

# 伊方3号機 耐震裕度2倍確保に係る取組みについて

平成25年3月21日  
四国電力株式会社

# 目次

---

1. はじめに
2. 取組みの基本的な考え方
3. 検討の流れ
4. 耐震裕度評価結果(既往評価結果を用いた評価)
5. 耐震裕度評価結果(実力評価)
6. 耐震裕度評価結果(耐震性向上工事後の評価)
7. 建屋非線形応答の影響に関する検討結果
8. 外部有識者による確認結果の概要
9. まとめ

## 【添付】

耐震裕度評価内容(実力評価)

# 1. はじめに

---

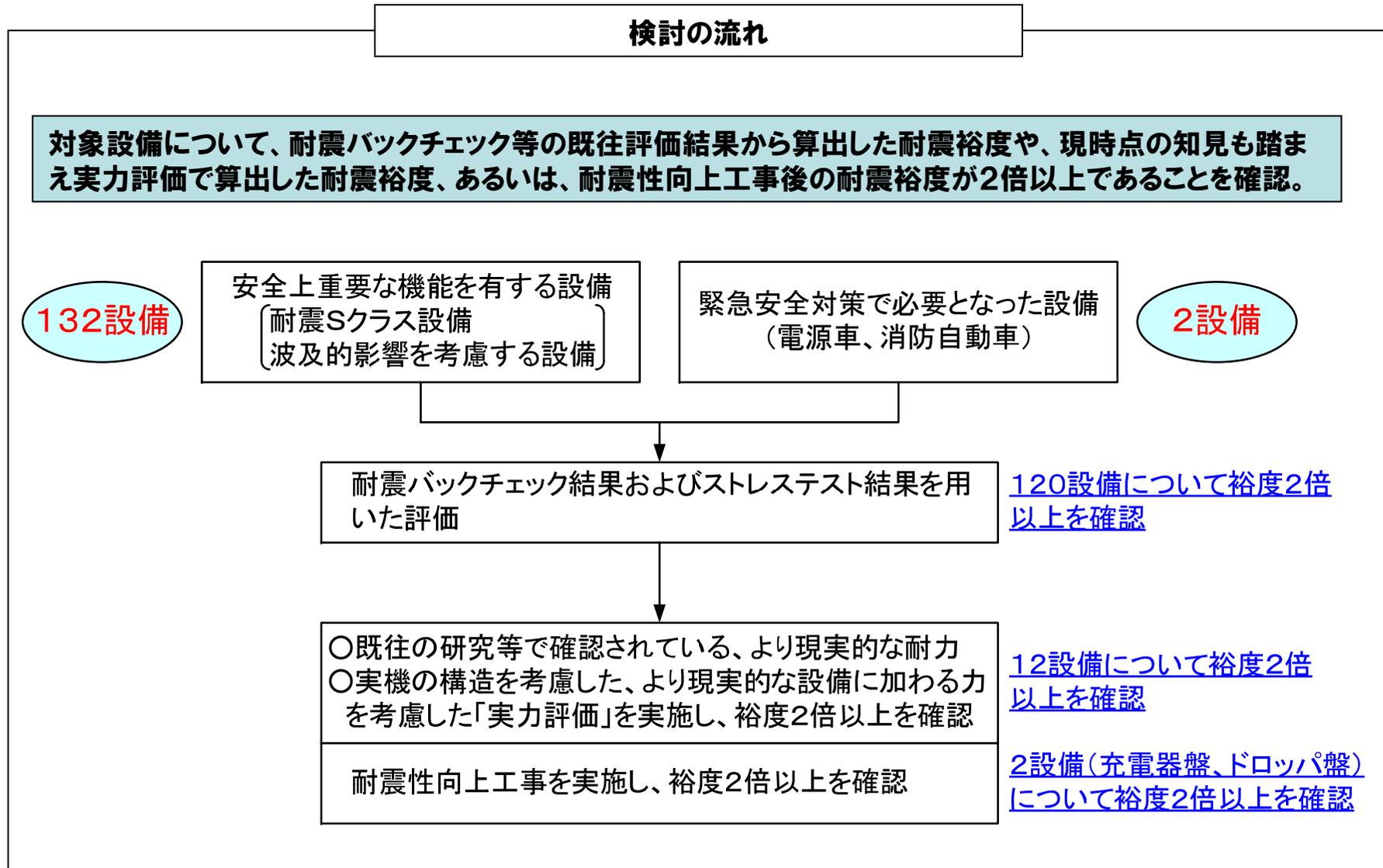
- 当社は、愛媛県知事からのご要請を踏まえ、更なる安全の向上を目指した自主的な取組みとして、安全上重要な設備および緊急安全対策で必要となった設備に対して耐震評価を行うとともに、必要に応じ耐震性向上工事を実施し、耐震裕度が2倍以上確保されるよう取り組んでおります。
- このうち、伊方3号機(対象設備は134設備)については、直流電源装置(充電器盤、ドロツパ盤)について昨年4月末に耐震性向上工事を実施しましたが、すべての設備について裕度の確認を実施し、6月18日に、2倍以上の裕度があることが確認できたことを公表しました。
- その後、外部有識者2名を委員とした検討会を開催し、当社が今回の耐震裕度2倍確保に係る取組みで採用した評価の妥当性について、第三者的な立場からの確認を得ました。

## 2. 取組みの基本的な考え方

---

- 伊方発電所では、安全上重要な設備に対して、基準地震動(570ガル)を入力条件として、それぞれの設備にかかる力を算出し耐震評価を実施しております。今回の取組みでは、基準地震動を入力した時の設備にかかる力が2倍になったとしても、設備が実力的に耐えられるかどうかを確認したものです。安全上重要な設備が、実力として2倍程度の耐震裕度を持っていることをお示しできれば、地域の皆さまの安全・安心感に繋がると考えたものです。
- 耐震評価は、基本的に、基準地震動を入力した時に設備にかかる力がそれに耐える力(評価基準値)を超えないこと(裕度でいえば1倍以上あれば良いこと)を確認してきております。一方、今回の取組みでは、耐震バックチェック等の既往評価結果を用いて裕度を算出し、裕度が2倍未満となっている設備に対して、
  - ・現時点の知見も踏まえた実力評価  
(基準地震動を入力した時に設備にかかる力とそれに耐える力について、より実態的な評価)あるいは、
  - ・耐震性向上工事を実施することにより、実力として2倍以上の裕度を確保しようとするものです。
- なお、耐震設計に関する技術的要求を定めた原子力発電所耐震設計技術規程(日本電気協会)には、「本規程は、既設プラントの耐震性安全評価にも用いることができ、その場合、運転実績、計測データ、実証試験結果等により得られた知見を反映して差し支えない」と記載されており、今回の耐震評価はこれを参考に実施したものです。

### 3. 検討の流れ



## 4. 耐震裕度評価結果(既往評価結果を用いた評価)

耐震バックチェック等の既往評価結果から算出した耐震裕度を確認した結果、134設備中、120設備について、耐震裕度が2倍以上であることを確認。

表2 裕度2倍が確認できた設備、評価結果 (1/6)

(例)

設備名	評価結果引用元 <sup>※1</sup>	評価部位および損傷モード		単位	発生値	許容値	裕度	備考
		評価部位	損傷モード(応力分類)					
原子炉容器	ST	出口管台(13C, 14C)	膜応力+曲げ応力	MPa	185	422	2.28	-
炉内構造物	ST	熱遮へい体取付ボルト	膜応力+曲げ応力	MPa	28	483	17.25	-
炉内構造物のうち 制御棒クラスター案内管	BC	制御棒クラスター案内管	膜応力+曲げ応力	MPa	38	391	10.28	-
炉心支持構造物	BC	下部炉心支持柱取付ボルト	膜応力+曲げ応力	MPa	185	483	2.61	-
燃料集合体	ST	参考資料1-1「添付資料-4.1.8」参照						-
原子炉容器支持構造物	BC	サポートシュ	支圧応力	MPa	219	465	2.12	-
原子炉容器支持構造物埋込金物	ST	参考資料1-1「添付資料-4.1.8」参照						-
蒸気発生器	ST	上部胴支持金物取付部	膜応力+曲げ応力	MPa	179	421	2.35	-
蒸気発生器内部構造物	ST	湿水分離器支持環	膜応力+曲げ応力	MPa	195	418	2.14	-
蒸気発生器支持構造物	ST	参考資料1-1「添付資料-4.1.8」参照						-
蒸気発生器支持構造物埋込金物	BC	支持脚埋込金物コンクリート	引張荷重	kN	3,047	7,720	2.53	-
一次冷却材ポンプ	ST	吐出ノズル付け根	一次応力	MPa	169	372	2.20	-
一次冷却材ポンプ支持構造物	BC	下部支持構造物ブラケット	せん断応力	MPa	42	189	4.50	-
一次冷却材ポンプ支持構造物埋込金物	ST	参考資料1-1「添付資料-4.1.8」参照						-
加圧器	BC	サージ用管台	膜応力+曲げ応力	MPa	194	406	2.09	-

