

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密あるいは防護上の観点
から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-340-13 改 16
提出年月日	平成 30 年 6 月 11 日

工事計画に係る補足説明資料

耐震性に関する説明書のうち

補足-340-13 【機電分耐震計算書の補足について】

平成 30 年 6 月

日本原子力発電株式会社

1. 炉内構造物への極限解析による評価の適用について
2. 設計用床応答曲線の作成方法及び適用方法
3. 建屋－機器連成解析モデルの時刻歴応答解析における振幅マージンの考慮について
4. 機電設備の耐震計算書の作成について
5. 弁の動的機能維持評価の検討方針
6. 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）
7. 原子炉格納容器の耐震安全性評価について
8. 制御棒の挿入性評価について
9. 電気盤等の機能維持評価に適用する水平方向の評価用地震力について
10. 大型機器，構造物の地震応答計算書の補足について

下線：ご提出資料

1. 炉内構造物への極限解析による評価の適用について

目 次

1. 概要	1
2. 耐震評価について	1
3. 炉内構造物への極限解析の準用	3
3.1 規格基準における扱い及び炉内構造物への準用	3
3.2 極限解析による評価	15
4. 試験による確認について	47
4.1 はじめに	47
4.2 試験目的	47
4.3 試験内容	47
4.4 試験結果	51
4.5 まとめ	57
5. 1本あたりの地震荷重の算出について	68
5.1 詳細モデルによる影響評価	68
5.2 最外周部の偏心の扱いについて	76
別紙ー1 試験体に対する極限解析について	78
別紙ー2 補強板の健全性について	82
別紙ー3 気水分離器と蒸気乾燥器の相対変位について	87

炉内構造物への極限解析による評価の適用について

1. 概要

既工認においては、炉内構造物として公式等を用いた評価を行っていたが、今回工認では、機能限界を踏まえた許容限界をより現実的に示す観点で、J E A G 4601, J S M E 設計・建設規格で定められた極限解析による評価（以下「極限解析」という。）を採用する。極限解析については、規格基準に基づく手法であり、また新規制基準での工認における高浜 1, 2 号炉, 美浜 3 号炉で適用実績のある手法である。

2. 耐震評価について

スタンドパイプの耐震評価フローを図 2-1 に示す。今回工認におけるスタンドパイプの地震荷重については、多質点系の建屋機器連成解析モデルを用いた地震応答解析を実施し、スタンドパイプ全 225 本を 1 質点として算出された地震荷重を算出する。得られた地震荷重からスタンドパイプ 1 本に掛かる地震荷重を算出し、算出した地震荷重が 1 本のスタンドパイプにおける極限解析により得られた許容値（許容荷重）以下であることを確認することにより、健全性を確認する。

これは、シュラウドヘッド及び全スタンドパイプに対する評価においては、あるスタンドパイプが許容限界を超えた場合においても、他のスタンドパイプが有する耐力により構造物としての耐力が期待できると考えられるが、1 本に対する許容値と荷重を比較する場合他のスタンドパイプの耐力に期待しないため保守的な手法となると判断しているものである。

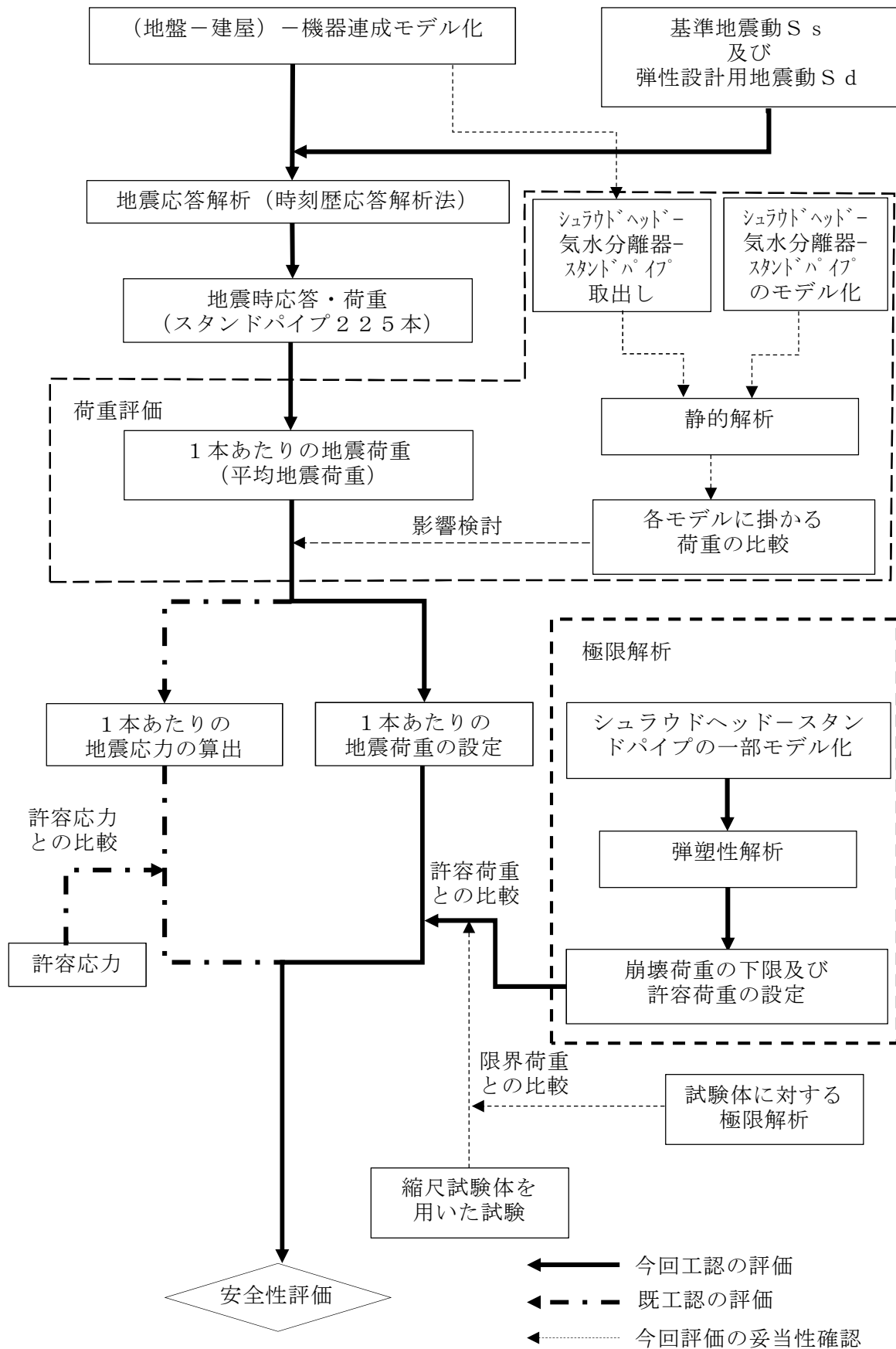


図 2-1 スタンドパイプの耐震評価フロー

3. 炉内構造物への極限解析の準用

3.1 規格基準における扱い及び炉内構造物への準用

J E A G 4601, J S M E 設計・建設規格の炉心支持構造物に関する抜粋を図 3-1 ~ 3 に示す。極限解析は, J E A G 4601, J S M E 設計・建設規格において, 炉心支持構造物に適用可能な設計手法として規定されている。また, J E A G 4601 において, 炉内構造物の許容応力は炉心支持構造物の許容応力を準用することができることを定めている。整理結果を表 3-1 に示す。

東海第二発電所の今回工認における炉内構造物の極限解析の適用に際して炉心支持構造物の規定を準用するため, 極限解析の具体的な評価手法が規定されている J S M E 設計・建設規格の炉心支持構造物の規格に定められた要求事項を満足することを確認して, 準用することとする。炉心支持構造物の規格要求事項に対して, 極限解析を適用するスタンドパイプの適合性確認に対する要求の整理結果を表 3-2 に示す。

J S M E 設計・建設規格の炉心支持構造物の規格に定められた要求事項について建設時の記録及び応力解析から要求事項を満足していることを確認した。

また, 評価範囲であるスタンドパイプとシュラウドヘッドの取付部の溶接施工管理については炉心支持構造物と同様の施工管理を実施している。

表 3 - 1 極限解析の規格基準における扱い

規格基準	適用範囲	備考
J E A G 4601	炉心支持構造物 炉内構造物	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉内構造物は炉心支持構造物を準用 ・ 具体的な手法として J S ME 設計・建設規格を読み込み (JEAG では告示 501 号を読み込み)

表 3 - 2 J S M E 設計・建設規格 炉心支持構造物の規格に対するスタンドパイプの適合性確認整理結果

CSS-1000：一般要求事項

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての考慮の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：考慮に対する方針を記載
CSS-1100	適用			
CSS-1110	適用範囲	適用範囲を炉心支持構造物の材料，設計及び検査としている。	要	材料，設計及び検査の規格を満足することで，適用範囲を満足することを確認する。
CSS-1120	境界			
CSS-1121	炉心支持構造物と炉内構造物の境界	境界は炉心支持構造物の外表面とする。	否	評価範囲はシュラウドヘッドとスタンドパイプであり，共に炉内構造物であることから炉心支持構造物と炉内構造物の境界がないため。
CSS-1300	記号の定義	使用する記号の定義を定めている。	要	記号の定義に従う。
CSS-1400	応力分類	CSS-3000 に規定する設計，応力解析の応力分類について定めている。	要	CSS-3000 に規定する設計及び応力解析は，規定の応力分類に従う。

51

CSS-2000：炉心支持構造物に使用する材料

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：確認結果を記載
CSS-2100	炉心支持構造物に使用可能な材料			
CSS-2110	炉心支持構造物に使用可能な材料の規定	付録材料表 Part1 の炉心支持構造物の規格に適合する又はこれと同等以上の化学成分及び機械的強度を有するものを使用することを定めている。	要	使用材料は SUS304TP 相当（ASME SA-312 Gr. TP304）であり，適合している。
CSS-2120	材料の熱処理に関する部分の特例規定	CSS-2120 の規定にかかわらない熱処理に関する特例規定を設けている。	否	特例規定を適用しないため。
CSS-2130	機械試験に関する要求事項	CSS-2110 及び CSS-2300 に規定する試験を行う場合は PVB-2200 及び 2300 の規定を準用する。	否	本要求はフェライト系材料に対しての要求であり，使用材料であるオーステナイト系ステンレス鋼に対する要求はないため。
CSS-2300	破壊靱性試験要求			
CSS-2310	破壊靱性不要となる規定	使用する材料は破壊靱性試験を行い，適合することを定めている。ただし，形状，材料によっては破壊靱性試験を要しない。	否	使用材料はオーステナイト系ステンレス鋼であり，CSS-2310 に記載される破壊靱性試験は不要の条件を満たしているため。
CSS-2320	破壊靱性試験における試験片数と組数	破壊靱性試験における試験片数と組数について定めている。	否	CSS-2310 を満足しており，破壊靱性試験を行わないため。
CSS-2330	破壊靱性試験の方法および判定基準	破壊靱性試験の方法及び判定基準を定めている。	否	CSS-2310 を満足しており，破壊靱性試験を行わないため。

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：確認結果を記載
CSS-2400	非破壊試験要求			
CSS-2410	各材料に適用する非破壊試験	使用する材料はPVB-2411に規定する非破壊試験を実施し、CSS-2430に合格することを定めている。	要	PVB-2411に規定する斜角法による超音波探傷試験及び浸透探傷試験を実施し、CSS-2430に合格している。
CSS-2420	溶接による補修	CSS-2410に規定に合格しないものに対して溶接による補修について定めている。	否	CSS-2410の試験に合格しており、溶接による補修を実施していないため。
CSS-2430	非破壊試験の判定基準	非破壊試験の判定基準を定めている。	要	PVB-2422に定められる超音波探傷試験の判定基準及びPVB-2426に定められる浸透探傷試験の判定基準を満足している。
CSS-2500	溶接材料			
CSS-2510	溶接に用いる材料	溶接に用いる材料は、溶接規格N-1040に適合することを定めている。	要	溶接に用いる材料は、母材と同等の強度を有するものを使用しており、溶接規格N-1040に適合している。

CSS-3000：炉心支持構造物の設計

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：評価結果を記載
CSS-3010	考慮すべき荷重	設計に考慮すべき荷重を考慮することを定めている。	要	考慮すべき荷重をとして、冷却材による差圧、自重、地震荷重を設計に用いる。
CSS-3020	考慮すべき事項	(1)減肉が考えられる部材は減肉を考慮すること。 (2)応力評価は公称寸法を使用してもよい。 を定めている。	要	(1)減肉は考慮しない (2)原則として公称寸法を使用する。
CSS-3100	材料の応力強さの限界および許容応力			
CSS-3110	ボルト等締付部材以外の応力評価			
CSS-3111	各供用状態における一次応力評価	設計条件及び各供用状態において生じる応力解析による一次応力評価は(1)～(4)の規定（一次一般膜応力強さ等に対する制限）を満足すること。	要	各供用状態における一次応力強さが規定を満足することを確認した。
CSS-3111.1	プロトタイプまたはモデル試験による評価	CSS-3111の応力評価の代わりにプロトタイプまたはモデル試験を実施する場合は、最大荷重 L_e を求め、実際の荷重が許容荷重値を超えないこと。	否	プロトタイプまたはモデル試験による評価は適用しないため。
CSS-3112	供用状態A、Bにおける一次+二次応力評価	供用状態A及びBにおいて生じる一次応力と二次応力の応力強さのサイクルの最大値と最小値の差は $3 S_m$ を超えないこと。	要	供用状態A、Bにおいて生じる一次応力と二次応力の最大値と最小値の差が $3 S_m$ 以内であることを確認した。
CSS-3113	疲労評価（供用状態A、B）	供用状態A及びBにおける疲労累積係数は1を超えないこと。	要	CSS-3130（疲労評価不要の条件）を満足すること確認したため、疲労評価を実施しない。

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：評価結果を記載
CSS-3114	純せん断応力評価	純せん断荷重を受ける部分に生じる平均せん断応力は許容値を満足すること。	要	評価結果からせん断応力は生じていないため。
CSS-3115	支圧応力評価	支圧荷重を受ける部分に生じる平均支圧応力は許容値を満足すること。	要	支圧応力は、2つの強度部材が接触し圧縮力が作用している場合の接触面における応力であり、シュラウドヘッドとスタンドパイプの継手は接触ではなくすみ肉溶接にて接合されている。このため支圧応力は発生しない。
CSS-3116	軸圧縮応力の評価			
CSS-3116.1	軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴の圧縮応力の評価	軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴に生じる圧縮応力は許容値を満足すること。	要	圧縮応力は自重のみであり、軸圧縮応力が小さい（1MPa）ため評価結果を記載しない。
CSS-3116.2	軸方向に圧縮荷重を受ける柱状の部材の圧縮応力の評価	軸方向に圧縮荷重を受ける柱形の胴に生じる圧縮応力は許容値を満足すること。	要	圧縮応力は自重のみであり、軸圧縮応力が小さい（1MPa）ため評価結果を記載しない。
CSS-3117	ねじりせん断応力の評価	ねじり荷重を受ける中実円断面の形状に生じる圧縮応力は許容値を満足すること。	否	中空円断面であり、中実円断面ではないため。
CSS-3120	ボルト等締付部材の応力評価	ボルト等の支持構造物についての各供用状態における許容値を満足すること。	否	ボルト等締結部材はないため。
CSS-3130	疲労解析不要の条件	繰り返し荷重が(1)～(4)に適合する場合は疲労解析を行うことを要しない。	要	疲労評価不要の条件(1)～(4)を満足することを確認した。
CSS-3140	疲労強度低減係数または応力集中係数	疲労解析に使用する疲労強度低減係数または応力集中係数について定めている。	要	CSS-3130（疲労評価不要の条件）を満足するため疲労解析が不要であることから、使用しない。
CSS-3150	溶接部継手効率	溶接部の許容応力等に対して継手効率を考慮することを定めている。（CSS-3111.1, 3160, 3113, 3116.2 除く）	要	溶接方法の区分に応じた継手効率を考慮している。

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：評価結果を記載
CSS-3160	極限解析による評価	極限解析による評価について定めている。これを満足する場合は CSS-3111 の規定を満足しなくてよい、	要	地震時以外は適用しない。 (地震時の評価は本資料に記載)
CSS-3200	外面に圧力を受ける炉心支持構造物の評価			
CSS-3210	外面に圧力を受ける炉心支持構造物の形状	外面に圧力を受ける炉心支持構造物の胴の形状について定めている。	否	各供用状態において、内面の圧力の方が外面の圧力より高いため。
CSS-3220	円筒形または円すい形の胴における許容圧力（外圧）	円筒形または円すい形の胴において外面に受ける圧力に対する許容値を定めている。		
CSS-3230	球形の胴における許容応力	球形の胴において外面に受ける圧力に対する許容値を定めている。	否	円筒形であり、球形でないため。また、各供用状態において、内面の圧力の方が外面の圧力より高いため。
CSS-3240	外面に圧力を受ける円筒形の炉心支持構造物に強め輪を設ける場合	円筒形において外面に受ける圧力に対する許容値を定めている。	否	強め輪は設けていないため。
CSS-3300	簡易弾塑性解析	CSS-3112 で一次＋二次応力強さが 3 S m を超えた場合の規定を定めている。	要	CSS-3112 で一次＋二次応力強さが 3 S m 以内であることを確認したため、簡易弾塑性解析を使用しない。
CSS-3400	クラッド構造の炉心支持構造物に対する強度評価上の取扱いについての規定	クラッド構造の炉心支持構造物の応力解析、疲労評価への考慮について定めている。	否	クラッド構造ではないため。

CSS-5000 : 完了検査

規格番号	規格名称	規格内容（概要）	炉内構造物としての確認の要否	左欄で否の場合：理由を記載 左欄で要の場合：確認結果を記載
CSS-5010	炉心支持構造物の完了検査	設計仕様書に定められた要求事項に従って、完了検査を満足すること。	要	完成後、要求事項に従い、外観検査、寸法検査を行い、満足している。

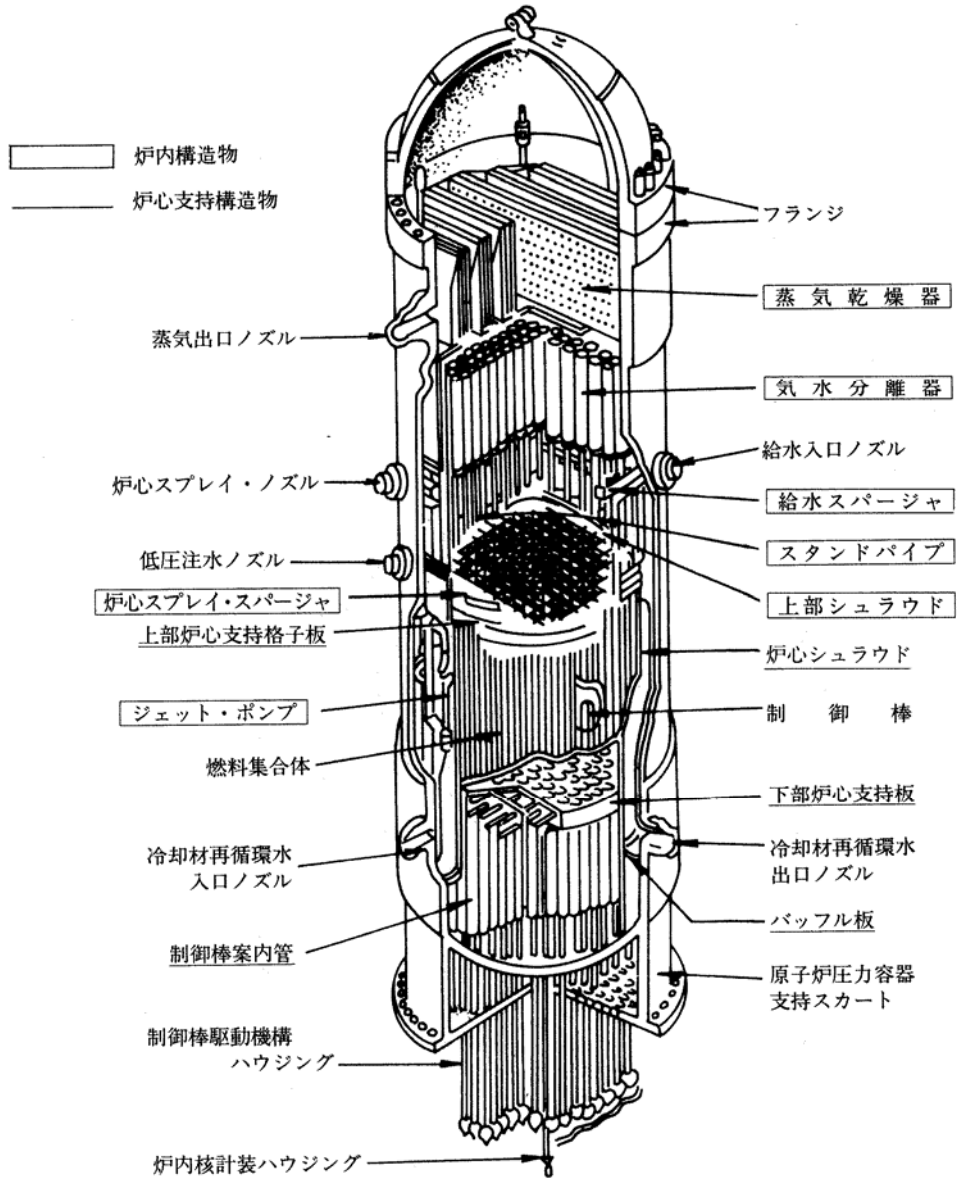


図 3 - 1 JEAG4601 炉心支持構造物と炉内構造物の分類に関する抜粋

2.5 炉心支持構造物の許容応力

2.5.1. 炉心支持構造物（ボルト等を除く）の許容応力

炉心支持構造物（ボルト等を除く）の許容応力を次に示す。

応力分類 許容 応力状態	1次一般膜応力	1次一般膜応力 + 1次曲げ応力	1次+ 2次応力	1次+ 2次 + ピーク応力	特別な応力限界		
					純せん 断応力	支 圧 応 力	ねじり 応 力
設計条件	$S_m^{(1)}$	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	—	—	—
I _A	—	—	$3 S_m^{(2)}$	運転状態I及び ⁽³⁾ IIにおける荷重 の組合せについ て疲れ解析を行 い疲れ累積係数 が1.0以下であ ること。	$0.6 S_m^{(4)}$	$S_y^{(5)}$ ($1.5 S_y$)	$0.8 S_m^{(7)}$
II _A	—	—			$0.6 S_m^{(4)}$	$S_y^{(5)}$ ($1.5 S_y$)	$0.8 S_m^{(7)}$
III _A	$1.5 S_m^{(1)}$	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$0.9 S_m^{(4)}$	$1.5 S_y^{(5)}$ ($2.25 S_y$)	$1.2 S_m^{(7)}$
IV _A	$2/3 S_u^{(1)}$ ただし オーステナイト 系ステンレス鋼 及び高ニッケル 合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$1.2 S_m^{(4)}$	$2 S_y^{(5)}$ ($3 S_y$)	$1.6 S_m^{(7)}$
III _A S	$1.5 S_m^{(1)}$	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$0.9 S_m^{(4)}$	$1.5 S_y^{(6)}$ ($2.25 S_y$)	$1.2 S_m^{(7)}$
IV _A S	$2/3 S_u^{(1)}$ ただし オーステナイト 系ステンレス鋼 及び高ニッケル 合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の1.5倍の値 ⁽¹⁾	—	—	$1.2 S_m^{(4)}$	$2 S_y^{(6)}$ ($3 S_y$)	$1.6 S_m^{(7)}$

注：(1) 告示第96条第1項第一号の崩壊荷重の下限に基づく評価（ただし、設計条件については同号イ、III_A及びIII_ASについては同号ロ、IV_A及びIV_ASについては同号ハの評価）を適用する場合は、この限りではない。

- (2) $3 S_m$ を超えるときは告示第97条の弾塑性解析を用いることができる。
- (3) 告示第96条第1項第三号を満たすときは、疲れ解析を行うことを要しない。
- (4) 告示第96条第1項第一号へによる。
- (5) 告示第96条第1項第一号トによる。（ ）内の値は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値
- (6) （ ）内の値は、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値
- (7) 告示第96条第1項第一号リによる。

図3-2 J E A G 4601 炉心支持構造物（ボルト等を除く）の許容値に関する抜粋

表 CSS-3110-1 応力強さの限界(ボルト等を除く)

応力の分類 供用状態	一次応力		二次応力	ピーク応力	特別な応力限界
	一般膜応力	曲げ応力	膜応力と曲げ応力		
	P_m	P_b	Q		
設計条件	P_m S_m 弾性解析 または $\frac{2}{3}P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.44L_e$ 試験(注5)	P_m+P_b $1.5S_m$ 弾性解析 または $\frac{2}{3}P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.44L_e$ 試験(注5)	評価不要	評価不要	—
供用状態A およびB			P_m+P_b+Q $3S_m$ 弾性解析 または P_m+P_b+Q+F S_a 疲労解析	P_m+P_b+Q+F S_a 疲労解析	支圧荷重 S_y または 平均支圧応力 $1.5S_y$ せん断荷重 $0.6S_m$ 平均せん断応力 $0.8S_m$ 最大ねじりせん断応力
供用状態C	P_m $1.5S_m$ 弾性解析 または P_{cr} 極限解析(注1) または $0.6L_e$ 試験(注5)	P_m+P_b $2.25S_m$ 弾性解析 または P_{cr} 極限解析(注1) または $0.6L_e$ 試験(注5)	評価不要	評価不要	供用状態A およびB の1.5倍
供用状態D	P_m $\frac{2.4S_m}{2/3S_u}$ (注2) 弾性解析 $\frac{2}{3}S_u$ (注4) または $0.9P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.8L_e$ 試験(注5)	P_m+P_b $\frac{3.6S_m}{S_u}$ (注2) 弾性解析 S_u (注4) または $0.9P_{cr}$ 極限解析(注1) または $0.8L_e$ 試験(注5)	評価不要	評価不要	供用状態A およびB の2倍

- (備考)
- (注1) 供用状態D以外の P_{cr} は $1.5 S_m$ の値を降伏点として計算した崩壊荷重の下限である。供用状態Dの P_{cr} は $\text{MIN}[2.3S_m, 0.7S_u]$ の値を降伏点として計算した崩壊荷重の下限である。
 - (注2) 2つのうちのいずれか小さい方の値をとる。
 - (注3) オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金に適用する。
 - (注4) オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金以外の材料に適用する。
 - (注5) L_e はプロトタイプまたはモデル試験により評価を行う場合の最大荷重である。
 - (注6) 実線は応力に基づく評価、破線は荷重に基づく評価を示す。

図3-3 J S ME 設計・建設規格 炉心支持構造物(ボルト等を除く)の許容値に関する抜粋

3.2 極限解析による評価

極限解析は、3次元FEMモデルを用いて、弾完全塑性体の物性値を入力した解析により崩壊荷重の下限（ P_{cr} ）を求め、求めた崩壊荷重の下限から許容荷重を設定ものである。極限解析フローを図3-4に示す。

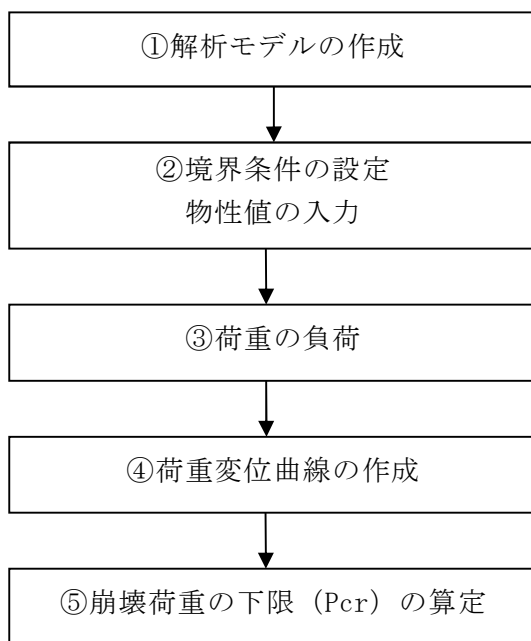


図3-4 極限解析フロー

① 解析モデルの作成

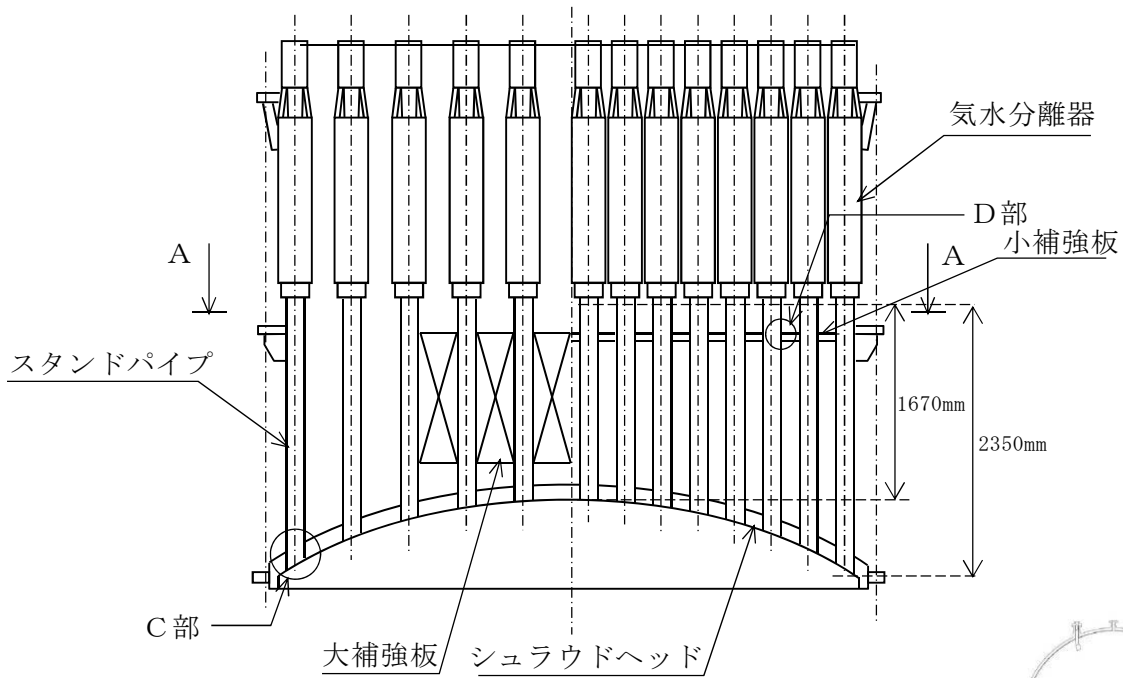
気水分離器及びスタンドパイプは、図3-5に示すとおり、シュラウドヘッド穴部に差し込まれ内外面を溶接にて取り付けている。気水分離器に作用する地震時の荷重は、スタンドパイプを介してシュラウドヘッドへ伝達される構造となっている。また、各スタンドパイプは大小の補強板で連結されている。

今回の評価では、1本のスタンドパイプが耐えることができる許容荷重を極限解析により求め、1本に掛かる地震荷重と比較することにより健全性を確認するため、解析においては、1本のスタンドパイプに着目してソリッド要素にてモデル化することとする。モデル図を図3-6に示す。

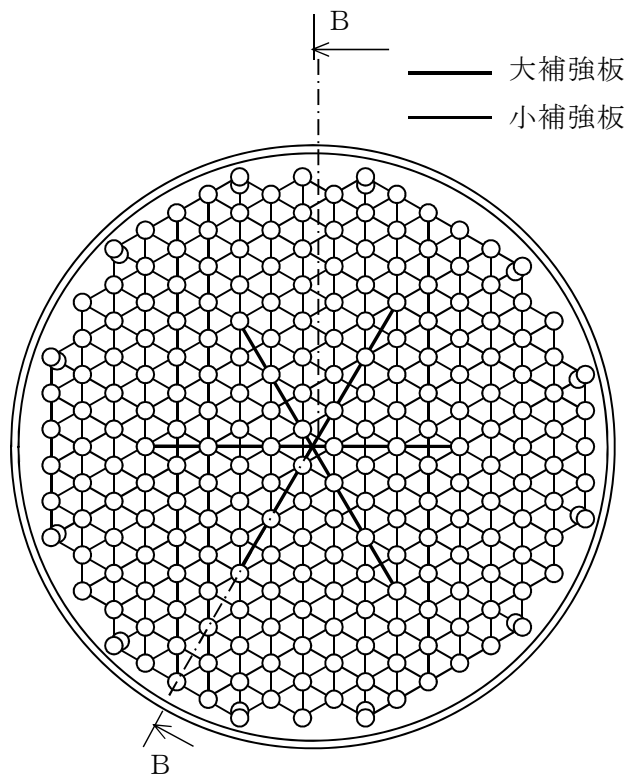
モデルは評価上厳しくなる構造不連続部であるスタンドパイプ付根部の許容荷重を設定する観点から、付根部を含むスタンドパイプの一部分（スタンドパイプ長さ1000mmまで）をモデル化する。

また、解析モデルはスタンドパイプがシュラウドヘッドに対して平面に取り付く中

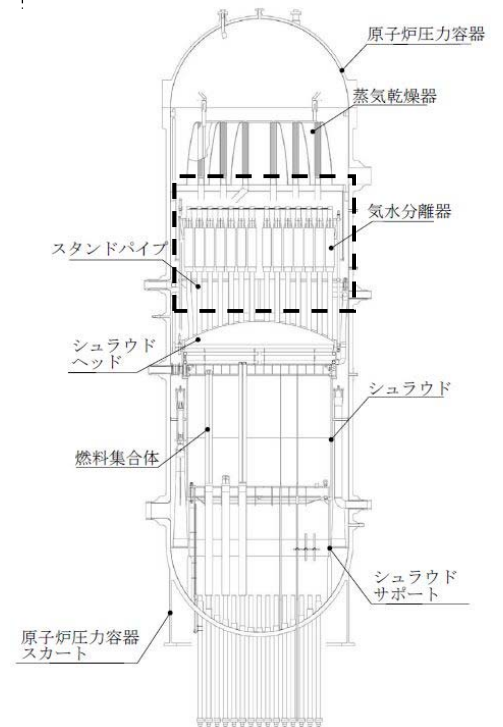
央位置及び斜めに取り付く最外周位置の2種類のモデルとする。



B～B断面図



A～A断面図



原子炉压力容器内部構造物

図3-5 炉内構造物（気水分離器及びスタンドパイプ）構造概要図(1/2)

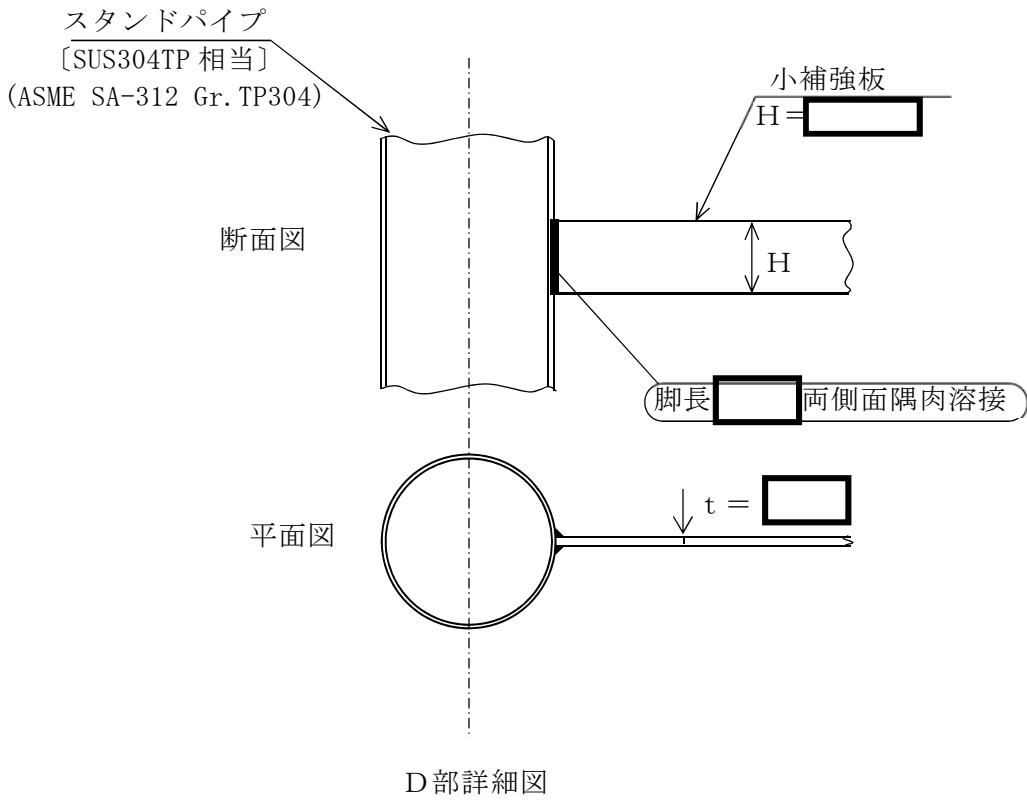
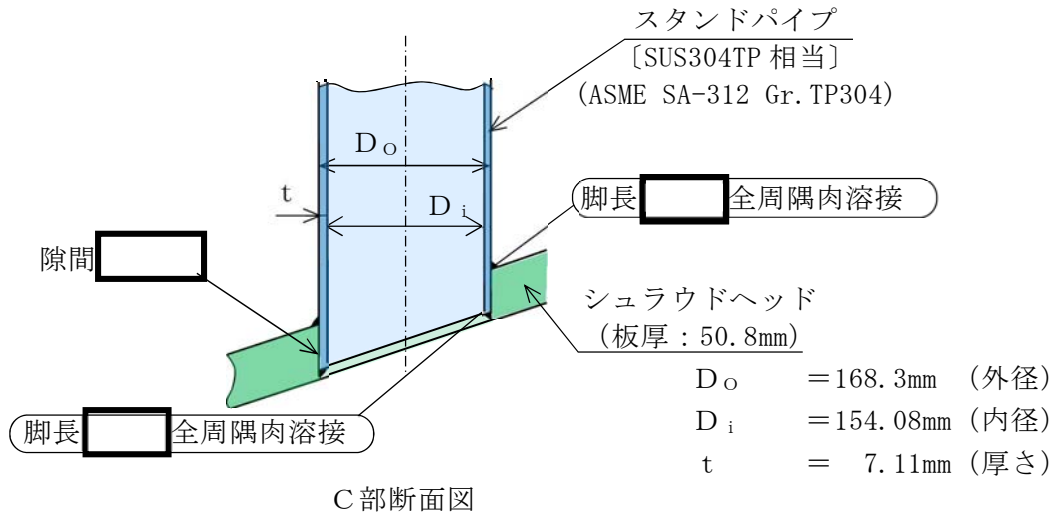
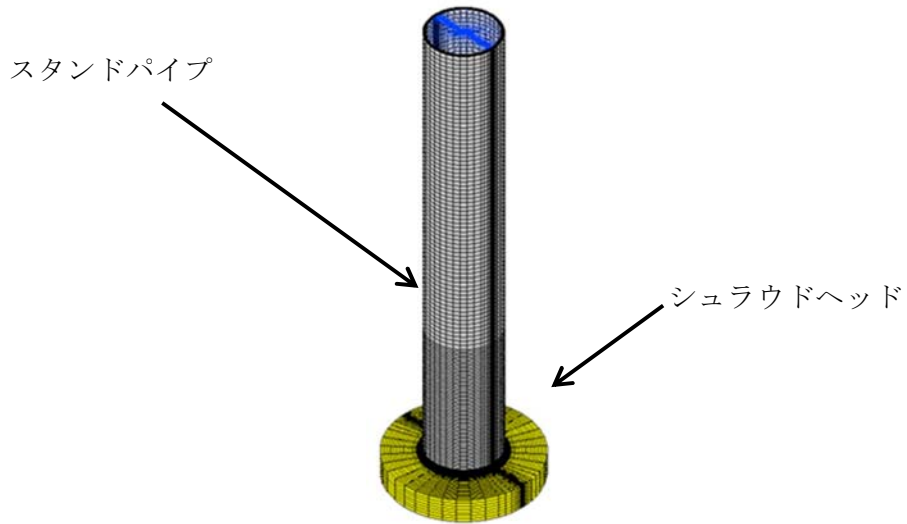


図3-5 炉内構造物（気水分離器及びスタンドパイプ）構造概要図(2/2)



溶接部

図 3 - 6 極限解析に用いる解析モデル概要図 (中央位置)

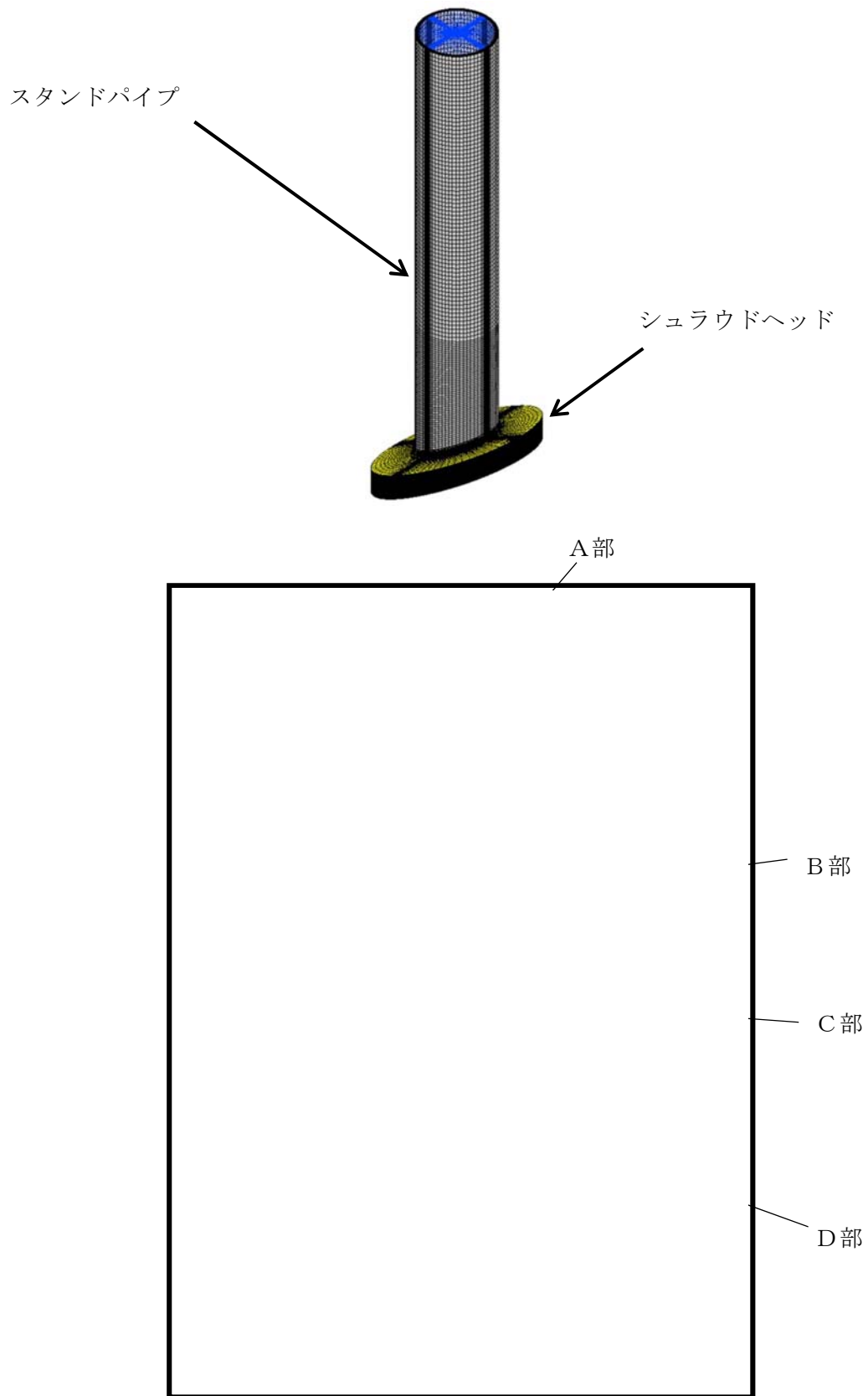


図 3 - 6 極限解析に用いる解析モデル概要図 (最外周位置)



A部詳細

B部詳細



C部詳細

D部詳細

図 3 - 6 極限解析に用いる解析モデル概要図 (最外周位置)

② 境界条件及び物性値

解析モデルの境界条件を図3-7に示す。境界条件として、モデル化したシュラウドヘッドの端部を完全固定としている。

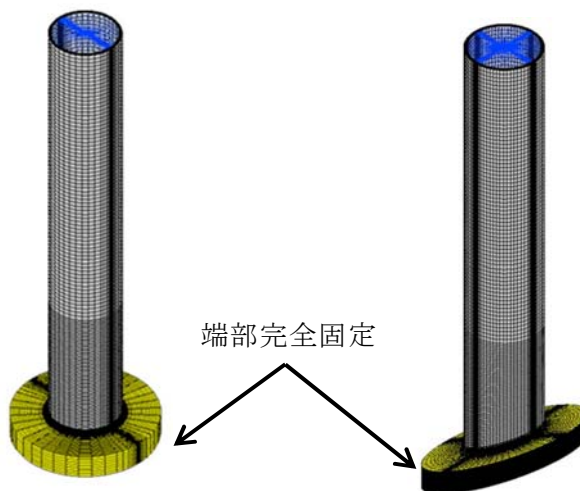


図3-7 解析モデルの境界条件

解析モデルの物性値は、許容応力状態Ⅳ_{AS}における許容荷重を求める際には、J S ME設計・建設規格 CSS-3160に規定されているとおり、 $2.3S_m$ と $0.7S_u$ の小さい方を材料の降伏点とした弾完全塑性体、許容応力状態Ⅲ_{AS}における許容荷重を求める際には、同じく、 $1.5S_m$ を材料の降伏点とした弾完全塑性体を入力する(表3-3, 図3-8参照)。また、シュラウドヘッドとスタンドパイプは溶接にて取り付けられており、溶接部は母材と同等の強度を有しているため、物性値は母材と同じとしている。

表 3 - 3 解析モデルに使用する材料の物性値

材料	ヤング率 × 10 ⁵ [MPa]	降伏応力 [MPa]		
		許容応力状態 IV _A S		許容応力状態 III _A S
		0.7Su	2.3Sm	1.5Sm
スタンドパイプ SUS304TP	1.76	273	264	172
シュラウドヘッド SUS304				

注：運転状態 I 及び II の最高使用温度（301℃）に対する物性値を使用

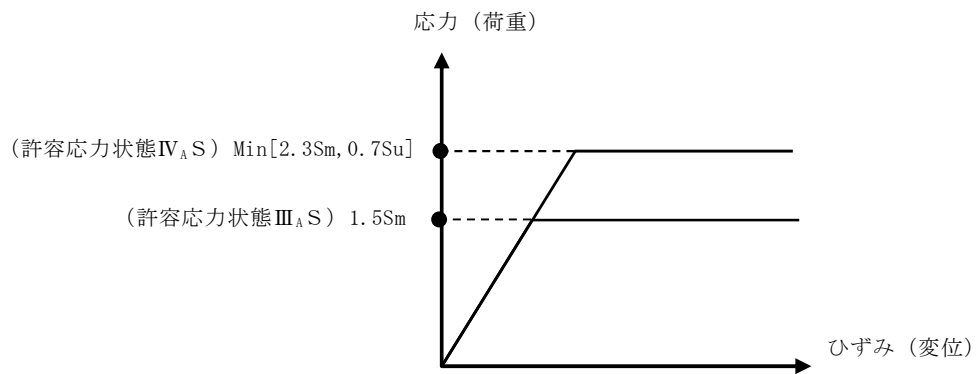


図 3 - 8 弾完全塑性体として応力とひずみの関係

③ 荷重の負荷

(1) 荷重の負荷に対する考慮

スタンドパイプはシュラウドヘッドとの取付部である付根部が構造不連続部であり評価上厳しい部位となるため、付根部が耐えることができる許容荷重を極限解析にて求める。

付根部の許容荷重と地震荷重との比較のため、地震荷重が有する3成分（水平荷重、鉛直荷重、モーメント）を有する負荷荷重とし、地震荷重の3成分のそれぞれの比率が等しくなるように負荷荷重を設定する。

また、荷重の負荷位置については、地震時に受ける荷重との整合性の観点から、モデル上端面から荷重を負荷する（以下、「入力荷重」という。）。

入力荷重に対して付根部が受ける荷重（以下、「出力荷重」という。）には、出力荷重の方が入力荷重の水平荷重によるモーメントの分だけ荷重が増加する。このため、出力荷重に対して地震荷重が有する3成分の比率が等しくなるように入力荷重を設定する。

(2) 荷重の負荷方向に対する考慮

a. 鉛直荷重方向

鉛直荷重の入力方向については、自重による荷重分だけ下向き方向の方が厳しい評価となるため、鉛直荷重は下向きとする。

b. 水平荷重方向

(a) 中心位置モデル

中心位置の水平荷重方向については、鉛直方向に対して軸対称モデルであることから、入力方向に対して許容荷重への影響はないと考えられるため、1方向とする。

(b) 最外周位置モデル

最外周位置の水平荷重方向については、鉛直方向に対して面对称モデルであることから、入力方向に対して許容荷重への影響があると考えられることから入力方向に対する検討を行う。

