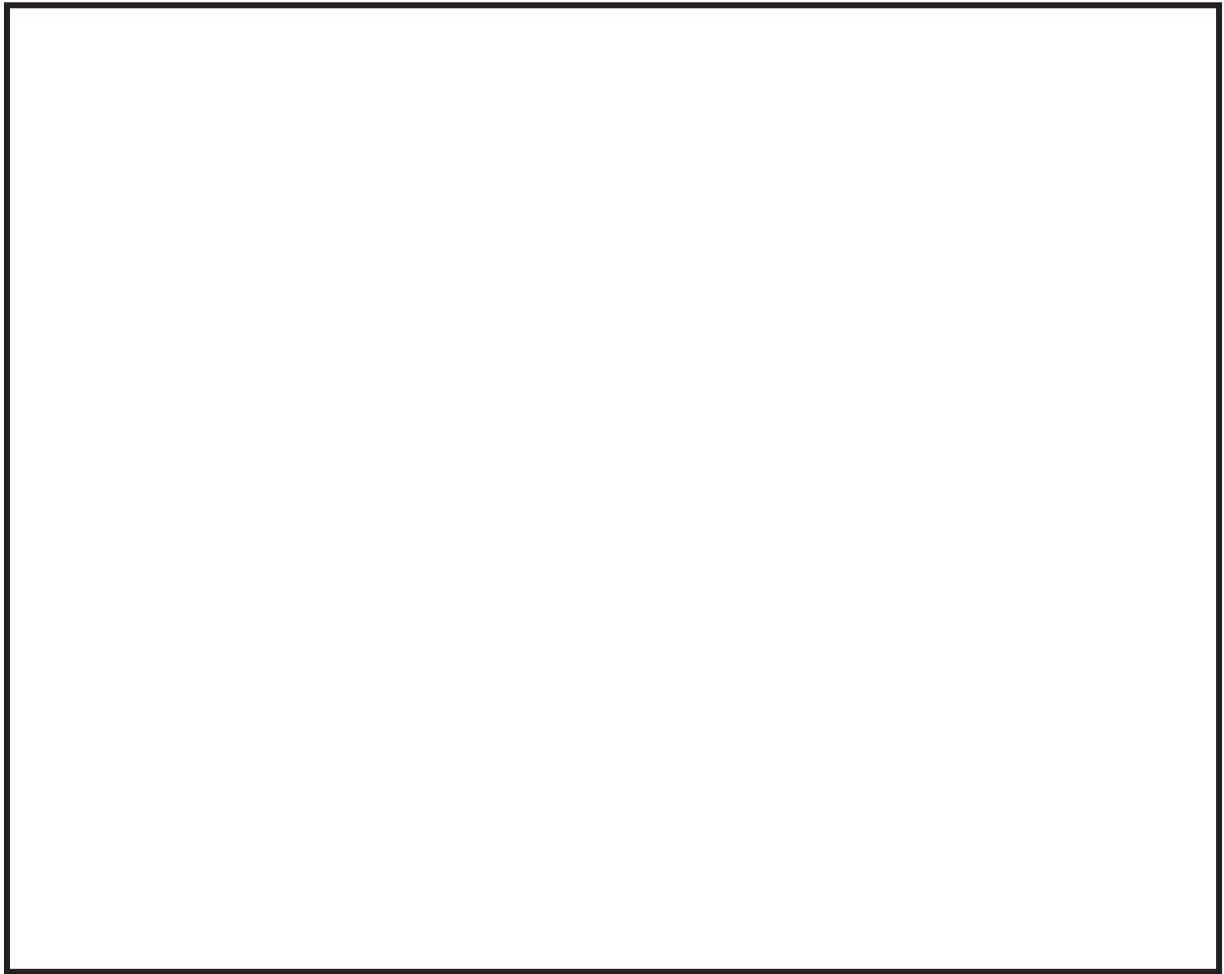


図 12 原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析モデル図

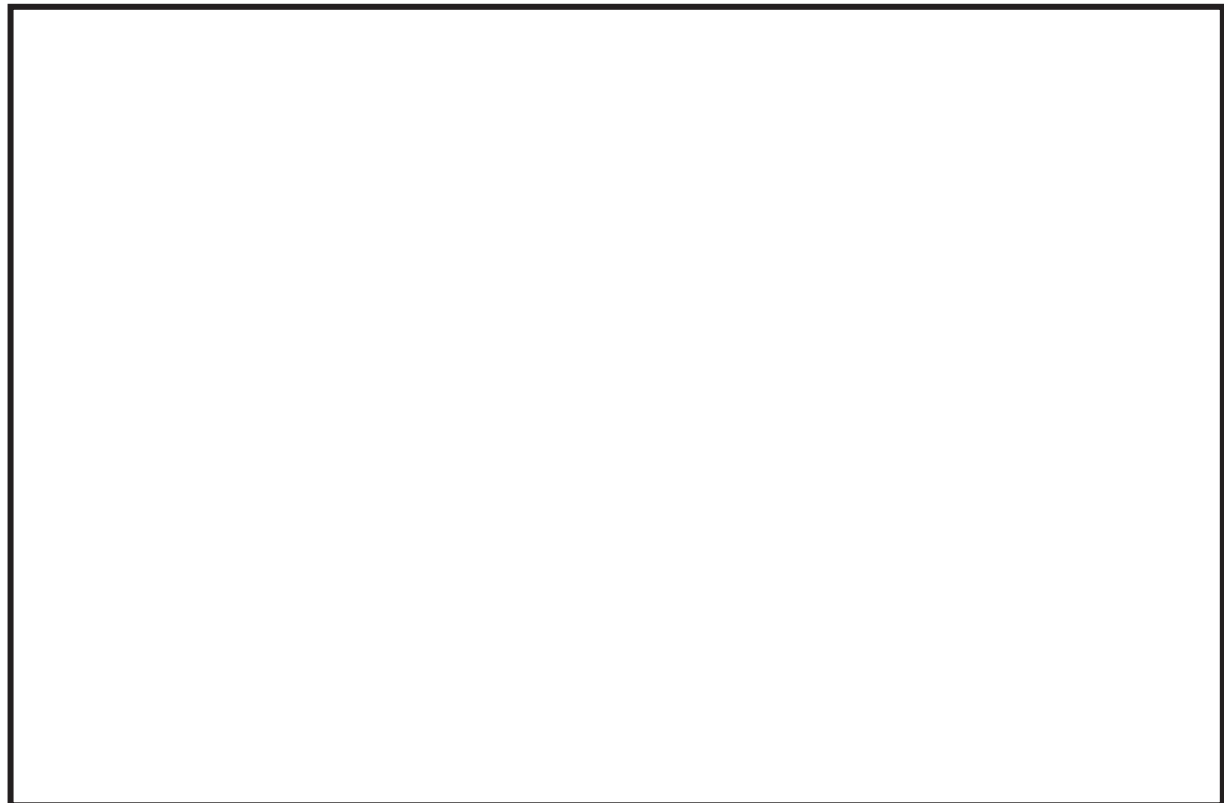


図 13 地震応答解析モデルの拘束条件

