

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7添-3-020 改1
提出年月日	2020年6月18日

## V-3-別添8 原子炉压力容器スカートの強度計算書

V-3-別添8 原子炉压力容器スカート強度計算書

目 次  
(原子炉压力容器スカート)

1. 一般事項	1
1.1 適用基準	1
1.2 記号の説明	2
1.3 計算精度と数値の丸め方	3
1.4 形状・寸法・材料	3
1.5 解析範囲	3
1.6 計算結果の概要	3
2. 計算条件	6
2.1 設計条件	6
2.2 運転条件	6
2.3 材料	6
2.4 物性値	6
2.5 荷重の組合せ	7
2.5.1 荷重の組合せ及び運転状態	7
2.5.2 荷重の組合せ及び応力評価	7
2.6 許容応力	7
2.7 応力の記号と方向	8
3. 応力解析の手順	9
3.1 温度分布計算	9
3.1.1 境界の熱伝達率	9
3.1.2 温度分布の計算	9
3.1.3 熱応力の計算時点	9
3.2 応力計算	10
3.2.1 応力評価点	10
3.2.2 内圧による応力	10
3.2.3 外荷重による応力	10
3.2.4 熱応力	10
4. 応力強さの評価	11
4.1 主応力	11
4.2 応力強さ	11
4.3 一次一般膜応力強さの評価	11
4.4 一次膜＋一次曲げ応力強さの評価	11
4.5 一次＋二次応力強さの評価	11

5. 繰返し荷重の評価	12
5.1 疲労解析	12
5.1.1 考慮する運転条件	12
5.1.2 疲労累積係数	12
6. 特別な応力の評価	13
6.1 座屈に対する評価	13
6.1.1 計算データ	13
6.1.2 荷重	13
6.1.3 圧縮応力	13
6.1.4 許容応力	14
6.1.5 座屈に対する評価	15
7. 引用文献	16
8. 参照図書	16

図 表 目 次  
(原子炉圧力容器スカート)

図1-1	形状・寸法・材料・応力評価点	4
図3-1	応力解析の手順	17
図3-2	温度分布及び応力計算のモデル	18
図3-3	温度遷移図	19
図3-4	温度分布図	25
図5-1	応力差の変動	40
表1-1	表示する数値の丸め方	3
表1-2	計算結果の概要	5
表2-1	外荷重	41
表2-2	荷重の組合せ及び運転状態	42
表2-3	荷重の組合せ	42
表2-4	許容応力	43
表2-5	許容応力評価条件	43
表3-1	熱伝達率の計算	44
表3-2	応力集中係数	47
表4-1	一次膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	48
表4-2	一次＋二次応力強さの評価のまとめ	49
表5-1	疲労累積係数の評価のまとめ	50
表6-1	座屈に対する評価に用いる荷重	51
表6-2	座屈に対する評価	51

## 1. 一般事項

本計算書は、原子炉压力容器スカート（以下「スカート」という。）の応力計算について示すものである。

スカートは、通商産業省告示第501号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」第88条第1項の規定により第13条第1項第1号及び第3号、第14条並びに第16条の規定を適用して解析する。

注：図表は、原則として巻末に示す。

### 1.1 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和55年10月30日 通商産業省告示第501号（以下「告示第501号」）という。）

注：本書において、告示の条項は「告示第○条第△項第◇号」として示す。

## 1.2 記号の説明

本計算書において、以下の記号を使用する。ただし、別途記載ある場合は、この限りでない。

なお、記号の字体及び大きさについては、異なる場合がある。

記号	記号の説明	単位
A	スカート断面積	mm <sup>2</sup>
H	水平力	N
M	モーメント	N・m
P <sub>b</sub>	一次曲げ応力	MPa
P <sub>L</sub>	一次局部膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
R <sub>m</sub>	スカートの平均半径	mm
S <sub>12</sub>	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S <sub>23</sub>	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S <sub>31</sub>	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S <sub>m</sub>	設計応力強さ 告示別表第2に定める値	MPa
S <sub>n</sub>	運転状態Ⅰ及びⅡにおける一次＋二次応力の応力差最大範囲	MPa
S <sub>p</sub>	一次＋二次＋ピーク応力の応力差範囲	MPa
S <sub>u</sub>	設計引張強さ 告示別表第10に定める値	MPa
S <sub>y</sub>	設計降伏点 告示別表第9に定める値	MPa
t	スカートの板厚	mm
U <sub>n</sub>	運転状態Ⅰ及びⅡにおける疲労累積係数	—
V <sub>1</sub>	スカート付根部下側より作用する鉛直力	N
V <sub>2</sub>	スカート付根部上側より作用する鉛直力	N
Z	スカートの断面係数	mm <sup>3</sup>
$\sigma_1$	主応力	MPa
$\sigma_2$	主応力	MPa
$\sigma_3$	主応力	MPa
$\sigma_\ell$	軸方向応力	MPa
$\sigma_r$	半径方向応力	MPa
$\sigma_t$	周方向応力	MPa
$\sigma_c$	スカートの圧縮応力	MPa
$\sigma_{ca}$	スカートの圧縮応力に対する許容応力	MPa
$\tau_{\ell r}$	せん断応力	MPa
$\tau_{rt}$	せん断応力	MPa
$\tau_{t\ell}$	せん断応力	MPa

### 1.3 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表1-1に示すとおりとする。

表1-1 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
応力強さ	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力*	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位
疲労累積係数	—	小数点以下第4位	切上げ	小数点以下第3位
許容値	—	—	—	小数点以下第1位

注記\*：告示別表に記載された温度の中間における許容引張応力，設計降伏点及び設計引張強さは，比例法により補間した値の小数点以下第2位を切り捨て，小数点以下第1位までの値として算出する。得られた値をSI単位に換算し，SI単位に換算した値の小数点以下第1位を切り捨てて整数化する。

### 1.4 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図1-1に示す。

### 1.5 解析範囲

解析範囲を図1-1に示す。

### 1.6 計算結果の概要

計算結果の概要を表1-2に示す。

なお，応力評価点の選定に当たっては，形状不連続部，溶接部及び厳しい荷重作用点に着目し，各部分ごとに数点の評価点を設けて評価を行い，疲労累積係数が厳しくなる評価点を記載する。



○ : 応力評価点  
 [ ] : 材 料

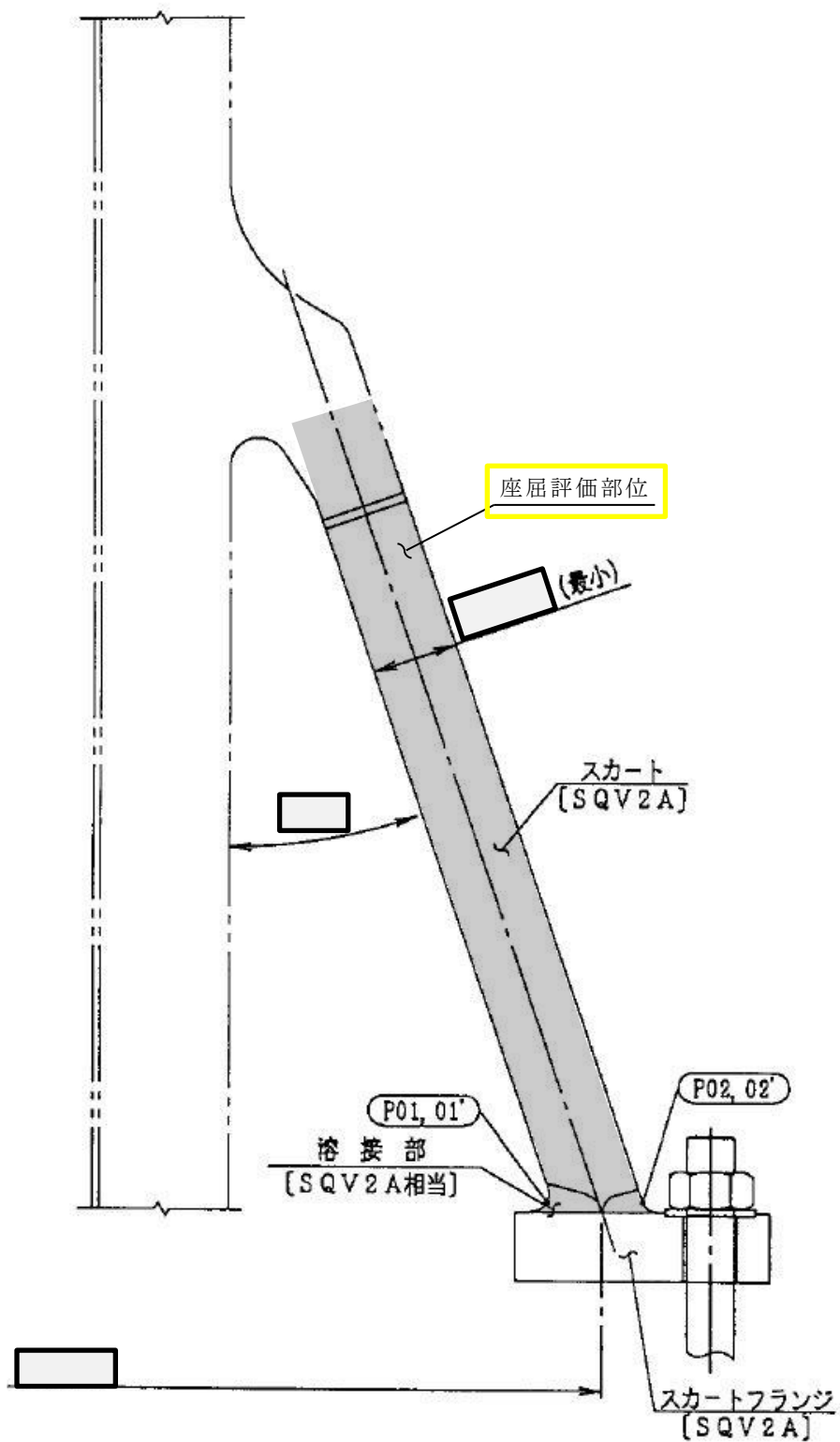


図1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表1-2(1) 計算結果の概要

部分及び材料	運転状態	一次一般膜応力強さ (MPa)			一次膜+一次曲げ応力強さ (MPa)			一次+二次応力強さ (MPa)			疲労解析		
		応力強さ	許容応力	応力評価面	応力強さ	許容応力	応力評価面	応力強さ	許容応力	応力評価面	疲労累積係数	許容値	応力評価点
スカート SQV2A相当	設計条件	—	—	—	28	276	P01' - P02'	—	—	—	—	—	—
	III	—	—	—	11	435	P01 - P02	—	—	—	—	—	—
	IV	—	—	—	18	490	P01' - P02'	—	—	—	—	—	—
	試験状態	—	—	—	11	456	P01 - P02	—	—	—	—	—	—
	I, II	—	—	—	—	—	—	260	553	P01	0.009	1.0	P01

表1-2(2) 計算結果の概要

(単位: MPa)

部分及び材料	運転状態	座屈に対する評価	
		圧縮応力	許容応力
スカート SQV2A	I, II	14	68
	III	14	82
	IV	23	102

## 2. 計算条件

### 2.1 設計条件

最高使用圧力 : 8.62MPa

最高使用温度 : 302℃

設計機械的荷重 : 表2-1に示す。

### 2.2 運転条件

運転条件及び記号は、参照図書(1)a.に定めるとおりである。

スカートの応力評価において考慮する外荷重の値を表2-1に示す。

### 2.3 材料

各部の材料を図1-1に示す。

### 2.4 物性値

各部の材料の物性値は、参照図書(1)a.に定めるとおりである。



## 2.5 荷重の組合せ

### 2.5.1 荷重の組合せ及び運転状態

荷重の組合せ及び運転状態を表2-2に示す。

なお、本計算書において、告示第13条第1項第1号イの規定による最高使用圧力（運転状態Ⅰにおいて原子炉圧力容器内面が受ける最高の圧力以上の圧力であって、設計上定めるものをいう。）と設計機械的荷重を組み合わせた条件を「設計条件」という。

### 2.5.2 荷重の組合せ及び応力評価

荷重の組合せ及び応力評価項目の対応を表2-3に示す。本計算書において、荷重の種類と記号は以下のとおりである。

荷重	記号
(1) 内圧	[L01]
(2) 設計機械的荷重	[L03]
(3) 熱負荷（温度分布計算で求めた温度分布に基づき算定する荷重）	[L10]
(4) 外荷重（運転状態Ⅰ及びⅡにおける荷重）	[L12, L13, L18, L19]
(5) 外荷重（運転状態Ⅲにおける荷重）	[L20]
(6) 外荷重（運転状態Ⅳにおける荷重）	[L21]
(7) 外荷重（試験状態における荷重）	[L22]

