

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	O2-他-F-19-0044_改2
提出年月日	2021年 9月10日

女川原子力発電所第2号機 機器・配管系の耐震評価に係る既工認からの相違点について

2021年9月10日
東北電力株式会社

1. 設計及び工事の計画の申請に係る論点整理について

■ 説明内容

- 第●●●回審査会合における指摘事項に対する回答について説明する。

資料No.	説明項目(指摘事項に対する回答)	関連する 主な説明事項*1
資料●-2	■ ■ ■ ● 第●●●回審査会合(2021年●月●日)における指摘事項への回 答	▲-▲

*1 第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(令和2年7月14日)において説明した主要説明項目番号

2. 主な説明事項に係る対応状況(1/4)

■ 説明内容①

➤ 第876回審査会合(令和2年7月14日)にて示した主な説明事項に係る対応状況について説明する。

(1) 設置変更許可審査時からの設計変更内容

No.	説明項目	説明状況
1-1	漂流物防護工の追加	第993回審査会合にて説明, 資料●-2

(2) 詳細設計申送り事項

No.	説明項目	説明状況
2-1	地下水位の設定, 耐震評価における断面選定 ・地下水位低下設備の設計方針 ・地下水位の設定 ・耐震評価における断面選定の考え方	第952, 979, 988, 1003回審査会合にて説明済 (第988回審査会合にて説明済) (第952, 979, 1003回審査会合にて説明済) (第979, 1003回審査会合にて説明済)
2-2	竜巻防護ネットの構造評価	第993回審査会合にて説明済
2-3	サプレッションチェンバの耐震評価	第988回審査会合にて説明済
2-4	3.11地震等の影響を踏まえた建屋の耐震評価	第970, 997回審査会合にて説明済
2-5	津波漂流物の衝突荷重	第970, 988回審査会合にて説明済
2-6	建屋の地震影響を踏まえた機器・配管系の耐震評価	第979, 1003回審査会合にて説明済
2-7	後施工せん断補強筋(CCb工法)の適用性	第1003回審査会合にて説明済
2-8	防潮堤の詳細設計結果	第993回審査会合にて説明済
2-9	原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置	第993回審査会合にて説明済

(3) 新たな規制要求(バックフィット)への対応事項

No.	説明項目	説明状況
3-1	安全系電源盤に対する高エネルギーアーク(HEAF)火災対策	第993回審査会合にて説明済

2. 主な説明事項に係る対応状況(2/4)

■ 説明内容②

- 審査の中で論点として整理された項目に係る対応状況について説明する。

(4) 設置変更許可審査時からの変更等があり, 説明が必要な項目

No.	説明項目	説明状況
4-1	使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数	第988, ●●●回審査会合にて説明。
4-2	制御棒挿入性評価	第993, 1003回審査会合にて説明済
4-3	メカニカルスナッパの耐震評価	第979, 997回審査会合にて説明済

2. 主な説明事項に係る対応状況(3/4)

■ 説明内容③

➤ 耐震評価に関し、説明が必要な項目について説明する。

: 今回提出範囲

(5)耐震評価に関し、説明が必要な項目 (1/2)

No.	説明項目	概要	先行実績	説明資料
5-1	原子炉建屋屋根トラスの耐震評価			●ページ参照
5-2	建屋剛性の不確かさケースを含めた地震応答解析結果を踏まえた機器・配管系の耐震評価結果(設計成立性)			●ページ参照
5-3	原子炉本体の基礎への非線形復元力特性の適用	原子炉本体の基礎について、適正な地震応答に基づく評価を行うためコンクリートの剛性変化を考慮した非線形解析モデルを適用する。	柏崎刈羽7号機 新規制基準 対応工認	●ページ参照
5-4	最新知見として得られた減衰定数の適用	原子炉建屋クレーン、海水ポンプ室門型クレーン、燃料交換機及び配管系について最新知見として得られた減衰定数を適用する。	大間1号機 建設工認	●ページ参照
5-5	シュラウドヘッドの応力評価への公式等による評価の適用	シュラウドヘッドについて、設計の簡便性を考慮して公式等による評価を適用する。	大間1号機 建設工認	●ページ参照
5-6	炉内計装設備の応力評価へのスペクトルモーダル解析の適用	炉内計装設備について、設計の保守性及び簡便性を考慮してスペクトルモーダル解析を適用する。	大間1号機 建設工認	●ページ参照
5-7	水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根(SRSS)法による組合せ	機器・配管系設備について、鉛直方向に動的地震力が追加されたことに伴い、二乗和平方根(SRSS)法を適用する。	大間1号機 建設工認	●ページ参照
5-8	たて軸ポンプの解析モデルの精緻化	たて軸ポンプについて、精緻化した地震応答解析モデルを適用する。	大間1号機 建設工認	●ページ参照
5-9	原子炉建屋クレーン及び海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用	原子炉建屋クレーン及び海水ポンプ室門型クレーンについて、すべりや浮上りを考慮した評価を実施するため非線形時刻歴応答解析を適用する。	大間1号機 建設工認	●ページ参照

2. 主な説明事項に係る対応状況(4/4)

■ 説明内容③

➤ 耐震評価に関し、説明が必要な項目について説明する。

: 今回提出範囲

(5)耐震評価に関し、説明が必要な項目 (2/2)

No.	説明項目	概要	先行実績	説明資料
5-10	鉛直方向応答解析モデルの追加	鉛直方向に動的地震力が追加されたことに伴い、鉛直方向の建屋-機器連成解析モデルを適用する。	大間1号機 建設工認	●ページ参照
5-11	応答倍率評価の適用	原子炉圧力容器関連及び原子炉格納容器関連の強度評価並びに耐震評価において、既工認の評価を元にして応答倍率評価を適用する。	柏崎刈羽7号機 新規制基準 対応工認	●ページ参照
5-12	炉心シュラウド支持ロッドの解析モデルの精緻化	炉心シュラウド支持ロッドについて、地震応答を精緻に算出するために、実機形状に合わせて精緻化した解析モデルを適用する。	大間1号機 建設工認	●ページ参照
5-13	流体中の構造物についての付加質量の考慮及び排除水質量による応答低減の考慮	流体の付加質量及び排除水体積質量による応答低減効果の考慮について、一部設備では既工認から考慮方法を変更して評価を実施する。	柏崎刈羽7号機 新規制基準 対応工認	●ページ参照
5-14	原子炉格納容器ベント系設備の解析モデルの精緻化	原子炉格納容器ベント系設備(ベント管、ベントヘッド、ダウンカマ)は、今回工認で実施した耐震補強対策を踏まえた精緻な耐震評価を実施するために、精緻化した解析モデルを適用する。	柏崎刈羽7号機 新規制基準 対応工認	●ページ参照
5-15	動的機能維持の詳細評価	動的機能維持評価において、JEAG4601に基づく評価方法を適用できない一部設備については、詳細検討、新たな検討又は加振試験によって評価を行う。	美浜3号機 新規制基準 対応工認	●ページ参照
5-16	等価繰返し回数の設定	機器・配管系の疲労評価に適用する等価繰返し回数については、基準地震動Ss等を考慮して新たな回数を設定する。	柏崎刈羽7号機 新規制基準 対応工認	●ページ参照

【5-3】原子炉本体の基礎への非線形復元力特性の適用

1. 概要

原子炉本体の基礎は鋼板とコンクリートで構成された構造物であるが、既工認においては剛性一定の線形を前提とした解析を実施していた。今回工認では基準地震動のレベルが増大し、原子炉本体の基礎の地震応答が線形領域を超えることから、適正な地震応答に基づく評価を行うために、コンクリートの剛性変化を考慮した非線形解析モデルを適用する。なお、本手法は柏崎刈羽7号機の新規規制基準対応工認で適用実績がある。

【既工認】剛性一定の線形特性

【今回工認】コンクリートの剛性変化を考慮した非線形特性

2. 実施内容

- 原子炉本体の基礎の復元力特性について、スケルトンカーブの設定に用いるコンクリート強度の設計条件は、既工認と同様に設計基準強度を用いる。
- また、建屋側でコンクリートの初期剛性低下が確認されていることから、建屋側と同様に初期剛性低下を考慮した地震応答解析も行い耐震評価に適用する（スケルトンカーブの例を図5-3-2に示す。）。
- 上記のスケルトンカーブを適用した建屋-機器連成解析を行い、原子炉本体の基礎については鋼板のみに期待した構造強度評価を行う。

