

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-54
提出年月日	2022年9月14日

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

2022年9月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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	9
4. 地震応答解析及び応力解析モデルの詳細	14
5. 既工認からの相違点に関する島根2号機への適用性のまとめ	20

1. はじめに

本書は、島根原子力発電所第2号機（以下「島根2号機」という。）のVI-2-9-2-3「ベント管の耐震性についての計算書」、VI-2-9-4-2「ダウンカマの耐震性についての計算書」及びVI-2-9-4-3「ベントヘッダ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、ベントヘッダ、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。

島根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及び応力解析モデルの設定、②地震応答解析及び応力解析手法、③解析手法に応じた設計用地震力、④ドライウェルベント開口部の応力解析モデルの設定及び応力解析手法、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、既工認においては3次元はりモデルを用いた地震応答解析により得られた荷重から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、今回工認においては3次元シェラー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出している。

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ダ及びダウンカマの耐震重要度分類が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（許容応力状態Ⅲ_AS）に加え、基準地震動 S_s による評価（許容応力状態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。

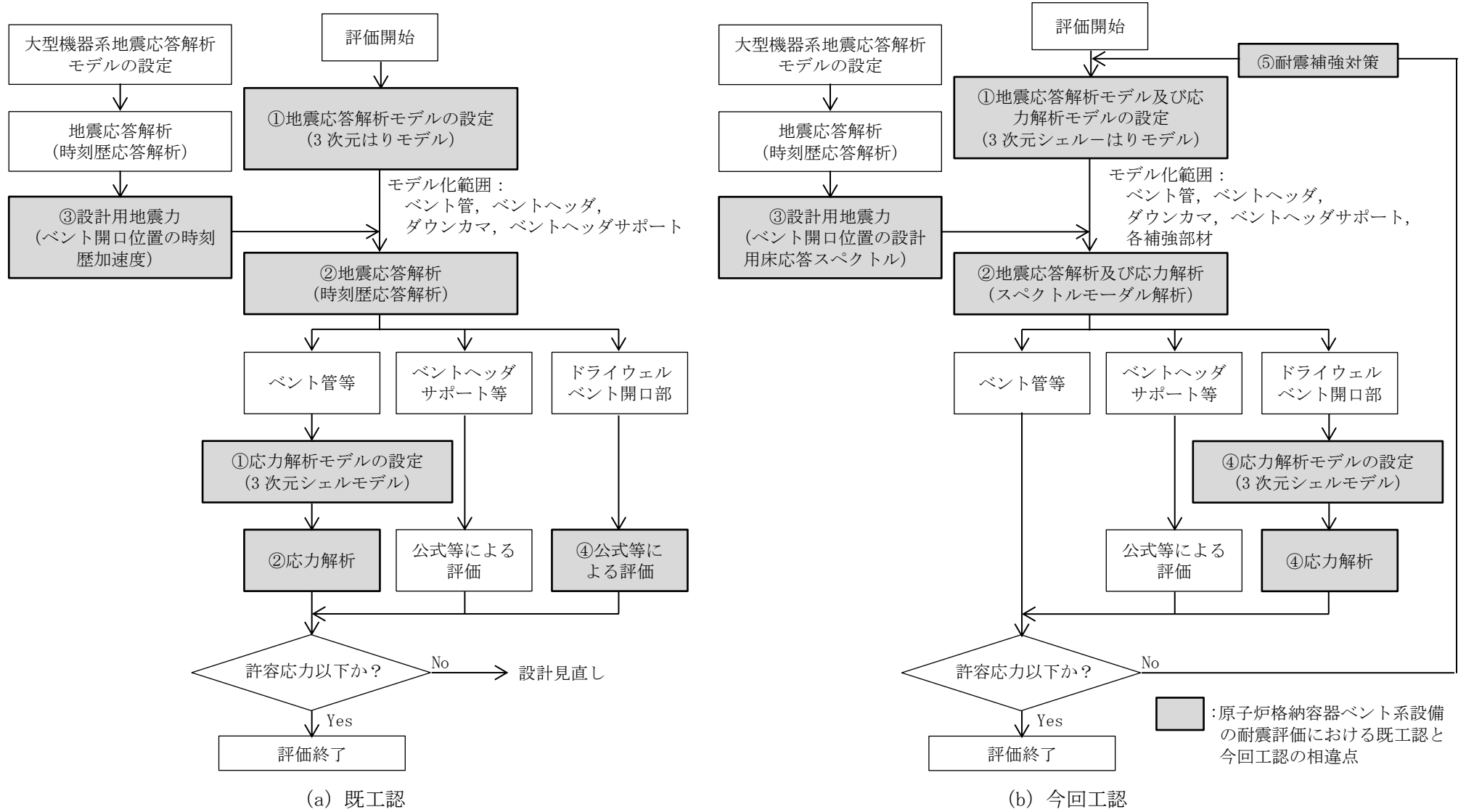


図1 原子炉格納容器ベント系設備等に係る耐震評価フロー

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ブプレッションチェンバ水中とを接続し、ベント管、ベントヘッドより分岐してサブ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カ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ブ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形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。ダウンカマはサブ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本配置した内径 mm、板厚 mm の管形の鋼製構造物であり、ベントヘッドに接続する。

各ベント管のドライウエルベント開口部には、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の構造を図2及び図3に示す。

