

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-20-0022_改1
提出年月日	2021年2月12日

VI-3-2-4 クラス2管の強度計算方法

2021年2月

東北電力株式会社

まえがき

本強度計算方法は、工事計画認可申請書に添付するクラス2管の強度計算について説明するものである。

本書は、以下により構成される。

クラス2管の応力計算方法

クラス2管の応力計算方法

目次

1. 一般事項	1
1.1 概要	1
1.2 適用基準	1
2. クラス2管の強度計算方法	1
2.1 計算方針	1
2.2 計算方法	1
3. 計算書の構成	9
3.1 管の応力計算書	9

1. 一般事項

1.1 概要

本計算方法は、発電用原子力設備のうち、クラス 2 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 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 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（以下「技術基準規則」という。）
- (2) 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（以下「技術基準規則解釈」という。）
- (3) 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）（以下「設計・建設規格」という。）
- (4) 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 2 管の強度計算方法

2.1 計算方針

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、施設時の規格によることから、クラス 2 管は、設計・建設規格 PPC-3500 と告示第 5 0 1 号 第 56 条のいずれか安全側による評価を実施する。

2.2 計算方法

2.2.1 解析による計算

応力計算についての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、解析は解析コード「I S A P」を使用する。評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「VI-5 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、管内流体の質量、付加質量として保温材等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

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 に規定する応力係数 (一次応力の計算に使用するもの)
D_0	mm	管の外径
f	—	設計・建設規格 PPC-3530 に規定する許容応力低減係数
i_1	—	・告示第501号第57条に規定する値又は1.33のいずれか大きい方の値 ・設計・建設規格 PPC-3810 に規定する値又は1.33のいずれか大きい方の値
i_2	—	・告示第501号第57条に規定する値又は1.0のいずれか大きい方の値 ・設計・建設規格 PPC-3810 に規定する値又は1.0のいずれか大きい方の値
M_a	N・mm	管の機械的荷重（自重その他の長期的荷重に限る。）により生ずるモーメント
M_{ab}	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（自重その他の長期的荷重に限る。）により生ずるモーメント
M_{ar}	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（自重その他の長期的荷重に限る。）により生ずるモーメント
M_b	N・mm	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。）により生ずるモーメント

記号	単位	定義
M_{bb}	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（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。）により生ずるモーメント
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。）により生ずるモーメント
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ずるモーメント
P	MPa	最高使用圧力
P_m	MPa	内面に受ける最高の圧力
S_a	MPa	告示第501号第56条第2号又は設計・建設規格 PPC-3530に規定する許容応力
S_c	MPa	室温における告示第501号 別表第6又は設計・建設規格付録材料図表 Part5 表5に規定する材料の許容引張応力
S_h	MPa	最高使用温度における告示第501号 別表第6又は設計・建設規格付録材料図表 Part5 表5に規定する材料の許容引張応力
S_n	MPa	一次＋二次応力
$S_{pr m}$	MPa	一次応力
t	mm	管の厚さ
Z, Z_i	mm ³	管の断面係数
Z_b	mm ³	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 ³	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
(I, II)	—	運転状態 I 及び運転状態 II 若しくは設計条件相当の応力評価を行う運転状態
(A, B)	—	供用状態 A 及び供用状態 B 若しくは設計条件相当の応力評価を行う供用状態

2.2.2.2 応力計算

(1) 告示第501号第56条の規定に基づく評価

a. 一次応力 (告示第501号第56条第1号)

(a) 最高使用圧力及び機械的荷重 (自重その他の長期的荷重に限る。) による一次応力

$$S_{pr m} = P \cdot D_0 / (4 \cdot t) + 0.75 \cdot i_1 \cdot M_a / Z \leq S_h$$

(b) 内面に受ける最高の圧力及び機械的荷重 (自重その他の長期的荷重及び逃し弁又は安全弁の吹出し反力その他の短期的荷重) による一次応力

$$S_{pr m} = P_m \cdot D_0 / (4 \cdot t) + 0.75 \cdot i_1 \cdot (M_a + M_b) / Z \leq 1.2 \cdot S_h$$

b. 一次+二次応力 (告示第501号第56条第2号)

(a) 最高使用圧力及び機械的荷重 (自重その他の長期的荷重に限る。) による一次+二次応力

$$S_n = P \cdot D_0 / (4 \cdot t) + (0.75 \cdot i_1 \cdot M_a + i_2 \cdot M_c) / Z$$

