

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 3-018
提出年月日	2022年6月20日

!!! *!%

中国電力株式会社

2022年6月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. 炉心支持構造物の強度評価の基本方針	2
3. 炉心支持構造物の強度評価方法	3
3.1 確認内容	3
4. 強度評価結果	7
5. シュラウドサポートの強度計算	8
5.1 一般事項	8
5.2 適用基準	8
5.3 記号の説明	9
5.4 計算精度と数値の丸め方	11
5.5 形状・寸法・材料	11
5.6 解析範囲	11
5.7 計算結果の概要	11
5.8 計算条件	15
5.8.1 評価対象機器	15
5.8.2 設計条件	15
5.8.3 運転条件	15
5.8.4 材料	15
5.8.5 物性値	15
5.8.6 解析モデルの物性値補正	16
5.8.7 荷重の組合せ及び供用状態	16
5.8.8 荷重の組合せ及び応力評価	17
5.8.9 許容応力	17
5.8.10 許容応力評価条件	17
5.8.11 溶接部の継手効率	18
5.8.12 応力の記号と方向	18
5.9 応力解析の手順	19
5.9.1 温度分布計算	19
5.9.2 応力計算	20
5.10 応力強さの評価	21
5.10.1 主応力	21
5.10.2 応力強さ	21
5.10.3 一次一般膜応力強さの評価	21
5.10.4 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	21

5.10.5	一次＋二次応力強さの評価	22
5.11	繰返し荷重の評価	22
5.11.1	疲労解析	22
5.12	特別な応力の評価	23
5.12.1	座屈に対する評価	23
5.13	引用文献	27
5.14	参照図書	27
6.	燃料支持金具の強度計算	96
6.1	一般事項	96
6.2	適用基準	96
6.3	記号の説明	97
6.4	計算精度と数値の丸め方	98
6.5	形状・寸法・材料	98
6.6	解析範囲	98
6.7	計算結果の概要	98
6.8	計算条件	102
6.8.1	評価対象機器	102
6.8.2	設計条件	102
6.8.3	運転条件	102
6.8.4	材料	102
6.8.5	荷重の組合せ及び運転状態	102
6.8.6	荷重の組合せ及び応力評価	103
6.8.7	許容応力	103
6.8.8	許容応力評価条件	103
6.8.9	溶接部の継手効率	103
6.8.10	応力の記号と方向	104
6.9	応力評価の手順	104
6.9.1	温度分布計算	104
6.9.2	応力の評価	104
6.9.3	繰返し荷重の評価	105
6.10	応力計算	106
6.10.1	応力評価点	106
6.10.2	差圧による応力	106
6.10.3	外荷重による応力	107
6.10.4	熱応力	108
6.11	応力強さの評価	109

6.11.1	一次一般膜応力強さの評価	109
6.11.2	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価	109
6.11.3	一次＋二次応力強さの評価	109
6.12	繰返し荷重の評価	110
6.12.1	告示第96条第1項第3号についての検討	110
6.12.2	疲労解析	110
6.13	引用文献	111
6.14	参照図書	111
添付1	熱伝達率の計算	125
添付2	応力集中係数の計算	128

図 表 目 次

図 5-1	形状・寸法・材料・応力評価点	12
図 5-2	応力解析の手順	28
図 5-3	温度分布及び応力計算のモデル	29
図 5-4	温度遷移図	37
図 5-5	温度分布図	43
図 5-6	応力差の変動	71
図 6-1	形状・寸法・材料・応力評価点	99
図 6-2	応力評価の手順	112
図 6-3	中央燃料支持金具の差圧による応力計算モデル	113
図 6-4	中央燃料支持金具の外荷重による応力計算モデル	113
表 3-1	重大事故等事象に対する荷重の整理表	4
表 3-2	設計基準事故事象に対する事故時荷重	6
表 5-1	表示する数値の丸め方	11
表 5-2	計算結果の概要	13
表 5-3	外荷重	30
表 5-4	温度分布計算及び応力計算に使用する材料の物性値	31
表 5-5	繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値	31
表 5-6	流体の物性値	32
表 5-7	荷重の組合せ及び供用状態	33
表 5-8	荷重の組合せ	33
表 5-9	繰返しピーク応力強さの割増し方法	34
表 5-10	許容応力	35
表 5-11	許容応力評価条件	35
表 5-12	溶接部の継手効率	36
表 5-13	熱伝達率の計算	75
表 5-14	応力集中係数	90
表 5-15	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	91
表 5-16	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	92
表 5-17	一次＋二次応力強さの評価のまとめ	93
表 5-18	疲労累積係数の評価のまとめ	94
表 5-19	座屈に対する評価	95
表 6-1	表示する数値の丸め方	98
表 6-2	計算結果の概要	101

表 6-3	各運転状態における差圧	114
表 6-4	外荷重	115
表 6-5	荷重の組合せ及び運転状態	116
表 6-6	荷重の組合せ	117
表 6-7	許容応力	118
表 6-8	許容応力評価条件	119
表 6-9	溶接部の継手効率	120
表 6-10	断面性状	121
表 6-11	一次一般膜応力強さの評価のまとめ	122
表 6-12	一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価のまとめ	123
表 6-13	一次＋二次応力強さの評価のまとめ	124

1. 概要

本計算書は、「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」（平成25年6月28日 原子力規制委員会規則第六号）（以下「技術基準規則」という。）第50条、第51条、第52条、第54条、第59条、第60条、第62条及び第63条において、重大事故等時に流路としての機能が要求される原子炉压力容器内の炉心支持構造物が、十分な強度を有することを説明するものである。

2. 炉心支持構造物の強度評価の基本方針

重大事故等時における炉心支持構造物の評価は、重大事故等時の評価条件が設計基準事故時の評価条件に包絡されており、燃料支持金具を除き、既に認可された工事計画の添付資料（以下「既工認」という。）における評価結果があるため、材料、構造及び強度の要求は同じであることから、その評価の適用性を確認し、既工認の確認による評価を実施する。

なお、シュラウドサポートについては、既工認における評価結果はあるが、シュラウドサポートの耐震計算書との整合性を考慮し、最新の知見を反映した解析モデルを用いて発電用原子力設備規格 設計・建設規格（（社）日本機械学会，2005/2007）による評価を5章で実施する。また、燃料支持金具については、既工認における評価結果がないため、施設時に適用された規格である通商産業省告示第501号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」による評価を6章で実施する。

3. 炉心支持構造物の強度評価方法

炉心支持構造物の強度評価について、シュラウドサポート及び燃料支持金具を除き、以下の3.1節に示す確認内容のとおり、既工認における評価結果の確認による評価を実施する。

3.1 確認内容

重大事故等事象は、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故事象に対して原子炉の安全性を損なうことがないように設計することが求められる構造物、系統及び機器の安全機能が喪失した場合に発生する又は発生する可能性があるものである。

重大事故等時の事故時荷重を表3-1に、設計基準時の事故時荷重を表3-2に示す。両表に示すとおり、起因となる運転状態Ⅲ及び運転状態Ⅳの事故時荷重は、重大事故等時の事故時荷重を包絡している。

表 3-1 重大事故等事象に対する荷重の整理表

重大事故等時			運転状態Ⅲ及びⅣの評価（表3-2）との関係	
事故シーケンスグループ	重要事故シーケンス	事故時荷重*1	事故時荷重の包絡性	ピーク差圧の包絡性
高圧・低圧注水機能喪失（給水喪失）	給水喪失＋低圧原子炉代替注水系（常設）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレイ/ベント）			
高圧注水・減圧機能喪失（給水喪失）	給水喪失＋残留熱除去系（低圧注水モード）＋原子炉格納容器除熱（残留熱除去系）			
全交流動力電源喪失（長期TB）	全交流動力電源喪失＋原子炉隔離時冷却系停止＋低圧原子炉代替注水系（可搬型）＋残留熱除去系（低圧注水モード）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレイ/残留熱除去系）			
全交流動力電源喪失（TBD, TBU）	全交流動力電源喪失/全電源喪失＋高圧原子炉代替注水＋低圧原子炉代替注水系（可搬型）＋残留熱除去系（低圧注水モード）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレイ/残留熱除去系）			
全交流動力電源喪失（TBP）	全交流動力電源喪失＋原子炉隔離時冷却系停止＋低圧原子炉代替注水系（可搬型）＋残留熱除去系（低圧注水モード）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレイ/残留熱除去系）			

(続き)

崩壊熱除去機能喪失 (取水機能喪失)	給水喪失＋全交流動力電源喪失＋原子炉 隔離時冷却系停止＋残留熱除去系（低圧 注水モード）＋原子炉格納容器除熱（残 留熱除去系）	
崩壊熱除去機能喪失 (RHR機能喪失)	給水喪失＋原子炉隔離時冷却系停止＋低 圧原子炉代替注水系（常設）＋原子炉格 納容器除熱（代替スプレイ/ベント）	
原子炉停止機能喪失	主蒸気隔離弁誤閉止＋スクラム失敗	
LOCA時注水機能 喪失（中小破断）	中小LOCA＋外部電源喪失＋低圧原子 炉代替注水系（常設）＋原子炉格納容器 除熱（代替スプレイ/ベント）	
格納容器バイパス	インターフェースシステムLOCA（残 留熱除去系（低圧注水モード）の破断）	
大破断LOCA	大LOCA＋低圧原子炉代替注水系（常 設）＋原子炉格納容器除熱（代替スプレ イ/残留熱代替除去系）	

51

注記*1：事故時に発生する機械的荷重

*2：

表 3-2 設計基準事象に対する事故時荷重

事象		事故時荷重*	強度評価上の取扱い	備考
運転状態Ⅲ	過大圧力			
運転状態Ⅳ	冷却材喪失事故			

注記*：事故時に発生する機械的荷重

4. 強度評価結果

本計算書は、炉心支持構造物の重大事故等対処設備としての応力評価結果を示すものであるが、シュラウドサポート及び燃料支持金具を除く機器は、設計基準対象施設としての使用条件を超えないことから、炉心シュラウドの評価結果については、平成 16 年 7 月 1 日付け電原運第 24 号にて届出した既工認の添付書類Ⅳ-3-1-1「炉心シュラウドの応力計算書」、上部格子板、炉心支持板及び制御棒案内管の評価結果については、昭和 60 年 12 月 25 日付け 60 資庁第 11431 号にて認可された既工認の添付書類Ⅳ-2-2-3「炉心支持構造物の耐震性についての計算書」による。

シュラウドサポートについては、評価結果を 5 章に、燃料支持金具については、評価結果を 6 章に示す。

5. シュラウドサポートの強度計算

5.1 一般事項

本章は、シュラウドサポート（炉心シュラウド下部胴とシュラウドサポートシリンダとの接合部を含む。）の応力計算について示すものである。

注1：以下、シュラウドサポートレグ、シュラウドサポートシリンダ、シュラウドサポートプレート及び炉心シュラウド下部胴を、それぞれ「レグ」、「シリンダ」、「プレート」及び「下部胴」という。

注2：図表は、原則として巻末に示す。

5.2 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（（社）日本機械学会，2005/2007）
（以下「設計・建設規格」という。）*

注記*：本章において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格 ○○○-△△△△(◇)a. (a)」として示す。

5.3 記号の説明

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

記号	記号の説明	単位
A	レグ1本当たりの断面積	mm ²
B	レグの幅	mm
C	部材両端の拘束条件に対する座屈長さの係数	—
E	縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3121.1(1)に定める値	MPa
f_c	許容応力 設計・建設規格 SSB-3121.1(3)に定める値	MPa
H	水平力	N
I	座屈軸についての断面二次モーメント	mm ⁴
i	座屈軸についての断面二次半径	mm
l	レグの長さ	mm
l_k	座屈長さ	mm
M	モーメント	N・mm
N_a	$S_{l'}$ に対応する許容繰返し回数	回
N_c	実際の繰返し回数	回
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
S	10 ¹¹ 回に対応する許容繰返しピーク応力強さ	MPa
S_{12}	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S_{23}	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S_{31}	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S_l	繰返しピーク応力強さ	MPa
$S_{l'}$	補正繰返しピーク応力強さ	MPa
S_m	設計応力強さ 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表1に定める値	MPa
S_n	供用状態A及びBにおける一次+二次応力の応力差最大範囲	MPa
$S_{n'}$	S_n のうち熱曲げ応力を除く一次+二次応力の応力差最大範囲	MPa
S_p	一次+二次+ピーク応力の応力差範囲	MPa
S_u	設計引張強さ 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計降伏点 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
$S_y (RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8 に定める材料の40°Cにおける設計降伏点	MPa

記号	記号の説明	単位
T	レグの板厚	mm
V	鉛直力	N
η	溶接部の継手効率	—
Λ	限界細長比	—
λ	有効細長比	—
ν	設計・建設規格 SSB-3121.1(3)a.における ν	—
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_l	軸方向応力	MPa
σ_r	半径方向応力	MPa
σ_t	周方向応力	MPa
τ_{lr}	せん断応力	MPa
τ_{rt}	せん断応力	MPa
τ_{tl}	せん断応力	MPa

5.4 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 5-1 に示すとおりとする。

表 5-1 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	四捨五入	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

注記*：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設計応力強さ，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 位を切捨て，小数点以下第 1 位までの値として算出する。許容応力として得られた値の小数点以下第 1 位を切捨てて整数化する。

5.5 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所形状・寸法・材料を図 5-1 に示す。

5.6 解析範囲

解析範囲を図 5-1 に示す。

5.7 計算結果の概要

計算結果の概要を表 5-2 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，応力評価上厳しくなる代表的な評価点を記載する。

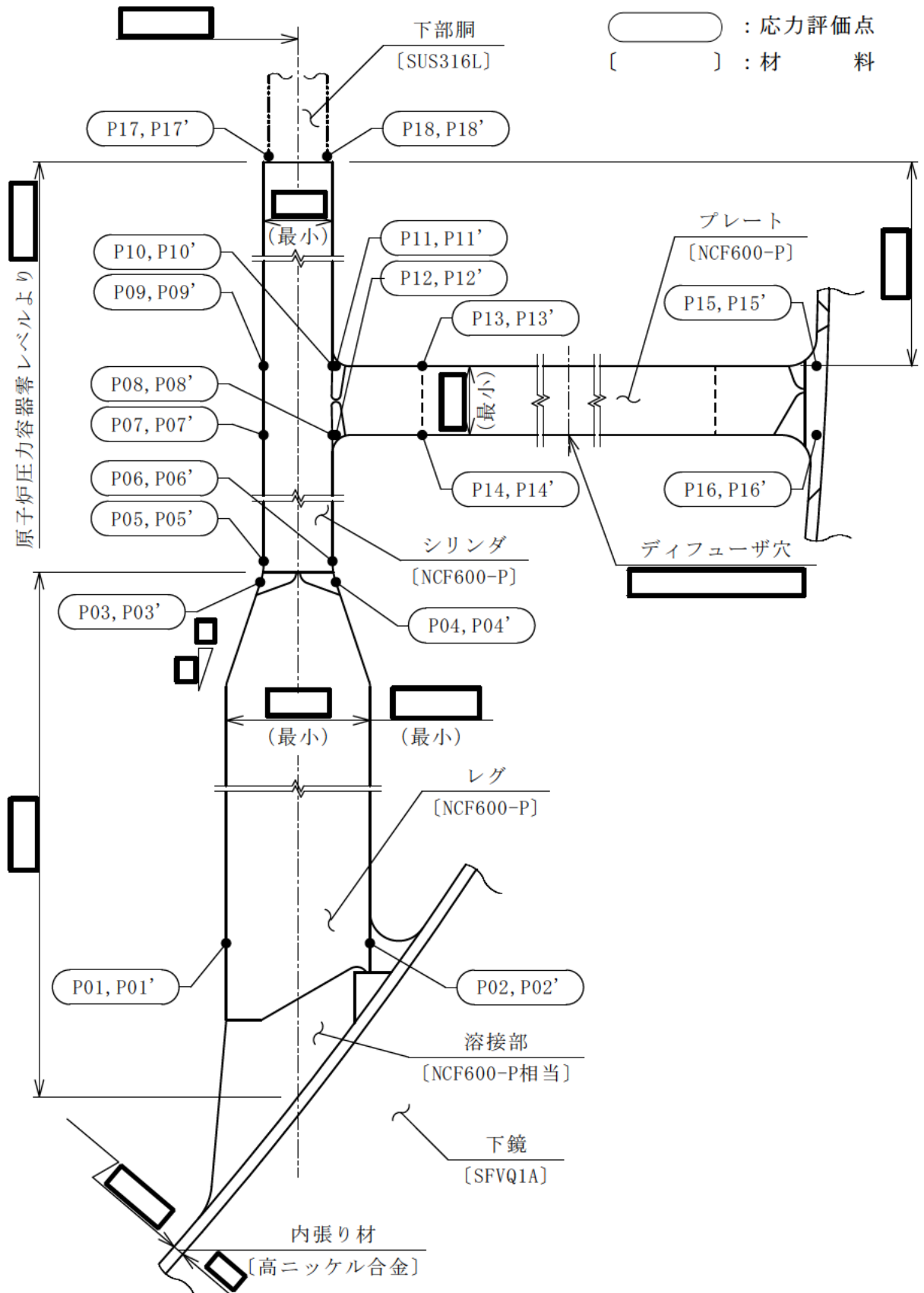


図 5-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表5-2(1) 計算結果の概要

部分及び材料	供用状態	一次一般膜応力 (MPa)			一次一般膜+一次曲げ応力 (MPa)			一次+二次応力 (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	応力評価点	疲労累積係数	許容値	応力評価点	
レダ	設計条件	108	164	P03 - P04	108	246	P03 - P04	---	---	---	---	---	---	
	C	18	246	P03 - P04	18	369	P03 - P04	---	---	---	---	---	---	
	D	20	334	P03 - P04	20	501	P03 - P04	---	---	---	---	---	---	
NCF600-P	A, B	---	---	---	---	---	---	142	492	P03	0.000	1.0	P03	
	設計条件	50	164	P07 - P08	50	246	P07 - P08	---	---	---	---	---	---	
	C	9	246	P05 - P06	9	369	P05 - P06	---	---	---	---	---	---	
NCF600-P	D	10	334	P09 - P10	10	501	P09 - P10	---	---	---	---	---	---	
	A, B	---	---	---	---	---	---	476	492	P07	0.001	1.0	P07	
	設計条件	17	147*1	P11' - P12'	17	221*1	P11' - P12'	---	---	---	---	---	---	
プレート	C	6	221*1	P11 - P12	6	332*1	P11 - P12	---	---	---	---	---	---	
	D	6	300*1	P11 - P12	6	450*1	P11 - P12	---	---	---	---	---	---	
	A, B	---	---	---	---	---	---	314	442*1	P12	0.013	1.0	P14	
下部胴	設計条件	71	85*1	P17 - P18	71	127*1	P17 - P18	---	---	---	---	---	---	
	C	18	127*1	P17 - P18	18	190*1	P17 - P18	---	---	---	---	---	---	
	D	19	208*1	P17 - P18	19	312*1	P17 - P18	---	---	---	---	---	---	
SUS316L	A, B	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		---	---	---	---	---	307*2	260*1	P17	0.019	1.0	P17		

注記*1：継手効率 を乗じた値を示す。

*2：許容値 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ を超えるが設計・建設規格 CSS-3300の簡易弾塑性解析の規定を満足する。

表 5-2(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部分及び材料	供用状態	座屈に対する評価	
		圧縮応力	許容応力
レグ NCF600-P	A, B	4	155
	C	4	233
	D	5	249

5.8 計算条件

5.8.1 評価対象機器

応力評価を行う機器は、次のとおりである。（図 5-1 参照）

機器名称	評価対象				
	供用状態に対する評価				
	設計条件	A, B	C	D	重大事故等時
シュラウドサポート	○	○	○	○	—

注：「○」は評価対象を示す。

5.8.2 設計条件

原子炉圧力容器の最高使用圧力：8.62 MPa

設計差圧： MPa

最高使用温度：302℃

設計機械的荷重：表 5-3 に示す。

5.8.3 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。

シュラウドサポートの応力評価において考慮する差圧は、参照図書(1)a.に定める差圧 P_{12} であり、考慮する外荷重の値は表 5-3 に示すとおりである。

5.8.4 材料

各部の材料を図 5-1 に示す。

5.8.5 物性値

温度分布計算、応力計算及び繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値は、以下のとおりである。

(1) 材料の物性値

材料の物性値は、次のように定める。

- a. 縦弾性係数 E 及び熱膨張係数 α は、設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 及び表 2 に定められたものによる。
また、熱伝導率 λ 及び温度伝導率 a は、引用文献(1)に定められたものによる。
- b. 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度（302℃）に対する値を用いる。温度分布計算及び熱応力計算に使用する物性値は、その

温度依存性を考慮する。

なお、常温は 20℃とする。

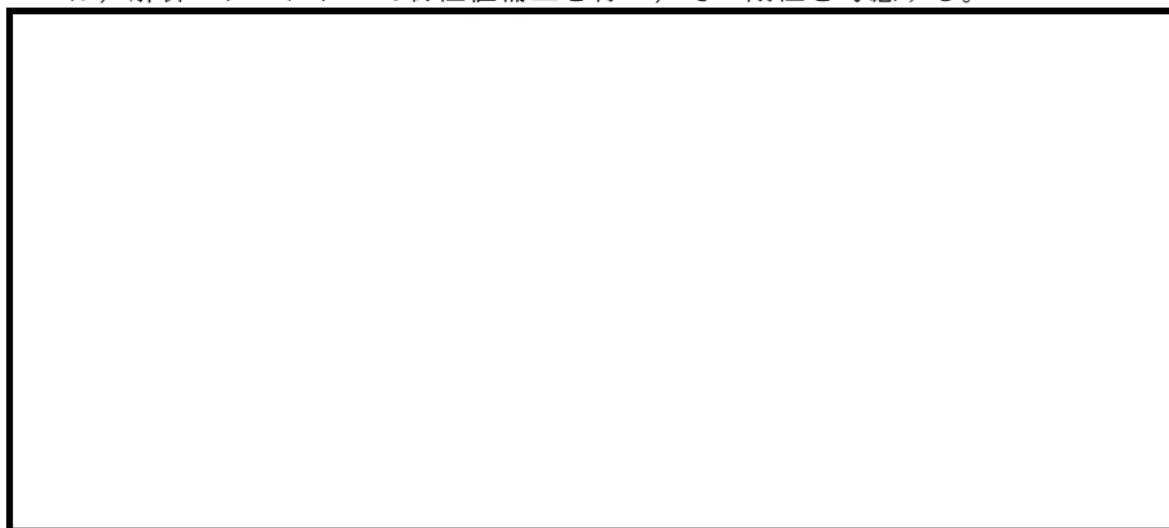
- c. 繰返し荷重の評価に使用する物性値は、運転温度（℃：定格出力運転時の蒸気温度）に対する値を用いる。
- d. 主な温度における材料の物性値を表 5-4 に示す。
繰返し荷重の評価に使用する物性値を表 5-5 に示す。

(2) 流体の物性値

温度分布計算に使用する流体の物性値は、引用文献(2)（改訂第4版）の表に定められたものによる。主な温度における物性値を表 5-6 に示す。

5.8.6 解析モデルの物性値補正

シュラウドサポートの応力計算には、軸対称モデルを用い、次の部位については、解析モデルにおいて物性値補正を行い、その剛性を考慮する。



5.8.7 荷重の組合せ及び供用状態

荷重の組合せ及び供用状態を表 5-7 に示す。

なお、本章において、設計・建設規格 GNR-2120(1)の規定による最高使用圧力（供用状態Aを定義する運転状態において機器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。）を「設計差圧」と呼び、設計差圧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。

5.8.8 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 5-8 に示す。本章において、荷重の種類と記号は以下のとおりである。

荷重	記号
(1) 原子炉圧力容器の内圧	[L01]
(2) 差圧	[L02]
(3) 設計機械的荷重	[L03]
(4) 死荷重	[L04]
(5) ジェット反力	[L09]
(6) 熱負荷	[L10]

5.8.9 許容応力

シュラウドサポートの許容応力は、設計・建設規格 CSS-3100 に基づき表 5-10 に示す。

5.8.10 許容応力評価条件

- (1) 許容応力評価において、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、それぞれ設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 1、表 8 及び表 9 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。供用状態 A 及び B、供用状態 C 並びに供用状態 D の一次応力の評価には、各供用状態を定義する運転状態における流体の最高温度（運転状態 I 及び II：℃，運転状態 III：℃，運転状態 IV：℃）に対する許容応力を用いる。供用状態 A 及び B 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。
- (3) シュラウドサポートの許容応力評価条件を表 5-11 に示す。

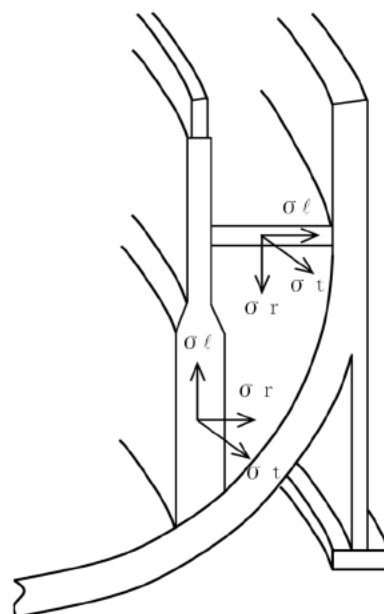
5.8.11 溶接部の継手効率

- (1) 溶接部の継手効率は、継手の種類と分類及び継手に適用する検査の種類により、設計・建設規格 CSS-3150 に従って定める。溶接部の継手効率を表 5-12 に示す。
- (2) 溶接部の許容応力は、材料の許容応力に継手効率を乗じたものとする。

5.8.12 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。

- σ_t : 周方向応力
- σ_l : 軸方向応力
- σ_r : 半径方向応力



5.9 応力解析の手順

応力解析の手順について述べる。

応力解析の概要を図 5-2 に示す。

5.9.1 温度分布計算

(1) 境界の熱伝達率

温度分布計算に使用する容器内面，容器外面及びシュラウドサポート外面の熱伝達率の計算条件と計算結果を表 5-13 に示す。

(2) 温度分布の計算

a. 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。

b. 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，計算機コード「TACF」により行う。なお，評価に用いる計算機コードの検証及び妥当性確認等の概要については，VI-5「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 5-3 に示す。

境界における熱伝達率は，5.9.1 項の計算結果を用いる。

c. 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 5-4 に示す。

シュラウドサポート，下部胴及び下鏡内に指定した 2 点間の温度差が極値となる時点を図 5-4 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。

d. 温度分布図

5.9.1 項(2)c.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 5-5 に示す。

(3) 熱応力の計算時点

熱応力計算は、5.9.1 項(2)c. 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 [C10-01, C20-01, C20-03 及び C20-05] 及び定格出力運転 [C12-01] (計算時点を図 5-4 中に示す。) 並びに耐圧試験 [C02-01] に対して行う。

5.9.2 応力計算

(1) 応力評価点

応力評価点の位置を図 5-1 に示す。

応力集中が生じる箇所の応力集中係数を表 5-14 に示す。

(2) 内圧及び差圧による応力

a. 荷重条件 (L01 及び L02)

各運転条件における内圧及び差圧を 5.8.2 項及び 5.8.3 項に示す。

b. 計算方法

内圧及び差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、計算機コード「ASHSD2-B」により行う。なお、評価に用いる計算機コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「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 5-3 に示す。

なお、各供用状態での内圧及び差圧による応力は、最高使用圧力及び設計差圧での応力を用いて、圧力の比により(比倍して)計算する。

(3) 外荷重による応力

a. 荷重条件 (L03, L04 及び L09)

シュラウドサポートに作用する外荷重を表 5-3 に示す。

b. 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、計算機コード「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 5-3 に示す。

なお、各荷重での応力は、単位荷重(鉛直力、水平力等)での応力を用いて、荷重(鉛直力、水平力等)の比により(比倍して)計算する。

(4) 熱応力

a. 荷重条件 (L10)

熱応力計算には，5.9.1項で求めた温度分布を用いる。

b. 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，計算機コード「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5-3に示す。

5.10 応力強さの評価

5.10.1 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 σ_t ， σ_l ， σ_r ， τ_{tl} ， τ_{lr} ， τ_{rt} の6成分を持つが，主応力 σ は，引用文献(4)の1・3・6項により，次式を満足する3根 σ_1 ， σ_2 ， σ_3 として計算する。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_t + \sigma_l + \sigma_r) \cdot \sigma^2 + (\sigma_t \cdot \sigma_l + \sigma_l \cdot \sigma_r + \sigma_r \cdot \sigma_t - \tau_{tl}^2 \\ & - \tau_{lr}^2 - \tau_{rt}^2) \cdot \sigma - \sigma_t \cdot \sigma_l \cdot \sigma_r + \sigma_t \cdot \tau_{lr}^2 + \sigma_l \cdot \tau_{rt}^2 \\ & + \sigma_r \cdot \tau_{tl}^2 - 2 \cdot \tau_{tl} \cdot \tau_{lr} \cdot \tau_{rt} = 0 \end{aligned}$$

上式により主応力を求める。

5.10.2 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。

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

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

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

5.10.3 一次一般膜応力強さの評価

各供用状態における評価をまとめて，表5-15に示す。

表5-15より，各供用状態の一次一般膜応力強さは，5.8.9項に示す許容応力を満足する。

5.10.4 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各供用状態における評価をまとめて，表5-16に示す。

表5-16より，各供用状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは，5.8.9項に示す許容応力を満足する。

5.10.5 一次＋二次応力強さの評価

供用状態 A 及び B における評価をまとめて、表 5-17 に示す。

表 5-17 より、以下の評価点を除くすべての評価点において一次＋二次応力の応力差最大範囲は、 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ 以下であり、5.8.9 項に示す許容応力を満足する。

P17, P17' , P18 及び P18'

一次＋二次応力の応力差最大範囲が $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ を超える上記の評価点にあつては、5.11 節で簡易弾塑性解析の方法を適用する。

5.11 繰返し荷重の評価

5.11.1 疲労解析

シュラウドサポ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。

(1) 設計・建設規格 CSS-3300 の適用性の検討

一次＋二次応力強さの最大範囲が $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ を超える応力評価点については、以下に示すとおり、設計・建設規格 CSS-3300 による簡易弾塑性解析の方法を適用する。

