

本資料のうち、枠囲みの内容は、
商業機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-360 改0 |
| 提出年月日 | 平成30年1月29日 |

東海第二発電所
耐震性に関する説明書に係る補足説明資料
(機電分耐震計算書の補足について)

平成30年1月
日本原子力発電株式会社

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. 炉内構造物への極限解析の適用

(1) 規格基準における扱い及び炉内構造物への適用

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 2-1, 2, 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 2-1 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ことになるため、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 2-2 に示す。材料及び完了検査については建設時の記録から要求事項を満足していることを確認した。設計に対する要求については、スタンドパイプは炉内にあり、地震時以外では、圧力・温度差等による応力は有意なものではないため、満足すると考えられる。しかしながら、これを確認するため詳細設計段階にて設計に対する要求を満足することを確認する。

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 2 - 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 2-2 JSME 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 | 「否」の理由 | 考慮に対する方針 |
|----------|------------------|--------------------------------------|----------------|---|--|
| 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。 |

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 | 「否」の理由 | 確認結果 |
|----------|--------------------|---|----------------|--|---|
| 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。 | — |

| 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 | 「否」の理由 | 確認結果 |
|----------|-------------------|---|----------------|--|--|
| 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。 | |
| 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 | 「否」の理由 | 要求事項に対する対応方針 |
|------------|---------------------|---|----------------|------------------------------|--|
| 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詳細設計段階で確認する。 |
| 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。 | — |

| 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 | 「否」の理由 | 要求事項に対する対応方針 |
|------------|---------------------------|--|----------------|-----------------------|---|
| 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規定を満足することを詳細設計段階で確認する。 |
| 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 を満足することを詳細設計段階で確認する。 |
| 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 | — | 純せん断応力を生じる部分がないことを詳細設計段階で確認する。 |
| 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 | — | 支圧応力を生じる部分がないことを詳細設計段階で確認する。 |
| 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 | — | 軸圧縮荷重が自重のみであり、軸圧縮応力が小さいことを詳細設計段階で確認する。 |
| 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 | — | 軸圧縮荷重が自重のみであり、軸圧縮応力が小さいことを詳細設計段階で確認する。 |
| 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。 | — |

| 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 | 「否」の理由 | 要求事項に対する対応方針 |
|----------|--------------------------|--|----------------|--|--------------------------------|
| 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 | — | 疲労評価不要の各条件を満足することを詳細設計段階で確認する。 |
| 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 | — | 疲労解析には応力集中係数を考慮する。 |
| 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する。 |
| 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。 |
| 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。 | — |

| 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 | 「否」の理由 | 要求事項に対する対応方針 |
|----------|------------------------------------|---|----------------|---------------|------------------------|
| 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 を満足することを確認する。 |
| 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 | 「否」の理由 | 確認結果 |
|----------|--------------|----------------------------------|----------------|--------|----------------------------------|
| 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。 |

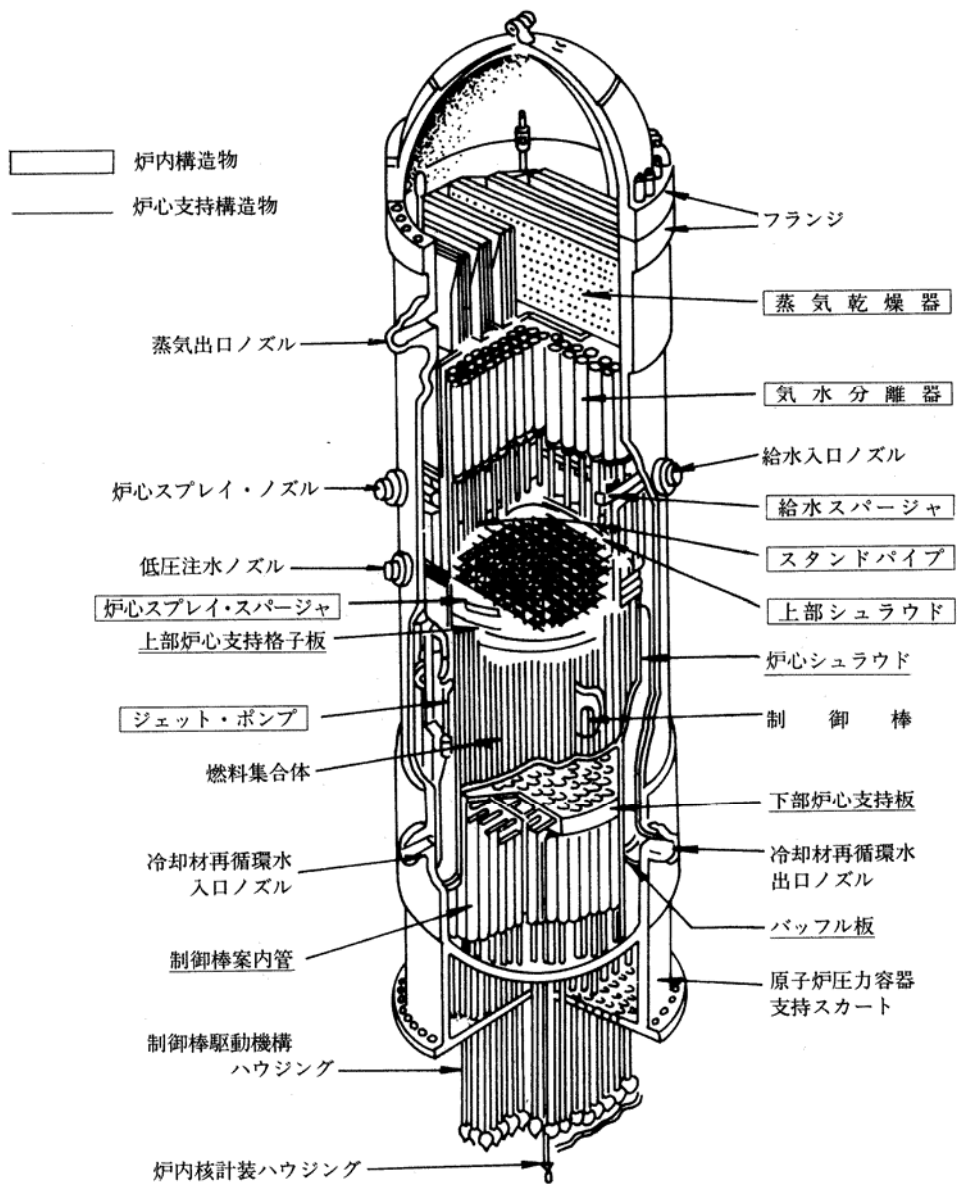


図 2 - 1 JEAG 4601 炉心支持構造物と炉内構造物の分類に関する抜粋

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II ⁽³⁾ 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I、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2-2 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 | F | |
| 設計条件 | P_m S_m 弾性解析 または $2/3 P_{cr}$ 極限解析 (注1) または $0.44 L_e$ 試験 (注5) | $P_m + P_b$ $1.5 S_m$ 弾性解析 または $2/3 P_{cr}$ 極限解析 (注1) または $0.44 L_e$ 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 弾塑性解析 | $P_m + P_b + Q + F$ S_a 疲労解析 | 支圧荷重 S_y または 平均支圧応力 $1.5 S_y$ せん断荷重 $0.6 S_m$ 平均せん断応力 $0.8 S_m$ 最大ねじりせん断応力 |
| 供用状態 C | P_m $1.5 S_m$ 弾性解析 または P_{cr} 極限解析 (注1) または $0.6 L_e$ 試験 (注5) | $P_m + P_b$ $2.25 S_m$ 弾性解析 または P_{cr} 極限解析 (注1) または $0.6 L_e$ 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 $2.4 S_m / 2/3 S_u$ (注2, 注3) 弾性解析 $2/3 S_u$ (注4) または $0.9 P_{cr}$ 極限解析 (注1) または $0.8 L_e$ 試験 (注5) | $P_m + P_b$ $3.6 S_m / 3 S_u$ (注2, 注3) 弾性解析 S_u (注4) または $0.9 P_{cr}$ 極限解析 (注1) または $0.8 L_e$ 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 $MIN[2.3 S_m, 0.7 S_u]$ 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 2-3 J S M E 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

(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を求め、求めた崩壊荷重の下限から許容荷重設定するものである。極限解析フローを図2-4に示す。