3. 耐震評価結果

- 非線形復元力特性を考慮した地震応答解析結果を用いた耐震評価を行い、原子炉本体の基礎について、算出応力度が許容応力度以下であることを確認した（表5-3-1参照）。

4. 説明図書

補足説明資料「補足-600-8-3 建屋-機器連成解析モデルにおける原子炉本体の基礎の非線形復元力特性等の設定に関する補足説明資料」

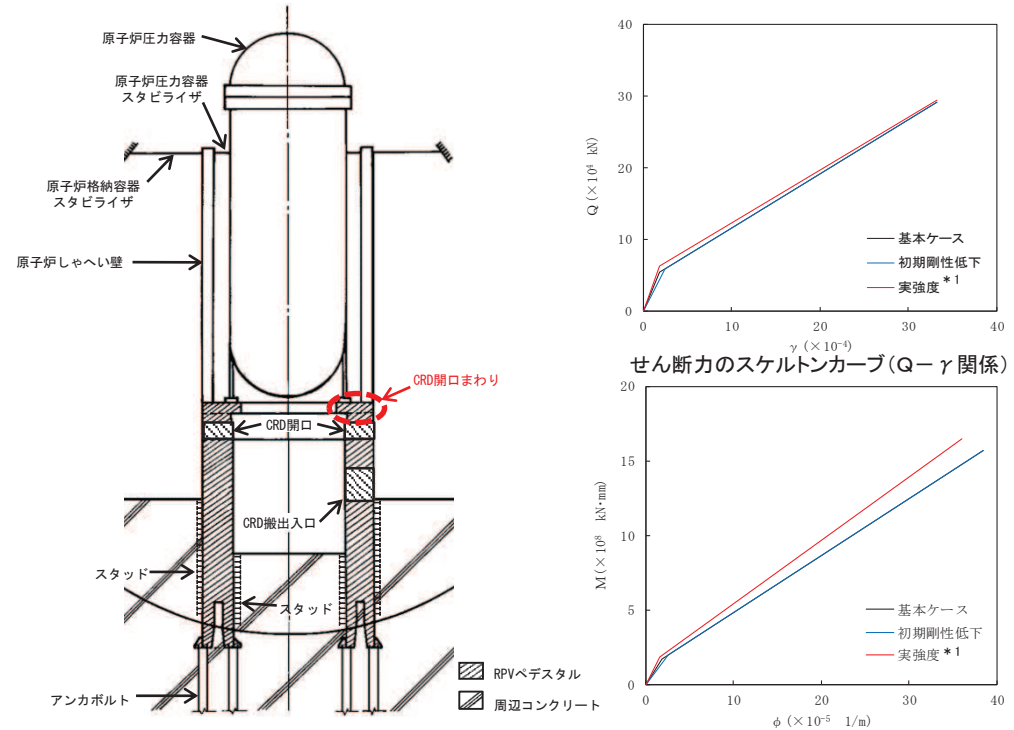


図5-3-1 原子炉本体の基礎の構造概要図

曲げモーメントのスケルトンカーブ(M-φ関係)

注記*1: 実強度は影響検討として実施。

図5-3-2 スケルトンカーブの例

表5-3-1 原子炉本体の基礎の耐震評価結果*2

評価部位	応力分類	算出応力度 (N/mm ²)	許容応力度 (N/mm ²)
CRD開口まわり	せん断応力度	151	245

注記*2: 基準地震動Ssに対する裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

【5-4】最新知見として得られた減衰定数の適用

1. 概要

原子炉建屋クレーン、海水ポンプ室門型クレーン、燃料交換機及び配管系について最新知見として得られた減衰定数を適用する。なお、適用する最新の減衰定数については、大間1号機建設工認で適用実績がある。

2. 実施内容

- 原子炉建屋クレーン、海水ポンプ室門型クレーン、燃料交換機及び配管系について、既往の研究成果*1,2,3より表5-4-1, 2に示す減衰定数が最新知見として得られている。
- 原子炉建屋クレーン、海水ポンプ室門型クレーン及び燃料交換機については、適用実績のある先行プラントのクレーンとの構造類似性などを確認し、女川2号機への適用性を確認した。
- 配管系について、既往の研究成果はBWRプラントの実機配管の仕様も考慮して網羅的に検討対象を選定していることから、女川2号機への適用性に問題はない。
- 以上より、最新知見として得られた減衰定数は、女川2号機の耐震評価に対して適用性があると判断している。

注記*1: 電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究(H7~H10)」
 *2: 電力共通研究「機器・配管系に対する合理的耐震評価手法に関する研究(H12~H13)」
 *3: (財)原子力工学試験センター「BWR 再循環系配管耐震実証試験(S55~S60)」

3. 耐震評価結果

- 最新知見として得られた減衰定数を適用して各設備の耐震評価を行い、耐震性が確保されていることを確認した。

4. 説明図書

添付書類「VI-2-1-6 地震応答解析の基本方針」及び「VI-2-11-2-1 海水ポンプ室門型クレーンの耐震性についての計算書」他並びに補足説明資料「補足-600-2 耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点の整理について」

表5-4-1 クレーン及び燃料交換機の設計用減衰定数

設備	設計用減衰定数(%)			
	水平方向		鉛直方向	
	JEAG4601*4	女川2号機 今回工認*5	JEAG4601*4	女川2号機 今回工認*5
クレーン	1.0	2.0	—	2.0
燃料交換機	1.0	2.0	—	1.5(2.0)*6

表5-4-2 配管系の設計用減衰定数

配管区分		設計用減衰定数*7(%)			
		保温材無		保温材有*8	
		JEAG 4601*4	女川2号機 今回工認*5	JEAG 4601*4	女川2号機 今回工認*5
I	スナッパ及び架構レストレイント支持主体の配管系で、支持具(スナッパ又は架構レストレイント)の数が4個以上のもの	2.0	同左	2.5	3.0
II	スナッパ、架構レストレイント、ロッドレストレイント、ハンガ等を有する配管系で、アンカ及びUボルトを除いた支持具の数が4個以上であり、配管区分Iに属さないもの	1.0	同左	1.5	2.0
III	Uボルトを有する配管系で、架構で水平配管の自重を受けるUボルトの数が4個以上のもの*9	—	2.0	—	3.0
IV	配管区分I、II及びIIIに属さないもの	0.5	同左	1.0	1.5

□ : 新たに設定したもの □ : JEAG4601*4から見直したもの

注記*4: 原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991追補版(社団法人日本電気協会)。

*5: 女川原子力発電所第2号機にて適用する設計用減衰定数。

*6: ()外は、燃料交換機のトリロリ位置が端部にある場合、()内は、燃料交換機のトリロリ位置が中央部にある場合。

*7: 水平方向及び鉛直方向の設計用減衰定数は同じ値を使用。

*8: 保温材有の設計用減衰定数は、無機多孔質保温材による付加減衰定数として1.0%を考慮したものである。金属保温材による付加減衰定数は、配管ブロック全長に対する金属保温材使用割合が40%以下の場合1.0%を適用してよいが、金属保温材使用割合が40%を超える場合は0.5%とする。

*9: 区分III(Uボルトを有する配管系)については、新たに設定したものであり、現行JEAG4601では区分IVに含まれている。

【5-5】シュラウドヘッドの応力評価への公式等による評価の適用

1. 概要

シュラウドヘッドの応力評価について、今回工認では設計の簡便性を考慮して公式等による評価を適用する。なお、シュラウドヘッドへの公式等による評価の適用は大間1号機の建設工認で適用実績がある。

【既工認】有限要素法(FEM)解析による評価

【今回工認】公式等による評価

2. 実施内容

- 既工認においては、差圧及び死荷重による構造不連続部の影響を含む一次＋二次応力評価が必要なため、一次応力評価を含めてFEM解析で評価を実施していた。
- 今回工認では、差圧及び死荷重による一次応力評価結果について、既工認におけるFEM解析による評価結果を引用し、水平及び鉛直方向地震による一次応力評価に対しては材料力学の公式等を適用することで、FEM解析を行わずに簡便に評価を行った（表5-5-1参照）。