※1 評価結果引用元において、

BCとは「伊方発電所3号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果報告書 改訂版(平成23年3月)」、

STとは「東京電力株式会社福島第一原子力発電所における事故を踏まえた伊方発電所第3号機の安全性に関する総合評価(一次評価)の結果について(報告)(平成23年11月)」

## 5. 耐震裕度評価結果(実力評価)

既往評価結果から算出した耐震裕度が2倍未満の設備(12設備)について、現時点の知見も踏まえ実力評価で算出した耐震裕度が2倍以上であることを確認。

設備名称	既往の耐震裕度 (*はストレステスト時点の知見も踏まえた耐震裕度)				現時点の知見も踏まえた耐震裕度			
	評価項目 [単位]	発生値 (a)	評価基準値 <sup>※2</sup> (b)	裕度 (b/a)	評価項目 [単位]	発生値 (a)	評価基準値 <sup>※2</sup> (b)	裕度 (b/a)
再生熱交換器 <sup>※1</sup>	組合せ応力 [MPa]	136	222	* 1.63	座屈 [-]	0.49	1.00	2.04
原子炉格納容器本体	座屈 [-]	0.88	1.00	1.13	座屈 [MN]	87.24	175.5	2.01
アニュラスシール	せん断応力 [MPa]	130	220	1.69	せん断応力 [MPa]	130	403	3.10
充てんポンプ・原動機	水平加速度 [G]	0.77	1.4	* 1.81	水平加速度 [G]	0.77	2.2	2.85
ほう酸ポンプ・原動機		0.77	1.4	* 1.81		0.77	2.2	2.85
燃料取替用水タンクポンプ・原動機 <sup>※1</sup>	鉛直加速度 [G]	0.54	1.0	* 1.85		0.97	2.2	2.26
非常用予備発電装置機関本体	水平加速度 [G]	0.90	1.7	* 1.88		0.90	2.0	2.22
アニュラス排気ファン・原動機		2.04	2.3	1.12		2.04	4.6	2.25
安全補機室排気ファン・原動機		2.04	2.3	1.12		2.04	4.6	2.25
中央制御室空調ファン・原動機	鉛直加速度 [G]	0.64	1.0	1.56	鉛直加速度 [G]	0.64	2.0	3.12
中央制御室再循環ファン・原動機		0.78	1.0	1.28		0.78	2.0	2.56
中央制御室非常用給気ファン・原動機		0.64	1.0	1.56		0.64	2.0	3.12

※1:再生熱交換器と燃料取替用水タンクポンプ・原動機については、今回の評価で最も裕度が小さい評価項目が変更となった。

※2:出典は原子力発電所耐震設計技術規程(以下「JEAC4601」という。)、日本工業規格(JIS規格)等。詳細は「添付 耐震裕度評価内容(実力評価)」参照。

# 5. 耐震裕度評価結果(実力評価)

## (1) 再生熱交換器の耐震裕度評価結果の概要

既往評価結果から算出した耐震裕度が2倍未満であった再生熱交換器支持脚について、現時点の知見も踏まえ実力評価で算出した耐震裕度が2倍以上あることを確認。

**既往の評価**

【評価内容】

支持脚にかかる力 = 地震力(F)

摩擦力(F $\mu$ =0)

支持脚(評価対象) 固定

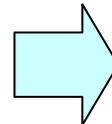
支持脚 可動

・脚部の摩擦力を考慮しない、簡便な手法で評価  
 ・地震力を保守的に設定  
 (水平地震動の評価条件(温度)を保守的に設定(最高使用温度)  
 鉛直地震動を1.2倍)

【評価結果】

項目	発生値	評価基準値 <sup>※1</sup>	裕度
組合せ応力	136[MPa]	222[MPa]	1.63
座屈	0.59	1.00	1.69

※1: JEAC4601により算出(材料特性はミルシート値)



**今回の評価**

【評価内容】

支持脚にかかる力 = 地震力(F'-F $\mu$ )

摩擦力(F $\mu$ )

支持脚(評価対象) 固定

支持脚 可動

・脚部の摩擦力を考慮した、より現実的な評価<sup>※</sup>  
 ・より現実的な地震力を設定  
 (水平地震動の評価条件(温度)を現実的な値に設定)  
 鉛直地震動は割増ししない

※: 再生熱交換器の支持脚は、熱による伸縮を吸収させるために、1本は水平方向に動く構造としている。したがって、地震時には、固定脚側の支持力と脚部の摩擦力とで地震力に耐えることとなる

【評価結果】

項目	発生値	評価基準値 <sup>※1</sup>	裕度
組合せ応力	106[MPa]	222[MPa]	2.09
座屈	0.49	1.00	2.04

※1: JEAC4601により算出(材料特性はミルシート値)

# 5. 耐震裕度評価結果(実力評価)

## (2) 原子炉格納容器本体の耐震裕度評価結果の概要

既往評価結果から算出した耐震裕度が2倍未満であった原子炉格納容器本体の座屈評価について、現時点の知見も踏まえ実力評価で算出した耐震裕度が2倍以上あることを確認。

### 【評価内容】

#### 既往の評価

$$\frac{\alpha_B(P/A)}{f_c} + \frac{\alpha_B(M/Z)}{f_b} \leq 1$$

$\alpha_B$ : 安全率=1.5  
 M: 曲げモーメント(水平地震による荷重)  
 P: 軸圧縮荷重(自重+鉛直地震荷重)  
 Z: 格納容器断面係数  
 A: 格納容器断面積  
 $f_c$ : 軸圧縮荷重に対する座屈応力  
 $f_b$ : 曲げモーメントに対する座屈応力

- 広範な座屈実験結果を基に定められた、弾性座屈に対する保守的な設計公式
- さらに、原子力発電所の耐震設計では、安全率1.5を考慮
- 材料物性は規格に定められた値を使用

### 【評価結果】

発生値	評価基準値	裕度
0.88	1.00	1.13

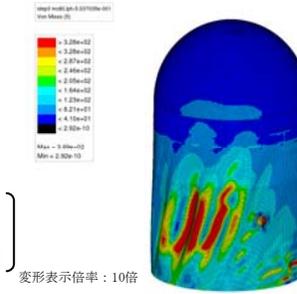
### 【評価内容】

#### 今回の評価



3次元FEM解析モデル

地震荷重を漸増させ、設備にかかる力が格納容器耐力に達する際の最大荷重を算出



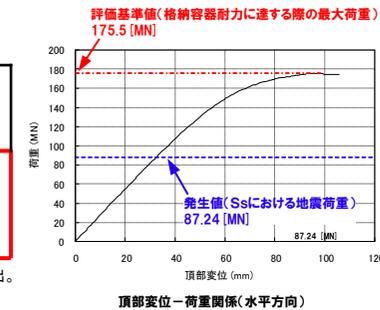
最大荷重時の変形・応力カウンター図

- 実構造を精緻に再現した3次元FEMモデルを構築
- より詳細で高度な解析手法である、静的弾塑性座屈解析を実施
- 円筒部の降伏応力はミルシート値を使用

### 【評価結果】

	発生値 [MN]	評価基準値 <sup>※1</sup> [MN]	裕度
水平	87.24	175.5	2.01
鉛直	3.96	7.96	

※1: 材料の降伏応力(ミルシート値)を基に解析により算出。



# 5. 耐震裕度評価結果(実力評価)

## (3) アニュラスシールの耐震裕度評価結果の概要

既往評価結果から算出した耐震裕度が2倍未満であったアニュラスシールの梁端ボルトのせん断応力評価について、現時点の知見も踏まえ実力評価で算出した耐震裕度が2倍以上あることを確認。

### 既往の評価

#### 【評価結果】

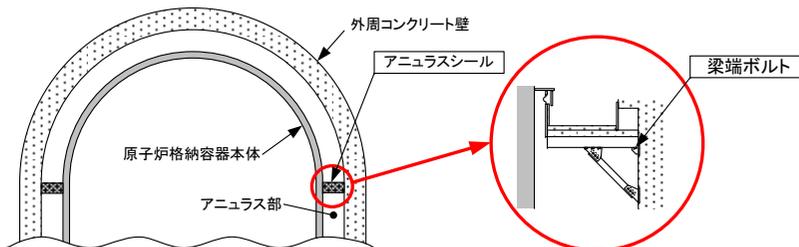
発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]	裕度
130	220	1.69

#### 【評価基準値根拠】

保守的な値である建設時の工事計画認可申請書記載値を使用

部 材 名	材 質	許 容 応 力 $\text{kg}/\text{mm}^2$				
		引 張	圧 縮	曲 げ	せん断	
サポ-ト	梁	SS41	24.0	—	24.0	13.8
	根 太	SS41	24.0	—	24.0	13.8
ビ--ム	ブ-レス	SS41	24.0	18.3	—	13.8
梁 端 ボ ル ト	F10T	46.5	—	—	22.5	≒220 [MPa]
ブ-レス 端 ボ ル ト	F10T	46.5	—	—	22.5	