具体的には、入力荷重を中心方向、中心方向と反対のリング方向、周方向の3ケースについて実施する。

c. モーメント方向

モーメントの入力方向については，中心位置及び最外周位置共に，地震荷重との方向の整合性の観点から水平荷重方向と同じ向きとする。

中心位置及び最外周位置の入力荷重方向を図 3 - 9 に示す。

(3) 入力荷重の設定

入力荷重と出力荷重の関係はつり合いの関係から，以下のとおりとなる。(図 3 - 10 参照)

a. 鉛直荷重

入力荷重と出力荷重は等しくなる

b. 水平荷重

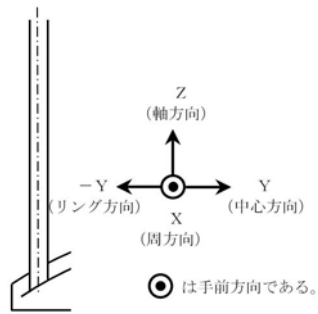
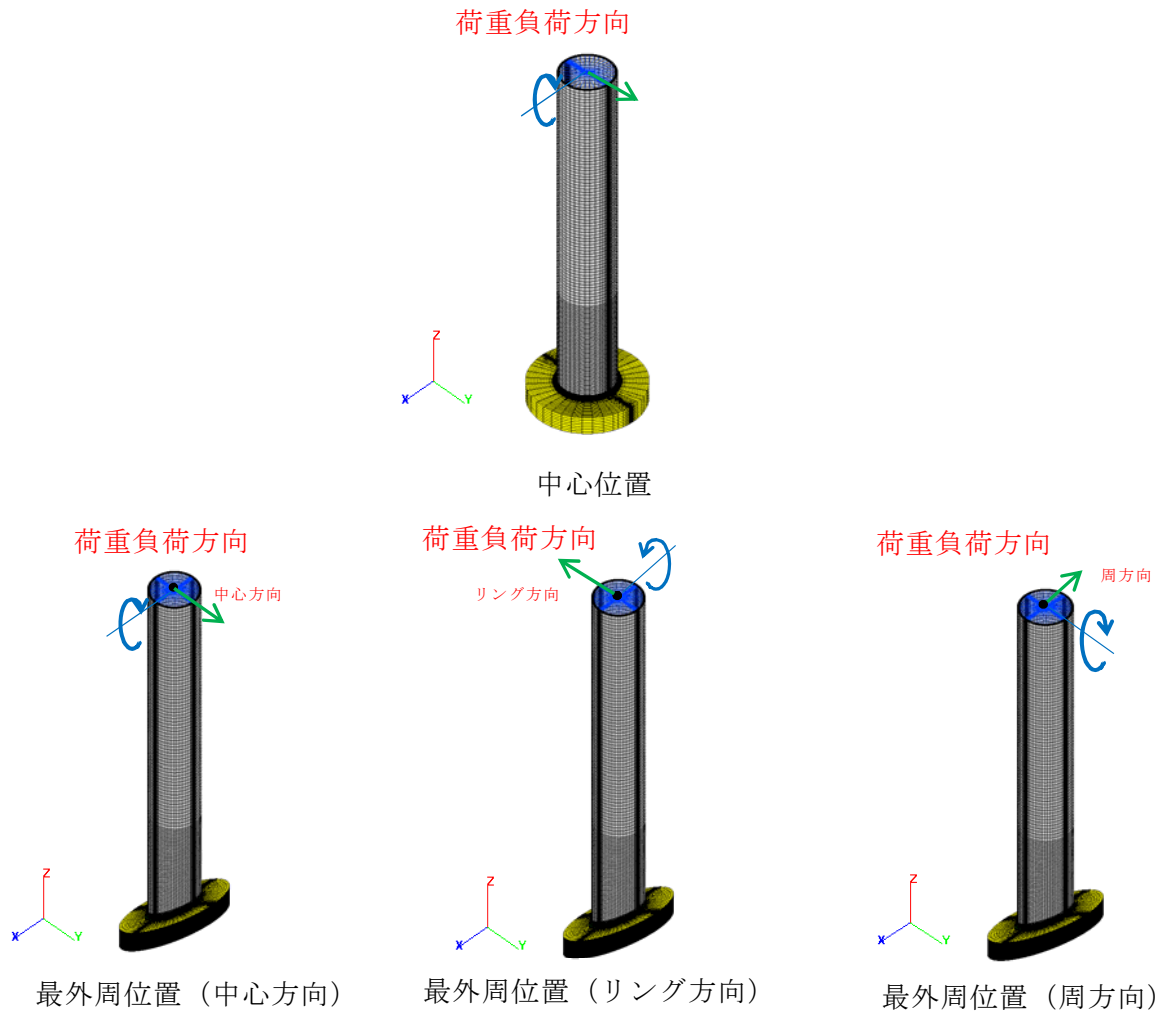
入力荷重と出力荷重は等しくなる

c. モーメント

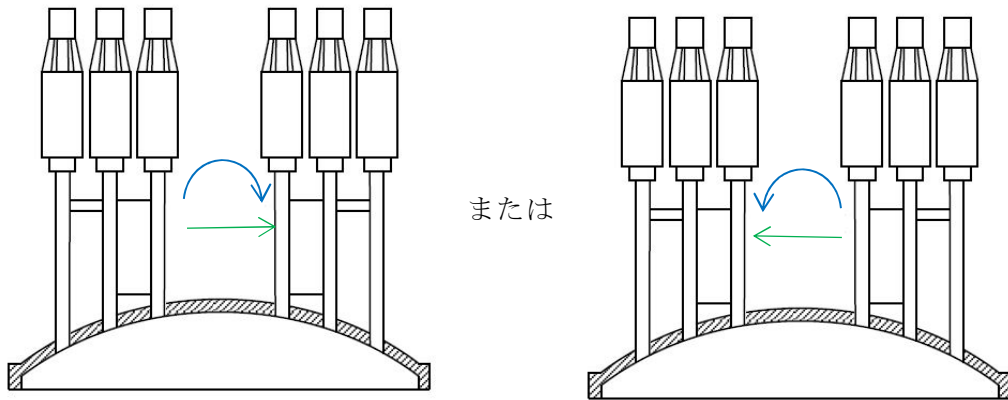
入力荷重に対して出力荷重は，水平の入力荷重と入力荷重位置と出力荷重位置の距離によるモーメントの分だけ荷重の絶対値は増加する。

(4) その他初期設定条件

入力荷重の他に初期設定条件として，圧力差(0.10MPa)による荷重及び自重による荷重を考慮する。

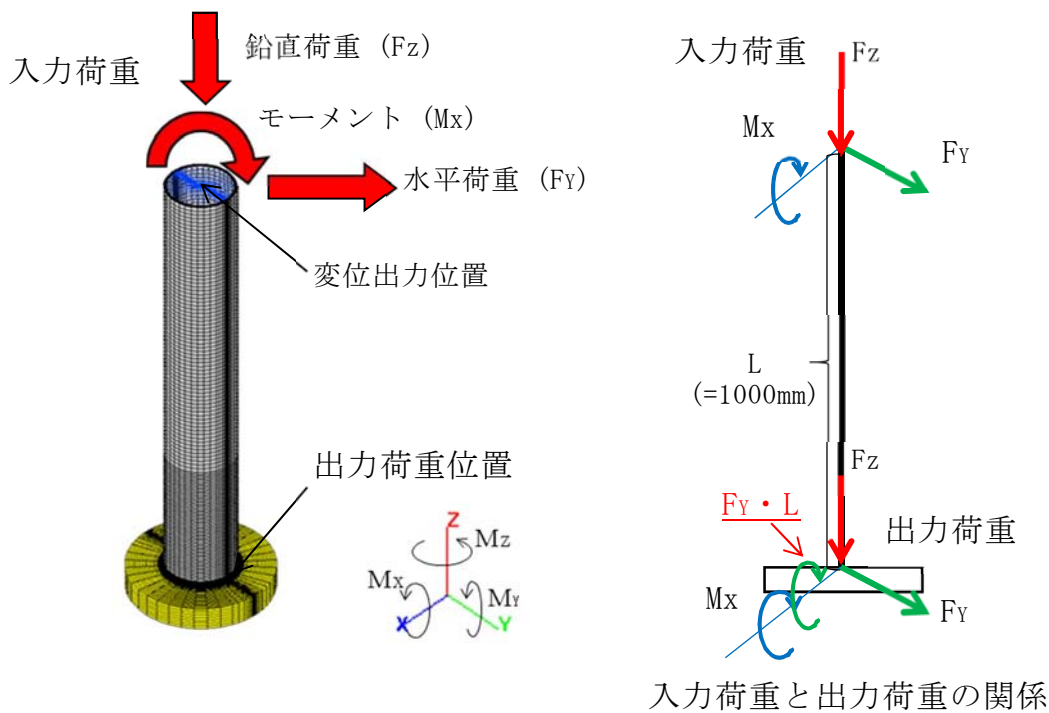


最外周位置の荷重入力方向は左図に示すとおり。



地震荷重方向

図 3 - 9 入力荷重の方向と地震荷重方向の関係



評価用入力荷重 (S s 地震用 倍率 1.0 倍時)

入力荷重成分		S s 地震評価用
鉛直荷重	$F_{Z(IN)}$	-1819.26 [N]
水平荷重	$F_{Y(IN)}$	10251.9 [N]
モーメント	$M_{X(IN)}^*$	-1.91312×10^7 [N・mm]

※スタンドパイプ付根部が受ける荷重（出力荷重）と地震荷重の鉛直、水平、モーメントの比率のそれぞれが等しくなるようにするため、入力荷重のモーメントは水平荷重 F_Y によってスタンドパイプ付根部に発生するモーメント（ $F_Y \cdot L$ ）を出力荷重から除いた値としている。

入力荷重と出力荷重の関係

$$|M_{X(OUT)}| = |M_{X(IN)}| + |F_Y \cdot L|$$

$M_{X(OUT)}$: 出力荷重（モーメント）

$F_Y \cdot L$: 付根部までの距離（L）により付根部に発生する荷重（モーメント）

評価用出力荷重 (S s 地震用 倍率 1.0 倍時)

出力荷重成分		S s 地震評価用
鉛直荷重	$F_{Z(OUT)}$	-1819.26 [N]
水平荷重	$F_{Y(OUT)}$	10251.9 [N]
モーメント	$M_{X(OUT)}$	-2.93831×10^7 [N・mm]

S s 地震荷重 (平均地震荷重)

荷重成分		S s 地震
鉛直荷重	F_Z	-1819.26 [N]
水平荷重	F_Y	10251.9 [N]
モーメント	M	-2.93831×10^7 [N・mm]

図 3 - 1 0 荷重の負荷

④ 荷重変位曲線の作成

入力荷重の倍率を段階的に増加させ付根部に荷重を負荷し、FEM解析にてその時の付根部の荷重（出力荷重）と変位（上端部中心位置）をプロットし、荷重－変位曲線を作成する（図3-11参照）。

なお、荷重－変位曲線の荷重は出力荷重を S_s 又は S_d 地震荷重で除した各地震荷重に対する荷重倍率で示す。

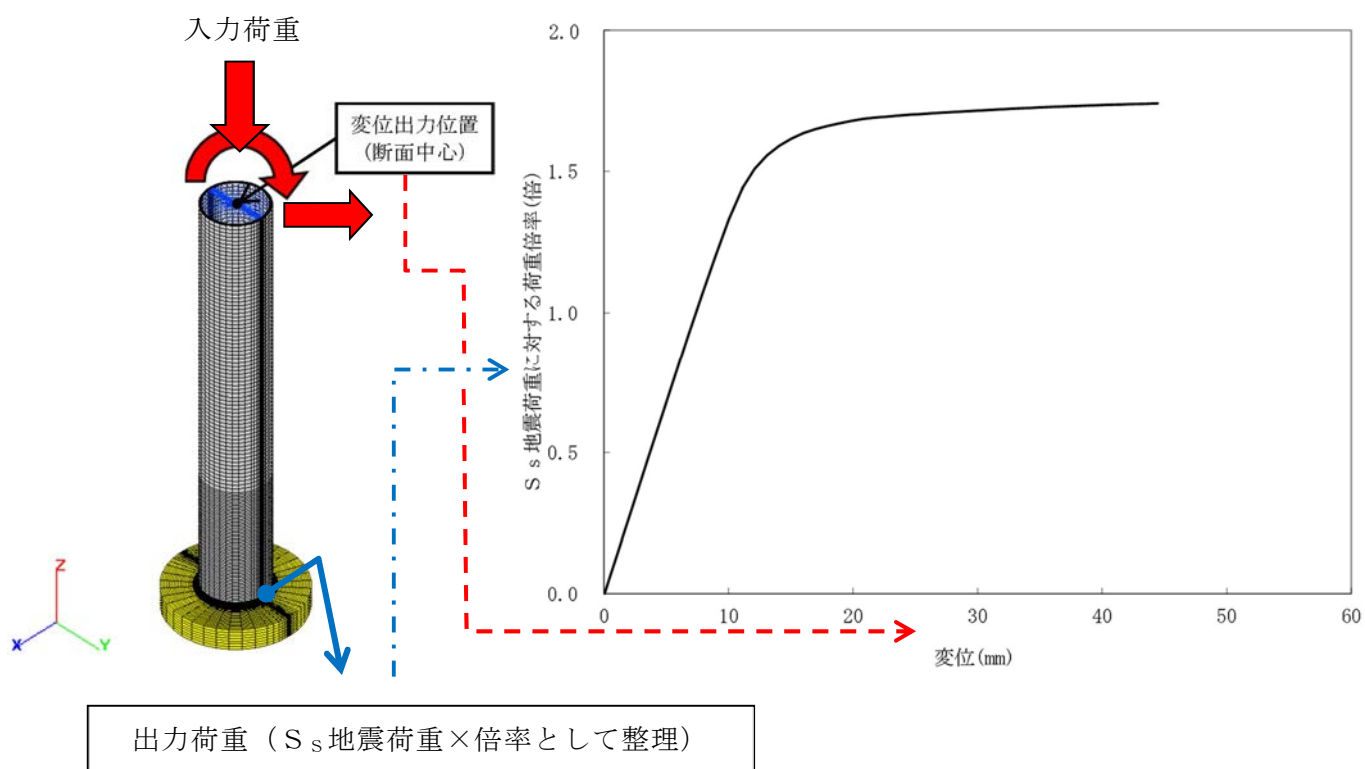


図3-11 荷重変位曲線の作成 (S_s 地震に対する評価の例、中心位置の場合)

⑤ 崩壊荷重の下限 (Pcr) の算定

④にて作成した荷重変位曲線を基に崩壊荷重の下限 (Pcr) を算定する。

S_s地震時及びS_d地震時の崩壊荷重の下限 (Pcr) の算定結果を図3-12~17及び表3-4に示す。S_s地震荷重及びS_d地震荷重は時刻歴応答解析に地盤物性のばらつきに対する考慮として、それぞれの地震荷重を1.5倍している。また、最外周については、S_s地震荷重に対して裕度が低い周方向ケースにて代表して評価を実施している。

ここで、崩壊荷重の下限は、J S M E 設計・建設規格 CSS-3160 から「荷重とそれによる変形量の関係直線に対して、弾性範囲の関係曲線の勾配の2倍の勾配を有する直線が交わる点に相当する荷重」と定義されている(図3-18参照)。

崩壊荷重とは、ひずみ硬化を含まない理想的な弾完全塑性体の材料からなる構造物が荷重を受けて、全断面降伏又は座屈限界に達し、これ以上の荷重を加えると構造物が不安定になって変形が際限なく増加するときの荷重をいう。

算定結果から中央位置と最外周位置では若干ではあるが中央位置のほうが厳しい結果となっている。これは、3次元FEMモデルで詳細にモデル化した場合、斜めに取り付く方が付根部の溶接長さが若干増加し、Pcrが増加したものと考えられる。

今回の極限解析では直接荷重を負荷することにより付根部に局所応力の影響を受けないようシュラウドヘッドからの距離を十分に取り観点から、モデル長さを1000mmとし、荷重を負荷し、その位置での変位を変位出力位置としている。モデル長さを変化させた場合、出力荷重である付根部の荷重は、上端面からの入力荷重にモデル長さが変わることによって変わる水平荷重によるモーメントの影響を考慮して長さを変える前と同じにしていることから変化しない。

モデル長さを1000mm, 1500mm, 2000mm, 2500mmに変化させた場合の荷重変位曲線を図3-19図に、評価結果を表3-5に示す。変位量は変化するが、長さを変えた場合においても崩壊荷重の下限 (Pcr) に対して影響がないことを確認した。これは、構造物が不安定になって変形が際限なく増加するときの挙動は構造不連続部である付根部によるものであり、モデル長さを変化させた場合においても、変形挙動は変化しないためである。

崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図を図3-20~23に示す。スタン

ドパイプとシュラウドヘッドの付根部に最大応力・ひずみが発生し、約 13%の相当塑性ひずみが断面内の極一部で発生しているが、断面全体としては塑性域が広がっておらず、塑性崩壊は起きていない。

また、スタンドパイプの材料であるオーステナイト系ステンレス鋼は延性材料であり、材料の伸びの規格値は 34%である。今回の最大ひずみが生じている箇所は溶接部であるが、これに比べても十分に小さい。極限解析は、規格に基づき弾完全塑性体としてモデル化し評価を実施しているため、本評価体系においても保守性を有している。以上から局所的に生じている約 13%相当のひずみにより崩壊は至らないものとする。

シュラウドヘッドに差し込まれたスタンドパイプとシュラウドヘッドとの間の変位は微小であり、スタンドパイプとシュラウドヘッドが接触していないことを確認している。これは、シュラウドヘッドに差し込まれたスタンドパイプは両端を溶接で固定することで、変位が微小になったものとする。

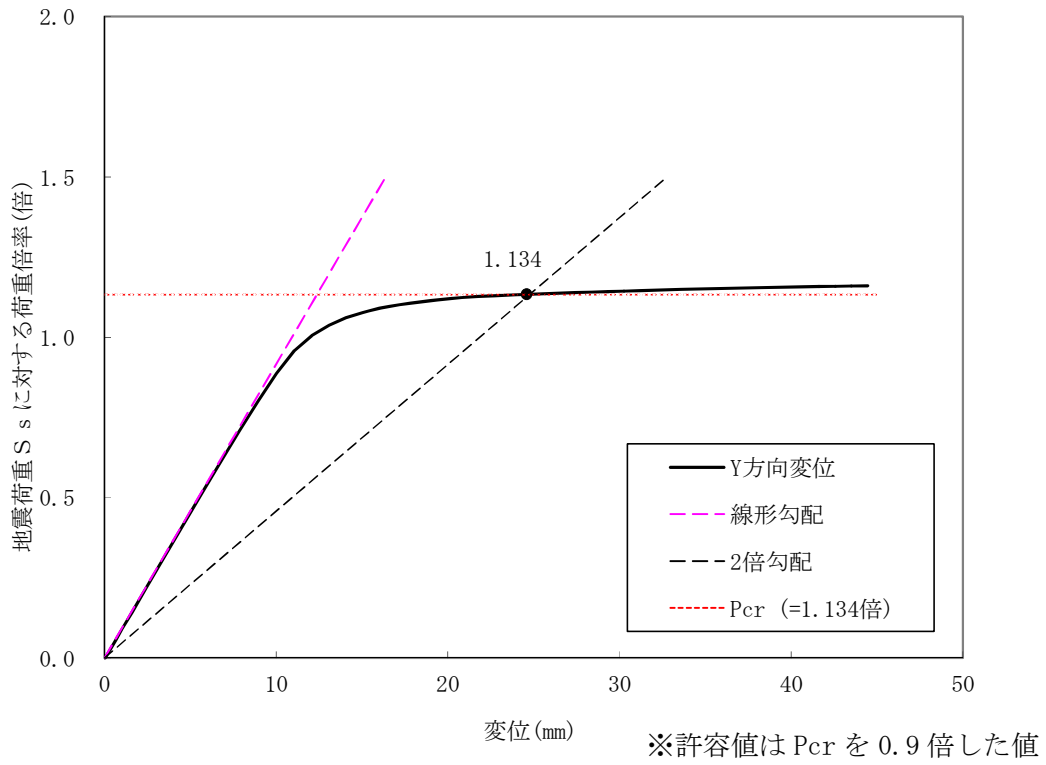


図 3-12 S_s 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果 (中心位置)

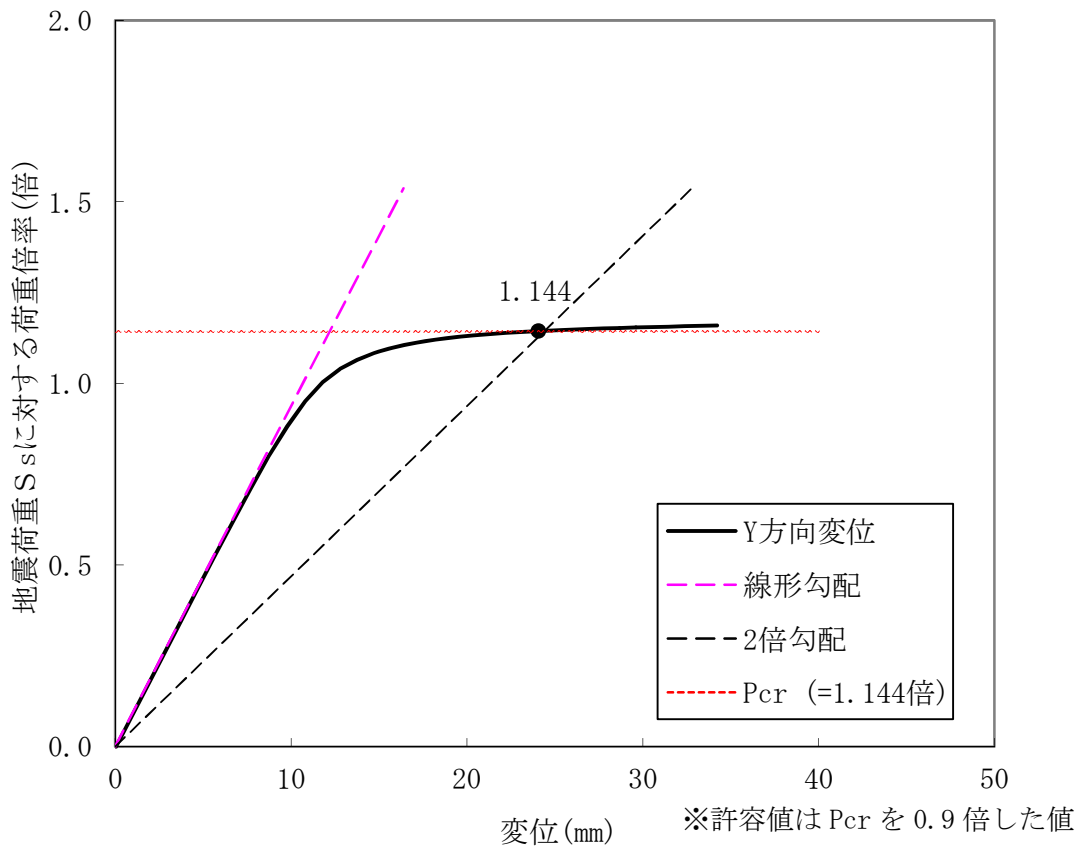


図 3-13 S_s 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果
(最外周位置 中心方向に荷重負荷)

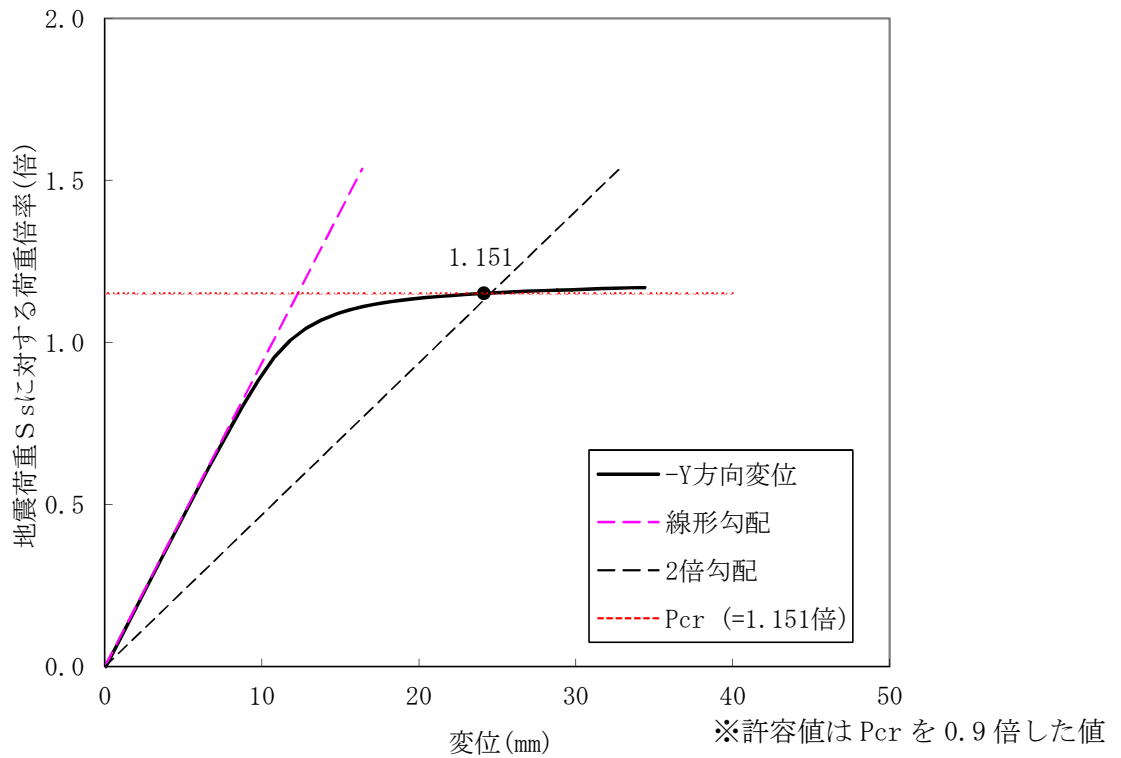


図 3-14 S_s 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果
 (最外周位置 リング方向に荷重負荷)

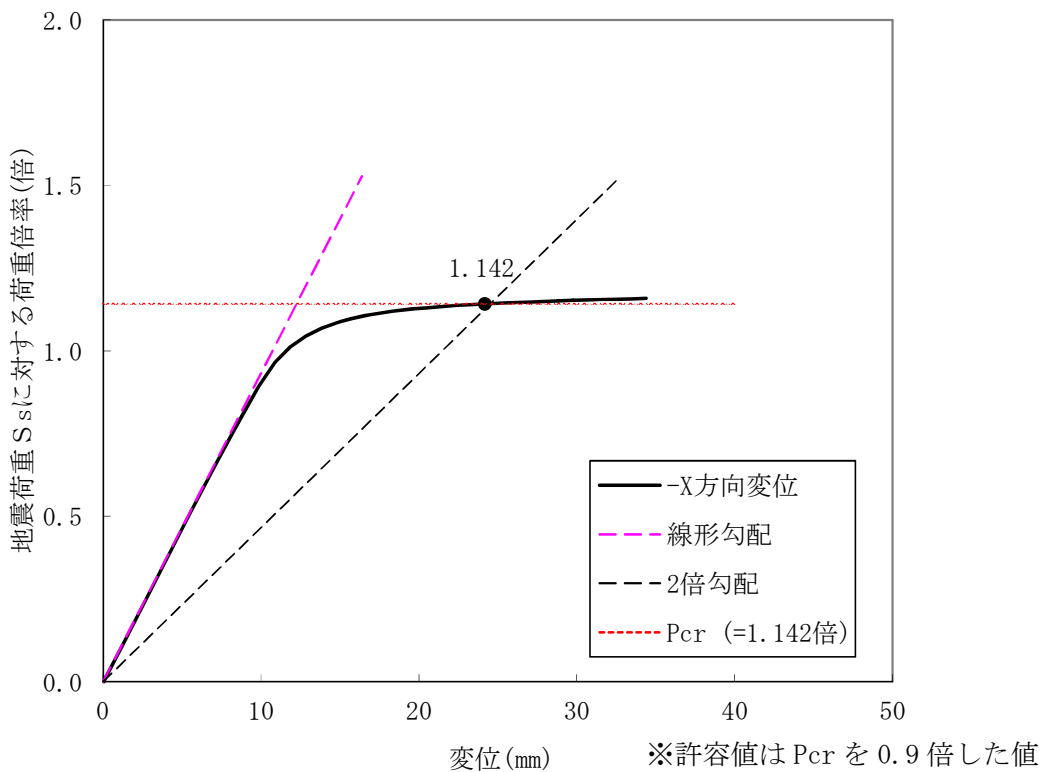


図 3-15 S_s 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果
 (最外周位置 周方向に荷重負荷)

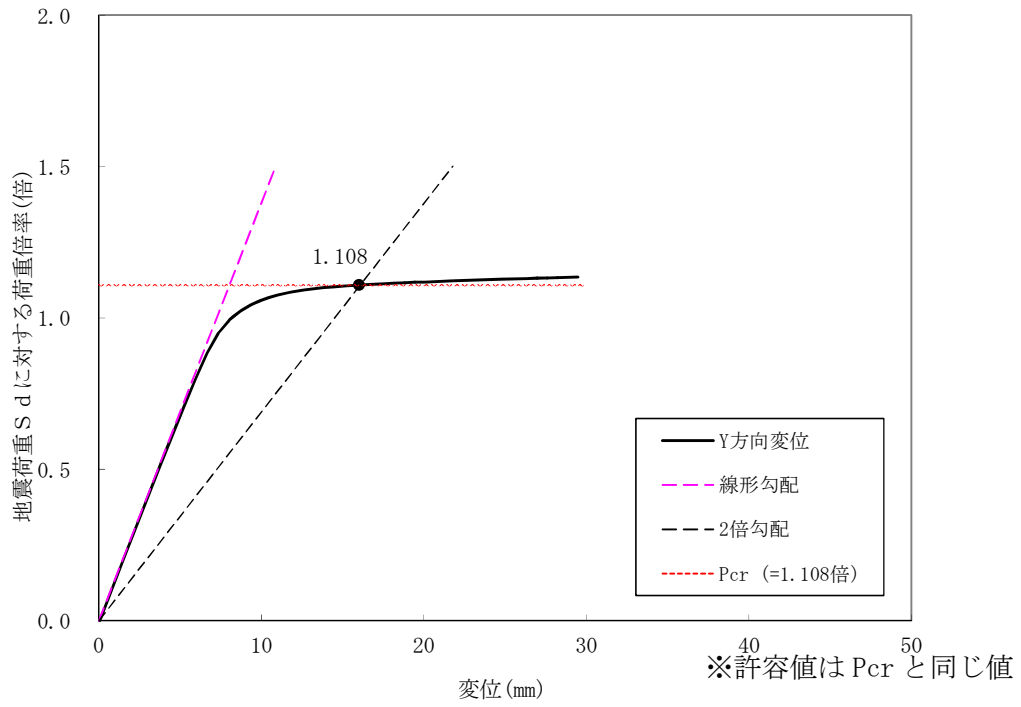


図 3-16 S_d 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果 (中心位置)

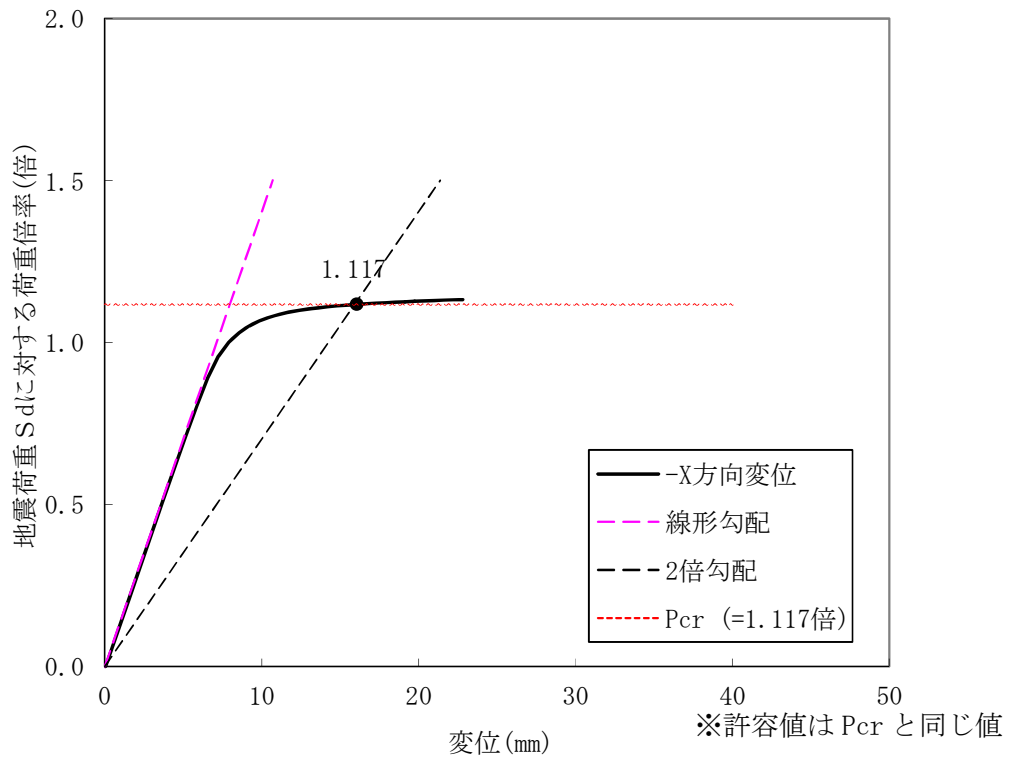


図 3-17 S_d 地震時の崩壊荷重の下限の算定結果 (最外周位置 周方向に荷重負荷)

表 3-4 崩壊荷重の下限の算定結果

スタンドパイ ブ位置	水平力及びモー メント負荷方向	許容応力 状態	裕度 (Pcr/地震荷重)	裕度 ^{※2} (許容荷重/地震荷重)
中央部	—	IV _A S	1.134	1.02
最外周部	中心方向	IV _A S	1.144	1.02
	リング方向	IV _A S	1.151	1.03
	周方向	IV _A S	1.142	1.02
中央部	—	III _A S	1.108	1.10
最外周部	周方向 ^{※1}	III _A S	1.117	1.11

※1：中心方向，リング方向，周方向のうちIV_ASの裕度が最も低いものを実施
 ※2：設計・建設規格 CSS-3160 に基づき許容応力状態IV_ASは0.9Pcr，
 許容応力状態III_ASはPcrを許容荷重としている。

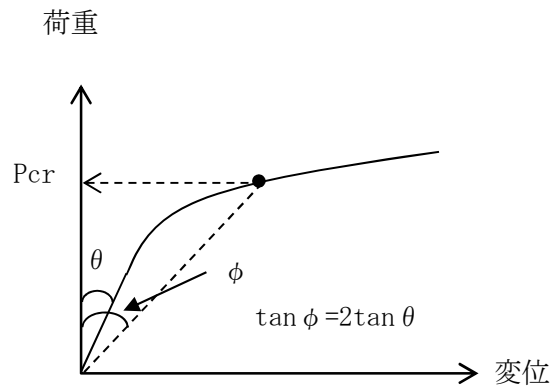
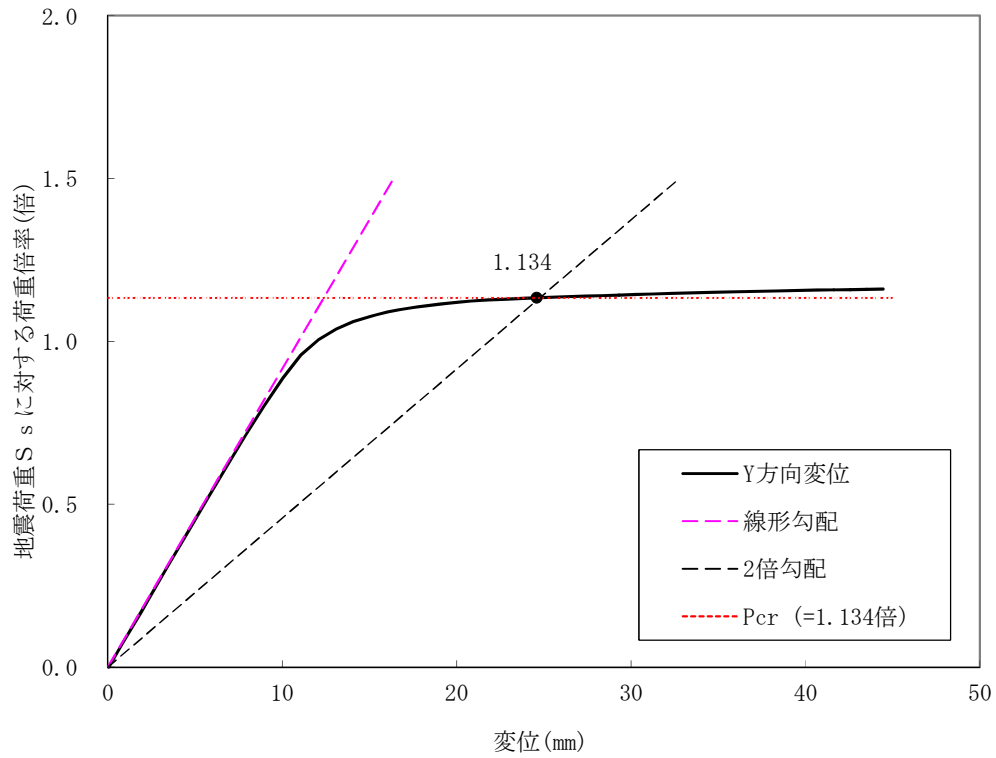
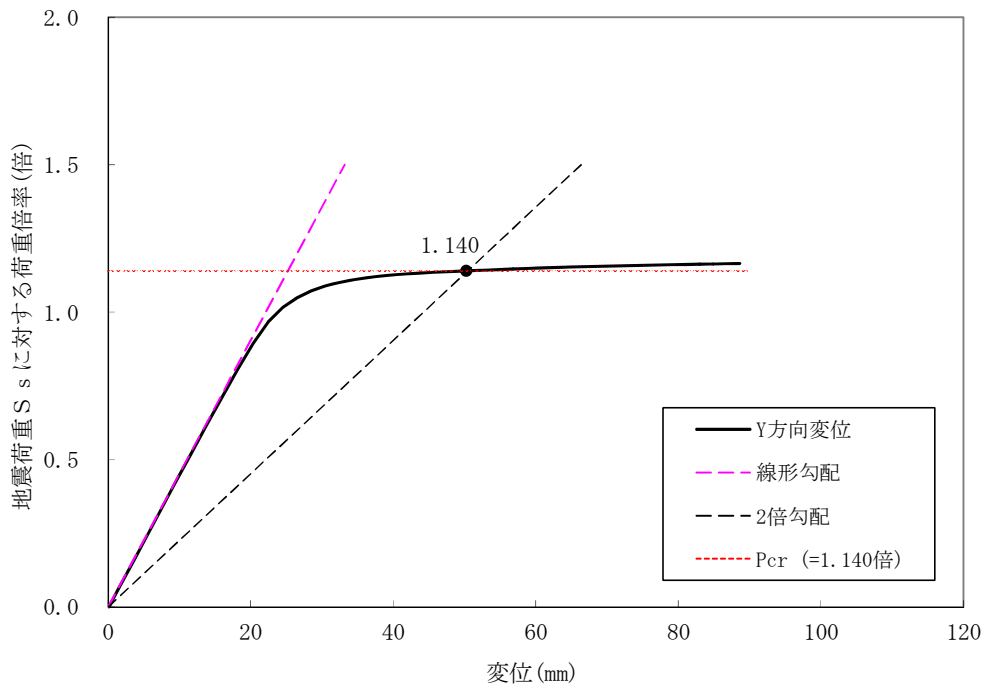


図 3-18 崩壊荷重の下限 (Pcr) の定義

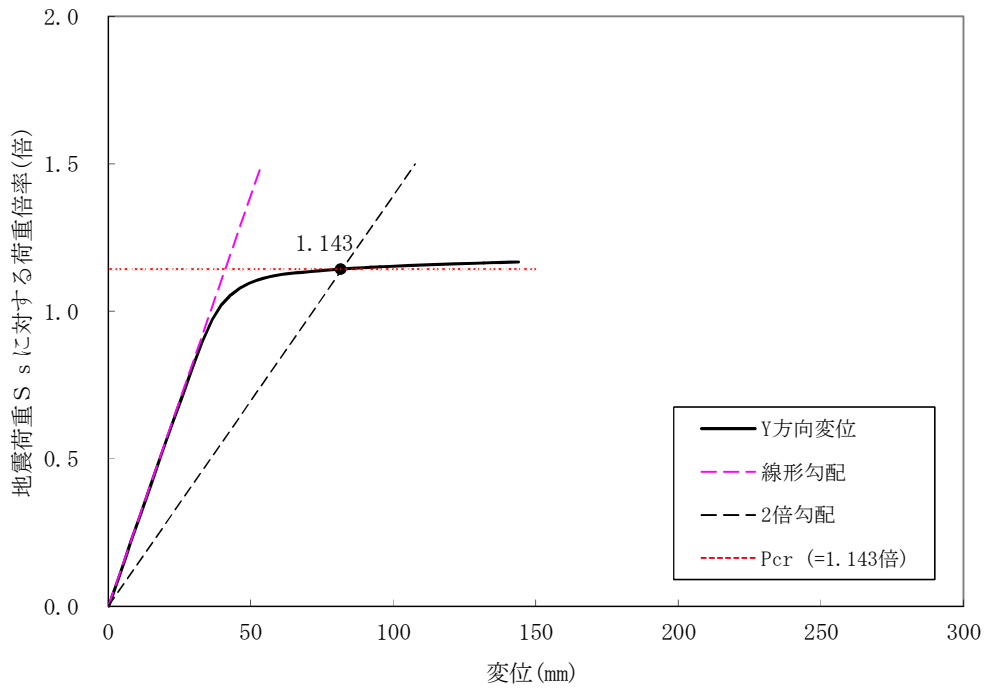


モデル長さ 1000m の場合

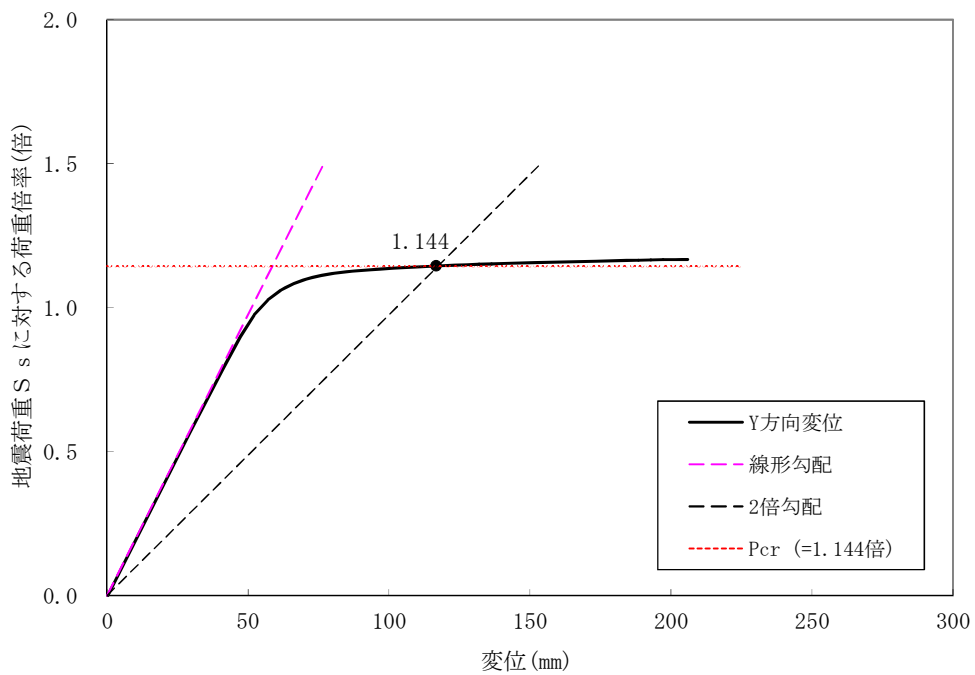


モデル長さ 1500mm の場合

図 3-19 長さを変化させた場合の極限解析結果 (1/2)



モデル長さ 2000mm の場合



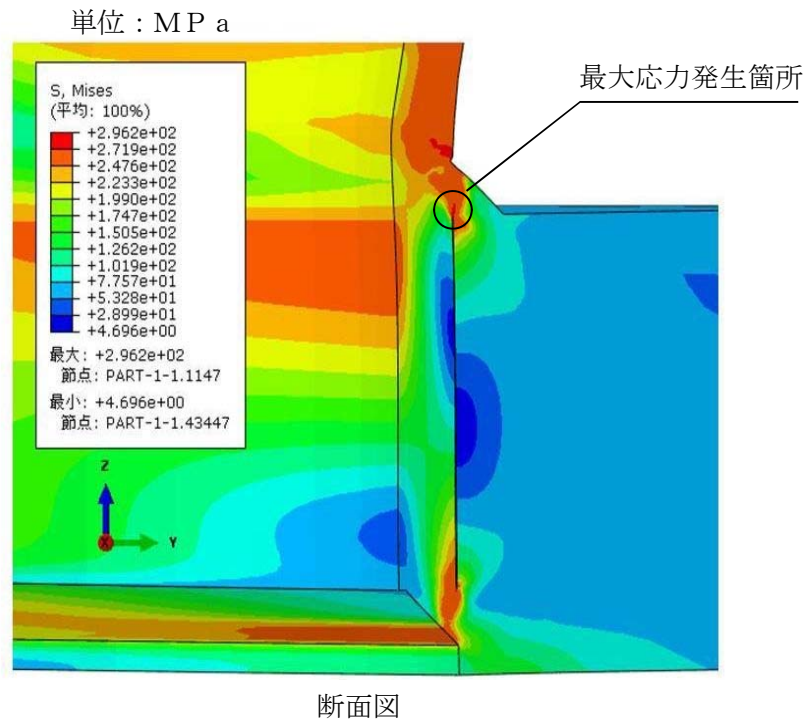
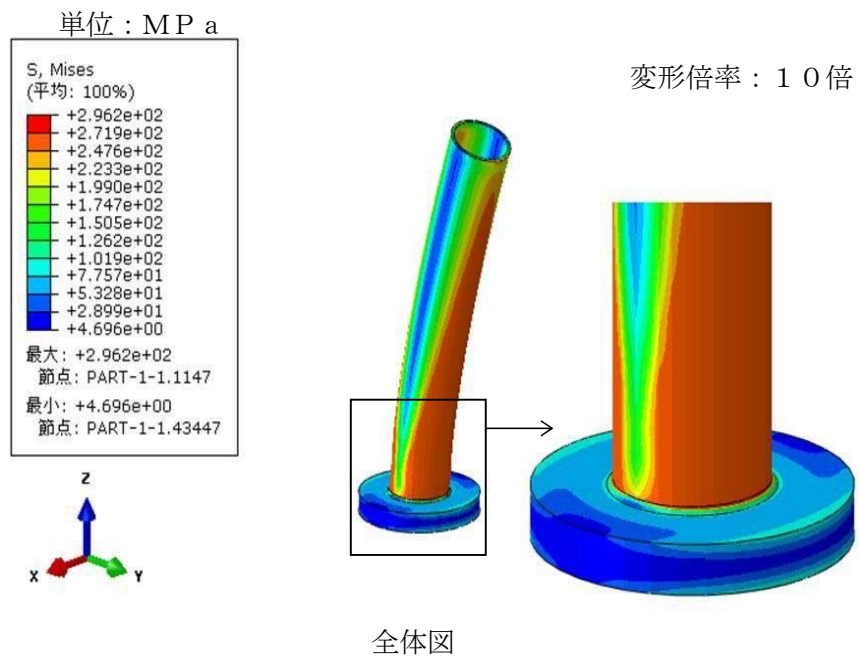
モデル長さ 2500mm の場合

図3-19 長さを変化させた場合の極限解析結果 (2/2)

表 3-5 モデル長さを変化させたときの影響検討結果

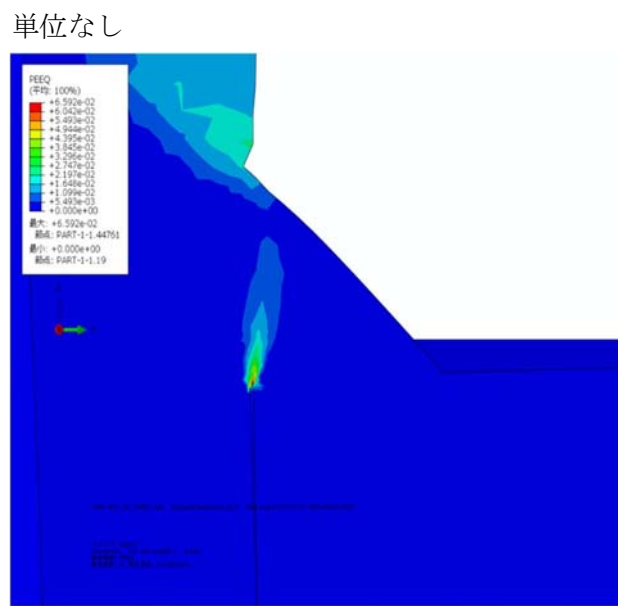
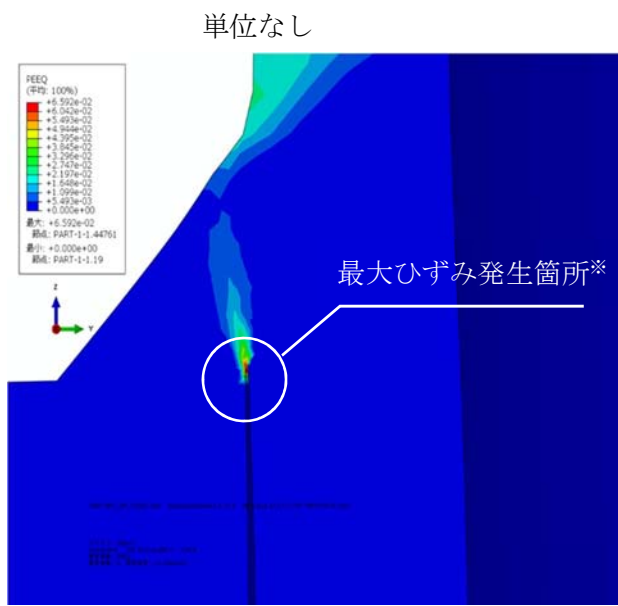
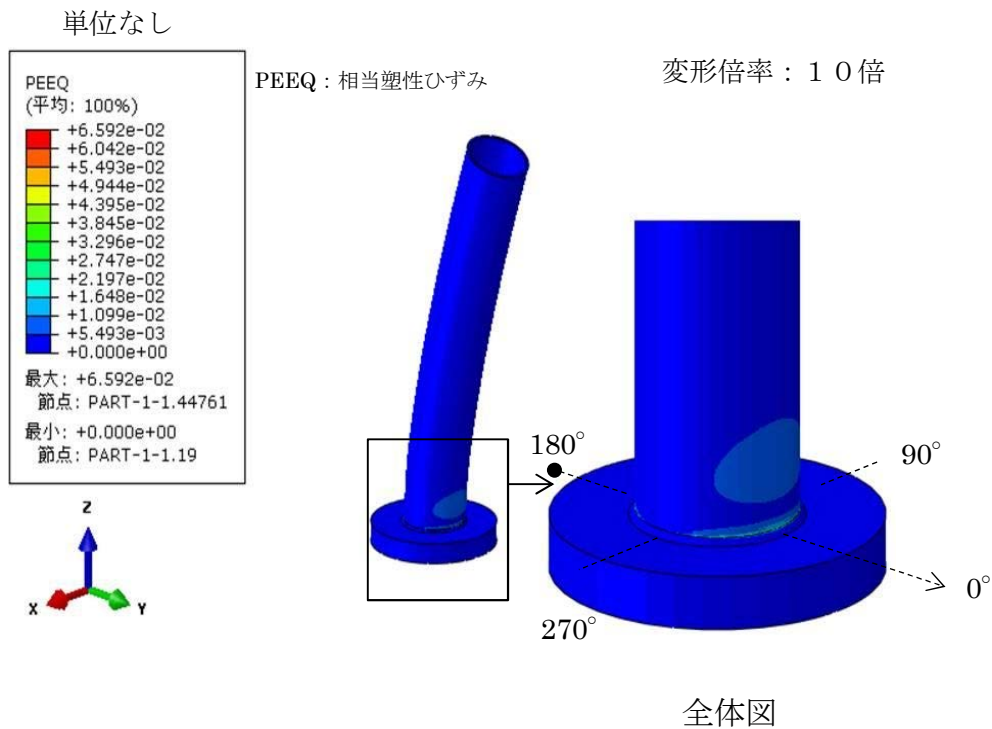
モデル長さ [mm]	許容応力 状態	裕度 (Pcr/地震荷重)	裕度 [*] (許容荷重/地震荷重)
1000	IV _A S	1.134	1.02
1500	IV _A S	1.140	1.02
2000	IV _A S	1.143	1.02
2500	IV _A S	1.144	1.02

※：設計・建設規格 CSS-3160 に基づき許容応力状態IV_ASは0.9Pcr を許容荷重としている。



応力分布図

図3-20 崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布 (中心位置) (1/5)



ひずみ分布図
断面図

※: 最大ひずみはシュラウドヘッド
鏡板表面位置

図3-20 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図 (中心位置) (2/5)