## 2.6 許容応力

各運転状態の応力評価に用いる許容応力は、告示第13条第1項第1号に基づき表2-4に示す。

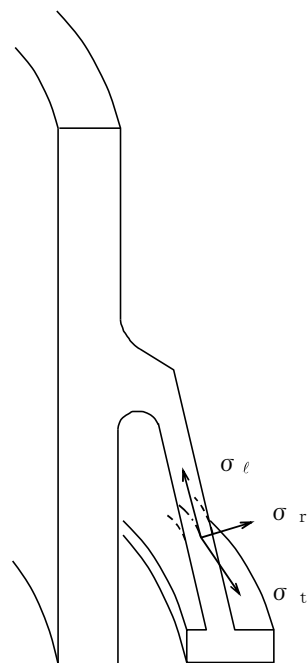
この表に記載のない圧縮荷重を受ける場合に対する許容応力は、6章に記載するものとする。

- (1) 設計応力強さ  $S_m$ 、設計降伏点  $S_y$  及び設計引張強さ  $S_u$  は、それぞれ告示別表第2、第9及び第10に定められたものを使用する。
- (2) 設計条件の評価には、最高使用温度（302℃）に対する許容応力を用いる。運転状態Ⅰ及びⅡ、運転状態Ⅲ並びに運転状態Ⅳの一次応力の評価には、各運転状態における流体の最高温度（運転状態Ⅰ及びⅡ：℃、Ⅲ：℃、Ⅳ：℃）に対する許容応力を用いる。運転状態Ⅰ及びⅡの一次＋二次応力及び繰返し荷重の評価には、運転温度（℃：定格出力運転時の蒸気温度）に対する許容応力を用いる。試験状態の評価には、試験温度（℃）に対する許容応力を用いる。
- (3) スカートの許容応力評価条件を表2-5に示す。

## 2.7 応力の記号と方向

応力の記号とその方向は，以下のとおりとする。

- $\sigma_t$  : 周方向応力
- $\sigma_l$  : 軸方向応力
- $\sigma_r$  : 半径方向応力
- $\tau_{tl}$  : せん断応力
- $\tau_{lr}$  : せん断応力



### 3. 応力解析の手順

応力解析の手順について述べる。

解析手順の概要を図3-1に示す。

#### 3.1 温度分布計算

##### 3.1.1 境界の熱伝達率

温度分布計算に使用する原子炉圧力容器内面、スカート外面及びスカートと胴板との間の熱伝達率の計算条件と計算結果を、温度及び流量の変化する時点を代表として表3-1に示す。

##### 3.1.2 温度分布の計算

###### (1) 荷重条件

参照図書(1)a.に定める運転条件に基づいて計算する。

###### (2) 計算方法

温度分布計算は、二次元軸対称の有限要素でモデル化し、解析コード「TACF」により行う。なお、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、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

温度分布計算のモデルを図3-2に示す。

境界における熱伝達率は、3.1.1項の計算結果を用いる。

境界3は、起動開始時及び停止終了時並びに耐圧試験は□℃、その他の事象は□℃一定の温度指定で温度分布計算を行う。

###### (3) 温度遷移図

温度分布計算を行った運転条件について、評価断面における熱応力が厳しくなる時点を検出するため、あらかじめ指定した数点の温度の時間的変化を図3-3に示す。

胴板及びスカート内に指定した2点間の温度差が極値となる時点を図3-3に記号で示す。なお、同図において、その差が極値をとった時点を熱応力が厳しくなるものとする。

###### (4) 温度分布図

(3)で選定した2点間の温度差が極値となる時点の温度分布を図3-4に示す。

##### 3.1.3 熱応力の計算時点

熱応力計算は、3.1.2項(3)で選定した2点間の温度差が極値となる時点、圧力ピークとなる時点□□□□及び定格出力運転□□□□（計算時点を図3-3中に示す。）並びに耐圧試験□□□□に対して行う。

## 3.2 応力計算

### 3.2.1 応力評価点

応力評価点の位置を図1-1に示す。

なお、応力集中を生じる箇所の応力集中係数を表3-2に示す。

### 3.2.2 内圧による応力

#### (1) 荷重条件 (L01)

最高使用圧力 : 8.62MPa (原子炉压力容器)

各運転条件における内圧 : 参照図書(1)a. 参照

#### (2) 計算方法

内圧による応力の計算は、二次元軸対称の有限要素でモデル化し、解析コード「ASHSD2-B」により行う。なお、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、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

応力計算のモデル及び仮定した境界条件（拘束条件）を図3-2に示す。

### 3.2.3 外荷重による応力

#### (1) 荷重条件 (L03, L12, L13, L18, L19, L20, L21及びL22)

スカートに作用する外荷重を表2-1に示す。

#### (2) 計算方法

外荷重による応力の計算は、二次元軸対称の有限要素でモデル化し、解析コード「ASHSD2-B」により行う。

応力計算のモデル及び仮定した境界条件（拘束条件）を図3-2に示す。

### 3.2.4 熱応力

#### (1) 荷重条件 (L10)

熱応力計算には、3.1節で求めた温度分布を用いる。

#### (2) 計算方法

熱応力の計算は、二次元軸対称の有限要素でモデル化し、解析コード「ASHSD2-B」により行う。

応力計算のモデル及び仮定した境界条件（拘束条件）を図3-2に示す。

#### 4. 応力強さの評価

##### 4.1 主応力

計算した応力は、応力の分類ごとに重ね合わせ、組合せ応力を求める。

組合せ応力は、一般に  $\sigma_t$ ,  $\sigma_\ell$ ,  $\sigma_r$ ,  $\tau_{t\ell}$ ,  $\tau_{\ell r}$ ,  $\tau_{rt}$  の6成分を持つが、主応力  $\sigma$  は、引用文献(1)の1・3・6項により、次式を満足する3根  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  として計算する。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_\ell + \sigma_r) \cdot \sigma^2 + (\sigma_t \cdot \sigma_\ell + \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_r \cdot \sigma_t - \tau_{t\ell}^2 \\ & - \tau_{\ell r}^2 - \tau_{rt}^2) \cdot \sigma - \sigma_t \cdot \sigma_\ell \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \tau_{\ell r}^2 + \sigma_\ell \cdot \tau_{rt}^2 + \sigma_r \cdot \tau_{t\ell}^2 \\ & - 2 \cdot \tau_{t\ell} \cdot \tau_{\ell r} \cdot \tau_{rt} = 0 \end{aligned}$$

上式により主応力を求める。

##### 4.2 応力強さ

以下の3つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

##### 4.3 一次一般膜応力強さの評価

応力評価面P01-P02及びP01'-P02'は構造不連続部であるため、一次一般膜応力に分類される応力は存在しない。

##### 4.4 一次膜+一次曲げ応力強さの評価

各運転状態における評価を表4-1に示す。

表4-1より、各運転状態の一次膜+一次曲げ応力強さは、2.6節に示す許容応力を満足する。

##### 4.5 一次+二次応力強さの評価

運転状態 I 及び II における評価を表4-2に示す。

表4-2より、すべての評価点において  $S_n$  は、 $3 \cdot S_m$  以下であり、2.6節に示す許容応力を満足する。



## 5. 繰返し荷重の評価

### 5.1 疲労解析

スカートの応力評価点について、詳細な繰返し荷重の評価を行う。

#### 5.1.1 考慮する運転条件

疲労解析に考慮する運転条件及び回数の組合せを図5-1に示す。

#### 5.1.2 疲労累積係数

各応力評価点における疲労累積係数を表5-1に示す。

表5-1より、各応力評価点において疲労累積係数は1.0以下であり、許容値を満足する。

6. 特別な応力の評価

6.1 座屈に対する評価

スカートには、鉛直力及びモーメントにより、圧縮応力が生じる。したがって、これらの荷重の組合せにより発生する圧縮応力の評価を行う。

6.1.1 計算データ

スカートの平均半径  $R_m = \boxed{\phantom{0000}} \text{ mm}$

スカートの板厚  $t = \boxed{\phantom{0000}} \text{ mm}$  (くされ代を除いた値)

スカートの断面積

$$\begin{aligned}
 A &= \pi \cdot \{(R_m + t/2)^2 - (R_m - t/2)^2\} \\
 &= \pi \times \{(\boxed{\phantom{0000}} + \boxed{\phantom{0000}}/2)^2 - (\boxed{\phantom{0000}} - \boxed{\phantom{0000}}/2)^2\} \\
 &= \boxed{\phantom{0000000}} \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

スカートの断面係数

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(R_m + t/2)^4 - (R_m - t/2)^4}{R_m + t/2} \\
 &= \frac{\pi}{4} \times \frac{(\boxed{\phantom{0000}} + \boxed{\phantom{0000}}/2)^4 - (\boxed{\phantom{0000}} - \boxed{\phantom{0000}}/2)^4}{\boxed{\phantom{0000}} + \boxed{\phantom{0000}}/2} \\
 &= \boxed{\phantom{00000000}} \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

6.1.2 荷重

各運転状態において、スカートに作用する鉛直力及びモーメントを表6-1に示す。

6.1.3 圧縮応力

表6-1に示す荷重によって生じる各運転状態での圧縮応力は以下のように求める。

(1) 運転状態 I 及び II

$$\begin{aligned}
 \sigma_c &= \frac{V_1 + V_2}{A} = \frac{\boxed{\phantom{0000}} + \boxed{\phantom{0000}}}{\boxed{\phantom{0000000}}} \\
 &= 14 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

(2) 運転状態 III

$$\begin{aligned}
 \sigma_c &= \frac{V_1 + V_2}{A} = \frac{\boxed{\phantom{0000}} + \boxed{\phantom{0000}}}{\boxed{\phantom{0000000}}} \\
 &= 14 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

## (3) 運転状態Ⅳ

$$\sigma_c = \frac{V_1 + V_2}{A} + \frac{M}{Z} = \frac{\boxed{\phantom{000}} + \boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}} + \frac{\boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}} = 23 \text{ MPa}$$

## 6.1.4 許容応力

各運転状態における許容応力は、次のように求める。

## (1) 運転状態Ⅰ及びⅡ

運転状態Ⅰ及びⅡにおける許容応力 $\sigma_{ca}$ は、告示第13条第1項第1号ヌ(イ)より次のように得られる。

$$\sigma_{ca} = \text{MIN}[S_m, B]$$

ここで、

$$S_m = 184.365 \text{ MPa}$$

$$B = 68.6466 \text{ MPa}$$

( $\boxed{\phantom{00}}$ °Cにおける値)

このうちB値は、告示第13条第1項第1号ヌ(イ)より、次のようにして求める。

告示別図第6より

$$\frac{R_i}{100 \cdot t} = \frac{R_m - t / 2}{100 \cdot t} = \frac{\boxed{\phantom{000}} - \boxed{\phantom{000}} / 2}{100 \times \boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}}$$

を用いて、

$$B = 68.6466 \text{ MPa}$$

よって、許容応力 $\sigma_{ca}$ は、

$$\sigma_{ca} = B = 68 \text{ MPa}$$

## (2) 運転状態Ⅲ

運転状態Ⅲにおける許容応力 $\sigma_{ca}$ は、告示第13条第1項第1号ヌ(ロ)より次のように得られる。

$$\sigma_{ca} = 1.2 \text{ MIN}[S_m, B]$$

ここで、

$$S_m = 184.365 \text{ MPa}$$

$$B = 68.6466 \text{ MPa}$$

( $\boxed{\phantom{00}}$ °Cにおける値)

よって、許容応力 $\sigma_{ca}$ は、

$$\sigma_{ca} = 1.2 \cdot B = 1.2 \times 68.6466 = 82 \text{ MPa}$$

(3) 運転状態Ⅳ

運転状態Ⅳにおける許容応力  $\sigma_{c a}$  は、告示第13条第1項第1号ヌ(ハ)より次のように得られる。

$$\sigma_{c a} = 1.5 \text{MIN}[S_m, B]$$

ここで、

$$S_m = 184.365 \text{ MPa}$$

$$B = 68.6466 \text{ MPa}$$

(°Cにおける値)