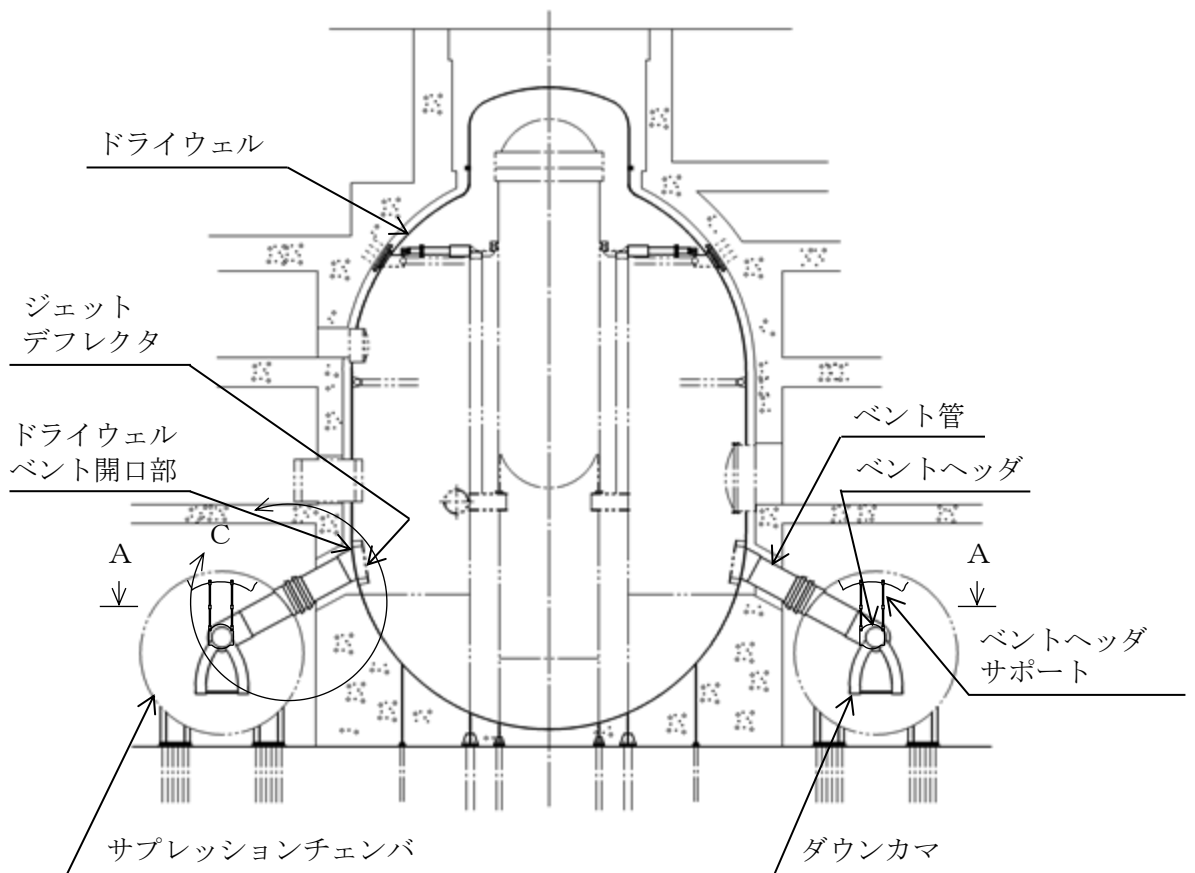


図2 原子炉格納容器ベント系設備構造図 (その1)

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）、重大事故等時のサブ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耐震補強対策も実施し、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、ベントヘッド及びダウンカマの補強構造を図4～図6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">・ベントヘッドとダウンカマの接続部に補強リブを追加
②ベントヘッドサポートの応力を抑制	<ul style="list-style-type: none">・サポートの主要材質及び外径を変更・サポートが取り付く接続部として、サブプレッションチェンバ補強リング（サブプレッションチェンバ側との接続部）及びベントヘッド補強リング（ベントヘッド側との接続部）との取り合い部にパッドを追加し、ピンの材質を変更・ベントヘッドサポート構造を中実（棒）構造から中空（パイプ）構造に変更