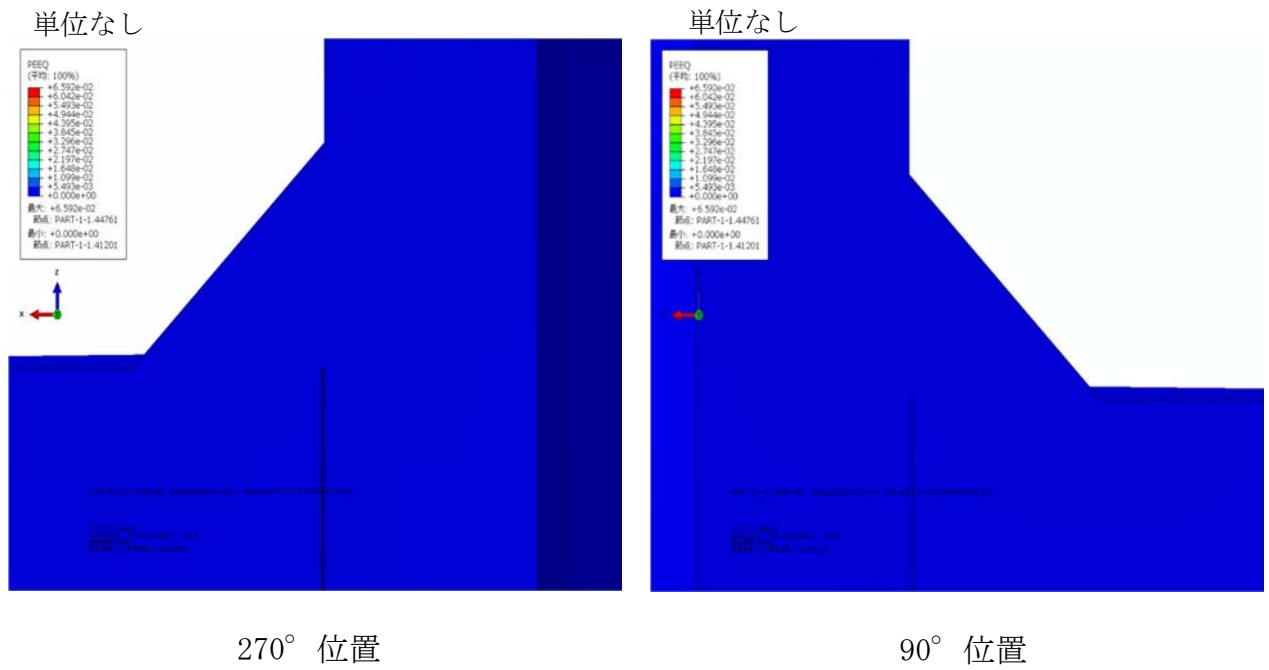
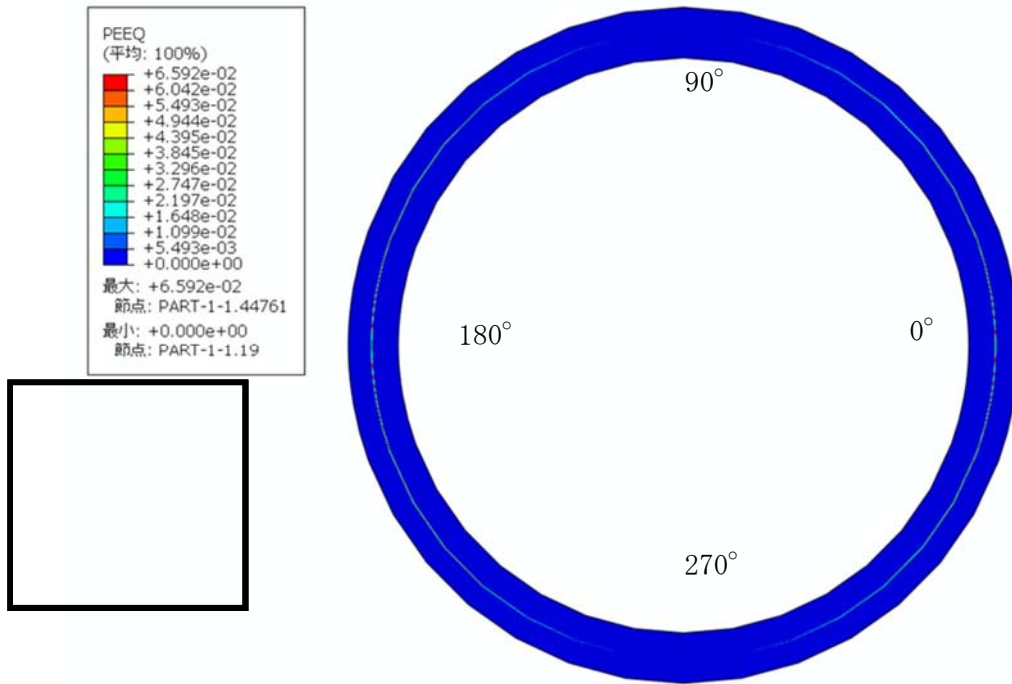


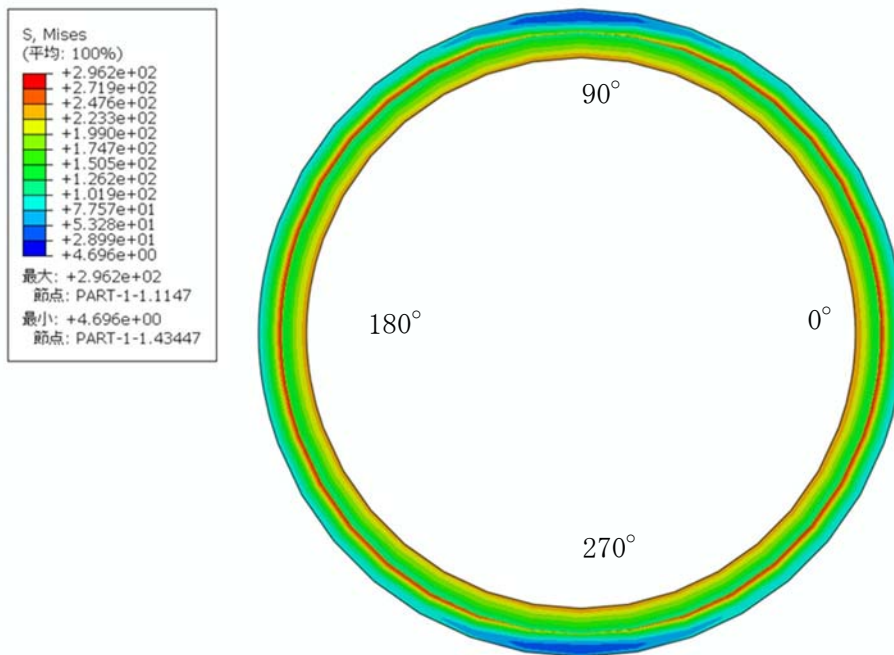
図3-20 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図 (中心位置) (3/5)

単位なし



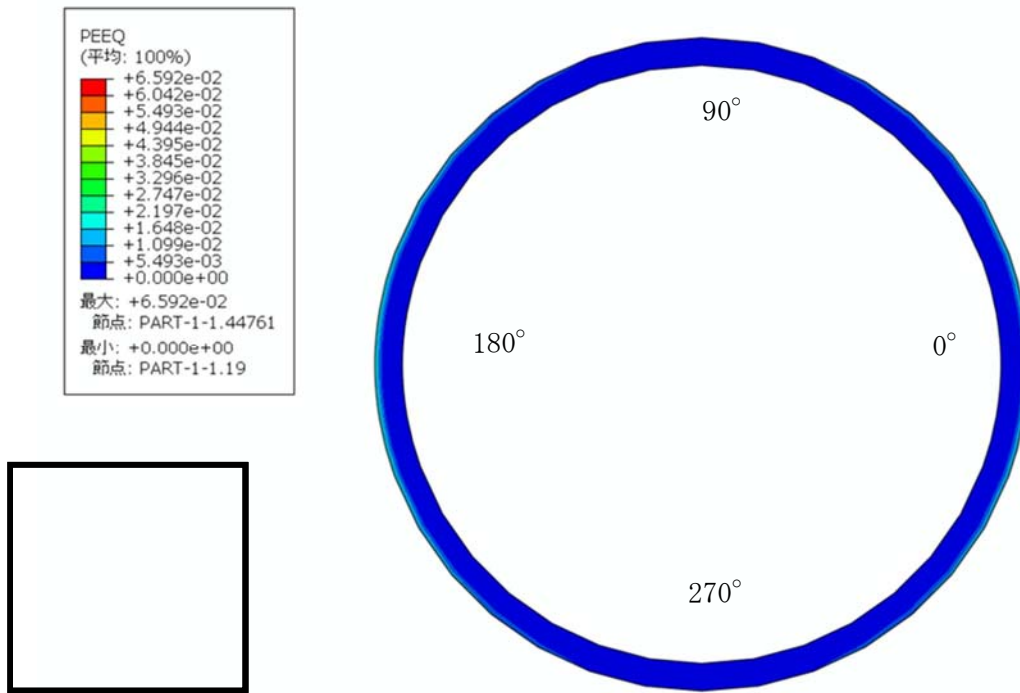
ひずみ分布図（平面図）最大ひずみ発生位置高さ

単位:MP a

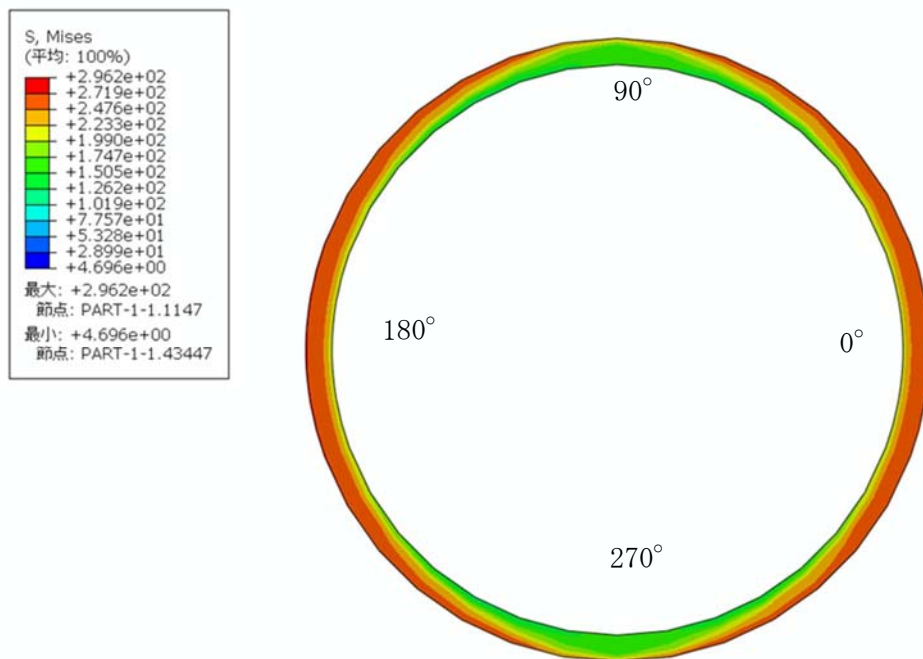


応力分布図（平面図）最大ひずみ発生位置高さ

図3-20 崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布図(4/5)

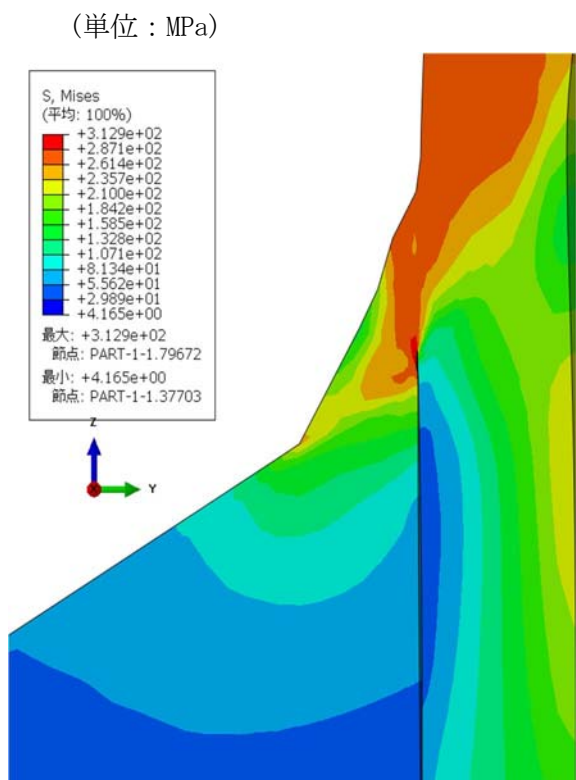
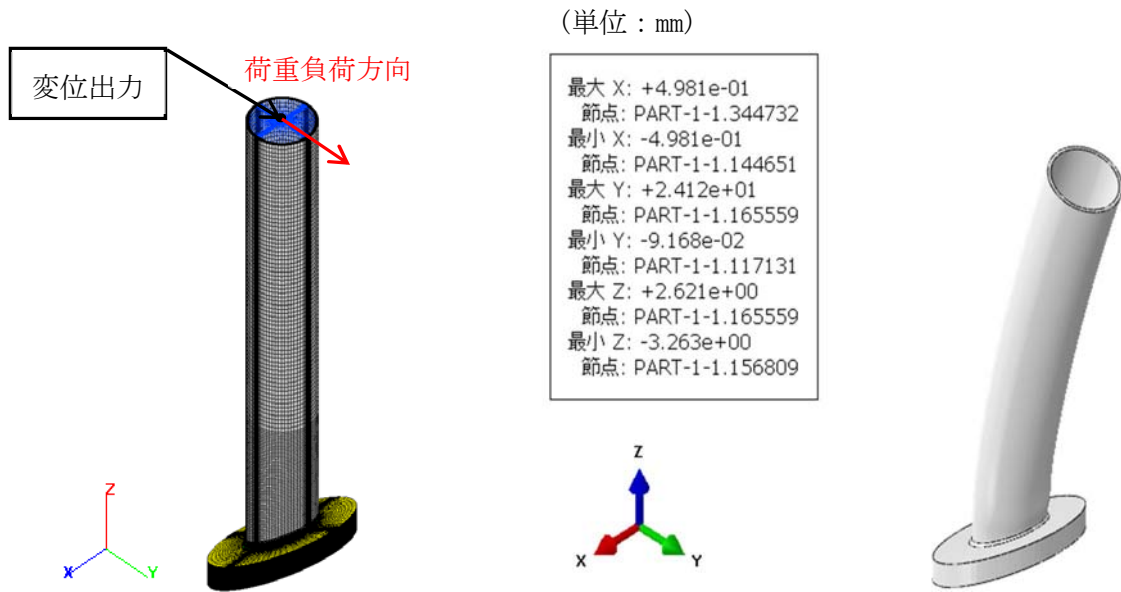


ひずみ分布図 (平面図) 隅肉溶接上端を含む位置

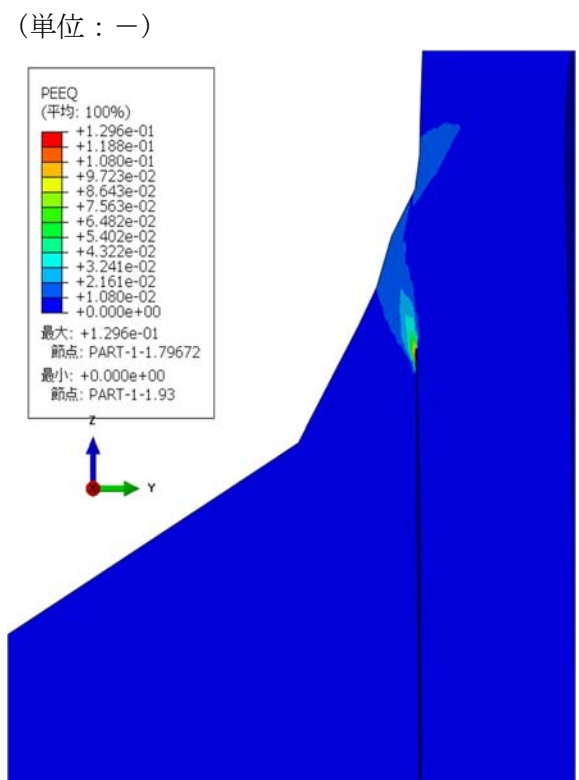


応力分布図 (平面図) (隅肉溶接上端を含む位置)

図 3 - 2 0 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図(5/5)

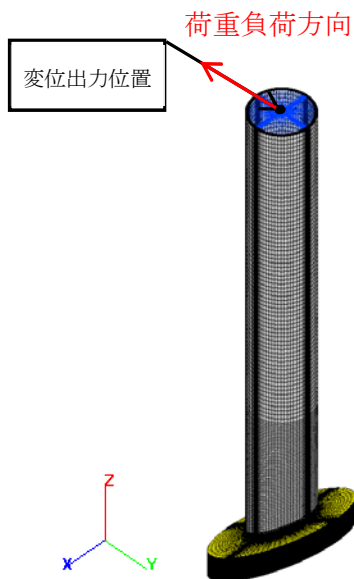


応力分布図(引張側断面)
(2倍勾配交点)



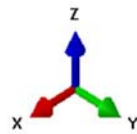
ひずみ分布図(引張側断面)
(2倍勾配交点)

図3-21 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図
(最外周位置 中心方向に荷重負荷)

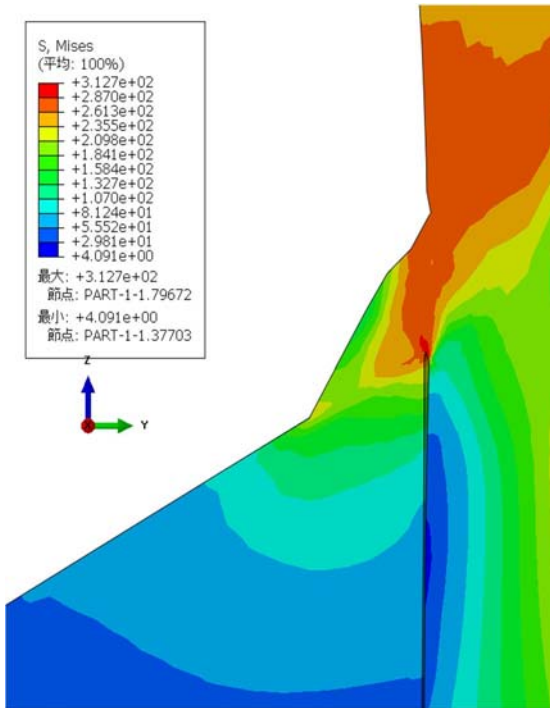


(単位 : mm)

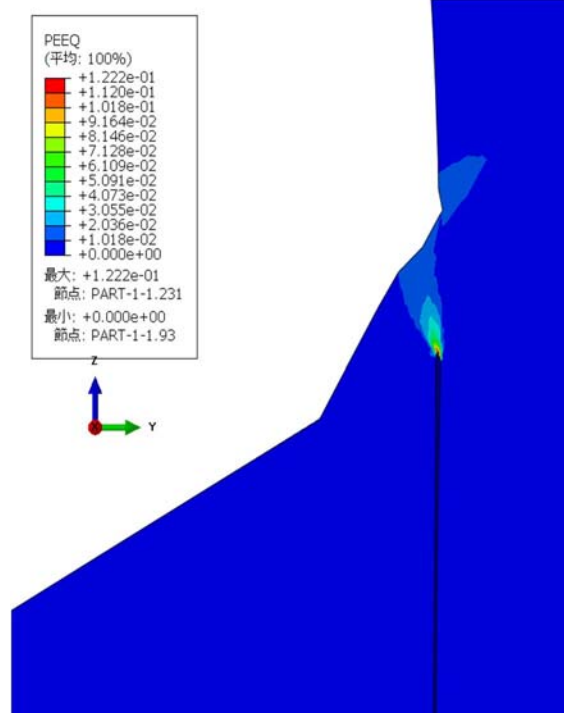
最大 X: +4.248e-01
 節点: PART-1-1.144551
 最小 X: -4.248e-01
 節点: PART-1-1.344632
 最大 Y: +9.590e-02
 節点: PART-1-1.117126
 最小 Y: -2.421e+01
 節点: PART-1-1.156809
 最大 Z: +2.607e+00
 節点: PART-1-1.156809
 最小 Z: -3.327e+00
 節点: PART-1-1.165559



(単位 : MPa)



(単位 : -)



応力分布図 (圧縮側断面)

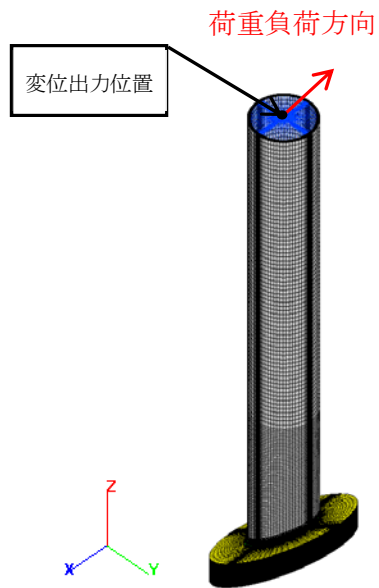
ひずみ分布図 (圧縮側断面)

(2倍勾配交点)

(2倍勾配交点)

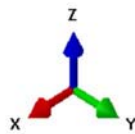
図3-22 崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布図

(リング方向に荷重負荷)

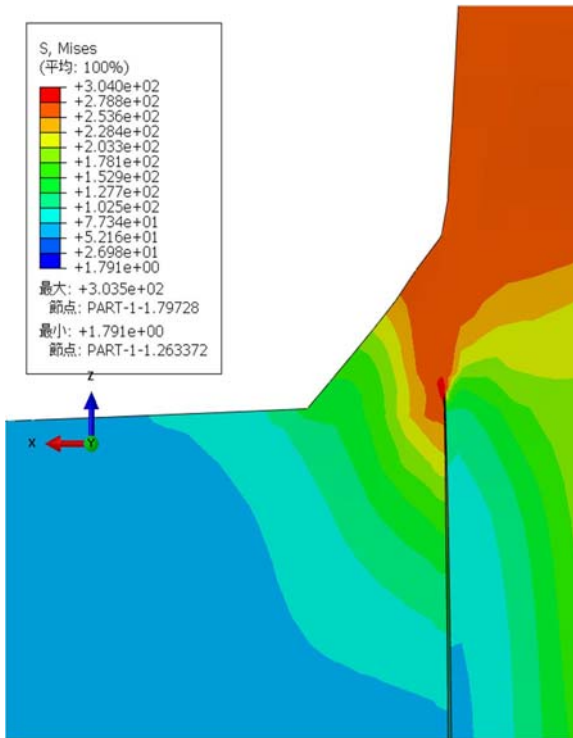


(単位 : mm)

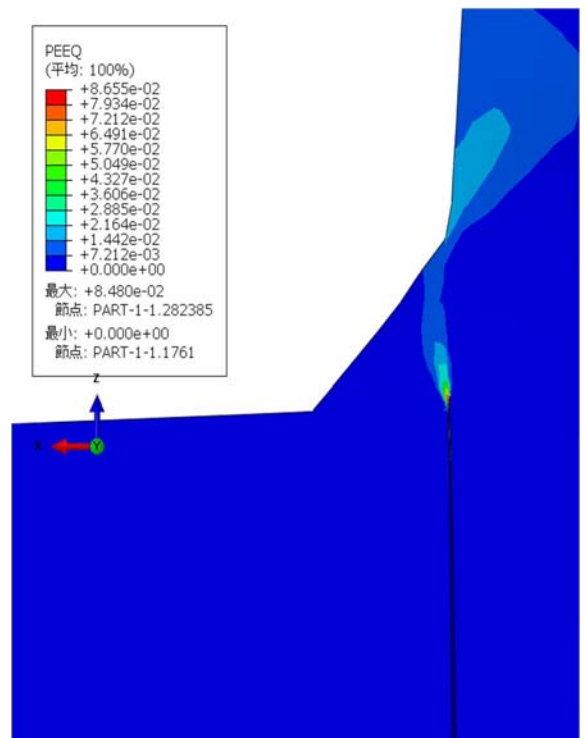
最大 X: +7.514e-02
 節点: PART-1-1.120205
 最小 X: -2.427e+01
 節点: PART-1-1.381740
 最大 Y: +3.257e-01
 節点: PART-1-1.341834
 最小 Y: -3.370e-01
 節点: PART-1-1.141753
 最大 Z: +2.607e+00
 節点: PART-1-1.360600
 最小 Z: -3.285e+00
 節点: PART-1-1.160799



(単位 : MPa)



(単位 : -)



応力分布図(引張側断面)

ひずみ分布図(引張側断面)

(2倍勾配交点)

(2倍勾配交点)

図3-23 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図

(周方向に荷重負荷)

(3) 極限解析に対する試験による確認

スタンドパイプにおける今回工認の申請は、極限解析を用いてスタンドパイプ部の有する耐力が地震荷重以上であることを確認することで、地震時における健全性を評価している。極限解析は、これまでの工認での適用例としてPWRの炉内構造物での適用実績はあるが、表3-6に示すように、適用範囲及び解析手法は同じであるものの、適用部位が異なる。なお、先行PWRと同様に東海第二発電所のスタンドパイプへの極限解析の結果が保守性を有することを補足的に確認する観点から、縮尺の試験体を用いた試験を行う。

表3-6 先行実績と東海第二との比較

	先行PWR	東海第二
適用範囲	炉内構造物	同左
適用部位	ラジアルサポート	スタンドパイプ
適用規格	J S M E 設計・建設規格 CSS-3160	同左
解析手法	3次元FEMによる 弾塑性解析	同左

4. 試験による確認について

4.1 はじめに

東海第二の気水分離器及びスタンドパイプのうち、スタンドパイプの耐震評価においては、今回工認では、極限解析を用い、スタンドパイプの耐力が地震荷重以上であることを確認することで地震時における健全性を評価している。極限解析はこれまでの工認で適用例が少ないため、実機スタンドパイプ及びシュラウドヘッドの一部を縮尺した試験体を用いた試験を実施し、極限解析を用いたスタンドパイプの耐震評価手法の保守性を確認する。

4.2 試験目的

試験は、スタンドパイプとシュラウドヘッド部を模擬した縮尺試験体（以下、単に「試験体」という。）に荷重（モーメント）を作用させる試験を実施し、スケール則を考慮してスタンドパイプが負担することができる最大の荷重（以下「限界荷重」という。）を求める。

試験にて得られた限界荷重が極限解析にて得られた崩壊荷重の下限(P_{cr})より大きいことを確認することで、極限解析の保守性を確認する。

4.3 試験内容

(1) 実施項目

東海第二のスタンドパイプ及びシュラウドヘッドを模擬した縮尺試験体にモーメントを作用させる試験を実施した。

(2) 試験内容

a. 試験体

解析結果から中心位置の方が若干 P_{cr} が低い結果であるため、中心位置を代表とした試験体とする。地震による荷重は鉛直荷重、水平荷重及びモーメントが発生するが、モーメントが支配的な荷重であるため、モーメントを負荷できる試験体とした。

試験体は、スタンドパイプの構造を模擬した縮小モデルとし、試験体のサイズは、試験装置が具備する恒温槽の寸法制限を考慮して外径及びスタンドパイプ板厚で

1/3 スケールとした。試験体の材料は実機と同等のものを使用した。

試験体の仕様を表 4-1 に示す。また、試験体の概略図を図 3-1 に、試験装置の概略図を図 4-1 に示す。試験体は、試験装置の荷重負荷を考慮して、シュラウドヘッドを模擬した鋼板に 2 本のスタンドパイプを模擬した管を溶接にて取付け、下側のスタンドパイプを試験装置に固定し、上側のスタンドパイプを上方へ引っ張ることにより、スタンドパイプ付根にモーメントを作用させた。

なお、シュラウドヘッドは固定しておらず、また、シュラウドヘッドは試験結果への影響が軽微と考え、厚い平板で模擬した。

試験では、試験体に荷重を加えながら変位を計測し、限界荷重を確認した。

b. 試験方法

試験は、恒温槽を具備した試験装置に試験体を取り付け、301 °C（運転状態 I，II の最高温度）の高温状態にて、試験体に上方へ荷重を負荷しながら変位を計測することにより実施した。

なお、変位については 2 本のスタンドパイプの変位であることから、変位に 1/2 を乗ずることにより 1 本のスタンドパイプの変位として整理している。

表 4-1 縮尺試験体の仕様

項目		試験体仕様	実機仕様
スタンドパイプ			
寸法	外径 (Do)	56.10mm (1/3 スケール)	168.3mm
	内径 (Di)	51.36mm (1/3 スケール)	154.08mm
	板厚	2.37mm (1/3 スケール)	7.11mm
材料		SUS304TP	SUS304TP 相当 (ASME SA-312 Gr. TP304)
シュラウドヘッド鏡板			
寸法	板厚	32mm	50.8mm
材料		SUS304	SUS304 相当 (ASME SA-240 TYPE304)
変位測定位置		鏡板表面から 148mm	鏡板表面から 1000mm (極限解析の変位出力位置)
荷重負荷位置		鏡板表面から 148mm (モーメントアーム)	鏡板表面から 1000mm

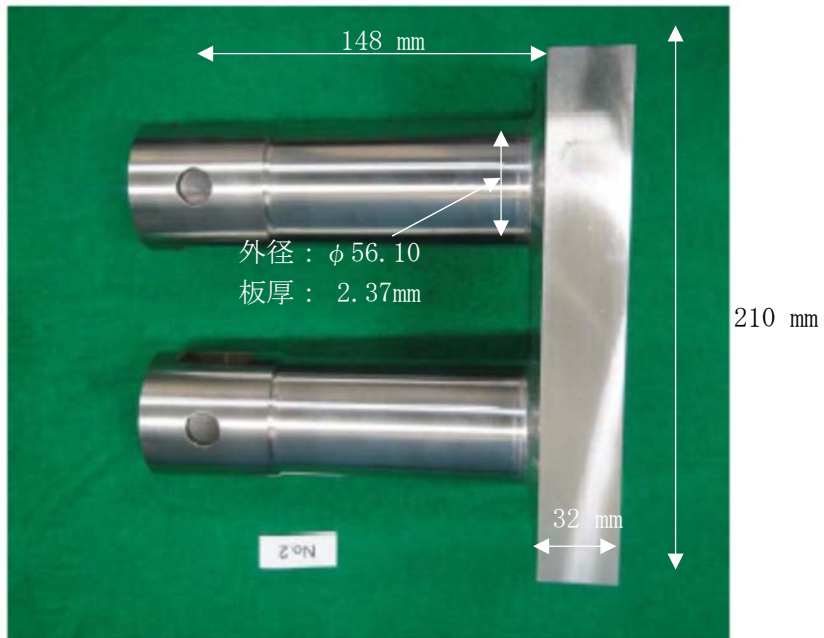
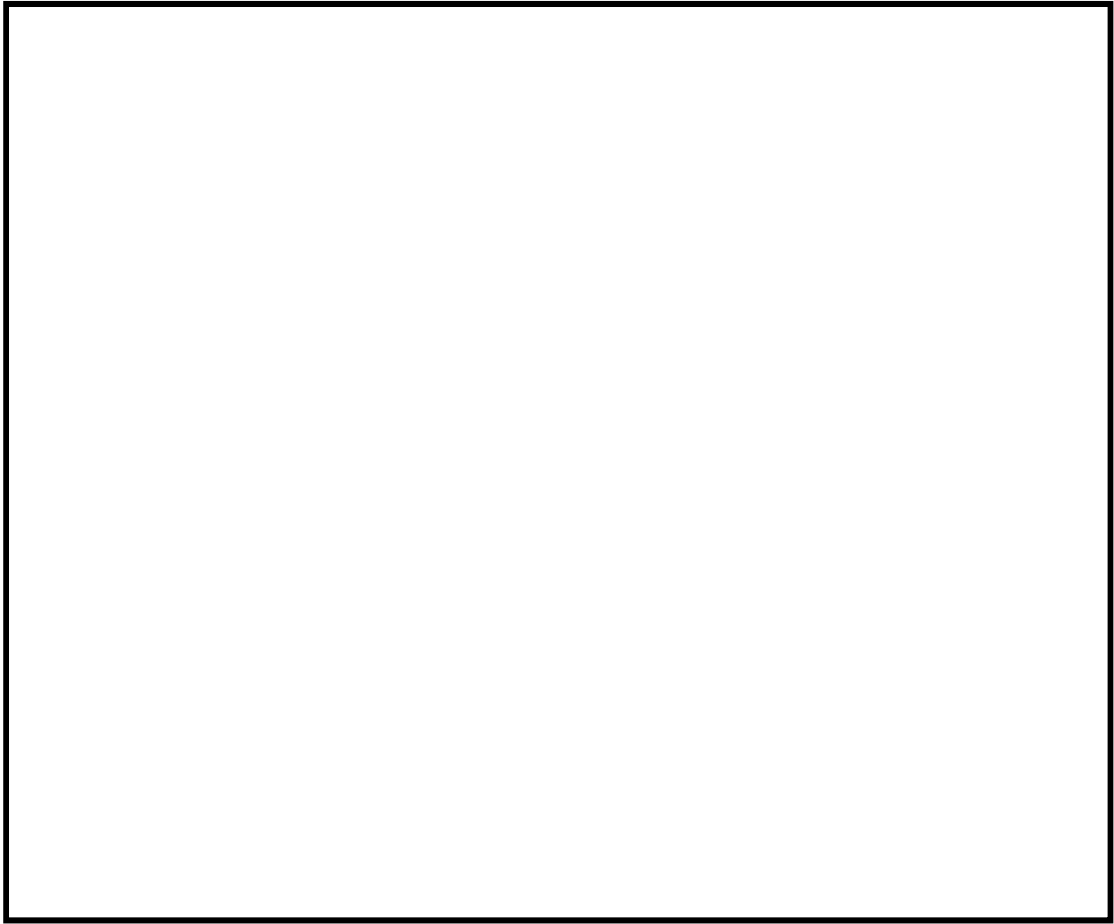


图 4 - 1 試驗体形状

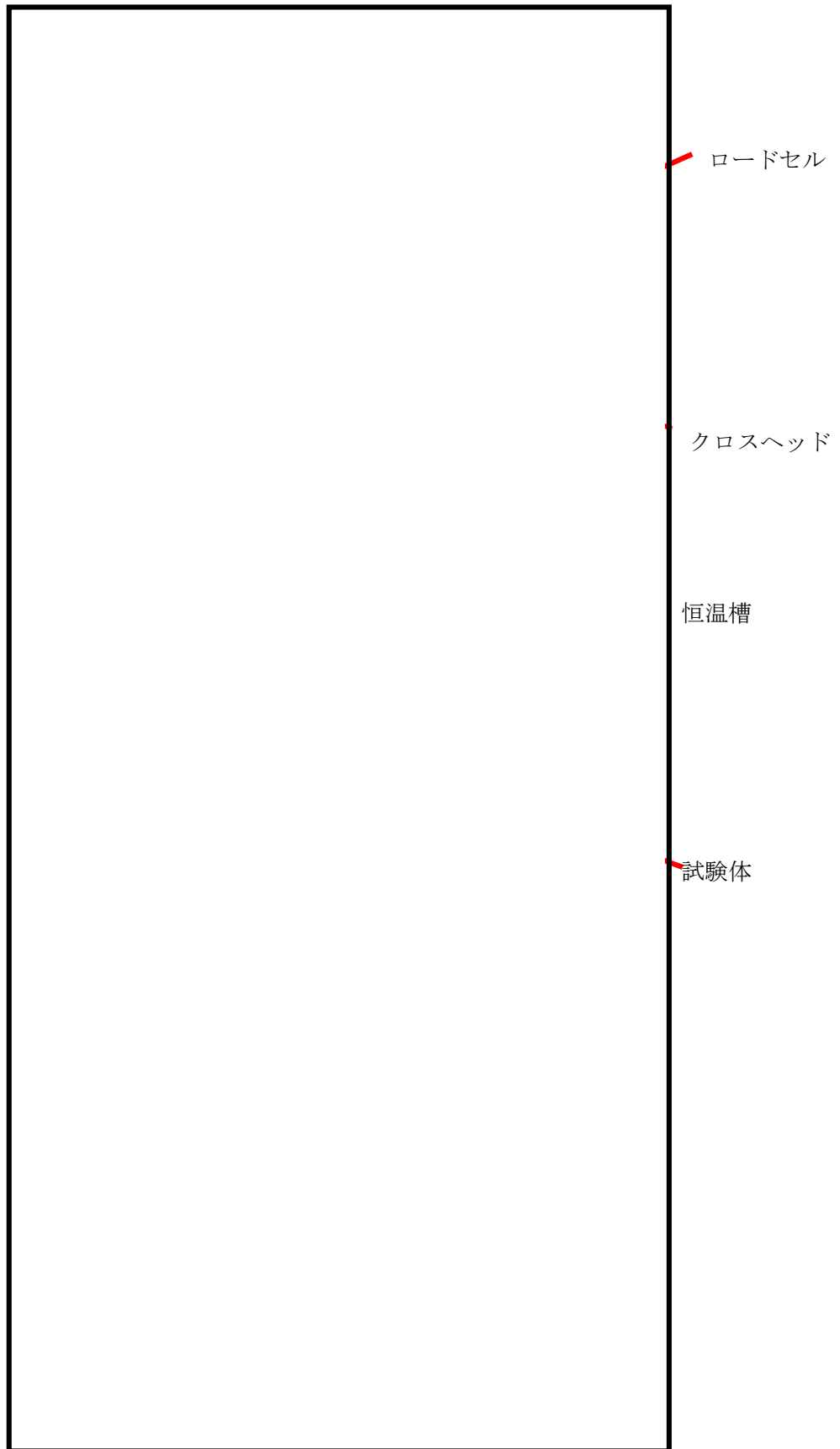
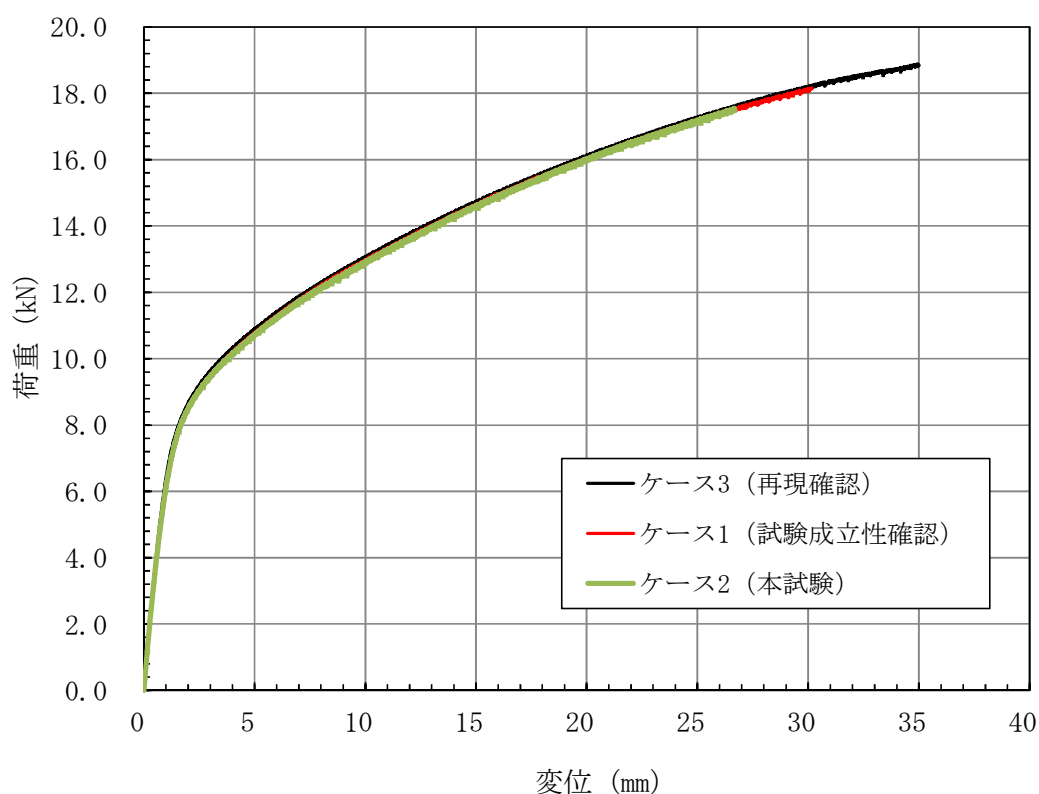


図 4 - 2 試験装置

4.4 試験結果

(1) 試験から得られた荷重変位曲線

試験から得られた荷重変位曲線を図4-3に示す。試験は、試験装置内の試験体と治具との干渉を考慮して、変位が26 mmを超えた時点（荷重：17.5 kN）で試験を終了した。なお、試験については試験成立性確認用、本試験、再現確認用として3回実施しており、それぞれの試験から得られた荷重変位曲線に有意な差はなかったため、本試験データを試験結果としている。



※：試験で得られた変位に1/2を乗ずることにより1本当たりの変位にしている

図4-3 試験から得られた荷重変位曲線

(2) 試験前後及び試験中の試験体の状況

試験前後及び試験中の試験体の状況をそれぞれ図4-4に示す。試験結果から、スタンドパイプ及びシュラウドヘッドを模擬した試験体に亀裂、損傷は確認されなかった。

この結果から、試験体の限界荷重としては、少なくとも17.5 kNであることが確認された。



試験前

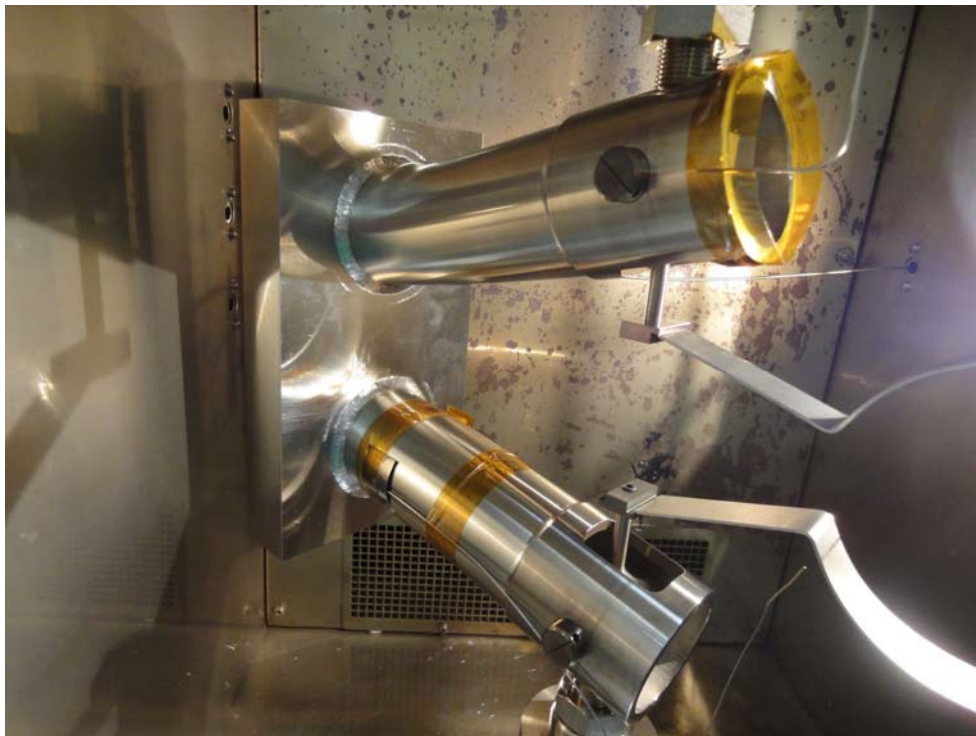


試験後

図4-4 各試験段階での試験体の状態 (1/2)



試験中



試験後

図4-4 各段階での試験体の状態 (2/2)

(3) スケール則を踏まえた試験結果と極限解析結果の比較

試験により求められた荷重変位曲線から、スケール則及びスタンドパイプ付根部に掛かる荷重（モーメント）を考慮して実機寸法における荷重変位曲線を作成し、極限解析結果と比較評価する。

スケール則は荷重と変位に対してそれぞれ考慮する。荷重及び変位についてのスケール則の考え方は以下の通りである。

試験体のスタンドパイプ付根部に作用するモーメントは、試験装置で負荷した荷重にモーメントアーム（0.148 m）を乗じて求める。荷重（モーメント）に対しては実機寸法と試験体の弾性断面係数と塑性断面係数の比はそれぞれ等しいこと、また、解析モデルと試験体における終局時の断面性状に即していることから塑性断面係数の比^{*}（= 27）を乗じる。

変位に対しては、今回の評価は弾塑性解析により変位を求めており、解析に用いる応力ひずみ線図は弾完全塑性体としており、塑性域の変位は弾塑性体である試験体と異なるため、弾性域での変位比を乗じる。試験体は、各位置で断面形状が異なることから、長さ、断面二次モーメントを考慮した面積モーメント法により変位を求める。実機はたわみの式により変位を求め、実機と試験体の変位比（= 20.4）を乗ずる（算出方法は補足－1参照）。

このスケール則を考慮した結果を表4－2に示す。極限解析で得られる崩壊荷重の下限値(P_{cr})よりも試験で得られた値の方が耐力を有するため保守的であることがわかる。また、スケール則を考慮した試験体の荷重変位曲線と極限解析結果の荷重変位曲線を重ね描いたものを図4－5に示す。

なお、試験結果と極限解析結果の弾性範囲で傾きが異なるが、これは極限解析ではスタンドパイプ下端を固定端として計算しておりスタンドパイプのみの変位であるが、試験ではスタンドパイプの変位のほかに鏡板やピンのたわみ等も含まれるため解析に比べて大きな変位となると考える。また、本試験目的は解析と試験で得られた荷重の比較を示すものであるが、補足－2に鏡板、ピンのたわみを除いた結果を示す。

※：円筒形の塑性断面係数 Z_p （= $(D_o^3 - D_i^3) / 6$ ）の比

D_o ：外径， D_i ：内径

（表3－1に示す実機と試験体それぞれの内外径）

実機の塑性断面係数： Z_p （実機）= 1.849×10^5 [mm³]

試験体の塑性断面係数： Z_p （試験体）= 6.846×10^3 [mm³]

表 4-2 試験結果と極限解析結果の比較

	荷重 (kN)	モーメント (kN・m)	備考
①試験結果	17.5	—	
②試験結果 (付根部に掛かる モーメント)	—	2.59	①×0.148 m (モーメントア ーム)
③試験結果 (スケール則考慮)	—	69.93	②×27 (塑性断面係数の比)
④極限解析 (Pcr)	—	49.73	降伏点を $\text{Min}[2.3S_m, 0.7S_u]$ とした場合
⑤極限解析 (Pcr) により 得られる許容荷重	—	44.75	許容応力状態 IV _{AS} (許容荷重 = $0.9 \times ④$)

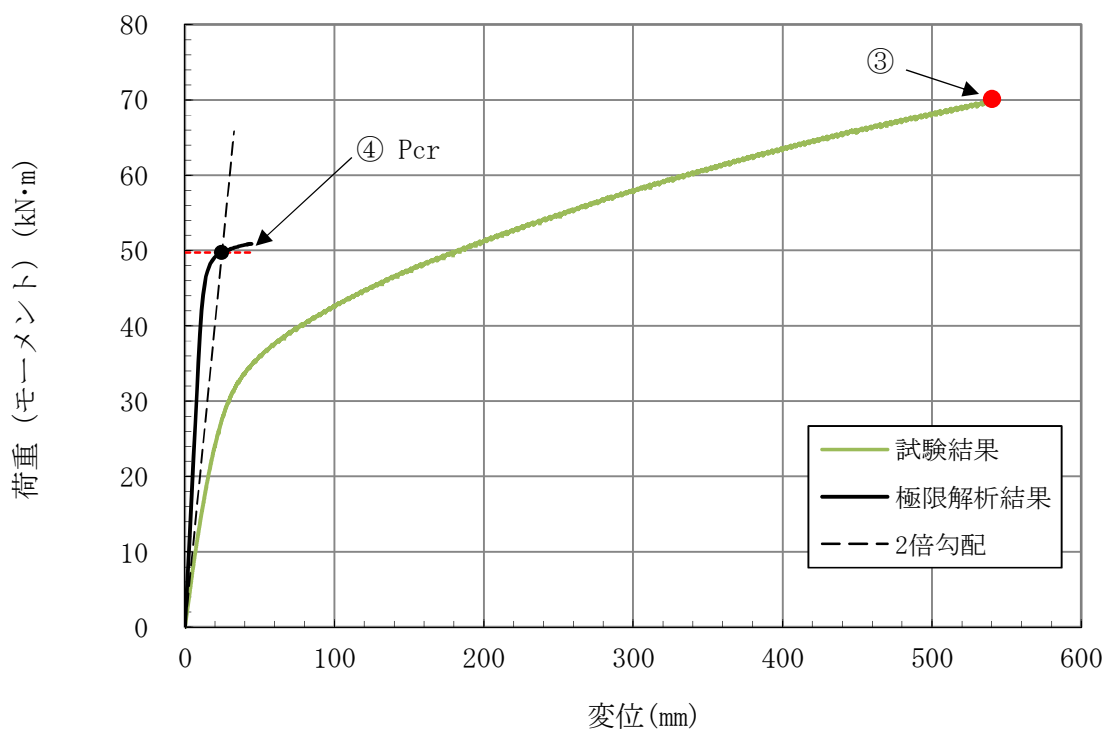


図 4-5 試験結果と極限解析結果の比較

4.5 まとめ

東海第二のスタンドパイプの縮尺試験体に荷重（モーメント）を作用させる試験を実施した結果、限界荷重は少なくとも 17.5 kN であり、試験後の試験体に亀裂、損傷は生じていなかった。試験における限界荷重 17.5 kN は、実機のスケールでは 69.93 kN・m に相当し、極限解析により得られる許容荷重（モーメント）44.75 kN・m に対して十分大きいことがわかった。

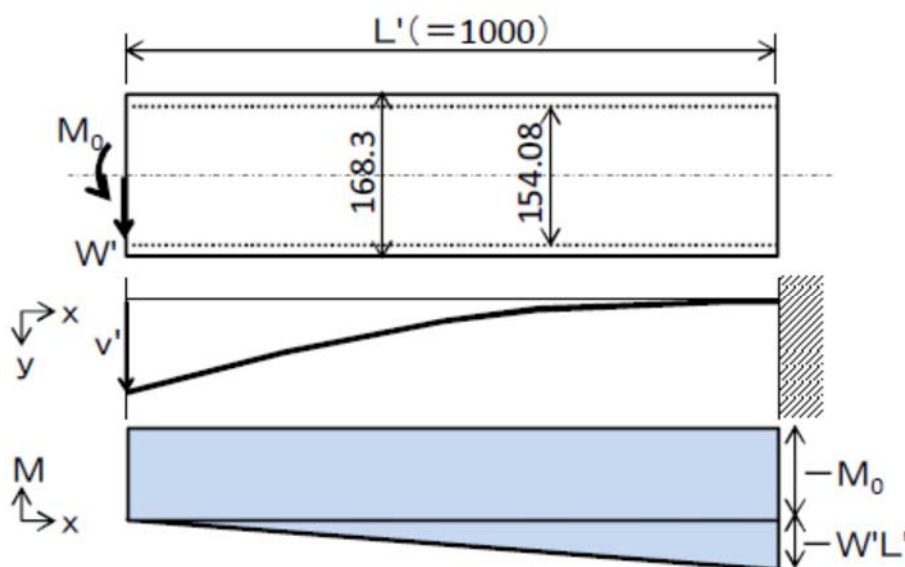
以上より、極限解析による評価手法は十分な保守性を有していることを確認した。

また、試験体に対する極限解析については別紙－1 に示すとおり、試験体に対する極限解析にて得られた P_{cr} (13.7 kN) よりも試験にて得られた許容荷重のほうが十分大きいことを確認した。

変位に対するスケール則の算出について

①実機スタンドパイプ解析モデルの変位の算出

実機スタンドパイプ解析モデルにはスタンドパイプ上面からモーメント及び水平荷重を負荷しているため、それぞれの荷重に対して、材料力学に基づき変位を算出する(下図参照)。



たわみの式より

$$\begin{aligned}
 v' &= W'L'^3 / (3EI') + M_0L'^2 / (2EI') \\
 &= \sigma Z' (W'/M') L'^3 / (3EI') + \sigma Z' \{1 - (W'/M') L'\} L'^2 / (2EI') \\
 &= 5247 \sigma / E
 \end{aligned}$$