よって、許容応力  $\sigma_{c a}$  は、

$$\sigma_{c a} = 1.5 \cdot B = 1.5 \times 68.6466 = 102 \text{ MPa}$$

6.1.5 座屈に対する評価

各運転状態における座屈に対する評価を表6-2に示す。

表6-2より、各運転状態における圧縮応力は、許容応力を満足するため、座屈は発生しない。

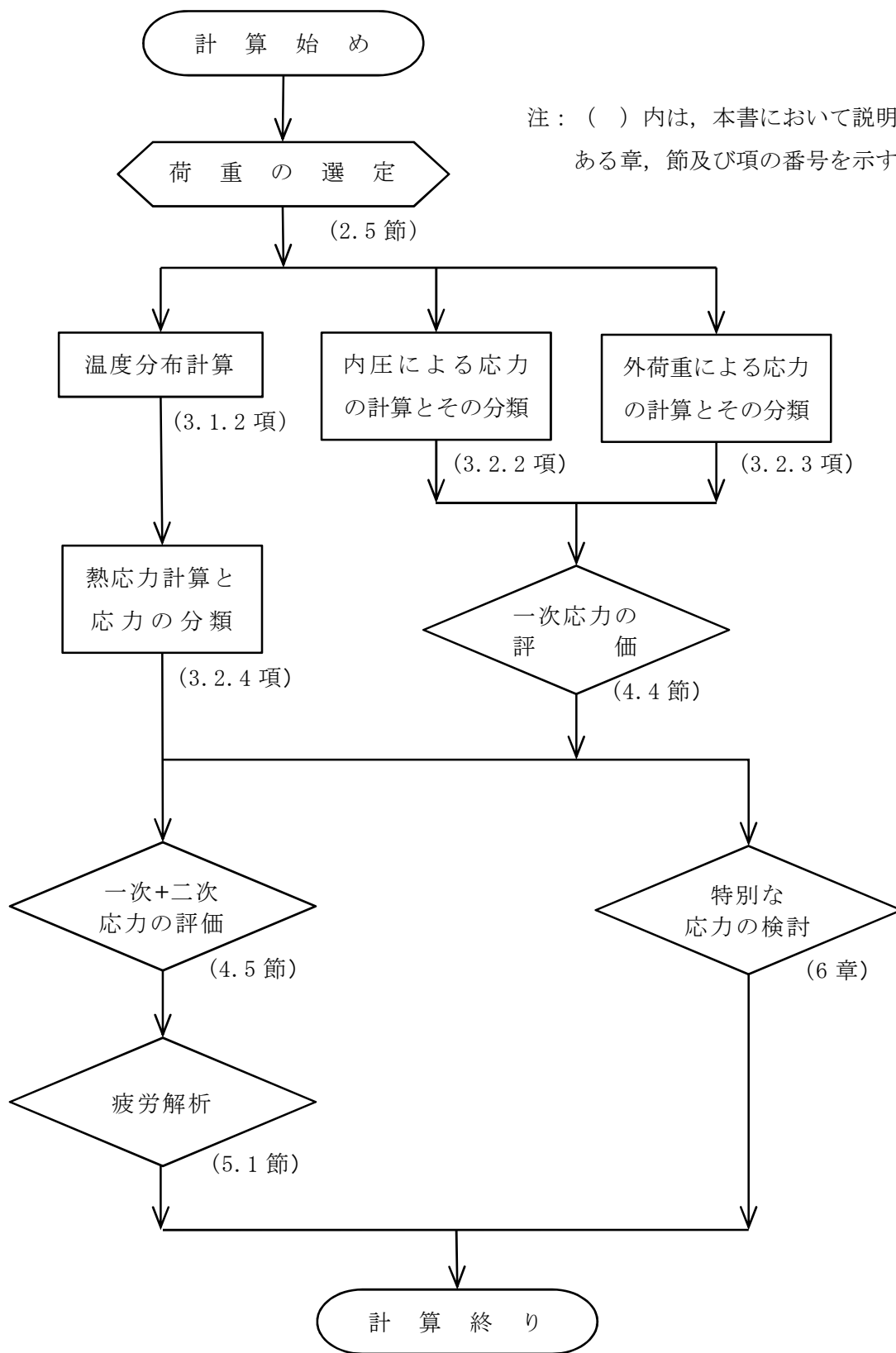
## 7. 引用文献

文献番号は，本書において共通である。

- (1) 機械工学便覧 基礎編  $\alpha$ 3 (日本機械学会)
- (2) 伝熱工学資料 (日本機械学会 改訂第4版)
- (3) WARREN H. GIEDT 「基礎伝熱工学」 横堀進，久我修共訳，丸善
- (4) March 1979 Revision of WRC Bulletin 107/August 1965 「Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings」

