

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 添-3-002-2 改0
提出年月日	2023年10月11日

## クラス1管の強度計算方法

K6 ① VI-3-2-2 R0

2023年10月

東京電力ホールディングス株式会社

## VI-3-2-2 クラス1管の強度計算方法

## 目 次

1. 一般事項	1
1.1 概要	1
1.2 適用規格・基準等	1
2. クラス1管の強度計算方法	2
2.1 計算方針	2
2.2 計算方法	2
2.2.1 解析による計算	2
2.2.2 計算式	4
2.2.3 荷重の組合せ及び許容応力	13
2.2.4 計算精度と数値の丸め方	15
3. 計算書の構成	16
3.1 管の応力計算書	16

## 1. 一般事項

### 1.1 概要

本書は、発電用原子力設備のうちクラス1管の応力計算書（以下「計算書」という。）について説明するものである。

### 1.2 適用規格・基準等

適用規格及び基準を以下に示す。

- ・ 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（原子力規制委員会 2013 年 6 月）（以下「技術基準規則」という。）
- ・ 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（原子力規制委員会 2013 年 6 月）（以下「技術基準規則解釈」という。）
- ・ 発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。）） J S M E S N C 1 -2005/2007）（日本機械学会 2007 年 9 月）（以下「設計・建設規格」という。）
- ・ 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和 55 年通商産業省告示第 5 0 1 号）（以下「告示第 5 0 1 号」という。）

## 2. クラス1管の強度計算方法

### 2.1 計算方針

設計基準対象施設はそれぞれの施設の評価条件での設計・建設規格による評価を実施する。

技術基準規則解釈において、技術基準規則第17条に規定の要求に適合する材料及び構造とは、設計・建設規格によることから、クラス1管は、設計・建設規格 PPB-3500 による評価を実施する。加えて、施設時に適用された規格が告示第501号の範囲については、告示第501号第46条から第48条までの規定に基づく評価を実施する。

### 2.2 計算方法

#### 2.2.1 解析による計算

応力計算は三次元多質点系はりモデルによる解析により実施する。配管系の動的解析手法としては、スペクトルモーダル解析法を用いる。なお、解析コードは、「I S A P」を使用し、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-3 別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

##### 2.2.1.1 解析モデルの作成

配管系の解析モデル作成に当たっては、以下を考慮する。

- (1) 配管系は三次元多質点系はりモデルとし、曲げ、せん断、ねじり及び軸力に対する剛性を考慮する。
- (2) 弁等の偏心質量がある場合には、その影響を評価できるモデル化を行う。また、弁の剛性を考慮したモデル化を行う。
- (3) 同一モデルに含める範囲は、原則としてアンカ点からアンカ点までとする。
- (4) 分岐管がある場合には、その影響を考慮できるモデル化を行う。ただし、母管に対して分岐管の径が十分に小さく、分岐管の振動が母管に与える影響が小さい場合にはこの限りではない。
- (5) 質点は応力が高くなると考えられる点に設定するとともに、代表的な振動モードを十分に表現できるように、適切な間隔で設ける。
- (6) 配管の支持構造物は、以下の境界条件として扱うことを基本とする。
  - a. レストレイント：拘束方向の剛性を考慮する。
  - b. スナッパ：拘束方向の剛性を考慮する。
  - c. アンカ：6方向を固定と扱う。
  - d. ガイド：拘束方向及び回転拘束方向の剛性を考慮する。
- (7) 配管系の質量は、配管自体の質量（フランジ部含む。）の他に弁等の集中質量、保温材等の付加質量及び管内流体の質量を考慮するものとする。

### 2.2.1.2 解析条件

解析において考慮する解析条件を以下に示す。

#### (1) 荷重条件

- a. 内圧
- b. 機械的荷重（自重及びその他の長期的荷重）
- c. 機械的荷重（逃がし弁又は安全弁の吹出し反力及びその他の短期的荷重）
- d. 熱膨張及び熱による支持点の変位による応力
- e. 配管肉厚方向の温度勾配及び管軸に沿った構造上不連続部に生じる熱応力