(b) 内面に受ける最高の圧力及び機械的荷重 (自重その他の長期的荷重及び逃し弁又は安全弁の吹出し反力その他の短期的荷重) による一次+二次応力

$$S_n = P_m \cdot D_0 / (4 \cdot t) + \{0.75 \cdot i_1 \cdot (M_a + M_b) + i_2 \cdot M_c\} / Z$$

(c) (a)に対する許容応力

$$S_a = 1.25 \cdot f \cdot S_c + (1 + 0.25 \cdot f) \cdot S_h$$

(d) (b)に対する許容応力

$$S_a = 1.25 \cdot f \cdot S_c + (1.2 + 0.25 \cdot f) \cdot S_h$$

(2) 設計・建設規格 PPC-3500 による評価

a. 一次応力 (設計・建設規格 PPC-3520)

(a) 最高使用圧力及び機械的荷重 (自重その他の長期的荷重に限る。) による一次応力

イ. 管台及び突合せ溶接式ティー

$$S_{pr m} = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot M_{ab} / Z_b + B_{2r} \cdot M_{ar} / Z_r \leq 1.5 \cdot S_h$$

ロ. イ.以外の管

$$S_{pr m} = B_1 \cdot P \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot M_a / Z \leq 1.5 \cdot S_h$$

(b) 内面に受ける最高の圧力及び機械的荷重 (自重その他の長期的荷重及び逃し弁又は安全弁の吹出し反力その他の短期的荷重) による一次応力

イ. 管台及び突合せ溶接式ティー

$$S_{pr m} = B_1 \cdot P_m \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_{2b} \cdot (M_{ab} + M_{bb}) / Z_b + B_{2r} \cdot (M_{ar} + M_{br}) / Z_r \leq 1.8 \cdot S_h$$

ロ. イ.以外の管

$$S_{pr m} = B_1 \cdot P_m \cdot D_0 / (2 \cdot t) + B_2 \cdot (M_a + M_b) / Z \leq 1.8 \cdot S_h$$

b. 一次＋二次応力（設計・建設規格 PPC-3530）

- (a) 最高使用圧力及び機械的荷重（自重その他の長期的荷重に限る。）による一次＋二次応力

$$S_n = P \cdot D_0 / (4 \cdot t) + (0.75 \cdot i_1 \cdot M_a + i_2 \cdot M_c) / Z$$

- (b) 内面に受ける最高の圧力及び機械的荷重（自重その他の長期的荷重及び逃し弁又は安全弁の吹出し反力その他の短期的荷重）による一次＋二次応力

$$S_n = P_m \cdot D_0 / (4 \cdot t) + \{0.75 \cdot i_1 \cdot (M_a + M_b) + i_2 \cdot M_c\} / Z$$

- (c) (a)に対する許容応力

$$S_a = 1.25 \cdot f \cdot S_c + (1 + 0.25 \cdot f) \cdot S_h$$

- (d) (b)に対する許容応力

$$S_a = 1.25 \cdot f \cdot S_c + (1.2 + 0.25 \cdot f) \cdot S_h$$

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	荷重の組合せ	状態
クラス 2 管	P + D	設計条件 運転状態 I, II 供用状態 A, B
	P + D + M	

表 2-2 許容応力 (告示第 5 0 1 号第 56 条)

状態	荷重の組合せ	一次応力 (曲げ応力 を含む。)	一次+二次応力
設計条件	P + D	S_h	—
	P + D + M	$1.2 \cdot S_h$	—
運転状態 I, II	P + D	—	$S_a = 1.25 \cdot f \cdot S_c + (1 + 0.25 \cdot f) \cdot S_h$
	P + D + M	—	$S_a = 1.25 \cdot f \cdot S_c + (1.2 + 0.25 \cdot f) \cdot S_h$

表 2-3 許容応力 (設計・建設規格 PPC-3500)

状態	荷重の組合せ	一次応力 (曲げ応力 を含む。)	一次+二次応力
設計条件	P + D	$1.5 \cdot S_h$	—
	P + D + M	$1.8 \cdot S_h$	—
供用状態 A, B	P + D	—	$S_a = 1.25 \cdot f \cdot S_c + (1 + 0.25 \cdot f) \cdot S_h$
	P + D + M	—	$S_a = 1.25 \cdot f \cdot S_c + (1.2 + 0.25 \cdot f) \cdot S_h$