## 8. 参照図書

- (1) 柏崎刈羽原子力発電所第7号機 第5回工事計画認可申請書 添付書類
  - a. IV-3-1-2-1 原子炉压力容器の応力解析の方針



注：（ ）内は、本書において説明のある章，節及び項の番号を示す。

図 3-1 応力解析の手順

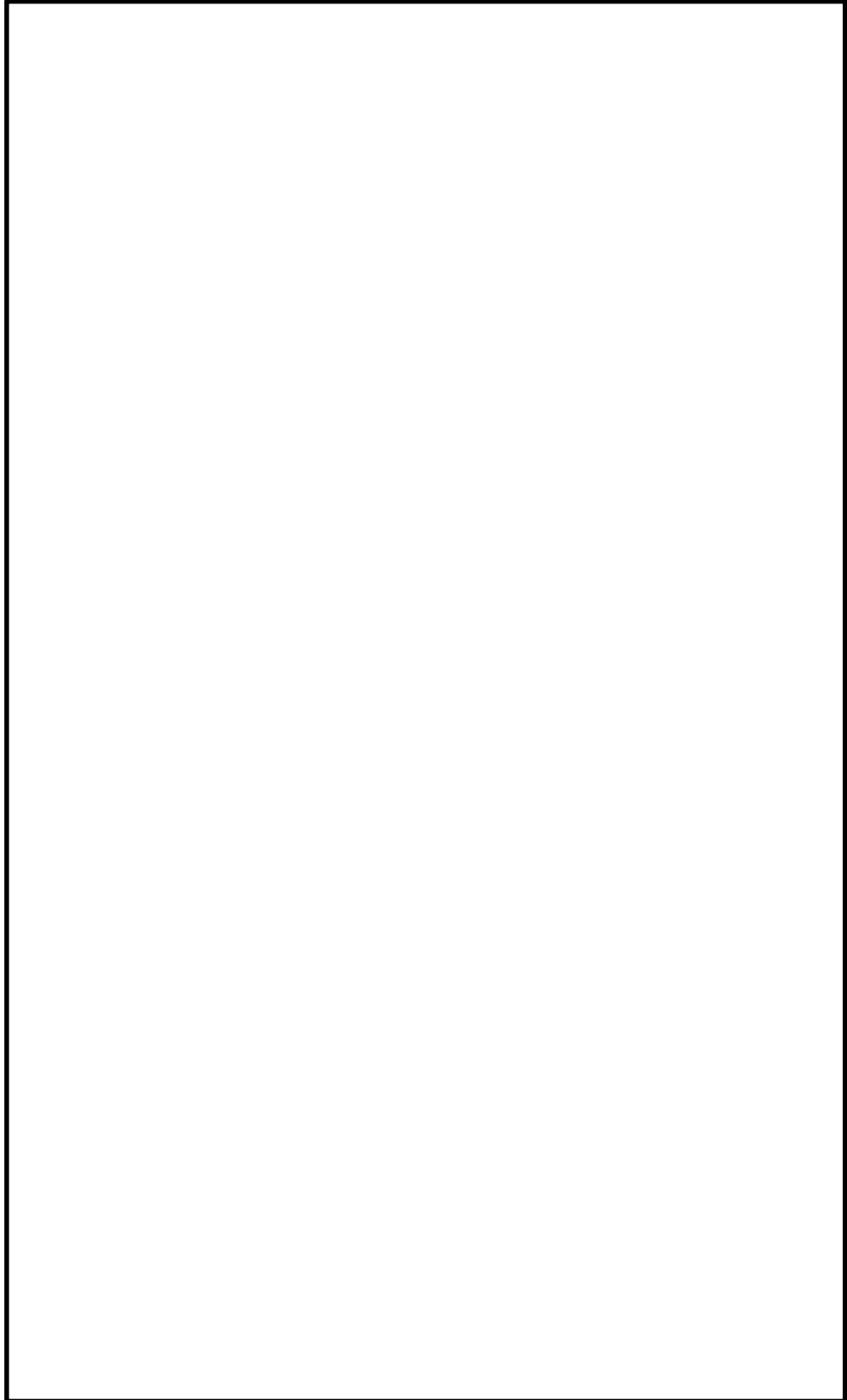


図 3-2 温度分布及び応力計算のモデル

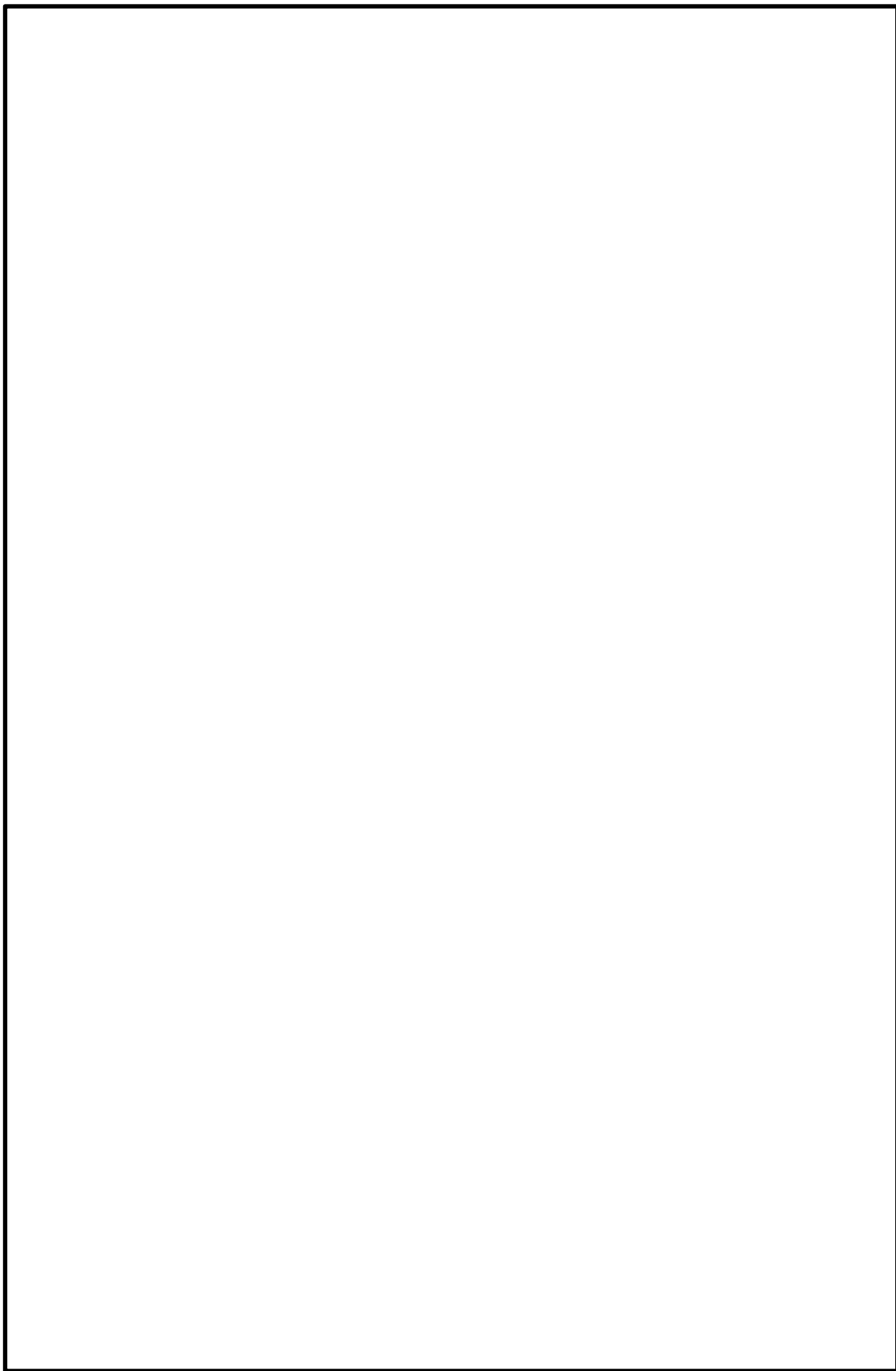


図 3-3(1) 温度遷移図



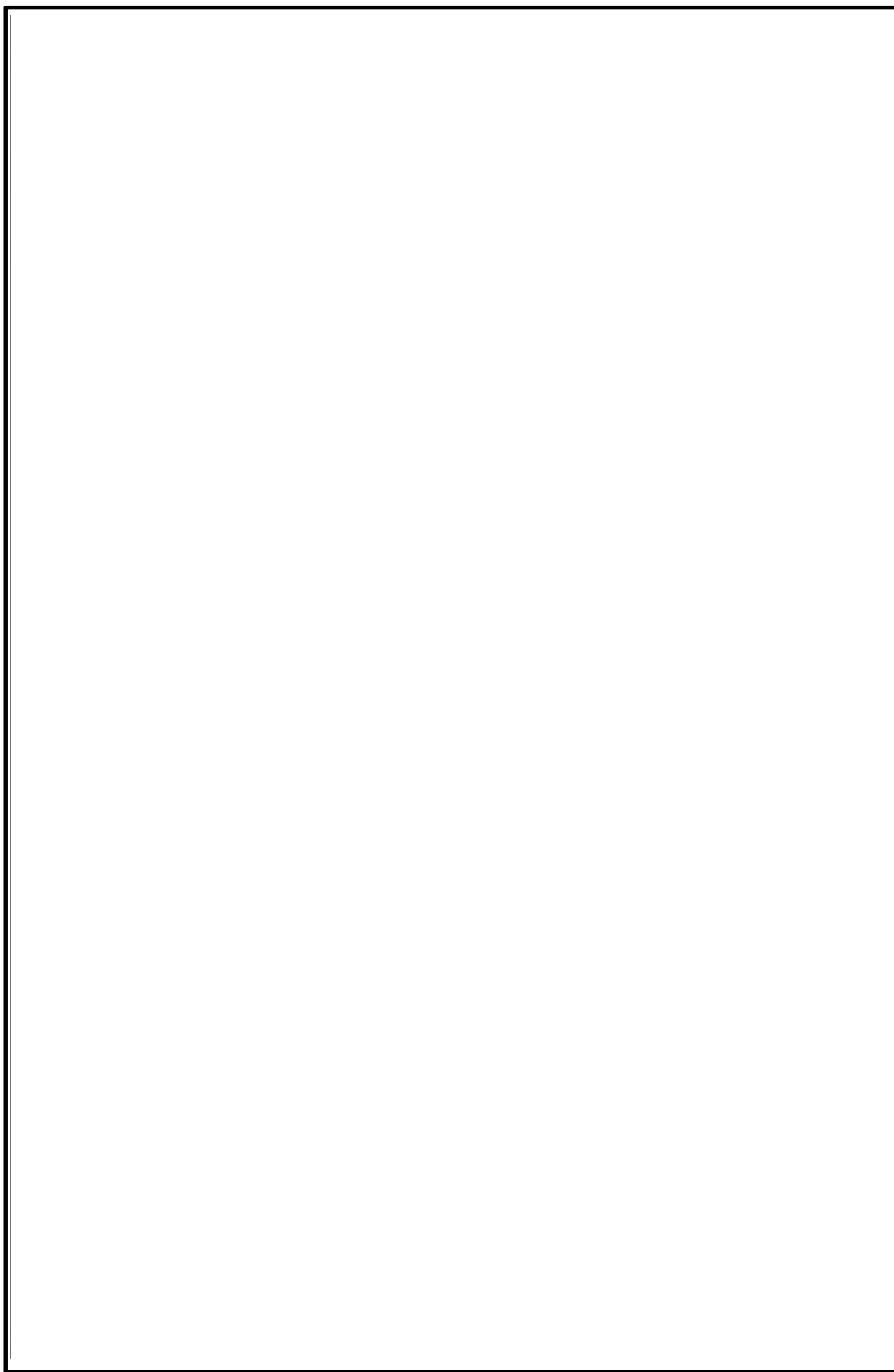



図 3-3(2) 温度遷移図 

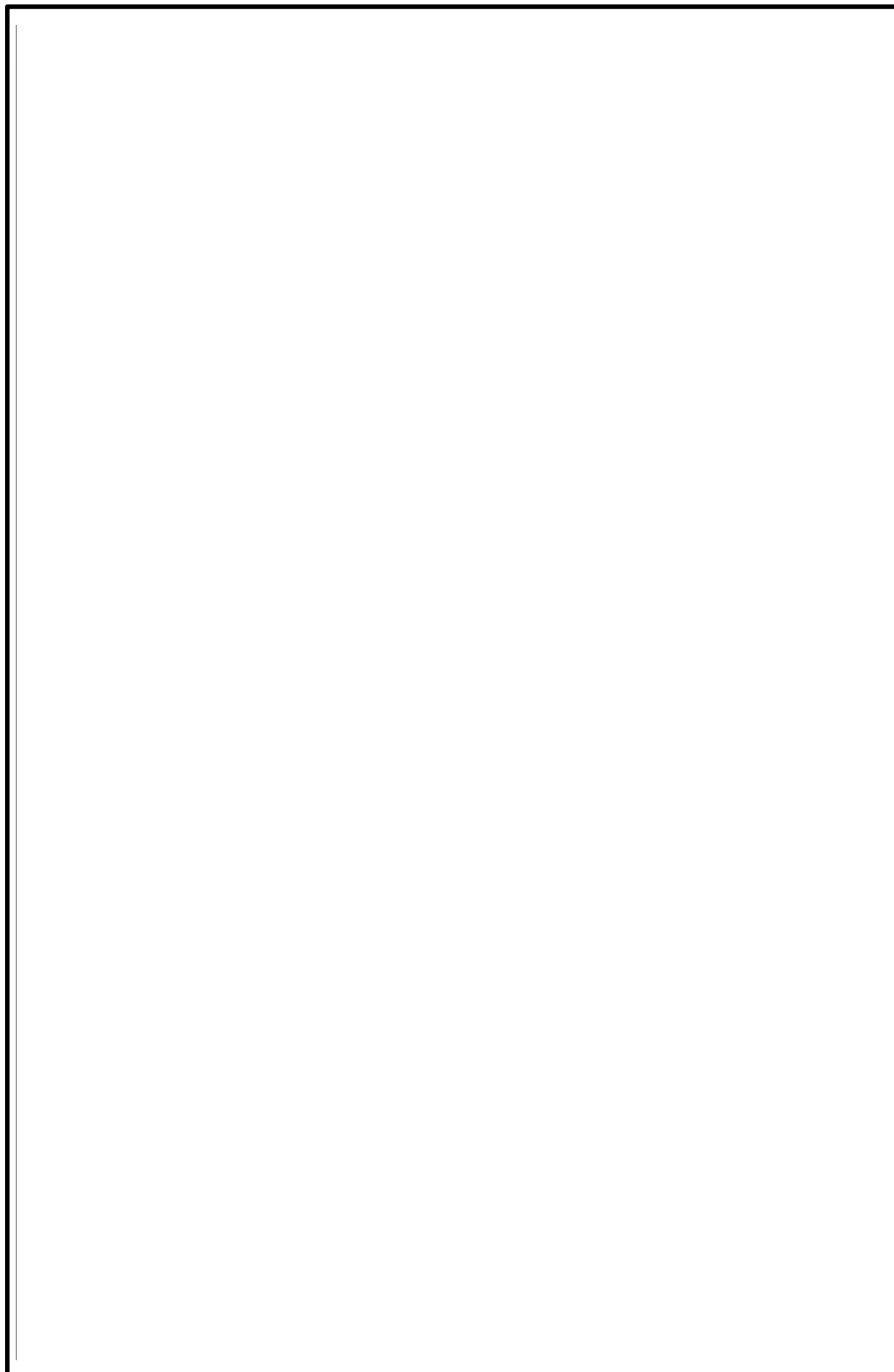


図 3-3(3) 温度遷移図

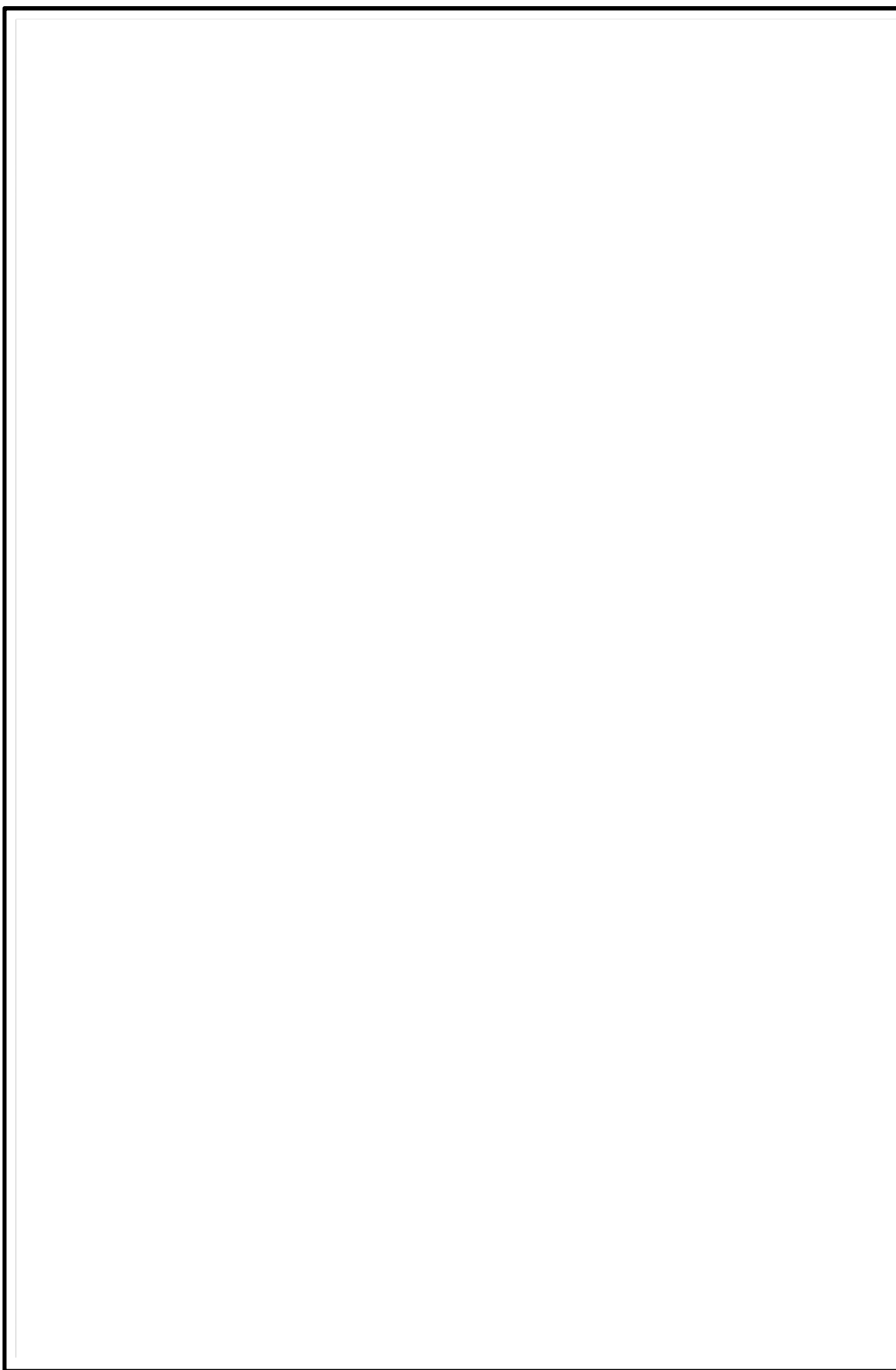