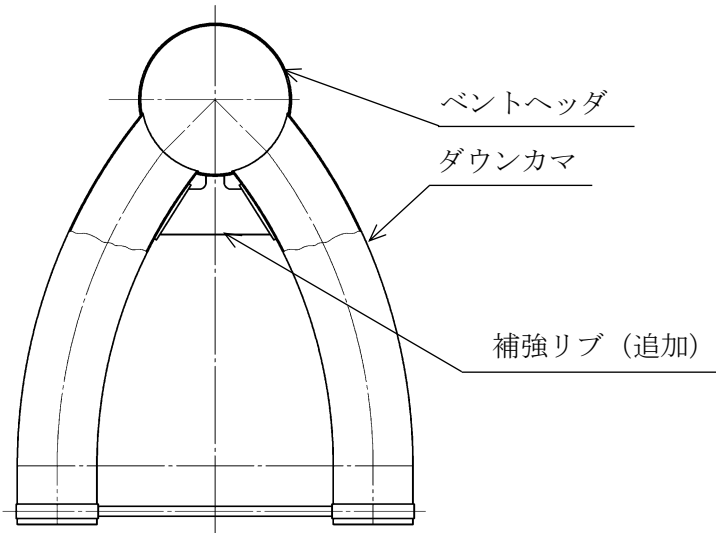


図4 ベントヘッド及びダウンカマの補強構造

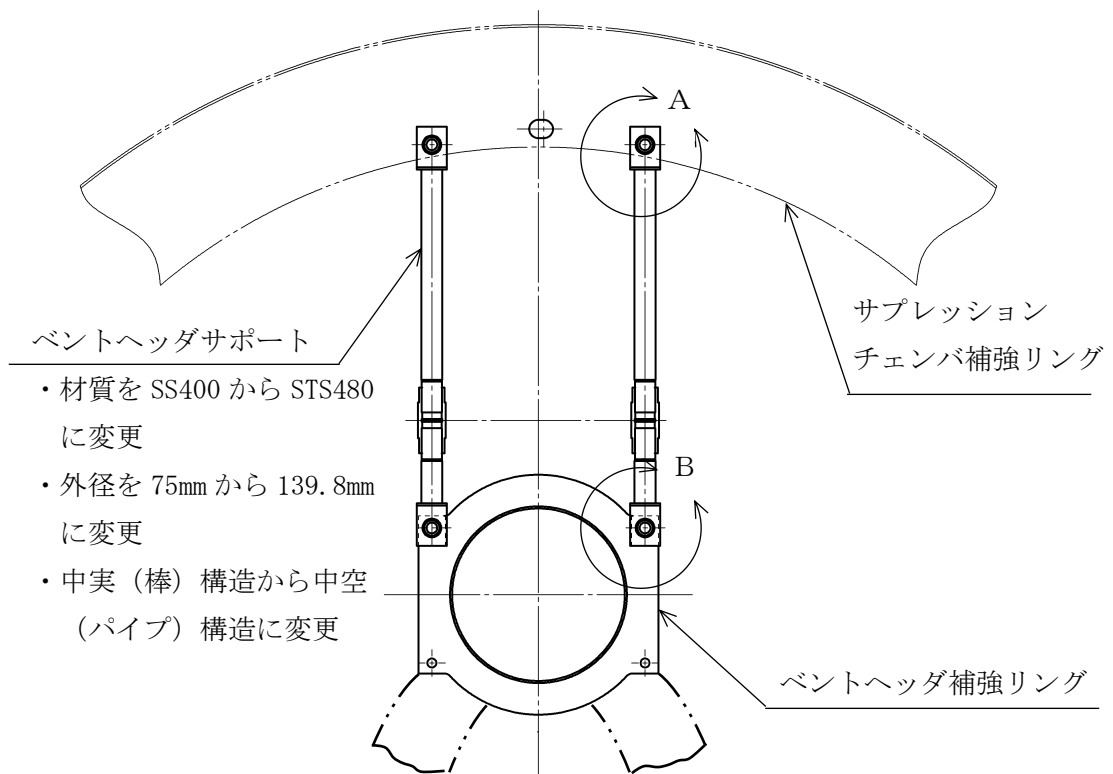
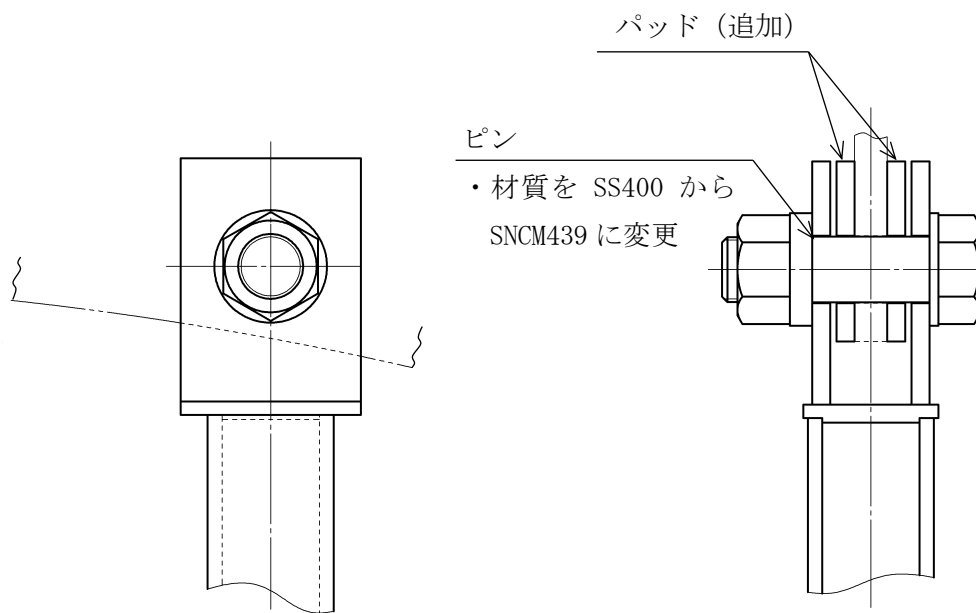
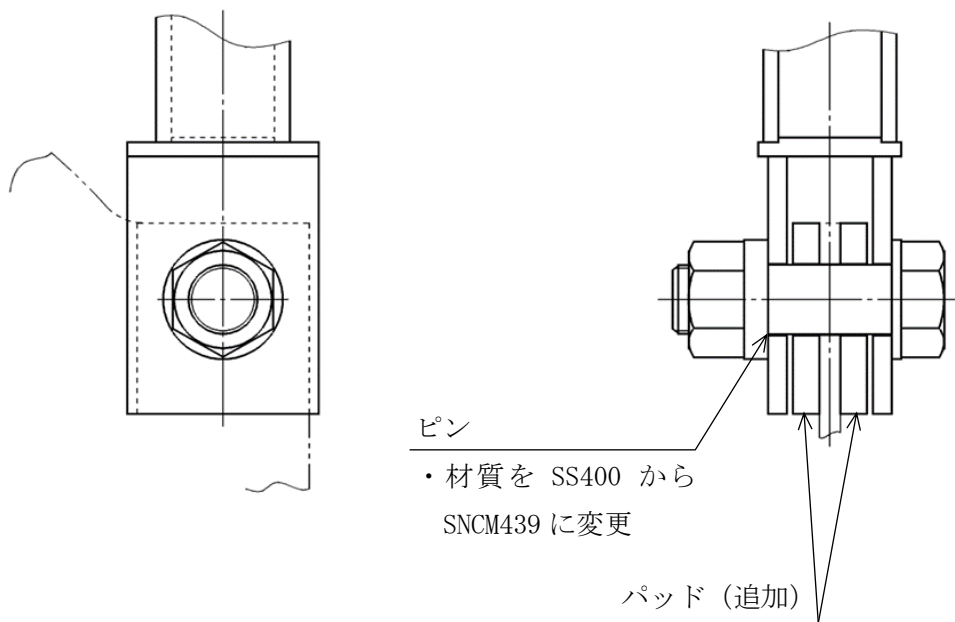