## 2.2.2 計算式

### 2.2.2.1 記号の定義

計算式中に説明のない記号の定義は下表のとおりとする。

記号	単位	定義
$B_1, B_2, B_{2b}, B_{2r}$	—	設計・建設規格 PPB-3810 及び告示第 501 号第 48 条に規定する応力係数（一次応力の計算に使用するもの）
$C_1, C_2, C_{2b}, C_{2r}, C_3, C_3'$	—	設計・建設規格 PPB-3810 及び告示第 501 号第 48 条に規定する応力係数（一次＋二次応力の計算に使用するもの）
$C_4$	—	フェライト系材料に対し 1.1, オーステナイト系材料に対し 1.3
$D_0$	mm	管の外径
$E$	MPa	設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 及び告示第 501 号別表第 11 に規定する縦弾性係数
$E_{ab}$	MPa	構造上の不連続部分のうち応力集中度が最も高いと推定した点又は材質を異にする点を境とするそれぞれの側の室温における設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 及び告示第 501 号別表第 11 に規定する縦弾性係数の平均値
$K_1, K_2, K_{2b}, K_{2r}, K_3$	—	設計・建設規格 PPB-3810 及び告示第 501 号第 48 条に規定する応力係数（ピーク応力の計算に使用するもの）
$M_{bp}$	N・mm	管台又は突合せ溶接式ティーに接続される分岐管の機械的荷重により生じるモーメント
$M_{br}$	N・mm	管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の機械的荷重（逃がし弁又は安全弁の吹出し反力その他の短期的荷重に限る。）により生じるモーメント
$M_{bs}$	N・mm	（ $S_n, S_p$ ）：管台又は突合せ溶接式ティーに接続される分岐管の熱膨張，支持点の変位及び機械的荷重（自重を除く。）により生じるモーメント （ $S_n'$ ）：管台又は突合せ溶接式ティーに接続される分岐管の支持点の変位（熱によるものを除く。）及び機械的荷重（自重を除く。）により生じるモーメント （ $S_e$ ）：管台又は突合せ溶接式ティーに接続される分岐管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生じるモーメント
$M_c$	N・mm	管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生じるモーメント
$M_{ip}$	N・mm	管の機械的荷重により生じるモーメント

記号	単位	定義
$M_{i s}$	N・mm	( $S_n, S_p$ ) : 管の熱膨張, 支持点の変位及び機械的荷重 (自重を除く。) により生じるモーメント ( $S_n'$ ) : 管の支持点の変位 (熱によるものを除く。) 及び機械的荷重 (自重を除く。) により生じるモーメント ( $S_e$ ) : 管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生じるモーメント
$M_{r p}$	N・mm	管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の機械的荷重により生じるモーメント
$M_{r s}$	N・mm	( $S_n, S_p$ ) : 管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の熱膨張, 支持点の変位及び機械的荷重 (自重を除く。) により生じるモーメント ( $S_n'$ ) : 管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の支持点の変位 (熱によるものを除く。) 及び機械的荷重 (自重を除く。) により生じるモーメント ( $S_e$ ) : 管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生じるモーメント
$n_i$	—	繰返し荷重 $i$ の実際の繰返し回数
$N_i$	—	繰返し荷重 $i$ の許容繰返し回数
$P$	MPa	最高使用圧力
$P_0$	MPa	供用状態 A 及び B (運転状態 I 及び II) において生じる圧力
$P_0'$	MPa	供用状態における最大圧力



記号	単位	定義
$S_c$	MPa	室温における設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 5 及び告示第 5 0 1 号別表第 6 に規定する材料の許容引張応力
$S_e$	MPa	熱膨張応力
$S_\ell$	MPa	繰返しピーク応力強さ
$S_m$	MPa	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 1 及び告示第 5 0 1 号別表第 2 に規定する材料の設計応力強さ
$S_n$	MPa	一次+二次応力
$S_n'$	MPa	一次+二次応力 (熱によるものを除く。)
$S_p$	MPa	ピーク応力
$S_{pr m}$	MPa	一次応力
$S_y$	MPa	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 及び告示第 5 0 1 号別表第 9 に規定する材料の設計降伏点
$t$	mm	管の厚さ
$T_a, T_b$	°C	構造上の不連続部のうち応力集中度が最も高いと推定した点又は材質を異にする点を境とするそれぞれの側における次の計算式により計算した範囲 $l_a, l_b$ 内の平均温度 $l_a = \sqrt{(d_a t_a)}, l_b = \sqrt{(d_b t_b)}$ $d_a$ 及び $d_b$ : 構造上の不連続部のうち応力集中度が最も高いと推定した点を境とするそれぞれの側における管の内径(mm) $t_a$ 及び $t_b$ : $l_a$ 及び $l_b$ の範囲内における管の平均厚さ(mm)
$\Delta T$	°C	温度差の変動範囲
$\Delta T_1$	°C	線形化した厚さ方向の温度分布における管の内外面温度差
$\Delta T_2$	°C	管の内面又は外面において生じる温度とそれに対応する線形化した温度との差のうちいずれか大きい方の温度 (負の場合は 0 とする)
$Z, Z_i$	mm <sup>3</sup>	管の断面係数
$Z_b$	mm <sup>3</sup>	管台又は突合せ溶接式ティーに接続される分岐管の断面係数
$Z_r$	mm <sup>3</sup>	管台又は突合せ溶接式ティーに接続される主管の断面係数
$\alpha$	mm/mm°C	室温における設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 2 及び告示第 5 0 1 号第 12 に規定する熱膨張係数
$\alpha_a, \alpha_b$	mm/mm°C	構造上の不連続部分のうち応力集中度が最も高いと推定した点を境とするそれぞれの側の室温における設計・建設規格付録材料図表 Part6 表 2 及び告示第 5 0 1 号別表第 12 に規定する熱膨張係数

