

熱応力緩和構造モデル(2)熱過渡強度試験

第1報 供試体の設計製作

1989年6月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

熱応力緩和構造モデル(2)熱過渡強度試験

第1報 供試体の設計製作

木村公隆* 梅田寿雄* 菊池政之*
笠原直人* 金沢誠一* 渡士克己*
今津 彰**

要 旨

構造物モデルによる熱過渡強度試験は、高速炉機器における耐熱応力設計法の開発、特に裕度の適正化や評価法の確立という課題に対して実施されている。

構造物強度確性試験施設(TTS)の第5回供試体「熱応力緩和構造モデル(2)供試体」は、実機設計に使用される典型的な形状をモデル化して供試体に盛り込み熱過渡強度データを得ること及び特定の構造について熱過渡荷重下の性能機能保持を確認することを目的として設計製作されるものである。

本供試体は、縦置スカート支持の円筒容器であり、2種のノズル構造、Yピース構造、2種のスカート構造、胴板接合構造の7種類の強度試験対象部及び、熱抵抗体、整流装置、管-多孔板溶接部の3種類の性能機能保持確認対象部を含んでいる。

供試体の設計では、伝熱流動解析により熱過渡条件を定め、熱伝導解析、熱応力解析を行った後、安全裕度を取り除いた専用設計基準(TTSDS)による評価を行った。使用材料及び施工法は基本的には原型炉内機器と同等として製作を行った。

* 大洗工学センター，機器構造開発部，構造工学室

** 大洗工学センター，機器構造開発部

Creep Fatigue Test of Thermal Stress Mitigation Structure Model (2) under Thermal Transient Loadings

Vol.1 Design and Fabrication of the Model

K. Kimura*, H. Umeda*, M. Kikuchi*,
N. Kasahara*, S. Kanazawa,
K. Watashi* and A. Imazu**

Abstract

Thermal transient strength tests of structure models are carried out to develop the design method of the fast breeder reactor components under thermal loadings.

The fifth testing model for Thermal Transient Test Facility for Structures (TTS), "Thermal stress mitigation structure model (2)", have been designed and fabricated. The purpose of this model is to get the thermal transient strength data for the typical shape of FBR components and to confirm the function of specific structures under thermal loading.

This testing model is a vertical type cylindrical vessel supported by a skirt. It has seven testing portion for failure test, such as two types of nozzle, a Y-junction, two types of skirt and a plate to shell junction. And it has three testing portion for confirmation of function, such as a thermal insulator, a flow straightener and tube to perforated plate weldments.

In designing the model, thermo-hydraulic analysis, heat transfer analysis, thermal stress analysis were performed. Testing portions were evaluated using the design guide for TTS exclusive use. Material and welding method are basically comparable to the prototype reactor internals.

* Structure Engineering Section, OEC

** System and Components Division, OEC

目 次

1. ま え が き	1
2. 供試体の基本形状	3
2.1 供試体の基本構造	3
2.2 設計の基本方針	4
3. 強度試験部の構造設計	7
3.1 伝熱流動解析	7
3.2 熱応力解析	18
3.3 強度評価	58
4. 強度試験部以外の試験部	69
4.1 管-多孔板溶接部	69
4.2 整流装置	70
4.3 熱抵抗体	73
5. 製作・検査	76
5.1 材 料	76
5.2 製 作	82
5.3 計 装	94
5.4 検 査	94
6. 参 考 文 献	102
7. 謝 辞	103
付 録	105
A. 構 造 図	107
B. K- ϵ モデルによる伝熱流動解析	119
C. 評価断面の温度分布及び応力分布	144

D. 出口ノズルのノッチ加工	172
E. 管-多孔板溶接寸法検査記録	175
F. 表面粗さ測定結果	181

List of Tables

Table 3.1.1	Material Properties for Thermo-hydraulic Analysis	10
Table 3.1.2	Thermal Transient Condition at Inlet Nozzle	10
Table 3.2.1	Material Properties for Heat Transfer Analysis	18
Table 3.2.2	Material Properties for Thermal Stress Analysis	19
Table 3.2.1.1	Summary of Stress Analysis (Inlet Nozzle and Cylindrical Support Skirt)	28
Table 3.2.2.1	Summary of Stress Analysis (Thickness Discontinuity)	32
Table 3.2.3.1	Summary of Stress Analysis (Y-junction)	37
Table 3.2.4.1	Summary of Stress Analysis (Shell to Plate Junction)	44
Table 3.2.5.1	Summary of Stress Analysis (Conical Support Skirt)	48
Table 3.2.6.1	Summary of Stress Analysis (Outlet Nozzle)	52
Table 3.2.7.1	Summary of Stress Analysis (Thermal Insulator)	57
Table 3.3.1	Creep Fatigue Damage according to TTSDS (Inlet Nozzle and Cylindrical Support Skirt)	61
Table 3.3.2	Creep Fatigue Damage according to TTSDS (Thickness Discontinuity)	62
Table 3.3.3	Creep Fatigue Damage according to TTSDS (Y-junction)	63
Table 3.3.4	Creep Fatigue Damage according to TTSDS (Shell to Plate Junction)	64
Table 3.3.5	Creep Fatigue Damage according to TTSDS (Conical Support Skirt)	65
Table 3.3.6	Creep Fatigue Damage according to TTSDS (Outlet Nozzle)	66
Table 3.3.7	Creep Fatigue Damage according to TTSDS (Thermal Insulator)	67
Table 3.3.8	Creep Fatigue Damage according to TTSDS (Summary)	68
Table 4.1.1	Expansion Condition	70
Table 5.1.1	Material Specification	77
Table 5.1.2	Material Specification (ALLOY 718)	81
Table 5.2.1	Welding Method	86

Table 5.2.2	Nomenclature for Welding Method	87
Table 5.2.3	Welding Joint List	88
Table 5.2.4	Chemical Composition of Welding Wire	92
Table 5.4.1	Testing and Examination	98

List of Figures

Fig. 2.1.1	Model Configuration	5
Fig. 2.1.2	Perspective View of the Model	6
Fig. 3.1.1	Thermo-hydraulic Analysis Model	9
Fig. 3.1.2	Flow Patterns and Temperature Contours (Cold Shock)	11
Fig. 3.1.3	Temperature Change (Cold Shock)	13
Fig. 3.1.4	Flow Patterns and Temperature Contours (Hot Shock)	15
Fig. 3.1.5	Temperature Change (Hot Shock)	17
Fig. 3.2.1	Heat Transfer and Thermal Stress Analysis Models	20
Fig. 3.2.1.1	Material Segmentation (Inlet Nozzle and Cylindrical Support Skirt)	23
Fig. 3.2.1.2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Inlet Nozzle and Cylindrical Support Skirt)	24
Fig. 3.2.1.3	Thermal Transient Condition (Inlet Nozzle and Cylindrical Support Skirt)	25
Fig. 3.2.2.1	Material Segmentation (Thickness Discontinuity)	29
Fig. 3.2.2.2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Thickness Discontinuity)	30
Fig. 3.2.2.3	Thermal Transient Condition (Thickness Discontinuity) ..	31
Fig. 3.2.3.1	Material Segmentation (Y-junction)	33
Fig. 3.2.3.2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Y-junction)	34
Fig. 3.2.3.3	Thermal Transient Condition (Y-junction)	35
Fig. 3.2.4.1	Material Segmentation (Shell to Plate Junction)	38
Fig. 3.2.4.2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Shell to Plate Junction)	39
Fig. 3.2.4.3	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis of one Ligament (Shell to Plate Junction)	40
Fig. 3.2.4.4	Material Segmentation for Thermal Stress Analysis (Shell to Plate Junction)	41
Fig. 3.2.4.5	Thermal Transient Condition (Shell to Plate Junction) ...	42
Fig. 3.2.5.1	Material Segmentation (Conical Support Skirt)	45
Fig. 3.2.5.2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Conical Support Skirt)	46
Fig. 3.2.5.3	Thermal Transient Condition (Conical Support Skirt)	47
Fig. 3.2.6.1	Material Segmentation (Outlet Nozzle)	49

Fig. 3.2.6.2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Outlet Nozzle)	50
Fig. 3.2.6.3	Thermal Transient Condition (Outlet Nozzle)	51
Fig. 3.2.7.1	Material Segmentation (Thermal Insulator)	53
Fig. 3.2.7.2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Thermal Insulator)	54
Fig. 3.2.7.3	Thermal Transient Condition (Thermal Insulator)	55
Fig. 3.3.1	Flow of TTSDS	60
Fig. 4.1.1	Location of Tube Expansion	71
Fig. 4.1.2	Expansion Position of Tube and Plug	72
Fig. 4.2.1	Flow Straightener Model	74
Fig. 4.3.1	Thermal Insulator Model	75
Fig. 5.2.1	Fabrication Sequence	83
Fig. 5.2.2	Position of Welding Joint	85
Fig. 5.2.3	Stud Bolt Structure	93
Fig. 5.2.4	Thermal Liner Structure	93
Fig. 5.3.1	Thermocouple Location	95
Fig. 5.3.2	Thermocouple Location (Perforated Plate)	96
Fig. 5.3.3	Thermocouple Setting	97

1. ま え が き

高速炉では地震荷重と共に過渡運転時の熱荷重が主要な設計対象荷重であり、このため後者については従来の小型供試体を用いた試験研究を補強すべく構造物強度確性試験施設TTSが昭和59年に建設され、その建設目的である1)クリープ疲労破損予測手法の精密化、2)健全性評価手法の開発、3)溶接法等熱応力解析と従来の評価では強度評価法適性化に対応仕切れない施工法がらみの構造強度評価法の開発、4)熱応力緩和構造の開発とその設計手法の構築、などの試験研究が試運転モデル³⁾、原子炉容器モデル¹⁾、ペローズ継手モデル⁴⁾、熱応力緩和構造モデル(1)⁵⁾の各供試体について鋭意実施されてきている。

本報告書は、TTSで試験を行った5番目の供試体“熱応力緩和構造供試体(2)”(以下“熱緩(2)”と略すことがある)に関する一連の報告書のうち、供試体の設計、製作に関するものである。

本供試体設計に関する基本的考えは、実機設計に使用される典型的な形状をモデル化して供試体を組み上げることにより、当該部位における熱過渡に対する強度データを採取すること及び熱過渡に対する性能、機能保持の確認をする必要のある部位を供試体に取り込むことにより当該部位、構造の熱過渡による影響を把握することである。

本供試体における評価対象部位、構造を具体的に示すと下記のようなになる。

- (1) 熱過渡強度設計上注意を要する構造不連続部位を選定し、熱過渡強度試験で強度データが得られるようにモデル化し、それらを組み込んだ供試体の基本構造を定める。本供試体ではこれらをノズル構造、Yピース構造、スカート構造及び胴板接合構造としてモデル化した。

ノズル構造については、実証炉設計主要目のノズル形状が、もんじゅ主要容器のノズル形状の考察からクロッチR部をノズル径の0.07とされているため、本供試体でも入口ノズルを同一縮尺で製作した。

スカート構造については、縦置き円筒容器に採用されるYピース型支持構造として、容器下側支持スカート部に円錐型の脚部構造を組み込んでいる。これとは別に容器上側にも上部スカート部を設け、円筒型の脚部構造を模擬した。

また、Yピース構造及び胴板接合構造はそれぞれ、機器の内部支持構造及び炉心支持板等炉内支持構造の典型的な構造案である。

- (2) 熱過渡に対しその性能、機能保持の確認を行なう部位、構造としては下記を選定した。
 - a. 熱抵抗体のナトリウム中での性能データを得る。
 - b. サーマルストライピング対策を施した整流装置のナトリウム中熱過渡に対する健全性を確認する。

- c. 管一多孔板溶接部の熱過渡に対する健全性を確認する。また拡管による管の多孔板への把握力の、熱過渡による影響を調査する。

これらの選定理由は以下の通りである。

炉壁熱保護対策の一案として炉壁への熱抵抗体の設置がある。熱抵抗体は流体と構造物の間に設置され熱伝導及び輻射による熱の移動を低減させるものである。熱抵抗体容器の内部を真空にすることにより熱伝導率を下げ、また内部を区切ることによって輻射を防止している。

今回の供試体に設置する目的は、熱抵抗体の性能をナトリウム中で確認することである。

整流装置は、各燃料要素からのナトリウムの流れを相互に交わらないように導き温度流速を計測するために設置されるものであり、炉心の直上に位置しているため下側からサーマルストライピングを受ける。もんじゅの場合、サーマルストライピングに対する高温での高サイクル疲労強度がSUS304では十分でないとの判断から、整流装置はSUS304の構造部材に高温強度の高い合金であるAlloy 718の薄板を熱保護用に取りつけた構造となっている。このサーマルストライピング対策の構造は起動停止等のグロスの熱過渡に対しても強度評価上特に問題とはならないと考えられているが、詳細挙動は不明である。

今回、本供試体にこの構造の整流装置を導入する目的は、サーマルストライピング対策として採用したAlloy 718の取り付け方法が、グロスの熱過渡に対しても保持されることを試験で確認することである。

FB R実証炉中間熱交換器(IHX)の管一多孔板溶接手法は、コスト低減の観点から完全差込溶接をすることで計画されている。この手法は、もんじゅIH Xへの導入に際し特に問題がないとされている。しかし、この部分については、ナトリウム中の熱過渡試験は実施されておらず、今後の設計に対して溶接部のき裂発生データの拡管の効果データの拡充が望まれている。

そこで、管一多孔板溶接部の熱過渡に対する健全性を確認すること及び拡管による管の多孔板への把握力の熱過渡による影響を調査することを目的として、今回の供試体に管一多孔板溶接を導入した。

本供試体は上述のようなクリープ疲労破損対象部及び性能、機能保持確認部を含んでおり、本試験研究は配管熱過渡試験装置や小型熱衝撃試験装置およびT T Sで実施した従来の試験結果から構成される構造物熱過渡強度データベースに、今日的な、また破損機構研究のうえでは根本的なデータを拡充しようとするものである。

2. 供試体の基本形状

2.1 供試体の基本構造

供試体の構造図を Fig. 2.1.1 に、鳥瞰図を Fig. 2.1.2 に示す。供試体は基本的には FBR 実証炉原子炉容器及び冷却系機器を対象としており、実証炉の設計において熱応力が問題となる部位をモデル化し供試体に盛り込むものとした。強度試験部は、2 種類のノズル構造、2 種類のスカート構造、2 種類の支持構造及び板厚不連続部の構造不連続部とする。各強度試験部は、構造物強度確性試験施設専用設計基準の評価により、可能な限り寿命が同一となるように設計を行った。

(1) 強度試験部

① ノズル構造

FBR 実証炉用に検討されているノズルの形状を模擬した一体鍛造型のノズルを採用する。入口ノズルには熱遮蔽板を内側に別途設置する熱遮蔽板無のタイプのノズル、出口ノズルにはフルードヘッドタイプの熱遮蔽板付ノズルを用いる。

② スカート構造

縦置き円筒容器に用いられる Y ピース型の支持構造を採用する。本供試体において、支持スカート部では円錐型の脚部構造、上部スカート部では円筒型の脚部構造とする。

③ 内部支持構造

機器の内部構造の支持構造に用いられる Y ピース及び炉心支持板等炉内支持構造の一案を模擬した胴板接合部を採用する。

④ 板厚不連続部

機器中で典型的な板厚不連続部形状を模擬した構造を採用する。

(2) 強度試験部以外の試験部

① 整流装置

熱応力緩和のため高温強度の高い合金である Alloy 718 で被覆された整流装置を模擬する。

② 管—多孔板溶接部

胴板接合部の多孔板に一部、管—多孔板溶接を採用する。

③ 熱抵抗体

炉壁保護の一案である熱抵抗体を設置する。

(3) 流路

供試体の型式は縦置スカート支持円筒容器である。ナトリウムは供試体上部の入口ノズ

ルより流入し下記(a)の主流路の①～⑤を通過した後、下部の出口ノズルより流出する。この主流路は入口ノズルにおけるナトリウム温度変化に追従し、比較的大きな温度変化を示す。一方、下記(b)の①、②はスタグナントナトリウム領域となり、主流路に比較してゆっくりした温度変化となる。

(a) 主流路

- ① 入口ノズル
- ② 入口プレナム
- ③ 多孔板
- ④ 出口プレナム
- ⑤ 出口ノズル

(b) スタグナントナトリウム領域

- ① 多孔板中心下部小胴
- ② Yピース・外胴間アニュラス部

2.2 設計の基本方針

(1) 熱過渡条件の設定

熱過渡条件は、基本的には構造物との熱的な相互作用を考慮した伝熱流動解析を実施することにより設定する。解析に当たっては系全体を軸対称として取り扱う。

(2) 構造解析

熱過渡強度試験の対象となる強度試験部について熱伝導解析及び熱応力解析を実施する。

(3) 評価

熱応力解析を実施した箇所について、構造物強度確性試験施設専用設計基準 (TTSDS) による評価を実施する。各強度試験部について本評価法によるクリープ疲労損傷値が1～3を目標とする。

強度試験部以外の構造については本評価法によるクリープ疲労損傷値が1以下となるようにする。

(4) 計装

ナトリウム温度、供試体内部及び外面の温度を計測するため熱電対を取りつける。

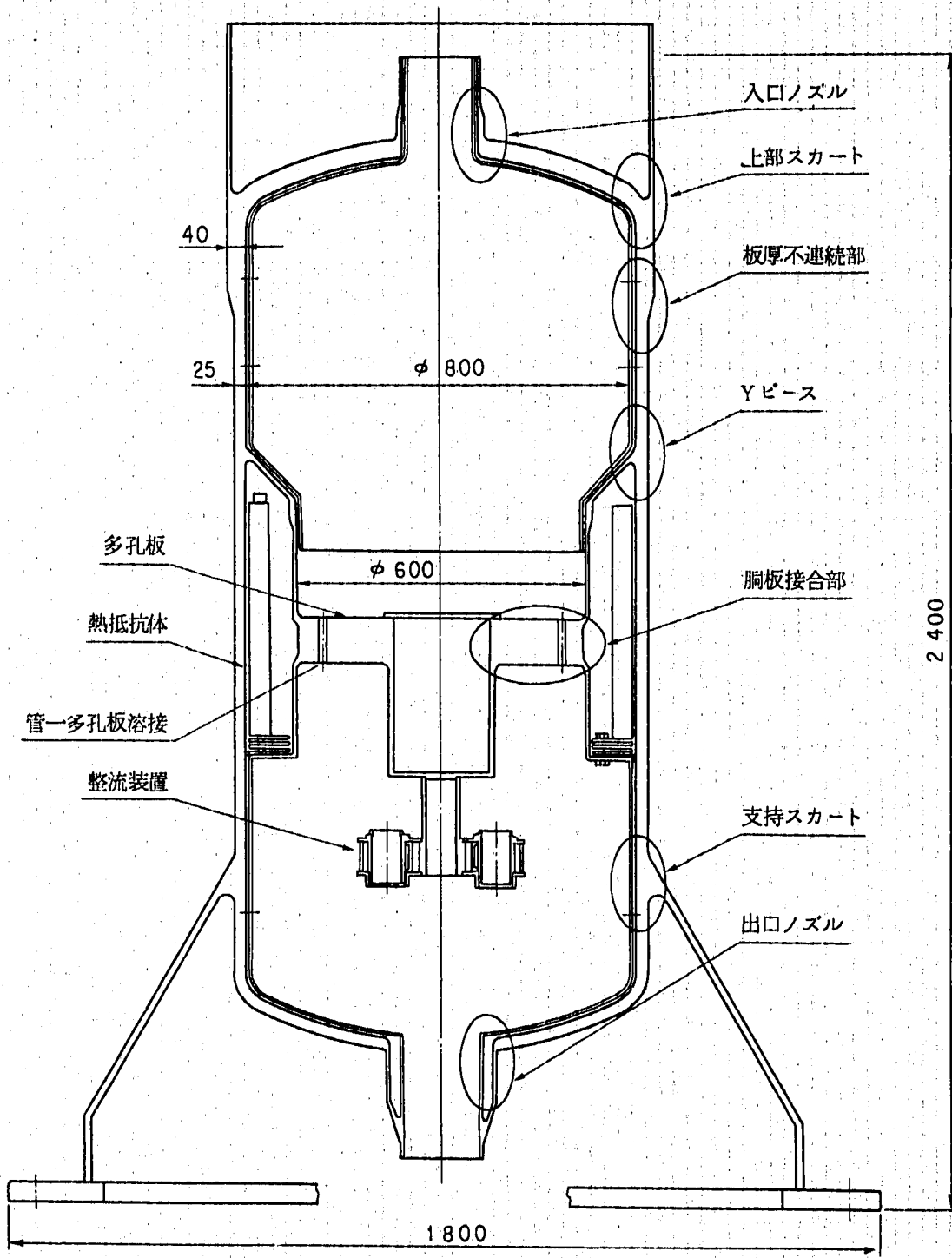


Fig. 2.1.1 Model Configuration

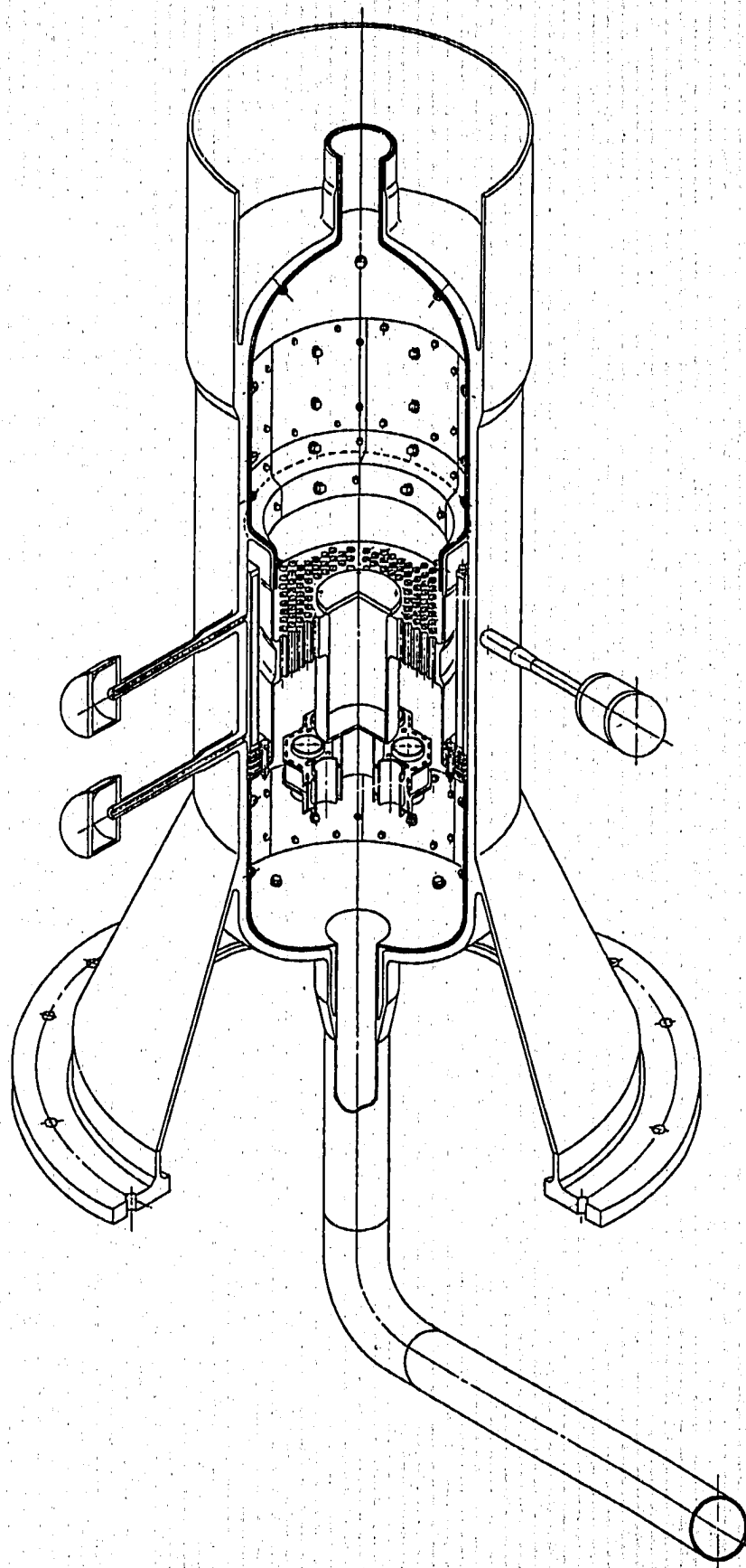


Fig. 2.1.2 Perspective View of the Model

3. 強度試験部の構造設計

3.1 伝熱流動解析

供試体設計のための熱過渡条件策定を目的として伝熱流動解析を実施した。以下に解析方法及び結果を示す。

(1) 解析方法

供試体の基本形状に従い軸対称としてモデル化した。メッシュ分割図を Fig. 3.1.1 に示す。なお伝熱解析にあたっては外胴、内部構造物及び熱抵抗体の熱伝導、熱容量を考慮している。使用した物性値を Table 3.1.1 に示す。

多孔板及び整流装置のフローホールについては流体部と構造部の断面積の比をモデル化できるようにメッシュ分割にあたって考慮した。また多孔板のフローホールについては縮流、管摩擦、拡流による圧損を考慮した。

解析には、株式会社東芝所有の汎用3次元熱流動解析コード“TRACER”を使用した。

(2) 解析条件

入口ノズルは温度及び流速指定の条件とする。解析は、熱過渡試験1サイクルのうちコールドショック及びホットショックの熱過渡についてそれぞれ行うものとした。入口ノズルの温度条件は、原子炉容器モデル熱過渡強度試験²⁾で得られた入口ノズルの温度変化を折線近似して用いた。これを Table 3.1.2 に示す。入口ノズルの流量条件は1 m³/min一定とし、入口ノズルでの流速分布は1/7乗則により設定する。また出口ノズルは圧力一定の条件とする。

解析は、乱流拡散係数を用いた層流解析とする。乱流拡散係数 ϵ_M は、入口ノズルの径 D 及び流速 V を用いた単管噴流コアの評価式により設定する。

$$\begin{aligned}\epsilon_M &= 0.012 \cdot V \cdot D \\ &= 0.001542 \text{ (m}^2/\text{s)}\end{aligned}$$

なお乱流拡散係数 ϵ_M と動粘性係数 ν との比 ϵ_M/ν は400℃のナトリウムの物性値にて設定する。

$$\epsilon_M/\nu \sim 5000$$

(3) 解析結果

コールドショック時の流況図及び温度分布図を Fig. 3.1.2 に、供試体各部の Na の温度変化を Fig. 3.1.3 に示す。

コールドショック時には、低温の流体が高温領域に入り込むため、ノズルから流入した流れは加速されて胴板接合部に衝突し、循環する流れと多孔板を通過する流れに分かれる

が、いずれも中心に近い領域が主流となっている。このため多孔板よりも下部については出口ノズルの方が支持スカート内面よりも温度変化が早くなっている。また多孔板よりも上部については循環流の影響で供試体上部になるほど温度変化が遅くなっている。

ホットショック時の流況図及び温度分布図を Fig. 3. 1. 4 に、供試体各部の Na の温度変化を Fig. 3. 1. 5 に示す。

ホットショック時には、高温の流体が低温領域に入り込むため浮力の効果でノズルから流入した流れは減速し多孔板に衝突して上部に向かう循環流は定常時に比べて遅くなるが、時間経過とともに循環流にそって高温領域が外側上部に広がっていき循環流も徐々に早くなる。従って上部鏡ナックル部は入口ノズルとほぼ同レベルであるが循環流が到達してはじめて大きな温度変化が始まるので入口ノズルに比べて温度変化が遅い。多孔板よりも下部については多孔板を通過する流れに沿って高温領域が広がるため下方になるほど温度変化が遅い。

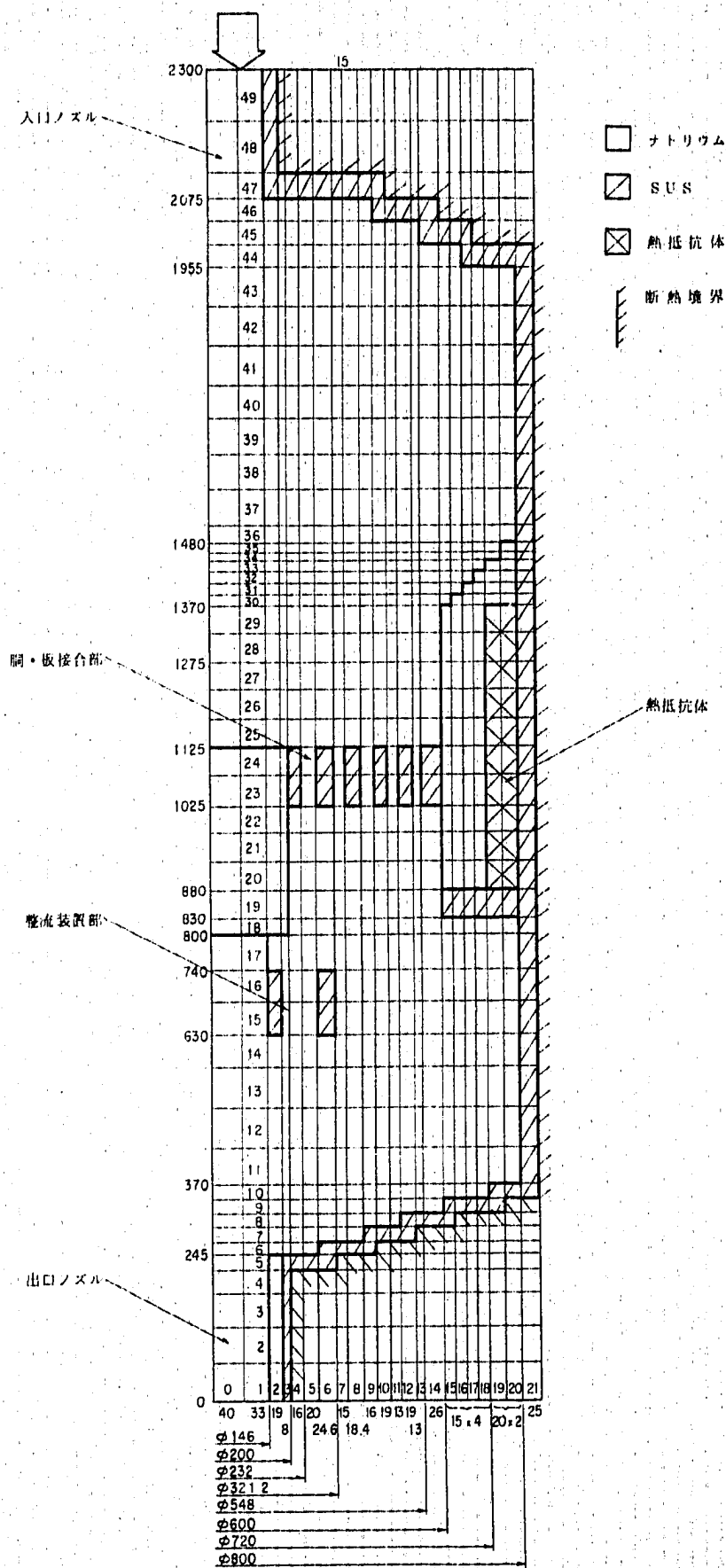


Fig. 3.1.1. Thermo - hydraulic Analysis Model

Table 3.1.1 Material Properties for
Thermo - Hydraulic Analysis

材 料	熱伝導率 λ (kcal/mh °C)	熱容量 γC_p (kcal/m ³ °C)
SUS 304	17.9	1.06×10^3
ナトリウム	61.6	2.61×10^3
熱抵抗体	1.8	2.00×10^2

注記 物性値は 400 °C の値を使用した。

Tabl. 3.1.2 Thermal Transient Condition (Inlet Nozzle)

コールドショック時

時 間 sec	0	10	22	29	43	65
温 度 °C	590	300	265	254	252	250

ホットショック

時 間 sec	0	7	17	25	40	50	81	180
温 度 °C	250	500	550	566	577	586	588	590

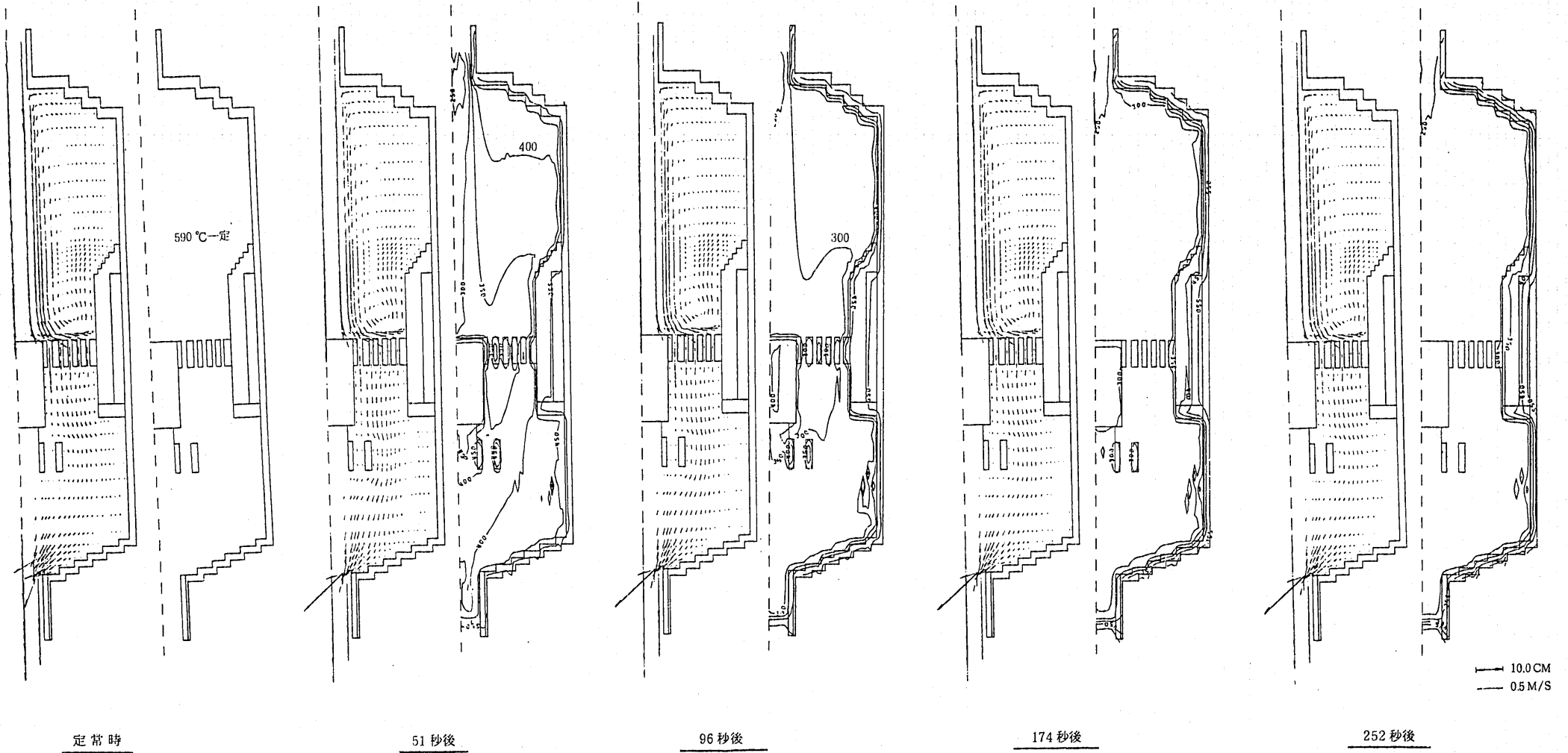


Fig. 3.1.2 Flow Patterns and Temperature Contours (Cold Shock)

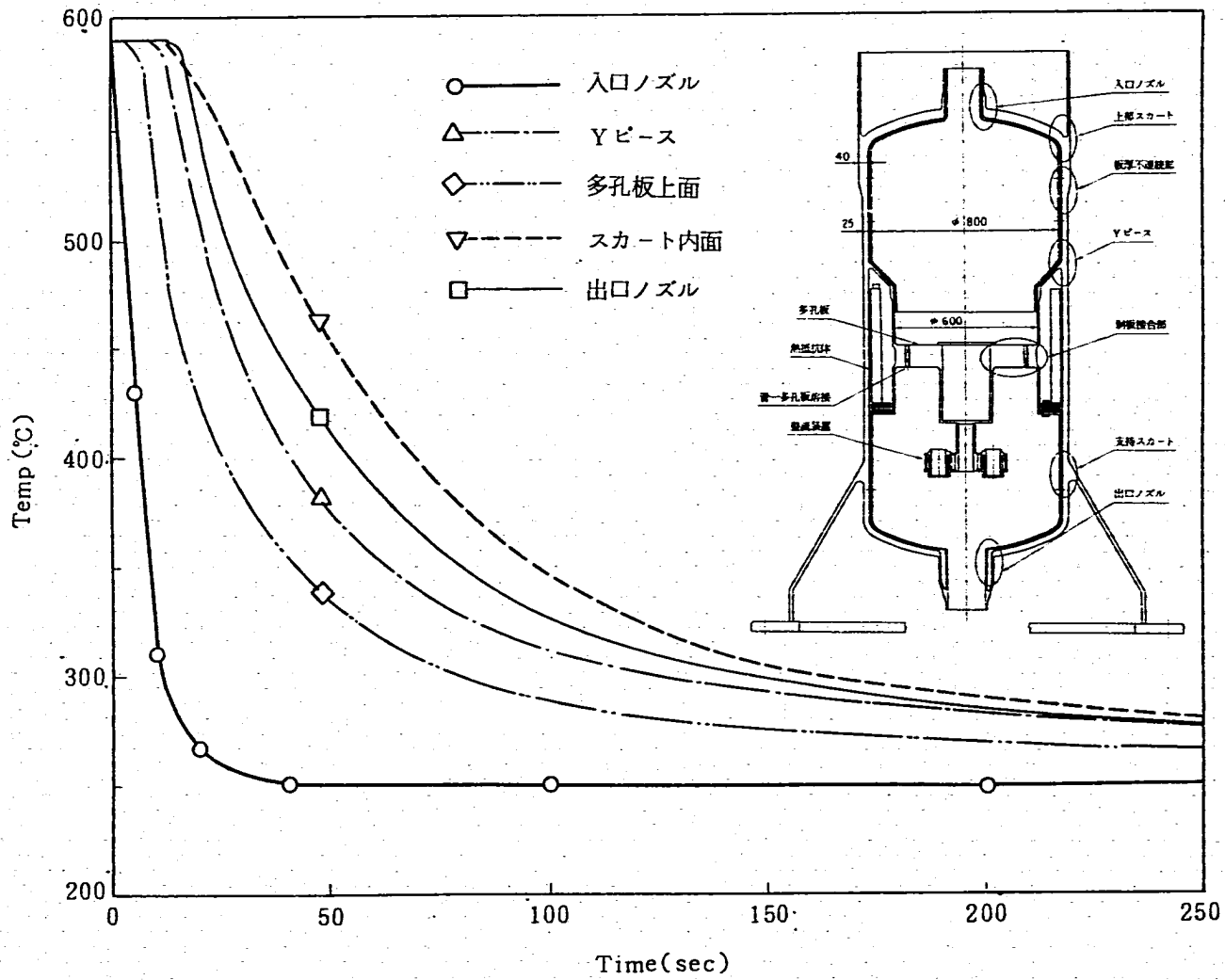


Fig. 3.1.3 Temperature Change (Cold Shock)

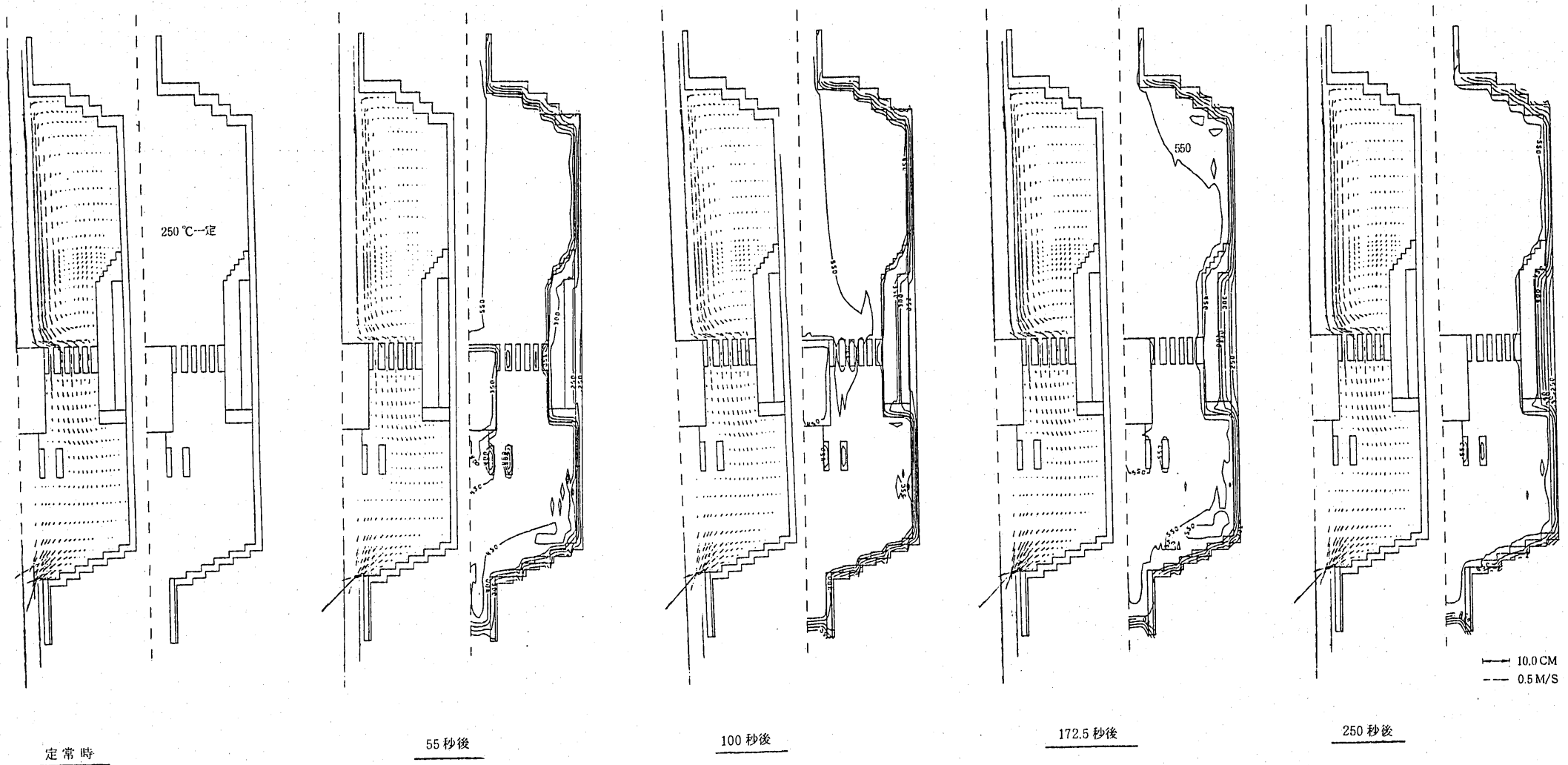


Fig. 3.1.4 Flow Patterns and Temperature Contours (Hot Shock)

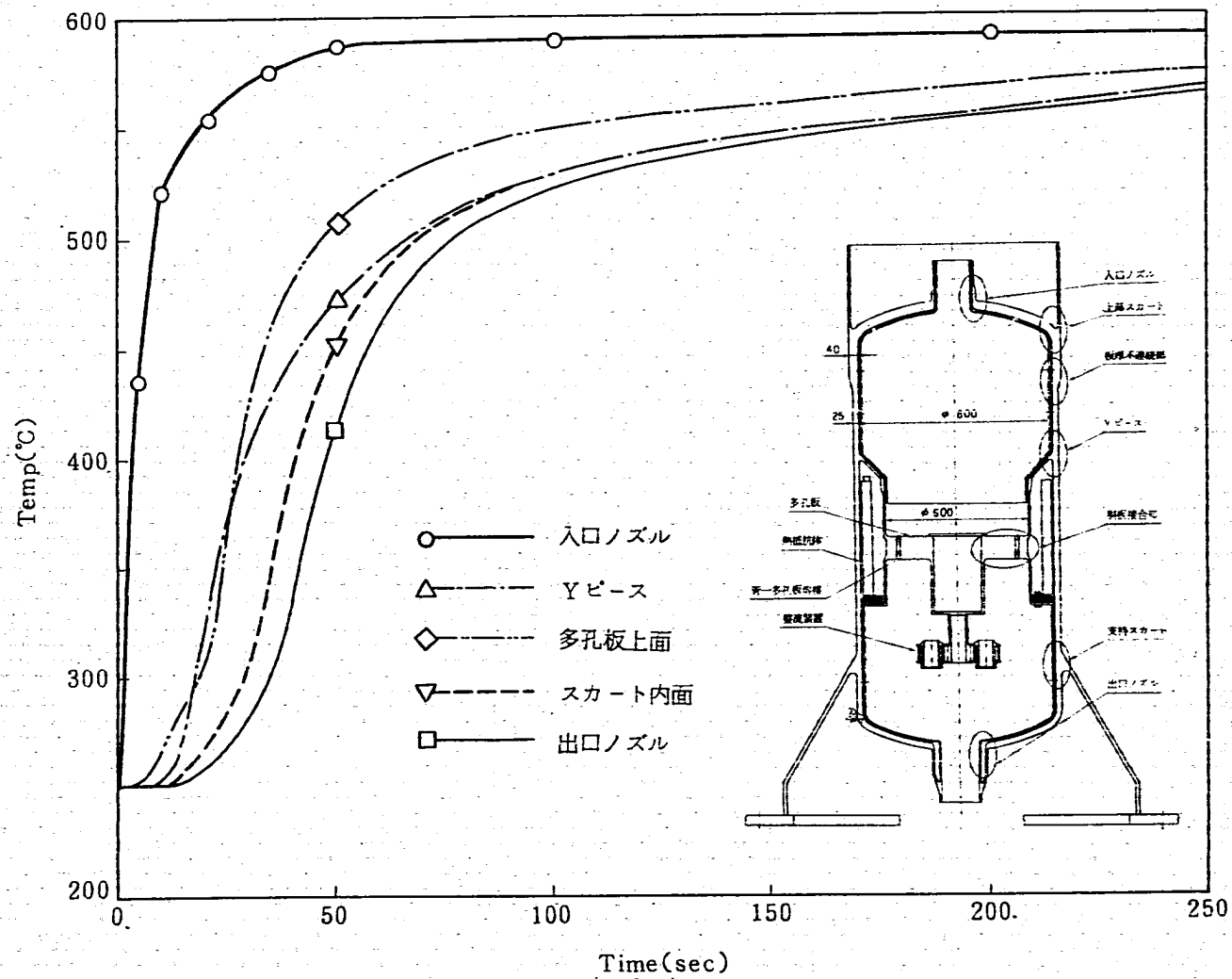


Fig. 3.1.5 Temperature Change (Hot Shock)

3.2 熱応力解析

(1) 解析部位

強度試験部の評価を目的として熱応力解析を実施した。次節以降に各部位毎の結果を示す。

なお、解析は下記の7モデルについて実施した。Fig. 3.2.1にモデルの概要を示す。

- ① 入口ノズル及び上部スカート
- ② 板厚不連続部
- ③ Yピース
- ④ 胴板接合部
- ⑤ 支持スカート
- ⑥ 出口ノズル
- ⑦ 熱抵抗体下部

(2) 解析コード

有限要素法応力解析プログラム“SAP”を用いる。使用要素は、3節点軸対称ソリッド要素及び4節点軸対称ソリッド要素とする。

(3) 物性値

熱伝導解析では物性値として Table 3.2.1 に示す 400 °C の値を使用した。熱応力解析では物性値の温度依存を考慮した Table 3.2.2 に示す値を使用した。ナトリウム及び強度に関係しない SUS 304 は縦弾性係数に十分小さな値を与えた。

(4) 熱過渡条件

熱伝導解析における熱過渡条件としては、伝熱流動解析による流体温度変化を用いるものとした。なお部位によっては妥当性を検討のうえ原子炉容器モデル試験データを用いたところがある。

ナトリウムと構造材の熱伝達率は、伝熱流動解析結果と従来の試験データをもとに定めた。構造材と外気との熱伝達率は 10 kcal/m² h °C を使用する。

Tabil. 3.2.1 Material Properties for Heat Transfer Analysis

材 料	熱伝導率 λ (kcal/mh °C)	熱容量 γ Cp (kcal/m ³ °C)
S U S 304	17.9	1.06×10^3
ナトリウム	61.6	2.61×10^3
熱抵抗体	1.8	2.00×10^3

Table 3.2.2 Material Properties for Thermal Stress Analysis
(SUS304)

温度 (°C)	縦弾性係数 E (kg/mm ²)	ポアソン比 ν	熱膨張係数 α (10 ⁻⁶ mm/mm/°C)
20	19900	0.300	—
50	19700	0.300	15.45
75	19600	0.300	15.63
100	19400	0.300	15.82
125	19200	0.300	16.00
150	19000	0.300	16.18
175	18900	0.300	16.37
200	18700	0.300	16.54
225	18600	0.300	16.72
250	18400	0.300	16.88
275	18200	0.300	17.04
300	18000	0.300	17.20
325	17800	0.300	17.34
350	17600	0.300	17.47
375	17400	0.300	17.58
400	17200	0.300	17.69
425	17000	0.300	17.78
450	16700	0.300	17.89
475	16400	0.301	18.00
500	16200	0.302	18.12
525	15900	0.304	18.23
550	15700	0.306	18.33
575	15400	0.308	18.44
600	15200	0.310	18.54
625	14900	0.312	18.64
650	14700	0.314	18.74

3.2.1 入口ノズル及び上部スカート

入口ノズル部では熱過渡による板厚方向温度分布及び鏡部の変形が応力要因となるため上部スカート部も同じモデル内で解析を行った。

スカートでは定常的な温度サイクルを考慮する必要があり、熱伝導解析では3サイクルの解析を行った。熱応力解析には、3サイクル目の熱伝導解析を使用した。

解析対象部の熱伝導解析の物性値の区分、熱伝導解析境界条件 Fig. 3.2.1.1, 2 に示す。

熱過渡条件図を Fig. 3.2.1.3 に示す。

評価断面及び評価点における応力解析結果を Table 3.2.1.1 に示す。

3.2.2 板厚不連続部

解析対象部の熱伝導解析の物性値の区分、熱伝導解析境界条件を Fig. 3.2.2.1, 2 に示す。

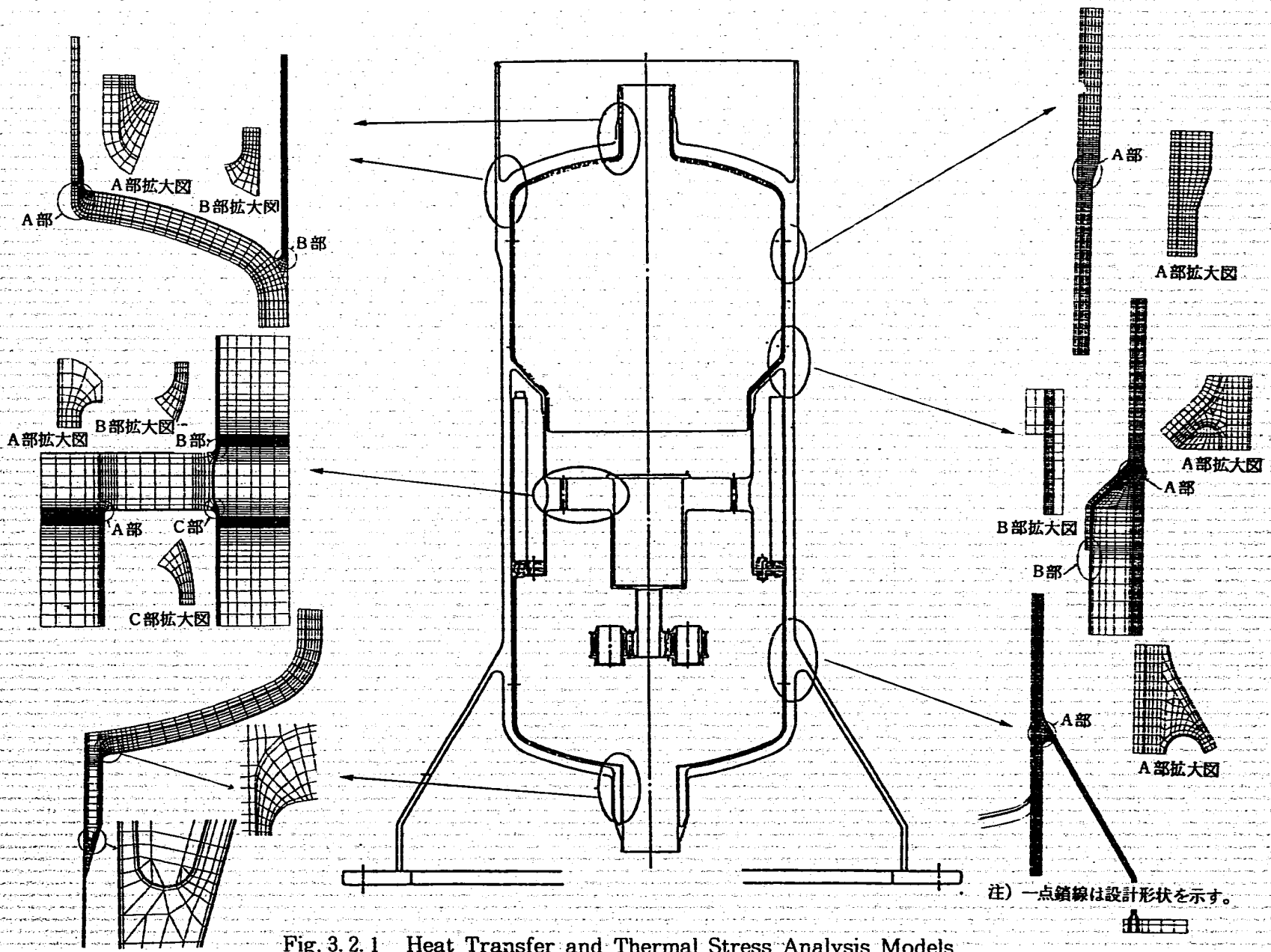


Fig. 3.2.1 Heat Transfer and Thermal Stress Analysis Models

注) 一点鎖線は設計形状を示す。

熱過渡条件図を Fig. 3. 2. 2. 3 に示す。

評価断面及び評価点における応力解析結果を Table. 3. 2. 2. 1 に示す。

3. 2. 3 Yピース

Yピース部において熱抵抗体は Table. 3. 2. 1 に示した等価物性値にモデル化した。熱抵抗体廻りのナトリウム領域については、次に示すような等価熱伝導率 λ_{eq} でモデル化した。対流により熱移動が促進される場合は $\lambda_{eq} = 12.5 \lambda_{Na}$ 、対流が無視できる場合は $\lambda_{eq} = \lambda_{Na}$ とした。ここで λ は熱伝導率である。具体的には、径方向等価伝導率は $12.5 \lambda_{Na}$ とし、周方向等価熱伝導率は領域の上方から冷却あるいは下方から加熱される場合は $12.5 \lambda_{Na}$ 、領域の上方から加熱あるいは下方から冷却される場合は λ_{Na} とした。ここで等価熱伝導率に使用した 12.5 という値は、閉領域ナトリウムの自然対流試験での知見をベースに設定した値である。

解析対象部の熱伝導解析の物性値の区分、熱伝導解析境界条件を Fig. 3. 2. 3. 1, 2 に示す。熱過渡条件図を Fig. 3. 2. 3. 3 に示す。

評価断面及び評価点における応力解析結果を Table. 3. 2. 3. 1 に示す。

3. 2. 4 胴板接合部

熱伝導解析は 2 段階にわけて実施した。まず一つの穴廻りの領域を同一体積の円筒にモデル化し熱伝導解析を行い多孔板部の温度分布を求める。次に全体モデルで熱伝導解析を行う。このとき多孔板の温度は円筒モデル解析の結果を用いる。

熱応力解析においてはリガメント部の等価縦弾性係数、等価ポアソン比及びリガメント範囲は ASME Sec. III A-8000 により定めた。

熱抵抗体廻りのナトリウム領域に関しては Y ピースと同様の考え方で設定した。

解析対象部の熱伝導解析の物性値の区分、全体モデルの熱伝導解析境界条件、1 リガメントモデルの熱伝導解析境界条件及び熱応力解析の物性値の区分をそれぞれ Fig. 3. 2. 4. 1 ~ 4 に示す。熱過渡条件図を Fig. 3. 2. 4. 5 に示す。

評価断面及び評価点における応力解析結果を Table. 3. 2. 4. 1 に示す。

3. 2. 5 支持スカート

スカートでは定常的な温度サイクルを考慮する必要があり、熱伝導解析では 4 サイクルの解析を行った。熱応力解析には、4 サイクル目の熱伝導解析を使用した。

解析対象部の熱伝導解析の物性値の区分、熱伝導解析境界条件を Fig. 3. 2. 5. 1, 2 に示す。

熱過渡条件図を Fig. 3. 2. 5. 3 に示す。

評価断面及び評価点における応力解析結果を Table. 3. 2. 5. 1 に示す。

3. 2. 6 出口ノズル

解析対象部の熱伝導解析の物性値の区分、熱伝導解析境界条件を Fig. 3. 2. 6. 1, 2 に示す。

熱過渡条件図を Fig. 3. 2. 6. 3 に示す。

評価断面及び評価点における応力解析結果を Table. 3. 2. 6. 1 に示す。

3. 2. 7 熱抵抗体下部

解析対象部の熱伝導解析の物性値の区分、熱伝導解析境界条件を Fig. 3. 2. 7. 1, 2 に示す。

熱過渡条件図を Fig. 3. 2. 7. 3 に示す。

評価断面及び評価点における応力解析結果を Table. 3. 2. 7. 1 に示す。

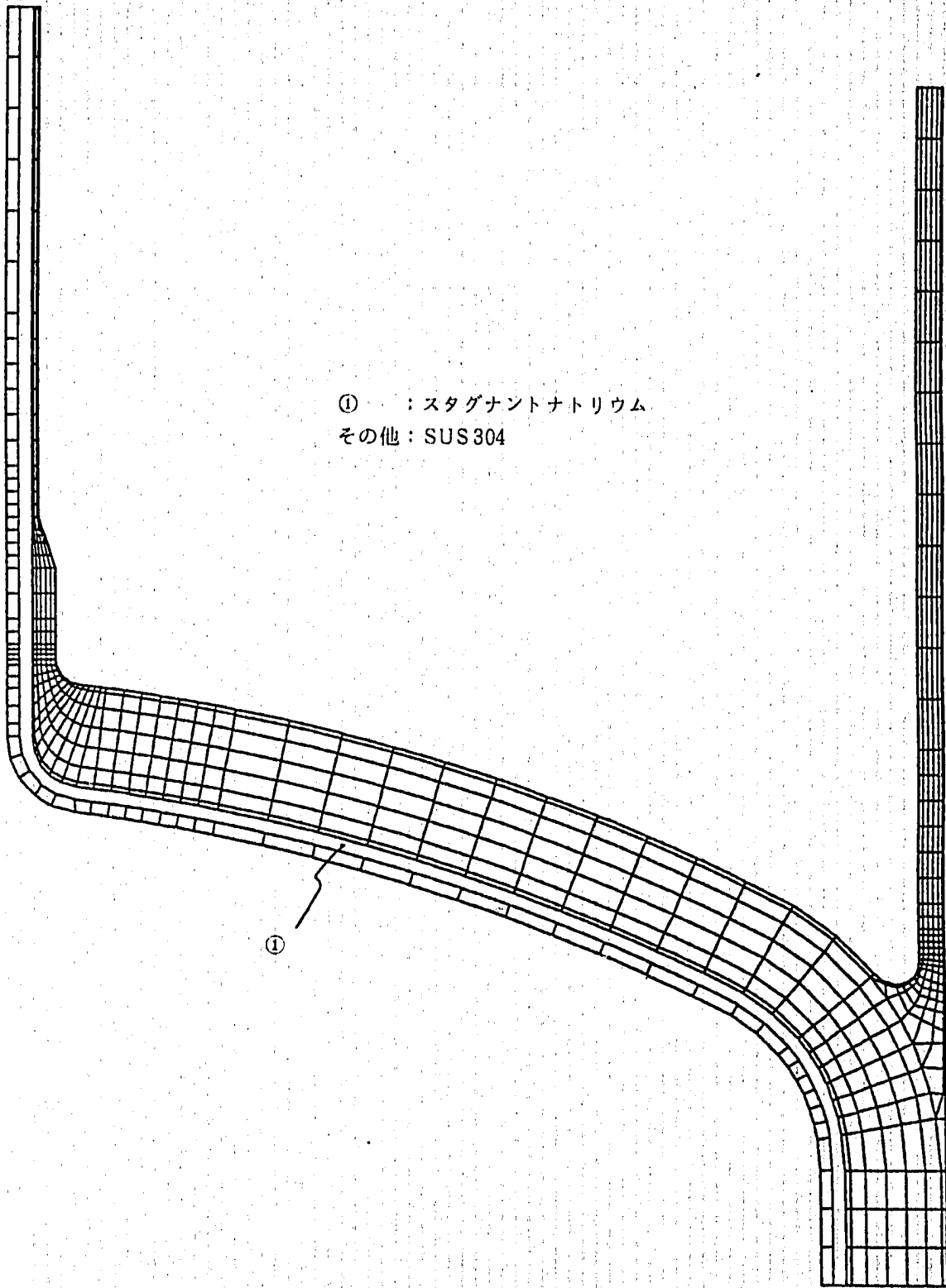


Fig. 3.2.1.1 Material Segmentation

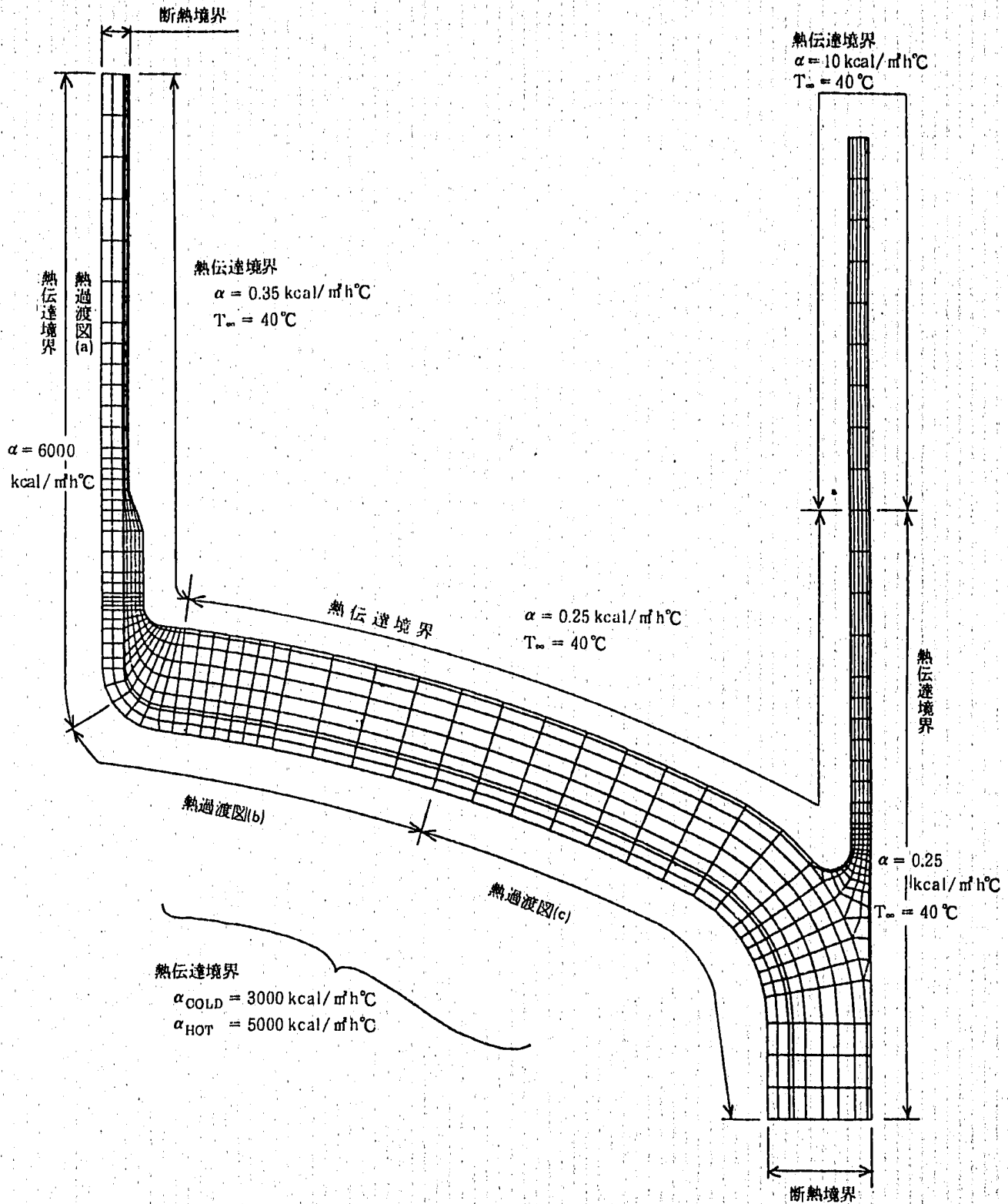


Fig. 3.2.1.2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis

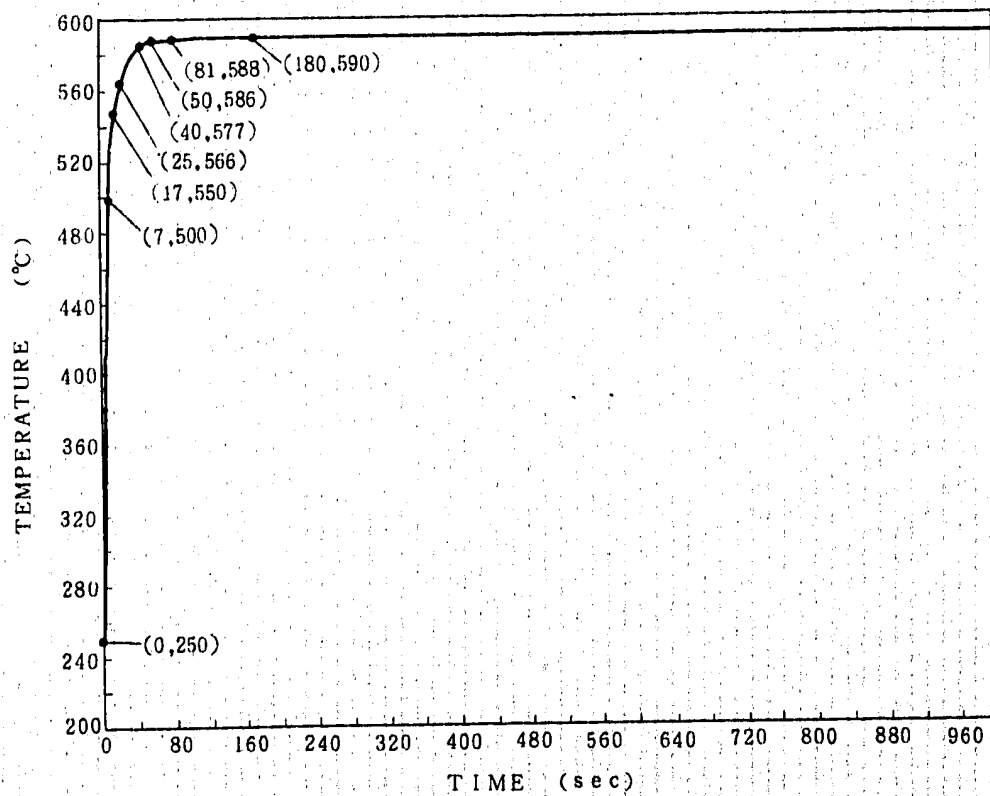
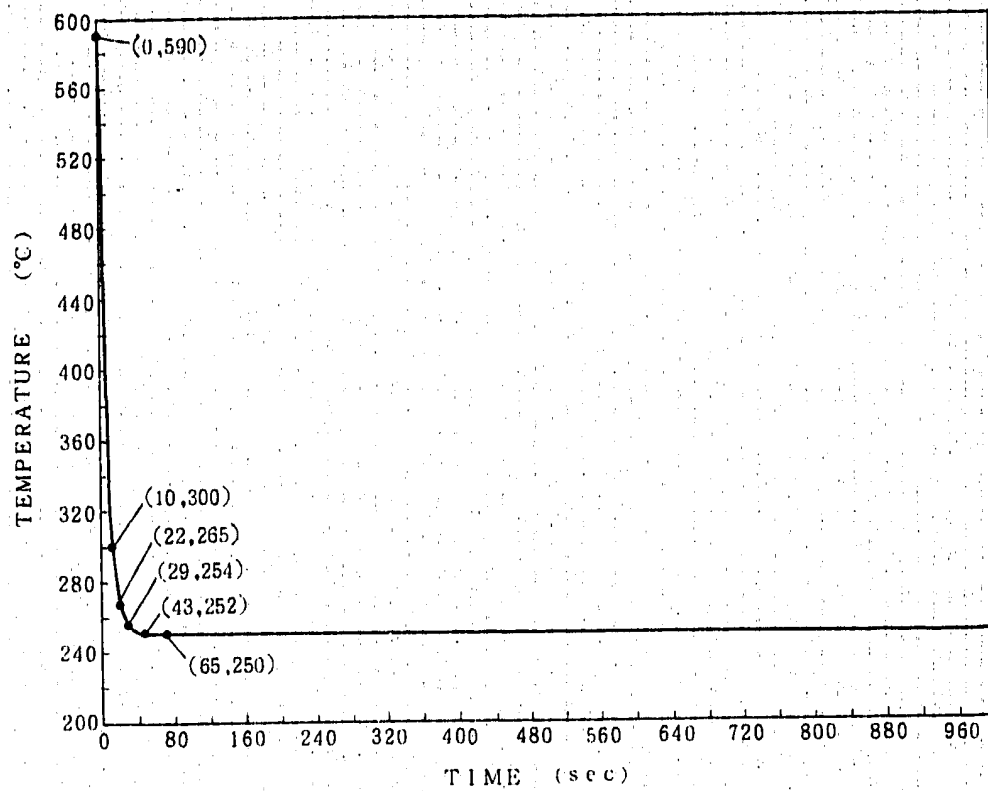