図5 ベントヘッドサポートの補強構造 (その1)



A部詳細図



B部詳細図

図6 ベントヘッドサポートの補強構造 (その2)

(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を追加する。ドライウェルベント開口部の補強構造を図7に示す。

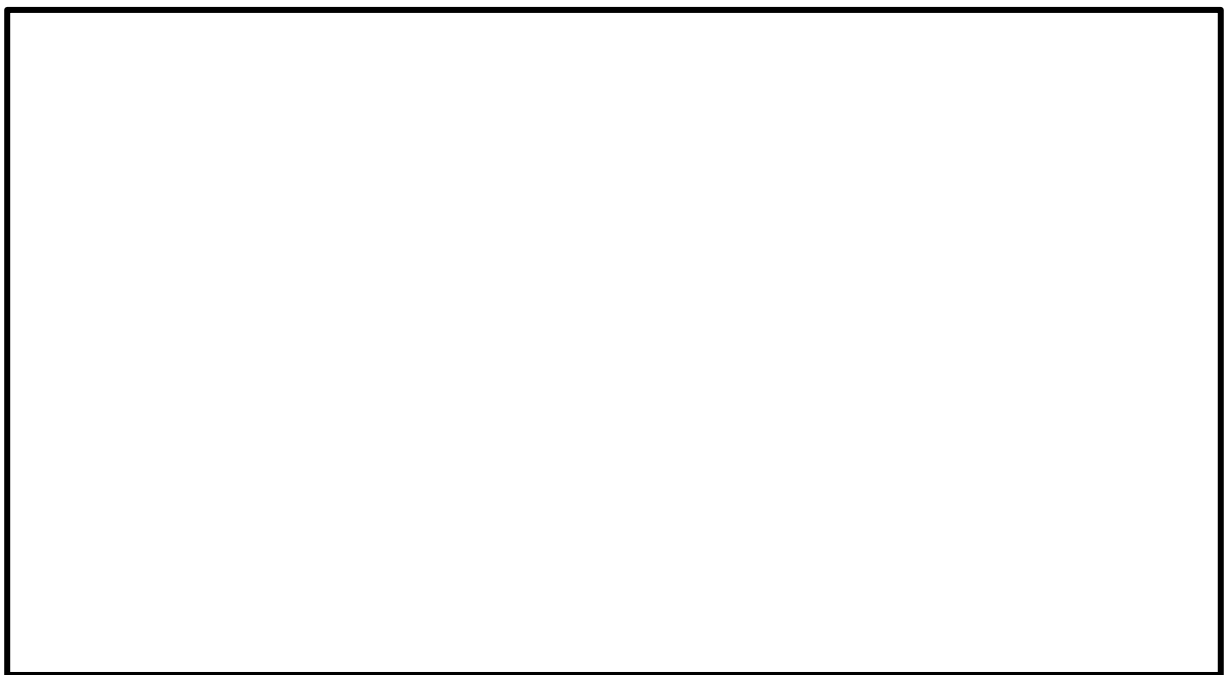
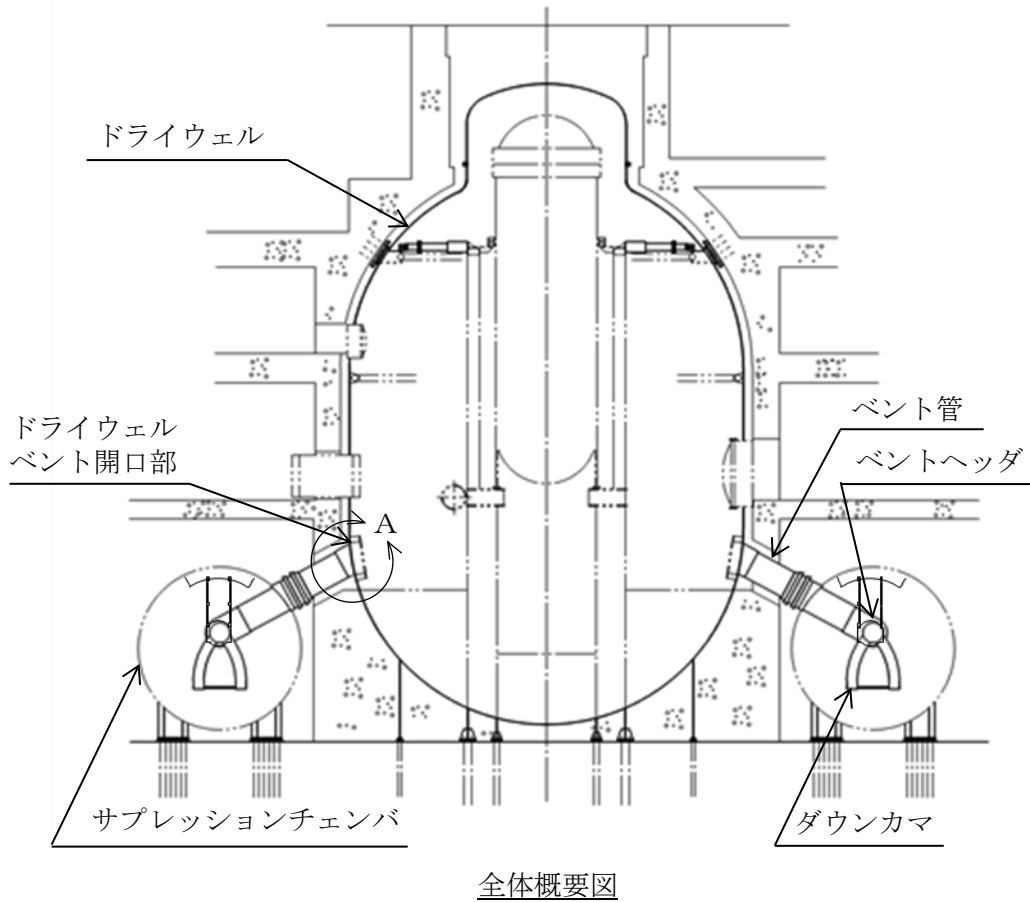