記号	単位	定義
$\varepsilon_e$	—	<p><math>S_p</math>を求めたピーク応力強さのサイクルに対して，弾性解析により計算したときのひずみであり，次の計算式により計算した値</p> $\varepsilon_e = \bar{\sigma}^* / E$ <p><math>\bar{\sigma}^*</math>：弾性解析によるミーゼス相当応力</p>
$\varepsilon_{ep}$	—	<p><math>S_p</math>を求めたピーク応力強さのサイクルに対して，材料の応力-ひずみ関係として，降伏応力を<math>S_m</math>の1.5倍の値とした弾完全塑性体とした弾塑性解析により計算したときのひずみであり，次の計算式により計算した値</p> $\varepsilon_{ep} = \bar{\sigma} / E + \bar{\varepsilon}^p$ <p><math>\bar{\sigma}</math>：弾塑性解析によるミーゼス相当応力  <math>\bar{\varepsilon}^p</math>：弾塑性解析によるミーゼス相当塑性ひずみ</p>

### 2.2.2.2 応力計算

(1) 設計・建設規格 PPB-3500 による評価

a. 一次応力（設計・建設規格 PPB-3520）

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_{pr m}(1) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \leq 1.5 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(1) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq 1.5 \cdot S_m$$

b. 一次応力（設計・建設規格 PPB-3552）

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_{pr m}(2) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \\ \leq \text{Min} (2.25 \cdot S_m, 1.8 \cdot S_y)$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(2) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq \text{Min} (2.25 \cdot S_m, 1.8 \cdot S_y)$$

c. 一次応力（設計・建設規格 PPB-3562）

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_{pr m}(3) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \\ \leq \text{Min} (3 \cdot S_m, 2 \cdot S_y)$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(3) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq \text{Min} (3 \cdot S_m, 2 \cdot S_y)$$

d. 一次+二次応力（設計・建設規格 PPB-3531）

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_n = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + C_3 \cdot E_{ab} \cdot \\ | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | \leq 3 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_n = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_2 \cdot M_{is} / Z_i + C_3 \cdot E_{ab} \cdot | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | \\ \leq 3 \cdot S_m$$

e. ピーク応力（設計・建設規格 PPB-3532）

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_p = K_1 \cdot C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + K_{2b} \cdot C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + \\ K_{2r} \cdot C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot | \Delta T_1 | / 1.4 + K_3 \cdot C_3 \cdot E_{ab} \cdot \\ | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | + E \cdot \alpha \cdot | \Delta T_2 | / 0.7$$

(b) (a)以外の管

$$S_p = K_1 \cdot C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + K_2 \cdot C_2 \cdot M_{is} / Z_i + \\ K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot | \Delta T_1 | / 1.4 + K_3 \cdot C_3 \cdot E_{ab} \cdot | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | + \\ E \cdot \alpha \cdot | \Delta T_2 | / 0.7$$

f. 繰返しピーク応力強さ（設計・建設規格 PPB-3533）

$$S_\theta = S_p / 2$$

- g. 許容繰返し回数（設計・建設規格 PPB-3534）  
 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 及び 3.2 を用いて、設計・建設規格 PPB-3533 に従って算出された繰返しピーク応力強さに対応する許容繰返し回数  $N_i$  を算出する。
- h. 疲労累積係数（設計・建設規格 PPB-3535）  