- a. 材料の最小降伏点と最小引張強さの比は、以下に示すとおり、0.8 以下である。（設計・建設規格 CSS-3311）

応力評価点	材 料	最小降伏点 (MPa)	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点と 最小引張強さの比
P17, P17' P18, P18'	SUS316L	175	480	0.37

- b. 原子炉圧力容器の運転温度は、430℃ 以下である。（設計・建設規格 CSS-3312）
- c. 熱応力のうち曲げ応力を除く一次＋二次応力の評価結果を表 5-17 に示す。表 5-17 より、一次＋二次応力（熱曲げを除く。）の応力差の最大範囲（ $S_{n'}$ ）は、 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$ を超えない。（設計・建設規格 CSS-3313）
- d. 計算された繰返しピーク応力強さ（ $S_{l'}$ ）に対する許容繰返し回数（ N_a ）は、10 回以上である。（設計・建設規格 CSS-3314）
- e. 繰返しピーク応力強さは、表 5-9 に示す方法により割増ししたものを使用する。（設計・建設規格 CSS-3320）

(2) 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 5-6 に示す。

(3) 疲労累積係数

各応力評価点における疲労累積係数をまとめて、表 5-18 に示す。

表 5-18 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。

5.12 特別な応力の評価

5.12.1 座屈に対する評価

レグには、シュラウドサポートに作用する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。

(1) 計算データ

a. 座屈長さ ℓ_k

$$\ell_k = C \cdot \ell = 0.7 \times \boxed{} = \boxed{} \text{ mm}$$

ここで、 $C = 0.7$

$$\ell : \text{レグの長さ} = \boxed{} \text{ mm}$$

b. 座屈軸についての断面二次半径 i

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\boxed{}} = \boxed{} \text{ mm}$$

ここで、 I : 座屈軸についての断面二次モーメント

$$= \frac{1}{12} T^3 \cdot B = \boxed{} \text{ mm}^4$$

$$T : \text{レグの板厚} = \boxed{} \text{ mm}$$

$$B : \text{レグの幅} = \boxed{} \text{ mm}$$

A : レグ 1 本当たりの断面積

$$= T \cdot B = \boxed{} \text{ mm}^2$$

c. 有効細長比 λ

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i} = \boxed{} = \boxed{}$$

(2) 圧縮荷重

シュラウドサポートに作用する鉛直力及びモーメントを表 5-3 に示す。

(3) 圧縮応力

各供用状態においてレグに発生する圧縮応力を表 5-19 に示す。

レグに発生する圧縮応力は、応力評価面 P03' -P04' での一次一般膜応力 (σ_t) を示す。

(4) 許容応力

各供用状態における許容応力の計算は、設計・建設規格 SSB-3121 を準用して計算する。

a. 供用状態 A 及び B

供用状態 A 及び B における許容応力度 F は、以下の 3 つの値のうち小さい方を用いる。

$$1.35 \cdot S_y = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{}^\circ\text{C} \text{ における値})$$

$$0.7 \cdot S_u = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{}^\circ\text{C} \text{ における値})$$

$$S_y = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{} \text{ における値})$$

したがって、許容応力度 $F = \boxed{} \text{ MPa}$ とする。

供用状態 A 及び B における許容圧縮応力 f_c は、 $F = \boxed{} \text{ MPa}$ に対して次のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{限界細長比} : \Lambda &= \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times \boxed{}}{0.6 \times \boxed{}}} \\ &= \boxed{} \end{aligned}$$

ここで、 E : 縦弾性係数 = $\boxed{} \text{ MPa}$ ($\boxed{}^\circ\text{C}$ における値)

ゆえに、 $\lambda < \Lambda$ なので f_c は、

$$\begin{aligned} f_c &= \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F}{\nu} \\ &= \left\{ 1 - 0.4 \times \left(\boxed{} \right)^2 \right\} \times \boxed{} = 155 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{ここで、} \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

$$= 1.5 + \frac{2}{3} \times \left(\boxed{} \right)^2 = \boxed{}$$

b. 供用状態 C

供用状態 C における許容応力度 F は、以下の 3 つの値のうち小さい方を用いる。

$$1.35 \cdot S_y = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{}^\circ\text{C} \text{ における値})$$

$$0.7 \cdot S_u = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{}^\circ\text{C} \text{ における値})$$

$$S_y = \boxed{} \text{ MPa} \quad (\boxed{} \text{ における値})$$

したがって、許容応力度 $F = \square$ MPa とする。

供用状態 C における許容圧縮応力 f_c は、 $F = \square$ MPa に対して次のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{限界細長比: } \Lambda &= \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times \square}{0.6 \times \square}} \\ &= \square \end{aligned}$$

ここで、 E : 縦弾性係数 = \square MPa (\square °C における値)

ゆえに、 $\lambda < \Lambda$ なので f_c は、

$$\begin{aligned} f_c &= 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F}{\nu} \\ &= 1.5 \times \left\{ 1 - 0.4 \times \left(\frac{\square}{\square} \right)^2 \right\} \times \square = 233 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{ここで、 } \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

$$= 1.5 + \frac{2}{3} \times \left(\frac{\square}{\square} \right)^2 = \square$$

c. 供用状態 D

供用状態 D における許容応力度 F は、以下の 3 つの値のうち小さい方を用いる。

$$1.35 \cdot S_y = \square \text{ MPa } (\square \text{°C における値})$$

$$0.7 \cdot S_u = \square \text{ MPa } (\square \text{°C における値})$$

$$1.2 \cdot S_y = \square \text{ MPa } (\square \text{°C における値})$$

したがって、許容応力度 $F = \square$ MPa とする。

供用状態 D における許容圧縮応力 f_c は、 $F = \square$ MPa に対して次のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{限界細長比: } \Lambda &= \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times \square}{0.6 \times \square}} \\ &= \square \end{aligned}$$

ここで、 E : 縦弾性係数 = \square MPa (\square °C における値)

ゆえに、 $\lambda < \Lambda$ なので f_c は、

$$f_c = 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F}{\nu}$$

$$= 1.5 \times \left\{ 1 - 0.4 \times \left(\boxed{} \right)^2 \right\} \times \boxed{} = 249 \text{ MPa}$$

$$\text{ここで, } \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

$$= 1.5 + \frac{2}{3} \times \left(\boxed{} \right)^2 = \boxed{}$$

(5) 座屈に対する評価

各供用状態における座屈に対する評価を表 5-19 に示す。

表 5-19 より、各供用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。

5.13 引用文献

文献番号は、本章において共通である。

- (1) ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE SEC. II PART D, MATERIALS (2015 Edition)
- (2) 伝熱工学資料 (日本機械学会 改訂第3版及び改訂第4版)
- (3) March 1979 Revision of WRC Bulletin 107/August 1965 「Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings」
- (4) 機械工学便覧 基礎編 $\alpha 3$ (日本機械学会)
- (5) 「伝熱概論」 甲藤好郎著, 養賢堂発行
- (6) WARREN H. GIEDT 「基礎伝熱工学」 横堀進, 久我修共訳, 丸善
- (7) Journal of Engineering for Industry, 「Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates With Square and Triangular Penetration Patterns」 (T. SLOT, W. J. O' DONNELL)

5.14 参照図書

- (1) 島根原子力発電所第2号機 第5回工事計画認可申請書 添付書類
 - a. IV-2-2-3(1) 炉心支持構造物の応力解析の方針
 - b. IV-2-2-3(2)b シュラウドサポートの応力計算書
 - c. IV-3-1-1-1 原子炉圧力容器の応力解析の方針

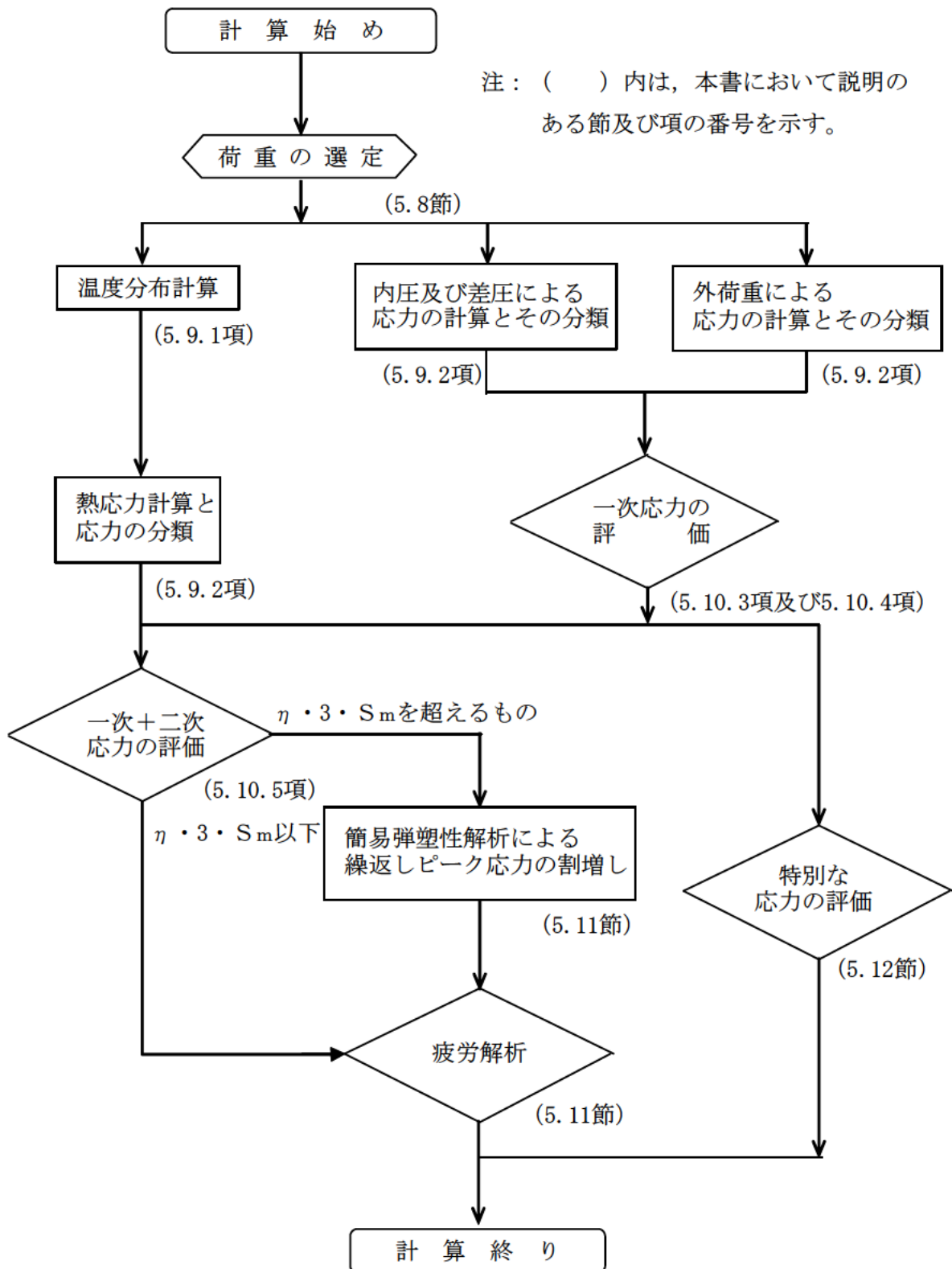


図 5-2 応力解析の手順

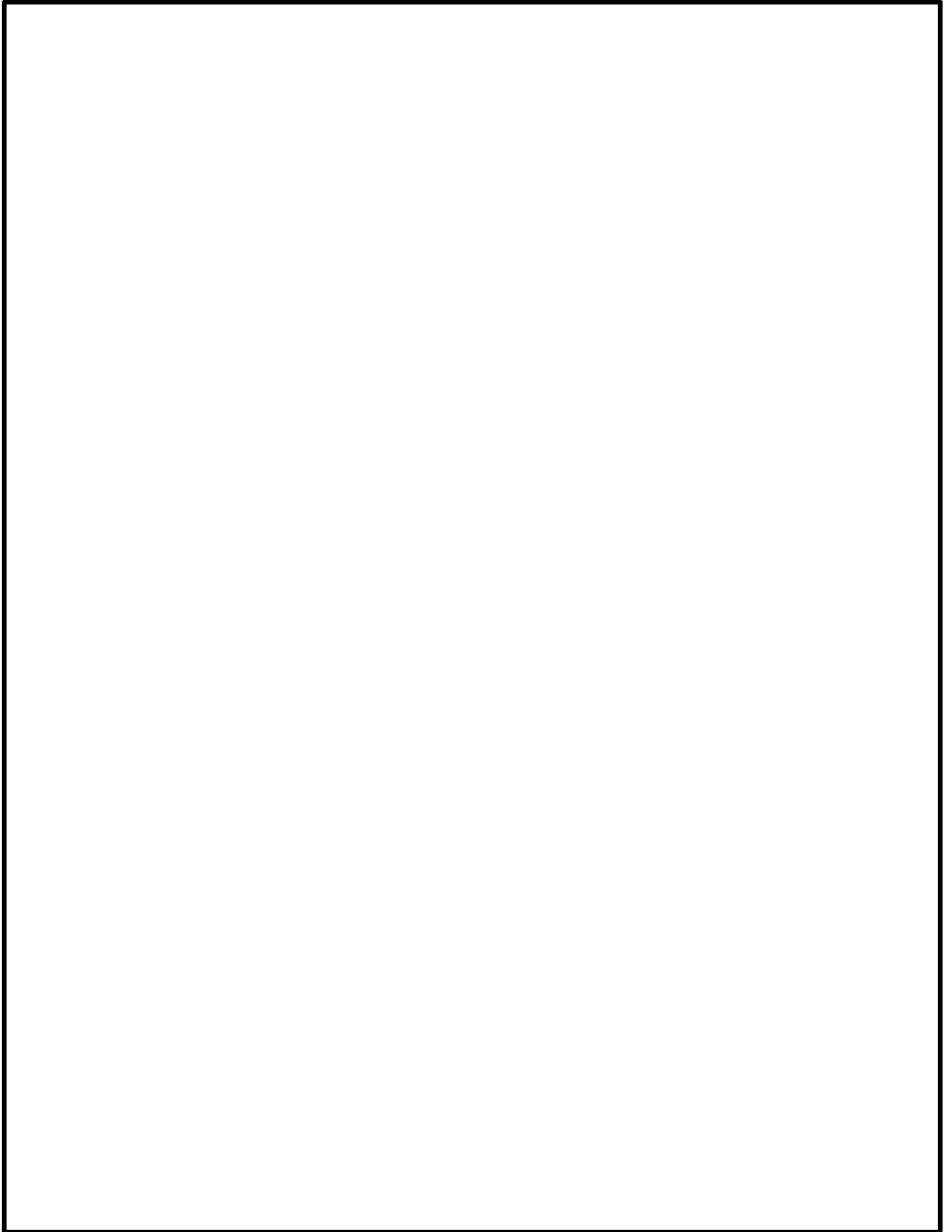


図 5-3 温度分布及び応力計算のモデル

表 5-3 外荷重

記号	荷重名称	鉛直力	水平力	モーメント
		V (kN)	H (kN)	M (kN・m)
L03	設計機械的荷重			
L04	死荷重			
L09	ジェット反力			

--	--	--	--	--

表 5-4 温度分布計算及び応力計算に使用する材料の物性値

材料	温度 (°C)	E ×10 ⁵ (MPa)	α ×10 ⁻⁶ (mm/(mm・°C))	λ (W/(m・K))	a ×10 ⁻⁶ (m ² /s)	ν
SFVQ1A						
SUS316L						
NCF600-P						

注 1 : α は 20°C より表記の温度までの平均熱膨張係数

注 2 : 温度分布計算及び熱応力計算においては、5.8.5 項に示す物性値の出典に基づき、設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表 1 及び表 2 に示される温度に対する物性値を算出し、さらに、これらの値から直線補間により任意の温度における物性値を算出し計算に用いる。

表 5-5 繰返し荷重の評価に使用する材料の物性値

材料	E ×10 ⁵ (MPa)	α ×10 ⁻⁶ (mm/(mm・°C))	S (MPa)	E ₀ ×10 ⁵ (MPa)	q	A ₀	B ₀
SUS316L					3.1	0.7	2.15
NCF600-P					3.1	0.7	2.15

注 :

- E : 運転温度 (°C) に対する縦弾性係数
- α : 運転温度 (°C) に対する瞬時熱膨張係数
- S : 設計・建設規格 表 添付 4-2-2 の曲線 C の 10¹¹ 回に対する繰返しピーク応力強さ
- E₀ : 設計・建設規格 添付 4-2 に記載された縦弾性係数
- q, A₀, B₀ : 設計・建設規格 表 PVB-3315-1 に示された簡易弾塑性解析に使用する係数の値

表 5-6 流体の物性値

種類	温度 (°C)	λ (W/(m·K))	C_p (J/(kg·K))	ρ (kg/m ³)	ν_0 (m ² /s)	Pr
水	20					
	160					
	300					

注：温度分布計算及び熱応力計算においては，5.8.5項に示す物性値の出典に基づき，設計・建設規格 付録材料図表 Part6 表1に示される温度に対する物性値を算出し，さらに，これらの値から直線補間により任意の温度における物性値を算出し計算に用いる。

表 5-7 荷重の組合せ及び供用状態

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
供用状態 A	運転状態Ⅰによる荷重
供用状態 B	運転状態Ⅱによる荷重
供用状態 C	運転状態Ⅲによる荷重
供用状態 D	運転状態Ⅳ（L）による荷重 *1
	運転状態Ⅳ（S）による荷重 *2

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表す。

*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表す。

表 5-8 荷重の組合せ

条件	荷重の組合せ	応力評価
設計条件	L02+L03	P_m $P_m + P_b$
供用状態 A 及び B	L01+L02+L04+L10	$P_m + P_b + Q$ 疲労解析
供用状態 C	L02+L04	P_m $P_m + P_b$
供用状態 D	L02+L04+L09	P_m $P_m + P_b$

表5-9 繰返しピーク応力強さの割増し方法

S _n	S _ℓ
3・S _m 未満	$S_{\ell} = \frac{S_p}{2}$
3・S _m 以上	<p data-bbox="464 443 655 510">$S_{\ell} = \frac{K_e \cdot S_p}{2}$</p> <p data-bbox="464 533 927 566">K_eは、次の手順により計算する。</p> <p data-bbox="499 584 679 618">(1) K < B₀</p> <p data-bbox="539 629 1461 757">① $\frac{S_n}{3 \cdot S_m} < \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4 \cdot A_0 (q - 1)}}{2 \cdot A_0}$</p> <p data-bbox="619 768 1046 846">$K_e = 1 + A_0 \cdot \left(\frac{S_n}{3 \cdot S_m} - \frac{1}{K}\right)$</p> <p data-bbox="539 891 1461 1025">② $\frac{S_n}{3 \cdot S_m} \geq \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4 \cdot A_0 (q - 1)}}{2 \cdot A_0}$</p> <p data-bbox="619 1037 1070 1115">$K_e = 1 + (q - 1) \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot S_m}{S_n}\right)$</p> <p data-bbox="499 1182 679 1216">(2) K ≥ B₀</p> <p data-bbox="539 1227 1246 1361">① $\frac{S_n}{3 \cdot S_m} < \frac{(q - 1) - \sqrt{A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot (q - 1)}}{a}$</p> <p data-bbox="619 1373 1214 1451">$K_e = a \cdot \frac{S_n}{3 \cdot S_m} + A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) + 1 - a$</p> <p data-bbox="539 1496 1246 1630">② $\frac{S_n}{3 \cdot S_m} \geq \frac{(q - 1) - \sqrt{A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot (q - 1)}}{a}$</p> <p data-bbox="619 1641 1070 1720">$K_e = 1 + (q - 1) \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot S_m}{S_n}\right)$</p> <p data-bbox="464 1753 568 1787">ここで、</p> <p data-bbox="496 1798 619 1865">$K = \frac{S_p}{S_n}$</p> <p data-bbox="496 1877 1337 1966">$a = A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) + (q - 1) - 2 \cdot \sqrt{A_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot (q - 1)}$</p>

注：q, A₀, B₀は、表5-5に示す。

表5-10 許容応力

供用状態	許容限界	
	一次一般膜応力	一次一般膜+一次曲げ応力
設計条件	S_m	—
A, B	—	$3 \cdot S_m$
C	$1.5 \cdot S_m$	—
D	$\text{Min}(2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u)$	$\text{Min}(3.6 \cdot S_m, S_u)$

表5-11 許容応力評価条件

評価部位	材料	温度条件 (°C)	S_m (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	S_y (R,T) (MPa)	
シュラウド サポート	SUS316L	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	94	104	373	
	オーステナイト系 ステンレス鋼及び 高ニッケル合金	流体の最高温度 (運転状態Ⅲ)					
		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					
	NCF600-P	最高使用温度	302	164	193	501	
		流体の最高温度 (運転状態Ⅲ)					

表5-12 溶接部の継手効率

継手の箇所	継手の分類	継手の種類	対応する応力評価面	検査の種類*	継手効率 η
炉心シュラウドと シリンダの溶接継手	胴と胴の周継手	シリンダとプレート の継手			
	プレートと原子炉圧力容器の周継手				
シュラウドサポート	シリンダとレグの継手	レグと原子炉圧力容器の継手			
	レグと原子炉圧力容器の継手				