表5-5-1 既工認及び今回工認での耐震評価項目及び評価手法の整理

評価項目	荷重の種類	既工認		今回工認
		強度評価	耐震評価	耐震評価
		許容応力状態 I _A , II _A	許容応力状態 III _A S, IV _A S	許容応力状態 III _A S, IV _A S
一次一般膜応力 及び 一次一般膜＋一次曲げ応力	差圧／死荷重	FEM	FEM	既工認を引用
	鉛直方向地震	評価対象外	FEM	公式による評価
	水平方向地震	評価対象外	公式による評価	公式による評価
一次＋二次応力	差圧／死荷重	FEM	評価対象外	評価対象外

表5-5-2 シュラウドヘッドの耐震評価結果*

3. 耐震評価結果

- 公式等による耐震評価を行い、シュラウドヘッドの発生応力が許容応力以下であることを確認した（表5-5-2参照）。

評価部位	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
シュラウドヘッド	一次一般膜＋一次曲げ応力	151	245

注記*：基準地震動Ssに対する裕度（許容応力度／算出応力度）が最小となる評価結果を代表で記載。

4. 説明図書

添付書類「VI-2-3-4-3-4 シュラウドヘッドの耐震性についての計算書」及び補足説明資料「補足-600-2 耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点の整理について」

【5-6】炉内計装設備の応力評価へのスペクトルモーダル解析の適用

1. 概要

炉内計装設備(中性子束計測案内管, 起動領域モニタ, 出力領域モニタ)の耐震評価について, 今回工認では設計の保守性及び簡便性を考慮してスペクトルモーダル解析による評価を適用する。なお, 炉内計装設備へのスペクトルモーダル解析の適用は大間1号機の建設工認で適用実績がある。

【既工認】時刻歴応答解析による評価

【今回工認】スペクトルモーダル解析による評価

2. 実施内容

(図5-6-1,2に起動領域モニタの例を示す。)

- 時刻歴応答解析の場合, スペクトルモーダル解析で考慮するスペクトルの±10%拡幅分の保守性について検討が必要であることから, 耐震評価の保守性, 簡便性を考慮してスペクトルモーダル解析を適用し評価を行った。
- 炉内計装設備の構造及び解析モデルについては既工認と差はなく, 解析手法のみを変更している。

3. 耐震評価結果

- スペクトルモーダル解析を適用して耐震評価を行い, 炉内計装設備の発生応力が許容応力以下であることを確認した(表5-6-1参照)。

表5-6-1 起動領域モニタの耐震評価結果*

評価部位	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
パイプ	一次一般膜+ 一次曲げ応力	352	424

注記*: 炉内計装設備から起動領域モニタの評価結果を代表として記載。また, 基準地震動Ssに対する裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

4. 説明図書

添付書類「VI-2-3-4-3-11 中性子束計測案内管の耐震性についての計算書」, 「VI-2-6-5-1-1 起動領域モニタの耐震性についての計算書」, 「VI-2-6-5-1-2 出力領域モニタの耐震性についての計算書」及び補足説明資料「補足-600-2 耐震評価対象の網羅性, 既工認との手法の相違点の整理について」

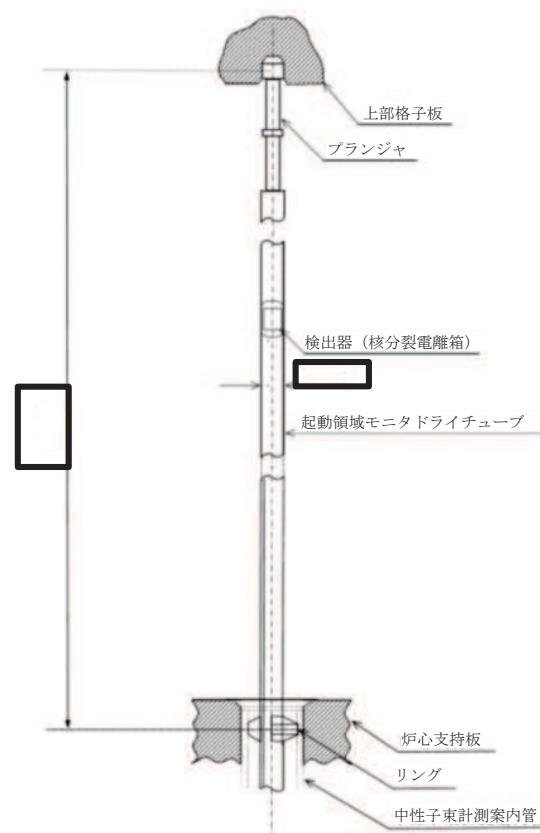


図5-6-1 起動領域モニタ構造図

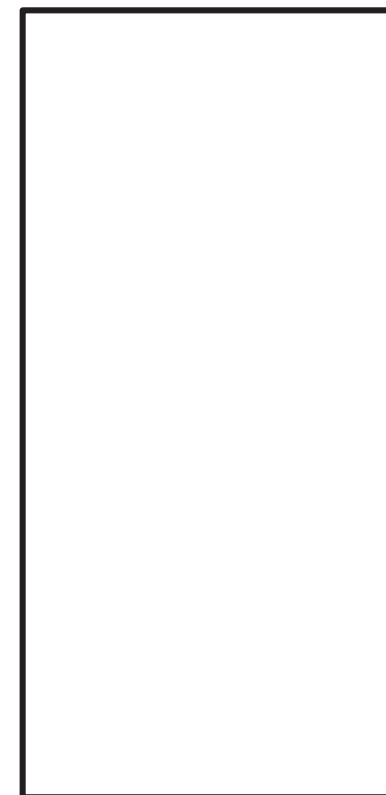


図5-6-2 起動領域モニタ解析モデル図

【5-7】水平方向と鉛直方向の動的地震力の二乗和平方根(SRSS)法による組合せ

1. 概要

水平方向及び鉛直方向の動的地震力の組合せ法として、今回工認では鉛直方向に動的地震力が追加されたことに伴い、二乗和平方根(Square Root of the Sum of the Squares)法(以下「SRSS法」という。)を適用する。
 なお、本手法は大間1号機の建設工認で適用実績がある。

【既工認】基準地震動による水平方向荷重と静的地震力等による鉛直方向荷重を絶対値和による組合せ

【今回工認】基準地震動による水平方向及び鉛直方向の最大荷重をSRSS法による組合せ

2. 実施内容

- 今回工認では鉛直方向に動的地震力が追加されたことから、地震力の組合せ方法としてSRSS法の適用を検討した。
- 女川2号機の地震応答について水平方向及び鉛直方向それぞれの最大応答値の生起時刻に差があることを確認した(表5-7-1, 図5-7-1参照)。
- 既往知見*2では、SRSS法と同時入力による時刻歴応答解析法による応力を比較し、SRSS法が保守的な結果となることが確認されている。
- 以上より、SRSS法は女川2号機の耐震評価に対して適用性があると判断している。

注記*2: 電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究(ステップ2)」(平成7年~平成10年)

3. 耐震評価結果

- 本手法を適用して各設備の耐震評価を行い、耐震性が確保されていることを確認した。

4. 説明図書

添付書類「VI-2-5-2-1-1 管の耐震性についての計算書(原子炉再循環系)」他及び補足説明資料「補足-600-2 耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点の整理について」

表5-7-1 最大応答値の生起時刻の差(女川2号機原子炉建屋)*1

位置(m)	最大応答値の生起時刻(秒)		生起時刻の差(秒)
	水平方向	鉛直方向	
50.500	24.0	17.9	6.1
41.200	13.5	21.6	8.1
33.200	13.6	23.6	10.0
22.500	20.4	23.6	3.2
15.000	20.4	23.6	3.2
6.000	20.4	23.6	3.2
-0.800	20.4	23.5	3.1
-8.100	20.4	11.4	9.0