図 3-3(4) 温度遷移図

K7 ① V-3-別添 8 R0

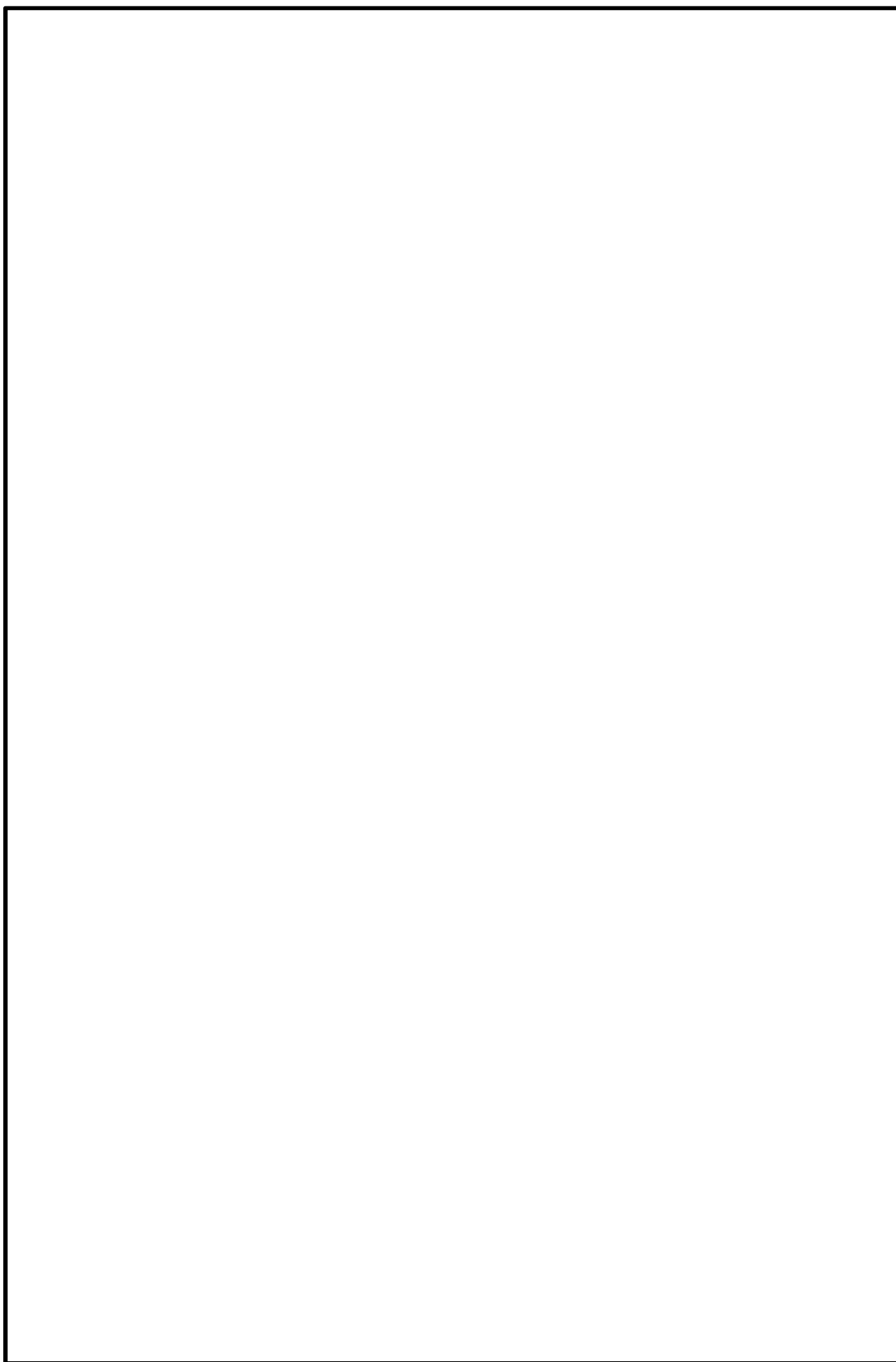


図 3-3(5) 温度遷移図

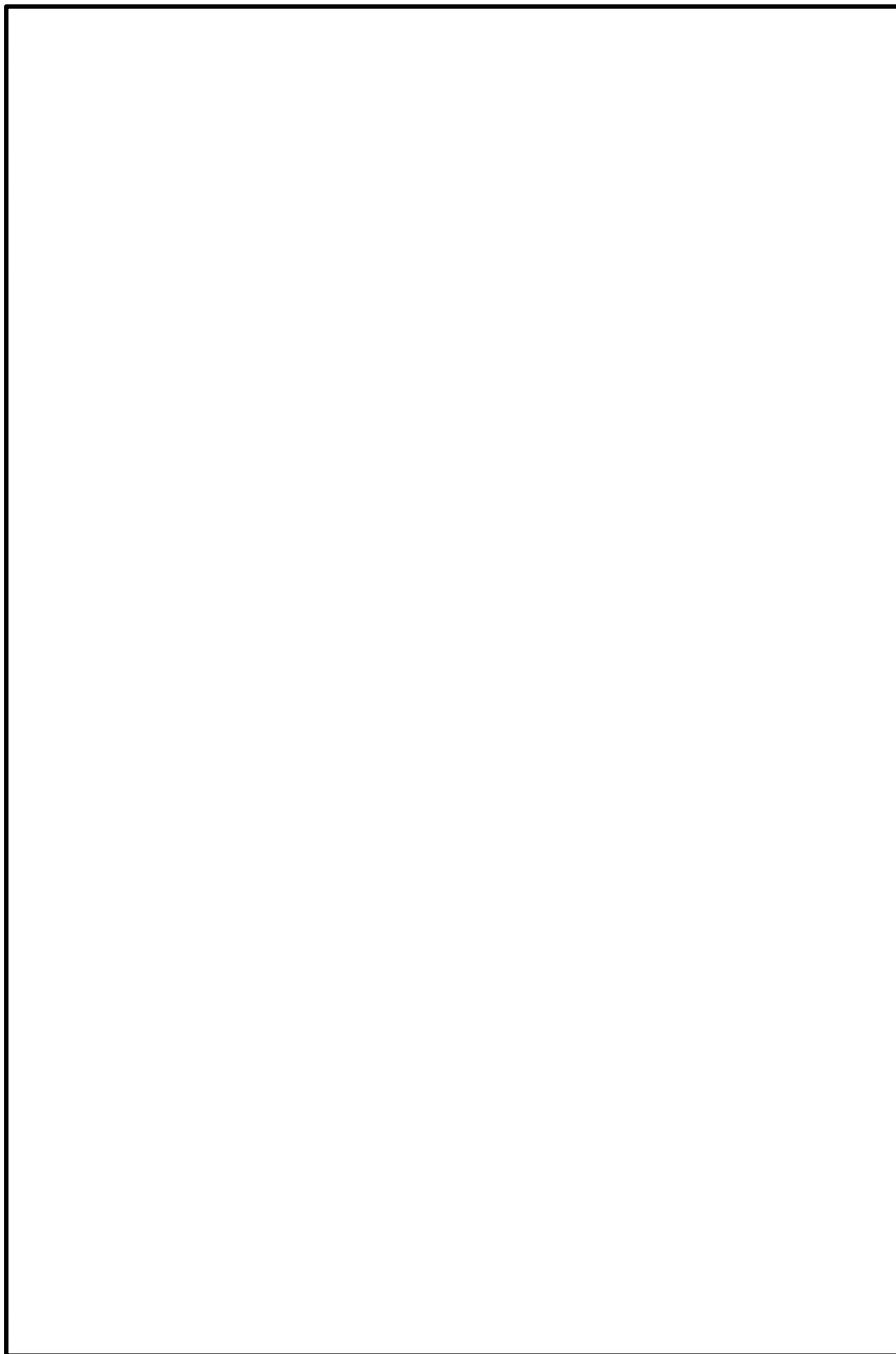


図 3-3(6) 温度遷移図

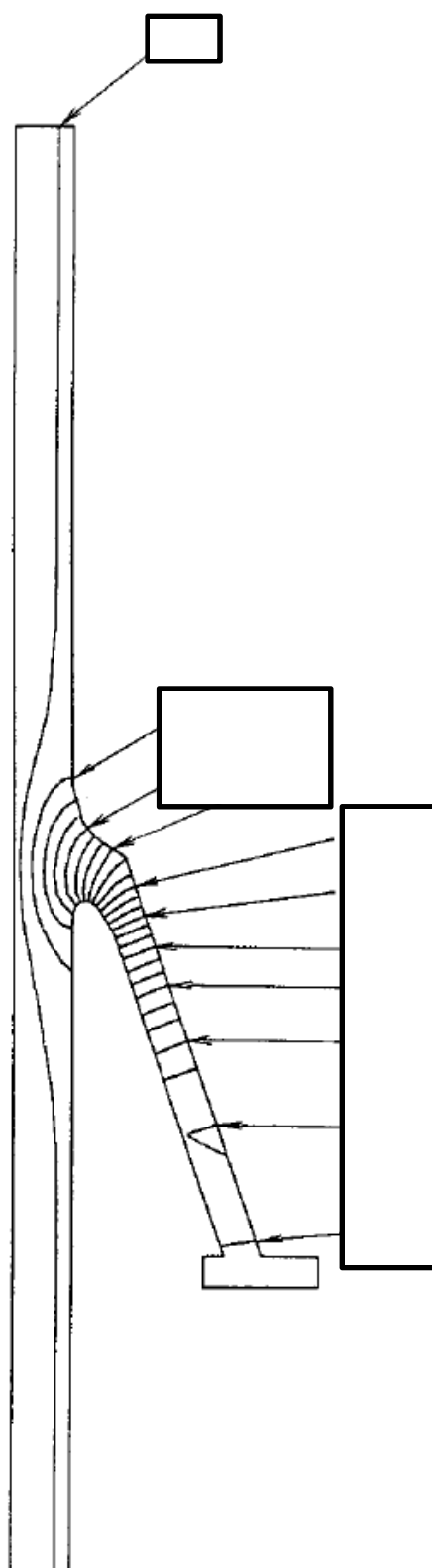


图 3-4(1) 温度分布图  (单位: °C)

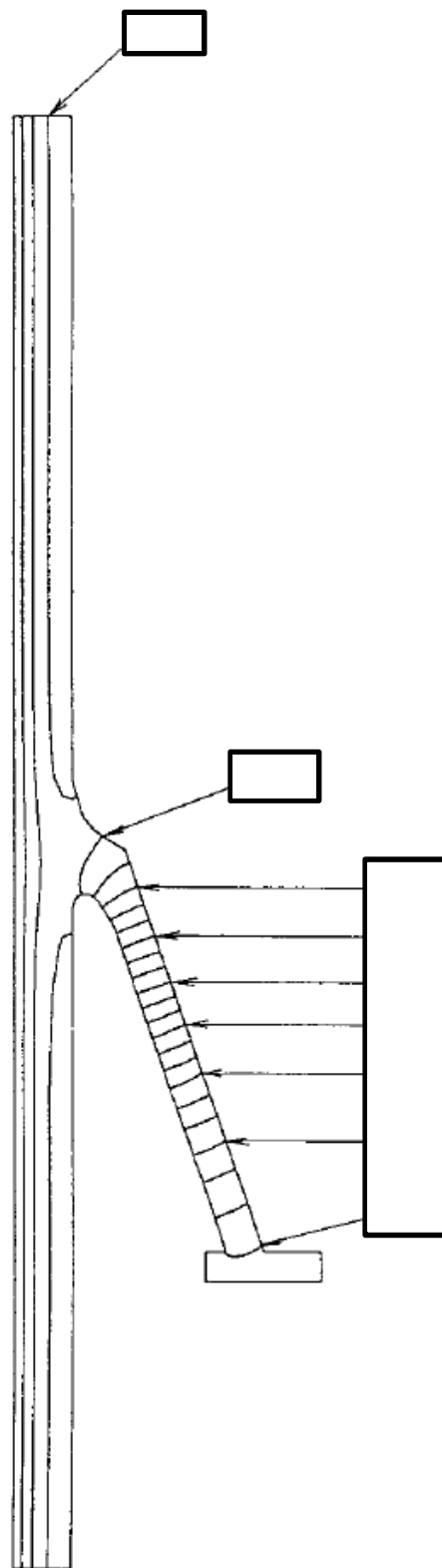


图 3-4(2) 温度分布图  (单位：℃)

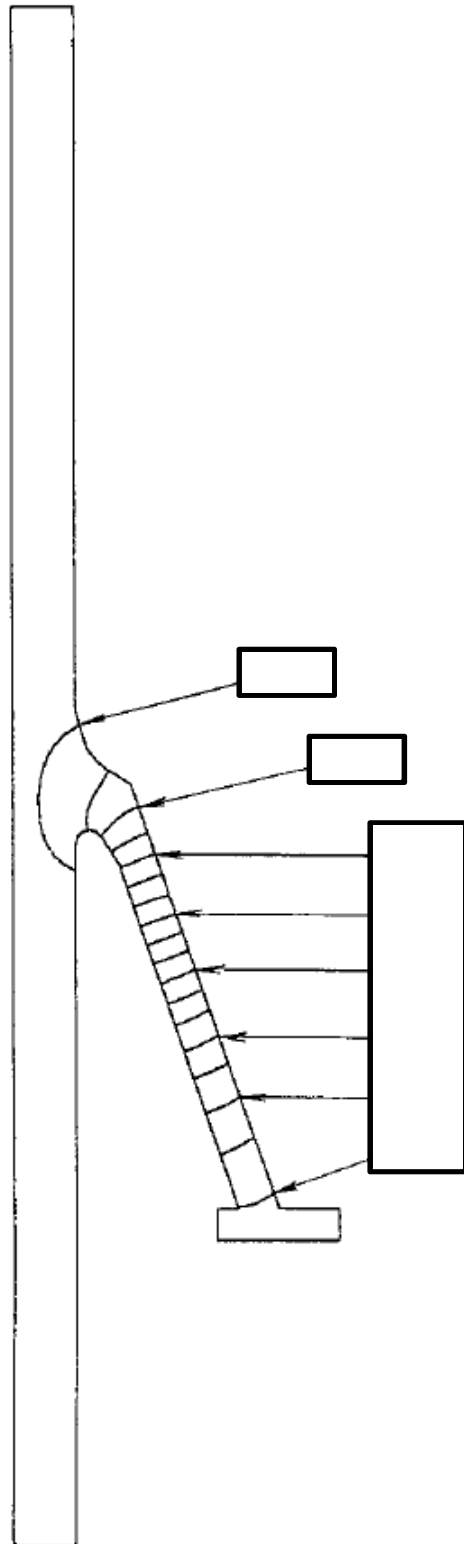


图 3-4(3) 温度分布图  (单位: °C)



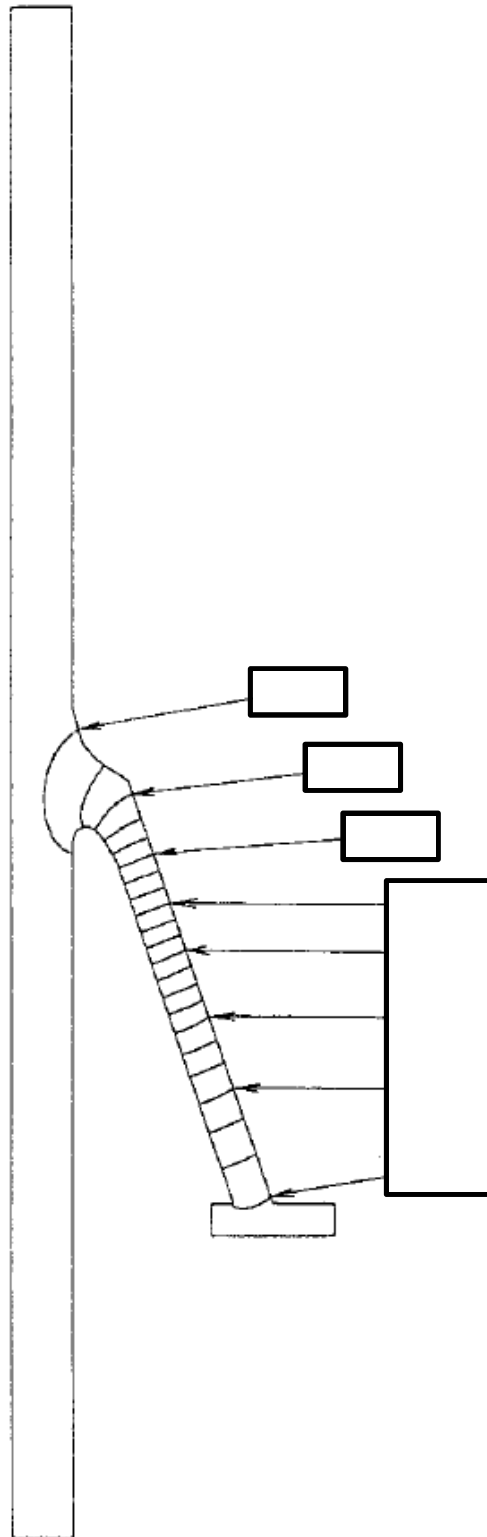


图 3-4(4) 温度分布图  (单位：℃)