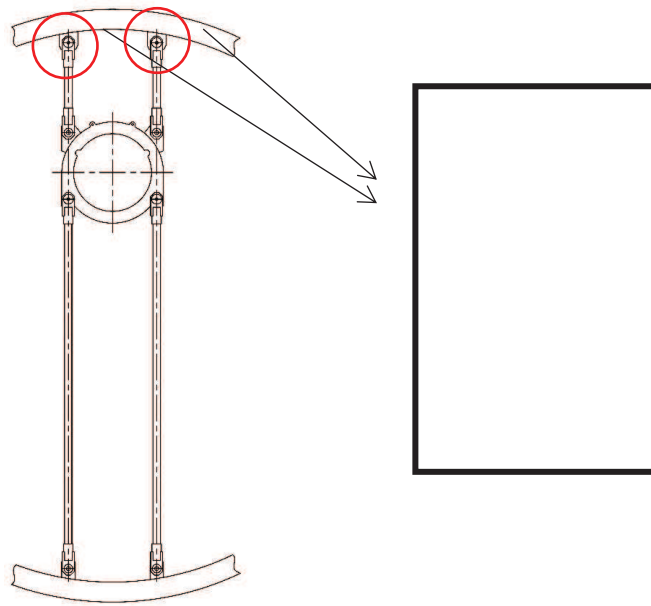


図 14 ベントヘッドサポート（上側）取付部の構造

表 6 ベント管とドライウェルのばね剛性算定方法

項目	ばね剛性算定方法
並進方向のばね剛性 K_P (半径 (R) 方向)	
回転方向のばね剛性 K_C, K_L (周 (θ) 方向周り (K_C) , 鉛直 (Z) 方向 周り (K_L))	