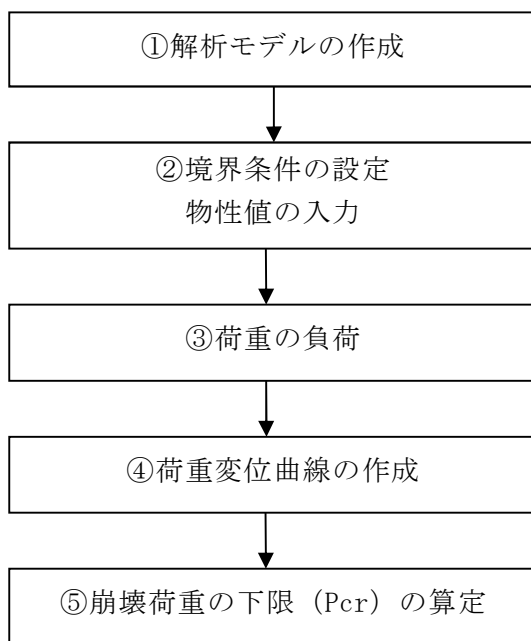
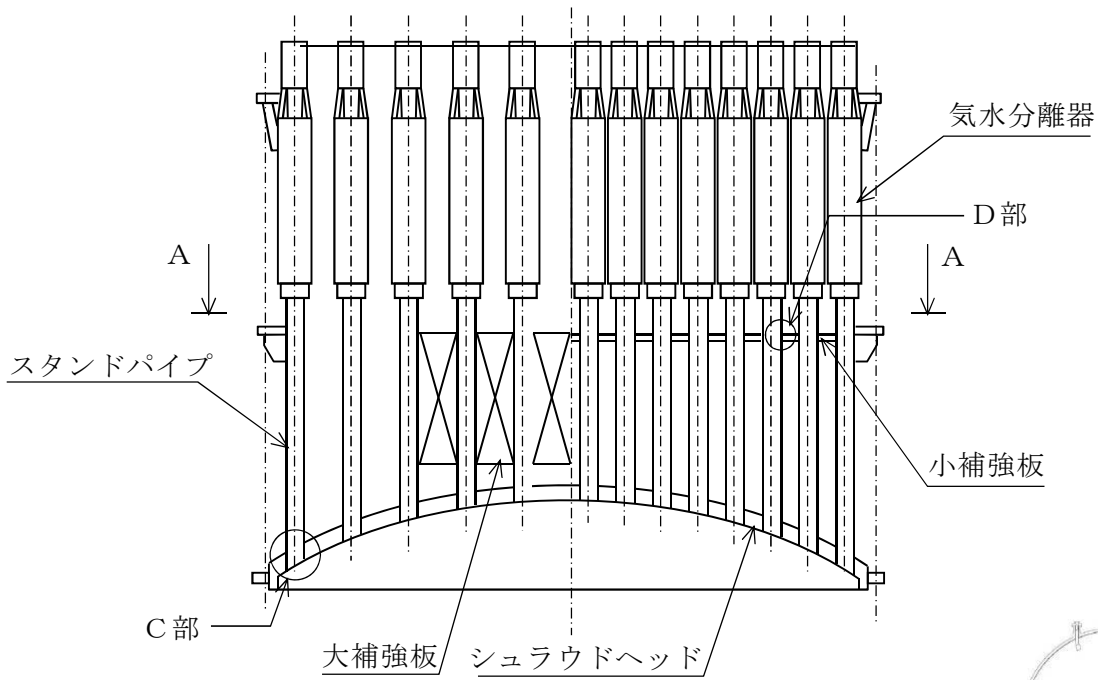


図2-4 極限解析フロー

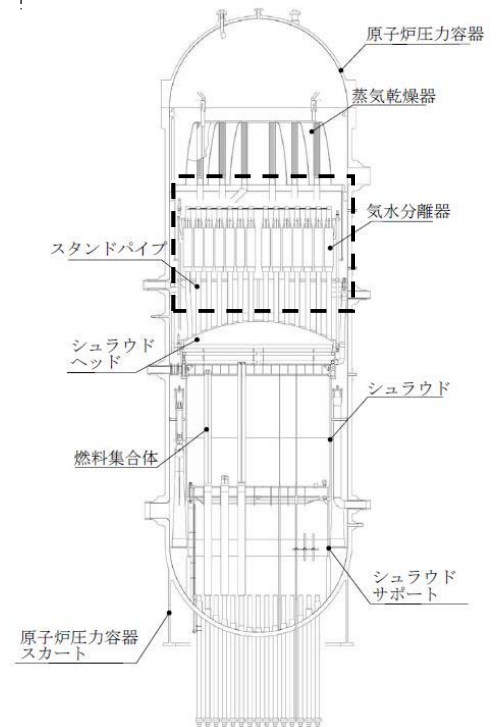
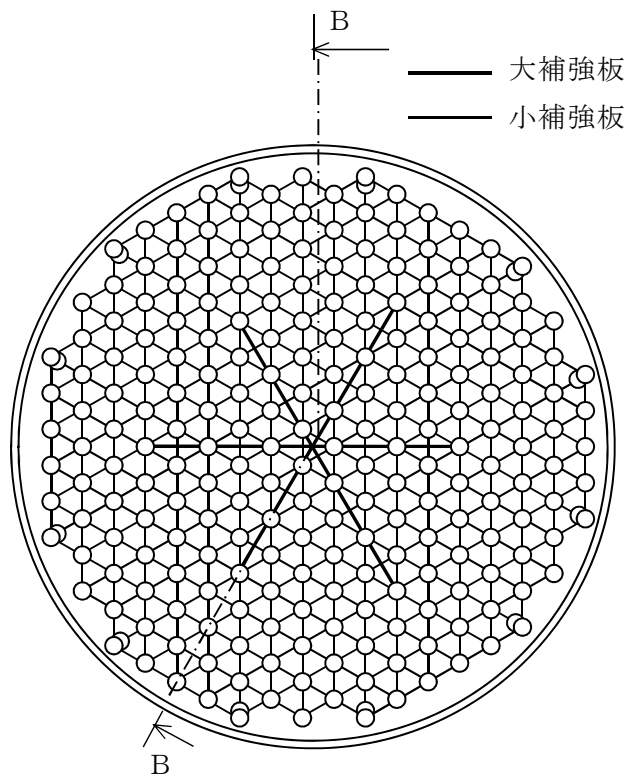
① 解析モデルの作成

気水分離器及びスタンドパイプは、図2-5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。各スタンドパイプは同一断面形状で曲げ剛性は等しいこと、及び補強板で連結されていることから、各スタンドパイプの地震時の応答変位は等しくなるため、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2-6に示す。

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



圧力容器内構造物

図2-5 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)

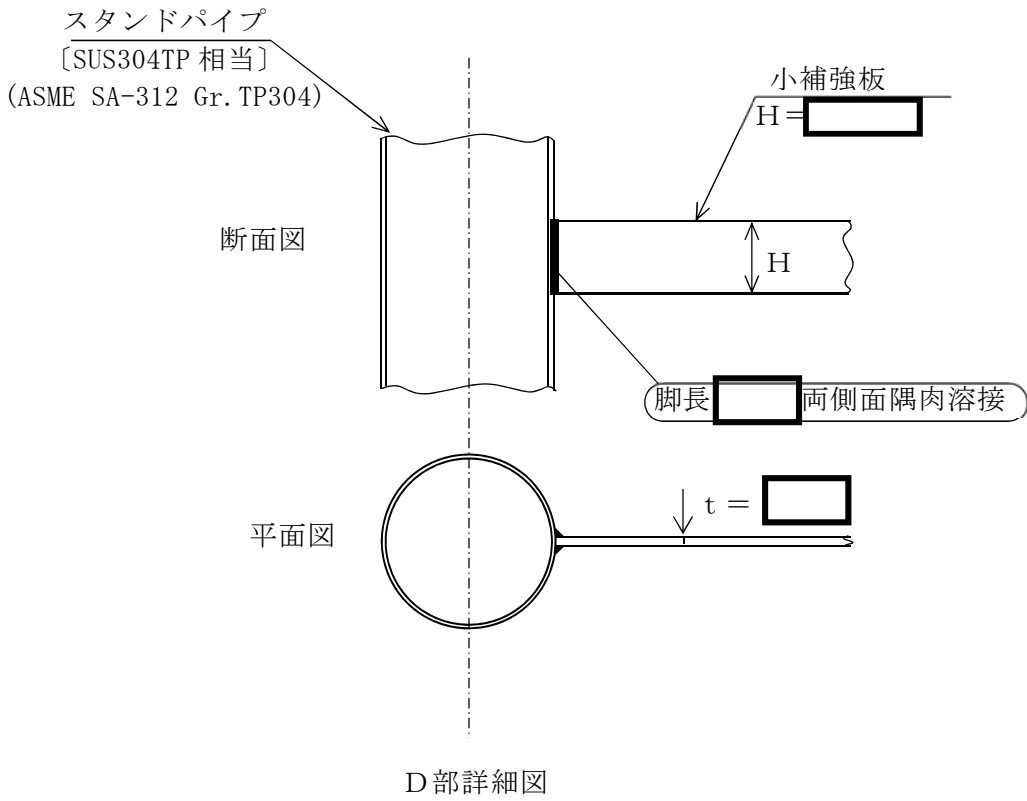
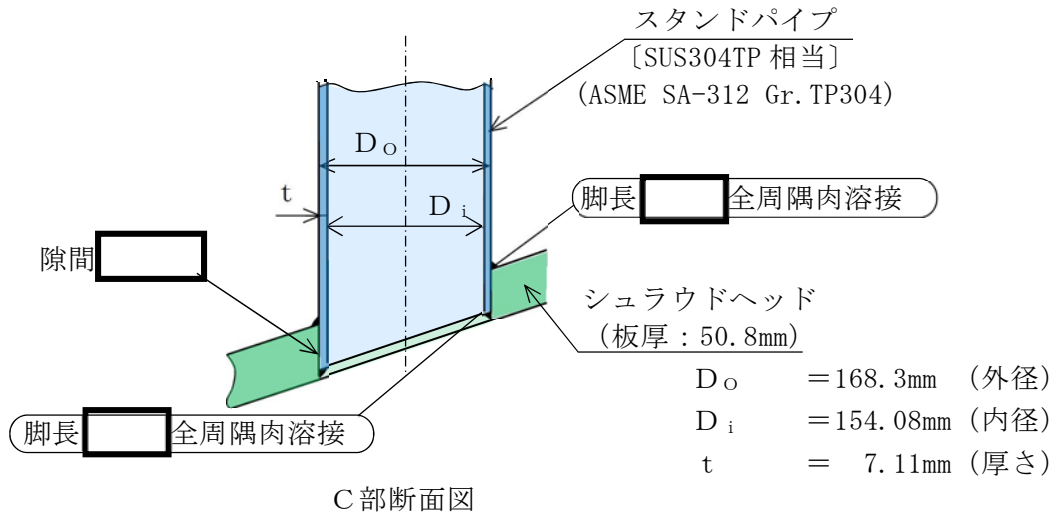
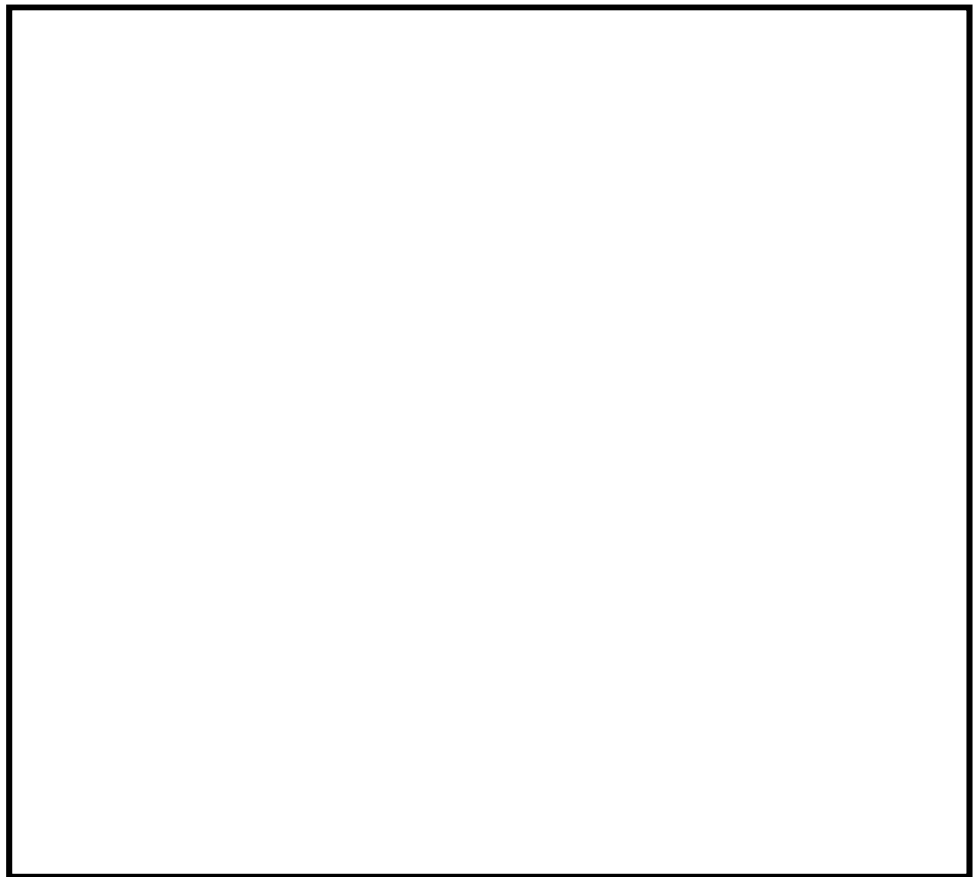
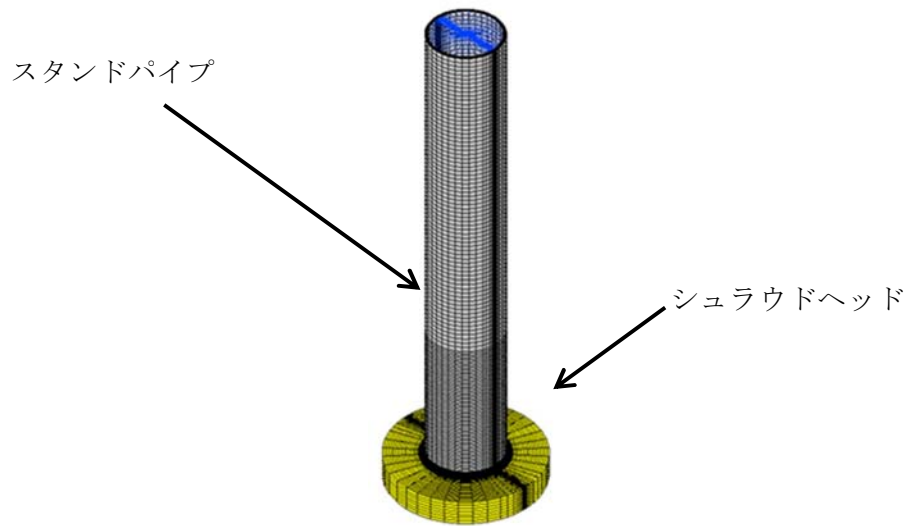