伊方3号機 第3回工事計画認可申請書 より



### 今回の評価

#### 【評価結果】

発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]	裕度
130	403	3.10

#### 【評価基準値根拠】

日本工業規格 (JIS規格) の機械的性質(耐力:900 [MPa]、引張強さ:1000 [MPa])を用いて、日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」(JSME規格)に基づき、より現実的な評価基準値を算出

表2 ボルト試験片の機械的性質

ボルトの機械的性質による等級	耐力 $\text{N}/\text{mm}^2$ { $\text{kgf}/\text{mm}^2$ }	引張強さ $\text{N}/\text{mm}^2$ { $\text{kgf}/\text{mm}^2$ }	伸び %	絞り %
F 8T	640以上 {65.3以上}	800~1 000 {81.6~102.0}	16以上	45以上
F10T	900以上 {91.8以上}	1 000~1 200 {102.0~122.4}	14以上	40以上
F11T	950以上 {96.9以上}	1 100~1 300 {112.2~132.6}	14以上	40以上

JIS B1186 より

# 5. 耐震裕度評価結果(実力評価)

## (4) ポンプ等の動的機器の耐震裕度評価結果の概要

既往評価結果から算出した耐震裕度が2倍未満であった動的機器の動的機能維持評価について、現時点の知見も踏まえ実力評価で算出した耐震裕度が2倍以上あることを確認。

### 既往の評価

【評価結果】例:横型ポンプ(充てんポンプ)

項目	発生値 [G]	評価基準値 [G]	裕度
水平	0.77	1.4	1.81
鉛直	0.38	1.0	2.63

【評価基準値根拠】

JEAC4601に規定されている保守的な評価基準値である、機能維持確認済加速度(下図①)を使用

### 今回の評価

【評価結果】例:横型ポンプ(充てんポンプ)

項目	発生値 [G]	評価基準値 [G]	裕度
水平	0.77	2.2 (1.4 × 1.6)	2.85
鉛直	0.38	2.3 (1.0 × 2.3)	6.05

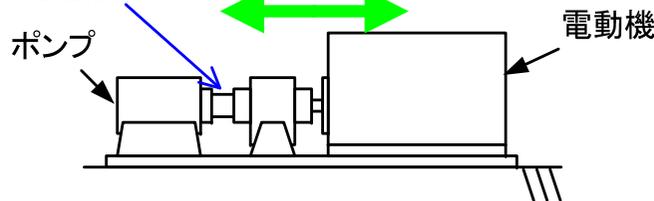
【評価基準値根拠】

より現実的な耐力である、最も厳しい評価となる部位が損傷しない最大の加速度(下図①')を使用

①' 最も厳しい評価となる部位が損傷しない最大の加速度(①×②)

② ①を入力した際に最も厳しい評価となる部位の耐震裕度

① JEAC4601に規定されている評価基準値(機能維持確認済加速度)



【JEAC4601記載値】横型ポンプの例

① 機能維持確認済加速度

水平方向:1.4 [G] , 鉛直方向:1.0 [G]

② ①を入力した際に最も厳しい評価となる部位の耐震裕度

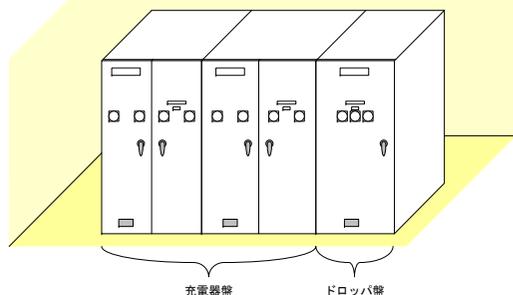
評価部位	基礎ボルト	支持脚	軸	軸継手※
裕度	2.3	27	7.7	1.6

※:軸方向

## 6. 耐震裕度評価結果(耐震性向上工事後の評価) (1) 充電器盤、ドロツパ盤の耐震裕度評価結果

既往評価結果から算出した耐震裕度が2倍未満であった充電器盤、ドロツパ盤について、耐震性向上工事(サポートを追設する工事)を実施し、工事後の耐震裕度が2倍以上であることを確認。

既往の評価(工事前)



概要図(工事前)

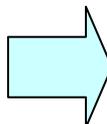
【固有振動数】

設備	固有振動数[Hz]
充電器盤・ドロツパ盤	25.77

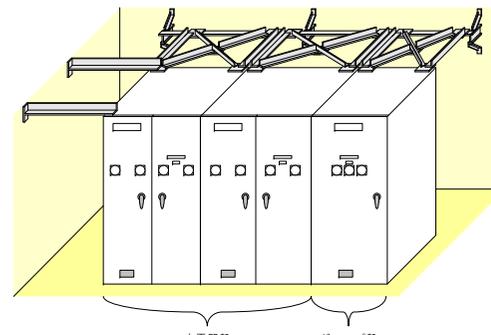
【評価結果】

設備	方向	発生値[G]	評価基準値※1[G]	裕度
充電器盤	水平	2.79	5.50	1.97
	鉛直	0.46	2.00	4.36
ドロツパ盤	水平	2.68	5.00	1.86
	鉛直	0.46	2.00	4.34

※1：平成14年度5電力委託(加振試験)成果。



今回の評価(工事後)



概要図(工事後)

【固有振動数】

設備	固有振動数[Hz]
充電器盤・ドロツパ盤	31.06

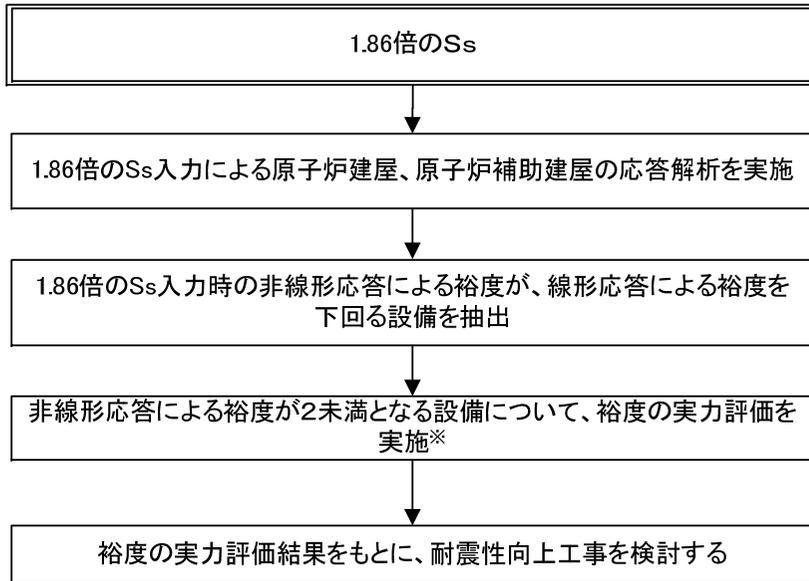
【評価結果】

設備	方向	発生値[G]	評価基準値※1[G]	裕度
充電器盤	水平	1.17	5.50	4.70
	鉛直	0.65	2.00	3.07
ドロツパ盤	水平	1.17	5.00	4.27
	鉛直	0.65	2.00	3.07

※1：平成14年度5電力委託(加振試験)成果。

# 7. 建屋非線形応答の影響に関する検討結果(1/2)

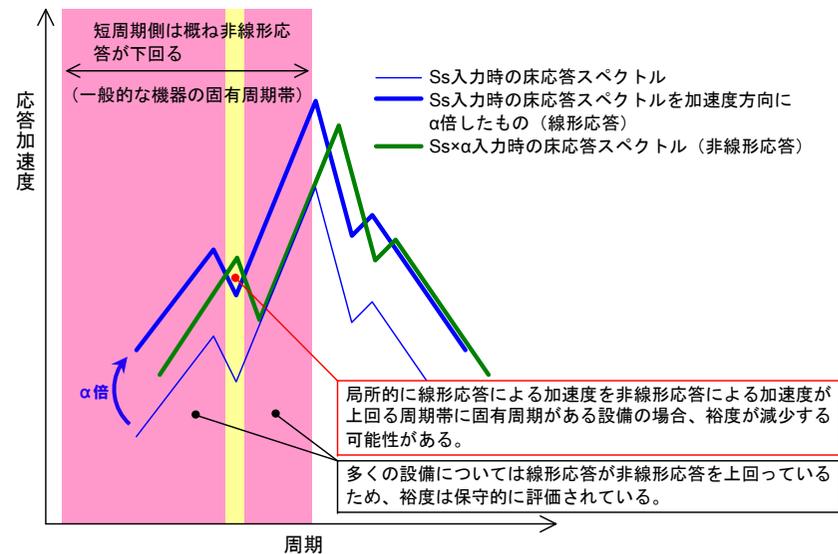
耐震裕度2倍確保の取組みにおいては、一般的に、安全側(厳しい側)の評価結果となる建屋の線形応答による検討を主としたが、すべての対象設備について建屋非線形応答の影響についても検討を実施。