表 2-1, 表 2-2, 表 2-3 中の記号

P : 内圧による荷重

D : 自重その他の長期的荷重

M : 逃し弁又は安全弁の吹出し反力その他の短期的荷重

2.2.4 計算精度と桁処理方法

計算精度は 6 桁以上を確保する。表示する数値の桁処理方法は表 2-4 に示すとおりである。

表 2-4 数値の桁処理方法

数値の種類		単位	処理桁	処理方法	表示桁
圧力*1		MPa	—	—	小数点以下第 2 位*2
温度		℃	—	—	整数位
長さ	下記以外の長さ	mm	—	—	小数点以下第 1 位
	移動量	mm	小数点以下第 2 位	四捨五入	小数点以下第 1 位
	鳥瞰図記載	mm	小数点以下第 1 位	四捨五入	整数位
質量		kg	小数点以下第 1 位	四捨五入	整数位
ばね定数		N/mm	有効桁数 4 桁	四捨五入	有効桁数 3 桁
回転ばね定数		N・mm/rad	有効桁数 4 桁	四捨五入	有効桁数 3 桁
方向余弦		—	小数点以下第 5 位	四捨五入	小数点以下第 4 位
応力	算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
	許容応力*3	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記 *1: 必要に応じて kPa を使用し, MPa 表示を () 内に併記する。また, 静水頭は「静水頭」と表示する。

*2: 必要に応じて小数点以下第 3 位又は第 4 位を用いる。

*3: 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応力は, 各温度の値を SI 単位に換算し, 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。

また、評価結果の記載方法は以下とする旨を記載する。

a. 管

工事計画記載範囲の管のうち、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) 概略系統図及び鳥瞰図

a. 概略系統図

工事計画記載範囲の管を含む概略系統図を添付する。

b. 鳥瞰図

工事計画記載範囲の管のうち評価結果記載の解析モデルの解析モデル図を添付する。

(3) 計算条件

本項目記載内容及び添付フォーマットを以下に示す。ただし、鳥瞰図の添付を省略した範囲については、同様の理由で添付を省略する。

a. 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 (℃)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材料

鳥瞰図番号

管名称	対 応 す る 評 価 点

配管の質量（付加質量含む）

鳥瞰図番号

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)

弁部の質量を下表に示す。

鳥瞰図番号

評価点	質量 (kg)	評価点	質量 (kg)

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)

支持点部のばね定数を下表に示す。

鳥瞰図番号

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

**印は斜め拘束を示しばね定数を X に示す。下段は方向余弦を示す。

b. 材料及び許容応力

材料	最高使用温度 (°C)	許容応力 (MPa) *			
		S_m	S_y	S_u	S_h

注記 * : 評価に使用しない許容応力については欄を設けない。

(4) 評価結果

工事計画記載範囲の管の各応力区分における最大発生応力の評価点の評価結果を示した表を解析モデル単位に添付する。解析モデルは各応力区分における裕度最小モデルを添付する。添付フォーマットを以下に示す。

a. 告示501号第56条による評価結果

鳥瞰図	運転状態	最大応力評価点	最大応力区分*1	一次応力評価 (MPa)		一次+二次応力評価 (MPa)	
				計算応力	許容応力	計算応力	許容応力*2
				$S_{prm}(1)$	S_h	$S_n(a)$	$S_a(c)$
				$S_{prm}(2)$	$1.2 \cdot S_h$	$S_n(b)$	$S_a(d)$
鳥瞰図 番号	(I, II)		$S_{prm}(1)$	Max	S_h		
	(I, II)		$S_n(a)$			Max	$S_a(c)$
	(I, II)		$S_{prm}(2)$	Max	$1.2 \cdot S_h$		
	(I, II)		$S_n(b)$			Max	$S_a(d)$

注記 *1 : $S_{prm}(1)$, $S_{prm}(2)$ はそれぞれ、告示501号第56条第1号(イ), (ロ)に基づき計算した一次応力, $S_n(a)$, $S_n(b)$ はそれぞれ、告示501号第56条第2号(イ), (ロ)に基づき計算した一次+二次応力を示す。

*2 : $S_a(c)$, $S_a(d)$ はそれぞれ、告示501号第56条第2号(ハ), (ニ)に基づき計算した許容応力を示す。

b. 設計・建設規格 PPC-3500 による評価結果

鳥瞰図	供用状態	最大応力評価点	最大応力区分*1	一次応力評価 (MPa)		一次+二次応力評価 (MPa)	
				計算応力	許容応力	計算応力	許容応力*2
				$S_{prm}(1)$	$1.5 \cdot S_h$	$S_n(a)$	$S_a(c)$
				$S_{prm}(2)$	$1.8 \cdot S_h$	$S_n(b)$	$S_a(d)$
鳥瞰図 番号	(A, B)		$S_{prm}(1)$	Max	$1.5 \cdot S_h$	Max	$S_a(c)$
	(A, B)		$S_n(a)$				
	(A, B)		$S_{prm}(2)$	Max	$1.8 \cdot S_h$		
	(A, B)		$S_n(b)$			Max	$S_a(d)$