図 2 - 5 炉内構造物 (気水分離器及びスタンドパイプ) 構造概要図 (2/2)



溶接部

図 2 - 6 極限解析に用いる解析モデル概要図 (中央位置)

② 境界条件及び物性値

解析モデルの境界条件を図 2-7 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。

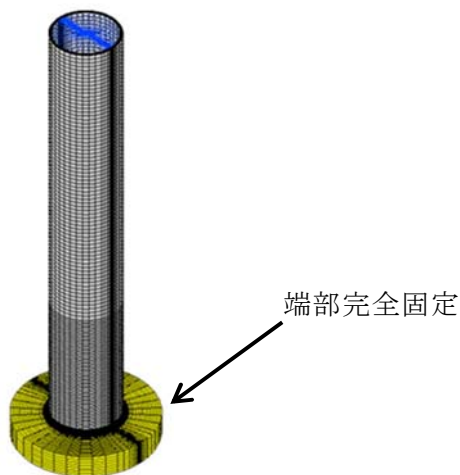


図 2-7 解析モデルの境界条件

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を入力する(図 2-8 参照)。なお、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。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。

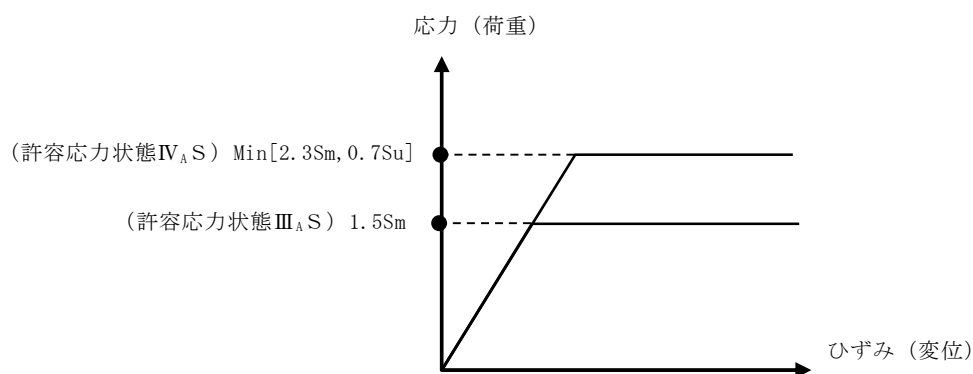


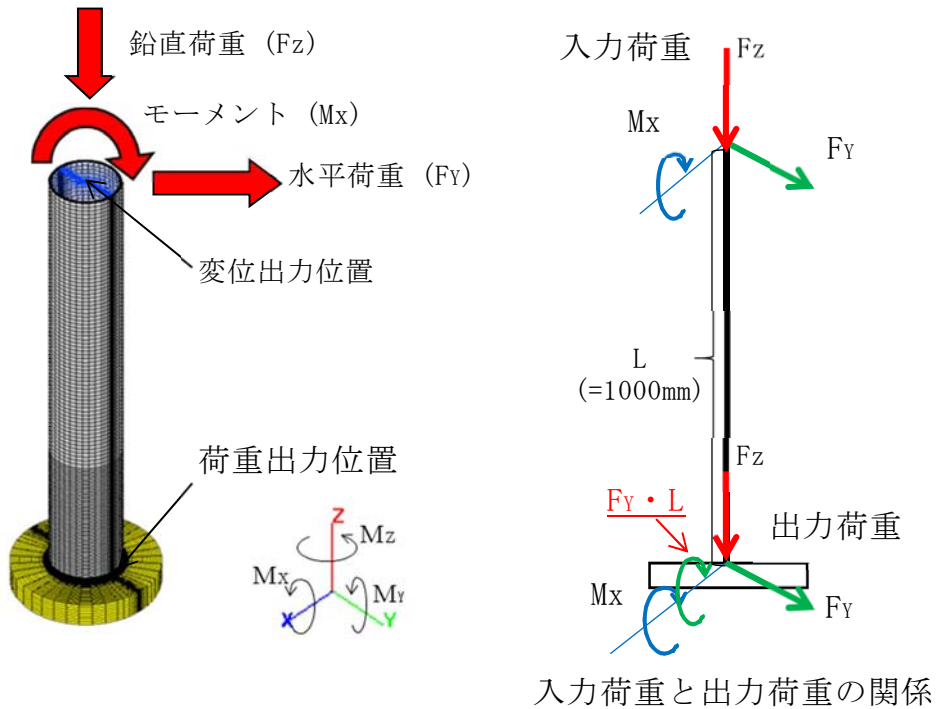
図 2-8 弾完全塑性体として応力とひずみの関係

③ 荷重の負荷

図2-9に示すように、スタンドパイプ上部端面に荷重を負荷することにより、スタンドパイプの変位（上端部中心位置）を求める。また、地震と組み合わせる荷重として、自重による荷重及びスタンドパイプ内外の圧力差による応力を初期荷重として入力している。

スタンドパイプ上部端面に負荷する荷重は S_s 地震動及び S_d 地震動の地震応答解析にて得られたスタンドパイプ取付部の地震荷重をスタンドパイプの総本数（225本）で除して、1本当たりが発生する地震荷重（鉛直荷重，水平荷重，モーメント）を算出し，上部端面に負荷することで取付部が発生する荷重（モーメント）を除いた荷重を倍率して付与することで，荷重出力位置での各荷重が地震荷重に同じ倍率付与したものと等しくなるようにする。

また，地震応答解析にて得られた地震荷重を1本当たりの平均地震荷重による荷重を負荷しているが，補強板の影響及び各スタンドパイプ長さが異なることの影響から各スタンドパイプ取付部での最大荷重負荷が平均地震荷重より大きくなる場合には，それを反映した入力荷重とすることとする（別紙1）。



S_s地震時の1本に対する入力荷重 (倍率 1.0 倍)

| 入力荷重成分 | | S _s 地震時 |
|--------|-----------------|-------------------------------|
| 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] |

※スタンドパイプ取付部に地震荷重 (モーメント) M_{MX} を発生させるため、水平荷重 F_Y によってスタンドパイプ取付部に発生するモーメント ($F_Y \cdot L$) を地震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

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

M_{MX} : 地震応答解析にて得られて1本当たりの地震荷重 (モーメント)