※2倍の裕度が確認できた段階で、評価を終了する。

建屋非線形応答の影響検討フロー

線形応答と非線形応答による床応答スペクトルの相違



建屋非線形応答の影響イメージ

## 7. 建屋非線形応答の影響に関する検討結果(2/2)

建屋非線形応答の影響について検討した結果、再生熱交換器、非常用予備発電装置機関本体および加圧器安全弁については、非線形応答による裕度が2倍未満であったが、現時点の知見も踏まえた実力評価を実施することにより、耐震裕度が2倍以上であることを確認。

建屋非線形性影響評価結果(非線形応答による裕度が線形応答による裕度を下回る設備)

設備名称	線形応答による裕度 (既往の耐震裕度)	非線形応答による 裕度	非線形応答による 裕度 (実力評価)	備 考
炉内構造物	17.25	16.90	—	
炉心支持構造物	2.61	2.56	—	
再生熱交換器	1.63	1.17	2.19	5.(1)で示した条件に加え、上層階(EL24m)ではなく当該機器据付け階(EL17m)の床応答値を用いて評価を実施した結果、裕度2倍が確認できた。
非常用予備発電装置機関本体	1.88	1.82	2.13	5.(4)で示した、より現実的な評価基準値(機能確認済み加速度:2.0G)を用いて実力評価を実施した結果、裕度2倍が確認できた。
直流電源装置	2.60	2.44	—	
その他配管・サポート	2.08	2.01	—	
動力変圧器	13.12	9.94	—	
一般弁	7.78	5.29	—	
加圧器安全弁	2.54	1.28	84.21	JEAC4601に基づく構造強度評価を実施した結果、裕度2倍が確認できた。
主蒸気逃がし弁	3.97	3.28	—	
ディーゼルコントロールセンタ	6.57	6.36	—	
制御用空気圧縮機盤	5.88	5.87	—	

## 8. 外部有識者による確認結果の概要

耐震裕度2倍確保に係る評価の妥当性について、第三者的な立場からの確認を得ることとし、外部有識者2名を委員とした検討会を開催した。

検討会では、今回の評価の基本的な考え方をはじめとして、検討の流れや、再生熱交換器・原子炉格納容器・アニュラスシール・動的機器(ポンプ等)の評価結果について確認いただき、妥当との見解が得られた。

### 【有識者】

藤田 聡 (ふじた さとし) 東京電機大学 工学部長  
山口 篤憲 (やまぐち あつのり) 一般財団法人 発電設備技術検査協会 参与

### 【開催実績および確認概要】

	開催日	確認概要
第1回	平成24年7月20日	・再生熱交換器、原子炉格納容器、アニュラスシール、動的機器(ポンプ等)の評価について、妥当であることを確認いただいた。 なお、有識者意見を踏まえ、再生熱交換器および原子炉格納容器の評価について、説明性の観点から追加の検討を行うこととした。
第2回	平成24年8月2日	・再生熱交換器に関する追加検討について、妥当であることを確認いただいた。 ・建屋非線形応答の影響評価について、妥当であることを確認いただいた。
第3回	平成24年8月20日	・原子炉格納容器に関する追加検討について、妥当であることを確認いただいた。
第4回	平成25年1月21日	・前回までの検討会での議論を踏まえたうえで、耐震裕度2倍確保に係る評価の全体について確認いただき、妥当であることを確認いただいた。

## 9. まとめ

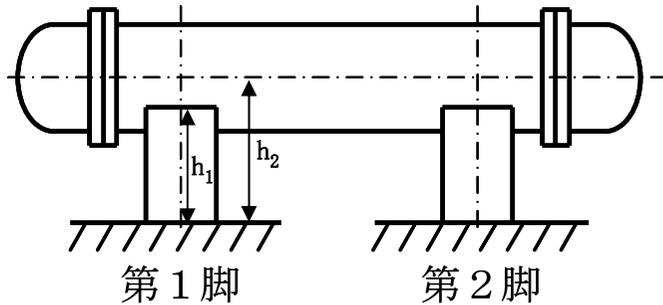
---

- 伊方3号機の対象設備(134設備)について、耐震裕度が2倍以上あることが確認できました。
- これを踏まえ、当社の評価について、外部有識者2名の委員により第三者的な立場から確認いただいた結果、今回の評価結果が妥当であるとの見解を得ました。
- 当社は、引き続き、伊方1、2号機についても同様の耐震評価を進めており、必要に応じ耐震性向上工事を実施するとともに、皆様にご安心していただけるよう、更なる安全性の向上をはかって参ります。

# 【添付】再生熱交換器支持脚の耐震裕度評価内容(実力評価)(1/4)

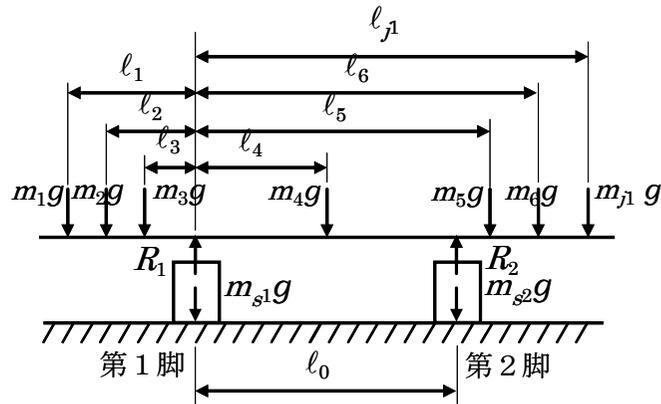
## 既往の評価

### ① 横置円筒形容器の構造と計算諸元



横置円筒形容器構造図

### ② 脚に作用する荷重の算出



荷重状態

### 主な計算諸元

$m_0$	容器の運転質量	5,360 kg
$m_{s1}$	第1脚の質量	40 kg
$h_1$	基礎から第1脚の胴付け根部までの高さ	264 mm
$h_2$	基礎から胴中心までの高さ	450 mm
$l_0$	脚中心間距離	2,600 mm
$A$	第1脚の断面積	9,170 mm <sup>2</sup>
$A_s$	第1脚のせん断断面積	3,880 mm <sup>2</sup>
$Z$	第1脚の断面係数	$2.01 \times 10^5$ mm <sup>3</sup>
$a_h$	Ss地震動による水平方向地震加速度	17.30 m/s <sup>2</sup>
$a_v$	Ss地震動による鉛直方向地震加速度	5.88 m/s <sup>2</sup>
$g$	重力加速度	9.80665 m/s <sup>2</sup>

### 【自重により脚が受ける荷重】

脚の受ける質量はモーメントの釣合より求める。左図において第1脚まわりのモーメントの釣合より次式が成り立つ。

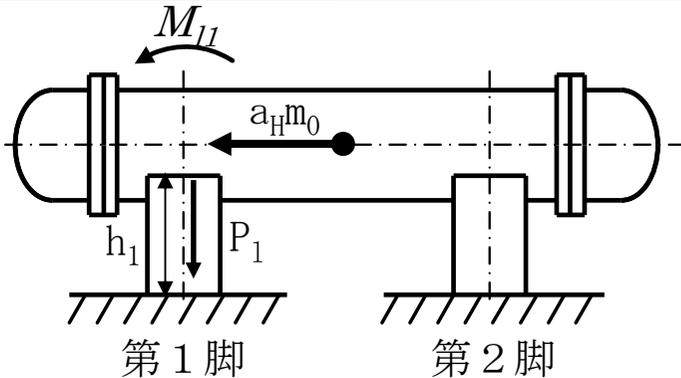
$$\sum_{i=1}^{j1} m_i g l_i - R_2 l_0 = 0$$

上記釣合式により計算した結果脚の受ける質量はそれぞれ以下のとおりとなる。

$$R_1 = 29,345.5 \text{ (N)}$$

$$R_2 = 22,433.6 \text{ (N)}$$

# 【添付】再生熱交換器支持脚の耐震裕度評価内容(実力評価)(2/4)



【水平方向地震により第1脚底面に作用する曲げモーメント】

$$M_{11} = a_H m_0 h_1 = 17.3 \times 5,360 \times 264 = 24,480,192(\text{N} \cdot \text{mm})$$