注記 *1: $S_{prm}(1)$, $S_{prm}(2)$ はそれぞれ、設計・建設規格 PPC-3520(1), (2)に基づき計算した一次応力, $S_n(a)$, $S_n(b)$ はそれぞれ、設計・建設規格 PPC-3530(1)a, bに基づき計算した一次+二次応力を示す。

*2: $S_a(c)$, $S_a(d)$ はそれぞれ、設計・建設規格 PPC-3530(1)c, dに基づき計算した許容応力を示す。

(5) 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、下表の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。

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果 (クラス 2 範囲)

No	配管モデル	運転状態 (I, II) *1					運転状態 (I, II) *2				
		一次応力					一次応力				
		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	1	**	***	*,**	—	9	**	***	*,**	—
2	***-2	2	**	***	*,**	○	10	**	***	*,**	○
3	***-3	3	**	***	*,**	—	11	**	***	*,**	—
4	***-4	4	**	***	*,**	—	12	**	***	*,**	—
5	***-5	5	**	***	*,**	—	13	**	***	*,**	—
6	***-6	6	**	***	*,**	—	14	**	***	*,**	—
7	***-7	7	**	***	*,**	—	15	**	***	*,**	—
8	***-8	8	**	***	*,**	—	16	**	***	*,**	—

注記 *1: 告示第 501 号第 56 条第 1 号 (イ) に基づき計算した一次応力を示す。

*2: 告示第 501 号第 56 条第 1 号 (ロ) に基づき計算した一次応力を示す。

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果（クラス 2 範囲）

No	配管 モデル	運転状態（Ⅰ，Ⅱ） ^{*3}					運転状態（Ⅰ，Ⅱ） ^{*4}				
		一次＋二次応力					一次＋二次応力				
		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	1	**	***	*,**	—	9	**	***	*,**	—
2	***-2	2	**	***	*,**	○	10	**	***	*,**	○
3	***-3	3	**	***	*,**	—	11	**	***	*,**	—
4	***-4	4	**	***	*,**	—	12	**	***	*,**	—
5	***-5	5	**	***	*,**	—	13	**	***	*,**	—
6	***-6	6	**	***	*,**	—	14	**	***	*,**	—
7	***-7	7	**	***	*,**	—	15	**	***	*,**	—
8	***-8	8	**	***	*,**	—	16	**	***	*,**	—

注記 *3：告示第 5 0 1 号第 56 条第 2 号（イ）に基づき計算した一次＋二次応力を示す。

*4：告示第 5 0 1 号第 56 条第 2 号（ロ）に基づき計算した一次＋二次応力を示す。

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果（クラス 2 範囲）

No	配管 モデル	供用状態（A，B） ^{*1}					供用状態（A，B） ^{*2}				
		一次応力					一次応力				
		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	1	**	***	*,**	—	9	**	***	*,**	—
2	***-2	2	**	***	*,**	○	10	**	***	*,**	○
3	***-3	3	**	***	*,**	—	11	**	***	*,**	—
4	***-4	4	**	***	*,**	—	12	**	***	*,**	—
5	***-5	5	**	***	*,**	—	13	**	***	*,**	—
6	***-6	6	**	***	*,**	—	14	**	***	*,**	—
7	***-7	7	**	***	*,**	—	15	**	***	*,**	—
8	***-8	8	**	***	*,**	—	16	**	***	*,**	—

注記 *1：設計・建設規格 PPC-3520(1)に基づき計算した一次応力を示す。

*2：設計・建設規格 PPC-3520(2)に基づき計算した一次応力を示す。

代表モデルの選定結果及び全モデルの評価結果（クラス 2 範囲）

No	配管 モデル	供用状態 (A, B) *3					供用状態 (A, B) *4				
		一次+二次応力					一次+二次応力				
		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	1	**	***	*,**	—	9	**	***	*,**	—
2	***-2	2	**	***	*,**	○	10	**	***	*,**	○
3	***-3	3	**	***	*,**	—	11	**	***	*,**	—
4	***-4	4	**	***	*,**	—	12	**	***	*,**	—
5	***-5	5	**	***	*,**	—	13	**	***	*,**	—
6	***-6	6	**	***	*,**	—	14	**	***	*,**	—
7	***-7	7	**	***	*,**	—	15	**	***	*,**	—
8	***-8	8	**	***	*,**	—	16	**	***	*,**	—

注記 *3：設計・建設規格 PPC-3530(1)aに基づき計算した一次+二次応力を示す。

*4：設計・建設規格 PPC-3530(1)bに基づき計算した一次+二次応力を示す。