(2) ドライウェルベント開口部

ドライウェルベント開口部の耐震評価では、より精緻な評価を実施するためドライウェル、ベント管、ジェットデフレクタ、補強リブ及び補強パッドをモデル化している。

ドライウェルベント開口部のモデル化詳細を表7に、ドライウェルベント開口部の解析モデル図を図15～19に示す。

表7 ドライウェルベント開口部のモデル化詳細

モデル化項目		内容	備考
シェル要素 (図15～19参照)			
拘束条件	① ドライウェル円筒部 (上端部)		
	② ドライウェル円筒部 (モデル側端部)		
	③ サンドクッション部 下端 (下鏡部)		

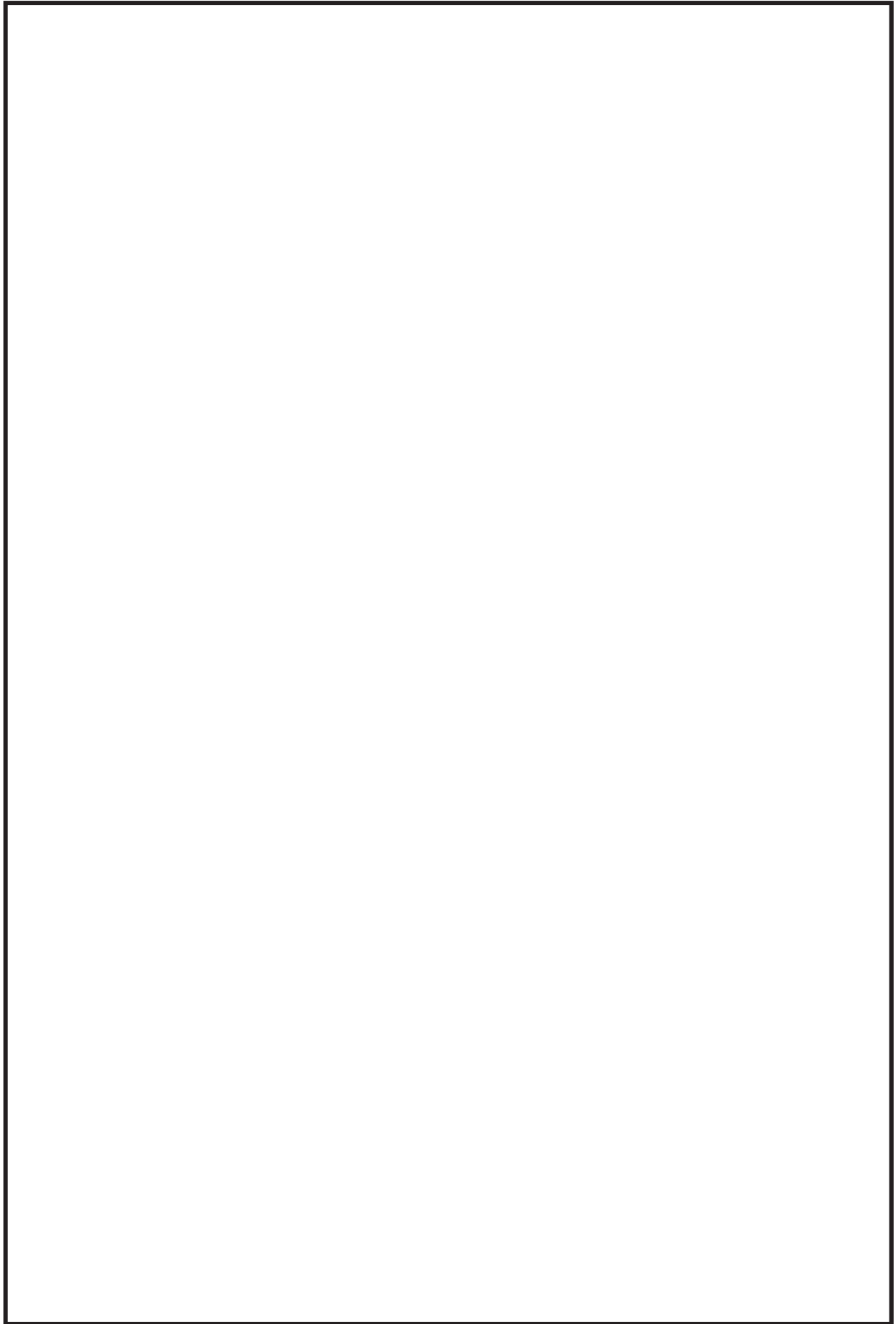


図 15 ドライウェルベント開口部の解析モデル図（全体）

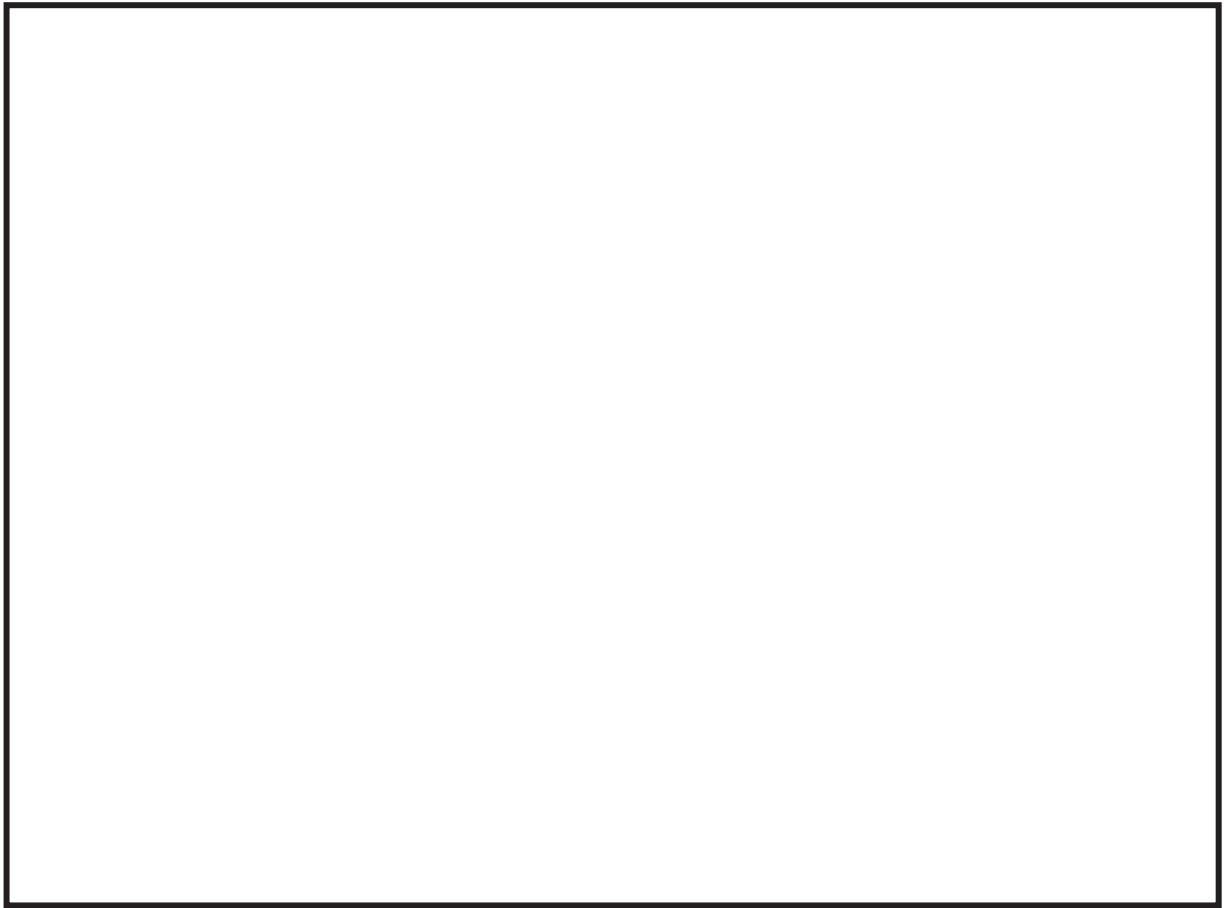


図 16 ドライウェルベント開口部の解析モデル (A部拡大)



図 17 ドライウェルベント開口部の解析モデル (B部拡大)