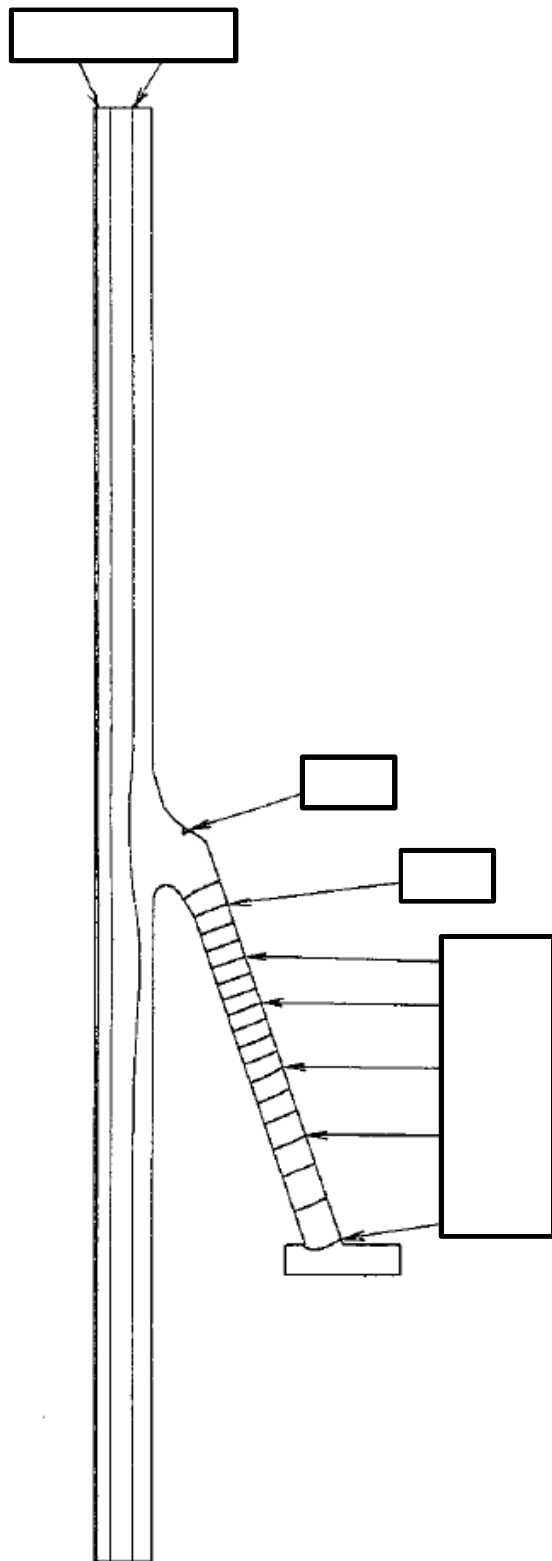


图 3-4(5) 温度分布图  (单位：°C)

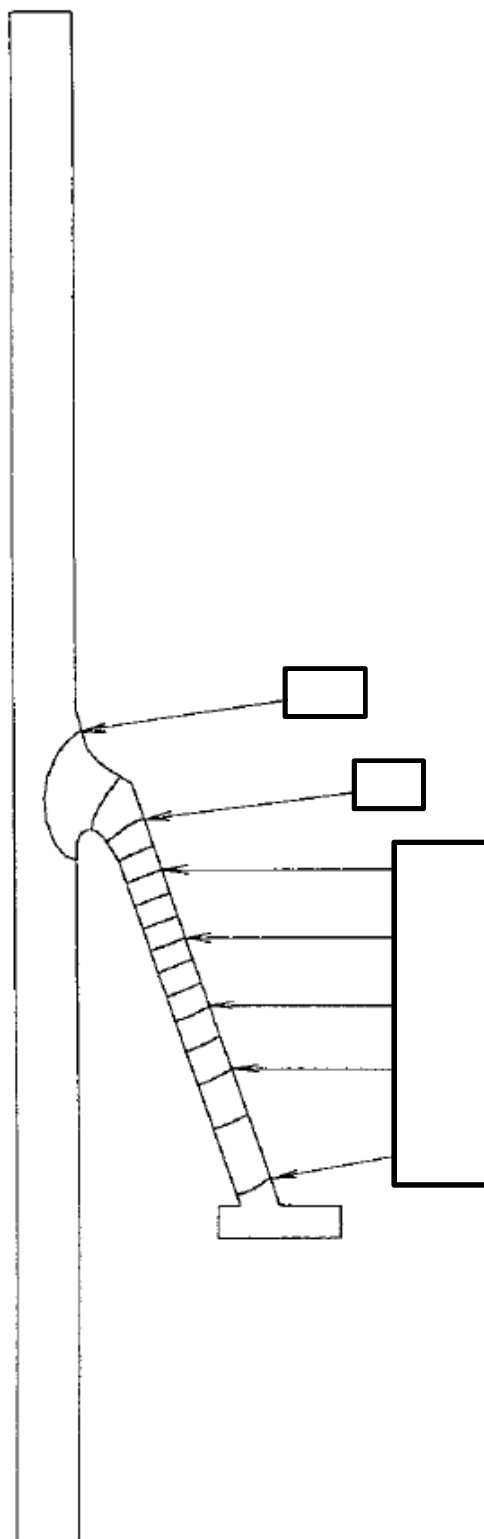


图 3-4(6) 温度分布图  (单位：℃)

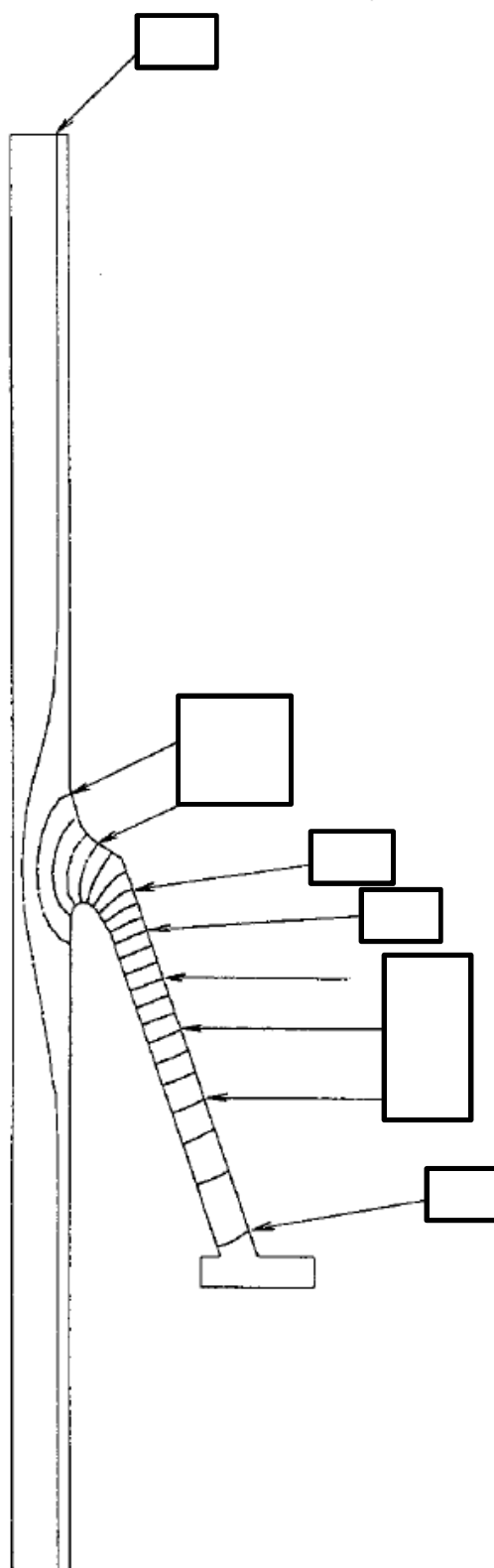


图 3-4(7) 温度分布图  (单位: °C)

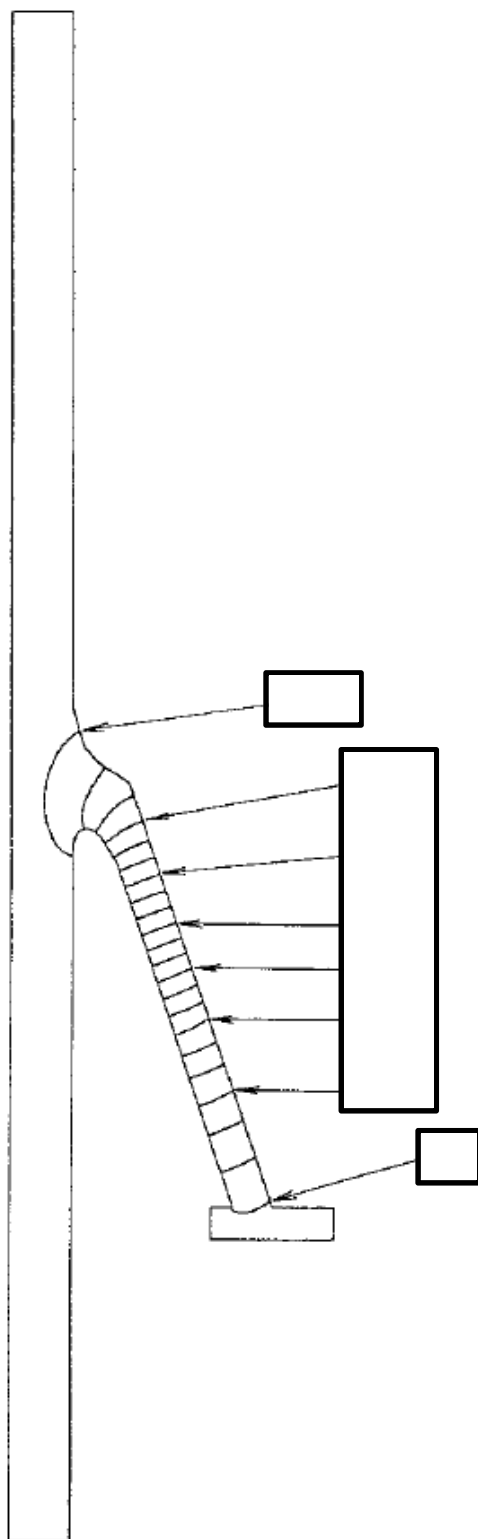


图 3-4(8) 温度分布图  (单位：℃)

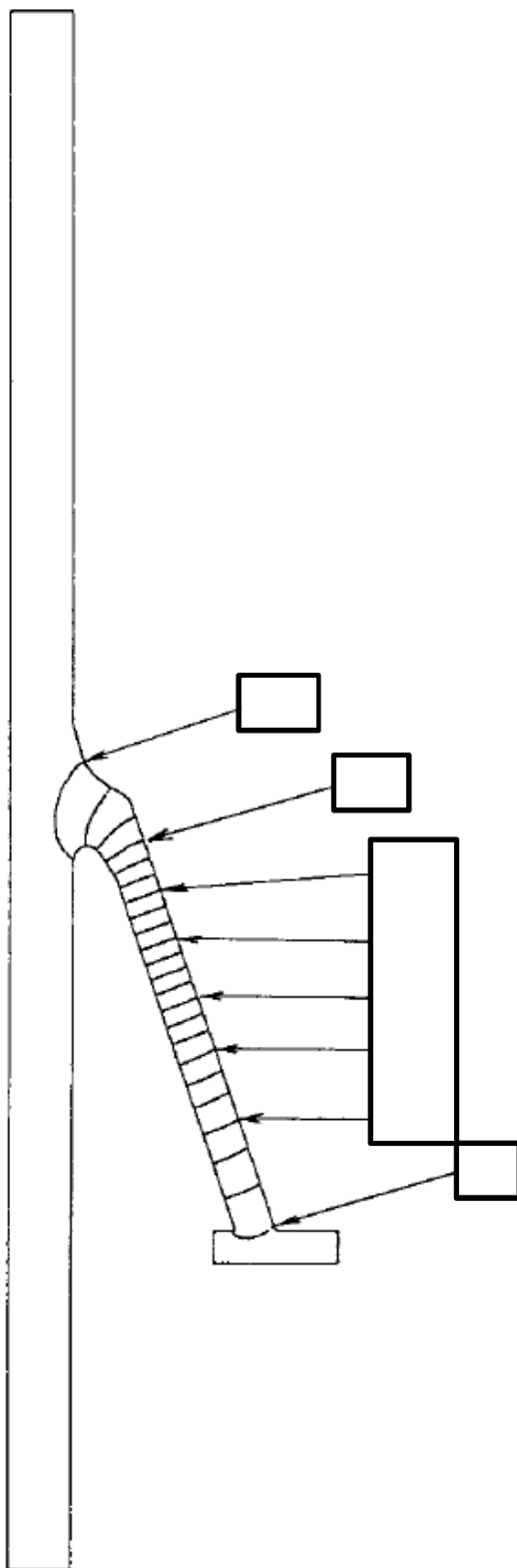


图 3-4(9) 温度分布图  (单位: °C)