$M_{X(OUT)}$: 出力荷重 (モーメント)

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

S_s地震時の1本に対する出力荷重 (倍率 1.0 倍)

| 出力荷重成分 | | S _s 地震時 |
|--------|--------------|-------------------------------|
| 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] |

図2-9 荷重の負荷

④ 荷重変位曲線の作成

上端部に入力した負荷荷重からFEM解析により最大荷重点（スタンドパイプ付け根部）を求める。その後、負荷荷重の倍率を増加して荷重を負荷し、その時の最大荷重と変位（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2-10参照）。

なお、荷重－変位曲線の荷重は入力した S_s 地震荷重又は 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。

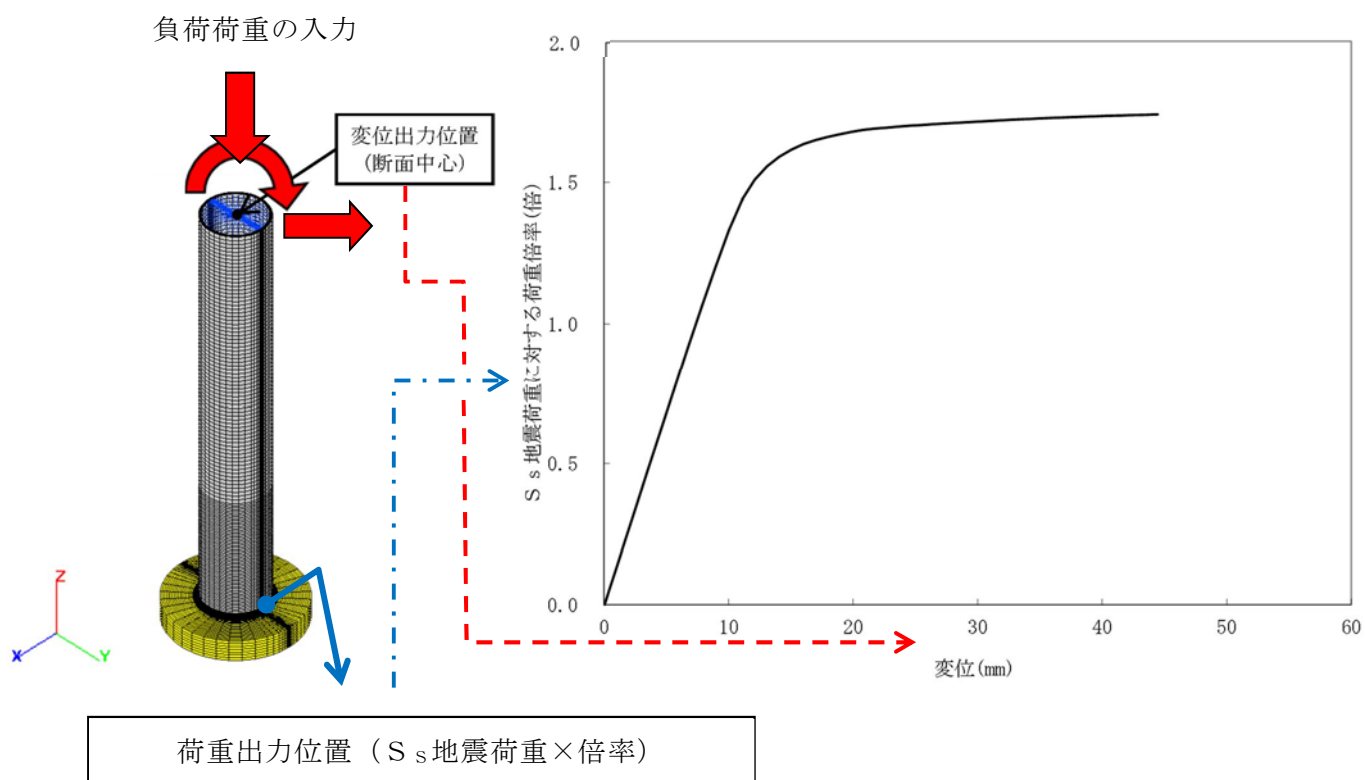


図2-10 荷重変位曲線の作成 (S_s地震時, 中心位置の場合)

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基に崩壊荷重の下限 (P_{cr}) 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 (P_{cr}) の算定結果を図2-11に示す。

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2-12参照)。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。

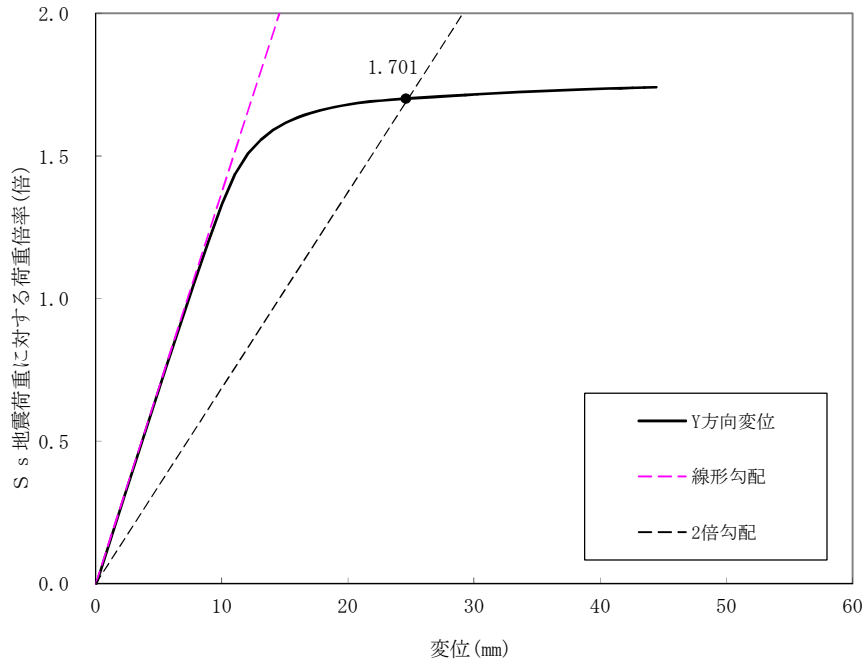
今回の極限解析では最大荷重点である付け根部に局所応力の影響を受けないようシュラウドヘッドからの距離を十分にとる観点から、スタンドパイプ長さを1000mmとし、荷重を負荷し、その位置での変位を変位出力位置としている。スタンドパイプ長さを変化させた場合、最大荷重点である付け根部に発生する荷重は上端面からの入力荷重にスタンドパイプ長さが変わることで生じる水平荷重によるモーメントの影響を考慮していることから変化しない。また、スタンドパイプ長さを変化させた場合、上部端面に入力する荷重(モーメント)は長さが変わることで水平荷重によるモーメントを考慮するため変化するが、変位出力位置が変わらなければ、変位出力位置での荷重は同じであるため、変位挙動は同じとなる。このため、スタンドパイプ長さを変化しても、崩壊荷重の下限 (P_{cr}) は同じとなる。

崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布図を図2-14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7%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7%相当のひずみにより崩壊は至らないものとする。