注記*1: 設備評価に支配的な基準地震動Ss-D2に対する確認を実施

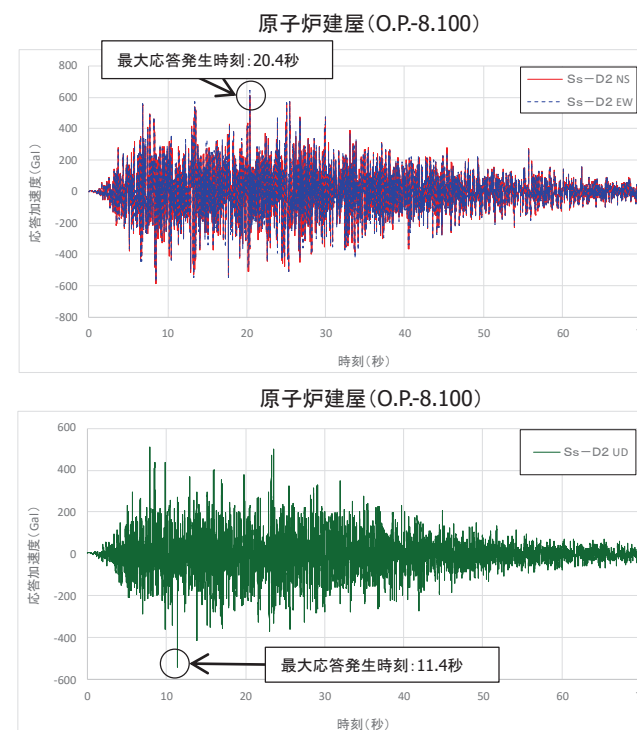


図5-7-1 女川2号機原子炉建屋の地震応答(O.P.-8.1の例)

【5-8】たて軸ポンプの解析モデルの精緻化

1. 概要

たて軸ポンプ(高圧炉心スプレイ系ポンプ, 低圧炉心スプレイ系ポンプ, 残留熱除去系ポンプ, 原子炉補機冷却海水ポンプ, 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ)について, 今回工認では精緻化した地震応答解析モデルを適用する。なお, たて軸ポンプの解析モデル精緻化については大間1号機の建設工認で適用実績がある。

【既工認】立形ポンプの構造を模擬したバレル部及びポンプケーシングによる3軸の質点系モデルで評価。
海水ポンプについては1軸でモデル化。

【今回工認】既工認モデルに対して, 基礎部の取付フランジの剛性を回転ばねとして設定。
海水ポンプは, 1軸から3軸へ変更。

2. 実施内容

(図5-8-1に原子炉補機冷却海水ポンプの例を示す。)

- 今回工認での解析モデルは, 地震応答を精緻に算出することを目的に, JEAG4601-1991追補版に基づきモデルを精緻化した。

3. 耐震評価結果

- 精緻化した解析モデルを適用して耐震評価を行い, たて軸ポンプの発生応力が許容応力以下であることを確認した(表5-8-1参照)。

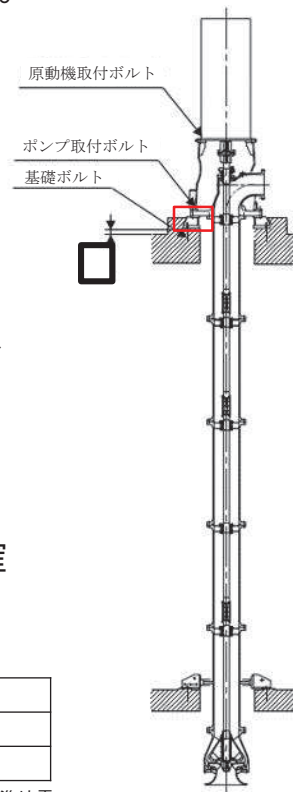
表5-8-1 原子炉補機冷却海水ポンプの耐震評価結果*

評価部位	応力分類	発生応力(MPa)	許容応力(MPa)
原動機取付ボルト	引張	392	451
	せん断	134	366

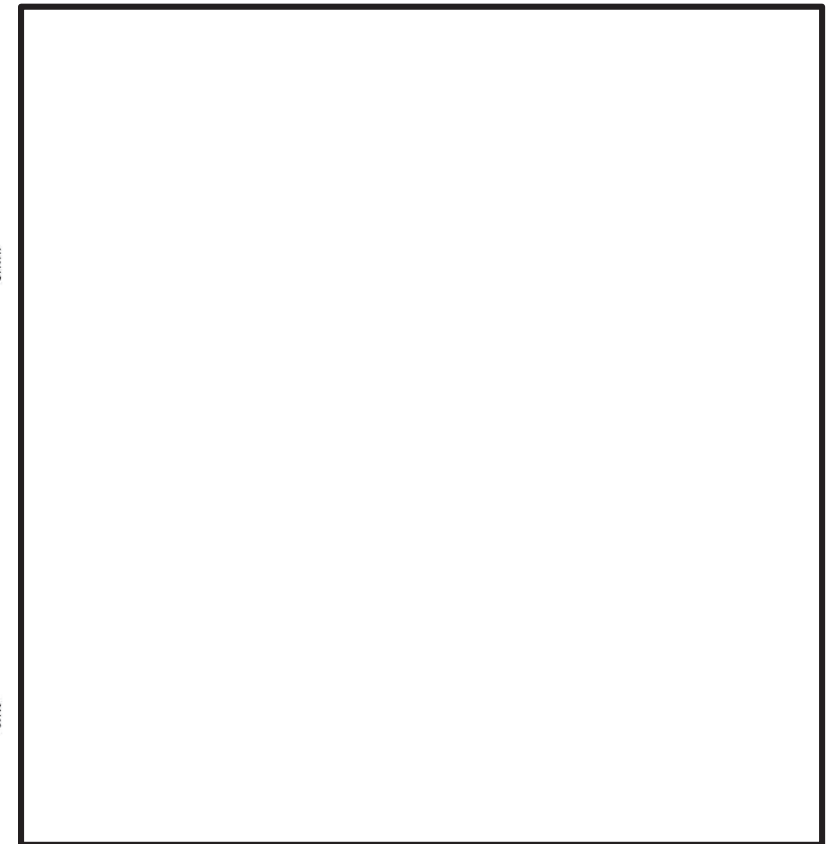
注記*: たて軸ポンプから原子炉補機冷却海水ポンプの評価結果を代表として記載。また, 基準地震動Ss1に対する裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

4. 説明図書

添付書類「VI-2-5-4-1-2 残留熱除去系ポンプの耐震性についての計算書」他及び補足説明資料「補足-600-2 耐震評価対象の網羅性, 既工認との手法の相違点の整理について」



構造概要図



既工認解析モデル

今回工認解析モデル

図5-8-1 原子炉補機冷却海水ポンプの解析モデル図

【5-9】原子炉建屋クレーン及び海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴 応答解析の適用

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

1. 概要

原子炉建屋クレーン及び海水ポンプ室門型クレーン(以下「クレーン」という。)の耐震評価について、すべりや浮上りを考慮した評価を実施するため非線形時刻歴応答解析を適用する。なお、クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用は大間1号機の建設工認で適用実績がある。

【既工認】理論式による評価(海水ポンプ室門型クレーンは評価対象外)

【今回工認】すべりや浮上りを考慮した非線形時刻歴応答解析による評価

2. 実施内容

(図5-9-1, 2に原子炉建屋クレーンの例を示す。)

- クレーンは、地震加速度によって浮上りが発生する可能性があるため、多質点はりモデルによる非線形時刻歴解析を適用した。
- 車輪部はレール上に乗っており固定されていないため、すべりが発生する構造であることから、解析においてすべり状況を考慮した。

3. 耐震評価結果

- 非線形時刻歴応答解析を適用して耐震評価を行い、クレーンの発生応力が許容応力以下であることを確認した(表5-9-1参照)。

表5-9-1 原子炉建屋クレーンの耐震評価結果*1

評価部位	応力分類	発生応力(MPa)	許容応力(MPa)
脱線防止ラグ	圧縮	261	308

注記*1: 原子炉建屋クレーンの評価結果を代表として記載。また、基準地震動Ss1に対する裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

4. 説明図書

添付書類「VI-2-11-2-1 海水ポンプ室門型クレーンの耐震性についての計算書」, 「VI-2-11-2-8 原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書」, 補足説明資料「補足-600-27 海水ポンプ室門型クレーンの耐震性についての計算書に関する補足説明資料」及び「補足-600-28 原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書に関する補足説明資料」