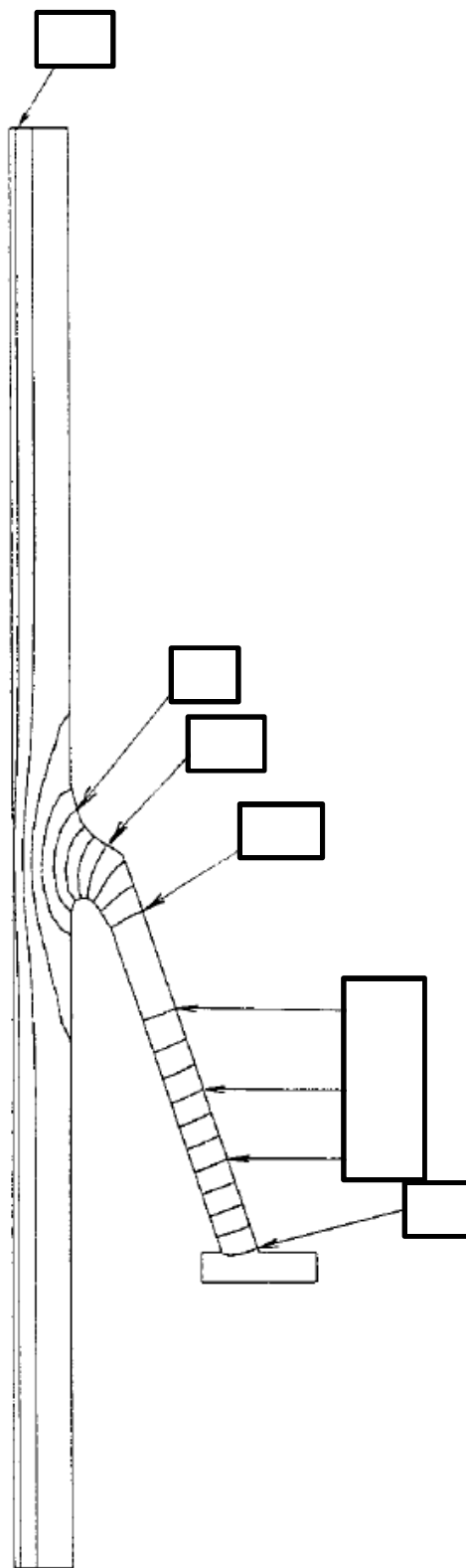


图 3-4(10) 温度分布图  (单位: °C)

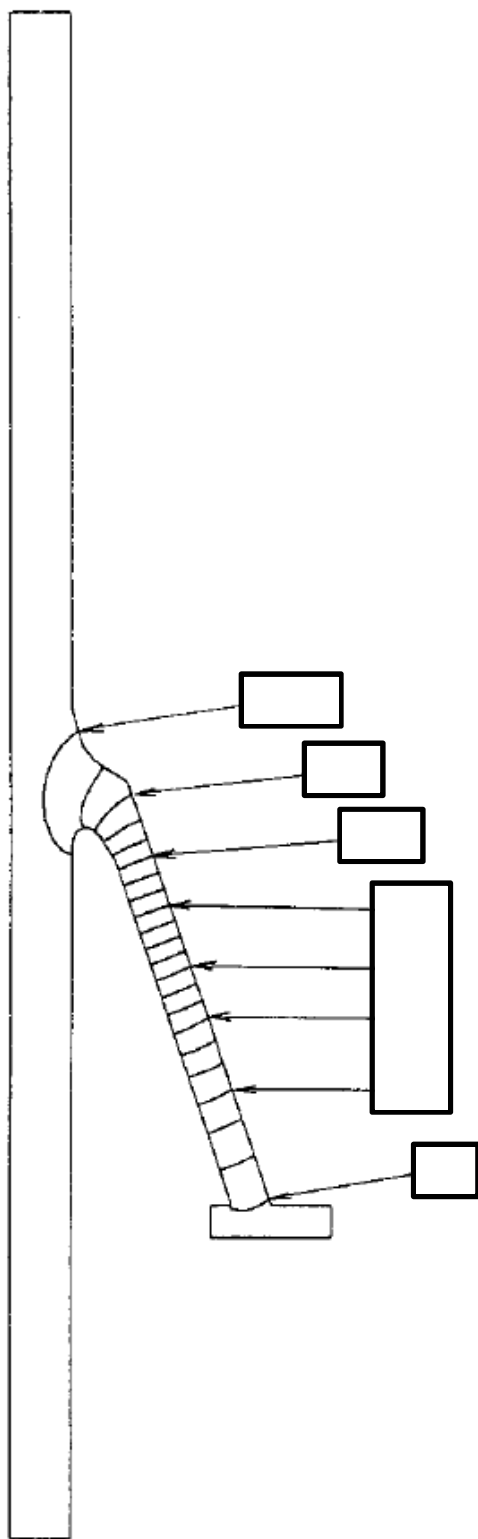


图 3-4(11) 温度分布图  (单位: °C)



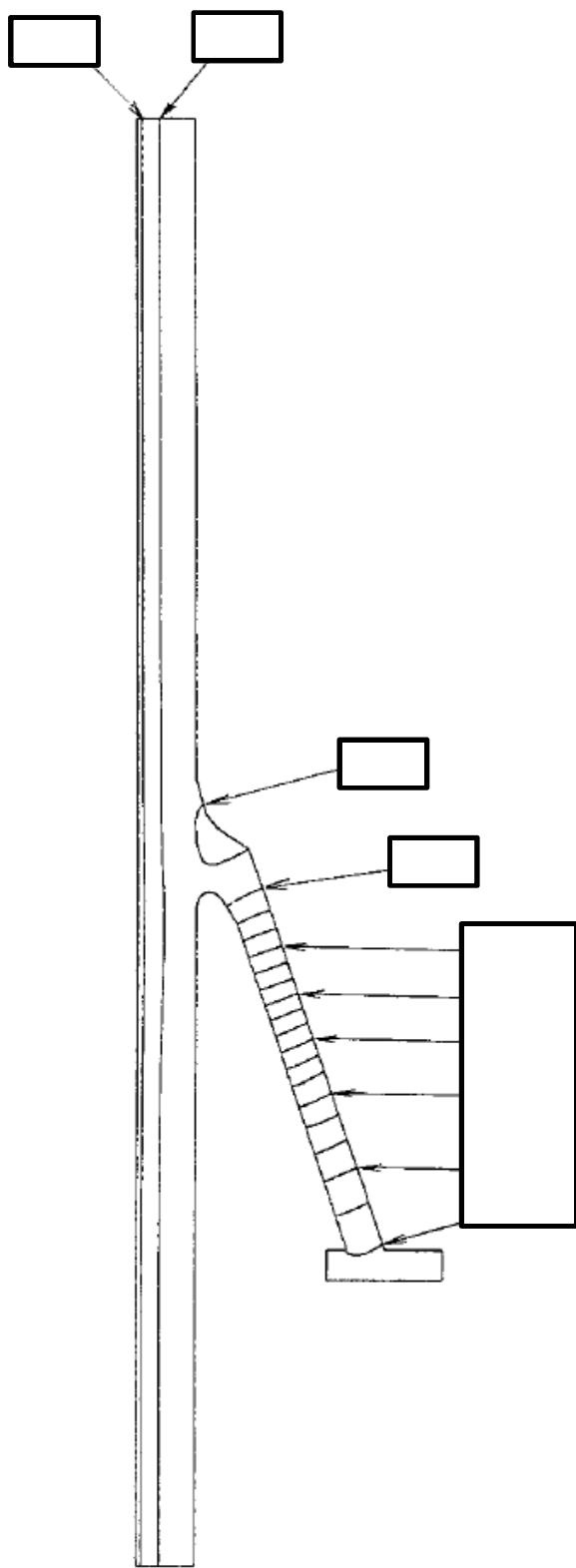


图 3-4(12) 温度分布图  (单位：℃)

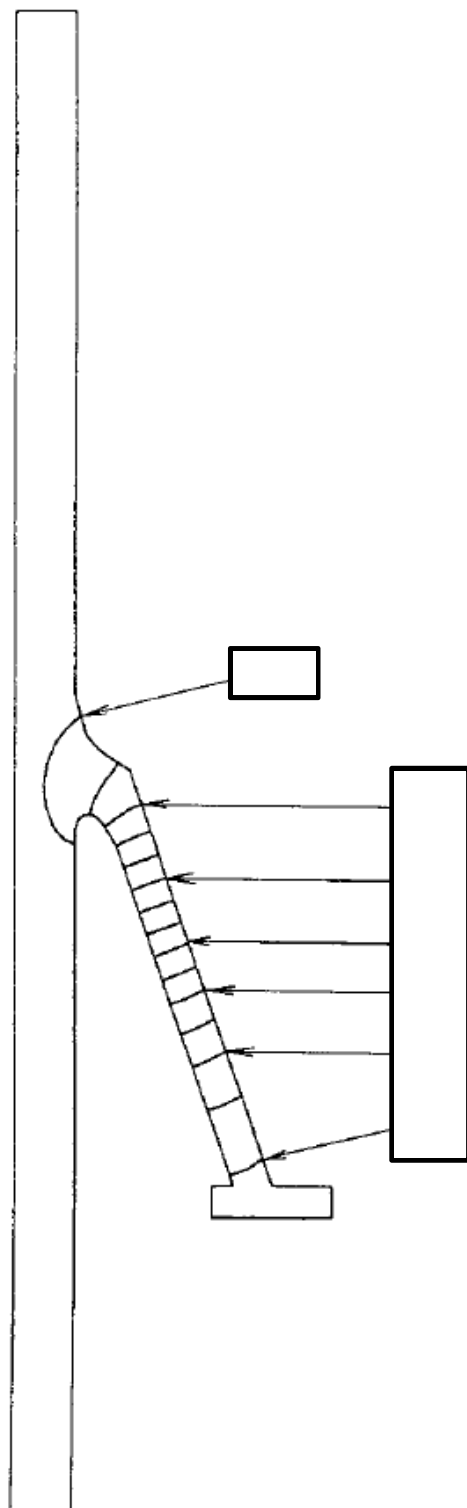


图 3-4(13) 温度分布图  (单位：℃)

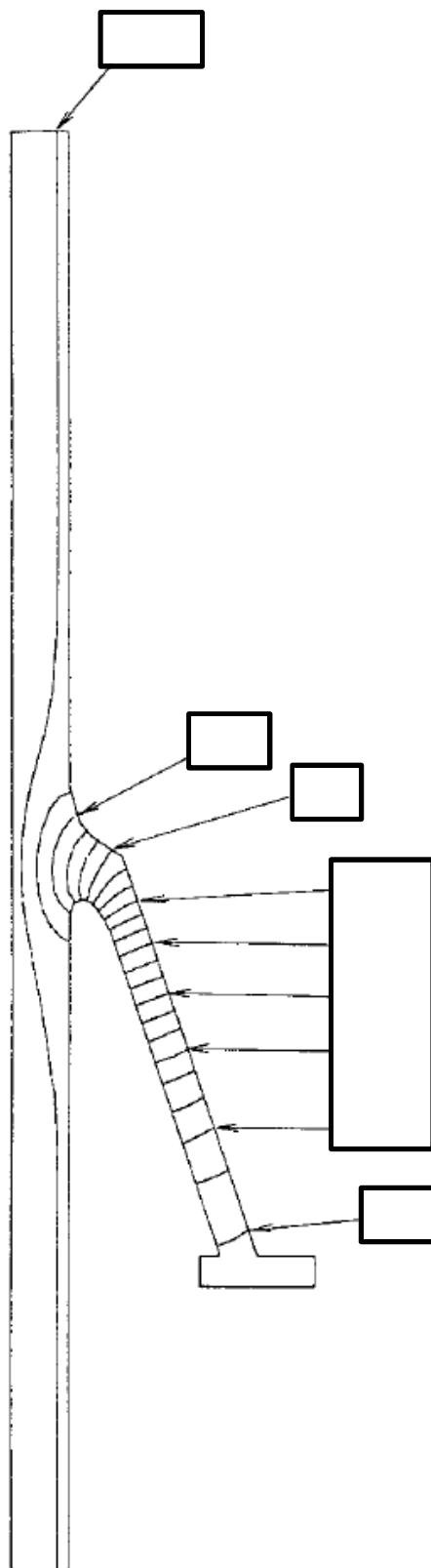


图 3-4(14) 温度分布图  (单位：℃)