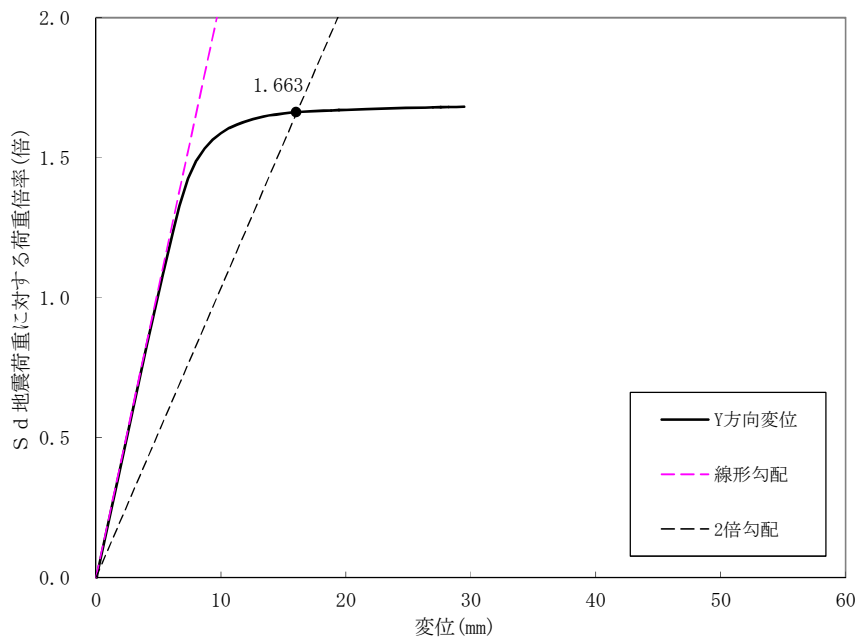
シュラウドヘッドに差し込まれたスタンドパイプとシュラウドヘッドとの間の変位

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。



S_s地震時の荷重-変位曲線（中心位置）

注：S_s地震荷重の許容値は $0.9 \cdot P_{cr}$ であるため、裕度は 1.53 である。



S_d地震時の荷重-変位曲線（中心位置）

注：S_d地震荷重の許容値は P_{cr} であるため、裕度は同じである。

図 2-11 S_s地震時及びS_d地震時の崩壊荷重の下限の算定結果

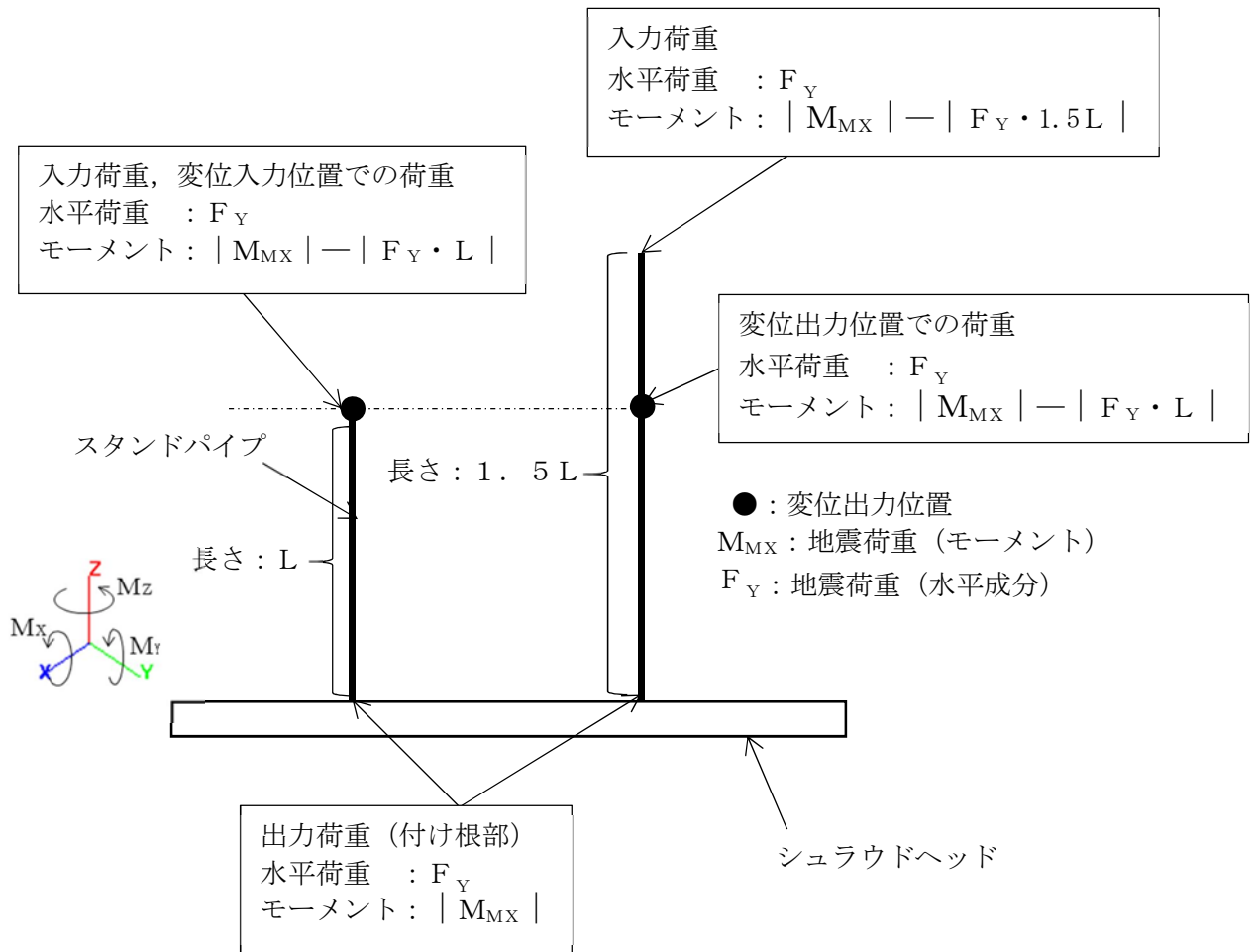
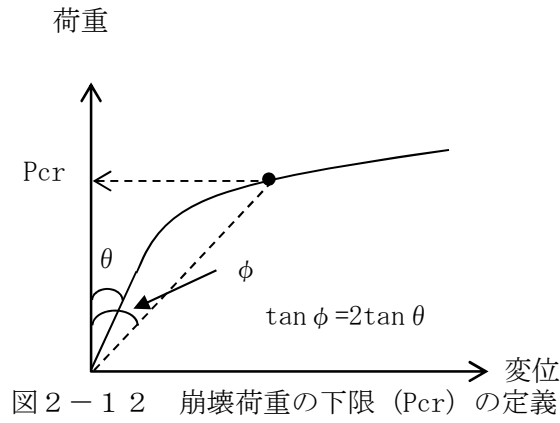
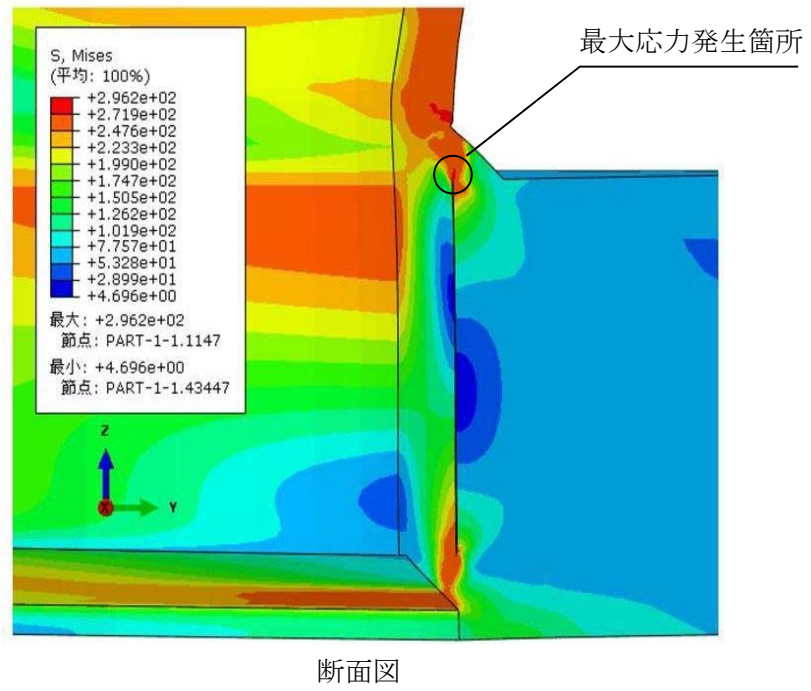
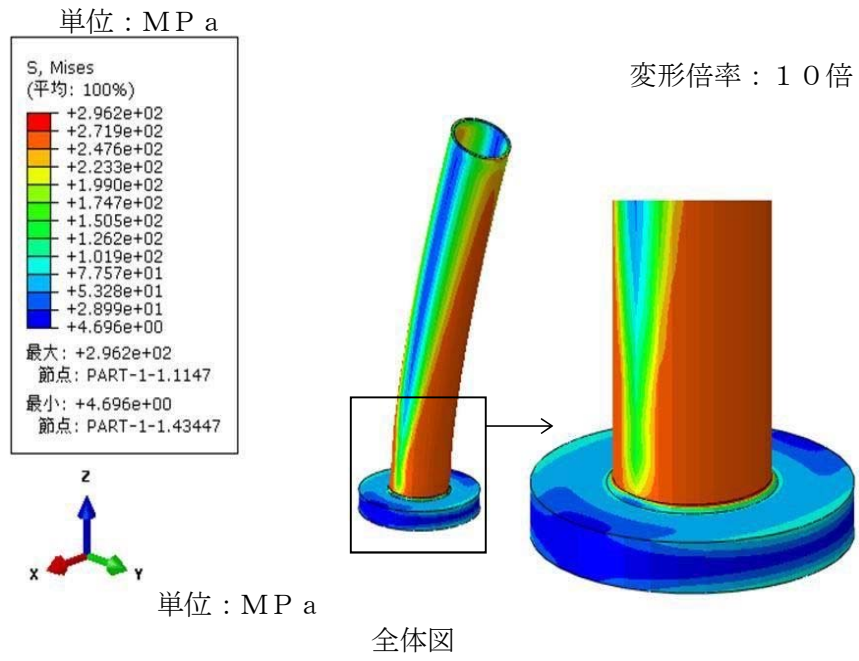
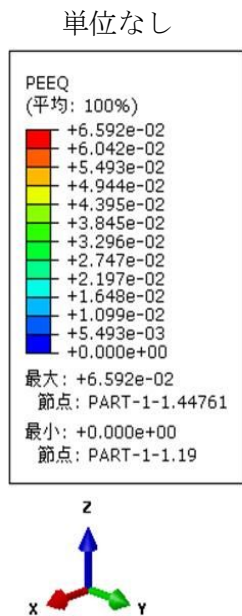


図 2-13 スタンドパイプ長さを変化させた場合の影響 (概略図)



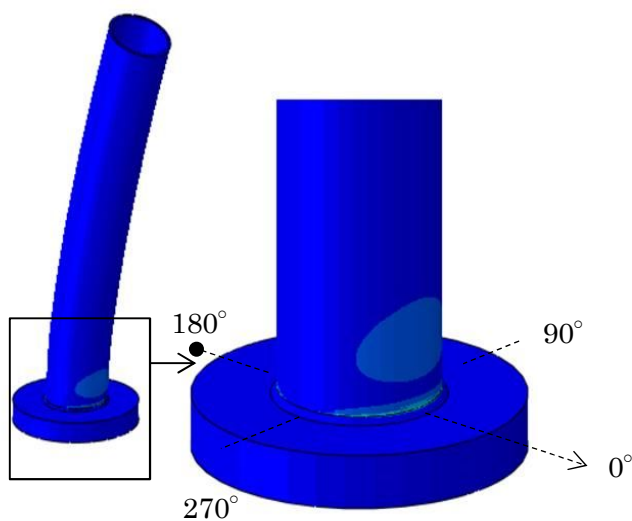
応力分布図

図 2 - 1 4 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図(1/5)