注記*：検査の種類を示す記号は次のとおりである。

P T + R T : 設計・建設規格 CSS-3150に規定するAの検査

P P T : 設計・建設規格 CSS-3150に規定するCの検査

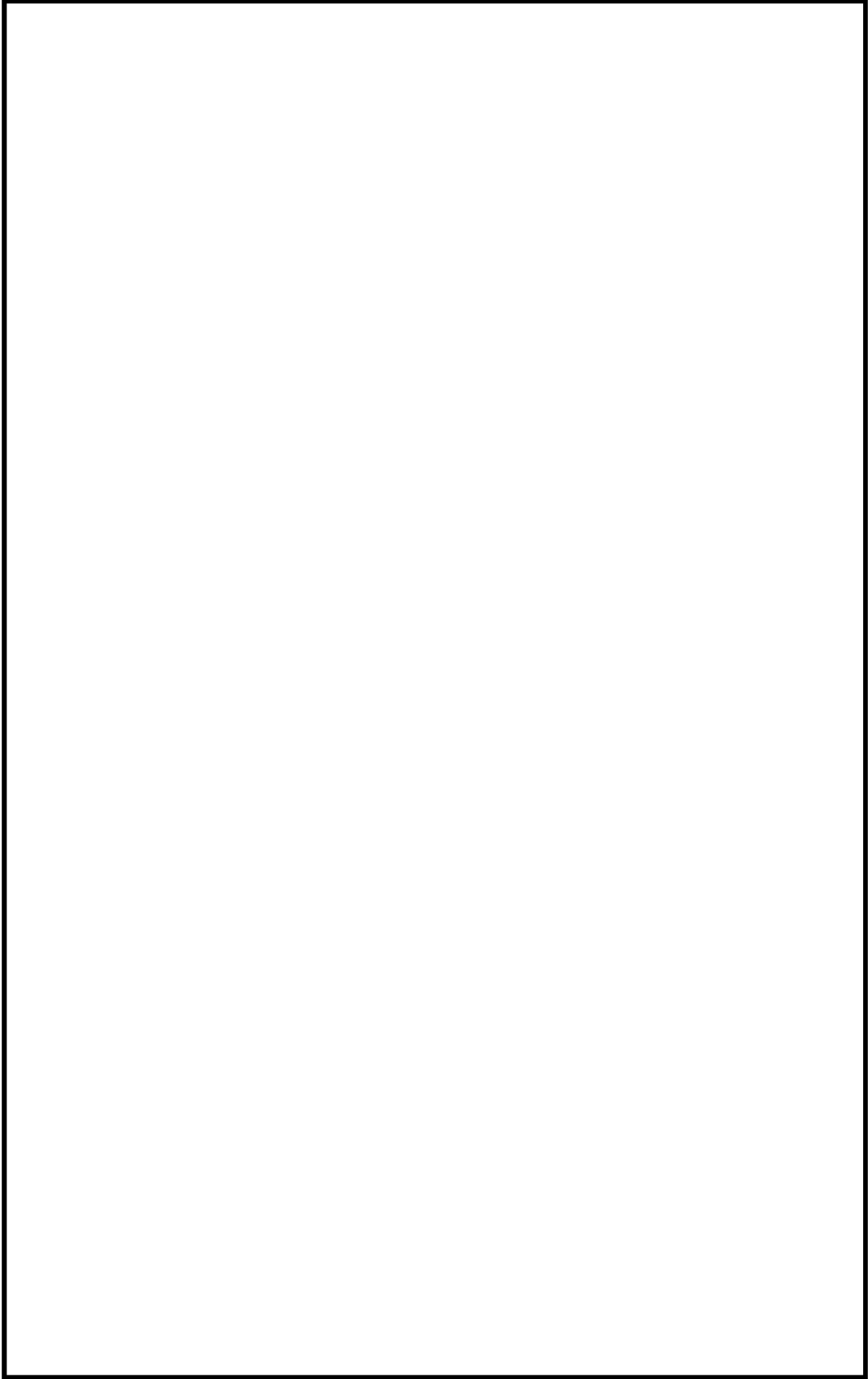


図5-4(1) 温度遷移図



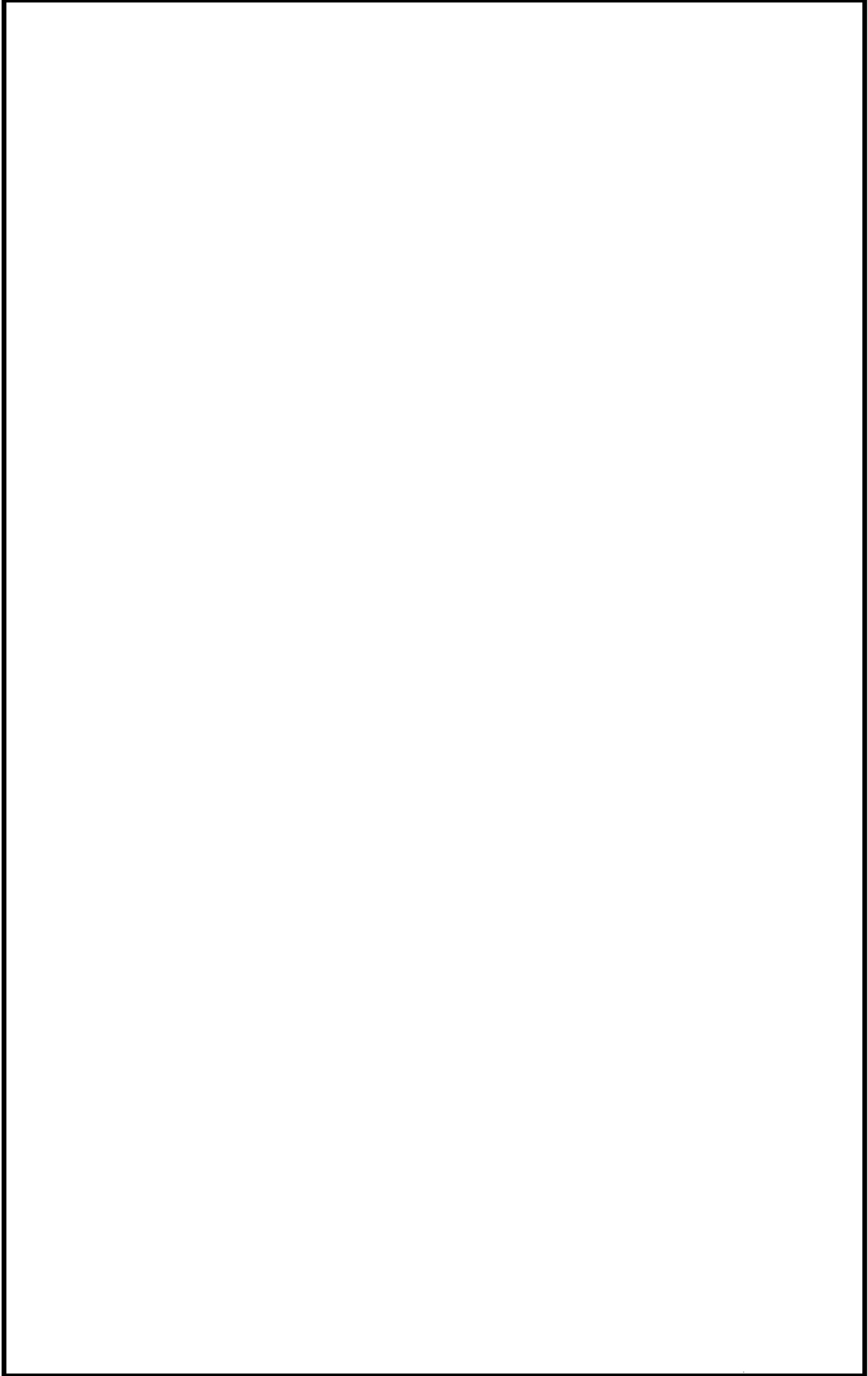



図5-4(2) 温度遷移図 

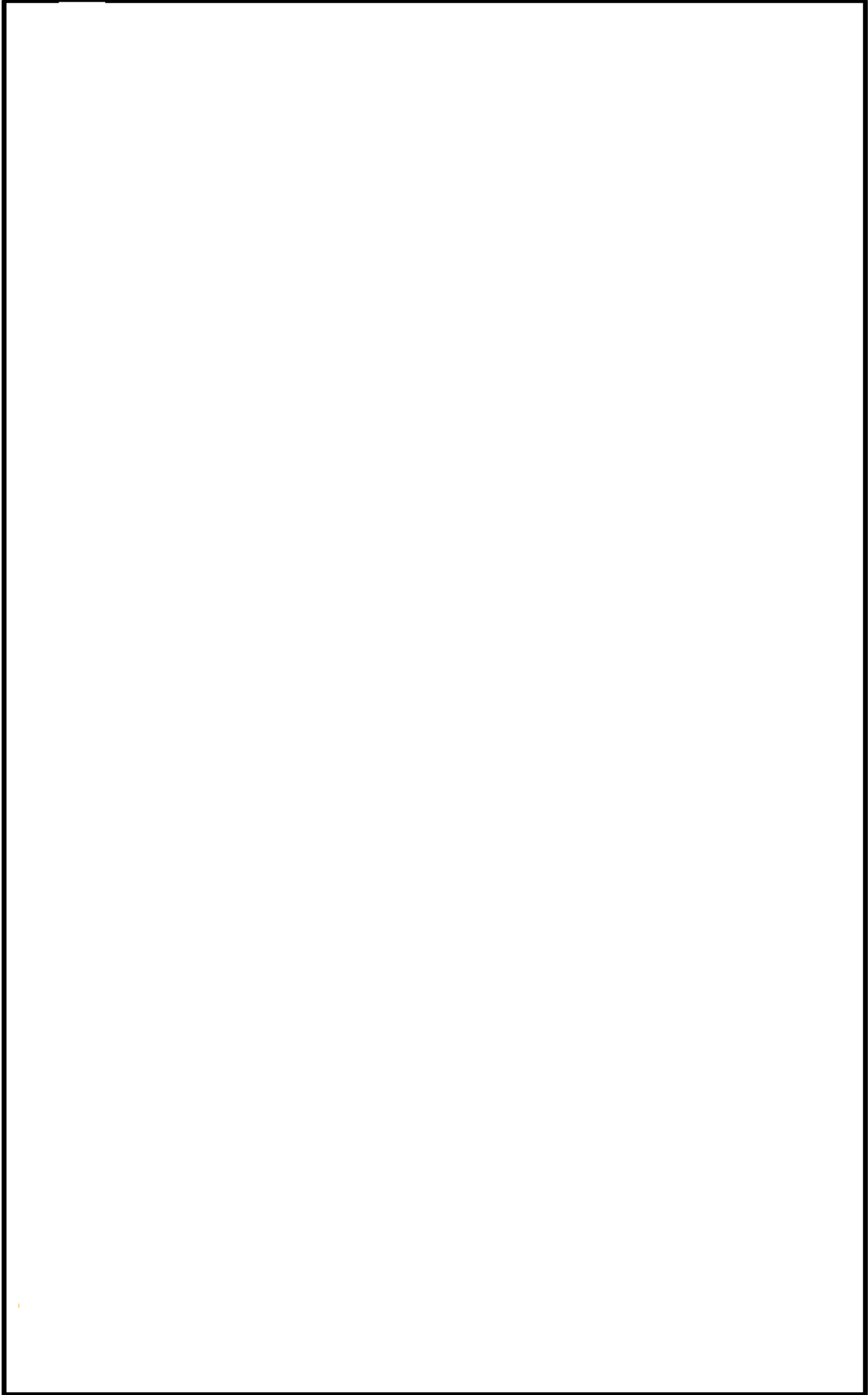


図5-4(3) 温度遷移図 

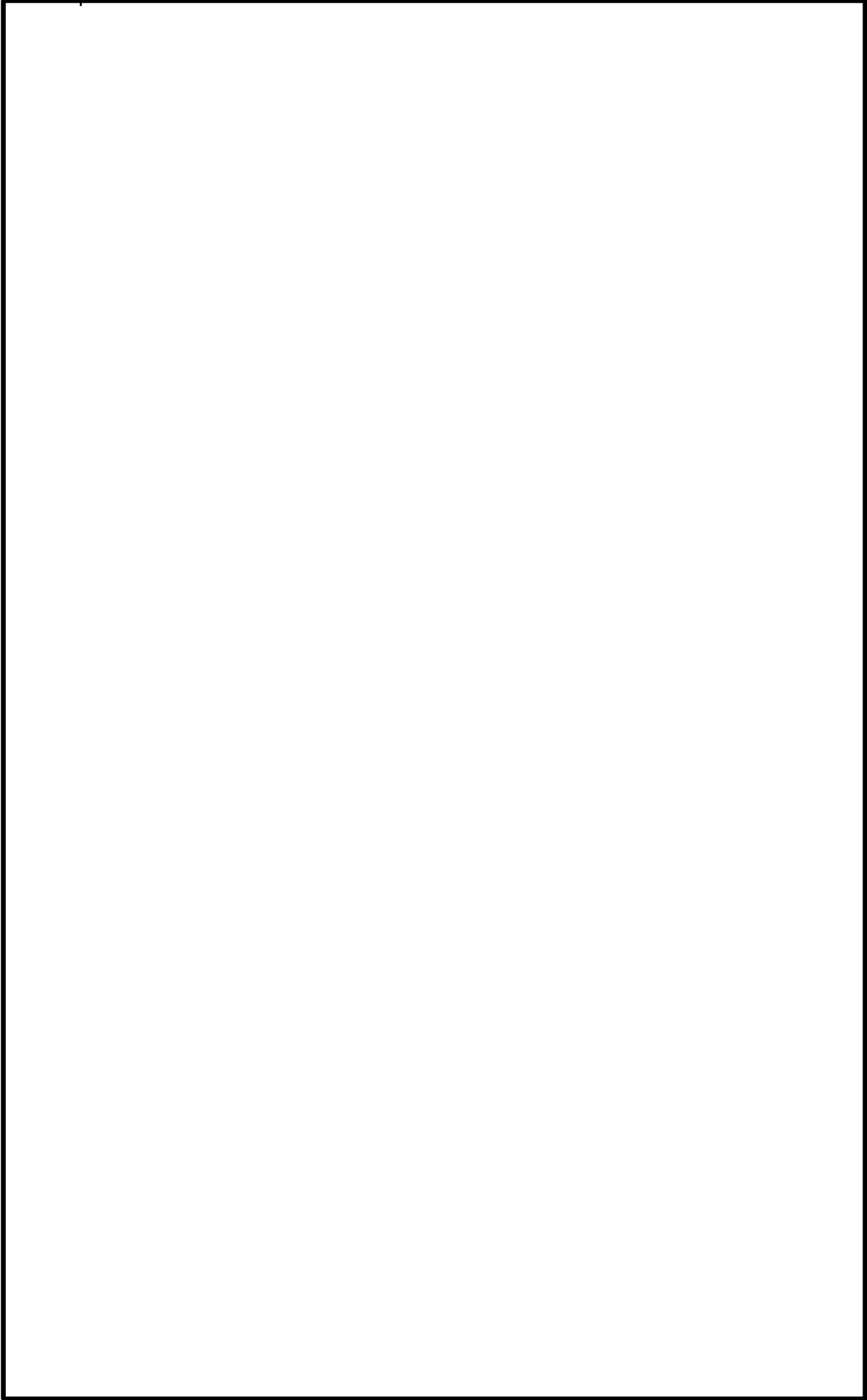


図5-4(4) 温度遷移図

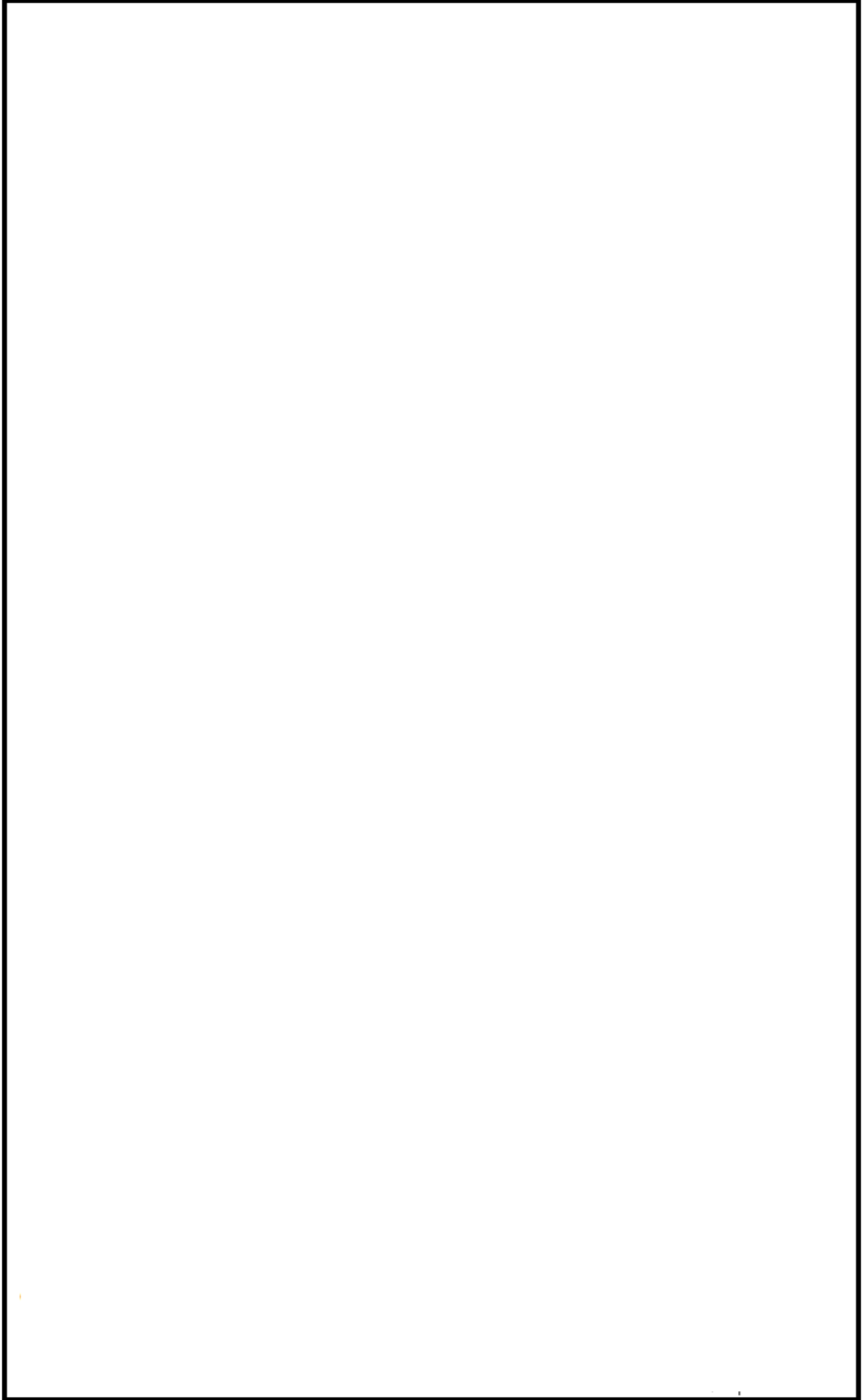


図5-4(5) 温度遷移図 

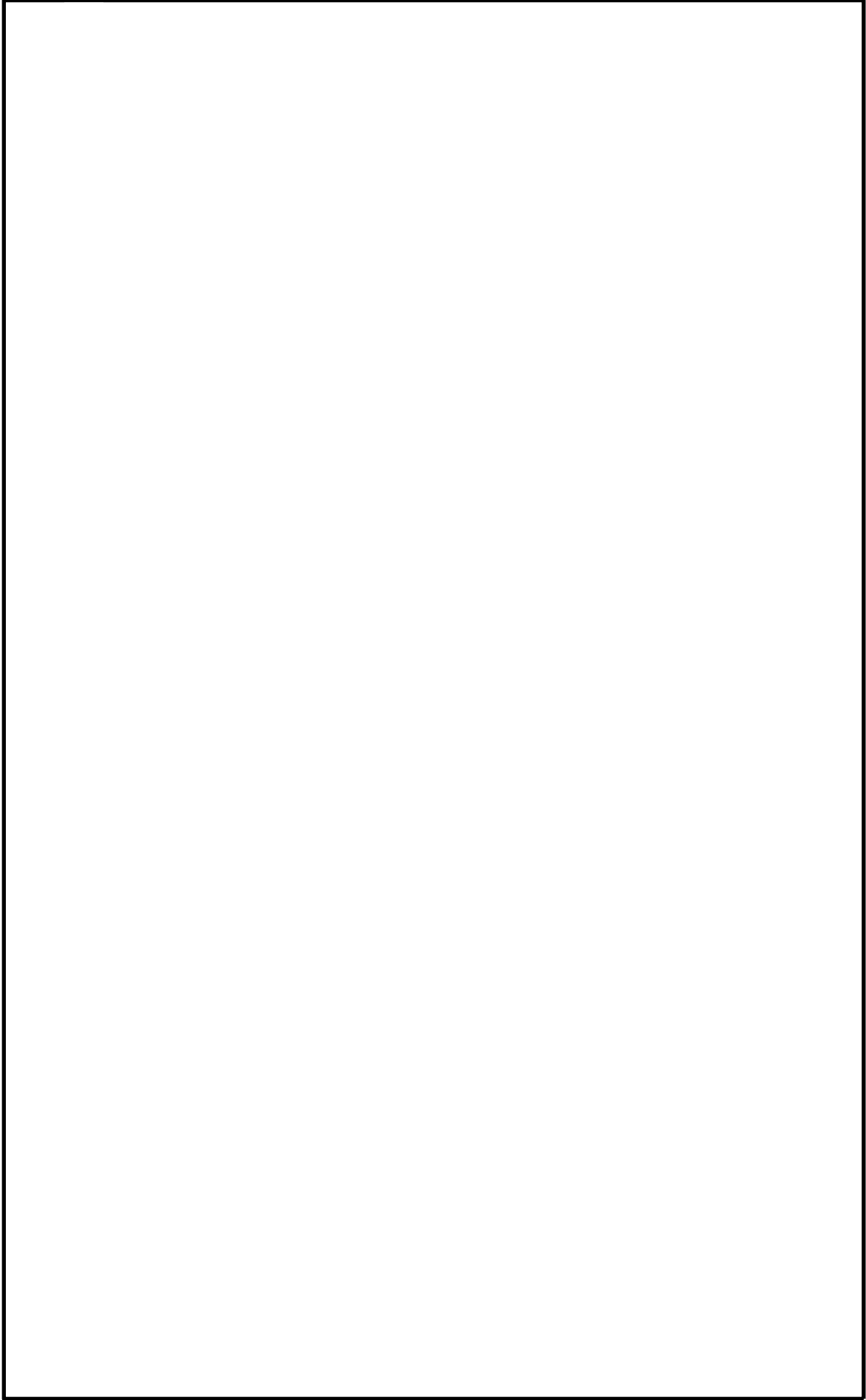


図5-4(6) 温度遷移図 

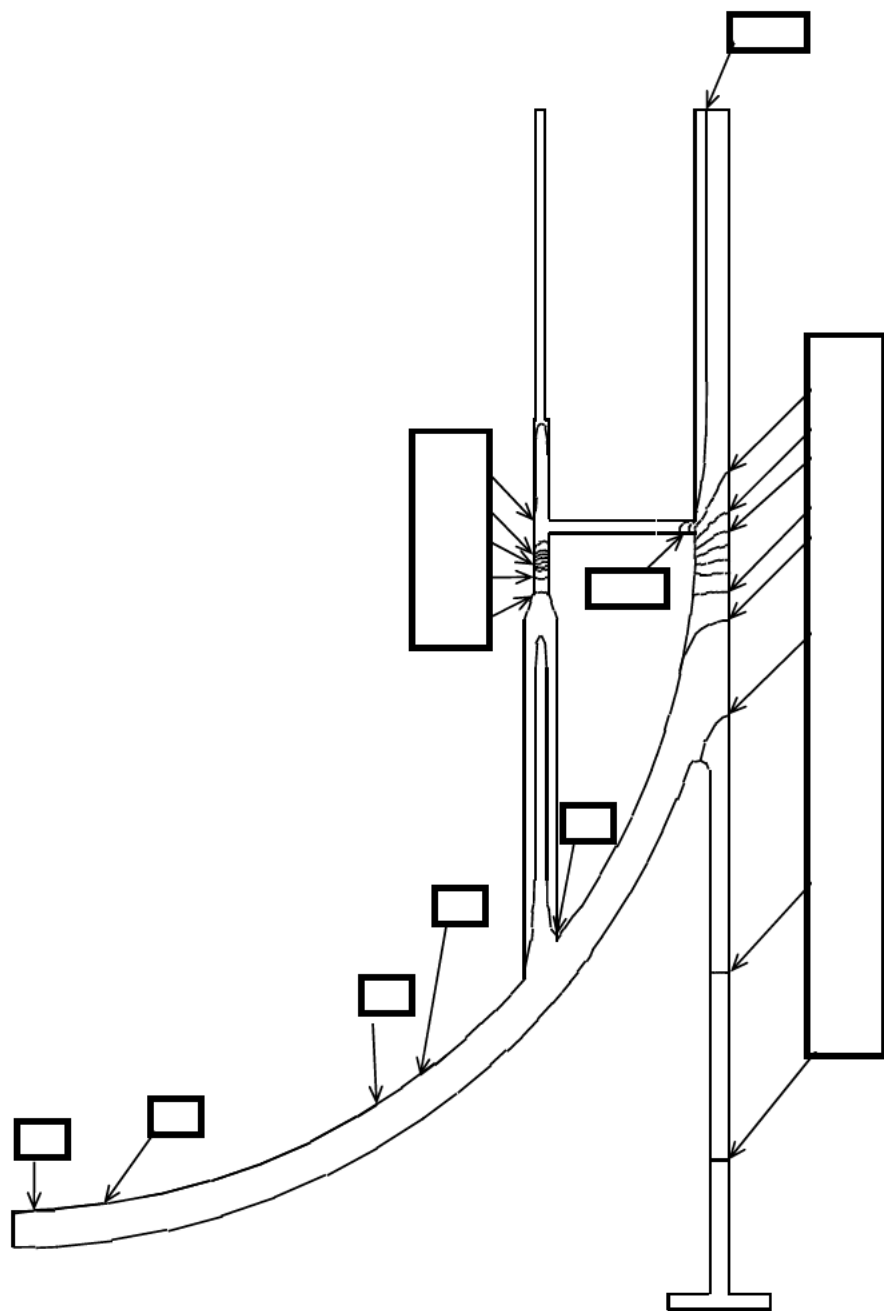


図5-5(1) 温度分布図 (単位: °C)

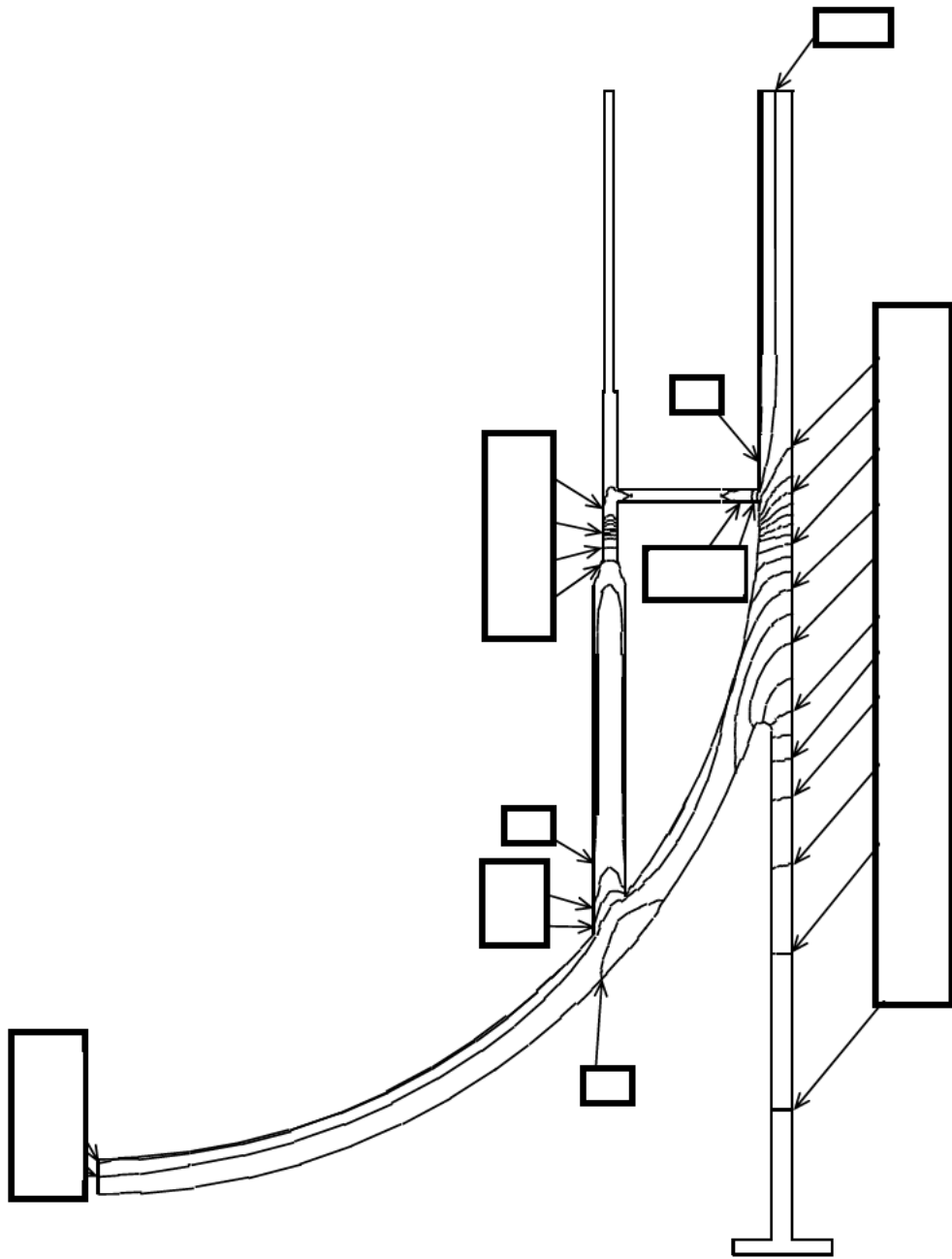


図5-5(2) 温度分布図 (単位: °C)

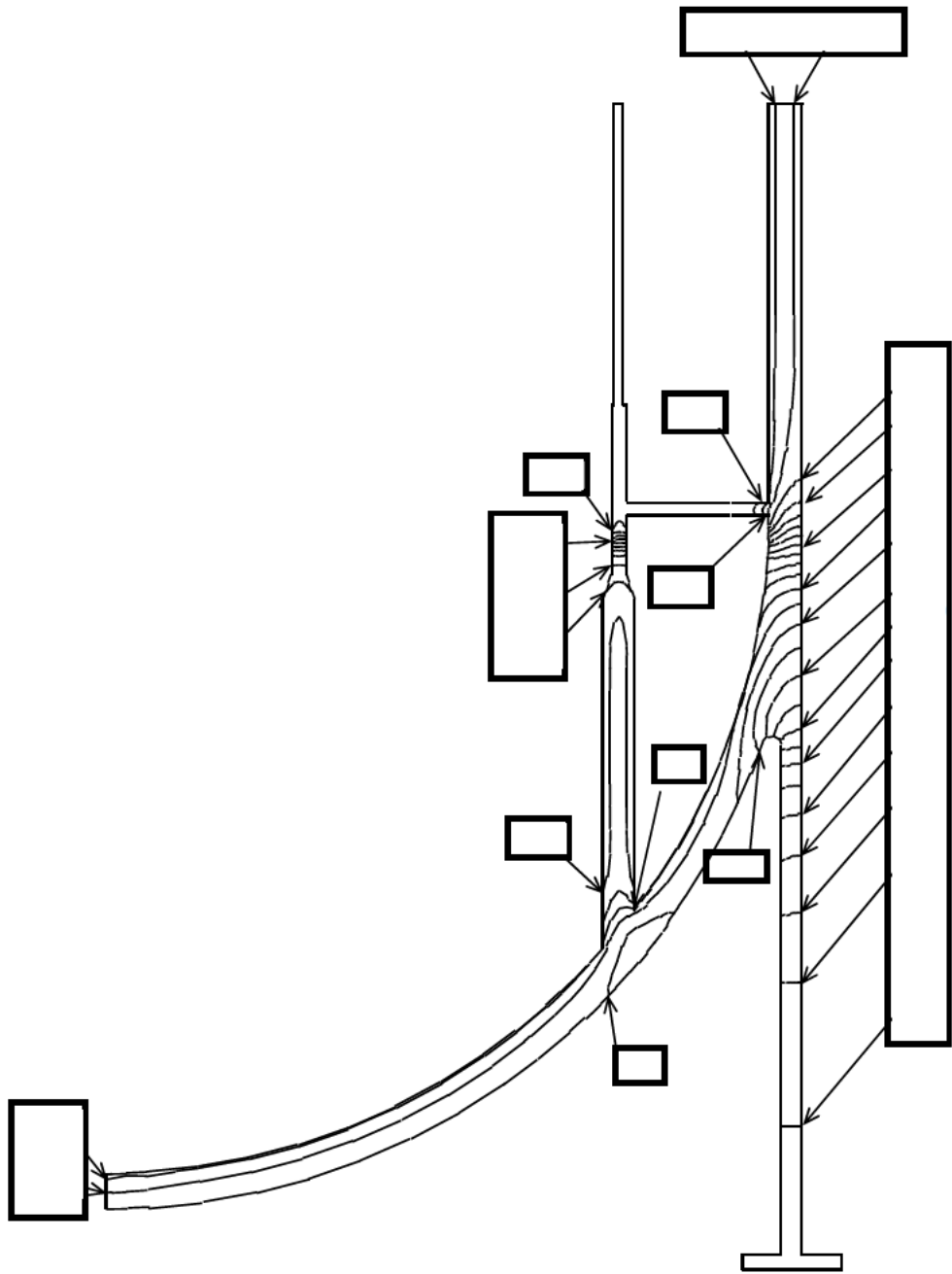


図5-5(3) 温度分布図  (単位: °C)

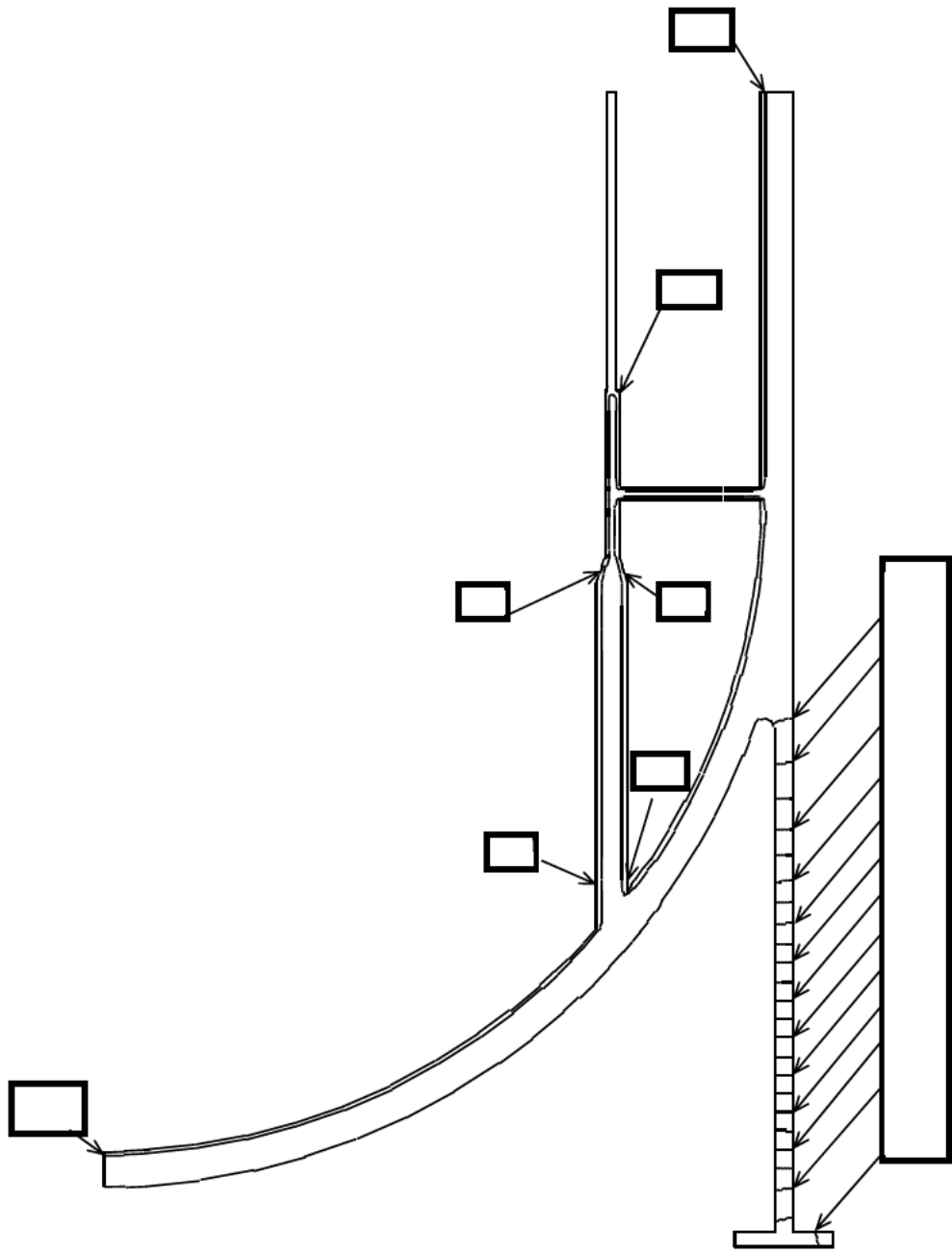


図5-5(4) 温度分布図 (単位: °C)