【水平方向地震により脚つけ根部に作用する鉛直方向荷重】

$$P_1 = a_H (m_0 - m_{s1}) \frac{h_2}{l_0}$$

$$= 17.3(5,360 - 40) \frac{450}{2,600} = 15,929.3(\text{N})$$

### ③ 脚の応力の算出

②で求めた各荷重を用いて脚の応力を算出する。

a. 運転時質量および鉛直方向地震力による応力 (圧縮)

$$\sigma_{s1} = \frac{R_1 + m_{s1}g}{A} \left(1 + \frac{a_v}{g}\right) = \frac{29,345.5 + 40 \times 9.80665}{9170} \left(1 + \frac{5.88}{9.80665}\right) = 5.2(\text{MPa})$$

b. 水平方向地震力による応力 (曲げ, 圧縮)

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{11}}{Z} = \frac{24,480,192}{201,000} \doteq 121.8(\text{MPa}) \quad (\text{曲げ})$$

$$\sigma_{s3} = \frac{P_1}{A} = \frac{15,929.3}{9,170} = 1.8(\text{MPa}) \quad (\text{圧縮})$$

c. 水平方向地震力による応力 (せん断)

$$\tau_s = \frac{a_H m_0}{A_s} = \frac{17.3 \times 5,360}{3,880} = 23.9(\text{MPa})$$

d. 組合せ応力

$$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s3})^2 + 3\tau_s^2} = \sqrt{(5.2 + 121.8 + 1.8)^2 + 3 \times 23.9^2} \doteq 136(\text{MPa}) < 222(\text{MPa})$$

e. 曲げと圧縮の組合せ (座屈) の評価

$$\frac{\sigma_{s1} + \sigma_{s3}}{f_c} + \frac{\sigma_{s2}}{f_b} = \frac{5.2 + 1.8}{220} + \frac{121.8}{222} \doteq 0.59 \leq 1$$

【脚の許容応力】

ミルシート値を基にした降伏点 $\sigma_y = 222\text{MPa}$
ミルシート値を基にした引張強さ $\sigma_u = 404\text{MPa}$
$F^* = \min(\sigma_y, 0.7\sigma_u) = \min(222, 282) = 222$
$ft^* = F^*/1.5 = 148 \quad 1.5 ft^* = 222\text{MPa}$

## 【添付】再生熱交換器支持脚の耐震裕度評価内容(実力評価)(3/4)

### 今回の評価

- 評価条件の温度設定を最高使用温度である343℃から、現実的な値である第1種機器設計過渡条件内の最高温度286.1℃に変更
- 評価に用いる地震動(加速度)のマージン(2割増)を考慮せず、現実的な地震加速度を使用。

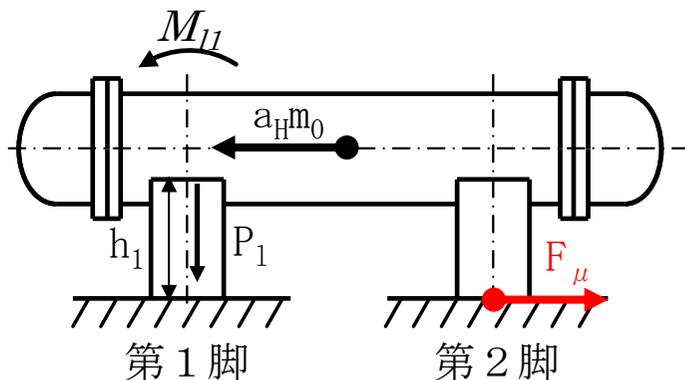
上記により、入力地震加速度が以下のとおり低減。

水平方向地震加速度  $17.30\text{m/s}^2 \rightarrow 16.07\text{m/s}^2$

鉛直方向地震加速度  $5.88\text{m/s}^2 \rightarrow 4.91\text{m/s}^2$

- 支持脚評価に用いる水平地震荷重を支持脚の静止摩擦力分低減させ、現実的な荷重を用いた評価とした。

### ① 脚に作用する荷重の算出



【水平方向地震により第1脚底面に作用する曲げモーメント】

$$\begin{aligned} M_{11} &= (a_H m_0 - F_{\mu}) h_1 \\ &= (16.07 \times 5,360 - 14,914) \times 264 = 18,802,397 \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} F_{\mu} &= \mu \{ F_b + m_0 (g - a_v) \} \\ &= 0.3 \{ 23,467.7 + 5,360 (9.80665 - 4.91) \} = 14,914 \end{aligned}$$

$\mu = 0.3$  (支持脚底面(鉄)と支持架台(鉄)の静止摩擦係数)

$F_b = 23,467.7$  (N) (ボルトの締付力)

## 【添付】再生熱交換器支持脚の耐震裕度評価内容(実力評価)(4/4)

【水平方向地震により脚つけ根部に作用する鉛直方向荷重】

$$P_1 = a_H(m_0 - m_{s1}) \frac{h_2}{l_0}$$
$$= 16.07(5,360 - 40) \frac{450}{2,600} = 14,796.8(\text{N})$$

### ② 脚の応力の算出

①で求めた各荷重を用いて脚の応力を算出する。

a. 運転時質量および鉛直方向地震力による応力 (圧縮)

$$\sigma_{s1} = \frac{R_1 + m_{s1}g}{A} \left(1 + \frac{a_v}{g}\right) = \frac{29345.5 + 40 \times 9.80665}{9,170} \left(1 + \frac{4.91}{9.80665}\right) = 4.9(\text{MPa})$$

b. 水平方向地震力による応力 (曲げ, 圧縮)

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{11}}{Z} = \frac{18,802,397}{201,000} \doteq 93.6(\text{MPa}) \quad (\text{曲げ}) \quad \sigma_{s3} = \frac{P_1}{A} = \frac{14,796.8}{9,170} = 1.7(\text{MPa}) \quad (\text{圧縮})$$

c. 水平方向地震力による応力 (せん断)

$$\tau_s = \frac{a_H m_0 - F_\mu}{A_s} = \frac{16.07 \times 5,360 - 14,914}{3,880} = 18.4(\text{MPa})$$

d. 組合せ応力

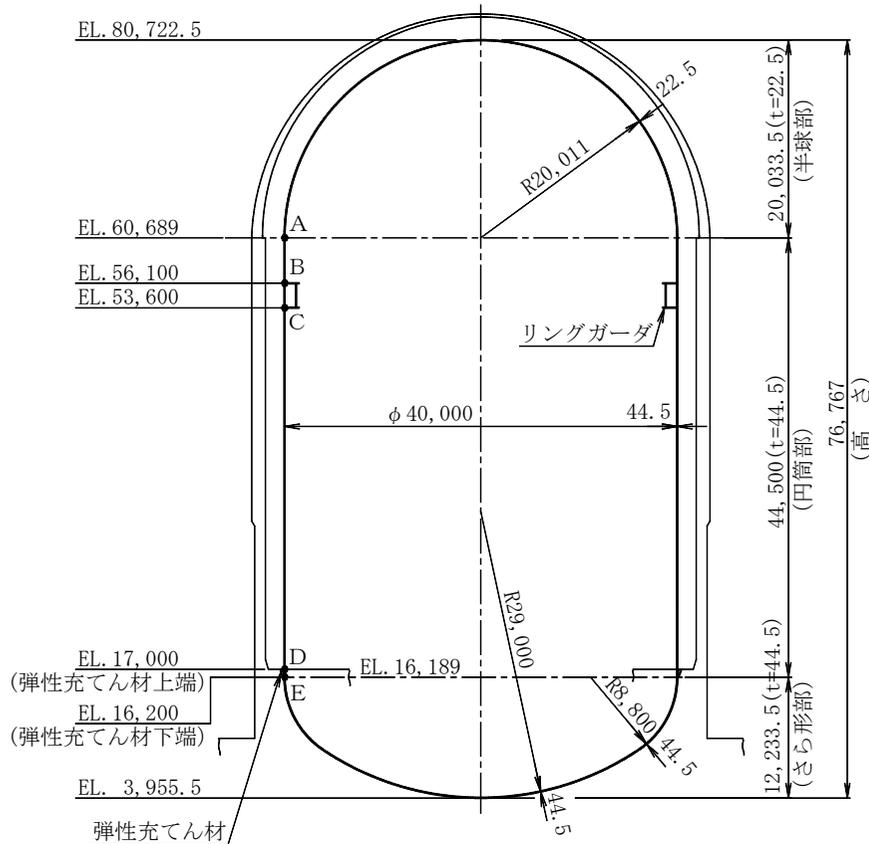
$$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s3})^2 + 3\tau_s^2} = \sqrt{(4.9 + 93.6 + 1.7)^2 + 3 \times 18.4^2} \doteq \underline{106(\text{MPa})}$$

e. 曲げと圧縮の組合せ (座屈) の評価

$$\frac{\sigma_{s1} + \sigma_{s3}}{f_c} + \frac{\sigma_{s2}}{f_b} = \frac{4.9 + 1.7}{205} + \frac{93.6}{207} \doteq \underline{0.49} \leq 1$$