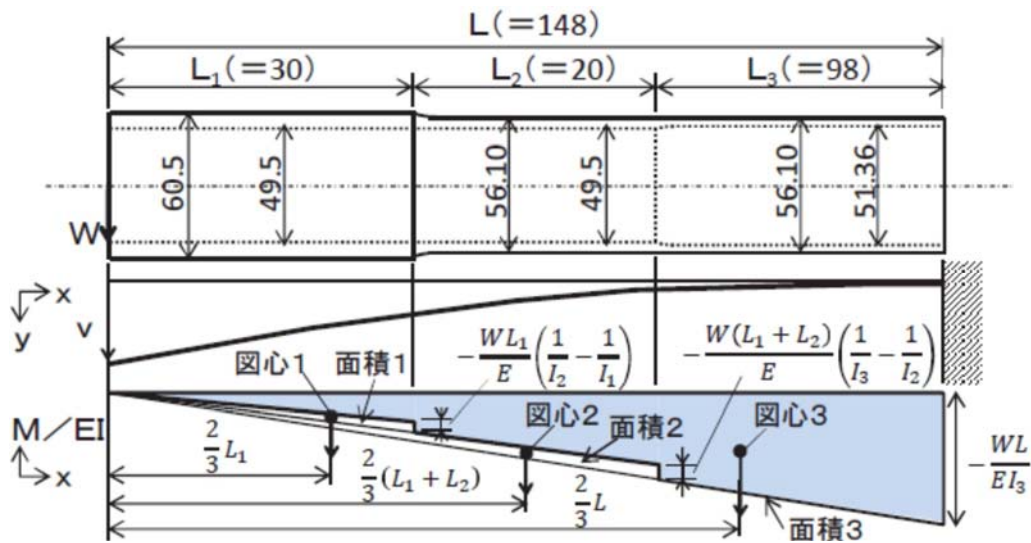
$$M_0 = M' - W'L'$$

実機スタンドパイプの諸元

項目	実機
外径 Do' (mm)	168.3
内径 Di' (mm)	154.08
板厚 t' (mm)	7.11
断面二次モーメント I' (mm ⁴)	1.172 × 10 ⁷
変位計測点 L' (mm)	1000
地震荷重 S s	
W' 水平力 (kN)	3460
M' 曲げモーメント (kN・mm)	9870000
W' / M' (mm ⁻¹)	3.506E-04

②スタンドパイプのたわみ v_0

試験体の変位の算出は、引張荷重を付与するために試験体上面に治具を取り付けることによる応力集中によりパイプと板との取付部以外が破損するのを防止するため、試験体上面付近の板厚を 1/3 より肉厚な構造（下図 L1, L2 範囲）にしている。肉厚な構造にすることにより、上面から荷重を負荷した場合、L1, L2 範囲の肉厚構造部の変位の低下を面積モーメント法にて考慮する（下図参照）。



面積モーメント法より

$$\begin{aligned}
 v_0 &= (\text{面積3}) \times (\text{図心3までの距離}) - (\text{面積2}) \times (\text{図心2までの距離}) - \\
 &\quad (\text{面積1}) \times (\text{図心1までの距離}) \\
 &= \{WL/(EI_3)\} \cdot (L/2) \cdot (2L/3) - \{W(L_1+L_2)/(1/I_3-1/I_2)/E\} \cdot \{(L_1+L_2)/2\} \cdot (2(L_1+L_2)/3) \\
 &\quad - \{WL_1/(1/I_2-1/I_1)/E\} \cdot (L_1/2) \cdot (2L_1/3) \\
 &= \sigma Z/E \cdot \{L_2/(3I_3) - (L_1+L_2)^3/(3L) \cdot (1/I_3-1/I_2) - L_1^3/(3L) \cdot (1/I_2-1/I_1)\} \\
 &= 257.1 \sigma / E
 \end{aligned}$$

変位比 $v' / v_0 = 5247/257.1 = 20.4$

試験体の諸元

項目	試験体		
	部位1 (長さ L_1)	部位2 (長さ L_2)	部位3 (長さ L_3)
外径 D_{1o}, D_{2o}, D_{3o} (mm)	60.5	56.1	56.1
内径 D_{1i}, D_{2i}, D_{3i} (mm)	49.5	49.5	51.36
板厚 t (mm)	—	—	2.37
断面二次モーメント I_1, I_2, I_3 (mm ⁴)	3.629×10^5	1.915×10^5	1.446×10^5
変位計測点 L (mm)	148		
長さ L_1, L_2, L_3 (mm)	30	20	98

試験体変位の詳細検討について

1. 概要

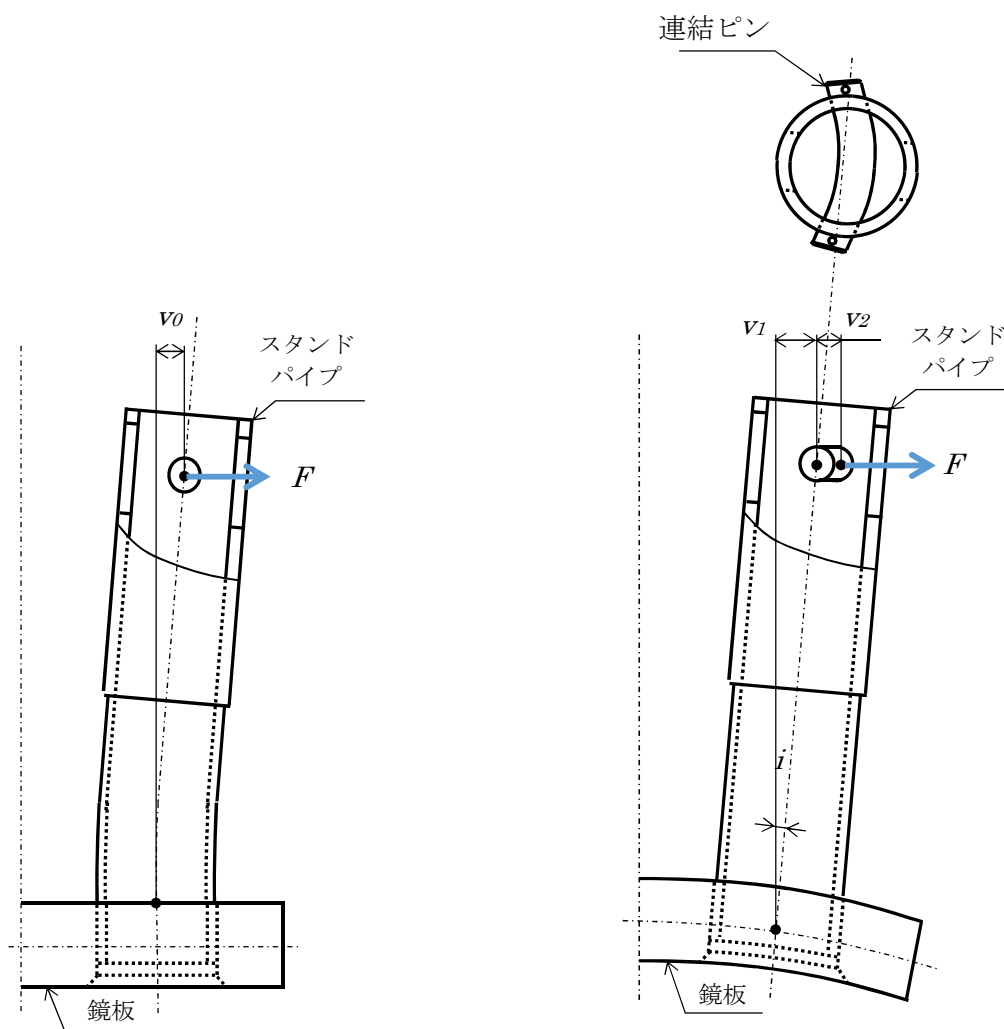
今回の試験体を用いた確認は極限解析により得られた崩壊荷重の下限（ P_{cr} ）より試験にて得られた限界荷重の方が大きいことを確認することを目的としたものである。スケール則を考慮した試験体の荷重変位曲線と極限解析で得られた荷重変位曲線では、試験結果の変位を実機スケールに換算するために乗じる変位比を試験結果に含まれる鏡板、ピン等のたわみによる変位にも乗じているため、パイプのみである解析結果とは試験体の弾性範囲においても一致しない。このため鏡板、ピン等のたわみによる変位を除いた変位と解析結果の変位についても詳細検討を行う。

2. パイプ以外の変位

「4. 試験による確認について」で乗じた変位比はパイプの他の鏡板、ピン及び引張試験装置の変位を含んだ試験体の変位に乗じているため、パイプの変位以外を除去する。鏡板及びピンの変位の除去については、材料力学等の理論式に基づき変位を算出し、試験体全体の変位とパイプの変位の比を試験結果で得られた変位に乗じることにより除去する。引張試験装置の変位については、試験体間に取り付けたひずみゲージを用いることで、引張試験装置の変位を含まない2点間距離の変位となるため、これを1本の変位にしたものを用いる。

2.1 試験体の変位の算出

試験体の変位は、スタンドパイプの変位の他に連結ピン及び鏡板のたわみによる変位が含まれることから、試験体の変位に対するパイプの変位の比を乗じることによりこれらの変位を除去する（下図参照）。



スタンドパイプのたわみ

鏡板と連結ピンのたわみ

$$\begin{aligned} \text{試験体の変位 } v_T &= \text{スタンドパイプたわみ} + \text{鏡板たわみ} + \text{連結ピンたわみ} \\ &= v_0 + v_1 + v_2 \end{aligned}$$

①鏡板のたわみによる変位 v_1

傾斜 $i(x)$ は、以下により求める。

$$\frac{di(x)}{dx} = \frac{M}{EI_1}$$

$$i(x) = \frac{M}{EI_1} x$$

よって、

$$i = i(a) = \frac{M}{EI_1} a$$

ここで、

$$M = F \left(L + \frac{T}{2} \right)$$

$$I_1 = \frac{W_e T^3}{12}$$

$$E = 176000 \text{ (MPa)} \text{ (301℃の SUS304 のヤング率)}$$

$$W_e = \frac{1}{a} \left(W a - \frac{\pi}{8} D_o^2 \right) \text{ (穴部を考慮した等価幅)}$$

変位 v_1 は、以下により求める。

$$\begin{aligned} v_1 &= i \left(L + \frac{T}{2} \right) \\ &= \frac{F a (L + T/2)^2}{EI_1} \end{aligned}$$

上式に、スタンドパイプ根元部の応力 σ と F の関係式を代入する。

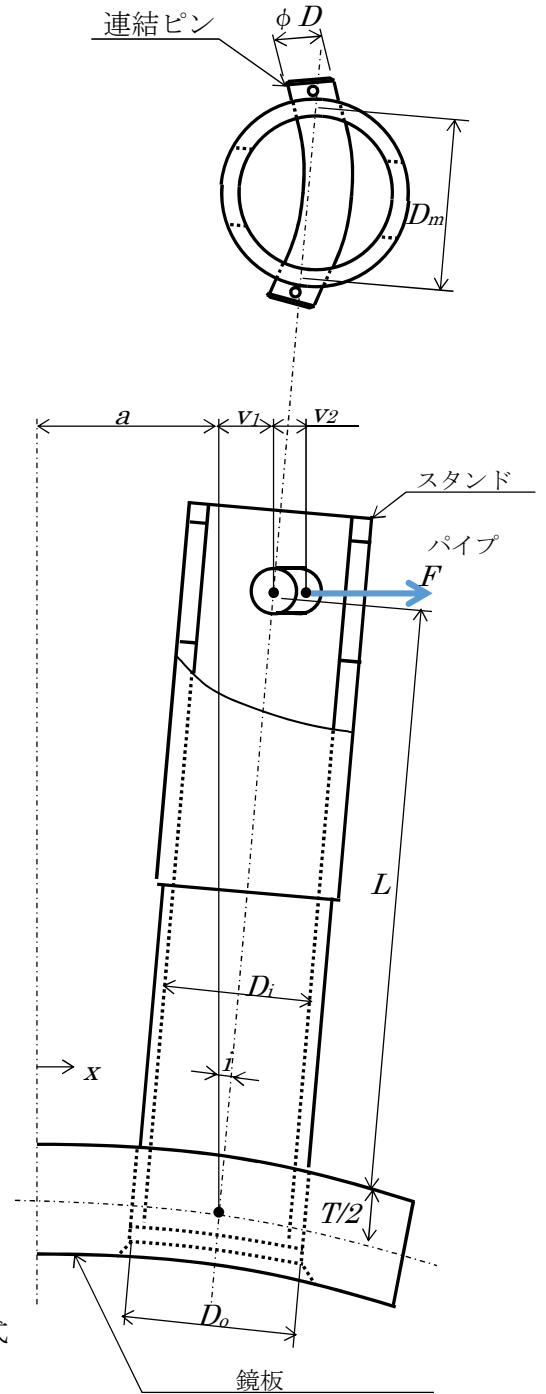
$$\sigma = \frac{FL}{Z}$$

$$F = \frac{\sigma Z}{L}$$

$$Z = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{32D_o}$$

これより、

$$v_1 = \frac{Z a (L + T/2)^2 \sigma}{L I_1 E} = 193.5 \frac{\sigma}{E}$$



(幅 W , 板厚 T)

$$a = 55 \text{ (mm)}$$

$$L = 148 \text{ (mm)}$$

$$D = 16 \text{ (mm)}$$

$$T = 32 \text{ (mm)}$$

$$D_m = 55 \text{ (mm)}$$

$$W = 120 \text{ (mm)}$$

②連結ピンのたわみによる変位 v_2

変位 v_2 は、以下により求める。

$$v_2 = \frac{FD_m^3}{48E'I_2}$$

(機械工学便覧 A4-28 No.7 より)

ここで、

$$I_2 = \frac{\pi D^4}{64}$$

$E' = 183000$ (MPa)(301°Cの連結ピン(低合金鋼)のヤング率)

変位 v_2 の式に、スタンドパイプ根元部の応力 σ と F の関係式を代入する。

$$\sigma = \frac{FL}{Z}$$

$$F = \frac{\sigma Z}{L}$$

$$Z = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{32D_o}$$

これより、

$$v_2 = \frac{ZD_m^3 E \sigma}{48Ll_2 E' E} = 36.1 \frac{\sigma}{E}$$

③試験体の全変位 v_T

$$v_T = v_0 + v_1 + v_2 = 486.7 \frac{\sigma}{E}$$

$v_0 = 257.1 \sigma / E$ (補足-1にて得られたパイプの変位)

④試験体の全変位に対するパイプの変位の比

$$\frac{v_0}{v_T} = \frac{257.1}{486.7} = 0.528$$

⑤試験結果に乗じる変位比

試験結果に乗じる変位比 = 実機と試験体の変位比 × 試験体の全変位に対するパイプの変位の比

$$= 20.4 \times 0.528 = 10.8$$

2.2 引張試験装置の変位について

本項に記載している荷重変位曲線の変位は引張試験装置で得られた変位であることから、引張試験装置での変位を除去するため、試験体間に取り付けたひずみゲージの変位を使用する。

3. 詳細検討を反映した荷重変位曲線

2.にて算出したピン、鏡板及び引張試験装置の変位を除いた荷重変位曲線と極限解析結果の荷重変位曲線を重ね合わせたものを図1に示す。図1には試験体の荷重変位曲線も併せて示す。図1に示すとおり、試験体の弾性範囲において解析結果と試験結果が良く一致することを確認した。

なお、その後の変位は差異が生じているが、差異理由については以下の通りである。

極限解析に用いる設計降伏点は設計・建設規格に従い、降伏点を許容応力状態Ⅳ_{AS}ではMIN[0.7Su, 2.3Sm]、Ⅲ_{AS}では1.5Smとしている。オーステナイト系ステンレス鋼のSm値はMIN[1/3Su, 0.9Sy]が採用されており、本評価での使用材料であるSUS304では0.9Syの値の方が低い。このため、許容応力状態Ⅳ_{AS}では2Sy、Ⅲ_{AS}では1.35Syとなるような設計降伏点となり、実際のオーステナイト系ステンレス鋼の降伏点であるSyよりも高い値である(図2参照)。

この理由については、設計・建設規格ではオーステナイト系ステンレス鋼のようにひずみ硬化特性が大きく安全率に余裕があるため、ひずみ硬化特性を考慮して実際の降伏点より高い設計降伏点を定めているとしている(図3参照)。

今回の試験体の降伏点はミルシートから245[MPa](0.2%耐力,室温)であり、設計・建設規格の室温における設計降伏点 $S_y=205$ [MPa]に対して1.2倍程度高い。これを301℃の降伏点に補正した場合、試験体の降伏点は152MPaであり、解析上の許容応力状態Ⅳ_{AS}での降伏点264[MPa]に対して約1.7倍の降伏点の差異がある。このため、試験体の弾性範囲においては解析結果と概ね一致しているが、その後の変位は差異が生じているものと考えられる。

また、解析と試験体で弾塑性状態における変位挙動が異なる理由は、図3の解説図PVB-3160-1に示すように、解析では設計降伏点以降はひずみ硬化特性を含まない弾完全塑性体であるため、降伏以降は急激に変位が増加するが、試験体はひずみ硬化特性を持つため、

降伏以降も荷重を負荷するとなだらかに変位は増加していく。このため、それぞれの降伏以降の変位挙動が異なるものとする。

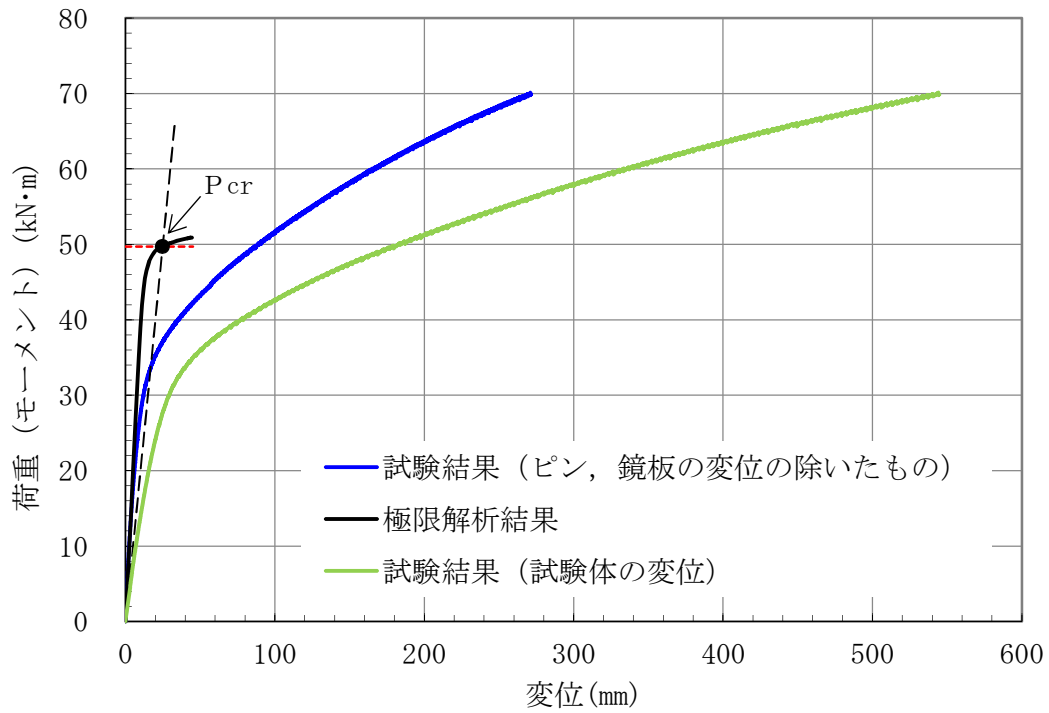


図1 試験結果と極限解析結果の荷重変位曲線
(ピン, 鏡板の変位除いて実機スケールに換算したもの)

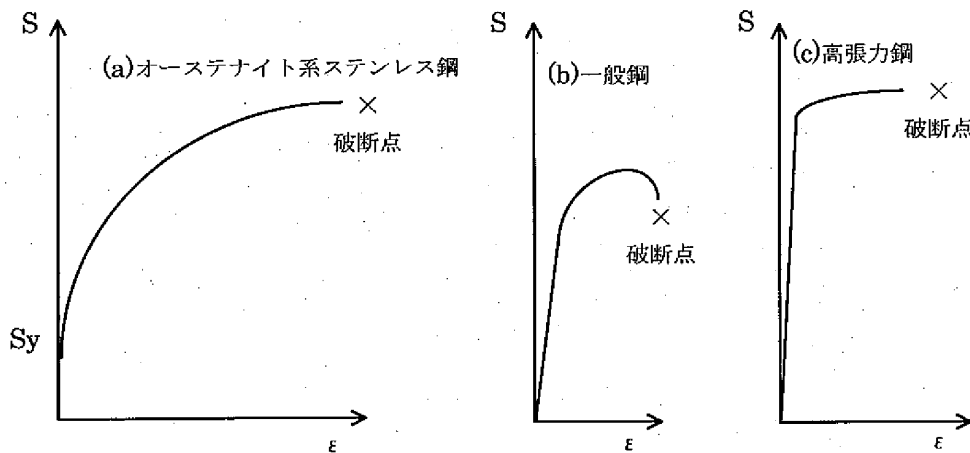
(解説 PVB-3110) ボルト以外の応力評価

PVB-3110 は、クラス 1 容器の応力強さの限界および許容応力について定めたものである。

(中略)

(2) 応力強さの制限の基本的な考え方は、次のとおりである。

各応力に対して定められる応力強さの限界は、基本的には材料の強度試験に基づいている。解説図 PVB-3110-1 に各種材料の引張試験の結果による応力-ひずみ線図の例を示す。



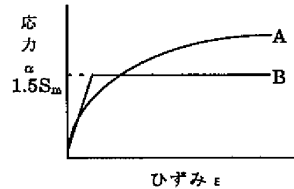
解説図 PVB-3110-1 各種材料における応力とひずみの関係

解説図 PVB-3110-1 は、鋼種による一般的な特性を示したものであるが、一般鋼と比較して、オーステナイト系ステンレス鋼は降伏点に達してもすぐ破断するのではなく、ひずみ硬化によりかなり持ちこたえる。また、それとは反対に高張力鋼は降伏点は高いが、一旦それを超えるとすぐ破断する等の傾向がある。従って、基本となる材料ごとの設計応力強さの S_m 値としては、低合金鋼などの一般鋼材に関しては降伏点の $2/3$ または引張強さの $1/3$ のいずれか小さい方の値にとられているが、オーステナイト系ステンレス鋼では引張強さの $1/3$ またはひずみ硬化を考慮して耐力の 0.9 倍のいずれか小さい方の値がとられている。(解説 GNR-2200 参照)

図 2 設計・建設規格の抜粋 (応力強さの制限の基本的な考え方に関する記載)

PVB-3160 の極限解析において $1.5S_m$ を降伏点とした弾完全塑性体を用いることとしたのは、次のとおりである。

たとえば、ステンレス鋼の応力-ひずみ線図は解説図 PVB-3160-1 の A のようになり、明確な降伏点はなく、このままでは崩壊荷重の解析が複雑になる。そこで、応力-ひずみ線図をより単純にした解説図 PVB-3160-1 の B のようなものを想定して、対象物の荷重-変位曲線を求めようとするものである。



解説図 PVB-3160-1 応力-ひずみ線図の例

ここでは、設計条件および供用状態 C については、材料の降伏点を設計応力強さの 1.5 倍 ($1.5 S_m$) とする弾完全塑性体と考える。 S_m は、 $2/3 S_y$ 以下にとっている場合は、 $1.5 S_m$ は、ほぼ S_y に等しくなる。

高温におけるオーステナイト系ステンレス鋼等の場合のように、 S_m が $0.9S_y$ の場合は、ほぼ $1.35S_y$ になるので、一見不安全側になるようにとらえられやすいが、オーステナイト系ステンレス鋼等の場合は、明確な降伏点がなく、0.2% 耐力を S_y と考えると降伏点は低くなり、また高いひずみ硬化性があり、構造設計の安全性という観点からみれば、 $1.5 S_m$ を降伏点にとっても、フェライト系材料とほぼ同じ効果があると判断できる。

(中略)

供用状態 D については、材料の降伏点を設計応力強さの 2.3 倍 ($2.3 S_m$) と設計応力強さの 0.7 倍 ($0.7S_u$) の小さい方とする弾完全塑性体と考えて、前述と同様にして崩壊荷重の下限を求め、これを P_{cr} とする。この時の許容限界は、次のように表わすことができる。

$$\text{供用状態 D} \quad P_c \leq 0.9 P_{cr}$$

供用状態 D における安全率のとり方は、ASME B&PV Code Section III に従っている。

図 3 設計・建設規格の抜粋 (極限解析での応力-ひずみ線図の設定に関するもの)

5. 1本あたりの地震荷重の算出について

5.1 詳細モデルによる影響評価

今回工認におけるスタンドパイプの耐震評価は、極限解析にて得られた許容荷重が建屋機器連成モデルでの地震応答解析にて得られた225本を1質点として得られた地震荷重をスタンドパイプ総本数(225本)にて除した1本当たりの平均地震荷重を上回ることによって健全性を確認している。

ここで、実際の気水分離器及びスタンドパイプはシュラウドヘッドの鏡板に対して取付くことによりスタンドパイプ長さがそれぞれ異なること、また大小の補強板に結合されており、それぞれのスタンドパイプ付根部に掛かる荷重は異なり、平均地震荷重を上回る可能性がある。このため、地震応答解析にて得られた地震荷重をスタンドパイプ総本数にて除する手法(以下、「平均化」という。)の妥当性を検討した。

検討方法については、図5-1に示す気水分離器、大小の補強板を含めたスタンドパイプ225本とシュラウドヘッドをはり要素及びシェル要素でモデル化したもの(以下「詳細モデル」という。)と図5-2に示す建屋機器連成地震応答解析モデルからシュラウドヘッド、気水分離器及びスタンドパイプの部分を取り出したモデル(以下「連成モデル」という。)に対してそれぞれ水平1Gの加速度を付与し、詳細モデルでの1本に掛かる最大モーメントと連成モデルの静解析結果から得られたモーメントを平均化して得られるモーメントを比較することにより、今回工認で用いている建屋機器連成地震応答解析にて得られた地震荷重を平均化した1本当たりの地震荷重の方が詳細解析に荷重を算出するよりも保守性を有することを確認する。

気水分離器、大小の補強板、スタンドパイプは実形状及び実剛性を考慮した梁モデルでモデル化し、シュラウドヘッドはシェル要素でモデル化している。表5-1、図5-3解析諸元及びモデル図を示す。

解析結果を図5-4に示す。図5-4に示すとおり、詳細モデルの最大モーメントの方が連成モデルの平均化モーメントより低くなった。また、詳細モデル及び連成モデルの固有値解析結果を図5-5示す。詳細モデルと連成モデルで固有周期に差異が生じているが、これは、詳細モデルでは各々のパイプが卓越部位となり、連成モデルでは大補強板の剛性を考慮した1本が卓越部位となるため、固有周期は異なる。

また、図5-6に示すように、スタンドパイプ225本を1本と見立てた連成モデルではモーメントとして算出される荷重が、実形状を模擬した詳細モデルでは軸方向荷重と距離によりモーメントに変換され、モーメントが下がったものと考えられる。

以上より、今回工認で建屋機器連成地震応答解析にて得られた225本の荷重を平均化した地震荷重の方が保守性を有していることから、平均化手法を採用している。

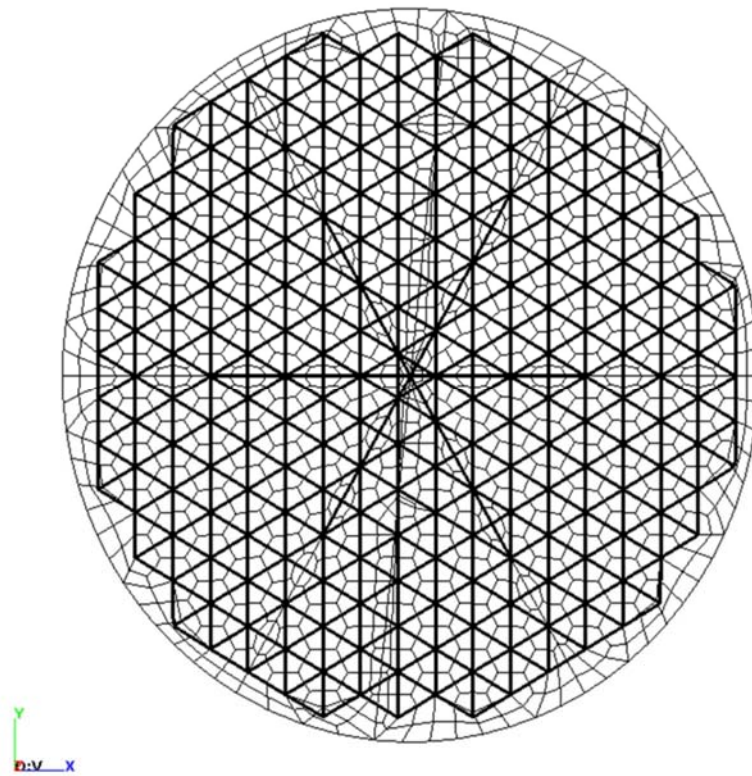
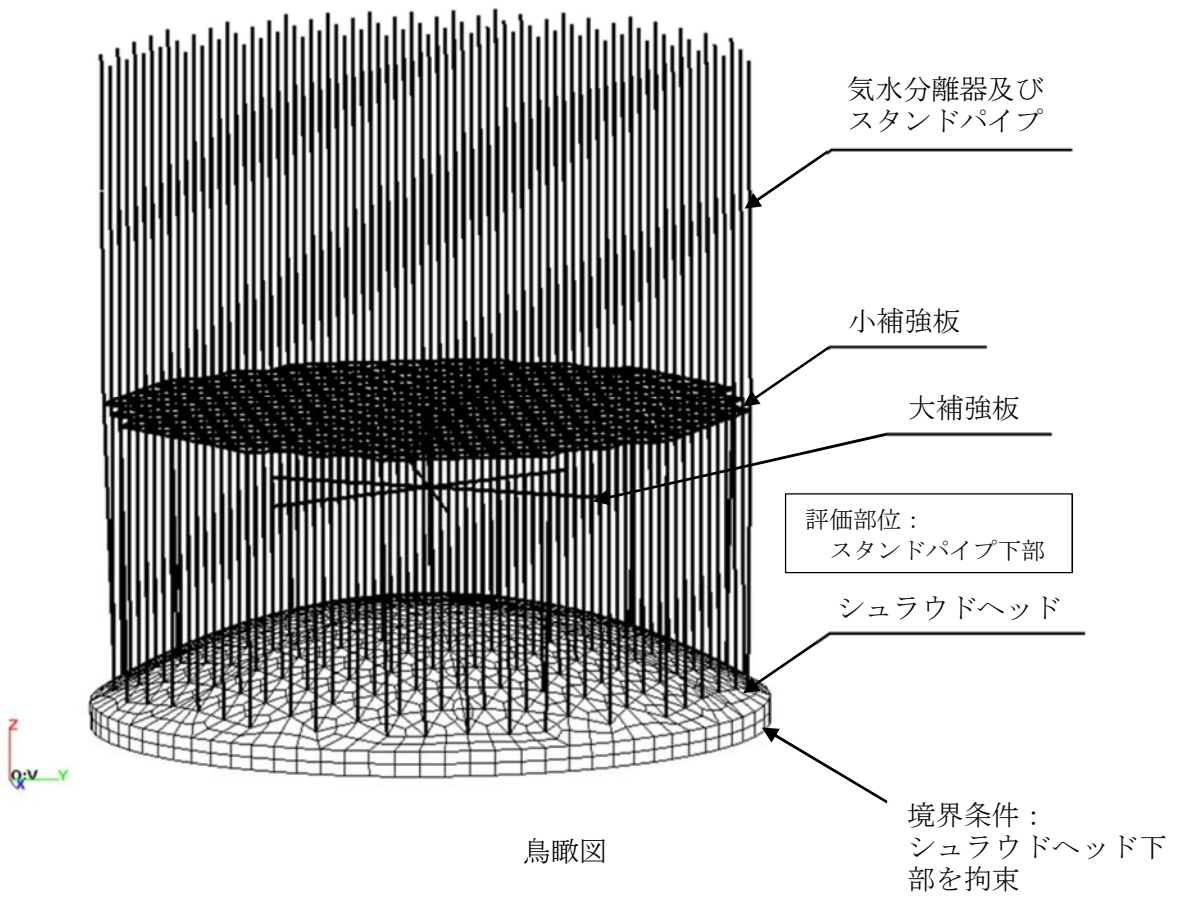
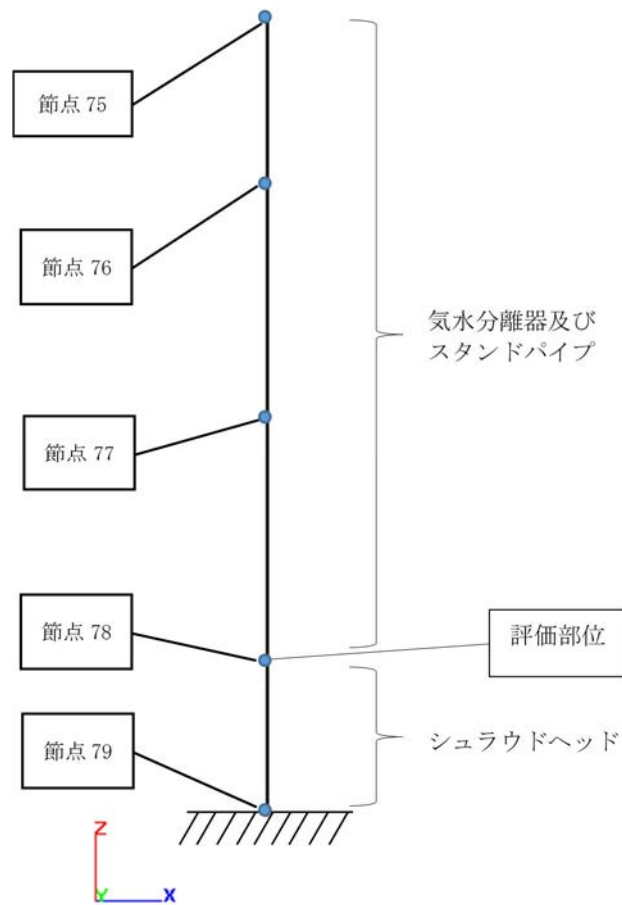


図5-1 シュラウドヘッド，気水分離器及びスタンドパイプ詳細モデル



解析モデル図

連成解析モデルのうち、気水分離器、スタンドパイプ及びシュラウドヘッド部分をモデル化

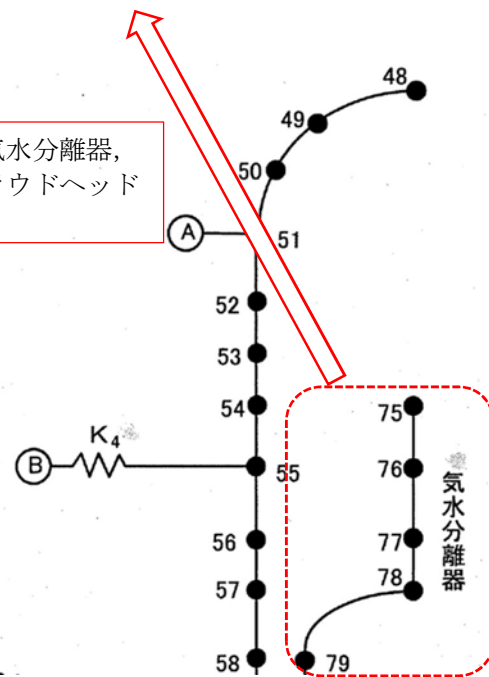


図5-2 シュラウドヘッド、気水分離器及びスタンドパイプ連成モデル

表 5-1 詳細モデルの諸元

各部名称	断面積 [mm ²]	有効せん断 断面積 [mm ²]	断面二次モーメント [mm ⁴]	ねじりモーメント [mm ⁴]	要素タイプ	
スタンドパイプ	3.600E+03	1.800E+03	1.1720E+07	2.344E+07	ビーム要素	
気水分離器	a	1.818E+03	9.088E+02	7.429E+06		1.486E+07
	b	2.194E+03	1.097E+03	8.888E+06		1.065E+07
	c	6.352E+03	3.176E+03	7.348E+07		1.398E+08
	d	1.112E+04	5.562E+03	1.035E+08		1.950E+08
	d'	1.112E+04	5.562E+03	1.035E+08		1.950E+08
	e	7.768E+03	3.884E+03	2.445E+07		4.890E+07
	f	3.600E+03	1.800E+03	1.1720E+07		2.344E+07
小補強板	7.315E+02	6.096E+02	3.540E+05	2.069E+04		
			5.618E+03			
大補強板	7.803E+03	6.502E+03	9.6650E+08	1.065E+05		
			2.6630E+04			
鏡板(球面部)	板厚 50.8[mm]				シェル要素	
鏡板(外周部)	板厚 76.2[mm]					

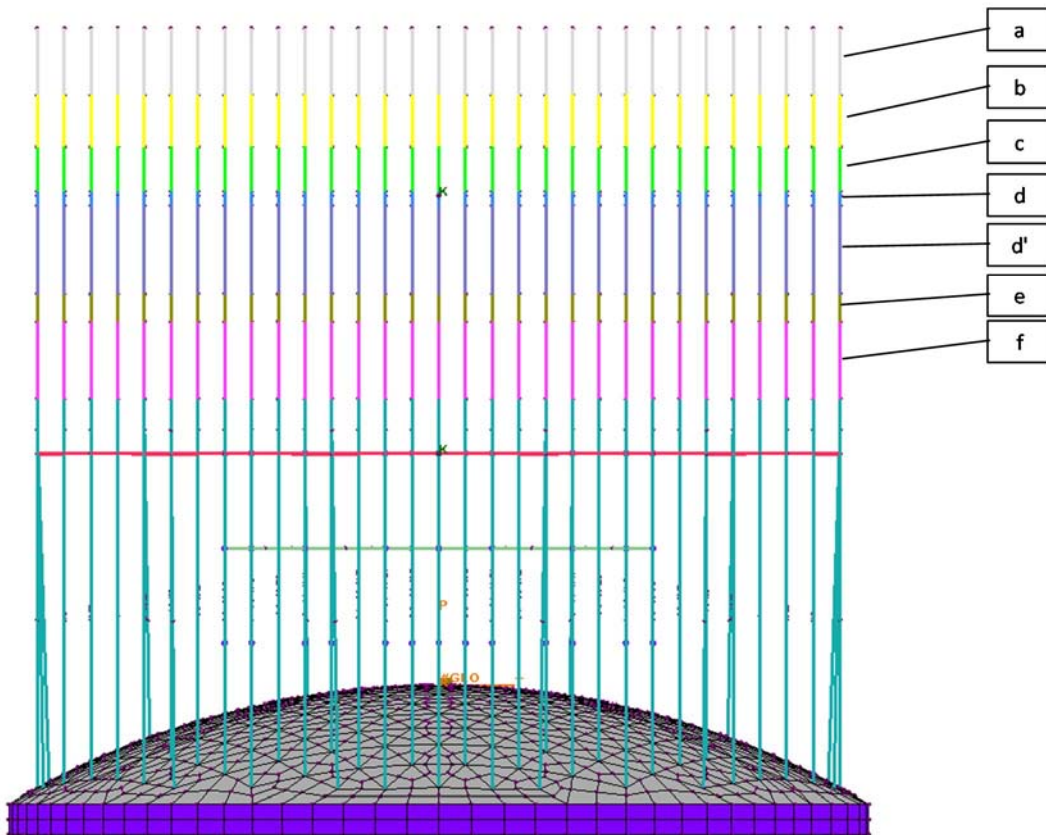


図 5-3 詳細モデルの解析モデル図

(単位：kN・m)

解析モデル 荷重条件	連成モデル モーメント	詳細モデル	
		荷重方向	モーメント
水平 1.0G	10.6 ^{注1}	X方向	8.5 ^{注2}
		Y方向	7.6 ^{注2}

注1：225本で除した値

注2：225本のうち最大値（位置は下図参照）を記載

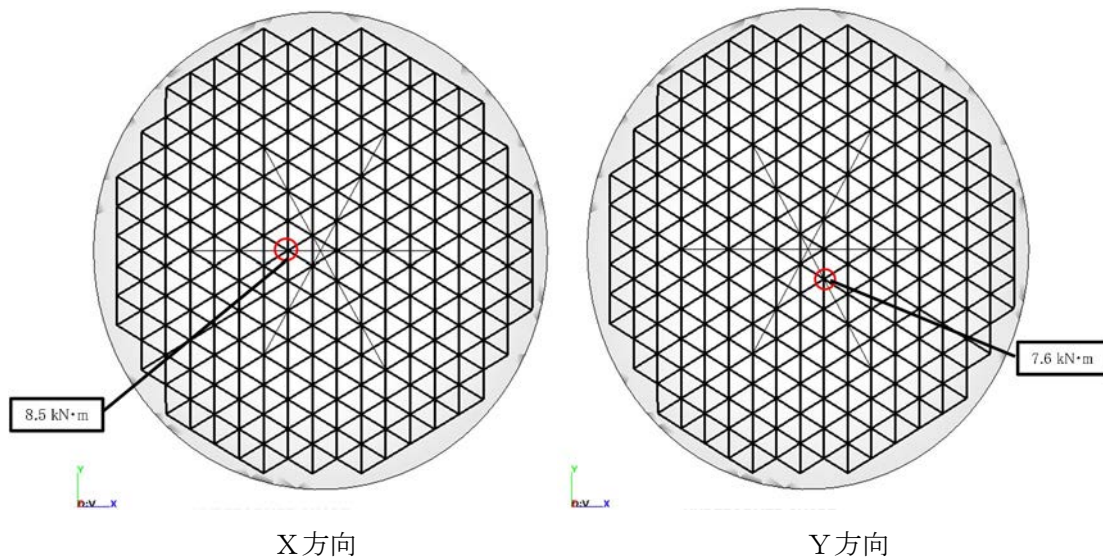
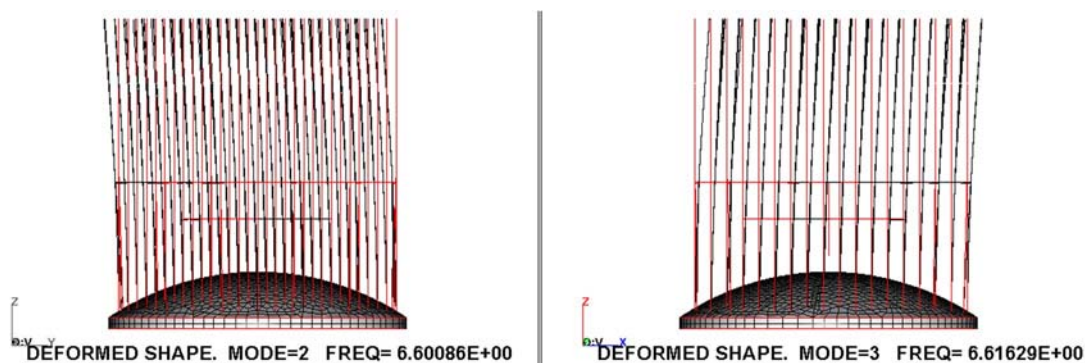


図5-4 連成モデルと詳細モデルの荷重比較

詳細モデルの固有周期及び刺激係数

モード	固有周期 (Hz)	刺激係数		
		x	y	z
1	5.4	0.01	0.03	0.00
2	6.6	-0.65	-7.67	0.00
3	6.6	7.67	-0.65	0.00
4	10.8	0.00	0.01	0.00
5	10.8	0.02	0.00	0.00



連成モデルの固有周期及び刺激係数

モード	固有周期 (Hz)	刺激係数		
		x	y	z
1	14.3	8.31	0.00	0.00
2	41.9	3.86	0.00	0.00
3	89.8	4.24	0.00	0.00
4	115.6	0.00	0.00	10.25
5	203.6	3.24	0.00	0.00

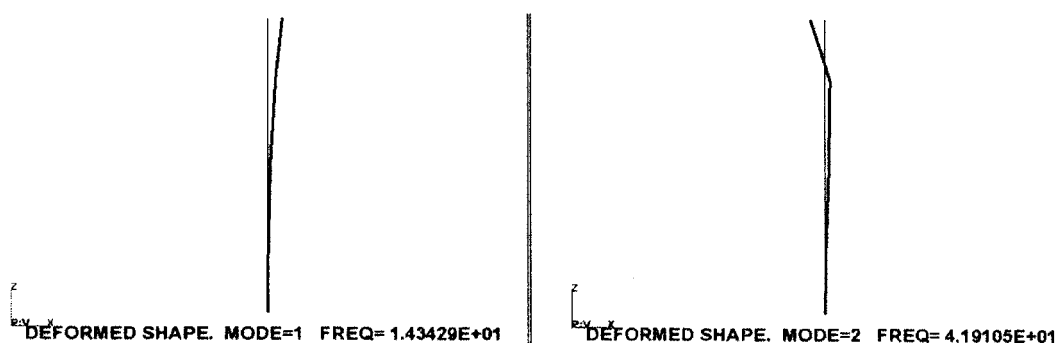


図 5 - 5 詳細モデル及び連成モデルの振動モード図

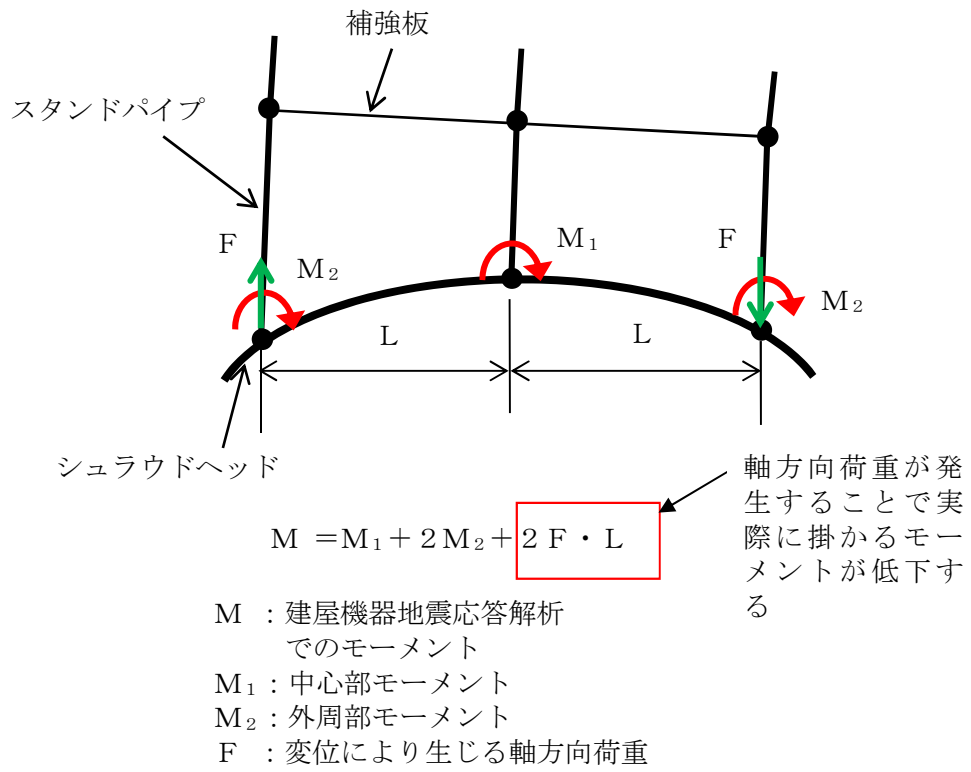


図 5-6 変位に伴い発生する荷重挙動の概略図

5.2 最外周部の偏心の扱いについて

最外周部のスタンドパイプのいくつかについては、スタンドパイプが鉛直方向に対して曲がりを有している構造であるため、偏心しているスタンドパイプの扱いについての影響について整理する。

(1) 地震荷重に対する影響

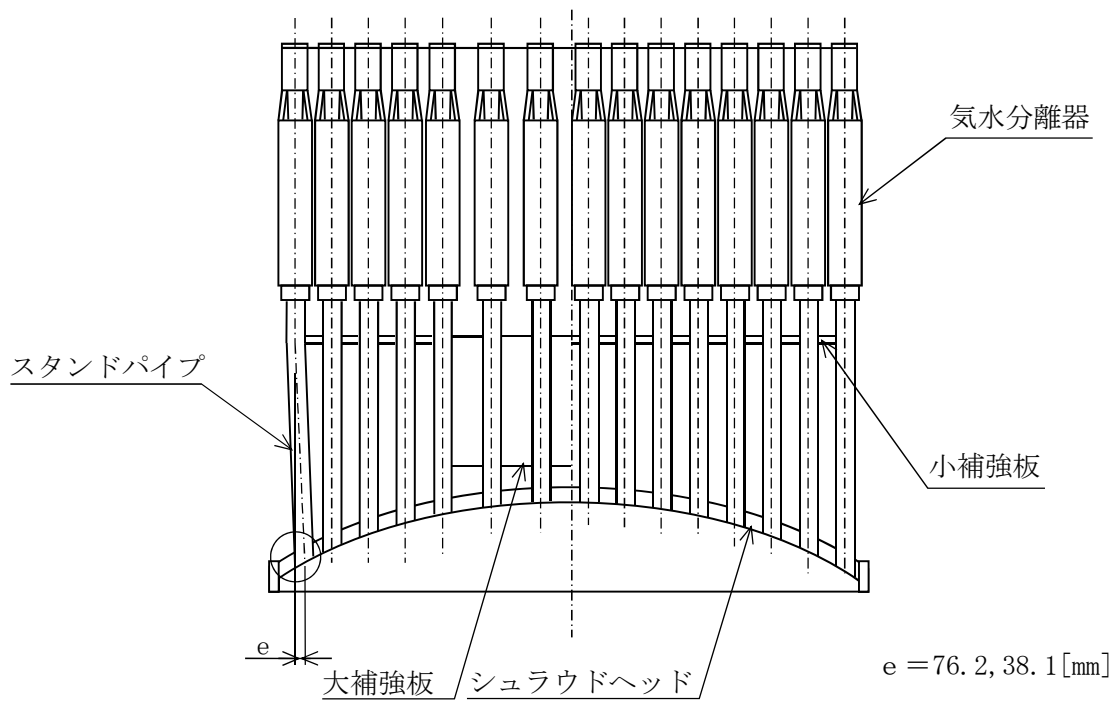
モーメント及び水平方向の地震荷重は偏心することによりスタンドパイプ付根部に対して新たに生じる荷重はない。

鉛直地震荷重は鉛直地震荷重と偏心量によるモーメントが発生するため、偏心により発生するモーメントを地震荷重として考慮する。同様に自重によってもモーメントが発生するため、これを考慮する。(図5-6参照)

なお、偏心により発生するモーメントは、最外周部の偏心を有しているスタンドパイプだけであるが、評価に用いる地震荷重については一律偏心により発生するモーメントを考慮する。

(2) 極限解析に対する影響

極限解析は中心位置と斜め取付く最外周位置の2ケース実施しているが、最外周の偏心を有するスタンドパイプに対してではなく、偏心を有しない最外周のスタンドパイプにて極限解析を実施している。これは、偏心を有するスタンドパイプの方が偏心を有しないスタンドパイプと比べ斜めに取付く影響が軽減されるためである。また、今回の極限解析結果から、中心位置の方が裕度が低い結果であり、斜めに取付く影響は軽微であると考えられることから、極限解析に対する影響はないと考える。



偏心量が 38.1mm と 76.2mm の 2 種類のスタンドパイプがあるが、偏心量が大きい方が鉛直力と偏心により発生するモーメントが大きくなることから、76.2mm の場合の荷重を一律考慮する。

死荷重によるモーメント： $V_{\text{自重}}/225 \times e = 1.91347 \times 10^5 \text{ [N}\cdot\text{mm]}$

$V_{\text{自重}}$ ：全スタンドパイプ死荷重 (= 565000 [N])

地震荷重によるモーメント： $V_{\text{地震}}/225 \times e = 1.38628 \times 10^5 \text{ [N}\cdot\text{mm]}$

$V_{\text{地震}}$ ：全スタンドパイプの鉛直地震荷重 (= 409334 [N])

図 5 - 6 偏心に対する考慮

試験体に対する極限解析について

1. はじめに

実機スタンドパイプ及びシュラウドヘッドの一部を縮尺試験体として試験を実施し、試験にて得られた限界荷重が極限解析にて得られた許容荷重よりも大きいことを確認している。試験体に対しても同様に極限解析を実施し、試験にて得られた限界荷重が極限解析にて得られた許容荷重よりも大きいことを確認する。

2. 解析方法

極限解析手法については、実機のスタンドパイプと同様に実施する。

①解析モデルの作成

解析モデルは2本の試験体の対称性を考慮して1本の試験体とする。解析モデルを図2-1に示す。縮尺試験体は対称形であることから、解析モデルは全体の1/2とし、パイプは鋼板との溶接部から148mm（荷重負荷位置）までの範囲をモデル化している。また、パイプの板厚は、引張試験治具による局所的な影響を考慮する観点から治具取付部近傍を肉厚形状にしていたが、解析上においては、考慮せず、一律1/3スケールの板厚としている。