Fig. 3.2.1.3 Thermal Transient Condition
(a) Inlet Nozzle

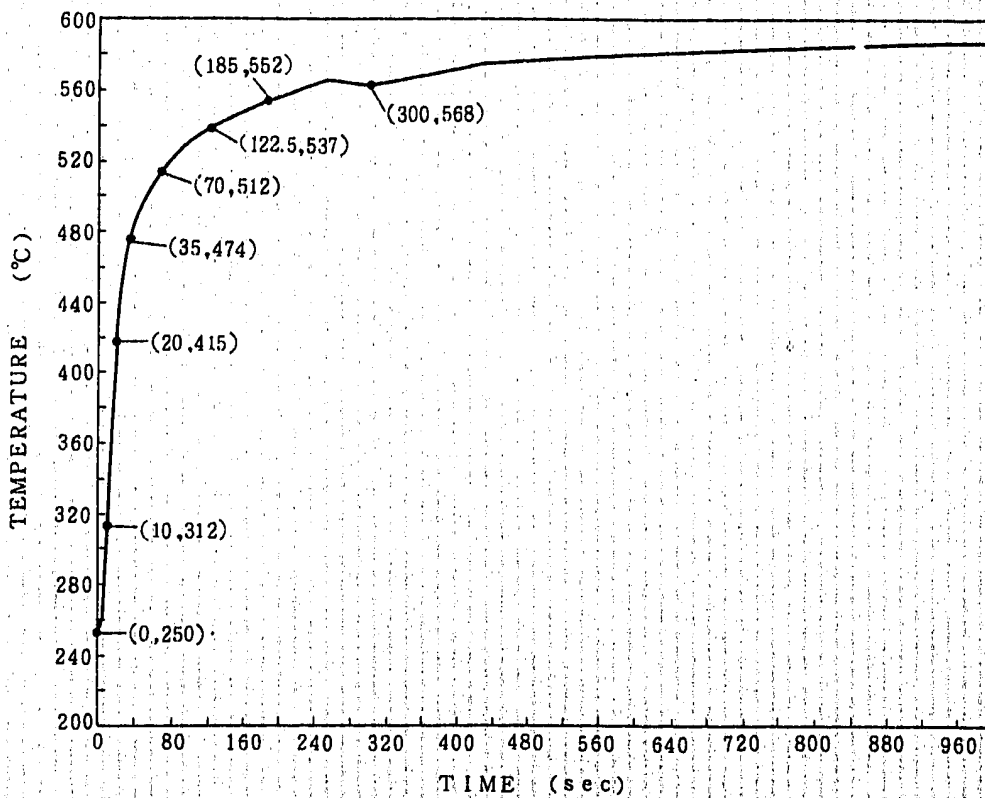
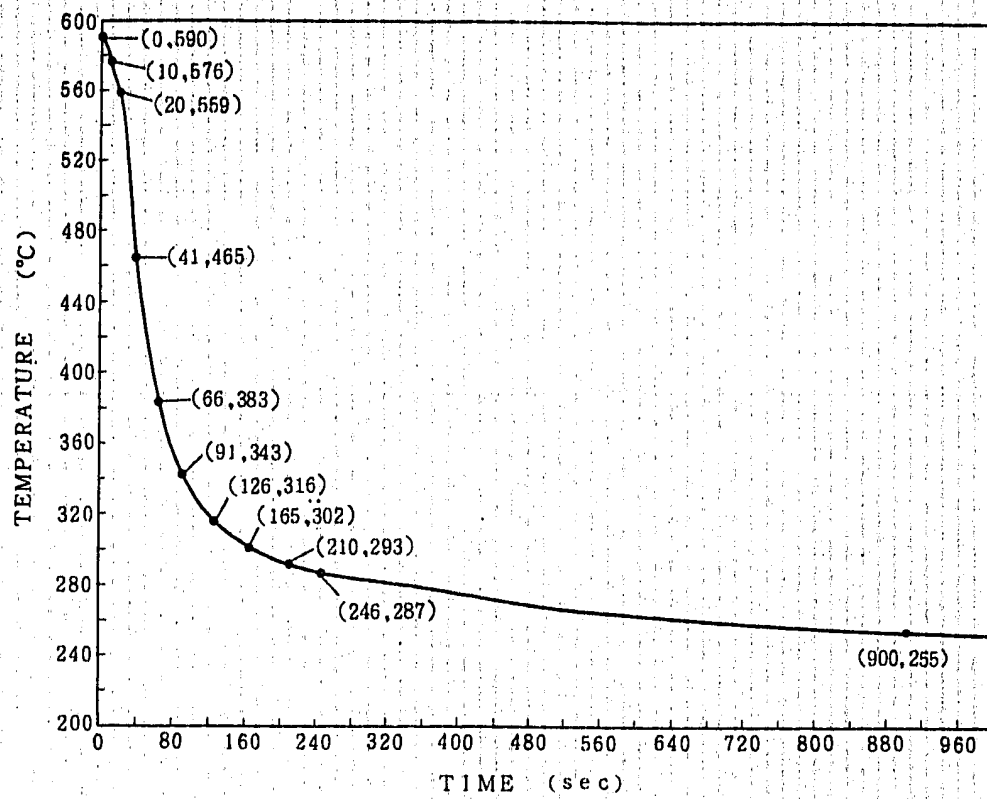


Fig. 3.2.1.3 Thermal Transient Condition
(b) Upper Head

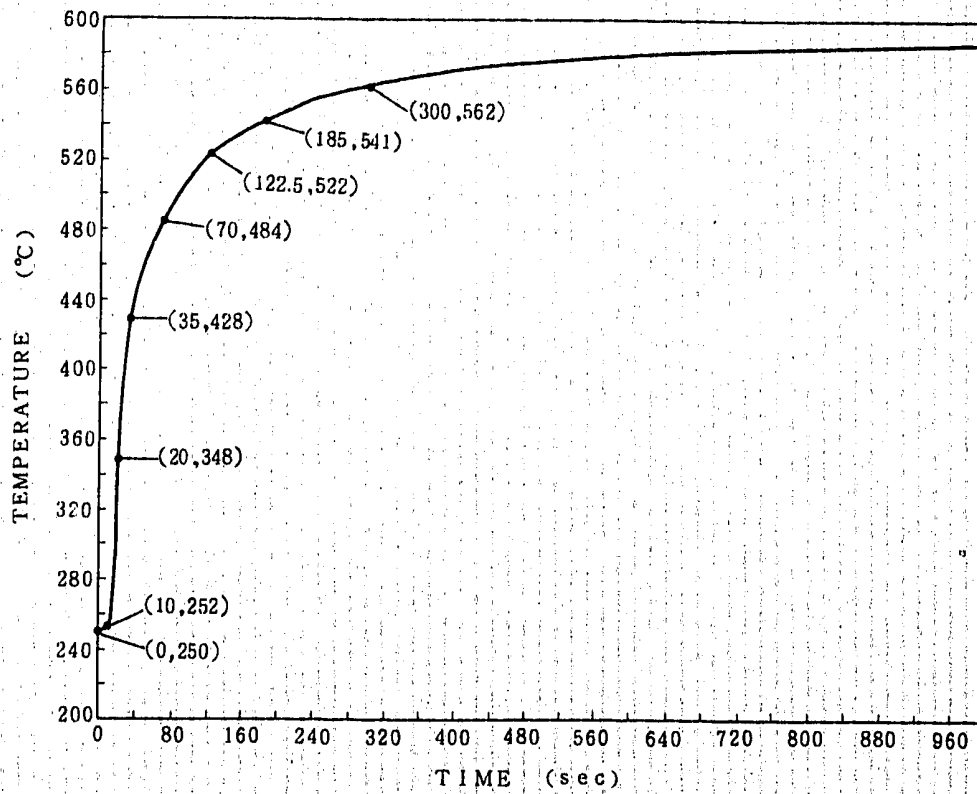
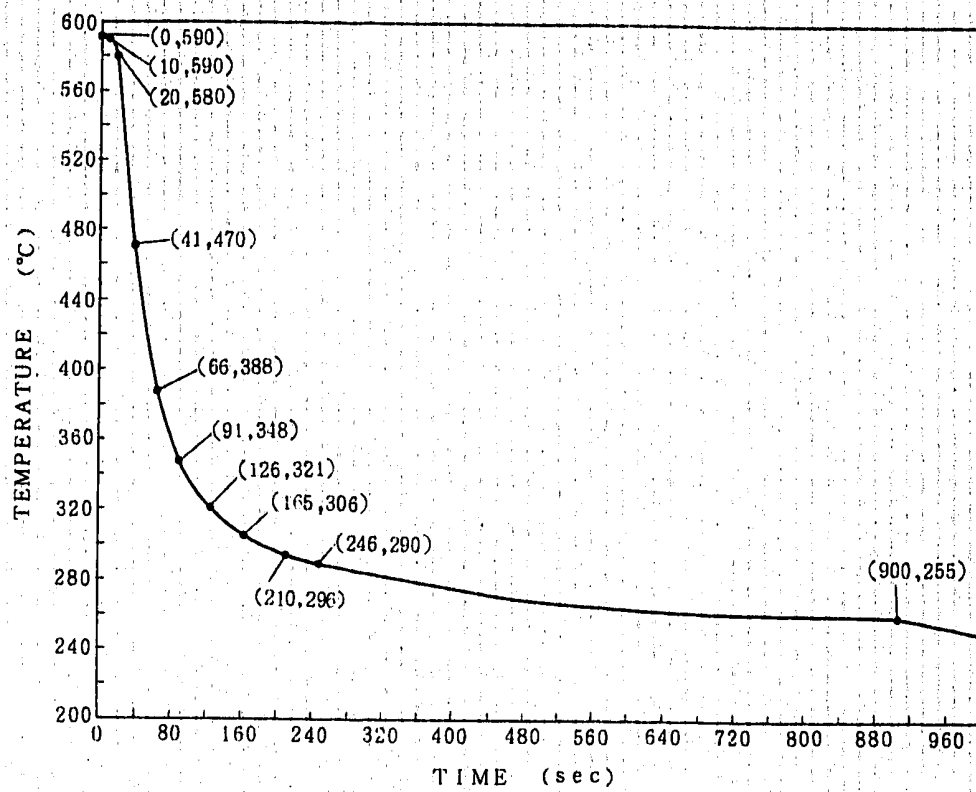
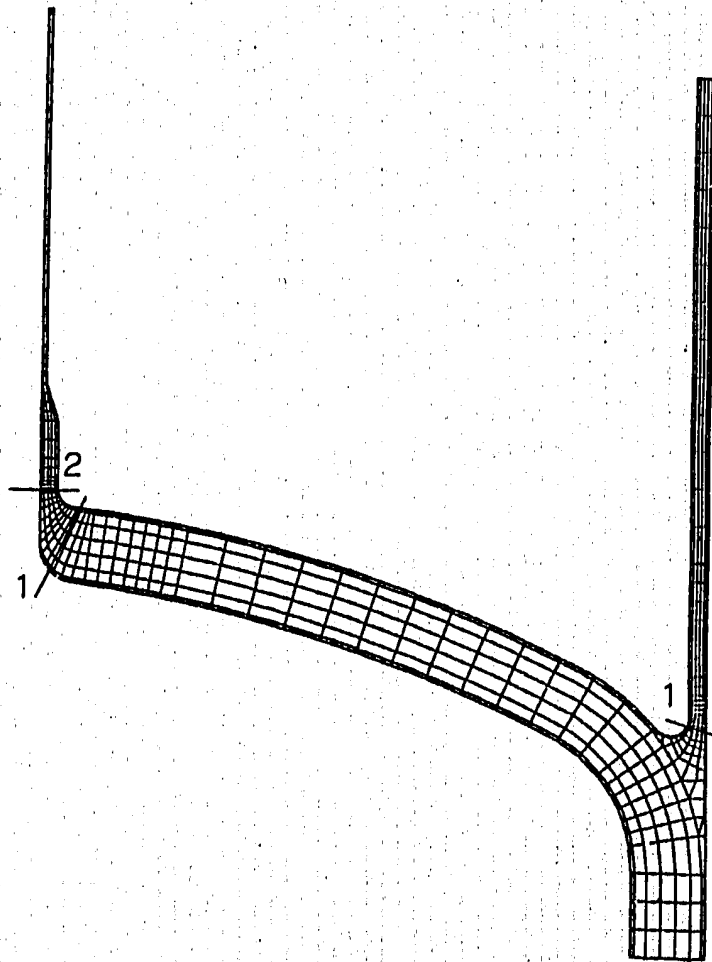
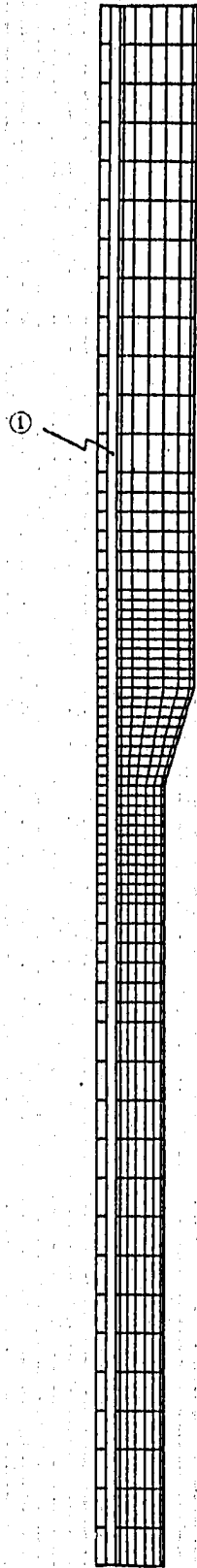


Fig. 3.2.1.3 Thermal Transient Condition
(c) Knuckle Portion

Table 3.2.1.1 Summary of Stress Analysis

Location	Time	Temp	σ_r	σ_z	σ_θ	τ_{rz}	$\sigma_{\theta q}$	$\Delta\sigma$
入口ノズル	C 150	338.2	-0.38	11.47	64.00	0.45	59.35	119.25
1 内 面	H 75	470.6	0.54	-16.40	-66.00	-0.59	59.90	
入口ノズル	C 150	310.2	-1.41	-51.45	-20.93	3.90	44.20	89.03
2 外 面	C 150	535.4	1.55	52.61	25.97	-4.22	44.83	
上部スカート	C 750	368.5	0.71	30.81	-8.72	0.37	35.77	141.71
1 内 面	H 750	440.0	-2.55	-110.10	-5.85	-0.47	105.94	





① : スタグナントナトリウム
その他 : SUS304

Fig. 3.2.2.1 Material Segmentation

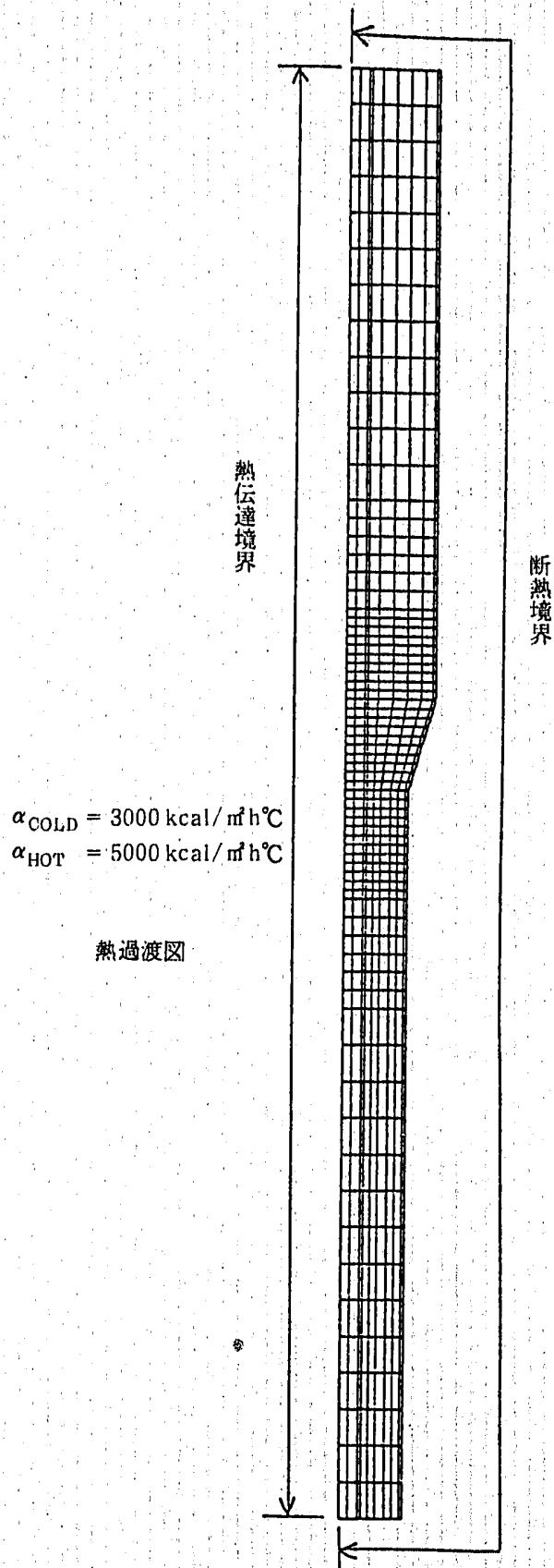


Fig. 3.2.2.2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis

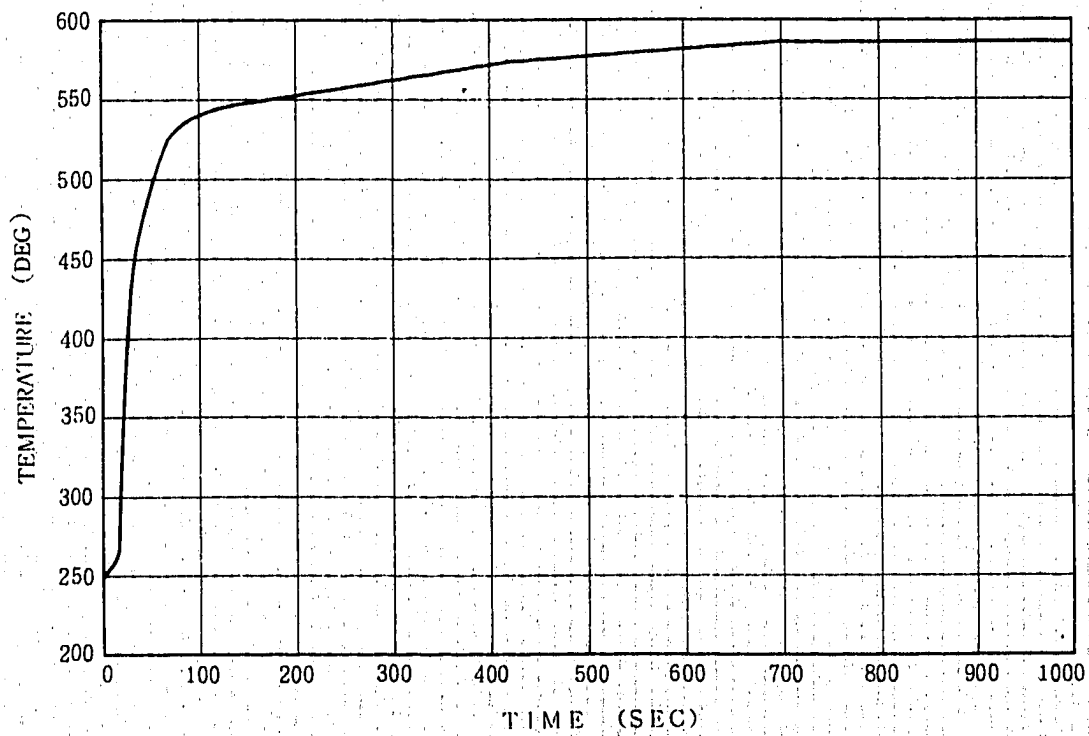
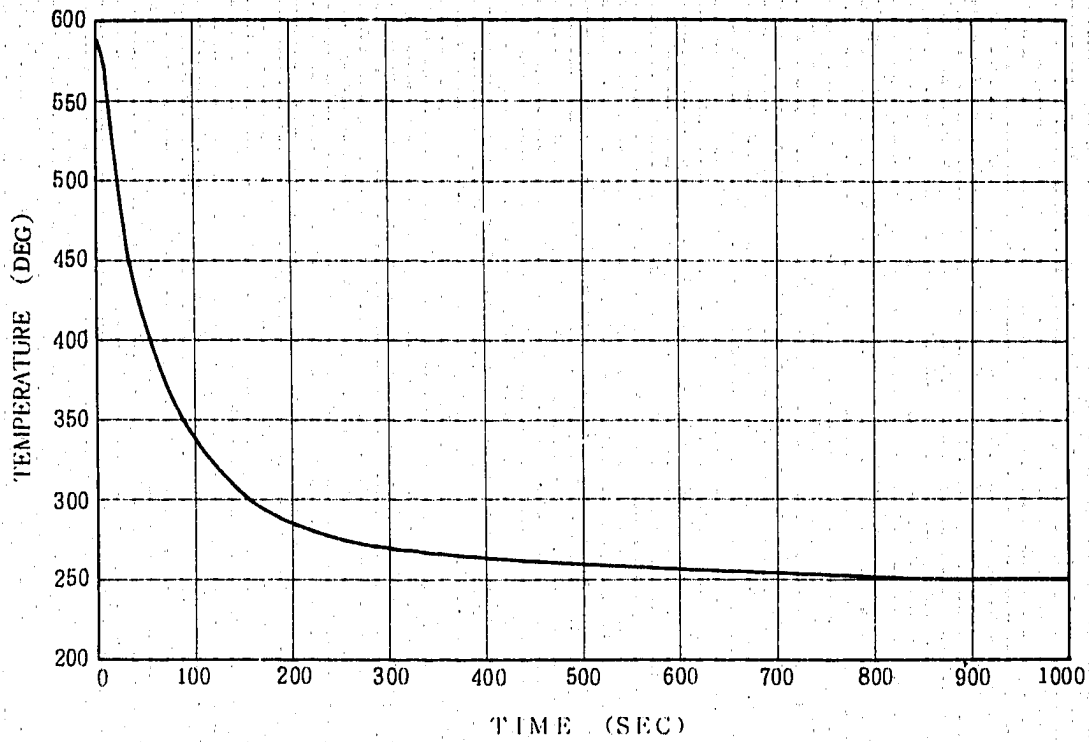
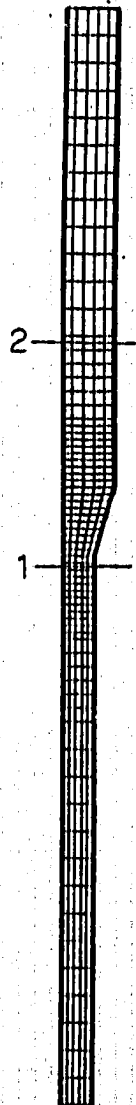
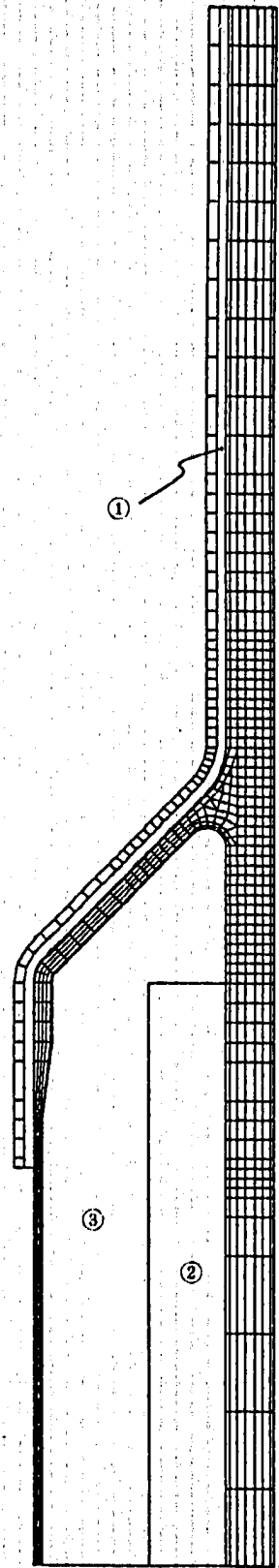


Fig. 3.2.2.3 Thermal Transient Condition

Table. 3. 2. 2. 1 Summary of Stress Analysis

Location	Time	Temp	σ_r	σ_z	σ_θ	τ_{rz}	σ_{eq}	Δv
板厚不連続 1 内 面	C 100	439.5	0.00	37.14	29.90	- 0.03	34.10	79.03
	H 75	419.1	0.00	- 48.57	- 40.07	0.03	44.93	
板厚不連続 2 内 面	C 100	443.4	- 0.15	36.22	42.56	0.08	39.92	88.98
	H 100	444.0	0.17	- 45.29	- 51.83	- 0.11	49.06	





- ① : スタグナントナトリウム
- ② : 熱抵抗体
- ③ : 対流を考慮したナトリウム

Cold Shock時

$$\begin{cases} \lambda_{eqR} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ \lambda_{eqZ} = 61.6 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \end{cases}$$

Hot Shock時

$$\begin{cases} \lambda_{eqR} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ \lambda_{eqZ} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \end{cases}$$

その他 : SUS304

Fig. 3.2.3.1 Material Segmentation.

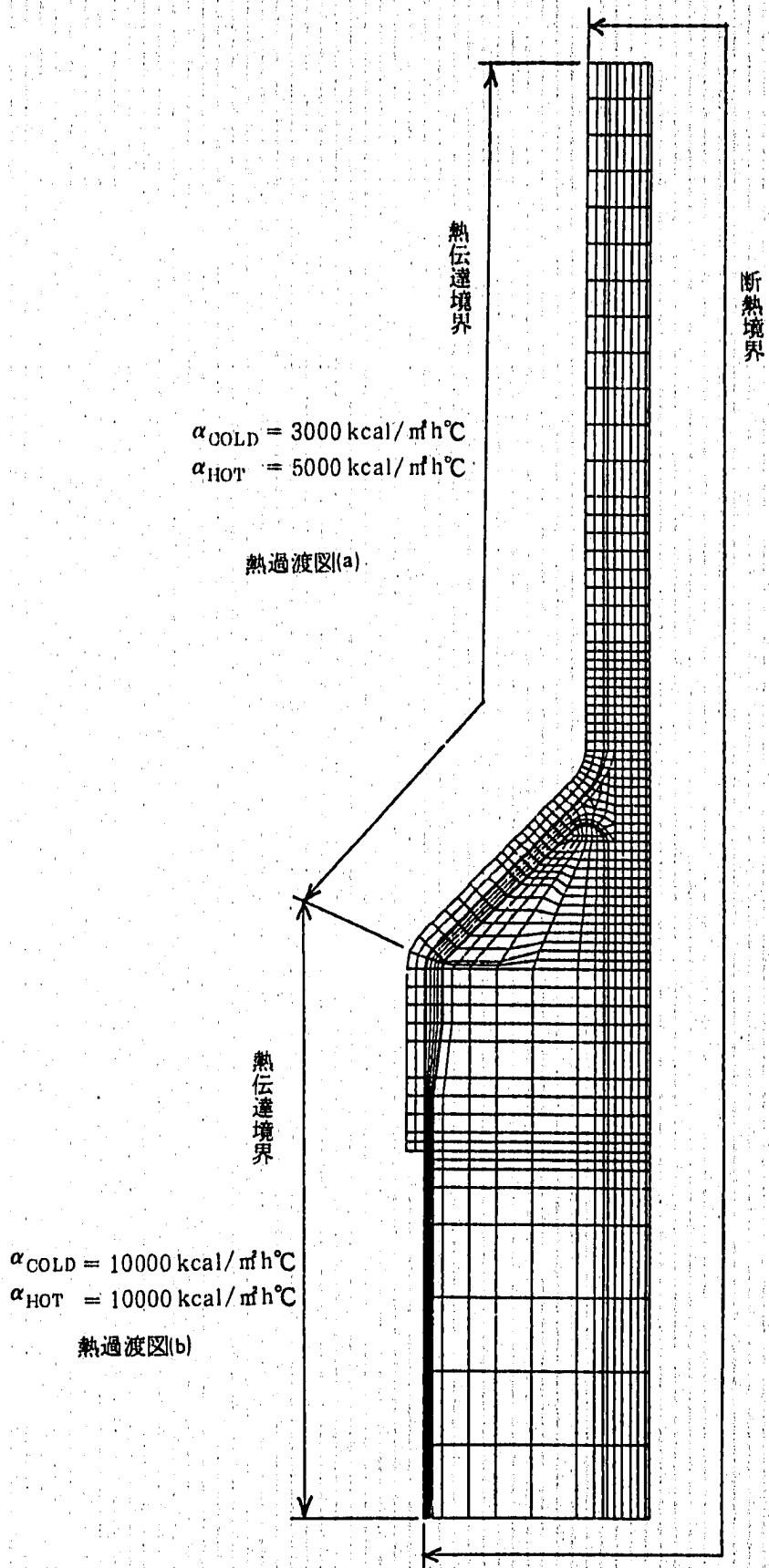


Fig. 3. 2. 3. 2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis

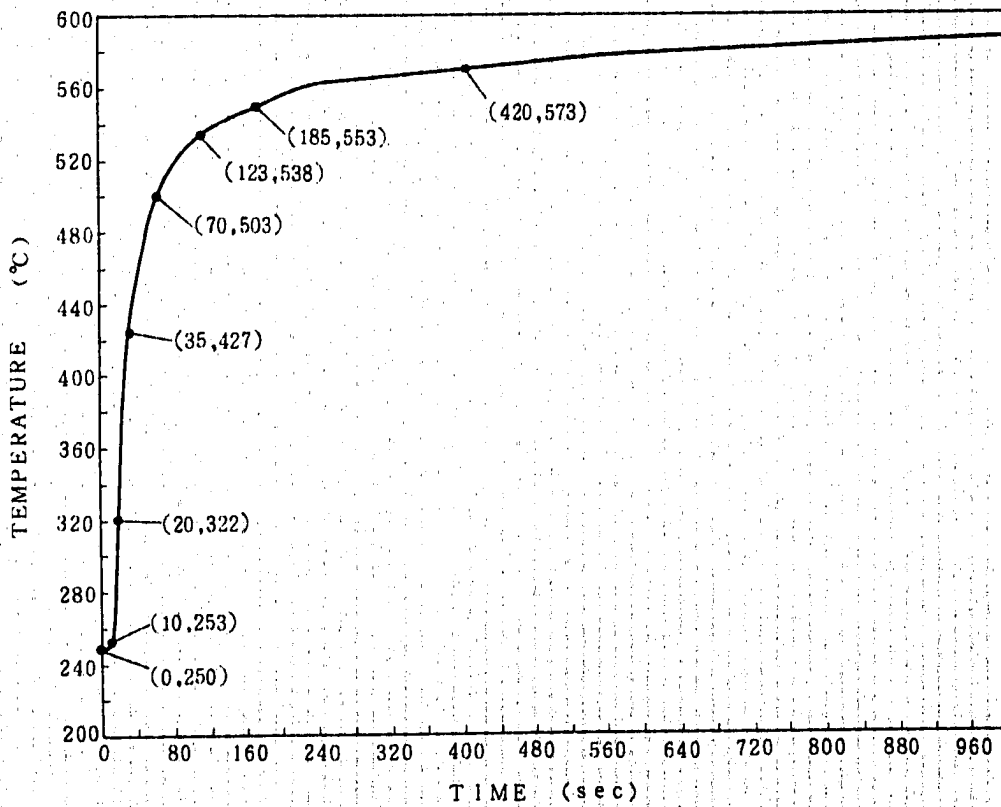
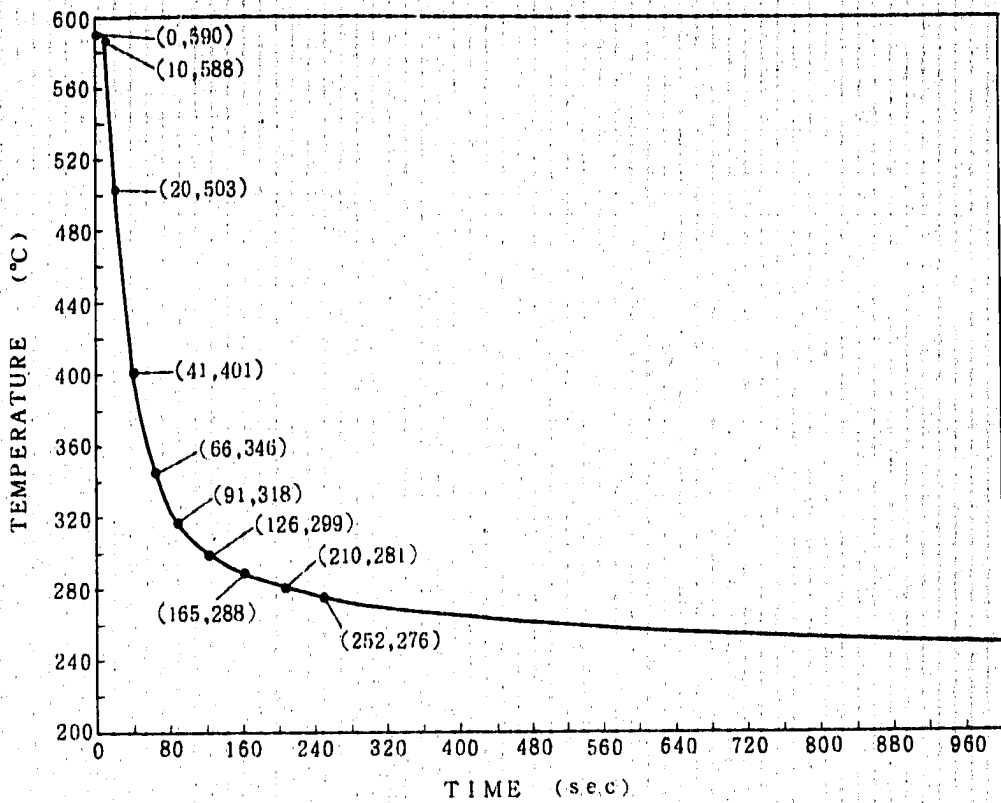


Fig. 3.2.3.3 Thermal Transient Condition
(a) Y-junction

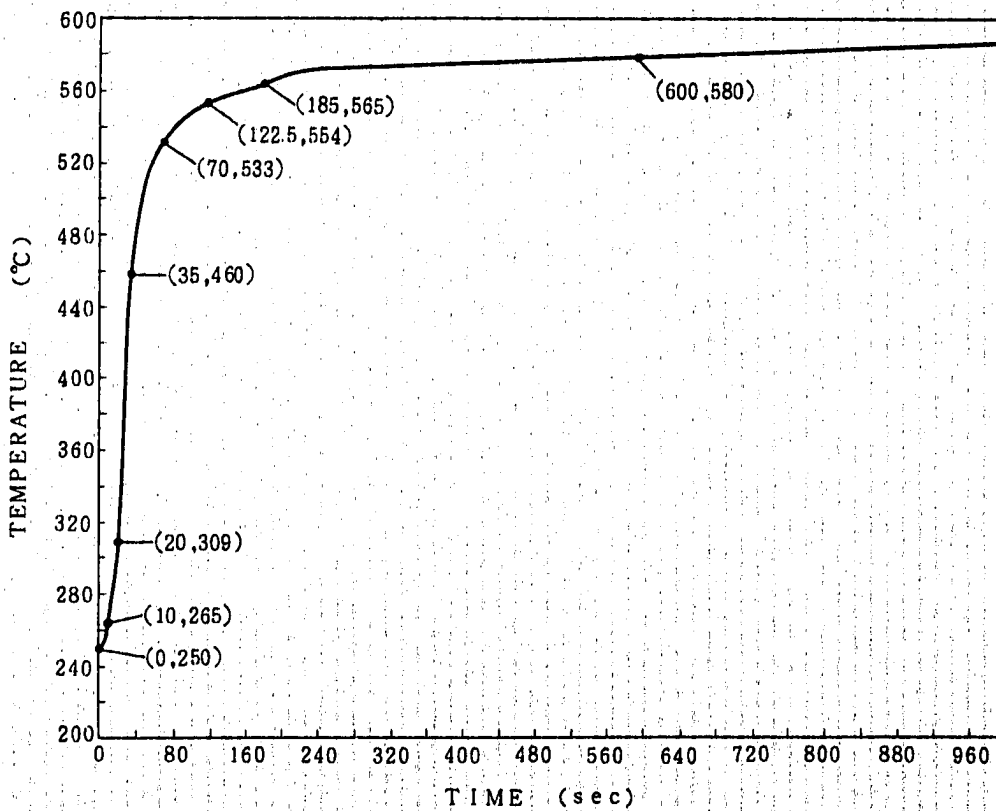
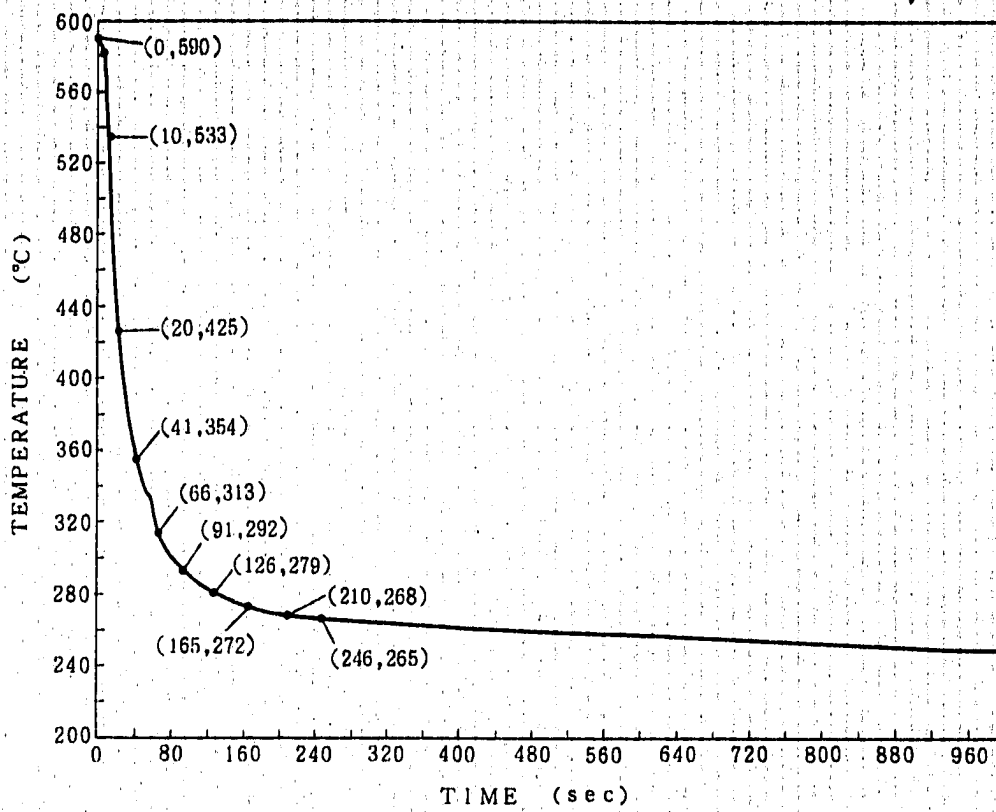
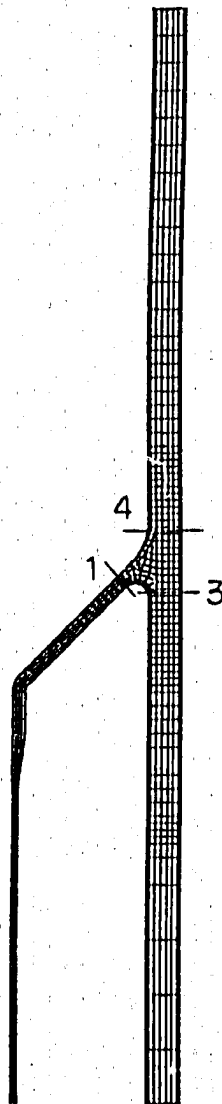


Fig. 3.2.3.3 Thermal Transient Condition
 (b) Upper Part of Perforated Plate

Table. 3.2.3.1 Summary of Stress Analysis

Location	Time	Temp	σ_r	σ_z	σ_θ	τ_{rz}	$\sigma_{\theta z}$	$\Delta\sigma$
Y ピース 1 内 面	C 150	392.1	- 0.08	- 17.26	23.08	0.21	35.07	77.90
	H 150	485.4	0.13	27.69	- 21.05	- 0.21	42.83	
3 内 面	C 200	425.8	5.18	48.07	20.98	2.87	37.90	90.57
	H 150	442.2	- 6.97	- 67.16	- 38.83	- 4.23	52.67	
4 内 面	C 150	394.0	1.57	38.57	32.56	- 2.80	34.73	75.16
	H 100	422.4	- 1.82	- 45.40	- 37.03	3.15	40.43	



- ① : 対流を考慮したナトリウム
 Cold Shock時
 $\begin{cases} \lambda_{eqR} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ \lambda_{eqZ} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \end{cases}$
 Hot Shock時
 $\begin{cases} \lambda_{eqR} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ \lambda_{eqZ} = 61.6 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \end{cases}$
- ② : 対流を考慮したナトリウム
 Cold Shock時
 $\begin{cases} \lambda_{eqR} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ \lambda_{eqZ} = 61.6 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \end{cases}$
 Hot Shock時
 $\begin{cases} \lambda_{eqR} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ \lambda_{eqZ} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \end{cases}$
- その他 : SUS 304

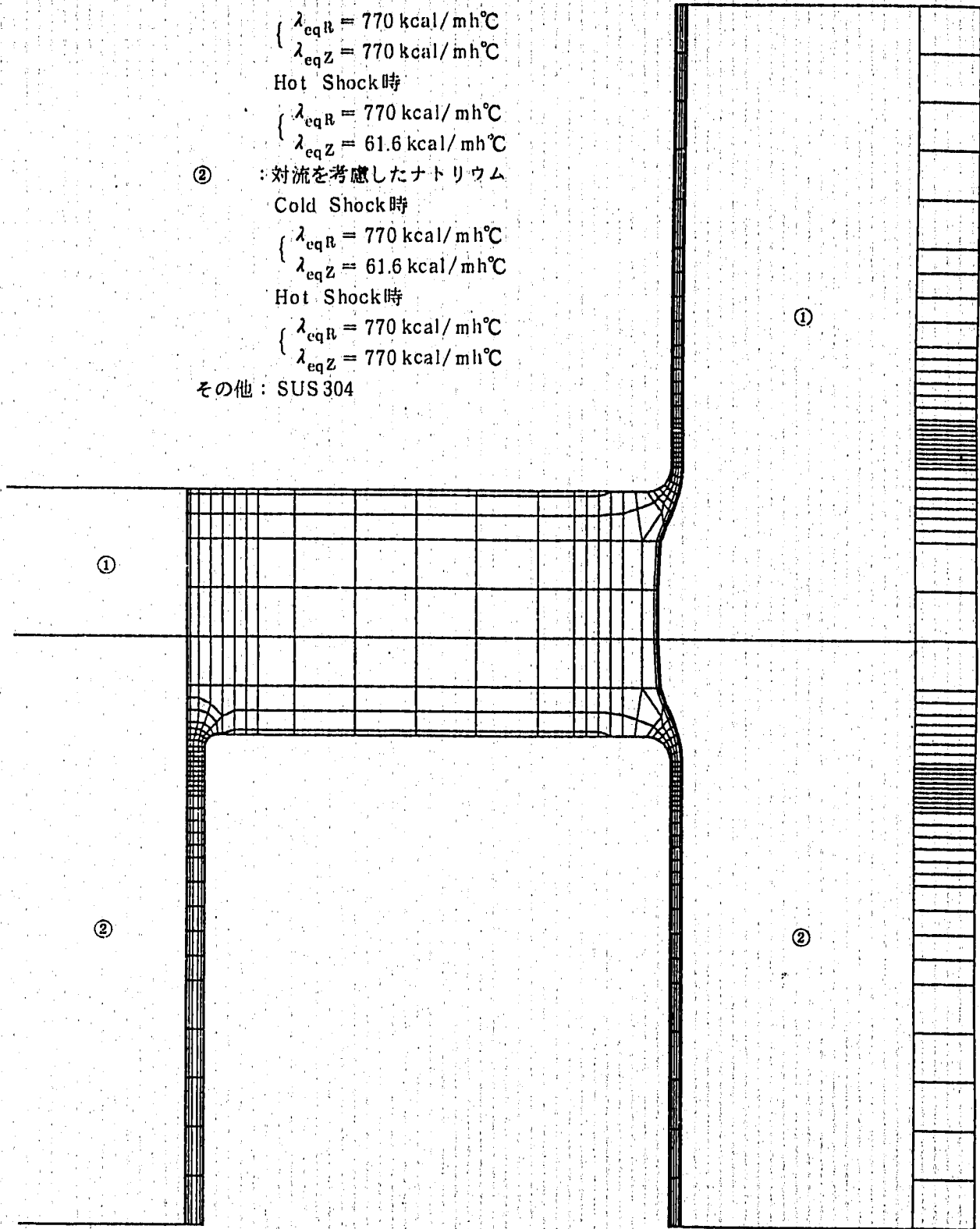


Fig. 3. 2. 4. 1 Material Segmentation

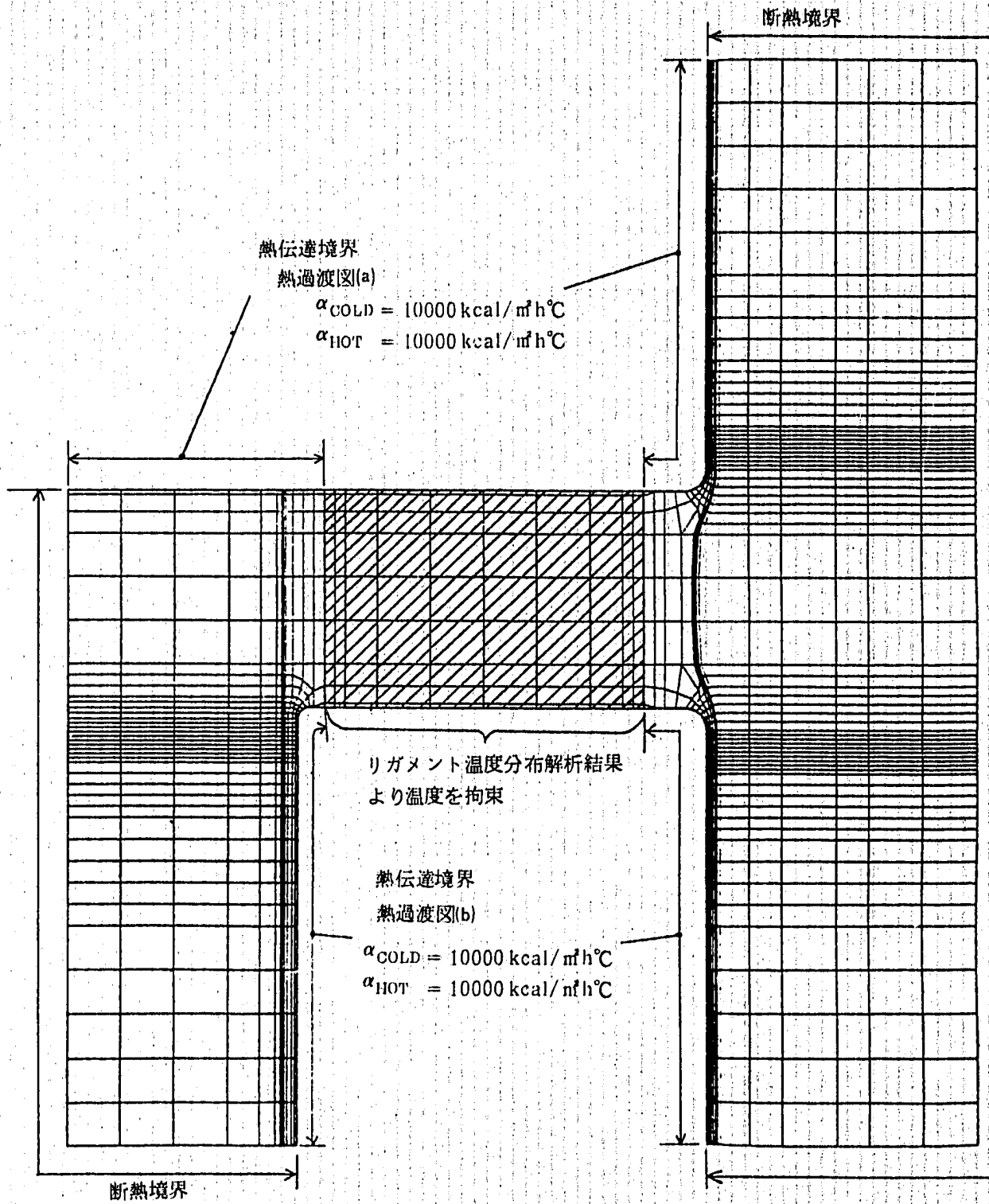


Fig. 3.2.4.2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis

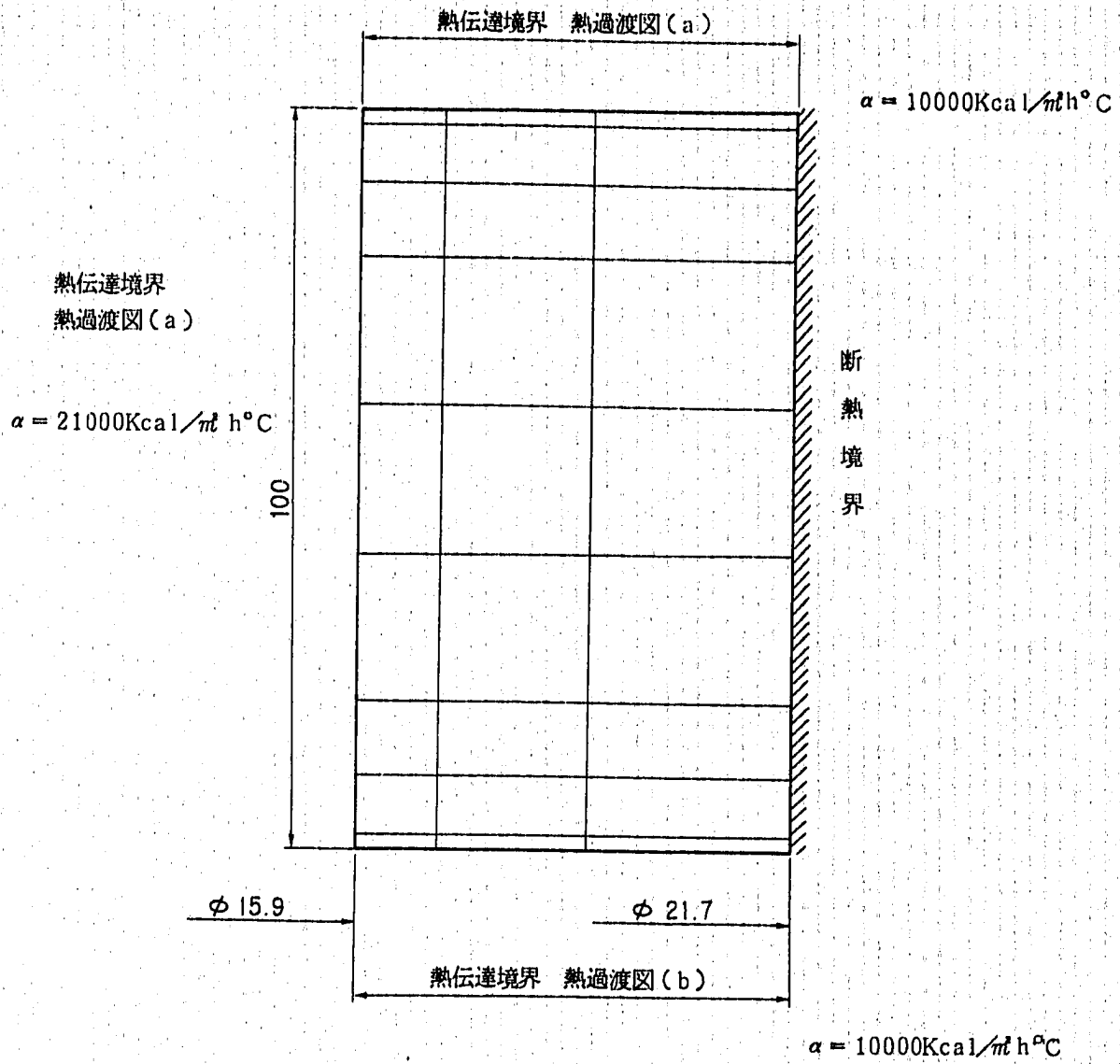


Fig. 3. 2. 4. 3 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis of one Ligament

リガメント部諸元

孔のピッチ： $P = 20.67 \text{ mm}$

孔間距離： $h = 4.57 \text{ mm}$

板中心から最外周孔の中心までの距離： $r_o = 264 \text{ mm}$

板中心から最内周孔の中心までの距離： $r_i = 124 \text{ mm}$

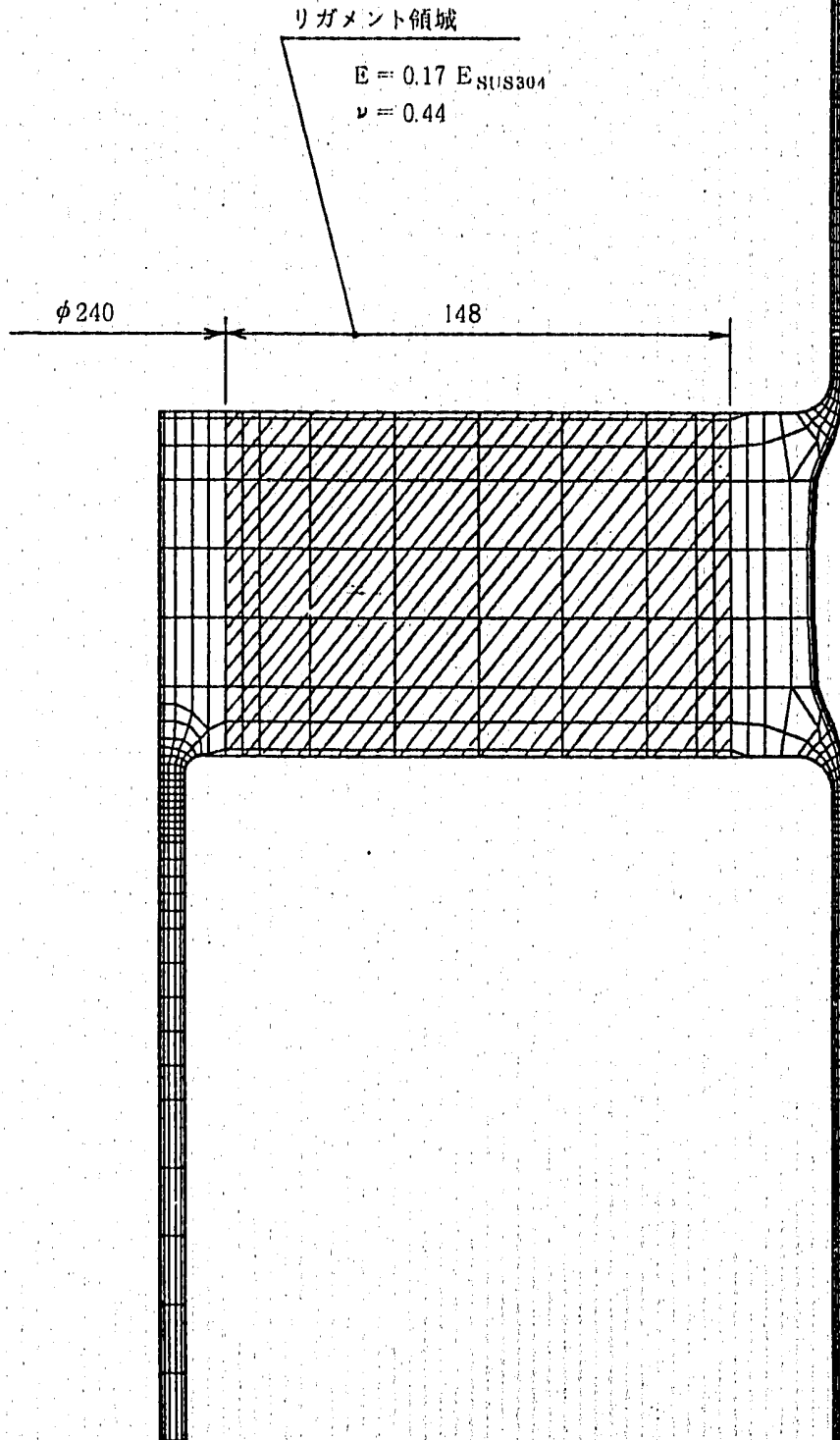


Fig. 3. 2. 4. 4 Material Segmentation for Thermal Stress Analysis

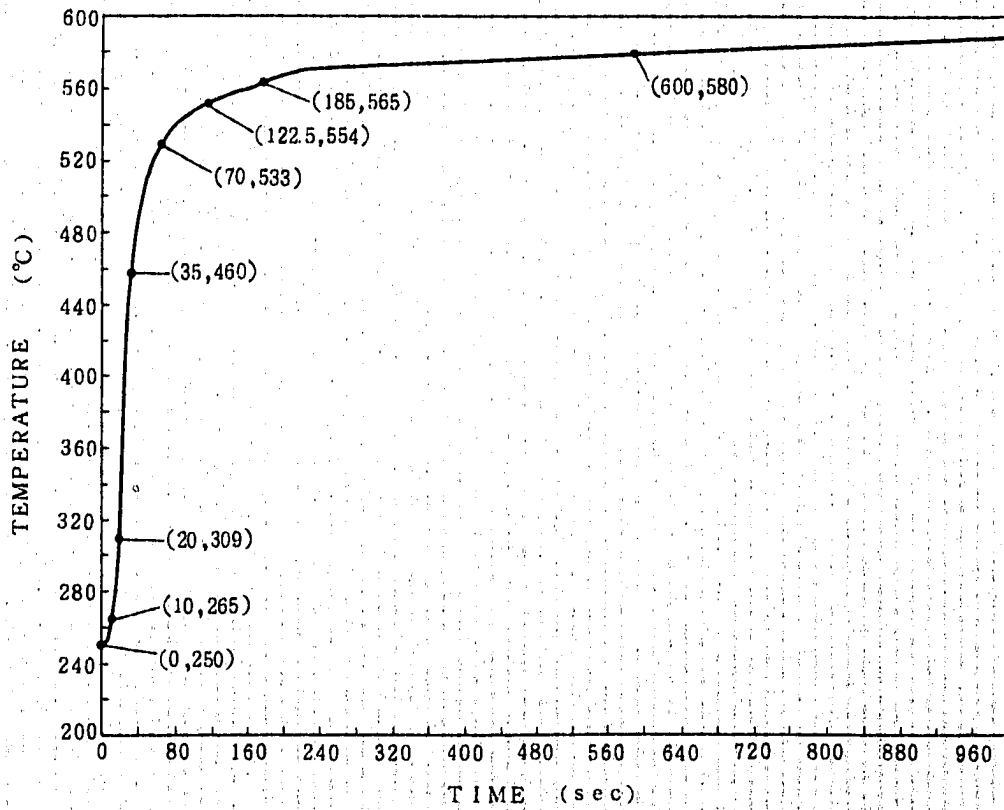
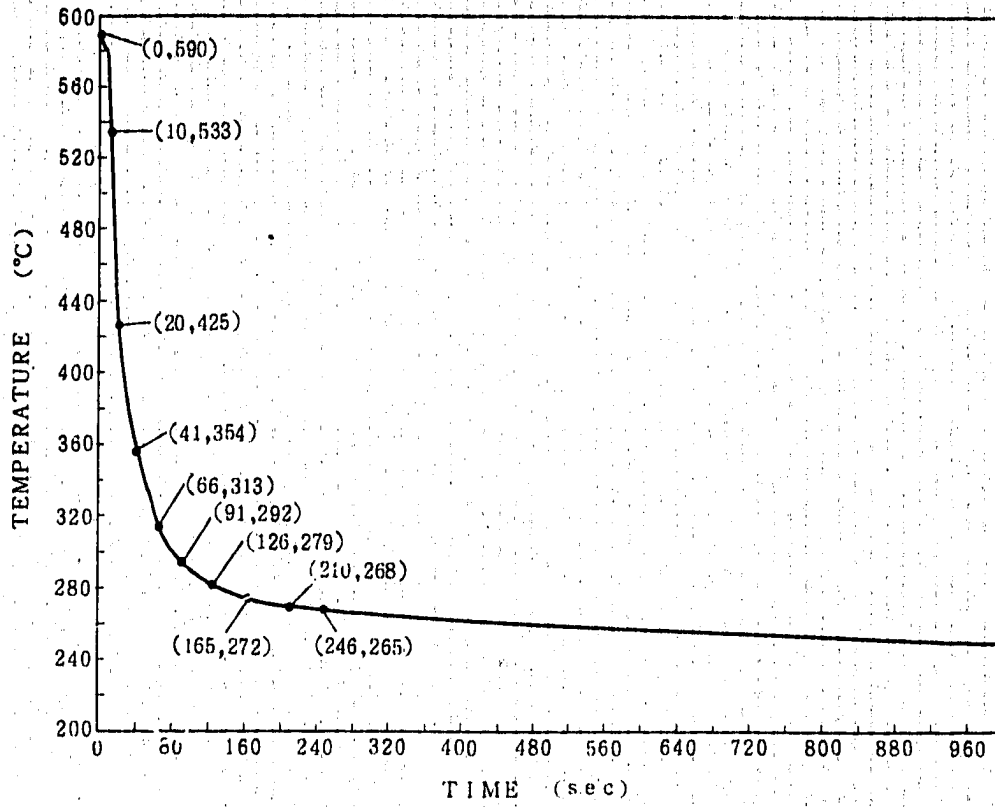