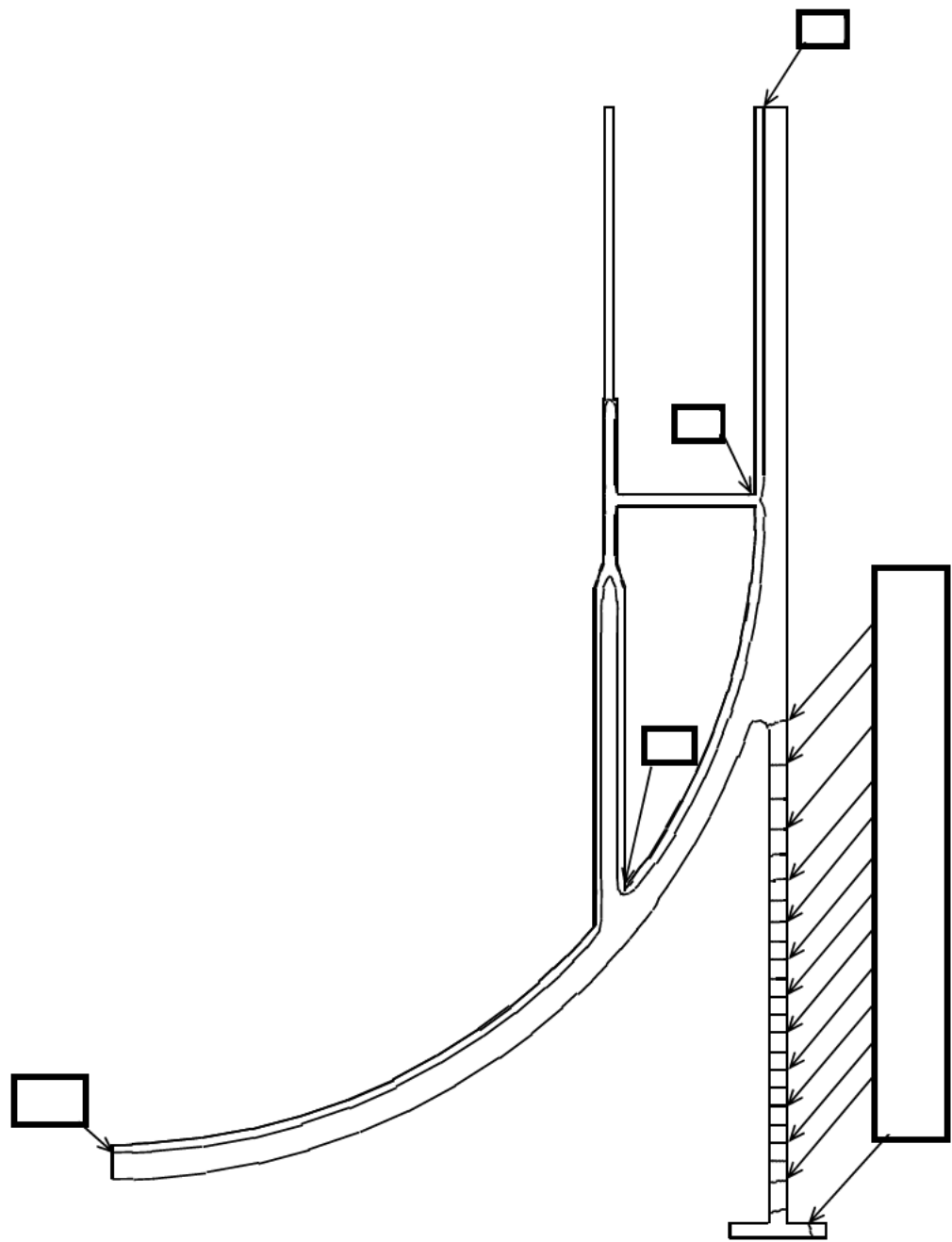


図5-5(5) 温度分布図  (単位：℃)

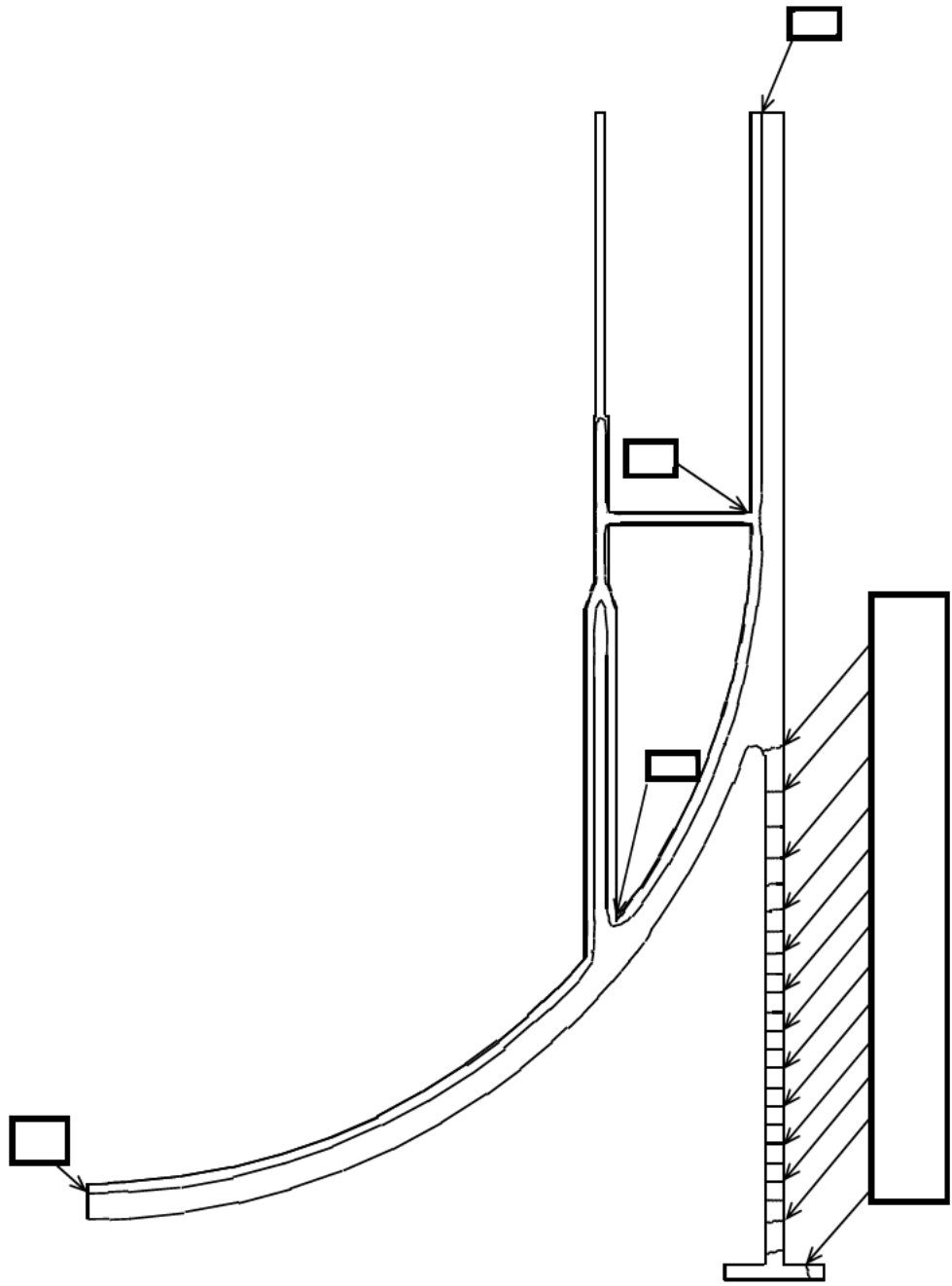


図5-5(6) 温度分布図  (単位：℃)

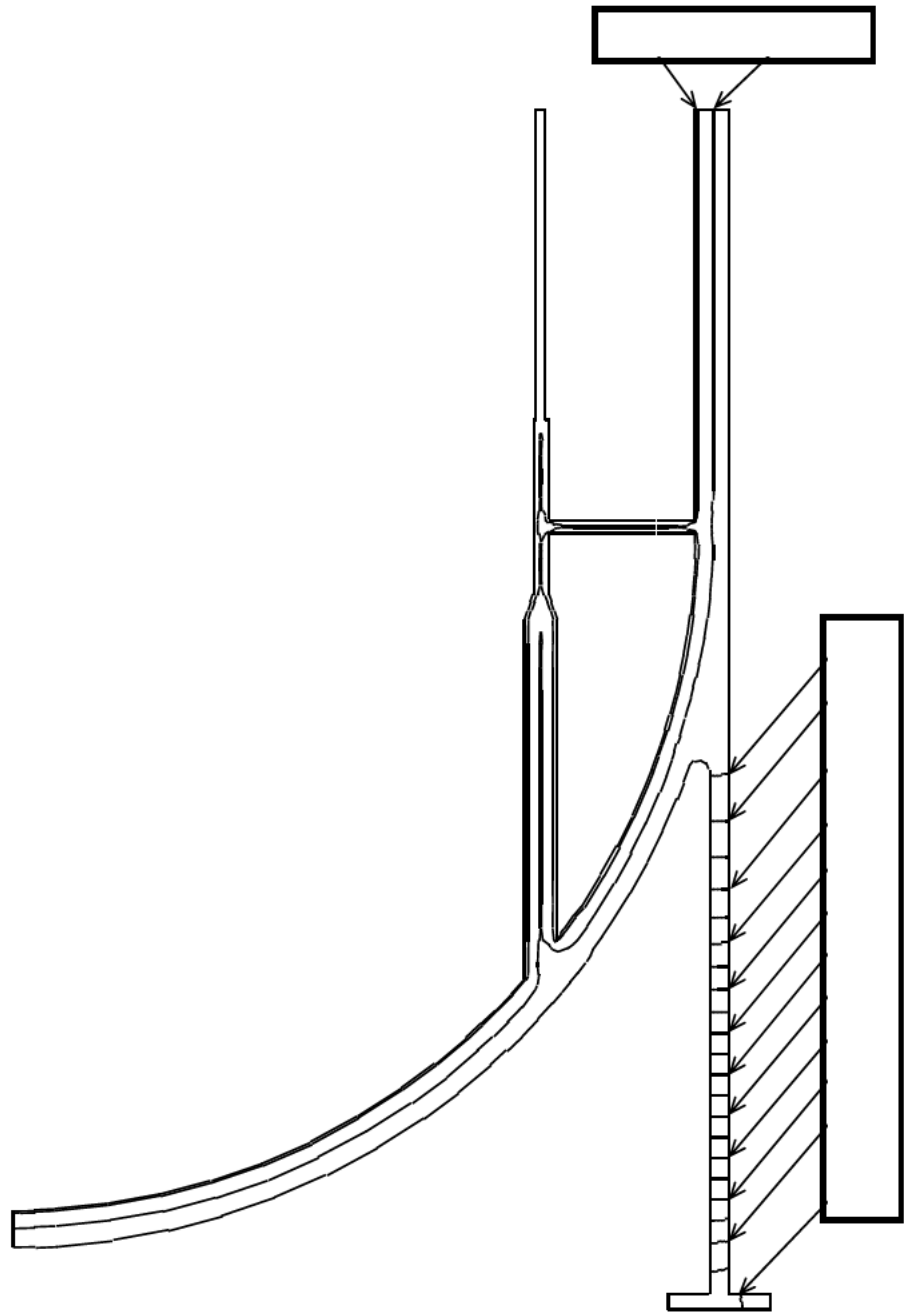


図5-5(7) 温度分布図 (単位: °C)

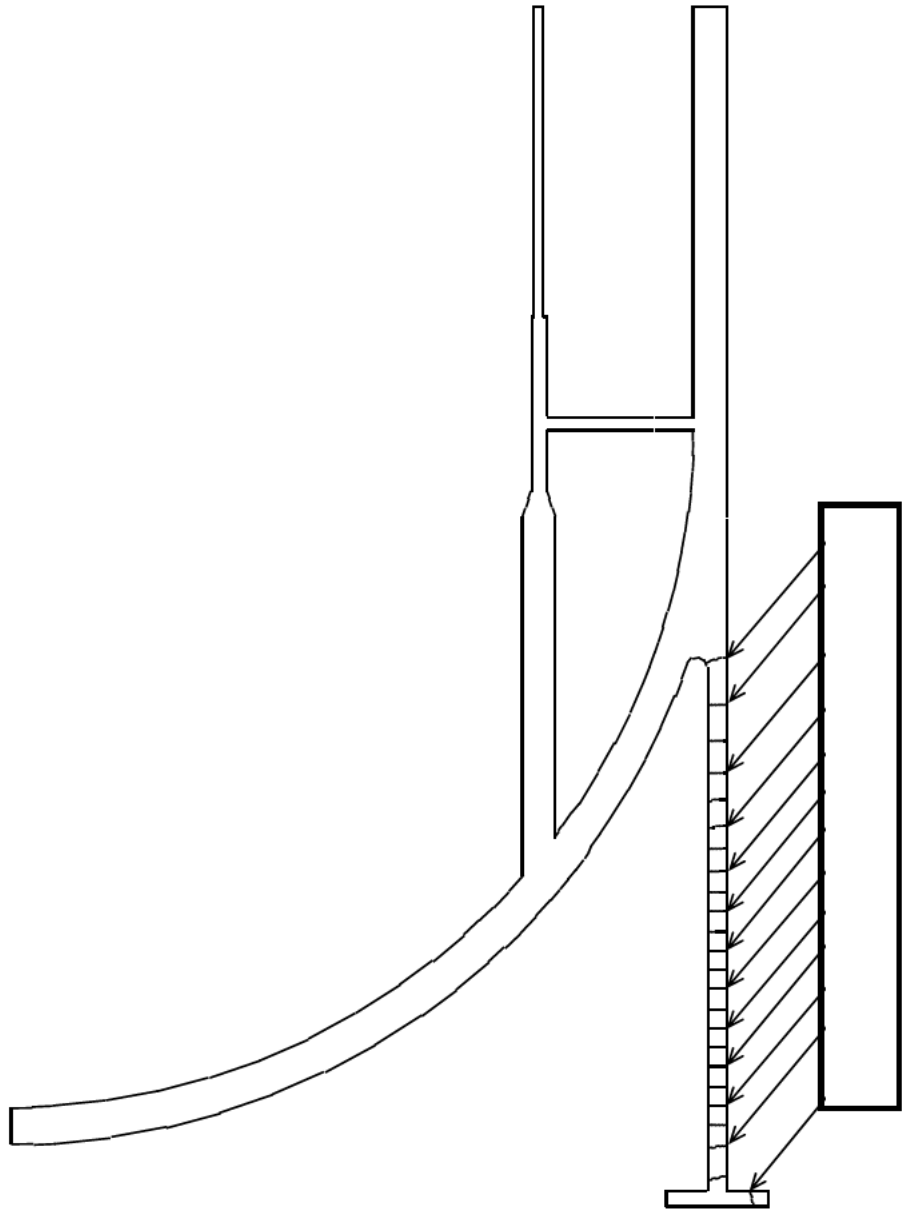


図5-5(8) 温度分布図 (単位: °C)

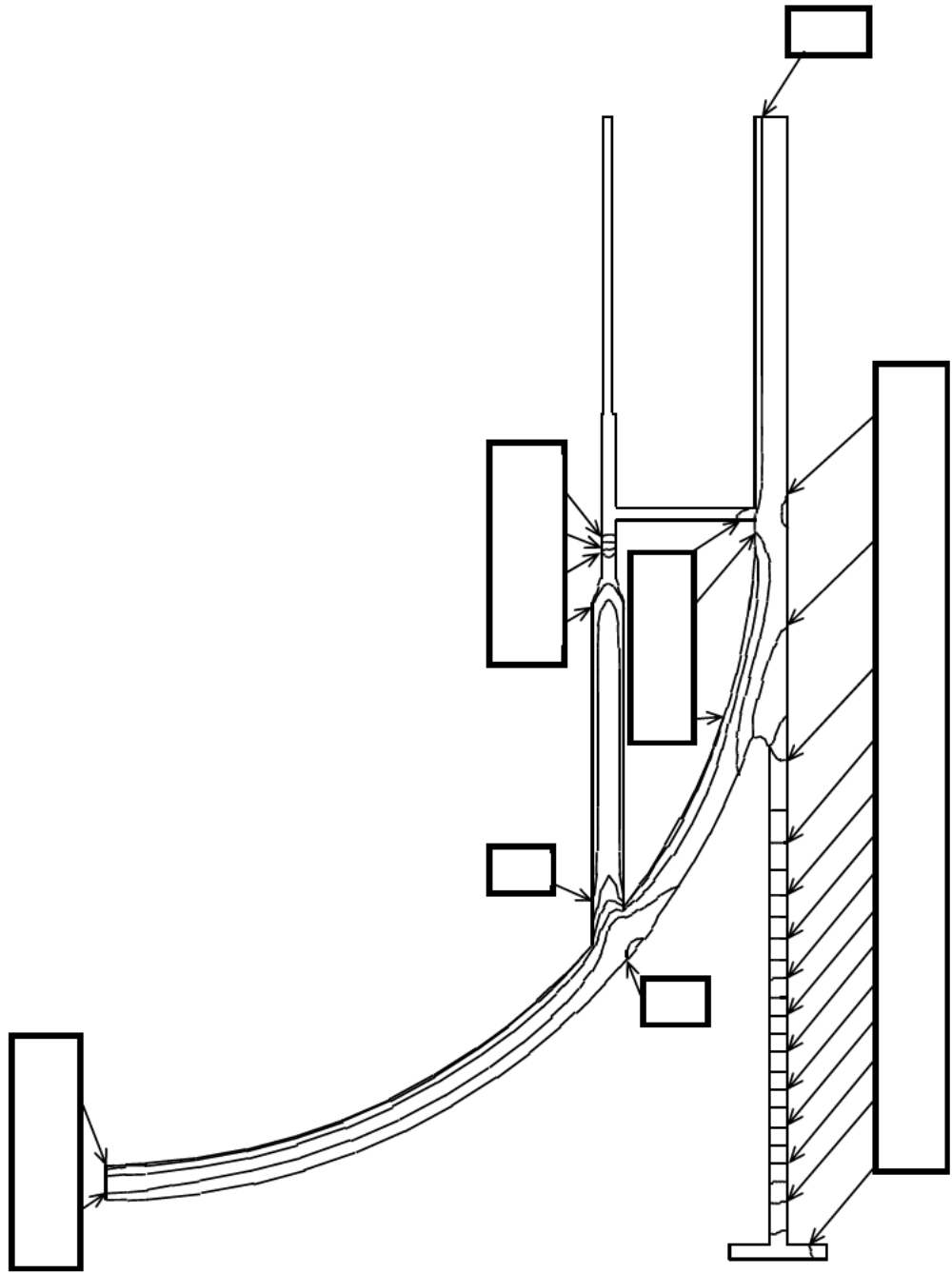


図5-5(9) 温度分布図 (単位: °C)

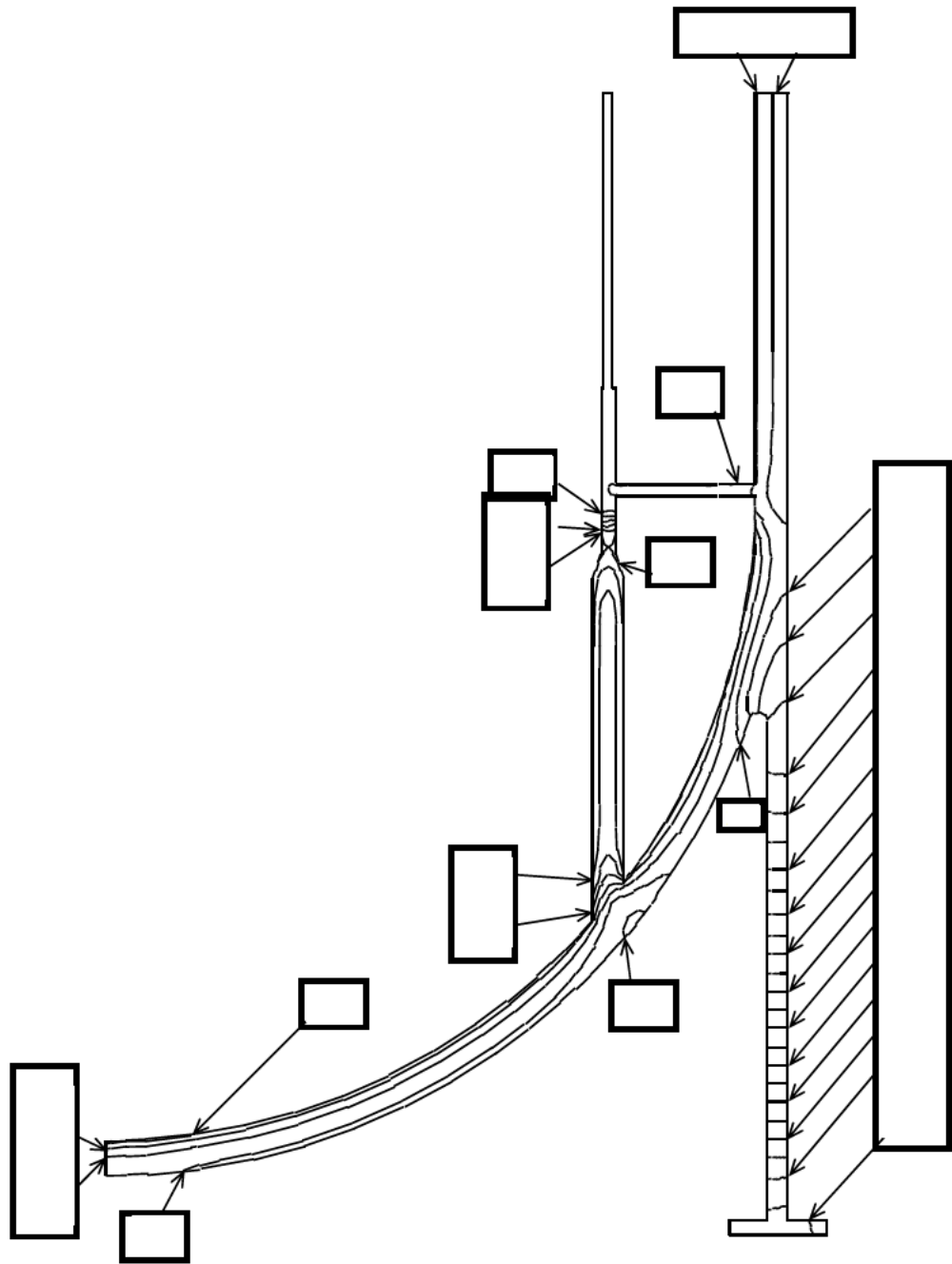



図5-5(10) 温度分布図  (単位 : °C)

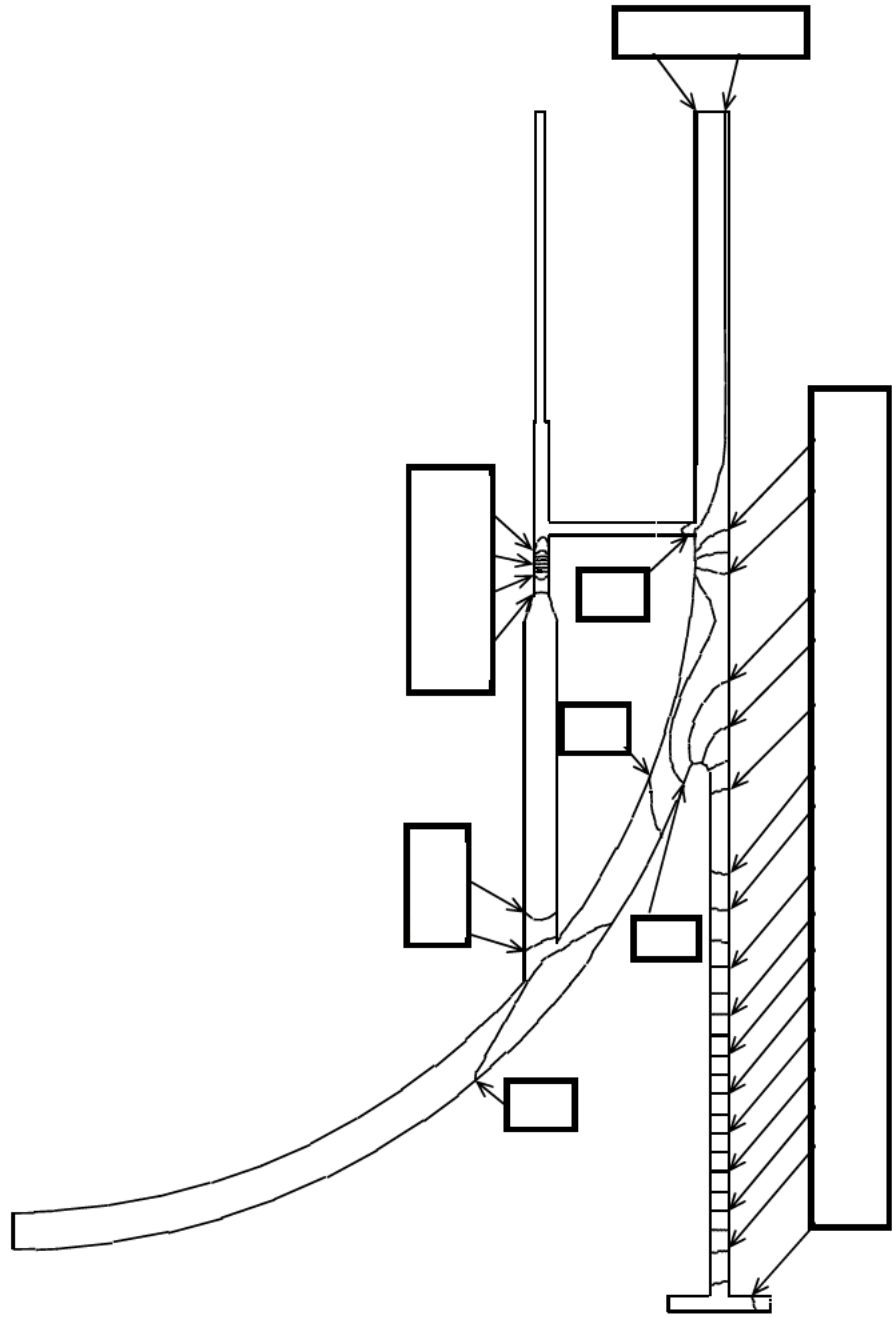


図5-5(11) 温度分布図 (単位 : °C)

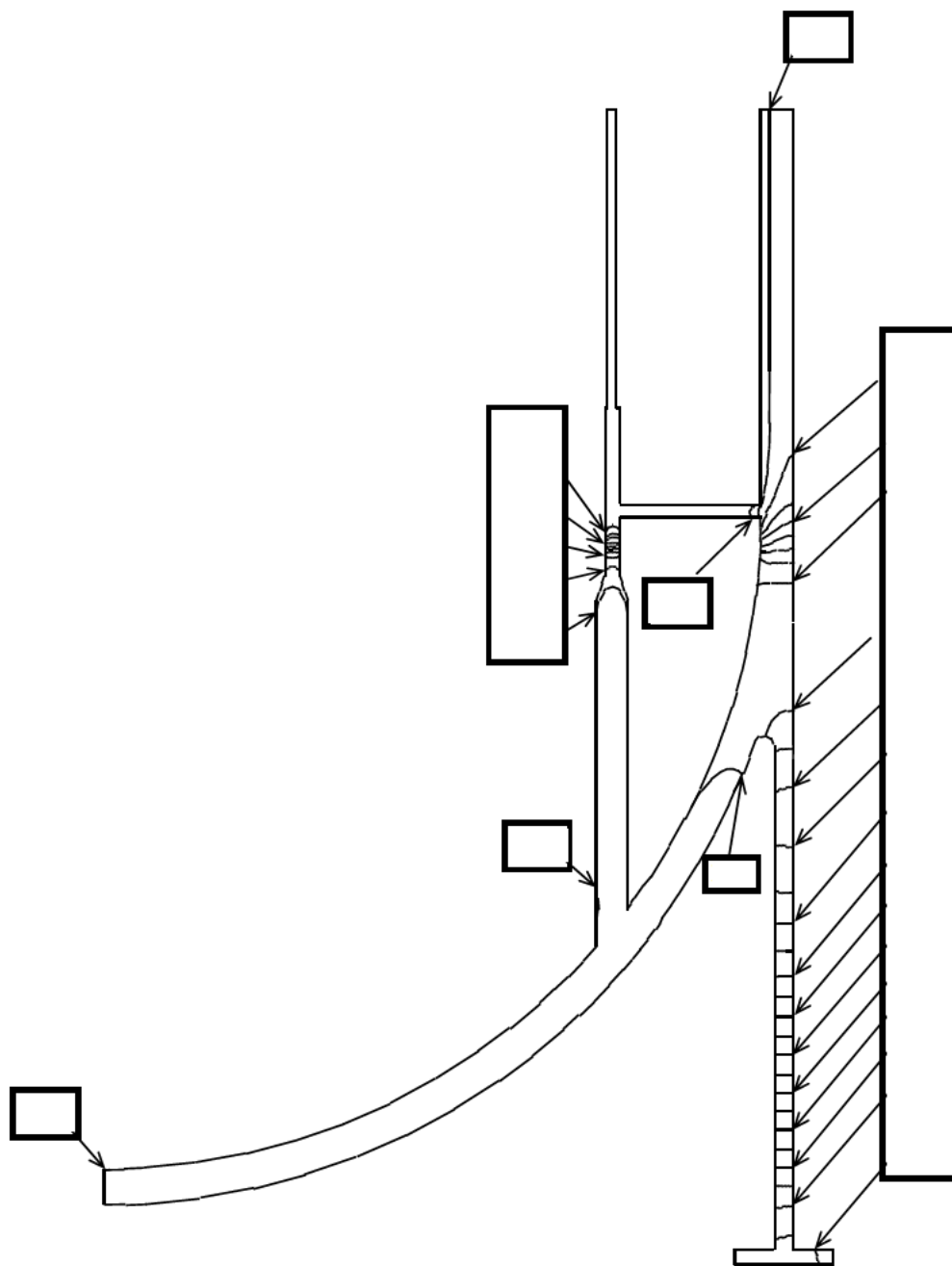


図5-5(12) 温度分布図 (単位: °C)