②境界条件の設定及び物性値の入力

境界条件は荷重負荷方向と反対側側面を拘束する。また、物性値は試験体及び実機の解析条件と同じとする。

③荷重の負荷

荷重の負荷は、試験の荷重の負荷と同様に試験体上面に引張力（水平荷重）を負荷する。

④荷重変位曲線の作成

③の荷重を増加させて荷重－変位曲線を作成する。

⑤崩壊荷重の下限（ P_{cr} ）の算定

④にて作成した荷重変位曲線をもとに崩壊荷重の下限（ P_{cr} ）を算定する。算定結果を図2-2に示す。算出結果から得られえた P_{cr} は13.7 kNであった。

3. 試験結果との比較

試験体に対する極限解析にて得られた荷重－変位曲線と試験にて得られた荷重変位曲線を重ね合わせたものを図3－1に示す。試験にて得られた限界荷重は17.5 kNであり、極限解析にて得られた P_{cr} (=13.7 kN) よりも、保守的であることがわかった。なお、図3－1は引張試験装置での荷重変位曲線であることから、ひずみゲージでの荷重変位曲線と重ね合わせたものを図3－2に示す。解析上はピンのたわみや形状変化部を考慮していないが、これらの変位に対する影響は小さいため、弾性勾配においても概ね一致していることが確認できる。

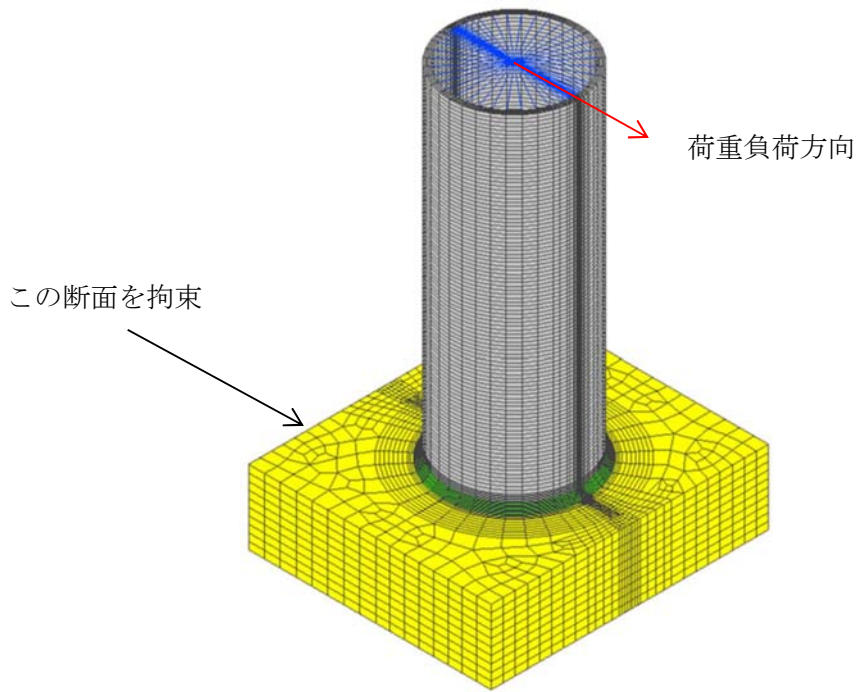


図 2 - 1 縮尺試験体の解析モデル図

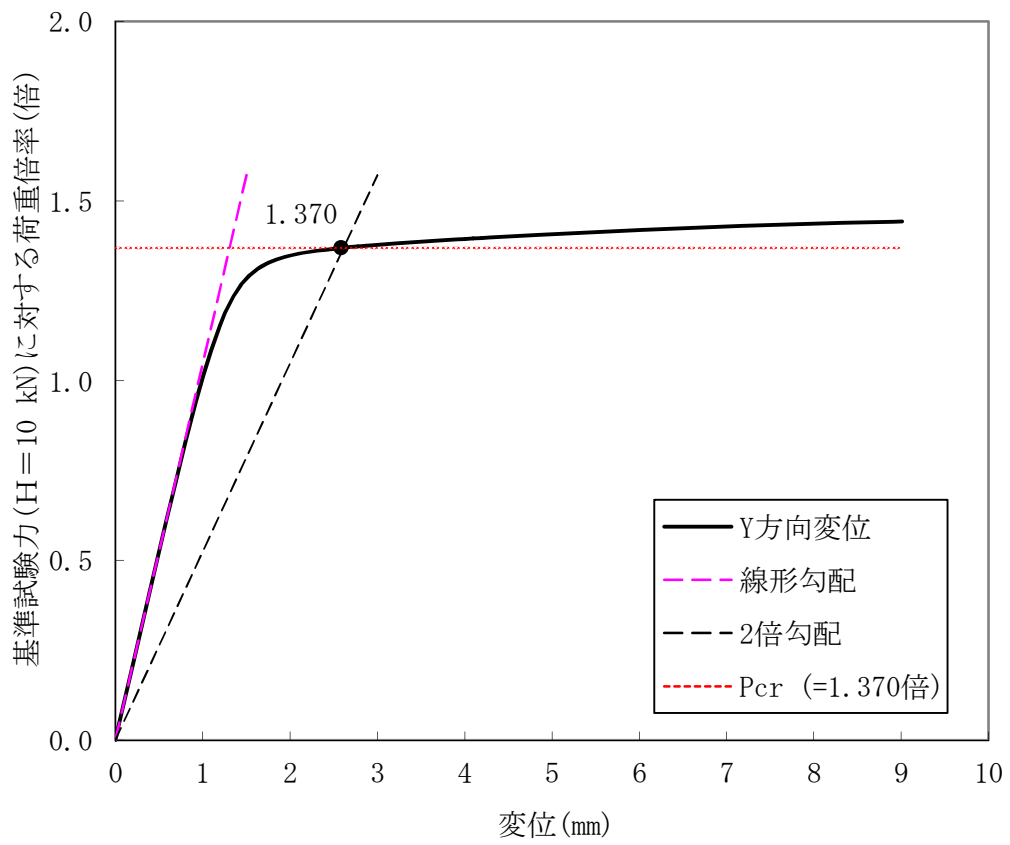


図 2 - 2 縮尺試験体の荷重-変位曲線

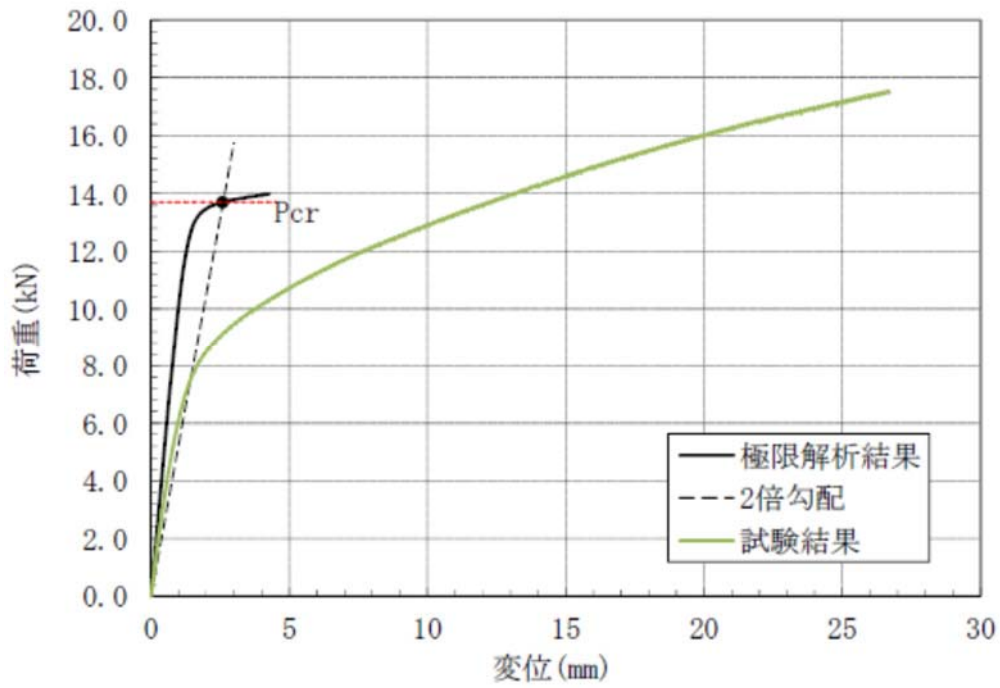


図 3-1 試験結果と試験体に対する極限解析結果との比較（引張試験装置の変位）

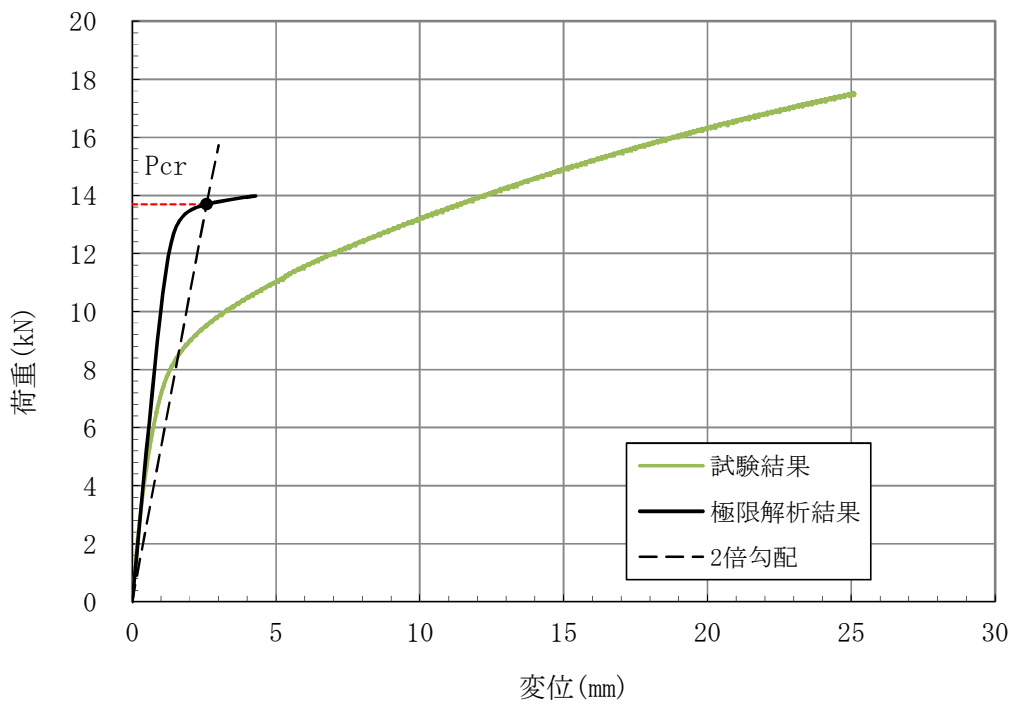


図 3-2 試験結果と試験体に対する極限解析結果との比較（ひずみゲージの変位）

補強板の健全性について

1. 概要

スタンドパイプの地震時の評価は、建屋機器連成解析にて得られた地震荷重が極限解析で得られた許容荷重下回ることで耐震健全性を確認している。極限解析にて得られた許容荷重及び通常の応力評価では大・小補強板の剛性を考慮していないが、地震応答解析に用いた建屋機器連成解析モデルでは大補強板の剛性を考慮しているため、大補強板の耐震健全性について示す。

また、本文 5. 項に記載している詳細モデルと連成モデルの荷重比較では、詳細モデルに大・小補強板の剛性を考慮していることから、併せて小補強板の健全性についても示す。上記をまとめたものを表 1 に示す。

表 1 補強板剛性の考慮の有無

モデル名称※	大補強板	小補強板
建屋機器連成解析モデル (地震荷重の算出)	○	×
極限解析モデル (許容荷重の算出)	×	×
詳細モデル (荷重分配の影響検討)	○	○

○：剛性を考慮する， ×：剛性を考慮しない

※：() 内はモデルの用途を示す

2. 評価方法

補強板 1 体当たりの死荷重に崩壊荷重発生時の震度を乗じて地震荷重を算出する（表 2 参照）。水平震度及び鉛直震度は建屋機器連成解析から得られた当該部位の震度を用いる。得られた荷重から一次応力を求め、応力強さが許容値を満足することを確認する。

表2 評価用震度

許容応力状態	EL. [m]	水平震度*	鉛直震度*	荷重倍率 (Pcr/地震荷重)
Ⅲ _A S	33.132	2.79(2.51)	0.92(0.83)	1.108
Ⅳ _A S	33.132	4.28(3.77)	1.74(1.53)	1.134

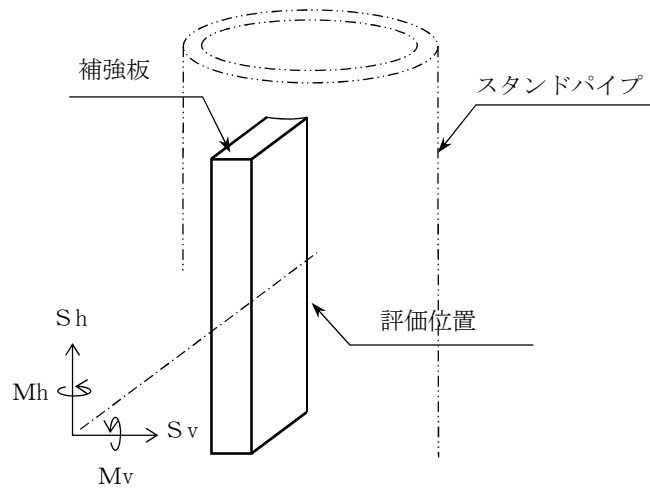
※：() 内に示す震度に荷重倍率を乗じた値

表2 大補強板に生じる地震荷重

許容応力状態	せん断力 S [N]		曲げモーメント M [N・mm]	
	Sh	Sv	Mh	Mv
Ⅲ _A S	397	131	28100	9270
Ⅳ _A S	608	247	43200	17600

表2 小補強板に生じる地震荷重

許容応力状態	せん断力 S [N]		曲げモーメント M [N・mm]	
	Sh	Sv	Mh	Mv
Ⅲ _A S	15.4	5.06	447	148
Ⅳ _A S	23.6	9.57	685	279



評価部位

3. 許容応力

補強板は原子炉圧力容器の内部にあることから JEAG4601-1984 の炉内構造物の許容限界を適用する。また、301℃（運転状態Ⅰ及びⅡの最高使用温度）における許容応力状態Ⅲ_AS及びⅣ_ASの許容応力に、JSME CSS-3150に準拠し、溶接継手効率として大補強板^{※1}は0.35、小補強板^{※2}は0.60を考慮する。表3に補強板の許容応力を示す。

※1 不連続すみ肉溶接，表面浸透探傷試験（検査の種類E）

※2 両側すみ肉溶接，表面浸透探傷試験（検査の種類E）

表3 補強板の許容応力（炉内構造物）

評価部位	応力分類	許容応力状態 [※]	
		Ⅲ _A S	Ⅳ _A S
小補強板 (オーステナイトステンレス鋼 (SUS304))	一次一般膜応力	103 (1.5Sm×0.60)	156 (Min (2.4Sm, 2/3Su) ×0.60)
	一次一般膜+ 一次曲げ応力	154 (2.25Sm×0.60)	234 (Min (3.6Sm, Su) ×0.60)
大補強板 (オーステナイトステンレス鋼 (SUS304))	一次一般膜応力	60 (1.5Sm×0.35)	91 (Min (2.4Sm, 2/3Su) ×0.35)
	一次一般膜+ 一次曲げ応力	90 (2.25Sm×0.35)	136 (Min (3.6Sm, Su) ×0.35)

※：301℃における値

4. 評価結果

補強板の応力評価結果を表4に示す。表4により各許容応力状態において、発生応力は許容応力を下回っており、補強板の健全性が確保できている。

表 4 補強板の応力評価結果

許容応力 状態	評価部位	評価応力	応力強さ [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度
Ⅲ _A S	大補強板	一次一般膜応力	1	60	60.0
		一次一般膜応力 +一次曲げ応力	4	90	22.5
	小補強板	一次一般膜応力	1	103	103.0
		一次一般膜応力 +一次曲げ応力	1	154	154.0
Ⅳ _A S	大補強板	一次一般膜応力	1	91	91.0
		一次一般膜応力 +一次曲げ応力	6	136	22.6
	小補強板	一次一般膜応力	1	156	156.0
		一次一般膜応力 +一次曲げ応力	1	234	234.0

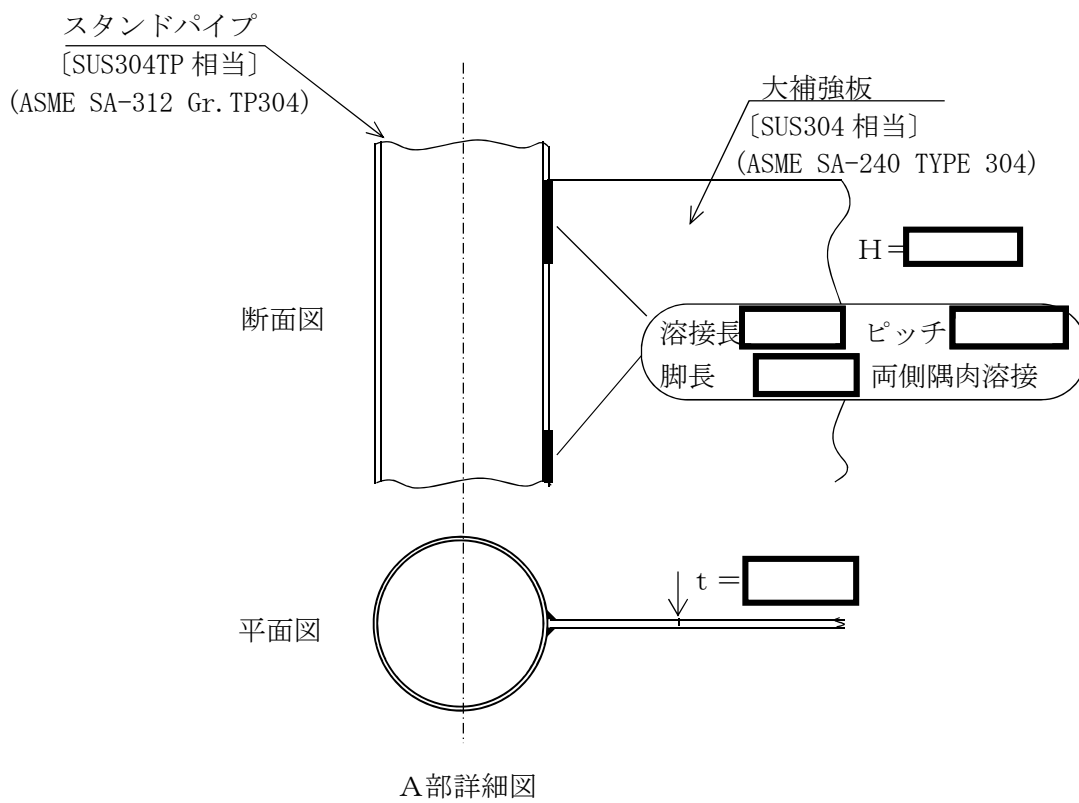
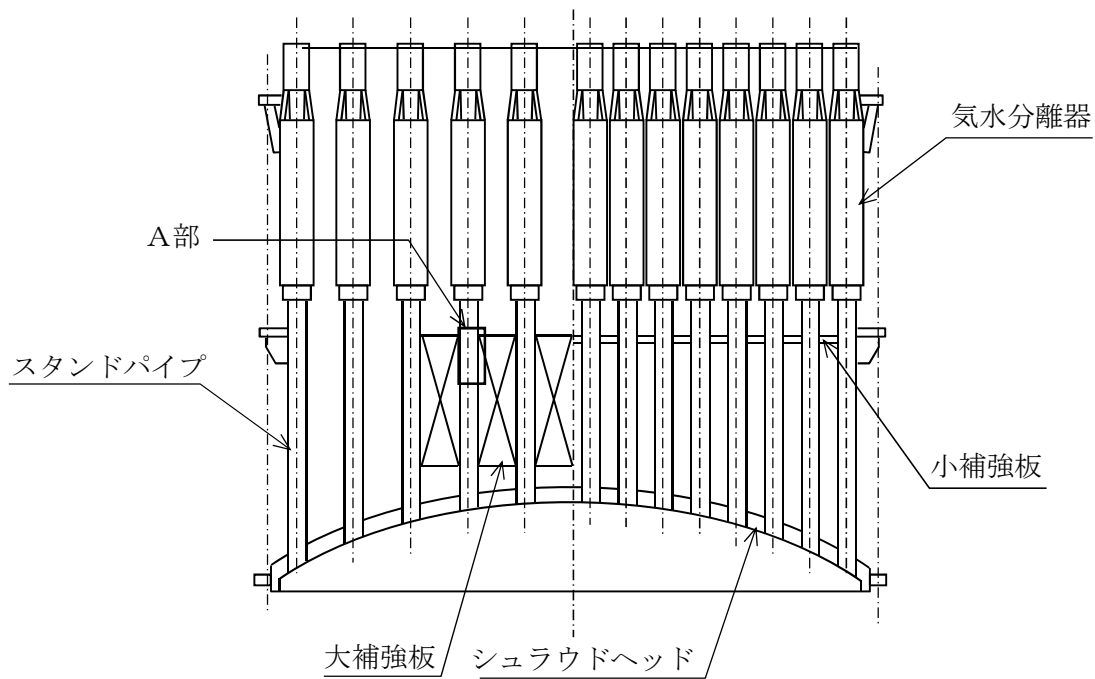


図1 補強板の外形図

気水分離器と蒸気乾燥器の相対変位について

1. 概要

蒸気乾燥器は原子炉圧力容器上部のブラケットにて支持され、気水分離器は炉心シュラウド上部のシュラウドヘッドに設置されている。気水分離器と蒸気乾燥器は水平方向に対してそれぞれを支持しておらず（図1参照）、地震時には水平方向の変位により蒸気乾燥器と気水分離器が接触、衝突が発生する可能性がある。また、今回のスタンドパイプに用いた極限解析は弾塑性状態まで考慮した許容荷重であり、かつ許容荷重とS_s地震荷重は近いことから、線形解析である建屋機器連成解析で得られる変位と比べ弾塑性状態での変位を含めると変位が増加する。このため、スタンドパイプ付根部の弾塑性状態による変位増加を含めた蒸気乾燥器と気水分離器の地震時の相対変位を評価することにより、衝突等の考慮の有無を確認する。

2. 気水分離器と蒸気乾燥器間の相対変位の算出

気水分離器と蒸気乾燥器間の相対変位の算出は、図2に示す建屋機器連成解析モデルを使用し、線形解析による時刻歴応答解析により蒸気乾燥器と気水分離器との相対変位を時々刻々に確認し、最大となる相対変位を算出する。線形解析により得られた最大相対変位にスタンドパイプ付根部の弾塑性状態による変位増加分を加えることにより、弾塑性状態を考慮した相対変位を算出する。

2.1 線形解析による相対変位の算出

建屋機器連成解析モデルを用いた時刻歴応答解析による気水分離器上部と同じ高さに位置する原子炉圧力容器間の相対変位の最大値を表1に示す。表1に示すとおり、相対変位の最大値は1方向で5.62mm、水平2方向で7.84mmである。

表1 建屋機器連成解析による相対変位の最大値（線形解析）（単位:mm）

評価位置	①相対変位		1方向 最大変位	水平2方向
	NS	EW	①の最大値	①のSRSS
気水分離器上部と原子炉圧力容器（同じ高さ位置） （質点番号54と75間）	5.62	5.46	5.62	7.84

2.2 弾塑性状態に対する変位増加の算出

2.2.1 変位増加の算出概要

スタンドパイプ付根部の弾塑性状態による変位の増加の影響を受けるのはシュラウドヘッド上部に設置される気水分離器及びスタンドパイプであるため、気水分離器及びスタンドパイプの変位増加量を算出する。

気水分離器及びスタンドパイプ自体の最大応答変位は建屋機器連成解析結果から、気水分離器上部（質点番号 75）で 38.0mm、シュラウドヘッド上部（質点番号 78）で 32.5mm であるため、気水分離器及びスタンドパイプ自体の最大応答変位は 5.5mm となる。これに極限解析にて得られた荷重変位曲線から S_s 地震時の弾性状態と仮定した変位と弾塑性状態での変位の比から弾塑性状態での変位の増加量を加える（図 3 参照）。増加量の算出は 2.2.2 に示す。

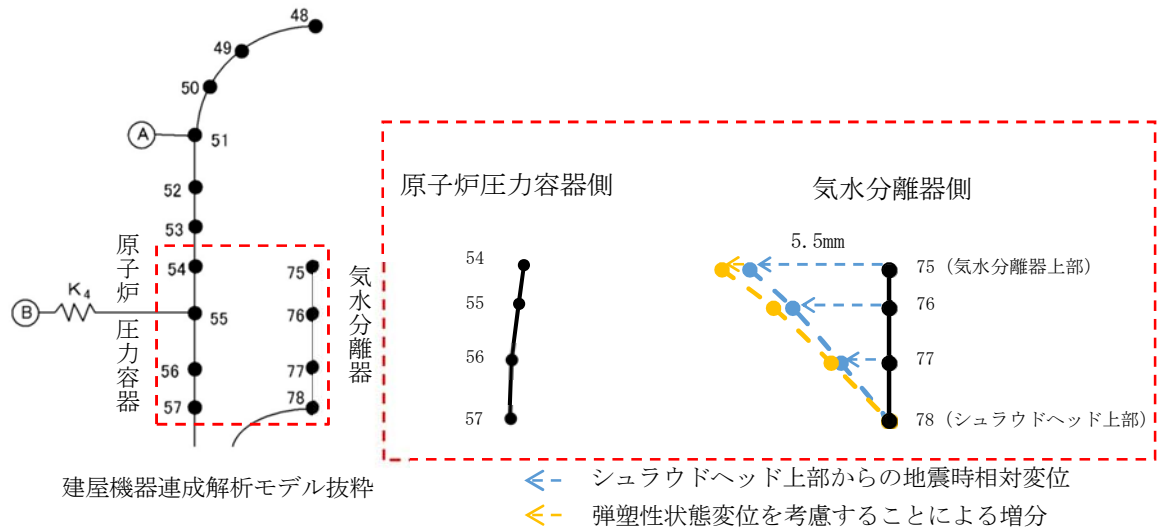


図 3 弾塑性状態の変位に対する考慮の概要図

2.2.2 弾塑性状態に対する変位増加の算出

図4に示す極限解析にて得られた荷重変位曲線からS_s地震時における変位は弾性状態と比較して約1.2倍変位が増加する。このため、弾塑性状態の変位に対する考慮として、スタンドパイプから気水分離器までの最大応答変位5.5mmに弾塑性状態による増加分である0.2分の変位1.1mmを上乗せする。弾塑性状態による変位増加を加えた結果を表2に示す。表2に示すとおり、相対変位の最大値は1方向で6.72mm、水平2方向で9.40mmである。

表2 弾性解析結果に弾塑性による変位増加を考慮した相対変位 (単位:mm)

評価位置	①相対変位 (線形解析)		1方向 最大変位	水平2方向
	NS	EW	①の最大値 +5.5×0.2	(①+5.5×0.2) のSRSS
気水分離器上部と原子炉圧力 容器 (同じ高さ位置) (質点番号54と75間)	5.62	5.46	6.72	9.40

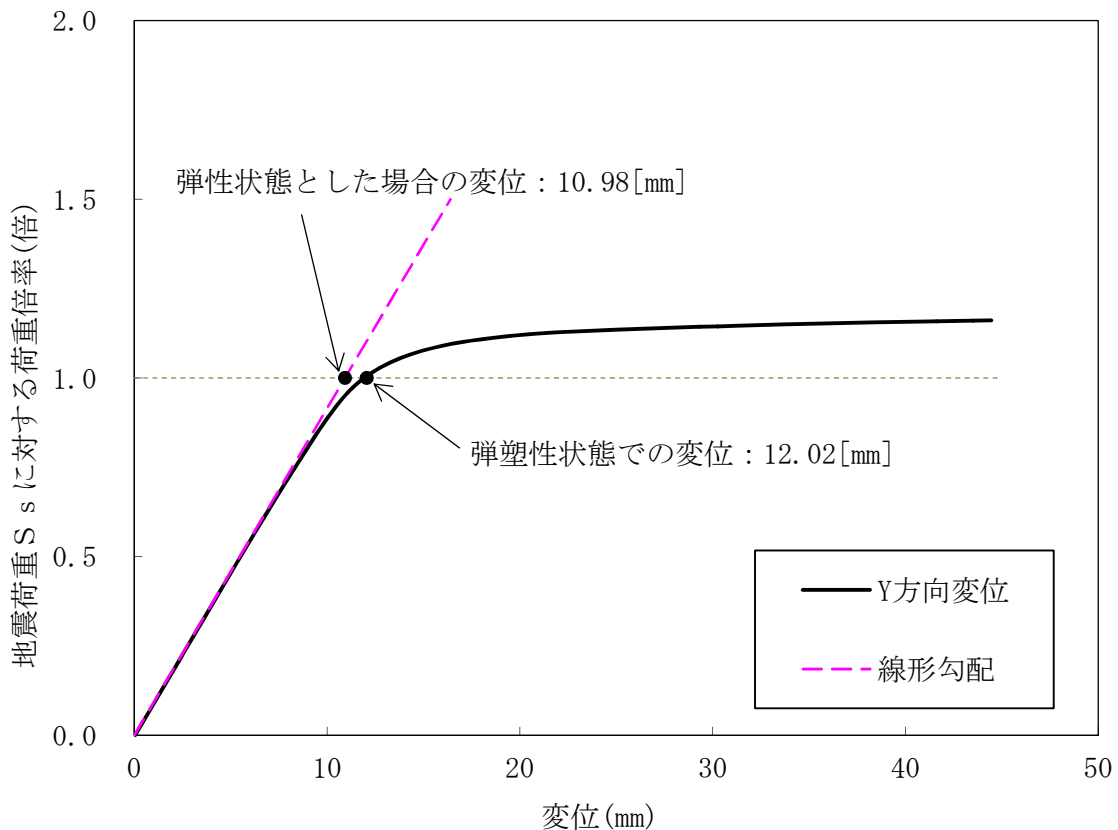


図4 極限解析での荷重変位曲線 (1000mm)

3. 気水分離器と蒸気乾燥器間の距離

気水分離器と蒸気乾燥器間の最短距離は図 1 に示すとおり，上リングと蒸気乾燥器スカート間の mm である。

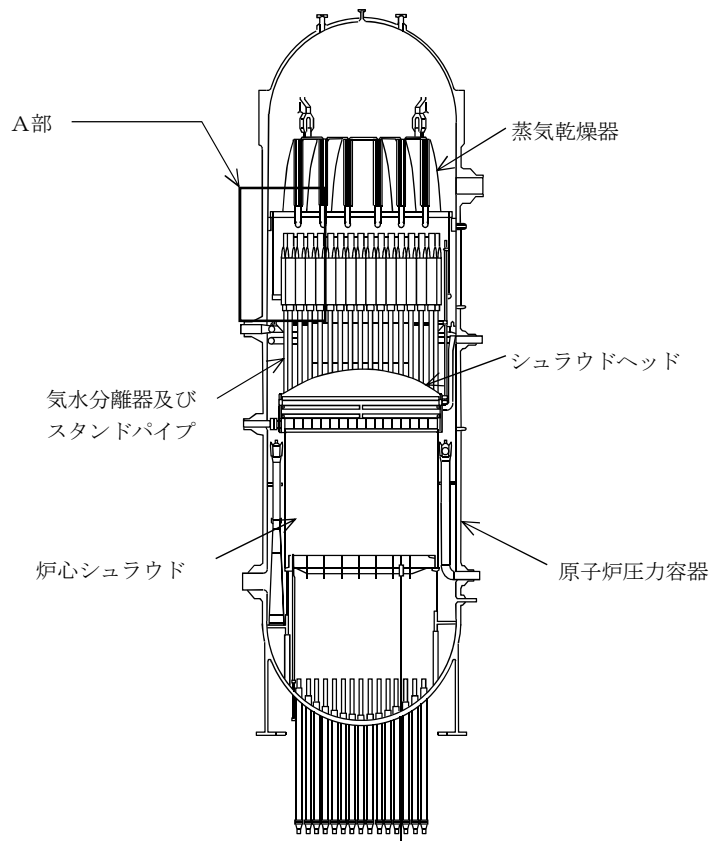
4. 評価結果

評価結果を表 3 に示す。表 3 に示すとおり，スタンドパイプ付根部の弾塑性状態による変位増加を考慮しても相対変位は基準値である mm 以内であることから，衝突等は生じない。

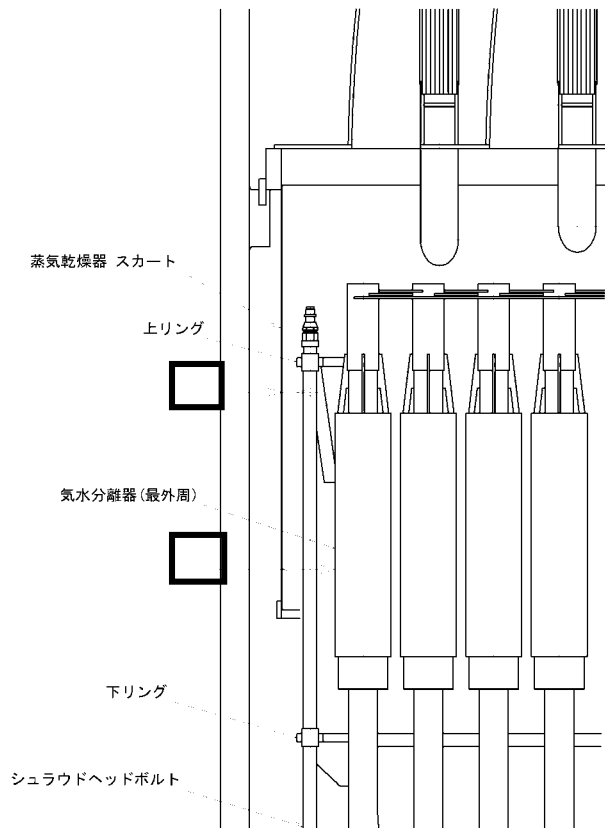
また，鉛直方向に対しては，気水分離器はシュラウドに，蒸気乾燥器はブラケットに支持されていることから鉛直方向に対して衝突は発生しない。

表 3 弾塑性状態の変位増加を考慮した相対変位評価結果 (単位:mm)

評価位置	1 方向 最大変位	水平 2 方向	基準値 (最小ギャップ)
気水分離器上部と原子炉圧力容器 (同じ高さ位置) (質点番号 5 4 と 7 5 間)	6.72	9.40	<input type="text"/>



原子炉压力容器内部構造物概要図



A部詳細図

図1 蒸気乾燥器，気水分離器及びスタンドパイプ概要図

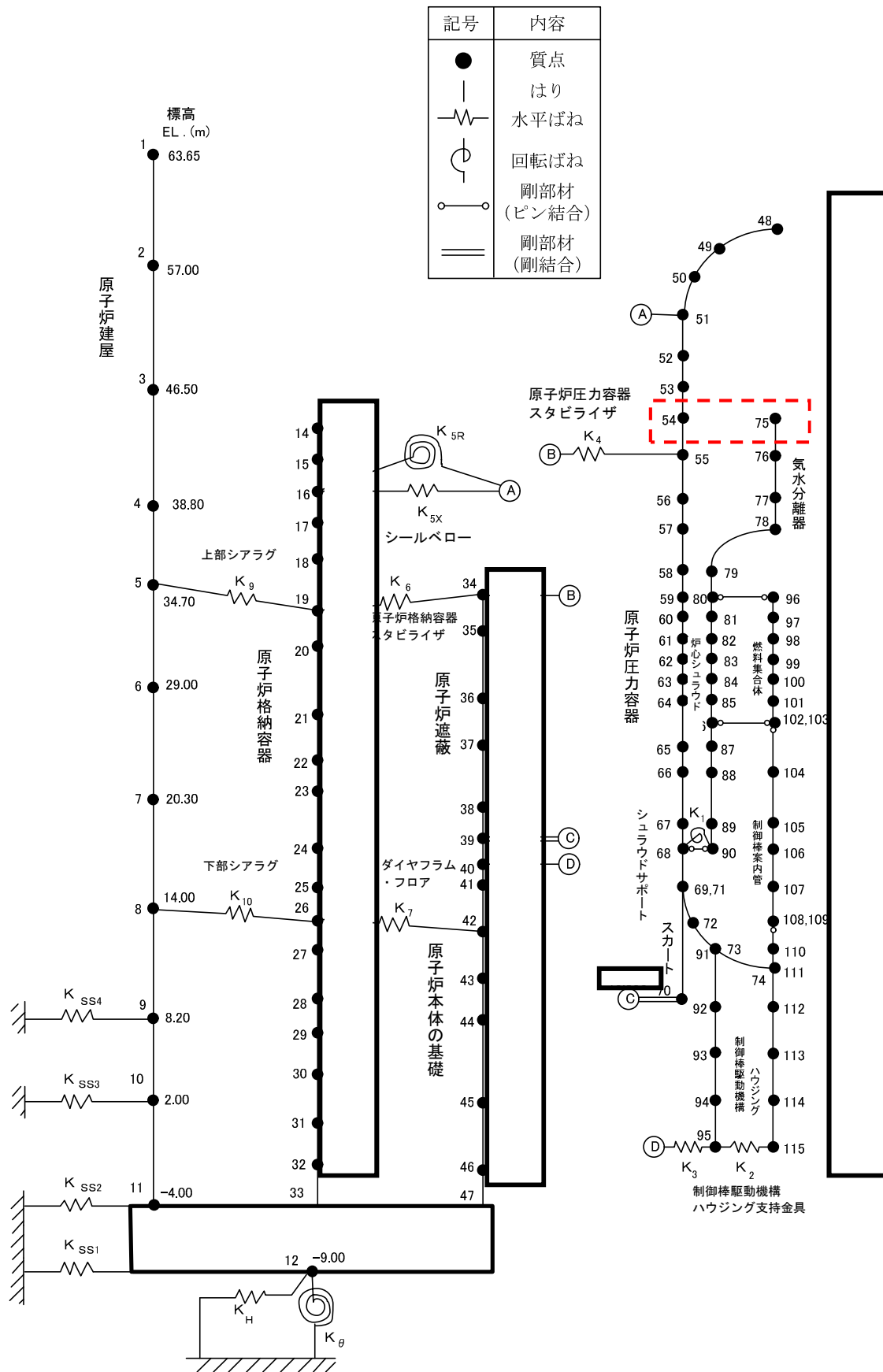


図2 建屋機器連成解析モデル (水平)

6. 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)

1. はじめに

本資料では、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈等における動的機能保持に関する評価に係る一部改正（以下「技術基準規則解釈等の改正」という）を踏まえて、動的機能維持が必要な設備の検討方針及び検討結果を示す。

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（抜粋）

第5条（地震による損傷の防止）

3 動的機器に対する「施設の機能を維持していること」とは、基準地震動による応答に対して、当該機器に要求される機能を保持することをいう。具体的には、当該機器の構造、動作原理等を考慮した評価を行うこと、既往研究で機能維持の確認がなされた機能確認済加速度等を超えていないことを確認することをいう。

耐震設計に係る工認審査ガイド（抜粋）

4.6.2 動的機能

【審査における確認事項】

Sクラスの施設を構成する主要設備又は補助設備に属する機器のうち、地震時又は地震後に機能保持が要求される動的機器については、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析結果の応答値が動的機能保持に関する評価基準値を超えていないことを確認する。

【確認内容】

動的機能については以下を確認する。

- (1) 水平方向の動的機能保持に関する評価については、規制基準の要求事項に留意して、機器の地震応答解析結果の応答値が JEAG4601 の規定を参考に設定された機能確認済加速度、構造強度等の評価基準値を超えていないこと。（中略）また、適用条件、適用範囲に留意して、既往の研究等において試験等により妥当性が確認されている設定等を用いること。
- (2) 鉛直方向の動的機能保持に関する評価については、規制基準の要求事項に留意して、機器の地震応答解析結果の応答値が水平方向の動的機能保持に関する評価に係る JEAG4601 の規定を参考に設定された機能確認済加速度、構造強度等の評価基準値を超えていないこと。（中略）また、適用条件、適用範囲に留意して、既往の研究等において試験等により妥当性が確認されている設定等を用いること。

(3) 上記(1)及び(2)の評価に当たっては、当該機器が JEAG4601 に規定されている機種、形式、適用範囲等と大きく異なる場合又は機器の地震応答解析結果の応答値が JEAG4601 の規定を参考にして設定された機能確認済加速度を超える場合（評価方法が JEAG4601 に規定されている場合を除く。）については、既往の研究等を参考に異常要因分析を実施し、当該分析に基づき抽出した評価項目毎に評価を行い、評価基準値を超えていないこと。また、当該分析結果に基づき抽出した評価部位について、構造強度評価等の解析のみにより行うことが困難な場合には、当該評価部位の地震応答解析結果の応答値が、加振試験（既往の研究等において実施されたものを含む。）により動的機能保持を確認した加速度を超えないこと。

2. 動的機能維持のための新たな検討又は詳細検討が必要な設備の検討方針

動的機器の耐震性評価法は原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4601-1991 追補版（以下 J E A G 4601 という）に従い実施するものとするが、J E A G 4601 で定める機能確認済加速度（J E A G 4601 に定められた既往研究で機能維持の確認がなされた入力又は応答レベル）と評価用加速度との比較による評価法には適用機種の範囲が定められている。本資料では、J E A G 4601 に定められた適用機種の範囲から外れ新たな検討（評価項目の検討）が必要な設備と、評価用加速度が機能確認済加速度を超えるため詳細検討が必要な設備について、設備の抽出を行うとともに、抽出された設備における動的機能維持のための検討方針を示す。

2.1 動的機能維持のための新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出

(1) 検討対象設備

検討対象設備は、耐震 S クラス並びに常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備とし、動的機能が必要な設備として J E A G 4601 で適用範囲が定められている機種（立形ポンプ、横形ポンプ、電動機 等）とする。

(2) 新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出

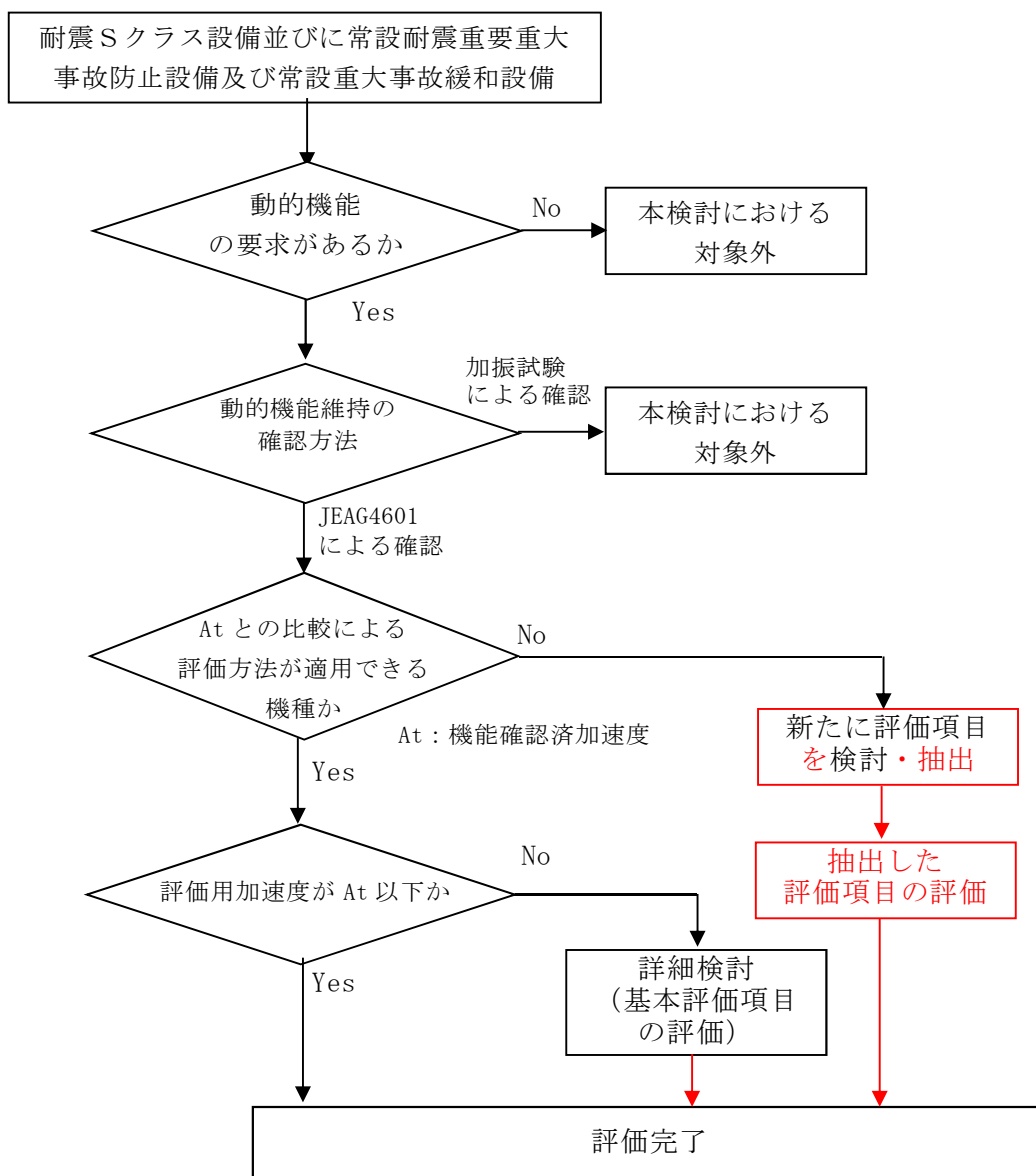
第 1 図にて設備の抽出及び検討のフローを示す。検討対象設備について、J E A G 4601 に定める機能確認済加速度（ A_t ）との比較による評価方法が適用できる機種に対して構造、作動原理等が同じであることを確認する。同じであることが確認できない場合は、新たに評価項目の検討が必要な設備として抽出する。

さらに評価用加速度が J E A G 4601 及び既往の研究等*により妥当性が確認されて

いる機能確認済加速度（ A_t ）以内であることの確認を行い、機能確認済加速度を超える設備については詳細検討（基本評価項目の評価）が必要な設備として抽出する。なお、弁については J E A G 4601 にて評価用加速度が機能確認済加速度を超えた場合の詳細検討の具体的手順が定められているため、本資料の対象外とする。

上記の整理結果として別表 1 に検討対象設備を示すとともに、新たな検討又は詳細検討が必要な設備の抽出のための情報として J E A G 4601 に該当する機種名等を整理した。

※ 電力共同研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究（平成 10 年度～平成 13 年度）」



第 1 図 動的機能維持評価フロー

(3) 抽出結果

別表 1 をもとに新たな検討又は詳細検討が必要な設備を抽出した結果を第 1 表に示す。

新たに評価項目の検討が必要となる設備として、横形スクリー式ポンプ（以下「スクリー式ポンプ」という。）、横形ギヤ式ポンプ（以下「ギヤ式ポンプ」という。）として非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ、常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ及び緊急時対策所用発電機給油ポンプが該当する。

また、評価用加速度が機能確認済加速度を超え詳細検討が必要となる設備として残留熱除去系海水系ポンプ、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ並びにこれらポンプ用の電動機が該当する。

3. 動的機能維持評価について

J E A G 4601 に定められた機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できる機種の種類から外れ、新たに評価項目の検討が必要な設備、評価用加速度が機能確認済加速度を超えるため詳細検討が必要な設備における動的機能維持評価について別紙にて説明する。

【機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できる機種の種類から外れ新たに評価項目の検討が必要な設備】

- ・別紙 1：非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ、常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ及び緊急時対策所用発電機給油ポンプ

【評価用加速度が機能確認済加速度を超えるため詳細検討が必要な設備】

- ・別紙 2：残留熱除去系海水系ポンプ、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ
- ・別紙 3：残留熱除去系海水系ポンプ用電動機、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ用電動機及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ及び電動機

第1表(1) 新たな評価項目の検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果

機種名	設備名称	At との比較 が可能か ○：可 ×：否（新たな 評価項目の 検討が必要）	At 確認 ○：OK ×：NG（詳細 検討が必要）
立形ポンプ	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	○	○
	残留熱除去系海水系ポンプ	○	×
	非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ	○	×
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用 海水ポンプ	○	×
	緊急用海水ポンプ	○	追而
横形ポンプ	原子炉隔離時冷却系ポンプ	○	○
	非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ	×	—
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃 料移送ポンプ	×	—
	常設低圧代替注水系ポンプ	○	追而
	代替燃料プール冷却系ポンプ	○	○
	格納容器圧力逃がし装置移送ポンプ	○	追而
	代替循環冷却系ポンプ	○	○
	常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ	×	—
	緊急時対策所用発電機給油ポンプ	×	—
ポンプ駆動用 タービン	原子炉隔離時冷却系ポンプ用駆動タービ ン	○	○
電動機	残留熱除去系ポンプ用電動機	○	○
	高圧炉心スプレイ系ポンプ用電動機	○	○
	低圧炉心スプレイ系ポンプ用電動機	○	○
	残留熱除去系海水系ポンプ用電動機	○	×
	ほう酸水注入ポンプ用電動機	○	○
	中央制御室換気系空気調和機ファン用電 動機	○	○

第1表(2) 新たな評価項目の検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果

機種名	設備名称	At との比較 が可能か ○：可 ×：否（新たな評価項目の 検討が必要）	At 確認 ○：OK ×：NG（詳細 検討が必要）
電動機	中央制御室換気系フィルタ系ファン用電動機	○	○
	非常用ガス処理系排風機用電動機	○	○
	非常用ガス再循環系排風機用電動機	○	○
	可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ用電動機	○	○
	非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ用電動機	○	追而
	非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ用電動機	○	×
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ用電動機	○	追而
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ用電動機	○	×
	常設低圧代替注水系ポンプ用電動機	○	追而
	代替燃料プール冷却系ポンプ用電動機	○	○
	格納容器圧力逃がし装置移送ポンプ用電動機	○	追而
	代替循環冷却系ポンプ用電動機	○	○
	緊急用海水ポンプ用電動機	○	追而
	緊急時対策所非常用送風機用電動機	○	追而
	常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ用電動機	○	追而
緊急時対策所用発電機給油ポンプ用電動機	○	追而	
ファン	中央制御室換気系空気調和機ファン	○	○
	中央制御室換気系フィルタ系ファン	○	○
	非常用ガス処理系排風機	○	○
	非常用ガス再循環系排風機	○	○
	可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロワ	○	○
	緊急時対策所非常用送風機	○	追而

第1表(3) 新たな評価項目の検討又は詳細検討が必要な設備の抽出結果

機種名	設備名称	At との比較 が可能か ○：可 ×：否（新たな評価項目の 検討が必要）	At 確認 ○：OK ×：NG（詳細 検討が必要）
非常用ディーゼル発電機	非常用ディーゼル発電機	○	○
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機	○	○
	非常用ディーゼル発電機調速装置及び非常用ディーゼル発電機非常調速装置	○	○
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機調速装置及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機非常調速装置	○	○
往復動式ポンプ	ほう酸水注入ポンプ	○	○
制御棒	制御棒挿入性	○	○ ^{注1}

注1) 地震応答解析結果から求めた燃料集合体変位が加振試験により確認された制御棒挿入機能に支障を与えない変位に対して下回ることを確認

J E A G 4601 に定められた機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できる機種
の範囲から外れ、新たに評価項目の検討が必要な設備における動的機能維持の検討方針