図7 ドライウェルベント開口部の補強構造

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、重大事故等時のサブ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、ベント管、ベントヘッド、ダウンカマ及びベントヘッドサポート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）を用いて時刻歴応答解析を行っていた。

応力解析は、ベント管のヘッド接続部周辺をシェル要素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）を用いて応力を算定していた。また、ヘッド接続部以外のベント管の応力評価点、ベントヘッド（ベントヘッドサポート含む）及びダウンカマは、はり要素の地震荷重から公式等による評価で応力を算出していた。

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、ベント管のヘッド接続部、ベントヘッド及びベントヘッドとダウンカマの結合部をシェル要素で、ベント管とダウンカマの一般部及びベントヘッドサポート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スペクトルを用いた。

ベント管、ベントヘッド及び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「SAP-IV」からシェル要素の解析が実施可能な「MSC NASTRAN」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スペクトルを入力している。入力する設計用床応答スペクトルは、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、ドライウエルベント開口部位置のものをを用いている。参考として、ドライウエルベント開口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8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、ドライウエルベント開口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

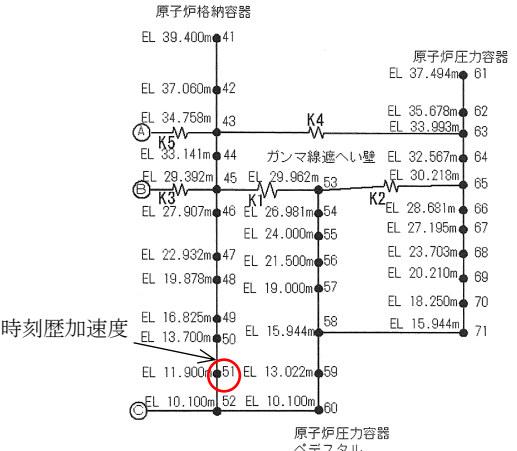
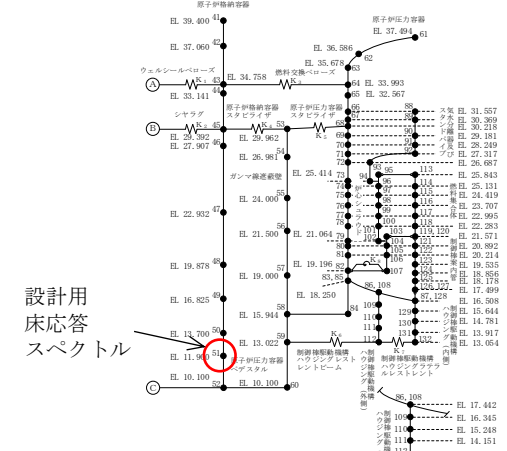
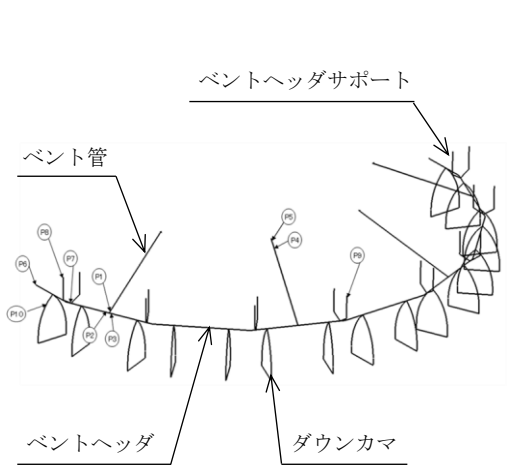
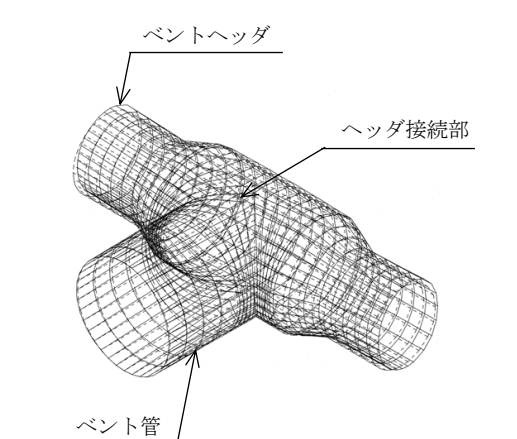
評価	既工認	今回工認
地震応答解析	 <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分の抜粋】（時刻歴応答解析）</p>	 <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分の抜粋】（時刻歴応答解析）</p>
	 <p>3次元はりモデル（時刻歴応答解析）</p>	
応力解析	 <p>3次元部分シェルモデル （ヘッド接続部以外:公式等による評価）</p>	

表3 ドライウェルベント開口部とベントヘッダサポートの地震荷重比較

荷重条件	方向	地震荷重	
		ドライウェル ベント開口部	ベントヘッダ サポート(上端)
運転状態 V (LL) 基準地震動 Ss	並進 (N)	半径方向 F_R	
		周方向 F_θ	
		鉛直方向 F_Z	
	回転 (N・mm)	半径方向まわり M_R	
		周方向まわり M_θ	
		鉛直方向まわり M_Z	

