

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1
提出年月日	2021年 9月 2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2日  
東北電力株式会社

## 【5-2】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。

【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. 検討内容

- 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5-1-2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5-1-1参照）。

### 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」

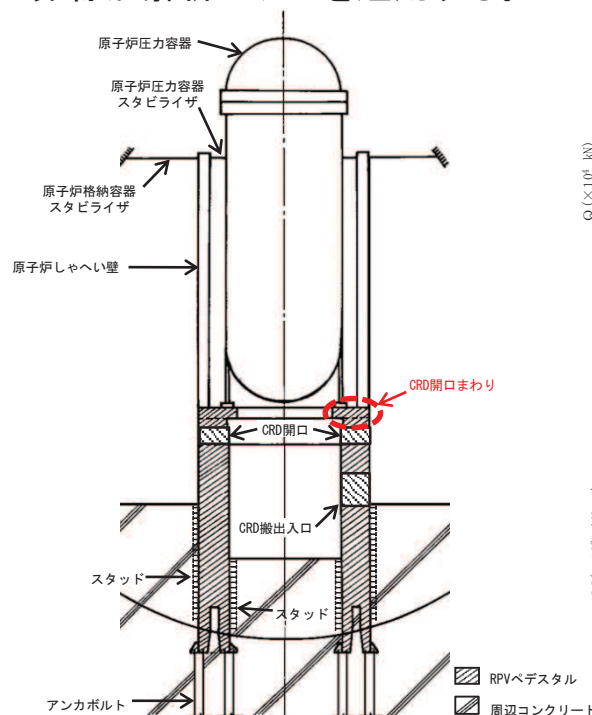
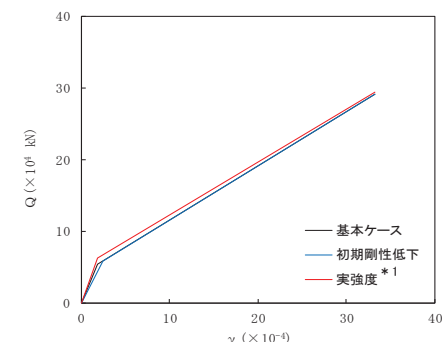
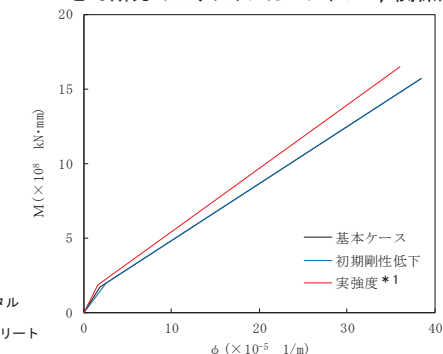


図5-1-1 原子炉本体の基礎の構造概要図



せん断力のスケルトンカーブ(Q-γ関係)



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5-1-2 スケルトンカーブの例

表5-1-1 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 <sup>2</sup> )	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
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】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。

【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. 検討内容

- 既工認の強度評価においては、差圧及び死荷重による構造不連続部の影響を含む一次＋二次応力評価のためにFEM解析で評価を実施している。
- 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し簡便に評価を行った（表5-4-1参照）。

表5-4-1 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 <sub>A</sub> , II <sub>A</sub>	許容応力状態 III <sub>A</sub> S, IV <sub>A</sub> S	許容応力状態 III <sub>A</sub> S, IV <sub>A</sub> 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	該当せず	FEM	公式による評価
	水平方向地震	該当せず	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	該当せず	該当せず

表5-4-2 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5-4-2参照）。

評価部位	応力分類	算出応力 (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」

## 【5-5】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。

【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. 検討内容(図5-5-1及び図5-5-2に起動領域モニタの構造図と解析モデル図を例として示す。)