Fig. 3.2.4.5 Thermal Transient Condition
(a) Upper Part

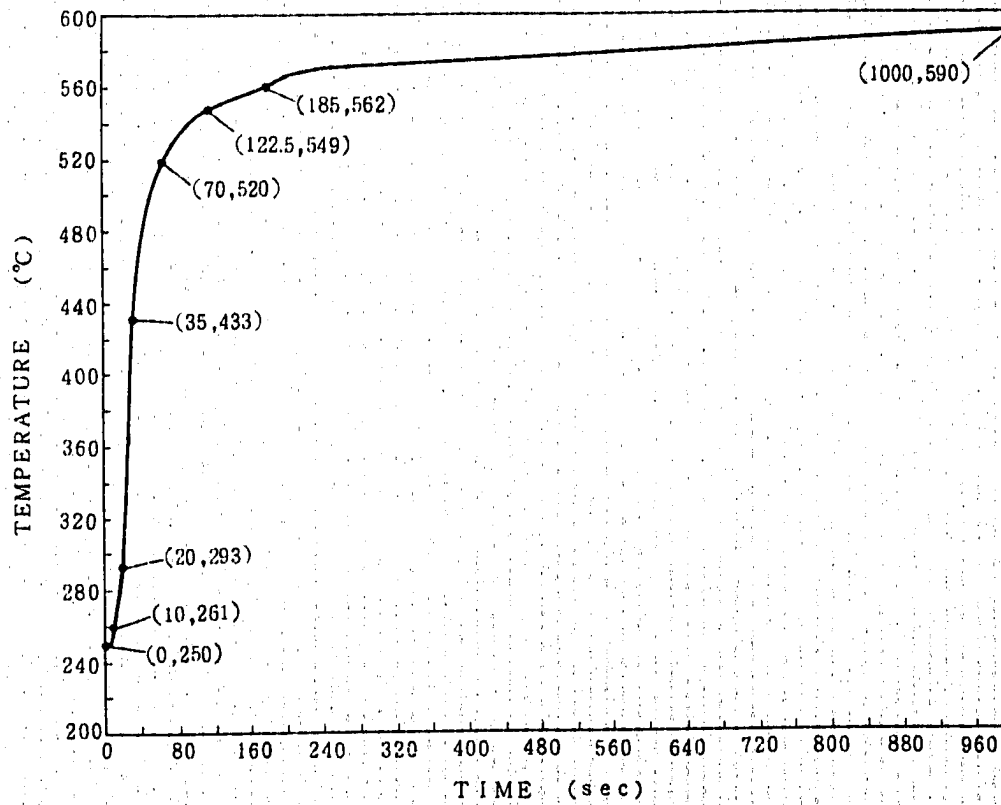
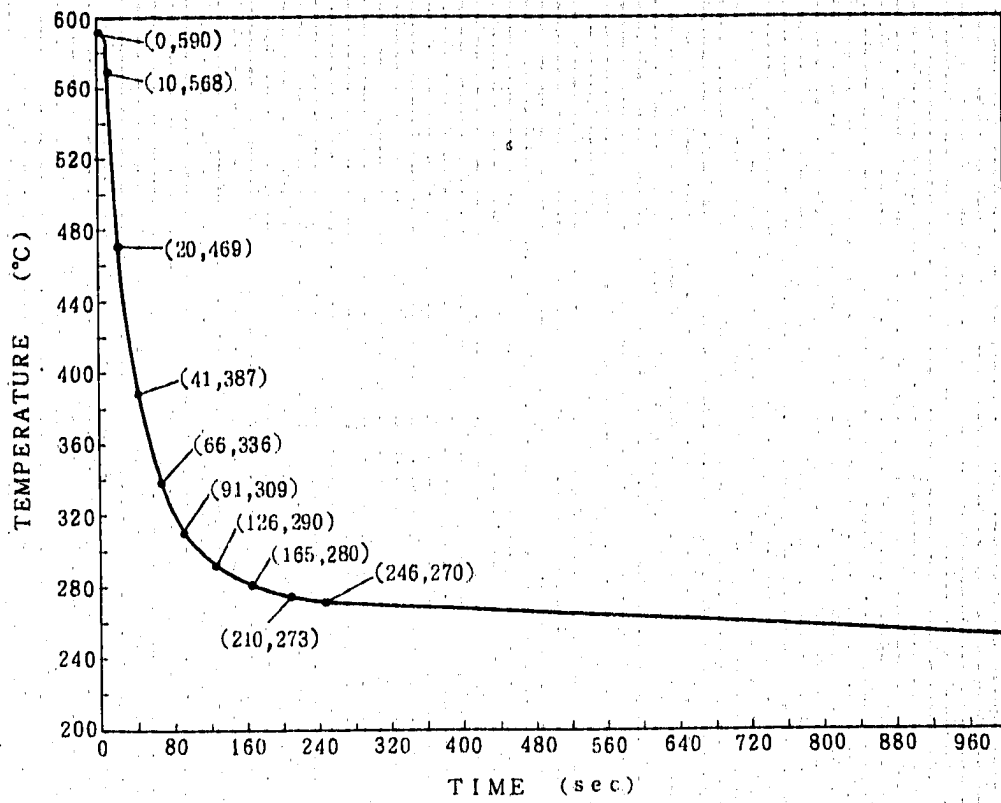
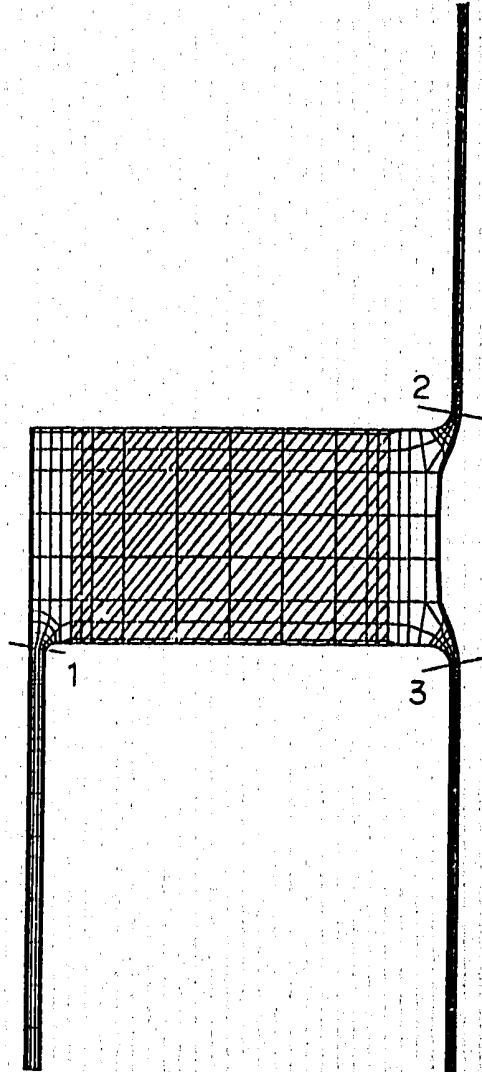


Fig. 3.2.4.5 Thermal Transient Condition
(b) Lower Part

Table. 3. 2. 4. 1 Summary of Stress Analysis

Location	Time	Temp	σ_r	σ_a	σ_θ	τ_{ra}	$\sigma_{\theta q}$	$\Delta\sigma$
胴板接合部 1 外面	C 50	394.2	5.33	68.26	43.20	- 1.24	54.92	122.44
	H 50	451.2	- 6.44	- 83.34	- 55.78	1.33	67.52	
2 内面	C 50	337.8	2.88	69.59	26.75	0.44	58.55	128.96
	H 50	502.7	- 2.97	- 73.37	- 29.65	- 0.46	70.41	
3 内面	C 50	348.8	2.48	63.22	22.88	- 0.41	53.54	116.98
	H 50	492.9	- 2.92	- 75.24	- 29.00	0.45	63.44	



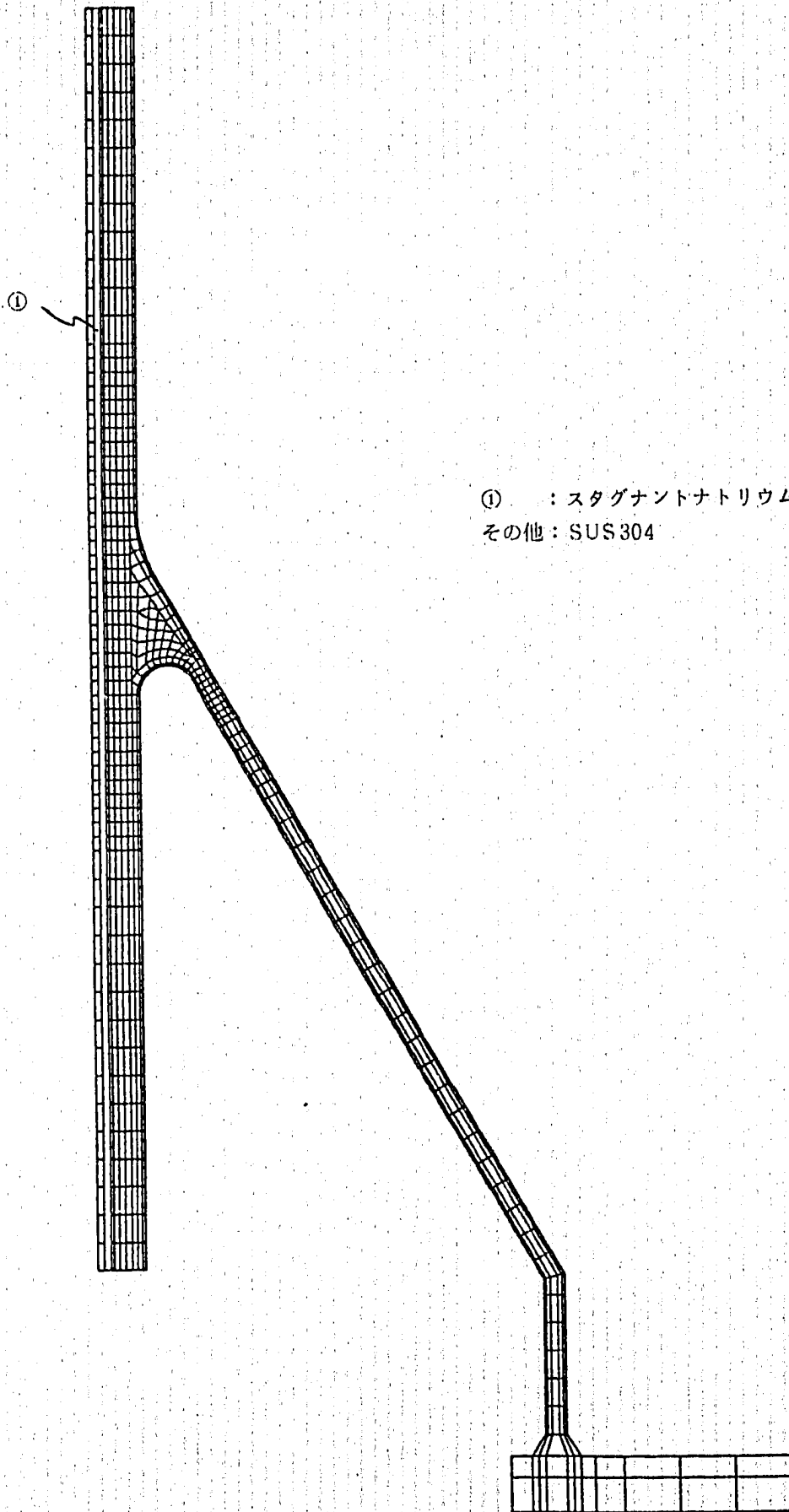


Fig. 3.2.5.1 Material Segmentation

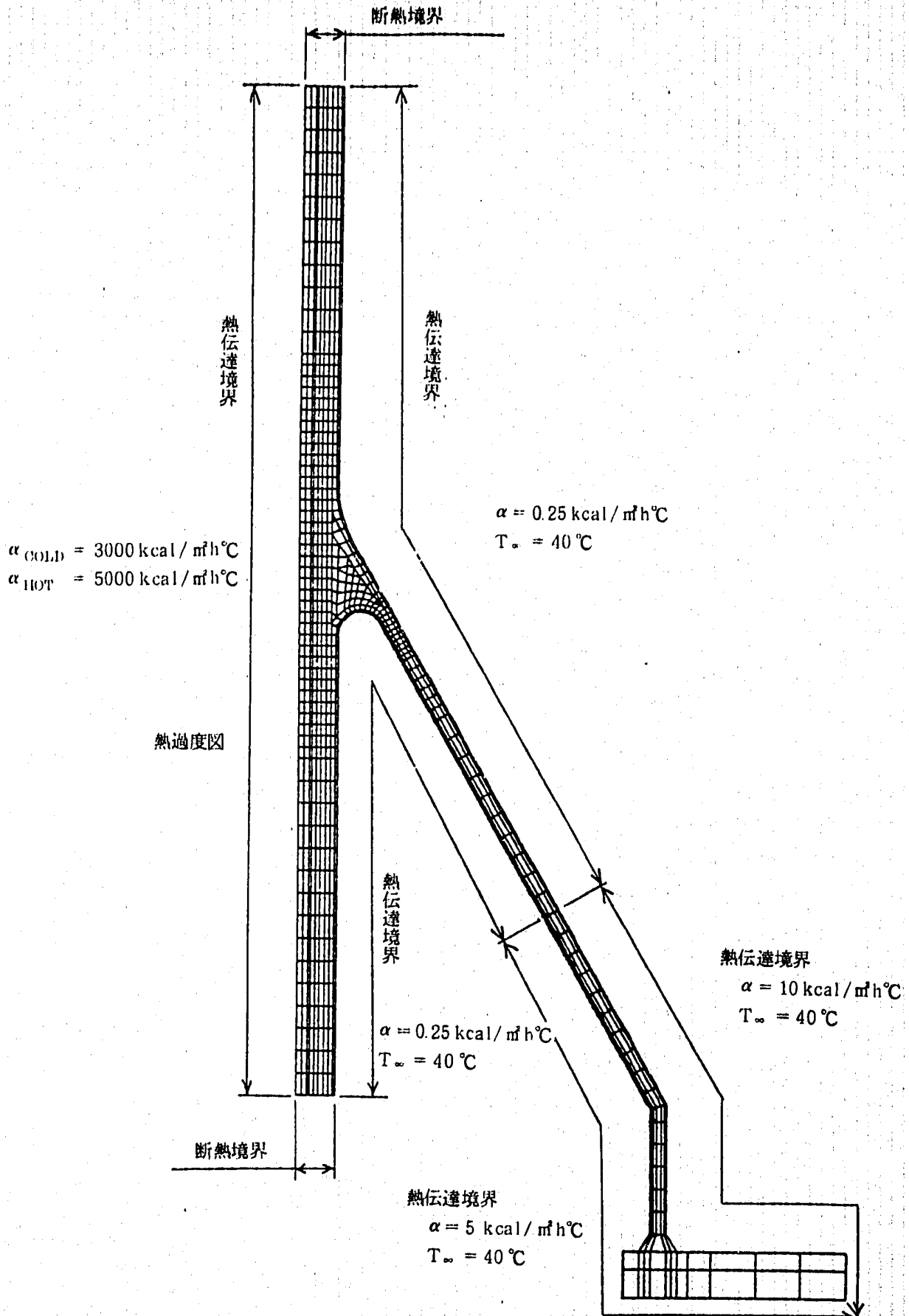


Fig. 3.2.5.2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis

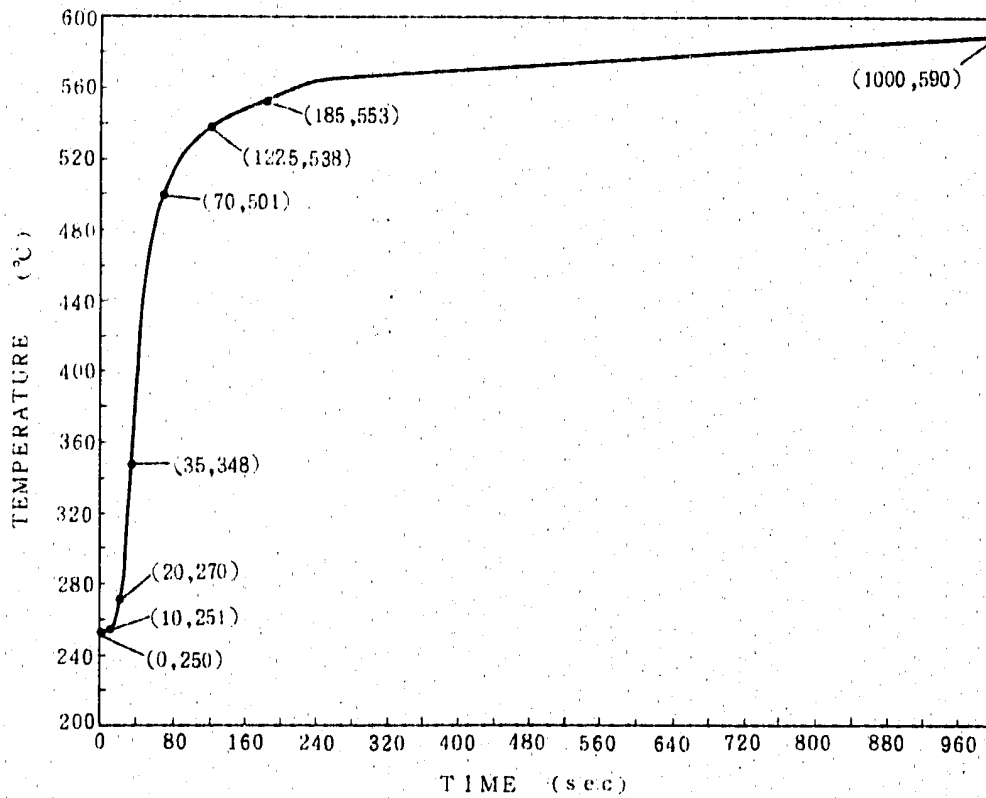
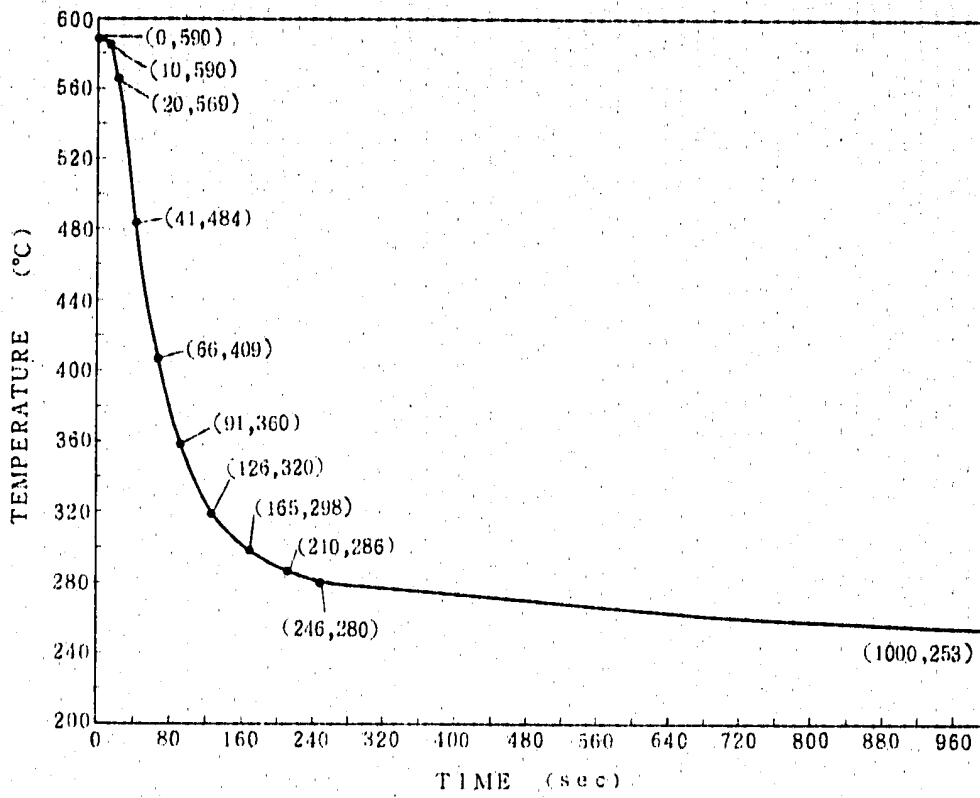
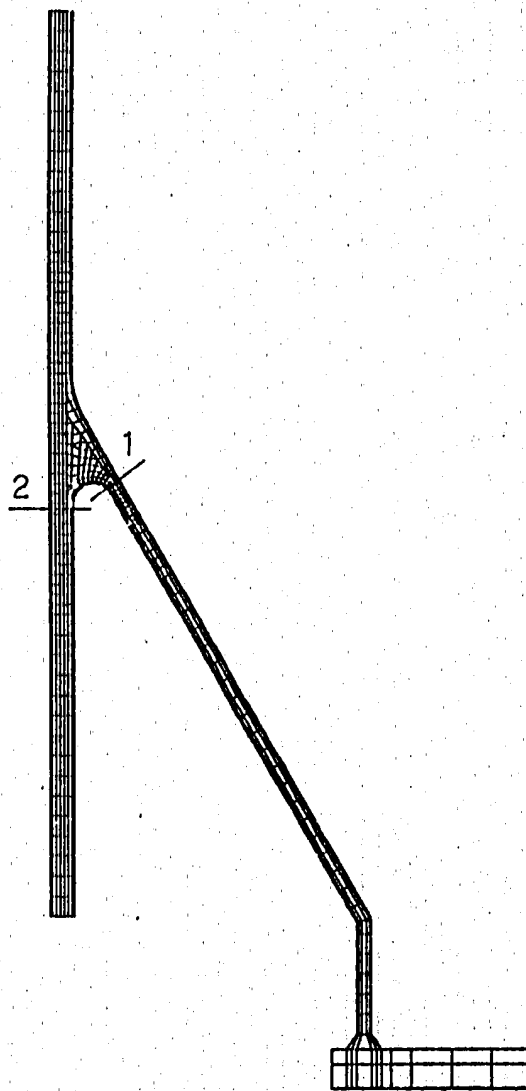


Fig. 3.2.5.3 Thermal Transient Condition

Table 3.2.5.1 Summary of Stress Analysis

Location	Time	Temp	σ_r	σ_x	σ_θ	τ_{rz}	$\sigma_{\theta z}$	$\Delta\sigma$
支持スカート	C 750	377.8	3.92	25.26	- 12.46	- 3.66	33.37	112.78
1 内面	H 750	422.7	- 12.26	- 84.74	- 2.38	8.91	79.41	
2 内面	C 75	481.5	0.03	33.71	24.85	- 0.08	30.24	67.56
	H 75	393.8	- 0.04	- 36.79	- 37.90	- 0.12	37.32	



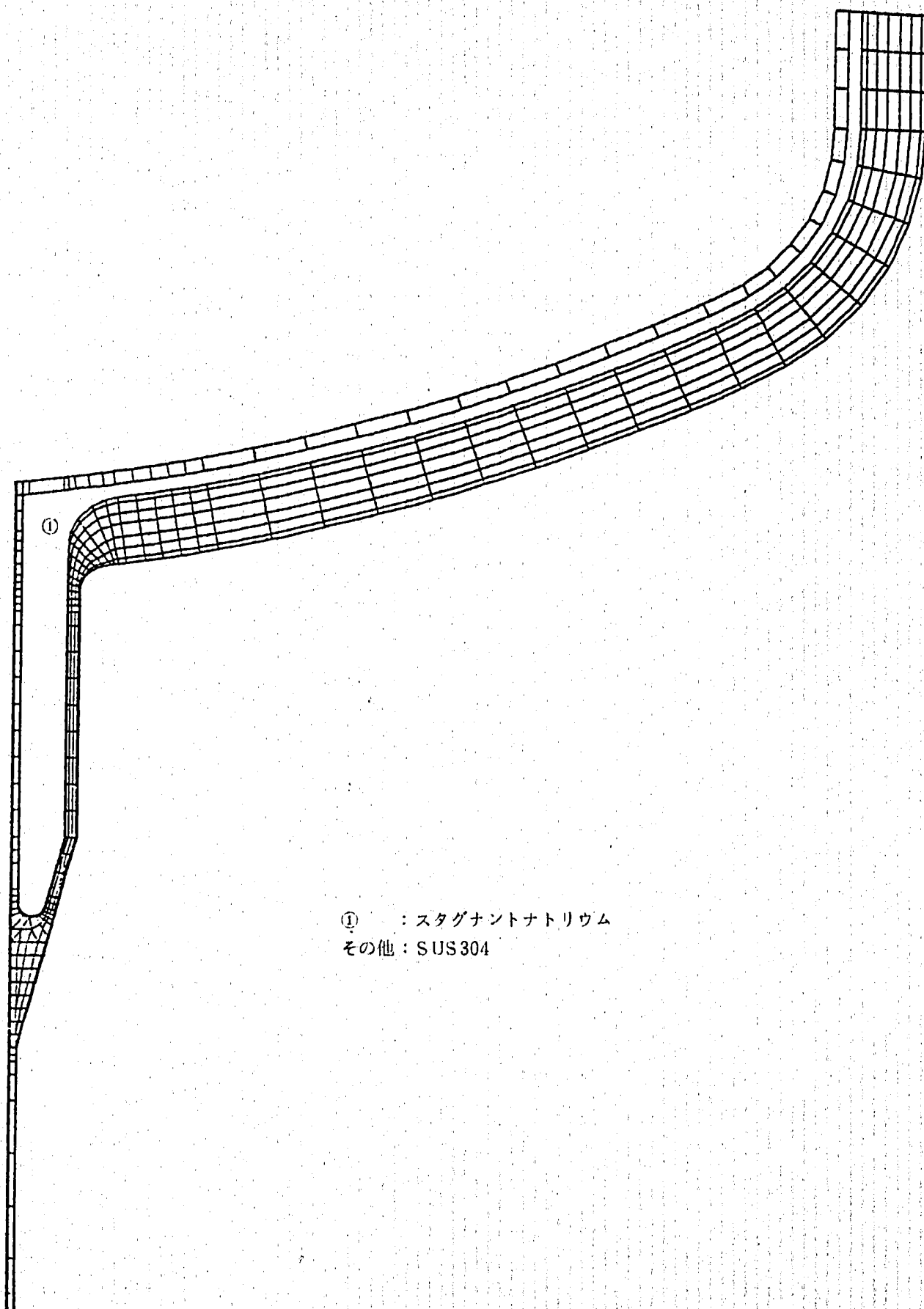


Fig. 3.2.6.1 Material Segmentation

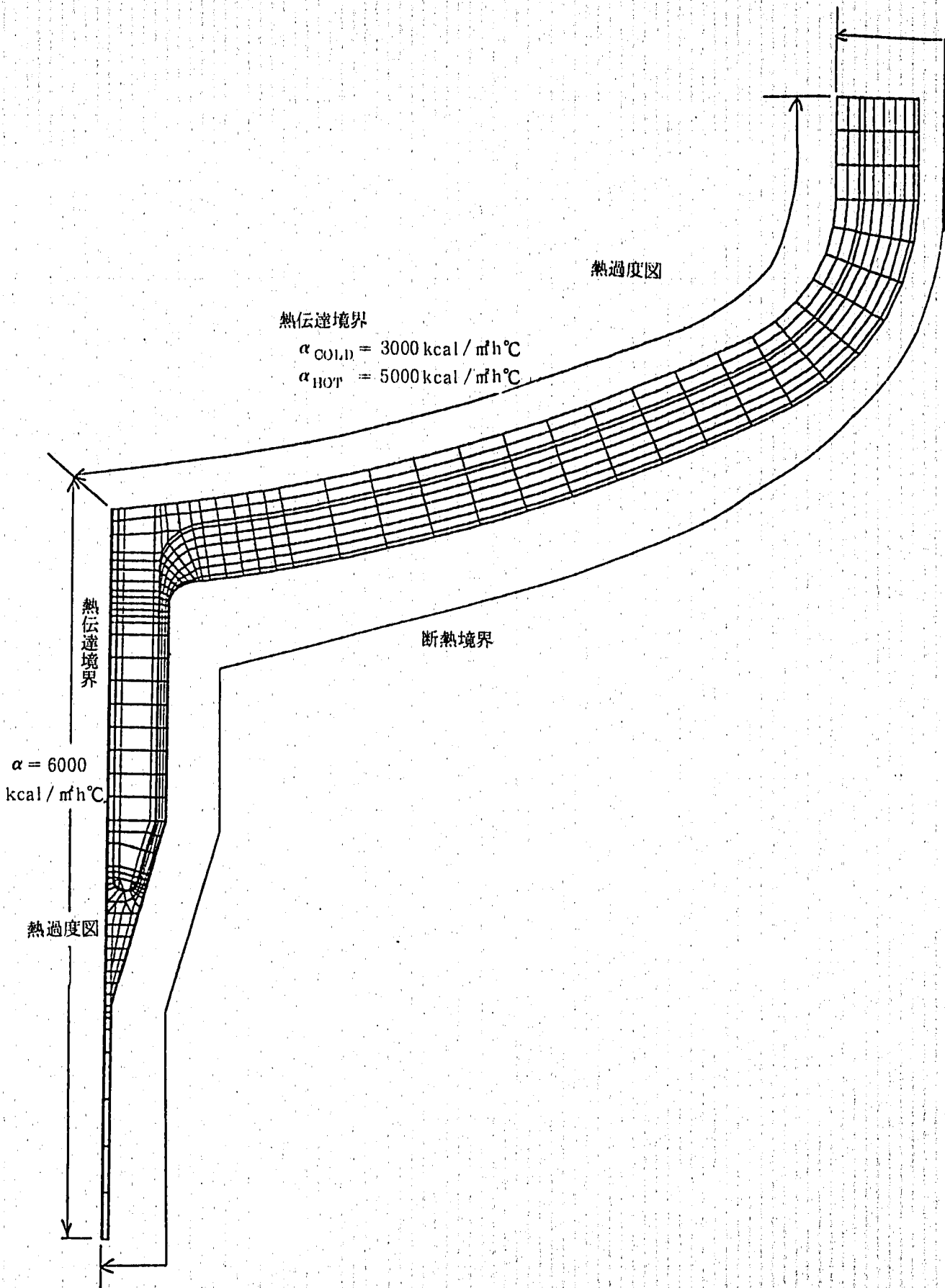


Fig. 3.2.6.2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis

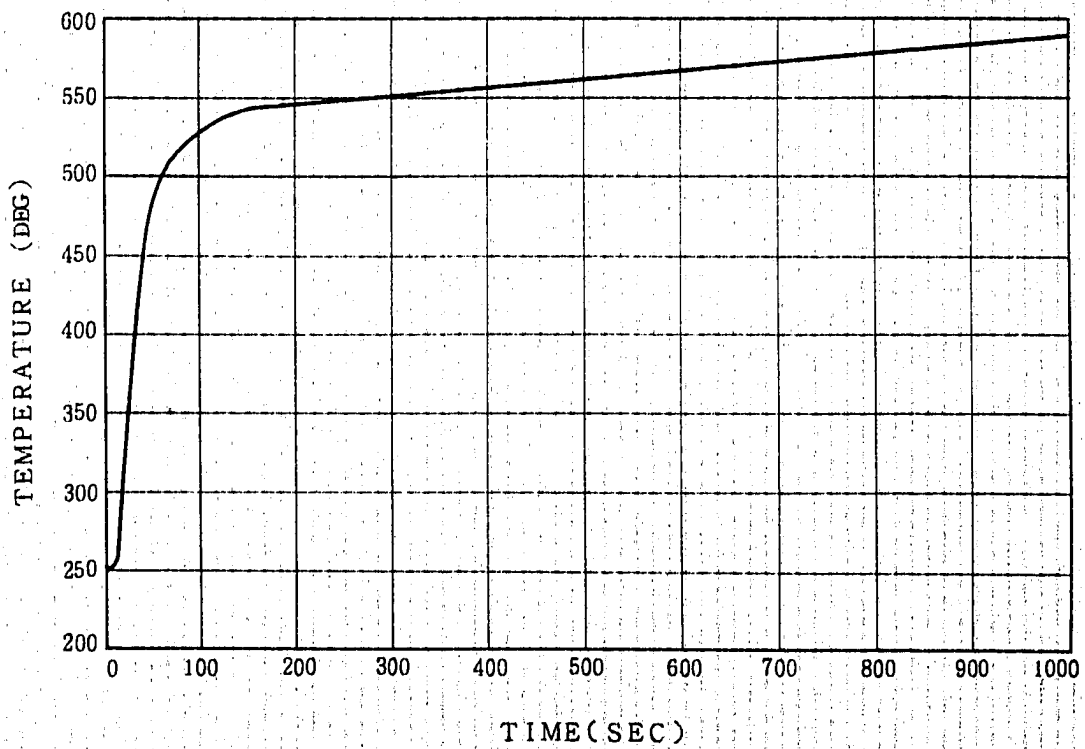
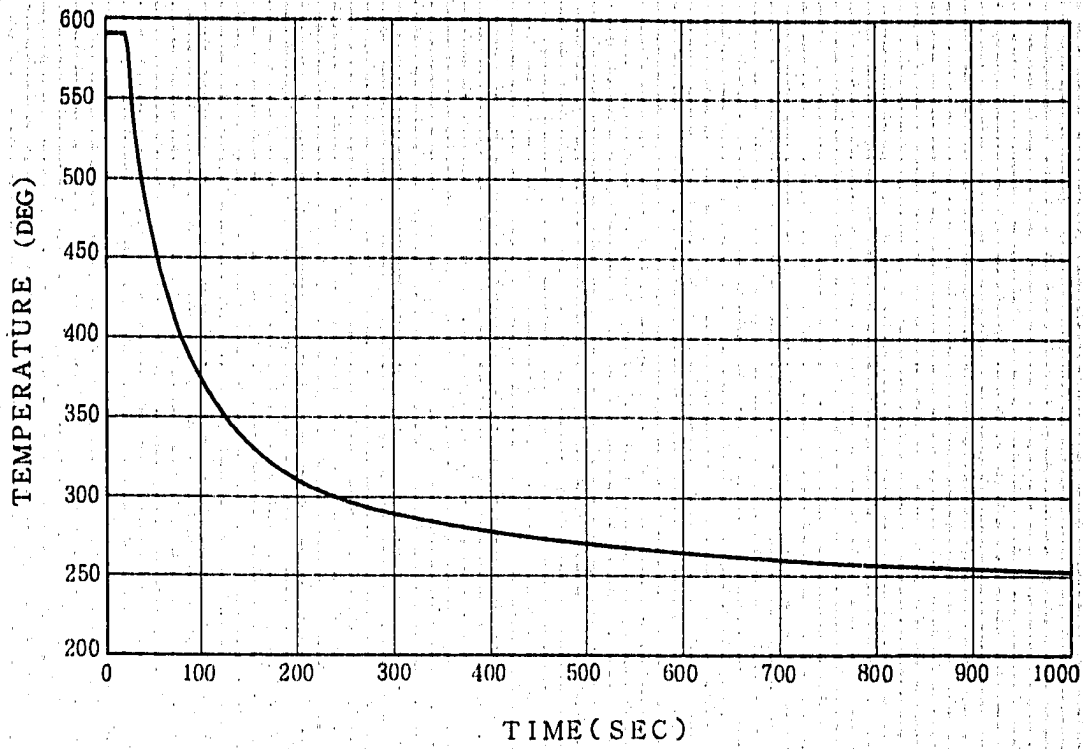
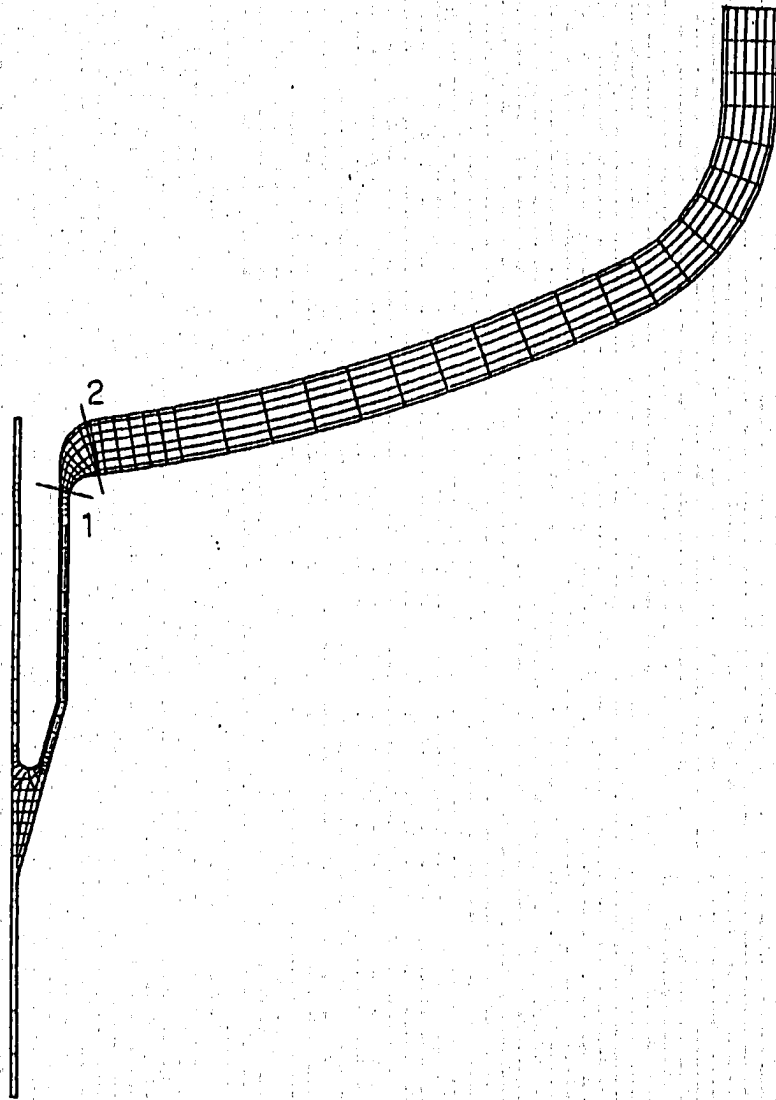
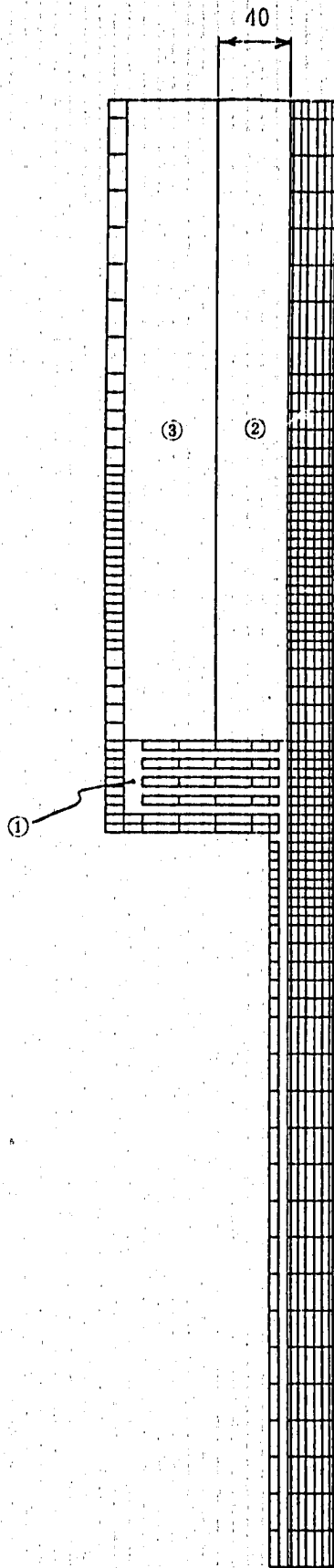


Fig. 3.2.6.3 Thermal Transient Condition

Table 3.2.6.1 Summary of Stress Analysis

Location	Time	Temp	σ_r	σ_x	σ_θ	τ_{rx}	$\sigma_{\theta x}$	$\Delta\sigma$
出口ノズル 1 外面	C 150	380.6	- 1.03	- 29.48	- 13.43	- 0.47	24.72	58.67
	H 75	419.8	1.41	40.58	21.42	0.69	33.95	
2 内面	C 150	387.1	- 0.08	6.41	28.95	- 0.34	26.40	60.67
	H 75	431.1	0.14	- 11.50	- 38.42	0.52	34.27	





- ① : スタグナントナトリウム
 - ② : 熱抵抗体
 - ③ : 対流を考慮したナトリウム
- Cold Shock時
 $\lambda_{eqR} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
 $\lambda_{eq\%} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
- Hot Shock時
 $\lambda_{eqR} = 770 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
 $\lambda_{eq\%} = 61.6 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
- その他 : SUS304

Fig. 3. 2. 7.1 Material Segmentation

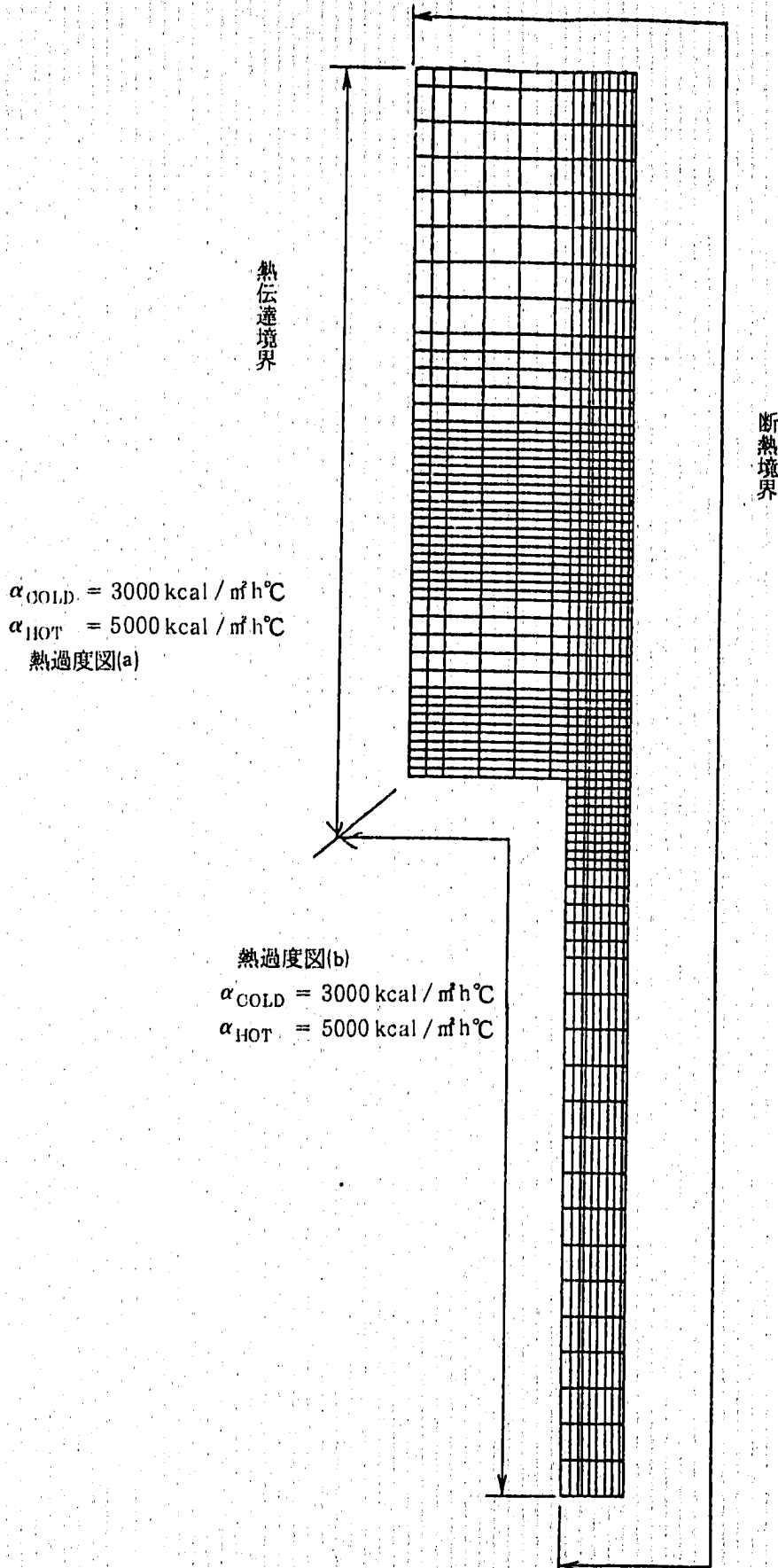


Fig. 3.2.7.2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis

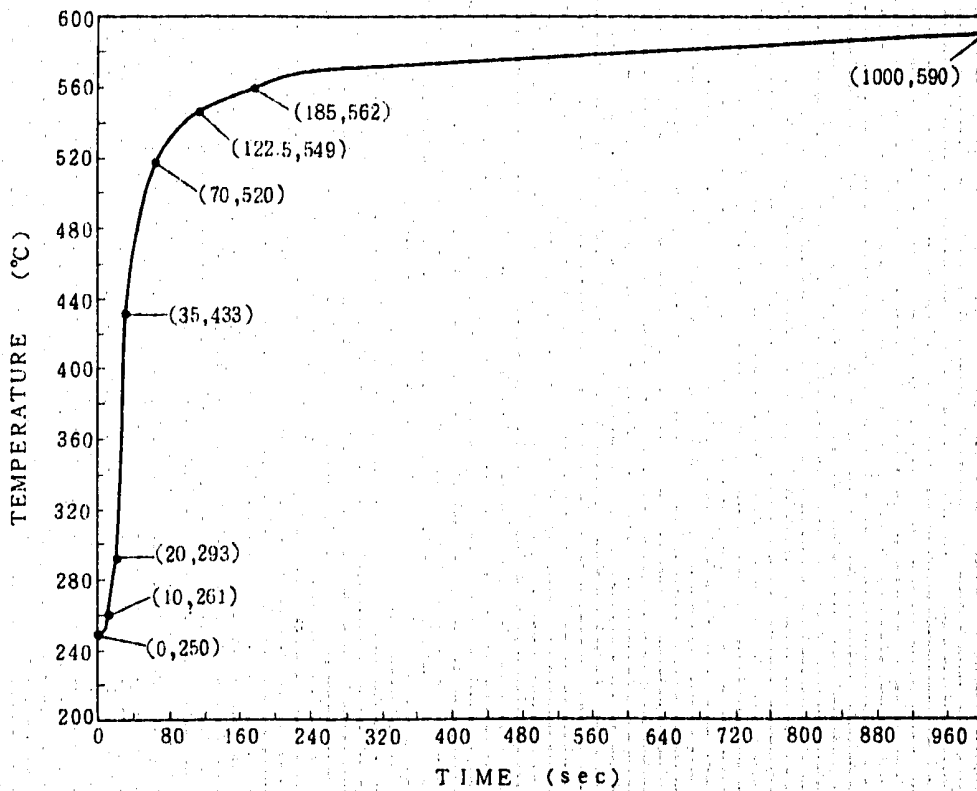
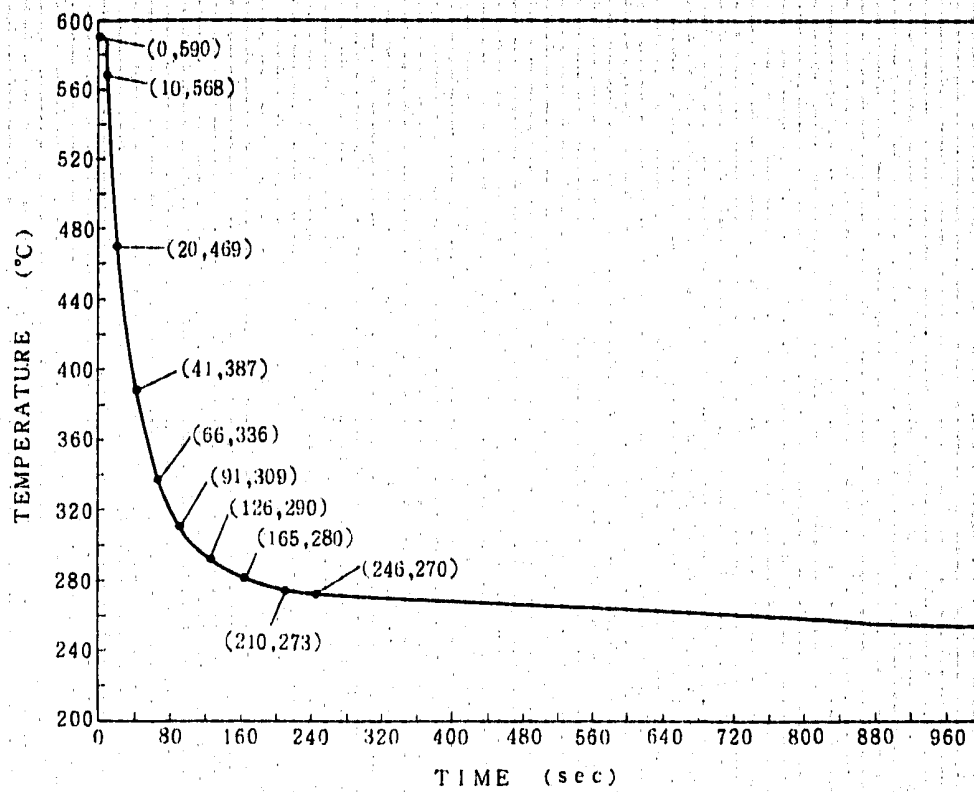


Fig. 3.2.7.3 Thermal Transient Condition
 (a) Lower Part of Perforated Plate

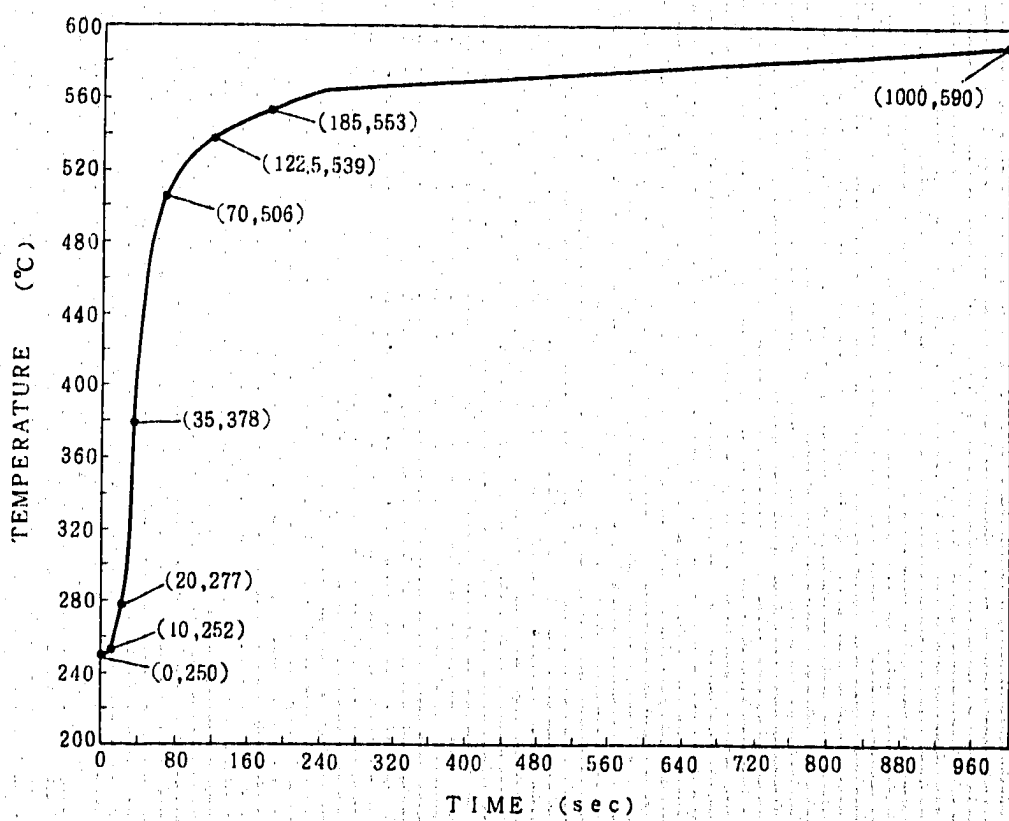
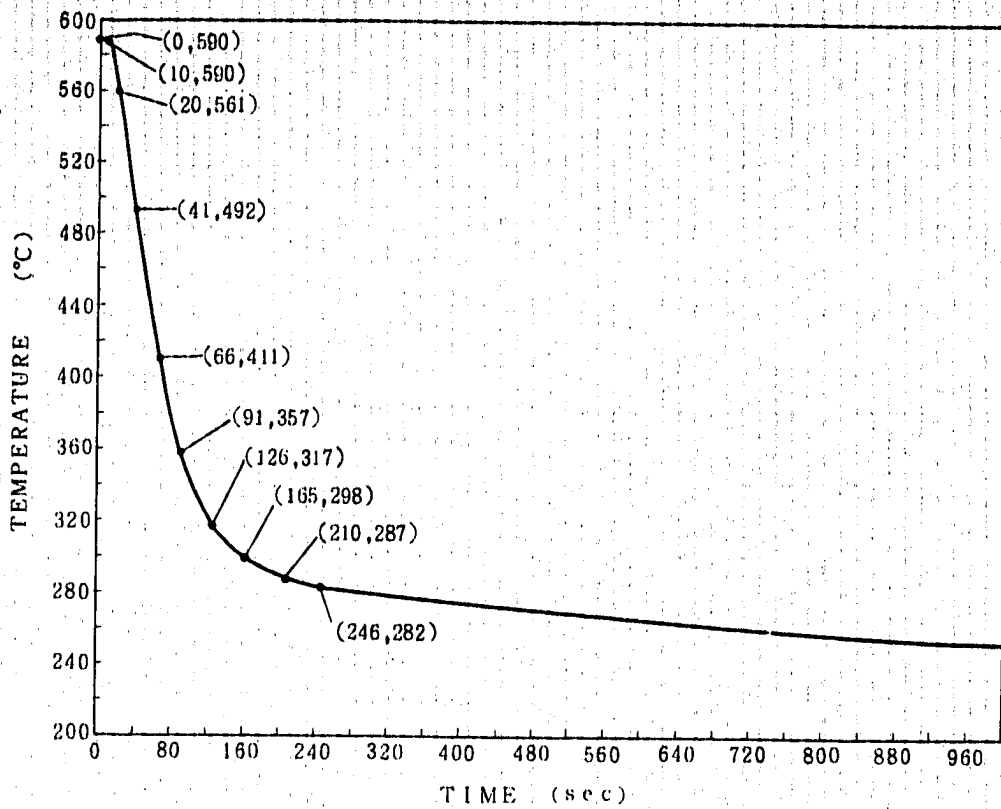
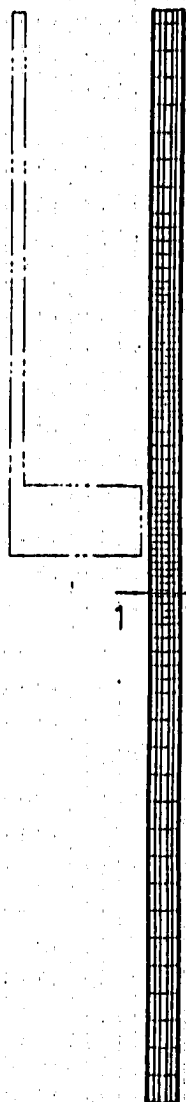


Fig. 3.2.7.3 Thermal Transient Condition
 (b) Under Part of Thermal Insulator

Table. 3.2.7.1 Summary of Stress Analysis

Location	Time	Temp	σ_r	σ_x	σ_θ	τ_{rz}	σ_{3q}	$\Delta\sigma$
熱抵抗体	C 150	402.1	0.00	32.51	38.14	0.19	35.66	76.09
1 内面	H 100	431.4	-0.01	-35.79	-43.87	-0.23	40.43	



3.3 強度評価

(1) 評価手法

構造物強度確性試験施設 (TTS) で試験される一連の供試体の設計には、TTS 専用設計基準 (TTSDS)^{1),2)} による評価が行われている。これは、材料強度の安全裕度を合理的に切り詰めることにより構造物の実質的なクリープ疲労強度を予測する設計手法である。

Fig. 3.3.1 に TTSDS の評価手法の流れを示す。

TTSDS では、まず弾性応力解析結果から熱過渡 1 サイクル中の最大相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ を求める。

$$\Delta \epsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left\{ (\Delta \epsilon_R - \Delta \epsilon_Z)^2 + (\Delta \epsilon_Z - \Delta \epsilon_\theta)^2 + (\Delta \epsilon_\theta - \Delta \epsilon_{II})^2 + \frac{3}{2} \Delta \gamma_{RZ}^2 \right\}^{1/2}$$

さらに公称ひずみ範囲 ϵ_n を次式により求める。

$$\epsilon_n = \frac{1.5}{1 + \nu} \Delta \epsilon_{eq}$$

ひずみ範囲 ϵ_i を次式で定義する。

$$\epsilon_i = K_\epsilon \cdot \epsilon_n$$

ここで、 K_ϵ をひずみ集中係数と呼び、弾性解析で得られたひずみにこの定数を乗じることにより実際のひずみ範囲を想定する。

(i) 疲労損傷の算出

熱過渡 1 サイクル中のひずみ範囲 ϵ_i 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = \frac{2 \cdot \epsilon_i}{t_0}$ (t_0 : サイクル周期)、温度 T_{max} (サイクル中の最高温度) より最適疲労破損式に代入して得られる寿命を $N(\epsilon_i)$ で表わし N_f とする。

$$N_f = N(\epsilon_i)$$

さらに繰返し熱過渡サイクル数を n とし次式で疲労損傷 D_f を定める。

$$D_f = n/N_f$$

(ii) クリープ損傷の算出

熱過渡 1 サイクル中のひずみ範囲の半分 $1/2 \epsilon_i$ に相当する応力 σ_0 を SUS 304 の動的応力ひずみ式に代入して算出する。この σ_0 を初期応力として単軸リラクゼーション解析を行い、 $t=0$ から $t=t_h$ (t_h : サイクル中の高温使用時間) までに生じるクリープ損傷 D_c を算出する。尚、単軸リラクゼーション解析ではひずみ硬化型のクリープを想定し、クリープ破断における時間係数 α_R およびクリープひずみ式における時間係数 α_c を

考慮してクリープ損傷を算出する。

$$D_c = n \int_0^{t_h} \frac{dt}{T^n}$$

以上、求めた疲労損傷 D_r とクリープ損傷 D_c の和としてクリープ疲労損傷 D を算出する。

$$D = D_r + D_c$$

(2) 評価結果

供試体の各強度試験部は熱応力解析結果を用いて、TTSDSでクリープ疲労損傷評価を行った。

TTSDSによる供試体の各モデルの強度評価結果を Table. 3. 3. 1 ~ 7 に示す。またこれをまとめたものを Table. 3. 3. 8 に一覧表として示す。なお評価は、590 °C から 250 °C のコールドショック開始後 30 分保持しその後 250 °C から 590 °C のホットショック開始後 90 分保持するという 1 サイクルの熱過渡を、1800 サイクル繰り返すという条件で実施している。