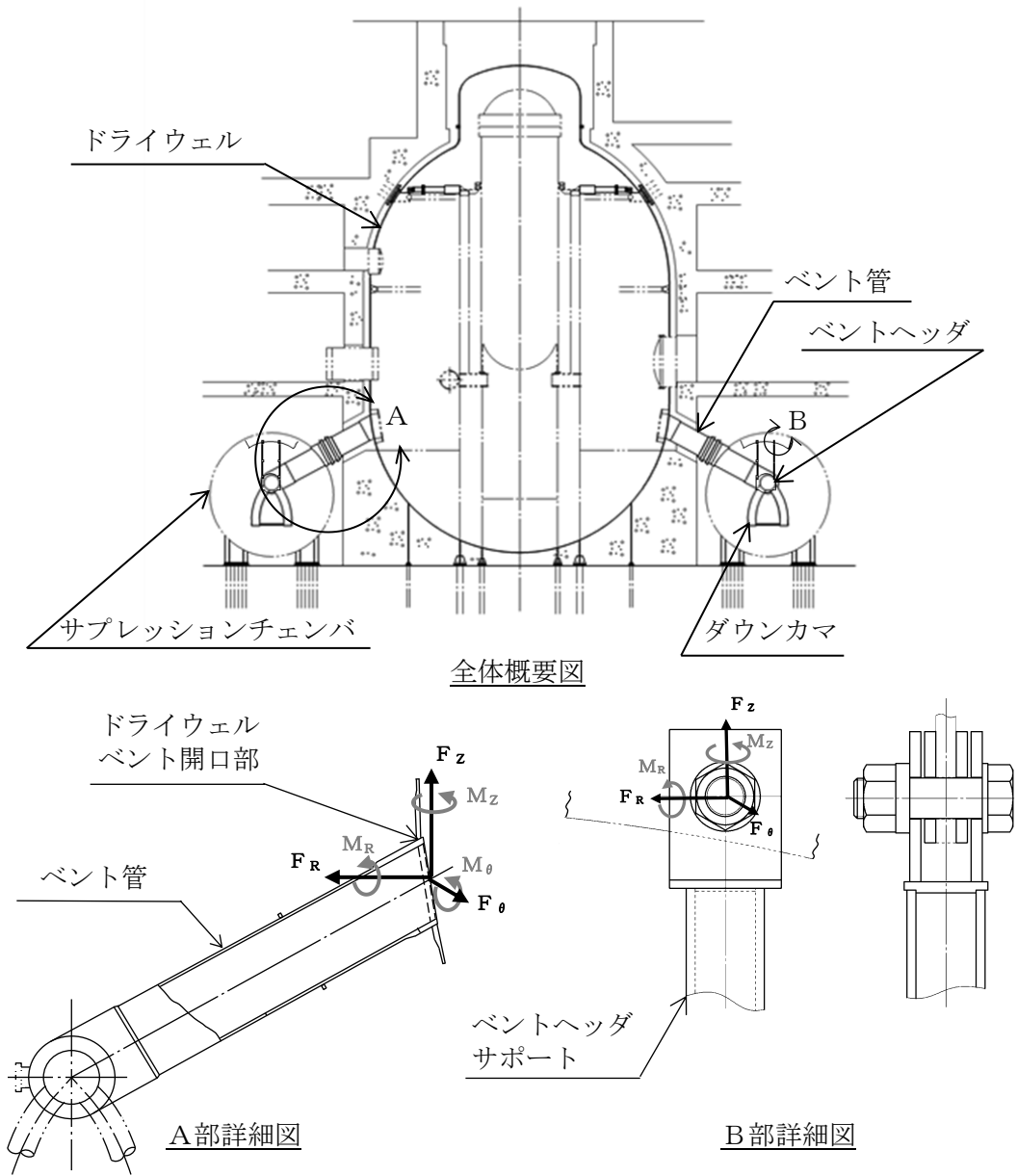


図8 ベント系設備の地震荷重のイメージ

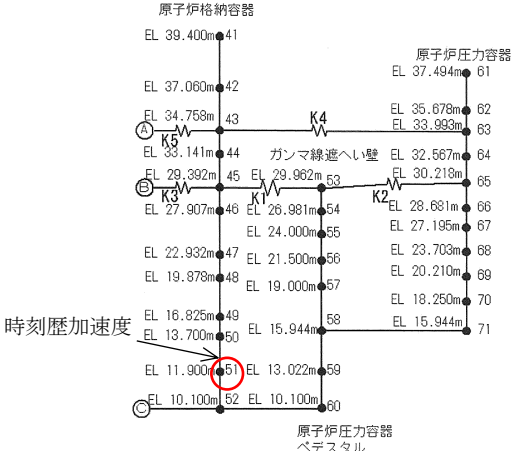
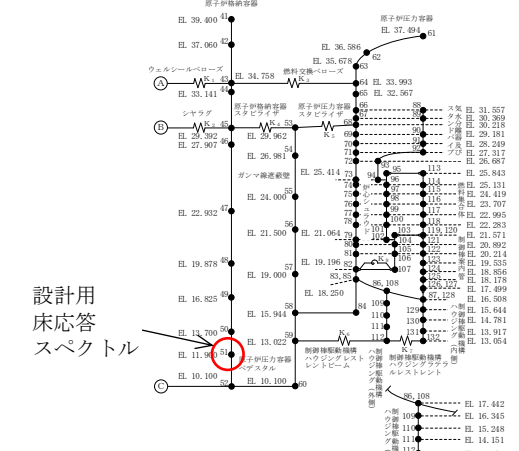
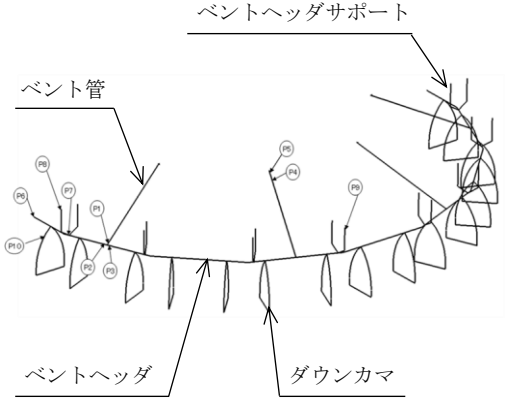
(2) ドライウェルベント開口部