- 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5-5-1参照)。

表5-5-1 起動領域モニタの耐震評価結果\*

評価部位	応力分類	算出応力 (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」

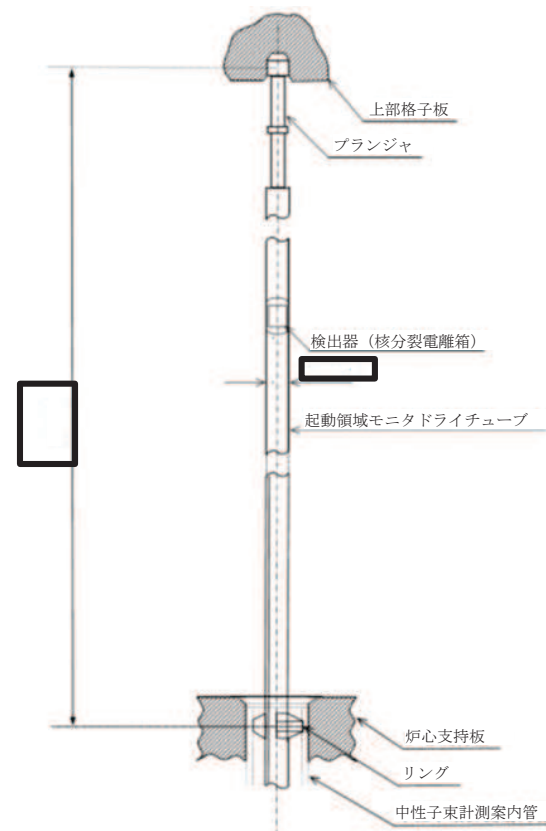


図5-5-1 起動領域モニタ構造図

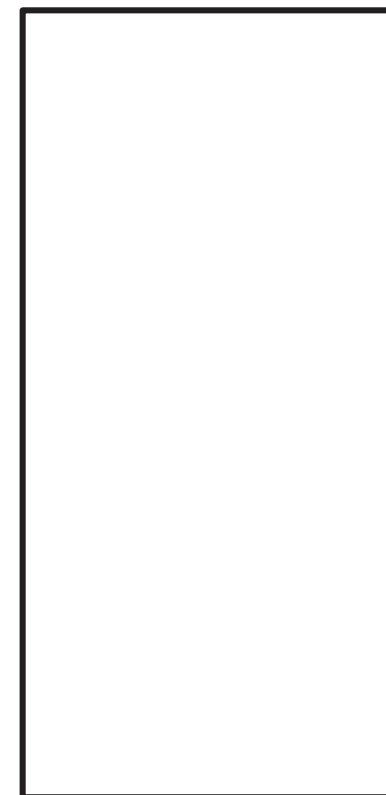


図5-5-2 起動領域モニタ解析モデル図

# 【5-6】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。

【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. 検討内容

- 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法を適用した。
- 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5-6-1, 図5-6-1参照)。
- 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号機の耐震評価におい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

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5-6-1 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

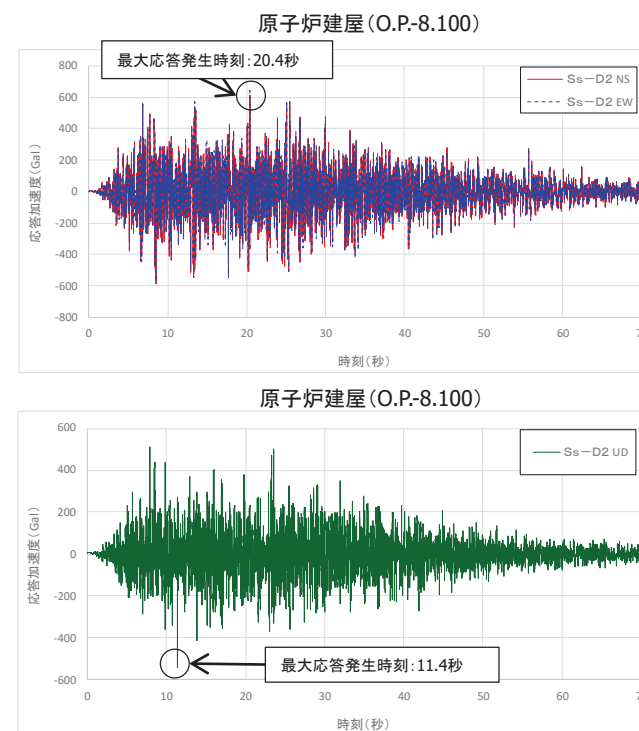


図5-6-1 女川2号機原子炉建屋の地震応答(O.P.-8.1の例)