$$\Sigma (n_i / N_i) \leq 1.0$$
- i. 簡易弾塑性解析（設計・建設規格 PPB-3536）
- (a) 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 1 に定める当該部分の材料の最小降伏点と最小引張強さとの比が 0.8 以下であること。
- (b) 供用状態 A 及び B において生じる当該部分の温度は、次の値を超えないこと。
- イ. 低合金鋼，マルテンサイト系ステンレス鋼及び炭素鋼 370°C  
 ロ. オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金 430°C
- (c) 一次＋二次応力（熱によるものを除く。）
- イ. 管台及び突合せ溶接式ティー  

$$S_n' = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + C_3' \cdot E_{ab} \cdot | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | \leq 3 \cdot S_m$$
- ロ. イ. 以外の管  

$$S_n' = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_2 \cdot M_{is} / Z_i + C_3' \cdot E_{ab} \cdot | \alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b | \leq 3 \cdot S_m$$
- (d) 供用状態 A 及び B における設計・建設規格 PPB-3533 の計算式により計算した応力を繰返しピーク応力強さとした値は、設計・建設規格 添付 4-2, 3.1 及び 3.2 における 10 回の許容繰返し回数に対応する許容繰返しピーク応力強さの値を超えないこと。
- (e) 供用状態 A 及び B における次の計算式により計算した応力を繰返しピーク応力強さとし、設計・建設規格 添付 4-2, 3.1 及び 3.2 において、これに対応する許容繰返し回数が実際の繰返し回数以上であること。この場合において、実際の繰返し回数が 2 種類以上ある場合は、疲労累積係数が 1 以下でなければならない。
- $$S_e = K_e \cdot S_p / 2$$
- $K_e$  : 次の計算式により計算した値
- イ.  $S_n < 3 \cdot S_m$  の場合  

$$K_e = 1$$
- ロ.  $S_n \geq 3 \cdot S_m$  場合  
 (イ)  $K < B_0$  の場合  
 i.  $S_n / (3 \cdot S_m) < [(q + A_0 / K - 1) - \sqrt{\{(q + A_0 / K - 1)^2 - 4 \cdot A_0 \cdot (q - 1)\}}] / (2 \cdot A_0)$  の場合  

$$K_e = K_e^* = 1 + A_0 \cdot \{ S_n / (3 \cdot S_m) - 1 / K \}$$

ii.  $S_n / (3 \cdot S_m) \geq [(q + A_0 / K - 1) - \sqrt{\{(q + A_0 / K - 1)^2 - 4 \cdot A_0 \cdot (q - 1)\}}] / (2 \cdot A_0)$  の場合

$$K_e = K_e' = 1 + (q - 1) \cdot (1 - 3 \cdot S_m / S_n)$$

(ロ)  $K \geq B_0$  の場合

i.  $S_n / (3 \cdot S_m) < [(q - 1) - \sqrt{\{A_0 \cdot (1 - 1/K) \cdot (q - 1)\}}] / a$  の場合

$$K_e = K_e^{**} = a \cdot S_n / (3 \cdot S_m) + A_0 \cdot (1 - 1/K) + 1 - a$$

ii.  $S_n / (3 \cdot S_m) \geq [(q - 1) - \sqrt{\{A_0 \cdot (1 - 1/K) \cdot (q - 1)\}}] / a$  の場合

$$K_e = K_e' = 1 + (q - 1) \cdot (1 - 3 \cdot S_m / S_n)$$

ここで、

$$K = S_p / S_n,$$

$$a = A_0 \cdot (1 - 1/K) + (q - 1) - 2 \cdot \sqrt{\{A_0 \cdot (1 - 1/K) \cdot (q - 1)\}}$$

$q, A_0, B_0$  : 下表に掲げる材料の種類に応じ、それぞれの同表に掲げる値

材料の種類	q	$A_0$	$B_0$
低合金鋼	3.1	1.0	1.25
マルテンサイト系ステンレス鋼	3.1	1.0	1.25
炭素鋼	3.1	0.66	2.59
オーステナイト系ステンレス鋼	3.1	0.7	2.15
高ニッケル合金	3.1	0.7	2.15

$S_n \geq 3 \cdot S_m$  の場合、2.2.2.2(1)i.(e)ロ.に関わらず、次の計算式により計算した値を用いても良い。

$$K_e = \varepsilon_{ep} / \varepsilon_e$$

(f) 熱膨張応力

イ. 管台及び突合せ溶接式ティー

$$S_e = C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r \leq 3 \cdot S_m$$