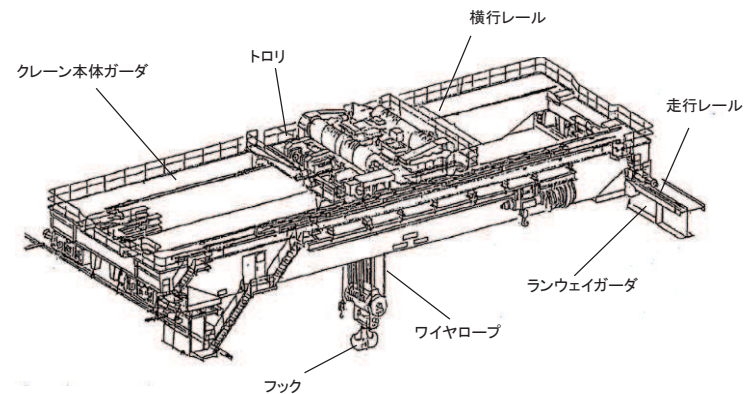
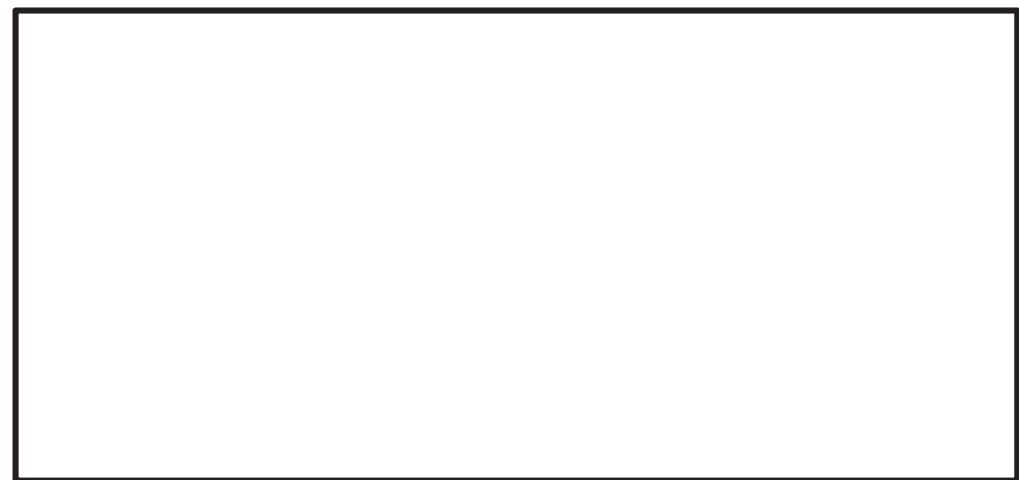


図5-9-1 原子炉建屋クレーンの全体構造図



注記*2: 固有値解析時は車輪部とレールの境界部は、3方向を拘束したモデルとする。地震応答解析時は非線形要素を鉛直方向に設定することで、滑り、浮上り及び衝突の挙動をギャップ要素で模擬。

*3: 引張剛性のみ有し、圧縮剛性は0となる非線形の材料特性をトラス要素で模擬。

図5-9-2 原子炉建屋クレーンの解析モデル図

【5-10】鉛直方向応答解析モデルの追加

1. 概要

今回工認では、鉛直方向に動的地震力が追加されたことに伴い、鉛直方向の建屋-機器連成解析モデルを適用する。なお、鉛直方向の地震応答解析モデルについては、大間1号機の建設工認で適用実績がある。

【既工認】動的地震動を水平方向に対してのみ考慮。

【今回工認】原子炉本体及び炉内構造物について、鉛直方向応答を適切に評価する観点で、新たに鉛直方向地震応答解析モデルを適用し、鉛直地震動に対する評価を実施。

2. 実施内容

- 鉛直方向解析モデルは、水平方向解析モデルとの整合を図ることを基本とし、上下方向の自由度のみを有する、集中質量質点と軸圧縮引張りばねで構成されるモデルとして作成し(図5-10-1参照)、本モデルを適用した地震応答解析を行い、解析結果を各設備の耐震評価に適用した。

3. 地震応答解析結果

- 原子炉建屋単独モデルによる地震応答と、建屋-機器連成解析モデルによる地震応答について、固有周期を比較し、整合していることを確認した(表5-10-1参照)。

表5-10-1 地震応答解析モデルに対する固有値比較

①原子炉建屋単独モデル		②建屋-機器連成解析モデル				卓越部位
次数	固有周期(秒)	大型機器系		炉内構造物系		
		次数	固有周期(秒)	次数	固有周期(秒)	
1	0.339	1	0.339	1	0.339	原子炉建屋(屋根トラス)
2	0.100	2	0.100	2	0.100	原子炉建屋
3	0.079	3	0.079	3	0.079	原子炉建屋(屋根トラス)
4	0.051	4	0.051	4	0.051	原子炉建屋

4. 説明図書

添付書類「VI-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」並びに補足説明資料「補足-600-8-2 建屋-機器連成解析における解析モデルの設定に係る補足説明資料」

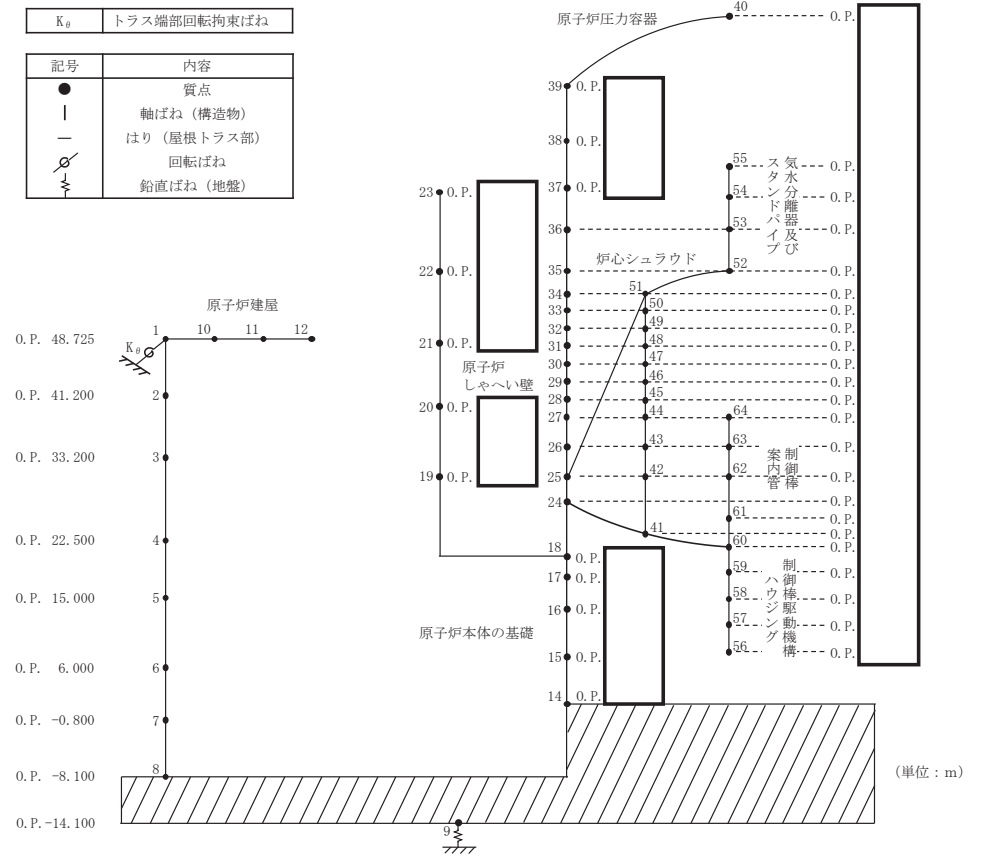


図5-10-1 鉛直方向地震応答解析モデル図(炉内構造物系)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

【5-11】応答倍率評価の適用

1. 概要

原子炉圧力容器関連並びに原子炉格納容器関連の強度計算書及び耐震計算書においては、理論式による応力計算等に加えて既工認の評価を元にして荷重条件や耐震条件の比を用いて発生応力を算出する応答倍率評価を適用する。なお、本手法は柏崎刈羽7号機の新規制基準対応工認で適用実績がある。

【既工認】適用無し*1。

【今回工認】理論式による応力計算等に加えて応答倍率評価を適用する。

注記*1: 単位荷重による解析により算出された発生応力に、荷重条件(=入力荷重/単位荷重)を乗じて発生応力を算出する応答倍率評価に類似した評価手法を適用している。

2. 実施内容

- 今回工認で適用する応答倍率評価については、図5-11-1に示す評価フローに基づいて実施する。
- 建屋-機器連成解析モデルに含まれている設備については、既工認における各荷重による応力に今回工認における荷重条件の比を乗ずることによって今回工認における各荷重による応力を算出する方法を適用した。
- 建屋-機器連成解析モデルに含まれていない設備については、震度条件の比を算出し、この震度比から評価用荷重を算出した後に、評価手法に応じて発生応力を算出する方法を適用した。