## 【5-7】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)の地震応答解析モデルについて, 今回工認では解析モデルを精緻化する。

【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. 検討内容(図5-7-1に原子炉補機冷却海水ポンプの概略図と解析モデル図を例として示す。)

- 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5-7-1参照)。

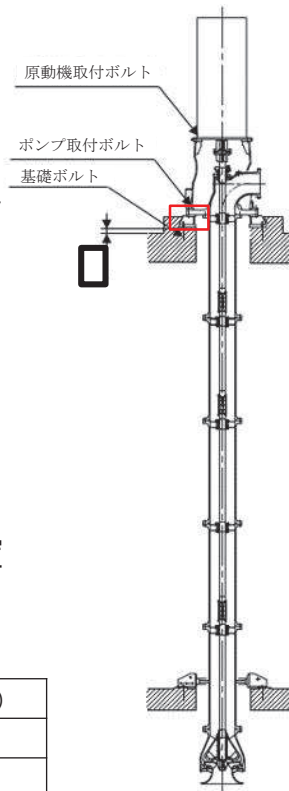
表5-7-1 原子炉補機冷却海水ポンプの耐震評価結果\*

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

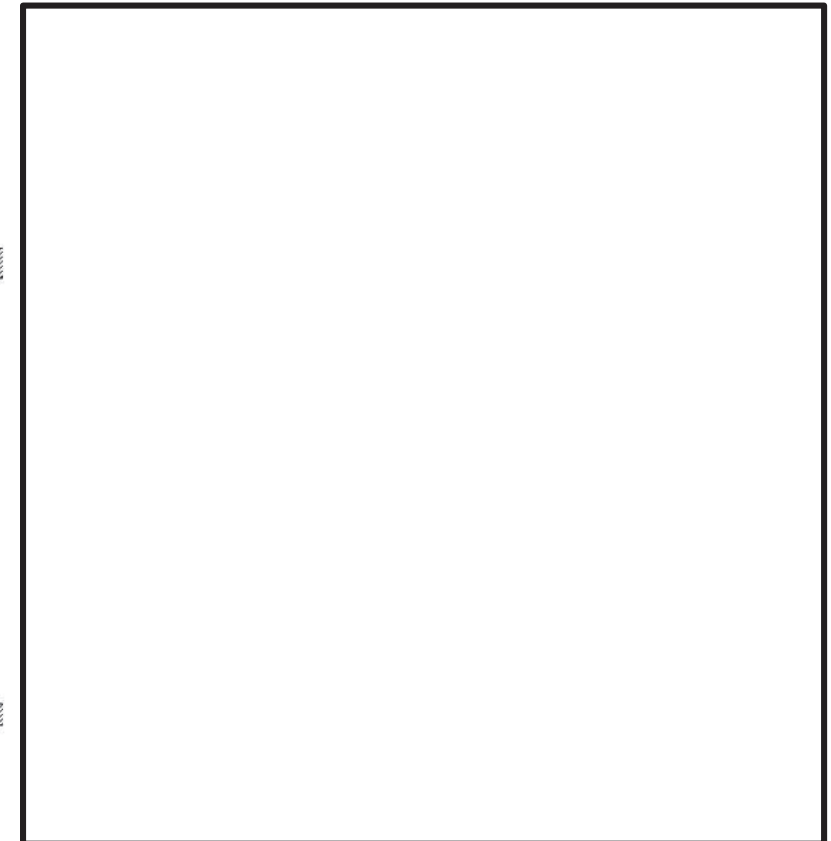
注記\*: たて軸ポンプから原子炉補機冷却海水ポンプの評価結果を代表として記載。また, 基準地震動 $S_{ss}$ に対する裕度(許容応力度/算出応力度)が最小となる評価結果を代表で記載。

### 4. 説明図書

添付書類「VI-2-5-4-1-2 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5-7-1 原子炉補機冷却海水ポンプの解析モデル図

## 【5-9】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。

【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. 検討内容

- 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5-9-1参照）、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5-9-1参照）。