ロ. (イ)以外の管

$$S_e = C_2 \cdot M_{is} / Z_i \leq 3 \cdot S_m$$

(g) 管の内外面の温度差の変動範囲

$$\Delta T \leq 1.4 \cdot y \cdot S_y / (E \cdot \alpha) \cdot C_4$$

y : x の値に応じ下表に示す値

x	0.3	0.5	0.7	0.8
y	3.33	2.00	1.20	0.80

(備考) 表中の値の中間の値は、比例法によって計算する。

x : 次式により計算した値

$$x = P_0' \cdot D_0 / (2 \cdot t) \cdot 1 / S_y$$

(2) 告示第501号第46条から第48条までの規定に基づく評価

a. 一次応力 (第46条第1号)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_{pr m}(イ) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \leq 1.5 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(イ) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq 1.5 \cdot S_m$$

b. 一次応力 (第46条第2号)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_{pr m}(ロ) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \leq 2.25 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(ロ) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq 2.25 \cdot S_m$$

c. 一次応力 (第46条第3号)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_{pr m}(ハ) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{bp} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{rp} / Z_r \leq 3 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_{pr m}(ハ) = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_{ip} / Z_i \leq 3 \cdot S_m$$

d. 一次+二次応力 (第46条第4号)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_n = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1| / 1.4 + C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| \leq 3 \cdot S_m$$

(b) (a)以外の管

$$S_n = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_2 \cdot M_{is} / Z_i + E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1| / 1.4 + C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| \leq 3 \cdot S_m$$

e. ピーク応力 (第46条第5号)

(a) 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_p = K_1 \cdot C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + K_{2b} \cdot C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + K_{2r} \cdot C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1| / 1.4 + K_3 \cdot C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| + E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_2| / 0.7$$

(b) (a)以外の管

$$S_p = K_1 \cdot C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + K_2 \cdot C_2 \cdot M_{is} / Z_i + K_3 \cdot E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_1| / 1.4 + K_3 \cdot C_3 \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| + E \cdot \alpha \cdot |\Delta T_2| / 0.7$$

f. 繰返しピーク応力強さ (第46条第5号)

$$S_\sigma = S_p / 2$$

g. 許容繰返し回数 (第46条第5号)

別図第1及び別図第2を用いて、繰返しピーク応力強さに対応する許容繰返し回数  $N_i$  を算出する。

h. 疲労累積係数（第 46 条第 5 号）

$$\Sigma (n_i / N_i) \leq 1.0$$

i. 簡易弾塑性解析（第 47 条）

(a) 別表第 2 に定める当該部分の材料の最小降伏点と最小引張強さとの比が 0.8 以下であること。

(b) 運転状態 I 及び II において生じる当該部分の温度は、次の値を超えないこと。

イ. 低合金鋼，マルテンサイト系ステンレス鋼及び炭素鋼 375°C

ロ. オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金 425°C

(c) 一次＋二次応力（熱によるものを除く）

イ. 管台及び突合せ溶接式ティー

$$S_n' = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r + C_3' \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| \leq 3 \cdot S_m$$

ロ. イ. 以外の管

$$S_n' = C_1 \cdot P_0 \cdot D_0 / (2 \cdot t) + C_2 \cdot M_{is} / Z_i + C_3' \cdot E_{ab} \cdot |\alpha_a \cdot T_a - \alpha_b \cdot T_b| \leq 3 \cdot S_m$$

(d) 運転状態 I 及び II における第 46 条第 5 号の計算式により計算した応力を繰返しピーク応力強さとした値は、別図第 1 又は別図第 2 における 10 回の許容繰返し回数に対応する許容繰返しピーク応力強さの値を超えないこと。

(e) 運転状態 I 及び II における次の計算式により計算した応力を繰返しピーク応力強さとし、別図第 1 又は別図第 2 において、これに対応する許容繰返し回数が実際の繰返し回数以上であること。この場合において、実際の繰返し回数が 2 種類以上ある場合は、疲労累積係数が 1 以下でなければならない。

イ.  $S_n < 3 \cdot S_m$  の場合

$$S_0 = S_p / 2$$

ロ.  $3 \cdot S_m \leq S_n \leq 3 \cdot m \cdot S_m$  の場合

$$S_0 = \max [K_e \cdot S_p / 2, \{S_p + A_o \cdot S_n \cdot (S_p / 3 \cdot S_m - 1)\} / 2]$$

$$K_e = 1 + (1 - n) \cdot (S_n / 3 \cdot S_m - 1) / \{n \cdot (m - 1)\}$$

$m, n, A_o$ : 下表に掲げる材料の種類に応じ、それぞれ同表に掲げる値

材料の種類	m	n	$A_o$
低合金鋼	2.0	0.2	1.0
マルテンサイト系ステンレス鋼	2.0	0.2	1.0
炭素鋼	3.0	0.2	0.66
オーステナイト系ステンレス鋼	1.7	0.3	0.7
高ニッケル合金	1.7	0.3	0.7