3. 耐震評価結果

- 応答倍率評価を適用して耐震評価を行い、各設備の発生応力が許容応力以下であることを確認した(表5-11-1, 2に震度比による発生荷重の算出例及び耐震評価例を示す。)

表5-11-1 給水スパージャにおける震度比による評価用荷重の算出

応力評価点	既工認 (水平震度:1.22, 鉛直震度:0.29)				最大震度比	今回工認 (水平震度:2.61, 鉛直震度:1.41)			
	軸力 [kg]	せん断力 [kg]	ねじりモーメント [$\times 10^3\text{kg}\cdot\text{mm}$]	曲げモーメント [$\times 10^3\text{kg}\cdot\text{mm}$]		軸力 [N]	せん断力 [N]	ねじりモーメント [N·m]	曲げモーメント [N·m]
P01,P02					4.87				
P03,P04									

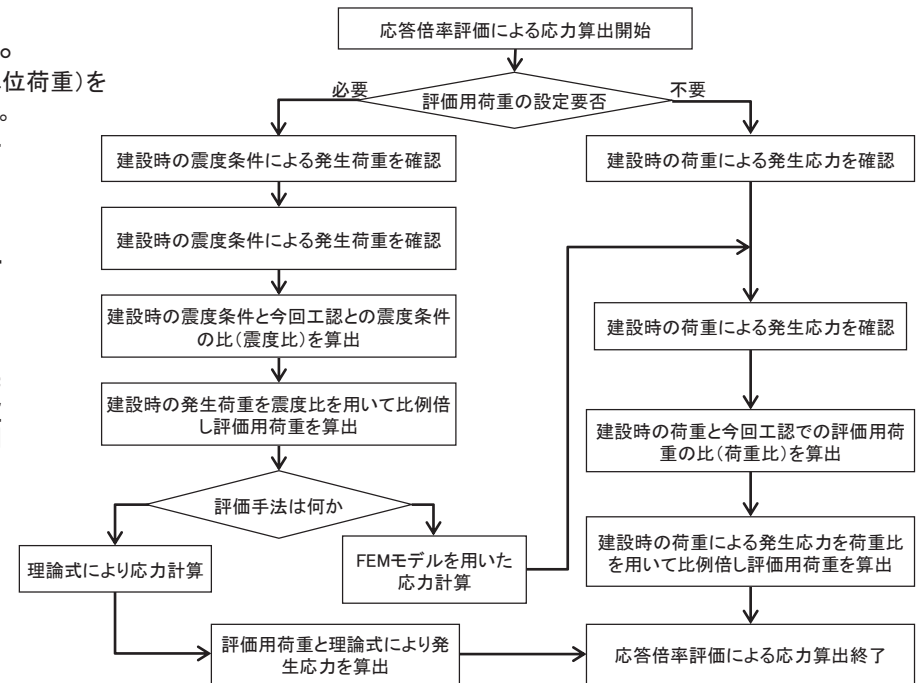


図5-11-1 応答倍率評価フロー

表5-11-2 給水スパージャの耐震評価結果*2

評価部位	応力分類	算出応力(MPa)	許容応力(MPa)
ヘッド	一次一般膜+一次曲げ応力	29	218

注記*2: 基準地震動Ssに対する裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

4. 説明図書

添付書類「VI-2-3-4-3-5 ジェットポンプの耐震性についての計算書」他及び補足説明資料「補足-600-40-17 原子炉圧力容器関連及び原子炉格納容器関連における工事計画認可で実施する評価手法の概要と応答倍率評価について」

【5-12】炉心シュラウド支持ロッドの解析モデルの精緻化

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

1. 概要

炉心シュラウド支持ロッドの耐震評価について、今回工認では地震応答を精緻に算出するために、実機形状に合わせて精緻化した解析モデルを適用する。なお、本解析モデルの精緻化は、モデル化の考え方を変更するものではなく、「No.5-8 たて軸ポンプの解析モデルの精緻化」と同様に、大間1号機の建設工認で適用実績がある。

【既工認】鉛直方向に等分割した解析モデル

【今回工認】実機形状に合わせて精緻化した解析モデル

No.	部品名称	No.	部品名称
①	上部サポート	④	下部スタビライザ
②	上部ウェッジ	⑤	下部ウェッジ
③	上部タイロッド	⑥	下部タイロッド
		⑦	トグル

2. 実施内容

(図5-12-1に炉心シュラウド支持ロッド(タイプ2*1)の例を示す。)

- 今回工認では炉心シュラウド支持ロッドの断面形状が変化する位置で分割したモデルとした。
- モデルの断面性状(断面二次モーメント, せん断断面積)について、既工認では簡略的に最小断面での一様な設定としていたが、今回工認では実機の形状に合わせて断面性状へ変更した。
- 本解析モデルの精緻化は、既工認での簡略的なモデル化を実機形状に合わせて精緻化するものであり構造の変更は生じない。

3. 耐震評価結果

- 精緻化した解析モデルを適用して耐震評価を行い、炉心シュラウド支持ロッドの発生応力が許容応力以下であることを確認した(表5-12-1参照)。

表5-12-1 炉心シュラウド支持ロッドの耐震評価結果*2

評価部位	応力分類	発生応力(MPa)	許容応力(MPa)
トグルクレビス	一次一般膜応力	515	585

注記*2: 基準地震動Ssに対する裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

注記*1: 炉心シュラウド支持ロッドは形状の異なるタイプ1及びタイプ2の2種類が存在。構造の相違点は以下のとおり。
 ・「①上部サポート」の形状(タイプ1はサポートの爪が2つでタイプ2はサポートの爪が1つ)
 ・「③上部タイロッド」の径

図5-12-1 炉心シュラウド支持ロッドの解析モデル図

4. 説明図書

「VI-2-3-3-2-4 炉心シュラウド支持ロッドの耐震性についての計算書」及び補足説明資料「補足-600-2 耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点の整理について」

【5-13】流体中の構造物についての付加質量の考慮及び排除水体积質量による 応答低減効果の考慮

1. 概要

流体中の構造物の耐震評価における、流体の付加質量及び排除水体积質量*1による応答低減効果の考慮について、一部設備は今回工認で考慮方法を変更して耐震評価を実施する。なお、本手法は柏崎刈羽7号機の新規制基準対応工認で適用実績がある。

注記*1:【付加質量】構造物が流体中で振動する場合において、あたかも質量が増加したような傾向(流体の付加質量効果)を示すことから、流体による付加質量効果を模擬するための機器の形状により定まる仮想質量

【排除水体积質量】機器が流体中にある場合に、機器-流体の相互作用による応答低減効果を模擬した質量

2. 実施内容

- 既工認及び今回工認で流体の付加質量及び排除水体积質量による応答低減効果の考慮方法を変更した設備を表5-13-1に示す。
- 炉内設備(表5-13-1※1)については、JEAG4601-1987に記載の燃料集合体と同じく無限水中の円柱構造物とみなして流体の付加質量及び排除水体积質量の応答低減効果を考慮した。
- たて軸ポンプ(表5-13-1※2)については、JEAG4601-1991追補版に記載の二重円筒構造の考え方を適用した。
- 新規に評価する設備(表5-13-1※3)については、流体の付加質量のみを考慮し排除水体积質量による応答低減効果は考慮していない。

表5-13-1 流体の付加質量及び排除水体积質量の応答低減効果の考慮に関する既工認と今回工認の相違点

設備名又は機器名	既工認		今回工認	
	付加質量	応答低減	付加質量	応答低減
炉心シュラウド支持ロッド※1	無	無	有	有
中性子束計測案内管※1	有	無	有	有
使用済燃料プール水位/温度(ガイドバルス式、ヒートサーモ式)※3	—	—	有	無
残留熱除去系ポンプ、高圧炉心スプレー系ポンプ、低圧炉心スプレー系ポンプ※2	有	無	有	有
原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ※2	有	無	有	有
起動領域モニタ、出力領域モニタ※1	有	無	有	有
制御棒貯蔵ラック、制御棒貯蔵ハンガ※3	評価対象外	評価対象外	有	無