1. はじめに

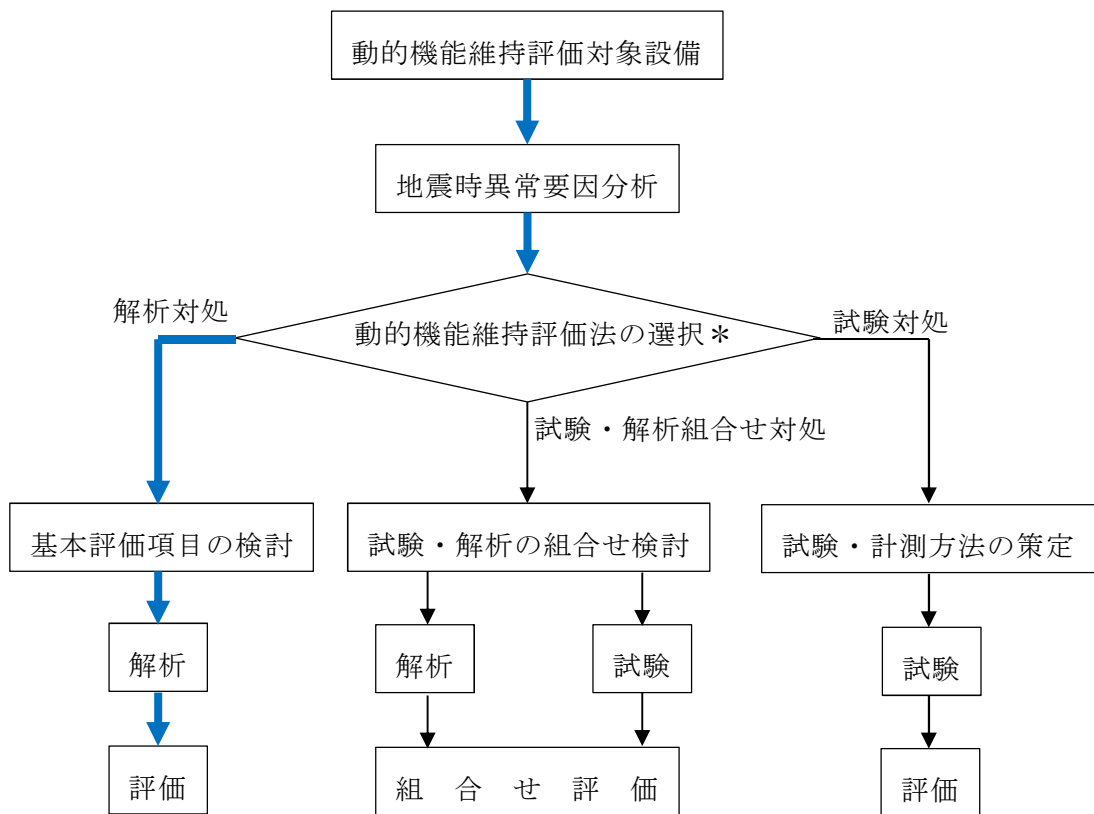
非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料
移送ポンプ、常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ及び緊急時対策所用発電機給油ポン
プの動的機能維持評価について、J E A G 4601 に定められた機能確認済加速度との比較
による評価方法が適用できる機種の範囲から外れ、新たに評価項目の検討が必要となる。
本資料では、それら設備の動的機能維持の検討方針を示す。

2. 評価項目の抽出方針

J E A G 4601 に定められた機能確認済加速度との比較による評価方法が適用できる
機種の範囲から外れた設備における動的機能維持の検討方針としては、技術基準規則解
釈等の改正を踏まえて、公知化された検討として（社）日本電気協会 電気技術基準調
査委員会の下に設置された原子力発電耐震設計特別調査委員会（以下「耐特委」という。）
により取り纏められた類似機器における検討をもとに実施する。

具体的には、耐特委では動的機能の評価においては、対象機種ごとに現実的な地震応
答レベルでの異常のみならず、破壊に至るような過剰な状態を念頭に地震時に考え得る
異常状態を抽出し、その分析により動的機能上の評価点を検討し、動的機能維持を評価
する際に確認すべき事項として、基本評価項目を選定している。

今回 J E A G 4601 に定められた適用機種の範囲から外れた設備については、基本的な
構造が類似している機種／型式に対する耐特委での検討を参考に、型式による構造の違
いを踏まえた上で地震時異常要因分析を実施し、基本評価項目を選定し動的機能維持評
価を実施する。動的機能維持評価のフローを第 1 図に示す。なお、J E A G 4601 におい
ても、機能維持評価の基本方針として、地震時の異常要因分析を考慮し、動的機能の維
持に必要な評価のポイントを明確にすることとなっている。



* 対象物の複雑さ等で選択

— 本評価でのフロー

第1図 動的機能維持評価のフロー

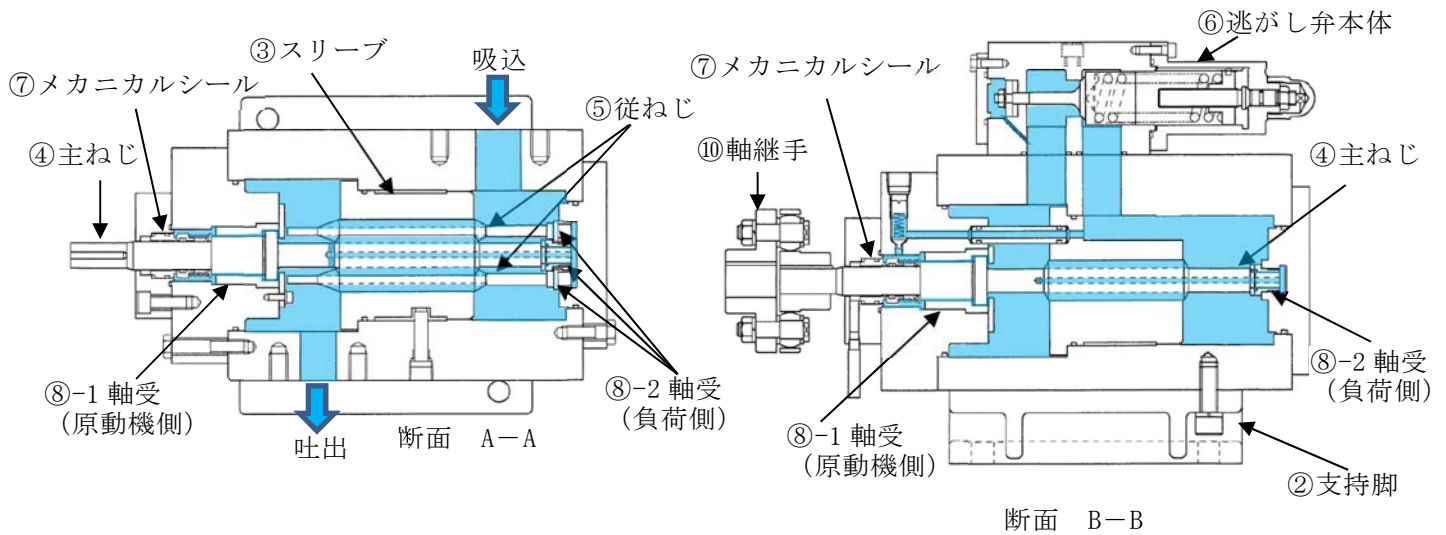
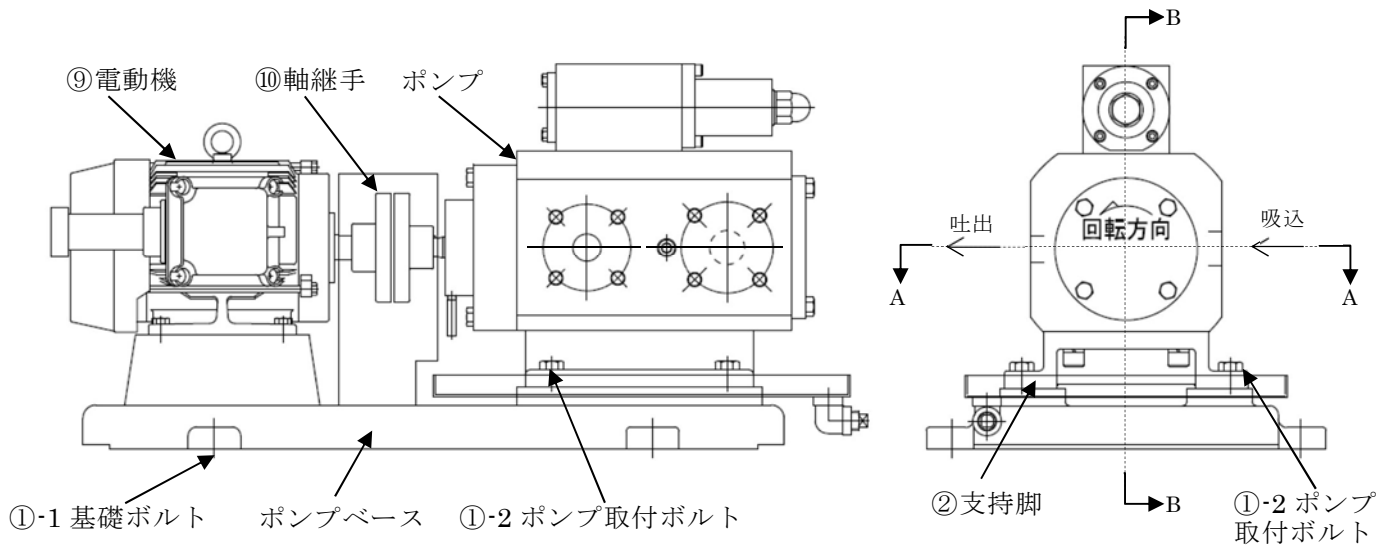
地震時異常要因分析を検討するに当たり、参考とする機種／型式を第1表に示すとともに、第2図、第3図及び第4図に今回工認にて新たな検討が必要な設備及び耐特委で検討され新たな検討において参考とする設備の構造概要図を示す。また、主要仕様を第2表及び第3表に示す。

スクリー式ポンプ及びギヤ式ポンプは、共に容積式の横形ポンプであり、一定容積の液をスクリー又はギヤにて押し出す構造のポンプである。一方、遠心式横形ポンプ（以下「遠心式ポンプ」という。）はインペラの高速回転により液を吸込み・吐出すポンプであり内部流体の吐出構造が異なるが、ケーシング内にて軸系が回転し内部流体を吐出する機構を有していること、固定方法については、基礎ボルトで周囲を固定した架台の上に、駆動機器である横形ころがり軸受の電動機とポンプが取付ボルトにより設置され、電動機からの動力を軸継手を介してポンプ側に伝達する方式であること、主軸、軸受及びメカニカルシール部のクリアランスにより地震荷重はメカニカルシール部には負荷されず、軸受を通してケーシングに伝達されることから、基本構造が同じといえる。このため、スクリー式ポンプ及びギヤ式ポンプについては、遠心式横形ポンプを参考とし、地震時異常要因分析を実施する。

なお、非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ、常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ及び緊急時対策所用発電機給油ポンプについては、新規制基準により新たに動的機能要求が必要となり、評価する設備となる。

第1表 新たな検討が必要な設備において参考とする機種／型式

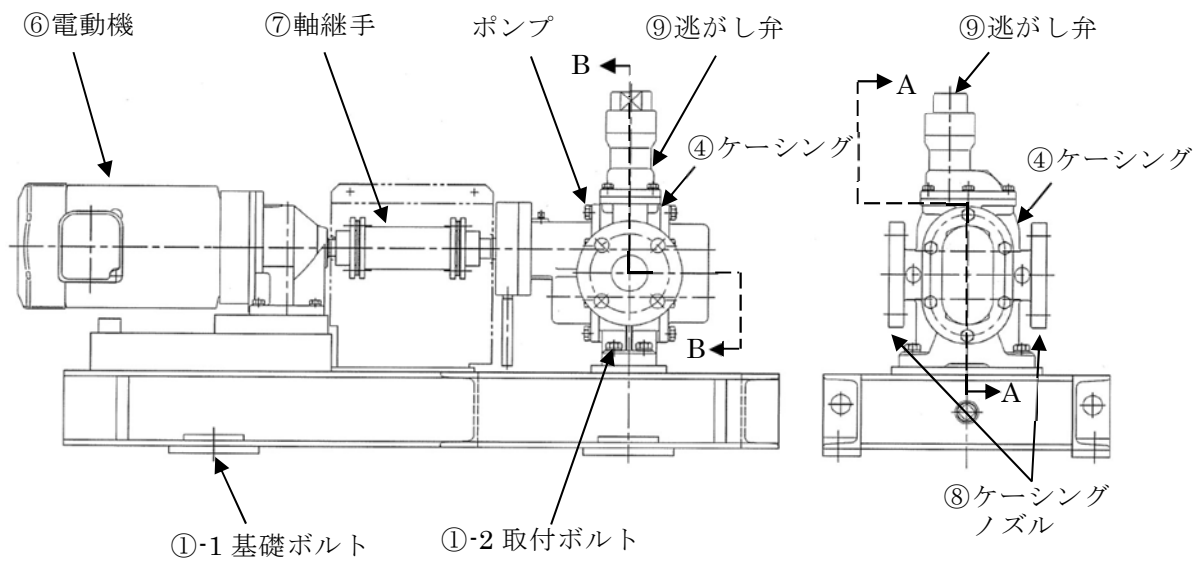
新たな検討が必要な設備	機種／型式	参考とする機種／型式
<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ ・常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ 	横形ポンプ／スクリー式	横形ポンプ／単段遠心式
<ul style="list-style-type: none"> ・緊急時対策所用発電機給油ポンプ 	横形ポンプ／ギヤ式	



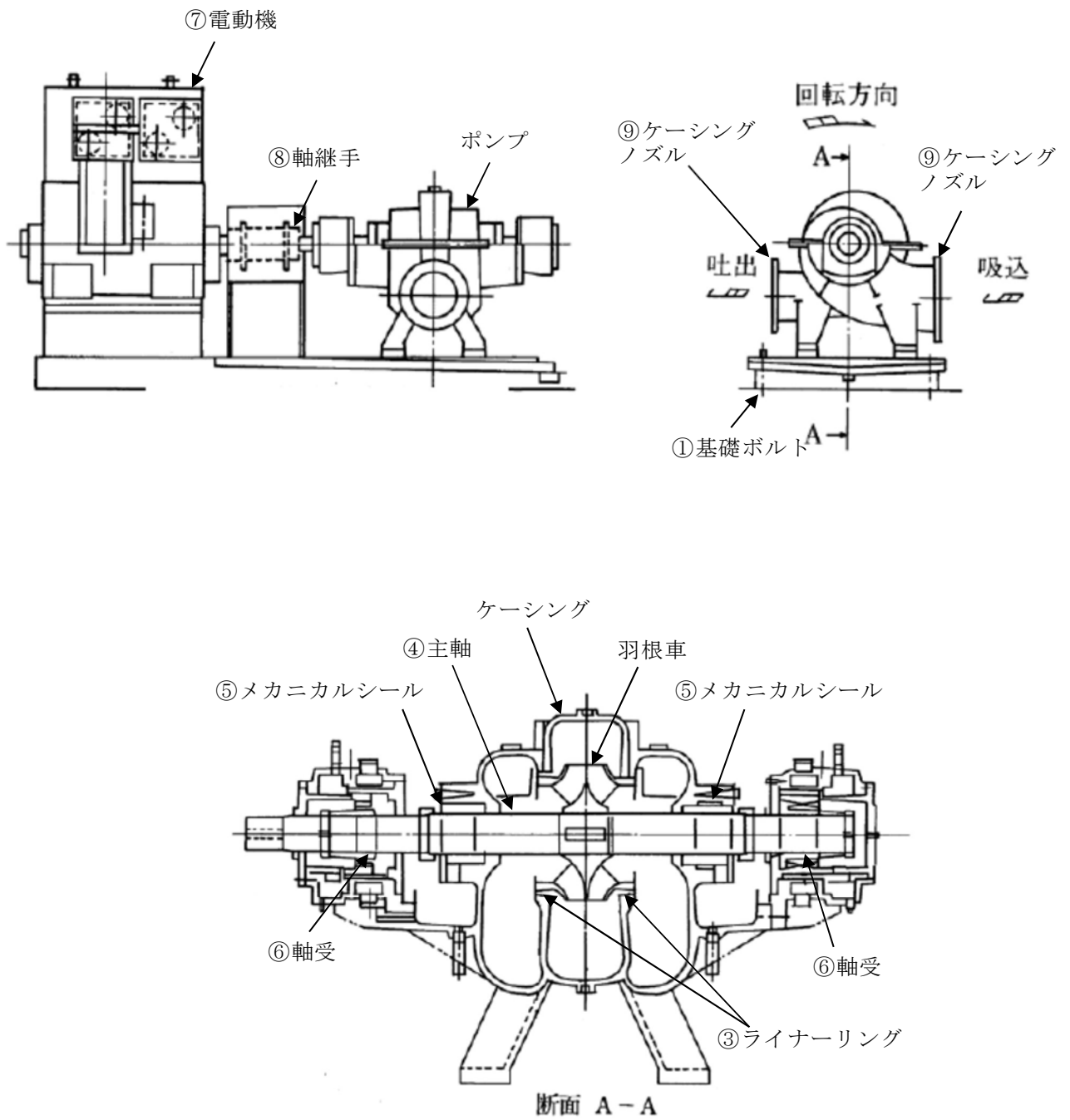
■: 接液部

注: スリーブ内に納められた主ねじと従ねじはかみ合っており、ねじの1リードごとに作られる密閉される空間に入った流体は、ねじ面に沿って吐出側へ移動する。

第2図 スクリュー式ポンプ構造概要図



第3図 ギヤ式ポンプ構造概要図



第4図 遠心式ポンプ構造概要図

第2表 スクリュー式ポンプの主要仕様

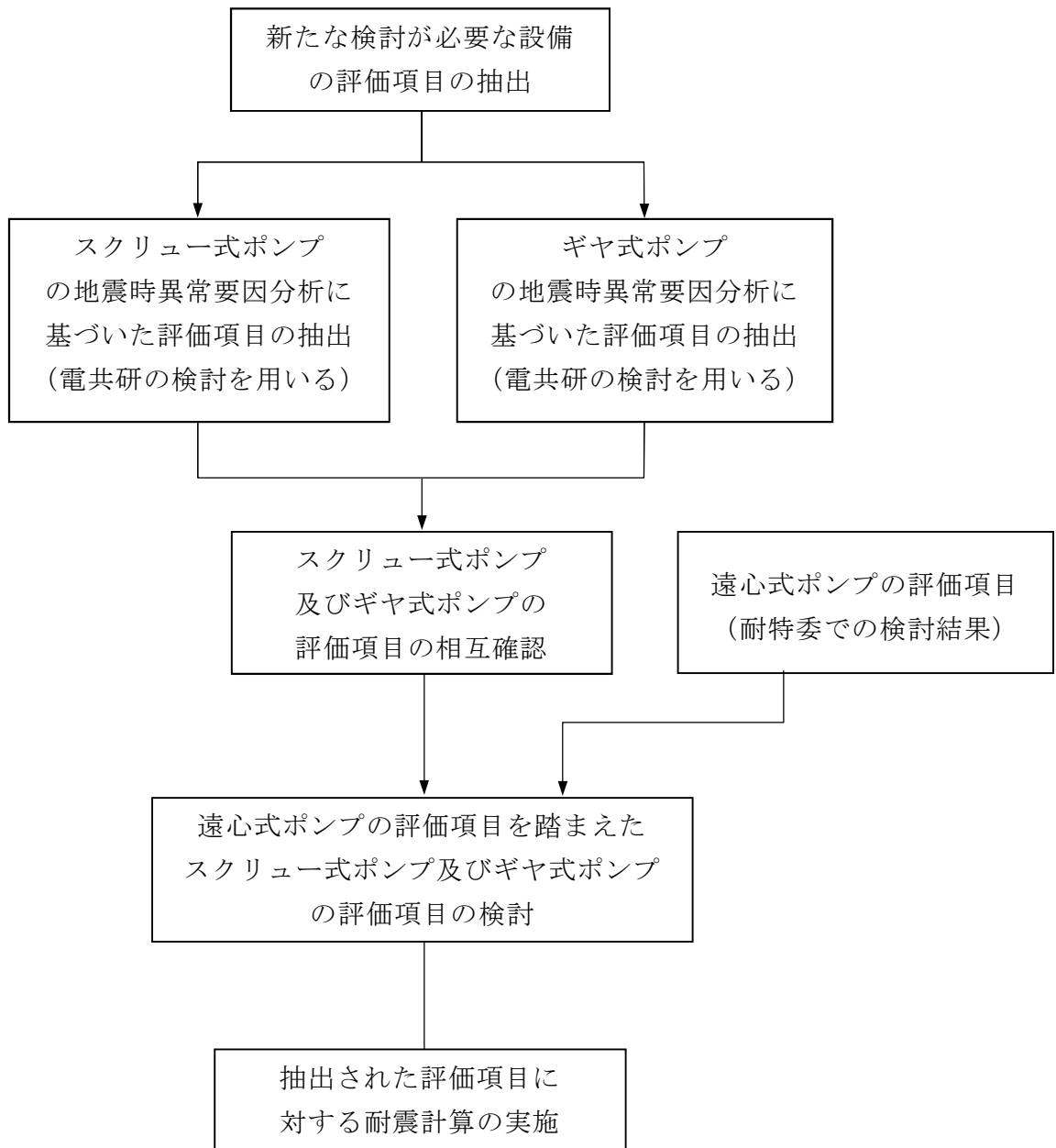
		非常用ディーゼル 発電機燃料移送 ポンプ	高圧炉心スプレイ系 ディーゼル発電機 燃料移送ポンプ	常設代替高圧電源 装置用燃料移送 ポンプ
容 量	m ³ /h/個	1.92 以上	1.04 以上	3.02 以上
揚 程	MPa	0.195 以上(2C 用) 0.156 以上(2D 用)	0.190 以上	0.285 以上
最高使用 圧 力	MPa	1.00	1.00	1.00
最高使用 温 度	℃	55	55	55
原 動 機 出 力	kW/個	1.2	1.2	2.2

第3表 ギヤ式ポンプの主要仕様

		緊急時対策所用発電機給油ポンプ
容 量	m ³ /h/個	1.3 以上
揚 程	MPa	0.3
最高使用圧力	MPa	0.5
最高使用温度	℃	45
原 動 機 出 力	kW/個	1.5

3. 新たな検討が必要な動的機能維持評価の評価項目の抽出

新たな検討が必要な設備として、スクリー式ポンプ及びギヤ式ポンプに対する地震時異常要因分析を踏まえて評価項目を抽出する。また当該検討において参考とする耐特委での機種／型式に対する評価項目を踏まえた検討を行う。動的機能維持評価のための評価項目の抽出フローを第5図に示す。



第5図 動的機能維持評価のための評価項目の抽出フロー

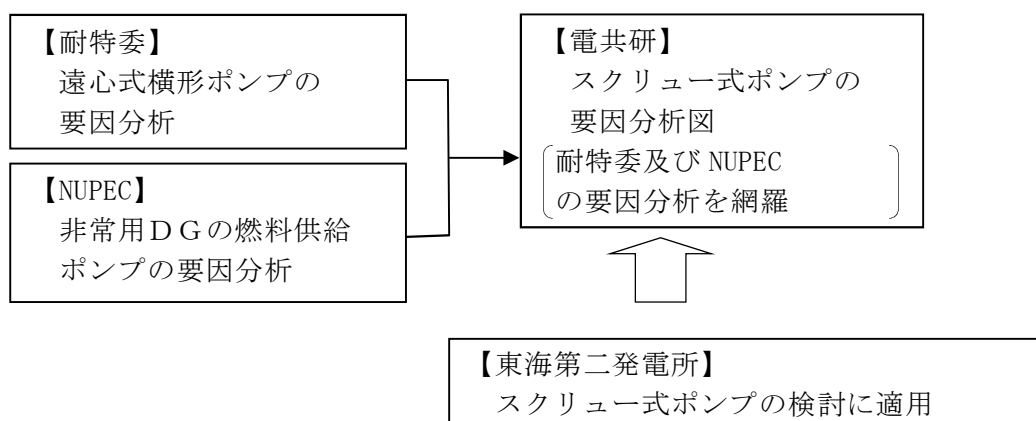
a. スクリュー式ポンプ及びギヤ式ポンプの地震時異常要因分析による評価項目の抽出

(a) スクリュー式ポンプの評価項目の抽出

スクリュー式ポンプの地震時異常要因分析図（以下「要因分析図」という。）及び評価項目は、電共研[※]での検討内容を用いる。電共研では第 6 図に示すとおり、耐特委における遠心式横形ポンプ及び NUPEC における非常用 DG の燃料供給ポンプに対する異常要因分析結果（非常用ディーゼル発電機システム耐震実証試験（1992 年 3 月））を網羅するように、スクリュー式ポンプに対する地震時異常要因分析を行い、評価項目を抽出している。

スクリュー式ポンプの要因分析図を第 7 図に示す。要因分析図に基づき抽出される評価項目は第 4 表のとおりである。

※ 動的機器の地震時機能維持の耐震余裕に関する研究（平成 25 年 3 月）



第 6 図 地震時異常要因分析の適用（スクリュー式ポンプ）

対象	要求機能	要因	現象	喪失機能				
スクリー ー式ポ ンプ	地震後の起動・運 転と輸送性能確保	ポンプ本体応答過大	ケーシング転倒 モーメント 応力過大	基礎ボルト応力過大 → 基礎ボルト損傷 ①	A B C			
				支持脚応力過大 → 支持脚損傷 ②	A B C			
				全体系(ケーシ ング)応答過大	ケーシング応力過大			
					ケーシング変形過大	逃し弁フランジ部 変形 ⑥	油の外部漏えい C	
				軸系(主)ねじ 応答過大	軸応力過大		軸(主ねじ)損傷 ④	A
					軸変形過大		メカニカルシール損傷 ⑦	B C
					軸変形過大		軸受損傷 ⑧	A
					軸変形過大	③ ④ ⑤ スリーブと主ねじ、 従ねじの接触	摺動部の損傷	A B
					電動機応答過大		電動機機能喪失 ⑨	A B
				電動機変形過大		軸継手部相対変位過大	軸継手損傷 ⑩	A
					配管応答過大	配管反力過大	ケーシングノズル 部損傷 ⑪	B C

第7図 スクリュー式ポンプの地震時異常要因分析図

第4表 スクリュー式ポンプ要因分析図から抽出した評価項目

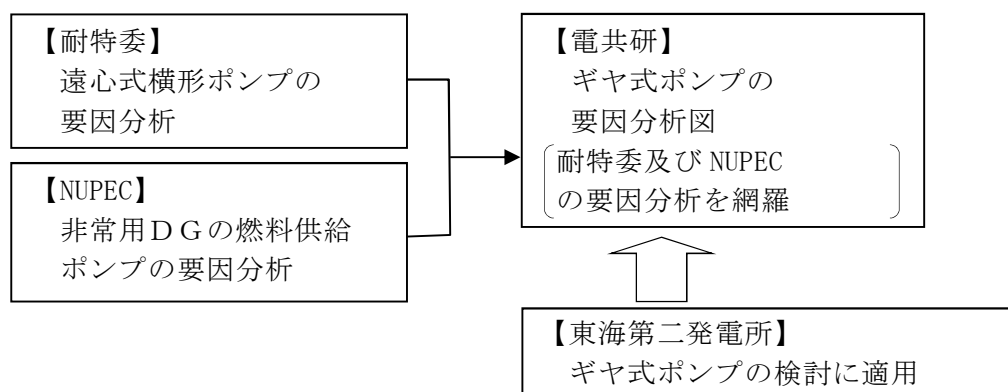
	評価項目	異常要因
①	基礎ボルト (取付ボルト含む)	ポンプ全体系の応答が過大となることで、転倒モーメントにより基礎ボルト(取付ボルトを含む)の応力が過大となり損傷に至り、全体系が転倒することで機能喪失する。
②	支持脚	ポンプ全体系の応答が過大となることで、転倒モーメントにより支持脚の応力が過大となり損傷に至り、全体系が転倒することで機能喪失する。
③ ④ ⑤	摺動部 (③スリーブ④主ねじ ⑤従ねじのクリアランス)	軸系(主)ねじの応答が過大となることで、軸変形が過大となることによりスリーブと主ねじが接触し、摺動部が損傷に至り回転機能及び移送機能が喪失する。
④	軸系(主ねじ)	軸応力が過大となり、軸が損傷することにより回転機能及び移送機能が喪失する。
⑥	逃がし弁	ケーシングの応答が過大となり逃がし弁フランジ部が変形し油の外部漏えいに至る。
⑦	メカニカルシール	軸系(主)ねじの応答過大により軸変形に至りメカニカルシールが損傷することにより移送機能及び流体保持機能が喪失する。
⑧	軸受	軸変形が過大となり、軸受が損傷することで回転機能及び移送機能が喪失する。
⑨	電動機	電動機の応答が過大になり電動機の機能が喪失することで、回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑩	軸継手	電動機の変形過大により軸受部の相対変位が過大となり、軸継手が損傷することで回転機能が喪失する。
⑪	ケーシングノズル	接続配管の応答が過大となり、ケーシングノズルが損傷することで移送機能及び流体保持機能が喪失する。

(b) ギヤ式ポンプの評価項目の抽出

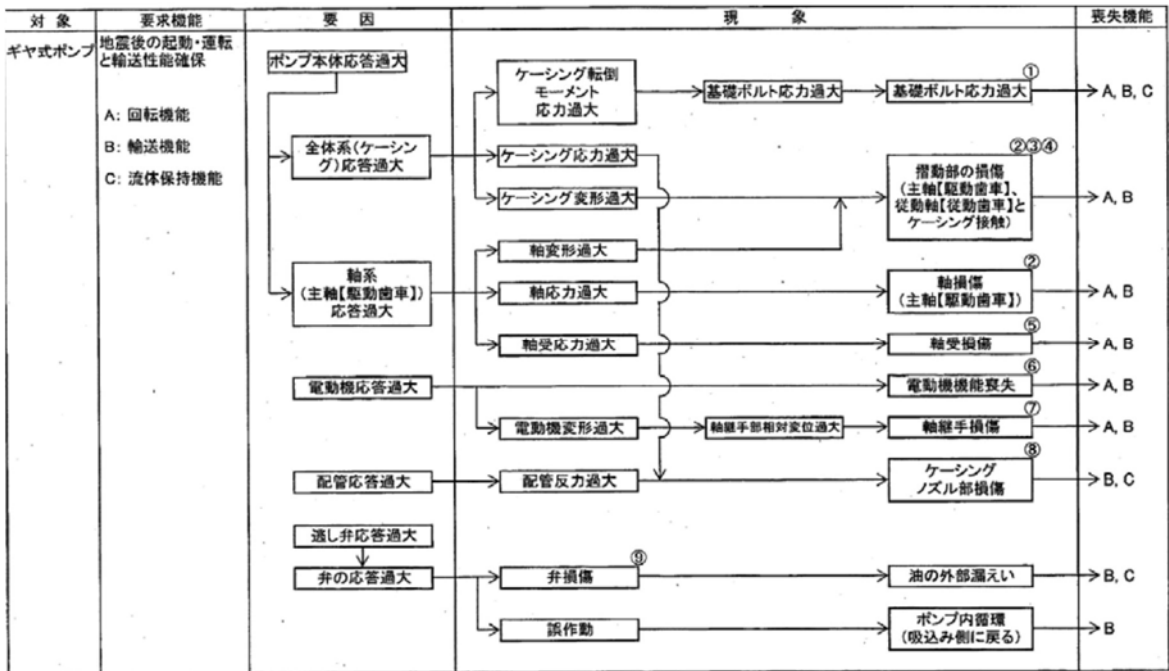
ギヤ式ポンプの要因分析図及び評価項目は、電共研[※]での検討内容を用いる。電共研では、第8図に示すとおり耐特委における遠心式横形ポンプ及びNUPECにおける非常用DGの燃料供給ポンプに対する異常要因分析結果（非常用ディーゼル発電機システム耐震実証試験（1992年3月））を網羅するように、ギヤ式ポンプに対する異常要因分析を行い、評価項目を抽出している。

ギヤ式ポンプの要因分析図を第9図に示す。要因分析図に基づき抽出される評価項目は第5表のとおりである。

※ 動的機器の地震時機能維持の耐震余裕に関する研究（平成25年3月）



第8図 地震時異常要因分析の適用（ギヤ式ポンプ）



第9図 ギヤ式ポンプの地震時異常要因分析図

第5表 ギヤ式ポンプ要因分析図から抽出した評価項目

	評価項目	異常要因
①	基礎ボルト (取付ボルト含む)	ポンプ全体系の応答が過大となることで、転倒モーメントにより基礎ボルト(取付ボルトを含む)の応力が過大となり損傷に至り、全体系が転倒することにより機能喪失する。
② ③ ④	摺動部 (②主軸又は③従動軸 と④ケーシングのクリアランス)	ポンプ全体系の応答が過大となることで、主軸(主動歯車)及び従動軸(従動歯車)の応答が過大となり軸部の変形により、ギヤがケーシングと接触することで損傷に至り、回転機能及び輸送機能が喪失する。
②	軸	軸応力が過大となり、軸が損傷することにより回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑤	軸受	軸受応力(軸受荷重)が過大となり、軸受が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑥	電動機	電動機の応答が過大になり電動機の機能が喪失することで、回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑦	軸継手	被駆動機軸と電動機軸の相対変位が過大となり、軸継手が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑧	ケーシングノズル	接続配管の応答が過大となり、ケーシングノズルが損傷することで輸送機能及び流体保持機能が喪失する。
⑨	逃がし弁	弁の応答が過大となり、弁が損傷又は誤作動することで外部漏えい、ポンプ内循環が発生し、輸送機能及び流体保持機能が喪失する。

(c) スクリュー式ポンプ及びギヤ式ポンプの抽出した評価項目に対する相互確認

スクリュー式ポンプ及びギヤ式ポンプは、ポンプ構造が類似していることを踏まえて、各ポンプの評価項目の抽出結果を比較することにより、その検討結果について相互の確認を行う。

i) スクリュー式ポンプで抽出した評価項目に対してギヤ式ポンプで抽出されなかった評価項目

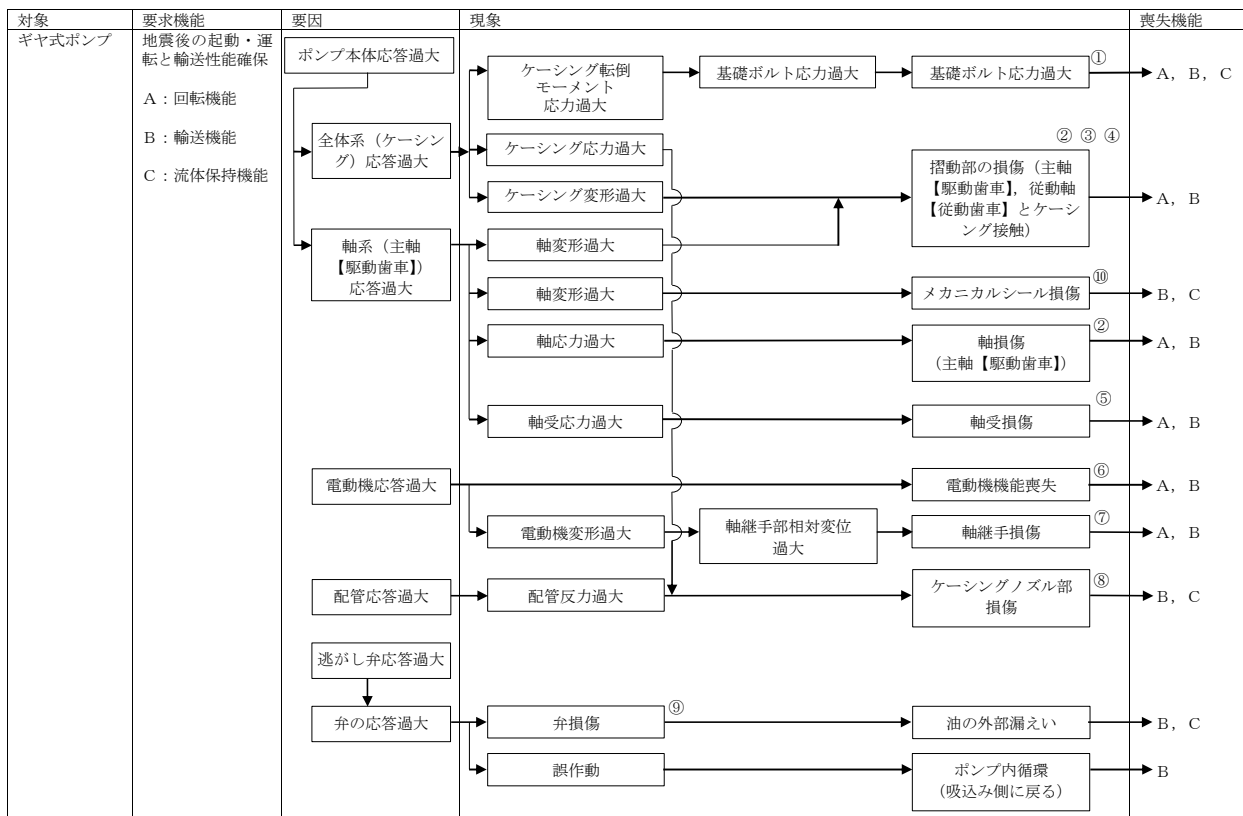
① 支持脚

ギヤ式ポンプはポンプケーシングに取付ボルト用のフランジが直接取り付けられており構造上存在しない。

② メカニカルシール

ギヤ式ポンプについてもメカニカルシールが設置されており、損傷すれば

スクリー式ポンプと同様に輸送機能及び流体保持機能に影響を与えることからギヤ式ポンプについても評価項目として選定する。メカニカルシールを追加したギヤ式ポンプの要因分析図を第 10 図に示す。

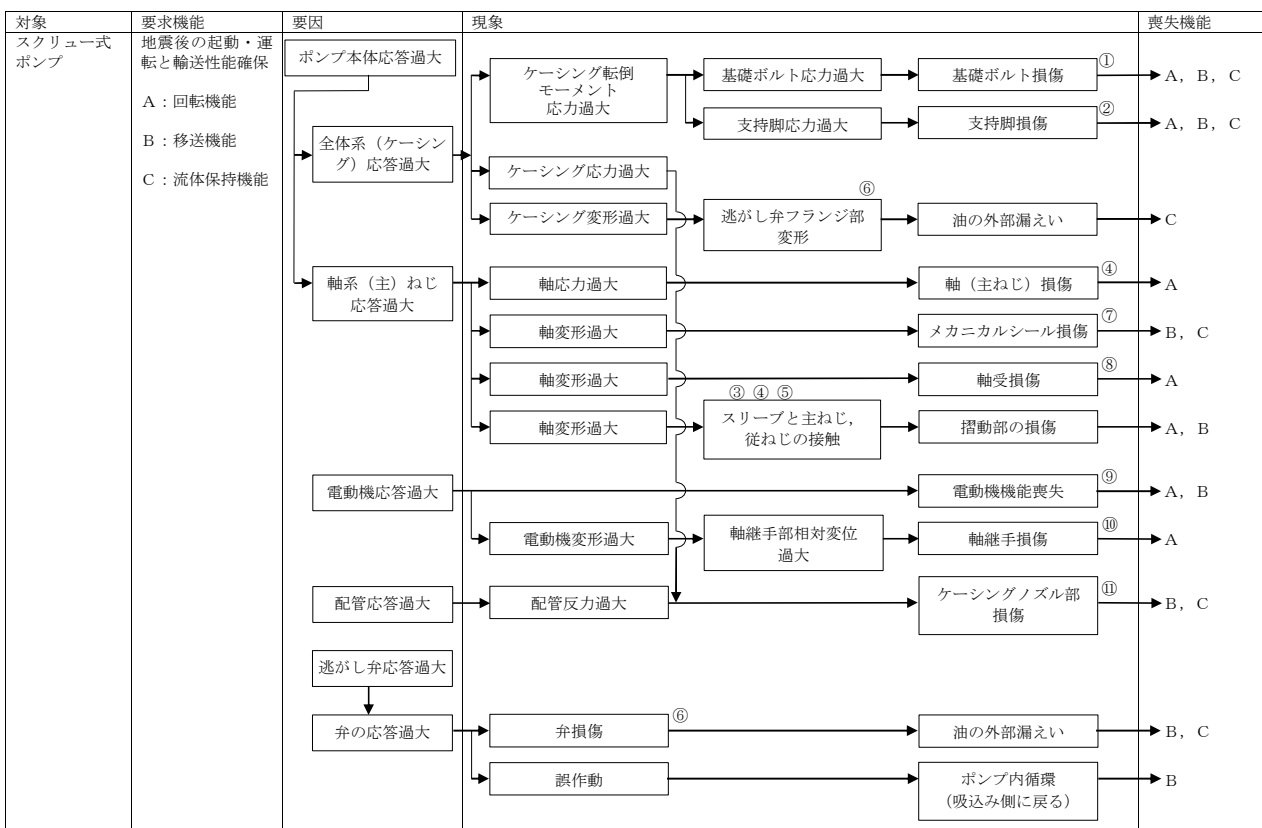


第 10 図 ギヤ式ポンプの地震時異常要因分析図

ii) ギヤ式ポンプで抽出した評価項目に対してスクリー式ポンプで抽出されなかった評価項目

③ 逃がし弁（移送機能）

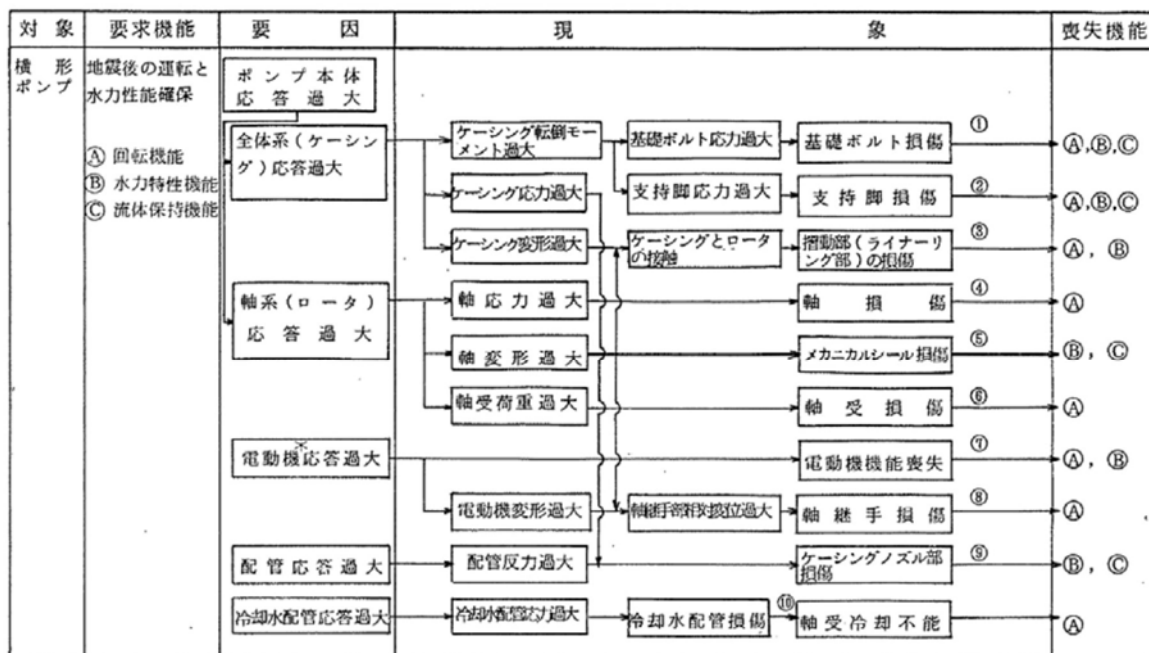
スクリー式ポンプについても逃がし弁が設置されており，誤作動すればギヤ式ポンプと同様に移送機能に影響を与えることからスクリー式ポンプについても評価項目として選定する。逃がし弁を追加したスクリー式ポンプの要因分析図を第 11 図に示す。



第 11 図 スクリー式ポンプの地震時異常要因分析図

b. 耐特委で検討された遠心式ポンプの地震時異常要因分析による評価項目

新たな検討が必要な設備としてスクリー式ポンプ及びギヤ式ポンプの評価項目の検討において、公知化された検討として参考とする耐特委での遠心式ポンプの要因分析図を第12図に、要因分析図から抽出される評価項目を第6表に示す。



* 駆動用タービンの場合も同様。また、増速機も含む。

第12図 遠心式ポンプの地震時異常要因分析図

第6表 遠心式ポンプ要因分析図から抽出した評価項目

	評価項目	異常要因
① ②	基礎ボルト（取付ボルト含む）、支持脚	ポンプ全体系の応答が過大となることで、転倒モーメントにより基礎ボルト（取付ボルト含む）の応力が過大となり損傷に至り、全体系が転倒することにより機能喪失する。 またポンプ全体系の応答が過大となることで、支持脚の応力が過大となり損傷に至り、ポンプが転倒することにより機能喪失する。
③	摺動部 （インペラとライナーリングのクリアランス）	軸変形が過大となり、インペラがライナーリングと接触することで損傷に至り、回転機能及び輸送機能が喪失する。
④	軸	軸応力が過大となり、軸が損傷することにより回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑤	メカニカルシール	軸変形が過大となり、メカニカルシールが損傷することにより流体保持機能が喪失する。
⑥	軸受	軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑦	電動機	電動機の応答が過大になり電動機の機能が喪失することで、回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑧	軸継手	被駆動機軸と電動機軸の相対変位が過大となり、軸継手が損傷することで回転機能及び輸送機能が喪失する。
⑨	ケーシングノズル	接続配管の応答が過大となり、ケーシングノズルが損傷することで輸送機能及び流体保持機能が喪失する。
⑩	軸冷却水配管	冷却水配管の応答が過大となり、損傷することで軸冷却不能に至り、回転機能が喪失する。

c. 遠心式ポンプの評価項目を踏まえたスクリー式ポンプ及びギヤ式ポンプの評価項目の検討

(a) スクリー式ポンプの評価項目の検討

スクリー式ポンプの要因分析結果について、耐特委における遠心式ポンプの要因分析結果と同様に整理した結果、スクリー式ポンプの評価項目は、遠心式ポンプとほぼ同様となった。スクリー式ポンプの動的機能維持の評価項目の抽出に当たり、遠心式ポンプの耐特委における評価項目に加え、構造の差異により抽出されたスクリー式ポンプの評価項目を加えて検討を行う。なお、構造の差異として抽出された評

価項目は下記の通りである。

- ・逃がし弁（遠心式ポンプの評価項目になくスクリー式ポンプのみで抽出）
- ・摺動部（スクリー式ポンプ及び遠心式ポンプの両方で抽出された評価項目であるが、構成部品が異なる。）
- ・軸冷却水配管（スクリー式ポンプの評価項目になく遠心式ポンプのみで抽出）

耐特委で検討された遠心式ポンプは、大型のポンプであり軸受としてすべり軸受を採用していることから、軸受の冷却が必要となる。このため、地震により軸冷却水配管の損傷に至ればポンプの機能維持に影響を及ぼすため、軸冷却水配管を評価項目として抽出している。一方でスクリー式ポンプの標準設計として、軸冷却水配管を有していない。軸冷却水配管は軸受の冷却のため設置されるが、スクリー式ポンプの軸受は内部流体で冷却が可能であるため、軸冷却水配管は設置されていない。

① 基礎ボルト（取付ボルトを含む）の評価

スクリー式ポンプは遠心式ポンプと同様に、基礎ボルトで固定された架台の上に、駆動機器及び被駆動機器が取付ボルトに設置されており、地震時に有意な荷重がかかることから動的機能維持の評価項目として選定する。

② 支持脚部の評価

支持脚部については、スクリー式ポンプと遠心式ポンプとで構造に大きな違いはなく、高い剛性を有するためにケーシング定着部に荷重がかかる構造となっている。このため、取付ボルト及び基礎ボルトが評価上厳しい部位であるため、取付ボルト及び基礎ボルトの評価で代表できる。

③④⑤ 摺動部の評価

摺動部の損傷の観点より、遠心式ポンプの検討におけるケーシングと接触して損傷するライナーリング部の評価を行うのと同様に、スクリー式ポンプにおける評価項目を以下のとおり選定する。

スクリー式ポンプのスクリー部は、構造が非常に剛であり、地震応答増幅が小さく動的機能評価上重要な部分の地震荷重が通常運転荷重に比べて十分小さいと考えられる。また、スリーブ部については、ケーシング部に設置されている。

軸系（主ねじ）についてはラジアル軸受で支持されており、軸変形によりスリーブ部と接触することで回転機能及び輸送機能が喪失に至ることが考えられるため、動

的機能維持の評価項目として選定する。

④ 軸系の評価

スクリー式ポンプは主ねじ及び従ねじを有する構造であり、一軸構造の遠心式ポンプとは軸の構造が異なるが、軸系の損傷によってポンプとしての機能を喪失することは同様である。このため、スクリー式ポンプにおいても、遠心式ポンプと同様に、軸応力過大により軸損傷が発生しないことを確認するため、軸系の評価を動的機能維持の評価項目として選定する。

⑥ 逃がし弁の評価

逃がし弁はばね式であり、弁に作用する最大加速度が、安全弁の機能確認済加速度以下であることを確認する。

⑦ メカニカルシール

メカニカルシールは、高い剛性を有するケーシングに固定されており、地震時に有意な変位が生じない。また軸封部は軸受近傍に位置し、軸は地震時でも軸受で支持されており、有意な変位は生じることはなく、軸封部との接触は生じないため、計算書の対象外とする。

⑧ 軸受の評価

ポンプにおいて、軸受の役割は回転機能の保持であり、その役割はスクリー式ポンプも遠心式ポンプも同じである。当該軸受が損傷することにより、ポンプの機能喪失につながるため、動的機能維持の評価項目として選定する。また、評価においては発生する荷重としてスラスト方向及びラジアル方向の荷重を考慮して評価を行う。

⑨ 電動機の評価

スクリー式ポンプの電動機は横向きに設置されるころがり軸受を使用する電動機であり、耐特委（J E A G 4601）で検討されている横型ころがり軸受電動機の適用範囲内であることから、機能確認済加速度との比較により評価を行う。

⑩ 軸継手の評価

スクリー式ポンプは、遠心式ポンプと同様に、軸受でスラスト荷重を受け持つこと及びフレキシブルカップリングを採用していることから、軸継手にはスラスト荷重による有意な応力が発生しないため、計算書の評価対象外とする。

⑪ ケーシングノズルの評価

東海第二発電所で使用するスクリー式ポンプの吸込、吐出部は直接配管のフラ
別紙 1-20

ンジを接続する構造でありノズル形状を有さないため、計算書の対象外とする。

以上から、スクリー式ポンプにおいて抽出される動的機能維持の評価項目のうち、計算書の評価対象とするものは以下の通りである。

- ・基礎ボルト及び取付ボルトの評価
- ・摺動部（軸系）の評価
- ・軸系としてねじの評価
- ・逃がし弁の評価
- ・軸受の評価
- ・電動機の評価

評価項目における評価基準値の説明を第7表に示す。

以上の検討に基づく評価結果を第12表に示す。

第7表 評価基準値の設定

評価項目	評価基準値の設定
① 基礎ボルト、ポンプ取付ボルト	支持機能の確保の観点から、運転状態Ⅳを基本として、通常材料の実降伏点が設計値に対し余裕があることを考慮し、概ね降伏点以下と同等とした値としてⅣ _A Sを評価基準値とした。
③④ 摺動部	主ねじとスリーブの接触により回転機能、移送機能が阻害されるという観点から、主ねじとスリーブのクリアランスを評価基準値とした。
④ 軸	回転機能の確保の観点から、軸（主ねじ）の変形を弾性範囲内に留めるようⅢ _A Sを評価基準値とした。
⑥ 逃がし弁	移送機能の確保の観点から、機能確認済加速度は、水平方向1.0[G]、鉛直方向1.0[G]を評価基準とした。(注1)
⑧ 軸受	回転機能の確保の観点から、メーカーが推奨する許容面圧を評価基準とした。
⑨ 電動機	回転機能、移送機能の確保の観点から、水平方向はJ E A G 4601に記載の電動機（横形ころがり軸受機）の機能確認済加速度である4.7[G]、鉛直方向は1.0[G]を評価基準とした。

(注1)