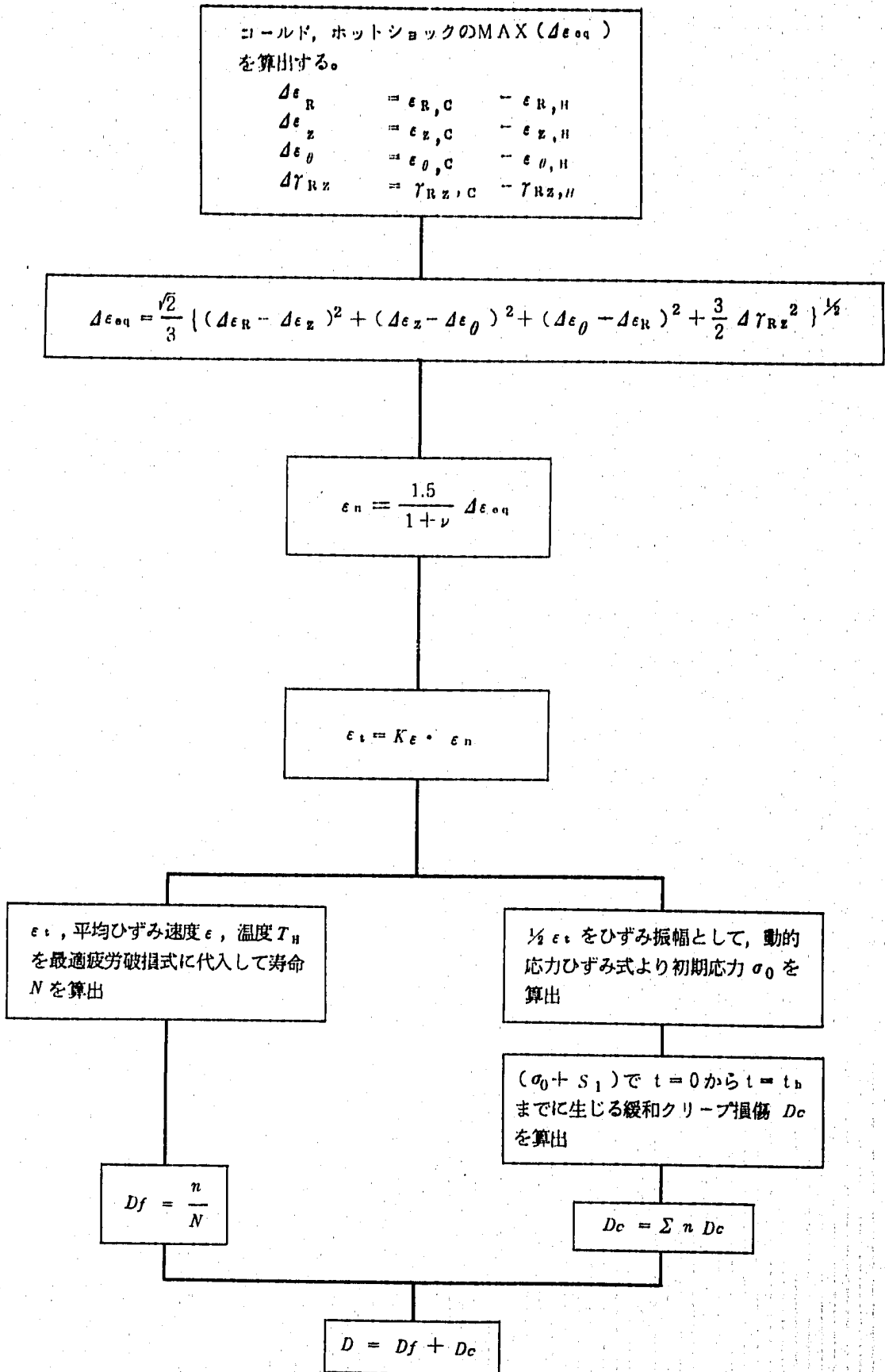


Fig. 3.3.1 Flow of TTSDS

Table 3.3.1 Creep Fatigue Damage according to TTSDS

Location	T_{max}	$\Delta\sigma_{eq}$	$K\epsilon$	ϵ_t	D_f	D_c	D
入口ノズル 1 内 面	590.0	119.25	1.2	8.378×10^{-3}	1.84	0.90	2.74
入口ノズル 2 外 面	590.0	89.03	1.25	6.614×10^{-3}	1.11	0.69	1.80
上部スカート 1 内 面	545.0	141.7	1.25	1.038×10^{-2}	2.11	0.89	3.00

(590 °C ··· 90 min, 250 °C ··· 30 min · 1800 cycle)

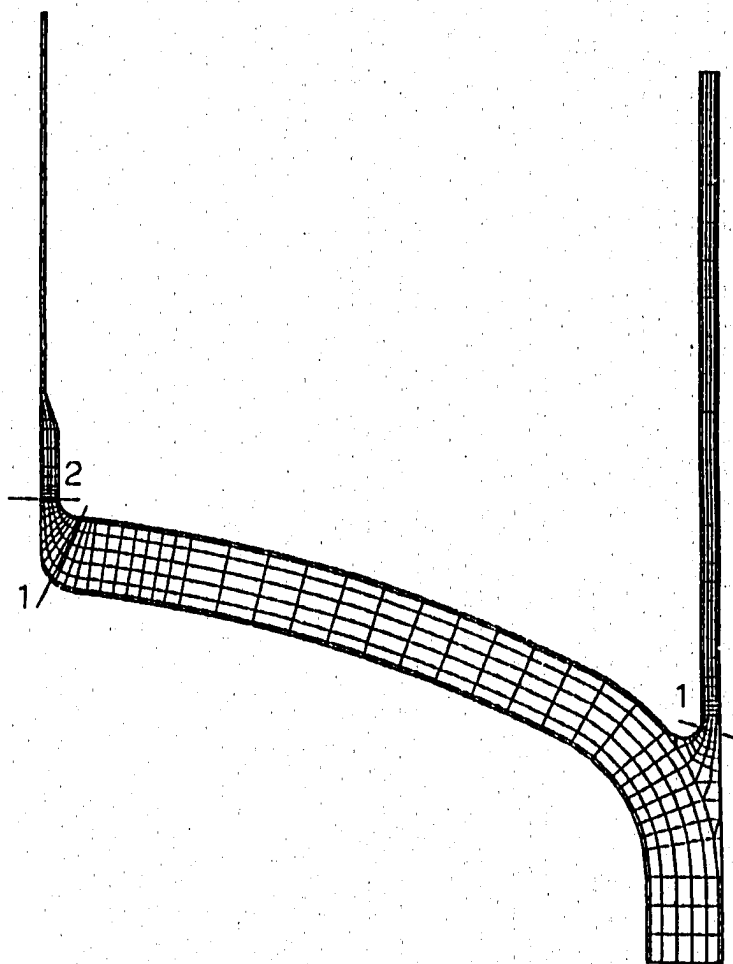


Table 3.3.2 Creep Fatigue Damage according to TTSDS

Location	T_{max}	$\Delta\sigma_{0q}$	$K\epsilon$	ϵ_t	D_r	D_c	D
板厚不連続 1 内面	590.0	79.03	1.2	5.602×10^{-3}	0.74	0.56	1.30
板厚不連続 2 内面	590.0	88.98	1.2	6.368×10^{-3}	1.02	0.66	1.68

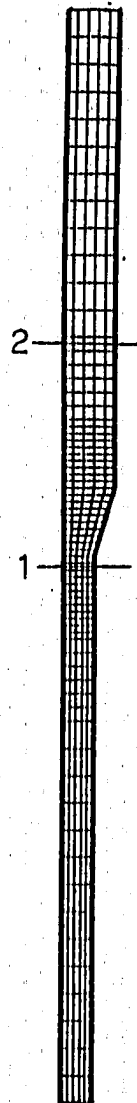


Table. 3.3.3 Creep Fatigue Damage according to TTSDS

Location	T_{max}	$\Delta\sigma_{eq}$	$K\epsilon$	ϵ_t	D_f	D_c	D
Yピース 1 内面	590.0	77.90	1.2	5.566×10^{-3}	0.73	0.56	1.29
Yピース 3 内面	590.0	90.57	1.25	6.690×10^{-3}	1.14	0.70	1.84
Yピース 4 内面	590.0	75.16	1.2	5.272×10^{-3}	0.63	0.52	1.15

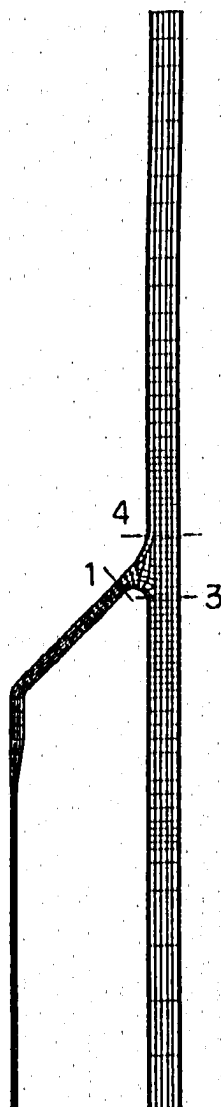


Table. 3.3.4 Creep Fatigue Damage according to TTSDS

Location	T_{max}	$\Delta\sigma_{eq}$	$K\epsilon$	ϵ_c	D_r	D_o	D
胴板接合部 1 外面	590.0	122.44	1.25	9.035×10^{-3}	2.13	0.97	3.10
胴板接合部 2 内面	590.0	128.96	1.25	8.895×10^{-3}	2.07	0.96	3.03
胴板接合部 3 内面	590.0	116.98	1.25	7.578×10^{-3}	1.97	0.93	2.90

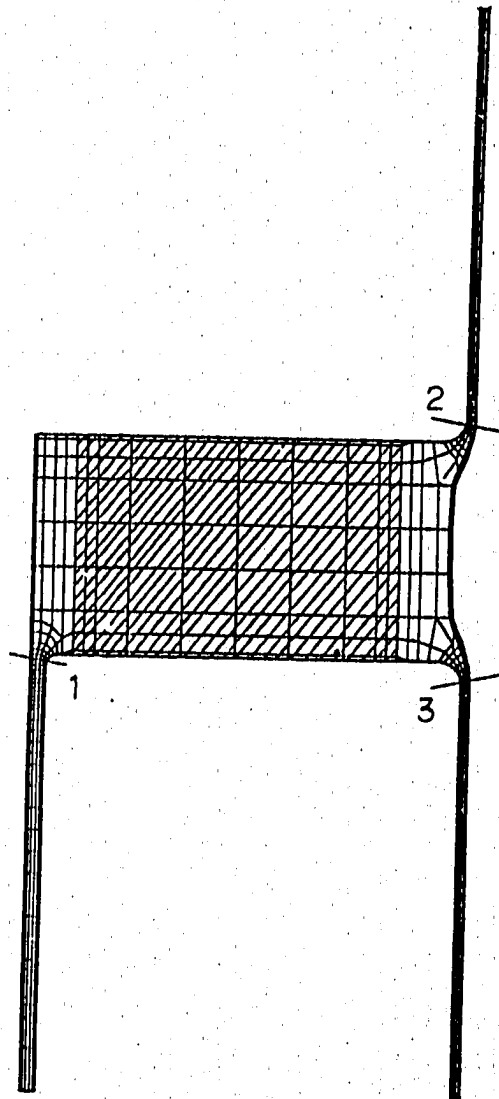


Table 3.3.5 Creep Fatigue Damage according to TTSDS

Location	T_{max}	$\Delta\sigma_{eq}$	$K\epsilon$	ϵ_1	D_r	D_c	D
支持スカート 1 内面	530.0	112.78	1.25	8.153×10^{-3}	1.16	0.48	1.64
支持スカート 2 内面	590.0	67.56	1.20	4.763×10^{-3}	0.46	0.46	0.92

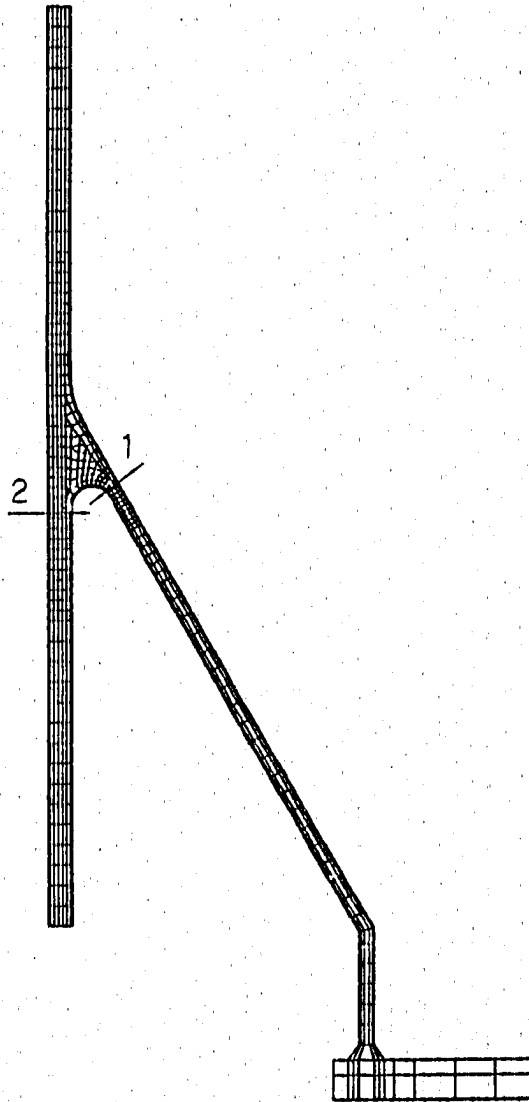


Table 3.3.6 Creep Fatigue Damage according to T²SDS

Location	T _{max}	$\Delta\sigma_{eq}$	K ϵ	ϵ_t	D _r	D _e	D
出口ノズル 1 外面	590.0	58.67	1.25	4.271×10^{-3}	0.33	0.39	0.72
出口ノズル 2 内面	590.0	60.67	1.20	4.261×10^{-3}	0.33	0.39	0.72

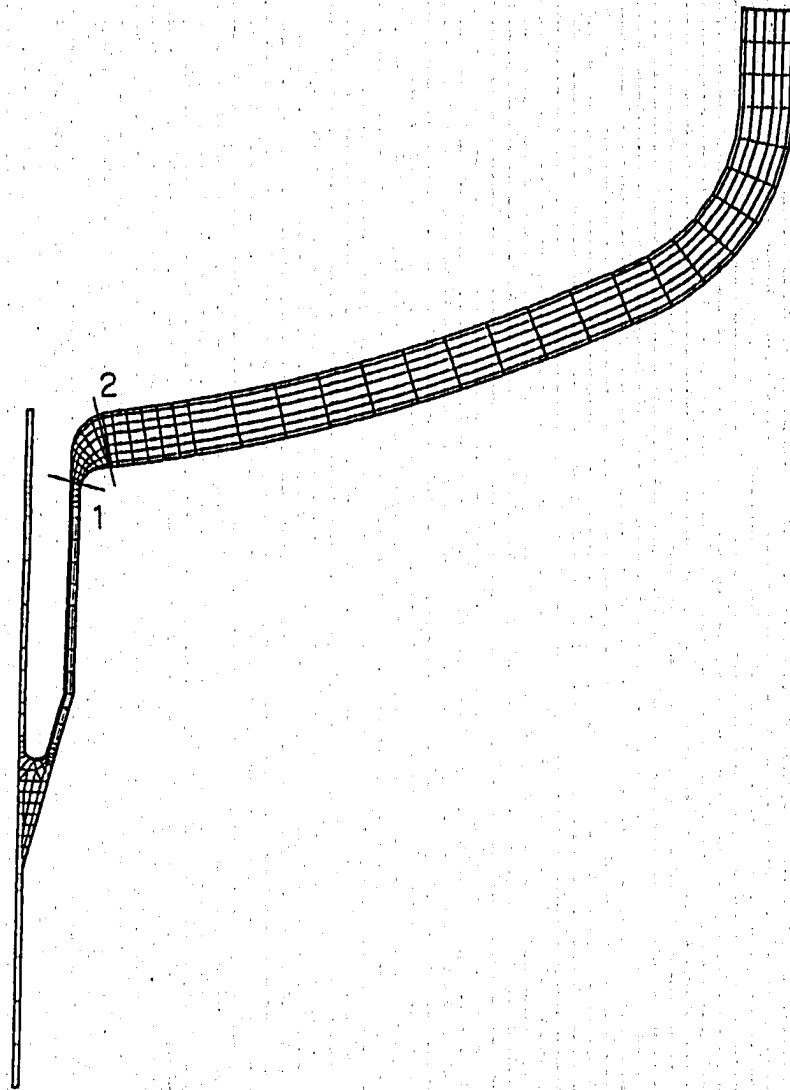


Table. 3.3.7 Creep Fatigue Damage according to TTSDDS

Location	T_{max}	$\Delta\sigma_{0q}$	$K\epsilon$	ϵ_r	D_r	D_a	D
熱抵抗体 1 内面	590.0	76.09	1.2	5.361×10^{-3}	0.65	0.54	1.19

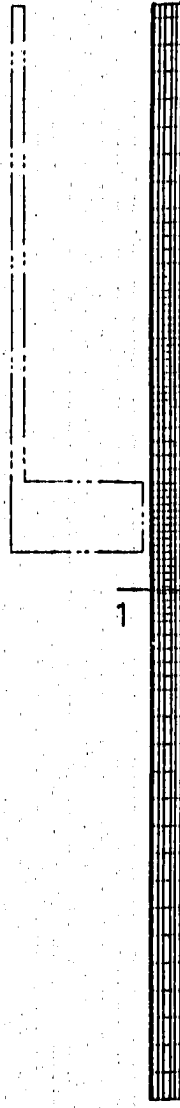
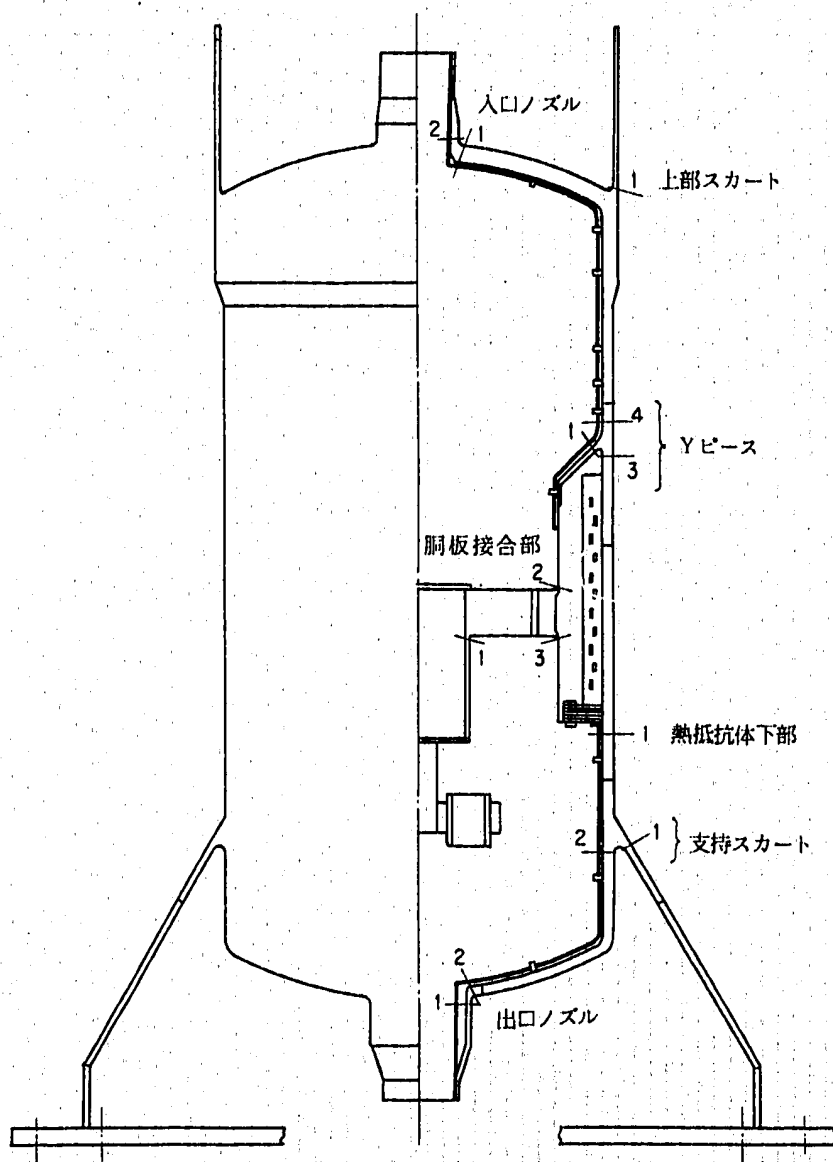


Table 3.3.8 Creep Fatigue Damage According to TTSDS



Location	D_r	D_e	D
入口ノズル 1 内面	1.84	0.90	2.74
入口ノズル 2 外面	1.11	0.69	1.80
上部スカート 1 内面	2.11	0.89	3.00
板厚不連続 1 内面	0.74	0.56	1.30
板厚不連続 2 内面	1.02	0.66	1.68
Yピース 1 内面	0.73	0.56	1.29
3 内面	1.14	0.70	1.84
4 内面	0.63	0.52	1.15
胴板接合部 1 外面	2.13	0.97	3.10
2 内面	2.07	0.96	3.03
3 内面	1.97	0.93	2.90
支持スカート 1 内面	1.16	0.48	1.64
2 内面	0.46	0.46	0.92
出口ノズル 1 外面	0.33	0.39	0.72
2 内面	0.33	0.39	0.72
熱抵抗体下部 1 内面	0.65	0.54	1.19

(590°C·90min, 250°C·30min,
1800 cycle)

4. 強度試験部以外の試験部

本供試体では、第3章に示した強度試験対象部位以外に次の構造を組み入れている。

- ① 管-多孔板溶接部
- ② 整流装置
- ③ 熱抵抗体

次節以降に各構造について述べる。

4.1 管-多孔板溶接部

FBR実証炉中間熱交換器 (IHX) の管-多孔板溶接手法は、コスト低減の観点から完全差込溶接をすることで計画されている。この手法は、もじゅ IHX への導入に際し特に問題がないとされている。しかし、この部分については、ナトリウム中の熱過渡試験は実施されておらず、今後の設計に対して溶接部のき裂発生 of データや拡管の効果 of データの拡充が望まれている。

そこで、管-多孔板溶接部の熱過渡に対する健全性を確認すること及び拡管による管の多孔板への把握力の熱過渡による影響を調査することを目的として、今回の供試体に管-多孔板溶接を導入した。

(1) 基本方針

- ① 管の拡管条件は、拡管力と拡管長さの組み合わせで4種類とする。

 拡管力：コンタクトロール (拡管力 小)

 中間ロール (拡管力 中)

 プレッシャーロール (拡管力 大)

 拡管長さ：大、小

- ② プラグの拡管条件は、1種類とする。
- ③ 管と多孔板の溶接条件は1層溶接及び2層溶接の2種類とする。
- ④ 管はJIS仕様のステンレス鋼管 ($\phi 15.9 \times t1.0$) を使用する。

(2) 製作

多孔板の管穴径は全て16.1mmである。管-多孔板溶接及びプラグを施工する多孔板の位置をFig. 4.1.1に示す。拡管条件をTable 4.1.1に示す。使用する管及びプラグの形状及び拡管範囲をFig. 4.1.2に示す。

拡管は管、プラグとも機械拡管とし、拡管力は肉厚減少率で次の値を目標とした。

 コンタクトロール : 1~3%程度

中間ロール : 3 ~ 5 %程度

プレッシャーロール : 5 ~ 8 %程度

なお、肉厚減少率とは次の式で定義されるものである。

$$W = ((d_o - d_i) - (D - d_e)) / (d_o - d_i)$$

ここで、W : 肉厚減少率

d_o : 拡管前の管外径

d_i : 拡管前の管内径

D : 拡管前の管孔内径

d_e : 拡管後の管内径

Table 4. 1. 1 Expansion Condition

記号	説明			施工数	備考
	管・管板接合部orプラグ部	拡管長さ	拡管状態		
○	管・管板接合部	46 mm	プレッシャーロール	15	1層溶接8箇所 2層溶接7箇所
◎	"	82 mm	コンタクトロール	15	1層溶接8箇所 2層溶接7箇所
◐	"	82 mm	中間ロール	15	1層溶接8箇所 2層溶接7箇所
◑	"	82 mm	プレッシャーロール	15	1層溶接8箇所 2層溶接7箇所
●	プラグ部	46 mm	プレッシャーロール	10	

記号は Fig 4. 1. 1, 2 に対応する。

中間ロールはコンタクトロールとプレッシャーロールの間の拡管把握力をねらった拡管を示す。

4. 2 整流装置

整流装置は、各燃料要素からの流れを相互に交わらないように導き温度流速を計測するために設置されるものであり、炉心の直上に位置しているため下側からサーマルストライピングを受ける。もんじゅの場合、サーマルストライピングに対する高温での高サイクル疲労強度が SUS304 では十分でないとの判断から、整流装置は SUS304 の構造部材に高温強度の高い合金である Alloy718 の薄板を熱保護用に取りつけた構造となっている。このサーマルスト

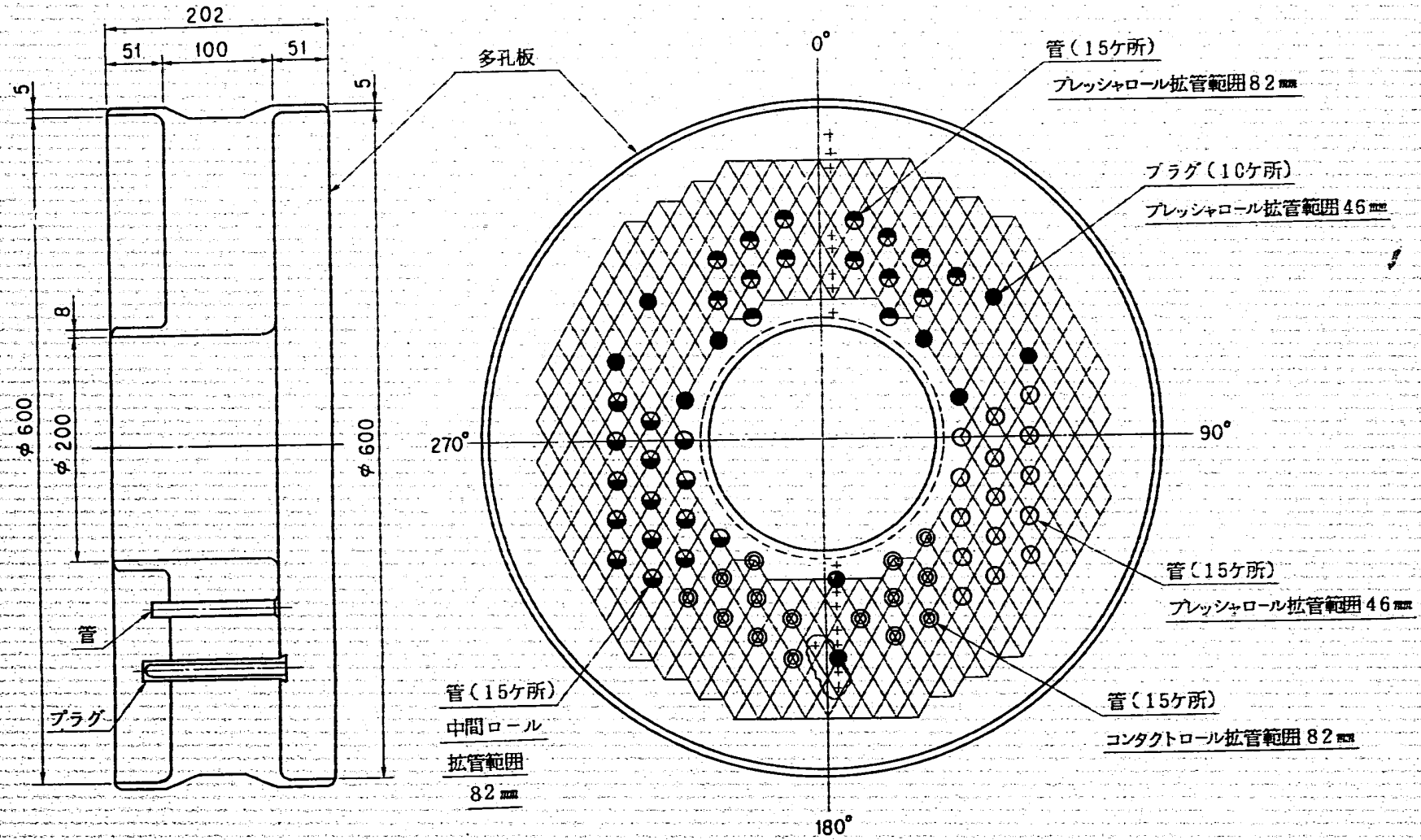
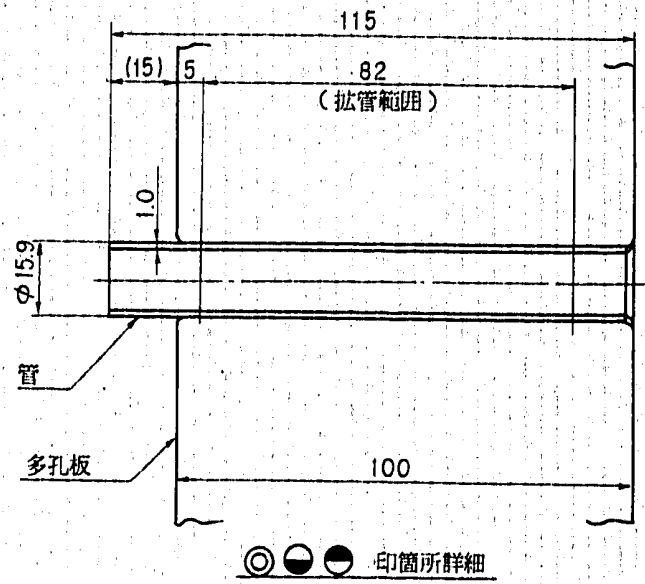
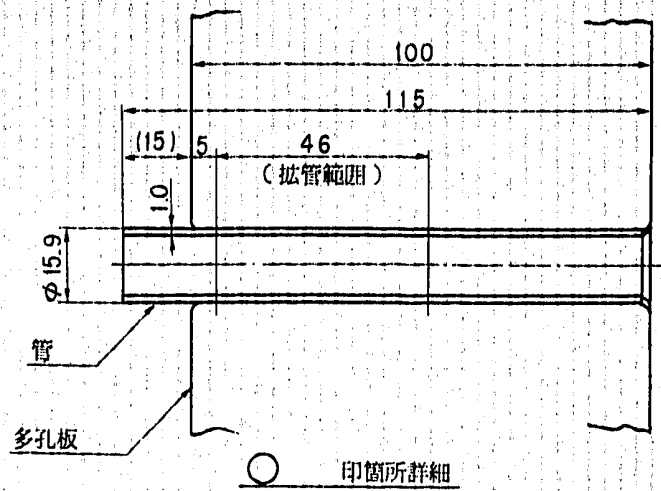
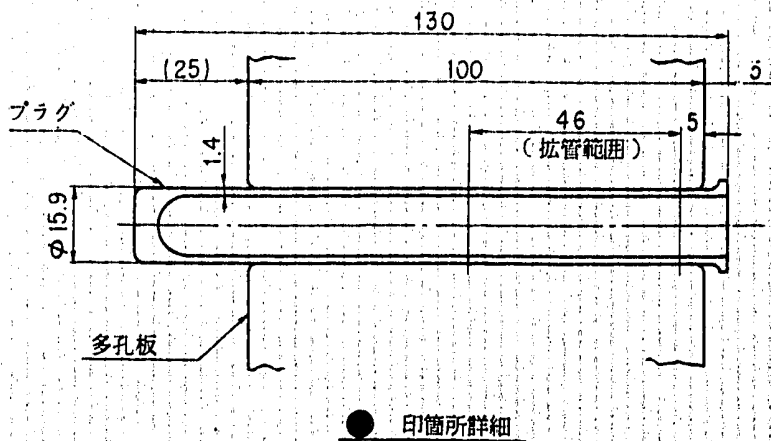


Fig. 4.1.1 Location of Tube Expansion



(a) Tube



(b) Plug

Fig. 4.1.2 Expansion Position of Tube and Plug

ライピング対策の構造は起動停止等のグロスの熱過渡に対しても強度評価上特に問題とはならない。

今回、本供試体にこの構造の整流装置を導入する目的は、サーマルストライピング対策として採用した Alloy718 の取り付け方法が、グロスの熱過渡に対しても保持されることを試験で確認することである。

試験部の概要を Fig. 4. 2. 1 に示す。これは制御棒上部案内管廻りの 6 本の整流筒及びダルマ型と円形のフローホールを模擬したものである。ベースの管板と制御棒案内管は SUS 304 で上下面に Alloy718 製の保護板を Alloy718 製の整流筒とナットで取り付けてある。また側面には Alloy718 製の側面保護板が、フローホールには Alloy718 製のフリースリーブが取り付けられている。

4. 3 熱抵抗体

炉壁熱保護対策の一案として炉壁への熱抵抗体の設置がある。熱抵抗体は流体と構造物の間に設置され熱伝導及び輻射による熱の移動を低減させるものである。容器の内部を真空にすることにより熱伝導率を下げ、また内部を区切ることによって輻射を防止している。

今回の供試体に設置する目的は、熱抵抗体の性能をナトリウム中で確認することである。

試験部の概要を Fig. 4. 3. 1 に示す。今回は輻射防止板間をハニカム構造とする構造のものを用いた。供試体の内径は 800 mm 程度の大きさのため、二重円筒のアニュラス部に直方体の熱抵抗体要素を周方向に 29 個並べる構造としている。

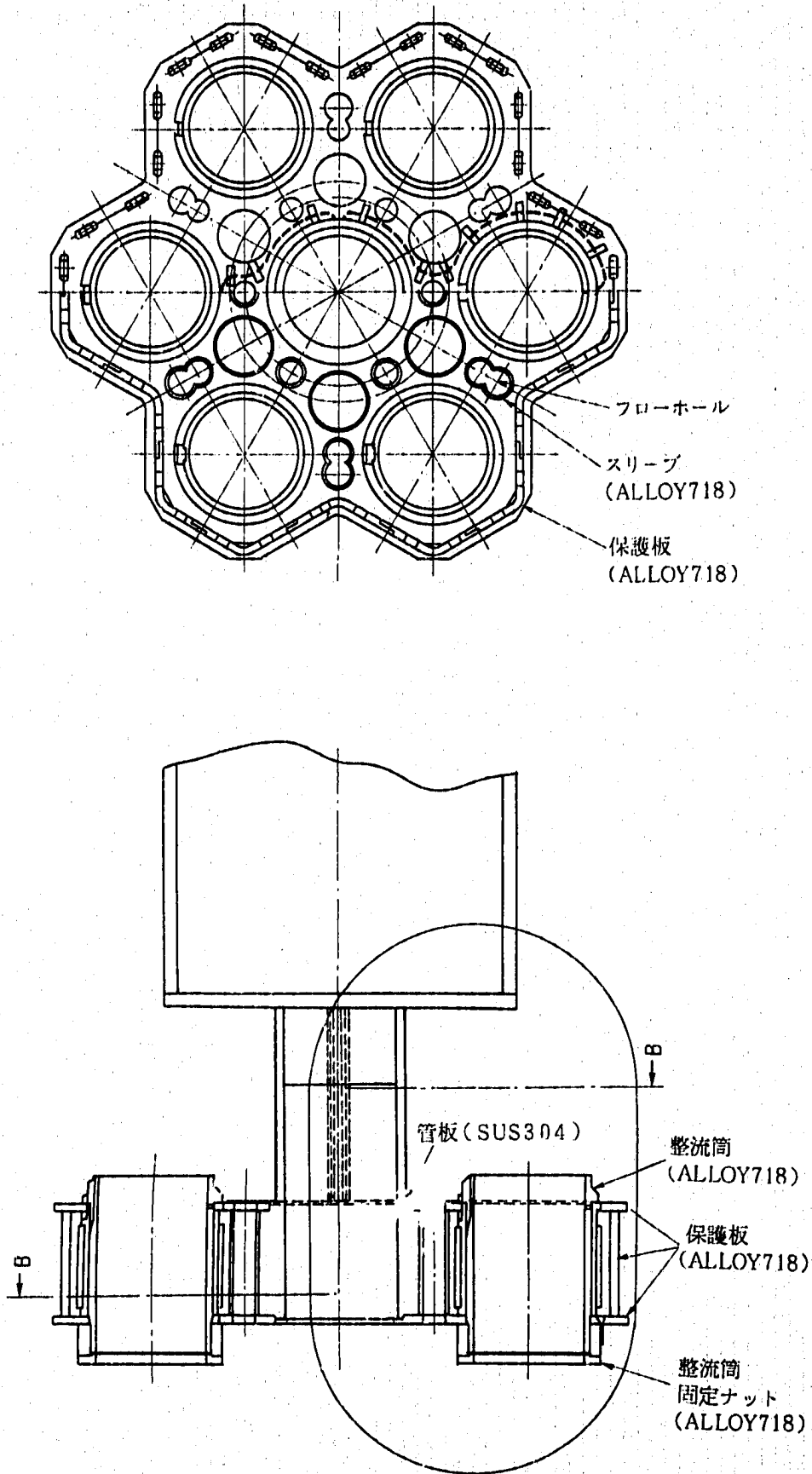


Fig. 4.2.1 Flow Straightener Model

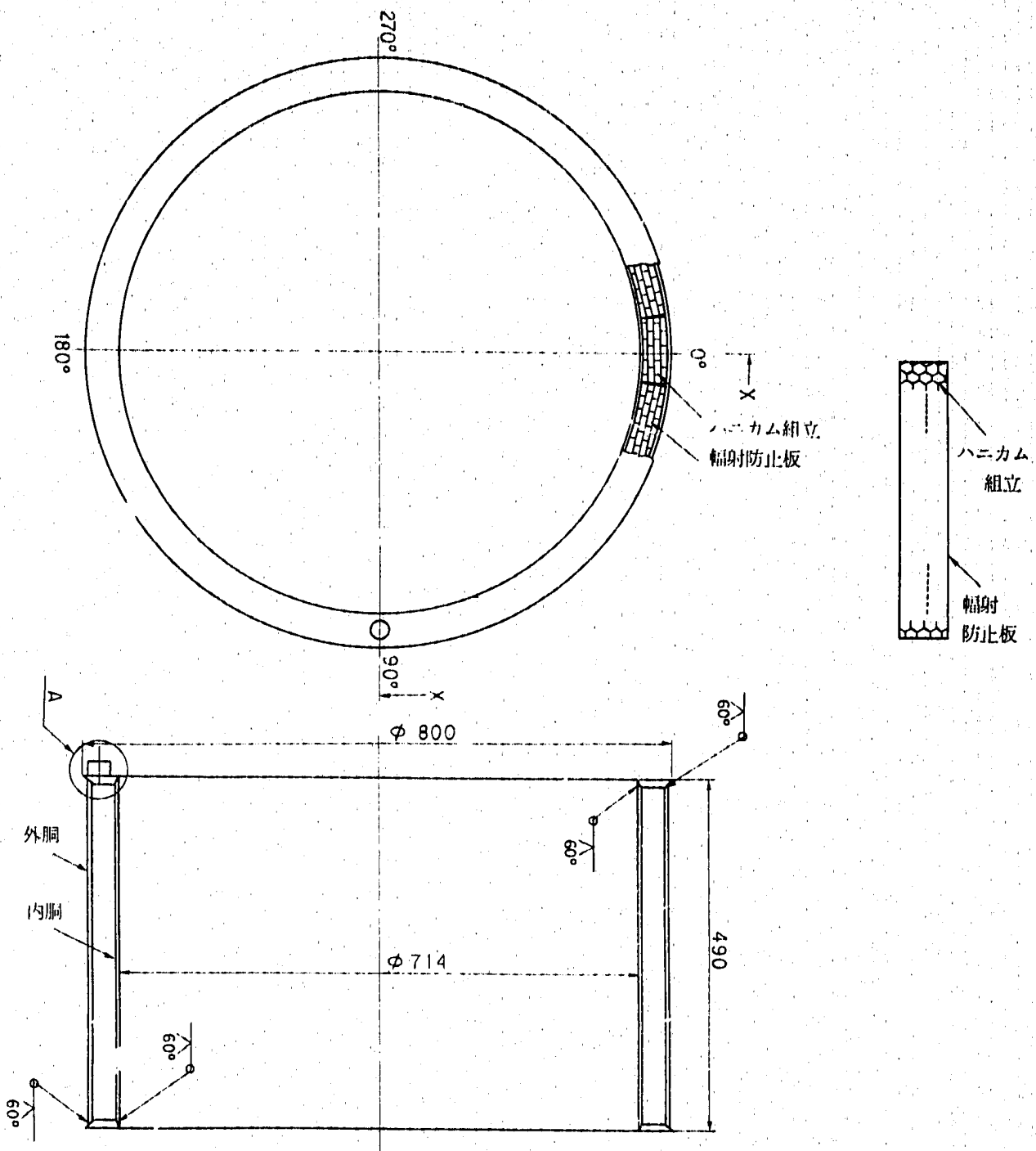


Fig. 4.3.1 Thermal Insulator Model

5. 製作・検査

5.1 材 料

本供試体に使用する材料は以下のとおりである。

(1) ステンレス鋼

① 鍛造材

名称：圧力容器用ステンレス鋼鍛鋼品

記号：JIS G 3214(SUSF304)

② 板材

名称：熱間圧延ステンレス鋼板

記号：JIS G 4304(SUS304)

③ 管材

名称：配管用ステンレス鋼鋼管

記号：JIS G 3459(SUS304TP)

④ 棒材

名称：ステンレス鋼棒

記号：JIS G 4303(SUS304)

⑤ 管材

名称：ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼鋼管

記号：JIS G 3463(SUS304TB)

主要部の化学成分と機械的性質を Table 5. 1. 1 (a)～(e)に示す。

(2) ALLOY718

材料の仕様はもんじゅの整流装置に使用する材料と同等とした。

化学成分と機械的性質の仕様を Table 5. 1. 2 (a), (b)に示す。

Table 5.1.1(a) Material Specification

No.	数量	名称	材質	寸法	機 械 的 性 質						化 学 組 成 (wt%)							
					温度 °C	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_u kg/mm ²	$\phi\%$	R.o.A. %	硬 度 HB	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
		上部鏡板	SUSF304	φ890 ×1780	RT	29.2	59.2	66.9	77.1	134	0.05	0.49	1.59	0.030	0.002	8.71	18.27	0.037
		Yピース	SUSF304	φ860 ×φ590 ×1310	RT	28.9	57.8	67.9	75.4	125	0.05	0.49	1.59	0.030	0.002	8.71	18.27	0.037
		下部鏡板	SUSF304	φ1060 ×1500	RT	31.2	59.4	64.7	75.7	134	0.05	0.49	1.59	0.030	0.002	8.71	18.27	0.037
		出口ノズル	SUSF304	φ280 ×φ130 ×1300	RT	30.0	58.6	66.7	77.8	129	0.05	0.49	1.59	0.030	0.002	8.71	18.27	0.037
		多孔板	SUSF304	φ620 ×1210	RT	29.2	59.0	67.4	77.4	129	0.05	0.49	1.59	0.030	0.002	8.71	18.27	0.037
		整流装置 管板	SUSF304	400×400	RT	29.9	58.3	66.3	77.8	129	0.05	0.49	1.59	0.030	0.002	8.71	18.27	0.037
JIS G 3214					RT	≥ 21	≥ 53	≥ 43	≥ 50	≤ 187	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤	≤	8.00	18.00	
													0.045	0.030	11.00	20.00		

-77-

Table 5.1.1(b) Material Specification

No	数量	名称	材質	寸法	機 械 的 性 質						化 学 組 成 (wt%)						
					温度 ℃	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_u kg/mm ²	$\phi\%$	R.o.A. %	硬 さ HB	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
		中間胴	SUS304	t25	RT	27	64	60	-	151	0.05	0.48	0.83	0.026	0.004	8.53	18.46
		内部胴	SUS304	t5	RT	29	61	54	-	82	0.05	0.45	1.12	0.026	0.008	9.32	18.67
		小胴底板	SUS304	t10	RT	26	59	65	-	144	0.05	0.49	0.85	0.028	0.005	8.59	18.41
		小 胴	SUS304	t8		28	64	60	-	151	0.05	0.47	0.83	0.026	0.006	8.56	18.48
JIS G 4304					RT	≥ 21	≥ 53	≥ 40	-	≤ 187						8.00	18.00
						≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤	≤	~	~	0.045	0.030	10.50	20.00	

Table. 5.1.1(c) Material Specification

No	数量	名称	材質	寸法	機 械 的 性 質						化 学 組 成 (wt%)						
					温度 ℃	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_u kg/mm ²	$\phi\%$	R.o.A. %	硬さ HB	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
		出口パイプ	SUS304TP	$\phi 165.2$ $\times t3.4$	RT	27	66	62			0.05	0.43	0.91	0.035	0.001	8.35	18.25
		計装管	SUS304TP	$\phi 27.2$ $\times t3.9$	RT	38	71	57			0.05	0.41	1.12	0.035	0.001	8.30	18.40
		JIS G 3459			RT	≥ 21	≥ 53	≥ 35			≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	\leq	\leq	8.00	18.00
													0.040	0.030	11.00	20.00	

Table 5.1.1(d) Material Specification

No	数量	名称	材質	寸法	機 械 的 性 質						化 学 組 成 (wt%)						
					温度 ℃	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_u kg/mm ²	$\phi\%$	R.o.A. %	硬 さ HB	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
		計装ノズル	SUS304	φ45	RT	30	59	65	76	149	0.06	0.36	1.11	0.033	0.018	9.10	18.14
		プラグ	SUS304	φ25	RT	26.1	64.4	64.4	75.4	81	0.04	0.04	1.40	0.024	0.005	8.18	18.28
JIS G 4303					RT	≥ 28	≥ 53	≥ 40	≥ 45	≤ 241	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤	≤	8.00	18.00
													0.045	0.030	10.50	20.00	

Table 5.1.1(e) Material Specification

No	数量	名称	材質	寸法	機 械 的 性 質						化 学 組 成 (wt%)						
					温度 ℃	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_u kg/mm ²	$\phi\%$	R.o.A. %	硬 さ HB	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
		伝熱管	SUS304TB	φ15.9 ×t1.0	RT	28	64	62			0.042	0.39	1.79	0.03	0.007	8.77	18.55
JIS G 3463					RT	≥ 21	≥ 53	≥ 30			≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤	≤	8.00	18.00
													0.040	0.030	11.00	20.00	

Table 5.1.2 Material Specification (ALLOY 718)

(a) ALLOY718の化学成分 (wt%)

Ni+Co	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co	C
50.00	17.00	4.75	2.80	0.65	0.20	1.00	0.08
~ 55.00	~ 21.00	~ 5.50	~ 3.30	~ 1.15	~ 0.80	以下	以下

Mn	Si	P	S	B	Cu	Fe
0.35	0.35	0.015	0.015	0.006	0.30	残り
以下	以下	以下	以下	以下	以下	

(b) ALLOY718の機械的性質

固溶化熱処理後の機械的性質						
材 料	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	硬 さ (HRC)
棒	常 温	—	—	—	—	28.8 以下
板	常 温	73.8 以下	105.5 以下	30 以上	—	25.0 以下

時効硬化熱処理後の機械的性質						
材 料	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	硬 さ (HRC)
棒	常 温	105.5 以上	130.1 以上	12 以上	15 以上	35.5 以上
	650	87.9 以上	102.0 以上	12 以上	15 以上	—
板	常 温	105.5 以上	126.6 以上	12 以上	—	36.0 以上
	650	84.4 以上	102.0 以上	5 以上	—	—

時効硬化熱処理後のストレスラプチャ特性	
材 料	伸 び (%)
棒	4 以上
板	4 以上

5.2 製作

(1) 製作手順

工場における製作手順は、Fig. 5. 2. 1 による。

(2) 溶接

供試体の溶接箇所を Fig. 5. 2. 2 に示す。溶接の施行法を Table 5. 2. 1 に、施行法の記号の説明を Table 5. 2. 2 に、溶接部詳細一覧表を Table 5. 2. 3 (a)~(d) に示す。また溶接材のミルシートを Table 5. 2. 4 に示す。

溶接はすべて（管-多孔板溶接を除く）手動 TIG 溶接であり、表面仕上げ状態は十分良好と考えられるので、原則として次の場合を除いて表面加工は実施しないこととした。

- 溶接終了部のクレータを滑らかに仕上げる場合
- 1 mm を超える余盛を除去する場合
- 継手面の食い違いが 1 mm を超えている場合

また主要溶接部についてはレプリカを採取している。

(3) 熱遮蔽板

熱遮蔽板の取り付け座は胴に溶接で取りつける構造を基本としたが、Yピース部の一部にもんじゅの燃料交換装置等で使用されているネジ込み式の取り付け座を採用した。これを Fig. 5. 2. 3 に示す。

熱遮蔽板の交差部についてはギャップが広がらないよう、Fig. 5. 2. 4 に示すように交差部のギャップをボルト・ナットで保持する構造とした。

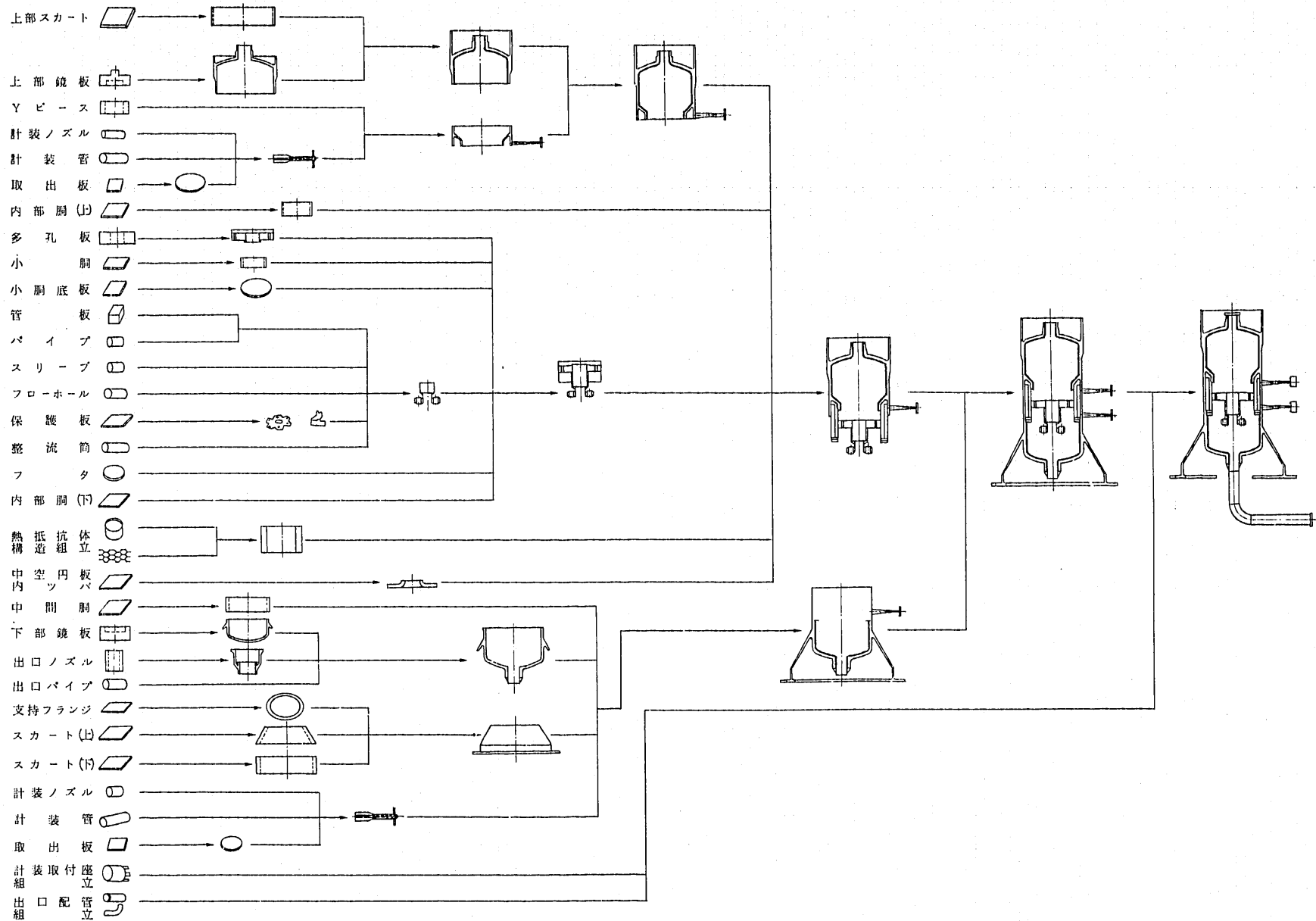


Fig. 5.2.1 Fabrication Sequence

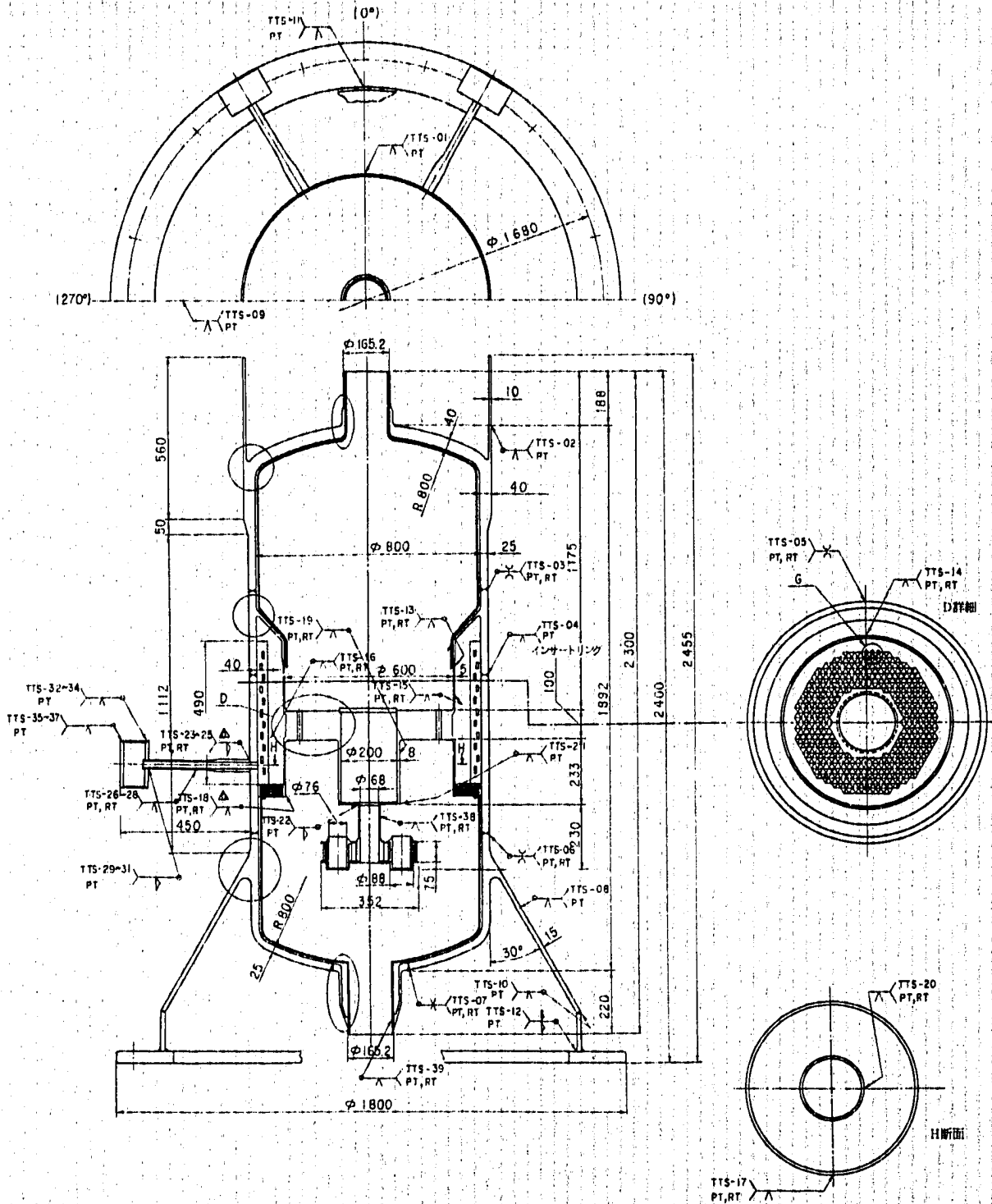


Fig. 5.2.2 Position of Welding Joint

Table 5.2.1 Welding Method

整理番号 確認事項の区分等	T-248	T-259	K-220N	K-284N
溶接方法	T _B	T	T	T _B
母材	P-8+P-8	P-8+P-8	P-8+P-8	P-8+P-8
溶接棒	—	—	—	—
溶接金属	—	—	A-7	A-7
予熱	行わない	行わない	行わない	行わない
溶接後熱処理	行わない	行わない	行わない	行わない
シールドガス	アルゴンガス	アルゴンガス	アルゴンガス	アルゴンガス
裏面からのガス保護	行わない	行う	行う(A _r)	行う
溶加材	R-7	R-7	TG 308L	R-7
ウエルドインサート	—	R-7	—	—
電極	—	—	—	—
フラックス	—	—	—	—
心線	—	—	—	—
溶接機	—	—	—	—
層	—	—	—	—
母材の厚さ	40mm以下	42mm以下	19mm以下	40mm以下
ノズル	—	—	—	—
電圧及び電流	—	—	—	—
揺動	—	—	—	—
あて金	—	—	—	—
リガメントの幅	—	—	—	—
衝撃試験	—	—	—	—
備考	(61 資庁第 15062 号)		(52 資庁第 12665 号)	

Table. 5. 2. 2 Nomenclature for Welding Method

(a) 溶接方法の区分

溶接方法の区分	種 類
T	ティグ溶接（裏あて金を用いない片側溶接）
T _B	ティグ溶接（両側溶接又は裏あて金を用いる片側溶接）
S	その他の自動溶接

(b) 母材の区分

母材の区分	種 類
P-8	オーステナイト系ステンレス鋼

(c) 溶接金属の区分

溶接金属の区分	溶 接 金 属	溶 接 金 属 の 主 要 成 分 (%)					
		炭 素	ク ロ ム	モリブデン	ニッケル	マンガン	けい 素
A-7	オーステナイト系ステンレス鋼	0.15 以下	14.50 ~ 30.00	4.00 以下	7.50 ~ 15.00	2.50 以下	1.00 以下

(d) 溶加材若しくはウェルドインサート又は心線の区分

溶加材又はウェルドインサートの区分	心線の区分	種 類
R-7	E-7	オーステナイト系 ステンレス鋼 溶接金属の成分が A-7に相当する もの

Table. 5. 2. 3 (a) Welding Joint List

名称	継手番号	材質		寸法 (mm) (内・外径) × (肉厚)	継手種別	溶接 方法	溶接棒または溶加材				フラックス + 心線	溶接 姿勢	電流 (A)	予熱 温度 (℃以上)	区 分		ガ ス		層 数	溶接施工法 (No.)	非破壊 試験
							初 層 部		残 層						溶接棒	溶接金属	シールド	バツク シールド			
		規格	区分				径(mm)	銘柄	径(mm)	銘柄											
上部スカート	TTS-01	SUS304	P-8	φ880×t10	突合せ (長手)	T	2.0	WEL TIG 308FR	2.0	WEL TIG 308FR	—	全姿勢	100 / 180	行わない	—	—	アルゴン	行う (アルゴン)	多層	58資庁 第12668号 (K-220N)	PT
上部スカート + 上部鏡板	TTS-02	SUS304 SUSF304	P-8 P-8	φ880×t10	突合せ (周)	T	2.0		2.0									行う (アルゴン)		58資庁 第12668号 (K-220N)	PT
上部鏡板 + Yピース	TTS-03	SUSF304 SUSF304	P-8 P-8	φ850×t25	突合せ (周)	T _B	2.0		2.0									行わない		61資庁 第15062号 (T-248)	PT RT
Yピース + 中間胴	TTS-04	SUSF304 SUS304	P-8 P-8	φ850×t25	突合せ (周)	T	1.6× 4.8		2.0									行う (アルゴン)		61資庁 第15062号 (T-259)	PT
中間胴	TTS-05	SUS304	P-8	φ850×t25	突合せ (長手)	T _B	2.0											行わない		61資庁 第15062号 (T-248)	PT RT
中間胴 + 下部鏡板	TTS-06	SUS304 SUSF304	P-8 P-8	φ850×t25	突合せ (周)	T _B												行わない		61資庁 第15062号 (T-248)	PT RT
下部鏡板 + 出口ノズル	TTS-07	SUSF304 SUSF304	P-8 P-8	t25	突合せ (周)	T _B												行わない		61資庁 第15062号 (T-248)	PT RT
下部鏡板 + スカート(上)	TTS-08	SUSF304 SUS304	P-8 P-8	t15	突合せ (周)	T _B												行う (アルゴン)		58資庁 第12668号 (K-284N)	PT
スカート(上)	TTS-09	SUS304	P-8	t15	突合せ (長手)	T _B															
スカート(上) + スカート(下)	TTS-10	SUS304 SUS304	P-8 P-8	φ1480× t15	突合せ (周)	T _B															
スカート(下)	TTS-11	SUS304	P-8	φ1480× t15	突合せ (長手)	T _B												行う (アルゴン)		58資庁 第12668号 (K-284N)	
スカート(下) + 支持フランジ	TTS-12	SUS304 SUS304	P-8 P-8	t15 t40	隅肉	T _B												行わない		61資庁 第15062号 (T-248)	PT
Yピース + 内部胴(上)	TTS-13	SUSF304 SUS304	P-8 P-8	φ610×t5	突合せ (周)	T _B	2.0	WEL TIG 308FR	2.0	WEL TIG 308FR	—	全姿勢	100 / 180	行わない	—	—	アルゴン	行う (アルゴン)	多層	58資庁 第12668号 (K-284N)	PT RT

Table. 5. 2. 3 (b) Welding Joint List

名称	継手番号	材質		寸法 (mm) (内・外径) × (肉厚)	継手種別	溶接方法	溶接棒または溶加材				フラックス + 心線	溶接姿勢	電流 (A)	予熱温度 (°C以上)	区分		ガス		層数	溶接施行法 (No.)	非破壊 試験		
		規格	区分				初層部		残層						溶接棒	溶接金属	シールド	バックシールド					
							径(mm)	銘柄	径(mm)	銘柄													
内部胴(上)	TTS-14	SUS304	P-8	φ610×t5	突合せ (長手)	T _B	2.0	WEL TIG 308FR	2.0	WEL TIG 308FR	2.4	—	—	100 ↓ 180	行わない	—	—	アルゴン	行わない (アルゴン)	多層	58資庁 第12668号 (K-284N)	PT RT	
内部胴(上) + 多孔板	TTS-15	SUS304 SUSF304	P-8 P-8	φ610×t5	突合せ (周)	T															58資庁 第12668号 (K-220N)		
多孔板 + 内部胴(下)	TTS-16	SUSF304 SUS304	P-8 P-8	φ610×t5	突合せ (周)	T															58資庁 第12668号 (K-220N)		
内部胴(下)	TTS-17	SUS304	P-8	φ610×t5	突合せ (長手)	T _B	2.0														58資庁 第12668号 (K-284N)		
内部胴(下) + 中空円板内ツバ	TTS-18	SUS304 SUS304	P-8 P-8	φ610×t5	突合せ (周)	T	1.6×3.2														61資庁 第15062号 (T-259)		
多孔板 + 小胴	TTS-19	SUSF304 SUS304	P-8 P-8	φ215×t8	突合せ (周)	T	2.0														58資庁 第12668号 (K-220N)		
小胴	TTS-20	SUS304	P-8	φ216×t8	突合せ (長手)	T _L															58資庁 第12668号 (K-284N)	PT RT	
小胴 + 小胴底板	TTS-21	SUS304 SUS304	P-8 P-8	φ216×t8	突合せ (周)	T															行 う (アルゴン)	58資庁 第12668号 (K-220N)	PT
小胴底板 + パイプ	TTS-22	SUS304 SUS304	P-8 P-8	t15 t9	隅肉	T _B															行わない	61資庁 第15062号 (T-248)	PT
Yピース + 計装ノズル	TTS-23 ~24	SUSF304 SUS304	P-8 P-8	t25 t10	隅肉	T															行 う (アルゴン)	58資庁 第12668号 (K-220N)	PT RT
中間胴 + 計装ノズル	TTS-25	SUS304 SUS304	P-8 P-8	t25 t10	隅肉	T								130 ↓ 130									PT RT
計装ノズル + 計装管	TTS-26 ~28	SUS304 SUS304 TP	P-8 P-8	φ27.2×t3.9	突合せ (周)	T								60 ↓ 130							行 う (アルゴン)	58資庁 第12668号 (K-220N)	PT RT
計装管 + 取板	TTS-29 ~31	SUS304 TP SUS304	P-8 P-8	t3.9 t15	隅肉	T _B	2.0	WEL TIG 308FR	2.0	WEL TIG 308FR	2.4	—	—	100 ↓ 180	行わない	—	—	アルゴン	行わない	多層	61資庁 第15062号 (T-248)	PT	