ハ.  $S_n > 3 \cdot m \cdot S_m$  の場合

$$S_0 = S_p / (2 \cdot n)$$

(f) 熱膨張応力

イ. 管台及び突合せ溶接式テーパー

$$S_e = C_{2b} \cdot M_{bs} / Z_b + C_{2r} \cdot M_{rs} / Z_r \leq 3 \cdot S_m$$

ロ. イ.以外の管

$$S_e = C_2 \cdot M_{is} / Z_i \leq 3 \cdot S_m$$

### 2.2.3 荷重の組合せ及び許容応力

計算における荷重の組合せ及び許容応力を以下に示す。

表 2-1 荷重の組合せ

管クラス	設備	荷重の組合せ	状態
クラス 1 管	原子炉冷却材 圧力バウンダリ	P + M + D	設計条件
		P + M + T + O	供用状態 A, B 許容応力状態 I, II
		P + M + D	供用状態 C 許容応力状態 III
		P + M + D	供用状態 D 許容応力状態 IV

表 2-1 中の記号

P : 内圧による荷重

M : 機械荷重 (自重除く。)

D : 配管の自重による荷重

T : 配管の熱膨張荷重 (支持点の熱膨張変位を含む。)

O : 過渡熱による荷重



表 2-2 許容応力 (設計・建設規格 PPB-3500)

状態	一次応力 (曲げ応力を含む。)	一次+二次 応力	一次+二次 +ピーク応力
設計条件	$1.5 \cdot S_m$	—	—
供用状態 A, B	—	$3 \cdot S_m$	疲労累積係数の和が 1.0 以下であること。
供用状態C	$\text{Min} (2.25 \cdot S_m, 1.8 \cdot S_y)$	—	—
供用状態D	$\text{Min} (3 \cdot S_m, 2 \cdot S_y)$	—	—

表 2-3 許容応力 (告示第 5 0 1 号第 46 条から第 48 条)

状態	一次応力 (曲げ応力を含む。)	一次+二次 応力	一次+二次 +ピーク応力
設計条件	$1.5 \cdot S_m$	—	—
許容応力状態 I, II	—	$3 \cdot S_m$	疲労累積係数の和が 1.0 以下であること。
許容応力状態III	$2.25 \cdot S_m$	—	—
許容応力状態IV	$3 \cdot S_m$	—	—

#### 2.2.4 計算精度と数値の丸め方

計算の精度は、6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は、表2-4に示すとおりである。

表2-4 表示する数値の丸め方

項目	数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
鳥瞰図	寸法	mm	小数点第1位	四捨五入	整数位
	変位量	mm	小数点第2位	四捨五入	小数点第1位
計算条件	圧力	MPa	小数点第3位	四捨五入	小数点第2位*1
	温度	℃	小数点第1位	四捨五入	整数位
	外径	mm	小数点第2位	四捨五入	小数点第1位
	厚さ	mm	小数点第2位	四捨五入	小数点第1位
	縦弾性係数	MPa	小数点第1位	四捨五入	整数位
	質量	kg	小数点第1位	四捨五入	整数位
	単位長さ質量	kg/m	小数点第1位	四捨五入	整数位
	ばね定数	N/mm	有効桁数3桁	四捨五入	有効桁数2桁
	回転ばね定数	N・mm/rad	有効桁数3桁	四捨五入	有効桁数2桁
	方向余弦	—	小数点第5位	四捨五入	小数点第4位
	許容応力*2	MPa	小数点第1位	切捨て	整数位
解析結果及び評価	計算応力	MPa	小数点第1位	切上げ	整数位
	許容応力*2	MPa	小数点第1位	切捨て	整数位

注記\*1：必要に応じて小数点第1位表示若しくは小数点第3位表示とする。また、静水頭は「静水頭」と記載する。

\*2：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における許容応力は、比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て、整数位までの値とする。また、告示別表に記載された許容引張応力は、各温度の値をSI単位に換算し、SI単位に換算した値の小数点以下第1位を四捨五入して、整数位までの値とする。その後、設計・建設規格と同様の換算と桁処理を行う。