# 【添付】原子炉格納容器本体の耐震裕度評価内容(実力評価)(1/4)

## 既往の評価



伊方3号機 原子炉格納容器の基本形状図

### ①座屈評価式

$$\frac{\alpha_B(P/A)}{f_c} + \frac{\alpha_B(M/Z)}{f_b} \leq 1 \quad (4.2.3.1-1)$$

軸圧縮座屈 曲げ座屈

$\alpha_B$ : 安全率=1.5 M: 曲げモーメント P: 軸圧縮荷重(W+N)  
 Z: 断面係数=5.598×10<sup>10</sup> mm<sup>3</sup> A: 断面積=5.598×10<sup>6</sup> mm<sup>2</sup>  
 f<sub>c</sub>: 軸圧縮荷重に対する座屈応力=90.7 MPa  
 f<sub>b</sub>: 曲げモーメントに対する座屈応力=124.1 MPa

### ②荷重(基準地震動Ssによる建屋応答解析結果より)

自重 W	建屋応答解析結果	
	軸力 N	曲げモーメント M
× 10 <sup>3</sup> N	× 10 <sup>3</sup> N	× 10 <sup>8</sup> N・mm
32,393	21,260	33,330

### ③座屈評価結果

$$\frac{1.5(5.3653 \times 10^7 / 5.598 \times 10^6)}{90.7} + \frac{1.5(33,330 \times 10^8 / 5.598 \times 10^{10})}{124.1} \doteq 0.88$$

# 【添付】原子炉格納容器本体の耐震裕度評価内容(実力評価)(2/4)

## 今回の評価

解析手法:FEMによる静的弾塑性座屈解析

解析コード:ABAQUS

主要要素:3次元シェル要素

解析対象:弾性材下端より上部(円筒胴部+上部半球)

解析条件:

(1)材料物性:

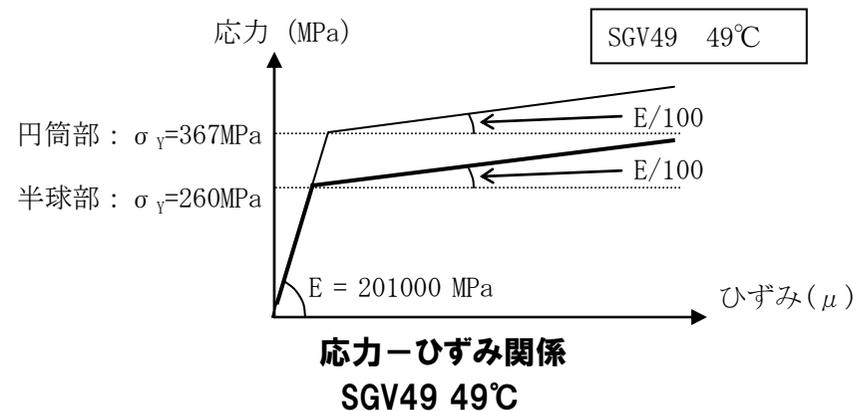
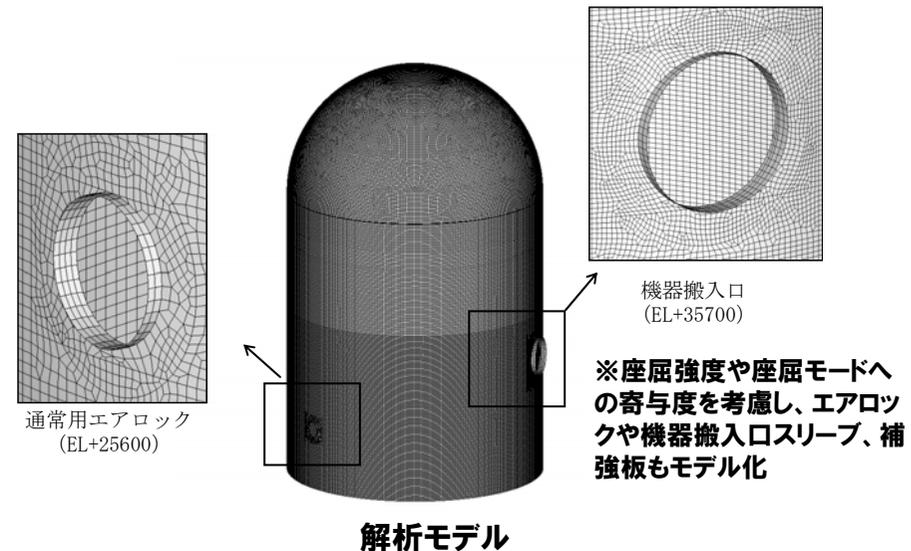
- ① 応力-ひずみ関係:バイリニア
- ② 温度条件:格納容器内初期温度49℃
- ③ 降伏応力 $\sigma_y$   
半球部:JSME 公称値  
円筒部:ミルシート平均値

(2)初期不整

- ① 弾性座屈固有値解析によって得られるせん断座屈と曲げ座屈に対応したモードを重畳させて入力
- ② 最大初期不整量は据付寸法計測記録に基づき38.4mmとした。

(3)負荷条件

水平荷重と鉛直荷重の同時載荷

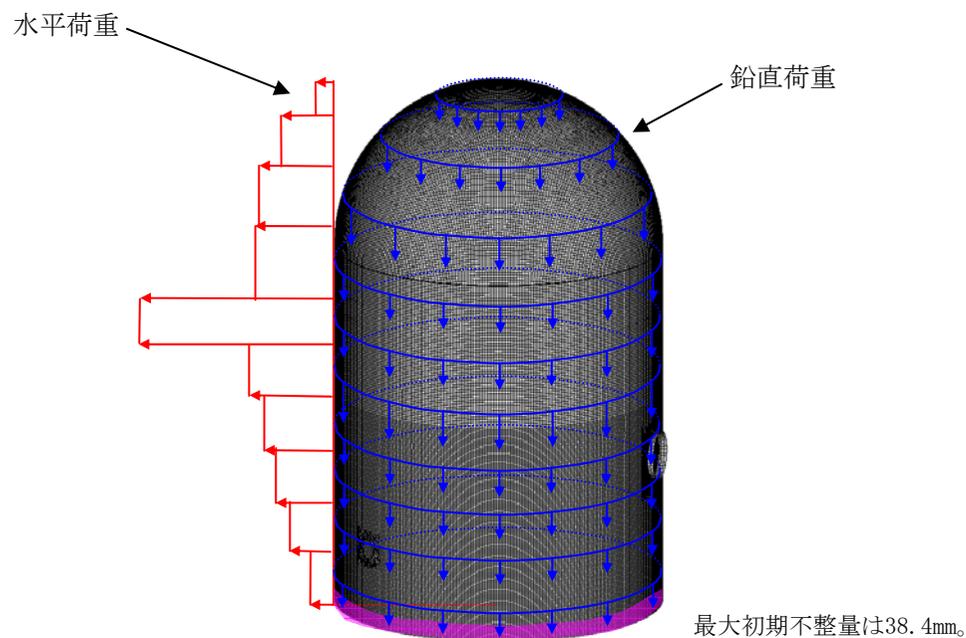


## 【添付】原子炉格納容器本体の耐震裕度評価内容(実力評価)(3/4)

解析条件(つづき):

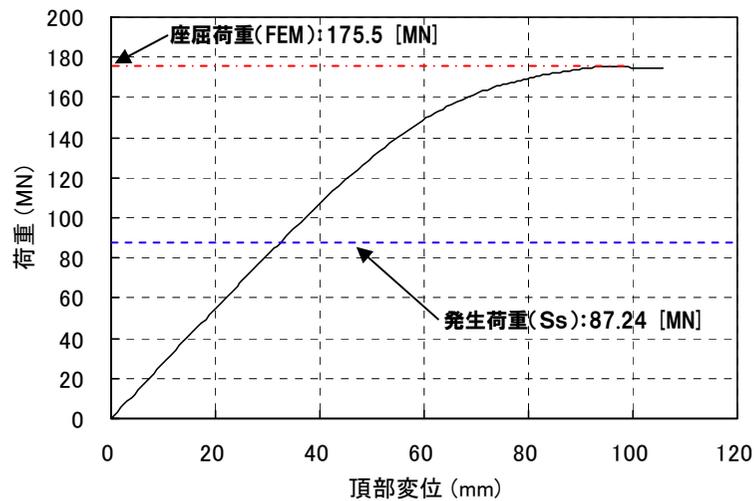
### (3)負荷条件

自重は一定として入力した状態で、地震による水平荷重、鉛直荷重を最大荷重(=座屈耐力)となるまで、静的に漸増させる。



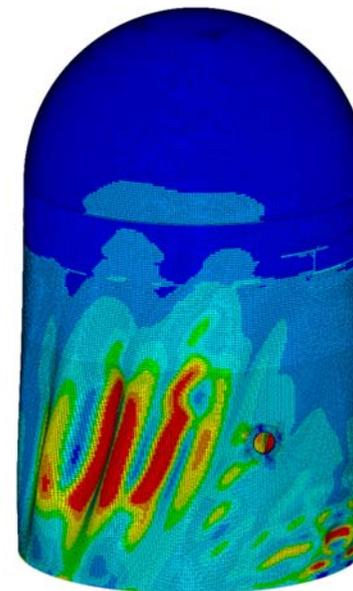
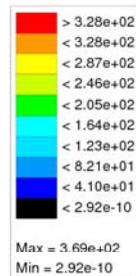
# 【添付】原子炉格納容器本体の耐震裕度評価内容(実力評価)(4/4)