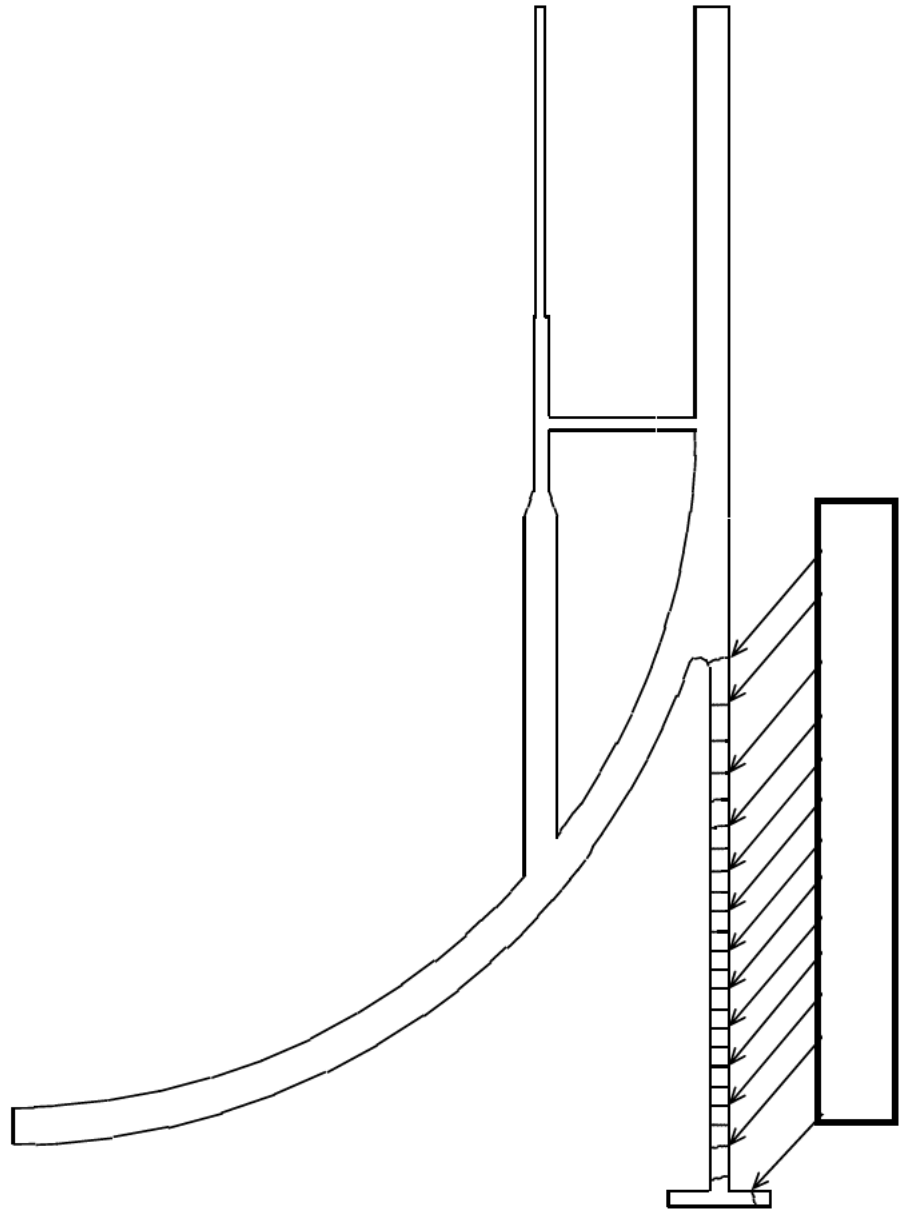


図5-5(13) 温度分布図 (単位 : °C)

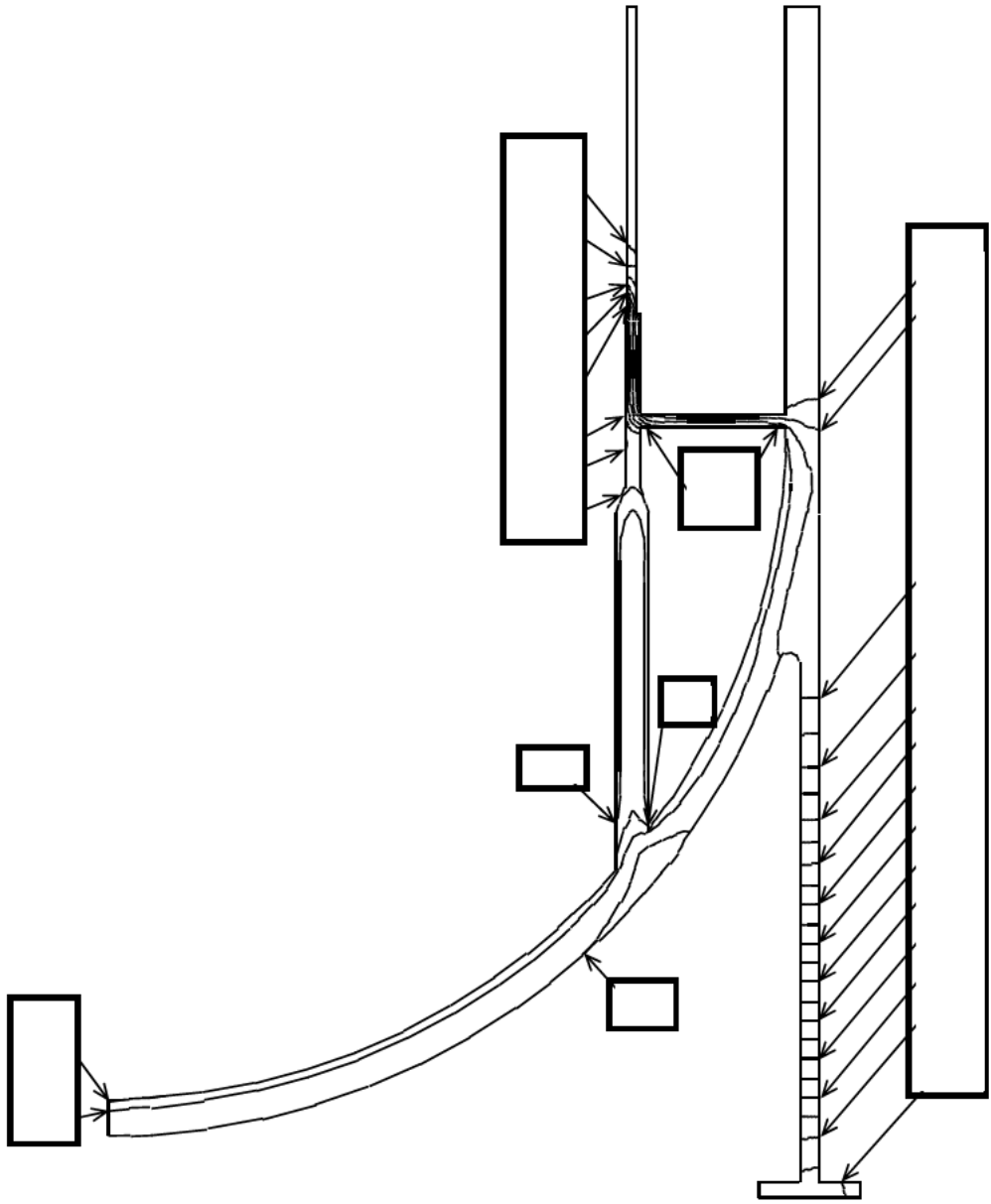



図5-5(14) 温度分布図  (単位：℃)

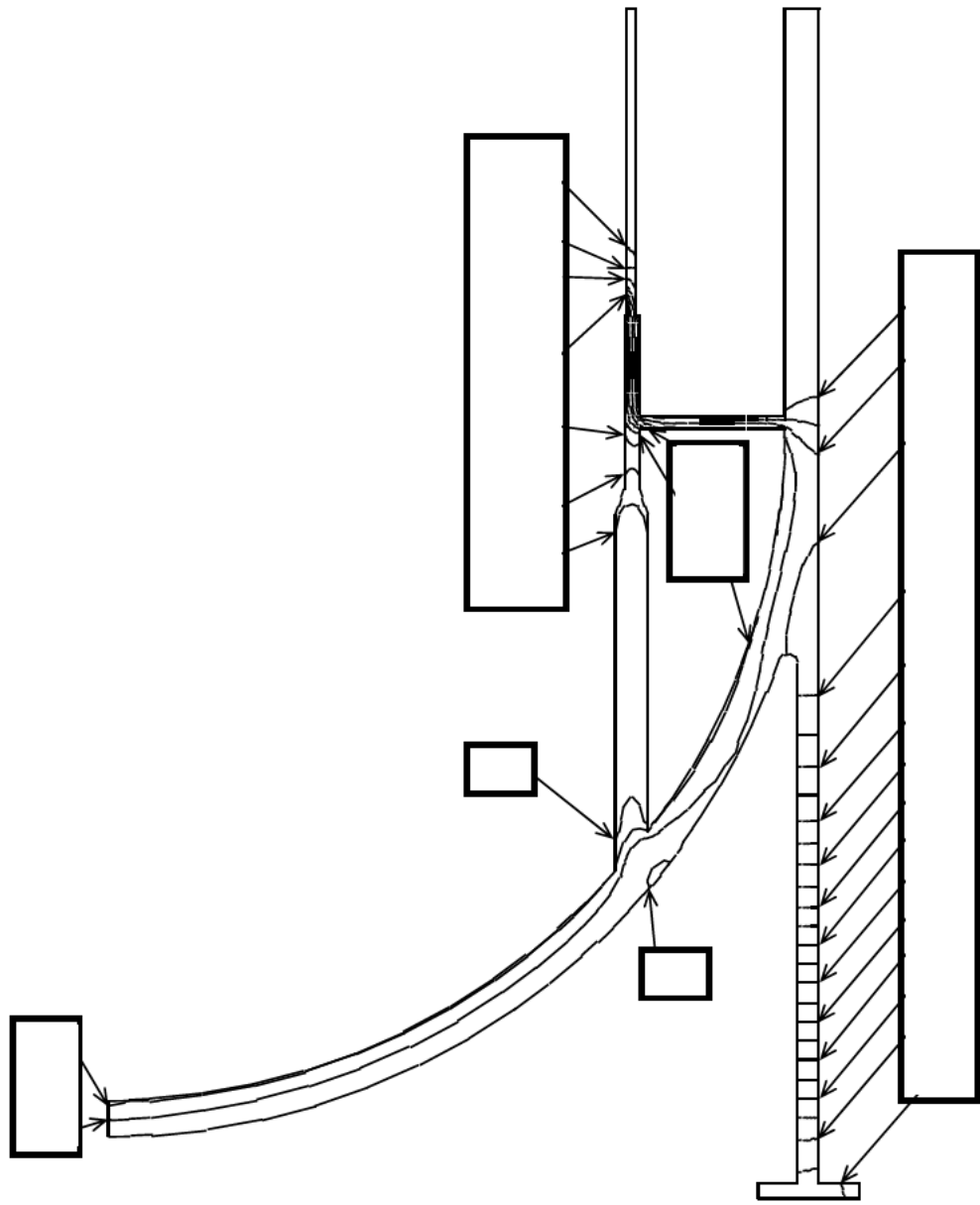



図5-5(15) 温度分布図  (単位 : °C)

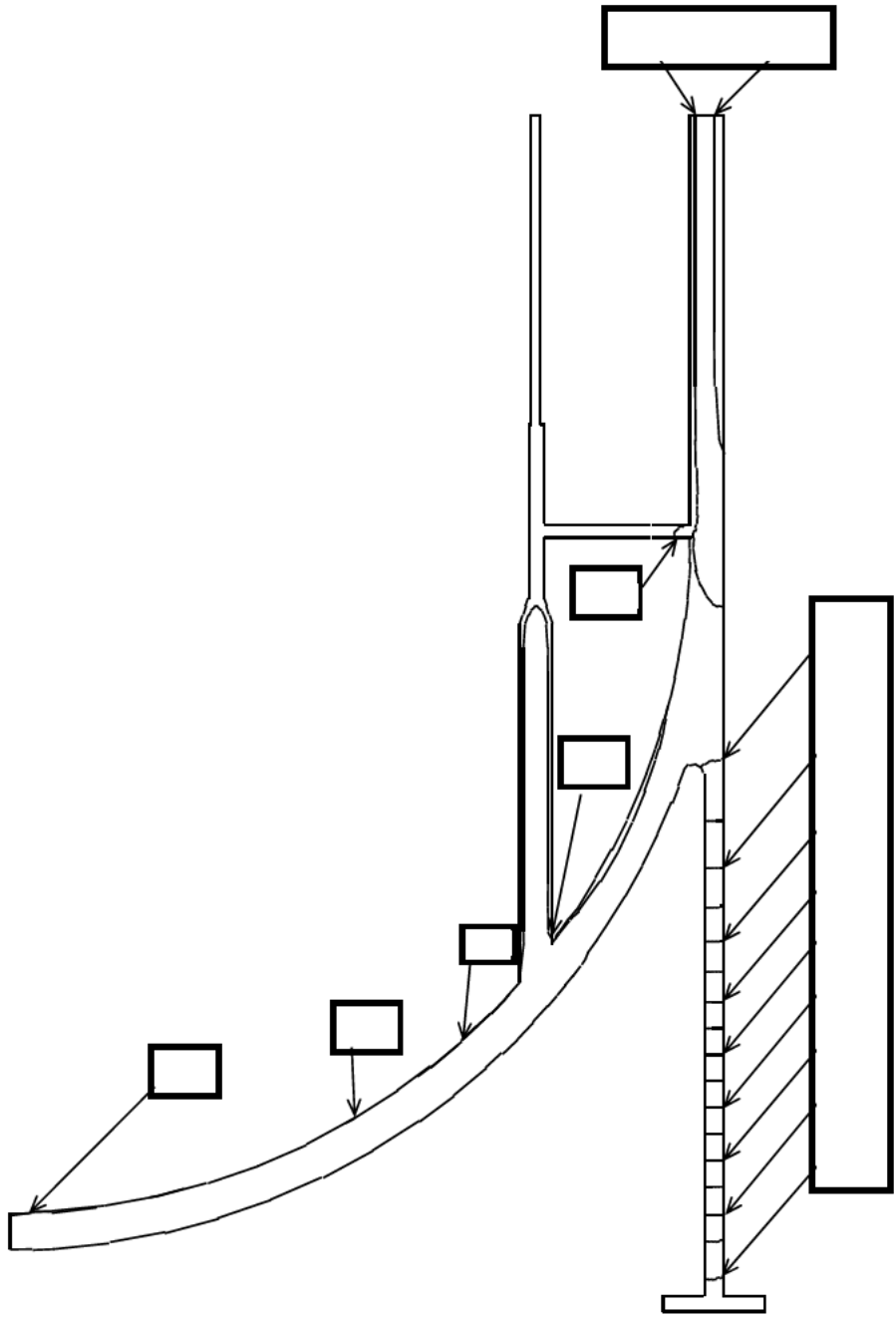



図5-5(16) 温度分布図  (単位：℃)

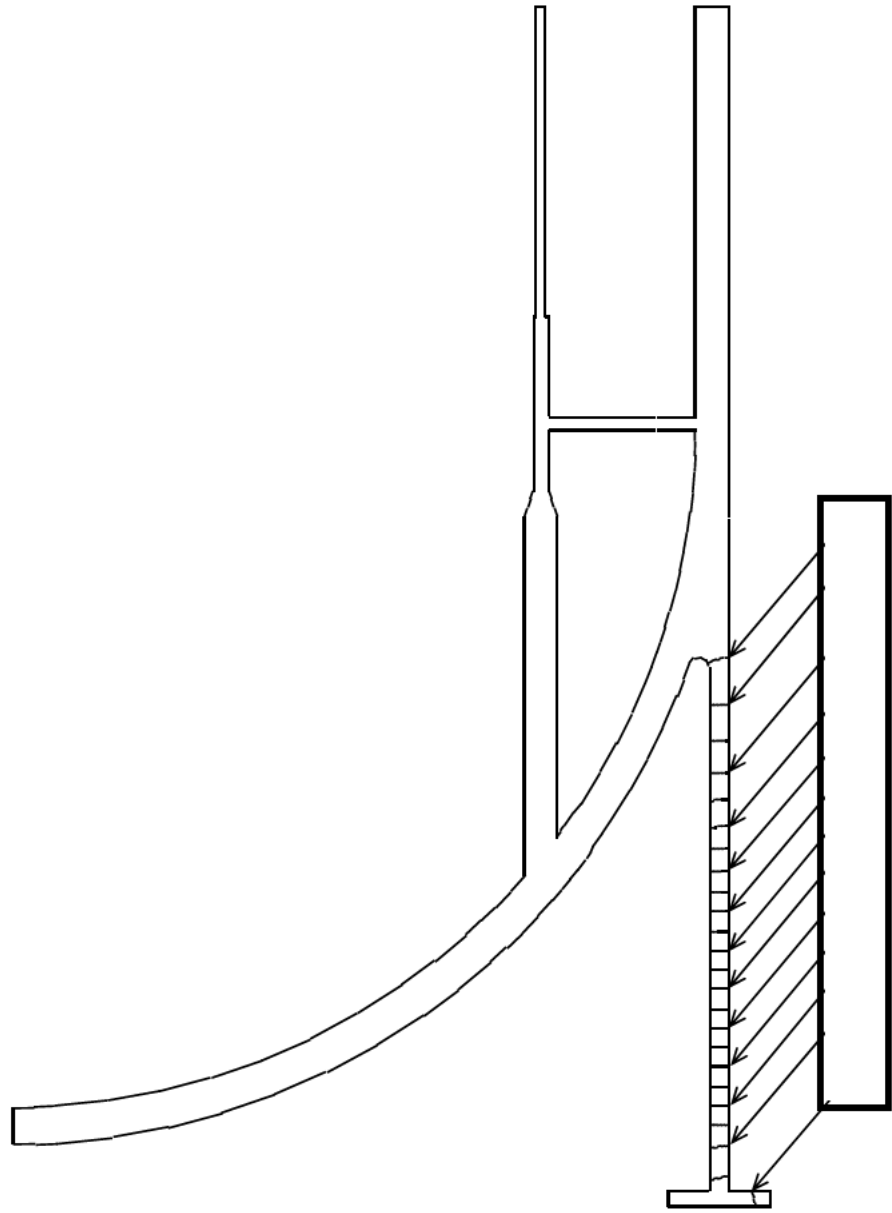


図5-5(17) 温度分布図 (単位: °C)

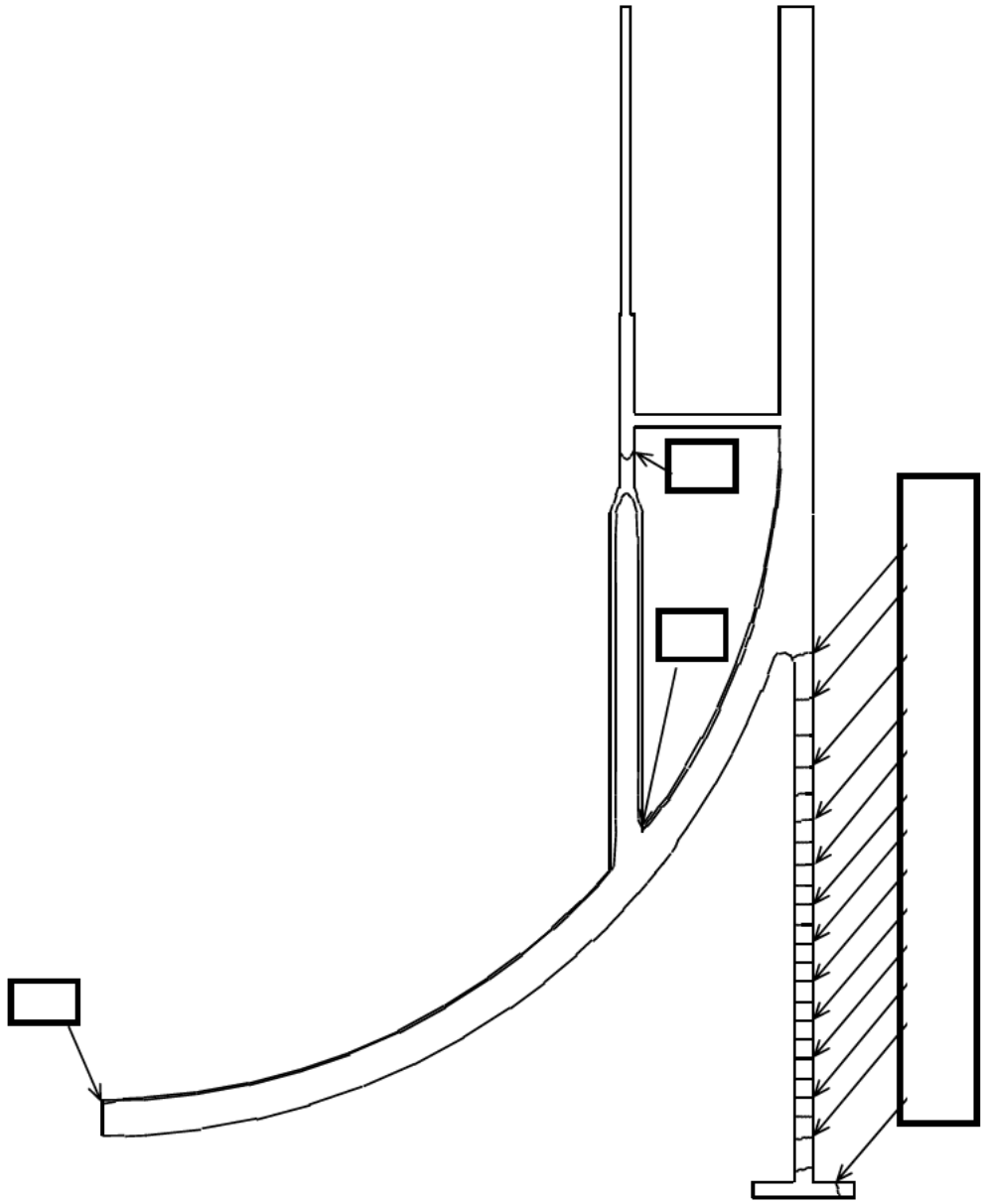


図5-5(18) 温度分布図 (単位: °C)

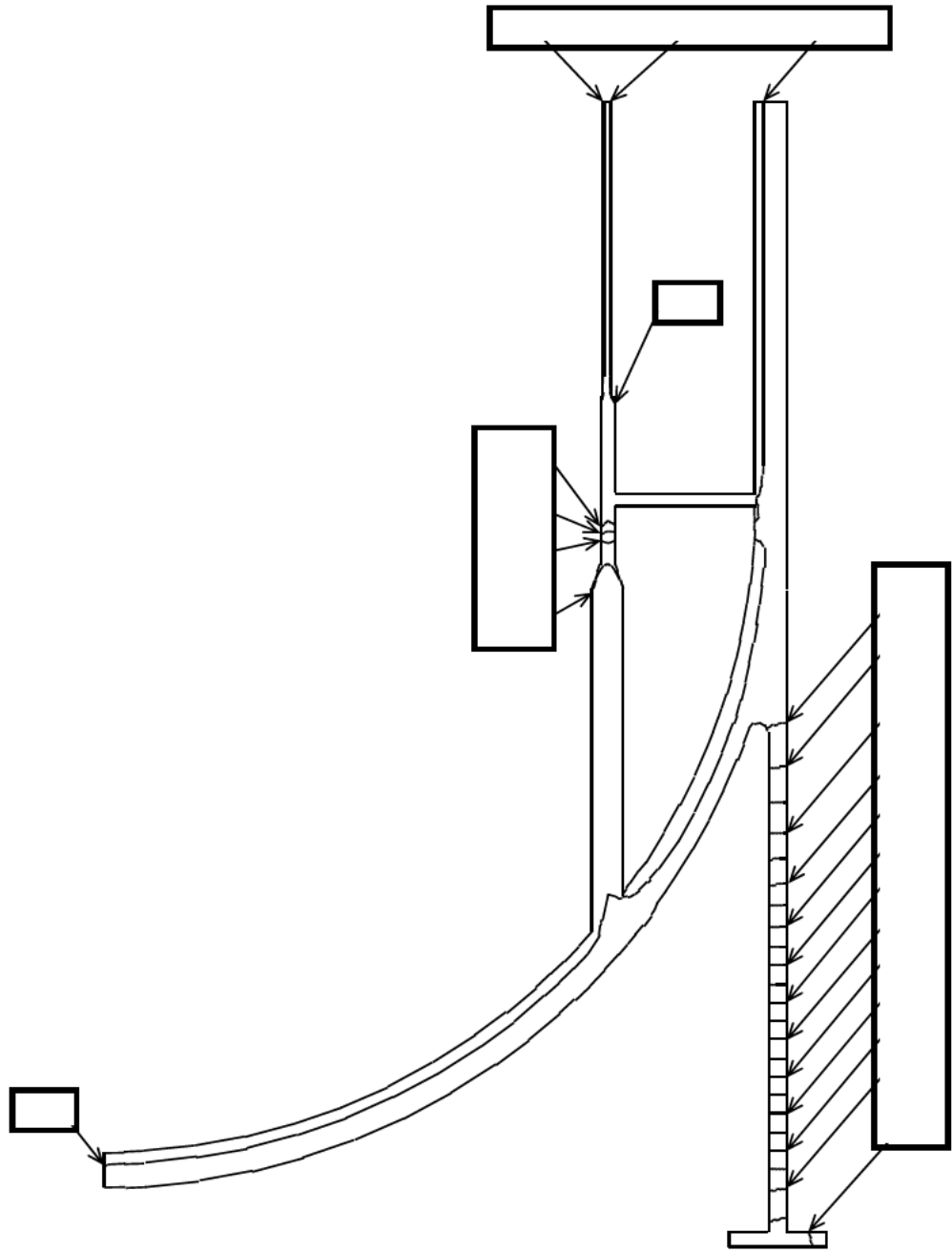


図5-5(19) 温度分布図 (単位 : °C)

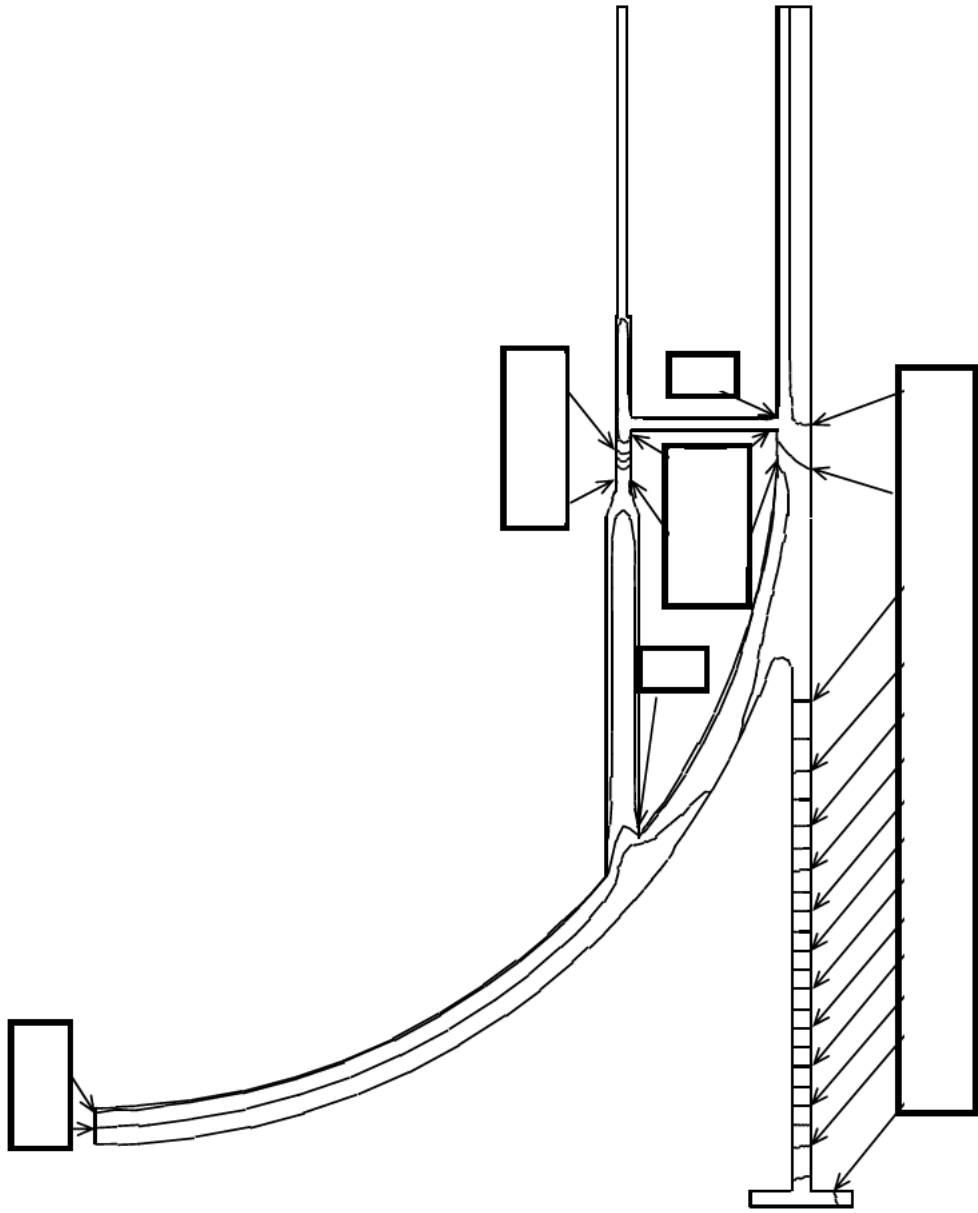


図5-5(20) 温度分布図 (単位: °C)