表5-9-1 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」

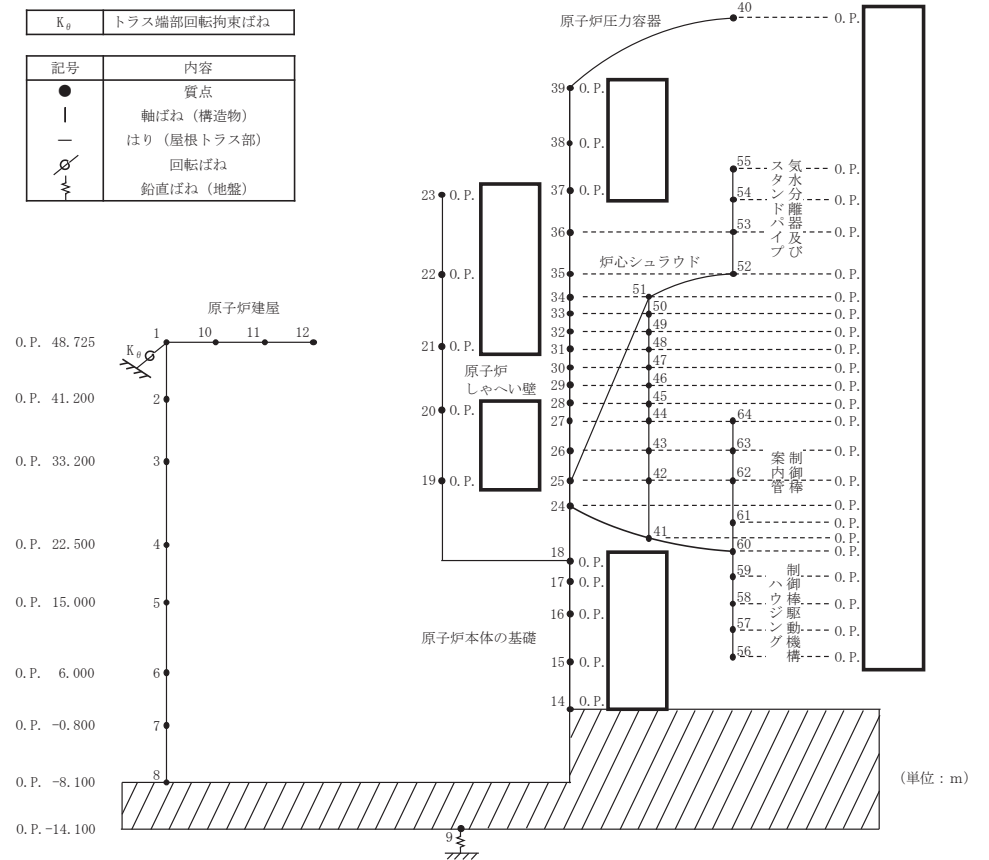


図5-9-1 鉛直方向地震応答解析モデル図 (炉内構造物系)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 【5-10】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実施する。

【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. 検討内容

- 今回工認で適用する応答倍率評価については、図5-10-1に示す評価フローに基づいて実施する。
- 建屋一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で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。
- 建屋一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5-10-1, 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5-10-1 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									