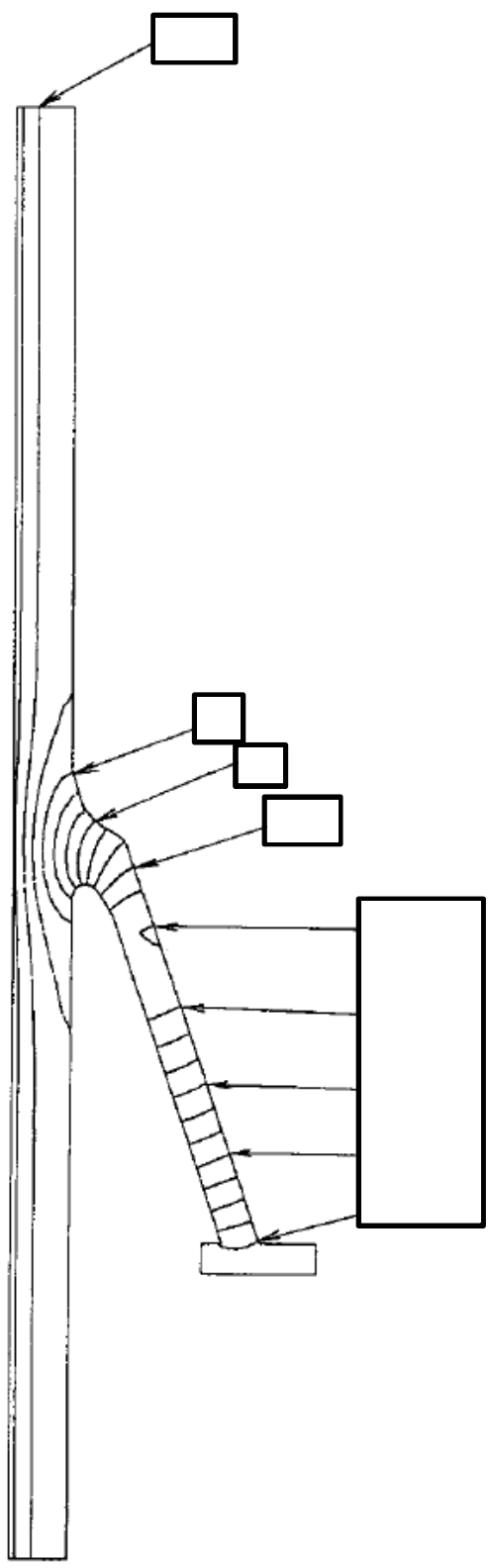
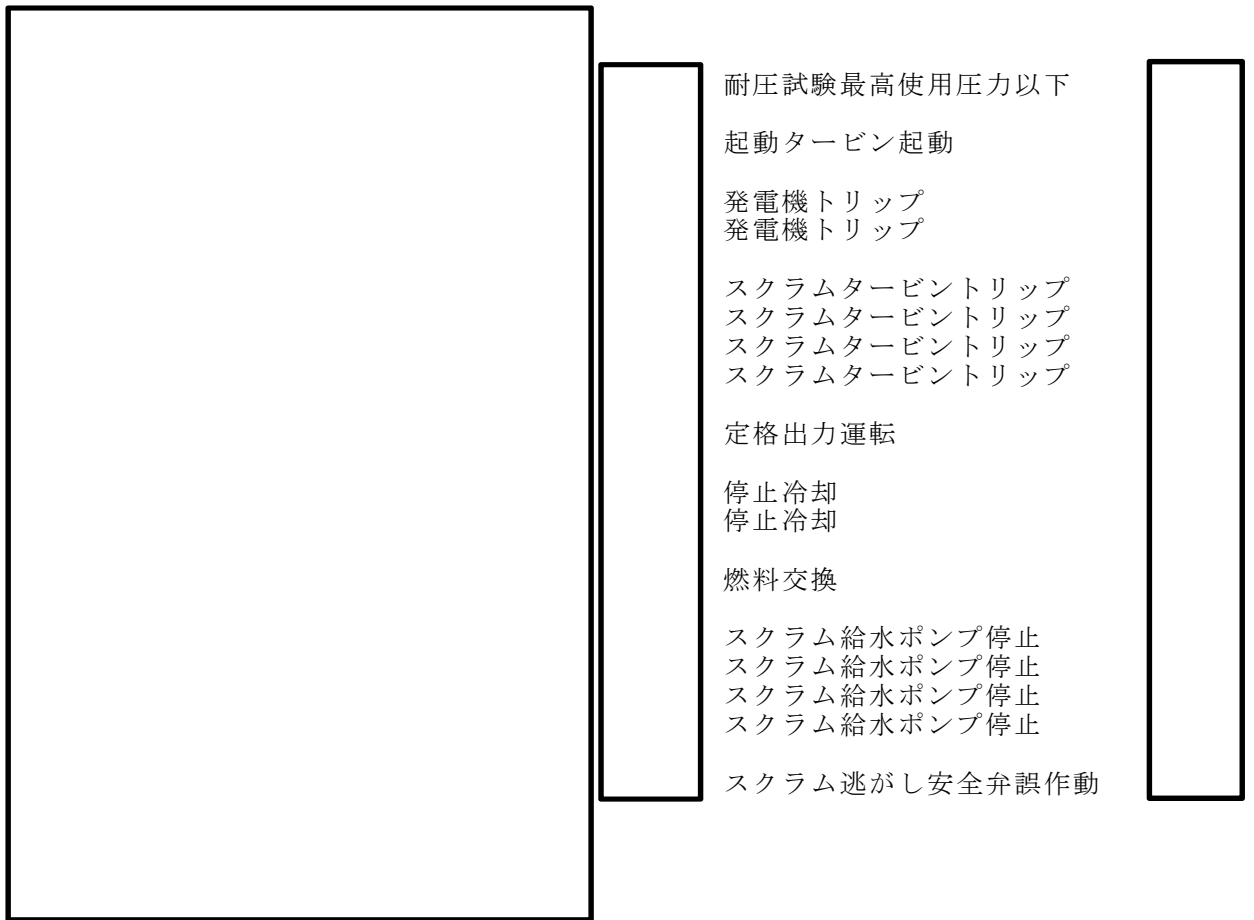


图 3-4(15) 温度分布图  (单位: °C)



No.	運転条件	運転条件	S <sub>p</sub>
1			
2			
3			

図5-1 応力差の変動 (P01, S<sub>12</sub>)

表 2-1 外荷重

記号	荷重名称	鉛直力		水平力	モーメント
		V <sub>1</sub> (kN)	V <sub>2</sub> (kN)	H (kN)	M (kN・m)
L03	設計機械的荷重				
L12	外荷重 A *1				
L13	外荷重 B *2				
L18	外荷重 C *3				
L19	外荷重 D *4				
L20	外荷重 E *5				
L21	外荷重 F *6				
L22	外荷重 G *7				

注 1 :

注 2 :

注 3 :

注記 \*1 :

\*2 :

\*3 :

\*4 :

\*5 :

\*6 :

\*7 :

表2-2 荷重の組合せ及び運転状態

区分	荷重の組合せ
	各運転状態による荷重
設計条件	設計条件による荷重
運転状態 I, II, III, IV	運転状態 I による荷重
	運転状態 II による荷重
	運転状態 III による荷重
	運転状態 IV (L) による荷重 *1
	運転状態 IV (S) による荷重 *2
試験状態	試験状態による荷重

注記\*1 : 運転状態IV (L) による荷重とは、運転状態IVによる荷重のうち長期荷重を示す。

\*2 : 運転状態IV (S) による荷重とは、運転状態IVによる荷重のうち短期荷重を示す

表2-3 荷重の組合せ

条件	荷重の組合せ	応力評価
設計条件	L01+L03	$P_L + P_b$
運転状態 I 及び II	L01+ (L12, L13, L18又は L19) +L10	$P_L + P_b + Q$ 疲労解析
運転状態 III	L01+L20	$P_L + P_b$
運転状態 IV	L01+L21	$P_L + P_b$
試験状態	L01+L22	$P_L + P_b$

表2-4 許容応力

運転状態	許容限界	
	一次膜+一次曲げ応力	一次+二次応力
設計条件	$1.5 \cdot S_m$	—
I, II	—	$3 \cdot S_m$
III	$\text{MIN}(1.5 \cdot S_y, S_u)$	—
IV	$S_u$	—
試験状態	$1.35 \cdot S_y$	—

表2-5 許容応力評価条件

評価部位	材料		温度条件 (°C)	$S_m$	$S_y$	$S_u$	
				(MPa)	(MPa)	(MPa)	
スカート	フェライト系鋼	SQV2A	試験温度				
			流体の最高温度 (運転状態IV) 及び 定格出力運転時の 蒸気温度				
			最高使用温度	302	184	—	—
			流体の最高温度 (運転状態III)				

K7 ① V-3-別添8 R0





表3-1(2) 熱伝達率の計算

流体	温度 T <sub>f</sub> (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	プラントル数 P <sub>r</sub> (—)	レイノルズ数 R <sub>e</sub> (—)	熱伝達率 h (W/(m <sup>2</sup> ·K))
空気						

注1：熱伝達率は、引用文献(2)のP46の(8)式に示す下記の式を用いて計算する。

$$h = 0.664 \cdot P_r^{1/3} \cdot R_e^{1/2} \cdot \frac{\lambda}{L}$$

ここで、 $R_e = v \cdot L / \nu_0$

v : 流速 (m/s)

ν<sub>0</sub> : 動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s)

注2：100%流量 =  m<sup>3</sup>/h

注3：流路断面積 =  m<sup>2</sup> (空調ダクト出口総断面積)

注4：代表長さ L =  m

表3-1(3) 熱伝達率の計算



流体	温度 T <sub>m</sub> (K)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	エアギャップ の距離 l (m)	形態係数 F (-)	対面金属のふく射率 ε <sub>1</sub> , ε <sub>2</sub> (-)	熱伝達率 h (W/(m <sup>2</sup> ·K))
空気						

注：熱伝達率は、引用文献(2)及び引用文献(3)に示す下記の式を用いて算出する。

$$h = \frac{\lambda}{\ell} + \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{F} + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$

ここで、A<sub>1</sub> : 胴板側エアギャップ範囲の表面積(m<sup>2</sup>)

A<sub>2</sub> : スカート側エアギャップ範囲の表面積(m<sup>2</sup>)

F : 形態係数

ℓ : エアギャップの距離(m)

T<sub>m</sub> : 対面金属表面温度の平均温度(K)

ε<sub>1</sub> : 対面金属のふく射率

ε<sub>2</sub> : 対面金属のふく射率

λ : 空気の熱伝導率(W/(m·K))

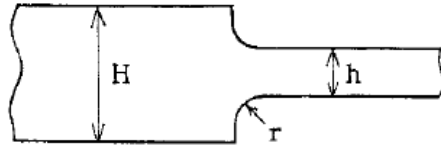
σ : ステファンボルツマン定数 (= 5.67×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>))

A<sub>1</sub> = A<sub>2</sub>とする。

表 3-2 応力集中係数

応力評価点	データ			K <sub>n</sub> (引張り)	K <sub>b</sub> (曲げ)
	T (mm)	t (mm)	r (mm)		
P01, P01'				2.0	1.7
P02, P02'				2.1	1.7

注：応力集中係数は、引用文献(4)の Appendix B に示す下記の式を用いて計算する。



$$K_n = 1 + \left\{ \frac{\frac{H}{h} - 1}{4 \cdot (1.4 \cdot \frac{H}{h} - 1)} \cdot \frac{h}{r} \right\}^{0.65}$$

$$K_b = 1 + \left\{ \frac{\frac{H}{h} - 1}{2 \cdot (5.37 \cdot \frac{H}{h} - 4.8)} \cdot \frac{h}{r} \right\}^{0.85}$$

- ここで、K<sub>b</sub> : 曲げに対する応力集中係数  
 K<sub>n</sub> : 引張りに対する応力集中係数  
 r : 隅部の半径  
 T : 大きい方の板厚 (= H/2)  
 t : 小さい方の板厚 (= h/2)

表4-1 一次膜+一次曲げ応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	設計条件		運転状態Ⅲ		運転状態Ⅳ		試験状態	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
P01 P02	12	276	11	435	6	490	11	456
P01' P02'	28	276	11	435	18	490	11	456

表4-2 一次+二次応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価点	一次+二次応力差最大範囲 ( $P_L + P_b + Q$ )	
	$S_n$	許容応力 $3 \cdot S_m$
P01	260	553
P01'	260	553
P02	248	553
P02'	248	553

表5-1 疲労累積係数の評価のまとめ

応力評価点	疲労累積係数	
	$U_n$	許容値
P01	0.009	1.0
P01'	0.009	1.0
P02	0.005	1.0
P02'	0.005	1.0

表 6-1 座屈に対する評価に用いる荷重

運転状態	鉛直力		モーメント M (kN・m)
	V <sub>1</sub> (kN)	V <sub>2</sub> (kN)	
I, II			—
III			—
IV			

表 6-2 座屈に対する評価

(単位 : MPa)

運転状態	圧縮応力	許容応力
I, II	14	68
III	14	82
IV	23	102