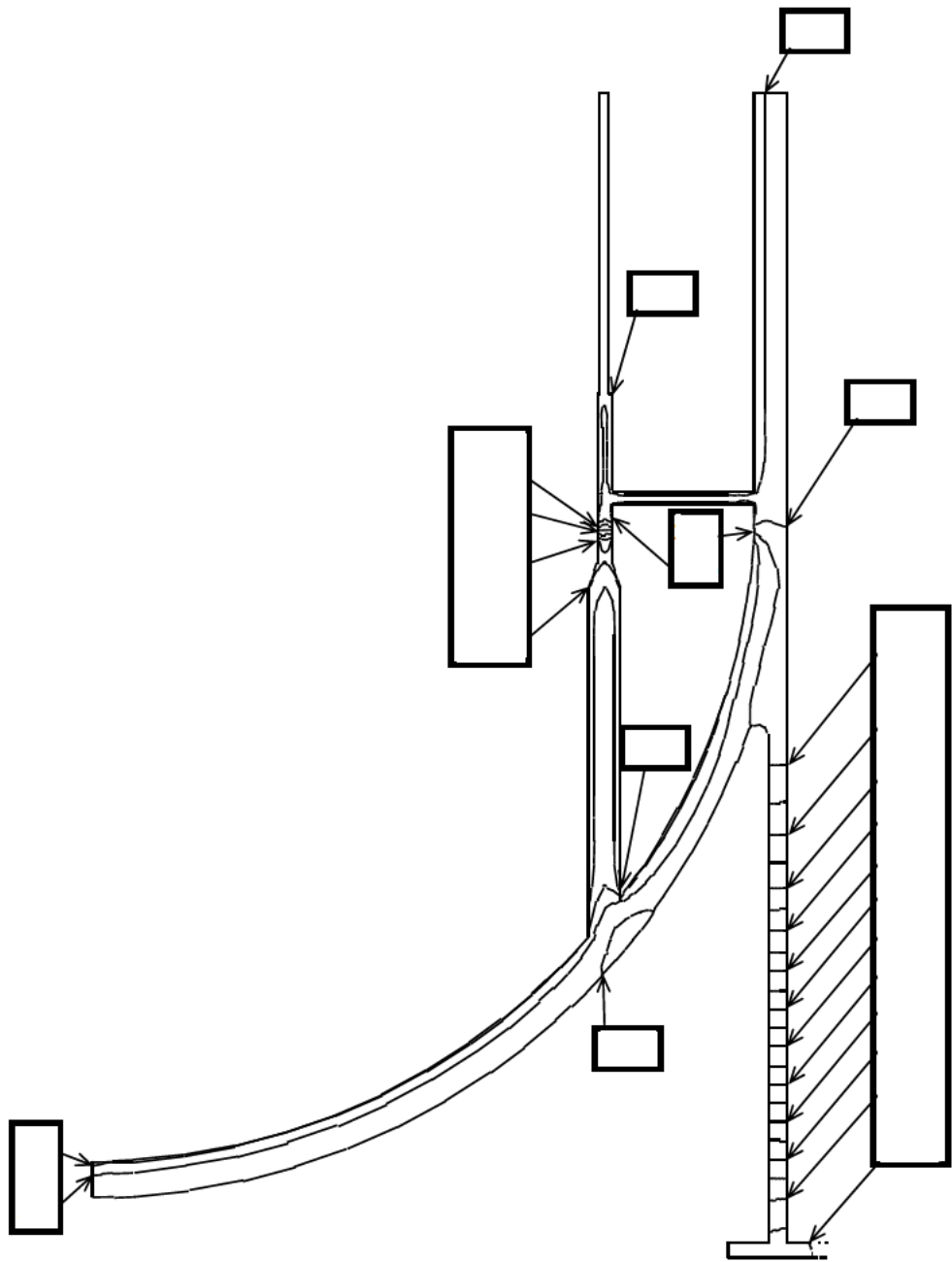


図5-5(21) 温度分布図  (単位: °C)

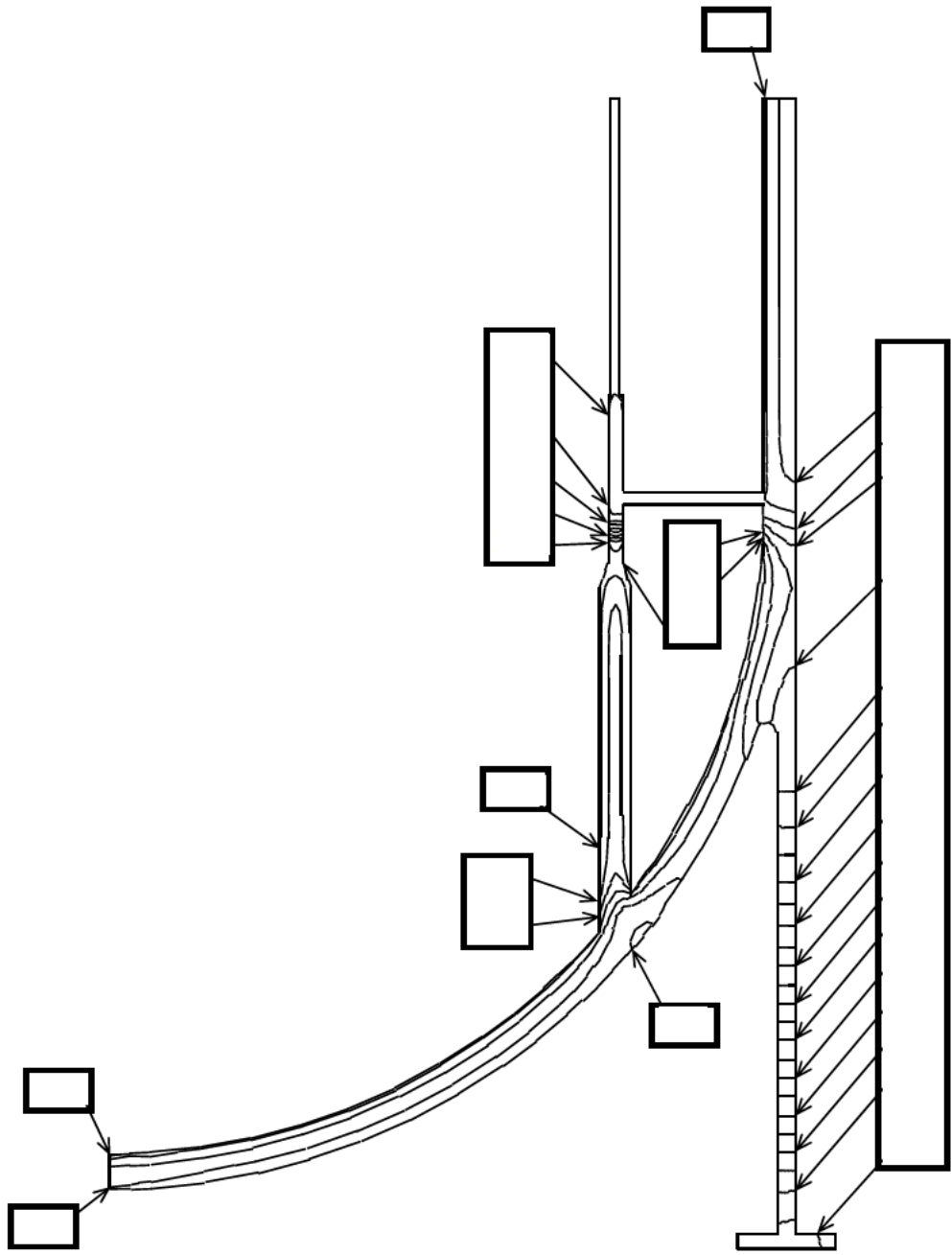


図5-5(22) 温度分布図  (単位：℃)

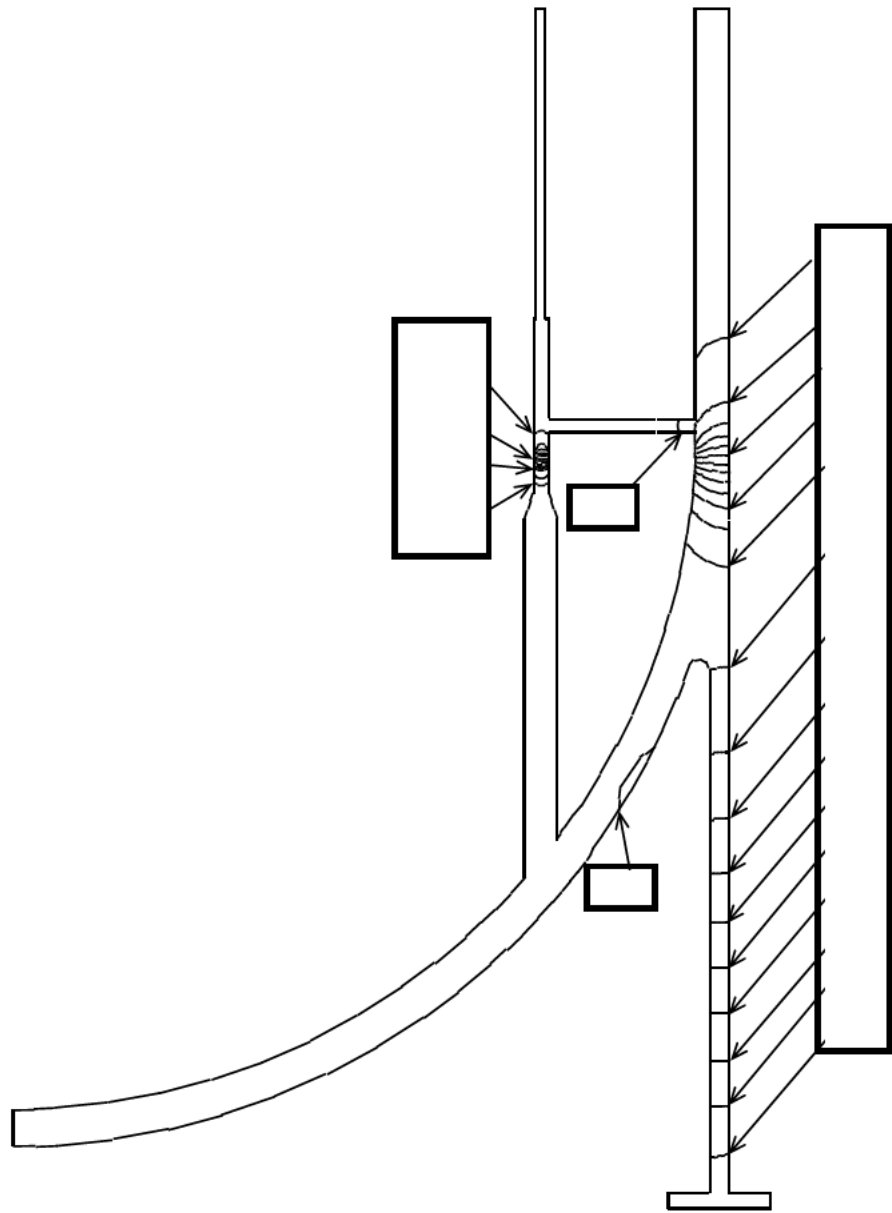


図5-5(23) 温度分布図 (単位: °C)

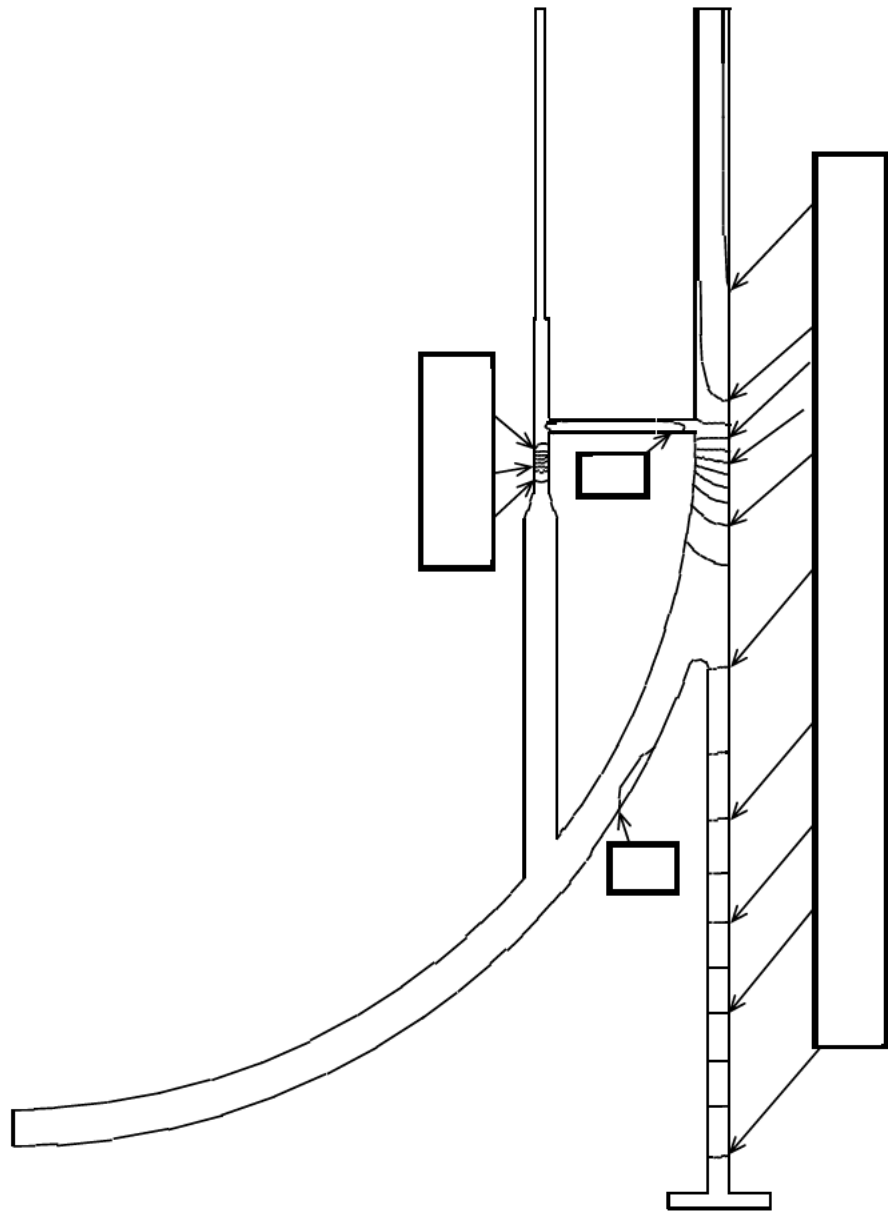



図5-5(24) 温度分布図  (単位：℃)

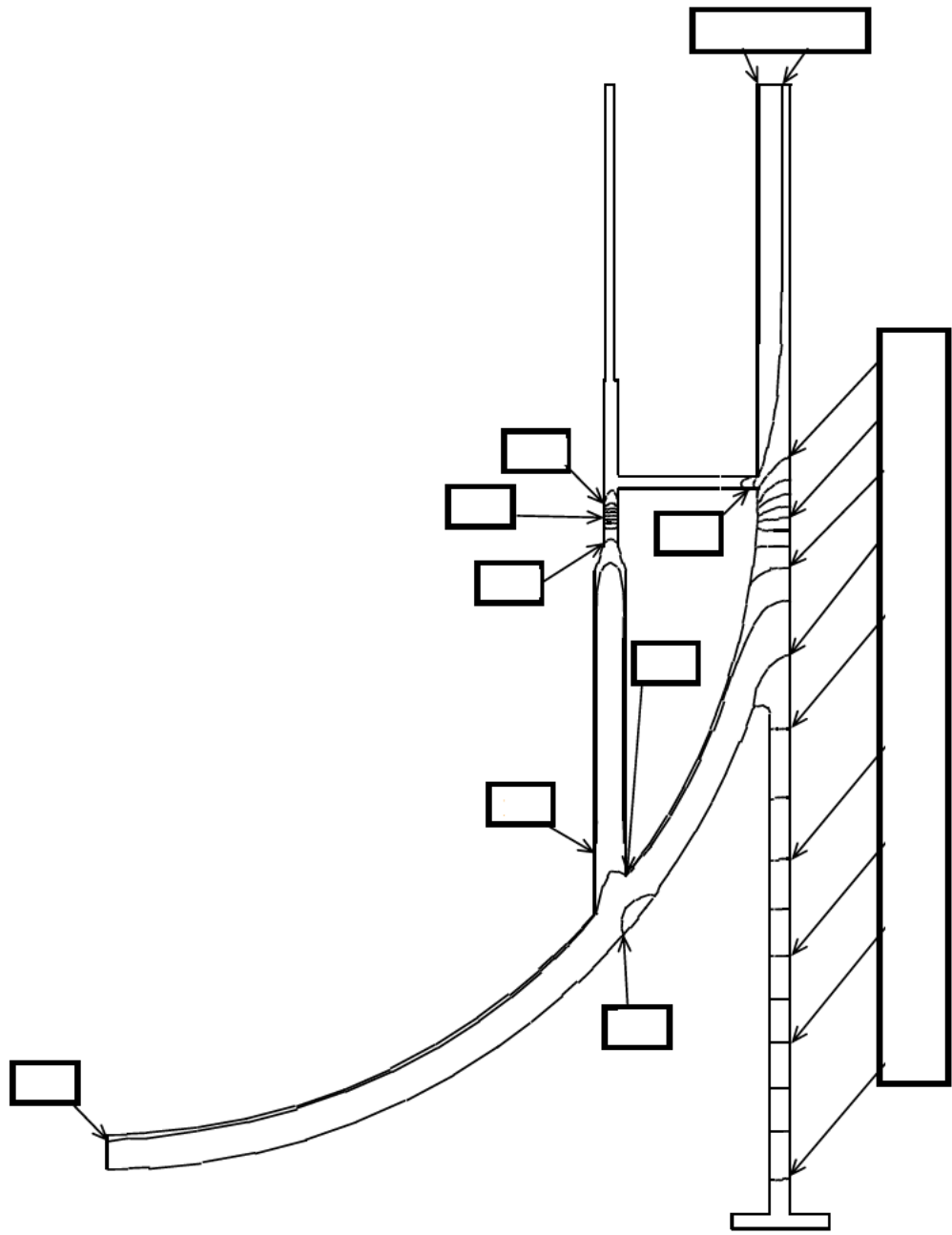


図5-5(25) 温度分布図 (単位: °C)

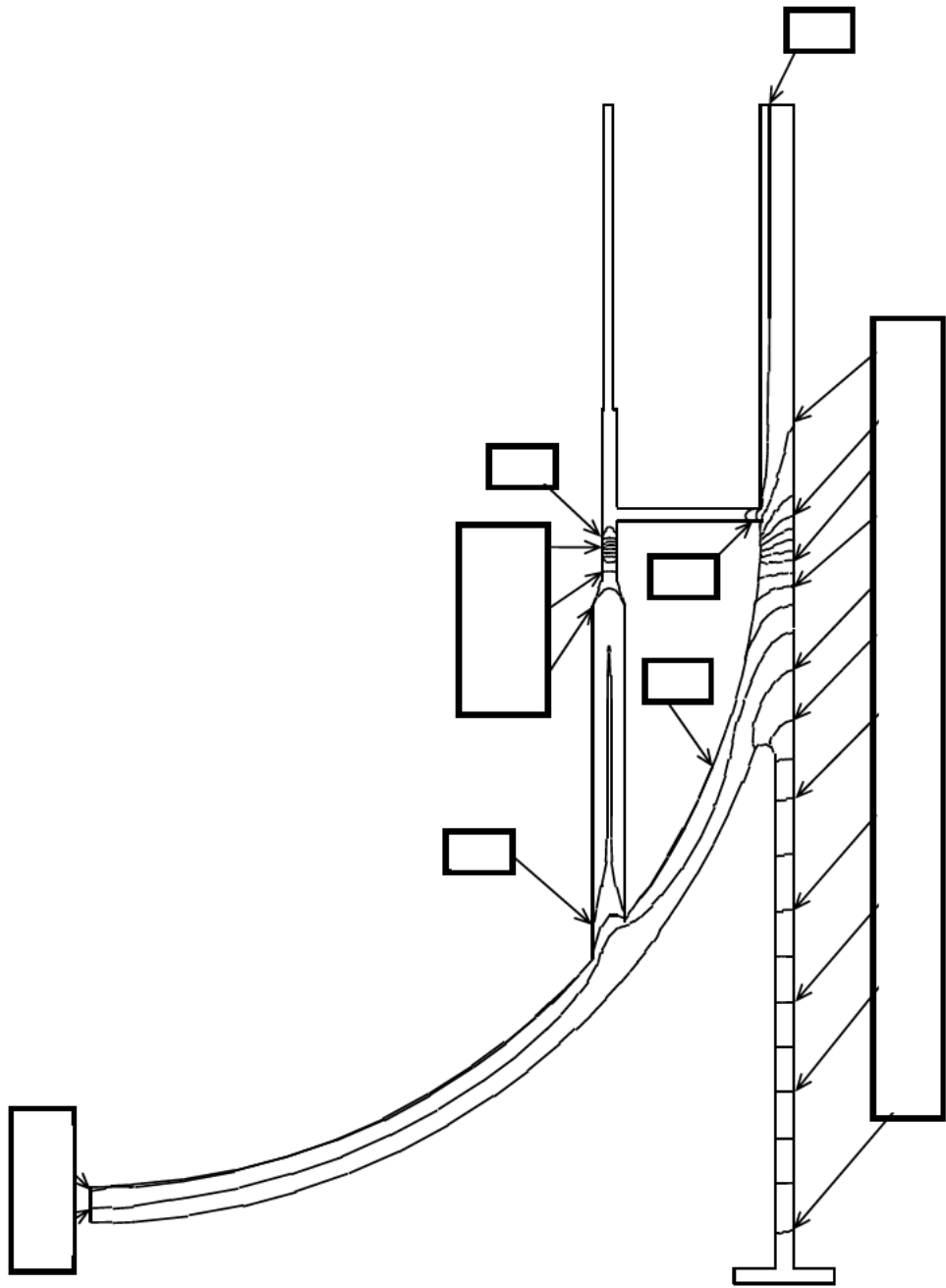


図5-5(26) 温度分布図 (単位: °C)

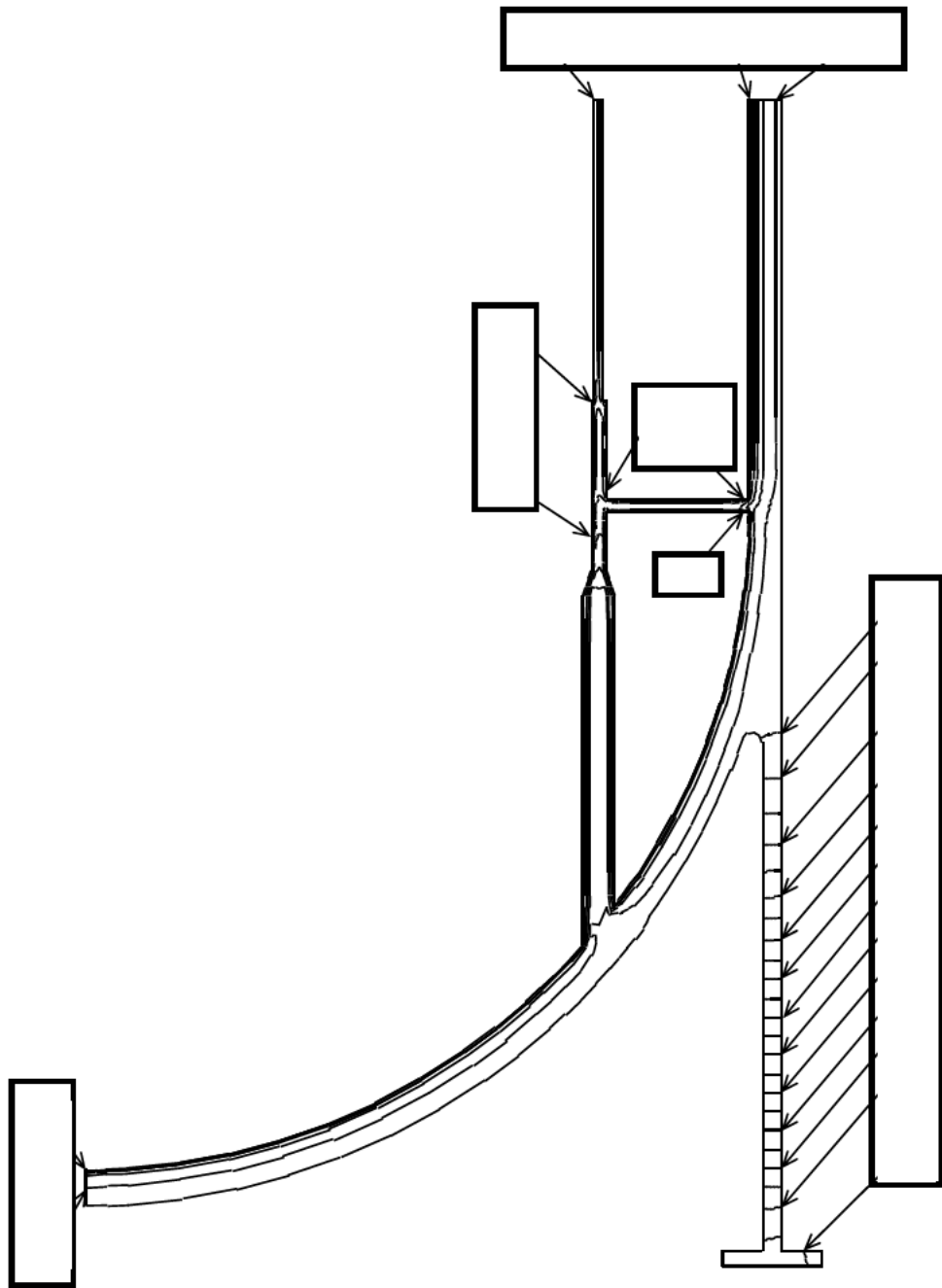



図5-5(27) 温度分布図  (単位：℃)

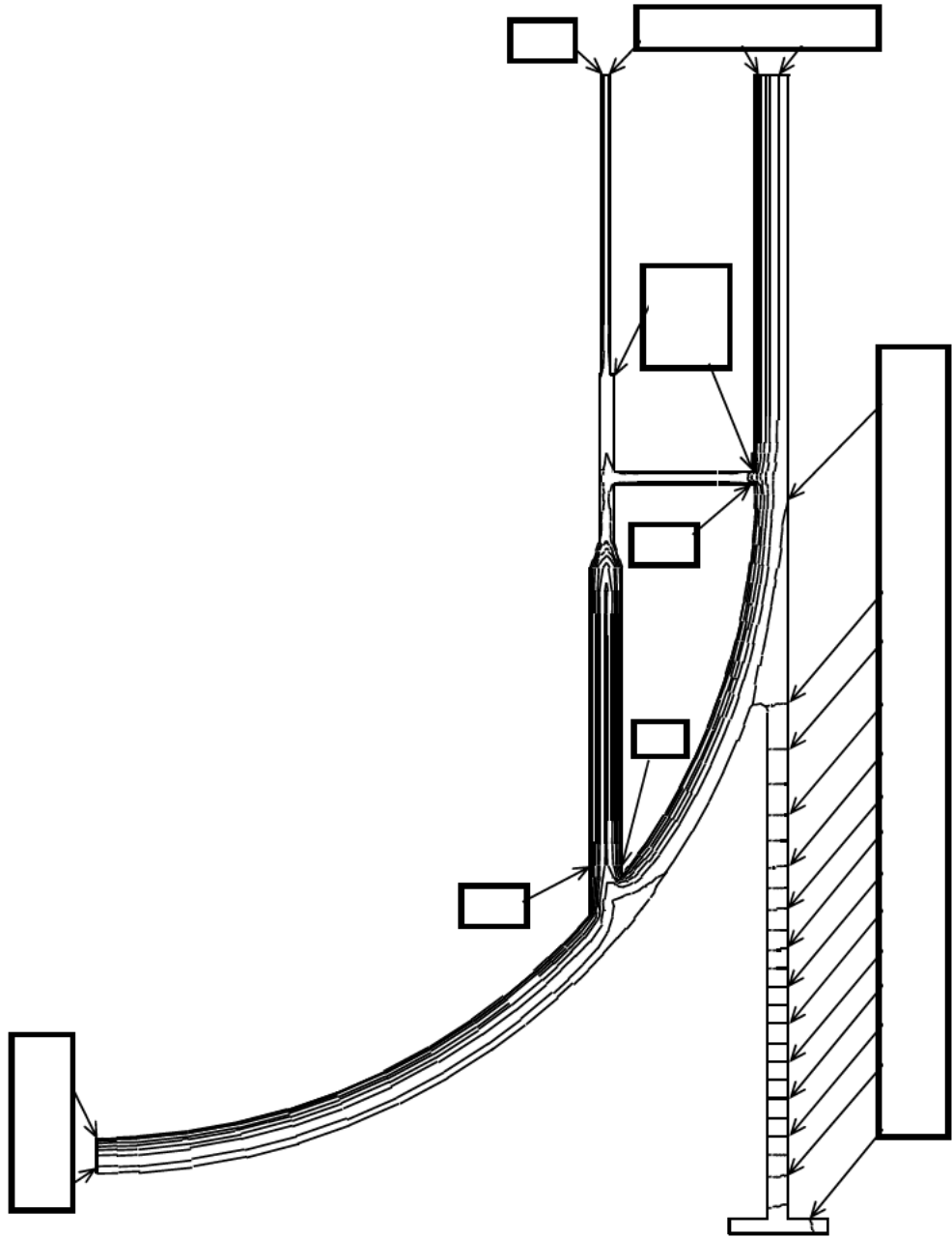
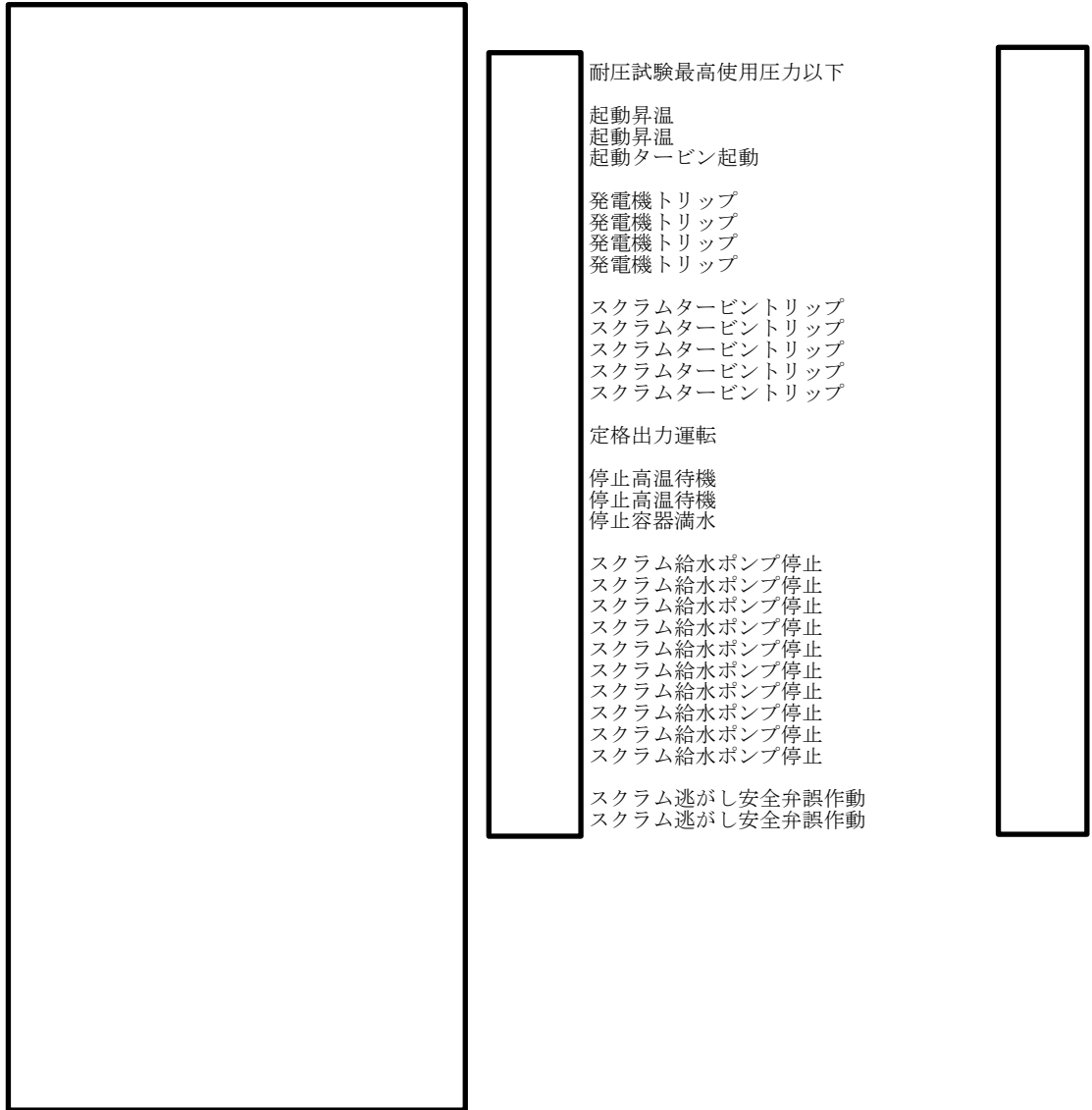