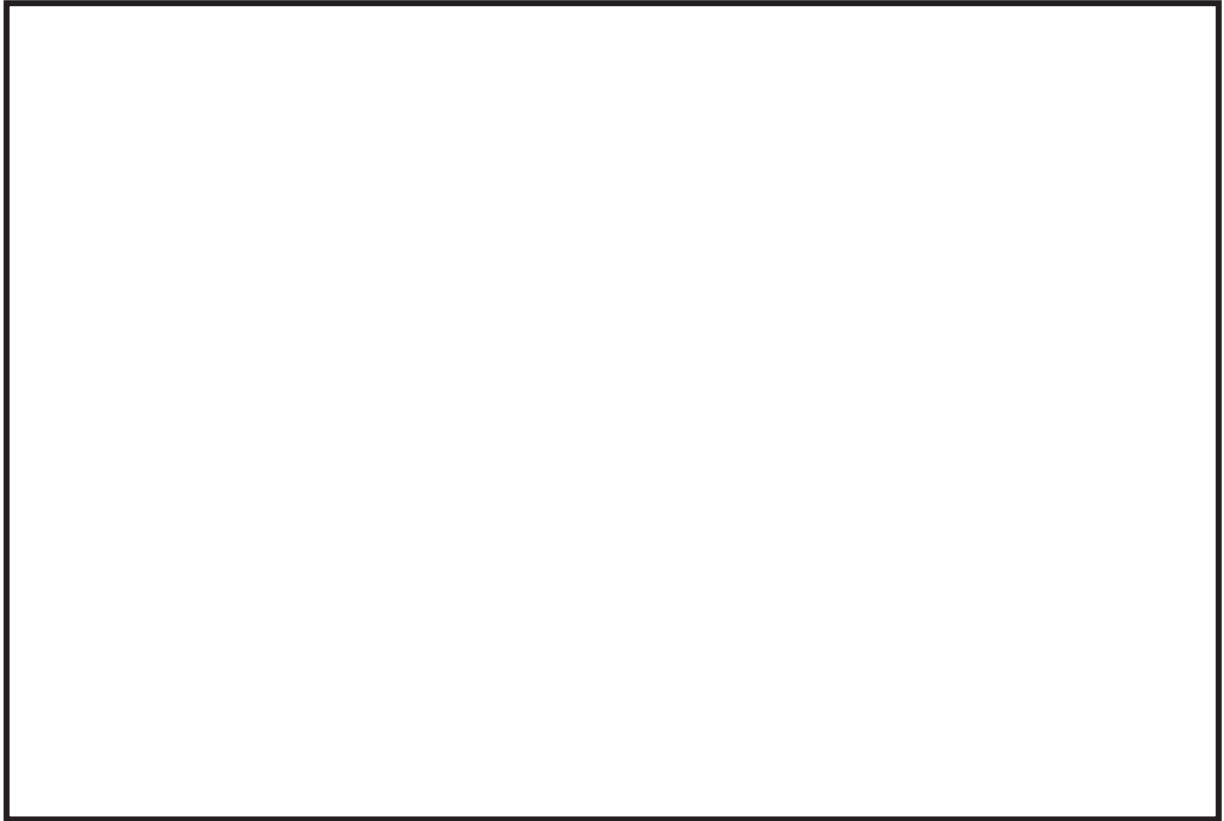


図 18 ドライウェルベント開口部の解析モデル (C-Cから見る)