Table. 5. 2. 3 (c) Welding Joint List

名 称	継 手 番 号	材 質		寸法 (mm) (内・外径) × (肉厚)	継手種別	溶接 方法	溶接棒または溶加材				フラックス + 心 線	溶 接 姿 勢	電 流 (A)	予 熱 温 度 (℃以上)	区 分		ガ ス		層 数	溶接施行法 (No.)	非破壊 試 験
		規 格	区 分				初 層 部		残 層						溶 接 棒	溶接金属					
							径(mm)	銘 柄	径(mm)	銘 柄											
取 出 板 取 出 管	TTS-32 ~34	SUS304 SUS304 TP	P-8 P-8	φ165.2×3.4	突合せ (周)	T _B	2.0	WEL TIG 308FR	2.0	WEL TIG 308FR	—	全姿勢	60 ↓ 130	行わない	—	—	アルゴン	行わない	多層	61資庁 第15062号 (T-248)	PT
取 出 管 計 装 取 出 座	TTS-35 ~37	SUS304 TP SUS304	P-8 P-8	φ165.2×3.4	突合せ (周)	T _B			2.0				60 ↓ 130					行わない		61資庁 第15062号 (T-248)	PT
パ イ プ + 管 板	TTS-38	SUS304 SUS304	P-8 P-8	φ82 × t _g	突合せ (周)	T			2.0				80 ↓ 150					行 う (アルゴン)		58資庁 第12668号 (K-220N)	PT RT
出 口 ノズル + 出 口 パイプ	TTS-39	SUSF304 SUS304	P-8 P-8	φ165.2×3.4	突合せ (周)	T	2.0		2.0				60 ↓ 130					行 う (アルゴン)		58資庁 第12668号 (K-220N)	PT RT
出 口 ノズル + 配 管 (上)	TTS-40	SUSF304 SUS304 TP	P-8 P-8	φ165.2×3.4	突合せ (周)	T	1.6×3.2													61資庁 第15062号 (T-259)	
配 管 (上) + エ ル ボ	TTS-41	SUS304 TP SUS304	P-8 P-8	φ165.2×3.4	突合せ (周)	T	1.6×3.2														
エ ル ボ + 配 管 (下)	TTS-42	SUS304 SUS304 TP	P-8 P-8	φ165.2×3.4	突合せ (周)	T	1.6×3.2	WEL TIG 308FR	2.0	WEL TIG 308FR	—	全姿勢	60 ↓ 130	行わない	—	—	アルゴン	行 う (アルゴン)	多層	61資庁 第15062号 (T-259)	PT RT

Table. 5. 2. 3 (d) Welding Joint List

名 称	継 手 番 号	材 質		寸法 (mm) (内・外径) × (肉厚)	継手種別	溶接 方法	溶接棒または溶加材				フลักス + 心 線	溶 接 姿 勢	電 流 (A)	予 熱 度 (℃以上)	区 分		ガ ス		層 数	非 破 壊 試 験
		規 格	区 分				初 層 部		2 層						溶接棒	溶接金属	シールド	バック シールド		
							径(mm)	銘 柄	径(mm)	銘 柄										
多 孔 板 + 管	S-1	SUSF304 SUS304 TB	P-8 P-8	φ15.9×t1.0	すみ肉	ST	0.8	TGS- 308N	—	—	—	横 向	60 / 130	行わない	—	—	アルゴン	—	1層	PT RT
多 孔 板 + 管	S-2	SUSF304 SUS304 TB	P-8 P-8	φ15.9×t1.0	すみ肉	ST	—	—	0.8	TGS- 308N	—	横 向	40 / 150	行わない	—	—	アルゴン	—	2層	PT RT

Table 5. 2. 4 Chemical Composition of Welding Wire

溶接材料の 種類・寸法	Elements (Wt%)		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	規格 品名	min max	-- 0.08	-- 0.65	1.0 2.5	-- 0.03	-- 0.03	9.0 11.0	19.5 22.0
ウエルドインサート W1.6×t4.8×φ800	WEL IR 308FR		0.060	0.38	1.66	0.004	0.003	9.67	19.92
溶 加 棒 φ 2.0	WEL TIG 308FR		0.060	0.38	1.66	0.004	0.003	9.67	19.92
溶 加 棒 φ 2.4	WEL TIG 308FR		0.060	0.38	1.66	0.004	0.003	9.67	19.92
溶 加 棒 φ 2.4	WEL TIG 308FR		0.059	0.33	1.65	0.003	0.006	9.62	19.64

(適用規格： JIS Z 3321-1985 Y308)

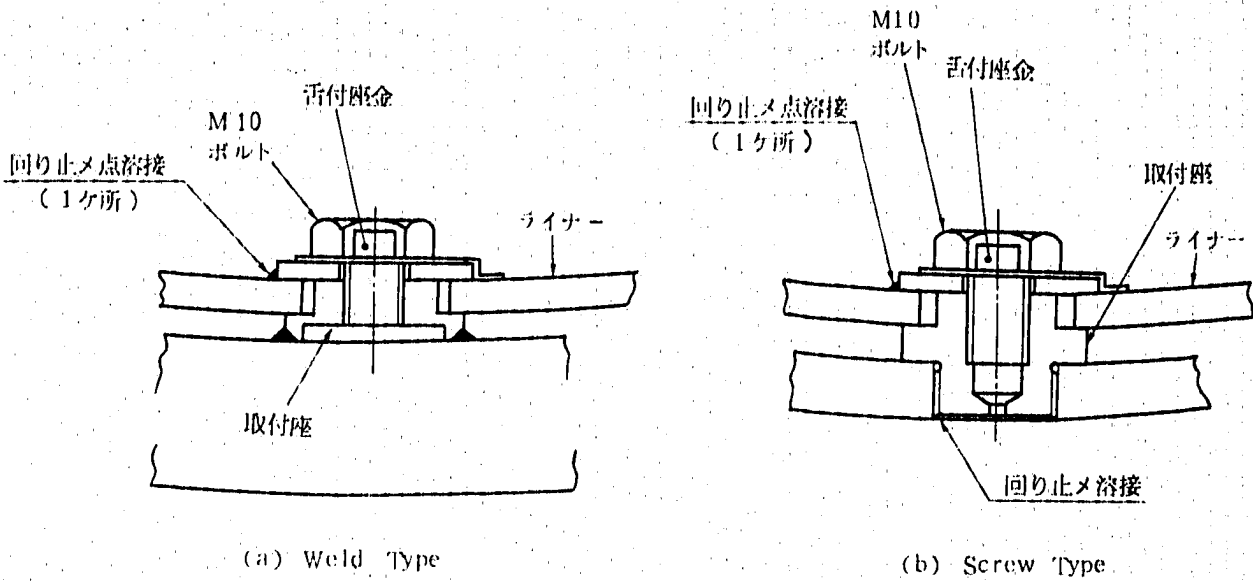


Fig. 5.2.3 Stud Bolt Structure

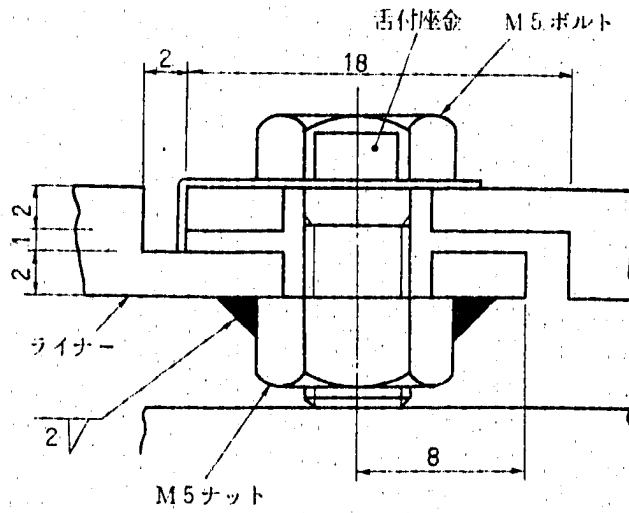


Fig. 5.2.4 Thermal Liner Structure

5.3 計 装

(1) 熱電対

熱電対は熱過渡試験時のナトリウム温度及び供試体温度の変化を計測するために設置される。熱電対取り付けの全体位置を Fig. 5. 3. 1 に、多孔板部について Fig. 5. 3. 2 に示す。これらの熱電対により計測された温度データは、内部熱流動解析結果の検証、試験後の熱応力解析に使用される。

熱電対の取り付け法の例を Fig. 5. 3. 3 に示す。

(2) 変位計

変位計は、供試体が配管系から過大な荷重を受けていないことを確認するために設置される。

本供試体において変位計は、支持スカートフランジ部と上部スカート上端部の2レベルに、それぞれ45°方向と135°方向の2箇所に取り付けられる。

5.4 検 査

検査は、材料確認、外観寸法検査、溶接検査、耐圧漏洩試験、電気試験等からなる。検査の方法と判定基準の概要を Table. 5. 4. 1 (a)~(d)に示す。

本供試体は検査の結果、これらの判定基準をすべて満足した。
完成した供試体の構造図等を付録に示す。

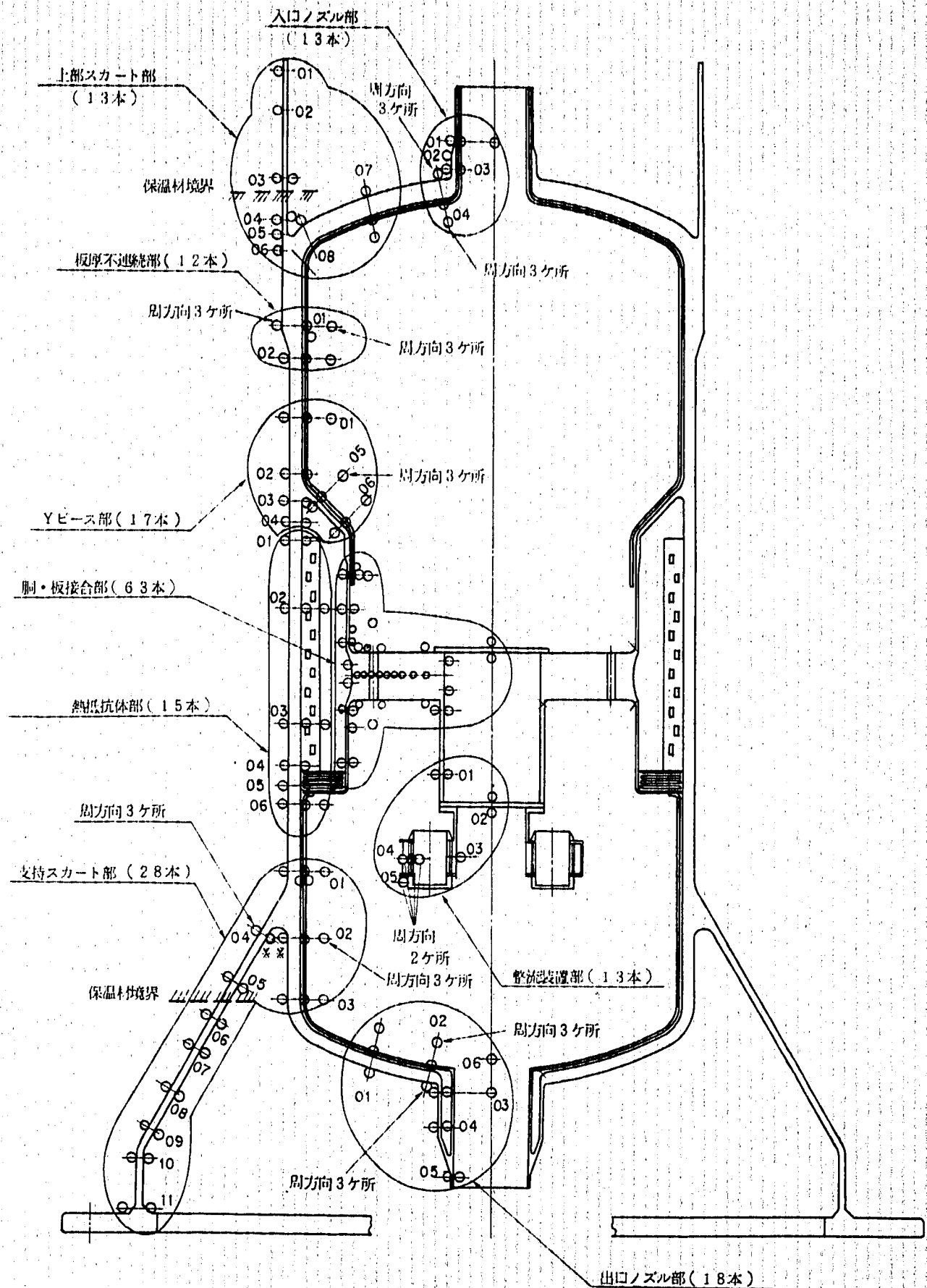


Fig. 5.3.1 Thermocouple Location

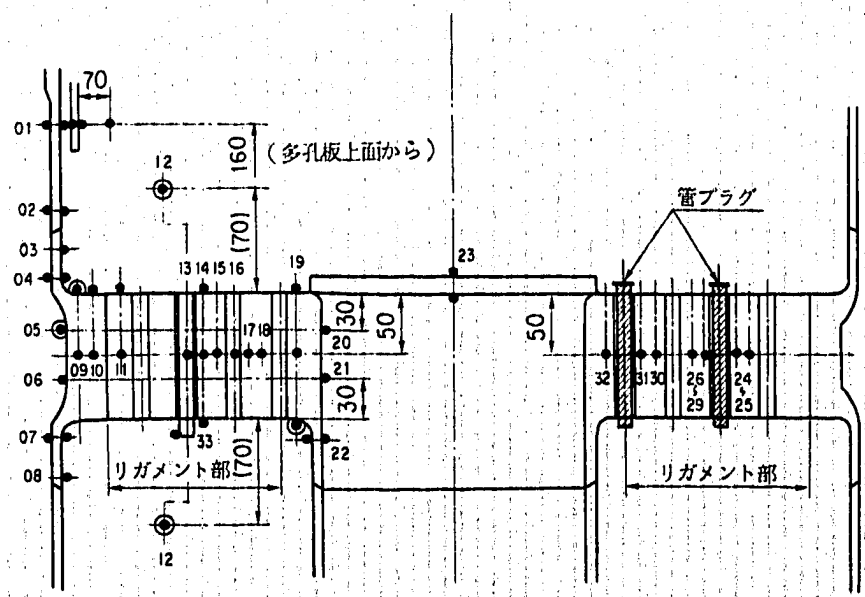
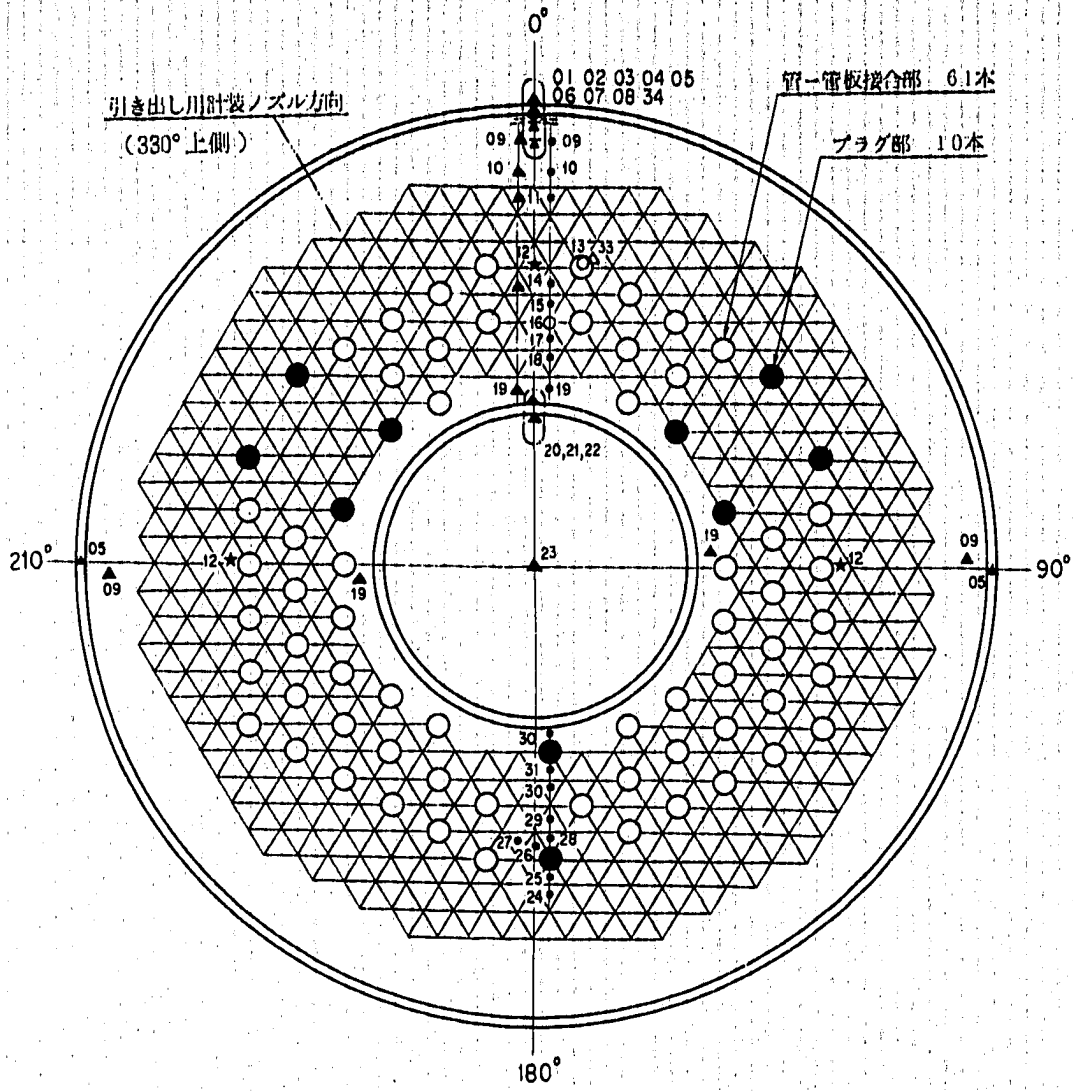
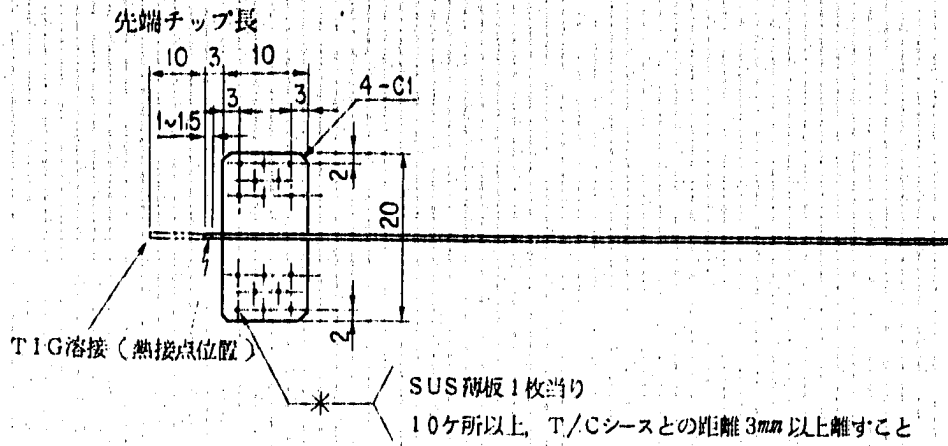
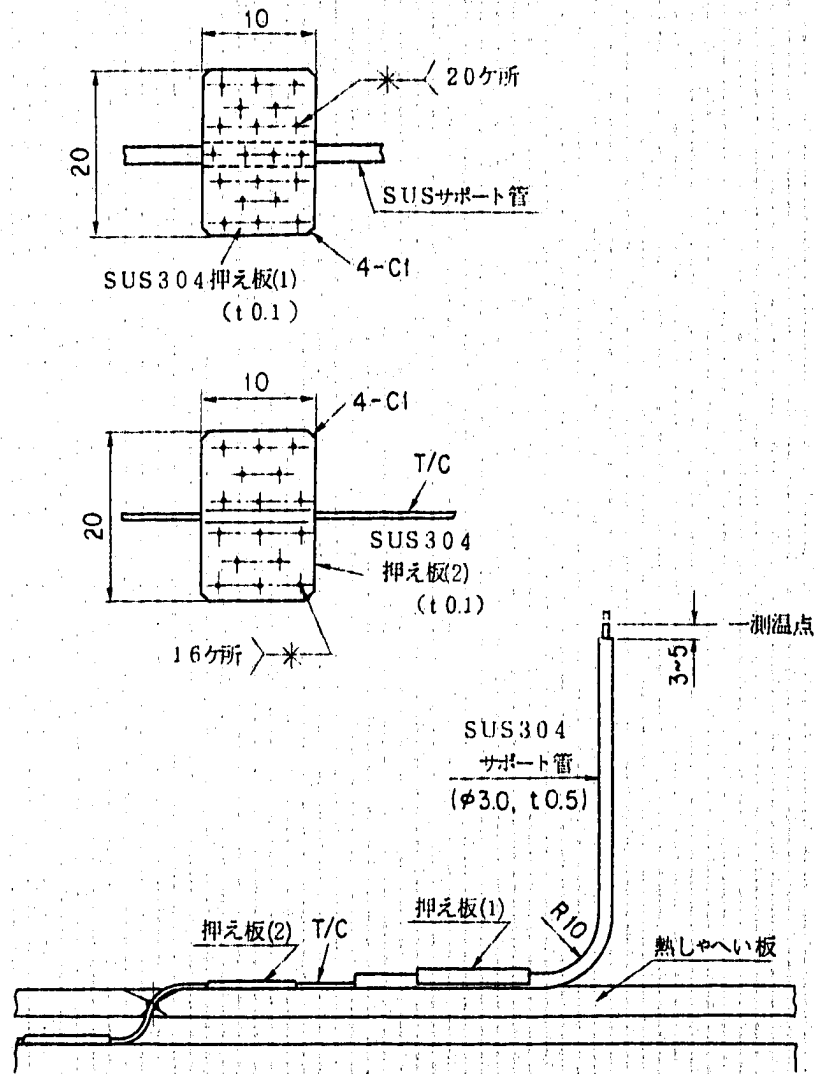


Fig. 5.3.2 Thermocouple Location (Perforated Plate)



(a) 供試体表面温度測定用熱電対



(b) ナトリウム温度測定用熱電対

Fig. 5.3.3 Thermo couple Setting

Table. 5. 4. 1(a) Testing and Examination

No.	項 目	検 査 の 方 法	判 定 基 準
I	部 品 検 査		
1.1	外 観 検 査	目視による。	有害な傷、バリ、変形及び汚れ等のないこと。
1.2	寸 法 検 査	構造図等に基づきノギス、マイクロメータ、スケール、Rゲージ等を用いて各寸法を確認する。また構造図等で重要な寸法は記録を残す。	実測した結果が、公差内であること。
1.3	非 破 壊 試 験 (浸透探傷試験)	JIS Z 2343(1978) により行う。	無欠陥を目標とする。

Table. 5.4.1(b) Testing and Examination

No.	項目	検査の方法	判定基準							
2	溶接検査									
2.1	材料確認	材料検査証明書（ミルシート）と材料の表示を照合する。	材料名，チャージ番号等が一致しており材料照合が可能であること。							
2.2	開先面検査	<p>外観検査：開先面及びその付近（熱影響部）について目視により確認する。</p> <p>浸透探傷試験：試験の方法は，JIS Z 2343(1982)により行う。</p>	<p>外観検査：水分，塗料，油脂，ごみ，有害な錆，溶けかす及びその他有害な異物のないこと。</p> <p>浸透探傷試験：無欠陥を目標とする。</p> <p>（欠陥が認められた場合は，別途協議とする。）</p>							
2.3	開先検査	<p>外観検査：開先及び溶接仮付け部を目視により検査する。</p> <p>寸法検査：開先部の寸法をノギス，スケール等により実測する。</p>	<p>外観検査：開先及びその付近（熱影響部）には，溶接に悪影響を及ぼす欠陥，付着物が認められないこと。</p> <p>寸法検査：測定結果が，「開先寸法公差」を満足していること。</p> <p>また，継手面の食違いは，最大0.5mmを目標とする。</p>							
			開先寸法公差							
			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>開先形状</th> <th>開先角度〔度〕</th> <th>ルート面〔mm〕</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V及びX形</td> <td rowspan="2" style="text-align: center;">± 5</td> <td rowspan="2" style="text-align: center;">± 1</td> </tr> <tr> <td>U,H,J,L 及びK形</td> </tr> </tbody> </table>	開先形状	開先角度〔度〕	ルート面〔mm〕	V及びX形	± 5	± 1	U,H,J,L 及びK形
開先形状	開先角度〔度〕	ルート面〔mm〕								
V及びX形	± 5	± 1								
U,H,J,L 及びK形										
2.4	溶接作業検査	溶接作業検査は，溶接施行記録（作業記録）の確認による。	<p>溶接作業が，通産省の認可を受けた施行法を使用して通産省の認可を受けた溶接士が施行していること。</p> <p>また，溶接条件（母材の組合せ，溶加材，溶接姿勢，溶接電流，シールドガスの有無等）は，「溶接部詳細一覧表」記載の溶接条件を満足すること。</p>							

Table. 5. 4. 1(c) Testing and Examination

No.	項 目	検 査 の 方 法	判 定 基 準
2.5	浸透探傷試験	試験の方法は、JIS Z 2343(1982)により行う。	無欠陥を目標とする。
2.6	放射線透過試験	通産省令第81号（昭和60年版）により行う。	<p>次の1) から3) までに適合すること。</p> <p>1) JIS Z 3104 の「3 透過写真の等級分類方法」の1級であること。この場合において、タングステン巻込みは、第1種の欠陥とみなし、その欠陥点数を2分の1として判定するものとする。</p> <p>2) 第1種の欠陥がある場合には、それぞれの欠陥の隣接する他の第1種の欠陥との間の距離が25mm未満の場合にあつては、母材の厚さの0.2倍（3.2mmを超える場合は、3.2mm）、隣接する他の第1種の欠陥との間の距離が25mm以上の場合にあつては、母材の厚さの0.3倍（6.4mmを超える場合は、6.4mm）の値を超えないこと。この場合において、1) において欠陥点数として算定しない欠陥については、欠陥とみなさない。</p> <p>3) 母材の厚さの12倍の長さの範囲内で、隣接する第2種の欠陥の間の距離が長い方の第2種の欠陥の長さの6倍未満であり、かつ、これらが連続して直線上に並んでいるときにおけるこれらの長さの合計が母材の厚さを超えないこと。</p>
2.7	外 観 検 査	目視により溶接部の状況及び余盛高さについて確認する。	溶接ビードの極端な不揃い、過度の余盛、アンダーカット、オーバーラップ、スラッグの付着、スパッタの付着及び有害な傷等のないこと。
2.8	耐 圧 試 験	容器内部を窒素により規定圧力に加圧し30分保持した後、溶接部に石鹼水を塗布する。	目視にて異常な変形がなくかつ、漏洩のないこと。

Table 5.4.1(d) Testing and Examination

No.	項目	検査の方法	判定基準
3	完成検査		
3.1	漏洩試験 (ヘリウム リーク試験)	容器内部を真空(ヘリウムリークディテクター入口で 10^{-3} TO RR以下)にしてヘリウムリーク試験を行う。	溶接部及び銀ロ一部： 1×10^{-6} acc/sec 以下
3.2	外観検査	外観を目視により検査する。	有害な傷、よごれ等がないこと。
3.3	寸法検査	構造図に基づき、主要寸法を巻尺、スケール、ノギス等により 実測する。	実測値が、公差内であること。
3.4	電気試験	絶縁抵抗試験：熱電対のリード線と対地間の絶縁抵抗を絶縁抵抗 測定器(DC100Vメガー)により測定する。 導通試験：熱電対のリード線間の導通をテスター又はプザー等に より確認する。	絶縁抵抗試験：絶縁抵抗値が $20M\Omega$ 以上であること。 導通試験：導通が有ること。
3.5	出荷検査	全ての試験検査について記録の確認及び目視による現物の確認 を行う。	記録に対しては、全ての試験検査結果が良好であること。 目視により、員数に間違いのないこと、汚れのないこと及び内 部に異物の残留がないこと。

6. 参考文献

- (1) 渡士他；原子炉容器モデル熱過渡強度試験，第2報，供試体の設計・製作
PNC SN9410 86-009
- (2) 渡士他；原子炉容器モデル熱過渡強度試験，第3報，熱過渡強度試験
PNC ZN9410 86-035
- (3) 渡士他；原子炉容器モデル熱過渡強度試験，第11報，試運転用供試体の熱過渡強度試験
PNC ZN9410 86-009
- (4) 梅田他；配管ベローズ継手モデル熱過渡強度試験，第1報，試験・検査
PNC SN9410 87-087
- (5) 梅田他；熱応力緩和構造モデル(1)熱過渡強度試験，第1報，試験・検査
PNC SN9410 89-(未定)
- (6) 谷川他；熱過渡強度データのまとめ
PNC SN9410 87-176

7. 謝 辞

本供試体は、株式会社 東芝 京浜事業所原子炉機器部にて製作された。岸氏、末園氏、大坪氏をはじめ関係各位に感謝します。

付 録

付録A. 構造図

- ① 供試体総組立図
- ② 上部構造組立図
- ③ 下部構造組立図
- ④ 多孔板構造図
- ⑤ 整流装置構造図
- ⑥ 鳥瞰図

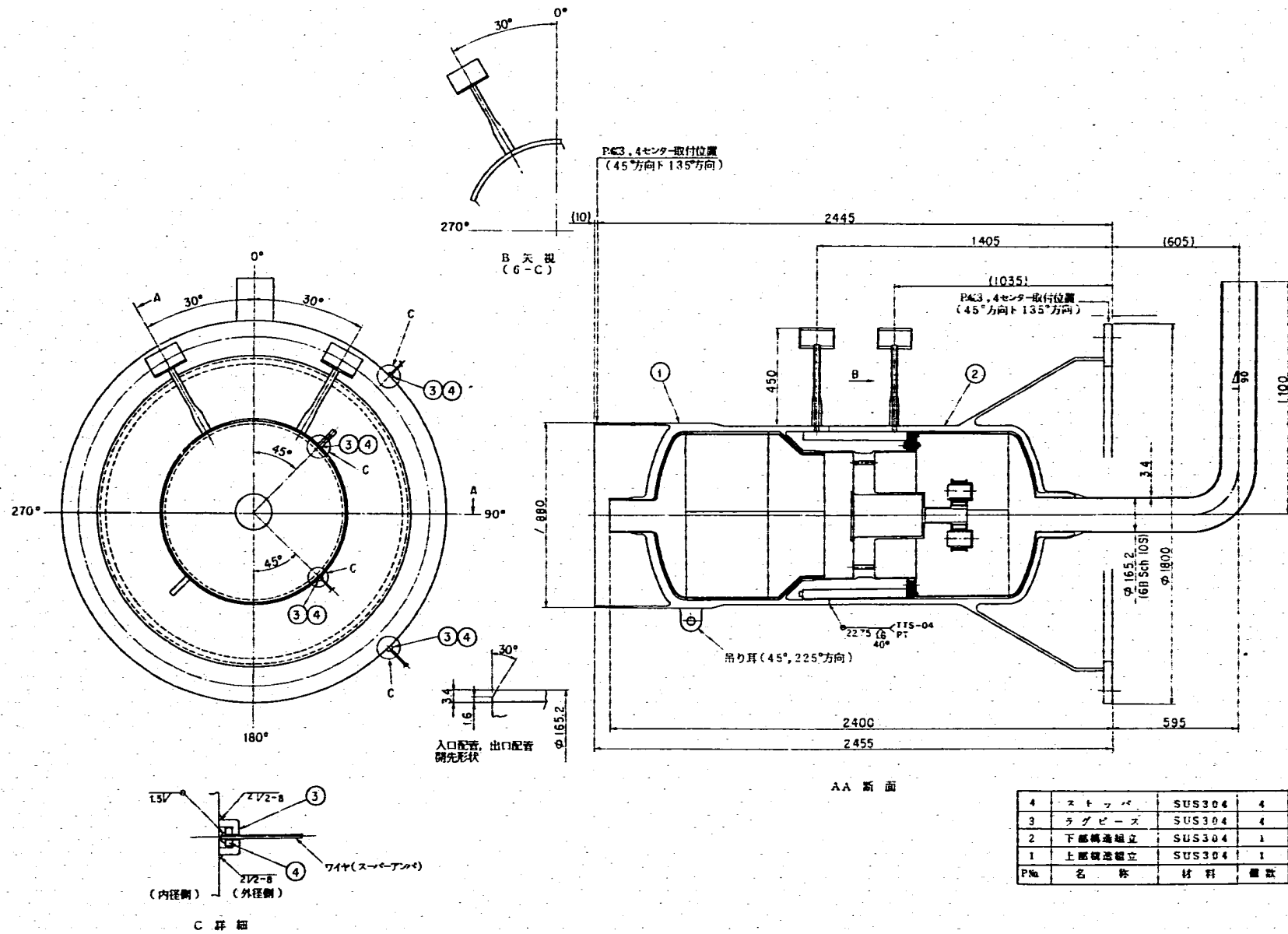
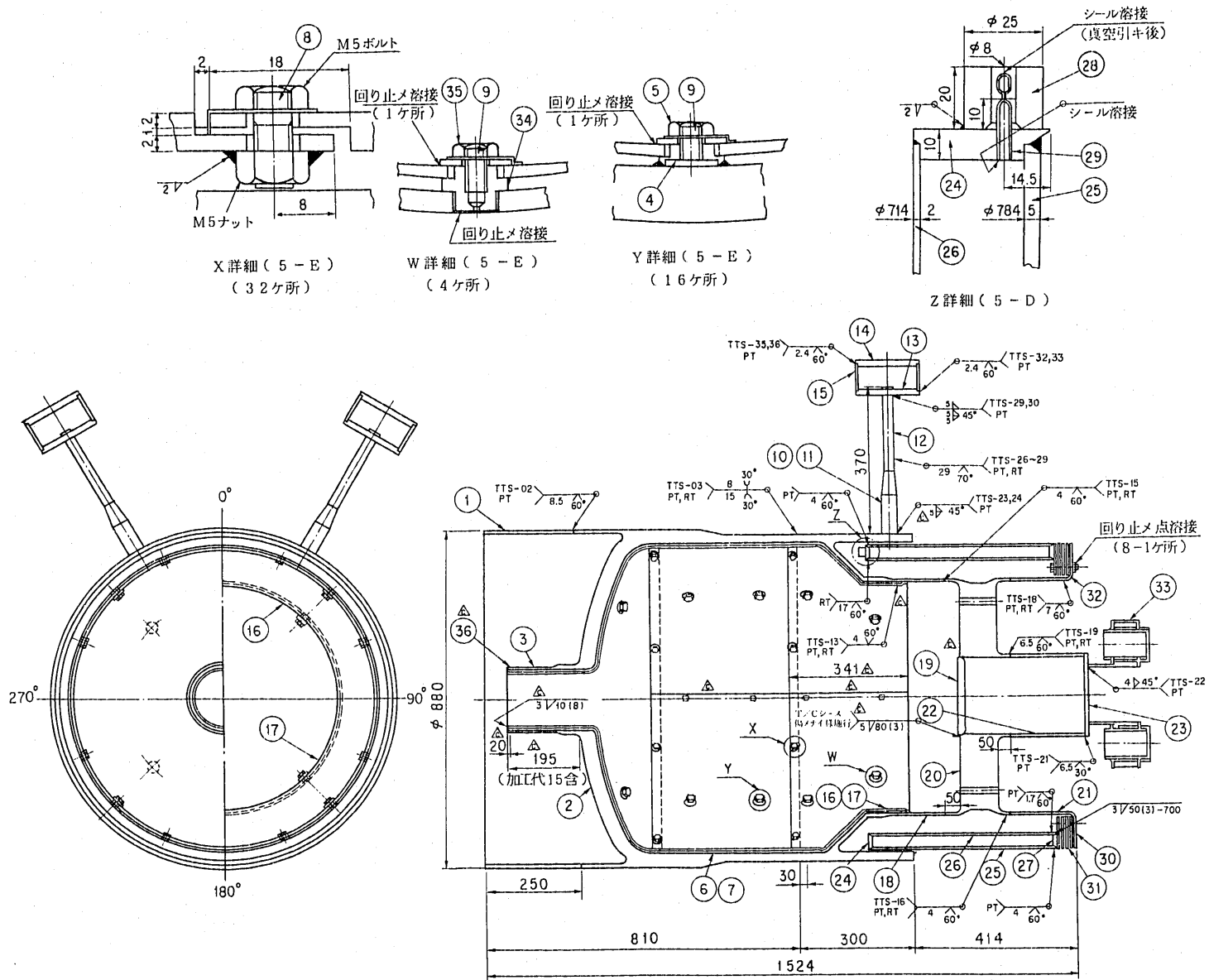


Fig. A. 1 Whole Structure



△ 36	シールリング	SUS304	1
△ 35	ボルト	SUS304	4
△ 34	取付度(2)	SUS304	4
△ 33	整流装置組立	SUSF 304 Adeoy 718	1
32	スペーサ	SUS304	32
31	中空円板	SUS304	4
30	中空円板内ツバ	SUS304	1
29	真空引用ノズル	SUS304	1
28	保護座	SUS304	1
27	底板	SUS304	1
26	内胴	SUS304	1
25	外胴	SUS304	1
24	上板	SUS304	1
23	小胴底板	SUS304	1
22	小胴	SUS304	1
21	内部胴(下)	SUS304	1
20	多孔板	SUSF304	1
19	フタ	SUS304	1
18	内部胴(上)	SUS304	1
17	上部熱しゃへい板(下2)	SUS304	1
16	上部熱しゃへい板(下1)	SUS304	1
15	取出管	SUS304	1
14	計装取出座(1)(2)	SUS304	各1
13	取出板	SUS304	2
12	計装管	SUS304	2
11	計装ノズル	SUS304	2
10	Yピース	SUSF 304	1
9	舌付座金	SUS304	32
8	舌付座金	SUS304	20
7	上部熱しゃへい板円筒(1)下	SUS304	2
6	上部熱しゃへい板円筒(1)上	SUS304	2
5	ボルト	SUS304	16
△ 4	取付座	SUS304	16
3	上部熱しゃへい板(上)	SUS304	1
2	上部鏡板	SUSF 304	1
1	上部スカート	SUS304	1
PNa	名称	材料	個数

Fig. A. 2 Upper Part of Structure

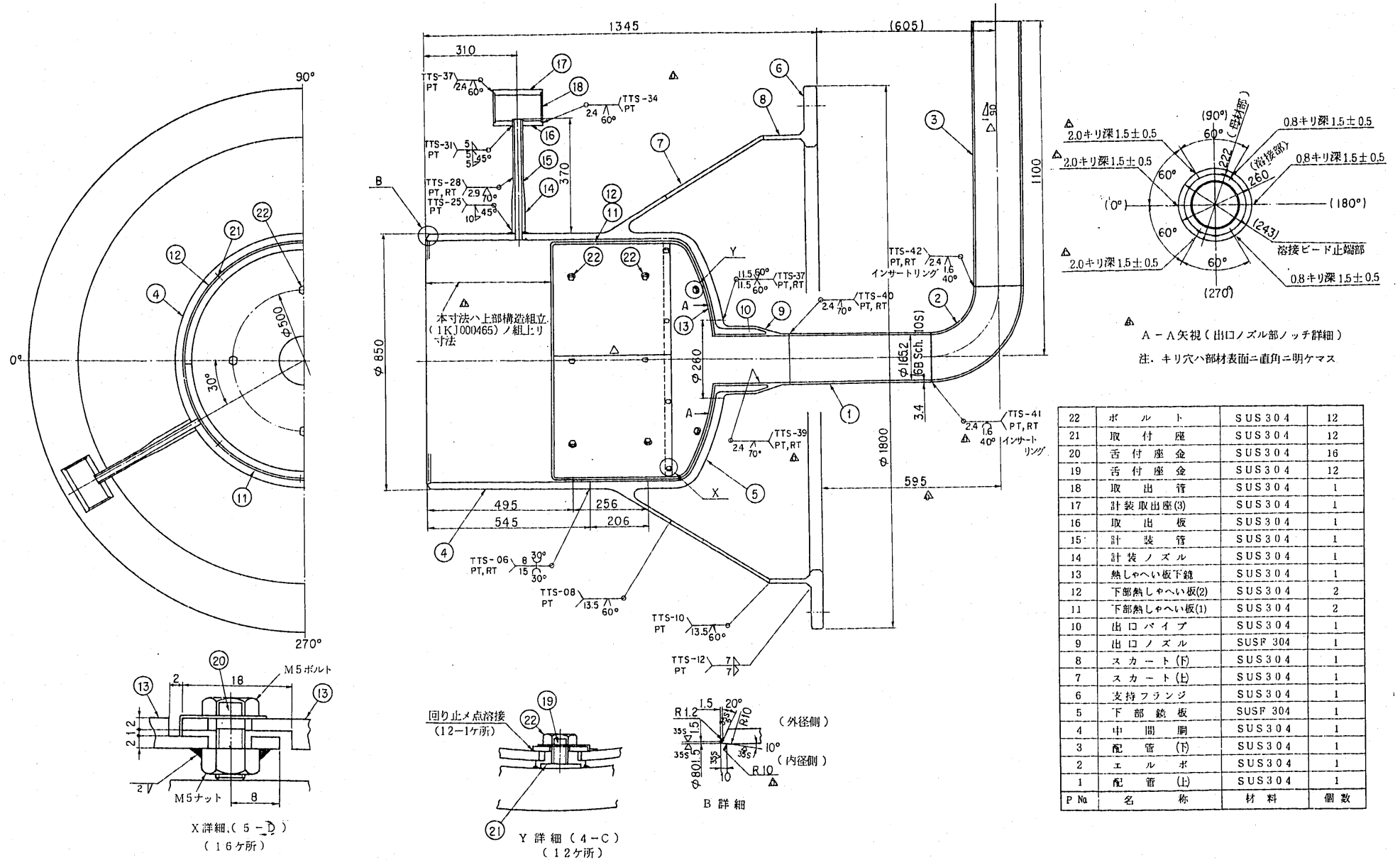


Fig. A. 3 Lower Part of Structure

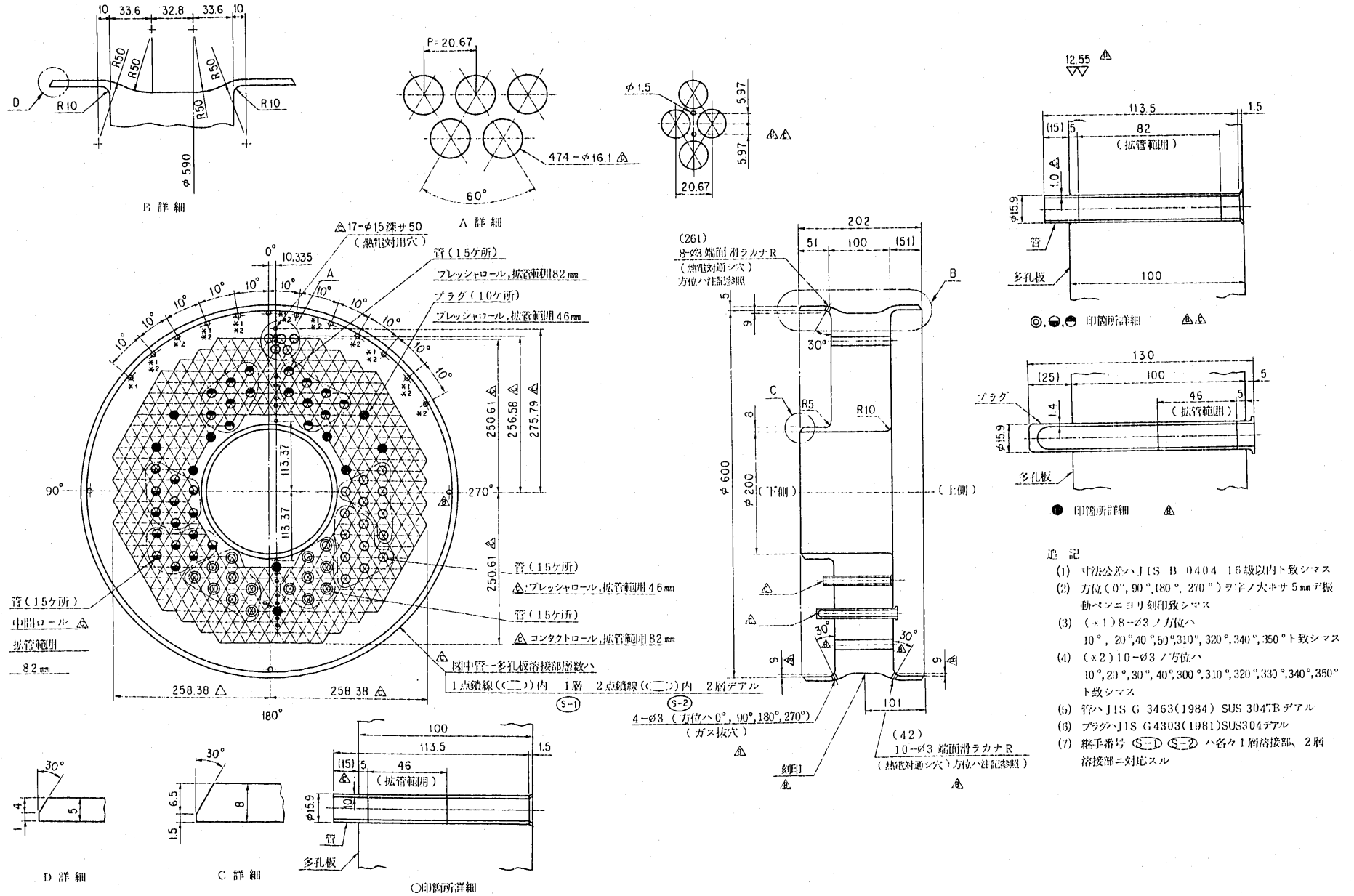
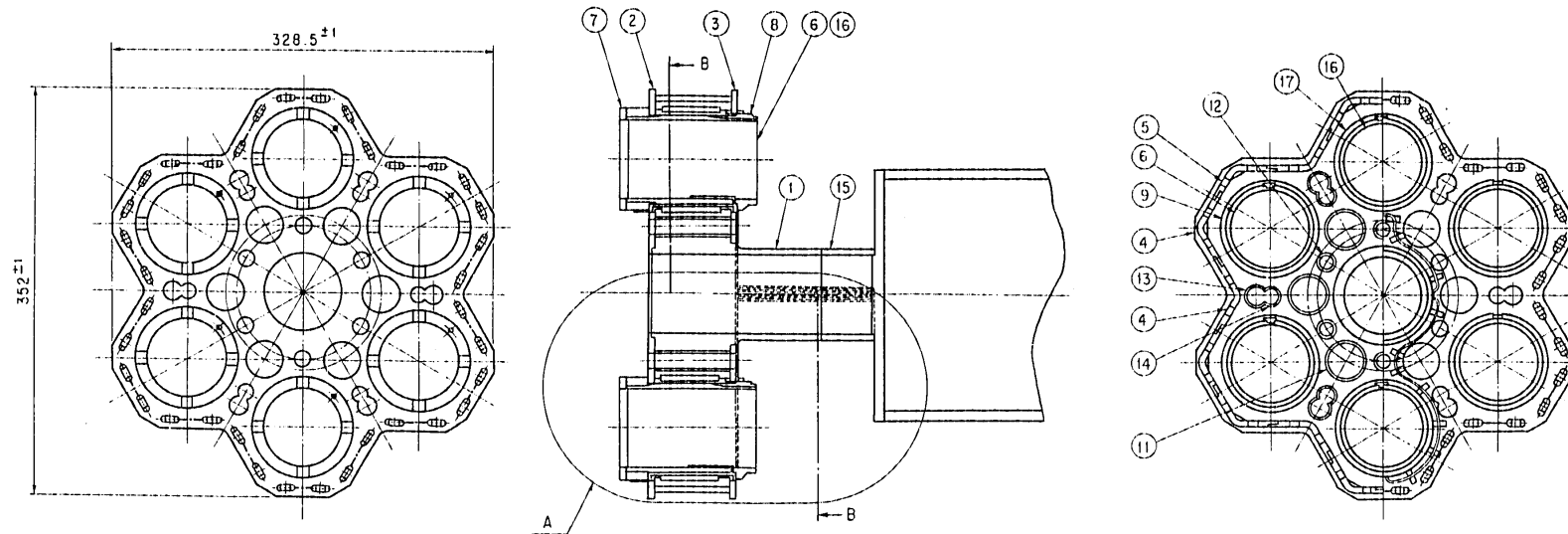
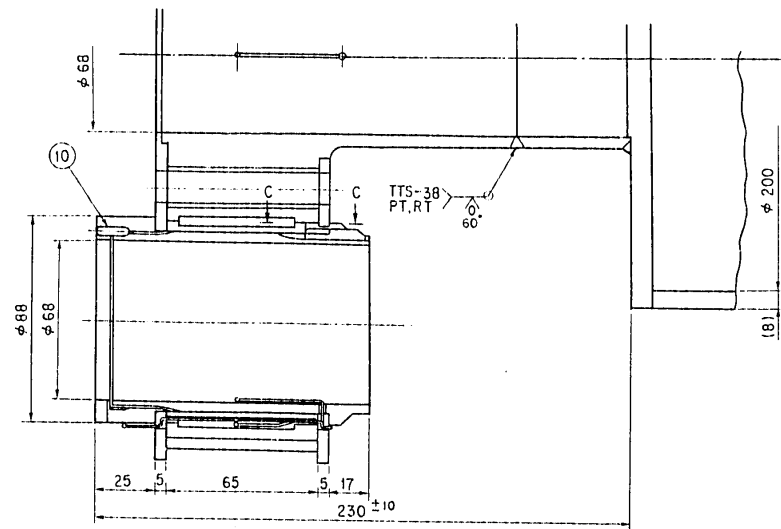


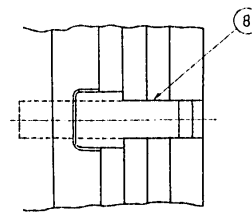
Fig. A. 4 Perforated Plate



B - B 断面



A 詳細 (1:1)



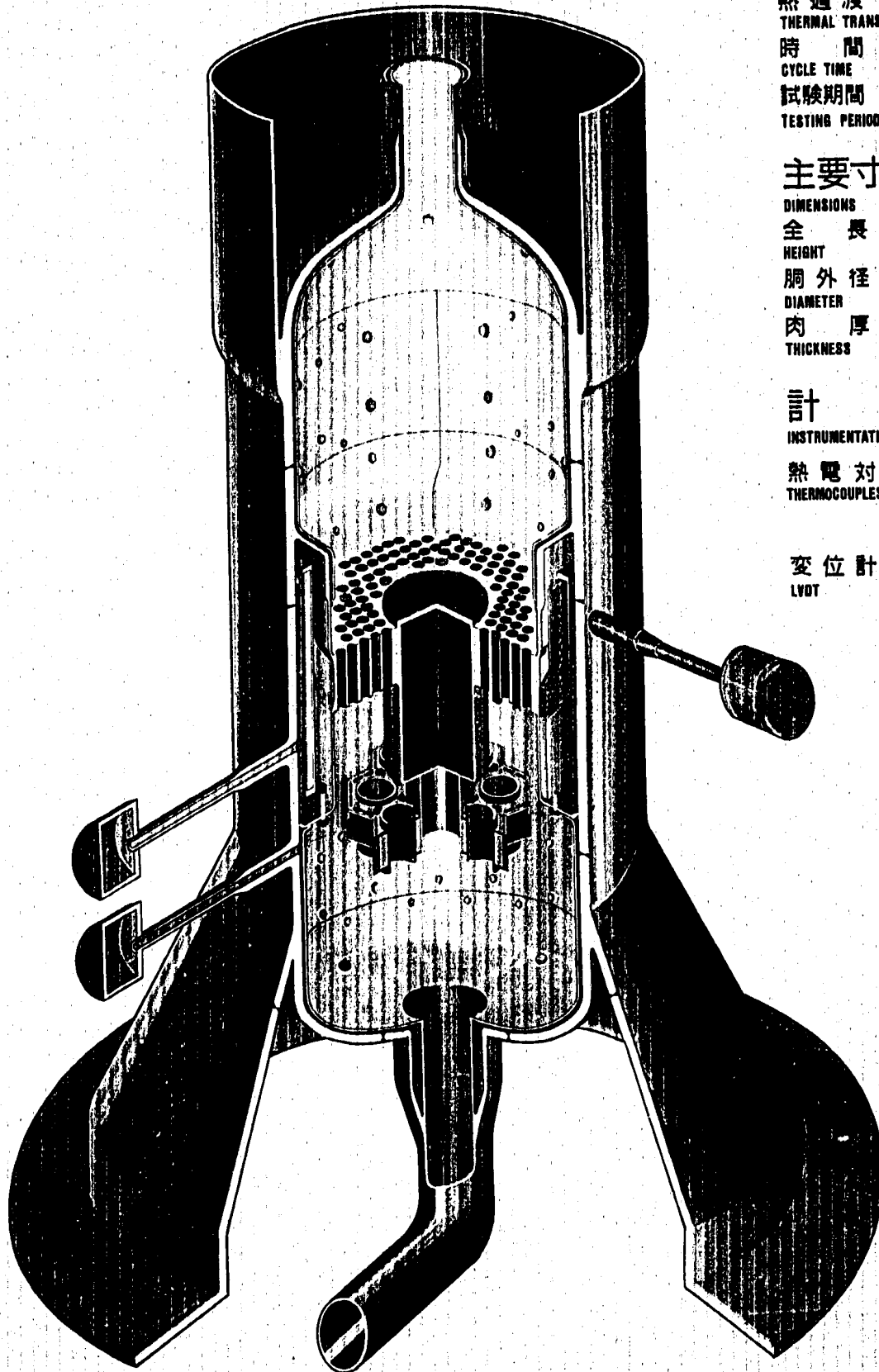
C - C 断面 (2:1)

17	スリーブ (2)	ALLOY718	2
16	整流筒 (2)	ALLOY718	2
15	パイプ	SUS 304	1
14	フローホール (2-1)	ALLOY718	6
13	フローホール (2-2)	ALLOY718	6
12	フローホール (1-1)	ALLOY718	6
11	フローホール (1-2)	ALLOY718	6
10	平行ピン	ALLOY718	6
9	スリーブ (1)	ALLOY718	4
8	整流筒位置決めキー	ALLOY718	6
7	整流筒固定ナット	ALLOY718	6
6	整流筒 (1)	ALLOY718	4
5	側面保護板 (2)	ALLOY718	6
4	側面保護板 (1)	ALLOY718	12
3	下側保護板	ALLOY718	1
2	上側保護板	ALLOY718	1
1	管板	SUS 304	1
PNo	名称	材料	個数

Fig. A. 5 Flow Straightener

熱応力緩和構造(2)熱過渡強度試験用供試体

MODEL (2) OF THERMAL STRESS MITIGATION STRUCTURE FOR STRENGTH TEST UNDER THERMAL LOADINGS



試験条件

TESTING CONDITION	
熱過渡 THERMAL TRANSIENT	600c → 250c
時間 CYCLE TIME	2 HRS
試験期間 TESTING PERIOD	5 MONTHS

主要寸法

DIMENSIONS	
全長 HEIGHT	2,455mm
胴外径 DIAMETER	850mm
肉厚 THICKNESS	5,15,25,40,100mm

計装

INSTRUMENTATION		
熱電対 THERMOCOUPLES	内表面 INNER SURFACE	137点
	外表面 OUTER SURFACE	55点
変位計 LVDT		4点

Fig. A. 6 Perspective View of the Model

付録B. $k-\epsilon$ モデルによる伝熱流動解析

3.1では、供試体設計のための熱過渡条件策定を目的として実施した乱流拡散係数を用いた層流解析による伝熱流動解析結果を示した。ここでは前記熱過渡の妥当性を検討することを目的に実施した乱流モデル ($k-\epsilon$) を用いた詳細解析結果を示す。

(1) 解析方法

供試体の基本形状に従い軸対称としてモデル化した。メッシュ分割図を Fig. B. 1 に温度出力点を Fig. B. 2 に示す。なお外胴、内部構造物及び熱抵抗体については熱伝導、熱容量を考慮している。

構造物のフローホールについては流体部と構造部の断面積の比をモデル化できるように分割にあたって考慮した。また多孔板については縮流、管摩擦、拡流の圧損を考慮した。

解析には、株式会社東芝所有の汎用3次元熱流動解析コード“TRACER”を使用した。

(2) 解析条件

入口ノズルの温度条件は、原子炉容器モデル試験で得られた入口ノズルの温度変化を折線近似して用いた。

入口ノズルの流量条件は、 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ 一定とする。なお入口ノズルでの流速分布は1/7乗則により設定する。

乱流拡散係数 ϵ_M は、2方程式モデルである $k-\epsilon$ モデルにより定める。

ここで、

k : 乱れのエネルギー

ϵ : 乱れの散逸率

解析対象時間は、ホットショック、コールドショックとも設計用熱過渡条件との比較上重要と考えられる過渡開始後50秒までとした。

(3) 解析結果

コールドショック時の流況図及び温度分布図を Fig. B. 3 に、供試体各部の温度変化を設計用熱過渡解析結果と比較したものを Fig. B. 4 (a)~(f)に示す。さらに乱流拡散係数 ϵ_M と動粘性係数 ν との比を Fig. B. 5 に示す。

(i) 多孔板より上部の領域

定常状態では、主流せん断領域での乱流拡散係数比 ϵ_M/ν は数千のオーダーであるが、それ以外の領域では1桁低い値となっている。

過渡状態での流況は、定常状態とほぼ同様であるが、 ϵ_M/ν は数千のオーダーとなっている。

各部の温度変化は、設計熱過渡と比較して過渡が早いケースと遅いケースがある。循環流に近いところで比較すると、上部鏡ナックル部、構造不連続部については両者は一致する傾向にあり、また多孔板上面についてはほとんど差はない。ただしYピース部については両者の差が拡大する傾向となるが、差はそれほど大きくない。

(II) 多孔板より下部の領域

定常状態での ϵ_M/ν は数百のオーダーであるが、過渡状態に入った後は密度差により低温ナトリウムが容器の中心領域を集中的に流れるため ϵ_M/ν はその領域で2000程度まで上昇する。しかし壁面近傍では100程度の値である。

支持スカート内面については壁面近傍での ϵ_M/ν の分布によって設計用熱過渡との差を生じている。出口ノズル内面は今回の解析結果のほうが熱過渡が早くなっているが、これは ϵ_M/ν が小さいことによる。

ホットショック時の流況図及び温度分布図を Fig. B. 6 に、供試体各部の温度変化を設計用熱過渡解析結果と比較したものを Fig. B. 7(a)~(f) に示す。さらに乱流拡散係数 ϵ_M と動粘性係数 ν との比を Fig. B. 8 に示す。

(i) 多孔板より上部の領域

定常状態では、主流せん断領域での乱流拡散係数比 ϵ_M/ν は数千のオーダーであるが、それ以外の領域では1桁低い値となっている。

過渡状態に入ると、高温ナトリウム流入に伴う浮力効果によりプレナム内上部領域でも循環流を生じる。その結果この領域での ϵ_M/ν は、例えば25秒の時点で壁面近傍を除いて3000程度まで上昇している。

各部の温度変化は、設計熱過渡よりも今回の解析結果の方が温度上昇が緩慢で、50秒の時点でみると20~30℃低めの結果となっている。これは、前者では壁面近傍も含めて一様な ϵ_M/ν を設定したのに対し、後者では ϵ_M/ν の空間分布を考慮することにより壁面近傍での ϵ_M/ν が循環流領域と比較して低くなり伝熱特性が良くなっていることによるものと推定される。

(ii) 多孔板より下部の領域

定常状態での ϵ_M/ν は数百のオーダーであり、この傾向は過渡状態に入っても同様である。 ϵ_M が設計熱過渡解析よりも1桁小さいことの効果により、定常状態では容器中心領域に見られた主流域がホットショックとともに外側に移行する傾向が生じる。

各部の温度変化を見ると、ホットショックの極初期にスパイク状の温度上昇を生じる点の特徴である。多孔板下面については約10秒後にピークを生じ約20秒後に下降し、その後単調な上昇を続ける。設計用熱過渡解析の場合にこの傾向が生じないのは、 ϵ_M/ν を5000と設定していることによるものと推定される。