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ていた。

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及びリブ（既設リブ及び補強リブ）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>時刻歴加速度</p> <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分の抜粋】（時刻歴応答解析）</p>	 <p>設計用床応答スペクトル</p> <p>大型機器系地震応答解析モデル 【大型機器部分の抜粋】（時刻歴応答解析）</p>
	 <p>3次元はりモデル（時刻歴応答解析）</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のうち、接続部の局部応力の評価が必要となるベント管のヘッド接続部、ベントヘッド及びベントヘッドとダウンカマの結合部はシェル要素でモデル化し、構造が単純であり円管としてモデル化できるベント管とダウンカマの一般部及び支持構造物として評価するベントヘッドサポートは、はり要素でモデル化した。

原子炉格納容器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9に示す。ここで、ベントヘッドサポートとサブプレッションチェンバ補強リングの締結部については、熱膨張を吸収する構造とするため、図5及び図6に示すピン支持構造としており、地震応答解析モデルとしては、これを模擬する支持条件を与える。なお、ベント管とドライウエルとの結合部のばね剛性は、4.(2)に示すドライウエルベント開口部の解析モデルでの荷重－変位特性により算定している。

表5 ベント系設備のモデル化詳細（その1）

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 サポートとサブ レクションチェ ンバ補強リング との結合部		
	②ベント管とド ライウエルとの 結合部		

表5 ベント系設備のモデル化詳細（その2）

モデル化項目	内容	備考
水の付加質量	付加質量を用いた水位条件： ・ダウンカマ外側 DB条件：EL <input type="text"/> mm （保守的にSA条件と同じとする） SA条件：EL <input type="text"/> mm ・ダウンカマ内側 DB条件：EL <input type="text"/> mm （保守的にSA条件と同じとする） SA条件：EL <input type="text"/> mm	・ダウンカマ外側（はり要素） 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（はり要素）
減衰定数	VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の溶接構造物に対する減衰1.0%を用いる	ダウンカマに内包する水の質量を考慮 ・ダウンカマ外側及び内側（シェル要素） NASTRANの仮想質量法により定義

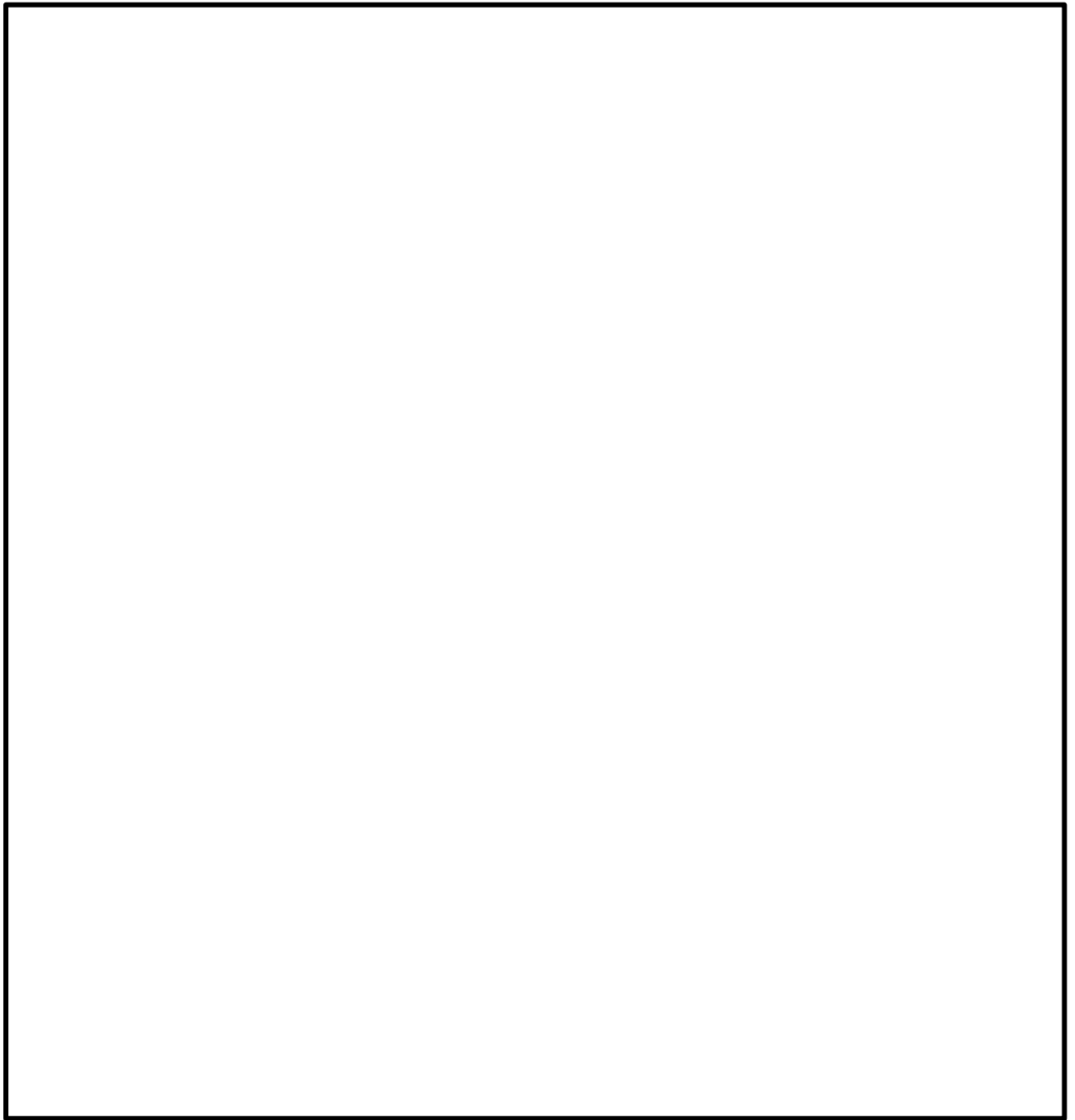


図9 原子炉格納容器ベント系設備の地震応答解析モデル図

(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及びリブ（既設リブ及び補強リブ）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 6 に、ドライウェルベント開口部の解析モデル図を図 10 及び図 11 に示す。