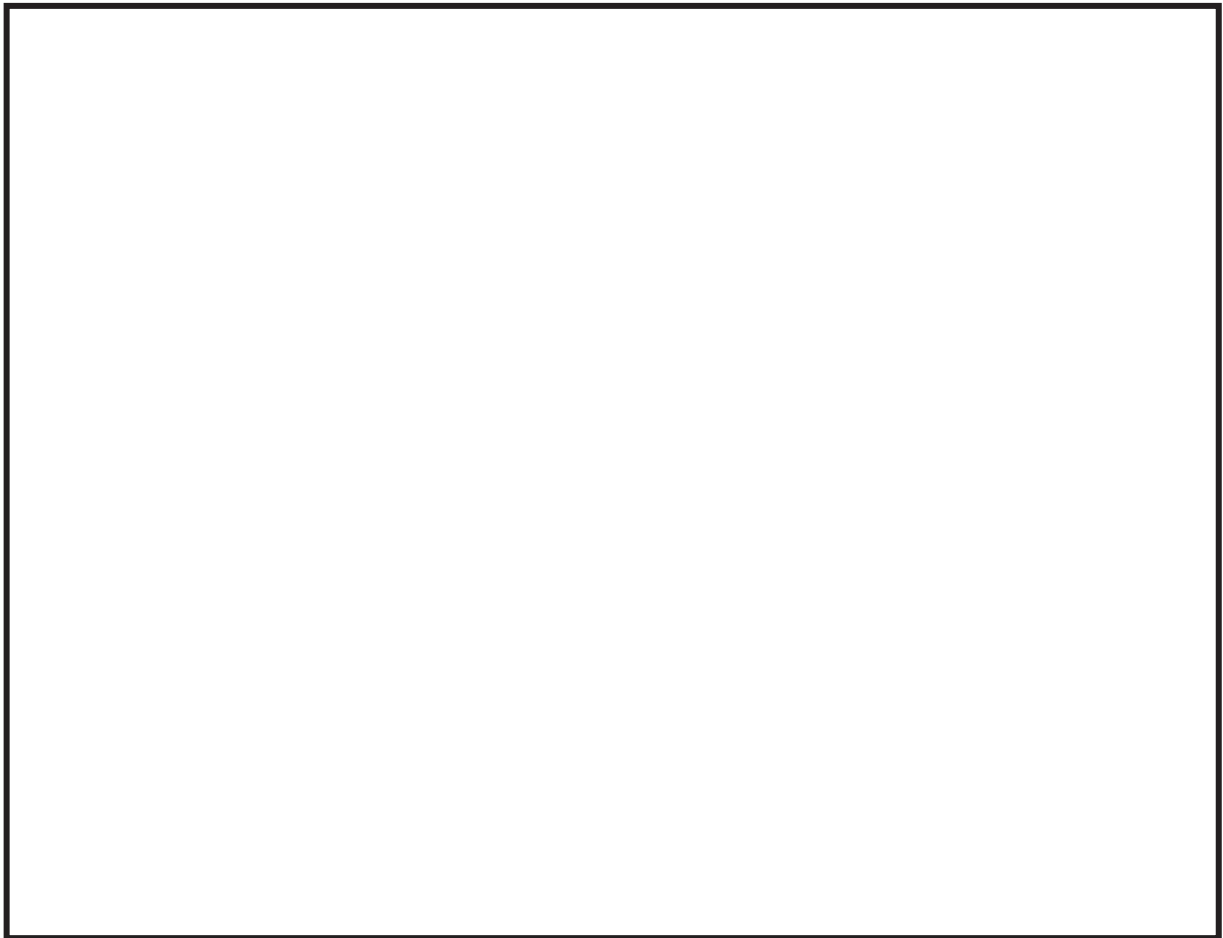


図 19 ドライウェルベント開口部の解析モデル (D/W 内側から見る)

5. 既工認からの相違点に関する女川2号機への適用性のまとめ

女川2号機の原子炉格納容器ベント系設備等の今回工認における耐震評価は、地震応答解析モデルの設定、地震応答解析手法、解析手法に応じた設計用地震力、応力解析モデルの設定及び耐震補強対策の観点で既工認からの相違点がある。既工認からの相違点及び既工認等での適用実績等の整理結果を表8、9に示す。

整理結果から、既工認からの相違点は、既工認での適用実績があること及び耐震評価・対策における標準的な手法であることから、今回工認に適用する方法として問題ないと判断している。

表8 原子炉格納容器ベント系設備の既工認からの相違点及び既工認での適用実績等

項目	既工認	今回工認	既工認での適用実績等
地震応答解析モデル	3次元はりモデル	3次元シェルーはりモデル	使用済燃料ラックで3次元シェルーはりモデルを適用
地震応答解析手法	静的解析	スペクトルモーダル解析	配管等で地震応答解析にスペクトルモーダル解析を適用
解析手法に応じた設計用地震力	ベント管位置の最大加速度	ドライウェルベント開口部の設計用床応答曲線	全般設備で設備の設置位置及び解析手法に応じて設計用地震力(最大加速度, 設計用床応答曲線)を適切に設定
耐震補強対策	—	発生応力を抑制するための部材追加(各ガセット, リング, 補強パッド)	既工認での構造設計や先行プラントの耐震対策と同等

表9 ドライウェルベント開口部の既工認からの相違点及び既工認での適用実績等

項目	既工認	今回工認	既工認での適用実績等
地震応答解析モデル*1	3次元はりモデル	3次元シェルーはりモデル	使用済燃料ラックで3次元シェルーはりモデルを適用
地震応答解析手法*1	静的解析	スペクトルモーダル解析	配管等で地震応答解析にスペクトルモーダル解析を適用
解析手法に応じた設計用地震力*1	ベント管位置の最大加速度	ドライウェルベント開口部の設計用床応答曲線	全般設備で設備の設置位置及び解析手法に応じて設計用地震力(最大加速度, 設計用床応答曲線)を適切に設定
応力解析モデルの設定	Bijslaardの方法で評価	3次元シェルモデル	原子炉格納容器ベント系設備で3次元シェルモデルを適用
耐震補強対策	—	発生応力を抑制するための部材追加(補強リブ, 補強パッド)	既工認での構造設計や先行プラントの耐震対策と同等

注記*1：原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析と同一