図5-5(28) 温度分布図 (単位: °C)



耐圧試験最高使用圧力以下

起動昇温
 起動昇温
 起動タービン起動

発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ

スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ

定格出力運転

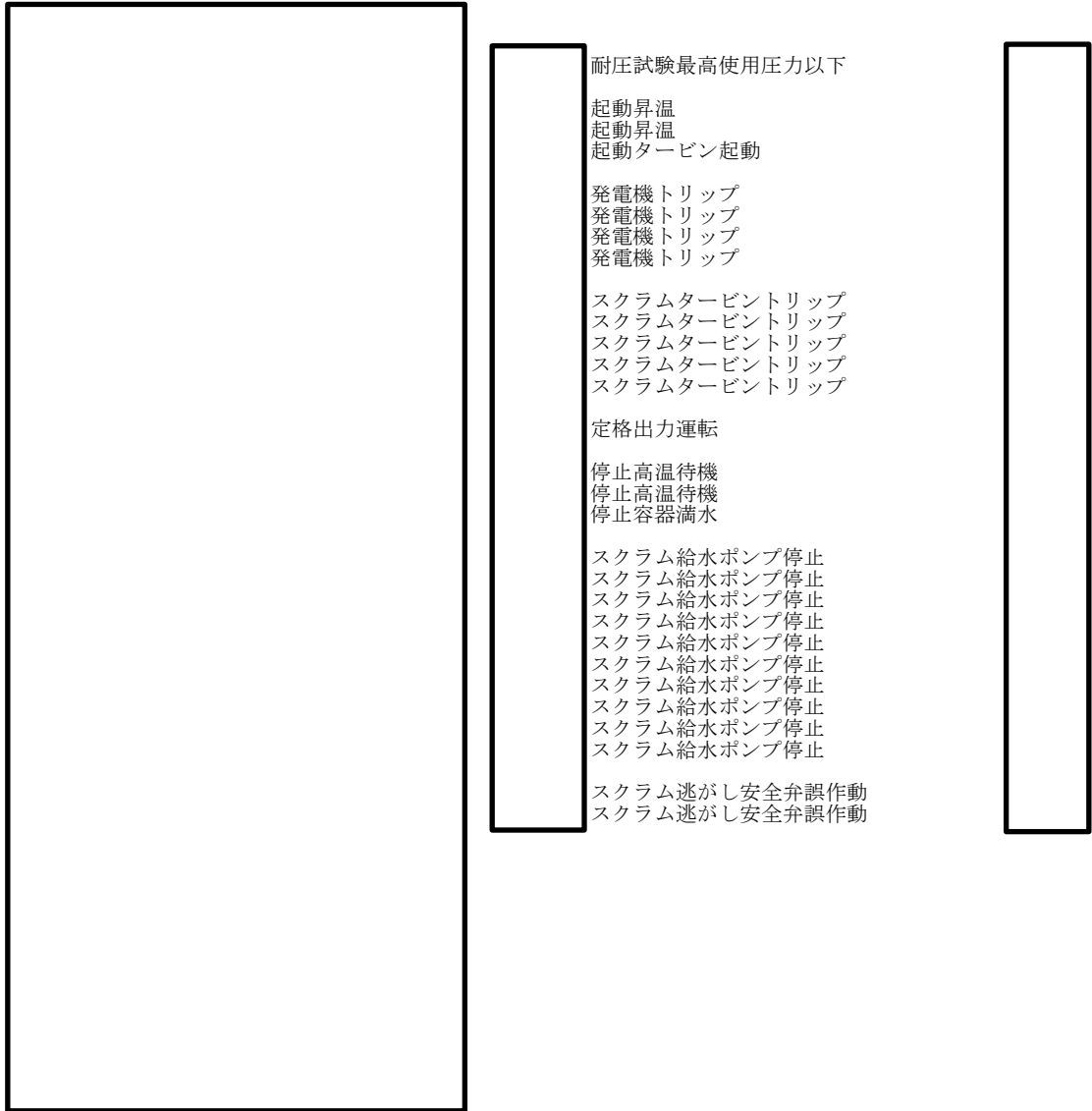
停止高温待機
 停止高温待機
 停止容器満水

スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止

スクラム逃がし安全弁誤作動
 スクラム逃がし安全弁誤作動

No.	運転条件	運転条件	S p
1			

図5-6(1) 応力差の変動(P03, S 2 3)



耐圧試験最高使用圧力以下

起動昇温
 起動昇温
 起動タービン起動

発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ

スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ

定格出力運転

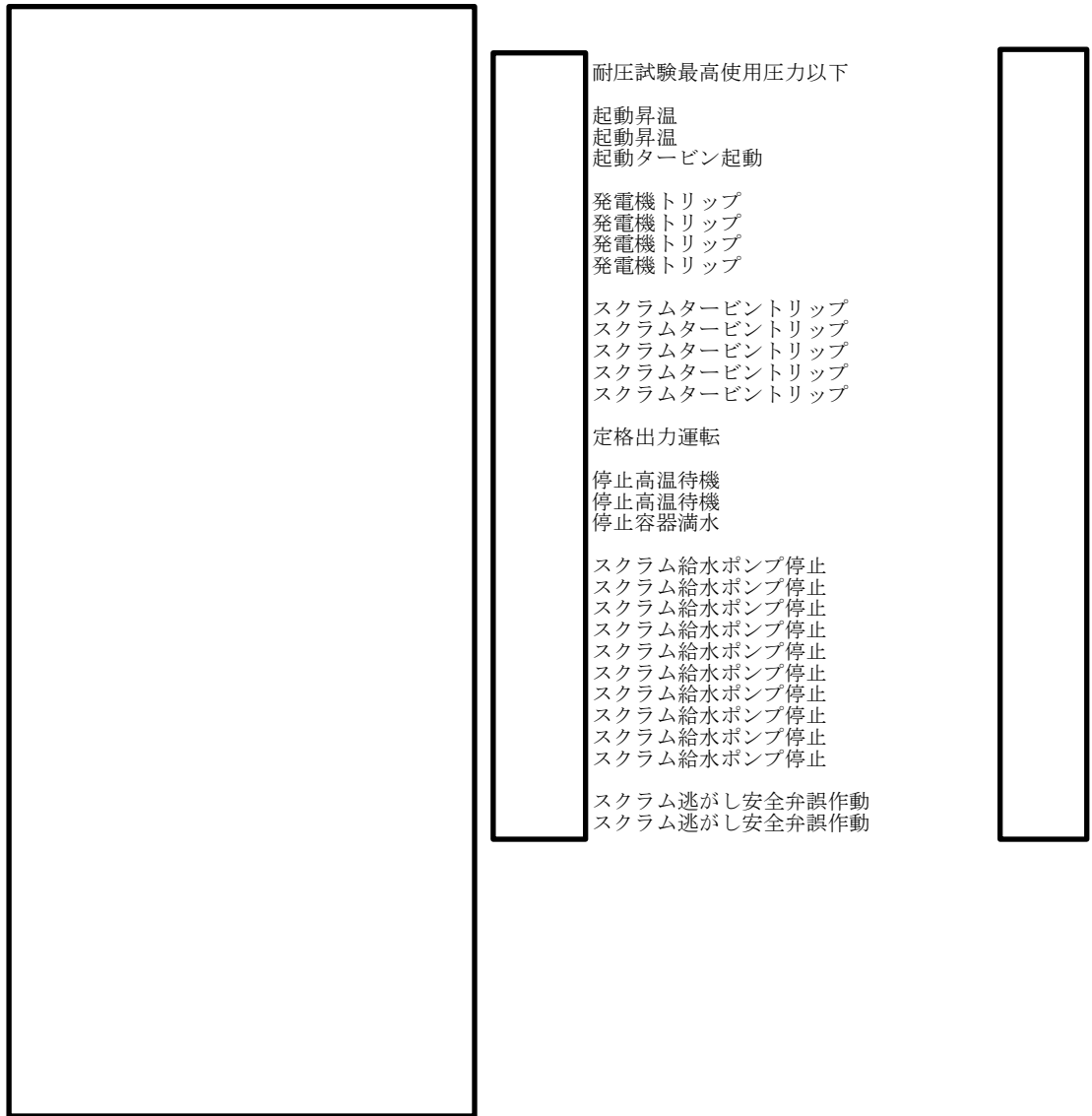
停止高温待機
 停止高温待機
 停止容器満水

スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止

スクラム逃がし安全弁誤作動
 スクラム逃がし安全弁誤作動

No.	運転条件	運転条件	S p
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

図5-6(2) 応力差の変動(P07, S 1 2)



耐圧試験最高使用圧力以下

起動昇温
 起動昇温
 起動タービン起動

発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ

スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ

定格出力運転

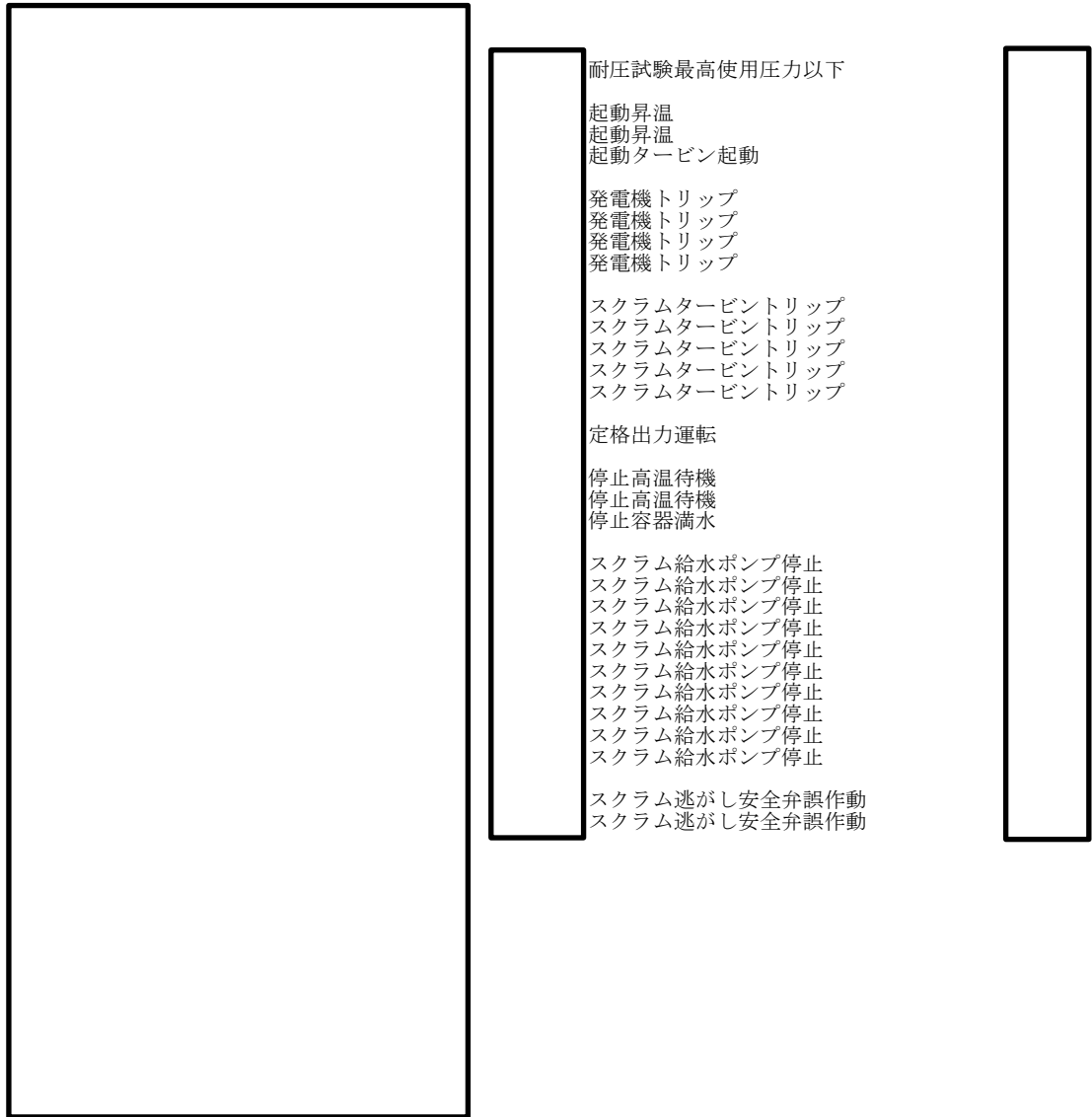
停止高温待機
 停止高温待機
 停止容器満水

スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止

スクラム逃がし安全弁誤作動
 スクラム逃がし安全弁誤作動

No.	運転条件	運転条件	S p
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

図5-6(3) 応力差の変動(P14, S 3 1)



耐圧試験最高使用圧力以下
 起動昇温
 起動昇温
 起動タービン起動
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 発電機トリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 スクラムタービントリップ
 定格出力運転
 停止高温待機
 停止高温待機
 停止容器満水
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム給水ポンプ停止
 スクラム逃がし安全弁誤作動
 スクラム逃がし安全弁誤作動

No.	運転条件	運転条件	S p
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

図5-6(4) 応力差の変動(P17, S 2 3)

表5-13(1) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(2) 熱伝達率の計算



流体	温度 T_f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(3) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T_f (°C)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイレー数 * R_a (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				
水				

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。
 注2：垂直接流体層の高さ $L = \square$ m
 注記*：温度差 $\Delta T = \square$ °Cに対する値を示す。

表5-13(4) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(5) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(6) 熱伝達率の計算



流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(7) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(8) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(9) 熱伝達率の計算

--

流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					
水					
水					
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (円筒胴とシリンダ間の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(11) 熱伝達率の計算



流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (シリンダ内面の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(13) 熱伝達率の計算



流体	温度 T _f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
水					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h × 20

注3：流路断面積 = m² (シリンダ内面の断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(14) 熱伝達率の計算



流体	温度 T_f (°C)	流量 Q (%)	熱伝導率 λ (W/(m·K))	レイノルズ数 Re (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
空気					

注1：計算方法及び記号の説明は、添付1による。

注2：100%流量 = m³/h

注3：流路断面積 = m² (ダクト総断面積)

注4：代表長さ L = m

表5-13(15) 熱伝達率の計算



流体	温度 T_m (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 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ (—)	熱伝達率 h (W/(m ² ·K))
空気						

注： 計算方法及び記号の説明は、添付1による。

表 5-14 応力集中係数

応力評価点	デ ー タ				K _n (引張り)	K _b (曲げ)
	T (mm)	t (mm)	r (mm)	θ (°)		
P01, P01'					1.4	1.2
P02, P02'					2.0	1.6
P03, P03'					1.3	1.1
P04, P04'					1.3	1.1
P05, P05'					1.3	1.1
P06, P06'					1.3	1.1
P08, P08'					2.3	1.8
P10, P10'					2.3	1.8
P11, P11'					1.8	1.5
P12, P12'					1.8	1.5
P13, P13'					3.0 ^{*2}	3.0 ^{*2}
P14, P14'					3.0 ^{*2}	3.0 ^{*2}
P15, P15'					1.8	1.5
P16, P16'					1.8	1.5
P17, P17'					2.0 ^{*3}	2.0 ^{*3}
P18, P18'					2.0 ^{*3}	2.0 ^{*3}

注：計算方法及び記号の説明は、添付 2 による。

注記*1：Tを無限大として計算した。

*2：西田正孝著「応力集中」による。

*3：設計・建設規格 CSS-3140 の完全溶け込み溶接部に対する値

表 5-15 一次一般膜応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

応力評価面	設計条件		供用状態C		供用状態D	
	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	59	147*	10	221*	11	300*
P01'						
P02'	51	147*	10	221*	9	300*
P03						
P04	108	164	18	246	20	334
P03'						
P04'	91	164	18	246	16	334
P05						
P06	47	164	9	246	9	334
P05'						
P06'	39	164	9	246	8	334
P07						
P08	50	164	7	246	8	334
P07'						
P08'	44	164	7	246	6	334
P09						
P10	41	164	8	246	10	334
P09'						
P10'	34	164	8	246	9	334
P11						
P12	16	147*	6	221*	6	300*
P11'						
P12'	17	147*	6	221*	6	300*
P13						
P14	7	164	6	246	6	334
P13'						
P14'	10	164	6	246	5	334
P15						
P16	9	147*	5	221*	5	300*
P15'						
P16'	7	147*	5	221*	6	300*
P17						
P18	71	85*	18	127*	19	208*
P17'						
P18'	63	85*	18	127*	19	208*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-16 一次一般膜+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		供用状態C		供用状態D	
	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	59	221*	10	332*	11	450*
P01'						
P02'	51	221*	10	332*	9	450*
P03						
P04	108	246	18	369	20	501
P03'						
P04'	91	246	18	369	16	501
P05						
P06	47	246	9	369	9	501
P05'						
P06'	39	246	9	369	8	501
P07						
P08	50	246	7	369	8	501
P07'						
P08'	44	246	7	369	6	501
P09						
P10	41	246	8	369	10	501
P09'						
P10'	34	246	8	369	9	501
P11						
P12	16	221*	6	332*	6	450*
P11'						
P12'	17	221*	6	332*	6	450*
P13						
P14	7	246	6	369	6	501
P13'						
P14'	10	246	6	369	5	501
P15						
P16	9	221*	5	332*	5	450*
P15'						
P16'	7	221*	5	332*	6	450*
P17						
P18	71	127*	18	190*	19	312*
P17'						
P18'	63	127*	18	190*	19	312*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 5-17 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 ($P_m + P_b + Q$)		
	^{*1} S_n	^{*2} S_n'	許容応力 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$
P01	109	—	442 ^{*3}
P01'	109	—	442 ^{*3}
P02	111	—	442 ^{*3}
P02'	111	—	442 ^{*3}
P03	142	—	492
P03'	142	—	492
P04	115	—	492
P04'	115	—	492
P05	214	—	492
P05'	214	—	492
P06	235	—	492
P06'	235	—	492
P07	476	—	492
P07'	476	—	492
P08	330	—	492
P08'	330	—	492
P09	369	—	492
P09'	369	—	492
P10	246	—	492
P10'	246	—	492
P11	254	—	442 ^{*3}
P11'	254	—	442 ^{*3}
P12	314	—	442 ^{*3}
P12'	314	—	442 ^{*3}
P13	277	—	492
P13'	277	—	492
P14	310	—	492
P14'	310	—	492
P15	205	—	442 ^{*3}
P15'	205	—	442 ^{*3}
P16	177	—	442 ^{*3}
P16'	177	—	442 ^{*3}
P17	307 ^{*4}	137	260 ^{*3}
P17'	307 ^{*4}	137	260 ^{*3}
P18	292 ^{*4}	111	260 ^{*3}
P18'	292 ^{*4}	111	260 ^{*3}

注記*1： S_n は供用状態A及びBによる一次+二次応力差の最大範囲を示す。
 *2： S_n' は S_n のうち熱曲げを除く一次+二次応力差の最大範囲を示す。
 *3：継手効率 を乗じた値を示す。
 *4：簡易弾塑性解析により安全性を示す。

表 5-18 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	0.000	1.0
P01'	0.000	1.0
P02	0.000	1.0
P02'	0.000	1.0
P03	0.000	1.0
P03'	0.000	1.0
P04	0.000	1.0
P04'	0.000	1.0
P05	0.000	1.0
P05'	0.000	1.0
P06	0.000	1.0
P06'	0.000	1.0
P07	0.001	1.0
P07'	0.001	1.0
P08	0.000	1.0
P08'	0.000	1.0
P09	0.000	1.0
P09'	0.000	1.0
P10	0.000	1.0
P10'	0.000	1.0
P11	0.000	1.0
P11'	0.000	1.0
P12	0.000	1.0
P12'	0.000	1.0
P13	0.005	1.0
P13'	0.005	1.0
P14	0.013	1.0
P14'	0.013	1.0
P15	0.000	1.0
P15'	0.000	1.0
P16	0.000	1.0
P16'	0.000	1.0
P17	0.019	1.0
P17'	0.019	1.0
P18	0.011	1.0
P18'	0.011	1.0

表 5-19 座屈に対する評価

(単位：MPa)

応力評価面	供用状態	圧縮応力	許容応力
P03'-P04'	A, B	4	155
	C	4	233
	D	5	249

6. 燃料支持金具の強度計算

6.1 一般事項

本章は、燃料支持金具（中央燃料支持金具及び周辺燃料支持金具）の応力計算について示すものである。

注：図表は、原則として巻末に示す。

6.2 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 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」（以下「告示」という。）

注：本章において、告示の条項は「告示第○条第△項第◇号」として示す。

6.3 記号の説明

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

記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
D _i	内径	mm
D _o	外径	mm
I	断面二次モーメント	mm ⁴
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S ₁₂	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S ₂₃	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S ₃₁	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S _m	設計応力強さ 告示 別表第 2 に定める値	MPa
S _u	設計引張強さ 告示 別表第 10 に定める値	MPa
S _y	設計降伏点 告示 別表第 9 に定める値	MPa
S _y (R T)	室温における設計降伏点 告示 別表第 9 に定める値	MPa
t	厚さ	mm
V	鉛直力	N
η	溶接部の継手効率	—
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_l	軸方向応力	MPa
σ_r	半径方向応力	MPa
σ_t	周方向応力	MPa
τ_{lr}	せん断応力	MPa
τ_{rt}	せん断応力	MPa
τ_{tl}	せん断応力	MPa

6.4 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 6-1 に示すとおりとする。

表 6-1 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

注記*：告示別表に記載された許容引張応力及び設計引張強さは、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。

6.5 形状・寸法・材料

本章で解析する箇所形状・寸法・材料を図 6-1 に示す。

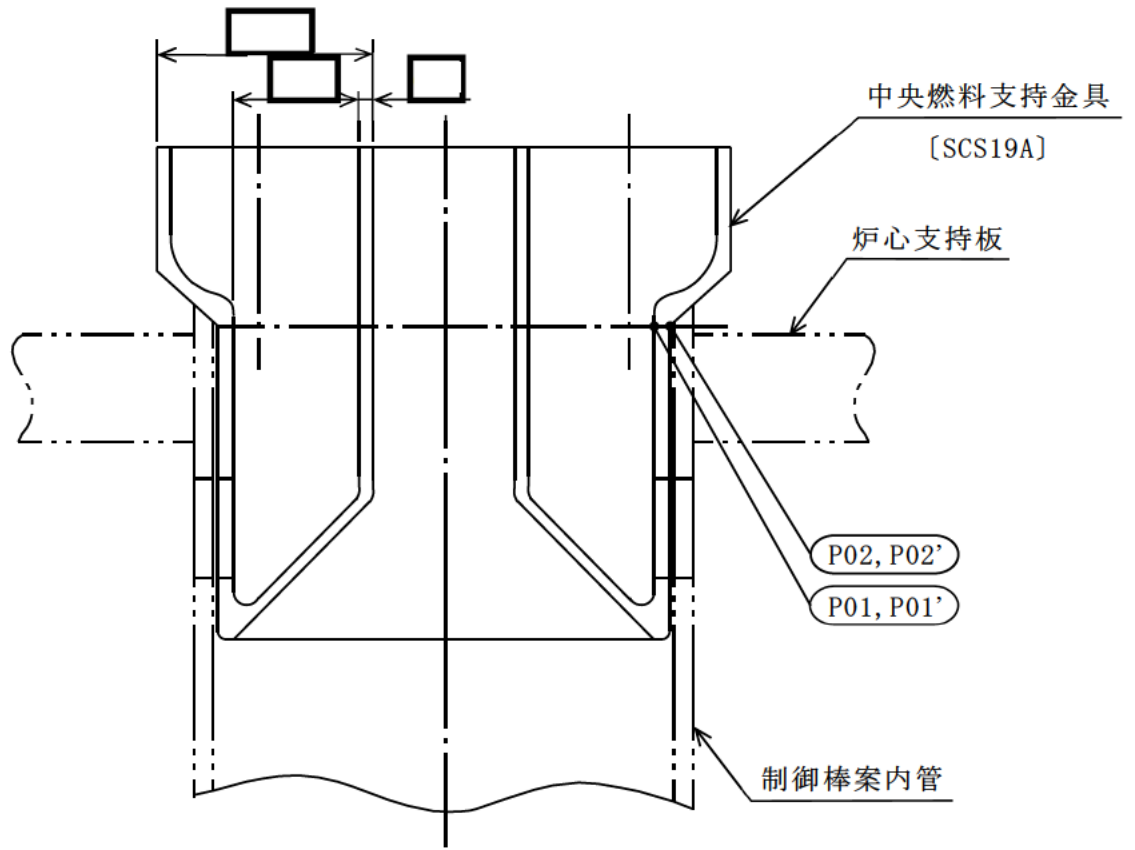
6.6 解析範囲

解析範囲を図 6-1 に示す。

6.7 計算結果の概要

計算結果の概要を表 6-2 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、応力評価上厳しくなる代表的な評価点を記載する。



○ : 応力評価点
 [] : 材 料

図6-1(1) 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

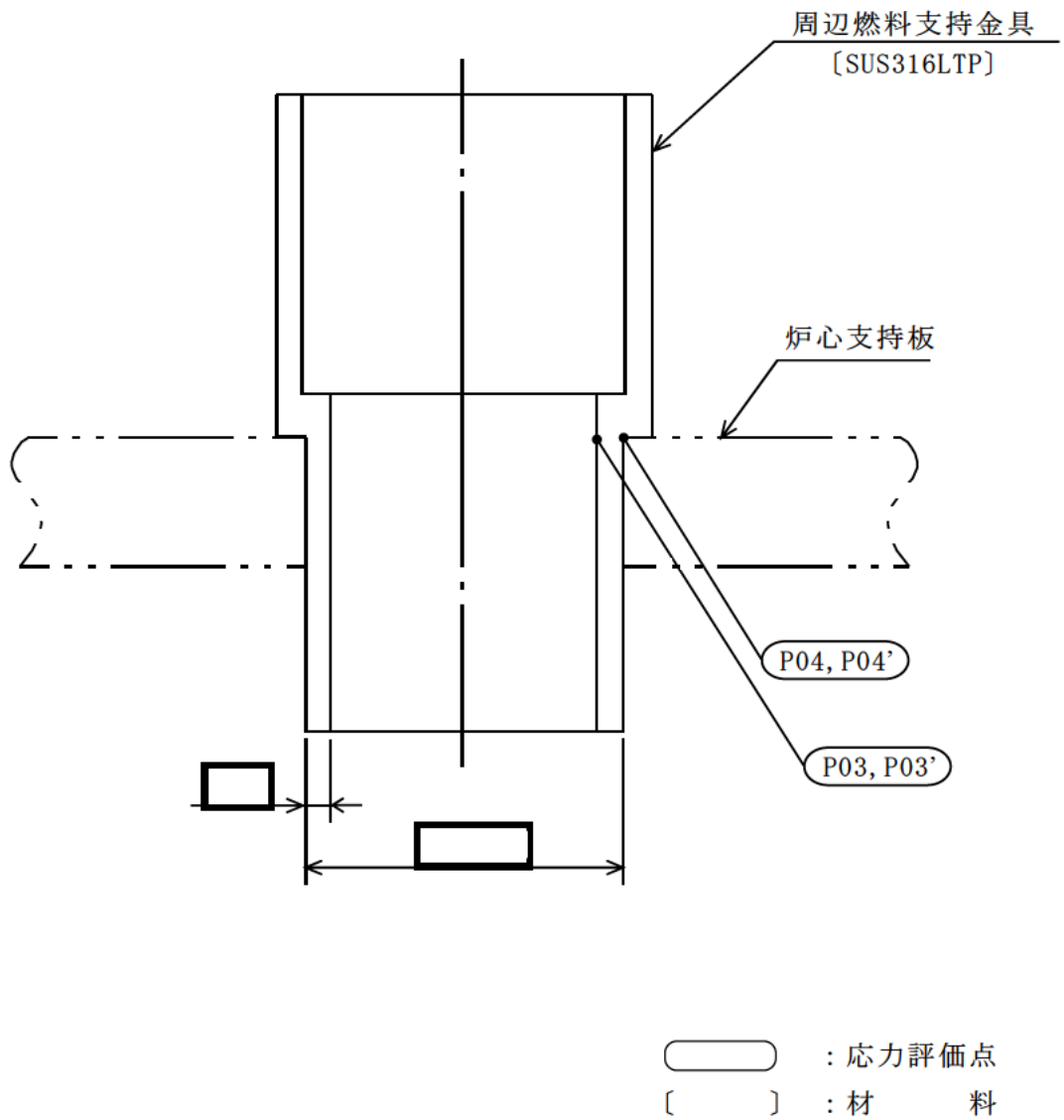


図6-1(2) 形状・寸法・材料・応力評価点 (単位: mm)