## 【解析結果】



頂部変位－荷重関係

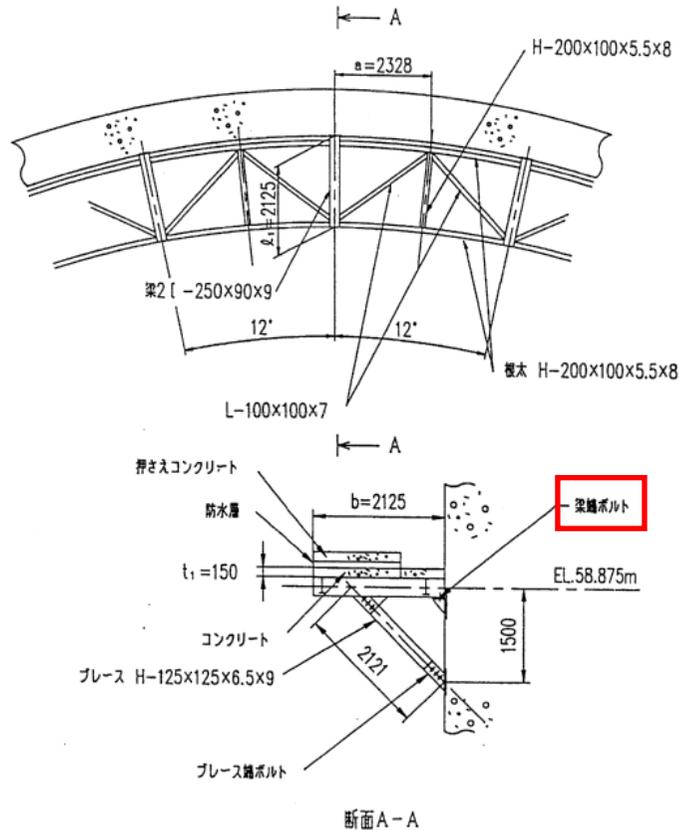
step3 inc80,ipl=5.037035e-001  
Von Mises (5)



最大荷重時の変形・応力コンター図

# 【添付】アニュラスシールの耐震裕度評価内容(実力評価)(1/3)

## 既往の評価



アニュラスシール構造図

## 【評価結果】

部材名	材質	せん断		
		評価値 [MPa]	許容値 [MPa]	裕度
梁端ボルト	F10T	130	220	1.69

## 【許容値根拠】

### 工事計画認可申請書記載値

部材名	材質	許容応力 kg/mm <sup>2</sup>				
		引張	圧縮	曲げ	せん断	
サポート	梁	SS41	24.0	—	24.0	13.8
	根太	SS41	24.0	—	24.0	13.8
ビーム	ブレース	SS41	24.0	18.3	—	13.8
	梁端ボルト	F10T	46.5	—	—	22.5
ブレース端ボルト	F10T	46.5	—	—	22.5	

伊方3号機 第3回工事計画認可申請書 より

22.5 (kg/mm<sup>2</sup>) × 9.80665 (m/s<sup>2</sup>)  
 ≒ 220 [MPa]

## 工事計画認可申請時の算出根拠

建築基準法施行令92条の2(下表)により、規定されている。

	長期に生じる力に対する 許容せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	短期に生じる力に対する 許容せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
1面せん断	0.3T <sub>0</sub>	長期に生じる力に対する許容せん断応力度の数値の1.5倍とする。

\*この表において、T<sub>0</sub>は高力ボルトの品質に応じて国土交通大臣が定める基準張力を表す。

F10T(高力ボルト)の基準張力T<sub>0</sub>=500N/mm<sup>2</sup>

0.3 × 500=150N/mm<sup>2</sup>(長期)

150 × 1.5=225N/mm<sup>2</sup>(短期)<sup>※1</sup>

※1: 工事計画認可申請時はSI単位化前であったため当時の評価基準値をそのままSI単位に換算した220MPaを耐震バックチェックでの評価基準値とした。

# 【添付】アニュラスシールの耐震裕度評価内容(実力評価)(2/3)

## 今回の評価

F10TのJIS規格の機械的性質(耐力、引張強さ)を用いてJSME規格に基づき許容せん断応力を算出して評価。

表2 ボルト試験片の機械的性質

ボルトの機械的性質による等級	耐力 N/mm <sup>2</sup> {kgf/mm <sup>2</sup> }	引張強さ N/mm <sup>2</sup> {kgf/mm <sup>2</sup> }	伸び %	絞り %
F 8T	640以上 {65.3以上}	800~1 000 {81.6~102.0}	16以上	45以上
F10T	<b>900以上</b> {91.8以上}	<b>1 000~1 200</b> {102.0~122.4}	14以上	40以上
F11T	950以上 {96.9以上}	1 100~1 300 {112.2~132.6}	14以上	40以上

JIS B1186 より

JSME規格 SSB-3131及びSSB-3133により規定されるボルト材の供用状態Dでの許容応力の算出

$$F = \min[1.2S_y, 0.7S_u] = \min[1.2 \times 900, 0.7 \times 1000] = 700 \text{ N/mm}^2 = 700 \text{ MPa}$$

$$\text{許容せん断応力 } f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = \frac{700}{1.5\sqrt{3}} \doteq 269 \text{ MPa}$$

$$f_s \times 1.5 = 269 \times 1.5 \doteq 403 \text{ MPa}$$

## 【評価結果】

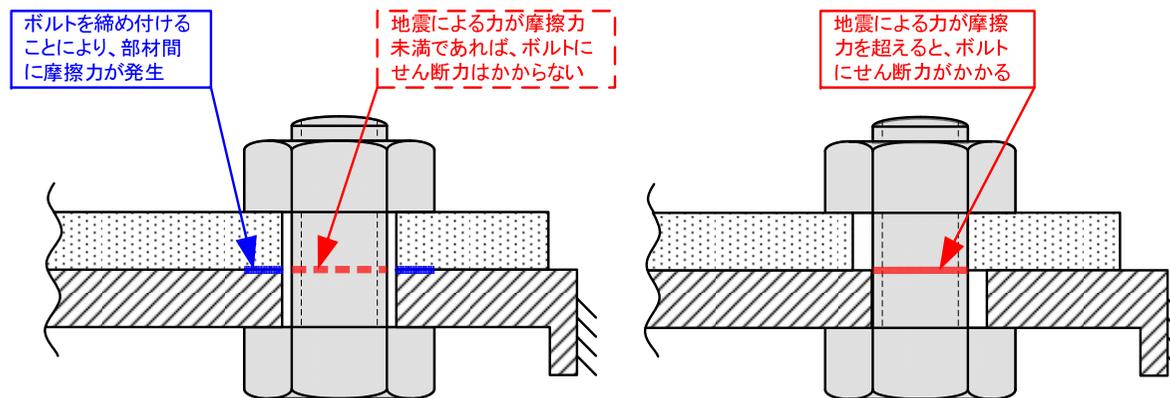
部材名	材質	せん断		
		評価値 [MPa]	許容値 [MPa]	裕度
梁端ボルト	F10T	130	403	3.10

## 【添付】アニュラスシールの耐震裕度評価内容(実力評価)(3/3)

当該ボルトは摩擦接合用の高力ボルトであり、既往の評価では、ボルトにせん断力が作用しない限界値を許容せん断応力としており、この応力以下では、ボルト軸断面に直接せん断力が作用することはない。

ここからさらにせん断力が増加し、摩擦力を上回った場合、ボルトの軸部が鋼板のボルト孔の側面に接触することになり、接合部に作用する力は、鋼板の接触面の摩擦ではなく、ボルトの断面のせん断で伝わることとなる。(下図参照)

この状態は、普通ボルトの支圧接合と同じ状態であり、ボルトの許容せん断応力は、ボルトの機械的性質から求まる値となる。



以上より、当該ボルトのせん断力による破損という観点から、JIS規格の当該機械的性質を基にJSME規格に基づき算出した評価基準値を用いる。

# 【添付】横形ポンプの耐震裕度評価内容(実力評価)

規格・基準<sup>※1</sup>で実施された機能維持評価では、最も耐震裕度が少ない部位は、水平方向では単段遠心式ポンプの軸継手で1.6、鉛直方向では基礎ボルトで2.3となっている。  
 当該裕度は規格・基準で定められた機能確認済加速度(水平方向1.4G、鉛直方向1G<sup>※2</sup>)を設備が受けたときの裕度であることから、最も裕度が少ない部位でも、水平方向は1.4G×1.6倍=2.2G、鉛直方向は1G×2.3倍=2.3Gの加速度を受けても損傷することはない。よって、これらを「より現実的な評価基準値」として採用した。