以上の結果から、設計用熱過渡解析と今回の解析結果は、細部については ϵ_M の分布に伴う差が存在するものの、全般的には比較的良好に一致していることが示された。

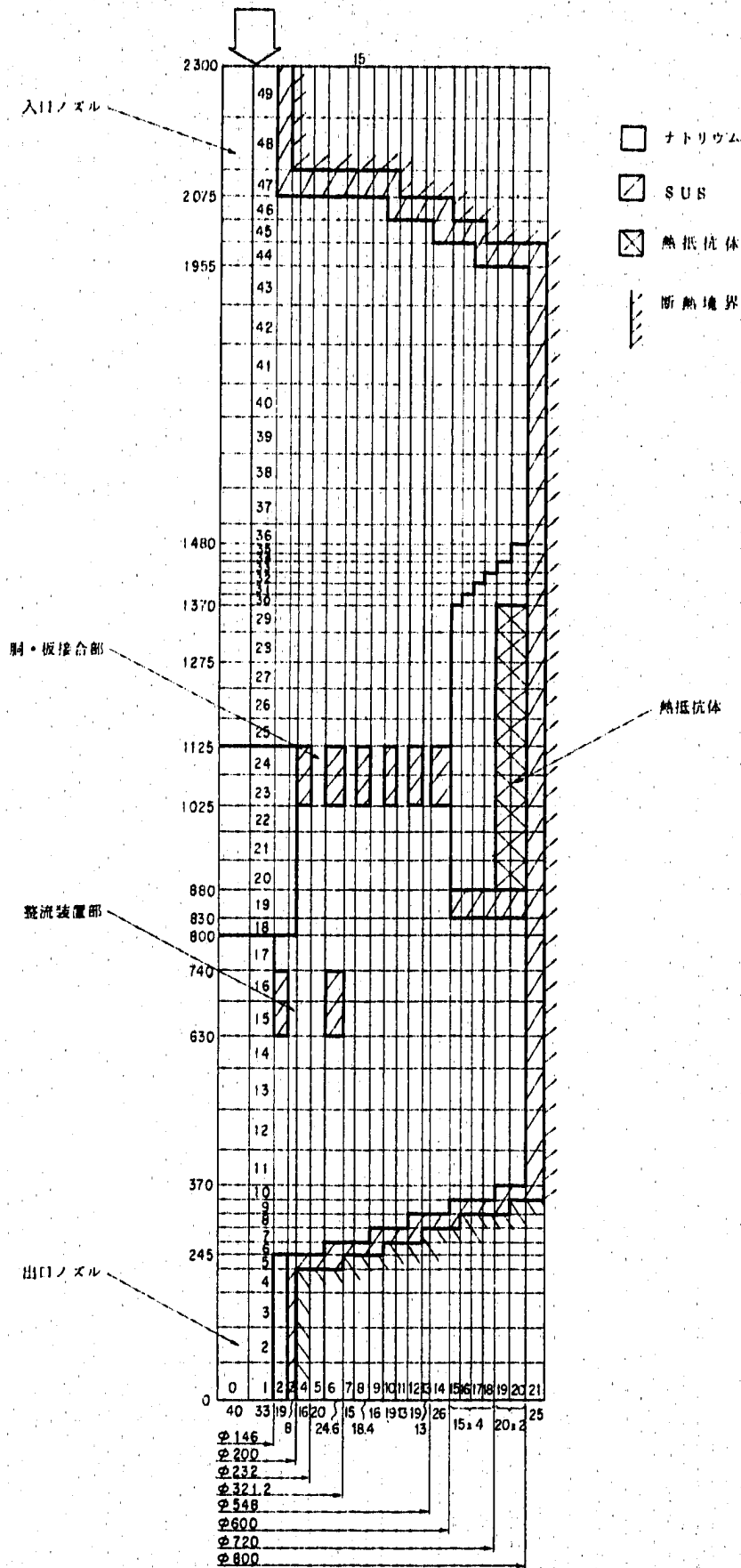


Fig. B. 1 Thermo Hydraulic Analysis Model

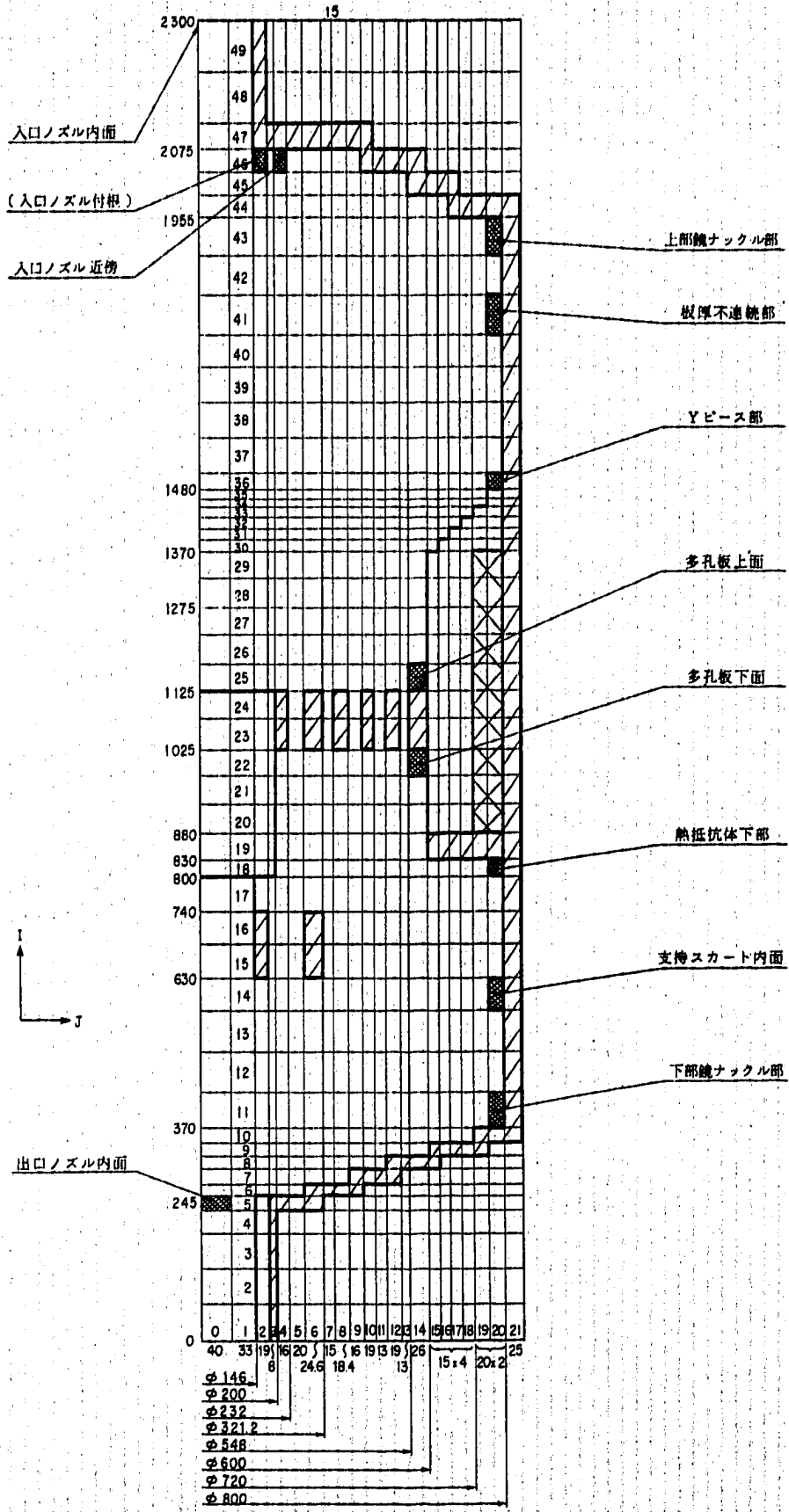


Fig. B. 2 Evaluation Point

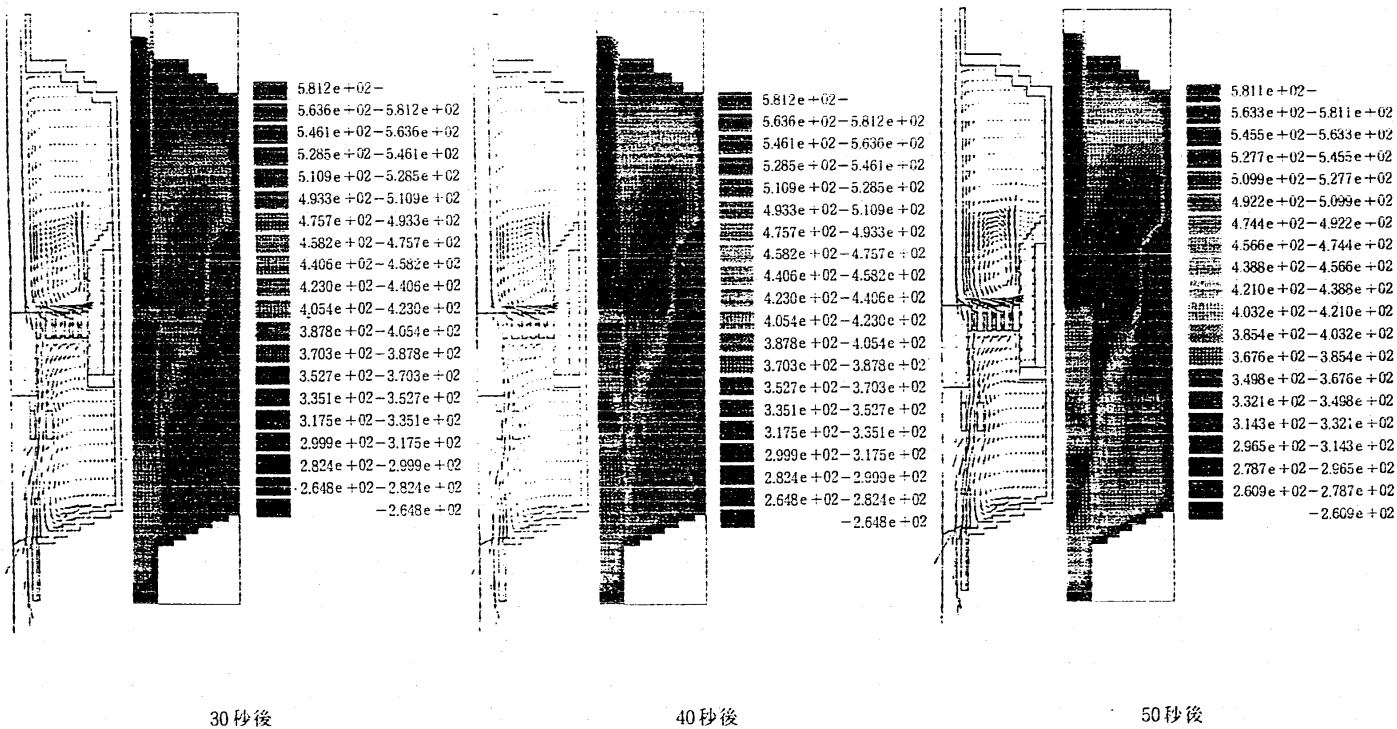
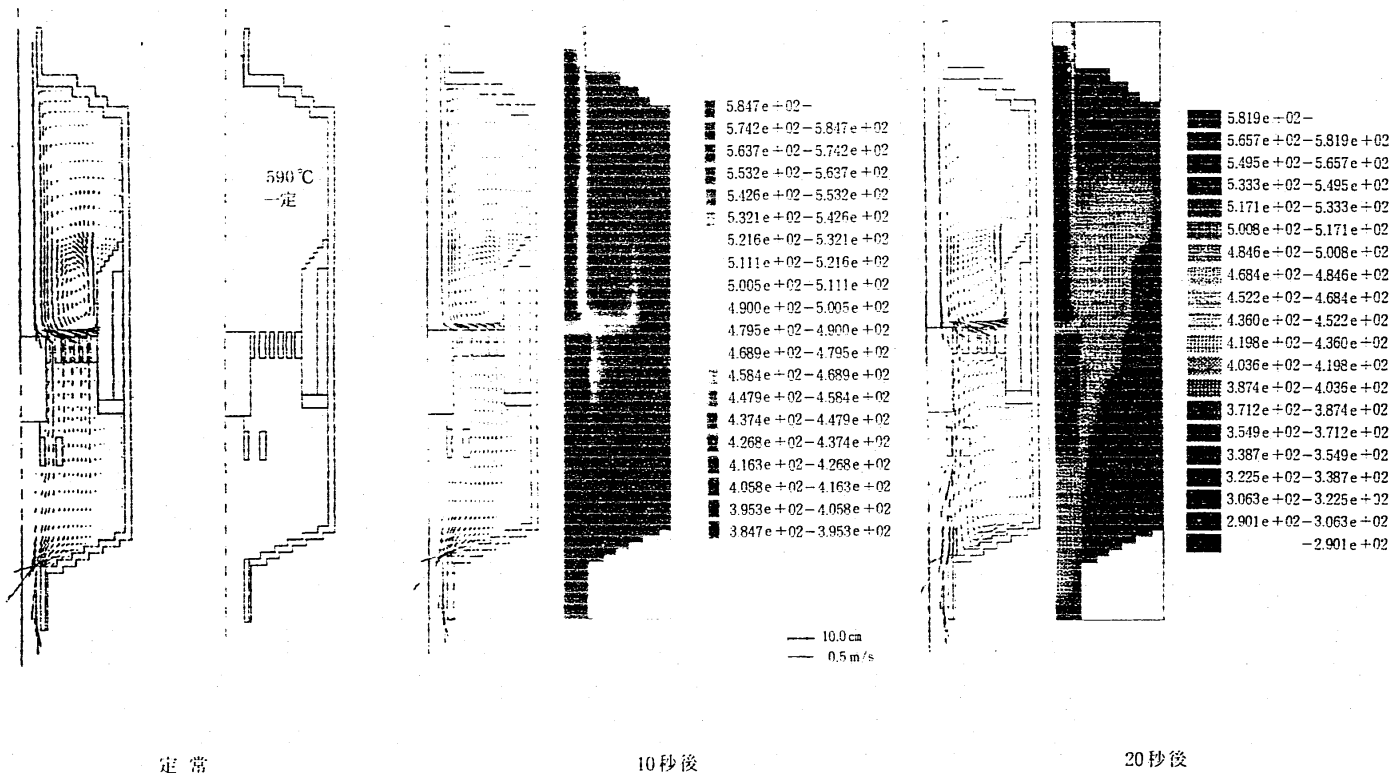


Fig. B. 3 Flow Pattern and Temperature Contour (Cold Shock)

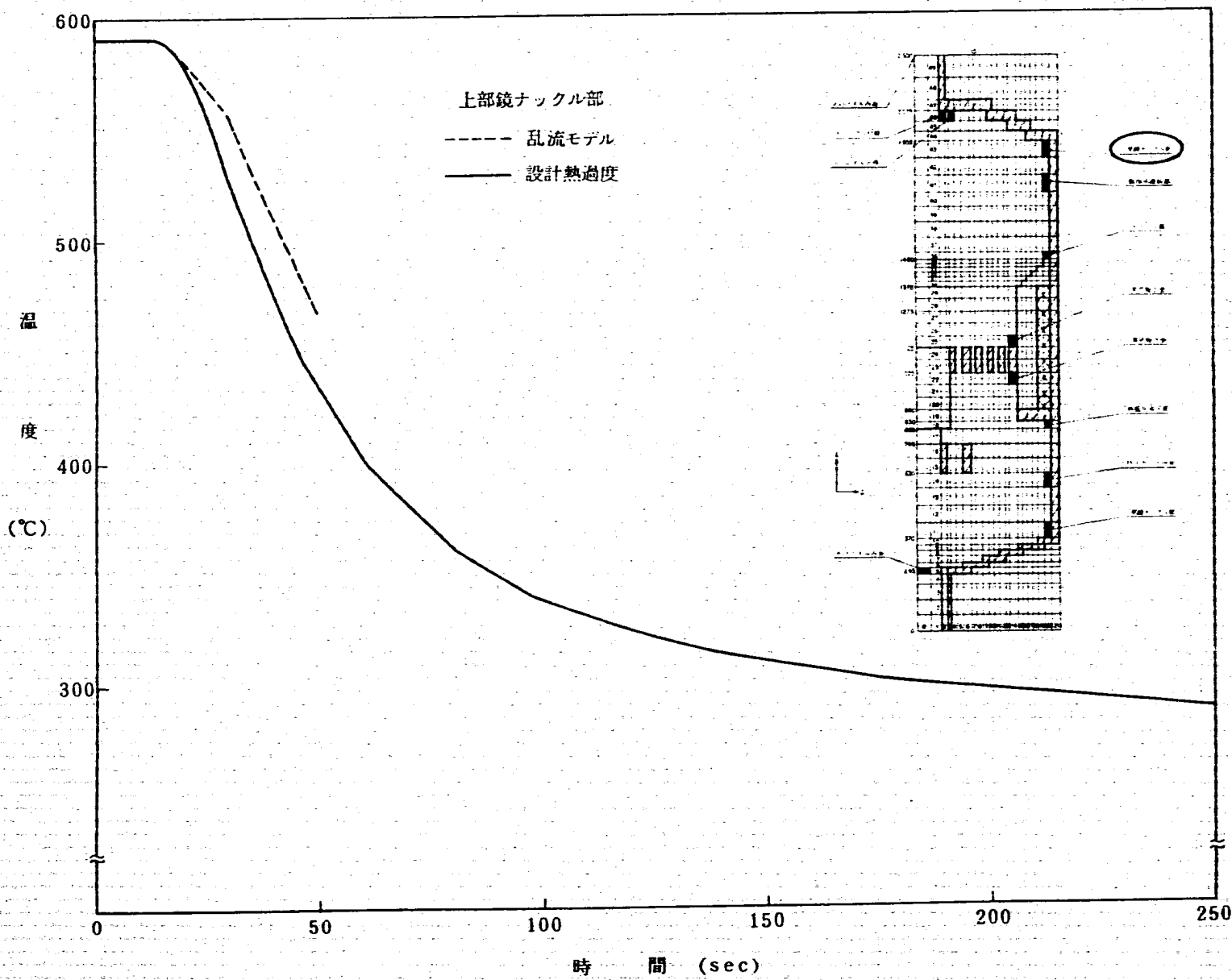


Fig. B. 4 Comparison of Temperature Change obtained by two methods
(a) Upper Head

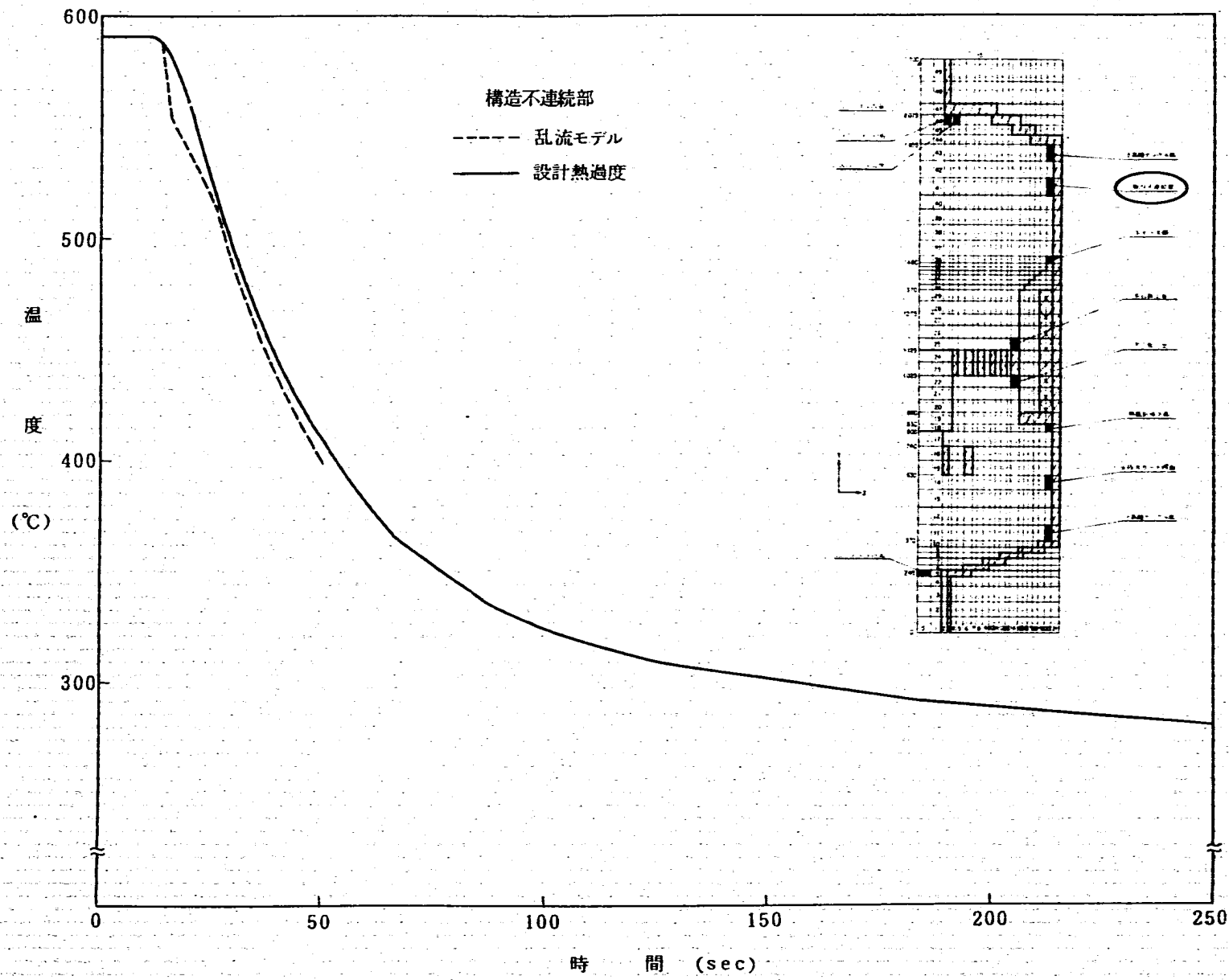


Fig. B. 4 Comparison of Temperature Change obtained by two methods
(b) Thickness Discontinuity

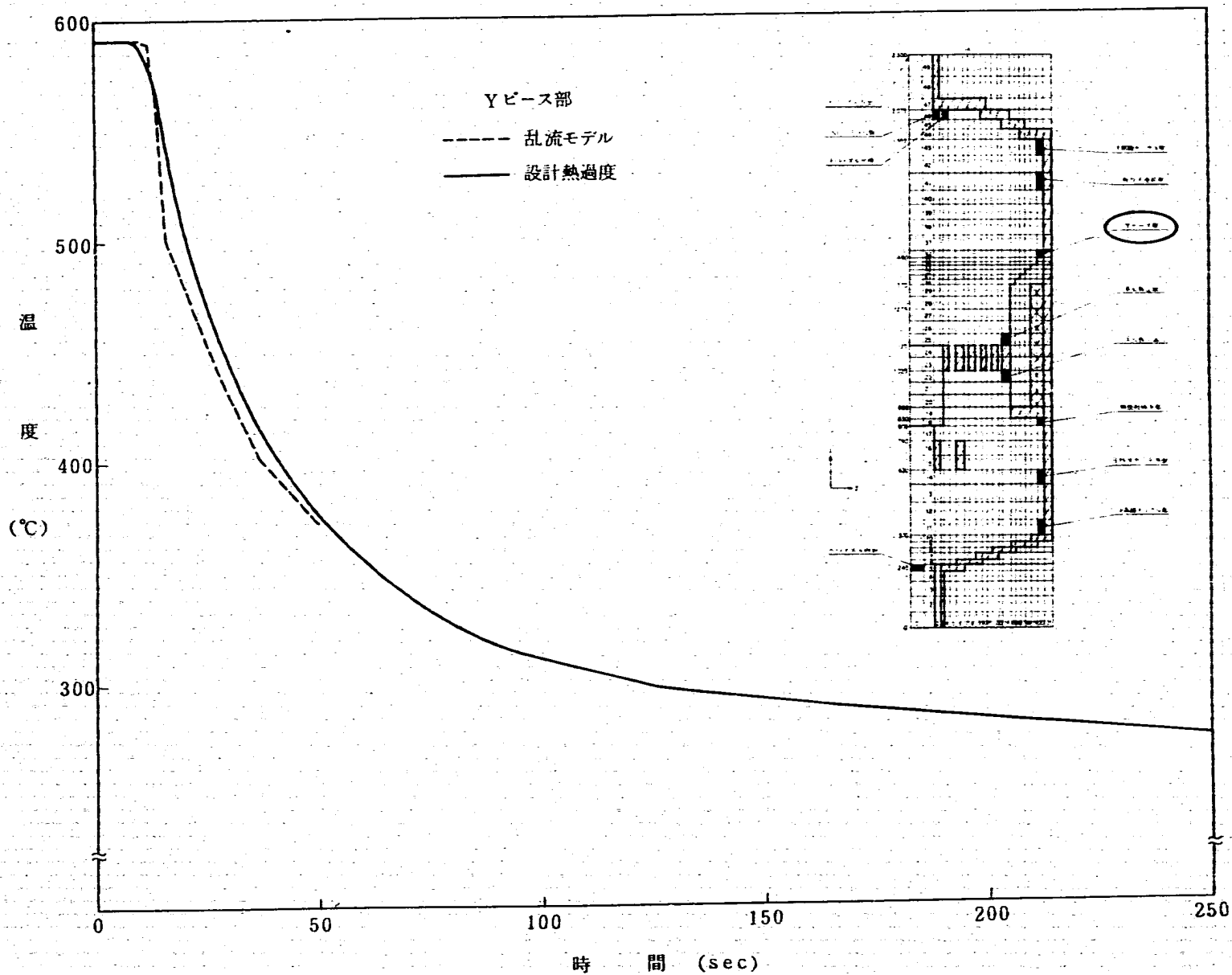


Fig. B. 4 Comparison of Temperature Change obtained by two methods

(c) Y-junction

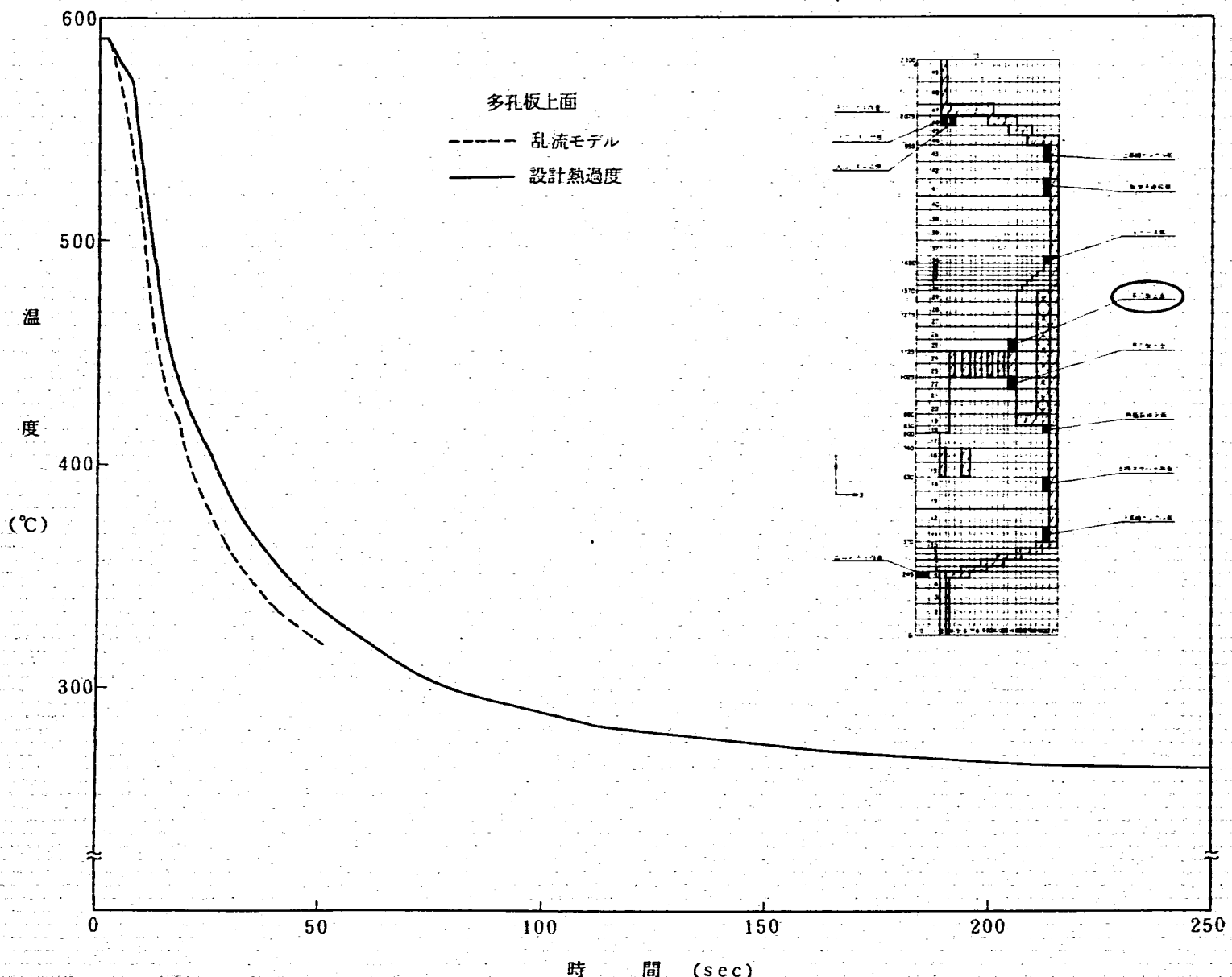


Fig. B. 4 Comparison of Temperature Change obtained by two methods
(d) Perforated Plate

—130—

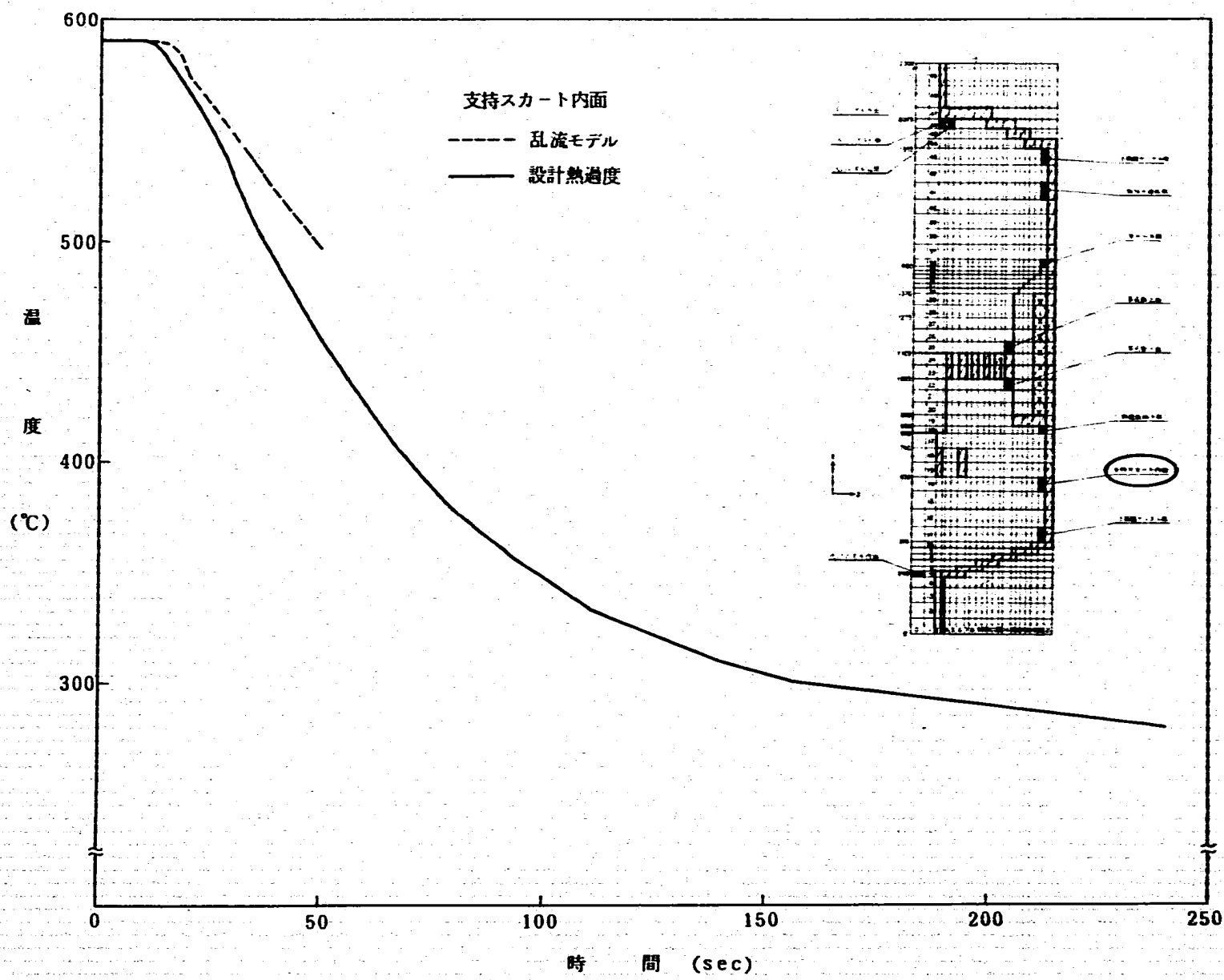


Fig. B. 4 Comparison of Temperature Change obtained by two methods
(e) Support Skirt

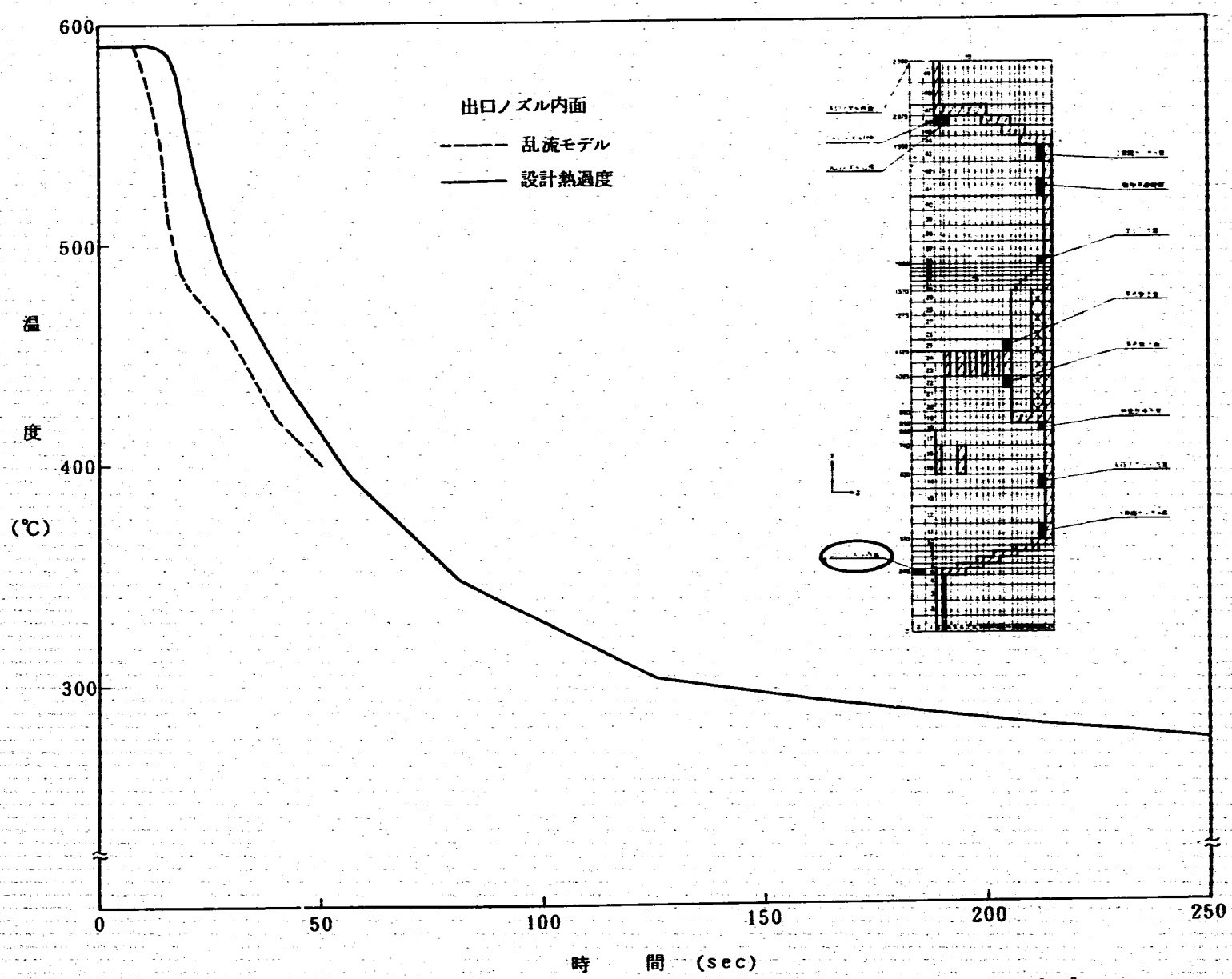


Fig. B. 4 Comparison of Temperature Change obtained by two methods
(f) Outlet Nozzle

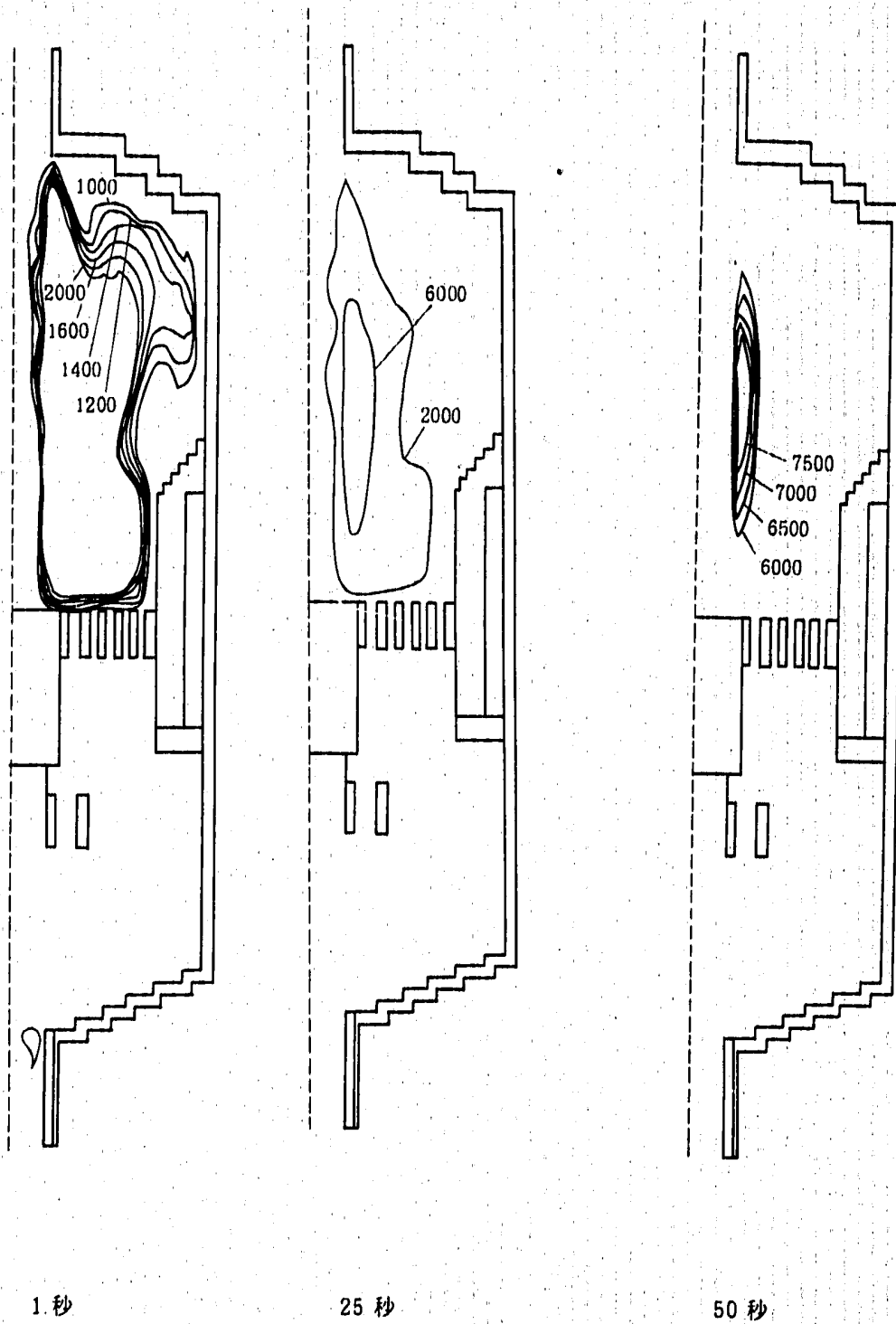


Fig. B. 5 Contour of ϵ_M/ν (Cold Shock)

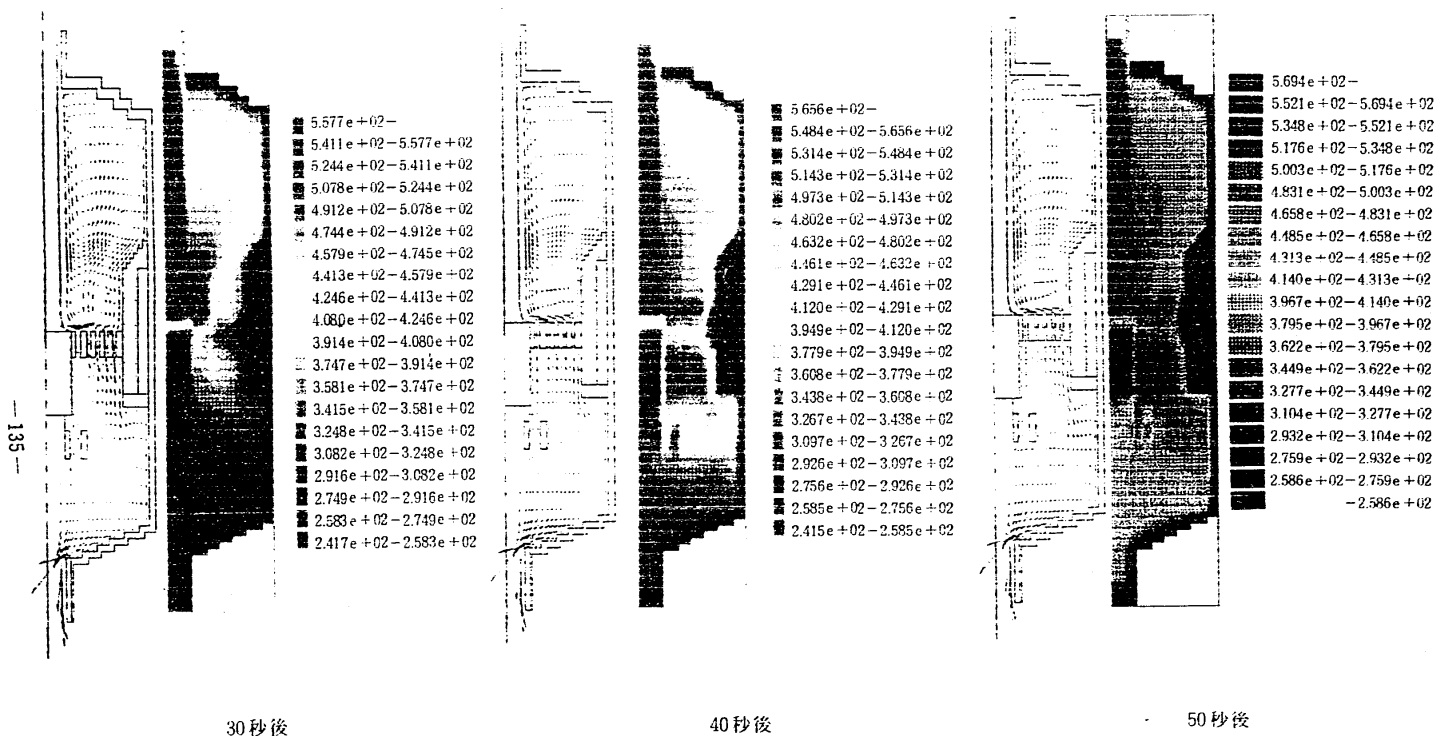
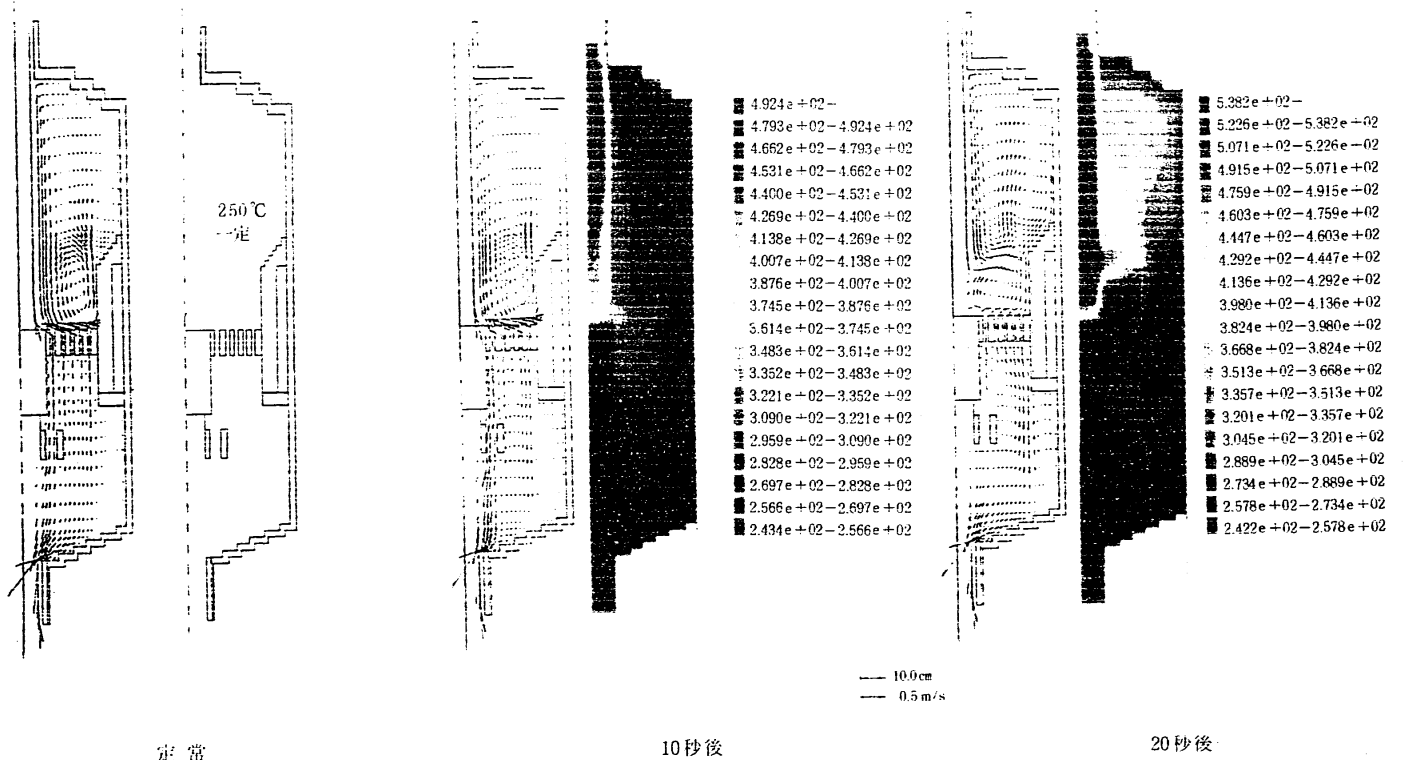


Fig. B. 6 Flow Pattern and Temperature Contour (Hot Shock)

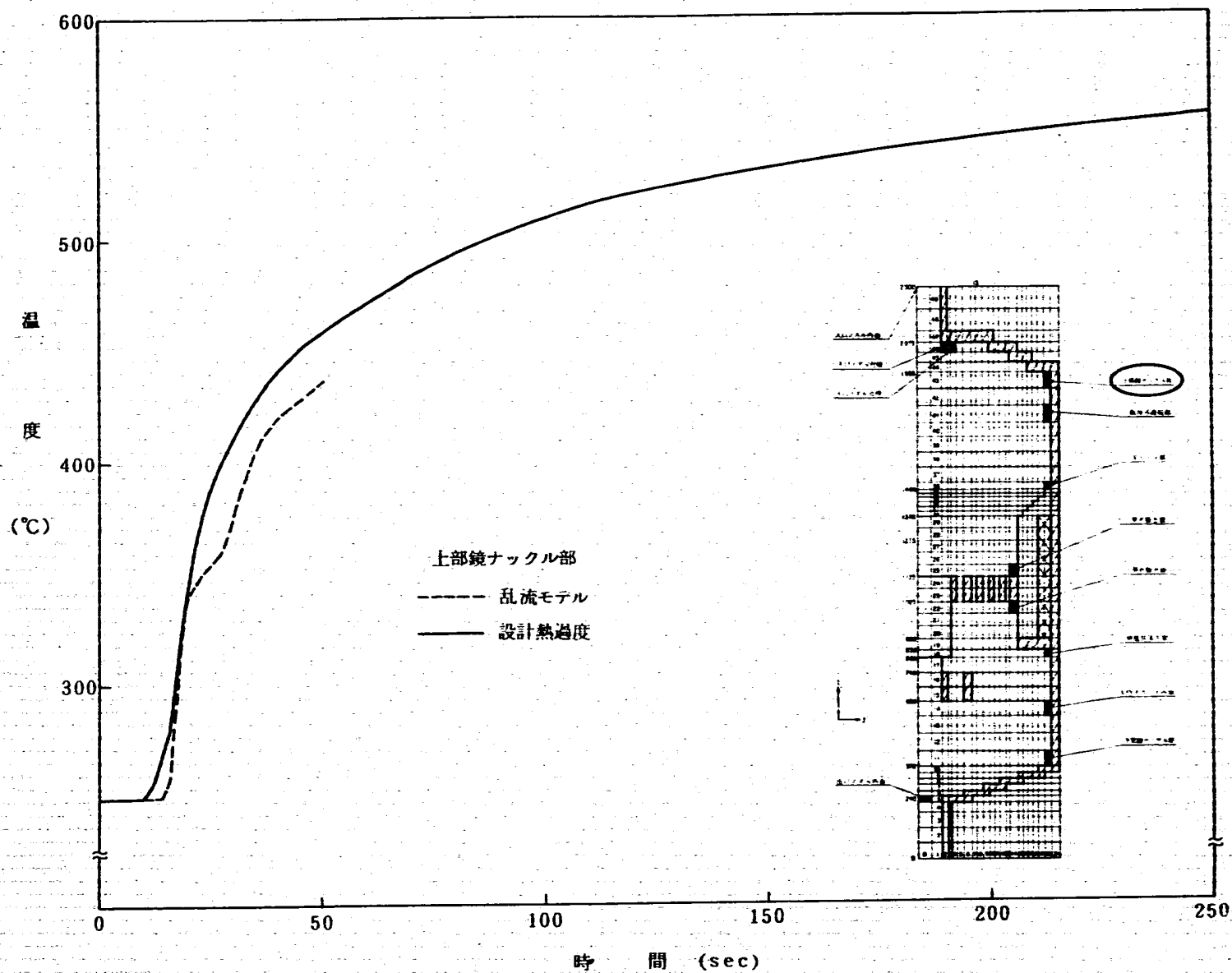


Fig. B. 7 Comparison of Temperature Change obtained by two methods
 (a) Inlet Nozzle

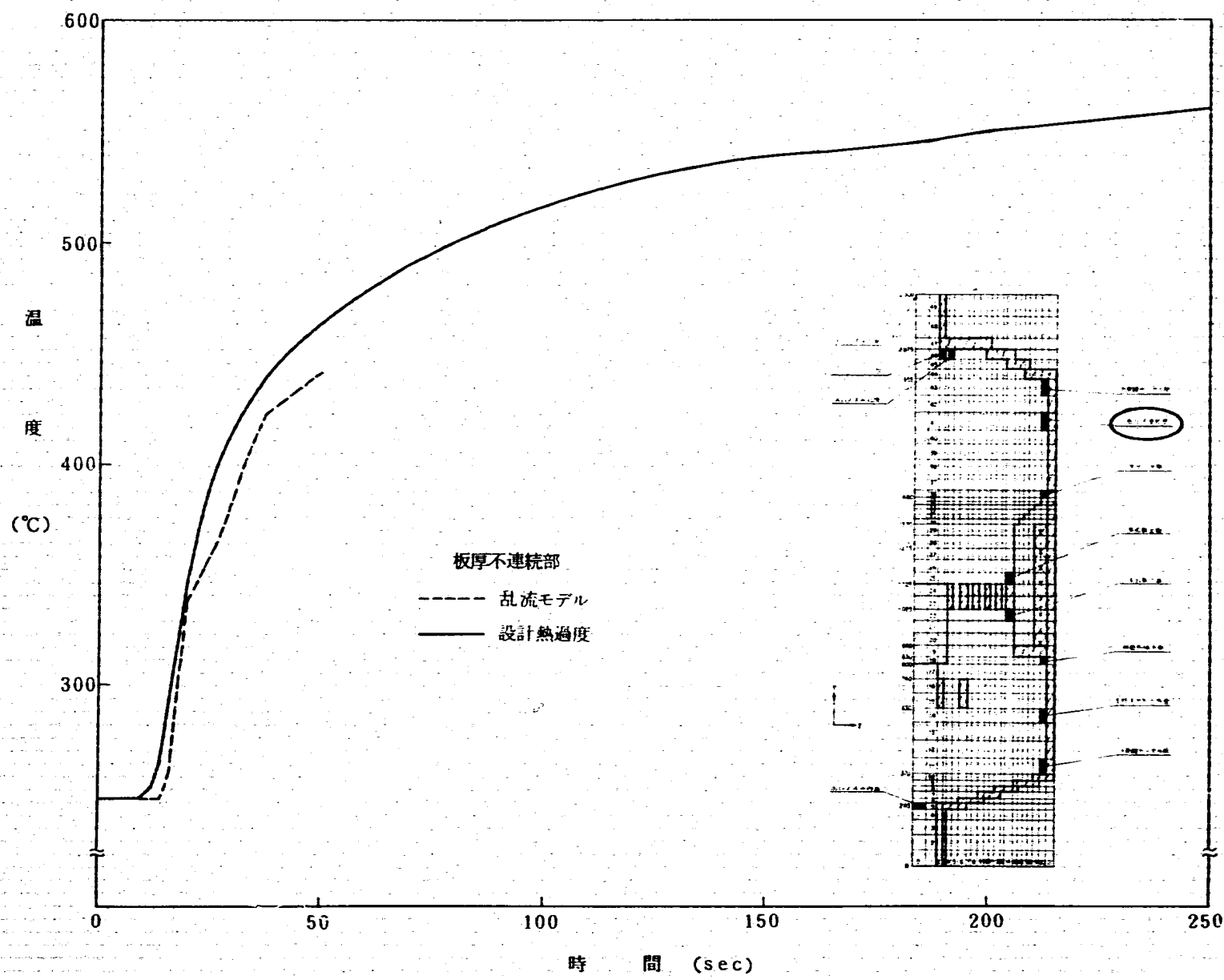


Fig. B. 7 Comparison of Temperature Change obtained by two methods

(b) Thickness Discontinuity

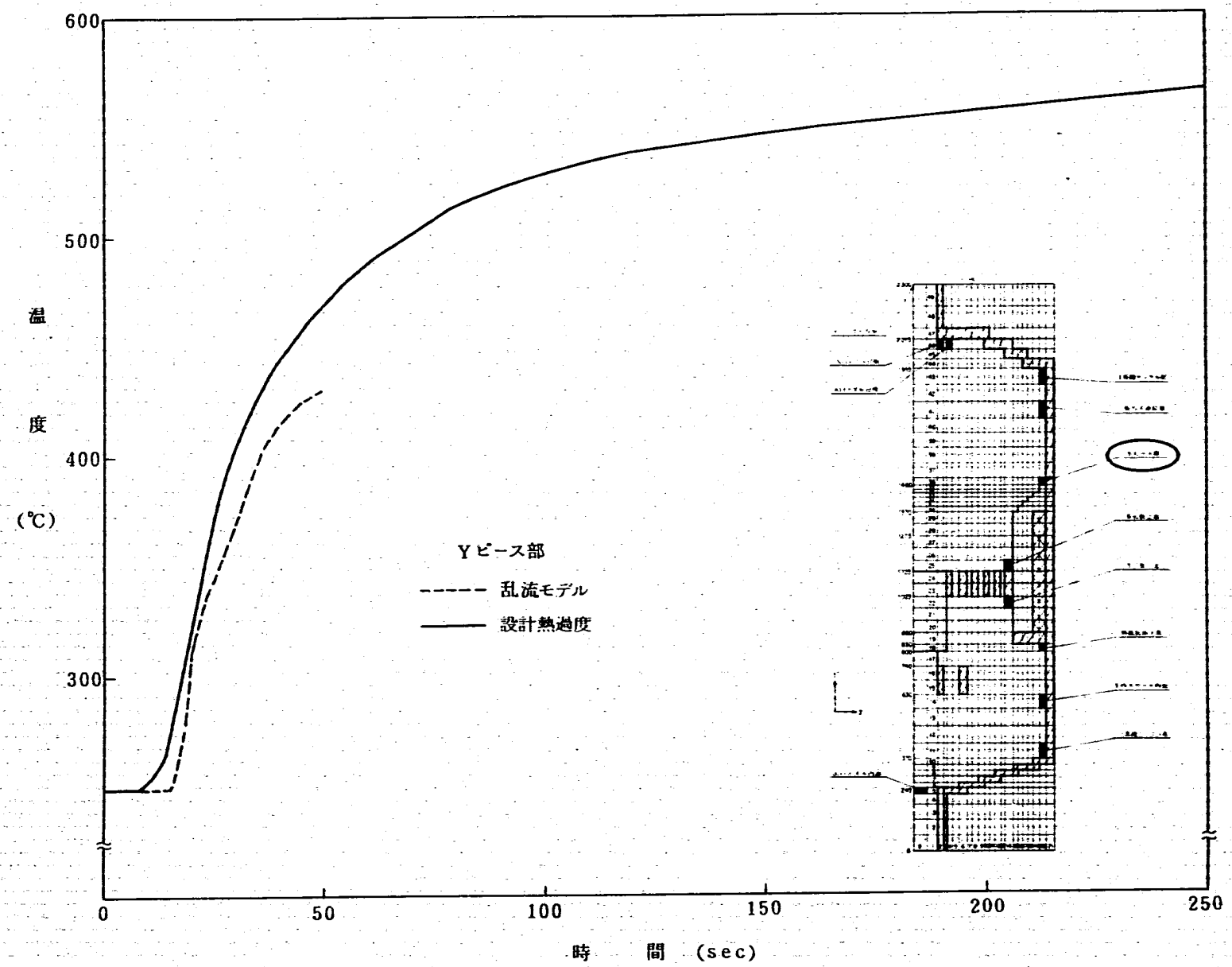


Fig. B. 7 Comparison of Temperature Change obtained by two methods
(c) Y-junction

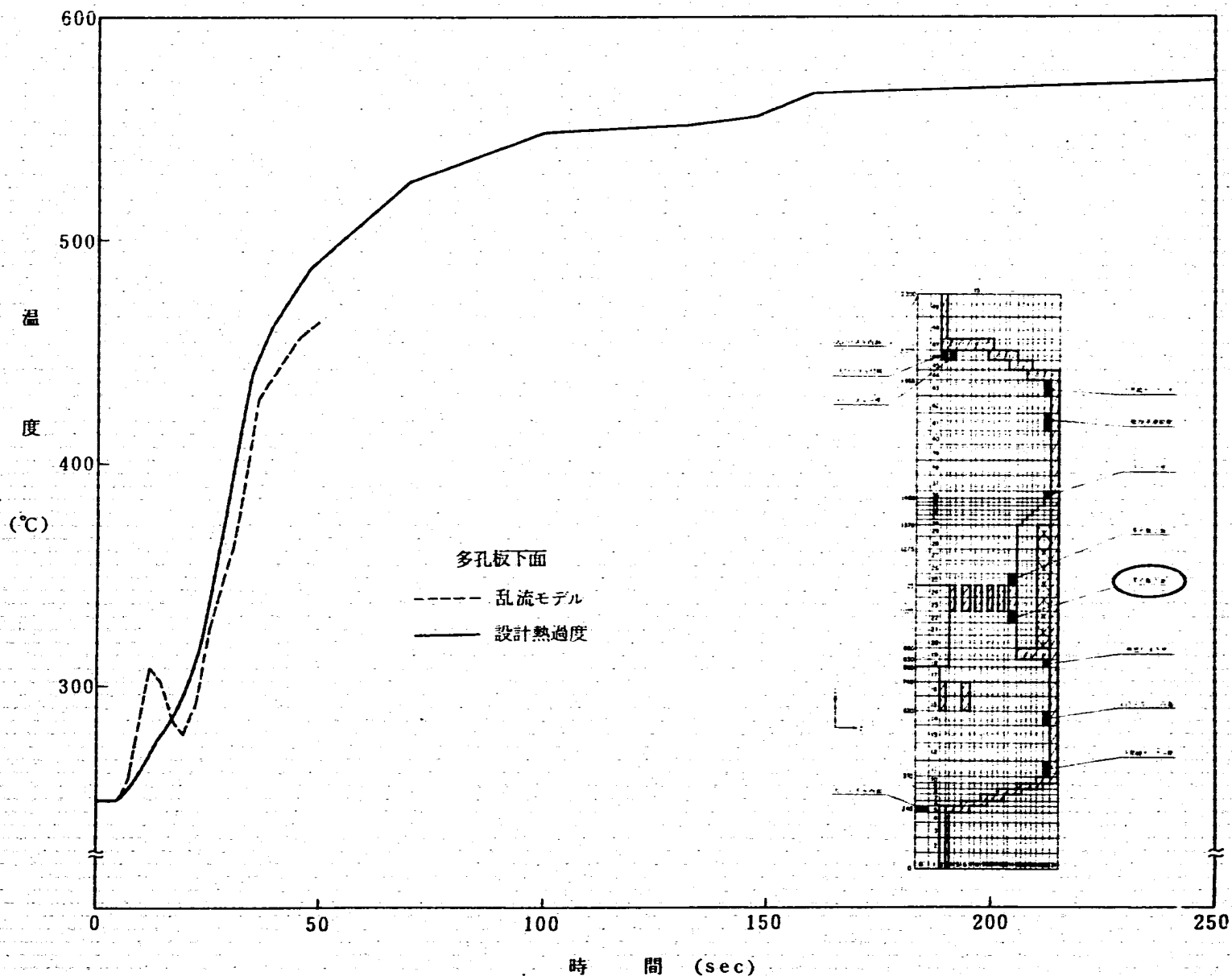


Fig. B. 7 Comparison of Temperature Change obtained by two methods

(d) Perforated Plate

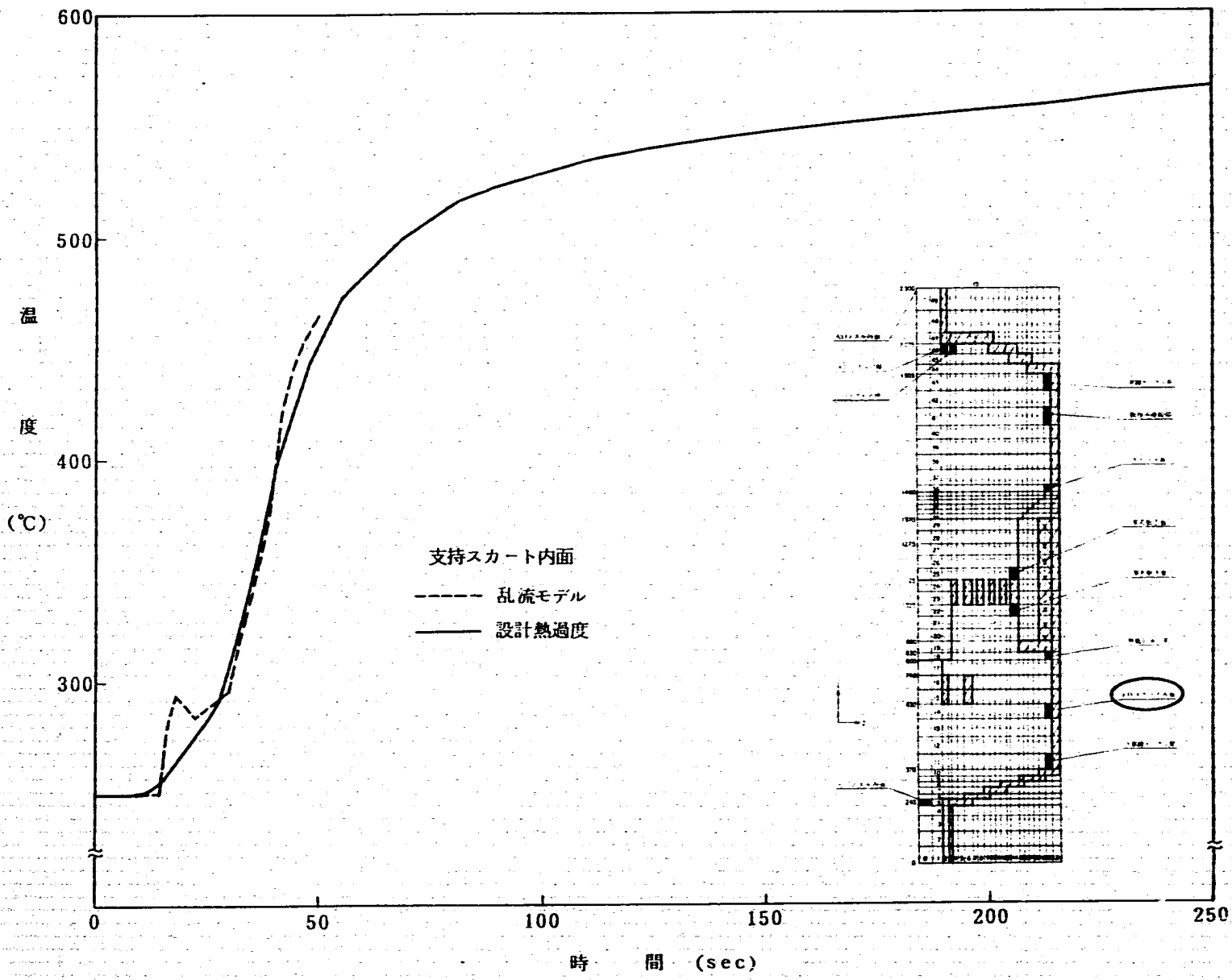


Fig. B. 7 Comparison of Temperature Change obtained by two methods
(e) Support Skirt