表 6-2 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)			一次一般膜＋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 評価点	疲労 累積 係数	許容値	応力 評価点
中央燃料 支持金具 SCS19A	設計条件	3	108	P01-P02	3	163	P01-P02	—	—	—	—	—	—
	Ⅲ	3	162	P01-P02	3	244	P01-P02	—	—	—	—	—	—
	Ⅳ	3	247	P01-P02	3	371	P01-P02	—	—	—	—	—	—
	重大事故等時	3	247	P01-P02	3	370	P01-P02	—	—	—	—	—	—
	Ⅰ, Ⅱ	—	—	—	—	—	—	3	330	P01	—*1	—*1	—*1
周辺燃料 支持金具 SUS316LTP	設計条件	2	37*2	P03-P04	2	56*2	P03-P04	—	—	—	—	—	—
	Ⅲ	2	56*2	P03-P04	2	84*2	P03-P04	—	—	—	—	—	—
	Ⅳ	2	92*2	P03-P04	2	138*2	P03-P04	—	—	—	—	—	—
	重大事故等時	2	90*2	P03-P04	2	135*2	P03-P04	—	—	—	—	—	—
	Ⅰ, Ⅱ	—	—	—	—	—	—	2	115*2	P03	—*1	—*1	—*1

注記*1：疲労解析は、告示第96条第1項第3号により不要である。

*2：継手効率 を乗じた値を示す。

6.8 計算条件

6.8.1 評価対象機器

応力評価を行う機器は、次のとおりである。（図 6-1 参照）

機器名称	評価対象				
	運転状態に対する評価				
	設計条件	I, II	III	IV	重大事故等時
燃料支持金具	○	○	○	○	○

注：「○」は評価対象を示す。

6.8.2 設計条件

設計差圧 : 表 6-3 に示す。

最高使用温度 : 302℃

設計機械的荷重 : 表 6-4 に示す。

6.8.3 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。

なお、重大事故等時の条件は以下のとおりである。

温度条件 : 運転状態Ⅲと同じ。

差圧条件 : 運転状態Ⅳと同じ。

燃料支持金具の応力評価において考慮する差圧は、表 6-3 に示す参照図書(1)a. に定める差圧 P_{13} であり、考慮する外荷重の値は表 6-4 に示すとおりである。

6.8.4 材料

各部の材料を図 6-1 に示す。

6.8.5 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 6-5 に示す。

なお、本章において、告示第 96 条第 1 項第 1 号イの規定による最高使用圧力を「設計差圧」と呼び、設計差圧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。

6.8.6 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 6-6 に示す。本章において、荷重の種類と記号は以下のとおりである。

荷重	記号
(1) 差圧	[L02]
(2) 設計機械的荷重	[L03]
(3) 死荷重	[L04]

6.8.7 許容応力

燃料支持金具の許容応力は、告示第 96 条第 1 項第 1 号に基づき表 6-7 に示す。

6.8.8 許容応力評価条件

- (1) 許容応力評価において、設計応力強さ S_m 及び設計引張強さ S_u は、それぞれ告示別表第 2 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Ⅲ及び運転状態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 (℃ : 定格出力運転時の流体温度) に対する許容応力を用いる。
- (3) 重大事故等時の一次応力の評価には、重大事故等時における流体の最高温度 (℃) を上回る運転状態Ⅲにおける流体の最高温度 (℃) に対する許容応力を用いる。
- (4) 燃料支持金具の許容応力評価条件を表 6-8 に示す。

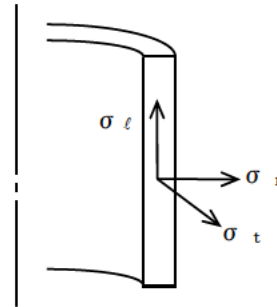
6.8.9 溶接部の継手効率

- (1) 中央燃料支持金具の応力評価点は、溶接部でないため $\eta = 1.00$ を用いる。
- (2) 周辺燃料支持金具の溶接部の継手効率は、継手の種類と分類及び継手に適用する検査の種類により、告示第 99 条第 4 項に従って定める。溶接部の継手効率を表 6-9 に示す。
- (3) 溶接部の許容応力は、材料の許容応力に継手効率を乗じたものとする。

6.8.10 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。

- σ_t : 周方向応力
 σ_ℓ : 軸方向応力
 σ_r : 半径方向応力



6.9 応力評価の手順

応力評価の手順について述べる。

応力評価の概要を図 6-2 に示す。

6.9.1 温度分布計算

燃料支持金具は、参照図書(1)a. に示すとおり、同一温度領域内（領域B）にあること、また、薄肉構造で材料の異なる部分はなく温度勾配は無視し得ることから温度分布計算を行わない。

6.9.2 応力の評価

(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 σ_t , σ_ℓ , σ_r , $\tau_{t\ell}$, $\tau_{\ell r}$, τ_{rt} の 6 成分を持つが、主応力 σ は、引用文献(1)の 1・3・6 項により、次式を満足する 3 根 σ_1 , σ_2 , σ_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。

(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。

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

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

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

(3) 一次応力強さ

設計条件，運転状態Ⅲ，運転状態Ⅳ及び重大事故等時において生じる一次一般膜応力及び一次一般膜＋一次曲げ応力の応力強さが，6.8.7 項に示す許容応力を満足することを示す。

(4) 一次＋二次応力強さ

運転状態Ⅰ及びⅡにおいて生じる一次＋二次応力の応力差最大範囲 (S_n) が，6.8.7 項に示す許容応力を満足することを示す。

6.9.3 繰返し荷重の評価

繰返し荷重の評価は，運転状態Ⅰ及びⅡによる荷重を用いて，告示第 96 条第 1 項第 3 号に従い疲労解析（詳細な繰返し荷重の評価）の必要性の検討を行い，疲労解析が不要であることを示す。

6.10 応力計算

6.10.1 応力評価点

応力評価点の位置を図 6-1 に示す。

なお、各応力評価点の断面性状は、表 6-10 に示すとおりである。

6.10.2 差圧による応力

(1) 荷重条件 (L02)

各運転状態による差圧を表 6-3 に示す。

(2) 計算方法

中央燃料支持金具の差圧による応力は、応力評価点の位置における断面で、外径を mm とし、かつ、厚さが最小となる円筒を考え、内圧を受ける円筒にモデル化し、計算する。

中央燃料支持金具の差圧による応力計算のモデルを図 6-3 に示す。

周辺燃料支持金具の差圧による応力は、応力評価点の位置における断面の円筒を考え計算する。

a. 一次一般膜応力

差圧 P_{13} による一次一般膜応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1}{Y-1} \cdot P_{13}$$

$$\sigma_l = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{13}$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{Y+1} \cdot P_{13}$$

$$\text{ここで, } Y = \frac{D_o}{D_i}$$

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

差圧による一次曲げ応力は存在しない。したがって、一次一般膜＋一次曲げ応力は、一次一般膜応力と同じである。

c. 一次＋二次応力

差圧 P_{13} による一次＋二次応力は、次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{1+K^2}{Y^2-1} \cdot P_{13}$$

$$\sigma_\ell = \frac{1}{Y^2-1} \cdot P_{13}$$

$$\sigma_r = \frac{1-K^2}{Y^2-1} \cdot P_{13}$$

ここで、 $K = Y$ (内表面)

$K = 1$ (外表面)

6.10.3 外荷重による応力

(1) 荷重条件 (L03 及び L04)

外荷重を表 6-4 に示す。

(2) 計算方法

中央燃料支持金具の外荷重による応力は、応力評価点の位置における断面で、その断面の最小幅を内径とし、かつ、厚さが最小となる円筒を考え計算する。

中央燃料支持金具の外荷重による応力計算のモデルを、図 6-4 に示す。

周辺燃料支持金具の外荷重による応力は、応力評価点の位置における断面の円筒を考え計算する。

a. 一次一般膜応力

外荷重による一次一般膜応力は，外荷重と各応力評価断面の断面性状により次式で求める。

$$\sigma_{\ell} = \frac{V}{A}$$

b. 一次一般膜＋一次曲げ応力

外荷重による一次曲げ応力は，存在しない。したがって，一次一般膜＋一次曲げ応力は，一次一般膜応力と同じである。

c. 一次＋二次応力

外荷重による二次応力は，存在しない。したがって，一次＋二次応力は，一次一般膜＋一次曲げ応力と同じである。

6.10.4 熱応力

6.9.1項に示すとおり熱応力は無視できる。

6.11 応力強さの評価

6.11.1 一次一般膜応力強さの評価

各運転状態における評価を表 6-11 に示す。

表 6-11 より、各運転状態の一次一般膜応力強さは、6.8.7 項及び 6.8.9 項に示す許容応力を満足する。

6.11.2 一次一般膜＋一次曲げ応力強さの評価

各運転状態における評価を表 6-12 に示す。

表 6-12 より、各運転状態の一次一般膜＋一次曲げ応力強さは、6.8.7 項及び 6.8.9 項に示す許容応力を満足する。

6.11.3 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 6-13 に示す。

表 6-13 より、運転状態 I 及び II の一次＋二次応力強さは、6.8.7 項及び 6.8.9 項に示す許容応力を満足する。

6.12 繰返し荷重の評価

6.12.1 告示第 96 条第 1 項第 3 号についての検討

燃料支持金具について，告示第 96 条第 1 項第 3 号により疲労解析が不要となることを以下の(1)から(4)に示す。

(1) 告示第 96 条第 1 項第 3 号イ及び同号ロ

6.9.1 項で述べたように，燃料支持金具の温度差は無視し得るので，告示第 96 条第 1 項第 3 号イ及び同号ロの検討は不要である。

(2) 告示第 96 条第 1 項第 3 号ハ（異なる材料よりなる部分の温度変動）

燃料支持金具には，縦弾性係数又は熱膨張係数の異なる材料よりなる部分は存在しない。

(3) 告示第 96 条第 1 項第 3 号ニ（機械的荷重変動）

機械的荷重により生じる応力の全振幅が，荷重変動回数 10^6 回に対応する繰返しピーク応力強さを超えないことを確認する。

告示別図第 2 より求めた 10^6 回に対応する繰返しピーク応力強さ : $S = 178 \text{ MPa}$

機械的荷重変動による応力の全振幅 : $\Delta \sigma$

全応力評価点の機械的荷重変動（死荷重）による一次＋二次応力のうち，応力の全振幅が最大となる応力評価点 P01 での一次＋二次応力は以下である。

$$\Delta \sigma = \square \text{ MPa}$$

したがって， $S > \Delta \sigma$ であり，条件を満足する。

(4) 検討結果

以上(1)から(3)より燃料支持金具は，告示第 96 条第 1 項第 3 号の要求をすべて満足している。

6.12.2 疲労解析

6.12.1 項に示すように，燃料支持金具は，疲労解析は不要である。

6.13 引用文献

- (1) 機械工学便覧 基礎編 α 3 (日本機械学会)

6.14 参照図書

- (1) 島根原子力発電所第2号機 炉心シュラウド修理工事 工事計画届出書 添付書類
 - a. IV-3-1-1 炉心シュラウドの応力計算書

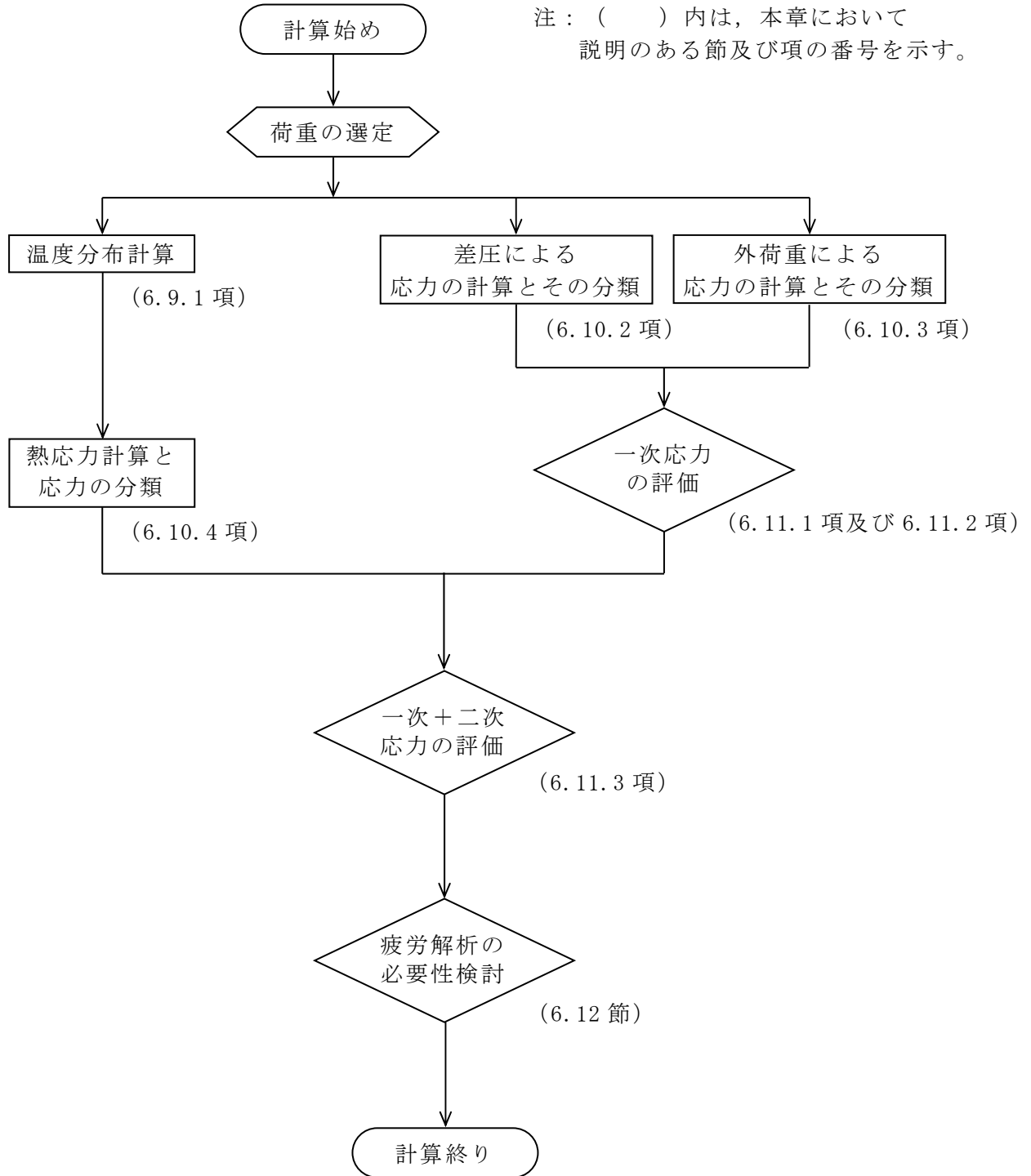


図 6-2 応力評価の手順

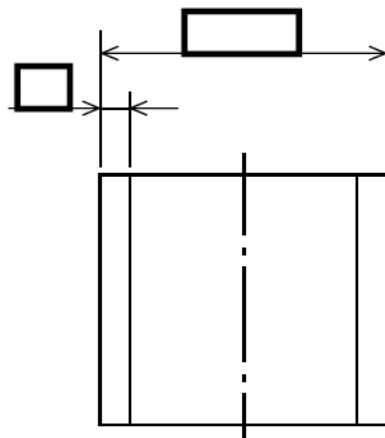


図 6-3 中央燃料支持金具の差圧による応力計算モデル (単位 : mm)

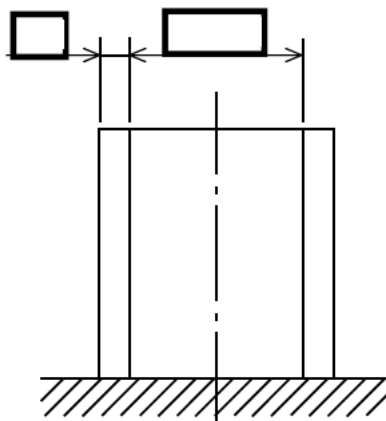


図 6-4 中央燃料支持金具の外荷重による応力計算モデル (単位 : mm)

表 6-3 各運転状態における差圧

(単位：MPa)

運転状態	差圧 P ₁₃
設計条件	
I, II	
III	
IV	
重大事故等時	

表 6 4 外荷重

記号	荷重名称	荷重 作用点*	鉛直力
			V (kN)
L03	設計機械的荷重		
L04	死荷重		

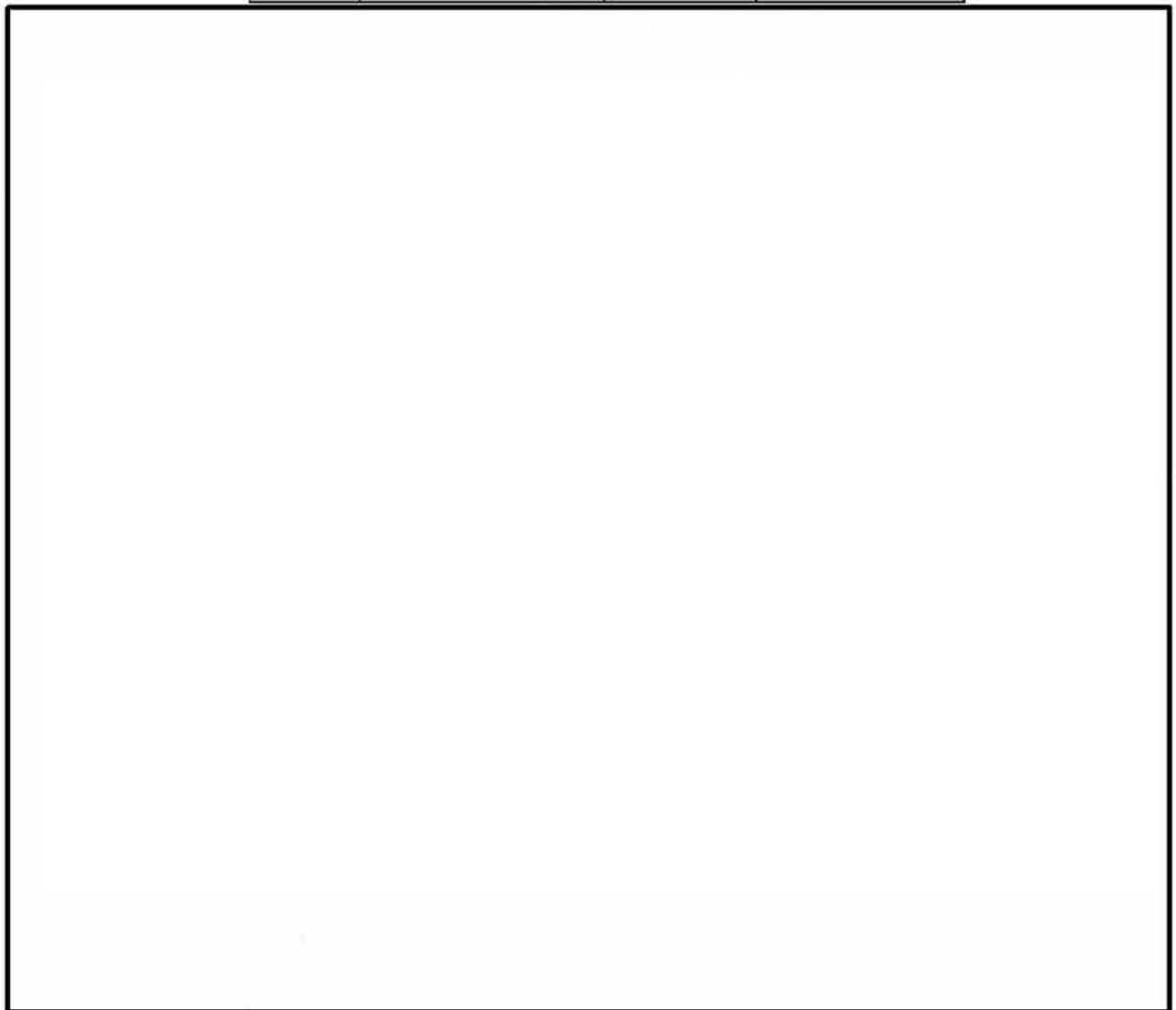


表 6-5 荷重の組合せ及び運転状態

運転状態	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
I	運転状態 I による荷重
II	運転状態 II による荷重
III	運転状態 III による荷重
IV	運転状態 IV による荷重
重大事故等時	重大事故等時による荷重

表 6-6 荷重の組合せ

運転状態	荷重の組合せ	応力評価
設計条件	L02+L03	P_m $P_m + P_b$
I, II	L02+L04	$P_m + P_b + Q$ 疲労解析
III	L02+L04	P_m $P_m + P_b$
IV	L02+L04	P_m $P_m + P_b$
重大事故等時	L02+L04	P_m $P_m + P_b$

表 6-7 許容応力

運転状態	許容限界		
	一次一般膜応力	一次一般膜+一次曲げ応力	一次+二次応力
設計条件	S_m	$1.5 \cdot S_m$	—
I, II	—	—	$3 \cdot S_m$
III	$1.5 \cdot S_m$	$2.25 \cdot S_m$	—
IV	$\text{Min}(2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u)$	$\text{Min}(3.6 \cdot S_m, S_u)$	—
重大事故等時*	$\text{Min}(2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u)$	$\text{Min}(3.6 \cdot S_m, S_u)$	—

注記*：重大事故等時の許容限界として運転状態IVの許容限界を用いる。

表 6-9 溶接部の継手効率

継手の箇所	継手の分類	継手の種類	検査の種類*	継手効率 η
燃料支持金具	周辺燃料支持金具と 炉心支持板の継手			

注記*：検査の種類を示す記号は次のとおりである。

P T：告示第 99 条第 4 項に定めるホの検査

表 6-10 断面性状

応力評価点	t (mm)	D _o (mm)	D _i (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)
P01, P02*					
P03, P04					

注記*：上段は差圧による応力計算モデルの断面性状を示し，下段は外荷重による応力計算モデルの断面性状を示す。

表 6-11 一次一般膜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		重大事故等時	
	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	3	108	3	162	3	247	3	247
P01' P02'	3	108	3	162	3	247	3	247
P03 P04	2	37*	2	56*	2	92*	2	90*
P03' P04'	2	37*	2	56*	2	92*	2	90*

注記* : 継手効率 を乗じた値を示す。

表 6-12 一次一般膜＋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		重大事故等時	
	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	3	163	3	244	3	371	3	370
P01' P02'	3	163	3	244	3	371	3	370
P03 P04	2	56*	2	84*	2	138*	2	135*
P03' P04'	2	56*	2	84*	2	138*	2	135*

注記*：継手効率 を乗じた値を示す。

表 6-13 一次+二次応力強さの評価のまとめ

(単位：MPa)

分類	一次+二次応力差最大範囲 ($P_m + P_b + Q$)	
応力評価点	S_n^{*1}	許容値 $\eta \cdot 3 \cdot S_m$
P01	3	330
P01'	3	330
P02	3	330
P02'	3	330
P03	2	115 ^{*2}
P03'	2	115 ^{*2}
P04	2	115 ^{*2}
P04'	2	115 ^{*2}

注記*1： S_n は運転状態Ⅰ及びⅡによる一次+二次応力差の最大範囲を示す。

*2：継手効率 を乗じた値を示す。

添付 1 熱伝達率の計算

1. 熱伝達率の計算式

熱伝達率の計算は、以下の式を用いて計算する。

(1) 強制対流による平板の層流熱伝達

a. 計算式の出典

5.13 節の引用文献(2) (改訂第 4 版) の P46 の(8)式

b. 計算式

$$h = 0.664 \cdot P_r^{1/3} \cdot R_{e x}^{1/2} \cdot \frac{\lambda}{L} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 L : 代表長さ(m)

$R_{e x}$: レイノルズ数 ($= v \cdot x / \nu_0$) ($x = L$)

v : 流体の流速(m/s)

λ : 流体の熱伝導率(W/(m・K))

c. 使用基準

$$R_e \leq 3.2 \times 10^5$$

ここで、 R_e : レイノルズ数 ($= v \cdot L / \nu_0$)

(2) 強制対流による平板の乱流熱伝達

a. 計算式の出典

5.13 節の引用文献(5) の P122 の(6・46)式

b. 計算式

$$h = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L h_x \cdot dx \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ここで、 } h_x = \frac{0.0296 \cdot R_{e x}^{0.8} \cdot P_r}{1 + 1.54 \cdot P_r^{-1/4} \cdot R_{e x}^{-0.1} \cdot (P_r - 1)} \cdot \frac{\lambda}{x}$$

L : 代表長さ(m)

$R_{e x}$: レイノルズ数 ($= v \cdot x / \nu_0$) ($0 \leq x \leq L$)

v : 流体の流速(m/s)

λ : 流体の熱伝導率(W/(m・K))

c. 使用基準

$$R_e > 3.2 \times 10^5$$

ここで、 R_e : レイノルズ数 ($= v \cdot L / \nu_0$)

(3) 自然対流による熱伝達

a. 計算式の出典

5.13 節の引用文献(2) (改訂第3版) の P113 の(1), (2)及び(4)式

b. 計算式

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{\lambda}{L} && (R_a < 10^3) \\ h &= 0.28 \cdot R_a^{1/4} \cdot (L/D)^{-1/4} \cdot \frac{\lambda}{L} && (10^3 \leq R_a < 10^7) \\ h &= 0.0516 \cdot R_a^{1/3} \cdot \frac{\lambda}{L} && (10^7 \leq R_a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, D : 流体層の厚さ(m) G_r : グラスホフ数 ($=g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 / \nu^2$) g : 重力加速度 (m/s^2) L : 垂直流体層の高さ(m) R_a : レーレー数 ($=G_r \cdot Pr$) ΔT : 流体とそれに接する物体の温度差(K) β : 体膨張係数 ($1/K$) λ : 流体の熱伝導率 ($W/(m \cdot K)$)

(4) エアギャップの熱伝達

a. 計算式の出典

5.13 節の引用文献(2) (改訂第4版) 及び引用文献(6)

b. 計算式

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

ここで, A_1 : 対面金属の表面積 (m^2) A_2 : 対面金属の表面積 (m^2) F : 形態係数 ℓ : エアギャップの距離(m) T_m : 対面金属表面温度の平均温度(K) ε_1 : 対面金属のふく射率 ε_2 : 対面金属のふく射率 λ : 空気の熱伝導率 ($W/(m \cdot K)$) σ : ステファンボルツマン定数 ($=5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$)

2. 計算方法

熱伝達率の計算は、流体の種類、流体温度 (T_f)、流量 (Q) 及び代表長さ (L) を用いて行う。

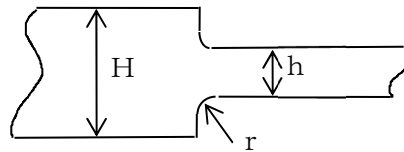
熱伝達率の表においては、計算に用いた熱伝達形態のほか、次のものを記載する。

流体	:	流体の種類
F	:	形態係数 (エアギャップの熱伝達の場合)
h	:	熱伝達率
L	:	代表長さ
l	:	エアギャップの距離 (エアギャップの熱伝達の場合)
Q	:	流量
R_a	:	ラーレー数 (自然対流による熱伝達の場合)
R_e	:	レイノルズ数
T_f	:	流体温度
T_m	:	対面金属表面温度の平均温度 (エアギャップの熱伝達の場合)
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$:	対面金属のふく射率 (エアギャップの熱伝達の場合)

添付 2 応力集中係数の計算

1. 応力集中係数の計算式

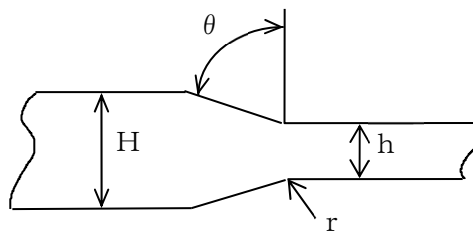
- (1) 板厚が変化する部分の応力集中係数は、5.13 節の引用文献(3)の Appendix B に示された手法によって求める。
- (2) この手法の概要は、次のとおりである。
- a. 以下のような、ステップ状のはりの応力集中係数を求める実験式 (Heywood による。) を用いる。



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

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

- b. 隅部にテーパのあるときは、次のように補正する。



(1)式, (2)式で求めた応力集中係数を K_0 , 補正した係数を K' として

$$2 \cdot r \leq H - h \text{ のとき} \quad \frac{K' - 1}{K_0 - 1} = 1 - \left(\frac{\theta}{90}\right)^n$$

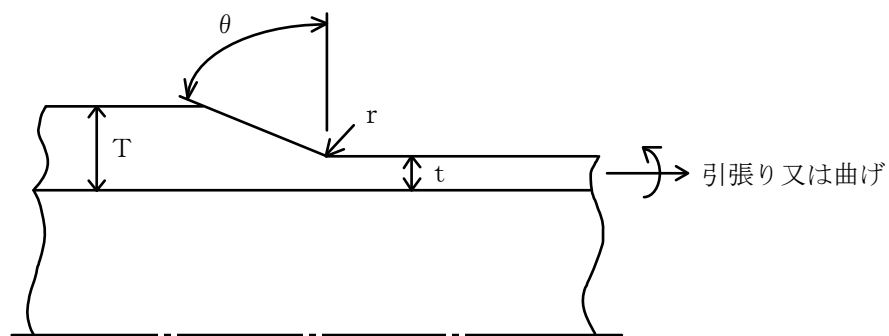
$$2 \cdot r > H - h \text{ のとき} \quad \frac{K' - 1}{K_0 - 1} = 1 - \left(\frac{\theta - \alpha}{90 - \alpha}\right)^n$$

ただし,

$$n = 1 + 2.4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot r}{H - h}}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(1 - \frac{H - h}{2 \cdot r} \right)$$

- c. 円筒部については, a 項及び b 項の式の H , h を $H = 2 \cdot T$, $h = 2 \cdot t$ とする。
 なお, T 及び t は, 下図に示す寸法を用いるものとする。



2. 計算方法

応力集中係数の計算は, T , t , r 及び θ を用いて行う。
 応力集中係数の表においては, 次のものを記載する。

- T : 大きい方の板厚 ($= H / 2$)
 t : 小さい方の板厚 ($= h / 2$)
 r : 隅部の半径
 θ : テーパー角度
 K_n : 引張に対する応力集中係数
 K_b : 曲げに対する応力集中係数