※1 原子力発電所耐震設計技術規程「JEAC4601-2008」

※2 重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)

横形ポンプ(単段遠心式)の機能維持評価結果(裕度)例<sup>※3</sup>  
 (水平(軸)方向1.4G、鉛直方向1G入力時)

基礎ボルト	支持脚	軸	軸継手 <sup>※4</sup>
2.3	27	7.7	1.6

※3 原子力発電所耐震設計技術規程「JEAC4601-2008」より

※4 軸方向

より現実的な評価基準値として採用する値  
 水平方向 2.2G 鉛直方向 2.3G

耐震裕度評価結果

設備名	方向	応答加速度(G)	機能確認済加速度(G) <sup>※</sup>	裕度 <sup>※</sup>
充てんポンプ	水平	0.77	2.2 (1.4)	2.85 (1.81)
	鉛直	0.38	2.3 (1.0)	6.05 (2.63)
ほう酸ポンプ	水平	0.77	2.2 (1.4)	2.85 (1.81)
	鉛直	0.38	2.3 (1.0)	6.05 (2.63)
燃料取替用水 タンクポンプ	水平	0.97 (354 [N])	2.2 (43500 [N])	2.26 (122.88)
	鉛直	0.54	2.3 (1.0)	4.25 (1.85)

※ ( )内は既往の評価結果

# 【添付】非常用予備発電装置機関本体の耐震裕度評価内容(実力評価)

規格・基準※1で実施された機能維持評価では、最も耐震裕度が少ない部位は、水平方向ではクランク軸基準軸受で1.2となっている。  
 当該裕度は規格・基準で定められた機能確認済加速度(水平方向1.7G、鉛直方向1G※2)を設備が受けたときの裕度であることから、最も裕度が少ない部位でも、1.7G×1.2倍≒2.0Gの加速度を受けても損傷することはない。  
 なお、鉛直方向については、既に2倍以上の裕度を有することから、現状の規格・基準で定められた機能確認済加速度である1G※2とし、これらを「より現実的な評価基準値」として採用した。

※1 原子力発電所耐震設計技術規程「JEAC4601-2008」

※2 重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)

非常用予備発電装置機関本体機能維持評価結果(裕度)例※3  
 (水平(軸)方向1.7G、鉛直方向1G入力時)

クランク軸 基準軸受	ガバナ リンク装置	潤滑油 サブタンク	発電機 軸受面圧
1.2	1.6	1.4	1.6

※3 原子力発電所耐震設計技術規程「JEAC4601-2008」より

より現実的な評価基準値として採用する値  
 水平方向 2.0G 鉛直方向 1.0G

耐震裕度評価結果

設備名	方向	応答加速度 (G)	機能確認済 加速度(G)※	裕度※
非常用 予備発電装置 機関本体	水平	0.90	2.0 (1.7)	2.22 (1.88)
	鉛直	0.37	1.0 (1.0)	2.70 (2.70)

※ ( )内は既往の評価結果

# 【添付】ファンの耐震裕度評価内容(実力評価)

規格・基準<sup>※1</sup>で実施された機能維持評価では、最も耐震裕度が少ない部位は、水平方向、鉛直方向ともに遠心型ファンのインペラで2.1となっている。  
 当該裕度は規格・基準で定められた機能確認済加速度(水平方向2.3G、鉛直方向1G<sup>※2</sup>)を設備が受けたときの裕度であることから、最も裕度が少ない部位でも、水平方向は2.3G×≒2倍=4.6G、鉛直方向は1G×≒2倍=2Gの加速度を受けても損傷することはない。よって、これらを「より現実的な評価基準値」として採用した。

※1 原子力発電所耐震設計技術規程「JEAC4601-2008」

※2 重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)

ファン(遠心直結型)の機能維持評価結果(裕度)例<sup>※3</sup>  
 (水平(軸)方向2.3G、鉛直方向1G入力時)

ケーシング	軸	軸受	インペラ
2.4	3.3	3.0	2.1

※3 原子力発電所耐震設計技術規程「JEAC4601-2008」より

より現実的な評価基準値として採用する値  
 水平方向 4.6G 鉛直方向 2.0G

※なお、軸流式ファンについては、機能確認済加速度に対して最も裕度が少ない部位でも8.9(軸)の裕度があるため、水平、鉛直方向ともに機能確認済加速度の2倍の値を評価基準値として採用した。

## 耐震裕度評価結果

設備名	方向	応答加速度(G)	機能確認済加速度(G) <sup>*</sup>	裕度 <sup>*</sup>
アニュラス 排気ファン (遠心型ファン)	水平	2.04	4.6 (2.3)	2.25 (1.12)
	鉛直	0.64	2.0 (1.0)	3.12 (1.56)
安全補機室 排気ファン (遠心型ファン)	水平	2.04	4.6 (2.3)	2.25 (1.12)
	鉛直	0.64	2.0 (1.0)	3.12 (1.56)
中央制御室 空調ファン (遠心型ファン)	水平	1.16	4.6 (2.3)	3.96 (1.98)
	鉛直	0.64	2.0 (1.0)	3.12 (1.56)
中央制御室 再循環ファン (軸流式ファン)	水平	1.37	4.8 (2.4)	3.50 (1.75)
	鉛直	0.78	2.0 (1.0)	2.56 (1.28)
中央制御室 非常用給気ファン (遠心型ファン)	水平	1.16	4.6 (2.3)	3.96 (1.98)
	鉛直	0.64	2.0 (1.0)	3.12 (1.56)

※ ( )内は既往の評価結果

# 【添付】原動機(電動機)の耐震裕度評価内容(実力評価)

規格・基準<sup>※1</sup>で実施された機能維持評価では、最も耐震裕度が少ない部位は、鉛直方向では横形ころがり軸受電動機の取付(基礎)ボルトの6.8となっている。

当該裕度は規格・基準で定められた機能確認済加速度(水平方向4.7G、鉛直方向1G<sup>※2</sup>)を設備が受けたときの裕度であることから、最も裕度が少ない部位でも、1G×6.8倍=6.8Gの加速度を受けても損傷することはない。

今回の評価は2倍の裕度を確認することが目的であるため、鉛直方向の評価基準値の設定にあたっては、保守的に現行の機能確認済加速度の2倍の値を「より現実的な評価基準値」として採用した。

なお、水平方向については、既に2倍以上の裕度を有することから、現状の規格・基準で定められた機能確認済加速度である4.7G<sup>※2</sup>とし、これらを「より現実的な評価基準値」として採用した。

※1 原子力発電所耐震設計技術規程「JEAC4601-2008」

※2 重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)

電動機(横形ころがり軸受)の機能維持評価結果(裕度)例<sup>※3</sup>  
(水平(軸)方向4.7G、鉛直方向1G入力時)

取付(基礎)ボルト	軸受
6.8	9.4

※3 原子力発電所耐震設計技術規程「JEAC4601-2008」より

より現実的な評価基準値として採用する値

水平方向 4.7G 鉛直方向 2.0G

## 耐震裕度評価結果

設備名	方向	応答加速度(G)	機能確認済加速度(G) <sup>※</sup>	裕度 <sup>※</sup>
充てんポンプ用原動機	水平	0.77	4.7(4.7)	6.10(6.10)
	鉛直	0.38	2.0(1.0)	5.26(2.63)
ほう酸ポンプ用原動機	水平	0.77	4.7(4.7)	6.10(6.10)
	鉛直	0.38	2.0(1.0)	5.26(2.63)
燃料取替用水タンクポンプ用原動機	水平	0.97	4.7(4.7)	4.84(4.84)
	鉛直	0.54	2.0(1.0)	3.70(1.85)
アニュラス排気ファン用原動機	水平	2.04	4.7(4.7)	2.30(2.30)
	鉛直	0.64	2.0(1.0)	3.12(1.56)
安全補機室排気ファン用原動機	水平	2.04	4.7(4.7)	2.30(2.30)
	鉛直	0.64	2.0(1.0)	3.12(1.56)
中央制御室空調ファン用原動機	水平	1.16	4.7(4.7)	4.05(4.05)
	鉛直	0.64	2.0(1.0)	3.12(1.56)
中央制御室再循環ファン用原動機	水平	1.37	4.7(4.7)	3.43(3.43)
	鉛直	0.78	2.0(1.0)	2.56(1.28)
中央制御室非常用給気ファン用原動機	水平	1.16	4.7(4.7)	4.05(4.05)
	鉛直	0.64	2.0(1.0)	3.12(1.56)

※ ( )内は既往の評価結果