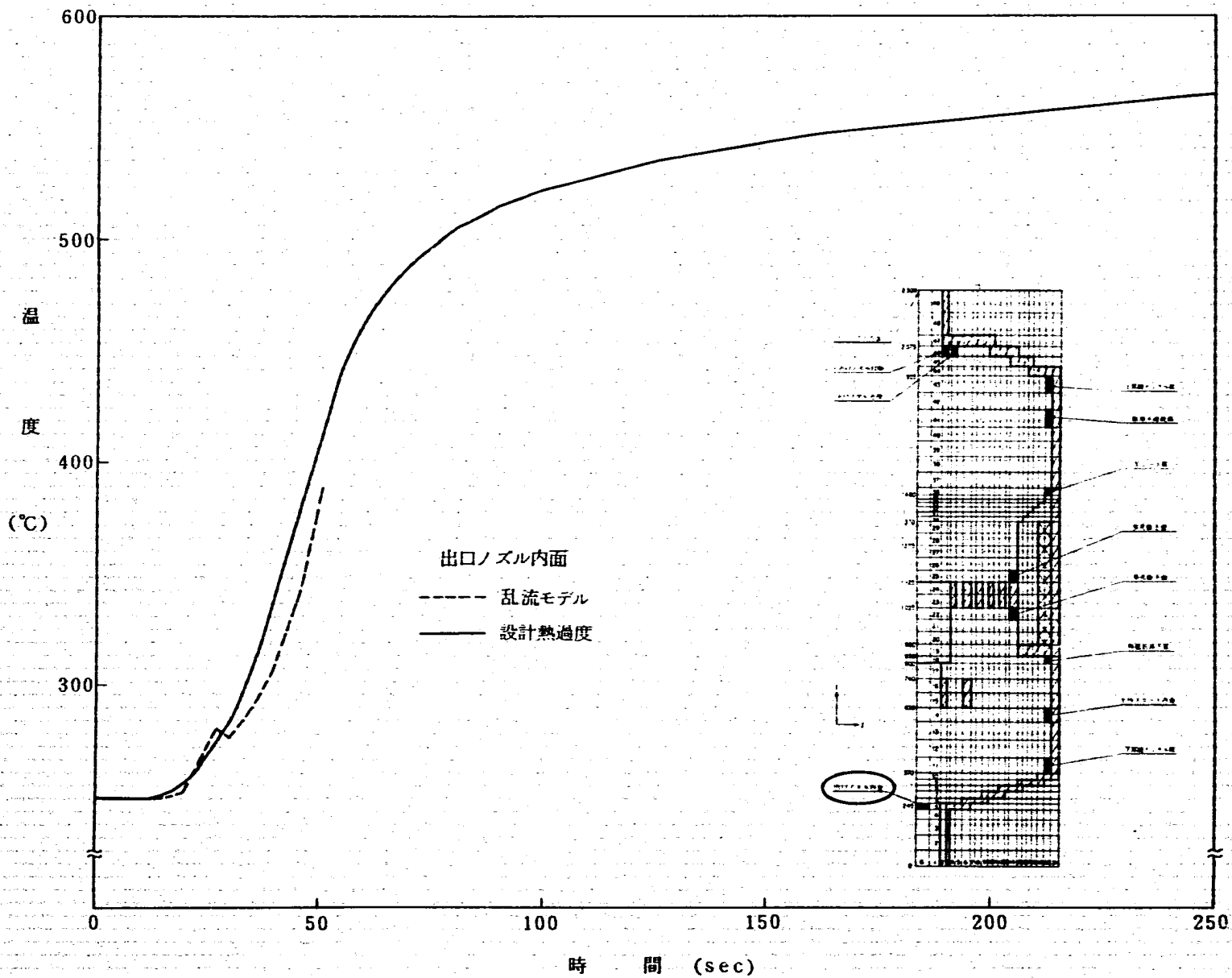


Fig. B. 7 Comparison of Temperature Change obtained by two methods

(f) Outlet Nozzle

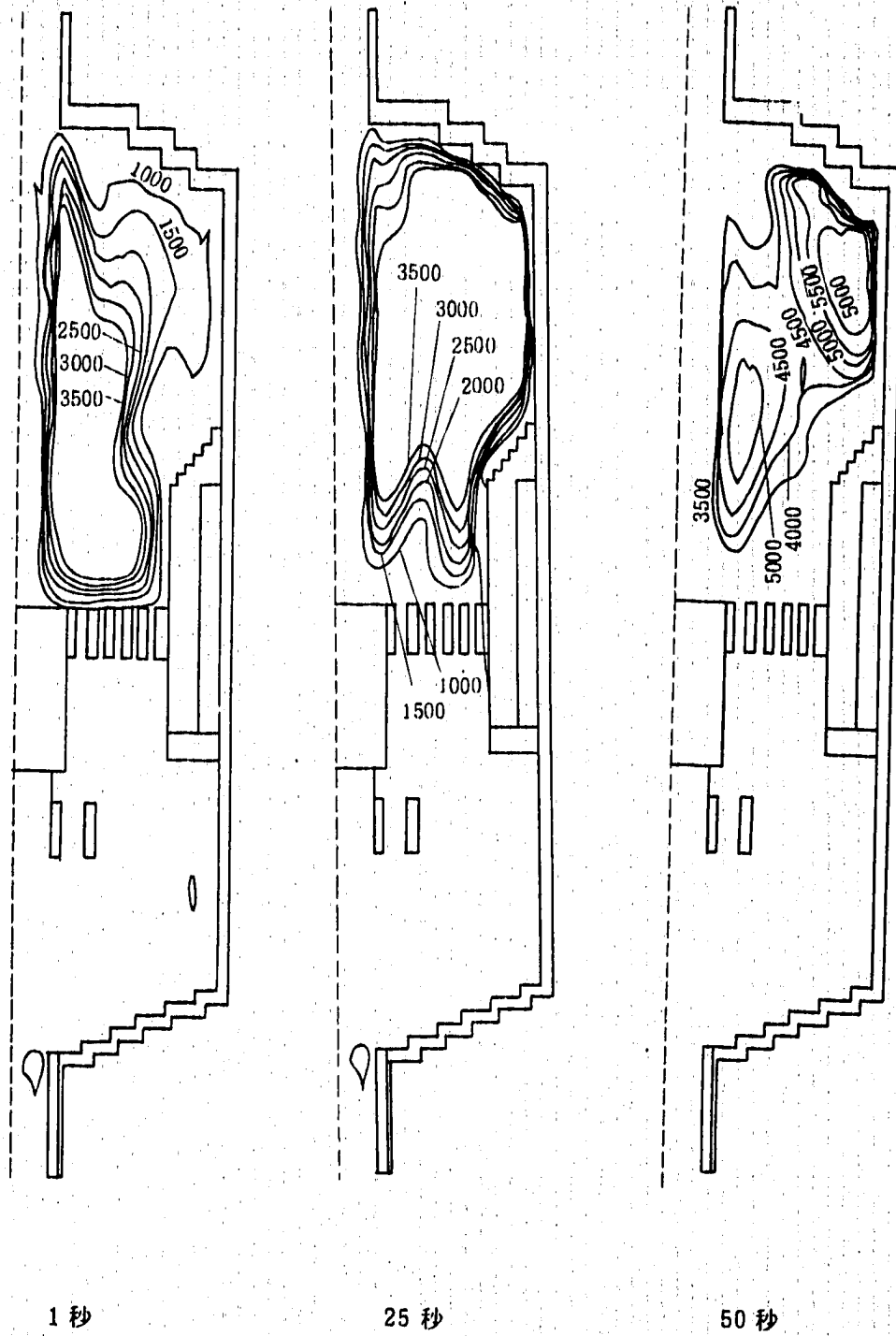


Fig. B. 8 Contour of ϵ_M/ν (Hot Shock)

付録C. 評価断面の温度分布及び応力分布

評価時点での、各評価断面における板厚方向の温度分布及び応力分布を示す。

評価断面は、断面図に示す。

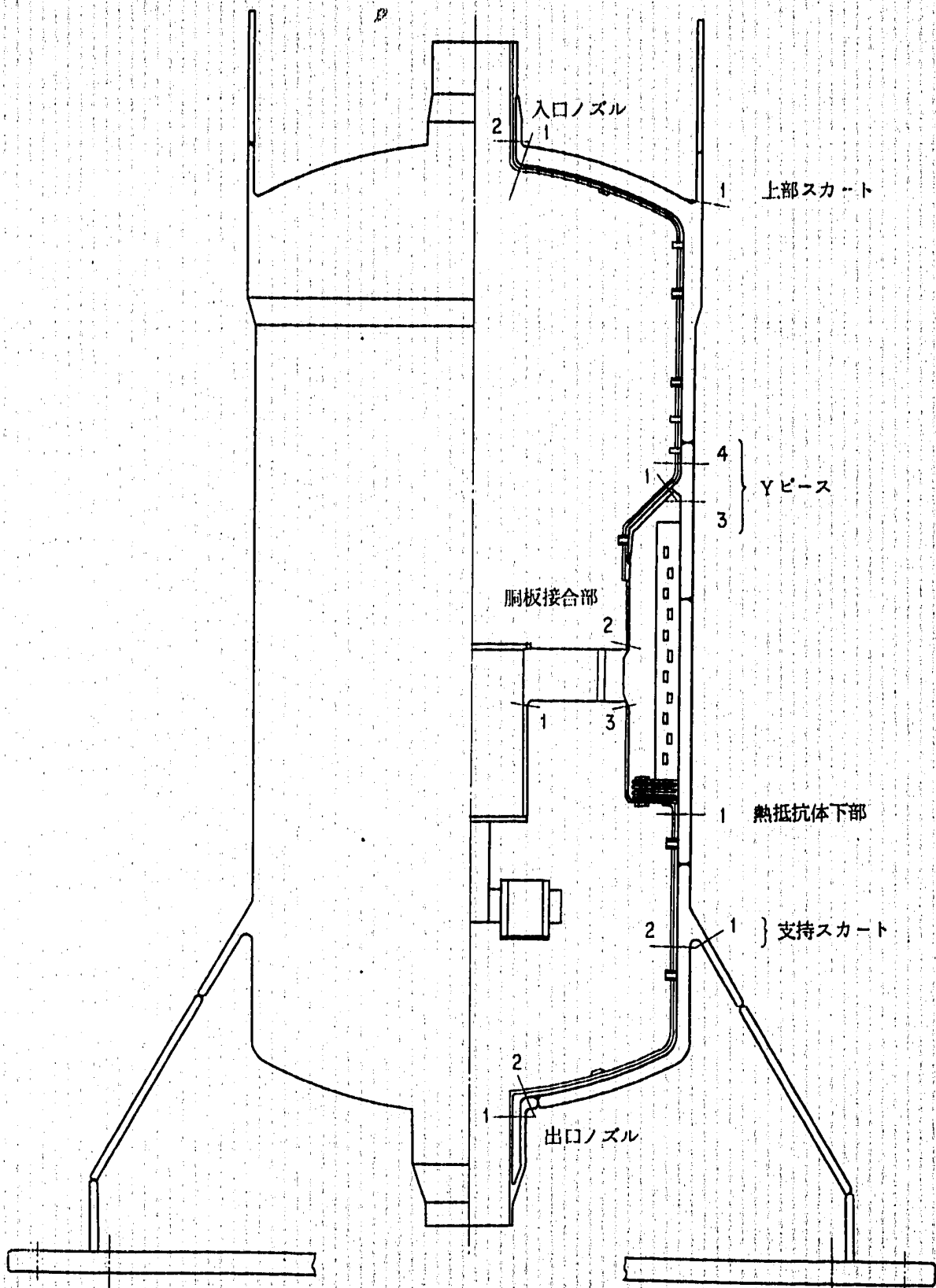
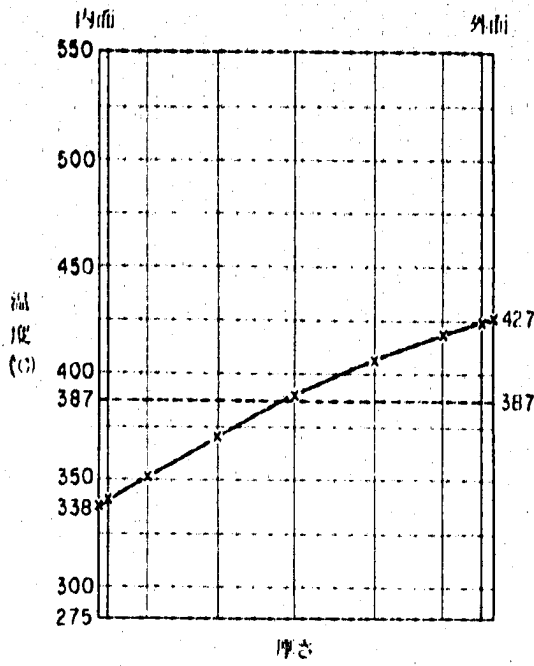
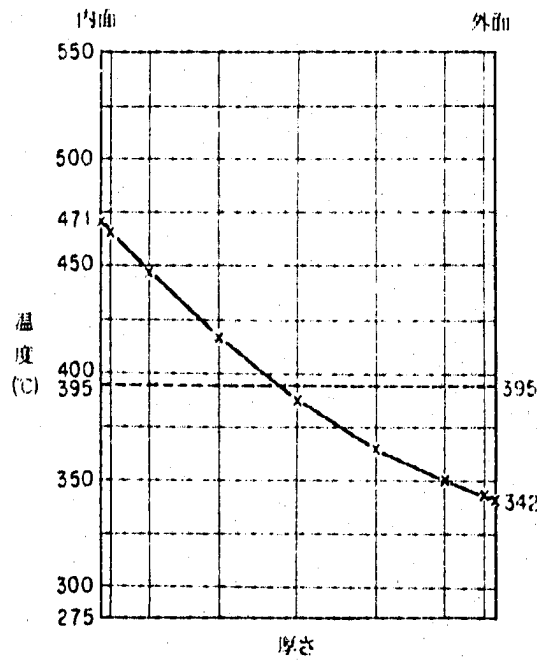


Fig. C. 1 Evaluation Line



事 象 (Event)	C 160
運 転 状 態 (Operating Status)	■
時 刻 (Time)	
平均温度 (°C) (Average Temperature)	387.2
ピーク温度 (°C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	-4.5
外表面 (Outer Surface)	-5.0

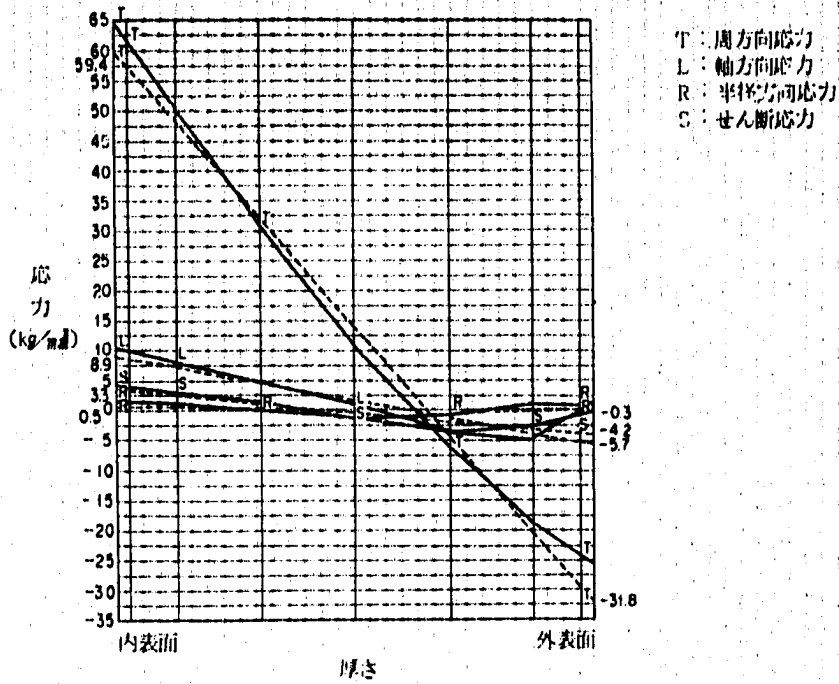
入口ノズル
温度分布図(評価断面 1)



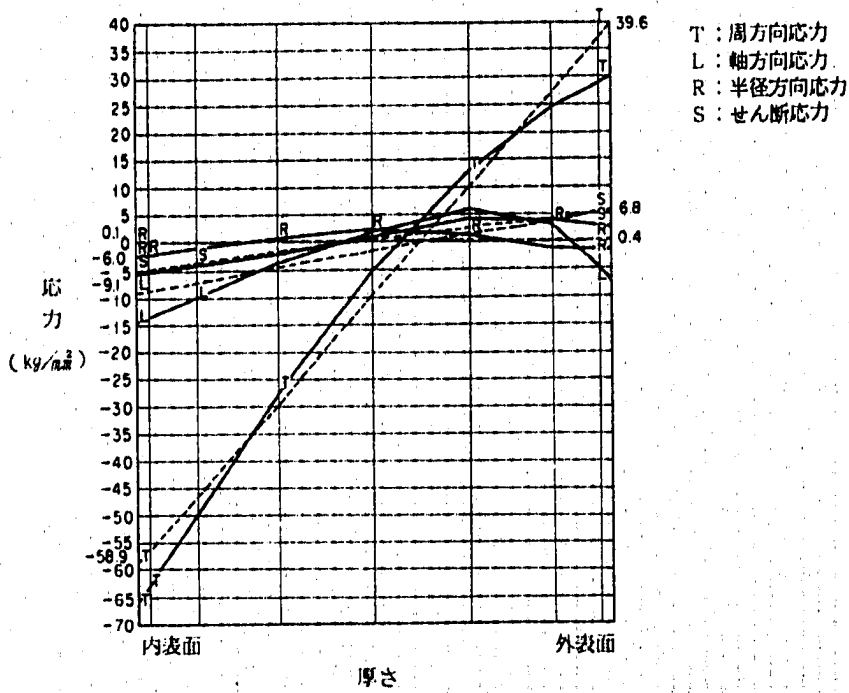
事 象 (Event)	H 75
運 転 状 態 (Operating Status)	■
時 刻 (Time)	
平均温度 (°C) (Average Temperature)	394.7
ピーク温度 (°C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	11.1
外表面 (Outer Surface)	11.8

入口ノズル
温度分布図(評価断面 1)

Fig. C. 2 Inlet Nozzle Line - 1

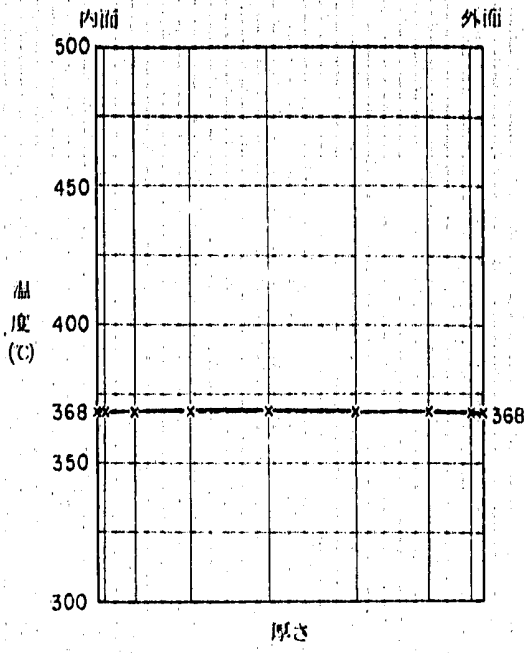


入口ノズル
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: C 150



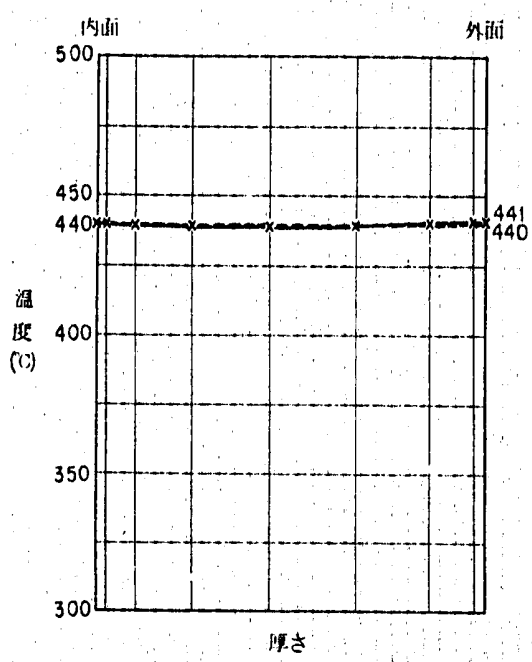
入口ノズル
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: H 75

Fig. C. 2 Inlet Nozzle Line-1 (Cont'd)



事 象	C 750
運 転 状 態	■
時 刻	
平均温度 (°C)	368.8
ピーク温度 (°C)	
内表面	-0.4
外表面	-0.3

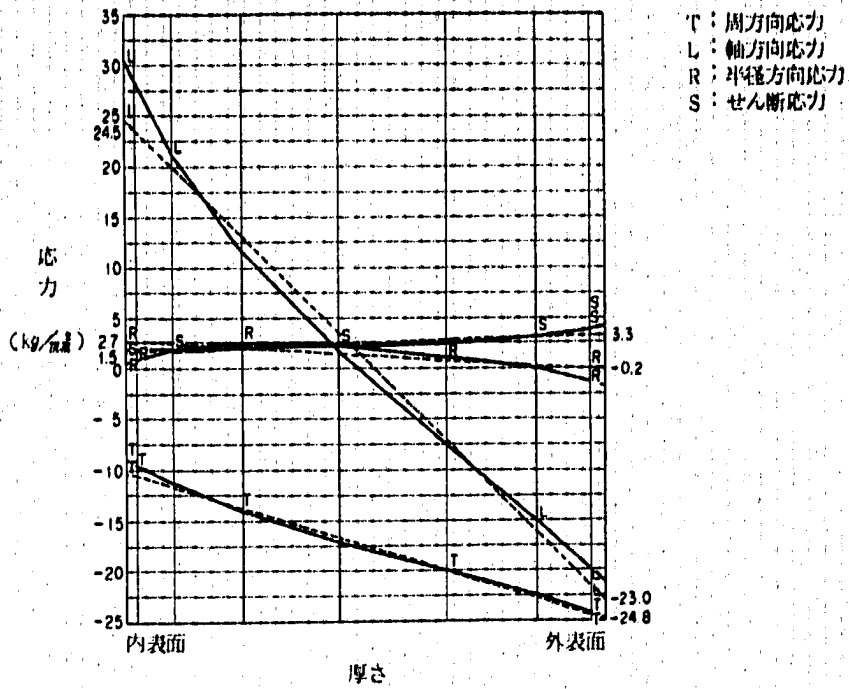
上部スカート
温度分布図 (評価断面 1)



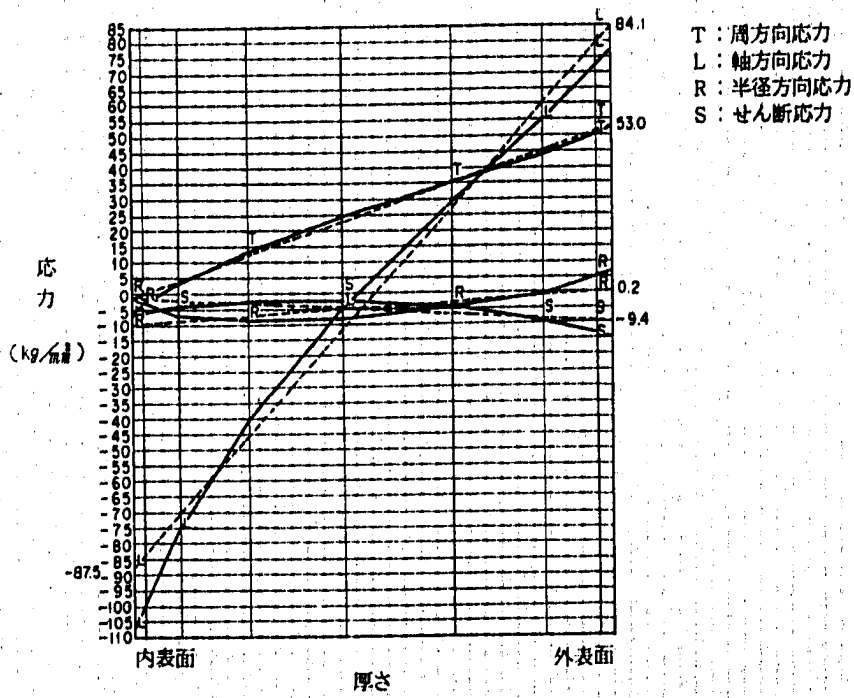
事 象	H 750
運 転 状 態	■
時 刻	
平均温度 (°C)	439.5
ピーク温度 (°C)	
内表面	1.1
外表面	0.7

上部スカート
温度分布図 (評価断面 1)

Fig. C. 3 Cylindrical Skirt Line-1

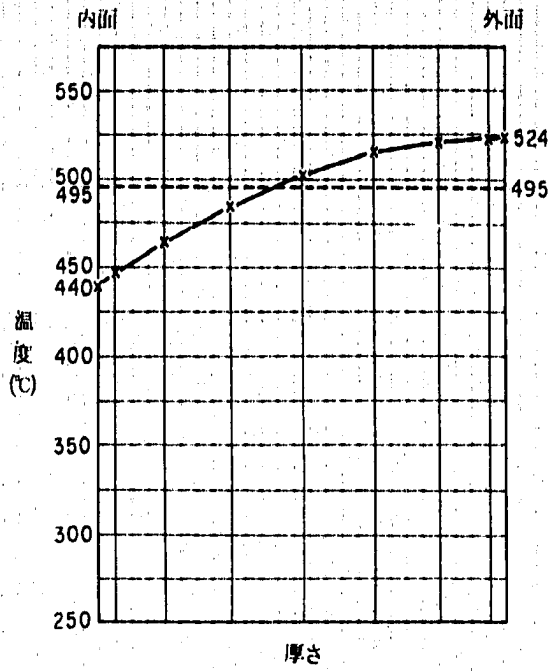


上部スカート
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: C 750



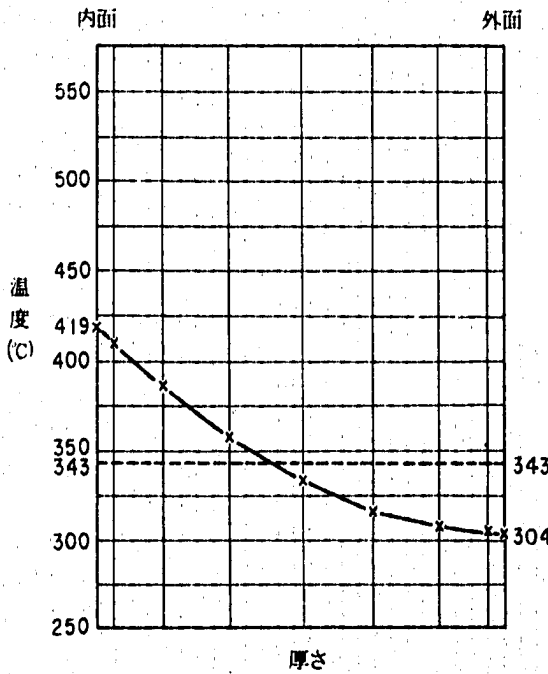
上部スカート
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: H 750

Fig. C. 3 Cylindrical Skirt Line-1 (Cont'd)



事 象	C 100
運 転 状 態	Ⅱ
時 刻	
平均温度(°C)	495.3
ピーク温度(°C)	
内表面	-13.3
外表面	-13.2

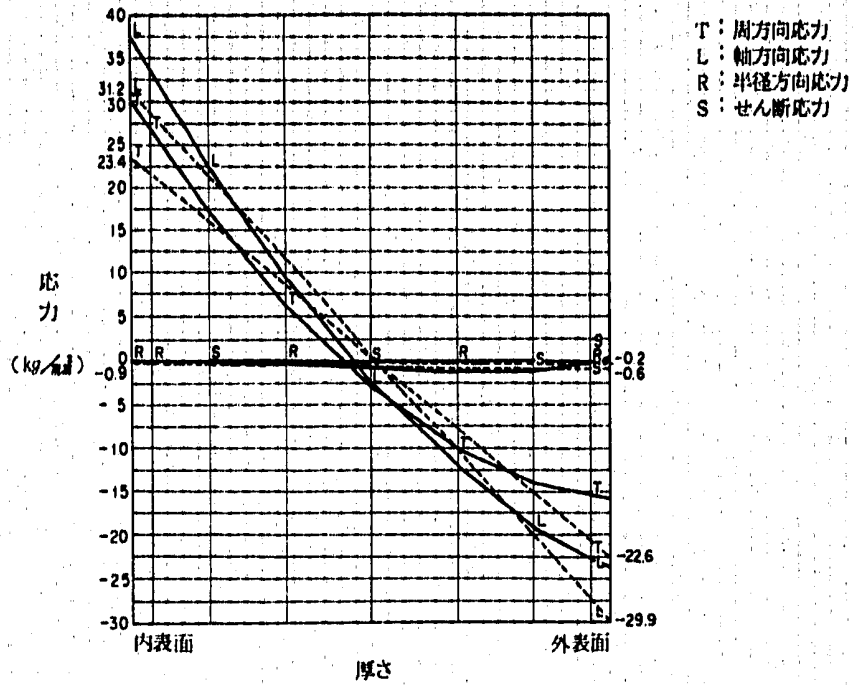
板厚不連続
温度分布図(評価断面 1)



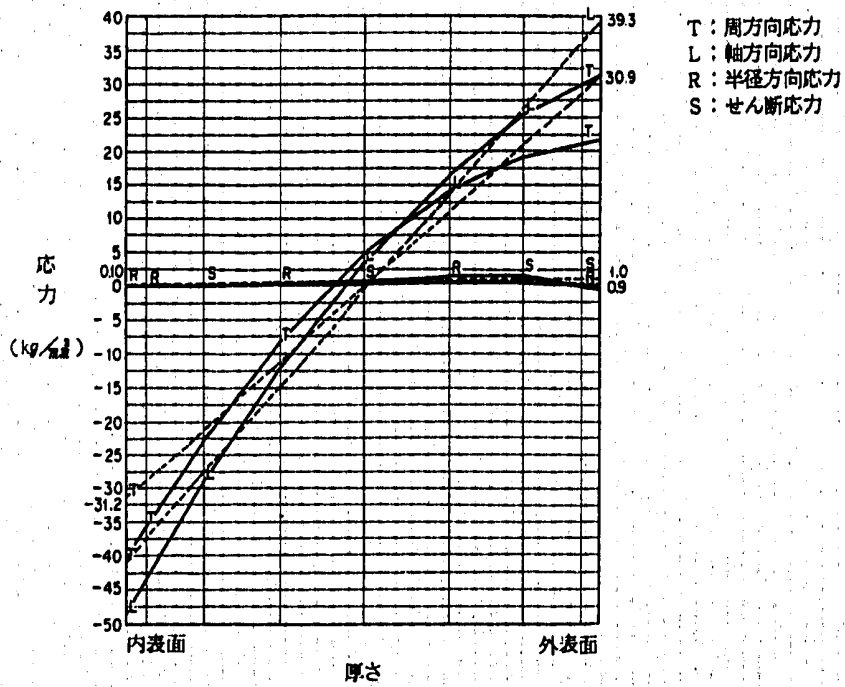
事 象	H 75
運 転 状 態	Ⅱ
時 刻	
平均温度(°C)	343.0
ピーク温度(°C)	
内表面	18.6
外表面	18.2

板厚不連続
温度分布図(評価断面 1)

Fig. C. 4 Thickness Discontinuity Line-1

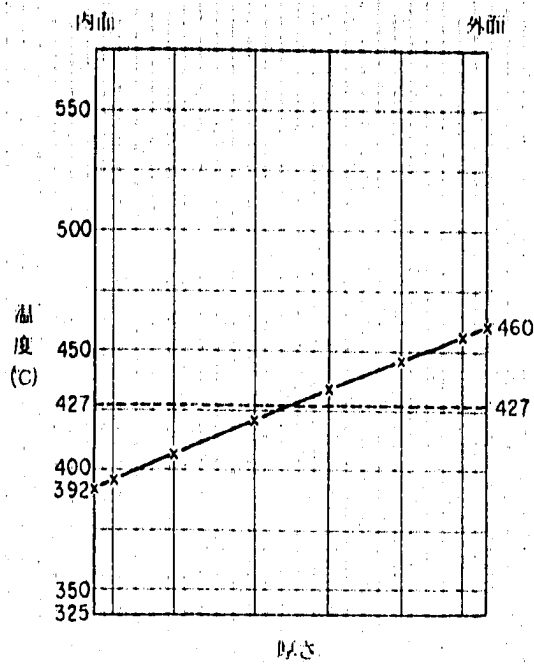


板厚不連続
 応力分布図 (評価断面 1)
 事象 : C 100



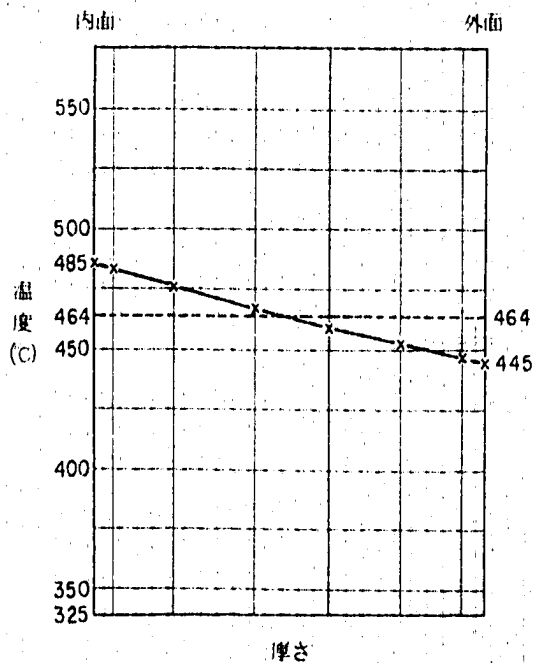
板厚不連続
 応力分布図 (評価断面 1)
 事象 : H 75

Fig. C. 4 Thickness Discontinuity Line - 1 (Cont'd)



事 象 (Event)	C 150
運 転 状 態 (Operating State)	Ⅱ
時 刻 (Time)	
平均温度 (°C) (Average Temperature)	426.8
ピーク温度 (°C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	-0.8
外表面 (Outer Surface)	-0.6

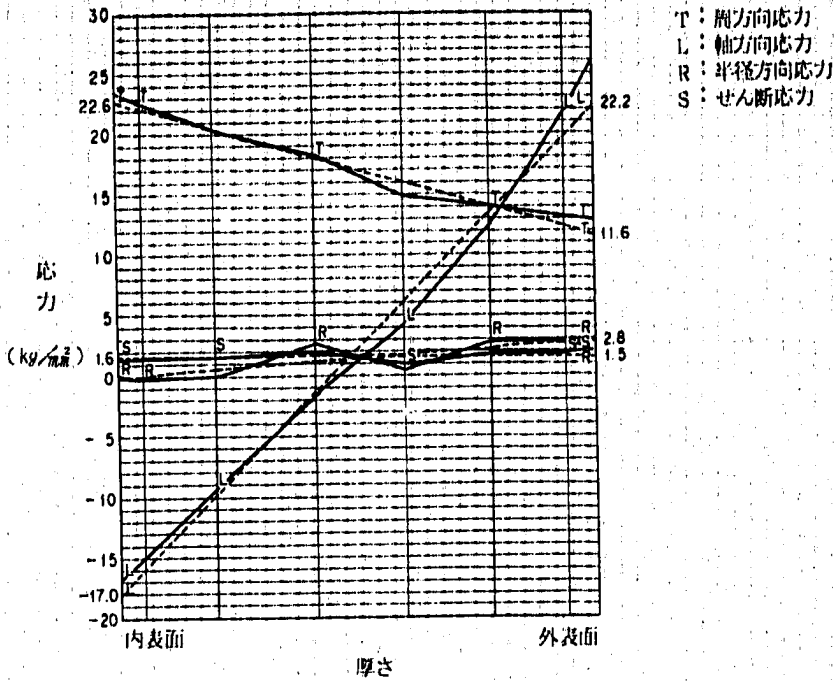
Yピース
温度分布図(評価断面 1)



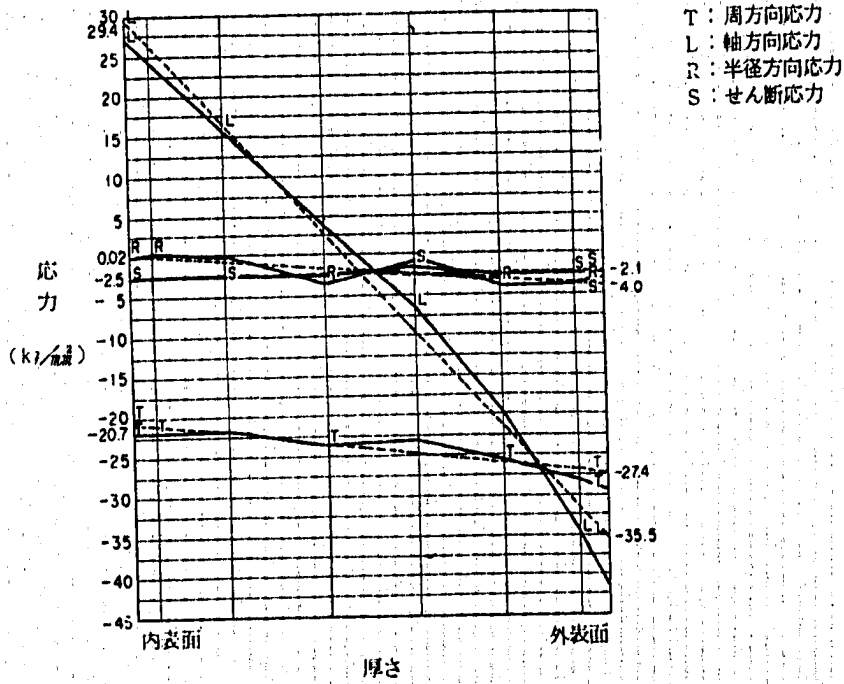
事 象 (Event)	H 150
運 転 状 態 (Operating State)	Ⅱ
時 刻 (Time)	
平均温度 (°C) (Average Temperature)	463.7
ピーク温度 (°C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	1.5
外表面 (Outer Surface)	1.4

Yピース
温度分布図(評価断面 1)

Fig. C. 5 Y-junction Line-1

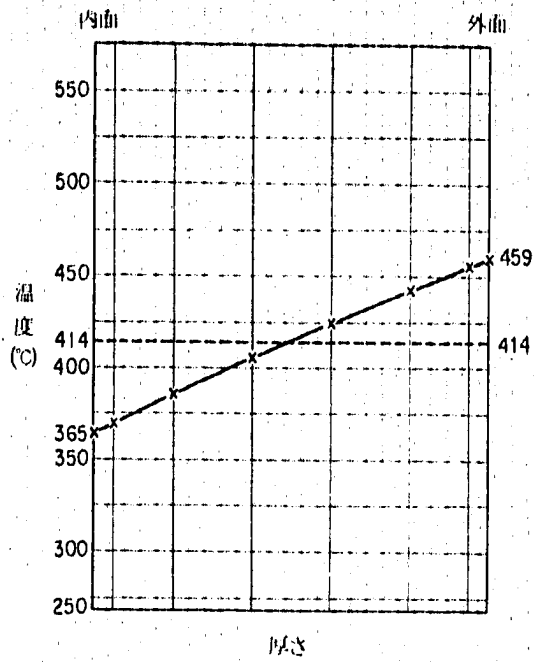


Yピース
 応力分布図 (評価断面 1)
 事象: C 150



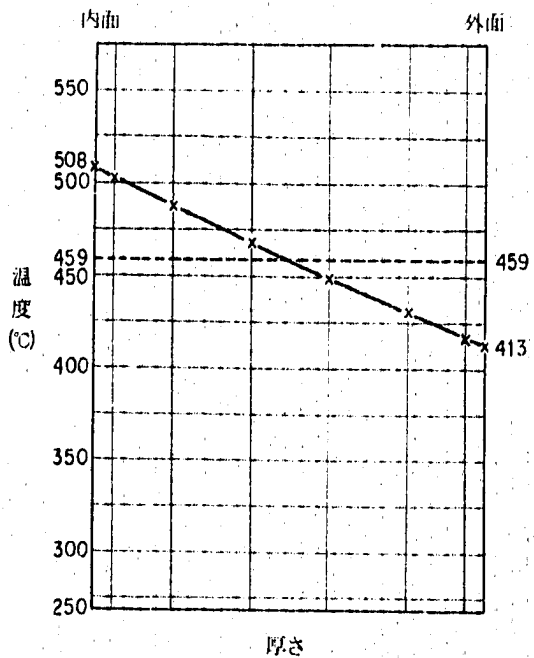
Yピース
 応力分布図 (評価断面 1)
 事象: H 150

Fig. C. 5 Y-junction Line-1 (Cont'd)



事 象 (Event)	C 50
運 転 状 態 (Operating Status)	■
時 刻 (Time)	
平均温度 (°C) (Average Temperature)	414.0
ピーク温度 (°C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	-2.2
外表面 (Outer Surface)	-1.9

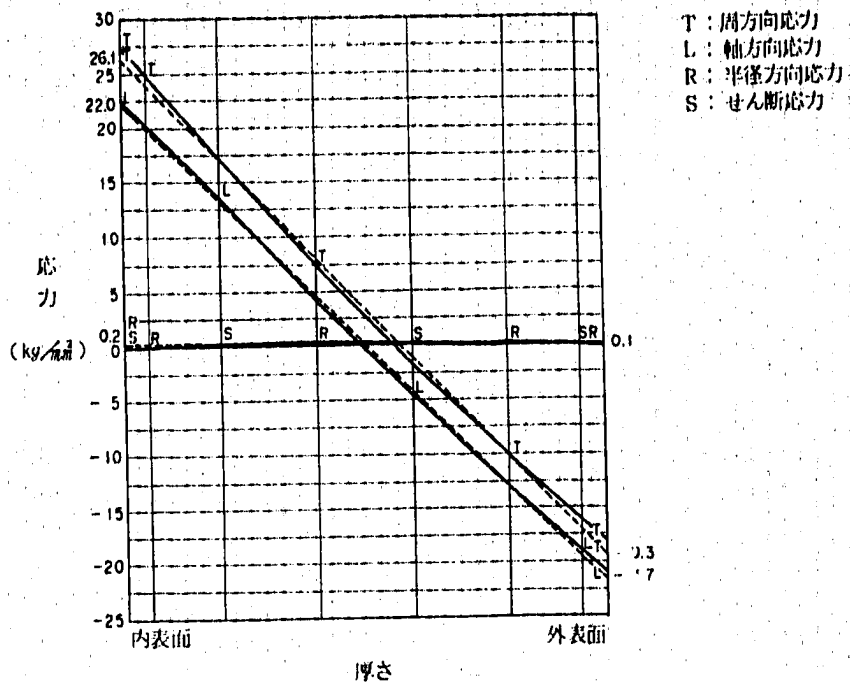
Yピース
温度分布図(評価断面 2)



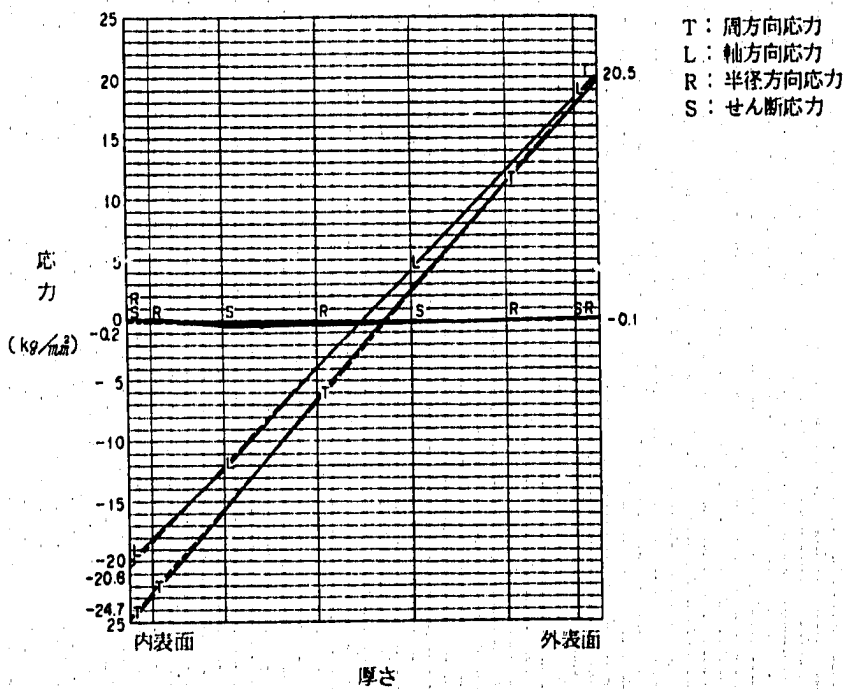
事 象 (Event)	H 75
運 転 状 態 (Operating Status)	■
時 刻 (Time)	
平均温度 (°C) (Average Temperature)	458.8
ピーク温度 (°C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	1.6
外表面 (Outer Surface)	1.4

Yピース
温度分布図(評価断面 2)

Fig. C. 6 Y-junction Line-2

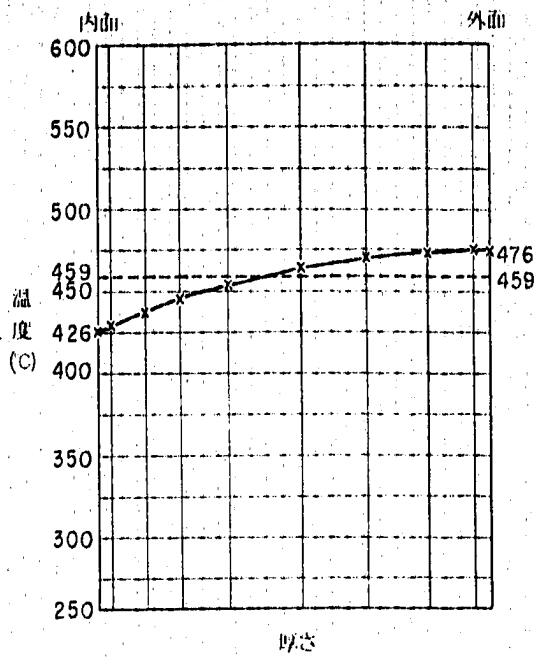


Y-junction
 応力分布図 (評価断面 2)
 事象: C 50



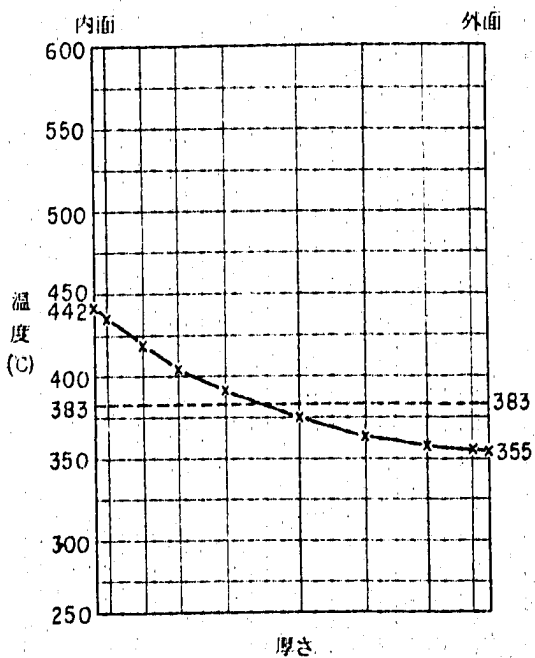
Y-junction
 応力分布図 (評価断面 2)
 事象: H 75

Fig. C. 6 Y-junction Line-2 (Cont'd)



事象 (Event)	C 200
運転状態 (Operating Status)	Ⅱ
時刻 (Time)	
平均温度 (C) (Average Temperature)	459.2
ピーク温度 (C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	- 8.7
外表面 (Outer Surface)	- 7.6

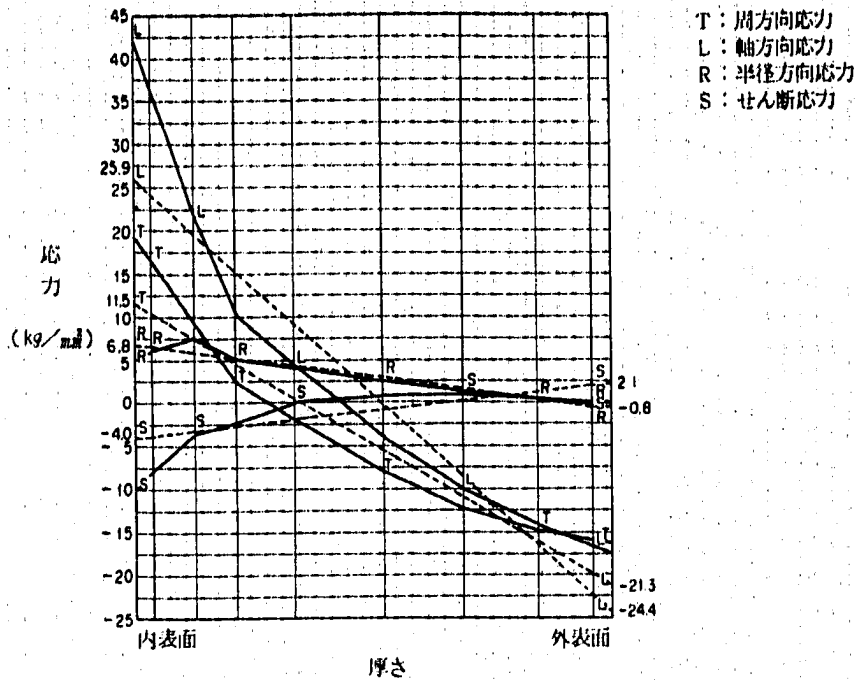
Yピース
温度分布図(評価断面 3)



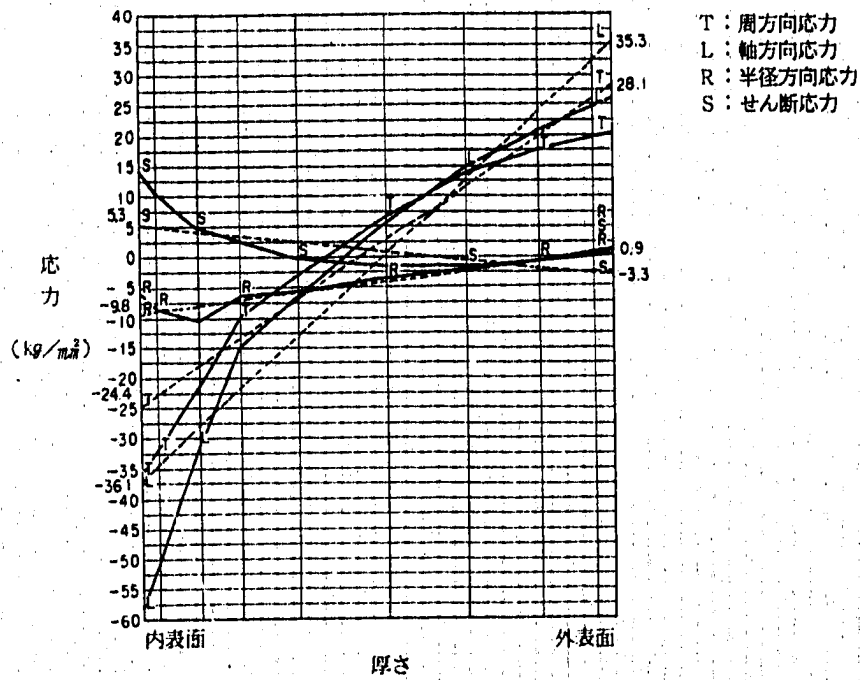
事象 (Event)	H 150
運転状態 (Operating Status)	Ⅱ
時刻 (Time)	
平均温度 (C) (Average Temperature)	383.0
ピーク温度 (C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	16.7
外表面 (Outer Surface)	13.5

Yピース
温度分布図(評価断面 3)

Fig. C. 7 Y-junction Line-3

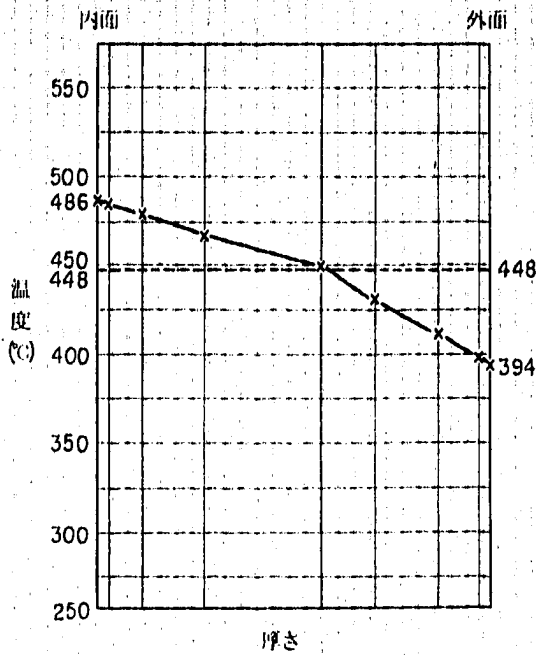


Yピース
 応力分布図(評価断面 3)
 事象: C 200



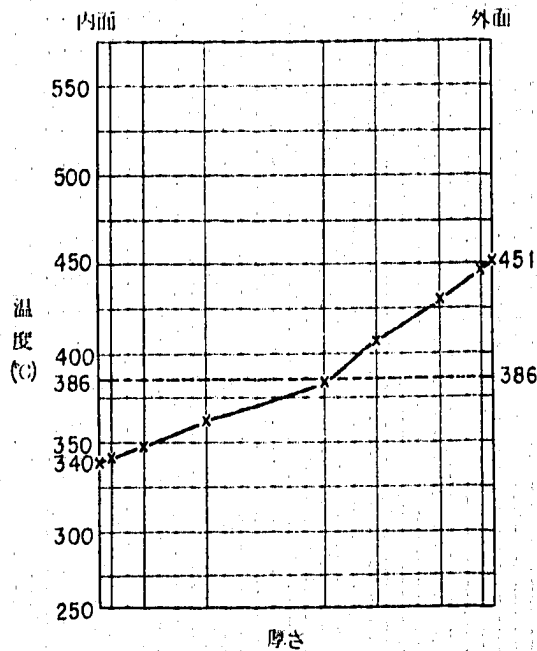
Yピース
 応力分布図(評価断面 3)
 事象: H 150

Fig. C. 7 Y-junction Line-3 (Cont'd)



事 象 (Event)	C 50
運 転 状 態 (Operating State)	Ⅱ
時 刻 (Time)	
平 均 温 度 (°C) (Average Temperature)	447.6
ピ ーク 温 度 (°C) (Peak Temperature)	
内 表 面 (Inner Surface)	-6.5
外 表 面 (Outer Surface)	-8.4

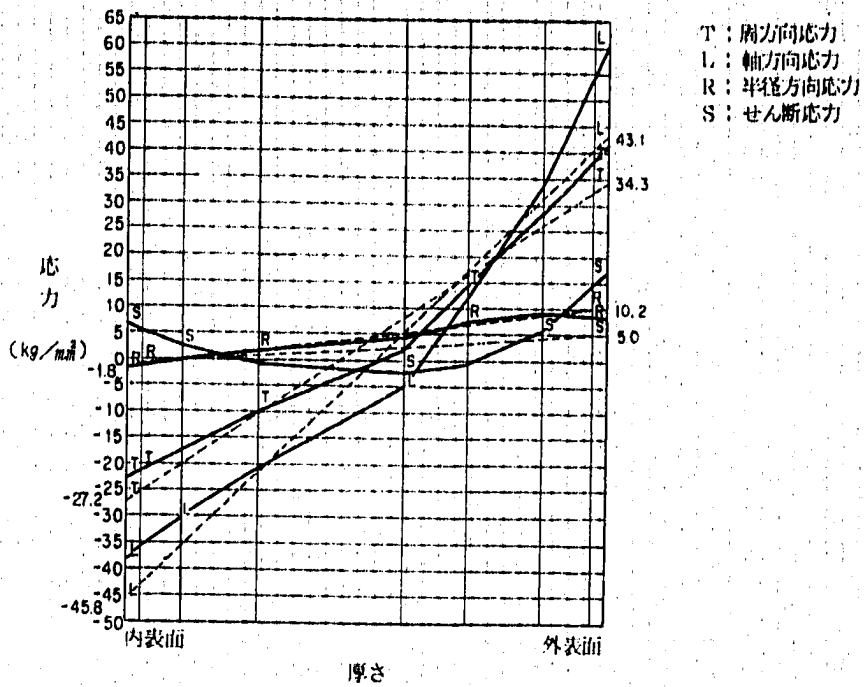
胴・板接合部
温度分布図(評価断面 1.)



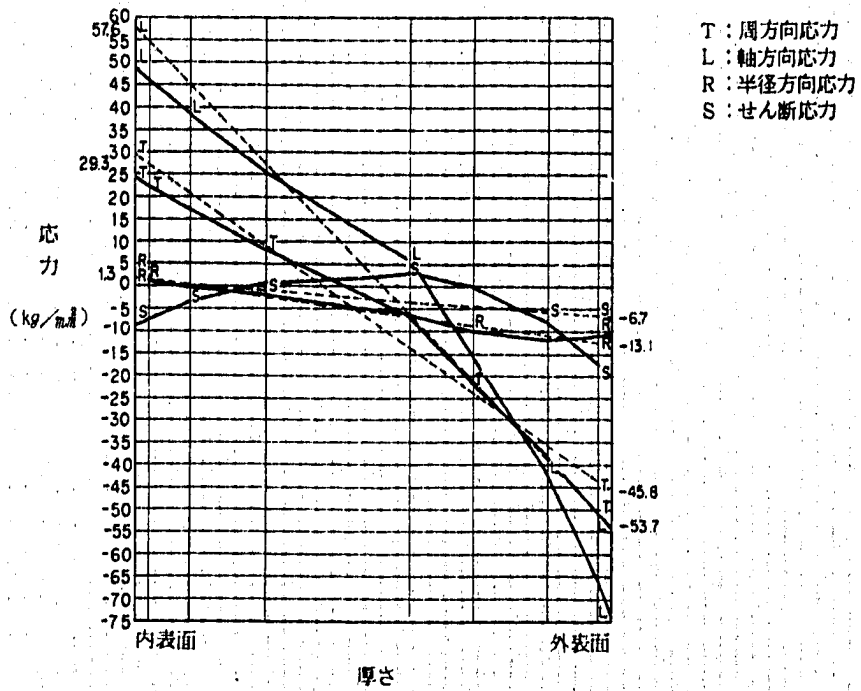
事 象 (Event)	H 50
運 転 状 態 (Operating State)	Ⅱ
時 刻 (Time)	
平 均 温 度 (°C) (Average Temperature)	386.0
ピ ーク 温 度 (°C) (Peak Temperature)	
内 表 面 (Inner Surface)	8.1
外 表 面 (Outer Surface)	10.8

胴・板接合部
温度分布図(評価断面 1.)