### 3. 計算書の構成

#### 3.1 管の応力計算書

##### (1) 概要

本計算方法に基づき、管の応力計算を実施した結果を示す旨を記載する。設計及び工事の計画書に記載されている範囲の管のうち、各応力区分における最大応力評価点の評価結果を解析モデル単位に記載する。また、各応力区分における最大応力評価点の許容値／発生値（以下「裕度」という。）が最小となる解析モデルを代表として鳥瞰図、計算条件及び評価結果を記載する。各応力区分における代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果についても記載する。

##### (2) 概略系統図

設計及び工事の計画書に記載されている範囲の系統の概略を示した図面を添付する。

##### (3) 鳥瞰図

評価結果記載の解析モデルの解析モデル図を添付する。

##### (4) 計算条件

本項目記載内容及び記載フォーマットを FORMAT 応-1～応-7-2 に示す。

なお、クラス 1 管の供用状態 A 及び B（運転状態 I 及び II）における一次＋二次応力評価及び疲労評価において考慮する運転条件については、既工認から変更がないことから、記載を省略する。

##### (5) 評価結果

本項目記載内容及び記載フォーマットを FORMAT 応-8-1～応-8-2 に示す。

##### (6) 代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果

代表モデルは各モデルの最大応力点の応力と裕度を算出し、応力分類毎に裕度最小のモデルを選定して鳥瞰図、計算条件及び評価結果を記載する。このため、代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果を記載する。本項目記載内容及び記載フォーマットを FORMAT 応-9 に示す。

・FORMAT 応-1 :

設計条件

鳥瞰図番号ごとに設計条件に対応した管名称で区分し、管名称と対応する評価点番号を示す。

鳥瞰図番号

管名称	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材料

・FORMAT 応-2 :

管名称と対応する評価点

評価点の位置は鳥瞰図に示す。

鳥瞰図番号

管名称	対応する評価点

・FORMAT 応-3 :

配管の質量(配管の付加質量及びフランジの質量を含む)

鳥瞰図番号

評価点の質量を下表に示す。

評価点	質量(kg)	評価点	質量(kg)	評価点	質量(kg)	評価点	質量(kg)	評価点	質量(kg)

・FORMAT 応-4 :

鳥瞰図番号

弁部の質量を下表に示す。

弁 1

弁 2

評価点	質量(kg)	評価点	質量(kg)

・FORMAT 応-5 :

鳥瞰図番号

弁部の寸法を下表に示す。

弁 NO.	評価点	外径(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)

・FORMAT 応-6 :

支持点及び貫通部ばね定数

鳥瞰図番号

支持点部のばね定数を下表に示す。

支持点番号	各軸方向ばね定数(N/mm)			各軸回り回転ばね定数(N・mm/rad)		
	X	Y	Z	X	Y	Z

・FORMAT 応-7-1 :

材料及び許容応力

使用する材料の最高使用温度での許容応力を下表に示す。

設計・建設規格に規定の応力評価に用いる許容応力

材料	最高使用温度 (°C)	許容応力(MPa) *			
		S <sub>m</sub>	S <sub>y</sub>	S <sub>u</sub>	S <sub>h</sub>

注記\* : 評価に使用しない許容応力については「—」と記載する。

・FORMAT 応-7-2 :

材料及び許容応力

使用する材料の最高使用温度での許容応力を下表に示す。

告示第501号に規定の応力評価に用いる許容応力

材料	最高使用温度 (°C)	許容応力 (MPa) *			
		S <sub>m</sub>	S <sub>y</sub>	S <sub>u</sub>	S <sub>h</sub>

注記\* : 評価に使用しない許容応力については「—」と記載する。

・FORMAT 応-8-1 :