表 6 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 10 及び図 11 参照)			
拘束条件	①ドライウェル円筒部 (モデル上端部)		
	②ドライウェル円筒部 及び球形部 (モデル側端部)		
	③サンドクッション部 下端以下		

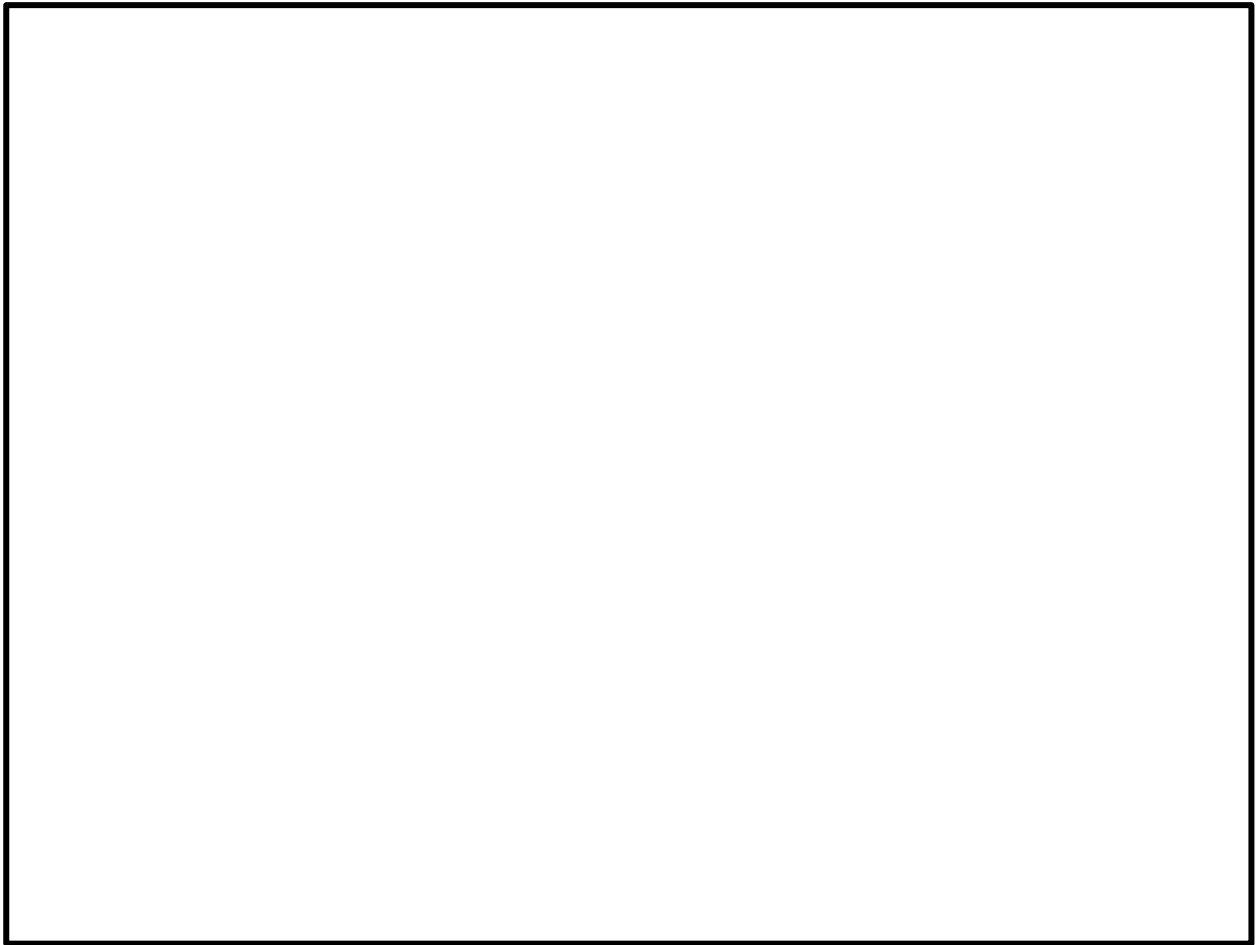


図 10 ドライウェルベント開口部の解析モデル図（全体）



図 11 ドライウェルベント開口部の解析モデル図（D/W 内側から見る）

5. 既工認からの相違点に関する島根2号機への適用性まとめ

島根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7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7 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次元シェルはりモデル	先行プラントの原子炉格納容器ベント系設備で3次元シェルはりモデルを適用
地震応答解析手法	時刻歴応答解析	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	ドライウエルベント開口部の時刻歴加速度	ドライウエルベント開口部の設計用床応答スペクトル	配管等で地震応答解析にスペクトルモーダル解析を実施する際に設計用床応答スペクトルを適用
ドライウエルベント開口部における応力解析モデルの設定	Bijlaard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の既工認においてベント管のヘッド接続部の評価に3次元シェルモデルを適用
耐震補強対策	—	<ul style="list-style-type: none"> 発生応力を抑制するための部材追加（補強リブ、パッド）及びベントヘッドサポートの主要材質の変更 ベントヘッドサポートの断面構造変更（中空（パイプ）構造） 	既工認での構造設計や先行プラントの耐震対策と同等