### 4. 説明図書

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」

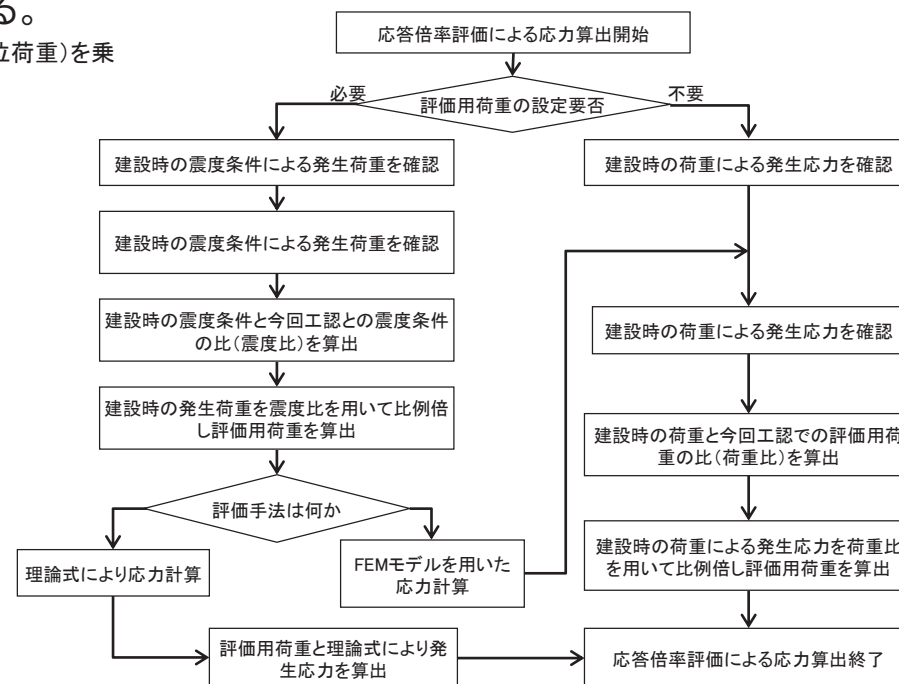


図5-10-1 応答倍率評価フロー

表5-10-2 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。



## 【5-12】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。

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. 検討内容

- 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5-12-1に示す。
- 炉内設備(表5-12-1※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を適用した。
- たて軸ポンプ(表5-12-1※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5-12-1※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。

### 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5-12-2に炉心シュラウド支持ロッドの評価結果を代表として示す。

表5-12-2 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	算出応力 (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。

表5-12-1 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(ガイドパルス式、ヒートサーモ式)※3	—	—	有	無
残留熱除去系ポンプ、高圧炉心スプレイ系ポンプ、低圧炉心スプレイ系ポンプ※2	有	無	有	有
原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレイ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

### 4. 説明図書

添付書類「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」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】動的機能維持の詳細評価

### 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。

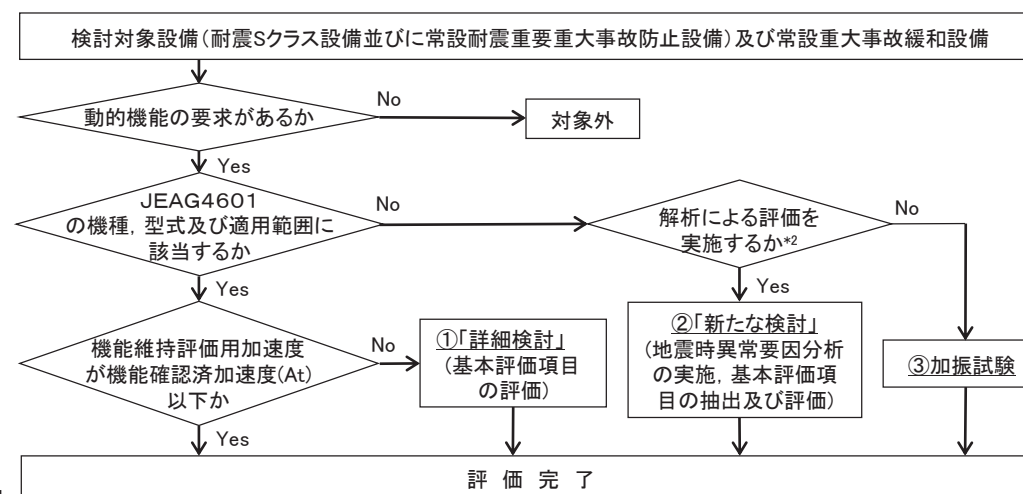
【既工認】評価項目対象外

【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. 検討内容

- 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5-14-1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現象を抽出し、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。



注記\*2: 構造強度評価等の解析実施が困難な場合はNo

図5-14-1 動的機能維持評価検討フロー

### 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5-14-1,2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5-14-1 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

表5-14-2 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。

### 4. 説明図書

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)」

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 【5-15】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おける等価繰返し数の設定の考え方について説明する。

【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. 検討内容

- 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5-15-1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。