3. 耐震評価結果

- 本手法を適用して各設備の耐震評価を行い、耐震性が確保されていることを確認した。表5-13-2に中性子束計測案内管の評価結果を示す。

表5-13-2 中性子束計測案内管の耐震評価結果*2

評価部位	応力分類	算出応力(MPa)	許容応力(MPa)
中性子束計測案内管下部	一次一般膜+一次曲げ応力	102	223

注記*2: 基準地震動Ssに対する裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

4. 説明図書

添付書類「VI-2-3-4-3-11 中性子束計測案内管の耐震性についての計算書」他及び補足説明資料「補足-600-40-40 耐震評価における流体中の構造物に対する付加質量及び応答低減効果の考慮」

【5-14】原子炉格納容器ベント系設備の解析モデルの精緻化

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

1. 概要

原子炉格納容器ベント系設備(ベント管, ベントヘッド, ダウンカマ)は, 今回工認で実施した耐震補強対策を踏まえた精緻な耐震評価を実施するために, 解析モデルを精緻化する。なお, 本手法は柏崎刈羽7号機新規規制基準対応工認で適用実績がある。
【既工認】個別に3次元はりモデルやFEMモデルを用いて評価
【今回工認】はり要素とシェル要素により一体でFEMモデル化を行い評価

2. 実施内容

- 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に係る既工認からの変更点は表5-14-1に示すとおり。
- 今回工認では, 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実施した。

3. 耐震評価結果

- 本解析モデルを適用して各設備の耐震評価を行い, ベント系設備の発生応力が許容応力以下であることを確認した(表5-14-2参照)。

表5-14-2 ダウンカマの耐震評価結果*2

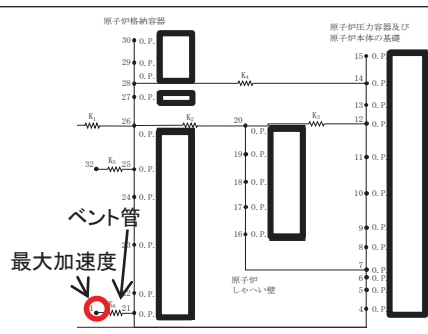
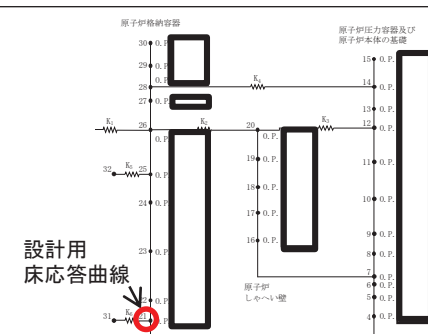
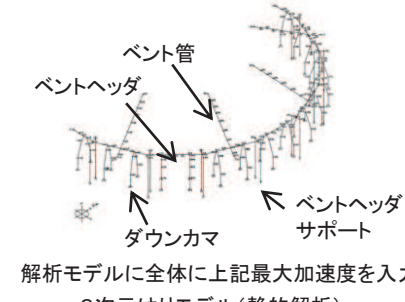
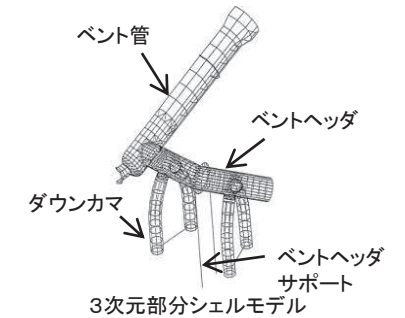
評価部位	応力分類	算出応力(MPa)	許容応力(MPa)
ダウンカマ(一般部以外)	一次+二次応力	457	458

注記*2: ダウンカマの評価結果を代表として記載。基準地震動Ss1に対する裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

4. 説明図書

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」, 「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」及び補足説明資料「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」

表5-14-1 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

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>
応力解析	 <p>解析モデルに全体に上記最大加速度を入力 3次元はりモデル(静的解析)</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>

【5-15】動的機能維持の詳細評価(1/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

【全体概要及び機器に対する検討内容】

1. 概要

動的機能維持評価は、今回工認より新たに評価を実施する評価項目であり、JEAG4601に基づく機能確認済加速度と機能維持評価用加速度との比較による評価方法を適用するが、本方法が適用できない一部の設備については、①「詳細検討」、②「新たな検討」、③加振試験のいずれかの個別検討を実施して動的機能維持評価を行う。なお、本手法は美浜3号機の新規制基準対応工認において適用実績がある。

【既工認】評価項目対象外

【今回工認】一部の設備について、「詳細検討」、「新たな検討」、加振試験のいずれかの動的機能維持評価を行う。

2. 実施内容

- JEAG4601に基づく機能確認済加速度と機能維持評価用加速度との比較が適用できない設備について図5-15-1に示す検討フローに基づいて評価を行う。
- ①「詳細検討」においては、各設備の基本評価項目*1について評価を実施した。
- ②「新たな検討」においては、異常要因分析に基づいて基本評価項目を抽出し評価を実施した。
- ③加振試験は個別の試験結果を評価に適用した。

注記*1:地震時に発生する可能性のある異常事象を抽出し、その要因分析を行い、機能維持の評価項目として選定したもの。

3. 耐震評価結果

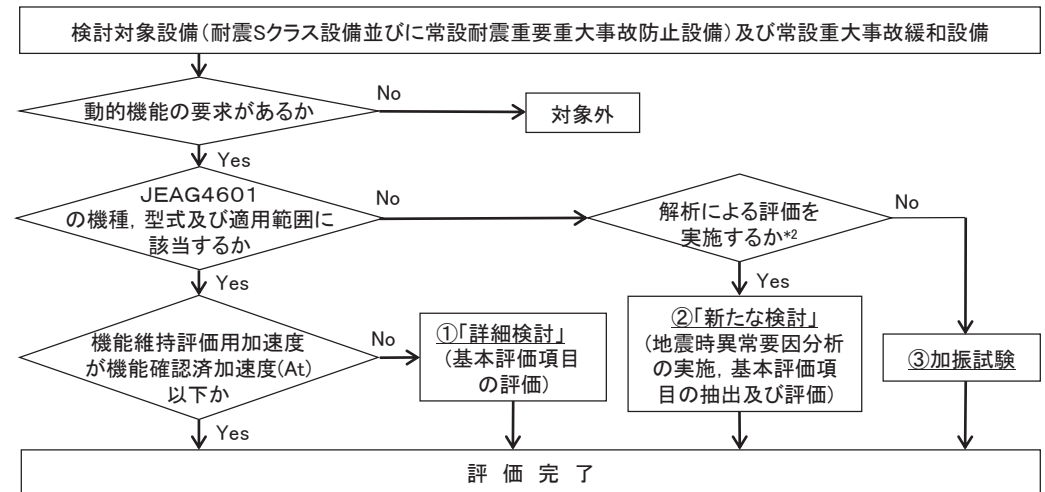
- 本手法を適用して各設備の耐震評価を行い、耐震性が確保されていることを確認した。表5-15-1,2に①「詳細検討」対象の燃料プール冷却浄化系ポンプの評価結果を代表で示す。

表5-15-1 燃料プール冷却浄化系ポンプの基本評価項目

対象設備	基本評価項目
燃料プール冷却浄化系ポンプ	摺動部, 主軸, 冷却水配管, 電動機, 取付ボルト, 基礎ボルト

4. 説明図書

添付書類「VI-2-10-1-2-1-4 非常用ディーゼル発電設備 燃料移送ポンプの耐震性についての計算書」他及び補足説明資料「補足-600-14-1 動的機能維持の詳細評価について(新たな検討又は詳細検討が必要な設備の機能維持評価について)」



注記*2:構造強度評価等の解析実施が困難な場合はNo

図5-15-1 動的機能維持評価検討フロー

表5-15-2 燃料プール冷却浄化系ポンプの耐震評価結果*3

評価部位	評価項目	変位量(mm)	許容変位量(mm)
摺動部	軸のたわみ	0.42	

注記*3:基準地震動Ssに対して裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

【5-15】動的機能維持の詳細評価(2/2)

【弁に対する検討内容】

1. 概要

動的機能維持評価を実施する弁のうち、JEAG4601に基づく機能確認済加速度と機能維持評価用加速度との比較によって耐震性が確認できない弁については、新たな加振試験の知見を適用した①「詳細検討」を行う。