Fig. C. 8 Plate to Shell Junction Line-1

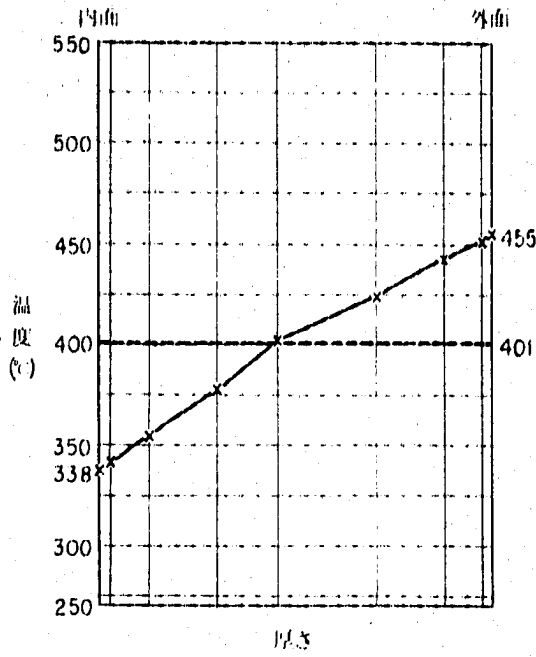


胴・板接合部
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: C 5.0



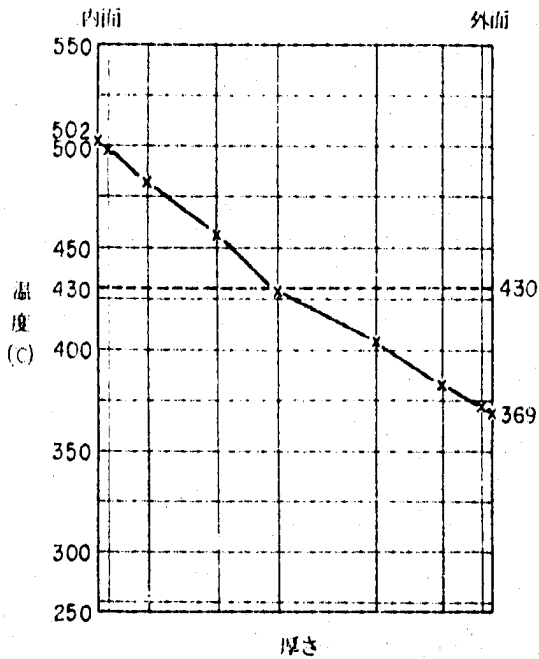
胴・板接合部
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: H 5.0

Fig. C. 8 Plate to Shell Junction Line-1 (Cont'd)



事象 (Event)	C 50
運転状態 (Operating State)	■
時刻 (Time)	
平均温度 (°C) (Average Temperature)	400.8
ピーク温度 (°C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	-5.0
外表面 (Outer Surface)	-4.3

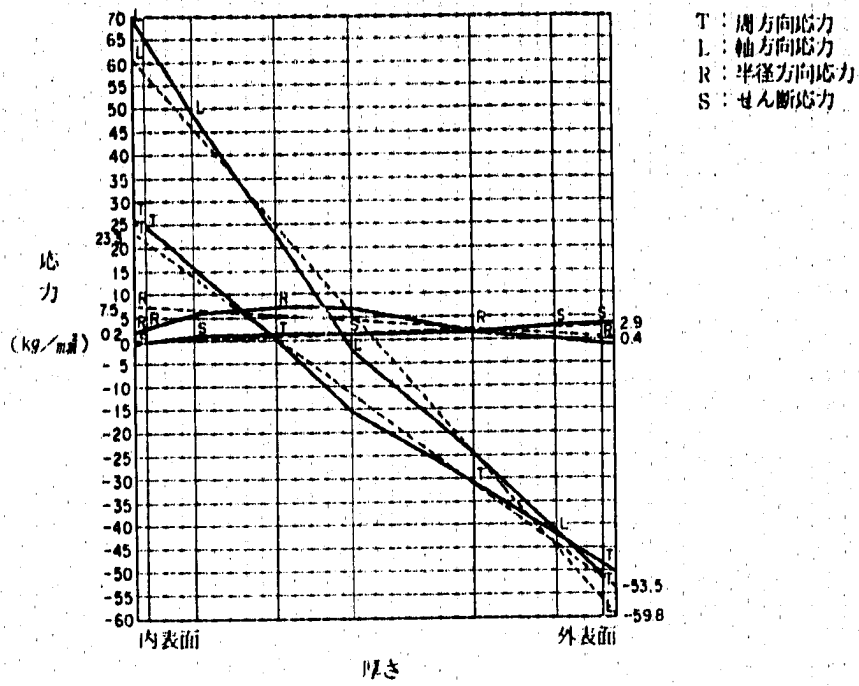
胴・板接合部
温度分布図(評価断面 2)



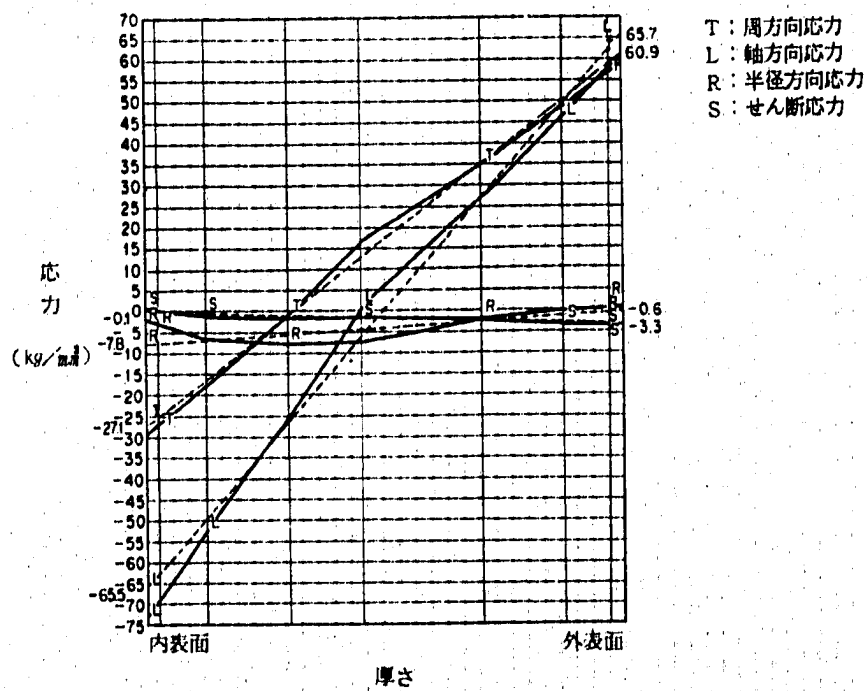
事象 (Event)	H 50
運転状態 (Operating State)	■
時刻 (Time)	
平均温度 (°C) (Average Temperature)	430.4
ピーク温度 (°C) (Peak Temperature)	
内表面 (Inner Surface)	5.9
外表面 (Outer Surface)	5.1

胴・板接合部
温度分布図(評価断面 2)

Fig. C. 9 Plate to Shell Junction Line-2

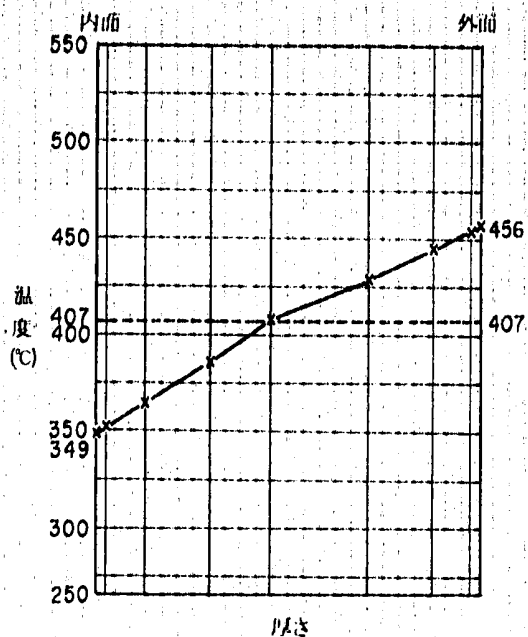


胴・板接合部
 応力分布図(評価断面 2)
 事象: C 50



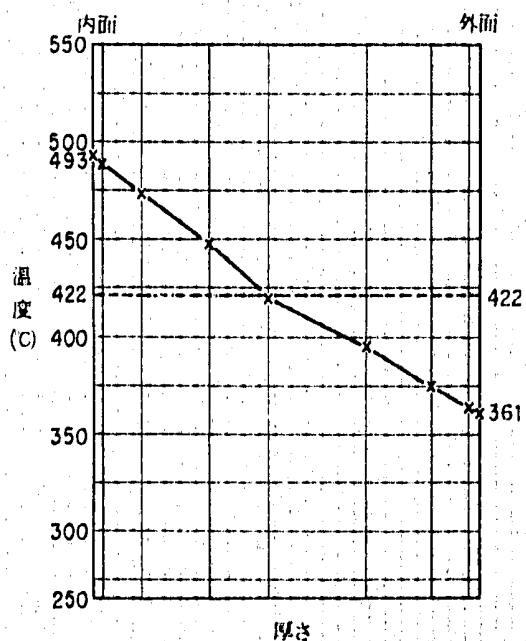
胴・板接合部
 応力分布図(評価断面 2)
 事象: H 50

Fig. C. 9 Plate to Shell Junction Line-2 (Cont'd)



事 象 (Event)	C 50
運 転 状 態 (Operating Status)	Ⅱ
時 刻 (Time)	
平均 温度 (°C) (Average Temperature)	407.1
ピーク 温度 (°C) (Peak Temperature)	
内 表 面 (Inner Surface)	-4.8
外 表 面 (Outer Surface)	-4.2

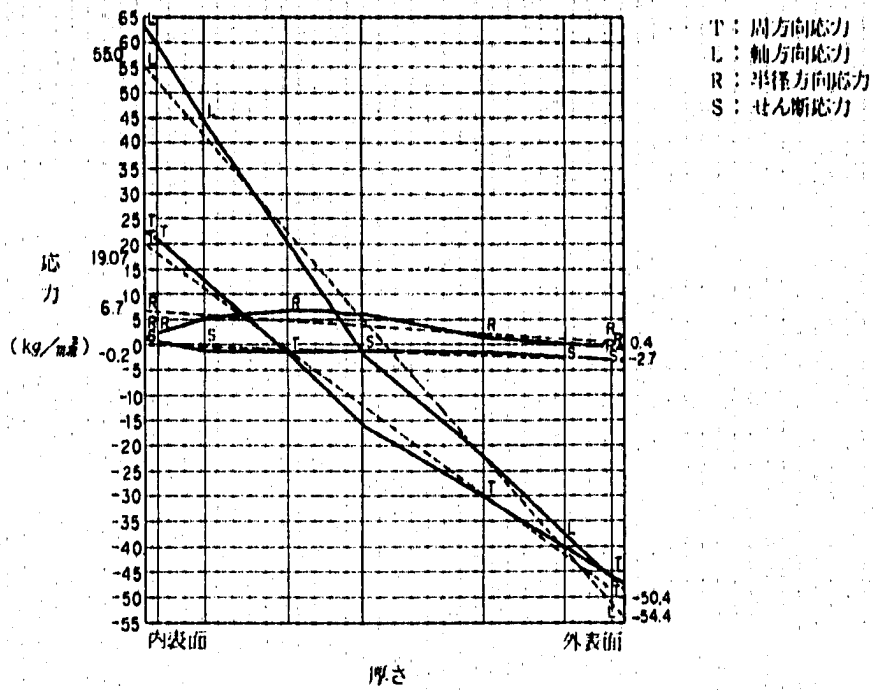
胴・板接合部
温度分布図 (評価断面 3)



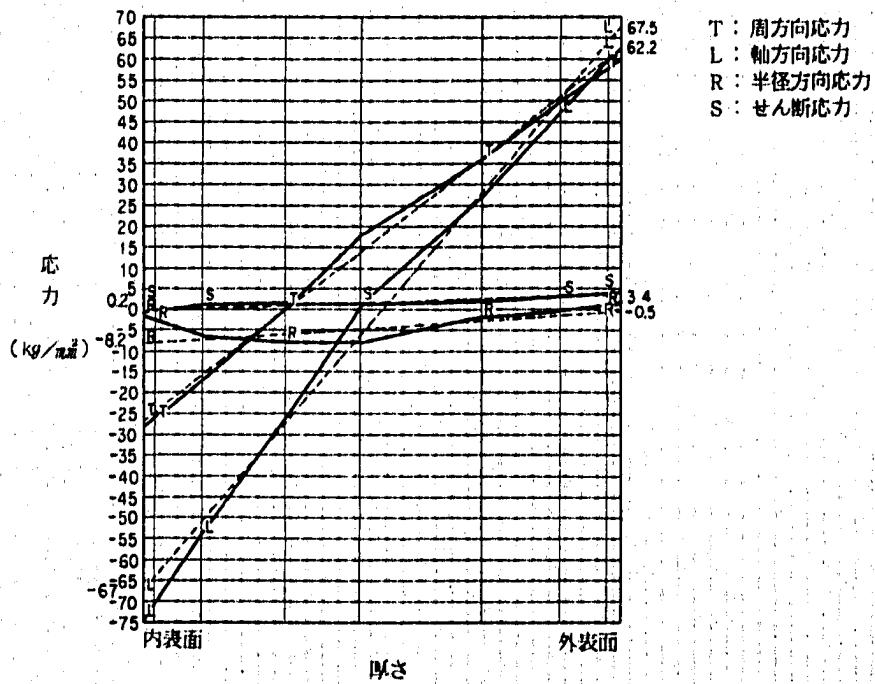
事 象 (Event)	H 50
運 転 状 態 (Operating Status)	Ⅱ
時 刻 (Time)	
平均 温度 (°C) (Average Temperature)	421.5
ピーク 温度 (°C) (Peak Temperature)	
内 表 面 (Inner Surface)	5.8
外 表 面 (Outer Surface)	5.0

胴・板接合部
温度分布図 (評価断面 3)

Fig. C. 10 Plate to Shell Junction Line-3

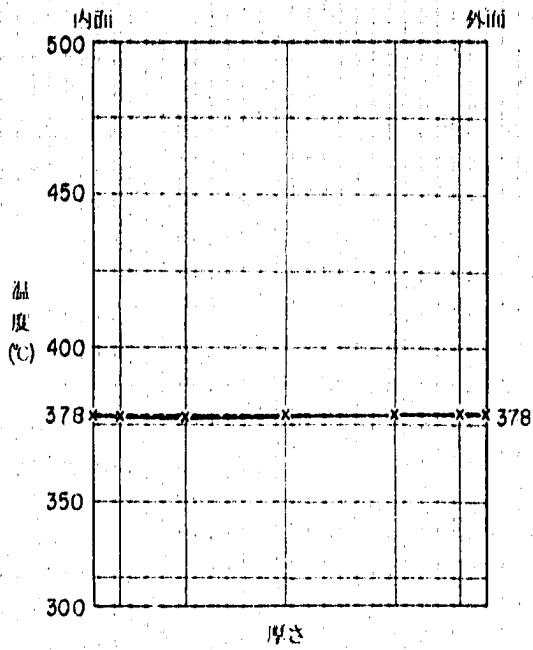


胴・板接合部
 応力分布図(評価断面 3)
 事象: C 50



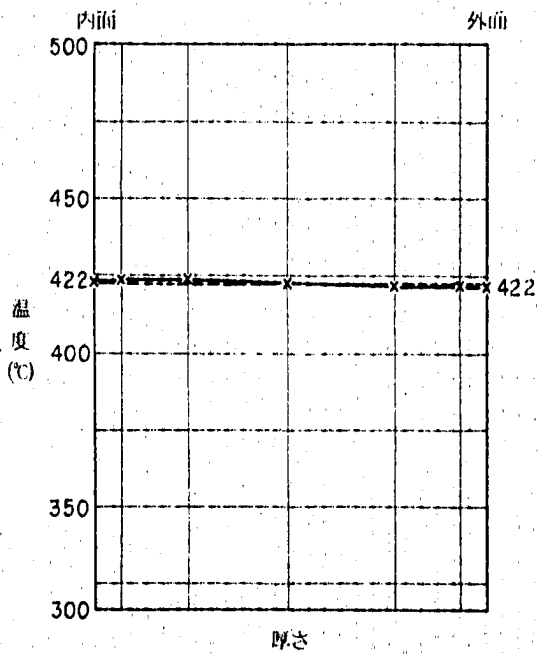
胴・板接合部
 応力分布図(評価断面 3)
 事象: H 50

Fig. C. 10 Plate to Shell Junction Line-3 (Cont'd)



事 象	C-750
運 転 状 態	■
時 刻	
平均温度 (°C)	378.1
ピーク温度 (°C)	
内表面	0.3
外表面	-0.1

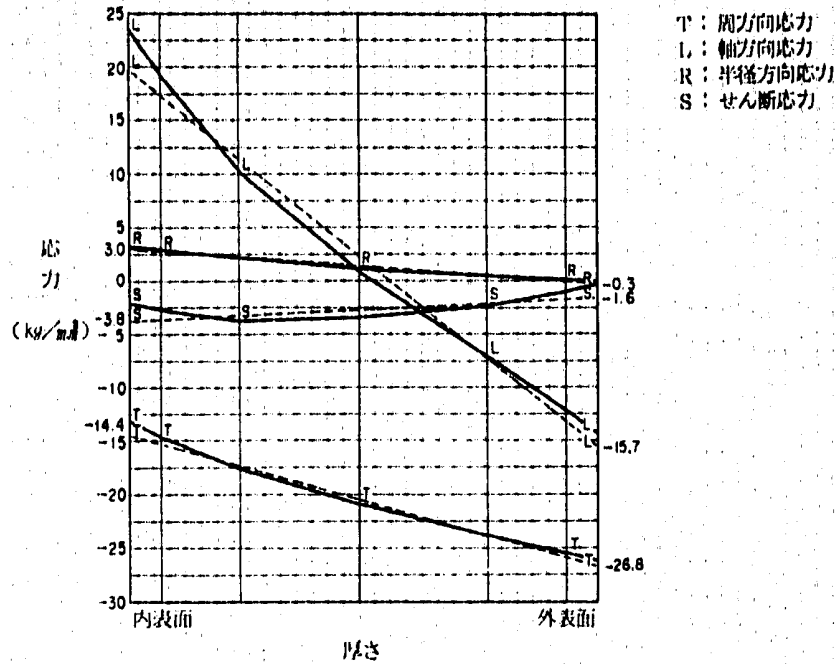
支持スカート
温度分布図(評価断面 1)



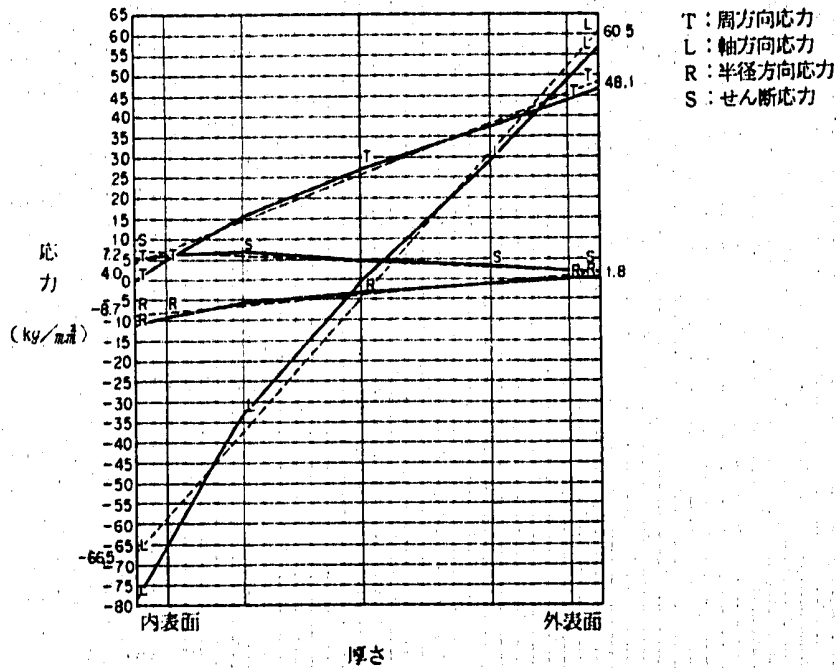
事 象	H-750
運 転 状 態	■
時 刻	
平均温度 (°C)	422.4
ピーク温度 (°C)	
内表面	-0.6
外表面	0.2

支持スカート
温度分布図(評価断面 1)

Fig. C. 11 Conical Support Skirt Line-1

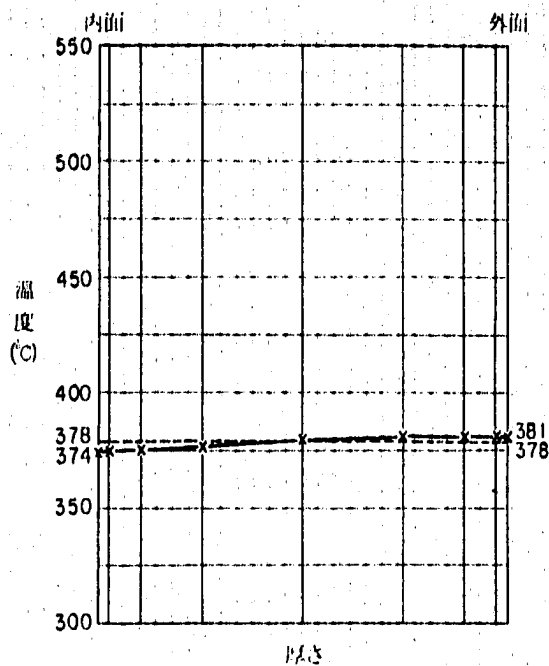


支持スカート
 応力分布図 (評価断面 1)
 事象 : C 750



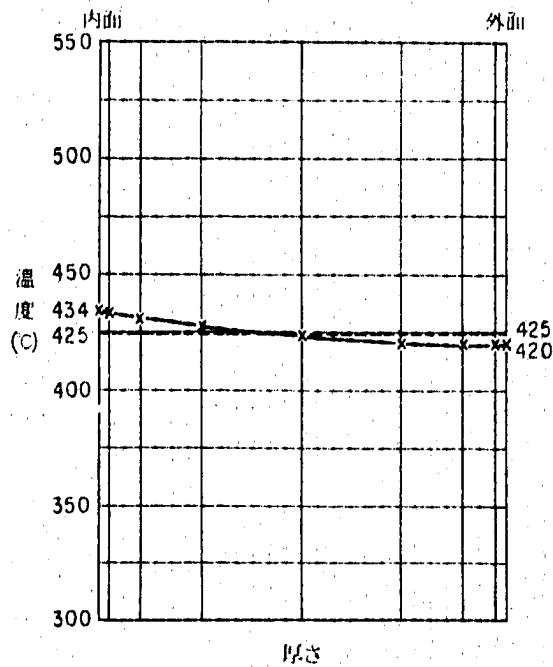
支持スカート
 応力分布図 (評価断面 1)
 事象 : H 750

Fig. C. 11 Conical Support Skirt Line-1 (Cont'd)



事 象	C 150
運 転 状 態	■
時 刻	
平均温度 (°C)	378.3
ピーク温度 (°C)	
内 表 面	-1.0
外 表 面	-1.1

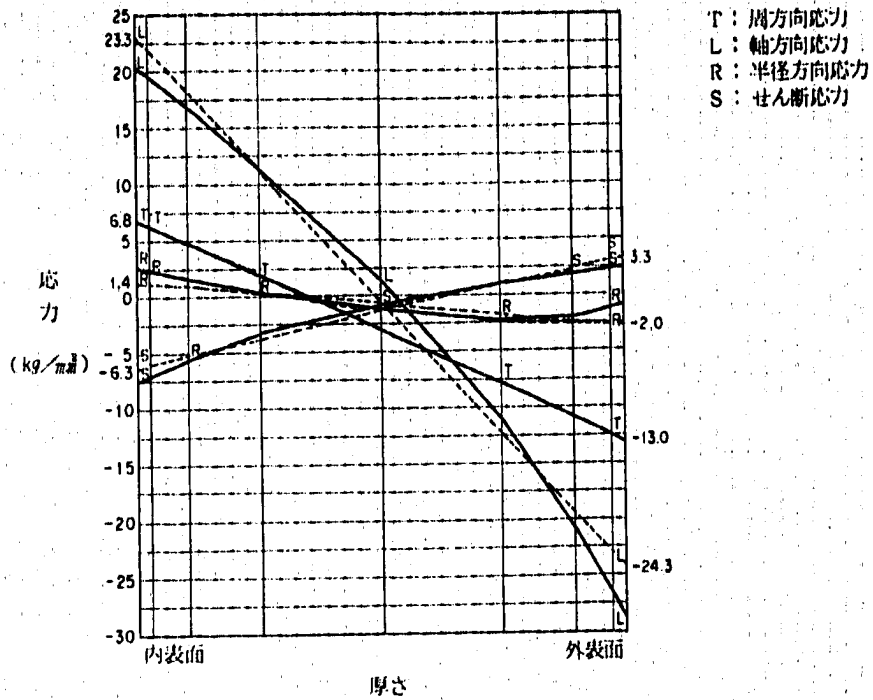
出口ノズル
温度分布図(評価断面 1)



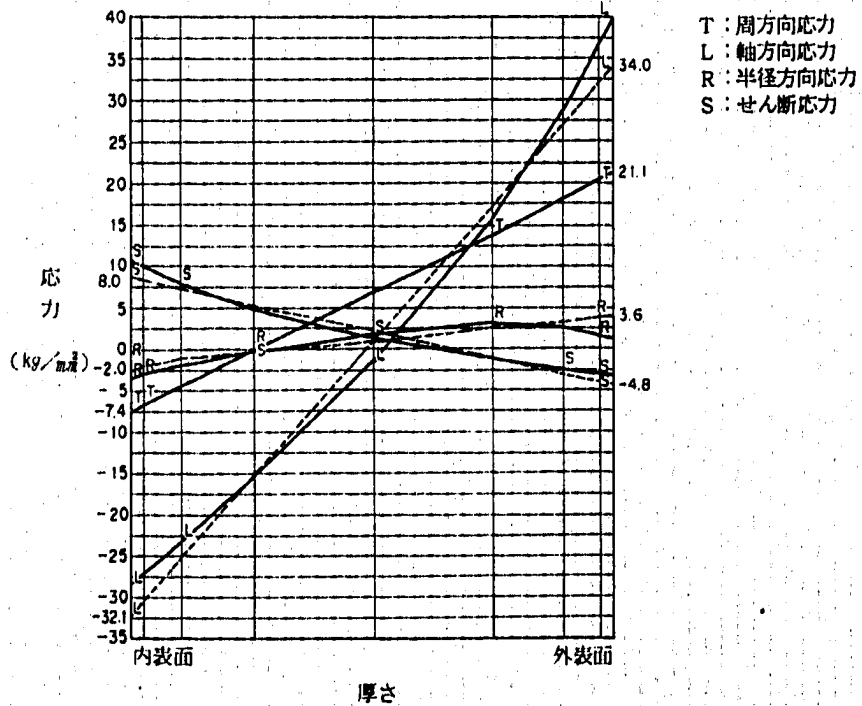
事 象	H 75
運 転 状 態	■
時 刻	
平均温度 (°C)	424.7
ピーク温度 (°C)	
内 表 面	2.0
外 表 面	2.2

出口ノズル
温度分布図(評価断面 1)

Fig. C. 12 Outlet Nozzle Line - 1

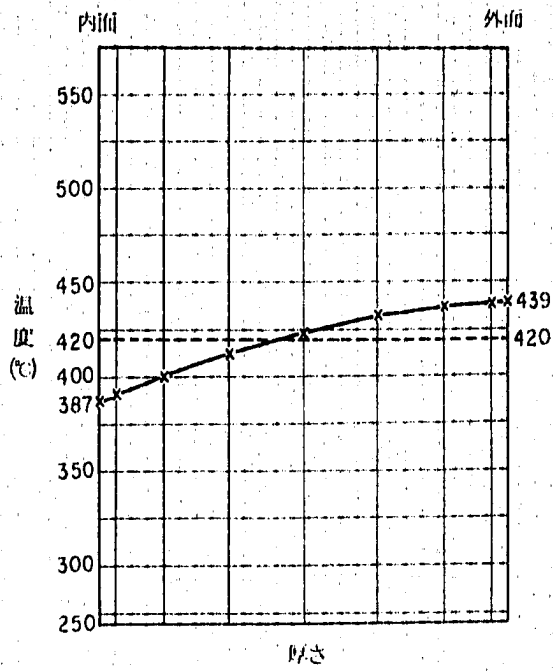


出口ノズル
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: C 150



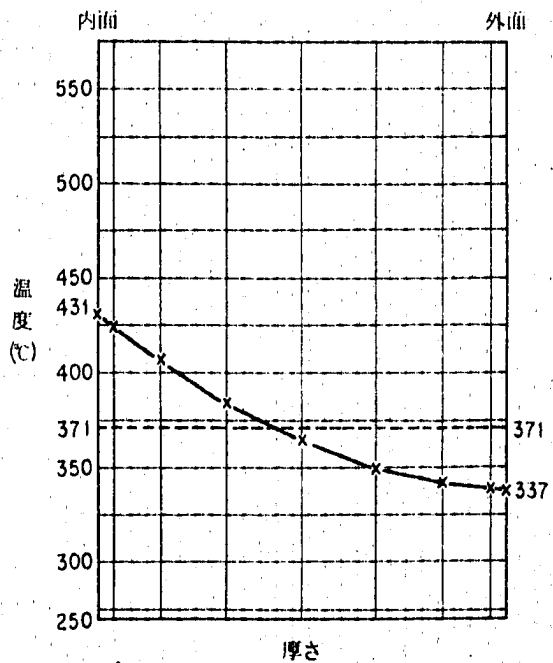
出口ノズル
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: H 75

Fig. C. 12 Outlet Nozzle Line-1 (Cont'd)



事象	C 150
運転状態	Ⅱ
時刻	
平均温度 (°C)	419.6
ピーク温度 (°C)	
内表面	-6.3
外表面	-6.8

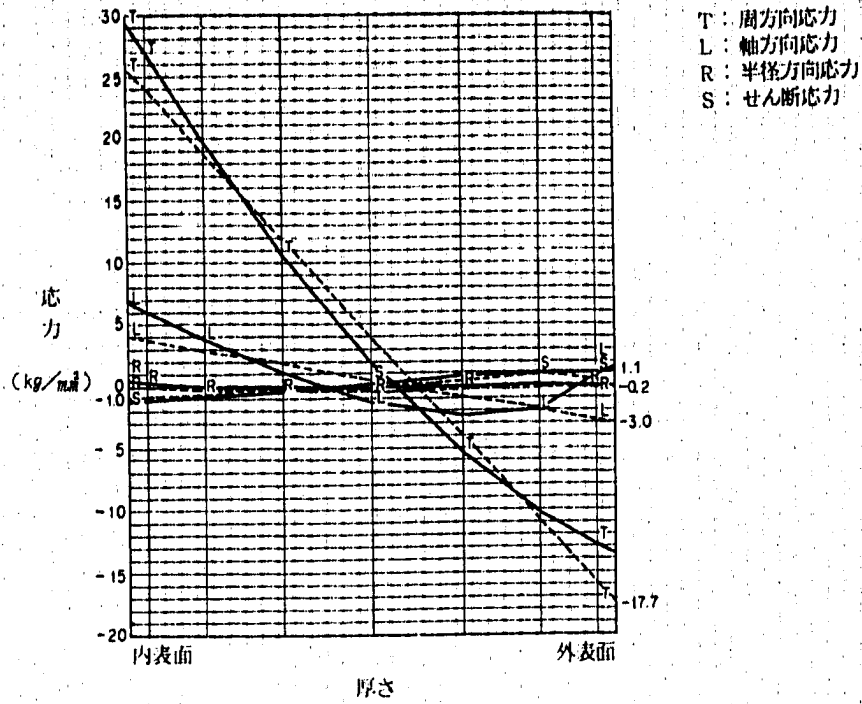
出口ノズル
温度分布図(評価断面 2)



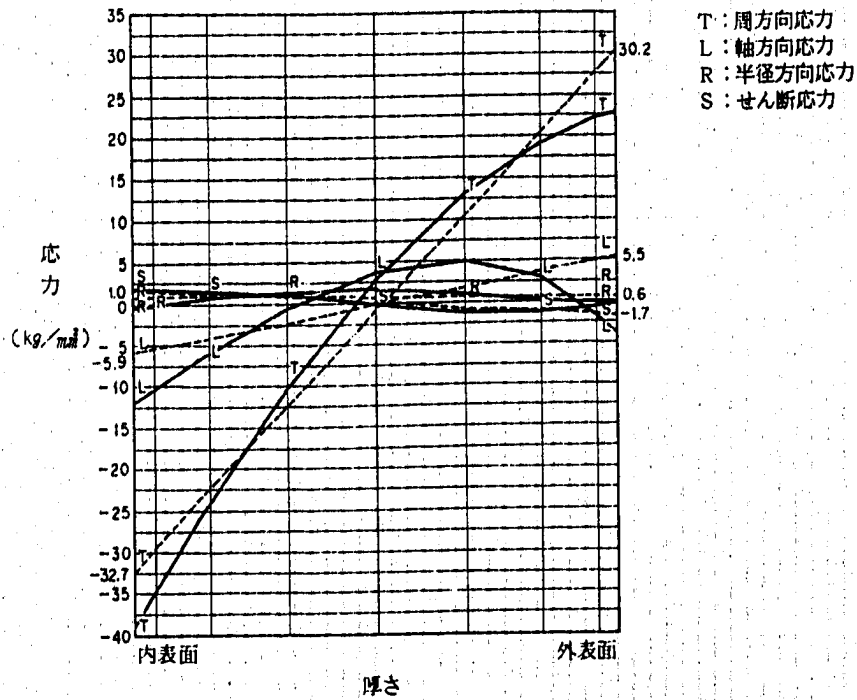
事象	H 75
運転状態	Ⅱ
時刻	
平均温度 (°C)	371.3
ピーク温度 (°C)	
内表面	12.8
外表面	13.1

出口ノズル
温度分布図(評価断面 2)

Fig. C. 13 Outlet Nozzle Line - 2

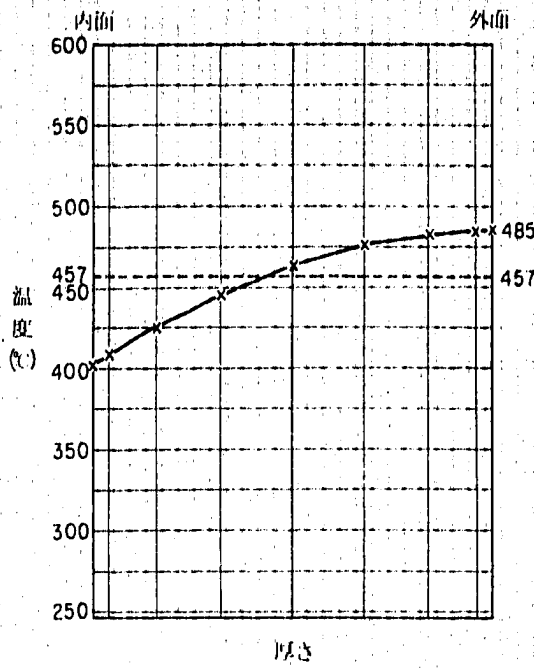


出口ノズル
 応力分布図(評価断面 2)
 事象: C 150



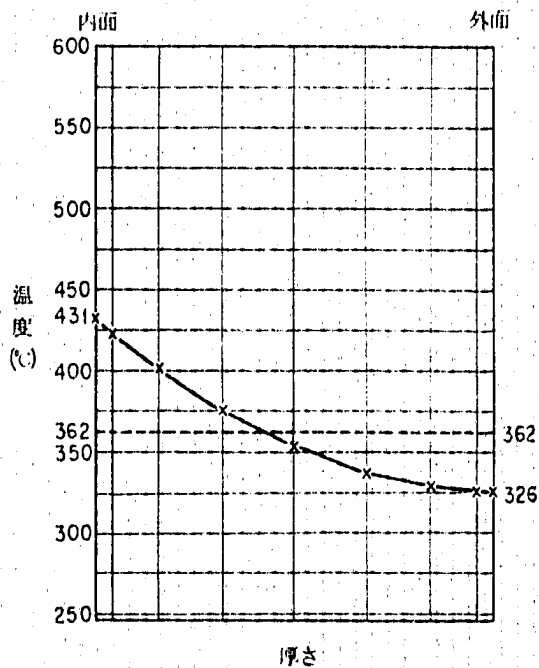
出口ノズル
 応力分布図(評価断面 2)
 事象: H 75

Fig. C. 13 Outlet Nozzle Line-2 (Cont'd)



事 象	C 150
運 転 状 態	■
時 刻	
平均温度 (°C)	456.6
ピーク温度 (°C)	
内表面	-12.8
外表面	-13.0

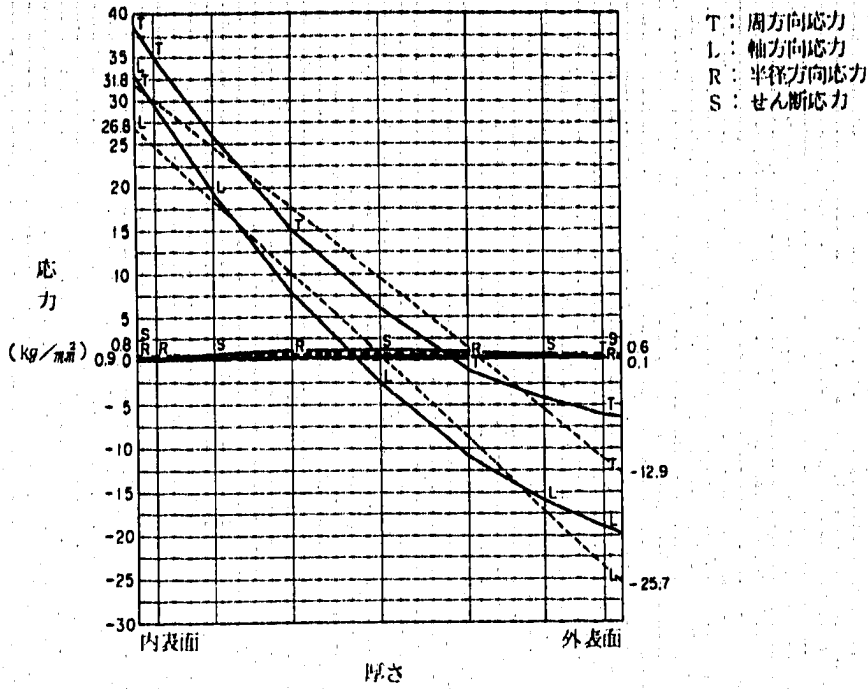
熱抵抗体下側胴部
温度分布図(評価断面 1)



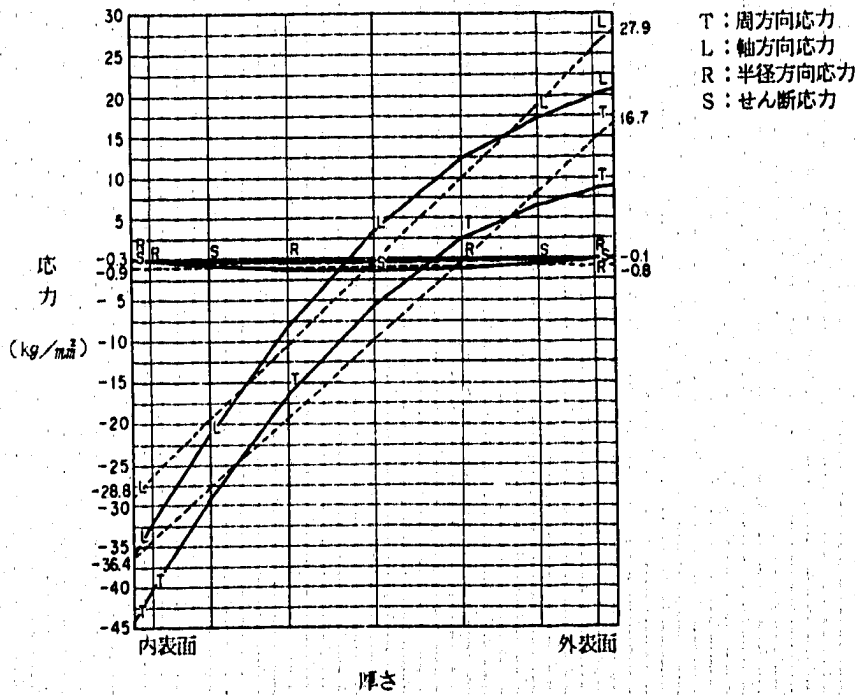
事 象	H 100
運 転 状 態	■
時 刻	
平均温度 (°C)	362.1
ピーク温度 (°C)	
内表面	16.3
外表面	16.5

熱抵抗体下側胴部
温度分布図(評価断面 1)

Fig. C. 14 Thermal Insulator Line-1



熱抵抗体下側胴部
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: C 150



熱抵抗体下側胴部
 応力分布図(評価断面 1)
 事象: H 100

Fig. C. 14 Thermal Insulator Line-1 (Cont'd)

付録D. 出口ノズルのノッチ加工

出口ノズル部については、形状寸法について種々の検討を行ったが、TTSDSによる強度評価によるクリープ疲労損傷値が有意なき裂が期待できるほど大きくすることができなかった。そこでき裂データを得るため擬似ノッチとしてドリル孔を設けることとした。ドリル孔は2種の径のものを各3箇所とした。形状及び位置は次のとおりである。

- 形状 : 0.8キリ 深 1.5 ± 0.5
 2.0キリ 深 1.5 ± 0.5
- 位置 : 母材部
 溶接止端部
 溶接部

ドリル穴の断面形状を Fig. D. 1 に示す。

ドリル穴のないモデルによる熱応力解析で得られた、ドリル穴位置での応力を Table D. 1 に示す。

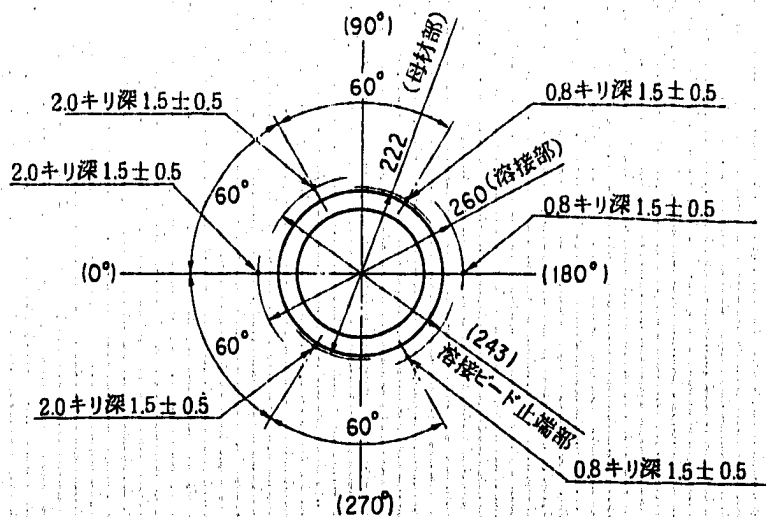
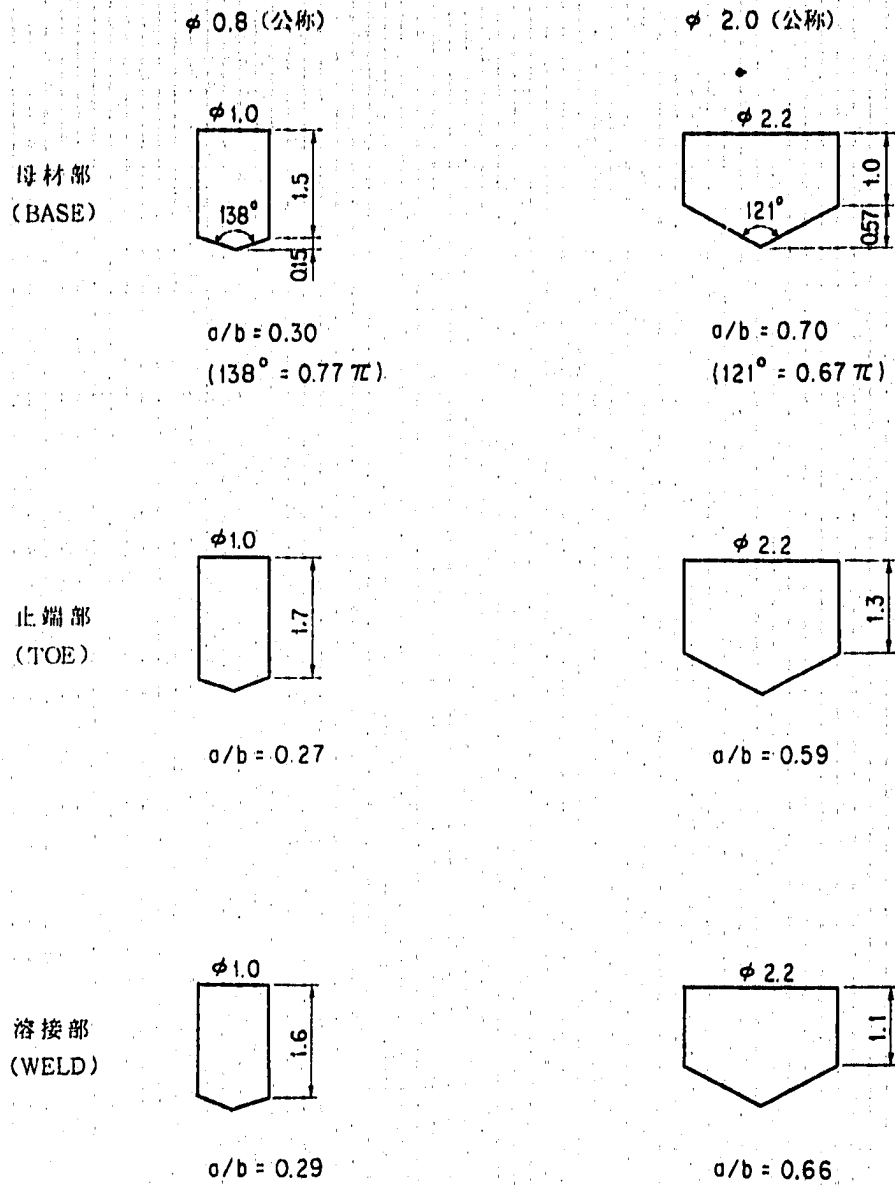
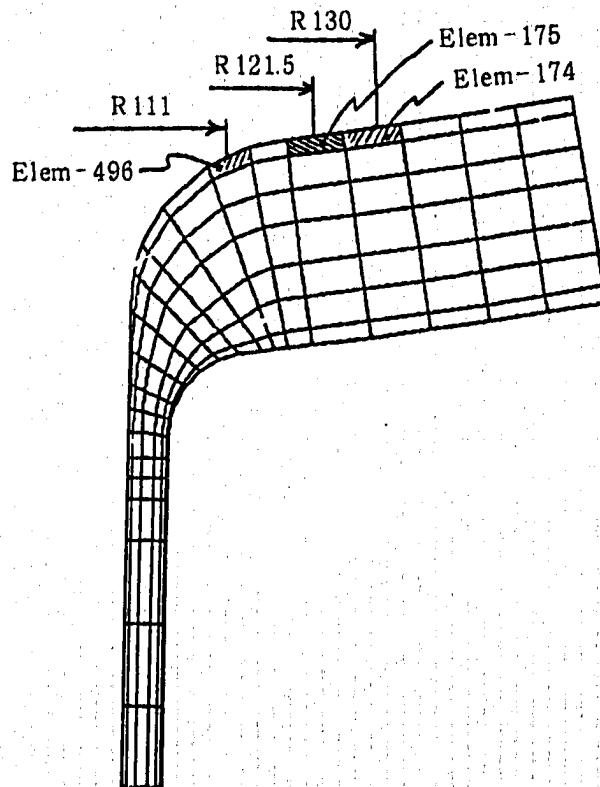


Fig. D. 1 Notch Shape

Table D. 1 Summary of Stress near the Drilled Hole

要素番号 時刻 (sec)	Temp (°C)	σ_n (kg/mm ²)	σ_p (kg/mm ²)	σ_H (kg/mm ²)	$\langle \sigma \rangle$ (kg/mm ²)	
Elem-496	C 150	391.500	- 0.080	6.410	28.950	29.048
	H 75	421.400	0.140	- 11.500	- 38.420	38.583
Elem-175	C 150	401.900	- 0.040	10.540	26.730	26.781
	H 75	411.800	0.070	- 17.700	- 37.310	37.392
Elem-174	C 150	407.700	0.020	11.810	24.920	24.902
	H 75	406.600	- 0.040	- 19.200	- 35.780	35.742

(注) σ_n は表面に垂直の応力成分, σ_p は表面に平行の応力成分を示す。



付録E. 管—多孔板溶接の寸法検査記録

管は多孔板に溶接後拡張されるが、拡張力は肉厚減少率で示される。

管—多孔板溶接及び拡張施工する多孔板の位置を Fig. E. 1 に、肉厚減少率の検査結果を Table E. 1 (a)~(d) に示す。

なお、肉厚減少率とは次の式で定義されるものである。

$$W = ((d_0 - d_i) - (D - d_e)) / (d_0 - d_i)$$

ここで、 W : 肉厚減少率

d_0 : 拡張前の管外径

d_i : 拡張前の管内径

D : 拡張前の管孔内径

d_e : 拡張後の管内径

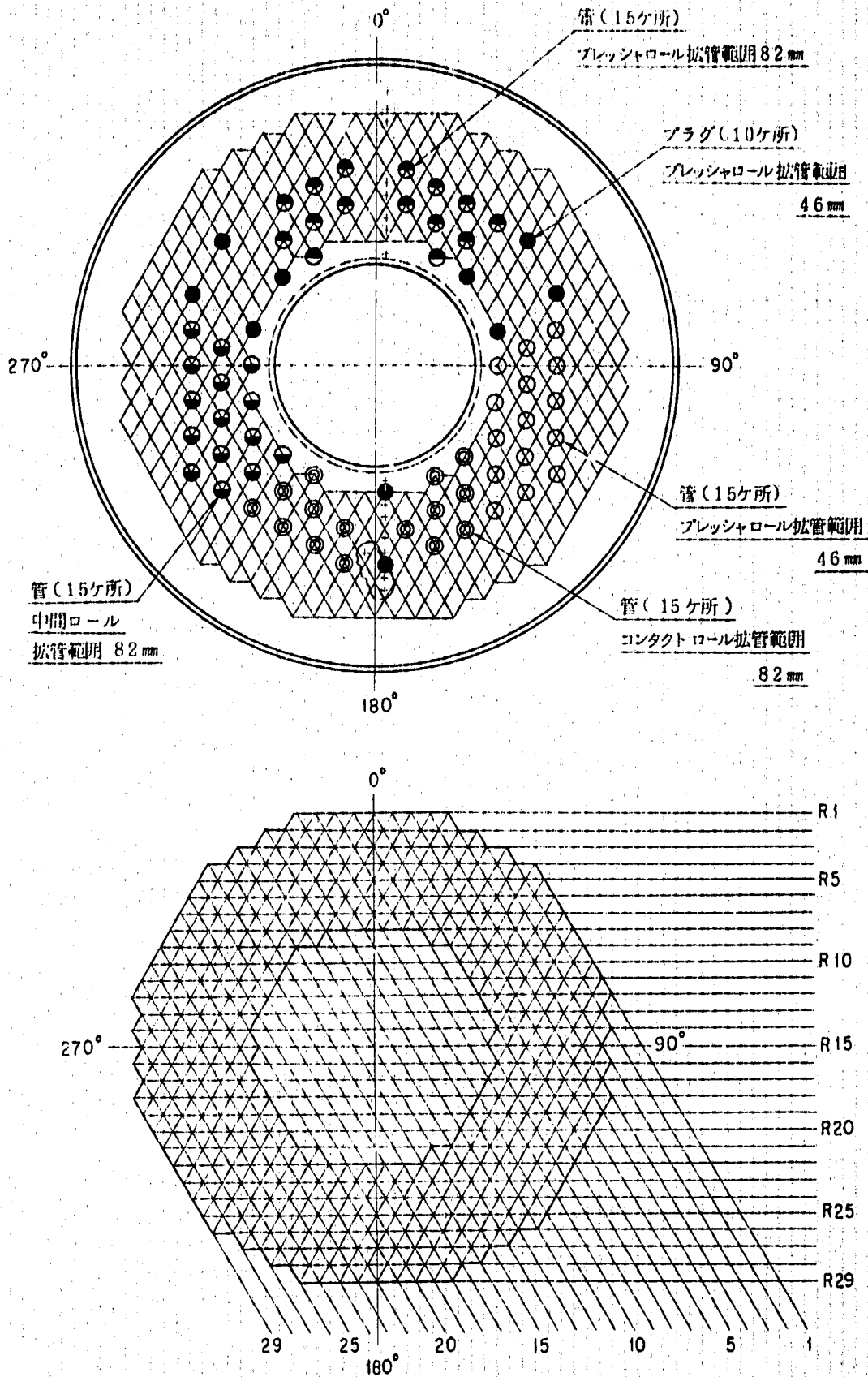
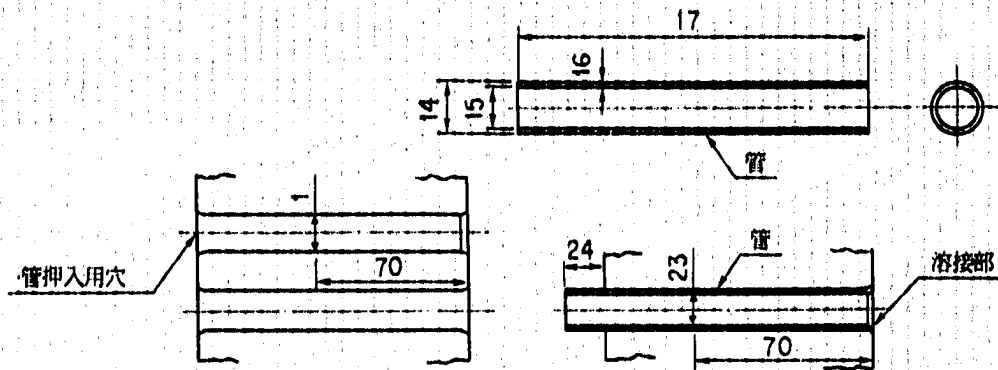


Fig. E. 1 Position of Tubes and Plugs

Table E. 1 (a) Dimension Test Record



(プレッシャロール×拡管範囲46mm)

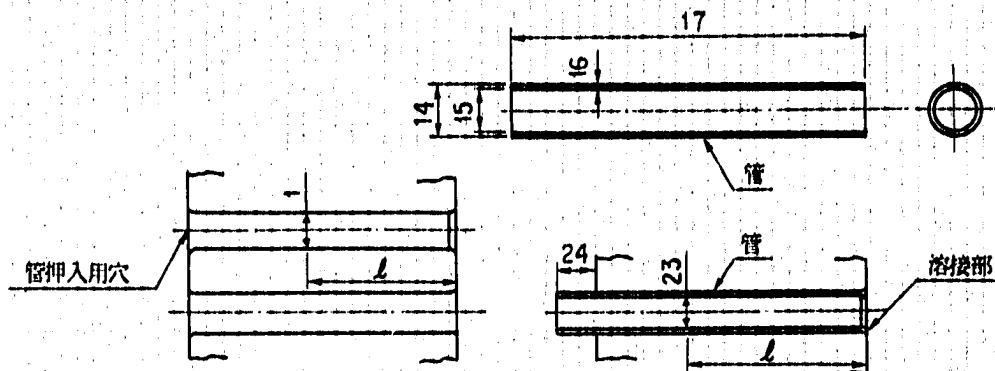
単位 mm

検査箇所 管穴 No	拡管前					拡管後		肉厚 減少率 %
	1	14	15	16	17	23	24	
寸法	±0.2 φ16.1	±0.25 φ15.9	(φ13.9)	1.0 +0.4 -0	±1 113.5	—	(15)	
R23-13	16.07	15.90	13.53	1.185	113.51	13.85	15.31	6.3
R21-12	16.08	15.92	13.52	1.200	113.51	13.84	15.04	6.7
R22-11	16.07	15.91	13.51	1.200	113.53	13.84	15.31	7.1
R19-11	16.07	15.91	13.50	1.205	113.52	13.81	15.92	6.2
R20-10	16.08	15.92	13.50	1.210	113.50	13.82	15.42	6.6
R21-9	16.07	15.91	13.52	1.195	113.50	13.87	15.45	7.9
R17-7	16.08	15.93	13.54	1.195	113.44	13.85	15.14	6.7
R17-10	16.09	15.92	13.54	1.190	113.51	13.84	15.31	5.5
R18-9	16.07	15.92	13.53	1.195	113.51	13.84	15.41	6.7
R19-8	16.07	15.91	13.51	1.200	113.52	13.82	15.08	6.3
R14-7	16.09	15.91	13.53	1.190	113.52	13.87	15.02	6.7
R15-6	16.07	15.91	13.52	1.195	113.52	13.86	15.22	7.5
R15-9	16.07	15.90	13.53	1.185	113.46	13.83	15.10	5.5
R16-	16.07	15.92	13.53	1.195	113.50	13.84	15.20	6.7
R13-5	16.09	15.91	13.53	1.190	113.54	13.87	15.23	6.7

$$\text{肉厚減少率} = \frac{(V_{14} - V_{15}) - (V_1 - V_{23})}{V_{14} - V_{15}} \times 100 (\%)$$

V_N は検査箇所 N の寸法測定値を示す。

Table E. 1 (b) Dimension Test Record



(コンタクトロール×拡管範囲82mm)

上段 $l = 30$ mm

下段 $l = 70$ mm

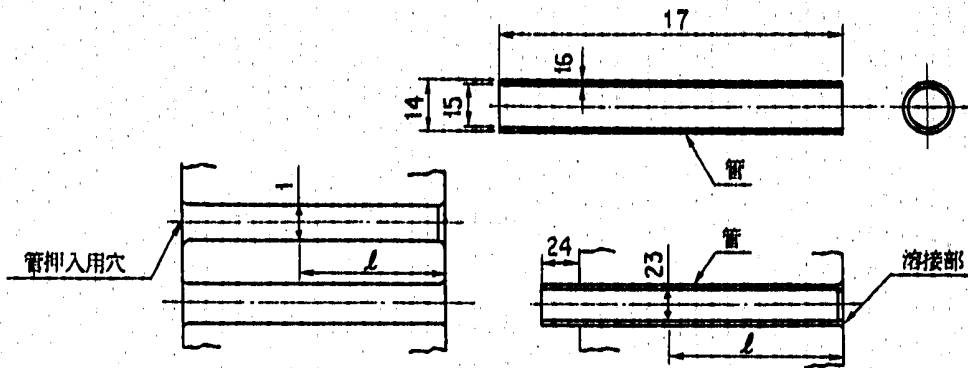
単位 mm

検査箇所 管穴 No.	拡管前					拡管後		肉厚減少率 %	平均値
	1	14	15	16	17	23	24		
	± 0.2 $\phi 16.1$	± 0.25 $\phi 15.9$	$(\phi 13.9)$	1.0 $+0.4$ -0	± 1 113.5	—	(15)		
R 23-16	16.07 16.07	15.91	13.53	1.190	113.44	13.76 13.74	14.89	2.9 2.1	2.5
R 23-22	16.09 16.09	15.91	13.51	1.200	113.47	13.75 13.75	14.94	2.5 2.5	2.5
R 23-25	16.07 16.07	15.91	13.52	1.195	113.52	13.78 13.79	14.97	4.2 4.6	4.4
R 24-16	16.07 16.08	15.91	13.54	1.185	113.50	13.76 13.76	15.06	2.5 2.1	2.3
R 24-18	16.07 16.07	15.92	13.52	1.200	113.50	13.75 13.74	14.87	3.3 2.9	3.1
R 29-21	16.08 16.08	15.90	13.52	1.190	113.47	13.76 13.76	15.10	2.5 2.5	2.5
R 21-15	16.08 16.07	15.92	13.52	1.200	113.47	13.74 13.74	14.73	2.5 2.9	2.7
R 21-21	16.08 16.08	15.92	13.52	1.200	113.52	13.79 13.77	15.11	4.6 3.8	4.2
R 22-14	16.06 16.08	15.91	13.50	1.205	113.54	13.73 13.72	14.88	3.3 2.1	2.7
R 22-13	16.08 16.07	15.92	13.52	1.200	113.44	13.75 13.77	14.74	2.9 4.2	3.6
R 20-13	16.08 16.08	15.90	13.51	1.195	113.50	13.73 13.74	14.85	1.7 2.1	1.9
R 24-24	16.10 16.10	15.92	13.51	1.205	113.47	13.75 13.76	15.10	2.5 2.9	2.7
R 25-17	16.07 16.07	15.92	13.52	1.200	113.51	13.75 13.73	15.03	3.3 2.5	2.9
R 25-23	16.06 16.07	15.91	13.52	1.195	113.48	13.75 13.75	15.08	3.3 2.9	3.1
R 26-22	16.07 16.07	15.91	13.53	1.190	113.48	13.76 13.76	14.77	2.9 2.9	2.9

$$\text{肉厚減少率} = \frac{(V_{14} - V_{15}) - (V_1 - V_{23})}{V_{14} - V_{15}} \times 100 (\%)$$

V_N は検査箇所 N の寸法測定値を示す。

Table E. 1 (c) Dimension Test Record



(中間ロール×拡管範囲 82 mm)

上段 $l = 30$ mm

下段 $l = 70$ mm

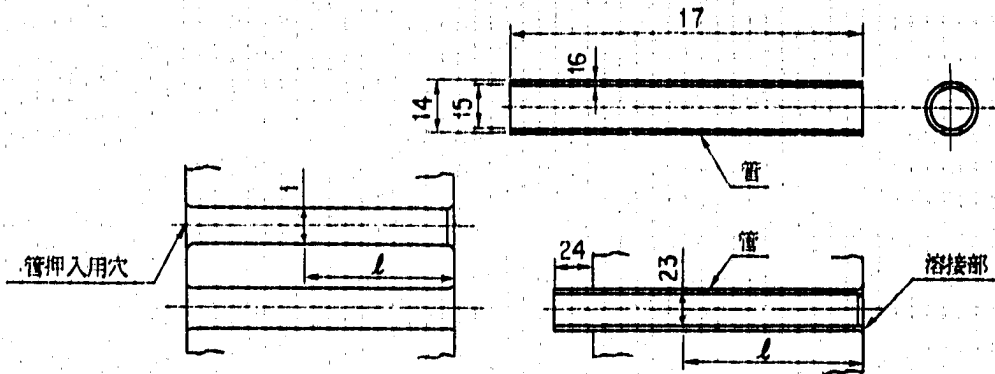
単位 mm

検査箇所 寸法 管穴 No	拡管前					拡管後		肉厚減少率 %	平均値
	1	14	15	16	17	23	24		
	± 0.2 $\phi 16.1$	± 0.25 $\phi 15.9$	$(\phi 13.9)$	$1.0^{+0.4}_{-0}$	± 1 113.5	—	(15)		
R 22-16	16.07	15.91	13.52	1.195	113.53	13.77	15.15	3.8	4.0
	16.07					13.78		4.2	
R 21-24	16.08	15.92	13.53	1.195	113.46	13.78	14.88	3.8	4.0
	16.08					13.79		4.2	
R 21-27	16.07	15.90	13.53	1.185	113.56	13.78	14.91	3.4	3.4
	16.07					13.78		3.4	
R 19-23	16.07	15.91	13.50	1.205	113.52	13.76	14.75	4.1	4.1
	16.07					13.76		4.1	
R 19-26	16.07	15.91	13.51	1.200	113.50	13.78	14.99	4.6	4.4
	16.07					13.77		4.2	
R 20-22	16.07	15.92	13.54	1.190	113.47	13.78	14.88	3.8	3.8
	16.08					13.79		3.8	
R 20-25	16.07	15.91	13.53	1.190	113.49	13.78	15.13	3.8	4.0
	16.08					13.80		4.2	
R 16-23	16.08	15.92	13.51	1.205	113.45	13.74	15.02	2.9	3.3
	16.08					13.76		3.7	
R 17-22	16.07	15.93	13.52	1.205	113.49	13.76	14.95	4.1	4.8
	16.07					13.79		5.4	
R 17-25	16.07	15.91	13.51	1.200	113.36	13.77	15.11	4.2	4.0
	16.07					13.76		3.8	
R 18-24	16.09	15.91	13.53	1.190	113.52	13.79	15.25	3.4	3.6
	16.08					13.79		3.8	
R 13-23	16.10	15.91	13.52	1.195	113.49	13.80	15.37	3.8	4.6
	16.10					13.84		5.4	
R 14-22	16.07	15.92	13.53	1.195	113.50	13.80	15.14	5.0	5.2
	16.07					13.81		5.4	
R 15-21	16.07	15.92	13.53	1.195	113.52	13.79	14.95	4.6	4.4
	16.08					13.79		4.2	
R 15-24	16.07	15.91	13.51	1.200	113.51	13.77	14.99	4.2	4.4
	16.07					13.78		4.6	

$$\text{肉厚減少率} = \frac{(V_{14} - V_{15}) - (V_1 - V_{23})}{V_{14} - V_{15}} \times 100 (\%)$$

V_N は検査箇所 N の寸法測定値を示す。

Table E. 1 (d) Dimension Test Record



(プレッシャロール×拡管範囲 82 mm)

上段 $l = 30$ mm

下段 $l = 70$ mm

単位 mm

検査箇所 管穴 No	拡管前					拡管後		肉厚 減少率 %	平均值
	1 $\phi 16.1$ ± 0.2	14 $\phi 15.9$ ± 0.25	15 $(\phi 13.9)$	16 1.0 $+0.4$ -0	17 113.5 ± 1	23 —	24 (15)		
R4-8	16.08	15.92	13.53	1.195	113.53	13.93	16.90	10.0	9.4
	16.08					13.90		8.8	
R4-11	16.08	15.92	13.54	1.190	113.64	13.89	16.21	8.0	8.0
	16.09					13.90		8.0	
R5-7	16.06	15.91	13.50	1.205	113.64	13.87	16.30	9.1	8.1
	16.07					13.83		7.1	
R5-13	16.06	15.91	13.54	1.185	113.67	13.86	16.30	7.2	7.4
	16.06					13.87		7.6	
R6-6	16.07	15.92	13.52	1.200	113.59	13.84	15.64	7.1	6.7
	16.08					13.83		6.3	
R6-9	16.07	15.91	13.51	1.200	113.60	13.81	15.88	5.8	6.3
	16.07					13.83		6.7	
R6-12	16.08	15.91	13.52	1.195	113.56	13.85	15.90	6.7	6.9
	16.07					13.85		7.1	
R6-15	16.07	15.90	13.52	1.190	113.50	13.88	15.97	8.0	7.8
	16.08					13.88		7.6	
R7-5	16.07	15.92	13.52	1.200	113.55	13.83	15.73	6.7	6.3
	16.07					13.81		5.8	
R7-8	16.08	15.91	13.51	1.200	113.58	13.82	16.06	5.8	5.8
	16.07					13.81		5.8	
R7-14	16.07	15.91	13.53	1.190	113.48	13.85	15.91	6.7	6.7
	16.07					13.85		6.7	
R8-7	16.09	15.91	13.50	1.205	113.51	13.84	15.63	6.6	7.3
	16.09					13.87		7.9	
R8-16	16.07	15.91	13.50	1.205	113.49	13.86	15.64	8.3	8.1
	16.07					13.85		7.9	
R9-9	16.08	15.91	13.52	1.195	113.51	13.81	15.58	5.0	5.5
	16.07					13.82		5.9	
R9-15	16.08	15.92	13.53	1.195	113.55	13.83	15.49	5.9	5.9
	16.08					13.83		5.9	

$$\text{肉厚減少率} = \frac{(V14 - V15) - (V1 - V23)}{V14 - V15} \times 100 (\%)$$

V_N は検査箇所 N の寸法測定値を示す。

付録F. 表面粗さ測定結果

Table F. 1 Surface Roughness

表面粗さ比較評価

最大高さ (Rmax) (μm)

測定箇所	測定結果		
(1)	3	3	3
(2)	6	6	6
(3)	9	9	8
(4)	17	15	16
(5)	12	11	11
(6)	1	1	1
(7)	34	32	29
(8)	5	5	5
(9)	11	12	11
(10)	6	6	6
(11)	14	14	15
(12)	24	26	26

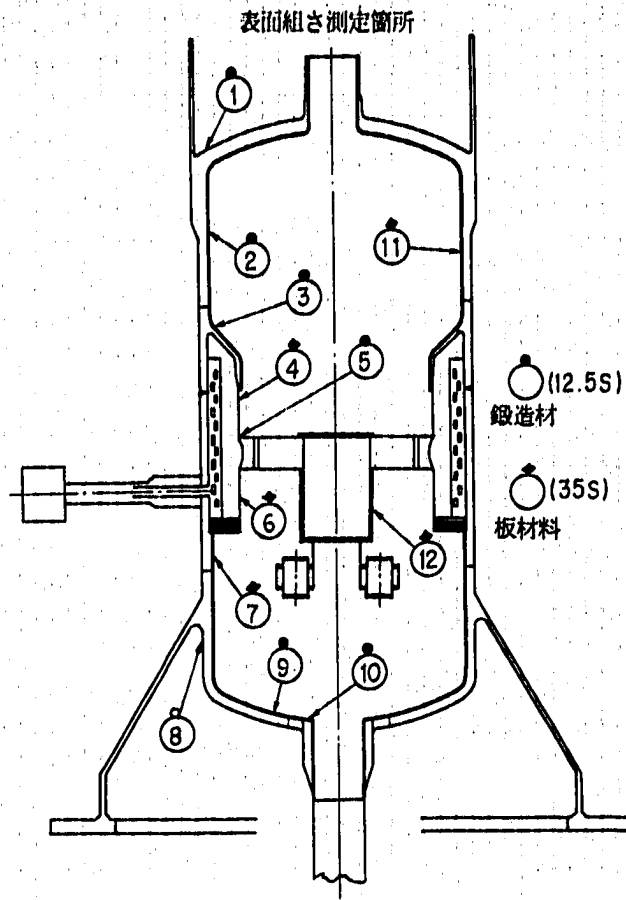


CHART SPEED 3.0 mm/s
 TRACING SPEED 0.3 mm/s
 VERTICAL MAG. × 1000
 HORIZONTAL MAG. × 10
 傾斜補正 有