逃がし弁の機能確認済加速度は以下の考えで定めた。

機能確認済加速度は、J E A G 4601の表3.5.10-8「弁駆動部の機能確認済加速度」に定められた安全弁のうち、最も小さいPWR加圧器安全弁の5.0[G]を参考に設定する(第8表)。

第8表 J E A G 4601 で定める弁駆動部の機能確認済加速度

種別	弁型式		機能確認済加速度[G]
特殊弁	安全弁	BWR主蒸気逃がし安全弁	9.6
		PWR加圧器安全弁	5.0
		PWR主蒸気安全弁	10.0

J E A G 4601 に定められた安全弁とスクリー式ポンプの逃がし弁の構造は第9表に示すとおりであり、両者の構造は以下の通り同等である。

- 構造はシート部を構成する弁座（本体）と弁体、圧力バウンダリとなる本体とふたにより構成される。
- 内部流体圧力と、ばねによる弁体押付け力との釣り合いにより開閉動作を行う。
- J E A G 4601 に記載の安全弁の例として口径200A以下と記載されていることに対し、

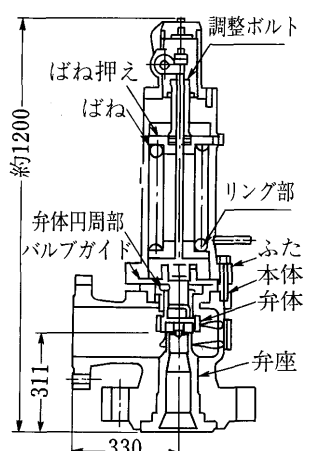
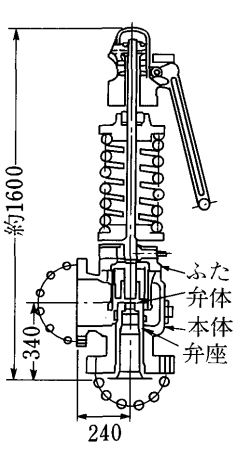
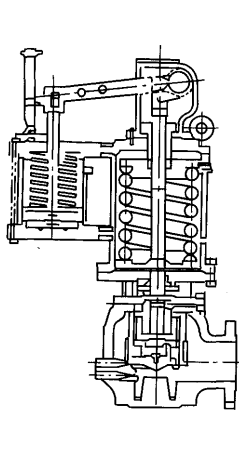
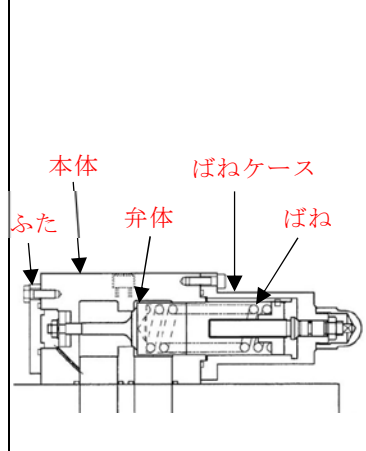
スクリー式ポンプ逃がし弁のポンプとの取り付け部の口径はすべて 200A 以下となっている。

ただし、機能確認済加速度を設定するに当たっては、PWR 加圧器安全弁が縦置きであるのに対し、スクリー式ポンプ逃がし弁は横置き設置であるため、以下のように配慮する（第 10 表）。

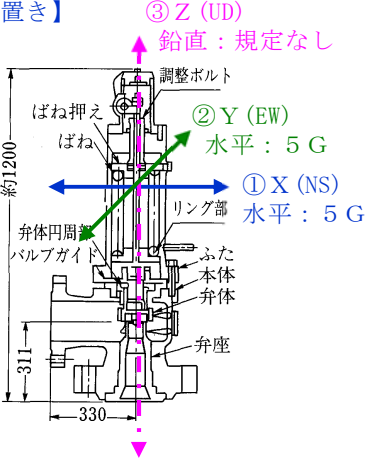
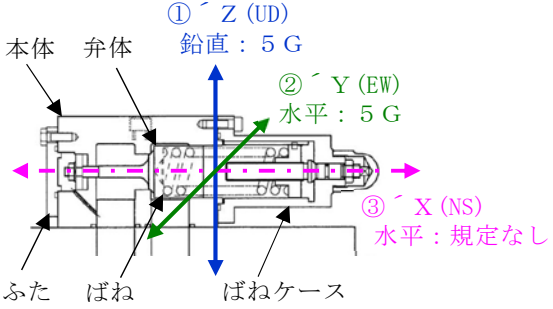
- PWR 加圧器安全弁の水平方向の機能確認済加速度を 90° 変換して鉛直方向の機能確認済加速度として 5.0[G]を適用（①[）]することが可能と考えるが、設置向きの違いを勘案して安全側に 1.0[G]を許容値として評価する。
- PWR 加圧器安全弁で規定していない鉛直方向（弁軸方向）が、スクリー式ポンプ逃がし弁の水平方向（弁軸方向）になる（③[）]ことから、水平方向の許容値に 1.0[G]を適用する。

なお、原子力発電所耐震設計技術規定 J E A C 4601-2008（以下「J E A C 4601-2008」という）においては、第 11 表に示す機能確認済加速度が規定されており、原子力発電所耐震設計技術規定 J E A C 4601-2015 では燃料移送ポンプ（スクリー式）の機能確認済加速度として水平：4.5[G]、鉛直：2.0[G]が定められている。

第 9 表 J E A G 4601 で定める安全弁とスクリー式ポンプ逃がし弁の構造比較

J E A G 4601			スクリー式ポンプ 逃がし弁
PWR 加圧器安全弁	PWR 主蒸気安全弁	BWR 主蒸気逃がし安全弁	
			

第10表 スクリュー式ポンプ逃がし弁の機能確認済加速度の設定の考え方

J E A G 4601 PWR加圧器安全弁	スクリュー式ポンプ逃がし弁
<p>【縦置き】</p>  <p>③ Z (UD) 鉛直：規定なし</p> <p>② Y (EW) 水平：5 G</p> <p>① X (NS) 水平：5 G</p>	<p>【横置き】</p>  <p>① Z (UD) 鉛直：5 G</p> <p>② Y (EW) 水平：5 G</p> <p>③ X (NS) 水平：規定なし</p>
<p>水平：5.0[G] 鉛直：1.0[G]</p>	<p>水平：1.0[G] 鉛直：1.0[G]</p>

第11表 J E A C 4601-2008 で定める弁駆動部の機能確認済加速度

弁型式	機能確認済加速度[G]	
	水平	鉛直
BWR主蒸気逃がし安全弁	9.6	6.1
PWR加圧器安全弁	13.0	3.0
PWR主蒸気安全弁	13.0	3.0
PWR主蒸気安全弁 (固有周期が20Hz未満の安全弁)	10.0	3.0

第12表(1) 非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価	
①-1 基礎ボルト	応力	引張	4 MPa	184 MPa	○	
		せん断	4 MPa	142 MPa	○	
①-2 ポンプ取付ボルト	応力	引張	3 MPa	433 MPa	○	
		せん断	2 MPa	333 MPa	○	
③スリーブ ④主ねじ	変位	—			○	
④ 軸	応力	せん断	8 MPa	495 MPa	○	
⑥ 逃がし弁	加速度	水平	$0.81 \times 9.8\text{m/s}^2$	$5.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	
		鉛直	$0.71 \times 9.8\text{m/s}^2$	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	
⑧ 軸受	面圧	⑧-1 ラジアル (原動機側)	0.0790 MPa			○
		⑧-2 ラジアル (負荷側)	0.1356 MPa			○
		⑧-2 スラスト	0.1588 MPa			○
⑨ 原動機	加速度	水平	$0.81 \times 9.8\text{m/s}^2$	$4.7 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	
		鉛直	$0.71 \times 9.8\text{m/s}^2$	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	

第12表(2) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価	
①-1 基礎ボルト	応力	引張	4 MPa	184 MPa	○	
		せん断	4 MPa	142 MPa	○	
①-2 ポンプ取付ボルト	応力	引張	3 MPa	433 MPa	○	
		せん断	2 MPa	333 MPa	○	
③スリーブ ④主ねじ	変位	—			○	
④ 軸	応力	せん断	8 MPa	495 MPa	○	
⑥ 逃がし弁	加速度	水平	$0.81 \times 9.8\text{m/s}^2$	$5.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	
		鉛直	$0.71 \times 9.8\text{m/s}^2$	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	
⑧ 軸受	面圧	⑧-1 ラジアル (原動機側)	0.0790 MPa			○
		⑧-2 ラジアル (負荷側)	0.1356 MPa			○
		⑧-2 スラスト	0.1588 MPa			○
⑨ 原動機	加速度	水平	$0.81 \times 9.8\text{m/s}^2$	$4.7 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	
		鉛直	$0.71 \times 9.8\text{m/s}^2$	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	

第12表(3) 常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価	
①-1 基礎ボルト	応力	引張	4 MPa	184 MPa	○	
		せん断	4 MPa	142 MPa	○	
①-2 ポンプ取付ボルト	応力	引張	3 MPa	433 MPa	○	
		せん断	3 MPa	333 MPa	○	
③スリーブ ④主ねじ	変位	—			○	
④ 軸	応力	せん断	6 MPa	495 MPa	○	
⑥ 逃がし弁	加速度	水平	$0.81 \times 9.8\text{m/s}^2$	$5.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	
		鉛直	$0.71 \times 9.8\text{m/s}^2$	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	
⑧ 軸受	面圧	⑧-1 ラジアル (原動機側)	0.0678 MPa			○
		⑧-2 ラジアル (負荷側)	0.0835 MPa			○
		⑧-2 スラスト	0.1769 MPa			○
⑨ 電動機	加速度	水平	$0.81 \times 9.8\text{m/s}^2$	$4.7 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	
		鉛直	$0.71 \times 9.8\text{m/s}^2$	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○	

(b) ギヤ式ポンプの評価項目の検討

ギヤ式ポンプの要因分析結果について、耐特委における遠心式ポンプの要因分析結果と同様に整理した結果、ギヤ式ポンプの評価項目は、遠心式ポンプとほぼ同様となる。ギヤ式ポンプの動的機能維持の評価項目の抽出に当たり、遠心式ポンプの耐特委における評価項目に加え、構造の差異により抽出されたギヤ式ポンプの評価項目を加えて検討を行う。なお、構造の差異として抽出された評価項目は下記の通りである。

- ・逃がし弁（遠心式ポンプの評価項目になくギヤ式ポンプのみで抽出）
- ・摺動部（ギヤ式ポンプと遠心式ポンプの両方で抽出された評価項目であるが、構成部品が異なる。）
- ・軸冷却水配管（ギヤ式ポンプの評価項目になく遠心式ポンプのみで抽出）

耐特委で検討された遠心式ポンプは、大型のポンプであり軸受としてすべり軸受を採用していることから、軸受の冷却が必要となる。このため、地震により軸冷却水配管の損傷に至ればポンプの機能維持に影響を及ぼすため、軸冷却水配管を評価項目として抽出している。一方でギヤ式ポンプの標準設計として、軸冷却水配管を有していない。軸冷却水配管は軸受の冷却のため設置されるが、ギヤ式ポンプの軸受は内部流体で冷却が可能であるため、軸冷却水配管は設置されていない。

① 基礎ボルト（取付ボルトを含む）の評価

ギヤ式ポンプは遠心式ポンプと同様に、基礎ボルトで固定された架台の上に、駆動機器及び被駆動機器が取付ボルトに設置されており、地震時に有意な荷重がかかることから動的機能維持の評価項目として選定する。

②③④ 摺動部の評価

摺動部の損傷の観点より、遠心式ポンプの検討におけるケーシングと接触して損傷するライナーリング部の評価を行うのと同様に、ギヤ式ポンプにおける評価項目を以下のとおり選定する。

ギヤ式ポンプのギヤ部は、構造が非常に剛であり、地震応答増幅が小さく動的機能評価上重要な部分の地震荷重が通常運転荷重に比べて十分小さいと考えられる。また、ケーシングについては、横形ポンプと同様に耐圧構造であり、使用圧力に耐えられる強度の肉厚を有している。

主軸又は従動軸については、損傷によってギヤがケーシングと接触することで回

転機能及び輸送機能が喪失に至ることが考えられる。主軸の重量は、従動軸の重量に比べ大きく、軸を支持する距離は双方の軸で同じであるため、評価項目は、主軸（ギヤ部）を対象として行う。

② 主軸の評価

ギヤ式ポンプは二軸（主軸及び従動軸）構造であり、一軸構造の横形ポンプとは軸の構造が異なるが、主軸の重量は、従動軸に比べ大きく、軸を支持する距離は双方の軸で同じであるため、主軸の健全性確認を行うことによって、一軸構造の横形ポンプと同様の見解が適用できるものである。そのため、ギヤ式ポンプにおいても、遠心式ポンプと同様に、軸損傷が発生しないことを確認するため、主軸の評価を動的機能維持の評価項目として選定する。

⑤ 軸受の評価

ポンプにおいて、軸受の役割は「回転機能の保持」であり、その役割は遠心ポンプもギヤ式ポンプも同じである。

当該軸受が損傷することにより、ポンプの機能喪失につながるため、動的機能維持の評価項目として選定する。また、評価においては発生する荷重としてスラスト方向及びラジアル方向の荷重を考慮して評価を行う。

⑥ 電動機の評価

ギヤ式ポンプの電動機は横向きに設置されるころがり軸受を使用する電動機であり、耐特委（J E A G 4601）で検討されている横型ころがり軸受電動機の適用範囲内であることから、機能確認済加速度との比較により評価を行う。

⑦ 軸継手の評価

ギヤ式ポンプは、遠心式ポンプと同様に、軸受でスラスト荷重を受け持つことから、軸継手にはスラスト荷重による有意な応力が発生しないため、計算書の評価対象外とする。

⑧ ケーシングノズルの評価

ギヤ式ポンプのケーシングノズル部は、遠心式ポンプと同様に、機器と配管の接続部であるが、ノズル出入口配管のサポートについて適切に配管設計することで、ノズル部に過大な配管荷重が伝わらないため、計算書の評価対象外とする。

⑨ 逃がし弁の評価

逃がし弁はばね式であるため、弁に作用する最大加速度が、安全弁の機能確認済加

速度以下であることを確認する。

⑩ メカニカルシール

メカニカルシールは、高い剛性を有するケーシングに固定されており、地震時に有意な変位が生じない。また軸封部は軸受近傍に位置し、軸は地震時でも軸受で支持されており、有意な変位は生じることはなく、軸封部との接触は生じないため、計算書の対象外とする。

以上から、ギヤ式ポンプにおいて抽出される動的機能維持の評価項目のうち、計算書の評価対象とするものは以下の通りである。

- ・基礎ボルト（取付ボルトを含む）の評価
- ・主軸（ギヤ部）の評価
- ・主軸の評価
- ・軸受の評価
- ・電動機の評価
- ・逃がし弁の評価

評価項目における評価基準値の説明を第13表に示す。

以上の検討に基づく評価結果を第16表に示す。

第13表 評価基準値の設定

評価項目	評価基準値の設定
① 基礎ボルト、ポンプ取付ボルト	支持機能の確保の観点から、運転状態IVを基本として、通常材料の実降伏点が設計値に対し余裕があることを考慮し、概ね降伏点以下と同等とした値としてIV _A Sを評価基準値とした。
②④ 主軸（ギヤ部）	主軸とケーシングの接触により回転機能、移送機能が阻害されるという観点から、主ねじとスリーブのクリアランスを評価基準値とした。
② 主軸	回転機能の確保の観点から、主軸の変形を弾性範囲内に留めるようIII _A Sを評価基準値とした。
⑤ 軸受	回転機能の確保の観点から、メーカーが推奨する許容面圧を評価基準とした。
⑥ 電動機	回転機能、移送機能の確保の観点から、水平方向はJ E A G 4601に記載の電動機（横形ころがり軸受機）の機能確認済加速度である4.7[G]、鉛直方向は1.0[G]を評価基準とした。
⑨ 逃がし弁	移送機能の確保の観点から、水平方向はJ E A G 4601に記載の安全弁の機能確認済加速度である5.0[G]、鉛直方向及び軸方向は1.0[G]を評価基準とした。（注1）

（注1）

逃がし弁の機能確認済加速度は以下の考えで定めた。

機能確認済加速度は、J E A G 4601 の表 3.5.10-8「弁駆動部の機能確認済加速度」に定められた安全弁のうち、最も小さいPWR加圧器安全弁の5.0[G]を参考に適用する（第14表）。

第14表 J E A G 4601 で定める弁駆動部の機能確認済加速度

種別	弁型式		機能確認済加速度[G]
特殊弁	安全弁	BWR主蒸気逃がし安全弁	9.6
		PWR加圧器安全弁	5.0
		PWR主蒸気安全弁	10.0

J E A G 4601 に定められた安全弁とギヤ式ポンプの逃がし弁の構造は第15表に示すとおりであり、両者の構造は以下の通り同等であるため、J E A G 4601 に定められた安全弁の機能確認済加速度が適用可能と考える。

- 構造はシート部を構成する弁座（本体）と弁体、圧力バウンダリとなる本体とふたにより構成される。

- 内部流体圧力と、ばねによる弁体押付け力との釣り合いにより開閉動作を行う。
- J E A G 4601 に記載の安全弁の例として口径 200A 以下と記載されていることに対し、ギヤ式ポンプ逃がし弁のポンプとの取り付け部の口径はすべて 200A 以下となっている。

第 15 表 J E A G 4601 で定める安全弁とギヤ式ポンプ逃がし弁の構造比較

J E A G 4601			ギヤ式ポンプ 逃がし弁
PWR 加圧器安全弁	PWR 主蒸気安全弁	BWR 主蒸気逃がし安全弁	
<p>調整ボルト ばね押え ばね 約1200 リング部 弁体円周部 バルブガイド ふた 本体 弁体 弁座 311 330</p>	<p>約1600 ふた 弁体 本体 弁座 340 240</p>		<p>ふた ばね 本体 弁体</p>

第16表 緊急時対策所用発電機給油ポンプ 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価
①-1 基礎ボルト	応力	引張	6 MPa	475 MPa	○
		せん断	5 MPa	366 MPa	○
①-2 ポンプ取付ボルト	応力	引張	12 MPa	205 MPa	○
		せん断	2 MPa	157 MPa	○
②④ 主軸 (ギヤ部)	変位	—			○
② 主軸	応力	組合せ	4 MPa	858 MPa	○
⑤ 軸受	面圧	—	1 MPa		○
⑥ 電動機	加速度	水平	$1.2 \times 9.8\text{m/s}^2$	$4.7 \times 9.8\text{m/s}^2$	○
		鉛直	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○
⑨ 逃がし弁	加速度	水平	$1.2 \times 9.8\text{m/s}^2$	$5.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○
		鉛直	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	$1.0 \times 9.8\text{m/s}^2$	○

4. まとめ

新たな検討が必要な設備について、地震時要因分析を行い、基本的な機構造が類似している機種／型式に対する耐特委での検討を参考に、型式による構造の違いを踏まえた上で地震時異常要因分析を行い、評価項目の抽出を行った。また、抽出した項目について評価を行い、機能が喪失することがないことを確認した。

評価用加速度が機能確認済加速度を超えるため詳細検討が必要な設備の動的機能維持評価について（立形ポンプ）

1. はじめに

本資料は、残留熱除去系海水系ポンプ、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価における詳細検討についてまとめたものである。

2. 動的機能維持の評価方針

動的機能維持評価の結果、表 1 に示すとおり、残留熱除去系海水系ポンプ、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプについて、評価用加速度が機能確認済加速度を超えるため、詳細検討が必要となる。

動的機能の評価においては、J E A G 4601 及び耐特委報告書「動的機器の地震時機能維持評価に関する調査報告書」（昭和 6 1 年 1 2 月）において、対象機種ごとに、現実的地震応答のレベルでの異常のみならず、破壊に至る様な過剰な状態を念頭に地震時に考え得る異常要因を抽出し、その分析により動的機能上の評価点を検討し、動的機能維持を評価する際に確認すべき項目として、基本評価項目を摘出している。

そのため、評価用加速度が機能確認済加速度を超える設備の機能維持評価については、J E A G 4601 及び耐特委報告書により選定された基本評価項目に基づき、動的機能維持評価として、詳細検討を実施する。

表 1 評価用加速度と機能確認済加速度の比較

解析実施中につき
見直し予定

機器	評価結果					
	水平(G)			鉛直(G)		
	評価用 加速度 (G)	機能 確認済 加速度 (G) ※1	裕度	評価用 加速度 (G)	機能 確認済 加速度 (G) ※2	裕度
残留熱除去系 海水系ポンプ	0.57	10.0	17.54	2.22	1.0	0.45
非常用ディーゼル発電機 用海水ポンプ	0.57	10.0	17.54	2.22	1.0	0.45
高圧炉心スプレイ系 ディーゼル発電機用 海水ポンプ	0.57	10.0	17.54	2.22	1.0	0.45

※1 J E A G 4601 より引用。

※2 1.0G は、機器一般の浮き上がりの目安として設定したもの。

耐専（原子力発電耐震設計専門部会）において、鉛直地震動に対する検討として、改めて鉛直地震動に注意して異常要因分析結果を見直しても、新たに加える損傷モードはなく、既往の水平地震動を前提とした評価の考え方が適用できることが確認されている。

3. 立形斜流ポンプの基本評価項目

残留熱除去系海水系ポンプは容量 885.7 m³/h の立形斜流ポンプ、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプは容量 272.6 m³/h の立形斜流ポンプ、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプは容量 232.8 m³/h の立形斜流ポンプであり、J E A G 4601 記載の適用機種範囲に該当する設備である。残留熱除去系海水系ポンプを代表として構造の概要を図 1 に示す。

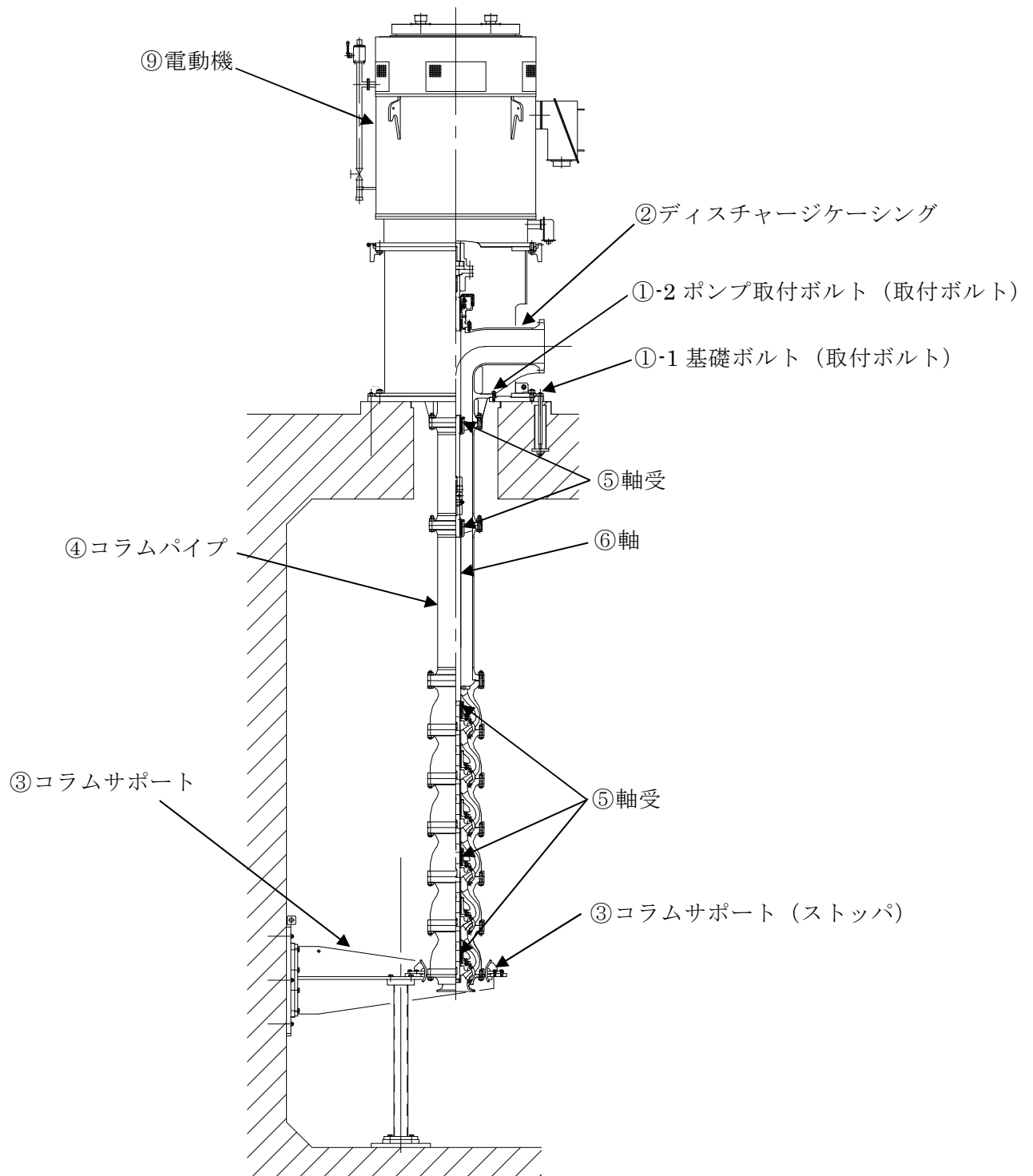


図1 残留熱除去系海水系ポンプの構造図

耐特委における立形ポンプの地震時異常要因分析結果を図2に示す。

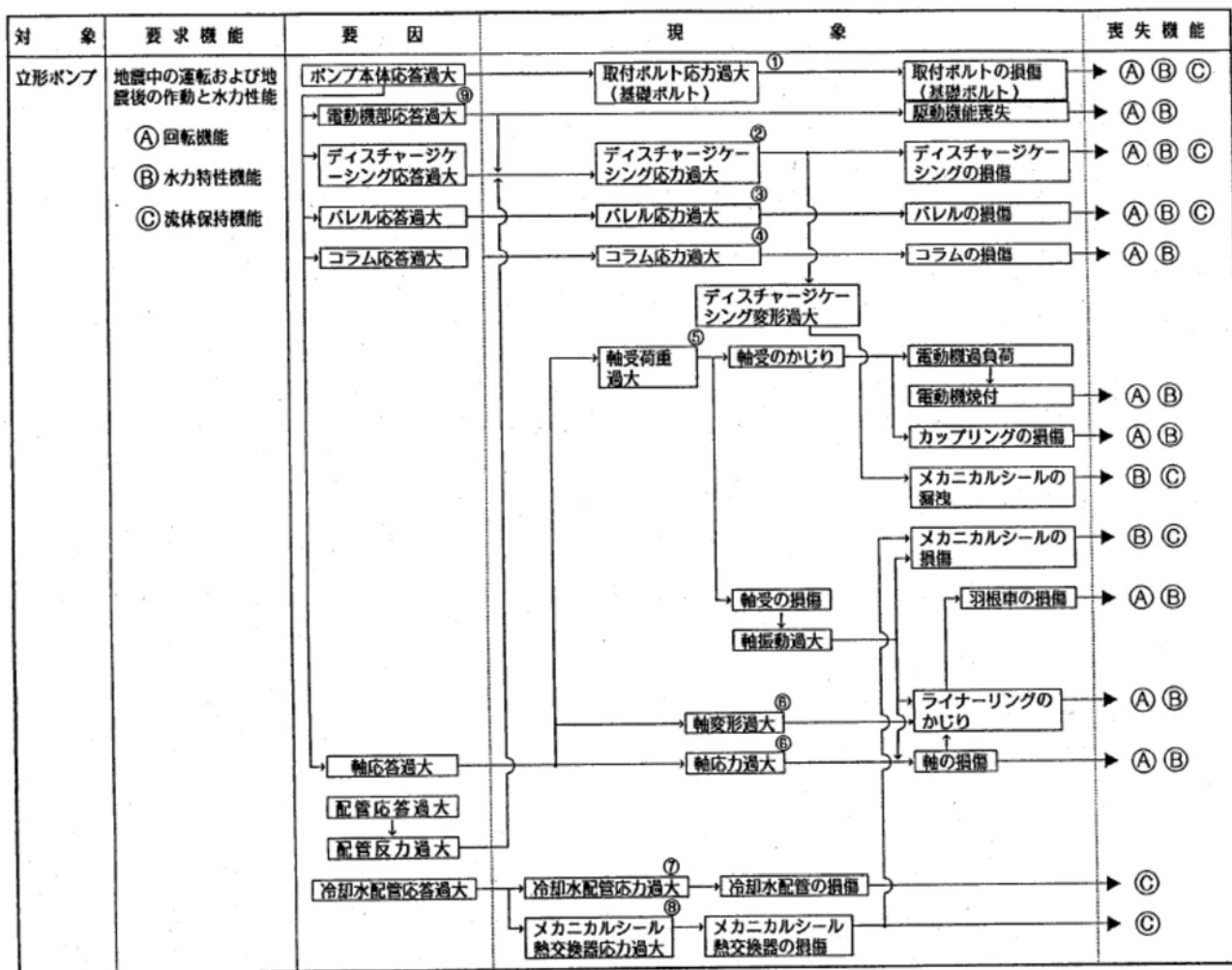


図2 立形ポンプの地震時異常要因モード図（耐特委）

耐特委報告書においては異常要因モードに基づき評価項目が以下①～⑨の項目のとおり抽出され、①～⑨の評価項目について評価することで、回転機能、水力特性機能及び流体保持機能が確認できるとされている。

これは、機能確認済加速度を超える地震加速度レベルにおいても、これらの①～⑨について全て評価基準値以下に収まっていれば、動的機能が維持できると解される。本項では、上記考え方に基づき各基本評価項目における機能喪失にいたる現象と、機能確認済加速度を越えた場合の評価の考え方を記述する。

①取付ボルトの健全性

立形ポンプの応答が過大となり、立形ポンプをポンプベースに固定しているポンプ取付ボルト、ポンプベースを基礎に固定している基礎ボルトに発生する応力が過大となり損傷に至り、回転機能、水力特性機能及び流体保持機能が喪失する。

②ディスチャージケーシングの健全性

ディスチャージケーシングの応力が過大となり、損傷又は変形過大となることにより回転機能、水力特性機能及び流体保持機能が喪失する。

③バレルの健全性

バレルの応力が過大となり、損傷することにより回転機能、水力特性機能及び流体保持機能が喪失する。

(注) 当該機器にバレルはないが、コラムサポート (ストッパ) あり。

④コラムパイプの健全性

コラムパイプの応力が過大となり、損傷することにより回転機能及び水力特性機能が喪失する。

⑤軸受の健全性

軸受荷重が過大となり、軸受のかじり又は損傷することにより回転機能、水力特性機能及び流体保持機能が喪失する。

⑥軸の健全性

軸変形が過大となり、ライナーリングがかじることにより回転機能及び水力特性機能が喪失する。また、軸応力が過大となり、軸が損傷することにより回転機能及び水力特性機能が喪失する。

⑦冷却水配管の健全性

冷却水配管応力が過大となり、冷却水配管が損傷することにより流体保持機能が喪失する。

(注) 当該機器に冷却水配管はない。

⑧メカニカルシール熱交換器の健全性

メカニカルシール熱交換器応力が過大となり、メカニカルシール熱交換器が損傷することにより流体保持機能が喪失する。

(注) 当該機器にメカニカルシール熱交換器はない。

⑨電動機の健全性

電動機部の応答が過大となり、駆動機能が喪失することにより回転機能、水力特性機能及び流体保持機能が喪失する。また、電動機部の応答が過大となり、ディスチャージケーシングが損傷することにより回転機能及び水力特性機能が喪失する。

(注) 当該機器の電動機はディスチャージケーシングに支持されていない。

4. J E A G 4601, 耐特委報告書及び耐専報告書後の知見について

平成 13 年の耐専報告書後の知見として、平成 24 年度電共研「動的機器の地震時機能維持の耐震余裕に関する検討」にて、機能確認済加速度の引き上げを目的として代表機器を対象に機能維持評価を行っている。立形ポンプについては表 2 に示すとおり、各項目について解析による評価を実施している。表 3 に評価の概要を示す。なお、本評価については、日本電気協会 原子力規格委員会において審議され、JEAC4601-2015 に取り込まれている。

表 2 平成 24 年度電共研 立形ポンプの機能維持評価結果 (JEAC4601-2015 抜粋)

参表 4.11.1-2 立形ポンプの機能維持評価結果

基本評価項目	① 過剰なトルク取付ボルト	② ディスチャージケーシング	③ バレル (ピット/バレル形) 揺れ止め台 コラムサポート (立形斜流)	④ コラムパイプ (ピット/バレル形、立形斜流) ケーシング (立形階段床型)	⑤ 軸受	⑥ 軸	⑦ 冷却水配管	⑧ メカニカルシール換替	⑨ 電動機	水力性能	
											地震力が寄与する方向
評価方法	強度評価側にて耐震設計を実施	水平・斜流	水平・斜流	水平・斜流	水平	水平・斜流	水平・斜流	水平・斜流	水平・斜流	右記項目での成果を基に、左記項目は右記項目により水力性能を代替評価	
	1682m ³ /h BWR 機器燃焼去水ポンプ	↓	2.9	4.8	1.1	4.8	↓	↓	↓		↓
	立形斜流ポンプ	↓	3.8	2.3	1.0	3.1	↓	↓	↓		↓
1180m ³ /h PWR 格納容器内部スプレイポンプ	↓	—	—	1.2	2.9	1.0	↓	↓	↓	↓	
評価結果	↓	↓	許容値を満足している。	許容値を満足している。	許容値を満足している。	許容値を満足している。	↓	↓	↓	左記各項の評価により性能も維持されたと判定	
代表評価項目 (O印)	○	—	○ (応力)	○ (応力)	○ (面圧)	—	—	—	○	左記代表項目の評価結果により水力性能維持を判定	
代表評価項目選定の考え方	支持部の機能確認として重要である。	設計耐力が確認されており別途評価	回転機能、水力特性に依る代表的な項目で余裕度小である。	回転機能、水力特性に依る代表的な項目で余裕度小である。	回転機能、水力特性に依る代表的な項目で余裕度小である。	—	—	—	電動機の型式により構造差異がある。電動機は必ず評価する。		

(注 1) 余裕度 = (許容値 - 通常発生値) / 地震による発生値

表 3 平成 24 年度電共研 立形ポンプ 動的機能維持評価概要

評価項目	評価内容
①基礎ボルト 取付ボルト	強度評価側にて耐震設計を実施
②ディスチャージケーシング	ノズル許容荷重以下になるよう配管設計を実施
③コラムサポート	解析により応力を評価
④コラムパイプ	解析により応力を評価
⑤軸受	解析により荷重を評価
⑥軸	解析により応力を評価
⑦冷却水配管	配管系として耐震設計を実施
⑧メカニカルシール熱交換器	静的機器として耐震設計を実施
⑨電動機	別途電動機側にて評価

5. 立形ポンプ評価概要

機能維持評価については、J E A G 4601 及び耐特委報告書により動的機能維持評価上、評価が必要な評価項目が選定されており、その評価項目に基づき、計算書対象とする動的機能維持確認の基本評価項目の考え方を示す。

①基礎ボルト，ポンプ取付ボルト

立形ポンプはポンプベースにポンプ取付ボルトを用いて固定されており，ポンプベースは基礎に基礎ボルトを用いて固定されており，地震時の荷重は当該ボルトに作用し，有意な荷重がかかることから評価項目として選定する。

②ディスチャージケーシング

ディスチャージケーシングはノズル荷重が作用するが，ノズル許容荷重以下になるよう配管設計を実施するため，立形ポンプの計算書の評価対象外とする。

③ストッパ（当該機器にバレルはないためコラムサポート（ストッパ）を評価）

ストッパはコラムをサポートしており，地震時はコラムの振れ止めとして荷重を受ける。ストッパは取付ボルトを用いて固定されており，地震時の荷重は当該ボルトに作用し，有意な荷重がかかることから評価項目として選定する。

④コラムパイプ

回転機能，水力特性機能の観点から動的機能維持の評価項目として選定する。

⑤軸受

回転機能，水力特性機能の観点から動的機能維持の評価項目として選定する。

⑥軸

回転機能，水力特性機能の観点から動的機能維持の評価項目として選定する。

⑦冷却水配管

当該機器に冷却水配管はないため評価対象外とする。

⑧メカニカルシール熱交換器

当該機器にメカニカルシール熱交換器はないため評価対象外とする。

⑨電動機

回転機能，水力特性機能の観点から動的機能維持の評価項目として選定する。

以上から，立形ポンプにおいて抽出される動的機能維持の基本評価項目のうち，計別紙 2-9

算書の評価対象とするものは以下の通りである※。

※ 表4においては、①～⑨の全ての評価項目を記載し、以下の評価項目に該当するものは評価内容を示し、それ以外の項目については評価省略理由を記載する。

①基礎ボルト，ポンプ取付ボルト

③ストッパ（取付ボルト）

④コラムパイプ

⑤軸受

⑥軸

⑨電動機

上記評価項目に基づき、表4のとおり機能維持評価を実施している。

評価項目における評価基準値の説明を表5に、また各設備における評価部位については図3, 4, 5に示す。

以上の検討に基づく評価結果を表6, 7, 8に示す。

表 4 動的機能維持評価内容

評価項目	評価内容	計算書対象 (○：計算書対象， －：計算書省略)
① 基礎ボルト，ポンプ取付ボルト	多質点はりモデルによる海水ポンプの応答解析結果を用い，材料力学等の公式により，基礎ボルト及びポンプ取付ボルトの発生応力を評価	○
② ディスチャージケーシング	ノズル許容荷重以下になるよう配管設計を実施するため，立形ポンプとして計算書は省略。	－
③ ストップ（取付ボルト）	多質点はりモデルによる海水ポンプの応答解析結果を用い，材料力学等の公式により，取付ボルトの発生応力を評価	○
④ コラムパイプ	多質点はりモデルによる応答解析結果を用い，材料力学等の公式によりコラムパイプの発生応力を評価	○
⑤ 軸受	多質点はりモデルによる応答解析結果を用い，軸受の発生荷重を評価。 なお，軸受部の発生荷重は，J E A G 4601 に従い解析にて算出した値に係数 4.3 を乗じた値とする。	○
⑥ 軸	多質点はりモデルによる応答解析結果を用い，材料力学等の公式により軸の発生応力を評価	○
⑦ 冷却水配管	当該機器に冷却水配管なし。	該当部無し
⑧ メカニカルシール熱交換器	当該機器にメカニカルシール熱交換器なし。	該当部無し
⑨ 電動機	別紙－3 参照。	○

表 5 (1) 評価基準値の設定

評価項目	評価基準値の設定
<p>①基礎ボルト， ポンプ取付ボルト</p> <p>③ストッパ（取付ボルト）</p> <p>④コラムパイプ</p>	<p>コラムパイプおよびポンプ取付ボルトは，軸や軸受といった構成部品を固定・支持しており，これらが大きな変形を起こさなければ，構成品の相互の位置関係は維持され，立形ポンプの地震時の機能は確保される。</p> <p>支持機能の確保の観点から，告示 501 号の運転状態Ⅳを基本として，通常材料の実降伏点が設計値に対し余裕があることを考慮し，概ね降伏点以下と同等とした値としてⅣ_AS を評価基準値とした。</p>
<p>⑥軸</p>	<p>回転子については，電動機で発生させた回転トルクを羽根車に伝える。</p> <p>回転機能の確保の観点から，軸の変形を弾性範囲内に留めるようⅢ_AS を評価基準値としている。軸の発生応力を弾性範囲内に留めることで，地震後の軸の応力過大による損傷はないことから，作動不良には至らず，軸の機能は確保される。</p> <p>また，地震による軸の変形は，通常運転時より大きくなるため，弾性範囲内でも軸に取り付ける羽根車とケーシングリングの接触により，回転機能及び水力特性に影響を与える可能性があるが，モデル解析において回転体とコラムパイプの相対変位が，羽根車とケーシングリングのクリアランス以下であることを確認することで，回転機能及び水力特性に影響を与える可能性はない。</p>

表 5 (2) 評価基準値の設定

評価項目	評価基準値の設定
⑤軸受	<p>当該ポンプの軸は水中軸受で支持されており、水中軸受は軸と軸受との間に水膜を形成することで回転機能を維持しているため、運転中に軸と軸受が接触しない水膜が保持されれば、回転機能、支持機能が維持される。</p> <p>軸受部では、軸の回転により軸と軸受との間に水膜が形成され、水压により軸と軸受とが直接接触しない状態が保持される。この状態で地震力等の外荷重が作用し水膜が押しつぶされると軸と軸受とが直接接触し損傷に至る恐れがあるが、非常に瞬時の事象のため、水切れによる影響は少なく、軸受に掛かる荷重が軸受の強度にとってより重要となる。そのため、軸受メーカーが推奨する許容面圧と軸受径及び軸受長さから求まる荷重を評価基準値（許容荷重）とした。</p>
⑨電動機	別紙－3 参照。

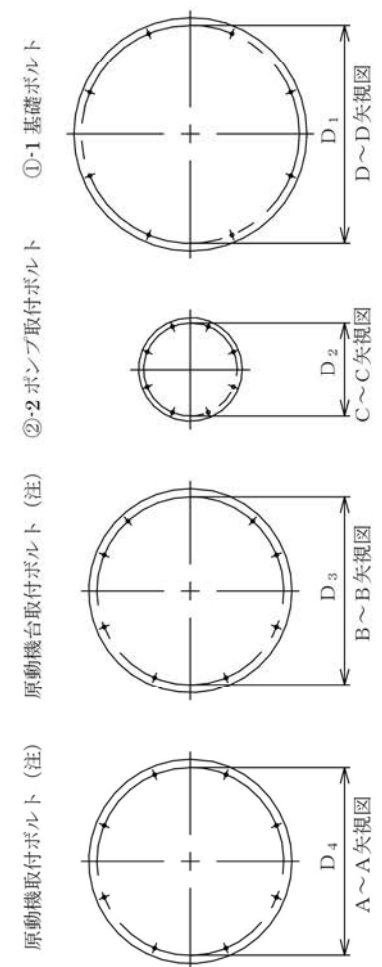
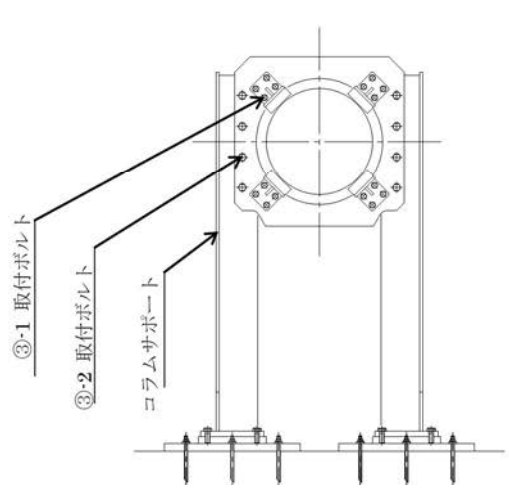
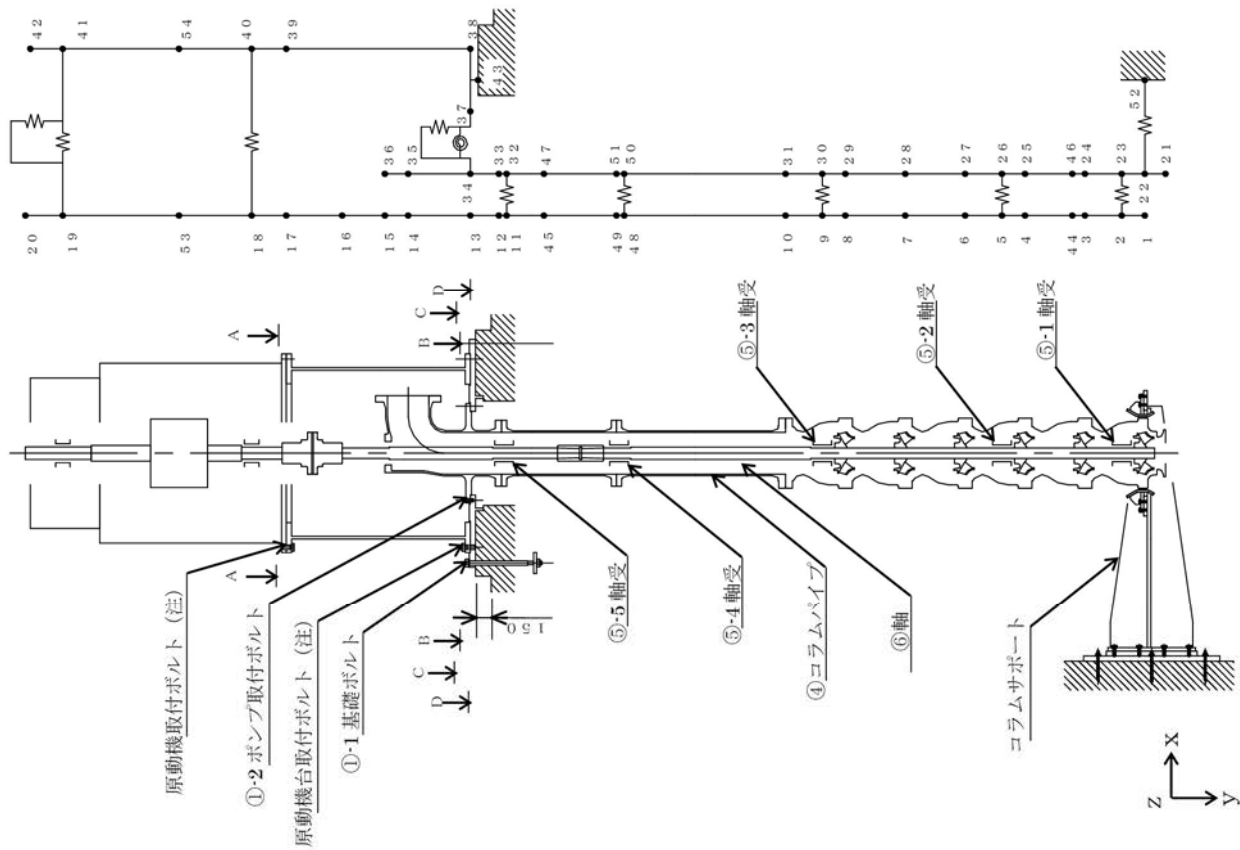


図3 残留熱除去系海水系ポンプ 評価部位

(注) 原動機取付ボルト, 原動機台取付ボルトについては別紙-3 参照

表 6 残留熱除去系海水系ポンプ 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価	
①-1 基礎ボルト	応力	引張	94 MPa	225 MPa	○	
		せん断	16 MPa	173 MPa	○	
①-2 ポンプ取付ボルト	応力	引張	148 MPa	153 MPa	○	
		せん断	26 MPa	118 MPa	○	
③-1 ストップ (取付ボルト)	応力	せん断	47 MPa	118 MPa	○	
③-2 ストップ (取付ボルト)	応力	せん断	15 MPa	118 MPa	○	
④コラムパイプ	応力	一次一般膜応力	118 MPa	283 MPa	○	
⑤軸受	荷重	⑤-1 軸受	4.626×10^3 N		○	
		⑤-2 軸受	2.613×10^4 N		○	
		⑤-3 軸受	3.469×10^4 N		○	
		⑤-4 軸受	下側		2.659×10^3 N	○
			上側		2.659×10^3 N	○
		⑤-5 軸受	下側		1.771×10^4 N	○
上側	1.771×10^4 N		○			
⑥軸	応力	追而	追而	追而	追而	
	変位	—	追而	追而	追而	

解析実施中につき
見直し予定

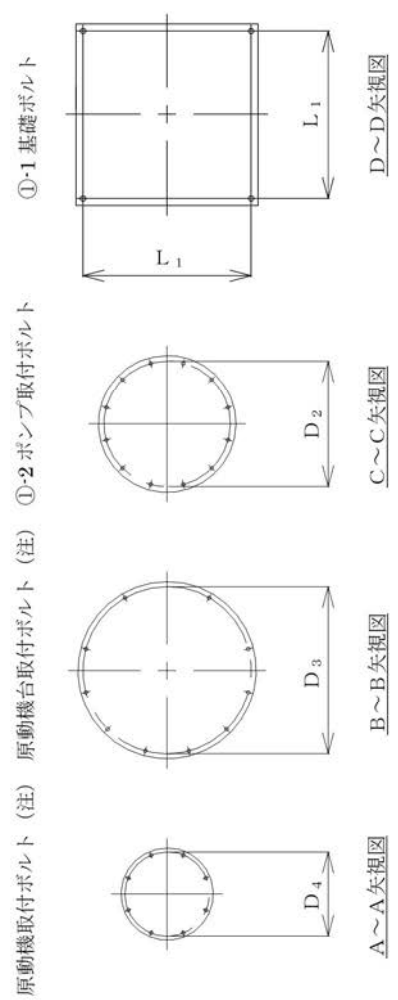
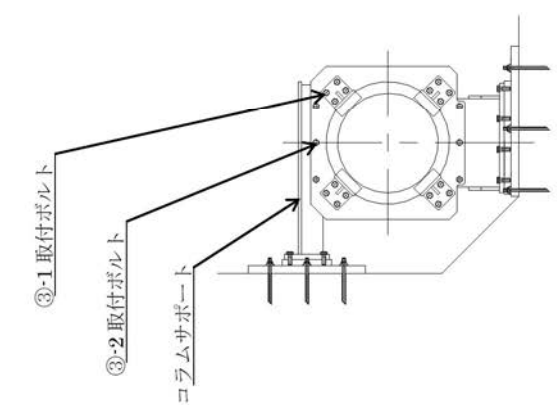
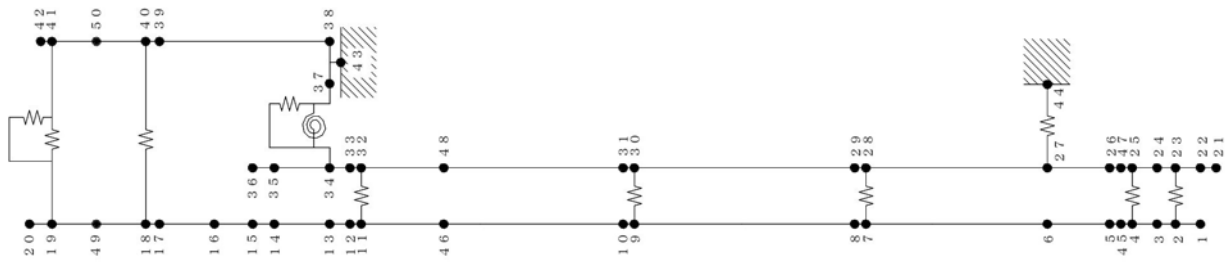
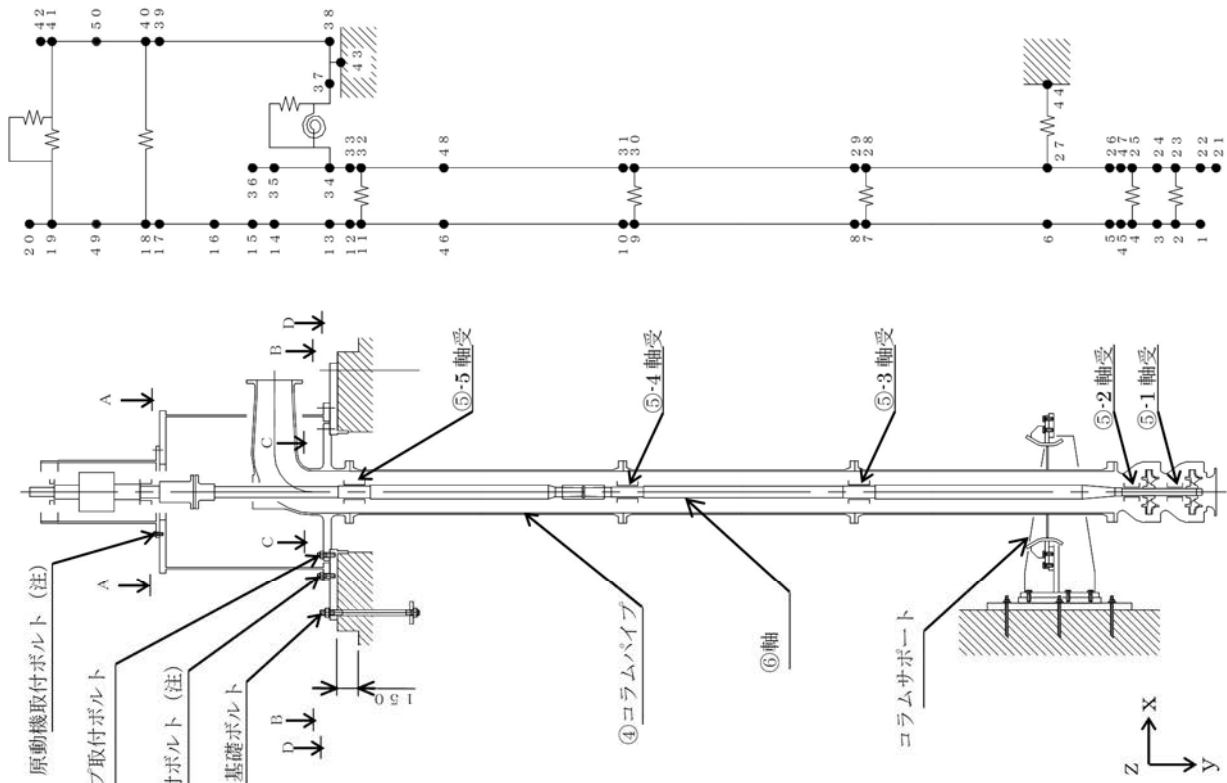