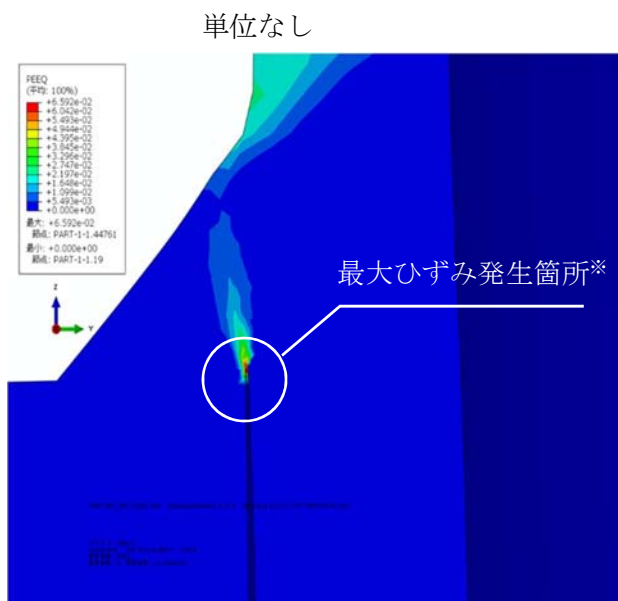


PEEQ : 相当塑性ひずみ

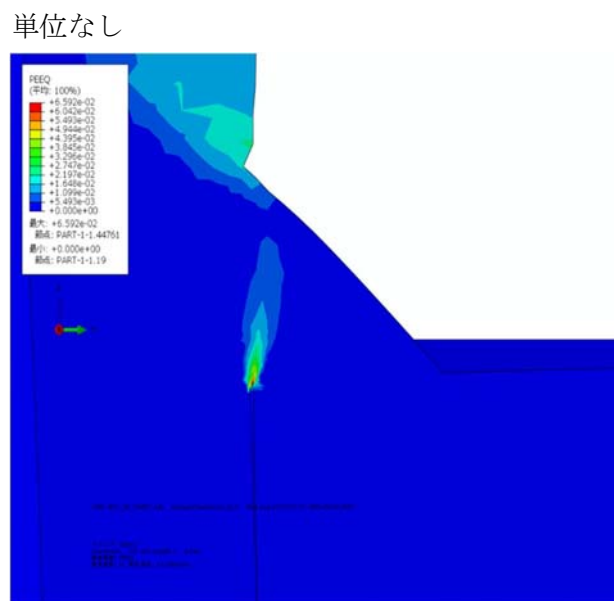
変形倍率 : 10倍



全体図



180° 位置



0° 位置

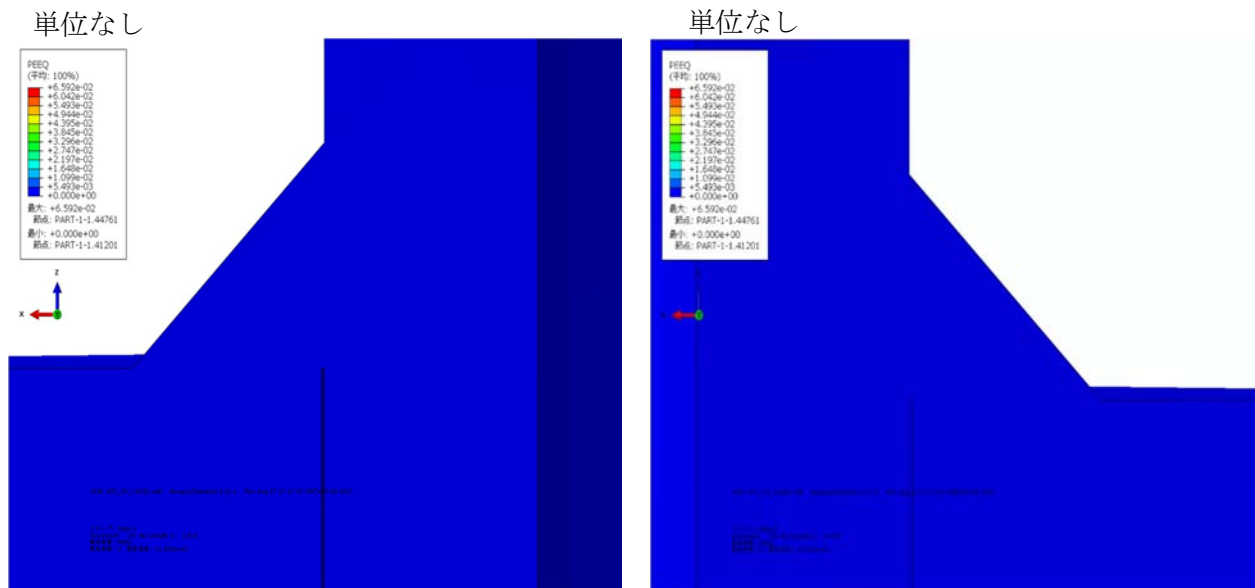
ひずみ分布図

※ : 最大ひずみはシュラウドヘッド

断面図

鏡板表面位置

図 2 - 1 4 崩壊荷重の下限 (Pcr) での応力・ひずみ分布図(2/5)

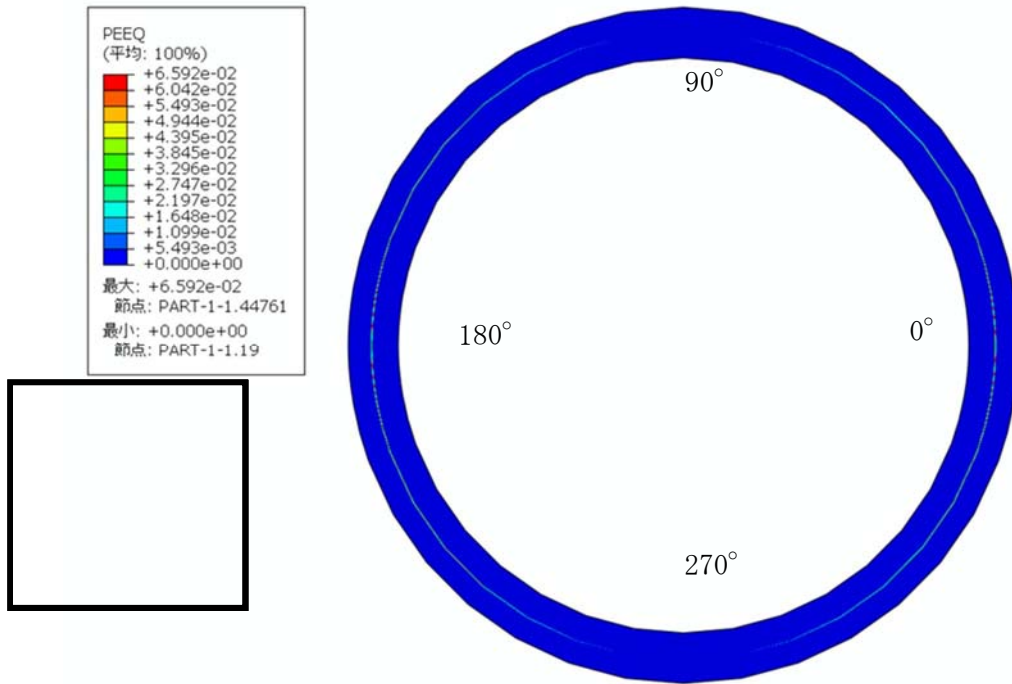


270° 位置

90° 位置

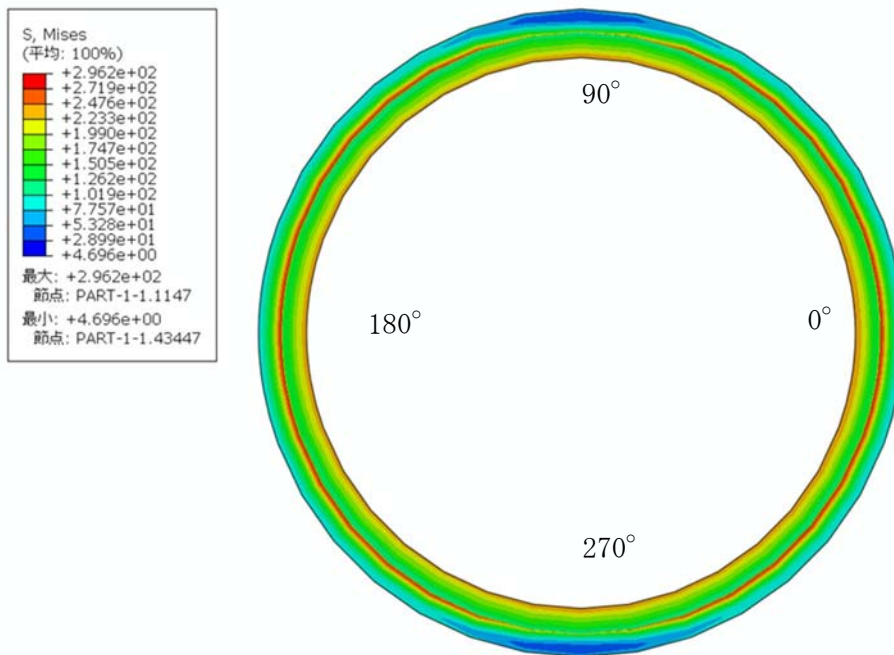
図 2 - 1 4 崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布図(3/5)