評価結果

下表に示すとおり最大応力及び疲労累積係数はそれぞれの許容値以下である。

クラス1管

設計・建設規格 PPB-3500 の規定に基づく評価

鳥瞰図番号

供用 状態	最大 応力 評価 点	配管 要素 名称	最大応力 区分	一次応力評価 (MPa)		一次+二次応力評価 (MPa)				熱応力評価 (°C)		疲労評価 疲労累積 係数 U
				一次応力 S <sub>prim</sub>	許容 応力 1.5・S <sub>m</sub> Min(2.25・S <sub>m</sub> , 1.8・S <sub>y</sub> ) Min(3・S <sub>m</sub> , 2・S <sub>y</sub> )	一次+二次 応力 S <sub>n</sub>	熱膨張 応力 S <sub>e</sub>	熱を除いた 一次+二次 応力 S <sub>n</sub> '	許容 応力 3・S <sub>m</sub>	温度差の 変動範囲 ΔT	許容 温度差 *	
(A, B)			S <sub>prim</sub> (1)	Max	1.5・S <sub>m</sub>	—	—	—	—	—	—	—
(A, B)			S <sub>n</sub>	—	—	Max	—	—	3・S <sub>m</sub>	—	—	—
(A, B)			S <sub>e</sub>	—	—	—	Max	—	3・S <sub>m</sub>	—	—	—
(A, B)			S <sub>n</sub> '	—	—	—	—	Max	3・S <sub>m</sub>	—	—	—
(A, B)			ΔT	—	—	—	—	—	—	Max	*	—
(A, B)			U	—	—	—	—	—	—	—	—	Max
C			S <sub>prim</sub> (2)	Max	Min(2.25・S <sub>m</sub> , 1.8・S <sub>y</sub> )	—	—	—	—	—	—	—
D			S <sub>prim</sub> (3)	Max	Min(3・S <sub>m</sub> , 2・S <sub>y</sub> )	—	—	—	—	—	—	—

注記\* : 本書 2.2.2.2(1) i. (g) に基づき計算した値  $((1.4 \cdot y \cdot S_y / E \cdot \alpha) \cdot C_4)$  を記載する。

・FORMAT 応-8-2 :

評価結果

下表に示すとおり最大応力及び疲労累積係数はそれぞれの許容値以下である。

クラス 1 管

告示第 5 0 1 号第 46 条から第 48 条までの規定に基づく評価

鳥瞰図番号

運転 状態	最大 応力 評価点	配管 要素 名称	最大応力 区分	一次応力評価 (MPa)		一次+二次応力評価 (MPa)				疲労評価  疲労累積 係数  U
				一次応力  $S_{p r m}$	許容 応力  $1.5 \cdot S_m$ $2.25 \cdot S_m$ $3 \cdot S_m$	一次+二次 応力  $S_n$	熱膨張 応力  $S_e$	熱を除いた 一次+二次 応力  $S_n'$	許容 応力  $3 \cdot S_m$	
I, II			$S_{p r m}$ (イ)	Max	$1.5 \cdot S_m$	—	—	—	—	—
I, II			$S_n$	—	—	Max	—	—	$3 \cdot S_m$	—
I, II			$S_e$	—	—	—	Max	—	$3 \cdot S_m$	—
I, II			$S_n'$	—	—	—	—	Max	$3 \cdot S_m$	—
I, II			U	—	—	—	—	—	—	Max
III			$S_{p r m}$ (ロ)	Max	$2.25 \cdot S_m$	—	—	—	—	—
IV			$S_{p r m}$ (ハ)	Max	$3 \cdot S_m$	—	—	—	—	—

・FORMAT 応-9 :

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果 (クラス1管 供用状態A, B)

No.	配管モデル	供用状態 (A, B)												
		一次応力 (膜+曲げ)					一次+二次応力 (Sn)					疲労評価		
		評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	疲労累積係数	代表
1	***-1	1	**	***	*,**	—	11	**	***	*,**	—	17	*,***	—
2	***-2	2	**	***	*,**	—	12	**	***	*,**	○	18	*,***	—
3	***-3	3	**	***	*,**	—	13	**	***	*,**	—	19	*,***	○
4	***-4	4	**	***	*,**	○	14	**	***	*,**	—	20	*,***	—
5	***-5	5	**	***	*,**	—	15	**	***	*,**	—	21	*,***	—
6	***-6	6	**	***	*,**	—	16	**	***	*,**	—	22	*,***	—

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果 (クラス1管 供用状態C, D)

No.	配管モデル	供用状態C					供用状態D				
		一次応力 (膜+曲げ)					一次応力 (膜+曲げ)				
		評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表	評価点	計算応力 [MPa]	許容応力 [MPa]	裕度	代表
1	***-1	23	**	***	*,**	—	29	**	***	*,**	—
2	***-2	24	**	***	*,**	—	30	**	***	*,**	—
3	***-3	25	**	***	*,**	—	31	**	***	*,**	—
4	***-4	26	**	***	*,**	○	32	**	***	*,**	○
5	***-5	27	**	***	*,**	—	33	**	***	*,**	—
6	***-6	28	**	***	*,**	—	34	**	***	*,**	—