2. 実施内容

- 弁駆動部に対して既往の研究成果*1~*4より得られている、動作機能確認済加速度を用いた評価を実施した。
- 弁の最弱部に対して構造強度評価を実施し構造健全性を確認した(図5-15-2参照)。
- 以上のとおり弁の詳細評価においては、弁駆動部に対する動作機能の確認及び弁最弱部に対する構造健全性の確認を行い、動的機能維持評価を実施した。

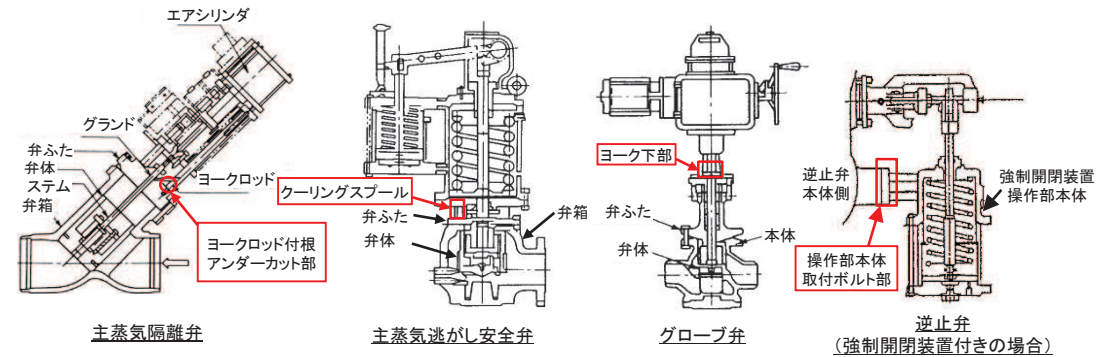


図5-15-2 構造強度評価部位

注記*1: 電動弁駆動部の動作機能確認済加速度向上に関する研究(2013年2月~2016年12月)
 *2: 空気作動弁駆動部の動作機能確認済加速度向上に関する研究(2017年3月~2021年3月)
 *3: 主蒸気逃がし安全弁の機能維持確認済加速度向上に関する研究(2012年12月~2016年3月)
 *4: 主蒸気隔離弁の機能維持確認済加速度向上に関する研究(2017年2月~2021年3月)

3. 耐震評価結果

- 本手法を適用して動的機能維持評価対象弁について耐震評価を行い、耐震性が確保されていることを確認した。表5-15-3,4に各分類での代表弁の評価結果を示す。

表5-15-3 耐震評価結果(弁駆動部)

分類	型式	方向*5	機能維持評価用加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	駆動部の動作機能確認済加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)
弁 特殊	主蒸気隔離弁	合成	14.96	15.0
	主蒸気逃がし安全弁	合成	15.86	20.0
一 般 弁	グローブ弁	合成	10.96	20.0
	ゲート弁	合成	8.19	20.0
	逆止弁	合成	13.95	14.02

注記*5: 合成とは機能維持評価加速度として水平方向と鉛直方向の加速度を合成した値を用いて評価することを示す。

表5-15-4 耐震評価結果(構造強度評価)

分類	弁型式	評価部位	構造強度評価(MPa)	
			算出応力	許容応力
特殊 弁	主蒸気隔離弁	ヨーク付根 アンダーカット部	885	889
		主蒸気逃がし安全弁	クーリングスプール	229
一 般 弁	グローブ弁	ヨーク下部	204	354
	ゲート弁	ヨーク下部	242	354
	逆止弁	操作部本体取付ボルト	71	259

4. 説明図書

添付書類「VI-2-5-3-1-2 管の耐震性についての計算書(主蒸気系)」他及び補足説明資料「補足-600-14-1 動的機能維持の詳細評価について(新たな検討又は詳細検討が必要な設備の機能維持評価について)」

【5-16】等価繰返し回数の設定

1. 概要

今回工認における、機器・配管系の疲労評価に適用する等価繰返し数については、基準地震動 S_s 等を考慮して新たな回数を設定する。なお、本手法は、柏崎刈羽7号機の新規制基準対応工認で適用実績がある。

【既工認】米国プラントでの設計の考え方を踏襲し、OBE(Operating basis earthquake)地震が6回起きた場合の繰返し回数を設定(60回)。

【今回工認】等価繰返し回数は、ピーク応力法による算出結果に基づき、「一律に設定する等価繰返し回数」又は「個別に設定する等価繰返し回数」を用いる。

2. 実施内容

- 等価繰返し回数の設定に当たっては、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に加え、東北地方太平洋沖地震等に対する影響も考慮する(図5-16-1に基準地震動 S_s に対する検討フローを示す)。
- 「一律に設定する等価繰返し回数」は、保守的な回数となるよう算出し、 S_s の疲労評価に用いる等価繰返し回数は340回、 S_d の疲労評価に用いる等価繰返し回数は590回と設定した。
- 「個別に設定する等価繰返し回数」は、その設定対象設備の設置建屋やピーク応力等に応じて適切に設定した。
- 東北地方太平洋沖地震等による疲労累積係数は、最大でも0.01に満たない結果であり、十分に小さいことを確認した上で、今回工認の耐震評価において疲労累積係数に0.01を見込んだ評価を実施した。

3. 耐震評価結果

- 本手法を適用して各設備の耐震評価を行い、耐震性が確保されていることを確認した。

4. 説明図書

添付書類「VI-2-5-2-1-1 管の耐震性についての計算書(原子炉再循環系)」他及び補足説明資料「補足-600-9 耐震評価における等価繰返し回数の妥当性確認について」

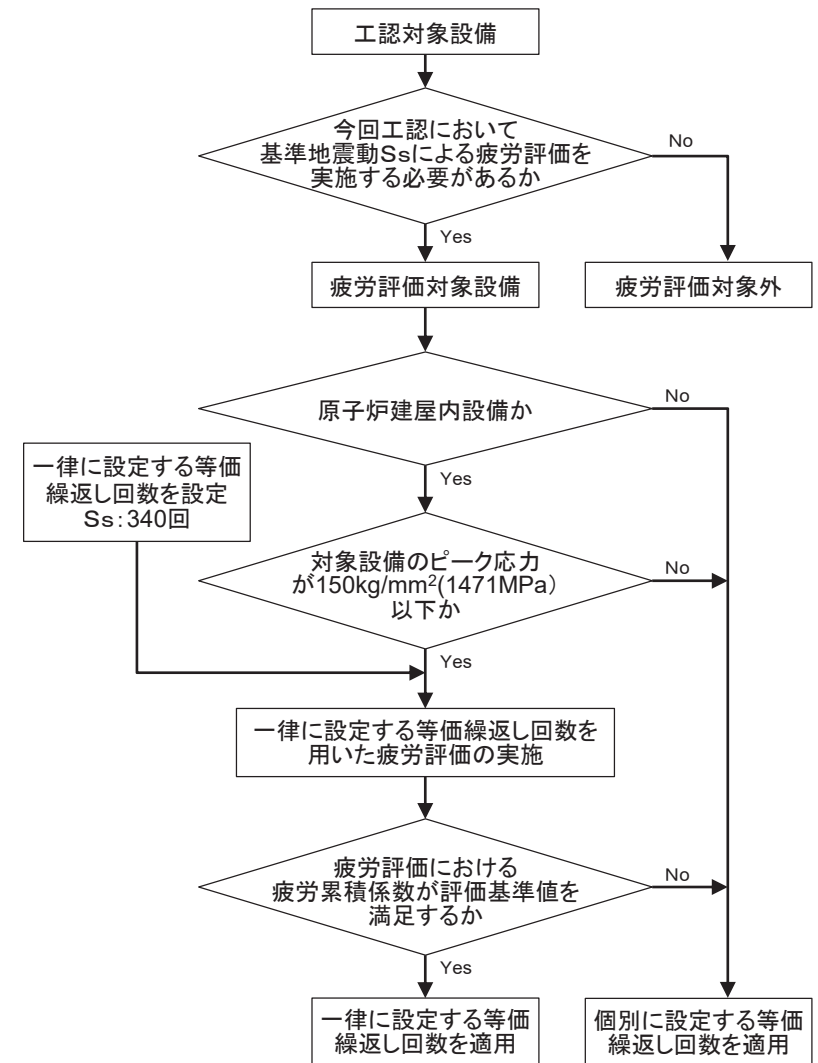


図5-16-1 基準地震動 S_s の疲労評価に用いる等価繰返し回数の分類