単位なし



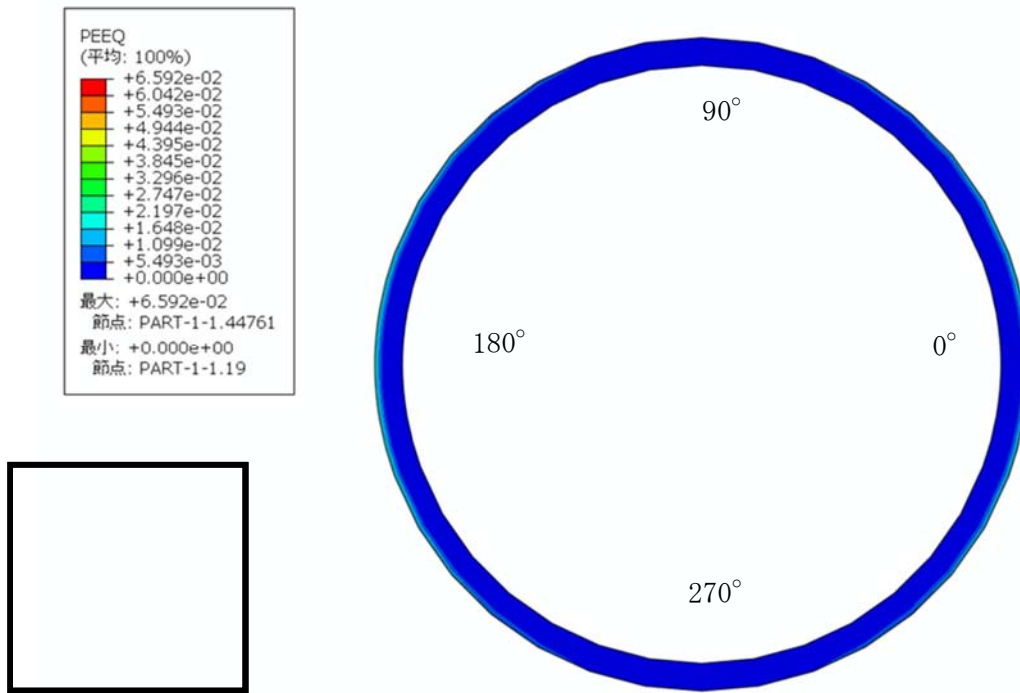
ひずみ分布図（平面図）最大ひずみ発生位置高さ

単位:MP a

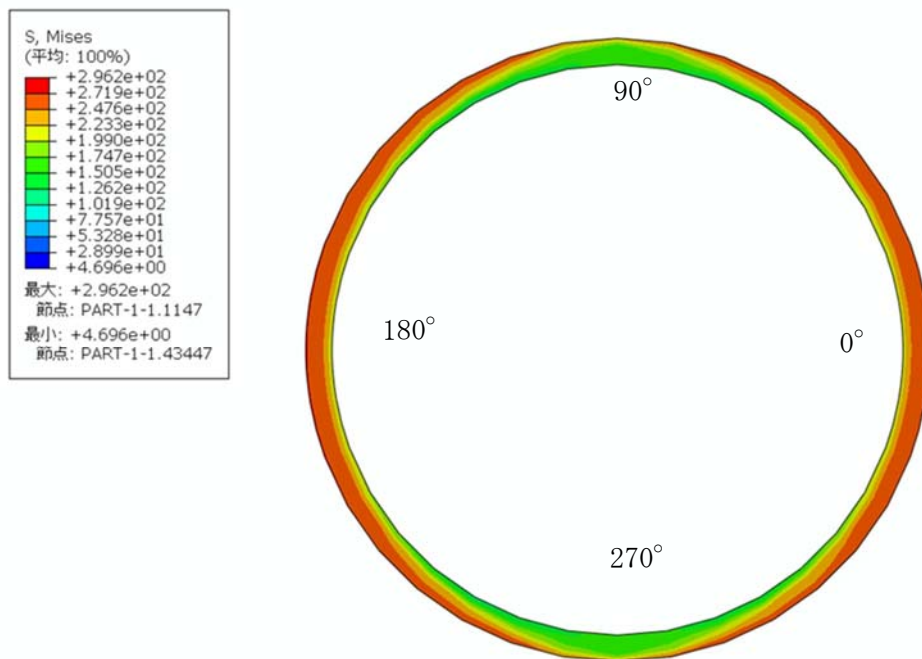


応力分布図（平面図）最大ひずみ発生位置高さ

図 2 - 1 4 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 2 - 1 4 崩壊荷重の下限 (P_{cr}) での応力・ひずみ分布図(5/5)

(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する。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2-3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2-3 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 |

3. 試験による検証について

3.1 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模擬体として試験を実施し、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。

3.2 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小試験体に荷重（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。

3.3 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

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、試験機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 3-1 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 3-1 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機に固定し、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形挙動を計測し、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機に試験体を取り付け、301℃（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3-1 縮小モデル試験体の仕様

| 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 |

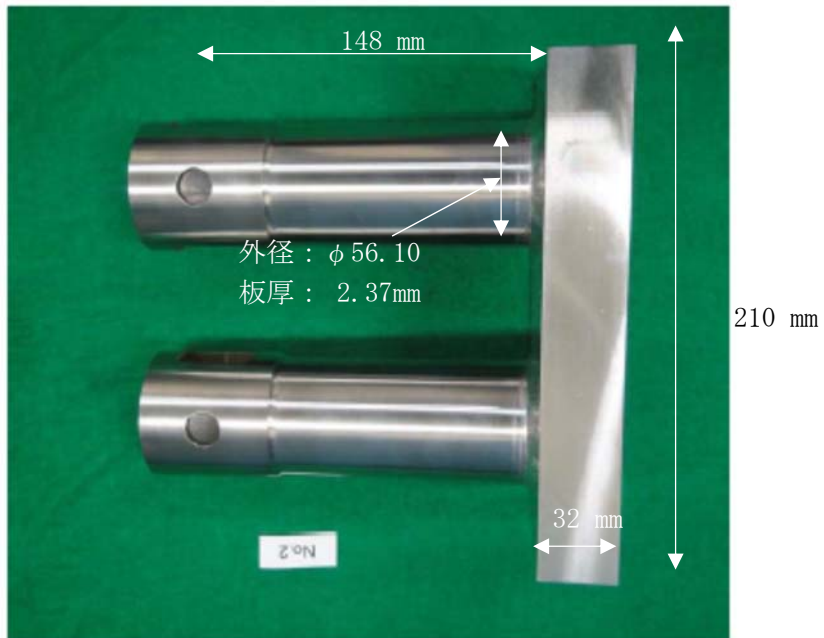
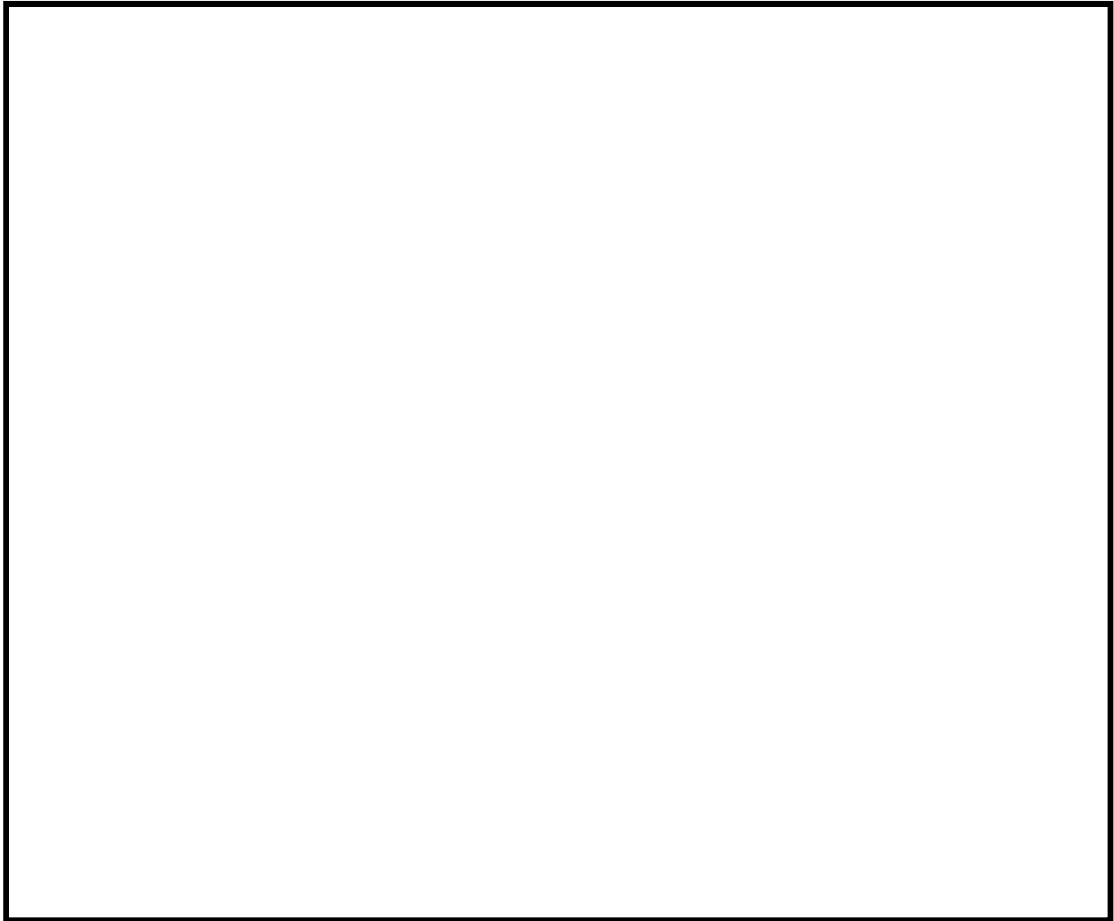


图 3 - 1 試驗体形状



ロードセル

クロスヘッド

恒温槽

試験体

図 3 - 2 試験装置

3.4 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3-3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、本試験データを試験結果としている。また、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。