図 4 非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ 評価部位

(注) 原動機取付ボルト, 原動機台取付ボルトについては別紙-3 参照

表 7 非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価	
①-1 基礎ボルト	応力	引張	28 MPa	205 MPa	○	
		せん断	7 MPa	158 MPa	○	
①-2 ポンプ取付ボルト	応力	引張	11 MPa	153 MPa	○	
		せん断	2 MPa	118 MPa	○	
③-1 ストップ (取付ボルト)	応力	せん断	6 MPa	118 MPa	○	
③-2 ストップ (取付ボルト)	応力	せん断	4 MPa	118 MPa	○	
④コラムパイプ	応力	一次一般膜応力	22 MPa	283 MPa	○	
⑤軸受	荷重	⑤-1 軸受	434.3 N		○	
		⑤-2 軸受	3.472×10^3 N		○	
		⑤-3 軸受	下側		3.452×10^3 N	○
			上側		3.452×10^3 N	○
		⑤-4 軸受	下側		2.259×10^3 N	○
			上側		2.259×10^3 N	○
		⑤-5 軸受	下側		4.141×10^3 N	○
			上側		4.141×10^3 N	○
⑥軸	応力	追而	追而	追而	追而	
	変位	—	追而	追而	追而	

解析実施中につき
見直し予定

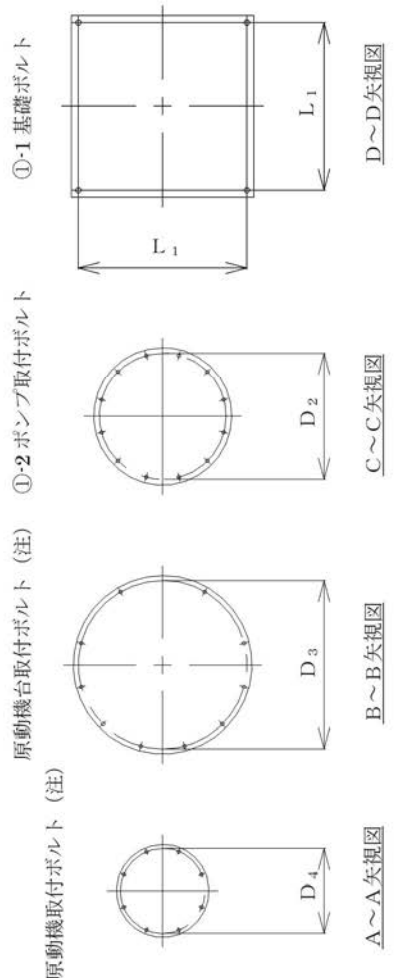
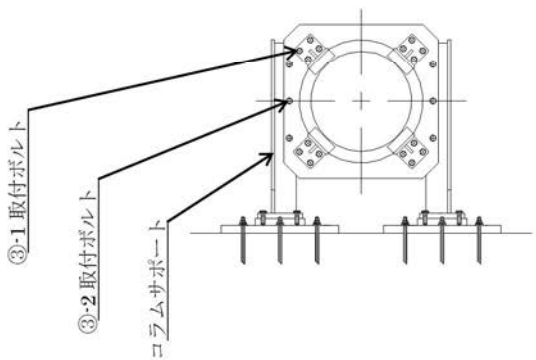
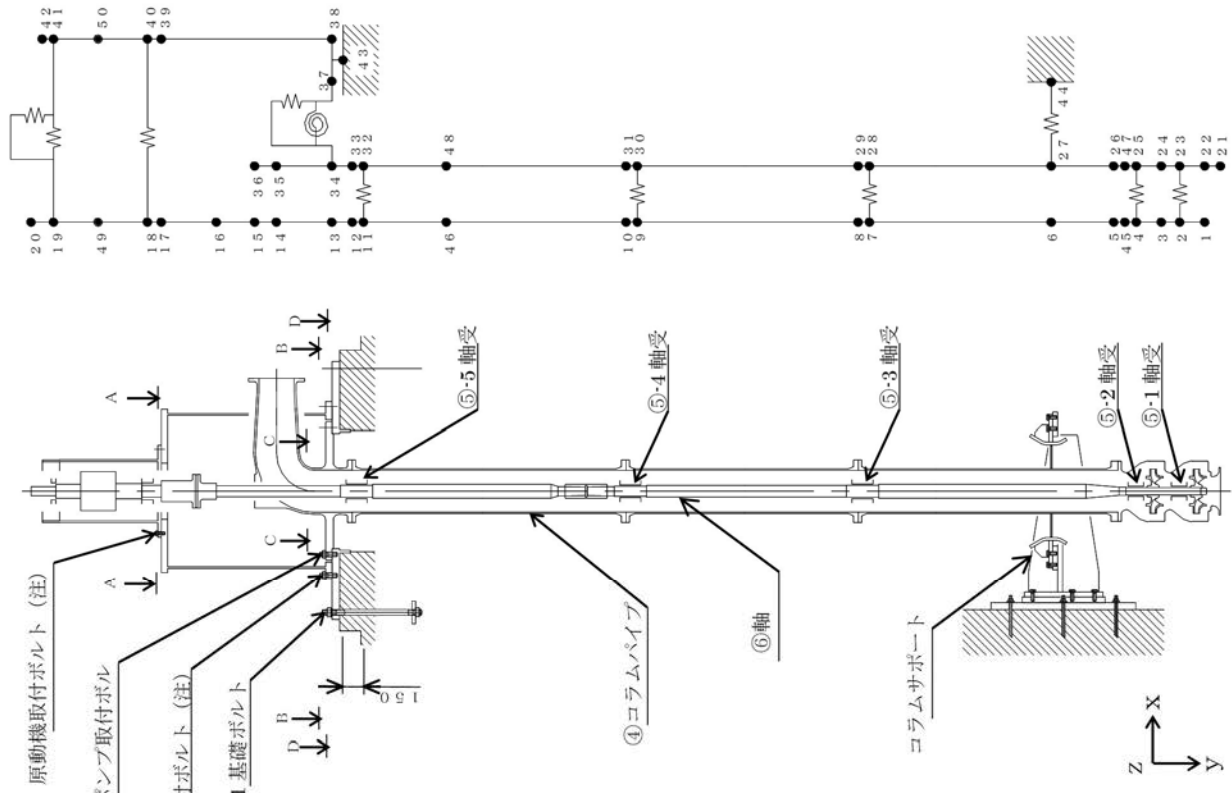


図5 高圧炉スプレイ系デューセル発電機用海水ポンプ 評価部位
 (注) 原動機取付ボルト, 原動機台取付ボルトについては別紙-3 参照

表 8 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価	
①-1 基礎ボルト	応力	引張	28 MPa	205 MPa	○	
		せん断	7 MPa	158 MPa	○	
①-2 ポンプ取付ボルト	応力	引張	11 MPa	153 MPa	○	
		せん断	2 MPa	118 MPa	○	
③-1 ストップ (取付ボルト)	応力	せん断	6 MPa	118 MPa	○	
③-2 ストップ (取付ボルト)	応力	せん断	4 MPa	118 MPa	○	
④コラムパイプ	応力	一次一般膜応力	22 MPa	283 MPa	○	
⑤軸受	荷重	⑤-1 軸受		434.3 N		○
		⑤-2 軸受		3.472×10^3 N		○
		⑤-3 軸受	下側	3.452×10^3 N		○
			上側	3.452×10^3 N		○
		⑤-4 軸受	下側	2.259×10^3 N		○
			上側	2.259×10^3 N		○
		⑤-5 軸受	下側	4.141×10^3 N		○
			上側	4.141×10^3 N		○
⑥軸	応力	追而	追而	追而	追而	
	変位	—	追而	追而	追而	

解析実施中につき
見直し予定

6. 動的機能維持確認結果について

異常要因分析に基づき抽出された評価項目に対し、機能維持詳細評価を実施した結果を以下に示す。

①基礎ボルト，取付ボルト

応力評価の結果，基礎ボルト，取付ボルトは許容値を満足しており，基礎ボルト，取付ボルトが損傷することはないこと，回転機能，水力特性機能及び流体保持機能が喪失することはないことを確認した。

②ディスチャージケーシング

ノズル許容荷重以下になるよう配管設計を実施しており，ディスチャージケーシングが損傷することはないこと，回転機能，水力特性機能及び流体保持機能が喪失することはないことを確認した。

③ストッパ（当該機器にバレルはないためストッパを評価）

応力評価の結果，ストッパ取付ボルトは許容値を満足しており，ストッパ取付ボルトが損傷することはないこと，回転機能，水力特性機能及び流体保持機能が喪失することはないことを確認した。

④コラムパイプ

応力評価の結果，コラムパイプは許容値を満足しており，コラムパイプが損傷することはないこと，回転機能及び水力特性機能が喪失することはないことを確認した。

⑤軸受

荷重評価の結果，軸受は許容値を満足しており，軸受が損傷することはないこと，回転機能及び水力特性機能が喪失することはないことを確認した。

⑥軸

追而

⑦冷却水配管

当該機器に冷却水配管はないため評価対象外とする。

⑧メカニカルシール熱交換器

当該機器にメカニカルシール熱交換器はないため評価対象外とする。

⑨電動機

別紙—3 参照。

以上、各評価項目について地震時の健全性を確認出来たことから、残留熱除去系海水系ポンプ、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプの要求機能は喪失に至ることはなく、機能確認済加速度を超えた評価用加速度（水平：0.57G、鉛直：2.22G）において当該設備の動的機能維持を確認することができた。

評価用加速度が機能確認済加速度を超えるため詳細検討が必要な設備の動的機能維持評価について（電動機）

1. はじめに

本資料は、残留熱除去系海水系ポンプ電動機、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ電動機及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ電動機の動的機能維持評価における詳細評価についてまとめたものである。

2. 動的機能維持の評価方針

動的機能維持評価の結果、表 1 に示すとおり、残留熱除去系海水系ポンプ、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプの電動機について、評価用加速度が機能確認済加速度を超えるため、詳細検討が必要となる。

動的機能の評価においては、J E A G 4601 及び耐特委報告書「動的機器の地震時機能維持評価に関する調査報告書」（昭和 61 年 12 月）において、対象機種ごとに、現実的地震応答のレベルでの異常のみならず、破壊に至る様な過剰な状態を念頭に地震時に考え得る異常要因を抽出し、その分析により動的機能上の評価点を検討し、動的機能維持を評価する際に確認すべき項目として、基本評価項目を抽出している。

そのため、評価用加速度が機能確認済加速度を超える設備の機能維持評価については、J E A G 4601 及び耐特委報告書により選定された基本評価項目に基づき、動的機能維持評価として、詳細検討を実施する。

解析実施中につき
見直し予定

表1 評価用加速度と機能確認済加速度の比較

機器	評価結果					
	水平(G)			鉛直(G)		
	評価用 加速度 (G)	機能 確認済 加速度 (g) ※1	裕度	評価用 加速度 (G)	機能 確認済 加速度 (G) ※2	裕度
残留熱除去系 海水系ポンプ電動機	0.57	2.5	4.38	2.22	1.0	0.45
非常用ディーゼル発電 機用海水ポンプ電動機	0.57	2.5	4.38	2.22	1.0	0.45
高圧炉心スプレイ系 ディーゼル発電機用 海水ポンプ電動機	0.57	2.5	4.38	2.22	1.0	0.45

※1 J E A G 4601 より引用。

※2 1.0G は、機器一般の浮き上がりの目安として設定したもの。

耐専（原子力発電耐震設計専門部会）において、鉛直地震動に対する検討として、改めて鉛直地震動に注意して異常要因分析結果を見直しても、新たに加える損傷モードはなく、既往の水平地震動を前提とした評価の考え方が適用できることが確認されている。今回の地震加速度レベルでは鉛直方向の機能確認済加速度を超える発生加速度が生じているが、2.以下では耐専での上記考え方に変わりはないことを確認する。

3. 電動機の基本評価項目

残留熱除去系海水系ポンプ電動機は出力 900kW の立形ころがり軸受電動機、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ電動機は出力 55kW の立形ころがり軸受電動機、高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ電動機は 55kW の立形ころがり軸受電動機であり、J E A G 4601 記載の適用機種範囲に該当する設備である。残留熱除去系海水系ポンプ用電動機を代表として構造の概要を図 1 に示す。

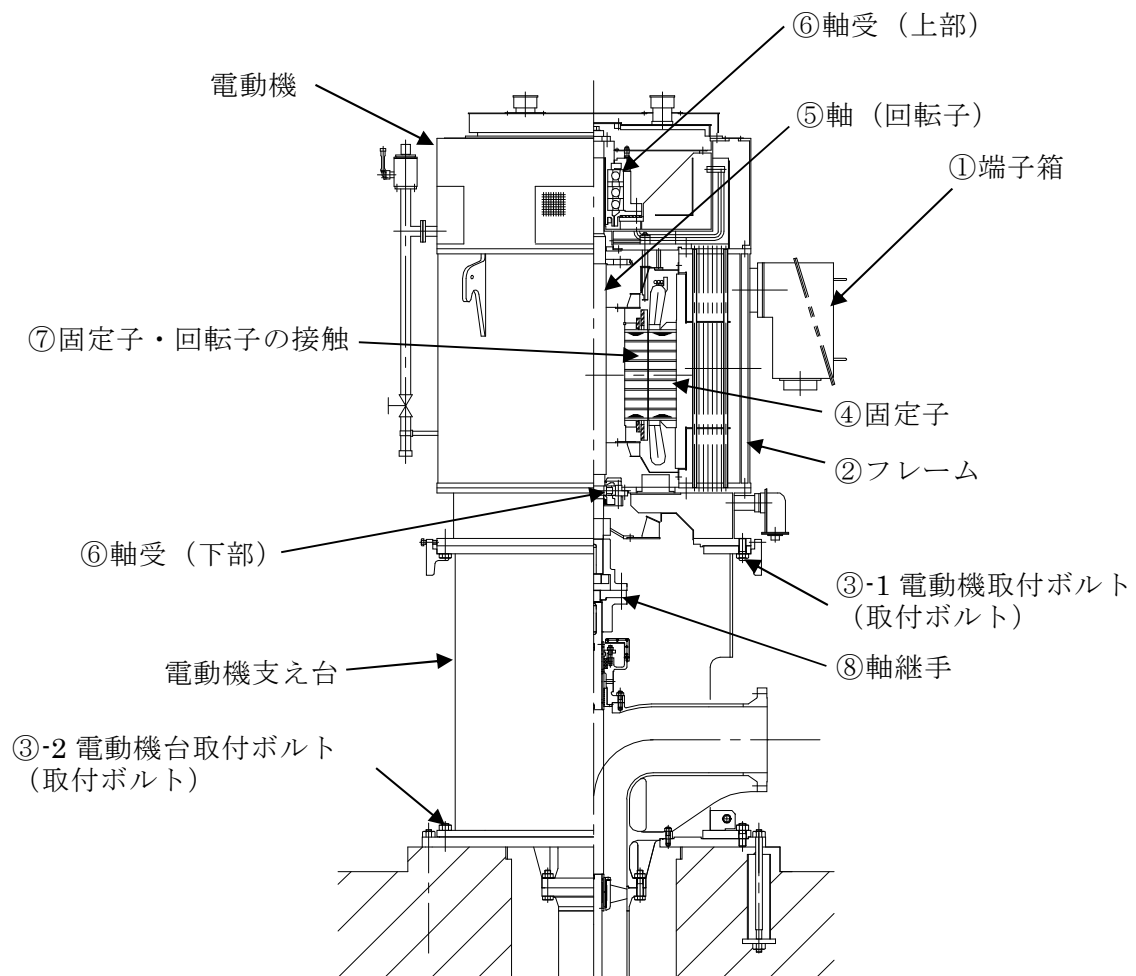


図1 残留熱除去系海水系ポンプ用電動機の構造図

耐特委における電動機の地震時異常要因分析結果を図2に示す。

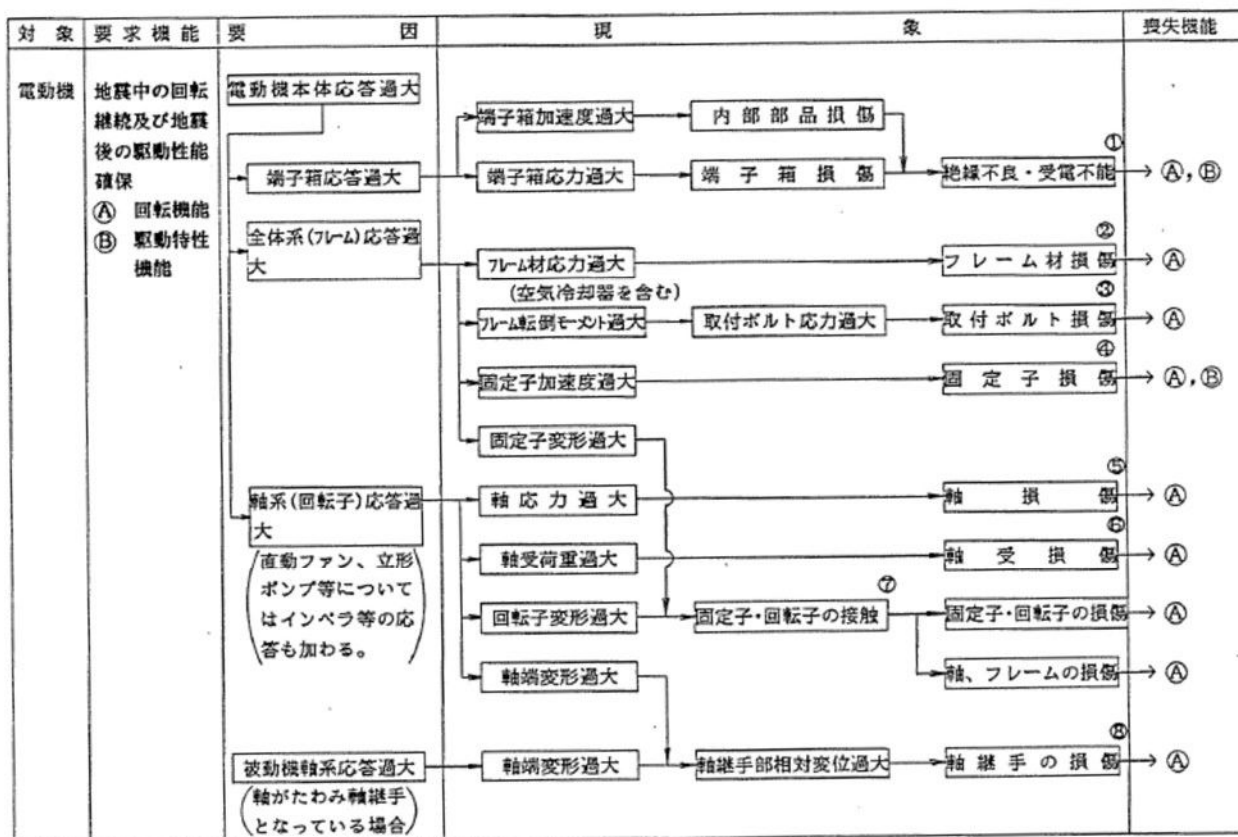


図2 電動機の地震時異常要因モード図 (耐特委)

耐特委報告書においては異常要因モードに基づき評価項目が以下①～⑧の項目のとおり抽出され、①～⑧の評価項目について評価することで、回転機能及び駆動特性機能が確認できるとされている。

これは、機能確認済加速度を超える地震加速度レベルにおいても、これらの①～⑧について全て評価基準値以下に収まっていれば、動的機能が維持できると解される。本項では、上記考え方に基づき各基本評価項目における機能喪失にいたる現象と、機能確認済加速度を越えた場合の評価の考え方を記述する。

なお、全評価項目の中で一つでも評価基準値を超えれば、当該機器は評価用加速度における動的機能維持が維持できないものとするが、各評価結果が概ね弾性域内に留まっており、各異常要因が複合し、新たな損傷モードが発生することはないと考えている。

①端子箱の健全性

端子箱の応答が過大となることにより、端子箱もしくは内部部品が損傷し、絶縁不良や受電不能になることにより回転機能及び駆動特性機能が喪失する。

②フレームの健全性

全体系（フレーム）の応答が過大となることにより、電動機構成部品の支持構造部材であるフレーム材の応力が過大となりフレームが損傷に至ることにより回転機能が喪失する。

③取付ボルトの健全性

電動機の応答が過大となって発生する転倒モーメントにより電動機を原動機台に固定している取付ボルトに発生する応力が過大となり損傷に至り、全体系が転倒することにより回転機能が喪失する。

④固定子の健全性

全体系の応答が過大となることにより、固定子自身に作用する加速度が過大となり固定子の損傷に至ることにより回転機能及び駆動特性機能が喪失する。

⑤軸の健全性

軸系（回転子）の応答が過大となることで軸応力が過大となり、軸が損傷することにより回転機能が喪失する。

⑥軸受の健全性

軸系（回転子）の応答が過大となることで軸受荷重が過大となり、軸受が損傷することで軸の回転が阻害され、回転機能が喪失する。

⑦固定子・回転子の接触

全体系（フレーム）の応答が過大となることによる固定子変形量の増大に加え、軸系（回転子）の応答が過大となることによる回転子変形量の増大により、固定子・回転子の接触が発生し、固定子・回転子が損傷することで回転機能が喪失する。

⑧軸継手の健全性

被駆動機（ポンプ）軸と電動機軸の相対変位が過大となり、軸継手が損傷することで被駆動機への回転運動の伝達が喪失する。

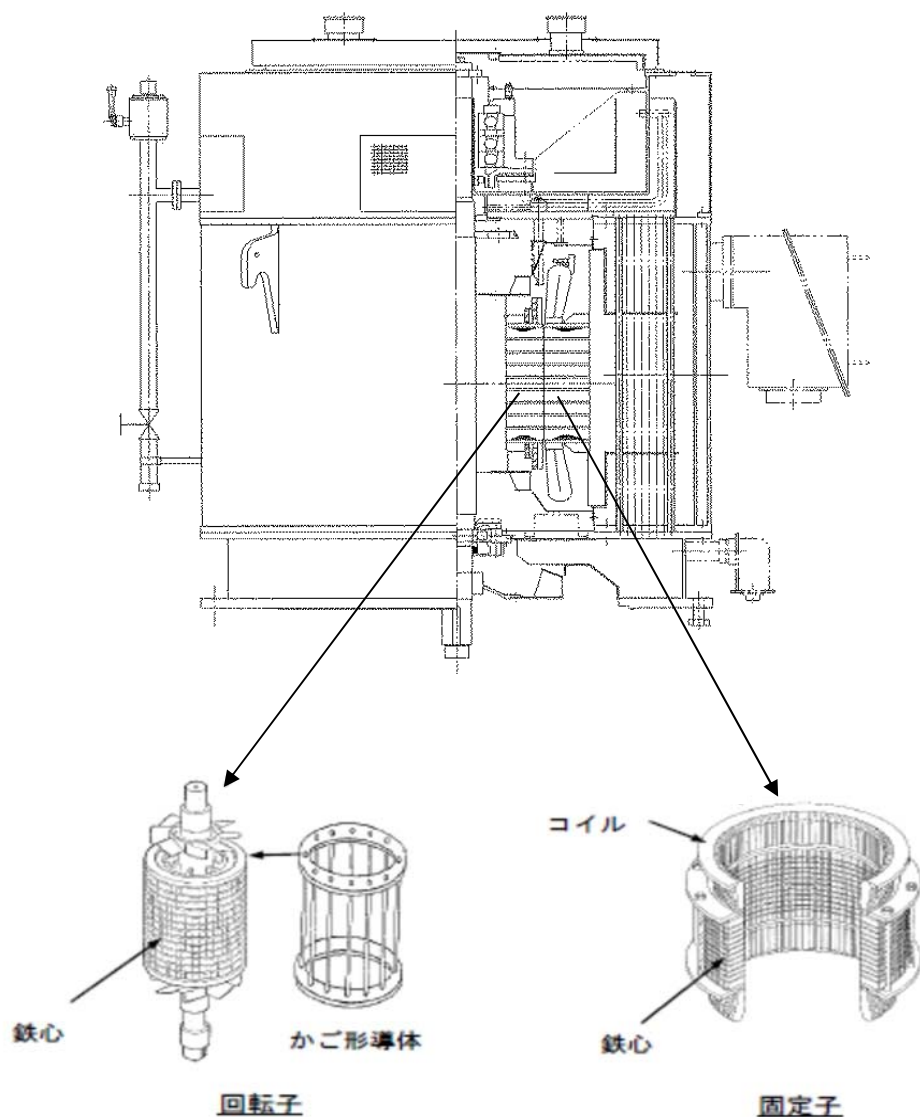


図3 東海第二発電所 海水ポンプ電動機の構造（立形ころがり軸受）

3. JEAG4601, 耐特委報告書及び耐専報告書後の知見について

平成13年の耐専報告書後の知見として、平成24年度電共研「動的機器の地震時機能維持の耐震余裕に関する検討」にて、機能確認済加速度の引き上げを目的として代表機器を対象に機能維持評価を行っている。電動機については表2に示すとおり、各項目について解析による評価を実施している。表3に評価の概要を示す。なお、本評価については、日本電気協会 原子力規格委員会において審議され、JEAC4601-2015に取り込まれている。

表 2 平成 24 年度電共研 電動機の機能維持評価結果 (JEA4601-2015 抜粋)

参考表 4.11.4-2 電動機の機能維持評価結果

基本評価項目	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	電気的特性	駆動性能
	端子箱	フレーム	取付ボルト 基礎ボルト	固定子	軸 (回転子)	軸受	固定子と回転子のクリアランス	軸継手		
地震力が与与する方向 評価方法 軸系が揺らぐ方向 軸系が揺らぐ方向 軸系が揺らぐ方向 軸系が揺らぐ方向	水平・鉛直	水平・鉛直	水平・鉛直	水平・鉛直	水平・鉛直	水平・鉛直	水平・鉛直	水平・鉛直	左記基本評価項目により 電気的特性を代替評価 左記基本評価項目により 駆動性能を代替評価	左記基本評価項目により 駆動性能を代替評価
	2.1	16.0	↓	15.3	9.4	2.0	11.3	↓		
	4.3	2.5	↓	10.3	10.0	2.0	9.2	↓		
	2.0	16.5	↓	9.2	5.3	7.1	3.5	↓		
2280kW 高圧炉心 スプレイス ポンプ用電動機	2.0	17.9	↓	5.1	5.8	2.8	2.4	↓	↓	↓
評価結果	許容応力を満足している。	許容応力を満足している。	許容応力を満足している。	許容応力を満足している。	許容応力を満足している。	許容応力を満足している。	許容応力を満足している。	許容応力を満足している。	左記評価結果より各電動機とも電気的特性及び駆動性能が維持されると判断する。	
代表評価項目 (○印)	—	—	○ [強度評価値にて耐震設計を実施]	—	—	—	—	○ [必要に応じて被駆動機器にて評価実施]	左記代表項目の評価結果により電気的特性及び駆動性能が維持されると判断する。	
代表評価項目 (○印)	—	—	○ [強度評価値にて耐震設計を実施]	—	○ (応力)	○ (荷重)	—	—	被駆動機器間との軸系の連結方式により相対変位の影響が異なる。	

(注 1) 余裕度 = (許容値 - 通常発生値) / 地震による発生値

表 3 平成 24 年度電共研 電動機 動的機能維持評価概要

評価項目	評価内容
①端子箱	材料力学等の公式により端子箱取付ボルトの応力を算出
②フレーム	材料力学等の公式によりフレームの応力を算出
③取付ボルト	材料力学等の公式により取付ボルトの応力を算出
④固定子	材料力学等の公式により固定子の応力を算出
⑤軸（回転子）	材料力学等の公式により軸（回転子）の応力を算出
⑥軸受	多質点はりモデルによる電動機の応答解析結果を用い、軸受の発生荷重を評価
⑦固定子 ・ 回転子	多質点はりモデルによる電動機の応答解析結果を用い、相対変位が固定子－軸（回転子）間空隙寸法を下回ることを確認
⑧軸継手	被駆動機側にて評価を実施

4. 電動機評価概要

機能維持評価については、J E A G 4601 及び耐特委報告書により動的機能維持評価上、評価が必要な評価項目が選定されており、その評価項目に基づき、計算書対象とする動的機能維持確認の基本評価項目の考え方を示す。

①端子箱

電動機の端子箱本体は、箱状の構造物で十分な剛性が確認されていることから、地震加速度の大きさに関わらず取付ボルトに最も荷重が作用し、有意な荷重がかかることから評価項目として選定する。

②フレーム

フレームは固定子、軸受を支持する構造物であり、地震時にはこれら構成部材に作用する地震荷重によりフレームに有意な荷重が作用することから、評価項目として選定する。

③取付ボルト

電動機は原動機台に取付ボルトを用いて固定されており、地震時には全体系（フレーム）の転倒モーメントが当該ボルトに作用し、有意な荷重がかかることから評価項目として選定する。

④固定子

固定子はフレーム内部に取り付けられ、フレームに比べ厚みが十分大きいことから、フレームに比べて、高い剛性を有する設計であることを確認しているため、計算書の評価対象外とする。

⑤軸

回転機能保持の観点から動的機能維持の評価項目として選定する。

⑥軸受

回転機能保持の観点から動的機能維持の評価項目として選定する。

⑦固定子・回転子

全体系（フレーム）の応答が過大となることによる固定子変形量の増大に加え、軸系（回転子）の応答が過大となることによる回転子変形量の増大により、固定子・回転子の接触が発生し回転機能喪失にかかわるため、動的機能維持の評価項目として選定する。

⑧軸継手

軸継手は駆動機側（電動機）から、被駆動機（ポンプ）へ回転運動を伝達する機能を有しており、地震時に駆動機側及び被駆動機側へ作用する相対荷重差あるいは相対変位が過大となり軸継手が損傷することで被駆動機の回転機能損失につながる。

ただし、軸継手はポンプ軸とモータ軸をリジットに接続するタイプであり、相対変位が発生しないこと、および地震荷重については軸受で負担するため軸継手部には有意な応力が発生しないことから、計算書の評価対象外とする。

以上から、海水ポンプ電動機において抽出される動的機能維持の基本評価項目のうち、計算書の評価対象とするものは以下の通りである*。

* 表4においては、①～⑧の全ての評価項目を記載し、以下の評価項目に該当するものは評価内容を示し、それ以外の項目については評価省略理由を記載する。

①端子箱（取付ボルト）

②フレーム

③取付ボルト

⑤軸

⑥軸受

⑦固定子・回転子

上記評価項目に基づき、表4のとおり機能維持評価を実施している。

評価項目における評価基準値の説明を表5に、また評価部位については図1に示す。

以上の検討に基づく評価結果を表6に示す。

表 4 動的機能維持評価内容

評価項目	評価内容	計算書対象 (○：計算書対象, －：計算書省略)
①端子箱 (取付ボルト)	多質点はりモデルによる海水ポンプの応答解析結果を用い、材料力学等の公式により、取付ボルトの発生応力を評価	○
②フレーム	多質点はりモデルによる海水ポンプの応答解析結果を用い、材料力学等の公式により、フレームの発生応力を評価	○
③取付ボルト	多質点はりモデルによる海水ポンプの応答解析結果を用い、材料力学等の公式により、取付ボルトの発生応力を評価	○
④固定子	固定子はフレームの内側に取り付けられ、フレームに比べ厚みが十分に大きいことから、フレームに比べ高い剛性を有する設計であることを確認している。(計算書省略)	－
⑤軸 (回転子)	多質点はりモデルによる海水ポンプの応答解析結果を用い、材料力学等の公式により軸の発生応力を評価	○
⑥軸受	多質点はりモデルによる海水ポンプの応答解析結果を用い、軸受の発生荷重を評価	○
⑦固定子 ・回転子	多質点はりモデルによる海水ポンプの応答解析結果を用い、固定子－軸（回転子）の相対変位が固定子－軸（回転子）間空隙寸法を下回ることを確認	○
⑧軸継手	ポンプ軸とモータ軸をリジットに接続するタイプの軸継手であり、相対変位が発生しないこと、および地震荷重については軸受で負担することから軸継手部には有意な応力が発生しないことから、軸継手の評価を省略している。(計算書省略)	－

表 5 評価基準値の設定 (1 / 2)

評価項目	評価基準値の設定
<p>①端子箱 (取付ボルト)</p>	<p>端子箱は筐体とケーブルで構成されるが、ケーブルの質量は小さく、かつフレームに直接支持されていることから、地震時の機能維持は、筐体の取付状態が健全であれば、これらの電氣的機能に影響及ぼすことはない。</p> <p>絶縁、受電機能の確保の観点から、動的機能維持の評価対象として告示 501 号の運転状態Ⅳを基本として、通常材料の実降伏点が設計値に対し余裕があることを考慮し、概ね降伏点以下と同等とした値としてIV_{AS}を評価基準値とした。</p>
<p>②フレーム ③取付ボルト</p>	<p>フレームおよびその取付ボルトは、軸（回転子）や軸受、固定子といった構成部品を固定・支持しており、これらが大きな変形を起こさなければ、構成品の相互の位置関係は維持され、電動機の地震時の機能は確保される。</p> <p>支持機能の確保の観点から、告示 501 号の運転状態Ⅳを基本として、通常材料の実降伏点が設計値に対し余裕があることを考慮し、概ね降伏点以下と同等とした値としてIV_{AS}を評価基準値とした。</p>

表 5 評価基準値の設定 (2 / 2)

評価項目	評価基準値の設定
<p>⑤軸 (回転子)</p>	<p>回転子については、作用する電磁気力を回転トルクとして被駆動機側に伝える。また、回転子は軸と一体であり、軸が健全であればその機能に影響はない。</p> <p>回転機能の確保の観点から、軸（回転子）の変形を弾性範囲内に留めるようⅢ_ASを評価基準値としている。軸（回転子）の発生応力を弾性範囲内に留めることで、地震後の軸（回転子）応力過大による損傷はないことから、作動不良には至らず、軸（回転子）の機能は確保される。</p> <p>また、地震による軸（回転子）の変形は、通常運転時より大きくなるため、弾性範囲内でも軸（回転子）と固定子の接触により、回転機能に影響を与える可能性があるが、これについては、以下の固定子・回転子の接触にて確認することで、回転機能は確保され異常振動が発生することはない。</p>
<p>⑥軸受</p>	<p>海水ポンプ電動機の回転子はこちら軸受で支持されている。ころがり軸受は軌道と転同体が健全であれば、円滑な回転を得られることから、軌道と転同体の接触面に限度となる永久変形量を発生させる基本静定格荷重を評価基準値とした。</p>
<p>⑦固定子 ・回転子</p>	<p>軸（回転子）と固定子の接触により回転機能が阻害されるという観点から、回転子と固定子のクリアランスを評価基準値とした。</p>

表 6 (1) 残留熱除去系海水系ポンプ用電動機 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価
①端子箱	応力	引張, 組合せ	追而	追而	追而
		せん断	追而	追而	追而
②フレーム	応力	圧縮	追而	追而	追而
		曲げ	追而	追而	追而
		せん断	追而	追而	追而
③-1 取付ボルト (原動機取付ボルト)	応力	引張	46 MPa	153 MPa	○
		せん断	12 MPa	118 MPa	○
③-2 取付ボルト (原動機台取付ボルト)	応力	引張	79 MPa	153 MPa	○
		せん断	13 MPa	118 MPa	○
⑤軸 (回転子)	応力	一次一般膜	20 MPa	103 MPa	○
⑥軸受	荷重	(上部軸受) 鉛直方向	追而	追而	追而
		(上部軸受) 水平方向	$3.397 \times 10^3 \text{ N}$		○
		(下部軸受)	$8.879 \times 10^3 \text{ N}$		○
⑦固定子・回転子	変位	—	追而	追而	追而

解析実施中につき
見直し予定

表 6 (2) 非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ用電動機 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価
①端子箱	応力	引張, 組合せ	追而	追而	追而
		せん断	追而	追而	追而
②フレーム	応力	圧縮	追而	追而	追而
		曲げ	追而	追而	追而
		せん断	追而	追而	追而
③-1 取付ボルト (原動機取付ボルト)	応力	引張	15 MPa	153 MPa	○
		せん断	7 MPa	118 MPa	○
③-2 取付ボルト (原動機台取付ボルト)	応力	引張	10 MPa	153 MPa	○
		せん断	3 MPa	118 MPa	○
⑤軸 (回転子)	応力	一次一般膜	14 MPa	110 MPa	○
⑥軸受	荷重	(上部軸受) 鉛直方向	追而	追而	追而
		(上部軸受) 水平方向	$3.599 \times 10^3 \text{ N}$		○
		(下部軸受)	$1.543 \times 10^3 \text{ N}$		○
⑦固定子・回転子	変位	—	追而	追而	追而

解析実施中につき
見直し予定

表 6 (3) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ用電動機 評価結果

評価部位	項目	応力分類	発生値	許容値	評価
①端子箱	応力	引張, 組合せ	追而	追而	追而
		せん断	追而	追而	追而
②フレーム	応力	圧縮	追而	追而	追而
		曲げ	追而	追而	追而
		せん断	追而	追而	追而
③-1 取付ボルト (原動機取付ボルト)	応力	引張	15 MPa	153 MPa	○
		せん断	7 MPa	118 MPa	○
③-2 取付ボルト (原動機台取付ボルト)	応力	引張	10 MPa	153 MPa	○
		せん断	3 MPa	118 MPa	○
⑤軸 (回転子)	応力	一次一般膜	14 MPa	110 MPa	○
⑥軸受	荷重	(上部軸受) 鉛直方向	追而	追而	追而
		(上部軸受) 水平方向	3.599×10^3 N		○
		(下部軸受)	1.543×10^3 N		○
⑦固定子・回転子	変位	—	追而	追而	追而

解析実施中につき
見直し予定

5. 動的機能維持確認結果について

異常要因分析に基づき抽出された評価項目に対し、機能維持詳細評価を実施した結果を以下に示す。

①端子箱

追而

②フレーム

追而

③取付ボルト

応力評価の結果取付ボルトは許容値を満足しており、全体系が転倒することはないこと、取付ボルト損傷による回転機能が喪失することはないことを確認した。

④固定子

固定子はフレームの内側に取り付けられ、フレームに比べ厚みが十分に大きいことから、フレームに比べ高い剛性を有する設計であり、応力評価の結果フレームは許容値を満足していることから固定子は健全であり、回転機能及び駆動特性機能が喪失することはないことを確認した。

⑤軸

応力評価の結果軸は許容値を満足しており、軸の損傷による回転機能が喪失することはないことを確認した。

⑥軸受

荷重評価の結果軸受は許容値を満足しており、軸受の損傷による回転機能が喪失することはないことを確認した。

⑦固定子・回転子

追而

⑧軸継手

ポンプ軸とモータ軸をリジットに接続するタイプの軸継手であり、相対変位が発生しないこと、および地震荷重については軸受で負担するため軸継手部には有意な応力が発生しないことから、軸継手は健全であり、回転機能が喪失することはないことを確認した。

以上、各評価項目について地震時の健全性を確認出来たことから、残留熱除去系海水系ポンプ、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプの電動機の要求機能は喪失に至ることはなく、確認済加速度を超えた評価用加速度（水平：0.57G、鉛直：2.22G）において当該設備の動的機能維持を確認することができた。

別表1 検討対象設備の抽出結果

施設区分/設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	At超え時の評価方法がJEAGに規定されている設備 ○：規定されている ×：規定されていない -：対象外	検討対象設備としての抽出結果 ○：検討対象とする設備 -：検討対象でない設備	J E A G 4601 機種/型式 (注1)		A t 確認		
					機種	型式	方向	評価用加速度	機能確認用加速度
原子炉本体									
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設									
使用済燃料貯蔵槽冷却浄化設備									
代替燃料プール注水系									
常設低圧代替注水系ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	横形ポンプ	遠心式	水平	追而	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)
							鉛直	追而	1.0
電動機	有	加振試験による確認	-	-	-	-	水平	追而	4.7
							鉛直	追而	1.0
代替燃料プール冷却系									
代替燃料プール冷却系ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	横形ポンプ	遠心式	水平	0.86	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)
							鉛直	0.65	1.0
電動機	有	加振試験による確認	-	-	-	-	水平	0.86	4.7
							鉛直	0.65	1.0
原子炉冷却系統施設									
原子炉冷却材再循環設備									
原子炉冷却材再循環系									
原子炉冷却材再循環ポンプ	無	-	-	-	-	-	-	-	-
原子炉冷却材の循環設備									
残留熱除去設備									
残留熱除去系									
残留熱除去系ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	立形ポンプ	ビットパレル形	水平	0.48	10.0
							鉛直	0.50	1.0
電動機	有	加振試験による確認	-	-	-	-	水平	0.48	2.5
							鉛直	0.50	1.0
格納容器圧力逃がし装置									
格納容器圧力逃がし装置移送ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	横形ポンプ	遠心式	水平	追而	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)
							鉛直	追而	1.0
電動機	有	加振試験による確認	-	-	-	-	水平	追而	4.7
							鉛直	追而	1.0
非常用炉心冷却設備その他原子炉注水設備									
高圧炉心スプレイ系									
高圧炉心スプレイ系ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	立形ポンプ	ビットパレル形	水平	0.48	10.0
							鉛直	0.50	1.0
電動機	有	加振試験による確認	-	-	-	-	水平	0.48	2.5
							鉛直	0.50	1.0
低圧炉心スプレイ系									
低圧炉心スプレイ系ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	立形ポンプ	ビットパレル形	水平	0.48	10.0
							鉛直	0.50	1.0
電動機	有	加振試験による確認	-	-	-	-	水平	0.48	2.5
							鉛直	0.50	1.0
原子炉隔離時冷却系									
原子炉隔離時冷却系ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	横形ポンプ	遠心式	水平	0.48	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)
							鉛直	0.50	1.0
ポンプ駆動用タービン	有	加振試験による確認	-	-	-	-	水平	0.48	2.4
							鉛直	0.50	1.0
高圧代替注水系									
常設高圧代替注水系ポンプ	有	加振試験による確認	-	-	-	-	-	-	-

注1：検討対象とする設備の内、J E A G機種/型式が「-」となる設備については、新たに評価項目の検討を行う。

施設区分／設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	At超え時の評価方法がJEAGに規定されている設備 ○：規定されている ×：規定されていない －：対象外	検討対象設備としての抽出結果 ○：検討対象とする設備 －：検討対象でない設備	JEAG 4601機種／型式 (注1)		At確認			
					機種	型式	方向	評価用加速度	機能確認用加速度	
低圧代替注水系										
常設低圧代替注水系ポンプ					－（前段で整理済）					
可搬型代替注水大型ポンプ					－（前段で整理済）					
代替循環冷却系										
代替循環冷却系ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	横形ポンプ	遠心式	水平	0.48	3.2(軸直角方向) 1.4(軸方向)	
							鉛直	0.50	1.0	
					電動機	横形ころがり軸受	水平	0.48	4.7	
							鉛直	0.50	1.0	
原子炉冷却材補給設備										
原子炉隔離時冷却系										
原子炉隔離時冷却系ポンプ					－（前段で整理済）					
原子炉補機冷却設備										
残留熱除去系海水系										
残留熱除去系海水系ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	立形ポンプ	立形斜流式	水平	0.38	10.0	
							鉛直	1.48	1.0	
					電動機	立形ころがり軸受	水平	0.38	2.5	
							鉛直	1.48	1.0	
代替残留熱除去系海水系										
可搬型代替注水大型ポンプ					－（前段で整理済）					
緊急用海水系										
緊急用海水ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	立形ポンプ	立形斜流式	水平	追而	10.0	
							鉛直	追而	1.0	
					電動機	立形ころがり軸受	水平	追而	2.5	
							鉛直	追而	1.0	
計測制御系統施設										
制御材										
制御棒	有	加振試験による確認	－	－	制御棒	BWR標準型式	水平	11.2mm	40mm	
							鉛直	鉛直方向地震による影響を整理する（追而）。		
ほう酸水注入設備										
ほう酸水注入系										
ほう酸水注入ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	往復動式ポンプ	横形	水平	0.93	1.6	
							鉛直	0.80	1.0	
					電動機	横形ころがり軸受	水平	0.93	4.7	
							鉛直	0.80	1.0	
放射性廃棄物の廃棄施設										
放射線管理施設										
放射線管理用計測装置										
換気設備										
中央制御室換気系										
中央制御室換気系空調機ファン	有	JEAG4601による確認	×	○	ファン	－	－	－	－	
							－	－	－	
					電動機	横形ころがり軸受	水平	0.86	4.7	
							鉛直	0.65	1.0	
中央制御室換気系フィルタ系ファン	有	JEAG4601による確認	×	○	ファン	－	－	－	－	
							－	－	－	
					電動機	横形ころがり軸受	水平	0.86	4.7	
							鉛直	0.65	1.0	

注1：検討対象とする設備の内、JEAG機種／型式が「－」となる設備については、新たに評価項目の検討を行う。

施設区分／設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	At超え時の評価方法がJEAGに規定されている設備 ○：規定されている ×：規定されていない -：対象外	検討対象設備としての抽出結果 ○：検討対象とする設備 -：検討対象でない設備	JEAG4601機種／型式 (注1)		At確認		
					機種	型式	方向	評価用加速度	機能確認加速度
緊急時対策所換気系									
緊急時対策所非常用送風機	有	JEAG4601による確認	×	○	ファン	遠心直動式	水平	0.90	2.6
							鉛直	0.78	1.0
					電動機	横形ころがり軸受	水平	0.90	4.7
							鉛直	0.78	1.0
原子炉格納施設									
圧力低減設備その他の安全設備									
原子炉格納容器安全設備									
格納容器スプレィ冷却系									
残留熱除去系ポンプ	- (前段で整理済)								
代替格納容器スプレィ冷却系									
常設低圧代替注水系ポンプ	- (前段で整理済)								
可搬型代替注水大型ポンプ	- (前段で整理済)								
代替循環冷却系ポンプ	- (前段で整理済)								
緊急用海水ポンプ	- (前段で整理済)								
格納容器下部注水系									
常設低圧代替注水系ポンプ	- (前段で整理済)								
可搬型代替注水大型ポンプ	- (前段で整理済)								
原子炉建屋放水設備									
可搬型代替注水大型ポンプ	- (前段で整理済)								
放射性物質濃度制御設備及び可燃性ガス濃度制御設備並びに格納容器再循環設備									
非常用ガス処理系									
非常用ガス処理系排風機	有	JEAG4601による確認	×	○	ファン	-	-	-	-
							-	-	-
					電動機	横形ころがり軸受	水平	1.4	4.7
							鉛直	1.0	1.0
非常用ガス再循環系									
非常用ガス再循環系排風機	有	JEAG4601による確認	×	○	ファン	遠心直動式	水平	1.4	2.6
							鉛直	1.0	1.0
					電動機	横形ころがり軸受	水平	1.4	4.7
							鉛直	1.0	1.0
可燃性ガス濃度制御系									
可燃性ガス濃度制御系再結合装置ブロー	有	JEAG4601による確認	×	○	ファン	遠心直動式	水平	1.11	2.6
							鉛直	0.84	1.0
					電動機	横形ころがり軸受	水平	1.11	4.7
							鉛直	0.84	1.0
その他発電用原子炉の附属設備									
非常用電源設備									
非常用発電装置									
非常用ディーゼル発電機									
非常用ディーゼル発電機	有	JEAG4601による確認	×	○	非常用ディーゼル発電機	機関本体	水平	0.72	1.1
							鉛直	0.75	1.0
					調速装置	UG型	水平	0.72	1.8
							鉛直	0.75	1.0
非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ	有	JEAG4601による確認	×	○	横形ポンプ	-	-	-	-
							-	-	-
					電動機	横形ころがり軸受	水平	0.81	4.7
							鉛直	0.71	1.0

注1：検討対象とする設備の内、JEAG機種／型式が「-」となる設備については、新たに評価項目の検討を行う。

施設区分/設備名称	動的機能維持要求の有無	動的機能維持の確認方法	At超え時の評価方法がJ EAGに規定されている設備 ○：規定されている ×：規定されていない -：対象外	検討対象設備としての抽出結果 ○：検討対象とする設備 -：検討対象でない設備	J EAG 4601機種/型式 (注1)		A t 確認		
					機種	型式	方向	評価用加速度	機能確認用加速度
非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ	有	J EAG4601による確認	×	○	立形ポンプ	立形斜流式	水平	0.72	10.0
							鉛直	1.48	1.0
					電動機	立形ころがり軸受	水平	0.38	2.5
							鉛直	1.48	1.0
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機									
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機	有	J EAG4601による確認	×	○	非常用ディーゼル発電機	機関本体	水平	0.72	1.1
							鉛直	0.75	1.0
					調速装置	U G型	水平	0.72	1.8
							鉛直	0.75	1.0
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料移送ポンプ	有	J EAG4601による確認	×	○	横形ポンプ	-	-	-	-
							-	-	-
					電動機	横形ころがり軸受	水平	0.81	4.7
							鉛直	0.71	1.0
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ	有	J EAG4601による確認	×	○	立形ポンプ	立形斜流式	水平	0.72	10.0
							鉛直	1.48	1.0
					電動機	立形ころがり軸受	水平	0.38	2.5
							鉛直	1.48	1.0
常設代替高圧電源装置									
常設代替高圧電源装置	有	加振試験による確認	-	-	-	-	-	-	-
常設代替高圧電源装置燃料移送ポンプ	有	J EAG4601による確認	×	○	横形ポンプ	-	-	-	-
							-	-	-
					電動機	横形ころがり軸受	水平	0.81	4.7
							鉛直	0.71	1.0
緊急時対策用発電機									
緊急時対策用発電機	有	加振試験による確認	-	-	-	-	-	-	-
緊急時対策用発電機給油ポンプ	有	J EAG4601による確認	×	○	横形ポンプ	-	-	-	-
							-	-	-
					電動機	横形ころがり軸受	水平	追而	4.7
							鉛直	追而	1.0
可搬型代替低圧電源車									
可搬型代替低圧電源車	有	加振試験による確認	-	-	-	-	-	-	-
タンクローリー	有	加振試験による確認	-	-	-	-	-	-	-
可搬型窒素供給装置用電源車									
可搬型窒素供給装置用電源車	有	加振試験による確認	-	-	-	-	-	-	-
タンクローリー					- (前段で整理済)				
補機駆動用燃料設備									
可搬型									
タンクローリー					- (前段で整理済)				
弁									
一般弁									
グローブ弁	有	J EAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-
ゲート弁	有	J EAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-
バタフライ弁	有	J EAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-
逆止弁	有	J EAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-
特殊弁									
主蒸気隔離弁	有	J EAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-
安全弁	有	J EAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-
制御棒駆動系スクラム弁	有	J EAG4601による確認	○	-	-	-	-	-	-

注1：検討対象とする設備の内、J EAG機種/型式が「-」となる設備については、新たに評価項目の検討を行う。