注記\* : 疲労評価の結果、疲労累積係数が0.99以上の設備においては改造工事等の対策を実施する。

### 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

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」

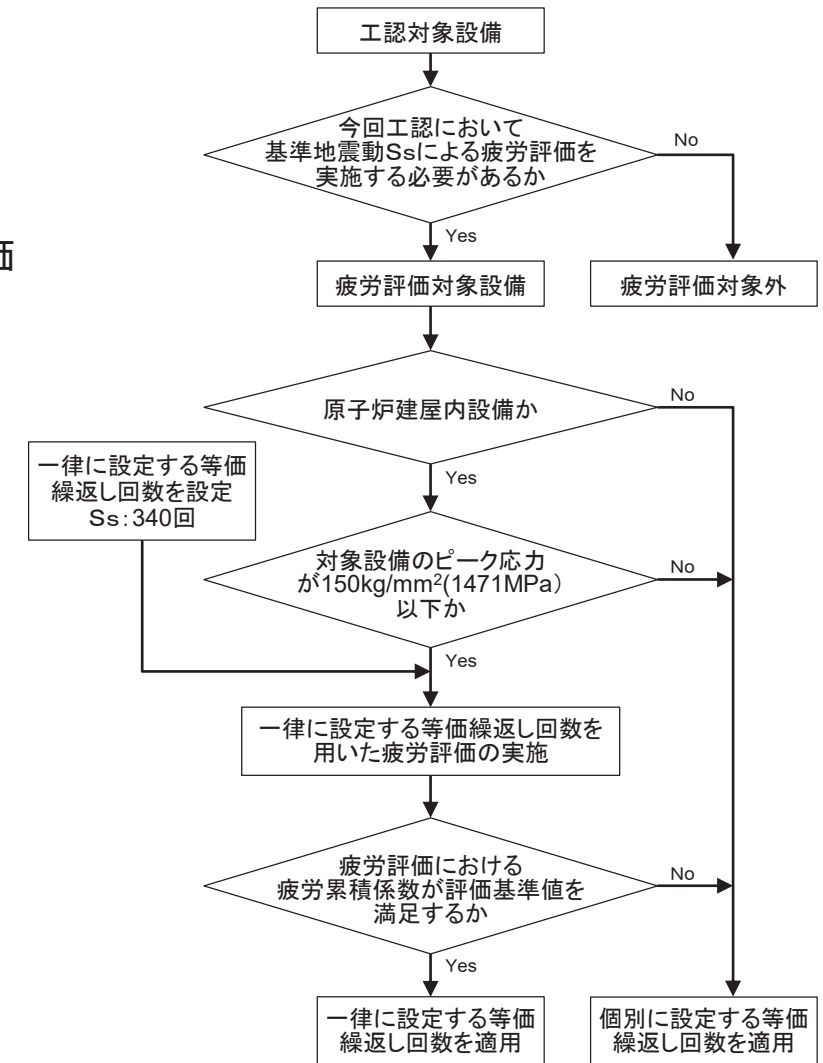


図5-15-1 基準地震動 $S_s$ の疲労評価に用いる等価繰返し回数の分類

## (参考)機器・配管系の耐震評価に係る既工認からの相違点一覧

## (5)耐震評価に関し、説明が必要な項目(既工認からの相違点等)

No.	説明項目	説明状況
5-1	原子炉建屋屋根トラスの耐震評価	資料●-1 4ページ
5-2	原子炉本体の基礎への非線形復元力特性の適用	資料●-1 5ページ
5-3	最新知見として得られた減衰定数の採用	資料●-1 6ページ
5-4	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	資料●-1 7ページ
5-5	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	資料●-1 8ページ
5-6	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	資料●-1 9ページ
5-7	たて軸ポンプの解析モデルの精緻化	資料●-1 10ページ
5-8	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	資料●-1 11ページ
5-9	鉛直方向応答解析モデルの追加	資料●-1 12ページ
5-10	応答倍率評価の適用	資料●-1 13ページ
5-11	炉心シュラウド支持ロッドの解析モデルの精緻化	資料●-1 14ページ
5-12	付加質量の考慮及び排除水体積質量による応答低減効果の考慮	資料●-1 15ページ
5-13	原子炉格納容器ベント系設備の解析モデルの精緻化	資料●-1 16ページ
5-14	動的機能維持の詳細評価	資料●-1 17ページ
5-15	等価繰返し回数の設定	資料●-1 18ページ

 :今回提出範囲