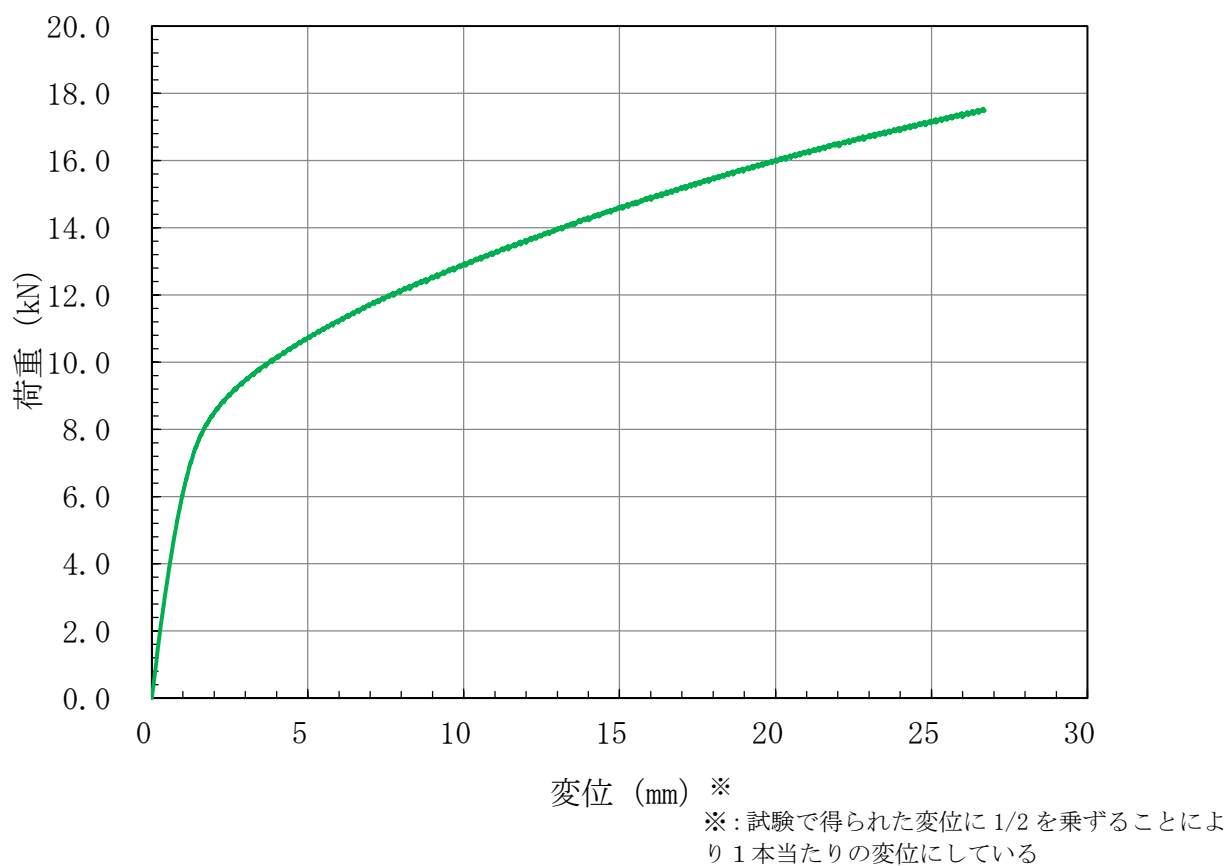


図3-3 試験から得られた荷重－変位曲線

(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 3-4 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3-4 各試験段階での試験体の状態 (1/2)



試験中



試験後

図3-4 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。

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、試験力にモーメントアーム（0.148 m）を乗じて求める。スケール則は、荷重（モーメント）に対しては実機寸法と縮尺試験体の塑性断面係数の比※（= 27）を乗じる。

変位に対しては、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、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を乗ずる。

このスケール則を考慮した場合、表 3-2 となり、極限解析で得られる崩壊荷重の下限値(Pcr)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、図 3-3 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 3-5 に示す。

※：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 3-2 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 | 許容応力状態IVaS |
| ⑤極限解析(Pcr)により 得られる許容荷重 | — | 44.75 | 許容荷重=0.9×④ |

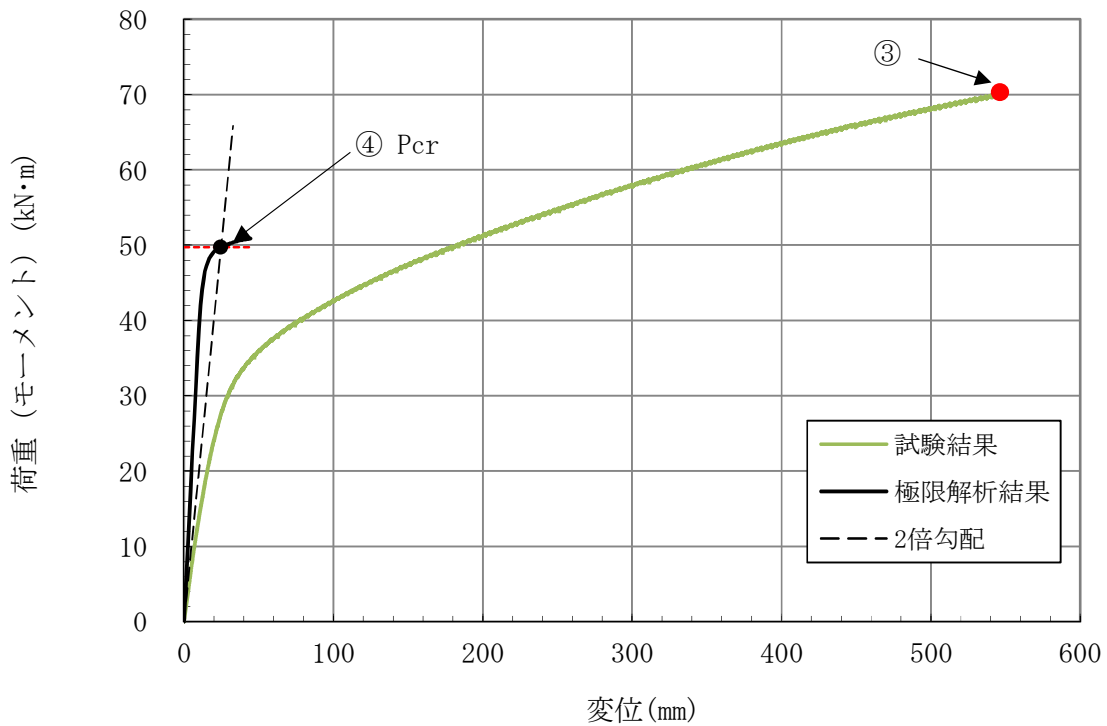


図 3-5 試験結果と極限解析結果の比較

3.5 まとめ

東海第二のスタンドパイプの縮小モデル試験体に荷重（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。

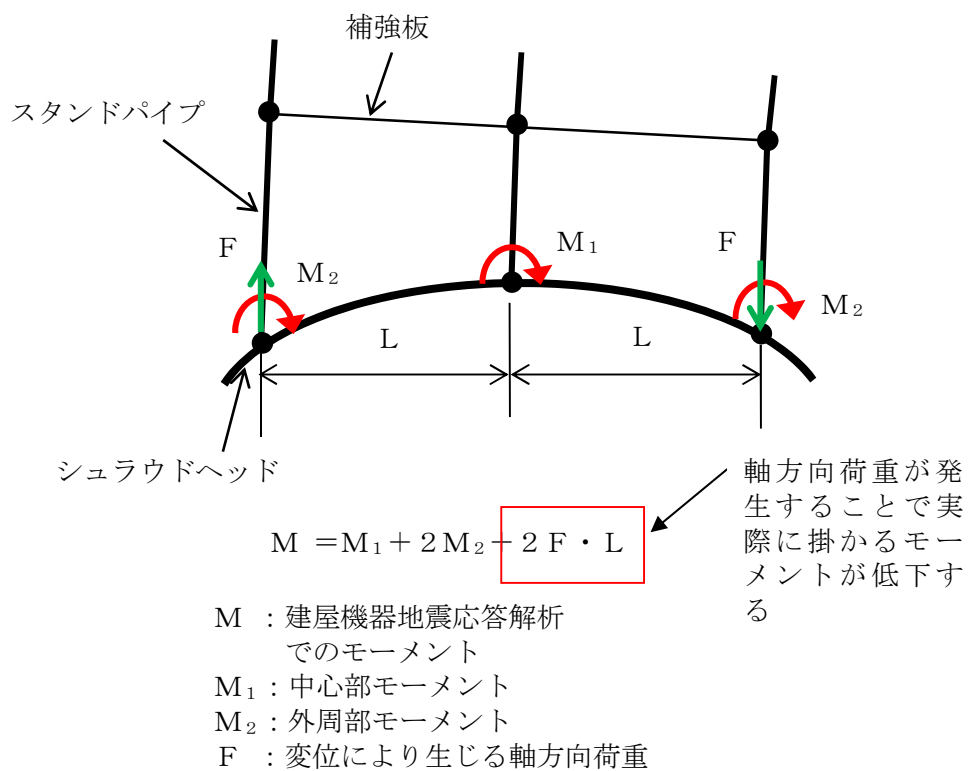
スタンドパイプの長さが異なること等の影響について

極限解析での負荷荷重は、225本のスタンドパイプを1本とした建屋機器連成モデルでの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（225本）にて除した1本あたりの平均地震荷重を入力しているが、実際のスタンドパイプはシュラウドヘッドに取り付けられており、設置位置によりスタンドパイプの長さが異なること及び小補強板並びに大補強板で連結されることにより各スタンドパイプが受け持つ地震荷重（モーメント）は異なると考えられる。

また、地震応答解析でスタンドパイプを1本として算出したスタンドパイプ全体のモーメントと比較して、実際に発生するモーメントは、補強板で連結されることにより変形挙動が同じになることで軸方向に変位が生じ、これにより発生する軸方向荷重によるモーメント分だけ低下すると考えられる。（別図1参照）

これらを踏まえて、建屋機器連成モデルから得られた荷重に対して、225本のスタンドパイプをはり要素にモデル化し、解析を行うことで、各スタンドパイプに発生する地震荷重を算出する。各スタンドパイプの荷重の算出については、補強板等を考慮したスタンドパイプ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、建屋機器地震応答解析から得られたモーメントとのつり合いを考慮した静的解析を実施することにより、スタンドパイプに発生する最大荷重を算出する。

また、スタンドパイプが受け持つ許容値（荷重）には1本のスタンドパイプをソリッド要素にてモデル化したFEMを用いて極限解析を行い、許容荷重が地震荷重を上回ることを確認することで、スタンドパイプの健全性を確認する。現状の極限解析ではスタンドパイプ付け根部に平均地震荷重の倍率を負荷することで崩壊荷重の下限（ P_{cr} ）を求めているが、はり要素にてモデル化して得られたスタンドパイプに発生する最大荷重が平均地震荷重を上回る場合には、最大荷重をスタンドパイプ付け根部に負荷し、極限解析を実施する。



別図1 変位に伴い発生する荷重挙動の概略図